

试论电气安装在航空航天领域的创新与发展

张书玮 鲁承金 张 锴*

北京航天万源科技有限公司, 北京 100176

[摘要]随着航空航天技术的迅速发展, 电气系统作为航天器运行的核心保障, 其安装方式和技术水平直接关系到设备的稳定性、安全性与智能化程度。近年来, 电气安装在材料选择、布线方式、智能控制、集成化设计等方面不断创新, 助力我国航空航天工程的高质量发展。文中通过分析航空航天电气安装的基本特点与技术难点, 探讨其在系统集成、新型材料应用、智能化趋势及标准规范化等方面的创新路径, 为相关工程技术人员提供参考与借鉴。

[关键词]航空航天; 电气安装; 系统集成; 智能化; 轻量化; 可靠性

DOI: 10.33142/sca.v8i5.16406

中图分类号: TM8

文献标识码: A

Trial Discussion on the Innovation and Development of Electrical Installation in the Aerospace Field

ZHANG Shuwei, LU Chengjin, ZHANG Kai*

Beijing Aerospace Wanyuan Technology Co., Ltd., Beijing, 100176, China

Abstract: With the rapid development of aerospace technology, electrical systems serve as the core guarantee for spacecraft operation, and their installation method and technical level directly affect the stability, safety, and intelligence of equipment. In recent years, electrical installation has continuously innovated in material selection, wiring methods, intelligent control, integrated design, and other aspects, contributing to the high-quality development of Chinese aerospace engineering. The article analyzes the basic characteristics and technical difficulties of aerospace electrical installation, explores its innovative paths in system integration, new material application, intelligent trends, and standardization, and provides reference and inspiration for relevant engineering and technical personnel.

Keywords: aerospace; electrical installation; system integration; intelligentization; lightweight; reliability

引言

航空航天技术体现了一个国家科技与工业的顶尖水准, 作为达成航天器动力、导航、通信及控制等功能的关键依托, 电气系统性能和安装质量的关系十分紧密。传统电气安装方式, 难以契合现代航天器对高集成度、轻量化、高可靠性及智能响应的需求, 分析航空航天领域电气安装的创新实践及未来发展走向, 有着显著的理论及现实层面意义。

1 电气安装在航空航天领域的基本要求

1.1 高可靠性要求

航空航天电气系统工作在极端复杂恶劣的环境中, 有剧烈温度变化 (高温或极寒情况)、强烈机械振动、电磁干扰及高强度辐射等方面, 这些因素对电气系统稳定性及可靠性有着极为严苛的要求。为使系统在各种应急与高风险情形中稳定运行, 系统设计应运用冗余架构、抗干扰方案、优质材料以及前沿的封装与防护工艺。需借助高频插拔、盐雾腐蚀、振动老化等多项试验对关键连接器的接触可靠性予以验证, 保障其在寿命周期内不存在接触不良这类风险。线束与接插件的布设工作, 也需将抗电磁干扰能力、抗疲劳性能和热膨胀影响纳入考量, 达成即便面临长时间、长航程任务, 信号传输也准确无误, 保障航天器控制系统跟数据链路稳定运作^[1]。

1.2 轻量化与高集成度

在航空航天内, 飞行器的质量直接关乎其燃料消耗情

况、飞行效率高以及任务完成能力, 研发把电气系统轻量化设计当作重要目标之一。伴随飞行器功能的持续强化, 电气系统的集成水平也在不断攀升, 为在有限的空间与重量限制内实现更多功能承载, 设计者必须对电缆布局进行最优路径的谋划, 降低冗余的线缆铺设, 且引入柔性电缆、轻质合金外壳、微型连接器等先进材料与相关器件。电气组件应朝着模块化、智能化、小型化迈进, 尽量把多功能集中到同一控制单元里面, 采用系统芯片 (SoC) 或嵌入式总线技术将多个子系统进行整合。高集成度应兼顾散热、电磁兼容性以及维修的便利特性, 要保证在不增添系统复杂度的状况下达成功能最优组合及运行稳定。

1.3 便于维护与检测

因为航天器在轨道运行当中, 无法和地面设备一样实现频繁的人工维护活动, 故而其电气系统需拥有较强的自诊断与自修复能力。在设计环节最大限度地减少潜在故障点, 此不仅要求系统电路结构做到简洁, 接口规范要统一, 尚需嵌入状态监测模块及故障报警逻辑, 若有异常出现, 可自动进行故障的判断、定位及隔离。地面人员可借助远程检测平台快速掌握电气系统的运行态势, 进行远程调试以开展数据分析, 要预留标准化测试接口及通讯通道。为了让系统的升级与测试过程简化, 关键部件最好采用可热插拔及模块化的设计形式, 能实现快速替换与单元级的查验, 进而大幅提升系统维护效率与任务保障水平, 减小系统运

行耗费^[2]。

2 电气安装技术的主要创新方向

2.1 新材料的应用

在航空航天电气系统设计的阶段中,材料的合理选择对整体性能、安全性和可靠性意义重大。伴随着技术的革新,各类飞行器电气系统普遍应用高性能绝缘材料、柔性电缆和低烟无卤材料,在高温、低温、强辐射等极端环境中,这些新型材料的耐受性能十分卓越,也极大地降低了系统的整体重量,增进了空间利用的效率与结构的灵活性。作为一种性能极为出色的高分子绝缘材料,聚酰亚胺(PI)薄膜线,鉴于其展现出出色的热稳定性、电绝缘性能及机械强度,已在卫星电气系统中被广泛地采用。PI 薄膜线能在 200℃以上环境中开展长期工作,而且其柔韧性十分优良,契合空间逼仄、弯曲复杂的布线所需。低烟无卤材料在赋予电缆阻燃能力的同时,减少了燃烧时产生的有毒烟雾,极大提高了系统在应急情形下保障人员安全的能力。利用这些先进材料的集成运用,航空航天电气系统在安全性、轻量化及可靠性方面实现全面优化,为复杂航天任务的顺畅推进筑牢了坚实壁垒。

2.2 模块化与集成化设计

在航空航天电气系统设计和集成的工作阶段,结构一体化封装技术逐渐变成增强系统可靠性与简化装配步骤的核心手段。此技术采用把多个电气功能模块集成的方式,如实施电源调控、信号分配、数据处理等事项,按系统功能需求开展整合设计。从结构角度实现一体化封装,有效降低了传统布线中大量分离式连接器与线缆的用量,还大幅增进了系统空间的利用水平与结构紧凑性。这种模块化与一体化结合的设计,可简化电气系统安装、调试及维护流程,大幅度缩短装配时间且降低人工成本。随着连接件数量的减少,由振动、热胀冷缩、电磁干扰等因素引起的接触不良和信号衰减风险也降低了,极大增强了整体抗震效能和电磁兼容水平。在实际应用的阶段,该技术在载人航天飞船、空间站舱段等高可靠性要求系统中获得良好成效,表现出优越的环境适应能力及运行稳定性^[3]。

2.3 数字化与智能化安装系统

随着数字化技术在航空航天领域的深入运用,电气系统的设计、制造及运维持续朝着智能化与自动化迈进。基于 CAD/CAM/CAE 这样的先进数字平台,设计人员可在三维环境当中对电气布线实施精准仿真设计及动态调整,凭借自动化排线、路径优化及碰撞检测功能,预先察觉布线中空间冲突、过度弯折等潜藏问题,从而于设计阶段有效降低后期返工比例与故障出现概率。系统可自主生成标准化的安装文档以及工艺流程,有效强化了电缆安装的规范性及效率。在设备制造及运行的阶段,采用 RFID(射频识别)标签技术和智能传感器手段,能对电气部件进行精准识别与实时状态管控,包含温度、电流、电压等关键参数

的不断采集与远程输送。系统能对运行状态开展智能评估与故障的预判,即刻给出维护预警,辅助地面控制中心开展远程诊断与决策事宜。集成应用这些相关技术,既改善了航天电气系统设计精准度,又提高了装配效率,更为保障其长期稳定运行、有效延长使用寿命给予了有力支持。

2.4 自动化安装设备的引入

在航空航天飞行器制造的流程中,舱段内部空间逼窄,为传统人工实施布线与部件安装带来极大困难。为了实现作业精度与效率提高,现代航天制造普遍引入激光定位系统与机器人辅助安装方面的技术。采用精细程序控制,机器人能自如地操作各类工具线缆,哪怕是在有限操作空间中,也能开展高复杂度的布线及固定作业,而且拥有高度的重复工作精度,切实防止因人工操作疲劳或误差所造成的故障隐患。激光定位系统可给出毫米量级的三维定位参照,借助数字模型达成线缆路径与接口位置的精准引导,保证各电气连接点精准无差错,避免错插和漏插等问题出现。该技术组合可与数字化装配流程实现无缝衔接,即时校正作业偏差,自动做好施工数据记录,给后续检测、运维方面提供详实的支撑依据。

3 电气安装过程中的关键技术难点

3.1 空间布局复杂性

航天器内部空间资源稀少,且其结构往往呈现高度集成状态,布局十分繁复。电气系统需要和液压系统、热控系统以及结构构件紧密配合,开展合理布设,以保证各系统之间实现有效协同,且杜绝相互之间的干扰与资源浪费。此外,应使电缆布线路径避开热源和高振动区域,避免造成性能下降或出现故障。为实现最适宜的安装方案,需借助空间仿真技术对布线路径、组件排布等方面进行可视化模拟。同时借助数字孪生技术实现实时验证与动态优化操作,大幅增进设计与集成的精细程度和功效,保障航天器整体性能的可靠及安全水平^[4]。

3.2 高电磁兼容性要求

在狭小空间中,航天器电气系统布线十分密集,容易产生电磁干扰(EMI),也易受其扰,为系统稳定性埋下严重的隐患。若电磁兼容性(EMC)设计放在高度重视位置,导线需要采用高质量的屏蔽层,稳妥杜绝辐射干扰;各系统接地方式要进行合理筹划,像运用单点接地、多点接地或者混合接地手段,以此抑制地电流引发的噪声。将滤波器、隔离变压器、抗干扰模块等元件添加到关键信号路径中,极大提升系统对外部干扰的抑制能力。借助系统层面的电磁仿真分析,可实现设计的进一步优化,增进整个航天器在复杂电磁环境中的运行稳定性。

3.3 热管理与散热

在航天器进行运行时,部分高功率电子设备,如电源模块、处理器及通信装置,会持续散发出大量热量。若散热不及时开展,将大幅降低设备性能,乃至引发设备失效,

在电气系统设计与安装进程中,热管理策略必须充分考虑,要合理预留散热空间和通风路径。采用高效的冷却途径,比如主动风冷、液冷系统这一类,针对热密度较高的区域而言,可引入热管、相变材料之类的先进热控手段辅助散热,保证热量迅速转移且充分扩散。采用热仿真技术可模拟不同工况时的温度分布状态,指导散热元件的放置布局与型号挑选,增进系统整体热稳定性及工作可靠性。

4 电气安装标准化与质量控制体系的建设

4.1 航空航天电气安装标准的建立

如 GJB (国家军用标准) 以及 NASA - STD - 8739 系列规范等,为电气安装工程供给了系统性与权威性兼备的技术依据。航空航天、军工电子等对可靠性要求严苛的领域广泛采用了这些标准,包括电气布线设计、导线敷设的各个步骤、焊接工艺的具体流程、接插件的选型与装配的相关工作、接地与屏蔽的操作、抗震安装的实施等关键内容。以 NASA - STD - 8739 为例,其针对焊点质量、端接方式、绝缘保护、导线扭绞及固定方法等内容均给出细致规定,保障电气系统在极端环境中依然拥有良好的电气性能与机械强度。GJB 系列标准与我国国情实现结合,兼顾先进与实用特性,对军用设备的电气可靠性、环境适应性提出高规格要求。实施这些标准,不但提升了安装的一致性和可重复性,同样有效降低了由于接触不良、短路、松脱等问题引起的系统故障概率,是维系高端装备稳定运行的依托,标准进一步促进了行业质量管理体系构建以及人员技能培训的规范进程^[5]。

4.2 全生命周期质量控制

在电气安装及集成的整个实施过程中,从设计开始、进行元器件的采购、开展材料的加工而后现场安装,再往后续是后续功能测试、系统验收,直至最终进入在轨使用阶段,皆要构建健全的闭环质量监督体系。此体系需覆盖每一个环节及每道工序,构建前后关联、紧紧相扣的质量控制轨道,保证问题可迅速发现并追踪到起始。基于这一基础,引入质量追溯机制十分关键,其要求针对所有用到的元器件、连接器、线缆、焊接工艺和安装记录等创建详细档案,实现从原材料批次、供应商数据到具体安装人员、操作时间等全流程信息可查询、可核验、可追溯。该管理手段显著增强了整个系统的可控性与透明程度,同时为后续出现的故障分析、维修保养提供了关键凭据。

4.3 参与协同设计平台的推广

在复杂系统的研发进程当中,加强多专业(结构、电气、热控等)联合设计平台建设意义重大。凭借打造多学科协同的设计空间,可冲破传统各专业相互的信息壁垒,实现数据即时交互与模型协同迭代。在系统设计起始的阶段,各专业相关人士能在统一平台针对结构布置、电缆走向、热控元件配置等关键内容开展可视化建模与联合鉴定,进而在设计阶段能完整识别出潜藏的安装冲突。如线缆与结构件的相互干涉、热控材料和电气部件布局的重叠状况,防止后期生产阶段因设计漏洞引发大规模返工。该平台还可整合仿真分析工具,针对线路路径长度、电磁兼容性、热传导性能等参数实施多维度优化,增强系统整体的性能与可靠水平^[6]。

5 结语

航空航天电气安装作为系统工程中至关重要的一环,其发展水平直接决定航天器运行的稳定性与安全性。本文从高可靠性、轻量化、智能化等角度出发,分析了当前电气安装的主要技术创新与应用难点,并强调了标准化管理与质量控制体系的必要性。未来,随着人工智能、数字孪生、柔性电子等新兴技术的融合应用,航空航天电气安装将在更高层次上实现自动化、智能化与系统化,助力我国航空航天事业迈向更高发展台阶。

[参考文献]

- [1] 吕辉,张永星. EWIS 电气安装标准件的应用[J]. 飞机设计, 2023, 43(3): 37-40.
 - [2] 李大伟,冯铁山,王暕来,等. 航天飞行器电气系统安全性设计技术[J]. 安全, 2021, 42(1): 53-56.
 - [3] 申天海. 空客系列飞机电气接地技术与安装方法研究[J]. 成都航空职业技术学院学报, 2021, 37(3): 42-44.
 - [4] 吕亚楠. 航空电气故障预测与管理的研究[J]. 石河子科技, 2020(4): 8-9.
 - [5] 王茜,周璐. 基于飞机电气分离面 EWIS 安装设计方法研究[J]. 飞机设计, 2019, 39(2): 53-55.
 - [6] 曹鹏飞. 民用飞机电气接地桩设计和安装研究[J]. 技术与市场, 2017, 24(10): 9-12.
- 作者简介: 张书玮(1993.8—), 毕业院校: 北京工业大学, 所学专业: 机械工程, 当前就职单位: 北京航天万源科技有限公司, 职务: 工程师, 职称级别: 中级。