

赵家礼 等编著

大中型电动机 节能挖潜 修理改造 实践

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



大中型电动机节能挖潜修理 改造实践

赵家礼 等编著



机械工业出版社

本书共 12 章, 介绍大中型电动机的修理改造实践。主要内容有:

大中型电动机的结构特点及拆装要求; 电动机的绕组型式及绕组接线规律; 电动机的常见故障及修理: 导电装置故障及修理, 轴承和转轴故障及修理, 铁心和笼型转子故障及修理, 绕组改电压、改极数及改频率计算, 电动机的绝缘结构及试验, 电动机的重绕工艺; 国外进口电动机修理实例; 国外电动机改电压、改极数、改频率重绕计算实例; 国产电动机节能挖潜改造实例。

图书在版编目 (CIP) 数据

大中型电动机节能挖潜修理改造实践/赵家礼等编著. —北京: 机械工业出版社, 2006.5

ISBN 7-111-18712-1

I. 大... II. 赵... III. 电动机-节能-研究 IV. TM32

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 021723 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: 李振标 版式设计: 霍永明 责任校对: 李秋荣

封面设计: 姚毅 责任印制: 杨曦

北京机工印刷厂印刷

2006 年 4 月第 1 版第 1 次印刷

787mm × 1092mm¹/₁₆ · 40.5 印张 · 2 插页 · 1006 千字

0 001—4 000 册

定价: 68.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68326294

编辑热线: (010) 88379768

封面无防伪标均为盗版

前 言

电动机修理大体包括两方面。一是修复，二是改造。修复就是按原样修好，不改变电机参数和性能。当前国内这方面的书籍出版较多。而改造是指通过修理手段对原电动机进行节能挖潜，提高电动机性能或改变电动机参数，（如电动机增容，改极、改压、提高效率、降低温升、提高过载能力等）。本书重点介绍电动机改造方面的内容。

多年来，作者从事电动机的节能改造工作，经历了不少电动机的修理实践，如：

1) 为焦作发电厂 JK 系列 4000kW 电动机，增容改造为 4500kW，带动高效水泵，原有 6 套水泵机组节省一半，只用三套便满足了。

2) 为北京二热发电厂 2000kW 电动机改造为 2250kW 后，带动高效水泵，4 套机组甩掉一半。

3) 为燕化动力厂 4 台 550kW 电动机的改造，6 极改 8 极，风机由 22 型改为 20 型，年节约电费 500 多万元。

4) 为有机化工厂 250kW 法国电动机的改造修理，国外报价 80 万元（不包括运输费），若购置新电机报价 300 万元。而在国内修理，只花费 16 万元，共两台，修好后运行正常。

5) 首钢 5000kW 德国西门子电动机，曾想送到国外修理，后来首钢电机总厂承担了此项工作，节省了几百万美元。

6) 多年来，首钢公司从国外先后购置了上万台二手电机，均经作者负责改造成功，从而积累了许多改造经验。

当前有些企业已着手电动机的改造工作，但大部分工矿企业尚未进行，致使电动机不能充分发挥性能，甚至电动机闲置于仓库中，造成设备浪费；有的电动机出了故障（国外电动机）盲目送往国外修理。究其原因，主要是缺乏这方面的宣传，企业也缺少这方面的知识。鉴于此，作者特意编写这本《大中型电动机节能挖潜改造实践》一书，以总结 40 余年的电机修理经验，填补此类图

IV

书的空白，为从事大中型电动机修理工作的同行，做些有益的工作。

全书共分 12 章，主要内容有：

- 1) 当代大中型电动机结构特点和技术发展概况。
- 2) 引进国外二手电动机和新购电动机的拆装、检查以及二手电动机的技术改造分析。
- 3) 电动机绕组接线规律，绕组接线图拾遗，以补充国内当前电机绕组图册的不全。
- 4) 电动机绕组、导电装置，机械部分的故障诊断和修理实例。
- 5) 国外电动机国产化修理典型实例。
- 6) 国内外电动机改压、改极、改频的计算方法和实例。
- 7) 最后介绍电动机修理和改造所需的材料选用、绕组重绕工艺以及绝缘结构、试验标准等。

本书内容丰富、实用性强。

参加本书编写的还有高级工程师赵捷、刘福振、孙树文、梁孟杰、何青、赵健等。

由于编者学识水平有限、时间仓促，书中不妥之处殷切希望广大读者给予批评指正。

编 者

目 录

前言

第一章 大中型电动机的结构特点及拆装

工艺要求 1

第一节 大中型电动机制造技术发展概

况 1

一、大型直流电动机的设计指标 1

二、国外电动机绝缘厚度的确定 2

三、国外电动机铁心制造特点 2

四、提高换向能力措施 3

五、国外电动机绝缘浸渍处理特点 4

六、电动机转轴套装、轴瓦浇铸和转子

测温 5

七、日本 Polytight “T” 绝缘系统 6

八、换向器制造特点及标准 6

九、提高耐压试验标准 7

十、采用钢质升高片 7

十一、高压交流电动机绝缘技术 7

第二节 国外“二手”电动机的技术改造

分析 8

一、概述 8

二、60Hz 异步电动机使用在 50Hz 电源

上的分析 9

三、国外电动机额定电压不符合国内电

源电压的分析 12

四、60Hz 电动机使用在 50Hz 电源上的

改造措施 13

五、改频重绕计算公式的推导 14

六、常用的改频简便计算 16

七、频率相同、电压不同的电动机的改

接 16

八、用国产 380V、50Hz 电器控制 440V、

60Hz 电动机的接线图 17

第三节 国外直流电动机结构特点及维

护 18

一、国外直流电动机结构特点 18

二、电动机性能特点 20

三、电刷及刷握装置 20

四、热装联轴器的拆卸方法 20

五、滚动轴承的拆卸方法 20

六、滑动轴承的拆卸方法 20

七、抽转子的方法 23

八、电动机接线方式 23

九、电动机的安装 25

十、电动机常见故障现象及原因 25

十一、电动机对冷却系统的要求及轴承

润滑特点 26

十二、电动机的日常维护要求 27

第四节 国外电动机的拆装及检查 27

一、确定施工项目及内容 28

二、确定引进电动机的运输路线 30

三、备用电枢开箱检查、试验 31

四、原电动机解体前的原始记录 31

五、新电动机解体程序及工艺要求 32

六、联轴器拆装的工艺要点 35

七、电动机装配工艺及调整标准 39

八、工具和设备准备 40

九、电动机的装配程序和调整 40

十、电动机整机试验项目及要求 42

十一、电动机试车注意事项及要求 43

第五节 国外电动机运行故障及现场处

理 44

一、前苏联 550kW 直流电动机飞车事故的

处理 44

二、受潮电动机现场清洗干燥处理 45

三、日本 3900kW 三相绕线转子电动机现

场检修实例 47

四、国外 60Hz 电动机使用在国内 50Hz

电源上时，电动机散热和冷却问题

及解决措施 52

第二章 电动机绕组型式及绕组接线

规律	56	四、修理实例	155
第一节 绕组型式、出线端标志及绕组排列		五、电动机绕组断路故障诊断及修理	156
方法	56	六、电动机绕组接地故障诊断及修理	159
一、交流电动机出线端标志	56	七、电动机绕组短路故障诊断及修理	161
二、交流电动机绕组型式	57	八、绕线转子甩焊锡和甩无纬带故障的诊	
三、三相对称分数槽绕组的排列方法	59	断及修理	166
四、三相非对称分数槽绕组的排列		九、电动机绕组接错故障诊断及修理	168
方法	67	十、高压电动机绕组故障及修理	173
五、直流电动机出线端标志	68	第三节 电动机起动故障及遭受水、火灾	
六、直流电动机的电枢绕组	69	故障的修理	180
七、直流电动机的励磁绕组	72	一、电动机投入电源不转的原因	180
第二节 三相定子绕组接线图及拾遗	72	二、电动机不转的故障查找	180
一、三相定子绕组接线图	72	三、电动机空载起动故障原因及查找	183
二、三相定子绕组接线图拾遗	72	四、电动机带负载直接起动故障的原因及	
第三节 三相绕线转子绕组接线图	103	查找	187
一、概述	103	五、遭受水淹的电动机故障诊断及修	
二、 q 等于整数槽的双层波绕组的连接		理	187
规律	106	六、遭受火灾的电动机故障诊断及修	
三、 q 等于整数 + $1/2$ 的分数槽		理	188
双层波绕组的连接规律	109	第四节 电动机振动、扫膛和噪声故障	
四、绕组接线表和接线图的应用	112	及修理	189
五、按绕组连接表安排绕组连接的程序		一、电动机振动故障及修理	189
方法	128	二、电动机噪声故障及修理	194
六、三相波绕组引出线端的计算	133	三、电动机扫膛故障及修理	200
七、乙类波绕组的连接	136	第五节 直流电动机故障及修理	202
第三章 电动机常见故障及修理	139	一、换向故障及排除	202
第一节 交流电动机过热故障及修理	139	二、定子绕组常见故障及修理	206
一、电动机损耗及散热	139	三、电枢绕组故障及修理	217
二、电动机绝缘等级及温升	140	四、直流电动机修理实例	222
三、电动机过热原因诊断及修理	141	第六节 特种电动机故障及修理	229
四、电动机现场吹风清扫及带电清洗		一、三相异步换向器电动机故障及	
检修	144	修理	229
五、电动机过热故障检修实例	146	二、变极多速电动机故障及修理	245
第二节 电动机绕组故障及修理	149	三、变极多速三相异步电动机修理	
一、高压电动机和绕组转子(铜排)常见		实例	251
故障	149	四、三相异步换向器电动机修理实	
二、电动机绝缘电阻的允许值及清洗烘		例	254
干实例	151	第四章 电动机导电装置故障及修	
三、绕组直流电阻不合格的故障诊断及		理	258
修理	153	第一节 换向器结构特点及对换向器的质量	

要求	258	四、滚动轴承轴电压故障	310
一、换向器结构	258	五、轴承破裂故障	315
二、国外直流电动机换向器结构特点	259	六、轴承变色、滚动体变形、滚道表面 金属剥落故障	315
三、对换向器质量的要求	261	七、轴承噪声故障	315
第二节 换向器故障修理	263	八、滚动轴承的修理	315
一、铆接式升高片铆接点松动的修理	263	九、提高滚动轴承使用寿命的措施	320
二、换向器松动的修理	265	第二节 滑动轴承故障及修理	321
三、换向器升高片的断裂及改造实例	265	一、滑动轴承的结构及轴瓦结构	321
四、换向器升高片根部大量断裂的修 理	267	二、轴瓦的各部分间隙测量	321
五、带电车削换向器实例	269	三、滑动轴承常见故障原因	324
第三节 配制换向器工艺	270	四、滑动轴承故障修理	326
一、换向片制作	270	五、各国滑动轴承的密封特点	330
二、配制升高片及连接	271	六、滑动轴承重新浇铸合金修复法	334
三、V形云母环制作	272	第三节 电机转轴故障及修理	339
四、换向器装配	275	一、不抽转子修磨轴颈法	339
五、换向器V形槽加工	277	二、转轴弯曲的修复	340
六、换向器总装配	278	三、氧乙炔喷涂法修复转轴的磨损	343
七、动压成型和热超速试验	278	四、同步电动机转轴断裂修复实例	345
第四节 集电环故障及修理	279	五、更换新轴时的机加工工艺	348
一、集电环常见故障	279	六、中型电动机转子换轴时的压轴工 艺	350
二、集电环故障修理	281	第六章 铁心和笼型转子故障及修 理	352
三、紧固式集电环修理	282	第一节 铁心故障及修理	352
四、集电环改装	284	一、铁心松动的修理	352
五、电刷刷杆改进修理	286	二、定子铁心松动的修理实例	353
六、集电环机加工工艺	286	三、铁心齿、槽局部烧毁的修理	355
七、集电环带电车削	287	四、铁心扇张故障的修理	356
第五节 电动机用电刷及选用	288	五、铁心表面擦伤(扫膛)的修理	356
一、电刷用途及要求	288	六、铁心齿部弯曲和错片的修理	358
二、电刷的分类	288	七、铁心冲片清洗、涂漆、烘焙工艺	358
三、电刷的技术特性及工作条件	289	八、转子铁心拆片修复	359
四、各类型电刷应用范围及选择	290	九、定子整圆冲片铁心叠装工艺	361
五、电刷的正确安装和检查	294	十、转子整圆冲片铁心叠装工艺	362
六、各国电刷技术性能表	295	第二节 笼型转子故障及修理	363
第五章 轴承和转轴故障及修理	309	一、笼型转子常见故障	364
第一节 滚动轴承故障及修理	309	二、铸铝转子故障修理	365
一、滚动轴承过热故障	309	三、铜笼转子故障修理	366
二、电动机轴承发热、甩油故障处理 实例	309	四、深槽式转子导条断裂故障局部修理	
三、滚动轴承急剧磨损故障	310		

实例	370	二、电枢绕组改电压计算	411
五、铜笼转子改装实例	371	三、换向极绕组重绕计算	412
第三节 凸极同步电动机转子的修理	374	四、电枢绕组重绕计算	412
一、常见故障形式及修理	374	五、励磁绕组重绕计算	414
二、对凸极转子检修后的要求	376	第八章 国外进口电动机国内修理	
三、转子解体检修	376	实例	416
四、同步电动机磁极装配	377	第一节 法国进口化工设备专用特种电动机	
五、凸极同步电动机修理	378	国内修理实例	416
第四节 斜键及装配故障的修理	381	一、电动机铭牌数据	416
一、斜键本身故障及修理	381	二、结构	416
二、斜键装配不良故障及修理	382	三、电动机故障情况及处理方案	418
三、故障修理实例	383	四、流经搅拌器电动机的冷却介质的主要成分	419
第七章 绕组改电压、改极数及改频率		五、修理材料的选用	420
计算	384	六、电动机解体及原始记录	421
第一节 改绕组接线方式改变电压方法及		七、绕线工艺要求	421
计算	384	八、清理铁心要求	424
一、改电压原则	384	九、嵌线、接线及整形工艺要求	424
二、改电压方法及计算	384	十、真空压力浸漆工艺	424
三、特殊改接改压方法	389	十一、转子检查	425
第二节 改压重绕计算应用实例	393	十二、电动机装配工艺要求及质量标准	425
第三节 绕组改极数计算	395	十三、整机试验项目和标准	425
一、概述	395	第二节 日本水冷滑差电动机修理实例	426
二、改极简易计算	397	一、电动机铭牌数据	426
第四节 改频、改压、改极重绕计算	398	二、用途	426
一、绕组每相匝数与电压、频率、极数的关系及计算	398	三、VS 型电动机结构特点	426
二、常用的变频简易计算	398	四、工作原理	427
三、计算时注意事项	399	五、故障情况分析 & 修理程序	428
第五节 改极变速节能计算应用实例	400	六、电磁调速异步电动机的拆装程序	428
一、改极变速的方案估算法	400	七、外转子的解体	428
二、改极校核计算	401	八、重绕线圈和外转子装配	429
三、改极重绕计算实例	404	九、内转子检查和处理	429
四、特殊改接改极措施	405	十、修后的电动机在投入运行时的检查	429
第六节 采用磁性槽楔改极增容重绕计		第三节 德国直流电动机电枢国内修理	
算	406	实例	430
一、概述	406	一、铭牌数据	430
二、改极方案的确定	407	二、电动机结构特点	430
三、6 极改 8 极的计算及试验结果	407	三、电动机故障情况	430
第七节 直流电动机简易计算	410		
一、励磁绕组改电压计算	410		

四、修理方案的确定	431	三、绕组数据记录	466
五、原电动机电枢制造工艺特点	431	四、重绕计算	467
六、电枢绕组解体后的原始记录	432	第十章 国内电动机节能挖潜改造	
七、绝缘材料的代用措施	433	实例	480
八、绝缘结构的改进措施	433	第一节 JSQ280-16F 型电动机改极增容计算	
九、嵌线工艺	434	实例	480
十、电枢线圈接头和升高片的焊接工艺	435	一、闲置电动机的铭牌数据	480
十一、修理试验结果和比较	435	二、改造要求	480
第九章 国外电动机改压、改极、改频		三、美国厂家对改造后的电动机技术要求	480
重绕计算实例	437	四、计算实例	480
第一节 8000hp 同步电动机的技术改造		第二节 JKZ2000-2 型三相异步电动机改造	
实例	437	实例	494
一、概况	437	一、改造意义及方案	494
二、改造的可能性分析	437	二、重绕计算	495
三、施工方案的选择	437	三、电动机投产运行试验记录及经济效益	504
四、定子绕组重绕大修、改造转子支架	438	第三节 YK400-2 型 4000kW 电动机改造	
五、改造后电动机电磁计算校核	441	实例	505
六、电动机试验	441	一、任务	505
七、经济效益	442	二、重绕计算	505
第二节 三相笼型异步电动机增容改造计算		三、试验结果	508
实例	442	四、节电效果	509
一、电动机铭牌数据及改造要求	442	第四节 同步电动机凸极转子的技术改造	
二、原始测绘记录	443	造	509
三、重绕计算	444	一、方案的确定	509
第三节 三相笼型异步电动机改压、改频		二、起动性能计算	510
重绕计算实例	451	三、起动时间及起动温升计算	513
一、铭牌数据和改造要求	451	四、经济效益	516
二、改造可能性分析及估算	451	第五节 JRQ630-8 型电动机改极增容计算	
三、测绘原始尺寸	452	实例	516
四、按原始记录推导原设计主要技术参数及分析	452	一、改造要求及原始记录	516
五、重绕计算	456	二、重绕时槽配合及每槽匝数校验	518
六、电机改造后的型式试验和出厂试验	465	三、重绕计算程序及计算实例	519
第四节 4000hp 三相绕线转子异步电动机		四、试验结果	530
重绕计算实例	465	第十一章 电动机绝缘结构及试验	532
一、原电动机铭牌数据	465	第一节 电磁线的选用	532
二、铁心尺寸记录	465	一、常用漆包电磁线的选用	532
		二、各种漆包线规格、特点及主要用途	532

三、常用绕包线的选用	538	三、旧铜条复用	595
四、特种电磁线的选用	541	四、新制插入式转子线圈	595
第二节 绝缘材料及选用	542	五、嵌线及接线工艺	597
一、云母带和云母箔制品的选用	542	六、定子半月式绕组重绕工艺	600
二、云母板材的选用	542	第三节 直流电动机重绕工艺	602
三、层压板的选用	542	一、电枢绕组拆前记录	602
四、绝缘粘带的选用	542	二、原导线的复用	603
五、玻璃丝套管的选用	549	三、新线圈的绕制	603
六、无纬绑扎带的选用	549	四、电枢绕组嵌线工艺	604
七、绝缘漆的选用	549	五、均压线圈的嵌线工艺	609
第三节 高压电动机定子绝缘结构	553	六、电枢绕组焊接工艺	609
一、定子绝缘结构	553	七、嵌线焊接后的质量检查	610
二、防电晕措施	556	八、励磁绕组重绕工艺	610
三、全粉绝缘结构的绝缘规范	558	第四节 同步电动机磁极线圈重绕工艺	612
第四节 直流电动机绝缘结构	560	一、磁极线圈重绕工艺流程	612
一、电枢绕组绝缘结构	560	二、清除旧绝缘	612
二、定子绕组绝缘结构	563	三、新铜(铝)排绕制线圈	612
第五节 绝缘测试及标准	567	四、导线退火	613
一、绝缘电阻和吸收比的测定	567	五、整形及补焊	613
二、高压电机新制备品线圈耐压试验	569	六、焊引线头和去毛刺	614
三、高压线圈介质损耗角及增量测定	571	七、垫匝间绝缘	614
四、交流高压线圈匝间绝缘试验	573	八、磁极线圈热压工艺(坯布热压整形)	614
五、交流电机工频耐压试验	575	九、极身绝缘工艺	615
六、泄漏及直流耐压试验	577	十、线圈套入磁极工艺	616
七、直流电机工频耐压试验	578	十一、实例: TM600-24/2130 型三相同步电动机磁极线圈重包绝缘	617
八、交流电动机的试验项目、周期和要 求	580	附录	621
九、直流电动机的试验项目、周期和要 求	580	一、附表	621
第十二章 绕组重绕工艺	584	附表1 短距系数 $K_p = \sin(\beta 90^\circ)$	
第一节 高压电动机定子绕组重绕工艺	584	$\beta = \frac{\gamma}{Q_{p1}}$	621
一、填写原始记录	584	附表2 分布系数 $K_d = \frac{\sin\left(\frac{\alpha}{2} q\right)}{q \sin \frac{\alpha}{2}}$	
二、拆除旧线圈	585	$\alpha = \frac{2p\pi}{Q_1}$	621
三、铁心清理及修整	585	附表3 三相双层绕组(60°相带)绕组系 数	622
四、圈式线圈制作工艺	586	附表4 空载压降系数 K_E 值	625
五、修理国外高压电动机实例	590	附表5 三相异步电动机 K_s 与 α_i 值	625
第二节 中型绕线转子电动机绕组重绕 工艺	593		
一、转子绕组拆除记录	593		
二、拆除旧绕组工艺	593		

附表6	$B_{25} = 1.48\text{T}$, D21-0.5 磁化曲线	626	附图1	铁心长度计算中径向通风道损失 宽度 b'	630
附表7	$B_{25} = 1.54\text{T}$, DR510-50(D23-0.5) 磁化曲线	626	附图2	节距漏抗系数 K_B 、 K_H	631
附表8	$B_{25} = 1.57\text{T}$, DR490-50(D24-0.5) 磁化曲线	627	附图3	三相60°相带谐波单位漏磁导 ΣS	631
附表9	$P_{10/50} = 2.5\text{W/kg}$, D21-0.5 损耗曲 线	627	附图4	三相60°相带谐波单位漏磁导 ΣS	632
附表10	$P_{10/150} = 2.1\text{W/kg}$, DR510-50 (D23-0.5)、DR490-50(D24-0.5) 损耗曲线	628	附图5	三相120°相带谐波单位漏磁导 ΣS	633
附表11	轭部磁路长因数 ξ 值	628	附图6	笼型转子谐波单位漏磁导 ΣR	634
附表12	50Hz 时硅钢片(D21, 0.5mm)的单位 铁损耗	629	附图7	三相单笼转子的 $\gamma(\beta)$ 、 $\varphi(\xi)$ 、 $\varphi'(\xi)$ 值	635
附表13	硅钢片新旧牌号对照表	630	附图8	径向通风沟对槽漏磁的影响	636
二、附图		630			

第一章 大中型电动机的结构特点 及拆装工艺要求

第一节 大中型电动机制造技术发展概况

一、大型直流电动机的设计指标

以西门子公司制造的接近极限容量的 5000kW 直流电机为例，其设计特点是选择较高的电磁参数和设计指标。除热负荷（8810A/cm·mm²）、片间电压（20.3V）、电枢线速度（99.5m/s）和电抗电动势（13.4V）之外，单位直径的电枢容量、换向能力系数、生产能力系数和电机利用系数等，均居国际先进水平。

(1) 单位直径的电枢容量 单位直径的电枢容量（ P_a/D_a ）越高，表明电机体积越小、重量越轻、成本越低。但此指标提高后电机线负载要增大，电机要发热，同时片间电压也升高，影响电机换向性能，所以只有在先进技术的保证下才能提高此指标。表 1-1 列出西门子公司与其他国家电机的 P_a/D_a 值对比（ P_a —电枢容量， D_a —电枢直径）。

(2) 换向能力系数 换向能力系数（ ζ_1 ）高的电机表明换向能力强。 ζ_1 值由下式确定：

$$\zeta_1 = (P_a/D_a)(I_{\max}/I_N)(n_{\max}/n_N)$$

式中 $I_{\max}$ ——电枢最大直流（A）；

I_N ——电枢额定电流（A）；

$n_{\max}$ ——电机最大转速（r/min）；

n_N ——电机额定转速（r/min）。

该指标不能设计太高，因为电枢转速越高则刷火越大，换向越困难。部分电机的 ζ_1 值见表 1-1。

表 1-1 电机的主要设计指标

	德国（西门子）		日本（东芝）	中国
	5000kW 电机	以往制造的电机		
P_a/D_a	2.4	2	1.52	1.36
ζ_1	9.17	8	6.9	6.2
ζ_2	$2.65 \times 10^6 \sim 3.2 \times 10^6$	3.5×10^6	1.5×10^6	1.2×10^6
C	9.98	10	5.9	4.6~5.2

(3) 生产能力系数 直流电机的生产能力受电机极限容量和极限速度限制，亦即受刷火的限制，因此可用 P_a 和 $n_{\max}$ 表示生产能力系数 ζ_2 （kW·r/min）

$$\zeta_2 = P_a \cdot n_{\max}$$

显然， ζ_2 值大，则制造厂的生产能力也大。但由于提高 P_a 和 $n_{\max}$ 两值均要受到电机换

向能力的限制,所以必须有较先进的控制刷火技术作保证。部分电机的 ζ_2 值见表 1-1。

(4) 电机利用系数 电机利用系数 C 由下式求出:

$$C = Pa/Da^2 \cdot l_{Fe} n_{max}$$

式中 l_{Fe} ——电枢铁心长度 (m)。

C 值表示电机的单位体积 ($l_{Fe} Da^2$) 和单位转速的容量大小,此指标高则表明电机用料少、体积小、重量轻。由表 1-1 可见,当今电机 C 值最高达到 10,我国的直流电机如能达到这一指标就是国际一流水平。

二、国外电动机绝缘厚度的确定

国外电机线圈绝缘单边厚度为 1.5~1.6mm (连续包扎云母带) 和 1.3mm (滚包工艺)。法国阿尔斯通有一单边厚度 δ (mm) 计算公式:

$$\delta = 0.22(U_N + 1)$$

式中 U_N ——额定电压 (kV)。

按此公式可求出 3kV 电机, $\delta = 0.88\text{mm}$, 10kV 电机, $\delta = 2.42\text{mm}$ 。

我国在 20 世纪 60~70 年代开始研制粉云母带。采用复合绝缘液压方式,线圈对地绝缘单边厚度为 $\delta = 2.2 \sim 2.3\text{mm}$,绝缘等级从 E 级升到 B 级,并开始以模压代替真空浸胶处理。80~90 年代,随着绝缘材料质量的提高,出现了 F 级粉云母带,使 δ 值降至 1.8mm。这是国内目前能够达到的较薄绝缘厚度。

我国要想缩小与国外的差距,除了要提高工艺精度外,更重要的是提高云母带的云母含量和制定出较为合理的击穿耐压等级标准。

国外计算电机绝缘耐压等级的公式为

$$\text{耐压等级} = 2(2U_N + 1)$$

如电机额定电压为 6kV,则按上式求出的耐压等级为 26kV。但国内对 6kV 电机规定优等品耐压等级为 65kV,良好品为 55kV,合格品为 42kV,均高于国际标准,为符合国内的规定,绝缘厚度当然很难再减薄。

国内外在高压电机防晕层单边厚度上也有差距。我国 20 世纪 60 年代以前采用原苏联的石棉带刷沥青漆,70 年代采用玻璃丝带刷醇酸漆,80 年代以后则采取玻璃丝带的热压工艺,使电机防晕层单边厚度从 0.6mm 逐步减薄至目前的 0.15~0.2mm。而美国西屋公司因直接刷漆,不再包带,故防晕层单边厚度达到 0.05mm。

三、国外电动机铁心制造特点

(1) 电机铁心采用斜槽形式,槽中心线与转轴中心线偏离一定角度。斜槽有平移式和旋转式两种。斜槽铁心的优点包括:降低气隙齿谐波和高次谐波;改善绕组电动势波形;改善直流电机换向,降低换向片间最大电压;使电机转速均匀,减小转矩脉动;降低电机附加损耗和噪声。

冲制斜槽的设备一般采用德国温加登厂的 NNS3-1B 型三坐标数控冲槽机或德国舒勒公司的高速电脑控制冲槽机。这些设备一方面因冲模的模座使用了滚动导轨,故导向精度高,模具寿命长;另一方面因模具强度高,故冲模间隙均匀、冲片毛刺小,保证了槽形尺寸的高精

度。

对于直流电机，冲槽机每冲一片能自动位移 0.0077 ~ 0.019mm，冲片自动编号，叠片时按编号自动排列，不会出现错位；对于交流电机，每冲一片自动位移 0.0287mm。叠装铁心后，要求做铁心发热试验。

(2) 硅钢片涂层采用水溶性无机漆，例如德、美、日等国均选用奥地利 E1150/41711 型水溶性无机漆。其优点是：涂层薄 (0.003 ~ 0.007mm)，可提高叠装系数和缩短铁心长度；涂层电阻大于 $10^5 \Omega/\text{cm}$ ；涂层表面光滑，无边缘效应；耐高温，寿命长；保证电机整浸质量，改善电机性能。

涂漆用漆基为水稀释的酚醛树脂，漆料组成 (质量分数) 为：粘合剂 30%，填料 (硫酸锌、硫酸铅) 40%，溶剂 13%，水 17%。涂漆的主要工艺参数为：炉温 320 ~ 340℃，链条速度 6 ~ 8m/min，漆粘度 120s (20℃时)。

(3) 铁心结构要适应晶闸管供电电源的要求。由于晶闸管供电含有脉动分量，对电机有不良影响，故应采取相应措施，其中包括对电机机座、主极、换向极、电枢铁心等均采用涂漆冲片装置；铁心紧固螺杆和铆钉均有绝缘措施；用不锈钢制作换向极的第二气隙垫片；将垫片剪出缺口阻隔涡流。

四、提高换向能力措施

具体措施有以下几方面。

(1) 减少槽深 槽深变低可减少槽漏磁量，从而降低电抗电动势，改善换向。一般降低槽高 30%。减少槽深的办法：一是不用槽楔，用无纬带绑扎电枢绕组代替槽楔，可使槽深减少 4 ~ 5mm (拉紧力在直线部分为 21MPa，端部为 24MPa，由强度和离心力等决定)；二是采用变截面导线，使槽内导线高度降低。表 1-2 为 2050 粗轧机内 2850kW 直流机电枢绕组采用变截面导线的情况。表中电机导线通常的高度应全是 28mm，但考虑到槽中导线散热比端部好，所以为了整体有均一的温升，可把槽内导线截面改小，使其电流密度增加。又由于槽内上层导线散热比下层好，所以上层导线截面又小于下层，使上层导线的电容量比下层大些。这样做将使槽深减少 ($2 \times 28 - (18 + 20.2) = 17.8\text{mm}$)，如再去掉槽楔 4mm，总槽深可降低 21.8mm。

表 1-2 2850kW 电机导线尺寸

		导线高度/mm	电流密度/ (A/mm ²)
槽内直线部分	上层	18	7.87
	下层	20.2	7.01
端 部		28	5.05

(2) 采用全节距异槽式单叠绕组 以往大型直流电机设计时选用蛙式绕组，目的是节省大量均压线，但电机运行效果不佳。此后改用全节距异槽式单叠绕组效果较好，原因是这种绕组能使电抗电动势波形平坦，对称性好，易于与换向极磁场波形匹配，电抗电动势被换向极磁势抵消。

(3) 采用钢质升高片 钢质升高片可提高换向元件电阻，降低换向电流和电抗电动势，同时也增加了机械强度，如图 1-1 所示。

(4) 采用分瓣电刷 其目的也是提高换向元件的电阻、抑制换向电动势和换向电流 (图 1-2)。

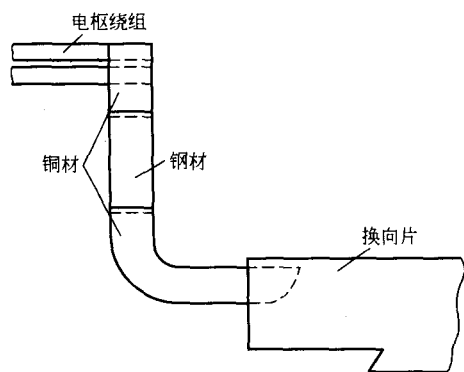


图 1-1 钢质升高片结构

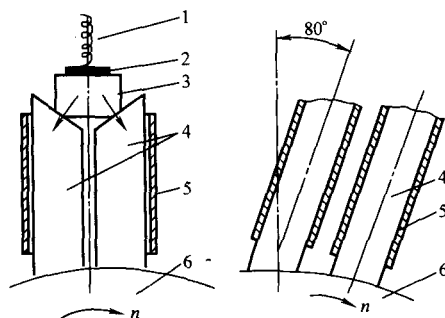


图 1-2 分瓣电刷结构

1—弹簧 2—硅橡胶垫 3—压块
4—电刷 5—刷盒 6—换向器

(5) 提高补偿度和降低片间电压峰值 以往设计主极下的补偿绕组槽数是 7 个，每槽两根导线，西门子公司把 7 个槽改为 14 个，每槽放一根导线。这样一改使补偿极的槽数增加一倍。补偿磁动势阶梯高度下降，从而减小补偿磁动势和直流电机高速运转的片间电压峰值，抑制刷火发生 (图 1-3)，但补偿度一样，均为 14。

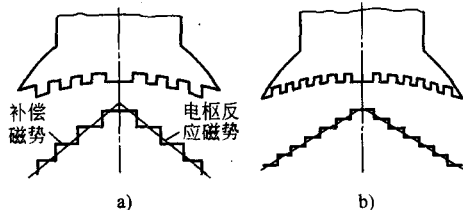


图 1-3 主极下补偿绕组的槽数变化

a) 主极下 7 槽 b) 主极下 14 槽

(6) 采用硬钎焊工艺 该工艺包括：电枢线圈接头之间采用钎极电阻焊；换向极线圈接头之间采用中频焊；补偿极线圈接头之间采用氩弧焊或中频焊接（频率为 10kHz）；升高片采用钎极电阻焊接。上述各焊接法有助于提高焊点机械强度，便于施焊，能保证特殊位置的焊接质量和降低焊接接触电阻。

五、国外电动机绝缘浸渍处理特点

德国狄纳摩电工厂于 1968 年创出的 F 级麦克拉斯 (Micalastic) 绝缘系统，将世界制造大型直流电机的绝缘处理技术推向了新的高度。直流电机的电枢线圈绝缘层很薄 (5000kW 电机为 2.2mm)，槽内无槽绝缘，所以必须采用真空压力整浸工艺，这就是麦克拉斯绝缘处理系统的特点。

目前国内许多电机厂采用美国 20 世纪 50 年代开发的真空压力整浸工艺，简称 VPI 工艺。但这种工艺与麦克拉斯绝缘系统有以下不同点：

(1) 树脂漆种类不同 国内一般以环氧树脂为主，加入活性稀释剂和潜伏性固化剂，而狄纳摩厂采用低分子量双酚 A 环氧树脂与高分子量的酸酐在常温下按比例混合的方法，不需活性稀释剂和潜伏性固化剂。

(2) 固化时间和固化温度不同 国内固化时间长，固化温度高。例如，B 级、F 级和 H

级绝缘的固化温度分别高达 130℃、150℃和 180℃。而西门子公司的绝缘漆在 130~140℃以下就可充分固化，并能避免漆的流失。

(3) 浸漆方法不同 国内 VPI 工艺只能“冷浸”，浸渍效果差。狄纳摩厂是将电机和树脂加热到 70℃进行“热浸”，由于此时绝缘漆粘度下降，故可提高浸透力和增加浸漆量。

(4) 防止漆流失的措施不同 国内浸漆不敢加热是怕绕组挂不住漆，而狄纳摩厂是在粉云母带中添加促进剂，以及在整浸固化时于烘炉四角也放置适量的促进剂。

六、电动机转轴套装、轴瓦浇铸和转子测温

(1) 冷热套轴工艺 电枢绕组嵌线完毕后，应将电枢（包括电枢支架）进行真空压力整浸处理（麦克斯绝缘处理），处理后再将电枢热套于转轴。热套采用过盈配合，如 5000kW 电机热套过盈量为 0.64mm。但由于电枢已嵌完线圈，加热温度受到限制（最高只能到 130℃），故电枢和电枢支架的膨胀量远不能满足要求。为此，还要将转轴冷却到零下 30℃左右，采用干冰法使其外径收缩 0.37mm，加上电枢受热膨胀的 0.27mm，总的间隙为 0.64mm，可满足过盈量要求。当然，如果电枢在嵌线之前就想套入转轴，那么电枢不带线圈均匀加热至 250℃是允许的，但真空浸漆罐往往不允许。一般浸漆罐尺寸为 $\phi 4.5\text{m} \times 5\text{m}$ ，而转轴长度则达 7~8m，所以只能在电枢绕组嵌线之后套轴。

电枢套入转轴后还要消除内应力。热电枢与冷转轴配合时，热电枢会因收缩困难而遇到拉应力，冷转轴会因膨胀受阻而遇到压应力，两种应力有可能引起电机断轴。消除应力的办法是向两个摩擦面间打入高压油（事先做出油道），油进入转轴与电枢支架间的配合面，使支架胀大，过盈配合变为过渡配合，形成一定间隙，电枢支架和转轴在无摩擦力情况下自由放松，达到合适位置。消除内应力后退出油压即可。

(2) 轴瓦浇铸 在浇铸工艺上国内外有以下不同之处。国外轴瓦座由 30 号铸钢制作；浇铸钨金后要经两小时 600~650℃的脱氢处理，目的是避免轴瓦发热放出氢气使钨金脱壳；轴瓦座与钨金接合面只是光滑平面，不带鸽尾槽；浇铸钨金前要电镀轴瓦表面，浇铸后精车钨金表面，一次成功，不再进行刮瓦；采用超声波检查钨金接合面的浇铸质量，要求粘结力大于 $34.8\text{N}/\text{cm}^2$ 。国内轴瓦座与钨金接合面有鸽尾槽，理由是增加结合面积和结合强度（国外认为鸽尾处易含有气泡和引起钨金脱壳）；轴瓦表面应先搪锡后浇铸钨金；浇铸中要为刮瓦留出刮磨余量。

(3) 转子测温 电机出厂时虽经试验，测出平均温升，但须在使用中监测电机最热点，因此应在转子上装设测温装置。国内电机无此装置，发热时不能随时监护。国外是将测温元件装在转子支架固定肋上边的电枢铁心槽内，因为此处通风差、易发热。测温元件工作时，先把电枢线圈温度变成电阻值，然后经频率转换器将频率信号从集电环处引出到接收装置，再变成温度显示出来。

由于国外电机大部分做成 F 级，或者按 B 级考核，所以测温元件的报警温度定在 140℃，自动切断温度定在 155℃。

顺便提一下绝缘等级问题。H 级绝缘的允许温升虽比 F 级高，但其绝缘材料的导热性较差，又无配套的 H 级绝缘漆，故实际温升也要定于 F 级，从而把 H 级允许温升高的好处抵消了。国外采用麦克斯绝缘系统后，允许温升可达 H 级，而实际温升却不高于 F 级，这