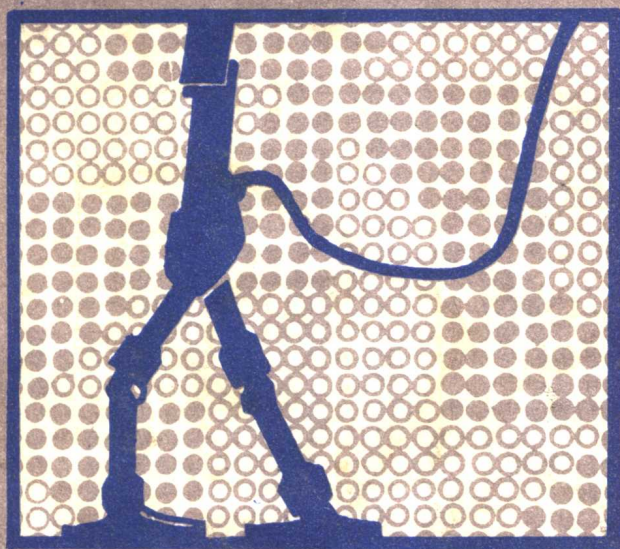


机械系统控制

〔日〕古田胜久 等著

张福恩 张福德 译

强文义 校



哈尔滨工业大学出版社

内 容 提 要

本书是一本从理论到实际阐述机械控制系统设计问题的专著。书中讲述了起重机、倒立摆，特别是机器人的控制问题，这些是现代控制理论应用的范例。

本书可供工科院校自动控制专业教师、研究生和高年级学生学习现代控制理论及其应用时参考，也可供从事机械系统自动控制，尤其是机器人研制和设计的工程技术人员、工程师们参考。

メカニカルシステム制御

工学博士 古田胜久

工学博士 川路茂保

工学博士 美多 勉 共著

工学博士 原 辰次

オーム社 1984

机 械 系 统 控 制

〔日〕 古田胜久 等著

张福恩 张福德 译

强文义 校

*

哈尔滨工业大学出版社出版

北京市新华书店发行

哈尔滨工业大学印刷厂印刷

*

开本850×1168 1/32 印张8 字数215,000

1986年8月第1版 1986年8月第1次印刷

印数 1—10,000

书号 15341·30 定价 1.65 元

原著者为中译本写的序言

现代控制理论的应用，与其理论研究相比较，进展是迟缓的。这主要是因为控制系统设计困难和设计出来的控制系统复杂的缘故。但是，最近由于计算机的发展解决了这些问题，所以，剩下的问题仅仅是应用方面的问题。但至今为止，讨论将控制理论如何推广到应用方面的书籍是不多的，尤其是在控制象机器人这样的机械系统中，如何应用控制理论的书籍还没有。

本书的材料是我研究室的同事们平时搜集的，它从理论到实践系统地叙述了控制机械系统所必须掌握的基础知识，眼下恐怕很难找到一本类似的书籍。

我祝愿东京工业大学的姐妹校哈尔滨工业大学在强文义先生主持下将本书翻译成功，并作为教材使用。同时也衷心地祝愿这本书能为中国现代控制领域的发展作出有益的贡献。

古田胜久

序 言

瓦特首先采用速度调节器，调节蒸汽机转速使其开始得到实际应用，并成为工业革命的基础。斯伯利发明了利用陀螺仪的自动操纵装置，使飞机向实际使用方面迈出了第一步。由于可以高精度地确定电子束的位置，因此，能够制造出高集成度的半导体器件。就在我们周围，如在机器制造厂里，利用工业机器人和激光器控制小型磁盘的磁道位置或控制信号读取装置与磁盘保持一定距离。自动控制就象人们驯服猛兽一样，使机器为人类服务。这类自动控制要求必须弄清楚机械本身的特性，同时还要知道控制的量及这些量的微分、积分，然后实行输入操作（反馈），就可以使系统稳定运行。与此同时，可以在有干扰存在的情况下，使控制量与一定的目标值相一致。这类控制不仅对于机械系统，就是对于化学设备的自动化，也起着不可缺少的作用。

此外，还有更复杂的系统控制。如在第二次世界大战中出现的雷达和火炮（一般指口径在13毫米以上的火炮）组合式的攻击系统，以及最近的导弹和反导弹系统等。特别是作为鬼怪式飞机中有代表性的 VTOL (vertical takeoff and landing), CCV (control configured vehicle) 等，由于采用了新的控制系统，获得了比一般飞机更好的飞行与操纵性能。

为了精确控制具有相互影响的多变量复杂系统，必须采用对系统特性先进行预测、数据处理，从而产生操作输入的控制系统。系统的特性，由系统内部状态及未来的输入所决定。所以，如果能够根据系统的内部状态进行控制，就有希望得到良好的控制结果。为了设计这样的控制系统，必须建立由系统内部状态决定的精确模型。1960年前后，以R.E. 卡尔曼教授为代表，研制开发了基于上述模型的控制理论，称为现代控制理论。现代控制

理论在实际应用方面，迄今为止，基本上仅限于军工生产，其它领域尚未得到应用。除了这种理论难以理解之外，而且实际上，为了设计控制系统，还不得不建立系统状态方程模型。一般化学过程不仅建立模型困难，甚至根据这种新的控制理论设计出控制系统，也不一定有多大效果。几年前，由于对自动化历史与化学过程的自动化历史同样看待，所以，对于机械也采用以前的控制系统这是当然的。对于机械系统，根据力学知识可在理论上推导出有限阶的数学模型，不仅可以辨识未知参数，还可以通过采用更好的控制系统，大幅度提高它的机能。本书将从理论到实际论述如何对这种机械系统进行控制。

本书第二章叙述了对于建立机械系统模型非常有效的拉格朗日方程的列写方法及其变换为状态方程的变换方法，状态方程式的构造、特点及其求解的解析方法。

第三章讲述了一般控制系统，尤其是伺服系统的设计方法及其步骤。

根据第三章论述的理论设计控制系统时，没有确定的结构，因此，这种控制系统最好采用微处理机进行控制运算来实现。但是，利用计算机实现的所谓数控，从测量到控制直至得出控制结果的运算是有时间延迟的，对于快速响应的机械系统必须考虑提前这种延迟。根据这种观点，在第四章讲述了数字控制系统的设计方法。

第五章介绍了机械系统的特点及其控制问题。机械系统的状态方程，因为必须要考虑各自由度的加速度，所以具有固有的结构。利用这种固有结构，在很多情况下，便于控制系统设计。第五章又特别详细地讲述了在机器人中采用的连杆机构的特点以及含有这种连杆机构的系统构造。进一步介绍了在实际应用的限制条件下，如何处理动态控制问题的方法。通过这些提高控制性能，就可以构成具有优异功能的机械系统。

如何利用上述设计方法设计控制系统，最好看一看实际设计的例子。第六章详细讲述了四个设计实例：（1）移动式起重机

起重臂控制；（2）利用微处理机的倒立摆数字控制；（3）起重机的最短时间控制；（4）高速双脚步行机器人控制。

总之，本书详细叙述了机械控制系统设计的理论和实际步骤。它对于基于状态空间进行机械控制系统设计的工程技术人员是会有帮助的，因此，本书的著作者们希望今后将有更多更好的机械控制系统实例在日本出现。

最后，向在编写本书时，对各位著者给予帮助和鼓励的欧姆（オーム）出版社的各位表示感谢。

工学博士 古田胜久

一九八四年二月

目 录

第一章 机电一体化与现代控制理论.....	(1)
1.1 机电一体化与控制	(1)
1.2 控制理论的诞生及其发展简史	(2)
1.3 现代控制理论的诞生	(3)
参考文献.....	(5)
第二章 机械系统模型的建立与特性分析.....	(6)
2.1 拉格朗日运动方程式与状态方程式.....	(6)
2.1.1 动态系统与状态方程式	(6)
2.1.2 线性化与状态方程式	(10)
2.1.3 拉格朗日运动方程式	(12)
2.2 状态方程式的解与稳定性	(19)
2.2.1 状态方程式的解	(19)
2.2.2 固有值与线性系统的稳定性	(21)
2.2.3 里雅普诺夫稳定理论与非线性系统的 稳定性.....	(24)
2.2.4 奇异摄动法与模型的降阶	(28)
2.3 可控性、可观测性与系统的构造	(31)
2.3.1 可控性与可观测性	(31)
2.3.2 输入输出关系与状态变量变换	(39)
2.3.3 系统的构造	(45)
练习题.....	(48)
参考文献.....	(50)
第三章 机械控制系统的设计.....	(52)
3.1 设计方法概述	(52)
3.2 调节器的设计	(54)

3.2.1	极点配置调节器	(55)
3.2.2	最优调节器	(61)
3.3	观测器的设计	(70)
3.3.1	状态观测器	(70)
3.3.2	线性函数观测器	(76)
3.3.3	未用观测器的反馈系统	(82)
3.4	伺服系统设计	(85)
3.4.1	伺服系统	(85)
3.4.2	系统类型与内部模型原理	(87)
3.4.3	伺服系统的设计方法	(98)
3.5	考虑灵敏度和强状稳定性的设计	(114)
3.5.1	模型不确切性的表达及其增益特性	(114)
3.5.2	相对灵敏度与强壮稳定性条件	(116)
3.5.3	设计指标与设计指南	(119)
3.5.4	最优调节器的强壮稳定性	(121)
练习题		(122)
参考文献		(125)
第四章	机械系统的数字控制	(130)
4.1	离散时间系统的特性分析	(130)
4.1.1	连续时间系统的离散时间系统逼近	(130)
4.1.2	离散时间系统的稳定性	(132)
4.1.3	可达性(可控性)与可观测性	(135)
4.2	离散时间系统的设计	(136)
4.2.1	极点配置与有限时间整定控制	(136)
4.2.2	最优调节器的设计	(138)
4.2.3	观测器的设计	(139)
4.2.4	伺服系统设计	(142)
4.3	考虑运算时间延迟的数字控制系统设计	(148)
4.3.1	考虑运算时间延迟的调节器(I)	(148)
4.3.2	观测器与调节器并行运算方式	(151)

4.3.3	考虑运算时间延迟的调节器 (II)	(152)
4.3.4	考虑运算时间延迟的最优 1 型伺服系统的设计	(154)
	练习题	(155)
	参考文献	(156)
第五章	机械系统控制理论的展开	(158)
5.1	连杆机构的特性	(158)
5.1.1	连杆机构控制规律的几个特点	(158)
5.1.2	平面连杆系的运动方程式	(161)
5.2	输出零化问题	(165)
5.2.1	输出零化问题	(165)
5.2.2	单输入输出系统的输出零化问题	(166)
5.2.3	多输入输出系统的输出零化问题	(175)
5.2.4	输出零化问题的几何方法	(183)
5.3	附有约束条件力学系统的运动控制	(192)
5.3.1	拉格朗日未定乘数法与附有约束条件运动控制	(192)
5.3.2	附有约束条件的调节器设计方法	(194)
5.4	利用非线性反馈的非线性系统线性化	(203)
	练习题	(208)
	参考文献	(209)
第六章	机械系统控制的实例	(211)
6.1	数字控制与电子计算机	(211)
6.1.1	电子计算机在数字控制中的应用	(211)
6.1.2	利用电子计算机进行数据处理的问题	(212)
6.2	利用直线步进脉冲马达控制移动式起重机的起重臂	(213)
6.2.1	模型建立与控制规律	(214)
6.2.2	硬件与软件的构成	(216)
6.2.3	实验结果	(218)

第一章 机电一体化与现代控制理论

1.1 机电一体化与控制

当前是产品多样化的时代。多品种小批量生产的商品和短期被淘汰的商品日益增多，所以生产设备也必须适应这种要求，即用同样的设备应该能够生产各种不同的商品，而且生产设备还要灵活地适应商品规格的变化。构成这些生产设备的机械本身也必须能够廉价地大批量生产，以便制造出适于多目的使用的机械。为使机械的功能多样化，相同的机械可以在各种不同的领域内使用，并且不断提高机械的功能，就必须把机械和电子结合起来。众所周知，这种结合被称为机电一体化。

机电一体化可以提供多用途的高性能机械，具体说来就是使同一台机械通过电子计算机，尤其是通过微型处理机的软件作用而具有多用途和使用的灵活性。因此，只要改变软件就可以制造出象机器人之类的机械。这种机器人是可以在多目的条件下使用的机械。这类机械的特点就是同样的机械，其功能、性能也可以通过逻辑软件进行某些改变。可见，为了制造出更好的机械，必须编制出更好的软件。

要使机械系统的许多元件能够协调地动作，只有在良好的控制下才能实现。我们知道，为了设计出良好的控制系统，多变量控制是有效的。但是，多变量控制理论过于高深，不仅其设计步骤复杂，其控制系统本身也很复杂。因此，在可以利用微型处理机以前，这种控制应用得不多。然而，在微型处理机可以利用的今天，控制系统的复杂性已经不成问题，而实现更佳的功能成为最重要的课题。于是，机电一体化开始使新的控制论得到应用。

本书的目的就在于说明现代控制理论在机械系统控制中的有效应用。

1.2 控制理论的诞生及其发展简史

自动控制是从瓦特利用调速器的调节作用，而使蒸汽机工作于确定的转数开始的。向蒸汽机通入一定流量的蒸汽使蒸汽机运转。当负荷减小时，蒸汽机转速增加；反之，负荷增大时，转速

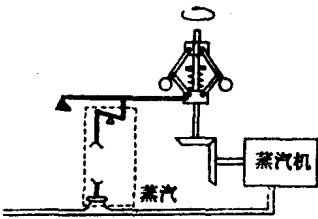


图 1.1 调速器原理图

减慢。蒸汽机调速器就是利用了这一特性制作的。瓦特给出了图 1.1 所示的调速器原理图，由于离心力的作用使球体上下移动，利用这种检测机构（调速器）检测转速的变化，再通过执行机构，调节蒸汽流量，使蒸汽机保持以确定的转速运转（蒸汽机调

速器不是瓦特的专利）。利用这种旋转球体获得一定转速的实例还有惠庚斯的摆式时钟和虎克的天体望远镜。19世纪中叶，已有7500多台瓦特调速器在英国得到应用，并吸引了许多理论研究工作者的注意。具有这种调速器的蒸汽机转速调节系统如图 1.2 所示，将被控制量与目标值加

以比较，然后进行操作，使被控制量接近目标值，这样就组成具有信号反馈回路的反馈控制系统。这种反馈系统有时会发生振荡，不能正常运行。

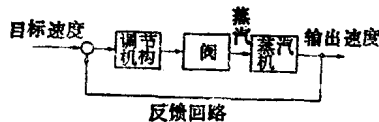


图 1.2 调节机构信号流

麦克斯韦尔研究了这种调速系统的稳定性之后提出，一般线性微分方程特征方程的根的实部皆为负，表示系统稳定。可见，为研究微分方程的稳定性，直接求解是无可争议的。但是，麦克斯韦尔对五阶微分方程式的稳定性仅提出了两个条件，未能给出充要条件，为此，许多科学工作者对这个问题进行了研究。

1877年,英国数学家E.J. 劳斯提出了线性微分方程式的稳定性由其系数确定的方法。1895年瑞士的古尔维茨独立地证明了与劳斯相同的结果。进入 20 世纪,自动控制开始在各个领域内采用,其中最重要的应用之一是飞机的自动操纵装置。自1903年莱特兄弟发明飞机之后11年,斯伯利发明了自动操纵装置用于稳定飞机,使飞机能够最稳定的飞行,受到法国航空学会的奖励。据说,当时斯伯利运用这种自动操纵装置双手离开操纵杆,高高举起,甚至他的助手在飞机机翼上行走,飞机仍在直线飞行。

确定反馈系统稳定性的是系统的过渡过程。这个问题在电路里也很重要,利用微分方程式的算子法很容易得到解决。这种方法是赫维希德提出来的。另外,反馈还被用来改善放大器的性能。以乃奎斯特和伯德等人为代表的电信技术工作者在第二次世界大战前,对这个问题就进行许多研究。第二次世界大战中,机械控制技术、通信技术、数学等方面的许多研究工作者一起对与达相结合的火炮控制问题进行了研究,这项研究成果在第二次世界大战后出版发表。

战后,在我国也广泛开展了对自动控制的研究工作。如伊沢计介先生出版了教科书《自动控制入门》。在市面上还出售了 PID 调节器,对于各种过程工业中的温度、流量等物理量实行了自动控制。这些都是以单输入单输出为主,基于频率特性进行设计的控制系统,这种控制理论称为“古典控制理论”。

1.3 现代控制理论的诞生

第二次世界大战结束后的头几年,在获得惊人发展的过程工业中利用 PID 调节器进行自动控制就已足够了。但是,1950年后,由于电子计算机得到了实际应用,人们开始对多输入多输出的复杂系统高级的数字控制问题展开了深入广泛的研究。尤其对如何在给定的指标下使评价函数为最小的最优控制与稳定性问题,进行了更广泛深入的探讨。在这里不仅采用输入输出关系描述系统,而且还采用系统内部状态来描述系统。

最优控制的惊人成果是由苏联的庞特列金等学者提出的极大值原理。他们找到了最优控制存在的必要条件。此原理对控制量



图 1.3

有约束情况下的最短时间控制问题提供了一个有效的方法。当时，在美国正在从事数控研究的青年科学工作者 R.E. 卡尔曼 (图1.3) 对系统采用了状态方程描述方法，揭示了系统的可控性、可观测性。与此同时，证明

了在二次型评价函数下线性系统最优控制的充要条件，进而提出了对于估计和预测有效的卡尔曼滤波器，证明了其对偶性。基于上述结果，人们确认了控制系统状态方程描述方法的实用性。当时，就将这种与状态方程式有关的控制理论称为“现代控制理论”。起初，对于控制系统模型的不正确性还没有考虑强壮性控制，控制系统设计算法很复杂，所设计的控制系统也很复杂。因此，根据这一理论进行控制系统设计只能限于有限的范围。但是，自从旺哈姆，达文逊确立了构造稳定性及强壮性目标跟踪伺服系统设计方法之后，同时由于近几年电子计算机的发展，特别是当前已进入微型计算机普及的时代，人们采用计算机设计控制系统和采用微型计算机实现控制系统成为很容易的事情了。

另一方面，在机械系统日益小型化的情况下，人们开始要求多功能、高精度的机械系统。机械系统的数学模型多数情况下是采用物理学中的拉格朗日方程等推导的，并便于变换为状态方程。对于这种机械系统，根据状态方程，应用控制理论，进行控制系统设计是比较容易的。因此，在近几年就控制理论的实际应用问题进行了广泛的研究。特别是在控制系统设计中，开发和研制了利用电子计算机的计算机辅助设计 (CAD)，并研究了有效的数值计算方法等。

本书特别地归纳了在机械控制系统设计中必须考虑的问题，

并通过实例说明了实际应用时的设计步骤。

参 考 文 献

- ① 示村悦二郎: 制御理论の史的展开と今後の课题, 早稻田大学理工学研究所报告第100号, pp.16—22 (1982)
- ② J. C. Maxwell: On governors, mathematical trends in control. ed. by R. Bellman, R. Kalaba, pp.5—17 (1964)
- ③ J. H. Blakelock: Automatic Control of Aircraft and Missiles. John Wiley (1965)
- ④ R. E. Kalman: On the General Theory of Control System Proc. 1st IFAC Congress, Moscow. Butterworth London (1960)
- ⑤ 例えば: Articles on history, ASME J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control, pp.109—129 (1976)

第二章 机械系统模型的 建立与特性分析

本章先叙述机械系统运动方程式的建立方法，然后叙述其线性化与线性近似，非线性系统的稳定性及线性化系统构造分析的基本理论。

2.1 拉格朗日运动方程式与状态方程式

2.1.1 动态系统与状态方程式

通常，把输入与输出保持某种因果关系的机构称为系统或系。在系统中，又特别地将过去的输入，影响现在输出的系统称为动态系统。在动态系统中把存储输入所必需的中间变量，称为状态变量，将状态变量的个数 n 称为动态系统的阶数或次数。

现假设 n 个状态变量、 m 个输入变量、 p 个输出变量分别为向量

$$\begin{aligned} x(t) &= \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_n(t) \end{bmatrix} \in R^n, u(t) = \begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \\ \vdots \\ u_m(t) \end{bmatrix} \in R^m \\ y(t) &= \begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \\ \vdots \\ y_p(t) \end{bmatrix} \in R^p \end{aligned} \quad (2.1)$$

则动态系统可用一阶联立常微分方程式描述如下（注）

（注）：通常，式 (2.2b) 为 $y(t) = g[x(t), u(t), t]$ ，但是就机械系统来说，几乎都是与 $u(t)$ 无关的。

$$\dot{x}(t) = f[x(t), u(t), t] \quad (2.2a)$$

$$y(t) = g[x(t), t] \quad (2.2b)$$

式中, 符号“ $\cdot$ ”表示时间微分 $\frac{d}{dt}$ 。

(2.2a)式称为**状态方程式**, (2.2b)式称为**输出方程式**, 总称为**系统方程式**。对于机械手等来说, $f[\]$, $g[\]$ 一般为 $x(t)$ 的非线性函数, 当它们用 $x(t)$ 、 $u(t)$ 的线性函数来表示时, 如

$$\dot{x}(t) = A(t)x(t) + B(t)u(t) \quad (2.3a)$$

$$y(t) = C(t)x(t) \quad (2.3b)$$

则称之为**线性时变系统**。进而, $A(t)$ 、 $B(t)$ 、 $C(t)$ 对时间为常数组矩阵时, 则有

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t): A(n \times n), B(n \times m) \quad (2.4a)$$

$$y(t) = Cx(t) \quad : C(p \times n) \quad (2.4b)$$

称为**线性时不变系统**。特别是对于 $m=p=1$ 的单输入、单输出系统来说, 则用向量 $b(n \times 1)$ 、 $c(n \times 1)$ 表示矩阵 $B(n \times m)$ 、 $C(p \times n)$ 。

下面用例题说明建立状态方程式的方法。

【1】机械系统的状态方程式

机械系统的基本元件有弹簧、质量 (作为质点研究的刚体) 和阻尼器。有代表性的阻尼是粘性摩擦。一般摩擦有**粘性摩擦**、**库仑摩擦**和**静止摩擦**等, 粘性摩擦是与速度成正比的摩擦; 库仑摩擦是仅取决于速度的符号、大小一定的摩擦; 静止摩擦是刚体从静止状态开始运动时产生的摩擦。库仑摩擦和静止摩擦为非线性摩擦, 一般可以忽略。

与各元件位移 $x(t)$ 对应的反作用力 $f(t)$ 可分别由下列各式表示

$$\text{弹簧 } f(t) = Kx(t) \quad (K: \text{弹簧特性系数}) \quad (2.5a)$$

$$\text{质量 } f(t) = M\ddot{x}(t) \quad (M: \text{质量}) \quad (2.5b)$$