

高等学校教材

电力拖动自动控制系统

(第2版)

上海工业大学 陈伯时 主编

机械工业出版社

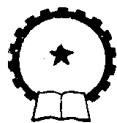
高等学校教材

电力拖动自动控制系统

(第2版)

上海工业大学 陈伯时 主编

1012/18



机械工业出版社

本书是根据 1988 年全国高等工业学校工业电气自动化专业教学指导委员会沈阳会议的决定编写的,也是 1981 年机械工业出版社出版的高等学校试用教材《自动控制系统》的修订本,内容包括直流和交流拖动控制系统。

本书继承了原《自动控制系统》教材的特点,遵循理论和实际相结合的原则,应用自动控制理论解决系统的分析和设计问题,以系统的控制规律为主线,由简入繁、由低及高地循序深入,主要讲述系统的静、动态性能 and 设计方法。

本书可作为高等工业学校工业电气自动化专业师生教材,也可供有关工程技术人员参考。

电力拖动自动控制系统

(重排本)

(第 2 版)

上海工业大学 陈伯时 主编

*

责任编辑:邱锦来 李卫东 韩雪清 版式设计:王 颖

封面设计:郭景云 责任校对:姚培新

责任印制:路琳

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

邮政编码:100037

(北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号)

北京市联华印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ · 印张 $20 \frac{1}{4}$ · 字数 485 千字

1996 年 5 月第 2 版第 16 次印刷

印数 328 001—345 000 定价:13.80 元

*

ISBN 7-111-03057-5/TP · 151 (课)

前 言

1981年机械工业出版社出版的高等学校试用教材《自动控制系统》已在国内使用了10年,得到了广大教师、同学和工程技术人员的充分肯定,也提出了不少宝贵的意见。与此同时,电力拖动控制技术发展迅速,可控关断的电力电子器件和由它实现的斩波与PWM技术正在中、小功率的直流拖动控制系统中逐步替代着晶闸管和相控整流的位置,各种交流电机调速系统和随动系统已经得到普遍应用而且还在日新月异地发展,微机数字控制系统已经日臻完善并开拓了变结构控制、自适应控制、自诊断技术等模拟系统难以达到的领域。因此,重新编写教材是十分必要的。鉴于“自动控制系统”范围很广,这门课程实际上只针对电力拖动的运动控制,所以本教材改用《电力拖动自动控制系统》这一名称。

1988年9月全国高等工业学校工业电气自动化专业教学指导委员会沈阳会议决定组织编写交直流拖动控制系统合在一起的新教材,并组成了以哈尔滨工业大学赵昌颖教授为首的评选组在全国范围内征稿。经投标和评选,1989年5月确定由我主编这本教材。经协商,决定请东南大学赵家璧教授主审。

电力拖动自动控制系统种类很多,如果面面俱到,势必形成繁琐的罗列,这是一般专业课程易犯的通病。本书继承了原《自动控制系统》教材的特点,遵循理论和实际相结合的原则,应用自动控制理论解决系统的分析和设计问题,以系统的控制规律为主线,由简入繁、由低及高地循序深入,主要讲授系统的静、动态性能和设计方法。关于具体的控制线路,限于课程学时和教材篇幅,只得割爱,而留给与本教材配合出版的《电力拖动自动控制系统习题例题集》中介绍。同时,正由于有这本辅助教材,本书中不再给出习题和思考题。

与原《自动控制系统》教材相比,本书主要改动和更新的内容如下:

(1) 仍以直流调速系统作为本书的基本内容,保留单闭环、多环、可逆系统的体系,加强对控制规律的提炼和阐述。取消原书第五章“电力拖动自动控制系统的工程设计方法”,将其动态设计内容分别纳入有关章节,对于调节器的工程设计方法则集中在第二章中介绍。

(2) 增设采用电力晶体管(GTR)的直流脉宽调速系统一章。

(3) 保留位置随动系统一章,改变其编写体系,着重介绍位置检测器、稳态误差分析和动态校正。

(4) 第二篇专述交流调速系统,其体系和直流系统一样,以分析系统的工作原理、阐明控制规律、静动态分析和设计为主。异步电动机调速系统按照对转差功率的处理分成三种类型,分别以变压调速、变压变频调速和串级调速为代表,分三章叙述。另外单设一章介绍同步电动机的变频调速系统。

(5) 异步电动机变压变频调速系统一章是交流调速的重点,着重于控制系统的分析和设计。对于变频器只作简要的概述,阐明其特点,仅对SPWM逆变器稍加详细分析,至于波形分析等细节以在“变流技术”课程中学习为宜。异步电机的非线性、多变量数学模型是很重要的内容,应该透彻地理解其性质,但由于问题比较复杂,考虑到学生的认识过程,不宜在该章一开始就介绍,因此放在“转差频率控制系统”后面推出,这时学生已经有更清楚地了解动

态数学模型的要求,提出这个问题就比较适时。至于动态设计,仍以简化成近似的线性单变量结构图后采用工程设计方法进行设计为主,而把应用现代多变量系统理论的设计方法留给研究生课程。

(6) 取消原书第六章“电力拖动自动控制系统中的一些非线性问题”。

(7) 微机数字控制技术是近代自动控制系统的主要方向,本应进行认真的探讨。鉴于各校本专业大部分设有“计算机控制技术”课,着重讲授微机应用。为避免重复,本课不再涉及。

本书按讲课70学时编写,由陈伯时主编,其中第七章的§7-3和第八章由上海交通大学陈敏逊教授编写,第三章和第五章由上海工业大学倪国宗副教授编写,其余各章、节均由陈伯时编写,倪国宗负责全书插图的绘制。清华大学韩曾晋教授曾参加编写《自动控制系统》一书,对本书自然有其不可磨灭的贡献,沈锡臣同志为本书第五章提供了原始资料,在此谨致衷心的感谢。

由于本人水平有限,错误或不当之处在所难免,殷切期望读者批评指正。

陈伯时

1991年4月

常用符号表

一、元件和装置用的文字符号(按国家标准GB7159—87)

A	放大器、调节器; 电枢绕组, A相绕组	G	发电机; 振荡器, 发生器
ACR	电流调节器	GAB	绝对值变换器
ADR	电流变化率调节器	GB	蓄电池
AE	电动势运算器	GD	驱动器
AER	电动势调节器	GE	励磁发电机
AFR	励磁电流调节器	GF	旋转式或静止式变频器; 函数发生器
AP	脉冲放大器	GFC	频率给定动态校正器
APR	位置调节器	G	给定积分器
AR	反号器	GM	调制波发生器
ASR	转速调节器	GS	同步发电机
ATR	转矩调节器	GT	触发装置
AVR	电压调节器	GTF	正组触发装置
A Ψ R	磁链调节器	GTR	反组触发装置
B	非电量—电量变换器	GVF	压频变换器
BIS	感应同步器	K	继电器, 接触器
BQ	位置变换器	KF	正向继电器
BR	旋转变压器	KMF	正向接触器
BRR	旋转变压接收器	KMR	反向接触器
BRT	转速传感器; 旋转变压发送器	KR	反向继电器
BS	自整角机	L	电感, 电抗器
BSR	自整角接收机	LS	饱和电抗器
BST	自整角发送机	M	电动机(总称)
C	电容器	MA	异步电动机
CD	电流微分环节	MD	直流电动机
D	数字集成电路和器件	MS	同步电动机
DHC	滞环比较器	MT	力矩电动机
DLC	逻辑控制器	N	运算放大器
DLD	逻辑延时环节	R	电阻器、变阻器
DPI	极性鉴别器	RP	电位器
DPT	转矩极性鉴别器	RV	压敏电阻器
DPZ	零电流检测器	SA	控制开关, 选择开关
DRC	环形分配器	SB	按钮开关
F	励磁绕组	SM	伺服电机
FA	具有瞬时动作的限流保护	T	变压器
FB	反馈环节	TA	电流互感器
FBS	测速反馈环节	TAFC	励磁电流互感器

} 必须区分时用

X

TC	控制电源变压器	VC	总称: 晶闸管整流装置
TG	测速发电机	VD	控制电路用电源的整流器
TI	逆变变压器	VF	二极管
TM	电力变压器, 整流变压器	VFC	正组晶闸管整流装置
TU	自耦变压器	VFC	励磁电流可控整流装置
TV	电压互感器	VR	反组晶闸管整流装置
TVD	直流电压隔离变换器	VST	稳压管
U	变换器, 调制器	VT	晶体管; 晶闸管
UI	逆变器	VTH	晶闸管(必须区分时用)
UPW	脉宽调制器	VTR	晶体管(必须区分时用)
UR	整流器	VVC	晶闸管交流调压器
URP	相敏整流器	YB	电磁制动器
V	开关器件: 二极管、晶体管、晶闸管等	YC	电磁离合器

二、常用缩写符号

CSI	电流源(型)逆变器(Current Source Inverter)	SOA	安全工作区(Safe Operation Area)
CVCF	恒压恒频(Constant Voltage Constant Frequency)	SPWM	正弦波脉宽调制(Sinusoidal PWM)
GTO	门极可关断晶闸管(Gate Turn-off Thyristor)	VCO	压控振荡器(Voltage-Controlled Oscillator)
GTR	电力晶体管(Giant Transistor)	VR	矢量旋转变换器(Vector Rotator)
P-MOSFET	场效应晶闸管(Power MOS Field Effect Transistor)	VSI	电压源(型)逆变器(Voltage Source Inverter)
PWM	脉宽调制(Pulse Width Modulation)	VVVF	变压变频(Variable Voltage Variable Frequency)

三、参数和物理量文字符号

A	面积	GD^2	飞轮惯量
a	线加速度; 特征方程系数	GM	增益裕度
B	磁通密度	h	开环对数频率特性中频宽
C	电容; 输出被控变量	I, i	电流, 电枢电流
C_e	直流电机在额定磁通下的电动势转速比	i	减速比
C_m	直流电机在额定磁通下的转矩电流比	I_d, i_d	整流电流
D	调速范围; 摩擦转矩阻尼系数; 脉冲数	i_f	励磁电流
E, e	反电动势, 感应电动势(大写为平均值或有效值, 小写为瞬时值, 下同); 误差	J	转动惯量
e_d	检测误差	K	控制系统各环节的放大系数(以环节符号为下角标); 闭环系统的开环放大系数
e_s	原理误差	K_a	加速度品质因数
e_t	负载扰动误差	$K_{b,s}$	自整角机放大系数
F	磁动势	K_e	直流电机电动势的结构常数
f	频率	K_g	减速器放大系数
G	重力	K_m	直流电机转矩的结构常数
g	重力加速度	K_{ph}	相敏整流器放大系数

K_v	速度品质因数	U_{ct}	触发装置控制电压
k	谐波次数; 振荡次数	U_d, u_d	整流电压
k_N	绕组系数	U_{dL}, u_{d0}	理想空载整流电压
L	电感, 自感	U_f, u_f	励磁电压
L_l	漏感	U_{pA}	相敏整流放大器输出电压
L_m	互感	U_s	电源电压
M	闭环系统频率特性幅值; 调制度	U_x	变量 x 的反馈电压(x 可用变量符号替代)
M_r	闭环系统幅频特性峰值	U_x^*	变量 x 的给定电压(x 可用变量符号替代)
m	整流电压(流)一周内的脉波数; 典型 I 型系统两个时间常数之比; 旋转变压器绕组有效匝数比	V	体积
N	匝数; 扰动量; 载波比	v	速度, 线速度
n	转速	$W(s)$	传递函数, 开环传递函数
n_0	理想空载转速; 同步转速	$W_{cl}(s)$	闭环传递函数
n_p	极对数	$W_{obj}(s)$	控制对象传递函数
P, p	功率	W_m	磁场储能
$p = \left(-\frac{d}{dt} \right)$	微分算子	X	电抗
P_m	电磁功率	x	机械位移
P_s	转差功率	Z	电阻抗
Q	无功功率	z	负载系数
R	电阻; 电枢回路总电阻; 交流电机绕组电阻	α	转速反馈系数; 可控整流器的控制角
R_a	直流电机电枢电阻	β	电流反馈系数; 可控整流器的逆变角
R_{rec}	整流装置内阻	γ	电压反馈系数; 相角裕度; (同步电动机反电势换流时的)换流提前角
S	视在功率	γ_0	空载换流提前角
s	转差率; 静差率	δ	转速微分时间常数相对值; 磁链反馈系数; 脉冲宽度; 换流剩余角
$s = \sigma + j\omega$	Laplace 变量	Δn	转速降落
T	时间常数; 开关周期; 感应同步器绕组节距	ΔU	偏差电压
t	时间	ΔU_d	正向管压降
T_c	脉宽调制载波的周期	$\Delta \theta$	失调角, 角差
T_e	电磁转矩	ζ	阻尼比
T_L	负载转矩	η	效率
T_i	电枢回路电磁时间常数	θ	电角位移; 可控整流器的导通角
T_m	机电时间常数	θ_m	机械角位移
T_o	滤波时间常数	λ	电机允许过载倍数
t_{off}	关断时间	μ	磁导率; 换流重叠角
T_{pA}	相敏整流器滤波时间常数	ρ	占空比; 电位器的分压系数
T_s	晶闸管装置平均失控时间	σ	漏磁系数
t_s	调节时间	$\sigma\%$	超调量
U, u	电压, 电枢供电电压	τ	时间常数, 积分时间常数
U_b	基极驱动电压	Φ	磁通
U_{bs}	自整角机输出电压	Φ_m	每极气隙磁通量
		φ	相位角, 阻抗角; 相频
		Ψ, ψ	磁链

X

Ω	机械角转速	α_o	开环特性截止频率
ω	角转速, 角频率	ω_n	二阶系统的自然振荡频率
ω_b	闭环特性通频带	ω_s	转差角转速

四、常用下角标

<i>abs</i>	绝对值(absolute)	<i>max</i>	最大值(maximum)
<i>cdd</i>	附加(additional)	<i>min</i>	最小值(minimum)
<i>av</i>	平均值(average)	<i>n,nom</i>	额定值, 标称值(nominal)
<i>b</i>	偏压(bias); 基准(basic)	<i>o</i>	开路(open circuit)
<i>b,bal</i>	平衡(balance)	<i>obj</i>	控制对象(object)
<i>bl</i>	堵转, 封锁(block)	<i>off</i>	断开(off)
<i>br</i>	击穿(break down)	<i>on</i>	闭合(on)
<i>c</i>	环流(circulating current); 控制(control)	<i>op</i>	开环(open loop)
<i>cl</i>	闭环(closed)	<i>p</i>	脉动(pulse)
<i>com</i>	比较(compare); 复合(combination)	<i>par</i>	并联, 分路(parallel)
<i>cr</i>	临界(critical)	<i>ph</i>	相值(phase)
<i>d</i>	延时, 延滞(delay); 驱动(drive)	<i>R</i>	合成(resultant)
<i>ex</i>	输出, 出口(exit)	<i>r</i>	转子(rotor); 上升(rise); 反向(reverse)
<i>f,fin</i>	終了(final)	<i>r,ref</i>	参考(reference)
<i>f</i>	正向(forward); 磁场(field)	<i>rec</i>	整流器(rectifier)
<i>g</i>	气隙(gap)	<i>s</i>	定子(stator); 电源(source)
<i>in</i>	输入, 入口(input)	<i>s,ser</i>	串联(series)
<i>ini,0</i>	初始(initial)	<i>sa</i>	锯齿波(saw teeth)
<i>i,inv</i>	逆变器(inverter)	<i>syn</i>	同步(synchronous)
<i>k</i>	短路	<i>t</i>	力矩(torque); 触发(trigger); 三角波(triangular wave)
<i>L</i>	负载(Load)	<i>1</i>	一次, 定子边
<i>l</i>	线值(line); 漏磁(leakage)	<i>2</i>	二次, 转子边
<i>lim</i>	极限, 限制(limit)	∞	稳态值, 无穷大处
<i>m</i>	极限值, 峰值, 励磁(magnetizing)		

目 录

第一篇 直流调速系统和随动系统

第一章 闭环控制的直流调速系统2

§1-1 直流调速系统用的可控直流电源2

一、旋转变流机组2

二、静止可控整流器3

三、直流斩波器和脉宽调制变换器4

§1-2 晶闸管-电动机系统的特殊问题6

一、触发脉冲相位控制6

二、电流脉动的影响及其抑制措施8

三、电流波形的连续和断续8

四、晶闸管-电动机系统的机械特性9

§1-3 反馈控制闭环调速系统的稳态分析和设计10

一、转速控制的要求和调速指标10

二、开环调速系统的性能和存在的问题12

三、闭环调速系统的组成及其静特性13

四、开环系统机械特性和闭环系统静特性的比较14

五、反馈控制规律16

六、反馈控制调速系统的主要部件和稳态参数计算17

七、限流保护——电流截止负反馈21

八、小结23

§1-4 反馈控制闭环调速系统的动态分析和设计24

一、反馈控制闭环调速系统的动态数学模型24

二、稳定条件29

三、动态校正——PI调节器设计30

四、小结35

§1-5 无静差调速系统和积分、比例积分控制规律36

一、积分调节器和积分控制规律36

二、比例积分控制规律33

三、稳态抗扰误差分析39

四、无静差调速系统举例及稳态参数

计算41

§1-6 电压反馈电流补偿控制的调速

系统43

一、电压负反馈调速系统43

二、电流正反馈和补偿控制规律44

三、电流补偿控制调速系统的数学模型和稳定条件47

第二章 多环控制的直流调速系统48

§2-1 转速、电流双闭环调速系统及其

静特性48

一、问题的提出48

二、转速、电流双闭环调速系统的组成49

三、稳态结构图和静特性50

四、各变量的稳态工作点和稳态参数计算51

§2-2 双闭环调速系统的动态性能51

一、动态数学模型51

二、起动过程分析52

三、动态性能和两个调节器的作用53

四、调节器的设计问题55

五、小结55

§2-3 调节器的工程设计方法56

一、工程设计方法的基本思路56

二、典型系统57

三、控制系统的动态性能指标58

四、典型 I 型系统参数和性能指标的关系60

五、典型 II 型系统参数和性能指标的关系64

六、调节器结构的选择和传递函数的近似处理——非典型系统的典型化68

七、调节器最佳整定设计法72

§2-4 按工程设计方法设计双闭环系统

的电流调节器和转速调节器·····	76	三、可控环流的可逆调速系统·····	114
一、电流调节器的设计·····	76	§3-5 无环流可逆调速系统·····	116
二、转速调节器的设计·····	80	一、逻辑控制的无环流可逆调速系统·····	116
三、转速调节器退饱和时转速超调量 的计算·····	83	二、错位控制的无环流可逆调速系统·····	124
四、设计举例·····	86	第四章 直流脉宽调速系统 ·····	127
§2-5 转速超调的抑制——转速微分负 反馈·····	90	§4-1 脉宽调制变换器·····	127
一、问题的提出·····	90	一、不可逆PWM变换器·····	128
二、带转速微分负反馈双闭环调速系 统的基本原理·····	90	二、可逆PWM变换器·····	130
三、退饱和时间和退饱和转速·····	92	§4-2 脉宽调速系统的开环机械特性·····	133
四、转速微分反馈参数的工程设计方 法·····	92	§4-3 脉宽调速系统的控制电路·····	134
五、带转速微分负反馈双闭环调速系 统的抗扰性能·····	93	一、脉宽调制器·····	134
六、小结·····	94	二、逻辑延时环节·····	136
§2-6 三环调速系统·····	94	三、基极驱动器·····	136
一、带电流变化率内环的三环调速系 统·····	94	§4-4 晶体管脉宽调速系统的特殊问题·····	137
二、带电压内环的三环调速系统·····	96	一、电流脉动量和转速脉动量·····	137
§2-7 弱磁控制的直流调速系统·····	99	二、脉宽调制器和PWM变换器的传 递函数·····	142
一、电枢电压与励磁配合控制·····	99	三、电力晶体管的安全工作区和缓冲 电路·····	142
二、非独立控制励磁的调速系统·····	99	四、电力晶体管的开关过程、开关损 耗和最佳开关频率·····	147
第三章 可逆调速系统 ·····	102	五、泵升电压限制电路·····	150
§3-1 晶闸管-电动机系统的可逆线 路·····	102	第五章 位置随动系统 ·····	151
一、电枢反接可逆线路·····	102	§5-1 位置随动系统概述·····	151
二、励磁反接可逆线路·····	103	一、位置随动系统的应用·····	151
§3-2 晶闸管-电动机系统的回馈制动·····	104	二、位置随动系统的主要组成部件及 其工作原理·····	151
一、晶闸管装置的整流和逆变状态·····	104	三、位置随动系统与调速系统的比较·····	152
二、电动机的发电回馈制动·····	106	四、位置随动系统的分类·····	153
三、如何在V-M系统中实现发电回馈 制动·····	106	§5-2 位置信号的检测·····	154
§3-3 两组晶闸管可逆线路中的环流·····	107	一、自整角机(BS)·····	154
一、环流及其种类·····	107	二、旋转变压器(BR)·····	157
二、直流平均环流与配合控制·····	108	三、感应同步器(BIS)·····	158
三、瞬时脉动环流及其抑制·····	109	四、光电编码盘·····	159
§3-4 有环流可逆调速系统·····	110	§5-3 自整角机位置随动系统及其设计·····	161
一、 $\alpha=\beta$ 配合控制的有环流可逆调速 系统·····	110	一、自整角机位置随动系统的组成和 数学模型·····	161
二、制动过程分析·····	111	二、位置随动系统的稳态误差分析及 参数计算·····	164
		三、位置随动系统的动态校正·····	172
		四、小结·····	187

第二篇 交流调速系统

第六章 交流调速的基本类型和交流变

压调速系统 189

§6-1 交流调速的基本类型 190

§6-2 闭环控制的交流变压调速系统——

一种转差功率消耗型调速系统 190

一、异步电动机改变电压时的机械特

性 191

二、闭环控制的变压调速系统及其静

特性 192

三、近似的动态结构图 193

第七章 异步电动机变压变频调速系统

(VVVF系统)——转差功率

不变型的调速系统 197

§7-1 变频调速的基本控制方式 197

一、基频以下调速 198

二、基频以上调速 198

§7-2 静止式变频装置 199

一、间接变频装置(交-直-交变频装

置)..... 199

二、直接变频装置(交-交变频装置)..... 200

三、电压源和电流源变频器 201

§7-3 正弦波脉宽调制(SPWM)逆变

器 202

一、SPWM逆变器的工作原理 203

二、SPWM逆变器的同步调制和异步

调制 208

三、SPWM的控制模式及其实现 209

四、高开关频率的电流滞环控制SPWM

逆变器 213

§7-4 异步电动机电压、频率协调控制

的稳态机械特性 215

一、恒压恒频时异步电动机的机械特

性 215

二、电压、频率协调控制下的机械特

性 215

三、小结 218

§7-5 转速开环、恒压频比控制的变频

调速系统 218

一、转速开环的交-直-交电压源变频

调速系统 219

二、转速开环的交-直-交电流源变频

调速系统 225

§7-6 转速闭环、转差频率控制的变频

调速系统 228

一、转差频率控制的基本概念 228

二、转差频率控制规律 229

三、转差频率控制的变频调速系统 230

四、优点与不足 231

五、近似动态结构图 232

§7-7 异步电动机的多变量数学模型和

坐标变换 233

一、异步电动机动态数学模型的性质 234

二、三相异步电动机的多变量数学模

型 235

三、坐标变换和变换阵 239

四、异步电动机在任意二相旋转坐标

系上的数学模型 246

五、异步电动机在二相静止坐标系上

的数学模型 253

六、异步电动机在二相同步旋转坐标

系上的数学模型 253

七、异步电动机在二相同步旋转坐标

系上按转子磁场定向的数学模型——

M、T坐标系数学模型 254

八、小结 255

§7-8 矢量控制的变频调速系统 255

一、异步电机的坐标变换结构图和等

效直流电机模型 255

二、矢量控制系统的构想 256

三、矢量控制基本方程式 257

四、磁链开环、转差型矢量控制的交-

直-交电流源变频调速系统..... 253

五、转子磁链观测模型 259

六、转速、磁链闭环控制的电流滞环

型PWM变频调速系统 261

七、矢量控制系统中调节器的设计问

题 261

第八章 绕线转子异步电动机串级

调速系统——转差功率回

馈型的调速系统 264

§8-1 串级调速原理及其基本类型	264
一、异步电动机转子附加电动势时的	
二、附加电动势的获得与电气串级调速系统	265
三、串级调速系统的其它类型	267
§8-2 串级调速系统性能的讨论	268
一、串级调速机械特性	268
二、逆变变压器	268
三、串级调速装置的容量	269
四、串级调速系统的效率	270
§8-3 异步电动机在串级调速工作时的机械特性	272
一、异步电动机转子整流电路的电压与电流	272
二、异步电动机在串级调速时的电磁转矩	274
三、异步电动机在串级调速工作时的机械特性方程式	278
§8-4 具有双闭环控制的串级调速系统	279
一、闭环控制系统的组成	279
二、串级调速系统的动态数学模型	279
三、调速系统调节器参数的确定	281
§8-5 超同步串级调速系统	282
一、超同步串级调速工作原理	283
二、超同步串级调速系统的再生制动工作	283

工作	265
§8-6 串级调速系统的几个特殊问题	284
一、串级调速系统的功率因数及其改善途径	284
二、串级调速系统的控制方式	288
第九章 同步电动机的变频调速系统	290
§9-1 同步电动机的变频调速	290
§9-2 他控变频同步电动机调速系统和矢量控制	291
一、转速开环恒压频比控制的同步电动机群调速系统	291
二、由交-交变频器供电的大型低速同步电动机调速系统	291
三、同步电动机的矢量控制系统	292
四、同步电动机的多变量数学模型	295
§9-3 自控变频同步电动机(无换向器电机)调速系统	297
一、工作原理	297
二、控制系统	301
附录	305
1 二阶系统的动态性能指标	305
2 典型Ⅰ型系统的 M_{rmin} 准则——式(2-32)、式(2-33)及式(2-35)的证明	308
参考文献	309

第一篇 直流调速系统和随动系统

直流电动机具有良好的起、制动性能，宜于在广范围内平滑调速，在轧钢机、矿井卷扬机、挖掘机、海洋钻机、金属切削机床、造纸机、高层电梯等需要高性能可控电力拖动的领域中得到了广泛的应用。近年来，交流调速系统发展很快，然而直流拖动控制系统毕竟在理论上和实践上都比较成熟，而且从反馈闭环控制的角度来看，它又是交流拖动控制系统的基础。所以首先应该很好地掌握直流系统。

从生产机械要求控制的物理量来看，电力拖动自动控制系统有调速系统、位置随动系统、张力控制系统、多电动机同步控制系统等多种类型，而各种系统往往都是通过控制转速(更本质地说，是控制电动机的转矩)来实现的，因此调速系统是最基本的拖动控制系统。

直流电动机的转速和其它参量的关系可用式(1-1)表达

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

式中 n ——转速，单位为r/min；

U ——电枢电压，单位为V；

I ——电枢电流，单位为A；

R ——电枢回路总电阻，单位为 Ω ；

Φ ——励磁磁通，单位为Wb；

K_e ——由电机结构决定的电动势常数。

由式 (1-1)可以看出，有三种方法调节电动机的转速。

(1) 调节电枢供电电压 U 。

(2) 减弱励磁磁通 Φ 。

(3) 改变电枢回路电阻 R 。

对于要求在一定范围内无级平滑调速的系统来说，以调节电枢供电电压的方式为最好。改变电阻只能有级调速；减弱磁通虽然能够平滑调速，但调速范围不大，往往只是配合调压方案，在基速(即电动机额定转速)以上作小范围的升速。因此，自动控制的直流调速系统往往以变压调速为主。

以位移或转角为被调量的系统是位置随动系统，一般在调速系统的基础上添加位置控制环就能实现。

第一章 闭环控制的直流调速系统

内 容 提 要

开环控制的直流调速方法已在《电力拖动》课中讲授,本课以讲授闭环控制系统为主。本章着重讨论基本的闭环控制系统及其分析与设计方法。在直流调速系统中主要采用变电压调速, § 1-1首先介绍三种可控的直流电源,其中目前应用最广的是晶闸管可控整流器,已在《半导体变流技术》课程中学过,在此基础上, § 1-2只重点地归纳晶闸管-电动机系统的几个特殊问题。 § 1-3开始研究反馈控制的闭环调速系统,首先研究它的稳态分析和设计方法,并总结反馈控制规律和闭环调速系统的几个实际问题; § 1-4则应用自动控制理论解决系统的动态分析和设计方法。 § 1-5讨论无静差调速系统,并总结积分控制规律和比例积分控制规律。 § 1-6介绍采用电压反馈和电流补偿的调速系统,并总结补偿控制规律。

§1-1 直流调速系统用的可控直流电源

变电压调速是直流调速系统用的主要方法,调节电枢供电电压需要有专门的可控直流电源。常用的可控直流电源有以下三种:

(1) 旋转变流机组——用交流电动机和直流发电机组成机组,以获得可调的直流电压。

(2) 静止可控整流器——用静止的可控整流器,例如晶闸管可控整流器,以获得可调的直流电压。

(3) 直流斩波器和脉宽调制变换器——用恒定直流电源或不控整流电源供电,利用直流斩波器或脉宽调制变换器产生可变的平均电压。

下面分别对各种可控直流电源以及由它供电的直流调速系统作概括性的介绍。

一、旋转变流机组

图1-1中给出了旋转变流机组和由它供电的直流调速系统原理图。由交流电动机(异步电动机或同步电动机)拖动直流发电机G实现变流,由发电机给需要调速的直流电动机M供电,调节发电机的励磁电流 i_f 即可改变其输出电压 U ,从而调节电动机的转速 n 。这样的调速系统简称G-M系统,在国际上通称Ward-Leonard系统。为了供给直流发电机和电动机的励磁,通常专门设置一台直流励磁发电机GE,可装在变流机组同轴上,也可另外单用一台交流电动机拖动。

对系统的调速性能要求不高时, i_f 可直接由励磁电源供电,要求较高的闭环调速系统一般都应通过放大装置进行控制。G-M系统的放大装置多采用电机型放大器(如交磁放大机和磁放大器,需要进一步提高放大系数时还可增设电子放大器作为前级放大。如果改变 i_f 的方向,则 U 的极性和 n 的转向都跟着改变,所以G-M系统的可逆运行是很容易实现的。图1-

2绘出了采用变流机组供电时电动机可逆运行的机械特性。由图可见,无论正转减速还是反转减速时都能够实现回馈制动,因此G-M系统是在允许转矩范围之内四象限运行的系统。图1-2右上角是表示四象限运行的简单示意图。

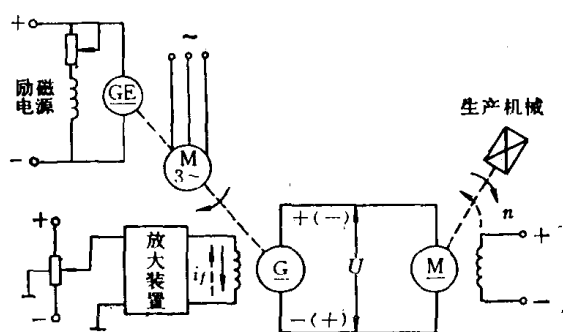


图1-1 旋转变流机组供电的直流调速系统(G-M系统)

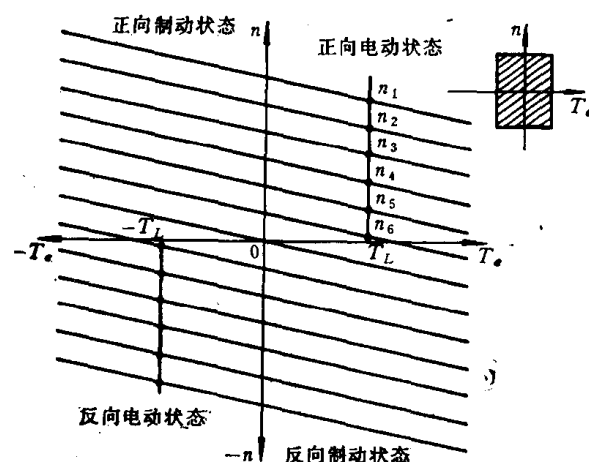


图1-2 G-M系统的机械特性

机组供电的直流调速系统在50年代曾广泛地使用着,至今在尚未进行设备更新的地方仍沿用这种系统。由于该系统需要旋转变流机组,至少包含两台与调速电动机容量相当的旋转电机,还要一台励磁发电机,因而设备多、体积大、费用高、效率低、安装须打地基、运行有噪声、维护不方便。为了克服这些缺点,在50年代开始采用汞弧整流器(大容量时)和闸流管(小容量时)这样的静止变流装置来代替旋转变流机组,形成所谓的离子拖动系统。到了60年代又让位给更为经济可靠的晶闸管整流器。

二、静止可控整流器

如上所述,离子拖动系统是最早应用的静止变流装置供电的直流调速系统。它虽然克服了旋转变流机组的许多缺点,而且还缩短了响应时间,但汞弧整流器造价较高,维护麻烦,特别是水银如果泄漏,将会污染环境,危害人身健康。

1957年,晶闸管(俗称可控硅整流元件,简称“可控硅”)问世,到了60年代,已生产出成套的晶闸管整流装置,使变流技术产生了根本性的变革,开始进入晶闸管时代。到今天,晶闸管-电动机调速系统(简称V-M系统,又称静止的Ward-Leonard系统)已成为直流调速系统的主要形式。图1-3是V-M系统的简单原理图,图中V是晶闸管可控整流器,它可以是单相、三相或更多相数,半波、全波、半控、全控等类型,通过调节触发装置GT的控制电压来移动触发脉冲的相位,即可改变整流电压 U_d ,从而实现平滑调速。和旋转变流机组及离子拖动变流装置相比,晶闸管整流装置不仅在经济性和可靠性上都有很大提高,而且在技术性能上也显示出较大的优越性。由图1-4可见,晶闸管可控整流器的功率放大倍数在 10^4 以上,其门极电流可以直接用晶体三极管来控制,不再象直流发电机那样需要较大功率的放大装置。在控制作用的快速性方面,变流机组是秒级,而晶闸管整流器是毫秒级,这将会大大提高系统的动态性能。

晶闸管整流器也有它的缺点。首先,由于晶闸管的单向导电性,它不允许电流反向,给系统的可逆运行造成困难。由半控整流电路构成的V-M系统只允许单象限运行(图1-5a);

全控整流电路可以实现有源逆变, 允许电动机工作在反转制动状态, 因而能够获得二象限运行 (图1-5b)。必须实现四象限运行时 (图1-5c), 只好采用正、反两组全控整流电路, 所用变流设备要增多一倍, 这种V-M可逆调速系统在第三章中将详细讨论。

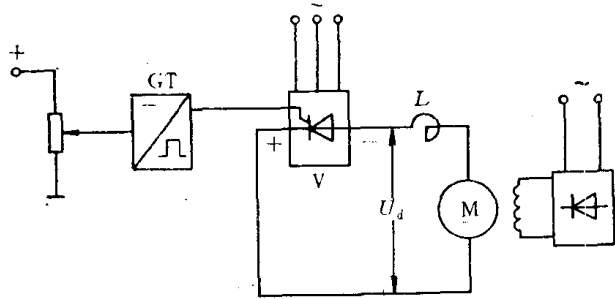


图1-3 晶闸管可控整流器供电的直流调速系统 (V-M系统)

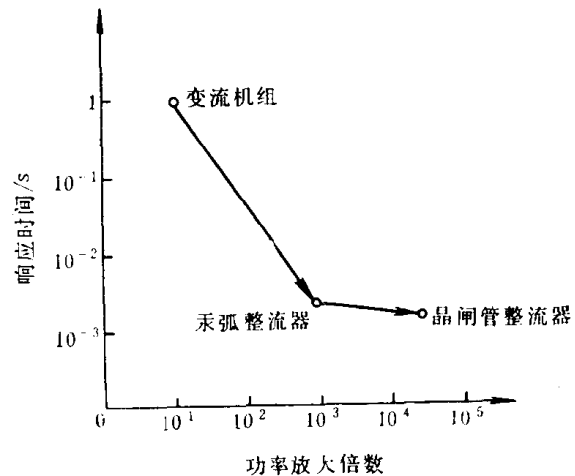


图1-4 各种变流装置技术性能的比较

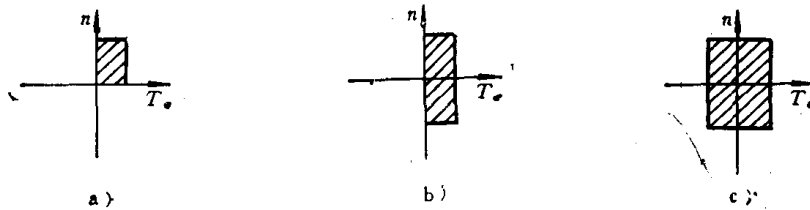


图1-5 V-M系统的运行范围

a) 单象限运行 b) 二象限运行 c) 四象限运行

晶闸管的另一个缺点是, 元件对过电压、过电流以及过高的 du/dt 和 di/dt 都十分敏感, 其中任一指标超过允许值都可能在很短时间内损坏元件, 因此必须有可靠的保护装置和符合要求的散热条件, 而且在选择元件时还应留有足够的余量。只要元件质量过关、装置设计合理、保护设施齐备, 晶闸管装置的运行就十分可靠, 如果不是这样, 就可能常出事故, 给维护运行带来不少麻烦。

最后, 当系统处在深调速状态, 即在较低速运行时, 晶闸管的导通角很小, 使得系统的功率因数很低, 并产生较大的谐波电流, 引起电网电压波形畸变, 殃及附近的用电设备。如果采用晶闸管调速的设备在电网中所占的容量比重较大, 就会造成所谓的“电力公害”。在这种情况下, 必须增设无功补偿和谐波滤波装置^[10]。

三、直流斩波器和脉宽调制变换器

在干线铁道电力机车、工矿电力机车、城市电车和地铁电机车等电力牵引设备上, 常采用直流串励或复励电动机, 由恒压直流电源供电。过去多用切换电阻来控制电车的起动、制动和调速, 电能电阻中损耗很大。晶闸管也可用来控制直流电压, 这就是直流斩波器, 或称直流调压器^[4, 10]。

采用晶闸管的直流斩波器基本原理示于图1-6a。与整流电路不同的是, 在这里晶闸管VT不是受相位控制, 而是工作在开关状态。当VT被触发导通时, 电源电压 U_s 加到电动机上,