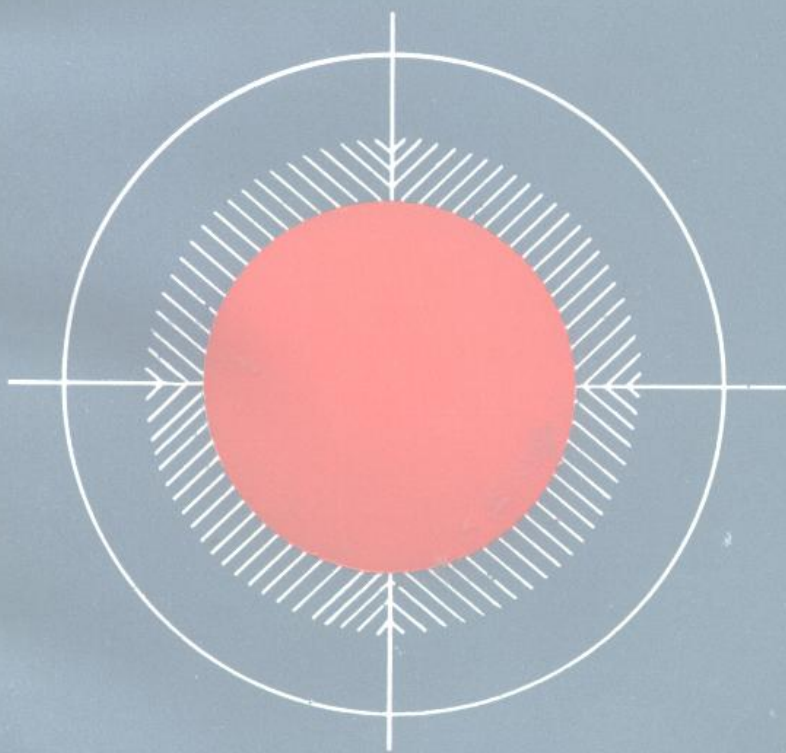


[美] G. F. 富兰克林 J. D. 鲍威尔 著

动态系统的 数字控制



张洪钺 汪一彭 严智民 译 孙增圻 校

动态系统的数字控制

〔美〕 G.F.富兰克林 著
J.D. 鲍威尔

张洪铨 汪一彭 严智民 译

孙增圻 校

新 时 代 出 版 社

DT10/08

内 容 简 介

本书系统地介绍了动态系统数字控制的分析和设计方法。对连续系统的离散等效、离散系统的经典设计方法（ Z 平面根轨迹法、 W 平面的伯德法、直接设计法）和现代设计方法（极点配置、估计器设计、二次型最优控制），系统辨识及卡尔曼滤波等都作了简明扼要的介绍。重点讨论了数字控制系统的量化误差和采样频率选择问题。

本书可供高等院校自动控制专业、计算机应用专业的研究生和高年级大学生作教材用，也可供从事自动控制的工程技术人员阅读。

DIGITAL CONTROL OF DYNAMIC SYSTEMS

Gene F. Franklin and J. David Powell

Addison-Wesley Publishing Company

*

动态系统的数字控制

【美】G. F. 富兰克林 J. D. 鲍威尔 著

张洪钺 汪一彭 严智民 译

孙增圻 校

责任编辑 陈子玉

新时代出版社出版 新华书店北京发行所发行

国防工业出版社印刷厂印刷

787×1092毫米 32开本 14印张 306千字

1988年7月第1版 1988年7月北京第1次印刷

印数：0001—3330册

ISBN 7-5042-0018-2/TP2 定价：3.70元

译者的话

由于数字计算机，特别是微处理机的迅速发展，数字控制技术正在得到日益广泛的使用，数字控制系统的分析和设计方法也得到了特别的重视。本书是美国斯坦福(Stanford)大学航空系为研究生开设数字控制系统课程所用的教材。书中比较系统地介绍了一些实用的数字控制系统的分析设计的理论和方法。内容新颖实际，数学推导简明扼要，着重介绍了适合于在计算机上编制程序的重要的控制、辨识和估计的算法。

本书前五章介绍了古典控制理论的分析设计方法。主要有数字滤波器法、根轨迹法、伯德法和直接设计法等。第六章以后介绍了现代控制理论的分析设计方法。主要有：用极点配置设计控制规律和估计器，离散线性二次型最优控制理论、系统辨识和状态估计（卡尔曼滤波器）等。第七章分析了量化的效应，第十章讨论了采样速率的选择。这是两个实现数字控制系统的重要的实际问题。本书对有些内容的介绍显得太简略，如扩展 z 变换和最小拍系统都放在习题和注释中来介绍。但总的来说，本书的内容和叙述方式都具有工程性，便于读者理解和掌握。所以本书适合于用作工科院校的研究生成大学生选修课教材，也可供广大工程技术人员自学。

本书的前言、词汇表、第一、三、七、八、九、十章和索引由张洪钺翻译，第二、五、六章由严智民翻译，第四章和附

录由汪一彭翻译，全书由张洪铨统稿。清华大学孙增圻对全书进行了详细的校阅并参与了第二、五、六章的翻译，特致深切的谢意。

限于译者水平，译文中难免有不少缺点和错误，热忱地欢迎读者批评指正。

440186

前 言

本书讨论了用数字计算机来实时控制动态系统。这些系统有伺服机构、化工过程以及水陆空和外层空间中的运载工具。为理解本书,读者应掌握拉普拉斯变换的有关知识并学过线性反馈控制系统的入门课程。本书具体分析了离散和采样数据系统,并特别强调 z -变换以及 z -变换和拉普拉斯变换之间的紧密联系。

内容的重点放在有信号采样和幅度量化时,如何来设计数字控制器以达到好的动态响应和小的误差。本书对变换方法(古典控制理论)和状态空间方法(现代控制理论)都加以介绍,并把这些方法用于具体例子的分析设计。在变换方法中,我们强调了伊文思(Evans)的根轨迹法和伯德(Bode)的对数频率特性法。为了在离散系统中便于使用伯德法,还引入了 ω -变换。在状态空间法中讨论了极点配置,并考虑了带有前馈的估计器和零点配置,还讨论了二次型最优控制。在二次型最优控制理论中,我们强调的是稳态常增益解,还给出了有噪音时的分离定理,但未加证明。在建立模型的问题中,讨论了用最小二乘和极大似然法对系统的参数进行统计辨识。

对学生来讲,本书所包含的新的材料是如何处理在时间上和幅度上都是离散的信号。这种信号与时间上和幅度上均为连续的信号共同存在于一个系统中。我们所采用的叙述材料的方法,是把新的材料与熟悉的旧材料联系起来,从而指

出新的方向，以扩大读者的知识。例如，按照这种方法，我们把 z -变换和拉普拉斯变换联系起来；根据已知的 s 平面零极点的意义来阐述 z 平面的零极点的意义。此外，在推导出设计方法时，把数字控制的设计方法与连续系统的设计方法联系起来。本书还包含了一些更先进的设计方法。我们用了最少的证明，介绍了线性二次型高斯设计的最基本的内容，使读者掌握这种强有力的方法的基本思想，并促使读者在今后去进一步深入研究这个理论。本书所介绍的方法非常适合于在实验设备上分析和处理问题，书中经常介绍一些适合在计算机上编制程序的算法。

下面简单介绍一下各章的内容。第一至第四章介绍了线性分析的方法。第二章介绍了 z 变换法。第三章导出了连续系统方程的各种离散近似方程。第四章讨论了包含有连续和离散两者的采样系统，引出了采样定理和频率混叠现象。第五、六章包括了基本的确定性设计方法。第五章讨论了根轨迹法、伯德法。第六章介绍了极点配置法和估计器。我们将从头开始介绍状态空间方法。所以读者不需具备相平面和状态空间的预备知识，但应熟悉线性联立方程和矩阵的知识。一些不常见的或较为先进的课题，如特征值、特征向量和凯莱-哈密顿（Cayley-Hamilton）定理等则放在附录C中。第七章研究了幅度量化的非线性效应以及对系统的误差和动态响应的影响。这前面七章构成了为时十周的数字控制入门课程的教学内容。

第八章介绍了系统辨识的方法。先从确定性的最小二乘法开始，再引入随机误差，最后介绍了极大似然的算法。第九章介绍了线性二次型最优控制。先讨论了状态反馈控制，再介绍了在有系统噪音和测量噪音时的状态估计方法。

最后一章，即第十章，讨论了数字控制系统中选择采样速率的分析设计方法。

在编写教科书时，符号的选用是很重要的。选择得好可以帮助读者学习，反之将妨碍学习。在本书的开头列出了一张所用符号的词汇表。我们一直采用这些符号，并向使用本书的教师们推荐这一套符号。

在斯坦福 (Stanford) 大学有两门课程是基于本书的材料。第一门课程包括本书的第一至第七章。在这门课后有一门线性控制的课程，可能采用多夫 (Dorf) (1980) 或绪方胜彦 (Ogata) (1970) 的书。第二门使用本教科书的课程包括本书的第八至第十章。这两门课程都有很多实验室内的研究工作来补充讲课内容，以帮助读者学习。能满足这些实验研究的设备包括一台可运行 BASIC 程序的数字计算机，A/D 和 D/A 变换器，一台具有十个运算放大器的模拟计算机和一台纸带记录仪。

和所有技术性著作的作者一样，我们必须感谢那些对本书的材料有所贡献的为数众多的人们。本书所列参考书目的作者只是我们应该感谢的人们中的一小部分。从私人的角度来说，我们要感谢那些使斯坦福大学成为美好的工作场所的负责的人们，还要感谢那些选读 E 207 和 E 208 课程的学生。本书就是为选读这两门课程的学生而写的。我们希望本书的出版将有助于今后在斯坦福大学和在其他的教学工作。

我们还特别感谢裘蒂·克勒克 (Judy Clark) 在很多方面帮助我们准备了笔记，后来这就变成了手稿和这本书。

斯坦福，加利福尼亚州

1980年1月

G. F. 富兰克林 (Franklin)
J. D. 鲍威尔 (Powell)

目 录

第一章 导论	6
1.1 问题的定义	6
1.2 几个系统的例子	10
1.3 设计方法概述	11
1.4 小结	13
对进一步阅读的建议	14
问题与练习	15
第二章 线性离散动态系统的分析: z -变换	18
2.1 引言	18
2.2 线性差分方程	18
2.3 离散传递函数	22
2.4 信号分析与动态响应	37
2.5 z -变换的性质	50
2.6 收敛区域与反积分	56
2.7 差分方程的实时实现	60
2.8 小结	66
第二章的附录	66
问题与练习	69
第三章 连续传递函数的离散等效: 数字滤波器	73
3.1 引言	73
3.2 用数值积分法设计数字滤波器	74
3.3 极零点映射法	83
3.4 保持器等效法	85
3.5 巴特沃思 (Butterworth) 和ITAE传递函数的离散等效传 递函数	90
3.6 小结	98

问题与练习	98
第四章 采样数据系统	102
4.1 引言	102
4.2 作为脉冲调制的采样	102
4.3 采样频谱和混叠	105
4.4 数据外推及虚假信号	108
4.5 采样数据系统的结构图分析	112
4.6 小结	121
问题与练习	122
第五章 用变换法设计数字控制系统	125
5.1 引言	125
5.2 控制系统设计的 z 平面技术指标	126
5.3 离散等效的设计方法	138
5.4 z 平面的根轨迹	142
5.5 频率响应法—— w -变换	148
5.6 拉格齐纳直接设计法	156
5.7 第二个示例：通过混合进行温度控制	162
5.8 小结	165
问题与练习	166
第六章 用状态空间法设计数字控制系统	170
6.1 引言	170
6.2 系统的表示	170
6.3 控制规律的设计	180
6.4 估计器的设计	188
6.5 调节器的设计：控制规律与估计器的组合	195
6.6 伺服设计：用前馈控制方式引入参考输入	201
6.7 可控性和可观测性	214
6.8 小结	223
第六章附录 A	224
第六章附录 B	232

X

问题与练习	237
第七章 量化的效应	241
7.1 引言	241
7.2 变量舍入的确定性分析	241
7.3 变量舍入的随机分析	248
7.4 参数舍入的影响	254
7.5 极限环和颤振	257
7.6 小结	261
第七章的附录	262
问题与练习	264
第八章 系统辨识	267
8.1 引言和问题的定义	267
8.2 最小二乘估计	280
8.3 递推最小二乘估计	285
8.4 随机最小二乘估计	292
8.5 极大似然法	305
8.6 极大似然估计的数值搜索	313
8.7 小结	318
问题与练习	318
第九章 多变量和最优控制	323
9.1 引言	323
9.2 解耦	324
9.3 最优控制	329
9.4 最优估计	340
9.5 多变量控制的例子	347
9.6 小结	354
第九章的附录	354
问题与练习	356
第十章 采样速率的选择	360
10.1 引言	360

10.2	跟踪性 (用带宽、时间响应和跟踪的不精确性 来表示)	361
10.3	抗干扰性	365
10.4	对参数变化的灵敏度	367
10.5	前置滤波器设计的影响	372
10.6	小结	376
	问题与练习	377
附录A 实例		380
A.1	卫星姿态的单轴控制	380
A.2	控制天线俯仰角的伺服机构	382
A.3	容器中流体的温度控制	386
A.4	通过柔性结构的控制	388
A.5	造纸机压力流箱的控制	391
附录B 表格		393
B.1	z -变换的性质	393
B.2	z -变换表	394
B.3	w -平面的传递函数	397
附录C 矩阵分析中的若干结果		399
C.1	行列式和逆矩阵	399
C.2	特征值及特征向量	401
C.3	相似变换	403
C.4	凯莱-哈密顿定理	406
附录D 概率论及随机过程中的一些主要结论		408
D.1	随机变量	408
D.2	期望值	410
D.3	多维随机变量	413
D.4	随机过程	415
参考文献		420
索引		424

词汇表

控制词汇

对象

连续情况:

$$\dot{x} = Fx + Gu(t - \lambda) + G_1 w$$

λ —— 纯延迟时间

离散情况:

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

x —— 状态变量, $N_s \times 1$ 或 $n \times 1$ 维

u —— 控制变量, $N_c \times 1$ 或 $m \times 1$ 维

w —— 输入扰动或对象噪音, $N_w \times 1$ 维

F —— 连续对象的系统矩阵

Φ —— 离散对象的系统矩阵

G —— 连续对象的控制输入矩阵

Γ —— 离散对象的控制输入矩阵

G_1 —— 连续对象的噪音输入矩阵

Γ_1 —— 离散对象的噪音输入矩阵

$\bar{w} = \mathcal{E} w$ —— 对象噪音的平均值

R_w —— 对象噪音的频谱密度矩阵

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

$\lambda_i(F) = p_i$ —— 开环极点 (根轨迹上用“ \times ”号表示)

对象的输出方程或传感器方程

连续情况

$$y = Hx + Ju + v$$

离散情况

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

y ——测量输出, $N_0 \times 1$ 或 $p \times 1$ 维

v ——输出噪音或干扰, $N_0 \times 1$ 或 $p \times 1$ 维

H ——连续对象的输出矩阵

J ——连续对象的直接传输矩阵

H_d ——离散对象的输出矩阵

J_d ——离散对象的直接传输矩阵

$v_{\bar{v}} = \mathcal{E} v$ ——输出噪音的平均值, 即传感器常值偏差

R_v ——测量噪音的频谱密度矩阵

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

$$= R_v \quad \text{离散情况}$$

控制规律

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

控制特征多项式

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

$\lambda_i(F - GK) = r_i$ ——闭环特征方程的根 (根轨迹上用

“ Δ ”号表示)

可控性矩阵 ($n = N_s$)

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

估计器/观测器

连续情况:

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

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

离散情况:

一步预报估计器

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

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

现时估计器

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

$$\hat{x}_{k+1} = \bar{x}_{k+1} + L(y_{k+1} - \hat{y}_{k+1}) \quad \text{测量更新}$$

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

L——估计器增益矩阵

$$P = \mathcal{E}(\hat{x} - \bar{x})(\hat{x} - \bar{x})^T = \mathcal{E} \tilde{x} \tilde{x}^T \quad \text{——状态估计的协方差阵}$$

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

$$R_u = \mathcal{E}(u u^T)$$

控制器

连续情况

$$\dot{x}_c = A x_c + B y + M r$$

$$u = C x_c + D y + N r$$

离散情况

$$x_c(k+1) = A x_c(k) + B y(k) + M r(k)$$

$$u(k) = C x_c(k) + D y(k) + N r(k)$$

x_c ——控制器状态

r ——参考输入, $N_0 \times 1$ 维

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——控制器直接传输矩阵

M——控制器参考输入矩阵

N——控制器参考输入直接传输矩阵

最优控制

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

二次型代价函数

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

离散二次型代价函数

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

按字母次序排列的词汇表

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	控制器直接传输矩阵
F	连续对象的系统矩阵
G	连续对象的控制输入矩阵
G ₁	连续对象的扰动输入矩阵
H	连续对象的输出矩阵
H _L	离散对象的输出矩阵
J	连续对象的直接传输矩阵
J _L	离散对象的直接传输矩阵
K	控制增益
L	估计器增益
M	控制器参考输入矩阵
N	控制器参考输入直接传输矩阵
P	E_{xx}^T
Q ₁ 、Q ₂ 、Q ₀	状态加权矩阵、控制加权矩阵、终端状态加权矩阵

R_w, R_v, R_x, R_u	w 和 v 的频谱密度矩阵。 x 和 u 的协方差矩阵
T	采样周期
u	控制量
v	测量噪音
w	对象噪音或输入噪音
x	对象的状态变量
x_0	控制器状态变量
y	输出量
α_c, α_e	控制和估计器特征方程
Γ	离散对象控制输入矩阵
Γ_1	离散对象噪音输入矩阵
λ	对象的延迟时间或传递迟后量
Φ	离散对象系统矩阵