中国航天
航天器环境工程
SPACECRAFT ENVIRONMENT ENGINEERING
中国科技核心期刊

# 固体发动机振动试验典型工况下的螺栓连接计算模型及验证

雷兵 刘兵 翟晓 张龙飞 王潇奕 杜昱坤

# Calculation model and verification of bolt connection under typical working conditions in solid propellant motor vibration test

LEI Bing, LIU Bing, ZHAI Xiao, ZHANG Longfei, WANG Xiaoyi, DU Yukun

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12126/see.2023177

**您可能感兴趣的其他文章**

**Articles you may be interested in**

流固耦合作用下水下点火固体发动机C/C复合材料喷管力学性能分析

Mechanical property evaluation of C/C composite material nozzle of underwater solid rocket motor influenced by fluid–solid coupling

航天器环境工程. 2020, 37(3): 240–244 https://doi.org/10.12126/see.2020.03.005

泵压式发动机瞬态热试验方法

Method for transient thermal test of turbopump–fed rocket engine

航天器环境工程. 2020, 37(1): 89–94 https://doi.org/10.12126/see.2020.01.014

固液捆绑火箭尾舱设备随机振动环境优化预示分析

Predictive analysis of random vibration environment optimization for equipment in solid–liquid strap–on rocket tail cabin

航天器环境工程. 2023, 40(6): 605–610 https://doi.org/10.12126/see.2023078

地外天体上航天器起飞瞬时羽流对主发动机干扰效应影响

The effect of plum on main engine of ascending spacecraft launched from extraterrestrial bodies

航天器环境工程. 2019, 36(6): 565–570 https://doi.org/10.12126/see.2019.06.006

基于振动台电枢的界面力监测和力限振动控制试验方法及其工程应用

An interface force monitoring and vibration control method based onthe armature of shaking table and its engineering application

航天器环境工程. 2019, 36(1): 69–75 https://doi.org/10.12126/see.2019.01.011

多点随机激励振动试验的推力需求下限分析

Lower limit of thrust load in vibration test with multi–point random excitation

航天器环境工程. 2020, 37(6): 546–551 https://doi.org/10.12126/see.2020.06.003

https://www.seejournal.cn E-mail: htqhjgc@126.com Tel: (010)68116407, 68116408, 68116544

# 固体发动机振动试验典型工况下的螺栓连接计算模型及验证

雷 兵，刘 兵，翟 晓，张龙飞，王潇奕，杜昱坤
（西安航天动力测控技术研究所，西安 710025）

**摘要：**固体发动机振动试验卧式工况下，连接振动试验工装的螺栓主要承受横向振动载荷而难免出现松动现象。为解决这一影响试验有效性的工艺问题，采用斜面滑块模型分析螺栓松动机理，并通过电磁振动台在固体发动机振动试验典型卧式工况下进行试验验证，给出常用的 M16 螺栓的连接安装预紧力与试验横向载荷幅值的建议比值。研究结果表明，固体发动机振动试验典型卧式工况下，要保证发动机在振动试验过程中（通常不超过 10 min）的螺栓连接可靠，螺栓连接安装预紧力与横向振动载荷幅值的建议比值为 12。该研究结果可为固体发动机振动试验工装设计过程中螺栓孔径大小及数量的选取提供参考，为试验工艺技术改进提供支撑。

**关键词：**固体发动机；振动试验；螺栓松动；横向振动载荷；预紧力
**中图分类号：**V475; V465.2 **文献标志码：**A **文章编号：**1673-1379(2024)04-0489-08
**DOI:** 10.12126/see.2023177

# Calculation model and verification of bolt connection under typical working conditions in solid propellant motor vibration test

LEI Bing, LIU Bing, ZHAI Xiao, ZHANG Longfei, WANG Xiaoyi, DU Yukun
(Xi’an Aerospace Propulsion Testing Technology Research Institute, Xi’an 710025, China)

**Abstract:** The bolts connecting the vibration test fixtures are mainly subjected to lateral vibration load and inevitably loosen under the horizontal working condition in solid propellant motor vibration test. To address the process issues affecting the effectiveness of the test, the mechanism of bolt loosening was analyzed by an inclined slider model. Test validation was carried out through electromagnetic shocker under typical horizontal working condition of the solid propellant motor vibration test. The recommended ratio of the connection installation pre-tightening force to the test lateral load for commonly used M16 bolts was given. The results show that under the typical horizontal working condition in the solid propellant motor vibration test, to ensure the reliability of bolt connection during the vibration test (usually not exceeding 10 min), the recommended ratio of the connection installation pre-tightening force to the test lateral vibration load for commonly used M16 bolts is 12. The proposed research may provide not only a reference for the selection of bolt aperture and quantity in the fixture design for solid propellant motor vibration test but also support for the improvement of related test technology.

**Keywords:** solid propellant motor; vibration test; bolt loosening; lateral vibration load; pre-tightening force

**收稿日期：**2023-12-10；**修回日期：**2024-08-05

*引用格式：雷兵, 刘兵, 翟晓, 等. 固体发动机振动试验典型工况下的螺栓连接计算模型及验证[J]. 航天器环境工程, 2024, 41(4): 489-496*
*LEI B, LIU B, ZHAI X, et al. Calculation model and verification of bolt connection under typical working conditions in solid propellant motor vibration test[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2024, 41(4): 489-496*

## 0 引言

振动试验作为结构动力学评估的关键环节，在固体发动机研制流程中占据着举足轻重的地位[1]。固体发动机振动试验在典型卧式工况下，连接振动试验工装的螺栓主要承受横向载荷，故当螺栓预紧力不足时会在试验过程中产生旋转型松动[2-8]，导致整体结构的约束条件发生变化，进而引发整体结构固有频率的偏移[9]。这不但对试验结果的准确性造成不良影响，甚至有可能导致试验失败。然而螺栓预紧力过大会产生较大应力，从而损坏受试固体发动机。为保证固体发动机振动试验能够安全、可靠地进行，振动试验工装螺栓的设计、选用及连接必须遵循严格的安全可靠原则。

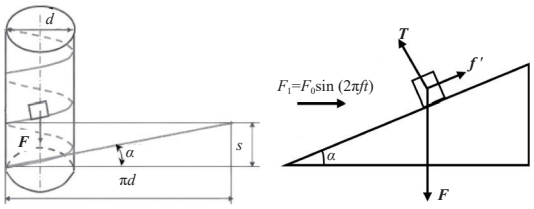
国内外研究人员均针对横向载荷下的螺栓连接松动问题开展了大量研究。国外方面，德国工程师 Junker[10] 首次提出横向振动试验方法，通过试验揭示了横向振动条件下的螺纹连接容易出现旋转型松动。此后，有多项数值仿真及试验验证研究的结果显示，螺栓连接松动起始于横向振动引起的螺纹面滑移[11-13]，须对这一过程加以有效控制。通过横向振动试验研究发现，螺纹面间摩擦系数的增大可以提高螺栓连接承受横向振动载荷的能力[14]；弹性垫圈的应用可以抑制螺纹面的滑移，起到一定的防松效果[15]。国内方面，学者们同样发现横向振动会导致螺纹连接松动[16]；并研究了预紧力对螺纹连接结构横向松动寿命的影响[17]；发现存在螺栓不易松动的初始预紧力范围[18] 及临界值[19]；分析了预紧力和横向载荷对螺栓松动的影响[20]；通过仿真分析研究了横向载荷作用下螺栓连接的松动过程[21]；分析了不同材料连接板的预紧力衰退情况[22]；研究了横向振动下螺栓预紧力衰减曲线[23]；推导出螺栓连接临界松动载荷计算公式并进行了试验验证[24]；提出了一种考虑螺纹柔性的螺栓连接临界松动载荷计算方法[25]。

综上可知，对于横向载荷下螺栓连接松动问题的定性研究已较为全面；而对于螺栓连接松动与横向振动载荷间关系的定量研究，目前主要通过仿真分析和数值计算开展，试验研究较少。鉴于此，本文针对固体发动机振动试验典型卧式工况下经常出现的螺栓连接松动问题进行定量研究，采用斜面滑块模型分析振动试验过程中常用的 M16 螺栓的连接预紧力与临界松动横向载荷间的关系；并通过卧式工况下的工程试验验证，给出螺栓连接安装预紧力与横向振动载荷幅值的建议比值，以期为固体发动机振动试验工装设计过程中螺纹孔径大小以及数量的选择提供参考，同时为振动试验工艺技术改进提供支撑。

## 1 基于斜面滑块模型的螺栓连接临界松动横向载荷计算

### 1.1 螺栓连接临界松动横向载荷计算模型

螺栓连接结构简单、拆装方便，在航空航天等领域应用广泛。在静载时，基于斜面滑块模型[26]，螺母与螺栓的连接可以简化为一个滑块在螺纹斜面上的运动；在低频振动时，外界施加到装置上的振动载荷可按照惯性载荷将整体质心的载荷等效为各螺栓连接点受到的横向载荷。等效后，在临界松动横向载荷下的螺栓连接受力如图 1 所示，其中：$s$、$\alpha$、$d$ 分别为螺栓的螺纹螺距、螺纹升角、螺纹大径；$\boldsymbol{F}$ 为螺栓预紧力；$\boldsymbol{T}$ 为滑块模型中斜面作用的支反力；$\boldsymbol{f}'$为最大静摩擦力；$F_1$ 为螺栓临界松动横向振动载荷；$F_0$ 为临界松动横向振动载荷幅值；$f$ 为横向振动载荷频率；$t$ 为横向振动时间。




(a) 螺纹斜面滑块模型 (b) 螺栓临界松动横向载荷

图 1 基于斜面滑块模型的螺栓连接受力分析

Fig. 1 Force analysis for bolt connection based on inclined slider model

Junker[10] 对横向载荷下的螺栓临界松动现象进行机理解释，首先给出临界松动横向振动载荷幅值

$$F_0 = F\tan(\rho-\alpha), \tag{1}$$

式中，$\rho$ 为螺纹摩擦角，其与螺纹面间摩擦系数 $\mu$ 的关系为

$$\mu = \tan\rho。 \tag{2}$$

为方便后续分析，本文将螺栓预紧力和临界松动横向载荷幅值的比值记为 $k$，即

$$k=\frac{F}{F_0}=\frac{\cos\alpha+\mu\sin\alpha}{\mu\cos\alpha-\sin\alpha}。\tag{3}$$

### 1.2　理论计算结果

不同型号的螺栓参数对应着不同的临界松动横向振动载荷，根据前面分析结果给出振动试验过程中常用螺栓的理论计算 $k$ 值，如表 1 所示，其中螺纹面间摩擦系数 $\mu$ 取 0.15。

**表 1　常用螺栓 $k$ 值的理论计算结果**

Table 1　Theoretical calculation results of $k$ values of commonly used bolts

| 螺栓型号 | 理论$k$值 |
|---|---|
| M10×1.5 | 9.8 |
| M12×1.75 | 9.7 |
| M16×2.0 | 9.2 |
| M20×2.5 | 9.2 |

由计算结果发现，$k$ 的理论值随螺栓型号的不同有所变化，总体数值在 9～10 之间。本文以固体发动机振动试验中常用的 M16 粗牙螺栓为例，开展 $k$ 值的试验测试。

## 2　$k$ 值的试验测试方案

### 2.1　试验系统

本文通过固体发动机振动试验进行 $k$ 值测试。如图 2 所示，试验系统主要由振动台、数据采集仪器、被试固体发动机及冷却装置等组成。振动台的试验加速度由控制仪器控制。二次循环水冷系统搭配功率放大器可保证发热部件能够长期可靠运行。

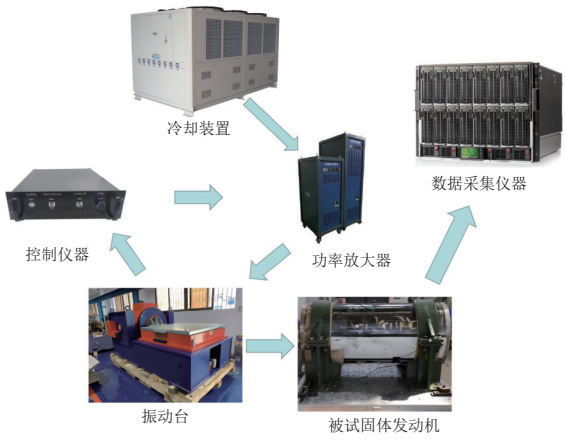
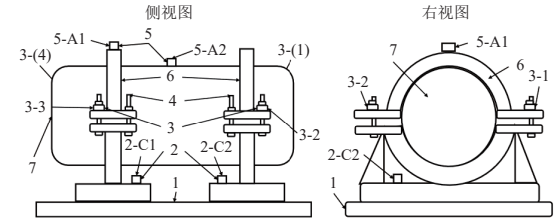



图 2　固体发动机振动试验系统

Fig. 2　Vibration test system for solid propellant motor

受试发动机采用典型卧式工况进行试验验证，试验加速度的控制根据相关试验标准采用两点平均控制，控制点紧邻试验工装与被试发动机连接处，并且在振动试验工装顶部和试验发动机壳体顶部分别粘贴加速度传感器以检测两处的振动响应，试验装置的具体安装状态及实物如图 3 所示。




1—水平滑台；2—加速度传感器（控制）；3—应变式压力传感器；4—试验螺栓；5—加速度传感器（监测）；6—试验工装；7—试验固体发动机。

(a)　试验装置安装状态

(b)　试验装置实物

图 3　固体发动机振动试验测试装置

Fig. 3　Test device for solid propellant motor vibration test

### 2.2　试验条件

试验中采用 DC-10000-100 型电动式振动台，其主要参数参见表 2。

**表 2　振动台参数**

Table 2　Parameters of the shocker

| 参数 | 数值 |
|---|---|
| 额定推力/kN | 98 |
| 正弦峰值加速度/$g$ | 100 |
| 正弦峰值速度/(m·s$^{-1}$) | 2 |
| 最大连续峰值位移/mm | 51 |
| 最大载荷/kg | 1500 |
| 频率范围/Hz | 2～2500 |

数据采集设备采用 16 通道高速数据测量系统，采集通道最大频率 46 kHz，最大采样率 102.4 kHz，采样精度 24 bit，数据传输速率 1 Gbit/s；控制仪器有 8 个模拟输入通道，每通道最大采样率 102.4 kHz，采样精度 24 bit，数据传输速率 1 Gbit/s。

参与试验的固体发动机的测试工装中有 8 个螺栓连接，均用力矩扳手拧紧。外侧 4 个螺栓接入中孔环形应变式压力传感器测量螺栓连接预紧力。传感器的主要参数见表 3。

表 3 应变式压力传感器参数

Table 3 Parameters of the strain gauge pressure transducer

| 参数 | 数值 |
|---|---|
| 量程/kN | 0～20 |
| 输出灵敏度/(mV·V$^{-1}$) | 1.0 |
| 零点输出/%F.S | ±2 |
| 非线性/%F.S | 0.1 |
| 激励电压/V | 5～12 |
| 阻抗/Ω | 700 |

试验螺栓为常用的 10.9 级 M16 螺栓，长度 150 mm，主要参数参见表 4。

表 4 试验螺栓参数

Table 4 Parameters of the tested bolt

| 参数 | 数值 |
|---|---|
| 螺纹升角$\alpha$/(°) | 2.28 |
| 螺纹面间摩擦系数$\mu$ | 0.15 |
| 螺纹螺距$s$/mm | 2 |

### 2.3 试验过程

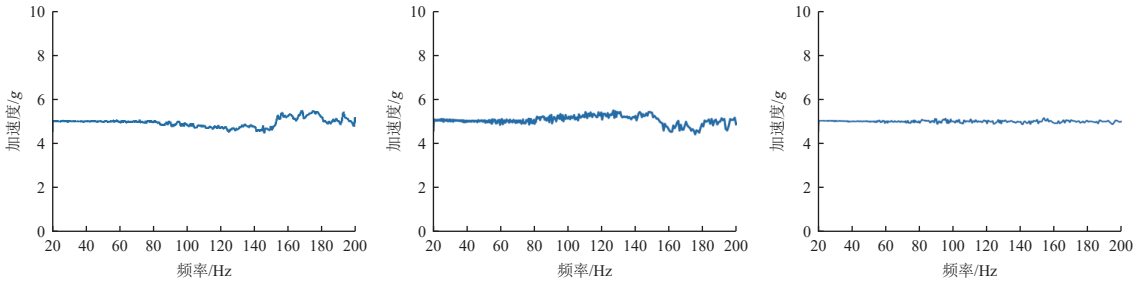
研究表明振动试验频率对螺栓连接松动没有显著影响[21, 27-29]，因此本文试验频率选择定频。为确保试验频率不在试验装置的共振频带内，以保证载荷平稳传递，在试验装置安装完成后进行扫频试验来选择试验频率。扫频范围根据固体发动机振动试验常用频率范围确定，取 20～200 Hz；加速度大小为 5$g$（重力加速度 $g$ 的值取 9.8 m/s$^2$）；试验时间为 5 min；扫频试验采用对数上下扫描，扫描速度为 3 oct/min。

临界松动载荷的试验测试方法如下：试验频率根据扫频试验结果确定。由于固体发动机振动试验工装之间存在一定间隙，难以保证螺栓连接预紧力相等，所以拧紧螺栓时将力矩扳手的拧紧力矩均先依据经验设置为 20 N·m，以保护被试固体发动机不受损坏。初始振动加速度根据试验条件通过式 (1) 计算得到，其中螺栓连接从动部分为试验装置螺栓连接承受横向载荷的部分，包括两个上弧座（质量均为 23.8 kg）以及固体发动机质量的 1/2（即 12.5 kg），即从动部分的总质量为 60.1 kg。根据初次试验结果对振动量级进行步进调节：若螺栓连接松动，则将振动量级降低 1$g$，反之则将振动量级增加 1$g$；在临界松动横向载荷附近振动量级的调节步幅减小为 0.5$g$，每次振动试验的时间为 10 min。最终试验判定螺纹连接松动失效的准则为螺纹连接预紧力小于初始试验预紧力的 80%。

## 3 试验结果及分析

### 3.1 扫频试验结果

扫频试验结果如图 4 所示，(a)、(b) 分别为两个控制加速度传感器信号，(c) 为平均控制信号。可以看到，平均控制信号在整个试验频率范围内比较平稳，但单点的控制信号在 80～200 Hz 频率范围内偏离预设加速度。这说明载荷传递在 80～200 Hz 频率范围内并不理想，为使试验加速度载荷平稳传递，螺栓的临界松动横向振动载荷试验的频率取为 20 Hz。




(a) C1控制信号 (b) C2控制信号 (c) 平均控制信号

图 4 固体发动机振动试验装置扫频试验结果

Fig. 4 Test results of the solid propellant motor in frequency sweep test

### 3.2 临界松动横向振动载荷试验结果

临界松动横向振动载荷试验结果如表 5 所示，表中数据记录了不同振动加速度下的功率放大器电流值以及试验结束后的螺栓状态。结果显示：横向振动加速度为 6.0$g$ 和 7.0$g$ 时，螺栓连接未松动；当横向振动加速度增至 8.0$g$ 时，螺栓连接出现了松动；再将横向振动加速度降为 7.5$g$，试验螺栓仍出现松动。这两个松动过程中的螺栓预紧力变化分别如图 5 和图 6 所示：当横向振动加速度达到 8.0$g$ 时，4 处螺栓连接全部松动；横向振动加速度降为

7.5*g* 时，螺栓连接预紧力出现较大波动，且第 4 处螺栓的预紧力明显降低，在近 300 s 时螺栓松动，试验控制超差导致试验终止。加之横向振动加速度为 7.0*g* 时螺栓连接并未松动，说明 7.5*g* 即为试验预紧力下的临界松动横向振动加速度——该载荷打破了螺纹面间的自锁平衡，从而产生旋松力矩，在循环的振动载荷下使得螺栓发生旋转型松动。

**表 5　一定预紧力下的临界松动横向振动载荷试验结果**

Table 5　Test results of critical loosening lateral vibration load under certain pre-tightening forces

| 振动加速度/*g* | 功率放大器电流值/A | 试验螺栓状态 |
|---|---|---|
| 6.0 | 210～230 | 未松动 |
| 7.0 | 250～270 | 未松动 |
| 8.0 | 290～310 | 松动 |
| 7.5 | 270～290 | 松动 |

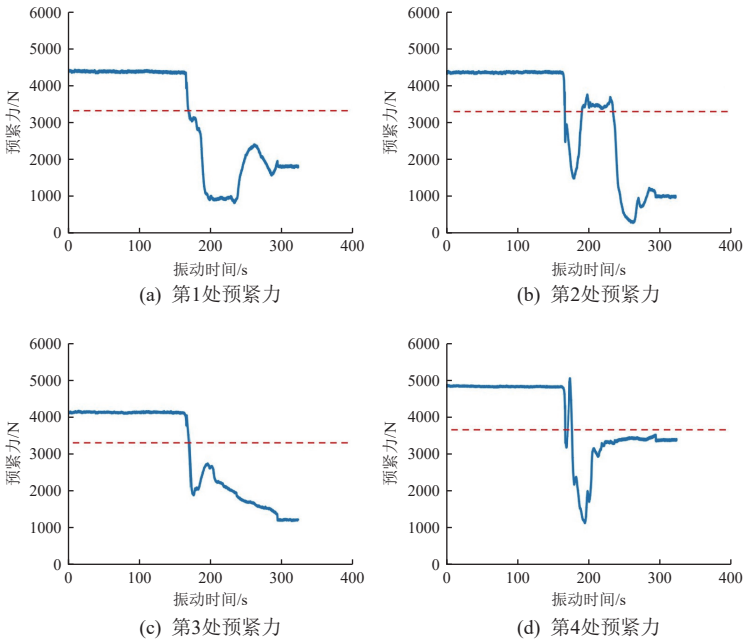



图 5　8.0*g* 横向振动加速度下的试验螺栓预紧力变化曲线

Fig. 5　Force curves of the tested bolts in 8.0*g* lateral vibration

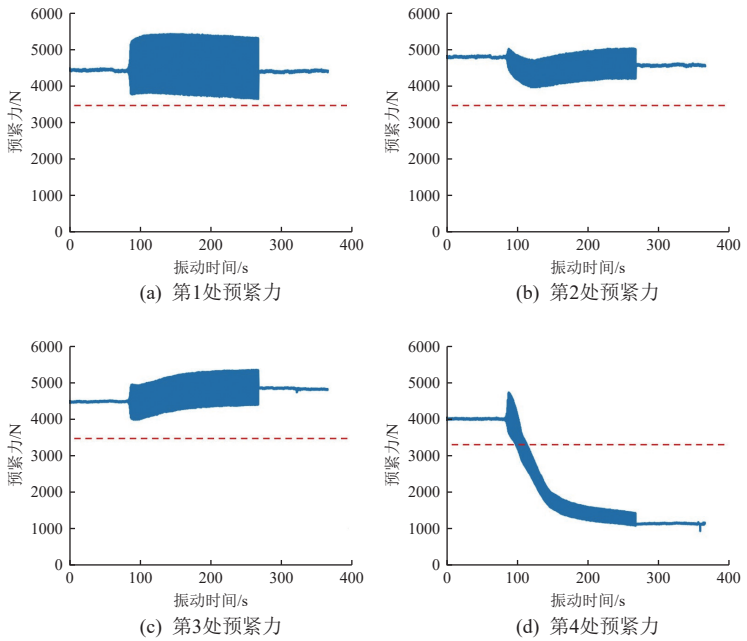



图 6　7.5*g* 横向振动加速度下的试验螺栓预紧力变化曲线

Fig. 6　Force curves of the tested bolts in 7.5*g* lateral vibration

### 3.3 结果分析

试验 $k$ 值为测量的螺栓连接预紧力 $F$ 和试验施加的横向振动载荷幅值 $F_0$ 的比值，其中螺栓预紧力由应变式压力传感器测量得到。假设试验采用压力传感器测量的 4 个螺栓预紧力（分别为 4100 N、4500 N、4500 N、4700 N）与未测量的 4 个螺栓预紧力相等，则螺栓预紧力 $F$ 的初始值为 $F$=2×(4100+4500+4500+4700)=35 600 N。横向振动载荷幅值 $F_0$ 通过螺栓连接从动部分质量以及试验加速度计算得到，

$$F_0 = ma, \tag{4}$$

式中：$m$ 为螺栓连接从动部分的质量，60.1 kg；$a$ 为试验得到的螺栓临界松动横向振动加速度，7.5$g$。则有，$F_0$=60.1×7.5×9.8=4417 N，继而可得 $k$ =$F$/$F_0$=35 600/4417=8.1。

第 1 章理论计算得到的 M16 螺栓的 $k$ 值为 9.2。在进行固体发动机振动试验时，要保证螺栓连接可靠，M16 螺栓的安装预紧力须高于临界松动横向振动载荷幅值的 10 倍，若取 120% 的安全余量，即令 $k$=12（建议比值）。

为证明该螺栓连接安装建议值的有效性，在前述测得的螺栓临界松动横向振动加速度 7.5$g$ 下再次进行固体发动机振动试验，此时螺栓安装预紧力为 $F$=12$F_0$=12×4417=53 004 N，可由

$$M = \frac{k_0 F d}{n} \tag{5}$$

换算出单个螺栓安装的预紧力矩 $M$ 为 23.3 N·m，向上取整为 24 N·m。式 (5) 中：$k_0$ 为力矩转换系数，本文采用螺栓表面氧化，故取 $k_0$=0.22；$n$ 为采用的螺栓个数。这次试验结束后，螺栓连接预紧力没有明显降低，验证了该螺栓连接安装建议比值的有效性。

## 4 结束语

本文对固体发动机振动试验在卧式工况下螺栓连接的旋转型松动现象做了定量研究，获得了典型螺栓预紧工艺的建议比值。通过螺栓连接受力分析及试验验证结果表明，固体发动机振动试验卧式工况下，要保证短时试验过程中螺栓连接可靠，M16 粗牙螺栓连接预紧力与横向振动载荷幅值间比值 $k$ 的建议值为 12。该建议比值在实际固体发动机振动试验过程中的应用效果良好，研究结果为固体发动机振动试验工装设计过程中螺纹孔径大小及数量选择提供了参考依据，同时也为振动试验工艺技术改进奠定了基础；研究方法可推广至其他型号的螺栓。

值得注意的是，在实际振动试验中，通常会用隔垫毛毡等软性材料对固体发动机进行保护，而本文尚未探讨由于此类保护材料引入可能导致的螺栓连接非旋转型松动问题。后续可就此补充深入研究，以全面评估并优化固体发动机振动试验的各个影响环节。

**参考文献**（References）

[1] 徐玉秀, 杨文平. 发动机结构振动与故障诊断理论技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2015: 25-46

[2] 黄志强, 郑旺辉, 金景峰. 螺纹连接防松技术研究及试验验证[J]. 现代防御技术, 2021, 49(1): 91-97
HUANG Z Q, ZHENG W H, JIN J F. Research and testing verification on anti-loosening of locking thread technique[J]. Modern Defence Technology, 2021, 49(1): 91-97

[3] 冯韶伟, 高学敏, 程全士, 等. 基于振动条件下的双螺母防松性能研究[J]. 导弹与航天运载技术, 2022(3): 17-21
FENG S W, GAO X M, CHENG Q S, et al. Anti-loosening performance of double-nut under vibration[J]. Missiles and Space Vehicles, 2022(3): 17-21

[4] 李天雷, 刘锴, 孙文东, 等. 振动工况下的双螺母结构防松性能研究[J]. 宇航总体技术, 2018, 2(4): 52-58
LI T L, LIU K, SUN W D, et al. Study on anti-loosening performance of double nut joint under vibration condition[J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2018, 2(4): 52-58

[5] 叶天赠. 防松螺栓横向振动试验研究[J]. 中国新技术新产品, 2021(16): 63-65

[6] 巩浩, 刘检华, 丁晓宇. 振动条件下螺纹预紧力衰退机理和影响因素研究[J]. 机械工程学报, 2019, 55(11): 138-148
GONG H, LIU J H, DING X Y. Study on the mechanism and influencing factors of preload decline for bolted joints under vibration[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(11): 138-148

[7] 熊承添. 横向激励下螺纹连接松动过程及防松装置研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2021: 4-12

[8] RAFIK V, DAIDIÉ A, COMBES B, et al. Simplified analysis of the early stage self-loosening of a shear-loaded bolted joint[C]//Proceedings of the Second International

Conference on Theoretical, Applied and Experimental Mechanics (ICTAEM 2019). Corfu, Greece, 2019: 169-175

[9] 王革, 周博成, 杨铭义, 等. 固体火箭发动机约束方式对内流场与结构共振影响数值研究[J]. 固体火箭技术, 2023, 46(1): 32-40
WANG G, ZHOU B C, YANG M Y, et al. Numerical study on effect of constraint mode on internal flow field and structure resonance of SRM[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2023, 46(1): 32-40

[10] JUNKER G H. New criteria for self-loosening of fasteners under vibration[J]. Society Automotive Engineering, 1969, 78: 314-335

[11] BORAWAKE S D, NAIK S S. Numerical study on effects of geometrical and operating parameters of bolt on performance of bolted joint[C]//Proceedings of the 2nd International Conference on Recent Advancements of Mechanical Engineering (ICRAME 2021), 2022: 69-81

[12] RAFIK V, COMBES B, DAIDIÉ A, et al. Experimental and numerical study of the self-loosening of a bolted assembly[C]// Proceedings of the International Joint Conference on Mechanics, Design Engineering & Advanced Manufacturing (JCM 2018), Advances on Mechanics, Design Engineering and Manufacturing II, 2019: 85-94

[13] AYAKA M, TADATOSHI W, MASAHIRO F, et al. Influences of various parameters on shear stiffness of bolted joints subjected to shear load[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 127: 5139-5154

[14] TANRIKULU B, KARAKUZU R, DOGAN S, et al. Fatigue behavior of re-tightened bolted joints affected by vibration-induced loosening[C]//The XX International Colloquium on Mechanical Fatigue of Metals (ICMFM XX) and KKMP2021 on Fatigue and Fracture of Materials and Structures, 2022: 141-146

[15] HESS D P, KEIFER O P, MOODY C B. Tests on loosening of aviation threaded fasteners with different washer configurations[J]. Journal of Failure Analysis and Prevention, 2014, 14(5): 683-689

[16] 王婕, 卢红立, 冯韶伟, 等. 弹箭螺纹连接松动机理分析研究[J]. 导弹与航天运载技术, 2022, 8(5): 122-125
WANG J, LU H L, FENG S W, et al. Analysis and research on loosening mechanism of threaded connection of missiles and rockets[J]. Missiles and Space Vehicles, 2022, 8(5): 122-125

[17] 邬杰, 廖日东, 丁晓宇. 螺纹连接结构横向松动寿命预测及影响因素研究[J]. 强度与环境, 2019, 46(2): 35-41
WU J, LIAO R D, DING X Y. Research on prediction of lateral loose life of threaded connection structure and its influencing Factors[J]. Structure & Environment Engineering, 2019, 46(2): 35-41

[18] 王开平, 张明远, 闫明, 等. 冲击载荷下材料松动期内螺栓松动影响因素研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(22): 35-40
WANG K P, ZHANG M Y, YAN M, et al. Factors affecting bolt loosening during material loosening period under impact loading[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(22): 35-40

[19] 王开平, 闫明, 孙自强, 等. 剪切载荷下航空发动机螺栓松动行为及其临界值的数值模拟研究[J]. 推进技术, 2022, 43(2): 37-48
WANG K P, YAN M, SUN Z Q, et al, Numerical simulation of bolt loosening behavior and critical value of aeroengine under shear load[J]. Journal of Propulsion Technology, 2022, 43(2): 37-48

[20] 宋树亮, 乔青峰, 赵海芹, 等. 横向载荷下不锈钢螺栓松动过程的试验与仿真研究[J]. 机械设计, 2023, 40(9): 129-134
SONG S L, QIAO Q F, ZHAO H Q, et al. Experiment and simulation study on loosening process of stainless-steel bolts with transverse load[J]. Journal of Machine Design, 2023, 40(9): 129-134

[21] 胡阳, 姜东, 王旻睿, 等. 横向载荷作用下螺栓连接松动过程研究[J]. 振动、测试与诊断, 2020, 40(6): 1091-1098
HU Y, JIANG D, WANG M R, et al. Study on loosening process of bolted joints under transverse load[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2020, 40(6): 1091-1098

[22] 杨丰豪, 周峰. 横向交变载荷下螺栓连接松动分析[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2022(11): 115-118
YANG F H, ZHOU F. Analysis of bolt connection looseness under transverse alternating loads[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2022(11): 115-118

[23] 高新尚, 周廷美, 莫易敏, 等. 横向振动下螺栓临界松动位移载荷的研究[J]. 机械工程与自动化, 2019(4): 22-24
GAO X S, ZHOU T M, MO Y M, et al. Research on critical loose displacement load of bolts under transverse vibration[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2019(4): 22-24

[24] 张明远, 鲁连涛, 唐明明, 等. 横向载荷作用下螺栓临界松动载荷数值计算方法研究[J]. 机械工程学报, 2018,

54(5): 173-178
ZHANG M Y, LU L T, TANG M M, et al. Research on numerical calculation method of critical load for bolt loosening under transverse loading[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(5): 173-178

[25] 江文强, 墨泽, 安利强, 等. 考虑螺纹柔性的螺栓连接临界松动载荷计算方法[J]. 机械工程学报, 2020, 56(15): 238-248
JIANG W Q, MO Z, AN L Q, et al. Computing method of bolted joint critical loosening load with flexible thread[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(15): 238-248

[26] 李立全, 庞永刚, 杨恩霞, 等. 机械设计基础[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018: 140-148

[27] 陈华隆, 孙戬, 张守京. 横向振动下的螺栓连接松动分析[J]. 机械制造与自动化, 2023, 52(2): 48-50
CHEN H L, SUN J, ZHANG S J. Analysis on bolt connection looseness under transverse vibration[J]. Machine Building & Automation, 2023, 52(2): 48-50

[28] 姜世霖, 阳光武, 肖守讷, 等. 螺栓松动寿命特性试验研究[J]. 机械强度, 2019, 41(5): 1060-1065
JIANG S L, YANG G W, XIAO S N, et al. Experimental study on the loosening life of bolts[J]. Journal of Mechanical Strength, 2019, 41(5): 1060-1065

[29] 李松如, 张平. 横向载荷下止动盘螺栓松动有限元分析与改进[J]. 石河子科技, 2023(5): 17-18
LI S R, ZHANG P. Finite element analysis and improvement of bolt loosening in the stop plate under lateral load[J]. Shihezi Science and Technology, 2023(5): 17-18

（编辑：张艳艳）

**一作简介：** 雷　兵，硕士研究生，研究方向为振动试验技术。