

高端装备关键基础理论及技术丛书

电机与控制

双凸极电动机 的原理和控制

PRINCIPLES AND CONTROL STRATEGIES
OF DOUBLY SALIENT MOTOR

孟小利 等



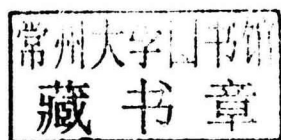
上海科学技术出版社

高端装备关键基础理论及技术丛书·电机与控制

双凸极电动机的原理和控制

Principles and Control Strategies of Doubly Salient Motor

孟小利 等 著



上海科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

双凸极电动机的原理和控制 / 孟小利等著. —上海:
上海科学技术出版社, 2018.1

(高端装备关键基础理论及技术丛书. 电机与控制)

ISBN 978-7-5478-3814-3

I. ①双… II. ①孟… III. ①凸极—电动机—理论②
凸极—电动机—控制 IV. ①TM32

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 282629 号

双凸极电动机的原理和控制

孟小利 等 著

上海世纪出版(集团)有限公司 出版、发行
上海科学技术出版社

(上海钦州南路 71 号 邮政编码 200235 www.sstp.cn)

上海盛通时代印刷有限公司印刷

开本 787×1092 1/16 印张 21.25 插页 4

字数 420 千字

2018 年 1 月第 1 版 2018 年 1 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5478-3814-3/TM·60

定价: 128.00 元

本书如有缺页、错装或损坏等严重质量问题, 请向工厂联系调换

内 容 提 要

双凸极电机是磁阻电机的一种,其特点是电机转子仅由硅钢片叠压而成,转子上无线圈无永磁体无滑环,是结构最简单的电机,适合于恶劣的环境下工作。

本书重点讨论双凸极电励磁电动机的结构原理和控制方法。双凸极电动机是一种新的调速电机,可用于每分钟几十转的低速区,用于每分钟几百到几千转的中速区,也可用于每分钟几万转的高速区,是一类可不用齿轮箱增速或减速的直驱电动机。

全书共6章:第1章介绍了调速系统的基本概念;第2章讨论了双凸极电机的基本结构参数,建立了简单的数学模型;第3章研究了三相电励磁双凸极电动机的调速系统,重点对五种控制方式、过载能力、调速性能以及制动性能进行了讨论;第4章围绕分布励磁线圈的双凸极电机进行了研究,分析总结了电机的发电特性、双通道工作特性以及电动工作特性;第5章论述了电励磁双凸极电机作为航空起动发电机相比于其他类型电机的优势;第6章讨论了电励磁双凸极电动机低速运行和高速运行的特点,着重对五相高速电机进行了研究。

本书可做相关专业的工程师和科技工作者参考,也可供高等院校电工学科的本科生和研究生参考。

磁阻电机是结构最简单的电机,适合于恶劣环境条件下工作。磁阻电机有三种类型:步进电机、开关磁阻电机和双凸极电机。

双凸极电机既可发电工作,也可电动工作,亦可构成起动发电机。本书是《双凸极直流发电机结构与原理》(2012年1月上海科学技术出版社出版)的姐妹篇。

近年来,北京某电机厂研制的18 kW双凸极无刷直流起动发电机已成功应用于某高空无人机,苏州某科技公司的双凸极直流发电机组已有系列产品,成功应用于增程式电动汽车,迈出了双凸极电机工业应用的步伐,我们衷心感谢他们。

励磁双凸极电动机是一种具有多个控制变量的调速电动机,为调速电机科技工作者和工程师们提供了广阔的天地,本书的目的是抛砖引玉,愿更多的人员共同来研究这种电机,为我国国民经济的发展添砖加瓦。

开关磁阻电机和双凸极电机都属于磁阻电机,结构简单,环境适应性好。开关磁阻电动机高速运行时的相电流峰值与有效值之比大,要求DC/AC变换器的电流容量大。多极低速异步电动机的功率因数较低。永磁同步电动机在低、中、高转速范围内都有好的性能,但永磁体价格高,高温工作有退磁风险,宽恒功率区的永磁电动机在高速区工作时万一失去直轴电流会导致电机电压过高的问题。这些因素为双凸极调速电动机的发展提供了机遇。目前6/4、12/8结构双凸极电动机转矩脉动较大,6/5、12/10结构分布励磁双凸极电动机转矩脉动明显减小但励磁损耗加大。著者写作本书的又一个出发点是希望广大电机工作者共同努力,改善双凸极电动机的不足之处,让其更好地为我国工农业的发展服务。

本书撰写过程中得到了南京航空航天大学电气工程系同仁的支持和帮助,研究生王婷婷、陆美玲、王兰凤的研究工作丰富了本书的内容,王寅博士提供了三相

九状态和六状态的宝贵实验数据。上海科学技术出版社为本书的出版付出了大量心血,在此致以衷心的感谢。

由于作者水平有限,有不当和错误之处敬请读者批评指正。

著 者

2017 年 10 月

第 1 章 概述	1
1.1 电动机调速系统的应用	1
1.2 直流电动机及其调速系统	2
1.2.1 直流电机的结构	2
1.2.2 直流发电机	4
1.2.3 直流电动机	6
1.2.4 直流电动机调速技术的历史	7
1.2.5 两开关管直流电动机的调速原理	8
1.2.6 三开关管直流电动机的调速原理	11
1.2.7 五管直流电动机的调速原理	14
1.2.8 直流电动机的双闭环调速系统	20
1.2.9 永磁直流电动机	22
1.2.10 直流电动机的调速系统小结	23
1.3 无刷直流电动机	23
1.3.1 永磁材料和永磁电机	23
1.3.2 方波电机和无刷直流电动机	24
1.3.3 方波电机的气隙磁感应、电动势和电磁转矩	32
1.3.4 无刷直流电动机的工作原理	33
1.3.5 BLDCM 的换相和换相提前	38
1.3.6 BLDCM 的制动和反转	41
1.3.7 BLDCM 的双闭环控制	45
1.3.8 高速无刷直流电动机	46
1.4 调速电动机的技术要求	49

1.5	本章小结	51
第 2 章	双凸极电机的结构和参数	53
2.1	磁阻电机和双凸极电机	53
2.2	双凸极电机的类型	53
2.3	双凸极电机的结构参数	57
2.4	双凸极电机的静态参数	59
2.5	转子极弧宽度与静态参数	67
2.6	电励磁双凸极电机的数学模型	69
2.7	齿槽转矩	71
2.8	本章小结	74
第 3 章	双凸极电动机调速系统工作原理	76
3.1	双凸极电动机的工作原理	76
3.2	三相三状态控制	77
3.2.1	三相三状态工作的换相过程	77
3.2.2	电磁转矩和励磁电流	83
3.2.3	电动工作的电枢反应	84
3.2.4	电动工作的相电流限制	87
3.2.5	转速调节的方法	90
3.3	三相三状态提前换相控制	92
3.3.1	提前换相控制的工作过程	92
3.3.2	提前换相控制时的电枢反应	98
3.3.3	第二种换相提前	98
3.4	三相六状态控制	103
3.4.1	转子极宽为 120° 的电动机三相六状态工作过程	106
3.4.2	转子极宽为 120° 的电动机三相六状态控制时的电枢反应	109
3.4.3	转子极宽大于 120° 的电动机三相六状态控制的工作过程	109
3.5	三相六状态的提前角度控制	111
3.5.1	$\alpha + \beta$ 控制的工作模态	112
3.5.2	三相六状态换相提前控制的工作特性	114

3.6	三相九状态控制	118
3.6.1	三相九状态仿真分析	119
3.6.2	三相九状态实验验证	122
3.7	单相工作方式	124
3.8	双凸极电动机的过载能力	132
3.9	恒转矩调速和恒功率调速	139
3.10	双凸极电动机的制动	146
3.10.1	双凸极电动机的制动方式	146
3.10.2	再生制动	146
3.10.3	反接制动	151
3.11	转子静止时的转矩	156
3.12	电动机的正反转运行	169
3.13	双闭环调速系统	170
3.14	高速双凸极电动机调速系统的主电路	171
3.14.1	高速电动机的参数	171
3.14.2	改善高速电动机可控性的方法	173
3.14.3	不加 C_2 的变换器调速系统的工作	174
3.15	串励和复励	176
3.15.1	有换向器电动机的串励结构	176
3.15.2	直流发电机的复励	177
3.15.3	电励磁双凸极直流发电机的复励	178
3.15.4	电励磁双凸极电动机的复励	179
3.16	本章小结	181
第 4 章	分布励磁线圈双凸极电机	183
4.1	DFDSM 的结构	183
4.2	6/5 结构电机的空载磁场	185
4.3	24/20 结构电机的静态参数	188
4.4	24/20 发电机工作特性	192
4.4.1	交流发电空载特性	192
4.4.2	直流发电空载特性	193

4.4.3	直流发电机的外特性	194
4.4.4	直流发电机的短路特性	197
4.5	24/20 电机的双通道发电工作	197
4.5.1	双通道发电的工作电路	197
4.5.2	双通道发电机的空载特性	198
4.5.3	双通道发电机的外特性	204
4.6	24/20 电机的磁场定向控制调速系统	208
4.6.1	电动机的数学模型	209
4.6.2	调速系统结构框图	210
4.6.3	坐标变换	211
4.6.4	SVPWM 工作原理	214
4.7	分布励磁线圈双凸极电机的电动工作特性	219
4.8	本章小结	223
第 5 章	双凸极起动发电机	224
5.1	直流起动发电机	224
5.2	变频交流起动发电机	226
5.3	开关磁阻起动发电机	231
5.4	电励磁双凸极起动发电机	235
5.4.1	双凸极电机的起动工作	237
5.4.2	双凸极电机的二极管整流发电	238
5.4.3	双凸极电机的可控整流发电	242
5.5	本章小结	251
第 6 章	低速和高速双凸极电动机	253
6.1	低速双凸极电动机	253
6.1.1	24/16 结构双凸极电动机	253
6.1.2	四种不同定转子极数电机的比较	262
6.1.3	48/32 结构电机定子极高的调整	270
6.1.4	降低电机体积重量的简单方法	273
6.1.5	调速特性	275

6.1.6 本节小结	276
6.2 12/10 高速悬浮电机	276
6.2.1 12/10 电机的静态参数和齿槽转矩	277
6.2.2 12/10 电机的发电工作特性	279
6.2.3 12/10 电机的空载悬浮力	279
6.2.4 悬浮力的控制	287
6.2.5 发电工作对悬浮力的影响	288
6.2.6 电动工作对悬浮力的影响	291
6.2.7 本节小结	293
6.3 五相高速电机	293
6.3.1 不同槽极配合的五相高速电机	294
6.3.2 五相电机的静态参数	295
6.3.3 发电工作电路和特性	297
6.3.4 五相电机的容错特性	300
6.3.5 转子极弧宽度对齿槽转矩和发电工作特性的影响	303
6.3.6 电动工作的电路和特性	305
6.4 四相双凸极电动机	307
6.4.1 四相双凸极电动机调速系统的构成	307
6.4.2 四相双凸极电动机	308
6.4.3 四相电机的电动运行	310
6.4.4 相绕组开路故障和容错控制	313
6.4.5 相绕组短路故障和容错运行	317
6.4.6 调速电动机的故障检测	322
6.5 本章小结	323
参考文献	324

1.1 电动机调速系统的应用

直流电动机在其接线端加以直流电源电机即旋转,可用于传动机械设备。异步电动机接三相交流电源也即能旋转。电励磁同步电动机借助其磁极表面的阻尼绕组,可实现异步启动和同步旋转。具有鼠笼的永磁同步电动机也可在三相电源作用下,异步启动并自动转入同步运行。

但是不论是直流电动机或交流电动机,直接和直流电源或交流电源连接,其转速是不变的,如同步电动机和永磁同步电动机,电机转速和电源频率直接相关,电源频率不变,电动机的转速也不变。直流电动机和异步电动机的转速则随电源电压和其传动的设备负载的变化转速有所变化,但变化不大。

转速基本上不变的电动机的应用范围是有限的,调速电动机的应用越来越广泛。

最早的汽车是电动汽车。但是随着内燃机的发展,电动汽车让位给了燃油汽车。100 多年来,燃油汽车迅速发展,汽车的发展推动了公路和高速公路的发展,促进了国民经济的快速增长,方便了人们的来往,增进了人类的文明。但是燃油车的负面效应也是明显的,它污染了空气,增加了 CO_2 的排放。目前,电动汽车有三类:纯电动汽车,它以电池储存的电作为能源;燃料电池电动车,它以燃料电池为能源;混合动力汽车,它是将油机和电动机共同用于推进的汽车。混合动力车仅减少了污染物的排放,纯电动汽车和燃料电池汽车则可达到零排放。

电动汽车的发展不仅减少了污染物的排放,而且简化了汽车的结构,减少了汽车的能量消耗。

电动汽车的发展和调速电动机的发展是分不开的。半个世纪前的电动汽车的驱动电动机为直流电动机,直流电动机调速方便,启动和低速转矩大,适合于车辆传动。直流电动机的缺点是有换向器和电刷,使用维护不方便,使用寿命短。现代电动汽车已不再采用直流电动机了。目前广泛使用的车用调速电动机有异步电动机、永磁同步电动

机,个别汽车应用开关磁阻电动机。这三种调速电动机都是电机本体、电机转子位置检测器、功率变换器和数字控制器的有机组合,不仅有好的调速性能,有大的起动转矩和低速工作转矩,使汽车有好的加速性能,而且有高的工作效率、高的功率密度、低成本、长的使用寿命,使用维护简单方便。电动汽车种类很多,所用电动机功率差别很大,小到 1 kW,大到数百千瓦,同时其工作转速范围也相当宽,工作环境相差很大,在这种情况下,究竟哪一种电动机更适合哪一种车,仍是值得探讨的工程问题。

驱动电梯的电动机是调速电动机应用的第二个实例。为了使乘员舒适,电梯起动和停止过程的加速度必须在一定范围以内,而当其停于某一楼层时,电梯地板平面必须与该楼层的地面齐平,以利于乘员进出和货物的装卸,只有精确控制调速电动机才能满足这两个要求。现在大多数电梯的驱动电动机为异步电动机或永磁电动机。

调速节能是电动风机和电动泵节能的极重要途径。我国风机水泵的节能成为节能的重要方面。家用电器的洗衣机、电冰箱和空调机都可借助调速节电,降低运行时的噪声。

由此可见,调速电动机在工农业生产的各个部门和家用电器的各方面得到广泛应用,对改善设备性能、节省电能等方面起着越来越重要的作用。

1.2 直流电动机及其调速系统

在讨论双凸极电动机调速系统之前,先就直流电动机和无刷直流电动机的调速系统进行讨论,以掌握调速系统的基本理论和技术。直流电动机调速系统是最早在工农业生产中应用的调速系统和伺服系统,调速系统的应用提高了工作机械的效率和工作的精确度,节省了工作机械的能源需求。

1.2.1 直流电机的结构

直流电机由定子和转子两个主要部分组成,如图 1-1 所示。

图 1-1a 的电机定子的导磁壳体内装有磁极,磁极上套有励磁线圈,励磁线圈通以图中所示方向的电流后,左边磁极成为 N 极,右边磁极成为 S 极。图 1-1b 是直流电机电枢绕组和电刷的示意图,电机的电枢绕组在转子上,由硅钢片叠成的转子铁心上有 12 个槽,12 个电枢元件分布于槽中,电枢元件的两个引出端与两相邻的换向器铜片相连,12 个电枢元件构成一闭合的电枢绕组。一对极的电机有两个电刷,电刷将发电机的电流引出送用电设备,或将电源的电引入电机,使电机电动工作带动用电设备。图 1-1b 和 c 是发电工作电机原理示意图,电机转子反钟向旋转时,电枢左半圆的元件感应电动势指向读者,右半圆元件感应电动势离开读者,左电刷为正电刷,电流流出,右电刷为负电刷,电流流入。

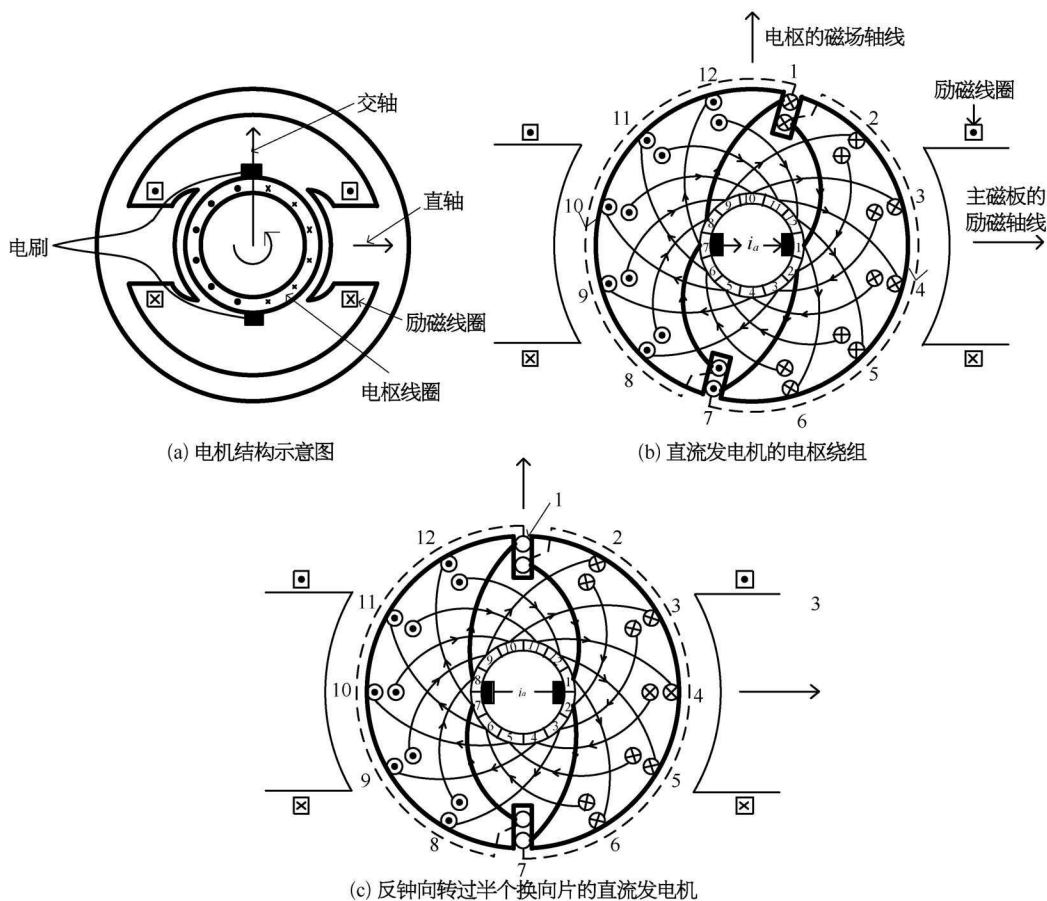


图 1-1 直流电机的构成和其电枢绕组

转子反钟向转过半个换向片,如图 1-1c 所示,电机进入换向工作,1 号槽内下层元件边(即 7 号槽上层元件边)为右电刷短路,1 号槽上层元件边(即 7 号槽内下层元件边)为左电刷短路,若称 1 号槽下层元件边为 1 号电枢元件,7 号槽下层元件边为 7 号电枢元件,则该两元件中的电流方向将改变,在电枢反钟向转过一个换向片后,1 号和 7 号电枢元件的电流方向完全反过来了。由于换向的 1 号和 7 号电枢元件此时的有效边处于磁极的中性线上,切割电势为零,可便于换向。但换向元件的自感电势会阻止电流的换向。

为了改善电机的换向,功率较大的电机在主磁极之间加有换向极(又称中间极),中间极的磁极线圈和电枢串联,以形成和电枢电流成正比的磁场,使换向的元件中产生切割电动势,其方向与自感电势相反,有助于电机的换向,如图 1-2 所示。

由图 1-2 可见,该电机励磁磁势的轴线为自左至右,而电枢磁场的轴线为自下向上,即励磁磁场和电枢磁场在空间差 90° 电角。这表明,铁心未饱和时,电枢磁场的改变不会导致励磁磁场的变化,反之亦然。这是直流电机的重要特点。

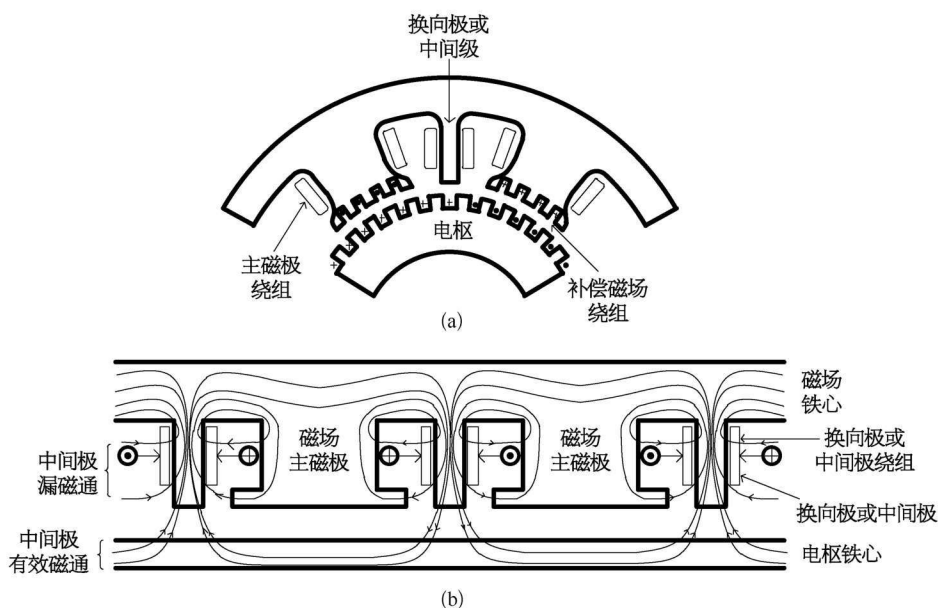


图 1-2 具有换向极的直流电机展开图

电机负载增加,电枢电流也相应增加,电枢磁势增大,气隙磁场改变,导致各电枢元件感应电势不同,相邻两换向片间电压也不同。两相邻换向片间电压过高会导致换向片表面的火花甚至电弧。装于磁极表面的补偿绕组,通过与电枢绕组相同的电流,形成与电枢磁场正好相反的补偿磁场,从而使电机气隙磁场在负载时仍接近空载磁场,保证了各相邻换向片间电压的均匀,有利于电机的运行。补偿绕组和电枢绕组磁场的互相抵消,显著地降低了电枢电感,减小了电枢电路时间常数,有利于改善电机的控制特性。

1.2.2 直流发电机

直流发电机是将机械能转为直流电能的旋转机械。表征直流发电机稳态性能的曲线有三种:一是空载特性,二是短路特性,三是外特性。

空载特性是电机转速一定时(例如为额定转速),电机电动势与励磁电流的关系曲线,该曲线可分为三段,如图 1-3a 所示。在励磁电流较小时,空载电动势与励磁电流成正比例增加,为不饱和段。励磁电流增加到一定值后,电机电动势的增加量小于励磁电流的增加量,电机铁心进入饱和区,进一步加大励磁,电动势增加量很小,电机进入过饱和区。直流发电机的励磁电流 $I_f = 0$ 时,电机空载电动势并不为零,而有一个较小的值 E_0 ,这是电机铁心的剩磁引起的。

发电机的短路特性是转速一定时,电机输出端短路时短路电流与励磁电流 I_f 间的关系,通常为直线,短路电流 I_k 随励磁电流的增加而增加。电机的剩磁在 $I_f = 0$ 时, $I_k = I_{k0}$, 如图 1-3b 所示。

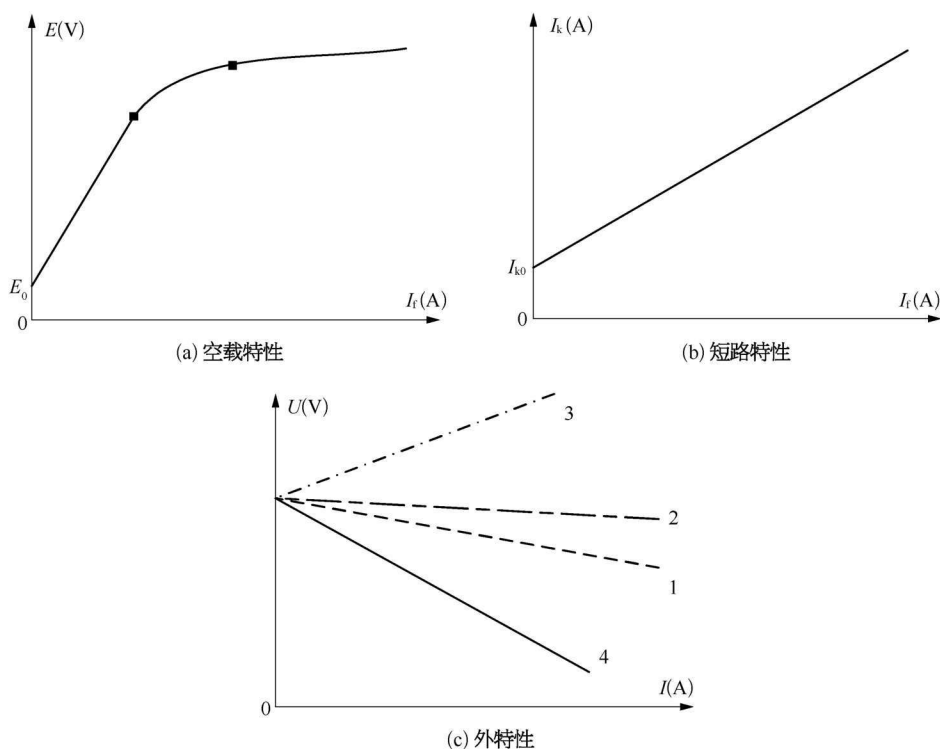


图 1-3 直流发电机的特性

发电机的外特性是在电机转速和励磁电流不变时,电机端电压 U 与负载电流,即发电机输出电流 I 间的关系。外特性和电机励磁方式相关。直流电机因为定子为励磁,可以有多种励磁方式,图 1-3b 的短路特性是将电机的励磁绕组由另一励磁电源供电时做出的,这种励磁方式称为他励。他励发电机的外特性如图 1-3c 的曲线 2,负载电流增加,发电机端电压 U 下降较少。他励直流发电机端电压 U 与负载电流 I 间的关系可用式(1-1)表示:

$$U = E - Ir \quad (1-1)$$

式中, E 为电机空载电动势, $E = C_e \Phi n$, C_e 为电势常数, Φ 为气隙磁通,和励磁电流 I_f 相关, n 为电机转速; r 为电机电枢绕组电阻。直流电机换向器和电刷间接触压降约 1 V,其大小与负载电流关系不大。

若发电机的励磁线圈并接于电枢两端,这种励磁方式为并励,并励直流发电机的外特性如图 1-3c 的曲线 1 所示,显然并励发电机的外特性的斜率比他励大。

直流电机的磁极上还可设置串励线圈,该线圈通过电机的负载电流,形成与负载电流成正比的励磁磁势,故具有串励线圈的电机励磁磁势 F_f 由两部分组成:

$$F_f = \pm W_s I + W_p I_f \quad (1-2)$$

式中, W_s 为串励线圈匝数; I 为电机输出电流; W_p 为并励(或他励)线圈匝数; I_f 为并励

线圈电流。若串励线圈磁势与并励线圈的磁势同方向,称为积复励,发电机的外特性如图 1-3c 的曲线 3 所示,发电机电压随负载电流的增加而升高。图中曲线 4 为差复励,串励线圈的磁势与并励的反向。电焊用直流发电机常用差复励,以限制焊接电流的最大值。

取不同的串励绕组匝数 W_s , 可得到不同的发电机外特性。

1.2.3 直流电动机

由式(1-1)知,若将 U 看成一个外电源的电压,该电源接于直流电机的两端。若 $U = E$, 即外电源电压等于电机的反电势,则电机处于空载状态,理想电机没有损耗,所以不需要吸取电源功率而能以转速 n 空转。实际上,直流电机的机械损耗较大,必须有一定的电流电动机才能空载运行,故应使 $U > E$ 。若 $U < E$, 则电动机成为发电机,向电源输送电流。由此可见,直流电动机和直流发电机运行状态的转换取决于外加电压 U , $U < E$ 为发电, $U = E$ 为空载, $U > E$ 为电动。

直流电动机的转矩 T :

$$T = C_T \Phi I \quad (1-3)$$

式中, C_T 为电动机转矩常数, 仅与电机结构参数有关; Φ 为气隙磁通; I 为电枢电流。

电动工作时, 电源电流 I 流入电机, 故式(1-1)应为:

$$U = E + Ir \quad (1-4)$$

将 $E = C_e \Phi n$ 代入上式, 得:

$$n = \frac{U - Ir}{C_e \Phi} \quad (1-5)$$

式(1-3)代入式(1-5), 得电机转速与转矩 T 间的关系:

$$n = \frac{U - T \cdot r / C_T \Phi}{C_e \Phi} \quad (1-6)$$

由此可见, 直流电动机的转速和电源电压 U 相关, 电机负载转矩和电机气隙磁通相关。

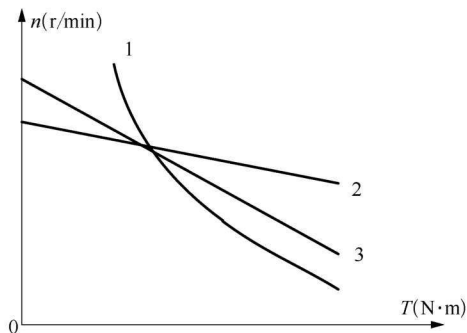


图 1-4 直流电动机的机械特性

表示直流电动机特性的曲线有空载特性、机械特性和调速特性。空载特性是转速一定时, 电机电动势与励磁电流的关系, 与发电机的空载特性相同。直流电动机用永久磁铁励磁, 称为永磁直流电动机, 由于永磁电动机的励磁不可调, 其一定转速时的空载电动势也为定值, 没有空载曲线。机械特性是电源电压 U 和励磁电流 I_f 一定时, 电机转速和转矩间的关系, 如图 1-4 所示。