第 37 卷第 6 期 2024 年 12 月

常 州 工 学 院 学 报

Journal of Changzhou Institute of Technology

Vol. 37 No. 6 Dec. 2024



doi : 10. 3969/j. issn. 1671 ⁃ 0436. 2024. 06. 005

轮毂电机驱动电动汽车垂向动力学控制研究综述 黄赟1 , 刘成晔1 , 赵景波2 , 李明辉1 , 周大宝1

(1 . 江苏理工学院汽车与交通工程学院，江苏 常州 213001 ; 2. 上海第二工业大学智能制造与控制工程学院，上海 201209)

摘要：从轮毂电机驱动电动汽车整车动力学特性、簧下质量增加对车辆动力学性能影响以及轮 毂电机不平衡电磁力对车辆动力学性能影响 3 个方面，介绍了 国 内外轮毂驱动电动汽车垂向动力 学研究现状，对适用于电动汽车的悬架控制策略进行归纳和总结，最后对轮毂电机驱动电动汽车未 来的发展进行展望。

关键词：轮毂电机；垂向动力学；主动悬架；主动控制

中图分类号：U463 . 6 文献标志码：A 文章编号：1671⁃ 0436(2024)06⁃ 0033⁃ 06

Summary of Vertical Dynamics Control Research on Hub Motor Driven Electric Vehicles

HUANG Yun1 ,LIU Chengye1 ,ZHAO Jingbo2 ,LI Minghui1 ,ZHOU Dabao1

( 1 . School of Automobile and Transportation Engineering , Jiangsu University of Technology , Changzhou 213001 , China; 2. School of Intelligent Manufacturing and Control Engineering , Shanghai Polytechnic University , Shanghai 201209 , China)

Abstract : This study introduces the current research status of vertical dynamics of wheel driven electric vehicles at home and abroad from three aspects : the overall dynamic characteristics of electric vehicles dri⁃ ven by wheel hub motors , the impact of increased unsprung mass on vehicle dynamic performance , and the impact of unbalanced electromagnetic force of wheel hub motors on vehicle dynamic performance. It sum⁃ marizes and generalizes suspension control strategies applicable to electric vehicles , and finally looks forward to the future development of wheel hub motor⁃driven electric vehicles.

Key words : hub motor; vertical dynamics ; active suspension; active control

0 引言

为了减少气候变化和化石燃料资源减少带来 的影响，新能源汽车已经成为世界各国的重点研 究对象[1] 。轮毂电机驱动电动汽车具有延迟时 间短、可控性好、结构灵活、底盘空间少等优点，也 被认为是未来分布式驱动电动汽车的主要形式。 从汽车动力学角度看，轮毂电机驱动这种将驱动

电机安装在车轮的特殊布置形式存在以下缺点： 悬架系统簧下质量增加会导致车辆的垂向振幅增 大，从而降低了车辆行驶的平顺性和安全性，不利 于汽车控制[2]51 。电动汽车的垂向振动问题也是 轮毂电机驱动电动汽车的主要动力学问题。

悬架系统关系到车辆的乘坐舒适性和行驶安 全性，针对悬架系统簧下质量增加、车辆垂向振动 幅度增大的问题，对电控悬架的控制策略进行改

收稿日期：2024⁃01⁃03

作者简介：黄赟(1998—) , 男，江苏苏州人，硕士研究生，主要研究方向为新能源汽车控制与运用。

通信作者：刘成晔(1966—) , 男，江苏盐城人，博士，教授，lcyyyy@ 163 . com。

中国知网 https:Www.cnki . net

34 常州工学院学报 2024 年

善，使用有效的控制算法能够减小轮毂电机气隙 偏心性和不平衡电磁力，对提升悬架系统的减振 性能具有关键作用，可以显著改善轮毂电机的垂 向负效应并提高车辆的行驶平顺性和乘坐舒适 性 [3] 。本文针对轮毂电机驱动电动汽车垂向动 力学问题以及电控悬架技术的研究现状展开阐述 并进行分析与展望。

1 轮毂电机驱动电动汽车垂向动力 学特性研究

从研究角度来说，目前针对轮毂电机驱动电 动汽车的动力学特性研究主要包括 3 个方面：轮 毂电机驱动电动车整车动力学特性、簧下质量增 加对车辆动力学性能的影响、轮毂电机不平衡电 磁力对车辆动力学性能的影响[4] 。

1. 1 轮毂电机驱动电动汽车整车动力学特性

对轮毂电机驱动电动汽车整车动力学特性的 研究，学者们主要是在车辆纵横向运动上增加垂 向运动，将车辆各个子系统耦合后进行纵⁃横⁃垂 向分析 。车辆垂向运动的加入主要体现在整车集 成控制加入悬架系统 。纵向⁃横向⁃垂向动力学综 合控制也因为控制目标的增加和各个子系统间的 更复杂的耦合情况变得更加复杂 。为了降低子系 统之间的耦合引发的潜在冲突，需要采用合适的 控制策略来有效地协调和管理各个子系统的操 作，从而提高车辆的主动安全性、操纵稳定性和乘 坐平顺性。

国内外学者根据电动汽车之间的结构差异， 对不同的悬架系统进行仿真分析，研究其动力学 特性，同时也通过悬架控制器进行开发设计，优化 电动汽车悬架系统 。Wang 等[5] 针对轮毂电机驱 动电动汽车，利用 MATLAB/Simulink 对汽车的 动力系统进行建模仿真，利用观测器对纵向加速 度和横摆角速度进行观测，设计 PID 控制器，提高 了车辆的安全性 。绳辰[6] 以滑移率、质心侧偏 角、横摆角速度为观测对象，建立包含车辆纵向横 向速度、横摆角速度以及车轮转动的七自由度整 车模型，对车辆的行驶稳定性进行分析，同时对比 了 2 种驱动防滑控制器，并评估它们的控制效果。 Li 等[7] 基于纵向速度控制、横向速度控制和横摆

角速度控制，设计了改进的滑模控制律( SMC) , 对分布式驱动电动车的转向和驱动均有很好的适 用性 。Zhao 等[8] 采用考虑了车辆在纵向、横向和 垂向非线性耦合关系的用于分布式电动汽车的分 层集成控制器以保持车辆的行驶稳定性，首先建 立最优预指向横向加速度模型来模拟驾驶员对车 辆的预期反应，然后通过非线性滑膜算法将复杂 问题解耦，在车辆控制层实现多目标独立跟踪，并 计算出满足上级指令的预期总力，其次以降低轮 胎动载荷比和平衡垂直动载荷系数为目标设计轮 胎力分配层，最后控制作动器输出最佳轮胎力。 Zhao 等[9] 先建立 UEMF 模型分析感应电机内部 的力⁃电⁃磁耦合关系，然后建立能够捕捉瞬态轮 胎⁃路面接触斑和轮胎带变形的路面⁃轮胎⁃轮圈力 ( RTR) 模型，以准确描述路面⁃轮胎和轮胎⁃转子 力，最后将 UEMF 和 RTR 模型引入 1/4 SIWMS 模型中，研究垂向⁃纵向耦合车辆动力学。

轮毂电机驱动电动汽车整体动力学特性分析 的主要目标是解决多个控制系统之间的协调问 题 。然而，根据现有研究的情况，针对多子系统之 间的干涉冲突消除和通过最优控制实现一致协调 的问题，目前尚未形成被广泛认可的理论或方法。 1. 2 簧下质量增加对车辆动力学性能的影响

由于轮毂电机驱动电动汽车的特殊构造（ 在 轮胎内安装电机与减速器），导致整车悬架系统 簧下质量显著增加，车轮动载荷和车身振动加速 度的均方根值由于非簧载质量的增加而增大，严

重地 影 响 了 整 车 的 平 顺 性 和 稳 定 性 。Slaski 等 [2]61 在二自由度 1/4 动力学模型上，对悬架系统 评价指标的均方根值进行计算并绘制幅频特性曲 线，研究表明簧下质量增加严重影响了电动汽车 的平顺性。

′

为减小簧下质量增加带来的负面影响 ，有以 下主要策略：对轮毂电机进行轻量化设计、对轮 毂电机悬置元件进行设计、对电动车半主动悬 架以及 主 动 悬 架 的 控 制 策 略 进 行 设 计 。马 英 等 [10] 使用 patternsearch 函数对 1/4 车辆线性振 动模型中的轮毂电机悬架结构进行了优化 ，以 获得最佳的悬架结构和参数 ，并通过仿真验证。

中国知网 https:Www.cnki . net

这一优化措施旨在解决电机与车轮刚性连接引 发的汽车垂向不利影响 ，从而提高电动汽车的 平顺性和安全性 。陈辛波等[11] 建立 1/4 悬架动 力学模型 ，将动力吸振器参数在不同车速下进 行对比 ，分析其对振动加速度以及相对动载荷 的影响 。韩桂忠[12] 基于 1/4 车辆振动模型 ，利 用动力吸振器原理将轮毂电机悬置 ，并对 3 种不 同的减振型轮边驱动系统进行垂向振动对比分 析 ，以选择效果好、结构简单的减振结构 ，最后 利用模糊优化方法对电机进行轻量化设计 。Liu 等 [13] 和 Zhao 等[14] 也分别对轮毂驱动电动汽车 悬架系统进行研究 ，通过设计开发悬架系统控 制器的控制策略 ，并对已有的控制策略进行优 化 ，结果表明 ，研究车辆悬架系统的主动控制能 够显著提高车辆的乘坐舒适性和操纵稳定性。 Zhao 等[15] 提出新型轮毂电机驱动( NIWMD ) 模 型 ，从车辆平顺性和电机振动方面综合评价车 辆垂向性能 ，并对比了 NIWMD 模型、CMD 模 型和 IWMD 模型的垂直性能 ，结果表明 ，特别是 在高频共振区域 ，NIWMD 模型能够有效抑制振 动响应峰值 ，提高车辆的垂向性能 。Zhao 等[16] 先开发了集成消振系统( IVES ) , 然后基于考虑 时滞性的 H∞ 控制器 ，设计主动悬架系统 ，进 一 步构建了新的频率兼容轮胎( FCT ) 模型以提高 IVES 精度 ，结果表明 ，IVES 显著降低了簧载质 量加速度均方根和偏心距 ，改善了车辆的乘坐 舒适性 。综合上述学者研究内容 ，各优化方法 结果如表 1 所示 。由表 1 可知 ，设计轮毂电机悬 置结构以及对车辆电控悬架控制策略进行优化 均能有效改善车辆的垂向负效应 ，然而 ，目前将 多种方法结合并进行优化的研究并没有很多。

表 1 垂向负效应优化方法及结论

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 优化方法 | | 结论 |
| 轮毂电机轻量化设计  轮毂电机悬置机构设计  电动车电控悬架设计 | 电机轻量化难度大，垂向振动负效应 改善效果好  设计难度大，垂向振动负效应改善效 果较好  舒适性提高，垂向振动负效应改善效 果好 | |

1. 3 轮毂电机不平衡电磁力对车辆动力学性能 的影响

轮毂电机在受到路面激励时，定转子产生相 对偏心，引起电机气隙不均，进而产生不平衡电磁 力 。与路面激励一样，不平衡电磁力也是电动汽 车的主要激励源，针对不平衡电磁力，国内外学者 对其值的计算以及对车辆垂向动力学性能的影响 展开研究 。Yim 等 [17] 首先计算了气隙中的径向 和切向电磁力，然后建立了内转子永磁同步电机 的有 限 元 模 型，以 研 究 其 强 迫 振 动 特 性 。Lin 等 [18] 推导了引起电磁振动和噪声的径向力的时 空分布特征，采用二维快速傅里叶变换获得了具 有特定空间谐波阶数的径向力的频率分量，并对 6 种不同槽极组合电机的力谐波进行了比较 。左 曙光等[19] 使用相对磁导法计算电动汽车永磁同 步电机定转子静态和动态偏心引起的径向电磁 力，这一方法在原有磁导函数的基础上引入了偏 心磁导修正系数 。徐广徽[20] 基于 1/4 车二自由 度模型，将电机转矩波动引起的电机激励和路面 不平度激励两者耦合，建立了电动车纵、横、垂三 向耦合动力学模型，对比分析了耦合激励对电动 车操作稳定性和平顺性的影响 。Deng 等[21] 基于 路面激励时具有不平衡径向力的悬架响应模型， 探讨了不平衡径向力的产生原理以及转子偏心与 路面激励的耦合关系 。采用傅里叶级数对开关磁 阻电机非线性解析模型进行拟合，采用麦克斯韦 应力张量法对径向电磁力进行建模分析 。为减小 偏心状态下径向电磁力波动和不平衡径向力幅值 对轮毂电机驱动系统的影响，采用精英非支配排 序遗传算法对开关磁阻电机的径向电磁力波动和 不平衡径向力幅值进行改进 。张海军等[22] 考虑 轮毂电机驱动电动汽车受不平衡电磁力和路面随 机激励双重作用的情况，建立耦合振动模型并采 用 PSD 方法进行分析，结果表明，耦合激励加剧 了车辆的垂向振动。

综上所述，针对电机不平衡电磁力对汽车垂 向动力学性能的影响，需要将电磁模型和路面模 型进行耦合分析，将电磁场和电机固体机构耦合 后对电动车的垂向振动问题进行研究，但大多数 学者对电动车垂向耦合振动问题仅考虑某一稳态

中国知网 https:Www.cnki . net

36 常州工学院学报 2024 年

工况，对复杂的非稳态工况并没有深入研究。

2 轮毂电机驱动电动汽车电控悬架 研究

轮毂电机驱动电动汽车由于引入轮毂电机导 致车辆簧下质量增大，电机定转子偏心振动产生 不平衡磁拉力，车辆平顺性和行驶安全性明显下 降 。针对上述问题，目前的研究多是直接对电机 或者悬架系统进行主动控制，结合需求采用不同 的控制算法抑制车辆垂向振动，提升车辆的平顺 性 。适用于车辆的电控悬架可分为半主动悬架和 主动悬架，大部分学者分别针对这 2 种不同的悬 架，采用不同的控制算法对悬架系统进行改进，以 提升汽车的平顺性和安全性 。常见的悬架控制算 法主要有预瞄控制、最优控制、滑模控制、模糊控 制、鲁棒控制等，其特点如表 2 所示。

表 2 电控悬架控制算法特点

|  |  |
| --- | --- |
| 控制算法 | 特点 |
| 预瞄控制 | 有效改善车辆的平顺性，成本高，环境影响大 |
| 最优控制 | 有效提高 车 辆 操 作 稳 定 性 和 平 顺 性，但 鲁 棒 性 较差 |
| 滑模控制 | 鲁棒性较好，环境影响小，但控制切换过程中易产 生抖动 |
| 模糊控制 | 有效提高车辆安全性和平顺性，抗干扰能力差，模 糊规则总结困难 |
| 鲁棒控制 | 抗干扰能力强，成本低，但计算量大 |

2. 1 半主动悬架控制策略研究

半主动悬架通过传感器感知路面状况和车身 姿态，调整阻尼器的阻尼大小，进而适应不同道路 情况，无需外部能量输入，成本低、结构简单，是能 有效改善汽车行驶平顺性和稳定性的可控式悬架 系统 。Wang 等[23] 为消除轮毂电机对车身垂直振 动的负面影响以及降低轮毂电机垂直振动带来的 垂向负效应，设计了集成磁流变阻尼器和电机的 电磁减振系统，并通过台架试验验证了减振系统 的可行性 。曹洁[24] 通过分析磁流变阻尼器的工 作原理和动力学特性，在此基础上对磁流变阻尼 器结构优化，再基于 WOA⁃PID 控制算法设计半 主动悬架控制器，通过台架试验验证了此算法的

可行性 。李仲兴等[25] 首先考虑路面激励与电机 激励的耦合，建立了考虑轮毂电机驱动汽车系统 垂纵向以及电机扭转振动的动力学模型，然后将 自适应控制算法和线性二次型控制算法结合，提 出自适应线性二次型调节器半主动悬架控制策 略，以最优垂向振动性能为目标，设计控制器并进 行仿真实验，结果表明，所采取的控制策略使悬架 系统的簧载质量垂向与纵向振动加速度、悬架动 行程、车轮相对动载荷、轮毂电机偏心距都得到了 降低，有效提高了车辆的平顺性和安全性 。严传 馨 [26] 针对轮毂电机驱动电动汽车垂向动力学问 题，设计了基于 LQR 控制算法的半主动空气悬架 系统，并采用遗传算法( GA) 对 LQR 控制器进行 优化，结果表明，设计的 GA⁃LQR 控制器能有效 抑制车辆的垂向振动 。江洪等[27] 针对轮毂电机 驱动电动汽车簧下质量增加的问题，设计了 MPC 控制器，对半主动空气悬架进行主动控制，建立九 自由度整车模型进行仿真分析，结果表明，基于 MPC 的半主动悬架有效提升了车辆的各性能指 标，提高了车辆的舒适性和安全性 。综上所述，半 主动悬架能够显著改善轮毂电机驱动电动汽车垂 向负效应，提升汽车的平顺性和操作稳定性。

2. 2 主动悬架控制策略研究

轮毂电机驱动电动汽车结构与传统汽车相 同，同样是在车轮与车身之间安装主动悬架系统， 起到承重、减振、调节车身高度等功用，以改善车 辆的性能、舒适性和安全性，但是在控制时需要考 虑轮毂电机的耦合效应等因素 。主动悬架相对于 半主动悬架系统通常更复杂，包括更多的传感器、 执行器和控制算法，响应速度快，成本也更高。

Qin 等[28] 提出了基于动态减振结构的新型 减振方法，旨在缓解不平衡电磁力对电机定转子 偏心带来的负面影响，仿真结果表明，与传统悬架 系统相比，新型减振方法使乘坐舒适性、操作稳定 性以及定转子偏心问题都得到了改善 。范珍珍 等 [29] 建立了同时考虑电机转矩波动及路面不平 度双重激励的动力学模型，并提出频率滤波加权 控制算法，以改善车辆平顺性及车轮动载荷，仿真 结果表明，所提出的频率滤波加权控制算法路面 适应性良好，能有效降低车身加速度、悬架动行程

中国知网 https:Www.cnki . net

以及车轮相对动载荷，改善车辆的乘坐舒适性及 安全性 。吴行[30] 为消除轮毂电机驱动电动汽车 因为簧下质量增加以及电机偏心引起的不平衡电 磁力干扰带来的垂向负面效应，对电动汽车的主 动悬架控制进行研究，在考虑电磁耦合效应以及 电动车的乘坐舒适性和操作稳定性的性能要求 下，设计了用于电动汽车主动悬架系统的多目标 优化 H2/H∞ 控制器，通过试验验证了主动悬架系 统容错控制器的可行性和有效性，结果表明，主动 悬架能有效降低不平衡电磁力干扰以及簧下质量 增加带来的垂向负效应，大大提高了轮毂电机电 动汽车的行驶平顺性和安全性 。Bingülö 等[31] 针 对 4 × 4 轮毂电机驱动电动汽车非线性主动悬架 系统，设计了模糊 PID 控制器，实现了非线性整车 模型和实际工况的多目标优化，有效降低了车辆 的垂向振动 。李兰崧等[32] 采用针对轮毂电机驱 动电动汽车的动力吸振器悬架结构，采用模型预 测( MPC) 控制策略控制主动悬架，针对控制器的 稳定性进行优化设计，显著提升了车辆的舒适性。 综上所述，轮毂电机驱动电动汽车由于簧下质量 的大幅增加以及电机定转子偏心引起的不平衡磁 拉力，车身振动加剧，为车辆设计主动悬架控制器 能有效改善汽车的平顺性和操作稳定性。

对于目前的半主动悬架系统以及主动悬架系 统，国内外的研究都集中在优化各种控制算法以 及对减振结构进行设计，但这些优化与设计大部 分停留在仿真试验阶段，后续应该进一步结合实 际道路和实际轮胎模型，有针对性地进行一些实 车试验以验证仿真试验的有效性和可行性。

3 总结和展望

轮毂电机驱动电动汽车延迟时间更短、可控 性更好、结构更灵活、底盘空间更少，将是未来电 动汽车的主要驱动形式。

轮毂电机驱动电动汽车悬架系统由于电机的 引入，簧下质量大大增加，同时又由于电机激励与 路面激励耦合作用于车辆的悬架系统，汽车的平 顺性和操作稳定性大大恶化 。但大多数研究对汽 车垂向动力学特性的分析停留在单一稳态工况， 复杂的多工况亟须进一步研究。

为了改善轮毂电机电动车的垂向负效应，未 来可一方面改善轮毂电机电动轮结构，在电动轮 内部增设减振器，抑制电机引起的垂向振动，另一 方面从电控悬架入手，改进其控制策略。

未来悬架系统的研究应结合优化算法，建立 符合实际的轮胎模型，并在一些实际道路进行实 车试验，进一步挖掘轮毂电机驱动汽车的潜能。

［ 参考文献］

[1] 刘亚威，刘成晔，赵景波，等．轮毂电机驱动汽车垂向振动耦合及

其′ 主动控制综述[J] . 常州工学院学报，2023 ,36(3) :9 - 13.

[2] SLASKI G , GUDRA A , BOROWICZ A. Analysis of the influ⁃

ence of additional unsprung mass of in⁃wheel motors on the com⁃ fort and safety of a passenger car[ J] . Archiwum Motoryzacji , 2014 , 63(3) : 51 - 64.

[3] SHAO X , NAGHDY F , DU H , et al. Coupling effect between road excitation and an in⁃wheel switched reluctance motor on ve⁃ hicle ride comfort and active suspension control[ J] . Journal of Sound and Vibration , 2019 , 443 :683 - 702.

[4] 张将．轮毂电机驱动系统垂向动力学特性分析[ D] . 武汉：武 汉理工大学，2018.

[5] WANG Z , WANG Y , GAO Z. Torque distribution control stra⁃ tegy based on dynamic axle load for 8 in⁃wheel motor drive vehi⁃ cle[ J] . Energy Procedia, 2016 , 104 :550 - 555 .

[6] 绳辰．轮毂电机驱动电动汽车纵向稳定性控制研究[ D] . 北 京：北京交通大学，2014.

[7] LI B , DU H , LI W. Fault⁃tolerant control of electric vehicles

with in⁃wheel motors using actuator⁃grouping sliding mode con⁃ trollers[ J] . Mechanical Systems and Signal Processing , 2016 , (72/73) :462 - 485 .

[8] ZHAO H , CHEN W , ZHAO J , et al. Modular integrated longi⁃ tudinal , lateral and vertical vehicle stability control for distribu⁃ ted electric vehicles[ J] . IEEE Transactions on Vehicular Tech⁃ nology ,2019 ,68(2) : 1327 - 1338.

[9] ZHAO Z , ZHANG L , WU J , et al. Vertical⁃longitudinal cou⁃ pling effect investigation and system optimization for a suspen⁃ sion⁃in⁃wheel⁃motor system in electric vehicle applications[ J] .

Sustainability , 2023 , 15(5) :4168.

[10] 马英，邓兆祥，谢丹．轮毂电机悬架构型分析与优化[ J] . 中

南大学学报（ 自然科学版），2014 ,45(9) :3008 - 3013 .

[11] 陈辛波，王威．分布式驱动电动汽车垂向动力学特性研究及

悬架参数优化方法[ J] . 机电一体化，2014(6) : 16 - 21 .

[12] 韩桂忠．轮边 驱 动 电 动 汽 车 的 垂 向 振 动 分 析 与 结 构 优 化 [ D] . 重庆：重庆大学，2015 .

[13] LIU M, GU F, HUANG J , et al. Integration design and optimi⁃

中国知网 https:Www.cnki . net

38 常州工学院学报 2024 年

zation control of a dynamic vibration absorber for electric wheels with in⁃wheel motor[J] . Energies , 2017 , 10(12) :2069.

[14] ZHAO W , WANG Y , WANG C. Multidisciplinary optimiza⁃ tion of electric⁃wheel vehicle integrated chassis system based on steady endurance performance [ J ] . J. Clean. Prod. , 2018 , 186 :640 - 651 .

[15] ZHAO P , FAN Z. Design modeling and research on vertical

performance of a drive system with in⁃wheel motor as dynamic vibration absorber [ J] . Proceedings of the Institution of Me⁃ chanical Engineers Part D Journal of Automobile Engineering , 2023 , 237(4) :862 - 877.

[16] ZHAO Z , GU L , WU J , et al. An integrated vibration elimi⁃ nation system with mechanical⁃electrical⁃magnetic coupling effects for in⁃wheel⁃motor⁃driven electric vehicles [ J ] . Elec⁃ tronics , 2023 , 12(5) : 1117.

[17] YIM K, JANG J , JANG G , et al. Forced vibration analysis of an IPM motor for electrical vehicles due to magnetic force[ J] . IEEE Transactions on Magnetics , 2012 , 48(11) :2981 - 2984.

[18] LIN F , ZUO S , WU X. Electromagnetic vibration and noise

analysis of permanent magnet synchronous motor with different slot⁃pole combinations[ J] . Electric Power Applications , IET , 2016 , 10(9) :900 - 908.

[19] 左曙光，张国辉，吴旭东，等．倾斜偏心下轮毂永磁同步电机 电磁力分析 [ J] . 浙江大学学 报（ 工 学 版），2015 , 49 ( 5 ) :

901 - 907.

[20] 徐广徽．轮边驱动电动车平顺性和操稳性分析与控制研究 [ D] . 重庆：重庆大学，2014.

[21] DENG Z , LI X , LIU T , et al. Modeling and suppression of unbalanced radial force for in⁃wheel motor driving system[ J] . Journal of Vibration and Control , 2022 , 28 ( 21/22 ) : 3 108 - 3119.

[22] 张海军，万少华，张明杰，等．随机激励下电动汽车轮毂电机

耦合振动特性分析[ J] . 机械设计，2024 ,41(1) : 146 - 152. Ⅳ

[23] WANG R , JIANG Y , DING R , et al. Design and experimen

tal verification of self⁃powered electro⁃magnetic vibrationsup⁃ pression and absorption system for in⁃wheel motor electricvehi⁃ cles[ J] . Joural of Vibration and Control , 2022 , 28 (19/20) : 2544 - 2555 .

[24] 曹洁．基于鲸鱼⁃PID 控制算法的四轮驱动电动汽车半主动 悬架系统研究[ D] . 芜湖：安徽工程大学，2020.

[25] 李仲兴，宋鑫炎，刘晨来，等．轮毂电机驱动汽车半主动悬架 自适应最优控制[ J] . 重庆理工大学学报（ 自然科学），2021 ,

35(8) :25 - 32.

[26] 严传馨．轮毂电机驱动汽车半主动空气悬架垂向最优控制研 究[ D] . 镇江：江苏大学，2022.

[27] 江洪，陈勃，吴楚骐．轮毂电机电动汽车半主动悬架模型预测 控制[ J] . 重 庆 理 工 大 学 学 报（ 自 然 科 学），2022 , 36 ( 8 ) :

[28] QIN Y , HE C , SHAO X , et al. Vibration mitigation for in⁃ wheel switched reluctance motor driven electric vehicle with dy⁃ namic vibration absorbing structures[ J] . Journal of Sound and Vibration , 2018 ,419 :249 - 267.

65 - 74.

[29] 范珍珍，詹慧贞．开关磁阻式轮毂电机驱动电动汽车悬架系 统振动抑制[ J] . 重庆理工大学学报（ 自然科学），2020 , 34

(6) :77 - 82.

[30] 吴行．轮毂驱动电动汽车主动悬架系统控制研究[ D] . 重庆： 重庆大学，2021 .

[31] BINGÜLÖ , YILDIZ A. Fuzzy logic and proportional integral derivative based multi⁃objective optimization of active suspen⁃ sion system of a 4 × 4 in⁃wheel motor driven electrical vehicle [ J ] . Journal of Vibration and Control , 2023 , 29 ( 5/6 ) : 1366 - 1386.

[32] 李兰崧，罗建南，殷珺，等．轮毂电机驱动汽车主动悬架模型 预测 控 制 器 设 计 [ J ] . 机 械 设 计 与 研 究，2023 , 39 ( 3 ) :

180 - 184.

责任编辑：刘景平

中国知网 https:Www.cnki . net