

月面环境下谐波减速器固液复合润滑 寿命试验研究

郑宗勇¹, 张智芳², 方蒙生², 王长亮², 张崇峰², 王治易¹

(1. 上海宇航系统工程研究所, 上海 201109; 2. 上海航天技术研究院, 上海 201109)

摘要: 本文对谐波减速器的失效机理和寿命影响因素进行了专门的研究分析。通过改进谐波减速器的润滑方式, 开展了固液复合润滑特性分析和月面环境适应性分析, 并对固液复合润滑谐波减速器进行了寿命试验验证。该固液复合润滑谐波减速器通过了在轨月面考核验证, 为确定月面巡视器各活动机构谐波减速器的润滑技术状态提供了理论和试验依据, 也为后续其他航天器的润滑技术状态提供了一条新的设计思路。

关键词: 谐波减速器; 寿命试验; 固体润滑; 固液复合润滑; 航天器

中图分类号: V 442 文献标志码: A

DOI: 10.19328/j.cnki.2096-8655.2021.02.016

Study on the Life Test of Solid-Liquid Composite Lubrication of Harmonic Reducer in Lunar Environment

ZHENG Zongyong¹, ZHANG Zhifang², FANG Mengsheng², WANG Changliang²,

ZHANG Chongfeng², WANG Zhiyi¹

(1. Shanghai Aerospace System Engineering Institute, Shanghai 201109, China;

2. Shanghai Academy of Spaceflight Technology, Shanghai 201109, China)

Abstract: The failure mechanism and life influencing factors of harmonic reducer are studied, and the lubrication mode of harmonic reducer is improved. The solid-liquid composite lubrication characteristics and the lunar environment adaptability are analyzed, and life tests for the harmonic reducer with solid-liquid composite lubrication are carried out. The harmonic reducer with solid-liquid composite lubrication has passed the on-orbit lunar surface assessment and verification. It provides a theoretical and experimental basis for the determination of the lubrication technical state of the harmonic drive reducer of the lunar rover mechanism and also a new design idea for the subsequent lubrication technical state of other spacecraft mechanism.

Key words: harmonic reducer; life test; solid lubrication; solid-liquid composite lubrication; spacecraft

0 引言

谐波减速器具有传动比大、精度高、空程小、承载能力高、效率高、体积小、传动平稳等优点, 技术相对成熟, 已广泛应用于空间航天器驱动机构、精密指向扫描机构、空间机器人等机构产品^[1-3]。“玉兔号”月面巡视器作为我国首次地外天体表面探测的新型航天器, 相对于以往的地球轨道航天器有很大不同, 具有活动机构多、系统资源严苛等技术难点,

月面巡视器上的活动机构必须重量轻、力矩大、运动精度高、能够适应月面恶劣环境^[4-5]。因此, 月面巡视器对谐波减速传动部件的要求非常高。

考虑到月面环境恶劣以及油脂在真空低温下黏度增大会导致阻力矩变大, 初样阶段谐波减速器选用CPL型WS₂固体润滑谐波减速器。为满足在轨月面工作寿命要求, 初样阶段对固体润滑谐波减速器开展了寿命试验(3个月寿命转数 $\geq 17 \times 10^4$ r)。

收稿日期: 2021-01-18; 修回日期: 2021-03-01

基金项目: 国家自然科学基金(51975381)

作者简介: 郑宗勇(1985—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为空间飞行器结构与机构技术。

但是,固体润滑谐波减速器在运转至 2×10^4 r 左右出现谐波减速器转动有杂音、电流不平稳、驱动力矩下降等异常现象,谐波减速器失效,寿命不能满足使用要求。该问题将直接影响到巡视器各机构产品的寿命、设计状态及型号研制进度。因而,提高固体润滑谐波减速器的寿命是一个亟需解决的问题。

本文通过对谐波减速器的失效机理和寿命影响因素进行专门研究分析,开展长寿命、高可靠空间润滑技术的研究,并进行月面环境适应性分析,为确定月面巡视器各活动机构谐波减速器的润滑技术状态提供了理论和试验依据,也为后续其他航天器的润滑技术状态提供了一条新的设计思路。

1 固体润滑谐波减速器试验结果分析

通过对出现问题的减速器进行刚度测试和分解,发现波发生器柔性轴承外圈外表面以及柔轮齿面、刚轮齿面均有明显的磨损,谐波减速器刚度下降,如图 1 和图 2 所示。由于轮齿工作面干涉磨损,产生的磨粒进入柔性轴承滚道,柔轮和钢轮啮合齿面润滑膜严重破坏而导致柔性轴承运动阻力增加,谐波减速器传动效率由初期的 62.5% 明显下降至 30.0%。谐波减速器中齿轮面接触区域的润滑状态不良导致活动零件材料产生磨粒磨损,致使谐波减速器的固体润滑膜遭受破坏,从而导致传动性能的逐渐衰退^[6-7]。

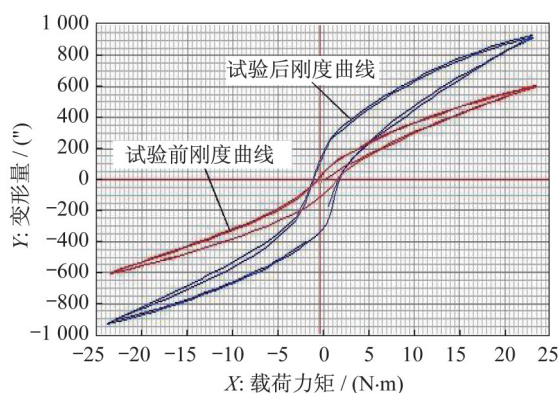


图 1 寿命试验前后谐波减速器扭转刚度曲线

Fig.1 The torsional stiffness curve of harmonic reducer before and after life test

经对谐波减速器失效机理分析,润滑是影响机构中谐波减速器在轨性能和转动寿命的关键因素。通过改进其润滑方式来提高空间机构运动部件工

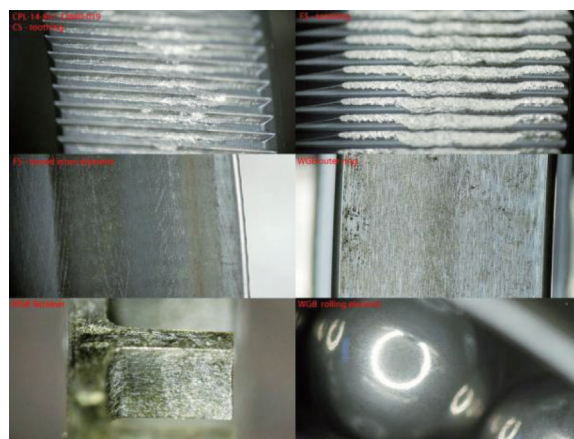


图 2 寿命试验后各部件外观照片

Fig.2 Appearance pictures of components after life test

作可靠性和转动寿命的研究,具有重要的应用价值^[8-11]。

空间机构传统的润滑方式主要有固体润滑和液体(油脂)润滑。固体润滑材料具有可承载大的载荷,有较宽的使用温度范围,可在高真空、低温和强辐射等特殊空间环境条件下工作等优点;液体润滑材料则存在真空易挥发、高温易降解、爬移、需要密封等特点,液体润滑材料在承载能力和稳定性方面与固体润滑材料相比较差。

近年来,国内外部分学者提出将固体润滑和液体润滑混合在一起使用。经研究表明,某些固体油脂复合润滑体系相对于纯固体润滑、纯液体润滑会表现出更好的润滑稳定性和耐磨寿命,该复合润滑体系有可能大幅提高运动机构的润滑性能和耐磨损性能,延长运动副的使用寿命^[12-13]。美国国家航空航天局(NASA)曾报道的 MoS_2 -TiC/PFPE 固体涂层/液体润滑剂复合润滑体系、黏结固体润滑涂层与润滑脂复合体系等具有良好的摩擦学性能,已在空间机构上获得了成功的应用^[14]。固液复合润滑方式作为一种新润滑方式在国内尚缺乏系统性和深入的研究^[15-16]。

2 固液复合润滑特性分析

固体润滑材料和液体润滑材料分类较多,但是,固液复合润滑体系并不是任意固体润滑材料和液体润滑材料的简单组合,需要考虑诸多因素,如协同效应、相容性和浸润性、运动部件类型和使用工况等。

2.1 协同效应

当固体润滑材料和液体润滑材料产生协同效应时,固液复合润滑体系的性能明显优于纯固体润滑和纯液体润滑,反之则润滑性能无明显改善或下降。例如 MoS_2 基薄膜和114脂复合时,其摩擦系数虽得到改善,但耐磨寿命缩短,说明 MoS_2 基薄膜-114脂不宜进行复合;而 MoS_2 基复合薄膜以及Ag基合金薄膜与CSF-250润滑油复合润滑在特定工艺条件下出现了摩擦系数降低、耐磨寿命延长的良好结果。

2.2 相容性和浸润性

固体润滑材料与液体润滑材料复合时,需考虑液体润滑剂是否对固体润滑材料的组分、结构、表面形态等造成影响。如两者材料发生化学反应产生腐蚀,破坏固体润滑材料的表面状态或者影响其与基体材料的结合强度而导致润滑性能明显下降等,则不能复合使用。因此,相容性差的固/液润滑材料不宜进行复合。

即使是相容性好的固液润滑材料,其浸润性不好,即液体润滑剂无法在固体润滑材料表面展开,无法形成油膜,将对复合使用后的润滑性能产生不利影响。

2.3 运动部件类型和传动工况

不同运动部件要求的润滑方式不同,如轴承一般采用固体润滑或油脂润滑,齿轮多采用脂膜或自润滑材料润滑。另外,润滑材料和润滑方式的选择要充分结合运动部件的工况,如温度、速度、载荷、真空度等。在高速轻载情况下,选用润滑油与固体润滑混合使用;而在低速重载情况下,可采用润滑脂与固体润滑进行混合使用。对不同运动部件和工况,需考虑运动部件的特点,合理选择润滑方式。

2.4 固液复合润滑的特点

从理论上分析,协同效应、相容性、浸润性好的固液复合润滑体系可以明显提高润滑性能,同时在耐空间环境性能、工作寿命、载荷承载等方面也可以获得显著改善,主要原因如下:

1) 空间活动部件在型号发射前都要经历贮存、地面环境试验等过程,要求所使用的润滑材料具有良好的环境适应性。 MoS_2 、 WS_2 等固体润滑材料与油脂进行混合后,油脂在固体润滑膜表面产生一层

油膜,可在一定程度上隔离固体润滑材料与水和氧气,减缓固体润滑材料与水、氧气等的化学反应,改善其贮存性能并提高可靠性,起到保护作用。

2) 固体与油脂复合润滑体系中的油脂润滑剂可降低摩擦,延长空间活动部件润滑的使用寿命。对于油脂润滑而言,其润滑效果主要受润滑剂量和运动部件的运动速度及载荷的影响,在摩擦过程中易产生热量,使油脂润滑剂容易降解,增加适量的固体润滑薄膜可减少或阻止热量的产生,避免油脂润滑剂的降解。

结合国内外的调研情况,通过改进润滑方式采用适当固体润滑和油脂润滑剂复合使用,有可能提高谐波减速器的润滑和抗磨损性能,从而提高谐波减速器使用寿命。因此,针对前面固体润滑谐波减速器的寿命不能满足使用要求的问题,在原 WS_2 固体润滑谐波减速器上,涂覆宇航级601EF油脂后的固液复合润滑谐波减速器,从理论上讲,可以提高月面巡视器谐波减速器的工作寿命。

3 固液复合润滑月面环境适应性分析

考虑到月面上低重力、高真空、高温差等空间环境较为复杂,由于地面验证试验条件的局限性,需要对 WS_2 +601EF固液复合润滑进行月面环境适应性全面分析,开展油脂的蒸发量测试和固液复合润滑配伍特性测试验证固液复合润滑的效果,测试过程及方法不在本文中阐述。

3.1 摩擦学性能测试

通过采用真空球盘摩擦试验,进行 WS_2 和 WS_2 +601EF两种润滑方式的摩擦学性能比对。摩擦副材料选用9Cr18钢球,工作转速1 000 r/min,载荷5 N,赫兹接触应力921.4 MPa,摩擦半径12 mm,线速度约1.26 m/s,膜厚1 μm 。

WS_2 固体润滑在干摩擦条件下的平均摩擦系数约0.1,干摩擦普遍寿命较短,约450 r, WS_2 +601EF混合润滑的摩擦系数范围0.15~0.20,耐磨寿命 1.46×10^5 r,如图3所示。“ WS_2 +601EF”混合润滑方式与纯 WS_2 固体润滑相比较,“ WS_2 +601EF”混合润滑的摩擦系数略高于 WS_2 固体润滑干摩擦的摩擦系数,但是能显著增加摩擦副的耐磨寿命,说明“ WS_2 +601EF油脂”组成的复合润滑体系具有良好的润滑性能。

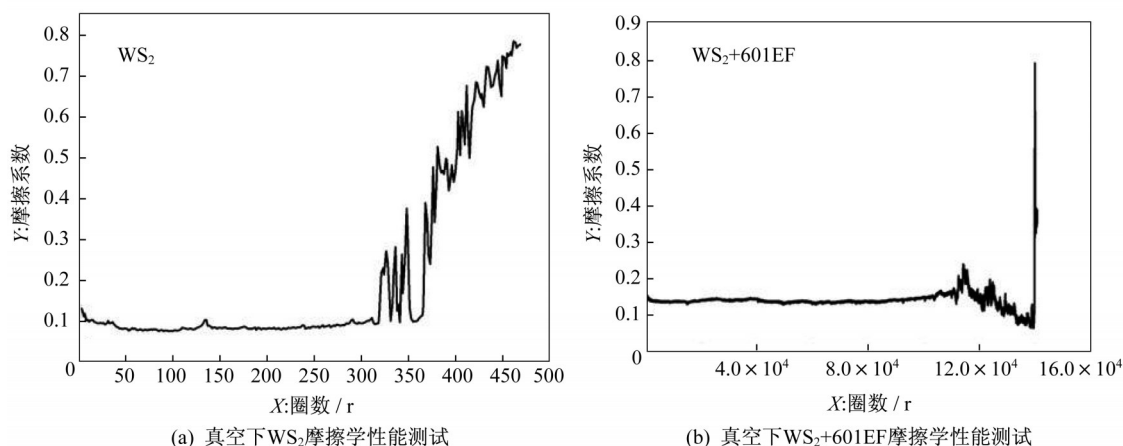


图 3 真空下 WS₂ 和 WS₂+601EF 摩擦学性能对比
Fig.3 Comparison of tribological properties of WS₂ and WS₂ + 601EF under vacuum

3.2 谐波减速器油脂蒸发损失量计算

谐波减速器的润滑脂蒸发计算量公式如下:

$$ML_n = W_n \times S \times t \quad (1)$$

式中: ML_n 为温度下润滑脂的蒸发损失量, g; W_n 为润滑脂在该温度下的蒸发速率, g/(cm²·s); S 为蒸发面积, cm²; t 为蒸发时间, s。

1) 首先在 150 °C、 1.6×10^{-4} Pa, 进行 60 h 基线扫描测试, 以去除天平在测试环境下的漂移。然后放入润滑脂, 重新抽真空至 1.6×10^{-4} Pa, 升温至 150 °C, 经过 10 h 出气, 然后开始 50 h 测试。通过计算平稳阶段的单位时间质损, 从而计算出蒸发速率。601EF 润滑脂在真空 150 °C 温度下的蒸发速率实测值为 7.65×10^{-9} g/(cm²·s)。

2) 针对月面 3 个月的测试周期, 每个测试周期共有 14 d 处于 150 °C 高温状态下, 另外一半时间处于低温状态, 由于润滑脂的蒸发速率与温度紧密相关。在 150 °C 下的蒸发速率一般是 20 °C 蒸发速率的上千倍, 因此, 低温下的蒸发可忽略不计, 仅计算高温时间, 即 $3 \times 14 \times 24 \times 60 \times 60 = 3\,628\,800$ s。

3) 润滑脂在实际使用工况中仅通过刚轮和柔轮传动副断面的啮合齿缝隙释放出不可返回的分子, 润滑脂蒸发面积是刚轮齿廓包含的截面积与柔轮齿廓包含的截面积之差的 2 倍。最大的缝隙面积, 即假设刚轮和柔轮轮齿全部磨平, 是刚轮齿根包含的截面积与柔轮齿根包含的截面积之差的 2 倍。

柔轮齿根圆直径为 $\Phi 34.4$ mm, 刚轮齿根圆直径为 $\Phi 35.8$ mm, 因此, 润滑脂最大蒸发面积为

$$S = 2\pi \frac{(d_{lr}^2 - d_{sr}^2)}{4} = 1.55 \text{ cm}^2 \quad (2)$$

对于谐波减速器, 在高真空环境中, 150 °C 高温下, 工作 42 d, 601EF 润滑脂通过刚轮柔轮的挥发量为

$$ML_n = W_n \times S \times t = 7.65 \times 10^{-9} \times 3\,628\,800 \times 1.55 = 4.3 \times 10^{-2} \text{ g} \quad (3)$$

因此, 采用“WS₂+601EF”混合润滑方式谐波减速器油脂在 150 °C 高温下蒸发量绝对值很小, 谐波减速器的油脂涂覆量约为 (1.9 ± 0.1) g, 蒸发量相对占比约为 2.3%, 不会对谐波减速器的润滑性能造成影响。

4 固液复合润滑谐波减速器寿命试验与月面验证

通过以上分析, 表明“WS₂+601EF”固液复合润滑体系可以满足月面的环境使用要求, 可以用于月面巡视探测器活动机构中。因此, 在原谐波减速器状态上开展了固液复合润滑后的谐波减速器寿命试验验证。

4.1 油脂涂覆要求

通过原 WS₂ 固体润滑谐波减速器上涂覆宇航级适用空间环境应用 601EF 油脂后的润滑方案, 即在谐波减速器刚轮齿面、柔轮齿面和柔轮与波发生器连接处等涂覆合适重量的 601EF 油脂, 柔性轴承内增加合适重量的 Z25 油, 涂覆状态如图 4 所示, 涂覆的油脂重量需大于 3.2 节计算得出的油脂蒸发量。

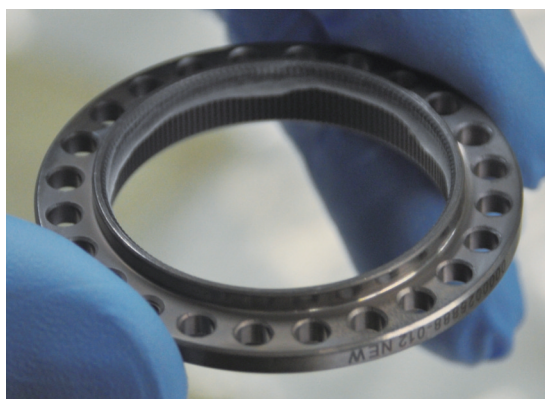


图 4 柔轮油脂涂覆状态

Fig.4 Grease coating state of flexspline

在谐波减速器涂油脂过程中,每套谐波减速器部件涂覆量必须有相应表格记录;最终装配前,应及时检查谐波润滑脂情况是否正常(应无严重损失、污染、夹渣、变色等异常现象),并及时清洁齿轮非工作面的多余物,保证后续装配试验顺利进行。

4.2 寿命试验验证

在经过油脂涂覆后,对固液复合润滑方式的谐波减速器开展寿命试验进行验证。试验条件与前期试验条件一致,见表 1。

表 1 寿命试验条件

Tab.1 Life test conditions

环境	输出力矩/ (N·m)	输入转速/ (r·min ⁻¹)	寿命要求/r
常温常压	≥10	40	≥17×10 ⁴

试验过程中监视驱动电机电流情况和运转声音,在整个试验过程驱动电流平稳,无噪声,谐波减速器共计运行 3.4×10^5 r 测试,试验后的扭转刚度和传动精度基本一致。寿命试验前后的谐波减速器扭转刚度曲线和部件外观照片,如图 5 和图 6 所示。试验后谐波减速器刚轮、柔轮的齿面和波发生器未见明显磨损,通过了寿命试验的考核。

在谐波减速器部件通过寿命试验后,将采用“WS₂+601EF 油脂”固液复合润滑的新谐波减速器装入机构产品中,重新开展机构加载热真空寿命试验,顺利通过了热真空寿命试验考核。

在确定谐波减速器润滑技术状态后,将固液复合润滑的谐波减速器应用在“玉兔号”和“玉兔二号”巡视器结构与机构分系统上。截至目前,“玉兔

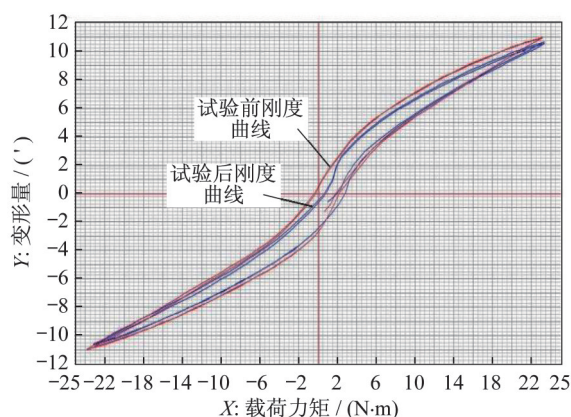


图 5 固液复合润滑谐波减速器试验前后谐波扭转刚度曲线

Fig.5 Torsional stiffness curve of solid-liquid composite lubrication harmonic reducer before and after test

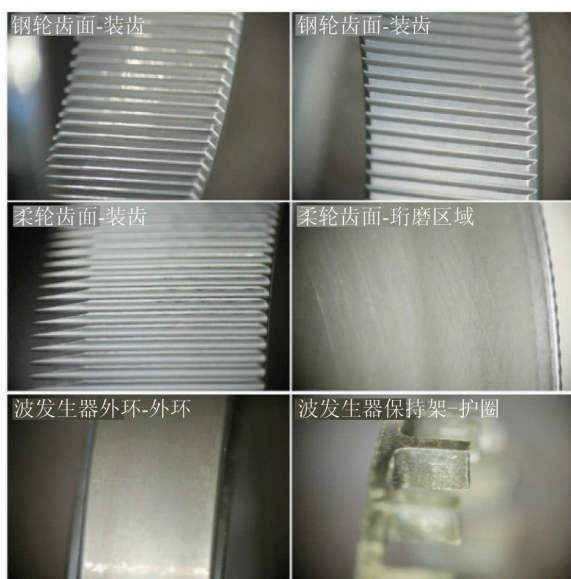


图 6 固液复合润滑谐波减速器寿命试验后各部件外观照片

Fig.6 Appearance pictures of components of the solid-liquid composite lubrication harmonic reducer after life test

二号”巡视器已在月面正常工作 26 个月,已远远超过原先寿命要求,通过了地面试验验证和月面在轨验证。

5 结束语

本文通过对固体润滑谐波减速器的失效机理和寿命影响因素进行了分析,采用全新“WS₂+601EF 油脂”等构成复合润滑体系,能产生良好的协同效应、相容性和浸润性,固体薄膜与油脂润滑剂起到了混合润滑的作用,使其润滑性能与纯固体润

滑相比获得显著改善,大大提高了机构的可靠性,较好地解决了月面环境下谐波减速器寿命不足的问题。本文的研究说明“WS₂+601EF 油脂”固液复合润滑体系,可以大大提高在高温差、高真空环境下谐波减速器的寿命,为后续其他航天器机构的润滑设计方面提供了一条新的设计思路。

参考文献

- [1] 陈烈民. 航天器结构与机构[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2005: 326-329.
- [2] 辛洪兵, 何惠阳, 陈菲. 谐波传动技术在航空航天领域中的应用[J]. 试验技术与试验机, 1997, 37(1/2): 22-23.
- [3] 周晖, 温庆平, 张伟文. 谐波减速器在空间飞行器中的应用[J]. 真空与低温, 2004, 10(4): 187-192.
- [4] 申振荣, 张伍, 贾阳, 等. 嫦娥三号巡视器及其技术特点分析[J]. 航天器工程, 2015, 24(5): 8-13.
- [5] 荣欣, 张建斌, 郭宏, 等. 月球车润滑与密封技术综述[J]. 航天器工程, 2001, 10(2): 34-38.
- [6] 翁立军, 汪晓萍, 李陇旭, 等. 谐波齿轮传动减速器的固体润滑失效机理[J]. 摩擦学学报, 1997, 17(2): 178-181.
- [7] 李俊阳, 王家序, 周广武, 等. 空间润滑谐波减速器失效机理及其加速寿命试验方法研究[J]. 摩擦学学报, 2013, 33(1): 44-48.
- [8] UEURA K, SLATTER R. Development of harmonic drive gear for space applications [C]//European Space Mechanisms and Tribology Symposium. Toulouse, France: European Space Agency, 1999: 259-264.
- [9] FUSARO R L. Space mechanisms technology workshop [R]. NASA/CP-2001-210971, 2000.
- [10] FUSARO R L. Preventing spacecraft failures due to tribological problems [R]. NASA/TM-2001-210806, 2001.
- [11] 吴葵平, 徐海燕, 鞠鹏飞, 等. 地面模拟空间环境下磷酸盐涂层的摩擦学行为[J]. 上海航天, 2020, 37(3): 45-50.
- [12] 姬芬竹. 空间润滑剂和液体润滑系统的研究进展[J]. 润滑与密封, 2010, 35(9): 122-126.
- [13] 郝俊英, 翁立军, 孙嘉奕, 等. 固体-油脂复合润滑 I: 二硫化钼膜在干摩擦及空间用油脂润滑下的摩擦学性能[J]. 摩擦学学报, 2010, 30(2): 105-110.
- [14] JONES W R, JANSEN M J. Handbook of space tribology [R]. NASA, 2000.
- [15] 权鑫, 孙嘉奕, 翁立军. WS₂薄膜/空间液体润滑剂复合润滑体系的摩擦学性能研究[J]. 摩擦学学报, 2014, 34(6): 665-672.
- [16] 周晖, 孙京, 温庆平, 等. 谐波减速器空间润滑及性能研究[J]. 宇航学报, 2009, 30(1): 378-381.
- [19] NOHMI M, MIYAHARA A. Modeling for lunar lander by mechanical dynamics software [C]// AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference and Exhibit. Reston, USA: AIAA, 2005: 6416.
- [20] 叶民镇. 地面撞击模型建模及相关参数确定[J]. 工程力学, 2006, 23(10): 107-110.
- [21] YUE S, NIE H, ZHANG M, et al. Dynamic analysis for vertical soft landing of reusable launch vehicle with landing strut flexibility [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2019, 233(4): 1377-1396.
- [22] YUE S, NIE H, ZHANG M, et al. Design and landing dynamic analysis of reusable landing leg for a near-space manned capsule [J]. Acta Astronautica, 2018, 147: 9-26.
- [23] ZHENG G, NIE H, CHEN J, et al. Dynamic analysis of lunar lander during soft landing using explicit finite element method [J]. Acta Astronautica, 2018, 148: 69-81.

(上接第 97 页)