

浅谈航天发动机电气系统技术

李 阳

首都航天机械有限公司 北京 100076

摘 要：本文围绕航天发动机电气系统技术展开。概述了系统定义、组成、功能与作用。分析了高可靠性设计、电磁兼容、智能化控制、新能源应用等关键技术。探讨了集成化、智能化、绿色化、网络化等发展趋势。强调电气系统对航天任务的重要性，为航天发动机电气系统技术发展提供参考，助力航天事业进步。

关键词：航天发动机；电气系统；关键技术；发展趋势

引言：航天发动机电气系统作为航天发动机的核心支撑，在航天任务中发挥着不可替代的作用。它确保发动机在极端太空环境下稳定运行，为航天器的各项任务提供关键支持。随着航天技术的不断发展，对航天发动机电气系统的性能和可靠性提出了更高要求。本文将深入探讨航天发动机电气系统的关键技术，并对其未来发展趋势进行展望，以期对航天发动机电气系统的进一步发展提供有益的参考。

1 航天发动机电气系统概述

1.1 系统定义与组成

航天发动机电气系统专为航天发动机设计，是集成电力供应、分配、控制及监测功能的系统，确保发动机在极端条件下稳定运行。系统由电源系统、配电系统、用电设备、控制系统四部分构成。电源系统负责产生所需电能，形式多样，涵盖太阳能电池阵列、燃料电池或化学电池等，具体选择依据任务需求与飞行环境，以满足长时间太空飞行能量需求。太阳能电池阵列适用于长期任务，光照充足时可持续供电；燃料电池适合高能量密度任务；化学电池则作为应急备用电源。配电系统将电能安全有效分配至用电设备，通过开关、继电器和保护装置管理电流，防止过载和短路，保障系统安全稳定^[1]。精细的电流管理机制对维持电气系统正常运作至关重要。用电设备包括发动机点火装置、燃料喷射器、涡轮泵及其他辅助机械，依赖稳定电力供应工作，电力中断可能引发严重后果。例如，发动机点火装置需在精确时间点启动，确保顺利点火；燃料喷射器需准确控制燃料流量，优化燃烧效率，提升推力性能。控制系统作为电气系统核心，利用传感器数据实时监控发动机状态，通过执行机构调整操作参数，确保高效运行。控制系统可接收各类传感器信息，快速反应，调节发动机工作状态，实现对发动机的全面掌控。

1.2 系统功能与作用

航天发动机中，电气系统至关重要，为发动机运行提供核心支持。电气系统为发动机点火提供能量，确保在预定时刻成功启动。同时向燃油喷射系统供电，精确控制燃料流量，优化燃烧效率，提升推力性能。对于涡轮泵，电气系统不仅提供动力，还通过反馈机制调节转速，维持最佳工作状态。电气系统实现对发动机运行状态的全面监测。借助温度传感器、压力传感器等各类传感器，实时获取发动机内部环境信息，帮助地面指挥中心了解工况。基于这些数据，控制系统及时响应，采取措施预防潜在故障，延长发动机使用寿命。电气系统的可靠性直接关系到航天任务成败。高度可靠的电气系统能在恶劣环境下稳定工作，减少因电力问题导致的任务失败风险。安全性也是重要考量指标。面对突发情况，电气系统需具备自动隔离故障区域的能力，避免事故扩大。通过冗余设计和多层次防护措施，即使某个组件异常，整个系统仍能继续运作，保障人员及设备安全。

2 航天发动机电气系统关键技术分析

2.1 高可靠性设计技术

高可靠性设计技术对于航天发动机电气系统至关重要。航天发动机电气系统在航天任务中扮演核心角色，其运行状态直接决定航天器成败，故对电气系统可靠性要求极高，需具备抗辐射、耐高温、耐振动等能力。在抗辐射方面，航天器在太空会受高能粒子辐射影响，可能导致电气元件性能退化或损坏。为应对此挑战，高可靠性设计技术采用多种方法，如选用抗辐射能力强的电子元器件，这些元器件经特殊处理，能在辐射环境下保持稳定性能。对电路进行合理布局，减少辐射对关键电路的影响^[2]。耐高温方面，航天发动机运行产生极高温度，电气系统必须能承受。采用耐高温材料是关键，如使用陶瓷基板、高温导线等。对电气系统进行热设计，通过散热片、热管等散热装置，有效散发热量，确保电气系统在高温下正常工作。耐振动也是高可靠性设计的

重要方面,航天器发射和飞行中会受强烈振动,电气系统必须具备足够抗振动能力。采用减振设计,如使用橡胶减振器、弹簧减振器等,减少振动对电气元件的冲击。对电气元件进行加固处理,提高其抗振动性能。高可靠性设计的主要方法和技术还包括冗余设计、容错技术和可靠性建模与评估。冗余设计指在系统中增加额外元件或子系统,当某个元件或子系统故障时,冗余部分可接管其功能,确保系统继续正常运行。容错技术通过软件和硬件结合,使系统在出现故障时能自动检测、隔离和恢复故障,保证系统正常运行。可靠性建模与评估是对电气系统可靠性进行定量分析和预测,为系统设计和改进提供依据。

2.2 电磁兼容技术

航天发动机电气系统中存在着复杂的电磁环境,电磁干扰问题严重影响了系统的性能和可靠性。电磁干扰主要包括电源干扰和信号干扰。电源干扰是指电源中的纹波、噪声等对电气元件和电路的影响,可能导致元件性能不稳定甚至损坏。信号干扰是指不同信号之间的相互干扰,如模拟信号和数字信号之间的干扰,可能导致信号失真、误码率增加等问题。为解决电磁兼容问题,需要采取一系列关键措施。屏蔽是常用的方法之一,通过使用金属屏蔽材料将电气元件和电路包裹起来,阻止电磁波的传播。例如,采用金属外壳对敏感元件进行屏蔽,减少外部电磁干扰的影响。滤波技术则是通过在电路中加入滤波器,滤除电源中的纹波和噪声,提高电源的质量。常见的滤波器有低通滤波器、高通滤波器、带通滤波器等。接地也是电磁兼容技术中的重要措施,合理的接地设计可以有效地降低电磁干扰。将电气系统的各个部分进行等电位连接,通过接地线将干扰电流引入大地,减少干扰对系统的影响。在电路设计过程中,还需要注意信号线的布局和布线方式。避免信号线之间的平行走线,减少信号之间的耦合干扰。采用差分信号传输技术,可以提高信号的抗干扰能力。对电气系统进行电磁兼容测试和验证,确保系统在实际运行中满足电磁兼容要求。

2.3 智能化控制技术

随着航天技术的不断发展,对航天发动机电气系统的控制精度和智能化水平提出了更高的要求。智能化控制在航天发动机电气系统中的应用需求日益增加,主要体现在自适应控制、故障诊断与预测等方面。自适应控制是指控制系统能够根据被控对象的变化自动调整控制参数,实现对系统的最优控制。在航天发动机电气系统中,由于工作环境和负载条件的变化,系统的动态特性

也会发生变化。自适应控制系统能够实时监测系统的状态,并根据变化情况调整控制策略,提高系统的控制精度和稳定性。故障诊断与预测技术则是通过对电气系统的运行数据进行实时监测和分析,及时发现系统中潜在的故障隐患,并预测故障的发生时间和发展趋势。这有助于提前采取措施,避免故障的发生,提高系统的可靠性和安全性。为实现智能化控制,需要采用多种主要方法和技术。人工智能算法是智能化控制的核心技术之一,如神经网络、模糊控制、遗传算法等。神经网络具有强大的非线性映射能力和自适应学习能力,可以用于对复杂的航天发动机电气系统进行建模和控制^[3]。模糊控制则能够处理不确定性和模糊性的信息,适用于对一些难以建立精确数学模型的系统进行控制。遗传算法是一种优化算法,可以用于优化控制参数,提高系统的性能。传感器网络技术也是智能化控制的重要组成部分,通过在电气系统中布置大量的传感器,实时采集系统的运行数据,并将数据传输到控制中心进行分析和处理。传感器网络技术可以实现对系统的全面监测,为智能化控制提供丰富的数据支持。

2.4 新能源应用技术

随着全球对能源和环境的关注度不断提高,新能源在航天发动机电气系统中的应用前景越来越广阔。燃料电池和太阳能电池是两种具有潜力的新能源。燃料电池是一种将化学能直接转化为电能的装置,具有能量密度高、无污染等优点。在航天发动机电气系统中,燃料电池可以作为备用电源或主电源,为系统提供电力。然而,燃料电池在航天应用中面临着一些关键问题,如能量密度需要进一步提高,以满足航天器长时间飞行的需求。燃料电池的可靠性和寿命也需要得到保障,确保在恶劣的太空环境中能够稳定运行。太阳能电池则是将太阳能转化为电能的装置,具有清洁、可再生等优点。在航天器上,太阳能电池板可以安装在航天器的表面,为航天器提供电力。但太阳能电池的应用也受到一些限制,如能量转换效率需要提高,以增加电力的输出。太阳能电池在太空环境中会受到辐射、微流星体撞击等因素的影响,需要采取相应的防护措施,提高其可靠性。新能源应用技术为航天发动机电气系统的发展带来了新的机遇和挑战。通过不断研究和创新,解决新能源应用中面临的关键问题,有望实现航天发动机电气系统的绿色、高效运行。

3 航天发动机电气系统技术发展趋势

3.1 集成化趋势

航天发动机电气系统的集成化发展是未来重要方向,

涉及电源、配电、控制及用电设备等多方面。集成化设计将原本分散的功能模块整合至更紧凑高效的系统中。将电源系统与配电系统紧密结合,可减少电力传输损耗,提高整体能效。控制系统与用电设备的深度融合,能简化操作流程,增强系统响应速度和精度。集成化优势显著,可提升系统性能,实现更高效的能量管理和更精准的操作控制。减少组件数量和接口复杂度后,制造成本得以降低。然而,集成化也带来新挑战。设计难度增加,要求工程师具备跨领域知识技术能力,以确保不同模块无缝协作。任何单一组件故障都可能影响系统稳定性,需更严格的测试和验证流程。在推进集成化过程中,需平衡优势与挑战,确保系统可靠性和稳定性。

3.2 智能化趋势

智能化是航天发动机电气系统发展的另一大趋势,涉及自主决策、自适应控制和智能维护等方面。随着人工智能技术的进步,未来的电气系统将具备更强的自我学习和决策能力。例如,基于机器学习算法的控制系统可以根据实时环境变化调整自身参数,优化发动机的工作状态。这种自适应控制不仅提高了效率,还增强了应对突发情况的能力。智能维护技术则利用传感器网络和大数据分析,提前预测潜在故障并提出预防性维护建议。这不仅可以延长设备使用寿命,还能大幅减少因意外停机造成的损失。智能化技术的应用彻底改变了传统电气系统的运行模式,使其从被动响应转向主动管理。尽管如此,智能化系统的开发仍面临诸多挑战,如算法的准确性和鲁棒性、系统的可靠性和安全性等。

3.3 绿色化趋势

绿色化也是航天发动机电气系统未来发展的重要方向之一,主要体现在节能减排和环保材料的应用上。在能源管理方面,采用高效能电池技术和优化的电力分配策略可以有效减少能耗。探索可再生能源在太空任务中的应用前景广阔,如太阳能电池和燃料电池等,它们不仅清洁无污染,还能提供持续稳定的能量供应^[4]。环保材料的应用对于提升系统的可持续性至关重要。选择轻质、高强度且对环境友好的材料,既能减轻飞行器重量,又能减少制造过程中产生的废弃物。绿色化技术不

仅有助于保护地球环境,还能为深空探测任务提供更加持久可靠的能源解决方案。这对于推动航天事业的长远发展具有重要意义。

3.4 网络化趋势

网络化趋势在航天发动机电气系统中至关重要,它实现了与地面控制中心的实时通信及设备间的互联互通。通过高速、稳定的数据传输通道,地面指挥中心能远程监控发动机状态并及时发出指令。这不仅增强了任务透明度和可控性,还促进了资源的有效利用。设备间的互联互通提升了系统的灵活性和响应速度,支持信息共享和协同工作。然而,网络化也带来了信息安全挑战,如防止未经授权的访问和数据泄露。必须强化加密技术,确保通信安全。保证数据传输的可靠性是一大课题,特别是在面对宇宙射线等干扰时。改进抗干扰能力,采用纠错编码和信号处理技术,确保数据准确性和完整性。构建安全可靠的通信网络还需考虑冗余设计,以维持部分受损情况下的基本功能。这些措施共同保障了航天发动机电气系统在网络环境下的高效运行,支持复杂的太空探索任务。

结束语

航天发动机电气系统作为航天事业发展的重要支撑,其技术创新至关重要。本文通过对航天发动机电气系统关键技术的深入分析,以及对未来发展趋势的展望,揭示了该领域面临的挑战与机遇。未来,随着技术的不断进步,航天发动机电气系统将朝着集成化、智能化、绿色化和网络化的方向发展,为航天事业的蓬勃发展注入新的活力。

参考文献

- [1]张启鹏,陈晓锦,康建成.航空发动机维修过程多余物防控的思考[J].装备维修技术,2023,(06):86-89.
- [2]陆泽明,赵文凯.航空发动机叶片疲劳损伤机理及寿命评估[J].航空动力学报,2024,39(3):114-119.
- [3]邸三虎.无损检测技术在航空发动机叶片故障自动检测中的应用[J].模具制造,2024,24(08):246-248.
- [4]汤捷中.浅谈航空发动机叶片的检测与维修[J].内燃机与配件,2023,(17):64-66.