

电机制造工艺学

赵朝会 等编著



上海科学技术文献出版社
Shanghai Scientific and Technological Literature Press

电机制造工艺学

赵朝会 等编著

图书在版编目 (CIP) 数据

电机制造工艺学 / 赵朝会 等编著. -- 上海: 上海科学技术文献出版社, 2018

ISBN 978-7-5439-7607-8

I. ①电… II. ①赵… III. ①电机 - 生产工艺 IV. ①TM305

中国版本图书馆CIP数据核字 (2018) 第066290号

电机制造工艺学

DIANJI ZHIZAO GONGYIXUE

赵朝会 等编著

责任编辑: 应丽春

封面设计: 张新月

出版发行: 上海科学技术文献出版社

上海市长乐路746号 邮政编码 200040

<http://www.sstlp.com>

印 刷: 上海华教印务有限公司

开 本: 184 × 260 毫米 1/16开

印 张: 25.75

字 数: 503 千字

版 次: 2018年5月第1版 2018年5月第1次印刷

ISBN 978-7-5439-7607-8

定价: 85.00 元

版权所有 翻印必究

编委会名单

主 编：赵朝会

副主编：滕文江 承 科 徐晨生 陆宝琦

编 委：王家璘 王耀伦 刘志晟 刘经利 陆惠国 张 毅

邵海良 张 斌 李子琦 郑丁福 姜瀛洲 许 权

郭环球

序

本书系统介绍了最新的电机制造工艺，内容包括电机零部件机械加工、电机铁芯制造、绕组制造、电机绝缘工艺、笼型转子制造、集电环制造工艺、电机装配、电机试验及性能分析等电机制造工艺的特征。

本书还介绍了高效节能的永磁材料及非晶带材等新材料；介绍了高压定子绕组、铸铜、永磁电机转子及电机绝缘等新工艺；介绍了计算机辅助工艺设计、电机制造中的精细化管理等新内容；结合“中国制造 2025”，增加了智能制造在电机制造应用中的新理念等。

本书突出了工艺要领和理论与实践的相结合，为推进电机行业的创新发展进一步夯实了基础。

本书可作为电机与电器、电机电器智能化、电气工程类专业研究生、本科生学习的必修教材，亦可供从事电机专业的技术与维修人员参考，是电机生产、维修、检测技术人员的参考资料。

目 录

第 1 章 电机制造工艺特征

- 1.1 电机制造工艺多样性..... 1
 - 1.1.1 电机制造工艺概述..... 1
 - 1.1.2 电机制造工艺的多样性..... 2
- 1.2 电机结构和制造工艺间的关系..... 3
 - 1.2.1 电机结构..... 3
 - 1.2.2 电机结构和制造工艺间的关系..... 6
- 1.3 电机的生产类型..... 7
 - 1.3.1 电机生产组织类型概述..... 7
 - 1.3.2 各种生产组织类型介绍..... 7
- 1.4 电机制造的技术和生产准备工作..... 8
 - 1.4.1 技术准备工作..... 8
 - 1.4.2 生产准备工作..... 11
 - 1.4.3 计算机辅助工艺设计..... 12
- 1.5 电机制造过程概述..... 21
 - 1.5.1 总体概述..... 21
 - 1.5.2 普通三相异步电动机制造过程..... 22
 - 1.5.3 隔爆三相异步电动机制造过程..... 23
 - 1.5.4 电机制造过程中节能减排做法概述..... 25
- 1.6 电机制造过程的精细化管理..... 26
 - 1.6.1 品质保证..... 26
 - 1.6.2 准时生产..... 26
 - 1.6.3 充分发挥员工智慧和创造力..... 28

第2章 电机零部件机械加工

| | |
|------------------------|----|
| 2.1 电机零部件机械加工的一般问题 | 29 |
| 2.1.1 电机零部件的互换性 | 29 |
| 2.1.2 尺寸公差的基本概念 | 29 |
| 2.1.3 公差、配合与表面粗糙度 | 30 |
| 2.1.4 尺寸链基本概念 | 34 |
| 2.1.5 电机的互换性 | 35 |
| 2.1.6 电机零部件机械加工的特点 | 35 |
| 2.2 电机同轴度及其工艺 | 36 |
| 2.2.1 影响电机同轴度的关键零部件 | 36 |
| 2.2.2 电机的气隙及其均匀度 | 36 |
| 2.2.3 气隙均匀度的影响因素 | 37 |
| 2.2.4 保证定子同轴度的工艺方案 | 37 |
| 2.3 转轴和转子加工 | 38 |
| 2.3.1 转轴的类型及其技术要求 | 38 |
| 2.3.2 工艺过程和工艺方案分析 | 39 |
| 2.3.3 电动机转轴加工自动化 | 42 |
| 2.4 端盖加工 | 43 |
| 2.4.1 端盖的类型及技术要求 | 43 |
| 2.4.2 端盖加工的工艺过程和工艺方案分析 | 44 |
| 2.4.3 电动机端盖加工自动化 | 44 |
| 2.5 机座加工 | 45 |
| 2.5.1 机座的类型及技术要求 | 45 |
| 2.5.2 机座加工的工艺方案 | 47 |
| 2.5.3 机座加工的方案分析 | 47 |
| 2.5.4 电动机机座加工自动化 | 49 |
| 2.6 防爆电机主要零部件加工的特点 | 50 |
| 2.6.1 隔爆型零部件-机座加工的特点 | 50 |

| | |
|------------------------|----|
| 2.6.2 隔爆型零部件-端盖加工的特点 | 51 |
| 2.6.3 隔爆型零部件-轴承内盖加工的特点 | 52 |
| 2.6.4 隔爆型零部件-接线盒座加工的特点 | 52 |
| 2.6.5 隔爆型零部件-接线盒盖加工的特点 | 53 |
| 2.6.6 隔爆型零部件-接线垫板加工的特点 | 53 |
| 2.6.7 隔爆型零部件-接线托盘加工的特点 | 54 |
| 2.6.8 隔爆型零部件-引线管加工的特点 | 54 |
| 2.6.9 隔爆型零部件-转轴加工的特点 | 55 |
| 2.6.10 隔爆型零部件的水压试验要求 | 55 |
| 2.6.11 隔爆型零部件缺陷处理要求 | 56 |
| 2.7 防爆电机零部件的防锈、刷抗弧磁漆措施 | 59 |
| 2.7.1 防爆电机零部件的防锈措施 | 59 |
| 2.7.2 防爆电机零部件的刷抗弧磁漆措施 | 59 |

第3章 电机铁心制造

| | |
|--------------|----|
| 3.1 铁心材料 | 60 |
| 3.1.1 概述 | 60 |
| 3.1.2 硅钢片 | 60 |
| 3.1.3 电工纯铁 | 63 |
| 3.1.4 铁镍合金 | 64 |
| 3.1.5 铁铝合金 | 64 |
| 3.1.6 铁钴合金 | 65 |
| 3.1.7 永磁材料 | 65 |
| 3.1.8 非晶带材 | 66 |
| 3.2 冲压设备 | 66 |
| 3.2.1 剪床 | 66 |
| 3.2.2 冲床 | 69 |
| 3.2.3 半自动冲槽机 | 72 |

| | |
|-------------------------|----|
| 3.2.4 摇摆冲床····· | 72 |
| 3.2.5 数控圆片冲槽机····· | 73 |
| 3.2.6 数控扇形片冲槽机····· | 73 |
| 3.2.7 闭式压力冲床生产线····· | 73 |
| 3.2.8 砂带去毛刺机····· | 73 |
| 3.2.9 点焊机····· | 74 |
| 3.2.10 激光切割点焊一体机····· | 74 |
| 3.2.11 液压机····· | 74 |
| 3.3 铁心冲片冲制····· | 75 |
| 3.3.1 冲片的类型及技术要求····· | 75 |
| 3.3.2 硅钢片的剪裁····· | 76 |
| 3.3.3 铁心冲片的冲制方法····· | 79 |
| 3.3.4 冲片制造工艺方案分析····· | 82 |
| 3.3.5 冲片的质量检查及其分析····· | 86 |
| 3.3.6 冲模的类型与结构····· | 87 |
| 3.3.7 冲片的结构工艺性····· | 90 |
| 3.3.8 提高冲片的结构工艺性方法····· | 92 |
| 3.3.9 冲片制造自动化····· | 93 |
| 3.4 冲片去毛刺····· | 94 |
| 3.4.1 去毛刺前的准备工作····· | 94 |
| 3.4.2 去毛刺注意事项····· | 95 |
| 3.4.3 去毛刺的质量要求····· | 95 |
| 3.5 冲片点焊····· | 95 |
| 3.5.1 点焊前的准备工作····· | 96 |
| 3.5.2 点焊的质量要求····· | 96 |
| 3.6 冲片绝缘处理····· | 97 |
| 3.6.1 概述····· | 97 |
| 3.6.2 冲片的涂漆处理····· | 97 |

| | |
|--------------------|-----|
| 3.6.3 冲片绝缘处理质量检查 | 99 |
| 3.7 铁心压装 | 101 |
| 3.7.1 铁心的类型及技术要求 | 101 |
| 3.7.2 保证铁心紧密的工艺措施 | 102 |
| 3.7.3 保证铁心准确性的工艺措施 | 104 |
| 3.7.4 保证铁心牢固性的工艺措施 | 105 |
| 3.7.5 内压装和外压装 | 106 |
| 3.7.6 扇形冲片铁心的压装特点 | 109 |
| 3.7.7 磁极铁心的制造 | 111 |
| 3.7.8 铁心压装质量的检查 | 112 |
| 3.7.9 铁心结构工艺性 | 114 |
| 3.8 铁心的质量分析 | 115 |
| 3.8.1 冲片的质量问题 | 115 |
| 3.8.2 铁心压装的质量问题 | 116 |

第4章 绕组制造

| | |
|------------------|-----|
| 4.1 绕组材料 | 118 |
| 4.1.1 概述 | 118 |
| 4.1.2 绕组的分类及技术要求 | 118 |
| 4.1.3 常用绕组材料 | 119 |
| 4.1.4 常用绝缘材料 | 121 |
| 4.2 散嵌绕组的制造 | 124 |
| 4.2.1 绝缘结构 | 124 |
| 4.2.2 绕组的绕制 | 126 |
| 4.2.3 绕组的嵌装 | 129 |
| 4.2.4 绕组接线 | 134 |
| 4.2.5 机械嵌线 | 137 |
| 4.2.6 质量检查 | 138 |

| | |
|--------------------------|-----|
| 4.3 高压定子绕组制造 | 139 |
| 4.3.1 高压定子绕组的绝缘结构 | 139 |
| 4.3.2 高压定子绕组制造工艺 | 147 |
| 4.3.3 绕组质量的检查与试验 | 151 |
| 4.4 绕线转子绕组制造 | 152 |
| 4.4.1 散嵌式绕组 | 152 |
| 4.4.2 插入式绕组 | 153 |
| 4.4.3 插入式绕组制造工艺 | 155 |
| 4.4.4 插入式绕组嵌线工艺 | 155 |
| 4.4.5 接线 | 156 |
| 4.4.6 端部绑箍 | 158 |
| 4.5 电机绕组制造工程中的节能减排的措施 | 159 |
| | |
| 第5章 电机绝缘工艺 | |
| 5.1 低压电机绝缘 | 161 |
| 5.1.1 电机绝缘结构的重要内涵 | 161 |
| 5.1.2 电机绝缘在运行过程中各种影响因素 | 161 |
| 5.1.3 电机绝缘结构的特点 | 162 |
| 5.1.4 电机绝缘处理工艺的基本内涵 | 164 |
| 5.1.5 绝缘处理的安全与环保 | 172 |
| 5.2 交流变频电机绝缘 | 173 |
| 5.2.1 交流变频调速电机的特点 | 173 |
| 5.2.2 交流变频调速电机绝缘损坏机理 | 174 |
| 5.2.3 交流变频电机绝缘的加强措施—解决方案 | 177 |
| 5.3 低压电压和交流变频电机常用的主要绝缘材料 | 187 |
| 5.3.1 主绝缘材料 | 187 |
| 5.3.2 薄膜材料 | 196 |
| 5.3.3 层压材料 | 201 |

| | |
|----------------------------------|-----|
| 5.3.4 绑扎带····· | 203 |
| 5.3.5 电气绝缘套管····· | 204 |
| 5.3.6 电气绝缘压敏胶带····· | 207 |
| 5.4 中型高压电机绝缘····· | 209 |
| 5.4.1 高压电机绝缘的重要性和高压电机绝缘设计要求····· | 209 |
| 5.4.2 中型高压电动机用的导线····· | 210 |
| 5.4.3 中型高压电动机定子线圈主绝缘····· | 214 |
| 5.4.4 中型高压电机定子线圈用防晕材料····· | 217 |
| 5.4.5 中型高压电动机绝缘结构示意图····· | 220 |
| 5.4.6 高压电机用绝缘浸渍树脂····· | 220 |
| 5.4.7 高压电机对绝缘的综合要求····· | 222 |
| 5.4.8 提高中型高压电动机质量的突破口····· | 230 |

第6章 笼型转子制造

| | |
|----------------------|-----|
| 6.1 笼型转子的结构与材料····· | 232 |
| 6.1.1 笼型转子的结构类型····· | 232 |
| 6.1.2 笼型绕组所用的材料····· | 232 |
| 6.1.3 笼型转子制造方法····· | 234 |
| 6.1.4 笼型转子的技术要求····· | 235 |
| 6.2 铸铝转子制造工艺····· | 235 |
| 6.2.1 离心铸铝····· | 235 |
| 6.2.2 压力铸铝····· | 242 |
| 6.2.3 低压铸铝····· | 245 |
| 6.2.4 铸铝转子的质量分析····· | 248 |
| 6.3 铸铜转子制造工艺····· | 251 |
| 6.3.1 铸铜基本原理····· | 252 |
| 6.3.2 压力铸铜工艺····· | 252 |
| 6.4 焊接笼型转子制造工艺····· | 255 |

| | |
|------------------------------|-----|
| 6.4.1 焊接鼠笼转子绕组材料····· | 256 |
| 6.4.2 焊接鼠笼转子的工艺过程····· | 256 |
| 6.4.3 焊接鼠笼转子的质量检查····· | 260 |
| 6.5 永磁电机转子制造工艺····· | 262 |
| 6.5.1 永磁转子交流电机的结构特点····· | 262 |
| 6.5.2 转子的磁钢安装工艺····· | 263 |
| 6.5.3 永磁电机定、转子的组装工艺····· | 264 |
| 6.6 节能减排措施····· | 265 |
| 6.6.1 压铸转子杂散损耗的产生与影响及措施····· | 266 |
| 6.6.2 压铸转子的损耗与降耗措施····· | 271 |
| | |
| 第7章 集电环制造工艺 | |
| 7.1 集电环制造原则及技术要求····· | 276 |
| 7.1.1 集电环制造原则····· | 276 |
| 7.1.2 集电环技术要求····· | 276 |
| 7.2 组装式集电环····· | 277 |
| 7.2.1 主环制造说明····· | 277 |
| 7.2.2 导电杆制造说明····· | 278 |
| 7.2.3 组装说明····· | 279 |
| 7.3 整体式塑料集电环····· | 280 |
| 7.4 集电环质量检验····· | 281 |
| 7.4.1 外观与尺寸检查····· | 281 |
| 7.4.2 电气试验····· | 281 |
| | |
| 第8章 电机装配 | |
| 8.1 电机装配的结构要领及技术要求····· | 282 |
| 8.1.1 电机装配的结构要领····· | 282 |
| 8.1.2 电机装配的技术要求····· | 282 |

| | |
|-------------------|-----|
| 8.1.3 装配工艺规程的制订 | 283 |
| 8.2 电机装配尺寸链的分析与应用 | 285 |
| 8.2.1 轴向尺寸链的分析计算 | 285 |
| 8.2.2 安装尺寸 C 的计算 | 288 |
| 8.2.3 尺寸链解法及装配方案 | 289 |
| 8.3 电机转动部件的平衡 | 292 |
| 8.3.1 平衡的基本原理 | 292 |
| 8.3.2 不平衡的种类 | 293 |
| 8.3.3 校平衡的方法 | 293 |
| 8.3.4 校静平衡 | 295 |
| 8.3.5 校动平衡 | 297 |
| 8.4 中、小型电机的装配工艺 | 301 |
| 8.4.1 转子装配 | 301 |
| 8.4.2 轴承装配 | 303 |
| 8.4.3 定子装配 | 307 |
| 8.4.4 总装配 | 308 |
| 8.4.5 气隙调整 | 309 |
| 8.5 大型座式轴承电机装配的特点 | 309 |
| 8.5.1 座式轴承 | 309 |
| 8.5.2 座式轴承电机的装配 | 310 |
| 8.5.3 轴承绝缘结构 | 311 |
| 8.6 装配工艺对电机质量的影响 | 312 |
| 8.7 电机柔性化装配流水线 | 313 |
| 8.8 小型电机的自动装配线 | 314 |
| 8.8.1 电机半自动总装线 | 315 |
| 8.8.2 电机出厂试验自动线 | 317 |
| 8.8.3 静电喷漆自动线 | 318 |
| 8.8.4 自动程序装配系统 | 320 |

第9章 电机试验及性能分析

| | |
|-------------------------------|-----|
| 9.1 通用试验 | 322 |
| 9.1.1 常用标准 | 322 |
| 9.1.2 绝缘电阻测定试验 | 323 |
| 9.1.3 绝缘吸收比的测量和考核标准 | 325 |
| 9.1.4 介电强度试验（耐电压试验） | 325 |
| 9.1.5 绕组匝间耐冲击电压试验 | 328 |
| 9.1.6 热试验 | 330 |
| 9.1.7 振动测定试验方法及限值 | 337 |
| 9.1.8 噪声测定试验方法及限值 | 341 |
| 9.1.9 短时过转矩试验 | 346 |
| 9.1.10 超速试验 | 346 |
| 9.2 三相交流异步电动机型式试验 | 347 |
| 9.2.1 试验项目和建议顺序 | 347 |
| 9.2.2 测量和计算中所用的主要量值代号 | 348 |
| 9.2.3 绕组在冷状态下直流电阻的测定 | 348 |
| 9.2.4 堵转特性试验 | 350 |
| 9.2.5 负载试验 | 354 |
| 9.2.6 空载特性试验 | 357 |
| 9.2.7 杂散损耗的测定试验和有关规定 | 359 |
| 9.2.8 A法和B法效率的计算过程和相关规定 | 361 |
| 9.2.9 绘制工作特性曲线和获取额定数值 | 365 |
| 9.2.10 最小、最大转矩和转矩—转速特性曲线的测定试验 | 366 |
| 9.2.11 绕线转子电机的特有试验 | 368 |
| 9.2.12 变频调速电机的特有试验 | 370 |
| 9.3 电动机检测系统的节能措施 | 372 |
| 9.3.1 典型电动机检测系统 | 372 |

| | |
|----------------------------------|-----|
| 9.3.2 电动机检测系统的节能措施····· | 373 |
| 9.4 对三相异步电动机不合格性能项目的分析····· | 378 |
| 第 10 章 智能制造在电机制造中的应用 | |
| 10.1 智能制造的定义····· | 381 |
| 10.2 智能工厂数字化车间的实现····· | 382 |
| 10.2.1 数字化车间基础····· | 382 |
| 10.2.2 数字化车间策划····· | 382 |
| 10.2.3 数字化工厂的实施····· | 383 |
| 10.2.4 数字化工厂建设全景落实····· | 385 |
| 10.3 电机生产中智能制造技术的关键体现····· | 387 |
| 10.3.1 冲压车间····· | 387 |
| 10.3.2 嵌线车间····· | 387 |
| 10.3.3 金工车间····· | 388 |
| 10.3.4 装配（总装）车间····· | 388 |
| 10.3.5 制造过程现场数据采集与可视化（电子看板）····· | 388 |
| 10.3.6 物流与仓储····· | 389 |
| 10.4 电机生产与智能制造未来的结合····· | 389 |
| 10.4.1 产品建模····· | 390 |
| 10.4.2 工艺建模····· | 390 |
| 10.4.3 虚拟装配过程仿真····· | 390 |

第1章

电机制造工艺特征

1.1 电机制造工艺多样性

1.1.1 电机制造工艺概述

电机由多结构的零部件装配组合而成,实现机电能量的传递和转换,其制造过程中的工艺质量保证,决定了电机整机性能质量的高与低。

电机制造工艺是机械制造业中的一部分,在电机制造的工艺过程中,除了一般机械制造中所共有的锻、铸、焊、车、铣、刨、磨等机械加工和装配工艺外,还具有电机制造所特有的工艺,例如:定子铁芯的冲制、压装;铸铝(铜)转子的压(离心)铸;有绕组定子铁芯的绕组绕线、嵌线、接线、整形以及浸漆、烘干等。

电机主要制造工艺内容:

1. 电机零部件机械加工工艺:包括机座、端盖加工和转子、轴加工。
2. 电机铁芯制造工艺:包括磁极铁芯的冲片制造、冲片叠压。
3. 电机绕组制造工艺:包括线圈制造、绕组嵌装、接线及其绝缘处理。
4. 电机绝缘工艺:包括绝缘材料及设计要求。
5. 鼠笼转子制造工艺:包括转子铁芯的叠压、转子压铸、转子绕组焊接和磁钢安装。
6. 集电环制造工艺:包括集电环制造原则、技术要求等。
7. 电机装配工艺:包括定、转子部件装配;动、静平衡的校核和电机总装配等。
8. 电机试验及性能分析:包括通用试验,型式试验与节能措施等。

在电机制造中,同样的设计结构和同一批原材料所制成的产品,其质量往往有很大的差异(铁耗值相差可达40%,线圈绝缘耐压强度相差可达80%,电机的使用寿命相差好几倍)。其所以如此,除原材料、外购件、外协件的因素外,一个重要的原因就是工艺不够完善或未认真按工艺规程加工,俗话说就是工艺波动性大。例如:转子铸铝、转子加工等等。在制造过程中所造成的缺陷,不是零部件检查时容易发现的,如果将有缺陷的零部件用到产品上去,就会造成产品质量下降和使用寿命降低。当前,电机品种的生产规模越来越大,自动化的程度越来越高,对电机的运行可靠性和质量稳定性的要求越来越严格,因此采用合理的工艺方法并认真执行,是保证电机质量的首要条件。随着生产量越来越大,采用专用的设备和工装就越多,相应工艺工作越细