阅读算子控制及其鲁棒控制理论基础

——统一连续域、离散域的控制理论

李惠光 武波 李国友 杨晨影 著

· 北京 ·

摇图书在版编目（悦郧孕）数据

摇阅藻算子控制及其鲁棒控制理论基础——统一连续域、离散域的控制理论 辕李惠光等著援—北京：国防工业出版社，圆猿猿藻
摇ISBN 苑载园原园载圆原远猿园园原

摇Ⅰ援阅…摇Ⅱ援李…摇Ⅲ援①控制论②鲁棒控制
Ⅳ援①圆猿园藻.圆②载猿园藻

摇中国版本图书馆 悦郧孕数据核字（圆猿猿藻）第 园载园猿园号

（北京市海淀区紫竹院南路 圆猿号）
（邮政编码摇员园园园愿愿）
北京奥鑫印刷厂印刷
新华书店经售
*
开本 苑园园伊怨远园摇员摇摇印张 员园员/4摇摇字数 载园千字
圆猿猿藻年 猿月第 员版摇摇圆猿猿藻年 猿月北京第 员次印刷
印数 员—猿猿园园册摇摇定价 圆园园园元

（本书如有印装错误，我社负责调换）

国防书店：（园员远）远载载园园猿摇摇发行邮购：（园员远）远载载园载园园
发行传真：（园员远）远载载园员猿摇摇发行业务：（园员远）远载载园圆园

本书由河北省重点学科基金
资助出版

前摇摇言

目前，在控制理论研究中，存在连续系统和离散系统两大研究领域。一般来讲，连续系统的研究领先于离散系统的研究。离散系统的研究结论较适用于计算机实现，连续系统的研究结论便于理论研究。两个领域的结论表面看来有很大的不同，一般很难找出其中的联系。阅读障碍算子（δ 算子）理论则是联系二者的桥梁。虽然，阅读障碍算子理论于 国际世纪 愿年代即被控制界提出，并进行了广泛的研究，但是，至今为止，并没有形成自己的理论体系，使之在控制界占有重要的一席之地。本书出版的目的即是为此做出努力，使三个领域的理论研究形成控制理论的统一研究框架。

由于计算机技术的飞速发展和工业自动化等领域的实际需要，离散采样控制理论得到了长足的进展。然而，有关离散化模型的控制理论与应用的研究结果表明，当离散系统的采样频率增高时，传统的移位算子（或称为 择算子）描述方法存在以下难以避免的缺点：随着采样频率的增加，离散化系统模型的参数并不趋于连续系统的相应参数而使采样系统的所有极点趋于稳定的边界上，导致系统的稳定性变差。当采样周期很小时，甚至出现极限环振荡和不稳定状态。为此，澳大利亚的控制理论专家古德温（阅读障碍 等建议采用 阅读障碍算子（或增量差分算子）来离散化连续系统，在快速采样情形下使其离散模型趋近于原来的连续模型。阅读障碍算子现已成为连续时间模型和离散时间模型的统一描述方法，既避免了 在变换引起的数值不稳定问题，又使得连续域的各类设计方法可直接用于离散域设计。对其进行深入研究，可以使其成为研究计算机控制系统的有力工具，尤其在高速信号处理、宽带通信与数字采样控制方面具有广阔的应用前景。

利用这种新的算子（阅读障碍算子）来描述离散采样系统，具有如下特点：第一，当采样周期趋于零时，阅读障碍算子系统的模型参数趋于相应的连续时间模型参数，所得结果也趋于连续情形的相应结果。第二，阅读障碍算子模型中采样周期作为显式参数，便于观察和分析不同采样周期下控制系统的性能。第三，阅读障碍算子实现时具有好的数字特性，包括有限子长特性、系数灵敏度等方面均优于移位算子。

研究 阅读障碍算子的意义在于：它与 在变换相比，具有许多优点，可以补充 在变换的不足。它除了可以接纳 在变换的全部优点外，还具有自己的特点，是 在变换的延伸与扩充，尤其在高速采样系统有着重要的应用意义。此外，研究 阅读障碍算子

的意义还在于：它的研究结果介于 γ 变换和 z 变换之间，可以架起二者之间的桥梁，揭示二者之间的理论联系本质，使连续系统理论与离散系统理论成为统一的理论体系。因此，它有着重要的理论意义和应用价值。

近几年来，δ 算子理论在经典控制、最优控制、鲁棒控制、系统辨识、自适应控制、信号处理、预测控制、容错控制、故障检测、分散控制、滑模控制以及 δ 系统等控制与估计的许多领域获得成功。

本书内容包括：δ 变换的定义和性质，z 域、γ 域和 δ 域（δ 域）的根轨迹，多项式的稳定性理论，状态空间分析与设计，最优控制，δ 算子的实现，反馈闭环稳定控制，δ 观测器及 H_2 控制，H_∞ 控制，保成本控制，H_∞ 滤波，应用等。大部分内容给出了连续域、离散域、δ 域相应的结论对比。这些结论均可以互相转化，从而将连续域、离散域、δ 域的研究统一在一个理论框架下。

目前，δ 算子控制理论体系正处于初级阶段，许多问题有待于深入研究、探索。希望本书的出版能对 δ 算子控制理论体系的完善做出一定的贡献，起到抛砖引玉的作用。这不仅丰富和发展了 δ 算子理论及鲁棒控制理论，而且为控制理论更好的发展及应用，做出了有益的努力。

本书的出版是在多年来国内外控制界的广大学者、专家研究结果的基础上，进行深入研究结果的结晶。本书所列参考文献中的内容是本书成文的丰富的理论源泉。在此，仅对各位作者表示诚挚的谢意。

本书的内容是近年来师生辛勤劳动的结果。研究生常玲芳、朱旭东、石磊、刘建涛等进行了文字校对、绘图及部分内容的仿真；燕山大学关新平教授主审了全文，对此，表示衷心的感谢。由于作者水平有限，书中的错误与不当之处恳请读者与专家批评指正。

李惠光

于燕山大学电气工程学院

目录

第 1章 绪论 …… 1
1.1 研究的目的及意义 …… 1
1.2 δ 算子发展概况 …… 3
1.3 系统鲁棒控制研究的目的及意义 …… 6
1.4 系统鲁棒控制研究概况 …… 7
第 2章 δ 变换及其性质 …… 11
2.1 δ 变换的定义及存在定理 …… 11
2.1.1 δ 变换的定义 …… 11
2.1.2 δ 变换的存在性 …… 12
2.1.3 δ 域、z域、在域之间的映射关系 …… 14
2.2 δ 变换的计算 …… 14
2.3 δ 变换的性质 …… 16
2.4 δ 反变换 …… 20
2.5 系统状态方程、算子方程及传递函数 …… 20
第 3章 z域、在域和 δ 域的根轨迹 …… 23
3.1 z域平面与 δ 平面之间的映射关系 …… 23
3.2 z域、在域和 δ 域的映射特性及系统设计的一种方法 …… 25
3.3 δ 域控制器的设计举例 …… 27
3.4 δ 域的根轨迹设计 …… 28
第 4章 在域和 δ 域多项式的稳定性理论 …… 30
4.1 在域特征多项式的稳定性 …… 30
4.1.1 判定稳定性表格的列写 …… 30
4.1.2 利用表格判断稳定性 …… 32
4.2 δ 算子和前向移位算子传递函数模型的转换 …… 34
4.2.1 变换多项式系数之间的关系 …… 34
4.2.2 反变换系数的关系 …… 36
4.3 δ 域多项式的稳定及稳定判据 …… 38
4.3.1 基于多项式列表的系统的稳定性 …… 38
4.3.2 主要结论 …… 39

摇摇源援源援源摇数值举例…… 源愿

第 缘章摇δ 域线性系统状态空间分析与设计 …… 缘园

缘援员摇离散系统 δ 域状态空间描述…… 缘园

缘援圆摇离散化中心 砸(栽) …… 缘源

摇摇缘援圆援员摇砸(栽) 的特性 …… 缘源

摇摇缘援圆援圆摇砸(栽) 的计算 …… 缘源

摇摇缘援圆援源摇计算举例…… 缘远

缘援猿摇δ 域内离散系统的能控性与能观测性 …… 缘苑

摇摇缘援猿援员摇能控性…… 缘苑

摇摇缘援猿援圆摇能观测性…… 缘愿

缘援源摇能控标准形与能观测标准形…… 缘怨

缘援缘摇δ 域内状态空间设计法 …… 远员

摇摇缘援缘援员摇极点配置设计法…… 远员

摇摇缘援缘援圆摇状态观测器设计法…… 远缘

摇摇缘援缘援源摇数值举例…… 远远

第 远章摇δ 域二次型性能指标最优控制 …… 远愿

远援员摇调节器设计…… 远愿

摇摇远援员援员摇有限时间控制器设计…… 远愿

摇摇远援员援圆摇无限时间控制器设计…… 苑园

远援圆摇有限时间跟踪器设计…… 苑猿

摇摇远援圆援员摇杂域的跟踪问题 …… 苑源

摇摇远援圆援圆摇在域的跟踪问题 …… 苑缘

摇摇远援圆援源摇δ 域的跟踪问题 …… 苑怨

远援猿摇无限时间跟踪器设计…… 愿源

摇摇远援猿援员摇杂域的跟踪问题 …… 愿源

摇摇远援猿援圆摇在域的跟踪问题 …… 愿缘

摇摇远援猿援源摇δ 域的跟踪问题 …… 愿远

远援源摇动态规划理论设计最优控制…… 愿愿

摇摇远援源援员摇杂域的最优控制器设计 …… 愿愿

摇摇远援源援圆摇在域的最优控制器设计 …… 怨猿

摇摇远援源援源摇δ 域的最优控制器设计 …… 怨缘

摇摇远援源援缘摇杂域、在域、δ 域反馈增益比较 …… 怨怨

摇摇远援源援远摇举例分析 …… 员园园员

第 苑章摇δ 算子的实现问题 …… 员园园猿

苑援员摇系统的描述 …… 员园园猿

4.2.1 离散化实现的主要结论 …… 57
4.2.2 数字控制器的计算机实现 …… 58
第 5 章 鲁棒控制相关基础知识 …… 59
5.1 数学知识 …… 59
5.1.1 距离空间 …… 59
5.1.2 线性赋范空间 …… 59
5.1.3 内积空间与 Hilbert 空间 …… 60
5.1.4 时间域函数空间 …… 61
5.1.5 频率域函数空间 …… 62
5.1.6 Hardy 空间 …… 63
5.1.7 Nevanlinna-Pick 插值等式 …… 64
5.1.8 H_2、H_∞ 范数的性质 …… 65
5.2 时域中的 H_∞ 控制问题 …… 66
5.2.1 广义受控对象的描述 …… 66
5.2.2 标准 H_∞ 控制问题 …… 67
5.3 连续系统的二次稳定性 …… 68
5.3.1 稳定半径 …… 68
5.3.2 二次稳定性 …… 69
5.4 离散系统的稳定性 …… 70
5.4.1 离散系统稳定性的主要定理 …… 70
5.4.2 离散系统的二次稳定性 …… 70
5.5 δ 域离散系统的稳定性 …… 70
5.6 H_2 范数的计算 …… 71
5.6.1 复杂域 H_2 范数的计算 …… 71
5.6.2 在域 H_2 范数的计算 …… 71
5.6.3 δ 域 H_2 范数的计算 …… 72
第 6 章 三个域反馈闭环稳定控制的理论基础 …… 73
6.1 统一的系统状态方程、算子方程及传递函数表达式 …… 73
6.2 系统组合 …… 73
6.2.1 系统并联 …… 73
6.2.2 系统串联 …… 74
6.2.3 系统反馈 …… 74
6.2.4 非奇异线性变换 …… 75
6.2.5 状态反馈 …… 75

摇摇 5.1.1 摇摇 全控制问题 云锐(云南省优秀博士学位论文) …… 5.2.3
摇摇 5.1.2 摇摇 输出估计问题 普云(韵质数域云南省优秀博士学位论文) …… 5.2.3
摇摇 5.1.3 摇摇 一般情况——输出反馈问题 普云(韵质数域云南省优秀博士学位论文) …… 5.2.3
第 5.2 章 摇基于 Lyapunov 的 H2 控制 …… 5.2.6
5.2.1 摇线性系统的 H2 状态反馈控制 …… 5.2.6
摇摇 5.2.2 摇复杂域线性系统的 H2 状态反馈控制 …… 5.2.6
摇摇 5.2.3 摇在域线性系统的 H2 状态反馈控制 …… 5.2.7
摇摇 5.2.4 摇δ 域离散系统的 H2 状态反馈设计 …… 5.2.7
摇摇 5.2.5 摇三个域结果之间的相互转化 …… 5.2.8
摇摇 5.2.6 摇举例比较 …… 5.2.8
5.2.7 摇δ 域具有不确定线性系统的 H2 状态反馈控制 …… 5.2.8
摇摇 5.2.8 摇δ 算子描述下的具有不确定的离散系统模型 …… 5.2.8
摇摇 5.2.9 摇引理介绍 …… 5.2.9
摇摇 5.2.10 摇H2 控制器设计 …… 5.2.9
摇摇 5.2.11 摇数值例子 …… 5.3.1
第 5.3 章 摇δ 域内的保成本控制 …… 5.3.4
5.3.1 摇引言 …… 5.3.4
5.3.2 摇预备知识 …… 5.3.4
5.3.3 摇具有区域极点约束的 δ 算子系统的保成本控制 …… 5.3.5
摇摇 5.3.4 摇δ 算子系统的描述 …… 5.3.5
摇摇 5.3.5 摇δ 算子系统的极点配置 …… 5.3.5
摇摇 5.3.6 摇具有区域极点约束的保成本控制 …… 5.3.7
5.3.7 摇数值举例 …… 5.3.8
5.3.8 摇基于 Lyapunov 的 δ 域不确定系统输出反馈保成本控制 …… 5.3.8
摇摇 5.3.9 摇离散系统稳定性的主要定理 …… 5.3.9
摇摇 5.3.10 摇离散系统的二次稳定性 …… 5.3.9
摇摇 5.3.11 摇δ 算子不确定系统的描述 …… 5.3.9
摇摇 5.3.12 摇鲁棒性能分析 …… 5.3.11
摇摇 5.3.13 摇保成本矩阵存在性分析 …… 5.3.12
摇摇 5.3.14 摇保成本控制器设计 …… 5.3.13
第 5.4 章 摇δ 算子系统的 H2 滤波问题 …… 5.4.3
5.4.1 摇引言 …… 5.4.3
5.4.2 摇H2 滤波问题的提法 …… 5.4.3
摇摇 5.4.3 摇估计的无偏性 …… 5.4.3
摇摇 5.4.4 摇H2 最优估计问题 …… 5.4.4

3.3.2 连续系统的 H_∞ 滤波问题的解 …… 43
3.4 δ 算子系统的 H_∞ 滤波 …… 45
3.4.1 问题描述 …… 45
3.4.2 控制器设计 …… 46
3.5 数值例子 …… 50
第 4 章 δ 算子在视觉伺服系统中的应用 …… 52
4.1 计算机视觉知识简介 …… 52
4.1.1 计算机视觉概述 …… 52
4.1.2 计算视觉理论框架 …… 53
4.2 机器人视觉伺服综述 …… 54
4.2.1 引言 …… 54
4.2.2 机器人视觉控制系统分类 …… 54
4.2.3 神经网络在视觉伺服中的应用 …… 55
4.2.4 视觉伺服中的特征抽取 …… 56
4.2.5 总结与展望 …… 57
4.3 视觉伺服系统的数学模型 …… 57
4.3.1 机器人模型 …… 57
4.3.2 摄像机模型 …… 58
4.3.3 基于图像矩的图像雅克比矩阵 …… 59
4.3.4 实际应用模型 …… 60
4.4 基于 Smith 预估的 H_∞ 控制器的设计 …… 61
4.4.1 模型的建立 …… 61
4.4.2 线性定常系统的 H_∞ 状态反馈控制器的设计 …… 62
参考文献 …… 64

第 员章摇绪摇摇论

员员摇研究的目的及意义

摇摇由于计算机技术的飞速发展和工业自动化等领域的实际需要，离散采样控制理论得到了长足的进展。然而，有关离散化模型的控制理论与应用的研究结果表明，当离散系统的采样频率增高时，传统的移位算子或称为 择算子描述方法存在以下难以避免的缺点：其一是随着采样频率的增加，离散化系统模型的参数并不趋于连续系统的相应参数，当连续系统的相对阶数大于 员时，将有零点趋于单位圆或位于单位圆外；其二是随着采样频率的增高会使离散化系统出现极限环振荡和不稳定状态[随源]。因此，当采样周期很小时，采用传统的移位算子对系统进行离散化，将导致采样系统的所有极点位于稳定的边界上，会使系统的稳定性变差。为此，澳大利亚的控制理论专家古德温 (员[员圆]等建议采用 算子 (或增量差分算子，即 δ 算子) 来离散化连续系统，在快速采样情形下使其离散模型趋近于原来的连续模型。δ 算子现已成为连续时间模型和离散时间模型的统一描述方法，既避免了 在变换引起的数值不稳定问题，又使得连续域的各类设计方法可直接用于离散域设计。对其进行深入研究，可以使之成为连接连续域与离散域之间的桥梁，成为研究计算机控制系统的有力工具，在高速信号处理、宽带通信与数字采样控制方面具有广阔的应用前景。

建立在差分算子基础上的微积分是 员怨世纪由 允 斯特林 (和柯西 (在作数字分析时共同发现的。在这篇论文中，就是采用了一个统一的离散系统和连续系统的微积分的理论，采用离散系统中不同于传统的移位算子的一个算子，称为 δ 算子，还可以称为增量差分算子，它的定义如下：

$$\delta(\text{栽}\quad \text{越}\begin{cases}\dfrac{\text{凿载(贼}}{\text{凿贼}}, \text{摇 (栽越园}\\[2ex]\dfrac{\text{载(贼亘栽}\quad \text{原载(贼}}{\text{栽}}, \text{摇 (栽}\neq \text{园}\end{cases}\qquad (\text{员原员}$$

这里，栽代表离散系统的采样周期，当 栽越园时为连续系统；当 栽≠园时为离散系统，δ 算子的引入把连续系统和离散系统统一起来。

在控制系统研究中，δ 算子或称 耘[员圆]算子，定义为

$$\delta \quad \text{越} \ (\text{择原员} \ \text{辖栽} \tag{员原圆}$$

式中，择为前向移位算子，即 择曾(噪 越曾(噪垣员 ；栽为采样周期。

考虑线性时不变连续系统

$$\text{蠢贼} \ \text{越} \ \text{粤曾(贼} \ \text{垣} \ \text{月怎(贼，赠(贼} \ \text{越} \ \text{悦曾(贼} \tag{员原猿}$$

式中，曾怎赠分别为 灶维、皂维、责维状态、控制和输出向量。粤 月 悦分别为相应维数的常值矩阵。其 在域离散化模型为

$$\text{择曾(噪} \ \text{越} \ \text{粤}_{\text{择}}\text{曾(噪} \ \text{垣} \ \text{月}_{\text{择}}\text{怎(噪，赠(噪} \ \text{越} \ \text{悦}_{\text{择}}\text{曾(噪} \tag{员原源}$$

其中

$$\text{粤}_{\text{择}} \ \text{越} \ \text{藻}^{\text{栽}}\text{，} \ \text{月}_{\text{择}} \ \text{越} \int_{\text{园}}^{\text{栽}} \text{藻}^{\text{栽}} \text{月} \ \text{蚤} \ \text{悦}_{\text{择}} \ \text{越} \ \text{悦} \tag{员原缘}$$

式 (员原猿的 δ 域离散化模型为

$$\delta\text{曾(噪} \ \text{越} \ \text{粤}_{\text{d}}\text{曾(噪} \ \text{垣} \ \text{月}_{\text{d}}\text{怎(噪，赠(噪} \ \text{越} \ \text{悦}_{\text{d}}\text{曾(噪} \tag{员原远}$$

其中

$$\text{粤}_{\text{d}} \ \text{越} \ (\text{粤}_{\text{择}} \ \text{原陨原} \ \text{辖栽} \ \text{月}_{\text{d}} \ \text{越} \ \text{月}_{\text{择}} \ \text{辖栽} \ \text{悦}_{\text{d}} \ \text{越} \ \text{悦}_{\text{择}} \tag{员原苑}$$

当 栽→园时，由式 (员原缘和式 (员原苑可分别得到

$$\text{粤}_{\text{择}} \rightarrow \text{陨原} \ \text{月}_{\text{择}} \rightarrow \text{园} \ \text{粤}_{\text{d}} \rightarrow \text{粤}, \ \text{月}_{\text{d}} \rightarrow \text{月} \tag{员原愿}$$

摇摇由此可见，利用这种新的算子来描述离散采样系统，具有如下特点：第一，当采样周期趋于零时，δ 算子系统的模型参数趋于相应的连续时间模型参数，所得结果也趋于连续情形的相应结果。第二，δ 算子模型中采样周期作为显式参数，便于观察和分析不同采样周期下控制系统的性能。第三，δ 算子实现时具有好的数字特性，包括有限子长特性、系数灵敏度等方面均优于移位算子。

下面我们通过一个例子来比较移位算子和 δ 算子的数字特性。考虑 砸悦闭环电路，模拟系统矩阵 粤是对称稳定的，有最大负特征值 原λ辕缸和最小负特征值 原λ辕砸，γ砸 跃γ缸 跃园 粤的条件数 (在 圆范数中，矩阵 酝 的条件数是 酝 的最大奇异值和最小奇异值的比率，酝 的奇异值是 酝藻酝 的特征值的均方根，对称矩阵 粤的奇异值是 粤的特征值的绝对值) 是 悦越 γ砸 辕缸 跃员，则是采样周期与时间常数的比率，根据有关的计算机控灼工程指南 则越辖辕缸来选择采样周期，移位算子模型的转移矩阵 Φ (栽 的条件数为

$$\text{悦(栽} \ \text{越} \ \text{藻}^{\text{责}}\text{(原栽辖辕砸)} \ \text{辖} \ \text{藻}^{\text{责}}\text{(原栽辖辕缸)} \ \text{越} \ \text{藻}^{\text{责}}\left\{\frac{\text{悦原员}}{\text{悦}}\right\}\text{则}$$

可得出：

(员 对于 则悦(栽 ≈员垣栽辖辕砸，因此 悦(栽 是通过采样周期和时间常数的比率来

控制的,不是通过模拟系统的动态性来控制的。

(圆) 采样极限 $\lim_{栽\to园}悦_{\delta}(栽)$ 越员,它反映了这样一个事实,当采样周期 栽→园时,移位算子模型的所有动态信息都集中在 员附近。

连续域模型和 δ 域模型的特征值之间的联系为 $\delta_{蚕}越\frac{员原藻责(泽_{蚕}栽)}{栽}$,$\delta_{蚕}$是 δ 域模型的特征值,$泽_{蚕}$是连续模型的特征值。根据这一关系,δ 域转移矩阵 Φ_{δ} (栽) 的条件数为

$$悦_{p}(栽) 越 \frac{员原藻责(原栽猿_{蚕max})}{员原藻责(原栽猿_{蚕min})} 越 \frac{员原藻责(原则)}{员原藻责(原则)}悦$$

可得出:

(员) 对于 则悦$_{p}$(栽) ≈悦,与移位算子模型比较,δ 算子模型的条件数是通过模型系统来控制的,并真正地反映了模拟系统的动态性。

(圆) 快速采样时 $\lim_{栽\to园}悦_{p}(栽)$ 越悦

通过上面的比较,我们可以看到 δ 算子的数字特性要好于移位算子的数字特性。

研究 δ 算子的意义在于:它与 在变换相比,具有许多优点,可以补充 在变换的不足。它除了可以接纳 在变换的全部优点外,还具有自己的特点,是 在变换的延伸与扩充,尤其在高速采样系统有着重要的应用意义。此外,研究 δ 算子的意义还在于:它的研究结果介于 在变换和 杂变换之间,可以架起二者之间的桥梁,揭示二者之间的理论联系本质,使连续系统理论与离散系统理论成为统一的理论体系。因此,它有着重要的理论意义。

员圆摇δ 算子发展概况

高速采样过程的方法在现代系统应用方面起着越来越重要的作用,例如宽带通信和数字控制,其中考虑到信号速度和闭环稳定描述采样速度高于相应的信号和系统的带宽。近些年来,当系统的采样频率较高时,传统的信号处理和控制方法都存在固有的缺陷,改善这一问题需要采用增量差分算子来代替传统的移位算子,我们简单地把近些年的发展作一个概括。

员怨世纪后期,数学家拉格朗日和拉普拉斯研究了移位算子的线性差分方程与差分算子之间的关系,导出了 在变换的计算方法,这一时期,柯西发现了有限差分的运算。早期的差分方程对 圆园世纪的尼奎斯特 (曼[illegible]) 和威纳 (宰[illegible]) 等人的工作有很大的贡献,对现代离散信号处理和离散系统理论作用重大。有限差分的方法在数字分析方面占有很重要的地位[缘],虽然这两个模拟模型的联系已经有研

究（例如参考文献[远[illegible]朱里（[illegible]等人的关于稳定性方面的工作），但并没有引起人们的足够重视，后来又被重新提出来，而且数据准确性的要求越来越高，这在很大程度上促进了此差分算子的研究。直到[illegible]世纪[illegible]年代米德尔顿（[illegible]和古德温（[illegible]发表关于δ算子方法的开创性研究论文[illegible]，从不同角度阐述了δ算子方法的优点。特别是两位合著的《[illegible]》一书出版以后，δ算子或变换作为一种新的离散化方法引起从事控制理论和信号处理方面的普遍关注和研究兴趣，并得到了较为系统深入的研究，取得了许多研究成果。近几年的[illegible]自动控制会刊和信号处理会刊、国际控制杂志、美国控制会议以及[illegible]控制与决策会议等均有很多篇关于δ算子方法的研究论文发表[illegible]。δ算子在高速信号处理、宽带通信与数字采样控制方面具有广阔的发展前景。

近几年来，δ算子理论在最优滤波[illegible]、系统辨识[illegible]、自适应控制[illegible]、信号处理[illegible]、预测控制[illegible]、鲁棒控制[illegible]、容错控制[illegible]、故障检测[illegible]、分散控制[illegible]、滑模控制[illegible]以及[illegible]系统[illegible]等控制与估计的许多领域获得成功。

参考文献[illegible]研究了δ域和[illegible]在域传递函数模型的相互转换问题，且较为全面地分析了δ算子模型的特性。赫什（[illegible]根据复变函数理论，讨论[illegible]域和δ域模型之间的直接转换算法，并研究了闭环零极点对系统性能的影响。[illegible]等探讨各种离散化模型之间的等价关系。参考文献[illegible]对于δ域和[illegible]在域算子的特性进行研究。

[illegible]和[illegible]进一步研究了δ域多项式根的稳定性问题[illegible]及其多项式列阵判别方法[illegible]。参考文献[illegible]对δ算子系统的能控性和能稳性进行了较为深入的研究。此外，参考文献[illegible]基于δ算子提出一种新的零极点匹配模型，在对连续模型离散化时不需要进行增益调整和无穷远零点处理，当采样周期趋于零时，零极点匹配模型也趋于原来的连续模型。

[illegible]（黎卡提）方程和[illegible]（李雅普诺夫）方程在控制与估计问题的研究中具有重要的作用，参考文献[illegible]给出了离散[illegible]代数方程解的迹的两个新结果，减少了估计的保守性。[illegible]对[illegible]方程和[illegible]方程解的上下界研究进行了系统总结，并给出了δ算子[illegible]方程解的一些结果。目前，δ算子[illegible]方程和[illegible]方程的研究工作已取得一些进展。[illegible]和[illegible]探讨了δ算子稳定[illegible]方程的上下界确定方法，且进一步研究了非稳定情形下[illegible]方程解的特征值的定界估计问题[illegible]。有关δ域和[illegible]在域[illegible]方程的关系研究参见参考文献[illegible]。

δ算子作为连续与离散模型的统一描述，在系统辨识领域、最优滤波和状态估计理论、自适应控制及预测控制方面取得了一些进展，参考文献[illegible]给出了在快速

采样时对粤陨模型进行辨识到莱文森－德宾（缘藻增凿藻则鄄阅藻则遭藻则）算法，其算法的数值稳定性优于传统的 择算子。云蚤止 等基于后项差分算子（定义为 $\delta_{遭}$越（员原孕）辕栽 提出了建模 粤陨参数的莱文森（缘藻增凿藻则鄄阅藻则遭藻则）和 杂蚤灶藻模型最小二乘法，将所得结果推广到带噪声的 粤陨过程，并对前项差分和后项差分 δ 算子进行了比较。宰藻灶凿藻则 分析了快速采样系统辨识到极限结果，给出噪声模型相对阶次的选取方法。员怨怨缘 悟蚤 等提出基于增量差分算子的卡尔曼滤波问题，分析了 δ 域 砸藻糟藻凿藻灶方程解的数字特征。基于 δ 算子描述建立了连续时间和离散时间模型参考自适应控制的密切联系，证明了采用 δ 算子可以避免因快速采样引起的非最小相位零点，分析了自适应算法的收敛型 [员园]。

δ 算子虽然在最优控制、鲁棒控制方面应用较少，但也出现了一些文章，杂蚤灶藻 [员员] 分析了 δ 算子系统的鲁棒稳定性，给出了保证系统稳定的特征方程系数的最大摄动区间。参考文献 [员圆] 基于 δ 算子离散系统的 勾$_{样}$控制器的设计方法，结果用一个例子证明了当采样周期 栽→园时，离散控制器趋于连续控制器。有关 缘耘砸砸藻则 设计和 缘耘砸砸藻则 的研究也有一些成果。参考文献 [员猿] 研究了跟踪器的设计。参考文献 [员源] 研究了 勾$_{圆}$最优控制。

任何数字滤波器和控制器都是在有限字长的计算机中实现的，一般情形下，有限字长会使系统的品质下降，甚至使系统失去稳定性，有限字长还引入非线性，从而导致极限环振荡和死带，米德尔顿（阅藻凿凿造藻贼燥灶）和 员怨愿缘 悟蚤 的分析表明 [员]，δ 算子的实现方法具有较好的系数表达精度和较小的舍入截尾误差。陈宗基等 [员缘] 证明了在有限字长相同的条件下，δ 算子的实现方法产生极限环振荡的可能性小于 择算子实现方法。

员.圆摇系统鲁棒控制研究的目的及意义

以 缘耘郧（缘灶贼则燥责赠 耘泽贼蚤皂葬贼燥则 郧藻灶藻则葬贼燥则）为代表的现代控制理论，克服了经典控制理论的很多局限性，它解决了某些非线性和时变系统的控制问题，适用于多输入多输出反馈控制系统，可以实现最优控制规律，不仅能够研究确定性的系统，而且可以研究随机的过程。但是，现代控制理论完全依赖于描述被控对象动态特性的精确数学模型，利用它设计的系统只对数学模型保证预期的性能指标，而这种设计指标在实际的被控对象上是否能得到实现，则完全取决于用来设计的数学模型的精确程度。然而，在客观的实际工程中，普遍存在着各种各样的不满足理想假设条件的不确定因素，要想获得精确的数学模型几乎是不可能的，因此产生了基于含不确定性的非精确模型来分析和设计的鲁棒控制理论。

控制系统设计中需要考虑的不确定性可以归纳为两个方面，一是控制对象的模型化误差；二是控制系统本身和外部的扰动信号。模型化误差不确定可分为非

结构不确定和结构不确定，非结构不确定仅考虑加法和乘法不确定。由加法不确定所描述的系统为

郧圆(泽 越郧(泽 垣宰员(泽∆郧(泽宰圆(泽，摇（‖∆郧(泽‖肆 约员 （员原怨

由乘法不确定所描述的系统为

郧圆(泽 越(陨垣宰员(泽∆郧(泽宰圆(泽) 郧(泽，摇（‖∆郧(泽‖肆 约员 （员原员员

式中，郧圆(泽为实际控制对象的传递函数 ;郧(泽为公称模型的传递函数 ;宰员(泽是不确定输出侧的加权函数 ;宰圆(泽是输入侧的加权函数 ;∆郧(泽是不确定性。对于结构不确定性，在实际控制对象中，描述动态特性的方程式往往具有已知的形式，即模型结构是已知的，但是方程式中具有不确定的系数，即模型参数的值是不确定的。一般地，包含在模型参数中的各种系数，由于测量误差、元器件老化或者动作点变化和线性近似等原因，常常含有不确定性 ;因而模型参数多少都包含有不确定性。这种不确定性由于具有已知的结构，所以称为结构不确定性。正是基于这种抗不确定的优势，鲁棒控制理论从 圆园世纪 苑园年代兴起，到目前仍然是一个非常活跃的研究领域，具有广泛的研究内容，尤其是与其他控制理论和研究方法结合是当前研究的热点、难点，这是由现代工业的复杂性及航空航天等高技术的要求所决定的。

一个系统具有鲁棒性，就是指这个系统在某一类特定的不确定性条件下具有使稳定性、渐近调节和动态特性保持不变的特性，即这一系统具有承受这类不确定性影响的能力。现代鲁棒控制就是针对实际对象具有的上述有界不确定性，设计控制器使整个闭环系统具有鲁棒性，同时还要满足一定的性能指标。鲁棒控制充分考虑了工程实际对象中各种各样的参数摄动，因此，对它的研究为控制理论的应用打下了坚实的基础，对于实际控制系统的设计和应用具有十分深远的意义。

员.圆 摇系统鲁棒控制研究概况

勾肆控制方法是鲁棒控制理论发展的最突出标志之一。员怨愿员年赞姆斯（在著名论文中首次提出并研究了 勾肆控制问题[猿]，引起控制界的广泛重视和关注，获得了迅速发展，至今已形成较为完整的理论体系。勾肆问题的研究方法由最初的函数插值方法[猿]到后来的汉克尔算子理论[缘]逐步发展，直到 员怨愿愿年多伊尔（阅.阅.阅辕等人在全美控制年会上发表了著名的 阅郧阅云论文[远]，证明了 勾肆设计问题的解可以通过解两个适当的代数 砸糟则藻方程得到，阅郧阅云的论文标志着现代时域 勾肆控制理论的成熟。基于离散 砸糟则藻方程的重要参考文献有[员园~员苑]。然而，尽管利用 砸糟则藻方程的方法可以处理一般的结构不确定性，但是需要预先调整大量的参数和正定对称矩阵，这给问题的求解带来很大的不便。近几年又发展了线性矩阵