



21世纪电气信息学科立体化系列教材

电机与拖动

● 主编 刘振兴 李新华 吴雨川

华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

TM3/98D

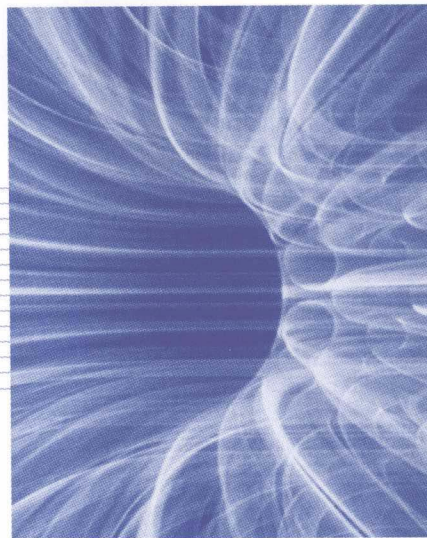
2008



21世纪电气信息学科立体化系列教材

电机与拖动

主 编 刘振兴 李新华 吴雨川
副主编 陈堂贤 辛小南 曾 丽



华中科技大学出版社

(中国·武汉)

图书在版编目(CIP)数据

电机与拖动/刘振兴 李新华 吴雨川 主编. —武汉:华中科技大学出版社,2008年2月
ISBN 978-7-5609-4390-9

I. 过… II. ①刘… ②李… ③吴… 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(2008)第 013457 号

电机与拖动

刘振兴 李新华 吴雨川 主编

策划编辑:王红梅

责任编辑:王红梅 何 汶

责任校对:刘 竣

封面设计:秦 茹

责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87557437

录 排:武汉众心图文激光照排中心

印 刷:湖北新华印务有限公司

开本:787mm×960mm 1/16

印张:16.5 插页:2

字数:337 000

版次:2008年2月第1版

印次:2008年2月第1次印刷

定价:27.80元(含1CD)

ISBN 978-7-5609-4390-9/TM·95

(本书若有印装质量问题,请向出版社发行部调换)

内 容 简 介

本书共 11 章。第 1 章介绍常用的基本概念、电磁定律和铁磁材料的特性;第 2 章介绍电力拖动系统的运动方程;第 3、4 章介绍直流电机的原理、机械特性、起动、调速和制动运行及其过渡过程;第 5 章介绍变压器的原理、特性和连接组别;第 6 章分析交流绕组的绕组结构、磁动势和电动势;第 7 章阐述异步电动机的原理、电磁关系、机械特性;第 8 章介绍异步电动机的起动与制动运行;第 9 章介绍异步电动机的调速方法;第 10 章阐述同步电动机的稳态运行和起动;第 11 章介绍电动机容量的选择。每章后面附有习题,供学习和复习用。

本书可作为自动化、电气自动化、机电一体等专业的教材或参考书,也可供从事相关专业的工程技术人员参考。

前 言

本教材面向自动化、电气工程,以及机电一体化等专业的学生,内容涵盖了过去的“电机学”和“电力拖动基础”两门课程,是二者的有机结合。通过本课程的学习,学生能掌握广泛应用于现代化生产中的直流电机、变压器和交流电机的基本原理和特性,电力拖动起动、制动和调速的方法及性能。

在编写过程中,既要考虑本课程学时大为削减的现实,也要体现内容的完整性和先进性。因此,对内容的组织进行了精心的选择,力求层次清楚、重点突出,侧重基本原理和基本概念、通俗易懂、深入浅出。

本书共 11 章。第 1 章介绍常用的基本概念、电磁定律和铁磁材料的特性;第 2 章介绍电力拖动系统的运动方程;第 3、4 章介绍直流电机的原理、机械特性、起动、调速和制动运行及其过渡过程;第 5 章介绍变压器的原理、特性和连接组别;第 6 章分析交流绕组的绕组结构、磁动势和电动势;第 7 章阐述异步电动机的原理、电磁关系、机械特性;第 8 章介绍异步电动机的起动与制动运行;第 9 章介绍异步电动机的调速方法;第 10 章阐述同步电动机的稳态运行和起动;第 11 章介绍电动机容量的选择。

在华中科技大学出版社的组织与协调下,来自 6 所高校长期从事“电机与拖动”课程教学的老师组成了本书编委会。经过认真讨论和具体分工,完成了本书的编写工作。武汉科技大学的刘振兴编写了第 1、9 章,武汉科技学院的吴雨川编写了第 2、3 章,武汉工程大学的曾丽编写了第 4 章,三峡大学的陈堂贤编写了第 5、10 章,湖北工业大学的武洁和李新华共同编写了第 6、8 章,郑州大学的辛小南编写了第 7、11 章。全书由刘振兴负责修改和统稿。

本书参考了国内兄弟学校的教材和专著,在此谨向有关著作者致以衷心的感谢!

由于作者水平有限、时间仓促,书中难免存在缺点、错误和疏漏之处,恳请同行专家和读者批评指正。

21 世纪电气信息学科立体化系列教材

《电机与拖动》编委会

2007 年 12 月



(87) 直流电机的用途及工作原理 (23)

(42) 直流电机的主要结构与额定值和型号 (25)

(58) 磁路、空载气隙磁密与空载磁化特性 (31)

1 绪论

(80) 1.1 教材内容与课程性质 (1)

(80) 1.2 电力拖动系统的组成 (2)

(70) 1.3 常用基本电磁量和电磁定律 (2)

2 电力拖动基础的动力学

(80) 2.1 单轴电力拖动系统的动力学分析 (9)

(80) 2.2 多轴电力拖动系统的简化 (10)

(82) 2.3 负载的转矩性质与系统稳定运行的条件 (15)

(82) 思考题与习题 (22)

3 直流电机原理

(82) 3.1 直流电机的用途及工作原理 (23)

(82) 3.2 直流电机的主要结构与额定值和型号 (25)

(82) 3.3 磁路、空载气隙磁密与空载磁化特性 (31)

(82) 3.4 直流电机电枢绕组 (33)

(82) 3.5 电枢电动势和电磁转矩 (37)

(82) 3.6 直流发电机原理 (40)

(82) 3.7 直流电动机原理 (44)

(82) 3.8 他励直流电动机的机械特性 (47)

(82) 3.9 串励和复励直流电动机 (50)

(82) 3.10 直流电机的电枢反应和换向 (52)

(82) 思考题与习题 (59)

4 直流电动机的电力拖动

(82) 4.1 他励直流电动机的起动 (61)

(82) 4.2 他励直流电动机的调速 (65)

4.3 他励直流电动机的四象限运行	(73)
4.4 电力拖动系统的过渡过程	(84)
思考题与习题	(87)

5 变压器

5.1 概述	(89)
5.2 变压器的空载运行	(91)
5.3 变压器的负载运行	(96)
5.4 变压器参数的测定	(103)
5.5 标么值及其应用	(106)
5.6 变压器的运行性能	(107)
5.7 三相变压器	(111)
5.8 自耦变压器	(117)
5.9 仪用互感器	(119)
思考题与习题	(120)

6 交流电机电枢绕组的电动势和磁动势

6.1 交流电机的基本原理	(125)
6.2 交流电机电枢绕组	(129)
6.3 交流电机电枢绕组的电动势	(135)
6.4 交流电机电枢绕组的磁动势	(140)
思考题与习题	(147)

7 三相异步电动机的工作原理

7.1 异步电机的结构、原理和额定值	(149)
7.2 三相异步电机转子开路时的电磁关系	(154)
7.3 三相异步电机转子堵转时的电磁关系	(155)
7.4 转子转动后异步电机的电磁关系	(158)
7.5 三相异步电机的功率和转矩	(164)
7.6 三相异步电机的机械特性	(166)
7.7 三相异步电机的工作特性	(171)
7.8 三相异步电机的参数测定	(172)
思考题与习题	(174)

8 三相异步电机的电力拖动

8.1 小容量异步电机的直接起动	(177)
------------------------	-------

8.2 三相笼型异步电机的降压起动	(179)
8.3 高起动转矩的三相笼型异步电机	(186)
8.4 绕线式三相异步电机的起动	(189)
8.5 三相异步电机的四象限运行	(193)
思考题与习题	(204)

9 三相异步电机的调速

9.1 绕线式异步电机转子串电阻调速	(207)
9.2 降电压调速	(210)
9.3 鼠笼式三相异步电机变极调速	(212)
9.4 变频调速	(214)
9.5 绕线式异步电机的串级调速	(218)
思考题与习题	(221)

10 同步电动机

10.1 概述	(223)
10.2 同步电机的电磁关系	(225)
10.3 同步电机的功角关系和矩角关系	(229)
10.4 同步电机功率因数的调节	(232)
10.5 同步电机的起动	(236)
思考题与习题	(237)

11 电动机的容量选择

11.1 电动机的一般选择	(239)
11.2 电动机的发热与温升	(241)
11.3 电动机的额定功率	(243)
11.4 电动机额定功率的选择	(247)
思考题与习题	(252)

参考文献

绪论

1

本章主要介绍电机的简单分类,电力拖动系统的组成、主要内容、课程的性质与特点,回顾与总结本课程必需的基本电磁量、定理、定律、铁磁材料的特性。一方面便于读者对课程有一个简单了解,另一方面为后续章节的学习提供基础。

1.1 教材内容与课程性质

“电机与拖动”是把“电机学”和“电力拖动基础”两门课程有机结合而成的一门课程。

电机是以电磁感应和电磁力定律为基本工作原理进行电能的传递或机电能量转换的机械装置。电能易于转换、传输、分配和控制,是现代能源的主要形式。发电机把机械能转化为电能。而电能主要通过火力、水力、核能和风力发电厂生产。为了减少输电中的能量损失,远距离输电均采用高电压形式。电厂发出的电能经变压器升压,然后经高压输电线路送达目的地,再经变压器降压供给用户。

电能转换为机械能主要通过电动机完成。电动机拖动生产机械运转的方式称为电力拖动。由于电动机的效率高,种类和规格多,具有各种良好的特性;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。因此,电力拖动广泛应用于国民经济的各个领域,例如各种机床、轧制生产线、电力机车、风机、水泵、电动工具乃至家用电器等。

为了能建立一个感性认识,对电机进行如图 1-1 所示的简单的分类。

在电力拖动自动控制系统中,大量应用控制电机。控制电机是一种在自动控制、自动调节、随动系统、远距离测量及计算装置中作为执行元件、检测元件的小型电机。这部分内容将在另外的教材中涉及。

在工业自动化专业与电气工程及自动化专业中,“电机与拖动”是一门十分重要的专业基础课或技术基础课,它在整个专业教学计划中起着承前启后的作用,是后续课程

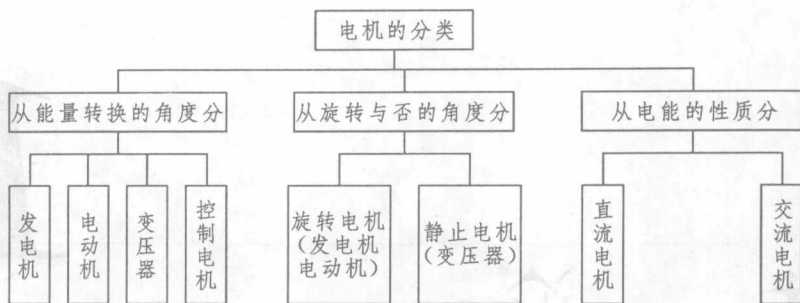


图 1-1 电机的分类

“自动控制原理”、“电力拖动自动控制系统”、“电力电子技术”等课程的重要基础。它主要研究电机拖动系统的基本理论问题,分析研究直流电机、变压器、异步电机和同步电动机的简单结构、原理、基本电磁关系和运行特性;并联系生产实际,从生产机械工作的要求出发,重点介绍交直流拖动系统的动静态运行特性。因此,该课程既具有较强的基础性,又兼具专业性。

1.2 电力拖动系统的组成

简单的电力拖动系统由电源、电动机、传动机构、负载和自动控制装置等部分组成,见图 1-2。电源提供电动机和控制系统所需的电能;电动机完成电能向机械能的转换;传动机构用于传递动力,并实现运转方式和运转速度的转换,以满足不同负载的要求;自动控制装置则控制电动机拖动负载按照设定的工作方式运行,完成规定的生产任务。



图 1-2 电力拖动系统的组成

1.3 常用基本电磁量和电磁定律

由于电机是利用电磁感应和电磁力原理来进行能量传递和转换的,因此,有必要复习在先修课中讲过的几个常用基本电磁量和电磁定律的相关概念。

1.3.1 磁感应强度 B

描述磁场强弱及方向的物理量是磁感应强度 B , 磁场往往采用磁力线来形象地描绘,磁力线可以看成是无头无尾的闭合曲线。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,磁力线方向与产生该磁场的电流的方向满足右手螺旋关系。

1.3.2 磁通量 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,有

$$\Phi = \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} \quad (1-1)$$

在均匀磁场中,如果截面 S 与 B 垂直,则式(1-1)变为

$$\Phi = BS \quad (1-2)$$

式中, B 为单位截面积上的磁通,也称为磁通密度,简称磁密。在国际单位制中, Φ 的单位名称为韦[伯],单位符号 Wb ; B 的单位名称为特[斯拉],单位符号 T , $1 \text{ T} = 1 \text{ Wb/m}^2$ 。

1.3.3 磁场强度 H

在充满均匀磁介质的情况下,若包括介质因磁化而产生的磁场在内时,用磁感应强度 B 表示;单独由电流或者运动电荷所引起的磁场(不包括介质磁化而产生的磁场时)则用磁场强度 H 表示,它与磁密 B 的关系为

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (1-3)$$

式中, μ 为导磁物质的磁导率。真空的磁导率为 μ_0 。铁磁材料的 $\mu \gg \mu_0$,例如铸钢的磁导率 μ 约为 μ_0 的 1 000 倍,各种硅钢片的磁导率 μ 约为 μ_0 的 6 000 ~ 7 000 倍。国际单位制中磁场强度 H 的单位名称为安[培] 每米,单位符号为 A/m 。

1.3.4 全电流定律

如图 1-3 所示,在磁场中,沿任意一个闭合有向回路的磁场强度的线积分等于该回路所交链的所有电流的代数和,即

$$\oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \sum I \quad (1-4)$$

式(1-4)也称为安培环路定律。一般情况下,如果电流的参考方向与回路方向满足右手螺旋关系,该电流前取正号,否则取负号。同时,磁场强度沿闭合回路的线积分的大小只与包围的电流代数和有关,与积分路径无关。简单电路和简单磁路的对偶关系如图 1-4 所示。

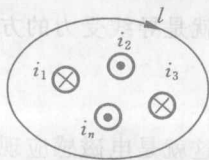


图 1-3 全电流定律的原理示意图

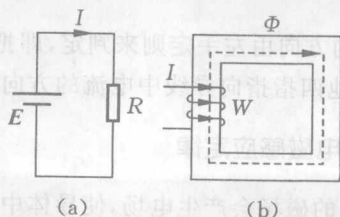


图 1-4 简单电路和简单磁路的对偶关系

1.3.5 磁路欧姆定律

自然界存在很多对偶现象,在某一领域存在的规律在其他领域中也有相似的规律存在,电路和磁路就是这样一个对偶对。由于磁路比较抽象,为便于理解,以最简单的电路和磁路进行对比。

正如电动势 E 作用在一定电阻 R 的电路,产生的电流 I 遵循欧姆定律一样,一定的磁动势 F 作用在一定磁阻 R_m 的磁路上,可以产生磁通 Φ 。磁通的大小同样遵循磁路欧姆定律,即

$$\Phi = \frac{F}{R_m} \quad (1-5)$$

表 1-1 电路与磁路基本物理量对照表 各量的对应关系见表 1-1。

电 路	磁 路
电流 I	磁通 Φ
电动势 E	磁动势 F
电阻 R	磁阻 R_m
$I = \frac{E}{R}$	$\Phi = \frac{F}{R_m}$
$R = \rho \frac{l}{s}$	$R_m = \frac{l}{\mu s}$

其中,磁动势 F 来自于安培环路定律的计算结果。沿着图 1-3(b) 虚线所示的闭合回路进行磁场强度的线积分,可得

$$\oint_1 \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \sum I = W I = F \quad (1-6)$$

正如电路的分析和运算遵循基尔霍夫第一定律和第二定律一样,磁路也存在相同的规律,可以用来计算和分析比较复杂的磁路系统。限于篇幅的关系,这里不再一一赘述。

1.3.6 载流导体在磁场中的电磁力

载流导线在磁场中受到的力称为电磁力。从通以电流 i 的导线上取一小段作为电流元,电流元受电磁力的大小及方向由安培定律来描述,为

$$d\mathbf{f} = i d\mathbf{l} \times \mathbf{B}$$

式中: $d\mathbf{l}$ 为线元; $i d\mathbf{l}$ 为电流元,方向与电流 i 的方向相同; $\mathbf{B}$ 为电流元所在处的磁感应强度; $d\mathbf{f}$ 为磁场对电流元的作用力。

在均匀磁场中,若载流直导线与 $\mathbf{B}$ 方向垂直,长度为 l ,流过的电流为 i ,载流导线所受的力为 $\mathbf{f}$,则

$$\mathbf{f} = B l i \quad (1-7)$$

式中, $\mathbf{f}$ 的方向由左手定则来判定,即把左手伸开,大拇指与其他四指垂直,磁力线指向手心,其他四指指向导线中电流的方向,大拇指所指方向就是导线受力的方向。

1.3.7 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有两种形式:① 导线与磁场有相对运动,导线切割磁力线时,导线内产生

感应电动势,称为切割电动势,也称运动电势。② 交链线圈的磁通发生变化时,线圈内产生感应电动势,称为变压器电势。

1. 运动电势

长度为 l 的直导线在磁场中与磁场相对运动,导线切割磁力线的速度为 v ,导线处的磁感应强度为 B 时,若磁场均匀,直导线、磁感应强度 B 、导线相对运动的方向三者互相垂直,则导线中感应电动势为

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

习惯上用右手定则确定电动势 e 的方向。伸开右手手掌,大拇指与其他四指成垂直,磁力线指向手心,大拇指指向导线切割磁力线的方向,其他四指的指向就是导线中感应电动势的方向。

2. 变压器电势

如图 1-5 所示,匝数为 W 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 $d\Phi/dt > 0$,A 点为高电位,X 点为低电位;当 Φ 减少时, $d\Phi/dt < 0$,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。有以下两种规定方法。

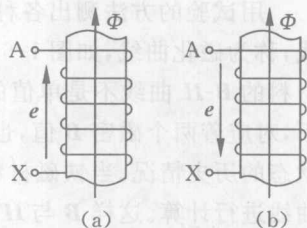


图 1-5 磁通及其感应电动势

1) 按右手螺旋关系规定 e 与 Φ 的正方向

如图 1-4(a) 所示,假定磁通的参考方向朝上,此时 e 的正方向从 X 指向 A。与实际情况比较,当 $d\Phi/dt > 0$ 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 $e < 0$;显然,当 $d\Phi/dt < 0$ 时, $e > 0$ 。这就是说 $d\Phi/dt$ 与 e 总是不同符号, e 和 Φ 的关系就应写为

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

2) 按左手螺旋关系规定 e 与 Φ 的正方向

如图 1-4(b) 所示,假定磁通的参考方向朝上,此时 e 的正方向从 A 指向 X。与实际情况比较,当 $d\Phi/dt > 0$ 时,实际上 A 点为高电位,X 点为低电位,而规定的 e 的正方向与之相同,这样 $e > 0$;当 $d\Phi/dt < 0$ 时,实际上 A 点为低电位,X 点为高电位,而规定的 e 的方向与之正好相反,因此 $e < 0$ 。也就是说 $d\Phi/dt$ 与 e 的符号是一致的,同时为正或同时为负,这样, e 和 Φ 的关系就应写为

$$e = W \frac{d\Phi}{dt} \quad (1-10)$$

以上两种不同正方向的规定,其数学式的符号不同,前者较后者更常用。

1.3.8 铁磁材料的磁化特性

磁场是各种电机通过电磁感应实现能量转换的媒介,因此电机中必须有引导磁通的磁路。根据磁路欧姆定律可知,在一定的励磁电流下要产生较强的磁场,磁路的磁阻必须较小,因此,电机中广泛使用铁磁材料构成磁路。铁磁材料(如铁、镍、钴)的磁导率 μ 比空气的磁导率 μ_0 大几千倍至几万倍。

铁磁材料的导磁性能之所以好,是因为其内部存在大量的强烈磁化了的自发磁化单元——磁畴。在正常情况下,磁畴无规则排列,对外不显示磁性。当一旦受到外磁场的作用时,磁畴就取外磁场方向,从而形成一个较强的附加磁场叠加在外磁场上。所以铁磁材料的导磁系数比非铁磁材料的导磁系数大得多。

对于一般的非磁性材料,磁感应强度 B 与磁场强度 H 成正比,即 $B = \mu_0 H$;对于铁磁材料,磁感应强度 B 与磁场强度 H 呈非线性关系,磁导率 μ 不再是常数。

用试验的方法测出各种铁磁材料在不同磁场强度 H 下对应的磁密 B ,并画成 $B-H$ 曲线,称为磁化曲线,如图1-6所示。从图1-6(a)中磁滞回线上升、下降分支曲线可知,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,即在同一个大小的磁场强度 H 下,对应着两个磁密 B 值,也就是说,究竟对应着哪一个磁密 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,可以用它的平均磁化曲线,即基本磁化曲线进行计算。这样 B 与 H 之间便呈现了单值关系。磁化特性的另一个特点是具有饱和性。图1-6(b)是铁磁材料在第一象限的平均磁化特性曲线和磁导率曲线。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(bc 段),最后几乎呈直线(cd 段)。其中, a 为跗点, b 为膝点, c 为饱和点。过了饱和点 c ,铁磁材料的磁导率 μ 趋近于0。

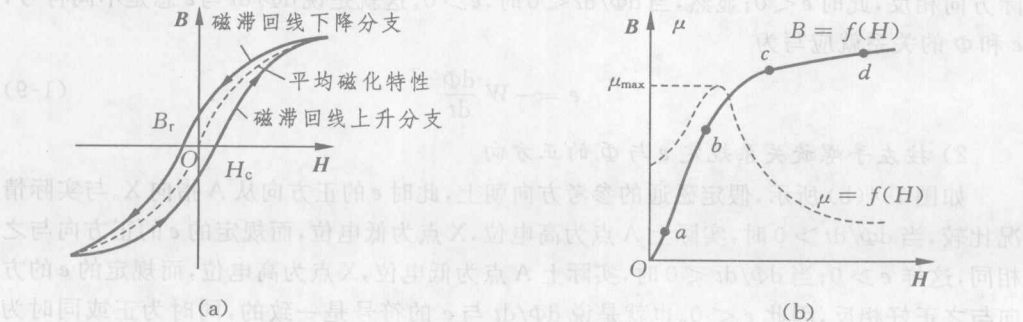


图 1-6 铁磁材料的磁化特性

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、铸钢等。这些材料的磁导率较高,回线包围面积小,磁滞损耗小,多用做电机、变压器的铁芯。硬磁材料,如钨钢、钴钢等,其磁滞回线较宽,主要用做永久磁铁。

铁磁材料在交变磁场作用下的反复磁化过程中,磁畴会不停转动,相互之间会不断摩擦,因而就要消耗一定的能量,产生功率损耗,这种损耗称为磁滞损耗。磁滞损耗与磁滞回线的面积、电流频率 f 和铁芯体积 V 成正比。

铁磁材料在交变磁场中会产生围绕磁通呈涡旋状的感应电动势和电流,简称涡流。涡流在其流通过径上的等效电阻中产生的 $I^2 R$ 损耗称为涡流损耗。涡流损耗与磁场交变频率 f 、厚度 d 和最大磁感应强度 B_m 的平方成正比,与材料的电阻率 ρ 成反比。由此可见,要减少涡流损耗,首先应减小厚度,其次是增加涡流回路中的电阻。例如,电工钢片中加入适量的硅,制成硅钢片,显著提高了电阻率。

铁磁材料在交变磁场作用时,磁滞损耗和涡流损耗是同时发生的。因此,在电机和变压器的计算中,当铁芯内的磁场为交变磁场时,常将磁滞损耗和涡流损耗合在一起来计算,并统称为铁芯损耗,简称铁耗,记为 p_{Fe} 。

铁耗 $p_{Fe} \propto f^\beta B_m^2$, 其中 $1 < \beta < 2$, β 与材料性质有关。

电力拖动基础的动力学

工业生产中最典型的电力拖动系统有电力机车、起重機、龙门刨床等。由于实际电力拖动系统种类太多,不可能逐一进行研究,所以要找到它们共同的运动规律加以综合分析。电力拖动系统的运动规律可以用动力学中的运动方程来描述。为了抓住本质,本章首先分析简单的单轴电力拖动系统动力学行为,然后分析多轴系统的折算问题和典型的负载转矩性质,最后分析电力拖动系统的平衡稳定运转问题。

2.1 单轴电力拖动系统的动力学分析

所谓单轴电力拖动系统,就是电动机转子轴直接拖动生产机械运转的系统,如图2-1所示。

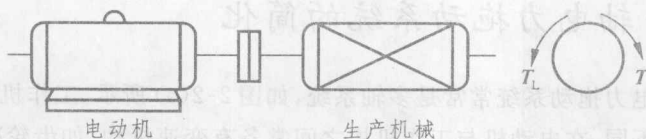


图 2-1 单轴电力拖动系统示意图

单轴电力拖动系统中电磁转矩 T 、负载转矩 T_L 和角速度 Ω 之间的关系用转动方程式表示为

$$T - T_L = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (2-1)$$

式中: T 为电动机产生的拖动转矩 ($N \cdot m$); T_L 为负载转矩 ($N \cdot m$); J 为单轴系统的转动