冯毅夫 著

广义系统的稳定性与H_∞控制

清华大学出版社

广义系统的稳定性与H_∞控制

冯毅夫 著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

广义系统是一种应用广泛且结构相对复杂的控制系统，对于这类动力系统的研究一直是控制理论界的热点之一。

本书是根据作者近几年在广义系统方面研究所取得的成果以及汇总国内外相关研究成果而撰写的。

全书共分6章，均以广义系统为研究对象，以线性矩阵不等式等为主要工具，对于李雅普诺夫函数方法、广义系统稳定性、时滞依赖 H_∞ 控制、非脆弱 H_∞ 控制、保成本控制、鲁棒控制以及 T-S 模糊控制，包括连续的模糊系统和离散的模糊系统等问题进行了论述和研究。

本书可作为控制理论与控制工程、系统工程、信息与计算科学以及相关工程与应用专业的研究生和高年级的本科生的参考资料，也可为相关领域从事教学与科研的教师与研究人员提供参考。

图书在版编目(CIP)数据

广义系统的稳定性与 H_∞ 控制/冯毅夫著. —北京：清华大学出版社，2015
ISBN 978-7-302-40250-3

Ⅰ. ①广…　Ⅱ. ①冯…　Ⅲ. ①广义系统理论　Ⅳ. ①N941.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 106333 号

责任编辑：刘　颖
封面设计：常雪影
责任校对：王淑云
责任印制：宋　林

出版发行：清华大学出版社
　　网　　址：http://www.tup.com.cn，http://www.wqbook.com
　　地　　址：北京清华大学学研大厦 A 座　　**邮　　编**：100084
　　社 总 机：010-62770175　　**邮　　购**：010-62786544
　　投稿与读者服务：010-62776969，c-service@tup.tsinghua.edu.cn
　　质 量 反 馈：010-62772015，zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn
印 装 者：三河市中晟雅豪印务有限公司
经　　销：全国新华书店
开　　本：185mm×230mm　　**印　张**：6.5　　**字　　数**：141 千字
版　　次：2015 年 6 月第 1 版　　**印　　次**：2015 年 6 月第1次印刷
印　　数：1～1500
定　　价：29.00 元

产品编号：054819-01

前　言

作为控制系统家族的“新宠”，广义系统理论是20世纪70年代才开始形成并逐渐发展起来的现代控制理论的一个独立分支。进入21世纪之后，由于广义系统在控制理论、电路、经济、机械以及其他领域中得到了广泛的应用，相应的广义系统理论的研究也吸引了很多国内外学者的关注，正是因为广义系统比正常系统具有更一般的形式，许多正常系统的结论已经被相继推广到广义系统中。

本书共分6章，以广义系统为研究对象，通过使用线性矩阵不等式(LMIs)等主要工具，借助于李雅普诺夫(Lyapunov)函数方法，分别介绍了时滞广义系统的稳定性、时滞依赖 H_∞ 控制、非脆弱 H_∞ 控制、保成本控制以及 T-S 模糊控制等方面的研究方法，并且对于提出的问题进行了论述和研究，主要内容如下：

在第1章绪论中对现代控制理论尤其是广义系统理论的研究背景以及结构特征进行简述。回顾了广义系统控制理论的发展状况，介绍了部分国内外学者对广义系统从不同角度的研究进展情况，其中对于具有时滞和模糊特征的两类应用比较广泛的广义系统理论做了较为详细的介绍。

本书第2章对连续和离散时滞广义系统的稳定性问题进行研究，同时给出这两类广义系统的稳定性判据；第3章介绍具有常时滞的广义系统的 H_∞ 控制问题；第4章对具有时变时滞的广义系统的 H_∞ 控制问题进行研究；第5章讨论具有状态时滞的不确定线性广义系统鲁棒控制问题；第6章介绍连续与离散两种具有广义系统特点的 T-S 模糊系统，并对它们的稳定性和 H_∞ 控制进行了研究。

本书在相关问题中参考了张庆灵所著《广义系统》及近几年的研究资料，在此表示感谢。

由于作者的学识与研究水平有限，研究领域与视角不够宽阔，书中一定有很多缺憾与不尽如人意的地方，恳请读者指正，以抛砖语冀引玉言。

冯毅夫

2015年3月

缩写字、缩写词、符号含义

缩写字、缩写词

LMI(或 LMIs)	Linear Matrix Inequality (Inequalities)	线形矩阵不等式
LQR	Linear Quadratic Regulator	线性二次型(最优)调节器
GBRL	Generalized Bound Real Lemma	广义有界实引理
BLMI	Bilinear Matrix Inequality	双线性矩阵不等式
PDC	Parallel Distributed Compensation	平行分布补偿

符 号 含 义

$\mathbb{R}$	实数域
$\mathbb{R}^n$	n 维实向量空间
$\mathbb{R}^{m\times n}$	$m\times n$ 实矩阵空间
$\equiv$	恒等于
$\not\equiv$	不恒等于
$\in$	属于
$\notin$	不属于
$\subset$	包含于
$\cup$	并
$\cap$	交
$\Leftrightarrow$	等价于
$\oplus$	直和
$\boldsymbol{I}_n$	$n\times n$ 单位矩阵
det	行列式
$\langle \boldsymbol{p},\boldsymbol{q}\rangle_T$	向量 $\boldsymbol{p}$ 与 $\boldsymbol{q}$ 的内积

$\lVert \cdot \rVert$	2-范数
$\mathrm{Re}(s)$	复数 s 的实部
$\mathrm{rank}(\boldsymbol{A})$	矩阵 $\boldsymbol{A}$ 的秩
$\ker(\boldsymbol{A})$	矩阵 $\boldsymbol{A}$ 的核空间
$\mathrm{Im}(\boldsymbol{A})$	矩阵 $\boldsymbol{A}$ 的像空间
$\mathrm{tr}(\boldsymbol{A})$	矩阵 $\boldsymbol{A}$ 的迹
$\mathrm{diag}(\boldsymbol{A},\boldsymbol{B})$	矩阵 $\boldsymbol{A}$ 和 $\boldsymbol{B}$ 构成的分块对角矩阵$\begin{bmatrix}\boldsymbol{A} & \boldsymbol{0}\\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{B}\end{bmatrix}$
$\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}$	矩阵 $\boldsymbol{A}$ 的转置
$\boldsymbol{A}^{*}$	矩阵 $\boldsymbol{A}$ 的共轭转置
$\boldsymbol{A}^{-1}$	矩阵 $\boldsymbol{A}$ 的逆
$\boldsymbol{A}^{-\mathrm{T}}$	$(\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}})^{-1}$
$\lambda(\boldsymbol{A})$	矩阵 $\boldsymbol{A}$ 的特征值集合
$\lambda_{\max}(\boldsymbol{A})$	矩阵 $\boldsymbol{A}$ 的最大实特征值
$\boldsymbol{A}>0$	矩阵 $\boldsymbol{A}$ 正定
$\boldsymbol{A}<0$	矩阵 $\boldsymbol{A}$ 负定
$\boldsymbol{A}\geqslant 0$	矩阵 $\boldsymbol{A}$ 半正定
$\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}$	向量 $\boldsymbol{x}$ 的转置
$\boldsymbol{x}^{*}$	向量 $\boldsymbol{x}$ 的共轭转置
$(\boldsymbol{E},\boldsymbol{A})$	广义系统
$\lambda(\boldsymbol{E},\boldsymbol{A})$	$(\boldsymbol{E},\boldsymbol{A})$的广义特征值集合
$\boldsymbol{G}(s)$	传递函数矩阵
$\boldsymbol{G}^{\sim}(s)$	$\boldsymbol{G}^{\mathrm{T}}(-s)$
$\sigma\{\boldsymbol{G}(s)\}$	$\boldsymbol{G}(s)$的奇异值
$\bar{\sigma}\{\boldsymbol{G}(s)\}$	$\boldsymbol{G}(s)$的极大奇异值
$\lVert \boldsymbol{G}(s) \rVert_2$	$\boldsymbol{G}(s)$的 H_2 范数
$\lVert \boldsymbol{G}(s) \rVert_\infty$	$\boldsymbol{G}(s)$的 H_∞ 范数
$L^{-1}\{\boldsymbol{G}(s)\}$	$\boldsymbol{G}(s)$的拉普拉斯逆变换
$\delta(t)$	脉冲时间函数
$\left\{\boldsymbol{E},\begin{bmatrix}\boldsymbol{A} & \boldsymbol{B}\\ \boldsymbol{C} & \boldsymbol{D}\end{bmatrix}\right\}$	状态空间实现或 $\boldsymbol{C}(s\boldsymbol{E}-\boldsymbol{A})^{-1}\boldsymbol{B}+\boldsymbol{D}$
$C_{n,\tau}=C([-\tau,0],\mathbb{R}^n)$	$[-\tau,0]$映射到$\mathbb{R}^n$上的连续向量函数构成的巴拿赫空间
$l_2[0,+\infty)$	$[0,+\infty)$区间上的二次可积函数空间
$\boldsymbol{E}^{*\perp}$	$\boldsymbol{E}^{*}$ 的锥

目　录

第1章　绪　　论

广义系统理论是现代控制理论的一个分支，而现代控制理论又是控制理论大家族的一个重要组成部分。控制理论产生于 18 世纪英国的第一次技术革命，1868 年麦克斯韦(James Clerk Maxwell)发表的《On governors》[1]（论调速器）通常被认定是人们开始进行控制理论研究的标志，这篇文章在控制理论的发展历史上是具有里程碑意义的。经过 100 多年的研究，在 20 世纪 60～70 年代初形成了研究控制理论的状态空间法，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，以用来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。这种方法是一种比较完善的描述方法，一般以微分方程或差分方程的形式对系统的模型进行数学描述，其一般形式为

$$\begin{cases} \boldsymbol{f}(T(\lambda)\boldsymbol{x}(t), \boldsymbol{x}(t), \boldsymbol{u}(t), t) = \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{g}(\boldsymbol{x}(t), \boldsymbol{u}(t), \boldsymbol{y}(t), t) = \boldsymbol{0} \end{cases} \tag{1.1}$$

其中，$\boldsymbol{x}(t)$，$\boldsymbol{u}(t)$，$\boldsymbol{y}(t)$分别是系统的状态、输入及输出；$T(\lambda)\boldsymbol{x}(t)$表示 $\boldsymbol{x}(t)$的微分或差分；$\boldsymbol{f}$ 是 $T(\lambda)\boldsymbol{x}(t)$，$\boldsymbol{x}(t)$，$\boldsymbol{u}(t)$及 t 的向量函数；$\boldsymbol{g}$ 是 $\boldsymbol{x}(t)$，$\boldsymbol{u}(t)$，$\boldsymbol{y}(t)$及 t 的向量函数。

随着近现代科学技术的发展以及大型工程技术的需要，人们提出了非传统数学模型描述的广义系统模型，即系统(1.1)的一种特殊形式

$$\begin{cases} \boldsymbol{E}(t)[T(\lambda)\boldsymbol{x}(t)] = \boldsymbol{J}(\boldsymbol{x}(t), \boldsymbol{u}(t), t) \\ \boldsymbol{y}(t) = \boldsymbol{K}(\boldsymbol{x}(t), \boldsymbol{u}(t), t) \end{cases} \tag{1.2}$$

这里 $\boldsymbol{E}(t)$是 n 阶时变矩阵；$\boldsymbol{J}$，$\boldsymbol{K}$ 是 $\boldsymbol{x}(t)$，$\boldsymbol{u}(t)$及 t 的向量函数。显然，当 $\boldsymbol{E}(t)$非奇异时（对所有的 $t\in\mathbb{R}$），通过逆矩阵的变换，系统(1.2)即可以转换成通常所说的正常系统(1.1)，当 $\boldsymbol{E}(t)$奇异时，则称系统(1.2)为广义系统。一般以 $\boldsymbol{E}(t)$为奇异（降秩或者不可逆）矩阵作为广义系统的标志。本书讨论的对象是具有广义系统背景的控制问题。

1.1　广义系统的结构特征及应用背景

广义系统是一类比正常系统更具有广泛形式的动力系统，其理论是 20 世纪 70 年代才开始形成并发展起来的现代控制理论的一个独立分支。在 1974 年英国控制理论学者罗森布罗克(H. H. Rosenbrock)在研究复杂电网络系统的过程中首先提出了广义系统模型，他在《International Journal of Control》上发表了题为《Structural Properties of Linear

Dynamical Systems》[4]一文，以复杂的电网络系统为实际背景，对线性广义系统的解耦零点及系统受限等价性问题做了研究。这成为广义系统研究诞生的标志，自此广义系统的研究引起了人们的极大兴趣，并获得了丰富的成果。其中值得提出的是美国学者 Luenberge 连续在美国《IEEE Transactions on Automatic Control》和在英国出版的《Automatica》上发表文章[5,6]，对线性广义系统解的存在性和唯一性等问题展开研究。自此，人们越来越多地发现，用广义系统来描述与刻画实际应用中经常遇到的一些系统比用正常系统来得自然、方便、精确。随着现代控制理论与方法应用于工程系统的深入和向其他学科如航空、航天、通信、电力、生态、人口、能源、经济和社会管理系统的渗透，人们在经济管理、电子网络以及航空航天技术领域发现了很多广义系统的实例，同时发现广义系统在电力系统、机械系统、机器人系统、交联大系统、导弹系统以及生物系统、时间序列分析、网络分析等领域起着不可替代的作用。特别是 20 世纪 80 年代，广义系统（也称为隐式系统、半状态系统、奇异系统、广义状态空间系统、微分代数系统）理论进入了一个新的发展阶段，显著的标志是许多正常系统的已有结论被成功地推广并移植到广义系统。由此广义系统的研究从基础向纵深发展，在范围上也进一步拓宽，从线性到非线性，从连续到离散，从确定性到不确定性，从无时滞到有时滞，从定常时滞到时变时滞，从线性二次型最优控制到 H_2 和 H_∞ 控制等各个专题，并且在这些方面都取得了丰硕成果。另一方面，在实际生产的应用中，广义系统模型广泛存在于社会生产诸多领域，例如，经济系统、电子网络、机器人系统、电力系统、核反应堆等都是可以用广义系统模型来刻画的。从另外的角度来看，诚然使用广义系统来刻画实际的生产过程具有正常系统不具备的优势，但是由于这些模型往往还具有维数高、结构复杂、不确定性、时变性、时滞性和分散性等特征，使得对于广义系统的研究具有相对较大的挑战性。

与正常系统相比，广义系统具有更好的保持系统的物理等特性的能力。虽然在一定的条件下，一些半状态变量可以通过变换而得到消除，从而将所考虑的系统用一般的正常系统形式来描述，但这样变换的结果将牺牲系统矩阵的一些特性，特别地，在一些耦合系统中，某些物理量之间确实存在着由代数方程所刻画的约束的需要。甚至有些实际系统（如受限机器人、核反应堆、非因果系统）只能用广义系统描述而不能用正常系统描述。罗森布罗克(Rosenbrock)与皮尤(Pugh)在《Contributions to a hierarchical theory of systems》[7]指出用广义系统来描述交联大系统的动态方程是非常方便的。大量示例都说明广义系统是描述与刻画实际系统的有力工具，对广义系统的深入研究具有重大的理论意义及广泛的应用前景。

广义系统经过四十多年的发展，其具有的本质特性已得到越来越深刻的揭示。与正常系统相比，广义系统无论是在形式上还是就其本质都显示了不小的差别。这里给出几种条件下的具体例子（以线性时不变的情况为例）：

(1)广义系统(1.2)的解中一般不仅含有正常系统所具有的指数项（对应于系统的有穷极点），而且含有正常系统解中所不出现的脉冲项和静态项（对应于系统的无穷极点），以及

输入的导数项。在离散情况下，广义系统(1.2)的解不仅需要 t 时刻以前的信息，还需要 t 时刻以后的信息，即离散广义系统不再具有传统的因果性。

(2)正常系统描述的动态特性只有一个层次，而广义系统的对象一般具有两个层次，一层为对象的动态特性(由微分(差分)方程描述，或称为系统的慢变部分)，另一层为对象的静态特性(由代数方程描述，或称为快变部分)。这一部分正是广义系统区别于正常系统的显著标志。

(3)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。

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

(5)正常系统的自由度为 n(也就是系统的维数)，广义系统的自由度为 $r(=\mathrm{rank}(\boldsymbol{E}))$，它有可能等于 n，也可能小于 n。

(6)正常系统的传递函数矩阵是真有理分式阵，而广义系统的传递函数矩阵一般包含多项式矩阵。

(7)广义系统的极点，除了有 $q(=\deg(\det(s\boldsymbol{E}-\boldsymbol{A})))$ 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。

这些特点反映了广义系统比正常系统在结构上具有的复杂性，同时广义系统所能描述的系统范围也比正常系统广阔得多。可以说，用广义系统来处理多维、多层次的大型复杂系统是十分合适的。但是事情都是辨证的，另一方面，也正由于广义系统特性复杂、层次丰富，使得对其研究要比正常系统复杂、困难得多。

广义系统模型存在于社会生产的诸多领域中，下面介绍几个广义系统的实际例子来说明它的应用背景。

首先给出大名鼎鼎的列昂季耶夫(Leontief)[14]动态投入产出模型。

此模型表示为

$$\boldsymbol{B}\boldsymbol{x}(k+1)=(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A}-\boldsymbol{B})\boldsymbol{x}(k)+\boldsymbol{d}(k)+\boldsymbol{\omega}(k)$$

其中，$\boldsymbol{A}$ 为消耗系数矩阵，$\boldsymbol{B}$ 为投资系数矩阵，均具有相应的阶数，$\boldsymbol{x}(k)$ 为 k 时刻的产量，$\boldsymbol{d}(k)+\boldsymbol{\omega}(k)$ 为 k 时刻的最终产品量，其中 $\boldsymbol{d}(k)$ 为确定性的，被称为计划中的最终消费，$\boldsymbol{\omega}(k)$ 为市场波动对消费的影响。在多部门的经济系统中，当各部门之间投资为零的时候，矩阵 $\boldsymbol{B}$ 中对应的行为零，从而 $\boldsymbol{B}$ 不满秩，于是此系统表示的是带有不确定项的离散广义系统。

1981 年在《IEEE Trans. Circuits and Systems》上 Newcomb[11] 给出了一个电子网络模型

$$\begin{bmatrix} L_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}\dot{\boldsymbol{x}}(t)=\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -r & r & 1 \end{bmatrix}\boldsymbol{x}(t)+\begin{bmatrix} N_1/N \\ N_2/N \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}\boldsymbol{u}(t)$$

其中，$\boldsymbol{x}(t)=[x_1(t),x_2(t),x_3(t),x_4(t)]^{\mathrm{T}}$，$x_i(t)(i=1,2,3)$表示通过相应电感器的电流，$L_i(i=1,2,3)$表示第 i 个电感器的电感，$x_4(t)$表示流经电阻为 r 的电阻器的电压降，N_1，N_2，N 表示互感器系数，它们都是实数域上的待定数。这个模型具有典型的广义系统结构。

下面我们给出一个水翼艇的纵向运动实例，它的数学模型表示为

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \dot{h}_1(t) \\ \dot{h}(t) \\ \dot{g}_1(t) \\ \dot{g}(t) \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 0 & -a_{15} & 0 & a_{16} \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -a_{25} & 0 & -a_{26} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} h_1(t) \\ h(t) \\ g_1(t) \\ g(t) \end{bmatrix}+\begin{bmatrix} b_{11} \\ 0 \\ b_{21} \\ 0 \end{bmatrix}r_1(t)+\begin{bmatrix} b_{12} \\ 0 \\ b_{22} \\ 0 \end{bmatrix}r_2(t)+\begin{bmatrix} z_s \\ 0 \\ m_s \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$y_1(t)=[c_{11} \quad c_{12} \quad c_{13} \quad c_{14} \quad c_{15} \quad c_{16}]\boldsymbol{z}(t)$$

$$y_2(t)=[c_{21} \quad c_{22} \quad c_{23} \quad c_{24} \quad c_{25} \quad c_{26}]\boldsymbol{z}(t)$$

其中

$$\boldsymbol{z}(t)=[h_1(t) \quad \dot{h}_1(t) \quad h(t) \quad g_1(t) \quad \dot{g}_1(t) \quad g(t)]^{\mathrm{T}}$$

且 $h(t)$表示水翼艇的重心偏离标准位置的距离，即水翼艇由海的波浪引起的垂直方向的位置变化，$h_1(t)$表示水翼艇的纵向偏移角度，$r_1(t)$，$r_2(t)$分别表示前后襟翼角的控制量，z_s，m_s 分别表示干扰波浪力和干扰波浪力矩，$c_{ij}(i=1,2;j=1,2,\cdots,6)$表示系统状态的组合系数，$a_{ij}$ 和 b_{ij} 随波浪的不同呈慢性变化而往往使

$$\boldsymbol{E}=\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

是奇异的，这是一个带有干扰的广义系统模型。

在环境污染问题中我们可以找到另外一个例子。设污染物为有毒化学物质或放射性同位素，物种在区域 D 中的总数为 $x_1(t)$，物种个体内的毒素浓度为 $x_2(t)$，环境中介质的毒素浓度为 $x_3(t)$，若 $x_1(t)$的妊娠期为 d_1，毒素在个体内停留 d_2 时间以后排出体外(对排出部分而言)，环境内毒素进入个体的平均时间为 d_3，若 $v(t)$表示毒素排入环境的速率，则污染问题的数学模型为

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t)=rx_1(t)-cx_1(t)x_1(t-d_1) \\ \dot{x}_2(t)=Kx_3(t-d_3)-ax_2(t) \\ \dot{x}_3(t)=-K_1x_3(t-d_3)x_1(t)+g_1x_2(t-d_2)-hx_3(t)+v(t) \end{cases}$$

其中，r，c，K，K_1，a，g_1，h 都是正数。但是 $v(t)$明显地依赖于物种个体内毒素的浓度以及环境中介质毒素的浓度，而不应该是常数，故

$$v(t)=f(x_2(t),x_3(t))$$

这样，完整的数学模型应为

$$\begin{cases}\dot{x}_1(t)=rx_1(t)-cx_1(t)x_1(t-d_1)\\ \dot{x}_2(t)=Kx_3(t-d_3)-ax_2(t)\\ \dot{x}_3(t)=-K_1x_3(t-d_3)x_1(t)+g_1x_2(t-d_2)-hx_3(t)+v(t)\\ v(t)=f(x_2(t),x_3(t))\end{cases}$$

这是一个含多个时滞的连续广义系统。

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，广义系统在实际工程中的应用非常广泛。

1.2 广义系统理论的研究成果概述

以数学的观点，广义系统是微分代数方程的一种形式很早就已经被提及，然而在工程技术和控制理论领域中，作为一类有着广泛实际背景的控制系统模型而备受瞩目并引起广泛研究兴趣距今不过几十年。值得指出的是从 20 世纪 80 年代初到 80 年代末的 10 年中，广义系统理论研究出现了蓬勃发展的现象，这一阶段有很多重要的成果。如：Verghese，Levy 和 Kailath[15] 等定义了广义系统的一些基本概念，像脉冲模的可控性和可观性等，建立了研究广义系统的一个基本框架；Lewis 和 Ozcaldiranz[16] 在 1984 年研究了广义系统的可达性和可控性；Fletcher 等[24] 研究了广义系统的特征结构配置等问题；戴立意等[25] 对连续广义系统设计了动态补偿器；Bender 和 Laub[26] 关于广义系统研究了线性二次型最优调节器问题；Lin X 等[27] 讨论了时变广义系统的最优控制问题。综合这一系列的研究成果，戴立意于 1989 年出版了广义系统理论的第一本专著[2]，系统地介绍了广义系统的基础理论，比较全面地集中了广义控制系统诸多论文的精华。

从 20 世纪 90 年代初至今，又经过了二十多年的发展，广义系统的研究从基础向纵深发展，涉及从线性到非线性，从连续到离散，从确定性到不确定性，从无时滞到时滞，从线性二次型最优控制到 H_2 和 H_∞ 控制等各个专题，取得了丰硕的成果。除戴立意出版的经典专著外，坎贝尔(Campbell)的《Singular Systems of Differential Equations》[28] 和 Boyarinchev 的《Solutions of Ordinary Differential Equations of Degenerate Systems》[29] 也总结了广义系统方面的许多论文的主要成果，成为广义系统的经典论著。1990 年，张金水出版了《广义系统经济控制论》[30]，介绍了广义系统稳态预测、鲁棒调节等基础知识以及广义系统理论在国民经济与管理中的应用。1997 年，张庆灵出版了广义大系统分散控制方面的专著[31]。在 2001 年，2003 年和 2004 年张庆灵与邢伟、杨冬梅、姚波等在总结国内外广义系统的研究现状基础上，结合自身近年来的研究成果，相继又出版了《相关稳定性问题及广义系统优化控制》[32]，《不确定广义系统的分析与综合》[33] 和《广义系统》[9] 三部专著，系统地介绍了广义系统的优化控制、不确定及确定广义系统的分析与综合的理论与方法。段广仁于 2003 年出版了《Descriptor Linear Systems》[34]，对线性广义系统进行了系统的分析和研究。Wang

He-Sheng 等于 2002 年出版了关于非线性广义系统的专著《H_∞ Control for Nonlinear Descriptor Systems》[35]，分析了非线性广义系统的 H_∞ 控制、降阶控制器设计以及混合 H_2/H_∞ 控制等问题，为非线性广义系统的研究提供了良好的素材。

这期间很多博士研究生的毕业论文也选择了广义系统作为研究对象，董心壮和杨丽在其博士论文[8,36]中，对于广义系统的耗散、无源分析与控制进行了初步的探讨，徐胜元和胡刚等在其博士学位论文[37,38]中，研究了不确定广义系统的鲁棒控制问题，随后对离散广义系统也进行了大量的研究，得出了许多有价值的结果，2002 年徐胜元等在《Dynamics of Continuous, Discrete and Impulsive Systems》和《IEEE Trans. Automatic Control》上面的两篇文章[39,40]分别给出了离散时滞广义系统和连续时滞广义系统正则、无脉冲、稳定的线性矩阵不等式条件，为时滞广义系统的分析奠定了良好的基础。此外，王汝琼、杨帆分别在他们的博士论文[41,42]中相应地讨论了时滞广义系统的稳定性、鲁棒控制及变结构控制等问题。陈伯山的博士论文[43]中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，随之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 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。同时，刘晓平[44]、刘永清[45]等对非线性广义系统的相关问题进行了大量的研究和分析，对广义系统理论的发展也起到了一定的促进作用。

1.3 广义时滞系统稳定性的研究

在诸多类型的广义系统中，广义时滞系统由于在工业过程中的广泛应用而受到了特别的关注。许多学者在这方面做了大量的工作。在实际应用中，由于信息传递等因素致使系统普遍存在时滞现象。人们通常假设所研究过程的行为仅由现在的状态决定，而与过去的状态无关，并假设系统由一个包含状态及状态变化率的方程来约束，这样，通常考虑的就是常微分方程或偏微分方程。然而，在实际工程中，这种假设是不满足的，系统的行为不仅与现在的状态有关，还包含系统过去的信息。这类系统被称为时滞系统。在各类工业系统中，时滞现象是极其普遍的，如长管道进料或皮带传输、极缓慢的过程或复杂的在线分析仪等均存在时滞现象。此外，对许多大时间常数的系统，也常用适当的小时间常数加上纯滞后环节来近似，这些都可以归结为时滞系统模型。可以说时滞是必然的，无时滞都是假定的，因此这一理论研究热点的产生是有实际生产要求的。

(1)实际的物理过程的内部动态中都存在时滞现象。大量的研究成果表明在化学、生理学、生物学、人口动力学、经济学、力学等学科中都有时滞存在。另外时滞还普遍存在于通信及信息技术领域：如遥控系统和机器人系统，以及网络控制系统，影响高速通信网络中的服务质量等。有时候，时滞还可用来简化一些高阶模型。因此，在科技领域尤其是控制工程中，时滞系统的研究得到了众多学者的重视。

(2)时滞的存在经常会带来很多不便。时滞会引起闭环系统的复杂行为，常见的有不稳

定、振荡或者较差的动态品质。有的时候很小的时滞就可能使得一些系统不稳定。

(3)研究表明,人为地引入时滞还可能便于对系统的控制。在一些特殊情况下,无时滞反馈系统是不稳定的,而含有适当滞后的控制则会使得系统渐近稳定。

近来,具有时滞的广义系统的稳定性分析问题受到越来越多的关注。研究的领域分别为广义时滞系统正则、无脉冲且渐近稳定的时滞无关型充分条件,此条件以受限等价形式给出,在数值计算上是稳定的,以及利用系统矩阵的分解,将连续广义时滞系统解的存在性、唯一性、无脉冲性与系统矩阵的性质结合起来。也有人研究了广义时滞系统的时滞依赖 H_∞ 控制问题,利用广义系统方法给出了系统时滞依赖稳定且满足一定的 H_∞ 性能指标的充分条件,最终得到了时滞依赖状态反馈控制器、滤波器和输出反馈控制器的设计方法。

为降低结果保守性,有的研究方法运用了线性矩阵不等式(LMI)技术和自由权矩阵方法,给出了系统鲁棒稳定的时滞依赖条件,这个条件是用严格线性矩阵不等式表示的,而且不依赖于系统矩阵的分解,便于求解。避免采用系统模型变换和矩阵不等式,使所得的时滞依赖条件有了很大的改进。基于以上相关文献的成果本书第 2 章研究广义时滞系统的稳定性问题,运用一种时滞分解方法,给出一个具有较小保守性的新稳定性判据。

1.4　广义时滞系统 H_∞ 控制的研究

1981 年赞姆斯(Zames)提出了著名的 H_∞ 控制思想[52]。经过近 40 年的发展,H_∞ 控制理论取得了大量的研究成果,成为控制中一个十分活跃的研究领域,一直是控制理论研究的热点。在广义系统的研究领域也同样如此,不过相对于正常系统,有关广义系统的 H_∞ 控制还是相对少一些。

在假设研究的广义系统是正则、无脉冲的情况下,对于时滞依赖 H_∞ 控制器的设计问题和具有状态时滞的不确定广义系统以及时滞依赖鲁棒 H_∞ 控制问题,一般都以线性矩阵不等式形式给出 H_∞ 控制器存在的一个充分条件。另外以线性矩阵不等式的形式也可以给出了广义时滞系统的时滞依赖有界实引理(GBRL)的描述,在此基础上,通过线性矩阵不等式方法设计 H_∞ 状态反馈控制器也是这个领域的一个研究方向。这些方法可以视为广义时滞系统自由权矩阵方法的推广。需要指出的是,因为引入了许多松弛矩阵变量,以上方法得到的结论都相对比较复杂。在本书的第 3 章通过研究了一类线性广义时滞系统的时滞依赖 H_∞ 控制问题,消除冗余的变量,推导出了一个简化的 H_∞ 控制条件。

1.5　广义时滞不确定系统鲁棒控制的研究

在本书的第 5 章研究了广义时滞不确定系统的无源控制和保成本控制以及广义非脆弱时滞系统的鲁棒控制。

无源性概念最早是由波波夫(Popov)[17] 等人引入控制中,经过了雅柯鲍维奇

(Yakubovich)[18],卡尔曼(Kalman)[19],赞姆斯(Zames)[20],威廉姆斯(Willems)[21],以及希尔(Hill)和莫伊伦(Moylan)[114]等人的发展形成了现有的无源性概念。一般的无源性定义有两类:一类是在研究非线性系统的输入输出特性时,根据网络中穿过正实网的能量是耗散的原理给出的基于输入输出的无源性;另一类是基于非线性系统的状态空间描述,由系统的耗散性引出的无源性定义。耗散系统在任意时刻所具有的能量总是小于或等于系统初始时刻的能量与外部提供的能量之和。如果考虑供给率为输入输出的乘积,则系统的耗散性就等价于系统的无源性。耗散性是无源性概念的更一般的推广,后者是前者的特例。耗散性和作为其特例的无源性概念广泛存在于物理学,应用数学以及力学等领域。

对于本身无源的系统,例如,具有配置执行器和传感器的多连接柔性机器人,已有一些关于系统稳定性的研究成果。对于这类系统,基于模型的控制器对参数不确定性非常敏感,而基于无源性的控制器可以保证无源动态系统的鲁棒稳定性,能够很好地对该类系统进行鲁棒控制。但是对于非无源的系统,不能够直接使用基于无源性的控制器。有效方法之一就是使得非无源系统具有无源性,即:利用一个合适的补偿器使之无源,被补偿的系统就可以被任何扩展严格证实的控制器来鲁棒控制。事实上,无源化技术是将鲁棒控制设计问题转化为鲁棒无源的过程,在某些情况下更易于实现。目前,相关文献显示已经得到关于正常系统无源化的结果和基于无源化控制的一些结论。

保成本控制概念由 Chang 等人于 1972 年提出[62]。不确定系统的保成本控制引起了众多学者的极大关注。在本书中通过基于状态观测器的线性状态反馈控制并采用一种新方法,结合凸优化理论得到了时滞不确定广义系统的最优保成本控制器的设计方法。该控制器的设计使得在满足一定的条件下对所有的不确定性,时滞广义系统是鲁棒可镇定的且二次保成本指标最小,并证明了所得结论等价于一组线性矩阵不等式(LMIs)的可解性问题。

对于广义控制系统,当状态可测时,我们可以设计状态反馈来完成系统的一些性能,状态不可测时,可利用观测器估计状态来设计反馈控制器使得闭环系统满足相应的性能。在这些控制器设计中,一个隐含的假设是控制器是精确的且能精确实施,事实上,由于 A/D、D/A 转换、有限字长限制以及舍入误差等因素的影响,控制器在实现过程中具有一定的不确定性,从而造成闭环系统的性能下降和稳定性破坏。科尔(Keel)等[69]指出,现有的鲁棒控制设计方法对控制器参数的摄动会表现出脆弱性。因此,设计一种控制器,能确保闭环系统具有良好性能,并能容忍控制器增益的一定变化范围就显得很有意义。

控制器的脆弱性是造成闭环系统性能下降和稳定性破坏的重要原因,非脆弱控制即设计一个反馈控制,在反馈增益受到一定误差或变化的时候系统也能保持需要的性能。在许多实际问题中,一个系统的状态往往是不可测或没有实际的物理意义的,即使有时系统的状态可直接测量,但考虑到实施控制的成本和系统可靠性等因素,如果可以用系统的输出反馈来达到闭环系统的性能要求,则更适合于选择输出反馈的控制方式,此时适于利用基于观测器的控制。本书在考虑被控对象的不确定性的框架下进一步扩展,提出鲁棒非脆弱 H_∞ 控制器的设计方法,其存在性同样可转换为线性矩阵不等式的可解性。

1.6 广义 T-S 模糊控制系统稳定性与 H_∞ 控制的研究

自 1965 年,美国的扎德(L. A. Zadeh)[22]教授将集合论的要素与隶属函数结合提出模糊集合论后,1974 年,英国的马达尼(E. H. Mamdani)[133]教授首次将模糊集合论知识用于蒸汽机与锅炉的控制,标志着模糊控制的诞生。

近几年,Takagi-Sugeno(T-S)模糊模型是最为常用的模糊模型。这是由日本学者高木(Takagi)和关野(Sugeno)[23]在 1985 年提出的基于模型的模糊控制系统,其控制规则前件依然是模糊量,而后件是输入的线性组合。后来的研究表明,很多控制问题都可以归结为 T-S 模糊系统。T-S 模糊模型基于输入空间的模糊划分,可看作是分段线性划分的拓展,此方法的本质在于:一个整体非线性的动力学模型可以视为多个局部线性模型的模糊逼近。T-S 模糊模型的提出,不仅开创了模糊模型辨识的一整套方法,同时也为模糊控制系统的稳定性分析提供了模型基础和系统化框架,20 世纪 90 年代以后模糊系统的稳定性分析主要是针对 T-S 模糊系统进行的,稳定性定义和条件都是在李雅普诺夫(Lyapunov)意义下的稳定性框架中的。

1999 年,日本学者谷口(Taniguchi T)等人[84]将正常 T-S 模糊模型推广到更一般情况,提出了广义 T-S 模糊系统模型,该模型利用多个局部线性广义系统模型逼近或表示一个全局非线性广义系统模型,从而可以借助于线性系统的分析和控制手段,解决全局非线性广义系统的控制问题。

广义 T-S 模糊系统的特点是:

(1)广义 T-S 模糊系统描述了一类包括物理模型和非动态约束条件在内的更广泛的系统,而且广义模糊模型能更加清晰地表达出系统的实时参数扰动。

(2)采用广义模糊系统描述或逼近非线性系统可以获得更简捷的形式。而广义模糊模型的提出为解决一类非线性广义系统、广义时变系统的控制问题提供了一条新的途径。

2000 年,谷口等人[85]又进行了推广,考虑了等式两端的模糊规则数与隶属度函数均不同的情况:谷口等人的有关研究中,总是假定新系统无脉冲,但是这并不表明原系统无脉冲。无疑这种变量代换在运用上具有局限性,因此,需要寻找另外的办法,解决导数矩阵 $\boldsymbol{E}$ 时变的问题。

对于广义系统来说,其稳定性与正常状态空间系统的稳定性有所不同,而研究广义系统稳定性,还要考虑系统的正则性和脉冲。考虑正则性,是因为正则性可以保证广义系统解的存在与唯一性;考虑无脉冲性,是因为脉冲行为可以破坏广义系统的正常工作,甚至毁掉系统。自 T-S 模糊广义系统模型提出以来,有关的理论和应用研究也逐步展开,研究领域从子系统和全局系统的正则、无脉冲、稳定的关系,以及子系统的容许性能否保证全局系统的容许性等,用来说明模糊广义系统进行研究的可行性和必要性。

如果采用状态反馈控制器对系统进行控制,则需要系统状态是物理可观测的,如果状态