

电机与控制

金茂椿 魏家轼 主编

电子科技大学出版社

TM301.2

J87

441605

中等专业学校教学用书

电机与控制

金茂椿 魏家轼 主编



电子科技大学出版社

• 1994 •

内 容 提 要

本书是为工科类中等专业学校的《生产过程自动化专业》、《计算机应用专业》、《无线电机械制造专业》和其他非电气类专业编写的专业基础课教材,或其选设专业课教材。

本书包括《电机学》、《电力拖动基础》和《电力拖动自动控制》三门课程的主要内容。

全书共十二章,分为四大部分:其一,交直流电机(包括变压器)的原理及拖动基础;其二,控制电机原理及其应用;其三,继电器-接触器控制系统的基本环节、工作原理和实例分析;其四,电气控制线路的设计。

本书对问题的阐述侧重于物理概念和定性分析,力求叙述简明、概念清晰、重点突出,培养分析问题、解决问题的能力。

本书的任务是使读者掌握电机和常用低压控制电器的工作原理,熟悉常用机械电气控制线路及其基本分析方法,通过学习,具备对常用机械电气控制线路进行安装、调试、维修及简单的技术改造能力,具备进一步自学和使用新型电气控制设备的能力。

本书内容适应面广,兼顾了当前科学技术的发展和我国的实际情况,对于从事现场工作的工程技术人员有一定的参考价值。

中等专业学校教学用书

电机与控制

金茂椿 魏家轼 主编

*

电子科技大学出版社出版

(中国成都建设北路二段四号)

电子科技大学出版社激光照排中心照排

四川省郫县印刷厂

开本 787×1092 1/16 印张 20.25 字数 502.3 千字

版次 1992年3月第一版 印次 1995年1月第三次印刷

印数 10001—15000 册

ISBN 7-81016-423-6/TN·120

定价:13.50 元

前 言

本书是根据机电部中等专业学校教材工作协会中南分会 1991 年 5 月会议决议,为工科中等专业学校“生产过程自动化专业”和“计算机应用专业”编写的专业基础课教材,也可作为机械类和其他非电气类专业选设专业课或选修课的教材。对于从事现场工作的工程技术人员有一定参考价值。

本书包括《电机学》、《电力拖动基础》和《电力拖动自动控制》三门课程的主要内容。

全书共十二章,分成四大部分:交直流电机(包括变压器)的原理及其拖动基础;控制电机原理及其应用;继电器-接触器控制系统的基本环节、工作原理和实例分析;电气控制线路的设计等。

本书内容适应面宽,兼顾了当前科学技术的发展和我国的实际情况,尽量考虑不同专业处理前后课程衔接的方便,各校可根据专业要求选择使用。

本书对问题的阐述侧重于物理概念和定性分析,力求叙述简明、概念清晰、重点突出、培养能力。

本书由中原机械工业学校金茂椿和武汉无线电工业学校魏家轼主编。参加编写的有:湖北二汽中专李房春、长治机电工业学校张慧明、甘肃机械工业学校刘洪涛、湖南机电学校陈仁森、湖北黄冈工业学校张青、河南电子工业学校徐辉、湖南机械工业学校赵伟、宜昌市电子工业学校张林国、河北机电学校赵双全、山西省机械工业学校杨祥成、武汉无线电工业学校林光友、中原机械工业学校王本轶、广东省机械学校刘保荣等。

全书由武汉无线电工业学校高级讲师朱儒英和中原机械工业学校高级讲师王勇主审。在此,编者对他们的辛勤劳动表示衷心感谢。

在编写过程中,参阅了许多作者编著的有关书籍,在此一并表示衷心感谢。

十余所中专学校联编教材是一种尝试。限于组编经验和学识水平,书中缺点及不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

编 者

一九九二年三月

目 录

第一章 绪 论	1
§ 1-1 电力拖动及电气控制技术概述	1
§ 1-2 课程的性质、任务和内容	2
§ 1-3 基本电磁定律	3
§ 1-4 铁磁材料	5
第二章 直流电机	8
§ 2-1 概 述	8
§ 2-2 直流电机的原理与结构	8
§ 2-3 直流电机的感应电势和电磁转矩	21
§ 2-4 直流发电机的运行	24
§ 2-5 直流电动机的运行	29
§ 2-6 直流电动机的拖动基础	42
§ 2-7 直流电动机调速系统实例	51
习 题	55
第三章 变 压 器	57
§ 3-1 变压器的结构与原理	57
§ 3-2 单相变压器的运行	60
§ 3-3 变压器的参数测定和运行特性	65
§ 3-4 三相变压器	71
§ 3-5 特殊变压器	77
习 题	86
第四章 异步电动机	88
§ 4-1 异步电动机的结构与原理	88
§ 4-2 三相异步电动机的工作原理	94
§ 4-3 三相异步电动机的运行	103
§ 4-4 三相异步电动机的功率和电磁转矩	107
§ 4-5 三相异步电动机的参数测定和工作特性	111
§ 4-6 三相异步电动机的机械特性	114
§ 4-7 三相异步电动机的起动	118
§ 4-8 三相异步电动机的调速	124
§ 4-9 三相异步电动机的制动	133
§ 4-10 单相异步电动机	137
习 题	140
第五章 控制电机	143

§ 5-1 伺服电动机	143
§ 5-2 测速发电机	149
§ 5-3 自整角机	153
§ 5-4 旋转变压器	156
§ 5-5 步进电动机	159
习 题	164
第六章 常用低压电器	166
§ 6-1 开关类控制电器	166
§ 6-2 接触器	172
§ 6-3 继电器	175
§ 6-4 熔断器	182
习 题	185
第七章 电气控制线路的基本环节	186
§ 7-1 电气控制线路的表达方式	186
§ 7-2 三相鼠笼型异步电动机直接起动控制线路	188
§ 7-3 三相鼠笼型异步电动机降压起动控制线路	195
§ 7-4 三相绕线型异步电动机起动控制线路	200
§ 7-5 三相异步电动机制动控制线路	204
§ 7-6 直流电动机起制动和正反转控制线路	208
§ 7-7 其他控制线路	212
习 题	215
第八章 常用机床的电气控制	217
§ 8-1 普通车床的电气控制	217
§ 8-2 平面磨床的电气控制	222
§ 8-3 摇臂钻床的电气控制	227
§ 8-4 铣床的电气控制	231
§ 8-5 刨床的电气控制	237
习 题	242
第九章 组合机床的电气控制	243
§ 9-1 组合机床控制线路的基本环节	243
§ 9-2 组合机床通用部件的电气控制参考电路	246
§ 9-3 DU 组合机床	252
习 题	255
第十章 起重机的电气控制	257
§ 10-1 电葫芦和梁式起重机的电气控制	257
§ 10-2 桥式起重机的电气控制	258
§ 10-3 电梯的电气控制	265
习 题	270
第十一章 步进电动机数控系统	272

§ 11-1	系统介绍	272
§ 11-2	步进伺服系统	276
§ 11-3	感应同步器位置检测装置	286
习 题		290
第十二章	机床电气控制线路的设计	291
§ 12-1	电气控制线路设计的基本原则和基本内容	291
§ 12-2	确定电力拖动方案和选择电动机的原则	293
§ 12-3	电气控制线路设计的一般要求	298
§ 12-4	电气控制线路的分析设计	301
§ 12-5	常用低压电器的选择	303
§ 12-6	生产机械电气设备的施工设计	306
习 题		311
附录一		312
附录二		316
主要参考书		318

第一章 绪 论

§ 1-1 电力拖动及电气控制技术概述

一、电力拖动系统的组成和发展

在国民经济各部门中,广泛地使用着各种各样的生产机械。在日常生活中,越来越多的家用电器走进千家万户。生产机械和家用电器大多采用电动机作为原动机来拖动,才能正常工作。这种拖动方式称为“电力拖动”。

电力拖动的主要特征,是将电能转换为机械能。由于电能的生产、变换、传输、分配、使用和控制都比较方便经济,因此,使电力拖动技术具有许多突出的优点,成为应用最为广泛的拖动方式。其主要优点有:

- (1) 电力拖动比其他形式的拖动效率高,与拖动对象的联接简便;
- (2) 电动机设计成熟,制造定型,种类型号多,有各种运行特性,可以满足不同的要求;
- (3) 电力拖动的状态控制、参数检测、信号变换、能量传递都比较容易做到;
- (4) 可对拖动系统实现远距离控制,便于集中管理和实现自动化。

电力拖动系统主要由电动机、控制设备、传动机构和生产机械和电源等基本环节组成,如图 1-1 所示。

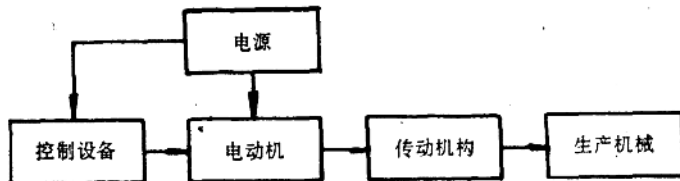


图 1-1 电力拖动系统的组成

电动机和发电机统称为电机。电机是一种实现机电能量转换的电磁装置。由于生产技术的不断提高产生和发展了电机,而电机的发展又促进了社会生产力的进步。十九世纪三十年代出现了直流电机的雏形,当初用伏打电池作电源,很不经济。十九世纪七十年代,直流电机已与现代电机的基本结构型式相同,并得到广泛应用。交流电的出现,使人们开始了对交流电机的研究。十九世纪九十年代至二十世纪初,制造出了三相异步电动机,很快占据了主导地位,并形成了系统的基本理论和设计方法。二十世纪以来,为适应不同的需要,研制了多种类型的电机,特别是航空航天、计算机应用、半导体电子学、生产自动化等现代科学新技术的产生和发展,不仅对电机性能的分析提出了新课题,也为新型电机的研制指明了方向。

新中国成立以来,我国的电机工业从无到有,从小到大,从零星到配套,从修配仿制到自行设计制造,形成了基本完整的体系,做到产品系列化、标准化。某些产品已经达到世界先进

水平。

由于电力拖动系统经历了由简单到复杂、由手动到自动、由单功能到多功能的过程,所以,电力拖动技术的发展也有个过程。

最初,采用“成组拖动”,就是用一台电动机通过一根天轴及机械传动系统,带动几台甚至整个车间的生产机械,耗能大,效率低,容易出事故,现已淘汰。

二十世纪二十年代,开始采用“单机拖动”,就是用一台电动机带动一台生产机械上的各个运动部件,使机械结构简化,提高了效率,增强了灵活性、安全性和可靠性。

到二十世纪三十年代,由于生产机械工作机构和运动形式增多,单电机拖动已无法予以满足,开始采用“多电机拖动”,就是一台生产机械中不同工作结构分别由不同的几台电动机带动,大大简化了机械结构,进一步提高了效率。这种拖动方式便于采用自动控制技术和应用电子计算机,对于实现自动化、改善劳动条件、减轻劳动强度、减少能量损耗、提高产品质量有极其重要的作用。

二、电气控制技术的分类和发展

生产机械采用的控制技术很多,有电气的、液压的、气动的、机械的或综合配用等,其中以电气控制技术应用最为普遍,因为它有以下特点:

- (1) 控制功能多,灵活性强,借助各种电器,可以对生产机械实行自动或远距离控制;
- (2) 控制设备制造周期短,占用空间小,易于操作、维护和改造,经济效率高;
- (3) 可直接利用电能,环境污染小;
- (4) 可以接收和输出非电量(如位移、速度、温度和压力等)。

随着科学技术突飞猛进,生产工艺要求越来越高,电气控制技术在不断的发展更新。控制方法从手动到自动;控制功能从简单到复杂;控制对象从单机到群控;操作则由笨重到轻巧。

根据采用的电气控制技术,可以将控制系统分为两大类:

1. 断续控制系统:控制不连续,控制线路简单,主要采用继电器、接触器,所以又称为继电器-接触器控制系统。其优点是结构简单、价格低廉、维护方便、抗干扰强,既可集中控制,又可远距离控制。缺点是固定接线,改变控制程序不容易,灵活性差;采用有触点开关电器,工作频率低,触点容易损坏,可靠性差。

2. 连续控制系统:控制连续,可以获得较满意的特性。最初应用的控制器件有电机放大器、磁放大器等。电子技术,特别是半导体的发展应用,为电气控制提供了各种放大器和无触点开关电器,出现了可编程序控制器、数字控制机床、晶闸管调速系统等现代化的控制设备。大规模集成电路和电子计算机的应用,更进一步赋予电力拖动系统自寻最佳运行规律、自动适应运行条件和参数变化的能力,以达到最理想的控制,高速度高质量地进行生产。

§ 1-2 课程的性质、任务和内容

本课程是“计算机应用专业”和“生产过程自动化专业”的专业基础课,也可作为非电气类专业的选设专业或选修课。

本课程是电机学、电力拖动基础和电力拖动自动控制三门学科的综合,涉及面较宽,既

有基础理论,又有实际问题;既有从应用角度出发对一般原理和运行特性的物理论述,又有依据工程观念对实际问题采取有条件的简化抓主要因素分析讨论的工程方法。

本课程主要内容分成四大部分:交直流电机(包括静止的电磁装置——变压器)的原理及其拖动基础;控制电机原理及其应用;继电器-接触器控制系统的基本环节、工作原理和实例分析;电气控制线路的设计。在学习中应注意它们间的共性和差异,重视理论联系实际,完成适量的作业和必要的实验,认真思考,理解概念,掌握方法,熟练运算,力求达到融会贯通,举一反三,培养对问题有提出、分析、解决、总结到再提出的能力。教学中,应注意介绍与本课程内容有关的新工艺、新技术、新产品、新理论,开拓学生视野。

§ 1-3 基本电磁定律

电力拖动中广泛应用的电机、变压器以及部分控制电器都是依靠电与磁相互作用而运行的,它们的原理既涉及电路又涉及磁路,因此,有必要了解有关电磁学和铁磁材料的基本知识。

一、基本物理量

描写磁场和磁路的基本物理量有磁感应强度、磁感应通量和磁场强度。

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 。一般采用磁力线来形象地表示磁场。磁力线是无头无尾的闭合曲线,其方向与产生磁场的电流方向符合右手螺旋定则。磁力线上任何一点的切线方向代表了该点 B 的方向,而 B 的大小则是通过该点并且与 B 垂直的单位面积上磁力线的条数,故 B 又称磁通密度。

国际单位制中 B 的单位为特斯拉(T),即韦伯/米²(Wb/m²)。工程实际中常用高斯(Gs)表示。

2. 磁通量 Φ

穿过某一截面 S 的磁力线总条数称为磁通量,简称磁通。所以

$$\Phi = \int_S B \cdot dS \quad (1-1)$$

在均匀磁场中,若截面 S 与 B 垂直,则

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

在国际单位制中, Φ 的单位为韦伯(Wb)。

3. 磁场强度 H

计算导磁物质(磁介质)中某点的磁场时,引入一个辅助性的物理量 H ,称为磁场强度或磁化力。它与 B 的关系为

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

式中, μ 为导磁物质的磁导率,表示该物质的导磁能力。

真空的磁导率 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ (亨/米)(H/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,坡莫合金经处理后 μ 可比 μ_0 大几百万倍。

国际单位制中, H 的单位为安培每米(A/m)。

二、安培环路定律

磁场中沿任意一条闭合路径 l 的磁场强度 H 的线积分, 等于该闭合路径所包围的全部电流的代数和, 即

$$\oint_l H \cdot d\tau = \sum_{i=1}^n I_i \quad (1-4)$$

式中, H 为沿路径上各点切线方向的磁场强度分量; I_i 为路径 l 所包围的第 i 个电流。其正负号这样确定: 当电流方向与闭合路径的绕向符合右手螺旋定则时, 该电流为正, 反之为负。

这个公式表明计算结果与积分路径无关, 又称为全电流定律, 见图 1-2。

如果磁场是由电流为 I , 匝数为 N 的螺旋线圈产生的, 那么对于包含线圈全部匝数的任一闭合路径 (如图 1-3(a) 中的虚线), 则有

$$\sum I = NI$$

于是, 安培环路定律便成为

$$\oint_l H \cdot dl = NI = F \quad (1-5)$$

F 称为该磁路的磁动势, 简称磁势, 单位为安培(A)。

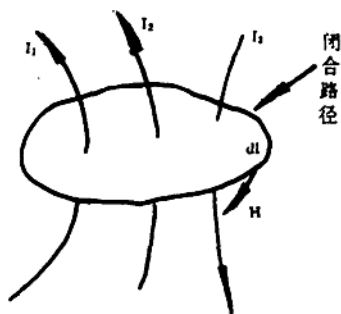


图 1-2 全电流定律

三、磁路和磁路欧姆定律

磁力线穿过的路径称为磁路。空气可以作为磁路, 但由于其阻力大, 磁场削弱严重, 所以工程实际中采用多种方法, 迫使磁力线尽可能多的集中在一定形状的磁路内, 以取得较强的磁场。这种磁路大部分由铁磁材料或铁磁材料加极短的空气隙组成, 可以有分支, 类似电路的串并联。

截面相等、材料相同的磁路叫均匀磁路, 如图 1-3(a) 中的虚线所示。这个均匀磁路上各

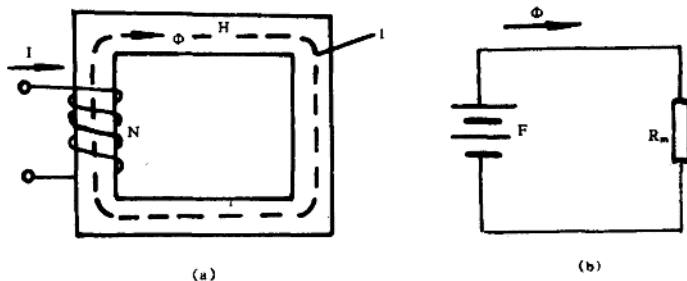


图 1-3 螺旋线圈的磁路

(a) 磁动势 (b) 模拟电路的画法

点的 H 大小相等, 所以

$$\oint_l H \cdot dl = H \oint_l dl = Hl = NI$$

即

$$H = \frac{NI}{l}$$

又

$$\Phi = BS = \mu HS = \mu S \frac{NI}{l}$$

令

$$R_m = \frac{l}{\mu S}$$

则

$$\Phi = \frac{NI}{R_m} = \frac{F}{R_m} \quad (1-6)$$

式中, R_m 与 Φ 成反比, 表现了对磁通的阻碍作用, 故称 R_m 为磁阻, 单位是每亨利 (H^{-1})。空气构成的磁路因 μ_0 很小, 磁阻比铁磁材料大得多。

公式表明, 磁路在磁势的作用下产生磁通, 所以磁通的大小应同时取决于磁阻和磁势的大小, 形式上与电路欧姆定律相似, 故称为磁路欧姆定律。图 1-3(b) 是图 1-3(a) 的模拟电路图。

四、电磁感应定律

一根导体在磁场中运动切割磁力线时, 该导体中将产生感应电势, 它的大小为

$$e_s = B_s lv \quad (1-7)$$

式中, B_s 为导体所在位置 x 处的磁通密度; l 为导体的有效长度; v 为导体在垂直于磁力线方向上的运动线速度。

感应电势的方向依照右手定则确定: 摊平右手, 让磁力线穿过手心, 四指并拢且与大拇指垂直, 若大拇指与运动方向一致, 则四指表示感应电势方向。显然, B_s 、 v 、 e_s 三者空间方向相互垂直。

当匝数为 N 的螺旋线圈中通过交变电流 i 时, 线圈中产生的磁通也是交变的, 而这个交变磁通在线圈中会产生感应电势, 企图阻止磁通的变化, 是一种反电势。它的大小为

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (1-8)$$

这种感应电势的方向符合右手螺旋定则。

五、电磁力定律

通以电流 i 的导体, 在磁场中将受到电磁力的作用。若磁场与导体相互垂直, 则电磁力的大小为

$$f_s = B_s li \quad (1-9)$$

式中, B_s 为导体所在位置 x 处的磁通密度; l 为导体的有效长度; i 为导体中的电流强度。

电磁力的方向由左手定则确定: 摊平左手, 让磁力线穿过手心, 四指并拢且与大拇指垂直, 若四指与电流方向一致, 则大拇指表示导体受力方向。显然, B_s 、 i 、 f_s 三者空间方向相互垂直。

§ 1-4 铁磁材料

电机、变压器和低压电器中的磁路主要由铁磁材料构成。

一、铁磁材料的特性和磁化曲线

物质从不表现磁性变为具有一定的磁性,叫磁化。铁磁材料在外磁场的作用下会引起强烈的磁性反应,表现出极小的磁阻,很容易被磁化而使磁场显著增强,这类材料有铸钢、硅钢片、铁及其与钴镍等的合金、铁氧体等。应用铁磁材料制成的磁路,可以把绝大部分的磁力线集中在所需要的路径和方向上。

铁磁材料在磁化过程中,磁感应强度 B 随磁场强度 H 变化的曲线称为磁化曲线。磁化曲线由实验测取。当磁化电流单向增大时, H 也单方向增大,磁化曲线是非线性的,如图 1-4 所示。整个曲线可以分成两段。以拐点 A 为界, OA 段 B 值上升很快,随着外磁场 H 的增大, B 基本上按正比例关系增长;过 A 点后, B 值上升逐渐缓慢,增长越来越不明显,使磁化进入饱和。饱和性是铁磁材料的主要特性之一。

由于 B - H 曲线的非线性,根据磁导率 $\mu=B/H$ 作出的 μ - H 曲线也是非线性的,如图 1-4 所示。

当磁化电流为交变电流使铁磁材料被反复磁化时,磁化曲线为封闭曲线,如图 1-5 所示,称为磁滞回线。回线具有对称性, B_m 为饱和磁感应强度。当磁化电流减小使 H 降为零时, B 的变化滞后于 H 的变化,即 $B=B_r \neq 0$,称 B_r 为剩磁感应强度,简称剩磁。为了消除剩磁(使 $B=0$),必须反向磁化增强磁场强度到 H_c ,称 H_c 为矫顽磁力。磁滞性是铁磁材料的又一个重要特性。产生磁滞现象的原因是铁磁材料中磁分子在磁化过程中彼此具有摩擦力而互相牵制。

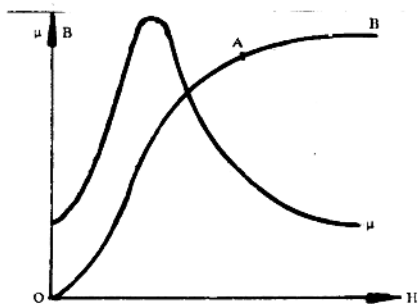


图 1-4 铁磁材料的磁化曲线

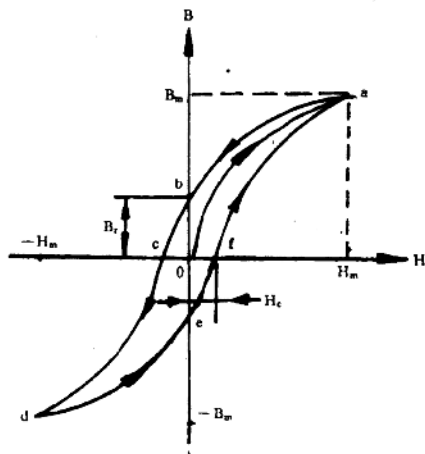


图 1-5 铁磁材料的磁滞回线

不同的铁磁材料,其磁滞回线形状不同。常见铁磁材料见表 1-1。软磁材料回线呈细长条形, B_r 小, H_c 小,磁导率高,易磁化,如硅钢片、坡莫合金、纯铁、铸钢、软磁铁氧体等,适用于制造电机、变压器和交流电磁铁。硬磁材料的回线呈阔叶形状, B_r 大, H_c 大,如钨钢、钴钢等,常在扬声器、传感器、微电机及仪表中应用。还有一种呈矩形回线的铁磁材料,可在电子计算机存储器中作磁芯。

表 1-1 常用铁磁材料

类 别 材料名称	μ_{max}	$B_s(T)$	$H_s(A/m)$
铸 铁	200	0.475~0.500	800~1040
硅钢片	8000~10000	0.800~1.200	32~64
坡莫合金	20000~2000000	1.100~1.400	4~24
碳 钢		0.800~1.100	2400~3200
钴 钢		0.750~0.950	7200~20000
铁镍铝钴合金		1.100~1.350	40000~52000

二、铁磁材料的损耗

当磁化电流为交流时,磁路中的磁通是交变的,因而在磁路的铁芯中产生两种能量损耗:磁滞损耗和涡流损耗,统称为铁芯损耗或铁损。

(一) 磁滞损耗

铁磁材料中的磁分子在交变磁化的过程中来回翻转均受阻力,产生了类似彼此摩擦的发热损耗,称为磁滞损耗。由实验得出的磁滞损耗为:

$$p_h = k_h f B_m^n \quad (1-10)$$

式中, k_h 为与材料有关的系数; f 为磁通交变频率(即磁化电流频率); B_m 为磁通密度的最大值, $n=1.6$ 或 2 。

(二) 涡流损耗

交变磁通在与其垂直的铁芯截面上产生感应电势引起的旋涡状电流,称为涡流。涡流是电流的一种,能使铁芯产生发热损耗。由实验得出的涡流损耗为

$$p_v = k_v f^2 B_m^2 \quad (1-11)$$

式中, k_v 为与材料有关的系数。

为了减小涡流损耗,铁芯用薄硅钢片迭成,片间绝缘,使电阻增大,或加大铁芯尺寸,减小 B_m 。

铁损 $p_{Fe} = p_h + p_v$, 一般不用上面两个公式计算,而由专门的实验测定或查找有关资料。上面两公式用作定性分析铁芯损耗与磁通密度 B 及频率 f 的关系时比较方便。

第二章 直流电机

本章以直流电动机为讨论的主要对象。分析直流电机的工作原理、结构、电路、运行原理及电力拖动等问题。重点是他励直流电动机的机械性能及各种运转状态。

§ 2-1 概 述

一、直流电机的分类及用途

直流电机是一种机电能量变换的电磁装置。其中,将机械能转换为直流电能的,称为直流发电机;将直流电能转换为机械能的,称为直流电动机。

直流电动机有很多优点,如调速性能好、起动转矩较大等,特别是调速性能为交流电动机所不及。因此,对调速性能和起动性能要求较高的生产机械,大都使用直流电动机。例如轧钢机、轧钢主要辅助设备、电气机车、内燃机车、船舶机械、矿井卷扬机和要求广泛调速的切削机床(龙门刨床)等。但是直流电动机的制造工艺复杂,生产成本较高,维护较困难,可靠性较差。所以,在现代工业的拖动系统中,直流电动机与交流电动机“各得其所”。

直流发电机可以作为各种直流电源。例如直流电动机的电源、同步电机的励磁机以及化学工业方面用作电解电镀的低压大电流的电源等。应该指出,直流发电机也有和直流电动机一样的缺点,而且还要配一台差不多容量的原动机。随着电子技术的迅速发展,特别是大功率可控硅元件问世以后,由可控硅整流元件组成的直流电源,正逐步取代直流发电机。但从电源质量和可靠性来看,可控硅整流电源还不能完全令人满意。因此直流发电机在某些场合仍有一定的应用价值。

二、直流电机的可逆性

直流电机可以作发电机运行,也可以作电动机运行,这就是电机的可逆性原理。

直流电机是以电磁感应定律和电磁力定律作为它的理论基础的。当导体在磁场中作切割磁力线运动时便产生感应电势;处于磁场中的载流(通以电流)导体便要受到电磁力的作用。如果原动机供给直流电机机械能,拖动电枢旋转,通过电磁感应,便将机械能转换为电能,供给负载,这就是发电机;如果由外部直流电源供给电机电能,通过电磁力作用,便将电能转换为机械能,拖动负载转动,这就是电动机。

§ 2-2 直流电机的原理与结构

一、直流电机的工作原理

如图 2-1 所示为最简单的直流电机的模型。图中, N 、 S 是主磁极,它可以是永久磁铁,也

可以是电磁铁。所谓电磁铁,就是在磁极铁芯上绕制励磁线圈,当励磁线圈中通入直流电流(也称励磁电流),磁极铁芯便产生了固定的极性。图中两根导体 ab 和 cd 联接成为一个线圈,

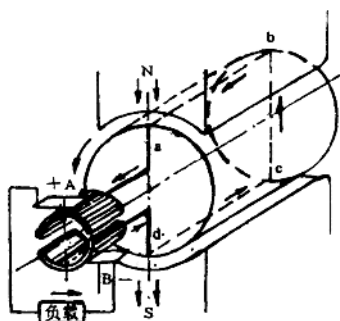


图 2-1 直流电机的模型

并敷设在可转动的圆柱体(称为电枢铁芯)的表面上。线圈的首、末端分别联接到两个圆弧形铜片(称为换向片)上。换向片固定在转轴上,换向片之间以及换向片与转轴之间都相互绝缘。这种由换向片构成的整体称为换向器。整个转动部分称为电枢(转子)。为了把电枢和外电路接通,特别配置了两个电刷 A 和 B 。电刷在空间上是固定不动的。当电枢转动时,电刷 A 只能与转到上面的一个换向片相接触;而电刷 B 则只能与下面的一个换向片相接触。利用这个模型,我们来说明直流电机的工作原理。

我们把图 2-1 所示的模型作为一台发电机,即用原动机拖动电枢,并使它以恒定的转速逆时针方向旋转。根据电磁感应定律,每一根导体均会感应产生电势,其方向可用右手定则确定,如图 2-2 所示。我们把由右手定则判定的导体中感应电势的方向,叫导体感应电势的瞬时实际方向。在图 2-1 所示瞬间, ab 导体处于 N 极下,电势方向由 b 到 a ;而 cd 导体处于 S 极下,电势方向由 d 到 c 。从整个线圈来看,导体 ab 与导体 cd 的电势方向恰好是相加的。

设每一根导体的感应电势为 e ,则线圈电势为 $2e$ 。电势 e 的瞬时值为

$$e = B_l v \quad (2-1)$$

式中, B_l 为导体所处位置的磁通密度,简称磁密(Wb/m^2); l 为导体的有效长度,即每根导体切割磁力线部分的长度(m); v 为导体的线速度(m/s)。

假定电枢是以恒转速旋转,则 v 为一常数。 l 在已制成的电机中是不变的。从式(2-1)可知,电势 e 与磁密 B_l 成正比,即 $e \propto B_l$ 。这就说明,在电机中,当导体与磁场有相对运动时,导体内感应电势依时间而变化的规律与气隙磁场沿气隙的分布规律相同。而在直流电机中,磁极下气隙磁密是按梯形波规律分布的,如图 2-3 所示。图中,正值为 N 极下磁密,负值为 S 极下磁密。由于 $e \propto B_l$,线圈电势 $2e$ 随时间变化的规律与 B_l 分布曲线同形状,所以只要改变坐标比例尺,便可得到 $2e - \omega t$ 关系的曲线。由图 2-3 可见,线圈电势是交变的。这是因为电枢以恒定转速旋转时,导体 ab (或 cd)将轮流在 N 极下或 S 极下切割磁力线,所以感应电势是交变的。

但从电刷 A 和 B 之间所测得的电势却是单向的。这是因为电刷 A 只与处于 N 极下的导体相接触,当导体 ab 在 N 极下时(如图 2-1 所示瞬间),电势方向由 b 到 a 引到电刷 A ,电刷 A 的极性为正;当电枢逆时针旋转 180° ,导体 cd 转到 N 极下时,电刷 A 则与 cd 导体相接触,电

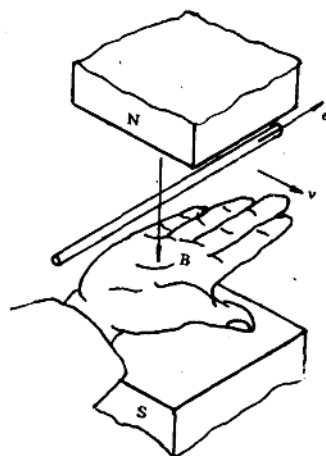


图 2-2 确定感应电势的右手定则

势方向由 c 到 d 引到电刷 A , 其极性仍为正。可见, 电刷 A 的极性永远为正。同理, 电刷 B 的极性永远为负。故电刷 A 与 B 之间的电势 e_{AB} 如图 2-1 所示。交变电势的负半周被改变了方向。也就是说, A 、 B 电刷间的电势为直流电势。

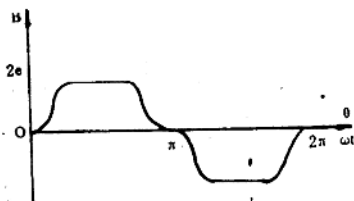


图 2-3 直流电机气隙磁密分布曲线

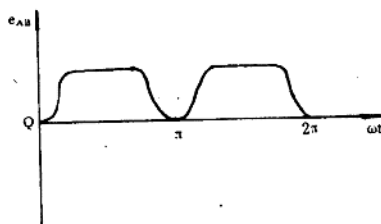


图 2-4 换向后的电势

图 2-4 中的电势的波形虽然有直流成分, 但大小却是随时间而变化的, 实际上是个脉动电势。使用中, 要求直流发电机能发出比较平稳的电势。为此, 现在生产的直流发电机, 电枢上安装许多线圈组成电枢绕组, 这些线圈均匀分布在电枢表面的不同位置上, 它们之间按一定规律互相联接起来。图 2-5 表示一台两极电机, 电枢上装有在空间互差 90° 的四个线圈时的电枢电势波形图。从图中可见, 其脉动程度大大减低了。

实践表明, 若电机每极下的导体数大于 8 时, 电势脉动的幅度已小于 1%。

上述的直流发电机的工作原理表明, 直流电机电枢绕组所感应的电势是交变电势, 而由于换向器配合电刷的作用才把交变电势“换向”成为直流电势。基于这个原因, 把上述这种电机称为换向器式直流电机。

以上仅分析了直流发电机的情况。若把上述电机模型作为电动机, 由外电源从电刷 A 、 B 引入直流电流, 使电流从正电刷 A 流入, 而由负电刷 B 流出。此时, 由于电流总是经过 N 极下的导体流进, 而经过 S 极下的导体流出, 所以上、下两根导体分别受到的电磁力的方向是始终不变的, 它们产生的转矩方向永远是逆时针方向。因此, 这台电机可以带动别的机械旋转, 把电能转换为机械能, 成为一台直流电动机。

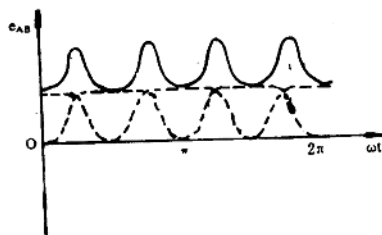


图 2-5 四个线圈换向后的电势

二、直流电机的基本结构

直流电机由两个主要部分: 静止部分(定子)和转动部分(转子)组成, 转动部分又称为电枢。定子与转子间的间隙, 称为空气隙。图 2-6 是一台常用的小型直流电机的结构图。

(一) 静止部分(定子)

定子的作用是用来产生主磁场和作为电机的机械支撑, 它由磁极、换向极、机座等组成, 静止的电刷装置也固定在定子上。