

# 面向高速度平稳驱动的空气弹簧组合缓冲 与动圈自动对中技术

朱禹

上海瀚海检测技术股份有限公司, 上海 200433

DOI:10.61369/ERA.2026020005

**摘要 :** 高速度驱动系统的平稳性与可靠性是高端装备领域的核心技术诉求, 其缓冲性能与执行机构对中性直接决定系统动态响应质量。针对高速驱动场景下传统缓冲装置冲击抑制不足、动圈执行机构易出现偏心磨损等问题, 提出一种空气弹簧组合缓冲与动圈自动对中集成技术。首先剖析空气弹簧非线性刚度特性与动圈偏心致失效机理, 构建组合缓冲系统的力学模型, 明确空气弹簧与辅助缓冲元件的参数匹配关系; 进而设计基于磁流变效应的动圈自动对中机构, 通过磁场梯度调控实现偏心量的实时补偿。结合仿真分析验证组合缓冲系统在冲击载荷下的平稳性提升效果, 以及自动对中机构对偏心误差的抑制能力。研究结果表明, 该集成技术可有效降低高速驱动过程中的冲击峰值加速度30%以上, 将动圈偏心量控制在0.02mm以内, 为高速度平稳驱动系统的设计提供关键技术支撑。

**关键词 :** 高速平稳驱动; 空气弹簧; 组合缓冲; 动圈; 自动对中

## Air Spring Combination Buffering and Moving Coil Automatic Centering Technology for High-Speed Stable Driving

Zhu Yu

Shanghai Hanhai Testing Technology Co., Ltd. Shanghai 200433

**Abstract :** The smoothness and reliability of high-speed drive systems are core technical requirements in the field of high-end equipment, where their buffering performance and actuator concentricity directly determine the quality of system dynamic response. To address the insufficient impact suppression of traditional buffer devices in high-speed drive scenarios and the tendency of voice coil actuators to suffer eccentric wear, an integrated technology combining air spring composite buffering and voice coil automatic concentricity is proposed. First, the nonlinear stiffness characteristics of air springs and the failure mechanism caused by voice coil eccentricity are analyzed, and a mechanical model of the composite buffer system is constructed to clarify the parameter matching relationship between air springs and auxiliary buffer components; subsequently, a voice coil automatic concentricity mechanism based on magnetorheological effect is designed, achieving real-time compensation of eccentricity through magnetic field gradient regulation. Simulation analysis is combined to verify the effectiveness of the composite buffer system in improving stability under impact loads and the ability of the automatic concentricity mechanism to suppress eccentric errors. The research results show that this integrated technology can effectively reduce the peak acceleration during high-speed drive by more than 30%, control the voice coil eccentricity within 0.02 mm, and provide key technical support for the design of high-speed smooth drive systems.

**Keywords :** high-speed stable driving; air spring; combined buffering; voice coil; automatic centering

### 引言

在航空航天、高端制造等领域, 高速度驱动系统的应用日益广泛, 其运行过程中的平稳性直接影响装备的工作精度与使用寿命。高速驱动时, 执行机构启停阶段产生的冲击载荷易导致系统振动, 而动圈作为核心执行部件, 其与定子间的偏心会引发摩擦磨损, 严重降低驱动效率与可靠性。传统缓冲装置多采用单一弹性元件, 难以在宽速度范围内实现冲击抑制与平稳过渡的平衡; 动圈对中多依赖机械加工精度, 缺乏实时补偿能力, 无法适应高速驱动下的动态偏心变化。空气弹簧凭借其刚度可调节、非线性缓冲特性等优势, 在振动控

制领域得到应用，但单一空气弹簧在高速冲击下的响应滞后问题制约了其缓冲效果。动圈自动对中技术虽有磁控、液压等多种形式，但如何与缓冲系统协同设计，实现高速驱动场景下的一体化性能提升，仍是当前研究的难点。基于此，本文提出空气弹簧组合缓冲与动圈自动对中集成技术，通过缓冲系统的参数优化与对中机构的动态调控，解决高速驱动中的平稳性与对中性问题，为高端驱动装备的性能升级提供技术方案。

## 一、核心技术机理分析

### （一）空气弹簧缓冲机理与特性

空气弹簧以压缩空气为弹性介质，通过气体的可压缩性实现能量吸收与缓冲，其核心特性体现为非线性刚度，该特性由气体热力学过程与结构参数共同决定。在高速驱动场景下，缓冲过程的时间尺度极短，气体压缩过程可近似为绝热过程，其刚度特性满足绝热过程方程。与传统金属弹簧的线性刚度不同，空气弹簧的刚度随内压与容积变化而动态调整，当受到冲击载荷时，内压迅速升高，刚度随之增大，可快速抑制冲击位移；载荷减小时，刚度同步降低，实现平稳回弹，这种特性使其在冲击载荷变化时具备自适应缓冲能力。空气弹簧的缓冲性能受气囊结构、初始压力、有效容积等参数影响。气囊采用曲囊式结构时，其变形过程中有效承压面积的变化会加剧刚度的非线性；而膜式结构则具备更稳定的承压特性，适合高速驱动中的精准缓冲控制。初始压力决定了空气弹簧的静态刚度基准，较高的初始压力可提升系统的抗冲击阈值，但会降低低载荷下的缓冲灵敏度。有效容积通过气室设计实现调节，增大有效容积可降低刚度变化率，使缓冲过程更平稳，但会增加响应时间。单一空气弹簧在高速冲击下，由于气体压缩的滞后效应，易出现冲击峰值过后的二次振动，因此需要与辅助缓冲元件组合，形成协同缓冲机制。

### （二）动圈偏心机理与危害

动圈作为高速驱动系统的核心执行部件，其与定子之间的气隙均匀性直接决定电磁驱动力的稳定性。动圈偏心主要是由三个方面造成的：一是机械加工误差，包括动圈轴的圆度误差、定子装配的同轴度误差；二是动态载荷作用，高速驱动时动圈受到的惯性力、电磁力不平衡而导致瞬时偏心；三是运行磨损，长期使用后轴承间隙增大，使动圈的径向跳动量增大。偏心产生后，动圈与定子间的气隙非均匀分布，电磁驱动力沿圆周方向分布不均形成径向附加力。而该附加力会加剧动圈的径向振动，从而使气隙更恶化，形成“偏心——附加力——更大偏心”的恶性循环。特别是在高速驱动场景下动圈偏心的危害更大。偏心量大于气隙设计值的10%时，可产生明显的电磁噪声，驱动力变形幅度增大；偏心量达到气隙值的30%时，可能造成动圈与定子的机械摩擦，破坏线圈绝缘层，引起短路。另外，偏心引起的振动会传入整个驱动系统，影响其他部件的工作精度，如精密加工设备中，动圈偏心造成刀具进给误差，加工表面质量差。因此，动圈的实时自动对中是确保高速驱动系统可靠运行的关键。

## 二、空气弹簧组合缓冲系统设计

### （一）组合缓冲系统结构设计

为克服单一空气弹簧在高速冲击下响应滞后，产生二次振动，将空气弹簧与金属阻尼器组成单个复合缓冲系统，采用串联布局，进行协同工作。系统主要由曲囊式空气弹簧、环形金属阻尼器、气室调节装置三部分组成。曲囊式空气弹簧是主缓冲元件，是吸收冲击能量的主要部分，其材料为三层帘线增强橡胶，承受高速冲击下的瞬时高压；环形金属阻尼器嵌套于空气弹簧内部，它通过金属片的剪切变形而实现阻尼力调节，用于抑制空气弹簧的回弹振动。气室调节装置采用小型化电磁比例阀控制气室与外气源的通断，以控制空气弹簧初始压力，以适应不同的高速驱动工况。组合缓冲系统的连接采用法兰式刚性连接，确保结构在高速冲击下的稳定性，避免连接部位的松动和变形。导向套结构设计在系统两端，限制缓冲过程中的径向位移，防止空气弹簧出现横向偏移，同时为后续与动圈组件的集成提供安装基准<sup>[1-5]</sup>。

### （二）参数匹配与优化设计

组合缓冲系统的性能优劣取决于空气弹簧与金属阻尼器的参数匹配，要配合高速驱动的冲击特性进行优化。首先确定空气弹簧的核心参数，根据高速驱动系统的额定载荷与冲击峰值，计算得到空气弹簧的有效容积与初始压力。有效容积满足冲击过程中内压不超过材料许用压力，初始压力根据静态载荷平衡来确定，使系统在静态时具有合适的预压缩量，提高动态响应速度。金属阻尼器的参数设计需与空气弹簧的刚度特性匹配，通过阻尼系数的调节实现缓冲过程的平稳性。阻尼系数过小会导致空气弹簧回弹振动加剧，过大则会使缓冲过程出现刚性冲击。采用能量法进行参数优化，以冲击过程中系统的总振动能量最小为目标，建立空气弹簧刚度、阻尼器阻尼系数与冲击速度的关系模型。通过仿真分析不同参数组合下的冲击响应曲线，确定最优参数组合：空气弹簧初始压力0.8MPa，有效容积0.005m<sup>3</sup>，金属阻尼器阻尼系数5000N·s/m。优化后的组合缓冲系统，在高速冲击载荷作用下，可通过空气弹簧的非线性刚度吸收大部分冲击能量，金属阻尼器则快速消耗回弹过程中的振动能量，有效抑制二次振动。

## 三、动圈自动对中机构设计

### （一）自动对中机构结构设计

针对高速驱动下动圈的动态偏心问题，设计基于磁流变效应的动圈自动对中机构，与空气弹簧组合缓冲系统集成设计，实现“缓冲-对中”一体化功能。机构主要由磁流变液腔、环形电磁

铁、位移传感器、控制器四部分组成。磁流变液腔环绕布置于动圈轴外侧，内部填充磁流变液，通过磁场强度的变化调节磁流变液的剪切屈服应力，产生径向对中力；环形电磁铁采用多极绕制方式，均匀分布于磁流变液腔外侧，通过改变线圈电流实现磁场梯度的精准调控。位移传感器采用非接触式电涡流传感器，沿动圈圆周方向均匀布置三个，实时采集动圈的径向位移信号，实现偏心量的三维检测；控制器采用嵌入式 MCU，通过 PID 算法对位移信号进行处理，输出控制信号调节各电磁铁的电流，实现对中力的动态分配。机构与缓冲系统通过共用安装法兰实现集成，动圈轴穿过缓冲系统的导向套与对中机构的中心孔，形成同轴布局，确保缓冲与对中过程的协同性。

## （二）对中控制策略设计

动圈自动对中控制的核心是根据偏心量的实时检测结果，精准调节各电磁铁的电流，形成自适应对中力。控制策略采用分层控制架构，分为信号采集层、决策控制层与执行层。信号采集层通过三个电涡流传感器同步采集动圈的径向位移数据，采用卡尔曼滤波算法对采集信号进行降噪处理，消除高速驱动过程中振动干扰对位移检测精度的影响，提高偏心量计算的准确性。决策控制层基于 PID 控制算法，将滤波后的偏心量信号与设定的目标对中值（通常为 0）进行比较，计算得到各电磁铁的电流调节量。为适应高速驱动下的动态偏心变化，采用变参数 PID 算法，根据偏心量的大小动态调整比例、积分、微分系数：当偏心量较大时，增大比例系数以加快响应速度；当偏心量接近目标值时，增大积分系数以消除静态误差。执行层通过功率放大模块将控制信号转换为电磁铁的驱动电流，改变磁场强度，使磁流变液产生相应的剪切屈服应力，形成径向对中力，推动动圈回归中心位置。

## 四、仿真分析与性能验证

### （一）组合缓冲系统仿真分析

为验证空气弹簧组合缓冲系统的缓冲效果，基于多体动力学仿真平台建立系统模型，模拟高速驱动启停阶段的冲击载荷工况。仿真参数设置如下：冲击载荷峰值为系统额定载荷的 3 倍，冲击持续时间为 0.05s，对应高速驱动系统的启停速度变化率。选取单一空气弹簧系统作为对比组，分析两组系统的冲击响应特性。

仿真结果显示，单一空气弹簧系统在冲击载荷作用下，峰值加速度为  $15\text{m/s}^2$ ，冲击过后出现 3 次明显的回弹振动，振动衰减时间为 0.3s；而组合缓冲系统的冲击峰值加速度降至  $10.5\text{m/s}^2$ ，

峰值降低 30%，回弹振动次数减到 1 次，衰减时间减到 0.15s。这说明组合缓冲系统通过空气弹簧和金属阻尼器的作用，可充分吸收冲击能量的同时，快速抑制回弹振动，提高高速驱动启停阶段的平稳性。不同冲击速度工况下的仿真结果表明，该组合缓冲系统在宽速度范围内都具有稳定的缓冲性能，能够适应高速驱动的工况变化需求。

### （二）自动对中机构仿真分析

采用电磁—机械耦合仿真方法验证动圈自动对中机构的对中效果。建立机构的三维模型，设置动圈初始偏心量为 0.1mm，模拟高速驱动过程中动圈的动态偏心变化。仿真过程中，控制器通过位移传感器采集偏心信号，控制策略来调节电磁铁电流，记录动圈偏心量的变化曲线。仿真结果表明，自动对中机构启动后，动圈偏心量在 0.03s 内降到 0.02mm 以下，达到稳定状态，对中调节时间较传统机械对中方式缩短 60% 以上。在高速驱动过程中，当动圈因惯性力产生瞬时偏心时，机构可在 0.01s 内作出反应，实时补偿偏心误差，将偏心量始终控制在 0.02mm 以内。与无对中机构相比，有对中机构时动圈与定子间气隙不均匀度由 15% 下降为 2%，电磁驱动力波动幅度由 8% 下降为 1%，提高了驱动系统的动力稳定性。仿真也测试了机构在不同转速时的对中性能，当驱动速度达到额定速度的 1.2 倍时，对中的精度仍能保持在 0.02mm 以内，具有良好的高速适应性。

## 五、结论

本文针对高速度平稳驱动系统缓冲与对中核心问题，提出空气弹簧组合缓冲与动圈自动对中集成技术，通过机理分析、结构设计及仿真验证，形成以下主要结论：空气弹簧与金属阻尼器的组合缓冲系统，利用空气弹簧的非线性刚度吸收冲击能量，金属阻尼器抑制回弹振动，可有效降低高速冲击峰值加速度 30% 以上，缩短振动衰减时间 50%；基于磁流变效应的动圈自动对中机构，通过多传感器检测与 PID 控制，后续研究可从两方面进行：一是缓冲系统的自适应控制策略的优化组合，结合高速驱动的实时载荷变化，实现空气弹簧压力与阻尼系数的动态调节；二是探索对中机构与缓冲系统的深度协同，利用缓冲过程中的位移信号预判动圈偏心趋势，进行提前补偿，进一步提高系统的整体性能。该集成技术为高速度平稳驱动装备的设计提供新的技术途径，可以在精密制造、航空航天等领域得到应用。

## 参考文献

- [1] 林达文, 彭立群, 黄涛, 王进. 橡胶空气弹簧扭摆性能试验装置设计与研究 [J]. 橡塑技术与装备, 2025, 51(07): 69-75.
- [2] 曹鑫鹏, 王晨, 彭晨, 王金星, 张宏建, 孙林林. 气动式播种下压力调节装置优化设计与试验 [J]. 农业机械学报, 2025, 56(05): 257-267.
- [3] 孙文, 李晨阳, 王军年, 万旭君, 刘桂均, 李伟. 基于多工况模式的复合型悬架平顺性研究 [J]. 汽车工程, 2024, 46(11): 2076-2090+2099.
- [4] 舒赣平, 墨泽, 刘汶津, 郑宝锋, 付亨利. 空气弹簧-铅芯橡胶支座三维隔震装置力学性能 [J]. 东南大学学报(自然科学版), 2024, 54(06): 1395-1403.
- [5] 彭立群, 林达文, 黄涛, 刘国钧, 丁行武, 王进. 轨道车辆空气弹簧刚度试验型设计与研究 [J]. 特种橡胶制品, 2024, 45(05): 58-64.