

智能主动悬架作动器机械设计与能量回收机理研究

张鹏 罗凯

江铃汽车股份有限公司

摘要: 智能主动悬架系统能够根据车辆行驶状态与路面条件实时调节作动器输出力, 显著提升车辆行驶平顺性与操纵稳定性。作动器作为主动悬架的核心执行元件, 其机械结构与能量管理策略直接影响系统整体性能。本文聚焦电磁式主动悬架作动器, 系统分析作动器的工作原理与力学特性, 从结构拓扑优化、关键部件参数匹配及轻量化设计等方面阐述机械设计方法, 深入探讨基于电磁感应原理的能量回收机理及其与主动控制的协同机制。

关键词: 主动悬架; 电磁作动器; 机械设计; 能量回收; 机电耦合

车辆悬架系统承担着缓冲路面冲击、衰减车身振动的重要功能, 其性能直接影响车辆的乘坐舒适性与行驶安全性。主动悬架通过外部能量输入实现作动器力的主动调节, 能够在不同工况下保持最优的悬架特性, 代表了悬架技术的重要发展方向。作动器作为主动悬架的能量转换与力输出装置, 其机械结构设计的合理性与能量利用效率直接决定了系统的综合性能。

1 智能主动悬架作动器的工作原理与力学特性

1.1 电磁作动器的结构组成与工作模式

电磁作动器是智能主动悬架系统广泛采用的新型执行元件, 其基本结构由定子组件、动子组件及导向支撑机构构成。定子组件包括永磁体阵列与铁芯, 永磁体按照特定极性与排列方式固定在定子基座上, 形成空间分布磁场。动子组件由绕组线圈与骨架构成, 线圈在磁场中通电时受到洛伦兹力作用产生轴向运动, 推动悬架实现主动动力输出。导向支撑机构采用直线轴承或滑动导套, 保障动子与定子之间的精确对中与平稳运动, 防止侧向力对作动器造成损伤。

1.2 作动器力学特性与输出性能要求

电磁作动器的力学特性表现为输出力与运动状态之间的非线性关系, 其输出力由电磁力与阻尼力两部分构成。电磁力取决于线圈电流与磁场强度的乘积, 在磁场分布均匀的理想条件下, 电磁力与驱动电流呈线性关系, 这一线性区间是主动控制算法实现精准力调控的基础。阻尼力来源于动子运动过程中产生的涡流损耗与机械摩擦, 在能量回收模式下, 阻尼力表现为负载电阻上的反电动势效应, 通过调节外接负载阻抗可以改变阻尼力的大小。

1.3 机电耦合机理与能量转换过程

电磁作动器的机电耦合过程遵循电磁感应定律与能量守恒原理, 其本质是电能与机械能之间的双向转

换。在主动驱动模式下, 电能输入作动器, 线圈电流在磁场中产生电磁力推动动子运动, 电能转化为机械能, 机械能一部分用于克服悬架弹簧力与阻尼力, 另一部分转化为车身动能, 实现振动衰减。在能量回收模式下, 路面不平度激励导致车轮与车身之间产生相对运动, 动子相对于定子运动使线圈产生感应电动势, 机械能转化为电能, 转化效率取决于磁场强度、线圈参数及负载匹配条件。

2 智能主动悬架作动器的机械设计方法

2.1 结构拓扑构型优化设计

作动器结构拓扑构型决定其基本性能边界, 需要在有限空间内实现出力密度与响应速度的最佳匹配。圆筒型电磁作动器采用同轴布置的动子与定子结构, 磁场沿轴向分布, 具有结构紧凑、径向力自平衡的特点, 适用于空间受限的悬架安装环境。平板型电磁作动器采用平面式磁路结构, 磁通路径短、磁阻小, 能够获得更高的推力密度, 但对安装空间的要求较高。拓扑优化方法以作动器整体质量与出力密度为优化目标, 以磁路结构、材料分布及几何尺寸为设计变量, 通过有限元分析与优化算法迭代, 获得满足出力要求且质量最小的结构构型。

2.2 关键部件参数匹配设计

关键部件的参数匹配是实现作动器性能优化的核心环节, 涉及永磁体选型、线圈参数设计及气隙尺寸确定。永磁体选用高剩磁、高矫顽力的钕铁硼材料, 其磁性能温度稳定性需满足车辆全工况环境温度范围, 通过磁路仿真确定永磁体厚度与充磁方向, 使气隙磁场达到设计的磁通密度。线圈设计综合考虑推力需求、供电电压及热负荷限制, 线圈匝数影响推力常数与反电动势系数, 匝数增多提升推力输出能力但同时增大电感值, 限制电流响应速度。气隙尺寸是作动器设计

的关键参数,小气隙能够获得更高的磁场强度与推力密度,但增加装配精度要求与动定子碰撞风险,大气隙降低推力密度但改善散热条件与可靠性,气隙尺寸需在性能与可靠性之间取得平衡。

2.3 轻量化与结构可靠性设计

轻量化设计对于悬架作动器具有重要意义,作动器质量属于非簧载质量,其增加会降低车轮接地性能与悬架响应能力。材料选择方面,壳体与支撑部件采用铝合金或复合材料替代传统钢材,在保证结构刚度的前提下实现减重。结构设计方面,采用集成化设计理念将作动器与悬架结构件融合,减少附加连接件与过渡结构,简化力传递路径。可靠性设计重点关注作动器的疲劳寿命与环境适应性,直线运动副采用耐磨材料与自润滑结构,保障长期往复运动下的精度保持能力。密封结构采用多层密封与防尘设计,防止泥水、沙尘侵入作动器内部造成磨损与腐蚀。

3 电磁作动器能量回收机理与实现途径

3.1 能量回收的物理机理与数学模型

电磁作动器能量回收的物理本质是振动机械能向电能的转换过程,其机理基于法拉第电磁感应定律。当车辆行驶于不平路面时,悬架系统产生相对运动,作动器动子相对于定子运动,线圈切割磁感线产生感应电动势,感应电动势的幅值与动子运动速度成正比,比例系数即为作动器的反电动势系数。将线圈两端接入负载电路后,感应电动势驱动电流流过负载,电能消耗在负载电阻上,形成电制动效应,这种电制动效应对悬架系统表现为附加阻尼力。能量回收过程的数学模型包含电气方程与机械方程的耦合关系,电气方程描述感应电动势与负载电流的关系,机械方程描述电磁阻尼力与运动速度的关系。

3.2 能量回收电路拓扑与功率转换

能量回收电路负责将作动器输出的交流电能转换为储能装置可接受的直流电能,其拓扑结构直接影响能量回收效率与系统集成度。不可控整流电路采用二极管桥式整流,将三相交流电转换为脉动直流电,结构简单、可靠性高,但整流损耗较大且无法主动调节回收功率。可控整流电路采用功率开关器件替代二极管,通过脉冲宽度调制实现整流电压与电流的主动控制,可对电磁阻尼力进行调节,实现回收功率与悬架阻尼需求的协调控制。双向直流变换器连接整流输出端与储能装置,完成电压匹配与功率调节功能,储能装置多为超级电容或锂电池组,其充放电特性与作动器输出特性存在差异,变换器实现两者之间的阻抗匹配与能量管理。

3.3 主动控制与能量回收的协同机理

主动控制与能量回收在同一作动器上的集成,需要在功能实现与能量管理两个层面建立协同机制。功能协同层面,主动控制要求作动器输出力跟随控制指令变化,能量回收要求将振动能量转化为电能回馈,两者在同一物理系统中可能产生功能冲突。解决思路是采用模式切换策略,在需要主动减振时优先保障主动力输出,在平顺行驶工况切入能量回收模式。能量管理层面,通过双向变换器实现能量流的灵活调配,主动控制消耗的能量可部分来源于回收储存的能量,形成局部能量循环。控制策略层面,采用基于半主动与主动混合的控制框架,在能量回收模式下等效实现可控阻尼的调节功能,在主动模式下通过外部能量注入实现力输出,两种模式之间依据车辆状态与储能装置荷电状态进行平滑过渡,实现系统整体能耗的最小化。

4 作动器机械设计与能量回收的耦合机制

4.1 机械结构对能量回收效率的影响

作动器机械结构参数直接影响能量回收效率的上限,其中磁路结构决定了感应电动势的幅值与波形质量。采用高磁能积永磁材料与优化磁路结构,能够提升气隙磁通密度,在相同运动速度下获得更高的感应电动势,从而提高单位振动输入下的回收功率。线圈参数对回收效率具有双重影响,线圈匝数增加提升反电动势系数与回收电压,但同时增加线圈内阻,内阻增大导致欧姆损耗上升,存在最优匝数使回收功率最大。动子质量影响悬架系统的振动特性,较大的动子质量降低簧下系统的固有频率,改变振动能量的分布频带,进而影响可回收能量的总量。

4.2 电气参数对机械出力特性的影响

电气参数的选择不仅决定能量回收性能,还反向约束作动器的机械出力特性。线圈电感影响电流响应速度,电感值过大时,在脉冲宽度调制控制下电流纹波减小,但电流上升时间延长,限制作动器的动态响应能力,难以实现高频力指令的精确跟踪。反电动势系数与推力系数存在比例关系,较高的反电动势系数意味着较大的推力系数,有利于提升出力能力,但高反电动势系数在高速运动时产生较大的反电动势电压,可能超过电源电压限制,导致电流控制失效。

4.3 机电耦合系统的参数匹配原则

机电耦合系统的参数匹配需要遵循综合性能最优原则,兼顾主动控制能力与能量回收效率。匹配原则之一是推力密度与功率密度的平衡,在车辆悬架安装空间有限的情况下,优先保障足够的推力输出满足主动控制需求,在此基础上通过优化磁路与线圈设计提

升功率密度。匹配原则之二是响应速度与回收效率的协调,采用较小电感值的线圈设计有利于提升电流响应速度,但可能增加电流纹波与电磁干扰,需结合控制算法进行补偿。匹配原则之三是热负荷约束下的持续工作能力,作动器在主动控制模式与能量回收模式下的热负荷不同,设计时以最严苛工况为校核条件,确保温升控制在绝缘等级与永磁体工作温度范围内。

5 智能主动悬架作动器的技术挑战与发展趋势

5.1 集成化与轻量化的技术挑战

作动器集成化与轻量化发展面临多方面的技术挑战。结构集成方面,将作动器与悬架弹簧、减振器及导向机构集成为一体化模块,需要在有限空间内容纳电磁作动器的全部功能部件,同时满足悬架系统的承载要求与运动学特性。热管理方面,作动器集成化导致散热条件恶化,主动控制模式下的持续发热与能量回收模式下的热损耗叠加,对热设计提出更高要求,需要探索高效的热传导路径与冷却方案。轻量化方面,采用轻质材料替代传统材料需要解决材料匹配、连接工艺及长期可靠性问题,复合材料壳体与金属磁路的连接界面在振动工况下可能出现疲劳失效。

5.2 能量回收效率提升的技术路径

能量回收效率的提升是智能主动悬架作动器实现节能化应用的关键技术问题。在作动器本体层面,探索新型磁路拓扑结构,采用 Halbach 阵列等先进磁体布置方式,在不增加永磁体用量的前提下提高气隙磁通密度,提升能量转换的物理极限。在电路层面,研发宽电压范围、高效率的功率变换拓扑,降低整流与变换环节的能量损耗,采用同步整流技术替代二极管整流,将开关损耗降至最低。在控制策略层面,开发路面识别与工况自适应算法,依据实时路面等级与车辆状态选择最优能量回收模式,在城市道路等周期性激励工况下提高回收功率,在紧急工况下优先保障主动控制功能。在系统层面,将多个车轮的作动器能量回收系统互联,实现能量在不同悬架单元之间的再分

配,提升整体能量利用效率。

5.3 智能化与网联化的发展趋势

智能主动悬架作动器正朝着智能化、网联化的方向演进,与车辆自动驾驶系统深度融合。智能化体现在作动器内置传感器与信号处理电路,能够实时感知自身力输出状态、温度及位移等参数,通过控制器局域网络总线与悬架控制器通信,形成闭环自诊断与自适应调整能力。网联化体现在作动器接收来自车辆网联系统的前方路面信息,依据导航地图提供的道路类型与曲率半径、车联网提供的交通拥堵状况等信息,预调节悬架刚度与阻尼特性,使作动器在车辆到达特征路面时处于最佳工作状态。

6 结束语

智能主动悬架作动器作为实现车辆主动振动控制的核心执行元件,其机械设计与能量回收机理研究对于提升悬架系统综合性能具有重要意义。本文系统分析了电磁作动器的工作原理与力学特性,从结构拓扑优化、关键部件参数匹配及轻量化设计等方面阐述了机械设计方法,深入探讨了电磁感应能量回收的物理机理、电路实现途径及与主动控制的协同机制,在此基础上揭示了机械结构、电气参数与系统性能之间的耦合关系。

参考文献:

- [1] 彭志召. 电磁主动悬架作动器设计与控制策略研究综述 [J]. 机械工程学报, 2022,58(10):1-15.
- [2] 江浩斌. 车辆电磁式主动悬架能量回收机理与实验研究 [J]. 振动工程学报, 2023,36(2):325-334.
- [3] 郑玲. 电磁作动器结构优化设计与控制性能研究 [J]. 汽车工程, 2024,46(1):78-86.
- [4] 张俊智. 电动汽车主动悬架电磁作动器能量管理与控制策略 [J]. 中国公路学报, 2023,36(5):212-222.
- [5] 喻凡. 车辆电磁主动悬架作动器机电耦合特性与能量回收潜力分析 [J]. 上海交通大学学报, 2024,58(3):312-321.