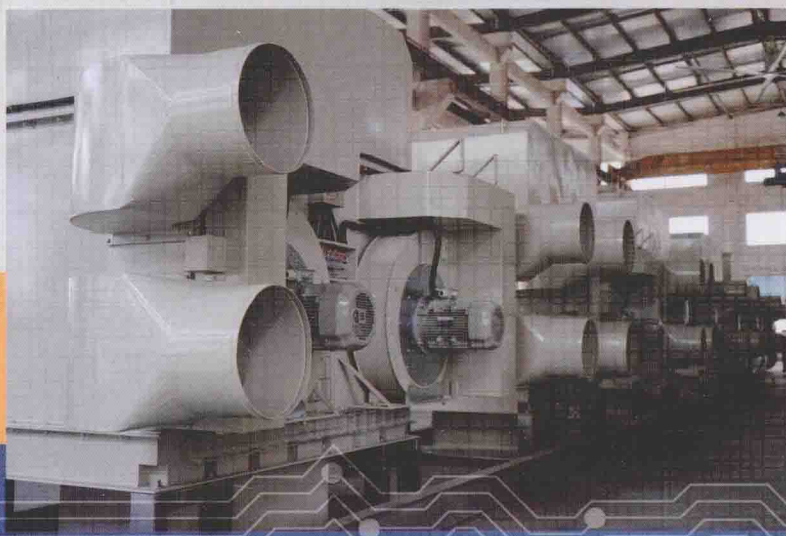


电机运行 热交换计算和设计

Calculation and design of
heat exchange for motor operation

黎贤钛 编著

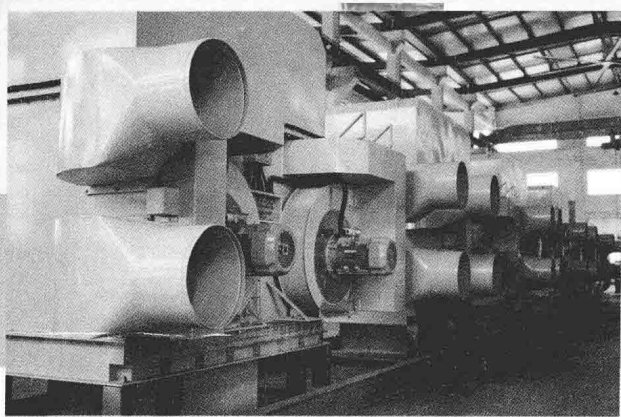


ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS
浙江大学出版社

电机运行 热交换计算和设计

Calculation and design of
heat exchange for motor operation

黎贤钛 编著



 ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS
浙江大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

电机运行热交换计算和设计 / 黎贤钦编著. —杭州:
浙江大学出版社, 2016.6

ISBN 978-7-308-15712-4

I. ①电… II. ①黎… III. ①发电机运行—热交换—
传热计算②发电机运行—热交换—设计 IV. ①TM306

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 066716 号

电机运行热交换计算和设计

黎贤钦 编著

责任编辑 张作梅

责任校对 余梦洁

封面设计 续设计

出版发行 浙江大学出版社

(杭州市天目山路 148 号 邮政编码 310007)

(网址: <http://www.zjupress.com>)

排 版 杭州林智广告有限公司

印 刷 富阳市育才印刷有限公司

开 本 710mm×1000mm 1/16

印 张 13.25

字 数 245 千

版 印 次 2016 年 6 月第 1 版 2016 年 6 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-308-15712-4

定 价 58.00 元

版权所有 翻印必究 印装差错 负责调换

浙江大学出版社发行中心联系方式 (0571) 88925591; <http://zjdxcsb.tmall.com>

前 言

电机冷却系统设计,就是基于其使用环境,综合考虑换热效率、可靠性、成本三大指标,对热力、流体(风压、水压)、几何(散热部件形状、排列等)三类参数进行优化组合,得到一个比较满足用户需要的综合方案。

近二三十年来,随着经济、技术的快速发展,大型电机的应用领域越来越多,容量越来越大,性能要求越来越复杂,相应地,对冷却系统的研发制造也提出了新的、更高的要求。但由于设计理念落后,国内厂家大多仍习惯于“凭经验试样→与实机反复匹配→合格后投入批量生产”的开发模式,造成了许多不必要的人力、物力和财力的浪费。尽管有换热设计软件,但材料性能、制造工艺差异较大,不同厂家需求也各不相同,在同行业竞争日趋激烈的情况下,旧的设计方法已不能适应市场要求,需要与时俱进,提高非标精细化设计能力。

尔格科技专注于电机冷却系统研制二十余年,在产品设计和技术人员培训方面积累了一些心得。公司久有心愿,将这些专业知识与广大客户及同行分享,以期共同进步。

本书由尔格技术团队参酌相关著作,结合多年设计经验,共同撰写编著。它详细解析了电机冷却系统的基本结构、换热计算、参数性能和设计方法,以换热计算和结构设计为重点,并穿插介绍了标准化、模块化的设计理念,尽量做到简洁明了、深入浅出,非常适合作为工厂初学者的学习用书。

本书由黎贤钛编写。编写完稿后,分别由尔格科技各技术人员核对:第1章为张龙波,第2、3章为俞钧,第4、5章为涂佳,第6、7章为杨照,第8、9章为虞礼辉。对他们的认真核对,表示谢意。

本书在编写过程中,曾得到不少单位和专家的支持,他们提供了许多资料和有益的建议,对此表示衷心的感谢。

黎贤钛

2015年1月于尔格科技

符号说明

A ——壳程总传热面积；

A_1 ——盘-环形折流板换热器盘板与壳体间纵向管束(轴向)流道环弧形空间传热面积；

A_2 ——盘-环形折流板换热器环板中心开口处纵向流道传热面积；

A_3 ——盘-环形折流板换热器横流流道传热面积；

D_1 ——盘-环形折流板的盘径；

D_2 ——盘-环形折流板的环板中间开口(孔口)直径；

D_m ——盘-环形折流板换热器横流面积计算的平均直径, $D_m = \frac{D_1 + D_2}{2}$ ；

D_s ——壳内径；

d ——传热管外径；

g_c ——重力加速度；

h_1 ——相当于 Nu_1 的纵向流传热膜系数；

h_2 ——相当于 Nu_2 的纵向流传热膜系数；

h_3 ——相当于 Nu_3 的横向流传热膜系数；

K ——传热校正系数；

L ——传热管长；

M ——方程式中的乘积因子；

M_s ——壳程质量流率；

N_t ——换热器总数；

N_{t1} ——盘-环形折流板换热器盘形板与壳体间弧环形流道处换热管数；

N_{t2} ——盘-环形折流板换热器环板中央开口处流道的换热管数；

N_{t3} ——盘-环形折流板换热器横流流道处换热管数；

Nu_1 ——计算传热膜系数 h_1 的努歇尔数；

Nu_2 ——计算传热膜系数 h_2 的努歇尔数；

- Nu_3 ——计算传热膜系数 h_3 的努歇尔数；
 Pr ——普兰特数；
 Re_1 ——纵向流流道截面 S_1 处雷诺数；
 Re_2 ——纵向流流道截面 S_2 处雷诺数；
 Re_3 ——纵向流流道截面 S_3 处雷诺数；
 S_1 ——穿过盘环形折流板与壳体间弧环形流道纵向流横截面积；
 S_2 ——穿过盘环形折流板与中央开口处纵向流流道横截面积；
 S_{k1} ——盘形折流板与壳体间弧环形截面积；
 S_{k2} ——环形折流板以内的截面积；
 S_q ——穿过管束的横流流道截面积；
 S_s ——纵向流流道平均截面积, $S_s = \frac{S_1 + S_2}{2}$ ；
 T_b ——壳体流体主体流体平均温度；
 T_w ——管壁温度；
 U_1 ——穿过横截面 S_1 的壳程流速；
 U_2 ——穿过横截面 S_2 的壳程流速；
 U_3 ——穿过横截面 S_3 的壳程流速；
 μ_s ——壳程流体主体平均温度下动力黏度；
 μ_w ——壳程流体壁温下动力黏度。

绪 论	1
第 1 章 电机构造	3
1.1 电机结构分类	3
1.2 异步电机结构	6
1.3 同步电机结构	11
1.4 直流电机结构	19
第 2 章 电机损耗与效率	25
2.1 基本铁耗	26
2.2 空载时铁芯中的附加损耗	30
2.3 电气损耗	37
2.4 电机负载时的附加损耗	38
2.5 机械损耗	47
第 3 章 电机发热计算	52
3.1 电机允许的温升限度	52
3.2 电机稳定温升的计算	56
3.3 电机不稳定温升的计算	66
第 4 章 电机热能传递	72
4.1 传热基本定律	72

4.2	牛顿散热定律和散热系数	79
4.3	热量传递的确定	81
4.4	热流传递计算	84
第5章	电机冷却系统	95
5.1	电机冷却方式	95
5.2	电机定子、转子内冷结构	100
5.3	电机冷却器风扇	107
第6章	电机的冷却介质特性	121
6.1	电机的冷却介质	121
6.2	氢气的基本特性	124
6.3	水的基本特性	128
6.4	电机定子水冷结构	135
第7章	风力发电机冷却系统设计	142
7.1	风电冷却系统概述	142
7.2	风力发电方式	146
7.3	风电水冷系统设计	150
第8章	翅片管传热及选型	161
8.1	翅片管的原理与应用	161
8.2	翅片管换热计算	164
8.3	翅片管的管内换热计算	171
8.4	翅片管的排列与连接	173
第9章	翅片管换热器设计	177
9.1	翅片管设计方法和步骤	177
9.2	翅片管换热器的传热温差计算	182
9.3	翅片管换热器的变工况计算	186

附 录	190
附录 1 干空气的热物理性质($p=1.01\times 10^5$ Pa)	190
附录 2 大气压($p=1.01\times 10^5$ Pa)下烟气的热物理性质	191
附录 3 饱和水的热物理性质	192
附录 4 干饱和水蒸气的热物理性质	194
附录 5 饱和氨(NH ₃)物性值	195
附录 6 金属材料的密度、比热容和导热系数	196
附录 7 虚变量的贝塞尔函数值	197
索 引	199
参考文献	202

绪 论

随着国民经济的快速发展,新技术、新材料的不断研究与应用,电机容量越来越大,电压等级也不断提高,为此,电机可靠性要求越来越高,对电机冷却系统研究和制造也提出新的课题。特别是用于风力发电机组中的冷却器重量、体积受到空间和空中运行的限制,价格又不能太高;用于核电、大型水力发电等大型发电机可靠性、寿命要求通常为30年;用于火电、石化、环保等电机因使用环境不同,对材料、结构和尺寸提出新的挑战,不断推出新的规格和品种。电机的发展促使冷却器从设计方面就要满足效率高、可靠性、价格成本等要求。要满足上述条件,除了要充分考虑电机发热原理外,对冷却器的研究、冷却器材料和制造上也需要新的突破。但是,近半个世纪以来,冷却器理论和设计方法上的进展相对较慢,其品种、规格、性能和尺寸没有统一标准。大部分企业都是凭借经验制造样机,在电机整机中测试合格后,才投入批量生产。如不合格则继续试样,造成不必要的财力和时间上的浪费。

在冷却器设计时需要很多参数,这些参数大体上可分为两组:第一组是冷却器内有关风压、水压、流体的参数和热力学参数;第二组是表示冷却器各通用部件形状、排列和管子材料、大小的几何参数。这二组参数都是三维的,相互之间有影响。尤其是流道上、下、左、右之间的流体动力参数也是相互关联的。在设计中要处理好这些关系,需要对整个过程反复进行修改,难度较大,以前的设计理论和方法已很难适应。

近年来,关于电机冷却器的学术和理论研究,已注意到了流体参数与性能参数之间的关系,但是却忽视了流道几何特征对流体力学参数的影响,而且学术和理论研究与设计方法的发展脱节,没有实质性推动电机冷却器整个优化设计。

大型电机冷却器常用介质可分为空气冷却和水冷却,空气冷却常选用风机,它是易损的主要部件,如叶轮、轴、轴承和轴封等配件,应该是可互换的,但如果用于风力发电机上,更换成本很高。因此,要进行有限元的分析,改变电机极数和材料,使之可构成多种组合,适应标准化。

作为专用于高寒型和海洋型特殊环境的电机冷却器,应尽量考虑使用条件

中的其他要求。为了获得最优的性能(但不一定最高效率)和最经济的设计,应有效分析其风机转速、极数、管子冷却系数、流道风压和流量系数,也应结合零部件的强度和结构以及材料等进行综合考虑。

近年来,发电行业和输变电行业设备使用部门存在着一些片面的看法,只追求表面的“节能”指标,即使是临时性工作或者间歇性工作,也选择同样的机型。选用复杂,其昂贵和大功率的机型,实际上提高了投资和总运行费用。

设计电机冷却器考虑最多的是:散热效率、冷却性能曲线、振动和重量。效率是最受人们重视的表观指标,特别是在当前能源紧张的情况下,“节能”是人们注重的一大指标,而且有时这也是最能“蒙骗人”的指标。因有些“节能”冷却器只是在设计点或工况点时效率高,但高效范围不宽,其性能曲线的形状不能令人满意。标准参数的冷却器,应适应较广泛的使用场合,但这些使用场合很难恰好都在标准电机冷却器的设计点上,甚至也不在高效工作点范围内,因此在实际使用的场合,冷却器的效率并不都是设计点的效率,其节能效果不如实际测试的某一特定点显著。对特定类提出优化设计,应该是处理三个指标的折中方案:一是强调效率设计,考虑到各种损失的折中,即流体效率、容积效率和机械效率等;二是强调材料选择节约成本,考虑到各种强度和振动的折中;三是强调零部件可靠性时应考虑通用零件和标准零件的生产成本的折中。其中折中就是优化。

本书内容极具基础性,主要是为了帮助制造型企业技术人员了解电机发热源的产生、热源的传递过程;如何把这部分热源让冷却器带走,保证电机在规定温升内运行,是本书的主要内容;热源通过冷却器的传递,对冷却器的换热计算、结构设计介绍是本书重点部分。

尔格科技作为电机冷却器的研制企业,对冷却器各部件使用造型有一定的实践经验,但缺乏理论深入研究,编写过程中参考了大量的著作,特别是附页中的参考文献,在此向其作者表示感谢。

由于编者水平有限,书中难免有不妥之处,敬请读者给予批评指正,不胜感激。

第 1 章 电机构造

随着科技的发展,电机用途十分广泛,系列品种、规格很多,结构形式多样。但无论哪一类电机,其原理都相同,结构上都是由固定、转动和过渡三大部分组成。其中固定部分通常称为定子,转动部分称为转子,过渡部分包括电气过渡(如集电环、换向器和电刷结构)和机械过渡(如端盖和轴承)。定子和转子部分主要是由铁芯和绕组构成,其余是机械支撑紧固用的结构部件。

1.1 电机结构分类

电机总体构造是根据电机的类别、运行条件、原动机或被传动机械的种类及传动方式、电机的容量与转速、冷却方式、防护型式、轴承型式和对数、安装方式等确定。在确定电机的总体结构时,必须根据技术使用条件提出的要求,结合具体情况来进行。总体结构应符合国家标准的规定,常用的主要有三种类型,即按通风冷却系统、防护型式和安装结构型式分类。

一、按通风冷却系统分类

空冷有自冷、自扇冷、它扇冷、管道通风、自由循环通风、封闭循环通风等多种型式;采用其他冷却介质(氢、水等)时,从总体结构上看,通常都是封闭循环系统。

二、按防护型式分类

根据防护型式不同,可将电机分成诸多类型,目前主要的防护型式有开启、防护、封闭、防爆、防水、水密、潜水、潜油等。

开启电机的结构特点是其带电和转动部分没有专门的保护装置。这种结构常用于卧式、低速的中大型直流电机和凸极同步电机,以及低电压大电流直流电机中,一般要求环境比较洁净。如图 1-1 所示为开启式直流电机总装图。

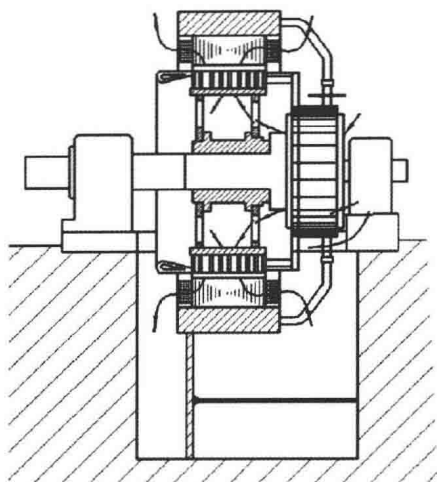


图 1-1 开启式直流电机总装图

防护式电机的机壳对于电机内带电部分和转动部分有必要的机械保护,以防止意外接触,但这种保护并不显著妨碍电机的通风。根据通风口防护结构的不同,它又可细分为网罩式、防滴式和防溅式三种。用铁丝网或多孔金属薄板遮盖通风口,使直径大于 15mm 的外物不能接触到电机的带电和转动部分的称为网罩式;能防止垂直下落的液体或固体直接进入电机内部的称为防滴式;能防止与垂直线成 100° 角范围内任何方向的液体或固体进入电机内部的称为防溅式。防护式结构适用于使用场所对电机

无特殊要求的情况。如图 1-2 和图 1-3 所示为自扇冷防护式异步电机总装图。

封闭式电机的机座和端盖能组织电机内外空气自由交换,但不要求完全密封。它可以防护来自任何方向的液体和异物进入电机内部。这种结构适于安装在多尘或露天场合的电机中。图 1-4 所示为封闭自扇冷式异步电机。

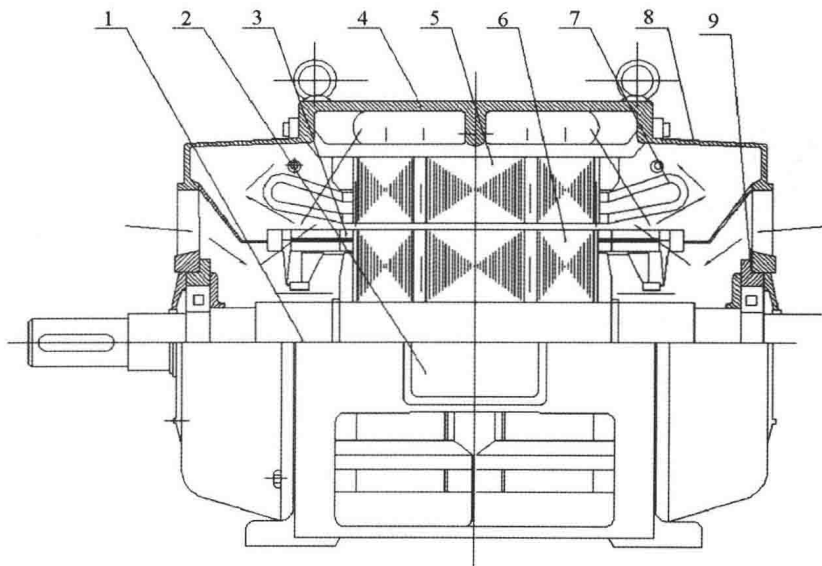


图 1-2 中型自扇冷防护式笼型转子异步电机总装图

- 1—转轴 2—出线盒 3—转子绕组 4—机座 5—定子铁芯
6—转子铁芯 7—定子绕组 8—端盖 9—轴承

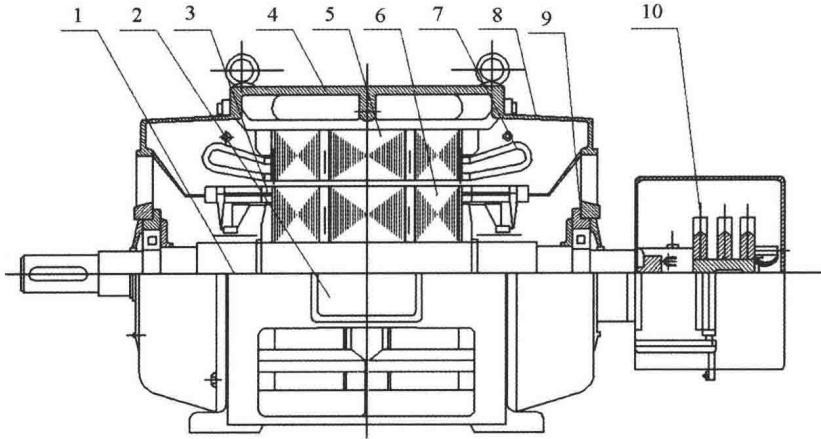


图 1-3 中型自扇冷防护式绕线转子异步电机的总装图

1—转轴 2—出线盒 3—转子绕组 4—机座 5—定子铁芯 6—转子铁芯
7—定子绕组 8—端盖 9—轴承 10—集电环

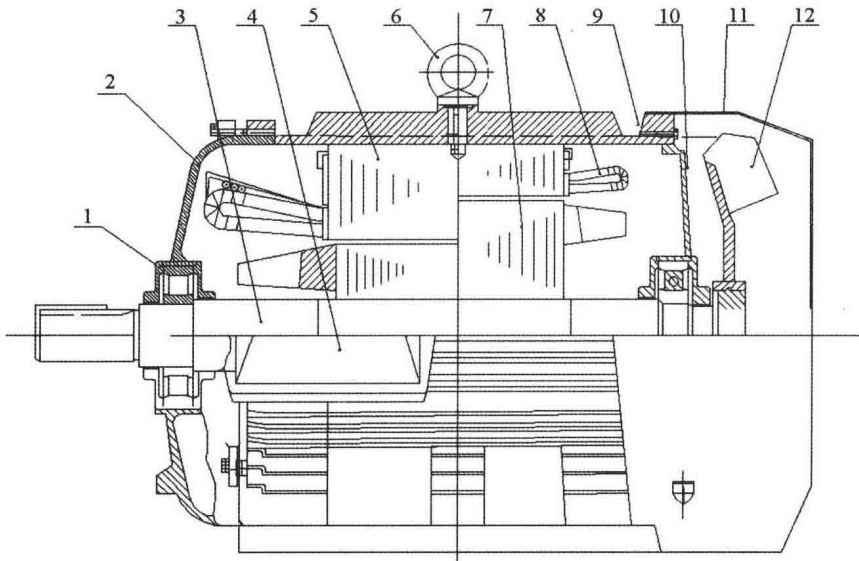


图 1-4 小型封闭自扇冷式笼型转子异步电机总装图

1—轴承 2—前端盖 3—转轴 4—出线盒 5—定子铁芯 6—吊攀
7—转子 8—定子绕组 9—机座 10—后端盖 11—风罩 12—风扇

防爆式(也称隔爆式)电机的外形与封闭式电机的类似,但其机座和端盖具有较高的机械强度,能承受爆炸性气体在电机内部产生的爆炸力,电机内外的各金属接缝面均具有足够的长度,以阻止爆炸时电机内部的高温气体迅速传递到电机外部。所有螺母都不允许外露,并设有锁紧装置。这种结构主要应用于煤

矿和化工等行业中。

防水式电机的机壳结构能阻止具有一定压力的水进入电机内部。常用的检查标准是：用直径为 25mm 的喷嘴，在距电机 2m 处以压力为 4m H₂O 或距电机 3m 处以压力为 10m H₂O 的水从各个方向喷射电机，历时 15min，水不得进入电机内部，即满足电机技术要求。

水密式电机，当其于静止状态浸没在 10m 深的水中历时 30min 以内，机壳结构能阻止水进入电机内部。

潜水(油)式电机在规定的水(油)压下，能长期在水(油)中运行。

1.2 异步电机结构

异步电机结构可分为封闭式、防护式和箱式三种类型。

一、封闭式

异步电机结构 Y 系列主要零部件见表 1-1。

表 1-1 异步电机结构 Y 系列主要零部件

定子部分	转子部分
机壳	转子绕组
定子绕组	转子铁芯
定子铁芯	内风扇
接线盒	轴
端盖	甩油盘
轴承	轴承盖

图 1-4 为小型封闭式自扇冷式笼型转子异步电机的总装图。电机的基本特征是：卧式，机座带底脚，有两个端盖轴承，单轴伸(根据需要也可以制成双轴伸)，带内、外风扇。

机座为铸铁件，表面带有散热筋，用以扩大散热面积，改善冷却条件。机座顶部有起吊用的吊环螺钉，底部有两个小孔(图上未标出)，供泄出冷凝水用。从传动端看，机座右侧有一方形出线盒，用来引入电源线。机座内腔呈圆筒形，无纵筋，此结构有利于定子绕组散热。

定子铁芯用扣片在其外圆处的鸽尾槽中将其沿轴向固紧，结构简单，又使铁芯

外圆几乎和机座内圆全部接触,有利于铁芯散热。这种结构可采用外压装工艺。

铸铝的笼型转子用热套与轴配合(也可将转轴滚花后采用冷压装配),端环和内风扇的叶片形成整体,使工艺简化和可靠性提高。在端环上还铸有若干放置平衡块用的小柱。内风扇的作用是使机内热风加速循环,以便更好地与机座和端盖交换热量。外风扇采用径向离心式风扇,用铝或塑料制成,风罩用螺钉固定于机座上,见图1-4所示。

前、后端盖相同,轴承为单列向心球轴承。

为了表示出系列电机在定子外径相同、极数不同时,机座可以相同这一情况,图1-4中左右两部分的定子内径与转子外径画成彼此均不相同,左半部分表示该机座号中极数较少的电机,右半部分表示电机的极数较多。

二、防护式

三相异步电机 JS/R 系列主要部件见表1-2。

表1-2 三相异步电机 JS/R 系列主要零部件

定子部分	转子部分
机壳	转子绕组
定子绕组	转子铁芯
定子铁芯	转子压圈
接线盒	转子支架
端盖	轴
挡风板	轴承
百叶窗	轴承套、轴承盖
	滑环(R)

图1-3为中型自扇冷防护式绕线转子异步电机的总装图。此电机的基本特征是:机座带底脚、有两个端盖轴承、单轴伸,采用两侧对称的径向通风系统,一般为自通风,根据需要也可制成管道通风,铁芯中有通风道,以利于散热。

机座系铸铁件,内圆处有纵筋,以便和铁芯外圆间形成通风道。因电机较重,故机座顶部有两个吊环螺钉。从传动端看,出线盒在机座右侧的正中处。

定子铁芯采用内压装结构,即冲片直接在机座内进行叠压。叠成后,沿轴向用压圈和弧形键固紧。3kV和6kV电机的定子铁芯采用开口槽,500V以下则采用半开口或半闭口槽。定子线圈端部用间隔垫片绑绳扎紧,或用涤纶护套玻璃丝绳绑扎。转速较高的电机,定子线圈端部还用包以绝缘的端箍加固,以增强

承受起动时冲击电流产生的电磁力的作用。

转子铁芯直接套于轴上,利用平键和环形键进行周向与轴向固定。轭部具有轴向通风道,以利冷却;当电机容量较大时,转子铁芯常装于支架上,铁芯和支架的筋、轭之间留有足够的轴向通风道。转子铁芯两端各有一个压圈,压圈用弧形键固定于支架上,用来沿轴向把铁芯固紧和支承线圈端部,其上并开有放置平衡块的沟槽。转子采用双层波绕组,以半成型的包有绝缘的铜排(称为半组式线圈)穿入半闭口槽,弯形后进行连接;除了斜导体(也称为跳层线圈)所在槽外,一般每槽有两根导体。线圈端部用无纬玻璃丝带(有的也用钢丝)扎紧。转子绕组的引出线用电缆通过转轴中心孔从非传动端穿出,再连接至集电环上。这样可缩短轴承间的距离,减小轴的挠度。转子半组式线圈端头的连接用并头套上,装有若干风叶,沿圆周等距分布,类似风扇冷却通风。

集电环和电刷装置用防护罩保护。图 1-5 所示结构具有电刷短路和举刷装置。起动时电刷与集电环接触,以便外接起动电阻;起动完毕后,将手柄扳至运行位置,电刷和集电环分离,同时借短路环将三个集电环短路。有些绕线式电机无举刷装置,这时电刷始终和集电环接触,运行时机械损耗及电刷磨损增大,但电机结构较为简单,便于工艺制作。

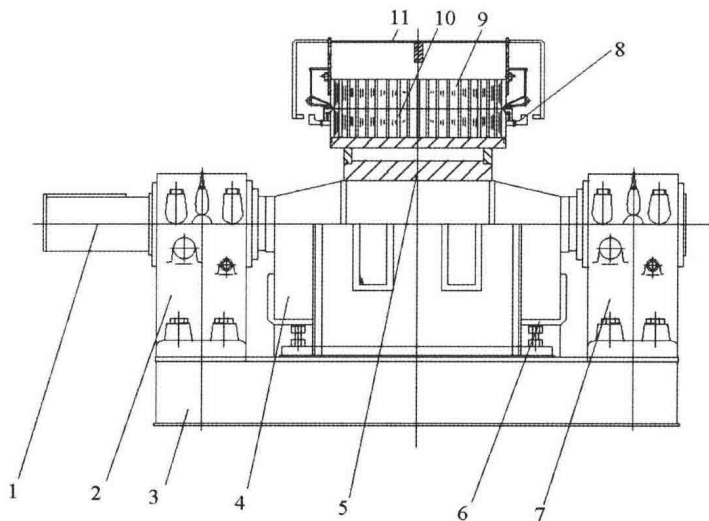


图 1-5 大型防护式双笼转子异步电机的总装图

- 1—转轴 2—座式轴承 3—底板 4,6—端罩 5—转子支架
7—座式轴承 8—风叶 9—定子 10—转子 11—机座

为了防止空气形成局部循环,在端盖内侧装有挡风板。借助于转子绕组两端的风叶和转子铁芯径向风道片产生的风压作用,冷却空气自两侧端盖下方的