

## 国际空间站宇航光纤通信器件发展综述

郑伟<sup>1,3</sup>, 殷杰<sup>2</sup>, 田庄<sup>3</sup>, 王九龙<sup>3</sup>, 叶杨高<sup>4</sup>, 周海峰<sup>4</sup>, 王琛<sup>5</sup>, 隋宁波<sup>6</sup>

(1. 北京空间机电研究所, 北京 100094; 2. 航天恒星科技有限公司, 北京 100086;

3. 中国空间技术研究院, 北京 100094; 4. 中国电子科技集团 第八研究所, 合肥 230000;

5. 中国电子科技集团 第三十四研究所, 广西 桂林 541004; 6. 北京玻璃研究院有限公司, 北京 101111)

**摘要:** 光纤通信技术在国际空间站(ISS)上首次大规模应用, 是光通信技术从地面进入太空应用的一个重要里程碑。回顾了 ISS 舱内光纤通信所用宇航光缆和光纤连接器的技术发展历程, 阐述了 ISS 对光纤通信技术的特殊需求; 介绍了美国航空航天局(NASA)开展的光纤器件空间适应性试验研究情况, NASA 和欧洲太空总署(ESA)负责建造舱段的光纤通信系统, 以及 NASA 针对 ISS 光纤通信器件缺陷问题的质量调查情况和整改过程; 结合 ISS 光纤通信器件质量问题的案例分析, 总结了宇航光缆和光纤连接器在制造、工艺、材料、环境、检测和管理方面存在的问题和经验教训。最后, 对宇航光纤通信器件的研发方向进行了展望。

**关键词:** 国际空间站; 宇航; 光纤; 连接器; 光通信; 经验教训

**中图分类号:** TN929.11 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2024)01-0051-09

**DOI:** 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2024.01.010

**开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



## Development of optical fiber communication devices for the international space station

ZHENG Wei<sup>1,3</sup>, YIN Jie<sup>2</sup>, TIAN Zhuang<sup>3</sup>,WANG Jiulong<sup>3</sup>, YE Yanggao<sup>4</sup>, ZHOU Haifeng<sup>4</sup>, WANG Chen<sup>5</sup>, SUI Ningbo<sup>6</sup>

(1. Beijing Institute of Space Mechatronics, Beijing 100094, China; 2. Aerospace Star Technology Co., Ltd., Beijing 100086, China;

3. China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China; 4. The 8th Research Institute of CETC, Hefei 230000, China;

5. The 34th Research Institute of CETC, Guilin Guangxi 541004, China; 6. Beijing Glass Research Institute Co., Ltd., Beijing 101111, China)

**Abstract:** The first large-scale application of optical fiber communication technology on the international space station (ISS) is an important milestone in the application of optical communication technology from the ground to space. The technological development of space optical cable and optical fiber connector used for optical fiber communication in ISS is reviewed, and the special requirements of ISS for optical fiber communication technology are expounded. The space adaptability test of optical fiber devices carried out by national aeronautics and space administration (NASA), NASA and european space agency (ESA) are responsible for building the optical fiber communication system of the module, and the quality investigation and rectification process of the defects of ISS optical fiber communication devices by NASA are introduced. Based on the case analysis of ISS optical fiber communication device quality problems, the problems and lessons in manufacturing, process, materials, environment, inspection and management of aerospace optical cable and optical fiber connector are summarized. Finally, the development direction of aerospace optical fiber communication devices is prospected.

**Key words:** international space station, aerospace, optical fiber, connectors, optical communication, lessons learned

收稿日期: 2022-07-29。

**作者简介:** 郑伟(1974—), 男, 辽宁营口人, 博士, 高级工程师, 中国空间科学学会会员, 主要研究方向是星载激光雷达技术。参与了国家某项目技术研究和空间站通信网技术体制的规划论证, 完成了多项地形测绘与气象探测领域的激光雷达型号和预研任务。



## 0 引言

国际空间站(ISS)起源于美国 20 世纪 80 年代提出的自由号(SSF)空间站计划项目。现在的 ISS 是以美国、俄罗斯为首, 包括加拿大、日本、巴西和欧空局(11 个国家) 共 16 个国家共同参与研制的大型载人航天器。ISS 是目前人类历史上规模最大、历时时间最长的

郑伟,殷杰,田庄,等:国际空间站宇航光纤通信器件发展综述

载人航天工程项目,其发展过程大致可分为3个阶段:第一阶段(1994—1998年),主要进行空间站关键技术和关键器件的空间试验验证;第二阶段(1998—2001年),此阶段的空间站初具雏形,建成了一个具有载3人能力的初期空间站;第三阶段(2001—2006年),此阶段是完成空间站的最终装配,可供航天员在轨工作,并开启了一个为期超过15年的载人运行期<sup>[1-2]</sup>。

舱内通信系统是空间站基础设施的关键组成部分之一。ISS设计的一个重要特点是光纤通信在其中首次得到了大规模的应用。美国航空航天局(NASA)、欧洲太空总署(ESA)、日本宇宙航空研究开发机构(NASDA)所负责的舱段中都大量使用了宇航光缆,广泛应用于话音、图像和高速数据传输系统。从此,光纤通信技术从地面移至太空,航天通信得到了极大的改观,这是人类通信技术发展史上的一次重要跃迁。

宇航光通信也是我国未来空间基础设施建设中的关键技术,是探索宇宙空间所需高速信息传输不可或缺的重要组成部分。在“921载人航天工程”需求的牵引下,中国航天科技人员筚路蓝缕、自力更生,于2021年4月29日,我国成功发射了“天和”核心舱,标志着我国独立建造的中国空间站进入了全面实施阶段。在信息系统方面,国产宇航光缆和光电子通信器

件历经国内自主研发和数次搭载试验后得到成功应用,为航天员天地一体化音视频通信和高速数据传输提供了极大的带宽<sup>[4-5]</sup>。然而,毕竟ISS起步比我国早二十余年,其经验教训对我们有很好的借鉴作用。为此,本文从可行性论证到建造实施方面对ISS舱内通信所用光纤通信器件的发展历程进行综述,同时阐述在航天工程应用中出现的2次质量问题和经验教训,为国内科研同行提供借鉴和参考。

## 1 ISS舱内通信特点和需求

ISS由航天员居住舱、实验舱、服务舱、对接过渡舱、桁架、太阳电池等部分组成,其设计寿命为10~15年,总质量约为423 t,长为108 m,宽(含翼展)为88 m,运行轨道高度为397 km,载人舱内大气压与地表面相同,可载6~7人。ISS的结构可分为两部分:一部分以俄罗斯“曙光号”功能货舱为中心,通过对接舱段与俄罗斯“星辰号”服务舱、“搜索号”迷你研究舱,美国“命运号”实验舱、3个节点舱、扩展舱,日本“希望号”实验舱,以及欧洲航天局“哥伦布号”实验舱对接,组成空间站加压舱部分;另一部分为非加压服务部分,由美国的中心桁架、4对太阳电池阵列、加拿大遥控机械臂系统、舱外仪器设施构成。ISS在轨结构<sup>[1-3]</sup>如图1所示。

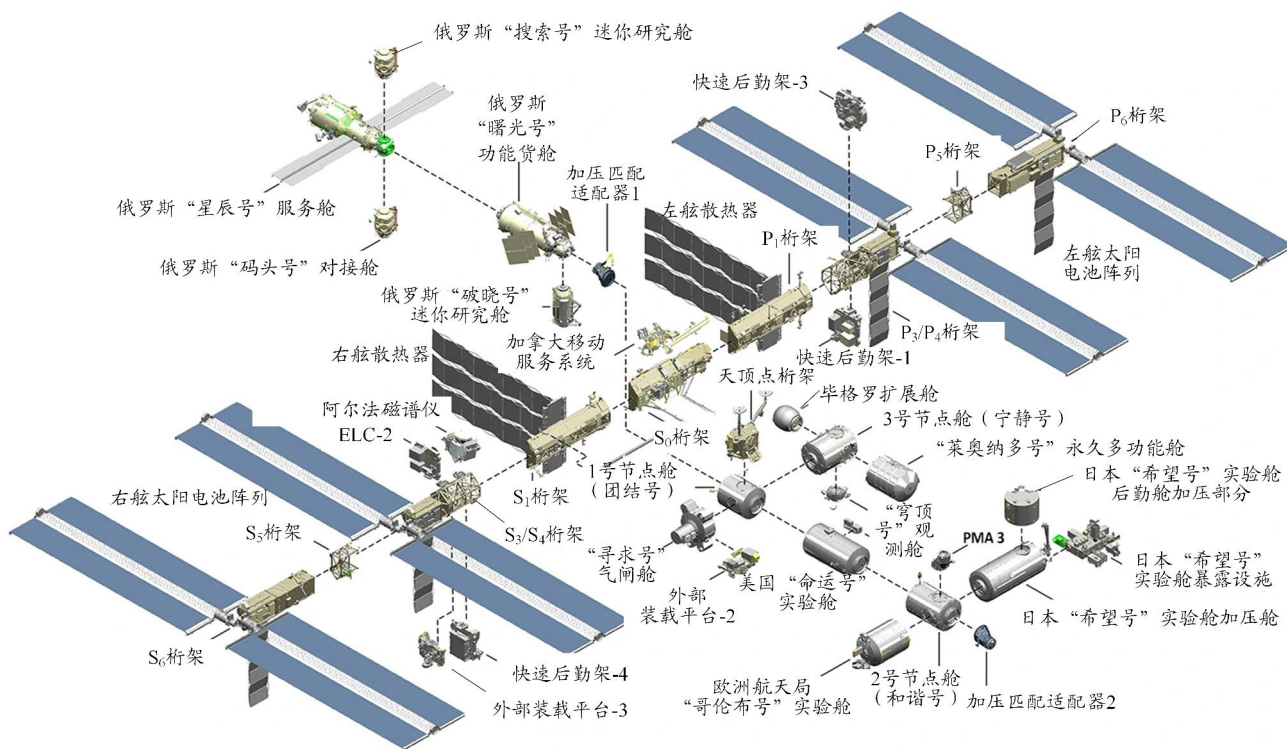


图1 ISS在轨结构示意图

ISS 规模宏大,在轨运行寿命长,而且有航天员长期驻留和进行科学实验,这使得它在空间尺寸和运行方式上与卫星平台有很大的不同,因此在舱内通信方面产生了一些特殊需求,具体如下:

首先,由于空间站任务需人类活动参与其中,因此空间站对音视频和高速数据通信有着比卫星平台更高的需求,而且在长期运行期间,这些需求会随着后续空间站任务载荷的不断增多而增加。作为基础设施,舱内通信介质需要具有较大的传输宽带。其次,ISS 大致相当于 2 个足球场的大小,是由多个模块对接组成的大型组合体,模块之间的通信距离远大于卫星平台,舱内布线长且复杂。为了节约空间资源和降低发射成本,空间站所使用的通信线缆需尽可能地减小体积、减轻重量。然后,空间站设计功耗为 80 kW,试验载荷种类多、数量多,整体电磁环境比较复杂,需要重视电磁兼容性(EMC)问题,舱内通信介质需要有良好的 EMC 性能。最后,空间站在轨运行时间长达数十年,所选用舱内通信体制要具有一定的前瞻性和技术可持续性,易于后续的升级改造,使后续发射的高性能功能模块能与早期的模块保持兼容。

基于上述多种因素,传统电介质总线在带宽、体积重量、电磁兼容、升级换代方面日益显现不足,因此需要寻找新的通信介质。与此同时,新兴的光纤通信技术以极低的损耗、更轻的质量、极高的传输带宽和优良的 EMC 性能开始进入人们的视野。

## 2 宇航光纤通信器件发展历程

1966 年 7 月,英籍华裔学者高锟博士在《PIEE》杂志上发表了《光频率的介质纤维表面波导》的论文,

从理论上分析证明了用光纤作为传输媒体实现光通信的可能性,并预言了制造通信用的超低耗光纤的可能性。1970 年,美国康宁玻璃公司根据高锟博士文章的设想,使用改进型化学气相沉积(MCVD)法制造出当时世界上第一根超低耗光纤,光纤损耗系数约 20 dB/km,验证了采用当时的科学技术与工艺方法制造通信用的超低耗光纤的可行性,这是光通信研究的重大实质性突破。同年,美国贝尔实验室<sup>[6-7]</sup>研制出世界上第一台在室温下连续波工作的砷化镓铝半导体激光器,为光纤通信找到了合适的光源器件。

40 多年以来,光纤技术从实验室走向工程应用,取得了巨大的成功。然而,与陆地通信应用不同的是,空间辐射环境会对玻璃纤维介质产生电离辐射的影响,这一度成为光纤能否应用于航天器工程的一个重要技术问题。为此,美国首先对光纤空间应用的可行性进行了一系列空间试验研究,然后组织企业和研究机构进行产品研发,对宇航光缆和连接器进行资格认证,试飞验证通过后,将应用于空间站项目。

### 2.1 重要事件里程碑

ISS 光纤通信技术发展历程<sup>[24]</sup>如图 2 所示。1984—1985 年,在“自由号”计划的 A 阶段,NASA 开展了长期暴露测试装置(LDEF)光纤试验研究,试验第一次证实了光纤在太空中应用的可行性。1986—1989 年,在“自由号”计划的 B 阶段,NASA 组织工业部门制定了光纤元器件的技术要求。1993 年,SSF 改为 ISS,ISS 项目正式开启。1994 年,政府开始采购光纤器件。1995 年,ISS 宇航光缆通过资格认证。1996 年,ISS 光纤环境连接器通过资格认证。1997 年,ISS 光纤气密连接器通过资格认证。同年,NASA 利用航天飞机试验(FOFE)项

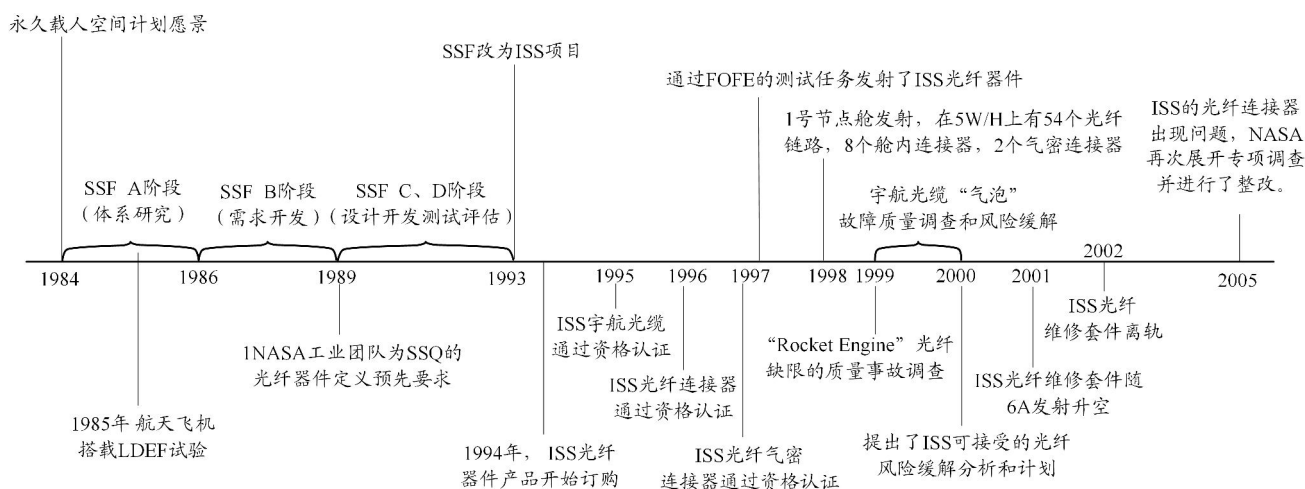


图 2 ISS 光纤通信技术发展历程

郑伟,殷杰,田庄,等:国际空间站宇航光纤通信器件发展综述

目搭载ISS的光纤通信元器件进行了空间试验。1998年,ISS的节点1号舱发射,该舱配置了54条光纤通信链路,其中包含8个环境连接器和2个气密连接器。1999年,波音工程师发现ISS的光纤中出现一个缺陷,由于形状类似于火箭发动机,因此命名为“Rocket Engine”缺陷。NASA为此展开了空间光缆质量事故调查。2000年,事故机理得到了分析,同时提出了ISS可接受的宇航光纤风险缓解分析和计划。2001年,NASA随6A发射了ISS光纤维修套件,对出现的问题进行了整改<sup>[8-9]</sup>。2005年,ISS的光纤连接器出现了可靠性问题,NASA再次对其展开专项调查并进行了整改。

## 2.2 光纤器件空间适应性研究

1984—1985年,NASA在LDEF试验中第一次验证了光纤在太空中应用的可行性。1984年4月7日LDEF由航天飞机释放到高度为413.6 km、倾角为28.4°的低地球轨道(LEO),于1990年1月29日由航天飞机在高度为288 km的轨道上回收。此次实验采用了4根光纤,光纤工作波长为830 nm。LDEF经历了太阳活动的最低年和高峰年,在69个月周期内经受的辐射总剂量为200~25 000 Rad(Si)。这次光纤测试代表了1978—1980年的光纤耐辐射水平。4根光纤中除了1根光纤受到微小陨石影响外,未观察到其它光纤出现任何明显的衰变。试验中观察到光电接收信号的信噪比有20 dB的变化,可能是由于温度的变化、光纤连接器或光缆结构因应力变形引起的损耗所致。此次实验验证了光纤空间应用的可行性。此后,NASA针对光纤和光电子器件进行了一系列辐射试验研究<sup>[2-5]</sup>,证实了光电子器件的空间应用可行性;在此基础上,光缆和连接器的空间工程技术问题陆续得到解决,并研究出MIL-STD-1773光纤数据总线等空间光通信器件和产品<sup>[10-22]</sup>。

## 2.3 ISS使用的舱内光纤通信系统

在光纤通信空间应用可行性验证方案通过之后,自1989年起,NASA组织工业部门开展了光纤通信元器件一系列相关的产品研发和技术鉴定。在1997年,ISS的空间光缆通过FOFE之后,配备光纤通信的空间站舱段模块陆续发射升空,并在太空中进行组装。

除NASA以外,ESA在ISS中承担了“哥伦布号”实验舱、2号和3号节点舱、“穹顶号”观测舱这4个舱段的研制任务,同样在其中大量地使用了光纤和光连接器。其中,2008年2月7日发射升空的Columbus舱有68根光缆;2007年10月23日发射的Node 2节点舱有1 200根光缆,56个光连接器;2010年2月8日

发射的Node 3节点舱有35个光连接器,包含326个光纤接触件。上述3个舱段的光缆主要用于高速数据链路(HRDL)、视频和音频传输。与Node 3节点舱同时发射升空的Cupola舱中有8根光缆,仅用于话音通信。图3是ISS Node 2节点舱中使用的光纤通信系统内部连接关系示意图<sup>[23]</sup>。其中,红色实线是视频光缆,蓝色实线是音频光缆,绿色虚线是高速数据链路光缆。舱内通信电缆用黑线表示。从图3中可以看出,Node 2节点舱内所使用的光缆数量超过了双绞线和同轴电缆。光纤通信已成为空间站舱内重要的通信技术途径。

## 3 ISS宇航光纤通信器件材料和工艺

ISS上使用的光纤通信系统主要是由波音公司设计和集成的。其中的物理层有源收发器件主要由SPI公司提供,Nufem公司负责生产1 330 nm渐变折射率多模抗辐射光纤,Amphenol、ITT等公司提供配套的光纤连接器。除了主能源舱外,其它的美国舱段都使用了光纤通信系统。图4是ISS上的美国空间实验室中的宇航光缆和连接器<sup>[24]</sup>实物图。

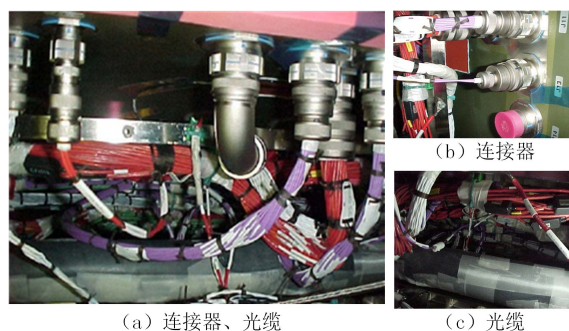


图4 ISS美国空间实验室中的宇航光缆和连接器实物图

### 3.1 ISS使用的宇航光缆

光纤本身材质很脆,在工程应用中需要强化成为具有一定抗拉伸和抗弯曲能力的光缆。NASA在ISS上使用了玻璃纤维光纤,对光纤/光缆的技术特性提出了较为严格的要求。ISS上使用的抗辐射光缆结构由纤芯(A)、包层(B)、密封涂层(C)、光纤缓冲层(D)、光缆缓冲层(E)、增强层(F)和外护套(G)组成,其光缆结构<sup>[25]</sup>如图5所示。

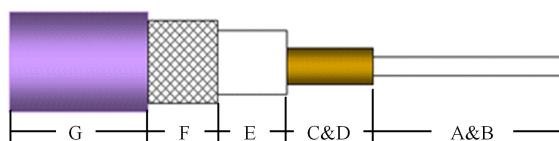


图5 ISS使用的抗辐射光缆结构

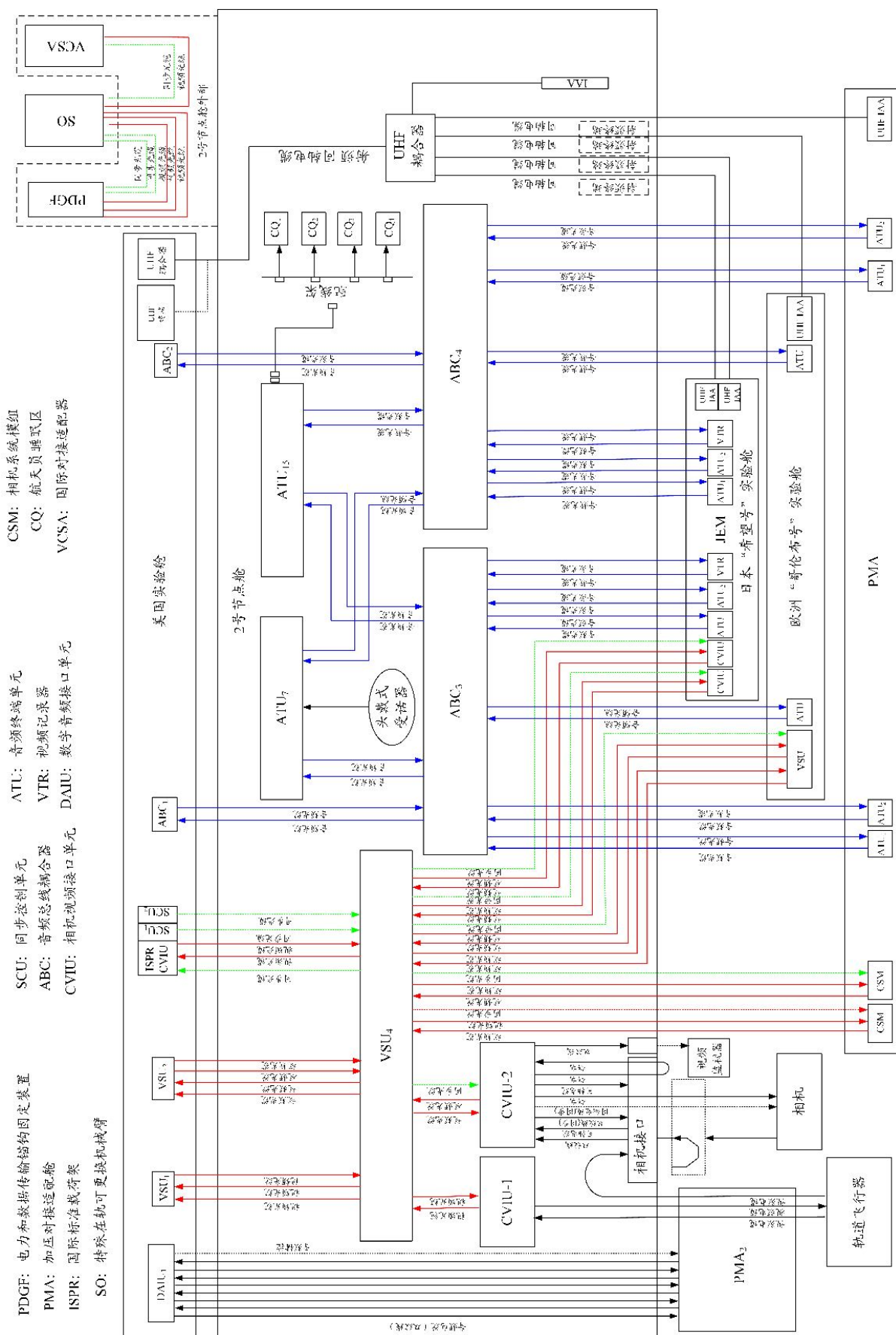


图 3 应用于 ISS Node 2 节点舱光纤通信系统内部连接关系示意图

郑伟,殷杰,田庄,等: 国际空间站宇航光纤通信器件发展综述

ISS 抗辐射光缆的纤芯和包层利用掺锗的  $\text{SiO}_2$  和化学气相沉积工艺,将纤芯和包层制成具有渐变折射率的  $100/140\ \mu\text{m}$  多模光纤。在密封涂层和缓冲层,使用了碳涂敷工艺和聚酰亚胺、FEP-Teflon 材料提高其耐辐射性能;同时,在光缆制造过程中,还使用了增强层和半松套管结构的外护套。在光缆产品的工艺技术要求方面,严格控制光纤/涂层的维度,对外涂敷要求零缺陷;同时,对光缆的外观要进行视觉检测;最后,对光缆的光学传输损耗进行测试,合格的光缆进行封装储存。ISS 使用的抗辐射光缆材料工艺<sup>[25]</sup>如表 1 所示,其中类型参数见图 5。

表 1 ISS 使用的抗辐射光缆材料工艺一览表

| 类型 | 项目    | 尺寸                                                  | 材料                 | 工艺   |
|----|-------|-----------------------------------------------------|--------------------|------|
| A  | 纤芯    | $100\pm 2\ \mu\text{m}$                             | 掺杂的 $\text{SiO}_2$ | 拉丝   |
| B  | 包层    | $140\pm 2\ \mu\text{m}$                             | 掺杂的 $\text{SiO}_2$ | 拉丝   |
| C  | 密封涂层  | $0.025\sim 0.05\ \mu\text{m}$<br>(厚度)               | 碳基密封               | MCVD |
| D  | 光纤缓冲层 | $170\pm 2\ \mu\text{m}$                             | 聚酰亚胺               | 加热涂敷 |
| E  | 光缆缓冲层 | $380\sim 760\pm 25\ \mu\text{m}$                    | FEP-Teflon         | 挤压   |
| F  | 增强层   | 1.6 mm                                              | 聚四氟乙烯浸渍玻璃纤维        | 编织   |
| G  | 光缆外护套 | $2.10\pm 0.05\ \text{mm}$<br>$0.25\ \text{mm}$ (厚度) | FEP-Teflon         | 挤压   |

表 2 是 NASA 在 ISS 上使用的光纤性能参数表<sup>[25]</sup>,由美国 Nufern 公司提供。

表 2 NASA 在 ISS 上使用的光纤性能参数表

| 参数                       | 单位            | 特性          |
|--------------------------|---------------|-------------|
| 光纤类型                     | —             | 渐变折射率,多模    |
| 工作波长(min/max)            | $\mu\text{m}$ | 1 270/1 380 |
| 纤芯直径(min/max)            | mm            | 98/102      |
| 包层直径(min/max)            | mm            | 138/142     |
| 数值孔径(min/max)            | —             | 0.28/0.32   |
| 衰减最大值 @1 290 $\pm$ 10 nm | dB/km         | $\leq 4$    |
| 带宽 @1 290 $\pm$ 10 nm    | MHz·km        | 200         |
| 最小弯曲半径                   | mm            | 50          |

### 3.2 ISS 使用的宇航光纤连接器

ISS 上使用的光纤连接器主要由 Amphenol、ITT Cannon、C&H Technologies、Brand Rex 和 Space Photonics 和法国苏里奥等公司生产。Amphenol 公司负责生产圆盘型连接器,ITT Cannon 公司生产滑轨型和面

板型连接器,C&H Technologies 和 Brand Rex 公司生产脐带型连接器,法国苏里奥公司生产 SOURIAU E-LIO 系列易清洁光纤接触件和光纤连接器。器件规格符合 MIL-STD-38999 和 MIL-T-29504 标准。图 6 是 Amphenol 公司为 ISS 生产的一款气密穿舱光纤连接器实物图<sup>[24]</sup>。



图 6 Amphenol 公司为 ISS 生产的气密穿舱光纤连接器

## 4 ISS 宇航光纤通信器件的质量问题及经验教训

光缆在 ISS 上进行了大量铺设,成为 ISS 通信系统的重要组成部分。与电缆相比,光缆不仅质量轻、电磁兼容性能好,且未来系统扩容的潜力大。然而,作为一种新技术被首次应用,NASA 的宇航光纤通信系统也出现过质量问题,曾经历过 2 次专项质量调查:一次是 2000 年光缆的“Rocket Engine”缺陷问题调查,另一次是 2005 年光缆连接器的可靠性调查。经过整改后,NASA 完成了光纤通信器件在空间应用的风险评估,并制定了相应的解决方案,然后将其继续应用于 ISS<sup>[24-27]</sup>。

### 4.1 “Rocket Engine”缺陷和原因分析

1999 年,波音公司的工程师监测到了 ISS 上出现的一个光纤故障,光纤破损的端面如图 7 所示。由于破损形状像火箭发动机,所以命名为“Rocket Engine”缺陷。NASA 决定以此为契机,检验宇航光缆的可靠性<sup>[25-27]</sup>。

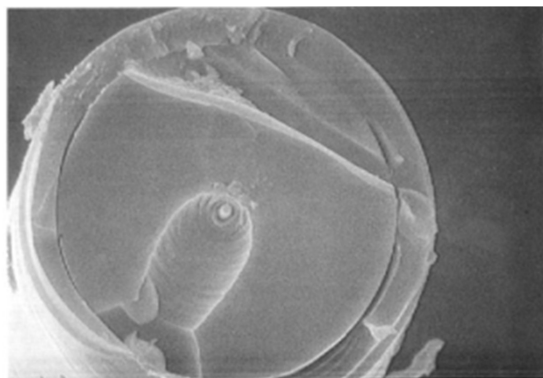
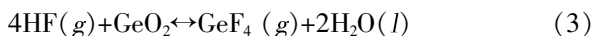
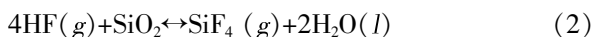


图 7 ISS“Rocket Engine”故障光缆端面图像

经过调查,“Rocket Engine”故障的原因是光缆在制造过程中使用了一种氟塑料(FEP),它是四氟乙烯(TFE)和六氟丙烯(HFP)的共聚物。在高温挤压涂敷过程中,FEP与空气中的 $O_2$ 和光纤涂敷层中的 $H_2O$ 发生化学反应,生成的氢氟酸(HF)腐蚀光纤而形成“Rocket Engine”。具体过程如下:FEP通过熔化挤压工艺涂敷在光缆上。FEP的分解速率依赖于周围环境的温度和组成。在有氧环境下,当温度达到 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,其分解速率为每小时总质量的2.5%;在纯氮情况下,其分解速率降至每小时0.4%。当空气中充满 $O_2$ 时,分解物为 $COF_2$ ,然后再与 $H_2O$ 反应生成HF。化学反应过程<sup>[25]</sup>如式(1)所示。



当HF成为刻蚀反应的一部分时,更多的HF从周围的多分子聚合物中释放出来,并汇聚到腐蚀点以维持化学平衡,如式(2)、式(3)所示。



该过程使NFOC-2FF-1GRP-1光缆产生 $COF_2$ ,从而生成HF。HF是一种众所周知的玻璃腐蚀物,最终使光纤产生缺陷<sup>[25]</sup>。针对这一故障原因,ISS的光缆制造商改进了工艺过程。为了尽量避免HF的生成,需要在干燥的氮气环境下处理FEP(除去 $O_2$ ),并去除多分子聚合物涂覆层中的水分,这样就能显著降低成缆过程中产生的HF量<sup>[25]</sup>。

#### 4.2 ISS 光纤连接器可靠性调查

2005年6月,ISS上使用的光纤连接器的接触件出现可靠性问题,NASA为此又一次展开专项调查和故障分析,并最终形成了《缺陷检查和光纤光学性能退化的调查报告》。此次调查中发现,在ESA为ISS建造的Node 2节点舱里的60个光纤接触件中,有58个需要清洁,其中还有4个存在缺陷(光纤端面有破裂和污染<sup>[27]</sup>)。

##### 4.2.1 故障现象

ISS光缆连接器故障示例如图8所示。图8(a)和图8(b)是由于光纤端面凸出高于光纤接触件前缘,在连接时造成端面挤压破裂的案例,可以看出亮场和暗场的图像明显的断裂。图8(c)和图8(d)是光纤涂敷层同心度不合格的案例。可以看出,光纤涂覆时同心度异常;另外,端面上还有碎片和污染物,涂覆层有很深的刮痕,中心破裂明显,并延伸出2道裂痕。图8(e)和图8(f)是光纤端面刮擦破裂的案例。可以看出,深的线性刮痕未被去掉,在涂覆层中也出现了裂痕;另

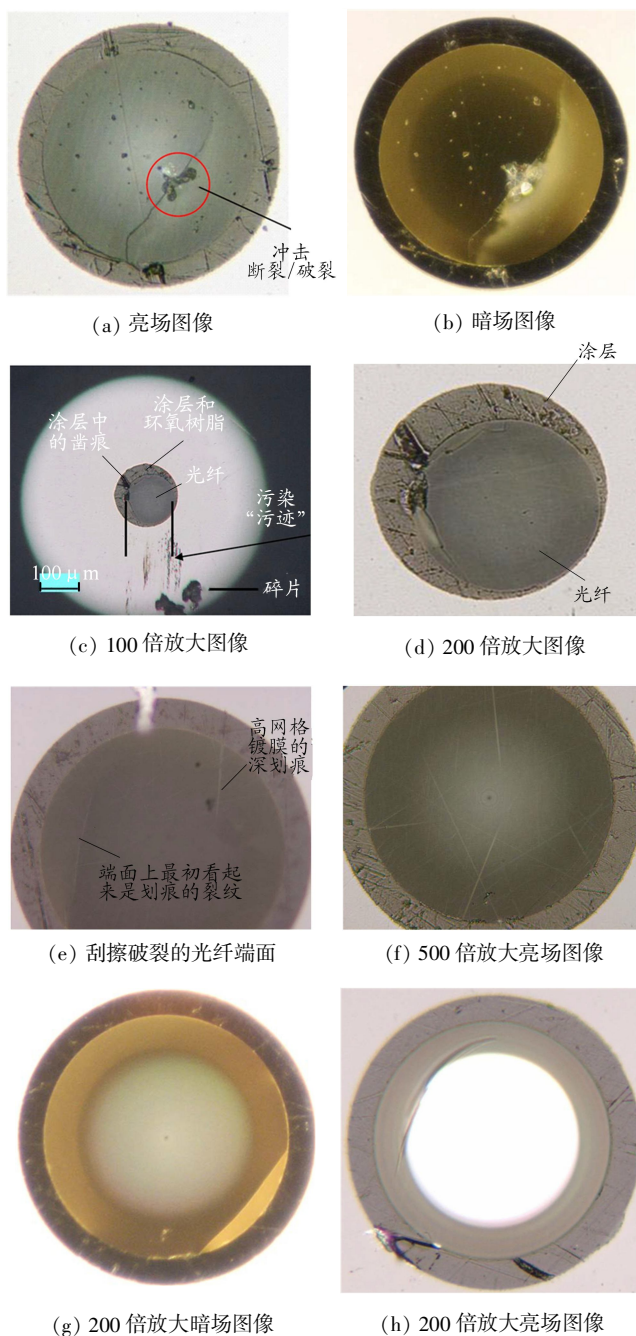


图8 ISS 光缆连接器故障示例

外,由于未保持端面的清洁,金属碎片刮擦光纤也可能进一步造成缺陷。图8(g)和图8(h)是手指接触后造成光纤端面污染且未及时保持清洁的实例。可以看出,显微镜下端面图像模糊,光纤端面未保持清洁;另外,涂敷层有破损,表明端面可能使用了粗糙的材料抛光,光纤端面凸起还导致在连接器锁紧时光纤端面发生破裂<sup>[27]</sup>。

##### 4.2.2 原因分析

经调查分析可知,光纤连接器故障的主要原因有以下几个方面:

郑伟,殷杰,田庄,等:国际空间站宇航光纤通信器件发展综述

1) 光纤端面破损问题。原因是光纤端面凸起,超过陶瓷接触件边缘,在连接过程中2个光纤接触件很容易受到挤压而损坏光纤端面。这是由于在光纤连接器制造和工艺方面存在的问题所导致的。

2) 非同心问题。光缆制造和工艺方面存在的同心度问题。非同心现象是由拉丝涂敷过程中温度不均匀产生的应力引起的。在环氧树脂(epoxy)涂覆过程中,光纤存在的不平衡应力加速了裂痕的形成。同心度不合格可能导致当非同心的光纤与同心的光纤耦合时产生较大损耗,从而导致光纤信号减弱。

3) 划痕问题。光纤连接器制造和工艺方面存在的问题。光纤产生划痕的主要原因是抛光前未使用符合标准的精研纸研磨光纤以去除刮痕;若未能去掉刮痕,抛光过程中可能产生潜在的裂纹,导致裂痕增多或扩大。实验证明,抛光工艺过程在瑕疵处产生新的附加裂纹并随着时间的推移而扩散。

4) 端面污染问题。端面污染是在光纤使用过程中操作不规范导致的。端面上的污染物表明光纤的生产和检验环境或操作过程未达到洁净标准。分析仪器数据显示端面上有氯化物,这说明有手指接触了端面。手指上的油和盐对掺锗光纤的腐蚀性非常大,尽管光纤的主要成分是非常耐腐蚀的 $\text{SiO}_2$ ,但在掺杂了锗之后,其耐腐蚀性能将会下降。此外,如果未按标准流程清洁光纤表面,还会使光纤表面沾染灰尘和颗粒。

#### 4.2.3 警示教训

以上光纤器件出现质量问题的主要原因是其生产、检验环节存在漏洞,以及管理不够严谨规范。由于光纤首次大规模地在空间应用,且宇航光缆和连接器制造过程的材料、方法、工艺、环境与电缆的制作过程都有很大不同,因此在技术和管理上都需要改进。NASA在ISS上出现光纤通信器件的2次质量问题给我们借鉴和警示:

1) 制造光缆时,要吸取“Rocket Engine”故障的经验教训,注意潜在和寄生的化学反应过程可能对产品质量造成的影响。在使用同样的工艺过程时需特别注意在高温挤压涂覆的操作过程应在纯氮环境中进行,并严格控制 $\text{O}_2$ 和 $\text{H}_2\text{O}$ ,以防FEP与空气中的氧气和光纤涂敷层中的 $\text{H}_2\text{O}$ 发生化学反应而生成HF,从而腐蚀光纤。

2) 在拉丝涂敷过程中要严格控制温度和避免涂敷产生的损耗风险。

3) 在制造光纤连接器的过程中,要确保光纤端面与光纤接触器件端面平齐,防止在对接过程中,由于

光纤接触件的相互挤压而损坏光纤端面。

4) 在抛光工艺之前,光纤接触件不能带刮痕抛光,应使用符合标准的精研纸研磨光纤,去除刮痕,防止直接抛光而导致裂纹进一步扩散。

5) 光纤是精密光学器件,其端面仅有几十微米厚,对制造、存储、使用过程中的洁净度有着严格的要求,严禁用手指触摸光纤端面。因此,需要重视光纤连接器的加工过程,确保生产环境的洁净度,严格控制生产过程产生的多余物。

6) 与电连接器不同,光纤连接器的接触件容易受到微小颗粒物的污染。在微重力环境下,光纤的切割、熔接、清洁所用到的工具和流体不利于航天员操作,产生的多余物还会增加安全隐患。因此,为了方便航天员在轨维护,设计产品时应考虑研发易于在线清洁或现场可快速维护的光纤连接器。在这方面,法国SOURIAU ELIO系列易清洁光纤连接器的设计理念值得国内借鉴。

7) 加强对质量检测环节的管理,在产品出厂前通过质量检验及早发现问题,确保产品不带隐患上天。

## 5 结束语

本文对光纤通信器件在ISS的应用情况进行了综述,阐述了空间站对光纤通信技术的特殊需求,回顾了宇航光缆和光纤连接器的技术发展历程,分析了ISS光纤通信器件的2次质量问题案例,总结了经验教训。

从20世纪80年代以来,作为人类探索的先锋,NASA和ESA在空间光通信技术领域经过不断实践和探索,最终在ISS项目上大规模使用了光纤通信器件。光纤以极大的带宽、优良的电磁兼容能力、更轻的质量、更小的体积和功耗为飞行器局域网总线的整体性能带来了质的飞跃,是人类通信技术和宇航技术发展史上的一个里程碑。我们一方面要学习他们勇于探索未知的精神,另一方面还要吸取他们的经验教训。NASA和ESA在ISS项目上的经历是我国空间站设计、建造、使用和管理过程可学习借鉴的珍贵教材。

光纤通信技术在我国的航天上首次应用不久<sup>[4-5]</sup>,其成熟度还需要不断锤炼提高。只有这样,它才能担负起未来空间基础设施建设和深空探测任务宽带信息传输的重任<sup>[29]</sup>。本文旨在抛砖引玉,希望国内同行能够科学地借鉴ISS光纤通信的历史经验教训,举一反三,在宇航光通信器件生产和检验过程中的“人、机、料、法、环、测”全面质量管理方面有所启示并改进;同时,也

希望国内专家学者在宇航光缆制造工艺质量控制方面不断进行技术革新,在宇航光纤连接器的现场易清洁、易维护和可靠性方面的性能进行改进,进一步推动相关宇航光电子基础关键核心器件的国产化升级换代,以促进我国未来空间技术的持续进步。

## 参考文献:

- [1] NASA. International Space Station[EB/OL]. (2018-04-08)[2023-08-27]. [https://www.nasa.gov/mission\\_pages/station/main/index.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/station/main/index.html).
- [2] 科学百科词条, 国际空间站 (一项国际太空合作计划)[EB/OL]. (2021-11-05)[2023-08-27]. <https://baike.baidu.com/item/%E5%9B%BD%E9%99%85%E7%A9%BA%E9%97%B4%E7%AB%99/40952>.
- [3] 苑艺. “国际空间站”发展历程及后续规划[J]. 国际太空, 2021(4): 16-24.
- [4] 新华社. 我国首次在航天工程上应用数字信号传输光模块[EB/OL]. (2017-04-20)[2023-08-27]. [http://www.xinhuanet.com/politics/2017-04/20/c\\_129557105.htm](http://www.xinhuanet.com/politics/2017-04/20/c_129557105.htm).
- [5] 新闻中心. 包河元素闪耀“问天”之旅[EB/OL]. (2022-07-29)[2023-08-27]. <http://www.baohenews.cn/DocHtml/644/22/07/00366231.html>.
- [6] OFweek 光通讯网. 光纤: 改变世界的十大发明之一[EB/OL]. (2012-10-16)[2023-08-27]. [https://fiber.ofweek.com/2012-10/ART-210001-8500-28646052\\_2.html](https://fiber.ofweek.com/2012-10/ART-210001-8500-28646052_2.html).
- [7] 吴晓江. 世界科技摇篮信息时代先驱——AT&T 贝尔实验室[EB/OL]. (1994-10-28)[2023-08-27]. <https://worldsciencecn/c/1994-10-28/632847.shtml>.
- [8] STOCK S J. Cable, single fiber, multimode, space quality, general specification for specification custodian: mcdonnell douglas space systems company space station division [EB/OL]. (1996-06-28)[2023-08-27]. [http://everyspec.com/NASA/NASA-JSC/NASA-SSP-PUBS/download.php?spec=SSQ21654\\_REV-B.033923.pdf](http://everyspec.com/NASA/NASA-JSC/NASA-SSP-PUBS/download.php?spec=SSQ21654_REV-B.033923.pdf).
- [9] DAVID G. ISS fiber optic link development lessons learned journey [EB/OL]. (2005-03-01)[2023-08-27]. <http://misspiggy.gsfc.nasa.gov/tva/meldoc/ESA-NASA/2005/Gill.pdf>.
- [10] LABEL K A. A spacecraft fiber optic data system-radiation effects[C]//NASA. RADECS 91 First European Conference on Radiation and its Effects on Devices and Systems, Greenbelt: NASA, 1992: 412-415.
- [11] CHARLES E B, ROGER A G. Radiation effects in photonic modulator structures [C]//SPIE. SPIE's 1995 Symposium on OE/Aerospace Sensing and Dual Use Photonics. Orlando: SPIE, 1995: 48-98.
- [12] PAUL M, CHERYL D, KEN L. Charged particle effects on optoelectronic devices and bit error rate measurements on 400Mbps fiber based data links[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1994, 41(3): 266-271.
- [13] KENNETH A L. Spaceflight experiences and lessons learned with NASA's first fiber optic data bus [C]//ESA. RADECS 93. Second European Conference on Radiation and its Effects on Components and Systems. Malo: ESA, 1993: 221-224.
- [14] MARDI C H, BETTY L A, BORNAIN C, et al. Effects of Gamma radiation on high-power infrared and visible laser diodes [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1996, 43(3): 2141-2149.
- [15] PAUL W M, CHERYL J D, KENNETH A L, et al. Space radiation effects in high performance fiber optic data links for satellite data management[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1996, 43(2): 645-653.
- [16] KENNETH A L, CHERYL M, PAUL M, et al. MPTB radiation effects study on the DR1773 fiber optics data bus [J/OL]. NASA/Goddard Space Flight Center. 1996[2023-08-28]. [https://radhome.gsfc.nasa.gov/radhome/papers/nresc97\\_MPTB.pdf](https://radhome.gsfc.nasa.gov/radhome/papers/nresc97_MPTB.pdf).
- [17] FRIEBELE E J, GINGERICH M E, GRISCOM D L. Survivability of optical fibers in space[C]//SPIE. Proceedings of SPIE Optical Materials Reliability and Testing: Benign and Adverse Environments. Boston: SPIE, 1993: 177-188.
- [18] ROBERT A R, CHERYL J, MARSHALL P W. Energy dependence of proton damage in AlGaAs light-emitting diodes [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2000, 47(6): 2492-2499.
- [19] BARNES C E, SCHWANK J R, SWIFT G M, et al. Proton irradiation effects in oxide-confined vertical cavity surface emitting laser (VCSEL) diodes[EB/OL]. (2001-09-20)[2023-08-28]. <http://nepp.nasa.gov/docuploads/B453C5CA-4F8D-4005-BD3747BE914F5BC6/Vcsel-99.pdf>.
- [20] BERGHMANS F, UFFELEN M V, NOWODZINSKI A, et al. Radiation effects in optical communication devices [C]//IEEE. Proceedings of Optical Fiber Communication Conference and Exhibit, Anaheim: IEEE, 2001: 63-66.
- [21] CHUCK C, FRED O, PAT P. Photonic packaging for space applications [C]//SPIE. Proceedings of Photonic and Quantum Technologies for Aerospace Applications IV, San Diego: SPIE, 2002: 1-6.
- [22] MARSHALL C J, LABEL K A, REED R A. Heavy ion transient characterization of hardened-by-design active pixel sensor array[C]//IEEE. Proceedings of IEEE Radiation Effects Data Workshop. New York: IEEE, 2002: 187-194.
- [23] GIULIANO C, KARIM M. European experience using FO for ISS Modules [EB/OL]. (2005-10-05)[2023-08-27]. <https://photonics.gsfc.nasa.gov/tva/meldoc/ESA-NASA/2005/Canovai.pdf>.
- [24] GILL D. ISS fiber optic link development lessons learned journey[EB/OL]. (2005-08-03)[2023-08-29]. <https://escies.org/download/webDocumentFile?id=1617>.
- [25] ISS Fiber Root Cause Investigation Team. ISS fiber optic failure investigation: root cause report, ISS fiber root cause investigation team lead organization NASA GSFC[EB/OL]. (2000-08-01)[2023-8-29]. [https://photonics.gsfc.nasa.gov/tva/issfoc/Root\\_Cause\\_part1.pdf](https://photonics.gsfc.nasa.gov/tva/issfoc/Root_Cause_part1.pdf).
- [26] MELANIE N O. Qualification and lessons learned with space flight fiber optic components[EB/OL]. (2007-09-20)[2023-08-29]. <https://nepp.nasa.gov/DocUploads/925B5B2A-F38E-4A53-92C349E3A2078542/Tutorial-FO-NEPP07.pdf>.
- [27] KICHAK R A, LEIDECKER H W, GREENWELL G J, et al. Failure analysis study and long-term reliability of optical assemblies with end-face damage [EB/OL]. (2006-08-08)[2009-08-29]. [https://www.nasa.gov/pdf/167279main\\_RP-06-61\\_05-036-E\\_Phase\\_I\\_Fiber\\_Optic\\_ReportNRB\\_Nov\\_9%20w-o%20ss.pdf](https://www.nasa.gov/pdf/167279main_RP-06-61_05-036-E_Phase_I_Fiber_Optic_ReportNRB_Nov_9%20w-o%20ss.pdf).
- [28] 沈荣骏. 我国天地一体化航天互联网构想[J]. 中国工程科学, 2006, 8(10): 19-30.