

电气工程及自动化应用丛书

电机

技术与应用

● 孙忠献 主编

福建科学技术出版社

电气工程及自动化应用丛书

电机

技术与应用

● 孙忠献 主编

福建科学技术出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

电机技术与应用/孙忠献编著. —福州: 福建科学技术出版社, 2004. 7

(电气工程及自动化应用丛书)

ISBN 7-5335-2413-6

I. 电… II. 孙… III. 电机学 IV. TM3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 043415 号

- | | |
|------|------------------------------------|
| 书 名 | 电机技术与应用
电气工程及自动化应用丛书 |
| 作 者 | 孙忠献 |
| 出版发行 | 福建科学技术出版社 (福州市东水路 76 号, 邮编 350001) |
| 经 销 | 各地新华书店 |
| 排 版 | 福建科学技术出版社排版室 |
| 印 刷 | 福建二新华印刷有限公司 |
| 开 本 | 720 毫米×980 毫米 1/16 |
| 印 张 | 23 |
| 字 数 | 447 千字 |
| 版 次 | 2004 年 7 月第 1 版 |
| 印 次 | 2004 年 7 月第 1 次印刷 |
| 印 数 | 1—4 000 |
| 书 号 | ISBN 7-5335-2413-6/TM·31 |
| 定 价 | 34.00 元 |

书中如有印装质量问题, 可直接向本社调换

编辑的话

——写在《电气工程及自动化应用丛书》出版之时

经济全球化的大潮，已使我国跻身制造大国，并逐步成为世界制造中心之一。在这期间，以电子信息技术为代表的高新技术迅猛发展，带动和提升了传统的工业技术产业，新技术、新设备不断涌现。同时，这也引起现代社会职业岗位结构的调整，产生了一些技术含量较高的新岗位，并对人才的结构、素质和能力提出了新要求。

电气工程及自动化技术，一端承接着信息技术革命最新的成果，另一端服务于几乎所有的工业部门，是当今最为活跃的技术领域之一。其从业者更需要不断汲取新知识、新技术，不断提高分析能力、创新能力和实践能力。我们编辑出版这套《电气工程及自动化应用丛书》，就是为从事这一领域的工程技术人员及相关专业的院校师生提供一套实用的新技术读本。他们有一定的专业理论基础，更希望获得新技术资料，以及指导工程实践的经验。因而本丛书采取理论从略、应用从详的原则，“淡化”理论知识，“强化”实际技能，从工程实例入手，重点介绍电气工程及自动化领域中的实用技术和新产品应用，将理论与实践紧密结合起来，以提高读者的分析能力和动手能力。我们的努力能否获得预期的效果，还有待时间的检验。

本丛书现已出版《PLC 技术与应用》、《变频器控制技术与应用》、《电气控制技术与应用》、《电机技术与应用》、《电力电子技术与应用》、《数控机床编程与加工技术》等六种，今后我们还将根据技术的发展与需求，进一步出版新的图书品种，也希望广大专家学者、工程技术人员提出建议，共同参与编写，为推广普及电气工程与自动化新技术而努力。

前 言

电机是各行业生产过程及日常生活中普遍使用的基础设备,它是进行电能量和机械能量转换的主要器件。现代电力系统主要采用同步发电机和变压器实现电能的产生和分配。在工业、农业、交通运输、石油化工、矿山冶金等诸多领域,大量采用交流、直流电动机驱动各种类型的机械设备和其他生产设备,80%~85%工业用电直接与电机有关。不仅如此,各种控制电机还是构造基于转速、转角控制的自动控制系统的重要部件。电机的广泛应用大大提高了生产自动化程度与效率,改善了劳动者的工作环境。在日常生活中,电动机也是各种家用电器、办公自动化设备、电动器具中难以或缺的部件,它们提高了人们的生活质量。与此同时,电机自身的理论、产品种类、制造技术与控制技术也在不断发展中,新型电机与驱动器不断出现,电子技术也在不断地渗入电机及其控制之中,电机的发展出现了机电一体化的趋势。

本书在易学、实用的宗旨下,以工业及日常生活中常用电机为主,介绍了:直流电机、变压器、交流异步电机、同步电机和控制电机。编者结合各自的实际工作经验编写,简化了深奥的电机理论分析,强调了电机的应用,力图使具有一定电机理论基础的读者在比较短的时间内总体了解各种电机的特性与主要的产品性能规格,提高产品的选用、运行、维护与维修能力。本书可作为从事电机控制、运行与维护工作的工程技术人员参考,也可由工科电气自动化、机电技术应用及相关专业的大专或高等职业技术学院学生作为电机拖动及电气控制课程的辅助学习材料。

本书第一章由安徽职业技术学院杨林国编写,第二章由安徽省电力设计院周海鹏编写,第四章由安徽职业技术学院常辉编写,第三章、第五章由安徽职业技术学院孙忠献编写。全书由孙忠献主编,在编写过程中得到了程周、李中显等老师的大力帮助,在此表示诚挚的谢意。

由于编者水平及经验有限,书中难免存在疏漏与不当之处,敬请读者批评指正。编者定当虚心接受并致感谢。

编者

2004年5月

目 录

第一章 直流电机	(1)
第一节 直流电机的基本知识	(1)
一、直流电机的基本工作过程	(1)
二、直流电机的结构与分类	(2)
三、直流电机的电枢反应	(3)
四、直流电机的换向问题	(3)
五、直流电动机的运行特性	(4)
六、直流发电机的运行特性	(5)
第二节 直流电动机的起动与反转	(6)
一、直流电动机的起动	(6)
二、直流电动机的反转	(8)
三、直流电动机的制动	(8)
第三节 直流电动机的调速	(10)
一、直流电动机的基本调速方法	(11)
二、晶闸管闭环调速系统	(13)
三、PWM 直流调速系统	(15)
四、直流电动机驱动实例	(17)
第四节 直流电机的参数与选用	(18)
一、电机产品的选用	(18)
二、直流电机的参数与产品规格	(21)
三、直流电机的选用	(37)
第五节 直流电机的维护与故障维修	(38)
一、电机的一般性维护	(38)
二、直流电机维护	(39)
三、直流电动机常见故障的处理	(41)
四、直流电机的维修	(43)
五、换向器的检修	(46)
第六节 无刷直流电动机	(49)

一、无刷直流电动机的结构	(50)
二、工作原理	(54)
三、控制方法	(55)
四、专用集成电路	(57)
五、应用实例	(63)
第二章 变压器	(66)
第一节 变压器的基本知识	(66)
一、变压器的结构与分类	(66)
二、变压器的基本工作过程	(66)
三、三相电力变压器	(67)
第二节 特殊变压器	(69)
一、仪用互感器	(69)
二、自耦变压器	(71)
三、电焊变压器	(72)
第三节 变压器的参数与选用	(73)
一、变压器的参数与产品规格	(73)
二、变压器的选择与使用	(75)
第四节 变压器的维护与故障维修	(77)
一、配电变压器的运行与维护	(77)
二、变压器常见问题与故障处理	(78)
三、电力变压器维修	(81)
四、仪用互感器的检修	(85)
五、电焊变压器的检修	(86)
第三章 交流异步电动机	(88)
第一节 交流异步电动机的基本知识	(88)
一、交流异步电动机的类型与结构	(88)
二、交流异步电动机的工作过程	(90)
三、交流异步电动机的工作状态	(90)
第二节 三相异步电动机的运行与特性	(92)
一、三相异步电动机的运行	(92)
二、三相异步电动机的特性	(93)
第三节 三相异步电动机的起动控制	(96)
一、三相笼型异步电动机的起动及控制	(97)

二、绕线型三相异步电动机的起动及控制·····	(105)
第四节 三相异步电动机的制动控制·····	(111)
一、三相异步电动机的反接制动及控制·····	(112)
二、回馈制动·····	(116)
三、能耗制动及控制·····	(117)
四、自制动交流异步电动机·····	(118)
第五节 三相异步电动机的调速控制·····	(120)
一、变极调速·····	(121)
二、变频调速·····	(133)
三、串级调速·····	(146)
四、绕线型电动机转子串电阻调速·····	(148)
五、定子调压调速·····	(149)
第六节 单相交流异步电动机·····	(150)
一、单相异步电动机的基本知识·····	(150)
二、分相式单相异步电动机·····	(153)
三、罩极式单相异步电动机·····	(162)
四、单相异步电动机的调速控制·····	(164)
五、单相异步电动机的应用·····	(167)
第七节 其他常用交流异步电动机·····	(172)
一、电磁调速三相异步电动机·····	(172)
二、单相换向器式电动机·····	(176)
第八节 交流异步电动机的规格与选用·····	(181)
一、参数与产品规格·····	(181)
二、中小型交流异步电动机的选用·····	(196)
第九节 交流异步电动机的运行、维护与维修·····	(199)
一、交流异步电动机的运行维护·····	(199)
二、交流异步电动机常见故障与处理·····	(207)
三、交流异步电动机维修·····	(208)

第四章 同步电机····· (214)

第一节 同步电机的基本知识·····	(214)
一、同步电机的分类与结构·····	(214)
二、同步电机的工作过程·····	(217)
三、同步电机的电磁关系·····	(218)
四、同步电机额定参数·····	(221)

第二节 同步发电机的特性与应用	(221)
一、同步发电机的运行	(221)
二、同步发电机的特性	(227)
三、同步发电机的励磁系统	(230)
第三节 同步电动机的特性与应用	(234)
一、同步电机的可逆过程	(234)
二、同步电动机的运行与特性	(235)
三、同步电动机的起动	(238)
四、同步电动机的励磁系统	(239)
五、同步电动机的应用	(241)
第四节 微型同步电动机及其应用	(246)
一、永磁式同步电动机	(247)
二、磁阻式同步电动机	(251)
三、磁滞式同步电动机	(255)
四、低转速同步电动机	(258)
五、微型同步电动机的应用	(261)
第五节 同步电机产品与选用	(262)
一、同步发电机的产品与选用	(262)
二、同步电动机的产品及选用	(269)
第五章 控制电机	(283)
第一节 步进电动机	(283)
一、步进电动机作用与要求	(283)
二、步进电动机工作过程	(284)
三、步进电动机的运行与特性	(288)
四、步进电动机的驱动控制	(291)
五、步进电动机的参数、选择与使用	(294)
六、步进电动机的应用	(301)
第二节 伺服电动机	(302)
一、伺服电动机的作用与要求	(302)
二、直流伺服电动机	(302)
三、交流伺服电动机	(305)
四、伺服电动机的参数、选择与使用	(308)
五、伺服电动机的应用	(317)
第三节 测速发电机	(319)

一、测速发电机的作用及要求·····	(319)
二、直流测速发电机·····	(320)
三、交流异步测速发电机·····	(322)
四、测速发电机的参数、选择与使用·····	(323)
五、测速发电机的应用·····	(327)
第四节 自整角机·····	(329)
一、自整角机的作用、要求、种类与结构·····	(329)
二、力矩式自整角机·····	(331)
三、控制式自整角机·····	(334)
四、多极自整角机·····	(336)
五、自整角机的参数、选择与使用·····	(337)
六、自整角机的应用·····	(340)
第五节 旋转变压器·····	(341)
一、旋转变压器的作用、要求、种类与结构·····	(341)
二、正余弦旋转变压器·····	(343)
三、线性旋转变压器·····	(345)
四、数据传输用旋转变压器·····	(346)
五、多极旋转变压器·····	(347)
六、旋转变压器的参数、选择与使用·····	(348)
七、旋转变压器的应用·····	(353)
参考文献·····	(355)

第一章 直流电机

直流电机是直流电动机和直流发电机的总称，直流电机具有可逆性，即一台直流电机既可以做发电机运行，也可以做电动机运行。

直流电动机由于起动性能和调速性能好，过载能力大，所以广泛应用于对起动和调速性能要求较高的生产机械。例如钢铁工业中的轧钢机、城市电车、船舶机械、矿井卷扬机、造纸机和纺织机等设备均采用直流电动机。直流发电机可用于直流电动机的供电、同步机的励磁等。随着电力电子技术的发展，直流发电机将逐渐被电力电子整流装置所取代。

第一节 直流电机的基本知识

一、直流电机的基本工作过程

(一) 直流电动机的基本工作过程

直流电动机的基本工作过程可用图 1-1-1 所示的一个最简单的模型来说明。加到直流电动机的直流电源，借助于换向器和电刷的作用，使直流电动机电枢中流过的电流方向是交变的，从而使电枢产生的电磁转矩方向恒定不变，保证直流电动机朝确定的方向连续旋转。

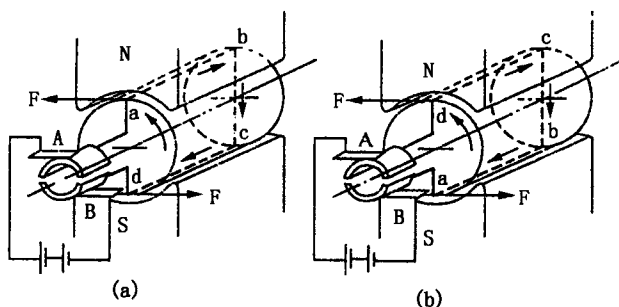


图 1-1-1 直流电动机的工作示意图

(二) 直流发电机的基本工作过程

直流发电机的模型与直流电动机的相似，不同在于发电机是靠外力拖动电枢朝某一方向旋转，如图 1-1-2 所示。导体切割磁力线产生感应电动势，通过换向器使

电枢绕组内产生的交变电动势变为电刷间的单向脉动电动势；又由于处于磁极下不同位置的电枢导体串联而使电动势相叠加，从而获得几乎恒定不变的直流电动势。

从以上分析可以看出，一台直流电机原则上既可以做发电机运行，也可以做电动机运行，电机的实际运行方式取决于外界不同的条件。

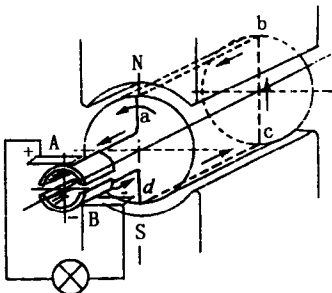
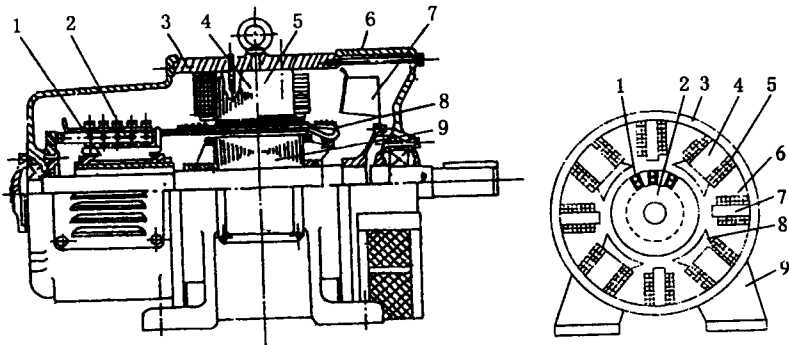


图 1-1-2 直流发电机的工作示意图

直流电机由定子和转子两大部分组成。定子的主要作用是产生磁场，它由机座、主磁极、换向极、端盖、轴承和电刷装置等组成。转子的主要作用是产生电磁转矩和感应电动势，是直流电机进行能量转换的枢纽，所以通常又称为电枢，它由转轴、电枢铁心、电枢绕组、换向器和风扇等组成。定子、转子间因有相对运动，故留有一定的空气隙，气隙大小与电机容量有关。图 1-1-3 (a) 为小型直流电机的纵剖面图，图 1-1-3 (b) 为横剖面示意图。



(a) 直流电机纵剖面图

(b) 直流电机横剖面图

- (a) 1-换向器 2-电刷杆 3-机座 4-主磁极 5-换向极 6-端盖 7-风扇 8-电枢绕组 9-电枢铁心
- (b) 1-电枢绕组 2-电枢铁心 3-机座 4-主磁极铁心 5-励磁绕组 6-换向极绕组 7-换向极铁心 8-主磁极极靴 9-机座底脚

图 1-1-3 直流电机的结构

直流电机按结构形式可分为开启式、防护式、封闭式和防爆式几种；按容量大小可分为小型、中型和大型直流电机；按励磁方式可分为他励、并励、串励、积复励和差复励直流电机，图 1-1-4 为各种励磁方式接线图。

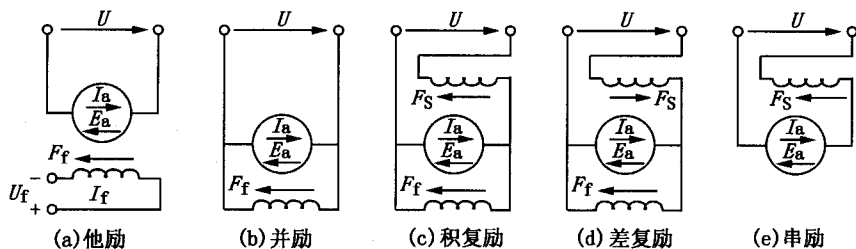


图 1-1-4 直流电机各种励磁方式接线图

三、直流电机的电枢反应

直流电机在运行时，电枢绕组中有电流，它会产生一个电枢磁场，该磁场对主磁场的影响称为电枢反应。电枢反应将使主磁场发生扭转畸变，而使合成磁场的轴线偏移一个角度，其偏移的方向对发电机来说，与电枢转向相同，对电动机则相反。同时电枢反应还将使主磁场被削弱，这些影响会使直流电机的换向火花增大，使发电机发出的电动势降低，使电动机输出的转矩减小。

四、直流电机的换向问题

直流电机在旋转时，电枢绕组元件的有效边越过磁极中性线，从一个磁极下进入另一个极性相反的磁极下，电枢绕组元件走向从一条支路经过电刷进入另一条支路，该元件中的电流方向发生改变，称为换向。

直流电机换向时，会在电刷与换向片之间产生火花。当火花超过一定限度时，有时会损坏电刷和换向器表面，从而使直流电机不能正常运行。按国家标准规定火花等级分为五级，见表 1-1-1。

表 1-1-1 直流电机火花等级

火花等级	火花特征	换向器及电刷状态
1	无火花	换向器上没有黑痕及电刷上没有灼痕
$1 \frac{1}{4}$	电刷边缘仅小部分（约 $1/5$ 至 $1/4$ 刷边长）有断续的几点状火花	
$1 \frac{1}{2}$	电刷边缘大部分（大于 $1/2$ 刷边长）有连续的较稀的颗粒状火花	换向器上有黑痕但不发展，用汽油擦其表面即能除去，同时电刷上有轻微灼痕

续表

火花等级	火花特征	换向器及电刷状态
2	电刷边缘大部分或全部有连续的较密的颗粒状火花, 开始有断续的舌状火花	换向器上有黑痕, 用汽油不能擦除, 同时电刷上有灼痕。如短时出现这一级火花, 换向器上不出现灼痕, 电刷未烧焦或未损坏
3	电刷整个边缘有强烈的舌状火花, 并伴有爆裂声音	换向器黑痕较严重, 用汽油不能擦除, 同时电刷上有灼痕。如短时出现这一级火花, 换向器上将出现灼痕, 同时电刷将被烧焦或损坏

电机正常运行时, 火花不应超过 $1\frac{1}{2}$ 级; 2 级火花仅允许电机在过载、起动或反转瞬时出现, 不允许长期存在; 3 级火花一般不允许出现。

直流电机换向产生火花的原因主要有电磁原因、机械原因、化学原因等。为了改善换向、减小火花, 常用的方法有: 安装换向极, 调整电刷的位置, 增加换向回路的电阻, 装设防止环火的补偿绕组等。

五、直流电动机的运行特性

电动机的机械特性是指电动机的转速 n 与电磁转矩 T 之间的关系, 即 $n = f(T)$, 它是电动机机械性能的主要表现, 也是电动机最重要的特性。

(一) 他励直流电动机

当电枢两端加上额定电压, 有
$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{R_a}{C_e C_T \Phi^2} T = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{R_a}{C_e \Phi} I_a$$

式中, n 为电动机转速; U 为电枢电压; C_e 为电动势常数 (由电机结构决定); C_T 为转矩常数 (由电机结构决定); Φ 为主磁通每极的磁通量; T 为电磁转矩; R_a 为电枢电阻; I_a 为电枢电流。

他励直流电动机的机械特性曲线如图 1-1-5 所示。

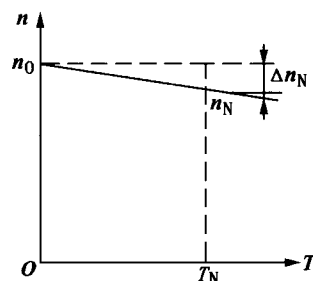


图 1-1-5 他励直流电动机机械特性

(二) 串励直流电动机

串励直流电动机轻载时, I_a 不大, 磁路不饱和, 故当 I_a 增大时, Φ 也增大, 使转速 n 迅速下降; 重载时, I_a 较大, 磁路已饱和, Φ 基本不随 I_a 变化, 转速 n 的下降已不明显, 与并励电动机相似。串励电动机的机械特性曲线如图 1-1-6 所示, 其机械特性较软。

六、直流发电机的运行特性

(一) 他励直流发电机

在发电机的运行特性中, 空载特性和外特性比较重要。

1. 空载特性

直流发电机的空载特性是指当电机转速为常数, 电流为 0 时, 发电机端电压 U 与励磁电流 I_f 的关系曲线, 即 $U = f(I_f)$, 如图 1-1-7 所示。

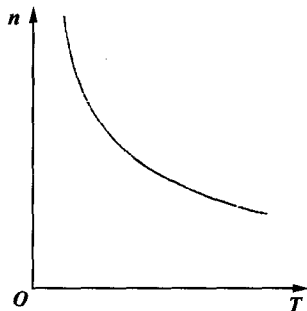


图 1-1-6 串励直流电动机机械特性

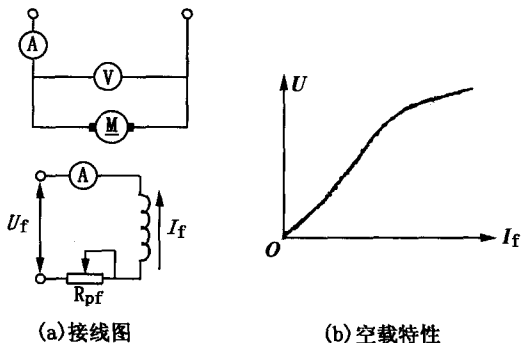


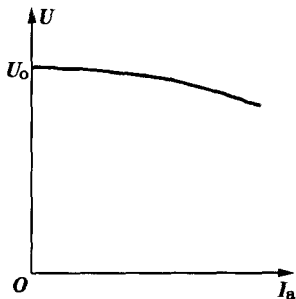
图 1-1-7 他励直流发电机的空载特性

2. 外特性

直流发电机的外特性是指在转速不变、励磁电流不变时, 端电压与负载电流之间的关系, 即 $U = f(I_a)$, 如图 1-1-8 所示。

(二) 并励直流发电机

并励发电机的自励条件有三个: 一是电机必须有剩磁, 如电机失去剩磁或剩磁太弱, 可用外部直流电源给励磁绕组通一下电流, 即充磁; 二是励磁绕组的接线与电枢旋转方向必须正确配合, 以使励磁电流产生的磁通方向与剩磁方向一致; 三是励磁回路的总电阻应小于与电机转速相对应的临界电阻。



1. 空载特性

并励直流发电机的空载特性曲线, 一般指用他励方法试验得出的 $E_0 = f(I_f)$ 。空载特性曲线如图 1-1-9 所示。该曲线与铁磁材料的磁化曲线相似。当 $I_f = 0$ 时, 只有很小的剩磁电动势 E_0 。其额定工作点应位于接近饱和的位置。

2. 外特性

并励直流发电机的外特性如图 1-1-10 所示。并励发电机的电压变化率一般在 30% 左右。

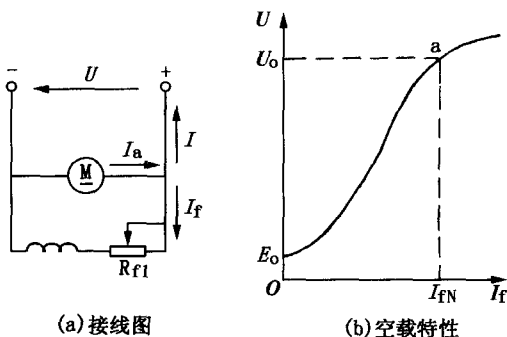


图 1-1-9 并励直流发电机接线图及空载特性

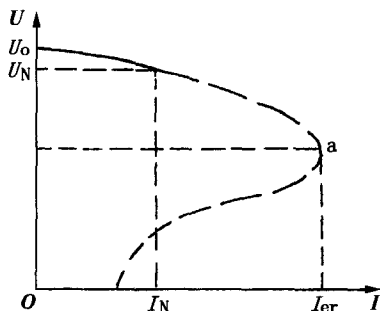


图 1-1-10 并励直流发电机外特性

第二节 直流电动机的起动与反转

一、直流电动机的起动

直流电动机在起动时，起动电流很大，为了缩短起动时间，需要的起动转矩应足够大，因此为了限制起动电流，一般采用电枢回路串电阻起动或减压起动。

(一) 电枢回路串电阻起动

为了限制起动电流，起动时在电枢回路中串入起动电阻，起动电阻是一个多级切换的可变电阻，一般在转速上升过程中逐级短接切除。图 1-2-1 为电枢回路串电阻起动电路原理图。起动开始瞬间，串入全部起动电阻，使起动电流不超过允许值。随着转速的上升，图 1-2-1 电枢回路串电阻起动电路原理图逐级切除起动电阻，最后切除全部起动电阻，电动机速度上升到稳定值，起动结束。

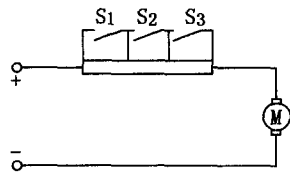


图 1-2-1 电枢回路串电阻起动电路原理图

这种起动方法广泛应用于中小型直流电机。技术标准规定，额定功率小于 2kW 的直流电机，允许采用一级起动电阻起动；功率大于 2kW 的，应采用多级电阻起动或降低电枢电压起动。起动电阻一般可按下面方法进行选择。

(1) 确定最大起动电流。技术标准规定，一般直流电机的起动电流应限制在额定电流的 2.5 倍以内，相应的起动转矩为额定转矩的 2~2.5 倍，因此一般选取最大起动电流 I_{s1} 为额定电流 I_N 的 1.5~2.2 倍。

(2) 由 $R_1 = \frac{U_N}{I_{s1}}$ 求出第一级起动电阻。

(3) 选择起动级数 m (通常可试选 $m=3$)。起动级数可根据控制设备来选取,也可根据经验试选,一般不超过六级。

(4) 求出起动电流比 λ 。 $\lambda = \sqrt[m]{\frac{R_1}{R_a}}$ 。

(5) 求出切换电流。如果 $I_{s2} > 1.1 I_N$ 则可; 否则, 应重新选取 m (或在容许范围内重选 I_{s1}), 至满足 $I_{s2} = (1.1 \sim 1.3) I_L$ 或 $I_{s2} = (1.1 \sim 1.3) I_N$ 为止 (I_{s2} 为第二级起动电流, I_L 为负载电流)。

(6) 根据下式算出各分段电阻值

$$r_i = \lambda^{m-i} (\lambda - 1) R_a$$

(7) 各段电阻的额定功率可按式 $P_r = I_{s1} I_{s2} r_i$ 估算。

(8) 根据电阻值和额定功率选择起动电阻。

图 1-2-2 为直流电动机电枢回路串电阻二级起动控制线路。

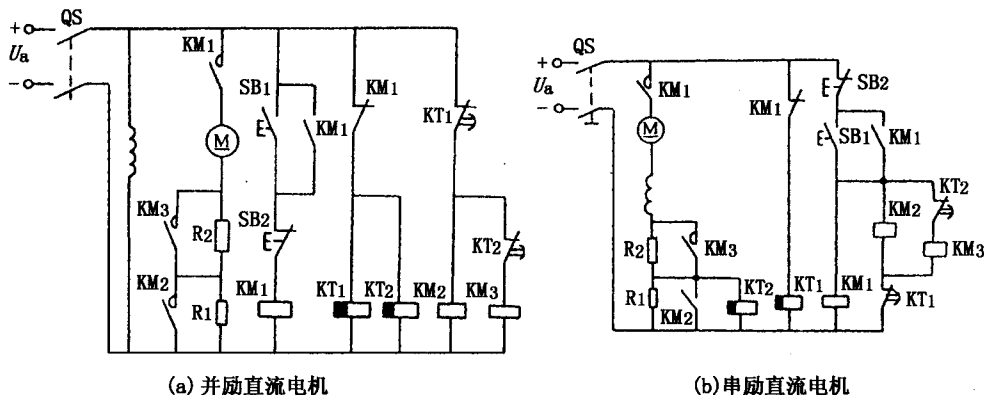


图 1-2-2 电枢回路串电阻起动控制图

(二) 减压起动

当直流电动机的电枢回路由专用可调电源供电时, 可用降低电压的方法来限制最大起动电流, 起动电流将随着电枢电压降低而减小。起动前, 先调好励磁, 然后起动电动机。起动后, 随着转速的上升, 可相应把电源电压由低向高调节。

在手动调节电源电压时, 应注意电压不能升得太快, 否则会产生较大的冲击电流。目前通常采用自动控制环节进行自动调节, 它能保证电压连续上升。

减压起动过程中能量损耗很少, 起动平滑, 但需要专用电源设备, 多用于要求经常起动的场合和大中型电机的起动。