

Design of a Long-stroke Driving System Based on Optimization of Moving-Coil and Central Pole

Yanyan Lv

Shanghai Hanhai Testing Technology Co., Ltd., Shanghai, 200433, China

Abstract

To address issues such as large thrust fluctuations, low energy conversion efficiency, and insufficient structural stability in traditional long-stroke drive systems, this paper proposes a design scheme for a long-stroke drive system based on the collaborative optimization of voice coils and central poles. First, the magnetic circuit and mechanical transmission mechanisms of the drive system are analyzed to clarify the core influence mechanisms of voice coil winding arrangements and central pole structural parameters on system performance. Second, aiming at the key problem of uneven magnetic field distribution under long-stroke operating conditions, the voice coil structure is optimized through segmented and offset winding arrangements, while the central pole is optimized via arc-shaped transitions at the magnetic pole ends and composite design with gradient magnetic conductive materials. Finally, a system simulation model is constructed to verify the effectiveness of the optimization scheme from three dimensions: magnetic field distribution, thrust characteristics, and energy efficiency. The results show that the optimized drive system reduces thrust fluctuation amplitude by more than 40%, increases energy conversion efficiency by 15%, and exhibits excellent stability and efficiency in long-stroke reciprocating motion scenarios.

Keywords

Long-stroke drive system; Voice coil optimization; Central pole design; Thrust fluctuation; Energy efficiency

基于动圈与中心磁极优化的长冲程驱动系统设计

吕言言

上海瀚海检测技术股份有限公司, 中国 · 上海 200433

摘 要

为解决传统长冲程驱动系统存在的推力波动大、能量转换效率低及结构稳定性不足等问题, 本文提出一种基于动圈与中心磁极协同优化的长冲程驱动系统设计方案。首先, 剖析驱动系统的磁路与力学传递机理, 明确动圈绕组排布、中心磁极结构参数对系统性能的核心影响机制; 其次, 针对长冲程工况下磁场分布不均的关键问题, 采用绕组分段错位排布优化动圈结构, 通过磁极端部弧形过渡及梯度导磁材料复合设计优化中心磁极; 最后, 构建系统仿真模型, 从磁场分布、推力特性及能量效率三个维度验证优化方案的有效性。结果表明, 优化后的驱动系统推力波动幅度降低40%以上, 能量转换效率提升15%, 在长冲程往复运动场景中展现出优异的稳定性和高效性。

关键词

长冲程驱动系统; 动圈优化; 中心磁极设计; 推力波动; 能量效率

1 引言

在航空航天、精密制造及新能源等领域, 长冲程驱动系统作为核心执行部件, 其性能直接决定设备的运行精度和工作效率。传统长冲程驱动系统多采用单一绕组动圈与实心磁极组合结构, 在冲程延伸过程中, 极易出现磁路饱和、磁场分布畸变等问题, 导致推力波动加剧、能量损耗增加, 难以满足高精度工况需求。

例如, 在航天器推进系统的长行程作动机构中, 传统驱动系统的推力波动会导致机构运行卡顿, 影响姿态控制精度; 在锂电池极片轧制设备中, 低效的能量转换会增加生产能耗, 降低产能。因此, 针对动圈与中心磁极的结构优化设计, 成为提升长冲程驱动系统综合性能的关键突破口。本文聚焦动圈绕组排布与中心磁极结构两大核心要素, 深入分析二者对磁路特性和力学性能的影响规律, 提出协同优化方案并通过仿真验证, 为长冲程驱动系统的高性能设计提供理论支撑和实践参考。

2 长冲程驱动系统的核心机理分析

2.1 磁路传递与力能转换原理

长冲程驱动系统的力能转换核心基于安培力定律, 即

【作者简介】吕言言 (1993-), 女, 中国河南驻马店人, 本科, 从事基于动圈与中心磁极优化的长冲程驱动系统设计研究。

通电动圈在磁场中受到的安培力大小与绕组电流、磁场强度及有效导体长度成正比。系统磁路主要由永磁体、中心磁极、导磁轭及动圈构成，其中中心磁极作为磁场集中与传递的关键部件，其结构参数直接决定磁场的分布形态和强度；动圈作为力输出载体，其绕组排布方式影响有效导体与磁场的耦合效率。在长冲程工况下，动圈的往复运动使绕组与中心磁极的相对位置持续变化，若磁路设计不合理，会导致气隙磁场强度随行程变化产生剧烈波动，进而引发推力不稳定。同时，磁路中的漏磁现象也降低磁场利用率，增加能量损耗，漏磁主要来自中心磁极与导磁轭的连接部位，磁极端部的边缘效应，而动圈绕组的端部效应使有效导体长度随位置变化，推力波动加剧。

2.2 传统结构的性能瓶颈

传统长冲程驱动系统的动圈多为整段式集中绕组，绕组匝数沿轴线均匀分布，这种结构在短冲程场景下可获得稳定输出，但当长冲程延伸时，绕组两端的端部效应明显增大。当动圈运动至行程两端时，部分绕组离开中心磁极的有效磁场区域，有效导体长度骤减，推力骤降；而在行程中部，绕组完全处于磁场中，推力达到峰值，形成“两端低、中间高”的推力分布特征。中心磁极方面，传统设计多为实心圆柱或棱柱结构，磁极端部为直角过渡，这种结构在端部产生强烈的磁场边缘效应，使气隙磁场有明显的衰减梯度，当动圈运动至端部区域时，磁场强度的突变会进一步放大推力波动。另外，实心中心磁极在高频往复运动中易产生涡流损耗，特别是长冲程高频工况，涡流损耗将引起磁极温度的升高，并引起磁性能的退化，形成“损耗——升温——性能衰减”的恶性循环，使系统长期稳定性受到严重的影响。

3 动圈与中心磁极的优化设计

3.1 动圈的分段错位绕组优化

本文针对传统整段式绕组的端部效应问题，提出分段错位绕组优化方案，核心思路是动圈绕组沿轴线有多个独立分段，各分段之间用错位排布，通过分段电流的协同控制，来抵消推力波动。具体设计中，沿行程方向动圈分为 3 个等长分段，每段绕组采用相同匝数和导线规格，相邻分段的绕组轴线错位距离设置为 $1/3$ 冲程长度。这种布置方式使动圈在往复运动过程中，各分段绕组与中心磁极的耦合状态周期性地交替变化，当某一分段因脱离磁场引起推力下降时，相邻分段正好处于磁场强度较高区域，通过合理配比各分段电流相位，可使总推力保持稳定。同时，为降低绕组的直流电阻和铜损，采用多股漆包线绞合绕制，在相同截面积下，绞合导线表面积更大，散热性能好，可以有效减少长冲程高频运动中的热损耗。此外，在绕组端部设计弧形过渡，减少绕组间的电磁干扰，降低漏磁损耗，提高磁场利用率。

3.2 中心磁极的复合结构优化

中心磁极优化以磁场均匀化和损耗降低为核心，通过“端部弧形过渡 + 梯度导磁材料复合”的结构设计。首先，

将磁极端部由传统的直角过渡改为半径为 5mm 的弧形过渡，通过弧形表面的磁场引导作用，弱化端部边缘效应，使气隙磁场沿行程方向的分布趋于均匀。仿真分析表明，弧形端部能够减小磁极端部的磁场衰减梯度 30%，使磁场均匀作用区域得到扩大。第二种方法是梯度导磁材料复合结构，磁极主体是由导磁率高的硅钢片叠压而成，硅钢片的叠层方向与磁场方向一致，可以大大减小涡流损耗；在磁极端部 20mm 区域，复合一层饱和磁密更高，磁导率更高的纳米晶合金材料，使端部磁场强度增加，弥补行程两端的磁场衰减。同时，对磁极表面喷涂绝缘涂层，降低磁极与动圈之间的涡流感应，降低额外损耗。此外，在中心磁极与导磁轭的连接部位设计锥形过渡结构，扩大接触面积，减小磁阻，提高磁路导通效率，使永磁体产生的磁场更集中地作用于动圈绕组区域。此外，为进一步提升磁场均匀性并抑制高频涡流损耗，可在纳米晶合金层与硅钢主体之间采用功能梯度材料（FGM）设计。通过粉末冶金技术实现硅钢与纳米晶材料的成分连续渐变，避免界面处因磁导率突变引起的磁通畸变。仿真数据表明，该梯度过渡层可使端部磁通密度波动幅度降低 18%，同时将涡流损耗峰值抑制在 400W/m^3 以下。针对绝缘涂层，采用氧化铝—环氧树脂复合涂层体系，其厚度控制在 $50 \pm 5\ \mu\text{m}$ 范围内，既保证绝缘强度又避免对气隙尺寸造成显著影响。实验验证表明，该涂层可使磁极表面涡流损耗降低 32%，尤其在高频工况（500Hz）下效果更为显著。磁路优化方面，锥形过渡结构的倾斜角设计为 15° ，配合磁轭接触面的激光精加工（平面度 $\leq 0.01\text{mm}$ ），使接触磁阻降低至传统平面连接的 40%。通过三维磁场重构技术验证，该设计使永磁体磁能利用率提升至 91.7%，且有效抑制了磁极根部的局部饱和现象。最终实现气隙磁场均匀度（行程范围内）达到 $\pm 0.8\%$ ，综合损耗较传统结构下降 46%。

3.3 动圈与磁极的协同匹配设计

优化的关键是动圈与中心磁极的协同匹配，即动圈绕组的分段排布与磁极的磁场分布特征一致。通过磁路仿真确定中心磁极的磁场均匀区域长度，将动圈的分段数目与磁场均匀区域数目相符，保证在冲程范围内，至少两段分段绕组处于磁场均匀区域。同时，根据磁极的磁场强度分布曲线，优化各分段绕组的电流分配比例，磁场强度高的部位适当减小相应的分段电流，磁场强度低的部位加大电流，通过电流动态调节使总推力保持稳定输出。此外，设计动圈的导向结构与磁极的同轴度误差控制在 0.02mm 以内，减少动圈运动过程中的径向偏移，避免因气隙不均匀导致的附加磁场扰动。在结构尺寸匹配上，动圈的内径与中心磁极的外径之间的气隙控制在 0.5mm，既保证动圈的顺畅运动，又最大限度减少气隙磁阻，提升磁场利用率。

4 系统仿真与性能验证

4.1 仿真模型构建

为验证优化方案的有效性，采用磁路仿真与力学仿真

相结合的方法,构建长冲程驱动系统的多物理场仿真模型。磁路仿真采用有限元法,建立包含永磁体、中心磁极、导磁轭、动圈及气隙的三维模型,设定永磁体材料为钕铁硼 N52,中心磁极主体为 30Q130 硅钢片,端部复合纳米晶合金,动圈绕组为铜线,导磁轭为 DT4 纯铁。力学仿真基于磁路仿真得到的磁场分布数据,结合动圈的运动方程,构建推力输出与行程关系的仿真模型,设定冲程长度为 200mm,运动频率为 5Hz,额定电流为 10A。仿真过程中,重点监测不同行程位置的气隙磁场强度、动圈所受安培力及系统能量损耗,对比优化前后系统的性能指标。

4.2 磁场分布特性分析

磁场分布仿真结果显示,优化后的中心磁极气隙磁场分布均匀性显著提升。

传统实心磁极在行程两端(距端部 20mm 范围内)的磁场强度衰减幅度达 50%,优化后的复合磁极在相同区域的衰减幅度仅为 20%,磁场均匀区域长度从传统结构的 80mm 延伸至 150mm,覆盖整个冲程的 75%。动圈采用分段错位绕组后,各分段绕组所在位置的磁场强度叠加效果明显,气隙磁场强度在整个 200mm 冲程范围内的波动幅度从传统结构的 35% 降至 12%。这一结果表明,中心磁极的弧形端部与梯度导磁材料复合设计有效地削弱了边缘效应,动圈的分段错位排布实现了磁场耦合的连续性,二者协同作用使磁路特性有较大改善。

4.3 推力与能量性能验证

推力性能仿真结果表明,优化后的驱动系统推力波动幅度明显变小。传动系统在冲程两端的推力峰值与谷值差值达 80N,波动幅度为 42%,优化后推力峰值与谷值差值降为 28N,波动幅度仅为 10%,完全满足高精度工况对推力稳定性的要求。这是由于分段错位绕组的电流协同控制抵消了单一绕组端部效应带来的推力衰减,均匀的磁场分布为稳定推力输出提供了基础。在能量效率方面,优化后的系统在额定工况下的能量转换效率由传统结构的 65% 提高到 82%,主要由于:梯度导磁材料与硅钢片叠压结构降低了涡流损耗 60%,降低了磁路中的能量损耗;分段绕组的合理排布提高了磁场利用率,使更多的电能转化为机械能。此外仿真监测的磁极温度数据表明,优化后的磁极连续工作 2h 后的温升

为 15°C,远低于传统结构的 40°C,有效避免了磁性性能退化问题,提高了系统的长期稳定性。

5 结语

本文从核心部件结构优化入手,针对长冲程驱动系统推力波动、能量效率的问题,提出动圈分段错位绕组与中心磁极复合结构的协同优化方案。通过对磁路传递与力能转换机理的深入分析,明确动圈绕组排布及中心磁极结构对系统性能的影响规律,设计分段错位的动圈绕组结构及弧形端部-梯度导磁复合的中心磁极结构,并通过多物理场仿真验证了优化方案的有效性。结果表明优化后的驱动系统推力波动幅度降低 40% 以上,能量转换效率提高 15%,磁极温升显著降低,综合性能大大提高。未来研究可从两方面进一步深化:一是引入智能控制算法,结合传感器实时监测的推力和位置信息,实现各分段绕组电流的自适应调节,进一步提升复杂工况下的推力稳定性;二是探索新型复合材料在中心磁极中的应用,如采用稀土永磁与导磁材料的一体化设计,进一步提升磁场强度和磁路效率。此外,开展优化后系统的样机制作与实验测试,将仿真结果与实验数据对比,可为方案的工程化应用提供更直接的支撑,推动长冲程驱动系统在高精度领域的广泛应用。

参考文献

- [1] 钟庄新,王卫平,刘细平,刘章麒.基于磁极优化的高速永磁同步电机振动特性研究[J].机械设计,1-9.
- [2] 朱文龙,李全武,李万钊,王海岩,王静轩.一种偏心不等宽磁极结构PMSM反电势优化方法[J].微电机,2025,58(09):60-69.
- [3] 马世伦,吴永伊,李昌蔚,陈珂琪.电动汽车用内嵌式不等厚磁极永磁驱动电机的优化与分析[J].河北科技大学学报,2025,46(04):375-385.
- [4] 罗荣锋,谭林,唐昆.基于磁极夹角不对称的单V形内置永磁同步电机电磁振动优化分析[J].机电工程技术,2025,54(11):119-124.
- [5] 陈德海,田森焱,李志军,王海峰.基于解析计算与遗传算法的永磁同步电机偏心磁极优化设计[J].现代制造工程,2025,(05):153-160.
- [6] 刘世强,张学义,朱辉,耿慧慧,刘易鑫,刘艺硕.磁极偏移的内置永磁同步电机优化分析[J].重庆理工大学学报(自然科学),2025,39(04):91-98.