动力系统反控制方法及其应用

禹思敏　吕金虎　陈关荣　著

科学出版社

动力系统反控制方法及其应用

禹思敏　吕金虎　陈关荣　著

科学出版社
北　京

内 容 简 介

本书详细论述了离散时间系统、连续时间系统和切换系统反控制(即混沌化)的研究方法与应用及其电路设计与实现,共20章。第1～9章主要介绍离散时间系统反控制,包括数学预备知识与混沌的基本概念,离散时间系统反控制的Chen-Lai算法及其电路实现,离散时间系统反控制的Wang-Chen算法,单峰和多峰映射,离散正弦多峰映射,线性取模运算多峰映射,混沌控制与同步,离散时间系统的单变量反控制、同步及其在混沌序列密码中的应用,高维广义超混沌猫映射及其在分组图像加密中的应用等。第10～19章主要介绍连续时间系统与切换系统的反控制,包括连续时间系统与切换系统反控制方法概述,连续时间线性系统的反控制,连续时间非线性系统的反控制,三维切换系统的反控制,四维切换系统的反控制,具有指标1鞍焦平衡点和相同特征平面的切换系统反控制,具有鞍焦型同宿轨道的混沌系统,基于切换流形的复合型混沌系统,以及基于平移、镜像反转和旋转变换构造网格多翅膀超混沌系统等内容。书中还提供了许多电路设计图、计算混沌吸引子相图、分岔图、李指数、混沌OGY控制和数字图像加密的MATLAB源程序,供读者学习和使用。

本书可作为控制科学与工程、电路与系统或相关专业研究生的教材或教学参考书,也可供自然科学和工程技术领域中的高校教师和研究人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

动力系统反控制方法及其应用/禹思敏,吕金虎,陈关荣著. —北京:科学出版社,2013

ISBN 978-7-03-038416-4

Ⅰ.①动… Ⅱ.①禹… ②吕… ③陈… Ⅲ.①动力系统-研究 Ⅳ.①O19

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第194293号

责任编辑:汤 枫 裴 育 唐保军 / 责任校对:张凤琴
责任印制:张 倩 / 封面设计:蓝正设计

科学出版社 出版
北京东黄城根北街16号
邮政编码:100717
http://www.sciencep.com

北京彩虹伟业印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013年9月第 一 版 开本:B5(720×1000)
2013年9月第一次印刷 印张:31 1/4
字数:610 000

定价: 138.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前　言

本书以动力系统反控制(即混沌化)为主要研究对象,重点介绍了离散时间系统、连续时间系统和切换系统的反控制理论、方法、应用及其电路设计与实现,归纳和总结了近年来作者及其合作者所取得的主要科研成果。

自 20 世纪 60 年代以来,作为非线性科学的一个重要分支——混沌理论引起了国内外科研人员的普遍关注。近年来,随着问题研究的不断深入,人们逐步认识到依据现代控制理论和方法来解决某些混沌学基本问题的可能性与重要性,其中混沌控制与混沌反控制(混沌化)是将混沌理论与控制理论相结合用于解决混沌系统相关问题的有效途径与方法。

有关离散时间系统和连续时间系统的混沌化问题,从理论上讲,这两者都可以依据反控制原理作为研究问题的基本原则和出发点,并且在反控制形式上和分析方法上也有诸多的平行与相似之处,因此有理由相信它们应得到平行发展。然而,事实上它们的研究进展却存在明显差异,主要体现在:自 1996 年以来,离散时间系统的反控制研究取得了一系列实质性的进展,而连续时间系统的反控制问题虽然也取得了一些进展,但至今尚未从理论上找到具有普适性的有效执行方案。尽管人们相继提出了一些相关的方法,解决了某些特殊类型的混沌和超混沌系统的生成问题,但目前尚未建立一种基于连续时间混沌存在性判据的通用设计准则。一方面,根据大量文献给出的结果,对大多数连续时间系统的混沌化,由于其基本理论与特征上的本质差异和困难,目前主要沿袭的方法依然是传统意义上研究混沌的数值实验层面上的参数“错试法”。具体而言,人们通常在参数错试、数值仿真和计算李指数“三步曲”的基础上完成并实现连续时间系统的混沌化,未能真正从理论上解决这一具有挑战性的重要研究课题。另一方面,通过上述的对比和思考,人们自然会提出这样一个最基本的问题:既然离散时间系统反控制理论已建立并获得了成功,那么能否将其推广到连续时间混沌系统的反控制呢? 答案是否定的。试图将离散时间系统的反控制方法直接推广到连续时间系统的许多尝试工作始终未能获得成功,这主要归咎于两类系统混沌理论中许多根本性的区别,也正是两者进展差异显著的根本原因所在。这同时也充分说明了,在研究连续时间系统的反控制问题时,不能只是沿袭已有离散时间系统的反控制原理与方法,而必须另辟蹊径。本书给出了这种新尝试的许多成功例子。

本书的第一部分主要内容包括有限区域条件下离散时间系统的反控制及其电路实现、离散时间系统的单变量反控制与同步及其在混沌序列密码中的应用、高维

广义超混沌猫映射及其在分组图像加密中的应用。在 Chen-Lai 算法和 Wang-Chen 算法等离散时间系统的反控制方式中，模函数的定义域均为$(-\infty,+\infty)$。然而，在电子电路等技术实现中，模函数定义在有限区域上才能工作。书中以有限区域条件下模函数分别为正弦函数和锯齿波函数的离散时间系统反控制作为典型实例，给出了受控系统在 Li-Yorke 意义下混沌的充分条件和理论证明，从而能根据定理给出的充分条件和电子器件自身规定的一个有限区域或动态范围的约束条件来共同确定电路的具体参数范围，为电路设计与技术实现提供理论依据和准则，并设计了有限区域条件下模函数为正弦函数和锯齿波函数的离散时间系统的反控制电路。该方法也可用于有限区域条件下模函数为其他非线性函数的离散时间系统的反控制与电路实现。

本书的第二部分主要内容旨在针对至今尚未真正获得解决的连续时间系统反控制若干基本问题，以混沌存在性判据和混沌控制与反控制辩证统一研究作为基本前提和出发点，通过对比离散时间系统和连续时间系统这两类反控制问题的共性（体现在这两者都具有正的李指数和轨道全局有界性）和差异（体现在这两者具有不同的李指数配置、不同的耗散性、不同的平衡点类型和不同的数学论证方法），并以轨道的全局有界性、系统的耗散性，同时配置正、负和零李指数以及构造异宿环等作为研究问题的切入点，从理论、方法与应用三方面探索其解决途径。目标在于突破传统意义下研究混沌的数值实验层面上的参数“错试法”所存在的局限性，建立连续时间系统反控制充分或必要条件的若干判定定理以及几个具有通用性的设计准则，提出满足判定定理充分或必要条件和设计准则条件下具有普适性的建模方法，从理论上初步解决连续时间系统反控制的一般设计问题。目前，作者根据这种方法获得了许多成功的实例。其中有些实例无需借助任何参数调试，只需满足设计准则的所有条件，就能直接生成所期望的连续时间混沌系统。然而，有些实例虽然满足设计准则的所有条件，但仍需通过简单的参数调试或改变特征根的分布才能获得所要求的结果，主要归咎于目前我们还只能够定性地配置李指数。例如，若系统雅可比矩阵特征根实部为正，则具备发散机制，对正的李指数有贡献；若特征根实部为负，则具备收缩机制，对负的李指数有贡献。可是目前还无法用解析方法定量地来计算出这些对李指数的贡献大小。对于定性配置只有一个正的李指数生成 $n(n\geqslant 3)$维混沌系统的情况，一般能获得成功。但对于定性配置多个正李指数生成的维超混沌系统，情况要更复杂一些，对李指数配置要求也更高；在没有解决定量配置多个正的李指数的情况下，目前成功的实例并不多。由于连续时间系统反控制至今尚未被人们所完全认识，并且相对离散时间系统的反控制来说难度更大，本书所给出的结果仍然只是初步的，需要在后续研究中进一步深入和提高。

本书的第三部分主要内容为切换系统的反控制。首先，根据切换控制和异宿

环方法构造在 Shilnikov 意义下的具有指标 2 鞍焦平衡点的三维多翅膀和网格多翅膀混沌系统。该方法比较适合于变换$(x,y,z)\rightarrow(-x,-y,z)$下具有不变性的一类广义 Lorenz 系统族，如 Lorenz 系统、Chen 系统、Lü 系统、Shimizu-Morioka 系统、Rucklidge 系统和 Sprott 系统等。更为重要的是，书中将三维混沌系统中构造异宿环的方法进一步推广到四维系统中，介绍了通过切换控制和超异宿环的方法构造多翅膀和网格多翅膀四维超混沌广义 Lorenz 系统族。其次，根据切换控制方法和异宿环特性，构造具有指标 1 鞍焦平衡点的混沌系统以及各个平衡点具有相同特征平面的多涡卷和网格多涡卷混沌系统。此外，书中还介绍了若干切换系统反控制方面的研究课题，根据同宿轨道 Shilnikov 定理构造具有鞍焦型同宿轨道的三维混沌系统、利用切换流形的方法生成复合型混沌系统，以及基于平移变换、镜像反转变换、旋转变换和切换控制等方法构造出各种不同类型的多翅膀和网格多翅膀超混沌广义 Lorenz 系统族。

多年来，作者的研究工作在很大程度上受益于国家和省部级科研项目的连续资助。借此机会，作者衷心感谢国家自然科学基金(60572073，60871025，61172023，61025017，11072254)、教育部高等学校博士学科点(博导类)专项科研基金(20114420110003)、广东省“211”工程第三期建设子项目(粤发改[431])、广东省自然科学基金(032469，05001818，8151009001000060，8351009001000002)、广东省科技计划项目(2009B010800037)和广州市科技计划项目(2004J1-CO291)的资助。作者在从事研究和撰写本书的过程中得到了许多同行的支持和帮助，特别是郭雷、陈翰馥、吴宏鑫、刘经南、李德毅等院士，以及 Wallace K S Tang、赖德健、汪小帆、李常品、史玉明、余星火、吴晓锋、黄煜、陆君安、张纪峰等教授。此外，作者衷心感谢家人给予的长期支持和理解，感谢中国科学院数学与系统科学研究院和香港城市大学的支持，同时感谢科学出版社在本书的出版过程中给予的大力支持和协助。

由于作者水平有限，不足之处在所难免，热诚地期待广大同行和读者批评指正。

作　者

2013 年 5 月

目　　录

第 1 章　数学预备知识与混沌的基本概念

本章从应用的角度出发，简要介绍混沌系统的分析与设计中所需的数学预备知识与混沌的一些基本概念。主要内容包括矩阵分析基础[1]、离散混沌系统中常用到的模函数运算及其性质、模函数的求导问题、证明离散系统混沌存在性的几个引理、回归排斥子、Marotto 定理、同宿轨道和同宿点、正向迭代与逆向迭代、Devaney 混沌定义和混沌主要特征及存在性判据。此外，回归排斥子和 Marotto 定理是 Li-Yorke 混沌定义在高维连续可微映射情况下的推广形式，使得判断高维映射的混沌存在性成为可能，是判定离散系统具有 Li-Yorke 意义下混沌的重要理论工具[2~5]。

1.1　矩阵分析基础

1.1.1　对称矩阵

满足条件 $a_{ij}=a_{ji}(i,j=1,2,\cdots,n)$ 的方阵 $A=(a_{ij})$ 称为对称矩阵，具有以下性质：若 A 和 B 均为对称矩阵，则 $A^{\mathrm{T}}=A$，并且 A^{-1}、A^m 和 $A+B$ 仍为对称矩阵。

实对称矩阵按其特征值可分为正定矩阵、半正定矩阵、负定矩阵、半负定矩阵和不定矩阵五种。需要注意：由于二次型是和对称矩阵相联系的，故正定和负定的概念也仅仅适合于对称矩阵，如果不是对称的矩阵，则不存在正定和负定的概念。有关正定矩阵、半正定矩阵、负定矩阵、半负定矩阵和不定矩阵的定义及充要条件如下。

(1) **正定矩阵**。特征值都大于零的实对称矩阵称为正定矩阵，记为 $A>0$。充要条件是所有主子式都大于零，即 $A_i>0(i=1,2,\cdots,n)$。

正定矩阵的一个重要性质是，若 A 为正定矩阵，则 A^{-1} 也为正定矩阵。因为 A 为正定矩阵，则存在酉矩阵 P，使得

$$P^{-1}AP = D = \begin{pmatrix} d_1 & & & 0 \\ & d_2 & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & d_n \end{pmatrix} \tag{1-1}$$

其中 $d_i>0$，两边取逆后，得

$$P^{-1}A^{-1}P=\begin{pmatrix} d_1^{-1} & & & 0 \\ & d_2^{-1} & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & d_n^{-1} \end{pmatrix} \tag{1-2}$$

其中 $d_i^{-1}>0$，故 A^{-1} 也为正定矩阵。

(2) **半正定矩阵**。特征值都不小于零的实对称矩阵称为半正定矩阵，记为 $A\geqslant 0$。充要条件是所有主子式都大于或等于零，即 $A_i\geqslant 0(i=1,2,\cdots,n)$。

(3) **负定矩阵**。特征值都小于零的实对称矩阵称为负定矩阵，记为 $A<0$。充要条件是各级顺序主子式满足

$$\begin{cases} A_i<0 & (i\ 为奇数) \\ A_i>0 & (i\ 为偶数) \end{cases}$$

类似的，若 A 为负定矩阵，则 A^{-1} 也为负定矩阵。

(4) **半负定矩阵。** 特征值都不大于零的实对称矩阵称为半负定矩阵，记为 $A\leqslant 0$。充要条件是各级顺序主子式满足

$$\begin{cases} A_i\leqslant 0 & (i\ 为奇数) \\ A_i\geqslant 0 & (i\ 为偶数) \end{cases}$$

(5) **不定矩阵**。特征值既有大于零又有小于零的实对称矩阵。

1.1.2　正交矩阵

如果 n 阶方阵 A 满足 $A^{-1}=A^{\mathrm{T}}$，即 $A^{\mathrm{T}}A=I$，就称 A 为正交矩阵，方阵 A 为正交矩阵的充要条件是 A 的列(行)向量都是单位向量且两两正交，能构成向量空间 $\mathbf{R}^n$ 的一个正交规范基。正交矩阵的主要性质如下：

(1) $|A|=\pm 1$；

(2) 若 A、B 都是正交矩阵，则 A^{-1} 和 AB 仍是正交矩阵。

1.1.3　矩阵的相似变换

若有一非奇异矩阵(或满秩矩阵、可逆矩阵) P，使得 $P^{-1}AP=B$，则称矩阵 A 与矩阵 B 相似，也称 A 经相似变换为 B，记为 $A\sim B$。$A\sim B$ 的主要性质如下：

(1) A 与 B 的秩相同，即 $\operatorname{rank} A=\operatorname{rank} B$；

(2) A 与 B 的行列式相同，即 $\det A=\det B$；

(3) A 的迹 $\operatorname{tr} A=\sum_{i=1}^{n}a_{ii}$ 与 B 的迹 $\operatorname{tr} B=\sum_{i=1}^{n}b_{ii}$ 相同，即 $\operatorname{tr} A=\operatorname{tr} B$；

(4) A 与 B 具有相同的特征多项式和特征值。

一个三阶实矩阵 A 总可通过相似变换变为特征值标准形、若当标准形和模态标准形等形式，并且只要求相似变换 P 可逆。

(1) 特征值标准形。其变换形式为

$$P^{-1}AP=\begin{pmatrix}a_1 & 0 & 0\\ 0 & a_2 & 0\\ 0 & 0 & a_3\end{pmatrix}=\Lambda \tag{1-3}$$

(2) 若当标准形。其变换形式为

$$P^{-1}AP=\begin{pmatrix}a_1 & 1 & 0\\ 0 & a_1 & 1\\ 0 & 0 & a_1\end{pmatrix}=J \tag{1-4}$$

(3) 模态标准形。其变换形式为

$$P^{-1}AP=\begin{pmatrix}\gamma & 0 & 0\\ 0 & \sigma & \omega\\ 0 & -\omega & \sigma\end{pmatrix}=H \tag{1-5}$$

注意到当为模态标准形时,矩阵 A 出现一对共轭复根和一个实根。与之相对应的动力系统 $\dot{X}=AX$ 才会出现鞍焦平衡点,对应的特征值为 $\gamma,\sigma+\mathrm{j}\omega,\sigma-\mathrm{j}\omega$。

反之,我们只需根据对应的特征值为 $\gamma,\sigma+\mathrm{j}\omega,\sigma-\mathrm{j}\omega$,就可以利用模态标准形构造出一个实矩阵

$$A=P\begin{pmatrix}\gamma & 0 & 0\\ 0 & \sigma & \omega\\ 0 & -\omega & \sigma\end{pmatrix}P^{-1} \tag{1-6}$$

矩阵 A 具有同样的特征值 $\gamma,\sigma+\mathrm{j}\omega,\sigma-\mathrm{j}\omega$,只需 P 可逆。例如,选取

$$P=\begin{pmatrix}1 & 1 & 1\\ 1 & 1 & 0\\ 1 & 0 & 1\end{pmatrix} \tag{1-7}$$

则有

$$A=\begin{pmatrix}-\lambda+2\sigma & \lambda-\omega-\sigma & \lambda+\omega-\sigma\\ -\lambda+\sigma+\omega & \lambda-\omega & \lambda-\sigma\\ -\lambda-\omega+\sigma & \lambda-\sigma & \lambda+\omega\end{pmatrix} \tag{1-8}$$

上述式(1-6)～式(1-8)常用于混沌系统的设计中。

1.1.4　特征值与特征向量

在上述矩阵的相似变换中,当为特征值标准形时,有

$$X^{-1}AX=\begin{pmatrix}\lambda_1 & & & 0\\ & \lambda_2 & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & \lambda_n\end{pmatrix}\rightarrow AX=X\begin{pmatrix}\lambda_1 & & & 0\\ & \lambda_2 & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & \lambda_n\end{pmatrix} \tag{1-9}$$