

电机与拖动基础

(第3版)

李发海 王岩 编著

清华大学出版社

内容简介

本书以电机拖动系统为研究对象，以电机拖动系统的基本理论为基础，着重介绍电机拖动系统的分析和设计方法。全书共分8章，第1章介绍电机拖动系统的基本概念；第2章介绍直流电机拖动系统；第3章介绍交流异步电动机拖动系统；第4章介绍交流同步电动机拖动系统；第5章介绍变频调速系统；第6章介绍伺服电动机拖动系统；第7章介绍步进电动机拖动系统；第8章介绍特种电机拖动系统。本书可作为高等院校电气工程及其自动化专业及相关专业的教材，也可供从事电机拖动工作的工程技术人员参考。

电机与拖动基础 (第3版)

李发海 王岩 编著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书主要讲述电机与电力拖动的基本理论和基础知识,主要内容包括电力拖动系统动力学,直流电机原理,他励直流电动机的启动、调速与四象限运行,变压器,交流电机电枢绕组电动势与磁通势,三相异步电动机原理、启动和四象限运行,同步电动机,交流电机调速,微控电机和电动机的选择。

本书适合于普通高等学校的非电机专业作为教材使用,也可供有关科技人员参考。与本书配套使用的教材为《电机与拖动基础习题解答》。

版权所有,翻印必究。举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

图书在版编目(CIP)数据

电机与拖动基础/李发海,王岩编著.—3版.—北京:清华大学出版社,2005.8

ISBN 7-302-11125-1

I. 电… II. ①李… ②王… III. ①电机—高等学校—教材 ②电力传动—高等学校—教材
IV. TM3

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第054778号

出版者:清华大学出版社 地 址:北京清华大学学研大厦
<http://www.tup.com.cn> 邮 编:100084
社总机:010-62770175 客户服务:010-62776969

责任编辑:张占奎

印刷者:北京市人民文学印刷厂

装订者:三河市化甲屯小学装订二厂

发行者:新华书店总店北京发行所

开 本:185×260 印张:24.5 字数:578千字

版 次:2005年8月第1版 2005年8月第1次印刷

书 号:ISBN 7-302-11125-1/TM·62

印 数:1~5000

定 价:29.80元

本书是为工业自动化等非电机专业编写的教材,全面阐述了这些专业所需的电机与电力拖动的基本理论和基础知识。

本书为第3版,第1版由中央广播电视大学出版社出版,第2版由清华大学出版社出版,均广泛地被普通高校、夜大学和广播电视大学选作为教材,受到师生普遍欢迎。根据教材使用情况及有关专业的需要,对本书再次进行修订。本书保留了绝大部分原有内容,删掉了少部分内容,如直流并励发电机电压建立条件,电焊变压器,电动机额定功率选择的复杂计算等。

本书内容共12章。第1章绪论,介绍了常用的物理概念和定律;第2章介绍了电力拖动系统;第3、4章阐述了直流电机原理,他励直流电动机的机械特性、启动、调速、电动与制动运行及其过渡过程;第5章为变压器;第6章阐述交流电机电枢绕组电动势与磁通势;第7、8章阐述了三相异步电动机的电磁关系、机械特性、启动、电动与制动运行;第9章同步电动机;第10章阐述了三相交流电动机各种调速方法;第11章介绍电动机的发热与温升及简单的选择方法;第12章为微控电机。

本书主要特点是:

(1) 将电机原理与电力拖动两部分内容有机地结合为一个整体。

(2) 以电力拖动系统中应用最广泛的他励直流电动机和三相异步电动机及其电力拖动为重点。

(3) 侧重于基本原理和基本概念的阐述,并始终强调基本理论的实际应用。阐述电机原理时紧密围绕着电力拖动,并着重分析电动机的机械特性。

(4) 文字阐述方面层次清楚、概念准确、通俗易懂、深入浅出。有许多地方例如直流电机电枢绕组电阻值的计算、电力拖动系统过渡过程中有关虚稳态点的概念、三相绕线式异步电动机定子串电阻启动计算等,比前两版简单、准确。变压器连接组别的确定方法受到授课教师和学生好评。

(5) 内容阐述循序渐进,富于启发性,便于自学。

(6) 针对各章内容中的重点和难点,精心编写了大量的例题、思考题和习题。题目具有典型性、规范性、启发性、趣味性和正确性,能很好地引导学生掌握本课程的主要理论,培养学生解决工程实际问题的能力。

(7) 适用面宽。本书从内容上、写法上都考虑了为不同层次的学生所使用,大学本科

与专科、夜大学等,只要对书中内容稍加取舍,都能选作为教材。

(8) 采用了国家最新标准。

本书第1版、第2版都受到了广大师生欢迎,特别是1993年获得清华大学优秀教材一等奖和中央广播电视大学优秀教材奖之后,更被广泛使用。作者在此对广大读者的支持表示深深的感谢。

由于作者水平有限,虽经修订,还会有缺点和错误,望广大读者批评指正。

李发海 王岩

2005年5月于清华园

目 录

CONTENTS

第 1 章 绪论	1
1.1 课程性质	1
1.2 本课程常用的物理概念和定律	2
思考题.....	7
第 2 章 电力拖动系统动力学	8
2.1 电力拖动系统转动方程式	8
2.2 多轴电力拖动系统简化.....	10
2.3 负载的转矩特性与电力拖动系统稳定运行的条件.....	18
思考题	22
习题	23
第 3 章 直流电机原理	26
3.1 直流电机的用途及基本工作原理.....	26
3.2 直流电机的主要结构与型号.....	29
3.3 直流电机的磁路、空载时的气隙磁密与空载磁化特性	33
3.4 直流电机的电枢绕组.....	37
3.5 电枢电动势与电磁转矩.....	44
3.6 直流发电机.....	48
3.7 直流电动机运行原理.....	51
3.8 他励直流电动机的机械特性.....	56
3.9 串励和复励直流电动机.....	62
3.10 直流电机的换向	64
思考题	65
习题	67
第 4 章 他励直流电动机的运行	68
4.1 他励直流电动机的启动.....	68

4.2	他励直流电动机的调速	70
4.3	他励直流电动机的电动与制动运行	80
4.4	直流电力拖动系统的过渡过程	90
	思考题	102
	习题	105
第5章	变压器	108
5.1	概述	108
5.2	变压器空载运行	113
5.3	变压器负载运行	121
5.4	标么值	134
5.5	变压器参数测定	136
5.6	变压器的运行特性	140
5.7	变压器的连接组别	145
5.8	变压器的并联运行	151
5.9	自耦变压器	156
5.10	仪用互感器	159
	思考题	161
	习题	164
第6章	交流电机电枢绕组的电动势与磁通势	168
6.1	交流电机电枢绕组的电动势	168
6.2	交流电机电枢绕组	176
6.3	交流电机电枢单相绕组产生的磁通势	185
6.4	三相电枢绕组产生的磁通势	195
6.5	两相电枢绕组产生的磁通势	200
	思考题	204
	习题	206
第7章	异步电动机原理	208
7.1	异步电动机结构、额定数据与工作原理	208
7.2	三相异步电动机转子不转、转子绕组开路时的电磁关系	214
7.3	三相异步电动机转子堵转时的电磁关系	220
7.4	三相异步电动机转子旋转时的电磁关系	227
7.5	三相异步电动机的功率与转矩	235
7.6	三相异步电动机的机械特性	238
7.7	三相异步电动机的工作特性及其测试方法	247

7.8 三相异步电动机参数的测定	248
思考题	251
习题	253
第8章 三相异步电动机的启动与制动	256
8.1 三相异步电动机直接启动	256
8.2 三相鼠笼式异步电动机降压启动	258
8.3 高启动转矩的三相鼠笼式异步电动机	264
8.4 绕线式三相异步电动机的启动	267
8.5 三相异步电动机的各种运行状态	273
思考题	285
习题	288
第9章 同步电动机	290
9.1 概述	290
9.2 同步电动机的电磁关系	292
9.3 同步电动机的功率关系与矩角特性	297
9.4 同步电动机功率因数的调节	302
9.5 同步电动机的启动	306
思考题	307
习题	307
第10章 三相交流电动机调速	309
10.1 降电压调速	309
10.2 绕线式异步电动机转子回路串电阻调速	311
10.3 鼠笼式三相异步电动机变极对数调速	313
10.4 变频调速	314
10.5 电磁转差离合器	321
10.6 绕线式异步电动机双馈调速及串级调速原理	323
10.7 自控式同步电动机	329
思考题	331
习题	333
第11章 电动机的选择	334
11.1 电动机的一般选择	334
11.2 电动机的发热与温升	337
11.3 电动机的额定功率	339

11.4 电动机额定功率的选择	342
思考题	346
第 12 章 微控电机	349
12.1 单相异步电动机	349
12.2 伺服电动机	355
12.3 力矩电动机	360
12.4 微型同步电动机	361
12.5 步进电动机	364
12.6 旋转变压器	370
12.7 自整角机	372
12.8 测速发电机	377
思考题	380
习题	381
参考文献	382

1.1 课程性质

现代社会中,电能是使用最广泛的一种能源。这是因为电能在生产、传输、分配、转换、控制和管理等方面都非常方便。

电能的生产和使用中,电机起着重要的作用。从能量转换角度看,电机中有发电机和电动机之分。把机械能转换为电能的电机为发电机;反过来,把电能转换为机械能的电机为电动机。

以汽轮机拖动发电机生产电能的工厂,称为火电厂或核电厂。前者以煤为燃料,后者以核能为动力,它们都是通过锅炉产生的蒸汽推动汽轮机旋转发电。以水轮机拖动发电机生产电能的工厂,称为水电厂。显然,水电厂是利用水库里水的位能进行发电。近年来,一些发达国家利用取之不尽、用之不竭的风能发电,取得了长足的发展。

发电机发出的电压一般为 $10\sim 20\text{kV}$ 。为了减少远距离输电中的能量损失,并保证输电质量,须采用变压器将电压升高,达到 110kV , 220kV , 330kV , 500kV 甚至更高。高压输电线将电能输送到用电地区,再经降压变压器,将电压降至用电设备所能承受的电压,如 220V , 380V , 6kV 和 10kV 等。

电能利用中,绝大多数负载都要求将电能转换为机械能加以使用,即由电动机来拖动各种用途的生产机械。电动机拖动生产机械运转完成既定的工艺要求,称为电力拖动。电力拖动有如下的优点:①电动机效率高,运行经济;②电动机具有各种良好的特性,且种类和规格繁多,能很好地满足不同生产机械的需要;③电力拖动易于操作和控制,可以实现自动控制和远距离控制,还能较好地满足控制精度的要求。

在国民经济的各行各业中使用的生产机械,诸如各种机床、轧钢机、矿井提升机、球磨机、风机、水泵、压缩机、铁路牵引机车、纺织机械、造纸机、印刷机、化工机械、榨油机、碾米机、电动工具乃至家用电器等,数不胜数。在电力拖动自动控制系统中,要大量应用控制电机。控制电机是具有特定功能要求,且容量很小的电机。

本课程以电力拖动系统中应用最广泛的电机及其电力拖动为重点,对电机基本原理及特性,从选材、重点及阐述方法上,有别于一般电机学的传统做法,既强调基本原理,又

突出其实用性。

本课程是工业电气自动化专业和非电机专业最主要的技术基础理论课,可为学习自动控制系统等专业课打下坚实的理论基础,同时,本课程又兼有专业课的性质。

1.2 本课程常用的物理概念和定律

为学习本课程,先复习几个常用的物理概念和定律。

1.2.1 磁感应强度(或磁通密度) B

磁场是由电流产生的。描述磁场强弱及方向的物理量是磁感应强度 B 。为了形象地描绘磁场,人们采用磁感应线或称磁力线。磁力线是无头无尾的闭合曲线。图 1.1 中画出了直线电流、圆电流及螺线管电流产生的磁力线。

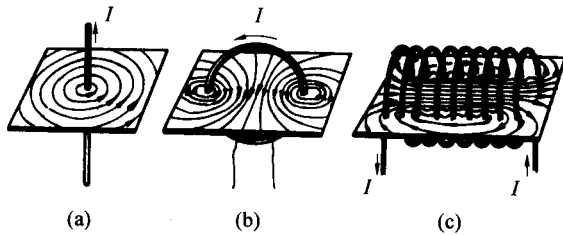


图 1.1 电流磁场中的磁力线

磁感应强度 B 与产生它的电流之间的关系用毕奥-萨伐尔定律描述,磁力线的方向与电流的方向满足右手螺旋关系,如图 1.2 所示。

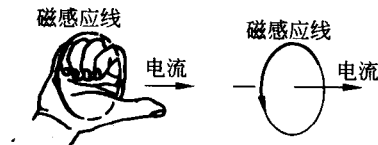


图 1.2 磁力线与电流的右手螺旋关系

1.2.2 磁通量(或磁通) Φ

穿过某一截面 S 的磁感应强度 B 的通量,即穿过截面 S 的磁力线根数称为磁通量,简称磁通,用 Φ 表示,即

$$\Phi = \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S}$$

在均匀磁场中,如果截面 S 与 B 垂直,如图 1.3 所示,则上式变为

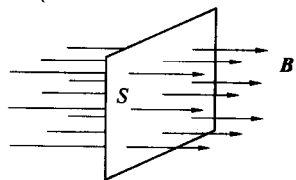


图 1.3 均匀磁场中的磁通

$$\Phi = BS \quad \text{或} \quad B = \frac{\Phi}{S}$$

式中 B 为单位截面积上的磁通,称为磁通密度,简称磁密。在电机和变压器中常采用磁密。在国际单位制中, Φ 的单位名称为韦[伯],单位符号为 Wb; B 的单位名称为特[斯拉],单位符号为 T, $1\text{T}=1\text{Wb}/\text{m}^2$ 。

1.2.3 磁场强度 H

计算导磁物质中的磁场时,引入辅助物理量磁场强度 H ,它与磁密 B 的关系为

$$B = \mu H$$

式中 μ 为导磁物质的磁导率。真空中磁导率 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H}/\text{m}$ 。铁磁材料的 $\mu \gg \mu_0$, 例如铸钢的 μ 约为 μ_0 的 1000 倍,各种硅钢片的 μ 约为 μ_0 的 6000~7000 倍。国际单位制中,磁场强度 H 的单位名称为安[培]/米,单位符号为 A/m。

1.2.4 安培环路定律

在磁场中,沿任意一个闭合磁回路的磁场强度线积分等于该回路所环链的所有电流的代数和,即

$$\oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \sum I$$

式中 $\sum I$ 为该磁路所包围的全电流,因此,这个定律也叫全电流定律。工程应用中遇到的磁路,其几何形状是比较复杂的,直接利用安培环路定律的积分形式进行计算有一定的困难。为此,在计算磁路时,要进行简化。简化的办法是把磁路分成几段,几何形状一样的为一段,找出它的平均磁场强度,再乘上这段磁路的平均长度,得磁位差(也可理解为一段磁路所消耗的磁通势)。最后把各段磁路的磁位差加起来,就等于总磁通势,即

$$\sum_1^n H_k l_k = \sum I = IN$$

式中 H_k 为磁路里第 k 段磁路的磁场强度,单位为 A/m;

l_k 为第 k 段磁路的平均长度,单位为 m;

IN 为作用在整个磁路上的磁通势,即全电流数,单位为安匝;

N 为励磁线圈的匝数。

上式也可以理解为,消耗在任一闭合磁回路上的磁通势,等于该磁路所链着的全部电流。

1.2.5 铁磁材料的磁化特性

铁磁材料(如铁、镍、钴等)的磁导率 μ 比真空磁导率 μ_0 大几千到几万倍。对于铁磁材料,磁导率 μ 除了比 μ_0 大得多外,还与磁场强度以及物质磁状态的历史有关,所以铁磁

材料的 μ 不是一个常数。在工程计算时,不按 $H=B/\mu$ 进行计算,而是事先把各种铁磁材料用试验的方法,测出它们在不同磁场强度 H 下对应的磁密 B ,并画成 $B-H$ 曲线(称为磁化曲线)如图 1.4 所示。从图 1.4(a)中的曲线 1,3 可看出,铁磁材料的 $B-H$ 曲线不是单值的,而是具有磁滞回线的特点,即在同一个磁场强度 H 下,对应着两个磁密 B 值。这就是说,一个 H 究竟是对应着哪一个磁密 B 值,还要看铁磁材料工作状态的历史情况。当铁磁材料的磁滞回线较窄时,可以用两条曲线的平均值,即基本磁化曲线[见图 1.4(a)中曲线 2]来进行计算。这样, B 与 H 之间便呈现了单值关系。顺便还要指出,磁化特性的另一个特点是具有饱和性。图 1.4(b)是铁磁材料的原始磁化特性,它与平均磁化特性相差甚小。当磁场强度从零增大时,磁密 B 随磁场强度 H 增加较慢(图中 Oa 段);之后,磁密 B 随 H 的增加而迅速增大(ab 段);过了 b 点, B 的增加减慢了(bc 段);最后为 cd 段,又呈直线。其中 a 称为跗点, b 点为膝点, c 点为饱和点。过了饱和点 c ,铁磁材料的磁导率趋近于 μ_0 。

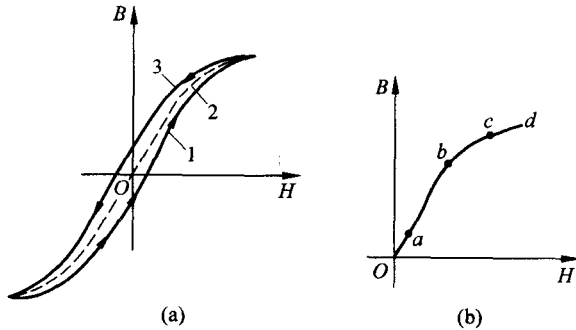


图 1.4 铁磁材料的磁化特性

1——磁滞回线上升分支; 2——平均磁化特性; 3——磁滞回线下降分支

磁滞回线较窄的铁磁材料属于软磁材料,如硅钢片、铁镍合金、铁淦氧、铸钢等。这些材料磁导率较高,回线包围面积小,磁滞损耗小,多用于做电机、变压器的铁心。硬磁材料,如钨钢、钴钢等,磁滞回线较宽,主要用做永久磁铁。

1.2.6 简单磁路的计算方法

图 1.5 是一个最简单的磁路,它是由铁磁材料和气隙两部分串联而成。铁心上绕了匝数为 N 的线圈,称为励磁线圈,线圈电流为 I 。进行磁路计算时,把这个磁路按材料及形状分成两段:一段是截面积为 S 的铁心,长度为 l ,磁场强度为 H ; 另一段是气隙,长度为 δ ,磁场强度为 H_0 。根据安培环路定律,有

$$Hl + H_0\delta = IN$$

在电机或变压器里作磁路计算时,一般已知的是磁路里各段的磁通 Φ 以及各段磁路的几何尺寸(即磁路长度与横截面),要求出所需的总磁势 IN 。从上式看出,磁路长度 l, δ

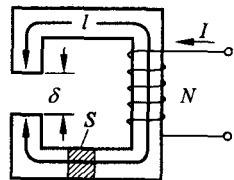


图 1.5 简单磁路

以及匝数 N 是已知的,要求出电流 I ,必须先找出各段磁路的 H 和 H_0 。具体计算时,根据给定各段磁路里的磁通 Φ ,先算出各段磁路中对应的磁通密度 B ($B = \frac{\Phi}{S}$, S 为截面积),然后根据算出的磁通密度 B ,求磁场强度 H ($H = \frac{B}{\mu}$)。

如果是铁磁材料,可以根据其磁化特性查出磁场强度 H 。

1.2.7 载流导体在磁场中的安培力

磁场对场中载流导体施加的力称为安培力。在通以电流 i 的导体上取一小段导体 dl ,其电流元 idl 受安培力的大小及方向,由安培定律来描述,即

$$df = idl \times B$$

式中 B 为电流元所在处的磁感应强度;

df 为磁场对电流元的作用力。

在均匀磁场中,若载流直导体与 B 方向垂直,长度为 l ,流过的电流为 i ,则载流导体所受的力为

$$f = Bli$$

在电机学中,习惯上用左手定则确定 f 的方向,即把左手伸开,大拇指与其他四指成 90° ,如图 1.6 所示,如果磁力线指向手心,其他四指指向导体中电流的方向,则大拇指的指向就是导体受力的方向。

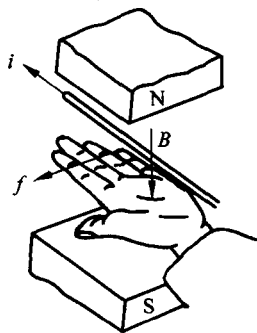


图 1.6 确定载流导体受力方向的左手定则

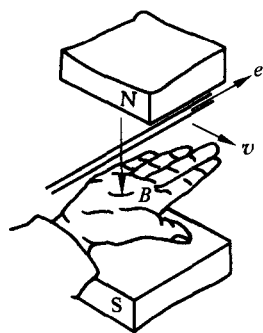


图 1.7 确定感应电动势方向的右手定则

1.2.8 电磁感应定律

变化的磁场会产生电场,使导体中产生感应电动势,这就是电磁感应现象。在电机中,电磁感应现象主要表现在两个方面:①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,称之为切割电动势;②线圈中的磁通变化时,线圈内产生感应电动势,称为变压器电动势。下面对这两种情况下产生的感应电动势作定性与定量的描述。

1. 切割电动势

长度为 l 的直导体在磁场中与磁场相对运动, 导体切割磁力线的速度为 v , 导体处的磁感应强度为 B 时, 若磁场均匀, 且直导体 l 、磁感应强度 B 、导体相对运动方向 v 三者互相垂直, 则导体中感应电动势为

$$e = Blv$$

在电机学中, 习惯上用右手定则确定电动势 e 的方向, 即把右手手掌伸开, 大拇指与其他四指成 90° 角, 如图 1.7 所示, 如果让磁力线指向手心, 大拇指指向导体运动方向, 则其他四指的指向就是导体中感应电动势的方向。

2. 变压器电动势

如图 1.8 所示, 匝数为 N 的线圈环链着磁通 Φ , 当 Φ 变化时, 线圈 AX 两端感应电动势 e , 其大小与线圈匝数及磁通变化率成正比, 方向由楞次定律决定。当 Φ 增加时, 即 $\frac{d\Phi}{dt} > 0$, A 点为高电位, X 点为低电位; 当 Φ 减小时, 即 $\frac{d\Phi}{dt} < 0$, 根据楞次定律, X 点为高电位, A 点为低电位。为了写成数学表达式, 首先要规定电动势 e 的正方向, 有以下两种方法。

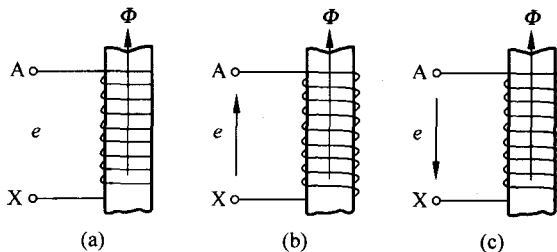


图 1.8 磁通及其感应电动势

(1) 按左手螺旋关系规定 e 与 Φ 的正方向

如图 1.8(b) 所示, 此时 e 的正方向从 X 指向 A。与实际情况比较, 当 $\frac{d\Phi}{dt} > 0$ 时, 实际上是 A 点高电位, X 点低电位, 而规定的 e 的正方向与之相同, 这样 $e > 0$; 当 $\frac{d\Phi}{dt} < 0$ 时, 实际上是 A 点低电位, X 点高电位, 而规定的 e 的方向与之正好相反, 因此 $e < 0$ 。也就是说, $\frac{d\Phi}{dt}$ 与 e 的符号是一致的, 同时为正或同时为负, 这样, e 和 Φ 之间的关系就应写为

$$e = N \frac{d\Phi}{dt}$$

(2) 按右手螺旋关系规定 e 与 Φ 的正方向

如图 1.8(c) 所示, 此时 e 的正方向从 A 指向 X。与实际情况比较, 当 $\frac{d\Phi}{dt} > 0$ 时, 实际

上 A 点为高电位, X 点为低电位, 而规定的 e 的正方向与实际方向相反, 此时 $e < 0$; 同理, 当 $\frac{d\Phi}{dt} < 0$ 时, $e > 0$ 。这就是说, $\frac{d\Phi}{dt}$ 与 e 总是符号相反, e 与 Φ 的关系式就应写为

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt}$$

以上两种不同正方向的规定下, 数学式的符号不同。

思考题

- 1.1 通电螺线管电流方向如图 1.9 所示, 请画出磁力线方向。
- 1.2 请画出图 1.10 所示磁场中载流导体的受力方向。

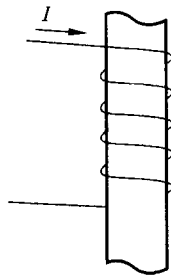


图 1.9 思考题 1.1 图

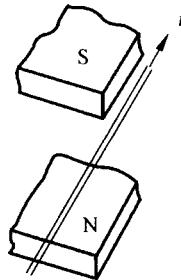


图 1.10 思考题 1.2 图

- 1.3 请画出图 1.11 所示运动导体产生感应电动势的方向。
- 1.4 螺线管中磁通与电动势的正方向如图 1.12 所示, 当磁通变化时, 分别写出它们之间的关系式。

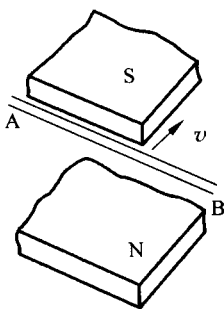


图 1.11 思考题 1.3 图

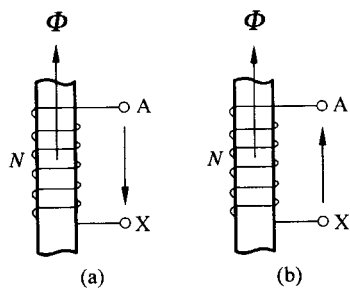


图 1.12 思考题 1.4 图

电力拖动系统动力学

2.1 电力拖动系统转动方程式

当电动机接通电源后,便可产生电磁转矩,使电机旋转起来,并向转轴拖动的机械负载输出机械功率(后面章节中介绍)。

电动机转子旋转时,转子本身由于风阻、轴承摩擦等原因有一些损耗,称之为空载损耗。电动机若不拖动负载,即空载运行时,空载损耗也存在;电动机负载运行时,空载损耗仍然存在,因此,电动机输出的转矩就比电磁转矩小,相差一个空载转矩。

电力拖动系统一般是由电动机、生产机械的传动机构、工作机构、控制设备和电源组成,如图 2.1 所示。

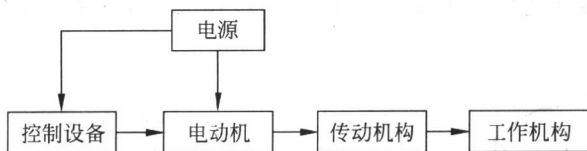


图 2.1 电力拖动系统组成

最简单的电力拖动系统是电动机转轴与生产机械的工作机构直接相连,工作机构是电动机的负载,这种简单系统称为单轴电力拖动系统,电动机与负载为一个轴、同一转速。

图 2.2 所示为单轴电力拖动系统,图中标示的物理量主要有: n ——电动机转速; T ——电动机电磁转矩; T_0 ——电动机空载转矩; T_F ——工作机构(负载)的转矩。图中还标注各量的正方向。为了分析问题的方便,通常称 $T_F + T_0 = T_L$ 为负载转矩,分析电力拖动系统运行时,所指负载转矩即为 T_L 。电动机负载运行时,一般情况下 $T_F \gg T_0$,可以忽略 T_0 ,认为 $T_L = T_F$ 。

转速的单位名称为转/分,单位符号为 r/\min ,转矩的单位名称为牛·米,单位符号为 $N \cdot m$ 。

如图 2.2 所示,单轴电力拖动系统中电磁转矩、负载转矩与转速之间的关系用转动方程式来描述,为