

DOI:10.3969/j.issn.1674-7135.2022.05.017

航天器新型高密度排插型 DC10 电缆安装技术

雷宇¹, 张卫², 唐鹏毅¹

(1. 中国空间技术研究院西安分院, 西安 710000;

2. 陕西军工人力资源有限责任公司, 西安 710061)

摘要:以互联网卫星上首次使用的新型高密度排插型电缆组件为研究对象,介绍了集成式排插型电连接器的制造技术要求和工作原理,从电连接器结构分析出发,研究影响该类型电缆的安装因素。首次提出了新型高密度排插型电缆的安装方法,阐述了该类型电缆的弯曲半径要求、绑扎要求、紧固力矩值要求和使用专用工装的拆卸方法。经过分系统的实际在轨性能测试验证,该安装技术可以显著降低新型高密度排插型电缆组件在大通量、高饱和度信号传输状态下性能下降的现象,成功解决了该类型电缆在卫星狭小空间下的安装与拆卸难题,提高了该类型电缆在卫星狭小空间内的安装精度和分系统的在轨可靠性,为该新型高密度排插型电缆组件的安装在后续卫星批量应用提供了技术指导和工艺基础。

关键词:互联网卫星;新型高密度排插型电缆;安装技术

中图分类号:V443

文献标志码:B

文章编号:1674-7135(2022)05-0113-06

Spacecraft new high-density plug-in DC10 cable installation technology

LEI Yu¹, ZHANG Wei², TANG Pengyi¹

(1. China Academy of Space Technology(Xi'an), Xi'an 710000, China;

2. Shaanxi Military Human Resources Co., Ltd., Xi'an 710061, China)

Abstract: Taking the new high-density row plug-in cable assembly used for the first time on the Internet satellite as the research object, the manufacturing technical requirements and working principle of the integrated row plug-in electrical connector are introduced, and the factors affecting the installation of this type of cable are studied from the structural analysis of the electrical connector. For the first time, the installation method of the new high-density row plug-in cable is proposed, and the bending radius requirements, lashing requirements, tightening moment value requirements and disassembly methods using special tooling of this type of cable are proposed. After the actual on-orbit performance test of the subsystem is verified, the installation technology can significantly reduce the performance degradation of the new high-density row-plug cable assembly in the high-throughput and high-saturation signal transmission state, successfully solve the installation and disassembly problem of the cable in the narrow space of the satellite, improve the installation accuracy of the cable of this type in the narrow space of the satellite and the on-orbit reliability of the subsystem, and provide technical guidance and process basis for the subsequent application of the new high-density row-plug cable assembly in the subsequent satellite batch application.

Key words: internet satellite; the new high-density row plug-in electric cable; install a technique

收稿日期:2022-04-30; 修回日期:2022-05-25

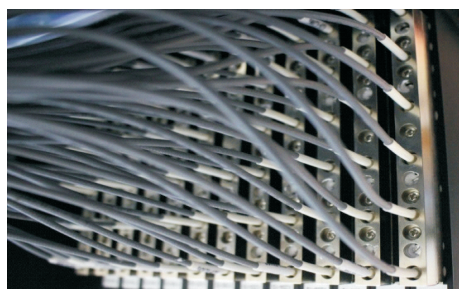
引用格式:雷宇,张卫,唐鹏毅. 航天器新型高密度排插型 DC10 电缆安装技术[J]. 空间电子技术,2022,19(5):113-118. LEI Y, ZHANG W, TANG P Y. Spacecraft new high-density plug-in DC10 cable installation technology[J]. Space Electronic Technology, 2022,19(5):113-118.

0 引言

随着航天技术和互联网技术的融合发展,在全球范围内开始的低轨卫星互联网技术的争夺也愈演愈烈,尤其是以美国马斯克星链计划为代表的抢夺地球低轨道资源的互联网卫星开始了垄断性的竞争,中国航天科技集团针对这一现状,提出了“融合试验卫星”低轨通信卫星星座计划^[1]。该星座计划将在今后几年内进行大数量、高度集成化、模块化的生产研制工作。

目前互联网卫星的发展趋势和要求是产品研制高度集成化,要能达到成批化的生产要求,现有应用于高密度安装与信号传输电缆的接口类型大多是 SMP 接口,在安装时,只能遵循逐行或者逐列顺序安装,安装效率低下^[2]。

针对这一现状,航天器上开始推广应用排插型电缆,该电缆相比传统的 SMP 接口类型的电缆使用了集成化设计,属于新型高密度排插型电缆连接器。为了保证连接器安装时的整体精度,在该连接器上设计了定位销作为定位和引导装置,确保连接器在安装时的对中度 and 同轴度。但是在卫星舱体内的狭小空间进行安装时,如何保障该类型电缆的安装精度和可靠性,就成为了一个关键性的难题。排插型电缆的外形结构和电连接器内部插针、定位销分别如图 1(a)、图 1(b)所示。



(a) 排插型电缆外形结构



(b) 电缆电连接器内部外形结构

图 1 DC10 排插型电连接器结构(6 合 1 SMP 类型)

Fig. 1 DC10 row plug-in electrical connector structure (6-in-1 SMP type)

本文以融合试验互联网卫星的排插型电缆安装技术为研究对象,首先从分析该类型电缆的连接器结构尺寸出发,分析该类型电缆因为连接器安装误差引起接触非线性问题,分析安装误差对电缆性能的影响,结合引起安装误差的因素,进行实验验证测试,分析测试结果并总结提出航天器排插型电缆的安装技术。

1 新型高密度排插型电连接器

集成化的新型高密度排插型电缆连接器是将传统的 SMP 单根电缆线束集成化设计成 6 合 1、9 合 1 等形式,将电缆线束整个 1 排或者 1 列的集成化制造^[3]。在安装时,电连接器在卫星舱狭小空间内安装受到一定限制,如何将电连接器的接口和设备对插端安装准确还能保证一定安装精度,是该类型电缆应用推广的一个关键性技术难题。

1.1 DC10 排插型电连接器结构特性分析

首先从电连接器的结构特性出发,分析其安装引起的误差对信号传输带来的影响。DC10 排插型电缆连接器属于新型高密电连接器,采用集成化设计,其典型的外形尺寸图如图 2(a)所示。该类型电连接器在安装时属于整体直插式对接,设计有两种不同规格的定位销,在安装时起到定位引导安装的目的,同时,不同规格的定位销还具有防插错的功能。其中对插端定位销孔 $\phi 2.5^{+0.10}_{+0.05}$ 、 $\phi 2.0^{+0.10}_{+0.05}$ 的制造精度均为 IT6 级,两个定位销孔的位置尺寸为 39 ± 0.05 ,也属于 IT6 级精度,对插端的结构尺寸如图 2(b)所示。该制造精度一般应用于有特殊要求的较高配合精度场合,由于后续有拆卸要求,所以配合关系肯定属于间隙配合,为了尽可能减少接触间隙带来非线性误差因素的影响,采用较紧的间隙配合方式^[4]。两个定位销控的配合精度分别为 $\phi 2.5 \frac{H7}{h6}$ 、 $\phi 2.0 \frac{H7}{h6}$,在制造精度和装配关系上就决定了该类型电连接器在安装时精度要求高,需要电连接器两端对称安装,这也是影响该类型电缆安装精度的主要因素,对称安装的示意图如图 3 所示。

1.2 影响 DC10 排插型电缆性能指标变化的因素分析

因为在航天器的发射、在轨运行中都会受到比较强烈的温升变化、重力加速度和振动的影响,所以排插型电缆的电连接器的安装精度可能影响航天器的工作状态和在轨寿命^[5]。影响排插型电缆

性能指标变化的主要影响因素分别是由电缆介质的不均匀引起的电缆性能非线性 and 电连接器和对插端的安装接触非线性^[6-7]。其中因为材料的非线性

性引起的信号损耗和相位变化属于整个材料的固有属性,该属性引起的信号损耗和相位变化是一个常数,在使用期间值基本保持不变^[8]。

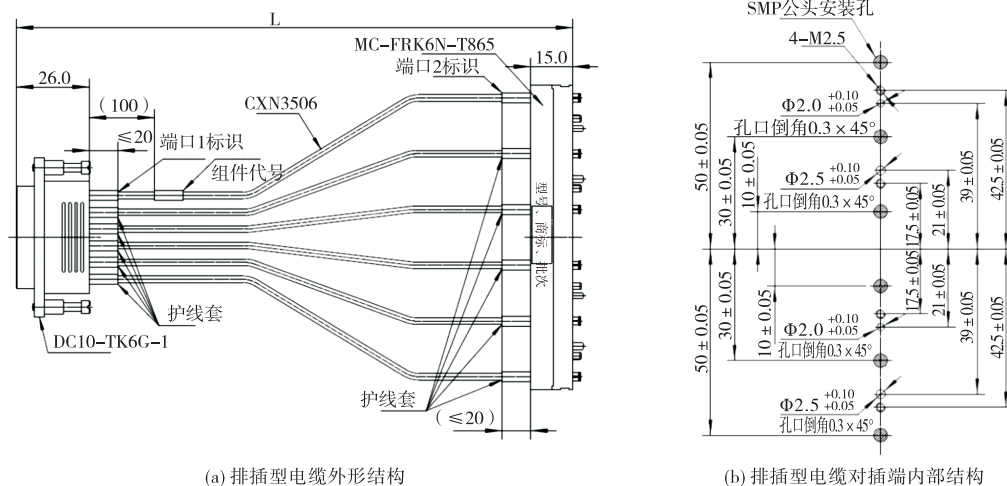


图 2 DC10 排插型电连接器外形结构与对插端开孔结构尺寸

Fig. 2 DC10 row plug-in electrical connector shape structure and opposite plug hole structure size

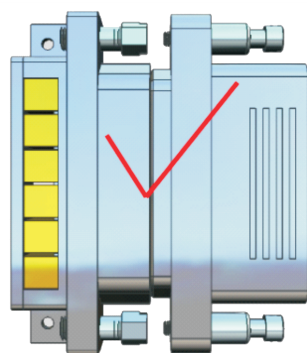


图 3 对称安装示意图

Fig. 3 Symmetrical installation diagram

连接器安装的接触非线性因素主要是航天器在地面、发射、在轨工作期间,航天器会受到剧烈的振动,电缆自身和电连接器会伴随着巨大的重力加速度产生振动发生动态弯曲,甚至产生应力^[9]。此外在轨工作时随着太阳光照环境的变化,载荷舱的空间热环境比较恶劣,会发生冷热交变、或长时间保持低温或高温,导致热应力增大;应力的变化会导致接触非线性持续加剧恶化,影响整个电缆的信号传输性能,进而影响分系统的稳定性^[10]。

新型高密度排插型电连接器在安装过程中影响接触非线性的主要因素有电连接器的安装精度、电缆的弯曲半径和线束绑扎的应力释放 3 个方面,而电连接器的安装精度是影响安装接触非线性最为主要的因素^[11]。所以,通信卫星的排插型电缆在总装环节产生的接触非线性对电缆的性能传输影

响最大,需要分析和研究出一套可靠性高、安装精度高的安装方法。

现针对该类型电缆的安装进行定性分析,由于插接面不对称安装引起的安装精度误差最大,对这一问题,进行定性分析。分别在排插型电连接器对插时倾斜 0°、1°、2°、3°、4° 时进行安装实验,并测试电缆的性能指标。

2 不对称安装引起的电缆性能指标变化分析

依据对影响 DC10 排插型电缆性能指标变化的因素分析结果,开展实验验证,并分析该类型电缆在正式试验时的测试数据结果,该类型电缆在正式数据传输时,频率最大为 10 GHz。当频率达到 8.3 GHz 时,其驻波达到最大,驻波最大值为 1.1968;当频率为 10 GHz 时,插损值达到最大,最大值为 2.81 dB/m,相位一致性为 10.12°,具体的正式测试数据结果如图 4 所示。依据该项测试数据结果,设置实验进行验证,分别在安装倾斜角度为 0°、1°、2°、3° 和 4° 时进行不对称式倾斜安装,设置 DC ~ 18 GHz、18 ~ 26.5 GHz、26.5 ~ 32 GHz、32 ~ 40 GHz 的 4 组不同的频率范围。使用矢量网络分析仪分别测试该电缆的电连接器分别在不同安装倾角、不同频率下的驻波比和插入损耗数据,并计算相位一致性和损耗一致性,将这些数据进行整理分析,绘制

X、Y 离散图,具体测试数据的图线结果如图 5 所示^[12]。

综合以上测试结果,可以发现,在安装倾角为 0° ,频率为 DC ~ 18 GHz 时,该类型电缆的驻波比和实际正式测试结果一致,为 1.196 8。在相同频率下,随着安装倾斜角度的增加,电缆的驻波比和插入损耗会呈现急剧恶化的状态,当倾斜角度达到 4° 时,驻波比和插入损耗反而随着安装倾角的增大而减小。这是由于电连接器和对插电缆的内部可能已经发生不可逆的塑性变形,该塑性变形导致接触非线性变化所致^[13]。

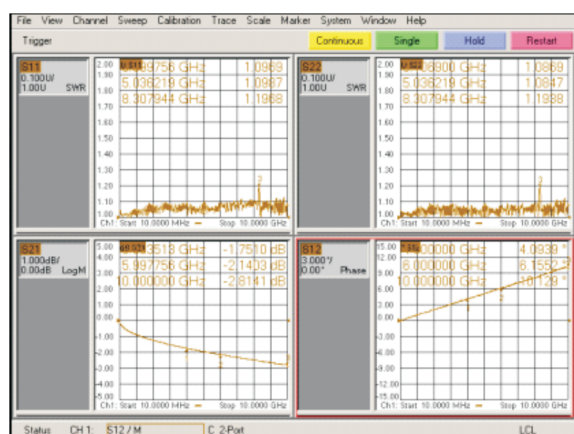
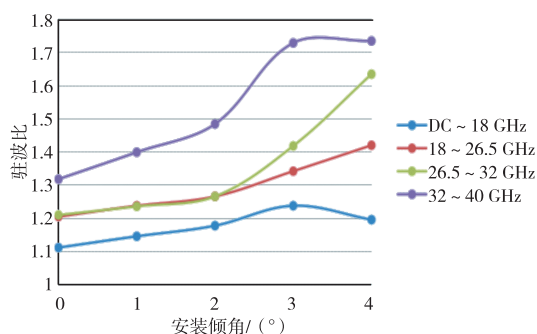
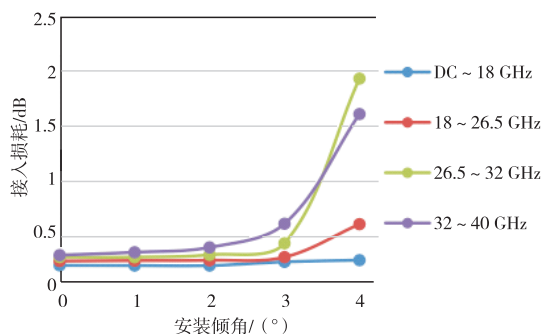


图 4 该类型电缆正式试验测试数据结果

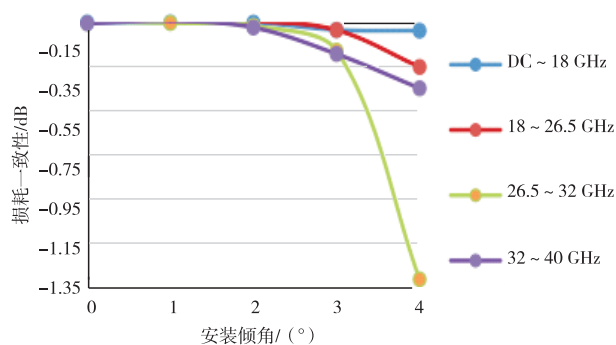
Fig. 4 This type of cable is officially tested with test data results



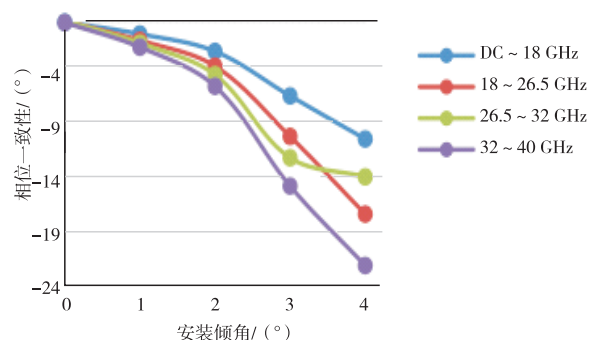
(a) 不同频率下安装倾角和驻波比关系



(b) 不同频率下安装倾角和插入损耗的关系



(c) 不同频率下安装倾角和损耗一致性的关系



(d) 不同频率下安装倾角和相位一致性的关系

图 5 排插型电连接器不对称安装引起的电缆性能指标变化
Fig. 5 The change in cable performance index caused by the asymmetric installation of the row type electrical connector

3 DC10 排插型电缆安装技术

依据对排插型电连接器不对称安装引起的电缆性能指标参数变化分析的结果,总结出以下新型高密度排插型电连接器的安装规范技术要求。

3.1 电缆安装前要求

核对电连接器接口 DC10 型排插电缆的电连接器和设备对插端接口标记一致。对排插电缆的设备电连接器接口和对插端进行物理外观检查,要求电连接器壳体完好无损、自带紧固螺钉齐全、电缆本体无压痕无损伤,对插端针孔内无金属屑等多余物,插针要求完好无异常^[14]。

3.2 安装技术要求

新型高密度排插型电连接器在安装时要求插头与插座垂直对插,通过电连接器壳体上的定位销实现连接时的定位和引导作用,同时两种不同规格的定位销孔还具有防插错功能^[15]。电连接器和插座插接时应沿同轴电缆轴线方向垂直插接,不允许产生大于 4° 的倾斜角度安装,要求电连接器的本体插针和对插端必须对正、垂直插接,排插型电连接器的插接要求示例如图 6 所示。在插接后拧紧锁紧

螺钉时,要求电连接器两边螺钉 0.5 圈/次对称交替拧紧,禁止单侧倾斜拧紧,要求安装螺钉的紧固力矩值为 $0.55 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

电缆线束在整理绑扎时,要求在第一个绑扎点设置有应力释放弯,禁止线束根部受力;将整束电缆沿着模型走向设置绑扎点,并要求整束电缆的最小弯曲半径大于 120 mm 。绑扎时要遵循从单机设备出来的电缆线束到第一个绑扎点之间的距离不大于 200 mm , 尽量避免电缆线束多次、反向弯曲^[16]。

由于电连接器在安装时属于较紧的间隙配合,插接到位之后,存在一定的啮合力,在拆除电连接器时,手工无法直接拆除,且存在连接器损坏的风险。针对此,专门设计该连接器的拆卸专用工装,拆卸专用工装如图 7 所示。使用专用工装卡住连接器的两侧卡槽,确保拔出过程中,两侧对称施力,消除在拆卸过程中因为不对称施力引起连接器和单机对插端损坏的风险,该类型电缆绑扎要求和拆卸专用工装使用情况分别如图 8(a)、图 8(b)所示。

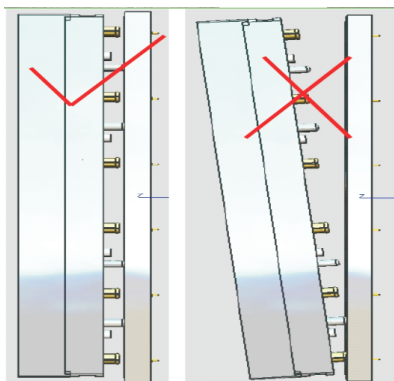


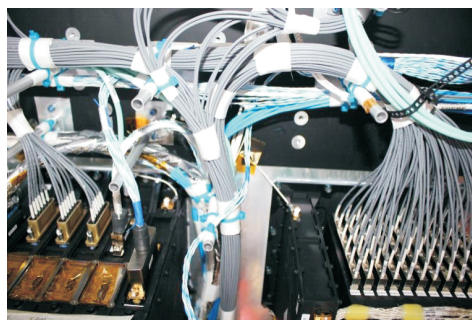
图 6 排插型电缆的安装技术要求

Fig. 6 Example of technical requirements for the installation of cables in a row-and-plug type



图 7 DC10 电连接器拆卸专用工装

Fig. 7 Special tooling for DC10 electrical connector disassembly



(a) 绑扎要求和集束电缆弯曲半径要求



(b) 拆卸用专用工装

图 8 排插型集束电缆的绑扎要求和拆卸用专用工装

Fig. 8 Special tooling for lashing requirements and disassembly of row-plug cluster cables

4 效果评价

上述安装方法能够显著地降低电缆组件在信号传输过程中因为不对称安装引起的插入损耗和相位变化,尤其是在降低大功率、高饱和度信号传输时的插入损耗和相位变化。设计的专用工装保证了连接器插拔过程中的对称度,消除了装配过程中由于不对称插拔造成连接器损伤的风险。该安装方法已成功应用于互联网星座的首批融合试验通信卫星 48 组新型高密度排插型电连接器的安装工作,目前整星在轨性能良好。经过系统测试验证,安装方法可以确保分系统长期稳定、可靠。

5 结论

本文从实际应用情况研究分析出发,针对航天器上狭小空间的 DC10 新型高密度排插型电缆的安装要求,分析排插型电连接器的结构尺寸,分析影响安装精度的因素,提出必须对称安装的要求。依据分析研究不对称安装引起的电缆性能指标变化的结果,总结出该类型电缆的安装方法、绑扎要求和弯曲半径要求,要求该类型电缆在插接时,电连接器和插座必须垂直对插,禁止带有倾角进行安

装。并提出在安装后的紧固要求,必须两侧对称交替拧紧,紧固力矩值必须达到 $0.55 \text{ N} \cdot \text{m}$,在拆卸时,也必须使用专用工装遵循对称拆卸的要求。从测试结果来看,该安装方法和技术能够很好的满足该类型电缆的信号传输指标要求。目前,该成果已成功应用于高性能互联网卫星通信系统及其他科研领域,已经取得了很好的实际应用效果。

参考文献:

- [1] 韩沁珂. 中国低轨卫星通信系统首星上天,要让全球永不失联[J]. 卫星电视与宽带多媒体,2019(1):58-64.
- [2] 余达,刘金国,周怀得,等. 单排插装连接器拼接安装工艺[J]. 电子工艺技术,2015,36(2):83-85.
- [3] 产品汇总:连接器[J]. 今日电子,2012(2):59-60.
- [4] 孟圆. 电连接器插拔与电接触行为的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2020.
- [5] 孟光,周徐斌. 卫星微振动及控制技术进展[J]. 航空学报,2015,36(8):2609-2619.
- [6] 王小丽,陈翔,崔万照. 空间大功率微波器件无源互调最新研究进展[J]. 空间电子技术,2020,17(5):1-10.
- [7] 金秋延. 射频连接器无源互调建模及信号干扰研究[D]. 北京:北京邮电大学,2020.
- [8] 孟光,周徐斌,苗军. 航天重大工程中的力学问题[J]. 力学进展,2016,46(6):267-322.
- [9] 薛玉雄,杨生胜,把得东,等. 空间辐射环境诱发航天器故障或异常分析[J]. 真空与低温,2012,18(2):63-70.
- [10] 王洪亮. 超大口径在轨组装望远镜热控技术研究[D]. 长春:中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所),2020.
- [11] 李姗姗,谭良辰. 接触式盲插连接器在 T/R 组件中的应用[J]. 电子机械工程,2021,37(3):13-16.
- [12] 刘迪. “卫星互联网”时代的低轨宽带卫星通信的测试挑战[C]//中国通信学会. 2020 中国卫星应用大会报告集,2020:28.
- [13] 陈国锋. 射频同轴开关射频性能与热学性能分析及优化方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.
- [14] 李树. J599 型电连接器总装过程中的插接技巧[J]. 科学技术创新,2018(14):147-148.
- [15] 孙阳,陈笑茹. 电连接器防错插设计浅析[J]. 技术与市场,2017,24(5):64-65+67.
- [16] 蔡鹏军. 通信卫星大功率射频组件无源互调的控制研究[D]. 成都:电子科技大学,2020.

作者简介:雷宇(1986—),陕西西安人,学士。曾获军队科技进步二等奖,嫦娥五号探测器试验队先进个人等奖项。主要研究方向为航天器总装技术。E-mail:122439391@qq.com

欢迎订阅《空间电子技术》

《空间电子技术》创刊于 1971 年,由中国航天科技集团有限公司西安空间无线电技术研究所主办,国内公开发行,双月刊。

本刊内容涵盖卫星通信、微波遥感、天线及其展开技术、卫星测控、数据传输与处理、电磁环境与可靠性、计算机应用、航天工艺及材料、空间站与载人航天、深空探测等空间电子学领域及其交叉学科。凡在理论与应用实践上具有创新的,代表我国最新空间电子学科技研究水平的学术论文、有科学依据和可靠数据的技术报告、阶段性成果报告以及属于前沿学科并对学科发展有指导意义的展望评论性文稿均可投稿。

本刊被中国核心期刊遴选数据库、中国学术期刊综合评价数据库(CAJCED)、中国期刊全文数据库(CJFD)、中文科技期刊数据库(CSTJ)全文收录,已被“万方数据”、“中国知网”即《中国学术期刊(光盘版)》以及《中文科技期刊数据库》(维普)、超星网络等平台全网搜索。本刊国内外公开发行。

《空间电子技术》为双月刊,A4 开本,彩色印刷,定价:每期 12.00 元、全年 72.00 元。

联系电话:029-85613384,传真:029-85613222,E-mail:kjdzjs504@163.com。

通信地址:西安市东长安街 504 号《空间电子技术》编辑部,邮编:710000。