

〔苏〕B. A. 别塞克尔斯基 著



数字自动 控制系统

科学出版社

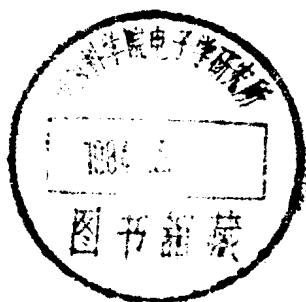
73.822
22

数字自动控制系统

〔苏〕B. A. 别塞克尔斯基 著

林桦 古明 译

李致杰 史若华 校



科学出版社

1984

1111283

053/08

内 容 简 介

本书是系统论述数字自动控制系统理论的专著。书中对系统在任意随机输入信号作用下的设计方法,特别是最优滤波理论在计算机控制系统中的应用问题有较深入的讨论。全书共分六章,第一章叙述数字自动控制系统的一般概念;第二章介绍线性化数字系统的研究方法;第三章讨论数字自动控制系统的随机过程;第四章和第五章分别阐述输入作用的统计特性已知和未知时线性化数字自动控制系统的最优动态综合方法;最后一章讨论系统中由于电平量化而可能引起的周期状态问题。

本书可供从事自动控制和计算机应用方面的工程技术人员、科研和设计人员,以及高等学校有关专业的师生参考。

В. А. Бесекерский

ЦИФРОВЫЕ АВТОМАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Издательство «Наука», 1976

数字自动控制系统

[苏] В. А. 别塞克尔斯基 著

林桦 古明 译

李致杰 史若华 校

责任编辑 李淑兰 鞠丽娜

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

*

1984年4月第一版 开本: 787×1092 1/32

1984年4月第一次印刷 印张: 17 3/4

印数: 0001—9,400 字数: 405,000

统一书号: 15031·555

本社书号: 3426·15—8

定价: 2.70 元

译 者 的 话

经典的控制理论在五十年代已逐渐成熟了。在分析和综合伺服系统和简单的调节器中，这种理论是适用的，而且，其结果基本上能满足要求。但是，随着科学技术的发展，对控制系统性能指标的要求愈来愈高，系统也日益复杂，经典控制理论的局限性便显得突出起来。从科学和工程实践发展趋势来看，迫切需要新的控制理论。

近数十年来，计算技术和数字技术的发展，特别是微电子技术的发展，使得工业和科学技术又发生一次变革。在六十年代中，突出的一点是出现了设备(或者系统)“数字化”的热潮，形成了广泛使用电子计算机和微处理机的局面。在解决速度快、精度高、体积小和重量轻等方面的问题上，取得了可喜的成果。数字控制系统就是在这种形势下出现的。由于计算技术和电子计算机在控制系统中的广泛应用，使得控制理论得到进一步发展，出现了近代控制理论。

近代控制理论是在动态规划、变分法和状态空间法的基础上发展起来的，其中包括系统辨识和参数估值两个互相联系的领域。在六十年代初，卡尔曼利用状态空间法研究线性系统，创立了一套估值算法，即滤波算法。自从卡尔曼滤波理论问世之后，引起学术界极大的兴趣，形成“卡尔曼滤波热”，在短短的十几年间，滤波理论与其应用两方面互相促进，发展迅速，在研究线性、非线性，时变和非时变系统中均可采用。目前，在国外，卡尔曼滤波技术已广泛应用于航天、遥测遥控、雷达、通信、自动控制、资源勘测、医学等各个技术领域之中。

应用维纳和卡尔曼滤波理论来综合数字自动系统是近代控制理论的一个重要方面。本书是系统地论述数字自动控制系统理论的专著。它的特点是：除了详细地论述了数字控制系统的特点、数学模型以及数学工具外，还系统地论述了数字自动系统在任意随机输入作用下，用维纳和卡尔曼滤波技术综合设计的方法，以及用极限滤波器综合的方法，列举了不少实例，而且，从工程应用角度，讨论了惯用的以振荡指标作为品质判据来设计数字自动系统的方法，这种方法实质上是将继续系统的综合法加以推广，对于已熟悉古典控制理论的工作者很容易掌握。在本书的最后一章还讨论了数字自动系统中出现周期状态的可能性和条件。

国内前几年对卡尔曼滤波理论及其应用，以及数字自动系统的理论和应用就已有所重视，在应用上也取得一定的进展，我们希望这本书的翻译出版，将进一步推动这方面工作的开展。

我们在翻译过程中，对原书的一些明显错误作了改正。由于我们的水平有限，书中难免有欠妥之处，望读者批评指正。

译 者

1982 年 12 月

前 言

离散微电子学领域内的巨大进展，使数字计算机和数字计算装置的所有质量指标，例如重量、体积、功耗、可靠性等方面大为改善。另一方面，随着对自动控制系统要求的提高和控制对象本身复杂程度的增加，使采用“连续”的自动装置和计算技术已不能解决大量的实际问题。所有这些情况都使数字自动控制系统的应用范围扩大了，但因这种系统的闭合回路内包含有数字计算机或数字装置，从而使系统变得复杂起来。

目前，数字系统用于调节和控制各种各样的对象和过程：高炉、轧钢机、舰船、化工设备等等，而它的应用范围还在不断扩大。

本书系统地论述数字自动系统理论，研究这种系统的分析和综合问题。这些年来，引用维纳、卡尔曼及其他作者提出的最优滤波机理，最优综合理论得到了很大的发展。但是应当指出，最优滤波实际上要求具有完备的先验信息。在很多情况下，这就限制了采用最优法来设计自动控制系统。当没有完备的先验信息时，一般地说，可走采用自适应系统这条路，但是这时在实现所设计的复杂系统时，将会遇到很大的困难，因此还是常常避免采取这种做法。

此外，设计新的自动控制系统的任务，常常是这样提出的：经过设计，要保证得到预先给定的工作精度。一般来说，这会使设计自动系统的任务比寻找最优系统还要复杂，因为后者是从可能的解中较快地选出最优解的数学问题。采用现

代化的计算工具,这常常是一个不足为奇的问题。可是,要按照预定的品质指标设计自动系统,在目前的技术发展水平和所采用的器件的质量条件下,这个问题就可能无法解决。

由于这个原因,在苏联的文献中,对输入作用先验信息为最少情况,如何设计具有给定品质指标的自动控制系统问题,进行了长时间的研究。这种信息一般可归结为只给出输入作用的方差及其导数的方差。对于大多数的实际情况,这样提出综合问题是最容易被接受的。

本书中,论述处理数字自动系统综合问题有两种途径,即采用最优滤波的方法和以所谓极限滤波器为基础的方法。后者能够在输入作用为任意统计特性的情况下,保证满足精度的要求。

在数字自动系统中,对其功能有显著影响的是在计算机或计算装置中信息的输入和输出装置的电平量化现象。可以用量化噪声并计算其附加误差的办法来考虑这种现象,这对于处在运动状态下的系统是正确的。当控制系统不动(处在同步状态)时,电平量化现象有时会使系统产生周期状态,因而出现附加的误差。确定由于电平量化产生的附加误差的两种方法,将在本书中加以探讨。

B. A. 别塞克尔斯基

目 录

第一章 数字控制系统的一般概念	1
1.1 数字控制系统的结构	1
1.2 自动控制系统中数字计算机所要解决的问题	6
1.3 数字控制系统的研究方法	14
第二章 线性化系统的研究方法	16
2.1 引言	16
2.2 数学工具	27
2.3 数字自动系统连续部分的传递函数	63
2.4 数字计算机的传递函数	84
2.5 数字自动系统的传递函数	90
2.6 线性化数字自动系统的稳定性和品质	101
2.7 强迫周期状态的计算	105
2.8 对数频率特性的绘制	108
2.9 多变量数字自动系统的传递函数	127
第三章 数字自动系统中的随机过程	133
3.1 引言	133
3.2 相关函数	138
3.3 平稳随机过程的谱密度	145
3.4 典型的栅状平稳随机过程	150
3.5 随机信号通过线性系统	160
3.6 线性化数字自动系统中稳态误差的计算	167
3.7 数字自动系统电平量化附加误差的计算	170
3.8 量化噪声的相关函数和谱密度	183
3.9 随机信号通过开环系统中的非线性环节	201
3.10 非线性闭环系统中的随机过程	220

3.11 具有随机离散周期的系统	234
第四章 输入作用的统计特性已知时, 线性化数字	
自动控制系统动态的最优综合	241
4.1 控制系统综合的一般概念	241
4.2 品质判据和综合方法	247
4.3 维纳滤波器的理论基础	260
4.4 数字系统中维纳滤波器的应用	279
4.5 卡尔曼滤波器的理论基础	293
4.6 形成滤波器	310
4.7 卡尔曼最优滤波器在控制系统中的应用	328
第五章 输入作用的统计特性不知道时, 线性化数	
字自动系统的动态综合	341
5.1 概况	341
5.2 复现有用信号所需精度的保证和极限滤波器	343
5.3 设计具有给定稳定余量的控制系统的一 般原则	370
5.4 数字控制系统的典型传递函数	402
5.5 校正装置的计算	423
5.6 复合控制	461
第六章 数字自动系统中由于电平量化引起的周期状态	492
6.1 考虑一个量化元件时对称周期状态的近 似计算	492
6.2 准周期状态	507
6.3 数字自动系统中周期状态的准确算法	513
6.4 确定对输入和输出变换器的要求	533
附录 积分表	545
参考文献	547
索引	555

第一章 数字控制系统的一般概念

1.1 数字控制系统的结构

由于数字装置，特别是数字计算机（IBM）具有很大的运算能力和逻辑判断能力，因而决定了它可用于控制自动化对象。以现代离散微电子技术为基础构成的数字处理装置，与连续装置比较具有很大的优越性，如高度稳定、没有漂移、运算精度高、重量轻、体积小、运算速度快、结构改装方便，等等。

目前，设计一个数字自动控制系统（LIAC），可以按两个方向进行。第一个方向是采用集中控制的数字计算机，这可按一般设计通用计算机的原理组成。这样的机器（图 1.1）包括运算器，存储器（长期的和操作的），控制器和信息的输入和

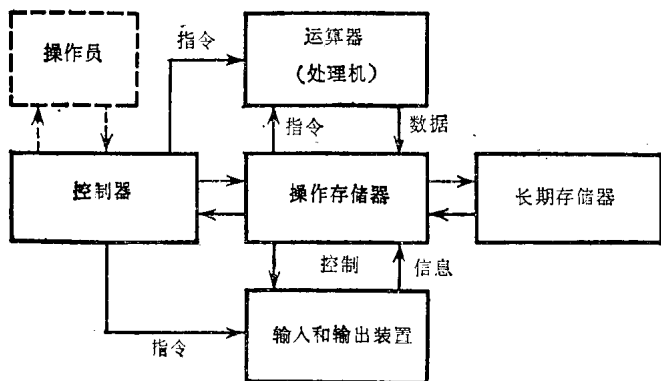


图 1.1 数字计算机的一种可能的结构图

输出装置。在某些情况下, 还需要人(操作员)参加检查和校正机器的工作。

这种计算机可用于控制复杂的对象(飞机、火箭、轧钢机、高炉等), 或在各种工业部门(冶金、化工、石油加工等)实现综合自动化时, 用于控制一组独立的对象。

用于上述情况的数字自动系统的一般结构图如图 1.2 所示^[8,84,121]。系统包括一系列的用交换器 K_1 控制的输入变换器 $\Pi_1, \dots, \Pi_m$, 和一系列实质上是存储器并用交换器 K_2 控制的输出变换器 $3Y_1, \dots, 3Y_k$ 。信号由存储器取出, 送到执行装置 $ИY_1, \dots, ИY_k$, 然后作用于一个(或几个)控制对象上。实际上, 数字计算机包括带有存储器和控制器的处理机。

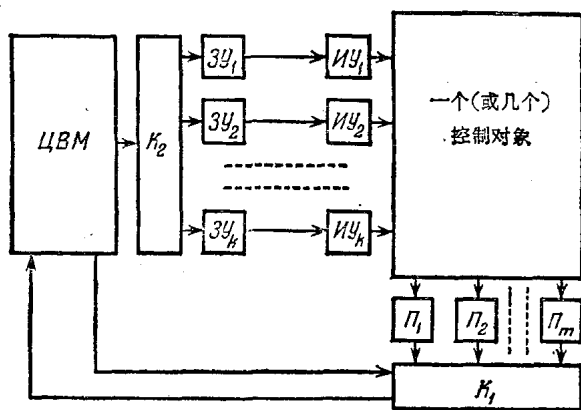


图 1.2 具有数字计算机的控制系统一般结构图

如果对复杂的多变量对象实行控制, 那么这种系统就是相关的多变量系统; 如果对一组互不关联的单变量对象实行控制, 那么这种系统就是非相关的多变量系统。

在后一种情况下, 可把数字自动系统分解为一组单变量系统。

当控制一个复杂对象或一组对象时，处理机轮流为各个控制通道服务。服务的顺序可以按硬程序进行或者按各通道提出请求使用的情况，给予最急需的情况优先服务。当按硬程序为各通道服务时，离散周期通常是固定的，即使各个通道的周期可能不同。当按软程序服务时，离散周期可能是具有某种数学期望和方差的随机量。

单变量系统通常是要研究的基本形式。具有计算机的单变量系统如图 1.3 所示^[8]。它包含有将连续量变为数码的输入变换器 $H-K$ 。要实行数码化的量可能是输入的给定作用 $g(t)$ (它是被控量 $y(t)$ 希望达到的值)，以及从外面加进来的其他信息。数码化的结果，进入数字计算机输入端，或准确地说，进入处理机输入端的是这些量的数字表示： g_c 和 y_0 。

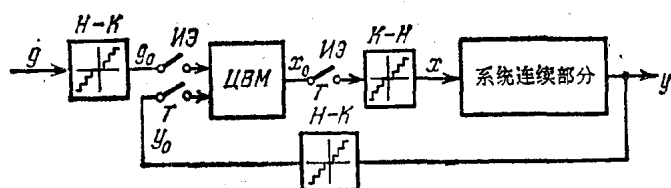


图 1.3 具有数字计算机的单变量控制系统

表 1.1

性 能	单位	1965 年	1970 年	1975 年	k_y
体积	英寸 ³	42.5	10.7	2.3	20
重量	公斤	34.0	9.1	2.7	13
功耗	瓦	170	50	17	10
快速性	微秒	115	17	2.8	40
价值	千美元	100	19	5	20
无故障平均工作时间	千小时	5	70	200	40

这些量进入处理机的离散化用离散周期为 T 的脉冲元件 $ИЭ$ 表示。处理机的输出量 x_0 是控制信号的数字表示。然后,这些量通过将数码变为连续量的变换器 $K-H$, 变换为连续量 $x(t)$ 。在大多数情况下,这个量是电压。然后这个量进入系统的连续部分,这里包括控制对象、执行装置、放大器、连续校正装置等。

目前,这种类型的控制数字计算机,按其应用的技术领

表

弹上数字计算机的类型	运算时间,微秒		
	加	乘	除
IBM 型,用于“土星-5”火箭	32	328	656
D37B,用于“民兵-B”火箭	78	1016	2030
用于“大力神-3”火箭	156	1880	8000
UNIVAC-1824M, 用于“大力神-3C”火箭	—	—	—
用于“阿特拉斯-E”火箭	128	896	—
用于“阿特拉斯-半人马星”火箭	6	22.5	40.5
IBM 型,用于“杰明(Джемини)”宇宙飞船	140	420	840
IBM 4P/1C	15	51	—
UNIVAC-1830A	4	20	34
D26C	6—12	18—45	106—112
D26I	12—18	42—234	—
L-90I	7	105	203
Adept 101—Adept 108	1.25—10	7.5—60	—
ADD-1020	12	150—186	225
PICO	12	242	606
Rajtheon-RAC-230	2.6	11.4	11.4

域(控制运动对象: 航空、宇宙飞行、航海;控制工艺过程)具有不同的特点.由于微电子学的飞跃发展,使得计算机技术得到巨大进展.为了说明情况,表 1.1 列举了某些假设的(“中等的”)数字计算机改装为火箭的弹上数字计算机的资料^[13].

指数 k_1 是十年内数字计算机的性能改善系数.

表 1.2 中列出了某些弹上计算机的比较详细的资料^[130].根据弹上计算机在各种类型火箭上的使用特点,表中列举了

1.2

存 储 器			重量 公斤	体积 英寸 ³	功耗 瓦
类 型	位数	容量(字)			
磁心	28	4096	36.5	57	138
磁盘	27	6912	15	20.2	169
磁鼓	24	9792	14	—	90
细薄带	16	12096	44	48.1	155
	24	8096			
多孔磁心	28	2048	6.8	—	50
磁心	24	8192	32.6	15	190
磁心	39	4096	27	45	85
磁心	8	16384	12.3	13	75
磁心	30	4096	90	71.5	56.7
磁心	30	16384	16.5	18.4	192
		32768			
磁心	30	1024	4—6	4.2—8.5	50—100
		16384			
磁心,玻璃线	28	8192	10	11.5	30
正交磁心	36	32768	—	—	—
细薄带	24	4096	30	25	202
		7168			
双轴磁心	24	2560	9	11.5	46
		7680			
磁心	24	4096	9	10.8	95

所采用的主要部件和数字机的许多基本特性，如位数、速度、存储量。

目前，研究数字自动系统的第二个发展方向是利用独立的数字计算机（相加器、积分器、函数器等），保证单变量或多变量控制系统的每一个控制通道都获得必需的运算和逻辑判断功能。这样的数字装置可用不同的原理构成，但是这时控制系统的一般结构图形式上仍然不变，且包括有图1.3所示的主要部件：把连续量变为数码和把数码变为连续量的变换器，以及保证必需的操作运算的处理机。

在许多情况下，采用这类数字装置能使控制系统简化，其原因是采用简单而可靠的模型，避免由一台数字计算机为多个用户服务的相当复杂的组织过程，简化交换线路，并且可以把数字计算部分直接安装在控制通道的主要部件附近。

由于每一个通道都采用自己的计算装置保证多通道以并程序工作，能够在很大程度上降低对各离散器件工作速度的要求，这就有可能提高工作的可靠性。

如果在这两种情况下，离散周期保持不变（或随机变化）并且相同，那么在数字控制系统中进行的动态过程的数学描述方面，这两种形式（采用集中计算机和采用独立计算机）没有什么不同。

1.2 自动控制系统中数字计算机所要解决的问题

在数字自动控制系统中，数字计算机所要解决的问题是极不相同的。这些问题可能是：对送来要求进行计算和逻辑判断的信息进行处理；为了改善控制系统的动态特性而在系统的数字部分实现某种校正程序，使系统实现自适应和最优控制，进行操作检查，工作前准备，寻找故障，等等。

在这些问题中,有两个问题是自动控制系统中最常见的。其中第一个问题是,为了确定控制系统应该复现的给定作用,要求进行计算的工作量很大。在很多情况下,特别是在目前的情况下,必须大大提高各种用途的控制系统精度,而连续计算装置已经无法满足这种不断增长的要求。在这种情况下,必须采用数字计算技术。数字计算机的任务有时可能只是确定给定作用与控制作用之间瞬时的差值,就是说实质上,这时数字计算机只是起着闭环控制系统的比较装置的作用。但是,要定出这个差值,有时要进行大量的计算,而这不是任何一种控制计算机都能胜任的。

作为一个例子,我们来研究装在运动对象(例如船舶)上的某种观测器轴线(图 1.4)的稳定问题^[10]。在该图上标明了空中被观测点对地球坐标系的转角——方位角 A 和高低角

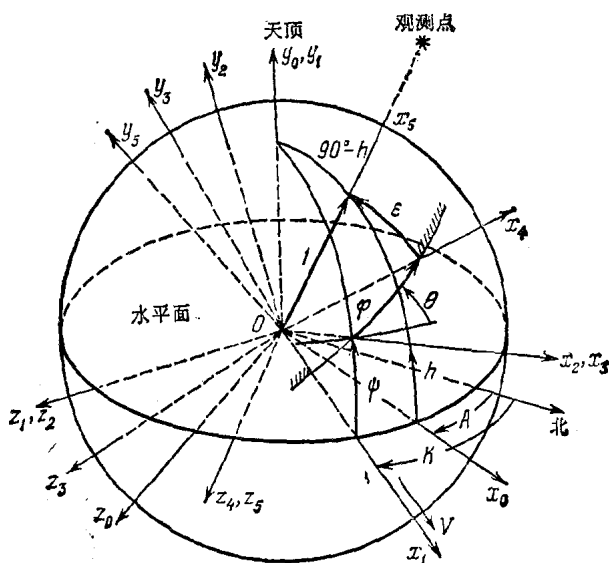


图 1.4 研究运动对象上观测器的稳定问题

h , 而坐标轴的方向是向北向东, 且对地垂直; 对象对同一坐标系的转角——方向角 K , 倾差 ϕ 和倾侧 θ . 设运动对象移动时, 要求指向被观测点的方向保持不变.

设在指向被观测点的方向上取单位向量, 并求该向量在坐标系 $Ox_1y_1z_1$ 水平轴上的投影. 然后, 将该坐标系依次转过倾差角 ϕ , 倾侧角 θ , 观测器轴线的转角 ϕ 和 ε . 经这些转动后, 坐标系 $Ox_5y_5z_5$ 就将处在这样的位置上, 它的 Ox_5 轴将和单位向量重合, 而 Oy_5 和 Oz_5 轴与它垂直. 这时, 单位向量在 Ox_5 轴上的投影等于 1, 而在其他两轴上的投影等于零. 用条件 $y_5 = 0$ 和 $z_5 = 0$ 指明转角 φ 和 ε 已正确实现, 并且观测器已指向空中的给定点.

当坐标系 $Ox'y'z'$ 对 Oz' 轴转过某 α 角时(图 1.5), 相应的坐标变换公式为

$$\left. \begin{aligned} x'' &= x' \cos \alpha + y' \sin \alpha, \\ y'' &= y' \cos \alpha - x' \sin \alpha. \end{aligned} \right\} \quad (1.1)$$

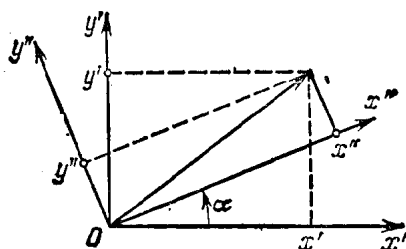


图 1.5 坐标变换问题

使用所谓坐标变换器, 便可按公式 (1.1) 对坐标进行换算. 可以采用数字计算机作为这样的变换器. 为了依次完成转过角度 h , $K-A$, ϕ , θ , φ 和 ε , 需要六台坐标变换器. 这种计算装置的结构图示于图 1.6. 原始单位向量依次转过的角度应从相应的角数码传感器送进数字计算机. 这些角传感