

李幼倩 韩君强 著

# 现代 新型无刷励磁 同步电动机的 设计及 应用

# 现代新型无刷励磁同步 电动机的设计及应用

李幼倩 韩君强 著



机械工业出版社

本书详述了无刷励磁同步电动机的设计及应用,同时还介绍和分析了国外无刷励磁技术的发展情况。本书以新的“概念产品设计”为指导思想,就电机产品结构设计、性能、试验、工业运行、防爆安全运行等内容进行全面而系统的技术性讨论,并以实践验证为依据进行产品设计,使读者在步入一个崭新的“概念产品设计的新时期”时有所借鉴和启发。

本书可供电机制造业和石油、化工和矿山等工业企业从事电机研究、设计、试验和运行的工程技术人员使用,也可作为高等院校从事电机、电器、自动化控制专业的师生和有关科研、工程设计的技术人员的参考用书。

### 图书在版编目(CIP)数据

现代新型无刷励磁同步电动机的设计及应用/李幼情,韩君强著. —北京:机械工业出版社,2009.1

ISBN 978-7-111-25390-7

I. 现… II. ①李…②韩… III. ①无刷励磁-同步电动机-设计②无刷励磁-同步电动机-应用 IV. TM341

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第162390号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:吉玲 (Email: Jinacmp@163.com) 版式设计:霍永明

责任校对:张晓蓉 封面设计:姚毅 责任印制:邓博

北京四季青印刷厂印刷 (三河市杨庄镇环伟装订厂装订)

2009年1月第1版第1次印刷

184mm×260mm·24.25印张·602千字

0001—3500册

标准书号:ISBN 978-7-111-25390-7

定价:55.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换  
销售服务热线电话:(010) 68326294

购书热线电话:(010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010) 88379768

封面无防伪标均为盗版

## 特别鸣谢

著者特别向张继文先生、薄长济先生、李建民先生、方毅先生、荀国栋先生、陈勇女士、李长春先生、唐启新先生、鲁东泉先生、陈世义先生、张乐群先生、陈伟先生深表衷心的感谢。感谢他们在著者处境极困难情况下所给予的信任和真挚的关怀、鼓励与帮助，才使本书得以完稿。

著者自己有义务特别向沈阳电机股份有限公司董事长、总经理王学军先生，总工程师邓宏伟先生表示衷心谢忱。他们在评阅本书手稿的过程中提出了极为宝贵的意见，同时也是在他们积极与有力的推荐、鼓励下，才使本书承印出版。

# 前言

自从国家将增安型无刷励磁同步电动机列入国家“七五”计划重大科研项目以后,1987年3月国务院重大技术装备、乙烯专项领导小组在为配套的镇海石化总厂、洛阳炼油厂、武汉石化厂、广州石化总厂、石家庄炼油厂、茂名炼油厂等七套加氢装置的重大技术装备项目的预备安排会上,提出研制增安型无刷励磁同步电动机的国产化设计任务。1987年4月先在北京,后又在南京两次召开了“加氢装置配套用中大型防爆同步电动机制造技术论证会”。会后国家机械电子工业部电器局颁发了机电科[1987]143号文件《加氢装置配套用中大型防爆同步电动机技术论证座谈会会议纪要》,开始拉开了我国自主开发研制、设计七套加氢装置配套用增安型无刷励磁同步电动机的序幕。沈阳电机厂承担了四台TAQ-W<sub>630-350-20</sub>型1000kW、6kV、20极增安型无刷励磁同步电动机的设计研制任务,安装在茂名炼油厂。1990年我国首台增安型无刷励磁同步电动机在茂名炼油厂安装运行并进行了历时两年的工业运行试验。1992年12月在国务院重大办、机电部第一装备司和中国石化总公司共同主持下,在沈阳电机厂召开了“加氢装置用增安型无刷励磁同步电动机重大科研项目研究课题鉴定会”,全国七套装置全部通过鉴定,至今已安全运行超过了15年时间。目前全国已生产了360多台450~8000kW,电压等级为6kV、10kV,最多极数为30极的大型高压增安型无刷励磁同步电动机,给石油精炼加氢装置和化工乙烯建设工程配套,为促进我国石油、化工工业的迅速发展起到了重要作用。但是让人遗憾的是,由于我国现状和其他种种原因,使其技术水平的发展与世界先进国家相比依然存在着非常明显的差距。

在本书中,我们在国家先行者所奠定的基础上,只是对自己所承担的设计、研制任务进行总结,把我们创新的科研成果加以整理,并将所搜集到的国外资料和研究成果加以介绍,以供借鉴国外的经验,赶超世界先进水平,开拓国际市场。

在本书中,我们将主要讨论现代新型增安型无刷励磁同步电动机的设计问题。同时也介绍增安型无刷励磁同步发电机的发展情况,这些都是按照国家标准的规定进行产品设计的。

本书主要是按下列一些标准来叙述的:GB 755—2000《旋转电机 定额和性能》、GB 3836.1—2000《爆炸性气体环境用电气设备 第1部分:通用要求》、GB 3836.3—2000《爆炸性气体环境用电气设备 第3部分:增安型“e”》、JB/T 8973—1999《增安型无刷励磁同步电动机防爆技术要求》、JB/T 8974—1999《TAW系列增安型无刷励磁同步电动机技术条件》等。但是由于我们设计时所引用的原国家标准与这些标准存在差别时,就不可避免地特殊的叙述中依然引用原国家标准。但是本书总体叙述是以新版国家标准为指导基础的。

本书参阅了国际电工委员会(IEC)制定的《爆炸性气体环境用电气设备》标准汇编(南阳防爆研究所,1998年)和日本劳动省产业安全研究所编制的《工厂防爆电气设备用户指南》(气体防爆,1994),南阳防爆电气研究所1998年8月出版。

就世界电机工业的发展而言,电机的单机功率不断增大,具有现代新型电力电子智能自动控制系统的电机产品的涌现,致使电机产品设计与新产品开发跨入新的技术领域,使产品

设计的模式成为制造企业与市场一体化的充分体现,同时在21世纪也将步入一个崭新的“概念产品设计的新时期”,即创造力和想象力有机结合的企业创新。而概念产品是指新产品开发设计制造要全面地体现时代和消费者的要求,并参与产品设计,共同选定产品的材质、产品的质量和产品的工业造型。因此对电机产品的性能、制造质量、运行可靠性的质量保证、工业造型的要求也越来越高,而且对制造过程的劳动量(机械加工量和手工加工量)则要大幅度地减少;环保卫生、节约能源、降低造价更是迫切的三项要求。而上述的诸项要求在很大程度上取决于下列因素:电机产品结构设计的工艺性;工艺流程统筹的正确性与合理性的划分;以及新工艺、新材料和新技术的电工专用设备的应用程度等。因此设计者必须密切地联系实际,并在设计中不断地改革设计,完善所设计的电机产品主体结构、改造产品制造的工艺和工艺装备、提高材料综合利用率、节约加工工时和能源,改善劳动条件等,成为电机产品开发、设计与制造中一项极为迫切任务。

增安型无刷励磁同步电动机设计也是多样化的,每个国家和每个企业都有不同特点和传统结构风格,从工业造型来看,其结构更是丰富多彩的。电机产品的开发和不断创新,来自工业发展和用户的需求和愿望,从而才能形成设计的新概念,创造出崭新的工业造型的电机产品。本书在结合国内外不同技术条件和发展程度差异的情况下,差不多对每个重要的环节都提出了多种不同的设计方案,并且要求每个方案都不能和现行国家标准规定相抵触。而从不同的设计方案中经过分析和研究之后,并结合实践选择出最佳设计方案,这就需要读者本身进行再创造了。

本书是在已发表的文章手稿为框架基础上,重新整理修改和补充编撰而成的,共分为16章。

本书承我的恩师,我国电机、自动化高级专家郑重教授、马云昌教授教诲,郑重教授在主审中又提出了许多宝贵的修改和补充意见。在本书的选题编撰、定稿和出版过程中,得到了南阳防爆电气研究所和《电气防爆技术》杂志编辑部王云生总编辑和机械工业出版社电工电子分社的大力支持与帮助,著者一并致以诚挚的感谢和敬意。

值得著者在此特别提出的是高级工程师欧启新、刘明骅,两位都是我国无刷励磁技术领域的先行者,他们为我国首批国产化增安型无刷励磁同步电动机的研制工作无私地提供了珍贵的国内外资料,特此深表谢意。

最后著者对于南阳防爆研究所所长、高级工程师季明焕,高级工程师梅之芬、顾企雄,国家防爆电气产品质量监督检验测试中心主任、高级工程师张煦,副主任、高级工程师张玉梅、周元昌,以及南阳防爆研究所、国家防爆电气产品质量监督检验测试中心全体工程技术专家一并致以诚挚敬意,他们各位在为我国国产化增安型无刷励磁同步电动机设计制造中做出了特殊贡献和热情而真挚地指导,在审阅本书手稿时提出了许多珍贵的意见。

参加我国首批增安型无刷励磁同步电动机自主开发研究、设计工作的主要有沈阳电机厂的高级工程师赵永义、程浩明、王洪兵、贾德义、栾峰、毕香玉、李改花、周树林、刘海燕、赫放等。他们在自己的工作中做出了创造性的劳动和特殊贡献。

沈阳电机厂电气成套有限公司总经理、工程硕士、高级工程师兰海洋,总工程师、高级工程师王庆东,沈阳电机厂计算机中心主任、高级工程师孙广民,沈阳电机厂总师办主任、高级工程师罗宏年等在本书定稿出版的过程中所给予了真挚的帮助,著者对此深表感谢和

敬意。

本书的主要内容 by 李幼倩撰写并负责全书定稿，韩君强负责产品试验、性能分析。协助文稿整理和绘图的有李虹光、刘天娇、周宏礼、庄凌、李玉霞、杜云华、于忠英、迟辉、彭礼文、陶淑宁。

关于对本书的一切缺点和错误，著者诚恳地希望广大读者批评指正。

李幼倩



# 目 录

特别鸣谢

前言

|                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------|----|
| 第 1 章 增安型无刷励磁同步电动机的设计特点 .....                             | 1  |
| 1.1 同步电动机主体防爆结构 .....                                     | 3  |
| 1.1.1 同步电动机主体防爆结构和安装使用的环境 .....                           | 3  |
| 1.1.2 同步电动机的安装基础及防爆密封部位 .....                             | 4  |
| 1.1.3 同步电动机的防爆标志 .....                                    | 6  |
| 1.2 同步电动机主体防爆大空腔结构的防护等级 .....                             | 8  |
| 1.2.1 电动机的主体防爆大空腔的防护等级 .....                              | 8  |
| 1.2.2 电动机的主体防爆大空腔的防爆密封 .....                              | 8  |
| 1.3 同步电动机主体防爆大空腔的外壳结构与防爆密封 .....                          | 9  |
| 1.3.1 电动机的主体防爆大空腔外壳的结构型式 .....                            | 9  |
| 1.3.2 防爆密封材料的选择 .....                                     | 10 |
| 1.4 同步电动机主体防爆大空腔与旋转主轴的防爆密封结构设计 .....                      | 11 |
| 1.4.1 主体防爆大空腔与旋转主轴的防爆密封的重要性 .....                         | 11 |
| 1.4.2 主体防爆大空腔与旋转主轴防爆密封结构密封材料的选择 .....                     | 12 |
| 1.4.3 主体防爆大空腔与旋转主轴的防爆密封的结构设计 .....                        | 12 |
| 1.5 同步电动机定子机座轴向可滑移的结构设计 .....                             | 13 |
| 1.5.1 定子机座轴向可滑移的结构优点 .....                                | 13 |
| 1.5.2 定子机座轴向可滑移的结构设计 .....                                | 14 |
| 1.6 同步电动机电磁中心线的刻划及标志装置 .....                              | 14 |
| 1.6.1 电动机产品刻划电磁中心线的目的 .....                               | 14 |
| 1.6.2 电动机产品电磁中心线的设计与刻划 .....                              | 15 |
| 第 2 章 增安型无刷励磁同步电动机主体防爆大空腔结构的冷却通风系统空气冷却<br>器的选型与风扇设计 ..... | 17 |
| 2.1 对同步电动机的冷却风路的分析 .....                                  | 17 |
| 2.1.1 轴向冷却风路 .....                                        | 18 |
| 2.1.2 径向冷却风路 .....                                        | 18 |
| 2.2 冷却通风系统的空气冷却器选型 .....                                  | 19 |
| 2.2.1 整体冷轧辗翅片管的电动机空气冷却器 .....                             | 19 |
| 2.2.2 翅片管冷却元件的轧辗成形 .....                                  | 20 |
| 2.2.3 翅片管冷却元件的规格与热导率 .....                                | 22 |
| 2.2.4 翅片管空气冷却器的配套选型规格 .....                               | 22 |
| 2.3 同步电动机的风扇的型式选择及计算 .....                                | 23 |
| 2.3.1 风扇的型式选择 .....                                       | 23 |
| 2.3.2 风扇的设计与计算 .....                                      | 24 |
| 2.4 同步电动机的风扇结构尺寸的确定 .....                                 | 26 |



|            |                                                               |           |
|------------|---------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.4.1      | 作图法确定风扇尺寸 .....                                               | 26        |
| 2.4.2      | 作图法的理论分析 .....                                                | 27        |
| 2.4.3      | 风扇宽度尺寸的确定 .....                                               | 28        |
| 2.4.4      | 风扇结构设计应考虑的问题 .....                                            | 29        |
| 2.5        | TAQW <sub>6</sub> 630—350—20 型同步电动机风扇设计 .....                 | 30        |
| 2.5.1      | 出风口倾角的计算 .....                                                | 30        |
| 2.5.2      | 风扇叶数的计算 .....                                                 | 30        |
| 2.5.3      | 入风口面积 $S_1$ 与出风口面积 $S_2$ 之比 .....                             | 30        |
| 2.5.4      | 入风口线速度 $\omega_1$ 与出风口线速度 $\omega_2$ 之比 .....                 | 30        |
| 2.5.5      | 风扇的风量计算 .....                                                 | 31        |
| 2.5.6      | 风扇的机械强度计算 .....                                               | 31        |
| 2.6        | 工业运行试验的结论 .....                                               | 32        |
| 2.6.1      | 电动机的工业运行试验的实测技术数据 .....                                       | 33        |
| 2.6.2      | 电动机的工业运行试验结论 .....                                            | 34        |
| <b>第3章</b> | <b>增安型无刷励磁同步电动机高压定子绝缘绕组绝缘结构设计 .....</b>                       | <b>35</b> |
| 3.1        | 高压绕组绝缘 .....                                                  | 35        |
| 3.1.1      | 高压绕组绝缘结构设计依据 .....                                            | 36        |
| 3.1.2      | 高压绕组匝间绝缘结构设计依据 .....                                          | 38        |
| 3.1.3      | 高压绕组绝缘结构承受机械应力和热稳定的设计依据 .....                                 | 41        |
| 3.2        | 高压电机的绝缘结构设计及防电晕处理 .....                                       | 42        |
| 3.2.1      | 对地绝缘 .....                                                    | 42        |
| 3.2.2      | 匝间绝缘 .....                                                    | 43        |
| 3.2.3      | 高压电机绕组绝缘结构设计的发展趋势 .....                                       | 44        |
| 3.3        | 同步电动机绝缘结构设计需要说明的问题 .....                                      | 47        |
| 3.3.1      | 复合式粉云母箔烘卷包和绕包超薄型半导体防电晕带一次模压成形绝缘结构设计的问题 .....                  | 47        |
| 3.3.2      | 真空整体浸渍 (VPI) 型防电晕带的问题 .....                                   | 48        |
| 3.3.3      | 6kV 电压级增安型同步电动机定子绕组线圈的绝缘结构设计按标准系列电动机 10kV 电压级的绝缘结构设计的问题 ..... | 48        |
| 3.4        | 复合式绝缘结构线圈的热模压一次成形 .....                                       | 49        |
| 3.4.1      | 绝缘结构设计的工艺质量的保证 .....                                          | 49        |
| 3.4.2      | 绝缘结构设计的安全系数的选定 .....                                          | 49        |
| 3.4.3      | 绝缘结构设计的主绝缘单边厚度的确定 .....                                       | 49        |
| 3.5        | 高压电动机定子绕组线圈设计采用复合式箔烘卷包防电晕处理一次模压成形线圈绝缘结构的实施方案 .....            | 50        |
| 3.5.1      | 增安型高压电动机定子绕组线圈的生产工艺流程和产品质量保证统筹 206 条工艺操作指南 .....              | 50        |
| 3.5.2      | 现代电动机辅助绝缘结构设计的技术措施 .....                                      | 53        |
| 3.6        | 高压定子绕组端部振动力的危害 .....                                          | 54        |
| 3.6.1      | 绕组端部振动力的形成 .....                                              | 54        |
| 3.6.2      | 绕组端部紧固整体化的技术措施 .....                                          | 55        |
| 3.7        | 同步电动机防电晕处理 .....                                              | 56        |
| 3.7.1      | 定子铁心和槽口防电晕处理 .....                                            | 57        |
| 3.7.2      | 高压绕组线圈槽部直线部分绝缘防电晕处理 .....                                     | 57        |

|                                                           |           |
|-----------------------------------------------------------|-----------|
| 3.7.3 高压绕组线圈端部绝缘防电晕处理 .....                               | 59        |
| 3.8 增安型无刷励磁同步电动机绝缘结构设计和防电晕处理示例 .....                      | 59        |
| 3.8.1 高压定子绕组线圈的绝缘结构设计 .....                               | 59        |
| 3.8.2 高压定子绕组线圈防电晕处理的结构设计 .....                            | 61        |
| 3.9 高压定子绕组线圈的设计及实施方案 .....                                | 62        |
| 3.9.1 高压绕组线圈的新型绝缘结构的设计 .....                              | 62        |
| 3.9.2 高压绕组线圈的新型绝缘结构的实施方案 .....                            | 62        |
| 3.10 高压定子绕组线圈箔烘卷包专用设备“云母箔烘卷包机” .....                      | 62        |
| 3.10.1 箔烘卷包主绝缘设计的工艺质量保证 .....                             | 62        |
| 3.10.2 云母箔烘卷包机的结构 .....                                   | 64        |
| 3.11 关于高压电动机主绝缘结构设计中值得探讨的问题 .....                         | 65        |
| 3.11.1 问题的提出 .....                                        | 65        |
| 3.11.2 关于含有自黏性有机薄膜主绝缘的高压定子绕组线圈绝缘结构的设计技术问题 .....           | 65        |
| 3.12 现代高压、大功率少极数高速同步电机的定子绕组线圈采用双层叠绕组圈式线圈结构和绝缘结构的设计 .....  | 66        |
| 3.12.1 高压、大功率少极数高速同步电机的定子绕组线圈设计采用双层叠绕组圈式线圈结构的设计 .....     | 66        |
| 3.12.2 高压、大功率少极数高速同步电机的定子绕组线圈采用双层叠绕组圈式线圈结构的绝缘结构设计 .....   | 67        |
| 3.13 高压电机定子绕组绝缘超低频 0.1Hz 介电强度试验技术与应用 .....                | 69        |
| 3.13.1 超低频 0.1Hz 介电强度试验技术的发展 .....                        | 69        |
| 3.13.2 超低频 0.1Hz 介电强度试验技术的应用 .....                        | 70        |
| <b>第 4 章 现代增安型无刷励磁同步电动机的接线装置和高压操作高频振荡过电压保护及运行保护 .....</b> | <b>71</b> |
| 4.1 增安型高压电动机接线装置 .....                                    | 71        |
| 4.1.1 增安型电动机接线盒的设计特点 .....                                | 72        |
| 4.1.2 冷挤压接线端头在电动机引接线上的应用与工艺技术的探讨 .....                    | 75        |
| 4.2 同步电动机高压接线箱操作过电压保护设计的特点 .....                          | 78        |
| 4.2.1 高压真空开关高频振荡冲击过电压的产生过程及危害 .....                       | 78        |
| 4.2.2 高压真空开关高频振荡冲击过电压在电动机绕组中传递的理论与发展 .....                | 80        |
| 4.2.3 高压真空开关高频振荡冲击过电压的防范措施 .....                          | 81        |
| 4.2.4 同步电动机的高频振荡冲击操作过电压保护方式 .....                         | 82        |
| 4.2.5 新型操作过电压保护装置的发展与应用 .....                             | 85        |
| 4.3 增安型高压接线箱的结构型式和电控器件的布置 .....                           | 87        |
| 4.3.1 增安型多功能高压接线箱的结构设计 .....                              | 88        |
| 4.3.2 增安型单功能高压接线箱的结构设计 .....                              | 94        |
| 4.4 同步电动机的运行保护 .....                                      | 96        |
| 4.4.1 高压、大功率电动机的故障特征 .....                                | 97        |
| 4.4.2 现代高压、大功率电动机的综合保护 .....                              | 97        |
| 4.4.3 励磁系统主发电机转子励磁绕组接地的监测与保护 .....                        | 97        |
| <b>第 5 章 增安型无刷励磁同步电动机滑动轴承及其转子轴向、径向定位锁定装置的设计 .....</b>     | <b>99</b> |

|                                             |            |
|---------------------------------------------|------------|
| 5.1 同步电动机滑动轴承 .....                         | 99         |
| 5.1.1 座式滑动轴承 .....                          | 99         |
| 5.1.2 端盖式滑动轴承 .....                         | 99         |
| 5.1.3 滑动轴承的选型 .....                         | 103        |
| 5.2 滑动轴承的设计与计算 .....                        | 104        |
| 5.2.1 滑动轴承油膜的油温温度 .....                     | 104        |
| 5.2.2 滑动轴承运行的发热温度 .....                     | 105        |
| 5.2.3 滑动轴承负载能力的计算 .....                     | 106        |
| 5.3 滑动轴承的润滑 .....                           | 106        |
| 5.3.1 滑动轴承的润滑方式的选择 .....                    | 107        |
| 5.3.2 滑动轴承润滑油的注入方式 .....                    | 107        |
| 5.3.3 滑动轴承润滑油膜的振荡及预防措施 .....                | 109        |
| 5.3.4 滑动轴承润滑油的冷却 .....                      | 109        |
| 5.4 弹性塑料轴承瓦的设计 .....                        | 110        |
| 5.4.1 弹性塑料轴承瓦的应用与发展 .....                   | 110        |
| 5.4.2 弹性塑料瓦在我国的应用情况 .....                   | 111        |
| 5.5 滑动轴承轴向力的试验、测定与计算 .....                  | 112        |
| 5.5.1 滑动轴承轴向力的试验、测定的重要意义 .....              | 112        |
| 5.5.2 电动机轴向力的形成 .....                       | 112        |
| 5.5.3 电动机轴向力的计算 .....                       | 113        |
| 5.5.4 电磁中心线刻划和轴向力的测定方法 .....                | 114        |
| 5.6 同步电动机转子轴向、径向定位锁定装置的设计 .....             | 116        |
| 5.6.1 电动机转子轴向、径向定位锁定的原则 .....               | 116        |
| 5.6.2 电动机转子轴向、径向定位锁定装置的结构设计 .....           | 117        |
| 5.6.3 电动机转子轴向、径向定位锁定装置基准线的刻划 .....          | 117        |
| <b>第6章 增安型无刷励磁同步电动机的振荡、共振危害及相关的问题 .....</b> | <b>119</b> |
| 6.1 同步电动机的振荡、共振危害 .....                     | 119        |
| 6.1.1 阻尼绕组电流 $i_d$ 变化过程 .....               | 119        |
| 6.1.2 同步电动机同步运行的工作状态 .....                  | 119        |
| 6.1.3 同步电动机的振荡机理和共振的危害 .....                | 120        |
| 6.2 同步电动机的自由振荡和强制振荡 .....                   | 122        |
| 6.2.1 同步电动机的自由振荡 .....                      | 122        |
| 6.2.2 同步电动机的强制振荡 .....                      | 123        |
| 6.2.3 同步电动机定子绕组电阻对振荡的影响 .....               | 125        |
| 6.2.4 同步电动机励磁控制系统对振荡的影响 .....               | 126        |
| 6.3 同步电动机 $GD^2$ 选择 .....                   | 127        |
| 6.3.1 同步电动机的转动惯量和飞轮力矩 .....                 | 127        |
| 6.3.2 转动惯量与飞轮力矩公式换算 .....                   | 128        |
| 6.3.3 同步电动机转动惯量和飞轮力矩计算 .....                | 128        |
| 6.3.4 驱动往复压缩机类型机械设备的同步电动机转动惯量的选择 .....      | 128        |
| <b>第7章 增安型无刷励磁同步电动机转子励磁绕组和阻尼绕组的设计 .....</b> | <b>130</b> |
| 7.1 转子励磁绕组的设计 .....                         | 130        |
| 7.1.1 传统的磁极绕组线圈绝缘结构 .....                   | 131        |

|                                              |            |
|----------------------------------------------|------------|
| 7.1.2 励磁绕组线圈的绝缘结构设计                          | 131        |
| 7.1.3 励磁绕组线圈的特殊结构                            | 133        |
| 7.1.4 励磁绕组线圈的特殊扁绕机                           | 136        |
| 7.2 阻尼绕组的设计                                  | 137        |
| 7.2.1 阻尼绕组的作用、结构尺寸与电流的分布                     | 137        |
| 7.2.2 阻尼绕组笼条与阻尼端环的断裂和产生电火花的原因                | 140        |
| 7.3 阻尼绕组结构型式的选择                              | 141        |
| 7.3.1 阻尼绕组材料的选择                              | 142        |
| 7.3.2 阻尼绕组笼条采用特殊的槽口冲胀紧固工艺的原因                 | 143        |
| 7.4 阻尼绕组的阻尼端环极间连接部位采用银铜钎焊的利弊论证分析             | 145        |
| 7.4.1 阻尼绕组的阻尼端环极间连接的结构设计                     | 146        |
| 7.4.2 阻尼绕组的阻尼端环极间连接新结构的探讨与研究                 | 146        |
| 7.5 增安型无刷励磁同步电动机的堵转时间 $t_E$ 的计算与允许起动次数的确定及依据 | 147        |
| 7.5.1 堵转时间 $t_E$ 的计算                         | 147        |
| 7.5.2 允许连续起动次数的确定                            | 147        |
| 7.5.3 连续起动时阻尼绕组笼条温升计算                        | 148        |
| <b>第8章 增安型无刷励磁同步电动机增安型空间加热器的设计</b>           | <b>150</b> |
| 8.1 空间加热器的功能和设计要求                            | 150        |
| 8.1.1 空间加热器的功能                               | 150        |
| 8.1.2 空间加热器的设计要求                             | 150        |
| 8.2 空间加热器的功率计算                               | 151        |
| 8.2.1 电动机功率估算法                               | 151        |
| 8.2.2 电动机质量估算法                               | 151        |
| 8.2.3 电动机表面散热面积估算法                           | 152        |
| 8.3 空间加热器电热元件表面散热系数和表面负荷功率                   | 152        |
| 8.3.1 电热元件的表面散热系数和表面负荷功率的测试                  | 152        |
| 8.3.2 降低电热元件管壁表面负荷功率                         | 154        |
| 8.3.3 电热元件两端特殊的双重密封结构                        | 155        |
| 8.3.4 SDRQA 型直管双重密封式电热元件的试验                  | 157        |
| 8.3.5 空间加热器的结构设计和选型                          | 159        |
| 8.3.6 空间加热器设计需要说明的三个问题                       | 160        |
| 8.4 空间加热器的整机试验和工业运行试验                        | 162        |
| 8.4.1 空间加热器的模拟主体空腔的温升试验                      | 162        |
| 8.4.2 空间加热器的工业运行试验                           | 164        |
| 8.5 现代新型空间加热器的结构型式                           | 164        |
| 8.5.1 现代新型开启式空间加热器                           | 165        |
| 8.5.2 现代新型防护式空间加热器                           | 166        |
| 8.5.3 防护式空间加热器结构设计的说明                        | 168        |
| 8.6 新型空间加热器的性能、规格和设计技术数据                     | 169        |
| 8.6.1 新型空间加热器的额定电压                           | 169        |
| 8.6.2 新型空间加热器表面最高温度的限值                       | 170        |
| 8.6.3 新型空间加热器及翅片管式电热元件绝缘电阻的要求                | 170        |
| 8.6.4 新型空间加热器绝缘介电强度试验的要求                     | 171        |

|                                                                            |            |
|----------------------------------------------------------------------------|------------|
| 8.6.5 新型空间加热器及翅片管式电热元件的功率规格、外形尺寸 .....                                     | 171        |
| <b>第9章 现代增安型无刷励磁同步电动机无刷励磁系统与无刷励磁控制系统 .....</b>                             | <b>173</b> |
| 9.1 无刷励磁系统与无刷励磁控制系统的发展和形成 .....                                            | 173        |
| 9.1.1 无刷励磁技术的应用与发展 .....                                                   | 173        |
| 9.1.2 无刷励磁技术应用电力半导体器件的基础电路 .....                                           | 174        |
| 9.2 无刷励磁系统与无刷励磁控制系统的设计特点 .....                                             | 175        |
| 9.2.1 静止式副励磁控制柜的无刷励磁控制系统 .....                                             | 176        |
| 9.2.2 永磁式副励磁机的无刷励磁控制系统 .....                                               | 179        |
| 9.3 无刷励磁系统和无刷励磁控制系统 .....                                                  | 182        |
| 9.3.1 具有桥式半控整流电路的无刷励磁系统 .....                                              | 182        |
| 9.3.2 无刷励磁系统用晶闸管触发控制器 .....                                                | 183        |
| 9.4 具有防范高压超高频振荡操作过电压冲击保护的无刷励磁控制系统 .....                                    | 184        |
| <b>第10章 增安型无刷励磁同步电动机自动灭磁保护、顺极性最佳时刻自动投励<br/>控制及带载失步自动保护三大智能自动控制功能 .....</b> | <b>186</b> |
| 10.1 增安型无刷励磁同步电动机的自动灭磁保护 .....                                             | 186        |
| 10.1.1 无刷励磁系统的自动灭磁保护电路的设计与控制原理 .....                                       | 188        |
| 10.1.2 无刷励磁系统的自动灭磁保护控制单元 .....                                             | 189        |
| 10.1.3 无刷励磁系统的超高感应电压的自动保护 .....                                            | 191        |
| 10.1.4 设计自动灭磁保护控制单元时应考虑的几个问题 .....                                         | 192        |
| 10.2 增安型无刷励磁同步电动机的最佳时刻自动投励控制 .....                                         | 193        |
| 10.2.1 现代增安型无刷励磁同步电动机自动投励控制方式 .....                                        | 193        |
| 10.2.2 投励与最佳投励时刻 .....                                                     | 194        |
| 10.3 增安型无刷励磁同步电动机的最佳时刻自动投励控制电路原理 .....                                     | 196        |
| 10.3.1 顺极性投励的最佳时刻自动投励控制单元 .....                                            | 196        |
| 10.3.2 超前顺极性投励的最佳时刻自动投励控制单元 .....                                          | 201        |
| 10.4 增安型无刷励磁同步电动机的带载失步运行的自动保护 .....                                        | 205        |
| 10.4.1 产生带载失步运行的原因及过程 .....                                                | 206        |
| 10.4.2 带载失步运行的自动保护 .....                                                   | 206        |
| 10.4.3 带载失步运行的自动保护与再投励牵入同步运行 .....                                         | 207        |
| 10.4.4 自牵入同步运行的欠励磁保护及其危害 .....                                             | 213        |
| <b>第11章 增安型无刷励磁同步电动机旋转整流器的设计及励磁引出线的合理布置 .....</b>                          | <b>215</b> |
| 11.1 旋转整流器的基本要求与电力半导体器件安全系数的选择原则和建议 .....                                  | 215        |
| 11.1.1 旋转整流器的基本要求 .....                                                    | 215        |
| 11.1.2 旋转整流器的电力半导体器件和电子元器件安全系数 $K_L$ 的选择原则和建议 .....                        | 216        |
| 11.2 旋转整流器的结构设计 .....                                                      | 217        |
| 11.2.1 $\Gamma$ 字形支架环型旋转整流器 .....                                          | 218        |
| 11.2.2 圆轮辐板型旋转整流器 .....                                                    | 221        |
| 11.2.3 分离式拼圆轮辐板型旋转整流器 .....                                                | 224        |
| 11.2.4 T 字形支架环型旋转整流器 .....                                                 | 228        |
| 11.2.5 双 $\cap$ 字形支架环型旋转整流器 .....                                          | 229        |
| 11.2.6 I 字形支架环型旋转整流器 .....                                                 | 231        |
| 11.3 我国自主开发设计的旋转整流器 .....                                                  | 236        |

|                                                  |            |
|--------------------------------------------------|------------|
| 11.3.1 旋转整流器设计的选型 .....                          | 236        |
| 11.3.2 旋转整流器的改型设计 .....                          | 239        |
| 11.4 旋转整流器的电力半导体器件冷却方式和散热器件的选配 .....             | 241        |
| 11.4.1 电力半导体器件冷却方式和散热器件的种类 .....                 | 242        |
| 11.4.2 电力半导体器件与散热器件的热计算 .....                    | 242        |
| 11.4.3 电力半导体器件平均热散功率的计算 .....                    | 243        |
| 11.5 电力半导体器件容许热阻和安装紧固力矩的确定 .....                 | 244        |
| 11.5.1 电力半导体器件容许热阻的确定 .....                      | 244        |
| 11.5.2 安装电力半导体器件所使用的紧固力矩 .....                   | 245        |
| 11.6 旋转整流器的电力半导体器件与单只管式散热器件或极板型多只管式散热器件的安装 ..... | 246        |
| 11.6.1 电力半导体器件的设计选型 .....                        | 246        |
| 11.6.2 电力半导体器件的安装注意事项 .....                      | 246        |
| 11.7 旋转整流器设计的几个问题说明 .....                        | 247        |
| 11.7.1 旋转整流器的直流励磁输出电压含有交流谐波分量的产生与影响的问题 .....     | 248        |
| 11.7.2 关于旋转整流器三相桥式整流电路采用双管串联的问题 .....            | 248        |
| 11.7.3 关于改善整流电路直流励磁输出电压脉动的问题 .....               | 249        |
| 11.7.4 旋转整流器的电力半导体器件紧固力矩的问题 .....                | 250        |
| 11.7.5 旋转整流器产生故障的原因 .....                        | 253        |
| 11.7.6 旋转整流器设置快速熔断器保护问题 .....                    | 254        |
| 11.8 旋转整流器用的整流二极管运行的监测与报警 .....                  | 254        |
| 11.8.1 旋转整流器用的整流二极管运行状态的纹波判定 .....               | 255        |
| 11.8.2 旋转整流器整流二极管运行状态监测与报警装置的工作原理 .....          | 255        |
| 11.9 旋转整流器安装位置与其三相交流输入和直流励磁输出引接线的合理布置 .....      | 256        |
| 11.9.1 主同步电动机、旋转整流器、交流主励磁机、永磁式副励磁机的布置方式 .....    | 257        |
| 11.9.2 主同步电动机、交流主励磁机、旋转整流器、永磁式副励磁机的布置方式 .....    | 257        |
| 11.9.3 直流励磁引出线嵌镶入空心主轴的绝缘结构与终端引接线装置的结构设计 .....    | 258        |
| <b>第12章 增安型无刷励磁同步电动机的灭磁电阻器的设计 .....</b>          | <b>261</b> |
| 12.1 无刷励磁系统旋转整流器自动灭磁保护电路的灭磁元件 .....              | 262        |
| 12.1.1 扁绕制成形的圆端矩形电阻线圈式灭磁电阻器 .....                | 262        |
| 12.1.2 骨架绕制的平板形防护式灭磁电阻器 .....                    | 263        |
| 12.1.3 圆螺旋充砂型圆管防护式灭磁电阻器 .....                    | 263        |
| 12.1.4 圆螺旋热塑成形防护式灭磁电阻器 .....                     | 263        |
| 12.1.5 圆螺旋充砂型适形防护式灭磁电阻器 .....                    | 264        |
| 12.2 现代新型灭磁电阻器 .....                             | 265        |
| 12.2.1 现代新型灭磁电阻器的防爆标志 .....                      | 265        |
| 12.2.2 现代新型灭磁电阻器的标准规格 .....                      | 266        |
| 12.3 现代新型灭磁电阻器的设计 .....                          | 266        |
| 12.3.1 灭磁电阻器的定额工作制的确定 .....                      | 267        |
| 12.3.2 灭磁电阻器表面额定功率的确定依据 .....                    | 267        |
| 12.4 现代新型灭磁电阻器温升测试数据 .....                       | 268        |
| 12.4.1 灭磁电阻器静态下测试的技术数据 .....                     | 268        |
| 12.4.2 灭磁电阻器在动态的旋转强迫通风冷却工况下的理论计算 .....           | 269        |
| 12.4.3 灭磁电阻器强迫通风冷却工况下的模拟试验 .....                 | 270        |

|             |                                 |            |
|-------------|---------------------------------|------------|
| 12.4.4      | 灭磁电阻器在静态下强迫通风冷却工况下的模拟试验与理论计算的核准 | 271        |
| 12.4.5      | 模拟试验与验证计算的对比与结论                 | 272        |
| <b>第13章</b> | <b>增安型无刷励磁同步电动机的交流主励磁机的设计</b>   | <b>273</b> |
| 13.1        | 交流主励磁机的型式                       | 273        |
| 13.1.1      | 端电压非恒定的交流主励磁机                   | 273        |
| 13.1.2      | 端电压恒定的交流主励磁机                    | 273        |
| 13.2        | 凸极磁极旋转电枢式交流主励磁机的设计特点            | 273        |
| 13.2.1      | 旋转电枢式交流主励磁机特点                   | 274        |
| 13.2.2      | 旋转电枢式交流主励磁机的设计                  | 274        |
| 13.2.3      | 无刷励磁系统交流主励磁机在旋转整流器的运行中几种故障的分析   | 276        |
| 13.3        | 凸极磁极旋转电枢式交流主励磁机主要参数的选择          | 277        |
| 13.3.1      | 旋转电枢式交流主励磁机的强励顶值电压的倍数           | 277        |
| 13.3.2      | 旋转电枢式交流主励磁机的频率和极数的确定            | 279        |
| 13.4        | 交流主励磁机的结构设计                     | 279        |
| 13.4.1      | 凸极磁极旋转电枢式交流主励磁机的结构设计            | 280        |
| 13.4.2      | 隐极磁极旋转电枢式交流主励磁机的结构设计            | 281        |
| 13.4.3      | 凸极磁极旋转电枢式交流主励磁机的特殊结构            | 281        |
| 13.4.4      | 交流主励磁机具有极靴和阻尼笼条槽口的凸极磁极形状与气隙的选择  | 283        |
| 13.4.5      | 交流主励磁机旋转电枢的结构设计                 | 284        |
| <b>第14章</b> | <b>增安型无刷励磁同步电动机的永磁式副励磁机的设计</b>  | <b>288</b> |
| 14.1        | 现代无刷励磁控制系统重要组成部分——永磁式副励磁机       | 288        |
| 14.1.1      | 永磁材料的性能和选用                      | 290        |
| 14.1.2      | 钕铁硼永磁材料                         | 291        |
| 14.1.3      | 铝镍钴永磁材料                         | 292        |
| 14.1.4      | 电工纯铁和纯铁薄板导磁材料                   | 293        |
| 14.2        | 永磁式副励磁机的磁路结构                    | 294        |
| 14.2.1      | 切向式槽楔转子磁路结构                     | 295        |
| 14.2.2      | 径向式凸极转子磁路结构                     | 296        |
| 14.2.3      | 轴向式爪极转子磁路结构                     | 296        |
| 14.2.4      | 设计磁路结构时应特别注意的几个问题               | 298        |
| 14.3        | 永磁式副励磁机设计的理论分析                  | 301        |
| 14.3.1      | 电动势波形                           | 301        |
| 14.3.2      | 突然短路与短路比                        | 302        |
| 14.3.3      | 气隙长度和极弧系数的选择                    | 303        |
| 14.3.4      | 电压调整率与降低电压调整率的技术措施              | 304        |
| 14.3.5      | 可靠性运行                           | 306        |
| 14.4        | 永磁式副励磁机的设计与研制                   | 306        |
| 14.4.1      | 设计依据及主要技术数据                     | 307        |
| 14.4.2      | 定子结构设计                          | 309        |
| 14.4.3      | 定子电枢绕组设计                        | 309        |
| 14.4.4      | 转子结构设计                          | 309        |
| 14.5        | 永磁式副励磁机的产品性能试验                  | 310        |
| 14.5.1      | 电压波形的测试                         | 311        |



|               |                                         |     |
|---------------|-----------------------------------------|-----|
| 14.5.2        | 突然短路试验                                  | 311 |
| 14.5.3        | 突然短路后的空载特性测定                            | 312 |
| 14.5.4        | 突然短路后的外特性试验和电压调整率的测定                    | 312 |
| 14.6          | 永磁体的充磁与稳磁处理及永磁体磁性能的检验测试                 | 313 |
| 14.6.1        | 永磁体充磁                                   | 313 |
| 14.6.2        | 永磁体的失磁与稳磁处理                             | 313 |
| 14.6.3        | 永磁体检验试样的磁性能测试                           | 314 |
| <b>第 15 章</b> | <b>增安型无刷励磁同步电动机的产品试验、安装调试、验收试验与工业运行</b> |     |
|               | <b>试验</b>                               | 315 |
| 15.1          | 无刷励磁同步电动机的产品试验                          | 316 |
| 15.1.1        | 产品试验标准和产品技术条件                           | 316 |
| 15.1.2        | 产品试验的分类                                 | 317 |
| 15.2          | 无刷励磁同步电动机三阶段试验方法                        | 318 |
| 15.2.1        | 旋转整流器的试验方法（第一阶段试验）                      | 318 |
| 15.2.2        | 交流主励磁机和永磁式副励磁机的试验方法（第二阶段试验）             | 322 |
| 15.2.3        | 无刷励磁主同步电动机的试验方法（第三阶段试验）                 | 324 |
| 15.3          | 同步电动机的防爆性能试验                            | 324 |
| 15.3.1        | 防爆无电火花试验                                | 327 |
| 15.3.2        | 防电晕试验                                   | 327 |
| 15.3.3        | 外壳防护性能试验                                | 328 |
| 15.3.4        | 防爆密封橡胶材料老化性能试验                          | 328 |
| 15.3.5        | 空间加热器试验                                 | 329 |
| 15.4          | 同步电动机的产品检查、试验项目                         | 330 |
| 15.4.1        | 产品检查项目                                  | 330 |
| 15.4.2        | 同步电动机的试验项目                              | 330 |
| 15.4.3        | 旋转整流器的试验项目                              | 335 |
| 15.4.4        | 增安型无刷励磁同步电动机的交流主励磁机的试验项目                | 339 |
| 15.4.5        | 增安型无刷励磁同步电动机的永磁式副励磁机的试验项目               | 341 |
| 15.4.6        | 空间加热器的试验项目                              | 343 |
| 15.5          | 同步电动机的安装调试、验收试验、工业运行试验与技术准备             | 344 |
| 15.5.1        | 安装调试                                    | 344 |
| 15.5.2        | 防爆密封部位检验                                | 348 |
| 15.5.3        | 工业运行试验前的调试检查与验收试验                       | 348 |
| 15.5.4        | 工业运行试验前的调试试验及试验技术数据                     | 349 |
| 15.6          | 试验与鉴定                                   | 355 |
| 15.6.1        | 安装调试、验收试验、工业运行试验的结论                     | 355 |
| 15.6.2        | 试验与鉴定                                   | 355 |
| <b>第 16 章</b> | <b>现代增安型无刷励磁同步电动机变频调速控制系统</b>           | 357 |
| 16.1          | 变频调速控制系统的发展                             | 358 |
| 16.1.1        | 早期增安型无刷励磁同步电动机变频调速控制系统                  | 359 |
| 16.1.2        | 新型增安型无刷励磁同步电动机变频调速控制系统                  | 360 |
| 16.2          | 新型变频调速控制系统的基本原理与主控制电路的构成                | 361 |

|                                                     |     |
|-----------------------------------------------------|-----|
| 16.2.1 新型变频调速控制系统的基本原理 .....                        | 361 |
| 16.2.2 新型变频调速控制系统的控制电路的构成 .....                     | 362 |
| 16.3 同步电动机变频调速的软起动、软停机与运行 .....                     | 363 |
| 16.3.1 变频调速软起动控制 .....                              | 363 |
| 16.3.2 变频调速软停机控制 .....                              | 365 |
| 16.3.3 变频调速运行的高效、节能、降耗控制 .....                      | 366 |
| 16.4 新型变频调速控制系统对交流电动机设计的特殊要求和同步电动机变频调速控制系统的发展 ..... | 366 |
| 16.4.1 新型变频调速控制系统对交流电动机设计的特殊要求 .....                | 367 |
| 16.4.2 变频调速同步电动机绝缘结构的设计 .....                       | 368 |
| 16.4.3 同步电动机变频调速控制系统的发展 .....                       | 369 |
| 参考文献 .....                                          | 371 |