

# 零秒脱落连接器可靠性设计及指标验证

王凤金, 王爱伟, 曹绘娜, 张国胜

(北京航天发射技术研究所, 北京 100076)

**摘要:** **目的** 实现零秒脱落连接器高可靠的要求。**方法** 在产品设计中系统地开展可靠性设计与分析工作, 进行设计方案优选以及设计方案优化, 提高连接器的固有可靠性水平。通过分析确定连接器的薄弱环节及其可靠性特征量, 并据此制定可靠性试验方案, 验证连接器可靠性水平。**结果** 通过对可靠性试验数据进行评估, 在规定的试验条件下, 零秒脱落连接器发射任务可靠度的单侧置信下限值满足规定的可靠性指标要求。**结论** 通过将可靠性设计与分析工作融入产品工程设计过程中, 在设计阶段有效地确保了连接器固有可靠性的实现。可靠性试验方案合理、可行, 有效地降低了样本数量及试验成本。为相似产品的可靠性设计验证工作积累了工程经验。

**关键词:** 零秒脱落连接器; 高可靠; 可靠性设计与分析; 可靠性验证

中图分类号: V19

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2023)01-0059-06

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2023.01.009

## Reliability Design and Index Verification of Zero-second Separating Connector

WANG Feng-jin, WANG Ai-wei, CAO Hui-na, ZHANG Guo-sheng

(Beijing Institute of Space Launch Technology, Beijing 100076, China)

**ABSTRACT:** The work aims to realize the high reliability of zero-second separating connector. First of all, the reliability design and analysis were carried out systematically in the product design, the design scheme was selected and optimized, and the inherent reliability level of the connector was improved. Then, through analysis, the weak links and reliability characteristic quantity of the connector were determined, and a reliability test scheme was formulated to verify the reliability level of the connector. Finally, through the evaluation of reliability test data, under the specified test conditions, the one-sided confidence lower limit of launch mission reliability of zero-second separating connector met the specified reliability index. By integrating the reliability design and analysis into the connector engineering design process, the realization of the inherent reliability of the connector is effectively ensured in the design stage. The reliability test scheme is reasonable and feasible, which effectively reduces the number of samples and test cost. In short, engineering experience has been accumulated for the reliability design and verification of similar products.

**KEY WORDS:** zero-second separating connector; high reliability; reliability design and analysis; reliability verification

气液连接器是运载火箭动力系统与地面推进剂加注、供配气系统的连接接口设备<sup>[1-4]</sup>, 在火箭发射

收稿日期: 2021-10-03; 修订日期: 2022-01-13

Received: 2021-10-03; Revised: 2022-01-13

作者简介: 王凤金(1985—), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为通用质量特性技术。

**Biography:** WANG feng-jin (1985—), Female, Master, Engineer, Research focus: general quality characteristics technology.

引文格式: 王凤金, 王爱伟, 曹绘娜, 等. 零秒脱落连接器可靠性设计及指标验证[J]. 装备环境工程, 2023, 20(1): 059-064.

WANG Feng-jin, WANG Ai-wei, CAO Hui-na, et al. Reliability Design and Index Verification of Zero-second Separating Connector[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(1): 059-064.

准备过程中,用于可靠输送推进剂、压缩气体等。20世纪研制的运载火箭气液连接器<sup>[5-6]</sup>均在火箭点火前脱落,而新一代运载火箭<sup>[7-8]</sup>基于发射流程需求,对部分气液连接器提出了零秒脱落的要求,它需要连接器在火箭点火后保持对接、持续工作,火箭起飞一定高度后,确认发射流程不可逆时才能脱落。零秒脱落连接器在与火箭分离时发射流程已不能终止,一旦不能脱落,则可能造成箭体损伤,甚至火箭爆炸或飞行失败<sup>[9-12]</sup>。因此,零秒脱落连接器的可靠性至关重要,而且对某零秒脱落连接器提出的任务可靠性指标高达0.999 9,可靠性要求高。

考虑到零秒脱落连接器的研制没有可借鉴的先例,尤其是针对一次性使用、小子样、高可靠的非电产品的可靠性试验研究较少,因此如何有效地应用可靠性系统工程理论确保产品高可靠性的实现与验证,是零秒脱落连接器研制过程中亟待解决的问题。为此,本文开展某零秒脱落连接器可靠性设计及指标验证研究,通过可靠性设计与分析工作,进行设计方案优选,以及设计方案优化,提高连接器的固有可靠性水平。采用寻找计量型可靠性特征量代替计数型特征量的思路,提出可靠性试验方案,验证连接器的可靠性水平。

## 1 可靠性设计与分析

### 1.1 设计要求

零秒脱落连接器需要满足发射任务期间可靠连接和密封,向箭上输送多路压缩气体,火箭起飞时适应火箭起飞滚转和振动,在多路高压供气带载工况下可靠脱落,脱落后不碰撞火箭等设计要求。任务可靠性指标为0.999 9。

### 1.2 设计方案优选<sup>[13-15]</sup>

在零秒脱落连接器设计方案的论证过程中,首先考虑采用提前脱落连接器应用较为成熟的球锁结构来实现连接器的对接锁紧、起飞随动、脱落功能,提出了2种设计方案,如图1所示。

根据零秒脱落连接器的工作流程和使用要求,采用FMECA方法<sup>[16]</sup>分析得到连接器在发射任务剖面下主要的故障模式为:连接器泄漏量超标、零秒不脱落,即可以认为连接器的任务可靠性由密封可靠性、脱落可靠性2部分组成。

方案A采用普通组合接头+2个球锁的结构,来应对多路高压组合密封时供气分离力较大的情况,可以实现连接器密封的功能;方案B采用供气分离力较小的平衡接头+中心球锁的结构来实现连接器多路高压组合密封的功能。考虑到2种方案都能可靠地实现连接器密封的功能,因此,下面仅对2种方案的脱落可靠性进行比较。

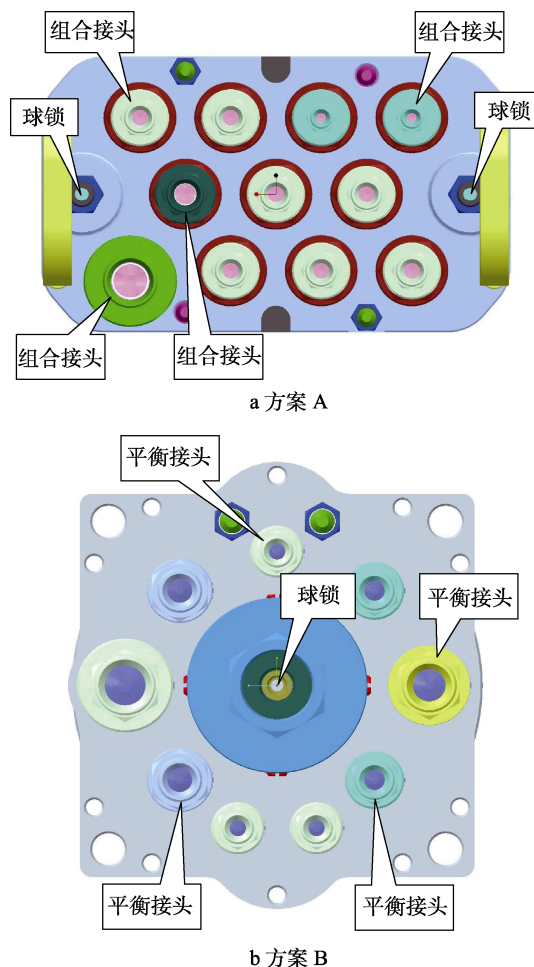


图1 设计方案

Fig.1 Design scheme: a) scheme A; b) scheme B

2种方案连接器的脱落功能均由球锁实现,通过将球锁解锁拉杆一端固定,依靠火箭点火起飞时的上升运动带动连接器上升,实现球锁的解锁,使连接器和火箭分离。方案A的2个球锁需要同时解锁才能实现连接器脱落,方案B的单个球锁解锁即可实现脱落。在假设除球锁外其他结构对连接器脱落影响相同的情况下,令 $R$ 代表单个球锁的解锁可靠度,则方案A与方案B的脱落可靠性模型分别为: $R_A=R^2$ , $R_B=R$ 。当 $R \in [0,1]$ 时, $R_A - R_B = R(R-1) < 0$ ,即 $R_A < R_B$ 。因此,在连接器方案论证过程中,首先将零秒脱落连接器的设计方案收敛为方案B。

### 1.3 设计方案优化

为进一步提高连接器的可靠性,在设计过程中对可能引起灾难性后果的故障给予了足够的重视,针对连接器脱落异常的故障事件开展了FTA工作<sup>[17]</sup>,寻找导致该故障事件的最基本原因,以便采取措施,对连接器的设计方案进行优化改进。依据连接器脱落异常的顶事件自上而下逐级建树,故障树如图2所示,底事件见表1。

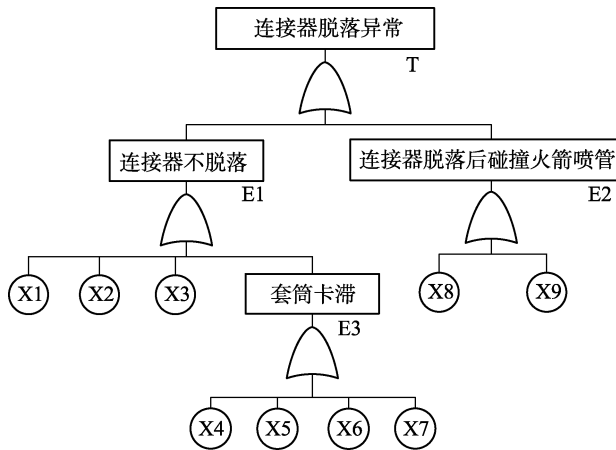


图 2 “连接器脱落异常”故障树

Fig.2 Fault tree of "connector separating abnormally"

表 1 “连接器脱落异常”故障树底事件

Tab.1 Bottom event of fault tree of "connector separating abnormally"

事件代码	说明
X1	球锁卡滞不解锁
X2	拉杆固定不牢
X3	拉锁固定失效
X4	导向长度不够
X5	导向间隙过大
X6	套筒刚度不足
X7	导向配合硬度不足
X8	牵制索固定不牢固
X9	牵制装置强度不足

采用下行法对故障树进行定性分析(见表 2), 得到 9 个一阶最小割集: {X1}, {X2}, {X3}, {X4}, {X5}, {X6}, {X7}, {X8}, {X9}。

表 2 下行法求解最小割集

Tab.2 Downward method for finding minimal cutset

步骤	1	2	3	4
过程	E1	X1	X1	X1
	E2	X2	X2	X2
		X3	X3	X3
		E3	X4	X4
		E2	X5	X5
			X6	X6
			X7	X7
			E2	X8
				X9

在设计阶段要想把顶事件的发生概率降至最低, 则需要使每个最小割集中至少有 1 个底事件恒不发生(或发生概率极低)。因此, 分别对每个一阶最小割集进行设计改进, 所采取的措施见表 3。

通过故障树定性分析, 发现了中心球锁式连接器的设计薄弱环节, 对球锁卡滞的故障模式采取了冗余解锁措施, 形成了中心球锁式、拉断销脱落冗余的连接器设计方案。当球锁出现卡滞故障后, 可通过拉断销强制解锁, 连接器脱落可靠性高, 该连接器设计方案具有较高的可行性。

表 3 针对最小割集的改进措施

Tab.3 Improvement measures for minimal cutset

最小割集	底事件	改进措施
{X1}	球锁卡滞不解锁	在球锁承力螺母上方设置一个削弱的拉断销, 通过控制其直径, 使其满足在一定载荷内强制拉断。如果球锁不解锁, 则拉断销进行强制破坏, 实现冗余解锁
{X2}	拉杆固定不牢	制定操作检查要求, 紧固到位
{X3}	拉索固定失效	拉索螺杆通过螺母备紧
{X4}	导向长度不够	分析计算及试验验证可行, 后续通过可靠性试验验证
{X5}	导向间隙过大	尽量减小导向配合的间隙
{X6}	套筒刚度不足	采用高强度材料
{X7}	导向配合硬度不足	采用高强度材料, 配合面进行表面硬度处理
{X8}	牵制索固定不牢固	牵制索螺杆通过两个螺母备紧, 4 根牵制索互为冗余
{X9}	牵制装置强度不足	开展强度仿真

## 2 可靠性指标验证

### 2.1 可靠性试验要求

在试验样本有限(参试样本最多提供 3 台)的情况下开展可靠性试验, 实现对连接器发射任务可靠性指标的验证。

### 2.2 可靠性试验方案设计

连接器为一次性使用(执行一次发射任务后就报废)的机械产品, 由于其可靠性指标要求很高, 如果按成型型试验方式来验证可靠性指标, 则需要大量的试验样本, 难以满足型号研制进度与试验费用的要求。针对连接器一次性使用、可靠性指标高、试验子

样少、使用条件复杂、机械类产品特点,采用寻找计量型可靠性特征量代替计数型(成败型)特征量的思路<sup>[18-19]</sup>,开展了可靠性试验方案的设计研究,制定了综合试验剖面,验证连接器是否满足预定的可靠性指标要求。

### 2.2.1 可靠性特征量及可靠性试验设计参数的确定

可靠性特征量是指能够衡量产品可靠性水平的可检测的随机变量。首先根据 FMECA 结果,确定对连接器功能实现具有致命性影响的薄弱环节为零秒脱落环节,其相应的可靠性特征量为脱落次数,特征量分布类型为威布尔分布。

可靠性试验就是再现产品规定功能实现能力的过程。基于确定的连接器薄弱环节及其可靠性特征量,在本试验方案中以连接器脱落试验为主要试验内容。在试验过程中对连接器的对接锁紧、密封性、脱落等各项功能性能进行检测。若试验过程中出现检测结果不满足规定功能性能要求的情况,均判定连接器出现故障。由于连接器脱落环节采取了冗余设计措施,为了减少试验样本数量,节约试验费用,不再分别考核球锁解锁脱落和拉断销强制拉断脱落这 2 种方式的可靠性,不论连接器以何种方式脱落,均视为脱落成功。

采用服从威布尔分布的定时截尾试验方法进行试验设计,在试验过程中,责任故障数为 0 的条件下,按式(1)计算得到可靠性特征量的试验值。

$$T = t_0 \left[ \frac{\ln(1-\gamma)}{n \times \ln R} \right]^{1/m} \quad (1)$$

式中:  $R$  为可靠性置信下限;  $t_0$  为单次发射任务中连接器对接、脱落次数;  $m$  为威布尔分布的形状参数;  $n$  为参试产品的个数;  $T$  为总有效试验次数;  $\gamma$  为置信度。

试验判断规则:若试验中责任故障为 0,则连接器的可靠性满足指标要求;否则,连接器的可靠性不满足指标要求,需要分析原因,采取改进措施。

### 2.2.2 可靠性试验剖面设计

制定可靠性试验剖面的主要工作在于确定试验中施加应力的类型、施加应力的量级、施加应力的时间、施加应力的顺序等<sup>[20]</sup>。

在可靠性试验中,应尽量对参试产品施加模拟真实使用工况的环境条件。由于连接器安装在火箭尾端面,连接器脱落时,火箭发动机喷管位于连接器下方,此时燃气流不直接冲刷连接器,对连接器的冲击力很小;连接器脱落后,当喷管高于连接器时,连接器才承受燃气流的直接冲刷和高温烧蚀。考虑到连接器为一次性使用的产品,燃气高温烧蚀后就报废,因此在可靠性试验方案中不再考虑火箭发射时燃气流的影响。由于连接器需要在火箭点火起飞时脱落,为供气

带载脱落,并且存在火箭点火后的振动、滚转、漂移等复杂的工况,考虑到连接器为机械结构类产品,对温度、湿度等自然环境条件不敏感,结合工程可行性,确定可靠性试验中施加的综合应力包括对接和脱落、供气压力、振动、球锁解锁拉索方向 4 种。试验剖面如图 3 所示。试验期间,每隔  $X$  个循环,对连接器的密封性能进行一次检测。

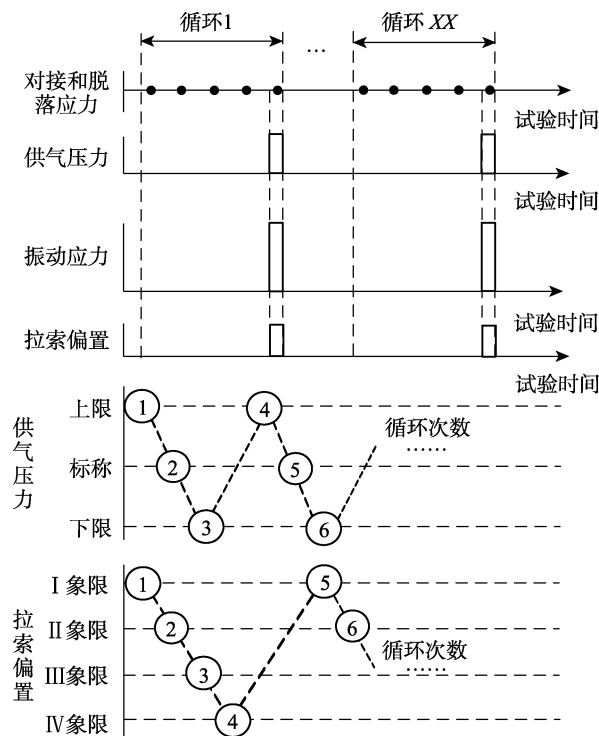


图3 零秒脱落连接器可靠性试验剖面  
Fig.3 Reliability test profile of zero-second separating connector

1) 振动应力。可靠性试验中,振动应力的振动类型、振动量级、振动谱型、振动方向等采用型号在相关文件中规定的验收级振动应力。单发发射任务中,连接器的振动时间依据实际发射任务流程确定。

2) 供气压力,连接器为多路组合供气连接器,可靠性试验中的供气项目为型号在相关文件中规定的零秒供气项目。供气压力依据连接器技术指标确定,并按“上限值→标称值→下限值”循环变化施加。供气持续时间不小于供气压力稳定时间,连接器脱落后停止供气。

3) 球锁解锁拉索方向,通过调整拉索与连接器球锁轴向的角度,来模拟火箭起飞时的姿态偏转。在可靠性试验中,使拉索对球锁的拉力方向偏离球锁轴向的角度,按“I象限→II象限→III象限→IV象限”循环变化。

## 2.3 可靠性试验结果

按照制定的可靠性试验方案,进行了3台连接器的可靠性试验。试验期间,连接器未发生责任故障,

因此不需要采取改进措施使可靠性增长。

通过对可靠性试验数据进行评估<sup>[21]</sup>,在规定的试验条件下,3台连接器的发射任务可靠度的单侧置信下限值 $R_L > 0.999\ 9$ ,满足规定的可靠性指标要求。

### 3 结语

1) 从方案论证阶段开始,将可靠性设计与分析工作融入到零秒脱落连接器的工程设计过程中,实现了设计方案的优选以及设计方案优化,在设计阶段有效确保了连接器固有可靠性的实现。

2) 通过分析确定连接器的薄弱环节及其可靠性特征量,并据此制定可靠性试验方案,有效地降低了试验样本数量及试验成本,并针对非电产品的特点创新性地对供气压力进行了拉偏,提高了试验效率,试验方案合理、可行,为小子样、高可靠、机械产品的可靠性试验方法的制定积累了工程经验,具有较高的技术推广意义。

#### 参考文献:

- [1] 王瑞铨. 长征系列火箭地面发射技术的成就与未来[J]. 导弹与航天运载技术, 2002(5): 53-62.  
WANG Rui-quan. The Achievement and Future of Ground Launching Technology of Long March Launch Vehicle[J]. Missiles and Space Vehicles, 2002(5): 53-62.
- [2] 徐明俊. 低温高压自动脱落冷氦连接器研制[J]. 导弹与航天运载技术, 1999(2): 26-30.  
XU Ming-jun. The Development of Auto Uncaging Cold Helium Connector of Low Temperature and High Pressure[J]. Missiles and Space Vehicles, 1999(2): 26-30.
- [3] 王爱伟, 刘忠明, 范虹, 等. 运载火箭连接器总体方案技术探讨[J]. 导弹与航天运载技术, 2019(2): 79-83.  
WANG Ai-wei, LIU Zhong-ming, FAN Hong, et al. Technical Exploration on Overall Scheme of Launch Vehicle Connector[J]. Missiles and Space Vehicles, 2019(2): 79-83.
- [4] 周载学. 发射技术[M]. 北京: 中国宇航出版社, 1993.  
ZHOU Zai-xue. Launching Technology[M]. Beijing: China Aerospace Press, 1993.
- [5] 符锡理. 运载火箭脐带自动脱落连接器[J]. 国外导弹与航天运载器, 1988(9): 60-67.  
FU Xi-li. Automatic Drop Connector for Umbilical Cord of Launch Vehicle[J]. Missiles and Space Vehicles, 1988(9): 60-67.
- [6] 符锡理. 运载火箭脐带自动脱落连接器技术进展[J]. 中国航天, 1994(5): 29-30.  
FU Xi-li. Technical Progress of Umbilical Cord Automatic Drop Connector for Launch Vehicle[J]. Aerospace China, 1994(5): 29-30.
- [7] 李东, 王珏, 何巍, 等. 长征五号运载火箭总体方案及关键技术[J]. 导弹与航天运载技术, 2017(3): 1-5.  
LI Dong, WANG Jue, HE Wei, et al. The General Scheme and Key Technologies of CZ-5 Launch Vehicle[J]. Missiles and Space Vehicles, 2017(3): 1-5.
- [8] 李东, 王珏, 李平岐, 等. 我国新一代大型运载火箭长征-5 首飞大捷[J]. 国际太空, 2016(11): 2-7.  
LI Dong, WANG Jue, LI Ping-qi, et al. New Generation of Large Launch Vehicle CZ-5 Launched Successfully[J]. Space International, 2016(11): 2-7.
- [9] 王爱伟, 刘忠明, 胡亚涛, 等. 自适应起飞脱落的支撑式插拔连接器系统[J]. 导弹与航天运载技术, 2017(4): 81-84.  
WANG Ai-wei, LIU Zhong-ming, HU Ya-tao, et al. Self-Adaptive Take-off Supporting-Feed-Connector System[J]. Missiles and Space Vehicles, 2017(4): 81-84.
- [10] 王爱伟, 唐强, 王立, 等. 一种平衡式气路插拔连接器的研制[J]. 导弹与航天运载技术, 2015(3): 104-106.  
WANG Ai-wei, TANG Qiang, WANG Li, et al. Development on a Type of Balanced Gas Circuit Wet-Mate Connector[J]. Missiles and Space Vehicles, 2015(3): 104-106.
- [11] 张振华, 何焱, 王爱伟, 等. 零秒脱落连接器“拉断球头”拉断力一致性研究[J]. 导弹与航天运载技术, 2018(5): 84-88.  
ZHANG Zhen-hua, HE Yi, WANG Ai-wei, et al. Study on the Consistency of Tensile Breaking Force of T-0 Rise-off Connector[J]. Missiles and Space Vehicles, 2018(5): 84-88.
- [12] 胡亚涛, 王爱伟, 张振华, 等. 中心球锁式零秒脱落连接器的设计与应用[J]. 导弹与航天运载技术, 2019(1): 112-115.  
HU Ya-tao, WANG Ai-wei, ZHANG Zhen-hua, et al. Design and Application of Central Locked Zero-Second Connector[J]. Missiles and Space Vehicles, 2019(1): 112-115.
- [13] 曾声奎. 可靠性设计与分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.  
ZENG Sheng-kui. Reliability Design and Analysis[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011.
- [14] 李良巧. 可靠性工程师手册[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2012.  
LI Liang-qiao. Handbook of Certified Reliability Engineer[M]. Beijing: China Renmin University Press, 2012.
- [15] 曾声奎. 系统可靠性设计分析教程[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2001.  
ZENG Sheng-kui. Course of System Reliability Design and Analysis[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics & Astronautics Press, 2001.
- [16] GJB/Z 1391—2006, 故障模式、影响及危害性分析指南[S].  
GJB/Z 1391—2006, Guide to Fault Mode, Effects and Criticality Analysis[S]
- [17] GJB/Z 768A—98, 故障树分析指南[S].  
GJB/Z 768A—98, Guide to Fault Tree Analysis[S].
- [18] 刘志全. 航天器机构的可靠性试验方法[J]. 中国空间科学技术, 2007, 27(3): 39-45.

- LIU Zhi-quan. Reliability Test Methods of Spacecraft Mechanisms[J]. Chinese Space Science and Technology, 2007, 27(3): 39-45.
- [19] 周正伐. 航天可靠性工程[M]. 2版. 北京: 中国宇航出版社, 2007.
- ZHOU Zheng-fa. Aerospace reliability Engineering[M]. 2nd Editon. Beijing: China Aerospace Press, 2007.
- [20] 姜同敏. 可靠性与寿命试验[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
- JIANG Tong-min. Reliability and Life Test[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012.
- [21] 胡昌寿. 航天可靠性设计手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.
- HU Chang-shou. Aerospace Reliability Design Manual[M]. Beijing: China Machine Press, 1999.
- 责任编辑: 刘世忠