

高性能磁场调制永磁直线电机研究综述与展望^{*}

朱旭辉，赵文祥

(江苏大学电气信息工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要：永磁直线电机(PMLM)直接以直线运动输出功率,具有结构简单、效率高等明显优势,适用于某些直线运动应用场合,受到越来越广泛的关注。分析了PMLM广泛存在的磁场调制效应,对几种典型PMLM拓扑结构进行研究,指出其内在磁场调制机理的应用。同时,针对PMLM结构的特殊性,讨论了几种电磁参数的建模方法。最后,对PMLM磁场理论与拓扑结构研究进行了展望和应用前景分析,对直线电机的实际工程应用具有一定的参考价值。

关键词：永磁直线电机; 磁场调制; 拓扑结构; 磁场理论

中图分类号: TM 359.4 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)08-0001-12

doi: 10.12177/emca.2020.092

Overview and Prospect of High Performance Magnetic Field Modulation Permanent Magnet Linear Machine^{*}

ZHU Xuhui, ZHAO Wenxiang

(School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Permanent magnet linear machine (PMLM) can directly output power in linear motion, which has significant advantages of simple structure and high efficiency. It is suitable for some linear motion applications and attracts more and more attentions. The widely existing magnetic field modulation effect is analyzed, several typical topology structures of PMLM are taken as examples, and the application of the internal magnetic field modulation mechanism is pointed out. Meanwhile, in view of the special structure of PMLM, several modeling methods of electromagnetic parameters are discussed. Finally, the prospects of research on the magnetic field theory, topology structure and application of PMLM are analyzed, providing certain reference value for the practical engineering application of linear machines.

Key words: permanent magnet linear machine (PMLM); magnetic field modulation; topology structure; magnetic field theory

0 引言

为了实现矿井提升、电梯和轨道交通等直线运动,传统旋转电机需配备额外的中间转换装置将旋转运动转换为直线运动,然而中间转换机构的引入会导致电机系统效率和可靠性降低。直线电机无需中间转换装置,可直接实现直线运动,在

直线牵引系统中具有显著优势^[1-3]。在矿井提升和电梯等垂直直线运载装备中,直线电机驱动可有效提升电机系统的载荷比,提高系统运行能效;在轨道交通等水平直线运载装备中,直线电机驱动可大幅提升爬坡能力,减小转弯半径,减少系统维护工作量^[4-6]。随着永磁体材料性能的不断发展,永磁直线电机(PMLM)在长行程应用中具有

收稿日期: 2020-05-28; 收到修改稿日期: 2020-07-03

*基金项目: 国家自然科学基金项目(51991383)

作者简介: 朱旭辉(1992—),男,博士研究生,研究方向为磁场调制电机及其设计。

赵文祥(1976—),男,教授,博士生导师,研究方向为电机设计与控制。(通信作者)

低成本、高效率等优势,已经成为了直线电机研究的热点^[7-10]。

近年来,新结构电机及新理论不断涌现,电机理论呈现碎片化,导致电机设计、分析和比较缺乏统一标准,严重阻碍了电机理论的发展。现阶段研究发现磁场调制效应在旋转电机中广泛存在^[11],并且该理论有效解释了众多现有电机的工作机制,同时也为电机拓扑结构创新指明了方向^[12]。PMLM 作为旋转电机的衍生结构电机,磁场调制理论广泛适用于 PMLM,其创新设计方法同样可以延伸到 PMLM 的设计中,有效拓宽了 PMLM 电机的设计与分析方法。

本文首先简单介绍了磁场调制原理,指出磁场调制效应在电机中广泛存在;其次根据 4 种典型的直线结构,分析了 PMLM 拓扑结构的发展;然后围绕直线电机结构的特殊性,梳理了现阶段较为常用的 PMLM 电磁参数解析分析方法;最后对 PMLM 的发展趋势和应用前景提出展望。

1 磁场调制机理

电机气隙磁场中会存在很多不同极对数和频率的谐波,这些谐波根据来源可以分为原激励磁场谐波和调制磁场谐波。其中,原激励磁场谐波是指原磁场基波及其奇次谐波;调制磁场谐波是指磁导变化产生的新极对数谐波。因此,调制效应就是将某些极对数和频率的谐波通过调制,产

生其他新极对数和频率的谐波,其调制原理如图 1 所示。

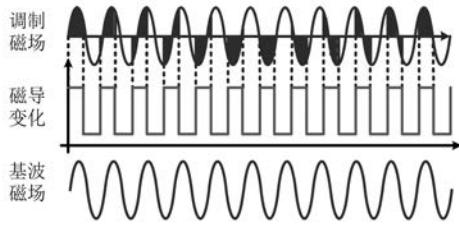


图 1 磁场调制原理

调制前后的谐波次数和调制极个数之间存在如下数量关系:

$$P_{m,k} = |mp + kn_s| \quad (1)$$

式中: $m=1,3,5,\dots$; $k=0,\pm 1,\pm 2,\dots$; $P_{m,k}$ 为经调制后气隙磁场所含谐波极对数; p 为原激励磁场基础谐波极对数; n_s 为调制极个数。

经过调制,磁场的谐波频率和旋转速度也会发生变化,其变化关系如下:

$$f_{m,k} = \frac{n P_{m,k}}{60} = \frac{n |mp + kn_s|}{60} \quad (2)$$

$$\Omega_{m,k} = \frac{mp}{mp + kn_s} \Omega_r + \frac{kn_s}{mp + kn_s} \Omega_s \quad (3)$$

式中: n 为电机转速; $\Omega_{m,k}$ 为电枢磁场旋转角速度; Ω_r, Ω_s 分别为转子和调制极旋转角速度。

电机径向和切向气隙磁密表达式为

$$B_r(r, \theta) = \overbrace{\lambda_{r0}(r) \sum_{m=1,3,5,\dots} b_{rm}(r) \cos [mp(\theta - \Omega_r t) + mp\theta_0]}^{\text{单位调制分量}} + \\ \overbrace{\frac{1}{2} \sum_{m=1,3,5,\dots} \sum_{k=1,2,3,\dots} \lambda_{rk}(r) b_{rm}(r) \cos \left\{ (mp + kn_s) \left[\theta - \frac{(mp\Omega_r + kn_s\Omega_s)}{mp + kn_s} t \right] + mp\theta_0 \right\}}^{\text{非单位调制分量}} + \\ \overbrace{\frac{1}{2} \sum_{m=1,3,5,\dots} \sum_{k=1,2,3,\dots} \lambda_{rk}(r) b_{rm}(r) \cos \left\{ (mp - kn_s) \left[\theta - \frac{(mp\Omega_r - kn_s\Omega_s)}{mp - kn_s} t \right] + mp\theta_0 \right\}}^{\text{非单位调制分量}} \quad (4)$$

$$B_\theta(r, \theta) = \overbrace{\lambda_{\theta 0}(r) \sum_{m=1,3,5,\dots} b_{\theta m}(r) \sin [mp(\theta - \Omega_r t) + mp\theta_0]}^{\text{单位调制分量}} + \\ \overbrace{\frac{1}{2} \sum_{m=1,3,5,\dots} \sum_{k=1,2,3,\dots} \lambda_{\theta k}(r) b_{\theta m}(r) \sin \left\{ (mp + kn_s) \left[\theta - \frac{(mp\Omega_r + kn_s\Omega_s)}{mp + kn_s} t \right] + mp\theta_0 \right\}}^{\text{非单位调制分量}} + \\ \overbrace{\frac{1}{2} \sum_{m=1,3,5,\dots} \sum_{k=1,2,3,\dots} \lambda_{\theta k}(r) b_{\theta m}(r) \sin \left\{ (mp - kn_s) \left[\theta - \frac{(mp\Omega_r - kn_s\Omega_s)}{mp - kn_s} t \right] + mp\theta_0 \right\}}^{\text{非单位调制分量}} \quad (5)$$

式中: b_m 、 $b_{\theta m}$ 分别为不加调制极径向和切向磁密的傅里叶系数; λ_{rk} 、 $\lambda_{\theta k}$ 分别为调制时的径向和切向磁密的傅里叶系数; θ_0 为原激励磁场初始位置角。

从式(5)可以看出, 电机的气隙磁场主要由 2 部分分量组成:(1)单位调制分量, 由原基波磁场和磁导直流分量作用产生;(2)非单位调制分量, 由原激励磁场和磁导交流分量共同作用产生。其中, 单位调制与传统永磁电机理论中磁场作用相同。因此, 传统电机为磁场调制电机的特殊结构, 传统电机理论为磁场调制理论的特殊组成部分。

2 PMLM 拓扑结构发展

由于新理论和新材料的不断进步, 直线电机拓扑结构也得到了进一步发展, 本节对现有的几种典型直线电机拓扑结构进行讨论, 根据不同应用场合的需求进行电机类型的选择分析。

2.1 单边永磁直线电机

单边永磁直线电机(SS-PMLM)是一种结构相对简单的直线电机, 主要由一个初级和一个次级组成。根据永磁体排布位置不同, SS-PMLM 可以分为次级永磁直线电机(SPMLM)、初级永磁直线电机(PPMLM)和初-次级永磁直线电机(P-SPMLM)。

SPMLM 是一种常规的 PMLM 结构, 其永磁体和电枢绕组分别排布于电机的次级与初级, 导致该结构不适合长行程应用。因此, 该类电机适用于短行程的直线运动领域, 如数控机床等。

哈尔滨工业大学谭强等^[13]提出了一种模块化 SPMLM, 其拓扑结构如图 2 所示。该电机在次级铁心靠近气隙一侧排布表贴式永磁体, 在初级侧采用模块化设计, 各个初级模块之间用磁障隔开, 磁障宽度为 $(2k \pm 1)/2$ 个永磁体极距。通过模块化和磁障设计, 降低了直线电机各个模块的边端力, 抑制了电机的边端效应。但是, 该方法也降低了电机的平均推力。另外, 对于传统电机理论, 绕组分布极对数需等于永磁体极对数才能产生稳定的推力。但是, 该结构的绕组极对数与永磁体极对数并不相等, 传统电机理论已不能解释其工作原理。由电机磁场谐波分析可知, 该结构通过初级齿调制次级永磁体产生的永磁磁场, 从而产生一些永磁磁动势中不含有的磁场谐波, 绕组按

照调制后的磁场谐波进行分相。此时, 电枢绕组产生的电枢磁场与调制后的永磁磁场相互作用产生推力。因此, 该结构属于明显的磁场调制电机。

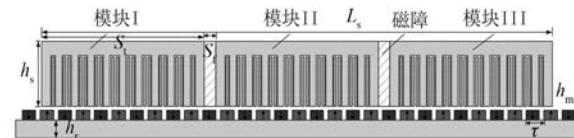


图 2 模块化 SPMLM

为了解决 SPMLM 在长行程领域成本过高的问题, PPMLM 应运而生。PPMLM 由于永磁体与电枢绕组均排布于初级, 次级仅由铁心材料组成, 具有成本低、推力密度大等优势, 适用于长行程领域, 如轨道交通、高楼电梯、油井等应用场合^[14-17]。但是, 由于绕组和永磁体存在空间上的冲突, 限制了电机的电磁负荷的提升, 也就进一步限制了电机性能的提升^[16, 18]。同时, 单边结构的边端效应也会造成 PMLM 反电动势不平衡、定位力大、推力脉动大等问题。

另外, PPMLM 结构将永磁体与电枢绕组均放置在电机初级, 绕组和永磁体基波磁场无相对运动, 因此基波磁场并不能产生有效反电动势和推力。因此, 这种结构电机是典型的磁场调制电机^[19-22]。

2018 年, 伊朗德黑兰大学 Nematsaberi 等^[23]提出了一种 Spoke 型 PPMLM, 如图 3 所示。该结构利用 Spoke 永磁体阵列的聚磁效应, 显著提升了电机气隙磁场强度, 提高了电机推力密度。但是, 该结构导致电机漏磁增大, 致使功率因数较小, 不利于电机系统体积和成本的控制。

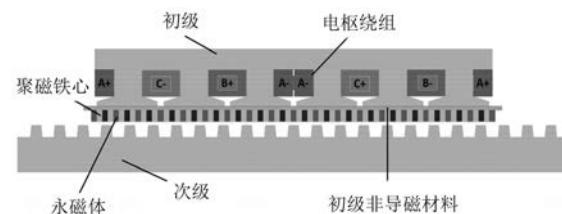


图 3 Spoke 型 PPMLM

2020 年, 南京航空航天大学曹瑞武等^[24]提出了一种初级分段型磁通切换 PPMLM, 其结构如图 4 所示。该结构初级导磁齿上交替设置永磁体和电枢绕组, 次级由若干分段导磁块组成。由电机

结构可以看出,电机的次级和初级均存在磁导的变化,使得气隙磁场中存在较多的谐波,根据推力产生机理^[25],发现该电机有多个有效工作谐波,这些谐波对整体推力的贡献可以通过麦克斯韦量法求出,有限元与解析计算的推力结果^[24]如图5所示。因此,该结构也属于磁场调制结构电机。

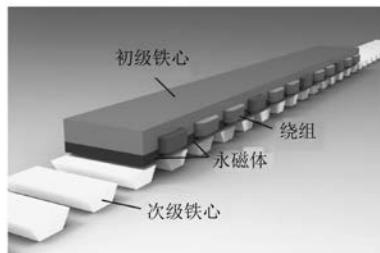


图4 初级分段型磁通切换 PPMLM

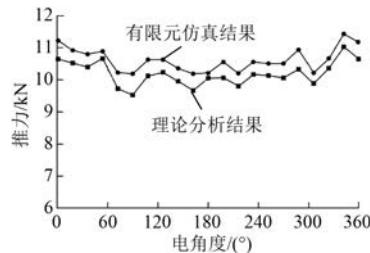


图5 推力解析值与仿真值对比

P-SPMLM 由于次级和初级均排布有永磁体,其磁负荷更大,具有更高的推力密度,但电机也更易饱和,使电机过载性能较差。同时,永磁体的用量增加也提高了电机系统的成本。

2017年,华中科技大学石超杰等^[26]提出了一种P-SPMLM,结构如图6所示。该结构在次级铁心齿之间嵌入垂向励磁永磁体,在初级电枢槽口放置 Halbach 阵列永磁体,每个永磁体阵列结构均相同。与 SPMLM 和 PPMLM 相比,该结构能提供更大的磁负荷,反电动势和推力能力得到了显著提升。但该结构电机垂向磁拉力大,电机装配难度较大,且永磁体无固定结构,易导致永磁体易位,甚至脱胶。

2019年,香港大学樊华等^[27]提出了一种P-SPMLM,其结构如图7所示。该结构次级同样采用凸极齿结构的铁心,并在凸极齿之间排布同向励磁永磁体。在初级侧,永磁体表贴于绕有电枢绕组的电枢齿顶端,且励磁方向与次级永磁体励

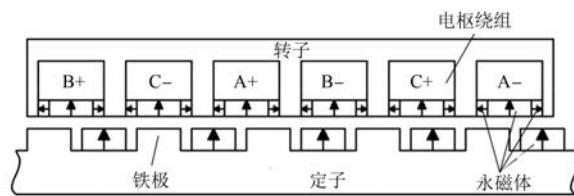


图6 P-SPMLM 拓扑结构

磁方向相反;另外,次级引入容错齿结构,间隔排布于电枢齿之间,使得相间形成物理隔离,提高了电机的可靠性;容错齿顶部高度与电枢齿顶部高度相同,保证电机等效气隙分布均匀。该结构与磁通反向直线电机和无刷直流直线电机相比,具有更高的功率密度和推力性能。

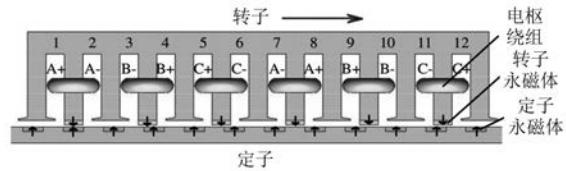


图7 P-SPMLM 拓扑结构

2.2 双边永磁直线电机

双边永磁直线电机(DS-PMLM)通常可以被认为是SS-PMLM沿中心线镜像变换而得到。与SS-PMLM相比,DS-PMLM多了一个初级或次级,为三层结构,用两层气隙隔开,结构更加复杂,但双边结构能进一步提升电机推力密度,同时单边结构边端效应引起的反电动势不平衡、定位力较大等问题也能通过双边结构的特殊设计进行有效抑制^[28-33]。

哈尔滨工业大学张赫等^[10]提出了一种游标DS-PMLM,结构如图8所示。该结构的永磁体表贴于2个长次级表面,2个初级对应位置永磁体励磁方向相反,初级铁心为双边直齿结构。绕组极对数 p_w 、永磁体极对数 p 和初级电枢齿数 n_s 之间满足:

$$p_w = n_s - p \quad (6)$$

该结构可以通过单边SPMLM以初级铁心轭部为中心线通过镜像变换得到。为了提高磁场谐波利用率,该电机采用分布式绕组,对于直线电机将形成较长的端部绕组,造成电机成本提升、效率降低等问题,采用环形绕组结构,有效地减少了电机端部长度,提高了电机效率,电机加工也更加

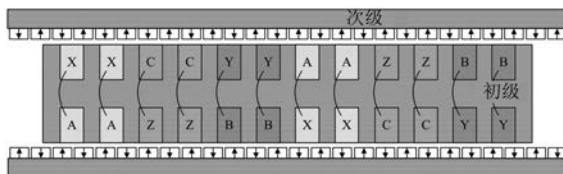


图 8 游标 DS-PMLM 拓扑结构

方便。

2018 年,浙江大学沈黎明等^[30]提出了一种磁通切换 DS-PMLM,结构如图 9 所示。该电机可以由单边磁通切换直线电机镜像变换并省去轭部铁心得到。该结构由 2 个仅有凸极齿的次级和 1 个有永磁体和电枢绕组的初级组成。永磁体嵌入初级电枢齿中间,电枢齿顶开虚槽,形成虚齿结构,该结构 2 个次级凸极齿位置错开半个极距,电机磁场能在初级与 2 个次级间形成有效磁回路。该结构利用次级齿与初级虚齿对永磁磁场和电枢磁场进行调制,通过调制后的磁场进行能量转换。但是,该结构不具备 $1+1>2$ 性能放大效果,电机漏磁也较多,且功率因数偏低。

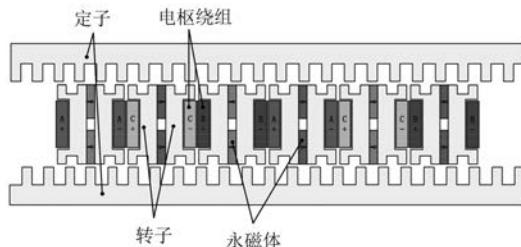


图 9 磁通切换 DS-PMLM 拓扑结构

2019 年,美国威斯康辛大学麦迪逊分校 Min 等^[34]分析了一种无铁心 DS-PMLM,其二维结构如图 10 所示。该结构两侧次级均由永磁体通过非导磁材料连接构成,且对应位置上的永磁体励磁方向相同,使得磁路在 2 个气隙中形成串联,以提高气隙磁密,达到性能提升的效果。该类结构磁场中磁导为常数,因此磁场谐波极对数与磁动势谐波极对数相同,并无新谐波产生。同时,绕组极对数与永磁体极对数相同,磁场基波即为工作波。因此,该电机可以用传统电机理论解释。同时,该结构电机属于较为特殊的单位调制电机,也可以用磁场调制理论进行分析。另外,无铁心结构降低了电机体积与质量,提高了动态效应速度。

但也使得电机磁阻较大,气隙磁密比普通带铁心结构电机低,电机推力密度较小。因此,此类电机结构适用于推力要求较低、响应速度要求较高的场合。

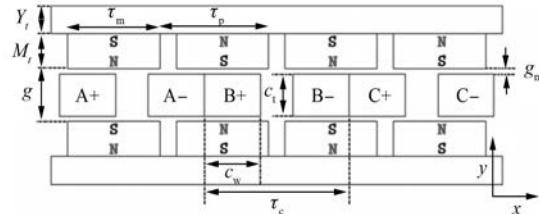


图 10 无铁心 DS-PMLM 二维结构图

2.3 圆筒永磁直线电机

圆筒永磁直线电机(TPMLM)是一种较为特殊的直线电机结构,可以由 SS-PMLM 或 DS-PMLM 电机沿某一中心线旋转一周得到,虽为圆形结构,但能直接以直线运动形式输出功率,适用于一些特殊场合,如汽车悬架馈能系统、作动器等。

2015 年,哈尔滨工业大学隋义等^[35]提出了一种双转子 TPMLM,结构如图 11 所示。该结构由一个 DS-PMLM 沿中心线旋转一周得到,内外 2 个同步转子均采用无轭设计,永磁体采用 Halbach 阵列表贴于转子表面,定子部分采用“H”型铁磁材料,定子的直齿结构作为电机磁场的调制齿,上下 2 个槽内排布绕组。与常规结构相比,该电机具有更高的效率、功率密度及电机空间利用率等优势。

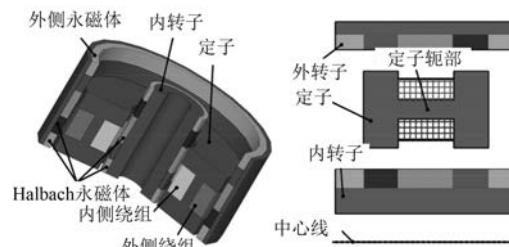


图 11 双转子 TPMLM 拓扑结构

同年,香港理工大学 Ho 等^[36]提出了一种潮汐能发电用的磁齿轮 TPMLM,结构如图 12 所示。该结构由一个直线磁齿轮结构沿中心线旋转一周得到,内外 2 个转子表贴有不同极对数的永磁体,永磁体均采用 Halbach 阵列,且 2 个转子运动速

度也不相同;其中,永磁体极对数较少的内转子为高速转子,永磁体极对数较多的外转子为低速转子。中间的定子由调制齿结构组成,与磁齿轮的不同之处在于,该结构将绕组排布于调制齿之间,以此将潮汐能转换成电能进行发电。基于磁齿轮原理,该结构具有更大的推力密度和更小的推力脉动。

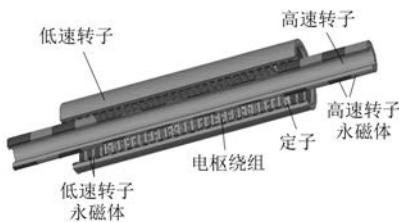


图 12 磁齿轮 TPMLM 拓扑结构

2016 年,英国皇家工程院 Zhu 等^[37]提出了 2 种定子分区型圆筒直线电机,其结构如图 13 所示。该结构分为三层,内外两层为定子,中间层为转子,由定子分区直线电机进行旋转得到。将永磁体和绕组分别置于内外 2 个定子上,转子仅由相互隔断的铁心材料形成调制齿结构。研究发现内嵌式永磁体结构电机比表贴式永磁体结构电机具有更高的推力密度。但是,由于较大的定位力,导致内嵌式电机推力脉动比表贴式电机大。

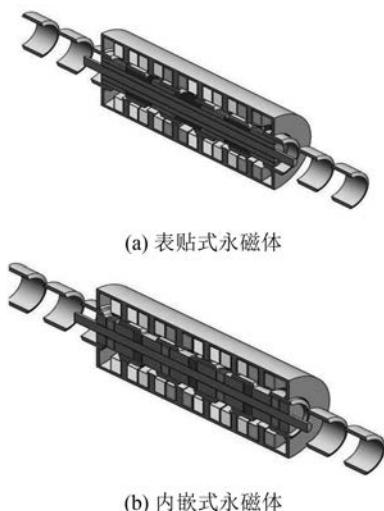


图 13 定子分区型 TPMLM

2.4 平面永磁直线电机

平面永磁直线电机(PIPMLM)也属于一种特殊的直线电机结构,与其他直线电机相比,平面电

机具有多自由度运行的特点,其结构分为动铁型和动圈型 2 种。其中,动铁型将线圈单元作为定子结构,铁磁单元作为多自由度转子结构;动圈型将铁磁单元作为定子结构,线圈单元作为转子结构。与多个直线电机层叠实现多自由度运行相比,平面电机结构更简单,控制精度更高,适用于半导体、集成电路、航空航天等高精度需求产业^[38]。另外,该类结构一般无调制齿参与磁场调制,属于单位调制的磁场调制电机。

2008 年,日本东京大学 Ueda 等^[39]提出了一种动铁型 PIPMLM,结构如图 14 所示。该结构将永磁体阵列作为转子,定子由双层三相绕组线圈组成,双层绕组绕向相互垂直,且用绝缘材料将这两层绕组隔开。为了提高电机推力密度,电机转子采用 Halbach 聚磁阵列。该电机结构具有 3 个方向自由度,在 x 方向和 y 方向产生推力,在 ϕ 方向上产生转矩。

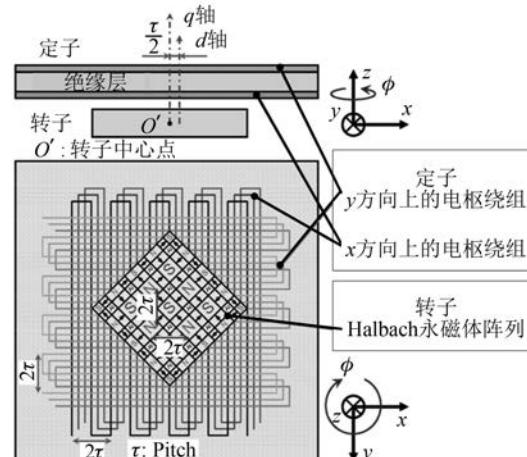


图 14 动铁型 PIPMLM

由于轴承摩擦,转子定位出现稳态误差。另外,在 x 、 y 、 ϕ 方向上的移动相互影响干扰,对电机定位性能产生负面影响。

2018 年,清华大学朱煜等^[40]提出了一种无铁心动圈型 PIPMLM,其结构俯视图如图 15 所示。提出了一种统一扳手模型,该模型可以计算任意形状线圈所受的洛伦兹力,并通过三角形线圈对所提出的模型进行了验证。为了降低线圈惯性,提高控制精度,电机线圈采用了无铁心设计,降低了电机磁密幅值,导致电机磁负荷和推力密度较低。为了弥补磁密削减带来的负面影响,该结构

利用 Halbach 永磁体阵列来增强有效磁场, 以提高电机推力性能。

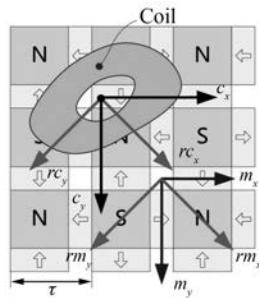


图 15 无铁心动圈型 PIPMLM

3 PMLM 电磁参数计算

由于直线电机的结构的特殊性, 其电磁参数的计算有别于传统方法, 本节将围绕现阶段直线电机电磁参数计算方法进行总结分析。

2003 年, 英国谢菲尔德大学汪佳斌等^[41]提出了一种针对 PMLM 的子域模型计算电机气隙磁场分布, 着重对直线电机边缘部分的磁场分布进行了解析, 有效反映了直线电机的边端对磁场畸变的影响。该方法与传统的有限元剖分计算方法类似, 将电机非铁心部分划分为若干子域, 针对无源子域列出拉普拉斯方程, 针对有源子域列出泊松方程:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial z} (rA_1) \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rA_1) \right) = 0 & \text{无源场} \\ \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial z} (rA_1) \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rA_1) \right) = -\mu_0 \nabla \times M & \text{有源场} \end{cases} \quad (7)$$

式中: A_1 为子域矢量磁势; μ_0 为真空磁导率; M 为永磁体磁化矢量。

由于拉普拉斯和泊松方程为二阶偏微分方程, 正常求解情况下存在无数个不确定解, 为了确定磁场分布的唯一解, 需要对各个子域列出边界条件。因此, 该方法计算量较大, 对研究者的数学能力要求较高。

在许多分析模型中, 磁场的计算是在假设 PMLM 的长度是无限长或在电机中加入周期边界的情况下进行的, 忽略了纵向边端效应。但是, 由于初级和次级的端部效应均被忽略了, 降低了电

机建模精度, 不可避免影响了电机后续的系统设计和运动控制。

2016 年, 北京机械设备研究所户恒在等^[42]提出了一种考虑纵向边端力的 PMLM 磁场和力的计算方法。该方案将笛卡尔坐标系下的 PMLM 模型转化到极坐标系下, 如图 16 所示。再将次级铁心拓展, 进而将 PMLM 转化成旋转电机进行解析计算, 其解析模型如图 17 所示。建立电机非铁心部分子域模型, 列出各部分的拉普拉斯方程或泊松方程, 根据边界条件求出各子域矢量磁位的唯一解, 进而得出电机磁密分布情况, 求出电机推力和法向力。同样, 该解析方案也需要较大的计算量。

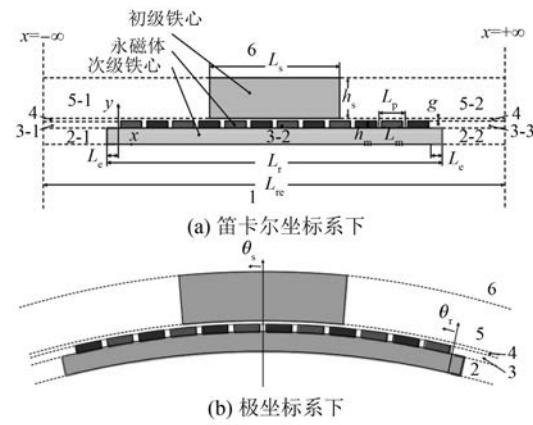


图 16 PMLM 分析模型

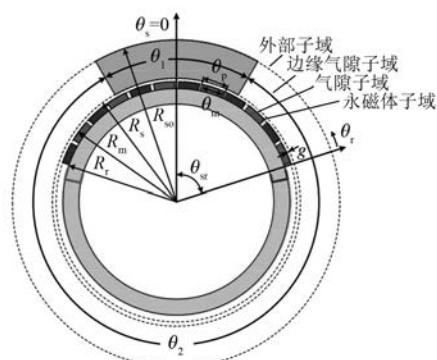


图 17 PMLM 解析模型

针对 DS-PMLM 结构较为复杂, 求解过程较为繁琐的问题, 华中科技大学周游等^[43]提出了一

种简化的 DS-PMLM 气隙磁密解析方法, 其电机等效磁路参数和简化磁路如图 18 所示。该方法将 Spoke 型永磁体磁路串联分布利用磁路特性等效成上下两层互不影响的磁路结构, 再通过磁动势磁导计算电机气隙磁密。气隙磁密函数可以表示为

$$\begin{aligned} B_{g1(2)}(x_m, t) = & \sum_{i=1,3,\dots} \lambda_0 F_{gi} \sin \frac{2\pi}{L_m} (iZ_2 x_m + ivt) \pm \\ & \sum_{i=1,3,\dots} \frac{\lambda_1 F_{gi}}{2} \sin \frac{2\pi}{L_m} [(iZ_2 + Z_1)x_m + ivt] \pm \\ & \sum_{i=1,3,\dots} \frac{\lambda_1 F_{gi}}{2} \sin \frac{2\pi}{L_m} [(iZ_2 - Z_1)x_m + ivt] \end{aligned} \quad (8)$$

式中: λ_0, λ_1 分别为磁导直流和 1 次交流分量; F_{gi} 为气隙磁动势 i 次分量; L_m 为转子铁心长度; Z_1, Z_2 分别为转子槽数、永磁体极对数; v 为转子运行速度。

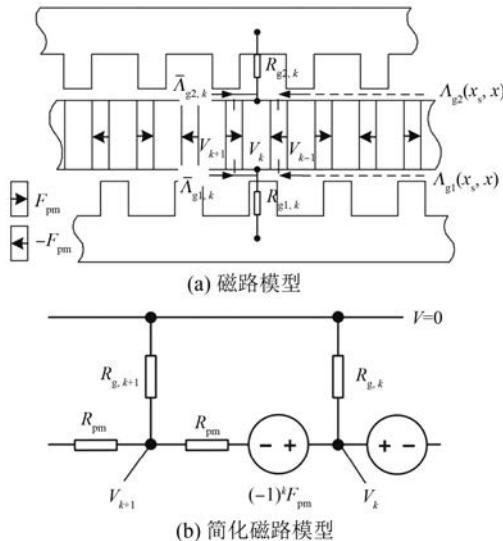


图 18 DS-PMLM 解析模型

利用绕组函数计算电机反电动势, 其中 A 相绕组反电动势可以表示为

$$\begin{aligned} e_A(t) = & \sum_{i=1,3,\dots} iv\pi F_{gi} l_{stk} \sin \left(\frac{iZ_2}{2} \frac{\pi}{Z_1} \right) \cdot \\ & \left(2N_{\frac{iZ_2}{P}} \lambda_0 + N_{\frac{Z_1+iZ_2}{P}} \lambda_1 \right) \cos \left(i \frac{2\pi}{L_m} vt - \frac{iZ_2}{2} \frac{\pi}{Z_1} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

式中: l_{stk} 为硅钢片叠片厚度; P 为绕组极对数。

利用磁能积法计算齿槽力和边端力:

$$\begin{aligned} F_c = & - \frac{gl_{stk} Z_2 \pi}{\mu_0} \sum_{t=0,1,2,\dots}^{\infty} s F_{gs} \lambda_{j_1} \lambda_{j_2} \cdot \\ & \cos \left[s Z_2 \left(\frac{2\pi v}{L_m} t - \frac{\pi}{2Z_1} \right) \right] \cos \left(\frac{s Z_2 \pi}{2Z_1} \right) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} F_{end}(x) = & \sum_{k=1,2} [F_{end,k,right}(x) + F_{end,k,left}(x)] = \\ & - \frac{2K_c g \Phi_m^2}{\mu_0 k_1 \tau_p^2 l_{stk}} \frac{8}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin \frac{4\pi Z_2}{L_m} \left(vt + \frac{\tau_{slot}}{4} \right) \cdot \\ & \cos \left(n \frac{4\pi Z_2 (L_{aux1} + L_{aux2})}{L_m} \right) \cos n \frac{\pi Z_2}{Z_1} \end{aligned} \quad (11)$$

式中: $\lambda_{j_1} \lambda_{j_2}$ 为磁导平方项系数, j_1 和 j_2 的关系可以表示为 $j_1 \pm j_2 = t \text{LCM}(Z_1, Z_2)/Z_1$, $s = t \text{LCM}(Z_1, Z_2)/Z_2$, LCM 为最小公倍数; Φ_m 为电机边缘磁通最大值; K_c 为电机卡特系数; g 为气隙厚度; k_1 为气隙磁通压缩参数; τ_p 为永磁体极距; τ_s 为槽距; L_{aux1}, L_{aux2} 分别为右侧和左侧辅助齿厚度。

4 PMLM 的发展趋势和应用前景

4.1 发展趋势

本文简要概述了现阶段 PMLM 的研究现状, 针对现有研究存在的不足之处和问题, 提出一些对于未来研究的展望。

(1) 完善磁场调制理论在 PMLM 中的应用。

目前, 直线电机的理论大多继承于旋转电机, 存在内在统一性。但是, 在实际应用过程中, 直线电机的设计和分析有别于旋转电机。现阶段的磁场调制效应在电机中的普适性正在得到逐步验证, 其在 PMLM 中的应用会产生一些新问题和新挑战, 有待进一步完善。

(2) 新的 PMLM 拓扑结构的发现。

与旋转电机受内部空间和内外结构非对称的限制相比, 直线电机在拓扑结构上具有更多设计维度。目前的 PMLM 大多从旋转电机结构转换而成, 因此, 其创新性的拓扑结构有待进一步发现。另外, 直线电机存在边端效应, 导致反电动势畸变, 推力脉动增大, 需要对 PMLM 电机进行针对性的结构设计, 抑制或者消除端部效应对电机造成的不利影响。

(3) 电磁解析计算和参数优化的研究。

电磁解析计算的难点主要在 PMLM 边端磁场的计算, 直线电机铁心在边缘部分截断会引起端部磁场畸变, 而该部分的畸变在常规磁场解析过程中常常

被忽略,造成直线电机定位力和推力的计算存在较大误差。另外,电机结构参数较多,在优化过程中需要进行大量的计算,且常规优化只考虑单目标,即某一目标参数达到最佳值,而对于多目标情况下,常规优化方案耗时耗力,得出的解也未必是全局最优解。对电机参数优化方案的研究有利于简化优化过程,减少优化时间,寻求全局最优解,达到事半功倍的效果。

(4) 兼顾 PMLM 性能的损耗抑制。电机损耗不仅会带来效率的降低,也会造成热集聚导致电机绝缘老化,永磁体不可逆退磁等降低电机使用性能和寿命的负面效果。PMLM 气隙中包含丰富的磁场谐波分量,这些谐波带来电机性能的提升的同时,也会造成电机损耗,特别是高速运行的应用场合中,如何在保证电机输出性能的情况下尽可能降低电机损耗,是直线电机工业应用的重要前提条件。

4.2 应用前景

PMLM 已经在工业制造^[44-47]、轨道交通^[29, 48-51]、电磁弹射^[52-54]、航空航天^[55-57]、海洋发电^[58-61]和电磁弹射等领域得到广泛应用。

文献[4]提出了一种轨道交通用的 PPMLM,其拓扑结构如图 19 所示。该电机采用短初级(转子侧)、长次级(定子侧)结构,电机的电枢绕组和永磁体均安装于初级,次级仅为凸极磁阻结构。该种电机不仅具有常规直线感应电机结构简单和非粘着直接驱动等优点,且功率因数和效率等性能指标优良。

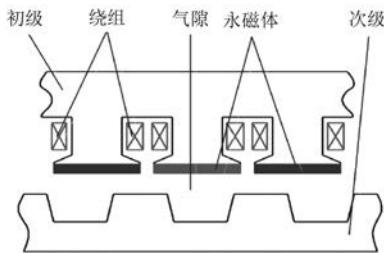


图 19 轨道交通用 PPMLM 拓扑结构

文献[53]综合比较了电磁弹射用磁通切换直线电机与感应电机,其磁通切换直线电机结构如图 20 所示。该结构属于 DS-PMLM,永磁体与绕组均放置在两侧初级,中间次级仅有铁心齿构成。与感应直线电机相比,该磁通直线切换电机

在平均推力、推力脉动、效率和功率因数上具有明显优势。

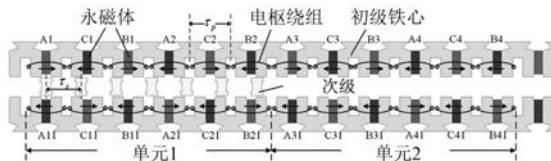
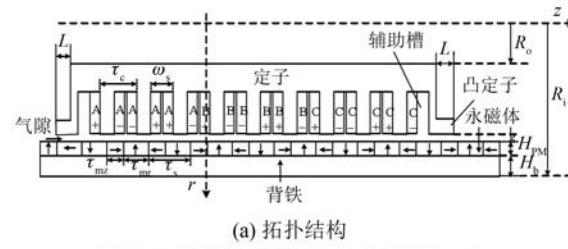


图 20 电磁弹射用永磁直线磁通切换电机

文献[62]提出了一种利用海洋波浪发电的 TPMLM 电机,拓扑结构与波浪发电试验如图 21 所示。一种将转子(永磁体)置于外部,永磁体采用准 Halbach 结构的 TPMLM,该电机可以增大功率密度,且提高气隙磁场强度的正弦程度。在体积相同的前提下,外转子 PMLM 的功率密度为内转子结构的 6~8 倍。准 Halbach 充磁结构的气隙磁密为径向充磁结构的 1.39 倍。



(a) 拓扑结构



(b) 波浪发电试验平台

图 21 波浪发电用 TPMLM 电机

5 结语

本文围绕 PMLM,分析了电机中普遍存在的磁场调制原理,将电机气隙磁场中的谐波分量分为原激励磁场分量和调制磁场分量两部分。结合现有 PMLM 拓扑结构的研究情况,分析了其内在磁场调制现象,验证了磁场调制的广泛存在性。针对 PMLM 的特殊结构,其电磁参数的解析计算有别于常规旋转电机,特别是铁心截断引起的边端力效应会对电机反电动势和推力产生不可忽视的作用。展望了 PMLM 后续相关研究方向,其在

工业制造、交通运输、电磁弹射、航空航天和海洋发电领域的应用前景广阔。

【参考文献】

- [1] 叶云岳. 直线电机原理与应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2000; 15-16.
- [2] 汪旭东, 袁世鹰, 焦留成, 等. 永磁直线同步电动机垂直运输系统的研究现状 [J]. 微电机, 2000, 33(5): 35.
- [3] BOLDEA I, TUTELEA L N, XU W, et al. Linear electric machines, drives, and maglevs: an overview [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(9): 7504.
- [4] 杨雄, 张凤阁, 王秀平. 轨道交通用初级永磁型直线电机电磁特性分析 [J]. 电气工程学报, 2018, 13(5): 1.
- [5] 赵青峰, 程晓民. 直线电机在城市轨道交通系统中的应用 [J]. 现代城市轨道交通, 2017(10): 54.
- [6] 李莉, 张瑞华, 杜玉梅, 等. 直线电机轨道交通牵引系统研究与试验 [J]. 机车电传动, 2016(6): 88.
- [7] 郭燕强, 尹志春. 直线电机技术在轨道交通中的应用 [J]. 机械工程与自动化, 2017(3): 222.
- [8] ZHAO W, ZHENG J, WANG J, et al. Design and analysis of a linear permanent-magnet vernier machine with improved force density [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(4): 2072.
- [9] EGUREN I, ALMANDOZ G, EGEA A, et al. Linear machines for long stroke applications—a review [J]. IEEE Access, 2020, 8: 3960.
- [10] ZHANG H, KOU B, ZHU Z Q, et al. Thrust ripple analysis on toroidal-winding linear permanent magnet vernier machine [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(12): 9853.
- [11] CHENG M, HAN P, HUA W. General airgap field modulation theory for electrical machines [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64 (8): 6063.
- [12] ZHU X, LEE C H T, CHAN C C, et al. Overview of flux-modulation machines based on flux-modulation principle: topology, theory and development prospects [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2020, 6(2): 612.
- [13] TAN Q, HUANG X, LI L, et al. Magnetic field analysis and flux barrier design for modular permanent magnet linear synchronous motor [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(5): 3891.
- [14] 程明, 张淦, 花为. 定子永磁型无刷电机系统及其关键技术综述 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5204.
- [15] ZENG Z, LU Q. Investigation of novel partitioned-primary hybrid-excited flux-switching linear machines [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(12): 9804.
- [16] LU Q, YAO Y, SHI J, et al. Design and performance investigation of novel linear switched flux PM machines [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(5): 4590.
- [17] FAN H, CHAU K T, LIU C, et al. Quantitative comparison of novel dual-PM linear motors for ropeless elevator system [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2018, 54(11): 8106506.
- [18] WU Z, ZHU Z Q, ZHAN H. Comparative analysis of partitioned stator flux reversal PM machine and magnetically geared machine operating in stator-PM and rotor-PM modes [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2017, 32(3): 903.
- [19] 杜怿, 邹春花, 朱孝勇, 等. 初级永磁型游标直线电机绕组连接及其电磁特性比较 [J]. 电工技术学报, 2017, 32(3): 130.
- [20] 寇宝泉, 罗俊, 杨小宝, 等. 横向磁场磁通反向直线电机的设计与分析 [J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(4): 1216.
- [21] LIU G, ZHONG H, XU L, et al. Analysis and evaluation of a linear primary permanent magnet vernier machine with multi harmonics [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, doi: 10.1109/TIE.2020.2973888.
- [22] SHEN Y, ZENG Z, LU Q, et al. Investigation of a modular linear doubly salient machine with dual-PM in primary yoke and slot openings [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2019, 55(6): 8102606.
- [23] NEMATSABERI A, FAIZ J. A novel linear stator-PM vernier machine with spoke-type magnets [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2018, 54(11): 8106905.
- [24] 曹瑞武, 苏恩超, 张学. 轨道交通用次级分段型直线磁通切换永磁电机研究 [J]. 电工技术学报, 2020, 35(5): 1001.
- [25] 吉敬华, 潘小云, 赵文祥, 等. 五相容错式磁通切换永磁电机的气隙磁场调制运行机理分析 [J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(21): 6227.

- [26] SHI C, LI D, QU R, et al. A novel linear permanent magnet vernier machine with consequent-pole permanent magnets and Halbach permanent magnet arrays [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2017, 53(11): 2501404.
- [27] FAN H, CHAU K T, CAO L, et al. Design and analysis of a new bipolar-flux DSPM linear machine [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2018, 33(4): 2081.
- [28] HAO W, WANG Y. Analysis of double-sided sandwiched linear flux-switching permanent-magnet machines with staggered stator teeth for urban rail transit [J]. IET Electrical Systems in Transportation, 2018, 8(3): 175.
- [29] CHEN H, YAN W. Flux characteristics analysis of a double-sided switched reluctance linear machine under the asymmetric air gap [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(12): 9843.
- [30] SHEN Y, LU Q, LI H, et al. Analysis of a novel double-sided yokeless multitooth linear switched-flux PM motor [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(2): 1837.
- [31] ZENG Z, SHEN Y, LU Q, et al. Comparative study of two novel double-sided hybrid-excitation flux-reversal linear motors with surface and interior PM arrangements [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2019, 55(6): 8202007.
- [32] KWON Y, KIM W. Steady-state modeling and analysis of a double-sided interior permanent-magnet flat linear brushless motor with slot-phase shift and alternate teeth windings [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2016, 52(11): 8205611.
- [33] ULLAH N, KHAN F, BASIT A, et al. Performance comparison and optimisation of dual mover linear permanent magnet flux switching machine [J]. IET Electric Power Applications, 2019, 13(7): 984.
- [34] MIN S G, SARLIOGLU B. A comparative study of coreless-type PM linear synchronous machines with non-overlapping windings [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(3): 2481.
- [35] SUI Y, ZHENG P, YU B, et al. Research on a tubular yokeless linear PM machine [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015, 51(11): 8204904.
- [36] HO S L, WANG Q, NIU S, et al. A novel magnetic-gearred tubular linear machine with Halbach permanent-magnet arrays for tidal energy conversion [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015, 51(11): 8113604.
- [37] ZHU Z Q, SHURAIJI A L, LU Q F. Comparative study of novel tubular partitioned stator permanent magnet machines [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2016, 52(1): 9500207.
- [38] 宋玉晶, 张鸣, 朱煜, 等. 基于伪周期的 Halbach 永磁阵列三维磁场端部效应建模研究 [J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 162.
- [39] UEDA Y, OHSAKI H. A planar actuator with a small mover traveling over large yaw and translational displacements [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2008, 44(5): 609.
- [40] ZHU Y, YUAN D, ZHANG M, et al. Unified wrench model of an ironless permanent magnet planar motor with 2D periodic magnetic field [J]. IET Electric Power Applications, 2018, 12(3): 423.
- [41] WANG J, HOWE D, JEWELL G W. Fringing in tubular permanent-magnet machines: part I. Magnetic field distribution, flux linkage, and thrust force [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2003, 39(6): 3507.
- [42] HU H, ZHAO J, LIU X, et al. Magnetic field and force calculation in linear permanent-magnet synchronous machines accounting for longitudinal end effect [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(12): 7632.
- [43] ZHOU Y, QU R, SHI C, et al. Analysis of thrust performance of a dual-mover linear vernier machine with horizontal-magnetized PM arrays [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2018, 33(4): 2143.
- [44] YAN L, PENG J, JIAO Z, et al. Flux field and thrust analysis of permanent-magnet linear machines with isolated movers [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015, 51(8): 8203208.
- [45] 冯大鹏, 刘中海. 潜油直线电机抽油系统设计 [J]. 化学工程与装备, 2015(7): 117.
- [46] 周封, 杨力源, 刘志刚, 等. 井下直线举升装置中直线电机关键技术研究综述 [J]. 微电机, 2015, 48(6): 100.
- [47] 李义强, 周惠兴. 精密伺服用无铁心永磁同步直线电动机研究综述 [J]. 微电机, 2008, 41(5): 71.
- [48] FERNANDES NETO T R, MUTSCHLER P, THÉ PONTES R S. Short primary linear drive designed for synchronous and induction operation in different

- sections[J]. IET Electric Power Applications, 2014, 8(6): 209.
- [49] CAO R, SU E, LU M. Comparative study of permanent magnet assisted linear switched reluctance motor and linear flux switching permanent magnet motor for railway transportation [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2020, 30(4): 3601205.
- [50] CAO R, LU M, JIANG N, et al. Comparison between linear induction motor and linear flux-switching permanent-magnet motor for railway transportation [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(12): 9394.
- [51] WANG W, FENG Y, SHI Y, et al. Fault-tolerant control of primary permanent-magnet linear motors with single phase current sensor for subway applications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(11): 10546.
- [52] ZHANG Z, ZHOU H, DUAN J, et al. Research on permanent magnet linear synchronous motors with ring windings for electromagnetic launch system[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2017, 45(7): 1161.
- [53] CAO R, JIN Y, LU M, et al. Quantitative comparison of linear flux-switching permanent magnet motor with linear induction motor for electromagnetic launch system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(9): 7569.
- [54] 杜超, 孟大伟. 基于场路结合法的电磁弹射用新型永磁直线同步电机的研究[J]. 电机与控制学报, 2019, 23(9): 65.
- [55] 任龙. 复合式电磁馈能悬架阻尼器关键技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2018.
- [56] 王会永, 周保华, 李向男, 等. 直线电机的应用现状及发展趋势研究[J]. 微电机, 2016, 49(9): 86.
- [57] 刘宇, 杨文将, 段毅, 等. 航天运载器磁悬浮助推发射关键技术[J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 32(10): 1180.
- [58] 张静, 余海涛, 施振川. 一种波浪发电装置用低速双动子永磁直线电机运行机理研究[J]. 电工技术学报, 2018, 33(19): 4553.
- [59] 刘春元. 圆筒型永磁直线发电机在直驱式波浪发电系统的应用研究[D]. 南京:东南大学, 2015.
- [60] 黄磊, 胡敏强, 余海涛, 等. 直驱式波浪发电用全超导初级励磁直线发电机的设计与分析[J]. 电工技术学报, 2015, 30(2): 80.
- [61] 刘春元, 洪立玮, 黄磊, 等. 外次级永磁直线电机在波浪发电系统中的应用[J]. 太阳能学报, 2019, 40(11): 3017.
- [62] 刘春元, 余海涛, 胡敏强, 等. 永磁直线发电机在直驱式波浪发电系统的应用[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(21): 90.

〔期刊简介〕

《电机与控制应用》(原《中小型电机》)创刊于1959年,是经国家新闻出版总署批准注册,由上海电器科学研究所(集团)有限公司主办的具有专业权威的电工技术类科技期刊。

期刊定位于电机、控制和应用三大板块,以中小型电机为基础,拓展新型的高效节能和微特电机技术,以新能源技术和智能控制技术引领和提升传统的电机制造技术为方向,以电机系统节能为目标开拓电机相关应用,全面报道国内外的最新技术、产品研发、检测、标准及相关的行业信息。

本刊每月10日出版,国内外公开发行,邮发

代号4-199。在半个多世纪的岁月中,本刊为我国中小型电机行业的技术进步与发展做出了巨大的贡献,在中国电机及其应用领域享有很高的声誉。

依托集团公司雄厚的技术实力和广泛的行业资源,《电机与控制应用》正朝着专业化品牌媒体的方向不断开拓创新,在全国科技期刊界拥有广泛的知名度,是“中国学术期刊综合评价数据库来源期刊”、“中国科学引文数据库来源期刊”、“中国学术期刊(光盘版)全文收录期刊”,得到了业内人士的普遍认可,备受广大读者的推崇和信赖,多次被评为中文核心期刊、中国科技核心期刊、全国优秀科技期刊。