

永磁直线电机推力波动抑制方法研究

程波成 420704199106074255

摘要：永磁直线电机凭借直接驱动、响应速度快、精度高等优势，在高精度数控机床、半导体制造装备等高端制造领域得到广泛应用，但推力波动问题是制约其定位精度与运行平稳性提升的核心瓶颈。本文首先分析了永磁直线电机推力波动的主要来源，包括齿槽效应、端部效应、永磁体磁场畸变以及电流谐波影响，随后对当前主流的推力波动抑制方法进行分类梳理，对比分析不同方法的适用场景与优缺点，最后对永磁直线电机推力波动抑制技术的未来发展方向进行展望，为高精度直线驱动系统的优化设计提供参考。

关键词：永磁直线电机；推力波动；抑制方法；端部效应；齿槽效应

一、引言

在高端装备制造领域，运动系统的定位精度与动态响应性能直接决定产品的加工制造质量，传统旋转电机通过滚珠丝杠转换为直线运动的传动方式，存在回程间隙、摩擦磨损、机械滞后等固有缺陷，无法满足现代装备对高加速度、高精度直线运动的需求。永磁直线电机取消了中间传动机构，实现了驱动系统的“零传动”，具备结构简单、加速度大、定位精度高、动态响应快等突出优点，被广泛应用于精密机床、半导体光刻设备、高速磁悬浮列车等领域。但受自身结构与制造工艺的限制，永磁直线电机存在较为显著的推力波动问题，会引发系统振动与噪声，降低定位精度，严重时甚至会诱发系统共振，制约永磁直线电机在高精度场合的应用。因此，研究高效的推力波动抑制方法，对提升永磁直线电机的运行性能、拓展其应用场景具有重要的理论与工程价值。

二、永磁直线电机推力波动的产生机理

（一）齿槽效应引起的推力波动

对于初级开槽的永磁直线电机，为了嵌放绕组，初级铁芯表面会开有均匀分布的齿槽，当永磁体相对于初级运动时，永磁体磁场与初级齿槽之间的相互作用会产生齿槽推力，这种推力会随着相对位置变化发生周期性波动，是永磁直线电机低速运行时推力波动的主要来源。齿槽推力波动的周期与初级齿距直接相关，波动幅值与齿槽形状、永磁体充磁均匀性等因素密切相关。

（二）端部效应引起的推力波动

与旋转永磁电机不同，永磁直线电机的初级铁芯在运动方向上是有限长度的，

两端存在开断，会导致初级磁路发生不对称畸变，进而产生与位置相关的端部推力波动，这是永磁直线电机特有的推力波动来源。端部效应分为静态端部效应与动态端部效应，静态端部效应由结构开断引起，波动周期与极距保持一致，动态端部效应则由电枢反应磁场畸变引起，会随着运行速度变化发生改变。

（三）磁场畸变与制造误差引起的波动

在制造过程中，永磁体不可避免存在尺寸误差、充磁不均匀、安装位置偏移等问题，会导致气隙磁场发生畸变，进而产生谐波分量，引发推力波动。同时，初级铁芯加工不平整、气隙长度不均匀等机械误差，也会导致气隙磁导发生周期性变化，产生额外的推力波动。

（四）电流谐波引起的推力波动

永磁直线电机的驱动逆变器通常采用脉冲宽度调制（PWM）技术，输出电流中会含有一定的谐波分量，谐波电流会与永磁体基波磁场相互作用产生脉动推力，此外，绕组的不对称也会引发电流不平衡，进一步加剧推力波动。

三、永磁直线电机推力波动主流抑制方法

当前永磁直线电机推力波动抑制方法主要分为两大类：一类是从电机本体设计层面出发，通过优化结构参数从源头上削弱推力波动，称为设计法；另一类是在驱动控制层面，通过补偿算法对已产生的推力波动进行抵消，称为控制补偿法。

（一）本体优化设计方法

本体优化是抑制推力波动的基础手段，从源头上削弱波动源，不需要改变控制系统结构，稳定性更好，常用的方法包括以下几种：

1.齿槽结构优化。针对齿槽效应引起的推力波动，常用的优化手段包括斜极、分数槽集中绕组、齿槽配对、优化齿槽形状等。斜极是将永磁体或初级齿沿运动方向倾斜一定角度，抵消不同位置的齿槽推力，该方法对齿槽波动的抑制效果显著，但会增加制造工艺难度，还会导致电机推力密度略有下降。分数槽绕组通过选择合理的槽极配合，改变齿槽推力的周期与幅值，能够有效削弱低次谐波分量，被广泛应用于中小功率永磁直线电机中。

2.端部结构优化。针对端部效应引起的推力波动，常用方法包括端部齿不对称设计、辅助齿、倒角优化等。在初级铁芯两端添加辅助齿，能够改善端部磁路的对称性，削弱端部磁场畸变，有效降低端部推力波动，辅助齿设计的关键是确定辅助齿的尺寸与位置，不合理的辅助齿反而会增大推力波动。还有学者提出对端部齿齿宽进行优化调整，通过不对称齿宽抵消端部磁导的不对称性，不需要额

外增加辅助齿，不会降低电机推力密度，工艺实现更简单。

3.永磁体结构优化。针对永磁体制造误差与磁场畸变引起的波动，可通过优化永磁体的形状、尺寸、排列方式来抑制波动。常用的方法包括 Halbach 阵列永磁体排列，这种排列方式能够有效汇聚气隙磁场，削弱气隙磁场谐波分量，不仅能降低推力波动，还能提升电机推力密度，是当前高端永磁直线电机常用的永磁体排列方式。

（二）控制补偿方法

本体优化受制造工艺成本限制，无法完全消除推力波动，对于精度要求较高的应用场合，还需要通过控制补偿方法进一步抑制剩余推力波动，常用的控制补偿方法包括以下几种：

1.前馈补偿法。前馈补偿法通过预先辨识得到推力波动的周期性模型，将补偿电流叠加到给定电流中，抵消原有推力波动。由于推力波动是位置的周期函数，通常可以采用傅里叶级数拟合推力波动模型，该方法实现简单，计算量小，对周期性推力波动的抑制效果显著，但对模型精度依赖较高，当电机运行工况发生变化时，补偿效果会下降。

2.迭代学习控制。迭代学习控制适合于具有重复运动特性的直线驱动系统，通过多次重复运行，不断修正控制量，逐步消除周期性推力波动带来的跟踪误差。该方法不需要精准建立推力波动模型，对非线性波动的补偿效果好，但是只适用于重复运动场合，对非周期运动无法起到良好的补偿作用。

3.智能控制方法。随着智能控制技术的发展，模糊控制、神经网络等方法也被应用到推力波动抑制中，这类方法能够自适应辨识推力波动的非线性特性，对参数变化与外部干扰的鲁棒性更好，但算法复杂度较高，对控制器运算能力要求较高，限制了其在高速场合的应用。

四、结论与展望

推力波动是制约永磁直线电机精度提升的核心问题，经过多年研究，学术界与工业界已经提出了多种抑制方法，本体优化方法从源头上削弱了波动源，控制补偿方法进一步消除了剩余波动，推动了永磁直线电机在高精度领域的应用。未来，永磁直线电机推力波动抑制技术的发展方向主要集中在三个方面：一是新型结构与材料的应用，进一步提升本体优化的效果；二是高精度、低运算量的在线辨识补偿算法，提升对工况变化的适应能力；三是多源耦合波动的协同抑制方法，考虑温度、磨损等因素对推力波动的影响，实现全生命周期的高精度推力波动抑

制。

参考文献

- [1] 王凤翔. 直线电机及其在交通运输中的应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [2] 寇宝泉, 张鲁, 杨大勇. 永磁直线同步电机推力波动抑制技术的研究进展[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(33): 92-100.
- [3] 陈特放, 刘子建, 黄守道. 永磁直线同步电机端部效应分析及推力波动抑制[J]. 电工技术学报, 2011, 26(10): 6-12.