

---

# 电气赋能：大功率航空起发发电机 系统永磁化的工程探究

专业学位类别： 工程硕/博士研究生

适用课程： 电气工程、航空电气化

作者姓名： 曲荣海

工作单位： 华中科技大学

中国专业学位案例中心

2024 年 8 月 26 日

---

案例正文：

## 电气赋能：大功率航空起发电机系统永磁化的工程探究

曲荣海

**摘要：**航空电气化趋势下，多电飞机大功率供电需求迫切，本案例以国家重大需求——航空起发电机系统为指引，以解决大功率航空起发电机系统永磁化工程探究中的实际问题为导向，引导学生有意识、按需地主动学习知识模块。案例围绕强容错型高功率密度永磁电机，结合变阻抗永磁电机容错原理与独特的容错调磁单元结构，探究功率密度和容错性能与底层设计参数之间的多维映射关系问题，实现兼顾高功率密度和强容错性能的航空起发系统永磁电机设计瓶颈突破。

**Abstract:** Under the trend of aviation electrification, there is an urgent need for high-power power supply for multi electric aircraft. This case study is guided by the national major demand for aviation generator systems, and aims to solve practical problems in the exploration of permanent magnetization engineering for high-power aviation generator systems. It guides students to consciously and actively learn knowledge modules according to their needs. The case revolves around a strong fault-tolerant high-power density permanent magnet motor, combining the fault-tolerant principle of variable impedance permanent magnet motors with a unique fault-tolerant demagnetization unit structure, to explore the multidimensional mapping relationship between power density and fault-tolerant performance and underlying design parameters, and to achieve a breakthrough in the design bottleneck of permanent magnet motors for aviation starting systems that balance high power density and strong fault-tolerant performance.

**关键词：**大功率航空起发电机系统、永磁电机、强容错、高功率密度

**Keywords:** High Power Aviation Generator System; Permanent Magnet Motor; Strong Fault Tolerance; High Power Density

**作者信息：**曲荣海，华中科技大学电气与电子工程学院教授

## 1. 工程项目背景及现状

航空电气化正重塑机载能源与动力体系，显著提升能量转化效率与飞机技术战术性能，成为航空领域的重大变革和重要发展方向<sup>[1]</sup>。航空发电机系统是支撑航空电气化的重要基础，高品质大功率供电赋能飞机机载能源利用的高效清洁化，同时有利于多电化战机机动性和任务航时的提升。

最初飞机通常采用复杂的二次能源结构传统，效率低，增加了发动机燃油消耗，存在气体油液泄漏等问题。最早出现的机载用电设备是无线电装置，一开始是采用蓄电池进行供电，但是后来采用风力驱动发电机进行供电，仅有200W的功率<sup>[2]</sup>。在二战期间电能逐渐用于一些雷达供电，此时飞机机载电功率在十几至几十千瓦的级别<sup>[3]</sup>。20世纪80年代欧洲空中客车公司首次将电传飞控用于商业航班，这个年代的客机机载电功率达到200~300kW的级别<sup>[4]</sup>。进入21世纪，飞机上电能逐渐替代了其他的二次能源，于是诞生了多电/全电飞机，电能的使用简化了飞机的内部结构以及发电机结构，减少了排放优化了性能。

传统上飞机使用活塞发动机或燃气涡轮发动机作为动力系统，但是活塞发动机和燃气涡轮发动机均存在能量转换效率极限，目前最先进的燃气涡轮发动机对燃料能量的利用率仅约40%<sup>[5]</sup>。而对于电推进飞机，从电能到推进功率的转化率能够超过70%<sup>[6]</sup>。航空电气化正重塑机载能源与动力体系，显著提升能量转化效率与飞机技术战术性能，成为航空领域的重大变革和重要发展方向<sup>[7]</sup>。航空发电机系统是支撑航空电气化的重要基础，高品质大功率供电赋能飞机机载能源利用的高效清洁化，同时有利于多电化战机机动性和任务航时的提升。因此，航空发电机的技术水平成为衡量多电飞机先进性的重要指标之一。然而，传统三级式起发电机体积大、重量沉，功率密度较低，进一步提升功率等级困难，难以满足未来航空电能用量激增的需求，已成为制约飞机发电能力增长的瓶颈。以美军F-35战机为例，发电机功率仅占总功率的1.1%，而发电系统重量即占发动机总重量的10%。因此，如何研发高功率密度航空发电机，已经成为国内外航空电机领域科研人员需要长期面临的核心问题。

此外，传统感应电机虽然结构简单，制造成本相对较低，维护容易。但是功率密度相对较低，效率和扭矩密度不如永磁电机，仅适用于对体积和重量要求不是特别严格的应用，或者成本敏感型的项目；开关磁阻电机结构简单，坚固耐用，调速范围宽，成本较低。但是噪音和振动较大，功率密度和效率相对较低，控制策略相对复杂，适合于对成本敏感且对噪音和振动要求不高的应用，如某些工业和地面交通工具；无刷直流电机高效率，低维护，良好的控制性能。但成本较高，对电子控制器的依赖性较强，适用于需要高效率和低维护的应用，如无人机和小型飞行器。

---

永磁电机由于具有功率密度高、运行效率高、控制灵活的特点，故成为了最有望满足航空起发系统供电需求的电机类型。随着对永磁电机的深入探索，其安全可靠性能越来越受到人们关注，尤其是航空等可靠性要求较高的场合，一旦发生了故障，会危害人类的生命安全。在永磁电机发生的故障中，匝间短路故障最为常见且最为严重，导致该故障的主要原因是电压应力、热应力和机械振动等引起的绕组绝缘的失效<sup>[8]</sup>。故障通常会发生在几匝线圈之内，由于单匝线圈阻抗很小，会产生很大的短路电流，导致电机迅速发热，同时故障会扩大，造成更为严重的故障，例如相间短路故障、相对地短路故障甚至是永磁体的退磁故障<sup>[9]</sup>。

不同于开路故障，匝间短路故障无法进行切除，永磁磁场也无法进行关断，一旦发生了匝间短路故障，电机就不可能继续正常工作，必须进行维修。因此永磁电机的容错技术就显得至关重要，决定匝间短路故障能否被有效抑制关键在于电机本身的结构和容错控制方面。在结构方面，容错电机必须具有良好的电、磁、热以及物理隔离能力来限制短路故障的迅速传播，同时要具有较高的电感值能够在短路故障发生时对短路电流进行一定的限制，然而传统永磁容错电机受磁路饱和的影响，相间的磁隔离无法完全实现，普遍存在相间热隔离能力差、匝间短路电流抑制能力不足的问题。20世纪90年代初，Jack等人<sup>[10]</sup>通过选取适当的定子槽数和转子极数、隔齿绕组、增加电机的相数等方式，提高了永磁电机容错能力，但相数增加的同时会增加控制器的复杂程度和成本；Bianchi等人<sup>[11]</sup>优化槽开口和齿靴厚度，通过增加电机槽部漏感，来抑制短路电流，由于这种方式对槽漏感的提升有限，短路电流仍处于较为危险的幅度，同时槽漏感的提升会导致效率和功率因数的降低；Zhao等人<sup>[12]</sup>在槽口处填充铁和环氧树脂制成的磁楔，改变磁楔的相对磁导率，增加电机的槽部漏感，以此来抑制短路电流，但其电枢合成磁动势空间谐波分量较大，增加了电机涡流损耗和转矩脉动。在控制方面，必须具备与容错电机相匹配的控制器和容错控制方案，以实现电机在故障下的持续运行<sup>[13]</sup>。传统永磁电机无法对高功率密度和容错性能进行兼顾，因此，如何设计满足航空强容错要求、高功率密度的永磁起发电机成为航空电气，乃至整个航空技术领域的热点、难点问题。

我国在研制满足航空强容错要求、高功率密度的永磁起发电机方面也投入了大量科研经费进行该方面的科研工作。因此，本工程案例“大功率航空起发电机系统永磁化的工程探究”具有重大需求明确、技术前沿、工程性强等特点，适合面向国之重器研发需求，持续培养高层次卓越工程师。

## 2. 工程的实施过程

航空起发电机系统在飞机运行过程中扮演着至关重要的角色，它们不仅需要提供稳定和可靠的电力供应，而且必须在极端的环境条件下保持性能和安全性。

---

以下是对这些极端工作条件的详细描述，以及它们对电机材料性能的具体要求：

- (1) 在高空，空气密度较低，这可能导致散热效率下降，使得电机温度升高。因此，电机材料需要具备良好的热稳定性和耐热性能，以保证在高温环境下不会发生性能退化或损坏。
- (2) 在高空等低温环境中，电机材料可能会经历热胀冷缩，影响其机械性能。电机材料需要具备优异的低温韧性，以防止在低温启动或运行时发生断裂或裂纹。
- (3) 飞机在高速飞行时，电机可能会受到强烈的气流冲击，这要求电机材料和结构设计必须能够承受高速气流带来的压力和磨损。
- (4) 飞行过程中，电机将持续受到来自发动机和飞机结构的振动影响。这些振动可能导致部件疲劳和早期失效。因此，电机材料需要有高的抗疲劳强度和耐冲击性能，同时结构设计要能够吸收和减少振动。
- (5) 飞机在潮湿环境中运行时，电机材料可能会受到水分和湿度的影响，导致绝缘性能下降或腐蚀。电机材料需要具有良好的防潮和耐腐蚀性能，以保持长期可靠的运行。
- (6) 考虑到飞机维护的复杂性和成本，电机系统需要设计成易于维护，并且具有高可靠性和长寿命。这通常意味着使用高质量的材料和先进的制造工艺，以减少维护需求和延长使用寿命。

下面针对大容量永磁航空起发电机工程研发项目案例，详细叙述其整体研制与实施过程。

## 2.1 需求分析

电机作为多电/全电飞机的核心动力来源和关键部件，需要具备功率密度高、效率高、可靠性高、转动惯量小、动态响应快等性能。相比于电励磁和磁阻电机，永磁电机在功率密度、转矩密度、效率和功率因数等关键电磁性能上具有显著的优势，成为优选的驱动电机类型。然而，永磁电机难以调节的励磁磁场也引起了对其可靠性的担忧和关注。对于飞机这一与人类生产生活密切相关的交通运载工具而言，其安全性至关重要。一旦电机发生故障停止运行，飞机动力系统或将面临瘫痪，人民的生命财产安全受到严重威胁。因此，研发强容错型永磁电机，对保障飞机驱动系统的安全可靠运行有重要意义。

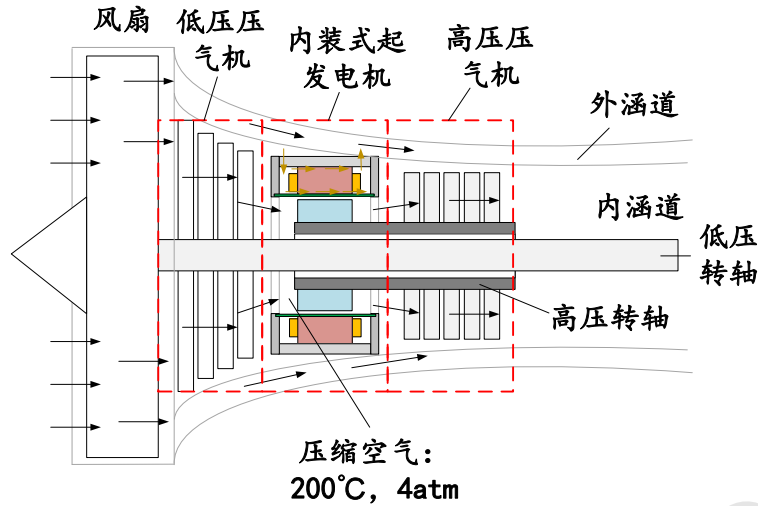


图 1 内装式起发电机电机结构示意图

在永磁电机可能发生的各种故障类型中，匝间短路的发生概率最高，可达30%~40%。槽内的绕组因为局部过热、机械应力、功率过载等原因会导致绝缘失效，进而导致匝间短路故障的发生。突然的短路会让短路匝之间会形成一个阻抗较小的回路，然而，故障后的转子因为惯性会继续旋转，短路回路中反电势和阻抗的不匹配会形成过大的短路电流，所产生的热量在短路点处累积并引起局部过热和绝缘的进一步损坏。短路后的正反馈效应使得故障不断扩大，导致匝间短路成为单相短路、多相短路等绕组故障的源头。不仅降低了电机电磁性能，而且严重威胁到了系统的安全。由此可见，匝间短路故障的处理成为永磁容错电机设计的关键。

匝间短路由于发生在绕组内部，相比于其他故障而言，较难处理和应对。目前，永磁容错电机所采用的分数槽集中绕组辅以隔离齿的拓扑虽然提升了物理、电磁和热隔离性能，但是对匝间短路故障的发生概率没有产生实质性的影响。减小槽开口或在槽口放置磁性槽楔的高阻抗的设计方法也仅能在一定程度上缓解匝间短路故障的危险程度，短路回路的反电势和阻抗难以匹配的难题依然存在，短路电流可达额定电流的数十倍甚至更高。同时，电机高阻抗设计会降低电机的功率因数和效率，进而导致控制器容量增加和电机过载能力下降。为了进一步降低匝间短路故障的危害，通过控制方式将匝间短路转化为开路故障或相间短路故障。然而，绕组内部的匝间短路回路依然存在，端子开路或短路的处理方式无法从根源上解决匝间短路电流过大的问题。因此，如何有效抑制匝间短路电流成为永磁容错电机的技术瓶颈，严重阻碍了其在航空航天这一超高可靠性领域的工程应用。

总之，匝间短路电流过大是永磁容错电机的共性和核心问题，其本质是短路回路的反电势和阻抗的不匹配。传统的容错设计方法抑制短路电流的效果有限，

且会对正常工作时的驱动系统整体性能产生一定的影响。因此,本研究将深入分析永磁容错电机的内在机理,基于一台理想的永磁容错电机所具备正常工作时低阻抗、短路故障时超高阻抗的特性,从可变阻抗的角度出发进行拓扑创新,力求突破永磁电机匝间短路电流难以抑制的难题,为下一代航空高可靠性动力系统提供技术储备。

## 2.2 初步设计

基于航空起发电机系统设计需求,大功率航空起发电机系统设计流程如图2所示。首先根据项目的技术指标及技术要求确定电机设计的约束条件,其中包括制动机性能指标、机电液接口要求、电机尺寸重量及环境要求等;然后开展航空起发电机的初步设计,确定电机总体方案。案例中要求电机容错性能高,由于传统叠绕组在短路故障发生时会产生很大的短路电流,而根据电机定子轭部的特性可知如若采用环形绕组,在短路故障发生时这种特殊的绕组缠绕方式能够利用环轭漏感极大地减小短路电流,所以通常在容错性能要求很高的场合,会选择采用新型环形绕组-内置式永磁转子,但是这会牺牲电机的一点功率密度,总体来说这种设计是取得了正向收益的。冷却方式有被动冷却以及主动冷却两种方式,由于航空起发电机通常工作在高功率和高热负荷的情况下,所以本工程案例采用了浸油冷却定子的冷却方案。同时根据性能指标要求选择合适的槽极配合及材料,并初步设定各材料的工作温度,便于开展电机性能计算。接下来确定电机的几个主要尺寸,包括定子外径、气隙长度,其中物理气隙长度主要根据电机直径、转速来确定,而电磁气隙为物理气隙、转子护套厚度和定子隔油套厚度之和,因此需要在此步骤初步确定护套厚度、隔油套厚度。

在确定电机定子外径、气隙长度之后,便可进行详细的电机电磁方案设计,包括电机有效部分长度、定子内外径之比、齿宽、定子轭部厚度、转子极弧系数、磁极形状、转子轭厚度等,该过程主要采用有限元软件ANSYS-Maxwell;电机性能初步满足转矩、功率等指标后,继续基于ANSYS-Maxwell开展电机细节尺寸的优化,包括槽开口宽度、齿靴高度等,并完成绕组设计、线规选择;接下来进行电机性能参数的计算,包括转矩、电压、电流、损耗、效率等,该过程采用的软件包括ANSYS-Maxwell、Motor-CAD、JMAG。若电机能满足电磁性能指标,则继续开展电机短路退磁校核,达标后将电机的损耗参数输出到冷却设计过程中,开展电机的冷却设计与分析。

开展冷却设计时,首先设计总体冷却方案及冷却流道,由于流道的设计还受电机总体结构的影响,因此冷却设计与结构设计并行开展。在获得电机电磁方案尺寸、冷却流道方案后,开展总体电机结构的设计,并将结构方案输入到冷却设计,进行冷却系统的流体仿真计算,保证冷却系统流量、压力满足冷却及结构耐压的要求。接下来便可进行电机温度场的计算分析,若各材料温升低于预设温度

及材料温升限值，则证明方案能够收敛，此时可根据计算温度与预设温度的差值确定是否需要进一步优化设计方案（即减小温升余量从而进一步减小电机体积重量）；若各材料温升超过预设温度或材料温升限值，则需重新调整电磁、冷却方案，降低损耗或提升散热条件，直至满足温升要求，此时便可锁定电机电磁、冷却设计方案。

机械结构设计部分还包括电机关键部件的机械强度校核，本项目中包括转子护套的应力变形校核、定子隔油套的耐压校核、转子临界转速校核以及转轴应力校核等，待上述校核全部通过后便可锁定机械结构设计方案，进行详细的结构工程设计。最后，输出满足全部技术要求的电磁、冷却、结构方案，及相关图纸。

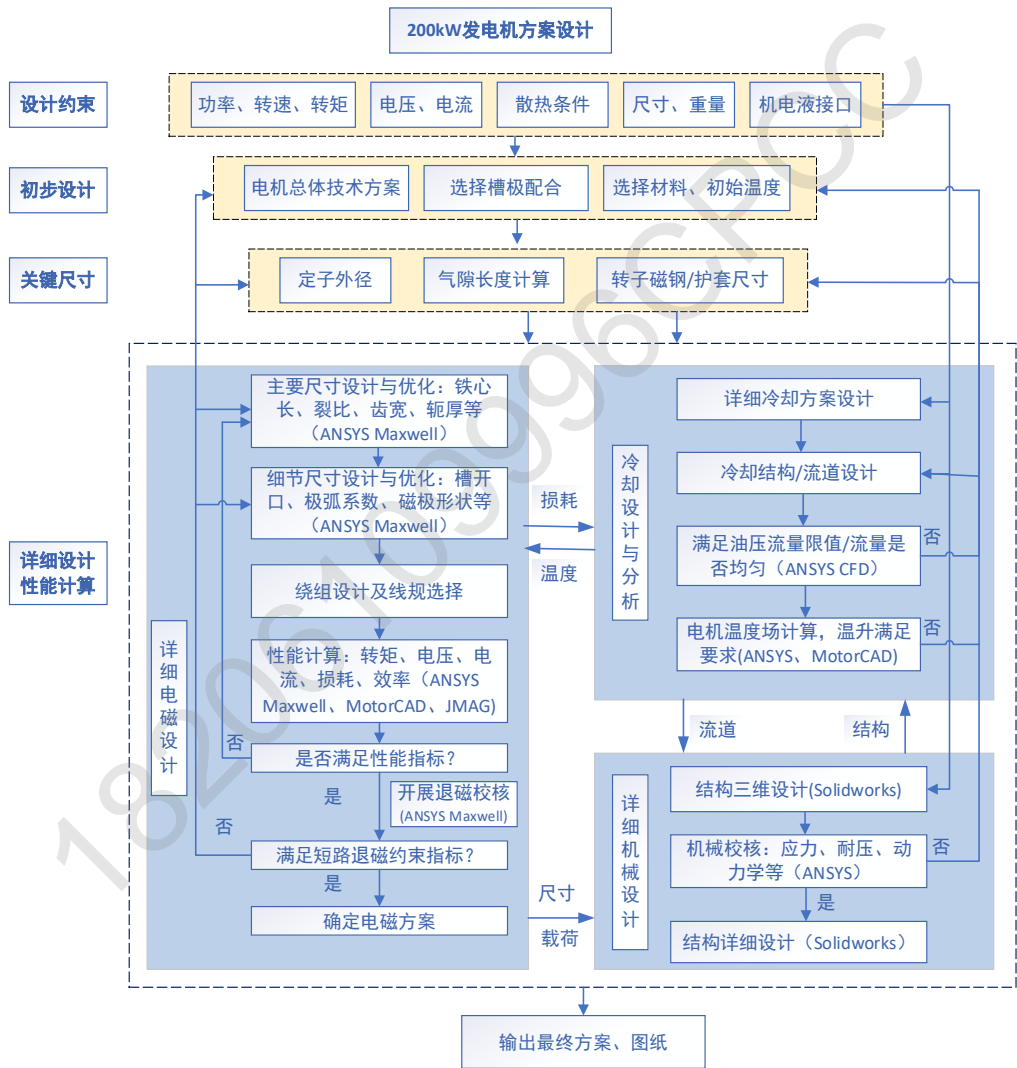


图 2 大功率航空起发电机方案设计流程

2.2.1 电机主要尺寸设计

首先根据项目的技术指标及技术要求确定电机设计的约束条件，包括制动机性能指标、机电液接口要求、电机尺寸重量及环境要求等；然后开展电机主要尺寸的初步设计，确定电机总体方案，目前主要使用的主要尺寸公式如公式（1）



所示：

$$P=\frac{\pi^2}{60}\alpha_iK_BK_{dp}D_{i1}^2L_1nA_1B_\delta$$

(1)

式中  $P$ ——电磁功率；  
 $\alpha_i$ ——计算极弧系数；  
 $K_B$ ——气隙磁场波形系数；  
 $K_{dp}$ ——绕组系数；  
 $D_{i1}$ ——定子内径；  
 $L_1$ ——铁心轴向长度；  
 $n$ ——电机转速；  
 $A_1$ ——定子电负荷；  
 $B_\delta$ ——气隙磁密。

2.2.2 电机总体技术方案

确定电机主要尺寸后，建立如图3所示基于ANSYS-Maxwell软件的有限元仿真模型，优化电机的裂比、齿槽结构、永磁体极弧系数以及定转子铁心轭部高度等结构参数，最终确定电机有效部分的设计参数如表1所示。

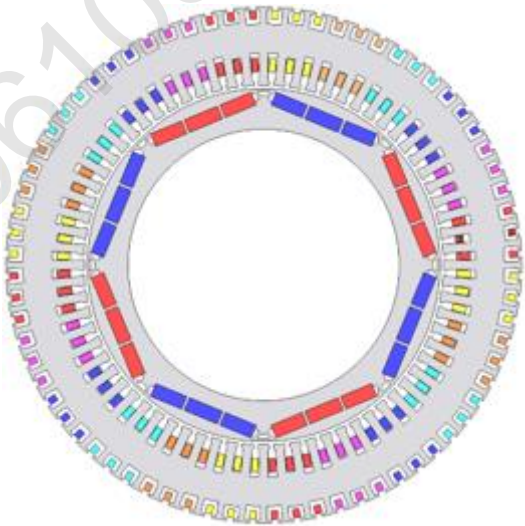


图 3 有限元仿真模型

表 1 有效部分设计参数

参数	值	参数	值	参数	值
槽数/极数	72/8	槽深[mm]	19/16.9	相数	12
定子外径[mm]	320	转子外径[mm]	208	并联支路数	2
定子内径[mm]	212	转子轭厚[mm]	24	每相串联匝数	6

物理气隙[mm]	2	铁心叠长[mm]	100	线径 [mm]	0.85
槽开口[mm]	2.5	磁钢厚度[mm]	8		

72槽8极电机具有8个9槽1极的单元电机，整个电机绕组包含72个线圈，一相有三个线圈，一个线圈16匝，两个线圈15匝。电机采用12相驱动，分为4个18槽2极的三相星型连接电机，如图4所示，每个三相电机分别由一个相同的三相逆变桥驱动，供电电源直流母线电压270V。

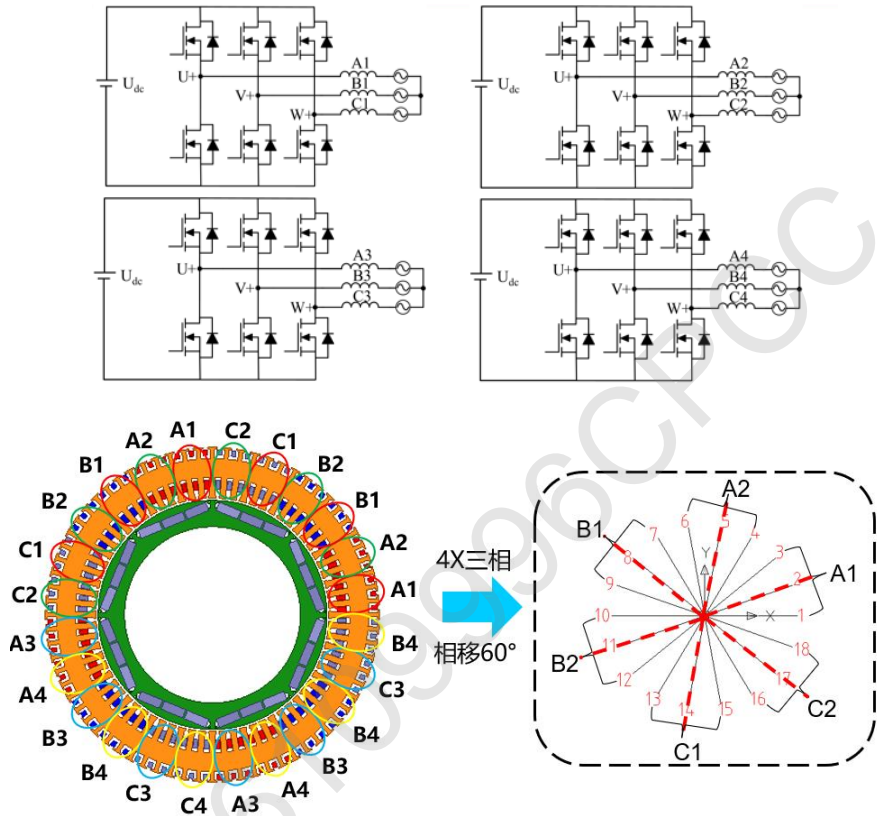


图 4 驱动拓扑示意图

### 2.2.3 电磁方案设计

通过上述尺寸设计后，借助ANSYS Maxwell有限元仿真软件，在8000rpm恒功率工况下，相电流有效值161A，电流超前角（Gamma角）为 $30^\circ$ 。额定负载磁密云图如图5所示，磁密值相较于过载工况有所降低。转矩波形如图6所示，平均转矩113Nm，转矩脉动2.70%。相电压波形如图7所示，相电压幅值129.5V。

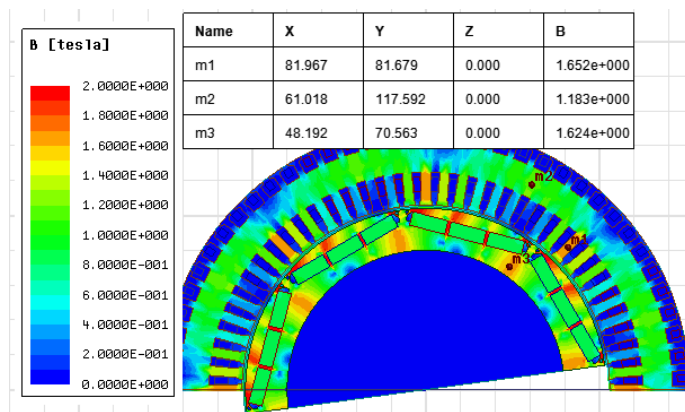


图 5 转速 8000rpm 恒功率工况磁密云图

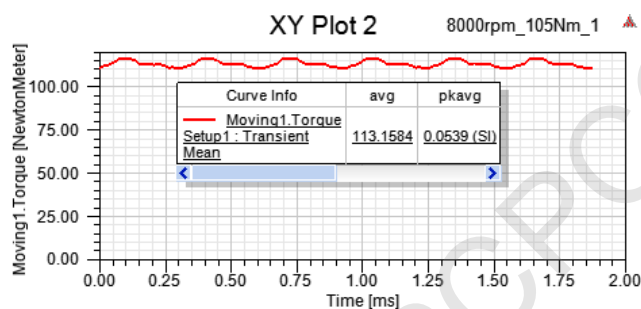


图 6 转速 8000rpm 恒功率工况转矩波形

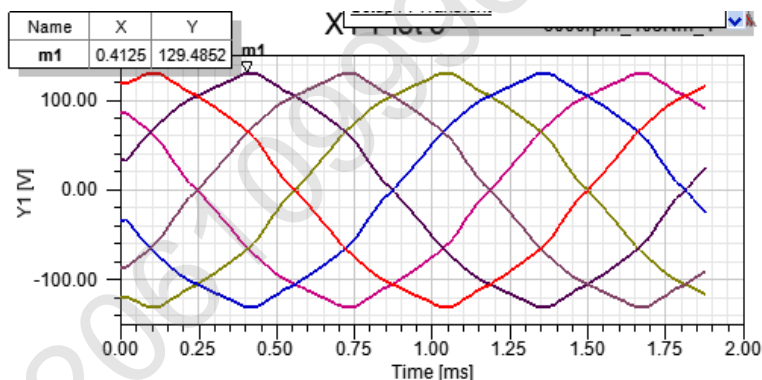


图 7 转速 8000rpm 恒功率工况三相电压波形

电机性能在初步满足转矩、功率等指标后，继续基于ANSYS Maxwell开展电机细节尺寸的优化，比如槽开口宽度、齿靴高度等；之后进行电机性能参数的计算，包括转矩、电压、电流、损耗、效率等，若电机能满足电磁性能指标，则开展电机短路退磁校核，达标后将电机的损耗参数输出到冷却设计过程中，进行电机的冷却设计与应力分析。

#### 2.2.4 冷却设计

电机的热分析涉及到热传导、热对流和热辐射的计算，以确保电机在限制时间内运行的温升控制在安全范围内。因此冷却设计需要考虑冷却介质的流动和热交换效率。开展冷却设计时，首先设计总体冷却方案及冷却流道，由于流道的设计还受电机总体结构的影响，因此冷却设计与结构设计并行开展。在获得电机电

磁方案尺寸、冷却流道方案后，开展总体电机结构的设计，并将结构方案输入到冷却设计，进行冷却系统的流体仿真计算，保证冷却系统流量、压力满足冷却及结构耐压的要求。接下来便可进行电机温度场的计算分析，若各材料温升低于预设温度及材料温升限值，则证明方案能够收敛，此时可根据计算温度与预设温度的差值确定是否需要进一步优化设计方案（即减小温升余量从而进一步减小电机体积重量）；若各材料温升超过预设温度或材料温升限值，则需重新调整电磁、冷却方案，降低损耗或提升散热条件，直至满足温升要求，此时便可锁定电机电磁、冷却设计方案。

电机的功率密度很高，采用普通的外壳循油冷却已经不能满足温升的要求，本次设计采用定子浸油冷却和转子开式风冷的方案，定转子之间用隔油套隔开，形成定子油路，转子依靠空气散热。定子有效部分油路示意图如图8所示。

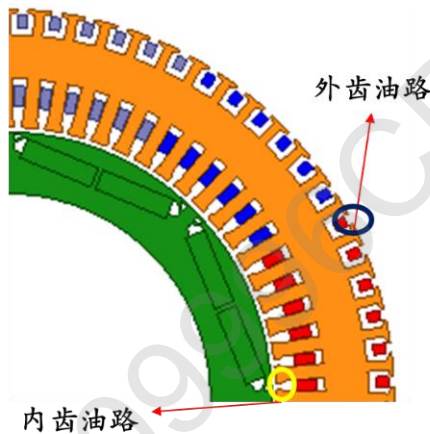
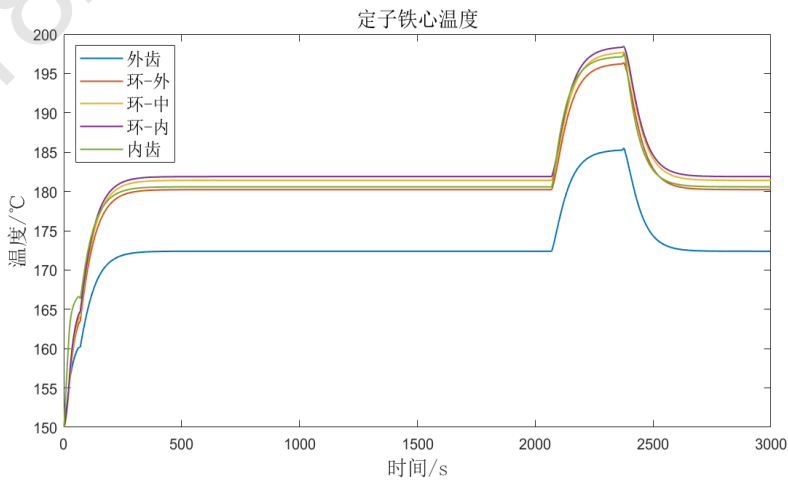
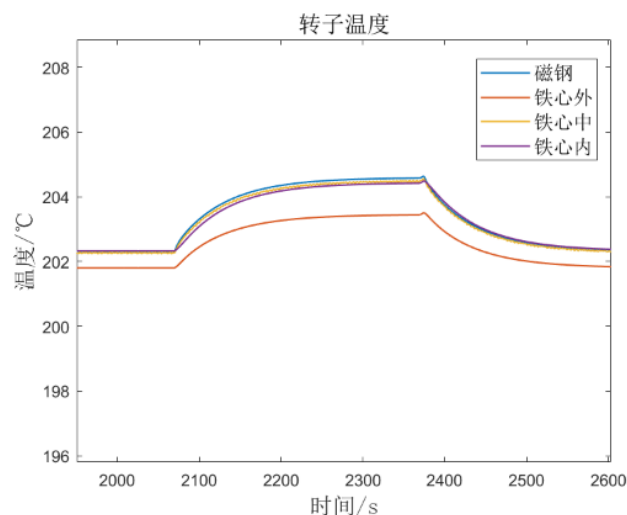


图 8 电机散热示意图

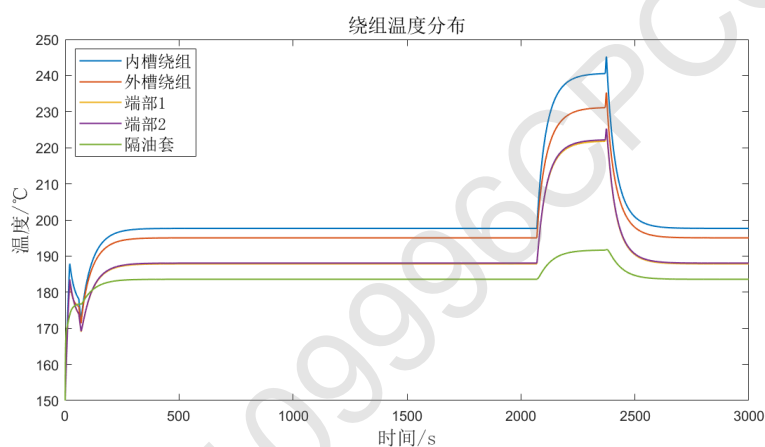
借助 Fluent 有限元仿真软件与集总热网络模型方法针对 3000rpm20s+8000rpm40s+空载10s+15000rpm稳定状态+1.5倍过载5min+2倍过载5s（全过程）热量散失情况进行分析，电机各部分温度变化数值如图9所示。



(a) 定子铁心



(b) 转子铁心



(c) 绕组及隔油套

图 9 全过程电机瞬态温度

### 2.2.5 转子动力学设计

机械结构设计部分还包括电机关键部件的机械强度校核，本项目中包括转子护套的应力变形校核、定子隔油套的耐压校核、转子临界转速校核以及转轴应力校核等，待上述校核全部通过后便可锁定机械结构设计方案，进行详细的结构工程设计。其具体结论从图 10 中可以看到，在 0-25000rpm 转速范围内，转速曲线与各阶模态曲线并没有交点，说明转子运行在刚性区域，临界转速位于该范围以外，而额定转速为 15000rpm，转子结构安全。模态频率表中，2.7495Hz 振型为径向膨胀。在 15000rpm 下，461.73Hz 和 470.3Hz 振型为一阶弯曲模态。517.74Hz 和 812.98Hz 为绕 X 轴的摆动模态。最后，输出满足全部技术要求的电磁、冷却、结构方案，及相关图纸。

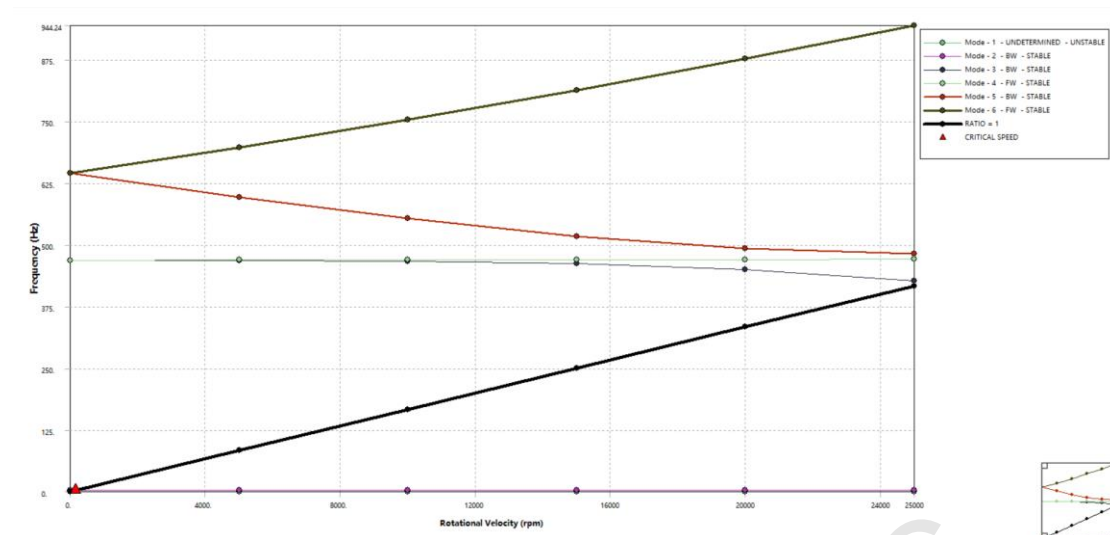


图 10 Campbell 图

Mode	Whirl Direction	Mode Stability	Critical Speed	0. rpm	5000. rpm	10000 rpm	15000 rpm	20000 rpm	25000 rpm
1.	UNDETERMINED	UNSTABLE	NONE	0. Hz	0. Hz	0. Hz	0. Hz	0. Hz	0. Hz
2.	BW	STABLE	164.97 rpm	2.7495 Hz	2.7495 Hz	2.7495 Hz	2.7495 Hz	2.7495 Hz	2.7495 Hz
3.	BW	STABLE	NONE	468.94 Hz	467.94 Hz	466.06 Hz	461.73 Hz	449.91 Hz	427. Hz
4.	FW	STABLE	NONE	468.95 Hz	469.57 Hz	469.99 Hz	470.3 Hz	470.53 Hz	470.71 Hz
5.	BW	STABLE	NONE	644.68 Hz	597.07 Hz	554.26 Hz	517.74 Hz	492.4 Hz	481.6 Hz
6.	FW	STABLE	NONE	644.71 Hz	696.7 Hz	752.86 Hz	812.98 Hz	876.85 Hz	944.24 Hz

图 11 各阶模态频率

A: Modal

Total Deformation 2

Type: Total Deformation

Frequency: 2.7495 Hz

Sweeping Phase: 0. °

Unit: mm

2022/4/17 19:39

9.6179 Max

8.5493

7.4806

6.4119

5.3433

4.2746

3.206

2.1373

1.0687

3.1297e-6 Min

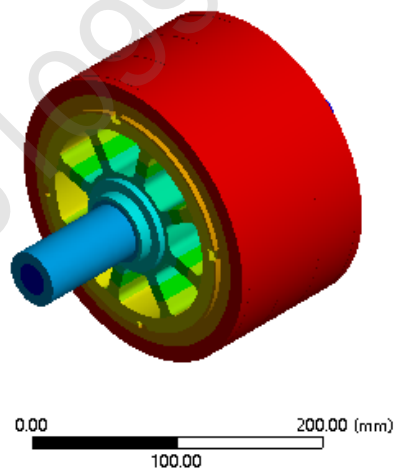


图 12 径向膨胀模态

A: Modal  
Total Deformation 3  
Type: Total Deformation  
Frequency: 468.94 Hz  
Sweeping Phase: 0. °  
Unit: mm  
2022/4/17 19:42

8.1389 Max  
7.7494  
7.3599  
6.9704  
6.5809  
6.1914  
5.8019  
5.4124  
5.0229  
4.6335 Min

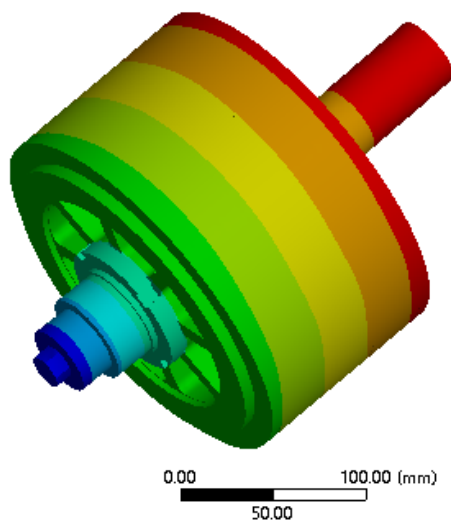


图 13 一阶弯曲模态

A: Modal  
Total Deformation 5  
Type: Total Deformation  
Frequency: 644.68 Hz  
Sweeping Phase: 0. °  
Unit: mm  
2022/4/17 19:43

14.231 Max  
12.651  
11.071  
9.4907  
7.9104  
6.3301  
4.7499  
3.1696  
1.5893  
0.0090673 Min

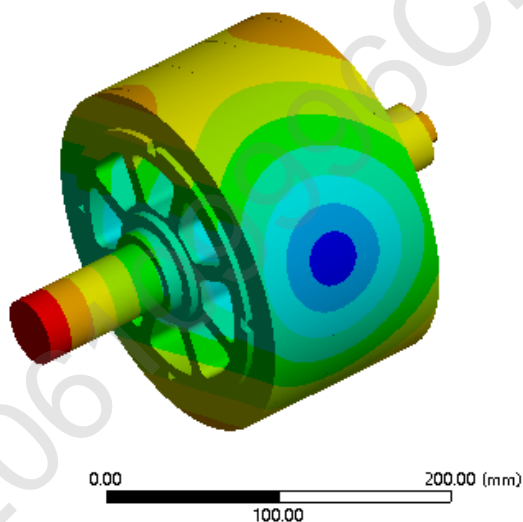


图 14 摆动模态

### 2.2.6 控制器设计

控制器结构设计采用模块化、分布式的设计思想，与电机分立设计，通过功率线连接，控制器整体分为四组全桥模块，每一组模块包括一组直流母线电容以及两组控制模块，整体呈现上下对称结构，直流母线电容为定制薄膜电容，集成了进线母排并放置于进线处以节省空间。

每一组控制模块包括一块功率模块以及一块分控制板，主控制板与分控制板通过光纤连接，分控制板通过额外铝支撑板与功率模块固定在腔体中。两组控制模块对称固定在腔体两侧，水路同时对两组控制模块进行冷却。

### 2.3 样机研制及设计



### 2.3.1 样机加工

依据所得到的电机各有效参数对电机进行研制加工得到样机。如图15所示，为样机定子的图片，可以看到是环形绕组的结构。图16给出了项目中转子的样件实物图。电机装配后的实物图如图17所示。

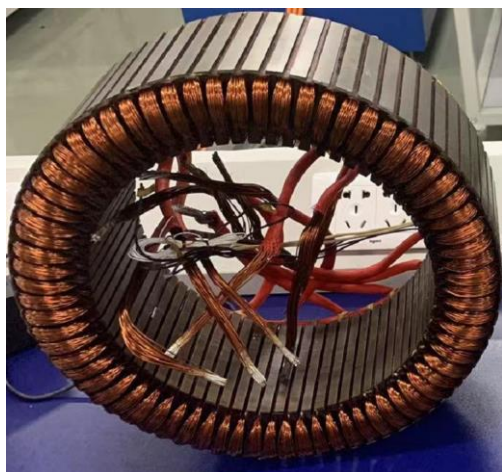


图 15 定子实物图

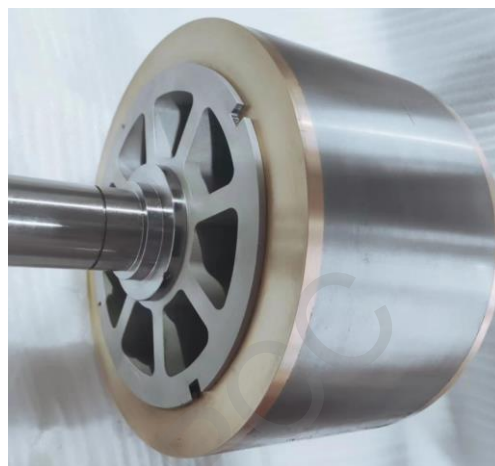


图 16 转子实物图



图 17 样机实物图

### 2.3.2 基本参数测试

- (1) 对电机样机结构尺寸以及重量进行测量，是否符合技术指标的要求。
- (2) 对电机样机各相之间的线电阻进行测量，再对短路点的电阻进行测量，初步判定样机匝数、线径、并绕根数等是否达到要求，以及绕组匝间是否存在短路故障等。
- (3) 对电机样机进行流阻-压降测试，保证电机耐油压在达到一定值时不会发生泄漏

### 2.3.3 性能测试



在工作台上对电机样机的空载、电动、制动以及短路性能进行测试。试验平台如图18所示。

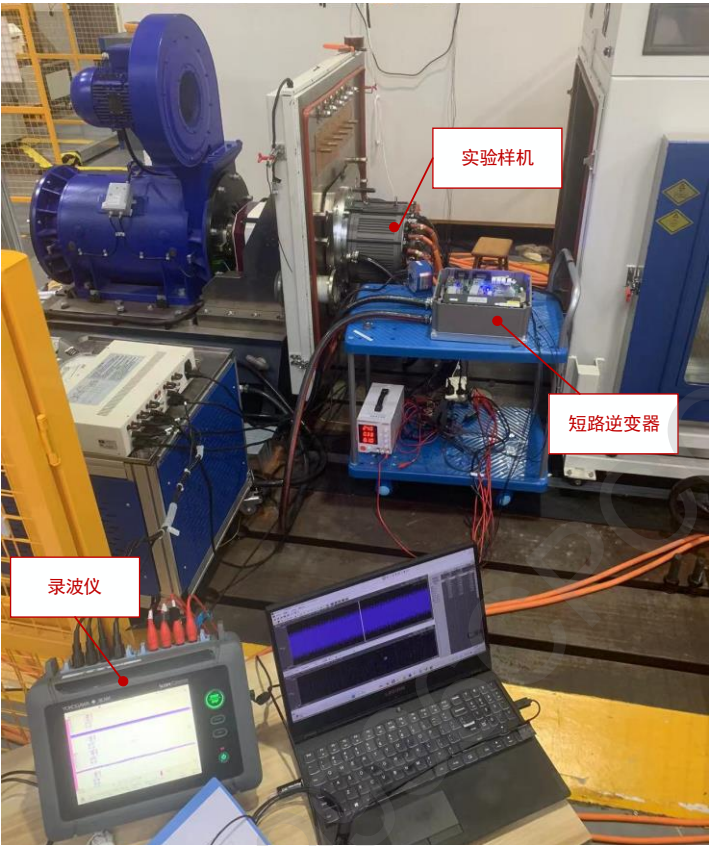


图 18 实验平台展示图

试验结果显示，电机能够安全稳定运行，电机空载反电势较为正弦。其中具体实验数据如表2与图19所示。

表 2 空载反电势试验测试数据

电机转速[rpm]	299
实测空载线反电势峰峰值[V]	8.32
仿真空载线反电势峰峰值[V]	8.53
实验误差	2.5%

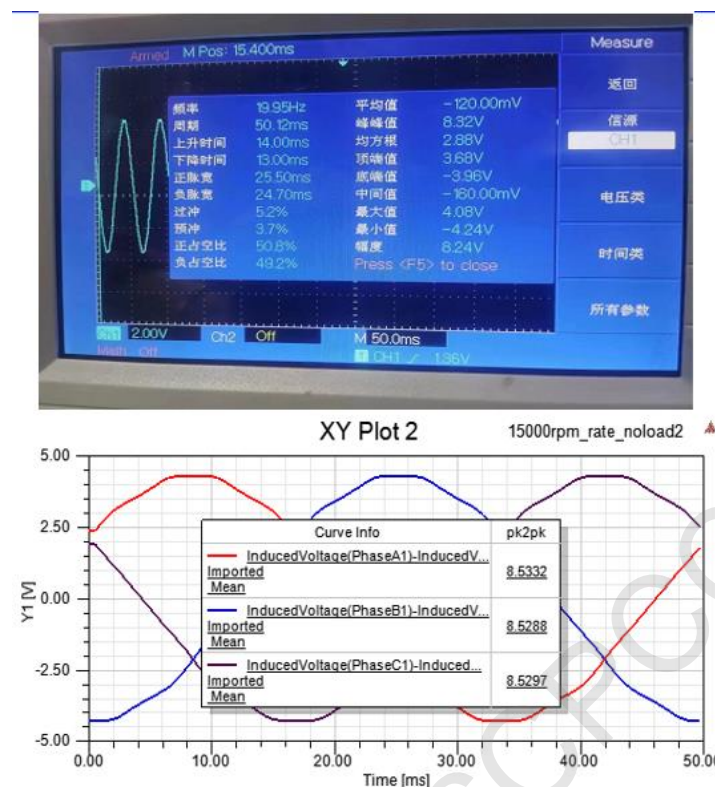


图 19 电机实测与仿真空载反电势

电动状态下所得试验结果与仿真结果一致性较好，电机具有较大的过载能力。其中，转矩-电流测量曲线如图20所示。在不同转速下，输出相同转矩所需要的电流大小基本相同，随输出转矩增大，电流基本呈线性增加。转矩电流曲线比较如图21所示，转矩误差基本在7%以内。

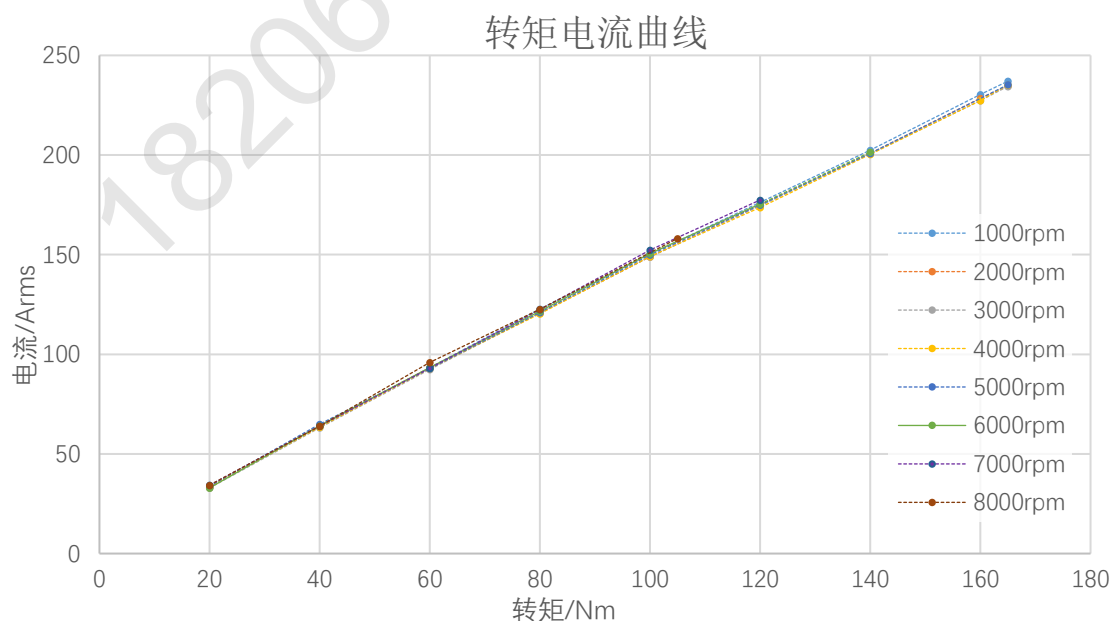


图 20 转矩-电流测量曲线

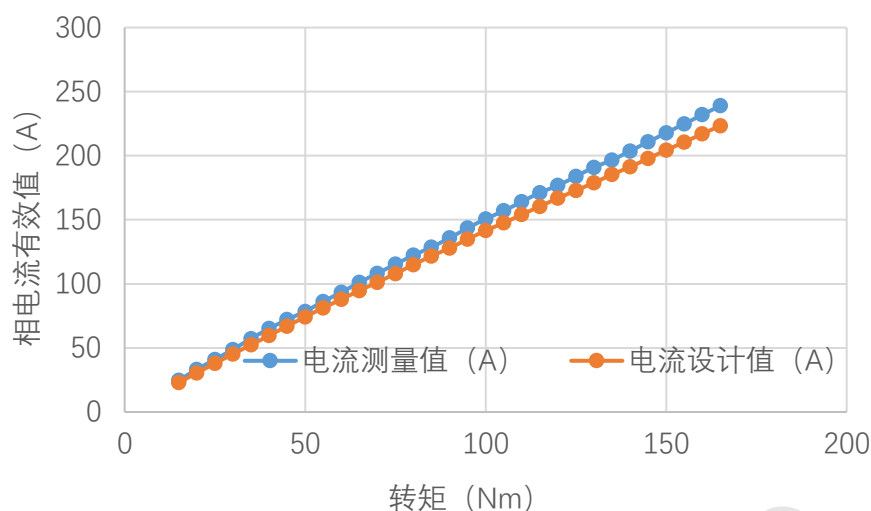


图 21 转矩-电流曲线设计与仿真比较

制动性能测试中，稳态电压和直流畸变系数均满足技术指标要求。具体对电机9000rpm100kW两套电动两套制动的温度测试，如图22所示，电机绕组温度达到约66℃，温升约为35℃，具有较大温升裕度。

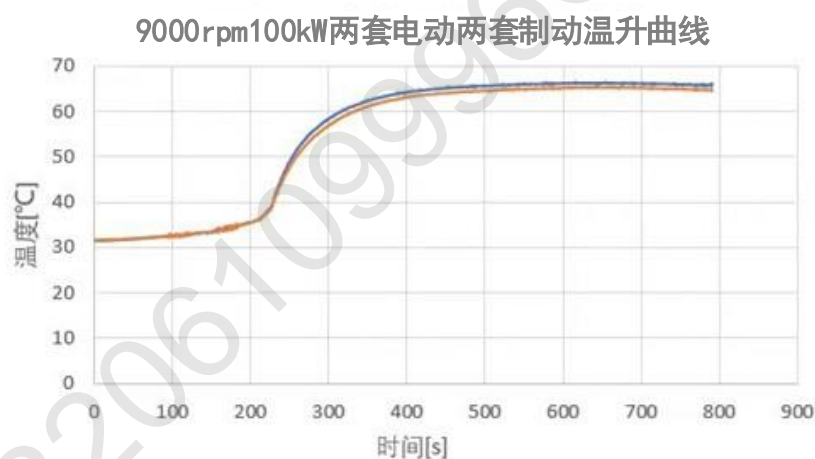


图 22 转速 9000rpm100kW 温升曲线

最后短路测试中，对各转速电动与制动状态工况下的匝间短路电流进行分析，所示结果与仿真计算结果吻合较好，间接验证了该电机所采用的环形绕组的容错性能，如图23所示。其中，匝间短路发生7个周期仍可正常运行，满足故障诊断要求的时间。匝间短路故障发生后，故障/正常相的电流及电压变化不大，电机运行平稳。

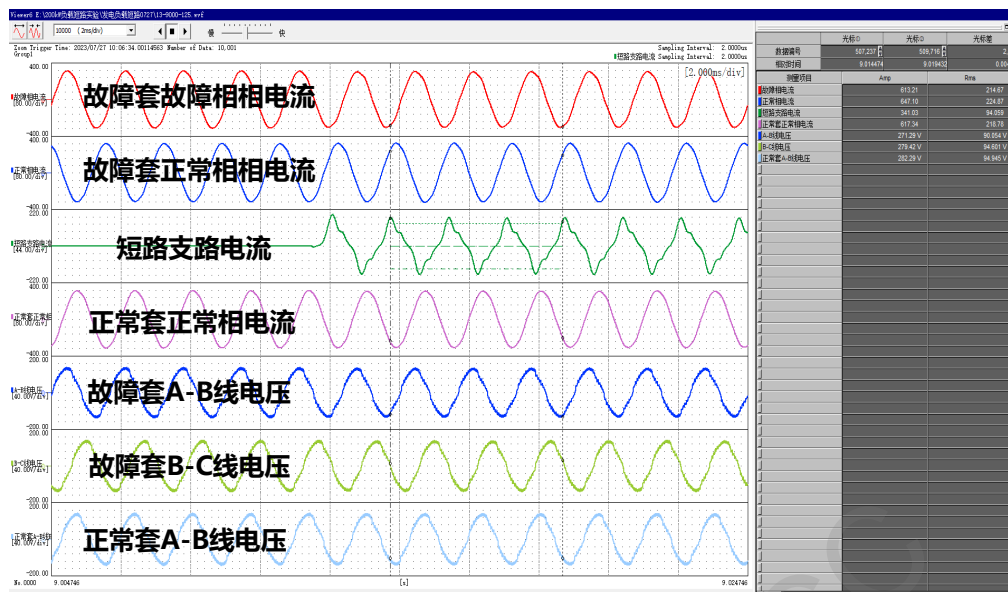


图 23 匝间瞬态短路测试情况

制动状态转速9000rpm下不同制动功率工况，两种匝间短路实测负载-短路支路电流曲线如图24所示。转速9000rpm下，负载以25kW为阶跃递增，两种短路情况均为负载100kW情况下短路支路电流有效值最大；两种短路情况对比，与电动状态相同，为一股线匝与匝之间短路比一匝两股线间短路造成的短路支路电流有效值更大，短路危害更大。

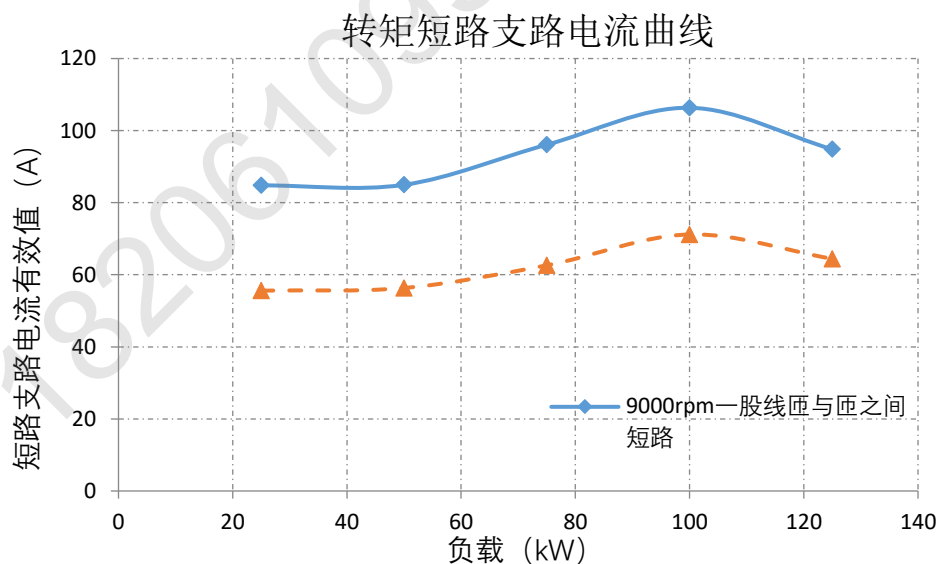


图 24 制动状态 9000rpm

制动状态9000rpm100kW工况下，针对一股线匝与匝之间短路情况进行仿真分析，其电流波形如图25所示：

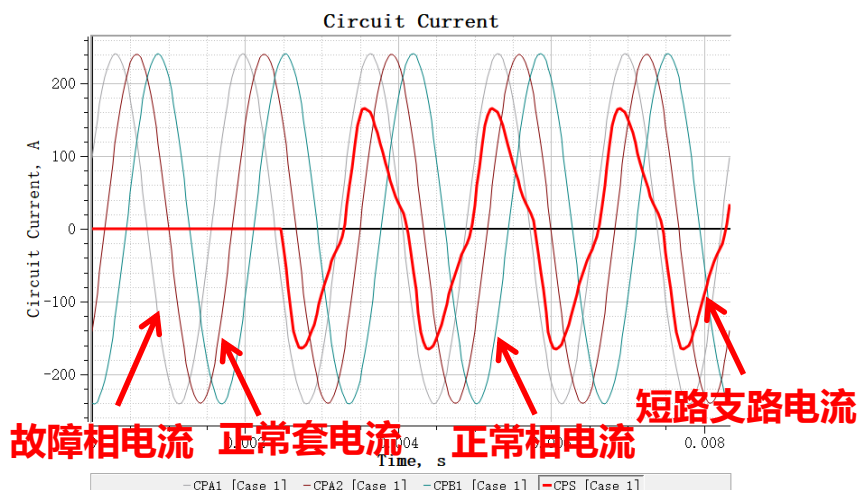


图 25 制动状态 9000rpm100kW 一股线匝与匝之间短路仿真电流波形

分析制动状态9000rpm100kW工况下仿真与实验各相电流波形数据，对比数据如表3所示，可以看到，短路支路电流有效值误差1.6%，误差较小，间接验证环形绕组的容错能力；分析仿真与实验误差来源主要为：接触电阻（接触电阻随温度会有变化）、电流角。

表 3 实验与仿真数据对比

电流	实验	仿真
短路前/后故障相电流有效值[A]	170.4/164.8	171.3/170.98
短路前/后正常相电流有效值[A]	173.9/173.4	168.37/168.28
短路支路电流有效值[A]	106.3	108.05
短路前/后正常套正常相电流有效值[A]	170.32/169.15	170.32/170.73

### 3. 工程方案分析论证

大功率航空起发电机系统永磁化的工程探究过程中，案例以解决实际工程项目中的问题为导向，基于现有工程实际案例，详述大功率航空起发电机系统永磁化的工程探究中的设计思路及要点，并针对兼顾航空起发电机高功率密度与强容错性能设计目标梳理多个技术难点，围绕现有进展及探究思路进行详细论证。

在大功率航空起发电机系统永磁化工程探究过程中，随着功率密度的提升，为兼顾电机容错性能。航空起发电机谐波损耗抑制技术、严苛环境条件下高效散热技术和容错技术成为大功率航空起发电机系统永磁化工程探究过程的技术难点，以下将围绕容错技术难点展开论述。

永磁化技术在大功率航空起发电机系统中的应用显著提升了电机的功率密度和系统效率，同时增强了电机的可靠性和使用寿命。这一技术通过利用高性能永磁材料的高磁能密度，在有限的空间内实现了更大的功率输出，从而优化了飞机的能效和经济性。



故高功率密度航空永磁起发电机成为最有望满足多电飞机大功率供电需求的电机类型。然而，永磁电机具有故障时难以灭磁的固有特性，短路故障下大电流产生大量铜耗，导致电机发热急剧增加，存在起火风险，严重威胁飞机可靠性，因此，如何设计满足航空强容错要求、高功率密度的永磁起发电机成为航空电气，乃至整个航空技术领域的热点、难点问题，我国也投入了大量科研经费进行该方面的科研工作。

在永磁电机可能发生的故障中，匝间短路是最为常见的故障，概率高达30%-40%<sup>[15]</sup>，也是相间短路、三相对称短路等故障的源头。以往的研究从不同的角度提供了两种缓解匝间短路故障的方法即主动容错和被动容错。主动容错的先决条件是快速准确的故障诊断技术，例如探测线圈以及基于神经网络模型等检测诊断方法，如图26所示为探测线圈放置方式，该方式侵入性较大对正常运行的电机会有影响<sup>[16]</sup>；如图27所示为基于小波神经网络模型的故障诊断，该方式需要大量的训练数据十分繁琐<sup>[17]</sup>。由于匝间短路故障前期的故障特性十分的微弱且易于判断错误，故主动容错的快速性以及准确性得不到保障。主动容错的关键是匝间短路电流缓解技术，例如端部短接、注入电流以及弱磁技术等方法，其中弱磁方法是最常用的，通过降低空载反电势以达到降低短路电流的目的，但是同时也会降低扭矩。

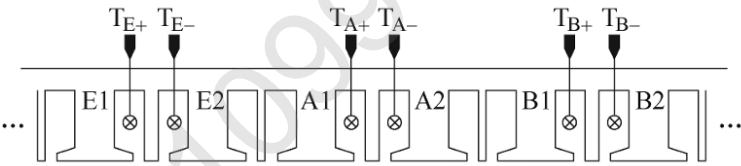


图 26 基于容错齿的探测线圈绕制方案

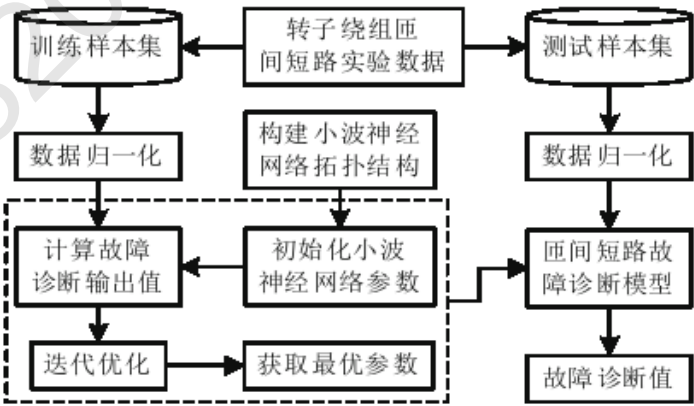


图 27 基于小波神经网络算法的故障诊断流程

被动容错则是通过对电机本体设计来抑制短路电流，与主动容错相比对短路故障响应具有零延迟，并且无需复杂的诊断技术以及控制策略。例如分数槽集中绕组（FSCW）具有电磁隔离度高、物理隔离性强、电感大、齿槽转矩低等优点，

已经成为了永磁电机的主流拓扑结构。如图28所示，Li等人<sup>[18]</sup>和Baker等人<sup>[19]</sup>将隔离齿结构与FSCW相结合，进一步改善了绕组之间的电磁和温度隔离。如图29所示，Arumugam等人<sup>错误!未找到引用源。</sup>研究了垂直放置的带状绕组，该绕组抑制了匝间短路电流，但同时增加了交流铜损耗。

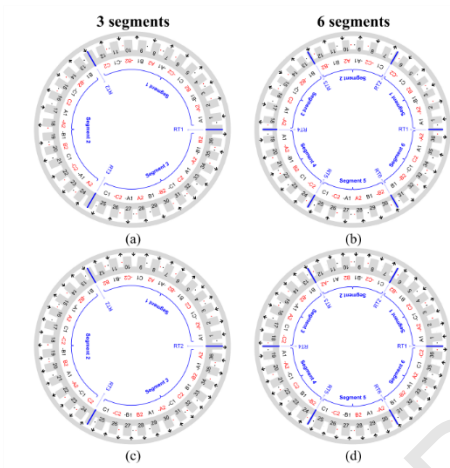
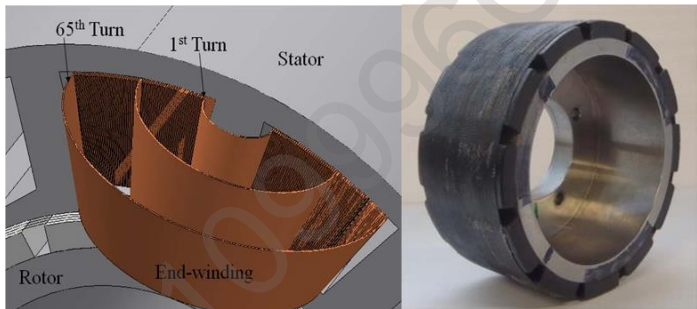
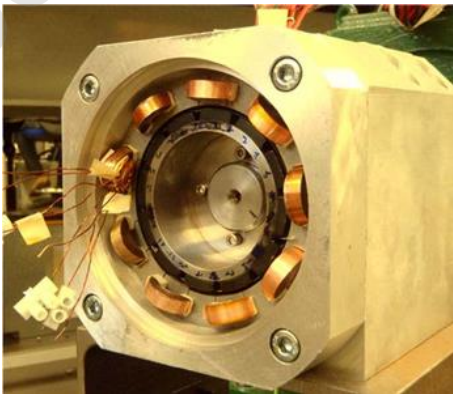


图 28 隔离齿与分数槽集中绕组结合电机结构



(a)带状绕组结构

(b)转子结构



(c)样机

图 29 垂直放置的带状绕组结构示意图以及样机

基于上述这些研究发现，主动容错可能会导致故障下电机转矩输出性能大幅降低或者是加入到电机中的设备侵入性严重会影响电机的正常运行，被动容错在提高电机漏感的同时会使得电机功率因数和效率较低，且通过电机结构改变来提

升的电感数值有限，难以将匝间短路电流抑制在额定值内。大功率航空内装式起发电机作为航空发动机系统的核心动力来源，其功率密度和容错能力直接决定了发动机系统的工作性能和可靠性。如图30所示，主要研究思路为在实际应用中，永磁电机在短路情况下的电流激增，这使得它们难以满足起发电机在高可靠性方面的需求。这一问题的核心在于，传统的永磁电机设计在追求高功率密度的同时，往往牺牲了系统的容错能力。为了解决这一矛盾，我们深入研究了电机的工作原理和结构设计，探索出了一种创新的解决方案——可变阻抗高功率密度永磁容错电机拓扑结构。这种设计通过引入可变阻抗机制，能够在短路发生时自动调整电机的电气特性，从而有效限制短路电流。通过实际测试和验证，我们发现采用这种新型拓扑结构的永磁电机，在短路情况下的电流峰值相比传统容错电机降低了60%以上。这一显著的改进不仅提高了电机的可靠性，还延长了其使用寿命，降低了维护成本，对于提升整个电力系统的稳定性和安全性具有重要意义。这一实践案例不仅证明了在面对技术挑战时，通过深入研究和创新思维可以找到有效的解决方案，而且也为我们提供了宝贵的经验和启示。它告诉我们，在设计和应用新技术时，需要综合考虑性能、可靠性和成本等多个因素，通过不断的技术创新和优化，来满足日益增长的电力系统需求。同时，这也激励着我们在未来的研究中，继续探索更多的可能性，以推动电力系统向更高效、更可靠、更环保的方向发展。

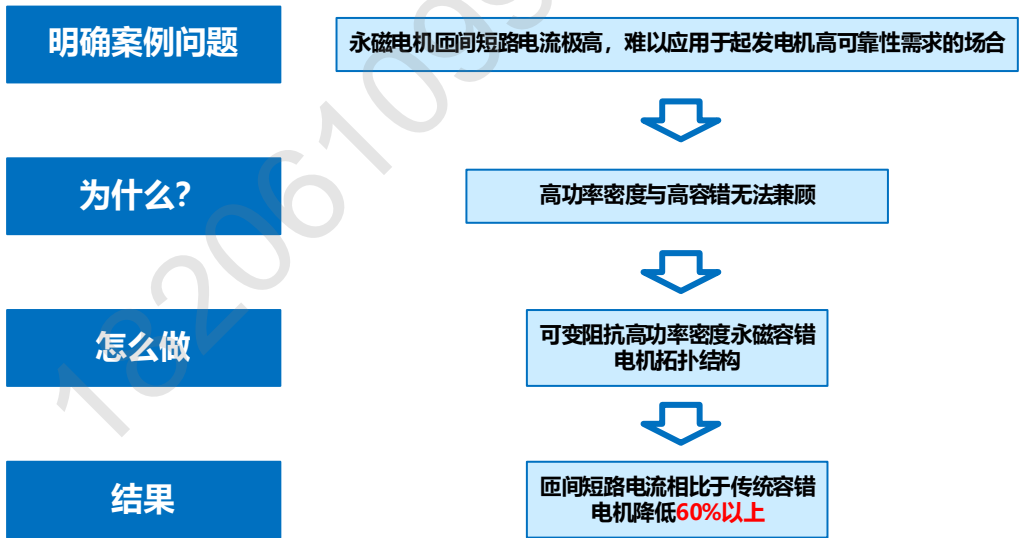


图 30 案例分析逻辑结构

从新型航空发动机整体架构可知，起发系统所占的空间极其有限，所以起发电机要有在高温下输出大功率的同时，具备高可靠性。本案例即探索强容错型高功率密度内装式永磁起发电机设计方法，基本研究思路是从可变阻抗的角度出发，提出新型可变阻抗永磁电机拓扑。

如图31(a)所示，提出了一种具有环形绕组的可变阻抗电机，每个线圈都围绕



着定子轭朝同一方向定向缠绕，与传统的FSCW和叠绕组相比，环形绕组在发生故障时可以自动切换到高阻抗特性，从而提供更强的短路电流抑制能力。其容错原理是，当电机正常工作时，沿着定子轭部路径的磁场强度的线积分如公式（2）所示：

$$\oint Hdl = Ni_a + Ni_b + Ni_c \quad (2)$$

但是当电机发生匝间短路故障时，由于短路分支电流 $i_f$ 的出现短路匝上的电流由相电流 $i_a$ 变成了 $i_{sc}$ ，重复上述的环轭线积分可以得到：

$$\oint Hdl = \lambda N_c i_{sc} + (1 - \lambda) N_c i_a + n N_c i_b + n N_c i_c = -\lambda N_c i_f = \phi_{yoke} R_{yoke} \quad (3)$$

其中 $n$ 是每相的线圈数， $N_c$ 是每个线圈的匝数， $\lambda$ 是短路匝数与线圈匝数的比值， $\phi_{yoke}$ 和 $R_{yoke}$ 分别是环轭漏磁通和磁阻。如图31(b)所示，当电机发生匝间短路故障时定子轭中会产生一个环轭漏磁通，该磁通在每个线圈上感应出一个额外的电压，该电机可以看成一个正常工作的三相永磁电机和一个仅有短路匝工作的三相永磁电机的合成，所以仅分析短路匝上所感应出的电动势如公式（4）所示：

$$e_{sc} = \lambda N_c \frac{d\phi_{yoke}}{dt} = -\lambda^2 L_{yoke} \frac{di_f}{dt} \quad (4)$$

其中 $L_{yoke}$ 为环轭漏感，由于漏磁路只经过定子铁芯，而定子铁芯磁导率较高，故环轭漏感较大相比于电机的自感以及互感高数十倍，所以环轭漏感所产生的感应电动势可以有效的抵消短路匝所产生的反电势，从而达到抑制短路电流的目的。如图32所示，可以看到这种拓扑结构相比于其他传统永磁容错结构匝间短路电流被抑制到了极小的地步。

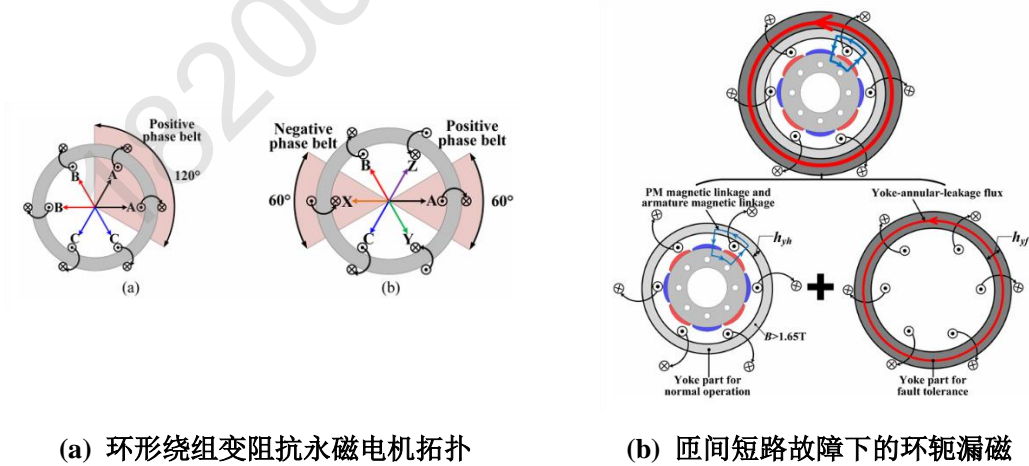


图 31 可变阻抗电机拓扑及原理

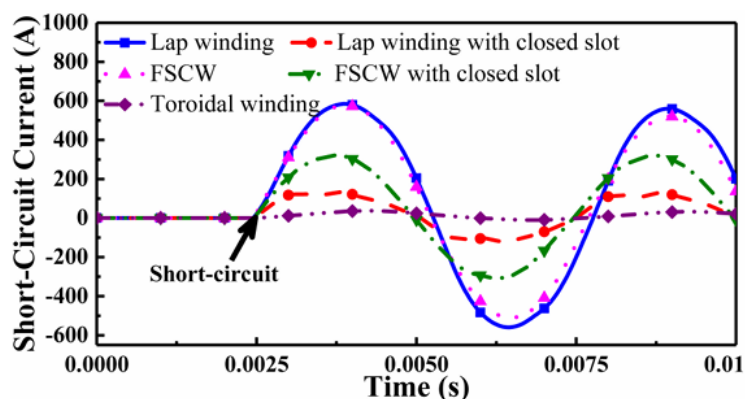


图 32 可变阻抗电机和传统高阻抗电机匝间短路电流对比

如图33所示，基于分数槽集中绕组拓扑，在特定的槽开口处增加导磁的连接桥，构建出容错调磁单元。与上述所展示的环形绕组容错原理基本一致，即正常工作下的电机三相平衡，不会在容错调磁单元里产生漏磁，但是当电机发生匝间短路故障后会破坏电机的三相平衡，此时短路匝内的短路会在容错调磁单元内产生一个环齿漏磁，由于此漏磁仍是仅经过定子铁芯故环磁漏感较大，最终在短路匝中产生较大的感应电势抵消短路反电势，实现了短路回路由低阻抗向高阻抗的转变，对短路电流的抑制。如图34所示，该容错电机匝间短路电流相比传统永磁电机降低60%以上，最高可降低90%左右。

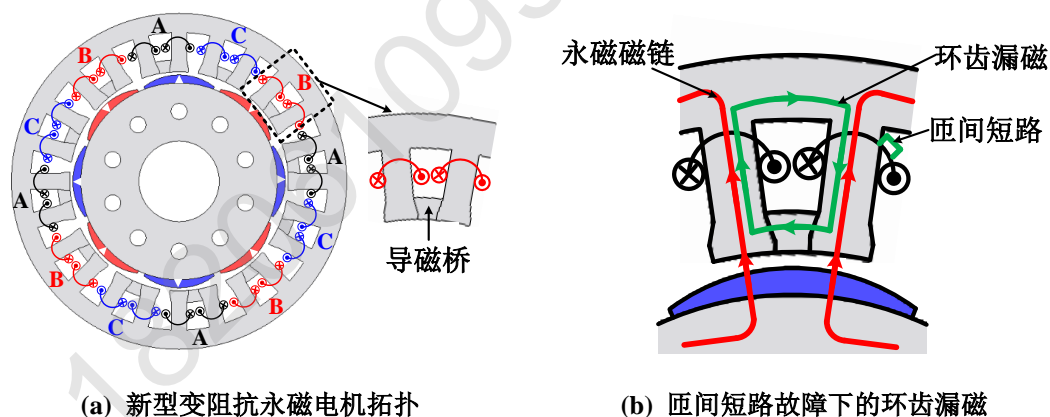


图 33 可变阻抗电机拓扑及原理

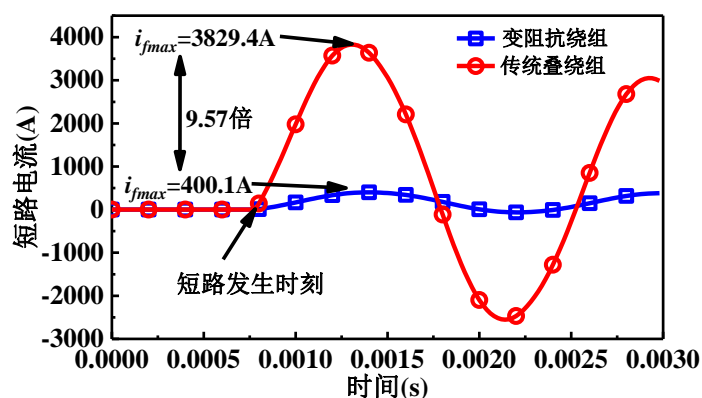


图 34 可变阻抗电机和传统容错电机匝间短路电流对比

上述两种拓扑结构实验验证了可变阻抗拓扑抑制短路电流的能力，容错原理相似只是结构不同，其为实现起发电机的强容错设计奠定了基础。

#### 4. 实施效果

在航空起发电机系统永磁化的工程探究中，目前已采用新型环形绕组设计方案完成200kW航空内装永磁起发电机项目。其中短路测试中，项目案例进行各转速电动与制动状态工况的不同匝间短路测试显示，电机故障套正常相电流变化率均较小，验证所提出变阻抗环形绕组技术在永磁航空起发电机场合显著的容错能力。提出了结合变阻抗永磁电机容错原理与独特的容错调磁单元设计方法，在不影响非故障工况下的功率输出前提下，突破了航空起发永磁电机匝间短路故障下短路电流自抑制关键技术，实现可变阻抗高容错航空起发永磁电机设计。

通过采用新型环形绕组设计方案，该方案内圈同极性，短路情况下可自动抑制短路电流。单个线圈物理隔离，增强容错。针对航空场合永磁电机应用故障灭磁问题，另辟蹊径。采用4x3相驱动拓扑，能够增强系统容错性，多相分流，便于功率模板选型。结合高效定子浸油冷却技术、转子开式风冷技术、控制器液冷技术以及高饱和磁密软磁合金硅钢片、高性能永磁材料的应用，最终实现电机、控制器的轻量化设计，且达到了相应项目要求的全部技术指标。其中，根据仿真试验验证，在 $1\Omega$ 接触电阻情况下，单匝短路短路点最大电流不超过额定电流的1.54倍，且短路发生前后线电压，转矩无明显波动。

#### 5. 结语部分

在大功率航空起发电机永磁化的工程探究过程中，目前已结项“XXX大功率航空电机系统”、“XX大功率xx永磁容错电机设计研究”、“XXX构型高速电机系统设计技术研究”等工程项目。并在航空齿轮泵构型高速电机中首次应用变阻抗环形绕组技术，增强了永磁电机航空场合的容错性，使得永磁电机在大功率航空齿轮泵构型高速电机的使用具有可能性，对其功率输出能力和容错能力进行了验证。专家团队掌握了强容错可变阻抗永磁电机设计方法，积累了相关研制经验，为高可靠性内装式起发永磁电机方面的积累奠定了坚实的理论与技术基础。

未来在教学过程中，团队以国家重大需求——航空起发电机系统为导向，将训练并培养学生的家国情怀、责任担当、个人素养、科学精神、工程师精神、创新精神六维核心素养。团队将在航空起发电机系统领域二十余年的科研成果转化为教学成果，将先进的起发电机技术、工程研发过程引入课堂。在双一流建设经费、全国重点实验室条件建设经费等经费支持下，依托优良试验条件，以项目制的形式，以问题为导向开展教学活动。依托已有项目，实现兼顾高功率密度和强

---

容错性能的航空起发系统永磁电机优化设计关键技术的突破。产教融合,在真实的实践环境中引导学生开展以真实项目为基础的实践活动,将教学融入到航空起发电机系统永磁化工程探究过程中,教学相长,根据实际工程应用中出现的问题作为研究内容,充分培养学生工程师精神与团队合作能力,训练学生个人科学素养与工程经验,培养高层次卓越工程师。

## 参考文献

- [1] Buticchi G, Wheeler P, Boroyevich D. The More-Electric Aircraft and Beyond[J]. Proceedings of the IEEE, 2023, 111(4): 356-370.
- [2] 张卓然,许彦武,姚一鸣,等.多电飞机电力系统及其关键技术[J].南京航空航天大学学报,2022,54(05):969-984.
- [3] Hyder A K. A century of aerospace electrical power technology[J]. Journal of Propulsion and Power,2003,19(6):1155-1179.
- [4] Roboam X, Sareni B, Deandrade A. More electricity in the air: Toward optimized electrical net-works embedded in more electrical aircraft[J]. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2012, 6(4):6-17.
- [5] 张小伟.面向2030年的分布式混合电推进技术[C]. 中国航空学会.2015年第二届中国航空科学技术大会论文集.中国航空工业发展研究中心,2015:5.
- [6] 黄俊,杨凤田.新能源电动飞机发展与挑战[J].航空学报,2016,37(01):57-68.
- [7] 张卓然,于立,李进才,等.飞机电气化背景下的先进航空电机系统[J].南京航空航天大学学报,2017,49(05):622-634.
- [8] 柴凤,耿丽娜,裴宇龙.轴裂相整数槽集中绕组永磁容错电机及其匝间短路故障抑制研究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(13): 5203-5218.
- [9] PRIETO M D, ESPINOSA A G, RUIZ J R R, et al. Feature extraction of demagnetization faults in permanent-magnet synchronous motors based on box-counting fractal dimension[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(5): 1594-1605.
- [10] Jack A G, Mecrow B C. Safety critical drives for aerospace applications[C]//International Conference on Electric Machines and Drives, Paris, France, 1994.
- [11] Bianchi N, Pre M D, Grezzani G, et al. Design considerations on fractional-slot fault-tolerant synchronous motors[C]//IEEE International Conference on Electric Machines and Drives, San Antonio, TX, 2005.

- 
- [12] Zhao W, Xu L, Liu G. Overview of permanent-magnet fault-tolerant machines: Topology and design[J]. CES Transactions on Electrical Machines and Systems, 2018, 2(1): 51-64.
- [13] ARUMUGAM P, HAMITI T, GERADA C. Modeling of different winding configurations for fault-tolerant permanent magnet machines to restrain interturn short-circuit current[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2012, 27(2): 351-361.
- [14] 周华伟, 陈钺, 周城. 基于虚拟定子磁链的五相圆筒永磁电机两相开路故障容错直接推力控制[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(20): 6734-6744.
- [15] Jeong, B. J. Hyon, and K. Nam, "Dynamic modeling and control for SPMSMs with internal turn short fault," IEEE Trans. Power Electron., vol. 28, no. 7, pp. 3495–3508, Jul. 2013.
- [16] 黄建, 尹佐生, 王天乙, 等. 基于容错齿磁通的五相永磁电机匝间短路故障诊断[J]. 电工技术学报, 2023, 38(14): 3733-3744.
- [17] 周煜晨, 吕飞, 周奇, 等. 基于小波神经网络算法的同步发电机转子绕组匝间短路故障诊断[J]. 光源与照明, 2024, (01): 107-109.
- [18] Y. Li, Z. Q. Zhu, and A. Thomas, "Generic slot and pole number combinations for novel modular permanent magnet dual 3-phase machines with redundant teeth," IEEE Trans. Energy Convers., vol. 35, no. 3, pp. 1676–1687, Sep. 2020.
- [19] N. J. Baker, D. J. Smith, M. C. Kulan, and S. Turvey, "Design and performance of a segmented stator permanent magnet alternator for aerospace," in Proc. 8th Inst. Eng. Technol. Int. Conf. Power Electron., Mach. Drives, 2016, pp. 1–6.
- [20] P. Arumugam, T. Hamiti, C. Brunson and C. Gerada, "Analysis of Vertical Strip Wound Fault-Tolerant Permanent Magnet Synchronous Machines," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, no. 3, pp. 1158-1168, March 2014.
- [21] R. Wang *et al.*, "Analysis of Short-Circuit Current Automatic Suppression for Toroidal Winding PM Machines," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 39, no. 6, pp. 7510-7524, June 2024.

---

(1) 本案例授权中国专业学位案例中心使用, 中国专业学位案例中心享有复制权、修改权、发表权、发行权、信息网络传播权、改编权、汇编权和翻译权。

(2) 由于企业保密的要求, 在本案例中对有关名称、数据等做了必要的掩饰性处理。

---

(3) 本案例只供课堂讨论使用，并无意暗示或说明某种工程方案（路径）是否有效。

18206109996CPCC