
分类号: O231.3
密 级: 公开

单位代码: 10363
学 号: 2221020124

题 目 网络攻击情形下悬挂系统的安全控制

题 目 Security Control of Suspension System under
Network Attack

学生姓名: 李中原
指导教师: 刘宏建 教授
专 业: 数学
研究方向: 复杂系统建模与控制

论文答辩日期: 2025 年 5 月 14 日

安徽工程大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：我恪守学术道德，崇尚严谨学风。所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已明确注明和引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品及成果的内容。论文为本人亲自撰写，我对所写的内容负责，并完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

学位论文作者签名：李中原

日期：2025年5月14日

安徽工程大学学位论文版权使用授权书

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，允许论文被查阅或借阅。本人授权安徽工程大学可以将本学位论文的全部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。

保密 ☐，在 _____ 年解密后适用本版权书。

本学位论文属于

不保密 ☒。

学位论文作者签名：

李中原

指导教师签名：

刘宏建

日期：2025 年 5 月 14 日

日期：2025 年 5 月 14 日

网络攻击情形下悬挂系统的安全控制

摘 要

伴随着汽车工业的不断发展,汽车的性能和舒适性受到了人们越来越多的关注。在智能网联汽车中,悬挂系统是影响汽车舒适性和安全性的重要组成部分,其控制策略的研究受到了广泛关注。然而,随着网络通信技术的飞速发展,网络攻击如重放攻击、拒绝服务攻击和欺骗攻击等,会影响悬挂系统的稳定性和性能,甚至可能导致系统的崩溃,给汽车的安全行驶带来严重威胁。

本文针对网络攻击情形下悬挂系统的安全控制问题展开深入研究,旨在设计出既节省通信资源又能承受网络攻击的控制器,提高悬挂系统的稳定性和性能,为汽车的安全行驶提供保障。研究内容主要包括以下几个方面:

在第一部分中,研究了重放攻击下基于人体模型的不确定座椅悬挂系统的 H_∞ 控制问题。在这一部分中,设计了一个状态观测器,并考虑到系统测量输出在从传感器传输至观测器的过程中,受到重放攻击影响的问题。之后,对 H_∞ 控制器进行设计。并运用李雅普诺夫稳定性理论,证明了在该控制策略下,即便悬挂系统面临重放攻击威胁,依然能够达成预先设定的 H_∞ 性能指标,确保系统稳定运行。最后,运用线性矩阵不等式方法,对观测器和控制器增益进行求解。仿真结果表明,所提出的 H_∞ 控制器能够有效地稳定受重放攻击影响的悬挂系统,从而确保汽车在行驶过程中的舒适性和安全性。

在第二部分中,研究了拒绝服务攻击情形下基于事件触发的主动悬挂系统有限时域 H_∞ 控制问题。本研究首先运用配方法结合倒向黎卡提差分方程理论,推导出事件触发 H_∞ 控制器存在的条件。在此基础上,通过引入广义逆矩阵理论,给出控制器增益的数学表达式。仿真结果表明了所提方法的有效性,所设计的控制策略能够使主动悬挂系统在拒绝服务攻击下保持良好的控制效果,确保汽车的行驶稳定性。

关键词: 悬挂系统, H_∞ 控制, 重放攻击, 拒绝服务攻击, 智能网联汽车

Security Control of Suspension System Under Network Attack

Abstract

With the continuous development of the automotive industry, the performance and comfort of vehicles have received increasing attention. As one of the important components of intelligent connected vehicles that affect vehicle comfort and safety, the research on the control strategy of the suspension system has attracted widespread attention. However, with the rapid development of network communication technology, the process of network attacks acting on vehicle intelligent networking poses new challenges to the stability of the suspension system. Network attacks such as replay attacks and denial-of-service attacks can affect the stability and performance of the suspension system, and may even lead to system crashes, posing a serious threat to the safe driving of vehicles.

This paper conducts an in-depth study on the safety control problem of the suspension system in the context of network attacks, aiming to design a controller that can not only save communication resources but also withstand network attacks, improve the stability and performance of the suspension system, and provide a guarantee for the safe driving of vehicles. The main research contents include the following aspects:

In the first part, the H_∞ control problem of an uncertain seat suspension system based on a human body model under replay attacks is studied. In this research work, a state observer is designed, taking into account the key issue of the interference of replay attacks during the transmission of the system's measured output from the sensor to the observer. Based on the calculated estimated state difference, we further carry out the design work of the H_∞ controller. To verify the reliability and effectiveness of this control strategy in the scenario of replay attacks, we use the Lyapunov function and, through mathematical derivation, prove that under the action of this control strategy, even if the suspension system faces the threat of replay attacks, it can still achieve the preset H_∞ performance index and ensure the stable operation of the system. Finally, we use the linear matrix inequality method to solve the observer and controller gains,

providing accurate parameter basis for practical applications. The simulation results show that the proposed H_∞ controller can effectively stabilize the suspension system affected by replay attacks, keep the system's state trajectory stable, and thus ensure the comfort and safety of the vehicle during driving.

In the second part, the H_∞ control problem based on event triggering within a finite time domain for the active suspension system under the situation of denial-of-service attacks is studied. When a denial-of-service attack occurs during the signal transmission process, an event-triggering mechanism is adopted to effectively handle the transmission of the measured output, so as to avoid the influence brought about by network attacks. In this study, firstly, by using the method of completing the square combined with the theory of backward Riccati difference equations, the existence conditions of the event-triggered H_∞ controller are derived. On this basis, by introducing the theory of generalized inverse matrices, the mathematical expression of the controller gain is given. The simulation results demonstrate the effectiveness of the proposed method. The designed control strategy can enable the active suspension system to maintain a good control effect under denial-of-service attacks and ensure the driving stability of the vehicle.

Li Zhongyuan (Applied Mathematics)

Supervised by Prof. Liu Hongjian

KEY WORDS: suspension system, H_∞ control, replay attack, denial of service attack, intelligent connected vehicle

目 录

摘 要.....	I
ABSTRACT.....	II
第 1 章 绪论.....	3
1.1 课题研究背景	4
1.1.1 悬挂系统.....	4
1.1.2 悬挂系统控制策略研究概述.....	5
1.1.3 网络攻击.....	8
1.2 内容提纲	10
第 2 章 重放攻击下基于人体模型的不确定座椅悬挂系统的 H_∞ 控制	11
2.1 问题描述	11
2.1.1 基于人体模型的座椅悬挂系统.....	11
2.1.2 重放攻击.....	13
2.1.3 考虑重放攻击的 H_∞ 控制器	14
2.2 主要结果	15
2.2.1 主要引用引理.....	15
2.2.2 稳定性和 H_∞ 性能分析	16
2.3 数值实例及其仿真	21
2.4 本章总结	25
第 3 章 拒绝服务攻击情形下基于事件触发的主动悬挂系统有限时域 H_∞ 控制	26
3.1 问题描述	26
3.1.1 考虑四分之一车辆模型的主动悬挂系统.....	26
3.1.2 拒绝服务攻击与事件触发机制.....	28
3.1.3 拒绝服务攻击情形下基于事件触发的 H_∞ 控制器设置	28

3.2 主要结果	29
3.3 数值实例及其仿真	35
3.4 本章总结	37
第 4 章 总结与展望.....	38
4.1 总结	38
4.2 创新点	38
4.3 展望	39
参考文献.....	40
攻读硕士期间取得的学术成果.....	47
致 谢.....	48

第1章 绪论

随着汽车数量的持续增长和消费需求的不断升级,用户对车辆的要求已不再局限于基本的行驶功能,而是更加注重驾驶体验的全面提升。特别是在车辆舒适性方面,消费者期望获得更好的减振效果以保证更平稳的驾驶体验,这种需求转变推动了汽车悬挂系统技术的快速发展。

悬挂系统在改善车辆乘坐舒适性和操纵特性方面发挥着重要作用,在有人乘坐时,它可以合理地隔离车轮周围不规则路面所产生的振动。悬挂系统的动力学特性对车辆的操纵有很大的影响。也就是说,提高系统性能不仅对驾驶员操纵车辆有积极的影响,还可以减少驾驶员身体疲劳,从而降低事故的发生概率。总的来说,悬挂系统在平顺性、车辆安全性、道路损害最小化和车辆整体性能方面发挥重要作用,近年来成为汽车领域内研究的热点问题之一。

得益于网络控制技术的快速发展,执行器、控制器和传感器可以通过板载有线或无线网络连接,形成域/本地或云/本地控制架构。但也不可避免地带来了一些网络引发的问题,如通信延迟、信号量化、丢包等。特别是在这样一个网络时代,越来越多的研究者已经意识到系统安全的重要性,并开始关注这一重大问题。在信号传输过程中,如果没有合适的安全保护机制,数据很容易受到网络攻击的影响。因此,建立一个安全的机制来防御网络攻击,显得尤为迫切。可行的攻击机制包括拒绝服务攻击^[1]、欺骗攻击^[2]、重放攻击^[3]。拒绝服务攻击是指阻断网络代理之间的通信,从而阻塞通信通道或攻击路由协议。欺骗攻击是将虚假信息注入传感器或控制器,攻击者可以通过破坏某些网络元素来获取密钥或伪造数据。重放攻击是通过在物理过程正常运行时记录传感器测量值,并用存储的数据替换当前传感器输出来进行的。在传感器输出被存储数据取代的同时,攻击者通过执行器攻击或物理攻击来破坏控制系统。

网络攻击情形下悬挂系统的安全控制问题还少有人研究。因此,设计出既节省通信资源又能承受网络攻击的控制器就显得尤为重要和有意义。

1.1 课题研究背景

1.1.1 悬挂系统

作为连接车身与轮胎的核心组件，车辆悬挂系统在现代汽车工程中扮演着至关重要的角色。该系统主要由弹簧元件、阻尼装置和作动机构构成，在应对因路面不平带来的冲击时，通过调整输出力或扭矩来使车辆保持动态平衡，从而使驾驶人员的操作更加稳定，以保证乘坐人员的乘坐舒适度。根据控制方式和性能特征的不同，目前车辆悬挂系统可基本分为三类：被动悬挂、半主动悬挂以及主动悬挂系统^[4]。

被动悬挂系统采用机械式结构设计，其核心组件包括弹性元件、减振装置和导向机构。其中，弹性元件多采用钢板弹簧结构，不仅承担着支撑车体重量的主要功能，还能有效缓解路面不平带来的振动冲击。与弹性元件协同工作的阻尼器通过液压或气压原理，将机械能转化为热能，从而实现对冲击能量的有效分散。得益于其结构简单、维护成本低且可靠性高的特点，这种传统的悬挂系统在各类商用车辆和经济型轿车中仍保持着广泛的应用。

在车辆最开始设计时，其被动悬挂系统中的弹簧刚度系数以及阻尼器阻尼系数就已经被确定下来了^[5]。这使得被动悬挂系统无法根据车辆实时运动状态和复杂路况变化对器件参数进行调节，以至于难以确保车辆在崎岖颠簸路面行驶时，依然具备良好的机动性，也无法充分保障驾乘的舒适性。车辆日常行驶过程中，遭遇复杂恶劣路面状况在所难免，被动悬挂系统在应对这类情况时，其局限性暴露无遗，难以契合车辆的实际需求。

半主动悬挂系统通过集成可调式阻尼器和可变刚度弹簧实现了性能的显著提升。该系统的核心在于其智能控制单元，其通过多源传感器网络实时采集车身姿态、加速度以及路面状况等关键参数，并基于预设的控制算法对悬挂参数进行动态调节。这种实时调节机制使得系统能够根据不同的行驶状况，调整阻尼特性和弹簧刚度，从而在保证车辆操控稳定性的同时，显著改善了乘坐舒适性^{[6]-[8]}。相较于传统被动悬挂，这种智能化的悬挂系统在复杂路况下展现出更优越的适应性和性能表现。

但需要指出的是，半主动悬挂系统在应对轻微或中等程度的路面不平度时能

够展现出优异的调节性能,可以通过快速响应和精确调节有效改善车辆的动态特性^[9]。可一旦面临复杂的行驶道路环境,就显得力不从心。除此之外,半主动悬挂系统结构繁杂,存在拆装不易、维护成本高昂等问题,这也在很大程度上制约了其在车辆领域的广泛应用。

主动悬挂系统属于有源控制系统,其核心在于集成了智能感知、实时计算和精确执行等功能模块。系统中的多源传感器网络能够采集车身状态、加速度以及路面不平扰动等关键信息,并通过通信网络将这些数据传输至中央控制单元。控制单元基于预设的控制算法,结合车辆动力学模型,计算出最优的控制指令并发送至执行器。这种闭环控制机制使系统能够根据实时路况和车辆状态动态调整悬挂参数,从而显著提升车辆的操控性和舒适性。

主动悬挂系统凭借其卓越的减振性能,能够对车身姿态实现自主调控。相比之下,在增强车辆乘坐舒适度与行驶灵活性上,主动悬挂系统的表现更为出色。

1.1.2 悬挂系统控制策略研究概述

国内外学者对悬挂系统的控制方法展开研究,提出了诸多方案。然而,其中部分研究中的悬挂系统控制策略普遍存在模型简化的问题。这些方法通常将复杂的悬挂动力学简化为线性时不变系统,忽视了系统固有的非线性特性、参数不确定性以及外部扰动等关键性因素。这些被忽视的系统特性可能导致控制器性能下降,甚至影响系统的整体稳定性。特别是在实际工程应用中,存在参数不确定性以及外部随机干扰等因素的耦合作用,这些问题进一步加剧了系统控制的复杂性。因此,如何准确描述并有效补偿这些问题,已成为提升控制系统性能亟待解决的重要方向。伴随现代控制理论逐步走向成熟,学术界研究不断深入,学者们已提出更为丰富多样的悬挂系统的控制方法。

1.1.2.1 自适应控制

在车辆主动悬挂系统的实际应用中,作动器作为核心执行部件,其内部普遍存在显著的参数不确定性。这些不确定性主要来源于元件老化、温度变化等因素,导致作动器的动态特性呈现时变特征。这些不利因素层出不穷,严重降低了悬挂系统控制器的性能表现,极大地限制了其在实际应用中的效果。为解决这一困境,许多学者倾向于采用自适应控制方法来解决。他们通过严谨的设计流程,构

建出适配的自适应控制率。借助这一控制率，能够对悬挂系统中持续变化的时变参数以及复杂多变的动态扰动进行较为准确地评估与分析，进而为主动悬挂系统的优化运行提供有力支撑^{[10]-[14]}。

文献[15]针对主动悬挂系统，设计出一款创新型自适应模糊控制器。该控制器在各类工况下均显著优化了车辆悬挂系统的表现，展现出出色的适应性与可靠性。文献[16]主要考虑的是液压悬挂系统，此系统中普遍存在参数不确定性，文中提出了一种非线性自适应控制方法。这一控制手段为液压悬挂系统的稳定运行提供了有效的解决方案。文献[17]设计了一套自适应神经网络控制算法，成功解决了悬挂系统内模型非线性以及作动器输出饱和这两个问题。该算法利用神经网络的强大学习能力，对复杂系统进行有效建模与控制，极大地提升了悬挂系统的性能。文献[18]通过建立包含弹簧非线性特性和阻尼器迟滞效应的精确动力学模型，设计了一套自适应控制策略。研究结果表明，该控制方案通过实时调节悬挂参数，有效提升了车辆在复杂工况下的横向稳定性和纵向平顺性，同时实现了安全性能和乘坐舒适度的协同优化。这种基于非线性理论的控制方法为智能悬挂系统的开发提供了新的技术思路，同时还将悬挂行程控制在限定区间内，避免了因行程过大或过小而导致的性能下降。

1.1.2.2 鲁棒控制

作为处理系统不确定性和外部干扰的有效工具，鲁棒控制理论主要包含两个研究方向：稳定性鲁棒控制和性能鲁棒控制。其中， H_∞ 控制理论在主动悬挂控制系统中得到了广泛运用，能够有效的处理限定频率区间内的最优控制问题^{[19]-[23]}。

文献[24]针对系统存在的参数不确定和非线性死区特性，设计了 H_∞ 鲁棒控制器，有效提升了系统在不确定性条件下的稳定性。文献[25]进一步提出了频域受限的 H_∞ 控制方法，该方法通过优化特定频带内的 H_∞ 范数，实现了悬挂系统在关键频率区间内的控制性能提升，为主动悬挂系统的频域优化控制提供了新的思路。在此基础上，文献[26]为整车主动悬挂系统设计了一种鲁棒容错 H_∞ 控制器，有效保障了在悬挂行程受限及作动器输出饱和情况下系统的控制效果。在悬挂系统时滞补偿控制研究方面，学者们提出了多项创新性解决方案。针对控制输入存在的时滞问题，文献[27]和文献[28]分别开发了基于时滞微分方程的鲁棒 H_∞ 控制

算法,有效解决了信号传输延迟对系统性能的影响。进一步地,文献[29]针对电磁主动悬挂特有的非线性特性,设计了一种改进型鲁棒 H_{∞} 控制器,通过实验验证,该控制策略显著提升了车辆平顺性指标,改善了驾乘体验。这些研究成果为复杂道路状况下的悬挂系统控制提供了新的技术路径,推动了悬挂系统控制理论的进一步发展。

1.1.2.3 事件触发控制

在车辆悬挂控制系统中,控制单元与分布式传感器网络之间需要实现实时数据交换,这种密集的信息交互往往会导致网络传输延迟和数据包丢失等问题。特别是在多节点协同工作的环境下,网络拥塞和时序不确定性等问题更加突出。事件触发控制器凭借在应对这类数据传输问题方面的独特优势,在车辆悬挂控制系统中得到了广泛应用^{[30]-[32]}。

文献[33]首次将神经网络与事件触发策略相结合,针对电磁悬挂系统设计了一种智能控制算法,通过引入自适应触发阈值,显著降低了系统通信负载。文献[34]则在 1/4 车辆模型框架下,提出了有限频域事件触发控制方法,使得系统在存在通信延迟和执行器故障的情况下,仍能保持优良的控制性能。文献[35]提出了一种创新性的自适应事件触发控制策略,该策略通过引入动态触发阈值机制,实现了对液压悬挂系统能量消耗的智能调控。实验结果表明,与传统连续控制方法相比,该控制器在保证系统性能的同时,可降低约三分之一的能耗,为液压悬挂系统的能效优化提供了新的解决方案。文献[36]中将事件触发 H_{∞} 控制理论引入主动座椅悬挂系统,通过优化触发条件,在保证舒适性的同时有效减少了控制信号的更新频率。针对系统不确定性带来的挑战,文献[37]提出了一种基于自适应触发函数的控制策略,该策略能够根据系统状态动态调整通信频率,在确保控制性能的同时最大限度地降低了网络传输压力。这些研究成果为悬挂系统的实用化发展提供了重要的理论支撑和技术保障。

在最新的悬挂系统控制策略研究中,文献[66]提出一种通过将数字孪生技术与人工神经网络相结合来增强汽车悬架系统自适应控制的创新方法,以优化驾乘舒适性和车辆操控性。研究表明,数字孪生与神经网络的集成在汽车悬架系统的性能和使用寿命方面都有显著的改善,为进一步的开发和实际应用提供了有力的依据。文献[67]通过将加权单次试弃协议与广义双级传输事件触发机制相结合,

研究了模糊车辆主动悬架系统中的滑模控制问题。通过在三种不同类型道路上进行的仿真实验,验证了该方法在提高模糊车辆主动悬架系统性能方面的潜力。文献[68]中提出一种高效的主动悬架系统,以应对不同的干扰状况和参数变化所带来的挑战。提出了一种非线性模糊比例-积分-比例-微分控制器,该控制器利用面积/重心去模糊化方法,通过减轻水平波动引起的振动来提升驾乘质量和鲁棒性。文献[69]将粒子群优化与水波优化相结合,提升了基于模糊逻辑控制器的主动悬架系统的性能。所提出的控制器与线性二次型控制器相结合,在三种不同的道路场景下对其性能进行了评估,证明了这种混合方法在不同道路条件下提高车辆稳定性和乘客舒适度方面的有效性。文献[70]提出了一种改进的 T-S 模糊史密斯预测时滞补偿控制策略。不同工况下的仿真和实验结果表明,所提出的控制策略能够有效降低时延对车辆半主动悬架系统的影响,显著提高半主动悬架系统的动态性能。文献[71]提出了一种自适应反步积分指数快速终端滑模控制器,以稳定配备新型机械弹性轮的车辆的车身姿态,同时提高乘坐舒适性。在不同类型的干扰输入下进行仿真,以验证所提出的控制器的有效性。

1.1.3 网络攻击

网络攻击的目的可通过其对系统产生的影响得以体现。欺骗攻击通过注入虚假信息破坏数据包的真实性,是一种隐蔽性较强的攻击方式;而拒绝服务攻击则通过干扰网络通道或攻击路由协议,来阻断设备之间的正常通信。在控制领域内,有关各种网络攻击研究的相关进展可在文献[38]-[43]及其参考文献中找到。例如,在文献[43]中,对一个典型的网络控制框架进行了建模、分析和说明。对于受到攻击的线性时不变系统,文献[44]将攻击者的行为表述为约束控制问题,并使用不变可达集的概念量化闭环系统的弹性。文献[45]研究了带有数据量化和拒绝服务攻击的不确定网络控制系统基于事件触发的鲁棒镇定问题。在文献[46]中,研究了网络控制系统在欺骗攻击和网络延时下的输出跟踪问题。对于遭受拒绝服务攻击的非线性系统,文献[47]设计了基于事件触发的控制策略,并研究了闭环系统的输入到状态稳定性。具有欺骗攻击和事件触发机制的时变系统的分布式控制问题在文献[48]中得到了解决。在文献[49]中,提出了一种针对隐秘网络攻击的网络物理系统的安全保证算法,该算法通过计算所有潜在网络攻击的可达系统状

态集来实现。

重放攻击的操作过程为，在正常运作期间记录传感器测量值，随后用之前存储的数据替代当前的传感器输出。在传感器输出被存储数据取代的同时，攻击者通过执行器攻击或物理攻击来破坏控制系统。这种攻击比其他攻击更危险。首先，重放攻击机制不需要知晓目标系统的模型就可生成攻击^[50]。与现有的基于模型的攻击策略相比^{[50]-[53]}，攻击者很容易进行重放攻击。第二，重放攻击有隐形攻击。常规的异常探测器无法检测到它们^[50]。同样值得注意的是，2010 年发生的 Stuxnet 攻击是一种重放攻击^[54]。这次袭击破坏了伊朗的核设施，并对数千台离心机造成巨大破坏。

在过去几年中，文献[55]-[61]开发了几种重放攻击检测方法并对其进行了评估。这些检测方法主要遵循主动检测，也就是将任意探测信号注入控制输入。检测原理很简单。如果目标系统正常工作，则所选探测信号的效果显示在输出信号中。相反，如果输出不显示期望值，则检测器确定传感器数据是伪造的。

文献[55]在基于状态观测器的控制体系结构中，提出了一种使用高斯噪声的重放攻击检测方法。文献[56]表明，当攻击者了解目标系统的模型时，他们可以避免被文献[55]的检测方法检测到。文献[57]基于多水印分布和非平稳识别信号，提出了一种新的攻击检测策略，在具有多个通信节点的网络控制系统中，水印方案可用于检测传感器攻击。文献[58]提出一种使用谐波振荡信号的重放攻击检测方法。为了产生振荡，在控制回路中任意插入非线性函数，并在控制输入中加入激励信号。通过设计的信号处理滤波器，检测器可以判断传感器信号是否正常。文献[59]提出一种将时变频率的正弦波注入控制输入的检测方法。在单个输出中设计了几种不同类型的带通滤波器，使用检测器观察频率变化。文献[60]也使用了正弦信号，他们采用同步检测方法对输出信号进行分析，以此观察攻击情况。一旦攻击发生，检测信号的幅度便会改变，而这一变化成为了检测异常行为的关键指标。文献[61]表明文献[60]的检测方法可用于检测微电网控制系统中的攻击。

1.2 内容提纲

本文研究了网络攻击下悬挂系统的安全控制问题。首先，分别研究了重放攻击和拒绝服务攻击情形下悬挂系统的安全控制问题，然后，解决了系统中因网络攻击带来的系统不稳定的问题，提高了系统的稳定性，得到较准确的结果，并设计了期望的 H_∞ 控制器。使悬挂系统在网络攻击存在的情况下达到预期的 H_∞ 性能指标。本文内容提纲总体概括如下：

第一章介绍了课题的研究背景及现状，包括智能网联汽车悬挂系统的研究背景，网络攻击下系统安全控制问题的研究背景和意义，悬挂系统，网络攻击的安全控制问题等方面的研究现状；最后列出了本文内容提纲。

第二章针对一类具有参数不确定性的半主动悬挂系统。此系统考虑人体垂向振动模型，并与座椅悬挂系统的动力学模型相结合。研究重放攻击下悬挂系统的 H_∞ 控制问题。首先是依据系统的测量输出，设计状态观测器，其目的在于对系统状态予以有效估计。在观测器设计过程中，重点考虑了传感器数据在传输至观测器过程中可能遭遇的重放攻击威胁。紧接着，进行 H_∞ 控制器的设计。通过运用李雅普诺夫稳定性理论，证明了在该控制策略下，即便悬挂系统面临重放攻击，依旧能够达成预期设定的 H_∞ 性能指标。最后，使用线性矩阵不等式方法，求解了观测器和控制器的增益。为验证所提出方法的有效性，采用了数值仿真的方式，仿真结果表明，该设计方案在保证系统稳定性的同时，显著提升了控制精度和抗干扰能力，为理论成果的实际应用提供了有力支撑。

第三章研究了拒绝服务攻击情形下基于事件触发机制的主动悬挂系统有限时域的鲁棒控制问题，并给出了相应的控制器设计方法。本章的主要目的是设计一个基于事件触发机制的 H_∞ 控制器，在发生拒绝服务攻击时能满足预定的 H_∞ 性能指标。本章先通过配方法和倒向黎卡提差分方程，推导出拒绝服务攻击情形下，基于事件触发机制的 H_∞ 控制器的存在条件。接着，利用广义逆方法给出控制器增益的数学表达式。仿真结果验证了所提出方法的有效性。

第四章是对全文的总结和展望。

第2章 重放攻击下基于人体模型的不确定座椅悬挂系统的 H_∞ 控制

本章针对一类具有参数不确定性的半主动悬挂系统。此系统考虑人体垂向振动模型，并与座椅悬挂系统的动力学模型相结合，研究重放攻击情形下悬挂系统的 H_∞ 控制问题。在本章中，从悬挂系统的测量输出入手，设计了状态观测器，以对系统状态进行有效估计。在设计状态观测器时，重点考虑了信号在传感器至观测器的传输过程中，遭受的重放攻击的影响。随后，进一步设计 H_∞ 控制器。并通过李雅普诺夫稳定性理论，证明了悬挂系统在遭受重放攻击时，能够达成预先设定的 H_∞ 性能指标。在完成理论设计后，通过线性矩阵不等式方法求解观测器和控制器的增益。最后，通过数值仿真实验，展示出所设计的观测器和 H_∞ 控制器能够切实发挥作用，验证了整个设计方案的有效性与可行性。

2.1 问题描述

2.1.1 基于人体模型的座椅悬挂系统

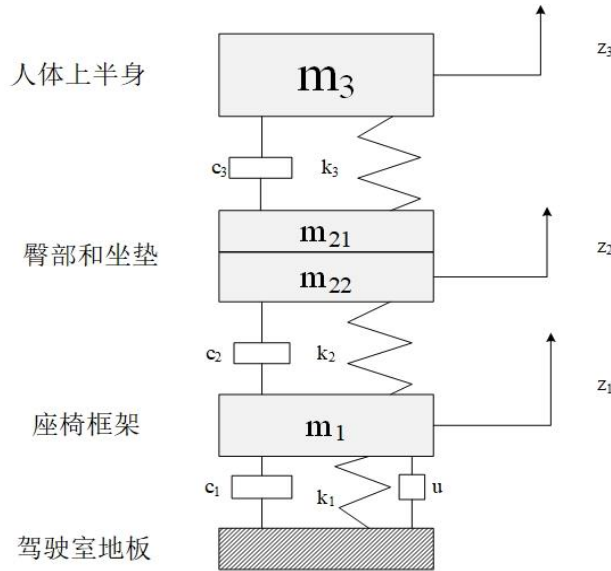


图 2-1 基于人体模型的座椅悬挂系统

图 2-1 中， m_1 为座架质量； m_{21} 、 m_{22} 分别为人体大腿与臀部、座垫的质量， $m_2 = m_{21} + m_{22}$ ； m_3 是坐着的人上半身的质量。 c_1 、 c_2 和 k_1 、 k_2 分别为被动悬挂系

统的阻尼和刚度； c_3 和 k_3 表示人体内部部件如脊柱的阻尼和刚度； z_1 、 z_2 、 z_3 分别为相应质量的位移； u 为座椅悬挂系统的主动控制输入。

则给出座椅悬挂系统的动力学运动方程

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{z}_1 &= -c_1 \dot{z}_1 - k_1 z_1 + c_2 (\dot{z}_2 - \dot{z}_1) + k_2 (z_2 - z_1) - u \\ m_2 \ddot{z}_2 &= -c_2 (\dot{z}_2 - \dot{z}_1) - k_2 (z_2 - z_1) + c_3 (\dot{z}_3 - \dot{z}_2) + k_3 (z_3 - z_2) \\ m_3 \ddot{z}_3 &= -c_3 (\dot{z}_3 - \dot{z}_2) - k_3 (z_3 - z_2) \end{aligned} \quad (2-1)$$

选择以下一组状态变量

$$\begin{aligned} x_1(t) &= z_1(t) \\ x_2(t) &= \dot{z}_1(t) \\ x_3(t) &= z_2(t) - z_1(t) \\ x_4(t) &= \dot{z}_2(t) \\ x_5(t) &= z_3(t) - z_2(t) \\ x_6(t) &= \dot{z}_3(t) \end{aligned} \quad (2-2)$$

其中 $x_i(t)$ ($i = 1, 3, 5$) 是弹簧 (k_1 到 k_3) 的挠度, $x_i(t)$ ($i = 2, 4, 6$) 是质量段 (m_1 到 m_3) 的速度。

定义状态向量为

$$x(t) = [x_1(t) \quad x_2(t) \quad x_3(t) \quad x_4(t) \quad x_5(t) \quad x_6(t)]^T \quad (2-3)$$

则下面的状态空间方程可由 (2-1) 写成

$$\dot{x}(t) = A_1 x(t) + B_1 u(t) \quad (2-4)$$

其中

$$\begin{aligned} A_1 &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{k_1}{m_1} & -\frac{c_1+c_2}{m_1} & \frac{k_2}{m_1} & \frac{c_2}{m_1} & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{c_2}{m_2} & -\frac{k_2}{m_2} & -\frac{c_2+c_3}{m_2} & \frac{k_3}{m_2} & \frac{c_3}{m_2} \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{c_3}{m_3} & -\frac{k_3}{m_3} & -\frac{c_3}{m_3} \end{bmatrix} \\ B_1 &= \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{m_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \end{aligned} \quad (2-5)$$

考虑以下一般系统

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A_1 x(t) + B_1 u(t) \\ y(t) = C_1 x(t) \end{cases} \quad (2-6)$$

其中 $x(t) \in \mathbb{R}^{6 \times 1}$, $u(t) \in \mathbb{R}$, $y(t) \in \mathbb{R}$ 是系统的测量输出。 $C_1 \in \mathbb{R}^{1 \times 6}$ 是一个具有合适维度的常数系统矩阵。

系统的离散时间形式如下

$$\begin{cases} x(k+1) = \bar{A}x(k) + \bar{B}u(k) + \bar{D}\omega(k) \\ y(k) = \bar{C}x(k) \end{cases} \quad (2-7)$$

其中 $\omega(t) \in \mathbb{R}$, 表示由道路不平引起的扰动, $\bar{A} = e^{A_1 h}$, $\bar{B} = \int_0^h e^{A_1 s} ds B_1$, $\bar{C} = C_1$, $h > 0$ 为采样周期, $\bar{D} \in \mathbb{R}^{6 \times 1}$ 是具有合适维度的常数系统矩阵。

2.1.2 重放攻击

攻击者会对信号实施窃取并进行存储。设攻击者在信息存储方面存在一个上限 $\bar{\mu}$, 因此存储的信号可以被描述为 $M(k) \triangleq \{y(k^{(1)}), y(k^{(2)}), \dots, y(k^{(\bar{\mu})})\}$, $k^{(1)} \neq k^{(2)} \neq \dots \neq k^{(\bar{\mu})}$, $k^{(p)} < k$, ($p=1, 2, \dots, \bar{\mu}$)。

为有效抵御重放攻击, 可采取在传输信号中引入时间戳的方式。具体而言, 每个测量信号在向观测器传输之前, 都会被附上时间戳, 以此增强信号的安全性与可识别性。设 $\alpha(k)$ 来表示重放攻击的发生。重放攻击发生时, $\alpha(k)=1$, 否则, $\alpha(k)=0$ 。当 $\alpha(k)=0$ 时, 攻击者将获取的系统实时测量输出 $y(k)$, 存储在 $M(k)$ 中。同时, 引入变量 $d(k)$ 来表示重放攻击的连续攻击次数。观测器在获取传感器的测量输出时, 会第一时间查看所附带的时间戳。凭借时间戳这一关键标识, 观测器能够判断该信息在传输途中是否遭受重放攻击。此外, 观测器还可以识别是否发生连续重放攻击, 并对连续攻击的次数进行统计。所以连续攻击次数 $d(k)$ 可表示为

$$d(k) = \begin{cases} d(k-1)+1, & \text{当 } \alpha(k)=1 \\ 0, & \text{当 } \alpha(k)=0 \end{cases} \quad (2-8)$$

综上所述，当发生重放攻击时，在 k 时刻接收到的测量输出可以表示为

$$\bar{y}(k) = y(k - d(k)) \quad (2-9)$$

用 $\bar{d}$ 表示攻击次数的最大值，则 $d(k) \leq \bar{d}$ 。

2.1.3 考虑重放攻击的 H_∞ 控制器

观测器和控制器的设计如下

$$\begin{cases} \hat{x}(k+1) = \bar{A}\hat{x}(k) + \bar{B}u(k) + L[\bar{y}(k) - \bar{C}\hat{x}(k - d(k))] \\ u(k) = K\hat{x}(k) \end{cases} \quad (2-10)$$

其中 $\hat{x}(k)$ 是状态估计。 L 是观测器增益， K 是控制器增益。

设估计误差为 $e(k) \triangleq x(k) - \hat{x}(k)$ 。那么 $e(k+1)$ 可以表示为

$$e(k+1) = \bar{A}e(k) - L\bar{C}e(k - d(k)) + \bar{D}\omega(k) \quad (2-11)$$

将闭环系统中的受控输出表示为

$$z(k) = \bar{M}x(k) \quad (2-12)$$

其中， $\bar{M}$ 是一个具有合适维度的矩阵。

此外，通过设置

$$\begin{aligned} \mathcal{X}(k) &\triangleq \begin{bmatrix} x^T(k) & e^T(k) \end{bmatrix}^T \\ \mathcal{X}(k - d(k)) &\triangleq \begin{bmatrix} x^T(k - d(k)) & e^T(k - d(k)) \end{bmatrix}^T \end{aligned} \quad (2-13)$$

推导出如下增广系统

$$\begin{cases} \mathcal{X}(k+1) = A\mathcal{X}(k) + B\mathcal{X}(k - d(k)) + D\omega(k) \\ y(k) = C\mathcal{X}(k) \\ z(k) = M\mathcal{X}(k) \end{cases} \quad (2-14)$$

其中

$$\begin{aligned} A &= \begin{bmatrix} \bar{A} + \bar{B}K & -\bar{B}K \\ 0 & \bar{A} \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} \bar{D} \\ \bar{D} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -L\bar{C} \end{bmatrix} \\ C &= [\bar{C} \quad 0], \quad M = [\bar{M} \quad 0] \end{aligned} \quad (2-15)$$

本研究的目标是为处于重放攻击下的离散系统(2-7)设计一个控制器(2-10)。也就是说，寻找增益矩阵 K 和 L ，使得满足以下性能要求

(1) 当 $\omega(k)=0$ 时，闭环系统(2-14)渐近稳定。

(2) 在零初始条件下，受控输出 $z(k)$ 满足以下 H_∞ 性能约束条件。

$$\sum_{k=0}^{\infty} z^T(k)z(k) \leq \gamma^2 \sum_{k=0}^{\infty} \omega^T(k)\omega(k) \quad (2-16)$$

其中 $\gamma > 0$ 是给定的干扰衰减水平。

2.2 主要结果

2.2.1 主要引用引理

为了得到主要结果，给出以下引理。

引理 2.1^[65]: 对于秩等于 m 的矩阵 $B \in \mathbb{R}^{n \times m}$ ，总是存在两个正交矩阵 $U \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 和 $W \in \mathbb{R}^{m \times m}$ ，使得

$$UBW = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} BW = \begin{bmatrix} \Sigma \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2-17)$$

其中 $U_1 \in \mathbb{R}^{m \times n}$ ， $U_2 \in \mathbb{R}^{(n-m) \times n}$ ，而 $\Sigma = \text{diag}\{j_1, \dots, j_m\}$ ，是 B 的非零奇异值，其中 $j_i (i=1, 2, \dots, m)$ 。

引理 2.2^[65]: 对于秩等于 m 的矩阵 $B \in \mathbb{R}^{n \times m}$ ，如果矩阵 P_l 由下式确定

$$P_l = U^T \begin{bmatrix} P_{11} & 0 \\ 0 & P_{12} \end{bmatrix} U = U_1^T P_{11} U_1 + U_2^T P_{12} U_2 \quad (2-18)$$

其中 $P_{11} \in \mathbb{R}^{m \times m}$ ， $P_{12} \in \mathbb{R}^{(n-m) \times (n-m)}$ 是正定矩阵， U_1 、 U_2 在(2-17)中定义，则存在非奇异矩阵 $\tilde{P}_1 \in \mathbb{R}^{m \times m}$ ，使 $\bar{B}\tilde{P}_1 = P_1 \bar{B}$ 。同理可得，存在非奇异矩阵 $\tilde{Q}_1 \in \mathbb{R}^{m \times m}$ ，使得 $\bar{B}\tilde{Q}_1 = Q_1 \bar{B}$ 。

2.2.2 稳定性和 H_∞ 性能分析

在这一小节中，对增广系统（2-14）的稳定性和 H_∞ 性能进行了分析。

定理 2.1: 考虑系统（2-7）以及测量输出受到网络重放攻击（2-9）的情况。对于给定的控制增益 K 和 L ，若存在正定矩阵 P 和 Q 满足

$$\Pi = \begin{bmatrix} \Pi_{11} & * \\ \Pi_{21} & \Pi_{22} \end{bmatrix} < 0 \quad (2-19)$$

其中

$$\begin{aligned} \Pi_{11} &= A^T P A - P + A^T Q A \\ \Pi_{21} &= B^T P A + B^T Q A, \quad \Pi_{22} = B^T P B + B^T Q B - Q \end{aligned} \quad (2-20)$$

那么，当 $\omega(k)=0$ 时，增广系统（2-14）是渐近稳定的。

证明: 选择如下所示的李雅普诺夫函数

$$V(k) = V_1(k) + V_2(k) \quad (2-21)$$

其中 $V_1(k) = \mathcal{X}^T(k) P \mathcal{X}(k)$, $V_2(k) = \sum_{i=k-d(k)}^k \mathcal{X}^T(i) Q \mathcal{X}(i)$ ，并将该李雅普诺夫函数的差值定义为

$$\Delta V(k) = V(k+1) - V(k) = \Delta V_1(k) + \Delta V_2(k) \quad (2-22)$$

根据（2-14），当 $\omega(k)=0$ 时， $\Delta V_1(k)$ ， $\Delta V_2(k)$ 分别可写为

$$\begin{aligned} \Delta V_1(k) &= \mathcal{X}^T(k+1) P \mathcal{X}(k+1) - \mathcal{X}^T(k) P \mathcal{X}(k) \\ &= [A \mathcal{X}(k) + B \mathcal{X}(k-d(k))]^T P [A \mathcal{X}(k) \\ &\quad + B \mathcal{X}(k-d(k))] - \mathcal{X}^T(k) P \mathcal{X}(k) \\ &= \mathcal{X}^T(k) A^T P A \mathcal{X}(k) + \mathcal{X}^T(k-d(k)) B^T P B \\ &\quad \times \mathcal{X}(k-d(k)) + 2 \mathcal{X}^T(k) A^T P B \mathcal{X}(k-d(k)) \\ &\quad - \mathcal{X}^T(k) P \mathcal{X}(k) \end{aligned} \quad (2-23)$$

$$\begin{aligned}
 \Delta V_2(k) &= \sum_{i=k-d(k)+1}^{k+1} \mathcal{X}^T(i)Q\mathcal{X}(i) - \sum_{i=k-d(k)}^k \mathcal{X}^T(i)Q\mathcal{X}(i) \\
 &= \mathcal{X}^T(k)A^TQA\mathcal{X}(k) + \mathcal{X}^T(k-d(k)) \\
 &\quad \times B^TQB\mathcal{X}(k-d(k)) \\
 &\quad + 2\mathcal{X}^T(k)A^TQB\mathcal{X}(k-d(k)) \\
 &\quad - \mathcal{X}^T(k-d(k))Q\mathcal{X}(k-d(k))
 \end{aligned} \tag{2-24}$$

可得 $\Delta V(k)$ 为

$$\Delta V(k) = \Delta V_1(k) + \Delta V_2(k) = \Phi^T(k)\Pi\Phi(k) \tag{2-25}$$

其中

$$\Phi(k) = \begin{bmatrix} \mathcal{X}^T(k) & \mathcal{X}^T(k-d(k)) \end{bmatrix}^T, \quad \Pi = \begin{bmatrix} \Pi_{11} & * \\ \Pi_{21} & \Pi_{22} \end{bmatrix}$$

根据舒尔补引理和 (2-19) 可知, $\Pi < 0$ 。证明了系统在不外界干扰的情况下是稳定的。

定理 2.2: 给定控制增益 K 、 L 和干扰衰减水平 $\gamma > 0$ 。当 $\omega(k)=0$ 时, 增广系统 (2-14) 是渐近稳定的, 并且在零初始条件下, 如果存在正定矩阵 P 和 Q 满足

$$\Theta = \begin{bmatrix} \Theta_{11} & * & * \\ \Theta_{21} & \Theta_{22} & * \\ \Theta_{31} & \Theta_{32} & \Theta_{33} \end{bmatrix} < 0 \tag{2-26}$$

其中

$$\begin{aligned}
 \Theta_{11} &= A^T P A - P + A^T Q A + M^T M \\
 \Theta_{21} &= B^T P A + B^T Q A, \quad \Theta_{22} = B^T P B + B^T Q B - Q \\
 \Theta_{31} &= D^T P A + D^T Q A, \quad \Theta_{32} = D^T P B + D^T Q B, \quad \Theta_{33} = D^T P D + D^T Q D - \gamma^2 I
 \end{aligned}$$

那么 H_∞ 性能要求 (2-16) 就能得到保证。

证明: 当 $\omega(k)=0$ 时增广系统的渐近稳定性直接由定理 2.1 得出。现在, 分析增广系统 (2-14) 的 H_∞ 性能。

选择定理 2.1 中相同的李雅普诺夫函数。 $\Delta V_1(k)$, $\Delta V_2(k)$ 分别可写为

$$\begin{aligned}
 \Delta V_1(k) &= \mathcal{X}^T(k+1)P\mathcal{X}(k+1) - \mathcal{X}^T(k)P\mathcal{X}(k) \\
 &= [A\mathcal{X}(k) + B\mathcal{X}(k-d(k)) + D\omega(k)]^T P \\
 &\quad \times [A\mathcal{X}(k) + B\mathcal{X}(k-d(k)) + D\omega(k)] \\
 &\quad - \mathcal{X}^T(k)P\mathcal{X}(k) \\
 &= \mathcal{X}^T(k)A^T P A \mathcal{X}(k) + \mathcal{X}^T(k-d(k))B^T P B \\
 &\quad \times \mathcal{X}(k-d(k)) + \omega^T(k)D^T P D \omega(k) \\
 &\quad + 2\mathcal{X}^T(k)A^T P D \omega(k) + 2\mathcal{X}^T(k)A^T P B \\
 &\quad \times \mathcal{X}(k-d(k)) + 2\omega^T(k)D^T P B \mathcal{X}(k-d(k)) \\
 &\quad - \mathcal{X}^T(k)P\mathcal{X}(k)
 \end{aligned} \tag{2-27}$$

$$\begin{aligned}
 \Delta V_2(k) &= \sum_{i=k-d(k)+1}^{k+1} \mathcal{X}^T(i)Q\mathcal{X}(i) - \sum_{i=k-d(k)}^k \mathcal{X}^T(i)Q\mathcal{X}(i) \\
 &= \mathcal{X}^T(k)A^T Q A \mathcal{X}(k) + \mathcal{X}^T(k-d(k))B^T Q B \mathcal{X}(k-d(k)) \\
 &\quad + \omega^T(k)D^T Q D \omega(k) + 2\mathcal{X}^T(k)A^T Q D \omega(k) \\
 &\quad + 2\mathcal{X}^T(k)A^T Q B \mathcal{X}(k-d(k)) + 2\omega^T(k)D^T Q B \\
 &\quad \times \mathcal{X}(k-d(k)) - \mathcal{X}^T(k-d(k))Q\mathcal{X}(k-d(k))
 \end{aligned}$$

则 $\Delta V(k)$ 为

$$\Delta V(k) = \Delta V_1(k) + \Delta V_2(k) = \Xi^T(k)\tilde{\Theta}\Xi(k) \tag{2-28}$$

其中

$$\Xi(k) = [\mathcal{X}^T(k) \quad \mathcal{X}^T(k-d(k)) \quad \omega^T(k)]^T, \quad \tilde{\Theta} = \begin{bmatrix} \tilde{\Theta}_{11} & * & * \\ \Theta_{21} & \Theta_{22} & * \\ \Theta_{31} & \Theta_{32} & \tilde{\Theta}_{33} \end{bmatrix}$$

$$\tilde{\Theta}_{11} = A^T P A - P + A^T Q A, \quad \tilde{\Theta}_{33} = D^T P D + D^T Q D$$

将零项 $z^T(k)z(k) - \gamma^2 \omega^T(k)\omega(k) - z^T(k)z(k) + \gamma^2 \omega^T(k)\omega(k)$ 加到 (2-28) 中, 得到

$$\begin{aligned}
 \Delta V(k) &+ z^T(k)z(k) - \gamma^2 \omega^T(k)\omega(k) - z^T(k)z(k) \\
 &+ \gamma^2 \omega^T(k)\omega(k) = \Xi^T(k)\Theta\Xi(k) - z^T(k)z(k) + \gamma^2 \omega^T(k)\omega(k)
 \end{aligned} \tag{2-29}$$

所以有

$$\Delta V(k) + z^T(k)z(k) - \gamma^2 \omega^T(k)\omega(k) = \Xi^T(k)\Theta\Xi(k) \tag{2-30}$$

将 (2-30) 的左右两端 k 从 0 到 ∞ 累加, 可得

$$\begin{aligned}
 & V(\infty) - V(0) + \sum_{k=0}^{\infty} z^T(k)z(k) - \gamma^2 \sum_{k=0}^{\infty} \omega^T(k)\omega(k) \\
 & = \sum_{k=0}^{\infty} \Xi^T(k)\Theta\Xi(k)
 \end{aligned} \tag{2-31}$$

考虑零初始条件和 $V(\infty) > 0$ ，(2-31) 可变换为

$$\sum_{k=0}^{\infty} z^T(k)z(k) - \gamma^2 \sum_{k=0}^{\infty} \omega^T(k)\omega(k) \leq \sum_{k=0}^{\infty} \Xi^T(k)\Theta\Xi(k) \tag{2-32}$$

根据 (2-26)， $\Theta < 0$ ，可得

$$\sum_{k=0}^{\infty} z^T(k)z(k) < \gamma^2 \sum_{k=0}^{\infty} \omega^T(k)\omega(k) \tag{2-33}$$

证明完成。

定理 2.3: 考虑离散系统(2-7)和测量输出受到网络重放攻击(2-9)。给定控制增益 K 、 L 和干扰衰减水平 $\gamma > 0$ 。若存在矩阵 P_1 、 P_2 、 Q_1 、 Q_2 、 Y_1 、 Y_2 、 Z_1 、 Z_2 满足以下线性矩阵不等式

$$\begin{bmatrix}
 \mathfrak{J}_{11} & * & * & * & * \\
 0 & \mathfrak{J}_{22} & * & * & * \\
 0 & 0 & -\gamma^2 I & * & * \\
 \mathfrak{J}_{41} & \mathfrak{J}_{42} & \mathfrak{J}_{43} & \mathfrak{J}_{44} & * \\
 \mathfrak{J}_{51} & \mathfrak{J}_{52} & \mathfrak{J}_{53} & 0 & \mathfrak{J}_{55}
 \end{bmatrix} < 0 \tag{2-34}$$

其中

$$\begin{aligned}
 \mathfrak{J}_{11} &= \begin{bmatrix} \tilde{\mathfrak{J}}_{11} & * \\ 0 & \tilde{\mathfrak{J}}_{22} \end{bmatrix}, \quad \tilde{\mathfrak{J}}_{11} = -P_1 + \bar{M}^T \bar{M}, \quad \tilde{\mathfrak{J}}_{22} = -P_2, \quad \mathfrak{J}_{22} = \begin{bmatrix} -Q_1 & 0 \\ 0 & -Q_2 \end{bmatrix} \\
 \mathfrak{J}_{41} &= \begin{bmatrix} P_1 \bar{A} + \bar{B} Z_1^T & -\bar{B} Z_1^T \\ 0 & P_2 \bar{A} \end{bmatrix}, \quad \mathfrak{J}_{42} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -Y_1^T \bar{C} \end{bmatrix}, \quad \mathfrak{J}_{43} = \begin{bmatrix} P_1 \bar{D} \\ P_2 \bar{D} \end{bmatrix}, \quad \mathfrak{J}_{44} = \begin{bmatrix} -P_1 & 0 \\ 0 & -P_2 \end{bmatrix} \\
 \mathfrak{J}_{51} &= \begin{bmatrix} Q_1 \bar{A} + \bar{B} Z_2^T & -\bar{B} Z_2^T \\ 0 & Q_2 \bar{A} \end{bmatrix}, \quad \mathfrak{J}_{52} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -Y_2^T \bar{C} \end{bmatrix}, \quad \mathfrak{J}_{53} = \begin{bmatrix} Q_1 \bar{D} \\ Q_2 \bar{D} \end{bmatrix}, \quad \mathfrak{J}_{55} = \begin{bmatrix} -Q_1 & 0 \\ 0 & -Q_2 \end{bmatrix} \\
 P &= \begin{bmatrix} P_1 & 0 \\ 0 & P_2 \end{bmatrix}, \quad Q = \begin{bmatrix} Q_1 & 0 \\ 0 & Q_2 \end{bmatrix}, \quad P_1 = U_1^T P_{11} U_1 + U_2^T P_{12} U_2, \quad Q_1 = U_1^T Q_{11} U_1 + U_2^T Q_{12} U_2
 \end{aligned}$$

则闭环系统 (2-14) 满足期望的 H_∞ 性能指标。进一步，如果上述不等式成立，则期望的控制器增益可计算为

$$L = P_2^{-1} Y_1^T, \quad K = W \Sigma^{-1} P_{11}^{-1} \Sigma W^T Z_1^T \tag{2-35}$$

其中 U_1 、 U_2 、 Σ 和 W 是在引理 2.1 中定义的。

证明： 根据 (2-26) 和舒尔补引理可知

$$\begin{bmatrix} -P+M^T M & * & * & * & * \\ 0 & -Q & * & * & * \\ 0 & 0 & -\gamma^2 I & * & * \\ A & B & D & -P^{-1} & * \\ A & B & D & 0 & -Q^{-1} \end{bmatrix} < 0 \quad (2-36)$$

将矩阵 A 、 B 、 D 、 M 、 P 、 Q 代入 (2-36)，并左乘 $\text{diag}\{I, I, I, I, I, P_1, P_2, Q_1, Q_2\}$ ，

右乘 $\text{diag}\{I, I, I, I, I, P_1, P_2, Q_1, Q_2\}$ 。由引理 2.2 可知，存在非奇异矩阵 $\tilde{P}_1$ 、 $\tilde{Q}_1$ ，使得 $\tilde{B}\tilde{P}_1 = P_1\bar{B}$ 、 $\tilde{B}\tilde{Q}_1 = Q_1\bar{B}$ 。令 $Y_1 \triangleq L^T P_2$ ， $Y_2 \triangleq L^T Q_2$ ， $Z_1 \triangleq K^T \tilde{P}_1$ ， $Z_2 \triangleq K^T \tilde{Q}_1$ ，则最终结果为

$$\begin{bmatrix} -P_1 + \bar{M}^T \bar{M} & * & * & * & * & * & * & * & * \\ 0 & -P_2 & * & * & * & * & * & * & * \\ 0 & 0 & -Q_1 & * & * & * & * & * & * \\ 0 & 0 & 0 & -Q_2 & * & * & * & * & * \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\gamma^2 I & * & * & * & * \\ P_1 \bar{A} + \bar{B} Z_1^T & -\bar{B} Z_1^T & 0 & 0 & P_1 \bar{D} & -P_1 & * & * & * \\ 0 & P_2 \bar{A} & 0 & -Y_1^T \bar{C} & P_2 \bar{D} & 0 & -P_2 & * & * \\ Q_1 \bar{A} + \bar{B} Z_2^T & -\bar{B} Z_2^T & 0 & 0 & Q_1 \bar{D} & 0 & 0 & -Q_1 & * \\ 0 & Q_2 \bar{A} & 0 & -Y_2^T \bar{C} & Q_2 \bar{D} & 0 & 0 & 0 & -Q_2 \end{bmatrix} < 0 \quad (2-37)$$

根据引理 2.1， $\tilde{B}\tilde{P}_1 = P_1\bar{B}$ 可写成

$$U^T \begin{bmatrix} \Sigma \\ 0 \end{bmatrix} W \tilde{P}_1 = P_1 U^T \begin{bmatrix} \Sigma \\ 0 \end{bmatrix} W^T \quad (2-39)$$

则

$$\tilde{P}_1 = W \Sigma^{-1} P_{11} \Sigma W^T \quad (2-40)$$

则 K 和 L 的数学表达式为

$$L = P_2^{-1} Y_1^T, \quad K = W \Sigma^{-1} P_{11}^{-1} \Sigma W^T Z_1^T \quad (2-41)$$

证明完成。

2.3 数值实例及其仿真

在本节中,在带有半主动悬挂系统的电子车辆上验证了设计的 H_∞ 控制方案。

表 1 座椅悬挂的系统参数

质量 (kg)		阻尼系数(Ns/m)		弹簧刚度 (N/m)	
m_1	16	c_1	880	k_1	28000
m_2	1+6.7	c_2	230	k_2	15000
m_3	43.4	c_3	1565	k_3	39620

本研究生物学参数参考文献[62]和文献[63],如表 1 所示。在离散化过程中,采样周期取 $h=0.001s$ 。设置扰动衰减水平为 $\gamma=10$,系统其他参数如下

$$\begin{aligned}\bar{D} &= [0.1 \quad 0.2 \quad 0.15 \quad 0.12 \quad 0.17 \quad 0.19]^T \\ \bar{C} &= [0.1 \quad 0.2 \quad 0.12 \quad 0.14 \quad 0.17 \quad 0.18] \\ \bar{M} &= [0.1 \quad 0.2 \quad 0.11 \quad 0.13 \quad 0.15 \quad 0.16]\end{aligned}$$

将系统的外部扰动设置为 $\omega(k) = e^{-0.1k} \sin k$ 。利用 Matlab 软件计算得出观测器、控制器增益为

$$\begin{aligned}L &= [1.4126 \quad 1.2179 \quad 1.4565 \quad 1.5192 \quad 1.6672 \quad 1.3713]^T \\ K &= [69.9708 \quad 887.7201 \quad 24.1487 \quad 67.7428 \quad 66.4117 \quad 65.6963]\end{aligned}$$

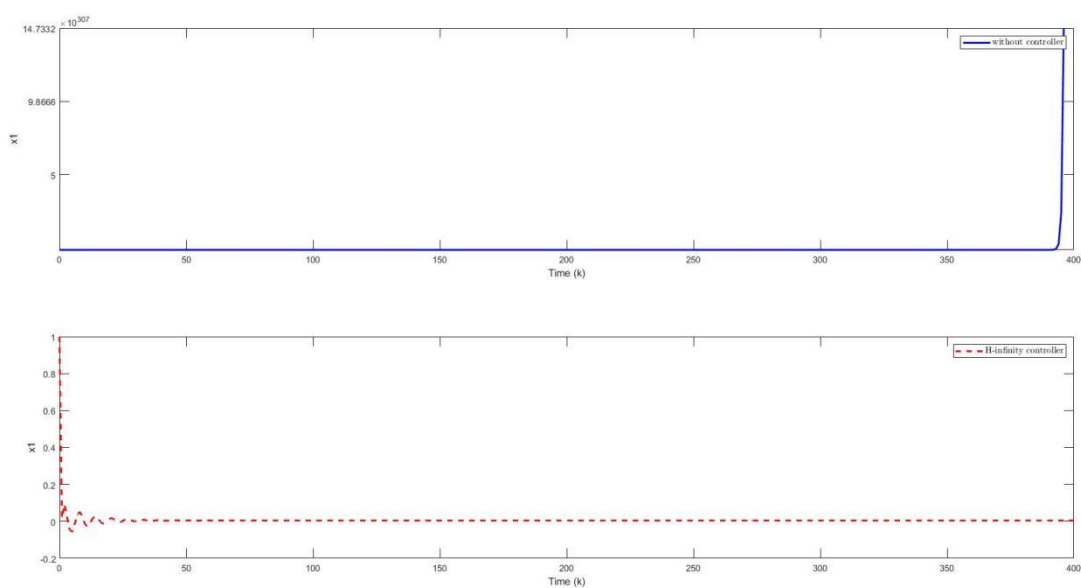


图 2-2 状态轨迹 x_1

图 2-2 中，上图为不含控制器的变量 x_1 的轨迹，其轨迹不稳定；下图为 H_∞ 控制器下变量 x_1 的轨迹，其中的轨迹是稳定的。

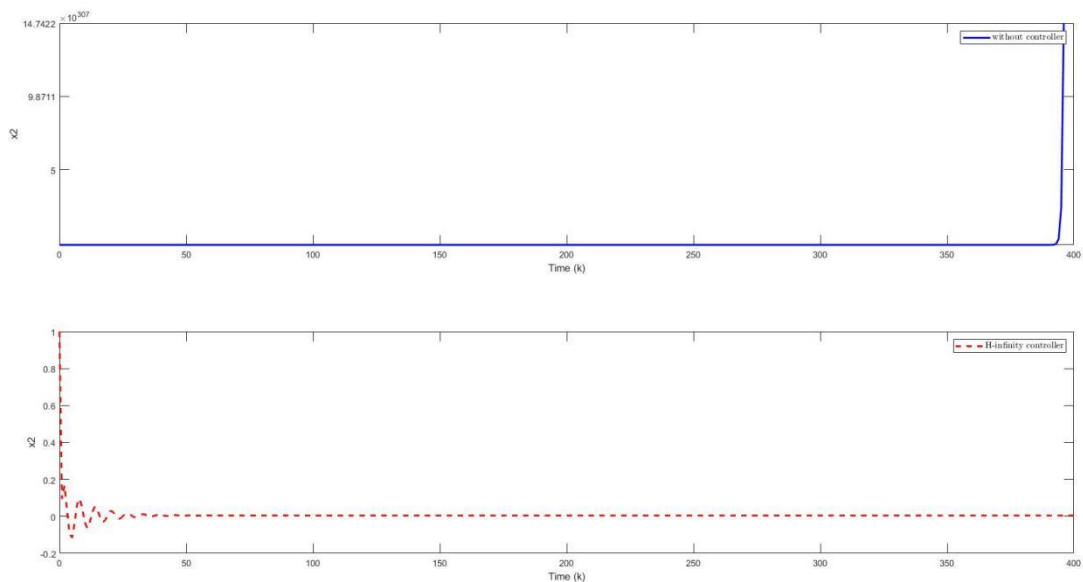


图 2-3 状态轨迹 x_2

图 2-3 中，上图为不含控制器的变量 x_2 的轨迹，其轨迹不稳定；下图为 H_∞ 控制器下变量 x_2 的轨迹，其中的轨迹是稳定的。

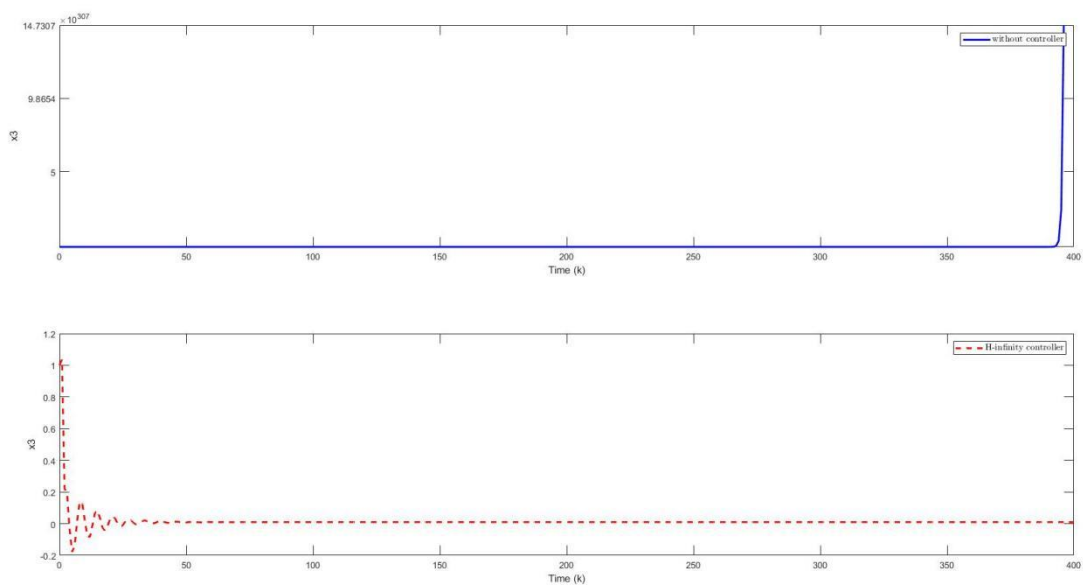


图 2-4 状态轨迹 x_3

图 2-4 中，上图为不含控制器的变量 x_3 的轨迹，其轨迹不稳定；下图为 H_∞

控制器下变量 x_3 的轨迹，其中的轨迹是稳定的。

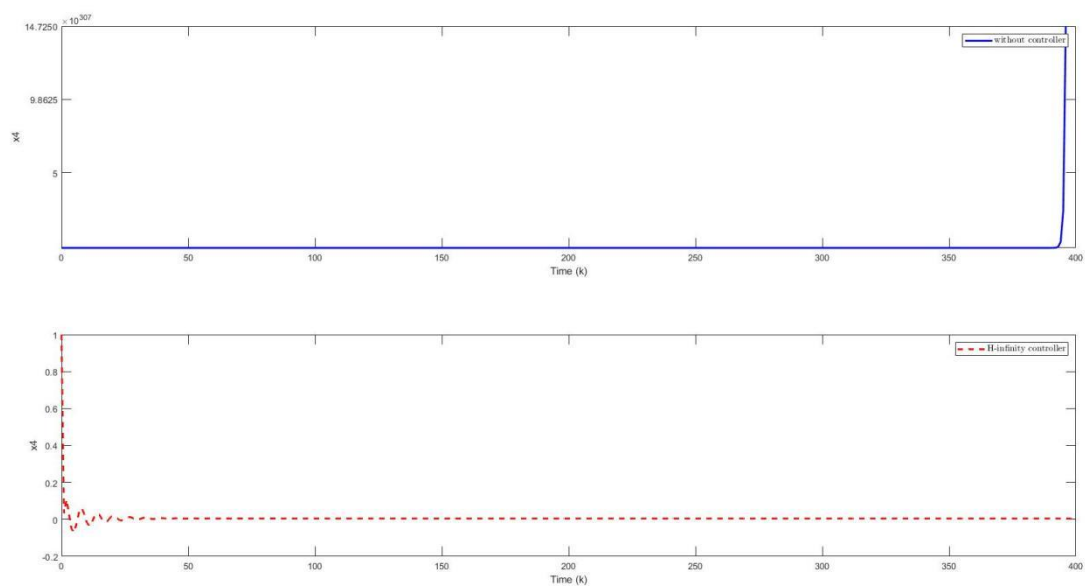


图 2-5 状态轨迹 x_4

图 2-5 中，上图为不含控制器的变量 x_4 的轨迹，其轨迹不稳定；下图为 H_∞ 控制器下变量 x_4 的轨迹，其中的轨迹是稳定的。

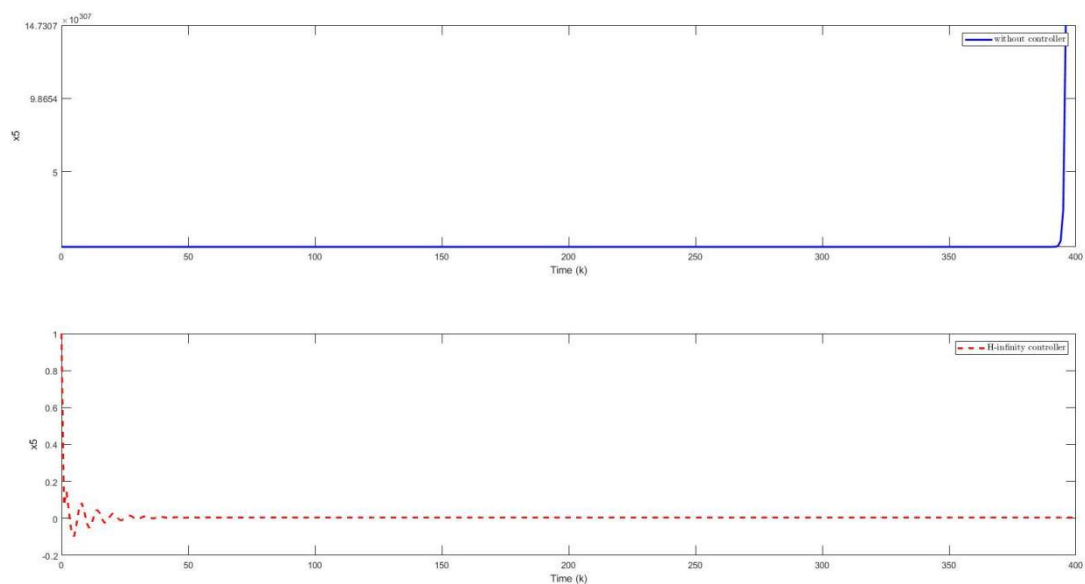


图 2-6 状态轨迹 x_5

图 2-6 中，上图为不含控制器的变量 x_5 的轨迹，其轨迹不稳定；下图为 H_∞ 控制器下变量 x_5 的轨迹，其中的轨迹是稳定的。

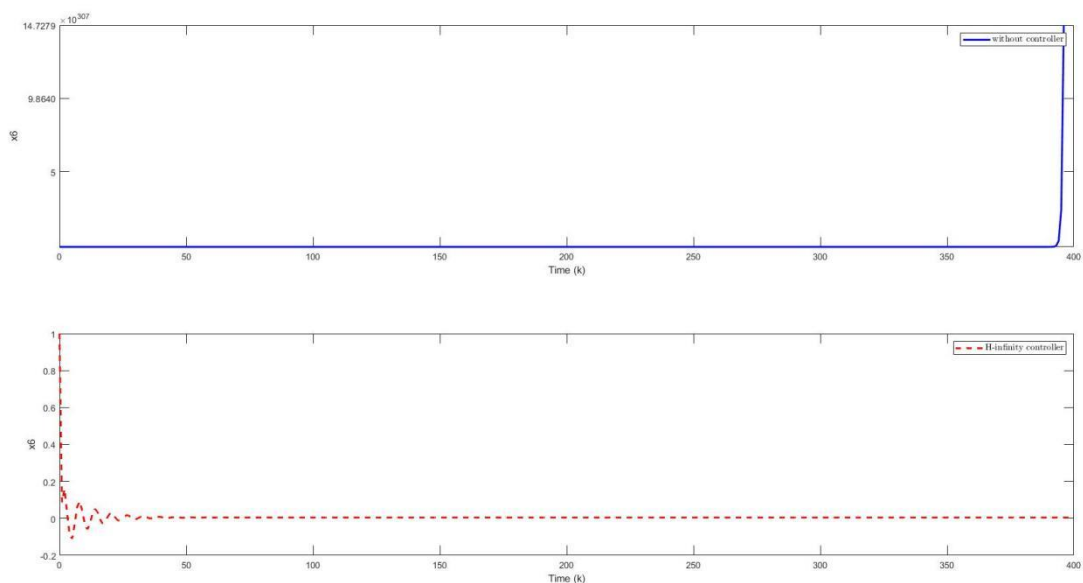


图 2-7 状态轨迹 x_6

图 2-7 中，上图为不含控制器的变量 x_6 的轨迹，其轨迹不稳定；下图为 H_∞ 控制器下变量 x_6 的轨迹，其中的轨迹是稳定的。

仿真结果如图 2-2—图 2-7 所示。其中不含控制器的变量的轨迹是不稳定的； H_∞ 控制器下变量的轨迹是稳定的，表明所提出的 H_∞ 控制器是有效的。

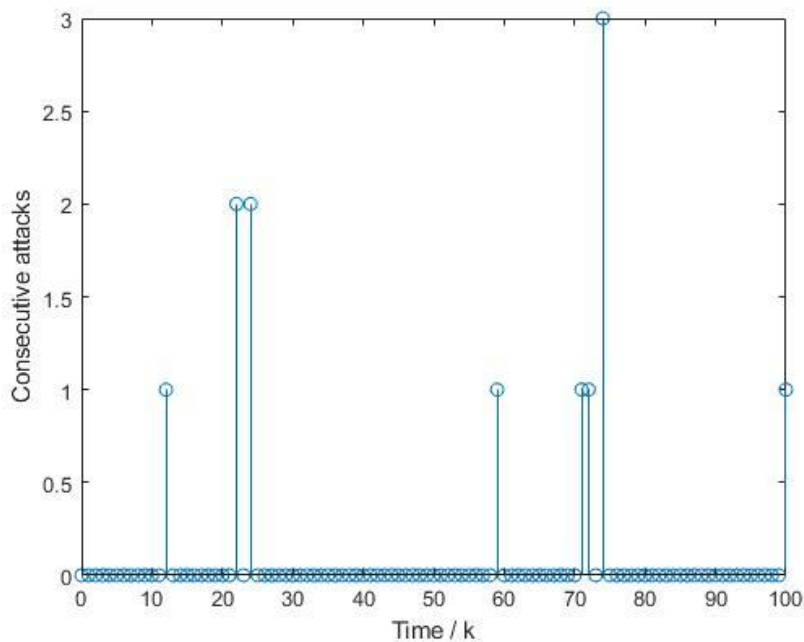


图 2-8 重放攻击发生时刻

网络攻击的具体发生时间如图 2-8 所示。图中横坐标为时间，纵坐标为连续

攻击次数，其中最大连续攻击次数为 3 次。

2.4 本章总结

本章针对一类具有参数不确定性的半主动悬挂系统，考虑了人体垂向振动模型，针对随机发生的重放攻击，研究了基于状态观测的 H_∞ 鲁棒控制策略。在成功获取观测状态后，以此为基础进一步设计 H_∞ 控制器。该控制器确保悬挂系统能够满足预先设定的 H_∞ 性能指标，达成所需控制要求。通过求解线性矩阵不等式，计算出观测器与控制器的增益。最后，通过数值仿真，验证了所设计控制器的有效性。

第3章 拒绝服务攻击情形下基于事件触发的主动悬挂系统 有限时域 H_∞ 控制

本章研究了拒绝服务攻击情形下，基于事件触发机制的主动悬挂系统在有限时域的 H_∞ 控制问题。借助配方法以及倒向黎卡提差分方程展开研究，设计出具有事件触发机制的 H_∞ 控制器。随后，通过广义逆方法给出控制器增益的数学表达式。仿真结果表明了所提方法的有效性。

3.1 问题描述

3.1.1 考虑四分之一车辆模型的主动悬挂系统

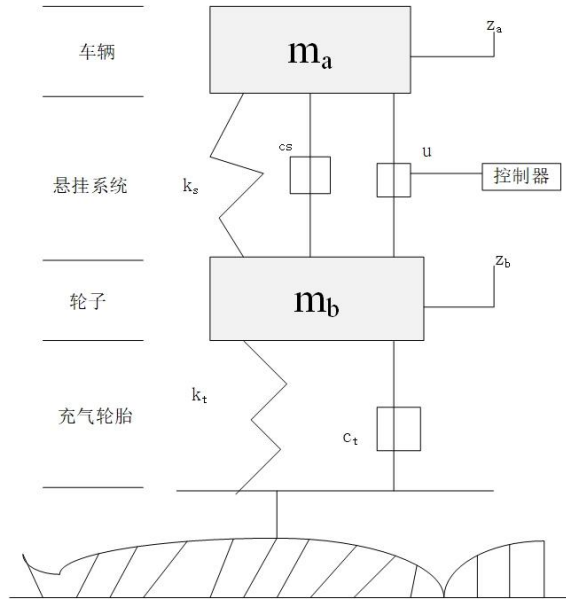


图 3-1 带有主动悬挂系统的四分之一车辆模型

图 3-1 中， m_a 是簧上质量， m_b 是簧下质量； c_s 和 k_s 分别是悬挂系统的阻尼和刚度； k_t 和 c_t 分别代表充气轮胎的压缩性和阻尼； z_a 和 z_b 分别是簧上和簧下质量的位移； u 是悬挂系统的主动输入。

在文献[64]中给出了簧上质量和簧下质量的理想动态方程。定义以下状态变量

$$\begin{aligned}
 x_1(t) &= z_a(t) - z_b(t) \\
 x_2(t) &= z_b(t) \\
 x_3(t) &= \dot{z}_a(t) \\
 x_4(t) &= \dot{z}_b(t)
 \end{aligned} \tag{3-1}$$

然后，通过定义

$$x(t) = [x_1(t) \ x_2(t) \ x_3(t) \ x_4(t)]^T \tag{3-2}$$

有如下的状态空间形式

$$\dot{x}(t) = A_a x(t) + B_b u(t) \tag{3-3}$$

其中

$$\begin{aligned}
 A_a &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{k_s}{m_a} & 0 & -\frac{c_s}{m_a} & \frac{c_s}{m_a} \\ \frac{k_s}{m_b} & -\frac{k_t}{m_b} & \frac{c_s}{m_b} & -\frac{c_s + c_t}{m_b} \end{bmatrix} \\
 B_b &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{m_a} & -\frac{1}{m_b} \end{bmatrix}^T
 \end{aligned} \tag{3-4}$$

考虑以下一般系统

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A_a x(t) + B_b u(t) \\ y(t) = C_c x(t) \end{cases} \tag{3-5}$$

其中 $x(t) \in \mathbb{R}^{4 \times 1}$ ， $u(t) \in \mathbb{R}$ ， $y(t) \in \mathbb{R}$ 是系统的测量输出。 $C_c \in \mathbb{R}^{1 \times 4}$ 是一个具有合适维数的常数系统矩阵。

系统的离散时间形式如下

$$\begin{cases} x(k+1) = \bar{A}x(k) + \bar{B}u(k) + \bar{D}w(k) \\ y(k) = \bar{C}x(k) \end{cases} \tag{3-6}$$

其中 $w(k) \in \mathbb{R}$ ，表示由道路不平引起的扰动，属于 $\ell_2[0, N-1]$ 。

$\bar{A} = e^{A_a h}$ ， $\bar{B} = \int_0^h e^{A_a t} dt B_b$ ， $\bar{C} = C_c$ ， $h > 0$ 为采样周期。 $\bar{D} \in \mathbb{R}^{4 \times 1}$ 是具有合适维度的常数系统矩阵。

3.1.2 拒绝服务攻击与事件触发机制

考虑拒绝服务攻击模型，用 $\varrho(k)$ 表示， $\varrho(k)$ 服从伯努利分布，其具有

$$\Pr\{\varrho(k)=1\}=\bar{\varrho}(k), \Pr\{\varrho(k)=0\}=1-\bar{\varrho}(k) \quad (3-7)$$

其中 $0 \leq \bar{\varrho}(k) \leq 1$ 。

以 $\lambda_c(0=\lambda_0 < \lambda_1 < \dots < \lambda_c < \dots)$ 表示触发瞬间，其确定如下

$$\lambda_{c+1} = \min\{k \mid f(\varsigma(k), \beta) > 0, k > \lambda_c\} \quad (3-8)$$

其中

$$\varsigma(k) = y(k) - y(\lambda_c), \quad f(\varsigma(k), \beta) = \varsigma(k)^T \varsigma(k) - \beta y(k)^T y(k)$$

β 是已知的正参数。

3.1.3 拒绝服务攻击情形下基于事件触发的 H_∞ 控制器设置

将闭环系统中的受控输出表示为

$$z(k) = \check{o}x(k) \quad (3-9)$$

其中， $\check{o}$ 是一个具有合适维度的矩阵。

考虑拒绝服务攻击的影响，新的离散时间系统可表示为

$$\begin{cases} x(k+1) = \check{A}x(k) + \varrho(k)\check{B}u(k) + \check{D}w(k) \\ y(k) = \check{C}x(k) \\ z(k) = \check{o}x(k) \end{cases} \quad (3-10)$$

对于 $k \in [\lambda_c, \lambda_{c+1})$ ，为系统 (3-10) 构造了以下控制器

$$\begin{cases} \hat{x}(k+1) = \check{A}\hat{x}(k) + \bar{\varrho}(k)\check{B}u(k) + K_1(y(\lambda_c) - \check{C}\hat{x}(k)) \\ u(k) = L_1\hat{x}(k) \end{cases} \quad (3-11)$$

其中 K_1 和 L_1 是要设计的增益矩阵。此外，初始估计为 $\hat{x}(0) = 0$ 。

设 $e(k) \triangleq x(k) - \hat{x}(k)$ 为估计误差，从 (3-10) 和 (3-11) 得到

$$\begin{aligned} e(k+1) &= (\check{A} - (\varrho(k) - \bar{\varrho}(k))\check{B}L_1 - K_1\check{C})e(k) \\ &\quad + (\varrho(k) - \bar{\varrho}(k))\check{B}L_1x(k) + K_1\varsigma(k) + \check{D}w(k) \end{aligned} \quad (3-12)$$

定义 $\xi(k) \triangleq [x^T(k) \ e^T(k)]^T$ 得到一个增广系统如下

$$\begin{cases} \xi(k+1) = (A + \varsigma(k)B_1 + (\varrho(k) - \bar{\varrho}(k))B_2)\xi(k) + \bar{K}_1\varsigma(k) + Dw(k) \\ y_k = C\xi(k) \\ z_k = o\xi(k) \end{cases} \quad (3-13)$$

其中

$$\begin{aligned} A &= \begin{bmatrix} \bar{A} & 0 \\ 0 & \bar{A} - K_1\bar{C} \end{bmatrix}, \quad B_1 = \begin{bmatrix} \bar{B}L_1 & -\bar{B}L_1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \bar{B}L_1 & -\bar{B}L_1 \end{bmatrix} \\ \bar{\rho} &= \begin{bmatrix} 0 \\ K_1 \end{bmatrix}, \quad C = [\bar{C} \ 0], \quad D = \begin{bmatrix} \bar{D} \\ \bar{D} \end{bmatrix}, \quad o = [\bar{o} \ 0] \end{aligned}$$

在本文中，主要目标是设计增益矩阵 K_1 和 L_1 ，使得增广系统 (3-13) 在有限时域 $[0, N-1]$ 上满足以下 H_∞ 性能指标

$$\mathbb{E} \left\{ \sum_{k=0}^{N-1} (z^T(k)z(k) - \gamma^2 w^T(k)w(k)) - \gamma^2 \xi^T(0)V\xi(0) \right\} \leq 0 \quad (3-14)$$

对于所有的 $(w(k), \xi(0)) \neq 0$ 和给定的扰动衰减水平 $\gamma > 0$ ，其中 V 是一个已知的正定矩阵。

3.2 主要结果

引理 3.1^[72]: 给定非零矩阵 S 、 W 和 M ，且具有适当维数，则 $\min_x \|SXM - W\|_F$ 的解是 $S^\dagger WM^\dagger$ 。

定理 3.1: 对具有事件触发机制 (3-8) 的闭环系统 (3-10)。给定扰动衰减水平 $\gamma > 0$ ，正标量 β 和 φ ，正定矩阵 V 和控制器增益矩阵 K_1 和 L_1 。如果存在一组非负定矩阵 $P_k (k=0, 1, \dots, N)$ 满足以下的倒向黎卡提差分方程

$$\begin{aligned}
 P_k &= (A + \bar{\varrho}(k)B_1)^T \Theta(k+1)(A + \bar{\varrho}(k)B_1) \\
 &\quad + \bar{\varrho}(k)(1 - \bar{\varrho}(k))(B_1 + B_2)^T P_{k+1}(B_1 + B_2) \\
 &\quad + (D^T \Theta(k+1)(A_k + \bar{\varrho}(k)B_1))^T \bar{\mathbf{U}}^{-1}(k+1) \\
 &\quad \times (D^T \Theta(k+1)(A + \bar{\varrho}(k)B_1)) \\
 &\quad + \beta \varphi^2 C^T C + o^T o \\
 P_N &= 0
 \end{aligned} \tag{3-15}$$

且

$$\begin{aligned}
 \partial(k+1) &= \varphi^2 I - \bar{K}_1^T P(k+1) \bar{K}_1 > 0 \\
 \bar{\mathbf{U}}(k+1) &= \gamma^2 I - D^T \Theta(k+1) D > 0 \\
 P_0 &< \gamma^2 V
 \end{aligned} \tag{3-16}$$

其中

$$\Theta(k+1) = P_{k+1}(I - \varphi^{-2} \bar{K}_1 \bar{K}_1^T P_{k+1})^{-1}$$

则对于任何扰动序列 $\{w(k)\}_{k=0}^{N-1}$ ，增广系统 (3-13) 满足 H_∞ 性能指标。

证明： 设 $V_1(k) = \xi^T(k) P_k \xi(k)$ ，则 $V_1(k)$ 的差可以定义为

$$\Delta V_1(k) = \mathbb{E}\{V_1(\xi(k+1)) | \xi(k)\} - V_1(\xi(k)) \tag{3-17}$$

将 (3-13) 代入 (3-17)，得到

$$\begin{aligned}
 \mathbb{E}\{\Delta V_1(k)\} &= \mathbb{E}\{((A + \varrho(k)B_1 + (\varrho(k) - \bar{\varrho}(k))B_2)\xi(k) \\
 &\quad + K_1 \varsigma(k) + Dw(k))^T P_{k+1}((A + \varrho(k)B_1 \\
 &\quad + (\varrho(k) - \bar{\varrho}(k))B_2)\xi(k) + K_1 \varsigma(k) + Dw(k)) \\
 &\quad - \xi^T(k) P_k \xi(k)\} \\
 &= \mathbb{E}\{\xi^T(k)((A + \varrho(k)B_1 + (\varrho(k) - \bar{\varrho}(k))B_2)^T \\
 &\quad \times P_{k+1}(A + \varrho(k)B_1 + (\varrho(k) - \bar{\varrho}(k))B_2) - P_k)\xi(k) \\
 &\quad + \varsigma^T(k) \bar{K}_1^T P_{k+1} \bar{K}_1 \varsigma(k) + w^T(k) D^T P_{k+1} Dw(k) \\
 &\quad + 2\xi^T(k)(A + \varrho(k)B_1 + (\varrho(k) - \bar{\varrho}(k))B_2)^T \\
 &\quad \times P_{k+1} \bar{K}_1 \varsigma(k) + 2\xi^T(k)(A + \varrho(k)B_1 \\
 &\quad + (\varrho(k) - \bar{\varrho}(k))B_2)^T P_{k+1} Dw(k) \\
 &\quad + 2\varsigma^T(k) \bar{K}_1^T P_{k+1} Dw(k)\}
 \end{aligned} \tag{3-18}$$

此外，通过在 (3-19) 的两侧添加零项

$$z^T(k)z(k) - \gamma^2 w^T(k)w(k) + \varphi^2 \varsigma^T(k)\varsigma(k) - z^T(k)z(k) + \gamma^2 w^T(k)w(k) - \varphi^2 \varsigma^T(k)\varsigma(k)$$

并且 $\varsigma^T(k)\varsigma(k) \leq \beta y^T(k)y(k)$ ，进一步得到

$$\begin{aligned}
 \mathbb{E}\{\Delta V_1(k)\} &\leq \mathbb{E}\{\xi^T(k)((A+\varrho(k)B_1+(\varrho(k)-\bar{\varrho}(k))B_2)^T P_{k+1} \\
 &\quad \times (A+\varrho(k)B_1+(\varrho(k)-\bar{\varrho}(k))B_2)+o^T o+\beta\varphi^2 C^T C-P_k)\xi(k) \\
 &\quad +2\xi^T(k)(A+\varrho(k)B_1+(\varrho(k)-\bar{\varrho}(k))B_2)^T P_{k+1}\bar{K}_1\varsigma(k) \\
 &\quad +2\xi^T(k)(A+\varrho(k)B_1+(\varrho(k)-\bar{\varrho}(k))B_2)^T P_{k+1}Dw(k) \\
 &\quad +2\varsigma^T(k)\bar{K}_1^T P_{k+1}Dw_k-w^T(k)\Lambda(k+1)w(k) \\
 &\quad -\varsigma^T(k)\partial(k+1)\varsigma(k)-z^T(k)z(k)+\gamma^2 w^T(k)w(k)\} \\
 &\leq \mathbb{E}\{\xi^T(k)((A+\varrho(k)B_1)^T P_{k+1}(A+\varrho(k)B_1) \\
 &\quad +\bar{\varrho}(k)(1-\bar{\varrho}(k))(B_1+B_2)^T P_{k+1}(B_1+B_2) \\
 &\quad +o^T o+\beta\varphi^2 C^T C-P_k)\xi(k)+2\varsigma^T(k)\bar{K}_1^T P_{k+1}Dw(k) \\
 &\quad +2\xi^T(k)(A+\varrho(k)B_1)^T P_{k+1}Dw(k) \\
 &\quad +2\xi^T(k)(A+\varrho(k)B_1)^T P_{k+1}\bar{K}_1\varsigma(k)-\varsigma^T(k)\partial(k+1)\varsigma(k) \\
 &\quad -w^T(k)\Lambda(k+1)w(k)-z^T(k)z(k)+\gamma^2 w^T(k)w(k)\}
 \end{aligned}$$

其中 $\Lambda(k+1) \triangleq \gamma^2 I - D^T P_{k+1} D$ 。

对 $\varsigma(k)$ 进行配方，得到

$$\begin{aligned}
 \mathbb{E}\{\Delta V_1(k)\} &\leq \mathbb{E}\{\xi^T(k)((A+\varrho(k)B_1)^T P_{k+1}(A+\varrho(k)B_1) \\
 &\quad +\bar{\varrho}(k)(1-\bar{\varrho}(k))(B_1+B_2)^T P_{k+1}(B_1+B_2) \\
 &\quad +\beta\varphi^2 C^T C+(A+\varrho(k)B_1)^T P_{k+1}\bar{K}_1\partial^{-1}(k+1) \\
 &\quad \times \bar{K}_1^T P_{k+1}(A+\varrho(k)B_1)+o^T o-P_k)\xi(k) \\
 &\quad +2\xi^T(k)((A+\varrho(k)B_1)^T P_{k+1}D \\
 &\quad +(A+\varrho(k)B_1)^T P_{k+1}\bar{K}_1\partial^{-1}(k+1)\bar{K}_1^T P_{k+1}D)w(k) \\
 &\quad -w^T(k)(\Lambda(k+1)-D^T P_{k+1}\bar{K}_1\partial^{-1}(k+1)\bar{K}_1^T P_{k+1}D)w(k) \\
 &\quad -(\varsigma(k)-\varsigma^*(k))^T \partial(k+1)(\varsigma(k)-\varsigma^*(k)) \\
 &\quad -z^T(k)z(k)+\gamma^2 w^T(k)w(k)\} \tag{3-19}
 \end{aligned}$$

其中 $\varsigma^*(k) \triangleq \partial^{-1}(k+1)\bar{K}_1^T P_{k+1}(A+\varrho(k)B_1)\xi(k)+\partial^{-1}(k+1)\bar{K}_1^T P_{k+1}Dw_k$

借助矩阵求逆引理，可以得到

$$P_{k+1}+P_{k+1}\bar{K}_1\partial^{-1}(k+1)\bar{K}_1^T P_{k+1}=P_{k+1}(I-\varphi^2\bar{K}_1\bar{K}_1^T P_{k+1})^{-1}=\Theta(k+1) \tag{3-20}$$

然后从 (3-19) 和 (3-20) 得出

$$\begin{aligned}
 \mathbb{E}\{\Delta V_1(k)\} \leq & \mathbb{E}\{\xi^T(k)((A+\varrho(k)B_1)^T \Theta(k+1)(A+\varrho(k)B_1) \\
 & + \bar{\varrho}(k)(1-\bar{\varrho}(k))(B_1+B_2)^T P_{k+1}(B_1+B_2) \\
 & + \beta\varphi^2 C^T C + o^T o - P_k)\xi(k) \\
 & + 2\xi^T(k)((A+\varrho(k)B_1)^T \Theta(k+1)Dw(k) \\
 & - w^T(k)\bar{\mathfrak{O}}(k+1)w(k) \\
 & - (\varsigma(k)-\varsigma^*(k))^T \partial(k+1)(\varsigma(k)-\varsigma^*(k)) \\
 & - z^T(k)z(k) + \gamma^2 w^T(k)w(k)\}
 \end{aligned} \tag{3-21}$$

再次使用配方法，由（3-15）和（3-21）可以推导出

$$\begin{aligned}
 \mathbb{E}\{\Delta V_1(k)\} \leq & \mathbb{E}\{\xi^T(k)((A+\varrho(k)B_1)^T \Theta(k+1)(A+\varrho(k)B_1) \\
 & + \bar{\varrho}(k)(1-\bar{\varrho}(k))(B_1+B_2)^T P_{k+1}(B_1+B_2) \\
 & + (D^T \Theta(k+1)(A+\varrho(k)B_1))^T \bar{\mathfrak{O}}^{-1}(k+1) \\
 & \times (D^T \Theta(k+1)(A+\varrho(k)B_1)) \\
 & + \beta\varphi^2 C^T C + o^T o - P_k)\xi(k) - (w(k)-w^*(k))^T \\
 & \times \bar{\mathfrak{O}}(k+1)(w(k)-w^*(k)) - (\varsigma(k)-\varsigma^*(k))^T \partial(k+1) \\
 & \times (\varsigma(k)-\varsigma^*(k)) - z^T(k)z(k) + \gamma^2 w^T(k)w(k)\} \\
 = & \mathbb{E}\{(w(k)-w^*(k))^T \bar{\mathfrak{O}}(k+1)(w(k)-w^*(k)) \\
 & - (\varsigma(k)-\varsigma^*(k))^T \partial(k+1)(\varsigma(k)-\varsigma^*(k)) \\
 & - z^T(k)z(k) + \gamma^2 w^T(k)w(k)\}
 \end{aligned} \tag{3-22}$$

其中 $w^*(k) \triangleq \bar{\mathfrak{O}}^{-1}(k+1)(D^T \Theta(k+1)(A+\varrho(k)B_1))\xi(k)$

由于 $P_0 < \gamma^2 V$, $\bar{\mathfrak{O}}(k+1) > 0$ 和 $\partial(k+1) > 0$, 可以从（3-22）得到

$$\begin{aligned}
 & \mathbb{E}\left\{\sum_{k=0}^{N-1} (z^T(k)z(k) - \gamma^2 w^T(k)w(k)) - \gamma^2 \xi^T(0)V\xi(0)\right\} \\
 & < \mathbb{E}\left\{\sum_{k=0}^{N-1} (\Delta V_1(k) + z^T(k)z(k) - \gamma^2 w^T(k)w(k))\right\} \\
 & \leq \sum_{k=0}^{N-1} \mathbb{E}\{-(w(k)-w^*(k))^T \bar{\mathfrak{O}}(k+1)(w(k)-w^*(k)) \\
 & \quad - (\varsigma(k)-\varsigma^*(k))^T \partial(k+1)(\varsigma(k)-\varsigma^*(k))\} \leq 0
 \end{aligned} \tag{3-23}$$

从而满足 H_∞ 性能指标。证明完成。

将 $w^*(k)$, $\varsigma^*(k)$ 代入增广系统（3-13），可以得到以下系统

$$\xi(k+1) = (\hat{A} + \tilde{A})\xi(k) + \tilde{\varrho}(k)Bu(k) + ZK_1\tilde{e}(k) \tag{3-24}$$

其中

$$\begin{aligned}\hat{A} &= \begin{bmatrix} \tilde{A} & 0 \\ 0 & \tilde{A} \end{bmatrix}, \quad Z = \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} \tilde{B} \\ \tilde{B} \end{bmatrix}, \quad \tilde{\varrho}(k) = \begin{bmatrix} \varrho(k)I & 0 \\ 0 & (\varrho(k) - \bar{\varrho}(k))I \end{bmatrix} \\ \tilde{A} &= (D + \bar{K}_I \partial^{-1}(k+1) \bar{K}_I^T P_{k+1} D) \bar{\mathfrak{U}}^{-1}(k+1) D^T \Theta(k+1) (A + \varrho(k) B_I) \\ &\quad + \bar{K}_I \partial^{-1}(k+1) \bar{K}_I^T P_{k+1} (A + \varrho(k) B_I) \\ \tilde{e}(k) &= -\tilde{C}e(k)\end{aligned}$$

在下面的定理中，控制器增益矩阵 K_I 和 L_I ，是由两个反向耦合黎卡提微分方程的解给出。

定理 3.2: 考虑具有事件触发机制 (3-8) 的闭环系统 (3-10)。对于 $\{w^*(k)\}_{k=0}^{N-1}$ 和 $\{\varsigma^*(k)\}_{k=0}^{N-1}$ ，给定干扰衰减水平 $\gamma > 0$ ，正标量 β 、 φ 、 ε_1 和 ε_2 ，正定矩阵 V ，若存在非负定矩阵 P_k 和 $Q_k (k=0,1,\dots,N)$ 满足 (3-15) 和以下倒向黎卡提方程

$$\begin{aligned}Q_k &= (\hat{A} + \tilde{A})^T Q_{k+1} (\hat{A} + \tilde{A}) \\ &\quad + \tilde{A}^T Q_{k+1} \tilde{\varrho}(k) B L_I \bar{I} + \bar{I}^T L_I^T B^T \tilde{\varrho}^T(k) Q_{k+1} \tilde{A} \\ &\quad + \tilde{A}^T Q_{k+1} Z K_I \tilde{C} + \tilde{C}^T K_I^T Z^T Q_{k+1} \tilde{A} \\ &\quad + o^T o - \hat{A}^T \Psi(k+1) \hat{A} - \hat{A}^T (Q_{k+1} \\ &\quad - \Psi(k+1)) Z (Z^T \Phi(k+1) Z)^{-1} Z^T \\ &\quad \times (Q_{k+1} - \Psi(k+1)) \hat{A}, \\ Q_N &= 0\end{aligned} \tag{3-25}$$

且

$$\begin{aligned}\vartheta(k+1) &= \varepsilon_1 \bar{\varrho}(k) I + B^T (\tilde{\varrho}(k) \odot Q_{k+1}) B > 0 \\ \Phi(k+1) &= \varepsilon_2 I + Q_{k+1} - \Psi(k+1) > 0 \\ \partial(k+1) &> 0, \quad \bar{\mathfrak{U}}(k+1) > 0, \quad P_0 < \gamma^2 V\end{aligned} \tag{3-26}$$

则控制器增益矩阵确定如下

$$\begin{aligned}L_I &= -\partial(k+1) \bar{I}^\dagger \\ K_I &= (Z^T \Phi(k+1) Z)^{-1} Z^T (\Psi(k+1) - Q_{k+1}) \hat{A} \tilde{C}^\dagger\end{aligned} \tag{3-27}$$

其中

$$\begin{aligned}
 \Psi(k+1) &= Q_{k+1} \bar{\bar{\varrho}}(k) B \bar{\varrho}^{-1}(k+1) B^T \bar{\bar{\varrho}}^T(k) Q_{k+1} \\
 \bar{\bar{\varrho}}(k) &= \begin{bmatrix} \bar{\varrho}(k) \mathbf{1}_n & \bar{\varrho}(k)(1-\bar{\varrho}(k)) \mathbf{1}_n \\ \bar{\varrho}(k)(1-\bar{\varrho}(k)) \mathbf{1}_n & \bar{\varrho}(k)(1-\bar{\varrho}(k)) \mathbf{1}_n \end{bmatrix} \\
 \bar{\varrho}(k) &= \begin{bmatrix} \bar{\varrho}(k) I & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \bar{C} = \begin{bmatrix} 0 & -\bar{C} \end{bmatrix}, \quad \bar{I} = \begin{bmatrix} I & -I \end{bmatrix} \\
 \delta(k+1) &= B^T \bar{\bar{\varrho}}^T(k) Q_{k+1} (I + Z(Z^T \Phi(k+1)Z)^{-1} \\
 &\quad \times Z^T (Q_{k+1} - \Psi(k+1))) \hat{A}
 \end{aligned} \tag{3-28}$$

则增广系统 (3-13) 满足 H_∞ 性能指标。

证明： 首先，定义一个代价函数如下

$$\begin{aligned}
 J(w^*(k), \varsigma^*(k)) &\triangleq \mathbb{E} \left\{ \sum_{k=0}^{N-1} (z^T(k)z(k) + \varepsilon_1 \varrho(k) u^T(k)u(k) \right. \\
 &\quad \left. + \varepsilon_2 \tilde{e}^T(k) \bar{K}_1^T \bar{K}_1 \tilde{e}(k)) \right\}
 \end{aligned} \tag{3-29}$$

其中 ε_1 、 ε_2 是给定的正参数。

选择函数 $V_2(k) = \xi^T(k) Q_k \xi(k)$ ，则 $V_2(k)$ 的差可以定义为

$$\Delta V_2(k) = \mathbb{E}\{V_2(\xi(k+1)) | \xi(k)\} - V_2(\xi(k)) \tag{3-30}$$

然后从 (3-24) 和 (3-30) 得出

$$\begin{aligned}
 \mathbb{E}\{\Delta V_2(k)\} &= \mathbb{E}\{((\hat{A} + \tilde{A})\xi(k) + \tilde{\varrho}(k)Bu(k) + ZK_1\tilde{e}(k))^T Q_{k+1} \\
 &\quad \times ((\hat{A} + \tilde{A})\xi(k) + \tilde{\varrho}(k)Bu(k) + ZK_1\tilde{e}(k)) \\
 &\quad - \xi^T(k) Q_k \xi(k)\} \\
 &= \mathbb{E}\{\xi^T(k) ((\hat{A} + \tilde{A})^T Q_{k+1} (\hat{A} + \tilde{A}) - Q_k) \xi(k) \\
 &\quad + u^T(k) B^T \tilde{\varrho}^T(k) Q_{k+1} \tilde{\varrho}(k) Bu(k) \\
 &\quad + \tilde{e}^T(k) K_1^T Z^T Q_{k+1} Z K_1 \tilde{e}(k) \\
 &\quad + 2\xi^T(k) (\hat{A} + \tilde{A})^T Q_{k+1} \tilde{\varrho}(k) Bu(k) \\
 &\quad + 2\xi^T(k) (\hat{A} + \tilde{A})^T Q_{k+1} Z K_1 \tilde{e}(k) \\
 &\quad + u^T(k) B^T \tilde{\varrho}^T(k) Q_{k+1} Z K_1 \tilde{e}(k)\}
 \end{aligned} \tag{3-31}$$

另一方面，可以得到

$$\begin{aligned}
 J(w^*(k), \varsigma^*(k)) &\triangleq \mathbb{E} \left\{ \sum_{k=0}^{N-1} (z^T(k)z(k) + \varepsilon_1 \varrho(k) u^T(k)u(k) \right. \\
 &\quad \left. + \varepsilon_2 \tilde{e}^T(k) \bar{K}_1^T \bar{K}_1 \tilde{e}(k)) \right. \\
 &\quad \left. + \sum_{k=0}^{N-1} \Delta V_2(k) + \xi^T(0) Q_0 \xi(0) \right\}
 \end{aligned} \tag{3-32}$$

根据 (3-13)、(3-31) 和 (3-32)，得出结论

$$\begin{aligned}
 J(w^*(k), \varsigma^*(k)) &= \sum_{k=0}^{N-1} \mathbb{E}\{\xi^T(k)((\hat{A} + \tilde{A})^T Q_{k+1}(\hat{A} + \tilde{A}) \\
 &\quad + \tilde{A}^T Q_{k+1} \tilde{\varrho}(k) B L_1 \bar{I} + \bar{I}^T L_1^T B^T \tilde{\varrho}^T(k) Q_{k+1} \tilde{A} \\
 &\quad + \tilde{A}^T Q_{k+1} Z K_1 \tilde{C} + \tilde{C}^T K_1^T Z^T Q_{k+1} \tilde{A} \\
 &\quad + o^T o - \hat{A}^T \Psi(k+1) \hat{A} - Q_k) \xi(k) \\
 &\quad + \tilde{e}^T(k) K_1^T Z^T \Phi(k+1) Z K_1 \tilde{e}(k) \\
 &\quad + 2\xi^T(k) \hat{A}^T (Q_{k+1} - \Psi(k+1)) Z K_1 \tilde{e}(k) \\
 &\quad + (u(k) + u^*(k))^T \vartheta(k+1)(u(k) + u^*(k)) \\
 &\quad + \xi^T(0) Q_0 \xi(0)\} \\
 &= \sum_{k=0}^{N-1} \mathbb{E}\{(K_1 \tilde{e}(k) + \tilde{e}^*(k))^T Z^T \Phi(k+1) Z \\
 &\quad \times (K_1 \tilde{e}(k) + \tilde{e}^*(k)) + (u(k) + u^*(k))^T \\
 &\quad \times \vartheta(k+1)(u(k) + u^*(k)) \\
 &\quad + \xi^T(0) Q_0 \xi(0)\}
 \end{aligned} \tag{3-33}$$

其中

$$\tilde{e}^*(k) \triangleq (Z^T \Phi(k+1) Z)^{-1} Z^T (Q_{k+1} - \Psi(k+1)) \tilde{A} \xi(k)$$

$$u^*(k) \triangleq \vartheta^{-1}(k+1) B^T \tilde{\varrho}^T(k) Q_{k+1} \tilde{A} \xi(k) + \vartheta^{-1}(k+1) B^T \tilde{\varrho}^T(k) Q_{k+1} Z K_1 \tilde{e}(k)$$

有 $u(k) = L_1 \bar{I} \xi(k)$, $\tilde{e}(k) = \tilde{C} \xi(k)$ 。如果想要使代价函数 (3-29) 最小化, 那么控制器增益可以按如下方式确定。

$$\begin{aligned}
 L_1 &= \operatorname{argmin}_{\delta^*} \|L_1^* \bar{I} + \vartheta(k+1)\|_{\mathcal{F}} \\
 \bar{K}_1 &= \operatorname{argmin}_{\rho^*} \|K_1^* \tilde{C} + (Z^T \Phi(k+1) Z)^{-1} Z^T \times (Q_{k+1} - \Psi(k+1)) \hat{A}\|_{\mathcal{F}}
 \end{aligned} \tag{3-34}$$

通过使用引理 3.1, 可以直接获得 (3-27)。

证明完成。

3.3 数值实例及其仿真

系统参数选择为 $m_a = 320 \text{ kg}$, $m_b = 40 \text{ kg}$, $k_s = 18 \text{ kN/m}$, $k_t = 200 \text{ kN/m}$, $c_s = 1 \text{ kN} \cdot \text{s/m}$, $c_t = 10 \text{ N s/m}$ 。

在离散化过程中, 采样周期取 $h=0.001\text{s}$ 。扰动衰减水平 γ 和正定矩阵 V 分别

被选择为 $\gamma=10$ 和 $V=3I$ 。其他参数取 $\beta=0.8$, $\varepsilon_1=\varepsilon_2=0.001$, $N=60$, $\bar{\rho}(k)=0.8$ 。控制器增益 L_I 、 K_I 可以通过利用 (3-27) 来确定。

在仿真中, 扰动 $w_k=0.05\sin(k)$, 初始状态 $x(0)=[0.3 \ 0.5 \ 0.7 \ 0.9]^T$ 。为验证所提出控制策略的有效性, 进行了系统的仿真实验。图 3-2 展示了开环与闭环系统的输出响应对比, 其中开环系统输出是不稳定的, 闭环系统输出趋于稳定。图 3-3 则呈现了事件触发机制的触发时刻。仿真数据分析显示, 该控制策略实现了预期的控制效果, 使系统在拒绝服务攻击情形下仍能保持稳定, 充分证实了所设计方法的可行性和优越性。

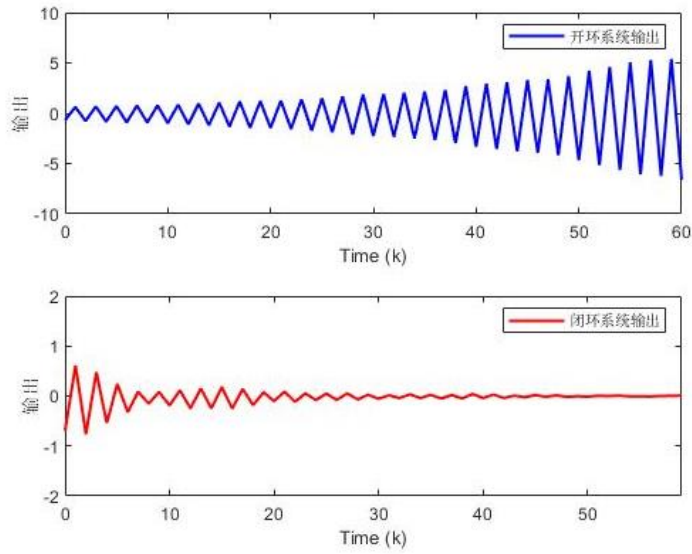


图 3-2 输出轨迹

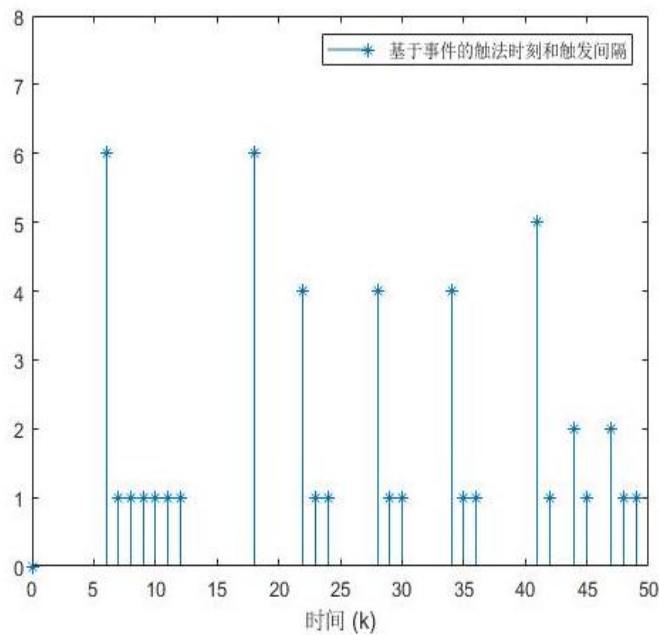


图 3-3 触发瞬间

3.4 本章总结

在本章中，研究了基于事件触发机制的主动悬挂系统，在拒绝服务攻击情形下的 H_∞ 控制问题。所需的基于观测器的控制器的存在条件以耦合的倒向黎卡提方程的形式给出，并且控制器增益的数学表达式通过广义逆方法给出。最后，通过数值仿真，所设计的 H_∞ 控制器的有效性得到了验证。

第4章 总结与展望

4.1 总结

本文主要研究了网络攻击情形下悬挂系统的安全控制问题。分别为：1.重放攻击下基于人体模型的不确定座椅悬挂系统的 H_∞ 控制；2.拒绝服务攻击情形下基于事件触发的主动悬挂系统有限时域 H_∞ 控制。

第一部分中研究了一类具有参数不确定性的半主动悬挂系统，并在系统中考虑人体垂向振动模型，将人体模型与座椅悬挂系统的动力学模型相结合，研究重放攻击下悬挂系统的 H_∞ 控制问题。针对网络传输过程中的重放攻击威胁，本研究提出了一种具有抗重放攻击能力的 H_∞ 控制方案。首先，设置状态观测器，通过对重放攻击进行建模，设计了一个鲁棒 H_∞ 控制器；其次，基于李雅普诺夫稳定性理论，确保系统在满足 H_∞ 性能指标约束下的渐进稳定性；最后，采用线性矩阵不等式，求出控制器和观测器的增益。为验证所提方法的有效性，进行了数值仿真实验，结果表明该方案能够有效抑制重放攻击对系统性能的影响，在保证控制精度的同时显著提升了系统的鲁棒性。

第二部分中主要研究了主动悬挂系统在拒绝服务攻击情形下，基于事件触发的有限时域 H_∞ 控制问题。通过使用配方法和倒向黎卡提差分方程，设计了具有事件触发机制的 H_∞ 控制器。之后，使用广义逆方法求出控制器增益的数学表达式。并进行了数值仿真，仿真结果验证了所提控制方案的有效性与可行性。

4.2 创新点

本文的创新点如下：

第一，目前对于网络攻击的安全控制问题的研究已经十分广泛，但是在汽车悬挂系统中，对存在网络攻击的悬挂系统的安全问题研究较少。因此，本文从工程实际的角度出发，考虑了重放攻击对系统稳定性的影响。首先，对悬挂系统进行建模，在重放攻击的影响下，设计了 H_∞ 控制器，其次，通过李雅普诺夫稳定

性理论，使系统达到预定的 H_{∞} 性能指标。最后，通过数值仿真实验，验证了所设计的控制方案的有效性。

第二，在主动悬挂系统的信号传输过程中，考虑拒绝服务攻击对系统的影响，通过设计相应的基于事件触发机制的 H_{∞} 控制器，有效缓解网络攻击导致的通信中断问题，显著降低了数据传输过程中的丢包率，减少了扰动项、网络攻击所引起的数据失真现象。

4.3 展望

本文通过采用不同的悬挂系统模型和不同的网络攻击形式，对网络攻击情形下的悬挂系统的安全控制问题进行了研究，然而，由于本人有限的学术能力水平，加上对问题的分析和考虑不够全面，因此需要进行更多更深入的研究。下面是针对未来潜在的研究课题进行的一些思考：

1.在本文中，研究主要是半主动悬挂系统和主动悬挂系统，但是在实际工程应用中，由于设备性能和工业环境的影响，具体的使用场景多种多样，研究的悬挂系统需要考虑更多的影响因素。如何考虑越来越复杂的实际运用场景，并提高座椅悬挂系统的稳定性和舒适度值得更深入的研究。

2.本文主要研究的控制方法是 H_{∞} 控制，如何使用其它控制手段来保证车辆行驶中稳定和舒适，进一步提高智能网联汽车智能化控制，是值得深入探究的研究课题。

3.本文目前的研究成果尚处于理论阶段，将本文的现有研究成果应用到无人机侦查、智能网联汽车的自动驾驶等实际工程场景中是值得研究的课题。

参考文献

- [1] V. D. Gligor. A note on denial-of-service in operating systems[J]. IEEE Transactions on Software Engineering, 1984, 3: 320-324.
- [2] C. Kwon, W. Liu, I. Hwang. Security analysis for cyber-physical systems against stealthy deception attacks[J]. 2013 American Control Conference, 2013, 3344-3349.
- [3] Y. Mo, B. Sinopoli. Secure control against replay attacks[J]. 2009 47th Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing (Allerton), 2009, 911-918.
- [4] 田海兰, 闫少华, 乔书杰. 汽车悬架系统研究现状综述[J]. 中国科技纵横, 2013, 1(19): 74-75.
- [5] 聂佳梅, 张孝良, 胡贝, 等. 车辆被动悬架技术发展新方向[J]. 车辆与动力技术, 2012, 126(2): 59-64.
- [6] K. Hudha, H. Jamaluddin. Simulation and experimental evaluation on a skyhook policy-based fuzzy logic control for semi-active suspension system[J]. International Journal of Structural Engineering, 2011, 2(3): 243-272.
- [7] X. Ma, P. K. Wong, J. Zhao. Practical multi-objective control for automotive semiactive suspension system with nonlinear hydraulic adjustable damper[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 117: 667-688.
- [8] S. K. Sharma, A. Kumar. Ride performance of a high speed rail vehicle using controlled semi active suspension system[J]. Smart Materials and Structures, 2017, 26(5): 055026.
- [9] H. E. Tseng, D. Hrovat. State of the art survey: active and semi-active suspension control[J]. Vehicle System Dynamics, 2015, 53(7): 1034-1062.
- [10] S. Chantranuwathana, H. Peng. Adaptive robust force control for vehicle active suspensions[J]. International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, 2004, 18(2): 83-102.
- [11] I. Fialho, G. J. Balas. Road adaptive active suspension design using linear parameter-varying gain-scheduling[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2002, 10(1): 43-54.

- [12]J. Zhang, F. Ding, B. Zhang, etc. An effective projection-based nonlinear adaptive control strategy for heavy vehicle suspension with hysteretic leaf spring[J]. Nonlinear Dynamics, 2020, 100(1): 451-473.
- [13]Y. J. Liu, Q. Zeng, S. Tong, etc. Actuator failure compensation-based adaptive control of active suspension systems with prescribed performance[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 67(8): 7044-7053.
- [14]R. Hao, H. Wang, S. Liu, etc. Multi-objective command filtered adaptive control for nonlinear hydraulic active suspension systems[J]. Nonlinear Dynamics, 2021, 105(2): 1559-1579.
- [15]袁传义, 贝绍轶, 刘成晔. 汽车主动悬架模糊自适应控制研究[J]. 噪声与振动控制, 2010, 30(05): 98-101.
- [16]管成, 朱善安. 液压主动悬架的非线性自适应控制[J]. 汽车工程, 2004(06): 691-695.
- [17]F. Zhao, S. S. Ge, F. Tu, etc. Adaptive neural network control for active suspension system with actuator saturation[J]. IET Control Theory & Applications, 2016, 10(14): 1696-1705.
- [18]Y. Huang, J. Na, X. Wu, etc. Adaptive control of nonlinear uncertain active suspension systems with prescribed performance[J]. ISA Transactions, 2015, 54: 145-155.
- [19]H. Jing, R. Wang, C. Li, etc. Robust finite-frequency H_∞ control of full-car active suspension[J]. Journal of Sound and Vibration, 2019, 441: 221-239.
- [20]G. Wang, C. Chen, S. Yu. Robust non-fragile finite-frequency H_∞ static output feedback control for active suspension systems[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 91: 41-56.
- [21]R. Wang, H. Jing, F. Yan, etc. Optimization and finite-frequency H_∞ control of active suspensions in in-wheel motor driven electric ground vehicles[J]. Journal of the Franklin Institute, 2015, 352(2): 468-484.
- [22]Y. Xu, Z. Xie, J. Zhao, etc. Robust non-fragile finite frequency H_∞ control for uncertain active suspension systems with time-delay using TS fuzzy approach[J]. Journal of the Franklin Institute, 2021, 358(8): 4209-4238.
- [23]Z. Zhang, H. Li, C. Wu, etc. Finite frequency fuzzy H_∞ control for uncertain active suspension systems with sensor failure[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2018, 5(4): 777-786.

-
- [24]陈逸宁, 曹青松, 程文明. 含作动器死区输入的主动悬架鲁棒控制[J]. 机床与液压, 2019, 47(24): 1-5.
- [25]W. Sun, H. Gao, O. Kaynak. Finite frequency H_∞ control for vehicle active suspension systems[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2011, 19(2): 416-422.
- [26]R. Wang, H. Jing, H. R. Karimi, etc. Robust fault-tolerant H_∞ control of active suspension systems with finite-frequency constraint[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2015, 62: 341-355.
- [27]H. Du, N. Zhang. Constrained H_∞ control of active suspension for a half-car model with a time delay in control[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2008, 222(5): 665-684.
- [28]X. Shao, F. Naghdy, H. Du, etc. Output feedback H_∞ control for active suspension of in-wheel motor driven electric vehicle with control faults and input delay[J]. ISA Transactions, 2019, 92: 94-108.
- [29]X. Chen, L. Wu, J. Yin, etc. Robust H_∞ control design of an electromagnetic actuated active suspension considering the structure non-linearity[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2019, 233(4): 1008-1022.
- [30]I. Ahmad, X. Ge, Q. L. Han. Decentralized dynamic event-triggered communication and active suspension control of in-wheel motor driven electric vehicles with dynamic damping[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2021, 8(5): 971-986.
- [31]H. Pan, W. Sun, J. Zhang, etc. Adaptive event-triggered control for vehicle active suspension systems with state constraints[J]. IFAC-PapersOnLine, 2018, 51(31): 955-960.
- [32]H. Zhang, X. Zheng, H. Li, etc. Active suspension system control with decentralized event-triggered scheme[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 67(12): 10798-10808.
- [33]L. Liu, X. Li, Y. J. Liu, etc. Neural network based adaptive event trigger control for a class of electromagnetic suspension systems[J]. Control Engineering Practice, 2021, 106: 104675.
- [34]Z. Fei, X. Wang, M. Liu, etc. Reliable control for vehicle active suspension systems under event-triggered scheme with frequency range limitation[J]. IEEE

-
- Transactions on Systems, Man and Cybernetics: Systems, 2019, 51(3): 1630-1641.
- [35] F. Ding, Q. Li, C. Jiang, etc. Event-triggered control for nonlinear leaf spring hydraulic actuator suspension system with valve predictive management[J]. Information Sciences, 2021, 551: 184-204.
- [36] W. Li, H. Du, D. Ning, etc. Event-triggered H_∞ control for active seat suspension systems based on relaxed conditions for stability[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 149: 107210.
- [37] H. Li, Z. Zhang, H. Yan, etc. Adaptive event-triggered fuzzy control for uncertain active suspension systems[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2018, 49(12): 4388-4397.
- [38] Y. Xu, R. Song, L. Korba, etc. Distributed device networks with security constraints[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2005, 1(4): 217-225.
- [39] Y. Li, S. Ling, C. Peng, etc. Jamming attacks on remote state estimation in cyber-physical systems: A game-theoretic approach[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2015, 60(10): 2831-2836.
- [40] A. D'Innocenzo, F. Smarra, M. D. D. Benedetto. Resilient stabilization of multi-hop control networks subject to malicious attacks[J]. Automatica, 2016, 71: 1-9.
- [41] Y. Yuan, P. Zhang, L. Guo, etc. Towards quantifying the impact of randomly occurred attacks on a class of networked control systems[J]. Journal of the Franklin Institute, 2017, 354: 4966-4988.
- [42] A. Ashok, M. Govindarasu, V. Ajjarapu. Online detection of stealthy false data injection attacks in power system state estimation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(3): 1636-1646.
- [43] A. Teixeira, I. Shames, H. Sandberg, etc. A secure control framework for resource-limited adversaries[J]. Automatica, 2015, 51: 135-148.
- [44] Y. Mo, B. Sinopoli. On the performance degradation of cyber-physical systems under stealthy integrity attacks[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2016, 61(9): 2618-2624.
- [45] X. Chen, Y. Wang, S. Hu. Event-based robust stabilization of uncertain networked control systems under quantization and denial-of-service attacks[J]. Information Sciences, 2018, 459: 369-386.
- [46] Z. Pang, G. Liu, D. Zhou, etc. Two-channel false data injection attacks against output tracking control of networked systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(5): 3242-3251.

-
- [47]C. D. Persis, P. Tesi. Networked control of nonlinear systems under denial-of-service[J]. *Systems & Control Letters*, 2016, 96: 124-131.
 - [48]X. Bu, H. Dong, F. Han, etc. Event-triggered distributed filtering over sensor networks with deception attacks and partial measurements[J]. *International Journal of General Systems*, 2018, 47(5): 522-534.
 - [49]C. Kwon, I. Hwang. Reachability analysis for safety assurance of cyber-physical systems against cyber attacks[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2018, 63(7): 2272-2279.
 - [50]A. Teixeira, I. Shames, H. Sandberg, etc. A secure control framework for resource-limited adversaries[J]. *Automatica*, 2015, 51: 135-148.
 - [51]G. Park, H. Shim, C. Lee, etc. When adversary encounters uncertain cyber-physical systems: Robust zero-dynamics attack with disclosure resources[J]. 2016 IEEE 55th Conference on Decision and Control, 2016, 5085-5090.
 - [52]H. Jeon, Y. Eun. A stealthy sensor attack for uncertain cyber-physical systems[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2019, 6(4): 6345-6352.
 - [53]Z. Li, G. H. Yang. A data-driven covert attack strategy in the closed-loop cyber physical systems[J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2018, 355(14): 6454-6468.
 - [54]R. Langner. Stuxnet: Dissecting a cyberwarfare weapon[J]. *IEEE Security & Privacy*, 2011, 9(3): 49-51.
 - [55]Y. Mo, S. Weerakkody, B. Sinopoli. Physical authentication of control systems: Designing watermarked control inputs to detect counterfeit sensor outputs[J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2015, 35(1): 93-109.
 - [56]J. Rubio-Hernan, L. De Cicco, J. Garcia-Alfaro. On the use of watermark-based schemes to detect cyberphysical attacks[J]. *Eurasip Journal on Information Security*, 2017, 2017(8): 1-25.
 - [57]B. Satchidanandan, P. R. Kumar. Dynamic watermarking: Active defense of networked cyber-physical systems[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2017, 105(2): 219-240.
 - [58]A. Hoehn, P. Zhang. Detection of replay attacks in cyber-physical systems[J]. 2016 American Control Conference, 2016, 290-295.
 - [59]H. S. Sanchez, D. Rotondo, T. Escobet, etc. Detection of replay attacks in cyberphysical systems using a frequency-based signature[J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2019, 356(5): 2798-2824.
 - [60]M. T. Ravichandran. Resilient Monitoring and Control Systems: Design, Analysis,

- hr/>
- and Performance Evaluation[J]. Dissertations & Theses Gradworks, 2015.
- [61]Y. Li, P. Zhang, L. Zhang, etc. Active synchronous detection of deception attacks in microgrid control systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(1): 373-375.
- [62]S. Choi, Y. Han. Vibration control of electrorheological seat suspension with human-body model using sliding mode control[J]. Journal of Sound and Vibration, 2007, 303(1-2): 391-404.
- [63]C. Liang, C. Chiang. A study on biodynamic models of seated human subjects exposed to vertical vibration[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2006, 36(10): 869-890.
- [64]H. Gao, W. Sun, P. Shi. Robust sampled-data H_{∞} control for vehicle active suspension systems[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2010, 18(1): 238–245.
- [65]Z. Wang, F. Yang, D. W. C. Ho, etc. Robust H_{∞} Control for Networked Systems With Random Packet Losses[J]. IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics Part B, 2007, 37(4): 916-924.
- [66]H. Qiu, A. K. J. Al-Nussairi, Z. S. Chevinli, etc. Integrating digital twins with neural networks for adaptive control of automotive suspension systems[J]. Scientific Reports, 2025, 15(1): 11078.
- [67]X. Ni, M. Luo, J. Cheng, etc. Dual-stage transmission event-triggered sliding mode control for interval type-2 fuzzy vehicle active suspension systems under improved weighted try-once discard protocol with hybrid network attacks[J]. Information Sciences, 2025, 698: 121770.
- [68]D. Sain, B. M. Mohan, J. M. Yang. Development of a 2-DoF nonlinear fuzzy PI–PD controller for a tractor active suspension system[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 232: 110076.
- [69]H. H. Tang, N. S. Ahmad. Enhanced Fuzzy Logic Control for Active Suspension Systems via Hybrid Water Wave and Particle Swarm Optimization[J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2025, 23(2): 560-571.
- [70]G. Ji, S. Li, G. Feng, etc. Time-delay compensation control and stability analysis of vehicle semi-active suspension systems[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2025, 228: 112414.
- [71]D. Li, Y. Zhao, F. Lin, etc. Adaptive backstepping fast terminal sliding mode control for nonlinear uncertain active suspension system with mechanical elastic

wheel[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2025, 47(2): 87-88.

[72]L. Li, M. Niu, Y. Xia, etc. Event-triggered distributed fusion estimation with random transmission delays[J]. Information Sciences, 2019, 475: 68-81.

攻读硕士期间取得的学术成果

- [1] 李中原, 万金伟, 刘祥玉. 第一届安徽省高校智能机器人创意大赛省级三等奖
- [2] 李中原, 刘宏建. 重放攻击下基于人体模型的不确定座椅悬挂系统的 H_∞ 控制. 安徽工程大学学报. (已录用)

致 谢

三年的研究生生活即将结束，回首这段充满挑战与成长的旅程，我心中充满了感激之情。行文至此，我要向刘宏建教授和谭海龙副教授致以最崇高的敬意和最诚挚的感谢。不论从论文的选题构思到研究方法的确定，还是从文献的梳理分析到实验数据的严谨解读，都给予了我悉心的指导和无私的帮助。老师的耐心与包容让我在遇到困难时能够坚定信心，老师的鼓励与支持让我在学术道路上不断前行。

感谢课题组的全体老师在科研过程中给予我的帮助与建议，感谢与我共同学习的张心怡、申亚港、王博、徐雯瑶、丁汝葭、杨露、袁飞、汪炜桀等同届小伙伴和张吉、盛梦瑶、王奕等师弟师妹们的支持与帮助，感谢我的室友杜杨、严昊、王海军同学，感谢你们的陪伴让这段旅程充满温暖与力量。

感谢我的家人。你们的理解与支持是我前进的动力源泉。无论我遇到怎样的困难，你们始终是我最强有力的后盾。你们的爱与关怀让我能够心无旁骛地追求学术梦想。

最后，感谢所有在研究生阶段给予我帮助的朋友和同学。你们的陪伴与鼓励让我在学术道路上不再孤单。这段经历将成为我人生中最宝贵的财富。