

高等专科学学校教学用书

电力拖动自动 控制系统

李正熙 主编



G AODENG

ZHUANKE

XUEXIAO

JIAOXUE

YONGSHU

冶金工业出版社

高等专科学校教学用书 容 内

电力拖动自动控制系统

吉林电气化高等专科学校 李正熙 主编

（出 版 社）

（工 业 出 版 社）

（电 子 工 业 出 版 社）

冶金工业出版社

内 容 摘 要

本书主要讲述直流电动机和交流电动机的传动控制。书中遵循理论和实际相结合的原则,以系统控制规律为主线,在强调闭环控制的前提下,由浅入深地介绍了系统的动、静态性能和设计方法及系统的工程实现。

全书分上、下两篇。上篇以直流传动控制为基本内容,介绍了由开环调速到单闭环、双闭环及可逆调速系统的组成方法、原理、特点以及典型应用线路;还介绍了脉宽调速系统、随动控制系统和张力控制系统及其应用实例。下篇专述交流传动控制,主要介绍了交流调压调速、变频调速和串级调速这三类较实用的调速方法,同时给出了应用实例。

本书特点是叙述简练,概念清楚,脉络清晰,避免了繁琐的公式推导,突出了工程应用,体现了工程专科教学特色。

本书为高等专科学校工企电气化专业及机电工程专业教材,也适用于职工大学和业余大学讲授,中等专业学校及短期培训班亦可选用。对于本科学生和厂矿工程技术人员,本书也有一定的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

电力拖动自动控制系统/李正熙主编.-北京:冶金工业

出版社,1997.8

高等专科学校教学用书

ISBN 7-5024-2051-7

I. 电… II. 李… III. 电力传动-自动控制系统-高等学校-教材 IV. TM921.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 09064 号

出版人 卿启云(北京沙滩嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009)

中国人民警官大学印刷厂印刷;冶金工业出版社出版;各地新华书店发行

1997 年 8 月第 1 版,1997 年 8 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16;21 印张;488 千字;313 页;1-3000 册

24.10 元

前言

有色、冶金系统专科学校电类教材编审组于1987年组织编写出版的《直流调速系统》和《交流调速系统》教材已使用十年,得到了广大教师、学生及工程技术人员的充分肯定,同时,也提出不少宝贵的意见。近几年来,电力电子技术和微电子应用技术的迅速发展,传动控制技术和设备日臻完善,为传动控制的教学提出了新的要求。

根据专科教学对教材提出的新要求,有色、冶金系统高等专科学校于1996年1月在吉林召开了电类教材编审会议,决定把原《直流调速系统》和《交流调速系统》两本教材合二为一,改用“电力拖动自动控制系统”这一名称。

本书遵循理论和实际相结合的原则,在传动理论的讲述上力求简练、实用,注重概念,避免了繁琐的理论推导和公式证明,突出了应用,尤其是突出了工程上的实用化;在强调闭环控制概念的前提下,由浅入深地介绍了组成各类模拟、全数字的控制系统的方法和实用线路,尤其在交流传动控制部分,打破了过去重理论、轻应用的做法,在简要介绍基本概念的前提下,详细介绍了如何应用各种现成的装置,如调压器、整流器、变频器等实现各类闭环交流调速系统的方法和手段,主要强调了交流调压调速、变频调速和串级调速这三类较实用的调速方法。总之,全书力图体现工程专科的教学特色。

全书共分十一章,前七章以直流传动控制为主,介绍了由开环调速到单闭环、双闭环及可逆调速系统的组成方法和原理、特点以及典型的应用线路。除此之外,在第七章介绍了直流传动的其它应用,如张力控制系统、随动控制系统等;在第六章讲述了脉宽调制型直流调速系统。后四章着重介绍了交流调压调速、变频调速和串级调速三部分内容,叙述中偏重应用,至于动态数学模型、动态设计等内容,仅做了一般概述。

本书第一、二、六章,附录一~附录五由李正熙编写,第八、十章由白晶、王修岩共同编写,第四、七章由弭洪涛编写,第九、十一章由曹晓波编写,第五章由贾玉宽编写,第三章由张明君编写。全书由吉林电气化高等专科学校李正熙主编、并统稿,吉林电气化高等专科学校王修岩、白晶任副主编,协助统稿。

北京科技大学李华德教授承担了本书的主审工作,本溪冶金高等专科学校逢万良、吉林电气化高等专科学校王振和、曲永印等参加了审稿工作,在此一并表示感谢。由于编者水平有限,加之时间仓促,书中难免有错误和不当之处,恳请读者赐教。

李正熙

一九九七年三月于吉林

目 录

上篇 直流传动控制系统

第一章 直流调速系统的基本概念	3
第一节 直流电动机的调速方法	3
一、调节电枢电压调速	3
二、改变电动机励磁调速	4
三、改变电枢回路电阻调速	5
第二节 可控直流电源供电下的直流电动机(V-M)开环调速及特性	6
一、晶闸管整流器—电动机系统(V-M)的调速特性	6
二、脉宽调制电源(PWM)供电下的直流调速特性	8
第三节 调速系统的性能指标	10
一、静态指标	10
二、动态指标	11
习题	13
第二章 单闭环控制直流调速系统	15
第一节 具有转速负反馈的直流调速系统	15
一、系统的组成及工作原理	15
二、系统的静态性能分析	17
三、单闭环转速反馈系统的动态分析	20
第二节 具有电流截止负反馈的转速闭环调速系统	26
一、系统的组成	26
二、系统的性能分析	27
三、给定积分器与无差调节器	29
四、具有电流截止保护的无静差调速系统	32
第三节 电压负反馈单闭环直流调速系统	36
一、电压负反馈直流调速系统的工作原理及性能分析	36
二、单闭环直流调速系统的工程应用举例	39
习题	43
第三章 电流、转速双闭环串级控制的直流调速系统	45
第一节 最大电流约束下的直流电动机最佳速度调节过程	45
一、最大电流约束条件下的最佳启动过程	45
二、最大电流约束条件下的最佳制动过程	47

三、最佳静特性	48
第二节 电流、转速双闭环调速系统	48
一、带限幅输出的 PI 调节器的动态响应	48
二、电流、转速双闭环系统组成	50
三、双闭环系统稳态时的工作情况	52
四、双闭环系统的跟随响应	54
五、双闭环系统的抗扰性能	55
第三节 具有电流自适应调节器的双闭环调速系统	58
一、电流断续问题的提出	58
二、具有电流自适应调节器的双闭环调速系统	59
第四节 带励磁控制的调速系统	61
一、独立控制励磁的调压、调磁系统	63
二、非独立控制励磁的调速系统	63
习题	65
第四章 直流调速系统的工程设计与调试	66
第一节 典型系统的性能指标与参数关系	67
一、典型 I 型系统	67
二、典型 II 型系统	69
三、典型 I、II 型系统的性能指标比较	74
第二节 系统的校正—调节器设计	77
一、直接校正成典型系统	77
二、低频大惯性环节的近似处理	79
三、高频小惯性群的近似处理	81
第三节 双闭环不可逆直流调速系统的工程设计	86
一、系统固有参数的计算和测试	87
二、电流环设计	89
三、转速环设计	94
四、设计举例	98
第四节 双闭环直流调速系统的调整	102
一、触发器调试	102
二、电流环调试	103
三、转速环调试	103
四、系统的静特性调整	104
五、故障分析	105
习题	105
第五章 直流电动机的可逆调速控制	108
第一节 直流电动机可逆系统主电路	108
一、电枢反接可逆线路	108

二、励磁可逆线路	110
第二节 晶闸管—电动机系统的工作状态分析	111
一、晶闸管装置的整流和逆变状态	111
二、电动机的发电回馈制动	112
三、如何在 V-M 系统中实现发电回馈制动	113
第三节 晶闸管反并联系统的可逆控制方案及实现	114
一、晶闸管反并联有环流控制方式	114
二、 $\alpha=\beta$ 配合控制的有环流可逆调速系统	117
三、可控环流的可逆调速系统	119
四、逻辑无环流可逆调速系统	122
五、逻辑无环流可逆系统的工程应用分析	137
第六章 直流脉宽调制调速系统	144
第一节 PWM 功率电源及 PWM-M 系统开环调速	144
一、不可逆 PWM-M 系统主电路	144
二、可逆 PWM-M 系统主电路	147
第二节 PWM 可控电源供电下的直流电动机闭环调速系统	150
一、脉宽调制器 UPW	151
二、逻辑延时环节	151
三、基极驱动器及保护电路	152
第三节 用微处理器实现的 PWM-M 系统	156
一、系统的硬件结构	156
二、系统的软件结构	161
第七章 直流传动的其它应用	167
第一节 位置随动系统	167
一、概述	167
二、位置信号检测装置	168
三、位置随动系统的基本类型	178
四、位置随动系统的应用举例	182
第二节 直流传动张力控制系统	184
一、概述	184
二、张力控制方法	185
三、铝箔轧机张力控制系统	188
习题	190

下篇 交流调速系统

第八章 交流调速系统基本概念	192
一、交流电动机的调速方式	192

二、交流调速传动系统的应用领域	196
第九章 交流调压调速	198
第一节 调压调速工作原理及机械特性	198
一、工作原理	198
二、机械特性	200
第二节 调压调速的闭环控制	201
一、转速负反馈闭环的交流调压调速系统	201
二、系统的静特性	201
第三节 晶闸管三相交流调压电路	203
一、几种常用的交流调压电路及性能比较	203
二、电感性负载电路的工作特点	206
第四节 交流调压系统工程举例	208
习题	210
第十章 变频调速	211
第一节 变频调速概述	211
一、基频以下调速	211
二、基频以上调速	212
三、逆变器的基本工作原理	212
第二节 变频器简介	216
一、变频器的构成	216
二、变频器的分类及其特点	218
三、变频器的主回路控制方式	226
第三节 SPWM 电压型变频器	228
一、SPWM 电压型变频器的概念	228
二、SPWM 电压型变频器的工作原理	229
三、SPWM 型逆变器的控制方式	232
四、SPWM 波的实现	234
五、由 8098 单片机实现的 SPWM 变频调速系统	237
第四节 变频调速系统	241
一、 V/F 控制及其机械特性	241
二、 V/F 控制系统构成及工作原理	245
三、转差频率控制	247
四、矢量控制	253
五、各种控制方式的特性比较	258
第五节 通用变频器的应用	258
一、通用变频器及其外围设备的选择	258
二、使用变频器时应注意的问题	262
三、变频器在节能方面的应用	263

四、通用变频器应用实例	268
习题	272
第十一章 串级调速	273
第一节 串级调速的原理、类型	273
一、工作原理	273
二、串级调速系统的分类	275
第二节 串级调速系统的能量关系	276
一、功率传递关系	276
二、效率 η	278
三、功率因数 $\cos\varphi$	279
四、双馈电机概念	279
第三节 异步电动机在串级调速工作时的机械特性	280
一、异步电动机转子整流电路的电压和电流	280
二、异步电动机在串级调速时的电磁转矩	283
三、异步电动机在串级调速工作时的机械特性方程式	286
第四节 双闭环串级调速系统	288
一、双闭环串级调速系统的组成	288
二、串级调速系统的动态数学模型	288
三、调速系统调节器参数的确定	293
第五节 工程应用实例	293
习题	299
附录	300
附录一 集成触发器	300
附录二 测速元件与电路	303
附录三 模拟信号隔离器	308
附录四 电流、电压传感器模块的技术性能参数及应用	310
附录五 8098 单片机的性能及特点	317
附录六 常用符号表	318
参考文献	326

上 篇

直流传动控制系统

长期以来,直流电动机由于其良好的起动、制动性能和调速性能,在电力拖动调速系统中占有主导地位。虽然近年来交流电动机的调速控制技术发展很快,但就其反馈闭环控制的机理来说,直流电动机的传动与控制理论和实现都是交流电动机传动控制的基础。从根本上说,由于直流电动机电枢和磁场能独立进行激励,而且转速和输出转矩的描述是对可控电压(或电流)激励的线性函数,因此,容易实现各种直流电动机控制系统(如调速系统、张力控制系统、随动系统等),也容易实现对控制目标的“最佳化”。这也就是直流机长期主导传动领域的原因。

近年来,随着电力电子技术的发展及其应用技术的进步,微处理器、外围电路元件(如集成检测元件)、专用集成件的不断出现,使得直流电动机的传动控制应用技术得到了显著的进步,而且仍不断地发展着。

首先,从大功率可控直流电源讲,传统的晶闸管可控整流器随着器件的耐冲击能力,单只容量(电压电流额定值)的增加和可靠性的提高,主电路结构和对元件的各种保护的完善,使得晶闸管整流器体积小造价低,使用方便,维修量小,应用面也就大了。另一方面,随着全控式电力器件(如可关断晶闸管 GTO,大功率晶体管 IGBT,场效应功率晶体管 P-MOS-FET 等)的出现和应用技术的进步,脉冲宽度调制型(PWM)可控功率直流电源越来越受人们的重视,应用越来越广泛,虽然目前功率器件价格限制了 PWM 电源的应用推广速度,但由于其有晶闸管电路不可比拟的优越性能,PWM 电源终将取代晶闸管相控式可控功率电源,成为可控直流电源的主流。

其次,集成电路的发展不仅使运算、放大器件的精度和可靠性已不再成为人们所担心和考虑的问题,而且新型的检测器件的出现(如霍尔器件、光码盘等)以及使其集成化和小型化,使交、直流电流和电压等信号的隔离与检测的精度和可靠性也不是影响整个控制系统性能的问题。另一方面,随着微处理器的应用技术的发展和完善,全数字的控制系统已开始得到广泛的应用。总之,半导体技术发展到今天,我们可以随心所欲地组成能满足生产设备拖动技术指标要求的各种传动控制系统。

本篇在叙述直流传动控制系统的基本组成原理的同时,尽量多结合工程实际,一方面使读者能建立根据生产设备所提出的技术指标组成,选择控制系统结构的思路和方法,另一方面要掌握在反馈闭环控制思想基础上,能合理正确地选择和整定系统的静、动态参数的方法和手段。

电力拖动的核心问题是对电动机的转矩控制。而调速系统又是最基本、应用最广泛的一种转矩控制拖动系统、因而是学习其它类型的传动控制系统的基础。如张力控制系统、位置

随动系统、交流调速系统的构成和实现都类似于直流调速系统,以转矩控制为目的,遵循闭环控制规律,采取不同的负反馈和不同的硬件实现的。因此,本篇从直流调速系统的分析入手,提出调速系统的指标、分析实现性能指标的手段,由浅入深地介绍各类直流调速系统。同时,考虑到新技术的发展和应用,介绍了以微处理器实现的全数字PWM直流调速系统。第六章给读者建立全数字式直流调速系统的软、硬件实现方法。第七章介绍了张力控制系统和随动控制系统。

本篇在功率可控电源和控制电路的实现上考虑了目前的普及应用技术和正在发展的新技术,介绍了模拟电路、微处理器、可编程控制器以及目前应用广泛的各类器件及由这些器件组成的系统。讲述中力图站在工程实用的角度上提出问题、分析问题和解决问题。提供的例子都具有典型意义和知识的长远延续意义。

第一章 直流调速系统的基本概念

本章首先介绍直流电动机的几种调速方法和可控调压电源,而后提出调速系统的性能指标并分析由晶闸管整流器供电下的直流电动机开环调速系统的性能指标。

第一节 直流电动机的调速方法

直流电动机转速表达式为

$$n = \frac{U - I_d R_z}{K_e \Phi} \quad (1-1)$$

式中 n ——转速, r/min;

U ——电枢电压, V;

I_d ——电枢电流, A;

R_z ——电枢回路总电阻, Ω ;

Φ ——励磁磁通量, Wb;

K_e ——电动机结构决定的电势常数。

由式(1-1)可以看出,直流电动机转速的调节有以下三种方法:1)调节电枢电压调速;2)改变电动机励磁调速;3)改变电枢回路电阻调速。

一、调节电枢电压调速

图 1-1 中, R_i 为可控电源电阻; U_{d0} 为理想空载电压。转速方程为

$$n = \frac{U_{d0} - I_d R_z}{K_e \Phi} = \frac{U_{d0}}{C_e} - \frac{R_z I_d}{C_e} = n_0 - \Delta n \quad (1-2)$$

式中 $C_e = K_e \Phi$ ——电动机在额定磁通下的电势转速比;

$n_0 = \frac{U_{d0}}{C_e}$ ——理想空载转速;

$\Delta n = R_z I_d / C_e$ ——转速降, $R_z = R_a + R_i$ 为电枢回路总电阻。

改变 U_{d0} 就得到一组相互平行的机械特性,如图 1-1(b)所示。如果连续改变可控电源电压,电动机转速就可以平滑连续地得到调节。由于电枢回路电阻的存在,实际的转速要比理想转速低一些。负载不变时,电枢电流 I_d 不变,转速降 Δn 也不变。可以看出,当电压低到一定时,由于转速降的存在,电动机转速降为零(U_{d0} 对应曲线);内阻越大,特性就越软,实际的调速范围就越窄。因此,如何减少或补偿电枢回路内阻的影响,将是我们在下章研究的核心问题之一。

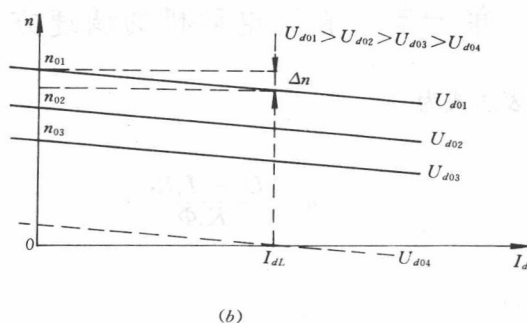
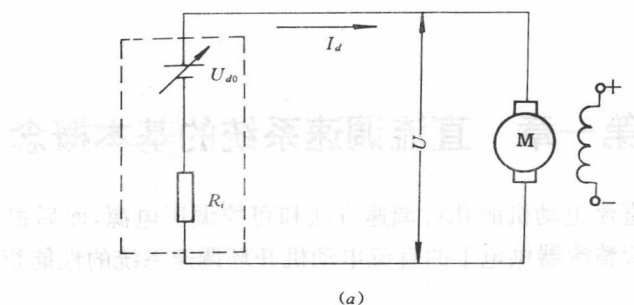


图 1-1 变电枢电压调速系统
(a) 电路; (b) 机械特性

变电枢电压调速时,电动机轴输出功率

$$P = \frac{T_e n}{975} = \frac{1}{975} K_m \Phi I_d \cdot n \quad (1-3)$$

当负载为恒转矩负载时

$$P = K n \quad (1-4)$$

式中 $K = \frac{1}{975} T_e$;

T_e ——电磁转矩,负载转矩 T_L 为恒转矩时, $T_e = T_L = \text{常数}$,从而 K 为常数。

式(1-4)表示,对应于恒转矩负载,电动机轴上输出功率与转速成正比。电动机只有在电动机转速达到额定转速 n_{nom} 时,才能输出额定功率;而对不同的转速,容许的输出转矩恒定。

变电枢电压调速的特点:

- (1) 机械特性较硬,负载不变时,转速降 Δn 不变;
- (2) 由于容许的输出转矩恒定,对于恒转矩性负载的拖动调速,能充分利用电动机容量;

(3) 由于电枢回路时间常数小,系统的动态响应快,适合于要求快速起、制动的设备的传动系统中,如初轧机、龙门刨床等设备。

二、改变电动机励磁调速

电动机转速方程为

$$n = \frac{U}{K_e \Phi} - \frac{R_a I_d}{K_e \Phi}$$

$$= n_0 - \Delta n \quad (1-5)$$

式中 U ——电枢端电压,为常数;

R_a ——电枢电阻。

当负载电流不变时,改变可控电压 U_f ,也就是说,改变电动机励磁磁通量 Φ 时,电动机的理想空载转速和转速降都在变化,随着磁通量的减少,转速降就越来越大,机械特性也就越软,如图 1-2 所示。

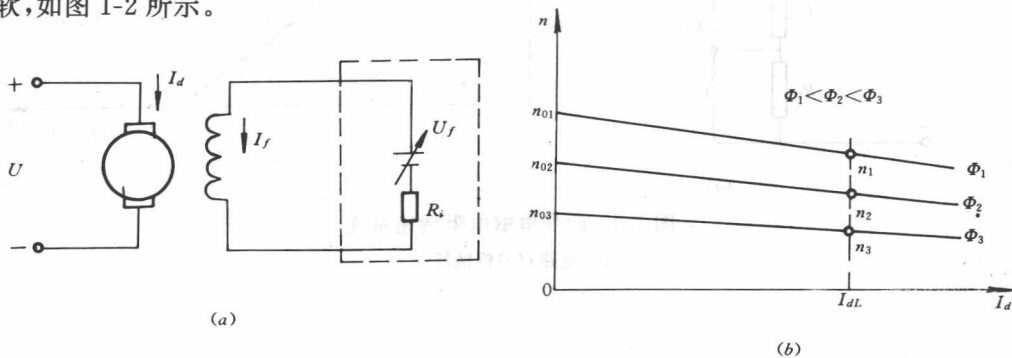


图 1-2 磁场调节调速系统

(a)原理图;(b)机械特性

这种调速方式下,调速时,电动机轴上容许输出功率 $P = \frac{1}{975} K_m \Phi I_a \cdot n$ 基本不变,适用于恒功率性质负载的拖动调速上。

变励磁磁通 Φ 调速的特点:

- (1)机械特性软,负载变化时转速的波动较大;
- (2)可控电源容量小,一般为电动机容量的 10% 以下,电源设备造价低;
- (3)磁场的时间常数大,系统的动态响应慢,适合于启、制动快速性要求不高的设备的传动控制。

三、改变电枢回路电阻调速

改变电枢回路电阻的调速方法就是在电枢回路中串接附加电阻 $R_1, R_2, \dots$, 来改变电动机电枢端电压,从而实现调速的目的。如图 1-3(a)所示,通过控制接触器 C_1, C_2 的通断来改变串入的电阻值。 C_1, C_2 全打开时,电枢回路总电阻 $R_\Sigma = R_a + R_1 + R_2$ 最大,转速降 $\Delta n = \frac{R_\Sigma I_a}{K_e \Phi}$ 也就最大。系统的调速特性如图 1-3(b)所示。这种调速方法的特点是:

- (1)系统的结构简单;
- (2)调速不连续,不平稳;
- (3)机械特性软,从而影响调速范围;
- (4)电动机速度的改变是靠改变电枢回路串接电阻大小来实现的,调速范围越大,串入电阻就越大,相应地电阻上消耗的能量就越大,这是很不经济的。

综上所述,三种调速方法中,改变电动机电枢电压调速方法优点较多,因而应用也最广泛,后几章将着重介绍以电枢控制下的各种闭环调速系统。

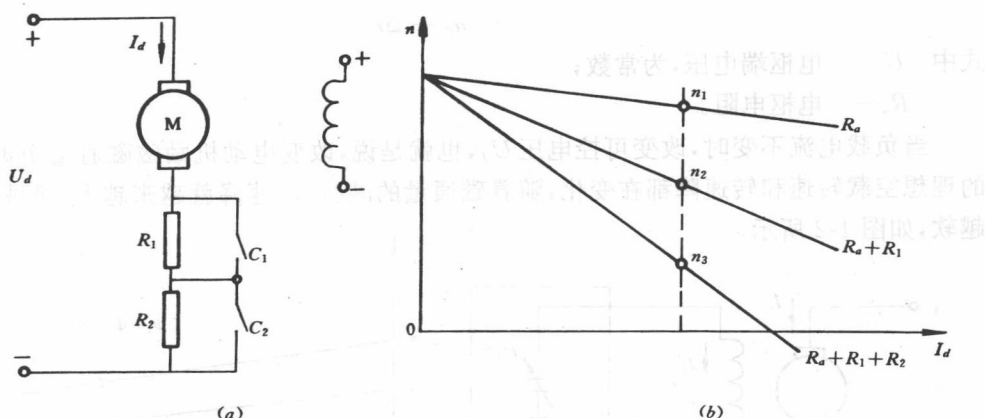


图 1-3 改变电枢电阻调速系统

(a) 电路; (b) 机械特性

第二节 可控直流电源供电下的直流电动机(V-M) 开环调速及特性

改变直流机电枢电压或励磁电压都需要可调电源,常用的可控直流电源有:发电机—电动机组,晶闸管整流器、直流斩波器等。

发电机—电动机组(G-M 系统)由交流电动机(异步或同步机)拖动直流发电机以固定的转速旋转。通过改变发电机励磁电压来改变发电机输出电压。这一可控电压作为直流电动机的电枢电压,就可以达到改变电动机转速的目的。这种系统在 50 年代曾广泛应用,至今尚有一些旧设备仍使用这种调速方法。这种系统由于旋转电机多,体积大,效率低,维护麻烦。50 年代末开始采用汞弧整流器(大容量)和闸流管(小容量)这样的静止变流装置来代替发电机—电动机组。到 60 年代末开始又让位给更为经济可靠的晶闸管整流器。由于晶闸管整流器优点比较突出,近二十多年来,在直流调速系统中应用也就最广泛。同时,随着全控式电力器件的发展,直流斩波器正在迅速地得到发展。下面主要介绍以晶闸管整流器供电下的调速系统和直流斩波器调压调速系统。对 G-M 系统感兴趣的读者可参阅参考文献。

一、晶闸管整流器—电动机系统(V-M)的调速特性

由晶闸管整流器和电动机组成的调速系统(简称 V-M 系统)如图 1-4 所示。

当改变速度给定值 n_{ref} 时,触发器输出脉冲相位 α 就得到改变,从而调节了整流器输出电压 U_d ,因而实现了调节电动机转速的目的。系统稳定时,V-M 系统的等值电路如图 1-5 所示。

图中 $U_{d0} = K_d U_2 \cos \alpha$ ——整流器在理想空载下的输出电压, K_d 为整流器结构系数,见表

1-1, U_2 为交流电源相电压;

$R_z = R_x + R_a$ ——电枢回路总电阻;

R_a ——电动机电枢电阻;

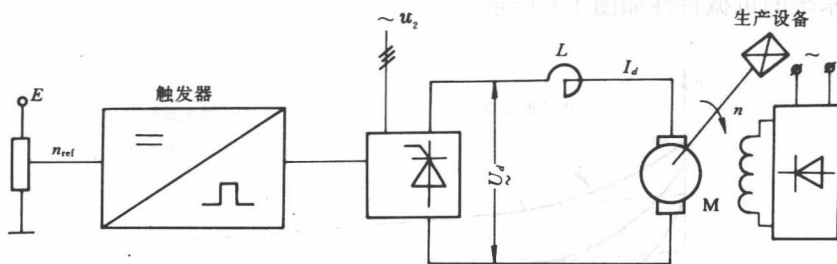


图 1-4 V-M 系统原理图

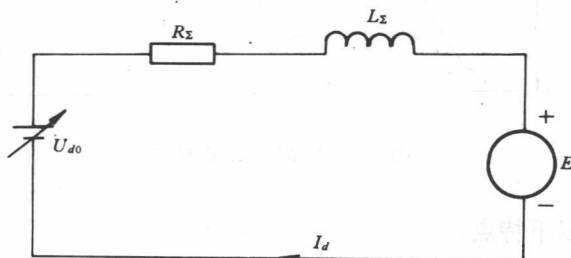


图 1-5 V-M 系统等值电路

$R_\Sigma = \frac{K_b X_b}{2\pi} + R_b + R_p$ ——整流器内阻和平波电抗器电阻之和；

X_b ——变压器漏抗(折算到副边)；

R_b ——变压器绕组折合到副边的等效电阻；

R_p ——平波电抗器电阻；

K_b ——波形系数见表 1-1。

(1) 整流器输出电流连续时, V-M 系统的机械特性方程可推得如下:

$$U_{d0} = E_d + I_d R_\Sigma \quad (1-6)$$

式中 E_d ——电动机反电动势。

将 $E_d = K_e \Phi n = C_e n$ 代入(1-6), 整理得

$$n = \frac{U_{d0}}{K_e \Phi} - \frac{R_\Sigma}{K_e \Phi} I_d = n_0 \Delta n \quad (1-7)$$

式中 $n_0 = \frac{U_{d0}}{K_e \Phi}$ ——理想空载转速。

表 1-1 整流系数及波形系数

系 数	单相全波	三相半波	三相全波
K_d	0.9	1.17	2.34
K_b	2	3	6

(2) 电流断续时, 相当于整流器内阻增大, 使转速降 Δn 增大。因此机械特性要比电流连续时软些。有关 V-M 系统电流断续时的理论分析详见《变流技术》一书, 在此不再叙述。工程中一般采用平波电抗器保证电动机电流在正常运行范围内连续。

V-M 系统的机械特性如图 1-6 所示。

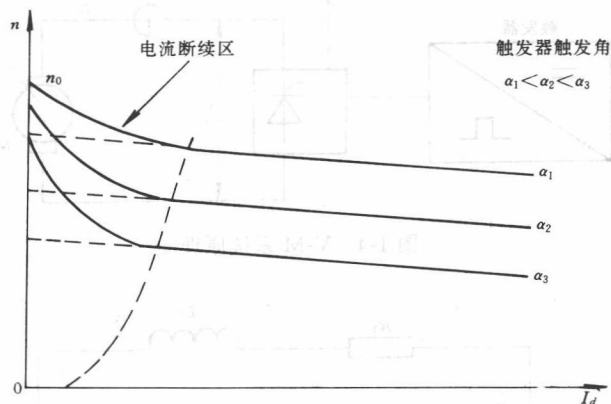


图 1-6 V-M 系统机械特性

V-M 系统具有以下特点：

(1) 由于晶闸管生产技术的日趋完善，晶闸管整流器运行可靠，而且随着单只晶闸管容量的增大（目前国内已有 4500V/2500A 的晶闸管投入市场），不需串并联就可以组成很大功率的整流电源，从技术性能看，晶闸管整流器比过去的发电机组、磁放大器等组成的可控电源响应快，控制精度高，因此，V-M 系统已成为直流调速系统的主要形式。

(2) V-M 系统由于其内阻比电动机本身电阻大，因此，机械特性要比电动机的自然特性软些，尤其是电流断续段，特性很软。为保证在负载变化时转速的稳定性，一般采用闭环调节的方法来补偿由内阻引起的转速降。关于闭环控制将是要讨论的中心内容。

(3) 晶闸管整流器的输出电压是靠改变触发器触发角来调节的。这种控制有两个特征：一是触发周期一定，这样，整流器结构确定后输出的波形周期一定（三相桥为 300Hz）。二是相控特征，即输出电压的改变实质上是对晶闸管交流电压的“放行”和“截止”的相位的控制。因此，当输出电压要求很小的时候，晶闸管触发角也就很小，系统的功率因数很小，并产生较大的谐波电流，对电网有“污染”。因此，中大型晶闸管整流器一般在交流输入口增加无功补偿和滤波装置。另一方面，低速时对传动设备本身来说，容易引起转矩脉动，造成步进感。对调速要求高，范围宽的系统，往往采用双电机串联式或改变整流变压器输出电压的方式使晶闸管导通最小角限制在一定范围内。

二、脉宽调制电源(PWM)供电下的直流调速特性

晶闸管整流电源输出电流的脉动频率只取决于整流电路结构形式和交流电网的频率，主要因为晶闸管属于相控元件，其关断只能靠阳-阴极间承受的反向电压。因此，如果想提高整流器输出电压的波形系数只能靠改变整流器结构（如 6 相整流、12 相整流等）。

而随着门极可控型电力电子器件的日益成熟并推向应用市场，一种输出电压（或电流）的脉动频率可控制的可控电源—脉宽调制型(Pulse-Width Modulation-简称 PWM)可控电源在直流调速领域里得到越来越广泛应用。由功率晶体管(GTR)，电力场效应管(P-MOS-FET)等元件组成的 PWM 电源的输出频率可达几千赫(GTR)，甚至达几十兆赫(MOS-