

摘 要

高速电机现正成为电机领域的研究热点之一。其主要特点有两个：一是转子的高速旋转；二是定子绕组电流和铁心中磁通的高频率。由此决定了不同于普通电机的高速电机特有的关键技术。本文针对一台已经研制出的 100KW 高速永磁电机的机械特性进行了分析研究。主要包括以下内容：

首先，对高速永磁电机的定子、转子结构，工作原理和 ANSYS 软件进行了简单的介绍。定子主要由机座、主磁极、换向极和电刷装置组成，作用是产生磁场。转子由电枢铁心和电枢绕组，换向器，轴及风扇等组成，作用是产生电磁转矩和感应电动势。电机中的电磁能与机械能的转换是在磁场中完成的，本设计中采用永磁体建立磁场，完成能量的转换。

其次，对高速永磁电机的转子强度进行了分析。基于弹性力学理论和有限元接触理论建立了高速永磁转子应力计算模型，确定了护套和永磁体之间的过盈量，分析了永磁体和护套的强度。永磁体与护套之间采用过盈配合，用护套对永磁体施加静态预压力抵消高速旋转产生的拉应力，使永磁体高速旋转时仍能承受一定的压应力，从而保证永磁转子的安全运行。

关键词：高速永磁电机，转子强度，ANSYS 软件

Abstract

The high-speed electrical motors are now becoming one of the hot areas of research. There are two main features: First, the rotor high-speed rotation and the other is the stator windings current and iron hearts of the high-frequency magnetic flux. This decision is different from the ordinary high-speed electrical motor unique key technologies. This paper has developed a 100 KW of high-speed permanent magnet motor of the mechanical properties of the analysis. Mainly include the following:

First, It is the simple introduction to the high-speed permanent magnet motor stator and rotor structure, working principle and ANSYS software. Stator mainly consists of the main magnetic pole, and brush, acting as generating the magnetic field. Rotor consists of the armature core and armature winding, commutator, shaft and fan, and other components, acting a role in the electromagnetic torque sensors and EMF. The conversion between the electromagnetic energy and mechanical energy is completed in the magnetic field, and permanent magnet was applied in this designing to establish magnetic field to complete the conversion of energy.

Secondly, the analysis of the rotor strength of the high-speed permanent magnet motor. On the basis the elasticity theory and finite element contact theory established a high-speed permanent magnet rotor stress model to determine the sheath between the permanent magnet and a win amount of sheathing and the permanent magnet strength. Permanent magnet and used between the jacket fit, with the permanent magnet sheath static pre-imposed pressure to offset high-speed rotation of the stress so that the permanent magnet can bear a certain stress at high-speed rotation, thus ensuring permanent magnet rotor the safe operation.

Key words: high-speed permanent magnet motor, the rotor strength, ANSYS software

1.1 课题的来源及意义

现代社会中，电能是使用最广泛的一种能源。这种能量形式有许多优点，如生产和变换比较经济，传输和分配比较容易，使用和控制比较方便等。人类自从使用了电能，从繁重的体力劳动中得到了解放，并能完成手工劳动不能完成的任务。

目前，我国电力工业居世界第二位^[1]。随着电力工业的发展，发电厂的装机容量在不断扩大，单机容量为 200MW、300MW、600MW 机组已成为我国电网的主力机型。由于我国幅员辽阔，电力发展及分布很不均匀，而经济发展又极不平衡，偏远地区用电困难，中心城市用电高峰期电力供应不足的情况仍很严重。集中发电、远距离输电和大电网互联的电力系统是目前电力生产、输送和分配的主要方式。但这种模式有缺点，如电力输送所需的成本随着输电距离的增加而增大；电能在输送过程中存在着损耗；电力需求随季节、时间的不断变化，造成电力生产与用户需求不协调等等。另外，集中式供电模式面临更严重的问题是：一旦供电中枢或电力网出现故障，造成的经济损失将难以估量。而且这种大电网又极易遭到战争或恐怖势力的破坏，严重时将危害国家安全；另外集中式大电网还不能跟踪电力负荷变化，而为了短暂的峰荷建造发电厂花费巨大，且经济效益也非常低。采用分布式供电系统作为辅助手段，可以很好地解决这些问题。分布式供电是指将发电系统以小规模、分散式布置在用户附近，可独立地输出电能、热能或冷能的系统。当今分布式主要是指用液体或气体燃料的内燃机、微型燃气轮机和各种工程用的燃料电池，其具有良好的环保性能。

纵观西方发达国家电力工业的发展过程，可以发现：电力工业的发展经历了从分布式供电到集中式供电，又到分布和集中相结合的供电方式的演变。造成这种现象不仅仅是由于生活水平提高的需求，而且也是集中式供电方式自身所固有的缺陷造成的。

由微型燃气轮机直接驱动内置式高速发电机，发电机与压气机、透气同轴，转速在 50000r/min~120000r/min 之间。高速发电机发出高频交流电，经电力变换系统转换成直流电后，再转换为 50Hz/380V 的交流电供用户使用。这样不仅简化了结构，使整台发电机组体积显著减小，重量减轻，而且也使系统的可靠性得到了提高。

在电能的生产，输送和使用等方面，电机起着重要的作用。电机发明至今已有 200 年的历史。工业革命以后，蒸汽动力得以普遍应用，但蒸汽动力输送和管理不便的缺点日益突出，迫使人们努力寻找新的动力源。十九世纪初，人们已经积累了有关电磁现象的丰富知识，在此基础上，法拉第发现了载流导体在磁场中受力现象，很快

原始型式的电动机就被制造出来了。但由于驱动源是蓄电池，当时极为昂贵，因而也就不能被推广。为此人们寻求能将机械能转为电能的装置。1831年，法拉第发现电磁感应定律，第二年皮克利用磁铁和线圈的相对运动，再加上一个换向装置，制造了一台原始型旋转磁极式直流发电机，这就是现代直流发电机的雏形。

电机是随着生产发展而产生和发展的，而电机的发展反过来又促进社会生产力的不断提高。随着国民经济的发展，工业自动化水平的不断提高，各种高科技领域如计算机、通信、人造卫星等行业也广泛应用各种控制电机。

电机是使机械能与电能相互转换的机械。历史上最早的电源是电池，只能供应直流电能，所以直流电机的发展比交流电机早。后来交流电机发展比较快，这是因为交流电机与直流电机相比有许多优点，如易生产、成本低、能做到较大容量等。目前电站的发电机全都是交流电机；用在各个行业的电机，大部分也是交流电机。然而，直流电机目前仍有相当多的应用。

电机主要包括发电机、变压器和电动机等类型^[2]。发电机可把机械能转换为电能，主要用于生产电能的发电厂。在火电厂、水电厂和核电厂中，水轮机、汽轮机带动发电机，把燃料燃烧得到的热能、水流的机械能或原子核裂变的原子能都转变为电能。发电机发出的电压为10.5~20KV，为了减少远距离输电中的能量损失，应采用高压输电，输电电压为110KV、220KV、330KV、500KV或更高。把发电机发出的电压升高到输电电压是由变压器完成的。高压输电线将电能输送到各个用电区，再由变压器把高电压降为所需的低电压。在十分庞大又复杂的电力系统中，发电机和变压器则是最重要的设备。

电动机将电能转换为机械能，用来驱动各种用途的生产机械。机械制造业、冶金工业、煤炭工业、石油工业、轻纺工业、化学工业、及其他各工矿企业中，广泛应用各种电机。例如用电动机拖动各种机床、轧钢机、电铲等生产机械。

当前科学技术突飞猛进，因此电机在制造上也向着大型、巨型发展。在应用上，由于计算机技术迅速发展，将会出现由机器人工作的无人工厂，以计算机作为这些工厂的“中枢神经”，使实现无人化成为可能。

近30年来，由于大功率电力电子器件以及微电子技术、微型计算机技术的一系列进展促进了交流调速技术的发展，已经生产出多种电机交流调速系统，不仅提高了生产机械的性能，而且节省了大量电能。随着现代社会的发展，电力和电机工业在国民经济中仍将起着重要的作用，并将得到更大的发展。

1.2 高速电机介绍及应用前景

高速电机正成为电机领域的研究热点。所谓高速电机通常是指转速超过 10000r/min 的电机。它们具有以下优点：一是由于转速高，所以电机功率密度高，而体积远小于功率普通的电机，可以有效的节约材料。二是可与原动机相连，取消了传统的减速机构，传动效率高，噪音小。三是由于高速电机转动惯量小，所以动态相应快^[3-5]。

基于以上优点，高速电机在以下各方面具有广阔的应用前景：

(1) 高速电机在空调或冰箱的离心式压缩机等各种场合得到应用^[6]，而随着科学技术的发展，特殊要求越来越多，它的应用也会越来越广泛。

(2) 随着汽车工业混合动力汽车的发展，体积小，重量轻的高速发电机将会得到充分的重视，并在混合动力汽车，航空，船舶等领域具有良好的应用前景。

(3) 由燃气轮机驱动的高速发电机体积小，具有较高的机动性，可用于一些重要设施的备用电源，也可作为独立电源或小型电站，弥补集中式供电的不足，具有重要的实用价值。

由于高速电机转子上的离心力与线速度的平方成正比，高速电机要求具有很高的机械强度；又由于高速电机频率高，铁耗大，在设计时应适当降低铁心中的磁密，采用低损耗的铁心材料。

轴承的研究也是与高速电机密不可分的内容，因为普通轴承难以承受在高速系统中承受长时间运行，必须采用新材料和新结构的轴承。目前人们正在研究的类型有气动轴承及磁力轴承。

高速电机可以有多种结构形式，如感应电机、永磁电机和磁阻电机等。电机在高速旋转时的离心力很大，当线速度达到 200m/s 以上时，常规叠片转子难以承受高速旋转产生的离心力，需要采用特殊的高强度叠片或实心转子。

在转子动力学发展的近百年的历史中，出现过很多计算方法，发展到今天，现代的计算方法主要可以分为两大类：传递矩阵法和有限元法。

有限元法的运动方程表达方式简洁，规范，在求解转子动力学问题或转子和周围结构一起组成的复杂机械系统的问题时，有很多优点。有限元法对复杂转子系统剖分庞大，计算结果比传递矩阵法准确，然而计算耗时长，占用内存大。现代计算机技术的发展，给有限元法提供了良好的硬件技术，目前，有限元方法得到了广泛的应用。

总而言之，国外对高速电机及相关技术的研究比较早，已经取得了很多的研究成果，而且随着新材料的不断出现，加工工艺的不断改进，技术必将以更快的速度向前推进。国内对高速电机的研究还不是很多，基本上限于功率较小的发电机或电动机。

1.3 永磁材料介绍及永磁电机

永磁材料是指经外部磁场饱和充磁后，无需外部能量而提供磁场的一种特殊材料，也称硬磁材料。

最早的永磁材料是磁铁矿，在最初的电机中，人们利用磁铁矿石建立所需要的磁场。随着科学技术的进步，永磁材料近年来开发很快，出现了性能各异的永磁材料。衡量永磁材料的好坏，主要是根据它的剩磁磁密 B_r 、矫顽力 H_c 、最大磁能积 $(BH)_{max}$ 和回复系数以及机械加工性能和稳定性等。现有铝镍钴、铁氧体和稀土永磁体三大类^[7]。

永磁电机的优点有：一是取消了励磁系统损耗，提高了效率。二是励磁绕组和励磁电源，结构简单，运行可靠。三是电机的尺寸和形状灵活多样，体积小。

由于电子技术和控制技术的发展和永磁电机的控制技术亦已成熟并日趋完善。以往电机的概念和应用范围已被当今的电机大大扩展。可以毫不夸张地说，永磁电机已在从小到大，从一般控制驱动到高精度的伺服驱动，从人们日常生活到各种高精尖的科技领域作为最主要的驱动电机出现，而且前景会越来越明显。通过对感应电机和同步电机的电磁、热和机械方面的比较，指出永磁电机是应用在高速电机的最佳选择。

1.4 本文研究的主要内容

本文主要针对一台已经研制成功的高速电机样机应用有限元软件进行机械特性分析，对电机进行机械特性研究的主要目的是校验转子是否能够承受所允许的应力，保证高速电机的安全运行。

- (1) 熟悉永磁电机的运行特点和工作原理。
- (2) 对高速电机转子护套和永磁体应力进行分析。
- (3) 采用有限元法计算护套和永磁体内的应力分布，由此保障永磁转子在高速运行时安全。

第 2 章 高速永磁电机的基本结构

高速电机可以有多种结构形式，如感应电机，永磁电机和磁阻电机等，它们各有优缺点。从功率密度和效率来看，选择顺序为永磁电机、感应电机和磁阻电机；然而从转子机械特性来看其选择顺序需要颠倒过来，即磁阻电机、感应电机和永磁电机。在确定高速电机结构形式时，需要对其电磁特性和机械特性综合对比研究。目前中小功率高速电机采用永磁电机较多，中大功率高速电机采用感应电机较多。

高速电机主要有两个特点：一是转子的高速旋转，转速高达每分钟数万转甚至十几万转；二是定子绕组电流和铁心中磁通的高频率，一般在 1000hz 以上。由此决定了不同于普通电机的高速电机特有的关键技术。

2.1 高速永磁电机的主要结构及特点

2.1.1 定子结构

定子的主要作用是产生磁场，由机座、主磁极、换向极和电刷装置组成。

(1) 机座：既作为电机的机械支撑，又是磁极间磁通的通路。

(2) 主磁极：其作用是使电枢表面的气隙磁通密度在空间按一定形状分布。通常用 0.5~3mm 厚的低碳钢板冲成一定形状的冲片，然后叠压形成。

(3) 换向极：其作用是帮助换向。换向极的气隙通常有两处：一是极弧与电枢表面形成的气隙；另一处是换向极与磁轭接触处，常用非导磁材料垫出，以减少漏磁。

(4) 定子铁心结构：高速永磁电机转速高，定子绕组电流和铁心中磁场交变频率较高。铁心中磁通的变化频率与电机的转速成正比，额定转速 60000r/min 的高速永磁电机定子磁场变化率是 3000r/min 电机频率的 20 倍，如铁心中的磁通密度相同，高速电机铁耗将增加 50 倍。为降低铁耗，目前高速电机定子铁心采用低损耗冷轧电硅钢片。

高速电机通常采用多槽、少槽和无槽三种不同类型的结构。无槽结构不产生高频齿波磁场，对减少转子损耗十分有利，但有效气隙大，气隙磁密较小，材料利用率低，需采用高性能的永磁材料。有槽结构产生的气隙磁场强，材料利用率高，但存在齿谐波磁场，转子的损耗大。本设计中，定子铁心采用六槽结构。如图 2.1b 所示

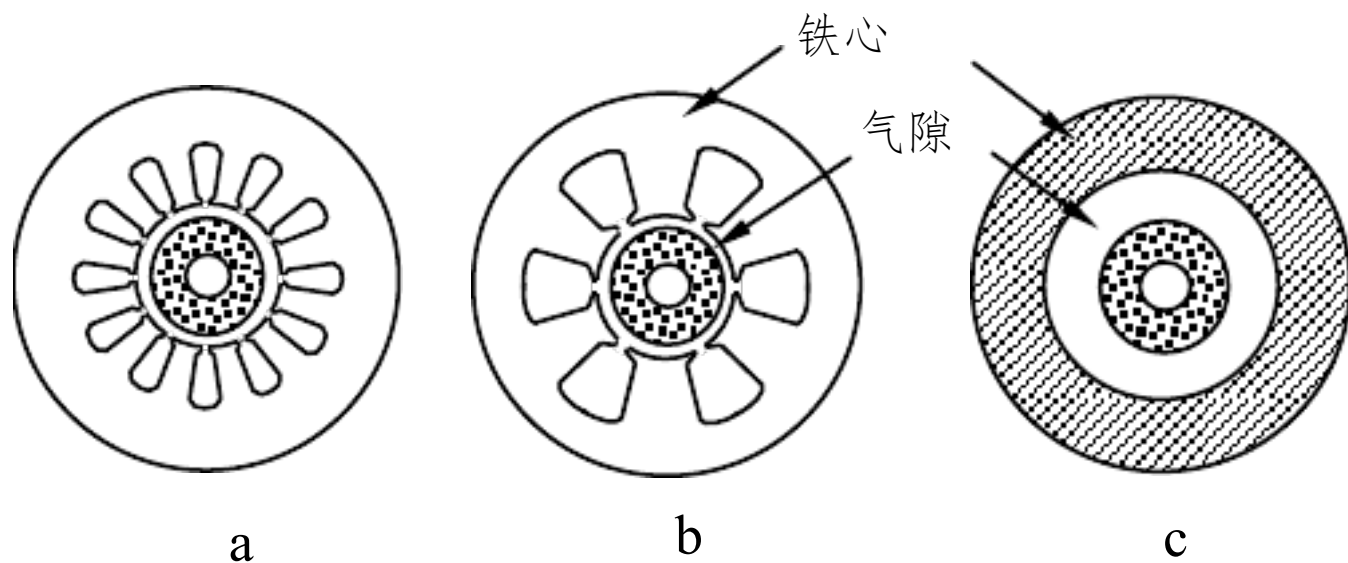


图 2.1 定子铁心结构

2.1.2 转子结构

转子通常称为电枢。作用是产生电磁转矩和感应电动势，由电枢铁心和电枢绕组，换向器，轴及风扇等组成。

转子设计是高速永磁电机设计的关键。在高速永磁发电机的设计中，永磁转子结构成为首选。但是，它也有不可避免的缺点：永磁体不能承受巨大的离心力，必须采用一些高强度材料来保护。此外，高温下容易引起永磁体退磁，所以设计时要防止转子过热。

(1) 电枢铁心：提供主极下磁通的通路。通常用低硅硅钢片或冷轧硅钢片叠成，片间涂绝缘漆以减少损耗。

(2) 换向器：换向器是电动机的整流部分，它是用来向旋转电枢供电和向各段绕组分配电流的。电枢绕组内流过的是交变电流，而外电路是直流电，换向器即是将电源提供的直流电转换为电枢绕组中的交变电流，使电动机工作时始终按一个方向连续旋转。

(3) 电枢绕组：电枢绕组是用带绝缘的铜导线绕成一个个的线圈元件，嵌放在电枢铁心的槽中，各元件按一定的规律联结到相应的换向片上，全部这些元件就组成了电枢绕组。元件可能是多匝的，也可能只有一匝。每个元件可预先做成相同的形状，嵌放在槽中时可以彼此错开。绕组导线的截面积决定于元件内通过电流的大小。除了每层导线上都包有绝缘外，每层的各元件边外面还包有绝缘，上下层之间有绝缘垫片，最外用楔将元件压住，以免转动时元件因离心力而甩出。绕组元件被嵌放在电枢铁心的槽内，它的一个元件边被放在槽的上层，另一边嵌放在另一槽的下层，同一槽内上下二层放置了不同元件的有效边。电枢绕组可分为：单叠绕组、单波绕组、复叠绕组、复波绕组、混合绕组等。它们的主要区别在于从电刷外看进去，电枢绕组联结成了不同数目的并联支路。

(4) 永磁材料的选择

衡量永磁材料的好坏，主要是根据它的剩磁磁密 B_r ，矫顽力 H_c ，最大磁能积 $(BH)_{\max}$ 和回复系数以及机械加工性能和稳定性等。目前国内外永磁电机所采用的磁钢大致分三类：

第一类是铝镍钴系磁钢。铝镍钴是本世纪三十年代研制成功的永磁材料，主要成分是铁、铝、镍、钴。虽其具有剩磁感应强度高，机械强度良好，热稳定性好等优点，但它矫顽力低，抗退磁能力差，而且要用贵重的金属钴，成本高，这些不足大大限制了它在电机中的应用。

第二类是铁氧体永磁材料。铁氧体磁体是本世纪五十年代初开发的永磁材料，它是非金属的，包含氧化钡和氧化铁或氧化锶和氧化铁，由粉末加压烧结成型。其最大的特点是价格低廉，有较高的矫顽力，不易失磁，其不足是剩磁感应强度和最大磁能积都较低。

第三类是一些稀土合金。钕钴稀土磁材料在六十年代中期间问世，它具有铝镍钴一样高的剩磁感应强度，矫顽力比铁氧体高，但钕稀土材料价格较高。80年代初钕铁硼稀土永磁材料的出现，它具有高的剩磁感应强度，高的矫顽力 H_c ，高的磁能积 $(BH)_{\max}$ ，这些特点特别适合在电机中使用。它们不足是温度系数大，居里点低，容易氧化生锈而需涂复处理。经过这几年的不断改进提高，这些缺点大多已经克服，现钕铁硼永磁材料最高的工作温度已可达 180°C ，一般也可达 150°C ，已足以满足绝大多数电机的使用要求。我国稀土蕴藏量很大，具有更高性能的稀土永磁材料还在不断被研制出来。永磁材料的发展极大地推动了永磁电机的开发应用。

(5) 永磁体的保护

高速永磁电机选用的是烧结钕铁硼永磁材料，这种永磁材料能承受较大的压应力 (1000mpa)，但不能承受大的拉应力，其抗拉强度一般低于抗压强度的十分之一。如果没有保护措施，永磁体将无法承受转子高速旋转时产生的巨大离心力而被破坏。

目前保护永磁体的措施有两种：一种保护方法是采用碳纤维绑扎永磁体；另一种是在永磁体外加非导磁保护套。

采用碳纤维绑扎时绑扎带的厚度要小，而且不产生高频涡流损耗。但是碳纤维绑扎工艺比较复杂。为了屏蔽气隙磁场中的高次谐波，减少永磁体中的磁滞损耗，一般需要在永磁体表面放置一层薄铜片，这就进一步增加了对加工工艺的要求，而且不利于转子动平衡，碳纤维是热的不良导体，这对永磁体的散热不利。

采用非导磁保护套的方法，根据永磁体抗压性能远大于抗拉性能的特点，永磁体

与护套之间采用过盈配合，即对静态的永磁体施加一定预压应力，以抵消高速旋转时离心力产生的拉应力，并保证永磁体在转子高速旋转时始终承受适当的压应力。非导磁保护套能够对高频磁场起到一定的屏蔽作用。导热性能好，有利于永磁体的散热，但护套为导体，会产生涡流损耗。如图 2.2 所示

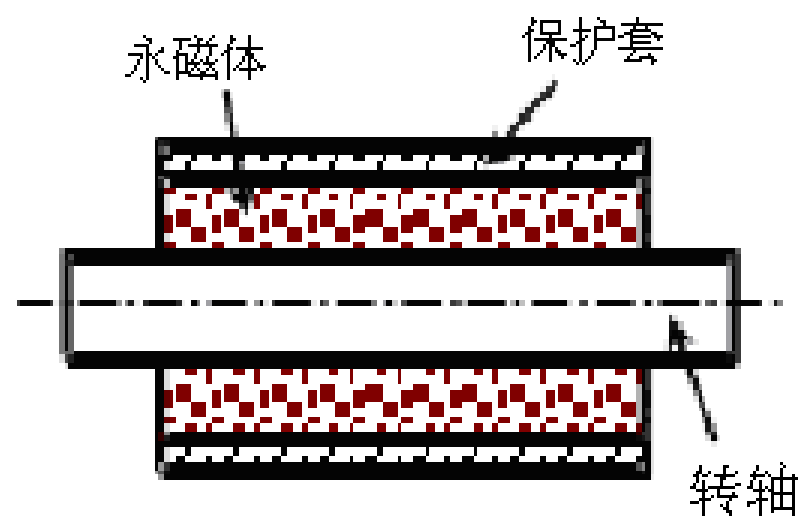


图 2.2 高速永磁电机转子结构

(6) 极数的选择

高速电机一般采用 2 极或 4 极结构，各有优缺点。2 极电机的优点是转子永磁体可采用整体结构，保证转子经向各同性有利于转子的动态平衡，同时可减少定子绕组电流和铁心中磁场的交变频率，有利于降低高额附加损耗。2 极电机的缺点是定子绕组端部较长而铁心轭部较厚。

4 极电机刚好与 2 极电机相反，优点是定子绕组端部较短和铁心轭部较薄，缺点是永磁转子需要多块永磁体拼接，这就降低了转子的刚度，同时定子绕组电流和铁心中磁场的交变频率较高，增加了铁耗。本设计中采用的是 4 极结构。

在直流电动机中，电枢反应磁动势对前半极增强，对后半极去磁。对于单向旋转的永磁电机，前半极的部分或全部可采用性能较低的而价格便宜的永磁材料，如铁氧体永磁材料或者使用软铁；后半极采用高性能永磁材料，如钕铁硼永磁，就是所谓的复合磁极结构。其优点是：可以保证电机性能的前提下，减少永磁材料的用量，降低电机的成本。

(7) 转子的直径和长度的选择

高速永磁电机的转速很高，一般在 20000r/min 以上，甚至高达十几万转，转子旋转时将产生很大的离心力。以减小离心力角度来看，高速电机转子直径应选得越小越好，所以高速电机转子一般为细长型。然而转子要有足够大的空间放置永磁体和转轴，因此，转子直径不可过小。而且为了保证转子具有足够的刚度和较高的临界转速，转子轴向不可过长。特别是采用磁悬浮轴承的高速电机转子，为了减小跨越临界转速时磁悬浮控制的难度，应采用适当的转子长径比。

电机中的电磁能与机械能的转换是在磁场中完成的。要弄清电机的工作原理和性能必须对电机的磁场有正确的了解。直流电机工作时，首先需要建立一个磁场，它可以由永久磁铁或由直流励磁的励磁绕组产生。一般前者建立的磁场比后者建立的磁场弱。本设计中采用永磁体建立磁场。

利用永久磁铁励磁，必须使永磁磁路中包含一段由其它物质所组成的磁路，这种磁路通常是气隙。气隙磁场就是由永磁体产生，工作原理与传统直流电机相同，只是主磁通由永磁体产生，因而不能人为调节。

电枢是用来产生磁通的，它由电枢铁心和绕组线圈组成。电枢铁心作为磁的通路及嵌放电枢绕组之用。当电枢在磁场中旋转时，铁心中的磁通方向不断变化，因而也会产生涡流及磁滞损耗，为了减少涡流损耗，电枢铁心一般用 或 0.35mm 厚的涂有绝缘漆的硅钢片叠压而成。电枢绕组是由许多个完全相同的绕组元件按一定的规律联接起来所组成。绕组元件一般就是一个线圈，它的两个线端分别接到换向器的两个换向片上，各元件是在换向片上相互联接起来的

电枢绕组是电动机的核心部分。当电枢在磁场中旋转时，电枢绕组会感应电动势。当电枢绕组中有电流流过时，会产生电枢磁动势，它与气隙磁场相互作用，又产生电磁转矩。电动势与电流相互作用，吸收或放出电磁功率。二者同时存在构成电磁能量与机械能量的相互转换，完成电机的基本功能。电枢绕组安放在定子铁心中，永磁体固定在转子上，利用转子位置传感器检查永磁磁极的位置，据此确定定子绕组的导通状态，使电机产生稳定持续的电磁转矩。因此，电枢绕组在电机中起着重要的作用。

2.3 ANSYS 软件和有限元方法简介

2.3.1 ANSYS 软件

ANSYS 软件诞生于上世纪七十年代，在有限元的发展史上，一直作为一个重要成员存在，在激烈的市场竞争中生存下来，并发展壮大，目前是世界上最有影响的有限元软件之一。

ANSYS 软件是融结构、流体、电场、磁场、声场分析于一体的大型通用有限元分析软件。由世界上最大的有限元分析软件公司之一的美国 ANSYS 开发，它能与多数 CAD 软件接口，实现数据的共享和交换，如 Pro/Engineer, NASTRAN, Alogor, I—DEAS, AutoCAD 等，是现代产品设计中的高级 CAD 工具之一。软

件主要包括三个部分：前处理模块，分析计算模块和后处理模块。

前处理模块提供了一个强大的实体建模及网格划分工具，用户可以方便地构造有限元模型；分析计算模块包括结构分析（可进行线性分析、非线性分析和高度非线性分析）、流体动力学分析、电磁场分析、声场分析、压电分析以及多物理场的耦合分析，可模拟多种物理介质的相互作用，具有灵敏度分析及优化分析能力；后处理模块可将计算结果以彩色等值线显示、梯度显示、矢量显示、粒子流迹显示、立体切片显示、透明及半透明显示（可看到结构内部）等图形方式显示出来，也可将计算结果以图表、曲线形式显示或输出。软件提供了 100 种以上的单元类型，用来模拟工程中的各种结构和材料。

2.3.2 有限元方法

有限元方法的基本思想：首先将偏微分方程的边值问题等价于变分问题，再利用合适的单元类型对求解区域进行剖分，在单元上构造相应的插值函数，对各个单元进行分析，得到单元内能量的表达式和单元能量对三个节点磁位的导数；然后对所有单元的分析结果进行总体合成，将能量泛函的极值问题转化为多元能量函数的极值问题，建立以各种节点磁位为变量的代数方程组，得到各节点的磁位，进而得到相应的磁场量。

主要特点是根据该方法编制的软件系统对于各种各样的电磁计算问题具有较强的适应性，通过前处理过程有效的形成方程并求解。它能方便的处理非线性介质特性，如铁磁饱和特性等。它所形成的代数方程具有系数矩阵对称正定、稀疏等特点，所以求解容易，收敛性好，占用计算机内存量也较少。这些正是有限元法能成为电气设备计算机辅助设计核心模块的优势所在。

从当前电磁计算的前沿发展来看，有限元方法不仅本身在应用方面具有很大的潜力，而且结合其他理论和方法还有广阔的发展前景。

章 永磁发电机的机械特性分析

3.1. 基本数据

电机尺寸：(1) 考虑变流器效率 0.95；(2) 发电机输出额定功率 $P_N = 110.53 \text{ kW}$ ；

(3) $U_N = 320 \text{ V}$ ； $n_N = 10000 \text{ r/min}$ ， $\eta = 0.95$ $m = 3$ ， $2p = 8$ ， $2q = 4$ ；

(4) $F = (p+q) n_N / 60 = (4+2) 10000 / 60 = 1000 \text{ Hz}$ ； 定子内径 $D_{i1} = 76 \text{ mm}$ ；

(5) $I_N = P_N / (3 U_N \cos\Phi) = 110530 / (320 \times 0.95) = 121 \text{ (A)}$ ；

(6) 定子极距 $\tau = \pi D_{i1} / (2p) = \pi \times 76 / 24 = 29.8 \text{ (mm)}$ ；

(7) 旋转速度 $v = 2f\tau / 1000 = 2 \times 1000 \times 29.8 / 1000 = 59.6 \text{ (m/s)}$ ；

(8) 铁心长选取 $l_t = 125 \text{ mm}$ ； 定子槽数 $Z_1 = 6$ 设槽满率 $S_f = 0.8$

3.2 110kW 永磁发电机的 ANSYS 电磁场分析

3.2.1 ANSYS 电磁场分析

ANSYS 电磁场分析，其基本原理是将所处理的对象首先划分成有限个单元，然后根据矢量磁势或电势，继而进一步求解出其他相关量。

它的主要分析过程是：①前处理，定义物理环境，包括坐标系选用、单位制设定、有限单元选用与说明和材料特性定义等。②对问题进行几何建模，然后对求解区域用选定的单元进行划分，并对划分的单元赋予特性和进行编号。（属前处理）③施加边界条件和载荷。④求解和后处理。在这次设计中对二维静态磁场进行了分析。

3.2.2 前处理

先确定关键点，ANSYS 语句 K, NPT, X, Y, Z 选定关键点。

程序如下所示：

```
/UNITS,SI
```

```
/PREP7
```

!进入前处理

```
*SET,PI,2*ASIN(1)
```

```
*SET,F,1000
```

```
*SET,INFINITY,TAN(PI/2)
```

```
DX=0
```

```
DY=0
```

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/077201155153006040>