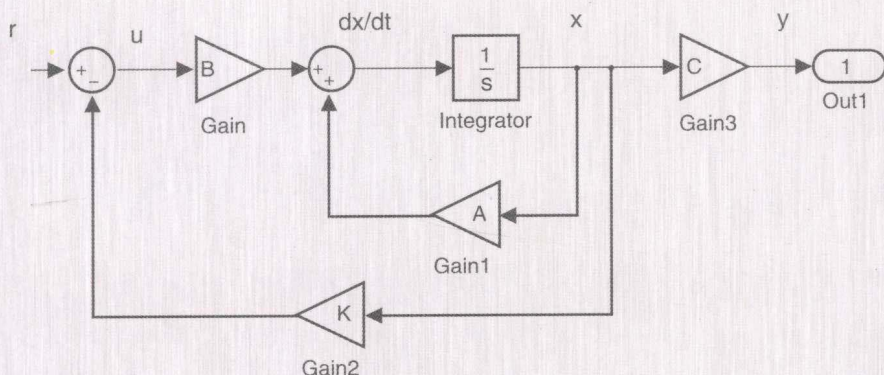


动力学控制 基础与应用

■ 黎明安 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

动力学控制基础与应用

Dynamics Control Foundation And Applications

黎明安 编著



国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书的主要内容是动力学基本知识和控制论的基本知识的有机集合,并使用了现代国际流行的 Matlab/Simulink 编程仿真工具,书中通过多个实例介绍了工程实际中的动力学控制的应用。

全书共分为 9 章,内容包括动力学控制的基本概念、结构振动模态分析方法、动态系统运动稳定性分析、系统的可观与可控性分析方法、反馈控制与极点配置方法、泛函分析的基本知识、最优控制方法、结构振动的控制方法中,重点介绍了振动模态控制方法、经典的 PID 控制方法等。

本书适用于力学、机械工程、车辆工程和土建类及其相关专业的高年级本科生和相关专业的研究生使用和参考,也可供工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

动力学控制基础与应用/黎明安编著. —北京:国防工业出版社,2013. 1

ISBN 978-7-118-08444-3

I. ①动... II. ①黎... III. ①动力学—控制 IV. ①0313

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 222247 号

※

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 100048)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787 × 1092 1/16 印张 16 $\frac{1}{4}$ 字数 359 千字

2013 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 48.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010)88540777

发行邮购: (010)88540776

发行传真: (010)88540755

发行业务: (010)88540717



中国科学院院士用笺

CHINESE ACADEMY OF SCIENCES

为书说几句话

世界上最早一篇关于控制系统分析的文章是著名物理学家麦克斯韦在 1868 年写的《论调节器》。研究的对象是瓦特发明了离心调速器并成功安装在蒸汽机上形成的系统，这是一个典型的力学系统。随后在 20 世纪控制科学形成独立的学科的过程中，力学特别是分析动力学的理论方法也始终起到了十分重要的作用，例如稳定性的分析、最优控制等。

过去推动控制科学发展的实际背景主要有两大类：一类是工业过程的过程控制；另一类则是运动体控制。这里运动体泛指按力学规律作机械运动的物体。运动体控制从 20 世纪 40 年代就伴随着控制科学的发展一起发展，例如飞机的驾驶仪以及用来追踪目标的火炮随动系统等。

20 世纪以来，力学家首先把注意力集中在固体力学与流体力学的分析上，而作为动力学研究无论是质点组还是刚体动力学，无论从研究的队伍、规模还是研究的视野与领域都不如由于建筑、航空的需求而带动起来的固体力学与流体力学蓬勃。但 20 世纪 60 年代以后由于大量受控机械的出现并在建设、交通、战争等方面的巨大作用，使受控力学系统的研究取得了巨大的发展。可以说现今所有要求工作精度高的机械几乎都离不开自动控制的技术。另一方面更深入地研究固体变形和流动与控制的结合对很多高端技术愈益起到十分重要的作用，例如吸入式飞行器发动机的控制和高超声速飞行器由于气动热引起的热弹性结构控制。即使在民用领域高层建筑和桥梁为了抗震也都在采用主动弹性控制的技术。正因如此，国际理论与应用力学联合会主席 W. Schiehlen 教授在世纪之交就正确指出“近十年来，动力学与控制已经成为力学学术讨论会的四大科学课题之一”。

既然无论从力学系统的控制还是控制科学发展本身来说，专门针对力学系统需要而进行教学的控制理论的教科书的出版就显得十分必要。但长期以来，人们从教学的角度总是把动力学与控制理论作为两门课程分开来进行教学，因而有明显的不足。黎明安教授注意到了这一点，用了近十年时间编写出一本《动力学控制基础与应用》正是填补了这方面的不足，这类教科书在国内外并不多见。



中国科学院院士用笺

CHINESE ACADEMY OF SCIENCES

当今的时代处于信息丰富的时代,这个时代的特征就是广泛应用计算机与数值技术,而这一点的确非常适合当前工程应用的需要。黎教授的书正是考虑了这一特点,在书中不仅讲了必要的理论与应用,而且配合以计算机的算法并利用国际通用的 Matlab 软件包来实现计算与设计,这样对于培养研究生或高年级本科生来说是十分合适的。

我相信该书对于在力学领域从事控制方面工作的教学和研究的人员来说是一本很好的教材。

中国科学院院士
北京大学 教授

前 言

在科学技术领域内力学学科与控制学科这两个学科十分接近且相互渗透,这就是力学控制学科,20 世纪这两个学科同时得到巨大的发展。力学工作者的关注点从物理与工程转到控制在力学中的应用,这主要是当今的工程力学(机械)系统大多都是受控系统,这些给力学工作者提出了新的挑战,开辟了新的研究领域,这也成为现代力学研究的一个大方向。

在控制领域中有相当一批科学工作者原来都是从事力学研究的,例如钱学森教授,而控制领域内的一些基本理论,例如,最优控制中的极大值原理是分析力学中最小作用量原理的发展,以及所用到的哈密顿(Hamilton)、拉格朗日(Lagrange)乘子法等,这些都是分析力动力学中提出和研究的内容。

随着力学界对控制的认识,工程中的受控机械系统动力特性研究越来越多的受到力学和控制学的关注,同时给力学工作者提出了新的研究领域,动力学控制作为一般力学、固体力学、计算机软件和硬件、信号分析与测试技术等多门学科的交叉,这一领域有着广阔的发展空间。

动力学控制作为一种全新的、特别是结构振动控制,在航空航天、机械、土建、车辆以及地震工程、风工程的前沿学科中,近 20 年来在理论研究、装置开发、工程实践等方面取得了许多新的进展和许多可喜的成就。理论和实践表明,动力学主动控制技术在抑制由于地震、风等外载激励下结构振动方面是十分有效的。它的特点是以较小的经济代价、灵活的控制策略及控制装置有效降低结构物的动力响应及罕遇荷载下的破坏程度。结构振动控制理论的发展及工程实践,标志着建筑结构由传统的结构分析、结构设计两阶段发展到结构控制阶段。

在汽车工业中,动力学控制具有重要的应用价值和相当多的成功应用实例,从 20 世纪 40 年代初期出现的被动悬架,以及后来出现的半主动悬架和全主动悬架,其中的动力学控制技术发挥了巨大作用,据有关资料表明,当前主动悬架系统已在高速赛车上进行了试验,预计主动悬架的应用可能大幅度推动赛车的发展。通过在赛车上的试验证明其加速度性能和越过突发障碍物以及爬坡功能可以达到一个新的高度。在普通的轿车领域中,为了改善动态特性,特别是乘坐品质,需要采用控制技术来应对不同速度下引起的悬架的振动。

在航天工程领域中,由于大柔度结构(如大型天线、太阳能电池板等)其模态频率低而且密集、阻尼小,这类结构在太空中运行时,一旦受到外界干扰,其引起的振动幅值大且延续时间很长,这些振动对航天系统的正常工作造成不利影响,甚至会引起某些部件或仪器失效(如光学仪器),使用传统的被动隔振难以解决问题,人们寄希望于新的主动控制技术,这些技术的高难度与重要性引起了总舵领域中学者的极大关注,成为了航天工程中一个非常重要的研究课题。

在机械工程领域内,采用制动控制技术消除自动生产线上的机器人臂在终端位置上的振动问题,尤其是随着机器人臂从刚体模型过渡到柔体模型时,必然带来更为突出的需要解决的振动带来的定位不准的问题。

作动器是实施振动主动控制的关键部件,是主动控制系统的重要环节。作动器的作用是按照确定的控制律对控制对象施加控制力。随着振动主动控制技术的发展,对作动器的要求越来越高。近年来,在传统的流体作动器、气体作动器和电器作动器的基础上,研究开发出了多种智能型作动器,如压电陶瓷作动器、压电薄膜作动器、磁致伸缩作动器、形状记忆合金作动器和电流变流体作动器、电液伺服作动器等,这些作动器的出现为实现高精度的振动主动控制提供了必要条件。

大量的研究结果表明了力学与控制学科的不可分割的这一特点,值得注意的是,将当今的力学基础理论与自动控制理论相结合,可以使力学的发展更接近工程应用。因此,动力学控制有着巨大的发展空间和应前景。

从工程应用角度来说,作为控制的主要部件作动器的动力学特性分析也是很重要的,请读者参考相关书籍。书中给出了动力学控制方面的多个应用实例分析,通过这些实例使读者更深入掌握解工程应用中相关动力学控制问题的一些基本方法。书中最后还给出了部分习题解答过程,供读者参考。本书采用了 Matlab7.0/Simulink 作为仿真平台,仿真结果均在此环境下调试通过。应用本书前需要具有一定的数学力学、结构振动基础知识以及 Matlab/Simulink 仿真基础知识。

本书内容是作者多年在从事本科和研究生教学的过程中使用的一些资料整理而成,编写本书的一个重要原因是来源于中国科学院黄琳院士的论文《力学与控制科学》的启发,并参考了黄院士的系统稳定性与控制理论方面的书籍和相关控制理论的书籍和文献结合力学学科的基础理论构建了本书的基本框架。此处需要向读者说明的是,本书中的有些问题因受限于不同专业上差异,其分析方法可能不是最好的。同时由于水平受限,书中还遗留了需要进一步研究的问题,希望有共同爱好动力学控制的同仁们进一步深入研究。

本书的初稿得到了中国科学院院士、北京大学教授黄琳先生的悉心指教,提供了历史研究背景,开阔了视野,为编写该书内容奠定了基础,并为本书写了“为书说几句话”,在此表示深切感谢。

本书由西安理工大学王忠民教授、太原科技大学牛学仁教授主审,在编写过程中,陕西工学院张宝忠教授,太原科技大学牛学仁教授、长安大学车胜创教授、西安科技大学郭志勇教授,西安理工大学徐开亮博士等诸位专家对本书提出了重要的修改意见和帮助,同时,师俊平教授、何钦象教授、曹小杉教授、以及曹胜虎、马凯老师和工程力学系的全体同仁给予了大量帮助。研究生雷霜、崔凯、朱小雄,张文帆等在读研究生期间对与书稿初稿进行了校对工作,在此表示衷心的感谢。

书中还有不足之处,敬请读者提出宝贵意见。

编者
2012. 10

目 录

第 1 章 动力学控制的基本概念	1
1.1 动力学控制中的基本概念	1
1.1.1 控制系统组成部分	1
1.1.2 常见控制系统的分类	2
1.1.3 控制系统的一般要求	4
1.2 控制基本框图	5
1.2.1 反馈系统控制框图	5
1.2.2 反馈控制系统的传递函数	5
1.2.3 反馈控制系统的一个重要特性	6
1.3 常用的控制方法	8
1.3.1 二位控制或开关控制	8
1.3.2 PID 控制	8
1.3.3 状态反馈控制	10
1.3.4 输出反馈控制	10
1.3.5 前馈控制	11
1.3.6 最优控制	12
1.3.7 模糊逻辑控制(Fuzzy Logic Controller)	13
1.4 控制模型实例分析	14
习题	18
第 2 章 结构振动模态分析法	21
2.1 线性系统的动力学方程	21
2.2 系统的实模态分析法	22
2.2.1 系统的实模态	22
2.2.2 主模态和正则模态	23
2.3 系统振动响应的实模态分析法	24
2.3.1 系统在零激励下的响应——自由响应	24
2.3.2 无阻尼系统在外激励下的响应	28
2.4 特征值为重根或等于零的情况	29
2.4.1 重特征值时特征向量的计算	29
2.4.2 零特征值情况——刚体模态	31
2.5 阻尼系统的模态分析法	33
2.5.1 比例阻尼系统的实模态分析	34

2.5.2	复模态分析法 1——对称系统	34
2.5.3	复模态分析法 2——非对称情况	40
2.6	温克尔地基梁的弯曲振动问题	41
2.6.1	温克尔地基梁固有振动分析	42
2.6.2	模态分析法	44
2.6.3	车载模型通过温克尔地基梁的耦合振动问题	46
	习题	53
第 3 章	动态系统运动稳定性分析	54
3.1	动态系统的稳定性	54
3.1.1	系统稳定性的基本概念	54
3.1.2	控制系统的稳定性分析	54
3.2	线性系统稳定性条件	56
3.2.1	线性系统稳定性的充要条件	56
3.2.2	线性系统稳定的必要条件	57
3.3	线性系统稳定判据方法	58
3.3.1	赫尔维茨判据(Hurwitz)	58
3.3.2	线性系统的稳定性劳斯判据	59
3.3.3	李亚普诺夫稳定性判据	61
3.4	系统稳定性分析的 Matlab 函数	64
3.4.1	直接判定方法	64
3.4.2	间接判定方法	66
3.4.3	李亚普诺夫方法	68
3.5	力学系统的系统平衡与稳定性	69
3.5.1	力学系统的平衡问题	69
3.5.2	保守力场中系统稳定性分析	71
	习题	72
第 4 章	线性系统的能控、能观性分析	75
4.1	能控性和能观测性的物理现象	75
4.2	系统的能控性分析	76
4.2.1	能控性的定义	77
4.2.2	能控条件	77
4.2.3	线性系统的能控性 Matlab 函数	79
4.2.4	可控标准形	81
4.3	系统的能观性分析	85
4.3.1	能观性的基本概念	85
4.3.2	系统能观性分析	86
4.3.3	能观性 Matlab 函数	87
4.3.4	系统方程的可观测标准型	88

4.4	可控性和可观性与传递函数关系	91
4.5	对偶原理——可控与可观之间的关系	93
	习题	94
第5章	动态系统状态反馈控制方法	97
5.1	动力学系统的反馈控制原理	97
5.1.1	状态反馈控制系统	97
5.1.2	输出反馈系统	98
5.1.3	闭环控制系统的可控与可观性质	99
5.2	状态反馈极点配置法	99
5.2.1	极点配置基本概念	99
5.2.2	状态反馈的极点配置的间接法	100
5.2.3	状态反馈极点配置的直接法	102
5.3	输出反馈的极点配置法	110
5.3.1	输出反馈到状态微分端	111
5.3.2	输出反馈到参考输入点	111
5.3.3	输出反馈极点配置方法	112
5.4	状态观测器和状态重构	113
5.4.1	全维观测器	113
5.4.2	采用状态观测器的状态反馈系统	115
5.4.3	降维观测器	117
	习题	120
第6章	泛函与泛函极值分析	123
6.1	泛函的基本概念	123
6.1.1	泛函实例	123
6.1.2	泛函的定义及性质	124
6.2	泛函的变分与泛函极值问题	125
6.2.1	泛函的变分	125
6.2.2	泛函极值,欧拉—拉格朗日方程	126
6.3	两种边界的变分问题	127
6.3.1	固定边界的变分	127
6.3.2	可动边界情况	129
6.4	拉格朗日乘子在求泛函极值中的应用	130
6.4.1	固定端点的问题	130
6.4.2	始端固定、末值状态自由情况下的最优控制问题	132
	习题	136
第7章	动态系统最优控制	137
7.1	最优控制问题的一般性提法	137
7.2	用变分法求解最优控制问题	139

7.2.1	固定端点的问题	140
7.2.2	当始端时刻固定、末值状态自由情况下的最优控制	140
7.3	线性系统的二次型与最优设计	141
7.3.1	连续系统的二次型最优控制指标	141
7.3.2	连续系统的二次型最优控制设计——黎卡提方程	143
7.3.3	线性离散系统的最优控制	147
7.4	线性系统的最优参数的李亚普诺夫第二方法	150
7.5	次最优控制	152
7.6	用 Matlab/Simulink 解二次型最优控制问题	153
7.7	基于二阶微分方程(组)的最优控制模型	158
	习题	163
第8章	结构振动控制	166
8.1	结构振动控制的基本方法	166
8.2	两类振动模态控制法	167
8.2.1	耦合模态控制	167
8.2.2	非耦合模态控制(独立模态控制)	168
8.3	无阻尼系统模态控制规律设计	172
8.3.1	极点配置法	172
8.3.2	最优控制法	173
8.3.3	模态滤波器	174
8.4	阻尼系统独立模态空间控制律设计	177
8.4.1	阻尼系统	177
8.4.2	状态反馈控制规律设计	177
8.4.3	最优控制规律设计	178
8.5	结构解耦控制问题	180
8.5.1	串联补偿器解耦	181
8.5.2	状态反馈解耦	182
8.6	振动半主动控制	187
8.6.1	半主动吸振	187
8.6.2	半主动隔振	187
8.7	主动隔振器设计	188
8.7.1	主动位移隔振	189
8.7.2	基础激励控制	190
8.7.3	工程实例分析	191
	习题	196
第9章	PID 控制原理	199
9.1	PID 控制模型	199
9.1.1	PID 控制的组成	199
9.1.2	PID 控制响应分析	200

9.2	离散 PID 控制	206
9.2.1	增量 PID 控制计算公式	206
9.2.2	近似离散 PID	207
9.3	改进的 PID 控制	208
9.3.1	饱和效应与饱和积分	208
9.3.2	克服饱和的方法	208
9.4	PID 参数工程整定法	208
9.4.1	频域方法	208
9.4.2	齐格勒—尼克尔斯方法	212
9.4.3	临界震荡法	214
9.4.4	衰减曲线法	216
9.5	PID 控制参数配置设计法	217
9.5.1	二阶系统 PD 控制参数配置法	217
9.5.2	二阶系统 PID 控制参数配置法	218
9.5.3	二阶 PID 控制系统并联模型	223
9.6	复杂系统的模糊 PID 控制 (Fuzzy - PID)	224
9.6.1	模糊控制工作原理	225
9.6.2	模糊 PID 控制器设计	226
	习题	231
	附录	234
	一、部分 Matlab 指令意义	234
	二、Simulink 仿真技巧	234
	三、部分习题答案	236
	参考文献	248

第 1 章 动力学控制的基本概念

动力学控制在工程应用中是一个十分重要的分支,其中的控制理论给研究动力学控制问题奠定了十分重要的理论基础。尽管在现代工业控制问题中,不断出现了新的控制方法和控制技术,学习动力学控制基础仍然是以经典控制的基本方法和控制原理为基础的,因此本章将介绍与动力学控制相关的一些基本概念和常用的几种控制类型,从控制理论上来看,它包括了一些常用的经典控制方法和现代控制方法。

1.1 动力学控制中的基本概念

1.1.1 控制系统组成部分

任何一个控制系统都是由被控对象和控制器与其他元件的有机构成,根据被控对象和具体用途不同,可以有各种不同的结构形式。用如图 1-1 所示的一个控制系统的功能框图来说明控制系统的基本组成。

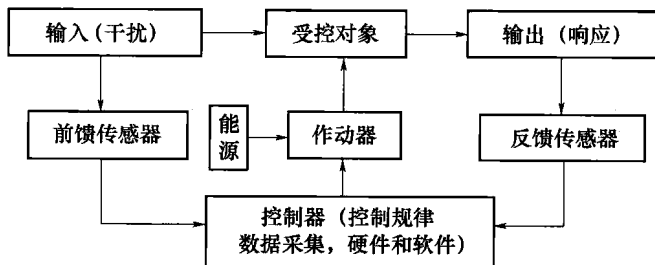


图 1-1 控制系统组成

主要环节有 6 个部分:

(1) 受控对象。受控对象是需要施加控制的目标。本书把被控制的实际目标也称为受控对象,在一般情况下,需要事先对受控系统有一个明确的了解,就动力学控制而言,需要使用力学建模理论给出系统的动力学方程,这些方程可能的一组平衡方程,或者是一阶、二阶甚至是更高阶的微分方程(组)等。

(2) 控制器。它可能是由一些机械元件和电学元器件根据功能要求组合在一起,其目的是完成一个特定的操作任务,它是控制系统的核心环节。根据不同的控制规律,就出现了各种各样的控制类型,控制器的控制规律见本书研究的重要内容。

(3) 干扰。对系统的输出有一定影响的信号,一般情况下这种干扰信号会对输出产生负面影响,干扰信号也有可能是系统内部产生的(内部干扰),也可能是系统外部产生的(外部干扰),外部干扰一般的是作为系统的一个输入(激励)的一个部分。

一个实际的控制系统还需要根据实际要求有以下几个附加环节组成部分：

(4) 测量系统。用来测量被控系统的输出,包括传感器、适调器、放大器、滤波器等,它是将被控系统的输出量转化为控制器的输入量,在动力学测量中通常使用的有压电加速度计、位移计和光电传感器等,用于测量被控系统的实际值或者是对被控量进行物理量变换的装置。在图 1-1 中,按传感器的输出信号作用不同可分为前馈传感器和反馈传感器等。

(5) 能源。它是用来提供给作动器的外部能源,如电能、火箭发动机的燃料,液压油源气源等。系统的能源不可能无穷大,因此在设计控制系统时要考虑到系统的能源损耗情况,以满足工程要求。

(6) 作动器。作动器接受控制单元的输出控制信号,产生具体的控制量施加给被控系统,使被控系统的输出达到预期的效果。作动器是控制系统的一个非常重要的部件,目前作动器的分类形式很多,已有多种性能良好的作动器产品,随着作动器的发展,使得控制技术在工程中应用更加广泛。

1.1.2 常见控制系统的分类

控制系统从不同的角度有不同的分类,按被控系统的动力学微分方程来分,可以分为线性和非线性控制系统、时变和定常控制系统;按输入信号的变化规律可以分为恒值控制和随动控制或伺服控制系统;按系统内部信号传送特点可以分为连续控制系统和离散控制系统;按被控系统的对象不同可以分为机电控制、气动控制、液压控制等;按被控量的不同可分为温度控制、速度控制、位移控制、动力控制等;按控制律是否依赖结构响应或外界激励可分为闭环控制、开环控制和开闭环控制等;按控制量作用在系统中的不同位置还可以分为前馈控制和反馈控制以及前馈反馈控制等;按控制方法可以分为两点控制法、PID 控制、状态反馈法和极点配置法、最优控制、模糊控制、自适应控制等。

有些控制问题没有明显的分类或是包含有多类控制的混合控制系统,动力学控制常常是一个复杂控制系统,可以涉及以上某一类控制或多个控制的混合控制。以下介绍常见的一些基本控制类型及其特点。

1. 开环控制系统

系统的输出信号对控制没有任何影响的系统称为开环控制系统,如图 1-2 所示。也就是说,在开环控制系统中,输出信号既不需要测量也不需要反馈以补偿输入,输出不与参考输入比较。因此,对于每个参考输入,都对应一个固定的运行环境,从而系统的控制精确度依赖于校正方法。当有干扰存在时,开环控制系统就不能完成理想的控制任务。实际上,开环控制系统只有在输入输出关系明确并且没有内部和外部干扰时使用。很明显,这类系统不是反馈控制系统。也可以说任何基于时间进行操作的系统都是开环控制系统,比如通过信号时间间隔进行控制的交通控制系统就是一个开环控制系统的具体例子。开环控制有一定的优点,结构简单,控制系统容易实现。

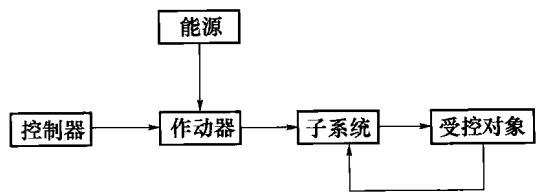


图 1-2 开环控制系统图

2. 反馈控制(闭环控制)系统

当有干扰存在时,反馈控制能减小干扰对系统输出的影响,并且能减小系统输出与参考输入之间的差别。可以预测及已知的干扰可以在系统内部设置补偿,所以下面仅考虑不可预测的干扰。

将比较和使用差异作为控制手段达到维持系统输出与参考输入之间关系的系统称为反馈控制系统或控制系统。例如,房间温度控制系统就是反馈控制系统的一个示例,通过测量房间实际温度并与预定的参考温度(理想温度)比较,温度调节装置自动开关加温装置或冷却装置,使室内温度维持在一个舒适的水平上。

当然反馈控制系统并不局限于工程领域,在很多非工程领域也能找出例子。例如人体就是一个高度先进的反馈控制系统,体温和血压都可以通过生理反馈维持恒定。实际上可以这样认为,反馈使得人体对外界变化不太敏感,从而使得人体在多变的环境中能正常工作。

驾驶员对车速的控制过程就是一个反馈控制系统的例子在给定状态下,驾驶员确定一个适当的速度,该速度可能是该路段或高速路的限制车速,以该速度为参考车速,驾驶员通过测速表观察车速,如果车速太低了,他就会踩加速器使车加速;如果车速过高了,就放松油门减少供油降低车速。该反馈控制系统需要驾驶员配合完成控制任务。这里的人类驾驶员可以由机械、电子或其他相类似的装置替代,像驾驶员观察车速表一样,电子装置能以产生一个与车速成比例的电压信号,比较该电压与对应于理想车速的电压,用它们的电压差作为误差信号来调节油门位置以根据需要加速或减速。

反馈控制系统常常称为闭环控制系统。实际上,术语“反馈控制”和“闭环控制”是可替换的。在闭环控制系统中,激励误差信号送入控制器,使得输出信号达到理想值。术语“闭环控制”总是意味着使用反馈手段减小系统误差。

一个典型的反馈控制系统由四部分组成,即被控过程(受控对象)、传感器装置(观测器)、执行器装置(作动器)、控制器,如图 1-3 所示。被控过程是实际物理系统,是不能改变的,执行器和检测器是由过程工程师根据物理和经济的要求来选择的,控制器是针对一个给定的控制对象所需的控制而设计的。

反馈控制系统的特性也包括四方面,即控制系统对参数变化的灵敏度、控制系统的瞬态响应、反馈控制系统的抗干扰作用、反馈控制系统的稳定误差。反馈控制系统的价值在于通过设计合适的反馈回路,可以调节系统的瞬态响应,可以使系统的灵敏度以及干扰造成的影响明显减少,还可以减少系统的稳态误差,使之趋于零。

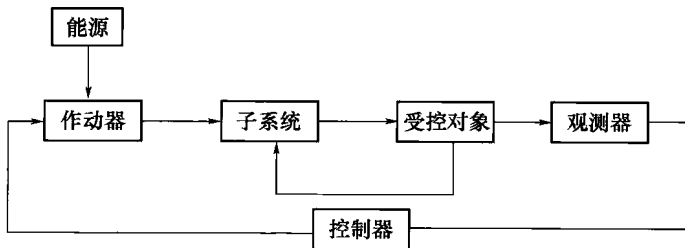


图 1-3 反馈控制系统

在控制系统中有时作动器的作用力不是直接作用在被控系统上,而是先作用在附加子系统上,通过该子系统产生的输出作用在被控系统上。当然不是每个控制系统都需要附加子系统。前面提到的6个系统是必须的。

激光制导系统就是典型的随动控制系统,如图1-4所示,系统的给定值就是目标参考量(位移、速度、加速度等),导弹运行过程中需要测量装置来检测导弹的运动状态量(位置和速度),如图中的位置检测装置和速度检测装置,并同时和目标参量相比较得到误差,以这个误差来产生控制作用控制导弹的飞行状态(位移和速度),向着减小误差的方向变化,直到击中目标(误差为零)。

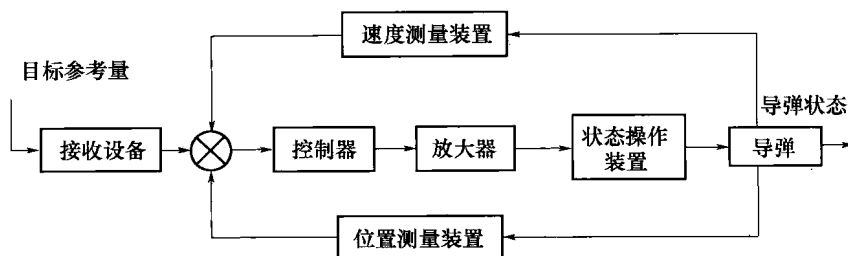


图 1-4 激光制导控制原理图

在图1-4控制系统中,误差检测是将参考输入和来自于传感器的反馈信号进行比较以产生误差信号,控制器是一个重要的部件,由于控制方法不同,所以就产生了各种各样的控制器,控制器信号一般经过放大后推动执行器来将控制施加给被控对象上,由于测量传感器时时刻刻检测被控对象的输出,因此被控对象的输入取决于误差信号的大小。执行器(状态操作装置)是根据控制信号对被控对象产生输入的元件,测量传感器的任务是把输出变量转化为另一种变量的装置,可以转化为位移、压力或电压,使得和参考输入信号有相同的量纲以便产生误差信号。

3. 开环控制与闭环控制的区别

开环就是没有加入反馈,输出不影响输入;闭环就是加入了反馈。判断开环与闭环的区别重在分析:①有无反馈;②是否对当前控制起作用。开环控制一般用在瞬间就完成了的控制活动,闭环控制一定会持续一定的时间。除此之外,还有开环和闭环两种控制法的联合应用就构成了开闭环控制。

1.1.3 控制系统的一般要求

根据不同工程中问题的不同要求对控制系统需要给出不同的评价,一般来说,对一个控制系统可以从以下几个方面评价:

(1) 系统的稳定性。系统的稳定性是指系统受到某个干扰后,被控系统可能会偏离原来的平衡位置,当干扰撤离后如果系统能够回到原来的平衡位置,则称系统是稳定的,否则系统是不稳定的,例如,倒立摆在铅直位置上是一个平衡位置,但是当系统受到某个干扰后,摆杆不能再回到原来的位置而达到另一个平衡位置,因此,倒立摆是一个不稳定系统。对控制系统的一个主要要求是系统必须稳定(包括绝对稳定和相对稳定)。

(2) 响应速度。对控制系统不但要求系统要稳定,同时对系统的响应应该具有一定的反应速度,也就是说系统响应必须显示合理的衰减,同时响应速度也必须足够的快。

(3) 控制精度。系统的控制精度通常是用它的稳态误差来度量的,例如在恒值控制中,如果系统在参考输入作用下,当系统达到稳定状态后,其输出量和期望要求的输出量之间的差值称为稳定误差,这种误差越小,则系统的控制精度越高。控制系统应该具有能够把误差减小到零或减小到一个可接受的小范围内的能力。

对于同一个系统,以上3个要求是相互制约的。例如,为了提高系统的响应速度和控制精度,往往会在控制过程中使得动态性能变差(如超调量过大),甚至会使系统变为不稳定系统。反之,如果要求系统的动态稳定性满足一定要求则会导致系统的响应速度变慢。由此可见,系统的动态响应的快速性、控制精度与系统的稳定性之间是一对矛盾,所以在设计系统时有必要兼顾以上三方面。

1.2 控制基本框图

1.2.1 反馈系统控制框图

控制系统常常由一系列元件组成,为了简化控制系统的主要功能,在分析和设计调试系统时常常使用框图。图1-5所示为一种典型的负反馈控制系框图,通常将各个环节简化为传递函数,在此将介绍控制系统开环传递函数、前馈传递函数和闭环传递函数等概念。对于复杂控制系统,可以使用串联系统、并联系统、反馈系统的传递函数一般规则简化框图的方法,或者使用状态空间表示。

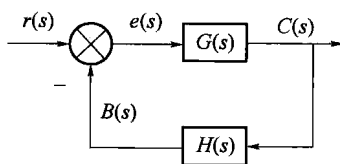


图 1-5 闭环控制

1.2.2 反馈控制系统的传递函数

在图1-5系统框图中, $B(s)$ 为反馈信号, $E(s)$ 为误差信号,定义以下几种传递函数:

(1) 开环传递函数。将反馈传递函数与误差传递函数的比称为开环传递函数,即

$$\frac{B(s)}{E(s)} = G(s)H(s) \quad (1-1)$$

这时的系统的框图转化为串联形式,如图1-6所示。

(2) 前馈传递函数。输出信号和误差信号的比称为前馈传递函数 $\frac{C(s)}{e(s)} = G(s)$ 。

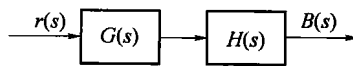


图 1-6 开环传递函数

(3) 闭环传递函数。输出 $C(s)$ 和输入 $R(s)$ 的比称为闭环传递函数,对于图1-5所示的系统,则有

$$C(s) = G(s)e(s); e(s) = r(s) - B(s) = R(s) - H(s)C(s)$$

由上式消去 $E(s)$, 得 $C(s) = G(s)[r(s) - H(s)C(s)]$

闭环传递函数为

$$\frac{C(s)}{r(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)} \quad (1-2)$$