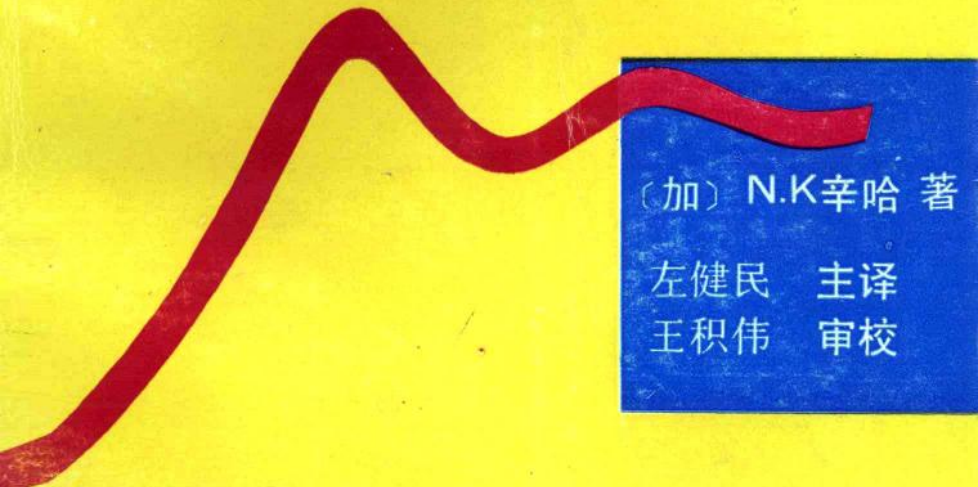


控制系统



(加) N.K辛哈 著

左健民 主译
王积伟 审校

河海大学出版社

控 制 系 统

[加]N. K. 辛哈 著

左健民 主译

王积伟 审校

河海大学出版社

(苏)新登字第 013 号

责任编辑 魏 连

控 制 系 统

左健民 主译

王积伟 审校

出版发行: 河海大学出版社
(南京西康路 1 号, 邮政编码: 210024)

印 刷: 南京航空航天大学印刷厂
(南京卫岗 邮政编码: 210014)

开本 850×1168 毫米 1/32 印张 12 字数 301 千字
1992 年 8 月第 1 版 1992 年 8 月第 1 次印刷
印数 1—2150

ISBN 7—5630—0225—1

TH·6

定价: 10.00 元

河海版图书若有印刷装订错误, 可向承印厂调换

译者序

随着科学技术的日益发展、计算机技术的普及和应用,《控制工程基础》这门课程已成为机电一体化、机械制造、机械设计等机械类工科学生必需掌握的专业基础知识,为了适应这个需要,我们在近年开设《控制工程基础》课程的基础上,结合教学实践,组织翻译了这本《控制系统》,该书是电子与计算机工程系列教材中的一本,由加拿大安大略州汉密尔顿市 McMaster 大学的学者 N. K. Sinha(辛哈)所著的一本控制理论基础方面的教材,书中叙述古典控制理论的同时引入了现代控制的基础内容。并在内容安排上具有独到之处。理论方面的叙述较为简单,没有繁琐的数学推导,侧重于应用,通过大量的例题使读者获得完整的理论训练,每章均附有小结和习题(部分习题有答案)。这些特点是区别于国内这方面的教材的最重要之处,也是我们选择它的根本所在。

本书第一章介绍了控制理论的发展情况;第二章介绍了物理系统的建模;第三章介绍了状态空间方法;第四章介绍了闭环系统的特性;第五章介绍了控制系统的时域响应和性能指标;第六章介绍了线性系统的稳定性和稳定判据及其在设计中的应用;第七章介绍了根轨迹方法的原理、特性及其应用;第八章介绍了频域分析方法,即伯德图、极坐标图,对数幅值和相角图以及传递滞后等内容;第九章介绍了频率响应的稳定性;第十章介绍了控制系统的补偿的概念及其补偿方法,提出了极点位置补偿的新方法;第十一章简单介绍了数字控制的概念,第十二章简单介绍状态空间设计方法。

根据实际需要,本书在翻译过程中对原著的内容上作了少量取舍,取消了第十三章非线性控制简介、附录中的矩阵变换、Z 变换和个别章节中少数难度较大的习题,对于原著附录 D 中收入的

计算程序,因考虑到目前国内同类书中这方面内容已屡见不鲜和篇幅等问题而没有编入,对此确有需要的读者可参阅原著。

本书由左健民主译,并负责全书最后的修改和统稿,参加翻译的有徐有忠(第一章、第二章、第三章、第四章、第六章)和魏连(第十一章、第十二章),其余由左健民翻译。最后由东南大学王积伟教授审校。在翻译过程中,得到了东南大学外语系舒洪同志、本校外语教研室单英同志的帮助和指点,在此特表示感谢。由于时间仓促,加上水平所限,文中定有许多不足之处,敬请广大读者指正。

左健民

一九九二年六月

前 言

教授控制理论是一项具有挑战性的任务。尽管实际控制系统通常是很复杂的,但是必须以简单的形式来表示它们以便于进行数学处理。在以往主要由于实际问题要求大量的计算,总存在着过分简化问题的趋势。而今天工程师和工科院校学生都很容易接触微型计算机,较繁琐的计算已不能成为一种限制了,但充分利用微机所存在的主要问题是缺乏为学习控制理论的学生所用的计算机程序。本书试图通过提供这些程序以及几个能应用于实际问题的程序来弥补这种不足。

本书作为控制系统的入门读物,其目的在于提供给读者控制理论的基本原理以及先前在时域和频域方面的发展,试图获得古典控制的基本原理,同时引入现代控制的概念,读者应时刻牢记廉价微机的作用。

本书在每章都含有大量的精心设计的例子,以助于解释已形成的理论和方法,第二章和第三章讨论了动态系统的建模,包括传递函数和状态空间模型,在第十章采用逻辑(合理)的和统一的方式介绍了控制系统的补偿。特别是大多数书上所介绍的用试验和误差的方法设计的超前补偿器最近已由直接设计方法所取代。此外,作为适用于大学生和从事实际工作的工程师的本书,首次包括了使用传递函数的极点位置补偿器的设计方法,这种补偿器把观测器和状态反馈控制器结合在一起,第十一章为数字控制,它是一个迅速发展的最新方法且使用广泛,它以适用于对研究对象的首次验证的方式出现,为此提供了许多实例以提高学习兴趣,第十二章以一种吸引学生和专业人员的方式介绍了状态空间方法,在第十一章中已提出的离散(时间)系统理论的基础上引入了能控和能观的概念,接下来是状态反馈理论。采用状态空间和传递函数方法

来决定状态反馈矢量,然后介绍了渐近状态观测器及其设计、讨论了状态反馈和观测器的设计,并将此与第十章中提出的传递函数法相联系起来。

在大多数工程学科中,人们必须解决许多数字问题以便能掌握各种各样的技术细节与技巧,并能处理工程设计问题。为了提高水平,每章都给出了许多实际问题。附录 D 讨论了数字计算并通过文件的形式给出了能适用于实际场合的程序清章。应该说明的是:在过去由于没有运用计算机,大多数有关控制系统的书仅限于二阶系统的问题。直到大约 1978 年,若某个问题要求找出高于二次的多项式的根的话,人们一般是放弃不干的,鉴于目前所有的工程师都可接触到可编程计算器或微型计算机,故试图通过引入适用于 HP-41C 编程计算器或 IBM-PC 的程序库来训练读者。

本书是供高年级工科学生和工程师之用的,不偏向于某一工程分支,尽管已预期读者在拉普拉氏变换、Z 变换以及复数等方面有一定的基础,但这些内容仍在附录中加以简述,在通过许多实际例子提高兴趣的同时,试图使读者获得一定的数学严密性。

过去的 3 年里,此书的早期版本在 McMaster 大学(位于加拿大安大略州汉密尔顿市)作为一学期的高年级有关控制系统方面的教材,由于高年级学生在低年级已完成了有关电路和系统方面的课程,他们在拉普拉氏变换、Z 变换、电路状态方程、运筹学、复数理论等方面有足够的基础,因此可用 13 周的学期内讲授此书的所有内容,如若有必要复习以上某些基础知识的话,可能就没有足够的时间来涉及全书的内容。此时,可以删去第十一章、十三章和十二章中的部分内容。

谢 启

我很高兴地感谢在本书的写作过程中得到的几个特别的帮助。尤其是 M. E. Van Valkenburg 教授,他是 Halt, Rinehart 和 Winston 所编电子和计算机工程系列教材的编辑,我的同事和朋友 O. Vidal 博士, S. Puthenpura 先生和已经毕业的 1983、1984 和

1985 届的学生阅读了部分手稿并提出了许多有价值的建议,滑铁卢大学的 G. J. Lastmn 帮我修改了一些用于 IBM—PC 个人计算机的 Pascal 程序。

在本书的写作过程中受到了 D. Moore 女士,电子和计算机工程丛书的年长的编者 Holt、Rinehart 和 Winston 的支持和鼓励,在此表示非常的感谢,还要感谢 McMaster 大学工程学院的文字处理中心的 Barbara Petro 夫人,L. Honda 小姐以及 J. Arsenault 夫人的帮助,他们耐心地打字和重新加印了几份文稿,Linda Hanter 女士打印了图稿的标题。

正如一个人不感谢他自己一样,对自己的妻子公开地表示感谢不是印度人的习惯,妻子被看成是丈夫的一部分,假设在她的丈夫写的任何书中她是合作者是不言而喻的,毫无疑问,如果没有 Meena's 的帮助,耐心和鼓励这本书将不可能写成。

N. K Sinha(辛哈)

目 录

第一章 绪 论	(1)
---------------	-----

第二章 物理系统的数学模型	(6)
---------------------	-----

§ 2-1 概 述	(6)
§ 2-2 物理系统的微分方程和传递函数	(6)
§ 2-3 机械系统的电模拟	(9)
§ 2-4 直流伺服电机电枢控制的模型	(14)
§ 2-5 方框图的化简	(16)
§ 2-6 直流位置控制系统	(24)
§ 2-7 梅逊公式	(26)
§ 2-8 小 结	(29)
§ 2-9 参考文献	(30)
§ 2-10 习 题	(30)

第三章 状态空间方法	(38)
------------------	------

§ 3-1 概 述	(38)
§ 3-2 状态空间表达式	(38)
§ 3-3 小 结	(56)
§ 3-4 习 题	(56)

第四章 闭环系统的特性	(63)
-------------------	------

§ 4-1 概 述	(63)
-----------------	------

§ 4—2	参数变化的灵敏性	(64)
§ 4—3	瞬态响应	(69)
§ 4—4	干扰信号的影响	(71)
§ 4—5	稳态误差	(73)
§ 4—6	反馈的缺点	(74)
§ 4—7	小 结	(75)
§ 4—8	参考文献	(75)
§ 4—9	习题	(75)

第五章 控制系统的性能 (80)

§ 5—1	概 述	(80)
§ 5—2	标准试验输入信号	(81)
§ 5—3	一阶系统的响应	(83)
§ 5—4	二阶系统的响应	(86)
§ 5—5	瞬态响应的性能指标	(92)
§ 5—6	稳态性能	(94)
§ 5—7	用闭环传递函数表示的稳态误差	(97)
§ 5—8	积分性能准则	(99)
§ 5—9	小 结	(101)
§ 5—10	习 题	(102)

第六章 线性系统的稳定性..... (106)

§ 6—1	概 述	(106)
§ 6—2	劳斯—赫尔维茨判据	(107)
§ 6—3	特 例	(109)
§ 6—4	相对稳定性	(112)
§ 6—5	设计中的应用	(115)
§ 6—6	状态空间表达式的稳定性	(116)

§ 6—7 小 结	(118)
§ 6—8 习 题	(118)

第七章 根轨迹方法 (121)

§ 7—1 概 述	(121)
§ 7—2 一个二阶系统的根轨迹	(122)
§ 7—3 根轨迹的基本原理	(125)
§ 7—4 根轨迹的几个特性	(128)
§ 7—5 设计中的应用	(144)
§ 7—6 灵敏度和根轨迹	(150)
§ 7—7 小 结	(152)
§ 7—8 参考文献	(153)
§ 7—9 习 题	(154)

第八章 频率响应图 (159)

§ 8—1 概 述	(159)
§ 8—2 传递函数的频率响应	(160)
§ 8—3 伯德图	(163)
§ 8—4 极坐标图	(178)
§ 8—5 对数幅值和相角图	(182)
§ 8—6 系统的传递滞后	(185)
§ 8—7 从伯德图推算传递函数	(187)
§ 8—8 小 结	(190)
§ 8—9 习 题	(190)

第九章 频率响应的稳定性 (193)

§ 9—1 概 述	(193)
-----------	-------

§ 9—2	幅角定理	(194)
§ 9—3	奈奎斯特稳定判据	(199)
§ 9—4	相对稳定性	(207)
§ 9—5	闭环频率响应	(212)
§ 9—6	纯延时系统	(218)
§ 9—7	小 结	(221)
§ 9—8	参考文献	(221)
§ 9—9	习 题	(222)
第十章 控制系统的设计和补偿		(228)
§ 10—1	概 述	(228)
§ 10—2	典型补偿器	(230)
§ 10—3	补偿的方法	(243)
§ 10—4	使用伯德图的补偿	(244)
§ 10—5	使用尼柯尔斯图的补偿	(251)
§ 10—6	使用根轨迹的补偿	(254)
§ 10—7	极点位置补偿	(261)
§ 10—8	PID 控制	(264)
§ 10—9	小 结	(266)
§ 10—10	参考文献	(266)
§ 10—11	习 题	(267)
第十一章 数字控制		(273)
§ 11—1	概 述	(273)
§ 11—2	数据发生器	(275)
§ 11—3	闭环离散(时间)系统的稳定性	(279)
§ 11—4	数字控制器的设计	(285)
§ 11—5	非周期性响应数字控制器的设计	(292)

§ 11 6 小 结	(294)
§ 11 7 参考文献	(294)
§ 11 8 习 题	(295)

第十二章 状态空间设计法..... (299)

§ 12 1 概 述	(299)
§ 12 2 离散(时间)系统传递状态的输入序列的确定	(299)
§ 12 3 能控和能观	(304)
§ 12 4 状态变量反馈	(311)
§ 12 5 状态变量反馈:传递函数方法.....	(319)
§ 12 6 渐近状态观测器	(322)
§ 12 7 观测控制器与补偿器的结合	(329)
§ 12 8 小 结	(335)
§ 12 9 参考文献	(336)
§ 12 10 习 题.....	(336)

结束语..... (343)

附录 A 拉普拉氏变换

附录 B 部分习题答案

第一章 绪 论

对于所有工程技术人员来说,控制系统的研究对象是最重要的。其目的就是要从重复烦杂的劳动中解放出来,而自动控制装置就可比较方便和经济地完成。近年来,半导体装置中大规模集成电路技术的发展和由此而制造的价格低廉的微处理器,以及在实际中作为控制系统集成部件的计算机的使用,使得控制装置变得更加便宜和先进。

从历史上看,在工业中使用的第一个自动控制装置是1767年由蒸汽机的发明者J·瓦特发明的飞锤调节器,这种装置的目的是要通过调节进入蒸汽发动机的蒸汽量来保持发动机的转速基本稳定,其原理如图1—1所示。在调节器上的两个飞锤相对于垂直轴按与发动机速度成比例的速度旋转。由于离心力的作用,飞锤向外运动。这个运动将通过一个机械连杆以及与其连接的蒸汽流量阀象人工一样地来控制进入发动机的蒸汽量,即当速度高时,蒸汽供应量就减少;而当速度太低时则增加供气量。

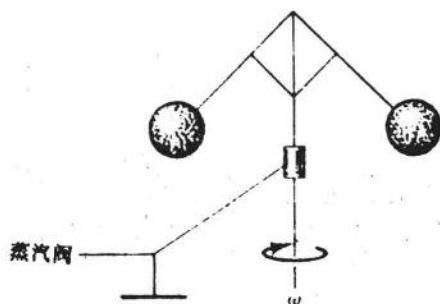


图 1—1 瓦特的飞锤调节器

人们发现,适当地设计蒸汽调节器能使发动机的速度保持在准确值的一个很小的范围内。同时也发现增大发动机轴和调节器之间的速比也可以增加调节器的灵敏度,但它将导致“振荡或在理想调整值波动。直到 100 年以后,其复杂的数学分析才有 J. C. 麦克斯韦尔(人们可能更了解他在电磁场理论方面的贡献)所完成。

许多年后人们才认识到所有控制系统的反馈工作原理,巧合的是,反馈放大器的理论也同时由电力工程师研究出来,并被应用于很长距离间的电话信号传递,特别是在 1930 年左右,奈魁斯特提出了稳定性的理论。第二次世界大战期间,自动控制理论得到了一个很大的推动,当时伺服机构被用来控制高射炮,战争以后,和平的应用随之而来,出现了飞机上的“自动驾驶仪”、自动控制的机床、自动控制的化工过程和自动调节发电厂的电压等等控制装置,尽管其最基本的理论基础是频率响应和拉普拉氏变换方法,但 1960 年出现的数字计算机的冲击导致了在时域理论中使用状态变量这一发展,这种理论对于复杂的多变量控制系统是非常有用的,因而常被用来处理较复杂的过程。现在由于计算机已经越来越便宜和紧凑,所以在更加高级的控制系统中常常使用其作为控制元件。

让我们来讨论一些控制系统的简单例子。图 1—2 所示的是 1940 年出现的控制电厂电压的原理图。一个操作人员通过观察与母线相连的电压表和调整变阻器来保持电压达到期望值。图 1—3 所示的是一个自动的电压调节器的原理。由图可知,调节器在工作中要把电压的实际值与期望值相比较,两者之差(或误差)经适当放大后输入伺服马达。伺服马达驱动一个与变阻器连接在一起的轴以改变磁场绕组电阻的方式来减小误差。在这里可以说利用“反馈实现自动控制。事实上,所有的自动控制系统都使用反馈,并可用如图 1—4 的方框图来表示。它能被看成是控制输出经反馈后与参考输入相比较。然后,其差(称为误差)被用来驱动系统的输出以接近于理想值(也就是参考输入)。

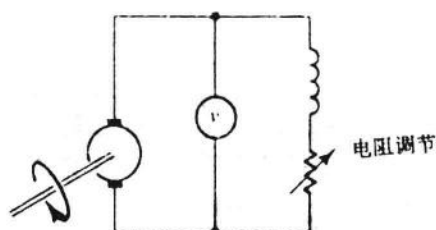


图 1—2 电压控制系统

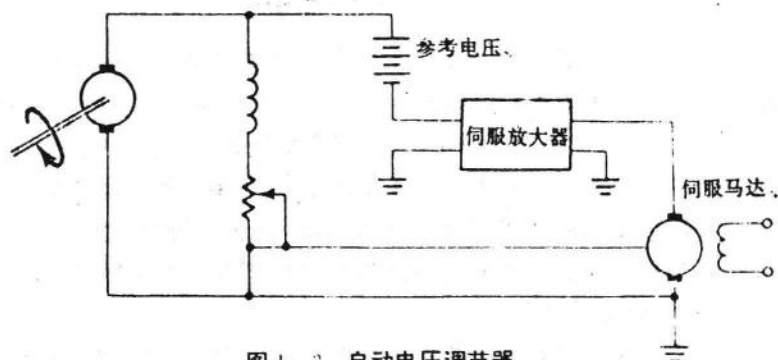


图 1—3 自动电压调节器

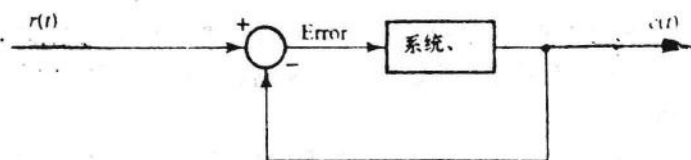


图 1—4 自动控制系统的方框图

另一个例子是家用供暖系统，一个恒温器测定温度，若温度比设定值低，则加热炉就开始工作；当温度超过另一个设定值时，加热炉

就停止工作,其方框图如图 1—5 所示。尽管它与图 1—3 和图 1—4 相类似,但是它只能被认为是一个开关型控制系统,而电压调节器是一个连续型控制系统。

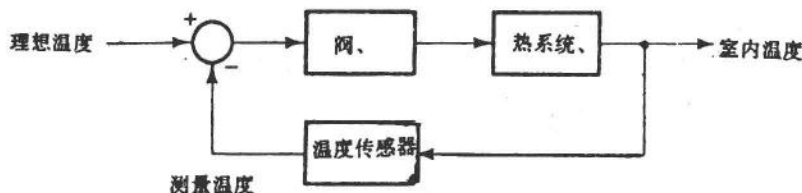


图 1—5 家用供暖系统

一开始人们就注意到增加回路的增益能提高系统的准确性,但是这将会导致系统不稳定或振荡。事实上,由于系统固有的时间滞后的影响,尽管系统被设计成负反馈,但在某些频率上也可能变成正反馈。因而,如果增益被增加到足够大,在这些频率上就可能产生振动。奈魁斯特稳定判据完善了负反馈放大器,在这个问题上提出了一个很好的解释。我们将在后面讨论怎样来提高系统的灵敏度(或准确性)而又不引起不稳定。

控制系统中使用的元器件有各种形式。例如:有机电的、电子的、热力的、液压的或气动的。为了能分析各种元器件的响应,我们必须用数学模型来代替它们,尽管这些装置的输入和输出之间基本上是用非线性微分方程表示,但是在工作点附近通常可以得到简单的线性模型,而这种模型是容易分析的、传递函数和状态变量模型是最常使用的模型。

在我们讲述控制理论中,将依据数学模型来进行分析和设计。尽管这种方法可能有时显得抽象,但必须认识到这些模型代表着真实的系统。虽然有各种各样的元件,但这种抽象在很大程度上对于发展成统一的自动控制系统理论又是必需的。问题的一个重要方面是从不同形式的物理系统得到数学模型,这将在第二章中讨论,在讨论中