

蔡 海 涛

副教授译

控制系统设计入门

(英) V. Weveleigh 著

湖南科学技术出版社

控制系统设计入门

蔡海涛副教授译

湖南科学技术出版社

内 容 提 要

本书译自Virgil W. Eveleigh 著的«Introduction to Control Systems design» 一书(MCGraw-Hill Book Company, New York, 1972)。

全书共十五章, 六个附录。前九章讲述控制系统设计的理论基础, 后六章讨论交流系统、状态空间概念、非线性系统、数据采样系统等。在附录中包含有模拟计算机与数字模拟方法等内容。

本书可供工程技术人员、大专院校有关专业的师生参考。

控制系统设计入门

〔英〕V. W. Eveleigh 著

蔡海涛 副教授 译

*

湖南科学技术出版社出版

(长沙市展览馆路14号)

湖南省新华书店发行

江西印刷公司排版 湖南省新华印刷二厂印刷

*

1981年10月第1版第1次印刷

开本: 850×1168毫米 1/32 印张: 19.25 字数: 645,000

印数: 1—4,300

统一书号: 15204·69 定价: 2.40 元

译者的话

本书是国外一本介绍自动控制系统设计的比较新的教材。全书共十五章。前九章属于与一般线性系统有关的分析与综合方法。这部分内容在我国一般自动控制系统的基础教材中虽有介绍，但本书的叙述比较从实用出发，适合于从事自动控制系统的实际工作者的需要。后六章内容比较新颖，如交流控制系统与采样系统的设计、状态空间概念等。附录中还专门介绍用计算机模拟的方法设计自动控制系统。此外还附有不少习题。对于工程技术人员、大专院校有关专业的师生、特别是从事自动控制系统设计的人员，确实是一本很好的参考书。

在此，对中南矿冶学院基础学科部、自动化系的大力支持，对张明达副教授、常振楫副教授的精心审查和指正，对李剑华副教授、傅彩兰同志和张志刚同志的帮助，译者一并致以衷心的感谢。

中南矿冶学院基础学科部
蔡海涛

目 录

1 导言	(1)
1.1 一些例题与定义	(2)
1.2 控制发展简史	(6)
1.3 所涉及材料的概述	(7)
2 描述各种物理现象的微分方程	(9)
2.1 符号的定义	(9)
2.2 电网络微分方程	(11)
2.3 描述机械平移的微分方程	(12)
2.4 描述旋转机械系统的微分方程	(17)
2.5 描述热力系统的微分方程	(23)
2.6 描述液压系统的简化微分方程	(27)
2.7 旋转功率放大器	(29)
2.8 直流伺服电动机	(32)
2.9 关于列写微分方程的Lagrange方程与能量平衡方法	(34)
2.10 摘要与结论	(39)
3 Laplace 变换方法	(41)
3.1 Laplace 变换及其特性	(41)
3.2 Laplace 逆变换及其计算	(50)
3.3 应用Laplace 变换求解一般积分-微分方程	(58)
3.4 脉冲函数, 褶积积分与传递函数分析	(60)
3.5 二阶系统的脉冲与阶跃响应特性	(65)
3.6 摘要与结论	(67)
4 传递函数, 方框图与流图	(68)
4.1 传递函数的确定	(68)

4.2	信号流程图	(74)
4.3	小结	(85)
5	判定系统稳定性的直接方法	(87)
5.1	与极点位置有关的线性系统稳定性	(87)
5.2	Routh 与Hurwitz稳定判据	(89)
5.3	Routh 判据在确定“相对”稳定性上的推广	(98)
5.4	摘要与小结	(100)
6	分析与设计中的根轨迹法	(101)
6.1	作为分析工具的根轨迹法的说明	(102)
6.2	根轨迹图的一般特性	(103)
6.3	作根轨迹图的几何方法	(110)
6.4	应用根轨迹法设计	(113)
6.5	由根轨迹图求频率响应和瞬态响应	(116)
6.6	小结	(118)
7	稳态正弦响应特性	(120)
7.1	稳态正弦响应, 传递函数与稳定性之间的关系	(120)
7.2	振幅与相位特性的图示法	(121)
7.3	渐近线振幅 (α) 图或Bode图	(125)
7.4	相位 (β) 图	(134)
7.5	由 α 图应用 $\arctan$ 近似求相位偏移	(143)
7.6	提要与小结	(152)
8	Nyquist 稳定性判据	(153)
8.1	Nyquist 判据的叙述	(153)
8.2	Nyquist 判据在基本单环系统中的应用	(159)
8.3	稳定性裕度与条件稳定性	(166)
8.4	由Nyquist 图求闭环频率响应	(170)
8.5	极点与零点重合时的Nyquist 判据	(175)
8.6	Nyquist 判据在多环系统中的应用	(177)

8.7	传输滞后	(181)
8.8	小结	(184)
9	Bode 图在设计串联校正闭环控制器中的应用	(185)
9.1	提供所需闭环工作特性的补偿法及校正器问题	(185)
9.2	Bode图及其与Nyquist 曲线间的关系	(190)
9.3	滞后校正器补偿	(193)
9.4	超前校正器补偿	(207)
9.5	应用组合校正器的串联校正	(214)
9.6	非最小相位网络的串联校正	(218)
9.7	提要与结论	(221)
10	品质判据与系统设计间的一般关系	(223)
10.1	频域品质指标	(224)
10.2	附加校正或反馈设计	(226)
10.3	依从, 干扰敏感性的度量	(232)
10.4	在时间区域内的品质指标	(236)
10.5	特定输入(阶跃、斜坡等等)的稳态误差	(240)
10.6	小结	(246)
11	子环设计	(247)
11.1	子环装置分析	(248)
11.2	子环校正器的综合	(252)
11.3	子环元件的选择	(260)
11.4	多重子环	(262)
11.5	子环反馈对参数变化与非线性元件的影响	(264)
11.6	有负荷与噪声干扰的子环性能	(269)
11.7	小结	(272)
12	载波控制系统	(274)
12.1	抑制载波振幅调制	(275)
12.2	交流同步联系系统位置变换器	(278)

12.3	两相 ac 伺服马达和 ac 测速发电机	(280)
12.4	解调过程	(282)
12.5	对 AM 信号工作网络的基带等效电路	(283)
12.6	通过频率变换实现 ac 补偿网络	(289)
12.7	RC 网络 ac 补偿器的特殊类型	(292)
12.8	ac 设计例题	(298)
12.9	小结	(301)
13	状态空间的基本概念	(302)
13.1	状态空间公式的一般叙述	(303)
13.2	按传递函数确定状态方程	(311)
13.3	状态方程的一般解	(315)
13.4	状态方程与传递函数间的一般关系	(330)
13.5	可控性与可监性	(340)
13.6	状态变量反馈控制系统的设计	(341)
13.7	小结	(348)
14	非线性系统	(350)
14.1	非线性系统的基本特性	(351)
14.2	描述函数	(355)
14.3	相平面	(369)
14.4	非线性系统稳定性与一般奇异点特性	(377)
14.5	Ляпунов 第二方法	(385)
14.6	临界盘状与 Попов 稳定性判据	(393)
14.7	小结	(396)
15	采样数据系统	(398)
15.1	采样过程	(398)
15.2	信号再现	(404)
15.3	Z-变换分析	(407)
15.4	采样数据系统的特性与分析	(422)
15.5	应用常规方法设计 SD 系统	(431)

15.6	脉冲传递函数按RC形式实现	(142)
15.7	应用数字补偿器设计采样数据系统	(145)
15.8	应用状态过渡函数的采样数据分析	(155)
15.9	小结	(157)
附录A	Laplace 变换表	(158)
附录B	多项式因式分解法	(169)
附录C	模拟计算机	(178)
C.1	基本模拟积木式元件	(179)
C.2	线性时不变积分-微分方程的解法	(184)
C.3	时间与振幅比例尺	(188)
C.4	系统模拟	(192)
C.5	模拟计算机的附加特征	(193)
C.6	小结	(195)
附录D	矩阵理论概述	(196)
D.1	矩阵符号与基本运算	(196)
D.2	线性矢量空间	(203)
D.3	微分方程的矩阵组——特征值问题	(208)
附录E	数字模拟方法	(214)
附录F	问题	(231)

1. 导 言*

现在几乎毫无例外地采用大规模的生产方法,主要是依靠自动化。而自动化又往往需要采用复杂的控制技术。我们到处看到大量控制系统和日益复杂的控制器的应用在高速发展。因此,控制系统技术的重要性还在扩大。我们的确生活在一个了不起的时代,在这个时代里,证明人类有能力直接探索宇宙。探险者在月球上着陆,成套成套的仪器被送上邻近的行星。所有这些,就象在二十世纪初第一次出现汽车与飞机那样,令人惊奇得目瞪口呆。控制理论的发展与应用,不但有助于推进这种技术的发展,而且将来还蕴藏着无穷的潜力。

在最近半个多世纪内,随着控制理论及其应用的高速发展,尤其自第二次世界大战以来,由于推广使用模拟计算机和引入通用数字计算机,它的发展速度大大增加,在讲授控制基础理论及其用于标准设计问题的方法上,发生了许多变革。模拟计算机或数字计算机的应用,可以得到复杂系统的工作特性的详细数据,但仅在几年以前,要详细地研究这些复杂系统却存在很大的难度,现在则成为控制系统工程师们的日常工作了。实际上,对于所有的工程师和学生,现在的分时数字计算机系统控制装置是易于掌握的,应该预料到最广泛的数值计算将会在数字计算机上进行,而不感到有多大的困难。对于当前适合研究的各类问题,它都提供相当大的灵活性。当然,把费脑筋的数值分析交给计算机,了解它所得到的数据,研究更多的情况,是很有意义的。这种方法比其它方法要容易,因为计算速度很高,同时还不用担心出错!通用数字计算机象计算尺一样,可以作为工程师和学生的运算工具。唯一不足之处,只是在使用上稍感不方便。

正如数字计算机扩大了所考虑的适于研究的问题范围一样,它也影响到我们的多数课程所涉及的材料和不同课题的重点。例如,考虑

* 本章略有删节,译者注

非线性系统，宁可在研究系统理论之初，应用计算机作为说明工作特性的工具要适当一些。这样，若强调用图解法来近似求解非线性系统响应，那就不合理了。仅在几年以前，这种图解法还是一种令人很感兴趣的研究领域。当然，我们必须考虑数据采样系统，因为数字计算机处理采样形式的数据，以及分析与综合数据采样系统的数学方法，在最近二十年来有着迅速的改变。在过去，一般尽可能地回避基于时域范畴的设计方法，因为用手工分析时间响应是很难做到的。但是，对单位阶跃响应的上升时间或最大超调特性却易于确定，因此，把数字（模拟）计算机的应用作为设计程序的组成部分，不能说是没有道理的。

先进的技术可使系统分析与设计的方法发生变革，但是，系统的工作特性的基本理论并不因此而改变。的确，对于程序控制、宇宙飞船导航以及类似的应用，我们用的是完善的计算机控制概念来设计许多复杂的系统，但是，这种情况是比较专业化的，大多数控制系统的应用涉及一些更现实的问题，如温度控制、速度控制、电压调节、仪表伺服机构等。本书前十二章所介绍的内容力图为常用结构的大多数线性问题求解，以提供一个完整的理论基础。一旦充分地掌握了这种基础，就可以探讨若干新的课题，包括交流（载波）系统、非线性系统以及数据采样系统。我们首先关心的是确定并阐明系统模型。然后考虑用于各种由简单到复杂系统的设计方法。重点放在阐明工程实践所遇到的大多数问题中经证明是特别有用的工具上，控制工程师必须熟悉它，才能成功地开展他的工作。全书所列问题与例题，全部用来说明所考虑材料的分析与计算等方面。

1.1 一些例题与定义

控制系统，或控制器可以定义如下：“控制系统是一种设备，其中称为响应的可变输出是按照要求由参考输入或控制输入调整。”控制器可以是开环的或闭环的。闭环控制器将一个或多个反馈信号与控制输入相比较，确定误差信号，用以驱动设备或执行元件，以及补偿器

或处理滤波器，按照如此方法（有希望）减少响应误差。一般的单位反馈的单环控制系统的方框图如图1.1中所示。这是最常见的装置，我们的兴趣几乎完全集中于这种问题，一直到在第11章确定多环控制系统

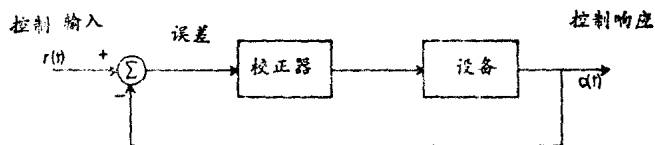


图1.1 标准单位反馈控制器

统的子环设计方法。我们所研究项目的主要要求，可以从图1.1看出。我们必须学习下列问题：

1. 确定系统的数学描述，并将它们变化为方框图形式；
2. 变换与求解所得到的系统方程；
3. 设计系统（选择设备中可以自由选择的部分以及校正装置的结构与参数）以满足一般性能技术要求；
4. 按照分析与模拟研究，评价我们的结果。因此，我们对于熟悉各种电气与机械装置是重要的，包括对用于观察与测量系统变量的敏感元件或传感器的熟悉，另还要学习如何应用这些设备，以有效地满足我们的需要。

在我们周围的环境中，控制系统的事例是极其普遍的。如在我们家里与公共建筑物内的恒温控制是我们都熟悉的事例。为了进一步讨论，假设采用强力空气火炉系统。电子恒温器或温度敏感器位于中心位置，通常离地面约五呎的内墙里。当室内温度下降至预定参考电平以下时，继电器动作，接通炉火。当火炉的空气导管系统的温度达到给定值，另一个继电器动作而开动鼓风机，强迫温暖的空气遍及整个建筑物。当室内温度达到最高允许值时，通常在此值以下二或三度，火炉关闭，而鼓风机一直运转到系统内的残热耗尽为止，然后也自动关闭。这种系统的循环接通与关闭，与外部气象、门与窗户的开放等因素有关。大部分火炉还装有由温度继电器关闭火的过热保护，以使热能不致迅速无偿地消耗，例如，当鼓风机工作失效时。空调系统的工

作与此类似。上述的气体火炉为通断控制器，由于明显的理由，通常称为噤-噤控制器。比例控制器与这种方法不同，其中试图激发一定数量的控制力，它和实际响应与给定响应间之差成比例。噤-噤控制器只是许多类型的非线性系统或不能应用迭加原理的系统的一种。在我们的气体热源系统中，执行元件是火炉与鼓风机。继电器也可称为执行元件，但它们基本上是控制设备。对于鼓风机与过热控制，恒温器与温度器件是敏感器或传感器。恒温器输出是控制输入。按照这种工作形式，系统在通与断状态间的往返周期，称为极限环，它是一种稳定极限环，因为温度变化范围在常态工作中，不随时间增长。所有非线性系统都有极限环，它在所有噤-噤系统中，当然必定会出现。

现在我们来讨论与驾驶小汽车有关的控制问题。初学驾驶的人员首先必须掌握控制车辆的各种工具的功能，以及汽车在所有条件下，对每一个输入反应的方法。例如，先要学习避免在光滑道路上应用制动器或加速器，因为在这种条件下，它只能引起车轮滑动，使我们对车辆的工作性能失去控制。许多驾驶经验表明，主要的控制目标是保持汽车在公路线上处于合理的工作状态，以避开在公路上可能有的其它车辆、行人、动物或其它物体，而以某一安全速度向最终目的地前进。控制输入由加速器、方向盘与制动器提供。在这种情况下，控制器无疑是最富有经验的驾驶本人。输入是通过驾驶员的感觉得到的。但是主要是来自眼睛、耳朵以及对平衡或方向的感觉。由这些敏感器官、驾驶员的头脑、控制辅助装置，以及影响车辆运动的机械装置组成控制器。基本执行元件是引擎、制动器与操纵机构。

在各种环境条件下顺利控制高功率汽车的能力，实际上是因人而异的，但它远非普通的问题。整个控制系统，包括驾驶员，易于变得不稳定。此时，这个术语不严格的定义为：在一定环境条件下，这种系统所得到的响应与控制输入间的矛盾。例如，打滑将导致完全失控，它常常是由于在结冰的道路上速度过高，特别是当有强烈的横向阵风时所引起的。当驾驶员的反应削弱时，例如他被灌醉了，也常常失控。事故一般是由于对重要的情况发觉迟了所致，例如驾驶员为了某种目的，转身去看座位后面，他转回身来，就会发现汽车已大大减

速。这表现出控制系统的能力依赖于它的工作特性或参数，向控制器提供有关数据的速度，有无干扰或噪声，以及控制器的能力与精致程度。正象在我们的例举中，由驾驶员的经验所说明的那样。

在最现代的汽车上，已使用一些辅助控制系统。用自动操纵器作位置控制，改变操纵位置，即可随意转动前轮方位。自动操纵控制器称为故障保险器，因为假若能源系统由于某种原因，工作发生故障，如当风扇皮带折断时，驾驶员可机动地取代这种系统，以保持运转。在正常工作时，由控制通过散热器冷却系统流动的水的速率，使引擎组件的水温大约保持在 180°F 。还有类似的装置，由调整通风来控制进入歧管的温度，从而控制在气缸内的燃料空气混合物的温度。应用交流发电机（或发电机），整流器与调压器，使蓄电池自动充电到所要求的电压。当蓄电池电压低时，充电速率加大，反之亦然。由汽化器提供的燃料空气混合物，按照引擎的温度和载荷调整，当引擎是冷的，而每当载荷增加时，由自动阻塞机构给单位空气体积提供较多的汽化汽油。当引擎速度增加时，由分配器自动将点火时间的提前。各种辅助电子设备也是普遍的，如收音机带有自动增益控制（AGC），以防止汽车通过接收信号强度不同地区时音量发生波动与衰减。AGC是一种自适应控制形式，因为当环境改变时，调整系统参数即放大器增益，力求改进整个工作特性。对于点火时间与自动阻塞控制，可以提供类似的要求。

前面提到的控制事例，是我们完全熟悉的简单情况。还有一些引人注目的应用，能扩大那些甚至富有经验的控制专家的想像力。每当我们探索人员送上月球或某个行星，先必定要考虑解决无数诘难的控制问题。就必须控制宇宙飞船的动态，达到高度准确的轨道，在目的地表面完成小心的着陆，并能提供生活保障与通讯系统，建立返回轨道。整个最关键的是，必须在高速下返回大气层，并保证在收回飞船范围邻近着陆。控制系统在整个飞行任务方面起着决定性的作用。这种系统与方程是高度复杂而且是非线性的，它由大量的数字与模拟计算机汇集而成，这些设备都安置在宇宙飞船上，并通过无线电通讯与地面保持联系。数据按照连续与采样形式处理，设备必须高度谐

调,并能圆满完成任务,这样才能保证完成即使是最简单的空间任务。

从这些例子了解到,我们周围到处都应用着控制系统。所有大量的化学工业生产过程和自动生产设备都紧密地依赖控制技术。控制理论的发展,以及在改进和提高生产能力方面的应用,具有广阔的天地,它影响着整个人类社会和经济。因此,为了提高人民的生活水平,必须具有高度自动化的生产力。

1.2 控制发展简史

反馈控制系统已经用了许多年,虽然在本世纪初以前还没有阐明有效的理论基础。早在公元前2000年,巴比伦人已应用浮动控制灌溉系统⁽¹⁾。早期的埃及人也有类似的设备。荷兰的Andrew Meikle⁽²⁾在1750年已发明扇形尾部传动装置,使风以最高效率转动大的风车。蒸汽引擎速度控制离心调节器在1750年由Watt⁽³⁾阐明。在19世纪期间,远洋航行舰应用大的蒸汽引擎作为动力元件,引入了船舶驾驶问题,随后又对速度控制发生兴趣。在远洋舰上所应用的大舵,要求各种类型的强有力的控制器,这种问题已由Maxwell⁽⁴⁾, Routh⁽⁵⁾与Minorsky⁽⁶⁾考虑过,他们也都对稳定性问题作了很多工作。

在1930年以前,几乎没有控制理论,但是从此以后发展极快。Nyquist⁽⁷⁾在1932年发表了他的稳定性理论研究,提出了确定系统稳定性的几何方法,它是我们许多设计方法的基础。虽然Nyquist最初只涉及反馈放大器设计,他的结果同样可应用于线性系统的所有类型,甚至在适当条件下,通过描述函数分析也已应用于特殊类型的非线性系统。Hazen⁽⁸⁾随后发展了Nyquist的工作,并且由适应(从动)机构引入了伺服机构。在第二次世界大战及战后期间,由于政府对诸如雷达、自动控制防空武器、无人驾驶飞机研制、原子弹释放装置、导弹研制等工程感兴趣,大大促进了它的发展。不幸,由于保密措施的限制,一些新的知识未能及时公布,使这个领域的发展推迟了若干年。

在20世纪50年代, 由于某些因素使控制理论与应用有着飞跃的发展。最有意义的模拟与数字计算机技术的迅速发展, 促进了日益复杂的控制器设计, 并且激起了人们对数据采样分析和综合的兴趣。Ragazzini 和 Franklin⁽⁹⁾, Jury⁽¹⁰⁾ 与 Tou⁽¹¹⁾ 有助于促进对采样系统的普遍了解与关心。对非线性的讨论, 在20世纪50年代期间也有了迅速的发展。Kalman⁽¹²⁾ 着重指出: 在19世纪由Ляпунов⁽¹³⁾的工作开始, 俄国在这个领域已有所成就。Kalman⁽¹⁴⁾ 还促进人们对状态变量分析的兴趣, 并且引入了可控性与可监性概念。这对于从事非线性系统、系统方程的状态表示, 以及对研究非线性系统来说是带根本性的方法, 在发展计算机类比时, 它也是方便的, 因此, 状态方程的应用在近年来已变得相当普遍。

对自适应控制系统的注意, 是在1951年由Draper与Li⁽¹⁵⁾开始的, 此后有迅速发展。应用迭代计算方法解非线性边值问题的方法, 在20世纪50年代后期与20世纪60年代初, 已由Breakwell⁽¹⁶⁾、Kelley⁽¹⁷⁾与Bryson⁽¹⁸⁾阐明。自适应控制领域与边界值方面或动态最佳问题是紧密相连的, 近年来, 已齐头并进。在相同时期, 其它紧密相关的重要课题是Pontryagin⁽¹⁹⁾及其同事们引入最大值原理, 提出了边界值问题最佳解的必要条件与充分条件。Bellman⁽²⁰⁾在20世纪50年代中期, 引入了动态程序设计与最佳原理, 它们已被应用于确定边界值问题的解, 虽然动态程序设计是最直接应用于离散系统。其它许多有意义的领域的研究, 已在最近一些年开始。本书的主要目的之一, 是建立一个完整的基础理论, 从而能探究属于这些问题的领域。

1.3 所涉及材料的概述

本书分为四个主要部分。第一部分是研究后面整个内容所要应用的基本数学概念, 包括第2章到第7章。在这一部分内, 讨论将系统转化为微分方程描述形式的方法。还介绍变换与求解微分方程的方法, 应用Laplace变换的等效的象函数, 以及系统特性间的基本关系, 例如稳定性、瞬态响应图与模型参数。在第二部分讨论通常的线性连

续控制所用的设计方法，包括第8章到第11章。所有的控制工程师必须全面地理解这些章节内所讨论的全部概念，这样，他们才能有效地解决实际问题。作者进一步在第12章到第15章内所提出的课题是十分重要的，它们包括载波、非线性与采样系统，还有状态表示以及基于状态可变反馈的设计方法。最后一部分由附录集成，它试图在本书的结尾提供有关的研究课题、有用的资料表、以及综合的问题集，从简单到复杂，即涉及从简单的代数运算到建议应用通用数字计算机的所有问题。

在这里所介绍的材料，试图提供适于高年级大学生或一年级研究生水平的控制系统分析与综合的基础部分知识相当全面的导引。在这里，假定读者仅具有最低程度的基础。书的整个重点在于阐明设计标准型反馈控制器的有效方法。所强调的是在工程实践中证明最常用的一些工具。这不是一本现代或最佳控制理论的书，然而，只有熟悉在这里所提供的基础后，才能着手研究上述问题。实习控制工程师若首先学会了运用那些工具，他也将会常常感觉到那是最有用的。的确，耐心探究基本设计概念还是十分值得的，因为在这个领域得到了适当的导引之后，多数大学毕业生继续从事某些高等课题的研究，将会感到十分容易。