

SEEC2023

# 第一届航天器环境工程大会

The 1st Spacecraft Environment Engineering Conference

论文摘要集

北京 | 2023.3

# 目 录

1. 全动舵系统柔性多体动力学建模方法研究 .....	1
2. 考虑认知不确定性的空间谐波减速器多性能参数加速退化试验评估方法 .....	1
3. 多轴振动台运动误差补偿方法 .....	2
4. 基于鲸鱼算法的 Whipple 结构损伤方程求解 .....	2
5. 水升华器周期模式蒸发过程理论分析 .....	3
6. Zn/Ti 化学计量比对 $Zn_2TiO_4$ 真空紫外辐照稳定性的影响研究 .....	3
7. 针对带有空腔的高温热流传感器的定标方法 .....	4
8. 知识图谱技术及其在航空领域的应用 .....	4
9. 面向空间站环境实验的热工水力测试台架设计 .....	5
10. 多孔介质模型在流阻模拟中的应用 .....	5
11. C/SiC 复合材料在典型模拟环境下高温力学性能研究 .....	6
12. 超低地球轨道卫星气动阻力的分析与减阻设计 .....	6
13. 空间站流体管/热管耦合式热辐射器性能的试验研究 .....	7
14. 高稳晶振空间辐照特性研究 .....	7
15. 某型卫星结构静力试验概述 .....	8
16. CIOES 深低温系统复启故障问题分析与处理 .....	8
17. 航天器吊点结构静力学试验技术研究 .....	8
18. 火星进入过程温度测量技术与验证 .....	9
19. 微放电检测数字调零技术研究 .....	9
20. 基于交互特征的典型装备风险场景识别方法应用研究 .....	9
21. 点式火箭分离冲击环境减缓设计与减冲性能试验研究 .....	10
22. 加速寿命试验设计与评估软件 ALT511 及其应用 (一) .....	10
23. 加速寿命试验设计与评估软件 ALT511 及其应用 (二) .....	11
24. 气相爆轰波凹面反射过程尺度效应的实验研究 .....	11
25. 模态残余矢量在航天器频响分析中的应用研究 .....	12
26. 某低成本平板卫星热控设计与热分析 .....	12
27. 考虑局部模态约束的卫星结构优化 .....	12
28. 总剂量效应对 SRAM 单粒子翻转敏感性影响的仿真研究 .....	13
29. 固液捆绑火箭尾舱设备随机振动环境预示与改善分析 .....	13
30. 某卫星停靠补加连接机构被动端热仿真分析与遥测数据对比研究 .....	14
31. 火星探测器再入过程中的 RCS 喷流干扰效应 .....	14
32. MBSE 在安全性可靠性建模分析的研究与展望 .....	14
33. 空间环境技术发展趋势及对策研究 .....	15
34. 高性能填充式空间碎片防护结构优化设计方法研究 .....	15
35. 航天器用热管焊缝批量化检测装置的设计与实现 .....	16
36. 无人机翼身组合体静强度试验研究 .....	16
37. 基于三维 GIS 数字地图雷达电磁环境态势显示研究 .....	16
38. 热解碳基吸波泡沫应用热真空吸波箱技术研究 .....	17
39. 新研载人航天工程安全性可靠性指标论证方法 .....	17
40. 一种真空下低温下模拟太阳翼展开试验方法 .....	18
41. 卫星主动段力学环境监测系统 .....	18
42. 主流马赫数对超声速气膜冷却流场及冷却效率的影响 .....	18

43. 空间应用商用货架部组件质量与可靠性保障体系研究.....	19
44. 航天装备结构的 FBG 冲击定位方法研究.....	19
45. 利用集成-迁移学习进行热层质量密度的沿轨预测.....	20
46. 低频瞬态振动环境等效模拟方法综述.....	20
47. 分子筛制氧装置性能衰减及活化试验台设计方案.....	20
48. 小型航天器离轨动力系统研究进展.....	21
49. 某高分遥感卫星星敏感器的热设计与仿真.....	21
50. 空天飞行器热噪声环境构建方法.....	21
51. 一种求解简支矩形薄板振动的等效方法.....	22
52. JLU-H 高地模拟月壤机械力学特性研究.....	22
53. 薄壁碳纤维管的模态试验和仿真模型优化研究.....	22
54. 基于卫星的在轨微振动时频转换技术.....	23
55. 偏压式月尘探测器多物理场仿真与分析.....	23
56. 振动台支架连接螺栓强度分析方法研究.....	23
57. 浅谈航天生产制造环境建设过程的 ESD 隐蔽工程管理.....	24
58. 大型真空容器结构评价方法研究.....	24
59. SBIRS GEO-3 卫星构形分析与启示.....	24
60. 基于 FPGA 的多通道同步数据采集系统研究.....	25
61. 遥感器在轨环境模拟试验系统自动控制技术.....	25
62. 航天器热平衡试验用红外加热笼系统设计.....	25
63. 基于声表面波的星载传感器无缆化互联技术研究.....	26
64. 基于 Python 的放大器输入输出特性自动测试软件设计.....	26
65. 数字化车间技术在航天器总体装配领域中的应用.....	26
66. 一种航天器在轨环境下结构变形反演方法.....	27
67. 基于集成学习方法的机电作动器故障诊断研究.....	27
68. 温变型石英晶体微量天平热效应分析.....	27
69. 数字化设计在多层隔热组件制作中应用的研究.....	28
70. 超大口径拼接式高辐照真空紫外模拟技术.....	28
71. 压电陶瓷与胶体缺陷对超声电机机电性能影响研究.....	29
72. 面向高精度航天器微振动检测的仿生加速度传感器设计.....	29
73. 混响室强电磁环境多馈源空间合成研究.....	30
74. 考虑桁架变形和结构非线性的空间可展开天线索网找形方法.....	30
75. 自润滑基础运动部件模拟空间环境试验装置研究进展.....	31
76. 真空中相对论电子束长程传输过程的仿真研究.....	31
77. 基于高温光测及数值仿真的火焰加热环境下 C/SiC 热膨胀行为研究.....	32
78. 模型弹陆态弹射出筒分析.....	32
79. 基于数据驱动的恒力弹簧零重力模拟系统控制.....	33
80. 空间环境下柔性或刚性材料自修复在轨试验设计.....	33
81. 基于多目标遗传算法的差速器壳体轻量化设计.....	33
82. 电子束辐照下的金属内能量沉积模拟研究.....	34
83. 基于 CNN 和 LSTM 的航天用涂层型自润滑关节轴承寿命预测及可靠性评估.....	34
84. 基于深度学习的高温结构材料动态裂纹检测.....	35
85. 基于概率神经网络的航天结构响应映射预示方法.....	35
86. 仪器舱结构试验模型的热振耦合模拟方法研究.....	36
87. 可控量程的仿生柔性缝传感器设计、制备及应用.....	36

88. 载人航天器环控生保系统地面综合性能试验真空系统研制 .....	36
89. 空间站舱外载荷适配器换热性能的优化研究 .....	37
90. 航天器结构冲击响应的研究现状和关键问题 .....	37
91. 数据缺乏条件下航空涡扇发动机关键部件性能衰退预测方法 .....	37
92. 极远紫外辐射探测在空间环境研究中的应用 .....	38
93. 基于 SERF 机制的原子磁强计发展现状 .....	38
94. 本征抗原子氧聚酰亚胺超细纤维的制备与抗原子氧侵蚀性能研究 .....	38
95. 双 POSS 组分抗原子氧聚酰亚胺薄膜的制备及性能研究 .....	39
96. 不同充液率下旋转热管性能的试验研究 .....	39
97. 胶体纳米二氧化硅复合 POSS 基聚酰亚胺薄膜的制备与抗原子氧侵蚀性能研究 .....	40
98. 基于单值控制图算法的单组元推力器组件关键特性数据分析 .....	40
99. KM6 大型太阳模拟器灯室系统研制技术 .....	41
100. 基于 IFE 方法的碳纳米管阵列电场仿真研究 .....	41
101. 基于直接声场的声振一体化试验方法 .....	42
102. 基于光纤光栅的典型卫星桁架胶接结构应变和温度监测技术研究 .....	42
103. 微波发射状态下雷达卫星真空热试验方法研究及应用 .....	43
104. 整星状态 SAR 天线基态测试有效性分析 .....	43
105. 空间环境下喷气式作动装置气动力分析与验证 .....	44
106. 燃料管路对空间碎片防护力试验研究 .....	44
107. 卫星组件真空烘烤去污染过程热分析 .....	44
108. 大磁矩航天器整器磁测试方法探究和实践 .....	45
109. 新一代载人飞船返回舱着水冲击动力学分析 .....	45
110. 核动力航天器中子辐射防护材料研究及对器件防护效果分析 .....	46
111. 航天器多级自由边界模拟系统多点姿态协调控制 .....	46
112. 热循环试验中试件控温点位置选择问题探讨 .....	46
113. 立式太阳模拟器准直镜组件设计 .....	47
114. 极区光照模拟系统设计 .....	47
115. 适应多任务模式的某微纳卫星热控系统研究 .....	47
116. 基于机器学习的 GEO 环境充放电异常风险评估模型构建 .....	48
117. 卫星内部结构响应深度学习间接测量方法研究 .....	48
118. 面向空间碎片防护的高熵非晶合金动态力学性能研究 .....	49
119. 基于橡胶隔振器的制冷机微振动抑制研究 .....	49
120. 小天体运动状态估计与动力学参数辨识 .....	50
121. MEO 轨道质子位移损伤效应分析 .....	50
122. 基于刚柔耦合空间机械臂热致响应分析 .....	51
123. 质控图在地磁环境下卫星磁矩测量中的应用 .....	51
124. 航天器部组件级热真空试验温度均匀性研究 .....	51
125. 航天器部组件级常压热试验管理系统设计与实现 .....	52
126. 气候风动制冷系统对系统能耗影响分析 .....	52
127. 卫星多磁偶极子建模方法研究 .....	52
128. GFDM-1 卫星高尺寸稳定星敏感器支架设计与验证 .....	53
129. 基于矢量夹具的卫星多轴振动响应分析 .....	53
130. 超低轨星表凸出物构型气动特性数值模拟研究 .....	54
131. 基于微放电机理的高压太阳能电池阵电位主动控制材料研究 .....	54
132. 超高速斜撞击下航天器 Whipple 结构碎片特性研究 .....	55

133. 一种基于面质比的小卫星随机振动与噪声试验确定方法 .....	55
134. 0.4 MeV 质子辐照对 AlGaIn/GaN HEMTs 栅沟道电子输运特性的影响 .....	56
135. 大尺寸碎片对活性防护结构的超高速撞击特性研究 .....	56
136. 红蓝光敏探测器在轨污染探测数据分析 .....	57
137. 电子束辐照下的金属内能量沉积模拟研究 .....	57
138. 基于 PSO-BP 神经网络的 CMG 综合应力失效包络面研究 .....	58
139. 飞行器力热联合试验技术探讨 .....	58
140. 螺钉连接件随机振动故障机理分析和寿命评估 .....	59
141. 基于模拟实验的在轨可修系统维修时间预计修正方法 .....	59
142. 低温存储装置噪声响应超标问题的理论分析 .....	60
143. 超大面源低温真空黑体定标器研制与性能测试 .....	60
144. 小行星探测返回舱的气动外形优化设计 .....	61
145. 航天器用电加热片粘贴缺陷的非接触可视化检测技术研究及应用 .....	61
146. 基于太阳模拟器的航天器高精度热流模拟试验方法研究 .....	62
147. 基于力限的部件加速度试验条件下凹仿真研究 .....	62
148. 基于 PFMEA 研究影响卫星成败的 AIT 关键点保障链 .....	62
149. 空间碎片移除工程验证进展 .....	63
150. 宇航用功率 VDMOS 自动测试系统设计及辐照损伤研究 .....	63
151. 液体火箭发动机结构疲劳寿命一体化评估技术研究 .....	64
152. 国外抗核加固卫星综述 .....	64
153. 脉冲激光单粒子效应测试中电荷收集的研究 .....	65
154. 大型立式准直太阳模拟器研制技术 .....	65
155. 面向小行星着陆的倾斜式气浮微重力模拟系统设计及分析 .....	66
156. 液体火箭发动机力学环境试验视觉测试技术 .....	66
157. 摆锤式冲击响应谱试验机台面结构改进设计方法及应用 .....	66
158. 基于 FMEA 的大型水平气动冲击模拟设备关键组件优化方法 .....	67
159. 卫星多级卸载微振动试验技术研究 .....	67
160. 柔性结构模态辨识的不确定量化方法 .....	67
161. 北斗三号增量载荷及数据分析 .....	68
162. 航天器运输包装箱平台化设计方法和应用 .....	68
163. 基于统计能量法的航天结构高频疲劳寿命分析 .....	68
164. 无人机机载设备系统内电磁兼容研究综述 .....	69
165. 空间望远镜在轨微振动隔振装置研究 .....	69
166. 一种基于直流式风洞的火星尘暴模拟装置 .....	69
167. 紫外辐照环境下月尘的充电机理及应用研究 .....	70
168. 基于创成式优化及导向式重构的大中型件轻量化设计 .....	70
169. 基于质量距熵的复杂装备健康状态识别技术研究 .....	71
170. 改进的 Gray 三相物态方程 .....	71
171. 基于统一模型的航天环境试验过程管控系统 .....	71
172. 星载光纤陀螺模糊两级温度控制策略 .....	72
173. 基于热图像的软件失效预测 .....	72
174. 电子束作用下空间介质材料表面带电建立过程研究 .....	72
175. 环境实验室自动测试系统内存泄漏的处理 .....	73
176. 浅谈出口电子设备环境适应性设计 .....	73
177. 卷积神经网络模型训练集扰动与其鲁棒性的关系研究 .....	74

178. 快中子辐照对 CMOS 图像传感器在石蜡屏蔽下的暗场特性影响.....	74
179. 空间薄膜可展开机构运动精度可靠性分析 .....	75
180. 大型构架天线抗低频载荷试验验证方法研究 .....	75
181. 基于分布式声传感器的航天器在轨碰撞及泄漏定位方法研究 .....	76
182. 通信卫星星箭耦合分析及应用研究进展 .....	76
183. 转动避让式锁紧释放机构设计及验证.....	76
184. 国外激光通信卫星及抗微振动设计进展 .....	77
185. 机械臂关节用调温热沉系统研制与验证 .....	77
186. 行波声场高声强声波传播特性研究.....	78
187. 电子产品多因素应力加速试验建模方法研究 .....	78
188. 典型卫星产品单轴、多轴随机振动试验振动效应 .....	78
189. 航天器在轨泄漏声场特征分析.....	79
190. 极高温外场试验多点动态热流测量系统研究 .....	79
191. 一种便于溯源的航天用超声探伤仪检定装置研制 .....	79
192. 基于 CSST 星冕仪制冷机的非线性振动建模分析.....	80
193. 卫星低气压放电与真空微放电安全性设计分析 .....	80
194. 空间制冷控制器在轨变频的设计与实现 .....	81
195. 基于经验模型的 COTS 器件单粒子风险评估方法研究 .....	81
196. KM3 行星大气环境模拟装置研制 .....	82
197. 不同温度条件下 SnPbAg 焊点拉伸性能变化及失效路径分析.....	82
198. 航天器微振动扰源模拟系统设计.....	83
199. 基于峰值提取的时变结构模态自动辨识方法 .....	83
200. 大型航天器微振动地面试验测试与分析 .....	83
201. 卫星微振动试验双级重力卸载装置研制 .....	84
202. 仿人五指灵巧手系统的运动控制研究.....	84
203. CMG 隔振金属橡胶制备工艺改进 .....	84
204. 基于霉菌试验箱的空间微生物微重力模拟试验装置研究 .....	85
205. 中国巡天空间望远镜光机桁架高精度形变测量方法研究 .....	85
206. 电路外引线断裂典型案例分析.....	85
207. 一种应用在某飞船垂挂吊索双拉强度试验方法 .....	86
208. 热真空试验设备的温度校准方法研究.....	86
209. “巴遥一号”卫星双相机热设计及验证 .....	86
210. 复合材料层合板中声发射源定位方法.....	87
211. 行星表面低气压环境模拟技术与 KM1200 装置改造 .....	87
212. 星敏感器智能控温策略仿真.....	88
213. 星敏感器热稳定性地面验证技术.....	88
214. ZM5600 光学成像质量检测环境模拟装置隔振系统研究 .....	89
215. ZM5600 光学成像质量检测环境模拟装置温度控制系统研究 .....	89
216. 低轨高能质子环境和总剂量效应监测仪研制与测试 .....	90
217. 低能电子辐照玄武岩纤维辐照损伤效应机理 .....	90
218. 空间站维修支持下的可靠性设计方法与实践 .....	91
219. 航天器单机产品电磁辐射发射限值设计研究 .....	91
220. 基于金刚石氮-空位色心的微波磁场成像技术 .....	91
221. 空间高能电子辐射效应及防护研究.....	92
222. 基于 Copula-Bayes 信息融合的机械产品可靠性评估方法.....	92

# 全动舵系统柔性多体动力学建模方法研究

杨执钧<sup>1</sup>, 张忠<sup>1</sup>, 李芮<sup>2</sup>, 高博<sup>1</sup>, 郭静<sup>1</sup>

(1. 北京强度环境研究所 可靠性与环境工程技术重点实验室, 北京 100076;

2. 北京强度环境研究所, 北京 100076)

**摘要:** 全动舵系统作为航天飞行器控制飞行姿态、调整飞行方向的重要部件, 其动态特性对飞行器的正常工作起重要作用。为了开展带有电机伺服系统、舵轴间隙的全动舵系统动力学特性分析, 本文提出基于柔性多体动力学方法的全动舵系统模型建模方法, 其中典型舵面采用 Craig-Bampton方法建立其刚柔耦合降阶模型, 电动舵机连接机构与全动舵面采用多体动力学方法连接, 气动力模型采用偶极子网格法建立基于模态的广义气动力。仿真结果表明, 基于柔性多体动力学方法建立的全动舵面动力学模型预测颤振速度为1270m/s, 与商用软件获得颤振速度误差低于2%, 证明该方法能够较为精确获得全动舵面颤振速度。当模型中存在伺服、间隙等需考虑的因素时, 同样能够基于该模型开展全动舵系统动力学响应分析, 研究表明伺服系统的存在会令典型舵面响应存在较大跳跃现象, 而间隙的存在则极大降低了舵面产生极限环振荡的临界速度。

**关键词:** 伺服舵系统; 柔性多体动力学; 机电耦合; 间隙非线性; 颤振; 极限环

# 考虑认知不确定性的空间谐波减速器多性能参数加速退化试验评估方法

高帅<sup>1,2</sup>, 郭宏轩<sup>1,2</sup>, 孙富强<sup>1,2\*</sup>

(1. 北京航空航天大学可靠性与系统工程学院, 北京 100191;

2. 可靠性与环境工程技术重点实验室, 北京 100191)

**摘要:** 谐波减速器是空间驱动机构的关键部件, 其可靠性直接影响航天器的在轨服役寿命。考虑到其高可靠、长寿命的特点, 一般采用加速退化试验 (ADT) 的方法评估其可靠性和寿命。然而, 由于谐波减速器的造价昂贵, 试验的样本数量很少, 且在有限时间内搜集到的性能退化信息不充分, 导致 ADT 数据具有较大的认知不确定性。对此, 本文引入不确定理论, 采用多维不确定过程对谐波减速器传动效率和传动误差的退化进行建模。在确信可靠性理论框架下, 推导出系统在正常应力水平下的确信可靠度, 并给出相应的统计分析方法。结果说明, 所提方法能够很好地预测空间谐波减速器的退化, 评估其寿命和可靠性, 指导空间谐波减速器在航天器中的高可靠应用。

**关键词:** 空间谐波减速器; 加速退化试验; 认知不确定性; 多性能参数

# 多轴振动台运动误差补偿方法

张颖<sup>1</sup>, 叶腾波<sup>3</sup>, 刘志华<sup>4</sup>, 朱美意<sup>1</sup>, 蔡晨光<sup>4</sup>, 郑德智<sup>1,2\*</sup>

(1. 北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191;

2. 北京航空航天大学 前沿科学技术创新研究院, 北京 100191;

3. 苏州东菱振动试验仪器有限公司, 江苏 215000;

4. 中国计量科学研究院力学与声学计量科学研究所, 北京 100029)

**摘要:** 多轴振动台的轨迹复现能力是保障航天器地面振动试验可靠性的前提。本文针对多轴振动台的特点, 开展了多轴振动台运动精度影响因素研究, 分析了动态误差来源, 建立了多轴运动台动态误差补偿模型。通过仿真多轴振动台圆锥运动, 验证了所提动态误差补偿模型能有效地提高多轴振动台的轨迹复现精度, 为航天器高可靠振动试验提供技术支撑。

**关键词:** 振动试验; 多轴振动台; 轨迹复现; 动态误差补偿

# 基于鲸鱼算法的 Whipple 结构损伤方程求解

贾光辉, 刘诗雨, 张子众

(北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100191)

**摘要:** 航天器结构损伤结果的损伤模式分类中, 毗邻损伤级别 (开坑、层裂、崩落、小穿孔、大穿孔) 间的分界方程是判断损伤分类/级别的依据。为构建损伤级别分界方程, 采用鲸鱼算法, 基于文献实验数据, 以弹道极限方程为样板, 以预测准确率最大、误差平方和最小为方程参数的优化确定目标, 研究了损伤级别分界方程的待定参数优化问题。主要结果: 损伤级别分界方程涉及到十五个待定参数, 共同影响方程对实验数据的预测结果; 方程待定参数优化确定问题是针对离散、隐式函数的优化求解问题; 鲸鱼算法适用于确定损伤级别分界方程参数, 所获方程将损伤空间按照损伤级别直观区分。

**关键词:** 空间碎片; 防护结构; 损伤级别; 分界方程; 鲸鱼算法

# 水升华器周期模式蒸发过程理论分析

廖俊元, 杨春信, 杨 涵\*

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191)

摘要: 水升华器是一种利用水的相变潜热进行散热的航天器热控器件, 能在微重力的空间环境中为舱外航天服提供有效的散热。现有水升华器的研究以数值仿真为主, 理论研究较少。本研究以周期模式下的水升华器作为研究对象, 对多孔板内的蒸发流动过程的控制方程进行了理论求解, 得到了多孔板内液面高度及液体速度的变化规律, 并建立了统一形式的解析解。本文的结果对于探究水升华器内的相变界面迁移规律具有一定意义。

关键词: 水升华器; 理论分析; 解析解; 量纲分析

# Zn/Ti 化学计量比对 $Zn_2TiO_4$ 真空紫外辐照稳定性的影响研究

张家强<sup>1</sup>, 牛 鏊<sup>2</sup>, 张 杭<sup>1</sup>, 郑 琰<sup>1</sup>, 平 托<sup>1</sup>, 孟 腾<sup>1</sup>, 白晶莹<sup>1</sup>, 崔庆新<sup>1</sup>, 张立功<sup>1\*</sup>

(1. 北京卫星制造厂有限公司, 北京 100190; 2. 中国空间技术研究院, 北京 100094)

摘要: 文章研究了不同 Zn/Ti 化学计量比 (2.0~2.5) 对正钛酸锌 ( $Zn_2TiO_4$ ) 性能的影响规律, 采用 SEM、EDS、XRD、VUV 和分光光度计等测试手段分析了不同 Zn/Ti 化学计量比  $Zn_2TiO_4$  粉体的形貌、成分、物相和光谱反射性等性能。结果表明, 随着 Zn/Ti 化学计量比的增加  $Zn_2TiO_4$  的晶格畸变愈发明显, 衍射峰峰强降低、半峰宽增加, Zn/Ti 化学计量比为 2.2~2.3 时可以降低真空-紫外辐照对  $Zn_2TiO_4$  粉体光谱反射性能的损伤, 当 Zn/Ti 化学计量比较高时过量的 ZnO 增加了额外光的吸收, 造成  $Zn_2TiO_4$  粉体太阳吸收比的上升。

关键词: 正钛酸锌; 化学计量比; 紫外辐照; 太阳吸收比

# 针对带有空腔的高温热流传感器的定标方法

胡旭阳, 王 日, 董素君\*

(北京航空航天大学航空科学与工程学院, 北京 100191)

摘要: 随着高超声速飞行器的发展, 准确测量高超声速飞行过程中的热壁热流的需求不断增加。由于戈登计等大热流密度的热流计并不适用于热壁环境的测量, 因此诞生了许多针对极端高温环境的热流计。其中, 带有空气层热阻的高温热流密度传感器在使用传统的灵敏度公式进行定标时的准确性较差。针对这个问题, 文章对一种带有空气层的高温热流计展开了讨论。通过对其内部传热的仿真对热流计工作时内部传热的三维效应展开讨论, 根据仿真结果提出了用于计算热流密度的简化模型。在真空黑体炉中开展定标实验并通过一定手段扩展定标数据。最终辨识得到的模型在验证集上的误差较好, 并对模型进一步的研究做了讨论。为具有相似结构的热流计的定标与建模提供了有效参考。

关键词: 热壁热流测量; 高温热流计; 定标实验; 参数辨识

# 知识图谱技术及其在航空领域的应用

曾继炎<sup>1,2,3</sup>, 程玉杰<sup>1,2,3,\*</sup>, 聂同攀<sup>1,4</sup>, 马 梁<sup>1,2,3</sup>

(1. 北京航空航天大学 可靠性工程研究所; 2. 北京航空航天大学 可靠性与系统工程学院; 北京 100191;  
3. 可靠性与环境工程技术国防科技重点实验室, 北京 100191; 4. 航空工业第一飞机设计研究院, 西安 710089)

摘要: 随着科技水平的发展, 飞机机载设备的电气化程度越来越高, 飞机电源系统故障对飞机飞行安全的威胁也不断增大, 因此需要快速准确地判断其健康状态。常用的基于数据驱动的故障诊断方法无法利用专家知识, 且结果可解释性差, 为实际使用带来了不便。知识图谱具备将专家知识等非结构化数据进行规范化存储并用于故障诊断的能力, 能够实现对非结构化先验知识的利用及故障原因的解释。然而在故障诊断领域, 知识图谱技术的应用尚少。因此本文针对航空领域知识图谱开展了研究, 提出了一种飞机电源系统故障诊断知识图谱构建及应用技术。首先, 利用专家知识构建知识图谱的本体, 明确知识图谱中的实体和关系类型; 然后, 使用 BME0 标注的实体抽取语料训练双向长短期记忆网络(LSTM)并利用其从非结构化文本中抽取实体; 在此基础上, 使用关系标注后的关系抽取预料训练基于注意力机制的双向长短期记忆网络, 进而利用训练好的模型进行实体间的关系抽取; 最终利用抽取出的实体和关系构建航空领域故障诊断的知识图谱。本文以飞机电源系统故障排故手册为原始数据, 对提出的知识图谱构建方法进行了案例验证, 从准确度和召回率等指标分析了所用方法的实体抽取和关系抽取效果, 证明了其有效性。在此基础上, 本文基于所构建的知识图谱实现了飞机电源系统相关故障的智慧搜索、推荐及智能问答, 展示了知识图谱技术在航空领域故障诊断具备良好的应用前景。

关键词: 知识图谱; 故障诊断; 航空领域; 飞机电源系统; 双向长短期记忆网络

# 面向空间站环境实验的热工水力测试台架设计

钟怡菲<sup>1</sup>, 汤凯<sup>2</sup>

- (1. 北京航空航天大学 航空科学与工程学院 人机与环境工程系, 北京市 100191)
- (2. 北京航空航天大学 航空科学与工程学院 人机与环境工程系, 北京市 100191)

**摘要:** 随着空间站向大型化发展, 其热管理的技术要求相应提高。地面热试验是保障载人空间站在轨运行可靠性及稳定性的基础, 技术复杂, 耗资较大, 影响因素复杂。本文基于 labview 测控软件设计一套热工水力测试台架, 能够满足测量任意有效载荷机箱在管路中的流动阻力曲线、进出口温差、进出口压强, 并可实现不同串并联体制连接方式的组合及自动测试功能, 能够满足空间站在步入式环境试验箱中的开展各项联试工作的需要。

**关键词:** 热工水力; 参数测量设备; 上位测控系统; LabVIEW 软件

# 多孔介质模型在流阻模拟中的应用

钟怡菲<sup>1</sup>, 林贵平<sup>2</sup>

- (1. 北京航空航天大学 航空科学与工程学院 人机与环境工程系, 北京市 100191)
- (2. 北京航空航天大学 航空科学与工程学院 人机与环境工程系, 北京市 100191)

**摘要:** 利用 FLUENT 软件中的多孔介质模型, 对叠加流阻件的板翅式换热器风道进行数值模拟。模拟研究所得压降与实验结果较为吻合, 为环控系统中换热器模块化集成设计提供了依据以及验证多孔模型在流阻模拟中的操作可能性。

**关键词:** 多孔介质; 数值模拟; 压力降; 板翅式换热器

# C/SiC 复合材料在典型模拟环境下高温力学性能研究

唐君, 袁泽帅, 黄汝超, 袁建宇, 徐林, 李军平, 卢鹏

(航天材料及工艺研究所, 北京 100076)

**摘要:** 本文以先驱体浸渍裂解 (PIP) 工艺制备的 C/SiC 复合材料为对象, 研究了 C/SiC 复合材料在典型模拟环境下的高温力学性能, 首次获得了约 3000s 时间不同变状态条件下材料的高温力学性能数据, 探讨了不同条件下 C/SiC 复合材料高温承载行为及其变化规律。研究结果表明, C/SiC 复合材料经历约 3000s 复杂阶梯热环境后拉伸强度仍保持 60%左右; 经历大温度梯度热震后, C/SiC 复合材料的高温力学性能保持率反而提高, 最高保持率超过 80%; 热震温差越大, 热震后保温时间越长, 对材料的高温力学性能保持和提高越有利。

**关键词:** C/SiC 复合材料, 热震, 界面强度, 高温力学性能

# 超低地球轨道卫星气动阻力的分析与减阻设计

蒋亦凡, 张俊, 田鹏

(北京航空航天大学, 北京 100191)

**摘要:** 超低地球轨道卫星由于在提高对地观测平台性能和降低观测成本方面的优势而引起了越来越多的研究兴趣。在超低地球轨道环境下, 大气阻力是影响超低轨卫星进行轨道预测和姿态控制的关键因素。此外, 大气阻力也是限制超低轨卫星使用寿命的主要因素, 减小大气阻力可以延长卫星的使用寿命。该文首先采用直接模拟 Monte Carlo (DSMC) 方法, 计算了超低轨环境下简单外形: 平板、圆柱和圆球的气动阻力, 并将计算结果与自由分子理论进行了比较。然后以一种简化的超低轨卫星模型为研究对象计算其气动阻力, 研究了轨道高度、分子速度比和壁面适应系数对卫星气动阻力系数的影响规律。通过 DSMC 计算详细研究了侧面光滑与外形优化两种卫星减阻设计方案, 我们发现将两种减阻策略组合可以获得更好的减阻效果。此外, 扩展了最佳长细比理论, 并提出了一个修正模型以更好地预测较低轨道高度下正棱柱卫星的最佳长细比。

**关键词:** 超低轨卫星; DSMC 方法; 气动阻力; 减阻设计

# 空间站流体管/热管耦合式热辐射器性能的 试验研究

丰茂龙<sup>1,2</sup>, 韩海鹰<sup>1,2</sup>, 黄磊<sup>1,2</sup>, 曹剑峰<sup>1,2</sup>, 申言森<sup>3</sup>

(1. 北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094; 2. 空间热控技术北京重点实验室, 北京 100086;  
3. 新乡航空工业(集团)有限公司, 河南 新乡 453000)

**摘要:** 空间热辐射器担负着航天器内部多余热量向外太空排散的任务, 是航天器热控系统的关键设备, 尤其是载人航天器, 辐射器需要满足长寿命/高可靠度/高稳定度的要求, 目前已发射载人航天器均采用流体回路辐射器。文章对中国空间站流体管/热管耦合式辐射器进行了试验研究, 得出了辐射器散热性能的变化规律。首先论述了试验方案和试验过程, 并给出了试验结果数据; 然后通过对试验数据的分析, 得出了辐射器传热热阻, 以及散热能力随流体回路参数及外热流参数的变化规律; 以试验为基础, 文章完善了辐射器仿真分析模型, 并与试验典型工况进行了对比分析, 实现了仿真模型与试验数据的良好吻合, 仿真模型可用于辐射器在轨工作性能预示分析。文章为空间站系统级热平衡试验方案选择及辐射器在轨工作状态设置提供了支持, 为其他空间辐射器设计提供了参考。

**关键词:** 空间站; 辐射器; 流体管; 热管; 试验; 仿真

# 高稳晶振空间辐照特性研究

杜二旺, 杨磊\*, 冯志富, 秦玉浩, 刘晓菊, 黄剑

(中国空间技术研究院西安分院, 西安 710000)

**摘要:** 采用双极工艺晶体管的高稳晶振, 在空间应用中存在低剂量率辐射损伤增强效应风险, 需要对其开展低剂量辐照试验验证; 辐射可引起石英晶体谐振器频率偏移, 需要开展总剂量辐照验证。在 0.01rad(Si)/s 低剂量率辐照条件下, 累积剂量 30krad(Si), 以 0.1rad(Si)/s 剂量率持续辐照, 至累积剂量 100krad(Si)停止, 分析对比不同剂量率试验条件下高稳晶振相位噪声和频率变化特性。

**关键词:** 高稳晶振; 低剂量率辐照; 总剂量; 相位噪声; 频率变化

## 某型卫星结构静力试验概述

刘禹含, 臧博, 周国栋, 张宝康, 闫虎义

(北京空间机电研究所, 北京 100094)

摘要: 卫星结构在设计初期, 需进行静力试验, 来验证卫星初样结构强度的可靠性, 同时可为整星结构进一步优化提供数据支持。考虑卫星整体试验件的特殊性, 需要在高效零缺陷的基础上, 真实模拟卫星在轨运行状态。本文以某型号卫星静力试验为例, 对其静力试验分级加载方法, 工况设计, 试验情况进行归类研究, 重点对边界力学模型构建, 试验流程进行讨论, 为卫星类静力试验提供良好的试验依据。

关键词: 卫星结构; 试验实施; 均布加载; 静力试验

## CIOES 深低温系统复启故障问题分析与处理

钱都\*, 臧博, 常鑫, 刘旷, 杨永赛

(北京空间机电研究所 北京 100094)

摘要: 深低温系统为 CIOES 提供 2000W@20K 的冷源, 以满足低温敏感产品地面测试的低背景噪声需求。该系统在久置复启时发现氦气纯度不足现象, 建立故障树模型分析原因, 发现如冷板回路暴大气、管道漏点等问题, 影响透平膨胀机正常开机制冷。为了恢复系统内氦气纯度, 针对问题开展维修与气体置换。维修后深低温系统稳定运行, 恢复验收制冷指标。

关键词: CIOES 深低温; 氦气纯度; 故障树模型

## 航天器吊点结构静力学试验技术研究

周国栋, 臧博, 刘禹含, 张宝康

(北京空间机电研究所, 北京 100094)

摘要: 吊点结构作为航天器重要结构之一, 其稳定性直接关系到产品的起吊转运安全, 因此, 需要对航天器吊点结构开展静力学试验技术研究。本文以航天器复合材料舱体吊点结构为研究对象, 提出了一种可以在航天器舱体吊点结构位置施加纵向载荷的加载方案, 攻克了多点随动加载技术, 解决了产品与工装加载过程中干涉的难题, 从而实现吊点结构多点纵向加载考核, 并成功应用于某型号航天器舱体吊点结构静力试验。试验结果表明, 此加载技术能够准确、高效完成复合材料舱体吊点结构载荷的施加, 试验结果满足设计要求, 为复合材料舱体吊点结构轻量化设计及强度评估研究提供参考依据。

关键词: 航天器; 复合材料; 吊点; 加载技术

# 火星进入过程温度测量技术与验证

邹昕<sup>1</sup>, 饶炜<sup>1</sup>, 李莹<sup>1</sup>, 韩承志<sup>1</sup>, 张荣华<sup>2</sup>, 高阳<sup>2</sup>

(1. 北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094; 2. 北京遥测技术研究所, 北京 100076)

**摘要:** 火星进入过程中的烧蚀温度, 是防热结构设计和气动热环境辨识的重要参数之一。针对在轨测量的需求, 提出了一种防热层柱塞式结构大底分层温度在轨测量和 U 型结构背罩温度在轨测量的方法, 通过热电偶元件选取、结构形式、安装方式、信号集中放大变换和自动冷端补偿等设计, 开展标定和风洞专项试验验证, 可以准确测量烧蚀温度的变化过程。此测量技术在我国首次火星探测任务天问一号上成功地得到了应用。

**关键词:** 火星进入过程; 温度测量; 柱塞式结构; U 型结构; 热电偶

# 微放电检测数字调零技术研究

王海林, 黄浩, 李砚平, 彭璐

(中国空间技术研究西安分院, 西安 710000)

**摘要:** 微放电性能是星载大功率器件长寿命可靠工作的重要因素, 为了准确测得器件的微放电性能, 微放电检测的灵敏度就至关重要, 本文研究了微放电现象的产生机理, 不同的微放电检测方法。重点讲述全局检测法中的调零检测法, 微放电试验调零检测法的原理及系统组成。数字化调零技术的原理及构成。设计模拟调零和数字调零的对比试验, 通过试验得到两种方法在调零深度、调零操作时间、对相位变化的响应灵敏度以及对幅度变化的响应灵敏度等方面的区别, 最后发现数字调零均优于模拟方式。

**关键词:** 微放电; 调零检测法; 模拟调零; 数字调零

# 基于交互特征的典型装备风险场景识别方法应用研究

高树成, 周海京, 沈岭, 刘春雷

(中国航天标准化研究所, 北京 100071)

**摘要:** 针对当前装备使用过程中人机交互故障频发、人机系统安全性试验技术手段不足等问题, 面向装备复杂运行风险场景, 针对人机交互过程的特殊性, 本文研究了基于交互特征的装备危险场景识别方法, 识别装备使用过程中的人机交互危险场景, 确定危险场景表征参数, 为装备安全性试验提供场景输入。通过民机着陆阶段飞行任务, 验证了所提方法的工程适用性。

**关键词:** 人机交互; 危险; 场景; 安全性试验

# 点式星箭分离冲击环境减缓设计与减冲性能试验研究

胡迪科<sup>1,2</sup>, 龙新军<sup>2</sup>, 任海辽<sup>2</sup>, 欧阳涵<sup>2</sup>, 唐国安<sup>1</sup>

(1. 复旦大学, 上海 200433; 2. 上海宇航系统工程研究所, 上海 201109)

**摘要:** 为解决点式星箭分离冲击环境过大难题, 优化连接解锁装置设计。研究了点式星箭分离的冲击传递机理, 冲击载荷来源主要有四方面: 药剂爆炸引起的冲击波和应力波的传播; 火工装置突然动作导致预先施加的载荷产生的应变能突然释放; 火工装置部件以一定速度和冲量撞击结构形成应力波和结构谐振响应; 点式分离火工品相互之间的影响。以星箭接口不变为约束, 提出对应减冲措施: 在火工品收集筒顶部增加蜂窝和橡胶垫, 降低火工品结构残体碰撞产生的二次冲击; 拆除分离螺母锁紧螺钉、增加不同材料的垫片, 降低药剂爆炸冲击作用。仿真结果表明, 镁合金、不锈钢、玻璃钢组合时减冲效果较好。开展减冲性能验证试验研究, 试验结果表明, 增加蜂窝和橡胶垫后, 二次冲击现象不明显。在冲击传递路径上增加 3mm 厚度和 1mm 厚度的组合垫片, 冲击环境降低了 44.3%和 39.5%。研究提出的减冲措施、仿真和试验验证方法, 对点式星箭冲击环境改善有较大工程指导意义。

**关键词:** 点式分离; 冲击环境; 减冲设计; 试验研究

# 加速寿命试验设计与评估软件 ALT511 及其应用 (一)

黄首清<sup>1,2,3</sup>, 杨晓宁<sup>1,2,3</sup>, 刘庆海<sup>1,2,3\*</sup>, 刘守文<sup>1,2,3</sup>, 遇今<sup>1,2,3</sup>, 李芳勇<sup>1,2,3</sup>

(1. 航天机电产品环境可靠性试验技术北京市重点实验室; 2. 可靠性与环境工程技术国防科技重点实验室; 3. 北京卫星环境工程研究所: 北京 100094)

**摘要:** 文章介绍了加速寿命试验设计与评估软件 ALT511 的基本模块、功能和使用流程, 对“单应力一个应力水平”模块进行了重点介绍, 包括输入选项卡、加速因子计算选项卡、退化建模选项卡、可靠性评估选项卡。详细介绍了该软件包含的阿伦尼斯、逆幂律、广义艾琳、Norris-Landzberg、线性模型 5 种加速模型的表达式和加速因子计算式, 给出了试验时间放大倍数和加速寿命试验时长的计算方法, 对未失效试验件给出了退化建模和伪寿命计算方法, 阐述了换算成正常应力下的试验结果分布拟合、可靠度点估计值、可靠度下限值计算方法。最后, 为了方便本软件的应用, 以航天器轴承加速寿命试验为对象详细给出了软件应用案例。本软件具备单应力 (包含一个应力水平和多个应力水平) 加速寿命试验设计和评估功能, 将成熟的加速模型、试验方法、权威标准、专家经验融入到加速寿命试验设计与评估软件中, 兼具通用性和航天器行业特色。

**关键词:** 加速寿命试验; 寿命评估; 加速寿命模型; 软件设计; 应用

## 加速寿命试验设计与评估软件 ALT511 及其应用（二）

黄首清<sup>1,2,3</sup>, 刘庆海<sup>1,2,3\*</sup>, 李芳勇<sup>1,2,3</sup>, 杨勇<sup>1,2,3</sup>, 遇今<sup>1,2,3</sup>, 张兆霖<sup>1,2,3</sup>

(1. 航天机电产品环境可靠性试验技术北京市重点实验室; 2. 可靠性与环境工程技术国防科技重点实验室;  
3. 北京卫星环境工程研究所; 北京 100094)

**摘要:** 文章介绍了加速寿命试验设计与评估软件 ALT511 的单应力多个应力水平模块, 包括导入数据选项卡、每组应力水平寿命分布选项卡、加速模型拟合选项卡、指定应力水平下寿命值选项卡。给出了基于多应力水平失效数据的指数分布、威布尔分布寿命分布拟合方法, 阿伦尼斯模型和逆幂律模型的加速模型拟合方法, 以及指定应力水平下考虑和不考虑置信度两种情况下的可靠寿命、失效概率密度函数和可靠度函数计算方法。最后, 为了方便本软件的应用, 以航天器超声电机加速寿命试验为对象详细给出了软件应用案例, 加速模型拟合结果与微软 Excel 软件拟合结果一致, 可靠寿命计算结果与 Minitab 软件计算结果基本一致。本文可对我国加速寿命试验软件的设计和应用提供有益参考和支撑。

**关键词:** 加速寿命试验; 应力水平; 加速寿命模型; 可靠寿命; 软件设计

## 气相爆轰波凹面反射过程尺度效应的实验研究

景天雨<sup>1</sup>, 李健<sup>2</sup>

(1. 北京机电工程总体设计部, 北京 100854; 2. 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081)

**摘要:** 气相爆轰波的凹面反射是爆轰波传播的基本问题, 是研究爆轰波在复杂边界条件下传播机制的基础, 能够为高性能航天推进系统的设计提供理论支撑。本文对胞格爆轰波的凹面反射过程中存在的尺度效应进行了实验研究, 得到了三波点轨迹和临界壁角与几何尺度之间的定量关系, 发现了类似于爆轰波楔面马赫反射的尺度效应和两个极限 (冻结和平衡极限), 并且高度依赖于两个特征长度尺度, 即胞格尺寸 $\lambda$ 和曲率半径 $R$ 。

**关键词:** 胞格爆轰波; 气相爆轰; 马赫反射; 尺度效应

# 模态残余矢量在航天器频响分析中的应用研究

李威

(上海卫星工程研究所, 上海 201109)

摘要: 为满足快速迭代仿真的需求, 在对航天器进行频响分析时可使用模态残余矢量以减少截断模态数, 从而减少计算时间同时减少计算精度的损失。截断模态中的通常做法是取关心频率的 2.5 倍作为截断频率, 在应用了残余矢量后这一倍率可以极大减少至 1~1.5 倍, 有效地减少了截断模态数, 节省了计算资源。以 Patran 2019 作为前处理, MSC.Nastran 作为后处理进行频响分析时, 存在选项是否启用残余矢量, 本文以悬臂梁为模型进行分析, 论证了启用残余矢量可以在截断频率不变的情况下有效提高分析精度, 可以使用更少的截断模态进行频响分析。

关键词: 悬臂梁; 频响分析; 残余矢量; 计算精度

# 某低成本平板卫星热控设计与热分析

李子轩, 王珏, 隋愿愿, 李博

(航天科工空间工程发展有限公司, 北京 100191)

摘要: 低成本平板卫星一般采用扁平结构, 可实现多星高密度堆叠发射。热控设计方案要适应卫星批量、快速总装实施, 同时批量制造后可显著降低热控成本。本文对某型号平板堆叠式卫星提出了经济性、可批产性的优化思路, 并介绍和论述了平板卫星的低成本热控设计方案和热分析情况。采用 Thermal Desktop 软件构建热模型并求解, 给出了极端工况下的主要设备平衡温度, 分析结果表明方案合理可行。

关键词: 低成本平板卫星; 经济性; 可批产性; 热控方案

# 考虑局部模态约束的卫星结构优化

刘嫣洁, 杨苗苑, 李子轩

(航天科工空间工程发展有限公司, 北京 100854)

摘要: 传统的全局频率约束问题的结构优化方法不能直接应用于模式置换现象的局部频率约束问题。为解决该问题, 本文提出了一种有效的近似方法。基于两个合理的假设, 将原始局部频率约束的优化问题转化为局部区域节点位移约束的优化问题。节点位移约束由当前局部频率和期望局部频率之间的比率确定。数值结果验证了该方法的可行性和有效性。

关键词: 传统优化方法; 全局频率; 局部频率; 节点位移约束

# 总剂量效应对 SRAM 单粒子翻转敏感性影响的仿真研究

刘艳<sup>1</sup>, 曹荣幸<sup>1\*</sup>, 李红霞<sup>1</sup>, 赵琳<sup>2</sup>, 韩丹<sup>1</sup>, 刘洋<sup>1</sup>, 郑澍<sup>1</sup>, 曾祥华<sup>1</sup>, 薛玉雄<sup>1\*</sup>

(1. 扬州大学 电气与能源动力工程学院, 扬州 225127;

2. 哈尔滨工业大学(深圳) 特殊环境物质科学研究院, 深圳 518055)

**摘要:** SRAM 在空间环境中会受到总剂量效应和单粒子效应的协合作用, 导致器件单粒子翻转的敏感性发生改变。针对 90 nm SRAM 器件总剂量效应对单粒子效应的影响机制, 本文通过器件级和电路级的综合仿真手段进行研究。结果表明, 当总剂量效应和单粒子效应作用在器件相反工作阶段, 即存储相反数据时, SRAM 单粒子翻转敏感性将随着剂量值的增高而增加; 当总剂量效应和单粒子效应作用在器件相同工作阶段, 即存储相同数据时, SRAM 单粒子翻转敏感性将随着剂量值的增高而减弱。此外, 与关态 N 管相比, 关态 P 管对总剂量效应与单粒子效应的协合作用更加敏感。研究表明, 其原因主要是 SRAM 的下拉 NMOS 管 M1 受到总剂量辐照损伤后, 会引起电路恢复时间和反馈时间的改变, 由于恢复过程和反馈过程贡献程度不同, 协合作用导致单粒子翻转敏感性出现不同的趋势。

**关键词:** SRAM; 总剂量效应; 单粒子翻转; 协合作用; 模拟仿真

# 固液捆绑火箭尾舱设备随机振动环境预示与改善分析

龙新军, 欧阳涵, 方贤亮, 潘望白, 胡迪科

(上海宇航系统工程研究所, 上海 201109)

**摘要:** 运载火箭发动机喷流噪声是引起火箭舱段随机振动环境的主要因素, 相比于液体发动机, 固体发动机工作产生的喷流噪声量级往往更大, 因此对于固液捆绑火箭而言, 多个固体助推发动机与芯级液体发动机喷流噪声组合捆绑效应将引起舱段高频随机振动环境也更为恶劣, 尤其是靠近发动机喷口附近的固体助推发动机尾舱。采用有限元分析方法, 重点针对某固液捆绑火箭试样阶段的固体发动机尾舱设备与支架安装面在噪声激励作用下的高频随机振动环境进行了改善分析研究, 结果表明增加单机设备支架厚度对单机设备安装面高频随机振动环境有明显改善, 与试样阶段试车测量结果对比表明单机设备与支架安装面随机振动均方根预示结果最大偏差 33.6% (2.5dB), 满足工程上一般要求的 3dB 偏差范围。

**关键词:** 固液捆绑火箭; 噪声激励; 随机振动; 有限元法; 环境改善

## 某卫星停靠补加连接机构被动端热仿真分析与遥测数据对比研究

马禄创, 李红兵, 冯文博, 赵一霖, 叶哲霄, 侯凌霄, 陈心锐  
(上海宇航系统工程研究所, 上海 201108)

摘要: 实现卫星燃料的在轨补加具有重大意义, 首先对某卫星停靠补加连接机构被动端进行了简单介绍, 随后阐述了机构被动端的热设计方案, 最后对机构被动端的数值模拟结果和飞行试验遥测数据进行了对比分析。分析结果表明: 停靠补加连接机构被动端热设计方案合理, 被动端各测点温度处于合理区间; 热仿真数据和实测数据偏差在允许范围之内, 表明热分析模型较为准确、热分析参数设置较为合理; 同时热仿真数据和实测数据存在一定的偏差表明热分析不确定性余量是必要的。

关键词: 热控制; 热设计; 数值模拟; 飞行试验

## 火星探测器再入过程中的 RCS 喷流干扰效应

孙瑞斌, 黄育群, 马继魁, 刘耀峰, 柳煜玮, 倪招勇  
(中国航天空气动力技术研究院, 北京 100074)

摘要: 采用 CFD 方法研究了 MSL 外形在火星大气环境中的 RCS 喷流干扰效应; 利用高超声速条件下喷流干扰风洞试验结果对数值方法进行了对比验证; 完成了火星大气环境下高超声速条件下( $M_\infty=5\sim 10$ )的偏航方向 RCS 喷流干扰效应数值模拟, 获得了不同攻角、不同马赫数条件的喷流干扰气动规律; 结果表明: 负攻角增大导致喷流干扰效应增强, 并导致附加偏航力矩增加; 来流马赫数对附加干扰力矩的影响较小。

关键词: 火星大气; 高超声速流; 火星探测器; 喷流干扰; 数值模拟

## MBSE 在安全性可靠性建模分析的研究与展望

覃沙, 李孝鹏, 张桅, 张姗姗, 高树成  
(中国航天标准化研究所, 北京 100071)

摘要: 针对基于模型的系统工程 (MBSE) 对传统安全性可靠性工作提出的新需求和挑战, 首先分析了安全性可靠性与 MBSE 集成的技术途径及其优缺点, 然后对基于 SysML 建模环境下安全性可靠性建模分析方法进行了应用研究和展望, 给出了基于 SysML 的安全性可靠性建模分析思路。结果表明 MBSE 在安全性可靠性的建模分析和早期验证等方面能够提供更好的手段, 可为工程推进 MBSE 在安全性可靠性工作上的应用提供参考。

关键词: MBSE; 安全性; 可靠性; SysML

## 空间环境技术发展趋势及对策研究

王健, 高欣, 冯展祖, 王亚龙  
(兰州空间技术物理研究所, 兰州 730000)

摘要: 空间环境是航天器在轨可靠性运行的重要挑战, 空间环境效应引起航天器材料、器件在轨性能退化甚至失效, 随着我国航天向着更高、更远的空间及技术方向迈进, 航天商业化的发展趋势等, 新的空间技术发展对空间环境的技术发展产生新需求, 通过分析空间环境科学领域的发展趋势, 对比分析存在的差距, 总结我国空间环境科学长期发展的需求及对策, 提出紧跟国际发展前沿科学的空间环境领域发展建议, 为我国航天发展战略从“认识空间、进入空间”向“利用空间、控制空间”转变提供必要的支撑。

关键词: 空间环境; 空间科学; 环境效应; 发展趋势; 航天器

## 高性能填充式空间碎片防护结构优化设计方法研究

武强, 任思远, 张品亮, 宋光明, 陈川, 龚自正  
(北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

摘要: 受发射成本及航天器尺寸的限制, 空间碎片防护结构面密度、防护间距往往受到严格限制, 如何在有限的面密度、防护间距下使防护结构获得更高的防护能力, 是高性能空间碎片防护结构设计在重点。本研究针对填充式空间碎片防护结构, 综合利用响应面试验设计、混料试验设计两种优化设计方法对填充式防护结构多参数进行优化, 获得填充层最佳填充位置前后间距比为 1.92:1, 最优防护屏面密度占比 0.45, 碳化硅织物面密度占比 0.45, Kevlar 织物面密度占比 0.1。基于优化结果完成对 NASA 填充式防护结构设计方程的修正。设计并开展超高速撞击实验验证所得设计方法的准确性, 实验结果分析表明, 优化填充位置、面密度占比可有效提升填充式防护结构防护能力。

关键词: 空间碎片; 填充式防护结构; 试验设计; 填充位置; 面密度占比

# 航天器用热管焊缝批量化检测装置的设计与实现

闫来信, 邵红亮, 颜世访, 闫浩, 周炜

(上海卫星装备研究所, 上海 200240)

摘要: 针对目前航天器用热管焊缝检测效率低、装夹难、底片保存难的问题, 本文提出了 X 射线实时成像检测技术(DR)将取代 X 射线照相检测技术 (RT) 和航天器用热管焊缝批量化检测的观点, 并进行了焊缝批量化检测装置的设计和实现, 这套航天器用热管焊缝批量化检测装置包括热管批量装夹系统和运动控制系统两部分, 采用半自动控制的方式对热管焊缝性能进行检测和评价。除此, 设计的航天器用热管焊缝批量化检测装置还能实现一些大尺寸的管材、棒材等原材料的探伤检测。通过热管焊缝批量化检测装置的实现, 降低了热管焊缝探伤检测时的装夹难度, 提高了检测的效率。并针对 X 射线实时成像检测技术 (DR) 的发展趋势, 提出了航天器用热管焊缝检测结果的智能化判读的观点。

关键词: 热管焊缝; 批量化检测装置; 智能化判读

# 无人机翼身组合体静强度试验研究

严振刚, 杨淇帆, 唐小军, 杨纯

(北京卫星制造厂有限公司, 北京 100094)

摘要: 无人机批生产后, 工艺检验性试验显得尤为重要, 通过定期抽样试验, 对制造工艺的稳定性进行验证; 本文从试验支持方案、加载方案、试验结果等方面提出了类型试验的方案, 并对试验过程问题、试验数据进行分析处理, 提出优化方法。结果表明该试验方案合理可行, 可为同类型试验方案设计和结构强度研究提供参考。

关键词: 无人机翼身组合体; 静载荷试验; 试验方案; 优化方法

# 基于三维 GIS 数字地图雷达电磁环境态势显示研究

买华

(中国航空综合技术研究所, 北京 100028)

摘要: 电磁空间作为未来信息化战争的主战场, 是否掌控空间电磁环境直接影响未来战争的胜负。科学、准确地描述战场电磁环境, 对于联合作战指挥员把握战场态势, 科学决策, 合理调配作战力量具有重要意义。面向电子对抗应用的要求, 本文深入研究信息化电磁环境可视化分析方法, 提出电磁环境数据运算参数要素, 开发电磁环境信息综合展示系统, 完成基于 GIS 的复杂电磁环境下雷达探测范围动态变化显示。为提高我军复杂电磁环境下作战训练能力提供技术支撑。

关键词: 复杂电磁环境; 雷达; 三维显示; 态势可视化

# 热解碳基吸波泡沫应用热真空吸波箱技术研究

李处森<sup>1</sup>, 秦家勇<sup>2</sup>, 林立海<sup>1,\*</sup>, 许卫刚<sup>1</sup>, 杜春林<sup>2</sup>, 张劲松<sup>1</sup>

(1.中国科学院金属研究所, 沈阳 110016; 2.北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

**摘要:** 针对卫星通信系统考核用热真空吸波箱对结构吸波材料的需求, 本文采用前驱体法、通过热解工艺制备了以热解碳为基体的轻质泡沫结构吸波材料, 性能测试结果表明该材料不仅适用于高真空、高低温循环热真空吸波箱环境, 而且具有适合尖锥型高效吸波结构设计的宽频带、宽温域高介电损耗的电磁特性。在此工作基础上, 以开展 PIM 吸波箱研制为例, 首先基于电磁波室温远场平面波照射目标的国军标测试方法建立仿真模型, 仿真设计并实测验证了满足吸波性能考核要求的热解碳基泡沫吸波材料尖锥+底板吸波结构。然后, 针对吸波箱内电磁波宽温域近场球面波照射吸波材料的使用状态, 开展了该尖锥+底板吸波结构在吸波箱内近场吸波的电磁仿真计算, 仿真结果表明该吸波结构的宽温域近场吸波性能满足使用要求, 采用该吸波结构装配的吸波箱通过了低 PIM 性能实测考核。

**关键词:** 吸波材料; 热真空吸波箱; 热解碳; 宽温域; 近场

# 新研载人航天工程安全性可靠性指标论证方法

周文明<sup>\*1</sup>, 李孝鹏<sup>1</sup>, 张 桅<sup>1</sup>, 李一钊<sup>1</sup>, 李彩霞<sup>2</sup>, 廖 捷<sup>3</sup>, 段加林<sup>4</sup>

(1. 中国航天标准化研究所, 北京 100071; 2. 中国运载火箭技术研究院, 北京 100076;

3. 中国航天员科研训练中心, 北京 100094; 4. 北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094)

**摘要:** 载人航天重大工程通常具有多阶段、多任务、多系统以及多目标特点, 为了衡量载人航天重大工程各阶段任务实施和保证航天员安全能力, 工程初期就需要开展工程安全性可靠性指标体系构建和确定工作。传统用单一顶层指标来指导工程各系统研制工作的观念会导致工程各阶段系统顶层指标的缺失, 影响各系统相关设计、验证及评估工作。本文在调研美国阿波罗计划和星座计划安全性可靠性指标情况基础上, 提出一种新研载人航天重大工程安全性可靠性指标论证方法和流程。研究确定了基于任务剖面链的工程任务安全性可靠性指标论证模型的构建方法, 着力解决新研载人航天重大工程任务层、工程各阶段以及工程各系统层三方面指标论证和确定问题, 并以星座计划载人登月任务为例介绍基于任务剖面链的安全性可靠性指标论证模型构建基本思路。本文提出的方法流程适用于新研载人航天重大工程安全性可靠性指标论证工作, 对后续其他新研载人航天重大工程安全性可靠性指标论证工作也有借鉴作用。

**关键词:** 新研载人航天工程; 任务剖面链; 安全性; 可靠性

# 一种真空下低温下模拟太阳翼展开试验方法

藏磊, 武强, 刘宝瑞, 杨永赛, 孙文峰, 刘冰  
(北京空间机电研究所, 北京 100094)

摘要: 太阳翼在太空中处于零重力环境, 地面展开验证试验通常使用导轨滑车、气球吊挂等方式进行, 但上述方式不适合在真空低温下进行模拟太阳翼展开。根据上述零重力展开试验方法的原理, 提出了适用于真空低温展开的试验方法。通过常温、常压下的验证试验确定方法可行, 进而在真空低温下进行试验验证。试验结果表明, 此种方法可行, 可以为其它类似模拟太阳翼机构在真空低温下进行展开试验提供参考。

关键词: 真空低温; 地面展开; 太阳翼; 摩擦力

# 卫星主动段力学环境监测系统

孙延博, 姚赛金, 方厚招, 薛景赛, 丁锋锋  
(上海卫星工程研究所, 上海 201109)

摘要: 卫星主动段力学环境监测系统已成功搭载于多颗卫星, 并开展了卫星发射主动段力学环境的测量。文章主要介绍了卫星主动段力学环境测量原理及系统组成, 经过实际地面实验验证卫星主动段力学环境监测系统振动测量精度达到  $0.08g$ , 应变测量精度与 LMS 系统应变采集之间误差最大为 3.9%; 讨论了监测系统对卫星发射主动段星箭连接环部位力学环境的测量情况, 并根据测量结果进行了分析。星上主动段力学环境测量的结果对完善、修正卫星结构设计及卫星分析模型具有重要意义, 也可为卫星地面力学试验条件的确定提供参考依据。

关键词: 力学环境监测; 星箭连接环; 卫星主动段

# 主流马赫数对超声速气膜冷却流场及冷却效率的影响

付强<sup>1</sup>, 雷龙清<sup>1</sup>, 陈伟<sup>1\*</sup>, 杨艳静<sup>2</sup>, 向树红<sup>2</sup>

(1. 四川大学 空天科学与工程学院, 成都 610065; 2. 北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

摘要: 在超声速气膜冷却中, 主流与冷却射流的相互作用既决定了气膜冷却孔附近的流场结构, 也影响下游的气膜冷却覆盖效果。本文采用数值方法研究了不同主流马赫数条件下, 气膜冷却的流场结构和传热特性。结果表明, 主流超声速条件下, 冷却射流的阻碍作用使得气膜冷却孔上游出现激波, 且随着主流马赫数的增大, 激波强度增大。激波诱导主流沿展向偏转而远离气膜冷却孔中心区域, 弱化了主流和冷却射流的相互作用, 降低了冷却射流在展向的掺混耗散。激波造成气膜冷却孔出口压力分布不均匀, 且其不均匀性随着主流马赫数的增大而增大, 使得气膜冷却孔出口处背风侧冷气质量流量相对更高, 这进一步降低了冷却射流与主流的掺混耗散, 也提高了下游气膜冷却的覆盖效果。主流超声速条件下, 气膜冷却覆盖效果更远, 且整体气膜冷却效率随着主流马赫数的增加而增加。

关键词: 气膜冷却; 超声速; 激波; 掺混; 流场结构

# 空间应用商用货架部组件质量与可靠性保障体系研究

邹田骥<sup>1,2\*</sup>, 武文博<sup>1,2</sup>, 于得权<sup>1</sup>, 李振祥<sup>1</sup>, 王明芳<sup>1</sup>, 伏洪勇<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院空间应用工程与技术中心, 北京 100094; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 商用货架部组件由于能够满足空间应用高性能需求, 同时能够降低全寿命周期成本, 缩短采办周期, 十分符合空间应用载荷研制任务的需求。但同时商用货架部组件不能完全得到其设计方案, 存在试验信息及可靠性信息可追溯性不强的问题, 导致其在空间应用中存在一定的风险与不确定性。针对商用货架部组件开展空间应用, 本文首先分析了商用货架部组件空间应用的需求和风险, 归纳了商用货架部组件选用方法, 提出了商用货架部组件的质量与可靠性保障的思路, 总结了商用货架部组件的选用与评估流程。通过在轨应用验证, 结果表明, 通过该体系保障的商用货架部组件, 能够满足空间应用载荷在轨稳定运行的要求, 同时为降低空间载荷研制成本、缩短研制周期提供了思路, 该方法对商用货架部组件的空间应用提供了一般性指导意义。

**关键词:** 货架部组件; 空间应用; 可靠性; 质量管理; 载人航天

# 航天装备结构的 FBG 冲击定位方法研究

刘子璇<sup>1</sup>, 辛朝军<sup>1\*</sup>, 李洁<sup>2</sup>, 杨鹏飞<sup>1</sup>, 皮姝<sup>1</sup>

(1. 中国人民解放军战略支援部队航天工程大学, 北京 101400; 2. 中国西昌卫星发射中心, 西昌 615000)

**摘要:** 结构的冲击定位, 对于在轨航天装备的健康管理和飞行控制具有重要的意义。为了实现对在轨航天装备结构冲击的高精度定位, 本文提出了一种新的光纤光栅传感网络时差定位方法。以表面粘贴光栅光纤传感器的钛合金板模拟航天装备板状载荷, 采用最大斜率法确认冲击信号到达各传感器时刻, 并利用到达时刻自适应地构建定位三角形进行时差定位, 从而实现对冲击点的确定。实验结果表明, 基于该方法的冲击定位平均误差可达 0.404cm。

**关键词:** 光纤布拉格光栅; 航天装备; 冲击定位; 实验研究

# 利用集成-迁移学习进行热层质量密度的沿轨预测

王培安<sup>1,2</sup>, 陈洲<sup>2\*</sup>, 王劲松<sup>3</sup>, 邓晓华<sup>1,2</sup>

(1. 南昌大学 资源与环境学院, 南昌 330031; 2. 南昌大学 空间科学与技术研究院, 南昌 330031;  
3. 中国气象局 空间天气重点开放实验室 国家空间天气监测预警中心, 北京 100081)

**摘要:** 对于低轨卫星, 热层质量密度的短期沿轨预测一直是十分重要但又极具挑战性。本文研究了三种深度学习预测算法, 包括 Bi-LSTM、Transformer 和它们的 LightGBM 集成模型。文章分别使用来自 CHAMP、GOCE 和 SWARM-C 的卫星数据来评估模型在不同密度变化下的鲁棒性和准确性。结果表明, 所有模型都能实现有效的预测, 并且效果优于 NRLMSISE-00。其中, LightGBM 集成模型 (LE 模型) 在准确性和稳定性方面始终优于其他模型。此外, 当新发射的卫星无法获得足够的密度数据时, 由其他卫星数据训练好的 LE 模型可以依靠迁移学习为新卫星提供有效的沿轨密度预测。文章对利用集成-迁移学习进行热层质量密度的短期沿轨预测提供了基础参考, 对低轨卫星的未来相关研究具有积极作用。

**关键词:** 低轨卫星; 热层质量密度; 集成学习; 迁移学习; Bi-LSTM; Transformer; LightGBM

## 低频瞬态振动环境等效模拟方法综述

高博, 张忠, 秦朝红, 魏龙, 郭静, 杨执钧

(北京强度环境研究所 可靠性与环境工程技术重点实验室, 北京 100076)

**摘要:** 航天飞行器发射过程中要经历严酷的低频瞬态振动环境。低频瞬态振动环境具有振动能量大、结构响应位移大的特点, 易造成结构和大中型设备故障, 是环境试验中必须重点考虑的载荷工况之一。文章将对低频瞬态振动环境的来源及特点进行分析, 并着重介绍低频瞬态振动环境的等效模拟方法。最后对低频瞬态振动试验中亟待解决的问题进行总结。

**关键词:** 环境试验; 低频瞬态振动; 环境等效; 冲击响应谱; 能量谱; 波形复现

## 分子筛制氧装置性能衰减及活化试验台设计方案

郭辰鑫, 林贵平, 魏雨辰, 曾宇\*

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191)

**摘要:** 机载分子筛制氧系统已在多种先进战机上得到装机应用, 是未来飞机氧源系统的发展方向。为了对分子筛材料及装置在不同进气条件下的性能衰减及活化再生过程进行研究, 了解其衰减及活化规律, 本文依据试验原理设计完成试验台主要组成部分: 供气处理单元、分子筛衰减特性试验设备单元、分子筛活化特性检测设备单元、上位测控系统单元并进行设备调研及选材, 最终搭建完成分子筛制氧装置性能衰减及活化试验台。

**关键字:** 分子筛制氧系统; 性能衰减及活化; 设计方案; 试验台

## 小型航天器离轨动力系统研究进展

康会峰<sup>1,3</sup>, 梅天宇<sup>1,3</sup>, 张斯迈<sup>1,3</sup>, 夏广庆<sup>2,3\*</sup>, 王晓阳<sup>1,3</sup>

- (1. 北华航天工业学院 河北省微小型航天器技术重点实验室, 河北 065000
2. 大连理工大学 工业装备结构分析国家重点实验室, 辽宁 116024
3. 北华航天工业学院 河北省微纳卫星协同创新中心, 河北 065000)

**摘要:** 为净化空间环境, 针对航天器寿命末期离轨问题, 对现有航天器离轨技术进行了分析。介绍了航天器寿命末期离轨技术的国内外研究发展现状, 总结了不同类型离轨方式的特点及适用对象, 分析了各种离轨方式发展趋势及关键技术, 提出了航天器寿命末期离轨技术各离轨方式的发展建议。通过调研发现: 现有航天器寿命末期离轨技术可使航天器在 25 年内离轨, 但在离轨装置可靠性、离轨过程稳定性、航天器离轨时间及离轨后处理等方面有较大提升空间。

**关键词:** 航天器; 寿命末期; 离轨技术; 离轨帆; 增阻球

## 某高分遥感卫星星敏感器的热设计与仿真

王翠林, 陈琦, 韩飞, 孙日思, 尹茂贤, 杨子鹏

(深圳航天东方红卫星有限公司, 深圳 518000)

**摘要:** 本文针对某高分遥感卫星星敏感器的高控温要求进行了相应的热控任务分析, 给出了星敏感器的详细热控设计方案: 在结构上采取隔热设计, 减小对星敏感器的热扰动, 同时采用偏冷设计, 对星敏感器进行独立散热控温, 利用高精度热敏电阻进行测温, 通过电加热回路对星敏感器进行控温, 加热回路通过开关加比例控温算法控制。最后利用 TD 软件进行建模仿真分析, 分析结果表明, 星敏感器温度在  $10\pm 0.35^{\circ}\text{C}$  之间波动, 满足  $10\pm 1^{\circ}\text{C}$  的指标要求, 验证了热设计的正确性。

**关键词:** 星敏感器; 热控; 偏冷设计; 比例控温

## 空天飞行器热噪声环境构建方法

王晓飞<sup>1</sup>, 林涛<sup>1</sup>, 王蕾<sup>1</sup>, 郭林<sup>1</sup>, 麻连净<sup>2</sup>, 杨静<sup>2</sup>

- (1. 北京无线电测量研究所, 北京 100143; 2. 北京机电工程研究所, 北京 100074)

**摘要:** 空天飞行器在再入大气层时或在大气层内高速飞行时, 会遇到严酷的气动热噪声复合环境, 导致结构出现热噪声疲劳破坏, 严重影响空天飞行器结构和设备的环境适应性和可靠性。为了验证空天飞行器结构和设备设计的合理性, 考核其环境适应性和可靠性, 需要构建地面热噪声环境。笔者根据多年从事空天飞行器热噪声环境构建的实践经验, 结合当前装备设计能力和试验技术的发展, 对空天飞行器热噪声环境构建方法进行论述, 为空天飞行器热噪声环境构建的全流程提供参考和指导。

**关键词:** 空天飞行器; 热噪声环境; 构建方法

# 一种求解简支矩形薄板振动的等效方法

杨开拓, 李志强

(可靠性与系统工程学院, 北京航空航天大学, 北京 100191)

**摘要:** 为了分析简支矩形弹性薄板在发生振动时, 板上的某具体位置的振动情况。本文提出了一种将简支矩形薄板的振动等效为单自由度质量-弹簧系统的振动的等效方法。该方法将简支矩形薄板自由振动时的动能及应变能与单自由度质量-弹簧系统的动能及应变能进行等效。通过推导单自由度质量-弹簧系统的参数, 进而将矩形板上某位置处的振动情况转化为单自由度质量-弹簧系统的振动。等效法参数推导结果及案例分析的结果表明, 将简支矩形薄板的振动等效成等效位置处的单自由度的质量-弹簧系统的振动是可行的。由于该方法将矩形板这样一个连续系统的振动转化为板上等效位置处的单自由度质量-弹簧系统的振动, 为后续分析在振动激励下板上某位置的振动响应提供了一种新的方案。

**关键词:** 振动; 简支矩形板; 质量-弹簧系统; 等效法

# JLU-H 高地模拟月壤机械力学特性研究

孙绪民<sup>1</sup>, 张锐<sup>1</sup>, 李秀娟<sup>1</sup>, 邹猛<sup>1\*</sup>, 王储<sup>2</sup>, 陈磊<sup>2</sup>

(1. 吉林大学 工程仿生教育部重点实验室, 长春 130022; 2. 中国科协航天器系统工程研究所, 北京 100094)

**摘要:** 月球风化层的机械力学特性是月球原位资源利用 (ISRU) 设备设计的关键参数。准确模拟月壤的机械力学特性是研制上述设备的必要条件。高保真度的模拟月壤价格昂贵, 由于产量有限, 往往无法大量获得。为了保证 ISRU 设备测试结果的准确性和可信度, 文章研制了一种廉价且大量生产的低保真度模拟月壤。该模拟物以斜长石为原料, 未添加其他化学物质。尽管 JLU-H 模拟月壤在化学成分上与真实月壤有部分差异, 但总体上接近真实月壤的矿物成分。通过调整试样的粒径分布, 使模拟月壤的粒径分布、颗粒形态、比重、相对密度和抗剪强度等参数接近 Apollo-16 高地月壤, 并在月壤样本的参数变化范围之内, 表明该模拟月壤可用于未来的工程试验, 并预测 ISRU 设备在月球上的性能。

**关键词:** 斜长岩; 高地模拟月壤; 工程试验应用; 力学参数

# 薄壁碳纤维管的模态试验和仿真模型优化研究

于冰<sup>1,2</sup>, 罗忠<sup>1,2,3\*</sup>, 张小霞<sup>1,2</sup>, 孙新宇<sup>1,2</sup>

(1. 东北大学 机械工程与自动化学院, 沈阳 110819;

2. 东北大学 航空动力装备振动及控制教育部重点实验室, 沈阳 110819

3. 东北大学 佛山研究生创新学院, 佛山 528312)

**摘要:** 薄壁碳纤维管结构由于具有质量轻、强度高、设计灵活等优点, 被广泛应用在航天飞行器结构, 但是目前关于薄壁碳纤维管的动力学特性研究较少。本文进行了薄壁碳纤维管的模型优化研究, 分析了薄壁碳纤维管的动力学特性。首先, 开展了薄壁碳纤维管模态试验, 测得了薄壁碳纤维管的固有频率; 然后, 建立了薄壁碳纤维管的动力学模型, 并对模型进行参数优化, 与试验结果进行对比, 验证了优化模型的准确性; 最后, 改变管长后进行多次对比, 进一步验证了优化后的模型的正确性。

**关键词:** 薄壁碳纤维管; 模态试验; 有限元建模; 模型优化

## 基于卫星的在轨微振动时频转换技术

姚赛金, 方厚招, 南玲巧

(上海卫星工程研究所, 上海 201109)

摘要: 文章阐述了在卫星在轨过程中利用在轨振动试验, 完成航天器复杂非平稳力学环境时频转换的实现过程。采用参数化小波时频分析方法对航天器结构进行高分辨率时频转换研究, 阐述了该算法的原理和实现过程, 提出了该算法在航天器结构上使用的优势和准确性。并利用该方法实现了卫星了空间环境下高分辨率时频转换的问题。

关键词: 参数化时频分析; 调频小波; 时频转换

## 偏压式月尘探测器多物理场仿真与分析

张海呈<sup>1</sup>, 郑玉展<sup>2</sup>, 张诚悦<sup>1</sup>, 全荣辉<sup>1</sup>

(1. 南京航空航天大学航天学院, 南京 211106; 2. 北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094)

摘要: 月尘会影响月球车的运转, 危害航天员的健康, 因此对月尘颗粒运动特性及累积分布情况进行高效探测是十分必要的。本文采用多物理场仿真软件对偏压式月尘探测器进行仿真, 重点对比计算了  $2\mu\text{m}$  以下月尘颗粒在探测器中的运动及累积分布情况, 并通过实验对  $2\mu\text{m}$  的月尘颗粒在环形电极上的累积分布进行了研究。仿真结果表明, 当最内环偏压为+30V、其它环偏压均为-50V时, 6环探测器对400个  $2\mu\text{m}$  以下初始速度  $0.41\text{m/s}$  的模拟尘埃收集效率为99.25%, 粒子分布最多的为第4环; 同样偏压设置的12环电极结构, 则可对相同的带电尘埃实现约100%收集, 粒子分布最多的为第9环。实验结果显示, 6环电极收集的尘埃约占总量的88.27%, 12环电极收集的尘埃约占总量的96.63%, 且分布特性与仿真相似。结果表明, 对应于占比95%的  $2\mu\text{m}$  以下月尘颗粒, 使用12环偏压式月尘探测器可以实现更高收集率探测, 但随着月尘荷质比的减小, 探测器收集效率将逐渐下降。

关键词: 月尘; 偏压式探测器; 环形电极; 多物理场仿真; 月球探测

## 振动台支架连接螺栓强度分析方法研究

张琪<sup>1</sup>, 魏金浩<sup>2</sup>, 王坤<sup>3</sup>, 王丹<sup>4</sup>

(1. 北华航天工业学院; 2. 河北省跨气水介质飞行器重点实验室;  
3. 河北省微纳卫星协同中心; 4. 河北省微小型航天器实验室; 廊坊, 邮编 065000)

摘要: 大吨位振动台是航天工程中必备的环境试验设备, 针对十吨大型振动台工作时其支架连接处螺栓横向受剪的强度问题, 对振动台支架及其螺栓连接方式进行了理论分析和有限元仿真计算, 分析预紧力和摩擦力的关系, 对静摩擦和动摩擦力的作用过程和机理进行了深入剖析, 发现了该支架结构及连接方式的部分缺陷, 为振动台支架结构及其连接方式的设计改进提供了参考方向与理论依据。

关键词: 振动台支架; 螺栓连接; 有限元; 强度分析

# 浅谈航天生产制造环境建设过程的 ESD 隐蔽工程管理

周黎, 董悻博, 肖志康

(北京东方计量测试研究所, 北京 100094)

摘要: 在航天器生产制造的环境建设过程中, 涉及静电防护工艺的隐蔽工程完成与验收是一项里程碑式的关键节点。防静电隐蔽工程是否合格, 直接关系到项目整体的防静电效果。最隐蔽的地方可能会成为最大的隐患, 加强隐蔽工程的跟踪检测与质量控制, 避免航天器生产制造活动出现重大质量隐患, 是工程质量管理过程中亟需关注和解决的重点问题。本文结合建筑装饰工程项目质量管理思想, 针对防静电隐蔽工程的过程检测控制和质量标准与方法做出概括、总结和分析, 为防静电工程管理流程的进一步完善积累了经验。

关键词: 隐蔽工程; 静电防护; 质量保证; 工程建设

## 大型真空容器结构评价方法研究

何绍栋, 王华新, 李云恒, 刘宝瑞, 施建昆, 杨健

(北京空间机电研究所, 北京 100094)

摘要: 真空容器是空间环境模拟试验系统的主体设备, 它为试验产品和试验设备提供有效的试验环境, 是真空获得、热沉、氮流程、外热流模拟等分系统汇集的中心, 真空容器不仅要承受大气压力和工艺设备质量, 还要满足试验产品对容器结构的要求, 在真空容器设计过程中, 容器的壁厚和结构形式, 将直接影响真空容器的稳定性。为了积累真空容器壁厚和结构形式对稳定性的实验数据, 需要设计一套真空容器结构稳定性的测试方法。本文采用有限元法对某大型真空容器进行强度及稳定性分析, 通过试验验证了强度及稳定性分析结果, 并提出了一套针对大型真空容器结构强度及稳定性评估测试方法。

关键词: 真空容器; 稳定性分析; 有限元分析; 评价方法

## SBIRS GEO-3 卫星构形分析与启示

姜云彬, \*赵华, 郝刚刚, 陈恩涛, 洪斌, 薛宏伟, 周辉

(中国空间技术研究院遥感卫星总体部, 北京 100094)

摘要: “天基红外系统”(space based infrared systems, SBIRS), 是美国空军针对国防支援计划(defense support program, DSP) 预警卫星而设计部署的后续新型卫星系统, 用于支持导弹预警、导弹防御和作战空间感知等领域, 是美国战略战术作战与防御系统的重要组成部分, 对国防军事具有重要作用。本文根据公开资料在对 GEO-3 卫星的任务及指标分析基础上, 对 GEO-3 卫星的构形设计与特点及采用的新技术进行了分析和总结。

关键词: 光学遥感卫星; 天基红外系统; 系统设计; 发展趋势; 设计启示

## 基于 FPGA 的多通道同步数据采集系统研究

李昊, 彭毓川, 刘庆海, 葛丽丽, 唐振宇

(北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

摘要: 基于 FPGA 设计了一套多通道同步数据采集系统。该系统采用模块化设计思想, 能够通过修改程序参数, 重构硬件资源, 灵活地配置采集通道的数量。使用带有同步功能的高精度  $\Sigma\text{-}\Delta$  型 ADC 进行信号采样, 各个 ADC 的同步信号和滤波器时钟信号由 FPGA 统一产生, 实现了多路采样通道相互同步。选用 LVDS 作为数据接口, 满足传输带宽需求。上位机使用 RS232 接口向硬件发送控制指令, 通过 USB 经接口转换电路读取 LVDS 传输的数据, 并在用户界面中以图形方式实时显示采集数据。测试结果表明, 该系统实现多通道同步采集模拟电压信号的功能, 可应用于空间载荷设备和地面测试设备的研制。

关键词: 数据采集; 多通道同步; FPGA; LVDS

## 遥感器在轨环境模拟试验系统自动控制技术

李云恒<sup>1</sup>, 何绍栋<sup>2</sup>, 王俊成, 邓高, 杨健

(1.北京空间机电研究所, 北京 100094; 2.北京空间机电研究所, 北京 100094)

摘要: 遥感器在轨环境模拟试验系统是为空间光学遥感器进行真空热试验时提供真空、冷黑背景等测试环境的专业试验装置。为提升设备自动化控制水平, 提出并设计了能够实现操作的自动化控制需求; 该控制方案基于 PLC 逻辑控制、以全流程配套的监控传感器状态反馈为判断, 智能化程度较高, 可根据自行判断当前工况并对所控设备进行调整, 通过多种工况模拟测试后, 满足空间光学遥感器模拟在轨试验的需求, 实现了系统真空度调节、高真空获取、冷黑背景建立等功能的自动化控制。

关键词: 遥感器、在轨环境模拟试验系统、PLC、自动化控制

## 航天器热平衡试验用红外加热笼系统设计

刘宝瑞, 李立广, 藏磊, 吴新建, 贾宇

(北京空间机电研究所, 北京 100094)

摘要: 根据航天器热平衡试验研制需求, 设计红外加热笼作为主要加热设备用于模拟空间外热流, 通过在不同分区间增加金属辐射屏遮挡以及狭小空间覆盖多层隔热组件的方法, 消除分区的热流干扰, 保证到达产品表面热流的均匀性和工况要求, 同时对结构进行了有限元强度校核以及加热控温效果进行了仿真分析和试验验证, 验证了该系统在真空热平衡试验中热环境模拟的有效性, 为后续航天器采用红外加热笼进行热试验, 如何消除分区的热流干扰提供了有效的解决方法。

关键词: 热平衡试验; 航天器; 红外加热笼; 金属辐射屏

# 基于声表面波的星载传感器无缆化互联技术研究

刘岩, 贾雨琴, 陈瑞勋, 陈朝基  
(北京飞行器总体设计部, 北京 100094)

摘要: 鉴于星载有线电气连接所带来的灵活性差、系统代价大等问题, 提出了星载传感器无缆化互联技术方案。基于时分分频的动态接入和声表面波无源无线测量技术, 开展了无线传感网络系统设计和协议设计, 及无源无线传感测量传感器和应答器设计。组建了测试系统, 开展了无线传感器组网测试, 统计得到了各种工况下无线通信误码率。测试结果表明, 文章提出的互联技术可基本满足航天器使用需求, 具备推广应用的条件。

关键词: 星载传感器; 无缆化互联; 声表面波

# 基于 Python 的放大器输入输出特性自动测试软件设计

鲁飞, 戴利栋, 杨宁彬, 李芄博, 李磊  
(中国空间技术研究院西安分院, 西安 710000)

摘要: 针对目前航天放大器输入输出特性测试频点多、工作电压多、工作模式多导致手动测试效率低、存在误操作等问题, 本文设计了一种基于 Python 软件自动化测试的方法来实现放大器输入输出特性测试, 该方法通过自动链接读取测试参数, 获取测试条件, 依次启动软件功能快速获取放大器输入输出特性, 有效解决了不同工作模式下多频点、多电压、输入信号跨度范围大等特殊复杂需求下的输入输出特性测试。充分利用 Python 第三方扩展包, 采用 PyQt5、NumPy、Matplotlib 等功能强大的扩展模块, 实现了在图形界面下快速且准确地完成对采集数据的分析和处理, 同时可以兼容调用其他语言编写的功能扩展包。通过该方法, 实际应用测试结果表明, 该方法与传统手动测试方法相比避免了误操作, 可缩短约 75% 的测试时间, 扩展性强, 能够为同类测试系统的自动化测试研究提供良好借鉴。

关键词: 自动化测试; Python; 放大器; 输入输出特性

# 数字化车间技术在航天器总体装配领域中的应用

任振岳, 杨春生, 孔晓瑶, 王晓臣  
(北京卫星环境工程研究所, 北京, 100094)

摘要: 为适应航天器需求多样化、系统集成复杂化、研制过程高效化的发展趋势, 数字化车间作为一种工业化与信息化相融合的集成制造系统, 能够有效解决当前航天器生产效率低、智能化程度低等问题。本文通过简要介绍数字化车间技术的国内外应用现状, 阐述数字化车间技术依赖的技术基础, 详尽分析数字化车间技术在航天器总装过程中的应用, 为加强生产过程管控、提高航天器总装研制效率提供一种整体解决方案。

关键词: 航天器装配; 数字化车间; 数字化制造

# 一种航天器在轨环境下结构变形反演方法

孙维<sup>1</sup>, 王丁<sup>1</sup>, 罗文波<sup>1</sup>, 原劲鹏<sup>1</sup>, 陈海峰<sup>1</sup>, 阎军<sup>2</sup>, 许琦<sup>2</sup>

(1. 北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094; 2. 大连理工大学, 大连 116000)

**摘要:** 随着对地、对天观测航天器指标要求的日益提高, 大型遥感卫星在轨结构变形已成为决定图像定位精度、相机成像质量的重要因素之一。但是目前获取航天器结构变形主要方法为根据在轨测量的温度载荷, 在地面通过有限元软件计算得到, 但整星有限元模型往往规模较大, 计算效率较低, 不能满足遥感卫星结构实时反馈的需求, 同时温度载荷的随机性及测量误差也会影响结构变形计算的精度, 需开展高精度高效率的变形反演方法的研究。本文提出了一种基于神经网络的结构变形反演方法, 借助有限元分析法获得结构在不同温度载荷作用下的应变分布特征, 利用获取的数据对输入和输出间神经网络进行训练, 获取高精度的代理模型, 以在轨测量的温度作为输入, 可实现对航天器结构全场变形的反演。本文所提方法具有精度高, 实时性好等优点, 对于提升遥感卫星的成像质量的应用具有重要意义。

**关键词:** 神经网络; 结构变形; 反演方法

# 基于集成学习方法的机电作动器故障诊断研究

张潇<sup>1</sup>, 刘沐阳<sup>2</sup>

(1. 中国空间技术研究院, 北京 100094; 2. 西北工业大学航空学院, 西安 710072)

**摘要:** 随着航空工业的发展, 人们对于飞行器综合性能的要求越来越高, 对机载机电作动器(EMA)进行健康管理尤为关键。本文以EMA作为研究对象, 重点研究基于集成学习方法的故障诊断框架来解决飞行器健康管理问题。论文对比不同集成学习策略间的优劣, 提出一种以Boosting集成学习方法为核心的故障诊断框架。该方法以XGBoost、LightGBM和CatBoost模型为基础, 相较于时下流行的深度学习框架, 其占用的计算资源更少, 模型的可解释性更强。试验结果表明本框架相较于传统机器学习方法具有更高的诊断准确率, 相较于深度学习训练时间更短, 内存占用率更低, 具有很强的工程应用价值。

**关键词:** 机电作动器; 永磁同步电机; 健康管理; 故障诊断; 集成学习

# 温变型石英晶体微量天平热效应分析

王璐<sup>1</sup>, 臧卫国<sup>1</sup>, 赵宝杰<sup>2</sup>, 傅东辉<sup>2</sup>, 杨东升<sup>1</sup>

(1. 北京卫星环境工程研究所, 北京 100094; 2. 首都航天机械有限公司, 北京 100076)

**摘要:** 对于长时间监测航天器研制过程中的污染量以及超低温环境试验, 现有的石英晶体微量天平不能满足完成一整次试验监测要求(此项研究的目的是为了实现传感器监测表面温度控制达到降温主动温控, 最终不宜否定), 为此研制了温变型石英晶体微量天平。为了实现温变型石英晶体微量天平的变温控制, 本文建立了热效应模型, 通过对在真空环境模拟设备中进行的温变型石英晶体微量天平热效应专项试验测试, 表明它可以实现污染传感器快速升降温, 变温40℃所需时间小于10分钟, 升降温幅度超过60℃。高温去除沉积污染, 低温采集污染沉积量, 实现长期监测, 解决了当前石英晶体微量天平污染量测量的瓶颈问题。

**关键词:** 石英晶体; 微量天平; 热效应; 温度控制; 温变调制

# 数字化设计在多层隔热组件制作中应用的研究

王华新, 何绍栋, 李云恒, 施建昆, 邓高, 杨建

(北京空间机电研究所, 北京 100094)

**摘要:** 多层隔热组件包覆于航天遥感器外表面, 主要用于阻止遥感器内、外的热流辐射, 减少热辐射交换。传统多层组件的制作需要现场比对航天器零件及部组件完成制作和包覆, 随着航天器数字化设计 (CAD) 的不断进步, 利用 CAD 软件在航天器三维结构模型上进行多层组件的模拟设计和装配, 将设计好的多层组件模型输入到自动剪裁机完成裁剪。采用多层组件的数字化设计, 可以实现自动裁剪、电子化存档, 能够大幅减少多层组件的拼接长度和漏热风险, 避免多余物的产生。

**关键词:** 航天器热控设计; 多层组件; 数字化设计; 三维展开; 被动热控设计

# 超大口径拼接式高辐照真空紫外模拟技术

张鹏嵩<sup>1</sup>, 蒋山平<sup>1</sup>, 王丹艺<sup>1</sup>, 王睿明<sup>1</sup>, 柳晓宁<sup>1</sup>, 龚洁<sup>1</sup>, 琚丹丹<sup>2</sup>, 闫继宏<sup>2</sup>

(1. 北京卫星环境工程研究所, 北京 100094; 2. 哈尔滨工业大学, 哈尔滨 150001)

**摘要:** “系统级综合辐照试验舱”作为国家重大科技基础设施“空间环境地面模拟装置”的分系统, 需要开展空间电子、质子辐射及太阳、紫外辐照环境模拟。针对米级直径辐照面的真空紫外模拟需求, 研制了超大口径拼接式高辐照真空紫外模拟子系统, 为系统级综合辐照试验舱提供紫外辐射环境。在研制过程中, 先后突破了超大口径氙灯光源阵列光路设计、氙灯光源阵列的高稳定高可靠拼接工艺控制、光学性能指标原位测试及量值溯源等多项关键技术, 在综合辐照试验舱  $\Phi 1000\text{mm}$  的聚焦辐照面内成功实现最大值 9.65 个真空紫外常数, 平均值 8.55 个真空紫外常数, 最小值 4.81 个真空紫外常数的紫外辐照模拟, 光谱波长范围为 100~200nm。

**关键词:** 超大口径; 拼接式; 真空紫外; 辐照模拟

# 压电陶瓷与胶体缺陷对超声电机机电性能影响研究

郭悦<sup>1,2,3</sup>, 黄首清<sup>1,2,3\*</sup>, 胡芳<sup>1,2,3</sup>, 苏新明<sup>1,2,3</sup>, 李芳勇<sup>1,2,3</sup>

(1. 航天机电产品环境可靠性试验技术北京市重点实验室; 2. 可靠性与环境工程技术国防科技重点实验室;  
3. 北京卫星环境工程研究所: 北京 100094)

**摘要:** 文章通过仿真方法研究了压电陶瓷与胶体的初始缺陷对超声电机机电性能的影响。针对含有球形缺陷和长方体缺陷的压电陶瓷, 本文采用 Creo 3.0 软件的几何参数联动技术和 Ansys Workbench 响应面分析技术开展了参数化缺陷尺寸对压电陶瓷内部应力的影响研究, 定量计算了压电陶瓷片的内部应力, 探究了 2 种缺陷的尺寸筛选判据。研究发现, 针对含有球形缺陷和长方体缺陷的压电陶瓷片, 最大应力均集中在缺陷处, 易发生裂纹的萌生和扩展。其中, 压电陶瓷片球形缺陷直径和长方体缺陷长度的尺寸筛选判据分别为 15  $\mu\text{m}$  和 10  $\mu\text{m}$ 。本文采用上述仿真方法开展了胶体缺失和参数化胶体气泡尺寸对超声电机机电性能的影响研究, 结果表明, 当超声电机胶体缺失和胶体含有气泡时, 其工作谐振频率仅发生微小漂移, 但齿面振幅明显增加, 在实际工况下易引发压电陶瓷片断裂风险。本文探究了超声电机生产工艺误差对其性能输出的影响, 研究结果可为压电陶瓷制造工艺改进和超声电机制造工艺控制研究提供量化参考, 在提升超声电机可靠性方面具有实际意义。

**关键词:** 压电陶瓷; 胶体; 超声电机; 机电性能

# 面向高精度航天器微振动检测的仿生加速度传感器设计

李健豪<sup>1</sup>, 张赫<sup>1</sup>, 王泽<sup>1,2</sup>, 韩志武<sup>1</sup>, 任露泉<sup>1</sup>

(1. 吉林大学 工程仿生教育部重点实验室, 长春 130022;  
2. 吉林大学 机械与航空航天工程学院, 长春 130022)

**摘要:** 经过数十年的发展, MEMS 传感器以其微型化、高性能、高可靠以及易于集成等特点, 在汽车工业、航空军事等领域有着广泛的应用前景。其中, 基于压电式的硅微加速度传感器因其响应速度快、高频性能优异、温度稳定性好、输出阻抗等优点, 成为面向高精度航天器微振动测量的重要发展方向。针对高精度遥感卫星地面微振动测试的实际需求, 受自然界超感知生物的启发, 设计一种宽频域 (~2 kHz)、高灵敏、低串扰的仿生硅微加速度计敏感结构。建立了仿生加速度传感器的动力学模型, 通过优化确定了仿生加速度传感器的几何尺寸和结构。

**关键词:** 压电加速度传感器; 仿生设计; 高灵敏; 低串扰

# 混响室强电磁环境多馈源空间合成研究

李文杰, 方建新\*, 谢攀, 陈根余, 彭旭  
(成都四威功率电子科技有限公司, 成都 610000)

摘要: 提出了多馈源天线在混响室内产生强电磁场环境的方法, 研究了多馈源天线对混响室场性能的影响。分析了多馈源天线产生高强辐射场的同时改善混响室场均匀性的原理, 对单元天线、双元阵列天线以及四阵元天线的混响室模型进行了仿真计算, 从辐射场强及场均匀性两方面研究了不同数量的馈电天线以及阵列形式不同馈电相位对混响室性能的影响。研究表明: 采用多馈源天线改善了混响室工作区域的场均匀性; 阵列形式天线采用同相馈电可以较非同相馈电降低混响室的测试功率成本。

关键词: 混响室; 多馈源天线; 场均匀性; 场强; 阵列

# 考虑桁架变形和结构非线性的空间可展开天线索网找形方法

孟南宇<sup>1</sup>, 时志奇<sup>1</sup>, 周青华<sup>1\*</sup>, 朱浩<sup>2\*</sup>  
(1. 四川大学 空天科学与工程学院, 成都 610065;  
2. 四川大学 建筑与环境学院, 成都 610065)

摘要: 在空间复杂环境下, 卫星天线的结构变形引起的反射表面形状误差是影响天线以及卫星整体性能的主要因素。针对现有空间可展开天线索网找形方法中参数确定困难、求解过程复杂、整体计算效率和精度低等问题, 综合运用非支配多目标遗传算法和非线性规划方法, 提出一种分层多次优化的索网找形方法, 避免目标函数中参数取值范围和权重系数选择的随机性和对优化结果影响的不确定性。基于有限元方法建立了网架结构非线性力学模型, 分析了支撑桁架变形和索网找形的耦合影响。结果表明, 在考虑桁架变形的多次找形过程中, 所提出的索网找形方法计算精度和计算效率均得到有效提升。

关键词: 桁架天线; 索网找形; 多目标优化; 结构非线性

# 自润滑基础运动部件模拟空间环境试验装置研究进展

李振<sup>1,3</sup>, 石佳东<sup>2,3</sup>, 马国政<sup>3\*</sup>, 张执南<sup>1</sup>, 李国禄<sup>2</sup>, 郭伟玲<sup>3</sup>, 王海斗<sup>3,4</sup>

(1. 上海交通大学 机械系统与振动国家重点实验室, 上海 200240;

2. 河北工业大学 材料科学与工程学院, 天津 300401;

3. 陆军装甲兵学院 装备再制造国防科技重点实验室, 北京 100072;

4. 陆军装甲兵学院机械产品再制造国家工程研究中心, 北京 100072)

**摘要:** 自润滑基础运动部件模拟空间环境试验装置的主要功能包括空间环境因素模拟与摩擦磨损性能测试。文章首先简要梳理了国内外用于空间高真空、高低温、质子辐照、电子辐照和原子氧侵蚀等主要环节因素模拟的代表性试验装置及其技术指标, 然后分别以空间装备自润滑轴承和自润滑齿轮为典型对象, 介绍了面向空间装备应用的自润滑基础运动部件模拟空间环境试验装置的研究进展, 最后分析展望了该领域的研究趋势。

**关键词:** 自润滑运动部件; 空间环境模拟; 轴承; 齿轮; 试验装置

# 真空中相对论电子束长程传输过程的仿真研究

王庆宇<sup>1</sup>, 铁维昊<sup>2</sup>, 郭雨林<sup>1</sup>, 张舒雅<sup>1</sup>, 孙安邦<sup>1</sup>, 方进勇<sup>2</sup>

(1. 西安交通大学 电力设备电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049;

2. 中国空间技术研究院西安分院, 西安 710100)

**摘要:** 本文基于狭义相对论中的洛伦兹变换对相对论电子束流的传输过程进行了仿真研究, 分析了相对论电子束流长程传输过程中的空间电磁场分布, 并结合相空间理论对电子束流半径随传播距离的变化规律进行探索, 研究表明束流半径首先呈指数增长, 传播一定距离后呈线性增长。洛伦兹变换解决了由于长程传输模型的时空尺寸较大而导致的计算资源不够等问题, 为相对论电子束长程传输提供了新的研究方法。

**关键词:** 电动力学; 相对论电子束; 洛伦兹变换; 长程传输

# 基于高温光测及数值仿真的火焰加热环境下 C/SiC 热膨胀行为研究

张治<sup>1</sup>, 屈哲<sup>1</sup>, 唐云龙<sup>2,3\*</sup>, 冯雪<sup>2,3\*</sup>

(1. 杭州柔谷科技有限公司, 杭州 310018;

2. 清华大学, 北京 10084; 3. 清华大学 柔性电子技术实验室, 北京 10084)

**摘要:** C/SiC 复合材料是航天航空领域的一种重要结构材料及隔热材料, 在火箭发动机燃烧室、推进器、鼻锥等位置以及超音速飞行器的热防护系统上得到了广泛应用。研究 C/SiC 的高温热膨胀行为, 可为其性能的优化和提高提供理论指导, 具有非常重要的意义。本文通过高温在线测量技术, 并将其与数值仿真方法相结合, 针对氧丙烷火焰加热环境下 C/SiC 的热膨胀行为进行了研究。通过高温在线测量方法获取到了试验过程中 C/SiC 试样的表面图像数据, 采用温度变形同步测量方法计算得到了其表面温度场分布的变化过程, 以及表面位移场及应变场的变化过程, 对其加热过程中表现出的热膨胀行为进行了分析。根据计算得出的温度场, 采用数值仿真得到了与试验环境较为一致的加热环境, 并计算得出了与 DIC 计算结果相吻合的位移场分布。通过数值仿真, 展示了裂纹对 C/SiC 材料热膨胀行为的影响。通过计算不同长度的裂纹与样品上端热膨胀量的关系, 最终给出了裂纹长度与样品上端热膨胀量之间的关系趋势。

**关键词:** C/SiC 材料; 高温环境; 热膨胀行为; 数字图像相关方法; 数值仿真

## 模型弹陆态弹射出筒分析

张朝阳<sup>1</sup>, 崔高伟<sup>2,3</sup>, 张斯迈<sup>2,3</sup>, 张林轩<sup>2,3</sup>, 康会峰<sup>2,3</sup>, 夏广庆<sup>1,2,3</sup>, 宣佳琳<sup>2,3</sup>, 鹿畅<sup>1,2,3</sup>

(1. 大连理工大学 工业装备结构分析国家重点实验室, 大连 116024;

2. 北华航天工业学院 河北省微纳卫星协同创新中心, 廊坊 065000;

3. 北华航天工业学院 河北省微小航天器技术重点实验室, 廊坊 065000)

**摘要:** 模型弹发射出筒过程中载荷及姿态容易受摩擦垫的刚度和摩擦的影响。通过研制模型弹发射系统, 模拟模型弹的发射出筒过程。通过数值分析方法实现模型弹出筒过程的仿真, 模拟摩擦垫的刚度和摩擦系数对载荷及姿态的影响; 通过实际实验, 获得模型弹发射过程中的载荷以及姿态数据, 研究摩擦垫的刚度和摩擦系数对载荷及姿态的影响。

**关键词:** 气动发射; 流固耦合; 重叠网格

# 基于数据驱动的恒力弹簧零重力模拟系统控制

乔云一<sup>1</sup>, 霍明英<sup>1</sup>, 齐乃明<sup>1</sup>, 李栋<sup>2</sup>, 孙浩<sup>2</sup>, 孙通<sup>2</sup>, 王婉秋<sup>2</sup>, 樊世超<sup>2</sup>, 刘闯<sup>2</sup>

(1. 哈尔滨工业大学, 哈尔滨 150001; 2. 北京卫星环境工程研究所, 北京 100029)

**摘要:** 随着对航天器地面模拟实验要求的提高, 恒力弹簧零重力模拟系统已经成为实现竖直方向自由度微低重力模拟的重要部分, 传统的控制方法无法实现对该系统的高精度和快响应控制, 传统的动力学建模方法也无法适应其动力学模型的高离散型和强非线性性。为进一步提高恒力弹簧零重力模拟系统的控制精度和响应速度, 本文提出利用基于 BP 神经网络构建的动力学模型的模型预测控制对该系统进行控制, 建立了 BP 神经网络动力学模型, 设计了模型预测控制控制器, 并完成了数值仿真实验和实际实验, 证明了所提出方法的有效性。

**关键词:** 模型预测控制 (MPC); BP 神经网络; 非线性系统控制; 竖向零重力

# 空间环境下柔性或刚性材料自修复在轨试验设计

徐嘉庆<sup>1</sup>, 冯昱龙<sup>1</sup>, 董泰郎<sup>1</sup>, 刘宇明<sup>2</sup>, 樊世超<sup>2</sup>, 王志浩<sup>2</sup>, 崔玉红<sup>1\*</sup>

(1. 天津大学, 天津 300350; 2. 北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

**摘要:** 载人航天和载人登月面临的巨大挑战之一, 是规避因微流星体、太空垃圾撞击导致用于航天设备的柔性或刚性材料发生微裂纹、穿孔和破坏等造成的潜在危险, 空间环境下的柔性或刚性材料自修复技术是解决手段之一。本文开展了空间环境下的柔性和刚性材料自修复技术在轨试验设计。柔性或刚性材料自修复材料式样由柔性或刚性材料和液态修复材料制作而成, 外部的沙林树脂材料或聚氯乙烯材料把内部液体材料稳定地密封在试件内部, 式样被刺破时内部液体流出受外部辐射会迅速固化以修复损伤处。本文设计的柔性和刚性自修复材料能够在微流星体和轨道碎片的撞击、与尖锐物体的意外接触、结构疲劳或仅仅由于材料老化而造成的损伤后自动实现在轨自修复, 并推动柔性和刚性自修复材料在载人航天和载人登月技术的发展与应用。

**关键词:** 空间环境; 撞击损伤; 材料自修复; 在轨试验设计

# 基于多目标遗传算法的差速器壳体轻量化设计

黄杰<sup>1</sup>, 阮景奎<sup>1\*</sup>, 张一兵<sup>2</sup>, 舒宗敏<sup>2</sup>

(1. 湖北汽车工业学院机械工程学院, 十堰 442002; 2. 郧西精诚汽配有限公司, 十堰 442002)

**摘要:** 针对某新能源汽车差速器壳体在满足行驶工况的刚强度要求下实现轻量化, 提出了一种基于多目标遗传算法(NGSA-II)和参数化模型相关联的优化设计方法。通过 Solidworks 和 ANSYS 的联合仿真, 首先对差壳的大端、小端、法兰、主减外圆等厚度尺寸实现了参数化手段, 并通过模态分析和静力学计算证明了足够的优化空间。其次构建了尺寸变量同优化目标之间的响应曲面, 最后基于多目标遗传算法, 建立了质量最小和壳体所受最大应力最小为目标的优化模型, 对差壳的进行轻量化设计。结果显示: 壳体总质量从 6.80kg 降为 6.10kg, 减少了 10.3%, 同时壳体所受到的最大应力也得到了降低, 证明了此次轻量化设计是成功的。

**关键词:** 轻量化; 参数化; 有限元分析; 响应曲面; 多目标遗传算法; 差速器壳体

# 电子束辐照下的金属内能量沉积模拟研究

程雅苹

(北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

**摘要:** 各类航天器在近地或宇宙空间的运行可靠性提升, 涉及到对多种充放电问题的持续深入研究。由充放电造成的航天器在轨故障占比超过 50%。构成航天器的主体是其内部的金属材料, 而在航天器表面, 分布着金属、半导体绝缘介质等多种类型的材料。本文基于 CASINO 软件, 研究了 1 keV, 10 keV 电子在金、铝中的运动轨迹和穿透深度, 以及能量沉积。电子的运动轨迹发生了明显的横向的扩散, 这是由于电子和原子发生多次弹性散射导致的。电子能量是 1 keV 时, 在金中的平均穿透深度大概在 5 nm 左右, 60% 的电子的能量沉积过程在 2 nm 厚度范围内完成。1keV 的电子在铝中的穿透深度明显长于在金中的穿透深度。当电子能量达到 10 keV 时, 可以轻松穿透 10 nm 厚的铝。

**关键词:** 电子; 能量沉积; 金属

# 基于 CNN 和 LSTM 的航天用涂层型自润滑关节轴承寿命预测及可靠性评估

刘云帆<sup>1,2</sup>, 林亮行<sup>2,3</sup>, 马国政<sup>2</sup>, 孙建芳<sup>3\*</sup>, 苏峰华<sup>3</sup>, 郭伟玲<sup>2</sup>, 朱丽娜<sup>1\*</sup>, 王海斗<sup>1,2,4</sup>

(1. 中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083;

2. 陆军装甲兵学院装备再制造国防科技重点实验室, 北京 100072;

3. 华南理工大学机械工程学院, 广州 510000;

4. 陆军装甲兵学院机械产品再制造国家工程研究中心, 北京 100072)

**摘要:** 涂层型自润滑关节轴承作为一种广泛应用于航天装备中的重要基础运动部件, 对其服役寿命进行准确预测和可靠性评价一直是该领域的研究热点。文章针对涂层型自润滑关节轴承这一特定对象, 提出了一种基于卷积神经网络 (CNN) 和长短期记忆神经网络 (LSTM) 的轴承剩余寿命预测方法。首先利用 CNN 对关节轴承的摩擦扭矩信号进行失效特征提取, 并将通过主成分分析 (PCA) 和滤波处理后的扭矩信号输入 LSTM 中进行训练, 得到涂层型关节轴承寿命预测模型, 该模型实现了对轴承剩余寿命的准确预测。最后, 基于加速寿命试验数据采用两参数 Weibull 分布模型对涂层型关节轴承的服役可靠性进行了评估, 研究结果表明涂层型关节轴承在轻载低频工况下能够维持在高可靠性水平下进行长时间稳定服役。

**关键词:** 涂层型自润滑关节轴承; 卷积神经网络; 长短期记忆神经网络; 加速寿命试验; 可靠性评估

# 基于深度学习的高温结构材料动态裂纹检测

王锦阳<sup>1,2</sup>, 张金松<sup>1,2</sup>, 屈哲<sup>3</sup>, 唐云龙<sup>1,2\*</sup>, 冯雪<sup>1,2\*</sup>

(1. 清华大学 航天航空学院应用力学教育部重点实验室, 北京 100084;  
2. 清华大学 柔性电子技术实验室, 北京 100084; 3. 钱塘科技创新中心, 杭州 310000)

**摘要:** 高温结构材料表面裂纹的萌生、扩展是导致其服役性能降低, 甚至结构失效的关键因素。基于数字图像的裂纹检测方法因其具有非接触式、高精度等优势被广泛应用。然而, 以高温结构陶瓷为代表的高温结构材料在服役中受到环境干扰使得图像对比度降低, 传统的裂纹检测方法很难实现表面裂纹的精细检测。文章提出了一种基于深度学习的高温环境裂纹检测方法, 通过构建数据集进行网络训练与测试, 验证了该方法的可靠性和高精度。进一步, 开展了对陶瓷材料的热考核实验, 表明该方法适用于高温环境下材料表面微裂纹的高精度检测。最后, 基于数字图像相关 (DIC) 法计算得到了试件表面变形场, 不连续的应变与裂纹检测结果一致, 分析了材料表面裂纹萌生、扩展和材料断裂、失效的成因。

**关键词:** 裂纹检测; 高温; 深度学习; 可视化测量

# 基于概率神经网络的航天结构响应映射预示方法

周嘉明, 董龙雷, 赵建平

(西安交通大学 航天航空学院 机械结构强度与振动国家重点实验室, 西安 710049)

**摘要:** 如何利用地面试验数据预示真实飞行状态下的动力学环境, 即天地一致性问题, 成为制约新型飞行器研制与发展的关键性问题。考虑到复杂航天结构非线性动力学特性和响应数据的不确定性, 文章提出了一种基于概率神经网络 (Probabilistic neural network, PNN) 的响应映射预示方法。首先, 给出了分布载荷下响应映射预示方法的理论基础, 表明映射关系的建立与载荷源数目无关。然后, 分析了引入概率神经网络来建立映射关系的必要性, 重点介绍了 PNN 方法进行响应预示的具体细节。最后, 利用某飞行器仪器舱噪声试验对所提方法进行了验证, 结果表明 PNN 方法在不同载荷量级、全频段均具有良好的响应预示精度。分析了噪声激励下仪器舱结构的非线性动力学特性, 并与矩阵映射法进行对比, 结果表明 PNN 方法具有更加优异的响应预示精度。文章将确定性映射预示方法推广到概率映射预示方法, 进一步丰富了响应映射预示方法的技术途径, 提高了这种预示方法的可信度和工程实用性。

**关键词:** 响应映射预示; 概率神经网络; 非线性和不确定性; 动力学环境预示; 仪器舱

# 仪器舱结构试验模型的热振耦合模拟方法研究

薛景天, 董龙雷, 刘振, 赵建平

(西安交通大学 机械结构强度与振动国家重点实验室, 西安 710049)

**摘要:** 建立高效、合理的地面热振耦合试验模拟方法, 对于预示火箭的可靠安全运行具有重要意义。传统的热振耦合方法缺乏对材料热特性变化的研究而导致数值仿真结果存在较大的误差。文章提出了一种导热系数与振动动态耦合的分析方法, 建立了动态变化的热振耦合方程, 基于闪光瞬态法得到材料的热特性参数并应用在数值仿真计算中。仿真结果表明了该方法的可信性。

**关键词:** 热振耦合; 数值仿真; 闪光瞬态法

# 可控量程的仿生柔性缝传感器设计、制备及应用

侯涛<sup>1</sup>, 王跃桥<sup>1</sup>, 赵宇锋<sup>1</sup>, 韩志武<sup>2</sup>

(1. 吉林大学 通信工程学院, 长春 130022; 2. 吉林大学 仿生工程重点实验室, 长春 130022)

**摘要:** 柔性传感器由于其具有灵敏度高、适应性强、可弯曲、可穿戴等优点, 广泛应用于人机交互、机器人等人工智能领域, 成为研发新一代传感器的重要发展方向。近年来, 从生物独特的感知能力中寻求柔性传感器的设计灵感, 已成为一个研究热点。如典型生物蝎子, 具有远超其他生物的微振动信号感知能力, 超过了大部分精密仪器, 吸引了国内外学者对其展开了研究, 但仍缺乏缝单元的几何参数对感知性能定量调控机制的探索, 导致缝传感器的设计随机、性能不稳定、量程不可控, 缺乏工程应用价值。因此, 文章以蝎子缝感受器的微观几何结构为仿生模板, 通过研究缝单元的几何参数对感知性能的量化调控机制建立了缝单元定量应变响应模型以指导可控量程传感器的设计, 并基于 MEMS 工艺制备可控量程的仿生柔性传感器。传感器的测试结果表明, 其量程范围为 0.18~1.78 mm, 灵敏度 GF 值为 4000~9000, 在经历 2 万次循环后其性能依旧稳定。最后结合多分类支持向量机方法, 对传感器的精密检测识别能力进行应用实验, 验证了所设计的传感器能够实现对不同微观表面形貌的纺织品识别分类, 具备实际工程应用价值。

**关键词:** 仿生学; 柔性传感器; 可控量程; MEMS 工艺; 表面形貌检测

# 载人航天器环控生保系统地面综合性能试验真空系统研制

冯红旗<sup>1</sup>, 刘力涛<sup>1</sup>, 王军伟<sup>2</sup>, 彭卓<sup>1</sup>, 施业海<sup>1</sup>, 徐靖皓<sup>2</sup>

(1. 中国航天员科研训练中心, 北京 100094; 2. 北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

**摘要:** 载人航天器环控生保系统地面综合性能试验中利用真空系统模拟外太空的真空环境, 为环控生保系统提供工作所需的真空资源。文章在分析地面综合性能试验真空资源需求的基础上, 提出了真空系统设计方案, 开展了设计计算、设备选型和系统集成测试等工作。经过测试和实际使用检验, 所研制的真空系统功能和性能指标满足设计要求, 为环控生保系统综合性能试验提供了可靠保障。

**关键词:** 低真空系统; 高真空系统; 模拟负载测试; 环控生保系统

# 空间站舱外载荷适配器换热性能的优化研究

李振宇<sup>1,2</sup>, 牛春洋<sup>1,2</sup>, 丰茂龙<sup>1,2</sup>, 马少君<sup>3</sup>, 康永<sup>3</sup>, 董占敏<sup>3</sup>

(1. 北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094; 2. 空间热控技术北京市重点实验室, 北京 100094;

3. 兰州空间技术物理研究所, 兰州 730000)

**摘要:** 舱外载荷适配器用于支持空间站舱外试验载荷在轨试验, 具备机电热支持能力。在轨时, 试验载荷与载荷适配器上形成固体/固体接触界面, 为了尽可能提高热传导的效率, 开展了进行了不同条件下的载荷适配器与试验载荷的换热性能试验, 获取了紧固状态、热界面材料种类、平面度等对接触换热性能的影响, 验证了载荷适配器对高热负荷试验载荷的散热支持效果。可为舱外应用载荷的在轨使用以及航天器在轨维修或操作设备的接触换热设计提供参考。

**关键词:** 空间站; 载荷适配器; 换热性能

# 航天器结构冲击响应的研究现状和关键问题

郑玲, 李军军, 张涵柯

(重庆大学 机械与运载工程学院, 重庆 400044)

**摘要:** 火工冲击对航天器结构具有恶劣影响, 甚至破坏航天器正常功能。因此, 对航天结构冲击响应进行系统的研究是非常必要的。文章基于目前已有的理论研究和实验探索, 分析了航天结构冲击响应所存在的问题, 综述了3类预示冲击响应的方法, 即理论计算、试验外推和数值仿真, 总结了从冲击产生到传递到终端元件过程中的可用防护手段, 结合数值计算模型与试验结果分析了冲击响应在具体航天器结构中的非线性传递机理。

**关键词:** 航天器; 火工冲击; 响应预示; 响应防护; 传递机理

# 数据缺乏条件下航空涡扇发动机关键部件性能衰退预测方法

陶来发<sup>1,2,3</sup>, 马可<sup>2,3</sup>, 陈翼玲<sup>2,3</sup>

(1. 北京航空航天大学 可靠性与环境工程技术重点实验室, 北京 100191;

2. 北京航空航天大学 可靠性工程研究所, 北京 100191;

3. 北京航空航天大学 可靠性与系统工程学院, 北京 100191)

**摘要:** 航空涡扇发动机工程数据采集过程中, 由于传感条件限制、不同型号差异等综合导致用于发动机性能衰退预测存在数据不足等情况, 致使传统的性能衰退预测方法精度低、稳定性差。文章以航空涡扇发动机为对象, 针对不同数据缺失模式, 提出了基于缺失模式随机增强门控网络(ERMP-GRU), 以提升数据缺乏条件下发动机退化规律认知的有效性和稳定性, 并结合C-MAPSS国际公开数据完成方法的测试验证, 试验表明: 论文提出的不同数据缺失条件下预测精度均高于85%, 且具有较好的整体稳定性, 为研究数据缺乏条件下的航空涡扇发动机关键部位性能衰退预测提供了一种新的解决途径。

**关键词:** 航空涡扇发动机; 数据缺乏; 性能衰退预测; 递归神经网络

# 极远紫外辐射探测在空间环境研究中的应用

彭吉龙, 于 钱, 冯桃君

(北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

摘要: 极紫外 (10~100 nm) 和远紫外波段 (100~200 nm) 是电磁波谱中以大量原子的共振辐射为特征的区域, 因此可用来观测恒星和行星大气中的电离辐射。随着多层膜和探测器技术的发展, 极远紫外辐射探测成为空间环境探测的重要手段。文章介绍了极远紫外辐射在太阳活动和高层大气探测中的应用和主要的探测方式。

关键词: 极紫外; 远紫外; 太阳活动; 电离层

# 基于 SERF 机制的原子磁强计发展现状

黄 魁, 高 扬, 彭 忠, 肖 琦, 唐小金

(北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

摘要: 基于 SERF (Spin-Exchange Relaxation-Free) 机制的微型光泵磁强计是目前弱磁探测领域精度最高的磁强计之一, 具有应用于心脑血管测量、空间磁测等领域的巨大潜力。文章以此为背景, 针对国内外 SERF 磁强计的发展情况进行全方位研究, 详细阐述国际各研究团队的 SERF 磁强计研制进展及发展趋势。目前各团队在技术上已较为成熟, 主要转向针对于应用方向的研究, 并且在诸多领域都取得丰硕的研究成果, 与脑科学的结合已成为重要发展方向, 面向空间弱磁场的测量也是未来发展趋势之一。

关键词: SERF 机制; 原子磁强计; 弱磁场; 高精度

# 本征抗原子氧聚酰亚胺超细纤维的制备与抗原子氧侵蚀性能研究

张 燕<sup>1</sup>, 吴 昊<sup>1</sup>, 刘金刚<sup>1\*</sup>, 武博涵<sup>2\*</sup>

(1. 中国地质大学(北京) 材料科学与工程学院, 北京 100083;

2. 北京卫星环境工程研究所 空间材料与结构防护事业部, 北京 100094)

摘要: 为应对空间探索活动对本征抗原子氧 (AO) 聚酰亚胺 (PI) 超细纤维膜的迫切需要, 将硅元素与磷元素引入到 PI 分子结构中, 采用静电纺丝技术制备了本征抗 AO PI 超细纤维膜。系统研究了硅元素与磷元素的引入对超细纤维的化学结构、微观形貌、光学性能、热性能以及抗 AO 侵蚀性能的影响。结果表明分子结构中引入了硅元素和磷元素的 PI 超细纤维膜表面光滑, 微观结构呈现连续的纤维状; 热性能良好, 玻璃化转变温度 ( $T_g$ ) 大于  $290^\circ\text{C}$ ,  $450^\circ\text{C}$  以下时均表现出良好的热稳定性; 且由于引入了硅元素和磷元素, 在经通量为  $2.0 \times 10^{21} \text{ atom/cm}^2$  的 AO 辐照后, PI 超细纤维膜的 AO 侵蚀速率与标准型 PI Kapton 相比降低了 1 个数量级。

关键词: 聚酰亚胺; 原子氧; 静电纺丝; 超细纤维; 笼形聚倍半硅氧烷 (POSS)

# 双 POSS 组分抗原子氧聚酰亚胺薄膜的制备及性能研究

吴昊<sup>1</sup>, 张燕<sup>1</sup>, 刘金刚<sup>1\*</sup>, 武博涵<sup>2\*</sup>

(1. 中国地质大学(北京) 材料科学与工程学院, 北京 100083;

2. 北京卫星环境工程研究所 空间材料与结构防护事业部, 北京 100094)

**摘要:** 具有抗原子氧(AO)特性的耐高温聚合物薄膜是低地球轨道(LEO)航天器必不可少的一部分。标准型聚酰亚胺(PI)薄膜相对较差的AO侵蚀率极大限制了他们在LEO航天器中的应用。在此项工作中,我们制备了一系列新型抗AO PI复合薄膜,复合薄膜的基体和填料中均含有笼型聚倍半硅氧烷(POSS)基团。含POSS的PI基体由POSS取代的芳香族二胺二氨基苯甲酰胺异丁基POSS(DABA-POSS)、均苯四甲酸二酐(PMDA)和4,4'-二氨基二苯醚(ODA)通过两步热亚胺化制得。POSS填料,三硅醇苯基笼型聚倍半硅氧烷(TSP-POSS)以20wt%的固定比例添加到基体中。POSS基团的引入赋予了复合薄膜出色的抗原子氧能力,DABA-POSS含量为30wt%的POSS-PI-30在经总量为 $2.51 \times 10^{21}$  atom/cm<sup>2</sup>的AO辐照后AO侵蚀率( $E_y$ )仅为 $1.64 \times 10^{-26}$  cm<sup>3</sup>/atom,比标准型PI薄膜降低两个数量级。

**关键词:** 聚酰亚胺; 笼形聚倍半硅氧烷(POSS); 原子氧; 自愈合

# 不同充液率下旋转热管性能的试验研究

吴畅, 曾宇\*

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191)

**摘要:** 对一种冷凝段内锥度为1°的轴向旋转热管传热性能进行了实验研究,充液率范围从5%到80%,热流密度为5000~20000 W/m<sup>2</sup>,转速从800r/min到1600r/min,得到了各充液率和工况下的启动过程温度变化,并通过启动时间、稳态温度和热阻等指标对各工况下的性能进行评价。实验结果表明,充液率50%时的传热性能最佳,充液率的提高整体会上会增加启动时间。

**关键词:** 旋转热管; 充液率; 启动时间; 稳态热阻

# 胶体纳米二氧化硅复合 POSS 基聚酰亚胺薄膜的制备与抗原子氧侵蚀性能研究

吴昊<sup>1</sup>, 张燕<sup>1</sup>, 刘金刚<sup>1\*</sup>, 武博涵<sup>2\*</sup>

(1. 材料科学与工程学院, 中国地质大学(北京), 北京 100083;

2. 空间材料与结构防护事业部, 北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

**摘要:** 标准型聚酰亚胺 (PI) 薄膜相对较差的抗原子氧 (AO) 侵蚀能力极大的限制了其在低地球轨道 (LEO) 航天器中的应用。以均苯四甲酸二酐 (PMDA)、4,4'-二氨基二苯醚 (ODA)、二氨基苯甲酰胺异丁基 POSS (DABA-POSS) 为原料通过共聚的方式制备了侧链含 POSS 的 PI 基体, 并以胶体纳米二氧化硅为填料, 通过机械共混法制备一系列复合薄膜。系统研究胶体纳米二氧化硅的引入对复合薄膜的热尺寸稳定性以及抗原子氧侵蚀性能的影响。结果表明: 纳米二氧化硅的引入显著提升了复合薄膜的热尺寸稳定性; 在二氧化硅与 POSS 基团的协同作用下, 显著提高了 PI 薄膜的抗原子氧侵蚀性能, 在地面模拟装置中经  $2.1 \times 10^{21}$  atom/cm<sup>2</sup> 总量的原子氧辐照后, 二氧化硅固含量为 25 wt% 的复合薄膜的原子氧侵蚀率为  $3.9 \times 10^{-25}$  cm<sup>3</sup>/atom, 仅为标准型 PI 薄膜的 1.3%。

**关键词:** 聚酰亚胺; 笼形聚倍半硅氧烷 (POSS); 胶体型二氧化硅; 原子氧; 热性能

# 基于单值控制图算法的单组元推力器组件关键特性数据分析

陈阳<sup>1,2</sup>, 陈健<sup>1,2</sup>, 姚兆普<sup>1,2</sup>, 蔡坤<sup>1,2</sup>, 王梦<sup>1,2</sup>, 张涛<sup>1,2</sup>

(1. 北京控制工程研究所; 2. 北京市高效能及绿色宇航推进工程技术研究中心; 北京 100190)

**摘要:** 随着单组元推力器组件产品的生产交付数量增加, 获得的飞行数据也日益增多, 数据中出现了一种“合格/不包络”的现象。为更好地了解产品特性, 提前发现产品风险点, 本文利用已成功飞行的推力器组件的关键特性数据, 提出了一种基于单值控制图算法的单组元推力器组件关键特性数据的分析方法, 该方法运算简单, 操作便利, 通过对数据的灵活分析、深度挖掘, 能够更好地提前发现产品在生产流程中的薄弱环节, 方便尽早开展相应风险分析, 提高产品可靠性。同时该方法普适性较好, 可推广应用于其他产品。

**关键词:** 单组元推力器; 单值控制图; 数据分析

# KM6 大型太阳模拟器灯室系统研制技术

向艳红, 蒋山平, 张鹏嵩, 李弘松

(北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

**摘要:** 随着我国空间技术的发展, 应用卫星的构型越来越复杂, 各种部件的热耦合对卫星温度影响越来越大, 如安装在星外的遥感器、天线对散热面的影响等, 这些热辐射的耦合效应, 只能通过太阳模拟器的试验才能较好的解决。大型太阳模拟器应运而生, 本文介绍的就是 KM6 大型准直型太阳模拟器。辐照面直径 5 m, 辐照度 0.5S0 ~ 1.3S0 连续可调, 面均匀性 $\pm 4.7\%$ , 体均匀性 $\pm 5.6\%$ , 为国内辐照面积最大的离轴准直型太阳模拟器。而拥有 37 套灯单元的大型灯室系统为国内尺寸最大, 数量最多, 同时也是难度最大的光源系统。本文从灯单元设计、球封头设计等详细介绍了大型太阳模拟器灯室系统的研制技术。

**关键词:** 太阳模拟器; 短弧氙灯; 灯室系统; 聚光镜; 灯单元

# 基于 IFE 方法的碳纳米管阵列电场仿真研究

官上伟<sup>1</sup>, 崔高伟<sup>2,3</sup>, 张斯迈<sup>2,3</sup>, 张林轩<sup>2,3</sup>, 康会峰<sup>2,3</sup>, 夏广庆<sup>1,2,3\*</sup>, 宣佳琳<sup>2,3</sup>, 鹿畅<sup>1,2,3</sup>

(1. 大连理工大学 工业装备结构分析国家重点实验室, 大连 116024;

2. 北华航天工业学院 河北省微纳卫星协同创新中心, 廊坊 065000;

3. 北华航天工业学院 河北省微小型航天器技术重点实验室, 廊坊 065000)

**摘要:** 碳纳米管 (CNT) 阵列推力器中碳纳米管阵列具有复杂的电极结构。传统有限元方法处理一些复杂界面时需要在界面划分适应几何的贴体网格, 且网格非结构化, 导致程序的计算量过大。将一种新的浸入式有限元 (IFE) 方法集成到了粒子云 (PIC) 方法中, 以提高具有复杂几何结构推力器电场求解的准确性和仿真效率。用三线性 IFE 方法构建来具有复杂几何边界的静电模型。模型采用结构化六面体网格, 复杂几何边界作为界面构造于结构化网格中, 将本来求解的边值问题转化为“界面”问题。通过数值算例验证了该静电模型的准确性。验证了 IFE 方法对界面的处理能力, 采用三线性 IFE 方法对碳纳米管阵列的静电场进行仿真, 碳纳米管尖端的场强随碳纳米管的间距和高度的增加而增加, 随电极间距的增加减小。

**关键词:** IFE 算法; 静电场; 复杂界面问题; 仿真

# 基于直接声场的声振一体化试验方法

马 蕾<sup>1</sup>, 王 娟<sup>2</sup>, 宋之恺<sup>1</sup>, 张 利<sup>1</sup>

(1.上海卫星装备研究所 上海 200240; 2. 上海航天技术研究院 上海 201109)

**摘要:** 为了适应航天器研制新需求, 本文提出一种声振一体化试验新方法更真实地模拟主动段的振动和噪声同时存在的综合动力学环境。通过直接声场试验仿真与测试, 验证了其有效性。将电磁振动试验系统与直接声场试验装置进行一体化设计, 并在某卫星结构上进行试验验证。试验结果表明, 卫星结构对低频段和中高频的振动响应有不同的影响效果, 整体上低频段以卫星振动激励的响应为主导, 高频段以噪声激励响应为主导, 直接声场低频段激励效果比较弱, 声振一体化试验由于耦合作用高频段响应产生抑制, 因此高频段响应被削弱。本方法可节约试验成本, 缩短整星力学试验周期, 为卫星力学试验提供高效可靠的声振联合解决方案与技术支撑。

**关键词:** 声振一体化试验; 直接声场试验; 正弦振动; 随机振动; 响应

# 基于光纤光栅的典型卫星桁架胶接结构应变和温度监测技术研究

孙征昊, 程涛\*, 王珂, 陈立, 刘锦

(上海卫星装备研究所, 上海 200240)

**摘要:** 碳纤维复合材料桁架具有高刚度、高稳定、轻量化等优点, 是卫星主承力结构的重要发展方向之一。桁架结构主要是由碳纤维杆件和接头通过胶接连接, 固化过程存在的残余应力, 会导致外形尺寸发生缓慢变化, 影响结构的稳定性。本文以典型卫星桁架胶接结构为监测对象, 研究基于分布式光纤传感器的复合材料/铝合金胶接结构固化历程监测方法, 构建了植入式分布式光纤智能监测系统, 实时在线获取胶接结构内部不同位置在固化阶段的应变分布与变化趋势, 为进一步实现卫星桁架胶接结构变形精确监测与服役状态实时感知提供了理论依据。

**关键词:** 卫星桁架; 光纤光栅; 应变监测; 温度监测

# 微波发射状态下雷达卫星真空热试验方法研究及应用

陶晶亮<sup>1,2</sup>, 杨政<sup>1,2</sup>, 王浩<sup>1,2</sup>, 李艳臣<sup>1,2</sup>, 陈丽<sup>1,2</sup>, 彭光东<sup>1,2</sup>, 周国锋<sup>1,2</sup>

(1. 上海卫星装备研究所, 上海 201109;

2. 上海空间环境模拟与验证工程技术中心, 上海 201109)

**摘要:** 随着合成孔径雷达卫星所搭载的微波天线朝着更大尺寸、更高功率、更高精度的方向发展, 为了保证整星在热试验时的天地一致性, 雷达天线也会随整星进行试验, 并开展微波无线发射测试, 这就需要试验环境条件既满足微波发射状态下的大功率吸收, 也能实现外热流精确模拟。本文针对八院新一代微波雷达在无线发射模式下真空热试验方法和系统研制进行技术攻关, 先后解决了真空低温环境下微波吸收与外热流模拟一体化试验设计等问题, 不断拓展适用载荷谱段范围, 实现了微波载荷整星状态下工作性能测试试验, 提升了微波雷达卫星地面热试验考核验证水平。

**关键词:** 雷达卫星; 真空热试验; 无线发射; 微波吸收; 外热流模拟

## 整星状态 SAR 天线基态测试有效性分析

王浩<sup>1,2</sup>, 王韬<sup>1,2</sup>, 孙晓春<sup>1,2</sup>, 霍伟航<sup>1,2</sup>, 吴锦伟<sup>1,2</sup>

(1. 上海卫星装备研究所, 上海 201109

2. 上海空间环境模拟与验证工程技术中心, 上海 201109)

**摘要:** 随着星载 SAR 技术发展, 对成像性能和多通道体制、大范围扫描能力等需求不断提升, SAR 天线尺寸和 TR 通道数量不断增大、频率越来越低。由此带来天线的子板划分越来越多、板间幅相一致性控制难度越来越大等问题。本文针对某型号整星级 SAR 天线尺寸大、多频段等特点, 采用天线近场测试方法, 获得 SAR 天线  $3\lambda-10\lambda$  近场幅度和相位分布, 修正 SAR 天线与波导探头扫描平面的平行度引入的测量误差, 得到 SAR 天线的基态误差矩阵, 为验证整星状态 SAR 天线性能提供了有效的方法和手段。

**关键词:** SAR 天线, 近场法, 基态, 幅度, 相位

# 空间环境下喷气式作动装置气动力分析与验证

王黎珍, 叶青, 张正峰

(北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094)

**摘要:** 针对深空探测航天器在轨飞行任务中的用于物体转移的气体作动装置, 本文提出了气体作动装置作动力的理论计算模型, 开展了真空环境下喷气作动力分析, 给出了特定气瓶压力下作用力数据, 最后通过开展地面试验, 气体作动装置的试验数据与仿真结果误差最大为 7.4%, 一致性较好。表明了采用气体作动装置, 可以有效的实现空间物体的运动。

**关键词:** 气体作动; 物体转移; 理论分析; 仿真计算; 试验验证

# 燃料管路对空间碎片防护力试验研究

王巍<sup>1</sup>, 郑世贵<sup>1</sup>, 柯发伟<sup>2</sup>, 于伟<sup>1</sup>, 闫军<sup>1</sup>, 宫伟伟<sup>1</sup>

(1. 中国空间技术研究院总体设计部, 北京 100094;

2. 中国空气动力研究与发展中心, 绵阳 621000)

**摘要:** 卫星燃料管路的安全性对卫星至关重要。当卫星燃料管路受到空间碎片的高速撞击时, 可能会产生穿孔等损伤, 其内在燃料发生泄漏, 将直接导致卫星姿态等运行参数发生变化, 并产生其他严重损伤, 对航天任务完成产生致命性的影响。本文根据卫星燃料管路设计现状, 分别面向星外燃料管路和星内燃料管路设计特点, 先后使用蜂窝板、芳纶织物作为防护材料, 设计燃料管路超高速碎片撞击试验。根据试验结果对燃料管路不同设计方式、不同防护手段条件下的对超高速碎片的防护力进行对比分析, 给出了对卫星燃料管路针对空间碎片的防护设计的建议。

**关键词:** 燃料管路; 超高速碎片; 防护力; 试验

# 卫星组件真空烘烤去污染过程热分析

王晓占, 刘家林, 季琨\*, 李灿伦, 黄赟, 蒋公羽

(上海卫星装备研究所, 上海 200240)

**摘要:** 卫星研制过程使用复合型有机材料在高真空环境可能挥发出大量可凝物质, 这些可凝物质严重影响了产品质量和型号寿命, 为解决材料污染问题开展了真空烘烤除气装置的研发, 对该装置的核心芯体部分开展了热设计。经仿真对比发现, 辐射隔热屏层数并不能对加热效果起到明显的改善效果, 降低加热丝间距和增大加热丝外径均可以提升芯体加热性能。设计的烘烤除气罐在升温速率、温度均匀性方面满足要求。通过试验验证, 烘烤除气能够起到明显的去污染效果。

**关键词:** 烘烤除气; 热分析; 空间污染; 去污染

# 大磁矩航天器整器磁测试方法探究和实践

吴卫权<sup>1</sup>, 符建明<sup>2</sup>, 陈丽<sup>1</sup>, 王义元<sup>2</sup>, 孙晓春<sup>1</sup>, 龚凯翔<sup>2</sup>, 王浩<sup>1</sup>, 王韬<sup>1</sup>, 周雪琴<sup>1</sup>

(1.上海卫星装备研究所, 上海 200240;

2.上海宇航系统工程研究所, 上海 201108)

**摘要:** 本文针对大磁矩航天器垂向不同舱段安装有多个大量级磁矩载荷部件的磁性分布特征, 采用在其垂向上下舱段典型区域赤道面上多层次布局传感器的方式代替在其几何赤道面单一布局传感器的传统方式; 获得整器垂向多个层次区域赤道面上的静态场强、磁矩结果, 通过分析垂向场强变化规律和特点, 确认并捕获航天器整器垂向磁赤道面区域位置, 最终将航天器磁赤道区域测到的磁矩值作为其垂向有效磁矩结果。为了验证这一测试方法和结果的准确性, 按 10:1 器模比例尺寸建立航天器垂向标准磁偶极子、双极子和组合态多极子磁矩分布模型; 按上述多层分布测试方法对标准模型进行仿真试验。在异向双极子模型仿真试验中发现, 当依次调节传感器布局高度、逐次逼近标准模型垂向磁赤道区域时, 测得的磁矩结果更加接近于模型预置的标准磁矩量值, 这一规律现象在异向多极子组合态分布模型上均呈现出高度一致性。通过分析和比对整器及异向多极子组合态模型 2 在不同赤道面上磁场、磁矩测试结果, 两者变化规律同样呈现高度一致性, 可以推断: 整器垂向磁性分布特征与模型 2 具有高度相似性。进一步证明磁赤道区域是获取大磁矩航天器整器垂向有效磁矩的最佳传感器布局区, 该区域测得的结果更真实代表了航天器垂向磁矩量值。这一测试方法极大提高了大磁矩航天器整器垂向磁矩准确性及其裕度控制范围, 解决了常规近场磁测试方法整器磁矩偏心误差大无法获得正确有效磁矩值的技术难题。由标准模型测试结果, 本文所述大磁矩航天器整器垂向磁矩测试方法误差可控制在 15% 以内。

**关键词:** 大磁矩; 航天器; 磁测试; 磁矩分布; 仿真试验

# 新一代载人飞船返回舱着水冲击动力学分析

于伟, 郑世贵

(北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094)

**摘要:** 载人航天器返回舱着陆/着水冲击过程, 宇航员及舱内设备经历严酷的力学环境, 是载人航天器设计中必须考虑的关键问题。本文针对我国新一代载人飞船的返回舱着水问题, 采用流固耦合方法分析了返回舱着水过程冲击载荷, 分析结果揭示了返回舱着水冲击载荷的基本规律, 对返回舱缓冲系统设计以及考核有重要意义。

**关键词:** 载人飞船; 返回舱; 着水冲击

# 核动力航天器中子辐射防护材料研究及对器件防护效果分析

周博<sup>1</sup>, 刘刚<sup>1</sup>, 徐骏<sup>1</sup>, 高冬冬<sup>1</sup>, 费涛<sup>1</sup>, 刘超铭<sup>2\*</sup>

(1.上海卫星装备研究所, 上海 200240; 2.哈尔滨工业大学, 哈尔滨 150006)

摘要: 核动力航天器作为空间站、全太阳系无人/载人深空探测、月面/火星等行星际空间基地建设等任务的重要载体, 核动力源反应过程释放的强中子通量密度比天然辐射环境高几个数量级, 会严重影响电子器件的可靠性。本文开展典型核动力航天器中子辐射环境仿真分析, 基于中子辐射防护策略研究, 通过使用 8cm 厚度的 PE/ZrH<sub>2</sub>(1 : 1)防护材料对器件进行防护, 将测试防护前后 JBS 器件在能量为 1MeV 中子的辐照过程中电性能随辐照注量的变化关系, 利用深能级瞬态谱 (DLTS) 分析防护前后缺陷位置及数目的变化趋势, 进一步研究防护效果与机理。本文的防护材料与试验方法能够为后续核动力的型号关键电子元器件的防护设计优化及可靠性评价提供支持。

关键词: 核动力航天器 JBS 器件; 中子辐照; DLTS 分析

# 航天器多级自由边界模拟系统多点姿态协调控制

张大志, 朱万铖

(北京科技大学, 北京 100083)

摘要: 为了在地面开展航天器设施部分和平台部分的在轨环境微振动模拟试验, 在航天器上下两端建立了自由边界模拟系统和自动控制模块, 然后通过力闭环和位移闭环对航天器重量卸载过程的多点姿态协调控制算法进行了设计和实施。最后通过硬件设施搭建和软件程序编写完成现场试验, 验证了控制系统的可行性和稳定性, 也为未来航天器地面模拟试验中重力卸载过程控制系统的设计提供技术支撑并积累了工程经验。

关键词: 航天器; 自由边界模拟系统; 自动闭环控制; 多点姿态协调控制

# 热循环试验中试件控温点位置选择问题探讨

刘媛, 王晓明, 李志宏, 张振龙, 任玉娇, 刘强

(中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190)

摘要: 在卫星产品的研发和生产过程中需要进行热循环试验以保障产品的环境适应能力及可靠性。在需要进行试件控温的热循环试验中, 温变速率有时因为控温点位置选择不当, 也会造成温变速率不能满足要求或由于温度均匀性差导致过试验或欠试验。针对热循环试验中试件不同控温点速率不同的问题, 通过设计模拟试验件, 对不同控温点位置对温变速率的影响进行试验验证, 对试验中控温点的选择问题进行简要探讨。

关键词: 热循环试验; 温变速率

# 立式太阳模拟器准直镜组件设计

王丹艺<sup>1</sup>, 蒋山平<sup>1</sup>, 张鹏嵩<sup>1</sup>, 向艳红<sup>1</sup>, 王睿明<sup>1</sup>, 柳晓宁<sup>1</sup>, 龚洁<sup>1</sup>, 琚丹丹<sup>2</sup>, 闫继宏<sup>2</sup>

1. 北京卫星环境工程研究所, 北京 100094;

2. 哈尔滨工业大学, 哈尔滨 150001)

**摘要:** 目前, 太阳模拟器多为卧式结构, 准直镜机构多采用拼接形式组成, 而立式太阳模拟器因其节省空间优势将逐步成熟化。本文设计一种应用于高辐照立式太阳模拟器的大口径俯视多为调节准直镜机构。根据高辐照、低背景工作环境特点, 设计多维可调节柔性吊装机构, 为提高系统整体调试性能, 采用单块整镜结构设计, 降低结构复杂性。针对以上设计进行计算及仿真分析。经过联合调试, 辐照度最高可达到 2.3 个太阳常数, 辐照均匀性可达到 $\pm 5\%$ , 准直镜组件达到太阳模拟器辐照度及均匀性使用需求, 为后续太阳辐照模拟、空间光照模拟、航天器热环境模拟等打下坚实基础。

**关键词:** 立式太阳模拟器; 准直镜机构; 俯视调节结构; 柔性吊装机构; 大口径单元镜; 高辐照能量

# 极区光照模拟系统设计

王睿明 王丹艺 蒋山平 张鹏嵩 吴东亮 柳晓宁

(北京卫星环境研究所, 北京 100094)

**摘要:** 月球巡视器在月球南极展开勘查任务时需要应对复杂地形而带来的多种光照条件, 因此需要一种理想光源来模拟月球南极光照环境。经过计算和模拟结果, 将 812 盏 LED 光源等分为四组, 固定在有角度调节机构的钢架结构上, 组成可调节 LED 阵列式光源系统。当月球极区光照模拟系统在  $2^\circ$  倾角状态下, 光照覆盖面积可以达到  $10\text{m} \times 50\text{m}$ , 辐照度在垂直方向不低于  $3000\text{Lx}$  ( $50\text{m}$  处), 辐照不均匀度在  $10\text{m} \times 20\text{m}$  范围内优于  $\pm 20\%$  (水平面照度)。该研究为后续巡视器环境模拟、极区光照模拟、不同光照条件模拟打下坚实基础。

**关键词:** 巡视器; 月球南极; 辐照度; 极区光照模拟

# 适应多任务模式的某微纳卫星热控系统研究

王瑾<sup>1</sup>, 巩萌萌<sup>2</sup>, 张群<sup>1</sup>, 李德富<sup>1</sup>, 朱尚龙<sup>1</sup>

(1.北京宇航系统工程研究所; 2.中国运载火箭技术研究院; 北京 100076)

**摘要:** 随着某微纳卫星星座组网以及其他大量的在轨应用需求, 需要搭载不同发射轨道的运载火箭完成应用任务, 但是不同的搭载任务和发射轨道, 小卫星所面临的空间环境会有所变化, 导致需要重新开展卫星热控系统设计及分析。本文本着产品化设计思路, 提出了外热流包络分析方法, 能适用于多任务的某微纳卫星热控方案, 并进行了仿真分析及在轨验证, 结果表明该热控方案能够适用多任务应用, 可节约设计成本, 提高研发效率。

**关键词:** 某微纳卫星 搭载任务 产品化设计 热控方案

# 基于机器学习的 GEO 环境充放电异常风险评估模型构建

赵瑜馨, 刘业楠, 刘宇明, 徐焱林

(北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

**摘要:** 航天器异常与空间环境密切相关, 完善航天器在轨异常风险评估是抢占空间安全制高点的根本保证。目前在轨空间环境风险评估主要采用空间天气参量阈值作为空间环境风险评价方法, 难以保证低虚警率的同时达到高正确率。本文基于空间环境数据和 GEO 轨道卫星异常数据, 采用主成分分析、广义线性回归、决策树、随机森林等方法, 通过因子降维、关联性筛选、模型构建及训练, 最终形成通过模型检验的 GEO 环境充放电异常风险评估模型。本文构建的模型预报准确率达 86.1%, 虚警率低至 5.3%。后续模型将迭代优化以降低模型漏报率, 为卫星在轨管理、异常故障归零、太空环境干扰识别等方面提供支撑。

**关键词:** 充放电; 航天器; 模型分析

# 卫星内部结构响应深度学习间接测量方法研究

彭瑾坤<sup>1</sup>, 武文华<sup>1,2</sup>, 顾乃建<sup>1</sup>

(1. 大连理工大学工业装备结构分析优化与 CAE 软件全国重点实验室, 大连 116024;

2. 大连理工大学宁波研究院, 宁波 315000)

**摘要:** 针对生产线卫星力学试验作为卫星研制过程中的必做项目, 但步骤繁琐且内部结构响应测量困难的问题, 提出了基于卷积神经网络 (Convolutional Neural Networks, CNN) 的卫星内部结构响应深度学习间接测量方法。分别对生产线 A 型卫星与成熟的 B 型卫星进行正弦扫频试验, 提取结构加速度频域响应信息, 并利用基于 CNN 方法建立内部响应的间接测量模型, 验证所提出方法的可行性。结果表明该方法在卫星结构的内部测点响应间接测量中具有较高的精度。该方法为生产线卫星脉动式快速生产提供了新的方法和思路, 具有较强的工程应用潜力。

**关键词:** 生产线卫星; 卷积神经网络; 内部响应; 频域; 间接测量

# 面向空间碎片防护的高熵非晶合金动态力学性能研究

钟贤哲, 张庆明, 吴明泽

(北京理工大学 爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081)

**摘要:** 钛基高熵非晶合金是 Whipple 防护结构缓冲屏的潜在应用材料。利用材料试验机和分离式霍普金森压杆对非晶合金在  $10^{-4}$ ~ $1650\text{ s}^{-1}$  宽应变率范围内进行了压缩实验研究, 并对实验后的样品进行了微观表征。结果表明: 高熵非晶合金表现出明显的负应变率效应, 室温抗压强度从  $2135\text{ MPa}$  ( $10^{-4}\text{ s}^{-1}$ ) 降到  $1523\text{ MPa}$  ( $1650\text{ s}^{-1}$ ), 降低了 28.7%; 在准静态加载时, 断口形貌主要为脉状花样, 而在动态加载时则以枝晶状花样为主; 在动态加载时, 沿着开裂方向, 压剪应力、剪应力和拉剪应力依次作用于剪切断裂面上, 断口形貌也发生相应的转变。

**关键词:** 高熵非晶合金; 动态力学性能; 微观形貌

# 基于橡胶隔振器的制冷机微振动抑制研究

刘宝禄<sup>1,2</sup>, 张宏<sup>1,2,3</sup>, 许明明<sup>1,2,\*</sup>, 窦江培<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所, 南京 210042;

2. 中国科学院天文光学技术重点实验室(南京天文光学技术研究所), 南京 210042;

3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 航天器敏感载荷在轨运行期间, 将不可避免的受到来自制冷机等扰动源的微振动影响, 它会对高分辨率成像造成影响, 因此需要将振动量级控制在可接受范围内。本文以某空间型号敏感载荷的微振动需求为背景, 重点研究了橡胶隔振器对载荷内部脉冲管制冷机的微振动抑制效果。首先对制冷机的微振源特性展开分析, 其次结合敏感载荷的隔振需求, 确定采取被动隔振的措施。量化橡胶隔振器对振源的隔振效果, 并进行了相应的环境力学试验。最终筛选出同时兼顾主动段和在轨工作段需求的橡胶隔振器。此结果可为制冷机微振动抑制提供技术参考, 优化后续的整体设计。

**关键词:** 航天器敏感载荷; 脉冲管制冷机; 微振动; 橡胶隔振器

# 小天体运动状态估计与动力学参数辨识

邓润然, 葛东明, 朱卫红

(北京空间飞行器总体设计部, 中国, 北京, 100094)

摘要: 本文提出了一种仅基于视觉的解算小天体相对姿态、角速度和惯量比的快速方法。该方法以光学序列图像获取的特征点作为输入, 通过不变平面与能量球推导得到角动量与惯量比以及主惯量比, 方法计算规模小, 适用于星上资源严重受限条件下实现目标运动状态与惯性参数的快速识别, 目标仅翻滚一圈以内即可获得参数辨识结果, 通过仿真分析发现, 在考虑噪声的情况下算法依然是有效的, 目标惯量比的识别准确率能够达到 90% 以上, 但是该方法非常重要的环节是图像处理算法必须保证良好且精确的目标特征点信息。总而言之, 本文为小天体运动状态与参数辨识星上快速实现提供了一种新的思路。

关键词: 图像获取; 参数辨识; 仿真分析

# MEO 轨道质子位移损伤效应分析

费涛, 苏京, 高冬冬, 潘阳阳, 韩贺祥, 徐骏

(上海卫星装备研究所, 上海 200240)

摘要: 辐射环境严重制约 MEO 轨道的应用。文章首先分析了不同高度 MEO 轨道的质子辐射环境, 计算了在不同高度和防护条件下在器件中的位移剂量, 发现 MEO 轨道不同高度的位移剂量有很大差异; 采用非电离能量损伤和等效位移剂量方法, 结合文献数据研究了双极晶体管、太阳电池在不同轨道高度、防护条件下关键性能随时间的退化规律, 发现仅采用结构防护的方式将产生大量的结构重量, 且对于 4000~6000km 高能质子通量最高的区域, 即使加厚屏蔽也难以提供有效的防护。研究结果可对 MEO 应用中的轨道设计和位移损伤效应防护工作提供参考。

关键词: MEO 轨道; 太阳电池; 双极晶体管; 位移损伤剂量法

## 基于刚柔耦合空间机械臂热致响应分析

洪岩, 董仕鹏, 宋之恺, 吴锦伟  
(上海卫星装备研究所, 上海 200240)

摘要: 航空航天领域中的直升机旋翼、空间机械臂等都存在着大范围运动, 旋转柔性梁系统可用于空间机械臂的建模和动力学分析。本文将空间机械臂简化为功能梯度柔性梁系统, 基于浮动坐标系法, 对温度场中旋转功能梯度材料悬臂梁进行了动力学建模。考虑了二阶耦合变形量, 获得了附加动力刚化项, 利用第二类拉格朗日方程推导出了系统的动力学控制方程。基于动力学控制方程, 讨论了结构在大范围运动未知和已知两种运动规律下柔性梁的动力学行为。

关键词: 功能梯度材料梁 动力学建模 耦合 温度

## 质控图在地磁环境下卫星磁矩测量中的应用

程素娜, 梁晓华  
(深圳航天东方红卫星有限公司, 深圳 518000)

摘要: 在地磁场中对经过零磁试验室校验的标准磁块进行磁矩测量, 实现了与零磁试验室持续对标的目的。基于磁矩测量数据绘制质控图, 来检验磁试验系统的准确性及磁矩测量时地磁环境的稳定性, 在测量系统可信及地磁环境稳定的前提下对卫星磁矩进行测量, 实现了在非零磁试验室对卫星进行磁矩测量的目的。通过建立质控图对磁矩测量系统进行质控, 对保证测量系统的可靠性具有重要作用。

关键词: 地磁环境; 磁块磁矩测量; 卫星磁矩测量; 质控图

## 航天器部组件级热真空试验温度均匀性研究

王笑寒, 郭威, 马腾飞, 李树鹏, 吕志伟, 王旭, 苏新明  
(北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

摘要: 温度均匀性是热真空试验中的一项重要技术指标。通过创建小型混合工质真空试验设备的数学与物理模型, 应用 Ansys Workbench 中的稳态热分析模块对不同工况下的不同试验产品进行温度场模拟仿真, 同时进行与仿真相同条件的热真空试验。分析结果表明, 热沉开口不利于产品的温度均匀性, 使用喷黑漆处理的紫铜片遮挡热沉开口可增加其升降温过程中的温度均匀性; 同时对多件试验产品进行热真空试验, 升降温过程温度均匀性较差。

关键词: 小型混合工质真空试验设备; 温度均匀性; 稳态热分析; 热沉开口

# 航天器部组件级常压热试验管理系统设计与实现

郑会明, 刘毅, 张童, 杨力坡, 张稚杰, 铁鑫, 苏新明

(北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

摘要: 随着型号任务不断增加, 部组件级常压热试验数量有了大幅增加, 原有管理方法和工具已经难以满足需求, 为此设计和开发一套试验管理系统以实现试验数据、过程记录、照片等文件的统一电子化管理和存储, 实现信息的高效查找、共享和复用; 提高试验准备、过程巡视及数据处理过程的自动化和信息化水平, 减少人员操作, 提高效率和过程管控能力。本文对常压热试验流程进行了梳理, 对试验管理系统总体设计和各功能模块进行了分析, 并对系统应用效果进行了总结。该试验管理系统使航天器部组件级常压热试验过程更加高效、可控。

关键词: 航天器部组件; 常压热试验; 试验管理系统

## 气候风洞制冷系统对系统能耗影响分析

叶哲霄, 马禄创, 张翔, 李红兵, 马龙宇, 许安易

(上海宇航系统工程研究所, 上海 201108)

摘要: 气候风洞可用于飞行器和地面设备环境条件仿真, 具有很大的军用和民用价值。目前风洞常用的制冷方式主要为蒸汽压缩制冷和液氮制冷, 然而蒸汽压缩制冷存在制冷剂泄露问题, 并且结构复杂, 低温性能差, 液氮制冷虽然可以达到极低的模拟温度, 但是实验成本高, 不适合大型风洞。随着制造水平的提升, 透平式膨胀机、高效紧凑式换热器等技术的发展, 空气循环制冷系统的效率不断提升, 逐渐在各行各业作为改进方案得到应用。本文通过对空气循环制冷系统和风洞进行建模, 研究不同实验段条件下系统总能耗, 并与传统风洞进行对比, 可以对采用空气循环制冷的风洞性能进行研究。

关键词: 气候风洞; 空气循环制冷

## 卫星多磁偶极子建模方法研究

徐超群, 郭涛, 刘超波, 梁智锦, 刘国鹏, 高扬, 肖琦, 易忠

(1. 北京卫星环境工程研究所, 北京 100094; 2. 北京宇航系统工程研究所, 北京 100076;

3. 可靠性与环境工程技术重点实验室, 北京 100094)

摘要: 针对卫星磁特性研究与磁试验, 建立了卫星多磁偶极子模型, 分离了线性和非线性部分, 利用遗传算法, 以测点的模拟值和测量值之差的均方根作为目标函数, 搜索多磁偶极子的位置, 同时检测拟合误差, 使得目标函数达到最优的同时, 拟合误差也满足要求。最后对卫星静止状态和加电状态的磁性进行了计算, 试验结果表明, 用该方法建立卫星磁场模型精度高, 磁矩和磁场的误差均小于 5%, 并且对测量误差不敏感, 具有很强的鲁棒性。

关键词: 卫星; 多磁偶极子; 遗传算法; 误差

# GFDM-1 卫星高尺寸稳定星敏感器支架设计与验证

张欢, 张玲, 罗文波, 王腾, 高行素, 张传强

(1 北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094;

2 中国空间技术研究院遥感卫星总体部, 北京 100094)

**摘要:** GFDM-1 卫星配置了 3 台甚高精度星敏感器, 其精度已达 1", 对卫星平台控制精度和稳定度提出了很高的要求。在轨环境中, 热环境是影响结构尺寸稳定性的重要因素, 为提高 GFDM-1 相机光轴与星敏光轴夹角稳定性, 降低温度变化带来的影响, 卫星构形布局时将星敏直接通过星敏支架安装在相机主镜支撑框上。同时, 对星敏支架自身的热稳定性要求很高。本文设计了高热稳定复合材料星敏支架, 研究了构型设计、材料、工艺过程及热处理均尺寸稳定性的影响, 通过试验及在轨验证, 证明其性能满足指标要求。

**关键词:** 星敏支架; 高热稳定; 结构设计; 设计验证

## 基于矢量夹具的卫星多轴振动响应分析

梁晓华, 赵巍, 董敏

(深圳航天东方红卫星有限公司, 深圳 518054)

**摘要:** 为了准确模拟产品经历的真实振动环境, 国内外学者开展大量基于三轴六自由度振动试验系统的多轴振动技术研究。基于矢量夹具的多轴振动试验技术采用“传统单轴振动+矢量夹具”的方式, 以经济高效的方式实现多轴振动。为了验证该技术在产品研制过程中的实际考核效果, 以某卫星真实结构星为试样, 开展单轴、多轴振动试验对比分析, 结果表明: 基于矢量夹具的多轴振动试验能够激起卫星的多个方向结构模态, 振峰频率前移; 卫星主结构测点与传统单轴振动相比, 响应趋势基本一致, 但是斜装太阳翼、星上支架经矢量夹具分解后受力方向发生变化, 测点响应趋势及量级偏差较大。在卫星结构简单、试验目的是验证工艺稳定性等情况下, 基于矢量夹具的多轴振动技术能提供一种经济、高效的考核方案。

**关键词:** 卫星振动试验; 矢量夹具; 振动响应

# 超低轨星表凸出物构型气动特性数值模拟研究

江一鹏, 崔玉福\*, 刘质加, 秦江  
(航天东方红卫星有限公司, 北京 100094)

摘要: 超低轨道是跨接航空与航天的新兴空域, 处于该轨道的飞行器需要考虑空间环境的气动影响。本文针对超低轨飞行器上气动舵以及凸出物装置等情况, 采用直接模拟 Mentor Carlo (DSMC) 方法研究了 180km 轨道高度稀薄流域星表凸出物绕流问题, 计算和分析了凸出物位置对各表面气动力值的影响以及表面不同区域的压力分布情况。结果表明: 由于各表面间遮挡及部分粒子的回流作用, 凸出物周边易形成不同程度的涡流; 凸出物位置对所在面受力及力矩都存在一定的影响, 或导致飞行器轨道或姿态的偏移; 超高速稀薄流区压强由来流碰撞作用及分子热运动作用共同组成, 导致星表压强场与密度场并不同步, 引起表面不同区域压力分布的极大变化。

关键词: 超低轨飞行器; 稀薄气体; 气动特性; DSMC 方法; Boltzmann 方程

# 基于微放电机理的高压太阳电池阵电位主动控制材料研究

冯娜<sup>1</sup>, 高志良<sup>1\*</sup>, 陈益峰<sup>2</sup>, 唐旭<sup>1</sup>, 韩炎晖<sup>1</sup>, 刘安<sup>1</sup>, 穆京国<sup>1</sup>

(1. 北京东方计量测试研究所, 北京 100094;  
2. 许昌学院, 许昌 461000)

摘要: GEO 卫星受地磁亚期空间高能等离子体表面充电的影响, 产生静电放电和二次放电效应, 导致太阳电池阵永久性短路。反转电位梯度作为触发 GEO 太阳电池阵表面产生静电放电的主要因素, 本文基于空间太阳电池阵“金属-介质-真空”三结合区的静电放电原理, 提出了一种新型静电防护材料电位主动控制方法; 仿真模拟了材料聚合物表面和金属基底之间的微放电机理和电子发射过程, 获得不同结构下电位主动控制静电防护薄膜的充电特性与电场分布; 采用涂敷层压结合激光刻蚀的方法制备了阵列式“三结合”结构分布的 Kapton/铜复合薄膜, 并通过电子辐照模拟试验表明, 新型静电防护材料可将 GEO 环境下充电电位-6000V 控制至-460V, 可有效控制卫星静电电位。

关键词: 表面充电; 微放电; 电位主动控制; 高压太阳电池阵

# 超高速斜撞击下航天器 Whipple 结构碎片特性研究

李正宇, 贾光辉, 张品亮, 彭厚吾, 武强, 任思远, 宋光明

(1. 北京卫星环境工程研究所, 北京 100094;

2. 北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100083;

3. 可靠性与环境工程技术重点实验室, 北京 100094

4. 中国空间技术研究院 遥感卫星总体部, 北京 100094)

**摘要:** 发生在近地轨道的空间碎片撞击事件几乎都是斜撞击, 撞击产生的碎片云会对航天器内部结构及设备产生威胁。本文采用 AUTODYN 软件对航天器 Whipple 结构受弹丸撞击的过程进行数值仿真, 通过与实验对比验证数值仿真有效性。处理并识别仿真结果, 以碎片质量分数、剩余速度以及形态分布为重点, 研究撞击角度在  $0 \sim 60^\circ$  范围内碎片云中最具威胁的碎片特征。研究表明: 超高速斜撞击下碎片分布特征呈现随撞击角度分区域变化的规律, 同时碎片的质量分数及剩余速度也随撞击角度变化呈现一定规律。

**关键词:** 空间碎片; 超高速斜撞击; 数值仿真; 碎片云模型

# 一种基于面质比的小卫星随机振动与噪声试验确定方法

扈勇强<sup>1</sup>, 冯振伟<sup>1</sup>, 王海明<sup>1</sup>, 刘质加<sup>1</sup>, 晏廷飞<sup>2</sup>, 向树红<sup>2</sup>

(1. 航天东方红卫星有限公司, 北京 100094;

2. 北京卫星总装与环境工程部, 北京 100094)

**摘要:** 目前小卫星随机振动与噪声试验确定不明确, 不同标准给出的准则也不同, 本文分析典型小卫星随机振动与噪声试验的差异性。通过小卫星试验数据, 修正基于 miles 面质比公式, 并给出某型卫星应用案例, 为卫星正样阶段随机振动与噪声试验方案确定提供依据。

**关键词:** 小卫星; 面质比; 随机振动; 噪声试验; 确定

## 0.4 MeV 质子辐照对 AlGaIn/GaN HEMTs 栅沟道电子输运特性的影响

季启政<sup>1,2</sup>, 刘峻<sup>3</sup>, 杨铭<sup>4</sup>, 马贵蕾<sup>1</sup>, 谢喜宁<sup>1</sup>, 胡小锋<sup>1</sup>, 刘尚合<sup>1,\*</sup>

(1. 陆军工程大学石家庄校区电磁环境效应重点实验室, 石家庄 050003;

2. 北京卫星环境工程研究所, 北京 100094;

3. 南京信息工程大学 电子与信息工程学院, 南京 210044;

4. 北京东方计量测试研究所, 北京 100094)

**摘要:** 研究不同栅漏间距的 AlGaIn/GaN 高电子迁移率晶体管 (High Electron Mobility Transistors, HEMTs) 的栅沟道载流子输运特性在 0.4 MeV 质子辐照前后的不同变化。不同尺寸 AlGaIn/GaN HEMT 器件的迁移率在辐照后的变化趋势以及幅度有所不同。研究发现, 这种现象是质子的位移效应引起极化分布的变动导致的, 并且质子对极化分布的影响会随着器件尺寸的变化而变化。由于极化散射与极化分布密切相关, 不同尺寸器件的极化散射在 0.4 MeV 质子辐照后发生不同变化, 迁移率的变化也因此不同。

**关键词:** AlGaIn/GaN HEMT; 质子; 极化; 散射

## 大尺寸碎片对活性防护结构的超高速撞击特性研究

任思远<sup>1</sup>, 张庆明<sup>2,\*</sup>, 武强<sup>1,3</sup>, 龙仁荣<sup>2</sup>, 张品亮<sup>1</sup>, 宋光明<sup>1</sup>, 胡天翔<sup>2</sup>

(1. 中国空间技术研究院 北京卫星环境工程研究所, 北京 100094;

2. 北京理工大学 爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081;

3. 可靠性与环境工程技术重点实验室, 北京 100094)

**摘要:** 随着航天活动的增加空间碎片数量急剧增长, 特别是厘米级空间碎片会对航天器安全造成严重威胁。本论文利用二级轻气炮, 对双层活性缓冲屏防护结构进行了超高速撞击实验, 得到了 PTFE/Al 缓冲屏穿孔直径随撞击速度的变化规律, 建立了活性缓冲屏的无量纲穿孔经验公式。通过回收防护结构后板, 对比及分析了后板的破坏特性, 验证了活性防护结构对大尺寸碎片的防护能力。通过数值模拟获得了碎片云的膨胀运动过程, 分析了弹丸动能、内能变化以及碎片特性, 揭示了活性防护结构的防护机理。结果表明, 双层活性防护结构的防护能力较单层有大幅提升, 可以抵御 1cm 空间碎片的撞击。

**关键词:** 超高速撞击; 空间碎片; 活性材料; 大尺寸碎片

# 红蓝光敏探测器在轨污染探测数据分析

院小雪, 郝宁, 杨东升

(北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

摘要: 本文分析了“新技术验证一号”卫星搭载的红蓝光敏探测器全寿命期间的在轨探测污染数据。该探测器是利用镓铟磷太阳能电池在空间污染环境下的性能变化情况来分析空间污染环境及效应, 根据其探测原理, 通过分析卫星下传的原始数据及修正后数据, 结合地面标定试验得到的污染沉积量和镓铟磷电池性能变化之间的关系式, 分析了探测器在轨工作期间的探测数据。结果表明: 我国空间材料热真空出气筛选控制有效, 满足卫星全过程污染控制的要求。该研究结果可以为太阳能电池防护设计提供参考, 同时可以和地面分析数据进行比对, 检验和修正地面污染控制措施。

关键词: 污染; 在轨探测; 太阳能电池; 非金属材料

# 电子束辐照下的金属内能量沉积模拟研究

程雅苹

(北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

摘要: 各类航天器在近地或宇宙空间的运行可靠性提升, 涉及到对多种充放电问题的持续、深入研究。由充放电造成的航天器在轨故障占比超过 50%。构成航天器的主体是其内部的金属材料, 而在航天器表面, 分布着金属、半导体绝缘介质等多种类型的材料。本文基于 CASINO 软件, 研究了 1 KeV, 10 KeV 电子在金、铝中的运动轨迹和穿透深度, 以及能量沉积。电子的运动轨迹发生了明显的横向的扩散, 这是由于电子和原子发生多次弹性散射导致的。电子能量是 1KeV 时, 在金中的平均穿透深度大概在 5nm 左右, 60%的电子的能量沉积过程在 2nm 厚度范围内完成。1KeV 的电子在铝中的穿透深度明显长于在金中的穿透深度。当电子能量达到 10 keV 时, 可以轻松穿透 10nm 厚的铝。

关键词: 电子; 能量沉积; 金属

# 基于 PSO-BP 神经网络的 CMG 综合应力失效包络面研究

黄首清<sup>1,2,3</sup>, 李芳勇<sup>1,2,3\*</sup>, 余溢方<sup>1,2,3</sup>, 秦泰春<sup>1,2,3</sup>, 张兆霖<sup>1,2,3</sup>, 杨勇<sup>1,2,3</sup>

- (1. 航天机电产品环境可靠性试验技术北京市重点实验室;
2. 可靠性与环境工程技术国防科技重点实验室;
3. 北京卫星环境工程研究所; 北京 100094)

**摘要:** 研究在真空热和模拟真实在轨工况条件下控制力矩陀螺 (CMG) 的失效包络面, 对于保证和提高 CMG 的可靠性非常重要。本文中的试验数据来自可同时模拟真空热环境和 CMG 与航天器角动量交换工况的试验平台。该试验模拟了包含了真空环境下温度、CMG 框架转速、航天器转速的综合应力, 获得了高精度模拟在轨状态的 CMG 运行状态数据。利用粒子群优化和 BP 神经网络(PSO-BP)方法学习运行状态数据, 随后预测其它应力组合下是否发生故障的运行状态数据, 最终获得反映 CMG 耐受极限综合应力的完整失效包络面。研究结果表明, 该方法能够显著降低 CMG 失效包络检测的试验成本, 同时具有较高的预测精度和对综合应力工况的适应性。利用 K 折交叉验证方法验证了 PSO-BP 模型在预测 CMG 运行状态时比 BP 模型具有更好的泛化性能。同时, 文章还讨论了优化 PSO-BP 模型隐藏层神经元个数。此外, 所提出的方法可以内化隐藏在试验数据中的工程经验。最后, 与 BP 方法相比, PSO-BP 方法可以获得更平滑、更稳定的预测初值, 有效防止预测结果陷入局部最优。

**关键词:** 控制力矩陀螺; 粒子群优化; 神经网络; 失效包络面; 综合应力

## 飞行器力热联合试验技术探讨

沈志强 晏廷飞 刘闯 信奇 路东东 张君 安万庆

(北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

**摘要:** 飞行器在高速飞行过程中, 舱体上会承受空气动力载荷、发动机推力载荷、结构及设备部件质量惯性载荷, 同时由于高速飞行也会产生气动热载荷, 因此有必要开展飞行器地面力热复合试验技术验证, 获取飞行器力热联合加载作用下的结构特性。本文以某型飞行器舱段模拟件作为研究对象, 开展了力热联合试验技术研究, 并与数值分析结果进行比较, 获取热静力试验技术方法, 为类似试验技术开展提供技术基础。

**关键词:** 飞行器; 静力; 强度; 热流; 试验

# 螺钉连接件随机振动故障机理分析和寿命评估

王 灿, 许 丹

(北京航空航天大学 可靠性与系统工程学院, 北京 100191)

**摘要:** 本文研究螺钉连接件在随机振动载荷下存在疲劳失效和预紧力松弛的故障机理和该耦合故障机理下的螺钉连接件随机振动疲劳寿命评估问题。首先开展飞行器舱段螺钉连接件在随机振动载荷下的故障机理分析, 采用不同的螺钉紧固件有限元建模方法建立典型螺钉连接件有限元模型, 通过静力学和模态分析, 考虑计算精度与计算速度, 综合选取最优建模方法。然后, 采用随机振动频域分析法, 考虑紧固件受扭剪应力, 建立了考虑扭剪应力修正系数的疲劳寿命模型, 开展了舱段连接结构疲劳寿命评估。最后通过改变螺钉预紧力计算不同预紧力情况下的螺钉紧固件的疲劳寿命, 以探究紧固件预紧力对疲劳寿命的影响。结果表明: 在螺钉紧固件有限元建模方面, 与真实螺纹法相比, MPC 法误差较小同时计算速度最快而被采用; 在随机振动载荷下, 随着螺钉预紧力的衰退, 舱段随机振动疲劳寿命总体呈下降趋势。

**关键词:** 沉头螺钉; 随机振动; 疲劳寿命; 预紧力衰退; 有限元仿真

# 基于模拟实验的在轨可修系统维修时间预计修正方法

李 语<sup>1,2,3</sup>, 周 栋<sup>1,2,3</sup>, 宋子聘<sup>1,2,3</sup>, 郭子玥<sup>1,3,4</sup>, 康子旭<sup>1,2,3</sup>, 帅松良<sup>1,2,3</sup>, 赵轩毅<sup>1,2,3</sup>

(1. 可靠性与环境工程技术国防科技重点实验室, 北京 100191;

2. 北京航空航天大学 可靠性与系统工程学院, 北京 100191;

3. 虚拟现实技术与系统国家重点实验室, 北京 100191;

4. 北京航空航天大学 计算机学院, 北京 100191)

**摘要:** 当前, 我国空间站建设已经进入收官阶段, 为保证空间站长期的安全可靠运行, 需要进行高效的在轨维修。由于航天员在空间站中受到时间和维修保障资源的制约, 因此准确预计在轨维修时间并及时配送维修保障资源对于提高空间站的可靠性具有重大意义。在现有在轨维修时间预计方法的基础上, 对微重力环境下的维修动作进行分析, 提出了在轨可修系统维修时间预计修正方法。开展模拟实验, 通过中性浮力水槽模拟微重力环境, 在水下进行一段简单的拆卸任务并记录时间, 测定出各个关节的基准动作时间, 验证了该方法的准确性。最后, 结合空间站中的其他影响因素, 在模拟实验数据的基础上, 推导出空间站的基准动作时间标准, 为空间站维修活动时间预计和空间站的维修性设计提供一定参考。

**关键词:** 在轨维修; 微重力; 动作时间标准; 水槽实验; 维修时间

## 低温存储装置噪声响应超标问题的理论分析

王泽宇<sup>1</sup>, 张立新<sup>1</sup>, 王帅<sup>1</sup>, 王波<sup>2</sup>, 张银<sup>2</sup>, 庞世伟<sup>1</sup>

(1.北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094;

2. 中国电子科技集团第十六研究所, 合肥 230088)

摘要: 为使空间站开展科学实验研究用的低温存储装置噪声响应满足研制要求, 开展了噪声响应测试, 根据不同试验条件下的响应情况, 对超标原因进行了排查。建立了有限元/边界元耦合分析模型并开展了声振分析, 确定了对噪声响应贡献最大的部位为-80°C箱体面板。分析对比了不同噪声抑制方法并进行了仿真预示, 验证了粘弹性阻尼材料对箱体振动及噪声抑制的有效性。最后, 试验结果证明了理论分析及方案的正确性。

关键词: 低温噪声声振; 耦合分析; 抑制试验

## 超大面源低温真空黑体定标器研制与性能测试

徐 骏, 兰少飞\*, 费志禾, 赵凯璇, 季 琨, 孙敬文, 林 宇, 王晓占, 刘海静, 随俊杰

(上海卫星装备研究所, 上海 200240)

摘要: 黑体定标器是综合光学、机械、热学、控制、计量等多种学科和技术的定标设备, 在红外光学载荷的辐射定标中具有重要作用。为满足大口径红外光学载荷的辐射定标需求, 研制了一套超大面源 (辐射面 2200mm×800mm)、宽温区 (182~410K)、高发射率、高均匀性、高稳定性的黑体定标器。在黑体定标器的研制中, 采用表面加工微型结构, 并配合高发射率涂层的方式实现辐射面的高发射率; 采用分区独立温度控制, 主区域精确调节、四周区域补偿控制和多点温度反馈的高精度 PID 闭环控制实现辐射面的高均匀性; 采用相邻交叉耦合控制算法, 实现辐射面的高稳定性。采用仿真与试验相结合的手段, 验证了设计的正确性。测试结果表明, 在室温大气环境下, 波段范围 2~5 $\mu$ m 时, 黑体定标器辐射面参比样品半球发射率优于 0.99; 在真空低背景环境下, 黑体定标器在 182~410K 范围内, 温度均匀性优于 $\pm 0.5$ K, 30min 内控温稳定性优于 0.03K。该黑体定标器能够满足现阶段大口径红外光学载荷的辐射定标需求, 为信息定量化应用水平的提高打下了坚实的基础。

关键词: 黑体定标器; 发射率; 温度均匀性; 控温稳定性

# 小行星探测返回舱的气动外形优化设计

李齐<sup>1</sup>, 张焯<sup>1</sup>, 魏昊功<sup>1</sup>, 周伟江<sup>2</sup>, 耿云飞<sup>1</sup>

(1. 北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094; 2. 中国航天空气动力技术研究院, 北京 100074)

**摘要:** 小行星返回的再入速度达到 12km/s, 高温效应导致返回舱再入过程中承受巨大的气动热载荷。而小行星探测返回任务对系统规模约束十分苛刻, 要求返回舱具有轻小型化特征, 这给返回舱气动外形设计带来了极大的压力。本文针对典型的球锥迎风大底返回舱外形特征, 在确定尺寸包络以及气动性能指标的条件下, 建立了基于化学非平衡的纳维-斯托克斯 (N-S) 方程及与 Kemp-Riddell 对流热工程模型和 Brandis-Johnston 辐射热工程模型相结合的气动性能计算方法, 并提出了基于近似模型和遗传算法的多目标优化设计方法, 对返回舱迎风半锥角与球头半径开展了可选范围分析和 Pareto 寻优。结果表明, 当迎风大底直径为 600mm 时, 球锥大底外形的返回舱迎风半锥角可选范围在 60°~65°之间, 球头半径  $R_n$  的可选范围在 0.32m~0.38m 之间, 满足热流峰值、压力系数以及减速性能的最优解为  $\theta=63.524^\circ$ 、 $R_n=343.836\text{mm}$ 。

**关键词:** 小行星探测; 返回舱; 化学非平衡; 纳维-斯托克斯 (N-S) 方程; 辐射热; 近似模型; 遗传算法; 多目标优化

# 航天器用电加热片粘贴缺陷的非接触可视化检测技术研究及应用

董学金\*, 李晓东, 邵红亮, 崔贺新, 闫来信, 颜世访

(上海卫星装备研究所, 上海, 200240)

**摘要:** 电加热片是卫星在轨控温的一种常用手段, 粘贴过程中易产生脱粘, 气泡, 夹杂等缺陷。目前对加热片缺陷的检查仍然依赖人眼目视法, 检测结果不直观, 容易产生错漏检, 且检测效率不高。本文采用红外长脉冲热成像检测技术对电加热片的粘贴质量进行检测。本文首先介绍了检测原理, 然后对预制缺陷的试样进行检测, 结果表明该方法能够有效地检测出电加热片粘贴过程产生的脱粘, 气泡, 夹杂等缺陷。

**关键词:** 电加热片; 在轨控温; 红外长脉冲热成像; 粘贴质量

# 基于太阳模拟器的航天器高精度热流模拟试验方法研究

刘瑞芳, 彭光东, 陶晶亮, 李钰, 王珊珊  
(上海卫星装备研究所, 上海 200240)

摘要: 大型空间太阳模拟器作为大型热试验的关键设备, 以其高准直性、高均匀性和与太阳光谱的高度匹配特性, 在高精度热流模拟试验中有不可替代的优势, 尤其是为大型光学载荷地面热试验提供精准外热流模拟, 有效检验航天器热光学性能、相互遮挡影响和内部光学汇聚影响。本文结合实例介绍了采用太阳模拟器开展试验的方案、优势、热流模拟方法等, 提出了太阳模拟器试验的适用范围和试验方法, 为航天器高精度热试验提供参考的解决方案。

关键词: 太阳模拟器; 组合模拟; 热试验; 空间环境模拟

# 基于力限的部件加速度试验条件下凹仿真研究

刘绍奎, 邹元杰  
(北京空间飞行器总体设计部, 中国, 北京 100094)

摘要: 本文主要探讨通过系统级仿真手段, 利用界面力控制技术, 实现部件基础激励加速度条件的合理下凹方法。经仿真分析对比可知, 如果部件基础激励分析使用的条件和系统级分析的界面响应一致, 那么不存在过试验和欠试验问题。部件基础激励存在过试验, 输入条件与系统级分析时产生的界面输出不一致是原因之一。基础激励相位信息的丢失和基础界面的过约束(角位移约束), 是产生过试验问题的根本原因。以基础激励和系统级分析之间的界面合力放大系数来调节基础激励条件, 可以得到加速度下凹谱, 从而有效的缓解部组件基础激励振动时的过试验问题。

关键词: 航天器; 力学环境; 力限; 下凹。

# 基于 PFMEA 研究影响卫星成败的 AIT 关键点保障链

刘小庆, 宋文成, 王敏捷, 陈林, 崔贺新, 刘毅  
(上海卫星装备研究所, 上海 200240)

摘要: 为适应航天器高密度发射的新形势, 以问题为导向, 充分运用 PFMEA 和“三个面向”质量工具, 基于卫星飞行时序, 运用 PFMEA 方法, 结合航天质量问题库, 开展影响卫星成败关键风险保障链研究, 分解关联产品, 制定控制措施和数据包及影像记录要求, 确保卫星飞行事件各项保障措施充分性和适宜性, 有重点的实现“事前预防”, 强化卫星 AIT 过程的风险控制, 已成功应用在卫星产品研制、AIT 和发射场现场。

关键词: 卫星飞行时序; PFMEA; 关键风险点; 风险控制

# 空间碎片移除工程验证进展

王俊峰, 陈川, 武强, 张品亮  
(北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

摘要: 鉴于空间碎片对航天活动构成的严重威胁, 对其移除刻不容缓, 国内外均对碎片移除开展了关键技术研究, 但工程验证未能取得突破性进展。本文调研了近年来国内外开展的空间碎片移除工程验证进展, 重点选取国外有一定代表性的三项任务, 关注碎片移除任务分析、平台特点与载荷配置、在轨验证进展等, 并对比研究, 给出了未来发展趋势与我国空间碎片移除工程验证的发展建议。

关键词: 空间碎片移除; 关键技术; 国外工程验证; 在轨飞行进展

# 宇航用功率 VDMOS 自动测试系统设计及辐照损伤研究

牟永强, 崔乃元\*, 刘宇明, 徐焱林, 沈自才, 乔世英  
(北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

摘要: 为了研究宇航级功率 VDMOS 的抗辐照特性, 需要对其在辐照条件下的电学参数的变化进行评估, 本文设计了一套可视化读取数据的宇航用功率 VDMOS 测试系统。该系统在树莓派 4B 开发板的基础上结合自主设计的器件测试夹具开发自动测试采集程序, 使用 Python Tkinter 可视化工具包实现了测试数据的实时显示和读取, 形成了一套成本低、自动采样、快速测试的参数测量系统。通过该自主设计的测试系统对国产宇航用功率 VDMOS 进行了电参数和抗辐照性能的分析, 重点研究了 VDMOS 分别在高低剂量率辐照下的退化情况, 并计算了高低剂量率下载流子迁移率随辐照剂量的变化。研究结果表明功率 VDMOS 器件在  $60\text{Co-}\gamma$  射线辐照环境下发生性能退化, 并且低剂量率下退化更明显, 呈现低剂量率增强效应 (Enhanced Low Dose Rate Sensitivity, ELDRS); 通过计算还可知相较于高剂量率而言, 低剂量率条件下 VDMOS 的迁移率退化也更为严重。

关键词: 功率 VDMOS; 自动测试系统; 可视化界面; 辐照损伤; 低剂量率增强效应

# 液体火箭发动机结构疲劳寿命一体化评估技术研究

王 珺, 穆朋刚

(液体火箭发动机技术重点实验室, 西安 710100)

**摘要:** 管路的疲劳寿命评估及验证是液体火箭发动机结构设计中关键的基础性问题, 也是亟待研究和解决的共性问题之一, 几乎涉及所有在役和预研发动机。针对发动机研制中管路结构疲劳寿命量化评估存在的问题及难点, 包括多源激励传递规律及动力学建模与修正、管路动特性及动强度分析、结构疲劳破坏机理及试验验证、疲劳寿命准确预估等方面, 开展了振动载荷等效及力学环境复现方法、疲劳载荷谱编制方法、高精度动力学建模、管路动强度及疲劳寿命评估等基础理论研究, 提出了适用于液体火箭发动机管路结构振动疲劳寿命评估的方法和一体化平台, 通过零件级、组件级和整机级试验验证, 并在运载火箭数十次飞行中得到考核, 具有较高的技术成熟度。

**关键词:** 液体火箭发动机; 疲劳寿命; 一体化平台; 评估

## 国外抗核加固卫星综述

郑建东<sup>1</sup>, 周江<sup>1</sup>, 王平<sup>1</sup>, 邹恒光<sup>1</sup>, 王立<sup>2</sup>, 薛永<sup>1</sup>, 杨凌轩<sup>1</sup>, 夏彦<sup>3</sup>, 陈颖<sup>2</sup>

(1. 中国空间技术研究院 通信与导航卫星总体部;

2. 中国空间技术研究院 钱学森空间技术实验室;

3. 北京空间飞行器总体设计部: 北京 100094)

**摘要:** 抗核加固卫星通信系统, 是确保国家安全的战略基石, 获取大国间战略博弈的筹码, 在空间对抗、战略通信和核指挥、控制和通信领域具有非常重大的军事价值。本文系统综述了近年来国外抗核加固通信卫星技术研究取得的主要进展, 首先对美军上一代的抗核加固卫星——国防卫星通信系统-3 (DSCS-III)、军事星 (Milstar) 进行了介绍; 然后讨论了美军现役的抗核加固卫星——先进极高频卫星 (AEHF), 特别着重于卫星系统组成、载荷配置、技术指标等方面; 最后对美国正在研制下一代受保护军事卫星通信系统——演进的战略卫星通信 ESS 项目的技术挑战和研究方向进行了展望, 其对我国未来抗核加固通信卫星系统研制具有指导性意义。

**关键词:** 卫星通信; 抗核加固

# 脉冲激光单粒子效应测试中电荷收集的研究

岳建松<sup>1,2</sup>, 魏强<sup>1,2</sup>

(1. 河北工业大学 机械工程学院 河北省跨尺度智能装备技术重点实验室, 天津 300401;

2. 河北工业大学 电气设备可靠性与智能化国家重点实验室, 天津 300401)

**摘要:** 脉冲激光是地面模拟单粒子效应 (SEE) 的手段之一, 其可行性已被证明。在实际应用中, 需要将激光测试结果与高能粒子进行关联, 以实现空间 SEE 率的准确预测。当前激光-高能粒子关联手段大多依据电荷收集 RPP 或嵌套 RPP 模型, 该模型尚未引入电离径迹差异的影响。本文通过调节激光的离焦量, 在双极器件运算放大器 LM324 内部不同深度获得了不同特征尺寸的电离径迹。对比不同特征电离径迹的激光所产生的电荷收集情况, 分析了其影响因素及作用机理。结果表明, 器件内部不同深度的电离径迹宽度是影响电荷收集的主要因素。处于器件表面区域的电离径迹宽度越大, 电荷收集越多, 而处于耗尽区及衬底层的电离径迹宽度越小, 电荷收集越多。进一步讨论了该结果对激光-高能粒子关联的影响。考虑电离径迹对器件敏感体积内电荷收集效率的影响, 激光所等效的 LET 将偏高或偏低。

**关键词:** 脉冲激光; 电离径迹; 双极器件; 电荷收集; 单粒子瞬态脉冲

# 大型立式准直太阳模拟器研制技术

蒋山平<sup>1</sup>, 王丹艺<sup>1</sup>, 张鹏嵩<sup>1</sup>, 向艳红<sup>1</sup>, 张博伦<sup>1</sup>, 柳晓宁<sup>1</sup>, 龚洁<sup>1</sup>, 琚丹丹<sup>2</sup>, 闫继宏<sup>2</sup>

(1. 北京卫星环境工程研究所, 北京 100094;

2. 哈尔滨工业大学, 哈尔滨 150001)

**摘要:** 综合辐照舱是国家重大科技基础设施“空间环境地面模拟装置”的重要分系统, 可实现真空、低温、带电粒子辐照和太阳辐照的综合环境模拟, 用于开展航天器材料和器件级的综合环境效应科学以及特殊环境物理规律研究。针对综合辐照舱对太阳辐照环境模拟的需求, 采用立式离轴准直型光学系统, 研制了大型立式太阳模拟器。设备研制过程中, 突破了大型立式离轴光机结构、大尺寸单体金属准直镜、一体化集成冷却和氙灯快速装校等关键技术, 实现了辐照面 $\Phi 1000\text{mm}$ 、辐照度 2.3 个太阳常数, 最高可扩展至 5 个太阳常数的光学指标, 是目前国内最大的立式离轴准直型太阳模拟器, 能够更为精准的模拟满足辐照度、辐照均匀性、准直性和太阳光谱分布的空间太阳辐照环境。

**关键词:** 辐照环境模拟; 太阳模拟器; 立式离轴准直; 单体金属镜

# 面向小行星着陆的倾斜式气浮微重力模拟系统设计及分析

苏桓立<sup>1</sup>, 霍明英<sup>1</sup>, 齐乃明<sup>1</sup>, 樊世超<sup>2</sup>, 刘 闯<sup>2</sup>

(1. 哈尔滨工业大学, 哈尔滨 150001;

2. 北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

摘要: 针对面向小行星弱引力场的航天器地面仿真中垂直方向引力模拟的需要, 设计了一套三点式动态调斜气浮试验平台模拟小行星表面弱引力场的试验系统, 开展实物实验对其姿态模拟精度进行验证, 并对所构建的方案进行系统分析。

关键词: 小行星着陆; 气浮平台; 微重力模拟

# 液体火箭发动机力学环境试验视觉测试技术

闫松<sup>1,\*</sup>, 张志伟<sup>2</sup>

(液体火箭发动机技术重点实验室, 西安 710100)

摘要: 液体火箭发动机工作时受到涡轮泵流体激振、燃烧振荡和起动冲击等多源载荷激励, 力学环境试验是考核发动机组件结构可靠性和环境适应性的主要手段。为了克服传统加速度传感器测振方法布线麻烦、测点信息少和工作变形分析困难等不足, 采用基于时域滤波和运动放大的视觉测试技术用于控制系统自检、驻留和随机振动试验中的结构响应视频分析, 分离得到了特定频率下结构的运动变形, 实现了发动机导管结构的微小运动放大, 本方法可用于液体火箭发动机复杂结构的振动模式分析。

关键词: 液体火箭发动机; 力学环境试验; 自检; 运动放大; 视觉

# 摆锤式冲击响应谱试验机台面结构改进设计方法及应用

白长行, 高文硕, 姜 兵, 郭健龙, 邵丽娟, 余小明

(北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

摘要: 摆锤式冲击响应谱试验机是航天器单机产品进行冲击响应谱试验的重要设备, 其中, 台面结构是摆锤式冲击响应谱试验机结构中的核心组成部分。文章针对在使用过程中台面结构易出现连接松动、维修频率高、进而影响试验精度与效率的问题进行了详细分析, 针对相关问题进行了改进设计。通过实践证明, 新式台面结构连接可靠、稳定性好, 缩短了设备维修时间, 降低了维修频率和试验风险, 提高了试验效率和试验质量。

关键词: 摆锤式冲击响应谱试验机; 冲击响应谱; 台面结构

# 基于 FMEA 的大型水平气动冲击模拟设备关键组件优化方法

郭健龙, 高文硕, 焦安超, 白长行, 高海洋, 沈志强  
(北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

摘要: 随着高量级冲击响应谱模拟试验的增多, 发现因水平气动冲击响应谱模拟设备(下文统称“气动冲击台”)自身特点、电动振动台实现高量级冲击试验的局限性, 导致只能在气动冲击台进行水平方向高量级冲击试验, 所以现有气动冲击台和电动振动台已很难较好地满足产品进行三个方向高量级冲击试验的需求。为解决此类试验问题, 设计一种通用高量级气动冲击台水平转垂直方向冲击试验设备。本设备通过转换装置将气动冲击台水平方向冲击力转换为垂直方向冲击力, 无需改变产品的安装方向, 即可实现产品垂直方向规定的冲击响应谱环境考核, 从而大大提升现有气动冲击台试验能力, 保证送试产品能够经受更加真实有效的模拟力学环境, 达到预期考核目的。

关键词: FMEA; 大型气动冲击; 模拟设备; 关键组件

# 卫星多级卸载微振动试验技术研究

武耀, 刘闯, 孙刚, 孙浩, 信奇, 谢一村, 张春柳  
(北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

摘要: 文本针对国内外高精度卫星的结构形式进行分析, 探讨了开展地面微振动试验时边界条件模拟的新变化。结合新的需求, 研究了多级卸载的微振动试验方法, 并且设计了多级卸载微振动试验系统, 为后续开展新一代卫星的微振动试验奠定基础。

关键词: 微振动试验; 多级卸载; 超低频卸载

# 柔性结构模态辨识的不确定量化方法

潘耀宗<sup>1</sup>, 孙铭业<sup>1</sup>, 赵岩<sup>1,2</sup>

(1. 大连理工大学 工业装备结构分析国家重点实验室 运载工程与力学学部 工程力学系, 大连 116023;  
2. 大连理工大学 宁波研究院, 宁波 315016)

摘要: 本文提出了一种时域贝叶斯方法, 利用结构的时域测量响应信号进行动力学参数辨识, 实现了相应的不确定量化。模态辨识目的是识别结构的固有频率、阻尼比和振型等模态参数, 提供了目标结构的固有动力学信息。与频域辨识方法相比, 时域方法不需要对测量信号进行频域转化, 避免了泄露、混叠等因素对辨识结果的影响。考虑实际结构中存在着比如测量噪声、环境噪声、建模误差等不确定因素对辨识结果的影响, 本文基于状态空间模型和马尔可夫参数的时域理论响应, 推导了辨识参数的后验概率密度函数, 有效地实现模态参数不确定量化。数值算例中对柔性空间结构进行动力学特性辨识, 对所提出的方法进行了验证。

关键词: 柔性结构; 贝叶斯; 状态空间; 模态识别

## 北斗三号增量载荷及数据分析

彭忠, 李昊, 彭毓, 葛丽丽, 刘庆海, 王俊峰, 唐振宇, 任琼英, 李涛, 肖琦, 黄魁

(北京卫星环境工程研究所, 北京, 100094)

**摘要:** 航天器在太空运行过程中, 与周围空间等离子体和光电效应等综合作用下, 会在航天器表面沉积电荷, 形成与背景等离子体环境不同的悬浮电位, 即充电的现象。等离子体环境及表面充电综合监测系统的主要功能是探测空间等离子体环境和卫星上的表面电位情况, 对接收到的信号进行处理、存储和传输。北斗增量载荷“等离子体环境及表面充电综合监测系统”的研制, 主要目的就是利用在轨探测的等离子体环境数据, 获得卫星在轨等离子体环境变化规律, 以及与航天器表面充电的关联性。北斗三号的低能等离子体探测器 (LPD) 是国内首次在中轨观测低能等离子体的探测器, 通过比较分析 LPD 观测结果、太阳风数据、地磁扰动以及模型的计算结果。观测结果表明, 卫星在轨运行中发现了多起卫星充电现象, 文中总结了上天以来 LPD 观测的几种典型结果, 发现卫星在穿越高维地区时, 易受到等离子体注入影响, 发生充电现象; 此外相对于平静期, 磁暴期间辐射带的高能粒子通量会显著增强。

**关键词:** 北斗卫星; 低能等离子体探测器; 电子; 质子; 卫星充电

## 航天器运输包装箱平台化设计方法和应用

杨明, 付铜玲, 孙福佳, 陈然

(天津航天机电设备研究所, 天津, 300458)

**摘要:** 结合卫星研制模式的转型升级, 提出航天器运输包装箱的平台化设计思路。通过将包装箱的型谱规划和功能模块定型进行有机结合, 实现包装箱的快速设计和制造, 提高产品的可靠性, 同时提出了未来航天器运输包装箱平台化设计的发展方向, 为高密度航天器发射运输任务提供有力支持。

**关键词:** 航天器运输包装箱; 平台化; 型谱; 功能模块定型

## 基于统计能量法的航天结构高频疲劳寿命分析

苏有彪<sup>1</sup>, 刘欣良<sup>1</sup>, 吴丹<sup>2</sup>, 王珺<sup>2</sup>, 谢石林<sup>1,\*</sup>

(1. 西安交通大学航天航空学院, 西安 710049;

2. 西安航天动力研究所, 西安 710100)

**摘要:** 提出了一种基于统计能量分析的航天结构高频疲劳寿命分析方法。首先建立了发动机系统的统计能量分析模型, 用于预示发动机组件安装处子系统的响应。然后根据不同的谱型假设, 从子系统的响应中确定了发动机组件的三种模拟基础激励谱。将考虑发动机组件几何参数和材料参数变化的蒙特卡洛方法应用于基于模拟基础激励谱的高频疲劳寿命分析中, 并将各模拟谱下的疲劳估计寿命及其平均值与基于实测基础激励谱的寿命值进行了比较。结果表明, 基于模拟平直型基础激励谱的发动机组件高频疲劳寿命估计与基于实测基础激励谱的疲劳寿命估计吻合较好。

**关键词:** 疲劳寿命; 统计能量分析; 高频; 发动机组件

# 无人机机载设备系统内电磁兼容研究综述

牟永强, 张陈, 刘明君, 张博维, 郭世超, 武南开

(北京卫星环境工程研究所, 北京, 100094)

摘要: 在无人机复杂系统中, 电磁兼容性问题日益突出。本文综述了无人机机载设备系统内电磁兼容研究的典型内容与一般方法。

关键词: 无人机; 系统内电磁兼容; 机载设备; 复合材料

# 空间望远镜在轨微振动隔振装置研究

刘明辉, 何玲, 杨江, 薛倩, 张肇元, 薛令博, 岳志勇, 冯咬齐, 刘闯

(北京卫星环境工程研究所, 北京, 100094)

摘要: 为了保证空间望远镜在轨指向精度, 需要对控制力矩陀螺在轨正常工作产生的微振动进行隔振。本文建立了空间望远镜控制力矩陀螺在轨微振动隔振装置总体方案, 完成了隔振装置设计, 重点开展了模态仿真分析与隔振性能试验验证。研究表明: 隔振装置模态基频设计值与试验测试值误差 0.91%, 控制力矩陀螺工作频率处插入损失 95.5%, 8~400Hz 宽频插入损失 91%, 隔振装置具有良好的隔振性能。

关键词: 空间望远镜; 微振动; 隔振; 控制力矩陀螺

# 一种基于直流式风洞的火星尘暴模拟装置

刘琛<sup>1</sup>, 王芳<sup>1</sup>, 李丽芳<sup>1</sup>, 周文<sup>2</sup>, 王振果<sup>2</sup>, 闫继宏<sup>1\*</sup>, 吴宜勇<sup>1</sup>

(1. 空间环境与物质科学国家重点实验室, 哈尔滨工业大学, 哈尔滨, 150001;

2. 中国航空工业空气动力研究院, 哈尔滨, 150001)

摘要: 火星探测是目前人类深空探测的一个主要方向。火星表面尘暴环境对探测器及人类活动的影响尤为重要。本文研制了一种基于直流式风洞的火星尘暴环境模拟装置, 由真空容器、风速模拟系统、沙尘喷射系统、天平系统、真空系统和 CO<sub>2</sub> 气源组成。通过仿真模拟和测试, 结果表明该装置可以实现 100~1500Pa 低气压下 5-100m/s 大跨度风速以及 0.1~1g/m<sup>3</sup> 的沙尘浓度参数模拟。该装置可用于研究火星尘暴环境对材料和机构的影响规律, 同时还可用于火星气动力问题研究。

关键词: 直流式风洞; 引射器; 大跨度风速; 沙尘浓度; 流场模拟

# 紫外辐照环境下月尘的充电机理及应用研究

陈 赟, 李丽芳, 闫继宏, 吴宜勇, 琚丹丹, 张鹏嵩

(哈尔滨工业大学空间环境与物质科学研究院, 哈尔滨 150001)

摘要: 月球探测活动中, 月表紫外辐照环境导致月尘充电后会对航天器功能表面、运动机构以及宇航员活动产生恶劣影响。本文主要利用月尘在紫外辐照环境中的充电机理研究, 建立月尘颗粒在紫外辐照环境下的充电物理模型, 通过数值解析获得充电辐照源的最优设计参数范围, 建立紫外辐照源的光学模型, 完成紫外辐照源测量系统装置研制并开展验证实验, 实现紫外月面辐照源充电环境模拟。月尘表面所带的电荷量与颗粒半径和紫外辐照度均成正相关, 辐照强度的提高有助于充电过程的加快。光学辐照仿真中, 紫外辐照强度从高到低由中心向外呈放射状分布, 最高强度约为  $7.33 \times 10^{-7} \text{ W/mm}^2$ , 并能在实验中印证仿真结果, 满足大于 3.5 个真空紫外常数的实验需求, 且稳定性良好。这些成果应用于国家重大基础科技设施“空间环境地面模拟装置”重要分系统-月球多因素综合环境模拟与研究系统。

关键词: 月球环境模拟; 月尘充电; 紫外辐照; 紫外辐照源测试

# 基于创成式优化及导向式重构的大中型件轻量化设计

韩 天<sup>1</sup>, 张延峰<sup>2</sup>, 张 超<sup>3</sup>

(1. 北京科技大学, 北京 100080;

2. 北京动力机械研究所, 北京 100080)

摘要: 大中型复杂构件在各个行业中被广泛应用, 但传统高的安全系数设计导致重量过重, 其有着很大的优化空间。拓扑优化作为一种通过计算优化模型传力质量分配的方法被学者关注。大中型结构件在拓扑优化后其结果不规则, 主要依赖于增材制造技术加工。而现有增材加工技术虽然已有成熟应用, 但受到尺寸等限制, 无法稳定大批量生产。因此本文提出一种基于创成式优化构建方案模型, 通过建立评价模型进行筛选, 再对模型导向式重构, 使之可以通过传统机加工技术生产的轻量化设计方法。以吊柱为案例对其进行优化设计, 通过仿真计算, 最终得到相比设计对象相比重量下降 73.7%, 强度提高 12%的优化设计模型。在保证结构强度的同时实现了轻量化的设计目的。论文结果为其他大中型构件轻量化设计提供了理论参考。

关键词: 轻量化; 拓扑优化; 重构设计; 大中型构件; 构件加工

# 基于质量距熵的复杂装备健康状态识别技术研究

张锐, 龙东腾

(中国航天标准化研究所, 北京 100071)

摘要: 针对复杂装备工况复杂, 难以直接从监测信号判断健康状态的问题, 综合利用希尔伯特黄变换 (HHT) 技术方法和信息熵原理, 提出了基于质量距熵的复杂装备工况识别方法, 并利用装备在不同状态下的试验数据进行了方法验证。基于装备多部位、多信道振动信号测点数据进行了健康状态划分, 结果表明该方法可将不同健康状态数据样本有效划分, 达到健康状态评估和工况识别的效果, 可为装备精细化使用与保障提供支撑。

关键词: 工况识别; 信息熵; 健康评估

## 改进的 Gray 三相物态方程

吴明泽, 张庆明, 钟贤哲

(北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京, 100081)

摘要: 基于 Gray 三相物态方程, 对其相关物理表述项进行了改进, 包含液相金属熵函数的精细修正、零温方程的分段描述以及气相方程的修正。改进后的物态方程能更好预测铝在冲击压缩以及等熵卸载过程中的热力学参数变化。并且, 验证了该物态方程对气相铝热力学描述的有效性。

关键词: 三相物态方程; 熵函数; 零温方程; 冲击压缩; 等熵卸载

## 基于统一模型的航天环境试验过程管控系统

王佳毅<sup>1</sup>, 牟全臣<sup>2</sup>, 冯国松<sup>3</sup>, 周连林<sup>2</sup>, 韩旭<sup>1</sup>, 李子瑞<sup>1</sup>

(1. 河北工业大学, 天津 300401;

2. 苏州数设科技有限公司, 苏州 215011;

3. 北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

摘要: 为推动航天器环境试验由多系统分离模式向跨网络/跨协议/跨粒度的端侧软件集成性试验管理系统转型, 针对航天器试验系统中存在的多部门、多模块、多源异构数据共享困难、不统一等问题, 提出基于统一模型的方法对其进行处理。该方法建立以树形层次结构为表示形式的同源表征模型, 针对航天器环境试验全要素、多业务、全流程的应用特点, 对系统各模块进行模型定义, 基于定义的模型设计系统架构并进行开发, 最终实现统一建模的航天环境试验过程管控系统。

关键词: 航天器; 同源表征; 多源异构; 统一模型; 试验系统

## 星载光纤陀螺模糊两级温度控制策略

常凯锋, 李运泽

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191)

摘要: 针对三轴一体化星载光纤陀螺仪的输出精度易受温度变化影响而降低的问题, 提出了一种模糊两级温度控制策略, 并通过数值研究评估了其控制效果。结果表明, 该控制策略可以维持光纤线圈温度的高度稳定, 从根本上改善光纤陀螺仪的温度动态特性, 有利于进一步提高三轴一体化星载光纤陀螺仪在开机和在恶劣热环境中长期运行时的输出精度。

关键词: 热管理; 光纤陀螺仪; 温度控制; 卫星

## 基于热图像的软件失效预测

龚屹昂<sup>1,2</sup>, 艾骏<sup>1,2,\*</sup>, 陆民燕<sup>1,2</sup>, 孔士溢<sup>1,2</sup>

(1. 北京航空航天大学 可靠性与系统工程学院, 北京 100191;

2. 北京航空航天大学 可靠性与环境工程技术重点实验室, 北京 100191)

摘要: 软件失效预测是当前软件可靠性研究领域中的重要问题。软件失效预测是指在软件运行过程中对软件的运行状态进行实时监控, 从而预测未来是否会发生失效。而软件失效预测有几个关键的挑战, 其中包括复杂的数据结构、较高的监测成本以及侵入性监测给系统带来的潜在风险。本文提出了 FPbTI 方法, 使用从硬件外部拍摄的热图像来预测软件失效, 该方法数据结构简单、且采用非侵入式方法进行监控, 解决了上述关键问题。该方法提出了一种灵活的数据处理方法, 并构建了一个卷积神经网络模型用于实现失效预测。此外, 还设计了相应的实验系统来验证该方法的有效性。实验结果表明, 该方法实现了软件失效预测的目标, 在 Cassandra 软件对象上能够实现 95.6% 的预测准确率。

关键词: 软件失效预测; 热图像; 卷积神经网络

## 电子束作用下空间介质材料表面带电建立过程研究

黄昆, 杨雄, 邹方正, 连汝慧, 宋佰鹏\*, 张冠军\*

(西安交通大学 电气工程学院, 西安 710049)

摘要: 表面充放电效应严重威胁航天器在轨运行可靠性, 研究空间介质材料表面带电建立的过程有利于加深对充放电和微放电的机理认识, 为材料选型等提供依据。本文基于自洽电子输运模型和介质表面带电测试平台, 通过数值模拟和实验测试研究了不同电子束能量下聚酰亚胺的表面带电建立过程, 分析了不同参量的时域演变规律。研究发现, 电子束能量对于介质充电过程稳态具有显著影响, 而对于稳态时间几乎没有影响; 电子束束流增大对于充电过程稳态几乎没有影响, 而显著减少到达稳态时间。实验结果与仿真结果呈现较高一致性。

关键词: 航天器介质; 表面充放电效应; 电子输运模型; 表面带电特性

# 环境实验室自动测试系统内存泄漏的处理

马浩原, 常 猛, 武宇婧, 贾玉鑫, 张美玉, 姜玲玲

(北京东方计量测试研究所, 北京 100029)

摘要: 内存泄漏 (Memory Leak) 是指程序中已动态分配的堆内存由于某种原因未释放或无法释放, 造成系统内存的浪费, 导致程序运行速度减慢甚至系统崩溃等严重后果。内存泄漏缺陷具有隐蔽性、积累性的特征, 比其他内存非法访问错误更难检测。因为内存泄漏的产生原因是内存块未被释放, 属于遗漏型缺陷而不是过错型缺陷。此外, 内存泄漏通常不会直接产生可观察的错误症状, 而是逐渐积累, 降低系统整体性能, 极端的情况下可能使系统崩溃。随着计算机应用需求的日益增加, 应用程序的设计与开发也相应的日趋复杂, 开发人员在程序实现的过程中处理的变量也大量增加, 如何有效进行内存分配和释放, 防止内存泄漏的问题变得越来越突出。例如服务器应用软件, 需要长时间的运行, 不断的处理由客户端发来的请求, 如果没有有效的内存管理, 每处理一次请求信息就有一定的内存泄漏。这样不仅影响到服务器的性能, 还可能造成整个系统的崩溃。因此, 环境实验室自动测试系统内存管理成为软件设计开发人员在设计中考虑的主要方面之一。

关键词: LABVIEW; 环境与可靠性; 内存泄漏; 实验室

# 浅谈出口电子设备环境适应性设计

马浩原<sup>1</sup>, 罗一丹<sup>2</sup>, 杨雅茹<sup>3</sup>, 郎昊<sup>1</sup>, 武宇婧<sup>1</sup>, 贾玉鑫<sup>1</sup>, 姜玲玲<sup>1</sup>

(1. 北京东方计量测试研究所, 北京 100029;

2. 中国长城工业集团有限公司, 北京 100054;

3. 解放军总医院京北医疗区, 北京 100089)

摘要: 产品的工作性能受环境、工艺和加工材质等多重因素的影响, 环境是设备可靠性设计和分析的重要因子之一。出口的宇航、武器类电子设备存在运输时间长, 贮存环境较为恶劣、使用环境不受控等问题, 遇到严酷的环境条件 (包括气候、机械、电磁等) 会影响设备本身的特性, 严重情况会损坏设备的效能、甚至失效, 设备的环境适应性问题就显得格外重要。本文介绍了出口电子设备所面临的环境条件, 分析了环境适应性设计步骤, 结合设计经验, 讨论了具体的环境适应性设计措施, 包括温度控制措施、防振抗冲击措施、电磁防护措施以及三防措施等。

关键词: 电子设备; 环境适应性设计; 控制措施

# 卷积神经网络模型训练集扰动与其鲁棒性的关系研究

吴自力<sup>1</sup>, 艾骏<sup>1,\*</sup>, 陆民燕<sup>1</sup>, 王洁<sup>1</sup>, 严亮<sup>2</sup>

(1. 北京航空航天大学 可靠性与系统工程学院 可靠性与环境工程技术重点实验室, 北京, 100191;

2. 北京高质系统科技有限公司, 北京, 100086)

**摘要:** 卷积神经网络 (CNN) 模型在图像处理中表现良好, 广泛被用于人脸识别、自动驾驶等领域。但 CNN 模型很容易受到扰动的影响, 导致其失效。提高 CNN 模型抗扰动能力的一种方法是向训练集中添加扰动样本。本文给出了包括数据集构建、模型重训练和鲁棒性度量的方法。本文对 PGD 对抗训练和 CNN 模型鲁棒性之间的关系进行了实证研究, 包括扰动程度、比例和训练集的样本特征。结果表明, CNN 模型鲁棒性与神经网络结构有关, 并随扰动程度和比例的组合呈规律性变化, 在训练集中扰动具有某种特征的图像可以提高 CNN 模型对具有该特征的图像的识别能力, 由此可得对 CNN 模型进行场景适应性训练可以提高其鲁棒性。

**关键词:** 卷积神经网络; 鲁棒性; 训练集对抗扰动; 图像特征

# 快中子辐照对 CMOS 图像传感器在石蜡屏蔽下的暗场特性影响

张翔<sup>1</sup>, 赵志明<sup>1</sup>, 龚凯翔<sup>1</sup>, 于格<sup>1</sup>, 叶哲霄<sup>1</sup>, 马林东<sup>2</sup>, 柴艳<sup>1</sup>, 牛睿<sup>3</sup>

(1. 上海宇航系统工程研究所, 上海 201100;

2. 上海精密计量测试研究所, 上海 201100;

3. 上海航天控制技术研究所, 上海 201100)

**摘要:** 随着航天事业的发展, 传统的太阳翼和蓄电池的供电方案已无法满足深空探测、高功率载荷等任务的能源需求, 空间反应堆的应用是一种必然的选择。与传统的供电方案不同, 空间反应堆在任务期间会产生大量的中子和伽马, 这些中性粒子的穿透能力远高于电子、质子等带电粒子, 这将导致传统辐射防护手段的屏蔽能力不足。所以, 需要对屏蔽材料的屏蔽特性开展研究。本文基于位移损伤因子理论, 以 CMOS 图像传感器的暗电流、固定模式噪声作为敏感参数, 通过石蜡屏蔽和无屏蔽的对照组, 研究石蜡对快中子的屏蔽效能, 并通过仿真验证。试验结果表明, 4cm 石蜡可以屏蔽 30%左右的 2.5MeV 快中子, 具有一定的应用价值。

**关键词:** 快中子; 石蜡; CMOS 图像传感器; 暗电流; 固定模式噪声

# 空间薄膜可展开机构运动精度可靠性分析

尹大勇<sup>1</sup>, 胡明<sup>2\*</sup>, 孟少华<sup>1</sup>, 高云<sup>2</sup>, 吴梅<sup>2</sup>

(1. 北京卫星环境工程研究所, 北京 100094;

2. 浙江理工大学, 杭州 310018)

**摘要:** 空间薄膜可展开机构是薄膜航天器的重要组成部分, 在火箭运载时呈折叠状态, 在轨工作后实现展开运动, 带动薄膜展开至相应的工作型面并锁定。本文针对空间薄膜可展开机构, 建立其运动精度可靠性理论模型, 基于 ADAMS 仿真平台建立考虑杆长误差的参数化虚拟样机模型。采用蒙特卡洛方法进行运动精度可靠性的数值模拟试验, 求解其运动精度可靠度, 为空间薄膜可展开机构的优化设计提供依据。

**关键词:** 空间薄膜可展开机构; 构型设计; 可靠性建模; 运动精度可靠性

# 大型构架天线抗低频载荷试验验证方法研究

邓明乐<sup>1\*</sup>, 王辉<sup>2</sup>, 周江<sup>1</sup>

(1. 中国空间技术研究院 通信与导航卫星总体部, 北京 100094;

2. 中国空间技术研究院 西安分院, 西安 710100)

**摘要:** 随着通信载荷技术的不断发展, 大型天线结构在航天器上逐渐被广泛使用。以大型构架天线结构为例, 这类结构由于尺寸较大, 即使是在未展开的情况下也会由于其特殊的收纳方式而具有低频振动特性 (一般小于 5Hz)。传统的大型通信卫星整星力学试验条件只对整星结构在 5~100Hz 的频段进行考核, 在该环节难以实现对星上构架天线部分在低频段的考核。但是考虑到实际主动段飞行过程中客观存在的低频载荷, 为了构架天线结构的安全, 依旧需要根据已有的信息开展安全评估, 确保构架反射器在全频段内 (0~100Hz) 均能满足考核要求。本文以某卫星型号的大口径构架式天线为例, 展开了对这类天线结构抗低频载荷的试验验证方法的研究。

**关键词:** 航天器; 大型构架天线; 主动段飞行; 低频载荷; 试验验证

# 基于分布式声传感器的航天器在轨碰撞及泄漏定位方法研究

慕磊, 闫荣鑫, 孙立臣, 欧道宇

(北京卫星环境工程研究所, 北京, 100094)

**摘要:** 随着人类航天活动的日益频繁, 空间碎片数量急剧增加, 在轨航天器遭受空间碎片等碰撞发生泄漏的可能性与日剧增。对航天器进行在轨碰撞与泄漏监测, 准确判定碰撞与泄漏位置, 及时采取有效措施, 是保障航天员生命安全和航天器正常运行的有效措施。本文提出一种基于分布式声传感器的航天器在轨碰撞及泄漏定位方法, 通过声传感器感知航天器结构碰撞及泄漏所产生的结构声波, 利用门限电平定位和互相关强度谱定位实现对碰撞及泄漏点的精确定位。试验结果表明, 该方法可准确判断  $1 \times 10^{-3} \text{kg} \cdot \text{m/s}$  的碰撞和直径 1mm 以上漏孔泄漏, 碰撞定位相对误差小于 2%, 泄漏定位相对误差小于 5%。2020 年 5 月, 搭载新一代载人飞船试验船开展了我国首次在轨泄漏碰撞定位试验, 取得圆满成功, 该技术可为我国载人航天器在轨碰撞及泄漏检测提供技术支撑。

**关键词:** 声传感器; 载人航天器; 泄漏定位; 碰撞定位

## 通信卫星星箭耦合分析及应用研究进展

尹家聪<sup>1</sup>, 谢伟华<sup>1</sup>, 周江<sup>1</sup>, 姜人伟<sup>2</sup>, 邓明乐<sup>1</sup>, 李正举<sup>1</sup>,

(1. 中国空间技术研究院 通信与导航卫星总体部, 北京 100094;

2. 北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

**摘要:** 本文简要回顾了通信卫星领域近年来在星箭耦合分析工作方面取得的一些研究进展: 包括二次缩聚方法、液体晃动对星箭耦合分析结果的影响, 总结了星箭耦合分析中存在的分析不准、缺乏敏感度分析的问题; 最后, 通过国内外星箭耦合分析的应用对比, 对后续的星箭耦合分析工作提出了若干发展建议。

**关键词:** 通信卫星; 星箭耦合分析; 液体晃动; 研究进展

## 转动避让式锁紧释放机构设计及验证

刘卫, 牛向相, 李林

(北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094)

**摘要:** 针对卫星有效载荷舱的抗力学环境及转动工作要求, 提出了马蹄形压紧滑块承载以及双层结构抗剪方法, 设计了一种转动避让式锁紧释放机构, 承载力大, 锁紧可靠, 并且解锁后可为载荷舱留出充足的转动避让空隙。进而给出了预紧力分析及设计过程, 开展了轴向抗拉及横向抗剪试验, 验证了方案设计的合理可行, 有效解决了 2 吨载荷舱经受严酷力学环境后转动工作的技术问题, 可适用于同类转动式有效载荷的抗力学环境锁紧释放任务。

**关键词:** 锁紧释放; 转动避让; 预紧力; 有效载荷; 空隙

# 国外激光通信卫星及抗微振动设计进展

叶 桑, 尹家聪, 张金辉, 谢伟华, 周 江

(中国空间技术研究院 通信与导航卫星总体部, 北京, 100094)

**摘要:** 与微波通信相比, 激光通信具有传输速率快、容量大、抗干扰性能强、保密性高、终端体积小、功耗低等优点, 有望变革未来空间通信技术发展。然而, 由于激光束散角窄, 激光通信对卫星平台微振动环境的要求很高。国外空间激光通信技术的研究开始较早, 经过多年的发展, 已逐步进入到工程实用阶段。本文首先简要概述了国内外激光通信技术的发展, 然后介绍了国外典型激光通信终端及其设计指标, 最后分析了国外激光通信卫星的抗微振动设计策略并介绍了四条平台微振动谱线, 为我国相关技术发展提供参考。

**关键词:** 激光通信卫星; 激光通信终端; 微振动试验; 微振动分析; 平台振动谱

# 机械臂关节用调温热沉系统研制与验证

王亚龙<sup>1,2</sup>, 杨居翰<sup>1,2</sup>, 李 辉<sup>3</sup>, 闫 格<sup>4</sup>

(1. 北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094;

2. 空间热控技术北京市重点实验室, 北京 100094;

3. 北京理工大学 机电学院 智能机器人研究所, 北京 100081;

4. 兰州空间技术物理研究所, 兰州 730000)

**摘要:** 为满足大型空间机械臂关节地面可靠性试验验证提供真空高低温环境, 研制成了一套关节力矩加载机构的真空高低温环境试验验证系统。通过对机械臂关节的传动部件与控制性能进行测试与验证, 以此对机械臂整臂的性能指标进行论证与评估。该设备具有两大特点: 加载装置可对两部关节进行分时加载, 最大输出力矩可达 2500Nm, 为我国已建成的最大加载力矩空间环境测试系统; 真空环境模拟系统采用液氮/气氮调温热沉, 解决传统红外模拟方法适应性差的问题, 可以满足关节在不同真空高低温环境下复杂试验需求。本文介绍了该试验设备的技术指标、系统组成、研制特点等, 顺利完成了某型号末端关节热真空试验和热平衡试验, 满足了大型空间机械臂在真空环境下温度控制, 力矩加载和速度加载的要求。该系统的顺利应用, 为推进我国大型空间机械臂关节动态性能测试打下了坚实的基础。

**关键词:** 空间机械臂; 关节; 空间环境模拟; 动态性能测试

## 行波声场高声强声波传播特性研究

晏廷飞<sup>1\*</sup>, 武耀<sup>1</sup>, 刘闯<sup>1</sup>, 郑玲<sup>2</sup>

(1. 北京环境工程研究所, 北京 100029;

2. 重庆大学 机械传动国家重点实验室, 重庆 400044)

摘要: 针对有限振幅声波在管内传播的非线性问题, 本文基于 Comsol Mutiphysics 多物理场仿真平台, 通过推导三维 Westervelt 非线性声波方程, 将频域输入条件转化为时域输入条件, 建立了三维大振幅声波在行波管中传播的时域有限差分 (FDTD) 数值分析模型。研究了单频、双频在行波管中的传播规律, 结果表明在单频输入下产生谐波滋生的非线性特性; 在双频输入下, 和频波始终占据所有谐波中的最大值。基于时域有限差分法的三维行波管数值模型能够为行波管中的高声强场分布预测与试验控制提供了分析手段。

关键词: 行波管; 非线性; 有限振幅波; 时域有限差分法; COMSOL Multiphysics; 谐波

## 电子产品多因素应力加速试验建模方法研究

常猛<sup>1</sup>, 李铁骊<sup>2</sup>, 贾军伟<sup>1</sup>, 武宇婧<sup>1</sup>, 郎昊<sup>1</sup>, 金光远<sup>1</sup>, 于海峰<sup>1</sup>, 张美玉<sup>1</sup>

(1. 北京东方计量测试研究所, 北京 100086;

2. 北京空间科技信息研究所, 北京 100086)

摘要: 加速试验将产品置于比使用环境高的应力环境下进行试验, 使产品可以过早的出现退化或失效, 进而对产品的加速试验数据进行收集。本文针对电子产品多因素环境下的性能变化情况开展研究, 通过对比国内外发展, 以军用实验室用加速度传感器为切入点, 提出一种多因素加速试验模型建立方法, 为其他电子产品多因素应力下加速试验模型的建立提供参考。

关键词: 电子产品; 多因素; 加速试验模型

## 典型卫星产品单轴、多轴随机振动试验振动效应对比研究

刘沫<sup>1</sup>, 邹纫秋<sup>2</sup>, 冯咬齐<sup>1</sup>, 杨江<sup>1</sup>, 徐在峰<sup>1</sup>, 刘同辉<sup>1</sup>

(1. 北京卫星环境工程研究所, 北京 100094;

2. 北京航天长征飞行器研究所, 北京 100076)

摘要: 本文通过选取典型卫星产品用试验的方法从振动响应的角度对单/多轴随机振动的振动效应和不同条件设置下的多轴随机振动的振动效应进行了比较研究。在比较研究完成后, 本文对典型卫星产品单/多轴随机振动的振动效应和不同条件设置下多轴随机振动的振动效应存在的差异进行了总结并得出了相应结论。

关键词: 卫星产品; 多轴; 单轴; 随机; 振动; 效应; 对比

## 航天器在轨泄漏声场特征分析

孙伟<sup>1</sup>, 王莉娜<sup>1</sup>, 任国华<sup>1</sup>, 孙立臣<sup>1</sup>, 姜利祥<sup>1,2</sup>, 闫荣鑫<sup>1,2</sup>, 孙继鹏<sup>1,2</sup>

(1. 北京卫星环境工程研究所, 北京 100094;

2. 可靠性与环境工程技术重点实验室, 北京 100094)

摘要: 对有人值守的在轨空间站系统而言, 泄漏会造成舱内气压的降低, 严重时危及航天员的生命安全, 亟需对泄漏漏孔进行快速定位。基于此, 本文建立漏孔泄漏流场和声场仿真模型, 开展大气向真空泄漏工况下漏孔孔径对泄漏声场特征影响分析。结果表明随着漏孔孔径的增大, 泄漏流场速度、最大湍动能会随之增大, 但最大湍耗散会随之减小, 且光滑孔漏孔出口处流体速度略大于粗糙孔; 低压侧偶极子声源声压级分布比较均匀; 四极子声源声压级分布呈向外辐射状。本文研究可为后续泄漏定位提供技术支持。

关键词: 航天器; 泄漏声场; 特征分析; 四极子; 偶极子

## 极高温外场试验多点动态热流测量系统研究

王青青<sup>1</sup>, 武宇婧<sup>1</sup>, 李沂乘<sup>2</sup>, 董学江<sup>1</sup>, 郎昊<sup>1</sup>, 郝剑昆<sup>1</sup>, 张韧<sup>1</sup>, 李耀<sup>1</sup>

(1. 北京东方计量测试研究所, 北京 100086;

2. 中国空间技术研究院, 北京 100094)

摘要: 恶劣环境下温度的监控与测试需求在工业生产、国防科工、航空航天等诸多领域中广泛存在, 传统的单点式高温温度测量方式 (尤其是 2300°C 高温以上) 难以满足此类极端恶劣环境中温度场和热流场的测量分析。本文基于无线组网的分布测量方式, 研制一套用于恶劣条件下极高温度和大热流参数测量系统, 可实现不同温度传感器的测量和热流参数的高精度高速采集及智能化分析, 并实现数据的实时存储和无线传输, 温度测试范围覆盖 (0~2350) °C, 温度响应时间达到  $\mu\text{s}$  量级、热流密度达到 20MW/m<sup>2</sup>。

关键词: 高温; 热流测量; 无线组网; 分布式测量

## 一种便于溯源的航天用超声探伤仪检定装置研制

武宇婧<sup>1</sup>, 罗琦<sup>2</sup>, 郭英辉<sup>3</sup>, 王青青<sup>1</sup>, 董学江<sup>1</sup>, 张韧<sup>1</sup>, 魏巍<sup>1</sup>

(1. 北京东方计量测试研究所, 北京 100086;

2. 宁波市民用建筑设计研究院有限公司, 浙江 315000;

3. 北京航天河科技发展有限公司, 北京 100086)

摘要: 超声探伤仪广泛应用于航天器无损检测领域, 其性能优劣直接决定检测结果的可靠性, 会直接影响航天器的安全。本文针对超声探伤仪的计量特性, 提出了便于溯源的超声探伤仪检定装置研制方法。校准装置主控电路、标准衰减器、输出保护电路、显示屏、按键等部分组成, 能够实现 A 型脉冲反射式超声探伤仪以及多通道超声探伤仪电性能校准, 同时创新性的设计了校准溯源工作模式, 便于计量检定机构在没有被测超声探伤仪的情况下实现超声探伤仪检定装置的溯源。

关键词: 超声探伤仪; 检定装置; 溯源

# 基于 CSST 星冕仪制冷机的非线性振动建模分析

张宏<sup>1,2,3</sup>, 刘宝禄<sup>1,2</sup>, 许明明<sup>1,2</sup>, 窦江培<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所, 南京 210042;

2. 中国科学院天文光学技术重点实验室(南京天文光学技术研究所, 南京 210042;

3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 中国空间站巡天望远镜 (CSST) 中的星冕仪模块能够实现系外行星直接成像。然而在轨运行期间其运动模块会产生微振动扰动, 导致星冕仪的图像质量下降。在本研究中, 我们针对航天载荷常用隔振系统进行了非线性建模分析, 针对粘弹性材料的 Kelvin-Voigt 模型进行了非线性扩展, 通过三阶谐波平衡法对本构方程求解。以微分形式建立了非线性 Kelvin-Voigt 模型的振动运动方程, 这对类似的设计假设以及工程应用提供了理论依据; 模型分析结果表明, 扩展后的非线性实体模型有效补充了非线性弹性的微振动隔振系统设计理论, 有助于提高工程设计的精度。

**关键词:** 星冕仪; CSST; 非线性振动; Kelvin-Voigt 模型

# 卫星低气压放电与真空微放电安全性设计分析

郭秉毅<sup>1</sup>, 李阳<sup>2</sup>

(1. 北京控制工程研究所, 北京 100190 ;

2. 北京工商大学 数学与统计学院, 北京 100048)

**摘要:** 卫星放电因发射过程客观环境因素诱发, 危险源无法消除, 风险无法避免, 采用一般的安全性设计方法开展卫星放电分析过程冗余繁琐, 针对性不强。本文提出一种故障致因的安全性设计方法和流程, 用以开展卫星放电安全性分析。实践案例显示采用安全性设计思路开展卫星低气压放电和真空微放电分析兼顾技术和管理层面, 实用全面。系统安全工程师还可以参照上述分析过程, 结合卫星电子部件的具体情况, 深入分析每一种放电防护设计的安全性要素和风险, 制定有效措施, 防范卫星低气压放电和真空微放电产生的风险。

**关键词:** 卫星; 低气压放电; 真空微放电; 安全性设计

# 空间制冷控制器在轨变频的设计与实现

田园, 谢妮慧, 史翠红, 刘成  
(北京空间机电研究所, 北京 100094)

摘要: 随着大功率斯特林空间制冷机的出现, 空间制冷控制器在轨运行期间, 若按照传统模式制冷机的驱动电压一直保持固定频率不变, 将无法满足斯特林制冷机在复杂工况下的制冷需求, 因此, 为解决空间制冷控制器在轨期间, 实时变换驱动电压频率的问题, 文章提出一种基于自然采样法的变频策略, 通过查表法和四分之一周期正弦波复用, 生成无符号的正弦调制波, 通过并行进程同步生成无符号的三角载波, 二者通过交叉比较, 生成按照正弦规律变化的占空比, 基于冲量等效原理, 经过滤波得到 SPWM 波。采用迭代除法的方式, 实现指令模式下的变频设计, 通过状态机交替转移的方法, 实现自动模式下的变频设计, 两种模式的变频精度均为 0.1Hz, 该方案的可行性通过了仿真和系统实验验证, 并通过了红外光学相机制冷控制器的在轨验证。

关键词: 斯特林制冷机; 空间制冷; 在轨变频; 迭代除法; 状态机

# 基于经验模型的 COTS 器件单粒子风险评估方法研究

刘佳强<sup>1</sup>, 张振龙<sup>1,2\*</sup>, 赵班池<sup>1</sup>, 刘红民<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 国家空间科学中心, 北京 100190;

2. 中国科学院大学 天文与空间科学学院, 北京 101408)

摘要: 随着航天任务不断发展, 低成本、高性能、短研发周期的商用现货(COTS)器件替代传统的宇航级器件已逐渐成为当前趋势, 但 COTS 器件的单粒子风险问题是制约其在空间应用的关键因素。基于工程任务中积累的试验数据, 分析了元器件单粒子风险随器件主要参数的关联性, 思考了基于经验模型的元器件单粒子风险评估方法, 为空间应用中的器件选型、防护设计及后续开展针对性辐照试验提供支撑。

关键词: 空间环境; COTS 器件; 单粒子效应; 抗辐射保证

## KM3 行星大气环境模拟装置研制

张振龙<sup>1,2</sup>, 彭晓东<sup>1</sup>, 万任新<sup>1,2</sup>, 沈旭晨<sup>1</sup>, 赵班池<sup>1</sup>, 刘佳强<sup>1</sup>, 刘媛<sup>1</sup>, 李志宏<sup>1</sup>, 高辉<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 国家空间科学中心, 北京 100190;

2. 中国科学院大学, 北京 101408)

**摘要:** 深空探测是我国航天计划的重要组成部分, 目前已实现登陆月球和火星, 未来还计划建设月球基地, 探测小行星、木星及其卫星、金星等。与近地环境相比, 深空环境包含很多新的、不同的要素, 例如行星表面的大气成分、压力, 以及温度、风场、磁场、沙尘等。为了适应或探测这些环境要素, 深空探测器在设计、研制, 以及返回数据的处理上, 需要有相应的地面模拟试验设备和试验数据支持。本文介绍了中国科学院国家空间科学中心近期新研制的 KM3 行星大气环境模拟装置。该装置试验舱内的有效空间为  $\phi 3.6\text{m} \times 10\text{m}$ , 可模拟包含 3 种及以上成分的混合气体, 压力范围从 10-5Pa 至 0.2Mpa 可调, 其热沉的温控范围  $-170^\circ\text{C} \sim +100^\circ\text{C}$ 。试验舱内配有一个可装卸的低气压风洞, 用于模拟行星表面的大气风场, 开展相关的试验研究。

**关键词:** 环境模拟; 行星; 大气; 风洞

## 不同温度条件下 SnPbAg 焊点拉伸性能变化及失效路径分析

万任新<sup>1,2</sup>, 朱永鑫<sup>1</sup>, 张振龙<sup>1,2</sup>, 翁正<sup>1</sup>, 叶帅<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 国家空间科学中心, 北京 100190;

2. 中国科学院大学, 北京 101499)

**摘要:** 随着深空探测的进行, 极低温及大温变等环境对航天器材料提出了更高的要求, 识别相关材料极端环境下的性能变化规律是对其开展进一步应用的前提。本文以航天器常用锡铅焊点为研究对象, 在室温下研究了 Cu/SnPbAg/Cu 焊点的组织形貌, 对不同温度条件下 (室温、 $-50^\circ\text{C}$ 、 $-100^\circ\text{C}$ 、 $-150^\circ\text{C}$ 、 $-196^\circ\text{C}$ ) 的拉伸性能进行了测试, 并对相应的断口形貌展开分析。结果表明, 室温条件下, Cu/SnPbAg/Cu 焊点组织以锡基体上弥散分布的 Ag-Sn 化合物以及富铅相为主, 界面处分布着连续扇贝状的  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  金属间化合物。随着温度的降低, Cu/SnPbAg/Cu 焊点的拉伸强度呈现递增趋势, 焊点脆性明显增加。室温至  $-100^\circ\text{C}$  条件下, 断口呈现出韧性断裂形貌。 $-150^\circ\text{C}$  及  $-196^\circ\text{C}$  下, 断口呈现出脆性断裂形貌, 相应的失效路径从焊料基体向焊料与铜基体界面处偏移。

**关键词:** SnPbAg 焊点; 极低温; 拉伸性能; 断口形貌

# 航天器微振动扰源模拟系统设计

冯国松<sup>1</sup>, 杨江<sup>1</sup>, 刘闯<sup>1</sup>, 郑荣慧<sup>2</sup>

(1. 北京卫星环境工程研究所, 北京 100094;

2. 南京航空航天大学, 南京 210016)

**摘要:** 微振动试验作为高精度对地观测卫星设计指标评估的有效手段广泛得到应用, 采用星上真实载荷扰源进行模拟, 对型号研制进度流程和成本均有极高的要求。本文构建了一种六自由度正弦加随机扰源模拟系统, 设计了自支撑惯性激振器及适配平台, 基于 PXIe 硬件及 LabVIEW 搭建了测控系统, 完成控制算法编制, 最后, 结合 ANSYS 软件给出了一个仿真控制试验算例, 验证了多维扰源力闭环控制算法的有效性, 满足航天器扰源模拟的需求。

**关键词:** 微振动; 扰源模拟; 惯性激振器

# 基于峰值提取的时变结构模态自动辨识方法

马庆港, 刘闯, 冯国松, 杨江, 张肇元, 于毅辉

(北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

**摘要:** 针对航天器结构时变结构模态参数在线辨识过程中存在大量虚假结果, 导致辨识结果需要递推验证的问题, 在工作模态分析中将基于深度学习目标检测的峰值提取应用到虚假结果筛选, 通过两步提取峰值频率为模态验证提供依据。首先根据振动响应瞬时功率谱数据, 通过事先训练的深度学习目标检测模型对其进行特征处理, 进行模态参数在频域的初定位, 进而开展尺度空间峰值提取, 结合多通道信息融合结果有效获取模态密集场景中的时变结构模态参数。通过数值算例对该方法进行验证, 结果表明该方法可有效完成密集模态下时变结构模态参数的递推筛选, 实现模态参数的自动辨识。

**关键词:** 模态分析; 时变系统; 深度学习; 目标检测

# 大型航天器微振动地面试验测试与分析

杨江, 刘闯, 李新明, 岳志勇, 冯国松, 杨光

(北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

**摘要:** 随着航天器技术的发展, 载荷对卫星平台的工作扰动和指向精度的要求越来越高。为了确保大型遥感和空间望远镜能顺利完成任务和科学目标, 研制过程中需要开展微振动地面试验验证。面向大型航天器的微振动验证需求, 系统分析了微振动的产生和影响机制, 梳理了和微振动有关的在轨自由边界、微振动扰源、传递路径、光轴成像抖动四个地面验证关键环节, 介绍了面向大型航天器微振动地面验证的在轨自由边界模拟、复杂微振动扰源模拟、传递路径分析方法、光轴抖动测量等新型微振动地面试验技术。大型航天器微振动地面试验系统能模拟航天器在轨边界条件, 实现扰源输出力和力矩模拟, 准确获取传递路径规律, 建立微振动与光轴抖动之间的关联。保证了微振动试验数据获取充分有效, 为航天器系统级的微振动指标验证及优化提供了可靠保障。

**关键词:** 大型航天器; 微振动地面试验; 试验系统; 测试方法

## 卫星微振动试验双级重力卸载装置研制

张文兵, 刘 闯, 冯国松, 孙 通, 张肇元

(北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

摘要: 微振动试验要求模拟卫星在轨工作状态, 对卫星平台和相机分别重力卸载模拟卫星在轨自由运动模式, 考核卫星微振动抑制措施的有效性。微振动试验双级重力卸载装置采用顶部悬挂和底部弹性支撑方式, 国内首次成功应用于某型号正样星微振动试验, 实现悬吊频率低于 1Hz, 支撑频率低于 2.5Hz。该型号卫星平台和相机连接的阻尼隔振装置分离间隙仅 1.5mm, 相机 6 点悬吊受力均衡调节复杂, 成功实现重力卸载后阻尼隔振装置机械解锁和长时工作后的再锁定, 验证了双级重力卸载装置极佳的工作稳定性。

关键词: 卫星; 微振动试验; 双级; 重力卸载

## 仿人五指灵巧手系统的运动控制研究

范军红, 朱云飞

(北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

摘要: 具有多自由度、多感知功能的仿人多指灵巧手, 作为机器人的末端执行机构, 是仿生机器人领域的一个重要研究方向。本文基于自研的灵巧手, 提出了一种基于速度分解的灵巧手指尖力/位置混合控制方法, 提高了该灵巧手的抓取稳定性。

关键词: 仿人五指灵巧手; 力/位置混合控制方法; 抓取稳定性

## CMG 隔振金属橡胶制备工艺改进

张肇元, 杨 江, 薛令博, 刘 闯, 冯国松, 魏 博

(北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

摘要: 随着遥感卫星分辨率等性能指标的逐渐提升, 微振动逐渐成为了影响卫星成像质量的关键问题, 为了解决微振动问题, 一般采取的方法是对星上扰源加装隔振器进行隔振, 从而达到抑制扰源微振动对星上载荷产生影响的目的, 而为了使隔振器的隔振效果达到最佳, 隔振器本身需要同时具备低刚度和高阻尼特性, 金属橡胶隔振器则具备这些的特性, 并且金属橡胶隔振器在真空中不挥发、不惧怕太空辐射环境、耐高低温等优点在在轨中广泛应用, 本文主要介绍的就是金属橡胶隔振器中金属橡胶的一种工艺制作方法, 如何通过特殊工艺方法将金属丝卷成螺旋卷, 再通过拉伸、绕丝、毛坯编制和模压成型等工序制成的金属橡胶产品, 并且通过大量的实测以及试验数据分析, 证明其不光拥有金属低刚度的特性的同时还具备类似橡胶的阻尼性质, 具备提高隔振性能, 并满足现如今型号的指标要求。

关键词: 金属橡胶; 隔振器; 微振动; 扰源隔振

# 基于霉菌试验箱的空间微生物微重力模拟试验装置研究

张美玉<sup>1</sup>, 邹幼秋<sup>2</sup>, 姜玲玲<sup>1</sup>, 武宇婧<sup>1</sup>, 常猛<sup>1</sup>, 于海峰<sup>1</sup>, 张博凯<sup>1</sup>, 张帅<sup>1</sup>

(1. 北京东方计量测试研究所, 北京 100086; 2. 北京航天长征飞行器研究所, 北京 100076)

**摘要:** 载人空间站为航天员长期驻留创造良好环境的同时也为微生物的滋生提供了有利条件, 而滋生的微生物如霉菌会腐蚀和降解空间站的电子设备元器件及各种材料, 导致空间站设备故障、电接触不良、平台失效和密封性下降等风险, 因此建造空间站使用的材料及设备需要选用具有良好耐菌防霉能力的材料。本文针对空间霉菌试验的实际需求, 参考 GJB 150.10A-2009 的霉菌试验条件要求, 给出了基于霉菌试验箱的空间微生物微重力模拟试验装置的设计方案, 并从机械结构设计、回转装置转速控制等方面阐述了研究的重点、技术途径和关键技术。为空间霉菌环境适应性检测提供参考, 积极推动空间材料的质量提升。

**关键词:** 空间环境; 霉菌; 微重力模拟; 试验装置

# 中国巡天空间望远镜光机桁架高精度形变测量方法研究

申旭, 王新萍, 刘世涛, 黄桂平\*

(华北水利水电大学, 郑州 450046)

**摘要:** 中国巡天空间望远镜的发射将极大地促进中国天文界的发展。光机桁架是巡天空间望远镜的内部骨架, 连接多级反射镜, 决定着它们之间的相对位置和姿态, 对望远镜的观测精度有重要影响。针对光机桁架的超高精度形变测量需求, 提出了采用工业摄影测量方式的测量方案。专门研制了直接适用于真空环境的测量相机并对其进行验证。介绍了光机桁架的数据处理方式, 给出构建坐标系的点云选取原则, 完成了光机桁架结构件的形变测试。

**关键词:** 光机桁架, 工业摄影测量, 真空相机, 巡天空间望远镜

# 电路外引线断裂典型案例分析

代超, 胡会能, 霍向东, 孙静, 王全

(航天材料及工艺研究所, 北京 100076)

**摘要:** 本文结合失效分析实际的工作案例, 针对电路安装后外引线断裂的失效案例进行分析。电路环境试验后问题主要集中在焊点开裂, 引线断裂等模式, 造成电路与印制板之间无法形成电连接导致电路功能失效。本文对电路安装后的常见问题进行剖析, 提高电子电路产品的可靠性, 才能提高航天产品的可靠性。

**关键词:** 集成电路; 案例分析

# 一种应用在某飞船垂挂吊索双拉强度试验方法

高征<sup>1</sup>, 冯蕊<sup>1</sup>, 张宝康<sup>1</sup>, 刘宇航<sup>2</sup>, 闫虎义<sup>1</sup>

(1. 北京空间机电研究所, 北京 100094;

2. 湘潭大学, 湘潭 411100)

**摘要:** 文章介绍了某飞船返回舱垂挂吊索双拉强度试验方法。通过模拟垂挂吊索不同角度拉伸中间钢丝绳的承力结构发生断裂, 为某飞船返回舱零部件选材和尺寸包络提供设计依据。文章设计了一种全新安装工装, 对限位套筒进行了仿真分析。利用同批次成熟相似结构进行垂挂吊索不同角度双拉强度试验, 验证了工装设计合理性, 为某飞船返回舱垂挂吊索转垂挂时所受冲击载荷提供数据支持。

**关键词:** 飞船返回舱; 垂挂吊索; 双拉; 强度试验; 钢丝绳; 不同角度

# 热真空试验设备的温度校准方法研究

郎昊<sup>1</sup>, 孙晓全<sup>2</sup>, 武宇婧<sup>1</sup>, 常猛<sup>1</sup>, 王青青<sup>1</sup>, 郝剑昆<sup>1</sup>, 董学江<sup>1</sup>, 张韧<sup>1</sup>

(1. 北京东方计量测试研究所, 北京 100086;

2. 河南省计量测试研究院, 河南 450018)

**摘要:** 热真空试验系统的验收和周检所涉及的性能参数主要包括真空特性和温度特性。目前对于热真空试验系统的计量, 国家、国防、航天等均无可依据的正式标准。本文对热真空试验系统现场检测的参数进行了分析, 结合 JJF1101、GJB5170 及日常热真空试验设备的检测工作, 提出热真空系统的温度特性的计量方法和评价方法。

**关键词:** 热真空; 温度; 计量

# “巴遥一号”卫星双相机热设计及验证

王云彬, 阳明, 韦广朗

(北京空间机电研究所, 北京 100094)

**摘要:** “巴遥一号”卫星为中国整星出口巴基斯坦的第一颗光学遥感卫星, 其上搭载两台全色/多光谱高分辨率相机, 相机主体具有焦距长、分辨率高等特点。光机主体等核心部组件的全寿命周期温度的稳定性和均匀性对相机的成像质量有较大影响。文章结合相机在轨成像需求, 通过热网格法建立了相机热阻网格模型, 详细分析了热控设计的重点和难点, 采用一体化热设计解决双相机电路盒大功率散热问题, 采用直接与间接相结合的控温方式提高了主光学结构的温度稳定性。通过分析相机入轨 4 年后近一个月内的在轨温度变化, 显示镜头的温度波动范围在 0.09 ~ 0.18°C, CCD 的温度波动范围在 0.93 ~ 4.3°C 之间。在轨飞行数据表明, 相机在轨温度稳定, 所有温度均能满足指标要求, 相机热控设计合理正确, 为双相机一体化热控设计提供了设计思路。

**关键词:** 热设计; 遥感相机; 在轨温度; 双相机

## 复合材料层合板中声发射源定位方法

张文熙<sup>1</sup>, 武希忠<sup>2</sup>, 何晶靖\*

(1. 北京航空航天大学 可靠性与环境工程技术重点实验室, 北京 100191;

2. 中国工程物理研究院材料研究所, 江油 621908;

3. 北京航空航天大学 可靠性与环境工程技术重点实验室, 北京 100191)

**摘要:** 声发射检测作为一种无损检测技术, 已被广泛应用于航空航天复合材料结构中的损伤检测。由于各向异性材料中 Lamb 波波速的方向依赖性, 传统的基于飞行时间的损伤定位技术需要获取各向异性板中各个方向的波速信息, 这对工程实际应用提出了极大的挑战。本文提出了一种各向异性板中的声发射源定位的新方法, 无需板的材料参数与各方向的波速作为先验信息。本文利用相关函数确定不同传感器接收到  $S_0$  波的时间, 利用小波变换识别  $A_0$  波的飞行时间。基于两种模式波的飞行时间, 利用几何关系得到声发射源到传感器组的方向和距离以达到损伤定位的目的。通过充分利用接收到的不同模式波的信息, 该方法可以将所需的传感器数量减少到只有三个。研究通过 ABAQUS 有限元分析对所提方法进行了验证。

**关键词:** 声发射源定位; 复合材料; 小波变换; 有限元分析

## 行星表面低气压环境模拟技术与 KM1200 装置改造

赵班池<sup>1</sup>, 张振龙<sup>1,2\*</sup>, 王晓明<sup>1</sup>, 刘佳强<sup>1</sup>, 何青峰<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 国家空间科学中心, 北京 100190;

2. 中国科学院大学, 北京 101408)

**摘要:** 火星是当前深空探测和行星科学的焦点。随着我国火星探测任务的成功, 火星大气与气候演化、火星表层物质组成、火星生命探测已逐渐成为研究热点, 衍生出了低气压环境下材料试验、生物试验、载荷研制等多方面的试验需求, 而地面环境模拟设备是开展相关试验的基础。中国科学院国家空间科学中心基于现有的一台 KM1200 热真空试验设备进行升级改造, 使其能够模拟火星表面大气环境。该设备在原有基础上增加了配气室, 可以配置 3 种及以上成分的混合气体, 气体充入主真空舱室内能够模拟 100Pa 至 1300Pa 的压力范围。设备顶部增加了 X 射线管, 用于模拟火星表面的 X 射线辐照。主真空舱室外增配一套紫外辐照装置, 用于模拟火星表面太阳紫外辐照。

**关键词:** 深空探测; 火星; 大气; 环境模拟

## 星敏感器智能控温策略仿真

习宴澳明, 李运泽

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191)

摘要: 作为高精度的姿态控制设备, 星敏感器在航天器尤其是卫星上的应用十分广泛。然而, 在复杂多变的空间环境下, 星敏感器光学镜头对温度的稳定性要求越来越高, 这对热控技术提出了挑战。本文运用了节点热网络的建模方法, 将星敏感器的传热学模型与控制理论结合起来, 不仅研究了在输入扰动、参数扰动及给定值扰动的情况下星敏感器的瞬态温度变化特性, 而且将专家 PID 智能控温策略运用在星敏感器的主动热控中, 并与传统 PID 控制策略进行了仿真比较分析。研究发现, 专家 PID 智能控温策略具有超调小、恢复稳定时间短、系统反应快等诸多优点, 尤其是在面对轨道外热流周期性扰动的时候优势更加明显。本文的仿真研究结果为星敏感器的热控设计提供了理论依据, 对其他航天器热控技术的研究也具有借鉴作用。

关键词: 星敏感器; 温度控制; 专家 PID; 集总参数法

## 星敏感器热稳定性地面验证技术

孟小迪, 王晓燕\*, 齐静雅, 武延鹏, 王艳宝, 王苗苗

(北京控制工程研究所, 北京市 100190)

摘要: 星敏感器为航天器提供高精度的惯性姿态, 受空间复杂热环境影响, 星敏感器姿态测量结果存在轨道周期的光轴热漂移低频误差。高精度星敏感器需要进行热设计, 减小光轴热漂移的影响。热设计的有效性以及光轴热稳定性需要通过地面真空环境的热稳定试验进行验证。本文提出星敏感器热稳定实验总体方案, 并建立热稳定性试验系统; 依据航天器真空热环境试验规范, 提出星敏感器热稳定试验判据与条件; 针对试验系统误差提出控制方法; 某型星敏感器试验结果表明星敏感器热稳定结果为  $0.114''/^{\circ}\text{C}$ , 验证了热设计的有效性。

关键词: 星敏感器; 光轴热稳定; 真空试验; 低频误差; 热设计

# ZM5600 光学成像质量检测环境模拟装置隔振系统研究

蒋 荻, 王 爽, 刘立杰, 徐阁检

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130000)

摘要: 随着航天器技术的逐步提高, 为了满足更大口径光学载荷在地面的试验、检验需求, 长春光机所于 2013 年计划建设 ZM5600 高精度光学成像质量检测环境模拟装置, 具备大口径空间光学载荷热光学、热平衡、热真空环境试验能力, 及在大气、高真空环境下光学指标检测与标定。本文详细描述了 ZM5600 装置为光学指标检测提出的隔振要求、隔振方案及最终隔振参数的测试方法与结果。该装置采用分离式隔振方案, 仅对容器内的光学平台隔振, 即: 真空容器内的光学平台通过贯穿真空容器底部壁的立柱固定到刚性隔振平台上, 贯穿容器壁处采用柔性或挠性真空密封器件密封, 容器由独立地基支承。该真空环境模拟器的隔振采用的这种隔振方式实现了环境模拟器与测试系统的分离, 能够同时消除地面振动和源自环境模拟器的振动对测试系统的影响, 适用于空间相机光轴水平测试。达到预期指标并为将来建造更大规模的空间环境模拟装置提供有力的理论证明及实践经验。

关键词: 空间环境模拟装置; 隔振系统; 分离式隔振; 光学测试

# ZM5600 光学成像质量检测环境模拟装置温度控制系统研究

王 爽, 蒋 荻, 刘立杰, 王 毓

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130000)

摘要: 随着航天器技术的逐步提高, 为了满足更大口径光学载荷在地面的试验、检验需求, 长春光机所于 2013 年计划建设 ZM5600 高精度光学成像质量检测环境模拟装置并于 2019 年正式竣工。本文详细描述了该装置为检验检测所提出的温度控制要求, 温度控制方法及最终测试方法与结果。该装置在满足真空热试验条件的同时, 采用液氮气氮并联的方式, 可以再在不同的温度控制需求下采用不同的温度控制方式, 并详细的描述了液氮系统与气氮系统运行的原理与方法已满足不同的检测检验需求。该装置满足了光学载荷对于环境温度的地面试验要求, 适用于空间相机光轴水平测试。提高了国内光学遥感器真空环模设备的试验、检验能力, 为新一代更大口径光学载荷环境模拟设施的建筑, 提供了有效的理论依据与有力的可行性证明。

关键词: 空间环境模拟装置; 温度控制系统; 液氮与气氮并联; 光学检测

# 低轨高能质子环境和总剂量效应监测仪研制与测试

唐振宇<sup>1,2</sup>, 李昊<sup>2</sup>, 彭毓川<sup>2</sup>, 彭忠<sup>2</sup>, 刘业楠<sup>2</sup>, 刘庆海<sup>2</sup>, 葛丽丽<sup>2</sup>, 杨勇<sup>1,2</sup>

(1.航天机电产品环境可靠性试验技术北京市重点实验室; 2.北京卫星环境工程研究所: 北京 100094)

**摘要:**近年来随着低轨商业卫星星座系统不断发展和投入使用,低成本 COTS 器件在商业卫星上的广泛使用使得非宇航器件的空间环境效应防护问题引起更大关注。为获得 1000 km 左右轨道高度更丰富的空间环境实测数据,从而更好地指导低成本商业卫星的空间环境效应防护设计,本文开展针对高能质子环境和总剂量效应两个参数原位探测载荷的研制和测试工作。基于功能需求和空间环境模型仿真结果开展低轨高能质子和总剂量效应监测仪系统设计和功能模块划分,采用蒙特卡罗辐射仿真方法设计基于硅半导体望远镜原理的高能质子探测器,选用辐射敏感场效应晶体管传感器(RadFET)器件设计电离辐射总剂量效应探测器。通过开展探测功能地面定标试验,获得载荷达到的探测性能。低轨高能质子环境和总剂量效应监测仪发射入轨后开展了短期测试,经数据分析和与环境模型初步对比,证明载荷在轨工作正常,探测结果合理。载荷后续可长期提供 1000km 轨道高能质子环境和总剂量效应原位探测数据,为完善这一空间的环境认知和航天器空间防护设计提供数据支撑。

**关键词:**低轨空间环境; 高能质子; 电离辐射总剂量; 原位探测载荷

# 低能电子辐照玄武岩纤维辐照损伤效应机理

赵凡丽<sup>1</sup>, 吴宜勇<sup>1,2</sup>, 王豪<sup>2</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 材料科学与工程学院, 哈尔滨 150001;

2. 哈尔滨工业大学 空间环境与物质科学研究院, 哈尔滨 150001)

**摘要:**本文利用 170 keV 电子辐照连续玄武岩纤维,测定玄武岩纤维的单丝拉伸强度、弹性模量以及断裂伸长率的力学性能变化趋势,并利用 SEM、AFM、FTIR、XRD、XPS 以及 Raman 测试手段,研究低能电子作用下玄武岩纤维内的损伤机理。结果表明,拉伸强度在注量为  $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$  达到最大值,其均值可达 2181.8 MPa,增加 19.0%,随着辐照注量继续增加,力学性能下降,最终趋于稳定,均值保持在 1700 ~ 1800 MPa 的范围;弹性模量整体变化趋势不大;断裂伸长率先增加后下降的趋势,其中在辐照注量为  $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$  时,达最大值 2.9%,较原始样品增加了 9.9%。对辐照前后纤维的结构与化学状态分析表明,辐照导致力学性能变化的主要原因在于辐照引起纤维表面浸润剂的脱落和内部硅酸盐结构的变化。

**关键词:**玄武岩纤维; 低能电子辐照; 拉伸性能; 损伤效应

# 空间站维修支持下的可靠性设计方法与实践

夏侨丽, 侯永青, 李伟, 李志海

(北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094)

摘要: 空间站在轨寿命通常超过 10 年, 实施在轨维修是维持空间站长期稳定运行的必要手段。空间站在轨维修过程中系统不停机, 具有维修风险高、地面保障支援困难的特点, 需要通过可靠性设计来保障维修过程中系统的安全。本文总结了空间站可靠性、维修性的工程实践, 论述了在可靠性维修性权衡设计、天地一体化备件保障、可靠性验证与评估方面的技术突破。

关键词: 空间站; 可靠性; 维修性; 备件保障

# 航天器单机产品电磁辐射发射限值设计研究

武南开, 肖琦, 郭世超, 张陈

(北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

摘要: 本文针对航天器单机产品电磁辐射发射限值难以量化设计的难题, 利用偶极子辐射模型, 推导出了邻近设备电磁辐射发射计算公式。在给出的特定算例中, 计算结果与国军标规定的舱外设备限值相比, 100MHz 以上频段趋势一致, 误差小于 3dB。该方法可应用于具体航天器单机产品的电磁辐射发射限值设计, 可根据航天器舱外接收设备的布局、接收频段、接收灵敏度等信息, 对具体的限值进行适当的裁剪, 开展电磁兼容精细化设计。

关键词: 电磁兼容; 辐射发射; 等效辐射源

# 基于金刚石氮-空位色心的微波磁场成像技术

唐雨桐<sup>1</sup>, 叶安<sup>1</sup>, 付鼎元<sup>1</sup>, 李晓林<sup>1</sup>, 张超<sup>2\*</sup>

(1. 华东理工大学 物理学院, 上海 200237;

2. 北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

摘要: 微波单片集成电路有着体积小、重量轻、大量生产成本低、一致性好的优点, 可提高微波毫米波系统集成度和可靠性, 在军用和民用的高科技领域有许多应用, 但芯片测试与失效分析工作迫切地需要开展和加强。利用基于金刚石氮-空位色心的微波磁场成像, 对毫米波微波芯片表面微波磁场成像与矢量重构, 可以采集获得芯片正常工作状态和非正常工作状态的微波磁场成像信息, 发现芯片异常磁场区域, 结合其它探测手段, 可以进行热态参数测试、可靠性评估和故障诊断。随着技术的发展, 基于金刚石氮-空位色心的微波磁场成像技术有望为芯片设计、生产、测试提供可靠性诊断。

关键词: 单片微波集成电路; 失效模式分析; 芯片热态可靠性; 氮-空位 (NV) 色心; 磁成像

## 空间高能电子辐射效应及防护研究

任三孩<sup>1</sup>, 冯展祖<sup>2\*</sup>, 王 鹞<sup>2</sup>, 张庆祥<sup>3</sup>, 秦晓刚<sup>2</sup>, 杨生胜<sup>2</sup>, 王 俊<sup>2</sup>, 郑玉展<sup>3</sup>, 姚 帅<sup>3</sup>

- (1. 航天工程研究所, 北京 100076;  
2. 兰州空间技术物理研究所, 兰州 730000;  
3. 中国空间技术研究院, 北京 100094)

**摘要:** 空间高能电子环境的辐射效应主要包括了总剂量、位移损伤及内带电效应等。空间高能电子辐射效应及防护是地球轨道卫星及深空探测任务可靠性设计的重点之一。文章基于最新地球轨道电子环境模型 AE9 中显示能量在 5~10MeV 的高能电子大量存在及木星等深空探测中存在大量能量超过 10 MeV 的高能电子的特点, 分析了 5MeV、10MeV、25MeV 高能电子的辐射效应特点, 识别出了该能段范围电子的辐射效应防护重点, 并针对总剂量防护讨论了屏蔽结构的设计及材料、器件的模拟试验方法。

**关键词:** 高能电子; 空间辐射; 屏蔽; 模拟实验

## 基于 Copula-Bayes 信息融合的机械产品 可靠性评估方法

郑嘉威, 黄 璞, 陈云霞\*

(北京航空航天大学 可靠性与系统工程学院, 北京 100191)

**摘要:** 随着技术加速发展, 越来越多机械产品更新换代, 寿命延长, 导致可靠性试验成本上升, 可用于可靠性评估的数据缩减。为解决该问题, 结合机械产品在使用过程中部件性能退化存在相关性的特征, 本文提出了一种基于 Copula-Bayes 信息融合的可靠性评估方法。首先, 基于 Copula 与部件退化数据构建部件联合退化模型, 得到产品伪寿命分布; 然后, 将伪寿命分布和系统寿命数据进行 Bayes 信息融合, 形成产品的系统可靠度函数作为评估结果。该方法在考虑机械产品部件退化相关性的同时充分利用了性能数据和寿命数据, 很大程度上提高了评估的全面性和准确性。

**关键词:** 可靠性评估; 信息融合; Copula; Bayes; 退化数据; 寿命数据; 机械产品

# 聚焦航天器环境工程 助力航天强国建设

## 航天器环境工程

中文核心期刊 中国科技核心期刊

航天器环境工程领域唯一的学术、技术类期刊  
1984年创刊，双月刊，大16开，不收版面费

主管单位：中国航天科技集团有限公司

主办单位：北京卫星环境工程研究所

编辑出版：《航天器环境工程》编辑部

官网：<https://www.seejournal.cn>

电话：010-68116407/6408/6544

地址：北京市朝阳区民族园路5号



ISSN 1673-1379

CN 11-5333/V

### 办刊宗旨

推动航天器环境工程的发展和  
应用，服务于卫星研制、载人  
航天、探月工程与深空探测。

### 专业方向

空间环境探测，环境效应建  
模与评价，地面环境模拟试验技  
术及设备研制，材料性能与防护，  
可靠性与人机环境工程等。