

数字调节系统



73.8203
555

数字调节系统

〔西德〕 R. 依扎尔曼 著

王振淮 赵鉴超 译

刘豹 贺国光 校



机械工业出版社

74.7.18/28

本书系统地介绍了用计算机实现数字调节系统的设计问题。介绍了各种调节算法和控制算法,以及对这些算法和相应的调节回路所作的实验,归纳列出了许多有价值的数据和表格,进行了详尽的分析讨论和评价。

本书内容深入浅出,取材得当,实用性强。全书共三十章,包括过程和过程控制计算机、确定性扰动调节、随机扰动调节、多回路调节、多变量调节、信号滤波和状态估计、自适应调节、过程控制计算机的数字调节系统等方面内容。

本书可供从事生产过程自动化、计算机应用技术以及航空航天等自动控制领域工作的科技人员阅读,也可作为自动控制专业、生产自动化专业和计算机应用专业的研究生和大学高年级学生的参考书。

Digitale Regelsysteme Rolf Isermann

Springer-Verlag

Berlin Heidelberg New York 1977

* * *

数字调节系统

〔西德〕R. 依扎尔曼 著

王振淮 赵鉴超 译

刘 豹 贺国光 校

*

机械工业出版社出版 (北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可出字第 117 号)

北京市密云县印刷厂

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 787×1092¹/₃₂·印张 18·字数 390 千字

1983 年 4 月北京第一版·1983 年 4 月北京第一次印刷

印数 (0,001—8,400·定价 2.75 元

*

统一书号: 15033·5401

译 者 的 话

数字技术的发展,正在引起自动化仪表和装置的新变革。1975年以来,以微型计算机为基础的数字调节器和可以自由编程的控制装置投入了市场,其进展日新月异,应用日趋广泛。数字调节技术比模拟调节具有更多的优点,诸如便于实现多功能计算调节控制、高精度数字定量配比控制、自适应控制、异常自动诊断、自动安全停车控制、各种调节算法的选择、过程特性自动辨识等等。尤其是便于实现调节器之间的数字通讯、相互冗余,这是模拟调节难以实现的。在我国,数字调节技术正在受到各方面的重视。鉴于目前国内专门论述过程控制计算机和微型计算机在控制调节方面应用的书籍尚不多见,我们翻译了这本书。望能对从事自动控制工作的技术人员有所帮助和借鉴。

本书的内容比较实用,论述比较系统、浅显,并有许多实验数据可供参考。具备一定线性调节理论和调节技术的基础知识即可阅读。

本书共三十章:前言、第一至十一章、二十三至三十章,由王振淮译;第十二至二十二章,由赵鉴超译。

全书由天津大学刘豹教授和贺国光老师详细审阅校订。在翻译过程中,得到天津工业自动化仪表研究所的领导的大力支持和帮助,译者表示衷心感谢。

由于译者水平有限,书中错误和不当之处在所难免,诚恳希望读者批评指正。

译 者

前 言

大规模集成电路的出现，以及由此而产生的廉价数字处理机和数据存贮器，对测量和调节技术产生了越来越广泛的影响。

过程控制计算机

从1960年起，过程控制计算机开始用于过程自动化。经过10~12年之后，过程控制计算机便成为很多自动化系统的标准设备。1960年德意志联邦共和国约有140台过程控制计算机用于过程自动化，1972年达900台，1975年2500台，1976年3300台，到1977年在各个领域总共装用了13000台。这一数字约等于在联邦共和国使用的通用计算机的数字。硬件的费用不断地下降，而软件的费用却相应地提高了。这是一种普遍的发展趋势。

就自动化而言，过程控制计算机至今主要被用于大型工矿企业的数据处理、记录、监视、控制和调节。在大多数情况下，这些任务都集中给一台或几台过程控制计算机。数字信号处理渗透到测量和调节技术中的第一阶段是以“集中控制”为特点的。

为了避免因中央计算机发生故障而使生产停顿，不得不设置类似的备用系统或并行的备用过程控制计算机，所以集中控制往往不能充分发挥数字信号处理的优点。过程控制计算机的短暂的溢出也可能造成事故。

微处理机

1970年首批微处理机在市场上出售。利用微处理机，再

配上大规模集成的半导体存贮器和输入/输出设备,就能组成廉价的微型过程控制计算机。微型过程控制计算机与大型过程控制计算机的不同之处,在于它的硬件和软件能灵活地适应特定的规模较小的任务。此外,这种微型的过程控制计算机,至今大都采用较短的字长,较低的工作速度和指令较少的小规模的操作系统。它能应用于各个方面,因而可以大批量地生产,从而降低硬件成本。

利用这种微型过程控制计算机能够组成分散的自动化系统。于是可将集中由一台过程控制计算机完成的任务分派给各个微型过程控制计算机。再配上数字总线以及上一级过程控制计算机,就能组成各式各样的能够适应不同过程的积木式自动化结构。这样就可避免中央计算机负担过大,用户软件过于庞大和层次不清,以及计算机故障率高等弊病。另外分散系统能够逐步地投入运行,并能用相互冗余组成(受干扰的可能性小)以及节约电缆费用等。事实表明,数字过程信号处理的第二阶段将是以分散控制为特点的。

数字测量和调节技术

微型过程控制计算机除用于分散型自动化系统的分站之外,现在越来越多地用于测量仪表和调节装置中。自1975年以来,以微处理机为基础的数字调节器和可自由编程序的控制装置已陆续提供给市场。

数字调节器能代替很多模拟调节器。由于传感器、变送器用模拟信号传送测量信号,数字调节器一般在其输入端需要设置一个模/数转换器;为了控制用模拟技术设计的执行器,在其输出端需要设置一个数/模转换器。可是从长远的观点来看,数字化将扩展到传感器和执行器。从而不仅可能去掉模/数转换器和数/模转换器,而且可以解决干扰问题。还

1110862

可以采用数字输出的传感器或在数字变送器中进行信号的预处理（量程的选择、非线性特性曲线的修正、不可直接测量参数的计算、故障的自动识别等）。比如电动步进电机就是带数字控制装置的执行器。

然而数字调节器不仅仅能代替一个或几个模拟调节器，而且还能另外地执行以前由其它仪表承担的功能，或者完成新的功能。附加功能包括设定值的时间程序控制，各种被测量和控制量的自动切换，与工作点有关的调节器参数的自适应控制，极限值监视等。能完成的新功能有：与其它数字调节器通讯；相互冗余；故障的自动识别和诊断；选择各种调节算法；特别是自寻最优的自适应调节算法的选择。在一个数字调节器内能实现全部的调节功能，如串级调节、有耦合调节器的多变量调节、前馈调节。前馈调节在投入运行时或投入运行后很容易由软件来修正或改变。最后能在很大的数字范围内实现调节器参数和采样时间。

可以预计，数字测量和调节技术将与久经考验的模拟测量和调节技术并驾齐驱，并将取而代之。

数字调节

与模拟调节相比，用过程控制计算机或微型过程控制计算机实现的数字调节有如下的一些特点：

调节算法和控制算法是用软件（或固件）来实现的；
时间离散化（被采样的）信号；

通过模/数转换器、中央处理单元和数/模转换器的有限字长所得的幅值整量化信号。

以软件形式提供的调节算法和控制算法具有极大的灵活性，所以可以不象模拟调节那样仅仅限于使用有 PID 作用的标准化的部件，而可以采用更高级的算法，并可以应用采样

调节的现代设计方法。

已有很多著作论述了如何在差分方程、向量差分方程和 z 变换的基础上,对线性采样调节进行理论探讨和如何设计线性采样调节系统等问题。可是,对采样调节的各种设计方法作总结和对比,并能用来设计适合各种过程的调节算法和控制算法的著作至今尚未问世。另外,这样的一部著作中还必须研究下列问题:实际可得到的数学模型的形式和精度;设计时的计算工作量;求得的调节算法的性能,比如调节品质与整定计算工作量的比,在各种过程和各种扰动信号下的特性及对过程状态变化的灵敏度。最后,还要研究通过采样和幅值整量化产生的不同于模拟调节的调节方式。

本书内容

本书研究了用过程控制计算机和微型过程控制计算机实现的数字调节系统的设计问题。根据确定性信号和随机信号线性采样调节的著名理论,本书选择了恰当的设计方法,并对这些方法做了改进。既研究了依据古典控制论得到的参数最优化的补偿调节算法和无振荡调节算法,也研究了经过状态变量表达式和参数的随机的过程/信号模型,由现代控制论得出的状态调节算法和最小方差调节算法。为研究各种调节算法和控制算法的性能,对本书研究的各种算法和相应的调节回路几乎全在数字计算机上进行了模拟,所有的算法都在有软件程序包的过程控制计算机上作了计算机辅助设计。用模拟仿真过程和工业上的典型过程在联机操作下做了实际试验,并按照各种观点对这些算法做了详尽的比较。

第二章对数字调节的信号流和设计数字调节系统应采取的步骤作了说明。第三章介绍了工业过程的基本类型,归纳了离散时间信号的数学过程模型,阐述了这些数学模型的获

得和简化问题。

本书的其它内容可从如下各篇得知：

第二篇 确定性扰动的调节

第三篇 随机扰动的调节

第四篇 多回路调节

第五篇 多变量调节

第六篇 信号滤波和状态估计

第七篇 自适应调节

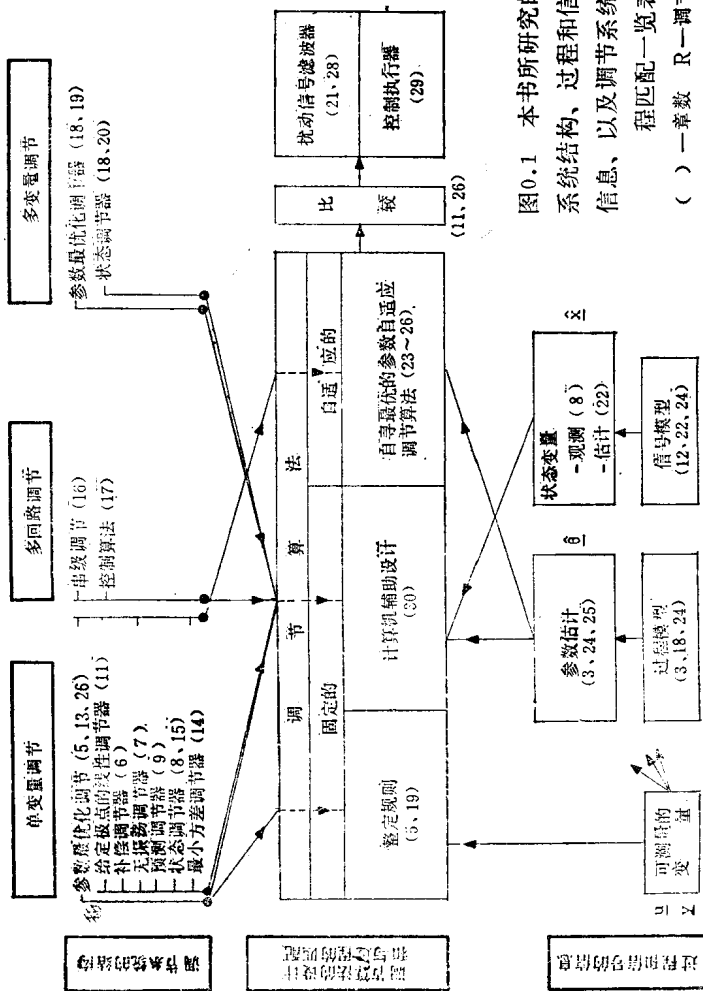
第八篇 用过程控制计算机和微处理机进行的数字调节

本书所研究的内容在图 0.1 中做了概括。从图中可看出设计数字调节系统时必须经过的主要程序，请参看第二章。

关于本书的内容还要作如下说明：主要以差分方程或向量差分方程形式的参数模型作为过程和信号模型，因为现代的设计方法是建立在这些模型的基础上的，过程可以只用很少几个参数来描述，用极短的计算时间就能求出时间域内的设计方法和结构最优的调节系统，还因为这些模型是参数估计算法的直接结果，并能直接用来观测和估计状态变量。非参数模型，比如表格形式的阶跃函数值或频率响应值就不具有这些优点，它们限制了设计的可能性，特别是限制了计算机的辅助设计和自适应调节算法。

第四章，特别是图 4.3 和第 12.1 节给出了为确定性扰动信号和随机扰动信号设计的调节算法的概貌。

在第五章中，对具有比例(P)、比例积分(PI)和比例积分微分(PID)作用的参数最优化调节算法，不仅借助于已知的模拟调节器做了推导和设计，而且越出了连续信号的范围，还研究了一般的低阶离散调节算法。从参考文献中总结出选择采样时间的准则和调节器参数的整定规则。根据大量的模



拟结果提出了新的建议。另外对计算机辅助设计作了说明。

第七章所介绍的无振荡调节器是因其设计工作量小而著称的。特别是改进后的高阶无振荡调节器对于自适应调节极为重要。

第八章对状态调节器和状态变量观测器的设计作了介绍。其中讨论了调节外部扰动信号的调节器和观测器的设计问题,阐明了为了能在过程控制机中实现所应作的其它改进。在这方面既要根据二次型函数的极小化,也要通过极点配置来进行设计。

第九章研究如何在预测调节器的作用下调节滞后时间长的过程。对各种调节算法作了对比。对比的结果表明,带有观测器的状态调节器比较优越。

因为设计调节系统时必须考虑过程状态的不断变化,所以第十章对各种调节算法的敏感性进行了研究,并对如何降低敏感性的问题作了解释。

接着在第十一章对为确定性信号设计的各种重要的调节算法作了对比,既比较了调节回路的极点和零点,也比较了调节品质、整定计算工作量、敏感性、综合工作量和连续计算工作量。最后对如何选择调节算法作了说明。

第十二章扼要地介绍了带离散时间信号的随机信号过程的数学模型。在第十三章中指出,当存在随机扰动信号影响时怎样调整参数最优调节算法的最优参数。在第十四章中,根据参数的随机过程模型和信号模型设计的最小方差调节器做了公式推导和分析。考虑到在自适应调节中的应用,以定参数的形式发展了改进后的最小方差调节器。

在第十五章中,研究了用于随机扰动的状态调节器。为了设计串级调节形式的多回路调节系统和前馈调节系统,第

十六、十七两章分别考察了几个实际例子。用控制算法的各种设计方法，比如通过参数最优化和按最小方差原理的设计方法，进一步充实了调节算法的设计。

对于多变量调节系统调节算法的设计来说，多变量过程的结构是重要的，见第十八章。在本章既对传递函数表达式作了说明，也对状态表达式作了解释。用参数最优化调节算法设计多变量调节系统要考虑主调节器、耦合调节器（具有耦合增强趋势或耦合减弱趋势）、稳定区域、主调节器的相互作用、双变量调节系统的整定规则。请见第十九章。

在第八章的基础上，第廿章介绍了带状态调节器的多变量调节系统的设计。

考虑到干扰信号的滤波问题，第廿一章介绍了低通和高通滤波器以及递推地求平均值的问题。接着第廿二章对时变状态变量的递推估计做了详细而清晰的推导。这些时变状态变量最终得出卡尔曼滤波器。卡尔曼滤波器是随机状态调节器必需的，并且它是测量不可直接测量状态变量方法的基础。

介绍自适应调节算法的第廿三到廿六章构成本书的另一个重点。在第廿三章对自适应调节算法作了简短的概括的介绍以后，第廿四章对用递推的参数估计法在线辨识动态过程和随机信号的各种方法进行了描述和比较。而后在第廿五章讨论了有状态信号和无状态信号闭环调节回路中的参数估计问题。最后通过参数估计法和调节器设计方法的恰当结合得出不同的自寻最优的自适应调节系统，参见第廿六章。特别是那些需要的设计费用较小，并能满足闭环调节回路中可辨识条件的调节算法，也就是无振荡调节器和最小方差调节器最适用于最优化的自适应调节。在一台过程控制计算机中，为 20 种不同的自适应调节算法编了程序，并在联机操作下用

模拟仿真过程和典型的工业过程作了试验和对比。很多例子表明，这些新研制的数字式自适应调节系统，具有快速的收敛特性和良好的调节品质，只有两个调节系统例外。

在本书的最后一篇中，第廿七章研究了由幅值整量化或舍入误差引入的非线性和由此而产生的效应，比如数字调节时的稳态偏差和极限环；数字控制和滤波器的死区。第廿八章研究了模拟的和数字的干扰信号的滤波问题。第廿九章介绍控制和调节执行器的各种可能性。

在为调节算法的计算机辅助设计准备的一个程序包中为本书中所研究的很多设计方法编了程序。第三十章扼要地介绍了计算机辅助设计的过程，指出借助在线程序包如何应用经过试验获得的模型，以及怎样按照典型过程进行计算机辅助设计的问题。利用这种程序包在计算机辅助下能很快地设计出数字调节系统(调节回路，调节算法和控制算法)，并能对设计出的调节系统进行改进、选择和在线机操作下试验，而勿须详细地掌握其中所包括的全部综合方法。

本书是为工业和研究部门的工程师和工科的大学生们撰写的。阅读本书的前提是线性调节理论和调节技术的基础知识。同样还应掌握对线性离散时间调节系统(采样调节)进行理论处理的基本知识。如需要的话，可借助本书第3.2.1节到3.2.3节中最主要的方程式和给出的参考文献来补充所缺少的知识。当然，研究线性采样系统首先必须与学习密切结合。由于差分方程容易处理和能够直接编程序，所以数字调节系统的设计往往比带连续信号的调节系统的设计简单。

本书所介绍的方法和研究成果，很多是在执行联邦政府第二和第三个数据处理规划中，设计具有数据处理装置的过程控制系统时获得的。这些研究计划曾得到联邦政府研究技

术部和德国研究协会的资助。对于这些支持作者表示衷心的感谢。

作者感谢那些在多年的共同工作中用他们的实际行动参与例题的计算、程序包的设计、在数字计算机和模拟计算机上的模拟、在各种过程上的实际试验和手稿的订正工作的同事们。

R. 伊扎尔曼

目 录

第一章 引言	1
--------------	---

第一篇 过程和过程控制计算机

第二章 用数字计算机(过程控制计算机、微处理机)进行的 调节	5
---	---

第三章 过程	11
--------------	----

3.1 工业过程的基本类型	11
---------------------	----

3.2 离散时间信号过程的数学模型	13
-------------------------	----

3.2.1 差分方程, z 传递函数	14
----------------------------	----

3.2.2 向量差分方程	18
--------------------	----

3.2.3 从微分方程和 s 传递函数中计算差分方程和 z 传递 函数	28
--	----

3.2.4 离散时间信号过程模型的简化	35
---------------------------	----

3.3 过程模型的获得——模型建立和辨识	41
----------------------------	----

第二篇 确定性扰动的调节

第四章 确定性调节	43
-----------------	----

第五章 参数最优化调节器	51
--------------------	----

5.1 连续的 PID 调节器的微分方程的离散化	51
--------------------------------	----

5.2 参数最优化的离散的低阶调节算法	53
---------------------------	----

5.2.1 一阶和二阶的调节算法	57
------------------------	----

5.2.2 预先给定第一个控制量的调节算法	61
-----------------------------	----

5.3 离散的 PID 调节算法的几种形式	63
-----------------------------	----

5.4 模拟结果	66
5.4.1 试验过程	67
5.4.2 二阶调节算法的模拟结果	69
5.5 参数最优化调节算法中采样时间的选择	82
5.6 参数最优化调节算法的整定规则	86
第六章 补偿调节器	94
第七章 调节时间有限的调节器 (无振荡)	99
7.1 未给定控制量的无振荡调节器	99
7.2 给定控制量的无振荡调节器	104
7.3 无振荡调节器采样时间的选择	109
第八章 状态调节器	111
8.1 对初始值最优的状态调节器	112
8.2 对外部扰动最优的状态调节器	125
8.3 预先给定特征方程的状态调节器	130
8.4 模态的状态调节	132
8.5 有限调节时间 (无振荡) 的状态调节器	137
8.6 状态变量-观测器	139
8.7 带观测器的状态调节器	143
8.7.1 初始值观测器	144
8.7.2 外部扰动观测器	146
8.8 降阶的状态变量观测器	156
8.9 关于加权矩阵和采样时间的选择	161
8.9.1 状态调节器和观测器的权矩阵	162
8.9.2 采样时间的选择	163
第九章 大滞后过程用的调节器	165
9.1 带纯滞后的过程的模型	165
9.2 用于滞后过程的确定性调节器	167
9.2.1 滞后大并带有附加动态的过程	167
9.2.2 纯滞后过程	170

XV

9.3 用于滞后过程的各种调节器	
的调节品质和灵敏度的比较	175
第十章 用恒定调节器调节可变的过 程	183
10.1 关于调节系统的灵敏度问题	184
10.2 参数变化大的过程的调节	190
第十一章 调节确定性扰动信号的各种调节器的比较	192
11.1 调节器结构、极点和零点的比较	192
11.1.1 给定极点的一般线性调节器	194
11.1.2 低阶的参数最优化调节器	196
11.1.3 普通补偿调节器	196
11.1.4 无振荡调节器	197
11.1.5 预测调节器	199
11.1.6 状态调节器	200
11.2 用于性能比较的特性值	203
11.3 调节算法的品质比较	205
11.4 动态调节因数的比较	219
11.5 关于调节算法应用的几点结论	228

第三篇 随机扰动调节

第十二章 随机调节	231
12.1 引言	231
12.2 随机信号过程的数学模型	232
12.2.1 基本概念	232
12.2.2 马尔可夫信号过程	235
12.2.3 纯量随机差分方程	238
第十三章 随机扰动信号的参数最优调节器	240
第十四章 随机扰动信号最小方差调节器	244
14.1 用于无滞后过程的广义最小方差调节器	244
14.2 用于带滞后过程的广义最小方差调节器	255