

# Manufacturing Process and Key Technology of High-Speed Permanent Magnet Electric Machine

Wenhua Zhang

Hunan XEMC Power Co. Ltd., Xiangtan Hunan  
Email: sunny\_eii@126.com

Received: Nov. 5<sup>th</sup>, 2018; accepted: Nov. 23<sup>rd</sup>, 2018; published: Nov. 30<sup>th</sup>, 2018

---

## Abstract

Because of the advantages of less volume, lighter weight, and higher efficiency, high-speed permanent magnet electric machine has been used widely in many applications. With the increasing demand for high-speed permanent magnet electric machine applications in the power application market, its manufacturing process and key technology problems are becoming more and more serious. So, the analysis of the characteristics and development trend of the electric machine process is provided, which can be usefully employed in design and fabrication of similar kind of electric machines.

## Keywords

Permanent Magnet Electric Machine, Manufacturing Process, Key Technology

---

# 高速永磁电机制造工艺特点及相关技术

张文华

湖南湘电动力有限公司, 湖南 湘潭  
Email: sunny\_eii@126.com

收稿日期: 2018年11月5日; 录用日期: 2018年11月23日; 发布日期: 2018年11月30日

---

## 摘要

高速永磁电机具有体积小、重量轻、效率高等特点, 其应用范围越来越广泛, 随着电力应用市场对高速永磁电机使用要求的不断提高, 永磁电机制造工艺及关键技术问题逐渐突出, 对此分析电机制造工艺特点及其发展趋势, 为同类电机工艺设计及施工提供参考。

## 关键词

永磁电机, 制造工艺, 关键技术

Copyright © 2018 by author and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

与传统的电机相比, 永磁电机具有结构简单、运行可靠、体积小、质量轻、损耗少、效率高等优点, 因此在高速机床[1]、鼓风机[2]、压缩机[3]、透平式膨胀机[4]、微型燃气轮机[5]等领域具有广阔的应用前景, 其涵盖了各种功率等级的场合, 已成为当前国内外电机领域的一个研究热点。高速永磁电机的制造仍然遵循基本的电机工艺, 但随着永磁电机往大容量、高速集成化方向发展, 其带来的一系列问题需要进行深入研究。一方面高速永磁电机的转子强度、转子支承是制造的难点之一, 其导致振动噪声问题突出; 另一方面高速永磁电机的功率密度大, 定、转子温升高为电机的绝缘提出了挑战。

国内的沈阳工业大学[6]、哈尔滨理工大学[7][8]、哈尔滨工业大学[9]、北京交通大学[10]等科研院所以及国外的一些科研机构[11][12]对高速永磁电机设计与分析技术等进行了深入研究, 但鲜有从制造工艺的角度研究振动噪声及绝缘问题的报道。

高速永磁电机振动噪声受转子装配质量的影响较大。按照永磁体安装方式, 永磁电机转子可分为内嵌式和表贴式两种类型。内嵌式结构的转子冲片中设置有磁钢槽, 磁钢装在槽内[13][14][15], 受冲片材质强度限制, 电机转速不高, 主要用于低速电动机。表贴式永磁电机的转子磁路的永磁体, 通常采用瓦片状磁钢结构[16]。为防止高速线速度下磁钢不至脱开转轴或产生松动导致电机振动噪声大, 需对磁钢进行固定。瓦片状磁钢的固定方式主要有螺钉、粘结剂粘结、无纬带绑扎、转子磁钢套、燕尾槽、极间压条、以及转子端板固定等[17], 上述固定工艺各有利弊, 需针对性的进行分析和改进。

高速永磁电机振动噪声受电机机械结构加工精度的而影响较大[18]。电机机械结构包括定子、转子、轴承、机座等。一方面, 当由于加工精度较差导致定转子间气隙不均匀, 引起单边磁拉力导致电机高速运行时的振动恶化。以端盖式滑动轴承座为例, 影响电机气隙均匀度的因素包括: 定子铁心内圆对定子两端止口公共基准的径向圆跳动、转子铁心外圆对两端轴承档公共基准轴线的径向圆跳动、端盖轴承孔对止口基准轴线的径向圆跳动、轴承内圈对外圈的径向圆跳动、机壳两端止口端面对两端面止口公共基准轴线的端面圆跳动(即垂直度)。另一方面, 当由于加工精度较差导致转子质量不对称时, 转子剩余不平衡量大, 引起离心力导致电机高速运行时的振动恶化。影响转子质量不对称的因素有转轴加、磁钢和护套的加工精度, 以及磁钢装配精度。对此, 需从定子冲片及叠压、机座及止口加工[19][20]、定子铁心套入机座、转子加工及动平衡[21]、轴承加工等方面, 对高速永磁电机机械结构加工工艺进行分析和改进。

定子耐高温、耐高压是高速永磁电机绝缘的重中之重, 要求绝缘材料具备较高的抗电晕性和耐瞬间高电压冲击, 为此需不断提高绝缘等级, 目前国内永磁电机绝缘等级大多为E级和B级, 并逐步向F级和H级发展[22]。永磁电机定子绝缘工艺主要包括电机冲片绝缘、绕组嵌线以及绕组绝缘。

电机在运行状态下对其定子铁心片间绝缘的要求很高。一方面, 由于定子铁心轭部截面处的磁通密度及感应电势较大, 局部点短路时造成的高温容易破坏冲片绝缘, 并逐渐扩散甚至烧毁铁心。如果短路发生在槽齿附近, 局部高温还将影响绕组绝缘, 因此铁心片间要有足够的绝缘强度。另一方面, 受电机

旋转磁场力影响，定子铁心中存在较大的径向和切向磁拉力，若铁心冲片叠压不牢或压紧力不均匀，将产生振动和松动，因此，冲片上的绝缘涂层应有足够的硬度和附着力，保证在高温和压力的作用下不发生塑性变形。

对此，需针对性地从高速永磁电机转子装配、机械结构高精度加工以及定子绝缘等方面分析电机制造工艺特点及相关技术，提高其制造工艺水平。

## 2. 高速永磁电机转子装配

### 2.1. 转子磁钢固定

表贴式永磁电机的转子磁钢装配时由于相邻永磁体具有强磁性而相互排斥，装配难度大，需制造装配工装实现磁钢装配时的径向和轴向定位，保证永磁体依次装配到位。由于磁钢质地较脆，在用金属护套、螺钉、燕尾槽、压条或端板固定的时候，如果施加力度不当，容易造成应力集中磁钢破裂，如图1所示。

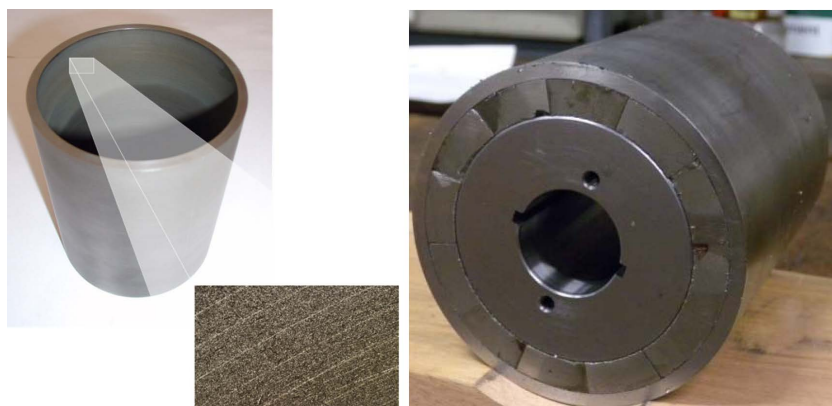
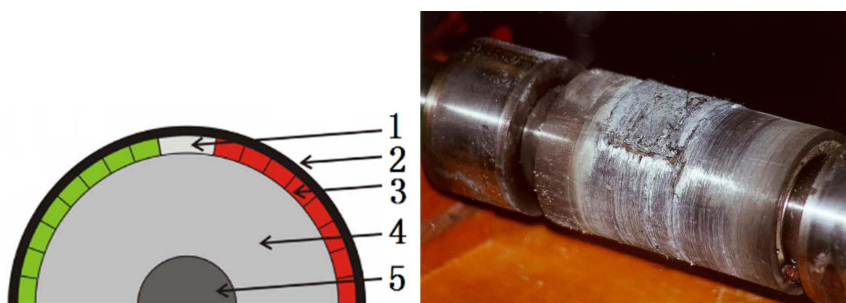


Figure 1. Rotor metal sleeve of surface-mounted permanent magnet motor [23]

图 1. 表贴式永磁电机转子金属护套[23]

而采用粘接，存在强度不足的问题，如图2所示。尤其是随着永磁电机的容量和转速的不断提升，传统磁钢固定工艺中的磁钢应力集中、高温下粘接强度低、高应力下材质屈服等问题凸显。



1. Magnetic pole gap; 2. Composite sheath; 3. Magnetic steel; 4. Rotor yoke; 5. Spindle

Figure 2. Rotor composite sheath of surface-mounted permanent magnet motor[24]

图 2. 表贴式永磁电机转子复合材料护套[24]

高速永磁发电机转子表面线速度高、磁钢离心大，采用金属护套方案，需要较高的热套温升、且护套径向厚，导致磁钢存在失磁风险以及护套涡流损耗大的问题，为实现对电机转子的保护，应采用非导电非导磁的保护套。转子加无纬带绑扎固定。无纬带是一种予浸渍无纬玻璃丝带，强度高、比重小、自

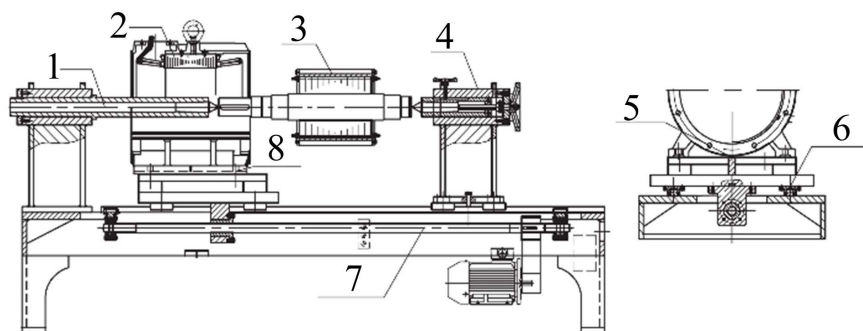
身离心力低。采用无纬带箍保护转子，能有效的克服电机运行时绕组所产生的电磁力和离心力；绝缘的无纬带箍能增加绕组爬电距离、减少绕组端部漏磁，有效地改善电机的电气性能；用无纬带代替钢箍节省了大量合金钢材，从而降低了成本，简化了加工制造工艺。基于上述优点，无纬带箍是电机产品中较为理想的一种固定材料。

高速永磁电机转子磁钢固定工艺也必须不断改进和完善。一方面采用新材料及新结构，如采用高强度复合材料替代无纬带，能大幅提高护套绑扎的机械强度；采用磁钢焊接和整体充磁技术[25]替代粘接，提高磁钢与转轴的连接强度。另一方面，将多种固定工艺组合在一起使用，形成优势互补，如将粘结剂粘结固定工艺与复合材料绑扎固定工艺相结合，先利用粘结剂将磁钢粘接在转子铁芯上，再在外侧绑扎复合材料护套；或者将转子端板固定与极间压条固定相结合，实现轴向和周向的双重固定，可取得更好的固定效果。

## 2.2. 定、转子总装

永磁电机定、转子总装工艺较传统电机有所不同，由于永磁电机转子内有永磁体，对定子等导磁材料吸附能力较强，会导致转子由于磁力作用无法装入定子，而且定转子极易相互吸引碰撞，造成绝缘损伤，使电机绝缘寿命减少，带来质量隐患。

装配方法分为立式和卧式两种，对于小型端盖式滚珠轴承永磁电机，多采用立式安装方式，对于大型高速永磁电机，由于电机机座外形尺寸大，且一般采用滑动轴承结构，若仍采用立式安装，转子装入定子后的固定及翻身困难，因此多采用卧式安装，如图3所示，在非传动端使用假轴和导向套定位，传动端使用高精度导向杆导向，采用液压装置将转子压入定子内。大中型永磁电机转子铁心内部装有多块永磁体，带有很大的磁力。总装时，定转子中心又不能完全重合，会产生单边磁拉力，而且定转子气隙较小，极易相互吸引，发生碰撞，因此对工装要求极高。首先定子重量较重，体积大，通过导轨实现安装固定与滑动较困难。再次，转子的顶紧装置要具备很高的抗弯性能，强度、挠度均需满足一定要求。



**Figure 3.** Horizontal assembly and alignment tooling of permanent magnet motor. 1. Front seat, 2. Stator, 3. Rotor, 4. Tailstock, 5. Positioning key, 6. Linear guide, 7. Transmission system, 8. Locating pin

**图3.** 永磁电机卧式总装及对中工装。1. 前座；2. 定子；3. 转子；4. 尾座；5. 定位键；6. 直线导轨；7. 传动系统；8. 定位销

## 3. 机械结构加工

### 3.1. 定子铁心冲片

高速永磁电机定子铁心冲片一般采用厚度薄，额定损耗小的软磁材料(硅钢片)板料或卷料经冷冲压制成，如35W270、50W300等牌号。铁心由冲片叠压而成，铁心冲片制造复杂，对冲制工艺、设备模具等方面的技术要求较高。目前，电机铁心冲片的制造工艺有复冲模、级进模、线切割等，各有其优缺点和应用范围，如表1所示。

**Table 1.** Comparison of stator core blanking process**表 1.** 定子铁心冲片制造工艺对比

工艺	加工精度	生产效率	模具结构	制造成本	生产周期
复冲模	较高	较高	复杂	较高	长
级进模	高	高	较复杂	高	较长
线切割	低	低	简单	低	短

复冲模和级进模的工件尺寸精确一致性好，但模具结构复杂，开模周期长且制造成本高，适用于大批量生产的电机铁心的冲制；而线切割不依赖于模具，周期短，但加工精度低，需在后续制造环节中进行二次加工补偿，多适用于电机推广阶段或产量不大的情况。随着相关技术和工艺水平的提高，近年来非晶合金在高速电机定子中的应用越来越广泛；但由于其质硬而脆，目前尚未有成熟的批量制作形状复杂的非晶合金冲片的技术。

### 3.2. 机座焊接及止口加工

机座一般采用浇铸和搭焊两种结构，前者主要用于中小型永磁电机，而大型高速永磁发电机的机座一般采用焊接方式，但无论采取何种方法，都应将机座内圆与止口的形位公差控制在合理的范围内，以确保加工件符合设计要求。

对于钢板机座焊接，首先要求机座的焊接变形及焊接残余应力尽量小[19]，对此需分析合理的焊接及热处理工艺参数并开展工艺验证。其次要求定子内圆和两边止口的加工精度尽量高，对此应提高加工设备精度，并通过一次装卡完成定子内圆和止口的加工来保证三者的同轴度。其中，用于装卡定位的基准面校正尤为重要，而且为了达到一次装卡完成，一般还需要特殊刀具和工装来保证。

### 3.3. 定子铁心套机座

高速永磁电机定子铁心外与机座内圆一般采用过盈配合。过盈量越小，铁心与机座的连接刚度低，电磁力作用下者不能容易相对移动或松动，使得振动噪声恶化；过盈量太大，容易导致机壳(薄壁件)变形严重而不满足精度要求，因此需合理选择过盈量和定子铁心套机座工艺。

定子铁心套入机座后，铁心内圆一般不进行加工，因此该内圆与机座端盖止口基准的同轴度靠部件加工和装配保证。首先通过加工保证冲片的尺寸公差，其次通过叠压工艺提高冲片叠压一致性，保证铁心叠压完成后的内、外圆同轴度，再次通过加工保证机座内圆和两端止口基准的同轴度，最后通过装配尺寸链计算，分析定子铁心套机座后内圆与止口基准的同轴度是否满足设计要求。

### 3.4. 转子加工及动平衡

高速永磁电机转子关键尺寸为磁钢外圆圆度、轴颈圆度及磁钢外圆与转轴两端轴颈基准的同轴度。其中，磁钢为装配件无法二次加工，因此需通过部件加工和装配保证其精度。首先通过加工提高转轴和磁钢尺寸精度，然后通过优化装配工艺提高磁钢装配精度，最后通过装配尺寸链计算，分析装配后的磁钢外圆的形位公差是否满足设计要求。

电机转动部件由于结构不对称，材料质量不均匀或制造加工时的误差等原因，造成转动体机械上的不平衡。它会使该转动体的重心对轴线产生偏移，转动时由于偏心的惯性作用，将产生不平衡的离心力或离心力偶，电机在离心力的作用下将产生振动。高速永磁电机转子质量不平衡主要来至转轴、磁钢和护套，其中转轴可通过加工和部件动平衡降低其残余不平衡量，但磁钢和护套无法单独进行动平衡，且带有磁性，因此需在转子装配完成后设计专用工装进行高速现场动平衡。区别于传统的离线动平衡技术，

现场动平衡不需要传统的动平衡机，只需一套价格低廉的测试系统，因而较为经济。此外，由于转子在实际工况条件下进行平衡，不需要再装配等工序，整机在工作状态下就可获得较高的平衡精度，同时也免去了拆卸机器、来回运送转子以及后期安装校正的工作。而且由于其直接作用于实际工作的机体上，动平衡操作时直接将所有影响因素都包含其中，最后得到的效果将远远好于只对单独的转子进行传统动平衡操作时的情况。

### 3.5. 轴承加工

轴承加工的关键是要保证端盖止口与轴瓦内圆的同轴度。端盖大多是在外侧做出工艺台，尽量一次装卡做完轴承孔和端面、止口和端面等同轴度、端面跳动要求高的相关尺寸。不仅要合理的设计工装，正确的使用工装也是保证零件精度关键。

轴承端盖止口与机座止口一般采用过渡配合或小间隙，再采用定位销定位，便于反复拆装，但由于存在配合间隙以及接触刚度低容易导致振动噪声恶化，尤其是对于变形量的大型端盖，其止口配合过盈量的设计尤为重要。

## 4. 定子绝缘

### 4.1. 电机冲片绝缘

电机冲片绝缘漆主要有有机漆和无机或半无机漆两大类，如表 2 所示，一般以有机漆为主。不同的绝缘漆在流动性，硬度、涂漆工艺、漆膜厚度，耐温性、挥发性等方面存在差异，从而影响定子铁心高温下绝缘、抗振动(摩擦)以及叠压系数等性能。无机或半无机漆由于漆膜薄，热收缩性小，叠压系数大，有效地防止了铁心松动，缩小了电机的外型尺寸并改善了发电机的机电性能，且对环境污染小，目前受到广泛应用[26]。

**Table 2.** Comparison of motor punching insulation paint  
**表 2.** 电机冲片绝缘漆对比

冲片绝缘漆	流动性	涂漆工艺	漆膜	热收缩性	叠压系数
有机漆	好	简单	厚	大	小
(半)无机漆	差	复杂	薄	小	大

但由于无机填料的加入，降低了漆液的流动性，造成了硅钢片漆涂漆工艺的复杂性，采用国内传统的两辊涂漆工艺，将产生较为严重的边缘增厚现象，同时存在毛毡辊的绒毛脱落粘到冲片上的风险；采用国外通用的四辊涂漆工艺，造成硅钢片断面涂不上漆，使硅钢片断面生锈或造成硅钢片片间短路。对此需对工艺改进，通过调整辊板硬度、转速、辊间间隙、辊轮表面绒毛防脱落措施以及漆膜工艺质量检查，提高冲片涂漆质量。

### 4.2. 绕组嵌线

为了保证永磁电机定子绕组嵌线质量，必须正确地掌握线圈绕制、绕组嵌线的工艺要领、工艺参数及正确合理的检验测试。根据定子结构、工艺性及制造方法，绕组的绕制及嵌线可分为手工嵌线、整体式机械自动绕线和拼块结构绕线[27]。采用手工嵌由于工序多、工作量大，对工人的熟练程度和要领掌握要求高，多适用于结构紧凑、铁心槽口窄、绕组漆包线细等情况。若采用整体式机械自动绕线，自动化程度高，操作简单，且节省材料，但工装和绝缘骨架专用性强，成本高，适用于大批量生产产品。若采用拼块结构绕线，将定子铁心根据槽数分成相应的拼块，只适用于槽数不多的电机，是一种半自动的绕组制作。

随着高速永磁电机频率的提高,电磁损耗随之增大,而低损耗的多股绞合(辫扁)线绕组逐渐受到关注,但该类型线圈的绕线复杂,嵌线难,尤其是在电机体积空间受限的情况下,端部绝缘问题突出。

### 4.3. 绕组绝缘

永磁电机定子绕组绝缘系统本体主要由粉云母、胶黏剂(一般为环氧树脂)和补强材料(一般为玻璃丝布)三部分组成,分别起着耐电、保证绝缘体致密性以及提高机械强度的作用。绕组绝缘系统的制造工艺主要有加热模压和真空浸渍两种[28],都必须满足绝缘特性基本要求,即绝缘体具有包括电气、机械、热学、化学等方面性能要求在内的综合指标;绝缘体致密,无气孔、气隙、疏松等缺陷;绝缘体高温下无分层、发空现象。

绕组绝缘性能随着总厚度的增加而加强,但绝缘的热传导性能要求是主要矛盾,希望尽可能减薄绝缘厚度,此外减薄绝缘厚度可以提高铁心槽的利用率,减小电机的体积、重量,提高电机效率等。因此绝缘厚度的选择须通过分析、计算,并结合丰富的经验予以综合考虑。理论上,当电机额定相电压确定后,绕组绝缘厚度与工作电场强度成负相关,因此工作电场强度确定以后,绝缘厚度也就确定了。工作电场强度一般取 2 kV/mm ~3 kV/mm,从绝缘可靠性的角度应选下限,从绝缘散热的角度应选上限。但是,绝缘厚度的减薄必须要由它具有的优良绝缘工艺和性能作为保证,目前采用加热模压和真空浸渍两种工艺,如表 3 所示。

**Table 3.** Comparison of winding insulation process

**表 3.** 绕组绝缘工艺对比

绕组绝缘	含胶量	绝缘厚度	工艺原理	胶浸渍方向
加热模压	37%~40%	厚	加压挤出	由内向外
真空浸渍	8%~10%	薄	负压浸入	由外向内

## 5. 结束语

通过对高速永磁电机中转子装配、机械结构加工、定子绝缘过程中的关键点的分析结果表明:

- 1) 随着永磁电机往大容量、高速集成化方向发展,其制造关键技术需围绕低振动噪声、高绝缘等级进行突破重点,其制造工艺呈现高精度、定量化和自动化的特点。
- 2) 高速永磁电机转子磁钢固定工艺难度大,传统的单一磁钢固定工艺难以满足高温高应力使用要求,需采用新材料、新结构并结合多种磁钢固定方法行程优势互补。
- 3) 电机结构加工及装配精度对电机振动噪声影响显著,从元件、部件加工到装配各个环节,需选择合理的加工工艺,并结合分析计算和工艺验证实现关键参数的量化及预估,确保满足设计要求。
- 4) 高速永磁电机定子绝缘主要集中在定子冲片、绕组嵌线以及绕组浸漆等关键环节选择合理的绝缘工艺并进行必要改进。尽可能地减薄厚度、缩小电机体积、增大单机容量、降低成本。优选低挥发或无挥发、无毒或少毒的环保绝缘材料。优选绝缘制造工艺,降低制造过程中的能源消耗、减少对环境的污染。

## 参考文献

- [1] Borisavljević, A. (2011) Limits, Modeling and Design of High-Speed Permanent Magnet Machines. Delft University of Technology, Delft.
- [2] Hong, D.K., Woo, B.C., Lee, J.Y., et al. (2012) Ultra High Speedmotor Supported by Air Foil Bearings for Air Blower Cooling Fuel Cells. *IEEE Transactions on Magnetics*, **48**, 871-874. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2011.2174209>
- [3] Beer, P., Tessaro, J., Eckels, B., et al. (2006) High Speed Motordesign for Gas Compressor Applications. *35th Turbo-machinery Symposium*, Texas A&M University, College Station, 103-112.

- [4] Hawkins, L.A., Zhu, L. and Blumber, E.J. (2011) Development of a 125 kW AMB Expander/Generator for Waste Heat Recovery. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, **133**, 072503. <https://doi.org/10.1115/1.4002660>
- [5] Calfio, R.M., Smith, M.B. and Tessaro, J.E. (2007) High-Speed Generators for Power-Dense, Medium-Power, Gas Turbinegenerator Sets. *Naval Engineers Journal*, **119**, 63-81. <https://doi.org/10.1111/j.0028-1425.2007.00020.x>
- [6] 王继强, 王凤翔, 孔晓光. 高速永磁发电机的设计与电磁性能分析[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(20): 105-110.
- [7] 殷巧玉, 李伟力, 张晓晨. 高速永磁发电机冷却流道结构双维度连续量子蚁群优化的温度场计算[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(36): 77-85.
- [8] 邱洪波, 李伟力, 张晓晨, 等. 背绕式定子绕组高速永磁电机三维端部区域电磁场分析与计算[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(24): 80-87.
- [9] 张晓晨, 李伟力, 邱洪波, 等. 超高速永磁同步发电机的多复合场结构电磁场及温度场计算[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(30): 85-92.
- [10] Li, W., Zhang, X., Cheng, S., et al. (2013) Thermal Optimization for a HSPMG Used for Distributed Generation Systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **60**, 474-482. <https://doi.org/10.1109/TIE.2012.2187418>
- [11] Hong, D.K., Woo, B.C., Koo, D.H., et al. (2010) Electrical, Structural and Rotordynamic Analysis of Ultra High Speed Motor with Shrink Fit Rotor for Air Blower Cooling Fuel Cells. 2010 14th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (CEFC), Chicago.
- [12] King, J.E., Kobuck, R.M. and Repp, J.R. (2008) High Speed Water Cooled Permanent Magnet Motor for Pulse Alternator-Based Pulse Power Systems. 14th Symposium on Electromagnetic Launch Technology, Victoria, 1-6.
- [13] 葛笑, 诸自强, 陈金涛. 工艺误差对内置式永磁电机电磁性能的影响[J]. 微特电机, 2017, 45(4): 6-9, 15.
- [14] 葛笑, 诸自强, 陈金涛. 内置式永磁电机转子外形对工艺误差的敏感性分析[J]. 微特电机, 2017, 45(5): 4-7, 17.
- [15] 张永平, 段小丽, 郭英桂. 内置式永磁同步电机转子加装工艺设计[J]. 微特电机, 2015, 43(11): 83-85.
- [16] 张超, 朱建国, 韩雪岩. 高速表贴式永磁电机转子强度分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(17): 4719-4728.
- [17] 张凤阁, 杜光辉, 王天煜, 黄娜. 高速永磁电机转子不同保护措施强度分析[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(S1): 195-202.
- [18] 黄勇. 交流永磁伺服电机关键加工工艺研究[J]. 机械设计与制造, 2002(5): 105-106.
- [19] 关志秋. 大中型立式电机机座的焊接工艺[J]. 防爆电机, 2013, 3(48): 59-61.
- [20] 赵天英, 张海红, 李磊, 李建雪. 箱体结构轻型汽轮发电机机壳焊接制造工艺研究[J]. 机械工程师, 2017(1): 253-254.
- [21] 岳华. 高速永磁电机转子动平衡的试验研究[J]. 矿业研究与开发, 2018, 38(2): 121-124.
- [22] 李宝库. 小电机绝缘材料与工艺的发展趋势[J]. 微特电机, 1999, 3: 43-44.
- [23] Yon, J.M., Mellor, P.H., Wrobel, R., Booker, J.D. and Burrow, S.G. (2010) A Semi-Permeable Containment Sleeve for High-Speed PM Machines. 5th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives, Brighton, 19-21 April 2010, 1-6.
- [24] Andreas, B., Tobias, S. and Markus, K. (2005) Fixation of Buried and Surface Mounted Magnets in High-Speed Permanent Magnet Synchronous Motors. 40th IAS Annual Meeting, Kowloon, 2-6 October 2005, 2843-2848.
- [25] 沈稼丰, 董艳杰, 周美兰, 梅厚珍. 国内充磁机的发展状况及整体充磁机的主要技术问题[J]. 哈尔滨电工学院学报, 1996(3): 349-352.
- [26] 张兰芝. 电机冲片涂聚酯亚胺硅钢片绝缘漆新工艺[J]. 防爆电机, 2015, 50(1): 45-46.
- [27] 万玉吉, 马质璞, 张子博, 谢靖. 电机快速嵌线装置的工艺性研究[J]. 微特电机, 2015, 43(10): 88-90.
- [28] 段衡, 蔡彩华, 梁正仁. 高压电机定子线圈真空浸漆的破压故障分析[J]. 电机与控制应用, 2014, 41(2): 69-71.



**知网检索的两种方式：**

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2167-6631，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：[met@hanspub.org](mailto:met@hanspub.org)