

直线电机设计、控制及系统集成专题

特约主编寄语

一、引言

在以往诸多工业应用场合中，直线驱动装置或系统大多采用常规旋转电机并通过中间传动装置（如链条、齿轮箱等）转换为直线运动，其面临体积大、效率低、精度低、噪声大、机械损耗大、维护量大等问题。直线电机通过初、次级电磁感应即可产生直接推力，并获得直线运动，是直线直驱场合的首要之选。由于省去了中间传动装置，直线电机直驱系统具有体积紧凑、推力大、响应速度快、精度高、维护量小、噪声小等众多优势，迄今已在轨道交通、新能源发电、高精度机床、压缩机等诸多领域得到广泛应用，未来市场方兴未艾，潜力十分巨大。

然而，直线电机受磁路开断、大气隙、初级半填充槽、初次级宽度不等及严重非对称结构等因素影响，其气隙磁场畸变严重、作用机理复杂，是一个典型的高阶、非线性、强耦合系统，很难获得准确的电机等效模型和参数，给直线电机性能分析、电磁设计、高效控制、系统级优化等工作带来了极大困难，严重制约了直线电机驱动系统整体性能的充分发挥，亦是限制直线电机驱动系统进一步大规模发展应用的主要因素。

为了反映国内学者在“直线电机设计、控制及系统集成”领域的研究成果，在《电工技术学报》编辑和国内外客座编委的支持下，本次专题应运而生。

本专题得到了国内学者的积极响应，共收到投稿论文 70 余篇，经过审稿专家认真严格评审，共录用 28 篇，《电工技术学报》优选部分稿件，在 2021 年第 5 期、第 6 期设专题集中刊登，本期刊登 11 篇稿件。研究内容涵盖了直线电机建模分析与优化设计、电磁计算、高性能控制策略等多个方面，研究对象不仅包括相对传统的直线感应电机和永磁直线电机，也包括音圈电机、双激励直线型静电电机、Halbach 直线发电机等多种新型直线电机结构，充分反映了当前直线电机系统的研究热点。

二、具体内容介绍

1. 在直线电机建模分析与优化设计方面有 8 篇文章

论文《音圈电机结构优化及应用综述》结合国内外对音圈电机本体结构的研究，对音圈电机的技术概况进行了综述，对如何提高音圈电机出力常数和定位精度的方法进行了归纳总结，对音圈电机的应用前景和热点问题进行了分析讨论。

论文《U型永磁凸极直线电机结构及电磁特性》提出了一种 U 型永磁凸极直线电机，其次级永磁采用 U 型结构，能够充分利用永磁体，提高电机的空载反电动势和电磁推力。

论文《次级断续时直线感应牵引电机的等效电路》针对直线轮轨交通线路中初级经过次级感应板断续路段这一特殊工况，综合考虑了初、次级耦合区域长度变化和纵向端部效应的影响，基于新型气隙磁通密度和去磁涡流的分布模型，构建了次级断续时的等效电路。

论文《静电电机理论研究及性能仿真分析》以一种双激励直线型静电电机为例，通过求解多层介质情况下的泊松方程和拉普拉斯方程，获得电机内部电场分布情况。继而通过静电能量的虚位移法获得电机推力特性，由此建立起完整的电机数学模型并计算得到了电机动子的推力曲线和最大电场强度数值，该推力曲线可用于指导电机换相系统设计。最后结合数学模型，利用 Sobol 灵敏度分析法获得电机各个参数对电

机最大推力的灵敏度,以指导该类电机的设计。

论文《基于模拟退火算法的 Halbach 直线发电机优化设计》描述了 Halbach 直线发电机的拓扑结构,引入磁矢量势能理论推导出了发电机性能的表达式,由此建立了直线发电机的综合分析模型。基于此模型,使用模拟退火算法求全局最优解,得到一组直线发电机设计参数,包括了永磁体尺寸和绕线圈的数据。

论文《双边错位高速永磁直线同步电机的设计与分析》针对传统的 4 极 6 槽双边对称长初级永磁直线同步电机,在保证电磁推力大小的情况下,提出了采用双边错位来降低永磁体涡流损耗的有效方法。

论文《电枢分段供电永磁直线同步电机的非线性数学模型》建立了电机的非线性相空间模型,可以准确描述多相分段供电 PMLSM 中由绕组分段引起的电感不平衡、饱和效应和动子通过分段时的暂态过程。

论文《120° 相带环形绕组圆筒型永磁直线发电机定位力降低的优化设计》(英文)考虑到圆筒型永磁直线发电机(TPLMG)采用 120° 相带环型绕组可以提高其功率密度,然而, TPLMG 具有较大的定位力,这会引发发电机的振荡甚至使系统不稳定,为了解决这一问题,对 120° 相带环形绕组的圆筒型永磁直线发电机进行了优化设计。

2. 在直线电机电磁计算方面有 1 篇文章

论文《两相无槽圆筒型永磁同步直线电机电感计算与分析》基于轴向磁动势函数与轴向比磁导函数推导得到了全行程范围内两相无槽 TPMSLM 的电感解析模型。并与有限元计算值和实验测量值进行了对比分析,证明了该解析方法对于电机不完全耦合状态下电感计算的准确性。

3. 在直线电机高性能控制策略方面有 2 篇文章

论文《热声发电系统自主协同起振控制策略》以热声发电系统(TAEGS)为应用背景,为了降低系统起振温度,缩短系统起振的时间,提出了一种控制热声发电机电动运行将系统牵入谐振的自主协同起振综合控制策略。仿真分析和实验验证结果表明,所提出的起振控制策略既能使热声发电系统运行频率快速跟踪谐振频率,提高系统输出功率;同时改进二阶广义积分控制器能有效滤除检测信号的采样噪声和干扰,提高控制器的稳定性。

论文《基于自适应观测器的永磁同步直线电机模型预测控制系统设计》为优化永磁同步直线电机的调速性能,解决永磁同步直线电机对速度传感器依赖程度高等问题,采用模型预测控制器代替传统的 PI 控制器,并用模型参考自适应观测器替代机械传感器,成功设计了一种带模型参考自适应观测器的永磁同步直线电机预测电流控制系统,提高了相关驱动性能。

三、结语

本次专题反映了我国学者在“直线电机设计、控制及系统集成”领域的最新进展,为相关领域的专家学者提供了交流的平台,为促进直线电机的性能提升和应用提供了思考和启发。

感谢各位专家编委对本专题的支持,感谢《电工技术学报》编辑部为本次专题能够顺利出版付出的辛勤劳动。

特约主编

2021年3月