

无源多通道星载光纤滑环可靠性设计与试验

覃波,李广宁,王振,程红霞,王超奇

(中国电子科技集团公司 第三十四研究所,广西 桂林 541004)

摘要:目前关于光纤滑环(FORJ)在空间应用领域的文献较少,设计了一种无源多通道星载 FORJ,首先分析了该设备在空间环境中运行时可能面临的问题及挑战,然后基于成熟的技术方案进行了针对性的可靠性设计,最后对设计的星载 FORJ 进行了试验验证。试验结果表明,所提的无源多通道星载 FORJ 达到了空间应用要求。

关键词:无源多通道星载光纤滑环;可靠性;插入损耗;摩擦力矩;挥发性;寿命试验

中图分类号:TN91 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2024)06-0046-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2024.06.009

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Reliability design and testing of passive multi-channel satellite-borne fiber optic rotary joint

QIN Bo, LI Guangning, WANG Zhen, CHENG Hongxia, WANG Chaoqi

(The 34th Research Institute of CETC, Guilin Guangxi 541004, China)

Abstract: At present, there is limited literature on the application of fiber optic rotary joint(FORJ) in the field of space. A passive multi-channel space-borne FORJ has been designed. Firstly, the potential problems and challenges that the device may face when operating in space environments are analyzed. Then, targeted reliability design is carried out based on mature technical solutions. Finally, the designed space-borne FORJ is experimentally verified. The experimental results indicate that the proposed passive multi-channel space-borne FORJ meets the requirements of space applications.

Key words: passive multi-channel space-borne fiber optic rotary joint, reliability, insertion lost, friction torque, volatility, life test

0 引言

卫星的天线系统与其它内部分系统及单机之间需要传输大量的多类型信号,通常采用电缆作为传输介质。在某些情况下,卫星还需利用旋转连接装置(如滑环)将信号从持续旋转的天线端传输至内部静止平台。在早期,为了实现卫星内部信号的旋转传输,王晓和刘兴富等人^[1-2]率先开展了星载电汇流环的可靠性设计及评估工作。随着光纤信号旋转传输技术的成熟,光纤滑环(FORJ)也成为卫星内部旋转传输设计的一个选项。FORJ 亦称光滑环、光纤旋转连接器^[3]、光纤

旋转接头^[4],主要分为有源 FORJ 和无源 FORJ 两大类。其中,无源 FORJ 又可依据通道数量细化为单通道 FORJ 和多通道 FORJ^[5]。目前,无源多通道 FORJ 在雷达、光电吊舱、光电桅杆、光电经纬仪、声纳及系留气球等多个领域应用广泛^[6]。然而,在卫星内部系统间通信领域的应用报道则较为少见。无源多通道 FORJ 特别适合于卫星内部使用,能有效实现转动部件与非转动部件之间的多种信号传输,包括但不限于星载天线阵列信号、时频同步信号、遥测遥控指令、内部总线数据以及高清视频信号等。随着我国空间探索任务对卫星转动机构在性能与寿命等方面要求的日益增长,无源多通道 FORJ 凭借其大容量、多业务承载、低损耗及灵活复用的光纤通信特性,成为了旋转体制卫星实现性能迭代升级的关键选择。

本文针对低轨环境应用,设计一种无源多通道星载 FORJ,并详细报告相关的试验验证情况。

收稿日期:2024-90-30。

基金项目:广西重点研发计划(桂科 AB24010272)资助。

作者简介:覃波(1980—),男,广西环江人,研究生,高级工程师,广西光学学会理事,主要从事光电子技术研究、航天产品技术研究。负责国家重大工程、省部级项目 10 余项,获省部级一等奖 1 项、二等奖 3 项。



1 无源多通道星载 FORJ 设计考虑

结合卫星的业务需求和可靠性需求,并考虑到其在体积和抗干扰能力方面的优势,以及装配的便利性^[7],本文中星载 FORJ 采用了无源多通道的设计方案,该方案有利于降低应用平台的设计和装配难度。此外,采用无源设计结合光波分复用技术,极大提高了光纤带宽资源的利用率,可以使一根光纤的传输容量比单波长传输增加几倍至数十倍^[8],方便后续业务扩展及升级。无源多通道星载 FORJ 可以同时传输多路光纤信号,有利于支撑信号通道物理备份。目前,能够实现无源多通道星载 FORJ 设计的方案很多,主要包括道威棱镜方案、菲涅耳透镜方案和反射镜组合方案等^[9]。本文从指标、扩展性、体积和可靠性综合考虑,认为道威棱镜方案较为适合。

由于无源多通道星载 FORJ 的空间应用资料较少,其可靠性设计成为方案设计的重要环节,本文主要从以下 7 个方面对其进行考虑和设计:

1)可靠性与寿命。随着信号种类和数量的增多,以及带宽和速率的提升,无源多通道星载 FORJ 的优势得以充分展现。FORJ 作为信号传输的关键中间枢纽,对其可靠性和工作寿命提出了严格的要求。因此,在选择 FORJ 时,应优先考虑成熟可靠的设计,并确保其经过充分的可靠性验证。

2)真空环境。在高真空环境中,主要关注的是由气压差引发的异常膨胀效应、挥发污染的风险以及散热与润滑方式的合理选择。内部结构考虑非气密设计或封闭室的真空环境保持设计,并对使用胶水的工序实施了脱气处理。针对所用材料及粘胶,需分析其挥发特性,并设计防溢出结构,随后进行挥发相关试验以验证其适用性。由于真空环境中散热条件与地面环境截然不同,设计时应依据使用模式、环境特点及 FORJ 自身的发热与散热性能,设计并验证相应的试验。对于 FORJ 内部需润滑的部件,应结合性能指标、使用寿命及相关敏感性因素,精心选择最适合的润滑方式。

3)地球引力的影响。当在地面工作时,机械设备转动磨损所产生的磨屑会在重力的作用下自然脱落或在地表堆积。然而,在空间环境失重的条件下,这些磨屑则会悬浮在设备内部空间中。因此,必须对转动过程中可能产生的磨屑及其潜在影响进行全面分析,并针对可能产生的不利影响,采取有效的控制和防范措施。

4)宇宙射线的影响。通过对辐照环境、材料构成

以及结构防护的深入分析和精心设计,确保设备在预设的辐照环境中能够正常工作。

5)体积和重量。星载 FORJ 对体积和重量要求非常严格,需要根据应用平台的要求控制体积和重量。

6)抗冲击振动。星载 FORJ 在随卫星发射的过程中需承受更为剧烈的冲击与振动。为此,其结构设计需针对这些极端条件进行优化与简化,特别是对力学敏感的光学部件,需进行承力情况的仿真分析,以确保在发射过程中免受损害。

7)为了保证星载 FORJ 在全寿命周期内可靠工作,需对其进行冗余设计。

2 无源多通道星载 FORJ 构成

根据某卫星的具体技术要求,并综合考虑其环境适应性分析,本文介绍的无源多通道星载 FORJ 采用被动式机械旋转部件的设计。该设计基于道威棱镜独特的光学特性,确保光信号能够跨越旋转界面实现不间断的传输。该 FORJ 结构如图 1 所示,主要由道威棱镜、精密传动机构、高性能轴承以及多个关键套筒组件构成。

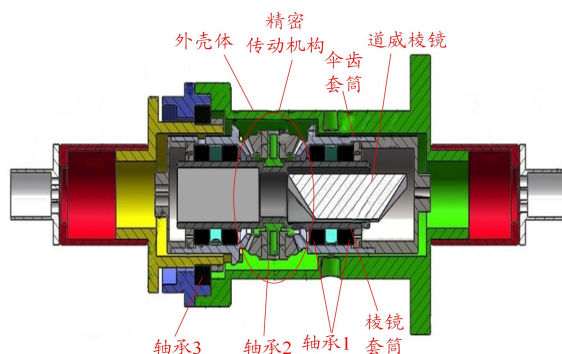


图 1 无源多通道星载 FORJ 结构示意图

无源多通道星载 FORJ 是精密的光学机械结合产品,包含几十种零件,其构成零件分解如图 2 所示。由于主要光学零件和机械零件的加工、装配、调试过程能直接对产品的性能指标、环境适应性和长期稳定性产生影响,少数关键工艺环节不可逆,故需要严格控制对构成零件的加工和装调过程。无源多通道星载 FORJ 实物图如图 3 所示。

3 无源多通道星载 FORJ 可靠性设计

可靠性设计是确保星载产品安全可靠运行的关键环节。根据任务提出的使用条件,本文综合考虑各种因素,评估并改善产品的可靠性,使其能够满足任

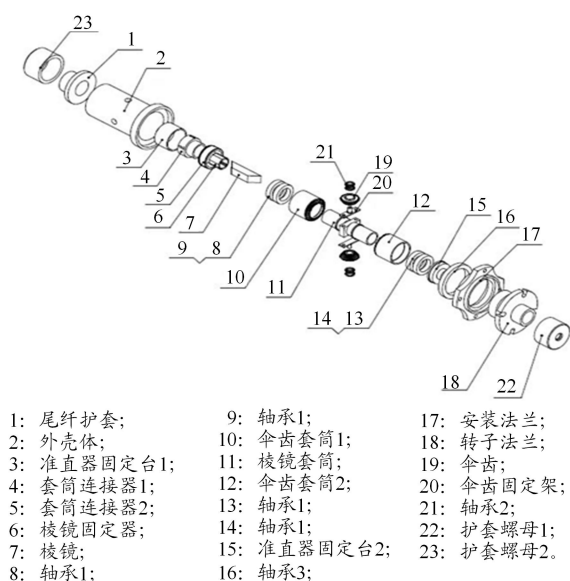


图2 无源多通道星载 FORJ 构成零件图



图3 无源多通道星载 FORJ 实物图

务的可靠性要求。无源多通道星载 FORJ 可靠性设计主要考虑失效模式分析、冗余设计、降额设计、结构设计、热设计等。

3.1 失效模式分析

无源多通道星载 FORJ 的失效模式多样,主要包括:由高位跌落导致的损坏;光纤或光纤套管折断引发的失效;因温度过高或过低引发的结构形变,进而导致指标劣化;光功率过高或光学端面污染直接造成光纤烧毁;在真空环境中,挥发物附着于光学面和机械面,影响光学和力学指标;热真空条件下光纤与附件不匹配产生的微弯,降低光学指标;装配过程中预紧控制不当,不仅引发光学指标劣化、不稳定甚至失效,还增加了摩擦力矩;安装不当直接导致的功能异常或失效。

3.2 冗余设计

光纤传输通常应用于需要处理多类型、大量数的数据以及要求高带宽和大容量的场景中。在这样的系统中,如果光纤链路中的任何一个环节出现问题,比如接头松脱或光纤损耗增加,都可能会影响到多种业务信号的正常传输。为此,星载 FORJ 通过设计的物理路径来为重要的光纤通道提供备份支持,从而显著提高了整个系统的可靠性。

3.3 降额设计

在设计 FORJ 时,轴承的最高转速、转动寿命、径向跳动指标以及光学部件的最大承受功率均按照优于 0.5 的降额系数进行设计。这样做是为了确保在极端环境条件下设备仍能稳定运行。降额参数主要基于对产品力学振动和光功率降额的考量。为了保证长时间稳定运行,本文特别关注了光功率指标随时间可能下降的情况。损耗指标根据系统评估值进行了进一步优化,以增加系统的光功率余量。即使在线路损耗增大或器件老化导致功率下降的情况下,系统也具备调整恢复的能力。

3.4 结构设计

为了实现多路光信号的旋转传输,无源多通道 FORJ 内部设计了精密机械结构,以确保光学器件在共轴、旋转和传动过程中的平稳性。采取针对性的设计措施,以增强其环境适应性。光学部件安装时使用低应变胶水粘合,并对光学部件与装配结构的接触点采用专门的粘接工艺,从而提升抗冲击能力。

套筒与轴承通过过盈配合的方式进行装配,并通过施加预紧力,结合止挡环和限位环的应用,减小轴承的游隙。光纤部件平台则采用细牙螺纹与螺纹胶粘接的方式进行紧固。传动机构采用了间隙联动配合设计,确保转子端承受的力不会传导到光学旋转部件上。此外,在转子端轴承的内圈和外圈前后设置刚性限位,以确保轴承牢固地固定在其位置上。为达到紧固和抗震的双重效果,在套管和滑环外壳的关键间隙处灌注了一种凝固后具有弹性的胶体。

3.5 热设计

热设计需要考虑环境温度变化对 FORJ 内部零件形变的影响,以确保这些形变不会超出公差要求,从而影响性能指标。主要涉及 2 个方面:一是 FORJ 的外壳体,二是内部光学平台。为了应对热胀冷缩的问题,FORJ 的外壳体与内部光学平台之间预留了伸缩空隙。根据外壳材料的热膨胀系数计算,在达到鉴定级

温度上限时,外壳体的尺寸变化不超过 $1\text{ }\mu\text{m}$ 。此外, FORJ 内部的关键部件,如定子端准直器平台、棱镜固定环和转子端准直器平台等,均采用不锈钢材质。在鉴定级温度上限条件下,这些不锈钢部件的尺寸变化同样被控制在不超过 $1\text{ }\mu\text{m}$ 的范围内。因此,根据公差控制要求,这 2 种尺寸的变化对器件整体性能的影响非常小。

3.6 润滑方式选择

在无源多通道星载 FORJ 中,需要润滑的部件主要包括轴承和齿轮。目前,在空间环境中,成熟的润滑方式主要有油脂润滑和固体润滑 2 种。与油脂润滑相比,固体润滑具有蒸发率极低、工作温度范围更宽以及更好的耐辐照性能等优点。经过试验验证,靠近外壳体的传动部分轴承采用了固体润滑方式。具体方法是通过沟道溅射润滑膜和自润滑保持架产生转移润滑膜。这种润滑工艺已经成熟,并在多个型号的任务中成功应用。对于内部光学套筒中的轴承,则采用油脂润滑。本文在设计时,特别注意了低径向跳动与装配预紧之间的平衡,并选用了已经在空间应用中证明成功的低饱和蒸气压空间润滑油脂。

3.7 润滑方式的挥发性影响分析

无源多通道星载 FORJ 内部光学平台中的轴承和齿轮采用了空间润滑脂进行润滑。在使用过程中,尤其是在真空条件下,润滑脂会产生挥发物。挥发量与所添加的润滑脂量有关。根据轴承及齿轮的加脂量计算,挥发量满足挥发控制要求。此外,通过分析轴承及齿轮的安装位置和内部间隙,确保了两者产生的挥发物会被封闭在套筒 2 和套筒 3 之间的密闭空间内。经热真空试验中的光学指标、关联挥发敏感设备受影响情况以及挥发性测试分析表明,没有发现对光学敏感面和机械敏感面产生明显不良的影响。

3.8 环境温湿度对 FORJ 影响分析

采用固体润滑方式的轴承在存储和装配过程中需要严格控制环境的湿度和洁净度。通常情况下,轴承的存储和装配应在相对湿度不超过 60% 的环境中进行。如果环境湿度过高,将会对轴承的润滑膜层寿命造成不利影响。暴露在高湿度环境中的时间越长,膜层寿命的减少就越严重,甚至可能导致关键功能失效。

4 验证试验

4.1 轴承寿命试验

无源多通道星载 FORJ 的转动寿命主要取决于其轴承部件的性能。本文设计的星载 FORJ 的轴承选用

了固态润滑和脂润滑 2 种方式,并针对 FORJ 采用固态润滑技术的关键轴承部件,进行了 1 300 万转的寿命验证试验。试验后,轴承的外观及沟道状态图片如图 4 所示。试验结果显示,轴承运转顺畅、外观保持良好且磨屑产生量极少。进一步拆解检查发现,轴承沟道内的润滑膜完好无损,滚动体表面已形成了优质的转移润滑膜,同时保持架的磨损程度极低。综合评估,该轴承完全满足 FORJ 对转动寿命的要求,其寿命验证情况如表 1 所示。采用脂润滑方式的轴承使用低饱和蒸汽压的空间润滑脂和金属保持架,这使得轴承在运转过程中能够获得持续润滑,有效减少摩擦和磨损。在正确控制加脂量的情况下,轴承的使用寿命可达 1 000 万转以上,完全能满足空间应用对转动寿命的要求。



(a) 轴承外观



(b) 轴承沟道

图 4 寿命试验后轴承外观及沟道图

表 1 固态润滑轴承寿命验证情况

轴承载荷/N	接触应力/GPa	试验转速/rpm	总转数/r
2	0.452	3 000	1.3×10^7

覃波,李广宁,王振,等:无源多通道星载光纤滑环可靠性设计与试验

4.2 环境鉴定试验

为了验证无源多通道星载 FORJ 空间环境适应性,本文按照相关航天器试验要求对设计的星载 FORJ 进行环境鉴定试验。环境鉴定试验项目主要包括力学方面的振动试验、热学方面的热真空试验等。其中,热真空试验的结果对于评估无源多通道星载 FORJ 的空间环境适应性有着重要作用。热真空试验条件如表 2 所示。

名称	范围
真空罐气压/Pa	$\leq 1.3 \times 10^{-3}$
温度范围/℃	-25~+60
温变速率/℃/min	≥ 1
转速/rpm	15~180

为了更真实地模拟实际使用条件,本文将设计的星载 FORJ 安装到转动平台上之后进行力学试验。试验中 FORJ 按预设速度旋转,并进行指标测试。无源多通道星载 FORJ 内部采用固态润滑方式的轴承在环境鉴定试验中要严格控制环境的湿度和洁净度,湿度一般不能超过 60%。为满足试验中星载 FORJ 旋转状态测试的要求,需要将星载 FORJ 安装在专用驱动系统上进行试验,专用驱动系统具备在热真空环境中 ze 常工作的能力。在热真空试验过程中,对于专用驱动系统中散热较大的设备(例如热真空电机和传感器),星载 FORJ 需要安装温度传感器监测其温升情况。在环境鉴定试验前后除对光学指标进行测试外,还需要重点检查摩擦力矩的变化情况。热真空试验配置图如图 5 所示。试验结果表明,无源多通道星载 FORJ 在经过环境鉴定试验后光学指标和力学指标满足指标要求,稳定性较好,性能指标无明显劣化的迹象。

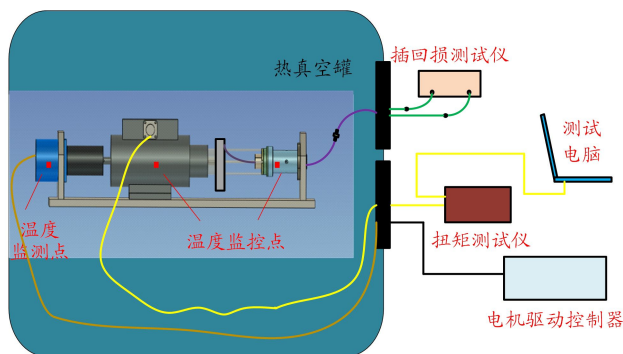


图 5 热真空试验配置图

4.3 验收试验

无源多通道星载 FORJ 的验收试验项目主要有振动试验、热真空试验和磁试验,本文按照实际的安装状态对其开展相关试验。为了最大限度模拟 FORJ 在

空间环境中的使用工况,热真空试验时对 FORJ 光学指标监测需要在预设的旋转状态下进行。

验收试验的目的是对 FORJ 正式产品的状态进行检验。除了按规定项目进行性能测试外,最重要的是将试验前后获得的试验数据进行比对。通过分析插入损耗、摩擦力矩等数据,可以判断试验过程中是否存在异常变化,从而发现 FORJ 在卫星发射过程及空间环境中可能暴露出的潜在问题。由试验结果可知,无源多通道星载 FORJ 在经过验收试验后光学指标和力学指标良好,在各类联试和随整机试验过程中表现稳定,通过分析全周期数据,性能指标无明显劣化的迹象。

4.4 寿命试验

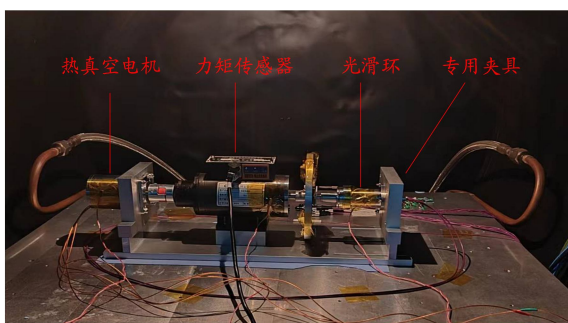
寿命试验旨在考核无源多通道星载 FORJ 在预设的环境下是否能满足卫星平台对其工作寿命的要求。考虑到寿命试验时间长、投入大,因此与其它试验合并。由于真空环境与大气环境存在区别,无源多通道星载 FORJ 内部的轴承在真空环境中的磨损比在大气环境中更加剧烈^[5],所以寿命试验需要在真空环境中开展,并按照鉴定级条件设定温度条件,采用加速寿命试验方式控制试验时间。

加速试验方式综合考虑了产品内部轴承的最高转速以及辅助试验驱动装置在真空环境下的可行转速。无源多通道星载 FORJ 在寿命试验中的总转数超过了基于卫星在轨工作模式计算的在轨旋转运行寿命。在寿命试验期间,定期依据所需的工作模式对 FORJ 的光学性能和力学性能进行测试,并与历史测试数据对比,分析是否存在显著恶化或劣化趋势。此外,寿命试验前后均需执行高速数字信号、高频信号等全面的业务指标测试和对比。寿命试验现场图如图 6 所示。

在接近 1 个月的热真空寿命试验中,无源多通道星载 FORJ 累计转数超过了 500 万转。在各种转速条件下,光学环回状态的插损最大值为 3.81 dB。在 1 300、1 550 nm 波长下的单端环回双通道动态插损变化情况,如图 7 所示。可以看出,单端环回双通道的动态插损变化保持稳定,没有出现明显的性能下降,符合预期的技术指标。

热真空寿命试验中,无源多通道星载 FORJ 的摩擦力变化情况如图 8 所示。可以看出,星载 FORJ 的摩擦力矩最大值为 0.024 N·m,全周期数据变化规律稳定。

由此可知,无源多通道星载 FORJ 在热真空寿命试验过程中的动态摩擦力矩变化稳定,无明显劣化。

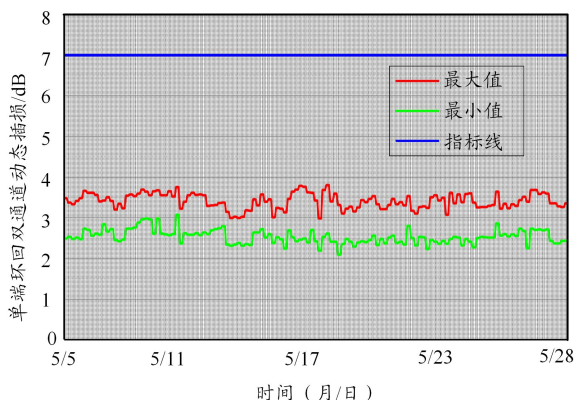


(a) 寿命试验中的光滑环

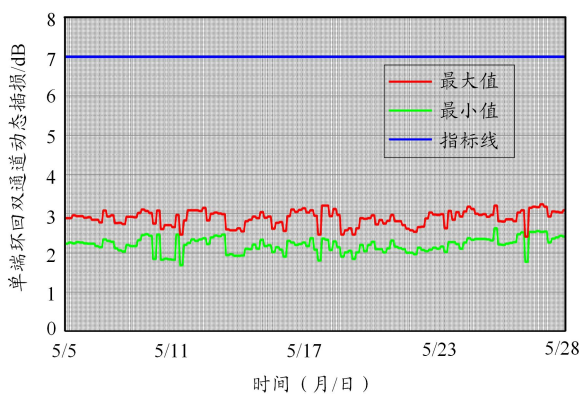


(b) 寿命试验使用的热真空罐

图6 寿命试验现场



(a) 1 310 nm



(b) 1 550 nm

图7 单端环回双通道动态插损变化情况

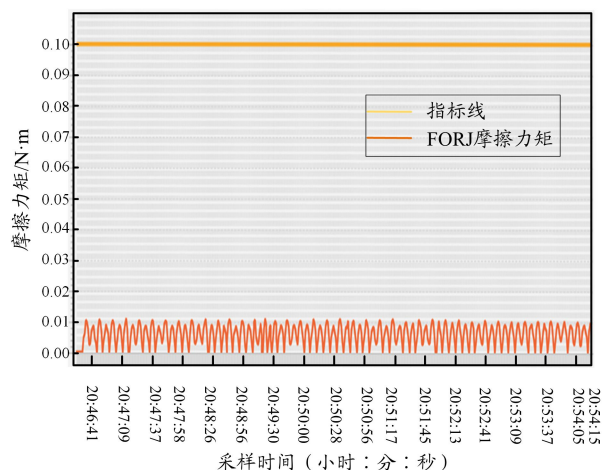


图8 无源多通信星载 FORJ 的摩擦力变化情况

5 结束语

无源多通道 FORJ 以其体积小、重量轻、质量稳定可靠的特点著称,能够充分发挥当前光通信技术的优势,如大容量、高带宽、低损耗及灵活的复用能力,为卫星平台内数据传输的性能提升、种类丰富和数量增加提供强有力的支撑。在寿命试验与在轨测试阶段,该无源多通道星载 FORJ 的各项设计指标均表现稳定,与历史数据相比,展现出良好的一致性,完全符合低轨道应用的需求。

参考文献:

- [1] 王晓,李超.某星载滑环的可靠性设计与试验[J].电子机械工程,2009,25(5):28-30,64.
- [2] 刘兴富,朱野,刘会杰,等.星载长寿命导电滑环的传输可靠性评估[J].光学精密工程,2019,27(9):2028-2035.
- [3] 贺正权,李育林,胡宝文,等.光纤旋转连接器的最新发展及其应用[J].激光与光电子学进展,2013,50(1):67-71.
- [4] 王芳,洪晓亮,陈惠钦,等.光纤旋转连接的温度和插入损耗特性研究[J].光纤与电缆及其应用技术,2024(2):11-14.
- [5] 王延暴,罗利强,王晓辉,等.光纤旋转连接器在雷达系统中的应用[J].红火控雷达技术,2012,41(2):22-24.
- [6] 米磊,姚胜利,孙传东,等.光纤旋转连接器的发展及其军事应用[J].红外与激光工程,2011,40(6):1138-1142.
- [7] 贾大功,张以谟,井文才.无源光纤旋转连接器的发展[J].仪器仪表学报,2003(S1):199-202.
- [8] 漆先虎,苏巧.基于光波分复用的雷达数据传输设计[J].火控雷达技术,2020,49(2):97-100.