

ZIDONG KONGZHI JISHU JICHU

自动控制技术基础

陈金醮 刘元扬 编

中南工业大学出版社

前 言

本书是为非自动控制专业的读者编写的。它的内容包括电机拖动、交流技术、检测与执行元件、基本控制理论等多门自动控制类课程的内容。旨在使不可能设置多门自动控制课程的计算机应用专业等非自动控制专业的学生,掌握自动控制最基本的理论、技术、方法和元件,以便于他们开展计算机在自动控制中应用的工作,或者其他自动控制方面的工作。本书也可作为非自控专业工程技术人员的自学教材,以及供从事自动控制工作的工程技术人员参考。

在内容的编写方面,力求简要、深度适宜。重在最基本的概念、理论和方法,达到入门引导的目的。

本书的内容由陈金醴、刘元扬、梁读勇、刘桂湘、周佩钧共同讨论定稿。全书由陈金醴执笔编写,刘元扬审校。

本书在编写过程中得到了自动控制工程系主任饶立昌教授、计算机科学系主任陈松乔教授的指导和支持,在此表示衷心的感谢。

由于编者水平所限,再加时间仓促、篇幅限制,未必能达到预期的目的,且书中难免有缺点和错误之处,恳请读者批评指正。

编 者 1990年6月

目 录

第一章 电机及拖动	(1)
第一节 直流电机概述	(1)
第二节 他励直流电动机的运行特性	(8)
第三节 他励直流电动机的调速	(12)
第四节 他励直流电动机的起动和制动运行状态	(22)
第五节 其他励磁方式直流电动机特性简述	(30)
第六节 交流电动机概述	(33)
第七节 三相异步电动机的运行特性	(42)
第八节 三相异步电动机的调速	(50)
第九节 三相异步电动机的起动和制动	(56)
练习思考题	(65)
第二章 晶闸管变流技术	(69)
第一节 晶闸管	(69)
第二节 晶闸管可控整流电路	(75)
第三节 晶闸管的其他应用简述	(96)
第四节 晶闸管的选择与保护	(103)
第五节 晶闸管触发电路	(108)
练习思考题	(117)
第三章 测量传感元件	(119)
第一节 温度测量传感元件	(119)
第二节 力的测量传感元件	(127)
第三节 流量测量传感元件	(135)
第四节 位移与转角测量传感元件	(139)
第五节 转速测量传感元件	(145)
练习思考题	(150)
第四章 执行元件	(151)
第一节 伺服电动机	(151)
第二节 步进电动机	(155)
第三节 执行器	(161)
练习思考题	(165)
第五章 自动控制系统的基础知识	(166)
第一节 自动控制系统基本概念	(166)
第二节 自动控制系统的数学模型	(171)
第三节 自动控制系统的频率特性	(189)

第四节	自动控制系统的稳定性.....	(198)
第五节	自动控制系统的性能分析.....	(202)
第六节	自动控制系统的校正.....	(212)
第七节	控制对象特性的测量和识别.....	(219)
第八节	恒转速控制系统分析举例.....	(222)
第九节	直流调速系统线路实例.....	(233)
	练习思考题.....	(238)
参考文献		(241)

第一章 电机及拖动

第一节 直流电机概述

一、电机的分类

凡是实现电能和机械能相互转换的旋转机械统称为电机。把电能转换为机械能的称为电动机,而把机械能转换为电能的称为发电机。电动机按其所耗的电能种类又分为交流电动机和直流电动机。同样,发电机按其发出的电能种类也可分为交流发电机和直流发电机。按其功能及其用途、结构的特殊性又有一般电机与特种电机之分。图1-1表示了电机的主要分类。

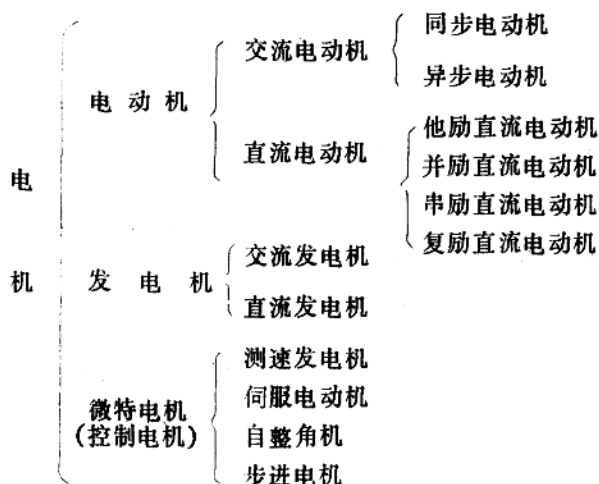


图1-1 电机的主要分类

具有一般结构的大功率电动机用于拖动各种生产机械、电力车辆,这些电动机往往是自动控制系统的被控对象。具有各种特殊结构和性能的小功率控制电机,在自动控制系统中大多作为执行元件或者检测元件,它的性能直接影响自动控制系统的结构和性能。尽管各种电动机的结构、功能和应用场合各不相同,但是电动机最基本的工作原理是一样的。特殊结构的控制电机也往往是由一般结构的电机进行改进、发展而得到的。

本章主要讨论直流电机。

二、直流电机的基本工作原理

1. 直流发电机的基本工作原理

图1-2表示了直流发电机的物理模型,它由磁极、线圈、换向器、电刷等部分组成。当由原动机拖动线圈以恒定的转速 n 转动时,线圈的 ab 段和 cd 段将切割磁力线,根据电磁感应原理,在线圈 ab 段和 cd 段都将感应出电势 e ,并且 e 的大小为

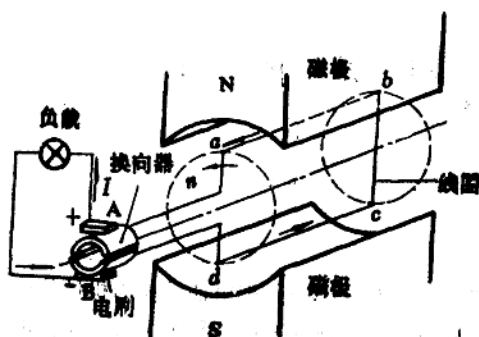


图1-2 直流发电机的工作原理

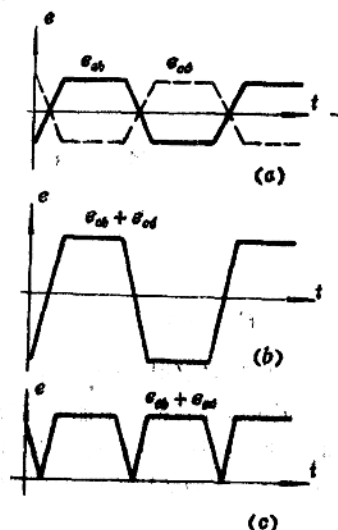


图1-3 感应电势

$$e = B_x l v \text{ (V)}$$

(1-1)

式中: B_x 是导体所在处的磁通密度 (Wb/m^2);

l 是导体 ab 或 cd 的长度 (m);

v 是导体切割磁力线的相对线速度 (m/s)。感应电势 e 的方向按照右手定则确定。

图1-3表示了线圈里和电刷之间的感应电势的波形与方向。从图中可见:

(1) 线圈 ab 段和 cd 段的感应电势 e_{ab} 、 e_{cd} 大小相等、方向相反, 并且每转动一圈方向改变二次, 其感应电势的波形表示于图1-3 (a)。可以推论: 如果沿圆周方向均匀分布有 m 对磁极 (N极与S极相间, 等距排列), 则每转动一圈感应电势 e 的方向将变化 $2m$ 次。

(2) 如果按图1-2所示, 线圈电势的引出采用换向器结构。当线圈转动时保证电刷A始终引出的是处于N极之下线圈段 (ab 和 cd 交替) 的电势, 电刷B引出的始终是处于S极之下的电势。那么, 在电刷A、B之间引出的电势将如图1-3 (c)所示, 是一个单方向的脉动电势, 这就是直流发电机的工作原理。

(3) 如果按图1-4所示, 线圈电势的引出采用滑环结构。在线圈转动过程中, 保证电刷A始终引出 ab 段的电势 e_{ab} , 电刷B始终引出 cd 段的电势 e_{cd} , 那么在电刷A、B间将得到图1-3 (b) 所示的交流电势, 这就是交流发电机的工作原理。

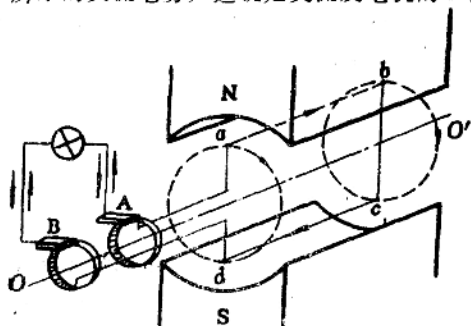


图1-4 滑环引出交流电势

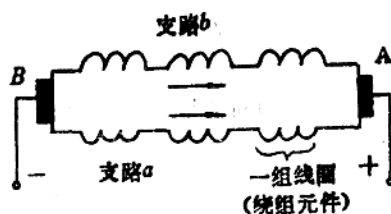


图1-5 直流电机绕组连接示例

(4) 在图1-2 (直流发电机) 中, 线圈 ab 段和 cd 段在经过两个磁极之间的几何中心线时感应电势改变方向。因此, 电刷必须安放在几何中心线上, 电刷要不断交替地断开和接通 ab 段和 cd 段, 才能保持始终引出同一方向的电势, 这个工作叫做换向。

在实际发电机中, 为了得到实用意义的直流电压, 即电压幅值足够大 (如230V)、脉动足够小, 能输出足够大的电流 (如100A), 因此实际的发电机电圈是很多圈数串联起来, 捆扎在一起组成一组线圈叫做绕组元件。一组线圈的输出电压与线圈的圈数成正比, 再通过多组线圈的串联, 可以得到足够高的输出电压。同时通过线圈的并联形成多条并联支路, 可输出足够大的输出电流, 如图1-5所示。在实际电机中, 为了减少电势的脉动, 也由于减少机械惯量以及充分利用空间等多方面的原因, 绕组元件实际上是沿着电枢 (一个表面有槽的导磁圆柱体) 表面均匀分布的, 如图1-6所示。

2. 直流电动机的工作原理

如果在图1-2中, 撤去原动机, 并且在电刷 A、B 间施加一个直流电压, 并将产生电流

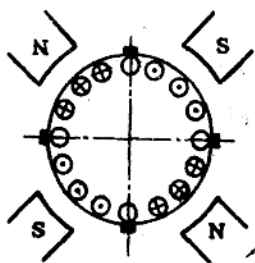


图1-6 绕组沿圆周均匀分布示意图

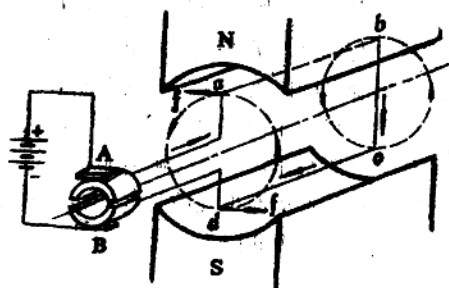


图1-7 直流电动机工作原理

I , 如图1-7所示。根据毕-萨电磁力定律, 载流导体 ab 、 cd 将受到电磁力的作用, 电磁力 f 的大小为

$$f = B_x I l \quad (\text{牛顿}) \quad (1-2)$$

式中 I 是流过导体的电流, 力的方向由左手定则确定。在电磁力的作用下, 线圈将在磁场中作固定方向的转动。并且当结构和磁场固定之后 (I 、 B_x 不变), 电磁力的大小取决于 I 的大小 (外加电压的大小), 电磁力的方向取决于 I 的方向 (外加电压的极性)。这就是直流电动机工作的基本原理。

同样为了得到有实际用途的电磁力, 与直流发电机一样, 线圈也是由多个线圈捆扎成一组线圈 (绕组元件), 由绕组元件的串联和并联组成整个电动机的绕组, 可以承受施加于电刷之间的不同等级的电压 (如220V), 产生足够大的电流和足够大的电磁转矩, 以带动生产机械运动。直流电动机的结构和绕组分布与直流发电机相同。

从上面的分析可以看到, 图1-2和图1-7的内部条件是完全相同的, 只是外部条件不同而已。这说明同样一台直流电机, 当外部施加电压时, 它将产生电磁力带动机械运动, 实现把电能转换为机械能, 作为电动机使用。当外部由原动机拖动电枢转动时, 它将感应出电势, 产生电动势, 实现把机械能转换为电能, 作为发电机使用。这就是直流电机的可逆性原理。

三、直流电机的实际结构

图1-8和图1-9分别表示了直流电机的结构图和剖面图。直流电机由静止的定子和转动的转子（电枢）两大部分组成。

1. 定子部分

定子部分包括主磁极、换向磁极、机座、电刷装置。

(1) 主磁极及主磁场

主磁极又称主极，由铁芯和励磁绕组组成（图1-9中的2、3），它的作用是产生主磁场。主磁场的磁动势 $F_f = I_f W_f$ ，式中 F_f 是励磁绕组的磁动势， I_f 是流过励磁绕组的电流， W_f 是励磁绕组的匝数。主磁场的磁路表示于图1-10。主磁路由定子磁轭、气隙、电枢磁轭构成闭合回路。定子磁轭和转子磁轭都是磁导体，磁阻很小，唯有气隙磁阻很大。因此气隙磁阻对主磁通的大小起主要影响，在电机设计时，总是希望减少气隙长度，并且保持气隙均匀，以保证磁路均匀和减少励磁功率。另一方面，由于气隙磁阻大，使得定子出来的磁通，有少部分不穿过气隙进入电枢，而是经气隙

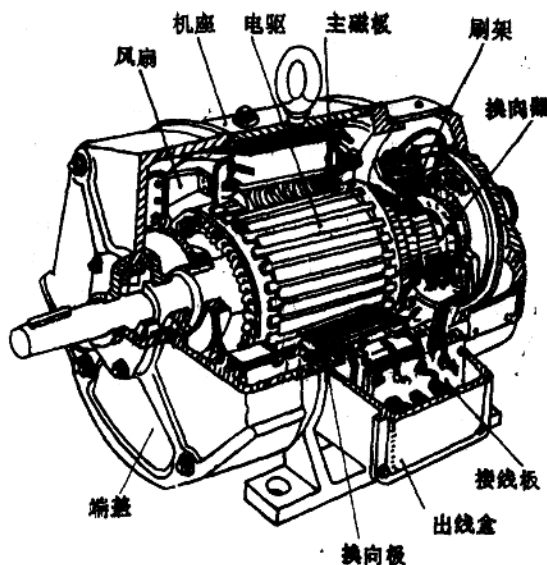


图1-8 直流电机的结构

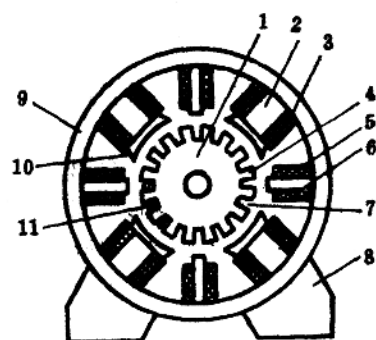


图1-9 直流电机剖面示意图

1. 电枢铁芯 2. 主磁极 3. 励磁绕组 4. 电枢齿
5. 换向绕组 6. 换向极 7. 电枢槽 8. 底脚
9. 磁轭(定子) 10. 极掌(极靴) 11. 电枢绕组

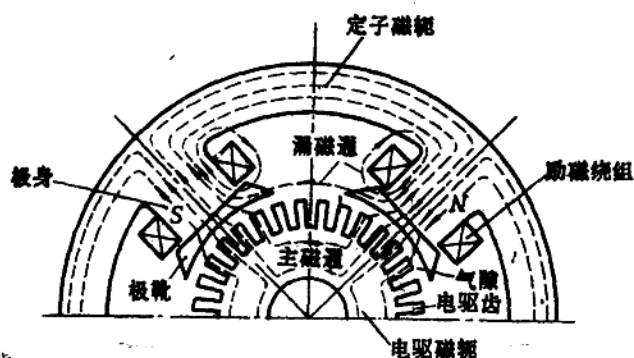


图1-10 主磁场磁路

直接返回定子磁轭形成回路，这部分磁通叫做漏磁通 Φ 。（图1-10），漏磁通是有害的。相反的，大部分磁通由气隙进入电枢与电枢绕组匝连，再经气隙回到定子上相邻磁极的极靴而形成闭合回路，这部分磁通称主磁通 Φ ，是有用的磁通。漏磁通 Φ 。一般为主磁通 Φ 的20%左右。

(2) 换向磁极

换向磁极也是由磁极和励磁绕组组成，它产生的只是一个很弱的局部的磁场，用于改善

电刷的换向。由于电枢电流产生的磁场对主磁场的作用，使主磁场的分布发生变化（扭曲），它对换向产生不利影响，换向磁极的作用就是消除这个不利影响，以改善换向。换向磁极通常处于电刷的上方。

(3) 电刷装置

电刷装置包括电刷和电刷架。电刷的作用在于从转动的电枢引出电势(发电机)，或者把直流电压输入到转动的电枢(电动机)，实现转动部分和静止部分的电传导。一般一台电机所拥有的电刷对数与磁极的对数相等。电刷是安放在两个相邻磁极的几何中心线上，以获得最大的输出电压(发电机)，或输出最大的电磁转矩(电动机)。例如图1-11(a)表示的是发电机的情况，电刷在 $A'B'$ 位置，电刷与中心线 OO' 之间的导体感应电势是起抵消作用的。图1-11(b)表示的是电动机的情况，电刷与中心线 OO' 之间的导体产生的电磁力也是起抵消作用的。

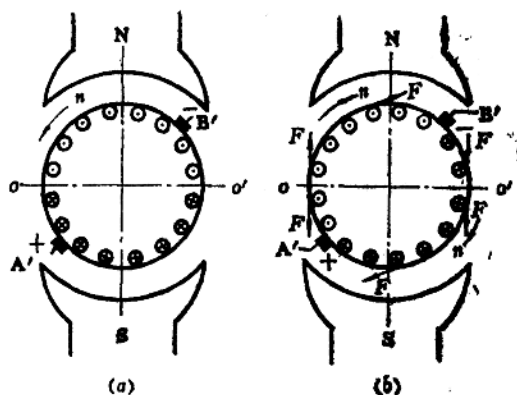


图1-11 电刷不在几何中心位置

(4) 机座

机座既是主磁极及换向磁极的支持固定部件，又是主磁通磁路的一部分。机座中通过磁通的部分称为磁轭。机座一般为铸钢件，为了减少涡流和磁滞损耗，也有用钢板焊接或用硅钢片冲制叠压而成的。

2. 转子部分

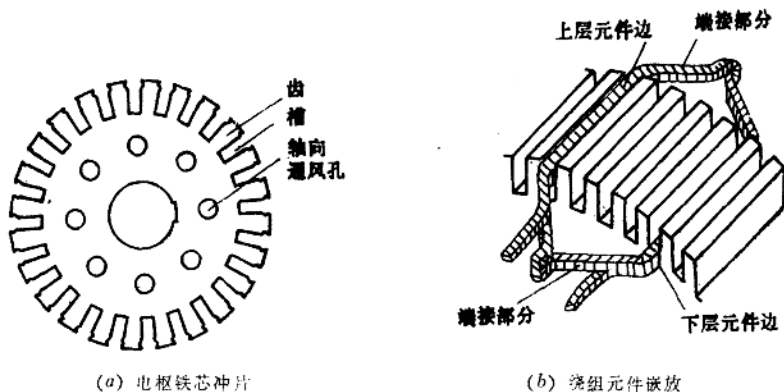


图1-12 电枢及绕组元件

转子部分由电枢铁芯、电枢绕组、换向器、转轴、风扇等部分组成。

(1) 电枢铁芯

电枢铁芯用于安放电枢绕组，并且作为主磁路的一个部分。为了减少磁滞损耗和涡流损耗，一般用0.5mm厚的涂有绝缘漆的硅钢片叠压而成，沿圆周方向均匀地冲有梨形或矩形的槽，如图1-12(a)所示。

(2) 电枢绕组

电枢绕组是一组线圈(绕组元件)集合的总称。线圈用高强度漆包线或玻璃丝包导线绕制而成。它分层地嵌放在电枢铁芯的槽里,并按一定的规律连接,如图1-12(b)所示。电枢的剖面图可参看图1-9。电枢绕组是产生电磁转矩,产生感应电势,进行能量转换的核心部件。

(3) 换向器

换向器是实现交流电与直流电之间转换的机械元件。在直流发电机中,通过换向器把线圈中的交流电转换为直流电由电刷引出。在直流电动机中,通过电刷引入的直流电压经换向器转换为交流电施加于线圈,以产生恒定方向的电磁转矩。换向器是由许多换向片(梯形截面的铜片)叠成圆筒形附于转轴上的。每个换向片之间用云母片绝缘,每个换向片一一与绕组元件连接。图1-13表示一个实际的绕组连接展开图的实例。

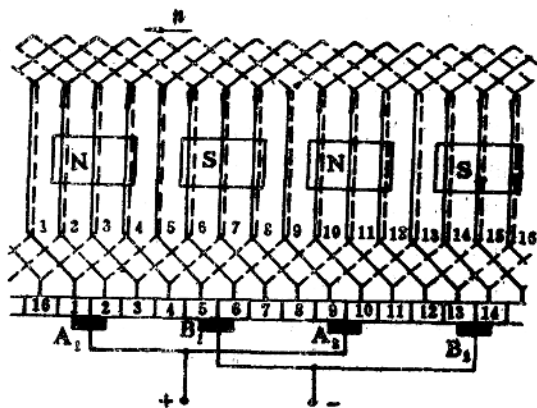


图1-13 直流电机绕组展开图实例

四、直流电机的励磁方式

励磁方式是指给电机主磁极励磁绕组供电的方式。图1-14列出了四种常见的直流电机的励磁方式。它们依序为他励直流电机、并励直流电机、串励直流电机、复励直流电机。

1. 他励直流电机：他励直流电机指励磁电流的供给与电枢的端电压 U_a 是独立的。图1-14(a)所示。

2. 并励直流电机：并励直流电机是指励磁绕组与电枢并联的励磁方式，励磁电流的供

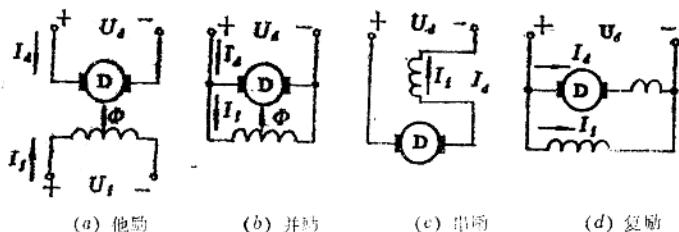


图1-14 直流电机励磁方式

给是来自于电枢的端电压。在正常运行状态 U_a 保持不变,所以这时与他励方式相同。

3. 串励直流电机：串励是指励磁绕组与电枢绕组串联, $I_f = I_a$, 电枢电流也就是励磁电流。串励直流电机的励磁绕组比其他励磁方式的励磁绕组匝数要少得多, 导体截面积要大得多。串励电动机的运行特性与他励、并励差别很大。这将在以后讨论。

4. 复励直流电机：复励是以并励为主, 带有串励的励磁方式。按照串励绕组连接的极性又有和复励及差复励之分。和复励的串励绕组与并励绕组产生的磁场是相互增强的, 反之差复励则是相互削弱的。

五、直流电机的铭牌数据

一台直流电机,都有一些符合国家标准规定的额定数据,这些额定数据都标写在一块标牌上,并贴附在电机外壳。用户根据这些额定数据正确使用电机,保证设备安全运行又能够得到充分利用。这些额定数据有:

(1) 额定电压 U_e (伏): 额定电压是直流电机安全运行的最高电压。不能超额定电压运行。

(2) 额定电流 I_e (安): 额定电流是电机按照规定的工作方式工作时,绕组允许的最大电流。

(3) 额定功率 P_e (千瓦): 额定功率是电机按照规定的方式工作时所能提供的输出功率。对于电动机而言是指轴上输出的机械功率,对于发电机而言,是指电机输出的电功率。

(4) 额定转速 n_e (转/分): 指在额定电压、额定电流、额定功率下运行时电机的转速。

另外还有额定励磁电流 I_{fe} 、额定效率 η_e 等其他数据。这些数据之间是相互有联系的,可以由一些数据计算出其他数据或者铭牌上没有标出的数据。例如,电动机额定效率 $\eta_e = P_e / I_e U_e$, 额定输出转矩 $M_e (\text{N} \cdot \text{m}) = 9550 \frac{P_e (\text{kW})}{n_e (\text{r/min})}$, 电枢电阻 $R_a (\Omega) \approx \frac{I_e U_e - P_e}{2 I_e^2}$, 式中 I_e 、 U_e 、 P_e 单位分别为安、伏、瓦。

电机在额定状态下运行是最佳的运行状态,具有良好的性能和效率,又使电机得到最充分的利用。在实际运行时很难完全做到这一点,但应当尽量做到或接近做到这一点。当实际运行值超过额定值的运行叫做过载运行,过载运行会损坏电机或者缩短电机的寿命。当实际运行值低于额定值的运行叫做欠载运行,欠载运行效率低,设备没有得到充分的利用。

六、直流电机的电枢反应和换向

1. 直流电机的电枢反应

当直流电机空载运行时,电机的磁场仅由励磁绕组的磁势 F_f 产生,这时的磁势只有直轴分量,如图1-15(a)的 F_f 。 F_f 产生的磁场在磁极下面的分布是对称的梯形波,如图1-15(b)的 B_f 。

当电机负载运行时,电枢流过负载电流 I_a , I_a 产生电枢磁势 F_a , $F_a = I_a W_a$ (W_a 是电枢绕组的匝数)。 F_a 是个交轴磁势,它与 F_f 在空间相差 $\pi/2$ 。 F_f 和 F_a 的合成磁势 F_H 是产生电机磁场的磁势,如图1-15(a)所示。图1-15(b)分别表示了由 F_f 、 F_a 单独作用产生的磁场 B_f 、 B_a , 以及由合成磁势 F_H 产生的磁场 B_H 。

B_H 和 B_f 相比较,可见电枢磁势 F_a 对气隙磁通密度的分布产生了如下的影响:

(1) 使气隙磁场的磁通密度分布曲线发生了变形,磁通密度分布变得不均匀,半个磁极之下的磁通密度得到加强,另外半个磁极之下被削弱。

(2) 由于磁饱和效应,加强的增量小于被削弱的增量。因此电枢磁势总的影响是削弱了励磁磁势的作用,即具有去磁作用。

(3) 因磁通密度的分布发生变形,磁通密度过 O 点 (物理中心线) 不在几何中心线 (B_f 的过 O 点在几何中心线,而 B_H 移动一个角度 β), 不利于换向,因此换向极的作用就是消除这个不利影响。

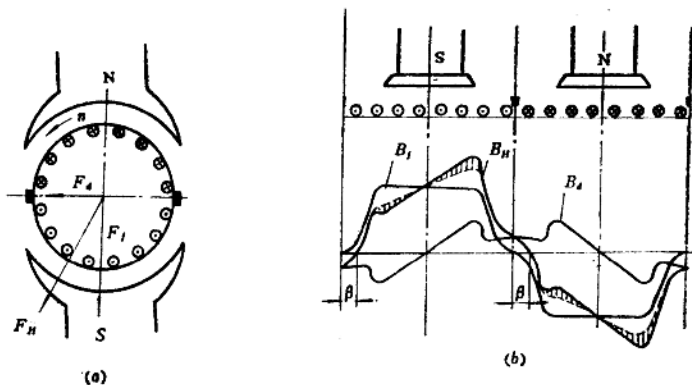


图1-15 电枢反应的影响

由负载电流引起的电枢磁势所产生的上述影响称为电枢反应，电枢反应是一种不利于电机运行的反应。

2. 换向

为了使电机能承受不同等级的额定电压和额定电流，电枢绕组里的所有绕组元件都是以串、并联支路的形式连接的。一个支路里串联元件的个数和并联的支路数对于同一台电机都是不变的，如图1-5所示。然而电枢是不停地转动着的，因此对于一条支路内的所包含的具体元件则是不断在交替更新的。也就是说一个具体的绕组元件，将随着转动位置的不同，轮流地更换支路，更换支路的同时必将改变元件电流的方向，而且元件更换支路都是在经过电刷时进行的。因此，将某一个绕组元件经过电刷时，从一条支路换到另一条支路，元件里电流改变方向的问题称为直流电机的换向问题。一个元件换向时间极为短促，通常只有千分之几秒，然而换向问题却很复杂，电磁的、机械的原因都会影响换向的质量，例如电枢反应、负载电流大小、换向元件的漏电感、电刷接触不良等等原因，换向不良会引起在电刷与换向片之间产生火花。换向火花加速换向器和电刷的损坏，严重时甚至使电机无法正常运行，有关换向火花问题国家有专门的技术标准规定。

从电磁方面来说，目前改善直流电机的换向最有效的办法是前面所述的装置换向极，近代1kW以上的直流电机几乎都要装换向极。另一个办法是对于大功率电机在主磁极上装有补偿绕组，用以抵消电枢反应对换向的影响。

第二节 他励直流电动机的运行特性

一、直流电动机的基本方程式

直流电动机是集机、电、磁能于一体的能量转换部件。在其运行过程中，存在电能、磁能、机械能之间的转换，并且遵守能量守恒、力矩平衡、电压平衡以及电磁感应定律等客观规律。直流电动机的基本方程式就是一组描写这些约束规律的一组方程式。下面仅列出直流

电动机的电压平衡方程式和力平衡方程式（结合图1-16）：

电压平衡方程式

$$u_d = e_d + i_d(R_d + L_d \frac{di_d}{dt}) \quad (1-3)$$

$$e_d = c_e \Phi n \quad (1-4)$$

力矩平衡方程式

$$m_d = m_z + \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} \quad (1-5)$$

$$m_d = c_m \Phi i_d \quad (1-6)$$

式中 u_d 是施加于电动机的电压（伏）， e_d 是直流电动机的反电势（伏）， i_d 是流过电枢回路的电流（安）， R_d 、 L_d 是电枢回路的电阻和电感， m_d 是电磁转矩， m_z 是阻力转矩（包括空载转矩 M_0 和负载转矩 M_l ，即 $M_z = M_0 + M_l$ ）， Φ 是每极磁通量（韦伯）， C_e 是电动势常数，取决于电机结构， C_m 是转矩常数，取决于电机结构，并存在 $C_m = 9.55 C_e$ 的关系， n 是电动机转速（转/分）， GD^2 是飞轮惯量（牛顿·米²），电动机转子的 GD^2 值可从产品目录查得。

当直流电动机稳定运行时，方程式便为静态平衡方程式，如下：

$$U_d = E_d + I_d R_d \quad (1-7)$$

$$E_d = C_e \Phi n \quad (1-8)$$

$$M_d = M_z = M_0 + M_l \quad (1-9)$$

$$M_d = C_m \Phi I_d \quad (1-10)$$

式中 U_d 、 I_d 、 E_d 、 M_d 分别为 u_d 、 i_d 、 e_d 、 m_d 的静态值。

从式（1-7）、式（1-8）可以得到转速的方程式

$$U_d = E_d + I_d R_d = C_e \Phi n + I_d R_d$$

得

$$n = \frac{U_d - I_d R_d}{C_e \Phi} \quad (1-11)$$

式（1-11）是反映电动机各参数之间的基本关系式。也是得到各种电动机人为特性、实现电动机调速的基本方程式。

二、直流电动机运行状态的功率关系

把式（1-7）两边同时乘以 I_d ，得

$$I_d U_d = I_d E_d + I_d^2 R_d$$

改写为

$$P_1 = P_M + P_{Cud}$$

式中 $P_1 = I_d U_d$ 是电动机从电源吸收的功率。

$P_M = E_d I_d$ 是电磁功率，是能量交换的功率。对应于电磁转矩。

$P_{Cud} = I_d^2 R_d$ ，电枢绕组的铜耗。

电磁功率 P_M 的主要部分在转轴上作为机械功率输出，这是电动机的有用功部分，一小部分用于克服机械摩擦损耗和铁损耗。因此，把式（1-9）两边乘以角速度 Ω ，得

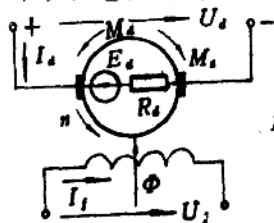


图1-16 直流电动机的表示

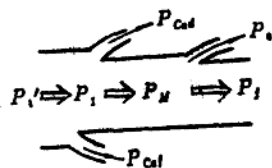


图1-17 直流电动机运行状态的功率关系图

$$M_d \Omega = M_o \Omega + M_f \Omega$$

写成

$$P_M = P_o + P_f$$

式中

$$P_M = M_d \Omega \text{ 是电磁功率}$$

$$P_f = M_f \Omega \text{ 是转轴上的输出功率}$$

$$P_o = M_o \Omega \text{ 空载损耗, 包括摩擦损耗和铁耗。因此, 功率关系可以表示为}$$

$$P_f = P_M - P_{cad} - P_o$$

如果考虑励磁消耗的功率 P_{cuf} 在内, 则整台直流电机输入的总功率 P_1 为

$$P_1' = P_f + P_{cuf} = P_f + P_{cad} + P_{cuf} + P_o$$

这个功率关系也可以用图1-17表示之。

三、他励直流电动机的固有机械特性

固有特性是指电动机在额定工作状态且电枢回路不串接任何外部电阻的情况下, 电动机本身固有的特性。电动机固有机械特性是指在这种状态下转速 n 和转矩 M 之间的关系曲线。将式 (1-10) 中的 I_d 解出代入式 (1-11), 便得

$$n = \frac{U_d}{C_e \Phi} - \frac{R_d}{C_e C_m \Phi^2} M_d \quad (1-12)$$

这便是 $n-M_d$ 的一般关系式, 也是机械特性的一般表示式。根据固有机械特性的含义是: $U_d = U_e$ (额定电压)、 $\Phi = \Phi_e$ (额定磁通)、不外串电阻。因此固有机械特性的表示式为:

$$n = \frac{U_e}{C_e \Phi_e} - \frac{R_d}{C_e C_m \Phi_e^2} M_d \quad (1-13)$$

式 (1-13) 绘制成图1-18的曲线便为固有机械特性曲线 $n=f(M_d)$, 可见:

(1) 固有机械特性是一条略为下斜的直线。下斜的斜率为 $-\frac{R_d}{C_e C_m \Phi_e^2}$, 把斜率的倒

数的绝对值叫做机械特性的“硬度”。

(2) 当理想空载时 ($M_d = M_o = 0$)、 $n = n_0 = \frac{U_e}{C_e \Phi_e}$, n_0 称理想空载转速。显然, 由于摩擦转矩的存在, M_d 是不可能为0的。

(3) $M_d = M_e$ 时, $n = n_0 - \Delta n_e = n_e$, n_e 便为额定转速。 $\Delta n_e = R_d M_d / (C_e C_m \Phi_e^2)$ 为额定转速降。

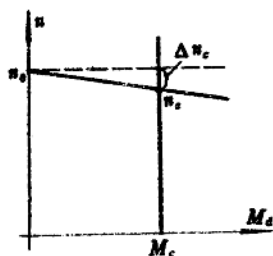


图1-18 固有机械特性

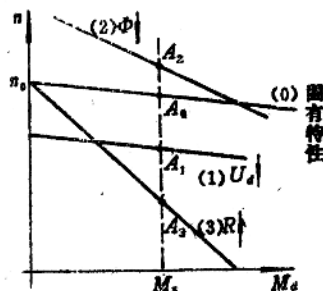


图1-19 人为机械特性

四、他励直流电动机的人为机械特性

式 (1-12) 是一般机械特性的表示式, 人为机械特性就是脱离额定状态, 人为地改变式

(1-12)中的 U_d 、 Φ ，以及在电枢回路串入电阻 R_e 的三个参数之一，所得到的机械特性，即：

$$n = \frac{U_d}{C_e \Phi} - \frac{(R_d + R_e)}{C_e C_m \Phi^2} M_d = n_0 - \Delta n \quad (1-14)$$

从式(1-14)可见，获得人为机械特性有三种方法：

(1) 改变电枢电压 U_d ：因为 U_e 是电动机的最高工作电压，所以 U_d 只能从 U_e 下调，而不能上调。改变 U_d 的机械特征表示于图1-19曲线(1)。从式(1-12)和曲线(1)均可见： $U_d \downarrow$ 、 $n_0 \downarrow$ ，机械特性整根曲线向下平移，斜率不变。(硬度不变)。

(2) 改变磁通 Φ ：因为额定磁通 Φ_e 是接近饱和磁通，所以 Φ 也只能从 Φ_e 下调， $\Phi \downarrow$ 的机械特性是 $n_0 \uparrow$ ，特性斜率变大，如图1-19曲线(2)所示。

(3) 改变电枢回路电阻：外串不同阻值的电阻 R_e ，增加电枢回路电阻。外串电阻之后机械特性 n_0 不变，但斜率显著加大，如图1-19曲线(3)所示。

要指出的是，如果上述的讨论中，电动机的阻力转矩为 M_z 不变，那么在固有机机械特性时运行点在 A_0 点，在其他人为特性时，运行点分别为 A_1 、 A_2 、 A_3 点，得到了不同的转速 n_0 、 n_1 、 n_2 、 n_3 ，实现了调速的目的。

【例1-1】已知某台他励直流电动机的铭牌数据 $P_e = 13\text{kW}$ ， $U_e = 220\text{V}$ ， $I_e = 68.7\text{A}$ ， $n_e = 1500\text{r/min}$ 求取：

- (1) 计算和绘出固有机机械特征
- (2) 计算和绘出电压下降一半的机械特性
- (3) 计算和绘出电枢串1欧电阻的机械特征
- (4) 计算和绘出磁通削弱30%的机械特性

解：(1)固有机机械特性表示式： $n = \frac{U_e}{C_e \Phi_e} - \frac{R_d}{C_e C_m \Phi_e} M_d$ 它是一条斜线，因此只要计算两个点的坐标值便可得整条曲线，一般选取理想空载点($n = n_0$ ， $M_d = 0$)和额定工作点($n = n_e$ ， $M_d = M_{de}$)最方便。

R_d 的要求： R_d 的求取有多种近似方法

1) $R_d \approx -\frac{I_e U_e - P_e}{2I_e^2}$ ，即取铜耗为整个空载损耗的一半，计算得 R_d 近似值。

2) 取 $E_e = (0.93 \sim 0.97)U_e$ ，小容量取小系数，中等容量取0.95。这是按我国直流电动机的一般设计数据取的。

3) 对于小容量电机可以用实验测取

这里采用第1)种方法

$$R_d = \frac{68.7 \times 220 - 13 \times 1000}{2 \times 68.7^2} = 0.224 (\Omega)$$

n_0 的计算：

$$C_e \Phi_e = \frac{U_e - I_e R_d}{n_e} = \frac{220 - 68.7 \times 0.224}{1500} = 0.136 (\text{V} \cdot \text{min/r})$$

$$n_0 = \frac{U_e}{C_e \Phi_e} = \frac{220}{0.136} = 1618 (\text{r/min})$$

M_{de} 的计算： M_{de} 是额定负载时的电磁转矩，它不同于额定转矩 M_e 。

$$M_{de} = I_e C_m \Phi_e = I_e C_e \Phi_e \times 9.55 \\ = 68.7 \times 0.136 \times 9.55 = 89.2 \text{ (N}\cdot\text{m)}$$

而
$$M_e = 9550 \times \frac{P_e}{n_e} = 9550 \times \frac{13}{1500} = 82.7 \text{ (N}\cdot\text{m)}$$

$$M_{de} = M_e + M_o, \quad M_o \text{——空载损耗转矩}$$

根据以上计算得到固有机械特性的两个点 $A_1(1618, 0)$ 、 $A_2(1500, 89.2)$ ，便可绘出固有机械特性，表示于图1-20的曲线(0)。

$$(2) \quad n_{o1} = \frac{\frac{1}{2}U_e}{C_e \Phi_e} = \frac{1618}{2} = 809 \text{ (r/min)}$$

额定负载时的转速

$$n_{e1} = n_{o1} - \Delta n_e = n_{o1} - (n_o - n_e) \\ = 809 - (1618 - 1500) = 691 \text{ (r/min)}$$

得到机械特性的两点 $B_1(809, 0)$ 、 $B_2(691, 89.2)$ ，据此绘出机械特性于图1-20的曲线(1)

(3) 串电阻的人为特性 n_o 不变。

$$n_{e2} = \frac{U_e}{C_e \Phi_e} - \frac{(R_d + R_e)}{C_e \Phi_e C_m \Phi_e} M_d = n_o - \Delta n_{e2}$$

$$\Delta n_{e2} = \frac{0.224 + 1}{0.136^2 \times 9.55} \times 89.2 = 618 \text{ (r/min)}$$

也可以用比例法求取

$$\frac{R_d}{R_d + R_e} = \frac{\Delta n_e}{\Delta n_{e2}} \quad \Delta n_{e2} = \frac{(R_d + R_e)}{R_d} \Delta n_e$$

$$n_{e2} = n_o - \Delta n_{e2} = 1618 - 618 = 1000 \text{ (r/min)}$$

可得机械特性两个点 $C_1(1618, 0)$ 、 $C_2(1000, 89.2)$ ，据此绘出机械特性曲线(2)。

$$(4) \quad n_{o1} = \frac{U_e}{C_e \Phi_e (1 - 0.3)} = \frac{n_o}{0.7} = 2311 \text{ (r/min)}$$

$$\Delta n_{e1} = \frac{R_d}{C_e C_m (\Phi_e \times 0.7)^2} \cdot M_d$$

$$= \frac{0.224}{0.136^2 \times 0.7^2 \times 9.55} \times 89.2$$

$$= 231 \text{ (r/min)}$$

$$n_{e1} = n_{o1} - \Delta n_{e1} = 2311 - 231 = 2080 \text{ (r/min)}$$

可得机械特性两个点 $D_1(2311, 0)$ 、 $D_2(2080, 89.2)$ ，据此绘出机械特性曲线③

第三节 他励直流电动机的调速

直流电动机的调速，就是根据被拖动对象的要求，人为地改变电动机的运行转速。具体

的是在同一个负载（被拖动对象）下，通过改变电动机的电气参数（ U_d 、 ϕ 、 R ），使电动机在不同的人为机械特性的工作点上运行，以得到不同的转速。这种改变电动机电气参数的调速方法称电气调速方法。相应的，改变电动机与负载之间传动机构的传动比，达到改变负载运行速度的方法称机械调速。机械调速方法电动机本身的转速是不变的。下面仅讨论直流电动机电气调速的方法。直流电动机电气调速的基本方程式是式(1-14)和(1-11)。

一、电枢回路串电阻调速

串电阻调速是在 $U_d=U_e$ ， $\phi=\phi_e$ 条件下，改变 R_c 的大小实现调速。

根据式(1-14)，当 U_d 、 ϕ 、 M_d 保持不变时， $R_c \uparrow$ ， $n \downarrow$ 或者 $R_c \downarrow$ ， $n \uparrow$ 。 $R_c=0$ 时，直流电动机运行在固有机械特性上，转速最高，它作为基速，串电阻调速只能从基速往下调。

串电阻调速的调节过程是， $R_c \uparrow \rightarrow I_d \downarrow \rightarrow M_d \downarrow (M_d < M_z) \rightarrow n \downarrow \rightarrow E_d \downarrow \rightarrow I_d \uparrow$ ， n 继续下降，直至 I_d 恢复原来数值， $M_d = M_z$ 为止， n 不再下降，调节过程结束，这时 n 稳定在一个新的稳定值。

图1-21直观地表示了串电阻调速的过程和运行点的变化。假设直流电动机原来稳定运行在固有机械特性的 A 点，转速为 n 。当电枢回路串入电阻 $R_d \rightarrow R_d + R_{c1}$ ，电气参数立即发生变化，但由于机械惯性， n 将还保持不变，因此运行点从 $A \rightarrow A'$ 。在 A' 点 $I_d \downarrow$ ， $M_d \downarrow$ 使 n 开始下降，并将沿着特性(1)从 $A' \rightarrow A_1$ 移动，即 n 逐渐下降， I_d 逐渐上升，直至 A_1 点，恢复到 $M_d = M_z$ ，电动机重新稳定运行在 A_1 点，转从 n 下降到 n_1 。

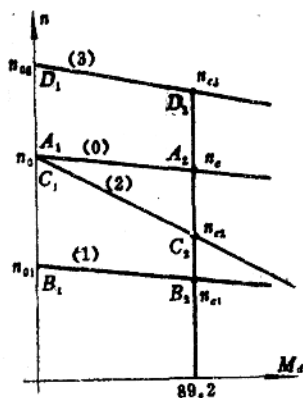


图1-20 计算绘制的机械特性

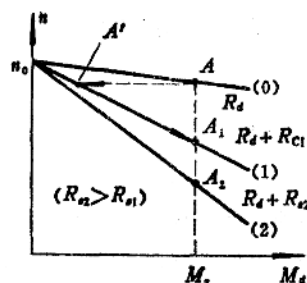


图1-21 串电阻调速

可见串电阻调速有如下特点和问题：

- (1) 串电阻调速是依靠增加转速降落实现的，因此机械特性显著变软， R_c 越大，特性越软。
- (2) 串电阻调速不改变理想空载转速 n_0 ，调速只能从固有特性的基速往下调。
- (3) 串电阻调速只能实现有级调速，并且耗能大，设备笨重。

二、降电压调速

降电压调速是在 $\phi=\phi_e$ 、 $R_c=0$ 的条件下，降低电源电压实现调速。根据式(1-14)，当 ϕ 、 R_c 、 M_d 不变时， $U_d \downarrow \rightarrow n \downarrow$ 从而 $n \downarrow$ ，而 Δn 不变。相反， $U_d \uparrow \rightarrow n_0 \uparrow$ 而 Δn 不变。但是由于 U_e 是最高