系统·微机
控制理论与设计

章贤民　编著

電子工業出版社

系统·微机
控制理论与设计

章贤民　　编著

電子工業出版社

内 容 简 介

本书系统地介绍了系统工程的理论基础，系统设计和性能测试方法，及工程问题的计算机解法，并给出了系统设计中许多实用的BASIC程序。

本书共分七章，分别介绍了系统工程的理论基础，连续系统、离散系统、混合系统，空间状态设计法，计算机（微机）的应用，以及系统特性的测试原理和方法。内容阐述由浅入深，并通过实例说明它们在工程中的应用。

本书可供从事自动控制，计算机应用技术、通信技术、雷达技术及系统工程等领域的科技工作者及大专院校师生参考。

系统·微机控制理论与设计
章贤民 编著
责任编辑 王明君 席文秀
*
电子工业出版社出版
（北京市万寿路）
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
中国电波传播研究所印刷厂印刷
*
开本：850×1168 1/32 印张：14.6 字数：340 千字
1991年3月第一版 1991年3月第一次印刷
印数：5200册 定价：6.50元
ISBN7—5053—1243—X/TP·205

序

本书是为从事复杂系统的研制与运行工作的工程技术人员编写的，是一本实用性较强的系统工程学专著。全书对系统工程所涉及的基础理论、设计、分析、测试和计算机应用等做了系统的理论联系实际的介绍，为系统工程师解决工程实际问题提供有益的方法与工具，以提高设计水平与工作效率。

系统工程是指认识、设计和运用一个系统整体以达到预期效果的技术，是现代科学技术的重要组成部分。所谓系统，一般是指客观存在的由相互联系又相互制约的许多部份组成的具有特定功能的有机整体。实际工作者习惯地把"系统"和"系统工程"作为同义词使用，因此有时出现了"用系统工程解决系统工程"这样的说法。事实上，前者是指工程(学)，后者是指工程实体。系统作为一个客观物理实体，对它的理解、研制、运用既需要多个专业科学技术知识，还需要对总体进行分析综合的技术。系统工程就是这样一门对专业技术进行抽象(建模、仿真)，然后用各种经典的和现代的系统科学技术理论，包括广为人知的运筹学，控制论、信息论等，进行分析、优化、运行评价的技术。毫无疑问，以上这一切都离不开电子计算机技术，它既作为工具，又是系统的组成部分。

本书以相当篇幅介绍各种系统的数学模型，包括连续系统、离散系统、混合系统及其所需要的基础理论知识，然后转入数学处理规范化，以及便于计算机处理的空间状态分析法，介绍了用途广泛的卡尔曼滤波器与α—β—γ滤波器，介绍了计算机用作系统控制与测量的理论和方法，作者本人是一位长期从事测控系统

研制工作的专家，因此本书选材凝集了他多年工程实践与理论探索的体会。全书结构合理，由浅入深，在给读者以系统的理论概念的同时，又提供了许多实用化的计算机程序，为读者解决工程实际问题提供钥匙和启示。这对于许多长期奋战在第一线的系统工程技术人员是一本有益的教材与手册。

我们的伟大祖国正在进行着伟大的社会主义现代化建设，各条战线都涌现出许多艰苦奋斗，忘我工作，无私奉献和创造性劳动的专家，他们理论联系实际，不仅在实际工作中做出了很好的成绩，而且在理论工作中也有所贡献。本书就是一个例证。我热烈欢迎本书的出版，并期待更多的专家，总结他（她）们的丰富实践，写出他（她）们的心得。这种来自实践而又高于实践的出版物，必将对实践起更多的指导作用与推动作用，从而对我国现代化建设做出更有成效的贡献。

童志鹏

1989. 6. 25

前　　言

在现代社会中，所有事物都与其相关联的其它事物组成系统。无论是电子、电气、机械或热工等工程，都是系统工程。系统工程学是最近几十年发展起来的以控制理论为基础，动筹学为手段，计算机为工具的一门边缘科学。它被广泛用于工农业和国防部门，对各种不同的系统进行分析、预测、估值、实现系统的优化设计。

本书共分七章，介绍系统工程的理论基础，设计和性能测试方法，以及工程问题编制程序问题，并给出了系统设计中许多实用的*BASIC*语言的计算程序。目的在于让读者能在较短的时间内了解一般理论知识，工程设计技能，根据需要直接引用或自行编制一些计算程序，这样可以大大提高设计水平和工作效率。

第一章是理论基础，将本书需要用到的数学工具，做了简要介绍，并对不同系统工程中的传递函数写法做了说明，以使本书以后章节中介绍的方法具有广泛适用性。

第二、三、四章分别介绍连续系统，离散系统和混合系统。讨论了它们的数学模型表示方法，在时域和频域中的行为和稳定性，以及系统误差分析，质量指标和设计方法。

第五章专门叙述空间状态设计法，对优化设计和估值方法做了介绍。

第六章是介绍计算机作为系统的组成部件的有关问题。讨论了不同算法对计算机允许能力的要求，计算机应具备的一般特

性，以及工程设计中参数选择等特殊问题。

第七章是介绍系统特性测试，主要讨论如何应用计算机由系统的信号，通过计算互相关、自相关函数获得系统的脉冲响应、误差指标、频率特性和传递函数等。

本书在叙述上力求深入浅出，简洁明了，理论说明服务于工程实际应用的需要。因此，本文不偏重数学公式的推导，而是强调物理概念的理解，对于引用的一些重要概念，给出了逻辑推理性证明，以便于读者加深理解，并能应用这些概念进行工程设计。

本书书稿由章红宇、卢克成高级工程师，叶平光教授级高级工程师进行了仔细阅读，由中国机械电子工业部电子科学研究院院长、教授级高级工程师童志鹏审定，对他们提出的宝贵意见，在此一并表示衷心的感谢。由于本书编著时间较短，编者水平有限，书中可能存在不少缺点和错误，敬请读者批评指正。

编著者

1989年 7 月

目　　录

第一章　　理论基础

本章简要介绍表示系统和分析系统时所涉及到的一些基本数学工具。此外，作为系统的实际组成元件可以是电子的、电气的、机械的或热力学的元件等，如何将它们进行数学表示，即给出传递函数表示式，本章也给予了说明，从而使本书以后要讨论的内容和方法具有广泛的适用性。

1.1　系统模型的表示方法

系统是按照一定方式连接在一起的元件的集合。我们主要研究线性时不变系统。

线性时不变系统可分为时间连续系统和时间离散系统。

1.1.1　时间连续系统

时间连续系统，可由n阶微分方程来描述。n为系统中包含的独立的贮能元件数。

在实际分析中，为了简化微分方程的演算工作，通常采用以下的方法。

1．微分算子表达式

定义

$$\frac{d}{dt}=p$$

$$\frac{d^2}{dt^2} = p^2$$

$$\int_{-\infty}^{t} (\quad) dt = \frac{1}{p}$$

如系统的输入为$f(t)$，输出为$y(t)$，则系统可由下式表示：

$$y(t) = H(p)f(t) = \frac{N(p)}{D(p)} f(t)$$

式中

$H(p) = \dfrac{N(p)}{D(p)}$称为系统的传输算子

$$N(p) = b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \cdots + b_0$$

$$D(p) = p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \cdots + a_0$$

对于一个物理上可实现的系统，$n \geq m$

2．传递函数表达式

将时域信号经拉氏变换后，成为复频域信号，于是在微分方程中的微积分运算就变成为代数运算。

如系统的输入为$F(s)$，输出为$Y(s)$，系统的传递函数为$H(s)$，则有关系

$$Y(s) = H(s)F(s)$$

3．状态方程表达式

将系统的n阶方程式，转化为n个一阶的微分方程式，则系统便由状态方程表示，系统的输出由输出方程表示。

状态方程

$$\dot{\mathbf{X}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{X}(t) + \mathbf{B}\mathbf{f}(t)$$

输出方程

$$\mathbf{Y}(t)=\mathbf{C}\mathbf{X}(t)+\mathbf{D}\mathbf{f}(t)$$

式中，**A**、**B**、**C**、**D**为系数矩阵，$\mathbf{X}(t)$为由n个状态变量x_i组成的列阵，$\mathbf{f}(t)$和$\mathbf{Y}(t)$分别为系统的输入和输出向量。

1.1.2 时间离散系统

对于时间离散系统，可用n阶差分方程来描述。为了简化差分方程的解算工作，通常采用以下几种方法：

1．算术方程式

定义

E为超前算子，E^{-1}为滞后算子。

于是，对于一个时间离散信号$f(k)$，经算子的作用后，则有

$$E[f(k)]=f(k+1)$$

$$E^{n}[f(k)]=f(k+n)$$

$$E^{-n}[f(k)]=f(k-n)$$

使用这种符号，一阶差分方程

$$y(k+1)-ay(k)=f(k)$$

可以表示为：

$$E[y(k)]-ay(k)=f(k)$$

或

$$(E-a)y(k)=f(k)$$

n阶差分方程的一般形式为：

$$y(k+n)+a_{n-1}y(k+n-1)+\cdots+a_1y(k+1)+a_0y(k)$$

$$=b_mf(k+m)+\cdots+b_1f(k+1)+b_0f(k)$$

使用运算符号表示时，其相应的表达式为：

$$(E^n + a_{n-1}E^{n-1} + \cdots + a_1E + a_0)\,y(k)$$
$$= (b_mE^m + \cdots + b_1E + b_0)\,f(k)$$

或

$$y(k) = \frac{N(E)}{D(E)}f(k)$$

式中

$$N(E) = b_mE^m + \cdots + b_1E + b_0$$

$$D(E) = E^n + a_{n-1}E^{n-1} + \cdots + a_1E + a_0$$

2．传递函数表达式

对差分方程进行Z变换，则可用Z变换的传递函数形式来表达。即

$$\mathscr{Z}[f(k)] = F(z)$$
$$\mathscr{Z}[y(k)] = Y(z)$$
$$\mathscr{Z}[h(k)] = H(z)$$

则

$$Y(z) = H(z)F(z)$$

3．状态方程式

将n阶差分方程转化为n个一阶的差分方程，则系统即由状态方程表示，输出由输出方程表示。

状态方程：

$$\mathbf{X}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{X}(k) + \mathbf{B}\mathbf{f}(k)$$

输出方程：

$$\mathbf{Y}(k) = \mathbf{C}\mathbf{X}(k) + \mathbf{D}\mathbf{f}(k)$$

式中

A、**B**、**C**、**D**为系数阵，$\mathbf{X}(k)$为状态矢量，$\mathbf{f}(k)$和$\mathbf{y}(k)$分别为系统的输入和输出矢量。

1.2 线性微分方程

对于n阶微分方程的微分算子表达式

$$y(t)=H(p)f(t) \tag{1.2.1}$$

$$H(p)=\frac{N(p)}{D(p)}=\frac{b_m p^m+b_{m-1}p^{m-1}+\cdots+b_1 p+b_0}{p^n+a_{n-1}p^{n-1}+\cdots+a_1 p+a_0} \tag{1.2.2}$$

为对（1.2.1）式求解，首先需将（1.2.2）式作部分分式展开。

一般地，如$D(p)$有r阶重根，即

$$H(p)=\sum_{j=0}^{r-1}\frac{a_j}{(p-\lambda_1)^j}+\sum_{i=r}^{n-r}\frac{K_i}{p-\lambda_i} \tag{1.2.3}$$

式中，λ为$H(p)$的极点，系数a_j和K_i按下式求解

$$a_j=\frac{1}{j!}\frac{d^j}{dp^j}[(p-\lambda_1)^r H(p)]|_{p=\lambda_1} \tag{1.2.4}$$

$$j=0,1,2,\cdots,(r-1)$$

$$K_i=(p-\lambda_i)H(p)|_{i=\lambda i} \tag{1.2.5}$$

在运算过程中，其简化规则如下：

$$\left.\begin{aligned}&D(p)\frac{1}{D(p)}=1\\ 但\ &\frac{1}{D(p)}D(p)\neq 1\end{aligned}\right\} \tag{1.2.6}$$

这是由于$D(p)$是微分作用，而$1/D(p)$是积分作用，即先积后微，微积作用相消。但先微后积应有一个常数项。

在现代的系统分析中，基于系统的线性和时不变性，通常是将外作用$f(t)$和$f(t)$加入时系统的储能（即初始状态）分别看作是系统的两种作用原因。因此，当没有$f(t)$作用，单独由系统的初始状态产生的输出响应，称为零输入响应，记为$y_x(t)$。当系统的状态为零，仅由输入$f(t)$产生的输出响应，称为零状态响应，记为$y_f(t)$。系统的总响应，则为两部分响应之和，即

$$y(t)=y_x(t)+y_f(t) \tag{1.2.7}$$

1．零输入响应

由于 $f(t)=0$，则由（1.2.1）和（1.2.2）得

$$D(p)y(t)=0 \tag{1.2.8}$$

如设

$$D(p)=\prod_{i=1}^{n}(p-\lambda_i)$$

则

$$(p-\lambda_1)y(t)=0$$
$$(p-\lambda_2)y(t)=0$$
$$\vdots$$
$$(p-\lambda_n)y(t)=0$$

由于$(p-\lambda)\ y=\dfrac{dy}{dt}-\lambda y=0$

$$\frac{dy}{dt}=\lambda y$$

$$\frac{dy}{y}=\lambda dt$$

两端积分得