

基于“嫦娥三号”放射性载荷的 总装防护设计与实施

张延磊, 冯伟, 易旺民, 田帅, 郑圣余
(北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

摘要: “嫦娥三号”月球探测器安装有放射性载荷, 因此需要在总装过程中进行有针对性的防护, 以尽量降低操作人员可能受到的辐射危害。文章在分析各工作平台辐射剂量率的基础上, 结合一般防护方法, 提出了基于操作时间控制、操作距离限定以及屏蔽防护选择 3 项基本控制要素的核辐射环境中的操作防护设计方案。经地面模拟演练的验证及塔架上最终实施结果比对, 证明防护方案设计合理可行, 操作人员受到的累积辐射剂量处于预期值范围内的较低水平。

关键词: 嫦娥三号; 航天器总装; 核辐射环境; 辐射防护

中图分类号: V465; TL7

文献标志码: A

文章编号: 1673-1379(2015)06-0674-06

DOI: 10.3969/j.issn.1673-1379.2015.06.021

Ground assembly protection scheme against nuclear radiation payload of Chang'e-3 probe

Zhang Yanlei, Feng Wei, Yi Wangmin, Tian Shuai, Zheng Shengyu
(Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing 100094, China)

Abstract: In view of the nuclear radiation payload on the Chang'e-3 probe, the targeted protection should be taken during the assembly process to reduce the radiation hazard on personnel. In this paper, by analyzing the effects of the radiation dose rate on different working platforms, combined with the general protection method, a radiation protection design scheme is proposed, based on the time control, the operating distance limit and the shielding choice involved in the nuclear assembly. Through the simulation-based verification and the final implementation results, it can be confirmed that the protection design scheme is reasonable and feasible, the cumulative radiation dose on personnel falls within the expected value and in the range of a low level.

Key words: Chang'e-3; spacecraft assembly; nuclear radiation environment; radiation protection

0 引言

“嫦娥三号”月球探测器(下文简称探测器)在软着陆阶段需通过伽马关机敏感器精确测定距离月面的高度,当达到关机的高度要求时,向着陆器发出轨控发动机和姿控推力器关机指令^[1]。月夜休眠期间,由于无太阳辐照,月表温度低至-180℃,探测器无法从外界获取热量以安全度过。为保证探测器上设备工作温度要求,需采用同位素热源供热^[2]。另外,为了探测和鉴别月壤的元素种类及其丰度,采用了粒子激发 X 射线谱仪^[3]。上述设备

均使用到放射源,故被称为核仪器设备。探测器总装期间,针对这些设备,须采取辐射防护技术措施,以降低对操作人员的辐射风险^[4]。

1 “嫦娥三号”涉核辐射环境分析

探测器使用的放射源会发射出 γ 射线和中子。因此,在探测器总装阶段,须分析放射源对周围环境产生的辐射剂量率,以距离放射源 0.5 m 处和 1 m 处的辐射剂量率检测结果作为制定防护方案的设计依据。

1.1 核仪器设备概况

“嫦娥三号”探测器共有核仪器设备 8 台^[5], 包

括 3 台 I 类 ²³⁸Pu 放射源、2 台 II 类 ²³⁸Pu 放射源、1 台 IV 类 ¹³⁷Cs 放射源以及 2 台 V 类放射源, 参见表 1。

表 1 “嫦娥三号”核仪器设备信息

Table 1 Information of nuclear radiation equipment on Chang'e-3

设备名称	放射性元素	功率/W	放射源种类	与整流罩侧壁距离/mm	辐射剂量率/(mSv·h ⁻¹)	
					0.5 m 处	1 m 处
着陆器+y 向的同位素热源	²³⁸ Pu	120	I	462	0.32	0.16
着陆器-y 向的同位素热源	²³⁸ Pu	120	I	462	0.32	0.18
极紫外相机核源	²³⁸ Pu	8	II	910	0.021 2	0.016
巡视器同位素热源	²³⁸ Pu	120	I	1972	0.32	0.20
粒子激发 X 射线谱仪生存装置	²³⁸ Pu	4	II	947	0.010 8	0.008
粒子激发 X 射线谱仪探头	²⁴⁴ Cm	可忽略	V	947	9×10 ⁻⁶	可忽略
伽马关机敏感器发射器	¹³⁷ Cs	可忽略	IV	822	0.006 ^①	0.003 4 ^①
					5 ^②	5 ^②
伽马关机敏感器接收处理器	¹³⁷ Cs	可忽略	V	800	可忽略	可忽略

注: ①为伽马关机敏感器发射器带罩时的辐射剂量率; ②为伽马关机敏感器发射器摘罩时的辐射剂量率。

1.2 操作环境辐射剂量分析

探测器放射源安装之前置于屏蔽容器内, 放在有特殊标识的位置, 使用时有专门交通工具对其搬运, 不会受到辐射影响或影响可忽略。而对总装操作人员有影响的主要有 2 个阶段: 发射场技术区和发射塔架上安装放射源后的总装操作。

1) 技术区放射源安装后

粒子激发 X 射线谱仪探头在发射场技术区完成安装后, 在距放射源 0.5 m 范围内需要完成包括巡视器吊具装拆和吊点热控多层恢复 2 项操作, 持续时间约需 1 h; 在距离放射源 1 m 以外还需要完成其他操作。

根据表 1 的放射源信息, 0.5 m 范围内的 2 项操作的累计辐射剂量较小, 约为 0.009 μSv。

2) 发射塔架放射源安装后

探测器核仪器设备在塔架平台上的布局参见图 1。

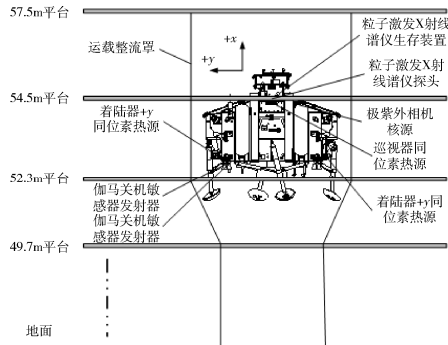


图 1 “嫦娥三号”探测器核仪器设备在塔架平台上的布局

Fig. 1 Layout of radiation equipment of Chang'e-3 probe on launch tower

“嫦娥三号”的总装过程中, 总装人员在发射塔架上开展工作的平台有 4 层: 49.7 m 平台, 52.3 m 平台, 54.5 m 平台和 57.5 m 平台。

据表 1 的核仪器设备信息, 除粒子激发 X 射线谱仪探头外, 其他核仪器设备分别在上述 4 层平台中的 3 层完成安装, 并分为 3 个阶段:

阶段 A: 在 54.5 m 平台上安装巡视器同位素热源、极紫外相机核源、粒子激发 X 射线谱仪探头及生存装置、伽马关机敏感器发射器;

阶段 B: 在 52.3 m 平台上安装着陆器±y 同位素热源;

阶段 C: 在 49.7 m 平台上摘除伽马关机敏感器发射器保护罩。

塔架上放射源安装后, 其他各项总装操作均在整流罩侧壁附近, 因此需重点关注该位置的辐射剂量率。由于辐射剂量率与距离平方成反比, 因此结合表 1 中给出的数据, 可以计算得到各工作平台上整流罩边界处的辐射剂量率。不同安装阶段后, 各平台整流罩边界处的最大辐射剂量率见表 2。

表 2 放射源阶段安装后各平台辐射剂量率最大值
Table 2 Maximal radiation dose on different platforms after radiation equipment being assembled

平台	mSv·h ⁻¹		
	阶段 A	阶段 B	阶段 C
49.7 m	0.003	0.011	0.145
52.3 m	0.009	0.099	0.102
54.5 m	0.022	0.051	0.051
57.5 m	0.005	0.009	0.009

2 核辐射环境保护原则

2.1 职业人员和公众剂量限值

我国现行标准对辐射工作人员定义为受聘用全日、兼职或临时从事辐射工作并已了解与职业辐射防护有关的权利和义务的任何人员；公众是指除职业受照人员和医疗受照人员以外的任何社会成员，但对于验证是否符合公众照射的年剂量限值而言，则指有关关键人群组中有代表性的个人。

在“嫦娥三号”项目中，核辐射环境中的总装操作人员属临时从事辐射工作的职业受照人员，按照国家标准其连续5年的年平均有效剂量限定为20 mSv，并且任何一年不超过50 mSv；而非操作人员即公众受照，关键人群组的成员所受到的平均剂量估计值年有效剂量限定为1 mSv^[6]。

核辐射环境人员基本要求：工作人员必须通过辐射安全和防护专业知识及相关法律法规的培训与考核并持有有效《辐射工作人员培训合格证》；取得辐射安全培训合格证书的人员，应每4年接受1次再培训，并提供个人受照剂量监测报告。

2.2 辐射防护基本原则

辐射对人体的照射方式分内、外2种，外照射是放射源在人体外部释放出粒子、光子作用于人体的照射，而内照射是放射性核素进入人体内，在体内衰变释放出粒子、光子作用于机体的照射。

针对这2种照射方式，分别有不同的防护措施与方法。外照射防护是尽量缩短受照射的时间，增加与放射源之间的距离，在人与放射源之间设置屏蔽物（防护三要素）；内照射防护包括包容、隔离、净化和稀释。

3 总装过程中的核辐射防护方案设计与实施

基于探测器核仪器设备安装后的辐射剂量率分析以及核辐射防护的一般策略，对总装过程中的核辐射防护方案进行设计及实施。

3.1 基于三要素的核辐射防护设计

“嫦娥三号”探测器总装阶段，操作人员不直接接触放射源，面临的辐射环境为外照射，应通过控制操作时间，并结合距离和屏蔽防护来实现核辐射防护。

3.1.1 时间防护及措施

首先，要求所有涉核操作要尽可能快速完成并减少人为失误；其次，通过合理规划、优化操作流程，从程序上减少涉核操作累计时间。

以放射源安装辅助踏板搭建与撤除为例，总装操作中采取如下具体措施：

1) 通过人机工效学分析^[7-10]，计算机仿真确定平台搭建的方向与位置，以保证核源安装人员能在较舒适的状态下完成操作；且搭建方案要在模拟塔架上进行演练，并最终确定合理位置，参见图2。

2) 辅助踏板未搭建之前，提前在发射塔架上标识摆放固定位置，以减少现场确认时间。

3) 踏板撤离时，分别撤收并摆放在所在平台，不必集中放置。

4) 合整流罩前，平台搭建原则为“3次搭建、1次拆除”；合整流罩后，平台搭建原则为“2次搭建、1次拆除”。

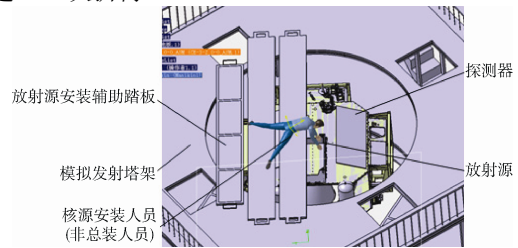


图2 放射源安装辅助踏板布局仿真
Fig. 2 Simulation and layout of auxiliary pedal for nuclear equipments mounting

3.1.2 距离防护及措施

要求所有的总装操作与放射源间的距离均不得小于安全控制距离，并根据放射源的辐射方向选择相对安全的操作方位。

伽马关机敏感器发射器的伽马源非工作状态下（安装时）带有防护罩，工作状态下无防护罩，伽马源的辐射方向在发射窗下部116°范围内，参见图3。以伽马源的工艺件更换为正样件为例，总装操作中采取如下具体防护措施：

1) 使用高度为250 mm的操作辅助踏板，以增加操作便利性，并增大操作人员与放射源间的距离。

2) 总装人员应在设备侧面进行操作，尽量避开放射源辐射方向。

3) 扶持设备人员只允许接触支架，不得接触设备本体，并尽量靠近设备安装面。

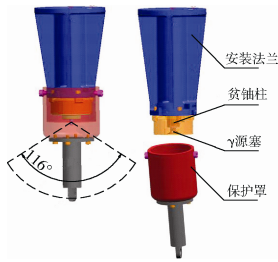


图 3 伽马源示意图

Fig. 3 Sketch map of gamma radiation equipment

总装过程中须根据具体工况选择不同的屏蔽防护措施:伽马放射源换装时,操作人员应佩戴铅背心、铅手套、个人辐射剂量计,考虑到放射源的辐射方向及操作的便利性,不建议佩戴防护眼镜。探测器发射前,伽马源防护罩摘除时,辐射剂量率达到最大,操作人员须佩戴尽可能多的屏蔽防护设施。

3.1.3 屏蔽防护措施

操作人员在操作过程中应佩戴防护设备。“嫦娥三号”核辐射环境中使用的防护设备见表 3。

表 3 安全防护设备清单

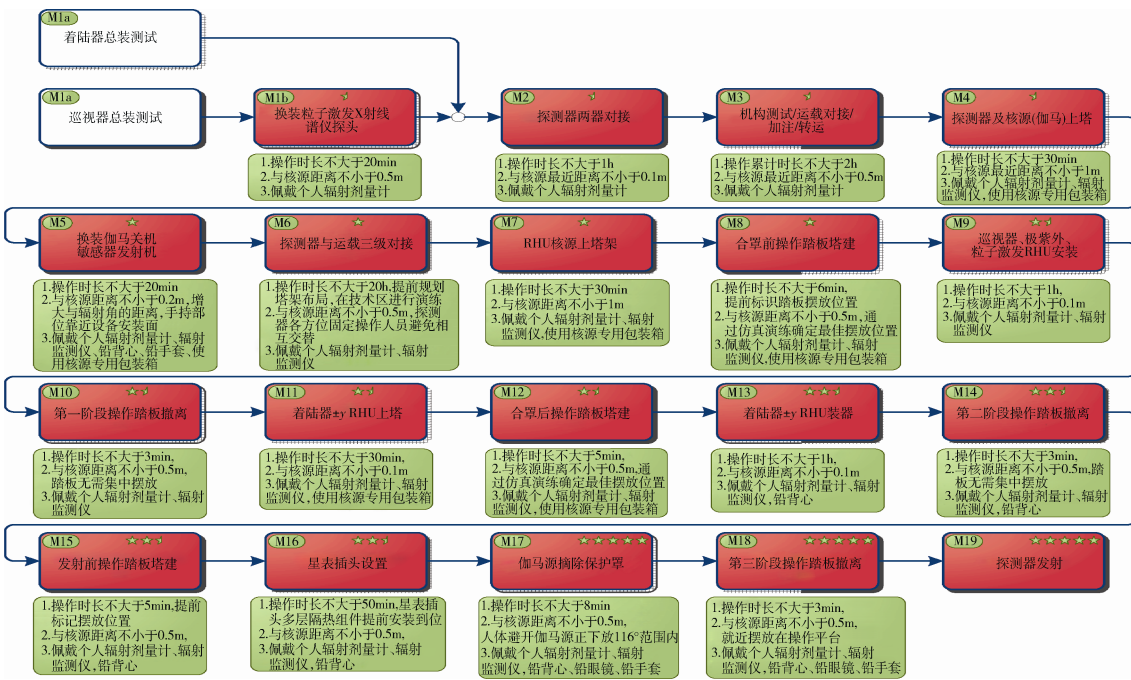
Table 3 List of radiation protection facilities

名称	型号规格	总数	携带数量	适用人员
辐射监测仪	RM-3100	2	1	操作一岗使用
个人辐射剂量计	PDM-122	19	19	所有操作人员
铅背心	无袖式	2	2	操作一岗使用
铅手套	介入性	2	2	操作二岗使用
铅眼镜	护边型	2	2	操作一岗使用
物品专用储藏柜	500 mm×500 mm×300 mm	1	1	所有操作人员

3.2 涉核操作的全流程防护实施

以减少时间、增大距离、增加屏蔽作为总装过程中的核辐射防护的三要素,对“嫦娥三号”探测器涉核操作全流程进行防护实施,防护方案见图 4。

粒子激发射线谱仪探头的放射源在技术区厂房内完成安装,根据前文所述此阶段辐射剂量率非常小,可通过严格控制操作时长及限定操作距离来控制照射剂量,同时操作人员佩戴个人辐射剂量计进行实时监测记录。塔架总装阶段,有 7 台核仪器设备需要陆续安装,其中伽马关机敏感器发射器、极紫外相机、粒子激发 X 射线谱仪生存装置、巡视器同位素热源等在合整流罩之前装器;着陆器 $\pm y$ 向的同位素热源在合整流罩后装器;发射前 1~3 h,摘除伽马关机敏感器发射器防护罩。随着核仪器设备逐一安装到探测器上,总装操作人员所采取防护措施的要求越来越高。



注:红色为总装涉核操作,★表示该项操作中的辐射剂量程度。

图 4 探测器总装涉核操作的全流程防护方案

Fig. 4 Protection scheme on whole process involving nuclear radiation during probe assembly

4 操作验证

在地面搭建模拟塔架,作为操作人员操作演练和工装规划的工作平台,以模拟真实塔架的状态和环境,对防护设计及实施方案进行综合演练及验证。演练阶段使用模拟件替代真实放射源,记录每次操作的耗费时间,并通过耗时计算得出总装操作过程中人员受到的辐射剂量。将总装过程中的全部涉核操作项目(伽马源更换为正样件、探测器与运载火箭对接、合罩前搭建辅助踏板、合罩前撤除辅助踏板、合罩后搭建辅助踏板、合罩后撤除辅助踏板、发射前搭建辅助踏板、星表操作、伽马源摘保护罩、发射前搭建撤离)分别标记为A~J。

操作人员受到的累计辐射剂量为

$$D(\tau) = \int_{t_0}^{t_0+\tau} \dot{D}(t) dt, \quad (1)$$

式中: t_0 为进入辐射环境的时刻; τ 为进入辐射环境后经历的时间(操作时长); $\dot{D}(t)$ 为 t 时刻的辐射剂量率。“嫦娥三号”项目中所使用的放射源,半衰期最短的为 18 a,因此可认为,在涉核操作的短时间内在设定距离处的辐射剂量率为定值 D ,那么,操作人员受到的累计辐射剂量为

$$D(\tau) = D \cdot \tau. \quad (2)$$

根据各项操作的时长及表 2 给出的辐射剂量率,可以得出操作人员在各项操作中受到的累计辐射剂量,结果见表 4。

表 4 模拟演练结果
Table 4 Results of simulation operation

项目标记	操作时长/min	距源距离	最大辐射剂量/ μSv
A	15~20	0.5 m	2.00
B	100~120	各平台整流罩边界处, 详值参见表 1	12.02
C	5~6		0.60
D	2~3		17.90
E	4~5		29.83
F	2~3		49.90
G	4~5		83.17
H	45~50		831.67
I	7~8		799.73
J	2~3		299.90
累计辐射剂量/ μSv			2 126.73

从表 4 数据可以看出,按照现有防护设计及实施方案执行,“嫦娥三号”探测器总装过程中全部涉核总装操作中人员(职业照射)受到的最大累计

辐射剂量为 2.13 mSv。对非操作人员(公众照射)须严格控制其进入区域,将其限定在安全控制距离之外,则其受到辐射的剂量可以忽略不计。

在“嫦娥三号”探测器发射场总装涉核操作人员佩戴的个人辐射剂量计监测记录数据中,最大辐射剂量为 2.05 mSv。可见,“嫦娥三号”总装过程中的涉核操作顺利完成的同时,操作人员所受的累计辐射剂量远低于国家标准的规定,验证了本文所述的核辐射防护方案设计的合理性。

5 结束语

本文对“嫦娥三号”探测器总装过程中涉核操作的全流程防护开展了研究。首先对塔架上各工作平台辐射剂量率进行了分析,然后通过选择防护措施、减少人员在核辐射环境中的操作时间、限定人员与放射源的距离等手段,针对不同总装工况制定了详细的防护方案。同时在地面搭建模拟塔架开展防护方案的演练,经地面模拟演练的验证及塔架上最终实施结果比对,防护方案设计确保了操作人员受到的辐射剂量处于预期值范围内的较低水平。本文核辐射防护方案的设计可为后续型号中涉核操作的安全防护方案设计与实施提供参考。

参考文献 (References)

- [1] 徐冰, 马龙, 郑兴林. 月球着陆环境模拟试验装置的研制[J]. 航天器环境工程, 2013, 30(1): 82-86
Xu Bing, Ma Long, Zheng Xinglin. Development of lunar landing environment simulation test equipment[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2013, 30(1): 82-86
- [2] 王录, 张红星, 莫青. 重力辅助两相流体回路不凝气体量间接测试方法研究[C]//第十三届全国热管会议论文集. 上海: 中国工程热物理学会, 2012: 1-8
- [3] 梁晓华, 吴明焯, 王焕玉. 嫦娥三号粒子激发 X 射线谱仪红外距离感知方法[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 32(5): 1360-1363
Liang Xiaohua, Wu Mingye, Wang Huanyu. Near infrared distance sensing method for Chang'e-3 Alpha particle X-ray spectrometer[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 32(5): 1360-1363
- [4] 刘晓洁, 朱立红. 长期涉核人员心理感受的质性研究[J]. 解放军护理杂志, 2010, 27(15): 1138-1140
Liu Xiaojie, Zhu Lihong. Qualitative research on psychological feelings of personnel with long-term implication in nuclear development[J]. Nursing Journal

- of Chinese People's Liberation Army, 2010, 27(15): 1138-1140
- [5] 吴伟仁. 嫦娥三号任务发射场阶段辐射安全防护手册[M]. 北京: 环境保护部核与辐射安全中心/国防科工局探月与航天工程中心, 2013: 22-54
- [6] GB 18871 电离辐射防护与放射源安全基本标准[S], 2002
- [7] 冯伟, 张延磊, 易旺民, 等. 基于虚拟仿真技术的探月工程二期航天器总装工艺设计[J]. 航天器环境工程, 2014, 31(3): 326-331
Feng Wei, Zhang Yanlei, Yi Wangmin, et al. The virtual simulation technology in assembly process design of China's Lunar Exploration Project II[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2014, 31(3): 326-331
- [8] 孙刚, 易旺民, 代卫兵, 等. 航天器总装工艺流程优化的分析与思考[J]. 航天器环境工程, 2008, 25(4): 381-383
Sun Gang, Yi Wangmin, Dai Weibing, et al. Optimization of spacecraft assembling process[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2008, 25(4): 381-383
- [9] 黄垒, 刘孟周, 邢帅, 等. 虚拟仿真技术在载人航天器总装工艺设计[J]. 航天器环境工程, 2011, 28(6): 609-614
Huang Lei, Liu Mengzhou, Xing Shuai, et al. Application of virtual simulation technology in assembly process design of manned spacecraft[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2011, 28(6): 609-614
- [10] 马智, 薛红军, 苏润娥. 基于 JACK 的人体建模与人机工效分析[J]. 航空计算技术, 2008, 38(1): 97-100
Ma Zhi, Xue Hongjun, Su Run'e. Human-modeling and analysis of ergonomics based on JACK[J]. Aeronautical Computing Technique, 2008, 38(1): 97-100

(编辑: 张艳艳)