

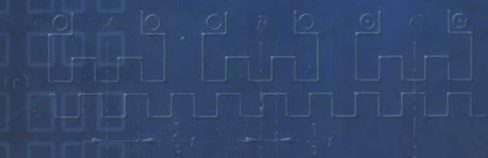
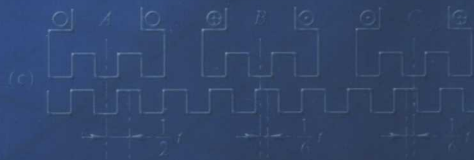
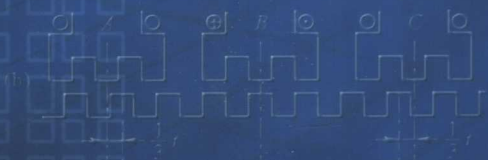
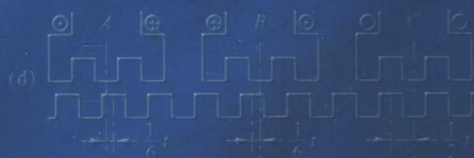
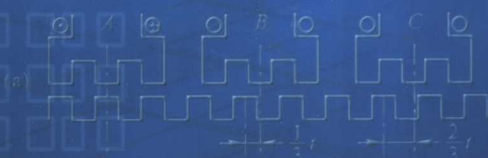
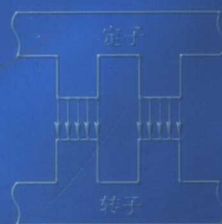
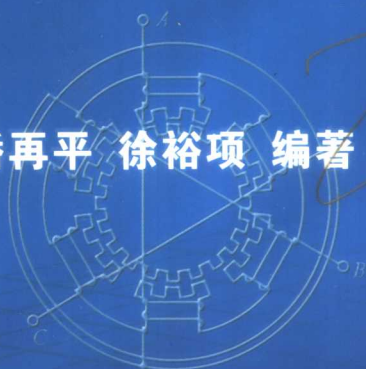


新世纪高等院校精品教材

DIANQI KONGZHI JISHU JICHU

电气控制技术基础

潘再平 徐裕项 编著



浙江大学出版社

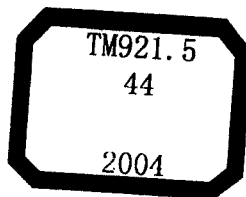
中国电力出版社 中国水利水电出版社

电气控制技术基础

第二版 杨文强 主编

中国电力出版社

新世纪高等院校精品教材



电气控制技术基础

潘再平 徐裕项 编著

浙江大學出版社

图书在版编目(CIP)数据

电气控制技术基础 / 潘再平, 徐裕项编著. —杭州:
浙江大学出版社, 2004.12

ISBN 7-308-03990-0

I. 电... II. ①潘...②徐... III. 电气控制—高等
学校: 技术学校—教材 IV. TM571.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 107221 号

责任编辑 阮海潮

出版发行 浙江大学出版社

(杭州浙大路 38 号 邮政编码 310027)

(网址: <http://www.zjupress.com>)

(E-mail: zupress@mail.hz.zj.cn)

排 版 浙江大学出版社电脑排版中心

印 刷 浙江大学印刷厂

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 16.25

字 数 416 千

版 印 次 2004 年 12 月第 1 版 2004 年 12 月第 1 次印刷

印 数 0001—3000

书 号 ISBN 7-308-03990-0/TM·033

定 价 25.00 元

内容提要

本书是为电子信息类和电气类学生编写的包括电力电子技术、运动控制技术等强弱电学科知识的教材,为宽口径人才培养打入坚实的专业基础知识。本书是浙江大学 21 世纪初校级本科教学改革项目“信息电子学科类强电控制课程教学内容、方法和教学手段的探索与研究”的成果。

本书内容主要包括变压器、交流电机、直流电机、微特电机、低压电器、电机的继电接触控制、电力电子技术、电机的电子控制等,集电机学、电机拖动、微特电机、电力电子技术、电机控制等内容于一体,可使在不多的教学时数内,较为系统地介绍电力电子技术和运动控制技术的基础知识,使学生系统掌握学科知识,为今后相关课程的学习和从事相关专业工作打下基础。

前 言

目前,电子信息类学生对电力电子技术、运动控制等强弱电结合的学科知识了解较少,而宽口径的人才培养模式则要求学生能掌握这些专业基础知识,适应未来的就业市场。但现在教学计划中本科生的总学时数有所下降,不可能设置较多的课程来满足上述要求。因此,如何开设出一门能综合电力电子技术、运动控制技术等内容课程(电气控制技术)是一个全新的研究课题。浙江大学 21 世纪初校级本科教学改革项目“信息电子学科类强电控制课程教学内容、方法和教学手段的探索与研究”课题正是为了解决这一问题而设立的,而编写《电气控制技术基础》教材则是本课题的重要环节。

本教材对应的课程“电气控制技术”是专门针对偏重于弱电控制的信息电子类学生而开设的一门强弱电结合的专业基础课。本课程集电机学、电机拖动、微特电机、电力电子技术、低压电器及控制、电机控制等内容为一体,利用不多的学时,较为系统地介绍了电力电子技术和运动控制技术的基础知识,增强电子信息类学生在强电方面的知识,初步掌握各类电气驱动系统及其控制方法。课程的学习能加宽学生的知识面,提高工程系统设计能力,为今后相关课程的学习和从事专业工作打下基础。

《电气控制技术基础》教材的主要内容有直流电机、变压器、交流电机、微特电机、低压电器、电机的继电接触控制、电力电子技术、电机的电子控制等。该教材的初稿已在浙江大学信息学院自动化专业的“电气控制技术”课程教学中使用了 3 届,先后 3 次修改。本教材是经过修改的第 4 稿,其中第一章至第四章由徐裕项编写;潘再平编写了其余部分,并对全书进行了统稿。限于编者的水平,教材中难免还有一些缺点和错误,恳请读者批评指正,以便作进一步改进。

本教材的出版得到了浙江大学教材出版基金的资助,在此表示感谢。

编著者

2004 年 8 月于求是园

目 录

第一章 直流电机	1
第一节 直流电动机的基本结构和励磁方式.....	1
第二节 直流电动机的基本工作原理.....	5
第三节 直流电动机的机械特性	10
第四节 并励(他励)直流电动机的起动、调速和制动.....	13
习题	20
第二章 变压器	23
第一节 变压器的结构和基本工作原理	23
第二节 变压器的空载电流和铁耗	28
第三节 变压器的运行特性和参数测定	32
第四节 三相变压器和特殊变压器	38
习题	43
第三章 交流电机	45
第一节 三相异步电动机的结构和工作原理	45
第二节 三相异步电动机的运行分析	58
第三节 三相异步电动机的电磁转矩和机械特性	65
第四节 三相异步电动机的起动、调速和制动.....	70
习题	84
第四章 微特电机	86
第一节 步进电动机	86
第二节 直流伺服电动机	90
第三节 交流伺服电动机	92
第四节 无刷直流电动机	95
习题	99
第五章 电机的继电-接触控制	100
第一节 控制用低压电器.....	100
第二节 电气控制线路基础.....	106
第三节 三相异步电动机的继电-接触控制	114
习题.....	120

第六章 电力电子器件及其驱动保护	121
第一节 电力电子器件.....	121
第二节 电力电子器件的驱动电路.....	135
第三节 电力电子电路的保护.....	144
习题.....	148
第七章 电力电子电路	150
第一节 可控整流电路(AC-DC)	150
第二节 交流变换电路(AC-AC)	173
第三节 斩波电路(DC-DC)	180
第四节 逆变电路(DC-AC)	184
习题.....	193
第八章 电机的电子控制	196
第一节 直流电动机的电子控制.....	196
第二节 异步电动机的电子控制.....	213
习题.....	224
附录一 实验指导	225
实验一 三相桥式全控整流及有源逆变电路实验.....	225
实验二 直流并励电动机.....	228
实验三 三相异步电动机的起动与调速.....	231
实验四 双闭环晶闸管直流调速系统.....	234
附录二 部分习题答案	239
附录三 电气控制技术常用符号表	246
参考文献	251

第一章 直流电机

直流电动机的起动性能和调速性能比交流电动机好,因此在要求调速平滑、调速范围广等对调速要求较高的电气传动系统中仍广泛应用。随着电力电子技术的发展,晶闸管整流电源已越来越多地替代直流发电机。但直流发电机发出的直流电在稳定性、平滑性和可靠性方面较之静止整流装置的直流电要好得多,所以在供电质量要求较高的电解、电镀、电焊以及飞机、船舶和各种自动机械等仍继续采用直流发电机。

第一节 直流电动机的基本结构和励磁方式

一、直流电动机的基本结构

直流电机的结构如图 1-1 所示,由静止的定子和转动的转子两大部分组成,图 1-2 为横剖面示意图。

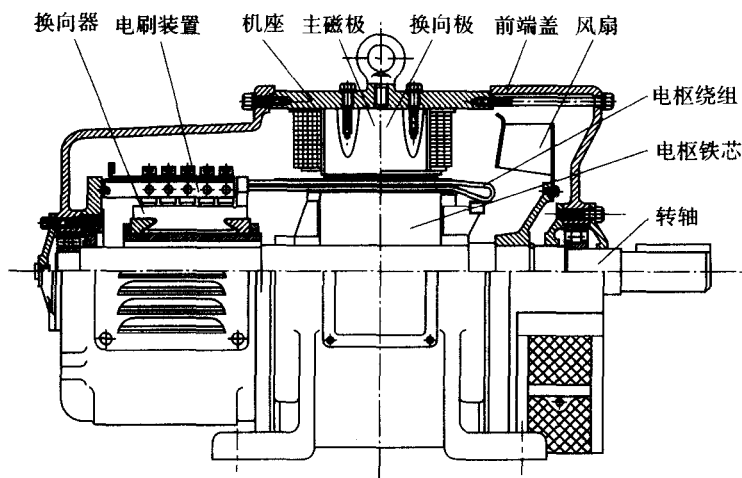


图 1-1 直流电机的结构

定子部分包括机座、主磁极、换向极、端盖、轴承和电刷装置等。转子部分包括电枢铁芯、电枢绕组、换向器、风扇和转轴等。

1. 主磁极

主磁极产生气隙磁场,并使电枢表面的气隙磁通密度按一定波形沿空间分布。

主磁极包括主磁极铁芯和励磁绕组。主磁极铁芯由 1~1.5mm 厚的低碳钢薄板冲片叠压而成。励磁绕组用圆形或矩形纯铜绝缘电磁线制成。各磁极的励磁绕组串联联接成一路。

大的直流电机在极靴上开槽,槽内嵌放补偿绕组,与电枢绕组串联,用以抵消极靴范围内的电枢反应磁动势,从而减少气隙磁场的畸变,改善换向,提高电机运行可靠性。

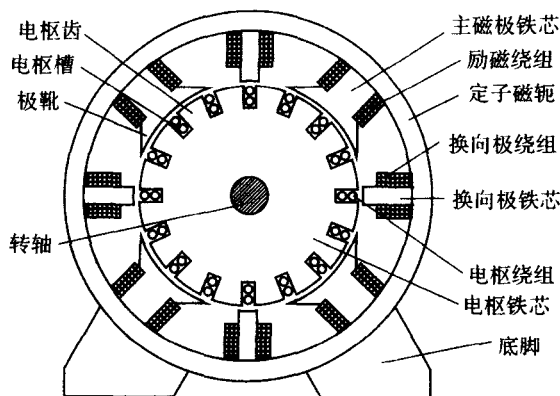


图 1-2 直流电机横剖面示意图

2. 换向极(或称附加极)

换向极用于改善直流电机的换向性能。换向极由换向极铁芯和换向极绕组组成。换向极绕组必须和电枢绕组相串联。

3. 机座

直流电机的机座不仅支撑和固定整个电机,而且还是磁极间的磁通路。所以机座应用导磁性好、机械强度较高的铸钢或厚钢板制成,绝不能用铸铁。

4. 电枢铁芯

电枢铁芯是主磁路的一部分。由于转子在定子主磁极产生的恒定磁场内旋转,所以电枢铁芯内的磁通是交变的,为减少涡流和磁滞损耗,通常用两面涂绝缘漆的 0.5mm 硅钢片叠压而成。冲片上有均匀分布的嵌放电枢绕组的槽和轴向通风孔。

5. 电枢绕组

电枢绕组是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。容量很小的直流电机用圆形电磁线绕制而成,一般均用矩形绝缘导线绕制成定形线圈。每个线圈(亦称元件)两边的跨距(称节距)一般在一个极距左右,首尾按要求与换向器上的两片换向片相焊接,形成闭合绕组。电枢绕组分叠绕组、波绕组和蛙形绕组。而叠绕组又分单叠绕组和复叠绕组;波绕组又分单波绕组和复波绕组;蛙形绕组是叠绕组和波绕组相结合,所以也称混合绕组。

一般将两端出线分别和两片换向片连接的单匝或多匝线圈称为绕组元件;有时为增加绕组元件数,在同一个槽内放置 μ 个元件,并将它们绑扎在一起,这绑扎在一起的 μ 个元件称为线圈;电枢表面所开的嵌线槽称为实槽数,用 Z 表示;同一个槽内放置 μ 个元件时, $Z_1 = \mu Z$ 称为虚槽数。计算时极距 τ 和绕组节距用虚槽数表示,则极距 $\tau = Z_1 / (2p) = \mu Z / (2p)$, p 为主磁极对数。

因每个元件的两个出线端分别与两个不同的换向片相连,而每个换向片上焊接了两个不同元件的出线端,所以元件数 S 和换向片数 k 必然相等,即 $S = k = Z_1$ 。

绕组在电枢上的绕法可以用绕组节距来表征,一定的绕组节距规定了元件边在电枢上的串联情况,元件串联时在电枢上的移动情况和每个元件的出线端在换向器上的移动情况。同一个元件的上、下两元件边在电枢表面所跨开的距离(用虚槽数表示)称为第一节距,用 y_1 表示,选择时应使两元件边电势相加后获得的感应电动势尽可能最大,尽量接近极距 τ ,即 $y_1 = Z_1 / (2p) \pm \epsilon = \text{整数}$ 。

(1) 单叠绕组 紧接着相连的两个元件是相邻的,其端部连线叠在一起,如图 1-3 所示,故

称为单叠绕组。

单叠绕组将上元件边(图 1-3 中实线边)在同一个极下的元件连接成一条支路,所以单叠绕组的并联支路对数 a 和主磁极对数 p 相等,即 $a=p$ 。电枢电流 $I_a=2ai_a$,其中, i_a 为每条支路的电流。

(2)单波绕组 单波绕组中,两个直接串联的元件构成波浪形,如图 1-4 所示,故有此称呼。

单波绕组将元件上层边(或下层边)处在同一极下的元件组成一条支路,所以单波绕组的并联支路对数只能为 $a=1$ 。

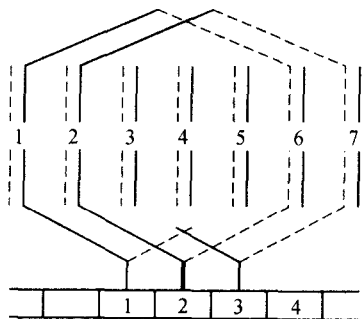


图 1-3 单叠绕组

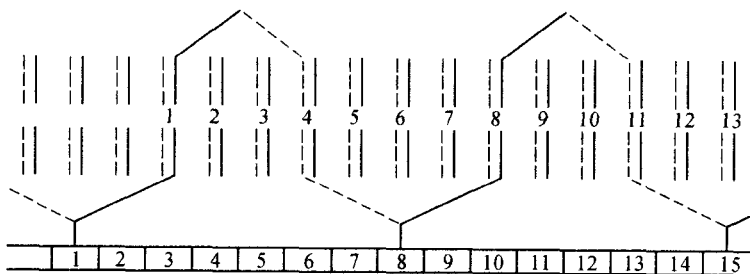


图 1-4 单波绕组

6. 换向器

换向器是直流电机换向的组成部分。它是直流电机特有的关键部件,也是最薄弱的一环,它的质量好坏直接影响直流电机的运行可靠性。由换向器套筒、换向片(铜)、云母片(0.4~1.2 mm 厚)和压紧圈等组成紧密整体。小型换向器用热固性环氧树脂热压成整体。换向片数目与元件数目相等。元件首尾端嵌放在换向片端部槽内或升高片上,并焊接在一起。

7. 电刷装置

电刷装置由电刷、刷握、刷杆和刷杆座等组成。电刷将转动的电枢绕组和静止的外电路联通。电刷装置与换向器配合,起整流或逆变作用。

8. 气隙

定、转子之间的气隙是主磁路的一部分,其大小直接影响运行性能。由于气隙磁场由直流励磁产生,可比异步电动机大得多,小型直流电机为 1~3mm,大型直流电机可达 12mm。

二、直流电动机的励磁方式

励磁方式是指励磁绕组中励磁电流获得的方式,分他励、并励、串励和复励。复励又分积复励和差复励。

1. 他励

励磁绕组与电枢绕组在电路上互不相连,由两个独立的直流电源 U_f 和 U 分别向励磁绕组和电枢绕组供电,如图 1-5(a)所示。由永磁体做成主磁极的亦可看作他励的一种。

由于励磁电流 I_f 的大小与电枢端电压 U 和电枢电流 I_a 无关,所以为便于控制, I_f 相对于 I_a 来说,要小得多,所以励磁绕组的匝数较多,截面积较小。

2. 并励

励磁绕组与电枢绕组并联,由同一直流电源 U 供电,如图 1-5(b)所示。因励磁回路自成一

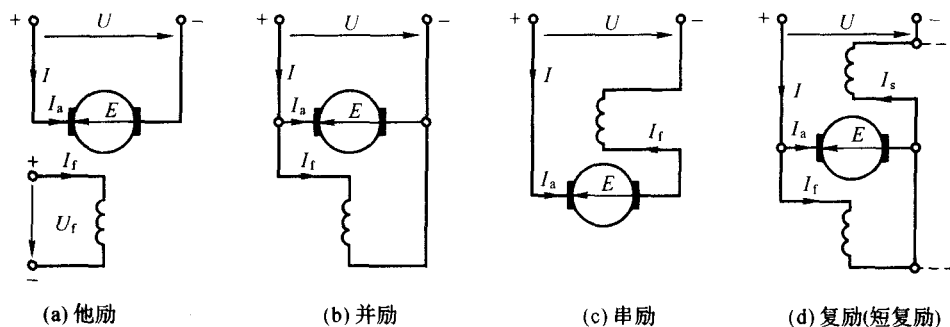


图 1-5 直流电动机的励磁方式

路,所以一般也与他励一样,选较小的励磁电流、较多的励磁绕组匝数。对并励直流电动机来说,电源提供的线路电流 $I = I_a + I_f$ 。

3. 串励

励磁绕组与电枢绕组串联,如图 1-5(c)所示。因此,对于直流电动机,电源提供的线路电流 I 、电枢电流 I_a 和励磁电流 I_f 是相等的,即 $I = I_a = I_f$ 。

由于电枢电流较大,所以串励绕组的截面积大,匝数少。

4. 复励

同时具有并励绕组和串励绕组称为复励,如图 1-5(d)所示。并励绕组和电枢绕组并联后再与串励绕组相串联称为短复励,如图 1-5(d)中实线所示;串励绕组和电枢绕组串联后再与并励绕组相并联,相应于图 1-5(d)中的虚线,称为长复励。

短复励时,流过串励绕组的电流 $I_s = I$;长复励时, $I_s = I_a$ 。但无论是短复励还是长复励, $I = I_a + I_f$ 。

更值得注意的是,按产生的磁动势相互叠加结果分积复励和差复励。如具有 w_f 匝的并励绕组所产生的磁动势为 $F_f = I_f w_f$,具有 w_s 匝的串励绕组所产生的磁动势为 $F_s = I_s w_s$ 。积复励时, F_s 与 F_f 的方向相同,总励磁磁动势 $\sum F = F_f + F_s$;差复励时, F_s 与 F_f 的方向相反,总励磁磁动势 $\sum F = F_f - F_s$ 。这两种复励形式的直流电机的运行特性差别很大,直流电动机根本不采用差复励;差复励发电机则作直流电焊机用。

三、直流电动机的额定值

额定值是电机生产标准对产品在规定工作条件下(即额定工作条件)所规定的一些量值。主要额定值通常标在电机的铭牌上。直流电动机的主要额定值有:

- (1) 额定功率 P_N 指直流电动机转轴上输出的机械功率,单位为 W 或 kW;
- (2) 额定电压 U_N 指额定状态下电机出线端的电压,即电源的输入电压,单位为 V;
- (3) 额定电流 I_N 指额定状态下电机出线端的电流,即电源输入的总电流,单位为 A;
- (4) 额定转速 n_N 指直流电动机转轴上输出的转速,单位为 r/min。

此外,直流电动机铭牌上还标有电机型号、绝缘等级、额定励磁电压 U_{fN} 、额定励磁电流 I_{fN} 等说明电动机特点的内容。而额定效率 η_N 、额定转矩 T_N 等通常不标注在铭牌上。

显然,直流电动机的 $P_N = U_N I_N \eta_N$ 。在实际运行时,如果电流恰好等于额定电流,就称为额定运行或满载运行;如果电流小于额定电流,就称为欠载或轻载;如果电流大于额定电流就称为过载或超载。长期过载不仅使电机过热,降低电机的使用寿命,甚至会损坏电机。长期轻载

不仅不能充分利用电机的设备容量,而且会降低电机的效率。

第二节 直流电动机的工作原理

一、直流电动机的工作原理

图 1-6(a) 是直流电动机的工作模型。图中 N 和 S 是定子主磁极直流励磁后所产生的恒定磁场,当电刷 A 和 B 间外施直流电压 U ,若 A 刷与电源的“+”极相连,B 刷与电源的“-”极相连,则在图示瞬间,外电流 I 经电刷 A 及与之相接触的换向片进入绕组元件 $abcd$,如元件内的电流为 i_a ,则 i_a 的方向为从 A 刷 $\rightarrow a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d \rightarrow B$ 刷。 i_a 与磁场相互作用,产生电磁力 f ,方向根据左手定则确定,如图 1-6(b) 所示。作用在电枢圆周切线方向的电磁力 f 将产生电磁转矩 T_{em} ,方向为逆时针。当电磁转矩 T_{em} 大于负载转矩 T_2 和空载转矩 T_0 之和时,在电磁转矩 T_{em} 作用下,电枢以 n 速度按逆时针方向旋转。同时,转动的电枢绕组切割恒定磁场,感应电动势 e ,方向按右手定则确定,与 i_a 正好相反。

转过 180° 的位置,由于电刷 A 通过换向片仍与处在 N 极下的元件边相连,所以从空间上看, i_a 的方向不变,即从 A 刷 $\rightarrow d \rightarrow c \rightarrow b \rightarrow a \rightarrow B$ 刷,电磁转矩 T_{em} 仍是逆时针方向,因此 n 亦不变。但 i_a 相对于元件 $abcd$ 来说,已改变了方向。

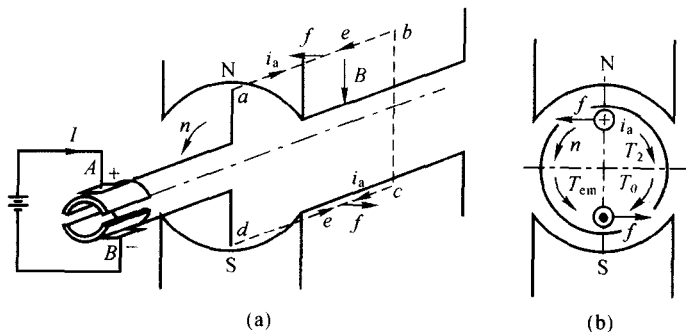


图 1-6 直流电动机的工作模型

所以直流电机在作电动机运行时,有以下几个特点:

(1) 电刷间外施电压 U 和外电流 I 均为直流,通过换向片和电刷的逆变作用,在每个电枢线圈内流动的电流 i_a 变成了交流,同时产生的感应电动势 e 亦为交流;

(2) 元件内的感应电动势 e 和电流 i_a 的方向相反,故称 e 为反电动势;

(3) 某一固定的电刷(如 A 刷)只与处在一定极性(N 极)磁极下的导体相联接。由于处在一定极性下的导体电动势和电流的方向是不变的,所以由电枢电流所产生的磁场在空间上也是固定不变的;

(4) 电磁转矩 T_{em} 起驱动作用,即 n 与 T_{em} 同方向,所以只要电动机外部持续不断地供给电能,电动机就有持续不断的电磁转矩 T_{em} 去驱动生产机械或设备。然而,只有一个元件的电动机,其所产生的电磁转矩是脉动的,所以实际电动机中在圆周表面均匀开有较多的槽,槽内嵌放着相当多的元件,使所得的电磁转矩 T_{em} 基本上不变。

二、空载气隙磁场和电枢反应

1. 空载气隙磁场

直流电动机空载运行时,电枢电流 $I_a \approx 0$,主磁极直流电流励磁后所产生的恒定磁场就是直流电动机的空载磁场。图 1-7 为四极电机空载时磁场的分布情况。

从图 1-7 可见,励磁磁动势所产生的主磁极磁通 Φ_0 分两部分:大部分磁通的路径为主磁极→气隙→电枢铁芯齿部→电枢铁芯轭部→电枢铁芯齿部→气隙→另一个主磁极→定子轭部→返回原主磁极,并与电枢绕组和两个极的励磁绕组相交链,是实现机电能量转换的媒介,故称为主磁通,用 Φ_0 表示;另一小部分磁通不经过电枢铁芯而仅通过极间气隙,或主磁极邻近的铁磁材料和空隙形成闭合回路,并仅与励磁绕组相交链,不会在电枢绕组中感应电动势和参与机电能量转换,称为漏磁通,用 Φ_σ 表示。电机实现机电能量转换依靠主磁通 Φ_0 来完成,而漏磁通仅仅影响电机的运行性能。

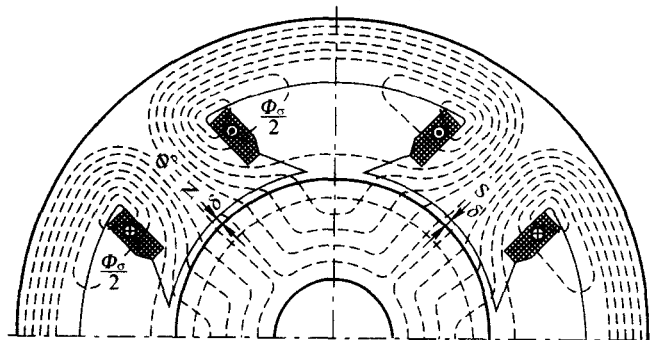


图 1-7 直流电动机空载时的磁场分布

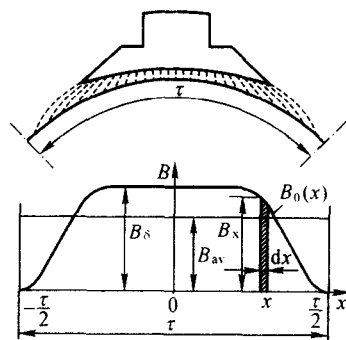


图 1-8 气隙中主磁场磁密的分布

主磁通整个回路所需磁动势可以分段计算,即分成主磁极(2段)、气隙(2段)、电枢铁芯齿部(2段)、电枢铁芯轭部和定子轭部,分别计算各段所需的磁动势,再相加就可以了。

主磁通所对应的气隙磁通密度 B_0 的分布情况如图 1-8 所示。显然,在不计齿槽影响时,气隙磁场的磁密曲线呈笠帽形。

由于电机的磁路由铁芯和气隙组成,所以当 Φ_0 较小时,铁磁材料部分的磁压降很小,磁动势主要降落在气隙部分, Φ_0 与磁动势 F_0 或励磁电流 I_f 基本上成直线关系。当 Φ_0 较大以后,铁芯部分的磁压降逐渐增加,并随铁磁材料的磁通饱和程度的增加而迅速增加。故磁动势 F_0 ,或励磁电流 I_f 与磁通 Φ_0 的关系曲线——磁化曲线呈弯曲形状,与铁磁材料的磁化曲线的形状基本一致,如图 1-9 所示。电机空载,在额定转速下,额定电压所对应的磁通值为 oa 时所需磁动势为 $F_0' = ac$,此时气隙中所需磁动势为 F_0' ,如图 1-9 所示,则 $k_\mu = F_0' / F_0'$ 称为饱和系数。一般电机中,饱和系数 $k_\mu = 1.1 \sim 1.35$ 。

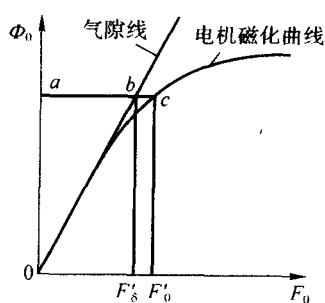


图 1-9 电机的磁化曲线

2. 直流电动机的电枢磁动势和磁场(主要分析气隙磁场)

当电枢电流 $I_a \neq 0$ 时,气隙磁场由励磁电流 I_f 产生的励磁磁动势 F_f 和由电枢电流 I_a 产生的电枢磁动势 F_a 共同建立。

电枢磁场的分布如图 1-10(a) 所示。分析时假设电枢槽内总有效串联导体数为 N ,并均匀

分布在电枢表面上,不计齿槽影响;电刷位于换向器几何中性线。根据全电流定律,距原点 $\pm x$ 处的闭合回路如图 1-10(b)所示。在不计铁芯部分磁压降时,可以表达为:

$$\sum Hl \approx 2F_{ax} \approx \sum i = (Ni_a/\pi D_a)2x = 2Ax$$

式中, F_{ax} 为距原点 x 处一个气隙所需的磁动势, i_a 为导体中的电流(即支路电流), D_a 为电枢外径, $A = \frac{Ni_a}{\pi D_a}$ 表示电枢表面线负荷。因此, $F_{ax} = (Ni_a/\pi D_a)x = Ax$ 。

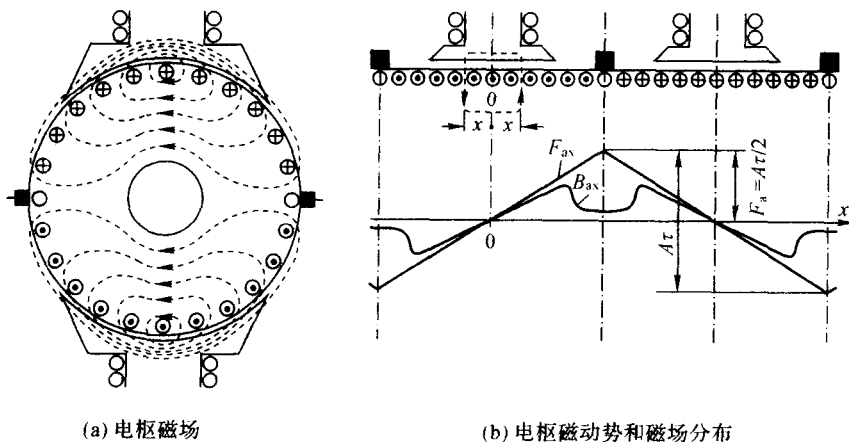


图 1-10 电刷放在几何中性线上的电枢磁动势和磁场

由此可以画出沿电枢表面电枢磁动势的分布曲线 $F_{ax} = f(x)$,如图 1-10(b)所示,从而得到气隙电枢磁密 B_{ax} 的空间分布为 $B_{ax} = \mu_0 H_{ax} = \mu_0 (F_{ax}/\delta') = \mu_0 Ax/\delta'$ 。

显然,尽管离磁极中心线愈远,磁动势愈大,但由于极间气隙增大,该处的磁密 B_{ax} 反而减小。气隙电枢磁密 B_{ax} 沿电枢表面呈马鞍形分布,如图 1-10(b)所示。

3. 电枢反应

电机负载运行时,电枢电流产生的电枢磁场对主极励磁磁动势建立的气隙磁场产生影响,使气隙磁场发生畸变的作用称为电枢反应。

将电枢某一点在运行中首先进入的主磁极极尖称前极尖,离开的极尖称后极尖。

电枢反应分交轴电枢反应和直轴电枢反应。

当电刷放在换向器几何中性线上时,电枢磁场轴线与主磁极轴线正交(即成 90° 电角度),故这时的电枢反应称交轴电枢反应。

图 1-11(a)是由 I_f 产生的空载气隙磁场,图 1-11(b)是由电枢电流 I_a 产生的电枢气隙磁场,图 1-11(c)为负载时的气隙合成磁场。

当电机磁路不饱和,即磁路为线性时,可以采用叠加原理。图 1-12 表示了交轴电枢反应采用叠加原理进行分析:先分别求出单独由 I_f 产生的空载气隙磁场和由电枢电流 I_a 产生的电枢气隙磁场,再将它们叠加,获得负载时的气隙磁场。图中呈笠帽形分布的 B_{0x} 为主磁极直流励磁空载磁密波,呈马鞍形分布的 B_{ax} 为交轴电枢磁动势产生的负载磁密波, B_{sx} 为合成气隙磁密波(图中实线所示)。

从图 1-12 可见,电动机运行时的交轴电枢反应的作用是:

(1)使气隙磁场发生畸变。前极尖磁场加强,后极尖减弱;

(2)物理中性线(即电枢表面磁密为零之处)从空载时与几何中性线重合位置,逆转向偏移

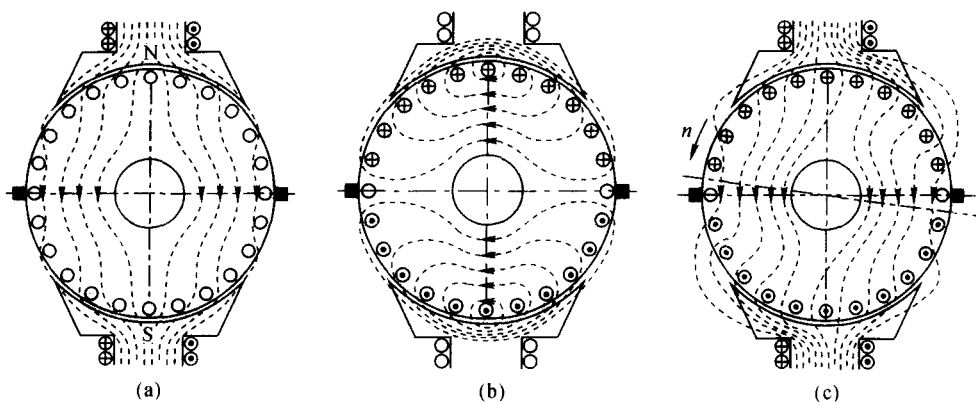


图 1-11 直流电动机负载运行时的气隙磁场

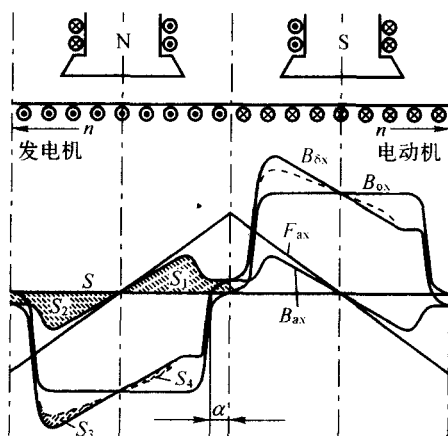


图 1-12 电刷在换向器几何中性线上时的交轴电枢反应

α 角；

(3) 磁路不饱和时, 主磁极产生的主磁场被电枢反应削弱的数量等于被加强的数量, 每极气隙总磁通量保持不变; 磁路饱和时, 由于磁场被加强部分更趋于饱和, 磁通密度相应减少, 故每极总磁通有所减少, 合成气隙磁密波 B_{sx} 如虚线所示。

电刷不在换向器几何中性线上时, 同时存在交轴电枢反应和直轴电枢反应。直轴电枢反应的作用仅对主磁极磁场起去磁作用或助磁作用。

三、直流电动机的感应电动势和电磁转矩计算

1. 直流电动机的感应电动势

电枢旋转时, 电枢绕组切割气隙磁场, 就会感应电动势。为便于计算, 假设电枢表面光滑无齿, 电枢绕组元件均匀地分布在电枢表面, 绕组为整距元件, 电刷位于换向器几何中性线上。不计被电刷短路的元件导体数。

电枢绕组感应电动势是指正、负电刷间的支路感应电动势。而每一条支路中的串联导体数为 $N/(2a)$ 。组成叠绕组每条支路的上元件边(即导体)均匀地分布在一个磁极下, 下元件边均匀地分布在另一不同极性的磁极下; 而组成波绕组每条支路的上元件边均匀地分布在同一极性的磁极下, 下元件边均匀分布在不同极性的磁极下, 每根导体的感应电动势 $e_i = B_{\text{sx}} l v$ 各不

相同,每条支路电动势等于支路中各条串联导体的电动势之和,即

$$E = \sum_{i=1}^{N/(2a)} e_i = lv \sum_{i=1}^{N/(2a)} B_{\delta xi}$$

式中, e_i 是支路中第 i 根导体的感应电动势, $B_{\delta xi}$ 为第 i 根导体处的气隙磁通密度值。

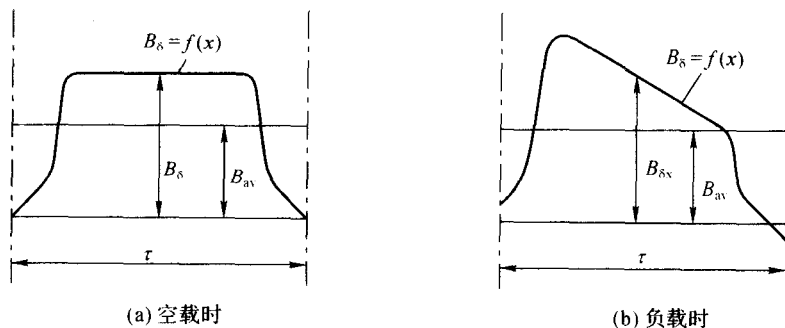


图 1-13 每极下气隙磁通密度的分布曲线

气隙磁场 $B_{\delta xi}$ 在不同空间位置的数值是不一样的,尤其是在负载运行时,如图 1-13(b) 所示,所以实际计算感应电动势时就会非常不便。由于每条支路的导体均匀分布在磁极下,因此用平均磁密 $B_{\delta av}$ 替代实际磁密 $B_{\delta xi}$,每根导体感应的平均电动势 $e_{av} = B_{\delta av}lv$ 。则每条支路,即电动机的感应电动势

$$E = \frac{N}{2a} e_{av} = \frac{N}{2a} B_{\delta av} lv \quad (1-1)$$

式中, $B_{\delta av}$ 为一个极距内的磁通密度平均值,即 $B_{\delta av} = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} B_{\delta x} dx = \frac{\Phi}{l\tau}$,电枢表面的线速度 $v = 2p\tau \frac{n}{60}$ 。将它们代入式(1-1)得

$$E = \frac{N}{2a} \frac{\Phi}{l\tau} l \frac{2p\tau n}{60} = \frac{pN}{60a} \Phi n = C_e \Phi n \quad (1-2)$$

式中, $C_e = \frac{pN}{60a}$,称为电动势常数。

式 1-2 中,当 Φ 的单位为 Wb, n 的单位为 r/min 时,感应电动势 E 的单位为 V。同时可以看出,电枢电动势仅与每极磁通和转速有关,而与每极下磁密分布状态无关。

当电刷不在换向器几何中性线上或绕组短距时,因磁通变化不大,所以感应电动势的变化也不大,上述结果仍基本正确。但负载时式中的 Φ 应以合成磁通数值代入。

2. 直流电动机的电磁转矩

当电枢绕组中有电流流通时,每一导体将受到电磁力作用,并产生电磁转矩。第 i 根导体所受的电磁力 $f_i = B_{\delta xi} l i_a$,电磁力 f_i 产生的电磁转矩

$$T_i = f_i (D_a/2) = B_{\delta xi} l i_a (D_a/2)$$

直流电机电磁转矩应是电枢所有串联的 N 根导体所产生的电磁转矩的总和,即

$$T_{em} = \sum_{i=1}^N T_i = l i_a \frac{D_a}{2} \sum_{i=1}^N B_{\delta xi}$$

实际计算时,与计算感应电动势一样,用 $B_{\delta av}$ 替代实际磁密 $B_{\delta xi}$,计算利用平均电磁力和产生电磁转矩。这样就可方便地求得直流电机电磁转矩

$$T_{em} = N B_{\delta av} l i_a D_a / 2$$