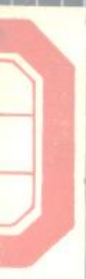


现代数字控制系统

〔美〕 R. G. 杰奎沃特 著



科学出版社

8223
693

现代数字控制系统

〔美〕 R. G. 杰奎沃特 著

刘兴良 王 洪 译

王子平 校



科学出版社

1985

8610152

7673/33 17

内 容 简 介

本书从工程技术观点出发,讲述了数字控制系统原理、 z 变换以及用它设计数字控制系统的方法、采样定理、量化及其误差、状态空间方法以及用它设计数字控制系统的方法、随机系统理论及随机控制系统的最优滤波与控制问题。书中列举了许多实例,各章附有适量习题,附录中还给出了有用的表格及实验室练习。

本书叙述深入浅出,适于教学和自学用。本书可作为自动化、计算机等专业的大学生教材,也可供有关专业的研究生、大学教师以及科技人员参考。

R. G. Jacquot

MODERN DIGITAL CONTROL SYSTEMS

Marcel Dekker, Inc. 1981

现代数字控制系统

〔美〕 R. G. 杰奎沃特 著

刘兴良 王 洪 译

王子平 校

责任编辑 李淑兰

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1985年11月第 一 版 开本:787×1092 1/32

1985年11月第一次印刷 印张:12 7/8

印数:0001—7,400 字数:289,000

统一书号:15031·674

本社书号:4166 15—8

定价:3.00 元

8010108

译 者 的 话

数字计算机和控制技术近年来发展很快,特别是二者的结合已大大影响和推动了科学技术的发展。数字控制系统(或计算机控制系统)就是二者相结合的产物。它在工业生产(如过程控制、冶金采矿、机械加工、自动检测等)、生产管理和经济管理中,在宇航及飞行器的控制中,以及在能源的开发和利用等方面都得到了广泛的应用,并预计将会有更大的发展。在我国的高新技术革命和四化建设中,计算机控制系统和数字控制理论将会发挥越来越大的作用,必将有越来越多的人需要学习和掌握这一理论和技术。为适应这种发展的需要,我们翻译了这本书。

本书第一章讲述了数字控制系统基本原理;第二章至第四章讲述了 z 变换以及在 z 域或 s 域设计计算控制系统或补偿器的方法;第五章讲述了采样定理;第六章讲述了状态空间方法;第七章讲述了计算机控制系统中量化及其误差;第八、九两章讲述了用状态空间方法设计计算机控制系统的问题;最后三章讲述了随机控制系统基本理论及随机数字控制系统的最优滤波及控制问题。

本书的主要特点是:第一,从工程技术观点出发,系统地讲述了数字控制系统的基本理论,特别注意着眼于工程实际中应用的方法;第二,本书取材适当,叙述深入浅出,文字通顺;第三,本书采用了很多有实际物理意义的例子,并附有适量的练习题和附录,附录中有若干个非常有用的实验室练习。

王子平教授对译稿进行了认真仔细的审校,提出了许多

宝贵的修改意见,并对翻译工作给予了许多指导,译者在此表示衷心的感谢。在翻译过程中还得到了其他同志的帮助和指导,在此一并致谢。

对于已发现的原书中的问题,译者与校者共同商定后作了改正,其中有些作了注释,但对于明显的排印错误在改正后未予加注。

由于译者水平所限,书中难免存在错误和不妥之处,恳请读者不吝指正。

译者
1984年4月

前 言

本书是为已学过一般反馈控制系统课程（不管是否介绍了状态变量这一概念）的大学生而写的。对于不熟悉现代控制概念的大学生来说，本书为他们提供了充分的有关材料。但是我们假设读者在运用拉普拉斯变换以及 s 域的概念方面已有了良好的基础，并且在初等矩阵理论和线性代数方面也已具有一定的基础知识。为了学习本书最后几章的内容，我们还假定读者已经熟悉了概率论并掌握了连续-时间随机过程方面的初步知识。对于学习过动力学系统的连续-时间控制概念的、有实践经验的工程师们来说，本书所讲述的内容也是有用的。

根据作者的经验，如果在学习离散-数据概念时引入脉冲采样技术，则往往会使问题复杂化。作者对此问题进行了深入研究之后，决定在没有调制脉冲函数的复杂情况下，介绍离散-时间控制系统和离散-时间信号处理等课题。为了保持本书的完整性也写入了脉冲采样这一章，这对于学习本书中的其他内容来说并非是必不可少的。

此外还列举了几个有实际背景的例题，作为书中理论的一些有意义的应用。这些实例与理论紧密结合在一起，在书中反复出现。从第三章开始一直到书末的各章节中都有这种实例。

作者根据这些材料的初稿讲授过一门课程，并发现，一个学期可以讲完第一至第七章的内容和第八、九两章的主要内容。本书后一部分中的内容已经用作另一估计理论课程的补

充教材。本课程每周可讲授三次，每两周进行一次实验室练习。在理解上述理论内容的过程中，我们不必过分强调这些实验室练习的重要性。

本书的大部分材料是作者在斯坦福大学宇航系度假期间构思出来的。作者特别感谢 A. E. 小布罗根 (Arthur E. Brogan) 和 J. D. 鲍威尔 (J. Darid Powell) 两位教授，和他们所进行的有益讨论促进了这一写作。

作者还要特别感谢斯特曼 (John Steadman) 博士，在本书的写作中他一直给作者以鼓励并积极地提出建议；他还负责小型计算机系统的开发工作，这使得实验室练习在本课程的讲授中很有意义。

围绕这些内容所设置的课程并不能代替有关数字计算机硬件和软件设计的知识。小型和微型计算机的硬件和软件知识是学生必须具备的。这是因为这些计算机乃是一切数字控制系统的核心。

在本书手稿的编写中，由于一些学生对细节的密切注意，使作者受到了极大的帮助，他们是 Ken Jensen, Kiw Sturm, Mizan Rahman, Mike Petrea, Mark Hepworth, Barry Eklund, Paul Nolson, Mike Mundt。如果没有这些辛勤的学生，就不可能成功地撰写出这本书。

R. G. 杰奎沃特

目 录

译者的话

前言

第一章 数字控制引论	1
1.1 系统控制的基本概念	1
1.2 用计算机做控制元件	4
1.3 单回路数字控制系统	6
1.4 为什么要用数字控制代替模拟量控制	7
1.5 小结	12
参考文献	12
第二章 线性差分方程和 z 变换	13
2.1 引言	13
2.2 标量差分方程	13
2.3 简单序列的 z 变换	16
2.4 关于 z 变换的一些有用的定理	21
2.5 z 变换的反变换	23
2.6 部分分式展开法	25
2.7 利用 z 变换求解线性差分方程	30
2.8 z 域传递函数与脉冲响应序列	32
2.9 z 平面极点位置与时间序列特性之间的关系	34
2.10 离散-数据系统的频率响应	37
2.11 s 域极点和采样函数的 z 域极点的关系	41
2.12 离散-时间的卷积和定理	45
2.13 终值定理	46
2.14 初值采样定理	48
2.15 小结	49

参考文献	50
习题	50
第三章 应用变换技术的数字控制系统常规设计方法...	54
3.1 引言	54
3.2 模/数和数/模转换器	54
3.3 由零阶保持器驱动并具有采样输出的连续-时间装置...	56
3.4 闭环的特征方程	66
3.5 控制系统常规设计的技术要求	69
3.6 z 域设计的基本出发点	75
3.7 干扰对闭环系统的影响	80
3.8 有限调整时间和最小原型系统	83
3.9 普通的 PID 直接数字控制算法	88
3.10 小结	92
参考文献	93
习题	93
第四章 数字滤波和数字补偿器的设计	99
4.1 引言	99
4.2 数字补偿器的常规设计方法	99
4.3 直接微分差分化	102
4.4 零阶保持器近似法	104
4.5 极点零点对应法	105
4.6 双线性变换法	108
4.7 带有预修正作用的双线性变换	109
4.8 脉冲响应不变法	112
4.9 数字补偿器的 z 平面设计法	114
4.10 小结	123
参考文献	123
习题	123
第五章 脉冲采样及采样定理	127
5.1 引言	127

5.2 单位脉冲序列	128
5.3 脉冲采样模型	129
5.4 采样定理	132
5.5 小结	136
参考文献	136
习题	137
第六章 数字控制系统的状态变量表达式	140
6.1 引言	140
6.2 连续-时间状态变量问题	141
6.3 状态方程的解	143
6.4 矩阵指数级数法	149
6.5 离散状态方程的解	151
6.6 从状态变量表达式求传递函数	154
6.7 可控性	156
6.8 可观测性	159
6.9 离散系统的状态变量表达式	161
6.10 混合式控制系统的状态变量表达式	174
6.11 小结	177
参考文献	178
习题	178
第七章 量化和误差影响	182
7.1 引言	182
7.2 量化误差	183
7.3 数字滤波器对量化误差的响应	188
7.4 输出幅值界限	195
7.5 乘法误差	196
7.6 数字滤波器系数的有限字长表示法	200
7.7 根的灵敏度分析	203
7.8 小结	208
参考文献	209

习题	209
第八章 控制系统的状态空间设计方法	212
8.1 引言	212
8.2 状态变量反馈与系统设计	212
8.3 不完全状态反馈控制	216
8.4 开环估计器	218
8.5 渐近预报估计器	219
8.6 现时估计器	229
8.7 降维估计器	231
8.8 有限调整时间调节器的算法	232
8.9 围绕非零调整点输出的控制	235
8.10 小结	238
参考文献	239
习题	240
第九章 线性离散-时间最优控制	242
9.1 引言	242
9.2 离散线性调节器问题	244
9.3 最优控制的动态规划方法	252
9.4 倒特征值和倒根轨迹	256
9.5 稳态调节器问题的特征向量分解	260
9.6 围绕非零调整点的最优控制	265
9.7 采用估计状态反馈的次最优控制	269
9.8 小结	273
参考文献	274
习题	274
第十章 离散-时间随机系统	277
10.1 引言	277
10.2 概率及随机变量	277
10.3 期望算子和统计矩	281
10.4 相关性、独立性及条件概率	283
10.5 联合高斯随机变量	284

10.6	高斯随机变量的线性组合及线性变换	286
10.7	离散随机标量序列	288
10.8	马尔柯夫和纯随机序列	291
10.9	随机向量序列	293
10.10	离散-时间动态系统中的随机序列	294
10.11	平稳解	298
10.12	小结	300
	参考文献	301
	习题	301
第十一章 存在噪声时的状态估计		303
11.1	引言	303
11.2	离散-时间向量卡尔曼滤波器的推导	304
11.3	用特征向量分解法求稳态的卡尔曼滤波器增益	319
11.4	小结	322
	参考文献	322
	习题	323
第十二章 离散-时间随机控制系统		325
12.1	引言	325
12.2	有随机干扰和无量测噪声的最优控制	326
12.3	有随机干扰而量测又有噪声污染情况下系统的控制	327
12.4	被控系统的平均性能	337
12.5	稳定状态控制系统的动力学特性	341
12.6	小结	344
	参考文献	344
	习题	345
附录 A z 变换表和特性		347
A.1	z 变换中复数反演积分的证明	347
附录 B 系统辨识导论		351
B.1	引言	351

B.2	最小二乘法	352
B.3	用最小二乘法估计传递函数	354
B.4	量测噪声的影响	358
附录 C	数字控制实验室练习	359
C.1	小型计算机数字控制程序包	359
C.2	熟悉 A/D 和 D/A	361
C.3	一阶装置的比例控制	362
C.4	数字式比例加积分控制器的设计	364
C.5	液面高度控制系统	365
C.6	状态变量的反馈	367
C.7	估计状态反馈	369
C.8	线性二次型最优控制	370
附录 D	数字控制中常用的计算机程序	371
D.1	引言	371
D.2	二次方程的求解程序	372
D.3	三次方程的求解程序	373
D.4	根据连续-时间状态方程建立离散-时间状态方程	375
D.5	有状态反馈的二阶系统的特征根	376
D.6	离散-时间黎卡提方程求解程序	378
附录 E	代数特征值-特征向量问题	381
E.1	引言	381
E.2	问题的描述	381
E.3	特征值问题在离散-时间系统中的应用	383
E.4	可控性和可观测性	387
E.5	凯利-哈密尔顿定理	390
索引		392

第一章 数字控制引论

1.1 系统控制的基本概念

我们现在考虑一个用来完成某一给定任务的受控动力学装置。这种装置一般具有在时间上是连续的输入和输出。在一般情况下，我们可以假定它具有 r 个输入变量（可控变量）和 m 个输出变量，也可能还存在若干个（非输出的）内部变量。至于哪些变量可作为输出，这是由系统设计人员来确定的。通常所谓的控制问题，就是通过对输入变量的控制使输出变量达到预期的形式，例如达到某一数值或某一变化率。

如果我们已知道足够精确的系统模型和初始条件，那么，就能够操纵输入变量使得输出变量按预期的方式变化。这就是所谓的“开环控制”。完成这种控制无需知道当前的输出。这种情况如图 1.1 所示。对于这种类型的控制，还假设系统是在没有外界干扰的条件下工作。因为如果有了外界干扰，就会使得系统的输出偏离按装置模型所预计的输出。

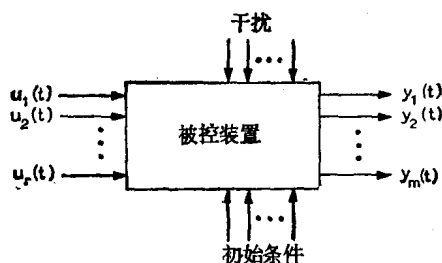


图 1.1 开环控制装置

由于系统模型和初始条件均存在某些不确定性，加之由于外界干扰的存在，还有另外一种能较好地完成任务的方法。这种方法需要测量出我们要加以控制的输出变量的某些子集 $y_1(t) \cdots y_k(t) (k \leq m)$ 的特性，并且在测量以后，还需要与在时间 t 所希望的数值 $r_i(t)$ 进行比较。 $r_i(t)$ 与实际数值 $y_i(t)$ 之差即称为“误差”。我们可以利用各个变量的误差来产生控制变量或控制作用，以促使这些误差变为零。这种情况如图 1.2 所示，称之为“反馈控制”。由于存在摩擦、惯性和其它动力学性质，因此想要促使系统的误差瞬时地变为零是办不到的。于是，系统的输出 $y_i(t)$ 将“滞后于”所理想的输入 $r_i(t)$ ，有时则在零误差状态的附近出现超调或振荡。

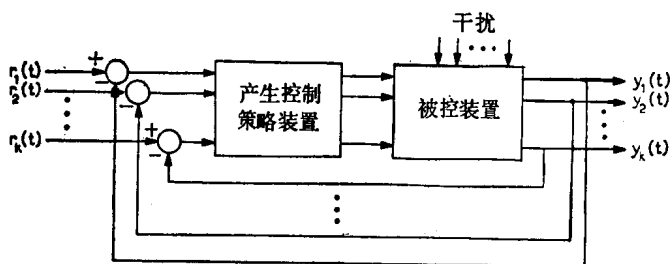


图1.2 多变量的反馈控制系统

我们往往得不到有效的实际输出变量，而且对这些实际变量进行比较也可能很不方便。例如，若这些变量之一是核反应堆中心的温度，那么对于这种温度既不可能进行实际测量，也不便于进行比较。一种最为方便的方法是使用能产生信号的传感器或敏感元件来测量其输出量，而这种信号又较易于和参考信号进行比较，以便产生控制作用。这种测量往往是(并非总是)采用电子学的办法来完成的。另外，由于传感器动态特性方面的原因，使得其输出并非总是能够与所测

量的变量完全成比例，因而所反馈的信号也就不可能总是与所测的变量完全一样。我们希望完成控制所需要的信息能存在于传感器的输出端，否则就变成了一种“开环”控制。具有传感器的反馈控制系统如图 1.3 所示，图中传感器的输出信号用 $w_1(t), w_2(t), \dots, w_k(t)$ 来表示。

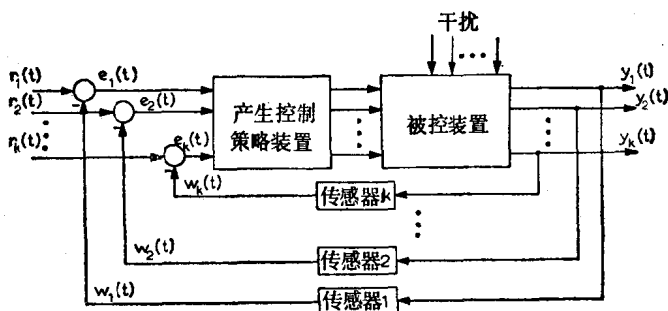


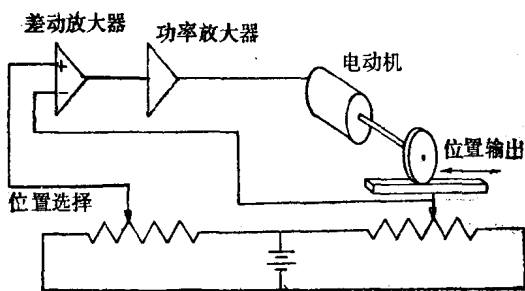
图 1.3 带有传感器的多变量反馈控制系统

许多年以来，传感器和控制信号发生器*的综合已经成为大量工程实践的核心问题，而一般说来这些装置在性质上都属于电气的和电子类的，诸如滤波器、放大器、功率放大器、电动机和执行装置等。在这些情况下所有信号都是时间变量 t 的连续函数。我们通常把这种系统叫做连续-时间控制系统。由于具有大量的控制变量和输出变量，这样就使系统变得越来越复杂，硬件的综合工作也就会变成了一项困难的任务。典型的系统包括飞机自动驾驶仪控制系统、化学过程控制系统、核动力设备控制系统和许多其它常见的大系统等。

随着数字计算机的出现，工程师们开始探讨使计算机能处理各种信号的可能性，以及在所测量信号和希望的输出值的基础上能进行控制信号的逻辑判定。但是我们知道，数字

* 即控制器或本书后面常提到的补偿器。——译校者注

例如,让我们来研究一个如图 1.4 所示的连续-时间单回路位置伺服机构,其参考信号和反馈信号都是电压,这两种信号都是通过机械方法驱动电位器而产生的。



1.2 用计算机做控制元件

• 4 •