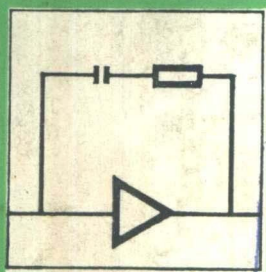
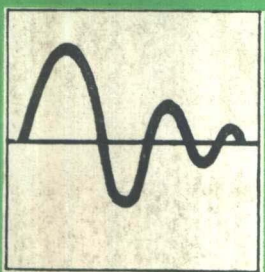
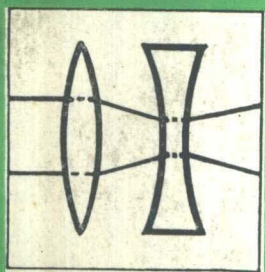
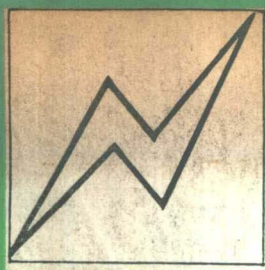
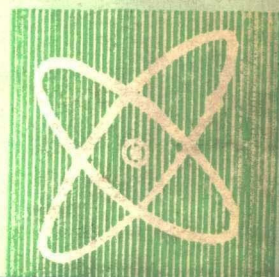


高等学校试用教材



自动控制系统

清华大学陈伯时 主编



机械工业出版社

高等学校试用教材

自动控制系统

清华大学陈伯时 主编



机械工业出版社

自动控制系统

清华大学陈伯时 主编

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(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 787×1092 1/16·印张17 $\frac{1}{4}$ ·字数 412 千字

1981年7月重庆第一版·1981年7月重庆第一次印刷

印数 00,001—43,000·定价 1.80 元

*

统一书号: 15033·5070

前 言

本书是根据1978年4月一机部在天津召开的高等学校对口专业座谈会制订的工业电气自动化专业教学计划和同年5月在黄山召开的工业电气自动化专业教材编写会议制订的《自动控制系统》教材编写大纲编写的。

现代的自动控制系统范围很广，本书着重讨论的是电力拖动的反馈控制系统。全书共分六章：第一、二、三章是调速系统，包括单闭环调速系统、多环调速系统、励磁控制系统和可逆调速系统，第四章是位置随动系统，第五章是对调速系统和随动系统都能适用的工程设计方法，第六章是电力拖动自动控制系统中的一些非线性问题。本书是在先修课程《电机及拖动基础》、《半导体变流技术》、《自动控制理论》的基础上编写的。关于数字控制和计算机控制的内容另在专门的教材中编写，交流调速系统、自适应控制系统等则列入选修课程中。本书可作为高等院校工业自动化专业及其它相近专业的教材，也可供厂矿和研究设计单位工程技术人员参考。

本书由清华大学自动化系陈伯时副教授和韩曾晋副教授编写，陈伯时任主编。其中，第一、二、三章由陈伯时编写，第四、六章由韩曾晋编写，第五章由韩曾晋、陈伯时合写，沈锡臣同志也参加了工作。南京工学院赵家璧副教授负责主审。参加审阅的有哈尔滨工业大学夏德铃教授、西安交通大学黄俊副教授、上海市业余工业大邬信鹤副教授、安徽工学院李仁副教授、南京工学院严学高、冷增祥、钟福金同志、哈尔滨建工学院周镇鲁同志、镇江农机学院王明良同志和北京工业大学一分校邹定国同志，在审阅中提出了许多宝贵意见，在此谨致衷心的感谢。

由于编写者的思想水平、业务造诣和教学经验都很有限，错误或不当之处在所难免，殷切期望广大读者批评指正。

1980年5月

关于编写和使用本书的说明

在我国社会主义的四个现代化建设中,自动控制系统无疑起着重要的作用。现代自动控制系统包含的内容很广,其中最基本的是开环(逻辑)控制系统和闭环(反馈)控制系统,本书着重讨论后者。反馈控制系统所适用的对象也很广泛,在机械、冶金、热工、化工、电力、交通等行业中都有应用,如果面面俱到,势必使教材臃肿不堪,或只能蜻蜓点水,不解决问题。考虑到一机部对口的工业电气自动化专业的情况,本书着重讨论电力拖动的反馈控制系统,具体来说,就是调速系统和位置随动系统。在叙述中,从实际问题出发,深入讨论基本原理和典型线路,以及静、动态特性的分析和设计,以期收举一反三之效。

关于反馈控制的概念、自动控制系统的基本分析方法和综合方法,已在《自动控制理论》课中讲授。本书的任务是:作为《自动控制理论》的后续课程,重点分析实际控制系统的特点,应用控制理论解决实际系统提出的问题,并在此过程中提高理论认识。关于《自动控制系统》与《自动控制理论》课程的关系,多年来在教学中做过各种不同的安排。一种做法是先学控制系统,其中对动态问题只作定性的分析,为后面系统地学习控制理论奠定物理基础。这样做,缺少了运用控制理论解决实际问题的教学过程,只靠学生毕业后自己去摸索,因此长期以来在工厂中有“调节原理无用”或“调节原理不好用”之说,实践证明,这是不符合我国工矿企业对大学毕业生的要求的。另一种做法是把“理论”与“系统”合并成一门课,使理论和实际密切结合,这虽然不错,但却使课程过于冗长,而且为了分析具体问题,容易把理论体系分割得支离破碎,影响学习效果。鉴于上述经验教训,经一机部对口的工业电气自动化专业教材会议决定,采取先系统地学习自动控制理论(关于其物理基础可在该课内举例来解决),然后再学习自动控制系统。这样,赋予本课的任务就如上所述,和过去的控制系统课程大不相同了。

综观全书,我们希望它能够具备以下特点:

一、不是逐个地罗列和描述不同的系统,而是从满足生产要求出发,站在控制规律的高度上,遵循由简到繁、由低及高的线索,逐步深入地认识各种系统。

二、对于控制系统的动态过程,少作烦琐的定性分析,而是在作了一定的基本分析掌握其物理概念之后,着重运用控制理论的工具,如传递函数、稳定判据、频率特性、描述函数等等,来研讨系统的特性。

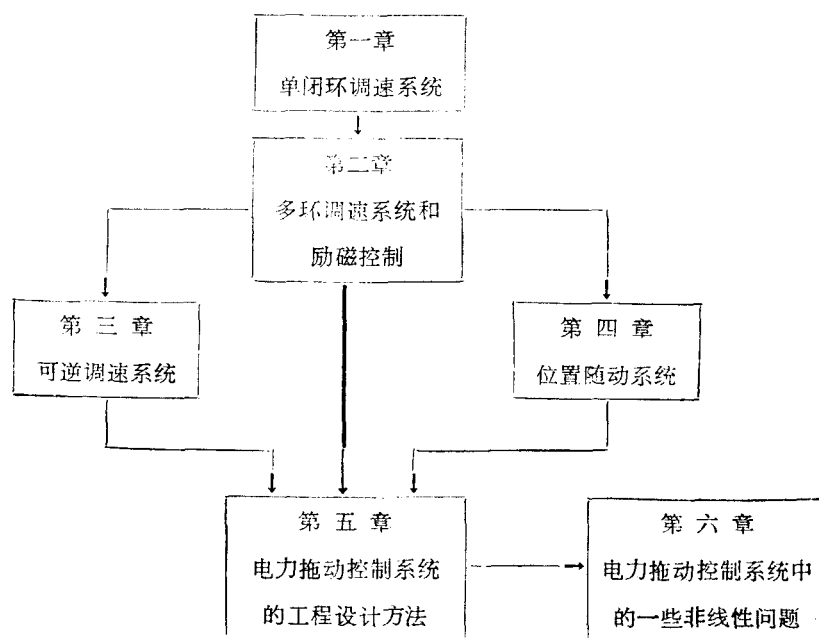
三、在动态设计中,充分运用频率法,特别是对数频率特性,并在此基础上,发展出一套简便实用概念清楚的工程设计方法。它综合了“振荡指标法”和“电子最佳调节原理”等方法的优点,取长补短,自成一格,务求做到:①理论与概念明确易懂;②计算方法简明好记;③不仅给出参数计算的公式,而且指明参数调整的趋向;④对一般的调速系统、随动系统以及类似的反馈控制系统都能适用。

四、在强调提高理论性的同时,不能削弱本课程的实践性,否则就变成仅仅是控制理论的例证了。实践性体现在:①主要的控制系统都有典型线路,并介绍以前未学过的主要元、部件;②能定量地解决工程设计问题;③重要的实际问题都有所阐述,并能运用理论去解决

它们。但本书不拟涉及具体的调试方法和特殊的设计经验，留待有关的实验指示书或设计指导书中去讨论。

此外，在叙述方法和语言上，尽量做到通俗易懂，深入浅出，以期便于自学，不一定每章、每节都必须经教师讲授不可，同时也有利于广大工程技术人员的参考。

全书共六章，视不同情况，讲授的内容和次序可作多种选择。例如，可以六章全学，也可按一、二、四、五章的顺序或按一、二、三、五章的顺序学习，第六章作为深入一步的问题可供选学，如须更精练些，也可只学第一、二、五章。建议讲授或阅读的次序如下：



以上编排只是初次尝试，由于我们的思想水平、业务造诣和教学经验都很肤浅，虽然对自己提出了上述要求，许多地方还没有做到，错误或不当之处在所难免，希望广大读者批评指正。

编 者

常用符号表

一、参数和物理量常用符号

A	整流电压系数
B	磁通密度
C	电容
C_e	电机电势常数 (当磁通为额定值时)
$C_{e\omega d}$	伺服电动机电势常数
$C_{e\omega i}$	测速发电机电势常数
C_f	运算放大器消振电容
C_m	电机转矩常数 (当磁通为额定值时)
D	调速范围; 齿轮半间隙
D_f	粘滞摩擦系数
E	电势; 电机反电势
E_{ed}	额定电势
E_2	变压器副边额定相电压 (有效值)
e_m	自整角机转子激磁电压
e_s	随动系统跟踪阶跃输入的稳态误差
$e_{\omega a}$	随动系统跟踪加速度输入的稳态误差
$e_{\omega v}$	随动系统跟踪速度输入的稳态误差
F	扰动量
f	频率
f_c	时钟脉冲频率
f_i	相位反馈电压频率
f_r	指令脉冲频率
GD^2	飞轮惯量
H	弹性变形距离
$H(s)$	反馈校正传递函数
h	控制系统开环对数频率特性的中频宽
I	电流; 电枢电流
I_a, i_a	整流电流 (大写为平均值, 小写为瞬时值, 下同)
I_{di}	电流截止临界电流
I_{dm}	最大整流电流
I_{dv}	电动机堵转电流
I_{ed}	额定电流
I_i	反组电流
I_{Ls}	稳态负载电流

I_{Δ}	给定环流
I_{Δ}	脉动环流
$I_{\Delta c}$	脉动环流平均值
I	励磁电流
I_z	正组电流
i	传动比
i_0	最佳传动比
J	转动惯量
J_a	电机转动惯量
J_l	负载转动惯量
K	闭环系统的开环总放大倍数, 开环增益; 弹性常数
K_a	随动系统的加速度品质因数
K_b	自整角机接收器磁通与发送器电势的比例系数
K_c	自整角机定子与转子绕组电势的比例系数
K_e	电机的电势结构常数
K_{ti}	霍尔元件常数
K_f	电流环开环放大倍数
K_i	电流调节器比例系数
K_m	电机的转矩结构常数
K_N	转速环开环放大倍数
K_n	转速调节器比例系数
K_p	比例系数, 比例放大倍数
K_{PWM}	PWM放大器的电压放大倍数
K_s	可控硅装置放大倍数
K_t	传动机构的弹性系数
K_v	运算放大器的电压放大倍数
K_v	随动系统的速度品质因数
L	电感; 电枢回路总电感
M	转矩; 闭环系统频率特性的幅值
M_L	负载转矩
M_p	反馈控制系统的振荡指标 (闭环幅频特性的谐振峰值)
m	电流环两个时间常数的比值, $m=T_{\Sigma 1}/T_i$
N	非线性特性的描述函数
n	转速; 粗-精测自整角机升速比

n_{e0}	额定转速	U_{d01}	反组空载整流电压
n_k	电流断续段和连续段的临界转速	U_{d02}	正组空载整流电压
n_0	理想空载转速	$U_{a\lambda}$	等效电源电压
n_{sc}	伺服电动机转速	U_{ea}	额定电压
P	功率	U_F, U_{LK2}	反组脉冲封锁信号 (开关量)
P_{en}	额定功率	U_f	反馈电压
q	整流电压一周内的波头数	U_{fb}	电流变化率反馈电压
R	电阻; 电枢回路总电阻	U_{fe}	电势反馈电压
R'	电流断续时电枢回路等效总电阻	U_{fi}	电流反馈电压
R_b	变压器绕组电阻; 偏置电阻	U_{fi}	励磁电流反馈电压
R_c	电枢串联电阻	U_{fn}	转速反馈电压
R_{du}	电位器电阻	U_{fv}	电压反馈电压
R_d	等效电阻	U_g, U_{ga}	给定电压
R	运算放大器消振电路电阻	U_{gb}	电流变化率调节器给定电压
R_{L2}	负载电阻	U_{g1}	电流调节器给定电压
R_h	变压器漏抗换向压降等效电阻	U_{gn}	转速调节器给定电压
R_{it}	可控硅整流装置内阻	U_{g2}	电压调节器给定电压
R_s	电枢电阻	U_H	霍尔电压
R_{s1}	输入电阻	U_k	电平检测器环宽电压
R_x	限流电阻	U_l	零电流检测信号 (开关量)
R_0	运算放大器输入回路电阻	U_{ih}	环流给定电压
s	静差率	U_k	触发装置的控制电压
T	时间常数; 感应同步器的节距	U_k	反组控制电压
T_1	控制系统抵抗扰动的恢复时间	U_{k2}	正组控制电压
T_2	电磁时间常数	U_{li}	发电机励磁电压
T_m	机电时间常数	U_M	转矩极性鉴别信号 (开关量)
T_0	滤波时间常数	U_0	电压调节器输出选触信号电压
T_{01}	电流反馈滤波时间常数	U_1	PWM放大器直流电源电压
T_{0n}	转速反馈滤波时间常数	U_{oe}	输出电压
T_p	控制系统跟随给定的过渡过程时间	U_s	测速发电机电压
T_s	可控硅失控时间 (滞后时间)	U_{sr}	输入电压
T_Σ	小时间常数之和	U_w	稳压管稳压值
$T_{\Sigma 1}$	电流环等效小时间常数	U_y, u_y	自整角机输出电压
$T_{\Sigma n}$	转速环等效小时间常数	U_Z, U_{LK1}	正组脉冲封锁信号 (开关量)
t	时间	$u_0(t)$	旋转变压器转子感应电势; 感应同步器定尺绕组的感应电势
t_f	PWM放大器的接通周期	v	速度; 线速度
t_q	起动时间	$W(s)$	传递函数; 开环传递函数
t_r	过渡过程的上升时间	$W_h(s)$	闭环系统传递函数
U	电压; 电枢供电电压	$W_b(s)$	电流变化率环的闭环传递函数
U_b	偏压	$W_d(s)$	调节对象的传递函数
U_{bi}	比较电压	$W_{di}(s)$	电流微分环节的传递函数
U_a, u_a	整流电压	$W_F(s)$	复合控制系统的传递函数
U_{d0}, u_{dc}	理想空载整流电压		

$W_i(s)$	电流环闭环传递函数
$W_{LBT}(s)$	电流变化率调节器传递函数
$W_{PD}(s)$	PD调节器的传递函数
$W_{PI}(s)$	PI调节器的传递函数
$W_{PID}(s)$	PID调节器的传递函数
$W_s(s)$	可控硅装置传递函数
$W_r(s)$	调节器的传递函数
$W_v(s)$	电压环闭环传递函数
$W_{VT}(s)$	电压调节器传递函数
X	电抗
x	机械位移
Z	电阻抗; 控制系统抗扰性能指标最大动态降落的基准值
α	可控硅控制角; 转速反馈系数; 超前校正网络系数; 电位器分压比
α_1	反组可控硅控制角
$\alpha_{\min}$	最小控制角
α_2	正组可控硅控制角
β	可控硅逆变角; 电流反馈系数; 滞后校正网络系数
β_1	反组可控硅逆变角
$\beta_{\min}$	最小逆变角
β_2	正组可控硅逆变角
γ	电压反馈系数
$\gamma(\omega_c)$	相角稳定余量
Δ	自整角机误差电压所对应的角差
ΔC_{ma}	控制系统突加阶跃扰动时输出响应的最大动态降落
ΔI	电流波动值
ΔI_{dmax}	最大动态电流降落
Δn	速降; 静态速降
Δn_{max}	动态速降 (最大值)
ΔU	偏差电压
ΔU_a	电源电压波动引起的整流电压变化量
ΔU_r	正向管压降
$\Delta \theta$	角差
$\Delta \phi$	相位差
δ	脉冲当量
ε	偏差信号
θ	可控硅导通角; 机械转角
λ	电机允许的过载倍数
ρ	运算放大器放大倍数分压电路的分压倍数; PWM放大器输入控制电压标么值

Σ	虚地点
τ	调节器的时间常数
τ_b	电流变化率调节器时间常数
τ_i	电流调节器时间常数
τ_n	转速调节器时间常数
τ_0	微分时间常数
τ_v	电压调节器时间常数
τ_d	高频噪声滤波时间常数
Φ	磁通
φ	相角; 相位移
ξ	二阶系统的阻尼比
$\sigma\%$	控制系统跟随给定过渡过程的超调量
Ω	随动系统负载端转速
ω	角频率
ω_c	频率特性的截止频率
ω_0	二阶系统的自然振荡频率
ω_r	闭环幅频特性峰值 M_r 所对应的频率

二、元件与装置常用符号

A/D	模数转换装置
B	变压器
C	电容; 接触器
CF	触发装置
CJ	交流接触器
D	电动机; 二极管
D/A	数模转换装置
DW	电位器
ET	电势调节器
EY	电势运算器
F	发电机
FC	反向接触器
FCF	反组触发装置
FH	反号器
FJ	反向继电器
FKZ	反向可控硅整流装置
FMK	反向模拟开关
FZ	反向可控硅开关
GZ	硅整流器
HZ	霍尔电流变换器
I	积分调节器
J	继电器
JD	交流电动机
JL	电流继电器

K 开关
 KZ 可控硅元件; 可控硅装置
 L 电感; 励磁机
 LBT 电流变化率调节器
 LCF 励磁触发装置
 L_d 平波电抗器
 LH 电流互感器
 LJ 无环流逻辑切换装置
 LJB 零电流检测器
 LLT 励磁电流调节器
 LT 电流调节器
 MJB 转矩极性鉴别器
 P 比例调节器
 PD 比例微分调节器
 PI 比例积分调节器
 PID 比例积分微分调节器

R 电阻
 RD 熔断器
 SD 伺服电动机
 SF 测速发电机
 ST 转速调节器
 T 晶体管, 三极管, 单结晶体管
 W 稳压管
 YB 电压隔离变换器
 YF 与非门
 YT 电压调节器
 ZC 正向接触器
 ZCF 正向触发装置
 ZJ 正向继电器
 ZKZ 正向可控硅整流装置
 ZMK 正向模拟开关
 ZZ 正向可控硅开关

目 录

前言

关于编写和使用本书的说明

常用符号表

第一章 单闭环直流调速系统	1
§ 1-1 直流调速系统的主要方案	1
§ 1-2 可控硅-直流电动机系统(KZ-D系统)及其开环机械特性	5
一、电流连续时可控硅-电动机系统的机械特性	6
二、电流断续时可控硅-电动机系统的机械特性	9
三、小结	15
§ 1-3 单闭环有静差调速系统	15
一、转速控制的要求和调速指标	15
二、闭环调速系统的组成及其静特性	17
三、单闭环有静差调速系统的基本特征	22
四、单闭环有静差调速系统的动态分析	24
五、调速系统的限流保护——电流截止负反馈	28
六、小结	32
§ 1-4 单闭环有静差调速系统的其它方案	33
一、电压负反馈调速系统和电压检测	33
二、电流正反馈——扰动量的补偿控制	37
三、小容量有静差调速系统实例	41
四、采用线性集成电路运算放大器的调速系统	49
五、小结	56
§ 1-5 无静差调速系统	56
一、积分控制规律	56
二、积分调节器(I 调节器)	57
三、比例积分调节器(PI	

调节器)	58
------	----

四、采用 PI 调节器的无静差调速系统及其动态特征	59
-----------------------------	----

五、小结	61
------	----

习题	62
----	----

参考文献	63
------	----

第二章 多环调速系统和励磁

控制	65
§ 2-1 转速、电流双闭环调速系统	65
一、问题的提出	65
二、转速、电流双闭环调速系统的静、动态品质	66
三、限幅输出的 PI 调节器的动态响应	66
四、双闭环调速系统突加给定时的动态过程——两个调节器的作用之一	68
五、双闭环调速系统的动态抗扰性能——两个调节器的作用之二	70
六、电流检测装置	71
七、双闭环调速系统的典型线路及反馈系数计算	75
八、小结	75
§ 2-2 电流断续对动特性的影响和电流自适应调节器	77
§ 2-3 带电流变化率调节器的三环调速系统	79
§ 2-4 带电压调节器的三环调速系统	82
§ 2-5 带有励磁控制的调速系统	84
习题	87
参考文献	87
第三章 可逆调速系统	88
§ 3-1 可控硅-电动机系统的可逆运行和回馈制动	88
一、可控硅-电动机系统的可逆线路	88

二、怎样利用可控硅装置的逆变状态实现回馈制动	90
三、小结	91
§ 3-2 有环流可逆调速系统	93
一、两组可控硅可逆线路的环流问题	93
二、配合控制的有环流可逆调速系统	93
三、给定环流和可控环流的可逆调速系统	99
四、小结	102
§ 3-3 逻辑控制的无环流可逆调速系统	103
一、可逆系统对逻辑切换装置的要求	103
二、无环流逻辑切换装置	105
三、逻辑无环流系统的一些改进方案	112
四、小结	113
§ 3-4 错位控制的无环流可逆调速系统	113
一、错位控制原理	113
二、错位无环流系统结构和电压环的作用	116
三、错位选触无环流系统	119
四、小结	120
习题	120
参考文献	121
第四章 位置随动系统及其稳态分析	123
§ 4-1 位置随动系统的构成和基本类型	123
§ 4-2 位置随动系统的特殊部件	126
一、自整角机	126
二、粗-精测装置	128
三、功率放大——脉冲调宽型开关放大器	132
四、伺服电动机及减速器	143
§ 4-3 随动系统的稳态分析	147
一、典型输入信号	147
二、随动系统的典型结构	148
三、随动系统的稳态误差	148
四、稳态品质因数	150

五、扰动输入的影响	151
六、稳态计算举例	153
七、小结	154
§ 4-4 高精度随动系统	155
一、旋转变压器和感应同步器的工作原理	155
二、脉冲-相位调制式随动系统结构图	157
三、脉冲-相位调制式随动系统工作原理	159
四、相位随动系统主要部件的线路	160
五、系统分析	163
习题	165
参考文献	166
第五章 电力拖动自动控制系统的工程设计方法	169
§ 5-1 系统的动态性能指标与典型系统的开环对数频率特性	170
一、动态性能指标	170
二、典型系统	171
三、典型Ⅰ型系统频率特性与跟随性能指标的关系	173
四、典型Ⅱ型系统频率特性与跟随性能指标的关系	175
五、小结	180
§ 5-2 非典型系统的典型化——调节器校正	181
一、调节器的选择	182
二、低频段大惯性环节的近似处理	183
三、高频段小惯性环节的近似处理	184
§ 5-3 反馈校正及其参数选择	185
§ 5-4 调速系统的调节器设计	189
一、双环调速系统电流调节器的设计	189
二、双环调速系统转速调节器的设计	196
三、设计举例	203
§ 5-5 随动系统的调节器设计	204
一、PI和PID位置调节器	205
二、转速反馈和转速微分反馈并联	

校正.....	208	四、快速随动系统的双模控制.....	249
三、复合控制.....	216	五、小结.....	251
四、机械谐振问题.....	218	§ 6-3 一些简单的非线性控制	
五、小结.....	222	方法.....	251
习题.....	223	一、线性开关控制.....	251
参考文献.....	224	二、非线性阻尼控制.....	253
第六章 电力拖动自动控制系统中		三、非线性积分器.....	254
的一些非线性问题.....	226	习题.....	256
§ 6-1 电力拖动自动控制系统中典型		参考文献.....	256
非线性的影响.....	226	附录 I 二阶系统的动态性能	
一、饱和的影响.....	226	指标.....	257
二、间隙的影响.....	231	附录 II 典型 II 型系统的 M_{pmin} 准	
三、摩擦的影响.....	237	则——(5-17)、(5-18)及	
§ 6-2 快速随动系统.....	242	(5-19)式的证明.....	261
一、问题的提出.....	242	附录 III 典型 I 型系统按 M_{pmin} 准	
二、快速定位的开环最优控制		则选择参数与“三阶最佳”	
系统.....	242	参数的比较.....	264
三、快速定位的闭环最优控制			
系统.....	245		

第一章 单闭环直流调速系统

电力拖动自动控制系统中应用得最普遍的是自动调速系统。按照拖动电动机的类型来分；自动调速系统有直流调速系统和交流调速系统两大类。直流电动机虽然不如交流异步电动机那样结构简单、价格便宜、制造方便、维护容易，但是它具有良好的起、制动性能，宜于在广范围内平滑调速，所以直流调速系统至今仍是自动调速系统的主要形式，在轧钢机及其辅助机械、矿井卷扬机、挖掘机、海洋钻机、大型起重机、造纸机、金属切削机床等领域的自动控制中得到了广泛的应用。

换向问题是直流电动机的主要弱点，其单机容量、过载能力、最高电压和转速等重要指标都受到换向和由它引起的机械强度等问题的限制，换向器也给直流电机的制造和维护添了不少麻烦；而交流电动机则恰恰没有这个缺点，因此近年来各种类型的交流调速系统得到了普遍的重视，实用的系统也越来越多，有些文章甚至认为：“一向难于维修的直流电动机有可能被取代了。”^{〔1〕}然而，至少在最近一个时期内，对于经济实用的交流调速系统的研究尚未获得较大的突破以前，在应用上占主导地位的还将是直流调速系统。

鉴于直流调速系统的理论和实践都比较成熟，而且从闭环的反馈控制角度上看，交流和直流调速系统之间的共性成份很大，关于交流调速的各种方法在《电机及拖动基础》教材中都有叙述，一些特殊问题又另有《交流调速系统》专题教材，所以本书将只着重讨论直流调速系统。

本章首先概括一下直流调速系统的主要方案，然后着重讨论前途最为广阔的可控硅-电动机调速系统。其中 § 1-2 分析系统的开环机械特性；§ 1-3 分析单闭环有静差调速系统的静特性，同时也作一定的动态分析，以便对系统有一个全面的认识；§ 1-4 中讨论简化或改善单闭环调速系统性能的几种常用的方法；最后在 § 1-5 中讨论积分控制的无静差调速系统。

§ 1-1 直流调速系统的主要方案

直流电动机的转速和其它参量的关系可用 (1-1) 式表达：

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

式中 n ——电动机转速；

U ——电枢供电电压；

I ——电枢电流；

R ——电枢回路总电阻；

Φ ——励磁磁通；

K_e ——由电机结构决定的电势系数。

由上式可见，直流电动机的调速方法有三种：

1. 改变电枢回路总电阻 R ;
2. 减弱电动机磁通 Φ ;
3. 调节电枢供电电压 U 。

对于要求广范围无级调速的系统来说,以调节电枢供电电压的方式为最好。减弱磁通虽然也能平滑调速,但调速范围不大,往往只是配合调压方案,在基速(电动机额定转速)以上作小范围的升速。

在调压调速方案中,从供电电源种类上看又有两种情况:

1. 在交流供电系统中,采用可控变流装置,以获得可调的直流电压;
2. 在具有恒定直流供电电源的地方,采用可控硅斩波器,实现脉冲调压调速。

现代工业企业的低压供电系统绝大多数都是交流的,因此前一类调压方式应用最广,只有在电气运输中,才推广后一类调压方式。关于可控硅斩波器及其应用,可参看本专业教材《半导体变流技术》。下面分几个方面着重讨论变流调压的直流调速方案。

一、可控变流装置

最早出现的可控变流装置是旋转变流机组,如图1-1,它是由交流电动机JD(异步机或同步机)带动直流发电机F来实现变流的。由F给需要调速的直流电动机D供电,调节F的励磁电流 i_F 的大小,就能够方便地改变其输出电压 U ,从而调节电动机D的转速 n 。这样的调速系统简称F-D系统。为了供给F和D的励磁电压,还专门设置了一台直流励磁发电机L,可装在变流机组同轴上由JD拖动,也可另外单用一台交流电动机拖动。如果改变励磁电流 i_F 的方向,例如利用正向继电器(或接触器)ZJ和反向继电器(或接触器)FJ来切换励磁电源, U 的极性和 n 的转向都跟着改变,因此调速电动机的可逆运行也是很容易实现的。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,它们基本上都是相互平行的直线。

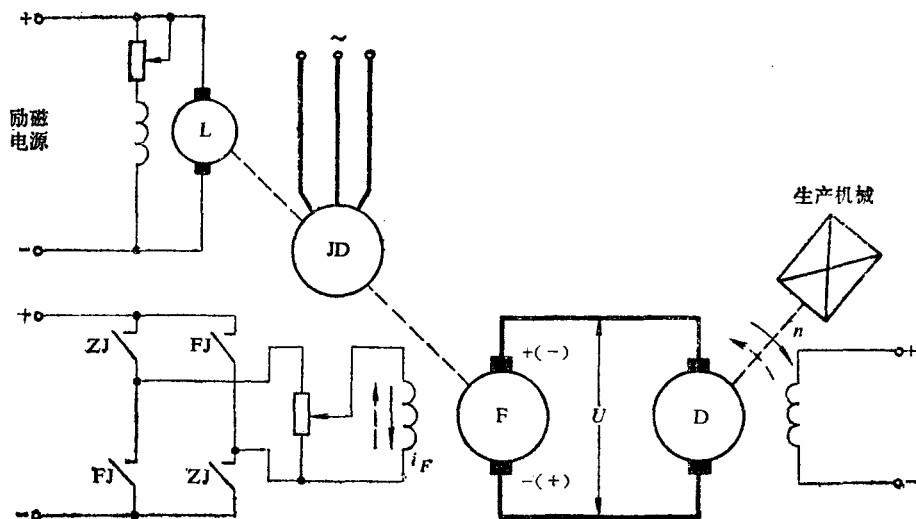


图 1-1 旋转变流机组供电的直流调速系统 (F-D系统)

旋转变流机组包含两台与调速电动机容量相当的旋转电机和另一台小一些的励磁发电机,因而设备多、体积大、费用高、效率低,安装须打基础、运行有噪音、维护不方便。为

了克服这些缺点, 在 50 年代开始采用水银整流器 (大容量) 和闸流管 (小容量) 这样的静止变流装置来代替旋转变流机组, 情况得到了一定的改善。但是这些设备的制造和维护都还存在不少麻烦, 因此, 时间不长, 到了 60 年代又让位给更为经济、可靠的可控硅 (晶闸管) 整流装置了, 对于小容量的系统也可用硅整流器变流而由大功率晶体管来控制直流电压。由可控硅整流装置 KZ 供给可调电压的直流调速系统简称 KZ-D 系统, 如图 1-3 所示; 通过调

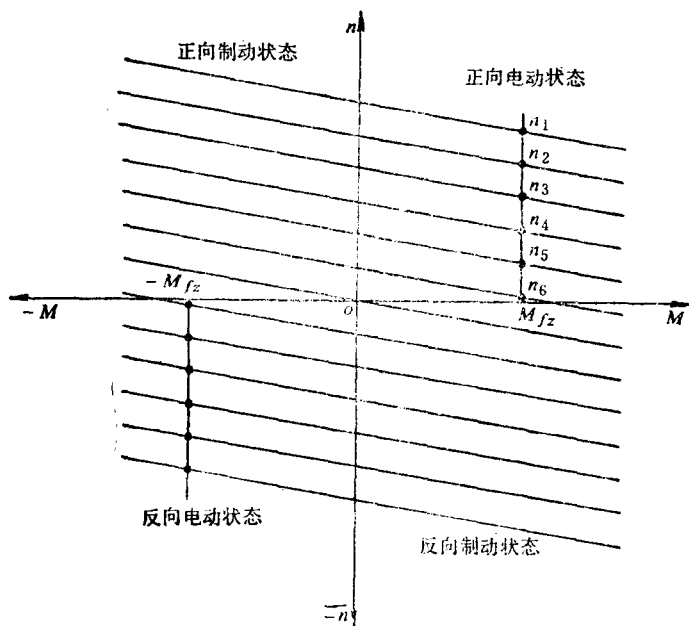


图 1-2 F-D系统的机械特性

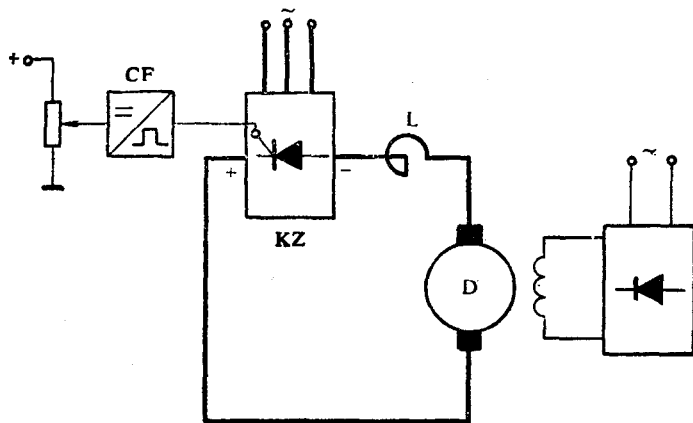


图 1-3 可控硅整流装置供电的直流调速系统 (KZ-D 系统)

节触发装置 CF 的控制电压来移动触发脉冲的相位, 即可改变整流电压, 从而实现平滑调速。和旋转变流机组及其它静止变流装置相比, 可控硅整流装置不仅在经济性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。由图 1-4 的比较可见, 可控硅整流装置的功率放大倍数在 10^4 以上, 比机组 (10^1) 高三个数量级, 比水银整流器 (10^3) 高一个数量级; 在控制作用的快速性上, 机组是秒级, 而可控硅只是毫秒级。因此, 现在世界上各主要工业国家的直流调速系统, 除了特大容量的仍有采用机组供电、可控硅励磁的系统 (图 1-5) 之外, 绝大部分都已改用可控硅整流装置供电了。

我国在 1963 年试制成功可控硅元件, 比世界上第一只可控硅问世只晚五年; 由于受到元件容量的限制, 可控硅整流装置最初只用在旋转变流机组的励磁控制上 (图 1-5), 随后才逐渐发展

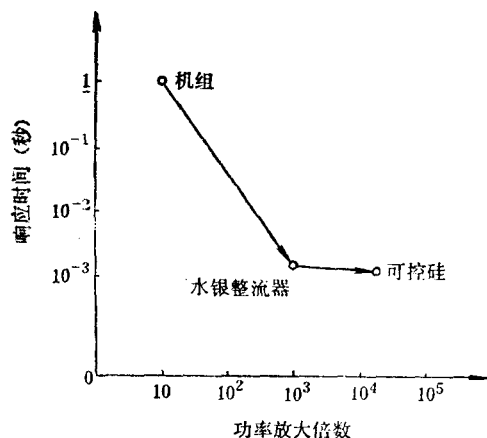


图 1-4 各种变流装置技术性能的比较

率 (0.4~200 kW) 可控硅传动装置的统一设计已经完成并投入生产。可以肯定地说,可控硅供电的系统占直流调速系统首要地位的形势在我国也是指日可待的了。

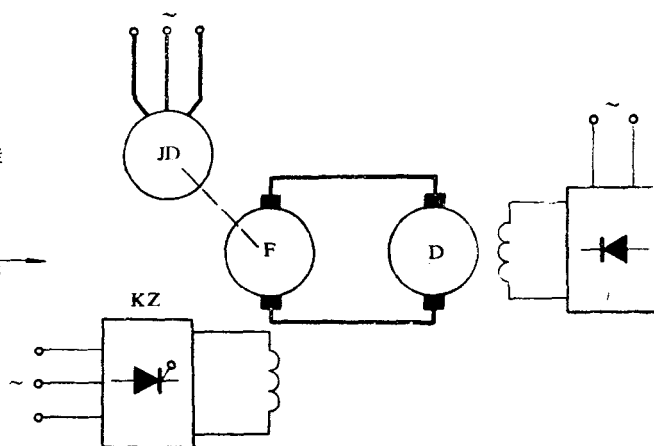


图 1-5 可控硅励磁机组供电的直流调速系统

一切事物都是“一分为二”的。可控硅装置也有它的缺点,主要是两个方面:首先,可控硅元件对过电压、过电流以及过大的 $\frac{du}{dt}$ 和 $\frac{di}{dt}$ 十分敏感,必须有可靠的保护装置,并在

元件选择上至少留有 2~3 倍的余量;其次,当系统处在深调速状态(即低速运行)时,可控硅的导通角很小,使得系统的平均功率因数很低,并产生较大的高次谐波电流,引起电网波形畸变,殃及附近用电设备,如果采用可控硅调速的设备占电网容量的比重较大,就会造成所谓的“电力公害”,为此,应采取相应的无功补偿、滤波和高次谐波电流的抑制措施^[3,5,16]。

二、放大与调节装置

常用的直流调速系统都是闭环系统,其中除了电动机和变流装置以外,还必须有放大与调节装置,主要是各种类型的放大器件与相应的校正装置。伴随着作为变流装置的功率器件的发展,放大器件也有一段发展和更新的过程。在旋转变流机组供电的调速系统中,多采用电机型放大器(主要是交磁放大机)和磁放大器,需要进一步提高放大倍数时,还可用电子管放大器作为前级放大。这种系统在 50 年代前后曾广泛地使用着,至今在尚未用可控硅装置替换的地方仍沿用这种系统,有关这种系统的论述可参看本专业教材《工厂电气控制设备》。50 年代以后,在水银整流器供电的系统里也采用磁放大器,并开始应用晶体管放大器。晶体管放大器在响应时间和信号放大倍数等方面都远比交磁放大机和磁放大器优越,而且体积小、成本低、又是静止装置,但受到晶体管元件最大功率的限制,难以直接和较大容量电机的励磁回路匹配,只有在使用了可控硅,因而功率器件本身的放大倍数增大以后,所需的控制功率降低了,才有可能直接应用晶体管放大。60 年代后期,集成电路运算放大器迅速发展起来,新的可控硅调速系统已经无例外地采用集成电路放大器了。