

密级：_____

南昌大学

NANCHANG UNIVERSITY

学士学位论文

THESIS OF BACHELOR

(2002—2006 年)



题目：三相鼠笼式异步电动机设计（Y-180L-6 15kW）

学院：信息工程学院 系 电气与自动化

专业：电气工程及其自动化

班级：电机电器 022 班

学号：02131107

学生姓名：刘常洲

指导教师：肖倩华

起讫日期：2006.3.13—2006.6.9

学士学位论文要求装订成册并应包含以下主要内容

- 一、毕业设计（论文）任务书
- 二、开题报告
- 三、南昌大学学士学位论文原创性申明
- 四、毕业设计（论文）
 - 1、中文摘要
 - 2、外文摘要
 - 3、毕业设计（论文）全文
- 五、外文资料原文
- 六、外文资料译文

获取更多资料 微信搜索蓝领星球

南昌大学

毕业设计（论文）开题报告

题目：三相鼠笼式异步电动机设计(Y-180L-6 15kW)

学院：信息工程学院 系 电气与自动化工程

专业：电气工程及其自动化

班级：电机电器 022 班

学号：02131107

姓名：刘常洲

指导教师：肖倩华

填表日期：2006 年 3 月 24 日

一、选题的依据及意义：

随着生产现代化程度的不断提高和人们对家用电器、汽车等消费的不断增长，市场对电机的需求也将越来越大。预计到 2010 年，全国发电装机容量将达到 6.6 亿千瓦左右，平均每年将投产发电装机容量 3700 万千瓦以上，年均增长 7.8% 左右。而电动机的需求与发电设备的需求呈 1:3.51 的正比关系，据此分析，大型、中小型交流电动机产品在国内市场的有效需求会保持稳定增长。

国家统计局的统计数字显示，2004 年 12 月我国电机制造业共有 1167 家生产企业，全部从业人员 388282 人，资产总计接近 972 亿元。2004 年全年电机行业工业总产值为 993 亿元，产品销售收入 938 亿元，利润总额 49.1 亿元。目前，我国生产的微特电机已占世界电机市场的 60% 以上。电机产品市场需求十分广阔，三峡工程建设的加速开展，国家“西电东送”工程的推进和西部大开发为行业提供了充足的市场空间。由于中小型电动机属于劳动密集型和材料密集型产品，发达国家几年前就不再生产通用型的交流电动机，而转向国外采购或定牌加工，因此为我国中小型电动机的出口提供了良好的机遇。此外，电机行业是劳动力密集型产业，我国发展电机制造业有着得天独厚的优势；国家对电机行业的扶持将不断加强；随着国内企业市场意识的逐步增强，行业竞争力也将不断加强。据此可知，对于中小型电动机的研究有着广阔的市场前景与很大的现实意义。

二、国内外研究现状及发展趋势（含文献综述）：

1、我国对电机的研究概况

我国的电机工业在解放前几乎是一片空白，在解放后才得以迅速发展，并逐步形成了完整的电机工业体系，大型电机、中小型电机、微特电机以及电力变压器等，各种门类的电机都有了专业生产厂家，生产门类齐全，产品不仅能满足国内需求，中小型电机还出口到国外。

我国的电机制造工业目前形成以下特点：

(1)、产品品种、规格不断增加，单机容量增大，技术经济指标逐步提高

一是大型电机（主要是发电机）和变压器向大功率方向发展。一般来说，一个国家生产的发电机，其最大单机容量是衡量这一国家电机工业水平的重要标志。目前我国已生产的气轮发电机单容量最大已达 600MW，水轮发电机的最大单机容量也达到了 300 MW，均已向世界最大单机容量靠拢；二是中小型电机方面，从 1953 年进行第一次全国统一设计后，开始走向统一和系列化的道路。中小型电机已经形成大批量生产的能力，并朝集约化方向发展，逐步改变过去那生产厂家星罗棋布、重复布点、低效运行的局面。据统计，到目前为止，我国生产的中小型电机系列，除了一般电机或基本系列外，还有防爆、船用、潜水、单绕组多速、力矩、起重冶金、高起动转矩、电磁调速、热带型、屏蔽电机、磁阻式同步电动机及永磁电机等派生系列和专用系列。此外还研究了中小型无槽直流电机、

晶闸管供电直流电机、潜油电机、钻探电机、谐波励磁同步发电机等多种新产品。从目前情况来看，一般或基本系列的中小型电机已能满足国民经济各部门的需要，其技术经济指标也在逐步提高；三是微特电机已经形成专业化生产局面，全国的微特电机产量主要集中在为数不多的专业化生产厂家，其生产过程的流水作业极其自动化水平较高。

(2) 采用新技术、新材料、新结构和新工艺

采用新技术方面，首先是应用电子计算机来进行电机的电磁计算以及磁、场温度场计算和零部件机械计算。

在绝缘材料方面，目前我国生产的电机中，主要采用 E、B 两级绝缘，F、H 级仅在少数要求较高或特殊用途的电机上应用，但前者正积极地分别向 B、F 级过度。环氧玻璃粉云母带和无溶剂浸渍漆、聚酰亚胺、DMA 复合绝缘、涂敷用环氧粉末和适形材料等新型绝缘材料中不少已在电机上大量应用。

在导磁材料方面，除一般热轧与冷轧取向硅钢片外，无硅低碳电工钢片和半冷轧无取向硅钢片已在部分电机中采用。此外，还在玻璃钢制造汽轮发电机转子护环以代替价格昂贵的非磁性钢护环方面进行了一系列研究，并已经试用。近年来，我国还在氢冷汽轮发电机上应用了液体塑料密封材料，以代替传统的橡胶皮条等固体密封材料，改善密封性能。

在工艺水平和机械化、自动化程度方面，小型电机的机座与转轴加工、静电喷漆、总装试验等自动线均已正式采用；级进式冲模、大型压铸机、定子绕组自动下线机、插槽绝缘机、端部整形机、自动绕线机等新设备及真空压力浸渍、中型感应电机转子导条环氧粉末涂敷，机座射压造型等新工艺的应用，也都使功效大大提高，电机质量进一步改进。

(3)、标准化系列化和通用化程度不断提高

1953 年以后多次组织了电机产品的改型和新系列的统一设计，使我国从发电设备、大型交直流电机一直到种类繁多的中小型电机，大多都有自己的系列。不但建立了若干产量大、使用面广的基本系列，还建立了应用场合比较特殊的派生系列和专用系列。

(4)、积极开展电机理论、测试技术和新型发电方式的研究

近年来，我国对电机绕组、附加损耗、电机冷却、大型电机的端部磁场、电机测试技术以及超导电技术在电机中的应用等方面开展了一系列研究，取得了不少成果。此外我国还对原子能、磁流体、地热、太阳能风力和燃气轮机用于发电方面进行一系列试验研究工作，已经建成一座试验性的地热发电站及制成若干燃气轮发电机组。

建国以来，我国电机工业迅猛发展，取得了可喜的成绩。但是由于我国工业基础比较薄弱，电机产品的品种还不能满足国民经济的需要；在产品质量方面，除少数达到世界先进水平外，多数与国外先进水平还存在一定差距；在产量、单

机容量、新材料供应和劳动生产率等方面，和国外先进水平的差距也较大，

2、国外电机工业的近况与发展趋势

国外发电设备的近况与发展趋势简介如下：

国外发电设备制造的主要趋势是在巩固上世纪六十年代至七十年代已制成大型机组极其采用的某些新材料新结构的基础上，在充分保证可靠性和希望取得足够运行经验的前提下稳步地发展更大的机组；同时努力寻求更好的绝缘材料和结构，以提高电机的电压等级；并采用更合理的冷却系统与励磁系统，以提高运行稳定性和在可供应的转子锻件范围内提高单机容量等。

国外的大型交流机已成系列生产。大型同步电机采用与汽轮发电机或水轮发电机相似的结构，近年来还先后出现和发展了带晶闸管变频装置的低速同步电机，户外电动机低噪声电动机以及与中小型电机类似的大型电机等多种产品。在一些先进的工业国家中，直流电动机已普遍采用晶闸管供电，直流发电机主要用于不宜采用晶闸管供电的系统中。

对于中小型电机，一些主要工业国家相继发展了中小型电机的新系列，他们都应用电子计算机进行设计，从而提高计算精度，缩短了设计周期，并为获得最佳方案创造条件，其功率等级和安装尺寸尽量和国际电工委员会的标准接近，也积极采用了新材料，目前B级绝缘的电机所占比重日益增大，而且已呈现向F级过度的趋势。磁性材料方面，无硅低碳冷轧电工钢片、半冷无取向硅钢片和磁性槽楔等已普遍采用。导电材料方面，少数国家发展了铝线电机系列，美国在小功率电动机生产方面，铝线电机已多于铜线电机，功率划分范围也得到了扩大，还有结构的改进，提高通用化程度，中小型同步电机和感应电机都大量采用箱型结构或通用定子，小型电机改用密封轴承，出厂前一次加油，使用过程中一般不在换油。中型电机采用不停机添加润滑脂的滚动轴承，并有甩油盘自动排除废油。除基本系列外，还发展了一些特殊用途的中小型电机，如中型防爆电动机，无刷励磁同步电机，无换向器电动机，磁阻式同步电机等产品。

三、本课题研究内容

本课题主要研究Y180L-6三相鼠笼式异步电动机的设计，首先应根据产品通用标准、技术条件设计原始数据，然后进行电磁设计和结构设计。电磁设计是根据设计技术要求确定电机的电磁负荷，计算转子、定子冲片和铁心各部分尺寸及绕组数据，进而核算电机各项参数及性能，并对设计数据做必要的调整，直到达到要求，提出电磁设计单。结构设计是根据设计技术要求及电磁设计确定的有关数据，确定电机总体结构、零部件尺寸、材料及加工要求，绘制总装图及零部件图，进行必要的机械计算及热计算，提出全套生产图样。

此次设计要进行多种方案的分析、比较，或采用优化设计方法，以权衡电机性能、运行费用、制造成本、运行可靠性等因素，决定最优的设计。

四、本课题研究方案

1、在原设计方案基础上，提出节省材料的方案。可以通过改变电磁负荷，因为电机的主要尺寸决定于电磁负荷 A 、 B_{δ} ，电磁负荷越高，电机的尺寸越小，重量就越轻，成本也就越低。

2、在原设计方案基础上，提出提高性能的方案。这点仍需从电磁负荷的选择上考虑，因为过分提高电磁负荷会影响电机参数、电气参数与电机特性。

3、在原设计方案基础上，提出既节省材料又提高性能的方案。这就要求在选择电磁负荷时，要充分考虑它们的比值要适当。电机的冷却条件，电机所用的材料与绝缘结构的等级对电磁负荷的选择有很大的影响，在选择时要充分考虑到这些。

五、研究目标、主要特色及工作进度：

研究目标：通过本次设计，让我们建立起系统的概念，熟悉有关的国家技术标准，掌握设计的相关步骤和设计方法。

主要特色：利用先进的计算机技术实现各种设计方案的比较从而实现设计的优化。

工作进度：复算 2-3 周，设计方案 5-6 周（上机），绘图 2-3 周（总装图、转子装备图、定子冲片图、绕组连接图），写毕业论文 1-2 周，毕业答辩。

六、参考文献：

[1]南昌大学电气自动化系电机教研室：《电机设计资料汇编》中小型异步电动机设计，2004。

[2]陈世坤主编：《电机设计》（第 2 版），机械工业出版社，2000。

[3]戴文进主编：《电机学》，航空工业出版社，1995.9。

[4]上海电器科学研究所编：《中小型电机设计手册》，机械工业出版社，1994.7。

[5]季杏法主编：《小型三相异步电动机技术手册》，机械工业出版社，1987。

[6]彭友元主编：《电机绕组手册》，辽宁科学技术出版社，1995 .5。

南昌大学

学士学位论文原创性申明

本人郑重声明：所呈交的论文是本人在导师的指导下独立进行研究所取得的研究成果。除了文中特别加以标注引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写的成果作品。对本文的研究作出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式表明。本人完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

作者签名：

日期：

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权南昌大学可以将本论文的全部内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

保密口，在 年解密后适用本授权书。

本学位论文属于

不保密口。

(请在以上相应方框内打“√”)

作者签名：

日期：

导师签名：

日期：

目 录

摘 要.....	1
ABSTRACT.....	1
第一章 中小型电机设计概述.....	2
1.1 设计技术要求.....	2
1.2 电机主要尺寸.....	2
1.3 绕组构成原理.....	4
1.4 主磁路.....	4
1.5 电抗.....	6
1.6 损耗与效率.....	7
1.7 通风散热.....	7
第二章 三相异步电动机设计 (Y180L-6/15KW).....	9
2.1 电机主要尺寸及绕组设计.....	9
2.2 电磁计算步骤与程序.....	9
第三章 电机优化设计方案.....	29
3.1 相关理论分析.....	29
3.2 电磁调整方案.....	29
第四章 AUTOCAD 简介及其绘图.....	31
4.1 AUTOCAD 简介.....	31
4.2 AUTOCAD 的基本功能.....	31
4.3 AUTOCAD 绘图.....	32
总 结.....	33
参考文献:.....	33
附 录 (I) 外文资料原文及译文.....	错误! 未定义书签。
附 录 (II) 三设计方案结果.....	40

三相鼠笼式异步电动机设计 (Y180L-6 / 15kW)

专业: 电气工程及其自动化 学号: 02131107 学生姓名: 刘常洲 指导老师: 肖倩华

摘 要

异步电机是工农业生产中应用最广泛的电机。其性能的提高具有重要意义。在文章中简要介绍了异步电机设计的基础知识, 阐述了中小型电机的设计与步骤, 介绍了电磁设计的步骤与计算程序, 也述及电机的优化设计。

电磁设计是根据设计技术要求确定电机的电磁负荷, 计算转子、定子冲片和铁心各部分尺寸及绕组数据, 进而核算电机各项参数及性能, 并对设计数据做必要的调整, 直到达到设计要求。本文也简单介绍了 AutoCAD 绘图的基础知识。

关键词: 异步电机 电磁计算

The design of the Three-phase squirrel cage induction motor (Y180L-6 / 15kW)

Abstract

The induction motor is the most widespread electrical machinery in the industry and agriculture production. Its performance enhancement has the vital significance. In this article, the elementary knowledge of the induction motor designs is Briefly introduced, the method and the step of the middle and small scale electrical machinery design is also elaborated, the electromagnetism design step and the design computational procedure is introduced, the optimized design of the electrical machinery is also mentioned.

The electromagnetism design is according to the specification of designs to determine the electromagnetism load, calculates each part of sizes of the rotor, the stator piece and iron core and the winding data, then calculates each parameter and the performance of the electrical machinery, and to make the essential adjustment to the designs data, until meets the design requirements. AutoCAD cartography elementary knowledge is also simply introduced in this article.

Keywords: induction motor electromagnetism computation

第一章 中小型电机设计概述

1.1 设计技术要求

1.1.1 设计原始数据

电机设计给定以下原始数据：

- (1) 额定功率 动机为轴上输出机械功率 (kw)。
- (2) 额定电压 V 或 kV)。
- (3) 相数与接法 (对交流电机)。
- (4) 额定频率 (Hz)。
- (5) 额定转速或同步转速 (r/min)。
- (6) 额定功率因数。

(7) 要求的性能指标。如效率、过载能力、起动电流、起动转矩、牵入转矩(对同步电动机)电压变化率(发电机)、转速变化率(对电动机)、振动与噪声等。

1.1.2 设计过程及内容

首先应根据产品通用标准、技术条件设计原始数据，然后进行电磁设计和结构设计。电磁设计是根据设计技术要求确定电机的电磁负荷，计算转子、定子冲片和铁心各部分尺寸及绕组数据，进而核算电机各项参数及性能，并对设计数据做必要的调整，直到达到要求，提出电磁设计单。结构设计是根据设计技术要求及电磁设计确定的有关数据，确定电机总体结构、零部件尺寸、材料及加工要求，绘制总装图及零部件图，进行必要的机械计算及热计算，提出全套生产图样。

电机设计要进行多种方案的分析、比较，或采用优化设计方法，以权衡电机性能、运行费用、制造成本、运行可靠性等因素，决定最优的设计。中小型电机生产量大，使用面广，品种规格繁多，一般都成系列设计及制造。设计时，应充分考虑到标准化、通用化、系列化的要求。

1.2 电机主要尺寸

1.2.1 利用系数

电机利用系数为电机有效部分单位体积、单位同步转速(或额定转速)的计算视在功率，即

$$C = \frac{S_c}{D_{st}^2 l_{ef} n_N} = 0.016 K_{dp} AB_{\delta} \times 10^{-3} (kVA \cdot \text{min} / m^3) \quad (1-1)$$

式中： D_{st} 交流电机定子内径或直流电机电枢直径；

l_{ef} 交流电机定子铁心有效长度或直流电机电枢长度 (m)；

n_N 交流电机同步转速或直流电机额定转速 (r/min)

K_{dp} 绕组系数；

A 线负荷 (A/m)；

B_{δ} 气隙磁通密度 (T)

S_c 视在功率

对交流电机

$$S_c = mEI_N \times 10^{-3} \text{ (kVA)}$$

式中： m 定子相数；

I_N 额定相电流(A)；

E 满载定子绕组每相电动势 (V) 忽略绕组阻抗压降，则 $E=U_N$ ；

电机的利用系数反映了材料的利用水平，随着电机冷却技术的发展，材料和工艺水平的提高，电机利用系数有提高的趋势。

1.2.2 电磁负荷

电磁负荷 A 、 B_δ 值决定了利用系数，直接影响电机的有效材料利用量，更为重要的是 A 、 B_δ 值与电机运行参数和性能密切相关。

$$A = \frac{2mWI}{\pi D_{i1}} = \frac{ZN_s I}{\pi D_i a} \text{ (A / m)}$$

式中 W —每相串联匝数；

I — 电流 (A)

N_s —每槽导体数；

Z —槽数；

a —绕组并联路数；

$$\text{气隙磁通密度 } B_\delta \approx \frac{E}{2\sqrt{2}fWK_{\phi}S_\delta} \text{ (T)}$$

式中 S_δ —每极气隙面积 (m^2)

绕组电流密度 J 及热负荷 AJ 直接影响电机绕组用铜量及绕组温升，热负荷表示定子（或电枢）圆周单位表面积上绕组电阻损耗，他们都是绕组设计的重要依据。

电磁负荷选择要点：

- (1) 电机输出功率一定时，提高电磁负荷可缩小电机体积和节省有效材料；
- (2) 选择较高的 B_δ ，铁心损耗一般会增加，而绕组电阻损耗通常可降低；
- (3) 选取较高的 A 或 j ，绕组电阻损耗将增加；
- (4) 励磁电流标么值与 B_δ/A 成正比，故选择较高的 B_δ 或 A ，励磁电流要增大，对异步电机，功率因数将降低；
- (5) 漏抗标么值与 B_δ/A 成反比，故 B_δ 较高或 A 较低时漏抗减小，电机起动转矩及过载能力提高，但起动电流及短路电流也增大；
- (6) 直流电机的 A 过高，电抗电动势将增加，使换向性能恶化。

1.2.3 主要尺寸比

主要尺寸比 λ 为交流电机的定子有效长度与极距之比，而对直流电机常指电枢长度与直径之比。当有效部分体积不变时， λ 值较大的电机较细长，反之较粗短。

λ 值选择要点:

- (1) 高速大型电机的转子直径受转子材料强度限制, 其 λ 值较大, 可达 3~4;
- (2) 转动惯量较小的电机, λ 值较大;
- (3) 在合理范围内适当选取较大的 λ 值, 可以减少绕组端部用铜量及端盖等结构件的材料用量;
- (4) λ 较大的电机, 绕组端部铜损耗及漏抗较小, 而槽部铜损耗及漏抗一般较大;
- (5) λ 值过大时, 通风冷却条件变坏, 转子刚性可能较差, 还会增加冲片冲剪、铁心叠压和嵌线的工时。对直流电机还会使其换向性能变坏。中小型交流电机的 λ 值一般为 0.5-3。

1.2.4 主要尺寸确定

主要尺寸指定子铁心外径 D_1 、内径 D_{1i} 以及铁心长度。在已知电机的视在功率及转速情况下, 可借助利用系数的经验值或通过适当地选择电磁负荷, 由式 (1-1) 计算的 $D_{1i}^2 l_{ef}$ 分别求得主要尺寸 D_{1i} 与 l_{ef} 。参照定子内外径比的经验值可估算定子外径 D_1 。

对应于系列电机的每一机座中心高, 根据合理利用机座径向空间及考虑硅钢片的合理套裁等要求, 确定合理的定子冲片外径 D_1 。设计时按 D_1 估算值或直接按电机功率及转速, 选定某一中心高的机座及与之相适应的外径。

1.3 绕组构成原理

电机绕组要求对称, 即各并联支路具有相同的电动势及阻抗。三相交流绕组要求各相相轴在空间互差 120° 电角度, 并有相同的有效匝数。以保正各相电动势对称 (即大小相等、相位互差 120° 电角度); 同时要求绕组感应电动势和产生磁动势的基波分量尽可能大, 而谐波分量尽可能小。交流绕组有多种分类方法, 按绕组布置分类, 有集中绕组及分布绕组; 按相带分类, 有 120° 、 60° 、 30° 相带绕组及混相绕组; 按每极每相槽数 q 分类, 有整数槽绕组及分数槽绕组 (q 为整数或分数); 按槽内线圈边层数分类, 有单层绕组、双层绕组及单双层绕组; 按线圈形状和端部连接方式分类, 有叠绕组、波绕组以及同心式、链式、交叉式绕组。

直流电枢绕组一般按绕组元件与换向片之间连接规律不同而分为叠绕组、波绕组和蛙绕组。绕组由多个按一定规律连接的线圈构成, 每一线圈包括置于槽中的有效部分及端接部分。若各相带的某些槽的线圈有规则地改属另一相, 即为混相绕组。

双层绕组每槽分上下两层放两个线圈边, 双层绕组所有线圈的形状、几何尺寸相同, 端部排列整齐, 可选择有利节距以改善电动势和磁动势波形。

1.4 主磁路

1.4.1 空载气隙磁场

空载气隙磁场在直流电机和同步电机中由磁极绕组的直流励磁磁动势建立, 而在异步电机中则由定子绕组的交流磁动势建立。

直流电机主极极弧形状大致有：（1）均匀气隙；（2）偏心气隙，极弧与电枢外圆不同心，使气隙从中心至极尖逐渐增大；（3）极尖削角的均匀气隙，气隙从极弧两端约 1/6 长度处至极尖逐渐增大。后两种电枢形状可抑制电枢反应所引起的气隙磁场畸变。

凸极同步电机的磁极极弧形状大致有两种：

- （1）沿极弧范围内气隙是变化的，得到接近正弦的磁场分布；
- （2）气隙均匀，得到近似矩形的磁场分布。

1.4.2 磁路计算原理

磁路计算是按给定的电机端电压求得每极磁通，进而求取磁路各部分磁通密度（磁密）和磁位降，计算所需的磁动势、励磁电流以及空载特性。磁路计算方法的依据是全电流定律，即总磁动势为磁场强度的线积分。实际计算是通过求各段磁路，如气隙、齿、轭、极身等部分磁位降的总和代替积分求得总磁动势。

气隙的一边或两边有齿和槽，因此，实际的气隙磁密分布是不均匀的，气隙磁位降较假定气隙光滑时的大，它的影响用气隙系数 k_δ 对气隙长度 δ 加以修正，设齿宽为 t ，槽口宽为 b_0 ，则气隙系数

$$k_\delta = \frac{t}{t - \gamma\delta}$$

式中 γ ——对开口槽， $\gamma = \left(\frac{b_0}{\delta}\right)^2 / \left(5 + \frac{b_0}{\delta}\right)$ ；

对半闭口或半开口槽， $\gamma = \left(\frac{b_0}{\delta}\right)^2 [4.4 + 0.75\left(\frac{b_0}{\delta}\right)]$

径向通风道使磁通通过气隙的轴向长度减小，计算气隙磁密时的实际长度为铁心的有效长度

$l_{ef} = l_t - k_v N_v b_v$ ，式中 l_t 为铁心总长， N_v 及 b_v 为通风道数及其宽度， $k_v = \frac{b_v / \delta}{(5 + b_v / \delta)}$ 。

如定转子均有通风道，两者交错时应分别考虑；两者对齐且相等时， k_v 式中应以 $2b_v$ 代替 b_v 。

沿齿部磁路不同位置的齿宽 b_t 一般是变化的，不同截面处磁密及磁场强度是不同的。计算齿磁位降时，沿齿高分段越多，计算结果也越准确。实际计算时常加以简化，取靠近齿部最窄的 1/3 齿高处的磁场强度为 H_t 。若齿宽不连续变化，则应在不连续处分段计算。

1.4.3 励磁磁动势及励磁电流

根据不同电机的磁路结构，由各部分磁位降之和求取所需的励磁磁动势。

直流电机

$$F = F_\delta + F_{ta} + F_{ja} + F_m + F_{lc} + F_{jf}$$

凸极同步电机

$$F = F_\delta + F_{t1} + F_{j1} + F_m + F_{j2} + F_{\delta j}$$

隐极同步电机及异步电机

$$F = F_{\delta} + F_{f1} + F_{j1} + F_{f2} + F_{j2}$$

上述各式中， F_{ic} 为主极补偿齿磁位降， F_{δ} 为磁极装配间隙磁位降。对直流励磁的电机，励磁绕组匝数为 W_f 时，空载励磁电流 $I_f = \frac{F}{W_f}$ (A) 对异步电动机，励磁电流

$$I_m = \frac{\pi}{\sqrt{2}} \frac{pF}{mWK_{\phi}} \quad (\text{A})$$

1.5 电抗

1.5.1 主电抗

与初、次级交链的基波互感主磁通在绕组中感应电动势，直接参与能量转换，与基波主磁场相对应的电抗称为主电抗。多相交流绕组的每相主电抗

$$X_m = \frac{4f\mu_0}{\pi} \frac{m(WK_{\phi})^2}{p} \cdot \frac{\tau l_{ef}}{K_s \delta_{ef}} \quad (\Omega)$$

式中： K_s' ——电机磁路总磁位降与气隙磁位降之比；

μ_0 ——气隙磁导率。

对异步电机，主电抗即为励磁电抗；对同步电机，主电抗为电枢反应电抗。

U_N / I_N 为基准值的主电抗标么值

$$X_m^* = \frac{\sqrt{2}\mu_0 K_{\phi} \tau}{\pi K_s \delta_{ef}} \cdot \frac{A}{B_{\delta}}$$

从上式可知，主电抗与 $\frac{A}{B_{\delta}}$ 成正比，而气隙长度增大，则主电抗减小。

1.5.2 漏电抗

漏磁通是绕组产生总磁通的一部分，一般只与初、次级中一侧交链，不参与能量转换。它能在绕组中感应电动势，该电动势频率与产生该磁通的电流频率相同，通常用漏抗压降表示，因而每种漏抗都与某一部分漏磁通相对应，相应的有槽漏抗、端部漏抗、齿端漏抗。设计中常把某种与初、次级都交链的互感磁通也归入漏抗，如谐波漏抗。

槽漏抗由横向穿过槽壁的漏磁通引起；

端部漏抗由端部漏磁通引起，与绕组端部结构及尺寸有关，端部越长，和附近的磁性金属构件越靠近，则端部漏磁导愈大；

齿端漏抗是由齿端漏磁通引起，它是从一个齿顶出发，沿气隙到相邻的另一个齿顶的漏磁通，齿端漏抗随槽口宽度与气隙长度比值的增大而减小。对气隙较小的电机，如异步电机可忽略齿端漏抗。

谐波漏抗由气隙中高次谐波磁通引起。有时把谐波漏抗划分为齿谐波漏抗及相带谐波漏抗。

1.6 损耗与效率

1.6.1 绕组电阻损耗

它是电流流过绕组产生的损耗（铜耗），按我国标准规定绕组电阻应折算到与绕组绝缘等级相对应的基准工作温度。若电流通过电刷与集电环或换向器，则应包括电刷接触损耗。对直流电机，除电枢绕组的电阻损耗外，还应包括与之串联的换向极绕组及补偿绕组的电阻损耗。对带励磁绕组的同步电机或直流电机，应计入励磁绕组的电阻损耗。

1.6.2 基本铁损耗

基本铁损耗是铁心中主磁通交变引起磁滞及涡流损耗。计算时应分别计算定子或电枢铁心的齿、轭部铁损耗，然后相加。正常运行时，同步电机的磁极主磁通不变，异步电机转子的磁通变化频率也很低，基本铁耗均可忽略。

1.6.3 风摩损耗

风摩损耗包括风扇及通风系统的损耗，电机转子表面与冷却介质的摩擦损耗、轴承摩擦损耗、电刷摩擦损耗等。

1.6.4 杂散损耗

杂散损耗包括表面损耗和脉振损耗。前者是由气隙谐波磁通相对与齿或磁极铁心表面移动而在其表面产生的涡流损耗；后者是该谐波磁通相对于齿移动，使进入齿中的谐波磁通脉动，因而在齿中产生的涡流及磁滞损耗。

1.6.5 效率

效率由输出功率 P_2 及在该功率下各种损耗总和 $\sum P$ 求得

$$\eta = 1 - \frac{\sum P}{P_2 + \sum P}$$

一般考核在额定输出功率 P_N 下的额定效率，当电机运行在不变损耗和可变损耗相等的负载时，电机运行效率最高。

1.7 通风散热

1.7.1 电机冷却方式

电机冷却过程是把电机损耗产生的热量首先传递给一次冷却介质，已升高温度的一次冷却介质，由新的低温冷却介质不断替换，或者通过某种形式的冷却器由二次冷却介质加以冷却。常用冷却方式有：表面冷却、通风冷却、循环冷却、管道通风冷却等。

1.7.2 风扇

风扇常作为驱使冷却介质循环所需要的动力，它应能产生足够的压力以克服电机冷却通道中的压力降落，并输送足够的介质流量通过电机。常用的风扇有离心式和轴流式两种。

1.7.3 电机温升限值

电机绝缘结构按其耐热性分为 A、E、B、F、H 五个等级，不同耐热等级的极限温度如下表：

耐热等级	A	E	B	F	H
极限温度 (°C)	105	120	130	155	180

电机绕组温升限值基本上取决于其绝缘结构耐热等级及环境温度，同时与温度测量方法有关，常用的方法有电阻法、温度计法及埋置检温法。

获取更多资料 微信搜索蓝领星球

第二章 三相异步电动机设计 (Y180L-6/15kw)

2.1 电机主要尺寸及绕组设计

2.1.1 主要尺寸

异步电动机中心高及相应的定子铁心外径:Y180L-6型号 中心高为180mm,定子铁心外径290mm,内径205mm,铁心长200mm。不同极数电机定子铁心内外径比 $KD=D_{i1}/D_{l1}$ 6~8极电机为0.68~0.74,主要尺寸比 $\lambda=l/\tau$ 为1.5-3.0之间。

2.1.2 气隙

气隙长度 δ 对电机性能及运行可靠性影响很大,确定 δ 时应考虑以下因素:(1)为降低励磁电流,改善功率因数,气隙应尽量小;(2)气隙小,谐波磁场及谐波漏抗增大,起动转矩降低,杂散损耗增加,温升可能升高;(3)为保证电机可靠运行,避免气隙不均引起的定、转子相擦,气隙不能太小,小型电机气隙一般不应小于0.25mm。本课题研究的电机气隙为0.45mm。

2.1.3 定、转子槽数选择

选择定子槽数 Z_1 时应考虑:

- (1)为减少谐波磁动势,除极数较多或在系列设计中两种极数冲片通用的情况外,每极每相槽数 q_1 一般取为整数。
- (2)为降低杂散损耗及提高功率因数,应选用较多的槽数。但槽数增多时,将增加槽绝缘,降低槽利用率,并增加线圈制造及嵌线工时,对高电压电机尤为显著。一般异步电动机 q_1 为2~6,本课题 q_1 为3,所选用的槽配合为定子54槽,转子44槽。

2.1.2 绕组选择

本课题所选绕组为双层叠绕组,定子绕组并联路数 $a=2$,每槽导体数 $N=34$,绕组节距 $y=8$,绕组短距系数 $K_{p1}=0.985$,绕组分布系数 $K_{d1}=0.96$ 。

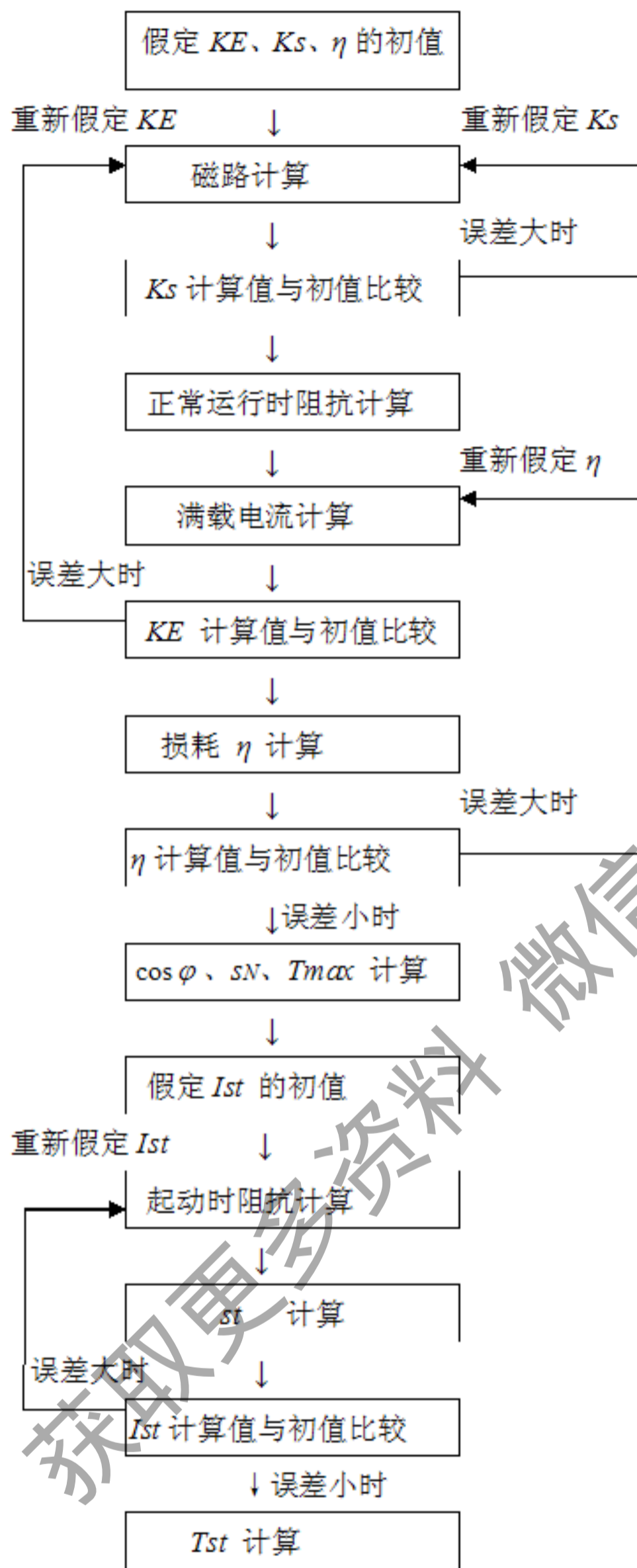
2.1.3 定、转子槽形及尺寸

定转子槽形选择及尺寸见附录与附图。

2.2 电磁计算步骤与程序

2.2.1 电磁计算步骤

电磁计算是根据电机设计数据、电磁参数、性能等物理量之间的关系式,核算电磁设计方案是否满足设计要求。电磁计算基本步骤如下:



电磁计算基本步骤

2.2.2 电磁计算步骤与程序

2.2.2 Y180L-6 电磁计算程序

(一) 额定数据及主要尺寸

1. 输出功率 P_2	$P_2=15\text{kw}$	$P_2=15\text{kw}$
2. 外施相电压 U_1	$U_1=380\text{V}$	$U_1=380\text{V}$
3. 功电流 I_{KW}	$I_{KW} = \frac{P_2 \cdot 10^3}{m_1 \cdot U_1} = \frac{15 \times 10^3}{3 \times 380} = 13.1579\text{A}$	$I_{KW} = 13.1579\text{A}$
4. 效率 η'	$\eta' = 0.89$	$\eta' = 0.89$
5. 功率因数 $\cos \varphi'$	$\cos \varphi' = 0.81$	$\cos \varphi' = 0.81$
6. 极数 p	$p = 6$	$p = 6$
7. 定子槽数 Q_1	$Q_1 = 54$	$Q_1 = 54$
转子槽数 Q_2	$Q_2 = 44$	$Q_2 = 44$
8. 定子每极槽数	$Q_{P1} = \frac{Q_1}{p} = \frac{54}{6} = 9$	$Q_{P1} = 9$
转子每极槽数	$Q_{P2} = \frac{Q_2}{p} = \frac{44}{6} = \frac{22}{3}$	$Q_{P2} = \frac{22}{3}$
9. 定转子冲片尺寸见图		
10. 极距 τ_p	$\tau_p = \frac{\pi \cdot D_{i1}}{p} = \frac{3.14159 \times 205}{6} = 107.3377$	$\tau_p = 107.3377\text{mm}$
11. 定子齿距 t_1	$t_1 = \frac{\pi \cdot D_{i1}}{Q_1} = \frac{3.14159 \times 205}{54} = 11.92641$	$t_1 = 11.92641\text{mm}$
12. 转子齿距 t_2	$t_2 = \frac{\pi \cdot D_2}{Q_2} = \frac{3.14159 \times 204.1}{44} = 14.5727$	$t_2 = 14.5727\text{mm}$
13. 节距 y	$y = 8$	$y = 8$
14. 转子斜槽宽 b_{SK}	$b_{SK} = 11.92641$	$b_{SK} = 11.92641\text{mm}$
15. 每槽导体数 Z_1	$Z_1 = 34$	$Z_1 = 34$

16. 每相串联导体数 $Z_{\phi 1}$ $Z_{\phi 1} = \frac{Q_1 \cdot Z_1}{m_1 \cdot a_1} = \frac{54 \times 34}{3 \times 2} = 306$ $Z_{\phi 1} = 306$

式中: $a_1 = 2$

17. 绕组线规 (估算) $N_1' \cdot S_1' = \frac{I_1'}{a_1 \cdot \Delta_1} \cdot I_1' = \frac{I_{KW}}{\eta' \cdot \cos \varphi'} = \frac{13.1579}{0.89 \times 0.81} = 1.8$

式中: 导线并绕根数·截面积 $N_1' \cdot S_1'$ 查表取 $N_1' \cdot S_1' = 1 \times 1.5$

$N_1' \cdot S_1' = 1 \times 1.5$

定子电流初步估算值 $I_1' = \frac{I_{KW}}{\eta' \cdot \cos \varphi'} = \frac{13.1579}{0.89 \times 0.81} = 18.252A$

$I_1' = 18.252A$

定子电流密度 Δ_1' $\Delta_1' = 5.07$

$\Delta_1' = 5.07$

18. 槽满率

(1) 槽面积

$$S_s = \frac{2R + b_{s1}}{2} (h_s' - h) + \frac{\pi R^2}{2} = \frac{2 \times 3.8 + 5.5}{2} (18.5 - 2) + \frac{3.14159 \times 3.8^2}{2} = 130.7573 \text{mm}^2$$

$S_s = 130.7573 \text{mm}^2$

(2) 槽绝缘占面积

$$S_i = C_i (2h_s' + \pi R + 2R + b_{s1}) = 0.35 (18.5 \times 2 + (3.14159 + 2) \times 3.8 + 5.5) = 21.7133$$

$S_i = 21.7133 \text{mm}^2$

(3) 槽有效面积

$$S_e = S_s - S_i = 130.7573 - 21.7133 = 109.044 \text{mm}^2$$

$S_e = 109.044 \text{mm}^2$

(4) 槽满率

$$S_f = \frac{N_1 \cdot Z_1 \cdot d^2}{S_e} = \frac{1 \times 34 \times 1.58^2}{109.044} = 0.7784$$

$S_f = 0.7784$

绝缘厚度 C_i $C_i = 0.35 \text{mm}$

$C_i = 0.35 \text{mm}$

导体绝缘后外径 d $d = 1.58 \text{mm}$

$d = 1.58 \text{mm}$

槽契厚度 h $h = 2 \text{mm}$

$h = 2 \text{mm}$

19. 铁心长 l

铁心有效长

无径向通风道

$$l_{\text{eff}} = 200.9\text{mm}$$

$$l_{\text{eff}} = l + 2g = 200 + 2 \times 0.45 = 200.9\text{mm}$$

净铁心长

无径向通风道

$$l_{F_e} = 184\text{mm}$$

$$l_{F_e} = K_{F_e} \cdot l = 0.92 \times 200 = 184\text{mm}$$

铁心压装系数 K_{F_e}

$$K_{F_e} = 0.92$$

$$K_{F_e} = 0.92$$

20. 绕组系数

$$K_{dp1} = K_{d1} \cdot K_{p1} = 0.956 \times 0.9848 = 0.945$$

$$K_{dp1} = 0.945$$

(1) 分布系数

$$K_{d1} = \frac{\sin\left(\frac{\alpha}{2} \cdot q_1\right)}{q_1 \cdot \sin\frac{\alpha}{2}} \quad \text{查表取 } 0.956$$

$$K_{d1} = 0.956$$

式中:

$$q_1 = \frac{Q_1}{m_1 \cdot p} = \frac{54}{3 \times 6} = 3$$

$$q_1 = 3$$

$$\alpha = \frac{p\pi}{Q_1} = \frac{3.14159 \times 6}{54} = 0.3491$$

(2) 短距系数

$$K_{p1} = \sin(\beta \cdot 90^\circ) = \sin\left(\frac{8}{9} \times 90^\circ\right) = 0.9848$$

$$K_{p1} = 0.9848$$

式中:

$$\beta = \frac{y}{Q_{p1}} = \frac{8}{9}$$

$$\beta = \frac{8}{9}$$

21. 每相有效串联导体数

$$Z_{\phi 1} \cdot K_{dp1} = Z_{\phi 1} \cdot K_{dp1} = 306 \times 0.945 = 289.17$$

$$Z_{\phi 1} = 289.17$$

(二) 磁路计算

22. 每极磁通

$$\begin{aligned}\phi &= \frac{E_1 \cdot 10^8}{2.22 f \cdot Z_{\phi 1} \cdot K_{dp1}} \\ &= \frac{355.51 \times 10^8}{2.22 \times 50 \times 306 \times 0.945} \\ &= 11069.612\end{aligned}$$

$$\phi = 11069.612$$

式中:

$$E_1 = (1 - \varepsilon_L') U_1 = 0.935 \times 380 = 355.31$$

$$E_1 = 355.31V$$

23. 齿部截面积

(1) 定子

$$\begin{aligned}S_{T1} &= b_{T1} \cdot l_{Fe} \cdot Q_{P1} \\ &= 6.58169 \times 184 \times 9 = 10899.28\end{aligned}$$

$$S_{T1} = 10899.28$$

(2) 转子

$$\begin{aligned}S_{T2} &= b_{T2} \cdot l_{Fe} \cdot Q_{P2} = 8.881 \times 184 \times 22/3 \\ &= 11983.43\end{aligned}$$

$$S_{T2} = 11983.43$$

24. 轭部截面积

(1) 定子

$$S_{C1} = h_{C1}' \cdot l_{Fe} = 20.66667 \times 184 = 3802.667$$

$$S_{C1} = 3802.667$$

式中:

定子轭部磁路计算高度

$$h_{C1}' = \frac{D_1 - D_{i1}}{2} - h_s + \frac{1}{3} R$$

$$h_{C1}' = 20.66667$$

h_{C1}' 圆底槽:

$$\begin{aligned}&= \frac{290 - 205}{2} - (18.5 + 0.8 + 3.8) + \frac{1}{3} \times 3.8 \\ &= 20.66667\end{aligned}$$

(2) 转子

$$S_{C2} = h_{C2}' \cdot l_{Fe} = 30.05 \times 184 = 6449.2$$

$$S_{C2} = 6449.2$$

转子轭部磁路计算高度

h_{C2}' 平底槽

$$\begin{aligned}h_{C2}' &= \frac{D_2 - D_{i2}}{2} - h_R - \frac{2}{3} d_{K2} \\ &= \frac{204.1 - 71}{2} - 32 = 35.05\end{aligned}$$

$$h_{C2}' = 35.05\text{mm}$$

25. 空气隙面积

$$S_g = \tau_p \cdot l_{eff} = 107.3377 \times 200.9 = 21564.14$$

$$S_g = 21564.14$$

26. 波幅系数

$$F_s = \frac{\text{最大}\phi}{\text{平均}\phi} = 1.459833$$

$$F_s = 1.459833$$

27. 定子齿磁密

$$\begin{aligned}B_{T1} &= F_s \frac{\phi}{S_{T1}} = 1.459833 \frac{11069.612}{10899.28} \\ &= 1.482647\end{aligned}$$

$$B_{T1} = 1.482647$$

28. 转子齿磁密	$B_{T2} = F_S \frac{\phi}{S_{T2}} = 1.459833 \frac{11069.612}{11983.52} = 1.3485$	$B_{T2} = 1.3485$
29. 定子轭磁密	$B_{C1} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\phi}{S_{C1}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{11069.612}{3802.667} = 1.4555$	$B_{C1} = 1.4555$
30. 转子轭磁密	$B_{C2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\phi}{S_{C2}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{11069.612}{6449.2} = 0.858216$	$B_{C2} = 0.858216$
31. 空气隙磁密	$B_g = F_S \frac{\phi}{S_g} = 1.459833 \frac{11069.612}{21564.14} = 0.7493831$	$B_g = 0.7493831$
32. 查附录 V1 得	$at_{T1} \quad at_{T2} \quad at_{C1} \quad at_{C2}$	
33. 齿部磁路计算长度		
定子		
圆底槽	$h_{T1}' = h_{s1} + h_{s2} + \frac{1}{3}R$ $= 18.5 + \frac{1}{3} \times 3.8 = 19.76667$	$h_{T1}' = 19.76667$
转子		
平底槽	$h_{T2}' = h_{R1} + h_{R2} = 12.5$	$h_{T2}' = 12.5\text{mm}$
34. 轭部磁路计算长度		
定子	$l_{C1}' = \frac{\pi(D_1 - h_{C1}')}{2p} = \frac{3.14159(290 - 20.66667)}{12} = 70.511$	$l_{C1}' = 70.511\text{mm}$
转子	$l_{C2}' = \frac{\pi(D_{i2} - h_{C2}')}{2p} = \frac{3.14159(70 + 35.05)}{12} = 27.502$	$l_{C2}' = 27.502$
35. 有效气隙长度	$g_e = g \cdot K_{C1} \cdot K_{C2}$ $= 0.45 \times 1.287 \times 1.0258 = 0.594$	$g_e = 0.594$

式中： 定、转子卡氏系数 K_{C1} 、 K_{C2}

$$K_{C1} = \frac{t(4.4g + 0.75b_o)}{t(4.4g + 0.75b_o) - b_o^2}$$

$$= \frac{11.92641(4.4 \times 0.45 + 0.75 \times 3.5)}{11.92641(4.4 \times 0.45 + 0.75 \times 3.5) - 3.5^2}$$

$$= 1.287$$

$$K_{C1} = 1.287$$

半闭口槽和半开口槽

$$K_{C2} = \frac{t(4.4g + 0.75b_o)}{t(4.4g + 0.75b_o) - b_o^2}$$

$$= \frac{14.5727(4.4 \times 0.45 + 0.75 \times 1)}{14.5727(4.4 \times 0.45 + 0.75 \times 1) - 1^2}$$

$$= 1.0258$$

$$K_{C2} = 1.0258$$

式中： 齿距 t

$$t_1 = 11.92644\text{mm} \quad t_2 = 14.5727\text{mm}$$

槽口宽 b_o

$$b_{o1} = 3.5\text{mm} \quad b_{o2} = 1\text{mm}$$

36. 齿部所需安匝

定子

$$AT_{T1} = at_{T1} \cdot h_{T1}' = 18.35322 \times 1.976667$$

$$= 36.2782$$

$$AT_{T1} = 36.2782$$

转子

$$AT_{T2} = at_{T2} \cdot h_{T2}'$$

$$= 10.41563 \times 1.25 + 25.99844 \times 1.9$$

$$= 62.41658$$

$$AT_{T2} = 62.41658$$

37. 轭部所需安匝

定子

$$AT_{C1} = C_1 \cdot at_{C1} \cdot l_{C1}'$$

$$= 0.3619942 \times 15.93694 \times 7.051125$$

$$= 40.64849$$

$$AT_{C1} = 40.64849$$

轭部磁路长度校正系数

C_1

$$C_1 = 0.3619942$$

$$C_1 = 0.3619942$$

转子

$$AT_{C2} = C_2 \cdot at_{C2} \cdot l_{C2}'$$

$$= 0.7 \times 2.806553 \times 2.7502$$

$$= 5.403$$

$$AT_{C2} = 5.403$$

校正系数 C_2	$C_2=0.7$	$C_2=0.7$
38. 空气隙所需安匝	$AT_g = 0.8B_g \cdot g_e$ $=0.8 \times 749.383 \times 0.594=356.11$	$AT_g=356.11$
39. 饱和系数	$F_T = \frac{AT_{T1} + AT_{T2} + AT_g}{AT_g}$ $= \frac{36.2782 + 62.41658 + 356.11}{356.11}$ $=1.2771$	$F_T=1.2771$
40. 总安匝	$AT = AT_{T1} + AT_{T2} + AT_{C1} + AT_{C2} + AT_g$ $=36.2782+62.41658+356.11+40.67849+5.403$ $=500.886$	$AT=500.866$
41. 满载磁化电流	$I_m = \frac{2.22 AT \cdot p}{m_1 \cdot Z_{\phi 1} K_{dp1}} = \frac{2.22 \times 500.886 \times 6}{3 \times 306 \times 0.945} = 7.69$	$I_m=7.69A$
42. 满载磁化电流标么值	$\bar{i}_m = \frac{I_m}{I_{KW}} = \frac{7.69}{13.1579} = 0.58444$	$\bar{i}_m=0.58444$
43. 激磁电抗	$\bar{x}_m = \frac{1}{\bar{i}_m} = \frac{1}{0.58444} = 1.711$	$\bar{x}_m=1.71$
(三) 参数计算		
44. 线圈平均半匝长 (估算)		
双层线圈	$l_z = L_B + 2C_s = 240 + 2 \times 61.655$	$l_z = 363.31$
式中:	L_B (直线部分长) $= l + 2d_1 = 240 + 2 \times 20 = 240$	$L_B = 240\text{mm}$
	$C_s = \frac{\tau_Y}{2 \cos \alpha} = \frac{106.8606}{2 \times 0.8666} = 61.655$	$C_s = 61.655$
	$\tau_Y = \frac{\pi [D_{i1} + 2(h_{S0} + h_{S1}) + h_{S2} + R]}{p}$ $= \frac{3.14157 (205 + 3 + 17.8 + 3.8)}{6} \times \frac{8}{9}$ $= 106.866$	$\tau_Y = 106.866\text{mm}$

式中:

$$d_1=20\text{mm}$$

$$\cos \alpha = \sqrt{1 - \sin^2 \alpha} = \sqrt{1 - 0.499^2} = 0.8666$$

$$\begin{aligned} \sin \alpha &= \frac{b_{s1} + 2R}{b_{s1} + 2R + 2b_{T1}} \\ &= \frac{5.5 + 2 \times 3.8}{5.5 + 2 \times 3.8 + 2 \times 6.576} = 0.499 \end{aligned}$$

45. 双层线圈端部轴向投影长

$$f_d = C_s \cdot \sin \alpha = 61.655 \times 0.499 = 30.7658$$

$$f_d = 30.7658\text{mm}$$

47. 漏抗系数

$$\begin{aligned} C_x &= \frac{2.63 f \cdot P_2 \cdot l_{\text{eff}} (Z_{\phi 1} K_{dp1})^2}{p \cdot U_1^2 \cdot 10^5} \\ &= \frac{2.63 \times 50 \times 15 \times 20.09 \times (306 \times 0.945)^2}{6 \times 380^2 \times 10^5} \\ &= 0.03825 \end{aligned}$$

48. 定子槽单位漏磁导

$$\begin{aligned} \lambda_{s1} &= K_{U1} \cdot \lambda_{U1} + K_{L1} \cdot \lambda_{L1} \\ &= 0.3842 \times 0.91667 + 0.9375 \times 1.237789 \\ &= 1.5216 \end{aligned}$$

$$\lambda_{s1} = 1.5216$$

式中:

$$K_{U1} = 0.916667$$

$$K_{U1} = 0.916667$$

$$K_{L1} = 0.9375$$

$$K_{L1} = 0.9375$$

$$\lambda_{U1} = 0.3842$$

$$\lambda_{U1} = 0.3842$$

49. 定子槽漏抗

$$\begin{aligned} \bar{x}_{s1} &= \frac{l_1 \cdot m_1 \cdot p \cdot \lambda_{s1}}{l_{\text{eff}} \cdot K_{dp1}^2 \cdot Q_1} C_x \\ &= \frac{200 \times 3 \times 6 \times 1.5126}{200.9 \times 0.945^2 \times 54} C_x \\ &= 0.5620 C_x \end{aligned}$$

$$\bar{x}_{s1} = 0.5620 C_x$$

式中:

$$\text{无径向通风道时 } l_1 = l = 200\text{mm}$$

$$l_1 = 200\text{mm}$$

50. 定子谐波漏抗

$$\begin{aligned} \bar{x}_{d1} &= \left(\frac{m_1 \cdot \tau_p}{\pi^2 \cdot g_s} \right) \frac{\sum S}{K_{dp1}^2 \cdot F_T} C_x \\ &= \left(\frac{3 \times 107.3377}{3.14159^2 \times 0.594} \right) \times \frac{1.026714 \times 10^{-2}}{0.945^2 \times 1.277} \end{aligned}$$

$$\bar{x}_{d1}$$

$$= 0.4945 C_x$$

$$=0.4945 C_x$$

式中:

$$\sum S = 1.026714 \times 10^{-2}$$

51. 定子端部漏抗

$$\begin{aligned} \bar{x}_{e1} &= \frac{1.2(d_1 + 0.5f_d)}{l_{eff}} C_x \\ &= \frac{1.2(20 + 0.5 \times 30.7658)}{200.9} C_x \\ &= 0.2113 C_x \end{aligned}$$

$$\bar{x}_{e1} = 0.2113 C_x$$

52. 定子漏抗

$$\bar{x}_1 = \bar{x}_{S1} + \bar{x}_{d1} + \bar{x}_{e1}$$

$$\bar{x}_1 = 0.048493$$

$$= (0.562 + 0.4945 + 0.2113) C_x = 1.2678 C_x$$

$$= 0.048493$$

53. 转子槽单位漏磁导

$$\lambda_{S2} = \lambda_{V2} + \lambda_{L2} = 0.5 + 3.341641 = 3.841641$$

$$\lambda_{S2} = 3.841641$$

式中:

$$\lambda_{V2} = 0.5$$

$$\lambda_{V2} = 0.5$$

$$\lambda_{L2} = 3.341641$$

$$\lambda_{L2} = 3.341641$$

54. 转子槽漏抗

$$\begin{aligned} \bar{x}_{S2} &= \frac{l_2 \cdot m_1 \cdot p \cdot \lambda_{S2}}{l_{eff} \cdot Q_2} C_x \\ &= \frac{200 \times 3 \times 6 \times 3.841641}{200.9 \times 44} C_x \\ &= 1.56454 C_x \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{x}_{S2} \\ &= 1.56454 C_x \end{aligned}$$

55.

$$\begin{aligned} \bar{x}_{d2} &= \left(\frac{m_1 \cdot \tau_p}{\pi^2 \cdot g_e} \right) \frac{\sum R}{F_T} C_x \\ &= \left(\frac{3 \times 107.3377}{3.14159^2 \times 0.594} \right) \frac{0.0153888}{1.277} C_x \\ &= 0.6619 C_x \end{aligned}$$

$$\bar{x}_{d2} = 0.6619 C_x$$

式中:

$$\sum R = 0.015388$$

56. 转子端部漏抗

$$\begin{aligned}\bar{x}_{e2} &= \frac{0.757}{l_{\text{eff}}} \cdot \frac{D_R}{p} C_x = \frac{0.757 \times 156}{200.9} C_x \\ &= 0.098 C_x\end{aligned}$$

$$\bar{x}_{e2} = 0.098 C_x$$

$$D_R = 156 \text{mm}$$

57. 转子斜槽漏抗

$$\begin{aligned}\bar{x}_{\text{SK}} &= 0.5 \left(\frac{b_{\text{SK}}}{t_2} \right)^2 \bar{x}_{d2} = 0.5 \left(\frac{11.92641}{14.5727} \right)^2 \cdot 0.6619 C_x \\ &= 0.2216 C_x\end{aligned}$$

$$\bar{x}_{\text{SK}} = 0.2216 C_x$$

58. 转子漏抗

$$\begin{aligned}\bar{x}_2 &= \bar{x}_{s2} + \bar{x}_{d2} + \bar{x}_{e2} + \bar{x}_{\text{SK}} \\ &= (1.56454 + 0.6619 + 0.098 + 0.2216) C_x \\ &= 0.0974\end{aligned}$$

$$\bar{x}_2 = 0.0974$$

59. 总漏抗

$$\bar{x} = \bar{x}_1 + \bar{x}_2 = 0.048493 + 0.0974 = 0.1459$$

$$\bar{x} = 0.1459$$

60. 定子相电阻

$$\begin{aligned}R_1 &= \frac{\rho \cdot l_z \cdot Z_{\phi 1}}{a_1 \cdot S_1 \cdot N_1 \cdot 100} \\ &= \frac{0.0217 \times 36331 \times 306}{2 \times 1.767 \times 1 \times 100} = 0.68264 \Omega\end{aligned}$$

$$R_1$$

$$= 0.68264 \Omega$$

61. 定子相电阻标么值

$$\bar{r}_1 = R_1 \frac{I_{\text{KW}}}{U_1} = 0.68264 \times \frac{13.1579}{380} = 0.023637$$

$$\bar{r}_1 = 0.023637$$

62. 有效材料

$$\begin{aligned}G_{\text{Cu}} &= C \cdot l_z \cdot Z_1 \cdot Q_1 \cdot S_1 \cdot N_1 \cdot \gamma \cdot 10^{-5} \\ &= 1.05 \times 36.331 \times 54 \times 34 \times 1.767 \times 1 \times 8.9 \times 10^{-5} \\ &= 11.015 \text{Kg}\end{aligned}$$

$$G_{\text{Cu}} = 11.015 \text{Kg}$$

$$\begin{aligned}G_{\text{Fe}} &= K_{\text{Fe}} \cdot l \cdot (D_1 + \delta)^2 \cdot 7.8 \cdot 10^{-3} \\ &= 0.92 \times 0.2 \times 290 \times 290 \times 7.8 \times 0.001 \\ &= 120.7 \text{Kg}\end{aligned}$$

式中:

$$C = 1.05$$

$$\gamma = 8.9$$

$$S_1 = 1.767 \text{mm}^2$$

$$S_1 = 1.767 \text{mm}^2$$

式中:

$$K_{\text{Fe}} = 0.92$$

$$\delta = 0.5 \text{mm}$$

$$\delta = 0.5 \text{mm}$$

63. 转子电阻

导条电阻

$$R_B = K \left(\frac{K_B \cdot l_B \cdot \rho_B}{S_B \cdot Q_2} \right)$$

$$= 25.0858 \left(\frac{1.04 \times 24 \times 0.0434}{107.7 \times 44} \right)$$

$$= 0.478$$

$$R_B = 0.478 \Omega$$

端环电阻

$$R_R = K \left(\frac{2 \cdot D_R \cdot \rho_R}{\pi \cdot p^2 \cdot S_R} \right)$$

$$= 25.0858 \left(\frac{2 \times 15.6 \times 0.0434}{3.14159 \times 36 \times 430} \right)$$

$$= 0.06985$$

$$R_R = 0.06985 \Omega$$

式中:

$$K = \frac{m_1 (Z_{\phi 1} K_{dp1})^2}{10^4}$$

$$= \frac{3(306 \times 0.945)^2}{10^4} = 25.0858$$

$$K_B = 1.04$$

$$K_B = 1.04$$

转子导条面积

$$S_B = 107.7$$

$$S_B = 107.7$$

端环截面积

$$S_R = 430$$

$$S_R = 430$$

转子导条或端环的电阻系数

$$\rho_B = 0.0434, \quad \rho_R = 0.0434$$

导条电阻标么值

$$\bar{r}_B = R_B \frac{I_{KW}}{U_1} = 0.478 \frac{13.1579}{380} = 0.01655$$

$$\bar{r}_B = 0.01655$$

端环电阻标么值

$$\bar{r}_R = R_R \frac{I_{KW}}{U_1} = 0.06985 \frac{13.1579}{380} = 0.00242$$

$$\bar{r}_R = 0.00242$$

转子电阻标么值

$$\bar{r}_2 = \bar{r}_B + \bar{r}_R = 0.01655 + 0.00242 = 0.01897$$

$$\bar{r}_2 = 0.01897$$

64. 满载电流有功部分

$$\bar{i}_P = \frac{1}{\eta'} = \frac{1}{0.89478} = 1.117585$$

$$\bar{i}_P = 1.117585$$

65. 满载电抗电流部分	$\bar{i}_s = K_m \cdot \bar{x} \cdot (\bar{i}_P)^2 \left[1 + (K_m \cdot \bar{x} \cdot \bar{i}_P)^2 \right]$ $= 1.02834 \times 0.1459 \times 1.115785^2 \left[1 + (1.02834 \times 0.1459 \times 1.115785)^2 \right]$ $= 0.19266$	$\bar{i}_s = 0.19266$
式中:	$K_m = 1 + \bar{i}_m \cdot \bar{x}_1 = 1 + 0.048493 \times 0.58444$ $= 1.02834$	$K_m = 1.02834$
66. 满载电流无功部分	$\bar{i}_R = \bar{i}_m + \bar{i}_x = 0.19266 + 0.58444 = 0.7771$	$\bar{i}_R = 0.7771$
67. 满载电势	$1 - \varepsilon_L = 1 - (\bar{i}_P \cdot \bar{r}_1 + \bar{i}_R \cdot \bar{x}_1)$ $= 1 - (1.115785 \times 0.023637 + 0.7771 \times 0.048493)$ $= 0.9359$	$1 - \varepsilon_L = 0.9359$
68. 空载电势	$1 - \varepsilon_0 = 1 - \bar{i}_m \cdot \bar{x}_1 = 1 - 0.58444 \times 0.02834$ $= 0.97166$	$1 - \varepsilon_0 = 0.97166$
69. 空载定子齿磁密	$B_{T10} = \frac{1 - \varepsilon_0}{1 - \varepsilon_L} B_{T1} = \frac{0.97166}{0.9359} B_{T1}$ $= 1.0382 \times 1.482647 = 1.53928$	$B_{T10} = 1.53928$
70. 空载转子齿磁密	$B_{T20} = \frac{1 - \varepsilon_0}{1 - \varepsilon_L} B_{T2}$ $= 1.0382 \times 1.3485 = 1.4000$	$B_{T20} = 1.4000$
71. 空载定子轭磁密	$B_{C10} = \frac{1 - \varepsilon_0}{1 - \varepsilon_L} B_{C1} = 1.0382 \times 1.4555 = 1.5111$	$B_{C10} = 1.5111$
72. 空载转子轭磁密	$B_{C20} = \frac{1 - \varepsilon_0}{1 - \varepsilon_L} B_{C2} = 1.0382 \times 0.858216 = 0.891$	$B_{C20} = 0.891$
73. 空载气隙磁密	$B_{g0} = \frac{1 - \varepsilon_0}{1 - \varepsilon_L} B_g = 1.0382 \times 0.7493831 = 0.778$	$B_{g0} = 0.778$
74. 空载定子齿安匝	$AT_{T10} = at_{T10} \cdot h_{T1}' = 25 \times 1.976667 = 49.42$	$AT_{T10} = 49.42$
75. 空载转子齿安匝	$AT_{T20} = at_{T20} \cdot h_{T2}'$ $= 12.6 \times 1.25 + 38.5 \times 1.9 = 88.9$	$AT_{T20} = 88.9$
76. 空载定子轭安匝	$AT_{C10} = C_1 \cdot at_{C10} \cdot l_{C1}'$ $= 0.4 \times 21.2 \times 7.0511 = 59.7972$	$AT_{C10} = 59.7972$

77. 空载转子轭安匝	$AT_{C20} = C_2 \cdot at_{C20} \cdot I_{C2}' = 0.7 \times 2.4 \times 2.7502$ $= 0.7 \times 6.6 = 4.62$	$AT_{C20} = 4.62$
78. 空载空气隙安匝	$AT_{g0} = 0.8g_e \cdot B_{g0} = 0.8 \times 778 \times 0.594 = 369.7$	$AT_{g0} = 369.7$
79. 空载总安匝	$AT_0 = AT_{T10} + AT_{T20} + AT_{C10} + AT_{C20} + AT_{g0}$ $= 49.42 + 88.9 + 59.7972 + 4.62 + 369.7$ $= 572.4372$	$AT_0 = 572.4372$
80. 空载磁化电流	$I_{m0} = \frac{2.22AT_0 \cdot p}{m_1 \cdot Z_{\phi 1} K_{dp1}} = \frac{2.22 \times 572.4372 \times 6}{3 \times 306 \times 0.945}$ $= 8.789$	$I_{m0} = 8.789 \text{ A}$
81. 定子电流标么值	$\bar{i}_1 = \sqrt{\bar{i}_P^2 + \bar{i}_R^2} = \sqrt{0.7771^2 + 1.117585^2}$ $= 1.3612$	$\bar{i}_1 = 1.3612$
定子电流实际值	$I_1 = \bar{i}_1 \cdot I_{kw} = 1.3612 \times 13.1579 = 17.91$	$I_1 = 17.91 \text{ A}$
82. 定子电流密度	$\Delta_1 = \frac{I_1}{a_1 \cdot N_1 \cdot S_1} = \frac{17.91}{2 \times 1 \times 1.767} = 5.0676$	$\Delta_1 = 5.0676$
83. 线负荷	$A_1 = \frac{m_1 \cdot Z_{\phi 1} \cdot I_1}{\pi \cdot D_{i1}} = \frac{3 \times 306 \times 17.91}{3.14159 \times 205} = 25.529$	$A_1 = 25.529$
84. 转子电流标么值	$\bar{i}_2 = \sqrt{\bar{i}_P^2 + \bar{i}_x^2} = \sqrt{0.19266^2 + 1.117585^2} = 1.13406$	$\bar{i}_2 = 1.13406$
转子电流实际值	$I_2 = \bar{i}_2 \cdot I_{kw} \cdot \frac{m_1 \cdot Z_{\phi 1} \cdot K_{dp1}}{Q_2}$ $= 1.13406 \times 13.1579 \times \frac{3 \times 306 \times 0.945}{44} = 294.2$	$I_2 = 294.2$
端环电流实际值	$I_R = I_2 \cdot \frac{Q_2}{\pi \cdot p} = 294.2 \times \frac{44}{3.14159 \times 6} = 686.7835$	$I_R = 686.7835$
85. 转子电流密度 导条 密度	$\Delta_B = \frac{I_2}{S_B} = \frac{294.2}{107.7} = 2.73166$	$\Delta_B = 2.73166$
端环密度	$\Delta_R = \frac{I_R}{S_R} = \frac{686.7}{430} = 1.59698$	$\Delta_R = 1.59698$
86. 定子铝损耗	$\bar{p}_{Al1} = \bar{i}_1^2 \cdot \bar{r}_1 = 1.85286 \times 0.023637 = 0.043796$	$\bar{p}_{Al1} = 0.04379$
87. 转子铝损耗	$P_{Al1} = \bar{p}_{Al1} \cdot P_2 \cdot 10^3 = 0.043796 \times 15000$	$P_{Al1} = 656.85 \text{ w}$

	$=656.85\text{W}$	
	$\bar{p}_{Al2} = \bar{i}_2^2 \cdot \bar{r}_2 = 1.286 \times 0.01897 = 0.0244$	$\bar{p}_{Al2} = 0.0244$
	$P_{Al2} = \bar{p}_{Al2} \cdot P_2 \cdot 10^3 = 0.0244 \times 15000 = 366\text{W}$	$P_{Al2} = 366\text{W}$
88. 附加损耗	$\bar{P}_S = \frac{P_S}{P_2 \cdot 10^3}$ 参考实测值取 0.01467	$\bar{P}_S = 0.01467$
89. 机械损耗	$P_{fw} = 5.5 \left(\frac{6}{p}\right)^2 \left(\frac{D_2}{10}\right)^3$ 参考实测值取 130W	$P_{fw} = 130\text{W}$
机械损耗标么值	$\bar{P}_{fw} = \frac{P_{fw}}{P_2 \cdot 10^3} = \frac{130}{15000} = 0.00867$	$\bar{P}_{fw} = 0.00867$
90. 定子铁耗		
(1) 定子齿体积	$V_{T1} = p \cdot S_{T1} \cdot h_{T1}' = 6 \times 10899.28 \times 19.76667$ $= 1292655$	$V_{T1} = 1292655$
(2) 定子轭体积	$V_{C1} = 2p \cdot S_{C1} \cdot h_{C1}' = 2 \times 6 \times 3802.667 \times 70.511$ $= 3217567$	$V_{C1} = 3217567$
(3) 损耗系数	$P_{T1} P_{C1}$	
(4) 定子齿损耗	$P_{T1} = p_{T1} \cdot V_{T1} = 54.11663$	$P_{T1} = 54.11663$
(5) 定子轭损耗	$P_{C1} = p_{C1} \cdot V_{C1} = 130.0664$	$P_{C1} = 130.0664$
(6) 总铁耗	$P_{Fe} = k_1 \cdot P_{T1} + k_2 \cdot P_{C1}$ $= 54.11663 \times 2.5 + 130.0664 \times 2$ $= 395.442$	$P_{Fe} = 395.442\text{W}$
铁耗校正系数	$k_1 = 2.5 \quad k_2 = 2$	
铁耗标么值	$\bar{P}_{Fe} = \frac{P_{Fe}}{P_2 \cdot 10^3} = \frac{395.442}{15000} = 0.02636$	$\bar{P}_{Fe} = 0.02636$
91. 总损耗标么值	$\Sigma \bar{P} = \bar{P}_{Al1} + \bar{P}_{Al2} + \bar{P}_{Fe} + \bar{P}_S + \bar{P}_{fw}$ $= 0.00867 + 0.043796 + 0.0244 + 0.01467 + 0.02636$ $= 0.117896$	$\Sigma \bar{P} = 0.117896$

92. 输入功率	$\bar{P}_1 = 1 + \sum \bar{P} = 1.117896$	$\bar{P}_1 = 1.117896$
93. 总损耗比	$\sum \bar{p} = \frac{\sum \bar{P}}{\bar{P}_1} = \frac{0.117896}{1.117896} = 0.10546$	$\sum \bar{p} = 0.10546$
94. 效率	$\eta = 1 - \sum \bar{p} = 1 - 0.10546 = 0.89454$	$\eta = 0.89454$
95. 功率因数	$\cos \varphi = \frac{1}{i_1 \cdot \eta} = \frac{1}{1.3612 \times 0.89454} = 0.82125$	$\cos \varphi = 0.82125$
96. 转差率	$S_n = \frac{\bar{P}_{AD}}{1 + \bar{P}_{AD} + \bar{P}_{Fe} - (\bar{P}_{T1} + \bar{P}_{Cl}) + \bar{P}_S + \bar{P}_{fw}} = \frac{0.0244}{1 + 0.0244 + 0.02636 + 0.00867 + 0.01467 + 0.00364 + 0.00867} = 0.02298$	$S_n = 0.02298$
97. 转速	$n = \frac{120 f (1 - S_n)}{p} = \frac{120 \times 50 \times (1 - 0.02289)}{6} = 977 \text{ r/min}$	$n = 977 \text{ r/min}$
98. 最大转矩	$T_M = \frac{1 - S_n}{2 \left(\bar{r}_1 + \sqrt{\bar{r}_1^2 + x^2} \right)} = \frac{1 - 0.02298}{2(0.023637 + 0.1478)} = 2.8495$	$T_M = 2.8495$
99. 起动电流假定值	$I'_{st} = (2.5 \sim 3.5) T_M \cdot I_{KW} = 2.955 \times 2.8495 \times 13.1579 = 110.79$	$I'_{st} = 110.79$
100. 起动时漏磁路饱和引起漏抗变化的系数	$B_L = \frac{AT_{(st)}}{1.6g \cdot \beta_c} = \frac{2718.714}{1.6 \times 0.45 \times 0.96578} = 3909.78$ 对应 $K_z = 0.53$ $AT_{(st)} = I'_{st} \frac{Z_1}{a_1} \cdot 0.707 \left[K_{U1} + (K_{d1})^2 \cdot K_{p1} \cdot \frac{Q_1}{Q_2} \right] \sqrt{1 - \varepsilon_0}$ $= 110.79 \times 17 \times 0.707 \left(0.91557 + 0.956^2 \times 0.9848 \times \frac{54}{44} \right) \sqrt{0.97166} = 2718.714$	$B_L = 39.9.78$ $AT_{(st)} = 2718.714$

$$\beta_c = 0.64 + 2.5 \sqrt{\frac{g}{t_1 + t_2}}$$

$$= 0.64 + 2.5 \sqrt{\frac{0.45}{11.92641 + 14.5727}}$$

$$= 0.96578$$

101. 齿顶漏磁饱和引起
定子齿顶宽度的减少

$$C_{S1} = (t_1 - b_{01})(1 - K_Z)$$

$$= (11.92641 - 3.5)(1 - 0.53)$$

$$= 3.96$$

$$C_{S1} = 3.96$$

102. 齿顶漏磁饱和引起
转子齿顶宽度的减少

$$C_{S2} = (t_2 - b_{02})(1 - K_Z)$$

$$= (14.5727 - 1)(1 - 0.53)$$

$$= 6.379$$

$$C_{S2} = 6.379$$

103. 起动时定子槽单位
漏磁导

$$\lambda_{S1(st)} = K_{U1}(\lambda_{U1} - \Delta\lambda_{U1}) + K_{L1} \cdot \lambda_{L1} =$$

$$0.916667(0.3842 - 0.14815) + 0.9375 \times 1.237789$$

$$= 1.3768$$

$$\lambda_{S1(st)} = 1.3768$$

式中:

$$\Delta\lambda_{U1} = 0.14815$$

104. 起动时定子槽漏抗

$$\bar{x}_{S1(st)} = \frac{\lambda_{S1(st)} - \lambda_{S1}}{\lambda_{S1}} \bar{x}_{S1} = \frac{1.3768 - 1.5126}{1.5126} \times 0.21496$$

$$= 0.51153Cx$$

$$\bar{x}_{S1(st)}$$

$$= 0.51153Cx$$

105. 起动时定子谐波漏
抗

$$\bar{x}_{d1(st)} = K_Z \cdot \bar{x}_{d1} = 0.53 \times 0.4945Cx = 0.262Cx$$

$$\bar{x}_{d1(st)}$$

$$= 0.262Cx$$

106. 定子起动漏抗

$$\bar{x}_{1(st)} = \bar{x}_{S1(st)} + \bar{x}_{d1(st)} + \bar{x}_{el}$$

$$= (0.51153 + 0.262 + 0.2113)Cx$$

$$= 0.03767$$

$$\bar{x}_{1(st)} = 0.03767$$

107. 考虑到挤流效应的
转子导条相对高度

$$\xi = 0.1987 h_B \sqrt{\frac{b_B \cdot f}{b_R \cdot \rho_B}}$$

$$= 0.1987 \times 31.5 \times \sqrt{\frac{50}{4.34}}$$

$$= 21.2446$$

$$\xi = 21.2446$$

式中: h_B

$$h_B = 31.5\text{mm}$$

$\frac{b_B}{b_R}$	$\frac{b_B}{b_R} = 1$	
ρ_B	$\rho_B = 4.34$	$\rho_B = 4.34$
108. 转子挤流效应系数	$\frac{r_{\sim}}{r_0} = 2.106836$	$\frac{r_{\sim}}{r_0} = 2.106836$
	$\frac{x_{\sim}}{x_0} = 0.25$	$\frac{x_{\sim}}{x_0} = 0.25$
109. 起动时转子槽单位漏磁导	$\lambda_{S2(st)} = \lambda_{U2(st)} + \lambda_{L2(st)} = 0.06776 + 0.83541$ $= 0.90317$	$\lambda_{S2(st)} = 0.90317$
式中:	$\lambda_{U2(st)} = \lambda_{U2} - \Delta\lambda_{U2} = 0.5 - 0.43224$ $= 0.06776$	$\lambda_{U2(st)} = 0.06776$
	$\Delta\lambda_{U2} = 0.43224$	$\Delta\lambda_{U2} = 0.43224$
	$\lambda_{L2(st)} = \frac{x_{\sim}}{x_0} \cdot \lambda_{L2} = 0.25 \times 3.341641 = 0.83541$	$\lambda_{L2(st)} = 0.83541$
110. 起动时转子槽漏抗	$\bar{x}_{S2(st)} = \frac{\lambda_{S2(st)}}{\lambda_{S2}} \bar{x}_{S2} = \frac{2.73268}{3.841641} \times 0.05984$ $= 1.11284 \text{ Cx}$	$\bar{x}_{S2(st)} = 1.11284 \text{ Cx}$
111. 起动时转子谐波漏抗	$\bar{x}_{d2(st)} = K_Z \cdot \bar{x}_{d2} = 0.53 \times 0.6619 \text{ Cx}$ $= 0.3508 \text{ Cx}$	$\bar{x}_{d2(st)} = 0.3508 \text{ Cx}$
112. 起动时转子斜槽漏抗	$\bar{x}_{SK(st)} = K_Z \cdot \bar{x}_{SK} = 0.53 \times 0.2216 \text{ Cx}$ $= 0.11744 \text{ Cx}$	$\bar{x}_{SK(st)} = 0.11744 \text{ Cx}$
113. 转子起动漏抗	$\bar{x}_{2(st)} = \bar{x}_{S2(st)} + \bar{x}_{d2(st)} + \bar{x}_{e2} + \bar{x}_{SK(st)}$ $= (1.11284 + 0.3508 + 0.11744 + 0.098) \times 0.03825$ $= 0.064225$	$\bar{x}_{2(st)} = 0.064225$
114. 起动总漏抗	$\bar{x}_{(st)} = \bar{x}_{1(st)} + \bar{x}_{2(st)} = 0.064225 + 0.03767$ $= 0.101895$	$\bar{x}_{(st)} = 0.101895$

115. 转子起动电阻	$\bar{r}_{2(st)} = \left[\frac{r_2}{r_0} \left(\frac{l}{l_B} \right) + \frac{l_B - l}{l_B} \right] \bar{r}_B + \bar{r}_R$ $= \left(2.106836 \times \frac{200}{240} + \frac{40}{240} \right) 0.019855$ $= 0.03761$	$\bar{r}_{2(st)} = 0.03761$
116. 起动总电阻	$\bar{r}_{(st)} = \bar{r}_1 + \bar{r}_{2(st)} = 0.023637 + 0.03761 = 0.061$	$\bar{r}_{(st)} = 0.061$
117. 起动总阻抗	$\bar{Z}_{(st)} = \sqrt{\bar{r}_{(st)}^2 + \bar{X}_{(st)}^2}$ $= \sqrt{0.061^2 + 0.101895^2} = 0.118758$	$\bar{Z}_{(st)} = 0.118758$
118. 起动电流	$I_{st} = \frac{I_{KW}}{\bar{Z}_{(st)}} = \frac{13.1579}{0.118758} = 110.7959$ $i_{st} = \frac{I_{st}}{I_1} = \frac{110.7959}{17.91} = 6.1861$	$I_{st} = 110.7959$ $i_{st} = 6.1861$
119. 起动转矩	$T_{st} = \frac{\bar{r}_{2(st)}}{\bar{Z}_{(st)}} (1 - S_n) = \frac{0.03761}{0.0141} (1 - 0.02298)$ $= 2.606$	$T_{st} = 2.606$

第三章 电机优化设计方案

3.1 相关理论分析

电机性能的提高要求效率、功率因数、起动转矩、最大转矩要有所提高，而起动电流则要求降低。

要提高效率，可从以下几个方面进行：

1、减少定子铜耗 可以通过增大导线截面积、减少每相串联导体数、减少绕组端部长度等方法来实现。不过这样会使槽满率增大，增加嵌线工艺的难度；用铜量增加，漏抗减小，起动电流增高；齿、轭部磁密增高，铁耗增加，功率因数会降低。

2、减少铝耗 通过增大转子截面积、增大端环尺寸等措施来降低转子绕组电阻，但这样会导致齿、轭部磁密增高，起动转矩降低。

3、减少杂散损耗 采用谐波含量较小的定子绕组形式、采用尽槽配合、采用斜槽以及通过工艺处理等措施来实现，也可以适当增大气隙，但这样会使功率因数降低，漏抗增加，起动转矩和最大转矩下降。

4、减少机械损耗 可通过减小风扇尺寸、选择较好质量的轴承润滑油、提高装配质量得以实现，但此过程可能会使温升升高。要加强冷却措施。

5、减少铁耗 主要是减少铁心的磁通密度，可以通过减小定子内径、增加齿宽、增加铁心长等，这样会导致转子齿轭部磁通密度增高，用铁量增加。

提高功率因数的方法：

功率因数的高低与定子电流的无功分量 I_{10} 的大小直接有关。要提高功率因数，应设法降低 I_m （缩小定转子槽面积、降低各部分磁密；减小气隙；增加每槽导体数；增大定子内径，放长铁心）或 I_x （增大定转子槽宽，减小槽高以降低 X_j ）使他们的和 I_{10} 降低。

提高起动转矩和最大转矩的方法：

起动转矩和最大转矩是由于漏电抗大和转子电阻小所致。减少槽漏可以增加定转子槽口宽来实现。还可以减少定子绕组每槽导体数、减小转子槽面积和端环面积来提高起动转矩与最大转矩。

降低起动电流：

起动电流大是因为漏抗小。可以通过增加每槽导体数、加大槽深、减小槽口宽来增加漏抗。这会使铁耗增加，效率降低，起动转矩减小，轭部磁密变大，功率因数降低。

3.2 电磁调整方案

1、节省材料：节约有效材料主要是减少电机的体积，可以减小定子外径和铁心长，也可以减少导体总数和导线截面积。电磁负荷 A 、 B_j 值决定了利用系数，直接影响电机的有效材料利用量，可以采取提高电磁负荷的办法来缩小电机的体积。

此方案中，将铁心长减小 5mm，然后在线规的选择上选择 2 跟直径为 1.04mm 的导线代替一根直径 1.5mm 的导线，这样导体总截面积由 1.767mm^2 减为 1.699mm^2 ，调试结果显示，五项指标都达到要求，用铜量 10.44423kg ，比原方案的 11.015kg 少了 0.5777kg 用铁量 117.6828kg ，比原方案的 120.7kg 减小了 3.0172kg ，所用的材料虽有所减少，但是其功率因数、效率都有所降低，最大转矩与起动转矩都有所提高，起动电流比原方案提高了。

分析：铁心长度减小，定、转子的齿部轭部截面积变小，定、转子的齿部轭部磁密增大，导致总安匝变大，从而满载磁化电流变大，满载电流无功部分增大，功率因数降低；由于满载电流无功部分增大，使得定子电流变大，从而定子铜损会升高，导致效率降低；由于铁心长度减小，定子相电阻会有所降低，最大转矩增高；转子起动电阻变大，起动转矩降低。铁心长度减小，导致起动总漏抗减小，使得起动电流升高。

2、提高性能的调整方法：提高效率的调整方法有多种，此处通过改变槽行来进行调整，本方案中 b_1 增加 0.1mm ， R_1 也增加了 0.1mm ，槽深增加了 2.1mm ，转子槽高减小 0.2mm ，端环面积减小 15mm^2 ，同时将气隙减小 0.05 个毫米，结果显示，五项指标都通过，效率、起动转矩倍数得到提高（因为转子电阻增大），起动电流由 6.1861 减为 6.159533A 。功率因数比原方案有所降低，可以通过减小气隙、增加每槽导体数来获得提高。

分析： b_1 增加 R_1 也增加使得定子齿、轭磁密有所增大，总安匝变大，满载磁化电流变大，会使功率因数降低；定子齿截面积变小，齿体积也相应减小，铁耗降低，效率得到提高；转子槽面积与端环面积减小，使得转子起动电阻减小，起动转矩倍数增大；气隙减小，谐波漏抗增大，起动总漏抗变大，使得起动电流降低。性能得到改善。

3、既节省材料又提高性能：要求将以上方案进行综合考虑，在此方案中，保留方案 2 中的气隙不变， b_1 增加了 0.5mm ， R_1 增加了 0.1mm ，槽深增加了 2mm ，转子槽也进行了调整， br_2 增加了 0.1mm ， hr_3 增加了 1mm ，端环截面积减少 10mm^2 ，铁心长减小 5mm ，每槽导体数增加 1，结果显示，仍然通过了五项指标，效率有了明显的提高，起动转矩倍数也增加了，起动电流减小为 6.159A ，选择的线规为 $2-1.12\text{mm}$ ，使得用铜量稍有增加，但用铁量减少到 117.6828kg ，总质量还是减小了达到了节约材料与提高性能的双重目的。

分析：同样的原因，增大了槽宽使得齿磁密变大，功率因数稍有降低；铁心长度的减小与所选线规总截面积变大使得定子绕组的电阻减小，转子槽面积与端环面积减小，使得转子起动电阻减小，每槽导体数增加，满载磁化电流减小，定子电流减小，这些都使效率得到提高；转子起动电阻减小，起动转矩倍数增加；每槽导体数增加，漏抗系数增大，总漏抗减小，起动漏抗也减小，起动电流降低。

第四章 AutoCAD 简介及其绘图

4.1 AutoCAD 简介

AutoCAD 是目前国内外计算机系统最为普遍应用的一种高性能绘图软件包。AutoCAD 提供了用户所需要的图形体,如画直线、画圆、画弧、自动标尺寸、文本字符串、汉字等等。只要输入命令 Command,就可以告诉 AutoCAD 用什么图形实体作图。命令可以在键盘上输入,或者从屏幕或数字化仪菜单中选择,然后根据显示屏幕上的提示,再键入被选实体的某些参数,这个参数就是图形中各个点的坐标,这样就可以画出所需要的图形。

AutoCAD 图形编辑功能非常强,提供多种方式对图形进行修改,它能把图形放大、缩小、删除、移动、旋转、复制拷贝以形成重复的图形,还可以把图形作为一个子模型存入磁盘,随意插入到所需要的图形中。

AutoCAD 可以自行标注图形尺寸及公差,给应用者带来方便。AutoCAD 还备有实用性强的线型库,字型库以及汉字字库,给绘图提供了更多的方便。因此,一般来说,凡手工可以绘制的线型、图形和汉字都可以由 AutoCAD 生成。

AutoCAD 的绘图过程与手工步骤基本类似。使用 AutoCAD 并非难事,只要使用者具有基本的绘图常识和上机操作的基本训练,进入 AutoCAD 后,根据给定的绘图任务,输入绘图命令,按照提示一一作答,就能画出所需要的图形。

4.2 AutoCAD 的基本功能

- (1) 基本绘图功能 点(Point)、直线(Line)、圆(Circle)、圆弧(Arc)、椭圆(Ellipse)、矩形(Rectang)、实心填充(Solid)、圆环(Doughnut)、正多边形(Polygon)、文字(Text)、多段线(Polyline)、样条线(Spline)、多线(Mline)、三维平面(3Dface)、三维面(Pface)、三维多段线(3Dpoly)、各种三维曲面、各种三维实体。
- (2) 图形编辑功能 删除(Erase)、移动(Move)、旋转(Rotate)、比例(Scale)、修改(Change)、断开(Break)、延长(Extend)、修剪(Trim)、拉伸(Stretch)、编辑文字(Ddedit)、编辑多段线(Pedit)、编辑样条线(Splinedit)、编辑多线(Mledit)。
- (3) 图形构造功能 复制(Copy)、镜像(Mirror)、阵列(Array)、偏移(Offset)、圆角(Fillet)、倒角(Chamfer)、三维镜像(3DMirror)、三维阵列(3DArray)、三维旋转(3Drotate)。
- (4) 显示控制功能 视图缩放(Zoom)、重画(Redraw)、重生成(Regen)、扫视(Pan)、视图(View)、视点(Vpoint)、动态视图(Dview)、视口(Vports)、用户坐标系(UCS)、模型空间(Model space)与图纸空间(Paper Space)。
- (5) 工具 图层(Layer)、图形块(Block)、尺寸标注(Dim)、图案填充(Bhatch)、正交(Ortho)、光标捕捉(Snap、Grid)、目标捕捉(Osnap)。
- (6) 三维实体造型 对三维实体实施各种三维造型,实行布尔逻辑运算。
- (7) 效果渲染 对三维模型进行浓淡着色处理。
- (8) 定制与图型数据 根据绘图的需要,创造形、线型、图案、菜单、工具栏等,输入输出图形数据交换文件(DXF 文件)。

(9) 程序开发设计 通过 Visual LISP 和 VBA 程序设计，可进行二次开发，扩充软件的功能。

4.3 AutoCAD 绘图

本次设计所绘制 AutoCAD 图有定子冲片图 1 张，三相异步电动机总装备图 1 张、定子冲片图 1 张、转子装备图 1 张、绕组联接图（只画一相）1 张，见附录部分。

获取更多资料 微信搜索蓝领星球

总 结

异步电机的设计是一个复杂的过程，要想达到理想的设计要求，需要考虑多方面的的因数，进行全局的把握。

在进行方案的调整中，常有顾此失彼之感。调节一个参数，使得一个性能指标提高后，另一个性能指标就会下降，常常如此，这就要求我们对电机的各参数之间的联系要有深刻认识。比如，考虑到气隙的影响，功率因数与起动转矩间就存在着矛盾，为降低励磁电流，改善功率因数，气隙应尽量小，而气隙小，谐波磁场及谐波漏抗增大，使起动转矩降低，这些此起彼伏的现象时常会出现，这就要求我们在各参数间权衡利弊，以图最优。

对于 AutoCAD 的应用，对我来说还是第一次，凭借一些计算机软件的基础知识，打开 AutoCAD，找到一些直线、圆的图标点击后就可以在绘图框中进行简单的绘图，起初好多东西不知道用，画绕组连接图时，一开始是用直线直接连接 1 号槽和 9 号槽，2 号槽和 10 号槽……后来学会了偏移与图层的应用后，才发现不必用蛮力去连接，2 号槽和 10 号槽的连接可以通过 1 号槽和 9 号槽连线的偏移来实现，如此等等，学会了应用之后，许多看来复杂的图形变得容易的多了。定子的槽就是最好的一例。AutoCAD 的功能非常强大，应用也非常广泛，这次的简单的学习是远远不够的，作为工科学子，即将踏上工作岗位，学习一门绘图软件具有非常重要的意义。只要我们平时多加学习，在加上平时如果多多上机操作训练，就一定能熟练掌握与应用 AutoCAD。

参考文献:

- [1]南昌大学电气自动化系电机教研室:《电机设计资料汇编》中小型异步电动机设计, 2004。
- [2]陈世坤主编:《电机设计》(第 2 版),机械工业出版社, 2000。
- [3]戴文进主编:《电机学》,航空工业出版社, 1995. 9。
- [4]上海电器科学研究所编:《中小型电机设计手册》,机械工业出版社, 1994. 7。
- [5]季杏法主编:《小型三相异步电动机技术手册》,机械工业出版社, 1987。
- [6]彭友元主编:《电机绕组手册》,辽宁科学技术出版社, 1995 . 5。

设计感想与致谢

本次设计的过程是一次对大学学习总结的过程，通过本次设计，让我们了解设计的基本知识，熟悉设计的过程，掌握设计一些基本方法，为以后的进一步学习打下基础。

本次进行的是三相异步电动机的设计，手算程序是按照资料上一步步算下来的，起初以为电机设计是这么的容易啊，就是按照步骤一步步算下来就行了，可是后来经过几次返工之后才意识到原来设计是那么的不容易，要具备全局统筹的能力，从局部到整体，逐步形成完整的设计思路。设计过程中遇到不少的困难，这于我们平时只学书本知识而很少参与社会实践有很大关系，较少的实践让我们对电机的认识很不全面，对电机的制造工艺知之甚少，在设计过程中遇到很多问题，如绝缘厚度的选择、导线规格的选择等与工艺有关的参数选择上很是被动，对好多初值的确定也没有基准，只能按照设计要求计算下去。不过在自己的努力、老师的辛勤指导以及同学的帮助下，很快形成设计思路，并很快学习了电机制造工艺的相关知识，保证了设计的顺利进行。

在设计的过程中，学习了电机的各参数之间以及各参数与电机各性能之间的关系，使以前的知识得到深化，更深刻地理解电机的理论知识。在设计中也提高了查阅文献资料的能力与培养独立获取知识与学习的能力。

两个多月的毕业设计时间里，各位指导老师辛勤工作，热心帮助我们解决问题。他们工作认真，治学严谨，潜移默化中使我们逐渐形成了科学的思维方式与严谨的求学态度，也使我们具备了科学工作者所必备的基本素质，为以后个人的发展奠定坚实的基础。在此真心感谢！

南昌大学

NANCHANG UNIVERSITY

外文资料原文及译文

(2002—2006 年)



学 院：信息工程学院 系 电气工程与自动化

专 业：电气工程及其自动化

班 级：电机电器 022 班

学 号：02131107

学生姓名：刘常洲

指导教师：肖倩华

起讫日期：2006.3.13—2006.6.9

ROTOR SLOT AND TURN INSULATION

The most widely used AC motor is the squirrel cage induction motor (Section 1.2.3). The rotor consists of heavy copper, brass, or aluminum alloy bars welded to end rings and embedded in iron laminations. Alternatively, the windings may be cast-in-place aluminum alloy. The winding, without the laminations, resembles a squirrel cage, hence the name squirrel cage motor. The squirrel cage induction motor operates without sliding electrical contacts of any kind. There is generally no applied insulation between the conductors and the laminations, as the difference in conductivity of copper or aluminum versus iron laminations and the low voltage at which the rotor operates obviates the need. Most other types of rotors in motors and generators operate at higher voltages and have both ground and turn insulation (Section 1.5). Rotors in smaller machines are usually random-wound, using round enameled (magnet) wire (usually with a varnish dip) that serves both as turn and ground insulation. For higher voltage rotors, with either random- or formwound coils, separate slot and turn insulation is used. This insulation is usually made from formed pieces of materials that are set in place before the windings are installed. Alternatively, some small rotors use an electrostatic coating process to apply polymer powders to the slots for insulation.

Materials selected for slot and turn insulation will vary depending on the temperature class of the winding and the voltage and power rating of the machine. Formed sheet materials may be of aramid paper (such as Nomex™ by Dupont) for medium-size generators or laminates of plastic films and nonwoven layers for smaller machines. A very common slot insulation is called DMD [for a lamination of Dacron, Mylar, Dacron (Dupont trademarks)], with a suitable adhesive. DMD is made by Dupont and other suppliers from polyethylene terephthalate polyester resin in film and nonwoven fiber form. A series of similar laminates are available for use in machines with different temperature classes. Films in use include polyethylene naphthate, nylon, and polyimides. The nonwovens include cotton paper, unbleached wood pulp kraft paper, aramid fiber mat, fiberglass mat, and the combination of polyester and fiberglass in mat form. Similar materials are used for turn insulation in the form of pieces cut from sheets or rolls. For round rotor fields with heavy copper coils, thin laminates of fiberglass cloth and polyester or epoxy resin are used.

The slot insulation for two- and four-pole round rotors (Section 1.5.2) has evolved over time from a mica-splittings-based composite with kraft paper, glass, or asbestos cloth and bonding resins to premolded slot cell or slot armor pieces. Several methods are in use to fabricate these insulation pieces. They include individual moldings made in compression presses, step-press compression molding, and hydraulic or autoclave molding of prepreg lay-ups in sheet metal molds. The long sections from the latter two methods are cut and trimmed into individual pieces. Polyester resins are used to preimpregnate glass fabric for individually compression molded pieces, whereas epoxy resin prepregs with glass cloth are used for the step-press process. This process may also add special layers of aramid fleece and high-temperature-resistant imide films to increase the crack resistance and electrical breakdown strength. The hydraulic and autoclave molding process may also use these materials, although continuous-filament nonwoven fiberglass sheets, preimpregnated with epoxy resins by 3M Company under the Scotchply trade name, have been the

most successful. The resins selected for slot cell insulation must be physically tough, resistant to thermal aging, and have a glass transition temperature (TG) for the cured material that is above the peak operating temperature. The TG is the temperature at which the cured resin softens or changes from a crystalline to a rubbery or amorphous state. Operating above this temperature allows the resin to creep out of the reinforcement, destroying the insulation pieces.

ROTOR WINDING INSULATION SYSTEMS

Most hydrogenerators and low-speed synchronous motors rated up to about 50 MW have salient pole rotor windings. As indicated in Section 1.5.1, the design used on most motors and generators rated less than a few megawatts is called a multilayer wire-wound type. In this design, the insulated magnet wire, which usually has a rectangular cross section, is used. Each pole is constructed with many hundreds of turns of magnet wire several layers deep, wrapped around a laminated steel pole piece. The turn insulation is the magnet wire insulation. Insulating washers and strips are placed between the magnet wire and the laminations to act as the ground insulation. Often, the entire pole may be dipped in an insulating liquid to glue the various components together.

Salient pole rotors in machines larger than about 50 MW, and those operating at 1200 rpm and above, favor the “strip on edge” design since it can better withstand rotational centrifugal forces (Section 1.5.1). The poles for this type of winding can be made from either laminated or solid steel. In the case of the solid steel pole type, used on larger high-speed machines, the pole tips can be bolted on or integral. In this case, a thin copper strip is formed into a “picture frame” shape and the coils are usually fully processed, including varnish impregnation, before they are installed on the poles. The only exception is the integral pole type construction for which picture frames have to be connected together to form a coil as they are installed on the pole. Separators act as turn insulation to separate each copper frame from one another. On some copper frames, especially near the pole face, an insulating tape may be applied to the copper to increase the creepage distance. The copper picture frames are connected in series to make the coil. As with the multilayer salient pole design, the winding is isolated from the grounded pole by insulating washers and strips.

The bonding varnishes for salient pole designs are selected according to the temperature class of the machine and the hardness and elasticity required for the application. The mica usually chosen for the ground insulation is clear muscovite mica, bonded with shellac, shellac-epoxy, or vinyl-alkyd. Composites of mica splittings, aramid sheets, glass fabrics, and epoxy resins are also used.

COLLECTOR INSULATION

Unless the rotor winding is of the “brushless” type (in which the DC comes from a rectified AC current induced in an auxiliary winding on the rotor), collector rings are needed to bring the positive and negative DC current to synchronous rotor windings. Collector rings are also needed for wound induction rotor windings. The collector assembly is generally manufactured as a separate item that is heat-shrunk onto the rotor shaft at assembly. A wide choice of materials is available for the insulation

needs. A common choice for ring insulation is molding mica. Molding mica is a B-stage material that is applied by heat softening to the collector shell or hub along with additional bonding varnish. After wrapping, the mica is subjected to high compressive force by, for example, wrapping with steel wire under tension. The unit is then oven baked to cure the varnish, stripped of the wire, and machined in a lathe to a closely specified outer diameter. The steel collector rings (copper or copper alloy rings are usually used on wound-rotor machines) are then heat-shrunk onto the mica ground insulation. Modern practice is to apply polyester-resin -impregnated fiberglass rovings, under winding tension, between and beyond each ring. After resin curing, the excess material is machined off and a final coat of sealing varnish is brushed over the fiberglass bands and cured.

The collector brush-rigging insulation is generally made from molding compounds, laminated boards, or tubes made from paper, cotton, or glass fibers suitably bonded and impregnated. The resins chosen for moisture-resistant surfaces of these pieces are very important for good operation.

Electrical Insulation for Rotating Machines : Design, Evaluation, Testing, and Repair

IEEE Press Series On Power Engineering

by Stone, Greg.

Publication: Hoboken, NJ John Wiley & Sons, Inc. (US), 2004.

获取更多资料 微信搜索 蓝球

槽绝缘与匝间绝缘

鼠笼式感应电动机是应用最广泛的交流电机。转子由紫铜，黄铜，或铝合金焊接成圆环形状嵌置在钢片中。绕组也可以由铝合金浇铸而成。由于其绕组类似鼠笼子，因此命名为鼠笼式电动机。鼠笼式感应电动机运行不需要换向片等电接触设备。一般在导体和硅钢片之间没有应用的绝缘材料，因为铜或铝对硅钢片在传导性上的差别使得转子在低压运行时不需要绝缘。电动机和发电机里的许多其他类型的转子在更高的电压下运行时需要对地绝缘和匝间绝缘。在小型电机里的转子经常很容易受到损伤，使用圆的上釉导线可以起到对地绝缘和匝间绝缘的作用。对于带有任意线圈的高压转子，需使用分槽孔和匝间绝缘材料。这种绝缘材料通常在绕组被安装之前被放置在成型的硅钢片中。一些小转子可以选择使用聚合物粉末通过静电涂层过程涂在上作为绝缘材料。

槽绝缘和匝间绝缘材料由绕组的温度、电机的电压和额定功率来决定。板料材料可以是用于中等大小发电机漆糊（芳族聚酰胺）或是用于小型电机的碾压的塑料胶膜粘合布。一种非常普通槽绝缘材料 DMD [为 Dacron 的分片，聚酯薄膜，Dacron (Dupont 商标)]，应用了适当的胶粘剂。DMD 由 Dupont 和其它供应商所做的聚乙烯对苯二酸盐树脂膜和非编织的纤维形成。一系列相似的多层 [粘合] 布可方便地用在有不同温度等级的机器上。使用的绝缘膜包括聚乙烯、尼龙，和聚酰亚胺。非编织的纺织品包括棉花纸，未漂白木浆牛皮纸，芳族聚酰胺纤维层，玻璃纤维层，和聚酯与玻璃纤维膜的组合体。类似的材料以片断的形式被用作切自钢板或轧制机的匝间绝缘。对使用铜线圈的转子，所使用的绝缘材料是稀薄碾压玻璃纤维布料和聚酯或环氧树脂。

二极和四极转子所用的槽绝缘对改铸槽孔单元或槽防护片从时间上经历了从基于云母、牛皮纸、玻璃或石棉布料和合成树脂。这些绝缘材料片断的几种制造方法正在使用中。它们包括各自的源于压缩机的造型，按步压缩造型，并且在金属板模子中对聚酯胶片水压或高压造型。从后面二个方法中得到的长的部分被削减和整理到各自的片断中。聚酯树脂被用来预浸被单独压缩铸造的玻璃织品片断，但是环氧树脂与玻璃薄片被用于按步过程。这个过程可以加入毛织物和高温耐磨的硫亚氨膜以增加气隙绝缘和电气故障强度。水压和热压过程也可以使用这些材料，尽管 3M 公司以 Scotchply 为商标的连续细丝非编织的玻璃纤维板料与环氧树脂是最棒的。被选择为槽绝缘材料的树脂必须是很强的韧度，抗老化性能好的，保持绝缘的软化温度 (TG) 远在运行时所能达到的温度之上。TG 是所用树脂变柔软或从水晶变为一个橡皮或无定形的状态的温度。运行在这个温度之上，会使树脂逐渐软化，从而毁坏绝缘材料。

转子绕组的绝缘系统

多数 50 兆瓦以上的水轮发电机和低速同步电动机，采用的是突极的转子绕组。依照 1.5.1 节所述，多数容量小于几兆瓦的电动机和发电机设计称为多层导线（绕组）类型。在这种设计中使用的绝缘磁铁导线通常有一个长方形横剖面，也即扁形导线。每极都由几个几百匝的线圈缠绕在硅钢片叠压成的铁心上所构成。匝间绝缘就是磁铁导线间的绝缘。绝缘的垫圈和小条被安置在磁铁导线和分片之间作为对地绝缘材料。通常，整个磁极可被浸在绝缘液体以胶合各个的部分。

50兆瓦以上的突极电机,运行在1200 rpm及以上时,设计时倾向“导条放于边缘”,因为它可能改善承受旋转的离心力量(1.5.1节)。这种磁极的绕组可由者叠压钢片的或实心钢做成。实心钢磁极被用在大型高转速的电机里。磁极端被固定为一整体。在这种情况下,稀薄的铜条被做成“画框”形状,线圈通常也被充分地处理,包括在他们被安装在极身上之前注入油漆。唯一的例外是隐极类型的“画框”结构在装在极身上时必须连接在一起形成线圈回路。不可缺少杆状分离器作为匝间绝缘材料分离各个铜框架。在一些铜框架,特别是在磁极表面附近,可用绝缘胶带来增加铜的移动距离。铜“画框”被连接为一串线圈。多层线圈的突极电机设计中,绕组被绝缘垫圈隔离从而与地绝缘。在突极电机设计中,所用绝缘油漆应根据温度等级、机械强度和弹性要求等因数来选择。云母中的白云母,与紫胶、环氧紫胶或乙烯基醇酸树脂合成体通常被选择为地面绝缘材料。也可以使用云母、防护板料、玻璃织品和环氧树脂的合成体作为对地绝缘材料。

集电器绝缘

除非转子绕组是“无刷”型(交流电流产生直流电流的辅助绕组),否则就需要集电环带来正的和负的直流给同步转子绕组。绕线转子绕组也需要集电环。集电器组装一般是作为热收缩转子轴在组装中的一个分开的项目。在较宽广的范围内选择绝缘材料是很方便的。通常所选择的圆环绝缘材料是造型云母。造型云母是B级绝缘材料,发热变软型的,它与机壳与插孔与另外的接合油漆一起,包裹好以后的云母有较强的抗压能力。例如,与绷紧钢绳的钢绳包裹在一起然后放在烤箱烘烤油漆,剥离导线,然后在车床上根据指定的外径进行加工,钢的集电环(铜或铜合金圆环通常被使用在绕线转子机器)然后热收缩成云母地面绝缘材料。现代实践中应用聚酯树脂浸渍的玻璃纤维粗沙,在绕组紧绷之下,在和在各个圆环之外之间。在树脂固化以后,剩余材料离开机器并封闭漆膜最后涂料刷在玻璃纤维之上然后固化。集电极电刷、配置模型的绝缘通常是利用造模化合物做成的,叠片纸板,或纸做的管子,棉花或玻璃纤维适当地融合成树脂浸渍胶合板。为了更好地操作,选择树脂作为表面抗湿材料显得非常重要。

《旋转电机的电气绝缘》:设计、评估、测试与维修

IEEE 出版之电力工程系列

Stone, Greg 著

出版: Hoboken, NJ John Wiley & Sons, Inc. (US), 2004.

附 录（II）三设计方案结果

获取更多资料 微信搜索蓝领星球