

控制系统设计手册

下册

国防工业出版社

控制系统设计手册

下 册

主 编

王 子 才

副 主 编

赵长安 姚纪文 张家余

国防工业出版社

(京)新登字106号

内 容 简 介

控制系统设计手册(下册)在上册控制理论基础上,论述了控制系统设计中的共性问题,给出了控制系统设计准则、控制系统设计中常用的各类控制元件及一些新型元、部件的规格、特性和选用原则,重点阐述了工程中常用各型控制系统的设计方法。本手册可供从事控制系统设计、研究的工程技术人员及相关专业科技人员使用,也可作为大专院校本科生、研究生和教师的参考书。

控制系统设计手册

下 册

主 编

王 子 才

副 主 编

赵长安 姚纪文 张家余

责任编辑 崔士义

*

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号)

(邮政编码 100044)

新华书店经售

北京昌平长城印刷厂印装

*

787×1092毫米 16开本 印张52¹/₂ 插页2 1229千字
1993年3月第一版 1993年3月第一次印刷 印数: 0 001—2 000册

ISBN 7-118-00895-8/TP·117 定价: 44.70元

科技新书目285—061

前 言

自动控制技术已广泛应用于各个方面,涉及到各个工程领域。从自动控制技术的发展和现状看,急需出版一本供广大工程技术人员使用的控制系统设计手册。在国外均集中相当大的人力编纂出版这种手册,并多次修订和不断完善。为适应国内控制工程界的需要,国防工业出版社组织出版该手册(分上、下册)。

控制系统设计手册(下册)在其上册(关于控制系统理论)基础上,重点讨论了控制系统的设计问题。下册共包括 21 章:第一至六章阐述了自动控制系统设计中应考虑的共同问题及设计准则;第七至十章给出了国内外控制系统设计中常用的各类控制元件及新型元、部件的规格、特性及选用原则;第十一至二十一章结合各工程领域中典型控制系统,给出了设计方法和步骤。

下册由王子才任主编,赵长安、姚纪文、张家余任副主编。参加编写的人员有:第一章王子才教授,第二、三章赵长安教授;第四、五、六章姚郁讲师及王子才教授;第七章姚纪文教授,赵文华讲师,曾月明讲师及冯幼田副教授;第八章[易科军]讲师,王子华工程师,姚纪文教授,叶文柄教授;第九章郑载满副教授,王明彦讲师及叶文柄教授;第十章梅晓榕讲师、曾月明讲师,姚纪文及叶文柄教授;第十一章马广富讲师及王子才教授;第十二、十三章赵长安教授;第十四章张家余副教授及叶文柄教授;第十五章[徐志筠]副教授;第十六章伞冶讲师及张家余副教授;第十七、十八章马树青高级工程师;第十九章周育才高级工程师;第二十章罗智英高级工程师;第二十一章冯幼田副教授。

这是第一次编写这类大型控制系统设计手册,我们将继续努力,不断加以修订与完善,由于编者水平有限,缺点和错误在所难免,希望广大读者和用户提出改进意见,不胜感谢。

作 者

《控制系统设计手册》

编 审 委 员 会

主 任 委 员

张 钟 俊

副主任委员

梁思礼 姚纪文

委员(以姓氏笔划为序)

王子才	王永健	甘和贵	冯幼田	吴宝初
张 铨	张钟俊	张福思	赵长安	姚纪文
梁思礼	常健生	薛景瑄		

目 录

第一章 自动控制系统设计概述

1.1 控制系统的类型及组成	1
1.1.1 顺序控制系统	1
1.1.2 反馈控制系统	2
1.1.3 复合控制系统	2
1.2 控制系统的设计技术指标	3
1.2.1 顺序控制系统的设计技术指标	3
1.2.2 反馈控制系统的设计技术指标	3
1.2.3 复合控制系统的设计技术指标	5
1.3 控制系统的设计问题	5
1.3.1 设计大纲	5
1.3.2 设计步骤	6
1.3.3 基本设计	7
1.3.4 详细设计	9

第二章 控制系统模型

2.1 控制系统模型及其分类	10
2.1.1 连续时间系统数学模型	10
2.1.2 离散时间系统数学模型	10
2.1.3 多变量系统数学模型及其特点	10
2.2 控制系统建模与校模	13
2.2.1 先验知识的利用与建模方法 选择	13
2.2.2 输入信号的选择	14
2.2.3 观测数据的采集和预处理	15
2.2.4 阶和时延的检验	17
2.3 系统模型工程确定方法	19
2.3.1 分析法	19
2.3.2 时域法	21
2.3.3 频域法	21
2.3.4 相关分析法	24
2.4 系统模型确定实例	24

第三章 生产过程控制技术基础

3.1 单回路控制系统	31
-------------------	----

3.1.1 单回路控制系统	31
3.1.2 控制规律 (调节规律)	35
3.1.3 常用的几种 PID 控制规律	37
3.1.4 积分饱和问题	39
3.2 复合控制系统	40
3.3 非线性控制系统工程设计	41
3.3.1 位式控制	41
3.3.2 Bang—Bang 控制	42
3.3.3 非线性过程的非线性控制	44
3.3.4 线性过程的非线性控制	47

第四章 控制系统计算机辅助设计

4.1 概述	51
4.2 CSCAD 的系统功能	53
4.2.1 数据共享功能	53
4.2.2 图形显示及绘图功能	53
4.2.3 扩展功能	54
4.2.4 人一机对话功能	54
4.3 CSCAD 的设计功能	55
4.3.1 控制系统分析、设计功能	55
4.3.2 仿真功能	55
4.3.3 模型的变换、分解、合成功能	56

第五章 控制系统可靠性

5.1 可靠性的基本概念	57
5.1.1 可靠度、维修度、有效度	57
5.1.2 可靠度函数	58
5.1.3 常用系统的可靠度	60
5.2 控制系统的可靠性分析	60
5.2.1 环境与失效	61
5.2.2 失效模式后果致命度分析	61
5.2.3 故障树分析	62
5.2.4 软件故障模式分析	62
5.3 可靠性设计	63
5.3.1 可靠性设计的方法	63
5.3.2 可靠度的分配原则	65

5.3.3 可靠度优化设计	66
5.4 可靠性试验及预测	66
5.4.1 可靠性试验	66
5.4.2 可靠性预测	67

第六章 控制系统安全保护对策

6.1 危险环境、爆炸性气体及防爆结构的分类	68
6.1.1 危险环境的分类	68
6.1.2 爆炸性混合物的分类	68
6.1.3 防爆结构的种类	69
6.2 隔爆型防爆结构	69
6.2.1 隔爆型	69
6.2.2 隔爆型接合面的结构参数	70
6.2.3 爆炸强度试验	70
6.2.4 爆炸点火试验	70
6.2.5 温度试验	70
6.3 安全火花型防爆结构	71
6.3.1 安全火花型	71
6.3.2 安全栅	71
6.4 噪声及其对策	72
6.4.1 产生噪声的原因	72
6.4.2 降低噪声影响的方法	73

第七章 测量元件及测量电路

7.1 过程量测量元件	75
7.1.1 概述	75
7.1.2 温度测量元件	75
7.1.3 压力测量元件	83
7.1.4 流量测量元件	90
7.1.5 湿度测量元件	94
7.1.6 液位测量元件	97
7.1.7 密度测量元件	99
7.1.8 粘度测量元件	100
7.1.9 成分测量元件	101
7.2 机械量测量元件	105
7.2.1 概述	105
7.2.2 位移、角度测量元件	105
7.2.3 速度、加速度测量元件	127
7.2.4 姿态测量元件	130
7.2.5 转速测量元件	134
7.2.6 力应变测量元件	146

7.2.7 力矩测量元件	149
7.2.8 荷重测量元件	151
7.2.9 厚度测量元件	155
7.3 数字测量元件	157
7.3.1 概述	157
7.3.2 编码盘	157
7.3.3 光电码盘	158
7.3.4 光栅	163
7.3.5 磁尺	165
7.3.6 感应同步器及测量电路	170
7.3.7 细分技术	176
7.4 新型测量元件	181
7.4.1 固体图像器件类型及应用	181
7.4.2 激光测量仪	185
7.4.3 光纤传感器	187
7.4.4 红外辐射传感器	192
7.5 测量电路	196
7.5.1 桥式测量电路	196
7.5.2 脉冲型测量电路	202

第八章 信号放大与变换

引言	206
8.1 运算放大器	206
8.1.1 运算放大器模型	207
8.1.2 基本运算放大电路	207
8.1.3 运算放大器的实际参数及减小运算放大器误差的方法	209
8.2 信号放大器	212
8.2.1 电压放大器	212
8.2.2 电流放大器	215
8.2.3 电荷放大器	216
8.3 信号处理电路	216
8.3.1 低通滤波器	216
8.3.2 高通滤波器	218
8.3.3 带通滤波器	220
8.3.4 带阻滤波器 (陷波滤波器)	223
8.3.5 移相滤波器 (全通滤波器)	225
8.3.6 峰值检波器 (峰值保持器)	227
8.3.7 采样保持电路	228
8.3.8 电压比较器	230
8.4 运算电路	231
8.4.1 求和放大器	231

8.4.2	微分电路	232
8.4.3	积分电路	233
8.4.4	对数电路	234
8.4.5	反对数电路	235
8.4.6	乘除电路	236
8.4.7	平方、开方电路	237
8.4.8	绝对值电路	237
8.5	变换电路	238
8.5.1	电压—电流变换电路	239
8.5.2	电容—电感转换电路	239
8.5.3	电容倍增电路	240
8.6	波形发生器	240
8.6.1	正弦波发生器	240
8.6.2	方波和三角波发生器	241
8.6.3	函数发生器	242
8.6.4	脉冲、锯齿波发生器	242
8.6.5	阶梯波发生器	246
8.7	信号变换	248
8.7.1	电压—频率、频率—电压变换电路	248
8.7.2	鉴相器	250
8.7.3	调制器	252
8.7.4	解调器	254
8.7.5	数/模转换器	257
8.7.6	模/数转换器	258
8.8	电路装配技术	259
8.8.1	保护电路	259
8.8.2	预防噪声技术	261
8.8.3	运算放大器电路中的无源元件的性能要求	264
8.9	电液伺服阀	264
8.9.1	电液伺服阀的功能与类型	264
8.9.2	工作原理与特性	265
8.9.3	电液伺服阀的性能及其规格选择	267

第九章 功率放大器

9.1	概述	270
9.2	功率晶体管开关放大器	270
9.2.1	功率晶体管的开关特性	273
9.2.2	功率晶体管的开关损耗	276
9.2.3	功率晶体管脉宽调制放大器	280

9.3	可控硅功率放大器	298
9.3.1	可控硅元件的特点及工作状态转换条件	298
9.3.2	单相可控整流电路	299
9.3.3	三相可控整流电路	307
9.3.4	多相可控整流电路	316
9.3.5	可控硅功率放大器供电时直流电动机的机械特性	321
9.3.6	可控硅的触发电路	323
9.3.7	可控硅元件的选择	328
9.3.8	可控硅的保护	329
9.3.9	可控硅的串联和并联	333
9.4	液压、气动放大器	335
9.4.1	液压放大元件	335
9.4.2	气动放大元件	345

第十章 执行元件

10.1	直流伺服电动机	349
10.1.1	直流伺服电动机的结构类型和特点	350
10.1.2	直流伺服电动机的静态和动态特性及参数	358
10.2	交流伺服电动机	362
10.2.1	两相交流伺服电动机	363
10.2.2	交流力矩电动机	372
10.2.3	三相异步电动机	373
10.3	步进电动机	376
10.3.1	步进电动机的结构、类型、工作原理、参数和特性	376
10.3.2	步进电动机的控制线路	383
10.4	直线电动机	393
10.4.1	直线直流电动机	394
10.4.2	直线感应电动机	397
10.4.3	直线步进电动机	400
10.5	液压执行元件	403
10.5.1	摆动液压马达	403
10.5.2	液压缸	404
10.6	气动执行元件	408
10.6.1	气缸	408
10.6.2	气动马达	410
10.6.3	其他气动执行元件	411
10.7	伺服电动机参数计算、测定和	

选择	412
----------	-----

10.7.1 伺服电动机参数计算和测定	412
---------------------------	-----

10.7.2 伺服电动机的选择	417
-----------------------	-----

第十一章 顺序控制系统

11.1 顺序控制系统的组成和功能	423
-------------------------	-----

11.1.1 顺序控制系统组成	423
-----------------------	-----

11.1.2 顺序控制器的功能	423
-----------------------	-----

11.2 顺序控制系统的逻辑运算	424
------------------------	-----

11.3 逻辑电路	424
-----------------	-----

11.3.1 继电器逻辑电路	424
----------------------	-----

11.3.2 晶体管逻辑电路	426
----------------------	-----

11.3.3 矩阵逻辑电路	427
---------------------	-----

11.4 可编程控制器	430
-------------------	-----

11.4.1 可编程控制器的结构和功能	430
---------------------------	-----

11.4.2 PC 的编程	432
---------------------	-----

11.4.3 用户程序编制举例	435
-----------------------	-----

11.4.4 PC 控制系统的设计	437
-------------------------	-----

11.5 顺序控制系统分类	440
---------------------	-----

11.5.1 条件顺序控制系统	440
-----------------------	-----

11.5.2 时间顺序控制系统	441
-----------------------	-----

11.5.3 逻辑顺序控制系统	441
-----------------------	-----

11.6 顺序控制系统的设计原则及	
-------------------	--

过程	442
----------	-----

11.7 顺序控制系统设计实例	444
-----------------------	-----

11.7.1 电梯控制系统——条件顺序	
---------------------	--

控制系统	444
------------	-----

11.7.2 运输机的启、停控制系统——时间	
------------------------	--

顺序控制系统	451
--------------	-----

11.7.3 钻床加工程序控制系统——逻辑	
-----------------------	--

顺序控制系统	453
--------------	-----

第十二章 生产过程控制系统设计

12.1 概述	455
---------------	-----

12.1.1 生产过程自动化的发展概况	455
---------------------------	-----

12.1.2 生产过程控制系统的组成和	
---------------------	--

分类	455
----------	-----

12.1.3 过程控制系统的性能指标	456
--------------------------	-----

12.2 单回路过程反馈控制系统	
------------------	--

设计	457
----------	-----

12.2.1 单回路反馈控制系统的组成	457
---------------------------	-----

12.2.2 对象特性对控制质量的影响	458
---------------------------	-----

12.2.3 控制规律的选择	459
----------------------	-----

12.2.4 单回路控制系统整定	461
------------------------	-----

12.3 串级控制系统	467
-------------------	-----

12.3.1 串级控制系统组成	467
-----------------------	-----

12.3.2 串级控制系统特点	468
-----------------------	-----

12.3.3 串级控制系统设计原则	470
-------------------------	-----

12.3.4 串级控制系统主、副调节器	
---------------------	--

选型	471
----------	-----

12.3.5 串级控制系统整定	472
-----------------------	-----

12.4 均匀控制系统	475
-------------------	-----

12.5 比值控制系统	478
-------------------	-----

12.6 分程控制系统	481
-------------------	-----

12.7 自动选择性控制系统	484
----------------------	-----

12.8 前馈控制系统	486
-------------------	-----

12.9 预估补偿控制系统	494
---------------------	-----

第十三章 计算机控制系统

13.1 计算机控制系统概述	501
----------------------	-----

13.1.1 计算机控制系统组成及特点	501
---------------------------	-----

13.1.2 计算机控制系统的基本类型	502
---------------------------	-----

13.2 计算机控制系统的过程通道	504
-------------------------	-----

13.2.1 过程通道概述	504
---------------------	-----

13.2.2 过程参数的采样原理	505
------------------------	-----

13.2.3 数字滤波	507
-------------------	-----

13.2.4 模拟量输入输出通道	508
------------------------	-----

13.2.5 开关量输入输出通道	509
------------------------	-----

13.2.6 脉冲输出电路	511
---------------------	-----

13.2.7 过程通道中的抗干扰问题	511
--------------------------	-----

13.3 直接数字控制系统 (DDC	
--------------------	--

系统)	511
-----------	-----

13.3.1 DDC 系统的组成、功能及其应	
------------------------	--

用场合	511
-----------	-----

13.3.2 DDC 的基本算式	514
------------------------	-----

13.3.3 PID 控制算法的参数整定	518
----------------------------	-----

13.3.4 PID 程序编制及程序框图	521
----------------------------	-----

13.3.5 DDC 串级控制系统	522
-------------------------	-----

13.4 自动位置控制系统 (APC)	524
---------------------------	-----

13.5 大纯迟后补偿控制系统	527
-----------------------	-----

13.6 多变量解耦控制系统	529
----------------------	-----

13.7 多变量前馈控制系统	535
----------------------	-----

13.8 分散型综合控制系统	542
13.8.1 概述	542
13.8.2 TDCS-2000 系统组成和主要部件	544
13.8.3 基本控制器的结构、功能和算法	547
13.8.4 带上位机的分散型综合控制系统	551

第十四章 伺服系统设计

14.1 性能指标与控制方案	555
14.1.1 性能指标	555
14.1.2 控制方案	555
14.2 系统构成与数学描述	557
14.2.1 系统构成	557
14.2.2 伺服系统的微分方程	557
14.3 伺服机构特性	560
14.3.1 静特性	560
14.3.2 动特性	562
14.3.3 过渡特性的改善	563
14.4 系统设计及动态计算	564
14.4.1 伺服系统设计的一般步骤	564
14.4.2 静态计算	565
14.4.3 动态分析与综合	567
14.5 电动伺服系统设计	583
14.5.1 方案选择	584
14.5.2 静态计算	584
14.5.3 动态分析与综合	592
14.6 电液伺服系统设计	596
14.6.1 电液位置伺服系统	596
14.6.2 电液速度伺服系统	601

第十五章 电力拖动控制系统

15.1 电力拖动控制系统及其技术指标	603
15.2 电力拖动系统的工程设计方法	605
15.2.1 典型系统开环对数频率特性	605
15.2.2 非典型系统的典型化	607
15.3 晶闸管直流调速系统	608
15.3.1 主电路	608

15.3.2 单相晶闸管-直流电机调速系统	608
15.3.3 多环调速系统	613
15.3.4 晶闸管可逆调速系统	620
15.4 异步电动机调压调速系统	626
15.5 异步电动机的串级调速系统	629

第十六章 飞行器模型与控制系统组成

16.1 概述	635
16.2 数学模型建立	637
16.2.1 全量方程	637
16.2.2 全量方程的简化形式	647
16.2.3 增量方程	650
16.2.4 解耦方程	653
16.3 飞行器控制系统的组成与设计要求	654

第十七章 飞行器稳定回路设计

17.1 引言	657
17.2 飞机纵向稳定系统设计	658
17.2.1 飞机纵向运动的数学模型	658
17.2.2 用模态分解技术设计自动驾驶仪	658
17.3 飞行器侧向自动驾驶仪设计	665
17.4 滚动自动驾驶仪设计	667
17.5 舵系统设计	669

第十八章 地空导弹制导系统设计

18.1 概述	671
18.2 地空导弹的导引方法	672
18.3 地空导弹控制系统分类	674
18.3.1 遥控系统	674
18.3.2 自动导引系统	676
18.4 指令遥控地空导弹控制系统设计	677
18.5 地空导弹系统指令形成	681

第十九章 反舰导弹控制系统设计

19.1 概述	684
19.1.1 反舰导弹的组成与分类	684

19.1.2	反舰导弹的战术技术指标	685
19.1.3	反舰导弹控制和飞行特点	685
19.1.4	反舰导弹的典型弹道	685
19.1.5	反舰导弹控制系统	686
19.2	反舰导弹控制系统设计程序	687
19.3	反舰导弹的线性模型辨识	689
19.4	反舰导弹时间最优控制系统设计	690
19.5	反舰导弹最优状态估计器设计	694
19.6	反舰导弹自适应控制系统设计	697
19.7	反舰导弹解耦控制系统设计	702
19.8	反舰导弹控制系统元部件的选择	708

第二十章 空空导弹控制系统设计

20.1	空空导弹战术技术指标	711
20.2	空空导弹控制方案与控制系统特点	716
20.3	制导系统设计	717
20.4	比例导引规律的实现	722
20.5	制导精度的近似分析	726
20.6	制导舱设计	730
20.7	仿真技术在寻的导弹制导系统设计中的应用	733

第二十一章 惯性系统

21.1	陀螺稳定系统	744
------	--------	-----

21.1.1	陀螺稳定系统的类型	744
21.1.2	陀螺稳定系统的应用与工程设计问题	746
21.2	惯性导航系统	746
21.2.1	惯性导航的基本原理	746
21.2.2	惯性导航系统的类型	749
21.2.3	平台式惯导系统与捷联式系统比较	751
21.2.4	惯性导航系统主要指标表示法	752
21.2.5	惯性导航系统的工程设计问题	753
21.3	惯性制导系统	755
21.3.1	飞航式导弹惯性制导系统	755
21.3.2	弹道式导弹惯性制导系统	756
21.4	空间惯性系统	757
21.5	惯性测量与定位系统	758
21.6	惯性系统应用的新领域	760
21.6.1	基于惯性技术的新型钻井测量系统	760
21.6.2	运载器的动态试验测量系统	760
21.6.3	陀螺称量装置	762
21.6.4	铁路轨道超高测量用陀螺平台	763
21.6.5	伺服加速度计式测斜仪	764
21.6.6	其他	765

附 录

附录 I	检测元件	766
附录 II	变换器	803
附录 III	执行元件	807
参考文献		826

第一章 自动控制系统设计概述

1.1 控制系统的类型及组成

自动控制系统是由具有一定功能的元、部件组成的，按技术要求自动地执行、完成指定任务的系统。在不同元、部件的各种组合所构成的系统中，其控制信号及流通方式是不一样的。在特定的控制信号作用下，系统将完成相应要求的控制任务。

从不同角度出發，控制系统分类不同。

按控制系统的组成形式划分，控制系统可分为：

- (1) 顺序控制系统，或称为开环控制系统；
- (2) 反馈控制系统，或称为闭环控制系统；
- (3) 开环控制与闭环控制相结合的复合控制系统。

各种类型的控制系统均由下述基本元、部件组成：(a) 控制对象；(b) 控制(量)指令给定装置；(c) 执行机构；(d) 测量元件；(e) 信号变换、处理装置；(f) 驱动装置；(g) 输入输出装置；(h) 显示报警装置。

1.1.1 顺序控制系统

顺序控制系统的构成原理如图 1-1 所示。系统中除控制对象及控制(量)指令给定装置外，其余部分统称为控制器。控制器可以是集中在一起的，也可以是分装的。

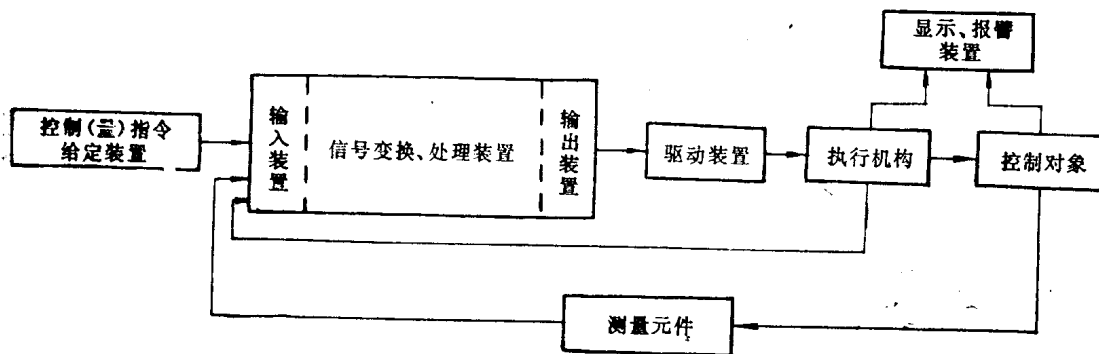


图1-1 顺序控制系统原理图

控制器的核心部分是信号变换、处理装置。它根据系统内部及外部各种条件综合判断产生控制作用所必须的控制信号。它具有信号记忆、延迟功能以及逻辑判断能力。一般它是由计算机组成的。

执行机构由驱动装置驱动，它的动作直接影响控制对象的行为状态。它的状态将随时通报给信号变换、处理装置。

驱动装置是中间装置。一般信号变换、处理装置给出的控制信号的功率不足以直接

驱动执行机构。驱动装置将控制信号放大并变换为执行机构能接收的信号形式。

顺序控制系统中的测量元件，不是为了形成反馈作用，而是为信号变换处理装置提供有关控制对象的状态信息。

一般，顺序控制系统的工作状态是断续的，不是连续的。

顺序控制系统，根据控制指令排列规则，又可划分为：

(1) 时间顺序控制系统。其控制指令是按时间程序排列的，且每段控制指令的执行时间是严格不变的。

(2) 逻辑顺序控制系统。其控制指令也是按程序排列的，但不是按时间顺序排列，而是按逻辑关系排列。即每段控制指令的执行时间是可变的，是自动变化的。

(3) 条件顺序控制系统。它的控制指令不是按固定程序执行的，而是根据一定条件选择执行的。

1.1.2 反馈控制系统

反馈控制系统的构成原理如图 1-2 所示。它与顺序控制系统不同的是：测量元件不仅给出必须的有关控制对象状态信息，而且是作为反馈回路所必需的。控制器可以是模拟的，也可以是数字的。

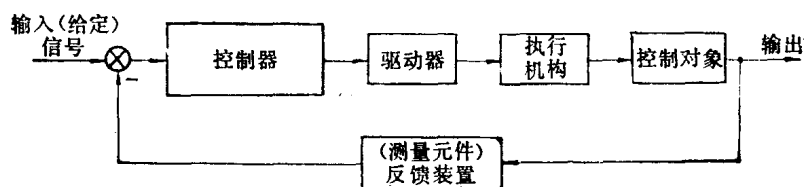


图1-2 反馈控制系统原理图

反馈控制系统，根据它所完成的任务不同，又可划分为：

(1) 镇定系统。它的输入信号是常值。

(2) 程序控制系统。它的输入信号是按已知规律变化的。

(3) 随动系统。它的输入信号是随机的。

反馈控制系统按本身的特性，又可划分为：

(1) 最优控制系统；

(2) 自适应控制系统；

(3) 鲁棒控制系统等。

按组成系统的元、部件特性，反馈控制系统又可划分为：

(1) 线性控制系统。组成该系统的所有元、部件都是线性的。

(2) 非线性控制系统。组成该系统的元、部件中至少有一个非线性元件。

1.1.3 复合控制系统

复合控制系统是开环控制与闭环控制相结合的系统。它的构成原理如图 1-3 所示。它是在反馈控制系统的基础上，又加入了一个开环控制正向补偿装置和干扰补偿装置。补偿装置可以是模拟的，也可以是数字的。复合控制系统具有反馈控制系统与顺序

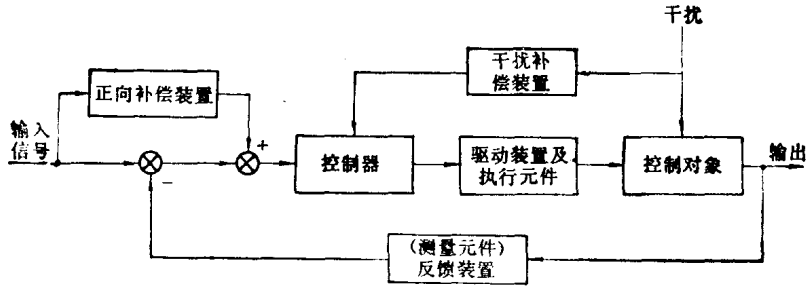


图1-3 复合控制系统原理图

控制系统两者的特点，且可直接补偿干扰的影响。

控制系统的设计任务是：根据控制对象特性、技术要求及工作环境，选择设计元件、部件及信号变换处理装置，组成相应形式的控制系统，完成给定的控制任务。

反馈控制系统是闭环系统。闭环系统因反馈作用存在着动态过程。设计时必须充分考虑这一点，使其满足动态过程的要求。开环系统的动态特性是由各组成元件确定的，不存在因反馈作用而产生的动态过程。

1.2 控制系统的设计技术指标

1.2.1 顺序控制系统的设计技术指标

顺序控制系统，一般是控制机械设备的运转、停止，生产过程中的加工、运输、检验等阶段性动作。控制过程是不连续的，是根据一定的顺序或条件变化的。因此，顺序控制系统的设计技术指标是：

- (1) 自动化范围及水平；
- (2) 操作过程的顺序、转移条件要求；
- (3) 工作环境。

至于转移过程的精度及静态精度均由所选定的元、部件确定。

1.2.2 反馈控制系统的设计技术指标

反馈控制系统是闭环动态系统，所以设计时应同时给出静态及动态特性要求。

设计反馈控制系统可以应用时域设计方法，也可用频域设计方法。应用不同方法时，设计技术指标是以不同形式给出的。

一、反馈控制系统稳定性要求

考虑到系统参数的可能变化及环境的影响，要求系统不但是稳定的，而且还要有一定的稳定余量，即稳定裕度。

二、静态特性要求

一般有两种方式给定。一是对应于一定的输入信号的稳态误差要求；一是对应于一定输入信号的误差系数要求。

三、动态特性要求

一般是给出单位阶跃输入函数 $x(t)$ 作用下的系统输出 $y(t)$ 过渡过程（见图

1-4) 的要求。表示过渡过程特性的特征值是:

PO ——超调量。它也可用相对值表示: $\sigma = \frac{PO}{y(\infty)} \cdot 100\%$ 。

t_d ——延迟时间。它对应于 $y(t)$ 上升到稳态值的 50% 时的时间。

t_r ——调节时间。它等于 $y(t)$ 进入稳态值的 5% 误差带 (不再出来) 的时间。

n ——振荡次数。

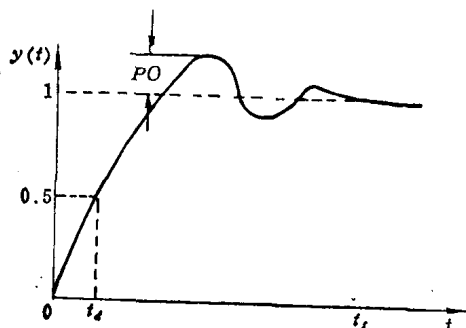


图1-4 系统输出过渡过程图

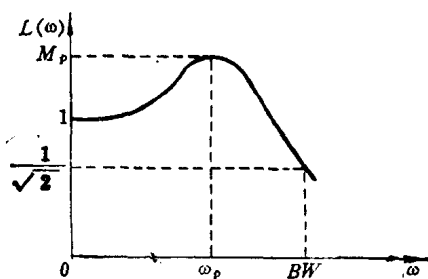


图1-5 反馈控制系统闭环频率特性

对应于上述动态过程的要求, 在频域内是对频率特性的要求。反馈控制系统的闭环频率特性如图 1-5 所示。表征动态特性的特征值为:

M_p ——峰值。它表示系统的输出的超调量大小。

ω_p ——峰值频率。

BW ——带宽 (它表示系统动态过程的快速性)。

在设计时常用的指标是 PO 、 t_d 及 BW 。

对于反馈控制系统, 不仅要求它能很好地复现输入中的有用信号, 而且应该有效地抑制噪声和干扰。这两者的要求往往是矛盾的, 所以设计时不应单纯追求跟踪精度 (即快速性) 单项指标。只要满足快速性的基本要求就可以了。这样可以减少噪声带来的误差而使总误差减小。

带宽 BW 不仅表征了系统的快速性, 而且在一定程度上也表征了系统的静态指标, 所以在系统设计中带宽这项指标是非常重要的。

在控制系统中, 对于带宽有不同的定义, 这与设计中使用的设计方法有关。对于二阶系统常以自然频率 ω_n 作为带宽。这是因为, ω_n 可以直接从系统的参数算出, 且 ω_n 与 BW 相接近。在用 Bode 图进行设计时, 又往往以过零 dB 线的剪切频率 ω_c 作为系统的带宽。

四、最优设计的指标函数

在反馈控制系统设计中可以根据特定的输入函数 (如单位阶跃函数等) 的动态响应来确定设计技术要求, 也可以依据某给定的性能指标进行最优设计。这时, 性能指标就是表征系统性能优良度的一个度量。如果系统的参数值选择得使所采用的性能指标达到了极大或极小, 那么我们就认为这个系统相对于这个指标函数是最优的。

选择性能指标的原则是, 为使性能指标有效, 它必须是系统参数的函数, 并应是凸函数。对应于参数的最佳值与非最佳值应有明显的差别。它必须容易计算、容易分析和检验。

在最优设计中常用的指标函数是取希望的(状态)输出与系统实际(状态)输出间偏差的某个函数或权函数的积分。常用的指标函数有:

(1) 平方误差积分指标函数

$$J_1 = \int_0^{\infty} e^2(t) dt \quad (1-1)$$

$$e(t) = y(\infty) - y(t) \quad (1-2)$$

式中 $y(t)$ ——系统的输出;

$y(\infty)$ ——系统的稳态输出值。

这个性能指标的特点是着重于加权大的误差,较少考虑小的误差。它可以使系统在大的起始误差中有迅速减少误差的倾向。因此响应速度是快的,但有振荡。在实际系统中使用这个指标函数,可以使能量消耗最小。

(2) 时间乘平方误差指标函数

$$J_2 = \int_0^{\infty} t e^2(t) dt \quad (1-3)$$

这个指标函数的特点是,系统对单位阶跃输入函数响应中大的起始误差考虑的较少,而着重于加权动态过程后期出现的误差。这种指标函数具有较好的选择性。

(3) 绝对误差积分指标函数

$$J_3 = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (1-4)$$

基于这种准则设计的系统具有恰当的阻尼和令人满意的动态过程。这种指标函数特别适用于用计算机处理。宇宙飞船系统使用这样的指标函数,可以使燃料消耗减少。这种指标函数的选择性较差。

(4) 时间乘绝对误差指标函数

$$J_4 = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt \quad (1-5)$$

这个指标函数的特点也是系统对于单位阶跃输入函数的动态响应中的大的起始偏差得到较小的加权,而是着重加权动态过程后期出现的误差。应用这种指标函数设计的反馈系统,动态过程超调量小,振荡有足够的阻尼。这种指标函数有良好的选择性。

1.2.3 复合控制系统的设计技术指标

复合控制系统在设计过程中通常化成等效的闭环反馈系统,按等效闭环反馈系统设计。这时,性能指标的确定及设计程序与闭环反馈系统相同。

1.3 控制系统的设计问题

1.3.1 设计大纲

设计大纲是设计工作的纲领性文件。它规定了设计任务、设计程序、验收标准等。在设计工作开始之前,应在调查研究的基础上拟定。大致应包括以下几个方面的内容:

(1) 明确控制对象及其控制过程的工艺特点及要求;

(2) 限定控制系统的工作条件及环境,确定给出安全保护措施及等级;

- (3) 关于控制方案的特殊要求;
- (4) 经济技术指标;
- (5) 规定试验项目;
- (6) 规定验收方式及验收项目、指标。

拟定设计大纲是个深入调查研究、探讨一些具体问题的反复过程。必须对要设计的控制系统的控制目标作深入研究,使设计过程中尽可能不出现失误。对于控制系统的控制量所具有的物理意义,选取哪些量作为控制量,可否互相代替,以及用哪些控制量可能组成更合适的系统等问题,都要在拟定设计大纲的过程中考虑。

对于控制对象所承受的负载,外界干扰的状况以及对于控制系统的性能要求应给出定量说明。

对于可使用的能源种类及技术要求也应该在编写大纲时确定下来。

1.3.2 设计步骤

关于控制系统的设计问题,从提出设计技术指标到控制系统投入生产,是一个从理论设计到实践,再从实践到理论设计的多次反复过程,因此很难为设计过程规定一个固定不变的程序,只能给出大体上要经过的几个过程。这些过程对于控制系统设计来说是共同的,必需的,但它们又往往反复交叉进行。

控制系统设计,一般有如下几个步骤。

一、建立控制对象的数学模型

受控对象的数学模型是进行控制系统设计的基础。建立受控对象数学模型的途径有两种:一是解析法,二是实验法。

解析法是根据对象的行为机理及服从的物理定律,利用数学解析方法推导出数学模型。实验法是根据对象运行过程中测得的有关数据(例如输入输出数据)利用模型辨识的方法估计出数学模型。

在简单的情况下或比较理想的状态下,才可能应用解析法得到可靠的数学模型,一般情况下是难以得到精确的数学模型的。利用辨识方法得到的模型是一个等效的模型类,且模型建立的精度受到干扰的影响。

因此,在建立对象数学模型时,应同时使用两种方法,兼取两者的优点,这样就能为设计者提供较为理想的模型。

另外,关于对象数学模型的要求,应根据控制系统的要求、方案组成方式来确定。并不一定在所有情况下都要求极高精度的数学模型。数学模型的建立问题,是设计控制系统的第一步,是前提。

二、方案选择

从分析设计任务和技术指标开始,经过调查研究,根据经济效果和技术实施的可能性选择合理的方案。

首先应根据其完成的任务和使用条件提出技术指标和有关设计数据作为控制系统设计、方案选择的依据。其内容应包括:

- (1) 关于控制系统的用途及使用范围。
- (2) 负载情况。包括①负载的静阻力(矩)、惯性力(矩)及其它附加力矩;②要