

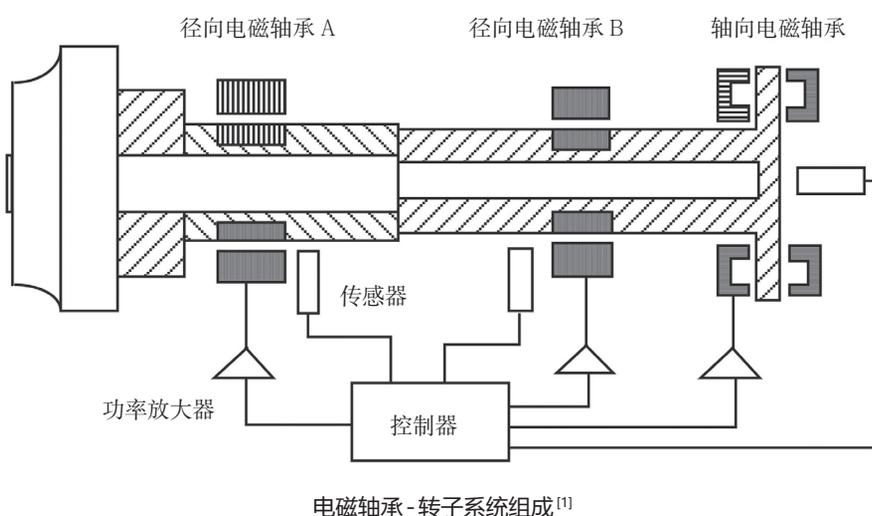
多电航空发动机电气化设备及应用*

More Electric Aero Engine Electrified Equipments and Applications

■ 张生光 张峻峰 张学宁 / 中国航发研究院

航空动力的电气化是未来发展的必然趋势，多电航空发动机是当前研究的重要方向，虽然存在热能、电能和机械能转换过程的损失，但可以大幅提高与飞行安全性相关的潜在收益。

多电航空发动机在20世纪末提出，其主要目的为降低发动机的耗油率、噪声和维护费用等。工作原理与传统发动机相似，同样包含压气机、燃烧室以及涡轮，不同之处在于附件系统、机械系统等尽可能采用电气化结构：采用电磁轴承替换滚动轴承，省却附件传动系统；通过高功率密度启动/发电一体化电机实现发动机启动以及后续发电，为发动机提供电能；采用电动燃油泵、作动器等实现电气化改造。



电磁轴承

电磁轴承是利用非接触电磁力使转子稳定悬浮并且可通过控制算法对电磁力进行调节的一种支承结构，具有无机械摩擦磨损、寿命长、可靠性高、无需润滑、转速高等优点。包括位移传感器、控制器、功率放大器、磁极和线圈等结构。工作原理是通过位移传感器实时观测转子位置，并将位置信号传送至控制器，由控制器根据设定的控制算法，输出控制信号至功率放大器，功率放大器输出控制电流传递给线圈，线圈与磁极产生磁场，从而实时改变

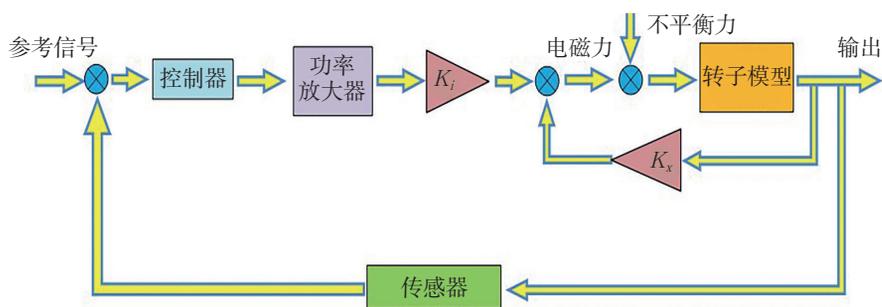
电磁力大小，使转子位于给定的平衡位置。电磁轴承技术是决定多电航空发动机能否取得实用的关键，由于其非接触特点，能够省去发动机的轴承润滑系统，并简化轴承密封系统，综合来看，能够有效减轻发动机质量，降低发动机油耗。

电磁轴承控制

由于航空发动机具有高转速、细长轴的特点，工作条件多处于1阶甚至2阶弯曲临界转速之上，因此，要求电磁轴承支承的转子系统具备过2阶弯曲临界转速的能力，而航空发动机对振动水平和过弯曲临界转

速行为有着严格的标准，需要通过电磁轴承控制器的设计调整其支承特性，从而满足有关振幅、工作转速与临界转速间的安全裕度、系统稳定性等方面的要求。而现有成熟的电磁轴承支承的转子系统多基于刚性转子系统和模型，建模方法与控制策略等与柔性转子存在较大差异。比例、积分和微分（PID）或基于PID方法的控制技术，由于结构简单，不依赖建模的精确性，具有一定的鲁棒性，是工业上应用最广泛的控制方法，由于实际电磁轴承系统的复杂性，存在噪声干扰、临

*基金项目：先进航空动力创新工作站项目（HKCX2019-01-008）



基于PID控制的电磁轴承系统原理图

界转速处阻尼不足等原因，简单的PID控制显然无法满足电磁轴承控制系统要求，因此，需要在控制器中添加滤波器以过滤传感器中的高频干扰信号，此外，由于电磁轴承-转子系统在高频位置等效阻尼不足，易激发转子2阶或3阶弯曲模态，通常需要添加固定中心频率的陷波器加以抑制，此外，由于过1阶弯曲临界转速时振动较大，也可考虑添加相位补偿器增加过临界阻尼以抑制振动。

目前，针对电磁轴承支承的柔性转子系统，由于在不同阶次柔性模态下，转子节点位置不同，由此产生的不确定性，导致基于PID方法的控制器鲁棒性较差，难以满足较高的控制要求，因此基于 H_∞ 控制、 μ 综合控制、LQG控制、滑模控制等多种形式的控制方法也在电磁轴承控制器中得到广泛研究，但是，各类新型控制方法多处于研究阶段，在工业中尚未普遍应用，有待进一步验证。

高温电磁轴承

传统滚动轴承工作极限温度为 $180 \sim 260^\circ\text{C}$ ，而高温电磁轴承的工作温度高达 600°C ，采用高温电磁轴承代替传统滚动轴承，能够显著提高轴承工作环境温度，节省大

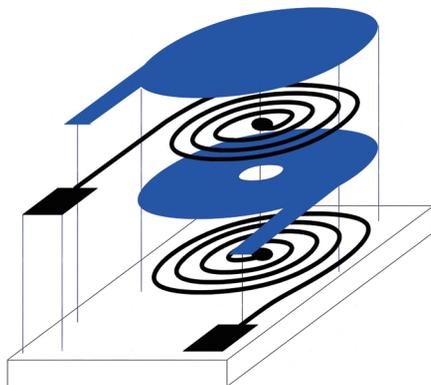
量冷气，有效降低空气系统设计复杂度。高温电磁轴承核心在于用高温材料替换常温材料，并考虑相应隔热措施，包含高温位移传感器、高温磁极与线圈、高温工作稳定性等关键技术。

首先，针对高温位移传感器技术，电磁轴承要求传感器具有非接触测量能力，通常以电涡流、电感传感器为主，并且需要具有优良的静态特性与动态特性，例如，具有高的灵敏度、信噪比、线性度、抗干扰能力，精确的重复性以及较宽的频带等。在常温条件下，以上要求能够得到有效保证，但是针对 600°C 高温环境，尚无成熟产品面市，需要开展定制化设计，传感器高温

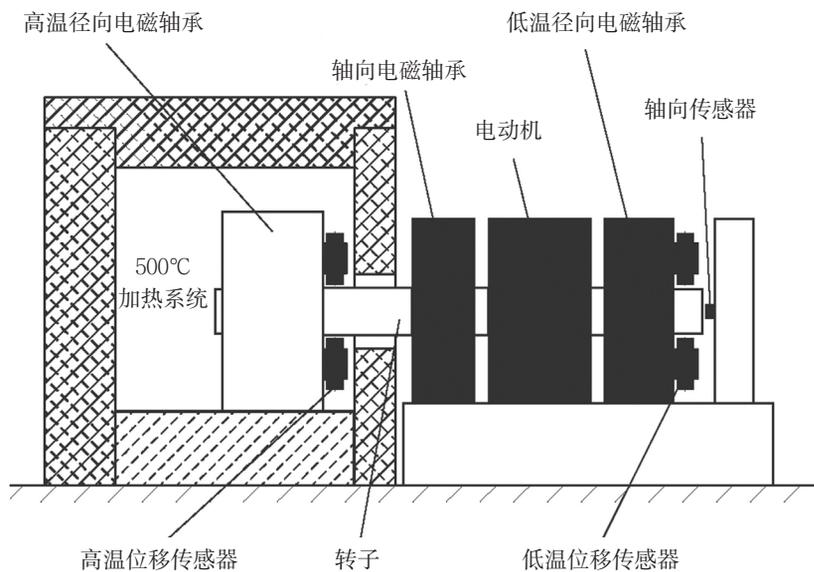
线圈材料、与检测电路之间的定量关系等均需要开展研究。

其次，针对高温磁极与线圈，在高温环境下，选择一种既有高导磁性能又具有良好力学和加工性能的软磁材料是高温磁极需要解决的首要问题，目前经过研究与验证，钴基合金（如Hiperco50或Hiperco50-HS）具有良好的高温导磁性能和力学性能，适合作为高温导磁极材料。针对高温励磁线圈，由于磁极内部空间限制，高温导线绝缘层普遍比较薄并且脆，考虑线圈在绕制过程中绝缘层容易脱落损伤导致短路，因此选择具有耐高温耐折绝缘层的导线并将其封装也是高温电磁轴承遇到的难题。

此外，针对轴承高温工作稳定性，在高温环境下，传感器、导线、作动器等可靠性也需要进行应用验证。并且，相对于传统轴承，同等空间下电磁轴承的承载能力和抗过载能力较小，而在飞机起飞、着陆、机动飞行等状态下，电磁轴承会受到较大的瞬时冲击，在高温环境下，该冲击能否得到有效抑制，需要从主动控制上予以解决。

高温位移传感器结构^[2]

高温电磁轴承

高温电磁轴承试验台结构^[3]

目前，高温电磁轴承已经达到在550℃高温环境下以转速30000r/min运行，用于定子和转子的磁极材料是钴基合金，励磁导线为银制导线，虽然实现了在高温高转速环境下运行，但由于长时间暴露于高温环境，尚有部分研究仍需要进一步探索，如材料在高温下结构变化、合金微观迁移与蠕变等可能会导致材料在高温下无法保持足够长的寿命^[1]。

电磁轴承轻量化

电磁轴承依靠电磁力使转子稳定悬浮，而受目前铁磁材料磁通量限制，电磁力不可能随着电流的增加无限增加，因此为保证电磁轴承最大承载力，需对其结构尺寸进行设计，通常其体积、质量以及所占空间要明显高于滚动轴承，但是由于无需润滑、耐高温等特性，可以省去润滑系统、简化密封系统，从而使得航空发动机整体质量得到减轻。由于整机结构尺寸限制以及对

高推重比的强烈需求，电磁轴承自身轻量化技术十分关键，而目前电磁轴承主要应用于地面环境，如鼓风机、管道压缩机、涡轮分子泵等设备之中，对体积、质量要求并不严苛，因此关于电磁轴承轻量化方面研究较少，电磁轴承轻量化技术可针对以下方面开展。

第一，电磁轴承的定子、转子磁极均需要具备较强的导磁性能，对磁通密度、磁通曲线等具有较高要求，不同铁磁材料对电磁轴承的性能影响较大，当前最常用的材料为硅钢片，可使用的最大磁通密度为1.6T左右，如果采用钴基合金，可使用的磁通密度能够增大至1.9T左右，但成本更高，磁通密度的提高可以有效减小电磁轴承体积，从而达到减轻质量的目的。

第二，除了磁极外，电磁轴承还包含功率放大器、传感器、控制器等部分。其中，控制器可考虑与发动机控制器集成，从而减少空间

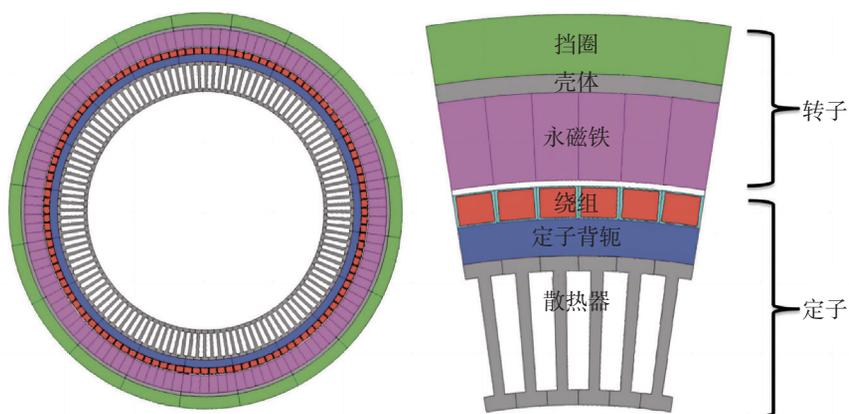
的占用；功率放大器及电源可通过紧凑型设计实现减轻质量、优化空间的目的。

起动/发电一体化电机

多电航空发动机另一显著特点是用起动/发电一体化电机代替传统附件传动系统，对转速、体积、质量等有严格要求，随着控制技术和电力电子技术的不断进步，制造工艺不断优化，电机的工作效率和可靠性有了很大的提高，根据实际需求可以实现4象限高效稳定的运行，电机在实际运行中可以很方便地切换工作状态，即电机的电动和发电是可以根据控制指令迅速改变的。

高速电机转速通常在10000r/min以上，现有电机中，开关磁阻电机、永磁电机、感应电机以及少数其他类型的电机能够实现高速功能。对于多电航空发动机而言，电机需具备起动/发电一体化功能，在航空领域，研究及应用较多的为永磁电机，以稀土永磁材料为代表的高性能永磁材料技术发展使得材料的永磁性能得到明显提升，永磁电机能够实现较高的功率密度与较高转速，已经得到一些初步应用，具备较大的使用潜能^[4]。

永磁电机可通过增加磁极对数、提高转速与频率、采用Halbach阵列等方式来提高功率密度。目前，针对高功率密度电机已经开展了大量研究并取得丰富成果，如西门子公司研制的260kW电机，质量为50kg，并应用于航空推进系统之中；美国“雷击”无人机采用了分布式混合电推进系统，机翼风扇电动机功率为100kW，鸭翼风扇电动机功率为70kW。



永磁电机结构^[5]

电动燃油泵

电动燃油泵是多电航空发动机的重要部件。目前，发动机主燃油泵以固定排量的齿轮泵为主，通过发动机附件机匣的固定传动比的齿轮传递功率与转速，由于附件机匣、燃油泵传动比固定，因此燃油排量与发动机转速相关，无法自行调节，由此产生在某些飞行条件下，燃油泵提供的燃油远大于燃油需求，因此需要大量燃油重新流回油箱。而针对多电航空发动机，首先，取消了附件机匣设计，无需从发动机转子提取功率到附件系统，因此使用电动燃

油泵恰好解决了这个问题，由此带来的好处还有各燃油泵流量可调，不再受制于传动齿轮的传动比限制，可根据发动机的需要主动调控燃油量。

结束语

与常规发动机相比，采用多电技术具有许多优点：采用电气化支承结构、附件系统、作动机构后，极大减少了发动机轴承、齿轮等的摩擦磨损，有效地提升了使用寿命与可靠性；相关电气化设备的使用简化了发动机润滑与密封系统，减轻了发动机质量。此外，电磁轴承的应

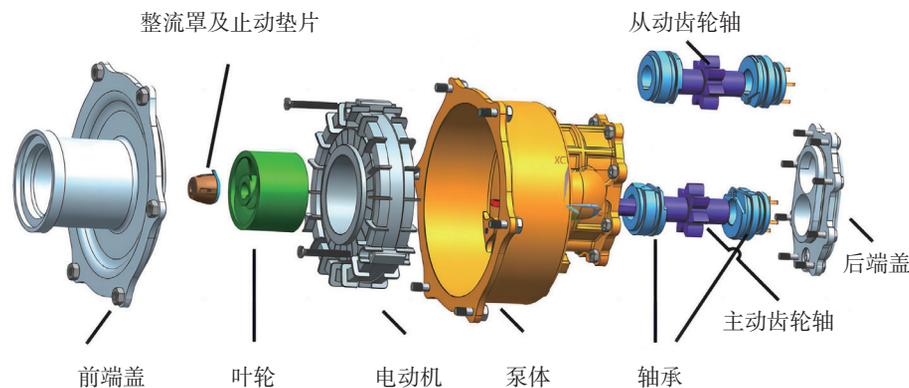
用也大幅降低航空发动机内流系统的设计难度。目前，针对多电航空发动机，在电磁轴承、起动/发电一体化电机、电动燃油泵等方面已经取得了阶段性成果，但是仍有较多关键技术需要突破，尤其是工程验证方面缺少相关研究，相信在不久的将来，有望看到多电航空发动机得到应用。

航空动力

(张生光，中国航发研究院，工程师，主要从事电磁轴承技术研究)

参考文献

- [1] SCHWEITZER G, MASLEN E H. 磁悬浮轴承理论、设计及旋转机械应用[M]. 北京:机械工业出版社,2012.
- [2] BURDET L. Active magnetic bearing design and characterization for high temperature applications[D].Swiss federal Institute of Technology in Lausanne, 2006.
- [3] XU L, WANG L, SCHWEITZER G. Development for magnetic bearings for high temperature suspension[C]. In Proceeding of 7th International Symposium on Magnetic Bearings, 2000: 115-123.
- [4] 孔祥浩,张卓然,陆嘉伟,等.分布式电推进飞机电力系统研究综述[J].航空学报,2018,39(1):51-67.
- [5] YOON A, YI X, MARTIN J, et al. A high-speed, high-frequency, air-core PM machine for aircraft application[C]. 2016 IEEE Power and Energy Conference at Illinois (PECI). IEEE, 2016: 1-4.
- [6] 吴博.基于数值仿真的一体化电动燃油泵优化设计[D].南京:南京航空航天大学,2021.



电动燃油泵结构^[6]