

## 面向"嫦娥七号"飞跃器任务的宽温区转动阻力矩原位测试方法

马晓荔 周原 马龙 韩知非 闫琦 许亚娟 丁磊 居楠 徐宏贵

# In-situ test method for rotational resistance torque in extreme temperature range based on the Chang'e-7 leaper

中国科技核心期刊

MA Xiaoli, ZHOU Yuan, MA Long, HAN Zhifei, YAN Qi, XU Yajuan, DING Lei, JU Nan, XU Honggui

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12126/see.2024066

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

## 星载转台活动电缆扭转阻力矩测试与分析

Testing and analysis of resistant moment of motional cable on satellite turntable 航天器环境工程. 2021, 38(6): 682-686 https://doi.org/10.12126/see.2021.06.011

## 基于专家系统理念的航天器特殊控温策略推理测试验证

Verification by reasoning test for spacecraft special temperature control strategy based on the philosophy of expert system 航天器环境工程. 2021, 38(5): 569-574 https://doi.org/10.12126/see.2021.05.012

## 基于离心机的超重旋转复合试验平台设计

Design of a hypergravity and rotation composite test platform based on centrifuge 航天器环境工程. 2023, 40(3): 263-268 https://doi.org/10.12126/see.2022129

## 热真空试验中产品控温方法研究及其效果验证

A temperature control method for test pieces in thermal vacuum test and its verification 航天器环境工程. 2022, 39(3): 274–278 https://doi.org/10.12126/see.2022.03.009

## 基于热电制冷的某舱外载荷两级控温设计

Two-stage thermal control design of an extravehicular load based on TEC 航天器环境工程. 2023, 40(4): 380-386 https://doi.org/10.12126/see.2023008

## 一种旋转失重模拟试验装置设计

A design of rotating and weightlessness simulation test device 航天器环境工程. 2022, 39(2): 187–192 https://doi.org/10.12126/see.2022.02.011

85

https://www.seejournal.cn

E-mail: htqhjgc@126.com

Tel: (010)68116407, 68116408, 68116544

## 面向"嫦娥七号"飞跃器任务的 宽温区转动阻力矩原位测试方法

马晓荔<sup>1,2</sup>,周 原<sup>1,2\*</sup>,马 龙<sup>1,2</sup>,韩知非<sup>3</sup>,闫 琦<sup>1,2</sup>,许亚娟<sup>1,2</sup>,丁 磊<sup>1,2</sup>,居 楠<sup>1,2</sup>,徐宏贵<sup>1,2</sup> (1.可靠性与环境工程技术重点实验室; 2.北京卫星环境工程研究所; 3.北京控制工程研究所:北京 100094)

摘要:为测量"嫦娥七号"飞跃器舱外低频绑扎线缆在月球极端环境下对关节运动的阻力矩,文章提 出一种在-195~120 ℃温度环境下原位测量关节旋转附加阻力矩的方法,设计了由驱动模拟与测试系 统、温度模拟与控制系统组成的测试装置并测量了 8 种温度工况下有/无绑扎线缆的旋转阻力矩。测试结 果表明,由于转动配合面与线缆多点位绑扎工艺的复杂性,温度对阻力矩的影响并非线性规律,所以需 要在所关心的全温区开展相应的测试;同时,在-150 ℃及更低的深低温条件下,线缆扭力产生的阻力矩 值会快速升高,应加以关注。该研究方法对航天型号验证线缆选型及温度环境对关节旋转造成的阻力矩 影响有借鉴意义。

关键词: 舱外低频绑扎线缆; 宽温区环境; 旋转阻力矩; 原位测试; 试验验证 中图分类号: V443 文献标志码: A 文章编号: 1673-1379(2025)01-0085-06 DOI: 10.12126/see.2024066

## In-situ test method for rotational resistance torque in extreme temperature range based on the Chang'e-7 leaper

MA Xiaoli<sup>1,2</sup>, ZHOU Yuan<sup>1,2\*</sup>, MA Long<sup>1,2</sup>, HAN Zhifei<sup>3</sup>, YAN Qi<sup>1,2</sup>, XU Yajuan<sup>1,2</sup>, DING Lei<sup>1,2</sup>, JU Nan<sup>1,2</sup>, XU Honggui<sup>1,2</sup>

(1. Science and Technology on Reliability and Environmental Engineering Laboratory; 2. Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering; 3. Beijing Institute of Control Engineering: Beijing 100094, China)

Abstract: To measure the resistance torque exerted by the extravehicular low-frequency lashing cables on the joint movement of the Chang'e-7 leaper in the extreme lunar environment, an in-situ method for measuring rotational resistance torque within a temperature range of -195 °C to 120 °C was proposed. A test device, equipped with a drive system and a temperature control system, was designed. Rotational resistance torque measurements, with and without lashing cables, were conducted at eight different temperature settings. The test results show that due to the complexity of the multi-point lashing process between the rotating mating surface and the cable, the effect of temperature on the resistance torque is non-linear, requiring tests across the entire temperature range of interest. Additionally, at temperatures below -150 °C, the torque generated by cable torsion increases rapidly, necessitating careful attention. This research method holds practical implications for selecting cables suitable for aerospace applications and for understanding the effects of temperature on the resistance torque during joint rotation.

**Keywords:** extravehicular low-frequency lashing cables; extreme temperature range environment; rotational resistance torque; in-situ testing; experimental verification

MA X L, ZHOU Y, MA L, et al. In-situ test method for rotational resistance torque in extreme temperature range based on the Chang'e-7 leaper[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2025, 42(1): 85-90

收稿日期: 2024-05-31; 修回日期: 2025-01-24

基金项目:国防科技重点实验室稳定支持科研项目(编号:WDZC614200420230401)

引用格式:马晓荔,周原,马龙,等.面向"嫦娥七号"飞跃器任务的宽温区转动阻力矩原位测试方法[J]. 航天器环境工程, 2025,42(1):85-90

## 0 引言

探月工程的成功实施推动了我国月球科学研 究从调查跟踪研究逐步向自主探索转变<sup>[1-2]</sup>。其中, "嫦娥七号"计划在月球南极着陆,主要任务是开展 飞跃探测,寻找永久阴影区内的水冰资源,并进行 原位采样与测量分析<sup>[3-5]</sup>。相比于以往的月球环境 探测任务,"嫦娥七号"将经历更严酷的高低温环 境<sup>[6-7]</sup>。"嫦娥七号"中的飞跃器作为首个在月球进 行飞跃探测的装置<sup>[5]</sup>,其天线双轴驱动机构需要在 不同的温度下转动以使天线多次展开,而围绕驱动 机构的转动关节绑扎的舱外低频线缆的材料物理 特性会随温度的变化而发生显著改变,导致线缆对 关节转动附加不同程度的阻力矩,这可能影响天线 展开的可靠性和精度,因此,有必要在"嫦娥七号"的 研制阶段针对此问题展开深入研究。

截止目前,针对航天器舱外低频线缆的布线优 化和扭转阻力矩分析,国内外学者已经开展了相关 研究。例如:袁新江等<sup>[8]</sup>在常温(约 25 ℃)下测试天 线座阻力矩,并采用电流等效法研究-55~-40℃低 温下及电缆走线方式对电缆阻力矩的影响程度:费 志禾等<sup>[9]</sup> 测试了活动电缆扭转阻力矩, 定量分析其 影响因素并考察不同运动状态下阻力矩的稳定性; 黄业平等<sup>[10]</sup> 测试了射频电缆低温扭转阻力矩,评估 其对展开锁定机构静力矩裕度的影响;高燕 飞[11] 通过二维扭转试验研究线缆扭转时的应力应 变及导体轴向应力响应;张忠等[12]设计扭转弯曲的 机械性能试验方案,研究不同的试验条件、内导体 结构和绝缘结构对电缆扭转弯曲性能的影响; Schweinhart B.W.等<sup>[13]</sup>研究了通过电缆规格和部署 几何形状预测电缆阻力和阻力矩的方法。但上述研 究均未涉及月球极地环境的宽温区范围。

本文以"嫦娥七号"探测器研制需求为背景,为 了明确不同温度环境下舱外绑扎线缆对关节旋转 阻力矩的影响规律,提出一种适用于宽温区环境的 原位阻力矩测试方法,并开发相应的测试装置,测 量不同温度工况下的旋转阻力矩,旨在为探测器研 制提供试验方法和数据支持。

## 1 测试对象

在原位测量某旋转关节的旋转阻力矩过程中, 该关节在-90°~90°位置往复旋转工况下,周围的绑 扎线缆随之产生了复杂的扭转和弯曲,如图1所 示。本文将该绑扎线缆作为试验件,研究其在关节 旋转时所带来的附加阻力矩。



图 1 旋转关节与绑扎线缆示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the rotational joint and lashing cables

## 2 线缆附加阻力矩原位测试方法

绑扎线缆产生的附加旋转阻力矩受线缆材质、 长度、直径、走向与绑扎方式等多种因素影响,难以 直接测量。除线缆的附加阻力矩外,旋转阻力矩还 包括摩擦阻力矩和由于附加质量产生的惯性力矩; 环境温度变化引起的热胀冷缩也会影响这些力矩 值。为精确测量不同温度下由绑扎线缆造成的附加 阻力矩,本研究提出了一种方法:在相同温度下分 别测试有绑扎线缆和拆除线缆情况下的旋转阻力 矩,两者差值即为该温度下由绑扎线缆引起的附加 阻力矩;保证有/无线缆测试状态的一致性及独立 单变量,通过多次测量求平均值以减小误差。原位 测试需要覆盖-195~120 ℃ 温度范围,因此设计了 8 个温度工况,即-195、-150、-100、-50、0、40、80 和 120 ℃,以测试每个温度工况下有、无绑扎线缆的 旋转阻力矩。

为了满足上述测试需求,设计了一套转动阻力 矩测试装置,如图 2 所示。图 2(b)中的红框表示液 氮储箱。测试在 27 m<sup>3</sup>的温度循环箱内进行,温度 循环箱内有温控小舱和液氮储箱;测试装置集成了 驱动模拟与测试系统、温度模拟与控制系统。



(b) 三维建模
 图 2 阻力矩测量装置结构图
 Fig. 2 Structure diagram of the resistance torque measurement device

## 2.1 驱动模拟与测试系统

驱动模拟与测试系统用于驱动试验件转动并 测量转动过程中的阻力矩。在该系统中,试验件依 次与扭矩传感器、减速器和驱动电机连接(如图 3 所示)。系统控制驱动电机使试验件按要求进行转 动<sup>[14]</sup>。减速器位于电机输出端,其作用是降低电机 输出端转速同时提高输出扭矩。输出扭矩为

$$T = 9550 \times P \times i \times a/n, \tag{1}$$

式中:P为电机功率,kW;i为减速器减速比;a为

使用系数; n 为电机输出转速, r/min。扭矩传感器 用于实时测量试验件转动时的阻力矩,并将数据传 输至计算机上显示。转速的测量采用增量式编码 器, 精度高且性能稳定。各组件之间通过膜片联轴 器连接,并对试验件、扭矩传感器、减速器和驱动电 机的中心高和同轴度进行调整, 以减小测量误差。



图 3 驱动模拟及测试系统 Fig. 3 Driving simulation and test system

## 2.2 温度模拟与控制系统

温度模拟与控制系统主要用于为试验件提供 所需的测试温度环境,并确保驱动模拟与测试系统 正常工作所需的温度环境,同时尽量减少两种温度 环境之间的干扰。测试时,旋转关节完全置于温度 循环箱中,通过控制温度循环箱内环境温度来实现 对试验件的温度控制。由于温度循环箱在液氮辅助 制冷下只能实现-180 ℃ 的最低温度环境, 所以在 试验箱中增设了液氮储箱。常压下液氮的沸点约 为-195℃,将试验件浸泡在液氮储箱的液氮中,可 以模拟出-195 ℃ 的原位环境。另一方面,温控小舱 的舱壁上安装了加热片,小舱外壁用隔热棉包覆; 驱动电机、减速器和扭矩传感器上均贴有加热片, 并放置在温控小舱内(参见图 2(a)),这样既可保证 驱动模拟与测试系统的温度环境,也减少了对温度 循环箱内测试环境的干扰。本研究使用的扭矩传感 器量程为5N·m,准确度等级为0.2,力矩测量精度 为 0.01 N·m。

温度循环箱和温控小舱的温度控制均采用 PID 控制方法<sup>[15]</sup>。在设定的采样周期内,根据目标 温度与实际温度之间的差值 *e*(*t*),利用 PID 算法计 算控制量 *u*(*t*)<sup>[16]</sup>,即

$$u(t) = \frac{1}{\delta_k} \left( e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right), \qquad (2)$$

其中: $\delta_k$ 是为临界比例度; $T_i$ 为积分时间; $T_D$ 为微分时间。图 4 所示为用 PID 算法实现温度控制。



Fig. 4 Schematic diagram of temperature control using PID algorithm

在试验件的非旋转部位上粘贴铂电阻,将铂电 阻测得的温度作为实际温度。试验中的所有温度工 况下,温度传感器位置均保持一致且无拆卸、无松 动,以保证每次温度测量时的环境条件和安装状态 一致。通过判断 *e*(*t*)值的正负,对温度循环箱内的 加热电阻丝以及控温小舱内的加热片的电流进行 调节,以实现精确控温。

通过驱动模拟及测量系统、温度模拟及控制系 统的一体化集成设计,最终构建出测量装置。该装 置采用垂直放置方式,以使旋转轴为沿铅锤方向, 从而有效排除重力因素对旋转力矩产生的交变 影响。

## 3 测试试验结果与分析

对 8 种温度工况下绑扎和拆除线缆时的转动 阻力矩各进行 10 次测量,并据此绘制力矩随转角 变化的曲线,图5所示为80℃和-150℃工况下 有、无线缆的阻力矩曲线;同一温度下有/无绑扎线 缆的 10 次测量数据的平均值如图 6 所示。可以看 出:阻力矩多次测量数据具有较好的重复性,同时 旋转阻力矩随转角呈现周期性变化;所有旋转工况 的测量力矩均在180°位置处出现突变,这归因于试 验件在"正向旋转→停机→反向旋转"状态转换时, 启/停加、减速过程中导致的附加惯性力。不同温度 下受热胀冷缩程度不同,故表现出的效应有不同 特点:在 0~120 ℃, 力矩突变幅度小于-195~-50℃ 的;而在-195~-100℃,正向旋转过程中阻力矩出 现负值,这说明在线缆因冷却收缩产生了主动扭力 矩,对旋转起到了助力作用。进一步分析发现,在 有绑扎线缆的状态下,由于存在线缆扭力,旋转关 节所受的阻力矩较无绑扎线缆时的增大,但其随温 度变化的趋势与无绑扎线缆时的基本一致。





Fig. 5 Resistance torque profiles at 80  $\,^\circ\!\mathrm{C}$  and -150  $\,^\circ\!\mathrm{C}$  with and without lashing

根据以上测量结果,计算了有/无绑扎线缆的阻 力矩平均值。表1所示为两种情况下的平均值和 10次测量结果中由绑扎线缆引起的附加阻力矩的 最大值。可以看出:在-100 ℃ 及以上的温度工况 下,绑扎线缆导致的附加阻力矩最大值在 0~ 0.06 N·m 范围内;而在-150 ℃ 和-195 ℃ 温度工况 下,测得的附加阻力矩最大值分别为 0.09 N·m 和 0.38 N·m,与其他工况下的附加阻力矩相比有显著 增加。这主要是由于在低温度环境下,线缆质地变 硬,导致线缆扭力增大。另外,测试结果还表明,在 无绑扎线缆的情况下,温度对工装阻力矩(包括驱 动机构工装支架因安装、配合等因素产生的摩擦阻 力矩和附加质量的惯性力等,即除线缆阻力矩外的 其他力矩之和)也有影响:在-100 ℃ 及以下的低温 条件下,工装阻力矩在转向时会发生明显的突变; 在-150 ℃ 及以下的深低温条件下,线缆扭力产生 的阻力矩己不容忽视,需要特别关注。



Fig. 6 Comparison of average resistance torque with and without lashing cables

#### 表 1 有/无绑扎线缆的阻力矩平均值

 Table 1
 Average resistance torque with and without lashing cables

温度/	10次测量阻力矩平均值/(N·m)		由绑扎线缆造成的附加
°C	无绑扎线缆	有绑扎线缆	阻力矩最大值/(N·m)
120	0.34	0.37	0.05
80	0.79	0.78	0.04
40	0.89	0.91	0.06
0	0.38	0.34	0.04
-50	0.28	0.26	0.03
-100	0.23	0.24	0.06
-150	0.23	0.23	0.09
-195	0.27	0.28	0.38

#### 4 结束语

本文以"嫦娥七号"飞跃器天线转动关节绑扎 的舱外低频线缆为研究对象,提出一种适用于宽温 区环境下的转动阻力矩原位测试方法,并研制了相 应的测量装置。该装置能够实现在-195~120 ℃ 的宽温区对旋转关节的阻力矩的精确测试,并探究 了温度对线缆附加阻力矩的影响规律。试验结果表 明,温度不仅影响旋转机构自身的转动阻力矩,还 影响由于线缆扭力产生的附加阻力矩。鉴于转动配 合面与线缆多点位绑扎工艺的复杂性,温度对阻力 矩的影响而呈现非线性规律。因此,有必要在所关 注的全温区开展系统而详尽的试验测试研究。本研 究的结果可为后续研究航天器舱外线缆的选型及 绑扎方式对关节旋转阻力矩的影响提供参考。

## 参考文献(References)

- 张腾飞, 王燕海, 杨蔚, 等. 基于文献计量的月球科学前沿研判[J]. 岩石学报, 2023, 39(10): 3169-3183.
   ZHANG T F, WANG Y H, YANG W, et al. Frontiers in lunar science based on bibliometric analysis[J]. Acta Petrologica Sinica, 2023, 39(10): 3169-3183.
- [2] LI E H, LI Y Z, WANG J X, et al. Ground-based investigations on phase-moving phenomenon with space sublimation cooling for lunar exploration missions[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2022, 35(8): 65-74.
- [3] PAIGE D A, SIEGLER M A, ZHANG J A, et al. Diviner lunar radiometer observations of cold traps in the Moon's south polar region[J]. Science, 2010, 330(6003): 479-482.
- [4] LI S, LUCEY P G, MILLIKEN R E, et al. Direct evidence of surface exposed water ice in the lunar polar regions[J].
   Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018, 115(36): 8907-8912.
- [5] 嫦娥七号进展曝光, 2026 年去月球寻水![EB/OL]. [2025-1-13]. https://news.qq.com/rain/a/20250113A03SQI00?suid= &media\_id=.
- [6] LE H J, RONG Z J, WEI Y. Exploring the universe and protecting the Earth: young Chinese scientists in action[J]. The Innovation, 2023, 4(4): 100466.
- [7] 贾阳, 任德鹏, 刘强. 月球表面及月壤内温度分布特征的 数值模拟[J]. 航天器环境工程, 2007, 24(5): 273-277.
  JIA Y, REN D P, LIU Q. INumerical simulation for the temperature distribution characteristics on the lunar surface
  [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2007, 24(5): 273-277.

- [8] 袁新江,姜洋,汪磊磊,等. 小型机载雷达天线座电缆阻 力矩测试分析[J]. 电子机械工程, 2012, 28(6): 30-33.
  YUAN X J, JIANG Y, WANG L L, et al. Test analysis of cable resistance moment of airborne radar minitype pedestal[J]. Electro-Mechanical Engineering, 2012, 28(6): 30-33.
- [9] 费志禾,李志慧,陈雅璐,等.星载转台活动电缆扭转阻 力矩测试与分析[J]. 航天器环境工程, 2021, 38(6): 682-686.

FEI Z H, LI Z H, CHEN Y L, et al. Testing and analysis of resistant moment of motional cable on satellite turntable[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2021, 38(6): 682-686.

- [10] 黄业平, 范凯, 蒋国伟. 射频电缆低温扭转阻力矩对卫星 展开锁定机构的影响[J]. 航天器环境工程, 2013, 30(3): 245-249.
  HUANG Y P, FAN K, JIANG G W. Influence of RF cable's low-temperature resistance torque on the deployable and lockable mechanism for satellite[J].
- 249.[11] 高燕飞. 多维转动机械臂用线缆疲劳特征分析与研究[D].苏州: 苏州大学, 2019.

Spacecraft Environment Engineering, 2013, 30(3): 245-

 [12] 张忠,张仁杰,单海龙,等.低损耗射频同轴电缆扭转弯
 曲性能的试验方法和影响因素分析[J].电线电缆, 2020(6):21-24 ZHANG Z, ZHANG R J, SHAN H L, et al. Analysis of influence factors on bending and torsion performance of low-loss RF coaxial cable[J]. Electric Wire & Cable, 2020(6): 21-24.

- [13] SCHWEINHART B W, ARZT Z, NUNAN B E, et al. Cable resistance in spacecraft deployable mechanisms[C]//AIAA SCITECH 2022 Forum. San Diego, CA, USA, 2022: 1623.
- [14] 钱华,陈辰,李志鹏,等. 特殊环境下的小力矩测试方法研究[J]. 微特电机, 2021, 49(7): 62-64.
  QIAN H, CHEN C, LI Z P, et al. Research on small torque test method for special environment[J]. Small and Special Electrical Machines. 2021, 49(7): 62-64.
- [15] LIU H R, FANG Y L, SU X Y, et al. Temperature control algorithm for polymerase chain reaction (PCR) instrumentation based upon improved hybrid fuzzy proportional integral derivative (PID) control[J]. Instrumentation Science & Technology, 2023, 51(2): 109-131.
- [16] 万任新,杨晓超,李志宏,等.热真空试验中产品控温方 法研究及其效果验证[J].航天器环境工程,2022,39(3): 274-278.

WAN R X, YANG X C, LI Z H, et al. A temperature control method for test pieces in thermal vacuum test and its verification[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2022, 39(3): 274-278.

(编辑:冯露漪)