

Abstract

This paper develops partial contents of project ---"The High Speed Highly Effective Explosion-proof Rare Earth Permenet Magnet Machine Research", which is one of the national 863 plans.

Revolved tightly the high speed highly effective increased-safety rare earth permanent magnetic synchronous motor's design, the paper researches thoroughly in the two-pole rotor structure, the electromagnetic field and the key explosion-proof parameter time t_E etc., also completes the design and the performance test experiments of a two-pole increased-safety rare earth permanent magnetic synchronous motor.

This article main research results are given as follows:

1. Based on thoroughly discussing on the rotor structure of rare earth permanent magnetic synchronous motor, a novel two-pole rotor structure has been designed and simulated.
2. By detailedly analysed the caking structure stress of tile shape rare earth permanent magnet of rare earth permanent magnetic direct current motor, a high reliability, good anti-impact performance cementation structure is proposed.
3. The paper takes the skin effect and radiation factors into account and brings forward a set of rotor time theoretical calculation method, Then proposes effective actions for being advantageous in lengthening the time t_E and decreasing the rotor temperature from the design aspect.
4. A high speed highly effective increased-safety rare earth permanent magnetic synchronous motor is designed, and the starting performance is simulated and analysed. Finally, the motor test has been done.

Key word: rare earth permanent magnetic synchronous motor, increased-safety motor, two-pole motor, the time t_E , rotor temperature rise

第一章 绪 论

1.1 论文研究背景、来源及意义

1.1.1 研究背景

在爆炸性危险场所中能够做到严禁使用明火，但却无法限制使用各种电气设备(如电动机、电器、各种灯具、仪表等)，而普通电气设备在正常或故障状态下都难免出现电弧、火花或高温，这些因素在爆炸性危险场所则可能成为爆炸性混合物的引燃源。因此，在这些场所中使用的电气设备都必须具备严格的防爆措施。防爆电机就是一种使用面广、使用频率高的防爆型电气产品。该类电机具有安全防爆措施，能够在具有可燃性气体或腐蚀性气体与空气形成的爆炸性气体混合物等危险性场所安全运行，从而广泛使用于石油、化工、煤炭及冶金等行业。

防爆电机按防爆原理不同，可分为隔爆型、增安型、正压型、无火花型电机和粉尘防爆电机等，其中隔爆型电机和增安型电机是石油、化工等系统中应用最为广泛的两类防爆电机。隔爆型电机是把电机中可能点燃爆炸性气体混合物的部件全部封闭在外壳内，其外壳能够承受通过外壳任何接合面或结构间隙渗透到外壳内部的可燃性混合物在内部爆炸而不损坏，并且不会引起外部由一种、多种气体或蒸气形成的爆炸性环境的点燃。增安型电机则是通过对正常运行条件下不会产生电弧、火花的电机组件采取一些附加措施，以提高安全程度，防止内部和外部部件可能出现危险温度、电弧和火花的可能性的一类防爆电机。隔爆型电机由于自身检修频繁，维修费用高，而且在一些特殊场合不适用（若使用环境中的气体颗粒小于隔爆外壳的最小间隙，则不能可靠防爆），使得此类防爆电机的应用日益减少。相比较而言，增安型电机具有的无需经常维修、安全性能更高以及能够长期可靠安全运行的优点，使其应用场合越来越广泛。

从目前的文献资料知，国内外防爆电机生产厂家生产的防爆型电机多为异

步电机，无刷励磁同步电动机等，并没有将稀土永磁同步电机纳入防爆电机领域。而随着永磁材料的高速发展，稀土永磁同步电动机具有其他类型电机无法比拟的优点：

(1) 明显的高效率和节电效果

稀土永磁同步电动机用永磁体取代电励磁，且无励磁损耗；同步运行时，转子绕组中无感应电流，就没有铜耗，由于定、转子同步，转子铁心中也没有铁耗，因此效率较电励磁同步电机和异步电机高，而且不需要从电网吸取滞后的励磁电流，从而大大节约了无功，极大地提高了电机的功率因数。

(2) 高效率、高密度电机

高性能的稀土永磁材料——钕铁硼永磁体具有很高的磁能积，它的剩余磁感应强度、矫顽力都较大，用较少的钕铁硼永磁体就能产生足够的电机磁能积，因此电机体积、尺寸可以大为减小，成为高效率、高密度电机。

(3) 运行稳定

由于转子上不需要电励磁装置，因此大大简化了转子结构，提高了电机运行的稳定性。有数据表明，稀土永磁同步电动机效率比同容量异步电动机提高3%—12%；并且在体积和最高工作转速与异步电动机相同的情况下，输出功率也高出10%—30%^[2]。

本课题主要是探索研究两极增安型稀土永磁同步电机，该型电机是专门为各防爆行业中的节能应用而设计开发的，工频启动，无需使用变频器，可直接代替普通异步电动机，大大减少了能耗，降低运行成本和维修费用，适用于长期运行的无须调速驱动场合。

1.1.2 课题来源及其研究意义

本课题来源于国家“863”计划（项目编号 2004AA32G082）——高速高效防爆稀土永磁电机研究。

由于增安型防爆电机的高安全性、低维修成本和广泛的应用场合等优点，使得国内各行业对增安型防爆电机的需求量很大，因此加快对增安型防爆电机

的研究是非常必要的。目前国内外增安型电机大多为异步电机、无刷励磁同步电机等，稀土永磁电机应用较少，至今国际上对于增安型稀土永磁同步电机还没有形成统一的标准。

与异步电机、无刷励磁同步电机等相比，稀土永磁同步电机不需外部电源励磁，效率高，是节能电机的发展方向。因此，对于防爆电机应用量大、运行时间长的石油、化工、冶金以及煤炭等行业而言，若以增安型稀土永磁同步电机替代防爆异步电机，将会在增强生产安全性和降低维修费用的同时，节约能源，有效缓解国内的能源紧缺现状。此外，稀土永磁同步电机最适合传统异步电机改造。利用异步电机原来的机座、定子，只需对转子进行永磁同步化改造即可。异步电机同步化是最实惠的方式，既不报废原来的电机，又降低了改造成本，是一举两得的方案，从而可达到节能、降耗的目的。

鉴于石油、化工、纺织和煤炭等行业中风机、泵类多在工频电源（3相 380V、50HZ）下运行，且对配套驱动电机的转速要求较高，而两极稀土永磁同步电动机在工频下转速可达到每分钟 3000 转，用来驱动风机、泵类可直接起动、运行，高效且无需变频驱动，使用方便。因此，研发成功两极增安型稀土永磁同步电动机对于工业生产具有节能降耗、安全可靠的重大意义。

1.2 防爆电机国内外研究现状

1.2.1 国内防爆电机行业发展概况

目前，我国防爆电机产品结构极为不合理，增安型和无火花型产品所占比例与用户部门实际情况相差甚大。因为在各种爆炸危险环境中（主要是石油、石化和化工等工厂环境）危险性较大的 0 区和 1 区场所一般占 20% 左右的比例，而 80% 左右的场所都是危险性相对较小的 2 区场所。根据防爆电机的选型规范要求，2 区场所适合选用增安型或无火花型电机。而我国防爆电机行业生产的防爆电机占总产量 (kW) 95% 以上的是隔爆型电机，增安型电机产量不足 5%，正压型、无火花型和粉尘防爆电机产量极微。国外产品比例分配与国内恰恰相反，增安型和

无火花型电机占防爆电机的80%以上,隔爆型电机所占比例小于20%。在2区场所选用隔爆型电机,无论从经济性,还是使用维护的便利性上权衡都不如增安型或无火花型电机。究其原因,我国增安型电机发展历史短,研究水平低。

现阶段我国防爆电机主导产品仍是相当于国外80年代中期水平的YB系列隔爆型电动机和YA系列增安型电动机,但目前防爆电机产品存在着通用基本系列防爆电机多、专用特殊型电机少、产品标准化水平低、产品可靠性较差等问题。根据目前国内的需求,防爆电机行业具有以下发展趋势:

(1) 防爆类型向多样化发展

目前,我国防爆电机产品中隔爆型防爆电机仍然占80%以上。随着用户部门对增安型产品使用场所、安全性的逐步认识,以及增安型电机与隔爆型电机相比所具有的显著优势——经济、维修方便,必将带动我国增安型电机使用量的增大及技术水平的提高,从而促使我国防爆电机制造行业产品结构向着合理的发展方向发展。

(2) 高效、环保型“绿色防爆电机”将成为新世纪的热点

21世纪人们对生活质量要求愈来愈高,环境保护意识愈来愈强。电动机的振动噪声已成为污染环境的公害。因此,新一轮的防爆电机将以节能、环保为目标,推动相关技术进步,如新型电机绕组设计、低损耗高导磁材料应用研究、通风结构改进、稀土永磁材料应用研究、降低振动噪声技术和质量控制等,以提高效率和降低振动噪声,开发研制出环保型的“绿色防爆电机”。不可否认,稀土永磁同步电机必将成为防爆电机的研究热点。

1.2.2 国外防爆电机发展概况

国外防爆电机种类很多,其先进水平主要体现在电机的整体可靠性高、安全性好、电机效率不断提高、噪声不断降低等方面。

根据近十年来防爆电机的发展情况以及国际市场的发展对防爆电机的要求来看,未来几年内国外防爆电机发展趋势主要向着以下几方面发展:

(1) 大力开发特种、专用防爆电机

进入90年代以来,国外许多著名的防爆电机生产厂看准市场,为用户着想,大力开发专用防爆电机,使防爆电机市场一直呈旺势。目前,许多专用电机已成系列。这些成系列的专用防爆电机除国内已有的双速变极低噪声电机、采煤机、运输机用空冷电机、水冷却电机、正压型电机、制动电机、低温用防爆电机等外,还有国内厂家很少生产的潜水电机,防腐蚀(船用)电机,高速电机等。

(2) 提高制造工艺水平

国外防爆电机制造厂充分吸收普通电机的先进的制造工艺,在铸造、冲压、精加工、绝缘处理等各方面,采用先进的技术与设备,确保加工质量。在生产中较多地采用自动检测技术,保证零部件的质量。

(3) 设计开发高效节能及环保产品

美国从80年代开始开发研制高效节能电机,到90年代大力推广使用高效节能电机。根据通过的能源法,从1997年10月24日开始,进入美国市场的普通电机必须是执行高效标准的节能电机。对于防爆电机,从1999年10月24日开始必须符合高效标准。加拿大的能源法也作出类似的规定,从1999年11月27日开始,进入加拿大市场的防爆电机必须符合高效标准。本世纪,环保型高效节能防爆电机必将取代普通型防爆电机。

1.3 稀土永磁同步电机研究现状

1.3.1 稀土永磁同步电机国内外发展概况

国外利用稀土永磁材料进行稀土永磁同步电动机的开发已经有20多年的历史。1978年,法国的CEM公司研制的ISOSYN系列0.55~18.5千瓦的稀土钴同步电动机,效率比一般的异步电动机高2%~8%,功率因数提高0.05~0.15。

我国在稀土永磁同步电动机的开发和应用上取得重大成就,先后开发了应用于纺织行业中织布机、细纱机以及化纤机械、风机泵类等多种规格和型号的稀土永磁同步电动机,取得了较好的经济效益。800瓦纺织专用稀土永磁同步电

动机是国内第一台研制成功的稀土永磁同步电动机，效率高达 91%，功率因数高于 0.95，节能率高达 10% 以上，已经进行生产并取得了很好的经济效益。而且我国已研制成最大容量为 110 千瓦和 250 千瓦的稀土永磁同步电动机。

根据我国国情，高性能的稀土永磁材料已实现产业化，钕铁硼的产量现已居世界第一位，钕铁硼的价格也趋向合理。计算结果统计资料表明，中小型永磁同步电动机的效率可提高 5%，节电率 10%，某些专用永磁同步电机节电达 15%~20%。所以发展稀土永磁同步电动机是新世纪电机工业技术发展趋势。

1.3.2 稀土永磁同步电机国内外研究热点

磁场磁势计算、合适的仿真计算模型的建立、自启动问题的仿真问题中的算法、精度、非线性的处理等方面一直是稀土永磁同步电动机的研究热点。

目前国内外对稀土永磁同步电机设计研究主要集中在两个方面：

(1) 结构设计研究

稀土永磁同步电动机具有很高的矫顽力，故充磁方向很薄的永磁体就可提供较高的气隙磁密和磁势。因此，除了传统的径向磁路结构外，当极数较少时，还可采用切向磁路结构或混合式结构。国内外学者都在研究稀土永磁同步电动机的各种转子形状，其设计准则都是通过增加磁通、减弱电枢反应或高速运行来提高功率密度和效率。

(2) 优化设计

在稀土永磁材料价格昂贵的情况下，考虑如何合理地选择永磁体的工作点，使之在满足电机性能指标前提下，使所用的永磁材料最少，即电机的成本最小或体积最小。

优化设计采用计算机来完成，优化设计中，通常选择永磁体体积作为目标函数。由于永磁体尺寸大小可直接影响电机的各项性能指标，因而可直接选用永磁体形状尺寸作为设计变量，而将其他尺寸都用这些变量来表示。在约束条件中，电抗参数、定子齿部和轭部磁密、定子电密、起动电流以及槽满率等都应限制在一定范围，而效率、功率因数和起动转矩等则应大于某一给定值。

虽然国内关于稀土永磁同步电动机的研究已经进行了很多工作，但迄今为止，稀土永磁同步电动机在我国并没有得到全方面的推广，其原因是多方面的。其一是稀土永磁同步电动机成本很高，但是随着稀土永磁材料的发展，稀土永磁同步电动机的成本呈下降趋势，同时在稀土永磁同步电动机设计中如何选用适量的稀土永磁体用量以成为学术界研究分析的重点。此外，稀土永磁同步电动机的铁耗相比于异步电动机比较复杂，如何准确分析和计算是设计高效节能稀土永磁同步电动机的关键。同时稀土永磁同步电动机的稳态性能研究和起动过程研究一直以来是国内外专家研究分析的焦点。稀土永磁同步电动机性能直接由参数决定，因而稀土永磁同步电动机的测试方法目前显得越来越重要。

1.4 本文主要研究内容及结构安排

本文的主要研究内容分为七章，其结构安排如下：

第一章叙述本课题的研究背景、意义及来源等内容，并详细阐述该课题的国内外研究现状及发展趋势，为后续的研究奠定基础，指明方向。

第二章主要探讨高速(两极)稀土永磁同步电动机的转子结构，并详细分析了其中典型两极转子结构，开发出一种新颖的两极转子结构；结合稀土永磁直流电动机，提出一种可靠性较高、抗冲击性能良好的粘接结构。

第三章对增安型稀土永磁同步电动机的关键防爆参数 t_E 时间计算进行了深入研究。在考虑集肤效应和散热等影响因素的基础之上，提出稀土永磁同步电动机的 t_E 时间计算方法；对稀土永磁同步电动机转子温升问题进行分析，从电机设计方面总结出有利于延长 t_E 时间、降低转子温升的有效措施。

第四章对开发出的两极转子结构进行电磁场分析，并对本文设计的一台两极增安型稀土永磁同步电动机的起动性能进行仿真分析。仿真结果表明转子结构的磁场分布良好，样机能够顺利起动。

第五章详细阐述了一台30千瓦的两极增安型稀土永磁同步电动机的设计开发。在电机设计指标给定之后，针对电机主要的外形尺寸、定转子冲片及磁钢

尺寸的设计等问题，具体实施了设计计算，最后进行电机的性能计算。

第六章为样机的试验研究。主要阐述实验目的及实验数据处理等过程，并对样机的效率、防爆性能等进行详细分析和总结。

第七章全面概括本文研究工作及取得的研究成果等，并提出对该课题的展望。

第二章 高速稀土永磁同步电动机转子结构和磁钢粘接研究

与电励磁同步电动机相比较而言,稀土永磁同步电动机结构比较简单,运行可靠性高。目前国内外对稀土永磁同步电机设计研究主要集中在结构设计方面,转子结构是稀土永磁同步电机设计的关键和核心。稀土永磁体放置在转子上,为解决起动问题,转子上还设有鼠笼条。稀土永磁同步电动机的高力能指标主要取决于稀土永磁体,起动性能主要取决于鼠笼条。选择合格的转子结构形式,在保证稀土永磁同步电动机起动性能的前提下,提高力能指标,减小稀土永磁体用量,是稀土永磁同步电动机设计的主要任务。

在稀土永磁同步电动机的设计中,两极电机是一个难点。两极电机要具有较高的稳态性能指标就要增加永磁体的用量,而较好的起动性能又要求电机的转子槽不能太浅,这使得永磁体槽与转子槽竞争转子有限空间的问题更为突出;此外,两极结构时电机的聚磁力差。在详细研究稀土永磁同步电动机转子结构的基础上,本章开发出一种结构新颖的、性能良好的两极转子。

在稀土永磁电机加工过程中,内嵌平块式磁钢的粘接对于磁钢与铁芯的加工精度要求不高,成本低,方法简便,可使电机在振动和冲击负荷下可靠地工作。而对于稀土永磁电机中常见的瓦片形磁钢结构,虽然容易放置,但是磁钢加工难度大,工艺较复杂,粘接结构稍有变形,就会严重影响电机的性能。本章对瓦片形磁钢在稀土永磁直流电机上的粘接状况进行了探讨,并用分析软件对常见的粘结结构进行应力分析,进而提出一种可靠性较高、抗冲击性能良好的粘接结构。

2.1 稀土永磁同步电动机的基本原理

稀土永磁同步电动机的运行原理同电励磁同步电机,不同之处在于它以永磁体提供磁通,而后者是以电流产生磁通。稀土永磁同步电动机定子为三相对称绕组,与三相异步电动机、电励磁同步电机相同,转子上粘有稀土永磁(目前

多为钕铁硼材料)磁钢。

初始状态下,转子上已充磁的永磁磁钢在电机中形成静止的磁场,当定子绕组中通入三相正弦波电压时,在定子三相绕组中产生对称三相正弦波电流,从而在气隙中产生圆形旋转磁场。

圆形旋转磁场的角速度:

$$\omega_1 = \frac{2\pi f}{p} \quad (2-1)$$

式中: f ——输入电源频率

p ——电机极对数

动态的圆形旋转磁场与静态的转子磁场作用,带动转子磁场与定子上的圆形旋转磁场同步旋转,并力图使定、转子磁场轴线对齐,从而进入同步运行。当外加负载转矩时,转子磁场轴线将落后定子磁场轴线一个功率角 θ ,负载愈大, θ 也愈大,直到一个极限角度 θ_m ,电动机失步为止。

可见,同步电动机在运行中,要么转速与频率严格成比例旋转,否则就失步停转。所以,它的转速与旋转磁场同步,静态误差为零;在负载扰动下,只是功率角 θ 变化,而不引起转速变化,响应时间是实时的。

2.2 稀土永磁同步电动机转子结构研究

根据稀土永磁体在转子中放置的位置不同,稀土永磁同步电动机的转子可分为表面式和内置式结构^[42]。

2.2.1 表面式转子磁路结构

表面式转子磁路结构具有外凸式和内嵌式两种,如图 2-1、2-2 所示,其中 1 是转子铁芯,2 是转轴,3 是永磁体。这种结构中,永磁体通常是瓦片形,永磁体的磁通方向是径向,永磁体表面与定子铁芯内圆之间一般套有一个起保护作用的非磁性圆筒。

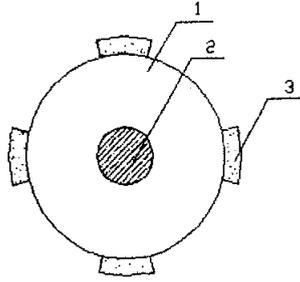


图 2-1 外凸式转子结构

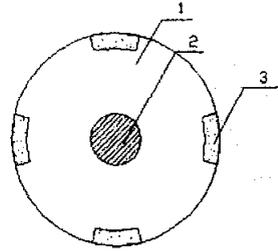


图 2-2 内嵌式转子结构

2.2.2 内置式转子磁路结构

根据稀土永磁体在转子内部放置的方向不同，稀土永磁同步电动机的转子结构可分为径向式、切向式和混合式。

径向式结构是指稀土永磁体产生的磁通方向是沿转子圆的半径方向，优点是漏磁系数小，无需隔磁措施，转子冲片的机械强度高，但非整体性的结构导致加工难度增加，结构强度差。图 2-3（图中 1 是鼠笼条，2 是转轴，3 是永磁体，4 是非磁性材料，5 是转子铁芯，6 是隔磁槽，以下同。）中 a、b 均为切向式结构。a 是美国的专利，b 的 V 形结构最早见于英国某产品中，该结构有效的利用了转子空间。

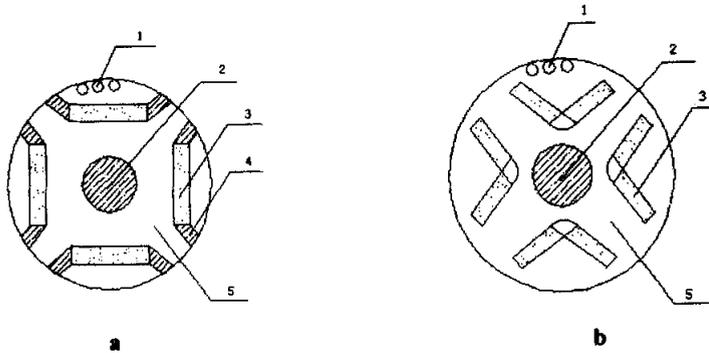


图 2-3 内置径向式结构

切向式结构是指稀土永磁体产生的磁通方向是沿转子圆周的切线方向，这种结构的漏磁系数较大，并需采取隔磁措施，优点是一个极距下的磁通有相邻

的两个磁极并联提供，可有更大的每极磁通，尤其当电动机极数较多、径向结构不能提供足够的每极磁通时，该结构的优势更为突出。图 2-4 是四种不同的切向结构，其中 a 是一种典型的 4 极切向式结构，永磁体内侧采用非磁性套筒或非磁性转轴；b、c 的转子结构利用空气隙隔磁，省去了 a 中的隔磁套，转子冲片具有整体性，当励磁不足时还可在隔磁槽中放置永磁体来增加励磁。

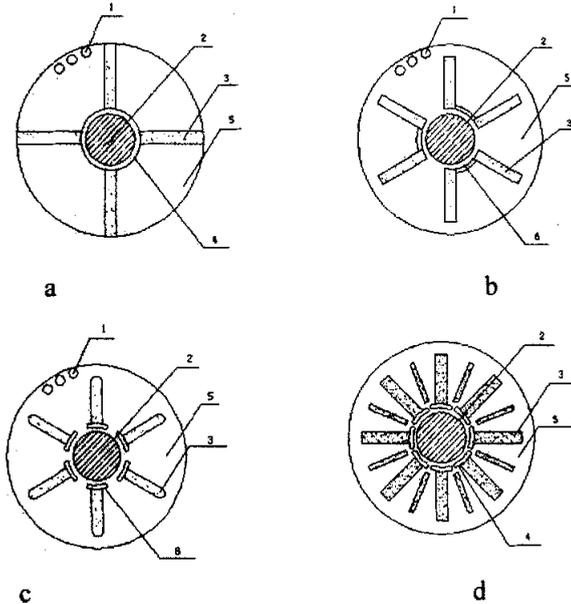


图 2-4 内置切向式结构

混合式结构集中上述两种结构的优点，但工艺复杂，成本高。图 2-5 是德国西门子公司专利，主要用于剩磁密度较低的铁氧体永磁同步电动机。随着永磁材料的高速发展，这种结构已失去其优势。

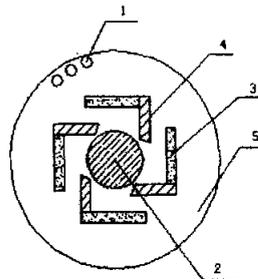


图 2-5 内置混合式结构

在相同的条件下,三种内置式转子磁路结构中电机直轴同步电抗 X_d 相差不大,但交轴同步电抗 X_q 却相差很大,其中切向式的 X_q 最大,径向式次之。较大的 X_q 和凸极率可以提高电动机的牵入同步能力、磁阻转矩和电动机的过载倍数等,但会使电机起动过程中振动和噪声变大,起动时间延长。因此,设计高过载倍数的电动机时可以利用大凸极率所产生的磁阻转矩,而设计高起动性能的电动机时则应设法降低磁阻转矩。

2.3 高速(两极)稀土永磁同步电动机的转子结构研究

由式 $n = \frac{60f}{p}$ 可知,当频率 f 一定时,极对数 $p=1$ 时电机转速 n 最大。而

两极稀土永磁同步电动机转子结构中,极距最大,永磁体所需空间也最大,这造成永磁体槽与转子槽放置空间上竞争的问题。此外两极电机转速高,对转子结构强度的要求也比较高。这些问题导致两极稀土永磁同步电机的设计成为异步起动稀土永磁同步电机设计中的难点。

2.3.1 两极稀土永磁同步电机转子结构

两极稀土永磁同步电机的转子结构形式多种多样,各有优缺点。传统的两极结构形式是瓦片形磁钢,永磁体容易放置,但是加工难度大,工艺较复杂。而矩形磁钢易加工,且具有较大的放置空间,又可降低成本,所以目前稀土永磁同步电机大多采用多段矩形磁钢替代瓦片形磁钢。但是对于多段矩形永磁体组合的径向结构,其段数越多,每段的永磁体宽度就越小,在加工和安放时永磁体越易损坏。

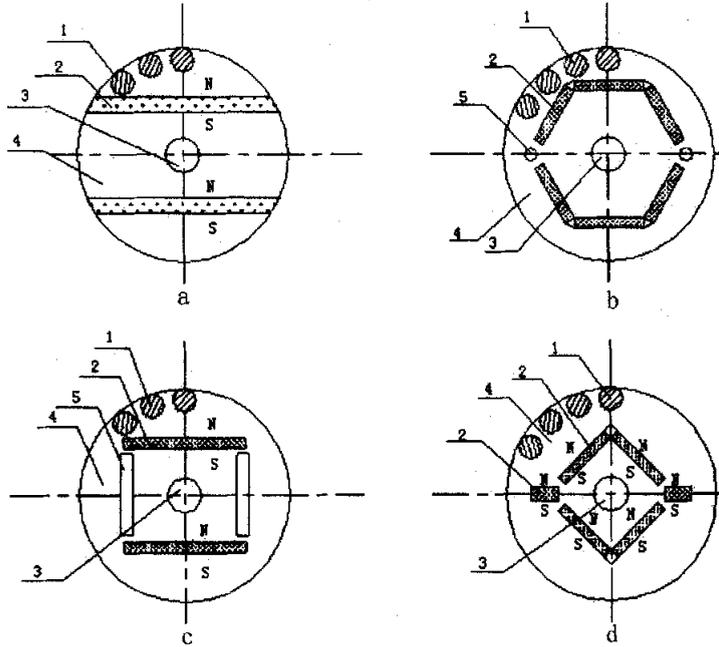


图 2.6 四种稀土永磁同步电机的两极转子结构

图 2-6 中所示的四种两极转子结构（图中，1 为鼠笼条，2 为磁钢，3 是转轴，4 是转子铁心）中，图 a 是法国 Issoy 公司的两极结构，磁钢形状简单，鼠笼条作用明显，缺点是转子冲片被磁钢分为三块，所以在制造加工方面工艺操作复杂，成本高；图 b 是用平板状磁钢代替传统的瓦片状结构，结构较为简单，加工容易，但相比瓦片形磁钢漏磁增加；图 c 在交轴方向开有隔磁槽，可以减小 X_q/X_d 值，有助于改善电机的起动性能；图 d 结构在交轴方向填入径向磁钢，大大减小了漏磁，但永磁体用量增加很多，使电机造价上升。

2.3.2 稀土永磁同步电机转子槽形研究

稀土永磁同步电机的起动性能一般来讲比异步电机的差，其鼠笼条仅在起动过程起作用。为简化，鼠笼条都取为对称均布，且由于其起动作用，转子槽

形多选取挤流效应较强的双笼、深槽或凸形槽。对小型稀土永磁同步电机来说，因其转子空间有限，槽形多选取圆形、梨形或梯形槽等。此外闭口槽可减小齿槽效应和杂散损耗，而对电机的功率因数影响不大，因此闭口槽在稀土永磁同步电机中应用广泛。

设计中转子槽形应设计的浅一些，可为磁钢的放置留出的足够空间，但从提高电机的牵入性能方面而言，在转子轭部磁密不过饱和且结构强度满足的情况下，应尽量增加转子槽的宽度，以减小电阻，同时端环截面积也应尽可能的增大。

2.3.3 一种新颖的两极转子结构

基于上述对两极稀土永磁同步电动机转子结构的研究分析，本文提出一种两极结构，如图 2-7 所示。该结构综合了图 2-6 中 b、d 各自的优点。其中主磁钢、副磁钢和隔磁槽磁钢均为矩形，转子槽为口半梨形槽。主磁钢和副磁钢产生磁通，隔磁槽中的磁钢可以有效减少漏磁。这种结构磁场分布良好，具有结构简单、漏磁小、易起动等特点。

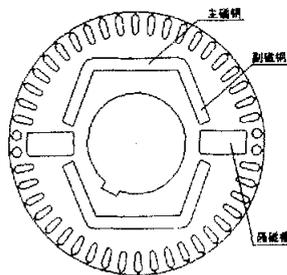


图 2-7 一种新的转子结构

2.4 瓦片形磁钢粘接技术研究

在稀土永磁同步电机制造过程中，瓦片形磁钢是在转子铁芯中粘接的，因此对于瓦片形磁钢与转子铁芯中瓦形槽的加工精度要求不高，成本低，粘接工

艺简便,胶接处的应力分布较为均匀,从而可使电机在振动和冲击负荷下可靠地工作。而对于稀土永磁直流电机,瓦片形磁钢是在其外壳内壁粘接的,磁钢与外壳的定位与固定完全依靠胶粘剂的粘接作用,没有其它辅助定位和固定结构;同时在稀土永磁直流电机受冲击过程中,不同的粘接结构应力集中点位置不同,应力与应变大小各异,对电机的可靠性影响程度不同。瓦片形磁钢和外壳的结构尺寸、粘接过程中所施加的夹紧力大小、力作用点的位置不同均严重影响粘接质量。所以,本章针对瓦片形磁钢在稀土永磁直流电机上的粘接结构进行了分析研究。

2.4.1 两种典型粘接结构分析

磁钢性脆,在受冲击时,需要胶层吸收一部分能量,避免磁钢破裂,因此要求胶层有一定厚度,并具有韧性,能起到缓冲作用。理想情况下,导磁外壳(一般为45#钢)内径尺寸为 R ,磁钢外径尺寸为 r ,则胶层厚度为:

$$\delta = R - r \quad (2-2)$$

理想的粘接状态如图 2-8 所示,可见磁钢与外壳之间胶粘剂的厚度均匀。

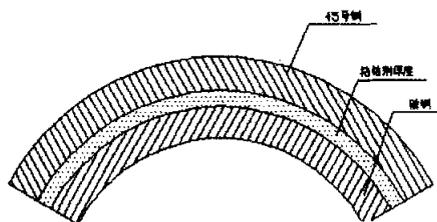


图 2-8 理想的粘接结构

一般情况下,工程上常用的公差是:外壳内径尺寸为 R_0^+a ,磁钢外径尺寸为 r_0^-b (其中 a, b 是加工误差),则胶层最大、最小厚度分别为:

$$\delta_{\max} = R + a - r + b \quad (2-3)$$

$$\delta_{\min} = R - r \quad (2-4)$$

磁钢与外壳常会粘接成图 2-9 所示结构,磁钢中部与外壳之间胶层非常薄,甚至会直接接触,此时磁钢两端部处胶层比中间厚很多。

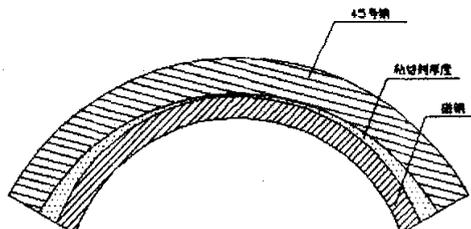


图 2-9 常见的粘接结构

在对某稀土永磁直流电机的设计过程中,作者提出不同于传统的公差:外壳内径尺寸为 R_a^0 ,磁钢外径尺寸为 r_0^{+b} ,则胶层最大、最小厚度分别为:

$$\delta_{\max} = R - r \quad (2-5)$$

$$\delta_{\min} = R - a - r - b \quad (2-6)$$

实际过程中形成的粘接结构如图 2-10,胶层最厚处产生在中间,而磁钢边缘处只需很少胶粘剂就能填满。

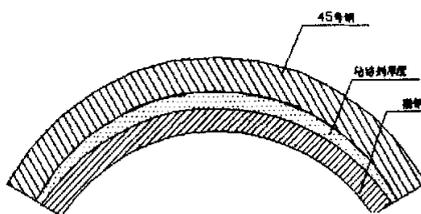


图 2-10 改进的粘接结构

2.4.2 应力分布分析

以作者设计的某稀土永磁直流电机的磁钢质量,取冲击加速度为 40g,根据式 $F = m \cdot (40g)$ 计算冲击力,对磁钢施加垂直向下的冲击力,力的作用点位于磁钢正上方,对上述三种粘接结构进行应力分析。

对于图 2-8 的理想粘接结构, 经分析知, 当磁钢受到冲击力时, 磁钢顶部略有变形, 图 2-11 的应力分析图放大了此变形效果, 下凹较明显。图 2-12 是理想结构时应力分布示意图 (其中 x 轴为磁钢弧度, A、B 是磁钢的两端点; y 轴是当磁钢顶部上施加 1 个单位力时, 磁钢上层面各处受到的单位应力, 下同。)。可见应力分布较均匀, 应力最大点分布于磁钢的顶部及两端部, 仅为 1.3 个单位应力。因此具有该结构的电机受到冲击力时, 均匀胶层的弹性会缓冲部分应力, 磁钢所受冲击应力小, 抗振动和冲击能力很强, 电机可靠性高。

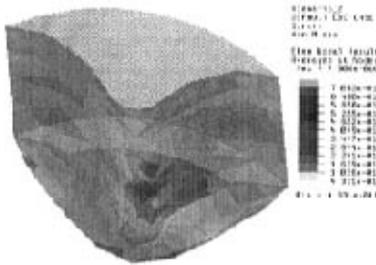


图 2-11 理想结构时应力分析图

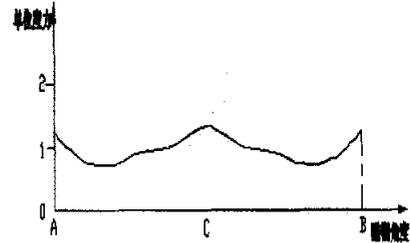


图 2-12 理想结构时应力分布示意图

对于图 2-9 的常见粘接结构, 经分析知, 最大变形发生在磁钢顶部, 由图 2-13 的应力分布图可见顶部下凹现象非常明显。图 2-14 是常见结构的应力分布示意图, 可见磁钢两端所受冲击力很小, 最大应力集中点在磁钢顶部, 为 2-13 个单位应力。此时当电机受到冲击力时, 两端部厚厚的胶层使得磁钢所受冲击力小, 而磁钢顶部稀薄的胶层很容易剥离, 磁钢顶部易与瓦形钢片直接相撞而造成磁钢碎裂, 可靠性非常差。



图 2-13 常见结构应力分析图

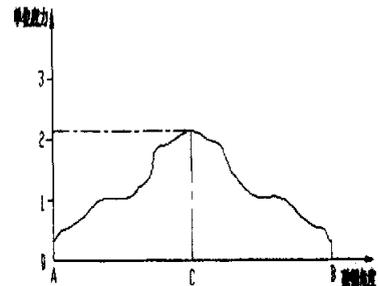


图 2-14 常见结构应力分布示意图

对于图 2-10 的改进结构, 经分析知, 磁钢两端部稍有变形, 由图 2-15 的应力分析图可看出顶部几乎没有变形, 这主要是因为顶部厚厚的胶层具有很大的弹性, 缓冲了大部分冲击力。图 2-16 为改进结构的应力分布示意图, 可见最大应力集中点分布在磁钢两端部, 仅为 1.54 个单位应力。

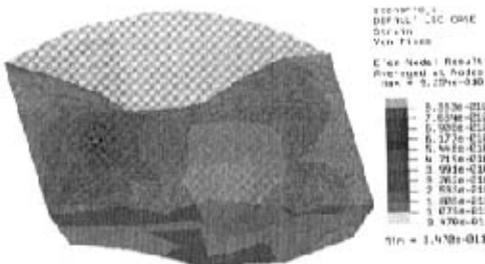


图 2-15 改进结构应力分析图

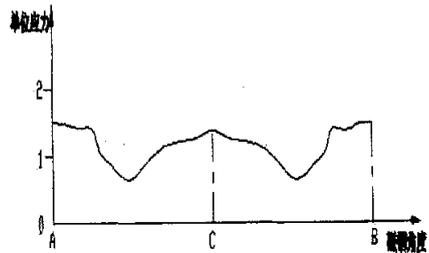


图 2-16 改进结构的应力分布示意图

这种粘接结构下, 当电机受到冲击力时, 磁钢中间部分由于胶层的存在没有被撞击至破裂的危险, 而两端较薄胶层处的磁钢受冲击力影响不大。可见, 仅对磁钢和外壳的公差尺寸进行很小改动, 就可大大改进粘接质量。

2.4.3 分析结果、应用实例及改善粘接质量的措施

电机在受冲击力时, 在理想结构下, 磁钢上应力小且分布均匀, 抗冲击性好; 当如图 2-9 的粘接结构时, 磁钢顶部所受应力最大, 最容易与外壳直接碰撞而破裂。粘接结构如图 2-10 时, 磁钢上应力较小, 分布较均匀, 可靠性高。

在所设计的某稀土永磁直流电机中, 磁钢与外壳的粘接结构起初如图 2-9 所示, 在做冲击试验时, 磁钢有掉片、断裂现象发生, 后经研究, 改变磁钢与外壳的加工公差, 为图 2-10 的粘接结构, 通过了冲击试验, 证实了图 2-10 的粘接结构能够有效改善电机运行的可靠性。

在对瓦片形磁钢粘接研究中, 本文总结出一些改进磁钢粘接质量的措施:

- (1) 结构尺寸: 应确保磁钢和外壳的结构尺寸, 建议采取外壳内径负公差,

磁钢外径正公差；

(2) 夹具设计：用于定位和夹紧磁钢的夹具，应确保所施加的夹紧力与外壳内壁表面保持垂直，尽量避免其它方向的分力，以免磁钢与外壳胶接过程中产生相对滑动或形成间隙，造成尺寸偏差；

(3) 夹紧力：夹紧力大小要恰当，因为夹紧力过大，易造成外壳变形、磁钢脆裂，过小会造成粘接层贴合不好，引起粘接面减少、内径尺寸不合格、固化过程中磁钢滑移等问题；

(4) 胶粘剂：选择好的胶粘剂对于提高粘接质量至关重要。目前国内外胶粘剂生产厂家开发的优良性能的胶粘剂种类非常多，可根据电机运行性能要求，选用合适的胶粘剂。

2.5 小结

本章在论述稀土永磁同步电机工作原理的基础上，探讨了稀土永磁同步电机转子结构，特别是对高速（两极）的稀土永磁同步电机转子结构进行了深入研究。在对多种两极转子结构进行了分析比较之后，开发出一种性能良好的两极转子结构。同时，对瓦片形磁钢在稀土永磁直流电机中的粘接结构进行应力分析，进而提出一种更为有效的粘接结构。分析结果表明，该粘接结构抗冲击性能较强，可靠性高，并在一台稀土永磁直流电动机上得到了验证。最后，作者根据实践经验，总结出提高瓦片形磁钢粘接质量的措施，对于瓦片形磁钢的粘接工艺发展具有一定的促进作用。

第三章 增安型稀土永磁同步电动机 t_E 时间及转子温升研究

t_E 时间和起动电流比 I_{st}/I_N 是增安型电动机的重要防爆性能参数,直接决定着电机防爆性能的合格与否。按照防爆电气设备标准 GB3836.3 规定:75kW 及以下的鼠笼型转子电动机应进行实测 t_E 时间和起动电流比 I_{st}/I_N 。由于电动机容量越来越大(几百千瓦以至几千千瓦),电压等级也高(6千伏至1万伏),用实测办法确定 t_E 时间太困难,只有寻求计算方法来确定 t_E 值。因为只有当电机过热保护装置动作时间小于电机的 t_E 时间,才能保证增安型电动机在爆炸性气体环境中经济可靠地应用。因此,增安型电机的 t_E 时间计算的准确性十分关键。

增安型异步电动机的 t_E 时间计算已有研究成果^[10],并得到普遍应用。增安型无刷励磁同步电动机的 t_E 时间计算在文献[11]的附录B中也给出了详细的计算公式。目前增安型稀土永磁同步电动机的 t_E 时间计算尚未有人提及。

稀土永磁同步电动机在正常运行时,理论上转子无基波损耗,转子温升应该较低,但在实际中由于磁钢涡流损耗和谐波损耗等不可避免的问题引起转子发热,温升增大。针对作者研制的一台稀土永磁同步电动机在试验时出现转子温升过大现象,本章从转子结构设计、槽配合以及稀土永磁材料等多方位进行了分析,提出降低转子温升的解决方法。最后通过实验得知,磁钢的涡流损耗对转子温升影响很大。

3.1 增安型稀土永磁同步电动机 t_E 时间研究

t_E 时间计算是对电机的定子和转子分别进行,并取两个计算值中的较小值做为该电机对应于相应温度组别的 t_E 时间。定子表面 t_E 时间是指在最高环境温度下达到额定运行稳定温升后的电动机定子绕组,从开始通入最初起动电流时计起直至上升到极限温度的时间。转子表面 t_E 时间是指电动机在最高环境温度下达到额定运行稳定温升后,从转子堵转开始计时,直至转子表面温度点的温

度上升到爆炸性危险物允许的极限温度所需要的时间。电机的极限温度是指电机所允许的最高温度，它由爆炸性气体混合物被点燃的危险温度及结构材料的热稳定性等因素决定。由于稀土永磁同步电动机损耗较小，功率因数高，与异步电机相比，定子电流小很多，因此增安型稀土永磁同步电动机定子表面 t_E 时间更容易满足要求，通常只考虑转子表面 t_E 时间。

由上述分析知，对于增安型稀土永磁同步电动机的 t_E 时间只需计及转子表面 t_E 时间。稀土永磁同步电动机和异步电动机的转子结构有很大差别。稀土永磁同步电动机本身无自启动能力，采用鼠笼条异步起动，同步运行，亦即鼠笼条仅在起动过程中有电流流过。由于转子结构的特殊性，使鼠笼条的设计在空间上受到较大限制；而且由于转子结构和永磁体的影响，稀土永磁同步电动机的起动电流倍数比异步电机大。因此，稀土永磁同步电动机转子 t_E 时间的计算与异步电动机相比，有很大差异。

稀土永磁同步电动机的转子只有鼠笼条和端环发热，而且两者上的电流密度不同，发热损耗不同。此外，由于端环距转子铁芯较远，在较短的时间内两者很难达到温度平衡，因此不能将它们作为等温体来计算，需分别计算鼠笼条 t_E 时间 t_{EB} 和端环 t_E 时间 t_{EK} 。电机转子堵转时的温升，可根据焦耳-楞次效应来进行计算，并应考虑鼠笼条和端环内产生的热量、鼠笼的热容量、集肤效应等对鼠笼条内的热量分布的影响以及转子铁芯和永磁体的热传导等实际影响因素。

考虑到集肤效应和散热因素的影响，本章完善了稀土永磁同步电动机 t_E 时间的理论计算，并对比了一台增安型稀土永磁同步电动机——RSMAG250-6的 t_E 时间理论计算和试验结果。

3.1.1 忽略散热和集肤效应时的 t_E 时间计算

当稀土永磁同步电动机额定运行到稳定温升时，堵转转子，此时转差率 $s=1$ ，角速度 $\omega=0$ ，转子没有功率输出，全部转变为转子发热。因此，在转子鼠笼和铁芯中产生的总损耗 P_{I2} 为：

$$P_{i2} = T_{st}^* \cdot P_N \quad (3-1)$$

式中:

T_{st}^* ——电动机的堵转转矩倍数;

P_N ——电动机的额定功率, kW。

堵转 t 秒后, 鼠笼条和端环的总发热量 W 为:

$$W = P_{i2} \times t \quad (3-2)$$

此时鼠笼条和端环的温升 $\Delta\theta_B$ 和 $\Delta\theta_K$ 分别为:

$$\Delta\theta_B = \frac{W}{C_B \cdot M_B} \cdot \frac{R_B}{R_B + R_K} \quad (3-3)$$

$$\Delta\theta_K = \frac{W}{C_K \cdot M_K} \cdot \frac{R_K}{R_B + R_K} \quad (3-4)$$

式中:

W ——发热量, kJ;

$\Delta\theta_B$ ——鼠笼条的温升, K;

$\Delta\theta_K$ ——端环的温升, K;

C_B ——鼠笼条材料的比热容, kJ/kg·K;

C_K ——端环材料的比热容, kJ/kg·K;

M_B ——鼠笼条总质量, kg;

M_K ——端环总质量, kg;

R_B ——鼠笼条电阻计算常数, Ω ;

R_K ——端环的电阻计算常数, Ω 。

在式(3-2)、(3-3)和(3-4)中, $\Delta\theta_B$ 和 $\Delta\theta_K$ 取 t_E 时间内允许温升 θ_2 , t 分别为鼠笼的 t_E 时间 t_{EB} 、端环的 t_E 时间 t_{EK} 。代入式(3-2)、(3-3)和(3-4)得:

$$t_{EB} = \frac{\theta_2 \cdot M_B \cdot C_B}{P_{I2}} \cdot \left(1 + \frac{R_K}{R_B}\right) \quad (3-5)$$

$$t_{EK} = \frac{\theta_2 \cdot M_K \cdot C_K}{P_{I2}} \cdot \left(1 + \frac{R_B}{R_K}\right) \quad (3-6)$$

3.1.2 考虑散热和集肤效应时的 t_E 时间计算

现有的许多文献提出的 t_E 时间计算公式主要是针对异步电动机或无刷励磁同步电动机提出的,而且是在绝热状态下推导出来的。针对稀土永磁同步电动机与众不同的转子结构,本章提出了计算转子 t_E 时间的公式,并考虑到了实际情况的影响。

在影响因素中,最明显的是散热和集肤效应。散热使发热体产生的热量被铁芯和介质等吸收掉一部分,温度上升速率趋缓, t_E 值延长;而集肤效应使发热导体(或导体的一部分)温度上升速率加快, t_E 值缩短。由于稀土永磁同步电动机的转子上分布有永磁体,受空间的制约,鼠笼条槽形多采用圆形槽、梨形槽或梯形槽等,槽一般不深,因此在稀土永磁同步电动机中集肤效应对转子 t_E 时间的影响作用不及在异步电动机中显著。因此,在稀土永磁同步电动机中集肤效应对 t_E 时间的影响作用不及散热,两者产生的效果不能抵消。所以要更准确地计算 t_E 时间,就应该同时考虑散热因素和集肤效应对电机 t_E 时间的影响。

散热系数 b_2 ^[5]:

$$b_2 = \Delta\theta_i / \Delta\theta_0 \quad (3-7)$$

式中:

$\Delta\theta_i$ ——转子堵转时,散热状态下任意时刻的温升, K;

$\Delta\theta_0$ ——转子堵转时,绝热状态下任意时刻的温升, K。

则此时鼠笼条和端环的总发热量 W_1 为:

$$W_1 = W \cdot b_2 \quad (3-8)$$

将鼠笼条的散热系数 b_{2B} 和端环的散热系数 b_{2K} 代入式(3-5)、(3-6)和(3-7)

中得:

$$t_{EB} = \frac{\theta_2 \cdot M_B \cdot C_B}{P_{t2} \cdot b_{2B}} \cdot \left(1 + \frac{R_K}{R_B}\right) \quad (3-9)$$

$$t_{EK} = \frac{\theta_2 \cdot M_K \cdot C_K}{P_{t2} \cdot b_{2K}} \cdot \left(1 + \frac{R_B}{R_K}\right) \quad (3-10)$$

集肤效应系数 S_w ^[6]是指在交变频率下引起电阻增大值 R_2 与鼠笼条本身固有电阻值 R_0 之比。 S_w 是在交变频率下才会出现的物理参数,是频率的函数。在电动机堵转时,鼠笼条中的电流频率等于电网频率,而电网频率是不变的。因此,集肤效应亦不会变化,即 S_w 恒定。考虑鼠笼条的集肤效应后代入式(3-9)得:

$$t_{EB} = \frac{\theta_2 \cdot C_B \cdot (M_B/S_w)}{P_{t2} \cdot b_{2B} \cdot S_w} \cdot \left(1 + \frac{R_K}{R_B}\right) \quad (3-11)$$

式中:

M_B/S_w ——考虑集肤效应时鼠笼条的重量。

增安型稀土永磁同步电动机 t_E 时间选取 t_{EB} 和 t_{EK} 中的最小值。

3.2 t_E 时间计算方法验证

对一台增安型稀土永磁同步电动机RSMAG250-6做了 t_E 时间测定试验,转子堵转时转子表面温度升高过程曲线见图3-1。

RSMAG250-6主要的技术指标见表3-1。根据电机设计参数进行 t_E 时间的理论计算,计算所需参数见表3-2,转子鼠笼条槽形尺寸如图3-2,鼠笼条和端环材料均为铸铝。取 t_E 时间内转子允许温升 $\theta_2 = 85K$ 。

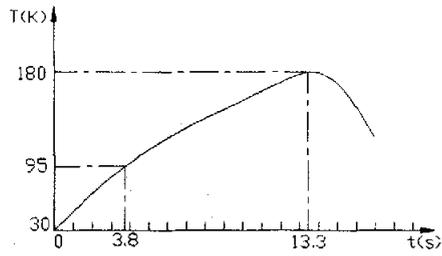


图 3-1 转子堵转试验温升图

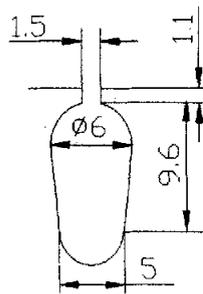


图 3-2 鼠笼条槽形尺寸图

表 3-1 RSMAg250-6 主要技术指标

电机型号 技术指标	RSMAg250-6 试验数据
额定功率 P_N (kW)	37
额定电压 U_N (V)	380
效率 η	0.94
功率因数 $\cos\varphi$	0.95
起动电流倍数 I_{st}^*	8
起动转矩倍数 T_{st}^*	2.67
转子 t_E 时间 (s)	9.5

表 3-2 RSMag250-6 转子 t_E 时间计算参数

参数名称	电机型号 RSMag250-6
铸铝电阻率 $\rho(\Omega \cdot m)$	0.434e-7
铸铝比热 $C_p(kcal/kg \cdot K)$	0.216
铸铝比热容 $C(kJ/kg \cdot K)$	0.92
鼠笼条总质量 $M_B(kg)$	7.265
端环总质量 $M_K(kg)$	1.074
每极鼠笼条数 Z_2	9.67
鼠笼条长度 $l_B(m)$	0.24
鼠笼条截面积 $S_B(m^2)$	0.7675e-4
端环的平均直径 $D_K(m)$	0.228
端环的截面积 $S_K(m^2)$	0.75e-3
鼠笼条总散热面积 $S_{SB}(m^2)$	0.5356
端环总散热面积 $S_{SK}(m^2)$	0.6283e-2

根据上述数据计算得出：

$P_{I2} = 99.16kW$; $R_B = 0.140 \times 10^{-4} \Omega$, $R_K = 0.126 \times 10^{-5} \Omega$, $K_w = 1.15$ 。
 $t = 5 \sim 15s$ 时^[2] , $b_{2B} = 0.736 \sim 0.440$, $b_{2K} = 0.977 \sim 0.929$, 取 $b_{2B} = 0.5$,
 $b_{2K} = 0.93$ 。代入式 (3-10)、(3-11) 得: $t_{EK} = 11.03s$, $t_{EB} = 9.44s$ 。则转子表面 t_E 时间为: $t_E = 9.44s$ 。

由表 3-3 可见, 不考虑散热和集肤效应时计算值与试验值相比误差很大, 而计及散热和集肤效应后, 计算值与试验值很接近。

表 3-3 RSMAG250-6 转子 t_E 时间

试验值	理论计算值	
	不考虑影响因素	考虑散热、集肤效应
9.5s	6.24s	9.44s

由上可知，在考虑了集肤效应和散热因素等对增安型稀土永磁同步电动机的关键防爆参数 t_E 时间的影响作用，并对 RSMAG250-6 的 t_E 时间进行计算，计算值比试验值小 1.68%，证实该计算是非常有效的，对增安型稀土永磁同步电动机的 t_E 时间测定试验具有很好的参考价值。在增安型稀土永磁同步电动机设计过程中可根据设计参数计算 t_E 时间，从而做出相应的调整，这非常有利于缩短电机设计周期。

3.3 两极增安型稀土永磁同步电动机起动转矩与 t_E 时间关系

由式 (3-1)、(3-11) 知，增安型电机的 t_E 时间与起动转矩成反比。因此，起动转矩的设计，尤其是两极电机的起动转矩是决定 t_E 时间是否合格的重要条件之一。增安型稀土永磁同步电动机转子采用铸铝或铜导线作鼠笼形转子绕组时的集肤效应必须考虑，特别是在深槽、刀形槽、瓶形槽、双笼槽作转子绕组时更不容忽视。对于两极电机来说，起动转矩的实测值往往是设计值的 3 倍左右，造成两极增安型电机的 t_E 时间很难合格。通过放大转子导条面积、减小挤流效应或增加定子绕组匝数，可降低电机堵转时的发热量即降低电机堵转时的功率，相应降低了电机的起动转矩倍数。起动转矩倍数的降低势必导致电机的最小转矩倍数的降低，但最小不得小于 1.0 倍，以保证电机使用时的顺利起动。

此外，起动电流比 I_s/I_N 如果过大，则电机转子发热严重且对电网冲击较大；如果过小，则按照防爆规程要求 t_E 时间相应延长，同样增加了 t_E 时间合格的难度。一般地在电磁方案计算时，将起动电流比定在 6~7 倍，然后进行调整

转子槽形较为合适。

3.4 稀土永磁同步电动机转子温升过高研究

稀土永磁同步电动机在正常运转时，理论上转子无基波损耗，转子温升应该较低。但在研究过程中，作者多次发现其转子温升高，其中图 3-3 所示是在电机堵转试验中发生的现象，可见由于转子温升过高，已经引起了转子端环部位烧毁、变黑。以作者研制的一台增安型稀土永磁同步电机为例，在做试验时出现转子温升过大现象。定、转子温升试验数据见表 3-4。

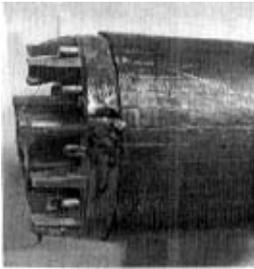


图 3-3 电机转子温升过高

转子温度过高，会对钕铁硼永磁体造成去磁的危险，从而影响电机正常工作，而且绕组绝缘有可能因发热而损坏，更严重的是，一定的高温会引起周围爆炸性混合物的燃烧爆炸。本章分析了可能导致转子温升过大的原因，从而提出了降低温升的措施。

表 3-4 样机温升试验数据

	温度	温升
定子铁芯	80℃	50.9℃
转子铁芯	154℃	124.9℃

3.4.1 分析原因及解决方法

(1) 转子温升大的原因分析

电机运行时的发热，均来自于电机的损耗。REPMSM 同步运行时，具体来说，转子上损耗包括磁钢损耗、谐波损耗等。

1) 磁钢损耗

钕铁硼的电阻率是 $1.44 \times 10^{-6} \Omega \cdot m$ ，具有一定的导电性，会在交变磁场中产生涡流损耗。钕铁硼的导热率 $7.7 \text{ cal/m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$ ，传热性差。钕铁硼磁铁容易生

锈、氧化，使磁钢上的热量更难以向外传导，加剧了转子上的温升。

2) 谐波损耗

受齿槽效应、定子磁场等因素影响，电机气隙中的谐波磁场很复杂。气隙中的谐波磁场以不同的速度相对转子运动，在转子铁芯和鼠笼条中感应电流，从而产生谐波损耗，使转子温度升高。

(2) 解决方法

由上述分析，提出相应解决方法如下：

1) 磁钢分段、分层

磁钢的放置不再是整段材料，而是将一大段磁钢分为多个小段或多个层，见图 3-4、3-5，并磁钢段（层）表面进行电泳处理，以减小磁钢的涡流损耗，降低转子温升。这种方法的缺陷是分段或分层后磁钢易碎，并且不易放置。

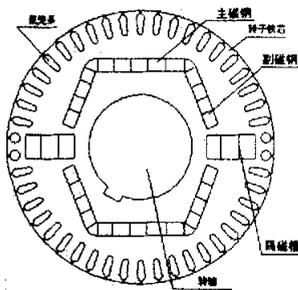


图 3-4 磁钢分段示意图

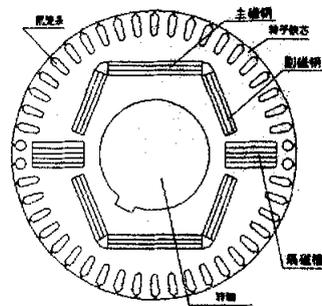


图 3-5 磁钢分层示意图

2) 增大气隙

对于异步电机，增大气隙会增大漏磁，使励磁电流增大，效率降低，而对于稀土永磁同步电机，加大气隙，则可增大高次谐波气隙磁场磁阻和谐波漏抗，减少其磁链的交链程度，削弱谐波电流，降低定转子表面损耗和谐波损耗等，从而起到降低温升的作用。

3) 转子采用半闭口槽或闭口槽

转子采用半闭口槽或闭口槽可以减少转子铁芯表面损耗和齿内脉振损耗，并使有效气隙长度减小，改善功率因数，同时降低气隙磁导谐波的脉振幅值，减小磁导谐波引起的谐波损耗。

4) 选取适当的槽配合

谐波次数越低，转子槽数越多，损耗就越大；定、转子槽数比接近于1时，损耗最小。因此，尽可能选取近槽配合。

5) 定子绕组双层短距分布绕组

双层短距分布绕组根据需要选择不同的跨距，可以减少高次谐波，又使基波电势减少不大，从而有效改善了气隙磁场的波形，减少谐波损耗，降低温升。

6) 选用高质量钕铁硼永磁体

在实际应用中发现，不同厂家生产的同牌号钕铁硼永磁体性能有较大差异。钕铁硼牌号不同，产生的涡流损耗大小不同，并且导热率也有所差异。选择导热率相对较大的高性能钕铁硼永磁材料，有利于磁钢上热量的传导，从而降低转子温升。

3.4.2 样机转子温升的改善措施及效果

由上述分析，更换样机所用的钕铁硼磁铁牌号，由以前的40SH换33UH，对样机重新进行温升试验，结果见表3-5。

表 3-5 样机温升试验数据

	温度	温升
定子铁芯	80℃	51℃
转子铁芯	140℃	110℃

对比表3-4中数据，更换磁钢后转子铁芯温升下降了10℃，可见磁钢的涡流损耗对于转子温升影响很大。因此若在电机制造过程中能采取磁钢分段或分层等上述方法，降低磁钢的涡流损耗，转子温升会有所下降。

3.5 增安型稀土永磁同步电动机加强防爆的措施

增安型电动机防爆的原理是以电机内部不会发生点火源、过热点为基础，因而在结构和过热保护上的要求比其它类型的电机要高，必须采取相应的措施。

因此，在电机制造过程中应从以下方面注意加强，以提高防爆的可靠性：

(1) 加强绝缘，增安型电机的出厂试验比普通电机高10%；

(2) 确保导电部件的连接紧密可靠、接触良好，不会引起过热；绕组引线绑扎间距短、定位牢固使在承受较大电动力时，引线也不会碰撞摩擦而划伤绝缘；

(3) 增大定、转子间气隙，防止产生扫膛现象，轴承游隙要适量，装配精度要保证，以防止咬轴。轴瓦型电机要采取有效措施防止轴电压产生轴电流和火花；

(4) 提高裸露的导电部件的漏电距离和电气间隙；

(5) 控制一切与爆炸气体相接触的表面温度，保证不达到危险的高温，因此在防爆规程里特别规定了允许堵转时间，即堵转时间超过 t_E 时间，保护装置应立即动作切断电源。

3.6 小结

本章首先介绍了增安型电机的关键防爆参数 t_E 时间，针对增安型稀土永磁同步电动机的 t_E 时间，在综合考虑了集肤效应和散热因素等的基础上，提出转子 t_E 时间的理论计算，并对一台增安型稀土永磁同步电动机进行计算，计算结果与试验结果接近，验证了该计算方法的正确性。进而分析了两极增安型稀土永磁同步电动机起动转矩与 t_E 时间之间的关系，提出电机设计过程中暂定起动转矩，修正转子槽形的方法，确保 t_E 时间的合格。

同时，对稀土永磁同步电动机试验中出现的转子温升过高现象进行了原因分析，从电机设计中转子结构、槽配合以及稀土永磁材料等多方位进行了分析，提出降低转子温升的解决方法。通过试验得知，磁钢的涡流损耗对转子温升影响很大。

最后，总结出在电机制造加工过程中需加强的一些措施，这些措施有利于提高增安型电机的防爆性能。

第四章 稀土永磁同步电动机数学建模及仿真研究

磁场分析在稀土永磁同步电动机的设计中极为重要,因为它是电机设计计算的基础,它决定了所设计电机性能的好坏与否。在实际的电机设计中一般是将磁场简化为磁路来计算,这是因为磁场的计算比较困难,通过磁路计算得到了气隙磁密,从而计算出反电势,已经成了许多电磁计算程序的固定模式。这种近似通常需要加上必要的修正才能接近于实际。系列电机磁路的相似性为这种修正提供了经验数据和修正曲线,但是对于永磁电机来说,由于没有现成的经验修正系数,采用磁路近似的方法常常并不满意,而且即使磁路计算比较准确,也并不能解决所有的问题。因此,特别对于稀土永磁电机,进行磁场分析是非常有必要的。

永磁电机采用永磁体励磁,电机内部的电磁场分布较为复杂,采用传统的等效磁路方法分析会带来较大的误差,为保证计算的准确,一般采用有限元法对电机内部电磁场进行数值计算。ANSYS是目前应用最为广泛、使用最方便的通用有限元分析软件之一。无论任何结构、任何形式的永磁电机,只要将其模型输入ANSYS就可进行求解,通过后处理得到磁密分布、磁场分布、磁场强度分布等。本章利用ANSYS 8.0中的Multiphysics模块对本文所开发的一种两极稀土永磁同步电动机转子结构进行二维静态磁场仿真分析,从中可以准确、直观地看到转子结构磁路设计的效果。

由于永磁体的存在,使得稀土永磁同步电动机异步起动过程比异步电机更加复杂化。本章建立了稀土永磁同步电动机的数学模型,对本文设计开发的两极稀土永磁同步电动机进行起动性能仿真研究。

4.1 高速稀土永磁同步电动机电磁场仿真

在使用 ANSYS 软件对电机进行磁场仿真分析过程中,可分为前处理、后处理和结果分析三部分。

4.1.1 仿真前处理

(1) 建立几何模型

在建模过程中,首先建立电机定、转子结构和气隙的几何模型,设置材料参数和单元类型,划分网格,形成有限元模型。首先进入 MainMenu>Preferences,选择与电磁分析相关的关键字以过滤图形用户界面。这样可简化图形用户界面,仅只显示与电磁分析相关的内容。

ANSYS 提供图形用户界面和命令流两种方式,本章采用简单、方便的图形用户界面来进行分析。设置作业名为 FX1,标题为静磁场分析,采用直角坐标系、国际单位制。利用 ANSYS 提供的图形用户界面,根据第五章中所设计的电机尺寸数据,建立的二维模型如图 4-1 所示。

使用 GLUE 操作保证所有区域边界粘接,以便在划分网格时相邻区域共节点,从而使解收敛。该命令执行结束后,模型的不同区域显示不同颜色,如图 4-2 所示。

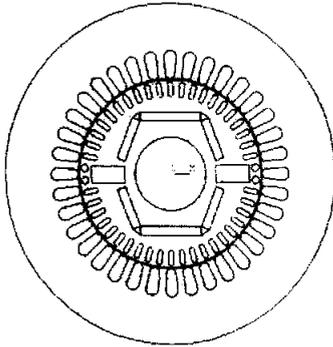


图 4-1 建立几何模型

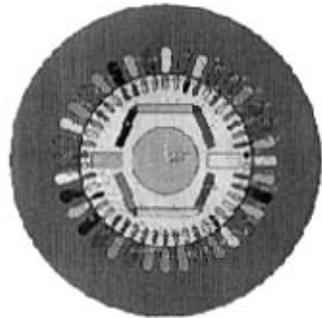


图 4-2 执行 GLUE 操作后的图形

(2) 定义材料

各种材料的性能设置如下:

- 1) 定、转子冲片材料: DW310-35, 输入该材料的 B-H 曲线, 显示如图 4-3。

- 2) 鼠笼条材料: 铸铝, 相对磁导率: 1.00002; 电阻率: 3E-009。
- 3) 定子绕组: 铜, 相对磁导率: 0.999983; 电阻率: 18E-009。
- 4) 空气: 相对磁导率: 1.00。
- 5) 磁钢 (Y 轴方向充磁, N 极向上): N-33SH, 相对磁导率: 1.002; 矫顽力: X 轴: 0; Y 轴: 8.9E+009A/m ; Z 轴: 0。
- 6) 磁钢 (N 极偏左): N-33SH, 相对磁导率: 1.002; 矫顽力: X 轴 -8.2693E+005A/m; Y 轴: 3.0098E+005A/m ; Z 轴: 0。
- 7) 磁钢 (N 极偏右): N-33SH, 相对磁导率: 1.002; 矫顽力: X 轴: 8.2693E+005A/m; Y 轴: 3.0098E+005A/m ; Z 轴: 0。

(3) 指定区域材料属性和划分单元类型

根据区域的不同, 把定义的材料和单元分配给适当的区域。所有区域均取 PLANE13 单元, 电机的不同组成部分赋予相应材料。

4.1.2 后处理

(1) 划分网格

采用 MESHTOOL 里的智能划分网格, 精度为 2, 网格形式为三角形和自由形式, 生成如图 4-4 所示网格。至此建模过程结束, 进入求解阶段。

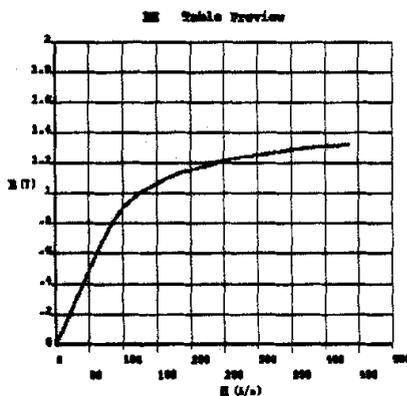


图 4-3 定、转子冲片材料的 B-H 曲线

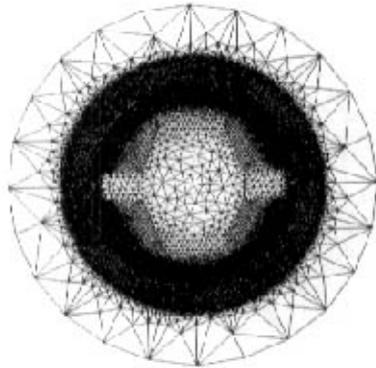


图 4-4 网格划分

(2) 施加载荷、求解

本文分析的是二维静态磁场，且为永磁电机，要得到的是永磁体在电机中形成磁场状况，故无须加载。边界取外边界线，这样通量将平行于边界，如图 4-5 所示。点击 solution>Electromagnet>Static Analysis-Opt&Sol,进行求解。求解结束后进入后处理阶段查看结果。

4.2 仿真结果及分析

在后处理部分可获得磁场分析结果。图 4-6 所示为磁通量线分布，显示的线条数为 100；图 4-7 所示为磁通量密度分布云图；图 4-8 所示为磁通量密度矢量分布图。

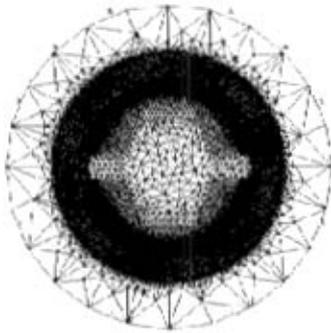


图 4-5 施加边界条件

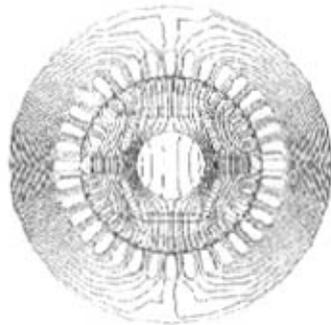


图 4-6 通量线结果

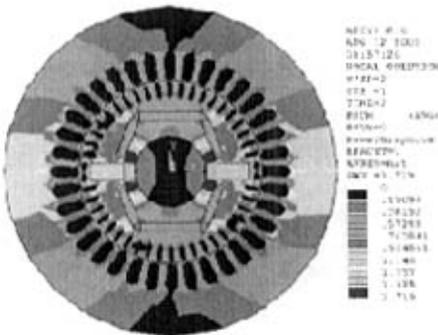


图 4-7 磁通量密度云图

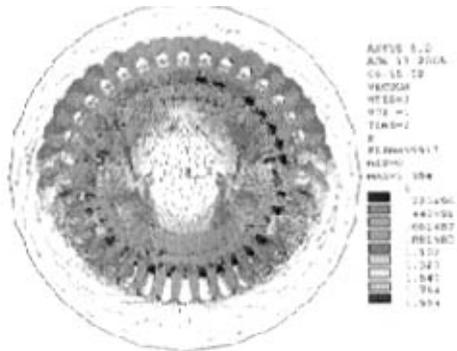


图 4-8 磁通量密度矢量分布图

由图 4-6、图 4-7 可见，磁力线密度大的点在 X 轴上，隔磁槽靠近圆心处呈红色，磁通量密度最大，说明此处漏磁大，同时隔磁槽另一端也有红点，也有少许漏磁。图 4-8 表示出该两极永磁电机转子上磁通量方向。这些表明该两极转子结构具有磁路分布良好、漏磁少的优点。

4.3 高速增安型稀土永磁同步电动机起动性能仿真

两极增安型稀土永磁同步电动机转子上的永磁体与鼠笼条的放置空间相互冲突，使得两极稀土永磁同步电动机的起动问题难度加大。稀土永磁同步电动机本身无自起动能力，通常采用鼠笼条异步起动，同步运行，其起动过程可分为异步起动和牵入同步两个阶段。在异步起动阶段要有足够的起动转矩，使电机起动并可运行到接近同步转速；在牵入同步阶段要有足够高的牵入同步能力，能够顺利牵入同步。

对于两极结构的稀土永磁同步电动机，转子上的永磁体所需安放空间最大，使得鼠笼条的放置空间与异步电机相比大为缩小，鼠笼条不可能太深，更难以改善起动性能。因此在两极稀土永磁同步电动机设计中，如何改善电机的起动性能成为一个突出的问题。本文在文献[13]、[14]的基础上，对两极稀土永磁同步电动机的起动过程进行了详细的分析研究，并使用 Matlab 对设计一台两极增安型稀土永磁同步电动机的起动过程进行了仿真。

4.3.1 稀土永磁同步电动机动态数学模型建立

在给出基于 PARK 方程的稀土永磁同步电动机数学模型推导过程中，做如下假设：

(1) 电机铁芯的磁导率为无穷大，不考虑铁芯饱和的影响，从而可利用叠加原理来计算电机各个绕组电流共同作用下的气隙合成磁场，铁磁饱和在参数计算中加以考虑；

(2) 定子和转子磁势所产生的磁场沿定子内圆是正弦分布的，即略去磁场

中的所有空间谐波；

(3) 各相绕组对称，这就是说各相绕组的匝数和电阻相同，各项轴线相互位移同样的电角度，鼠笼的阻尼条及转子导磁体对转子d、q轴对称。

图4-9是一台两极稀土永磁同步电动机的简图，图中假定了定子电流的正方向。正向电流流经相绕组产生的正弦分布磁通势波的轴线就是该相绕组的轴线， a_s 、 b_s 和 c_s 为定子三相绕组的轴线。设转子逆时针方向旋转，取永磁体基波磁场轴线方向为d轴，q轴顺着旋转方向朝前d轴 90° 电角度。转子参考坐标的旋转速度即为转轴速度。转子参考坐标的空间坐标 δ 轴由q轴与固定轴线（即A相绕组轴线）间的电角度 θ_r 确定。

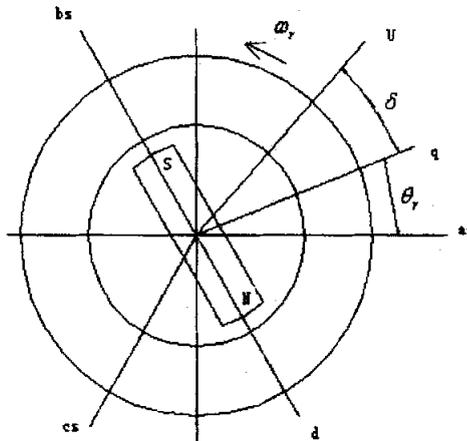


图 4-9 两极稀土永磁同步电动机简图

在稀土永磁同步电动机起动过程中，定、转子间的互感随转子位置而变，且定子绕组的自感和定子各相绕组的互感受磁路不对称的影响，也随转子位置而变，所以描述起动瞬变过程的是一组变系数的微分方程。

(1) 稀土永磁同步电动机的电压方程

$$\left. \begin{aligned}
 u_d &= \frac{d\psi_d}{dt} - \omega_r \psi_q + r_1 i_d \\
 u_q &= \frac{d\psi_q}{dt} + \omega_r \psi_d + r_1 i_q \\
 u_{2d} &= 0 = \frac{d\psi_{2d}}{dt} + r_{2d} i_{2d} \\
 u_{2q} &= 0 = \frac{d\psi_{2q}}{dt} + r_{2q} i_{2q}
 \end{aligned} \right\} \quad (4-1)$$

式中:

r_1 ——定子绕组相电阻

r_{2d} ——转子直轴阻尼绕组电阻

r_{2q} ——转子交轴阻尼绕组电阻

ω_r ——电机转子电角速度

磁链方程为

$$\left. \begin{aligned}
 \psi_d &= L_d i_d + L_{ad} i_{2d} + \psi_f \\
 \psi_q &= L_q i_q + L_{ad} i_{2q} \\
 \psi_{2d} &= L_{2d} i_{2d} + L_{ad} i_d + \psi_f \\
 \psi_{2q} &= L_{2q} i_{2q} + L_{ad} i_q
 \end{aligned} \right\} \quad (4-2)$$

式中:

L_d, L_q ——定子直轴、交轴电感

L_{2d}, L_{2q} ——转子直轴、交轴电感

L_{ad}, L_{aq} ——定转子之间直轴和交轴互感

ψ_f ——永磁体产生的磁链(常值), 可由 $\psi_f = \sqrt{3}E_0 / \omega_1$ 求取, E_0 为空载相

反电动势有效值。

将磁链方程(4-2)代入电压方程式(4-1)中,整理得:

$$\left. \begin{aligned} \frac{di_d}{dt} &= \frac{u_d}{A} + E_1 i_d + E_2 \omega_r i_q + E_3 i_{2d} + E_4 \omega_r i_{2q} \\ \frac{di_q}{dt} &= \frac{u_q}{B} + F \omega_r i_d + F_2 i_q + F_3 \omega_r i_{2q} + F_4 i_{2q} + B_0 \omega_r \\ \frac{di_{2d}}{dt} &= C u_d + G_1 i_d + G_2 \omega_r i_q + G_3 i_{2d} + G_4 \omega_r i_{2q} \\ \frac{di_{2q}}{dt} &= D u_q + H_1 \omega_r i_d + H_2 i_q + H_3 \omega_r i_{2d} + H_4 i_{2q} + D_0 \omega_r \end{aligned} \right\} \quad (4-3)$$

式中:

$$\begin{aligned} A &= \frac{x_d x_{2d} - x_{ad}^2}{\omega_1 x_{2d}} & B &= \frac{x_q x_{2q} - x_{aq}^2}{\omega_1 x_{2q}} & C &= -\frac{x_{ad}}{A x_{2d}} & D &= -\frac{x_{aq}}{A x_{2q}} \\ E_1 &= -\frac{r_1}{A} & E_2 &= -\frac{x_q}{A \omega_1} & E_3 &= -\frac{r_{2d} x_{2d}}{A x_{2d}} & E_4 &= -\frac{x_{aq}}{A \omega_1} \\ G_1 &= \frac{r_1 x_{ad}}{A x_{2d}} & G_2 &= -\frac{x_q x_{ad}}{A \omega_1 x_{2d}} & G_3 &= -\frac{r_{2d} x_d}{A x_{2d}} & G_4 &= -\frac{x_{aq} x_{ad}}{A \omega_1 x_{2d}} \\ F_1 &= -\frac{x_d}{B \omega_1} & F_2 &= -\frac{r_1}{B} & F_3 &= -\frac{x_{ad}}{B \omega_1} & F_4 &= \frac{r_{2q} x_{ad}}{B x_{2q}} \\ H_1 &= \frac{x_d x_q}{B \omega_1 x_{2q}} & H_2 &= -\frac{r_1 x_{aq}}{B x_{2q}} & H_3 &= \frac{x_{ad} x_{aq}}{B \omega_1 x_{2q}} & H_4 &= -\frac{r_{2q} x_d}{B x_{2q}} \\ B_0 &= -\frac{\sqrt{3} E_0}{B \omega_1} & D_0 &= -\frac{\sqrt{3} E_0 D}{\omega_1} & \omega_1 & \text{——电机的同步角速度} \end{aligned}$$

(2) 稀土永磁同步电动机的运动方程

电磁转矩方程:

$$T_{em} = p(\psi_d i_q - \psi_q i_d) \quad (4-4)$$

将式(4.2)代入式(4.4)可得到:

$$T_{em} = \frac{P}{\omega_1} [(x_d - x_q)i_d i_q + x_{\sigma q} i_{2d} i_q - x_{\sigma q} i_{2q} i_d + \sqrt{3} E_0 i_q] \quad (4-5)$$

电机的机械运动方程为：

$$J \frac{d\Omega_r}{dt} = T_{em} - T_L - R_\Omega \Omega_r \quad (4-6)$$

式中：

T_L ——负载转矩

R_Ω ——粘滞摩擦系数

Ω_r ——机械角速度

J ——转子和所带负载的总转动惯量

p ——电机极对数

机械角速度与电角速度的关系为：

$$\omega_r = p\Omega_r \quad (4-7)$$

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{p(T_{em} - T_L) - R_\Omega \omega_r}{J} \quad (4-8)$$

电机同步运行时的功角 δ 变化率为：

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega_1 - \omega_r \quad (4-9)$$

(3) 数学模型

由式 (4-3)、(4-8) 和 (4-9)，可得到 d-q 轴坐标系下用非线性微分方程组表示的电机的数学模型：

$$\left. \begin{aligned}
 \frac{di_d}{dt} &= \frac{u_d}{A} + E_1 i_d + E_2 \omega_r i_q + E_3 i_{2d} + E_4 \omega_r i_{2q} \\
 \frac{di_q}{dt} &= \frac{u_q}{B} + F_1 \omega_r i_d + F_2 i_q + F_3 \omega_r i_{2d} + F_4 i_{2q} + B_0 \omega_r \\
 \frac{di_{2d}}{dt} &= C u_d + G_1 i_d + G_2 \omega_r i_q + G_3 i_{2d} + G_4 \omega_r i_{2q} \\
 \frac{di_{2q}}{dt} &= D u_d + H_1 \omega_r i_d + H_2 i_q + H_3 \omega_r i_{2d} + H_4 i_{2q} + D_0 \omega_r \\
 \frac{d\delta}{dt} &= \omega_1 - \omega_r \\
 \frac{d\omega_r}{dt} &= \frac{1}{J} [p(T_{em} - T_L) - R_\Omega \omega_r]
 \end{aligned} \right\} (4-10)$$

(4) 坐标变换

为克服派克变换中功率不守恒的缺点，采用正交变换法，变化矩阵为：

$$C_{3 \rightarrow 2} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 120^\circ) & \cos(\theta + 120^\circ) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - 120^\circ) & -\sin(\theta + 120^\circ) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (4-11)$$

式中 θ 是电机转子磁极轴线（直轴）与 A 相定子绕组轴线之间夹角。在三相系统中定子三相电压表达式为：

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \sqrt{2} U_N \begin{bmatrix} \cos \omega_1 t \\ \cos(\omega_1 t - \frac{2}{3}\pi) \\ \cos(\omega_1 t + \frac{2}{3}\pi) \end{bmatrix} \quad (4-12)$$

式中:

U_N ——电源相电压有效值

转换到 $d-q$ 轴, 即有:

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \sqrt{3}U_N \begin{bmatrix} \cos(\theta - \omega_1 t) \\ -\sin(\theta - \omega_1 t) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4-13)$$

可见, $d-q$ 系统中电压的幅值是三相系统中有效值的 $\sqrt{3}$ 倍, 电流和磁链也一样。

4.3.2 电机瞬态起动过程仿真研究

求解微分方程组的初值问题用四阶龙格——库塔法, 该方法具有计算精度高、计算量适中等优点, 公式如下:

$$y_{im+1} = y_{im} + \frac{h}{6}(k_{i1} + 2k_{i2} + 2k_{i3} + k_{i4}) \quad (4-14)$$

其中, $k_{i1} = f_i(t_m, y_{1m}, \dots, y_{nm})$

$$k_{i2} = f_i\left(t_m + \frac{h}{2}, y_{1m} + \frac{h}{2}k_{i1}, \dots, y_{nm} + \frac{h}{2}k_{i1}\right)$$

$$k_{i3} = f_i\left(t_m + \frac{h}{2}, y_{1m} + \frac{h}{2}k_{i2}, \dots, y_{nm} + \frac{h}{2}k_{i2}\right)$$

$$k_{i4} = f_i\left(t_m + \frac{h}{2}, y_{1m} + \frac{h}{2}k_{i3}, \dots, y_{nm} + \frac{h}{2}k_{i3}\right)$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, n; m = 0, 1, 2, \dots,$$

这里, y_{im} 是第 i 个因变量 y_i 在节点 $t_m = t_0 + mh$ 处的近似值, h 是积分步长。

4.3.3 起动过程仿真结果分析

根据本文第五章中样机电磁设计方案中所采用的参数进行仿真。该电机给定参数如表 4-1 所示，额定状态下的电机参数见表 4-2。

表 4-1 样机给定参数

额定功率 P (kW)	30
额定电压 U (v)	380
额定频率 f (Hz)	50
极对数 p	1

表 4-2 样机额定状态下的参数

定子直轴电抗 x_d Ω	6.3829
转子直轴电抗 x_{2d} Ω	5.7976
定子交轴电抗 x_q Ω	65.1544
转子交轴电抗 x_{2q} Ω	64.5691
定转子直轴互电抗 x_{ad} Ω	4.7474
定转子交轴互电抗 x_{aq} Ω	63.5189
定子电阻 r_s Ω	0.1205
转子直轴阻尼绕组电阻 r_{2d} Ω	1.2
转子交轴阻尼绕组电阻 r_{2q} Ω	1.08

其中，定子直轴电抗 x_d 、定子交轴电抗 x_q 、转子直轴电抗 x_{2d} 和转子交轴电抗 x_{2q} 可由下式计算得：

$$x_d = x_{s1} + x_{ad} \quad (4-15)$$

$$x_q = x_{s1} + x_{aq} \quad (4-16)$$

$$x_{2d} = x_{s2} + x_{ad} \quad (4-17)$$

$$x_{2q} = x_{s2} + x_{aq} \quad (4-18)$$

式中：

x_{ad} —— 定转子直轴互电抗， Ω ；

x_{aq} —— 定转子交轴互电抗， Ω ；

x_{s1} —— 定子漏抗， Ω ；

x_{s2} —— 转子漏抗， Ω 。

所得仿真结果如图 4-10、4-11 所示，图 4-10 是电机转速随时间变化的曲线，图 4-11 是电机定子 A 相电流随时间变化曲线。

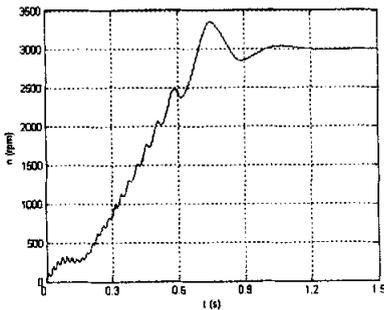


图 4-10 时间——转速仿真曲线

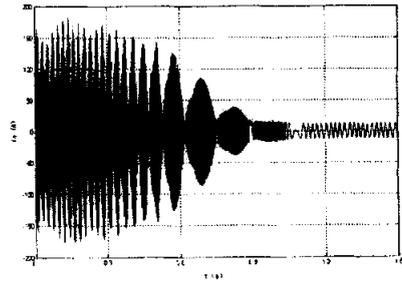


图 4-11 时间——A 相电流仿真曲线

由图 4-10 可见，电机在低速区有明显的下凹现象，这是因为空载反电动势比较高所导致。空载反电动势高也就是说发电制动转矩大，且发电制动转矩的最大值出现在低速区，从而使得转速曲线有明显下凹现象。之后在 1.2 秒时逐步稳定运行在额定转速 3000 转每分钟。这说明本文所设计的两极电机是可以顺利完成启动、牵入同步的过程。

4.4 小结

本章在稀土永磁同步电动机转子结构设计中,应用 ANSYS 软件对一种两极转子结构进行了辅助设计、分析,分析结果准确、直观。这种分析过程有利于稀土永磁同步电动机的转子结构优化设计分析,可以缩短电机设计和分析周期。同时,对稀土永磁同步电动机起动过程进行数学建模,对所设计的一台两极稀土永磁同步电动机的起动过程进行了仿真分析,仿真结果表明该电机的能够顺利起动。

第五章 高速高效增安型稀土永磁同步电动机设计

稀土永磁同步电动机设计大部分与电励磁同步电动机相同，主要区别在于励磁部分不同及由此引起的转子结构形式和参数取值范围的差异。稀土永磁同步电动机的转子结构多种多样，磁场分布复杂，计算的正确度较电励磁电机要低；而且永磁材料本身的性能也在一定的范围内波动，直接影响磁场的大小及分布，并使得电机的性能产生波动；稀土永磁同步电动机一旦制成后，很难调节其性能；可见，稀土永磁同步电动机的设计比电励磁电机的设计的风险要大得多，因此，把握好稀土永磁同步电动机设计的每一个环节是至关重要的。

稀土永磁同步电动机的磁路计算主要是需要确定永磁材料和尺寸。稀土永磁同步电动机磁路的构成，一般包含永磁体、软磁材料和工作气隙三个部分。电机的合理设计应该使磁势的主要部分降落在气隙中。在电机设计中，为了得到磁路的磁势平衡，永磁体在磁化方向上必须有一定的厚度，永磁材料矫顽力越大，则永磁体在磁化方向的厚度就可以越小。对于两极电机，存在气隙很难均匀的问题，造成磁密不均匀，电势很难平衡，电枢需重点设计。

本章采用电磁设计法设计电机，其设计流程如图 5-1 所示，具有思路清晰、参数确定、方案易调整的优点。其缺点是经验参数多，计算精度较低。

5.1 电机设计指标

本章将设计开发一台两极增安型稀土永磁同步电动机，具体的性能指标设计值如下：

- | | |
|-----------|------------------|
| (1) 额定功率： | $P_n=30$ 千瓦 |
| (2) 额定电压： | $U_n=380$ 伏 |
| (3) 额定频率： | $f_n=50$ 赫兹 |
| (4) 极对数： | $p=1$ |
| (5) 额定效率： | $\eta \geq 92\%$ |

(6) 额定功率因数:

$$\cos \phi \geq 0.93$$

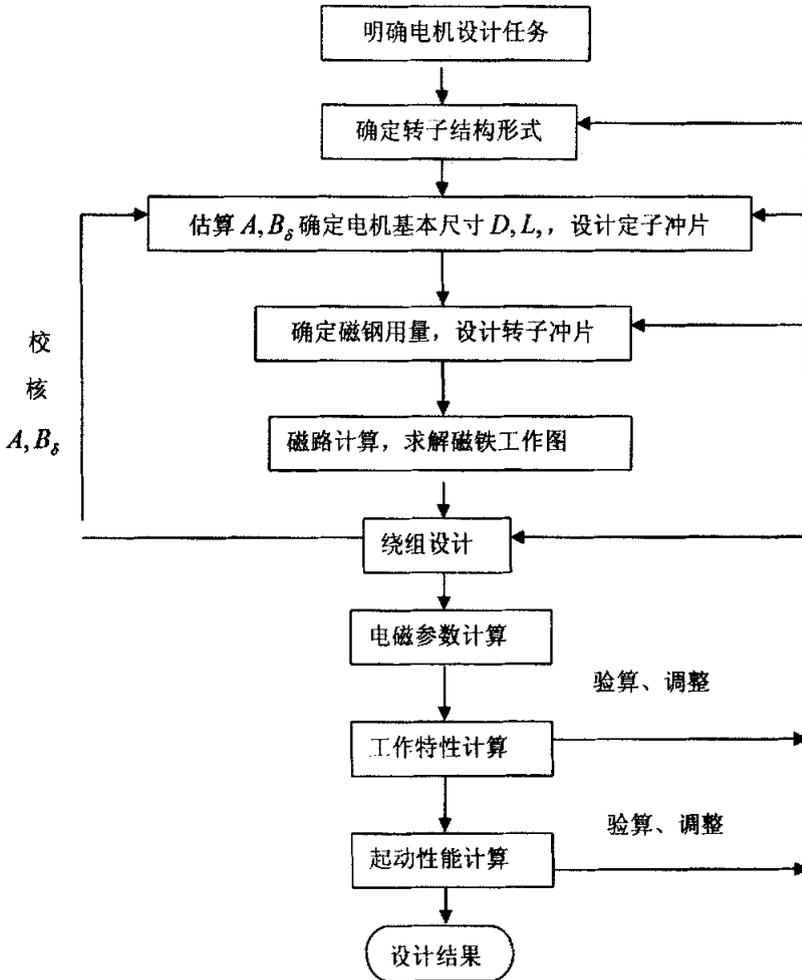


图 5-1 稀土永磁同步电动机电磁设计流程图

(7) 起动电流倍数: $I_{st}^* \leq 8$ (8) 起动转矩倍数: $T_{st}^* \geq 2$ (9) 最小转矩倍数: $T_{min}^* = 1.2$ (10) 牵入同步转矩倍数: $T_{sm}^* = 1.5$

(11) 过载能力:	$K_c=1.2$	
(12) 连接方式:	L_{type}	三角形连接
(13) 工作状态:	W_{type}	长时工作
(14) 绝缘等级:	J-DJ	B级绝缘
(15) 工作温度:	$T=120$	$^{\circ}\text{C}$

5.2 电机主要参数设计

5.2.1 转子结构形式设计

异步起动稀土永磁同步电动机可采用多种转子磁路结构,设计时应根据待设计电动机的具体性能指标按照转子磁路结构的特点选用,或者研究、开发新的转子磁路结构。

本章设计的增安型两极稀土永磁同步电机功率为 30 千瓦,长时工作,起动性能要求高,并要求转子结构坚固。该样机的转子结构采用第二章中开发的两极转子结构,见图 2-7,并经第三章中 ANSYS 分析得知,该转子结构的漏磁小,磁场分布较好。

5.2.2 电机外形尺寸设计

(1) 确定主要尺寸

稀土永磁同步电动机的主要尺寸与普通电动机的主要尺寸一样,包括定子冲片内径 D_n 和电枢计算长度 L_{ef} ,可以在原系列电动机主要尺寸的基础上进行初步的估算,然后再调整设计,直至电动机设计成功。这样可以缩短电机研制的周期。

参考同功率等级的 Y 系列异步电机,确定稀土永磁同步电动机的外形尺寸。外形基本尺寸如下:

定子外径: $D_{1e} = 32.7$ 厘米

定子内径: $D_{1i} = 18.2$ 厘米

定子铁心长度: $l_{1i} = 19.5$ 厘米

转子外圆直径: $D_{2e} = 18$ 厘米

转子铁心长度: $l_{12} = 19.5$ 厘米

(2) 选择定、转子槽数

稀土永磁同步电动机的定子槽数选择原则与异步电动机相同,而定、转子槽配合则与感应电动机稍有不同。为提高稀土永磁同步电动机的制造工艺性和便于电动机极弧系数的控制(尤其是对采用内置径向式转子磁路结构的稀土永磁同步电动机),电动机的转子槽数通常在定转子槽配合选用原则的容许范围内被选定为电动机极数的整数倍。

最终确定: 定子槽数: $Z_1=36$ 槽; 转子槽数: $Z_2=46$ 槽。

5.3 定子冲片设计

为降低电机成本,在电机定、转子铁芯材料方面均选取价格便宜的 0.35 毫米的 DW310 冷轧硅钢片。DW310 冷轧硅钢片性能参数如下:

(1) 密度: $K\rho_1=7.6$ 克/立方厘米;

(2) 铁耗系数: $P_{1.5/50}=3.10$ 瓦/千克。

选取同功率的异步电动机中型号为 Y200L1-2 的定子冲片,如图 5-2 所示。定子冲片叠片系数 $K_{\sigma 1}$ 取 0.93,槽绝缘厚度 $K_{s1}=0.03$ 厘米,槽契厚度 $d_{s1}=0.2$ 厘米。定子槽形为底半梨形,见图 5-3,具体尺寸如下:

(1) 槽口宽: $b_{01}=0.38$ 厘米

(2) 定子槽口深: $h_{01}=0.1$ 厘米

(3) 定子槽肩宽: $b_{x1}=0.88$ 厘米

(4) 定子槽肩深: $h_{x1}=0.091$ 厘米

(5) 定子槽身深: $h_{s1}=1.899$ 厘米

(6) 定子槽底圆弧的直径: $d_{01}=1.22$ 厘米

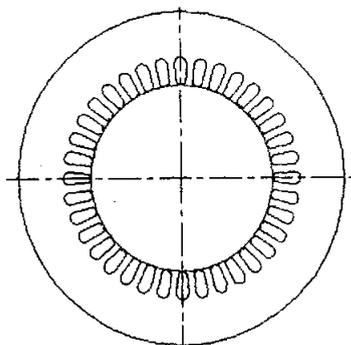


图 5-2 定子冲片

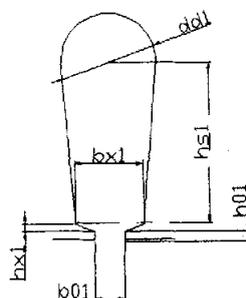


图 5-3 定子槽形

5.4 转子结构尺寸设计

5.4.1 磁钢设计

永磁体用量在很大程度上决定电机的成本。如果用量大，会增大电机成本；若设计过小，又会影响电机性能。

采用的钕铁硼永磁材料的牌号是NNF40SH。NNF40SH具有很高的磁能积，很高的剩磁密度和很高的矫顽力，且其退磁曲线为直线等优点。其性能参数如下：

(1) 主剩磁感应强度	$B_{r1} = 12800$	高斯
(2) 工作时的 B_{r1}	$B_{r1t} = 11461.12$	高斯
(3) 主矫顽力	$H_{c1} = 12150$	奥斯特
(4) 工作时的 H_{c1}	$H_{c1t} = 11461.12$	奥斯特
(5) 主导磁率	$\mu_{r1} = 1.1$	高 / 奥
(6) 主内禀矫顽力	$H_j = 20000$	奥斯特
(7) 工作时的 H_j	$H_{jt} = 15000$	奥斯特
(8) 主不可逆温度系数	$\Delta B_d / B_{d1} = -0.0004$	
(9) 主可逆温度系数	$K_{brt1} = -0.0011$	1 / °C
(10) 主最大磁能积	$(BH)_{max1} = 3.9e+07$	高·奥

永磁体尺寸包括轴向长度 l_M ，磁化方向长度 h_M 和磁化方向宽度 b_M 。一般情况下， l_M 等于或小于电机的轴向长度 l_{fl} ，实际只需要设计永磁体的 h_M 和 b_M 。

所需钕铁硼永磁材料的体积为：

$$V_M = 2.16 \times 10^7 \frac{k_r(k_e + 1)P_N}{k_e f B_r H_c \xi} \text{ (cm}^3\text{)} \quad (5-1)$$

$$\xi = \frac{B_{M0} H_m}{B_r H_c} \quad (\text{对小容量电机, } \xi = 0.4 - 0.5) \quad (5-2)$$

式中：

k_r ——设计系数，取决于电机的效率，对于小容量电机， $k_r = 1.5 - 1.8$ ；

k_e ——电势系数， $k_e = \frac{U_N}{E_0}$ ， E_0 是电机空载电势；

B_{M0} ——空载时永磁体的磁感应强度；

H_m ——折算到永磁体两端的最大电枢反应磁势所对应的磁场强度。

磁铁宽度 b_M 尺寸：

$$b_M = (5 - 15)h_M \quad (5-3)$$

磁钢的磁路长度为：

$$h_M = \frac{2\delta k_\delta C_{fe} B_\delta}{H_{M0}} \text{ (cm)} \quad (5-4)$$

式中：

k_δ ——电机卡氏系数， $k_\delta = 1.4 - 1.5$ ；

C_{fe} ——空载饱和系数， $C_{fe} = 1.2 - 1.35$ ；

δ ——电机气隙长度；

$B_{\delta 0}$ ——电机气隙磁密；一般取 $0.7B_r$ ；

H_{M0} ——在退磁曲线上 $B_{M0} = (0.85 - 0.95)B_r$ 处查得。

设计的主、副磁钢尺寸和隔磁磁钢尺寸如表 5-1 所示：

表 5-1 磁钢尺寸

尺寸 \ 类别	主磁钢	副磁钢	隔磁磁钢
厚度 h_M (厘米)	0.8	0.8	0.8
宽度 b_M (厘米)	4.05	5.95	3.25
重量 G_M (千克)	0.972	2.856	0.78

由于工艺上的原因，异步起动永磁同步电动机转子上永磁体槽与永磁体之间留有一定的间隙，此间隙被称为附加气隙，大小与电动机生产厂家的工艺水平有关，一般在 0.01~0.02 厘米。进行直轴磁路计算时，附加气隙必须被考虑进去。

5.4.2 转子槽形及端环设计

由于稀土永磁同步电动机的转子槽主要用于起动，为节约铸铝材料和为永磁体留出足够放置空间，在电动机对牵入同步能力要求不是很高时，转子槽可开得浅一点，窄一点。但当设计高牵入同步能力的电动机时，确定转子槽形时就应注意不能使电动机接近同步转速时的特性曲线陡度过小，否则电动机牵入同步能力指标很难达到。则此时电动机转子槽也不能开得过浅和过窄。

设计的转子槽形如图 5-4 所示。具体尺寸如下：

- (1) 转子槽口宽 $b_{02}=0.1$ 厘米
- (2) 转子槽口深 $h_{02}=0.2$ 厘米
- (3) 转子槽肩圆弧直径 $d_{x2}=0.5$ 厘米
- (4) 转子槽身深 $h_{s2}=0.96$ 厘米
- (5) 转子槽底圆弧直径 $d_{d2}=0.47$ 厘米

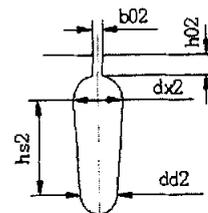


图5-4 转子槽形

转子端环的设计与转子槽的设计原则类似，在保证电动机有足够牵入同步能力的前提下，应尽量使端环的厚度小一点，以节约铝材料和提高电动机的起动能力。此外，对于增安型电机，转子端环的截面积在允许的范围内也应尽量增大，以便散热，这有利于延长转子的 t_E 时间。

所设计端环尺寸如下：

(1) 端环高度	$h_r=1.5$	厘米
(2) 端环外径	$d_{re}=17.2$	厘米
(3) 端环内径	$d_{ri}=10.5$	厘米
(4) 端环平均直径	$d_{ra}=13.85$	厘米
(5) 端环平均宽度	$d_{rw}=3.35$	厘米
(6) 端环截面积	$S_{rs}=5.025$	平方厘米

5.5 气隙和转轴设计

稀土永磁同步电机的气隙长度是一个非常重要的设计参数，为减小过大的杂散损耗，降低电动机的振动与噪声和便于电动机的装配，其气隙长度 δ 一般要比同规格感应电动机的气隙大。设计异步起动永磁同步电动机的气隙长度时，参照相同规格或相近规格的感应电动机的气隙长度，并加以适当的修改。或按经验公式选取：

$$\delta \approx 4.7D_n / \sqrt{p} \times 10^{-3} \quad (5-5)$$

适当地加大电机的气隙长度在一定程度上可减小电机的杂散损耗，提高电机的效率。同时气隙长度的增加，为保证电机的性能需增加永磁体的用量，这又与转子上有限的放置空间相矛盾，所以电机的气隙也不宜取得太大。本样机气隙长度 δ 取 0.1 厘米。

转轴材料取 45 号钢。稀土永磁同步电动机的转轴可由电动机的转矩确定或参考同规格的感应电动机的转轴尺寸来确定。本样机采用电机转矩确定转轴尺寸。

(1) 许用剪应力	$(\tau) = 7e+07$	帕
(2) 许用扭转角	$(\theta) = 1$	° / 米
(3) 剪切弹性模量	$G_3 = 8e+09$	帕
(4) 转矩	$M = 95.7$	牛·米
(5) 转轴安全系数	$K_2 = 20$	
(6) 按强度估算的转子内径	$D_{2i}' = 2.1231$	厘米
(7) 按刚度估算的转子内径	$D_{2i}'' = 6.51967$	厘米
(8) 转子冲片内径	$D_{2i} = 7$	厘米

5.6 磁路计算

磁路计算的目的是在已知永磁体性能和磁路尺寸条件下，求解磁体工作图的各项数据，并根据永磁体工作图调整磁路尺寸，以保证磁路的合理设计，主要包括磁化特性计算，磁路参数计算，求解空载、负载永磁体工作图三部分。下面根据磁化特性计算所得磁路参数，对电机的空载、负载永磁体工作图求解。

5.6.1 空载特性计算

由空载特性计算可得磁钢空载工作图，如图 5-5 所示。则由图 5-5 可得空载磁路结果，见表 5-2。

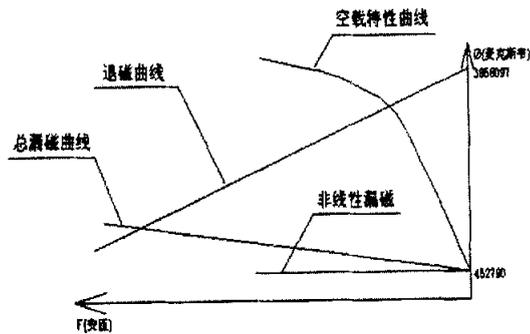


图 5-5 永磁体空载工作图

表 5-2 空载工作点参数

空载磁钢总磁通 (麦克斯韦)	3058176	空载磁路转子齿 磁场强度 (安/厘米)	1.254
空载气隙磁通 (麦克斯韦)	2431855	空载磁路转子轭 磁场强度 (安/厘米)	0.352
空载气隙磁势 (安匝)	968.96	定子齿磁势 (安匝)	11.706
空载气隙磁密 (高斯)	5212.2646	定子轭磁势 (安匝)	162.2544
空载磁路定子齿磁密 (高斯)	12196.699	转子齿磁势 (安匝)	3.53628
空载磁路定子轭磁密 (高斯)	13521.114	转子轭磁势 (安匝)	1.0115
空载磁路转子齿磁密 (高斯)	9921.02	空载附加气隙磁势 (安匝)	416.9812
空载磁路转子轭磁密 (高斯)	3161.41	一对极下总磁势 (安匝)	1564.45
空载磁路定子齿 磁场强度 (安/厘米)	2.552	折算系数	0.7952
空载磁路定子轭 磁场强度 (安/厘米)	5.28		

5.6.2 定子绕组设计

稀土永磁同步电动机的绕组设计与一般异步电机相同，绕组形式有单层链式、单层同心式、双层叠绕等形式。为改善波形、减少杂散损耗，一般多采用双层正弦绕组。本样机采用双层叠绕组，选取的绕组导线牌号为 QY-1，直径是 1.6 毫米，两根并绕。设计的绕组参数如表 5-3 所示。

表 5-3 定子绕组设计参数

每相绕组串联匝数	84
基波绕组系数	0.9404
每槽有效导体数	28
计算电负荷 (安)	262.555

5.6.3 工作特性计算

由工作特性计算可得工作特性曲线如图 5-6，由图得电机工作点参数见表 5-4。设计值与指标值列于表 5-5，可见，该电机设计参数达到指标要求。

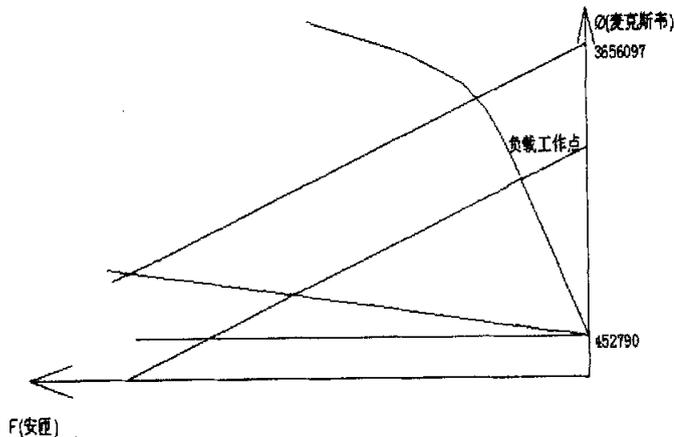


图 5-6 永磁体负载工作图

表 5-4 负载工作点参数

额定电流 I_N (安)	31.84
额定功率因数角 ϕ_N (度)	24.07
额定内功率因数角 φ_N (度)	81.57
额定功率角 θ_N (度)	57.5
额定输出功率 P_N (千瓦)	30.15
额定转矩 T_N (牛·米)	95.98
额定功率因数 $\cos\phi_N$	0.94
额定效率 η_N	0.925
直轴电枢反应电抗 x_{ad} (欧姆)	4.75
直轴同步电抗 x_d (欧姆)	7.43
最大功角 θ_{max} (度)	61.48
额定直轴电流 $I \sin\varphi$ (安)	31.5
折算到直轴的反应磁势 F'_{ad} (安匝)	6695.96

表 5-5 设计值与指标值对比表

	指标值	设计值
额定功率 P (kW)	30	30.15
额定效率 η_N	$\geq 92\%$	93%
额定功率因数 $\cos\phi_N$	≥ 0.93	0.94

5.7 起动特性计算

起动特性计算采取假设起动电流 I'_{st} ，计算得到起动电流 I_{st} ， $I'_{st} = I_{st}$ 。计

算得 $I_{st} = 221.4A$ ，则起动电流倍数 $I_{st}^* = 6.95$ ；起动转矩 $T_{st} = 204.8N.m$ ，起动转矩倍数 $T_{st}^* = 2.13$ 。指标要求为： $I_{st}^* \leq 8$ ， $T_{st}^* \geq 2$ ，因此设计值达到指标要求。

5.8 t_E 时间计算

根据电机设计参数进行 t_E 时间的理论计算，计算方法见第三章。计算所需参数见表 5-6，取 t_E 时间内转子允许温升 $\theta_2 = 85K$ 。由起动特性计算有： $I_{st}^* = 6.95$ ，则 t_E 时间应该大于 5.4 秒，计算得转子表面 t_E 时间为： $t_E = 10.8s$ ，故增安型防爆参数设计合格。

表 5-6 RSMAG250-6 转子 t_E 时间计算参数

参数名称	计算值
铸铝电阻率 $\rho(\Omega \cdot m)$	0.434e-7
铸铝比热 $C_p(kcal/kg \cdot K)$	0.216
铸铝比热容 $C(kJ/kg \cdot K)$	0.92
鼠笼条总质量 $M_B(kg)$	3.968
端环总质量 $M_K(kg)$	0.719
每极鼠笼条数 Z_2	23
鼠笼条长度 $l_B(m)$	0.195
鼠笼条截面积 $S_B(m^2)$	0.65052e-4
端环的平均直径 $D_K(m)$	0.1385
端环的截面积 $S_K(m^2)$	0.5025e-3
鼠笼条总散热面积 $S_{SB}(m^2)$	0.35076
端环总散热面积 $S_{SK}(m^2)$	0.8749e-2

5.9 小结

本章就所给电机设计指标，开发了一台两极稀土永磁同步电动机。设计过程中，对于外形尺寸、定转子冲片和槽配合等方面采用同功率等级异步电动机所用尺寸，在此基础上加以计算、调整。根据第二章中研究开发出新型两极转子结构，对其主、副磁钢及隔磁槽尺寸进行设计计算。最后对空载特性、工作特性、起动特性和 t_e 时间等进行了计算，设计值符合指标要求。

第六章 增安型稀土永磁同步电动机性能测试

为防止爆炸性混合物的自燃,要对增安型电机内部与爆炸性气体相接触的各部分的温度加以限制。这类电机的定转子在起动、额定运行和堵转时间 $t_E t_E$ 内均要避免出现危险的温度。因此,增安型稀土永磁电动机试验不仅包括常规的电机性能试验,还应包括增安型电机专用试验项目。以下是对第五章设计的两极增安型稀土永磁同步电动机进行相关试验研究。

6.1 稀土永磁电动机性能试验

6.1.1 空载试验

空载试验是电机的基本试验项目之一。该试验的目的是求取额定电压和额定频率下的空载电流和空载损耗,检查电机气隙绕组参数、铁芯质量以及装配是否正常。还可求取空载特性曲线,确定电机的铁耗和机械损耗,验证样机磁路设计是否合理。

空载损耗与空载电流是稀土永磁同步电动机试验的重要指标。调节端电压 U ,改变 $K_E = E_0/U$,相当于调节 I_f ,其 $I_0 = f(U)$ 也存在一个类似的 V 形曲线。由 V 形曲线可知,空载损耗与空载电流存在最小值,对于额定运行的稀土永磁同步电动机,若 E_0 设计的过大或过小,都会导致空载损耗与空载电流值增大。因此合理的电磁设计使得空载损耗与空载电流值在正常范围内,电机效率提高。

测试环境及条件: 28.7℃

(1) 定子电阻(欧姆): $R_{ab}=0.1378$; $R_{bc}=0.1382$; $R_{ac}=0.1381$

(2) R_{ab} (热态): 0.1203欧姆

试验原始数据见表 6-1, 试验处理数据见表 6-2。所得 V 形曲线如图 6-1 所示, 图 6-2 是稀土永磁同步电动机的功率—电压曲线。
示, 图 6-2 是稀土永磁同步电动机的功率—电压曲线。

表 6-1 空载试验原始数据

Ua (V)	Ub (V)	Uc (V)	电流 倍数	Ia (A)	Ib (A)	Ic (A)	W1 (W)	W2 (W)	P (W)	Q (W)	PF
381	380	382.4	5	1.47	1.8	1.43	309.3	-73.5	235.8	929.5	0.246
393	391.7	394.3	5	1.88	2.22	1.78	385.4	-159.5	225.9	1227.8	0.181
405.3	403.9	406.9	5	2.34	2.7	2.19	500.9	-225	275.8	1569.3	0.173
417.4	415.9	419.1	5	2.79	3.22	2.65	586.1	-331.7	254.3	1956.1	0.129
405.5	403.9	407.1	5	2.33	2.74	2.19	466.2	-240	226.4	1575.4	0.1422
392.5	391	394.1	5	1.84	2.26	1.8	363.4	-142.2	221.2	1219.5	0.178
381.9	380.8	383.6	5	1.44	1.86	1.5	295.6	-65.6	230	948.2	0.236
369.4	368.5	371.2	5	1.03	1.44	1.18	228.1	33.9	262	658	0.37
356.9	356.2	358.2	2	1.83	2.63	2.11	378.7	193.1	571.9	1076.3	0.469
344.2	343.4	345.6	2	1.43	2	1.9	233.3	354.4	587.6	805.9	0.589
332.6	332.1	333.7	2	1.45	1.77	1.98	142.5	511.3	653.8	742.7	0.66
320.7	320.5	321.6	2	1.94	2.05	2.45	28.1	643.4	671.5	1018	0.55
310.2	309.8	311.3	2	2.45	2.44	2.95	-80.6	733.8	653.2	1299.2	0.45
296.5	296.3	297.9	2	3.37	3.22	3.72	-160.9	868.8	707.9	1682.6	0.388

表 6-2 空载试验处理数据

线电压 V	线电流 A	空载损耗 W
381.1	7.83	1179
393.0	9.80	1129.5
405.4	12.05	1379
417.5	14.43	1271.5
405.5	12.10	1132
392.5	9.83	1106
382.1	8.00	1150
369.7	6.08	1310
357.1	4.38	1143.8
344.4	3.55	1175.2
332.8	3.47	1307.6
320.9	4.29	1343
310.4	5.23	1306.4

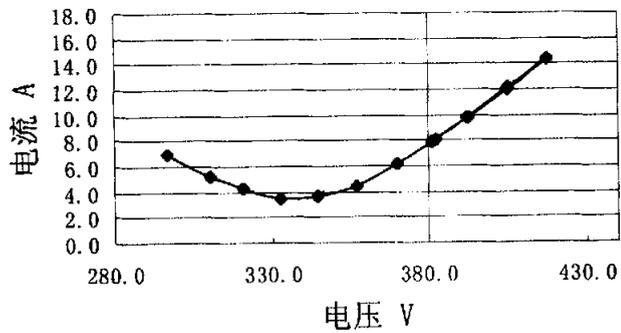


图 6-1 V形曲线

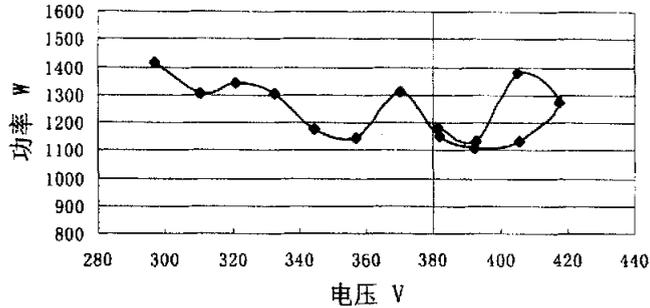


图 6-2 功率—电压特性曲线

由表 6-1 可知，三相空载电流基本平衡，说明了样机三相绕组对称，气隙较均匀。图 6-1、图 6-2 可见，额定电压和额定频率下的空载电枢电流有效值为 7.83 安培，是额定电流的 24.6%，说明空载反电势 E_0 设计合理，亦即磁钢尺寸和定子绕组设计恰当。

空载损耗主要包括定子铁芯中的基本铁耗、定转子铁芯中的附加损耗和机械损耗，设计值分别为 408.512 瓦，1000 瓦，因此空载损耗设计值为 1408.15 瓦；而试验值是 1150 瓦，两者有所不同的原因在于设计中机械损耗难以确定，使用经验公式计算误差是不可避免的。

6.1.2 堵转试验

堵转试验时转子被堵住不动，测得堵转电流 I_K 、堵转转矩 T_K ，堵转电流倍数 I_{st}^* 和堵转转矩倍数 T_{st}^* ，可考查转子的铸铝质量和转子槽形尺寸设计的合理性，从而确定电机的起动性能是否符合技术条件的要求。

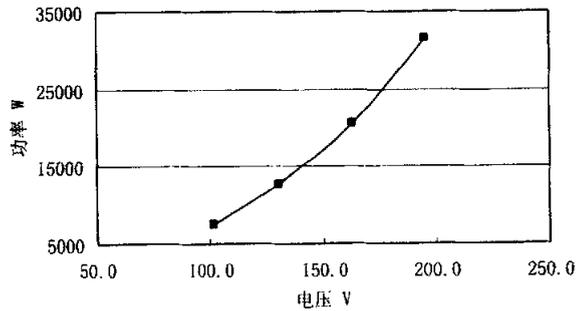
堵转试验中采取三角形接法。通过试验所得原始数据见表 6-3，处理后数据列于表 6-4。图 6-3、6-4 和 6-5 是堵转特性。

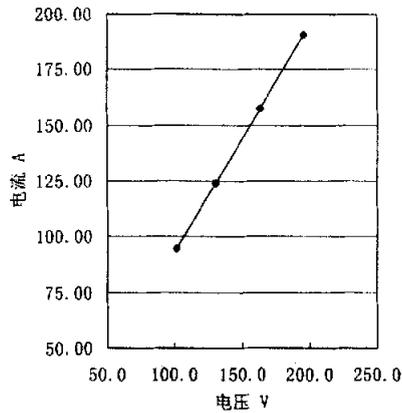
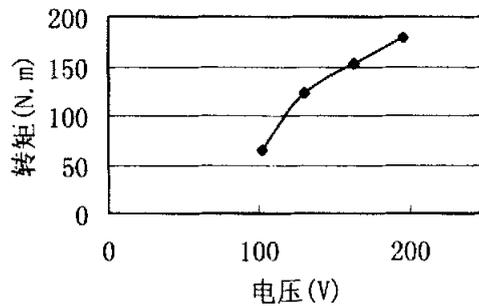
表 6-3 堵转试验原始数据

Ua (V)	电流 倍数	Ia (A)	Ib (A)	Ic (A)	功率 倍数	W1 (W)	W2 (W)	P (W)	Q (W)	P _F
101.8	50	1.91	1.82	1.96	50	169.1	-17.1	152.0	306.8	0.444
130.5	50	2.48	2.39	2.55	50	281.3	-25.9	255.4	511.6	0.447
163.5	50	3.15	3.05	3.25	50	448.4	-36.1	412.3	810.8	0.453
195.5	50	3.89	3.68	3.86	50	671.4	-39.1	632.3	1159.7	0.479

表 6-4 堵转试验处理数据

线电压 U (V)	线电流 I (A)	堵转损耗 P (W)	堵转转矩 T _k (N.m)
101.8	94.83	7600	64.895
130.5	123.67	12770	122.05
163.5	157.50	20615	152.025
195.5	190.50	31615	179.42

图 6-3 $P_K = f(U_1)$ 特性曲线

图 6-4 $I_K = f(U_1)$ 特性曲线图 6-5 $T_K = f(U_1)$ 特性曲线

从上图中取 $U_1 = 220V$ 时的电流、转矩即为堵转电流 I_K 、堵转转矩 T_K 。可得 $I_K = 214.8A$ ，则堵转电流倍数 $I_{st}^* = 6.75$ ； $T_K = 196.6N.m$ ，则堵转转矩倍数 $T_{st}^* = 2.06$ 。由表 6-5 知，试验值基本符合设计值。

表 6-5 试验值与设计值对比表

	指标值	设计值	试验值
起动电流倍数 I_{st}^*	≤ 8	6.95	6.75
起动转矩倍数 T_{st}^*	≥ 2	2.13	2.06

6.1.3 负载试验

该试验中以直流电机为负载，依靠调节直流电机来改变样机的输出功率，从而测出电机在不同负载情况下电机的效率和功率因数，最后绘制出样机的工作特性曲线。表 6-6 是原始数据，处理数据见表 6-7。所得效率曲线如图 6-6 所示，图 6-7 是稀土永磁同步电动机的功率因数曲线。

定子电阻： $R_{ab}=0.1065\ \Omega$ ； $R_{bc}=0.1071\ \Omega$ ； $R_{ac}=0.1071\ \Omega$ （ 27°C ）

表 6-6 试验原始数据

U _a (V)	U _b (V)	U _c (V)	电流 倍数	I _a (A)	I _b (A)	I _c (A)	W ₁ (W)	W ₂ (W)	P (W)	Q (W)	P _F
379	379	380	20	0.18	0.217	0.23	55.9	39.1	94.99	97.6	0.696
379	379	380	20	0.38	0.41	0.46	136	110.5	246.9	125	0.893
381	381	382	20	0.68	0.697	0.75	248	190.7	438.5	173	0.93
378	379	381	20	0.92	0.937	1.01	331	270.2	601.6	202	0.948
380	380	381	20	1.16	1.19	1.22	425	322	746.8	236	0.954
379	380	381	20	1.41	1.43	1.46	517	386	902.9	279	0.955
379	378	380	20	1.67	1.7	1.73	612	454.7	1066	334	0.954
379	380	381	20	1.9	1.93	1.97	696	514.2	1210	386	0.953
379	379	381	20	2.14	2.16	2.2	787	565.4	1352	451	0.949
380	380	381	20	2.36	2.39	2.41	877	604.2	1481	526	0.942
380	380	381	20	2.6	2.62	2.63	972	640.8	1613	609	0.936
380	380	381	20	2.84	2.87	2.87	1068	676.4	1744	707	0.927

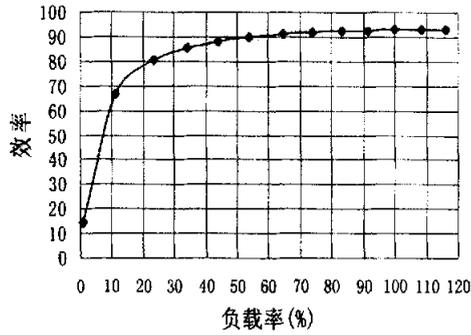


图 6-6 效率曲线

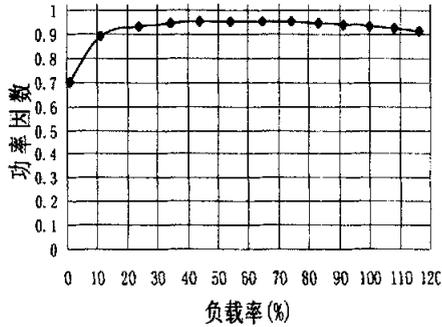


图 6-7 功率因数曲线

表 6-7 试验处理数据

线电压 V	线电流 A	输入功率 W	不变损耗 W	铜耗 W	总损耗 W	输出功率 W	效率	功率因数	负载率%
379.4	4.2	1900	1617	3.3	1630	270.04	14.2	0.6884	0.9
379.5	8.3	4938	1617	13	1655	3283.5	66.5	0.9051	10.9
381.3	14.2	8770	1617	37	1698	7072.1	80.6	0.9352	23.6
379.3	19.1	12032	1617	68	1745	10287	85.5	0.9589	34.3
380.5	23.8	14936	1617	105	1796	13140	88	0.9522	43.8

379.7	28.7	18058	1617	152	1859	16199	89.7	0.9567	54
379.0	34.0	21326	1617	213	1937	19389	90.9	0.9555	64.6
379.9	38.6	24206	1617	276	2014	22192	91.7	0.9530	74
379.3	43.3	27040	1617	347	2099	24941	92.2	0.9506	83.1
380.5	47.7	29620	1617	421	2186	27434	92.6	0.9422	91.4
380.4	52.3	32260	1617	506	2284	29976	92.9	0.9362	99.9
380.2	57.2	34878	1617	604	2396	32482	93.1	0.9259	108
380.3	62.2	37424	1617	714	2519	34905	93.3	0.9131	116

从图 6-6、6-7 可得样机的额定效率和额定功率因数。表 6-8 给出了样机效率和功率因数的设计值和实测值，可见样机的功率因数、效率的设计值与实测值很接近，表明样机设计达到指标要求。

表 6-8 性能指标对比表

	指标值	设计值	实测值
功率因数	≥0.93	0.94	0.9362
效率	≥0.92	0.925	0.929

6.2 增安型电机专用试验

为防止爆炸性混合物的自然，应对增安型电机内部与爆炸性气体相接触的各部分的温度加以限制。这类电机的定转子在起动、额定运行和堵转时间 t_E 内均要避免出现危险的温度。试验应在电压为 $U_N \pm 10\%$ 的条件下进行，周围空气温度的测定应多测几个点，以最高的温度为准。电机各部分的最高温度不得超过 GB3836.1-83 的规定。

6.2.1 额定工作状态下定、转子极限温升试验

电机某部分温度与冷却介质温度之差即为该部分的温升。电机的温升是电机的一项关键指标，温升过高，超过了所用绝缘材料的温度限值，使绕组受到损害，降低了使用寿命；温升过低，表示电机有效材料利用率低，经济性差。

对于增安型电机，为了增加安全性能，所用材料应提高绝缘耐压强度和降低使用耐热温度。增安型电机绝缘绕组温升比标准规定的普通电机温升降低 10℃。笼型转子非绝缘的绕组温升在起动时转子表面温度不得超过 300℃。对于笼形转子表面温度的测量大多数采用埋置热电偶，也用粘贴温度变色条等方法。

为使电机能够长期稳定可靠的工作，需对样机进行温升试验，其温升应满足电机绝缘等级的要求。温升试验中电机在额定电压下连续运行 2 到 3 小时，等电机温度稳定后（半小时内电机温度变化不超过 0.5℃），停机测取电机的热态电阻值，通过电阻法测得电机定子绕组的实际温升，转子表面温度的测量采用粘贴温度变色条。试验结果如表 6-9 所示：（实验室温 29.1℃）

表 6-9 样机温升试验数据

	温度	温升
定子铁芯	80℃	51℃
转子铁芯	140℃	110℃

样机设计采用 B 级绝缘，而指标中规定的 B 级绝缘，定子绕组的温升值（电阻法）对各单层绕组应不超过 80℃，对双层绕组应不超过 70℃，而样机的定子绕组温升是 50.9℃，说明样机的定子温升合格，并且具有一定温升裕度。此外，增安型电动机在起动、额定运行或规定的过载（如在 t_F 时间结束时），其任何部件的最高表面温度应不超过 290℃，转子铁心的最高表面温度是 154℃，温升是 124.9℃，转子温升合格，同时具有很大的温升裕度。

6.2.2 t_E 时间及起动电流比 I_{st}/I_N 的测定

t_E 时间是增安型电机关键防爆参数,是指当电机在最高允许环境温度下作额定运行达到稳定后,将转子堵住,绕组内通过额定频率的额定电流,从开始通过堵转电流的瞬间起直至上升到极限温度的时间,如图 6-8 所示,图中 A 表示最高允许环境温度, B 表示额定运行达到稳定温度, C 表示极限温度。增安型电机的 t_E 时间是区别其他电机的特点之一。

起动电流比 I_{st}/I_N 是指起动电流 I_{st} 与额定电流 I_N 之比,电机效率和功率因数的提高,会使 I_N 减小,起动电流比 I_{st}/I_N 增大。一般增安型电动机的 t_E 时间应大于图 6-9 中按 I_{st}/I_N 确定的最小值。一般 t_E 时间不允许小于 5 秒,起动电流比 I_{st}/I_N 不允许大于 10。

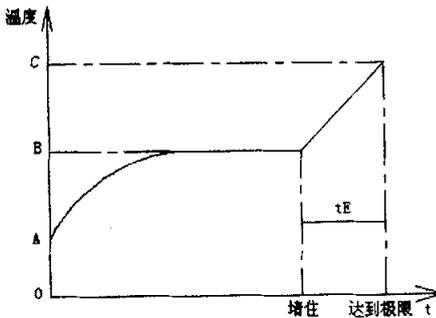


图 6-8 t_E 及堵转温升的图例

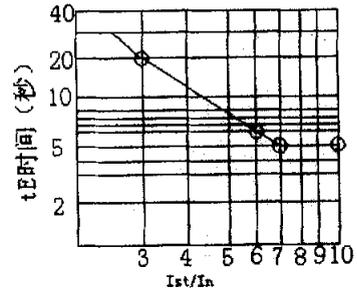


图 6-9 t_E 的最小值与 I_{st}/I_N 的关系

(1) t_E 时间测定

电动机在最高环境温度下达到额定运行最终稳定温升后^[40],交流绕组从通过起动电流时计起,各部分温度上升至表 6-10 规定的温升限值的时间即 t_E 时间。 t_E 时间应不低于当转子堵住时过电流保护装置能够切断电动机的电源所需的时间。电动机的 t_E 时间应大于图 6-9 中按起动电流比确定的 t_E 时间最小值。

表 6-10 电机各部分温升限值

电动机部位	温升限值 K
定子绕组 (B 级绝缘) (电阻法)	145
转子表面	250

(2) 测试结果

由堵转试验测得样机起动电流比 I_{st}/I_N 是 6.78, 则查图 6-9 知 t_E 不得小于 5.5 秒。试验测得样机的转子 t_E 时间是 11.5 秒, 第五章根据设计数据计算的转子 t_E 值为 10.8 秒, 计算值与试验值比较接近。转子 t_E 时间大于 5 秒, 则样机防爆性能合格。。

6.3 小结

对于设计开发的一台两极增安型稀土永磁同步电机进行了试验研究。试验结果表明本文开发的样机说明了样机三相绕组对称, 气隙较均匀, 磁路设计合理。样机效率为 92.9%, 比同功率等级的异步电机高 1.5%~2%, 能够顺利启动。增安型电机的关键防爆参数 t_E 时间合格, 为 11.5 秒, 表明样机可以满足高效、安全运行的要求。

第七章 全文总结

本章对高速高效防爆稀土永磁同步电机的研究工作进行了总结,并对今后要进行的研究做出方向性的展望。

7.1 主要研究内容及成果

高速高效防爆稀土永磁同步电机是一个建立在传统拖动系统上的、涉及多学科、宽领域的研究课题。本文围绕两极增安型稀土永磁同步电机,重点对以下几部分进行了研究:

(1) 研究了稀土永磁同步电动机的转子结构,特别是对两极结构进行深入系统的分析,并设计开发出一种新颖的两极转子结构。

(2) 探讨了稀土永磁直流电动机瓦形磁钢粘接技术。对一种常见的粘接结构进行应力分析,提出一种改进的可靠性较高、抗冲击性能良好的粘接结构,该结构的抗冲击性能在样机上得到验证。

(3) 针对增安型稀土永磁同步电动机的关键防爆参数 t_E 时间,在综合考虑了集肤效应和散热等因素的基础上,提出其转子 t_E 时间的理论计算,并对一台增安型稀土永磁同步电动机进行了验证计算。此外,针对两极电机的设计特点,研究了电机的主要设计参数对增安型稀土永磁同步电动机的 t_E 时间的影响。此外,对堵转试验中出现的转子温升过高问题进行了研究,进一步总结出有利于延长两极增安型稀土永磁同步电动机的 t_E 时间的主要参数的设计准则。

(4) 对上述两极转子结构进行电磁场数值仿真。同时建立了稀土永磁同步电动机的数学模型,并对其起动过程进行了仿真研究,结果表明所设计的样机能够快速起动。

(5) 设计开发了一台高速高效增安型防爆稀土永磁同步电动机,并对样机进行性能试验。试验结果表明,样机性能符合设计指标。

主要研究成果如下:

- (1) 一种新的两极转子结构;该结构具有磁场分布好、漏磁小,电机易起动等优点。
- (2) 一种增安型稀土永磁同步电动机的 t_E 时间计算方法。
- (3) 瓦片形磁钢在稀土永磁直流电机上的一种新的粘接结构;该结构抗冲击性能良好,磁钢粘接牢靠。
- (4) 一台两极增安型稀土永磁同步电动机,具有效率高、防爆性能好等优点。

7.2 工作展望

对于高速高效增安型防爆稀土永磁同步电机研究目前刚刚起步,其工艺性、可靠性和经济性需要进一步提高,电机起动、运行过程中的防爆增安等问题仍需解决。研究高速高效防爆稀土永磁同步电机过程中,发现以下问题需要更深一步地去探索。

(1) 在本文中电机设计采用的是电磁设计法,而随着有限元的发展,在电机设计方面出现了更为精确的场路结合法。

场路结合法是以有限元磁场分析为基础,磁参量用有限元分析得到,而电路参数按路方法计算。从目前永磁电机的研究情况来看,根据永磁电机的本身特性,利用 CAD 技术和计算机数值仿真技术,进一步对其数学模型、运行特性、电磁参数、起动性能进行研究。本文采用手算完成两极稀土永磁同步电动机设计,以后有待使用稀土永磁电机机控制技术研究所开发的电机设计 CAD 软件完成设计工作,将会大大缩短设计周期,并且设计参数更为精确。

(2) 对于高速高效防爆稀土永磁同步电机来说,温度场分布研究比传统的电动机更为重要,这不仅有助于对电动机的内部温升进行更加深入的研究,也有助于进一步提高电动机的功率密度。

现在使用的计算软件大都可以利用有限元法对电动机的电磁场和温度场进行三维动态分析,目前市场上出现的一些计算软件如 Magnet、Ansoft 等,可以

用来进一步对稀土永磁同步电机电磁场、温度场进行分析，在此基础上再对电动机进行优化。

(3) 目前，两极稀土永磁同步电动机设计很不成熟，特别是转子结构方面的设计仍需深入研究。

本文开发研制的两极电机是可提供最高转速的电机，适用于高速的风机、泵类的驱动。由于两极电机转速高，风磨损大，必须改进风扇，减少损耗，以保证两极电机效率。

今后的工作将更加繁重，与高速高效防爆稀土永磁同步电机有关的新的研究课题也会不断被发现，继而被解决。

参考文献

- [1] 中国风机行业研究报告, 2002. 12
- [2] 张传林, 胡文静, 稀土永磁材料的发展及在电机中的应用[J], 微电机, 2003 年第 36 卷, 第 1 期
- [3] 文立强, 靳芝等, 增安型无刷励磁同步电机 tE 时间计算探讨[J], 电气防爆, 1999, 4
- [4] GB3836. 3-2000, 爆炸性气体环境用电气设备, 第 3 部分:增安型“e” [S]
- [5] 陈世坤, 电机设计[M], 机械工业出版社, 2000, P118-P139
- [6] 雷鸣, 雷良钊, 增安型电动机堵转时, 转子集肤效应系数 (K_r)、温度系数 (b_r) 的探讨, 防爆电机, 2000 年第 4 期
- [7] 马鹏起, 国内外稀土原材料市场的现状和发展趋势[D], 全国第一届永磁材料会议论文, 1986
- [8] 雷鸣, 增安型电动机 K_r 、 b_r 系数的理论推导[J], 电气防爆, 2001, 4
- [9] 吴敬法, 靳芝, 贾丽丽, 增安型防爆电动机的优化设计及有关 tE 时间的几个问题[J], 爆炸性环境电气防爆技术, 1998 年第 1 期
- [10] 顾企雄等, 中型低压防爆安全型电机最高发热点测定及堵转时间计算公式的修订
- [11] 梅之芬等, JB/DQ3292-88 加氢装置配套用增安型无刷励磁同步电动机制造检验暂行规定
- [12] 米春亭等, 永磁同步电动机空载电势最佳取值问题研究[J], 西北工业大学学报, 1994. 1, 第 12 卷第 1 期
- [13] 王群京, 稀土钕铁硼永磁同步电动机的设计理论及计算机仿真, 中国科学技术大学出版社, 1997, P65-101
- [14] 贺益康, 交流电机的计算机仿真, 科学出版社, 1990, P190-206
- [15] 李钟明, 稀土永磁电机[M] 国防工业出版社 2001, P225-P235
- [16] 唐任远. 现代永磁电机理论与设计. 机械工业出版社, 1997

参考文献

- [17] 王国强. 实用工程数值模拟技术及其在 ANSYS 上的实践. 西北工业大学, 1998
- [18] 洪庆章等. ANSYS 教学范例. 中国铁道出版社, 2002
- [20] 蓝宇, 张连杰, 大型有限元分析软件 ANSYS 应用科技, 第 27 卷第 6 期 2000 年 6 月
- [21] 尹柏生. 有限元分析系统的发展现状与展望[J]. 计算机世界, 2000, (3):1-2
- [22] 民主德国, K. 福格特 等著, 刘彦清译 电机学-旋转电机设计[M], 机械工业出版社, 1986. 10
- [23] 东南大学, 周鄂 主编, 电机学[M], 水利电力出版社, 1995. 5
- [24] 华中理工大学, 许实章 主编, 电机学[M], 机械工业出版社, 1995. 5
- [25] 黄国治 傅丰礼 主编, Y2 系列三相异步电动机技术手册[M], 机械工业出版社, 2004. 1
- [26] 冯雍明 主编, 电机的工业试验[M], 机械工业出版社, 1990. 4
- [27] 陈琦, 季国瑜, 基于 MATLAB5. 3 的永磁同步电机的分析和仿真[J], 南昌大学学报工科版, 2001 年 3 月, 第 23 卷第一期
- [28] Sancaktar E, Gomatam R. conference paper of reliability, stress analysis, failure prevention aspectd of adhesive and bolted joints rubber components and composite springs, ASME, DE 1998;100:91-111
- [29] B.J.Chalmers, S.A.Hamed, G.D.Baines, Parameters and Performance of a High field Permanent Magnet Synchronous Motor for Variable Frequency Operation, Proc, IEE, 1985, 132Pt.B(3), 117-127
- [30] 杨家明, 起动电机磁钢粘接技术[J], 中国胶粘剂, 第九卷, 第四期
- [31] 李艳芳, 曹维军, 永磁电机拼块式磁极的粘接固定[J], 中小型电机, 2003, 30 (5)
- [32] 刘新华, 高性能两极化纤永磁同步电动机的设计研究, 沈阳工业大学硕士学位论文
- [33] 张文海, 中小型电机温升试验中的能量消耗问题[J], 微电机, 2005, 第 38 卷, 第 2 期
- [34] 周勤凤, 陆显斌 电机在制造过程中降低温升的对策[J], 防爆电机, 1999, 第 3 期
- [35] 电子工业部第二十一研究所, 微特电机设计手册[M], 上海科学技术出版社, 1998 年 7 月

参考文献

- [36] 严静妮, 窦满峰, 增安型稀土永磁同步电动机 t_e 时间研究[J], 微特电机, 2005 年第 8 期
- [37] 窦满峰, 严静妮等, 微型稀土永磁直流电机磁钢粘接技术研究[J], 微特电机, 2005 年第 8 期
- [38] 窦满峰, 稀土永磁同步电动机起动过程的分析及仿真[J], 稀土永磁电机理论与应用, 1991
- [39] 严静妮, 窦满峰等, Ansys 在稀土永磁同步电机设计中的应用[J], 微电机, 2006 年第 1 期
- [40] T. J. Miller. Methods for Testing Permanent Polyphase AC Motors. IEEE on IAS 1981, 23D, pp. 494-499
- [41] 张志涌等, 精通 MATLAB6.5 版[M], 北京航空航天大学出版社, 2004 年 3 月
- [42] 江辉, 稀土永磁同步电机有限元分析与计算, 福州大学硕士研究生论文, 2001.12.1
- [43] F.M.Abdel-Rader,S.M.Osheba. performance Analysis of Permenent Magnet Synchronous Motor. Part I: Dynamic Performance.IEEE Trans. On Power Con. 1990,5(2): 366-373
- [44] M.A.Rahman,A.M.osheiba,Performance of Line-start permanent Magnet Synchronous Motors.1990,5(2):366-373
- [45] 励鹤鸣, 吴凯等, 三相永磁同步电动机起动过程性能分析, 微特电机, 1995 (1): 2-6
- [46] 马瑞卿, 窦满峰等, 稀土永磁同步电动机最佳效率调速, 西北工业大学学报, 1996, Aug. vol. 14, No. 3:401-405
- [47] 叶东, 张锋奇等, 稀土永磁同步电动机起动过程研究, 中国电机工程学报, 1998, Sept. vol. 18, No. 5:335-339
- [48] TAX 系列增安型三相稀土永磁同步电动机技术条件(机座号 H80-H315), 岳阳中闽特种电机有限公司企业标准, 岳阳中闽特种电机有限公司、西北工业大学联合发布
- [49] P. H.Mellor, Estimation of Parameters and Performance of Rare Earth Permanent Magnet Motor: Avoiding Measurement of Load Angle. IEE PROCEEDINGS B, 1991,138(6), 322-330
- [50] H.Tai, A.KeyHani, et al, On-line Synchronous Machine Parameter Estimation from Small Disturbance Operating Data

参考文献

-
- [51] M.A.Rahman, T.A.Little, Dynamic Performance analysis of Permanent Magnet Synchronous Motors, IEEE TRANS. On Power Apparatus and Systems, Vol.Pas-103, No.6, pp.1227-1282, 1984
- [52] S.F.Gorman, C.Chen, J.J.Cathey, Determination of Permanent Magnet Drive Analysis, IEEE Trans.1998,3(3),674-680
- [53] 高景德等, 交流电机及其系统的分析, 清华大学出版社, 1993
- [54] 陈俊峰, 永磁电机, 机械工业出版社, 1995
- [55] 符曦, 高磁场永磁式电动机及其驱动系统, 机械工业出版社, 1997
- [56] 胡之光, 电机电磁场的分析与计算, 机械工业出版社, 1989
- [57] 潭浩强, C语言设计, 清华大学出版社, 1997. 2
- [58] 刘小东, 赵衡兵等, 钕铁硼永磁盘式同步电动机的设计研究, 微特电机, 1998. 3: 6-7
- [59] 郭振宏, 徐广人等, 稀土永磁同步电动机现代设计方法, 微特电机, 1998. 3: 488-494
- [60] 叶东, 李和明等, 永磁直线同步电动机计算机辅助设计及 7.5W 钕铁硼永磁同步电动机, 微特电机, 1998. 3: 495-502

发表论文和参加科研情况说明

一、在学期间发表的论文

- 1、严静妮，窦满峰，增安型稀土永磁同步电动机 t_c 时间研究，微特电机，2005 年第 8 期
- 2、窦满峰，严静妮等，微型稀土永磁直流电机磁钢粘接技术研究，微特电机，2005 年第 8 期
- 3、严静妮，窦满峰等，Ansys 在稀土永磁同步电机设计中的应用，微电机，2006 年第 1 期
- 4、严静妮，窦满峰等，稀土永磁同步电动机转子温升问题研究，微电机（已投出）
- 5、张敏，窦满峰，严静妮，基于直接设计法的稀土永磁同步电动机 CAD 系统，微特电机，2005 年第 9 期
- 6、何琳琳，窦满峰，严静妮，高空气球吊篮的全数字反捻控制系统，微特电机，2005 年第 12 期

二、参加科研情况

- 1、参与国家“863”项目中防爆高速高效稀土永磁电机课题的部分内容，已递交专利一项；
- 2、主持西北工业大学研究生种子基金项目一项；
- 3、参与风云三号太阳能帆板展开机构用双余度稀土永磁直流电机的研制工作，该项目获省科技进步三等奖，并申请专利一份，本人均排名第六。

致 谢

作者在攻读硕士期间，得到了导师窦满峰教授的精心指导。窦老师治学严谨，学识渊博，视野开阔，为我营造了一种良好的学术氛围，使我不仅树立了正确的学术目标，而且还明白了许多待人接物与为人处世的道理。在论文的研究过程中，窦老师多次为我指明方向，使我少走弯路，受益匪浅。在此特向窦老师表示深深的谢意和崇高的敬意。

感谢西北工业大学稀土永磁电机及控制研究所的刘卫国教授、马瑞卿教授、刘景林教授、骆光照博士、罗玲博士、韩英桃高级工程师、罗兵工程师等的大力帮助和支持。感谢你们三年来对我在学习工作生活中的关心和照顾！感谢我的师兄冯智海和同学宋受俊，林全喜，杨琰，敖惠君，何琳琳，丁冲，张敏，符荣等对我的帮助和鼓励。

感谢所有给予支持和帮助的朋友！你们是我不断前进的动力源泉！

最后感谢我的家人，感谢父母对我的养育之恩！没有他们的支持和无私奉献也就不会有我今天的成绩，是他们使我懂得了人生的追求所在，我将把他们对优良品德的定义铭刻在心！感谢伴我成长、给我许多快乐和欢笑的弟弟，在我漫长的求学路上，有他的理解和鼓励。

感谢我的朋友胡海豹对我的理解和支持！