

# 航空发动机机械结构与电气控制系统协同设计研究

魏秀蕊

天津平高智能电气有限公司 天津 300300

**【摘要】**：航空发动机的机械结构与电气控制系统之间的协同设计对提高发动机性能具有重要意义。通过优化机械与电气系统的设计，能够实现系统功能的最大化并保证其运行稳定性。本文分析了在协同设计中面临的关键问题，并提出了有效的解决方案，结合现代控制技术与机械设计方法，推动了航空发动机整体性能的提升。通过多学科设计优化，机械结构与电气控制的协同工作能够显著提升发动机的综合效能与可靠性，为航空领域的技术发展提供了新的思路。

**【关键词】**：航空发动机；机械结构；电气控制；协同设计；多学科优化

DOI:10.12417/2705-0998.26.05.069

## 引言

航空发动机是现代航空工业的核心技术之一，机械结构与电气控制系统在其运行过程中起着至关重要的作用。随着技术的不断进步，如何有效地实现这两大系统的协同设计，成为了提升发动机性能与保障其稳定运行的关键。机械结构设计关注着发动机的物理强度与耐久性，而电气控制系统则直接影响发动机的运行效率与安全性。尽管两者之间存在一定的联系，但传统的分开设计模式常常导致效率低下及资源浪费。为了解决这一问题，协同设计作为一种新型的优化方法，越来越受到业界的重视。通过在设计阶段引入机械与电气系统的同步优化，不仅能提高设计效率，还能大幅提升发动机整体的性能与可靠性。

## 1 机械结构与电气控制系统设计的互动性

### 1.1 机械结构与电气控制系统的基础概念

航空发动机的机械结构和电气控制系统是其核心组成部分，二者各自承担着不同的功能。机械结构主要涉及发动机的物理组件，如压气机、燃烧室、涡轮等，它们的设计需满足强度、耐久性、热管理等多方面的要求。而电气控制系统则负责对发动机运行状态进行实时监控与调节，确保各部件的协同工作。该系统包括传感器、执行器、控制单元等，确保发动机的各项参数处于最佳工作范围。这两者虽然功能不同，但相辅相成，彼此的运行状态密切关联，往往需要在设计初期便进行深入的耦合考虑。

### 1.2 两者设计之间的相互影响与挑战

机械结构与电气控制系统设计存在较为复杂的交互关系。机械设计的结构优化往往会对电气控制系统的布置、传感器的选择及线路布局产生影响。某些传感器可能会受到发动机外部振动和温度变化的影响，从而需要在机械结构设计中做出相应的防护措施<sup>[1]</sup>。电气控制系统的控制逻辑和算法也会对机械结构的动态响应产生影响，要求机械结构能够快速响应控制指令，保证发动机的稳定运行。这种相互制约和依赖，导致了设计过程中必须处理的多项复杂问题，包括如何平衡二者之间的

空间和性能需求。

### 1.3 协同设计的基本框架与原理

协同设计是为了更好地整合机械结构与电气控制系统，在设计阶段同步进行优化的过程。其基本框架包括多学科设计优化(MDO)，该方法通过将机械设计与电气系统设计视为一个整体，进行联合优化。通过建立耦合模型，将机械和电气系统的参数进行集成，确保两者的设计能够互相支持。通过迭代算法优化各项设计参数，使得两者在性能、成本和可操作性上达到最优平衡。在此过程中，控制理论、系统工程以及仿真技术将发挥重要作用，能够确保设计过程中的实时反馈和调整，从而有效提高整体系统的运行效率和可靠性。

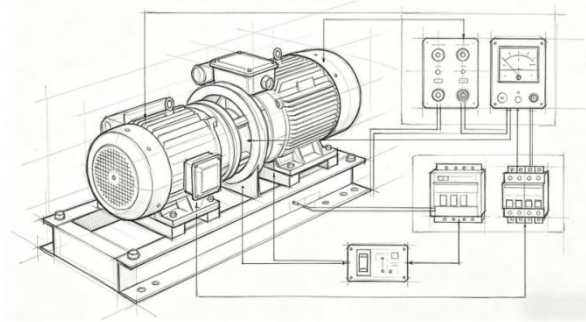


图1 机电动力机组接线布局示意图

## 2 协同设计中的关键技术与方法

### 2.1 多学科优化设计方法

多学科优化设计(MDO)是一种有效整合不同领域知识与技术的设计方法，在航空发动机的协同设计中应用广泛。MDO将机械设计与电气控制系统设计作为一个整体，通过系统化的方式协调各学科间的矛盾与协同需求。具体而言，MDO方法将设计问题划分为多个子问题，分别进行优化，最终通过全局优化算法将各子问题的最优解合成。这种方法能够确保各学科在优化过程中不会互相冲突，并能从系统级别寻求全局最优解。在航空发动机的设计中，MDO方法不仅关注各个设计环节的局部最优，还能综合考虑重量、结构强度、动力性能、控

制精度等多个因素，充分发掘各设计模块的潜力，最终达到协同设计的目标。

## 2.2 机械与电气系统的耦合分析

机械与电气系统的耦合分析是协同设计中的一项关键技术。由于机械系统和电气控制系统在工作过程中存在复杂的相互作用，单独分析各自的性能往往无法得到准确的设计结果。机械系统的振动、热膨胀等物理特性，都会对电气控制系统产生影响，电气控制系统的运行状态和信号传输也会影响机械系统的响应性能。为了准确模拟二者之间的相互作用，耦合分析将机械系统和电气系统的动态行为进行统一建模<sup>[2]</sup>。这一过程通常需要运用有限元分析（FEA）、多体动力学（MBD）、电磁场分析等多种仿真手段，对不同物理场之间的交互作用进行模拟和优化。通过耦合分析，设计人员能够精确识别机械系统和电气控制系统的潜在问题，调整设计参数，优化二者之间的协同工作，进而提升航空发动机的整体性能和可靠性。

## 2.3 控制系统在协同设计中的作用

在航空发动机的协同设计过程中，控制系统发挥着至关重要的作用。控制系统不仅用于实时监测和调节发动机各部件的运行状态，还直接影响着机械系统的动态性能和稳定性。控制系统的设计必须考虑到机械系统的特性，例如在发动机运行过程中可能发生的振动、温度变化等因素，控制系统需根据这些变化实时调整控制参数，以确保发动机始终在最佳工作状态下运行。同时，控制算法的优化对于提升系统性能也至关重要。在协同设计中，控制系统的设计需要与机械系统的各项参数紧密配合，通过高级控制策略，如自适应控制、鲁棒控制等，克服由于外部干扰或内部不确定性引起的性能波动。通过有效的控制系统设计，不仅能够提高发动机的响应速度和稳定性，还能在保障安全的前提下优化能源利用效率和降低维护成本。

# 3 协同设计的实践与案例分析

## 3.1 成功案例分析

在航空发动机的协同设计中，许多成功的案例展示了机械与电气控制系统有效集成的潜力。某先进航空发动机设计项目中，采用了多学科优化设计（MDO）方法，将机械结构和电气控制系统进行了深度集成。在这一过程中，设计团队通过仿真工具对发动机的动态特性进行了全面分析，确保了机械部件的设计能够与控制系统的实时调节相匹配。通过优化系统的耦合性，发动机的燃油效率和推力输出得到了显著提升，同时可靠性也大大增强。该项目中的成功关键在于，在初期设计阶段便实现了机械和电气系统的密切协作，并通过实时反馈和动态优化调整，在不同工况下保持了良好的系统性能。这种协同设计不仅提升了发动机的综合效能，还缩短了开发周期，节省了大量的设计和生产成本。

## 3.2 实践中遇到的主要问题

在协同设计的实际应用中，虽然取得了不少成功，但也面临着诸多挑战。首先机械结构和电气控制系统之间存在较为复杂的相互影响，尤其是在高温、高压等极限工况下，电气系统容易受到外部环境的干扰，导致控制信号的不稳定<sup>[3]</sup>。其次传统的分开设计模式仍然在许多工程中占主导地位，机械和电气系统的设计往往缺乏同步和统一，导致各自的优化方案无法完全协调一致，进而影响整体系统的性能。在协同设计过程中，多个学科间的沟通和数据共享也常常成为瓶颈。不同领域的设计人员可能在工作语言、模型表达及计算方法等方面存在差异，增加了协同设计的复杂度。最后现有的仿真和优化工具虽然在多学科优化设计中取得了重要进展，但在复杂系统的模拟和分析上，仍然存在一定的局限性，难以全面反映机械与电气系统之间的互动关系。

## 3.3 解决方案与改进措施

为了应对协同设计中遇到的挑战，采取了一系列创新的解决方案。在多学科设计中，采用了统一的设计平台，实现了机械设计和电气控制系统的实时数据共享与交互，这有效避免了传统分开设计模式下的矛盾。在控制系统设计方面，优化了信号处理算法，增强了其对外界扰动的适应能力，确保在各种工况下控制系统的响应更加迅速和稳定。同时，设计团队加强了跨学科的合作，建立了一个跨领域的设计团队，通过统一的设计标准和工具，降低了设计人员之间的沟通障碍。仿真和优化工具的改进也是提升协同设计效果的关键，采用了更为精确的多物理场耦合仿真软件，能够在更细致的层面上模拟机械和电气系统的交互，确保设计方案的精度和可行性。通过这些措施，协同设计不仅提升了发动机的性能，还降低了整体设计与制造成本，推动了航空发动机技术的发展。

# 4 协同设计的性能提升与优化

## 4.1 设计优化与性能提升的关系

设计优化是提升航空发动机性能的关键手段。优化过程中，设计参数的调整往往会对系统性能产生直接影响。通过对机械结构和电气控制系统的各项指标进行联合优化，可以实现更高的综合效能。在传统设计中，机械结构和电气系统的优化往往分别进行，结果往往导致两者之间的协调性不足，影响整体系统的工作效率。协同设计通过将这些子系统的优化过程统一为一个整体，避免了单一学科优化所带来的局限性。系统性优化能够从多个角度提升性能，如减少能量消耗、提升推力输出、优化燃烧效率以及提高可靠性等。同时，协同设计还通过模拟和仿真技术，对设计方案进行不断调整和改进，确保在不同工况下都能保持最佳性能。设计优化不仅提高了发动机的操作性能，还增加了系统在极端环境下的适应能力和稳定性。

## 4.2 协同设计对发动机性能的影响

协同设计显著提升了发动机的整体性能,尤其是在系统可靠性和效率方面。在传统的设计过程中,机械结构的优化与电气控制系统的设计往往脱节,容易造成不必要的能量损失或系统不协调。而在协同设计下,机械部件与电气控制的设计同步进行,通过实时反馈和迭代优化,二者的配合能够实现最大效能。具体来说,协同设计能够通过精确的机械结构与控制系统之间的耦合,减少发动机在运行中的振动与摩擦,进而提高燃油效率和减少损耗<sup>[4]</sup>。与此同时,电气控制系统的优化可以更精确地调节发动机的工作状态,从而提高发动机的响应速度和动态性能。在多个参数优化的共同作用下,发动机的推力、燃油效率及维护周期等关键性能得到了有效提升,推动了航空发动机技术的进一步发展。

## 4.3 性能评价与优化策略

在协同设计中,性能评价是确保设计成果达到预期目标的重要环节。性能评价不仅需要传统的性能指标,如推力、燃油消耗、发动机寿命等,还需要综合考虑机械系统与电气控制系统之间的协调性和互操作性。通过建立精确的性能评估模型,能够对发动机在不同工况下的表现进行系统性分析。针对评估过程中发现的问题,可以采用一系列优化策略来进一步提升系统性能。对于燃油效率不高的情况,可以通过优化控制算法,调整燃烧过程中的气流与燃料供给,从而减少不必要的能量浪费。对于机械系统的振动问题,则可通过优化结构设计,改进部件的强度和耐久性,减少机械损耗。优化策略还包括对发动机寿命的延长,通过精细化的材料选择和热管理系统设计,提高发动机在极端条件下的稳定性。通过不断的评估和优化,不仅提升了发动机的工作效率,也为长期运营提供了保障。

## 5 综合评估与未来发展方向

### 5.1 协同设计的综合效果评估

协同设计的综合效果评估是检验其应用价值和实际效果的关键环节。在多学科优化设计过程中,机械结构与电气控制系统的协同工作需要通过一系列的性能指标进行评估。综合效果评估不仅考虑单一学科的优化效果,还要衡量两者之间的协同效应,如系统的稳定性、响应速度、燃油效率及推力输出等

### 参考文献:

- [1] 梁彦兵,丁思云,杨博峰,刘杰,彭骞,谢星,王永乐.航空发动机燃油泵用机械密封多物理场耦合分析[J].流体机械,2025,53(6):31-38.
- [2] 聂卫健,杨晓光,李坚,刘飞春,陈亚农.中国航空发动机新型结构挤压油膜阻尼器研究进展[J].科学技术与工程,2025,25(19):7909-7919.
- [3] 彭苗娇,黄锦文,胡殿印,王荣桥,杨俊杰,贾志刚,陈清林,孙义洋,蔡应强,范宽,朱兆一,李晓文.航空发动机 CFRP 复合材料界面力学性能、损伤机理与强化策略研究进展[J].航空学报,2025,46(16):88-117.
- [4] 田伟,郭会明,刘砚飞,吴晨.涂层技术在航空发动机中的应用及典型失效案例[J].燃气涡轮试验与研究,2025,38(5):1-10.
- [5] 李双喜,黄柏淇,廖浩然,毕恩哲,张江腾.航空发动机轴承腔气液两相润滑机械密封性能分析[J].润滑与密封,2023,48(3):30-39.

多维度指标。可靠性分析也在评估中占据重要位置,评估模型需能够预测发动机在长时间运行中的表现,包括故障概率、维修周期等因素。通过全面评估,不仅能够了解协同设计方案的整体性能,还能为后续的优化调整提供科学依据。

## 5.2 技术进展与协同设计的发展趋势

航空发动机技术的不断进步,协同设计的应用范围与深度也在逐步扩展。先进的计算能力与高效的仿真工具正在推动协同设计方法的深化,使得机械结构与电气控制系统的集成更加精细化。新一代的多学科设计优化(MDO)方法与自适应控制算法的出现,使得设计过程中的实时调整更加精准,能够应对更为复杂的工况。与此同时,人工智能(AI)与机器学习技术的引入,正在为协同设计提供全新的解决方案<sup>[5]</sup>。通过利用AI优化控制策略和设计参数,可以实现更加智能化和自动化的设计过程,提升设计效率与性能。随着传感器技术的进步,更多实时数据的采集与反馈将促进设计的持续优化,进一步提高航空发动机的智能化水平。

## 5.3 总结与未来展望

协同设计作为航空发动机设计中的重要方法,已经证明了其在提升系统性能、优化设计流程和提高可靠性方面的巨大潜力。通过有效的机械与电气系统集成,协同设计能够最大化地利用两者的优势,提高发动机的推力、效率以及长时间稳定运行的能力。在未来,随着多学科优化设计技术、智能控制系统和大数据技术的发展,协同设计的应用将更加广泛,能够处理更加复杂的设计问题,并为航空领域带来更加高效和低成本解决方案。为了进一步推进协同设计的发展,未来的研究将聚焦于如何提高设计过程中的实时反馈机制、智能化优化工具以及跨学科团队的协作效率。

## 6 结语

协同设计作为航空发动机设计中的一种创新方法,极大地提高了机械结构与电气控制系统之间的集成度与优化效率。通过合理的多学科设计与系统优化,能够有效提升发动机性能,减少能源消耗,增加系统稳定性与可靠性。未来,随着技术的不断进步,协同设计将更加智能化、精确化,推动航空发动机及相关领域的持续创新与发展。