

硕士学位论文

|  |  |
| --- | --- |
|  | 马尔可夫跳变系统 |
|  |  |

|  |  |
| --- | --- |
| **作者姓名** | **姚才康** |
| **指导教师** | **沈英 教 授** |
| **学科专业** | **控制科学与工程** |
| **学位类型** | **工学硕士** |
| **培养类别** | **全日制学术型硕士** |
| **所在学院** | **信息工程学院** |

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | **提交日期：** | **2024年01/06月** |  |

|  |  |
| --- | --- |
|  | |
| PhotocatalyticReductionofCarbonDioxidesby××××PhotocatalystunderVisibleLightIrradiation | |
|  | |
| Dissertation Submitted to  **Zhejiang University of Technology**  in partial fulfillment of the requirement  for the degree of  **Doctor of Engineering** | |
|  | |
| by  **Mou-mou JIA** | |
| Dissertation Supervisor: | Prof. Mou-mou YI |
| Associate Supervisor: | Associate Prof. Mou-mou BING |
|  | |
| Mon.， YEAR | |

**浙江工业大学学位论文原创性声明**

本人郑重声明：所提交的学位论文是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的研究成果。除文中已经加以标注引用的内容外，本论文不包含其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果，也不含为获得浙江工业大学或其它教育机构的学位证书而使用过的材料。对本文的研究作出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人承担本声明的法律责任。

作者签名： 日期： 2024 年 6 月

**学位论文版权使用授权书**

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权浙江工业大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

本学位论文属于： 1、保密□，在一年解密后适用本授权书。

2、保密□，在二年解密后适用本授权书。

3、保密□，在三年解密后适用本授权书。

4、不保密□。

（请在以上相应方框内打“√”）

作者签名： 日期： 2024年 月

导师签名： 日期： 2024年 月

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 中图分类号 | TP390 |  | 学校代码 | 10337 |
| UDC | 004 |  | 密级 | 公开 |
| 研究生类别 | 全日制学术型硕士研究生 |  |  |  |



硕士学位论文

|  |
| --- |
| 论文中文题目 |

|  |
| --- |
| Dissertation Title |

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 作者姓名 | 姚才康 |  | 第一导师 | 沈英 教 授 |
| 学位类型 | 工学硕士 |  | 第二导师 |  |
| 学科专业 | 控制科学与工程 |  | 培养单位 | 信息工程学院 |
| 研究方向 |  |  |  | |

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 答辩日期： | 2024 | 年 | 6 | 月 |  | 日 |  |

论文中文题目

# 摘 要

论文题目为黑体三号，可以分成1-2行居中撰写，上面空1行，下面空2行居中撰写“摘要”二字。

“摘 要”二字（黑体三号），字间空2格。

“摘要”二字下空1行撰写摘要内容（中文宋体小四号，英文Times New Roman小四号，1.25倍行距）。每段首行缩进二格，标点符号占一格。

摘要内容下面空1行撰写“关键词”三字（黑体小四号，加粗），其后为关键词（宋体小四号）。关键词数量为3-5个，每一关键词之间用逗号（全角）分开，最后一个关键词后不打标点符号。

**关键词：**关键词1，关键词2，关键词3，关键词4

**ENGLISH DISSERTATION TITLE ENGLISH DISSERTATION TITLE ENGLISH DISSERTATION TITLE**

# ABSTRACT

论文题目全部采用大写字母，Times New Roman三号，可分成1-3行居中撰写，每行左右两边各缩进两格，上面空1行，下面空3行居中撰写“ABSTRACT”。

“ABSTRACT”全大写，Times New Roman三号。

“ABSTRACT”下空2行撰写英文摘要内容（Times New Roman小四号，1.25倍行距）。摘要内容每段首行缩进同中文摘要（每段首行缩进二格，标点符号占一格）。

英文摘要内容下面空1行撰写“KEY WORDS”（Times New Roman小四号，全大写，加粗），其后关键词小写（Times New Roman小四号），每一关键词之间逗号（半角）分开，最后一个关键词后不打标点符号。

**KEY WORDS:** key word 1， key word 2， key word 3， key word 4， key word 5

# 

# 目 录

[摘 要 I](#_Toc155386089)

[ABSTRACT II](#_Toc155386090)

[目 录 III](#_Toc155386091)

[插图清单 V](#_Toc155386092)

[表格清单 V](#_Toc155386093)

[符号说明 VI](#_Toc155386094)

[第一章 绪 论 1](#_Toc155386095)

[1.1 课题背景及研究意义 1](#_Toc155386096)

[1.2 国内外研究现状 3](#_Toc155386097)

[1.2.1 最优控制的研究现状 3](#_Toc155386098)

[1.2.2 控制的研究现状 4](#_Toc155386099)

[1.2.3 滤波的研究现状 5](#_Toc155386100)

[1.2.4 数据驱动控制的研究现状 5](#_Toc155386101)

[1.3 本文研究内容 6](#_Toc155386102)

[1.4 本文组织框架 7](#_Toc155386103)

[第二章 马尔可夫跳变系统跟踪控制问题 8](#_Toc155386104)

[2.1 引言 8](#_Toc155386105)

[2.2 研究对象 8](#_Toc155386106)

[2.3 基础知识 9](#_Toc155386107)

[2.4 LQT问题给出 11](#_Toc155386108)

[2.5 跟踪控制问题给出 12](#_Toc155386109)

[2.5 总结 15](#_Toc155386110)

[第三章 LQT问题求解 16](#_Toc155386111)

[3.1 引言 16](#_Toc155386112)

[3.2 耦合代数Riccati方程 16](#_Toc155386113)

[3.2.1 耦合代数Riccti方程推导 16](#_Toc155386114)

[3.2.2 耦合代数Riccti方程解的存在性与稳定性 18](#_Toc155386115)

[3.3 已知TP下耦合代数Riccati方程求解 19](#_Toc155386116)

[3.4 未知TP下耦合代数Riccati方程求解 21](#_Toc155386117)

[3.5 总结 22](#_Toc155386118)

[第四章 跟踪控制问题求解 23](#_Toc155386119)

[4.1 引言 23](#_Toc155386120)

[4.2 跟踪控制博弈耦合代数Riccati方程 24](#_Toc155386121)

[4.2.1 博弈耦合代数Riccti方程推导 24](#_Toc155386122)

[4.2.2 博弈耦合代数Riccti方程解的存在性与稳定性 28](#_Toc155386123)

[4.3 估计博弈耦合代数Riccati方程 31](#_Toc155386124)

[4.4 博弈耦合代数Riccati方程求解 34](#_Toc155386125)

[4.4.1 已知TP下博弈耦合代数Riccti方程求解 34](#_Toc155386126)

[4.4.2 已知博弈耦合代数Riccti方程求解 38](#_Toc155386127)

[4.5 总结 39](#_Toc155386128)

[第五章 结论与展望 40](#_Toc155386129)

[5.1 结论 40](#_Toc155386130)

[5.2 展望 40](#_Toc155386131)

[参考文献 41](#_Toc155386132)

[致 谢 45](#_Toc155386133)

[作者简介 46](#_Toc155386134)

[1 作者简历 46](#_Toc155386135)

[2 攻读博士/硕士学位期间发表的学术论文 46](#_Toc155386136)

[3 参与的科研项目及获奖情况 46](#_Toc155386137)

[4 发明专利 46](#_Toc155386138)

[学位论文数据集 47](#_Toc155386139)

# 

# 插图清单

**未找到图形项目表。**

# 表格清单

**未找到图形项目表。**

# 符号说明

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| MJS | —— | 马尔可夫跳变系统(Markov Jump System)； |
| TP | —— | 转移概率(Transition Probability)； |
| SS | —— | 随机稳定(Stochastically Stable)； |
| LQR | —— | 线性二次型调节(Linear Quadratic Regulator)； |
| LQT | —— | 线性二次型跟踪(Linear Quadratic Gaussian)； |
| LQG | —— | 线性二次型高斯控制(Linear Quadratic Tracker)； |
| LMI | —— | 线性矩阵不等式(Linear Matrix Inequality)； |
| DP | —— | 动态规划(Dynamic Programming)； |
| CLE | —— | 耦合Lyapunov方程(Coupled Lyapunov Equation) |
| ARE | —— | 代数Riccati方程(Algebraic Riccatic Equation)； |
| CARE | —— | 耦合代数Riccati方程(Coupled Algebraic Riccatic Equation)； |
| GCARE | —— | 博弈耦合代数Riccati方程(Game Coupled Algebraic Riccatic Equation)； |
|  | —— | N维实欧氏空间； |
|  | —— | N维实欧氏空间； |
|  | —— | 合适维度的单位阵； |
|  | —— | 合适维度的零矩阵； |
|  | —— | 对称正定矩阵； |
|  | —— | 对称半正定矩阵； |
|  | —— | 矩阵的转置； |
|  | —— | 矩阵的逆； |
|  | —— | 数学期望； |
|  | —— | 事件发生的概率； |
|  | —— | 定义为； |
|  | —— | 向量或矩阵范数； |
|  | —— | ； |
|  | —— | 克罗内克积； |
|  | —— | 算子的谱半径； |

# 第一章 绪 论

## 1.1 课题背景及研究意义

本课题关注无限时域下马尔可夫跳变系统(Markov Jump System, MJS)的状态估计与输出跟踪控制问题。混杂系统（Hybrid System）是由连续变量动态系统和离散事件动态系统相互混杂、相互作用形成的统一动态系统[1]。切换系统作为混杂系统的一种，其系统的离散事件表现为系统具有多个模态用于描述系统的不同运行状态，且各个模态在特定的切换策略下进行切换[2]。MJS同时具备马尔可夫过程和切换系统的特征，可以看作一种特殊的切换系统，区别在于MJS的模态转移服从于马尔可夫过程而不是给定的切换策略。相比于一般的线性或非线性定常系统，MJS的结构是时变的，其模态在多个可能的取值之间转移，因此在刻画一些具有随机突变如元器件损坏、网络传输延迟、功率切换等结构或参数突变的系统时，马尔可夫跳变模型具有非常突出的优势。然而MJS的系统状态在时间上连续变化，模态转移却呈现时间上的离散变化，表现出强时变、非线性的特征，因此已有的关于一般线性或非线性系统的研究方法和理论无法直接应用于MJS的分析与设计。针对MJS的理论分析和相关问题及方法的研究具有重要意义，值得深入探讨，不论是学术界还是工业界都迫切需要建立和完善MJS分析设计的理论体系。自20世纪60年代以来，MJS受到了专家和学者的广泛关注，其理论和应用取得了巨大进展，许多基本的控制估计问题得到了深入研究，如能控性能观性[3][4][5]，稳定性[6][7][8][9][10]，镇定控制[11][12]，最优控制[13][14][15][16]，线性二次型高斯(Linear Quadratic Gaussian, LQG)控制[17][18][19]，状态估计和滤波[20][21][22] [23][24]，参数估计[25][26]，模型降阶[27][28]，其中巴西学者Costa及其团队对MJS进行了系统性的研究，并取得了系统的研究成果[29][30]。

本课题讨论MJS无限时域下的输出跟踪控制问题。跟踪控制要求系统状态或输出与目标信号保持一致，已被广泛地应用于无人机混合编队协同作战跟踪控制[31]、不可预测飞行物的雷达追踪[32]、水下机器人跟踪作业[33]等工程实践中。通过线性二次型跟踪(Linear Quadratic Tracker, LQT)控制方法设计最优跟踪控制器使被控系统输出在给定性能指标下实现对参考轨迹的跟踪，是解决跟踪控制问题的重要方法之一。LQT属于最优控制的一种，最优控制是现代控制理论和应用中最基本的工具之一，最优控制问题可以通过变分法、极大值原理、动态规划(Dynamic Programming, DP)等数学方法推导得到代数Riccati方程(Algebraic Riccatic Equation, ARE)，根据ARE的解设计出满足预设性能指标的反馈控制器。LQT控制不考虑被控系统存在过程噪声的情况，是比较理想的控制器设计方法，然而系统实际运行时存在各种各样的随机因素，如量测输出中可能存在量测噪声，系统运行时存在过程噪声等等。如果在控制器设计时忽略这些随机因素，就难以达到预期的控制效果，因此LQT控制无法应对系统存在各类噪声时的跟踪要求。同属最优控制的LQG控制可以处理随机干扰为高斯噪声且其统计特性已知时的控制问题。LQG控制下系统具有的幅值稳定裕度和大于等于的相位稳定裕度，控制效果优越。然而LQG控制基于被控对象数学模型进行控制器设计，控制性能的实现极大地依赖于被控系统数学模型的精确程度，因此对于受控对象模型摄动时的鲁棒性很差，同时如果仅仅知道噪声干扰属于某个集合但是其统计特性未知时，LQG控制也无法应用[34]。为了解决LQG的这些局限性与缺点，以Zames.G为代表的学者们提出控制理论，即对扰动信号不再假设具有固定的统计特性，只要求其能量有界即可，此外，引入了对模型不确定性的处理，使得系统具有较好的鲁棒性[35]。

上述控制方法在设计时一般假设系统状态已知或可直接获得，但大多数情况下系统的状态无法直接获得。当系统满足能观性条件且无随机干扰时，可以利用系统量测信息通过系统重构设计状态观测器获取系统状态。当系统受过程噪声或量测噪声等随机干扰影响时，简单的状态观测器无法获得精确的系统状态，此时可以通过一些状态估计方法减少噪声的影响获取较为精确的系统状态。状态估计问题也被称为滤波问题，而实现滤波的装置也被称为滤波器，状态估计即从数据中滤除噪声和干扰以提取有用的信息估计出真实的系统状态。早期的滤波器设计在频域进行，出于第二次世界大战时的军事需要，柯尔莫哥洛夫和维纳相继提出了针对平稳随机过程的最优线性滤波理论，即维纳滤波理论，但维纳滤波只能处理平稳随机过程，对非平稳随机过程滤波效果一般。时域上最经典的滤波器是卡尔曼滤波器，它结合先验信息和实际测量实时更新状态估计及其协方差，需要的数据量小，计算速度快[37]。卡尔曼滤波的局限性在于其实现需要已知噪声的统计特性，依赖于精确的系统模型，因此仍然需要其他可以处理噪声统计特性未知以及建模误差的滤波算法，即要求滤波算法有较好的鲁棒性。众多学者已针对该问题进行了深入研究，并提出了许多基于卡尔曼滤波理论的鲁棒滤波算法，但这些算法仍属于卡尔曼滤波的范畴。本课题关注滤波问题，也被称为极小极大滤波，即在最坏噪声条件下设计滤波器，因此该滤波器将具有较好的鲁棒性，同时它不要求噪声统计特性已知，仅要求其能量有界[38]。

现代控制理论以被控对象的数学模型为基础进行控制，被称为基于模型的控制。系统的建模与辨识是基于模型的控制理论中最重要的组成部分，只有基于一个精确的数学模型，才能设计出满足预期控制效果的控制器。但是随着被控系统规模的扩大和复杂性的增加，建立精确的物理化学机理模型逐渐变得困难。如何直接通过系统输入输出数据进行系统控制，即基于数据的控制受到了控制领域专家学者的广泛关注。基于数据的控制是指在不建立系统模型的情况下，仅利用被控系统的输入输出数据直接设计、优化控制器，避免了建模误差对控制器性能的影响，是直接从数据到控制器设计的控制理论和方法。数据驱动控制的实现依赖于高质量的系统数据、高效的数据分析和处理能力，而不是事先建立的精确数学模型，其优势在于可以处理难以建模的复杂系统，自适应地调整控制策略以适应系统行为的变化。因此， 发展数据驱动控制理论方法是现代控制理论发展与重大应用的必然要求， 具有重要的理论与现实意义[39]。

## 1.2 国内外研究现状

### 1.2.1 最优控制的研究现状

关于MJS的最优控制，文献[13][14] 首次研究有限时域下连续MJS的线性二次型调节器(Linear Quadratic Regulator, LQR)问题，基于极大值原理得到 LQR问题对应的耦合代数Riccati方程(Coupled Algebraic Riccatic Equation, CARE)，提出适用于MJS的模态相关最优状态反馈控制器。太阳能发电系统在运作时可能会被天空中的云层遮挡，其所能接收到的日照量以难以预测的方式随机突变，文献[15]将发电系统中的蒸汽温度调节器建模为连续MJS，并将文献[13]的结果应用于蒸汽锅炉的温度控制中，实现了更稳定的温度输出和更迅速的温度调节。随后文献[14]将文献[13]的结果推广到无限时域下离散MJS的LQR问题中，基于DP给出了相对应的CARE及其反馈控制器形式，并在萨缪尔森乘数-加速器模型描述的简单经济系统中进行了仿真验证。文献[13]与[15]虽然给出了LQR问题对应的CARE，但是没有讨论CARE镇定解的存在性问题。文献[4]与文献[5]为研究离散或连续CARE镇定解的存在性，提出了弱能控性与能观性、绝对能控性与能观性的概念，分别给出了CARE镇定解存在的充要条件。文献[16]结合矩阵不等式，通过序列的单调性设计CARE镇定解的数值求解算法。

系统实际运行时可能各种随机因素的影响，针对系统存在加性高斯白噪声的情况，文献[17]与[18]研究了连续以及离散MJS的LQG问题，在有限时域下根据分离原理分别设计了最优控制器和最优滤波器，在无限时域下给出了稳态控制器和次优滤波器。文献[19]关注广义加性白噪声下的有限时域离散MJS的LQG问题，提出了适用该情况的分离原理。一般情况下，最优控制中的二次型权重矩阵要求是正定的，对于权重矩阵半正定或不定的问题，文献[40]给出了最优控制器存在充要条件。文献[41]研究了一步时滞下离散MJS的最优控制问题，在有限时域下给出了对应Riccati方程，但在无限时域下仅仅给出了对应的线性矩阵不等式(Linear Matrix Inequality, LMI)求解方法，结果具有一定的保守性。文献[42]研究了一类具有有界时变时滞的离散MJS 在转移概率(Transition Probability, TP)部分已知时的稳定性及镇定问题，以LMI的形式给出控制器设计方法。在表征系统模态的马尔可夫参数不可获得时，文献[43]研究系统状态和控制输入受约束下的无限时域离散MJS的LQR问题，利用模态探测器获取模态信息，通过LMI求解反馈控制器。对于具有不确定TP分布的非齐次MJS，文献[44]引入总变化距离衡量模态转移过程的不确定性，通过DP导出鲁棒最优控制器。

### 1.2.2 控制的研究现状

控制作为一种抑制扰动的鲁棒控制方法，是现代控制理论与应用中非常重要的控制工具，文献[45]首次研究了有限和无限时域下连续MJS的控制问题，随后文献[46]将结果推广到离散情况下，得到了博弈耦合代数Riccati方程(Game Coupled Algebraic Riccatic Equation, GCARE)和对应的控制器，并证明了当增益趋于无穷时，GCARE将退化为CARE。文献[47]研究离散MJS的全信息控制，给出了GCARE具有唯一半正定解的充分必要条件，证明了在任意能量有界噪声下闭环系统都满足预设的增益，并且在最坏噪声下闭环系统随机稳定。文献[48]考虑具有有界时变参数不确定性MJS的控制问题，并讨论了TP不确定时的鲁棒控制问题。对于TP在有界凸集内的混合控制问题，文献[49]给出了相应的LMI解，但只考虑单一模态的噪声增益矩阵，建模存在局限，文献[50]进一步将该结果推广到具有多模态噪声增益，带有乘性噪声的无限时域混合控制问题，给出了相应的Riccati方程与LMI求解算法。文献[51]将TP不确定性量化为高斯概率密度函数，利用LMI给出了控制器存在的充分条件。文献[52]研究了基于Roesser模型的二维MJS的异步控制问题。文献[53]通过子系统变换对MJS进行解耦，考虑TP和系统动态未知的连续MJS，使用积分强化学习求解GCARE和控制器。

文献[54]首次研究无限时域下连续MJS的跟踪问题，基于LMI给出了跟踪控制器。文献[55]将存在随机推力器故障的航天器轨迹跟踪控制问题建模为MJS输出跟踪问题，利用LMI保证输入约束下MJS的随机稳定性给出跟踪控制器。文献[56]研究了一类具有多源不确定性，部分未知TP，未知非线性，以及未知动态的严格反馈MJS的自适应模糊跟踪问题，在执行器存在不可预测故障时利用LMI给出跟踪控制器。当被跟踪系统存在未知有界能量输入时，文献[57]研究了模态已知或未知情况下的跟踪问题，并分别给出了模态依赖以及模态非依赖的跟踪控制器。

### 1.2.3 滤波的研究现状

关于MJS的状态估计问题存在大量的理论研究，主要有卡尔曼滤波和滤波两类状态估计方法，其中关于MJS的卡尔曼滤波在过去十几年间已经被深入讨论[20][21][22][23]。特别要注意，不论是使用卡尔曼滤波或滤波对MJS进行状态估计时，其模态是否可获得是至关重要的。本课题关注MJS的滤波问题，文献[58]考虑系统模态可获得解决了连续MJS的滤波问题，利用LMI设计模态相关滤波器，随后文献[59]将结果推广到离散MJS。文献[60]研究具有有界参数不确定性连续MJS的鲁棒滤波问题，设计LMI算法进行鲁棒滤波器求解。对于系统模态信息未知且TP具有多面体不确定性的情况，文献[61]与[62]结合模态相关的Lyapunov函数给出了模态非依赖的鲁棒滤波器，随后文献[63]将结果推广到连续系统中，文献[64]给出了比文献[63]保守性更弱的结果，并且适用于具有终止模态的MJS。对于带有有界时变不确定性以及模态相关有界时变时滞的时变MJS，文献[65]给出了相应的鲁棒滤波器。文献[66]研究基于Roesser模型的二维MJS的滤波问题，给出了模态相关的全阶滤波器。文献[67]研究了TP未知离散MJS的滤波问题，构造模态相关的全阶滤波器，并通过LMI得到的滤波误差系统的有界实引理，给出了滤波器的存在性定理。文献[68]研究了TP部分未知的MJS的和滤波，提出了一种引入额外矩阵变量的方法，使Lyapunov矩阵与滤波器参数解耦，改进了已有的滤波器设计方法，降低了保守性，提高了计算速度。文献[69]考虑TP和检测器的检测概率未知，基于检测器方法估计不可获得的模态信息，给出了滤波器存在的充要条件，文献[70]将结果推广到混合滤波问题上，使得滤波性能得到提升，文献[71]将文献[70]的结果应用到MJS的鲁棒故障检测中取得了不错的效果。

### 1.2.4 数据驱动控制的研究现状

注意到MJS的控制或估计方法基于TP信息才能实现，现有的结果通常假设TP完全已知，在许多实际情况下这个假设相当理想化，受成本或系统本身限制完整的TP难以获得。一种解决思路是估计TP，如文献应用期望极小极大算法估计TP并用于控制器设计[25]。另一种是引入数据驱动控制方法进行控制器或滤波器设计，文献[72]使用离线类TD(λ)算法来求解TP完全未知时的CARE，通过已有的模态序列求解按TP加权的解矩阵实现控制器设计，文献[73]将文献[72]提出的离线算法转化为在线算法，提高求解效率，文献[74]与[75]将在线算法推广到TP未知时MJS与半马尔可夫跳变系统的GCARE求解中。文献[76]与[77]结合强化学习提出的无模型近似动态规划作为一种数据驱动方法，利用系统运行过程中的状态信息，在激励噪声下使用最小二乘求解控制器，目前已被运用到CARE或GCARE的求解中。文献[78]使用积分强化学习，研究连续MJ在参数部分未知及TP未知时的LQT问题，但参数矩阵完全未知的问题还未解决。文献[79]针对模糊非线性MJS，得到一组模糊随机耦合代数Riccati方程，提出了系统参数未知下基于积分强化学习的非脆弱输出反馈跟踪控制器求解算法。文献[53]通过子系统变换对MJS进行解耦，考虑TP和系统动态未知的连续MJS，使用积分强化学习求解GCARE和控制器并运用在潮汐涡轮机系统控制中。

## 1.3 本文研究内容

通过查阅国内外相关文献，了解MJS的理论体系和研究现况，并深入研究MJS的LQT控制、控制、滤波等控制估计方法。针对无限时域下MJS的跟踪控制问题，考虑不同场景，通过DP推导Riccati方程及其控制器，同时设计TP已知或未知时Riccati方程的迭代求解算法，并在数值仿真系统上验证所提方法的有效性与优越性。本文主要研究内容如下：

(1) 研究系统状态与模态可获得时，无限时域下MJS的LQT问题。基于被控系统与被跟踪系统，定义跟踪误差与增广状态变量，构造跟踪误差系统。通过DP推导得到LQT问题对应的CARE及LQT控制器。结合跟踪误差系统，在给定衰减因子下，讨论CARE解的存在性以及对应反馈控制器作用下闭环系统的稳定性。考虑TP已知以及未知两种情况进行CARE求解，基于初始镇定解设计迭代求解算法并证明算法的收敛性并对所提算法进行模拟仿真验证；

(2) 研究系统状模态可获得但系统状态不可获得时，无限时域下MJS的跟踪控制问题。基于被控系统与滤波器，定义估计误差与增广状态变量，构造估计误差系统。基于被控系统与被跟踪系统，定义跟踪误差与增广状态变量，构造跟踪误差系统。利用博弈论的思想，将增益的实现转化为极小极大问题的求解，利用DP求解跟踪控制问题以及滤波问题对应的GCARE及跟踪控制器和滤波器。在给定衰减因子以及期望的增益下，讨论GCARE解的存在性以及对应跟踪控制器和滤波器下闭环系统的稳定性。考虑TP已知以及未知两种情况进行GCARE求解，基于初始镇定解设计迭代求解算法并证明算法的收敛性并对所提算法进行模拟仿真验证。

## 1.4 本文组织框架

本文分为五个章节，每个章节的主要内容如下：

第一章，绪论。本章介绍了课题的研究背景及研究意义，总结了马尔可夫跳变系统控制与估计问题的研究现状，最后概述了本文的主要研究内容并介绍本文的组织结构。

第二章，数学基础。本章介绍MJS的基本理论，给出研究对象和研究问题，为后续工作提供知识基础与思路指引。基于被控系统与滤波器，定义估计误差与增广状态变量，构造估计误差系统。基于被控系统与被跟踪系统，定义跟踪误差与增广状态变量，构造跟踪误差系统。

第三章，系统状态与模态可获得时无限时域下MJS的LQT问题。本章基于跟踪误差系统，通过DP推导得到LQT问题对应的CARE及LQT控制器。结合跟踪误差系统，在给定衰减因子下，讨论CARE解的存在性以及对应反馈控制器作用下闭环系统的稳定性。考虑TP已知以及未知两种情况进行CARE求解，基于初始镇定解设计迭代求解算法并证明算法的收敛性并对所提算法进行模拟仿真验证。

第四章，系统状模态可获得但系统状态不可获得时无限时域下MJS的跟踪控制问题。基于估计误差系统和跟踪误差系统，利用博弈论的思想，将增益的实现转化为极小极大问题的求解，利用DP求解跟踪控制问题以及滤波问题对应的GCARE及跟踪控制器和滤波器。在给定衰减因子以及期望的增益下，讨论GCARE解的存在性以及对应跟踪控制器和滤波器下闭环系统的稳定性。考虑TP已知以及未知两种情况进行GCARE求解，基于初始镇定解设计迭代求解算法并证明算法的收敛性并对所提算法进行模拟仿真验证。

第五章，结论与展望。本章对全文研究工作和研究成果进行总结，并指出马尔可夫跳变系统跟踪控制中有待进一步研究的问题。

# 第二章 马尔可夫跳变系统跟踪控制问题

## 2.1 引言

由于MJS独特的系统结构，已有的关于一般线性或非线性系统的研究方法和理论无法直接应用于MJS的分析与设计。尤其是无限时域下马尔可夫跳变系统的跟踪控制问题目前并没有被很好的解决，其中大部分文献考虑的情形比较简单，给出的控制器大都基于LMI进行求解，保守性较强。且TP未知时，控制问题与滤波问题的GCARE的求解算法目前研究较少且集中在连续MJS上。因此，如何在TP未知时，实现无限时域下马尔可夫跳变系统的跟踪控制具有迫切需求。

本章介绍MJS的基本理论和，如MJS的随机稳定性、稳定性判据，增益、Fréchet导数、Newton-Kantorovich 定理等等。同时提出本课题的研究对象和研究问题，本课题基于被控系统与滤波器，定义估计误差与增广状态变量，构造估计误差系统。基于被控系统与被跟踪系统，定义跟踪误差与增广状态变量，构造跟踪误差系统。

## 2.2 研究对象

本课题研究对象为状态空间方程描述的离散马尔可夫跳变系统：

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2-1) |

其中为被控系统状态，为被控系统控制输入，为被控系统扰动噪声，包括过程噪声和量测噪声，为被控系统量测输出，为被控系统控制输出。是一个在有限集合内取值的离散马尔可夫过程，用于描述系统模态转移，其模态转移服从下列条件概率：

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2-2) |

其中对任意的，有且。定义转移概率矩阵为：

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2-3) |

当系统模态时，模态依赖矩阵被表示为。、、、、、、、是合适维度的实矩阵，且是行满秩的。此外噪声增益矩阵满足保证行满秩，目的是使得量测输出的每一个分量都包含噪声。

**注 2.1:** 在MJS(2-1)中只有一种噪声，即作为被控系统扰动噪声包括了过程噪声和量测噪声。实际上这种建模形式与系统具有不同测量和过程噪声的情况是等价的。如果考虑不同的过程噪声和测量噪声，则 MJS 可以建模为

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2-4) |

其中、、表征系统扰动，定义，，，，则(2-4)等价于

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2-5) |

显然，(2-5)与(2-1)为同一个系统。不失一般性，我们选择(2-1)的形式讨论问题。

考虑被控系统为离散马尔可夫跳变系统，被跟踪系统为线性定常系统：

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2-6) |

其中为被跟踪系统状态，为被跟踪系统未知随机输入，为被跟踪系统控制输出，为被跟踪系统量测输出。、、、、是已知的实矩阵，注意到这里不要求是稳定矩阵。此外噪声增益矩阵满足。

## 2.3 基础知识

下面提出一些基本的数学概念以及数学定理便于后续理论推导。

**定义2.1 随机稳定:** 如果且时，对于任意的初始状态有：

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2-5) |

那么马尔可夫跳变系统被称为是随机稳定(Stochastically Stable, SS)的**[29]**。

**定义2.2: (****增益)** 给定标量，当时，对于任意能量有界噪声有：

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2-6) |

那么马尔可夫跳变系统有小于等于的增益。

**定义2.3: (****Fréchet导数)** 令是一个从线性空间上的开集到另一个线性空间的映射。令，如果存在一个线性有界映射，对于某个零点的邻域内所有的，使得下式成立：

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2-7) |

那么在处是Fréchet可微，被称为在处的Fréchet导数。

**引理1：[29]**马尔可夫跳变系统是SS的当且仅当对于给定的任意半正定矩阵序列，下列耦合Lyapunov方程(Coupled Lyapunov Equation， CLE)存在唯一半正定解：

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2-8) |

其中，此外，

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2-9) |

其中算子为：

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2-10) |

**引理2：**

**引理3(**Newton-Kantorovich 定理\**)：**令是从Banach空间到另一个Banach空间的映射。令，在处的Fréchet导数存在并且可逆。定义：

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2-11) |

如果在内二阶Fréchet可微，并且，那么在存在零点，定义，有，那么始于的如下牛顿迭代：

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2-12) |

将二次收敛于的零点，且和牛顿迭代序列在空间内，此外在内有唯一解。

## 2.4 LQT问题给出

在该LQT跟踪控制问题中假设状态变量和模态变量可获得的，不考虑状态估计问题。期望设计LQT跟踪控制器，在尽量小的控制输入下，使得被控制系统（1-2-1）的输出跟踪被跟踪系统（1-2-5）生成的参考轨迹，即跟踪误差随时间趋于0。令噪声增益矩阵为0，定义，构造如下误差系统：

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2-15) |

其中，

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2-16) |

针对跟踪误差系统（1-2-6），令时刻系统状态为，系统控制输入为，系统模态为。考虑到可能不是行满秩的，因此引入了加权项对控制输入进行约束，其中。此外为了对不稳定的系统进行跟踪，引入衰减因子以保证性能指标控制输入能量的有限和问题的可解，提出如下二次型性能指标：

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2-17) |

其中，且

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2-18) |

由于引入了衰减因子，跟踪误差难以保证一定随时间趋于0，但是我们可以构造如下衰减误差系统，考察衰减跟踪误差的收敛性，定义衰减增广状态为，衰减控制输入为，衰减跟踪误差为，有衰减误差系统为：

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2-18) |

定义，性能指标(1-2-10)可以改写为等价的形式：

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2-19) |

我们分析在设计的控制器下衰减误差系统(1-2-11)的稳定性以及性能指标的实现。

## 2.5 跟踪控制问题给出

我们试图设计跟踪控制器使得系统（1-2-1）的输出跟踪系统（1-2-5）的输出轨迹。考虑对不稳定的被跟踪系统（1-2-5）设计控制器进行无限时域的跟踪，要求在最坏的噪声下，使用尽量小的控制输入，使得跟踪误差随时间趋于0，定义，，，构造如下误差系统：

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2-20) |

其中，

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2-21) |

针对跟踪误差系统（1-2-6），提出性能指标如下：

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2-22) |

其中，且

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2-23) |

同样由于引入了衰减因子，跟踪误差难以保证一定随时间趋于0，定义衰减增广状态为，衰减控制输入为，衰减过程噪声为，衰减跟踪误差为，有衰减误差系统为：

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2-24) |

定义，性能指标(1-2-10)可以改写为等价的形式：

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2-25) |

期望的增益从(1-2-8)变为：

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2-26) |

我们分析在设计的控制器下衰减误差系统(1-2-11)的稳定性以及性能指标的实现。

在前述控制器下，针对误差系统，考虑具有如下结构的离散马尔可夫跳变滤波器：

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2-27) |

其中，为估计的误差系统状态，为估计的误差系统量测输出，定义状态估计误差为，量测新息为，为需要被确定的对应量测新息的滤波器增益，可构造估计误差系统为：

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2-28) |

对于估计误差系统，在控制器以及滤波器共同作用下，可以得到闭环系统（1-2-14）以及(1-2-15)。我们期望找到一个滤波器增益满足增益，提出如下性能指标：

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2-29) |

其中，且

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2-30) |

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2-25) |



## 2.5 总结

# 第三章 LQT问题求解

## 3.1 引言

基于传感器量测信息的融合估计可以实时提供信息物理系统运行状况，是信

息物理系统研究中的一个关键问题。近年来的信息安全事件表明，CPSs 面临的网络攻击手段在不断更新，攻击者可以发动隐蔽且目的性强的攻击策略，对估计系统产生不可估量的严重后果[40]。传统的网络安全技术，一方面，如通过信息加密以及相关的密钥分配与管理技术，在抵御窃听和数据篡改的同时，也提高了系统中传感器节点的性能要求；另一方面，采用流量分析、入侵检测等网络技术尽管可以察觉网络中的异常行为，但是无法校正被篡改的控制指令或量测信息。因此，需要充分了解CPSs 模式和现有网络攻击策略，制定适用于CPSs 自身特点的安全状态融合估计方法，以降低网络攻击对系统估计性能的影响。

本章针对非线性CPSs 的安全融合估计问题，首先，分析与论述了现有CPSs中存在的网络安全估计问题；其次，简单介绍了系统估计中两个重要的滤波框架，包括卡尔曼滤波框架、最小二乘滤波框架；最后，总结了现有基于卡尔曼滤波的多传感器融合估计方法，分析了线性化误差对分布式融合估计的影响，为后续研究提供基础。

## 3.2 耦合代数Riccati方程

### 3.2.1 耦合代数Riccti方程推导

针对性能指标（1-18），考虑其在时刻，系统模态，状态为时，选择控制律使得性能指标尽可能的小，机求解下列极小化问题：

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3-1) |

将极小化问题写为递推的形式，得到Bellman方程为：

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3-2) |

由文献。。。知，可写为关于的二次型函数，即，其中，定义。则结合系统状态空间方程（1-14）并考虑的二次型形式，得，

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3-3) |

其中

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3-4) |

将(12)代入(11)中，可以得到如下无约束优化问题：

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3-5) |

其中，

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3-6) |

则控制器的求解问题（2-1-1）转化为一个关于和的无约束优化问题（2-1-4），我们令对偏导数为0求解使得最小的，即

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3-7) |

此处要求可逆才能计算，其中要使得逆矩阵存在，可以证明充要条件是，这显然成立。此外，考虑对的二阶偏导数有：

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3-8) |

因此（2-1-8）求得的为（2-1-4）的极小值，定义，有，代入（2-1-4）中，得

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3-9) |

由（2-1-10）中得时刻递推的耦合黎卡提方程，利用相同的推导可以得到对应各个时刻的CARE，考虑解矩阵是定常矩阵，则可以得到最优控制问题（4）对应的耦合代数黎卡提方程(Coupled Algebraic Riccati Equation，CARE)的控制器形式：

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3-9) |

将代入中，可以得到CARE的解矩阵形式：

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3-9) |

### 3.2.2 耦合代数Riccti方程解的存在性与稳定性

能镇定；

可检测；

此时，GARE（2-1-14）存在唯一的半正定解。

我们分析衰减误差系统在控制器下的稳定性，即考察在反馈控制器下系统（1-2-11）是否闭环稳定，此时闭环系统为：

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3-9) |

因为，所以收敛等价于收敛。考虑Lyapunov稳定性判据，将满足CARE(2-1-11)的作为Lyapunov函数中的二次型矩阵有：

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3-9) |

由于，所以在系统（2-1-16）该反馈控制器（20）下是闭环稳定的。

## 3.3 已知TP下耦合代数Riccati方程求解

给定的镇定控制器与，，，是下面这组耦合Lyapunov方程的唯一半正定解

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3-9) |

其中，且，其中。那么选择与保证系统稳定的，即使得，，对应的闭环算子谱半径小于1。则有以下定理成立：

，l=0，1，2…;

;

1) 选取一个满足条件的（镇定的），定义，则可以求解（4）得到正定的，而后代入得到。同样定义，则是稳定的可以保证也是稳定的，因此求解（4）可以得到正定的。即选择合适的就可以得到和镇定的，下面证明这一点。

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3-9) |

由，考虑k=0得，

 （1-5）

移项，得

 （1-6）

将（1-6）代入（1-4），得到

 （1-7）

移项，左右两侧同乘以，得到

 （1-8）

由公式（4），考虑k=0时，取反馈控制律为，代入公式（9），得

 （10）

（10）式中和为正定阵，则由Lyapunov稳定性原理，一定是一个离散意义上的稳定矩阵。因此可以解出正定阵，考虑有：



考虑Lyapunov稳定性原理，是正定阵，是稳定的，则是正定的，得。

同理，利用上述证明可以发现最优控制率对应的ARE解有。

对于，重复上述论证，则是一个单调递减的有界序列，1）证毕。

2)由1）的结果，是一个以为下界的单调递减的有界序列，因此i趋向于无穷时，收敛于，2）证毕。

## 3.4 未知TP下耦合代数Riccati方程求解

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3-9) |

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3-9) |

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3-9) |

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3-9) |

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3-9) |

## 3.5 总结

本章首先总结了信息物理系统中存在的网络安全问题，针对FDI 攻击，分析了该攻击的攻击策略、攻击方式和可能导致的严重后果。由此引出本文主要研究的两类问题，即信息物理系统传感器遭受攻击和执行器遭受攻击下的安全状态融合估计问题。其次，介绍了两个重要的滤波估计框架，包括高斯近似滤波框架和最小二乘滤波框架。最后，考虑信息物理系统在现实应用中的分布性与非线性，分析了非线性对分布式融合估计方法的影响，为后续研究提供思路指引。

# 第四章 跟踪控制问题求解

## 4.1 引言

基于传感器量测信息的融合估计可以实时提供信息物理系统运行状况，是信

息物理系统研究中的一个关键问题。近年来的信息安全事件表明，CPSs 面临的网络攻击手段在不断更新，攻击者可以发动隐蔽且目的性强的攻击策略，对估计系统产生不可估量的严重后果[40]。传统的网络安全技术，一方面，如通过信息加密以及相关的密钥分配与管理技术，在抵御窃听和数据篡改的同时，也提高了系统中传感器节点的性能要求；另一方面，采用流量分析、入侵检测等网络技术尽管可以察觉网络中的异常行为，但是无法校正被篡改的控制指令或量测信息。因此，需要充分了解CPSs 模式和现有网络攻击策略，制定适用于CPSs 自身特点的安全状态融合估计方法，以降低网络攻击对系统估计性能的影响。

本章针对非线性CPSs 的安全融合估计问题，首先，分析与论述了现有CPSs中存在的网络安全估计问题；其次，简单介绍了系统估计中两个重要的滤波框架，包括卡尔曼滤波框架、最小二乘滤波框架；最后，总结了现有基于卡尔曼滤波的多传感器融合估计方法，分析了线性化误差对分布式融合估计的影响，为后续研究提供基础。

控制问题与滤波问题的求解，得到各自对应的Riccati方程以及控制器与滤波器。基于系统模型，将增益性能的实现转化为极小极大问题的求解，利用动态规划将极小极大问题变为Bellman方程，代入系统状态空间方程得到Hamilton函数，考察Hamilton函数的一阶偏导得到当前时刻下最优控制输入与最差噪声干扰的值，通过二阶偏导保证极大极小点，代入Hamilton函数并考虑系统参数方程是定常的，将递推方程化为代数方程，化简得到控制问题与滤波问题的GCARE；

讨论控制问题与滤波问题对应GCARE解的存在性，在给定衰减因子以及期望的增益下，结合被控系统与被跟踪系统，从跟踪误差系统的能镇定性与可探测性出发，讨论GCARE解的存在性，给出解存在的条件；

讨论H\_∞跟踪控制问题与H\_∞滤波问题对应GCARE解的稳定性，基于跟踪误差系统，在给定衰减因子以及期望的l\_2增益下，利用MJS的Lyapunov稳定性定理，讨论在GCARE解对应控制器(滤波器)下闭环系统(估计误差系统)的稳定性，给出稳定性证明，理论上证明H\_∞跟踪设计的可行性；

设计在给定衰减因子以及期望的增益下TP已知以及未知时控制问题与滤波问题对应GCARE的求解算法，在TP已知时设计Kleinman 迭代算法，利用Newton-Kantorovich 定理证明在给定镇定控制器下Kleinman 迭代算法的收敛性，并给出收敛条件与收敛速度。在TP未知时设计TD(λ)算法,利用模态序列进行控制器求解，给出收敛条件、收敛速度，并对两种算法进行模拟仿真验证；

## 4.2 跟踪控制博弈耦合代数Riccati方程

### 4.2.1 博弈耦合代数Riccti方程推导

针对性能指标（1-18），考虑其在时刻，系统模态，状态为时，选择控制律使得性能指标尽可能的小，同时由于系统过程噪声不受控制，时刻变化且影响系统状态，我们考虑一组使得性能指标尽可能的大的过程噪声进行控制器设计，在这种情况下设计的控制器可以称为控制器。

动态规划值函数：

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4-1) |

将动态规划值函数(4)写为递推的形式，得到Bellman方程

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4-2) |

考虑是二次型函数，即，，定义。则结合系统状态空间方程（1-14）并考虑的二次型形式，定义，得，

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4-3) |

其中

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4-4) |

将(12)代入(11)中，可以得到如下无约束优化问题：

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4-5) |

其中，

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4-6) |

此外，

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4-7) |

则控制器、的求解问题（2-1-1）转化为一个关于和的无约束优化问题（2-1-4），我们尝试求解使得最小的和令最大的。令对偏导数为0，即

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4-8) |

令对偏导数为0，即

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4-9) |

联立（2-1-5）与（2-1-6），得

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4-9) |

那么此处要求和可逆才能计算控制律。解得：

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4-9) |

其中要使得逆矩阵存在，可以证明充要条件是和。此外，考虑对和的二阶偏导数有

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4-9) |

因此（2-1-8）求得的和分别为（2-1-4）的极小值和极大值，将（2-1-8）以反馈控制器的形式即，与，定义，有，代入（2-1-4）中，得

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4-9) |

由（2-1-10）中得时刻递推的耦合黎卡提方程，利用相同的推导可以得到对应各个时刻的CARE，考虑解矩阵是定常矩阵，则可以得到最优控制问题（4）对应的博弈耦合代数黎卡提方程(Game coupled Algebraic Riccati equation, GCARE)的控制器形式：



GCARE的等价形式——解矩阵形式

将（2-1-8）代入（2-1-11）中展开，我们可以得到（2-1-11）的另一种等价形式。这里先考察，便于后续推导。将（4-9）的定常形式化为增广矩阵，即



由于和，则可得



将（2-1-11）中有关控制律、的部分写为的增广形式并代入（2-1-13），得该问题的GCARE的解矩阵形式：



### 4.2.2 博弈耦合代数Riccti方程解的存在性与稳定性

本实验所用主要实验仪器与设备见表3-2。

能镇定；

可检测；



此时，GARE（2-1-14）存在唯一的半正定解。

由于引入了衰减因子，跟踪误差难以保证收敛，我们转而分析的收敛性，即考察在反馈控制器下系统（1-2-11）是否闭环稳定，此时闭环系统为



因为，所以时，收敛等价于收敛。考虑Lyapunov稳定性判据，将满足GCARE(2-1-11)的作为Lyapunov函数中的二次型矩阵有，





由于，所以在系统（2-1-16）该反馈控制器（20）下是闭环稳定的。这其实给出了与(2-1-11)类似的另一种GCARE的控制器形式，

可以证明，如果GCARE有镇定解存在，那么在该镇定解对应的控制器下，系统满足预设的增益，即对于给定的，在零初始条件以及任意噪声序列下，满足，考虑控制器下的闭环系统为：



令时刻，系统模态为，将满足GCARE(2-1-11)的作为Lyapunov函数中的二次型矩阵，结合()得到时刻，为



代入(2-1-17)中得





其中，由于反馈控制器下系统（1-2-11）闭环稳定，即，且系统处于零初始条件下，则



则将()代入()得



系统满足能镇定，可检测，即存在镇定解，且再镇定解对应的控制器下，系统满足预设的增益。我们尝试证明：在反馈控制器下系统（1-2-11）是否闭环稳定。定义极小化问题为：



由。。。可知，上述极小化问题的解为：



其中，且



其中，



## 4.3 估计博弈耦合代数Riccati方程

针对性能指标（1-18），考虑其在时刻，系统模态，状态为时，选择控制律使得性能指标尽可能的小，同时由于系统过程噪声不受控制，时刻变化且影响系统状态，我们考虑一组使得性能指标尽可能的大的过程噪声进行控制器设计，在这种情况下设计的控制器可以称为控制器。动态规划值函数：

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4-1) |

定义

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4-6) |

以及

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4-6) |

部：

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4-6) |

将（2-1-11）中有关控制律、的部分写为的增广形式并代入（2-1-13），得该问题的GCARE的解矩阵形式：

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4-9) |

将（2-1-11）中有关控制律、的部分写为的增广形式并代入（2-1-13），得该问题的GCARE的解矩阵形式：

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4-6) |

能镇定；

可检测；



此时，GARE（2-1-14）存在唯一的半正定解。

这其实给出了与(2-1-11)类似的另一种GCARE的控制器形式，即：



可以证明，如果GCARE有镇定解存在，那么在该镇定解对应的控制器下，系统满足预设的增益，即对于给定的，在零初始条件以及任意噪声序列下，满足，考虑控制器下的闭环系统为：



令时刻，系统模态为，将满足GCARE(2-1-11)的作为Lyapunov函数中的二次型矩阵，结合()得到时刻，为



代入(2-1-17)中得



其中，由于反馈控制器下系统（1-2-11）闭环稳定，即，且系统处于零初始条件下，则



则将()代入()得



## 4.4 博弈耦合代数Riccati方程求解

### 4.4.1 已知TP下博弈耦合代数Riccti方程求解

给定的镇定控制器与，，，是下面这组耦合Lyapunov方程的唯一半正定解



其中，且，其中



那么选择与保证系统稳定的，即使得，，对应的闭环算子谱半径小于1。则有以下定理成立：

，l=0，1，2…;

;

将GCARE（2-1-14）定义为等价的非线性算子，其中为：



显然的零点就是GCARE（2-1-14）的解。我们尝试使用Newton-Kantorovich 定理求解，给定迭代初值，定义牛顿迭代序列为：



其中为在处的Fréchet导数。下面证明基于的牛顿迭代与Kleinman 迭代等价。对于这个讨论，关键在于考察在处的Fréchet导数，但是Fréchet导数通常难以计算，下面引入Gâteaux导数便于Fréchet导数的计算。对于在处的Gâteaux导数，有以下等式成立：



其中，为零点的某个邻域内的任意实数，为的高阶无穷小，则Gâteaux导数可直接通过下式表达：



关于Fréchet导数与Gâteaux导数的关系有：如果在的某个邻域内Gâteaux导数存在，且在处的Gâteaux导数连续，那么在处的Gâteaux导数等于在处的Fréchet导数，后续推导将Fréchet导数与Gâteaux导数都表示为。

由于，我们首先考察及其Gâteaux导数，对于增量有:



其中，



求与在时的值以及对的偏导数，有





以及对的偏导数为



代入（2-3-7-1）、（2-3-7-2）以及（2-3-7-3），使用（2-3-4-2）计算，



由（2-1-13）结合（2-3-8-1）以及（2-3-8-2）得



则将（2-3-9）中某些项用（2-3-9）代替，并代入（2-3-8-1）以及（2-3-8-2）得：



其中，以上讨论都是针对的，那么对于我们有以下结论:



分别将以及作为增量矩阵代入（2-3-10）的中，求其在处的导数，即



代入时（2-3-10）中的控制器形式，将（2-3-2）转化为形如（2-3-11）的形式，即：



由得



前述的牛顿迭代序列在可满足可逆的条件下等价于为对下式求解：



将（2-3-13）中的、以及（2-3-15）中的代入（2-3-16）中得：



我们可以发现进行牛顿迭代（2-3-17）与我们在给定镇定控制器与下使用Kleinman 迭代算法求解耦合Lyapunov方程（2-3-1-1）的形式是一样的，区别在于一个基于满足Newton-Kantorovich 定理的进行迭代，一个是基于镇定控制器与进行求解。

### 4.4.2 已知博弈耦合代数Riccti方程求解

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3-9) |

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3-9) |

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3-9) |

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3-9) |

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3-9) |

## 4.5 总结

本章首先总结了信息物理系统中存在的网络安全问题，针对FDI 攻击，分析了该攻击的攻击策略、攻击方式和可能导致的严重后果。由此引出本文主要研究的两类问题，即信息物理系统传感器遭受攻击和执行器遭受攻击下的安全状态融合估计问题。其次，介绍了两个重要的滤波估计框架，包括高斯近似滤波框架和最小二乘滤波框架。最后，考虑信息物理系统在现实应用中的分布性与非线性，分析了非线性对分布式融合估计方法的影响，为后续研究提供思路指引。

# 第五章 结论与展望

## 5.1 结论

通过在XXX下光催化还原XXX并将之转化成XXX、XXX等是一个具有广阔应用前景的技术。本文制备并表征了一系列XXX催化剂，研究了XXX条件下XXX催化还原XXX反应，系统探讨了XXX、XXX以及XXX效应对XXX的增强机理与XXX途径，得出以下结论：

……

本工作的主要创新点在于……

## 5.2 展望

（1）通过对催化过程微界面的直接观察，如，利用XXX测定反应过程中催化剂的XXX及XXX，以更深入地理解发生于XXX表面及界面的光催化还原XXX反应的XXX、XXX与XXX的本质机理，有助于高效可见光催化剂的设计与发展，可为光催化还原CO2理论模型的进一步完善提供更好的支持。

（2）利用XXX测定XXX反应过程中的XXX产物，研究不同反应条件下的反应途径，探明影响XXX还原反应途径的因素，为高选择性地获取XXX提供理论与实验依据。

# 参考文献

1. 翟海峰. 混杂系统分析与控制设计研究[D]. 浙江大学,2002.
2. 孙振东, 郑大钟. 关于切换系统的一个例子[C]//中国自动化学会控制理论专业委员会.1998年中国控制会议论文集.国防大学出版社,1998:4.
3. Mariton M. On controlability of linear systems with stochastic jump parameters[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1986, 31(7): 680-683.
4. Ji Y, Chizeck H J. Controllability, observability and discrete-time Markovian jump linear quadratic control[J]. International Journal of Control, 1988, 48(2): 481-498.
5. Ji Y, Chizeck H J. Controllability, stabilizability, and continuous-time Markovian jump linear quadratic control[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1990, 35(7): 777-788.
6. Feng X, Loparo K A, Ji Y, et al. Stochastic stability properties of jump linear systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1992, 37(1): 38-53.
7. Fang Y, Loparo K A. Stochastic stability of jump linear systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2002, 47(7): 1204-1208.
8. Hou Z, Luo J, Shi P, et al. Stochastic stability of Ito differential equations with semi-Markovian jump parameters[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2006, 51(8): 1383-1387.
9. Hou T, Ma H. Exponential stability for discrete-time infinite Markov jump systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2015, 61(12): 4241-4246.
10. Wu X, Shi P, Tang Y, et al. Stability analysis of semi-Markov jump stochastic nonlinear systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2021, 67(4): 2084-2091.
11. Fang Y, Loparo K A. Stabilization of continuous-time jump linear systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2002, 47(10): 1590-1603.
12. Xiao N, Xie L, Fu M. Stabilization of Markov jump linear systems using quantized state feedback[J]. Automatica, 2010, 46(10):1696-1702.
13. Sworder D. Feedback control of a class of linear systems with jump parameters[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1969, 14(1): 9-14.
14. Blair W P, Sworder D. Feedback control of a class of linear discrete systems with jump parameters and quadratic cost criteria[J]. International Journal of Control, 1975, 21(5): 833-841.
15. Sworder D, Rogers R. An LQ-solution to a control problem associated with a solar thermal central receiver[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1983, 28(10): 971-978.
16. Abou-Kandil H, Freiling G, Jank G. On the solution of discrete-time Markovian jump linear quadratic control problems[J]. Automatica, 1995, 31(5): 765-768.
17. Chizeck H J, Ji Y. Optimal quadratic control of jump linear systems with Gaussian noise in discrete-time[C]//27th IEEE Conference on Decision and Control, 1988, 1989-1993.
18. Ji Y, Chizeck H J. Jump linear quadratic Gaussian control in continuous time[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1992, 37 (12): 1884–1892.
19. Costa O L V, Tuesta E F. Finite horizon quadratic optimal control and a separation principle for Markovian jump linear systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2003, 48(10): 1836-1842.
20. Costa O L V. Linear minimum mean square error estimation for discrete-time Markovian jump linear systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1994, 39(8): 1685-1689.
21. Costa O L V, Guerra S. Stationary filter for linear minimum mean square error estimator of discrete-time Markovian jump systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2002, 47(8): 1351-1356.
22. Costa O L V, Benites G R A M. Linear minimum mean square filter for discrete-time linear systems with Markov jumps and multiplicative noises[J]. Automatica, 2011, 47(3): 466-476.
23. Costa E F, Saporta B. Linear minimum mean square filters for Markov jump linear systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2017, 62(7): 3567-3572.
24. Sun Q, Lim C C, Shi P, et al. Design and stability of moving horizon estimator for Markov jump linear systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2019, 64(3): 1109-1124.
25. Balenzuela M P, Wills A G, Renton C, et al. Parameter estimation for jump Markov linear systems[J]. Automatica, 2022, 135: 109949.
26. Balenzuela M P, Wills A G, Renton C, et al. A new smoothing algorithm for jump Markov linear systems[J]. Automatica, 2022, 140: 110218.
27. Shen Y, Wu Z G, Shi P, et al. Model reduction of Markovian jump systems with uncertain probabilities[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2019, 65(1): 382-388.
28. Shen Y, Wu Z G, Meng D. Nonsynchronous model reduction for uncertain 2-D Markov jump systems[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2021, 52(10): 10177-10186.
29. Costa O L V, Fragoso M D, Marques R P. Discrete-time Markov jump linear systems[M]. Springer Science & Business Media, 2005.
30. Costa O L, Fragoso M D, Todorov M G. Continuous-time Markov jump linear systems[M]. Springer Science & Business Media, 2012.
31. Zhou H, Kong H, Wei L, et al. Efficient road detection and tracking for unmanned aerial vehicle[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2014, 16(1): 297-309.
32. Joshi S K, Baumgartner S V, Krieger G. Tracking and track management of extended targets in range-Doppler using range-compressed airborne radar data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2021, 60: 1-20.
33. Wang Y, Tang C, Wang S, et al. Target tracking control of a biomimetic underwater vehicle through deep reinforcement learning[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2021, 33(8): 3741-3752.
34. 褚健.鲁棒控制理论及应用[M].浙江大学出版社,2000.
35. Zames G. Feedback and optimal sensitivity: Model reference transformations,multiplicative seminorms, and approximate inverses[J]. IEEE Transactions on Automatic Control,1981, 26(2): 301-320.
36. Stoorvogel A A. The control problem: a state space approach. Prentice-Hall, New York, 1992.
37. 谢克明.现代控制理论[M].清华大学出版社, 2007.
38. Simon D. Optimal state estimation: Kalman, , and nonlinear approaches[M]. John Wiley & Sons, 2006.
39. Hou Z S, Wang Z. From model-based control to data-driven control: Survey, classification and perspective[J]. Information Sciences, 2013, 235: 3-35.
40. Costa O L V, Paulo W L. Indefinite quadratic with linear costs optimal control of Markov jump with multiplicative noise systems[J]. Automatica, 2007, 43(4): 587-597.
41. Matei I, Martins N C, Baras J S. Optimal linear quadratic regulator for Markovian jump linear systems, in the presence of one time-step delayed mode observations[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2008, 41(2): 8056-8061.
42. Zhang L, Boukas E K, Lam J. Analysis and synthesis of Markov jump linear systems with time-varying delays and partially known transition probabilities[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2008, 53(10): 2458-2464.
43. Zabala Y A, Costa O L V. A detector-based approach for the constrained quadratic control of discrete-time Markovian jump linear systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2019, 65(3): 1211-1217.
44. Tzortzis I, Charalambous C D, Hadjicostis C N. Jump LQR systems with unknown transition probabilities[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2020, 66(6): 2693-2708.
45. Souza C E, Fragoso M D. control for linear systems with Markovian jump parameters[J]. Control Theory and Adovanced Thchnology, 1993, 9(2): 457-466.
46. Fragoso M D, Val J B R, Pinto D L. Jump linear control: the discrete-time case[J]. Control Theory and Advanced Technology, 1995, 10: 1459-1474.
47. Costa O L V, Val J B R. Full information -control for discrete-time infinite Markov jump parameter systems[J]. Journal of Mathematical Analysis and Applications, 1996, 202(2): 578-603.
48. Shi P, Boukas E K. -control for Markovian jump linear systems with parametric uncertainty[J]. Journal of optimization theory and applications, 1997, 95: 75-99.
49. Costa O L V, Marques R P. Mixed /-control of discrete-time Markovian jump linear systems[J].IEEE Transactions on Automatic Control, 1998, 43(1): 95-100.
50. Huang Y L, Zhang W H, Feng G. Infinite horizon / control for stochastic systems with Markovian jumps[J].Automatica, 2008, 44: 857-863.
51. Luan X L, Zhao S Y, Liu. control for discrete-time Markov jump systems with uncertain transition probabilities[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2013, 58(6): 1566-1572.
52. Wu Z G, Shen Y, Shi P, et al. control for 2-D Markov jump systems in Roesser model[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2018, 64(1): 427-432.
53. Fang H Y, Zhang M G, He S P, et al. Solving the zero-sum control problem for tidal turbine system: An online reinforcement learning approach[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2023,53(12): 7635-7647.
54. Boukas E K. On reference model tracking for Markov jump systems[J]. International Journal of Systems Science, 2009, 40(4): 393-401.
55. Fu Y M, Li C J. Parametric method for spacecraft trajectory tracking control problem with stochastic thruster fault[J]. IET Control Theory & Applications, 2016, 10(17): 2331-2338.
56. Wang Z, Yuan Y, Yang H. Adaptive fuzzy tracking control for strict-feedback Markov juming nonlinear systems with actuator failures and unmodeled dynamics[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2020, 50(1): 126-139.
57. Tian G. Tracking control of discrete-time Markovian jump systems[J]. International Journal of Systems Science, 2020, 51(15): 3070-3080.
58. Souza C E, Fragoso M D. filtering for Markovian jump linear systems[J]. 35th IEEE Conference on Decision and Control, 1996, 4: 4814–4818.
59. Souza C E, Fragoso M D. filtering for discrete-time linear systems with Markovian jumping parameters[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2003, 13(14): 1299-1316.
60. Souza C E, Fragoso M D. Robust filtering for uncertain Markovian jump linear systems[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2002, 12(5): 435-446.
61. Souza C E, A mode-independent filter design for discrete-time Markovian jump linear systems[C]//42nd IEEE Conference on Decision and Control, 2003, 3: 2811-2816.
62. Souza C E, Trofino A, Barbosa K A. Mode-independent filters for hybrid Markov linear systems[C]//43rd IEEE Conference on Decision and Control, 2004, 1: 947-952.
63. Souza C E , Trofino A , Barbosa K A. Mode-independent filters for Markovian jump linear systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2006, 51: 1837-1841.
64. Liu H, Ho D W C, Sun F. Design of filter for Markov juming linear systems with non-accessible mode information[J]. Automatica, 2008, 44(10): 2655-2660.
65. Xu S, Chen T, Lam J. Robust filtering for uncertain Markovian jump systems with mode-dependent time delays[J]. IEEE Transactions on Automatic control, 2003, 48(5): 900-907.
66. Wu L, Shi P, Gao H, et al. filtering for 2D Markovian jump systems[J]. Automatica, 2008, 44(7): 1849-1858.
67. Zhang L, Boukas E K. Mode-dependent filtering for discrete-time Markovian jump linear systems with partly unknown transition probabilities[J]. Automatica, 2009, 45(6): 1462-1467.
68. Li X, Lam J, Gao H, et al. and filtering for linear systems with uncertain Markov transitions[J]. Automatica, 2016, 67: 252-266.
69. Oliveira A M, Costa O L V. -filtering for Markov jump linear systems with partial information on the jump parameter[J]. IFAC Journal of Systems and Control, 2017, 1: 13-23.
70. Oliveira A M, Costa O L V. Mixed / filtering for Markov jump linear systems[J]. International Journal of Systems Science, 2018, 49(15): 3023-3036.
71. Carvalho L P, Oliveira A M, Costa O L V. Robust fault detection filter for Markovian jump linear systems with partial information on the jump parameter[J]. IFAC-PapersOnLine, 2018, 51:202-207.
72. Costa O L V, Aya J C C. Monte Carlo TD (λ)-methods for the optimal control of discrete-time Markovian jump linear systems[J]. Automatica, 2002, 38(2): 217-225.
73. Beirigo R L, Todorov M G, Barreto A M S. Online TD (λ) for discrete-time Markov jump linear systems[C]//2018 IEEE Conference on Decision and Control (CDC). IEEE, 2018: 2229-2234.
74. Chen Y, Wen J, Luan X, et al. Robust control for Markov jump linear systems with unknown transition probabilities–an online temporal differences approach[J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2020, 42(15): 3043-3051.
75. Chen Y, Wen J, Luan X, et al. optimal control for semi-Markov jump linear systems via TP-free temporal difference (λ) learning[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2021, 31(14): 6905-6916.
76. Kiumarsi B, Lewis F L, Modares H, et al. Reinforcement Q-learning for optimal tracking control of linear discrete-time systems with unknown dynamics[J]. Automatica, 2014, 50(4): 1167-1175.
77. Kiumarsi B, Lewis F L, Jiang Z P. control of linear discrete-time systems: Off-policy reinforcement learning[J]. Automatica, 2017, 78: 144-152.
78. Zhang K, Zhang H, Cai Y, et al. Parallel optimal tracking control schemes for mode-dependent control of coupled Markov jump systems via integral RL method[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2019, 17(3): 1332-1342.
79. Wang J, Wu J, Cao J, et al. Nonfragile output feedback tracking control for Markov jump fuzzy systems based on integral reinforcement learning scheme[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2022, 53: 4521-4530.
80. Cheney E W. Analysis for applied mathematics[M]. New York: Springer, 2001.

# 致 谢

此论文完成之际,首先要衷心感谢悉心教导和关怀我的导师XXX教授。在攻读XX学位期间,导师对我论文的研究方案、实验思路和实验结果的分析提供了许多直接、深入、有益的指导、建议和帮助,让我能顺利完成学业。

感谢XXX、XXX在此课题上取得的成果为我的研究做了准备。

感谢XXX、XXX等对我实验过程的帮助。

感谢XXXX大学XXX教授、XXXX大学XXX教授及XXXX分析测试中心对催化剂测试的帮助。

感谢国家自然科学基金委（项目编号XXXXXXXX）对本研究的资助。

# 作者简介

## 1 作者简历

××××年××月出生于××××。

××××年××月——××××年××月,××大学××院（系）××专业学习,获得××学硕士学位。

××××年××月——××××年××月,××大学××院（系）××专业学习,攻读××学博士学位。

## 2 攻读博士/硕士学位期间发表的学术论文

(时间均为倒序)

[1] Jia M M, Yi N N, Bing O, Ding P Q, Wu R. Photocatalytic reduction of CO2 in aqueous solution on TiO2. Energ. Fuel., 2016, accepted. （SCI源,IF = X.XX）

[2] Jia M M, Yi N N, Bing O, Ding P Q. Article Title. Journal Title, 2015, 118(1/2): 389–398. （SCI, IF= X.XX）

[3] 贾某某, 易某某, 邴某某, 等. 碘掺杂磁性TiO2光催化降解有机物. 化工学报, 2014, xx(x): xx–xx. （EI：2014XXXXXXXXX）

## 3 参与的科研项目及获奖情况

(时间均为倒序)

[1] 易某某, 贾某某. ××催化剂的制备及其性能研究, 国家自然科学基金项目. 编号: ××××.,2016

[2] 易某某, 贾某某. ××生物/催化强化机制. ××省科学技术一等奖, 2014.

## 4 发明专利

(时间均为倒序)

[1] 贾某某. 一种磁分离催化剂制备方案. 中国, 2013 1 0513271.2 [P]. 2015-04-26.

# 学位论文数据集

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 密 级\* | | 中图分类号\* | | UDC\* | 论文资助 | |
|  | |  | |  |  | |
| 学位授予单位名称\* | | 学位授予单位代码\* | | 学位类型\* | 学位级别\* | |
| 浙江工业大学 | | 10337 | |  |  | |
| 论文题名\* |  | | | | | |
| 关键词\* |  | | | | | 论文语种\* |
| 并列题名 |  | | | | |  |
| 作者姓名\* | |  | | 学 号\* |  | |
| 培养单位名称\* | | 培养单位代码\* | | 培养单位地址\* | 邮政编码\* | |
| 浙江工业大学环境学院 | | 10337 | | 杭州市潮王路18号 | 310032 | |
| 学科专业\* | | 研究方向\* | | 学 制\* | 学位授予年\* | |
|  | |  | |  |  | |
| 论文提交日期\* | | 与封面日期一致 | | | | |
| 导师姓名\* | |  | | 职 称\* |  | |
| 评阅人 | | 答辩委员会主席\* | | 答辩委员会成员 | | |
|  | |  | |  | | |
| 电子版论文提交格式：文本（ ）图像（ ）视频（ ）音频（ ）多媒体（ ）其他（ ） | | | | | | |
| 电子版论文出版（发布）者 | | | 电子版论文出版（发布）地 | | 版权声明 | |
|  | | |  | |  | |
| 论文总页数\* | |  | | | | |
| 注：共33项,其中带\*为必填数据,为25项。 | | | | | | |

**附件2：学位论文书脊示例**

|  |
| --- |
| **专**  **业**  **姓**  **文字方向竖向，四号黑体，加粗，行距为单倍行距，居中。**  **名**  **浙**  **江**  **工**  **业**  **大**  **学**  **博**  **士**  **/**  **硕**  **士**  **学**  **位**  **论**  **文**  **2020春** |

**上边距3cm**

**下边距3cm**