

GAODENG
XUEXIAO
JIAOXUE
YONGSHU

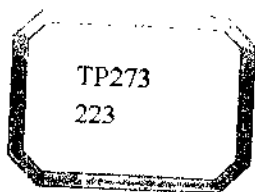
高等学校
教学用书

自动控制系统

(第2版)

刘建昌 主编

冶金工业出版社



高等学校教学用书

自动控制系统

(第2版)

东北大学 刘建昌 主编

北 京

冶金工业出版社

2001

图书在版编目(CIP)数据

自动控制系统 / 刘建昌主编. —2 版, —北京: 冶金工业出版社, 2001.3
高等学校教学用书
ISBN 7-5024-2753-8

I. 自… II. 刘… III. 自动控制系统—高等学校—教学参考资料 IV. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 14632 号

出版人 卿启云(北京沙滩高视院北巷 39 号, 邮编 100009)

责任编辑 宋良 美术编辑 王耀忠 责任校对 刘倩 责任印制 刘静

北京兴华印刷厂印刷: 冶金工业出版社发行: 各地新华书店经销

1987 年 11 月第 1 版, 2001 年 3 月第 2 版, 2001 年 3 月第 5 次印刷

850mm×1168mm 1/32: 8.125 印张: 216 千字: 249 页: 18771-21770 册

15.00 元

冶金工业出版社发行部 电话: (010)64044283 传真: (010)64027893

冶金书店 地址: 北京东四西大街 46 号(100711) 电话: (010)65289081

(本社图书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

前 言

1987年,由东北大学李世卿老师主编的高等学校教学用书《自动控制系统》由冶金工业出版社出版,后经多次印刷,在国内许多高校得到广泛的应用。随着自动控制技术的不断发展,尤其是随着高校教学改革的不断深入,教材的更新势在必行。1997年,原冶金部将《自动控制系统》列为“九五”教材出版规划,并委托东北大学对此书进行重新编写。正是在这样的背景下,我们开始编写此书。这里要感谢李世卿老师等原书作者所做的巨大贡献,正是他们为本书的编写奠定了基础。根据教学大纲的要求,在本书的编写过程中,我们力图做到教材内容的精选和完整,分析和论述的深入浅出,理论上的严密与工程实践经验的融合。

本书以晶闸管供电的直流调速系统为研究对象,对自动控制系统的概念、系统的工作原理及其分析方法、系统的工程设计方法等进行了全面深入的介绍。

本书按讲课40学时编写,全书共分五章:第一章为单闭环直流调速系统,着重介绍系统的基本概念、组成原理及设计思路;第二章为以双闭环直流调速系统为主的各种多闭环调速系统,包括磁场控制系统;第三章为可逆调速系统;第四章为直流调速系统的工程设计方法;第五章介绍位置随动系统。

本书由东北大学刘建昌任主编,第一章和第二章由东北大学葛延津编写,第三章和第五章由东北大学钱晓龙编写,第四章由刘建昌编写。

中国科学院沈阳自动化研究所于海斌研究员、东北大学顾树生教授和王立平教授对本书进行了认真的审阅,并提出了宝贵的意见,在

此，向上述三位专家表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，不足之处在所难免，恳请读者批评指正。

编 者

2000年12月

目 录

第一章 单闭环直流调速系统

第一节 直流调速系统概述	1
一、可控直流电源	1
二、直流调速系统的调速方式及其机械特性	5
三、生产机械对调速系统的控制要求及调速指标	7
第二节 转速负反馈单闭环直流调速系统	10
一、转速负反馈直流调速系统的组成及其基本工作原理	11
二、转速闭环调速系统的静态特性	11
三、转速闭环调速系统的动态特性	19
第三节 单闭环无静差调速系统	29
一、采用积分调节器的单闭环无静差调速系统	30
二、采用比例积分调节器的单闭环无静差调速系统	34
第四节 带电流截止环节的单闭环直流调速系统	42
一、带电流负反馈截止环节的直流调速系统	43
二、电流检测环节	47
第五节 电压负反馈与电流补偿控制的直流调速系统	50
一、电压负反馈调速系统	51
二、带电压负反馈与电流正反馈 (IR 补偿) 的直流调速系统	53
习题	57

第二章 多闭环直流调速系统及磁场控制

第一节 快速系统与最佳过渡过程的概念	60
第二节 转速电流双闭环直流调速系统	64
一、转速、电流双闭环系统的构成	64
二、双闭环调速系统的动态特性	66
三、双闭环调速系统的静特性	71
第三节 带转速微分负反馈的双闭环调速系统	73
一、带转速微分负反馈的双闭环调速系统的动态结构图	74
二、转速微分反馈对转速超调量的抑制	76
第四节 带电流变化率内环的三环调速系统	78
第五节 直流电动机的磁场控制系统	82
一、非独立励磁控制系统	84
二、最大电流限制	89
习题	92

第三章 可逆调速系统

第一节 晶闸管直流调速系统的可逆运行方案与回馈制动	94
一、晶闸管直流调速系统的可逆运行方案	94
二、晶闸管直流调速系统的回馈制动	98
第二节 有环流可逆调速系统	101
一、可逆系统中的环流问题	101
二、有环流电枢可逆直流调速系统	102
三、可控环流的可逆调速系统	110

第三节 逻辑控制的无环流可逆调速系统	115
一、逻辑无环流系统的结构及其对逻辑装置的要求	115
二、无环流逻辑控制器	120
三、逻辑无环流系统的改进方案	128
习题	130

第四章 自动控制系统的工程设计

第一节 工程设计的基本方法与典型系统	132
一、典型系统	132
二、工程设计的基本方法	136
第二节 典型系统的性能指标	136
一、控制系统的动态性能指标	137
二、二阶典型系统的性能指标	139
三、三阶典型系统的性能指标	147
第三节 工程设计中的近似处理与调节器串联校正	
——非典型系统典型化	161
一、工程设计中的近似处理	161
二、调节器的串联校正	168
第四节 双闭环调速系统的设计	170
一、电流环的设计	170
二、转速环的设计	176
三、转速调节器饱和和非线性对启动过程的影响	180
四、设计举例	184
习题	190

第五章 位置随动系统

第一节 位置随动系统的构成和基本类型	192
第二节 位置随动系统的部件	195
一、自整角机测角电路	195
二、旋转变压器测角电路	201
三、感应同步器	202
四、相敏整流放大器	205
五、PWM 功率放大器	206
六、伺服电动机	212
第三节 自整角机位置随动系统	213
一、典型输入信号	214
二、位置随动系统的典型结构	215
三、位置随动系统的稳态偏差	215
四、稳态品质因数	219
五、扰动输入对位置随动系统稳态偏差的影响	220
六、位置随动系统的动态校正	222
第四节 脉冲相位随动系统	230
一、简介	230
二、主要部件工作原理	230
三、脉冲相位随动系统的几种工作制	243
四、脉冲相位随动系统的动态分析	245
习题	247
参考文献	249

第一章 单闭环直流调速系统

第一节 直流调速系统概述

一、可控直流电源

直流调速系统中的可控直流电源随着电子技术与电力电子技术的发展在不断地更新换代，常用的可控直流电源主要包括旋转变流机组、静止可控整流器、直流斩波器或脉宽调制变换器三类。

1. 旋转变流机组

20 世纪 40 年代的可控直流电源是旋转变流机组。它由交流同步电动机或交流异步电动机带动直流发电机，直流发电机直接为直流电动机供电，直流电动机带动生产机械。通过调节发电机励磁电流的大小，可以方便地改变直流发电机的输出电压，从而达到调节直流电动机转速的目的。改变发电机励磁电流的方向，可以改变发电机输出电压的极性，从而实现直流电动机的可逆运行。这种系统简称为 G-M 系统。在 G-M 系统中，直流发电机的磁场是由作为功率放大器的交磁放大机直接供电的，所以称之为放大机控制的发电机-电动机调速系统。由于在这种可控直流电源中旋转设备多，所以简称其为旋转变流机组。

旋转变流机组在 20 世纪 40 至 60 年代得到广泛的应用，在一些不发达的国家或地区，目前仍有这样的调速系统在运行，但肯定要成为被改造的对象。这种调速系统包含与调速直流电动机容量相当的交流电动机和放大机组，因而设备多，占地大，运行费用高，安装须打地基，运行有噪音，维护不方便。因此，研制静止可控直流电源成为一种必然的需求。

2. 静止可控整流器

(1) 水银整流器

作为可控直流电源的水银整流器于 20 世纪 50 年代问世。由

于水银整流器是静止的,所以它克服了旋转变流机组的许多缺点。但由于水银的泄露会严重污染环境,危害人身健康,并且造价高、难以维护,因而在 20 世纪 50 年代末期就被另一种静止可控直流电源——晶闸管变流装置所取代。

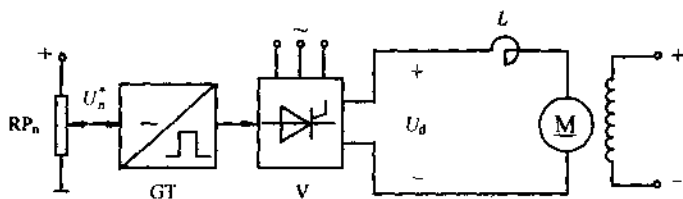


图 1-1 晶闸管-直流电动机调速系统

RP_n —转速给定电位计；GT—触发器；V—晶闸管整流器

U_n^* —转速给定电压；L—平波电抗器

(2) 晶闸管变流装置

1957 年,晶闸管研制成功,使变流技术产生了根本性的变革。到了 20 世纪 60 年代,成套的晶闸管变流装置(整流器)投入生产。由晶闸管变流装置为直流电动机供电的调速系统称为晶闸管-直流电动机调速系统,简称为 V-M 系统。直到如今,V-M 系统仍然显示出强大的生命力,是直流调速系统的主要形式。图 1-1 为 V-M 系统的原理图。

在图 1-1 中,晶闸管可控整流装置 V 可以是单相、三相或多相整流电路。系统的工作原理是:由转速给定电位器取出转速给定信号(控制信号) U_n^* ,控制触发器输出脉冲的相位,从而改变晶闸管整流装置输出电压 U_d 的大小,实现直流电动机的平滑无级调速。与旋转变流机组相比,晶闸管变流装置有以下优点:

1) 晶闸管变流装置的功率放大倍数在 10^4 以上,比机组放大倍数高三个数量级,且门极控制所需功率也很小,不需要像直流发电机组那样大的功率放大器。

2) 晶闸管变流装置的响应速度为毫秒级(机组的响应速度为

秒级)，大大提高了系统的快速性。

3) 晶闸管整流器的效率高，设备投资及运行费用低。

4) 晶闸管整流器无噪音，无磨损，体积小，重量轻。

5) 晶闸管整流器可靠性高，维护方便。

晶闸管变流装置的缺点是：

1) 需要有可靠的保护装置以及符合散热要求的散热条件，如散热片、风冷、水冷装置等。

2) 晶闸管变流装置中的半导体元件对过电压、过电流、以及过高电压变化率 du/dt 与电流变化率 di/dt 都很敏感，任何一项指标超过允许范围都可在很短时间内使元件遭到毁坏。因此，选择元件时，电流、电压等参数都要有足够的裕量，对过高的 du/dt 与 di/dt 要采取限制措施，以保护晶闸管。

3) 功率因数低，有较大的谐波，尤其是在晶闸管的导通角较小时尤为严重。当晶闸管变流装置的容量在电网中占有较大的比重时，就要考虑增设无功补偿与滤波装置。

(3) 直流斩波器或脉冲调制变换器

直流斩波器是将恒定的直流电压斩波为有一定宽度的脉冲电压加在负载两端的装置。显然它是接在恒定直流电压与负载之间、用以改变负载直流电压平均值的。若负载为直流电动机，则构成直流斩波器或脉冲调制变换器供电的直流调速系统，如图 1-2 所示。晶闸管斩波器是把晶闸管作为开关，用以接通或关断电路。

在图 1-2 (b) 中， t_{on} 为晶闸管的导通时间。 T 为晶闸管的通断周期。在 t_{on} 时间内，脉冲幅值为恒定直流电源电压。加在负载两端电压的平均值 U_d 低于恒定直流电源电压值。

在图 1-2 (a) 中，作为开关使用的晶闸管 VT 在电路中总是承受正向恒定直流电压的。当给晶闸管控制极施加脉冲时，晶闸管 VT 导通，相当于开关闭合，恒定直流电源电压施加在负载两端。晶闸管 VT 一旦导通，就不能再采用门极触发信号使其关断，只能采用强迫关断电路，才能使晶闸管承受反向电压而关断。

晶闸管关断期间，电路中电感贮存的能量从续流二极管中释

放。由图 1-2 (b) 可见, 输出到负载两端脉冲电压的平均值为

$$U_d = \frac{t_{on}}{T} U_s = \rho U_s \quad (1-1)$$

式中 $\rho = t_{on}/T = t_{on} \cdot f = U_d/U_s$ ($0 \leq \rho \leq 1$) ——负载电压系数或
占空比;

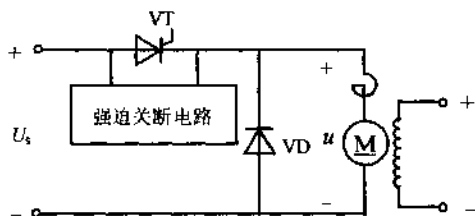
U_s —— 电源电压;

t_{on} —— 晶闸管导通时间;

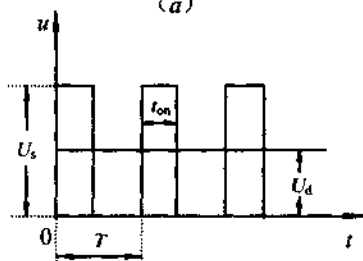
T —— 晶闸管的通断周期;

t_{on}/T —— 斩波器的导通比;

$f=1/T$ —— 斩波频率。



(a)



(b)

图 1-2 斩波器—电动机系统的原理与电压波形

(a) 原理图; (b) 电压波形

由式 (1-1) 可以看出, 改变输出电压 U_d 的大小有两种办法:

1) 脉冲周期 T 保持不变, 改变晶闸管 VT 的导通时间 t_{on} , 即改变脉冲宽度, 一般称其为脉冲宽度调制 (Pulse Width Modulation, 简称为 PWM);

2) 晶闸管 VT 导通时间 t_{on} 保持不变, 改变开关频率或开关周期 T , 一般称其为脉冲频率调制(Pulse Frequency Modulation, 简称为 PFM)。

普通晶闸管的关断时间比较大, 约在 $100\mu s$ 以上, 所以, 由普通晶闸管构成的斩波器开关频率较低($100\sim 200Hz$), 电路输出的电流脉动较大。采用逆导晶闸管构成的斩波器虽开关频率有所增加, 但仍受到一定限制。20 世纪 70 年代以来, 全控式电力电子器件问世, 如 GTO (门极可关断晶闸管)、MOSFET (电力场效应管)、IGBT (绝缘栅双极晶体管) 等。全控式器件的关断时间短, 由这类件构成的斩波器, 其工作频率可达 $1\sim 4kHz$, 甚至达到 $20kHz$ 。采用全控式器件实现关断时, 多采用 PWM 控制方式, 构成 PWM 装置—电动机系统, 简称为 PWM 调速系统或脉宽调速系统。

与 V-M 直流调速系统相比, PWM 调速系统具有如下优越性:

1) 由于 PWM 开关频率较高, 仅靠电枢电感这样小的电感就可使负载电流的脉动很小, 因此, PWM 调速系统的电枢电流极易连续, 系统低速性能好, 稳态精度高, 调速范围宽; 由于谐波少, 所以电动机损耗小, 发热少。

2) 系统频带宽, 快速响应性能好, 动态抗扰能力强。

3) 主电路线路简单, 损耗小, 效率高。

4) 直流电源可采用不控整流, 电网功率因数高。

受到器件容量的限制, 直流 PWM 调速系统只用于中、小功率的系统, 在诸如电力机车等驱动装置中得到广泛的应用。

二、直流调速系统的调速方式及其机械特性

对晶闸管直流调速系统(图 1-1), 在电枢电流连续的情况下, 当系统处于稳态运行时, 其主电路电压平衡方程为 Φ

$$U_{d0} = E + I_d R_\Sigma \quad (1-2)$$

式中 U_{d0} ——晶闸管变流装置空载输出电压;

E ——电动机反电动势, $E=C_e \Phi n$;

I_d —— 电动机电枢电流；

R_Σ —— 电枢回路总电阻（包括电动机电枢电阻、平波电抗器电阻、整流变压器绕组折合到副边的等效电阻及其漏抗引起的换向压降所对应的等效电阻）；

n —— 电动机转速；

Φ —— 电动机励磁磁通；

C_e —— 由电动机结构决定的电动势常数。

将 $E=C_e\Phi n$ 代入 (1-2) 式，经整理可得电动机转速表达式

$$n = \frac{U_{d0} - I_d R_\Sigma}{C_e \Phi} \quad (1-3)$$

由式 (1-3) 可知，V-M 系统的调速方式有以下 3 种：

1) 电动机磁场为额定值，改变电动机电枢两端电压，实现电动机在一定转速范围内的无级平滑调速。

2) 电动机电枢两端电压保持额定值不变，减弱电动机磁场（即减弱励磁磁通 Φ ），实现在电动机基速（额定转速）以上范围的调速。

3) 改变电枢回路总电阻 R_Σ ，实现电动机的有级调速。

在这几种调速方式中，第一种方式最为常见，它的调速范围大；第二种调速方式虽然也能平滑调速，但调速范围不大，而且不能单独作为一种调速方式使用，需要与第一种调速方式配合使用；第三种调速方式由于电阻本身消耗电能，而且只能实现有级调速，所以一般很少使用。

由式 (1-3) 可推导出开环 V-M 系统的机械特性如下

$$n = \frac{U_{d0} - I_d R_\Sigma}{C_e \Phi} = n_0 - \Delta n_{op} \quad (1-4)$$

式中 U_{d0} —— 空载整流电压， $U_{d0}=AU\cos\alpha$ ；对三相零式整流电路， $A=1.17$ ；对三相全控桥式整流电路， $A=2.34$ ；

U_2 —— 整流变压器副边相电压有效值；

$$n_0 = \frac{U_{d0}}{C_e \Phi} = \frac{AU_2 \cos \alpha}{C_e \Phi} \text{——对应脉冲移相角 } \alpha \text{ 的理想}$$

空载转速；

$$\Delta n_{op} = \frac{I_d R_{\Sigma}}{C_e \Phi} \text{——V-M 系统的开环转速降。}$$

开环 V-M 系统的机械特性如图 1-3 所示。

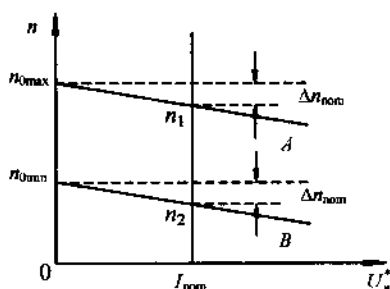


图 1-3 晶闸管一直流电动机调速系统的机械特性

I_{nom} —电动机额定电流； n_{0max} —最高理想空载转速； n_{0min} —最低理想空载转速

三、生产机械对调速系统的控制要求及调速指标

生产机械对调速系统的控制要求，一般可概括为静态调速指标与动态调速指标。静态调速指标要求调速系统能在最高转速与最低转速之间调节转速，并且要求系统能在不同转速下稳定地工作。动态调速指标要求系统启动、制动快而平稳；当电动机在某一转速下稳定运行时，若受负载变化、交流电源电压波动等外界因素的影响，转速波动应尽量小。

调速系统的静态指标包括调速范围和静差率。下面结合图 1-3 所示的 V-M 系统机械特性，分别给出两个调速系统的静态指标。

1. 调速范围

在额定负载时，生产机械要求电动机提供的最高转速 n_{max} 与最低转速 n_{min} 之比叫做调速范围，用字母 D 表示为

$$D = \frac{n_{\max}}{n_{\min}} \quad (1-5)$$

许多生产机械对调速范围有较高的要求，例如，在额定负载下，重型铣床的进给机构快速移动时最高转速可达到 600mm/min；而精加工时，最低转速却只有 2mm/min。最高转速是最低转速的 300 倍，即 V-M 系统的调速范围为 300。

在不弱磁的调速系统中，电动机的最高转速 $n_{\max}$ 就是额定转速 n_{nom} 。

2. 静差率

当调速系统在某一转速下稳定运行时，负载由零增加到额定值所产生的静态转速降落 Δn_{nom} 与对应的理想空载转速之比称为静差率，用 S 表示

$$S = \frac{\Delta n_{\text{nom}}}{n_0} \quad (1-6)$$

也可用百分数表示为

$$S = \frac{\Delta n_{\text{nom}}}{n_0} \times 100\% \quad (1-7)$$

静差率是用来衡量调速系统静态精度的一个性能指标。由式 (1-6) 或图 1-3 可以看出，在同一理想空载转速下，调速系统的静差率越小，则表明该系统静态速降 Δn_{nom} 越小，即系统的机械特性越硬，也就是说该系统具有较高的静态精度。同时，我们也清楚地看到，对同一调速系统，对应不同的理想空载转速会得到大小不同的静差率，因此，按照式 (1-6) 定义的静差率 S 所表达的系统静态精度是相对（理想空载转速）静态精度，不能简单地凭其大小来断定一个调速系统静态精度的优劣。显然，理想空载转速 n_0 越大，则对应的静差率 S 越小，最小的理想空载转速 $n_{0\min}$ 将对应最大的静差率。综上所述，不难得出结论：如果一个调速系统最大的静差率（ $n_{0\min}$ 所对应的 S ）能满足设计对静态精度的要求，则该系统的静态精度就一定能满足设计要求。因此，设计系统时要求的静差率指的是最大静差率，即最小的理想空载转速