

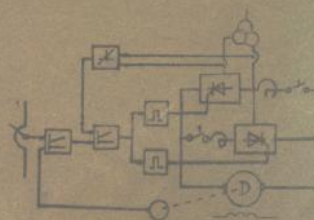


电力电子技术丛书

直流电动机 晶闸管调速系统

赵扶摇 万里雄 编著

机械工业出版社



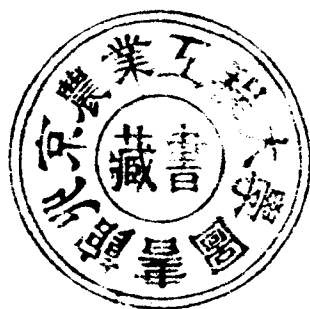
DIANLI DIANZI JISHU CONGSHU

7M-51
1.2

电力电子技术丛书

直流电动机 晶闸管调速系统

赵扶摇 万里雄 编著



机械工业出版社

内 容 提 要

本书系统地介绍了直流电动机晶闸管调速系统（习称可控硅调速系统）的一般原理、各种调速系统的类型、动态品质分析和校正参数的工程计算方法以及调速系统的试验、调试和维修方法。同时书中对组成调速系统的一些常用控制单元的原理、设计及实用线路作了较详细的介绍，并列举了一些典型应用实例，还介绍了直流调速的发展动向和计算机在直流调速系统中的应用。

本书可供从事电力电子技术和电气自动化工作的初学者入门之用，也适合于具有中等以上专业知识的科技人员、技术工人扩大知识领域，同时也可供高等院校和中等专业学校有关专业的师生参考。

ES36/01

直流电动机晶闸管调速系统

赵扶摇 万里雄 编著

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南里一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

重庆印制一厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32·印张9.375·插页2·字数241千字

1986年12月重庆第一版·1986年12月重庆第一次印刷

印数 0.001—3.270·定价 2.30元

*

统一书号：15033·6300

出版者的话

电力电子技术是以晶闸管为主的电力半导体器件及其应用的技术，也是融合“电力”、“电子”和“控制”于一体的技术。由于电力半导体器件具有效率高、控制性能好、体积小、重量轻、使用可靠等优点，它已广泛地应用于电力、冶金、矿山、化工、交通运输、机械、轻工等部门，成为节能最有成效的技术之一。

为了普及与推广电力电子技术，大力促进我国国民经济各部门的发展，在中国电工技术学会电力电子学会组织下，我们决定出版这套《电力电子技术丛书》。

这套丛书包括《电力半导体器件原理》、《电力半导体电路原理》、《电力电子技术与节能》、《直流电动机晶闸管调速系统》、《交流电动机晶闸管调速系统》、《晶闸管斩波器》、《无功补偿与电力电子技术》、《家用电器与电力电子技术》、《晶闸管交流电力控制器》、《电力半导体直流稳定电源》、《不间断供电系统》、《脉冲电镀与脉冲焊电源》等，将陆续出版。

电力电子学会及本丛书编委会对丛书的选题、组稿、审定稿付出了辛勤劳动，还有不少单位对编审稿工作给予了热忱关怀与帮助，在此表示深切的谢意。

机械工业出版社

前 言

直流电动机晶闸管调速系统（习称可控硅调速系统）已普遍地应用于各个工业部门，它正在日益广泛地取代了过去传统的发电机—电动机和汞弧变流器—电动机系统等调速方式。随着这一新技术的普及推广使用，愈来愈多的人迫切地需要了解这方面的知识和更好地掌握维修技术。尽管有关这方面的文献和资料已屡见不鲜，但是作为一本比较系统、详尽而又通俗的读物尚不多见，本书就是为适应这种需要而编写的。

全书共分六章。第一章介绍直流电动机的控制基础，包括直流电动机的简单工作原理、调速方式、调速系统性能指标的定义、晶闸管调速系统的组成以及晶闸管变流器供电对直流电动机的影响。第二章介绍直流晶闸管调速系统的类型、可逆传动的方式及主电路联结型式、各种有环流和无环流可逆系统的原理。第三章介绍主要元、器件参数的选取及各种常用控制单元的原理、设计及实用线路。第四章介绍系统的动态品质分析和调节器校正参数的工程计算方法并配有计算实例。第五章介绍系统试验、调试的要点和方法以及日常维修的注意事项。第六章介绍直流晶闸管调速系统的应用实例、发展趋向以及电子计算机在调速系统中的应用。

本书在编写中力求通俗易懂、深入浅出，尽量少用数学推导，而力求多用物理概念说明问题。在取材上尽量选取经过实践应用的实例，以便读者阅后有所裨益。本书适合于从事电力电子技术和电气传动系统设计、调试和现场维修工作的科技人员、技术工人的自学，也可供高等院校及中等专业学校有关专业的师生参考。

本书前三章由天津电气传动设计研究所赵扶摇执笔，后三章由万里雄执笔，天津电气传动设计研究所副总工程师罗春农负责主审。全书初稿还经南京电机电器工业公司总工程师张明勋和南京工学院陆善文等老师做了详尽的审阅。以上同志在审阅中提

出了许多宝贵的意见，在此致以衷心的感谢。

由于编著者的思想水平和业务造诣有限，加之编写时间匆促，书中难免有错误和不当之处，敬请广大读者批评指正。

编著者

一九八四年十二月

目 录

前 言

第一章 直流电动机的控制基础	1
第一节 直流调速系统概况	1
第二节 直流电动机的工作原理及特性	4
一、直流电动机的工作原理	4
二、直流电动机的励磁及工作特性	7
第三节 直流电动机的调速方法	9
一、变电枢回路电阻调速	10
二、变电枢电压调速	11
三、变励磁电流调速	13
第四节 调速系统的性能指标	14
一、静态指标	15
二、动态指标	17
第五节 电力拖动的运动方程式	19
第六节 晶闸管变流器供电对直流电动机的影响	21
一、换向恶化	22
二、损耗增大, 温升增高	24
第七节 直流电动机晶闸管调速系统的组成	25
一、主电路部分	25
二、控制调节部分	28
三、励磁部分	28
四、操作、保护和故障检测部分	29
第二章 直流电动机晶闸管调速系统的类型	30
第一节 反电势负载下变流器的工作原理	30
一、晶闸管在反电势负载下的工作	30
二、换相	36
三、相位控制	39
四、逆变器的“颠覆”	41
第二节 常用整流电路的特性参数	43

第三节 晶闸管供电的可逆传动系统	43
一、可逆传动的四种工作状态	43
二、晶闸管-电动机系统的可逆电路	47
第四节 有环流可逆系统	52
一、按 $\alpha=\beta$ 控制原则的有环流系统	52
二、给定环流和可控环流系统	59
第五节 无环流可逆系统	62
一、逻辑控制无环流可逆系统	62
二、错位控制无环流可逆系统	64
第三章 组成直流调速系统的主要元器件、设备及控制 单元	72
第一节 交流变压器的选择	72
一、阀侧相电压	72
二、阀侧相电流	74
三、表观功率	74
第二节 晶闸管的选择	75
一、额定断态重复峰值电压(U_{DRM})和反向重复峰值电压 (U_{RRM})	75
二、额定通态平均电流	75
第三节 快速熔断器的选择	76
一、额定电压	76
二、额定电流	76
第四节 平波和均衡电抗器的选择	77
一、电动机及交流变压器电感值的确定	77
二、按减小电流脉动原则选择电抗器	78
三、按保持电流连续原则选择电抗器	80
四、按抑制环流原则选择电抗器	80
五、电抗器的安排	80
第五节 直流稳压电源	82
一、简单的稳压电路	83
二、采用分立元件的稳压电源	84
三、采用集成稳压块的稳压电源	86
第六节 半导体调节器	87

一、理想的半导体调节器	87
二、调节器的类型	88
三、调节器的输出限幅	94
第七节 给定积分器	96
一、工作原理	96
二、给定积分器的限幅	97
第八节 转速(电压)调节器	99
第九节 电流调节器	102
第十节 触发器	104
一、对触发器的基本要求	104
二、移相电压为正弦波的触发电路	105
三、移相电压为锯齿波的触发电路	110
第十一节 无环流逻辑转换单元	115
一、无环流逻辑转换单元的组成	115
二、无环流逻辑转换单元的应用实例	119
第十二节 电流变换器	121
一、采用交流电流互感器的电流变换器	122
二、采用直流电流互感器的电流变换器	123
第十三节 直流电压变换器	124
第四章 直流调速系统的动态品质分析和计算	127
第一节 动态品质分析的基础知识	128
一、反馈控制(闭环控制)	128
二、拉氏(拉普拉斯)变换	128
三、传递函数	133
四、框图及框图的变换	138
五、调速系统的传递函数	140
第二节 品质指标和频率特性	152
一、品质指标	152
二、频率特性	158
三、对数频率特性与系统品质	164
第三节 按预期系统计算调节器参数	169
一、概述	169
二、按二阶预期系统计算调节器参数	170

三、按三阶预期系统计算调节器参数	173
第四节 实际系统参数计算举例	178
一、几点说明	178
二、计算实例	180
三、调整的结果	194
第五节 改善动态品质的方法	196
一、自适应调节	197
二、状态和负载观测器	198
第五章 直流电动机晶闸管调速系统的试验和调整	200
第一节 直流电动机的试验	200
一、绕组电阻和电感的测量	200
二、负载试验	204
三、损耗测试和效率计算	205
四、飞轮力矩的测试	206
五、电动机允许的 $\frac{di}{dt}$ 值试验	208
第二节 变流变压器、直流电抗器和快速开关的试验	211
一、变流变压器的试验	211
二、直流电抗器的试验	212
三、快速开关的试验	214
第三节 晶闸管变流装置的试验与调整	217
一、一般检验	217
二、通电前的准备工作	218
三、调节器特性测试和保护环节的整定	221
四、变流器的调试	223
五、系统闭环试验	230
六、调整中的异常现象	234
第四节 现场安装与维护	235
一、安装注意事项	235
二、抗干扰措施	237
三、日常维护和定期检修	238
四、晶闸管常见故障的查找	241
第六章 应用与发展	243

第一节 直流电动机晶闸管调速系统的应用	243
一、在造纸机中的应用	243
二、在机床中的应用	247
三、在卷扬机中的应用	249
四、在电梯中的应用	251
五、在轧机中的应用	254
六、电动活套支撑器用晶闸管调速装置	259
七、工业机械手用晶闸管调速装置	261
第二节 新系列直流电动机晶闸管调速装置	263
一、主要技术参数	263
二、装置的主要特点	265
第三节 直流电动机晶闸管调速系统的发展	268
第四节 计算机控制的直流电动机晶闸管调速系统	273
一、微型计算机在晶闸管调速系统中的应用	273
二、采用计算机控制的自动位置控制(APC)系统	280
三、计算机控制的厚度自动调节(AGC)系统	283
参考文献	285

第一章 直流电动机的控制基础

第一节 直流调速系统概况

在现代工业中，几乎没有一个地方不用电动机作为电能转换的传动装置。众所周知，在机械、冶金、石油化学、国防等工业部门中，采用了各种大大小小的电动机来传动诸如机床、轧钢机、电铲、提升机、起重机、水泵、压缩机、造纸机、运输机械等各类生产机械。随着对生产工艺、产品质量的要求不断提高和产量的增长，越来越多的生产机械要求能实现自动调速。

在可调速传动系统中，按照传动电动机的类型来分，可分为两大类：直流调速系统和交流调速系统。交流电动机具有结构简单、价格低廉、维修简便、转动惯量小等优点，但其主要缺点是调速较为困难，如何获得具有较高技术经济指标的交流调速系统，一直是人们多年来所努力寻求解决的问题。近年来，各种类型的交流调速系统得到了普遍的重视和较快的发展，特别是随着晶闸管变流装置和各种控制元件（如中、小规模集成电路组件）成本的降低，有人预言：“一向难于维修的直流电动机最终有可能被取代。”然而至少在最近一个时期，对于经济而又实用的交流调速系统的发展尚未获得重大突破以前，在工业应用上占主导地位的还将是直流调速系统。直流电动机与交流电动机相比，虽然存在结构复杂、价格较高、维修麻烦等缺点，但由于其有较大的起动转矩和良好的起、制动性能以及易于在宽范围内实现平滑调速，所以直流调速系统至今仍然是自动调速系统的主要形式。目前绝大多数要求调速的工作机械，几乎仍采用直流电动机来传动。

最初的直流调速系统是采用恒定的直流电压向直流电动机电枢供电，通过改变电枢回路中的电阻来实现调速（图1-1）。这种方法简单易行，设备制造方便，价格低廉。但其缺点是效率

低、机械特性软、不能得到较宽的调速范围和平滑的调速，所以目前已极少采用，只是在一些小功率且调速范围要求不大（如2:1以下）的场合（如城市无轨电车）仍有使用。三十年代末，出现了发电机-电动机系统（也称为旋转变流机组），如图1-2所示，才使调速性能优异的直流电动机得到广泛的应用，配合采用磁放大器、电机扩大机、闸流管等控制器件，可获得优良的调速性能，如有较宽的调速范围（十比一至数十比一）、较小的转速变化率（1~0.1%）和调速平滑等。特别是当电动机减速时，可以通过发电机非常容易地将电动机轴上的飞轮能量反馈给电网，这样，一方面可得到平滑的制动特性，另一方面又可减少能量的损耗，提高效率。但是发电机-电动机调速系统的主要缺点是需要增加

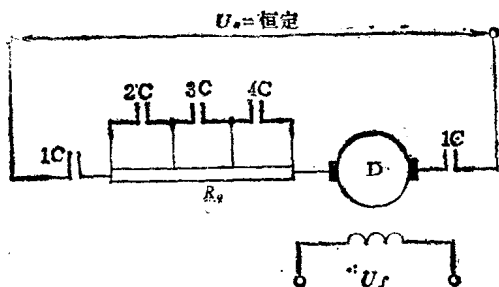


图1-1 变电枢电阻调速

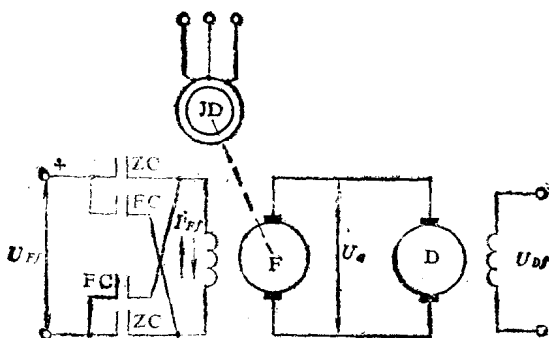


图1-2 发电机-电动机调速系统

两台与调速电动机容量相当的旋转电机和一些辅助励磁设备，因而设备较多、体积大、费用高、效率低、安装需有地基、运行有噪声、维修困难等。自出现汞弧变流器以后，利用汞弧变流器代替上述发电机-电动机系统，使调速系统的性能指标又进一步得到提高。特别是它的系统快速响应性是发电机-电动机系统不能比拟的。但是汞弧变流器仍存在一些缺点：维修还是不太方便，特别是水银蒸气对维护人员会造成一定的危害等。1957年世界上出现了第一只晶闸管（习称可控硅元件），与其它变流元件相比，晶闸管具有许多独特的优越性，因而晶闸管直流调速系统立即显示出强大的生命力。由于它具有体积小、响应快、工作可靠、寿命长、维修简便等一系列优点，采用晶闸管供电不仅使直流调速系统在经济指标上和可靠性上有所提高，而且在技术性能上也显示出很大的优越性。晶闸管变流装置的放大倍数在10000以上，比机组（放大倍数10）高1000倍，比汞弧变流器（1000）高10倍。在快速响应性上，机组是秒级，而晶闸管变流装置为毫秒级（见图1-3）。因此，目前在直流调速系统中，除某些特大容量的设备而且供电网络容量较小的情况下，仍有采用机组供电、晶闸管励磁系统以外，几乎绝大部分都已改用晶闸管供电了。我国从六十年代初试

制成功第一只硅晶闸管以来，晶闸管直流调速系统也得到迅速的发展和广泛的应用。目前，用于中、小功率的0.4~200kW晶闸管直流调速装置已作为标准化、系列化通用产品批量生产。用于大功率的8340kW系列产品也已开始在某些大型轧机上试用。晶闸管供电的直流调

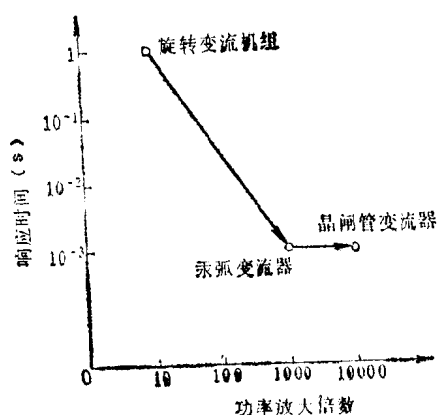


图1-3 各种变流装置功率放大倍数比较

速系统在我国国民经济各部门的应用将愈来愈广泛。但是在看到它的发展的同时，也必须注意解决采用晶闸管直流调速系统时，由于功率因数低、无功冲击大、产生高次谐波等因素而引起的对电网及其他用电设备的影响和干扰等问题。

随着各种新型控制器件的发展，直流电动机晶闸管调速系统除向大功率(单机容量已达数千千瓦，输出电压达1200V)发展以外，正在实现控制单元标准化，控制装置集成化、小型化；结构积木式组合化。对某些中小功率装置，正在做到使电动机和控制设备组合一体化、随着计算机和微处理机的推广应用，采用计算机和微处理机控制的直流调速系统将会达到更高的性能指标。在预期不久的将来，这类系统将会在工业上获得广泛的应用。

第二节 直流电动机的工作原理及特性

在了解如何调节和控制直流电动机的转速这一问题之前，首先必须熟悉一下直流电动机的工作原理及其机械特性。

一、直流电动机的工作原理

直流电动机的工作原理是建立在电和磁相互作用的基础上，根据毕奥-萨伐尔电磁力定律，当把一根载流导体放入磁场中，并使其与磁场相互垂直时(图1-4a)，则在此导体上将产生一个电磁力，其大小为

$$F = BIl \quad (\text{N})$$

式中 B ——磁场的磁感应强度 (T)；

I ——流过导体的电流 (A)；

l ——导体的有效长度 (m)。

这个力的作用方向可按照“左手定则”来确定，见图1-4b。

图1-5表示直流电动机工作原理，N、S为一对固定的磁极(即主磁极)，两磁极之间为一个圆柱形电枢，电枢由硅钢片迭制而成。在电枢表面的槽中嵌有线圈，上线圈边为a，下线圈边为x，当在a、x中通有直流电流时(如果是从a流入，x流出)，则按上述电磁力定律，导体ax将会受到一个电磁力 F 的作用。按

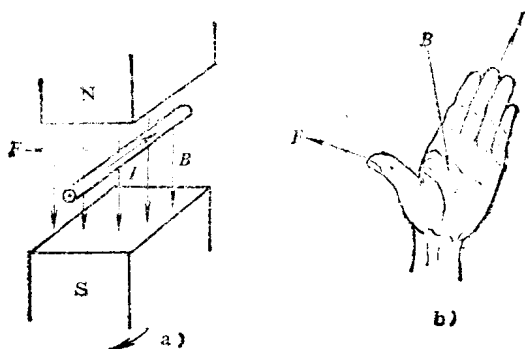


图1-4 一根载流导体在磁场内受到的力及其作用方向

图1-4b所示的“左手定则”，力 F 使导体按反时针方向转动，一旦 a 、 x 按反时针方向转动了一个角度而相互调换上、下位置以后，即 x 在上面、 a 在下面（如图1-5a上虚线所示），如果此时流过导体中的电流方向仍不变（即仍为 a 进， x 出），则显然在导体上会产生一个与上述作用方向相反的力 F' ，使导体 a 、 x 按顺时针方向转动。这种交变的电磁力只能使电枢来回摆动，而不能使电极连续转动。显然，要想使电枢按同一方向转动，关键在于当导体位置由上变到下或由下变到上时，必须及时地改变流过该导体中电流的方向，这就叫做“换向”。

图1-5b表示在电枢轴上装设一组换向片，外加电流 I 通过电刷 A 、 B 引入到换向片上，然后再通入到导体中。由于换向片随电枢轴一起转动，而电刷 A 、 B 是固定不动的，所以虽然外加在电刷 A 、 B 上的电压和电流方向不变，但随着导体在磁场中上、下位置的交替变换，流过该导体中电流的方向也随着交替地变换。这样就可以使电枢总是按一个方向连续地转动。

在实际的电动机中，电枢表面上嵌入许多个均匀分布的线圈，如图1-6所示。图中只画出16个线圈，每一个线圈由一至数根导体组成，并且各连接到一个换向片上。各换向片之间相互绝缘组成一个圆柱形整体，这就是换向器。在主磁极 N 和 S 的几何

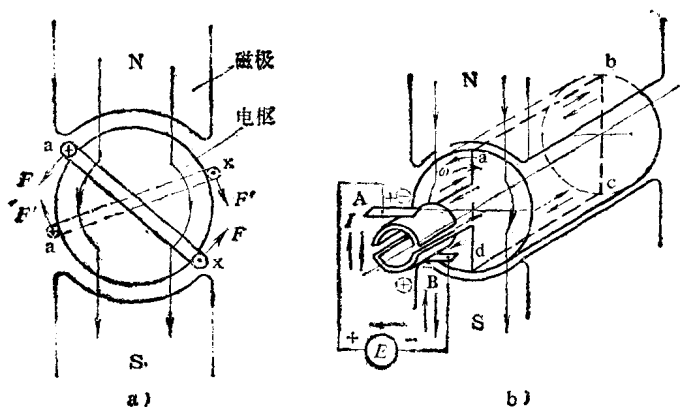


图1-5 直流电动机工作原理示意图

中心线位置上，设置两个电刷A和B。当在电刷A和B两端上加直流电压时，并假定A接电源的正极，B接电源的负极，此时电流 I 从电刷A流入并在电枢的线圈中形成两个并联支路。一个是通过换向片13后，流经线圈 $13 \rightarrow 14 \rightarrow 15 \rightarrow 16 \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow 3$ ，然后从换向片4经电刷B流出；另一个支路是通过换向片12后，流经线圈 $11 \rightarrow 10 \rightarrow 9 \rightarrow 8 \rightarrow 7 \rightarrow 6 \rightarrow 5$ ，然后从换向片5经电刷B流出。图中符号“ $\cdot$ ”表示导体中的电流是从里向外流，而符号“ $+$ ”表示导体中的电流是从外向里流。由图可看出，以几何中心线为界，电流 I 在电枢中总是形成两个并联支路，而在这两个并联支路中流经导体的电流方向恰恰相反。按图1-4b所示的左手定则，可以看出两个支路中导体所产生的电磁力 F 都是使电枢按顺时针方向转动的。尽管电枢和换向器连续转动，但在任何时刻电刷A和B总是各同两个换向片同时接触。因此通过电刷A和B总是以几何中心线为界把电枢中的线圈分成两个并联支路。而只要外加电源电压方向不变，流经每个支路中的电流方向就不会变，所以电磁力 F 的方向也不会变，这样就可使电枢连续不断地转动。这就是直流电动机工作的基本原理。

由上可见，当主磁极N、S的极性不变时，只要改变加在电