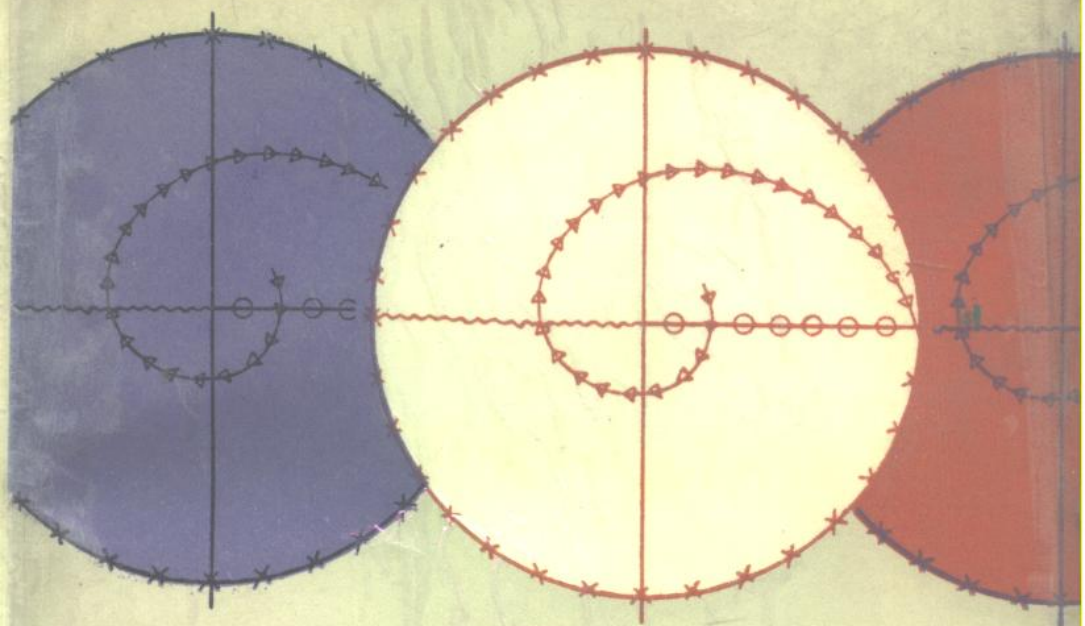


[美] G. E. 富兰克林 著
J. D. 鲍威尔

姜光之译



动力系统的 数字控制

同济大学出版社

TP271
5

系 统 学

[美]

G. F. 富兰克林 著
J. D. 鲍威尔

动力系统的
数字控制

姜光之 译

林滋治 审

同济大学出版社

内 容 提 要

本书是作者多年的研究成果,已被美国斯坦福大学和其他大学选为“数字控制”课程的权威性教材。全书共十章,前四章介绍线性分析方法,后六章介绍经典与现代分析方法。本书强调工程应用,在介绍物理过程的同时,引出相应的数学推导,便于阅读。内容既反映了数字控制的现状,又指出其研究前景。全书紧密联系算法程序,使本书更具有实用价值。书中附有适量的例题和习题。

本书可作为自动控制或计算机应用专业的教材和有关工程技术人员的参考。

责任编辑 洪建华

封面设计 王肖生

动力系统的数字控制

«Digital Control of Dynamic Systems»

G. F. Franklin 和 J. D. Powell 著

姜光之 译

同济大学出版社出版

(上海四平路 1239 号)

新华书店上海发行所发行

同济大学印刷厂印刷

开本: 850×1168 1/32 印张: 11.75 字数: 338 千字

1987年1月第1版 1988年1月第1次印刷

印数: 1—3200 科技新书目: 153—311

统一书号: 15335·046 定价: 2.95元

ISBN 7-5608-0014-9/TK·1

译者的话

本书原文版是美国斯坦福大学教授G.F. 富兰克林和J.D. 鲍威尔为高年级学生和研究生写的一本论述数字控制理论和设计的教材。也是作者五十年代写的《经典数字控制》的姐妹篇。近年来，斯坦福大学以其卓越的科学研究和教学成果而蜚声全球。它的教材也被广为选用。

《动力系统的数字控制》一书在选材、编排和叙述方面都有其独到之处。本书强调工程概念，把数学概念隶属于控制应用之下。用清晰的物理过程，引出相应的数学推导，全面系统地论述了数字控制的基本概念、理论和设计方法。在叙述上作者采用温故知新的比较方法，把连续控制系统的概念和设计方法引伸到数字控制系统。在内容编排上沿着经典和现代控制理论两个方面展开，既介绍各自的理论，设计方法，又互相进行比较。使学生加深对问题本质的理解。书中还列出了有关的计算程序逻辑，使理论学习与实验研究有机地结合起来。每章都有适量的例题和习题，以供学生思考和练习。

中国科学院上海分院测试计算中心主任林滋治研究员细致地审阅了本书的译稿，提出了许多宝贵的意见。如果没有他的指导，

本书将逊色不少。在译稿整理过程中，得到了黄澄明同志的大力协助。在此，一并致以谢意。

译者在翻译过程中对原书内容作了勘误补正。个别问题作了注释。译名力求采取目前惯用的译法。限于译者的水平，定有许多不妥之处，恳请读者批评指正。

译 者

一九八六年十二月

7276/05

目录

序言.....	(1)
词汇符号表.....	(4)
1. 绪论.....	(9)
1.1 问题的定义.....	(9)
1.2 提供研究的系统实例.....	(12)
1.3 设计方法概述.....	(13)
1.4 小结.....	(15)
深入学习的建议.....	(15)
问题和练习.....	(16)
2. 线性离散动力系统分析: z -变换	(19)
2.1 引言.....	(19)
2.2 线性差分方程.....	(19)
2.3 离散传递函数.....	(22)
2.4 信号分析和动态响应.....	(34)
2.5 z -变换的性质.....	(45)
2.6 收敛区域和反演积分.....	(50)
2.7 差分方程的实时实现.....	(53)
2.8 小结.....	(58)
第 2 章附录.....	(58)
问题和练习.....	(61)

3. 连续传递函数的高散等效: 数字滤波器.....(64)

- 3.1 引言.....(64)
- 3.2 使用数值积分设计数字滤波器.....(65)
- 3.3 极点-零点映射(73)
- 3.4 保持器等价.....(74)
- 3.5 Butterworth 和 ITAE 等效.....(78)
- 3.6 小结.....(85)
- 问题和练习.....(85)

4. 采样数据系统.....(89)

- 4.1 引言.....(89)
- 4.2 采样过程的冲激调制.....(89)
- 4.3 采样频谱和混迭.....(92)
- 4.4 数据外推和虚假成分.....(94)
- 4.5 采样数据系统的方块图分析.....(98)
- 4.6 小结(106)
- 问题和练习(106)

5. 使用变换法设计数字控制系统(109)

- 5.1 引言(109)
- 5.2 控制系统设计的 z 平面性能指标(110)
- 5.3 离散等效设计(120)
- 5.4 z -平面中的根轨迹(123)
- 5.5 频率响应方法: w -变换(127)
- 5.6 Ragazzini 直接设计方法(134)
- 5.7 第二个例子: 温度混合控制(139)
- 5.8 小结(141)
- 问题和练习(142)

6. 使用状态空间法设计数字控制系统(145)

6.1 引言(145)

6.2 系统表示(145)

6.3 控制律设计(153)

6.4 估计器设计(160)

6.5 调节器设计: 控制律和估计器的组合(166)

6.6 伺服系统设计: 通过前馈控制引入参考输入 ... (171)

6.7 能控性和能观测性(182)

6.8 小结(188)

第6章附录A(189)

第6章附录B(196)

问题和练习(201)

7. 量化作用(204)

7.1 引言(204)

7.2 舍入变量的确定性分析(204)

7.3 舍入变量的随机分析(209)

7.4 参数舍入的影响(215)

7.5 极限环和高频振动(217)

7.6 小结(220)

第7章附录(221)

问题和练习(223)

8. 系统辨识(226)

8.1 引言和问题的定义(226)

8.2 最小二乘法(237)

8.3 递归最小二乘法(240)

8.4 随机最小二乘法(245)

8.5 最大似然	(256)
8.6 最大似然估计的数值搜索	(262)
8.7 小结	(267)
问题和练习	(267)
9. 多变量及最优控制	(271)
9.1 引言	(271)
9.2 解耦	(271)
9.3 最优控制	(276)
9.4 最优估计	(285)
9.5 多变量控制举例	(291)
9.6 小结	(296)
第 9 章附录	(297)
问题和练习	(298)
10. 采样频率的选择	(301)
10.1 引言	(301)
10.2 用带宽、时间响应和粗糙性表示的跟踪有效性	(302)
10.3 抗干扰	(305)
10.4 参数变化的灵敏度	(306)
10.5 设计前置滤波器的效果	(310)
10.6 小结	(313)
问题和练习	(315)
附录 A 实例	(317)
A.1 单轴卫星姿态控制	(317)
A.2 天线方位控制的伺服机构	(318)
A.3 贮槽流体温度控制	(321)
A.4 通过柔性结构的控制	(323)

A.5	造纸机加压流体箱的控制	(326)
附录 B:	表格	(328)
B.1	z 变换的性质	(328)
B.2	z 变换表	(329)
B.3	w 平面传递函数	(331)
附录 C:	矩阵分析一些结论	(333)
C.1	行列式和矩阵求逆	(333)
C.2	特征值和特征向量	(335)
C.3	相似变换	(337)
C.4	凯莱-哈密尔顿定理	(340)
附录 D:	概率论和随机过程一些结论的总结	(341)
D.1	随机变量	(341)
D.2	期望	(343)
D.3	多于一个随机变量	(345)
D.4	随机过程	(347)
词 汇		(352)

序言

这是一本关于应用数字计算机，对伺服控制系统、化学过程、水上、陆上、空中或航天运载工具等类动力系统进行实时控制的书籍。本书要求读者对拉氏变换已有所了解。并假定读者已学了线性反馈控制的初级课程。书中介绍了离散和采样数据系统分析这一专题。对 z 变换及其与拉氏变换之间密切的联系给予了足够的重视。

本书的重点是：用时间上采样、幅值上量化的信号来设计数字控制，以获得满意的动态响应和小误差。对变换(经典控制)和状态空间(现代控制)二种方法进行了阐述并赋之于实例。变换法的重点是伊文思(Evans)的根轨迹法、伯德(Bode)的对数幅频、相频法。为有助于使用伯德法，介绍了 w -平面。所给出的状态空间法包括带有前馈或零点配置估计器(观测器)推广的极点配置方法以及最优二次型损失控制。后一课题的重点是稳态常值增益解，对存在噪声时的分离定理只作了叙述而未加证明；建模这一专题则由最小二乘法 and 最大似然估计法对模型参数进行统计辨识而加以处理。

书中可能对学生感到新的内容是：时间、幅值均已离散的信号的处理。这种离散信号又必须与在上述(时间、幅值)两维上皆连续的信号共存。叙述的原则是新内容必须与已熟悉的内容紧密联系。但在最后又指出更为开阔的研究方向。例如，这种处理方式把拉氏变换与 z 变换相联系，使对 z 平面中零极点的含义与已熟知的 s 平面中的零极点意义相比较。同样地，在提出设计方

法时，我们把数字控制设计方法与连续设计方法相联系。但是为了指出更复杂的方法，我们对高斯二次型损失设计只作了极少的证明，给出使用这一有效方法的某些概念，从而推动以后对其理论的全面研究。书中内容特别适合安排实验，因而经常给出了适宜于实验室计算机的程序算法。

简单回顾本书章节，第一章至第四章介绍了线性分析方法。其中第二章介绍了 z 变换，第三章叙述了建立离散方程近似连续动态特性的方法，第四章则把离散与连续系统合并在一起分析。介绍了采样定理和混迭现象。第五、第六章阐述了基本的确定性系统的设计方法。其中第五章叙述了根轨迹和伯德方法，第六章介绍了极点设置和估计器。在状态空间内容方面，作者假定读者对相平面或状态空间并没有预先的了解，因而从头给出了必要的分析。指望读者对联立线性方程和矩阵方法有某种程度了解。少数不常见、更深的课题如特征值、特征向量和凯莱-哈密顿定理在附录C作了介绍。第七章研究幅值量化的非线性现象及其对系统误差和系统动态响应的影响。这最初的七章构成了有关数字控制10周初级课程的教材。

第八章从确定性最小二乘开始，引入随机误差，最后以最大似然算法为结束介绍了参数辨识。第九章提出了最优二次型损失控制；首先叙述了状态反馈，然后根据第八章导出的递推最小二乘估计提出了存在系统噪声和测量噪声时的状态估计。最后，第十章对数字控制系统采样周期的选择，叙述了分析和设计的指导方法。对于这样一本书，选择记号使之有助于而不是妨碍学习总是很重要的。在书首列出了本书使用的总词汇表，建议使用本书的教师也采用这些术语。

在斯坦福大学，根据本书内容开出了二门课。第一门课包括前七章内容。可在学完如Dorf(1980)或Ogata(1970)的线性控制课程后进行。第二门课包括后三章内容。两门课程都紧密依赖于实验，把它作为授课学习的补充。一台可用BASIC语言、包括A/D和D/A转换器的数字计算机、一台十阶模拟计算机以及

一台磁带录音机将是非常满意的一套配备实验室的装置。

如同所有作者所做的，我们要感谢众多的有贡献的人们，正是基于他们的工作，我们才能写出这本著作。所列参考文献只是我们要致谢的作者的一部分，就个人感情而言，我们更要感谢那些把斯坦福变成激动人心场所的人们，同时还要感谢 E.207 和 E.208 的学生们，本书是为他们而写的。也希望这本书的出版将对继他们而来在斯坦福或其他地方接受教育的人们作出贡献。

我们特别要感谢 Judy Clark。她多方设法帮助我们整理笔记，并把笔记加工成手稿，最后成为本书。

G. F. Franklin

J. D. Powell

斯坦福大学 加利福尼亚

1980 年 1 月

词汇符号表

控制词汇

对象

连续情形:

$$\dot{x} = Fx + Gu(f - \lambda) + G_1 W$$

λ ——纯时间延迟

离散:

$$x_{k+1} = \Phi x_k + \Gamma u_k + \Gamma_1 W_k$$

x (状态) = $N_s \times 1$ 或 $n \times 1$

u (控制) = $N_c \times 1$ 或 $m \times 1$

W ——输入扰动或对象噪声 $N_w \times 1$

F ——连续系统矩阵

Φ ——离散系统矩阵

G ——连续控制输入矩阵

Γ ——离散控制输入矩阵

G_1 ——对象噪声输入矩阵

Γ_1 ——离散对象噪声 (输入) 矩阵

$\bar{W} = \mathcal{E} W$ ——对象噪声均值

R_w ——对象噪声谱密度矩阵

$$\mathcal{E}(W - \bar{W})(W - \bar{W})^T = R_w \delta(t) \quad \text{连续} \\ = R_w \quad \text{离散}$$

$\lambda_i(F) = p_i$ ——开环极点——根轨迹上“ x ”

对象输出或传感器方程

连续系统:

$$y = Hx + Ju + v$$

离散系统:

$$y = H_d x + J_d u + v$$

y ——输出测量值 $= N_o \times 1$ 或 $p \times 1$

v ——输出噪声或扰动 $= N_o \times 1$ 或 $p \times 1$

H ——连续输出矩阵

J ——连续对象直接传输矩阵

H_d ——离散系统输出矩阵

J_d ——离散对象直接传输矩阵

$\bar{v} = \mathcal{E} v$ ——输出噪声均值——传感器偏差

R_v ——测量噪声谱密度矩阵

$$\mathcal{E}(v - \bar{v})(v - \bar{v})^T = R_v \delta(t) \quad \text{连续}$$

$$= R_v \quad \text{离散}$$

控制律

$$u = -Kx \quad \text{或} \quad u = -K\hat{x}$$

控制特征多项式

$$\alpha_c(s) \quad \text{或} \quad \alpha_c(z)$$

$$\lambda_i(F - GK) = r_i \quad \text{——闭环特征方程的根(根轨迹上“Δ”)}$$

能控性矩阵($n = N_s$)

$$\mathcal{C} = [G \quad FG \cdots F^{n-1}G] \quad \text{或} \quad [\Gamma \quad \Phi\Gamma \cdots \Phi^{n-1}\Gamma]$$

估计器/观测器

连续:

$$\dot{\hat{x}} = F\hat{x} + Gu + L(y - \hat{y})$$

$$\hat{y} = H\hat{x} + Ju$$

离散:

一步预测

$$\hat{x}_{k+1} = \Phi\hat{x}_k + \Gamma u_k + L(y_k - \hat{y}_k)$$

$$y_k = H_d\hat{x}_k + J_d u_k$$

现时估计器

$$\bar{x}_{k+1} = \Phi \hat{x}_k + \Gamma u_k \quad \text{时间修正}$$

$$\hat{x}_{k+1} = \bar{x}_{k+1} + L(y_{k+1} - \hat{y}_{k+1}) \quad \text{观测修正}$$

$$\bar{y}_{k+1} = H_d \bar{x}_{k+1} \quad (J_d = 0)$$

L ——估计器增益矩阵

$$P = \mathcal{E}(x - \hat{x})(x - \hat{x})^T = \mathcal{E} \tilde{x} \tilde{x}^T \quad \text{——状态误差协方差矩阵}$$

$$R_x = \mathcal{E}(xx^T)$$

$$R_u = \mathcal{E}uu^T$$

控制器

连续:

$$\dot{x}_c = Ax_c + By + Mr$$

$$u = Cx_c + Dy + Nr$$

离散:

$$x_c(k+1) = Ax_c(k) + By(k) + Mr(k)$$

$$u(k) = Cx_c(k) + Dy(k) + Nr(k)$$

x_c ——控制器状态

r ——参考输入 = $N_0 \times 1$

A ——控制器系统矩阵

B ——控制器输入分配矩阵

C ——控制器输出矩阵

D ——控制器直接传输矩阵

M ——控制器参考输入分配矩阵

N ——控制器参考输入直接传输矩阵

最优控制

$$J = \int_{t_0}^{t_f} l(x, u, t) dt + \psi(x_f, t_f)$$

二次型损失

$$J = \mathcal{E} \left\{ \int_{t_0}^{t_f} (x^T Q_1 x + u^T Q_2 u) dt + x^T Q_3 x \right\}$$

离散二次型损失

$$J = E \left\{ \sum_{i=1}^N (x^T Q_1 x + u^T Q_2 u) + x_N^T Q_0 x_N \right\}$$

字母顺序词汇表

A	控制器系统矩阵
B	控制器输入矩阵
C	控制器输出矩阵
D	控制器直接矩阵
F	对象系统矩阵
G	对象输入矩阵
G_1	对象扰动输入矩阵
H	对象输出矩阵
H_d	离散对象输出矩阵
J	对象直接矩阵
J_d	离散对象直接矩阵
K	控制增益
L	估计器增益
M	控制器参考输入分配矩阵
N	控制器参考输入直接矩阵
P	$E\tilde{x}\tilde{x}^T$
Q_1, Q_2, Q_0	分别为状态、控制、终端损失矩阵
R_w, R_v, R_z, R_u	w 和 v 的谱密度矩阵; x 和 u 的协方差矩阵
T	采样周期
u	控制
v	测量噪声
w	对象或输入噪声
x	对象状态
x_c	控制器状态
y	输出
α_c, α_s	控制律和估计器特征多项式