

■ 高等院校电气工程系列教材

DIANJI
YU TUODONG JICHU

电机与拖动基础

(第二版)

林瑞光 主编



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS
浙江大学出版社

高等院校电气工程系列教材

国际书号 (CIP) 自录编查件图

出学大工浙, 册册, 编主光瑞林, 册基电拖

(重量 83010 重版)

12M X 258-3-308-03043

电机与拖动基础

(第二版)

林瑞光 主编

九第册

册第册

册第册

册第册

册第册

册第册

册第册

册第册

册第册

册第册

册第册

册第册

册第册

册第册

册第册

册第册

册第册

册第册

册第册

册第册

册第册

浙大负责 浙大负责

突心出编育研林瑞



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS

浙江大学出版社

16033958(1750) 形电拖基行安其册出学大工浙

图书在版编目(CIP)数据

电机与拖动基础 / 林瑞光主编. —杭州:浙江大学出版社, 2002.8(2010 重版)

ISBN 978-7-308-03049-6

I. 电… II. 林… III. ①电机②电力传动 IV. TM3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 048085 号

(第二版)

主编 林瑞光

电机与拖动基础(第二版)

林瑞光 主编

责任编辑 杜希武

封面设计 刘依群

出版发行 浙江大学出版社

(杭州市天目山路 148 号 邮政编码 310007)

(网址: <http://www.zjupress.com>)

排版 杭州中大图文设计有限公司

印刷 杭州浙大同心教育彩印有限公司

开本 787mm×1092mm 1/16

印张 18.25

字数 444 千

版印次 2002 年 8 月第 1 版 2010 年 2 月第 2 版, 2010 年 2 月第 12 次印刷

书号 ISBN 978-7-308-03049-6

定价 33.00 元

版权所有 翻印必究 印装差错 负责调换

浙江大学出版社发行部邮购电话(0571)88925591

浙江大学出版社

前 言

《电机与拖动基础》是原《电机学》、《电力拖动》和《微特电机》等课程的有机结合,主要论述各类电机的基本原理与特性,以及利用电动机作为原动机来拖动生产机械按人们规定的要求进行运动的基本理论,是工业自动化类专业必须掌握的一门技术基础课。

根据工业自动化类专业特点与新时期教学改革要求,结合作者多年来在《电机学》和《电机与拖动》课程的教学实践中所取得的教学法研究成果以及《电机学》和《电机与拖动》教材编写经验,力图使本书能以较少的学时深入浅出地阐明各类电机的原理、特性及电机拖动的基本理论,同时适量增加电机领域的最新技术成果内容,以形成适应工业自动化类专业新时期教学要求的课程体系。

本书由林瑞光教授主编,负责绪论、直流电机、直流电机电力拖动、三相感应电动机、三相感应电动机电力拖动及电动机容量的选择等各章的编写工作,并对全书进行统稿。徐裕项副教授负责变压器与三相同步电机两章的编写工作,而驱动与控制微电机一章由陈敏祥副教授编写。每章都辅以若干典型例子以助加深理解,并附有相当数量的习题与思考题供读者课后练习。

本书可以作为大学本科、专科以及成人高校的工业自动化类专业的“电机与拖动”课程的教学用书;对书中内容作适当取舍,也可作学时较少的“电机学”课程的教材;书中注有*的内容,可根据各校的教学要求及学时数多少而决定取舍。

由于编著水平所限,在编著过程中难免有不妥甚至错误之处,敬请读者批评指正。

编 者

2010年3月

目 录

绪 论	1
§ 0-1 电机的主要类型	1
§ 0-2 电机理论中常用的基本电磁定律 ^(*)	2
§ 0-3 电机中铁磁材料的特性 ^(*)	4
习题与思考题	6
第 1 章 直流电机	8
§ 1-1 直流电机的基本工作原理和结构	8
§ 1-2 直流电机的电枢绕组	12
§ 1-3 直流电机的磁场	17
§ 1-4 直流电机的电枢电动势、电磁转矩和电磁功率	22
§ 1-5 直流电动机的运行原理	23
§ 1-6 直流发电机的运行原理 ^(*)	27
§ 1-7 直流电机的换向	30
习题与思考题	33
第 2 章 直流电机的电力拖动	37
§ 2-1 电力拖动系统的运动方程式	37
§ 2-2 生产机械的负载转矩特性	41
§ 2-3 他励直流电动机的机械特性	43
§ 2-4 他励直流电动机的起动	47
§ 2-5 他励直流电动机的制动	50
§ 2-6 他励直流电动机的调速	56
§ 2-7 他励直流电动机的过渡过程 ^(*)	64
§ 2-8 串励和复励电动机的电力拖动 ^(*)	68
习题与思考题	71
第 3 章 变压器	77
§ 3-1 变压器的结构和基本工作原理	77
§ 3-2 单相变压器的空载运行	80
§ 3-3 单相变压器的负载运行	85

§ 3-4 变压器的参数测定	89
§ 3-5 标么值	91
§ 3-6 变压器的工作特性	92
§ 3-7 三相变压器	97
§ 3-8 变压器的并联运行 ^(*)	103
§ 3-9 其他用途的变压器 ^(*)	105
习题与思考题	107
第 4 章 三相感应电动机	110
§ 4-1 三相感应电动机的基本工作原理与结构	110
§ 4-2 交流电机的电枢绕组	114
§ 4-3 交流绕组的感应电动势	119
§ 4-4 交流绕组建立的磁动势	125
§ 4-5 三相感应电动机转子静止时的运行分析	138
§ 4-6 三相感应电动机转子转动时的运行分析	143
§ 4-7 三相感应电动机的功率和转矩	150
§ 4-8 三相感应电动机的工作特性	152
§ 4-9 三相感应电动机的参数测定	153
习题与思考题	155
第 5 章 三相感应电动机的电力拖动	160
§ 5-1 三相感应电动机的机械特性	160
§ 5-2 三相感应电动机的起动	166
§ 5-3 三相感应电动机的制动	178
§ 5-4 三相感应电动机的调速	188
习题与思考题	200
第 6 章 三相同步电机	204
§ 6-1 同步电机的基本工作原理和结构	204
§ 6-2 同步电机的电枢反应	207
§ 6-3 同步电动机的电势平衡方程式、同步电抗和相量图	210
§ 6-4 同步电动机的功角特性、矩角特性和有功功率的调节	214
§ 6-5 同步电动机的无功功率调节和 V 形曲线	218
§ 6-6 同步电动机的起动	221
§ 6-7 同步发电机 ^(*)	224
习题与思考题	228
第 7 章 驱动和控制微电机	231
§ 7-1 单相感应电动机	231

§ 7-2 伺服电动机	236
§ 7-3 测速发电机(*)	240
§ 7-4 步进电动机	245
§ 7-5 无刷直流电动机	251
§ 7-6 其他驱动与控制电机(*)	254
习题与思考题	261
第 8 章 电动机容量的选择(*)	262
§ 8-1 概述	262
§ 8-2 电机的发热与冷却	263
§ 8-3 连续工作制电动机容量的选择	266
§ 8-4 短时工作制电动机容量的选择	272
§ 8-5 周期性断续工作制电动机容量的选择	274
习题与思考题	279

绪 论

由于电能的生产、变换、传送、分配、使用和控制都比较方便经济,因此电能是现代最主要的能源。在现代工业企业中,利用电动机把电能转换成机械能,去拖动各种类型的生产机械按人们所给定的规律运动(即电力拖动),比其他拖动方式有无可比拟的优点。

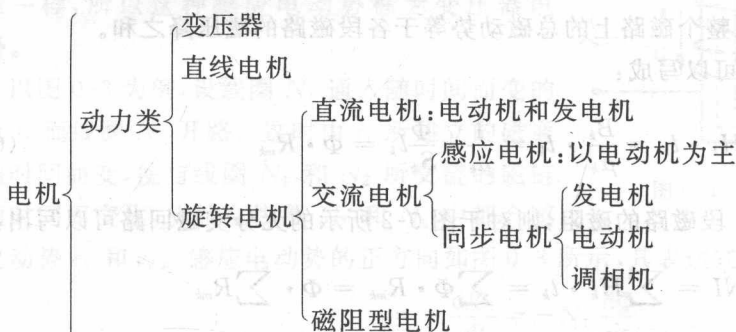
电力拖动具有良好的调速性能,起动、制动、反转和调速的控制简单方便、快速性好且效率高。电动机的类型很多,具有各种不同的运行特性,可以满足各种类型生产机械的要求。电力拖动系统各参数的检测、信号的变换与传送方便,易于实现自动控制。

因此,电力拖动成为现代工业电气自动化的基础。《电机与拖动基础》课程内容,是工业电气自动化等专业学生必须学习和掌握的基本理论。

本课程是一门技术基础课,它运用电路原理等基础课程的基本理论来分析各类电机的电磁物理过程及复杂的而且往往带有综合性的工程实际问题。这是学习本课程的特点,也是难点。

§ 0-1 电机的主要类型

电机的类型很多。按其功能用途来分,可以归纳如下:



控制电机:用于自动控制系统中作为执行元件、检测元件等

本课程的内容,就是学习以上各种电机的基本结构、工作原理和特性,以及在电力拖动系统中的应用。

§ 0-2 电机理论中常用的基本电磁定律^(*)

一、全电流定律

当导体中有电流流过时,就会产生与该载流导体相交链的磁通。全电流定律就是揭露电产生磁的本质,阐明电流与其磁场的大小及方向的关系。

设空间有 n 根载流导体,其电流分别为 $I_1, I_2, \dots$, 则沿任闭合路径 l , 磁场强度 H 的线积分 $\oint H \cdot dl$ 等于该回路所包围的导体电流的代数和。即

$$\oint_l H \cdot dl = \sum I$$

式中 $\sum I$ 是回路所包围的全电流。若导体电流的方向和积分路径的方向符合右手螺旋关系,该电流取正号;反之取负号。电流的正方向与由它所生的磁场正方向必符合右手螺旋关系,如图 0-1 所示。

在电机和变压器中,常把整个磁路分成若干段,每一段磁路内的磁场强度 H 、导磁材料及导磁面积 S 相同,如图 0-2 所示,则全电流定律简化为:

$$H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_3 l_3 + H_\delta \delta + H_4 l_4 + H_5 l_5 = NI$$

即

$$\sum H_k l_k = NI = F \quad (0-1) \quad \text{图 0-1 电流与其磁场的右手螺旋关系}$$

式中 H_k 为第 k 段磁路的磁场强度 $[A/m]$, l_k 为第 k 段磁路的平均长度 $[m]$, $F = NI$ 为作用在整个磁路上的磁动势 $[A]$, N 为线卷匝数, $H_k l_k$ 为第 k 段磁路上的磁压降。

式(0-1)表明,作用在整个磁路上的总磁动势等于各段磁路的磁压降之和。

第 k 段磁路的磁压降可以写成:

$$H_k \cdot l_k = \frac{B_k}{\mu_k} \cdot l_k = \frac{1}{\mu_k} \cdot \frac{\Phi}{S_k} l_k = \Phi \cdot R_{mk} \quad (0-2)$$

式中 $R_{mk} = \frac{l_k}{\mu_k S_k}$ 称为第 k 段磁路的磁阻,则对于图 0-2 所示的无分支磁回路可以写出:

$$F = NI = \sum H_k \cdot l_k = \sum \Phi \cdot R_{mk} = \Phi \cdot \sum R_{mk}$$

或

$$\Phi = F / \sum R_{mk} \quad (0-3)$$

式中 $\sum R_{mk}$ 为整个磁路的总磁阻。

例 0-1 对于图 0-2 所示的无分支磁路,为了产生给定的磁通 $\Phi [Wb]$,求所需的励磁磁动势 $F = NI$ 。

对于气隙部分, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} [H/m]$ 是一常数,则气隙 δ 上的磁压降 $H_\delta \cdot \delta = \frac{\Phi}{\mu_0 \cdot S_\delta}$

• δ 。对于铁芯部分,由于铁的导磁系数 μ_{Fe} 不是常数,所以先据给定 Φ 值和各段磁路截面积 S_k 求出该段的磁通密度 $B_k = \frac{\Phi}{S_k}$,再在该段磁路材料的磁化曲线 $B = f(H)$ 查出与 B_k 相对应的 H_k 值,然后算出该段磁路的磁压降 $H_k l_k$ 。最后,将各段磁路的磁压降相加,即得和给定磁通 Φ 相对应的磁动势 $F = NI$ 。

由于 $\mu_0 \ll \mu_{Fe}$,所以即使气隙 δ 很小,气隙磁压降仍比其他各段铁磁路的磁压降之和还要大得多,即励磁磁动势的绝大部分都消耗在气隙上。换言之,由于图 0-2 的磁回路中含有气隙,将使励磁磁动势大为增加。

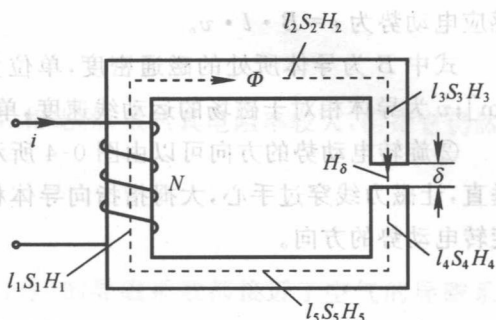


图 0-2 无分支磁路

二、电磁感应定律

设匝数为 N 的线圈处在磁场中,它所交链的磁链为 $\Psi = N \cdot \Phi$,则不论由于什么原因,当该线圈所交链的磁链发生变化时,在线圈内就有一感应电动势产生,这种现象称为电磁感应。感应电动势的大小和该线圈所链的磁链变化率成正比;感应电动势的方向是该电动势企图在线圈内产生电流(即感应电流),使之所建立的磁通用来阻止线圈中磁通的变化。如果感应电动势的正方向与磁通的正方向符合右手螺旋关系,则电磁感应定律可用下式表示:

$$e = -\frac{d\Psi}{dt} = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (0-4)$$

线圈中磁链的变化可能由两个原因所引起:

(1)线圈与磁场相对静止,但是穿过线圈的磁通本身(大小或方向)发生变化。这种情况如同变压器一样,所以这种感应电动势称为变压器电动势。

以图 0-3 为例,设线圈 N_1 通入随时间而变的电流 i_1 而线圈 N_2 开路。这时由 i_1 所建立的磁通也随时间而变,使与线圈 N_1 和 N_2 所交链的磁链也随时间而变化,从而在线圈 N_1 和 N_2 中都会感应电动势 e_1 和 e_2 。感应电动势的正方向如图 0-3 所示,其表达式为

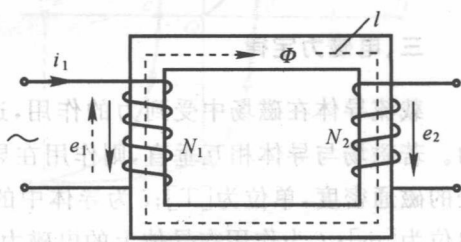


图 0-3 感应电动势的正方向

$$e_1 = -\frac{d\Psi_1}{dt} = -N_1 \frac{d\Phi}{dt}$$

$$e_2 = -\frac{d\Psi_2}{dt} = -N_2 \frac{d\Phi}{dt}$$

在此例中,由线圈 N_1 中电流 i_1 的变化在自身线圈感应电动势 e_1 称为自感电动势,而由 i_1 的变化在另一线圈 N_2 内感应的电动势 e_2 称为互感电动势。

(2)磁场的大小及方向不变,而线圈与磁场之间有相对运动,使得线圈中的磁链发生变化。这种情况一般发生在旋转电机中,所以称之为旋转电动势或速率电动势。

①当导体在恒定磁场中运动时,若导体、磁力线和运动方向三者互相垂直,则导体内的

感应电动势为 $e = B \cdot l \cdot v$ 。

式中 B 为导体所处的磁通密度, 单位为 $[T]$; l 为切割磁力线的导体有效长度, 单位为 $[m]$; v 为导体相对于磁场的运动线速度, 单位为 $[m/s]$; e 为导体中感应电动势, 单位 $[V]$ 。

② 旋转电动势的方向可以由图 0-4 所示的右手定则确定: 右手大拇指与其余四指互相垂直, 让磁力线穿过手心, 大拇指指向导体相对于磁场的运动方向, 则四指所指的方向即为旋转电动势的方向。

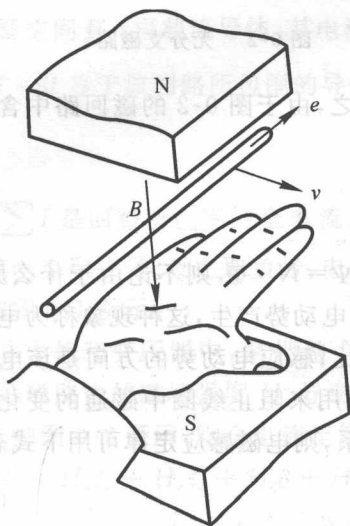


图 0-4 右手定则

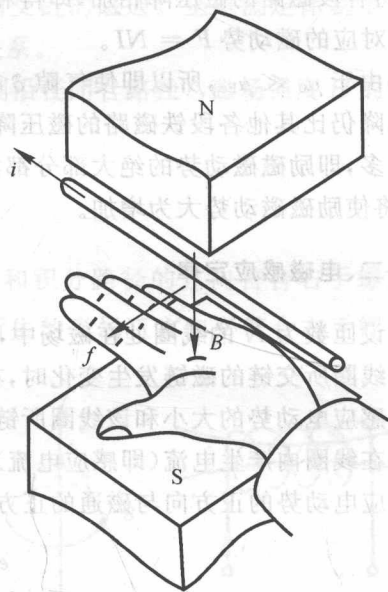


图 0-5 左手定则

三、电磁力定律

载流导体在磁场中受到力的作用, 这种力是磁场与电流相互作用所生的, 故称为电磁力。若磁场与导体相互垂直, 则作用在导体上的电磁力为: $f = B \cdot l \cdot i$ 。式中 B 为导体所处的磁通密度, 单位为 $[T]$; i 为导体中的电流, 单位为 $[A]$; l 为导体在磁场中的有效长度, 单位为 $[m]$; f 为作用在导体上的电磁力, 单位为 $[N]$ 。

电磁力的方向可用图 0-5 所示的左手定则确定: 左手大拇指与其余四指互相垂直, 让磁力线穿过手心, 四指指向电流的方向, 则大拇指所指的方向即为电磁力的方向。

§ 0-3 电机中铁磁材料的特性^(*)

各类电机都是以磁场作为媒介, 通过电磁感应作用实现能量转换的, 所以在电机里必须有引导磁能的磁路。为了在一定的励磁电流下产生较强的磁场, 电机和变压器的磁路都是用导磁性能良好的铁磁材料组成。

铁磁材料包括铁、钴、镍及其合金 (如电机和变压器中常用的硅钢片)。其特性简述如下。

一、良好的导电性

铁磁材料与电机中常用的导电材料(铜或铝)相比较,虽然其电阻率较大,但是它仍然是一种有较好导电性能的导电材料。

二、高的导磁性能与磁化曲线的非线性

所有非铁磁材料(如铜、铝、绝缘材料和木材等)的导磁系数都接近于空气的导磁系数 μ_0 ,而铁磁材料的导磁系数 μ_{Fe} 比 μ_0 大几百到几千倍,所以在同样大小的电流下,带铁芯线圈的磁通比空芯线圈的磁通大得多。

将铁磁材料在外界磁场作用下(外施励磁磁动势),改变励磁磁动势大小,测出磁通密度 B 与磁场强度 H ,得到 B 与 H 的关系曲线 $B=f(H)$,称之为铁磁材料的磁化曲线,如图0-6所示。由图可知,铁磁材料的磁化曲线不是一条直线。在 $\widehat{Oa}$ 段, B 的增加缓慢;在 $\widehat{ab}$ 段, B 几乎随 H 成正比增加而且增长迅速;在 $\widehat{bc}$ 段, B 的增加又缓慢下来;在 c 点以后,当 H 再继续增加时, B 几乎不再增加了。铁磁材料当 H 较大时 B 之增加变缓甚至几乎不增加的现象,称为磁饱和现象。由图可知,当铁磁材料饱和时,其导磁系数变小,即其导磁性能变差。

对于非铁磁材料,其 $B=\mu_0 \cdot H \propto H$,即 $B=f(H)$ 是一条直线。

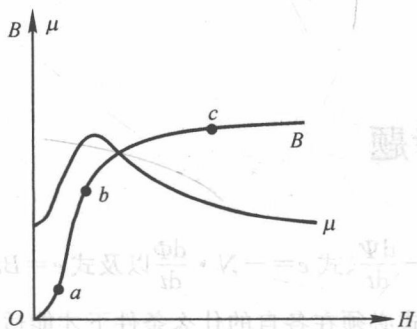


图 0-6 铁磁材料的磁化曲线

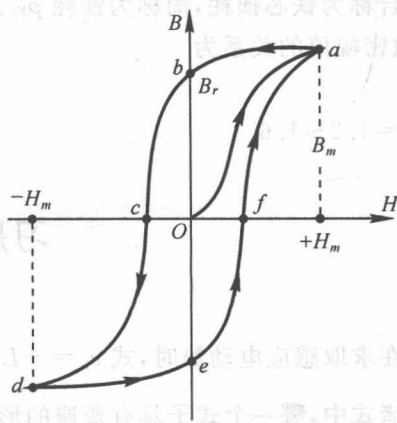


图 0-7 铁磁材料的磁滞回线

三、磁滞现象和磁滞损耗

在测取铁磁材料的磁化曲线时,改变外施励磁磁动势的大小及方向,使磁场强度在 $-H_m \sim +H_m$ 之间反复磁化,所得的 $B \sim H$ 关系曲线是图0-7所示的闭合曲线 $abcdefa$,称为铁磁材料的磁滞回线。同一铁磁材料在不同的 H_m 值上有不同的磁滞回线。把不同 H_m 值的各磁滞回线的顶点(如图中 a 点)连接起来所得的曲线,称为基本磁化曲线(如图中的 $\widehat{Oa}$)。

由图可知,上升磁化曲线与下降磁化曲线不重合。下降时 B 的变化总是滞后于 H 的变化,当 H 下降到零时, B 未下降到零而是仅下降至某一数值 B_r ,这种现象称为磁滞现象, B_r 称为剩余磁感应强度。

铁磁材料在交变磁场的作用下反复磁化时,内部的磁畴不停地往返倒转而消耗能量,引

起损耗。这种损耗称为磁滞损耗 p_n 。它与磁通的交变频率 f 及磁通密度的幅值 B_m 的关系为 $p_n \propto f \cdot B_m^\alpha$ 。

对于常用的硅钢片,当 $B_m = 1.0 \sim 1.6 \text{ [T]}$ 时, $\alpha \approx 2$ 。硅钢片的磁滞回线较窄,磁滞损耗较小,所以电机和变压器的铁芯都用硅钢片。

四、涡流损耗

当铁芯中的磁通发生交变时,在铁芯内也会感应电动势并产生感应电流,如图 0-8 所示。由于此电流在铁芯内的流动状态呈旋涡状,故称之为涡流。此涡流在铁芯电阻上的损耗称为涡流损耗 p_w 。

涡流损耗与磁通的交变频率 f 、铁芯中磁通密度幅值 B_m 、钢片的电阻 r_w 及钢片厚度 d 的关系为 $p_w \propto f^2 \cdot B_m^2 \cdot d^2 / r_w$,由此式可知,为了减少涡流损耗,必须减少钢片的厚度,所以电工钢片的厚度一般为 0.35mm 和 0.5mm。同时必须增加钢片的电阻率,所以电工钢片中常用加入 4% 左右的硅,变成硅钢片。

所以,当铁芯中的磁通交变时,有磁滞损耗和涡流损耗两种损耗,合称为铁芯损耗,简称为铁耗 p_{Fe} 。当硅钢片厚度及材料一定时,铁耗与磁通的交变频率及磁密幅值的关系为

$$p_{Fe} \propto f^\beta \cdot B_m^2$$

式中 $\beta = 1.2 \sim 1.6$ 。

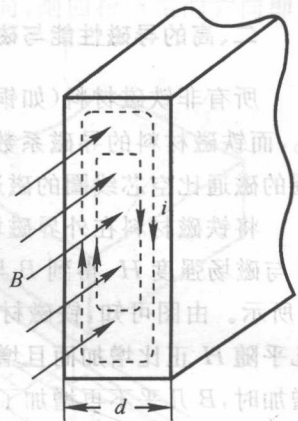


图 0-8 一片硅钢片中的涡流

习题与思考题

- 0-1 在求取感应电动势时,式 $e_L = -L \cdot \frac{di}{dt}$ 、式 $e = -\frac{d\psi}{dt}$ 、式 $e = -N \cdot \frac{d\Phi}{dt}$ 以及式 $e = Blv$ 等诸式中,哪一个式子具有普遍的形式? 另外诸式必须在各自的什么条件下才能适用?
- 0-2 有两个线圈匝数相同,一个绕在闭合铁芯上,另一个绕在木材上,两个线圈通入相同频率的交变电流。如果它们的自感电动势相等,试问哪个线圈的电流大? 为什么?
- 0-3 如果感应电动势正方向与磁通的正方向之间不符合右手螺旋关系,则电磁感应定律应写成 $e = +\frac{d\psi}{dt} = +N \frac{d\Phi}{dt}$,试说明其原因。
- 0-4 在图 0-9 中,当线圈 N_1 外施正弦电压 u_1 时,为什么在线圈 N_1 及 N_2 中都会感应出电动势? 当电流 i_1 增加时,标出这时 N_1 及 N_2 中感应电动势的实际方向。

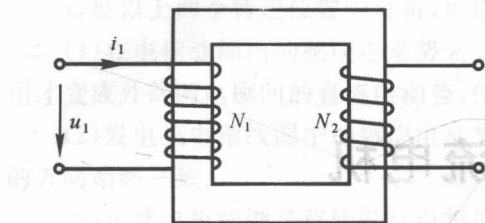


图 0-9 习题 0-4 附图

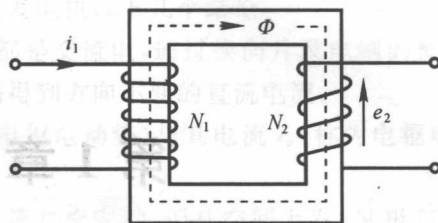


图 0-10 习题 0-5 附图

0-5 在图 0-10 中, 电流 i_1 在铁芯中建立的磁通为 $\Phi = \Phi_m \cdot \sin \omega t$, 各物理量的正方向如图所示。试求匝线 N_2 的线圈中感应电动势的表达式。

第 1 章 直流电机

直流电动机是将直流电能转换成机械能而带动生产机械运转。由于直流电动机具有优良的启动性能和调速性能,所以在电气传动系统中,尤其是对启动及调速性能要求较高的生产机械,一般都用直流电动机进行拖动。

直流发电机是将机械能转换成直流电能而对电解、电镀及直流电动机等负载供电。随着电子技术的发展,直流发电机有逐步被可控整流电源所取代的趋势。

§ 1-1 直流电机的工作原理和结构

一、直流电机的工作原理

图 1-1 是一个直流发电机的工作模型。图中 N, S 是两个在空间固定不动的磁极(它可以是永久磁铁,也可以是在铁芯上绕上励磁线圈并通入直流电流来建立磁场的电磁铁); $abcd$ 是一个装在可以转动的铁磁圆柱体上的线圈(合称为电枢);线圈的首、末端分别连接到与电枢同轴旋转的两个圆弧形的铜片(称为换向片)上,换向片之间及换向片与转轴之间是互相绝缘的; A 和 B 是两个与换向片相接触,但在空间上静止不动的铜片(称为电刷),从电刷 A, B 引出即可对负载(图中用灯泡表示)供电。

当原动机拖动电枢以转速 n 恒速旋转时,导体 ab 和 cd 切割磁力线而感应电动势,其方向可用右手定则确定。在图 1-1 所示的时刻,整个线圈的电势方向是 e_{dcba} ,即从 d 到 a 。此时 a 端经换向片接触电刷 A, d 端经换向片与电刷 B 接触,所以电刷 A 为正极性而电刷 B 为负极性。如果在电刷 AB 之间接上负载,则就有电流 I 从电刷 A 经过外电路负载而流向电刷 B 。根据电流的连续性,此电流必须通过换向片及线圈 $abcd$ 而构成回路,所以此刻在电枢线圈中电流的方向也是 i_{dcba} ,亦从 d 到 a 。

当电枢转过 180° 时,线圈 $abcd$ 中感应电动势的方向为 e_{abcd} ,即从 a 到 d 。此时 d 端与电刷 A 相接触,而 a 端与 B 电刷接触。所以电刷 A 仍为正极性,电刷 B 仍为负极性。因而流过外部负载的电流方向不变。据电流连续性,此时在电枢线圈中的电流方向为 i_{abcd} ,即从 a 到 d 。

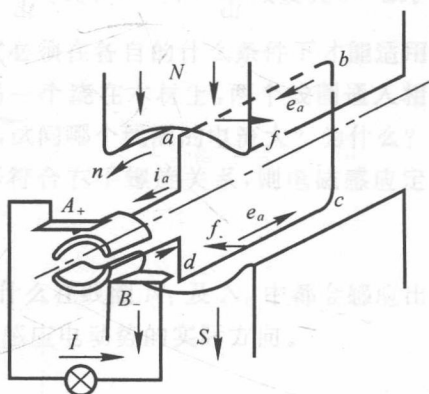


图 1-1 直流发电机的工作模型

根据以上两个特定位置的分析,可以得出直流发电机以下几个结论:

(1)在电枢线圈内的感应电动势 e_a 及电流 i_a 都是交流电,通过换向片及电刷的整流作用才变成外部两电刷间的直流电动势,使外部电路得到方向不变的直流电流。

(2)发电机电枢线圈中的感应电动势 e_a (称为电枢电动势)与其电流 i_a (称为电枢电流)的方向始终一致。

(3)虽然电枢线圈是旋转的且电枢线圈中的电流是交变的,但从空间上看, N 极与 S 极下的电枢电流的方向不变,因此,由电枢电流所产生的磁场在空间上是一个恒定不变的磁场。

(4)电枢绕组电流与磁场相互作用产生电磁力 f 。据左手定则可以得出 f 的方向如图 1-1 所示。此电磁力 f 使转轴受到一个力矩 $T=f \cdot R$ (式中 R 为导体对转轴中心的半径),称之为电磁转矩,其方向是与转子转向相反的,是制动性质。为此原动机必须输入机械功率克服电磁转矩的制动作用才能使转子继续恒速旋转,才能继续不断地发出电能输给负载,这就是机械能通过电磁感应作用变成了电能。

将图 1-1 的电刷出线端的灯泡改成外施直流电源 u ;而且将轴上的原动机换成生产机械负载,这样就成了直流电动机的工作模型。

在外施电压 u 的作用下,有电流 I 经过电刷 A 及换向片进入电枢绕组 $abcd$,成为电枢绕组中的电流 i_a ,然后经换向片及电刷 B 而返回电源负端。电枢电流 i_a 与磁场相作用,使电枢线圈受到电磁力 f ,在此电磁力所产生的电磁转矩 T 的驱动下,使转子沿 T 的方向旋转起来。

仿照发电机的分析方法,也可以得出以下结论:

(1)在直流电动机中,虽然外施电压 u 及电流 I 是直流,但在电枢绕组内部电流 i_a 是交流。这是靠换向片及电刷的逆变作用,将外部直流变成内部的交流。

(2)从空间上看,由电枢电流所生的磁场也是一个恒定磁场。

(3)当电枢旋转时,电枢导体切割磁力线也会感应电动势且是交变的,其方向与电枢电流 i_a 的方向始终相反,称之为反电势。

(4)直流电动机中电磁转矩的方向与转子转向一致,是驱动性质的。

由以上分析可知:同一台直流电机,只要改变外界的条件,既可以当发电机运行,也可以当电动机运行。如果用原动机拖动电枢恒速旋转,就可以从两电刷端引出直流电动势而作为直流电源对负载供电;如果在两电刷端外施直流电压,则电动机就可以带动轴上的机械负载旋转,从而把电能转变成机械能。

这种同一台电机由于外界条件的不同,既可作发电机也可作电动机运行的原理,不仅适用于直流电机,而且也适合于交流电机(感应电机和同步电机),是电机理论中的普遍原理,称为电机的可逆原理。

二、直流电机的主要结构

图 1-2 是一台小型直流电机的结构剖面图,它由定子和转子两部分所组成,简述如下。

1. 定子部分

(1)主磁极 主磁极的作用是在气隙中建立磁场,它包括主极铁芯和励磁绕组两部分。为了降低电枢旋转时的极靴表面损耗,主极铁芯一般用 $1 \sim 1.5\text{mm}$ 厚的低碳钢板冲片叠压而成。在小型直流电机中,主磁极也可采用永久磁铁,它不需要励磁绕组,叫做永磁直流电机。

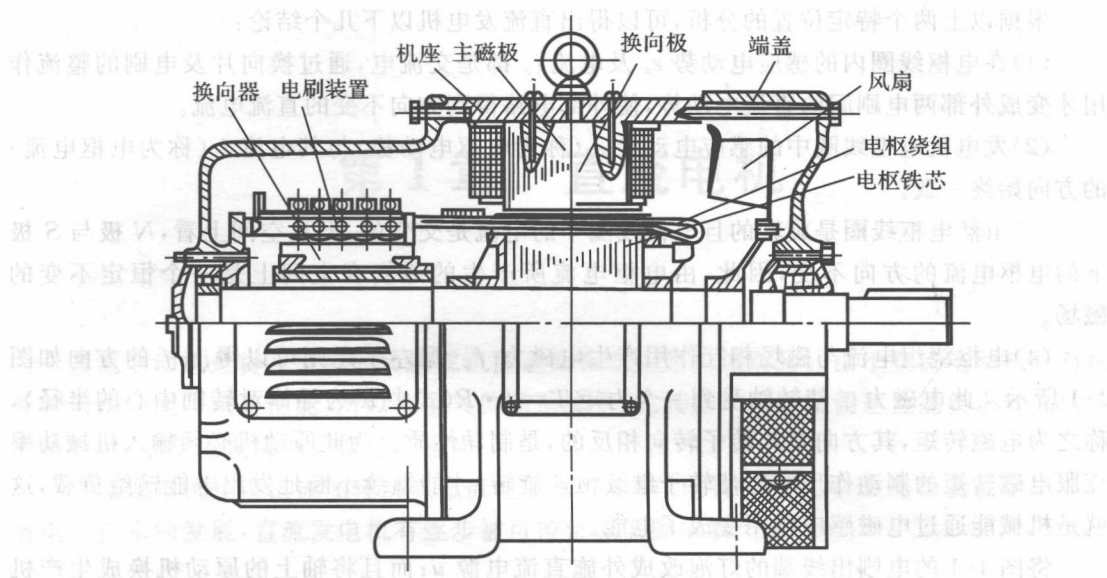


图 1-2 直流电机的结构图

(2)换向极 换向极又称附加极,装在相邻主磁极之间的几何中心线上,其作用是改善直流电机的换向。换向极也由换向极铁芯和换向极绕组两部分组成,见图 1-3。换向极铁芯一般用整块钢制成,当换向要求较高时用 $1.0 \sim 1.5\text{mm}$ 厚的钢片叠压而成。换向极绕组须与电枢绕组串联。在 1kW 以下的小容量直流电机中,有时换向极的数目只有主磁极的一半,或不装换向极。

(3)机座 直流电机的机座既是磁的通路又起固定作用,因此要求机座既要导磁性好与足够的导磁面积,又要有足够的机械强度和刚度。对于换向要求较高的电机,机座也可用薄钢板冲片叠压而成。

(4)电刷装置 电刷与换向器相配合,起到整流或逆变器的作用。

2. 转子部分

(1)电枢铁芯 电枢铁芯是电机主磁路的一部分,而且用来嵌置电枢绕组。为了减少电枢旋转时电枢铁芯中涡流损耗及磁滞损耗,电枢铁芯通常用 0.5mm 厚的两面涂有绝缘漆的硅钢片叠压而成。

(2)电枢绕组 电枢绕组是用来产生感应电动势和电磁转矩,实现机电能量转换的关键部件。现代直流电机的电枢,在其圆周上均匀地分布有许多个线圈,每个线圈可以单匝也可以多匝,称之为元件。每个元件的两个有效边分别嵌放在相隔一定槽数的电枢铁芯的两个槽中,如图 1-4 所示。每个元件的首端与尾端,按一定的规律分别与换向器上的两个换向片相连接。

(3)换向器 换向器的作用是在电刷间得到直流动势,并保证每个磁极下电枢导体电流方向不变,以产生恒定方向的电磁转矩。电枢绕组由许多元件组成而每个元件的两个引出端分别连结两片换向片,换向器由许多彼此互相绝缘的铜换向片所组成,如图 1-5 所示。

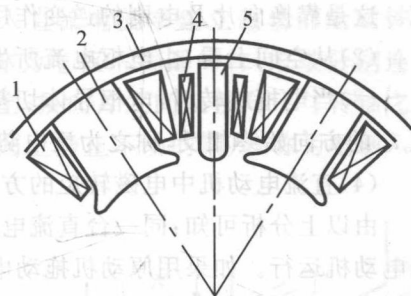


图 1-3 主磁极和换向极

1. 励磁绕组; 2. 主极铁芯
3. 机座; 4. 换向极绕组;
5. 换向极铁芯