

自动控制系统

尔联洁 主编

航空工业出版社

714273

E 80

381433

自 动 控 制 系 统

南京航空航天大学 耿文明

西北工业大学 尹绍清 合编

北京航空航天大学 申功璋

尔联洁 主 编



航空工业出版社

1994

(京)新登字161号

内 容 简 介

本书从工程实践的角度出发,论述了电力拖动自动控制系统设计中的众多问题。内容包括半导体变流技术的基础知识;直、交流调速系统的组成、分析、工程设计及位置随动系统;最后介绍了非线性系统的稳定性分析和自适应控制及变结构控制方法。

本书主要供自动化专业本科生使用,尤其对没有学过半导体变流技术的学生最为适合。同时,也可作为大专院校学生、工程技术人员和教师学习和教学参考用书。

DW 15/69

自动控制系统

南京航空航天大学 耿文明
西北工业大学 尹绍清 合编
北京航空航天大学 申功璋
尔联洁 主编

航空工业出版社出版发行
(北京市安定门外小关东里14号)
— 邮政编码: 100029 —
全国各地新华书店经售
煤炭工业出版社印刷厂印刷

1994年3月第1版	1994年3月第1次印刷
开本: 787×1092 1/16	印张: 21.75
印数: 2300	字数: 542千字

ISBN 7-80046-710-4

TP·047

定价: 10.30元

前 言

改革开放十余年来,航空工业民品生产得到了巨大的发展。为了适应这一形势的需要,南京航空航天大学、西北工业大学和北京航空航天大学均在飞行器自动控制专业类学生中开设“自动控制系统”这门课程,使学生弥补了在自动控制系统工程设计及处理方法等方面知识的不足,适应毕业后工作上的需要。因而开设该课七年来,受到了广大学生的欢迎。与此同时,电力拖动的控制技术发展迅速,可控关断的电力电子器件和由它实现的PWM技术正在中小功率范围内逐步取代晶闸管和相控整流装置,各种交流电机调速系统和随动系统已经得到普遍应用,微机数字控制系统已经日趋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。

为了总结三院校近年来在这方面的教学实践和经验,提高教学质量,反映自动控制系统日新月异的发展,1991年10月经航空航天部教材编审室批准由三院校统一编写这本教材。

根据航空自动控制专业类本科教学计划要求,本书系统地介绍了电力拖动控制系统的组成、稳态、动态分析和设计,强调了工程的设计、处理方法以及工程实现中实际问题的处理;用相当的篇幅论述了PWM技术、交流调速技术,自适应控制和变结构控制等新技术和新方法。考虑到有些学校先修课中无“半导体变流技术”内容,故本书专设一章加以概述。同时,各章后面均有一定数量的习题和思考题供学生复习之用。

全书共分六章,其中第二章由耿文明和尹绍清同志编写;第三章由耿文明同志编写;第四章由尹绍清同志编写;第五章由申功璋同志编写;其余各章由尔联洁同志编写并担任主编,全书由北京理工大学教授曾禾生同志主审,孙奎兰同志绘制了全部的插图。在编写过程中,还参考了兄弟院校的有关教材及专著,吸取了他们不少有益的经验,在此表示衷心感谢。

由于编者水平有限,错误或不当之处在所难免,殷切期望读者批评指正。

编 者

1993.6

常用符号表

一、参数和物理量常用符号

A	整流电压系数, 晶闸管的阳极, 面积
A, B, C	三相变压器一次端
a, b, c	三相变压器二次端
AC	交流电
B	磁通密度
b	晶体管基极
C	电容量
C_e	电机电势常数
C_{ed}	伺服电动机电势常数
C_{ef}	测速发电机电势常数
C_m	电机转矩常数
C_k	时钟脉冲信号
d	导线直径
D	调速范围
D_f	粘滞摩擦系数
E	电势, 电机及电势
$E_{\phi,1}$	相电势基波有效值
$E_{\phi,\gamma}$	γ 次谐波电势有效值
E_{ed}	额定电势
E_s	变压器副边额定相电压, 电动机转子不动时的转子电势
E_{Δ}	运算放大器输出死区电压
e_L	电感的自感电势
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_{sv}	随动系统跟踪速度输入的稳态误差
e_{sa}	随动系统跟踪加速度输入的稳态误差
E_{2D}	电动机转子开路时的相电势
F	扰动量
F_{α}, F_{β}	α, β 轴上的磁势
f	频率
f_0	自然频率 (固有)
f_c	时钟脉冲频率

f_f	相位反馈电压频率
f_r	指令脉冲频率
$F_{\Delta,1}$	单相基波脉振磁势的共振
F_2	转子磁势
G	晶闸管控制极
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	整流后负载上电流的有效值、电流, 电枢电流, 励磁电流
I_d, i_d	整流电流 (大写为平均值, 小写为瞬时值)
I_{d1}	电流截止临界电流
I_{dm}	最大整流电流
I_{du}	电动机堵转电流
I_{ed}	额定电流
I_f	反组电流, 定子绕组相电流
I_{fn}	稳态负载电流
I_{gb}	给定环流
I_h	脉动环流
I_z	正组电流, 转子绕阻相电流
i	传动比
i_0	最佳传动比
I_1	变压器一次线电流有效值
i_1	变压器一次线电流瞬时值
I_2	变压器二次线电流有效值
i_2	变压器二次线电流瞬时值
I'_1	变压器一次线电流基波有效值
I'_n	变压器一次线电流 n 次谐波有效值
I_d	整流电路的直流输出平均电流
i_d	整流电流的瞬时值
I_{dT}	流过晶闸管的平均电流
I_{dD}	流过硅整流管的平均电流
I_T	流过晶闸管的电流有效值
i_T	流过晶闸管的瞬时电流
I_L	晶闸管的掣住电流
I_H	晶闸管的维持电流
I_R	整流后其输出电流中谐波, 电流的有效值
I_{T0}	晶闸管的通态平均电流, 即额定电流
i_p	二整流桥之间的环流

I_0	流过硅整流管的电流有效值
I_{1m}	换流过程中最大瞬时负载电流
I_{2e}	转子额定相电流
i_D	流过硅整流管电流的瞬时值
I_{DR}	流过续流二极管的电流有效值
I_{Aor}	晶闸管阳极可关断电流
I_b	晶体管基极电流
J	转动惯量
J_d	电机转动惯量
J_l	负载转动惯量
K	开环增益, 弹性常数, 晶闸管的阴极, 常数,
K_s	随动系统的加速度品质因数
K_1	自整角机接收器磁通与发送器电势的比例系数
K_e	电机的电势结构常数
K_H	霍尔元件常数
K_I	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_r	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
K_{fa}	速度反馈系数
K_{wy}	γ 次谐波绕组系数
K_{w1}	基波绕组系数
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_{fz}	负载转矩
M_p	反馈控制系统的振荡指标
m	相数, 一个周期的脉波数, 电流环两个时间常数的比值
M_m	异步电动机最大转矩
m_1	定子绕阻相数
m_2	转子绕阻相数
M_{10}	起动力矩
M_e	额定转矩

M_0	机械损耗转矩
M_1	电动机输出机械转矩
n	电动机的转速
n_N	电动机的额定转速
N	线圈的匝数
n_1	电动机的同步转速
n_{0d}	额定转速
n_b	电流断续段和连续段的临界转速
n_0	理想空载转速
n_{sd}	伺服电动机转速
P	功率
P_{0d}	额定功率
P_m	电动机轴上机械功率
P_M	电动机的电磁功率
P_1	电动机输入功率
P_0	机械损耗
P_d	整流输出的直流功率
P_D	直流电动机的反电势功率
P_F	直流发电机的功率
P_R	电阻上消耗的功率
p	极对数
Q	无功功率
q	整流电压一周内的波头数
r_1, r_2	电动机定、转子绕组的电阻
R	电阻, 电枢回路总电阻
R'	电流断续时电枢回路等效总电阻
R_b	变压器绕组电阻, 偏置电阻
R_0	电枢串联电阻
R_{dw}	电位器电阻
R_{dx}	等效电阻
R_f	运算放大器消振电路电阻
R_{f2}	负载电阻
R_{hx}	变压器漏抗换向压降等效电阻
R_n	放大器电阻在电枢中的等效电阻
R_s	电枢电阻
r	输入信号
R_{ir}	输入电阻
R_{x1}	限流电阻
R_0	运算放大器输入回路电阻

R_B	从变压器二次计算的变压器等效电阻
R_D	直流电动机电枢电阻
s	静差率
s_m	转矩为 M_{n1} 时的转差率
T	时间常数, 感应同步器的节距, 周期
T_f	控制系统抵抗扰动的恢复时间
T_l	电磁时间常数
T_m	机电时间常数
T_0	滤波时间常数
T_{01}	电流反馈滤波时间常数
T_{0n}	转速反馈滤波时间常数
T_p	可控硅失控时间
T_s	可控硅失控时间
T_{x1}	电流环等效小时间常数
T_{xn}	转速环等效小时间常数
T_x	小时间常数之和
t	时间
t_f	PWM放大器的接通周期
t_q	起动时间
t_r	过渡过程上升时间
t_{on}	晶闸管门极控制开通时间
t_{off}	晶闸管关断时间
U	经过整流后负载上电压的有效值
U_1	变压器一次相电压有效值
u_1	变压器一次相电压瞬时值
U_{11}	变压器一次线电压有效值
U_2	变压器二次相电压有效值
U_{21}	变压器二次线电压瞬时值
U_i	变压器一次线电压基波有效值
U'_n	变压器一次线电压 n 次谐波有效值
U_a, U_b, U_c	三相变压器二次相电压瞬时值
U_{ab}, U_{bc}, U_{ca}	三相变压器二次线电压瞬时值
U_d	整流电路的输出平均电压
u_d	整流输出的瞬时电压
$U_{d\alpha}$	当控制角为 α 时整流电压平均值
$U_{d\beta}$	当逆变角为 β 时逆变电压平均值
U_g	晶闸管门极电压瞬时值
U_T	晶闸管两端电压的瞬时值
$U_k\%$	整流变压器的短路电压比

u_L	电抗器两端电压瞬时值
U_n	整流后负载上 n 次谐波电压有效值
U_{nm}	整流后 n 次谐波电压的最大值
U_i	输入信号
U_o	输出信号
u_o	硅整流管两端电压瞬时值
U_{DR}	续流二极管两端电压瞬时值
U_R	整流后负载上谐波电压有效值
U	电压, 电枢供电电压
U_b	偏压
U_{b1}	比较电压
U_d, v_d	整流电压
U_{d0}, u_{d0}	理想空载整流电压
U_{d01}	反组空载整流电压
U_{d02}	正组空载整流电压
U_{dx}	等效电源电压
U_{ed}	额定电压
U_F, U_{ck}	反组脉冲封锁信号
U_f	反馈电压
U_{fb}	电流变化率反馈电压
U_{fe}	电势反馈电压
U_{fi}	电流反馈电压
U_{f1}	励磁电流反馈电压
U_{fn}	转速反馈电压
U_{fu}	电压反馈电压
U_g, U_{gd}	给定电压
U_{gb}	电流变化率调节器给定电压
U_{g1}	电流调节器给定电压
U_{gn}	转速调节器给定电压
U_{gV}	电压调节器给定电压
U_H	霍尔电压
U_h	电平检测器环宽电压
U_l	零电流检测信号
U_{lh}	环流给定电压
U_k	触发装置的控制电压
u_{k1}	反组控制电压
U_{k2}	正组控制电压
U_{11}	发电机励磁电压
U_M	转矩极性鉴别信号

U_a	PWM放大器直流电源电压
U_{aG}	输出电压
U_{af}	测速发电机电压
U_{ir}	输入电压
U_w	稳压管稳压值
U_y, U_g	自整角机输出电压
U_a, U_{LK1}	正组脉冲封锁信号
$U_a(t)$	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
U_β	逆变电压平均值
U_T	同步电压有效值
U_R	给定电压有效值
U_v	单晶体管的峰值电压
v	速度; 线速度
W	每条支路串联匝数
$W(s)$	传递函数, 开环传递函数
$W_B(s)$	闭环系统传递函数
$W_b(s)$	电流变化率环的闭环传递函数
$W_d(s)$	调节对象的传递函数
$W_{di}(s)$	电流微分环节的传递函数
$W_F(s)$	复合控制系统的传递函数
$W_i(s)$	电流环闭环传递函数
$W_{LB1}(s)$	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
$W_a(s)$	可控硅装置传递函数
$W_i(s)$	调节器的传递函数
$W_u(s)$	电压环闭环传递函数
$W_{VT}(s)$	电压调节器传递函数
x_1, x_2	电动机定、转子绕组的漏电抗
X	电抗
x	机械位移
X_B	从二次侧计算变压器的漏抗
X_P	平波电抗器的电抗
Z	电阻抗, 控制系统抗扰性能指标最大动态降落的基准值
z	复数阻抗
Z_f	基频阻抗
Z_n	n 次谐波的阻抗
Z_A, Z_B, Z_0	三相平衡负载阻抗

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_t	反组可控硅控制角
$\alpha_{\min}$	最小控制角
β	可控硅逆变角, 电流反馈系数, 滞后校正网络系数
β_t	反组可控硅逆变角
$\beta_{\min}$	最小逆变角
β_n	正组可控硅逆变角
γ	电压反馈系数, 相角稳定余量换相重叠角, 纹波因数
δ	晶闸管的停止导电角, 晶闸管的关断时间, 脉冲当量
$\delta\%$	控制系统跟随给定过渡过程的超调量、断时间, 脉冲当量
Δ	自整角机误差电压所对应的角差
$\Delta C_{\max}$	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
$\Delta I_{\max}$	最大动态电流降落
Δn	速降, 静态速降
$\Delta n_{\max}$	动态速降
ΔU	偏差电压
ΔU_d	电源电压波动引起的整流电压变化量
ΔU_n	正向管压降
$\Delta \theta$	角差
$\Delta \phi$	相位差
e	偏差信号, 死区, 转速系数, 电网波动系数
ζ	畸变因数, 阻尼系数
η	单极晶体管的分压比, 效率
θ	晶闸管的导通角, 机械转角
λ	电机允许的过载倍数
λ_M	力矩系数
ξ	二阶系统的阻尼比
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, 磁极矩
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_u	电压调节器时间常数
τ_4	高频噪声滤波时间常数
ϕ	相角, 相位移
ϕ_1	定子功率因数角

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_p	闭环幅频特性峰值 M_p 所对应的频率
Ω	随动系统负载端转速

二、元件与装置常用符号

A	安培、安培表
AC	交流电
A/D	模数转换装置
B	单结晶体管
BT	单结晶体管
C	电容, 接触器
CF	触发装置
CJ	交流接触器
D	电动机, 二极管, 硅整流管
D/A	数模转换装置
DW	电位器
D _w	硅稳压管
D _R	续流二极管
ET	电势调节器
EY	电势运算器
F	发电机, 电容量的单位
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
FF	触发器
GTO	可关断晶闸管
GTR	大功率晶体管
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, 电感器的符号
L_p	平衡电感器
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
ZD	直流电机

目 录

第一章 绪论	(1)
1.1 自动控制系统的一般概念	(1)
1.1.1 自动控制系统的定义	(1)
1.1.2 自动控制系统的基本控制方式	(1)
1.1.3 自动控制系统的分类	(2)
1.2 对自动控制系统的要求	(2)
1.2.1 自动控制系统的品质指标	(2)
1.2.2 控制系统的其他要求	(3)
1.2.3 控制系统的设计步骤	(3)
1.3 自动控制系统发展概貌	(4)
1.3.1 自动控制理论发展近况	(4)
1.3.2 直流传动技术概况	(5)
1.3.3 交流传动技术概况	(5)
1.3.4 计算机应用技术	(6)
第二章 半导体变流技术	(7)
2.1 晶闸管	(7)
2.1.1 晶闸管的结构	(7)
2.1.2 晶闸管的工作原理	(7)
2.1.3 晶闸管的特性	(8)
2.1.4 晶闸管的主要定额	(10)
2.1.5 几种常用晶闸管简介	(11)
2.2 单相可控整流电路	(13)
2.2.1 单相半波可控整流电路	(13)
2.2.2 单相桥式全控整流电路	(15)
2.2.3 单相桥式半控整流电路	(17)
2.3 三相半波可控整流电路	(19)
2.3.1 电阻性负载	(19)
2.3.2 电感性负载	(21)
2.3.3 共阳极整流电路	(21)
2.4 三相桥式全控整流电路	(22)
2.4.1 三相桥式全控整流电路的组成	(22)
2.4.2 三相桥式全控整流电路的工作原理	(23)
2.4.3 整流电压与控制角的关系	(28)
2.5 晶闸管的触发与保护电路	(29)

2.5.1	对触发电路的要求	(29)
2.5.2	单结晶体管及其触发电路	(31)
2.5.3	同步信号为正弦波的触发电路	(36)
2.5.4	整流器件的选择	(41)
2.5.5	晶闸管的过电压保护	(42)
2.5.6	晶闸管的过电流保护	(45)
2.5.7	电压与电流上升率的限制	(47)
2.6	逆变电路和变频电路	(49)
2.6.1	逆变电路	(49)
2.6.2	变频电路	(58)
2.6.3	脉宽调制型逆变器	(79)
2.6.4	大功率晶体管与可关断晶闸管逆变器	(85)
	思考题与习题	(90)
第三章	直流调速系统	(92)
3.1	概述	(92)
3.2	单闭环直流调速系统	(95)
3.2.1	晶闸管—电动机系统的特殊问题	(95)
3.2.2	单闭环调速系统的稳态分析和设计	(101)
3.2.3	单闭环调速系统的动态分析和设计	(106)
3.2.4	带电流截止环节的单闭环调速系统	(123)
3.2.5	单闭环无静差调速系统	(126)
3.2.6	其它闭环调速方案——带电压负反馈和电流正反馈的调速系统	(130)
3.3	多环调速系统	(131)
3.3.1	双闭环调速系统的组成	(131)
3.3.2	双闭环调速系统的静特性	(133)
3.3.3	双闭环调速系统的动态特性	(134)
3.3.4	调节器的工程设计	(136)
3.3.5	闭环调速系统转速超调的抑制——转速微分负反馈	(147)
3.3.6	其它多环调速方案	(151)
3.4	可逆调速系统	(153)
3.4.1	晶闸管直流调速系统可逆运行方案	(153)
3.4.2	电枢反并联可逆电路中的环流	(155)
3.4.3	有环流电枢可逆直流调速系统	(157)
3.4.4	无环流可逆调速系统	(160)
3.5	直流脉宽调速系统	(164)
3.5.1	脉宽调速系统的主回路	(165)
3.5.2	脉宽调速系统的控制回路	(168)
3.6	数字式直流调速系统	(170)
	思考题与习题	(172)

第四章 交流调速系统	(174)
4.1 概述	(174)
4.1.1 交流调速的意义	(174)
4.1.2 交流调速的分类	(175)
4.2 异步电动机的调压调速系统	(175)
4.2.1 控制方式	(175)
4.2.2 晶闸管三相交流调压电路	(176)
4.2.3 调压调速系统的特性分析	(182)
4.2.4 变极调压调速	(185)
4.3 异步电动机的串级调速系统	(186)
4.3.1 串级调速原理	(186)
4.3.2 串级调速系统的基本类型	(188)
4.3.3 串级调速的闭环控制系统	(190)
4.3.4 串级调速系统设计中的几个问题	(191)
4.4 异步电动机的变频调速	(193)
4.4.1 变频调速原理	(193)
4.4.2 异步电动机在变频调速时的机械特性	(193)
4.4.3 异步电动机变频调速系统	(196)
4.4.4 无换向器电动机及其调速系统	(215)
思考题与习题	(236)
第五章 位置随动系统及其工程设计	(237)
5.1 位置随动系统概述	(237)
5.1.1 主要组成部件及系统工作原理	(237)
5.1.2 位置随动系统的分类	(238)
5.2 位置随动系统的基本部件	(240)
5.2.1 常用的位置检测装置	(240)
5.2.2 减速器的速比选择与分配	(250)
5.3 位置随动系统的数学模型及稳态分析	(253)
5.3.1 自整角机位置随动系统的组成和数学模型	(253)
5.3.2 位置随动系统的稳态误差分析及参数计算	(256)
5.4 位置随动系统的动态综合	(267)
5.4.1 从属调节三环系统	(267)
5.4.2 位置反馈单环系统	(269)
5.4.3 带有速度反馈或加速度反馈的双环系统	(272)
5.4.4 复合控制随动系统	(278)
5.5 随动系统设计举例	(284)
5.5.1 确定系统性能指标	(285)
5.5.2 控制方案和主要元部件选择	(285)
5.5.3 稳态设计	(286)