

高功率密度航空推进超导电机关键技术分析

Technical Analysis of High Power Density Aero-Propulsion Superconducting Machines

■ 闫炬壮 杨文将 白明亮 张学峰 / 北京航空航天大学 姚轩宇 蒋承志 / 中国航空发动机研究院

超导电机因体积小、功率密度高、效率高等优势，在航空电推进领域有较大的应用潜力。基于固氮蓄冷的超导单极电机攻克了传统超导电机的低转速、高故障率、制冷系统庞大复杂等难题，可以在航空环境中稳定运行，有助于实现基于超导电驱动的航空飞行器工程化研制。

航空电推进具有分布式推进、灵活机动、高效低污染等显著特点，同时多电/全电推进飞机对电推进系统空间及质量的限制有严格的要求，其发展需要依靠功率大、结构紧凑、体积小、质量轻、可靠性高的特种电推进系统。超导材料以大电流、无电阻的特性，通过绕制成电磁线圈，分别应用于电机系统的励磁磁体和定子电枢，有望大幅度提高电机系统的气隙磁密、定子绕组电负荷，从而实现更高的功率等级、功率密度、电机效率（97%以上）和更小的电机功率损耗，对于大功率航空电推进技术取得实质性进展具有重要意义。目前，高温超导电机在连接到高转速工作的航空燃气轮机时，具备实现大于10kW/kg功率密度的能力，已经优于传统飞机涡轮发动机的功率密度。

随着电推进飞机总推进功率的增加，动力系统对于推进电机的需求功率越来越大。相比于常规电机，超导电机拥有的高功率密度优势，在大功率条件下更加显著，从而为实现大型航空器的紧凑型设计和经济性运营提供了关键的技术支持。

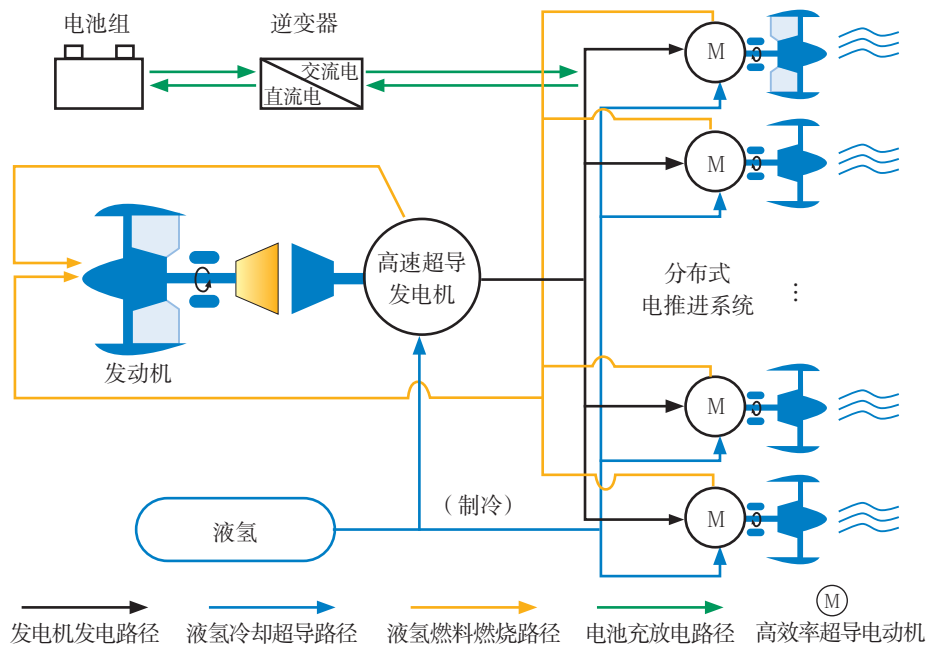


图1 一种串联式涡轮直驱发电超导电推进系统

航空超导电推进系统方案分析

目前，航空超导电推进系统根据动力来源的不同，分为超导全电推进系统与超导混合电推进系统。又根据系统架构的不同，将超导混合电推进系统分为并联式与串联式两类。

超导全电推进系统受限于电池技术的发展，无法有效保证长时间续航、大起飞质量及高飞行速度等需求，目前只适用于小功率等级电

推进飞行器，而大功率飞行器则需要由航空发动机驱动的超导混合电推进系统。其中，并联式混合电推进系统由于机械齿轮箱的存在，架构较为复杂且质量较大；串联式混合电推进系统通过航空发动机轴与超导电机直连，结构紧凑，能量利用效率更高。

涡轮发电超导电推进系统是日前实现大功率航空电推进飞机动力需求最有前景的一种方案。图1是一

种串联式涡轮直驱发电超导电推进系统，该方案采用航空涡轮发动机直接驱动超导发电机高效发电，经过超导电缆供给超导电动机驱动风扇工作产生飞行推力。将涡轮与风扇解耦，高速涡轮发动机连接高速超导单极发电机提升核心机功率密度，高效率超导电动机驱动风扇实现大涵道比推动，大幅降低燃油消耗，推动绿色低碳航空发展。同时，涡轮电力分布式推进系统可将机载传统气动或液压驱动系统以电驱动系统取代，实现飞机全电气化，而高功率密度和高效率的超导电机技术是此种推进系统重要的挑战之一。

高功率密度超导电机总体设计与电磁分析技术

超导电机拓扑结构分析

面向电动航空涡轮发电单元对推进电机高转速、高可靠性的必要需求，聚焦于轴径向磁通同步电机类型，提出了超导单极电机的高速电机拓扑结构方案，如图2所示。高强度刚性转子结构整体锻造加工成形，可实现万转级高转速工作；静态直流、近零损耗超导励磁绕组静置于定子侧，超导材料不受转动离心力影响，极大简化了冷却和绝热

密封结构，不再需要滑环电刷等复杂输电换向装置。超导单极电机拓扑结构解决了传统超导电机因复杂超导转子结构导致的低转速以及高故障率的关键难题，同时静态超导励磁增强了超导电机的运行稳定性。

超导电机高效设计方法

针对超导单极电机复杂的轴径向三维磁路结构，建立了一套高效简化的超导单极电机解析设计方法。通过对超导单极电机的关键导磁结构进行量纲一参数建模，构建了超导单极电机关键位置磁密分布关联式，以及漏磁系数与电机结构的关系，得到等效气隙磁密分布的解析表达式，并通过有限元仿真和原理样机测试验证了建立的超导单极电机解析设计方法的有效性，解决了超导单极电机设计方法复杂的难题，大幅提高了设计效率。

超导电机电磁优化设计

为了追求超导单极电机性能最优化，磁通路径越短，同样功率电机励磁磁动势需求越小。励磁磁动势减小，励磁线圈用材减小，电机结构体积减小，功率密度提高。对于超导单极电机这样的复杂三维磁通电机，在同等功率的条件下，磁通路径的缩减可以通过缩短电机长

度来实现。但电机长度缩短会导致定子内径增加，进而增大定子外径，通过参数化建模寻找到结构质量最小极值来实现功率密度极大化。

定子由背铁和电枢绕组构成，背铁起到闭合磁路的作用，电枢绕组为电机的电磁转换中枢单元。按照电枢绕组的结构，电枢绕组可分为分布式绕组与集中式绕组。超导单极发电机的电枢绕组可以采用铜电枢绕组与超导电枢绕组。铜电枢绕组与低温超导 MgB_2 线材可以适用分布式绕组，而YBCO高温超导带材，由于其制作与绕制的工艺限制，仅适用于集中式绕组。

按照电枢绕组的数量，超导单极电机可分为单电枢绕组和双电枢绕组。单电枢绕组结构，电枢绕组位于励磁绕组内侧，横跨整个电机；而双电枢绕组结构，电枢绕组与励磁绕组具有相同内径，电枢绕组分为两部分。

为了分析不同定子结构对电机结构的影响，对不同定子结构的超导单极电机建模如图3所示，包括气芯半超导单电枢分布式绕组、气芯全超导单电枢集中绕组、气芯全超导双电枢集中绕组和铁芯全超导双电枢集中绕组和铁芯半超导双电枢分布式绕组。

超导电机总体结构设计

基于以上超导单极电机的设计方法及电磁优化分析，完成了1MW、20000r/min的大功率超导单极电机方案设计，如图4所示，气隙磁密高达1.7T，设计功率密度达到8.23kW/kg，发电效率达到97%，体现并保证了超导单极电机在功率等级、功率密度、发电效率等方面的优越特性，使涡轮发电单元体积小、质量轻、结构

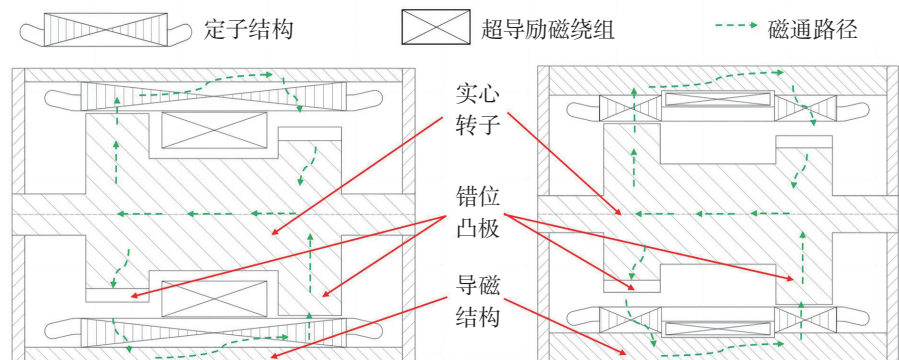


图2 超导单极电机原理

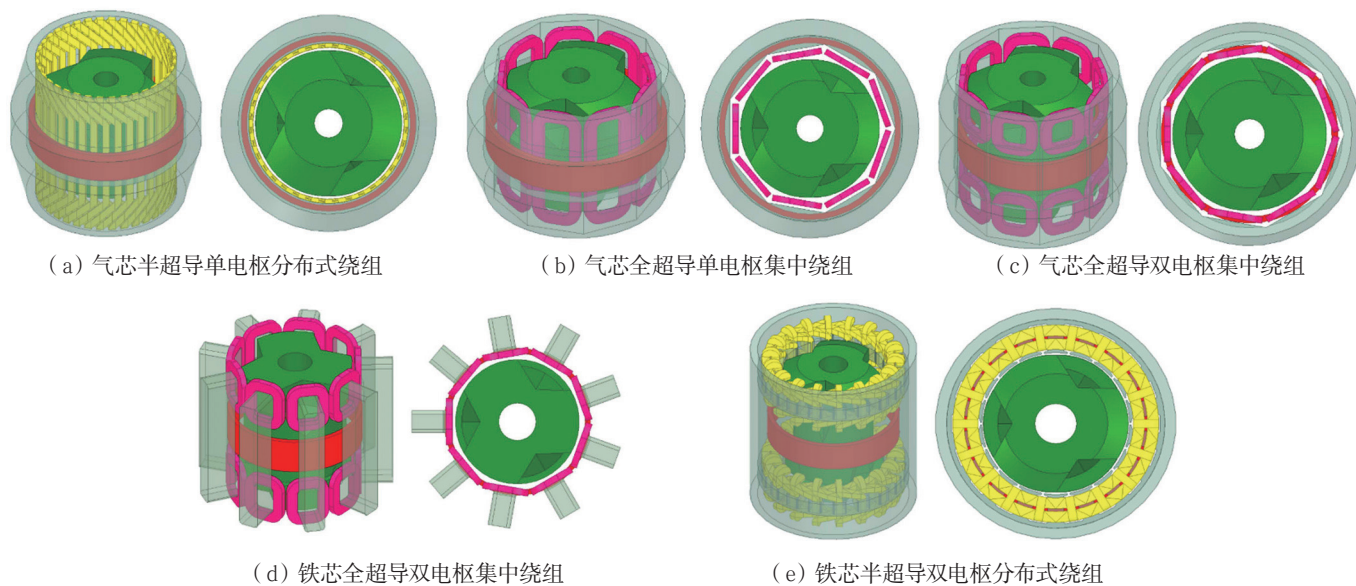


图3 不同定子结构超导单极电机对比

更紧凑。

超导电机变负载工况调节能力分析

针对电推进飞机变工况飞行对涡轮发电单元变负载能力的需求，提出了一种高效、便捷、安全可靠的超导单极电机输出负载调节方法。基于超导单极电机的超导电励磁特点，作为发电机时，能够在不改变飞机涡轮发动机转速的情况下，通过改变超导磁体的励磁电流来调节

输出电压与输出供电功率水平；作为电动机时，能够在不改变控制电压与电流的情况下，通过改变超导磁体的励磁电流来调节输出转速与扭矩水平。有效解决了传统飞机推进电机输出负载调节能力差、调节过程复杂、可靠性低的难题。

基于混合励磁的高转速低损耗磁性转子技术

永磁辅助励磁的混合励磁方法

针对传统单极电机转子漏磁现象严重的问题，提出了一种在单极转子凹极间增加永磁辅助励磁的高效混合励磁方法，如图5所示。超导单极电机的等效气隙磁密与转子轴向流通的最大磁通量密切相关，电励磁型和永磁励磁型的等效气隙磁密与转子轴向磁通量的模成正比，但轴向磁通方向相反。因此，混合励磁单极电机的磁通线性叠加后，转子轴向磁通未达到饱和，继续增大励磁电流，等效气隙磁密能够继续增大。混合励磁方法大幅增强了电机气隙磁

密，有效解决了超导单极电机严重的漏磁问题，进一步提高了超导单极的输出功率与功率密度。

高转速低损耗磁性转子

基于高效混合励磁方法，发展了一种基于混合励磁的高转速低损耗磁性转子技术。该转子采用混合励磁结构降低转子漏磁，提高有效气隙磁密，进而提升电机功率密度。转子通过端面焊接、圆周碳纤维缠绕和不锈钢加固等多重工艺成形，结构可靠，适合高速工作。中空自引风风冷结构保障了转子工作环境稳定，叠片加压焊接成形定向导磁结构降低转子损耗，提升了超导单极电机发电效率。

高速转子动力学特性分析

针对超导单极电机的磁性转子在高转速下的结构安全问题，建立了一套超导电机高速转子设计与动力学分析方法。结合超导强励磁环境、机电耦合转子动力学、结构强度和电磁损耗等多物理场模型，基于多目标优化算法完成了磁性转子

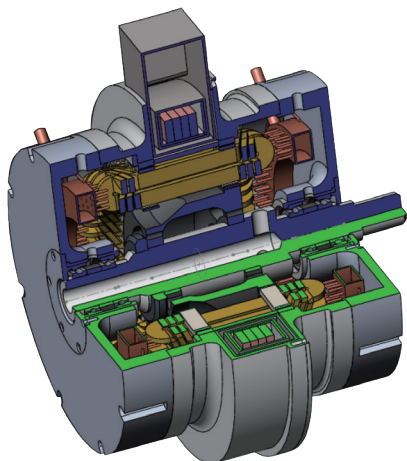


图4 高功率密度超导单极电机

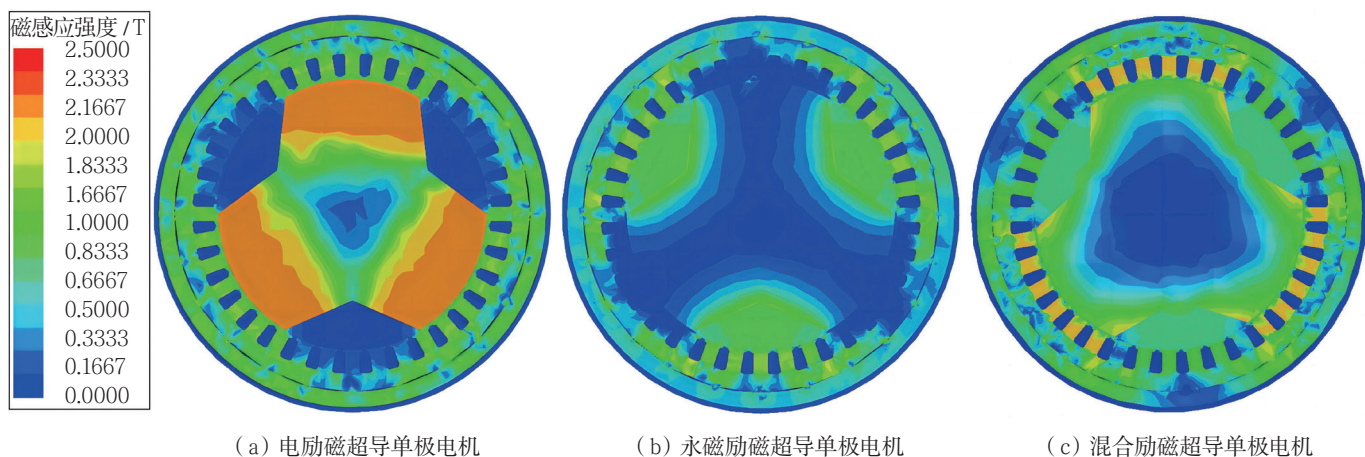


图5 不同励磁方式的超导单极发电机磁密云图

结构的设计与整体优化。综合考虑磁性转子系统机械振动和定转子间电磁拉力引起的机电耦合特性，研究机电耦合系统中转子模态和平衡响应分析，能够有效避免高速超导电机中磁性转子的弯曲振动问题，保障了超导单极电机的高速磁性转子动力学设计与校核需求。

基于固氮蓄冷的分离式热管传导冷却技术

超导电机需要低温冷却，其运行严重依赖于超导材料性能及其绕制磁体的低温工作稳定性。外部环境漏热和电机内部高频工作生热对超导磁体稳定性及低温保障条件提出了巨大挑战，无论是低温液体浸泡冷却还是制冷机传导冷却，为满足有效冷却功率，低温制冷结构和低温保障系统的尺寸和质量都较大，往往成为超导电动系统设计时的负累，若解决不好，其相对传统电动系统的优势难以体现。

超导电机的低温制冷问题短时间内难以克服，必须独辟蹊径。考虑到航空电推进的应用环境，对降低电机系统体积与减轻质量有很高

需求，而对超导电机的连续工作时间没有苛刻的要求，这显著区别于超导电机的传统应用场合。如果按完成单次飞行任务的时间来设计考虑（如10h），若能采用合理的低温蓄冷技术及超导电机低漏热技术，有望将超导磁体或电机低温保障制冷系统的大部分有效质量纳入到地面保障系统中，而机载设备仅保留很小一部分。这样可最大程度地降低超导电机所需的机载低温保障条件，从而机载超导电机的高功率密度优势将凸显。

基于固氮蓄冷的分离式热管传导冷却技术通过在固氮腔内保存液氮并制冷形成固氮，通过固氮较强的热容能力来提供充足的低温蓄冷量，用于保障脱离制冷设备后超导磁体本身的热稳定需求；采用可伸缩冷头实现冷头位置漏热的最小化，并平稳过渡到超导磁体的固氮蓄冷低温维持阶段；最后依赖封闭式液氮热管冷热端的热量交换，对超导磁体进行传导冷却，大幅提高磁体区与冷源区的导热可靠性，实现更好的磁体制冷灵敏性和稳定性，从而保障超导磁体小时级的有效工作

时间，如图6所示。

与同等条件下的其他超导磁体及冷却能力相比，可有效降低磁体漏热，保障超导低温需求，增强磁体运行稳定性，提升磁体临界电流及中心磁场，实现对超导电机的强磁场励磁，同时可插拔原理与灵活的柔性结构满足机载设备空间小、质量轻、便携性好、机动性强的需求。

研制难点与未来研究重点

与其他类型超导电机相比，超导单极电机在功率密度、转速、强度、可靠性等方面的性能出色，可以作为适用于航空推进电机未来研究和发展的研究对象。面向未来工程应用，超导单极电机及其关键技术的研究还存在以下问题，需要进一步攻关。

超导单极电机拓扑结构设计的局限性

超导单极电机的轴向磁通需要集中通过磁性转子与定子形成回路，较小的电机长径比有利于避免转子发生磁通饱和与磁泄漏的问题，从而能够有效提升等效气隙磁密，而电机长径比越小，转子惯量越大，

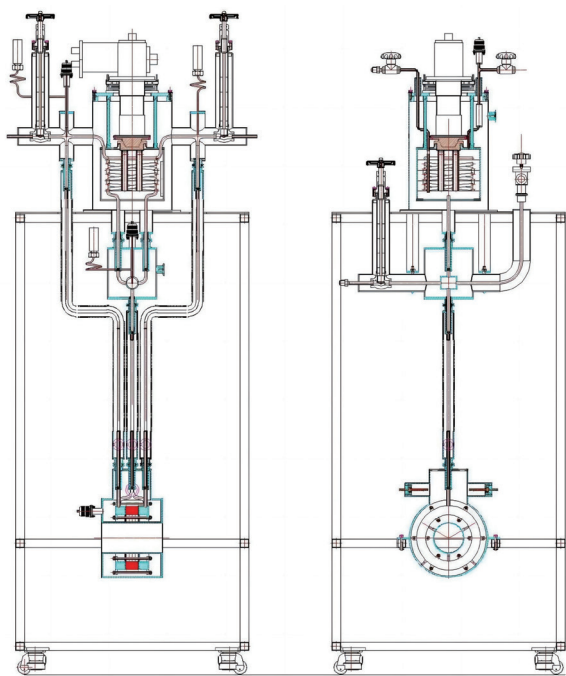


图6 基于固氮蓄冷的分离式热管传导冷却超导磁体系统

电机难以在高转速下稳定运行。需要对超导单极电机的长径比与转速的关系进行优化分析，在保障应用转速需求的前提下，尽可能提高等效气隙磁密，从而提高电机输出功率。

超导单极电机对铁磁材料的依赖性

超导励磁磁体位于电机中间段的定子侧，中间段定转子结构为无效质量，不对电机输出能力产生增益；超导单极电机的轴向磁通路径需要通过具有良好导磁能力的背铁结构与磁性转子形成闭合回路，背铁结构与实心磁性转子集中增加了电机整体的质量，不利于超导单极电机功率密度的进一步提升。需要通过对超导单极电机进行全方位结构优化，在保障输出功率的前提下，尽可能削减电机无效区域的质量，同时采用高饱和磁密的软磁材料，进一步提高电机关键结构的磁密，从而提高电机整体的功率密度。

固氮蓄冷系统的稳定性与高效换热能力

可插拔冷头技术实现传导制冷系统分离时，应尽可能降低对超导磁体冷却温区的不可控扰动影响，保证从传导制冷到固氮蓄冷的平稳过渡。该问题需对可插拔冷头结构设计及试验测试进行充分的研究，了解过渡过程中薄弱环节，在传热材料、结构、过渡流程上想办法，尽量减少影响。

超导电机的高功率密度特点对进一步优化超导磁体的固氮蓄冷系统空间提出了挑战，面临固氮冷却过程中微小体积衰减以及“干涸”效应带来的不确定性。该问题需结合固氮本身的物理特性，合理地引入其他高导热率的填充材料或结构，如蜂窝铜结构，来加强固氮的导热与制冷效果。

分离式热管传导冷却结构能够有效避免浸泡冷却带来的结构不稳

定与泄漏问题，但是受限于盘管技术发展，整体结构尺寸较大，不利于超导磁体的轻量化设计，同时传导冷却的冷却速度较慢，换热效率没有浸泡冷却高。但是浸泡冷却的腔体需要焊接密封，会形成大量漏气点，密封性差，导致超导磁体运行中的漏热量较大。所以需要研发一种既有较高的冷却效率，又结构紧凑、质量轻、可靠的低温冷却结构。

超导电机复杂的工作情况会影响低温冷却系统的有效工作时间，这要求固氮蓄冷系统具有较强的稳定性以及抗干扰性，如减少漏热、优化固氮冷却流程等，以维持超导磁体工作所需的冷量，保证电机驱动系统的持续工作时间能够维持在小时级。

结束语

飞机电气化正逐步成为航空业实现绿色、健康、可持续性发展的重要途径，以高功率密度超导电机技术为核心的大功率航空电推进为飞机电气化带来了希望与曙光。超导单极电机凭借其独特的拓扑构型，一体成形刚性转子，定子侧静置超导励磁，高效负载调节能力等优势，成为高功率密度航空推进电机的重要选择对象。同时，随着以固氮蓄冷系统为代表的轻量化机载制冷设备的进一步发展，以超导电机为核心的涡轮发电超导电推进系统的机载工程化研制将更有希望，将会开启航空领域新一轮创新与变革热潮，引领航空技术创新、推动绿色低碳航空深度发展。

航空动力

(闫炬壮，北京航空航天大学，博士研究生，主要从事空天电推进中的超导电机技术及超导磁体稳定性技术研究)