



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
高等职业技术教育机电类专业规划教材

电工专业技能实训

张仁醒 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



电

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
高等职业技术教育机电类专业规划教材

电工专业技能实训

主 编 张仁醒
副主编 张迎辉 周 烨
参 编 张志成 林泽从 唐上峰 彭庆宪
主 审 张永枫



机械工业出版社

本书依据国家职业标准和职业技能鉴定规范,参照深圳市中级电工职业技能考核要求,结合电工行业特点,系统阐述了中级电工必须掌握的知识内容和职业能力。

全书分为3个职业能力训练模块和1个理论知识考核模块,职业能力训练模块主要内容包括电动机控制技术、电子技术和电工测量技术。每个职业能力训练模块中首先介绍完成实训项目所需的必备知识,然后介绍实训项目,每个实训项目重点介绍实训内容与步骤、故障分析,以训练学生电工专业操作技能,培养学生分析实际问题和解决实际问题的综合能力;理论知识考核模块总结了电工考核知识点,方便培训、考核鉴定和读者自测。

本书可作为高职高专院校机电类专业电工技能实训教材,也可作为非电类学生“一专多能”系列课程的实训教材,还可作为企业电工培训和维修电工晋级考试的参考教材。另外,还可供各类职业院校的实践指导教师和从事电气、电子技术工作的工程人员参考。

为方便教学,本书配有免费电子课件,凡选用本书作为授课教材的院校,均可来电索取。咨询电话:010-88379375; E-mail: cmpgaozhi@sina.com。

图书在版编目(CIP)数据

电工专业技能实训/张仁醒主编. —北京:机械工业出版社, 2010.5

普通高等教育“十一五”国家级规划教材. 高等职业技术教育机电类专业规划教材

ISBN 978-7-111-30508-8

I. ①电… II. ①张… III. ①电工技术—高等学校:技术学校—教材 IV. ①TM

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第075208号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:王宗锋 责任编辑:王宗锋 版式设计:霍永明

责任校对:陈延翔 封面设计:鞠杨 责任印制:杨曦

保定市中国画美凯印刷有限公司印刷

2010年5月第1版第1次印刷

184mm×260mm·14.75印张·362千字

0001—4000册

标准书号:ISBN 978-7-111-30508-8

定价:25.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010)68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010)88379649

读者服务部:(010)68993821 封面无防伪标均为盗版

前 言

近年来,我国高等职业教育得到了蓬勃发展,“以就业为导向”的教学改革不断深化,以职业能力为依据组织课程内容逐渐取代了以往的实验和认知课程。作者在总结了十几年培养生产第一线应用型技术人才经验的基础上,调研了不同经济形式和不同技术应用程度的企业对生产第一线技术人才的要求,依据国家职业标准和职业技能鉴定规范,参照深圳市电工职业技能考核要求,结合电工行业特点,组织经验丰富的讲师、工程师、技师等编写了《电工技能实训》这套教材。

《电工技能实训》教材共分三册,即《电工基本技能实训》、《电工专业技能实训》和《电工高级技能实训》,可作为高职高专院校相关专业初级、中级、高级考工使用的模块化一体化教材。为高技能人才培养搭建了科学的模块化、组合型、进阶式培训架构。

本教材以现行电器和设备维修、电气施工及验收规范为依据,以实用、够用为宗旨,力求精练、科学、规范、先进。教材中各模块均遵循人的认知规律和技能养成规律来精心设计实训项目,并将理论知识与动手实践相融合(即一体化),各模块相对独立。模块顺序由简到繁、由易到难安排,形成岗位或岗位群的以职业能力为核心的技能培训系统。

本教材较全面地介绍了电工专业知识及专业技能要求,将实训模块分成17个项目,包括电动机控制技术、电子技术和测量技术。完成全部训练项目和理解理论知识题后,能达到职业标准中的中级电工水平。

本书适合边教、边启发、边做、边总结的教学,在每个项目中,先对考核要求、相关知识点、难点、方法、技巧予以讲解,在此基础上启发学生独立完成实训项目。各院校可根据自身的实训条件、设备情况、专业方向和学生情况,对教材的内容和进度作适当灵活的调整。

本教材由张仁醒任主编,张迎辉、周焯任副主编,参加编写的还有张志成、林泽从、唐上峰、彭庆宪,全书由张永枫主审。

由于编写时间仓促,加之编者水平有限,书中错误和不当之处在所难免,恳请读者提出批评和建议。

编 者

目 录

前言

模块1 电动机控制技术 1

1.1 必备知识 1

1.1.1 三相异步电动机的结构与 工作原理 1

1.1.2 三相异步电动机绕组 3

1.1.3 三相异步电动机的转矩和 机械特性 8

1.1.4 三相异步电动机的维护 15

1.1.5 直流电动机 19

1.1.6 直流电动机的检修 23

1.1.7 其他电机 25

1.1.8 电动机参数计算 28

1.1.9 照明负荷的计算 32

1.1.10 动力用电负荷的计算 33

1.1.11 低压开关的选用 35

1.1.12 低压保护电器的选用 36

1.1.13 低压执行电器的选用 37

1.1.14 导线截面积与载流量的计算 ... 37

1.1.15 电路的保护与低压电器的 选择 41

1.1.16 电动机电气控制原理图的 识读与测绘 45

1.1.17 电气控制电路的安装 47

1.1.18 电气控制电路故障的检修 48

1.2 三相交流异步电动机控制实训 52

1.3 多速异步电动机控制实训 83

1.4 直流电动机控制实训 94

模块2 电子技术 104

2.1 必备知识 104

2.1.1 台式数字万用表 104

2.1.2 直流稳压电源 105

2.1.3 信号发生器 105

2.1.4 示波器 107

2.1.5 电子元器件的识别与检测 109

2.2 电子技术实训 114

模块3 电工测量技术 131

3.1 必备知识 131

3.1.1 电工测量指示仪表的正 确选用 131

3.1.2 电动系电流表 134

3.1.3 电动系电压表 134

3.1.4 电动系功率表 135

3.1.5 直流单臂电桥 137

3.1.6 阻抗计算 139

3.1.7 并联电容器提高功率因数的 原理 139

3.1.8 三相变压器 141

3.2 电工测量技术实训 143

模块4 电工技能考核试题精选 159

4.1 电工与电子基础 159

4.1.1 直流电路 159

4.1.2 正弦交流稳态电路 163

4.1.3 三相交流稳态电路 169

4.1.4 晶体管放大电路和振荡电路 ... 171

4.1.5 集成运算放大器及其应用 174

4.1.6 晶闸管及其应用 174

4.1.7 数字电路 178

4.2 维修电工工艺学 179

4.2.1 电气测量 179

4.2.2 低压电器 183

4.2.3 变压器 185

4.2.4 交流电动机 190

4.2.5 直流电机 195

4.2.6 电力拖动控制 196

4.3 内外线安装电工工艺学 197

4.3.1 内外线安装工程常用材料和 工具 197

4.3.2 内外线安装工程常用仪器与 试验	198	4.3.6 电力线路的施工工程	209
4.3.3 高压电器	200	4.3.7 防雷和接地装置	212
4.3.4 10kV 变(配)电所主接线及电气 设备的安装	205	4.4 模拟试卷	214
4.3.5 车间、宾馆与商场电气设备的 安装	207	附录 电工技能考核试题精选参考 答案	220
		参考文献	229

模块1 电动机控制技术

1.1 必备知识

1.1.1 三相异步电动机的结构与工作原理

1. 三相异步电动机的结构

三相异步电动机由定子和转子两大部分组成，定子和转子间的气隙一般为 $0.25 \sim 2\text{mm}$ 。三相笼型异步电动机的结构如图 1-1 所示。

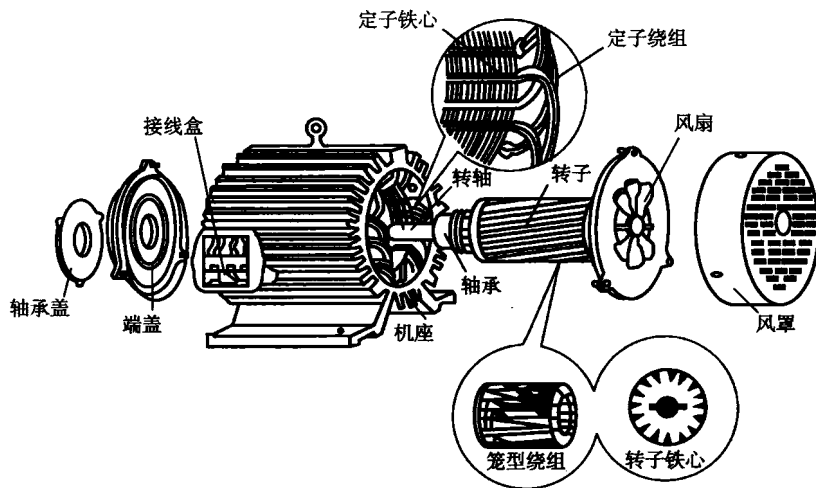


图 1-1 三相笼型异步电动机的结构

(1) 定子 电动机的静止部分称为定子，主要由定子铁心、定子绕组和机座等组成。

1) 定子铁心。定子铁心是电动机磁路的一部分，并放置定子绕组。为了减小定子铁心的损耗，铁心一般用 $0.35 \sim 0.5\text{mm}$ 厚、表面有绝缘层的硅钢片冲制叠装而成。在定子铁心的内圆冲有均匀分布的槽，以嵌放定子绕组。

2) 定子绕组。定子绕组的作用是通入三相对称交流电，产生旋转磁场。将定子绕组在铁心槽内嵌放完毕后，按规律接好线，并把三相绕组的 6 个出线端引到电动机机座的接线盒内。使用时可按需要将其接成星形和三角形。

3) 机座。机座的主要作用是固定定子铁心，并以两个端盖支撑转子，同时可用于保护整台电动机的电磁部分，另外电动机运行时产生的热量还可通过机座迅速散发到空气中。

(2) 转子 转子是电动机的旋转部分，由转子铁心、转子绕组及其他附件组成。

1) 转子铁心。转子铁心也是电动机磁路的一部分，一般用 0.5mm 厚、相互绝缘的硅钢片冲制叠压而成。转子铁心的外圆冲有均匀分布的槽，用来安装转子绕组。转子铁心一般固

定在转轴或转子支架上。笼型异步电动机转子铁心一般采用斜槽结构。

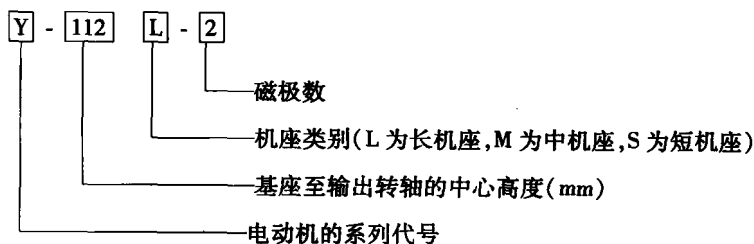
2) 转子绕组。转子绕组的作用是产生感应电动势和电流,并在旋转磁场的作用下产生电磁力矩而使转子转动。根据转子绕组结构不同,三相异步电动机分为笼型和绕线型两种。

3) 其他附件。其他附件包括端盖、轴承、轴承盖、风扇和风罩等。

2. 三相异步电动机的铭牌

电动机的机座上有一块铭牌,上面标出了电动机的主要技术数据,包括型号、额定功率、额定电流、额定电压、额定转速及接法等,可供选用电动机时参考。

(1) 型号 三相异步电动机的型号一般由汉语拼音的大写字母和阿拉伯数字组成。举例说明如下:



(2) 额定功率 P_N 电动机在额定工作状态下,即额定电压、额定负载和额定冷却条件下运行时,转轴上输出的机械功率,单位为 kW。

(3) 额定电流 I_N 电动机在额定工作状态下运行时定子绕组输入的线电流,单位为 A。

(4) 额定电压 U_N 电动机正常运行时的电源线电压,单位为 V。

(5) 额定转速 n_N 电动机在额定工作状态下的运行转速,单位为 r/min。

(6) 接法 电动机三相定子绕组的连接方法有三角形联结和星形联结,小型电动机(3kW 以下)多采用星形联结,大、中型电动机(4kW 以上)采用三角形联结。

(7) 其他 铭牌上还有防护等级、绝缘等级、额定频率与额定工作制等。

3. 三相异步电动机的工作原理

(1) 定子旋转磁场的产生 当三相异步电动机接到三相交流电源上时,有三相对称电流通入三相对称的定子绕组,将会在定子和转子间的气隙中产生旋转磁场。

1) 旋转磁场的旋转方向。

电动机的转向与旋转磁场的旋转方向相同,是由接入三相绕组的电流相序决定的,只要调换电动机任意两相绕组的电源接线(相序),旋转磁场即反向旋转,电动机也随之反转。

2) 旋转磁场的旋转速度。

旋转磁场的旋转速度为

$$n_1 = \frac{60f_1}{p}$$

式中, n_1 为旋转磁场旋转速度,又称同步转速(r/min); f_1 为三相交流电频率(Hz); p 为磁极对数。

(2) 转子感应电流的产生 假定旋转磁场以转速 n_1 顺时针旋转,而转子开始时是静止的,故转子绕组相对磁场运动而切割磁力线,感应出电动势。感应电动势的方向可用右手定则判定。又因转子绕组自成闭合回路,故将产生感应电流。

(3) 转子电磁力矩的产生 有感应电流的转子导体在旋转磁场中会受到电磁力的作用,

力的方向可用左手定则判定。转子导体受到电磁力的作用会产生一个电磁转矩,驱动转子旋转,转子旋转的方向与定子旋转磁场旋转的方向相同。

4. 异步电动机的转速与转差率

(1) 异步电动机的转速 由于异步电动机转子绕组中的电流是感应产生的,所以又称为感应电动机。转子的转速 n 不能与定子产生的旋转磁场的转速 n_1 同步,否则转子绕组将无法切割磁力线,便不能产生感应电动势、感应电流和电磁转矩,而且感应电动机的转速总是小于旋转磁场的转速 n_1 (同步转速)。因为它们的转速不同步,故称为异步电动机。

(2) 异步电动机的转差率 通常将同步转速 n_1 与转子转速 n 之差与同步转速 n_1 的比值称为转差率,用 s 表示,即

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1}$$

转差率 s 是电动机的一个重要参数,在电动机运行时,有 $0 < s < 1$ 。

1) 在电动机起动瞬间, $n = 0$, $s = 1$, 转子切割磁力线相对速度最大,感应电动势、电流最大。反映在定子上,电动机的起动电流也很大,可达 4~7 倍的额定电流。

2) 电动机空载时阻力很小,转速很高,此时 $n \approx n_1$, s 很小,一般在 0.005 左右。转子感应电动势、电流也较小,此时定子空载电流约为 0.3~0.5 倍的额定电流。

3) 电动机在额定状态下运行时, s_N 一般在 0.01~0.07 之间,通常为 0.05 左右。

5. 三相变极多速异步电动机

三相变极多速异步电动机是转速可调的异步电动机,有双速、三速和四速等多种,分为倍极调速(如 2/4、4/8 极)和非倍极调速(如 4/6、6/8 极)两大类。

对于变极多速电动机,改变转速的方法是:改变电动机定子绕组的接线方法,从而改变电动机定子的极对数。这种电动机要采用笼型结构,其转子的极对数能自动地随定子极对数的改变作相应变化。

1.1.2 三相异步电动机绕组

1. 三相异步电动机绕组概述

三相异步电动机各相绕组应结构对称、阻抗相等,为此要求各绕组形状、尺寸、匝数相等,且在空间分布上必须彼此相差 120° 电角度。所用材料应有可靠的绝缘性能,机械性能、工艺性能好,用铜量少,散热好,维修方便。电动机运行过程中要力求获得较大的基波磁动势和基波电动势,且波形接近正弦波,尽量减少谐波及其产生的损耗。

根据绕组结构上的不同,定子绕组可分为单层、双层和单双层混合绕组;按绕组的连接来分,单层绕组又分为链式绕组、同心式绕组、交叉式绕组,双层绕组又可分为叠绕组和波绕组。

2. 基本术语

(1) 线圈 线圈也称为绕组元件,是构成绕组最基本的单元,用导线绕制,分为有效边和端部。有效边进行电磁能量转换。在不影响电磁性能及工艺操作的条件下,端部应尽量短。

(2) 线圈组 多个线圈按一定规律连成一组称为线圈组。

(3) 绕组 多个线圈或线圈组按一定规律连在一起形成绕组。三相电动机有三个绕组,

常称为三相绕组。

(4) 极距 τ 在定子圆周内, 每个磁极所占的槽数称为极距, 即

$$\tau = \frac{z_1}{2p}$$

式中, z_1 为定子铁心总槽数; $2p$ 为磁极数。

(5) 线圈节距 y 一个线圈的两个有效边所跨定子圆周的距离称为节距, 一般用槽数表示。为获得较大的电动势, 应使 $y \approx \tau = \frac{z_1}{2p}$ 。当 $y = \tau$ 时, 称为整距绕组; 当 $y < \tau$ 时, 称为短距绕组, 可节省导线, 双层绕组常用 $y = \frac{5\tau}{6}$, 可以减少谐波损耗, 改善电气性能; 当 $y > \tau$ 时, 称为长距绕组, 浪费导线。

(6) 机械角度 即几何角度, 如一个圆周所对应的几何角度为 360° 。

(7) 电角度 从电磁方面看, 导体每经过一对磁极 N、S, 其感应电动势变化一个周期, 也即相位变化了 360° 电角度, 所以每对磁极对应的是 360° 电角度。若有 p 对磁极, 则相应的电角度为 $p \times 360^\circ$ 。所以, 电角度 $= p \times$ 机械角度。

(8) 每极每相槽数 q 在每一个磁极下每相绕组(相带)所占有的槽数, 即

$$q = \frac{z_1}{2pm}$$

式中, m 为相数, 一般三相异步电动机采用 60° 相带, 即每极分为 3 相。

(9) 极相组 将一个磁极下属于同一相的线圈按一定方式串联成的线圈组, 称为极相组。极相组数为 $2pm$ 。

3. 三相定子绕组的构成原则

1) 为达到磁场对称的目的, 各相绕组在每个磁极下应均匀分布, 因此先将定子槽数按极均分(分极), 使每极为 180° 电角度, 每极下分为三相(分相), 也称为 3 个相带, 每个相带 60° 电角度。三相绕组的分布在每极下按相带顺序 $U_1 \rightarrow W_2 \rightarrow V_1 \rightarrow U_2 \rightarrow W_1 \rightarrow V_2$ 均匀分布。

2) 各相绕组引出线应彼此相隔 120° 电角度。展开图中每个相邻相带的电流参考方向相反。

3) 同相绕组中线圈间应顺着电流参考方向进行连接。

4) 同一相绕组的各有效边在同性磁极下, 电流方向应相同。而在异性磁极下, 电流方向相反。为节约铜线, 线圈的两条边之间的距离应尽可能短。

4. 三相单层绕组

三相单层绕组是指每一个槽内只有一个线圈边, 整个绕组的线圈数为槽数的一半。这种绕组嵌线方便, 槽内没有层间绝缘, 槽的利用率高。但由于单层绕组本质上是整距绕组, 磁动势和电动势的波形稍差, 故铁损耗、噪声都较大, 起动性能不好, 一般用于小容量的三相异步电动机。

(1) 单层链式绕组 链式绕组由相同节距的线圈组成, 其结构特点是线圈一环套一环, 形如长链, 其展开图如图 1-2 所示。

(2) 同心式绕组 同心式绕组的结构特点是各相绕组均由不同节距的同心线圈(大线圈

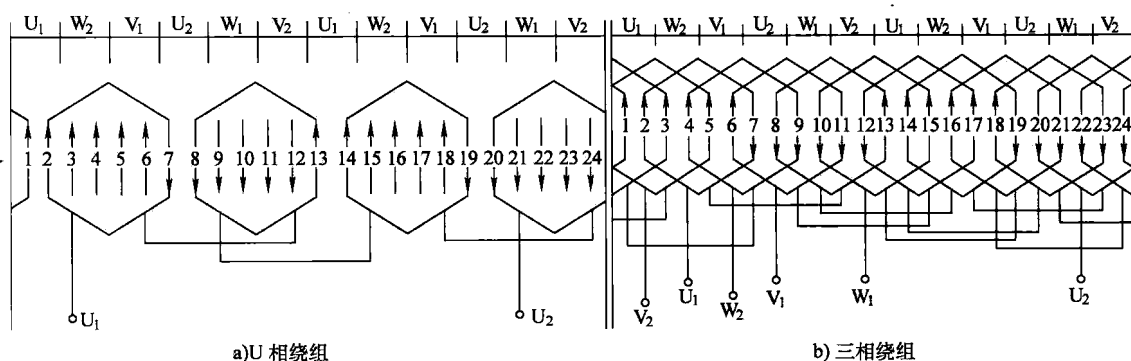


图 1-2 单层链式绕组展开图

套在小线圈外面)经适当连接而成,这种绕组的端部较长,常用于两极电动机中。每极每相槽数为 $q \geq 4$ 的偶数,其展开图如图 1-3 所示。

(3) 交叉式绕组 交叉式绕组主要用于每极每相槽数 $q = 3$ (奇数)的小型三相异步电动机定子绕组中,其展开图如图 1-4 所示。

5. 三相双层绕组

双层绕组的每个槽内有上、下层两个线圈边,每个线圈的一边嵌放在某一槽的上层,另一边则嵌放在另一槽的下层,整个绕组的线圈数正好等于槽数。10kW 以上的电动机一般采用双层绕组。它分为叠绕组和波绕组两种形式。可以选择合适的节距,使异步电动机的旋转磁场波形更接近于正弦波,从而减少电动机的损耗、噪声、振动,增加电动机的输出功率。下面仅介绍叠绕组。

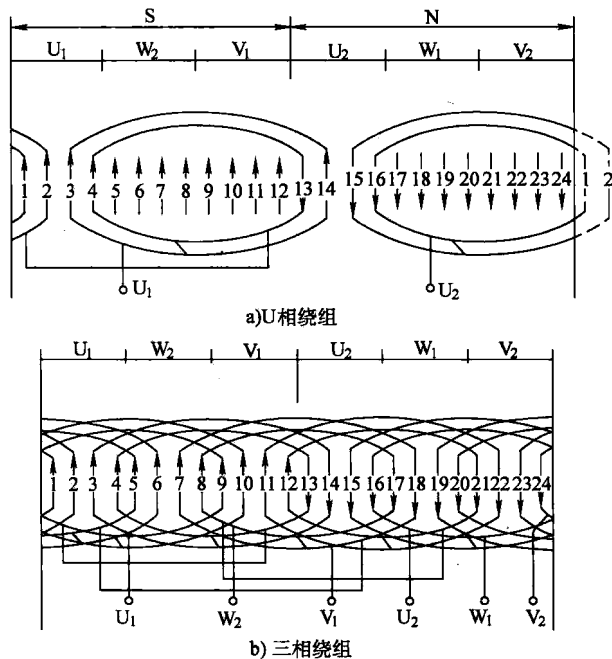


图 1-3 单层同心式绕组展开图

(1) 双层叠绕组的展开图 叠绕组在嵌线时,总是后一个叠在前一个上面,所以得名叠绕组,展开图的画法与单层基本相同,只是用实线来表示线圈的上层边,虚线来表示线圈的下层边。下面以例题的形式讲解双层叠绕组展开图的绘制方法。

【例 1-1】 国产 J02-61-4 型三相异步电动机的定子绕组采用双层叠绕的形式,定子槽数为 $z_1 = 36$ 槽,极数 $2p = 4$,线圈节距 $y = 7$ (即 1 与 8 槽),试绘出其绕组展开图。

【解】 1) 划分极和相带。

$$\tau = z_1 / 2p = 36 / 4 \text{ 槽} = 9 \text{ 槽}$$

$$q = z_1 / 2pm = 36 / 12 \text{ 槽} = 3 \text{ 槽}$$

可以选取合理的节距来提高电动机的电气性能。在单层绕组中,由于线圈的两个边在相

带中是固定的, 节距 y 也是固定的, 所以本质上是整距绕组。

双层绕组与单层绕组相似, 一个相带中上层边的电流方向应相同, 与相邻相带的上层边电流方向相反, 图 1-5a 中标出的电流方向是 U_1 、 V_1 、 W_1 相带向上, U_2 、 V_2 、 W_2 相带向下。

2) 按相带和电流方向连接成线圈组及相绕组。

以 U 相为例, 如图 1-5a 所示, 因线圈节距 $y = 7$ 槽, 则第 1 槽的上层边与第 8 槽的下层边连接起来构成线圈 1, 第 2 槽的上层边与第 9 槽的下层边连接起来构成线圈 2, …… , 以此类推, 即可构成定子绕组 U 相的全部 12 个线圈 (1、2、3、10、11、12、19、20、21、28、29、30)。

图 1-5 中, 每个线圈都由一根实线和一根虚线组成, 实线表示上层边, 虚线表示下层边, 各线圈的编号都用其上层边所在的槽号表示。由图 1-5 可见, 双层绕组比单层绕组更好画, 只要画好第一个线圈后, 以此类推即可, 所有线圈都是一样的, 所以也称为等元件结构。将线圈 1、2、3 串联起来, 19、20、21 串联起来, 就分别组成了两个对应于 S 极下 U 相带的极相组; 将线圈 10、11、12 串联起来, 28、29、30 串联起来, 又分别组成了两个对应于 N 极下 U 相带的极相组。顺着电流的方向, 如果 S 极下的极相组是正向连接, 则 N 极下的极相组应反向连接, 与单层绕组展开图一样, 就可把四个极相组串联成相绕组。

确定各相绕组的出线端: 定子相邻两槽间的电角度为 20° , U、V、W 三相绕组出线端的首端相隔 120° 电角度, 则电源引出线应相隔 6 槽。若将 U_1 定在第一槽, 则 V_1 应定在第 7 槽, W_1 应定在第 13 槽,

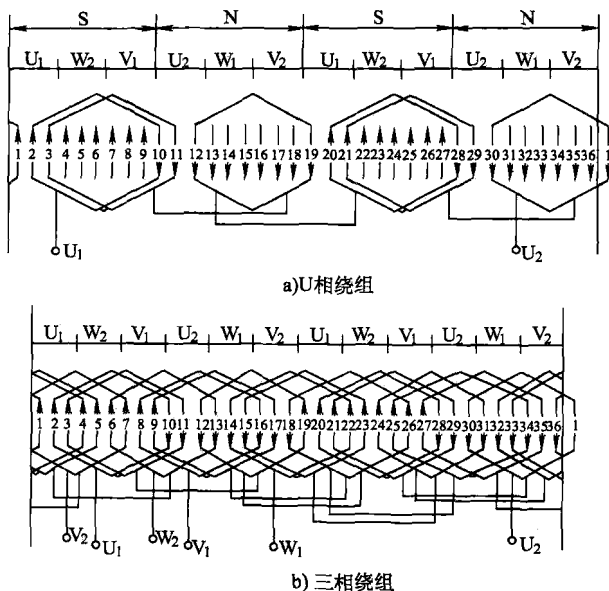


图 1-4 单层交叉式绕组展开图

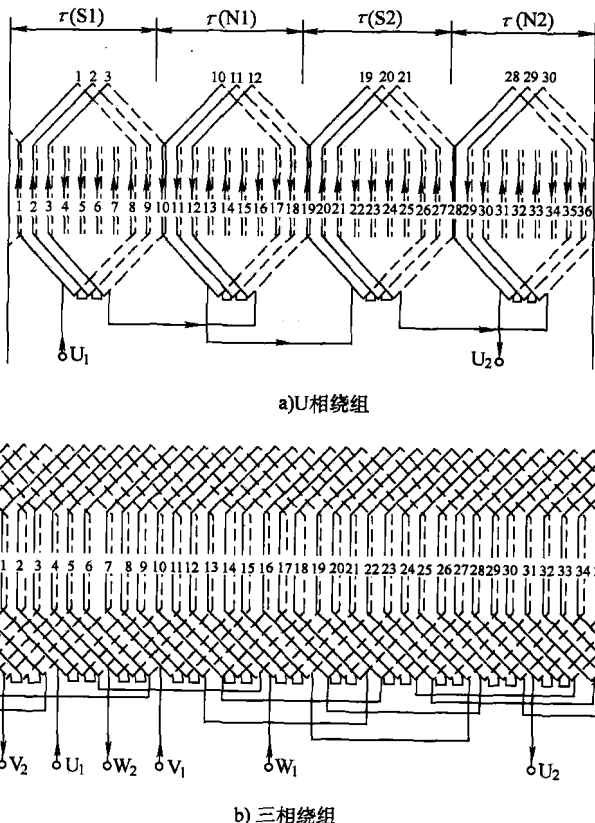


图 1-5 三相双层叠绕组展开图

U_2 、 V_2 、 W_2 分别在第 28 槽、34 槽、4 槽, 如图 1-5b 所示。

(2) 多支路数的接线方法 上述绕组的连接, 是假定绕组的并联支路数 $a=1$ (也称单进火) 来分析的, 即各相绕组的 4 个极相组串联成一条支路, 如图 1-5a 所示的 U 相。但实际上, 常要求绕组的并联支路 $a>1$, 如要求并联支路数 $a=2$ (也称为双进火), 即将每相绕组的 4 个极相组连成 2 条支路。以例 1-1 中的 U 相为例, 只要把第一对极中 S 极下的极相组 1、2、3 与 N 极下的极相组 10、11、12 “尾与尾相连” (即反接) 组成一条支路, 第二对极中 S 极下的极相组 19、20、21 与 N 极下的极相组 28、29、30 “尾与尾相连” 组成另一条支路。然后再把这两条支路的首端与首端 (即线圈 1 与线圈 19 的首端) 相连, 作为 U 相绕组的首端 U_1 ; 尾端与尾端 (即线圈 10 与线圈 28 的尾端) 相连, 作为 U 相绕组的尾端 U_2 , 如图 1-6b 所示。图 1-6 中短线是同一极相组线圈之间的连线, 一个槽号代表一个线圈, 带箭头的短线是极相组之间的连线。

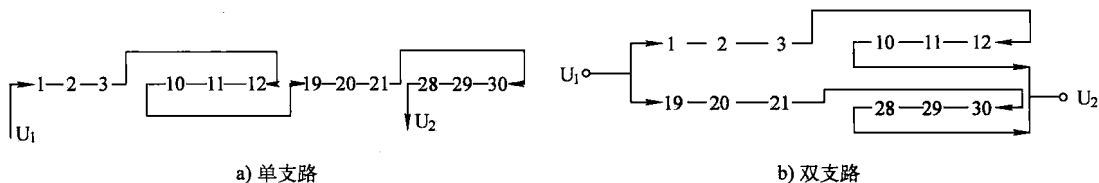


图 1-6 4 极 36 槽 U 相绕组并联支路数的改接

由上述分析可知, 双层叠绕组每相的极相组数正好等于电动机的极数, 即每相共有 $2p$ 个极相组, 而每个极相组都有可能单独成为一条支路, 因此双层叠绕组每相的最多并联支路数等于磁极数, 即 $a_{\text{最大}}=2p$ 。但对已绕好的单支路 ($a=1$) 三相绕组, 不能随意改成双支路 ($a=2$), 因为若这样改变, 每相匝数将减少一半, 根据 $U_1 \approx E_1 = 4.44 K_1 N_1 f_1 \Phi_m$, 电动机的磁通 Φ_m 将增大一倍, 会使电动机发热损坏。

(3) 接线图 三相绕组的展开图, 可以清楚地表示出绕组的节距、线圈组数、各相的首尾连接方法等。但由于线圈边的重叠, 看起来比较复杂。因此在实际接线时, 为了能清楚地看出各线圈组之间的连接方式, 常采用一种简化的圆形接线参考图。画接线图时, 不管每极每相有几个槽, 也不管一个极相组内有几个线圈, 每一个极相组都用一根带箭头的短圆弧线来表示, 箭头所指方向表示电流参考方向。

现以上述所给电动机为例, 说明圆形接线参考图的画法, 如图 1-7 所示。

1) 将定子圆周按极相组数均分成 $2pm$ 圆弧段, 每段表示一个极相组, 对上例来说, 三相共有 $2pm = 2 \times 2 \times 3 = 12$ 个极相组 (每个极相组有三个线圈串联), 故图中有 12 根圆弧短线。

2) 极相组的排列次序应与展开图一致, 顺次给每个极相组编号, 如第一极相组 (本例中由 1、2、3 三个线圈串联而成) 编号为 1, 第二个极相组编号为 2, 以此类推, 共有 12 个极相组。根据 60° 相带原则, 对应为 U_1 - W_2 - V_1 - U_2 - W_1 - V_2 , 则 U 相的极相组编号为 1、4、7、10; V 相的极相组编号为 3、6、9、12; W 相的极相组编号为 2、5、8、11。箭头的方向说明相邻的极相组电流参考方向相反。

3) 三相绕组的首端相隔 120° 电角度, 因而可确定: U 相的首端 U_1 是极相组 1 的首端, V 相的首端 V_1 是极相组 3 的首端, W 相的首端 W_1 是极相组 5 的首端; 顺着电流方向连接

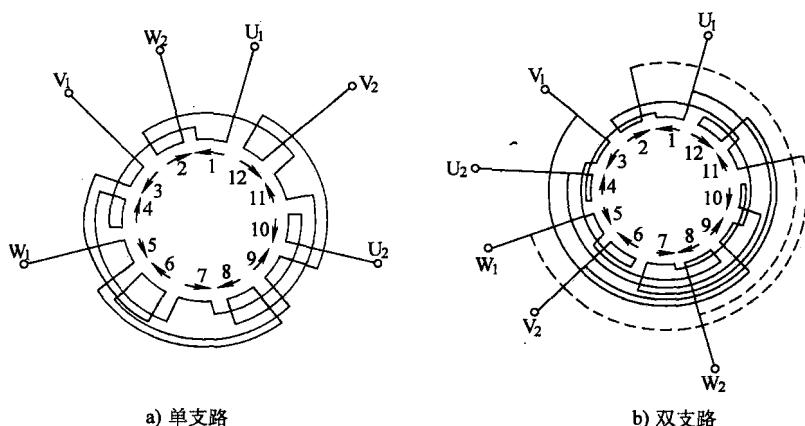


图 1-7 4 极绕组接线图

就可得到三相绕组的尾端 U_2 、 V_2 、 W_2 。

如果绕组是几路并联的，可以将每个支路各自串联后再并联起来，并联后各支路的线圈数应相等，电流方向也应一致。图 1-6b 和图 1-7b 为 $a=2$ 时的绕组连接图。

1.1.3 三相异步电动机的转矩和机械特性

1. 三相异步电动机的转矩

电动机的转矩 T_2 一般是指转轴输出的转矩，加上电动机的空载转矩 T_0 ，称为电动机的电磁转矩 T 。从电动机的驱动角度来说，电磁转矩是电动机的转子绕组所受的电磁力乘以力臂。通过数学分析得到：

$$T = T_0 + T_2 = C_T \Phi_m I_2 \cos \varphi_2 \approx \frac{C s r_2 U_1^2}{f [r_2^2 + (s X_{02})^2]}$$

式中， C 为电动机结构常数； C_T 为电动机转矩常数； Φ_m 为旋转磁场每极磁通的最大值； $\cos \varphi_2$ 为转子每相功率因数； r_2 为转子每相绕组等效内电阻； X_{02} 为转子未转时每相绕组的漏电抗。

如果忽略 T_0 ， T_2 就近似等于 T ，可以看出电磁转矩与电压的二次方成正比，即电压的变化将显著影响电动机的输出转矩。

电磁转矩与功率的关系为 $T = 9.55 P_2 / n$ ，则额定转矩 $T_N = 9.55 P_N / n_N$ （本公式适用于任何电动机）。电动机的损耗 p 包括铜损 p_{Cu} （可变损耗）、铁损 p_{Fe} 和机械损耗 p_m （两者称不变损耗），即

$$P_1 = p + P_2 = p_{Cu} + p_{Fe} + p_m + P_2$$

其效率为

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\%$$

2. 电力拖动的基本知识

用电动机拖动生产机械，使之按预定的方案进行生产的方式称为电力拖动。电力拖动中存在两个主要转矩，一个是生产机械的负载转矩 T_L ，一个是电动机的电磁转矩 T ，这两个转矩与转速间的关系分别称为负载的机械特性 $n = f(T_L)$ 和电动机的机械特性 $n = f(T)$ 。

(1) 负载的机械特性 负载转矩 T_L 分为反抗力矩(摩擦力矩)和位能力矩(压缩力矩、张力矩、扭转力矩、重力力矩等)。负载的机械特性又可分为恒转矩负载特性与变转矩负载特性。变转矩负载又分为负载转矩 T_L 与速度成比例变化的负载 $T_L = Kn$; 负载转矩与速度的二次方成比例变化的负载 $T_L = Kn^2$ (通风机、水泵等); 负载转矩与速度成反比的恒功率负载 $T_L = K/n$ (车床加工等)。

(2) 电动机的机械特性 多数电动机的机械特性是转速随转矩增加而下降。但不同的电动机其下降程度不同, 一般用特性硬度来评价它的变化程度。根据特性硬度, 电动机的机械特性分为: 绝对硬特性, 转速不下降, 如同步电动机; 硬特性, 转速下降较少, 如感应电动机的直线部分; 软特性, 转速下降较多, 如直流串励电动机。

(3) 电力拖动系统 电力拖动的运动方程式为

$$T - T_L = J \frac{d\omega}{dt}$$

式中, J 为拖动系统的转动惯量; ω 为拖动系统的旋转角速度。还可将上式等效为运动数值方程式, 即

$$T - T_L = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt}$$

式中, GD^2 是一个整体, 为飞轮转动惯量, 又称为飞轮矩 ($N \cdot m^2$); $\frac{dn}{dt}$ 为拖动系统的加速度。当 $T > T_L$ 时, $\frac{dn}{dt} > 0$, 拖动系统加速; 当 $T < T_L$ 时, $\frac{dn}{dt} < 0$, 拖动系统减速; 当 $T = T_L$ 时, $\frac{dn}{dt} = 0$, 拖动系统稳定运行或处于静止状态。如果电动机轴与生产机械轴不在同一个轴上, 在运用以上表达式时应先将其折算到同一个轴上, 一般是折算到电动机轴上。

3. 三相异步电动机的机械特性 $n = f(T)$

三相异步电动机的机械特性是指电动机的转速与电磁转矩间的关系, 即 $n = f(T)$ 。又因为 $s = \frac{n_1 - n}{n_1}$, 所以又将 T 和 s 的关系称为三相异步电动机的机械特性。电磁转矩有如下三种表达式:

(1) 物理表达式

$$T = C_T \Phi_m I_2 \cos \varphi_2$$

式中, I_2 、 $\cos \varphi_2$ 与 s 有关。

(2) 参数表达式

$$T = \frac{m_1 p U_1^2 \frac{r'_2}{s}}{2\pi f_1 \left[\left(r_1 + \frac{r'_2}{s} \right)^2 + (X_1 + X'_2)^2 \right]}$$

(3) 实用表达式

$$T = \frac{2T_{\max}}{\frac{s}{s_m} + \frac{s_m}{s}}$$

三相异步电动机的机械特性有固有机机械特性与人为机械特性之分。固有机机械特性是指电动机处于额定参数条件下运行的机械特性,额定参数即定子绕组接上额定电压、额定频率的三相交流电源,定子绕组按规定联结,且在定子和转子回路不串任何外加电阻。其特性曲线如图 1-8 所示。其中, A 点对应于 $T = T_{ST}$, $s = 1$, $n = 0$, 称为电动机的起动点; B 点对应于 $T = T_{max}$, $s = s_m$, $n = n_m$, 称为电动机的临界点; C 点对应于 $T = T_N$, $s = s_N$, $n = n_N$, 称为电动机的额定工作点; D 点对应于 $T = 0$, $s = 0$, $n = n_1$, 称为电动机的理想空载点。电动机一般运行在 BD 段, 称为稳定工作区, AB 段称为非稳定工作区。

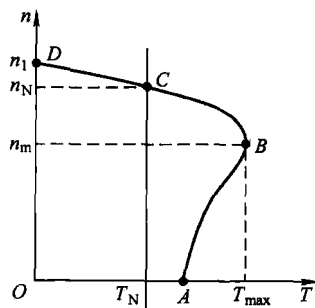


图 1-8 三相异步电动机固有机械特性曲线

若要人为地改变参数 U_1 、 p 、 f_1 、 r_2 、 X_1 及 X_2 等, 即可得到不同的机械特性, 这种机械特性称为人为机械特性。

4. 三相异步电动机的起动、调速、制动、反转

(1) 起动 让电动机从静止到稳定运行的过程称为起动。起动时要求电动机有足够大的起动转矩, 且起动电流尽可能小, 转速尽可能平滑上升。如果电动机直接起动, 则其起动电流为 4~7 倍的额定电流。这样大的电流会在线路上产生很大的电压降, 影响同一线路上其他负载的正常工作; 还会使绕组发热, 绝缘老化, 缩短电动机的寿命。若起动时间较长, 则可能烧坏电动机。

1) 绕线转子异步电动机的起动。

绕线转子异步电动机常采用转子回路串电阻起动, 如图 1-9 所示, 或转子回路串接频敏变阻器起动, 如图 1-10 所示。频敏变阻器的感抗会随电动机转速的上升而自动下降, 不需要在起动时单独切除感抗。

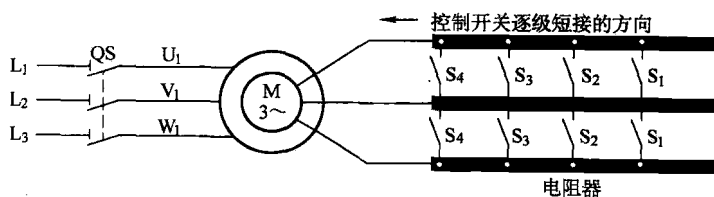


图 1-9 绕线转子异步电动机转子串电阻起动

2) 笼型异步电动机的起动。

笼型异步电动机常采用直接起动和减压起动两种方法起动。

① 所谓直接起动, 就是将电动机三相定子绕组直接接到额定电压的电网上来起动电动机。一台异步电动机能否采用直接起动应视电网的容量(变压器的容量)、起动次数、电网允许干扰的程度等许多因素决定。通常认为只需满足下述条件中的一条即可采用直接起动: 容量在 7.5kW 以下的三相异步电动机一般均可直接起动; 用户由专用的变压器供电时, 如电动机容量小于变压器容量的 20% 时, 允许直接起动(对于不经常起动的电动机, 则该值可放宽到 30%)。

② 减压起动主要有: 在定子电路中串接电抗器(或串电阻), 如图 1-11 所示; 自耦变压

器减压起动,如图1-12所示,起动电压为直接起动时的 $\frac{1}{k}$ 倍,起动电流为直接起动时的 $\frac{1}{k}$ 倍,自耦变压器的电压比为 $\frac{1}{k^2}$;Y/Δ减压起动,如图1-13所示,起动电压为直接起动时的 $\frac{1}{\sqrt{3}}$ 倍,起动转矩和起动电流均为直接起动时的 $\frac{1}{3}$ 倍,此方法只适用于正常运行时定子绕组是Δ联结的电动机。

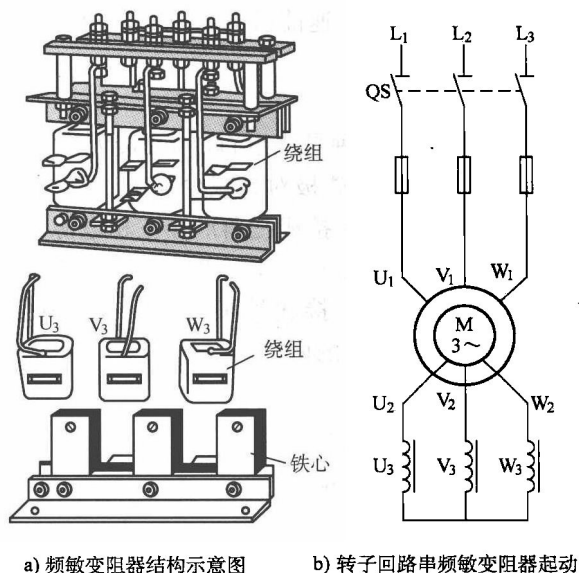


图1-10 绕线转子异步电动机串频敏变阻器起动

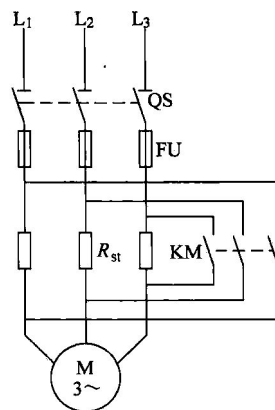


图1-11 串电阻减压起动

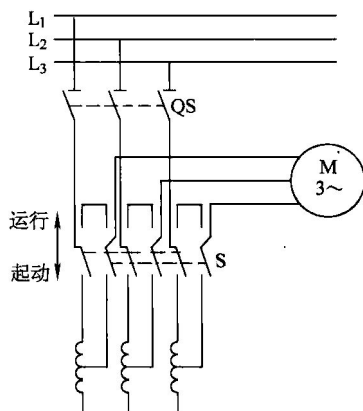


图1-12 自耦变压器减压起动

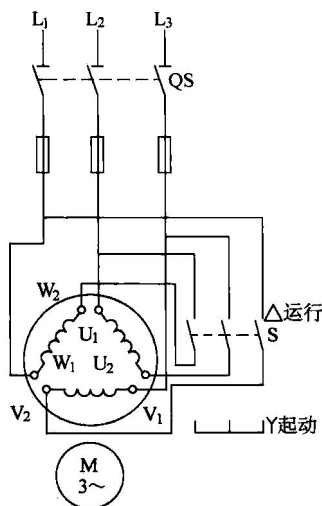


图1-13 Y/Δ减压起动

三相笼型异步电动机采用不同的减压起动方法起动时,起动转矩都有不同程度的下降,对起动性能而言,这是不好的一面,当负载较大时可能无法起动。因此,在确定起动方法