

线控转向系统齿条动态间隙的鲁棒控制

卢彩红

上海龙创汽车设计股份有限公司 上海

【摘要】线控转向系统是现代汽车技术中的重要组成部分，其动态性能的精确控制对于提升驾驶安全性和操控性能至关重要。在此背景下，齿条动态间隙的鲁棒控制方法成为研究的热点问题。传统控制方法往往难以有效应对系统的不确定性和外部干扰。本文提出了一种基于鲁棒控制理论的齿条动态间隙控制方法，通过构建不确定性模型和外部干扰模型，设计了鲁棒控制器以保持系统的稳定性和动态性能。仿真结果表明，该方法能够显著改善齿条动态间隙的控制精度，增强系统对外部干扰的抗干扰能力。

【关键词】线控转向系统；齿条动态间隙；鲁棒控制；外部干扰；系统稳定性

【收稿日期】2025 年 3 月 10 日

【出刊日期】2025 年 4 月 18 日

【DOI】10.12208/j.ijme.20250023

Robust control of rack dynamic clearance in steer-by-wire system

Caihong Lu

Shanghai Launch Automotive Technology Co. Ltd., Shanghai

【Abstract】The steer-by-wire system is a crucial component of modern automotive technology, and precise control of its dynamic performance is vital for enhancing driving safety and handling performance. In this context, the robust control method for rack dynamic clearance has become a hot research topic. Traditional control methods often struggle to effectively address system uncertainties and external disturbances. This paper proposes a rack dynamic clearance control method based on robust control theory. By constructing uncertainty models and external disturbance models, a robust controller is designed to maintain system stability and dynamic performance. Simulation results show that this method can significantly improve the control accuracy of rack dynamic clearance and enhance the system's anti-disturbance capability against external disturbances.

【Keywords】Steer-by-wire system; Rack dynamic clearance; Robust control; External disturbance; System stability

引言

智能汽车和自动驾驶技术的快速发展使线控转向系统（Steer-by-wire, SBW）成为关键技术之一。与传统机械转向系统相比，线控转向通过电子控制替代机械连接，提供更精确的操控和更高的设计灵活性。齿条动态间隙问题在外部干扰和内部不确定性影响下，仍是影响系统稳定性和可靠性的主要因素。为了确保系统高效运行，如何精确控制齿条动态间隙成为关键挑战。鲁棒控制理论在处理不确定性和干扰方面具有明显优势，是解决该问题的有效方法。本文提出了一种基于鲁棒控制的齿条动态间隙控制策略，旨在通过优化控制方案提升线控转向系统的性能，为相关技术发展提供新的思路与理论支持。

1 线控转向系统的齿条动态间隙问题分析

线控转向系统（SBW）作为现代智能汽车的重要组成部分，其核心优势在于电子化控制替代了传统机械连接，不仅提升了操控精度，还带来了更高的设计灵活性。齿条动态间隙问题在该系统中始终存在，成为影响系统稳定性和可靠性的关键因素之一。齿条动态间隙指的是在转向系统工作过程中，齿条和驱动部件之间由于不完全接触而产生的间隙变化。这一现象不仅导致了驾驶时的反应迟缓和不精准，还会引起系统的震动、噪音等不良表现，严重影响驾驶体验与安全性。

齿条动态间隙的产生通常涉及多方面因素，其中最主要的两个因素是机械磨损和外部干扰。随着

使用时间的增加,转向系统中的齿轮、齿条等关键部件会经历不断的摩擦,导致其表面磨损和形状变化。这些磨损使得原本紧密啮合的部件逐渐松动,从而产生动态间隙,影响转向精度和系统响应。外部干扰也是导致齿条间隙变化的关键因素。在行驶过程中,尤其是在路面不平或者急转弯的情况下,车辆的振动和加速度会导致齿条和驱动部件之间的相对位置发生变化。此类变化往往具有非线性和时变性,难以预测,并且与车辆的运行状态紧密相关,进一步加剧了系统的复杂性,增加了控制的难度和不确定性。

为了解决齿条动态间隙对系统稳定性的影响,传统的控制方法通常依赖于反馈控制策略。由于线控转向系统本身的复杂性和多变的外部环境,仅通过简单的反馈控制很难有效地消除动态间隙带来的不良影响^[1]。具体来说,传统控制策略无法充分考虑到系统在复杂环境中的不确定性和干扰,导致系统的鲁棒性较差。如何设计一种具有鲁棒性的控制方案,以应对动态间隙对系统性能的挑战,成为了研究的重点。通过应用鲁棒控制理论,可以在控制器设计中充分考虑系统的不确定性,优化控制策略,从而提高系统的稳定性和抗干扰能力。这也为进一步提升线控转向系统的性能提供了理论依据和技术支持。

2 鲁棒控制理论在齿条动态间隙控制中的应用

在齿条动态间隙的控制过程中,鲁棒控制理论的应用提供了一种有效的解决方案。鲁棒控制的核心思想是设计一种控制器,使系统能够在面对外部干扰和内部不确定性时保持稳定,并达到期望的性能。在齿条动态间隙控制中,系统常常受到多种不确定因素的影响,包括部件磨损、外部振动以及环境变化等,这些因素使得传统的控制方法难以有效应对。而鲁棒控制通过引入不确定性模型,可以有效地识别和补偿这些不确定性,从而优化系统的动态性能。

鲁棒控制方法通过对系统的建模和分析,能够更准确地描述齿条动态间隙的非线性和时变特性。在传统的控制方法中,诸如PID控制或线性控制往往依赖于系统的精确数学模型,而在实际应用中,模型的参数可能会随着环境变化、系统老化或外部扰动而发生不确定性变化,这使得传统控制方法的效果大打折扣。不同,鲁棒控制并不依赖于系统模型的精确性,而是通过设计一个对系统不确定性具有高度容忍度的控制器,确保系统能够在各种工况下保

持稳定运行。对于线控转向系统而言,这意味着鲁棒控制能够适应不同的行驶状态,包括路面条件变化、驾驶行为差异等,并实时调整控制参数,确保转向系统的精度和稳定性。鲁棒控制能够有效地抑制齿条动态间隙变化所带来的转向误差,减少因不稳定性引发的操控不精准,从而提升驾驶安全性和舒适性。

应用鲁棒控制理论可以显著提升线控转向系统的响应速度和精度。当系统遭遇振动、冲击等外部扰动时,鲁棒控制能够实时修正控制输入,减少齿条动态间隙引起的负面影响^[2]。鲁棒控制策略能够更好地处理系统中的非线性和时变特性,使得即便在不完全了解系统具体参数的情况下,控制器仍能保持较高的稳定性和精度。这种方法的优势不仅体现在系统对干扰的抵抗能力上,还能有效延长系统的使用寿命,减少因齿条磨损和间隙变化带来的维护成本。鲁棒控制在齿条动态间隙控制中的应用,不仅提升了系统的性能,还为实际工程中的系统设计提供了可行的理论指导和技术支持。

3 基于鲁棒控制的齿条动态间隙控制策略设计

在齿条动态间隙的控制中,设计一个基于鲁棒控制的控制策略可以有效提升线控转向系统的稳定性和抗干扰能力。该策略的设计核心是构建一个适应性强且具有鲁棒性的控制器,以确保系统能够在面对外部干扰、内部不确定性以及齿条磨损等变化条件下,依然维持精确的操控性能。控制器的设计依赖于对系统动态特性的深入理解,尤其是齿条动态间隙这一非线性、时变的复杂现象。为了实现这一目标,首先需要对系统进行建模,并在控制算法中充分考虑各种不确定性因素,如系统的非线性行为和不确定负载变化等。

基于鲁棒控制的设计策略考虑到系统中存在的时变参数和不确定因素,通过引入适应性控制机制,使控制器能够根据实际工作状态动态调整控制参数。为了实现更高的控制精度,控制器需要能够实时感知齿条的动态间隙变化,并根据变化情况自动调节控制输出。该策略通过设定多个控制目标,如最小化齿条间隙对转向精度的影响、提高系统对振动和外部扰动的适应能力等,进而设计出一个鲁棒控制器。这种控制器能够在各种工况下稳定运行,并有效抑制由于齿条间隙引发的误差,从而确保线控转向系统能够在实际驾驶过程中提供平稳的操控体验。

在实现该控制策略时,鲁棒控制算法的实际应用需要综合考虑系统的非线性特性以及实时反馈机制。控制器不仅要对外部扰动做出快速反应,还必须对内部的不确定性做出准确的估计和补偿。通过仿真和实验验证,基于鲁棒控制的齿条动态间隙控制策略能够显著提高系统的响应速度和精度^[3-7]。与传统控制方法相比,鲁棒控制策略展现了更强的抗干扰能力和稳定性,尤其在复杂的驾驶环境中,能够有效抑制由齿条间隙引起的误差。这一策略的成功应用不仅提升了线控转向系统的整体性能,也为齿条动态间隙控制的实际工程应用提供了有力的技术支撑。

4 仿真分析与实验结果

在齿条动态间隙控制策略的设计与应用中,仿真分析是评估控制效果的重要手段。通过仿真,可以在不同的工况下验证鲁棒控制策略的有效性,特别是在面对系统不确定性和外部干扰时,控制策略是否能够保持系统稳定性和精度。在仿真模型中,考虑了车辆的多种行驶状态,包括平稳行驶、急转弯、颠簸路面等情境,并模拟了不同程度的齿条间隙变化和干扰因素。仿真结果显示,基于鲁棒控制的策略相比于传统的PID控制方法,能够显著减少由于齿条间隙引起的转向误差,并且能够在复杂的工况下保持较高的控制精度。特别是在高频扰动和强烈外部干扰的情况下,鲁棒控制策略展示了其优越的抗干扰能力和系统稳定性。

实验验证是检验仿真结果的重要步骤。在实际实验中,采用了具备实时反馈机制的硬件平台,通过搭建实际的线控转向系统来测试鲁棒控制策略的性能。实验结果进一步验证了仿真分析中的结论。在各种驾驶情境下,实施鲁棒控制后,系统能够实时调整控制输入,精确控制齿条动态间隙,显著提升了转向响应速度和稳定性。尤其在复杂环境下,如急刹车或高频振动的情况下,系统的稳定性和操控性得到了显著改善。与传统控制策略相比,鲁棒控制不仅减少了因齿条间隙波动带来的转向误差,还有效提高了驾驶安全性和舒适性。

实验结果还表明,鲁棒控制策略在延长系统寿命方面具有明显优势。通过对系统在长时间使用后的性能测试,发现实施鲁棒控制后,齿条磨损和动态间隙变化对系统性能的影响显著减少^[8]。这表明,鲁棒控制策略能够有效减缓齿条磨损进程,降低维护

成本,提高系统的长期稳定性。这些仿真与实验结果共同验证了基于鲁棒控制的齿条动态间隙控制策略在实际应用中的可行性和优势,为线控转向系统的实际工程应用提供了有力的支持和参考。

5 结语

基于鲁棒控制的齿条动态间隙控制策略,在提高线控转向系统稳定性和精度方面表现出了显著优势。通过仿真分析和实验验证,表明该策略能够有效应对系统中的不确定性和外部干扰,显著提升转向性能,减少齿条间隙对系统稳定性的负面影响。鲁棒控制策略还具有延长系统使用寿命、降低维护成本的优势。整体而言,该策略为线控转向系统的优化设计提供了新的思路和技术支持,具有广泛的应用前景,对未来智能汽车的发展具有重要的实际意义。

参考文献

- [1] 李煜,曾凯,蔡玉梅.基于齿条力估算的线控转向系统二自由度线性二次高斯控制[J].邵阳学院学报(自然科学版),2025,22(02):38-44.
- [2] 佟雨哲,张昕.基于MPC的线控转向系统主动转向控制策略研究[J].车辆与动力技术,2025,(01):21-28.
- [3] 郭峰,陈慧.基于干扰观测器的线控转向齿条位移跟踪控制[C]//中国汽车工程学会.第三十一届中国汽车工程学会年会论文集(3).同济大学汽车学院,2024:35-41.
- [4] 周小川.面向信息物理系统的商用车电液线控底盘设计优化研究[D].南京航空航天大学,2023.
- [5] 范瑞浩.多模式线控转向执行系统设计与控制策略研究[D].吉林大学,2023.
- [6] 杨蕊璇.基于转向负载观测的线控转向系统路感模拟研究[D].吉林大学,2023.
- [7] 孙昌秀.自动驾驶双电机电动线控转向冗余控制研究[D].燕山大学,2023.
- [8] 李怀宇.线控转向系统齿条力估计与随动控制研究[D].哈尔滨工业大学,2022.

版权声明:©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS