



电气自动化技能型人才实训系列

DIANQIZIDONGHUA
JINENGXINGRENCAI
SHIXUNXILIE

电动机控制 与变频调速

主 编 王玉梅

副主编 梁 强 张瑞林 殷淑英



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



电气自动化技能型人才实训系列

电动机控制 与变频调速

主 编 王玉梅

副主编 梁 强 张瑞林 殷淑英

参 编 张洪宝 高 强 裴勇生



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书是《电气自动化技能型人才实训系列》之一。

交流电力拖动技术广泛应用于现代自动控制工程、机械工程等领域中,并逐步成为电力拖动的主流。全书共6个学习情境,内容包括:交流电动机的基本知识、交流电动机的起动控制、运行控制、制动控制、传统调速控制和变频调速控制。本书旨在通过工程案例引领广大读者掌握各种交流电动机控制技术的知识和技能,提高其综合应用能力。

本书可作为高职高专类院校机电一体化、工业自动控制、机械工程及自动化等专业的一体化教学用书,也可以作为相关工程技术人员的学习和参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

电动机控制与变频调速/王玉梅主编. —北京:中国电力出版社, 2011.2

(电气自动化技能型人才实训系列)

ISBN 978-7-5123-1385-9

I. ①电… II. ①王… III. ①电动机-控制 ②变频调速
IV. ①TM301.2 ②TM921.51

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 018383 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2011年6月第一版 2011年6月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 13印张 347千字

印数 0001—3000册 定价 28.00元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前言

对于电动机控制技术教学的广大师生以及爱好者而言,如何找到一本好的教学用书或学习资料一直困扰着我们,笔者就深有体会。目前与电动机控制技术相关的书籍很多,在原理、实用性以及广度和深度等方面都各有特色,但是随着新技术的发展,为了专业面的拓宽和现代控制技术的开发及应用,更希望有一本二者兼顾的书籍,本书正是以这种思想为启示,在中国电力出版社的大力指导与帮助下编写了本书。

随着工业现代化的发展和自动化水平的提高,作为主要的传动系统,电力拖动系统在传动技术领域中的地位是不言而喻的。特别是随着现代电力电子技术的发展,半导体变流技术使得交流调速系统得以迅速发展,为交流电力拖动系统的广泛应用创造了有利条件。

电动机的种类繁多,所涉及的知识领域非常广泛,鉴于篇幅有限,本书选择目前工农业生产中最为广泛的三相异步交流电动机为载体,以交流电动机的控制技术为主线,整合《电机与拖动》、《电力电子技术》等课程的部分内容,吸纳了现代控制技术知识,依托工程实例,强调应用,突出操作,将传统与现代、硬逻辑与软逻辑、理论知识与工艺操作有机融合为一体,形成一门实用性、知识性、资料性、工艺性相统一的独具特色的高职专业教材。

本书在课程内容的选取上,以完成典型工作任务为目标,选取了交流电动机基本知识、交流电动机起动控制、交流电动机运行控制、交流电动机制动控制、交流电动机传统调速控制、交流电动机变频调速控制6个学习情境。在内容的组织实施上,坚持工程实例引领,将各个知识点、技能点,全部依托工程案例贯穿到每个学习情境中,以应用的形式出现,突出了知识技能的生动性和鲜活性,体现了教、学、做一体化教学,使学生掌握相关技能和知识,提高学生综合应用能力。

本书由王玉梅等人编写,其中情境1、5、6主要由王玉梅编写,情境2由裴勇生编写,情境3由张洪宝编写,情境4由梁强编写,殷淑英参与编写情境1,张瑞林参与编写情境5,高强参与编写情境6,全书由王玉梅统稿。

现代电动机控制技术发展迅猛,新型电动机控制技术发展层出不穷,限于编者的学识与能力,肯定有很多不足之处,恳请广大读者批评指正。

编者

2011年1月

目 录

前言

情境 1	交流电动机的基本知识	1
任务 1	电机学理论基本知识	1
任务 2	三相异步电动机的结构和工作原理	9
任务 3	三相异步电动机的运行原理	16
任务 4	三相异步电动机的机械特性	26
情境 2	交流电动机的起动控制	30
任务 1	小型台钻直接起动控制	30
任务 2	鼓风机降压起动控制	47
任务 3	胶带运输机降压起动控制	55
任务 4	起重机串电阻起动控制	63
任务 5	大型空气压缩机软起动控制	74
情境 3	交流电动机的运行控制	83
任务 1	X62W 型万能铣床电动机异地控制	83
任务 2	传送带运输机顺序控制	86
任务 3	运料小车自动往返控制	89
情境 4	交流电动机的制动控制	94
任务 1	卷扬机机械抱闸制动控制	94
任务 2	T68 型卧式镗床主轴电动机反接制动控制	97
任务 3	X 射线管旋转阳极能耗制动控制	103
任务 4	起重机回馈制动控制	107
情境 5	交流电动机的传统调速控制	110
任务 1	T68 型卧式镗床主轴双速电动机控制	110
任务 2	拉丝机电磁调速电动机控制	115
情境 6	交流电动机的变频调速控制	121
任务 1	大楼恒压供水变频调速控制	121
任务 2	加热炉鼓风机变频调速控制	150
任务 3	带式输煤机变频调速控制	156
任务 4	起重机械变频调速控制	166

任务 5 薄膜卷绕机械变频调速控制	178
任务 6 数控车床主轴变频调速控制	186
附录 A CVF-S1CVF-P3 系列变频器的接线图和操作面板	195
附录 B 富士变频器基本接线图和操作面板	196
附录 C 三菱 FRE500 系列变频器的接线图和操作面板	198
附录 D ABB ACS800 系列变频器的接线图	200
参考文献	201

情境 1 交流电动机的基本知识



情境描述

交流电动机的容量从几十瓦到几千千瓦，在国民经济的各行各业中应用极为广泛。三相异步交流电动机主要用于拖动各种生产机械。它结构简单、制造、使用和维护方便，运行可靠，成本低，效率高，得以广泛应用。

电动机是借助其内部磁路和电路，依据电磁感应原理实现能量转换的，一般工程应用中，对于电磁场的分析，采取场化路的分析方法。由于其计算简单，计算精度也足以满足大部分工程实际需要，因而得到了广泛应用。

由电动机带动生产机械运动的系统，称为电力拖动系统，对电力拖动系统的评价，首先取决于对生产机械的要求是否取得了充分的满足，电力拖动系统的工作状态，取决于电动机和负载机械特性之间的比较，所以正确的分析电动机和拖动系统负载的机械特性尤为重要。



学习目标

1. 掌握电机学基本理论知识。
2. 掌握三相异步电动机的结构和原理。
3. 掌握三相异步电动机的特性。

任务 1 电机学理论知识



任务描述

电能是世界上应用最广泛的二次能源，它具有便于生产、传输、变换、控制等优点，利用电动机实现电力拖动是工业完成加工工艺和生产过程的关键手段。电动机借助于内部电磁场进行能量转换，是一种机电能量转换装置。

一、电动机及电力系统的发展

电动机在国民经济中起着举足轻重的作用。它以电磁场作为媒介将电能转变为机械能，实现旋转或直线运动；或将机械能转变为电能，给用电负荷供电。因而，电动机是一种典型的机电能量转换装置。

电动机的种类繁多，除了传统的直流电动机、交流电动机，以及功率在 1kW 以下的驱动微电动机之外，还有一类是以实现信号转换为目的的电动机，这类电动机又称为控制电动机。控制电动机包括：伺服电动机、测速发电机、力矩电动机、旋转变压器、自整角机、直线电动机以及

超声波电动机等。

采用电动机作为动力源拖动生产机械运动,由此组成的系统即为电力拖动系统,如图 1-1 所示。随着相关技术的发展,电力拖动系统的功能也越来越完善。它不仅可以实现生产机械的速度调节(相应的系统又称为调速系统),而且可以实现位置的跟踪控制(相应的系统又称为位置伺服系统或随动系统)以及力或加速度的控制(相应的系统又称为张力控制系统)。

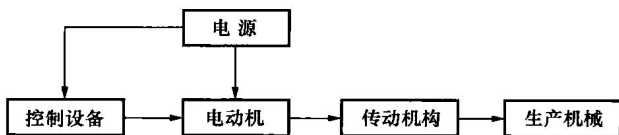


图 1-1 电力拖动系统的组成框图

1837 年,直流电动机才真正变为商业化产品。

1887 年,特斯拉发明了三相异步电动机。此后,其他各种类型的电机相继问世。各类电机无论在结构材料上、特性上,还是在运行原理上都存在较大差异。应该讲,各类电机的采用,标志着以煤和石油为主要能源体系的电气化时代的开始,从而为现代工业奠定了基础。作为机电能量转换装置,电机既可以用于电气传动,也可以作为发电机用于发电。事实上,迄今为止世界上几乎所有的电能都是通过同步发电机发出的,而所发出的大部分电能都是通过电动机消耗的。

1. 电动机制造业的发展趋势

- (1) 大型化。单机容量越来越大,如 60 万千瓦及以上的汽轮发电机。
- (2) 微型化。为适应设备小型化的要求,电动机的体积越来越小,重量越来越轻。
- (3) 新原理、新工艺、新材料的电动机不断涌现;如无刷直流电动机、开关磁阻电动机、直线电动机、超声波电动机等。

随着电力电子技术、控制理论,可以实现各种软算法的微处理器技术、电气与机械信号的检测技术与数字信号处理技术以及永磁材料等方面的迅猛发展,电机领域也面临着前所未有的机遇与挑战。一方面,这些技术和理论对电机领域的渗透和综合改变了传统电机采用固定频率、固定电压的供电模式,从而为各类电机提供了更加灵活的供电电源和控制方式,大大提高了电力拖动系统的动、静态性能;另一方面,也使得以符号法(仅处理正弦波)为基础的传统电机学理论受到挑战。于是,能够建立各类电机数学模型的电机统一理论便应运而生。以此为基础,采用统一矢量变换理论的矢量控制技术在伺服系统和变频调速系统中得到广泛应用。这一迹象表明,电机学理论与技术进入了一个全新的发展阶段。

2. 电力拖动系统的发展概况

从结构上看,电力拖动系统经历了最初的“成组拖动”(即单台电动机拖动一组机械)、“单电动机拖动”(即单台电动机拖动单台机械)到“多电动机拖动”(即单台设备中采用多台电动机)几个阶段。每一阶段生产机械所采用电动机的数量有所不同。

从系统上看,电力拖动系统经历了最初仅采用继电器—接触器组成的断续控制系统,到后来普遍采用由电力电子变流器供电的连续控制系统两大阶段。连续控制系统包括由相控变流器或斩波器供电的直流电力拖动系统,以及由变频器或伺服驱动器供电的交流调速系统两大类。后者包括由绕线式异步电动机组成的双馈调速系统、由异步与同步电动机组成的变频调速与伺服系统等。

随着电力电子技术、控制理论以及微处理器技术的发展,电力拖动系统的性能指标也上了一大台阶。它不仅可以满足生产机械快速起、制动以及正、反转的要求(即所谓的四象限运行状

态), 而且还可以确保整个电力拖动系统工作在具有较高的调速、定位精度和较宽的调速范围内。这些性能指标的提高使得设备的生产率和产品质量大大提高。除此之外, 随着多轴电力拖动系统的发展, 过去许多难以解决的问题也变得迎刃而解, 如复杂曲轴、曲面的加工, 机器人、航天器等复杂空间轨迹的控制与实现等。

目前, 电力拖动系统正朝着网络化、信息化方向发展, 包括现场总线、智能控制策略以及因特网技术在内的各种新技术、新方法均在电力拖动领域中得到了应用。电力拖动的发展真可谓是日新月异。考虑到电力拖动系统是各类自动化技术和设备的基础, 其理论与技术的发展必将对我国当前的现代化进程起到巨大的推动作用。

二、电机学中常用的物理概念与电磁定律

从能量角度看, 旋转电动机是一种机电能量转换装置。电动机借助于内部电磁场将输入的电能转换为机械能输出。发电机则相反, 借助于内部电磁场将输入的机械能转换为电能输出。因此, 电磁场在电动机内部起到了相当重要的作用。为了熟悉和掌握电机的运行理论与特性, 就必须首先了解有关电磁学的基本知识与电磁学定律。

一般来讲, 对于电磁场的分析不外乎有两种方法: 一种是采取场的分析方法; 另一种是采取路的分析方法。后者是一种宏观分析方法, 它将闭合磁力线所经过的路径看作是由几段均匀磁路组成, 然后将磁路问题等效为电路问题, 最终统一求解电路。尽管这种方法在准确性方面存在一定的限制, 但由于其计算简单, 计算精度也足以满足大部分工程实际需要, 因而得到了广泛应用。为此, 本章首先简要回顾了有关电磁学的基本知识与电磁学定律。

1. 有关磁场的基本物理量

关于磁场的概念早在物理学、电工基础等课程中已经学过, 在此就有关的几个物理量做简单叙述。

(1) 磁感应强度

通电导体周围会产生磁场, 磁场是一矢量。通电导体中的电流与所产生的磁场之间符合右手螺旋关系, 如图 1-2 所示。

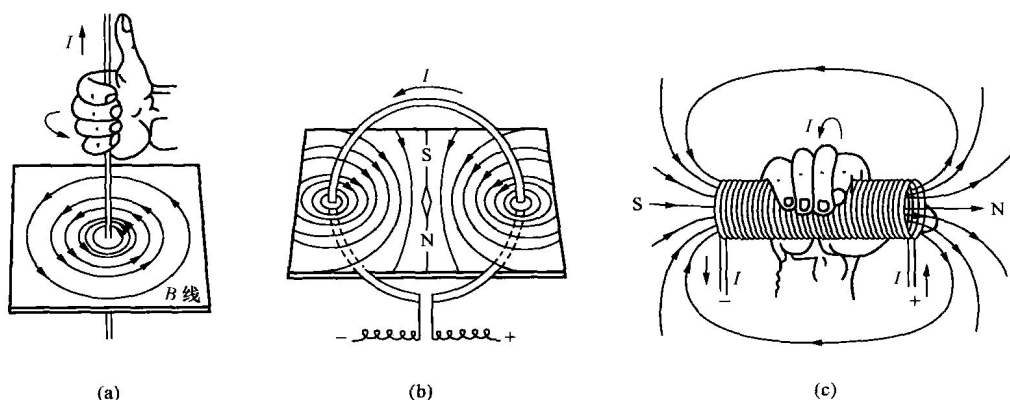


图 1-2 用磁力线表示的载流长导线、线圈和螺线管周围的磁场

(a) 载流长导线; (b) 线圈; (c) 螺线管

带电的导体周围存在着磁场, 描述磁场强弱及其方向的物理量是磁感应强度, 因磁感应强度是矢量, 用 B 表示。常用磁力线形象地描绘磁场。磁力线是闭合的曲线, 它在磁场外部由 N 极指向 S 极; 而在磁场内部, 由 S 极指向 N 极。磁力线的方向与产生它的电流的方向遵守右手螺旋定则, 并且规定磁力线上的每一点的切线方向就是该点的磁感应强度 B 的方向, 磁力线的疏

密常被用来表示磁感应强度 B 的大小。

(2) 磁通

穿过某一截面 S 的磁力线总数或磁感应强度 B 的通量称为磁通, 一般用 Φ 来表示。对于均匀磁场, 若 B 与 S 相互垂直, 则

$$\Phi = BS, \text{ 或 } B = \Phi/S \quad (1-1)$$

因此, B 又称为单位面积上的磁通, 即磁通密度。磁通 Φ 的单位为韦伯, 用符号 Wb 表示; B 的单位为特斯拉, 用符号 T 表示。

(3) 磁场强度

磁场强度是表征磁场性质的另一基本物理量, 它同样是一矢量。磁感应强度 B 与磁场强度 H 的比值反映了磁性材料的导磁能力, 即磁导率用下式表示

$$\mu = B/H \quad (1-2)$$

(4) 磁导率

式 (1-2) 中的 μ 为导磁介质的磁导率。在电动机中应用的介质一般按其磁性能分为铁磁材料和非铁磁材料。如空气、铜、铝和绝缘材料等为非铁磁材料, 它们的磁导率可认为等于真空的磁导率 μ_0 , $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ 。铁磁材料的磁导率远大于真空的磁导率 μ_0 , 如铸钢的磁导率为 μ_0 的 1000 倍。各种硅钢片的磁导率约为 μ_0 的 6000~7000 倍, 但不是常数。

2. 电路的基本定律

(1) 基尔霍夫电流定律

基尔霍夫电流定律 (KCL) 指出: 电路中流入某一节点电流的代数和等于零, 即在电路中, 电流是连续的, 流入某一节点的电流之和等于流出该节点的电流之和, 即

$$\sum I = 0 \quad (1-3)$$

(2) 基尔霍夫电压定律

基尔霍夫电压定律 (KVL) 指出: 电路中任一闭合回路电压的代数和为零, 即

$$\sum U = 0 \quad (1-4)$$

3. 磁路的基本定律

(1) 磁路的基尔霍夫第一定律

磁路中任何一闭合面内, 在任一瞬间穿过该闭合面的各分支磁路的磁通代数和为零, 即

$$\sum \Phi = 0 \quad (1-5)$$

(2) 磁路的基尔霍夫第二定律——安培环路定理

在磁场中, 磁场强度 H 沿任意闭合磁回路的线积分值 $\oint_L H \cdot dl$ 等于该闭合磁回路所包围的总电流代数和。这就是安培环路定律, 也称全电流定律, 用公式表示为

$$\oint_L H \cdot dl = \sum i = Ni = F \quad (1-6)$$

式中, F 为磁动势, 若电流的正方向与闭合回路 L 的环行方向符合右手螺旋定则时, 则 i 取正号, 否则取负。安培环路定律描述的是电生磁的基本定律。假定闭合磁力线是由 N 匝线圈电流产生的, 且沿闭合磁力线 L 上的磁场强度 H 处处相等, 则上式变为 $HL = Ni$ 。

(3) 磁路的欧姆定律

磁路的磁动势等于磁通与磁阻的乘积。

$$F = Ni = Hl = \frac{Bl}{\mu} = \Phi \frac{l}{\mu S} = \Phi R_m \quad (1-7)$$

(4) 电磁感应定律

变化的磁场产生电场,使导体产生感应电动势,就是电磁感应现象。在电动机中电磁感应现象有电动机电动势和变压器电动势两种。

1) 电动机电动势:导体与磁场有相对运动,导体切割磁力线时导体内产生感应电动势,称为切割电动势。感应电动势与磁场、导体运动速度之间符合右手定则,如图 1-3 所示,则感应电动势的表达式为

$$e = Blv \quad (1-8)$$

式中, l 为导体有效长度; v 为导体相互对磁场的运动速度。

2) 变压器电动势:当绕组中的磁通变化时,绕组内产生感应电动势,其方向由楞次定律判定,如图 1-4 所示。

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (1-9)$$

(5) 电磁力定律

载流导体在磁场中会受到力的作用,其方向由右手定则判定,如图 1-5 所示,当磁场和导体垂直时,电磁力大小的公式为

$$F = Blv \quad (1-10)$$

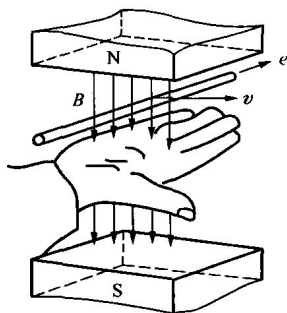


图 1-3 右手定则

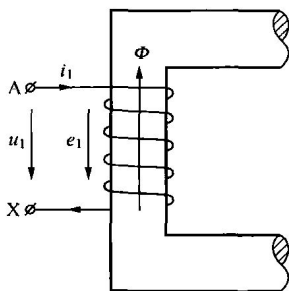


图 1-4 磁通与其感应电动势的正方向

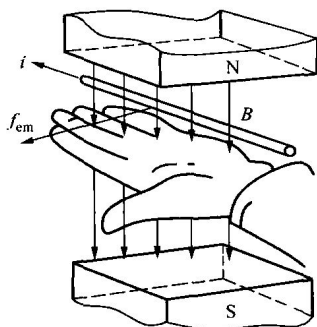


图 1-5 左手定则

三、电动机中铁磁材料的特性

电动机是依据电磁感应原理实现能量转换的,其内部要构成完整的磁路独立的电路。

1. 铁磁材料的磁化特性

为了在一定的励磁磁动势作用下能激励较强的磁场,电动机和变压器的铁心常采用磁导率较高的铁磁材料制成。铁磁材料包括铁、镍、钴等以及它们的合金,铁磁材料在外磁场中呈现很强的磁性,此现象就称为铁磁材料的磁化现象。铁磁材料能被磁化,是因为在它内部存在着许多很小的被称为磁畴的天然磁化区,在铁磁材料未放入磁场之前,这些磁畴杂乱无章地排列着,其磁效应相互抵消,对外部不呈磁性,如图 1-6 所示。当铁磁材料放入磁场后,在外磁场的作用下,磁畴的轴线将趋于一致,由此形成一个附加磁场,叠加在外磁场上,使合成磁场大大增强,所以铁磁材料的磁导率要比非铁磁材料的大得多。

在非铁磁材料中,磁通密度 B 和磁场强度 H 呈线性关系,如图 1-7 中虚线所示;铁磁材料的 B 和 S 呈非线性关系, $B = f(H)$ 称为起始磁化曲线。将铁磁材料进行周期性磁化,磁通密度和磁场强度之间的变化关系就会变成如图 1-8 所示的曲线 $Oabcdefa$, $abcdefa$ 称为磁滞回线。

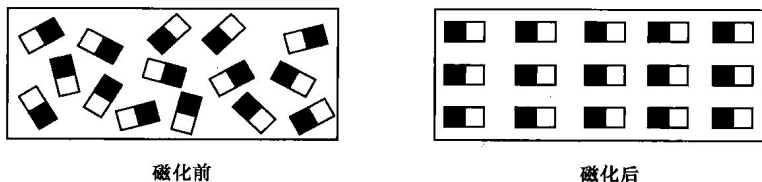


图 1-6 铁磁材料的磁化

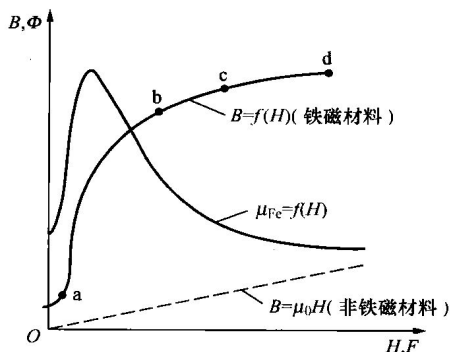


图 1-7 铁磁材料与非铁磁材料的磁化曲线

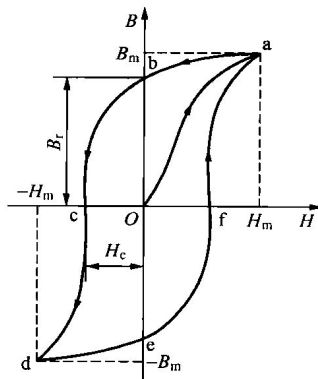


图 1-8 铁磁材料的磁滞回线

2. 铁心损耗

铁心损耗是指磁滞损耗和涡流损耗。

(1) 磁滞损耗

当铁磁材料置于交变磁场中时，材料将被反复交变磁化，与此同时，磁畴间相互不停地摩擦并消耗能量，从而造成损耗，这种损耗被称为磁滞损耗。分析表明，磁滞损耗，与磁场的交变频率、铁心的体积和磁滞回线所包围的面积成正比。

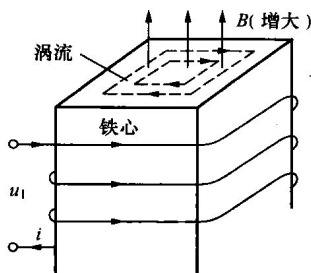


图 1-9 铁磁材料的涡流现象

(2) 涡流损耗

由于铁心是导电的，故根据电磁感应定律，当通过铁心的磁通随时间变化时，铁心中将产生感应电动势，并引起环流，这些环流在铁心内部围绕磁通做旋涡状流动，故称为涡流，如图 1-9 所示。涡流在铁心中引起的损耗被称为涡流损耗。分析表明，频率越高，磁通密度越大，感应电动势就越大，涡流损耗也就越大，而铁心的电阻越大，涡流所流过的路径越长，涡流损耗就越小。

四、生产机械的负载特性

电力拖动系统是电动机和生产机械这两个对立物的统一体。单轴电力拖动系统的运动方程定量地描述了电动机的电磁转矩 T 与生产机械的负载转矩 T_L 和系统转速 n 之间的关系。但是，要对运动方程式求解，除了要知道电动机的机械特性 $n = f(T)$ 之外，还必须知道负载的机械特性 $n = f(T_L)$ 。本节就讨论负载的机械特性。

负载的机械特性就是生产机械的负载特性，它表示同一转轴上转速与负载转矩之间的函数关系，即 $n = f(T_L)$ 。虽然生产机械的类型很多，但是大多数生产机械的负载特性可概括为下列三大类。

1. 恒转矩负载特性

这一类负载比较多，它的机械特性的特点是：负载转矩 T_L 的大小与转速 n 无关，即当转速

变化时, 负载转矩保持常数。根据负载转矩的方向是否与转向有关, 恒转矩负载又分为反抗性恒转矩负载和位能性恒转矩负载两种。

(1) 反抗性恒转矩负载

这类负载的特点是: 负载转矩的大小恒定不变, 而负载转矩的方向总是与转速的方向相反, 即负载转矩始终是阻碍运动的。属于这一类的生产机械有起重机的行走机构、皮带运输机等。图 1-10 所示为桥式起重机的行走机构的行走车轮, 在轨道上的摩擦力总是和运动方向相反的。显然, 反抗性恒转矩负载特性位于第一和第三象限内。

(2) 位能性恒转矩负载

这类负载的特点是: 不仅负载转矩的大小恒定不变, 而且负载转矩的方向也不变。属于这一类的负载有起重机的提升机构, 如图 1-11 所示。负载转矩是由重力作用产生的, 无论起重机是提升重物还是下放重物, 重力作用方向始终不变。为对应的机械特性曲线, 显然位能性恒转矩负载特性位于第一与第四象限内。

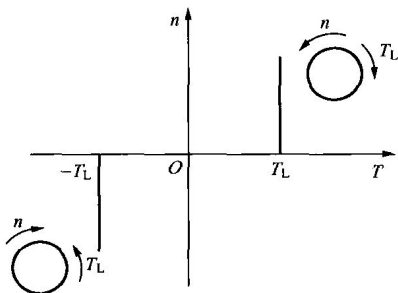


图 1-10 反抗性负载转矩与旋转方向的关系

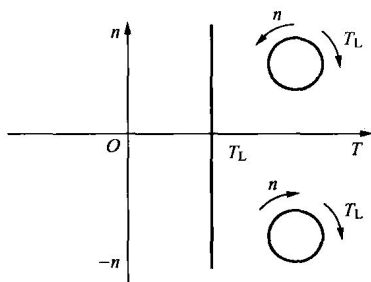


图 1-11 位能性负载转矩与旋转方向的关系

2. 恒功率负载特性

恒功率负载的特点是: 负载转矩与转速的乘积为一常数, 即负载功率常数, 也就是负载转矩 T_L 与转速 n 成反比。它的机械特性是一条双曲线, 如图 1-12 所示。

在机械加工工业中, 有许多机床 (或车床) 在粗加工时, 切削量比较大, 切削阻力也大, 宜采用低速运行。而在精加工时, 切削量比较小, 切削阻力也小, 宜采用高速运行。这就使得在不同情况下, 负载功率基本保持不变。需要指出, 恒功率只是机床加工工艺的一种合理选择, 并非必须如此。另外, 一旦切削量选定以后, 当转速变化时, 负载转矩并不改变, 在这段时间内, 应属于恒转矩性质。

3. 风机与泵类负载的转矩特性

转矩随转速而变的其他负载有风机、水泵、油泵等, 它们的特点是负载转矩与转速的平方成正比, 即 $T_L \propto kn^2$, 其中 k 是比例常数。这类机械的负载特性是一条抛物线, 如图 1-13 中曲线 1 所示。

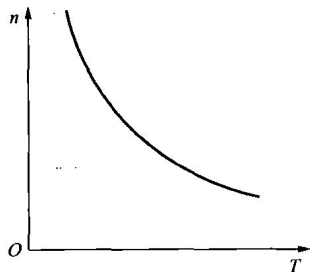


图 1-12 恒功率负载特性图

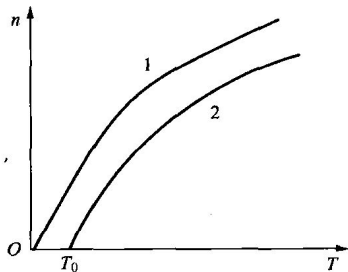


图 1-13 风机与泵类负载特性图

以上介绍的是三种典型的负载转矩特性，而实际的负载转矩特性往往是几种典型特性的综合。如实际的鼓风机除了主要是风机负载特性外，由于轴上还有一定的摩擦转矩 T_0 ，因此实际鼓风机的负载特性应为 $T_L = T_0 + kn^2$ ，如图 1-13 中的曲线 2 所示。

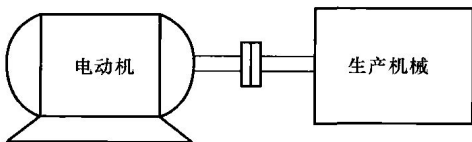


图 1-14 单轴电力拖动系统的示意图

方程为

$$T_{em} - T_L = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (1-11)$$

其中，转动惯量 J 为

$$J = mp^2 = \frac{G}{g} \frac{D^2}{4} = \frac{GD^2}{4g} \quad (1-12)$$

考虑到机械角速度 Ω 与转速 n 之间的关系为 $\Omega = 2\pi n/60$ ，于是有

$$T_{em} - T_L = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} \quad (1-13)$$

2. 运动方程中转矩正负号的确定

(1) 对于实际电力拖动系统，考虑到以下几种情况：

- 1) 电动机可能正、反转运行。
- 2) 电机可能运行在电动机或发电机运行状态。
- 3) 负载转矩也可能由上升过程中的制动性变为下降过程中的驱动性转矩。

(2) 因此使用式 (1-13) 时需注意正负号问题。正负号一般按如下惯例选取：

- 1) 首先取转速的方向为正方向。
- 2) 对于电磁转矩，若与方向相同，则取“+”；反之，若与方向相反，则取“-”。
- 3) 对负载转矩而言，若与方向相反，则取“+”；方向相同，则取“-”。

(3) 根据上述正负号选取规则，式 (1-11) 计算结果存在下列三种情况：

1) 当 $T_{em} > T_L$ 时， $\frac{dn}{dt} > 0$ ，系统作加速运动，电动机把从电网吸收的电能转变为旋转系统的动能，使系统的动能增加。

2) 当 $T_{em} < T_L$ 时， $\frac{dn}{dt} < 0$ ，系统作减速运动，系统将放出的动能转变为电能反馈回电网，使系统的动能减少。

3) 当 $T_{em} = T_L$ 时， $\frac{dn}{dt} = 0$ ， $n = \text{常数}$ （或 $n = 0$ ），系统处于恒转速运行（或静止）状态，系统既不放出动能，也不吸收动能。

六、自动控制基础

自动控制系统，是指利用控制装置操纵被控对象，使被控对象自动地按照给定的规律运行，使被控量等于给定值或根据输入信号的变化按所需规律变化，如图 1-15 所示。自动控制系统有开环控制和闭环控制两种最基本的形式。

五、单轴电力拖动系统的动力学方程式

1. 电力拖动运动方程式

电力拖动运动方程描述了系统的运动状态，如图 1-14 所示，系统的运动状态取决于作用在原动机轴上的各种转矩，如果忽略电动机的空载转矩，由牛顿第二定律可知拖动系统旋转式的运动

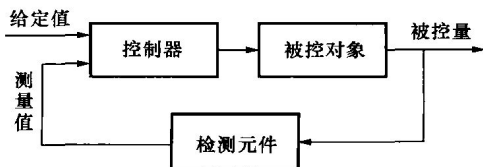


图 1-15 自动控制系统示意图

1. 开环控制

开环控制的系统结构和控制过程均很简单,无抗干扰能力,控制精度较低,一般在控制性能要求不高时采用,开环控制系统示意图如图 1-16 所示。

2. 闭环控制

闭环控制系统的控制装置与被控对象之间,不但有正向控制作用,而且还有反馈控制作用,即被控量的偏差可以影响控制过程,如图 1-17 所示。闭环控制又称为反馈控制或偏差控制。

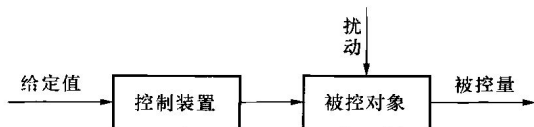


图 1-16 开环控制系统示意图

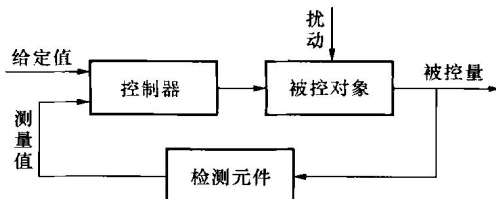


图 1-17 闭环控制系统示意图

闭环控制系统具有以下特点:

(1) 闭环控制系统中,由给定值至被控量的信号通道称为顺向或正向通道;由被控量至系统输入端的信号通道叫反馈通道。

(2) 闭环控制系统能减小或消除反馈通道中扰动所引起的偏差值,具有较高的控制精度和较强的抗干扰能力。

(3) 若设计调试不当,易产生振荡甚至不能正常工作。



思考与练习

1. 电磁感应电动势有哪两种?
2. 电磁感应电动势和电磁力方向的判断方法是什么?
3. 生产机械的负载特性有哪些?

任务 2 三相异步电动机的结构和工作原理



任务描述

电动机是依据电磁感应原理实现能量转换的,所以其内部要构成完整的磁路和独立的电路。带电导体要有绝缘,还要有构成电动机整体的结构支撑部分。

一、三相异步电动机的基本结构

交流电动机可分为异步电动机和同步电动机两大类,异步电动机又分为三相异步电动机和单相异步电动机。三相异步电动机主要用作电动机,去拖动各种生产机械。和其他电动机比较,它具有结构简单、制造容易、价格低廉、运行可靠、维护方便、效率较高等一系列优点,所以三相异步电动机得到了更加广泛的应用。三相异步电动机的缺点是不能经济地在较大范围内平滑调速和必须从电网吸收滞后的无功功率,使电网功率因数降低。

三相异步电动机按其转子结构分为笼型和绕线转子两类,三相笼型异步电动机结构如图 1-18 所示。它们的区别在于转子结构不同。异步电动机结构主要由固定不动的定子和旋转的转子所组

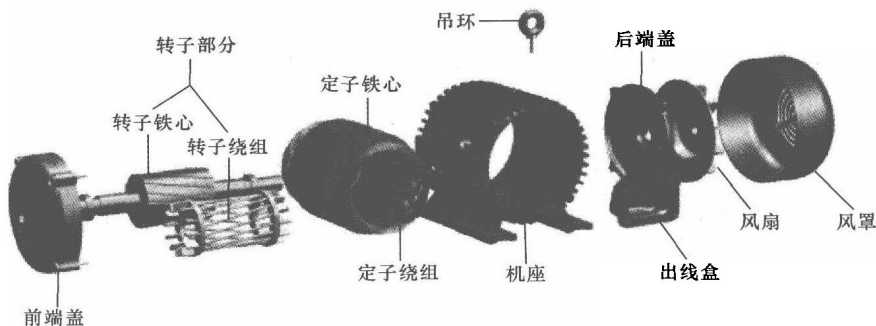


图 1-18 笼型异步电动机的结构图

成，定子与转子间存在很小的间隙，称为气隙。

1. 定子

异步电动机定子由定子铁心、定子绕组和机座等部件组成，定子的作用是用来产生旋转磁场。

(1) 定子铁心

定子铁心是电动机磁路的一部分，由于异步电动机中的磁场是旋转的，定子铁心中的磁通为交变磁通。为了减小磁场在铁心中引起的涡流及磁滞损耗，定子铁心由导磁性能较好的 0.5mm 厚、表面具有绝缘层（涂绝缘漆或硅钢片表面具有氧化膜绝缘层）的硅钢片叠压而成。定子铁心叠片内圆冲有均匀分布的一定形状的槽，用以嵌放定子绕组。中小型电动机的定子铁心采用整圆冲片，如图 1-19 所示。大、中

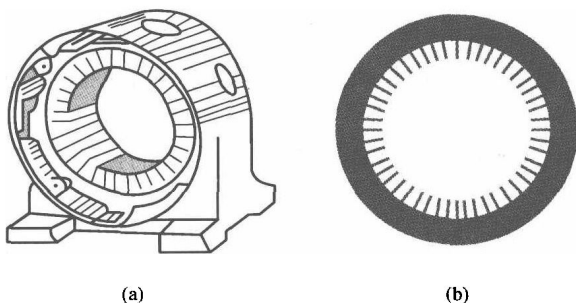


图 1-19 定子机座和铁心冲片

(a) 定子机座；(b) 定子铁心冲片

型电动机常采用扇形冲片拼成一个圆。

(2) 定子绕组

定子绕组是电动机的电路部分，由许多线圈按一定的规律连接而成。小型异步电动机的定子绕组由高强度漆包圆铜线或铝线绕制而成，一般采用单层绕组；大、中型异步电动机的定子绕组用截面较大的扁铜线绕制成型，再包上绝缘，一般采用双层绕组。

(3) 机座

机座是电动机的外壳，用以固定和支撑定子铁心及端盖，机座应具有足够的强度和刚度，同时还应满足通风散热的需要。小型异步电动机的机座一般用铸铁铸成，大型异步电动机机座常用钢板焊接而成。为了增加散热面积、加强散热，封闭式异步电动机机座外壳上面有散热筋，防护式电动机机座两端端盖开有通风孔或机座与定子铁心间留有通风道等。

2. 转子

转子由转子铁心、转子绕组和转轴等部件构成。转子的作用是用来产生感应电流，形成电磁转矩，从而实现机电能量转换。

(1) 转子铁心

转子铁心也是电动机磁路的一部分。通常用定子冲片内圆冲下来的原料做转子叠片，即一般仍用 0.5mm 厚的硅钢片叠压而成，套装在转轴上，转子铁心叠片外圆冲有嵌放转子绕组的槽。如图 1-20 所示。

(2) 转子绕组

转子绕组的作用是感应电动势和电流并产生电磁转矩。其结构有笼型和绕线转子两种,现分述如下。

1) 笼型转子绕组:在每个转子槽中插入一铜条,在铜条两端各用一铜质端环焊接起来形成一个自身闭合的多相短路绕组,形如鼠笼,称为铜条转子,如图 1-21 所示。也可以采用铸铝的方法,把转子导条和端环、风扇叶片用铝液一次浇铸而成,称为铸铝转子,如图 1-22 所示。中小异步电动机的笼型转子一般采用铸铝转子。为了提高电动机的

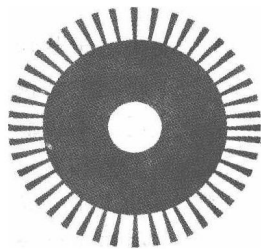


图 1-20 转子铁心冲片

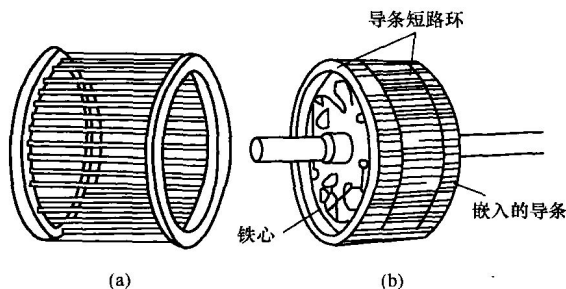


图 1-21 铜条转子结构

(a) 铜条转子绕组; (b) 铜条转子

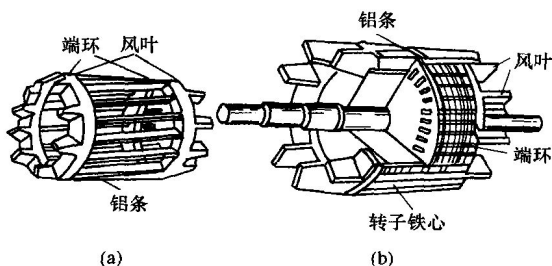


图 1-22 铸铝型转子结构

(a) 铸铝转子绕组; (b) 铸铝转子

2) 绕线式转子绕组:绕线式转子绕组与定子绕组相似,也是制成三相绕组,一般为星形联结。三根引出线分别接到转轴上彼此绝缘的三个集电环上,通过电刷装置与外部电路相连,如图 1-23 所示。转子绕组回路串入三相可变电阻的目的是为了改善起动性能或调节转速。为了消除电刷和集电环之间的机械摩擦损耗及接触电阻损耗,在大中型绕线式电动机中,还装有提刷短路装置。起动时转子绕组与外电路接通,起动完毕后,在不需调速的情况下,将外部电阻全部短接。

(3) 转轴

转轴一般用强度和刚度较高的低碳钢制成,其作用是支撑转子和传递转矩。整个转子靠轴承和端盖支撑着,端盖一般用铸铁或钢板制成,它是电动机外壳机座的一部分。

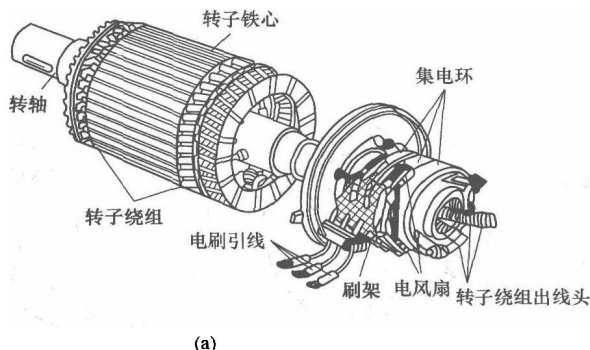


图 1-23 绕线转子

(a) 绕线转子; (b) 绕线转子回路接线示意图

