

基于视觉引导的机械臂轨迹规划技术

王 帅

武汉纺织大学阳光校区 湖北武汉 430200

摘 要: 在工业自动化与智能制造蓬勃发展的背景下,视觉引导下机械臂轨迹规划技术已成为人们关注的焦点。本文对视觉引导技术原理及分类进行综述,并对机械臂轨迹规划理论基础进行介绍,主要包括轨迹规划定义、分类及关键技术等。着重研究基于视觉引导下机械臂轨迹规划,主要包括视觉信息获取和处理、轨迹规划算法和轨迹规划实现及验证。通过建立实验平台并对实验结果进行分析证明了所提方法的有效性与实用性,旨在对提高机械臂灵活性、准确性及智能化水平有重要指导意义。

关键词: 视觉引导;机械臂;轨迹规划;图像处理;模型预测

引言

机械臂是现代工业生产自动化生产线上一个重要部件,机械臂轨迹规划是否准确灵活直接关系到生产效率与产品质量。在计算机视觉技术不断发展的背景下,出现了以视觉引导为核心的机械臂轨迹规划技术,该技术可以实时采集环境信息并依据视觉反馈动态调整以增强机械臂适应性与灵活性。

一、视觉引导技术概述

(一) 视觉引导技术的原理

视觉引导技术以视觉传感器获取环境信息、把图像信息转换成机械系统可以理解的信息、用于实时控制为核心原理。它一般依靠摄像头和激光雷达等视觉设备来实时监控目标的位置,姿态和移动过程。利用视觉反馈可以使机械臂随环境变化而动态地调节运动轨迹以达到准确完成任务的目的。视觉引导技术将计算机视觉和机械运动有效地结合在一起,可以在复杂环境下支持自动化操作,特别是在定位、抓取和装配任务上。在实践中,视觉引导系统采用图像处理算法来提取对象的特征,利用这些信息优化机械臂的路径以提高其精度与灵活性。

(二) 视觉引导技术的分类

视觉引导技术可按不同应用场景及处理方式划分。常用分类有基于目标识别,深度学习,激光雷达等。以目标识别为核心的视觉引导大多依靠传统图像处理方法对目标物体进行位置与姿态识别,从而对机械臂动作进行调节;采用深度学习为基础的视觉引导技术,通过深度神经网络对图像进行更为深入的解析,这种方法拥有

出色的自我学习功能,并能适应更为复杂的场景;利用激光雷达进行的视觉指导是通过激光扫描技术来捕获三维空间的信息,这种方法特别适合在复杂且不断变化的环境中使用。每一种分类都有自己具体的应用领域,针对不同需要选择适当的视觉引导技术能够提高系统效率与可靠性。

二、机械臂轨迹规划理论基础

(一) 轨迹规划的定义与分类

轨迹规划就是按照任务要求对机械臂初始位置至目标位置的轨迹及动作序列进行设计与计算。其需综合考虑机械臂运动学约束,动力学约束和环境中障碍物。轨迹规划通常有两种类型:一是路径规划,重点研究如何寻找一条有效地从始到终的道路;二是轨迹规划问题,除路径选择问题之外,还有轨迹中时间的控制问题,也就是如何将机械臂运动的速度与加速度合理地分配给路径中。轨迹规划可分为离散轨迹规划与连续轨迹规划两种。离散轨迹规划对于任务状态清晰且离散的情景比较合适,连续轨迹规划对于需要平滑过渡的复杂动作任务比较合适。

(二) 轨迹规划的关键技术

轨迹规划关键技术有运动学建模、轨迹优化、碰撞检测和避障和实时控制。运动学建模为轨迹规划提供依据,阐述机械臂各关节间关系及运动能力;轨迹优化是一种通过运用优化算法,在满足各种约束条件的前提下,来寻找最优运动路径的方法,这通常涉及最短路径和最小能量消耗等多个目标;碰撞检测及避障为了保证机械臂移动时不会对周围的物体造成撞击,通常采用几何算

法及传感器信息进行障碍物的检测及规避；实时控制的核心目标是确保在不断变化的环境中，轨迹规划的结果能够被实时地执行。

三、基于视觉引导的机械臂轨迹规划技术方法

(一) 视觉信息的获取与处理

1. 图像采集设备的选择

基于视觉引导进行机械臂轨迹规划时，图像采集设备类型与性能的优劣直接关系到视觉引导系统精度与可靠性。常见的图像采集设备包括RGB摄像头、深度摄像头、立体摄像头以及激光雷达等。RGB摄像头是以拍摄二维图像的方式提供视觉信息的摄像头，一般应用在对比较简单的环境下，能够利用图像处理技术对目标物体进行位置与形状的提取。该装置因其造价低廉，操作方便而被广泛地应用在简单物体识别与定位任务中。深度摄像头具备捕获三维深度数据的能力，它提供了场景的三维建模，尤其在复杂环境下，能够对物体的距离、方向和姿势进行准确的分析。相较于传统摄像头，深度摄像头能够很好地处理周围环境中被物体遮挡的情况，并提供更多空间信息。立体摄像头采用双目视觉技术来模拟人眼的操作模式，通过比较两台摄像头的角度差异来计算物体的深度信息，从而能够生成高精度的三维图像，这对于细致的抓取和装配任务是非常有用的。激光雷达是一台能够在激光扫描环境中捕获三维点云数据的仪器，它在多变和动态的场景中能够提供极为精确的空间信息，特别是在实时环境建模和障碍物侦测方面表现出色。利用激光雷达，机械臂可以获得周围环境准确的空间信息，可以有效地规避障碍物和优化运动轨迹。在选择适合的图像采集设备时应既考虑成本、精度等因素，又考虑具体任务要求。比如在动态生产环境下，深度摄像头与激光雷达可以提供更准确的反馈信息以保证机械臂对环境变化做出实时的轨迹调整响应。

2. 图像预处理与特征提取

图像预处理要进行去噪处理，利用多种去噪算法消除图像干扰因素以改善图像质量。常用的去噪方法有中值滤波，均值滤波和Gaussian滤波，它们能有效地消除图像随机噪声并提高清晰度。图像增强作为图像预处理的又一重要环节，它以增强图像对比度、亮度为目的，从而使图像目标更突出、更易于后续加工。常见图像增强技术有直方图均衡化，对比度拉伸。边缘检测在图像预处理中处于核心地位，从图像中提取边缘可以辅助系统对物体轮廓及边缘信息进行识别，并在此基础上提取

其形状特征。常用的边缘检测算法有Canny边缘检测，Sobel算子。特征提取的过程是在经过预处理的图像中抽取有代表性的数据，如角点、边缘、纹理和颜色等，这些建议的特征为后续的目标检测和路径规划提供了坚实的基础。常见的特征提取算法有SIFT（尺度不变特征变换），SURF（加速稳健特征），ORB（Oriented FAST and Rotated BRIEF），它们能在图像上提取稳定而有区分度的特征点。利用这些特性，该系统可以实现对物体定位，姿态估计以及对其运动轨迹预测等功能，从而为之后轨迹规划和机械臂控制等提供准确信息。

(二) 轨迹规划算法

1. 基于视觉反馈的轨迹优化

以视觉反馈为核心的轨迹优化技术利用实时视觉信息动态调整机械臂轨迹，其目的是提高轨迹执行精度和灵活性。该优化方法通过视觉传感器连续采集目标物体及周围环境实时图像数据并依据其校正机械臂运动轨迹。视觉反馈提供轨迹规划所需的环境数据并进行实时更新，利用该动态信息可以使机械臂在动作过程中对自身路径进行自适应调节。以视觉反馈为基础进行轨迹优化，主要依靠闭环控制机制对轨迹进行实时比对修正。闭环控制系统将图像处理和运动控制算法相结合，可以动态地计算出目标和机械臂间的误差，根据误差对机械臂运动路径进行调节。常见的控制方法主要有PID控制以及模型预测控制（MPC）。PID控制器采用比例、积分和微分三个参数对机械臂运动状态进行调节，以保证机械臂能稳定跟踪目标轨迹。模型预测控制是基于当前的视觉反馈来预测未来一段时间的轨迹，并对其进行调整，目的是减少系统误差并加快响应速度。以视觉反馈为基础的轨迹优化既可以实现静态环境中的轨迹调整，又可以有效地处理动态环境中的障碍物干扰问题。以抓取任务为例，目标物体移位或者被遮挡后，该系统能够依据视觉反馈及时对机械臂运动轨迹进行调整，以避免碰撞，准确执行任务。

2. 基于模型预测的轨迹规划

基于模型预测的轨迹规划根据机械臂运动学与动力学模型对系统进行优化，并采用优化算法对未来时刻的运动轨迹进行预测，以规划出机械臂最优路径。模型预测控制（MPC）是该方法中经常采用的一种技术，它通过对机械臂运动进行实时建模，预测其未来的运动轨迹，并利用优化算法来选择最适合的运动路径。MPC在设计轨迹时，充分考虑了机械臂的各种限制条件，如移动速

度、加速度和环境中的障碍等。因此，它能够综合考虑多个目标，例如最短的路径、最低的能量消耗和最高的速度。MPC可以通过预测未来轨迹来发现实际移动前可能存在的矛盾或者阻碍因素，以便提前做出调整以保证轨迹规划安全高效。区别于传统轨迹规划方法，模型预测轨迹规划可以实时对路径进行优化，根据周围环境变化进行动态调整，从而使机械臂能更准确，更有效地运行于复杂，动态工作环境下。模型预测具有能应对复杂非线性系统、多重约束条件等优点，尤其适用于要求快速响应、精确控制等应用场景。MPC进行轨迹规划时，通过对目标函数进行不断优化来计算最佳控制输入和根据预测结果进行路径调整，从而达到更精细轨迹跟踪的目的。

(三) 轨迹规划的实现与验证

1. 实验平台搭建

建立实验平台是验证视觉引导机械臂轨迹规划技术的一个重要环节。实验平台一般由机械臂、视觉采集系统、计算平台以及控制系统几个部件组成。平台搭建时首先要选择合适的机械臂来满足实验需求，这类机械臂要求有更多自由度来满足各种任务要求。视觉采集系统利用多种摄像头和传感器来捕获周边环境和目标物体的信息，常用的设备包括RGB摄像头、深度摄像头和激光雷达。计算平台负责对视觉系统采集到的图像数据的处理和轨迹规划，主要工作包括基于图像数据的环境建模、目标定位和轨迹优化计算任务。控制系统再依据计算平台规划结果对机械臂运动实施实时控制以保证机械臂按规划轨迹运行。为保证该实验平台能对轨迹规划算法进行综合检验，该平台需支持对各种环境及任务场景进行仿真。比如，该平台可通过布置动态障碍物和改变工作环境光照条件，在实际使用过程中模拟复杂条件。另外，构建实验平台还要兼顾系统的实时性与精确性，从而保证实验时可以对轨迹规划算法的性能进行检验与评价。该平台应具有一定灵活性，可针对不同实验需求对其进行调节与优化，从而实现对各种场景中系统有效性的验证。

2. 实验结果分析

实验结果分析对于轨迹规划系统的性能验证至关重要，实验数据采集与分析可以评价实际环境下轨迹规划算法的性能。在试验过程中一般要多做组试验，既有静态环境轨迹规划试验，也有动态环境避障试验。这些试

验将机械臂实际执行轨迹同规划轨迹相比较、计算误差值、对轨迹执行精度及稳定性作出评价。从实验结果可评价基于视觉反馈轨迹优化与基于模型预测轨迹规划算法的性能。比如实验能够验证动态环境下视觉反馈是如何辅助系统实时调节目标物体的位移或者有障碍物的情况。实验结果也可对控制系统进行实时性分析，评价系统能否在复杂环境下及时作出反应和精确地进行轨迹。除此之外，该实验还能评估轨迹规划算法在面对不同任务复杂度，例如不同的障碍物密度和不同的运动速度时，其规划效果如何。综合实验结果可辨识出系统优劣，为下文算法优化奠定基础。试验过程中可能存在的问题有轨迹误差，响应延迟和系统稳定性，对其进行深入剖析可为后续技术改进提供数据支撑，促进系统进一步优化。

结束语

总之，本论文对基于视觉引导下的机械臂轨迹规划技术进行了研究，理论分析与实验验证表明其具有增强机械臂灵活性与适应性等优点。在计算机视觉与机器学习技术日益进步的今天，以视觉为导向的机械臂轨迹规划技术将来会越来越智能化、自动化，给工业自动化、智能制造等领域带来革命性变化。经过深入的研究与运用，这一技术可望广泛应用于医疗手术，精密装配，危险环境作业以及其他更多的领域中，从而对人类社会的发展起到更大的推动作用。

参考文献

- [1] 张斌. 基于OpenCV视觉引导的多自由度机械臂的研究与应用[J]. 科技资讯, 2024, 22(10): 52-54.
- [2] 常财超, 胡浩然, 尹纪康, 陈松. 视觉引导的番茄采摘机械臂定位与轨迹控制研究[J]. 电子产品世界, 2024, 31(05): 8-12.
- [3] 陈策博, 万琴, 苏宏博, 刘波. 基于PatMax视觉引导的机械臂末端轨迹规划与控制[J]. 自动化与仪表, 2024, 39(01): 84-88.
- [4] 颜小豪, 刘楠, 王毅, 陶佳, 杨长辉. 基于视觉引导的机械臂对接规划[J]. 机械设计与研究, 2023, 39(05): 38-43+54.
- [5] 海康机器人3D视觉引导机械臂拆码垛解决方案[J]. 物流技术与应用, 2023, 28(S2): 42.

半主动减振器rattle噪音识别与优化

张 磊

同济大学汽车学院 上海 200082

摘 要: 半主动悬架系统能够提供不同的阻尼力, 相比传统的被动减振器, 阻尼的变化会使减振器内部产生更大的冲击, 随着里程数的增加, 减振器rattle会变得更加明显, 这对减振器内部阀系的设计提出了更高的要求, 以满足驾驶舒适性, NVH和安全的要求。由于减振器rattle主要通过结构传播进入车内, 很难用麦克风识别到, 本文通过对比减振塔端的振动与主观评价, 建议振动评价指标。为了优化减振器rattle噪音, 研究了半主动减振器在不同阻尼力下, 对减振器噪音的影响, 得到最佳控制电流。同时还研究了一定耐久里程下, 减振器的rattle的变化情况, 并通过台架实验, 找到问题原因, 并通过优化阀系耐磨性, 提高了减振器耐久后的rattle性能。

关键词: 半主动减振器; Rattle; CDC 阀; 电流控制; 气体氮碳共渗技术

前言

随着汽车逐渐走向电动化和智能化, 智能悬架越来越多地被应用在电动汽车上。由于缺少了发动机噪音的掩蔽效应, 电动汽车在行驶过程中格外安静, 对车内的各零部件的NVH带来了更大的挑战。

汽车悬架作为底盘系统的关键部件, 起着衰减路面激励的重要作用, 其性能的好坏决定着整车的操纵稳定性、平顺性以及NVH (Noise, Vibration, Harshness) 性能。影响悬架性能的因素很多, 橡胶衬套主要是用于约束悬架构件间的相对运动、缓冲各构件之间的振动冲击以及弥补装配制造误差等。

减振器的rattle主要是由于活塞杆的低幅值高频振动通过top mount传递到车身, 车身钣金再通过空气传入乘员的耳内。Rattle的主要频率在100 ~ 800Hz, 听起来表现为“咕噜咕噜声”。

提高可控减振器的NVH性能对于以后智能悬架在电动汽车上的普及具有很大的正面意义。

本研究主要针对减振器的rattle噪音, 通过分析半主动式减震器的激励源的振动特性, 建立橡胶模型, 分析并优化top mount的动态性能, 从而减小车内的rattle噪音。

作者简介: 张磊 (1991-), 男, 贵州铜仁人, 工程师, 同济大学, 硕士学历, 专业: 机械, 研究方向: 车辆工程。

一、半主动减振器的基本构造和工作原理

半主动减振器结构图如图1所示, 主要由控制线、活塞杆、密封圈、工作缸、储油缸、缓冲块、主动CDC阀、被动附阀以及被动底阀构成。

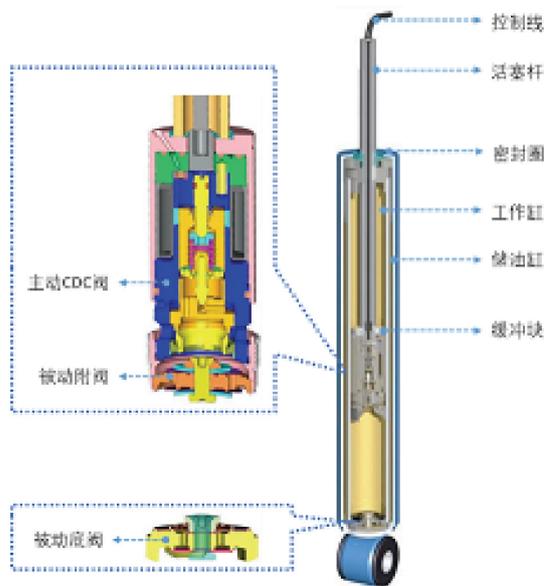


图1 半主动减振器结构图

主动CDC阀、被动附阀和被动底阀相互配合, 共同控制减振器内部油液的流动以及工作腔的压力平衡等, 使得减振器工作缸内不产生气泡, 避免减振器在压缩和复原过程中产生空程冲击现象。储油腔上部充有一定的氮气, 底部油液则通过底阀和工作腔的下腔相连, 在减振器活塞杆上下运动或由于环境温度的改变使得油液体积发生变化时, 能够保证油液的供给。

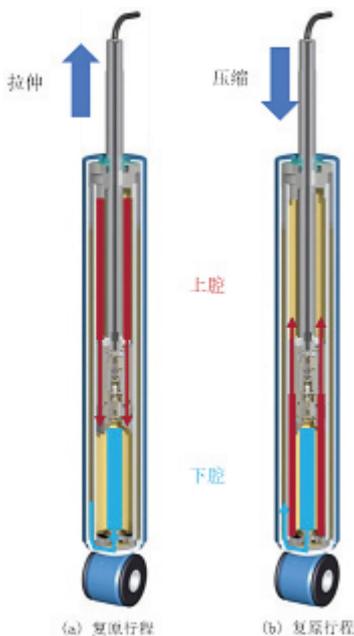


图2 减振器工作原理示意图

减振器的拉伸工作原理如图2(a)所示，减振器在拉伸行程时，活塞向上运动，此时外圈油液从上工作腔经CDC阀以及附阀流入下工作腔，同时由于下工作腔增大，储油腔里的油液也会经底阀流入下工作腔。油液主要经由CDC阀，附阀以及底阀时产生节流压力，将振动转换成热能消散出去，从而达到减振的目的。减振器的压缩工作原理如图2(b)所示，减振器在压缩行程时，活塞向下运动，油液从下工作腔经CDC阀以及附阀流入上工作腔，同时有一部分油液从下工作腔经过底阀流入储油腔。当油液经过阀系时，由于阀片的节流效应产生一定的节流压力，从而将振动转化成热能分散出去，达到减振的目的。

二、整车实验

当汽车在不平道路行驶时，在车内会听到从减振器附近发出的低频敲击声，主观描述为rattle，即“咕噜”声。首先我们需要通过设计整车实验，来分析rattle声的来源，传递路径以及特征频率。在实验中，我们选取某品牌SUV为研究对象，在试车场里的不规则混凝土路上以23km/h速度匀速驾驶，采集声音和振动数据，测试道路如图3所示。



图3 不规则混凝土路

实验中，我们在主驾内耳布置了一个麦克风如图4所示。在前减振器活塞杆，减振塔，以及减震筒下端布置分别布置了一个三向加速度传感器，如图5所示。

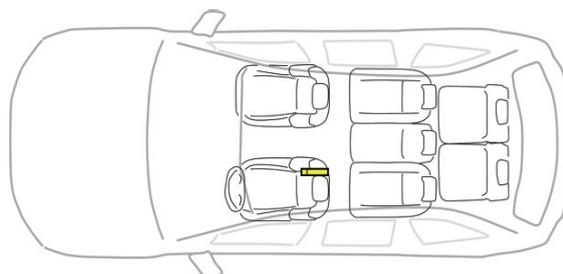


图4 车内麦克风位置

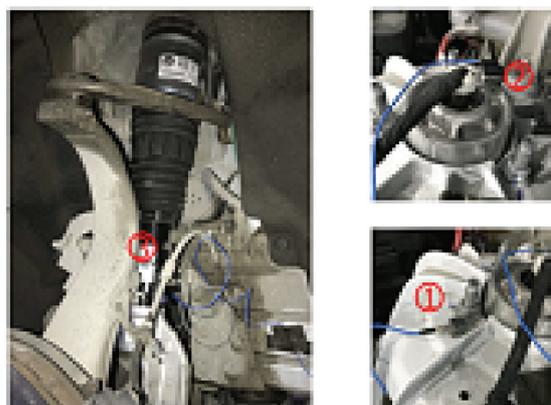


图5 加速度传感器位置

实验结果显示，减振器的rattle在车内是比较低频的“咕噜声”，通过分析车内麦克风采集的声音信号，无法识别到rattle特征。而通过分析在活塞杆，减振塔和减震筒底部采集的加速度信号，均可以识别到明显的rattle特征，频率范围在100-1600Hz之间。

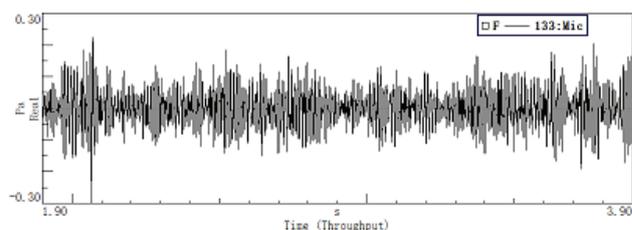


图6 主驾内耳噪音

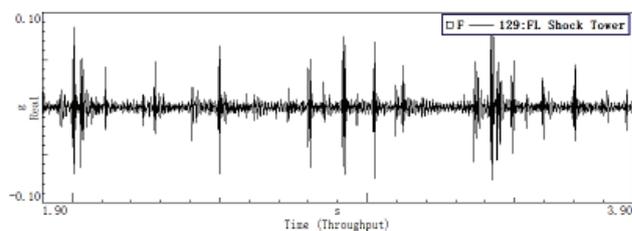


图7 减震塔端振动

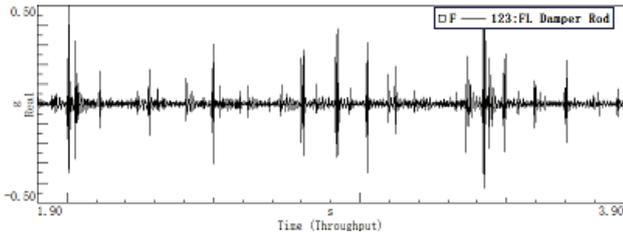


图8 活塞杆端振动

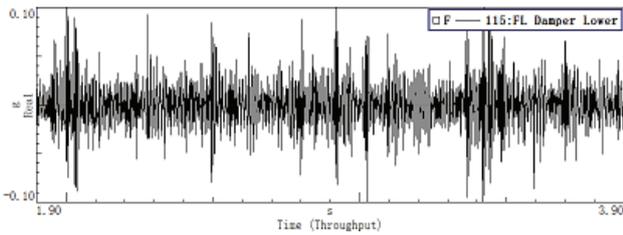


图9 减震筒下端振动

三、减振器电流对rattle噪音的影响

CDC减振器通过调整CDC阀的开度，调节节流压力，从而实现不同的阻尼。而CDC阀的开度调节则是通过控制减振器的通电电流实现的。在减振器工作状态下，减振器的电流会根据路面的颠簸情况，进行实时调整，波动范围在0-1.8A。为了研究电流对噪音的影响，我们以0.5A为单位，测试了减震塔上的振动。不同电流下噪音表现如图10所示，可以发现，从0A到1.8A，随着电流的增大，100-300Hz的振动值会逐渐变小，我们把该频率段的振动称为低频rattle。而300-1600Hz的振动值会逐渐变大，我们把该频率段的振动称为高频rattle。

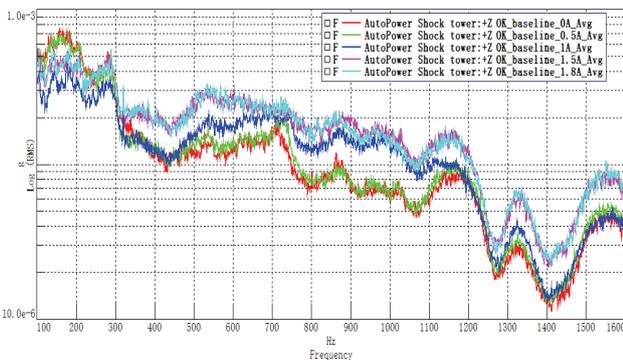


图10 不同电流下噪音表现

通过进一步以0.1A为单位，测试减振器的振动，并且分别以100-300Hz和300-1600Hz的振动均方根为纵坐标，以电流为横坐标，绘制曲线如图11所示。通过实验，我们发现当减振器电流在1.0A时，高频rattle和低频rattle综合表现最好。

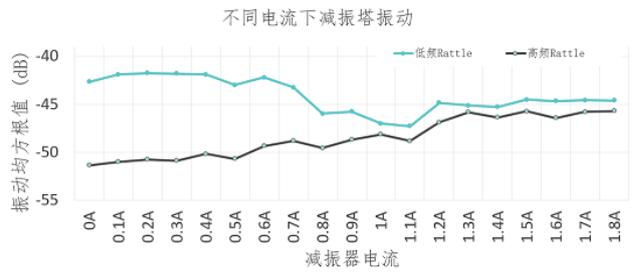


图11 不同电流下高低频rattle振动

四、行驶里程对减振器rattle的影响

为了研究随着里程的增加，减振器rattle的变化情况，我们以耐久车为实验对象，每个25%里程定期跟踪耐久实验车的减振器rattle情况。测试结果如图12所示，可以看到，随着里程数的增加，减振器rattle振动在逐渐增大。主观评价rattle噪音有明显恶化。

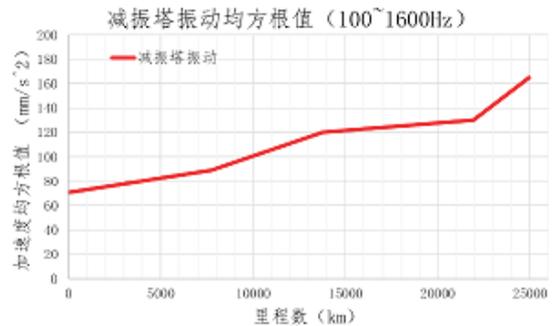


图12 减振器rattle随里程影响

五、减振器台架实验

为了研究减振器rattle产生的机理以及随耐久变化的情况，我们分别以新件和耐久后的样件为研究对象，在台架上进行振动实验。振动台架如图13所示，通过工装将活塞杆上端固定，然后在减振器下端施加路谱载荷。在活塞杆上布置一个三向加速度传感器采集振动信号。在减振器下端和活塞杆上布置拉线传感器，采集活塞杆的位移。



图13 减振器振动台架

实验结果如图14所示。可以看到，新的减振器和耐久后的减振器均存在rattle，rattle现象主要发生在压缩开始的时候。耐久后rattle明显增大，和整车表现一致。

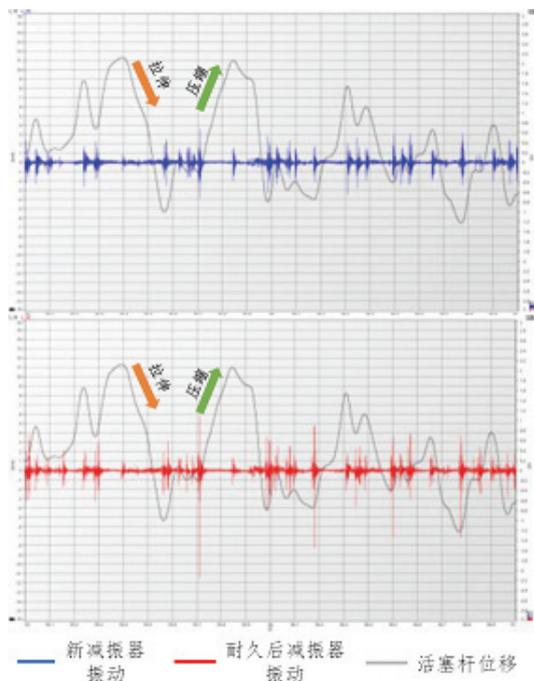


图14 耐久前耐久后振动对比

通过进一步对新减振器和耐久后减振器拆解分析，最终将问题锁定在主动CDC阀。主动CDC阀工作原理如图15所示。在拉伸行程时，油液从上工作腔经CDC阀流下下工作腔，阀环受到油压的作用，向上运动。在压缩行程时，油液从下工作腔经CDC阀流入上工作腔，阀环受到油压的作用，向下运动。阀环的上下运动产生了rattle。

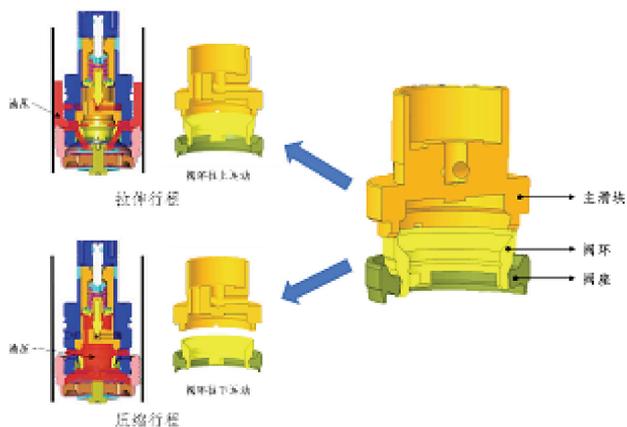


图15 CDC阀工作原理图

通过对阀环进行3D扫描，如图16所示，可以看到，经过一段里程行驶过后，阀环的上部比耐久前变得更平，阀环的下部发生了变形，更换新的阀环，rattle噪音明显

变小。从而我们得到结论，耐久后减振器阀环的磨损使rattle噪音变大。

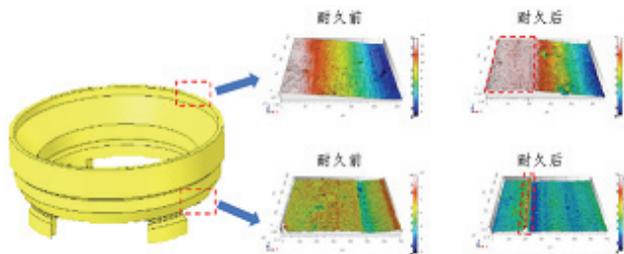


图16 阀环3D扫描图

六、减振器rattle优化方案

气体氮碳共渗技术是一种具有与传统盐浴氮碳共渗相同的质量和性能，但不存在质量和环境问题的氮碳共渗方法。一般情况下，气体氮碳共渗温度设定在570摄氏度左右。在此过程中，加入以氨气为主要成分的混合气体，使碳化物和氮化物在制造材料的表面形成复合层，从而在下面形成扩散层。氮化层的形成显著改善了钢部件的机械性能，包括耐磨性、耐腐蚀性和疲劳耐久性。

阀环是钢材通过机加工生产的。为了改善减振器耐久后的rattle噪音，需要降低阀环在耐久过程中的磨损。如图17所示，通过对阀环进行气体氮碳共渗处理，显著增加了阀环的耐磨性。

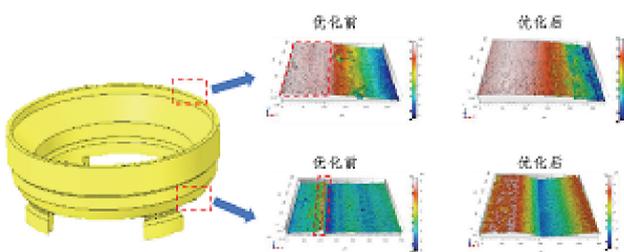


图17 阀环优化前后对比

结论

(1) 由于车内很难用麦克风采集到减振器rattle噪音。本文通过采集减振塔，活塞杆以及减振器筒下端的振动，发现减振塔的振动能够和主观评价很好的对应起来。并且识别到减振器rattle的主要频率范围为100-1600Hz。

(2) 减振器电流对rattle高低频振动产生不同影响，从0-1.8A，100-300Hz的低频振动会逐渐变小，300-1600Hz的高频振动会逐渐增大。车内噪音表现为，减振器电流小于1.0A时，rattle表现为低频的“咚咚”声。当电流大于1.0A时，rattle表现为“咕噜”声。减振器在1.0A时，整体rattle噪音表现最好，可以有效改善耐久前

的 rattle 问题。

(3) 随着里程数的增加,减振器 rattle 会变大。结合 CDC 阀的工作原理,通过台架分析,发现 CDC 阀内的阀环在一定耐久里程后,在上下运动的撞击点都产生了不同程度的磨损,使得 rattle 噪音变大。对阀环进行气体氮碳共渗硬化处理,可以显著提高阀环的耐磨性和耐腐蚀性。通过 3D 扫描撞击点表面,优化后的阀环相比优化前改善明显,从而解决了减振器耐久后的 rattle 的问题。

参考文献

- [1] 翁建生. 基于磁流变阻尼器的车辆悬架系统半主动控制 [D]. 南京航空航天大学, 2002.
- [2] 杨柳青, 陈无畏, 高振刚, 陈一锴. 基于电磁阀减振器的 1/4 车辆半主动悬架非线性控制 [J]. 农业机械学报, 2014, 45 (04): 1-7+36.
- [3] 赵宇. 阀控半主动减振器研究及整车应用 [D]. 吉林大学, 2013.
- [4] 王恩慧. 汽车减震器的现状及其发展趋势 [J]. 科技资讯, 2021, 19 (12): 78-80.
- [5] Park, Y., Kim, H., Joo, K., and Jeon, N., "Characteristic Evaluation and Improvement of Suspension Rattle Noise," SAE Technical Paper 2010-01-1141, 2010
- [6] Seiyed Hamid Mousavi. Modeling and controlling a semi-active nonlinear single-stage vibration isolator using intelligent inverse model of an MR damper [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2020, 34(9).