華夏英才基金學術文庫

陈跃鹏　周祖德　著

广义系统的鲁棒控制与容错控制

科学出版社
www.sciencep.com

華夏英才基金學術文庫

广义系统的鲁棒控制与容错控制

陈跃鹏　周祖德　著

科学出版社
北　京

内 容 简 介

本书根据作者近几年科研与教学工作的总结撰写而成，介绍了当前这一领域中一些重要研究课题所取得的主要成果。全书共分 8 章，主要内容包括：绪论、广义系统的完整性控制、广义系统 H_∞ 可靠控制、广义系统混合 H_2/H_∞ 性能的可靠容错控制器设计、基于控制器增益变化的广义系统可靠保成本控制、广义系统的分散控制、广义系统的 H_∞ 控制、基于容错理论的同时镇定研究。读者可以根据兴趣和需要对本书的内容进行选读。

本书可供控制与系统科学、系统工程、应用数学以及相关工程与应用的专业研究人员及教师阅读和参考，也可作为高等院校相关专业研究生和高年级本科生的选修课教材。

图书在版编目(CIP)数据

广义系统的鲁棒控制与容错控制/陈跃鹏，周祖德著. —北京：科学出版社，2010

(华夏英才基金学术文库)

ISBN 978-7-03-028544-7

Ⅰ. 广… Ⅱ. ①陈… ②周… Ⅲ. ①广义系统理论-鲁棒控制 ②广义系统理论-容错技术 Ⅳ. ①TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 159280 号

责任编辑：王志欣 裴 育 / 责任校对：张怡君

责任印制：赵 博 / 封面设计：陈 敬

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

双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010 年 8 月第 一 版 开本：B5(720×1000)

2010 年 8 月第一次印刷 印张：11

印数：1—3 000 字数：212 000

定价：40.00 元

(如有印装质量问题，我社负责调换)

前　言

在现代科学技术的众多领域中,自动控制技术起着越来越重要的作用。自动控制理论是研究自动控制共同规律的技术科学,产生于18世纪中叶英国的第一次技术革命。20世纪60年代初期,随着现代应用数学新成果的推出和电子计算机技术的应用,为适应宇航技术的发展,自动控制理论跨入了一个新阶段——现代控制理论。随着现代控制理论研究的日趋深入,以及向其他学科,如航空航天、能源、网络、石油、化工和通信等应用领域的渗透,人们发现了一类更具广泛形式的系统,即广义系统。广义系统于20世纪70年代被提出,是描述与刻画实际系统的有力工具。广义系统模型的提出具有深刻的实际应用背景。经过几十年的发展,广义系统理论取得了令人瞩目的研究成果,其具有的本质特性已得到越来越深刻的揭示,现已经发展成为控制理论的一个重要分支。

自1999年首篇广义系统容错控制方面的文章在北京IFAC国际会议上发表之后,国内外众多高校和研究机构的学者致力于广义系统鲁棒控制与容错控制方面的理论研究工作,同时有关应用方面的研究在世界范围内也悄然兴起。为了使有志从事于这一领域研究的读者了解和掌握该领域的有关知识和研究现状,进一步丰富和完善广义系统容错控制理论,作者撰写了这本专著。

本书是根据作者近几年科研与教学工作的总结撰写而成的,介绍了当前这一领域中一些重要研究课题所取得的主要成果,也是当前广义系统容错控制领域第一部公开出版的专著。全书共分8章:第1章介绍本书研究工作的背景;第2章采用广义Riccati不等式研究不确定连续和离散广义系统具有完整性的容错控制问题;第3章研究广义系统H_∞可靠控制问题;第4章利用线性矩阵不等式方法,研究基于观测器的广义系统混合H_2/H_∞性能的可靠控制器设计问题;第5章讨论一类基于控制器增益变化的广义系统可靠保成本控制问题;第6章研究广义系统的分散H_∞控制器设计,以及系统执行器和传感器故障时分散容错控制器的设计问题;第7章讨论基于观测器的具有反馈增益变化的广义系统H_∞控制问题,以及研究具有时变仿射的广义系统H_∞性能;第8章探讨基于容错理论的r个不确定广义系统输入饱和同时镇定问

题，以及具有二次性能的 r 个线性离散时滞系统同时镇定问题。读者可以根据兴趣和需要对本书的内容进行选读。

为便于研究生和高年级本科生阅读，本书尽量采用代数方法作为论述的数学工具，因此建议读者具备线性系统理论、广义系统理论，以及正常系统的容错控制理论等方面的基础知识。

特别感谢东北大学张庆灵教授在工作和学术上给予的大力帮助和指导，本书第一作者的成长与进步与恩师的辛勤培养是分不开的。此外，也感谢中央高校基本科研业务费专项资金(2010-Ⅵ-009)、国家自然科学基金国际合作交流项目（以网络为基础的数字制造环境的新理论和新技术研究，50620130441）和国家自然科学基金（导数项系数矩阵带扰动的广义系统鲁棒控制，60574011）对作者的研究工作给予的资助，尤其是第十三批华夏英才基金对本书出版的资助。

由于作者水平有限，书中不妥之处在所难免，恳请读者指正。相信本书在读者的关心与帮助下，一定会得到不断的完善和提高。

作　者

2010 年 5 月

目　录

第 1 章　绪　　论

1.1　广义系统的结构特征及应用背景

自动控制理论作为一门科学，产生于 18 世纪中叶英国的第一次技术革命。1868 年 Maxwell 发表的“On governors”(论调速器)[1]一文被认为是人们开始进行控制理论研究的标志性文献。社会生产力的发展，尤其是计算机技术的更新换代，推动了控制理论不断地向前发展。在控制理论整个的发展过程中，具有里程碑意义的是 20 世纪 60～70 年代初提出的状态空间法，即将古典控制理论中的高阶常微分方程转化为一阶微分方程组，以描述系统的动态过程，从而将“古典控制理论”的研究过渡到“现代控制理论”的研究。随着人们对现代控制理论研究的深入，以及现代控制理论向其他学科，如航空航天、卫星定位、化学工程、生物医学、能源、网络、电力、经济和通信等应用领域的渗透，一类具更广泛形式的系统已经出现，它与通常讨论的正常系统：

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x,u,t) \\ y &= g(x,u,t) \end{aligned} \tag{1.1.1}$$

相对应，可以表示为[2]

$$\begin{aligned} E(x,t)\,\dot{x} &= f(x,u,t) \\ y &= g(x,u,t) \end{aligned} \tag{1.1.2}$$

其中，x、u 和 t 分别表示状态变量、输入变量和时间变量；$f(x,u,t)$ 和 $g(x,u,t)$ 是 x、u 和 t 的 n 维向量函数；$E(x,t)\in \mathbf{R}^{n\times n}$。当 $\mathrm{rank}[E(x,t)]=n$ 时，通过适当的数学运算，式(1.1.2)可转化为式(1.1.1)，即正常系统。当 $\mathrm{rank}\,[E(x,t)]=r<n$ 时，称式(1.1.2)为广义系统[3]。广义系统在许多文献中又称为奇异系统(singular systems)、描述系统(descriptor systems)、隐式系统(implicit systems)、广义状态空间系统(generalized state-space systems)、半状态系统(semistate systems)及微分代数系统(differential-algebraic systems)等。与正常的线性时不变系统相对应，当式(1.1.2)表示成线性时不变模型时，称为线性时不变广义系统。其模型为

$$E\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t)$$

$$y(t) = Cx(t) \tag{1.1.3}$$

其中，E、A、B 和 C 为具有适当维数的实常数矩阵。在不引起混淆的情况下，称式(1.1.3)为广义系统。通常假定广义系统(1.1.3)是正则的。对于这一条件，广义系统(1.1.3)比较容易满足。于是，对于给定的允许初始状态，广义系统(1.1.3)的解存在且唯一。

相应的，定义在无穷区间上的离散广义系统表示为

$$\begin{aligned} Ex(t+1) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) \quad (t = 0,1,\cdots) \end{aligned} \tag{1.1.4}$$

其中，$x(t)$、$u(t)$和 $y(t)$依次为 t 时刻的 n 维状态、m 维输入和 l 维输出。

1974 年著名学者 Rosenbrock 在英国出版的国际控制杂志(*International Journal of Control*)上发表题为 Structural properties of linear dynamical systems[4] 的文章中指出，其所描述的实际问题是复杂的电网络系统。该文献研究了线性广义系统的解耦零点及系统受限等价性问题。接着，Luenberger 和 Arbel[5]分别在美国电子电气工程师学会自动控制汇刊(*IEEE Transactions on Automatic Control*)和英国出版的国际自控联汇刊自动化(*Automatica*)上发表文章，对线性广义系统解的存在性和唯一性等问题展开了研究，由此拉开了对广义系统研究的帷幕。因此，广义系统并非凭空想象出来的，它是对实际应用中存在的一类问题比较精确的模型描述。近几十年来，人们发现，用广义系统模型描述和刻画实际应用中经常遇到的一些系统比用线性正常系统模型更自然、方便和精确，如里昂捷夫动态投入产出模型[6]和冯纽曼模型[7]等。

正常系统与广义系统之间有本质的区别，以连续系统为例，主要体现在以下几个方面：

(1) 解的结构。广义系统(1.1.3)的解中通常不仅含有正常系统所具有的指数解(对应于有穷极点)，而且含有正常系统解中所不出现的脉冲解和静态解(对应于无穷极点)，以及输入的导数项。

(2) 正常系统有 n 个自由度；广义系统有 rank(E)个自由度。

(3) 正常系统的传递函数阵为真有理分式阵；广义系统的传递函数阵通常包含次数大于 1 的多项式矩阵。

(4) 正常系统的齐次初值问题的解存在且唯一。但广义系统的齐次初值问题可能是不相容的，即可能不存在解；即使有解，也不一定唯一。

(5) 广义系统具有层次性，一层为对象的动态特性(由微分或差分方程描述)，另一层为管理特征的静态特性(由代数方程描述)；正常系统没有静态

特性。

(6) 广义系统的极点，除了有 $q(=\deg\det(sE-A))$ 个有穷极点外，还有正常系统不具有的 $(n-q)$ 个无穷极点，在这些无穷极点中又分为动态无穷极点和静态无穷极点。

(7) 在系统结构参数扰动下，广义系统通常不再具有结构稳定性。

广义系统的这些特点使广义系统比正常系统显示出更加丰富的内涵，它所能描述的系统范围比正常系统广阔得多。因此，受到国内外数学界、工程界、化学界和经济界等很多学者的重视与研究。

下面通过举例来说明广义系统的应用。

例 1.1.1　一个电子网络模型[8]：

$$\begin{bmatrix} L_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -r & r & 1 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} N_1/N \\ N_2/N \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u$$

其中，$x=[x_1^{\mathrm{T}}\quad x_2^{\mathrm{T}}\quad x_3^{\mathrm{T}}\quad x_4^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}}$，$x_i(i=1,2,3)$ 表示通过相应电感器的电流，x_4 表示流经电阻为 r 的电阻器时的电压降；L_i 表示第 i 个电感器的感抗；N_i、N 表示互感器系数。这些是实数域上的待定数。它是一个典型的广义结构集中系统。

例 1.1.2　熟知的 Leontief 动态投入产出模型表示为[6, 9]

$$Bx(t+1)=(I-A-B)x(t)+w(t)+d(t)$$

式中，A 为消耗系数矩阵，B 为投资系数矩阵，均具有相应的阶数；$x(t)$ 为 t 时刻的产量；$d(t)+w(t)$ 为 t 时刻的最终产品量，其中 $d(t)$ 为确定性的，称为计划中的最终消费，$w(t)$ 为市场波动对消费的影响。在多部门的经济系统中，当各部门之间不存在投资时，在矩阵 B 中对应的行为 0。从而可知 B 不满秩。这样，此系统表示的是带有不确定项的离散广义系统。

例 1.1.3　单机多产品批量调度中的时间平衡方程可以表示为[9]

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 1 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & 1 & 1 & \cdots & 0 \end{bmatrix} x(t+1) = \begin{bmatrix} d_{1t}-1 & -1 & -1 & \cdots & -1 \\ 0 & d_{2t}-1 & -1 & \cdots & -1 \\ 0 & 0 & d_{3t}-1 & \cdots & -1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & d_{nt}-1 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} -1 \\ -1 \\ -1 \\ -1 \\ -1 \end{bmatrix} \tau_0$$

其中，d_{it} 表示单位的 i 种产品在一个循环生产周期平均的满足市场需求的时间；$x(t)$ 中的分量表示循环生产中的产量，也表示生产时间；τ_0 表示生产准备

时间总和。这是一个离散广义系统模型。

例 1.1.4 Hopfield 神经网络模型的输入包括两部分：一部分是模型的外部输入；另一部分是神经元输出信号的加权和。模型可表示为[9]

$$\begin{bmatrix} cI & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} = \begin{bmatrix} -gI & 0 & 0 & -W_1 \\ 0 & I & 0 & 0 \\ 0 & -W_2 & I & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ -g(x_1) \\ -i_B \\ -f(x_3) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$y = \begin{bmatrix} 0 & I & 0 & 0 \end{bmatrix} x, \quad x^{\mathrm{T}} = \begin{bmatrix} x_1^{\mathrm{T}} & x_2^{\mathrm{T}} & x_3^{\mathrm{T}} & x_4^{\mathrm{T}} \end{bmatrix}$$

其中，W_1 和 W_2是两个加权矩阵；$f(x_3)$和 $g(x_1)$是非线性函数。这是一个非线性广义系统模型。

例 1.1.5 两个机械手协助抓一个物体的动力学方程为[9]

$$\begin{bmatrix} M_1(q_1(t)) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M_2(q_2(t)) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & mI & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{p}_1(t) \\ \dot{p}_2(t) \\ \ddot{p}(t) \\ \ddot{f}_1(t) \\ \dot{f}(t) \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} T_1(t) + G_1(q_1(t), p_1(t)) + J_1^{\mathrm{T}}(q_1(t)) f_1(t) \\ T_2(t) + G_2(q_2(t), p_2(t)) + J_2^{\mathrm{T}}(q_2(t)) f_1(t) \\ -f_1(t) - f_2(t) - mg \\ H_1(q_1(t)) - P \\ H_2(q_2(t)) - P \end{bmatrix}$$

其中，$p_i(t)=\dot{q}_i(t)$；$M_i(q_i(t))$表示惯性矩阵；$G_i(q_i(t), p_i(t))$表示 Coriolis 离心和引力效应；m 为所抓物体的质量；$T_i(t)$为第 i 个机械手的输入力矩，一般视为控制量；P 表示所抓物体的中心位置坐标；$H_1(q_1(t))$和 $H_2(q_2(t))$分别表示两机械手的直接运动学关系；$J_i(q_i(t))$表示 Jacobian 矩阵。这也是一个非线性广义系统模型。

例 1.1.6 神经网络系统[9]：

$$\dot{x}_i = a_i(x_i)\left(b_i(x_i) - \sum_{k=1}^{L} w_{ik} \frac{d_i(k)}{s(x_i)} \prod_{j \in I_k} y_j^{d_j(k)}\right)$$

$$0 = a_L(x_L)\left(b_L(x_L) - \sum_{k=1}^{L} w_{lk} \frac{d_L(k)}{s(x_L)} \prod_{j \in I_k} y_j^{d_j(k)}\right)$$

其中，x_i 和 x_L 为神经元的状态（$i=1,2,\cdots,n$）；a_i 对应神经细胞相关生存期标度，b_i 对应接受力和时间延迟，也可能包括细胞的自我反馈；s 为神经元的输入；w_{ik} 为网络的连接权；$\{I_1,I_2,\cdots,I_L\}$ 为 $\{1,2,\cdots,m+n\}$ 的 L 个无序子集。此例是典型的广义大系统。

例 1.1.7　电子设备中常用的正弦波信号源控制问题[10]。

一个电子设备（电视机、感应信号发生器等）中常用的正弦波信号源，是由延迟器件、乘法器件和加法器件组成，其振荡频率取决于乘法因子。当系统输入 $u(t)$ 有一个扰动时，就可导致系统振荡，振荡的周期为 $2\pi/\omega$，其信号流程图如图 1.1.1 所示。该问题可用以下周期系统描述：

$$\begin{aligned} Ex(t+1) &= A(t)x(t)+B(t)u(t) \\ y(t) &= C(t)x(t)+D(t)u(t) \end{aligned} \tag{1.1.5}$$

其中

$$A(t)=\begin{bmatrix} 2\cos(\omega t) & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix},\quad B(t)=\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$C(t)=[\cos(\omega t)\quad -1],\quad D(t)=1$$

$$E=\mathrm{diag}(e_1,e_2),\quad e_i=\begin{cases} 1,\text{系统有因果性} \\ 0,\text{系统无因果性} \end{cases}\quad (i=1,2)$$

这是用于研究广义周期系统稳定性和控制问题的实例。

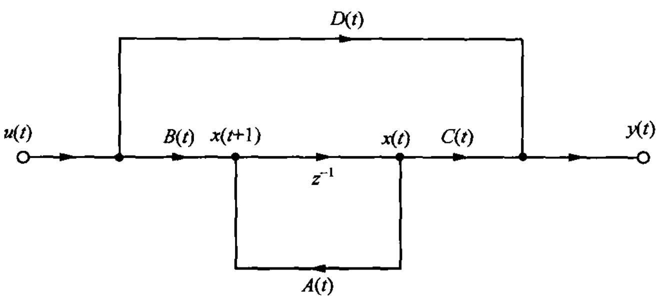

图 1.1.1　电子设备信号流程图

这些实例从几个侧面反映了广义系统在实际中的应用背景。因此，有必要对广义系统的分析和研究给予重视。

1.2 广义系统的发展现状

自广义系统被提出以来,学者对其进行了广泛而深入的研究。目前,普遍采用的方法主要有:状态空间法[3]、几何方法[11]和频域法[12]。状态空间法也称为时域方法,是基于广义系统的状态方程研究广义系统的结构性质及设计控制器[3,13,14]。该方法是广义系统中较常用的方法,所刻画问题的方式简洁直观,结果清晰明了。其中,Riccati 方法和 LMI(线性矩阵不等式)方法具有能揭示系统的内部结构且易于计算机辅助设计等优点,成为时域方法中较常用的两种方法。几何方法是 Wonham[15] 针对线性系统提出的,后来被 Lewis[11] 推广到广义系统的方法。其优点是对广义系统结构具有独到的刻画,如广义系统的能控性结构、能控子空间及不变子空间的刻画等,而且几何方法简洁明了,避免了状态空间方法中大量繁杂的运算,所得的结果可转化为矩阵运算;其缺点是对系统的鲁棒控制问题的分析和综合显得无能为力。频域法也称为多变量频域法,是对状态空间描述的广义系统采用频率域的系统描述和频率域的计算方法进行研究。频域法具有物理直观性强和便于设计调节等优点。

近年来,关于广义系统的研究,已经取得了很大的进展,特别是对线性时不变广义系统的研究,其中包括可解性、稳定性、能控性、能观性、极点配置、观测器设计、解耦、H_∞ 控制、最优控制、分散控制在内的许多问题正逐步解决,建立了较完备的理论[3,9,16,17]。关于对线性时变广义系统,在过去的十年里也已取得了相当的成就。Campbell 和 Petzold 的研究表明通过解析坐标变换可将线性时变广义系统转化为标准正则型[18]。文献[19]和[20]对线性时变广义系统的能控、能观性问题进行了一定的研究;Wang[21] 对基于状态反馈的消除脉冲问题进行了一定的研究;基于给定输出结构的线性时变广义系统的解耦能观和不能观子空间的分解问题在文献[22]中也得到了研究。关于非线性广义系统的问题研究,近年来主要集中在可解性及数值解方面[23~25]。关于广义系统的反馈控制设计问题,主要是涉及能控性[26]、线性化[27,28]、输入输出解耦[29,30]、干扰解耦[29]、反馈稳定化[31, 32]、Kronecker 规范型[33]、输出跟踪[34,35]、鲁棒稳定化[36]、变结构控制[37]等方面的研究。

在国内,有关广义系统的研究,在理论上已经取得了许多开创性的成果,主要表现如下。

张庆灵[38]和王朝珠[39]分别用连续的状态反馈控制考虑了形如

$$E\dot{x}(t)=(A+\Delta A)x(t)+Bu(t)$$
$$E\dot{x}(t)=(A+\Delta A)x(t)+(B+\Delta B)u(t)$$

的鲁棒镇定问题。而且,张庆灵研究了广义互联大系统的分散控制问题[9],讨论了这类互联大系统的互联稳定性,利用 Riccati 方程给出了广义互联控制大系统的鲁棒镇定方法;设计了广义互联控制大系统的广义状态观测器和正常状态观测器,包括鲁棒观测器,并且运用于控制问题中,证明了广义互联控制大系统的状态观测器同样满足分离性原理。1997 年,张庆灵出版了《广义大系统的分散控制与鲁棒控制》一书,这是该领域公开发表的第一部专著。对于这本书天津大学原校长李光泉在序中赞扬道:"日出江水红胜火,春来江水绿如蓝。愿这本著作像一颗石子能激起这一研究长河的层层浪花。出现更多的成果,问世更多的专著。"在 2003 年和 2004 年张庆灵又相继出版了《不确定广义系统的分析与综合》[40]和《广义系统》[41]两部专著,其中有很大一部分成果是近几年来关于广义系统的最新成果。

杨冬梅研究了如下一类离散广义系统[42]:

$$\begin{cases}Ex(k+1)=Ax(k)+Bw(k)+B_1u(k)\\ z(k)=Cx(k)\end{cases}$$

得到了离散广义系统的 H_2 最优控制器和次优控制器,以及 H_2 范数界的一个矩阵不等式的充分条件。

苏晓明[10]研究了将广义区间系统的稳定性问题转化为一类广义不确定系统的二次允许和二次镇定问题,得到了广义区间系统二次允许和二次镇定的充分必要条件,同时给出了控制器的实现算法,解决了长期以来未能解决的镇定问题;并利用分散控制技术研究了系统的因果性和稳定性,给出了广义离散周期系统具有状态因果性的充分条件和两类系统的稳定控制器及其之间的关系。

徐胜元[43]是在深入研究广义系统理论及正常系统鲁棒控制理论的基础上,系统研究了广义系统的鲁棒控制问题,给出了一些新的概念和设计方法,得到了一些较为深刻的研究结果。

刘永清、王伟、李远清[44]首先运用单调迭代法、泛函分析法、等价分解法、Green 函数法对广义线性系统的边值问题、广义非线性系统的边值问题进行了系统的研究,主要就带有时滞项的广义线性系统、广义非线性系统解的存在性、唯一性进行了深入的研究。

针对非线性广义系统定性理论与控制,陈伯山[45]首先利用一次近似理论讨论了广义系统的局部结构理论和分支问题;然后讨论了非线性广义系统解

的性质，包括微分代数不等式、混合单调迭代和 Lyapunov T-S 模糊广义系统的 H_∞ 控制运动稳定性理论，而且研究了非线性微分代数控制系统的输入-输出解耦问题。

杨成梧等[46]用几何方法研究了脉冲能控线性定常广义系统的输入输出稳定化问题，提出了适用于脉冲能控系统的 FASA 解法，即首先通过快反馈配置好系统的无穷远极点，其次把配置好的系统化为受限等价系统，最后利用慢反馈将系统输出稳定化，并在文献中讨论了无干扰的确定广义时变线性系统：

$$E(t)\dot{x}(t) = A(t)x(t) + Bu(t)$$

在参数 $E(t)$、$A(t)$缓变时的运动稳定化问题，采用的方法为冻结系数法。所得结果表明：与正常系统不同，广义系统的运动稳定性不仅与其参数的缓变有关，而且与其解在其“冻结系统族”的慢子系统的解空间上的投影有关，冻结系数法一般已不能保证广义时变线性系统（充分缓变时）的稳定性，只能保证其具有某种意义下的弱稳定性。

在最近几年，国际上关于广义系统相关问题的研究成果也大量涌现，主要表现如下：

Ricardo 在其专著[47]的第一部分采用投影方法分析了微分代数系统的性质；第二部分对源于电路理论的微分代数系统进行了重点分析，特别是模型分析，研究了电路系统的一些线形和非线性方面的应用问题。

Koenig 和 Marx 通过构造适当的切换 Lyapunov 函数，利用 LMI 方法研究了一类带有不确定输入的离散切换广义系统的 H_∞ 滤波问题。他们将滤波器看做是带有比例和比例积分的观测器，并将观测器的设计问题转化为广义切换系统的控制器设计问题[48]。

文献[49]考虑指数为 1 的广义系统线性二次微分对策问题，得到了开环 Nash 均衡存在的充分必要条件。

Camlibel 和 Frasca 用 LMI 给出了与正常系统完全对应的广义系统 KYP 引理条件，严格的正实属性，以及一些早期关于正常系统的相关结果都被推广到了广义系统[50]。

文献[51]研究了大模型系统的逐段线性（PWL）降阶模型稳定性理论及应用问题，其中给出了包括对 PWL 近似于确定类型的非线性广义系统的输入/输出稳定性，以及投影技术来保证降阶 PWL 模型保持输入/输出稳定性的证明；得到了一个新的 PWL 公式，介绍了一种新的非线性投影，这些结果能将稳定性结论推广到一类更广的包含非线性广义函数的非线性系统模型；

最后给出了算法来有效地计算稳定非线性左投影矩阵算子的要求。

总之，从广义系统的提出到现在的几十年时间里，有关广义系统的研究取得了很大进展，但与正常系统相比，广义系统的研究还处于初始阶段，仍有大量的理论问题和实际问题急待解决，所以广义系统的研究前景是非常广阔的。

1.3 容错控制的发展现状

容错控制是20世纪80年代发展起来的一种为了提高控制系统可靠性的技术。“容错”(fault-tolerant)原是计算机系统设计技术中的一个概念，是容忍故障的简称。容错控制(fault-tolerant control)的概念是1986年9月由美国国家科学基金会和美国电气和电子工程师学会(IEEE)控制系统学会共同在美国加州桑塔卡拉拉大学举行的控制界专题讨论会的报告中正式提出的[52]。然而，容错控制的思想最早可以追溯到1971年，以Niederlinski提出的完整性控制(integral control)的新概念为标志[53]。Siljak于1980年发表的关于可靠镇定的文章是最早开始专门研究容错控制的文章之一[54]。我国在容错控制理论上的研究基本上与国外同步。1987年叶银忠等就发表了容错控制的论文，并于次年发表了该领域的第一篇综述文章[55]。1994年葛建华等出版了我国第一部容错控制的学术专著[56]。容错控制系统是一类更一般的控制系统，它可适应其环境的显著变化。容错的指导思想是一个控制系统迟早会发生故障，因此在设计控制系统时应考虑一旦发生故障，这种故障就可能会对系统的稳定性及性能有很大的影响。最简单的情况，可以认为当传感器和执行器出现故障时，如何保持系统的稳定性。

国际自动控制界对容错控制的发展给予了高度重视。在1986年美国的自动控制峰会上，把多变量鲁棒、自适应和容错控制列为控制科学面临的富有挑战性的研究课题[57]。在国际上，领导着容错控制学科发展的是1993年成立的IFAC技术过程的故障诊断与安全性技术委员会。从1991年起IFAC每三年定期召开故障检测和故障诊断(FDD)、故障检测控制(FTC)等方面的国际专题学术会议。容错控制发展至今只有几十年的历史，是一门新兴的交叉学科。促使这门学科迅速发展的一个最重要的动力来源于航空航天领域。美国空军从20世纪70年代开始就不断投入巨资支持容错控制的发展，力求开发出具有高度容错能力的战斗机，甚至在多个翼面受损时，也能保持战斗机的生存能力[58]。

所谓容错控制系统，就是具有冗余能力的控制系统，即在某些部件发生故