

## 直线感应电机在轨道交通中的应用与控制技术综述

李庆来, 方晓春, 杨中平, 林 飞

(北京交通大学 电气工程学院 北京 100044)

摘要: 综述了直线感应电机在轨道交通中的应用情况和相应的控制技术, 从直线感应电机相比于与旋转感应电机的特殊性出发, 详细论述了造成特殊性的原因以及对列车运行和控制的影响, 并概述解决方式和研究方向。针对轮轨式和磁悬浮式的牵引控制系统, 介绍了两者的控制策略, 详细阐述了针对直线感应电机的特殊控制方法。论述了在直线感应电机牵引系统中的几种新型控制策略和未来的研究方向。

关键词: 直线感应电机; 控制策略; 磁悬浮; 牵引力; 转差频率控制

中图分类号: TM346; TM359.4 文献标志码: A 文章编号: 1004-7018(2021)08-0039-09

## Review of the Application and Control Technology in the Linear Induction Motor for the Rail Transit

LI Qing-lai, FANG Xiao-chun, YANG Zhong-ping, LIN Fei

(School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** The application in the linear induction motor for the rail transit and the corresponding control technology, and the current research status in control technology were summarized. Starting from the particularity of linear induction motors compared with rotary induction motors. The reasons for the particularities and their influence on operation and control, and outlines solutions were discussed. For wheel-rail and magnetic levitation traction control systems, the two control strategies were introduced, and the special control structure for linear induction motors was elaborated. Several new control strategies and future research directions in the linear induction motor traction system were discussed.

**Key words:** linear induction motor, control strategy, magnetic levitation, traction force, slip-frequency control

## 0 引言

随着我国城市建设的速度越来越快, 城市的规模也越来越大, 城市内部各地域间快速、安全、舒适的客运越来越重要, 轨道交通对于城市而言具有不可替代的地位, 因此对我国城市轨道交通提出了更进一步的要求。

在城市中, 轨道交通往往滞后于城市的建设发展, 其线路的设计布局也受到建筑与地形的限制, 这也要求城市轨道交通的建设能够尽可能的实现占地空间小、避让现有建筑的目标, 这样可以减小大规模的拆迁以及投资成本, 同时考虑到城市中车站的距离较近, 城市轨道交通也需要具有优秀的加减速性能。目前, 在城市轨道交通领域, 旋转电机列车占据主导, 但由于其自身结构上的局限性无法满足上述的新要求, 因此具有更强爬坡能力、更小转弯半径、非黏着驱动的直线电机车辆的出现, 有效地解决了这些问题。

本文以轨道交通为背景, 首先介绍直线感应电机在轨道交通中的应用和特点, 进而论述与旋转感

应电机相比的特殊性, 例如边端效应、法向力、气隙变化、次级感应板偏移缺失等, 同时通过仿真论述了其造成的影响和研究方向。针对轮轨式和磁悬浮式的牵引控制系统, 以广州地铁4号线和日本东部丘陵线为例, 详细阐述了两者的牵引控制策略。最后介绍了几种新型控制策略和未来的研究方向, 例如参数辨识控制和模型预测控制。

## 1 直线感应电机在轨道交通中的应用

城市轨道交通中采用直线感应电机的运营线路如表1所示, 包括短初级和长初级两种制式, 其区别在于初级放置在车上还是铺设于轨道。

## 1.1 短初级直线感应电机

目前, 在直线感应电机轨道交通领域, 无论磁悬浮列车、轮轨列车以及单轨交通<sup>[2]</sup>, 短初级制式的应用最为广泛, 其在结构上的主要特点如下:

- 1) 牵引变流系统和电机的初级安装在列车上, 并通过接触网或接触轨进行供电;
- 2) 电机的次级沿着轨道铺设。

对于直线感应电机轮轨列车, 其支撑和导向方式与旋转感应电机列车相同, 不同之处在于电机制式; 对于磁悬浮列车, 则需要考虑列车的悬浮稳定, 这也对系统的控制有进一步的要求。

收稿日期: 2021-04-06

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(2019JBM061)

表1 直线感应电机交通的运营线路<sup>[1]</sup>

电机制式	车辆制式	线路名称
短初级直线感应电机	轮轨	北京地铁机场线、广州地铁4/5/6号线、东京大江户线、东京地铁7/8号线、神户地铁海岸线、福冈3号线、大阪市营7/8号线、横滨4号线、仙台东西线、韩国龙仁 EverLine、肯尼迪国际机场快线 JFK、多伦多 ALRT 线、温哥华 ALRT 线、底特律 DPM 系统、吉隆坡 PUTRA 系统
	磁悬浮	北京地铁 S1 线、长沙磁浮快线、日本东部丘陵线、仁川机场磁浮线
	单轨	莫斯科高架单轨
长初级直线感应电机	轮轨	休斯顿机场客运系统、美国国会地铁客运系统

### 1.2 长初级直线感应电机

对于一些对供电安全要求较高的场合,不希望将供电系统和牵引传动系统安装于列车上,因此采用长初级直线感应电机,其在结构上的主要特点如下:

- 1) 牵引变流系统和电机的初级安装在地面,不需要接触网或接触轨;
- 2) 电机的次级安装在车下,使得列车端结构简单,车体较轻;
- 3) 电机的初级为分段不连续,需要进行分段切换供电。

考虑到建设成本较高,目前应用场合较少,典型线路为休斯顿机场线和美国国会地铁。

### 1.3 直线感应电机的特点

相比于在轨道交通中占据主导的旋转感应电机车辆,采用直线感应电机的车辆能够迅速发展,得益于以下的特点<sup>[3-9]</sup>:

- 1) 由于直线感应电机车辆不依靠齿轮箱等机械传动装置和轮轨间的黏着力,可以将电机产生的推力直接作为牵引力,提升了列车的爬坡能力,使得其最大坡度大于旋转感应电机车辆,以韩国仁川机场线和日本东部丘陵线为例,其最大坡度分别可达70‰和60‰,而采用旋转感应电机的北京地铁八通线的最大坡度仅为23.5‰;

- 2) 由于直线感应电机轮轨车辆简化了转向架的设计,使得列车可通过半径较小的曲线,其最小曲线半径小于旋转感应电机车辆,以韩国仁川机场线和日本东部丘陵线为例,其最小转弯半径分别仅为50 m和75 m,而采用旋转感应电机的北京地铁八通线最小转弯半径为300 m;

- 3) 由于直线感应电机为扁平设计,同时省略了传动机构,可以减小车辆的轮廓尺寸和隧道的盾构面积,进而节省土方成本,以广州地铁6号线为例,其受电弓落弓高度不大于3 650 mm,而我国

采用旋转感应电机 A、B 型车的受电弓落弓高度约为 3 890 mm;

- 4) 由于直线感应电机列车轮轨间不传递牵引力,大大减少轮轨损伤,维护成本较低,同时由于初级和次级裸露在外部,加大了散热面积,因此散热性能好,提高了系统寿命;

- 5) 由于没有齿轮传动机构的啮合振动,也没有动力轮对与钢轨产生的振动噪声,噪声水平低于旋转感应电机列车,以韩国仁川机场线和日本东部丘陵线为例,车厢内的噪声水平分别为 70 dB 和 60 dB,而我国 GB 14892—2006《城市轨道交通列车噪声限值 and 监测方法》规定地铁车辆车内噪声等效声级的最大容许限值为地下 83 dB、地上 75 dB,其中文献[9]在北京地铁进行噪声水平调查,在速度 53.3 km/h 的条件下噪声可达 80 dB;

- 6) 直线感应电机的运行灵活性为轨道线路的设计提供了较大的选择空间,减少了地面建筑物的拆除和重建工作,可以节省大量成本,以长沙市为例,磁浮线路包含拆迁在内,每千米成本为 2.3 亿元,而普通地铁每千米成本则为 7 亿元。

但是直线感应电机系统也存在以下不足<sup>[3-10]</sup>:

- 1) 初次级间的气隙长度较大,以韩国仁川机场线和日本东部丘陵线为例,电机的气隙长度均为 8 mm,而旋转感应电机的气隙长度通常在 0.2~0.5 mm,导致电机的功率因数和效率较低,文献[10]根据牵引制动特性对广州地铁 1~4 号线的功率因数和效率进行计算,其中旋转电机的功率因数和效率可达 0.9 和 93.5%,但是直线电机的功率因数和效率只有 0.602 和 75%,在实际运行中会更低;

- 2) 由于存在边端效应、气隙变化等特殊工况,会造成电机参数的变化、牵引力和电流的波动,这对系统的稳定控制带来了挑战,而直线感应电机法向力的存在,加大了对控制系统的要求。

因此,直线感应电机系统需要集成多种技术,才能充分发挥自身的优势,实现更稳定的控制,同时弥补自身的缺点,以适应城市的发展要求。

## 2 直线感应电机交通的特殊性及影响

相比于旋转感应电机,直线感应电机由于其自身结构,使得在轨道交通中存在多种特有的工况,例如边端效应、气隙变化、初次级偏移、次级感应板缺失等,以及存在特有的法向力。下面将介绍这些工况所造成的影响,并阐述相应的解决方式和研究方向,为直线感应电机的设计和控制提供强有力的学术参考,其中主要的分析手段有解析法<sup>[11]</sup>和有限元法<sup>[12]</sup>。

### 2.1 边端效应

由于直线电机自身结构上的特点,例如初级铁心结构不连续,初次级横向宽度的设计,以及运行中的特点,例如次级感应出初级磁场,使得直线感应电机初级气隙磁场发生畸变,这种现象称为边端效应<sup>[13]</sup>。

边端效应会造成电机电感参数的不对称,气隙磁场的畸变和削弱,以及相电流的不平衡,并且次级产生的涡流还会削弱气隙磁场,造成推力下降并产生涡流损耗。

目前研究中为了简化分析,通常只考虑涡流效应导致的纵向二类边端效应。结合涡流产生的去磁作用和损耗,在励磁支路并联一个去磁电感以及串联一个涡流损耗电阻,其等效电路图如图1所示,这也是在分析控制中最为广泛采用的。其中 $R_r$ 为次级电阻, $L_m$ 为励磁电感, $L_{lr}$ 为次级漏感, $R_s$ 为初级电阻, $L_{ls}$ 为初级漏感, $s$ 为转差率, $Q$ 是将初级长度进行标么化得到的, $f(Q)$ 为关于 $Q$ 的函数。

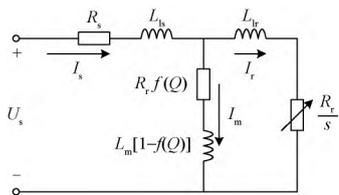


图1 基于涡流分析的直线感应电机等效电路图

为了验证边端效应的影响,依据某型号直线感应电机列车的参数,采用如图1所示的等效电路图进行仿真。仿真条件为从静止运行到最高速度160 km/h,其中列车质量等参数已折算到单台直线感应电机,推力参考值指令根据速度值进行查表得到。图2为正常运行下的速度曲线,图3表示不存在边端效应的输出推力和存在边端效应的输出推力,同时在控制中未对边端效应进行补偿。从图3中可以看出,当存在边端效应时,推力会降低,从而无法实现目标控制。

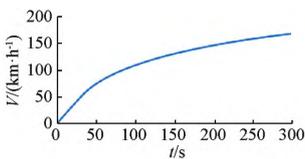


图2 速度曲线图

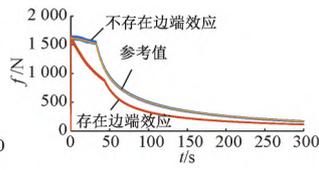


图3 考虑边端效应下的推力图

针对直线感应电机的边端效应,目前的研究方向包括:

1) 对直线感应电机等效电路的研究,可以更好地在控制器中对电机进行控制。文献[14]在图1的基础上提出了考虑次级缺失下的等效电路,将初

级通过感应板缺失区域的过程,详细地划分为3种工况,与有限元仿真结果相比,推力和效率具有整体一致性。文献[15]针对横向和纵向边端效应,通过 $K_r$ 、 $C_r$ 、 $K_x$ 、 $C_x$  4个系数对受影响最大的参数进行修正,等效电路图如图4所示,并通过实验验证了该电路能够合理地描述电机的稳态性能,如推力、功率因数、效率和电流等,误差均在5%以内。文献[16]则在文献[15]的基础上,将表征铁损的电阻并联于电机,以更精确地计算电机损耗,实验表明,损耗误差在5%左右,证明了该模型的精度。

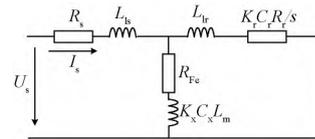


图4 基于系数修正的直线感应电机等效电路图

2) 对直线感应电机边端效应进行补偿,从而实现更稳定的控制。在结构上,文献[17-18]采用了边端补偿器,该补偿器可以采用永磁体或者集中绕组的线圈,使得在定子前端形成一个与定子频率相同的涡流,从而对边端效应进行补偿,可以提高直线感应电机的推力和效率。在牵引控制中,文献[19-21]根据边端效应方程在控制器中对电机参数、电压电流指令值等进行补偿,进而得到参考指令值,实现闭环控制;

3) 对电机次级感应板结构的设计和优化<sup>[22-23]</sup>,包括尺寸、形状以及材料,从而减小边端效应,提高电机的输出性能。

### 2.2 气隙长度变化

相比于旋转感应电机,直线感应电机气隙长度的选择通常较大,这是由于当气隙过小时,容易造成初次级接触事故;如果气隙过大,会导致推力和效率的降低,因此气隙长度的选择是至关重要的。在列车运行中,气隙长度时常会发生变化,从而直接引起直线感应电机性能的变化,例如牵引力和电流的波动,导致列车运行的不稳定。而引起气隙变化的主要原因如下<sup>[24]</sup>:

- 1) 轮轨交通钢轨和枕木的变形,会引起次级感应板上升或凹陷;
- 2) 车体转向架由于转弯而发生的侧滚,以及正常行驶的浮沉(上下运动)和点头(绕着横轴摆动)会引起气隙变化;
- 3) 初、次级之间的法向力使得次级感应板产生挠度形变,造成气隙的变化。

对于气隙变化所造成的影响,文献[24-25]采用解析法说明了随着气隙的增大,推力、法向力、效率、功率因数、品质因数都相应地降低,而初级电流和铜

耗却升高,并通过二维有限元法进行验证,其中文献[24]和文献[25]分别通过直线感应电机实验装置和高温超导直线感应电机系统进一步验证上述结论。除了对电机性能的影响,文献[26]也对参数影响性进行了分析,表明励磁电感和漏感与电磁气隙近似成反比。

利用仿真验证不同气隙长度的影响,取气隙长度分别为8 mm和10 mm,其中电感参数与气隙长度具有函数关系,其在低速恒推力区的仿真对比结果如图5所示。可以看出,在相同的控制条件下,气隙长度越大,输出推力越低,导致加速性能降低,而图5中35 s后输出推力较大的原因为此时速度较低、参考推力较大。

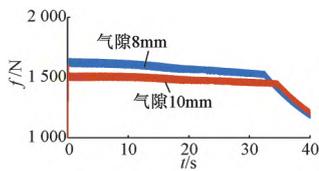


图5 考虑气隙变化下的推力图

通过对直线感应电机气隙长度的研究,可以从结构上为电机额定气隙长度和初次级厚度的设计提供理论指导<sup>[25-27]</sup>,同时促进了气隙长度检测技术<sup>[28]</sup>、悬浮控制技术<sup>[29]</sup>的发展。在牵引控制中,气隙长度变化导致的电机参数变化,可以通过建立离线参数表或者采用在线参数辨识进行修正。

### 2.3 初次级横向偏移

由于城市空间错综复杂,为避开已经建成的设施,以及高低起伏的地形,曲线和弯道是不可避免的。在经过弯道时,由于存在离心力,会使得电机的初、次级发生横向偏移,不再处于对中位置。在这种情况下,边端效应和磁场磁力线会表现出不对称的严重畸变。由于磁场分布不均,使得直线感应电机的推力沿横向分布不对称,从而产生附加扭矩和阻力,影响列车的稳定性。并且使得磁场基波分量减小,导致推力降低,同时不对称结构下的法向力会在次级产生机械应力,造成次级的形变<sup>[30]</sup>。

对于初次级造成的影响,文献[31-32]采用三维有限元模型进行研究,说明了推力和法向力随着偏移程度的增加而降低。文献[33]在真空管道高温超导直线感应电机系统中,对次级偏移量和推力的关系进行实验验证,并说明了在该磁悬浮列车系统中次级偏移的限制值。

针对列车运行中初次级偏移的工况,需要在列车牵引计算和电机结构设计时进行考虑,留出适当裕量,否则容易造成牵引力不足的问题,而针对电机参数的变化,同样可以采取相应的算法进行整定。

### 2.4 次级感应板缺失

在实际线路中,由于存在道岔路段,次级感应板不可避免地断续铺设。当列车经过次级感应板缺失的路段时,会产生推力和电流的波动,造成车辆的机械磨损和电流保护等问题,对列车的运营服务质量造成了极大的影响。尽管列车的牵引系统具有过电流抑制和保护控制,但是由于直线感应电机时间常数较大,使得电流响应速度较慢,过电流问题无法完全消除<sup>[35-36]</sup>。

对于次级感应板缺失工况,文献[34]分别采用三维有限元模型和场路联合仿真进行研究,说明了随着次级缺失程度的增加,推力、法向力和涡流损耗逐渐降低,初级电流和铜耗增加。在参数方面,文献[35]指出,自感和互感值随着耦合长度的增加呈线性降低,在耦合长度为0时自感仍为正值,互感基本为0。文献[36]也通过近似线性化的方法,将初次级漏感、励磁电感、次级电阻等参数与耦合长度相关联,并在电路中对其进行修正。

因此通过仿真说明次级感应板缺失所造成的影响,其中用励磁电感等参数的变化表征该工况,仿真结果如图6所示。列车在280 s时经过次级感应板缺失区域,由于速度较高使得通过该区域时间较短,并出现了推力降低和电流冲击的情况。

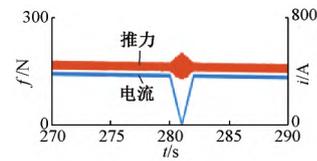


图6 考虑感应板缺失下的推力图

针对列车运行时次级感应板缺失的问题,文献[35]从控制的角度出发,采用在线观测算法对互感参数进行观测,以判断次级感应板是否出现缺失,并对控制中的参数进行修正,从而减小次级感应板缺失对控制的影响。在实际应用中,牵引控制系统会根据实际电流的变化情况,判断是否进入无感应板区域,当系统确认进入了无感应板区域时,便启动过电流抑制控制对参考电流进行调整,从而减小电流冲击,例如广州地铁4号线<sup>[37]</sup>。文献[38]针对过电流无法完全消除的问题,通过调整电流检测的设定值和时间常数,从而加快电流的抑制速度,但这样也增大了误触发的风险。

### 2.5 法向力

在直线感应电机中,次级涡流切割气隙磁场产生作用力,结构不对称使得这个力与水平方向形成一定夹角,对其进行分解可以得到水平力和法向力,其中法向力的数值通常为水平牵引力的数倍<sup>[39]</sup>。

对法向力进行细分,可以得到吸引力和排斥力两种作用力,吸引力是初、次级铁磁媒质之间的作用力,排斥力则是由初级电流与次级感应板上的感应涡流相互作用产生的<sup>[40]</sup>。法向力的存在会造成严重影响,例如在轮轨交通中,法向力会直接作用在轨道上,增大系统的运行阻力和附加损耗,加剧轮轨的磨损。在磁悬浮交通中,还会影响悬浮稳定和运行安全,增加控制难度。因此,和牵引力一样,法向力也需要进行公式分析才能更好地对其进行控制。

文献[41]从电机的磁场和结构角度,给出了法向力的计算公式:

$$\left. \begin{aligned} F_y &= \frac{l_s \lambda_s \mu_0}{4} \frac{1 - (sR_m)^2}{\left(\sinh \frac{\pi g_e}{\tau}\right)^2 + \left(sR_m \cosh \frac{\pi g_e}{\tau}\right)^2} J_1^2 \\ R_m &= \frac{\pi g_e G}{\tau} \\ J_1 &= \frac{m_s W_s k_{ws}}{p\tau} |i_s| \end{aligned} \right\} (1)$$

式中: $l_s$ 为初级长度; $\lambda_s$ 为初级宽度; $\mu_0$ 为真空磁导率; $s$ 为转差率; $g_e$ 为等效气隙长度; $\tau$ 为极距; $G$ 为品质因数; $m_s$ 为相数; $W_s$ 为串联初级绕组的匝数; $k_{ws}$ 为初级绕组系数; $p$ 为极对数; $i_s$ 为初级电流。

文献[30]将法向力分为吸引力和排斥力,作者得到法向力公式,并引入了电机的卡式系数 $k_c$ 和饱和系数 $k_{sat}$ :

$$\left. \begin{aligned} F_y &= K_a' \frac{\lambda_{dr}^2}{L_m'} + K_r' \lambda_{qs}^2 \\ K_a' &= \frac{3}{2gk_c k_{sat}} \left[ 1 - \frac{(1 - e^{-Q})(3 - e^{-Q})}{2Q} \right] \\ K_r' &= \frac{K_a' L_m' L_r'}{(L_m' + L_r')^2} - \frac{\mu_0 l}{2\pi g k_c k_{sat}} \left( \frac{L_m'}{L_m' + L_r'} \right)^2 \\ L_m' &= L_m [1 - f(Q)] \end{aligned} \right\} (2)$$

式中: $g$ 为气隙长度; $l$ 为初级绕组串联总长度; $\lambda_{dr}$ 为次级 $d$ 轴磁链; $\lambda_{qs}$ 为初级 $q$ 轴磁链; $L_r'$ 为次级自感。如果得不到电机的卡式系数和饱和系数将难以进行计算。

为了简化计算,文献[42]基于电机 $MT$ 坐标系,提出一种不涉及电机结构参数的公式:

$$F_y = \frac{3pL_m i_{sm} \psi_r}{8L_r g} \quad (3)$$

式中: $i_{sm}$ 为 $M$ 轴电流; $\psi_r$ 为次级磁链但是这种方法存在计算误差较大的问题。

根据已有电机数据,选择式(1),通过仿真说明转差频率在全速域下对法向力的影响,如图7所示。可以看出,不同的转差频率对于法向力的影响不同,

同时与图3相比,在高速下法向力可以达到输出推力的数倍,对于悬浮控制来说将是巨大的挑战。为了实现系统的稳定运行,需要选择合适的转差频率。

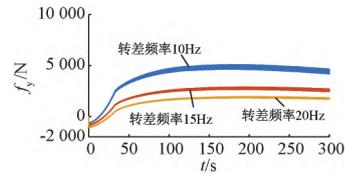


图7 法向力和转差频率关系图

结合公式和仿真可以看出,法向力的大小与转差频率息息相关,转差频率越大,法向力波动越小,但是过大的转差频率也会对牵引控制和损耗造成影响<sup>[43-44]</sup>。因此磁悬浮直线感应电机牵引系统通常会采用恒转差频率控制,即在控制中采用一个合适的转差频率,从而减小法向力对牵引系统的影响。例如日本东部丘陵线中低速磁浮<sup>[45]</sup>。而针对转差频率控制,文献[46]提出一种分段变转差频率控制方法,即能实现稳态下法向力最小,又能兼顾启动时较大的推力。

### 3 直线感应电机列车的牵引控制系统

由于存在上述特殊性,直线感应电机列车的牵引系统不能和旋转感应电机列车完全相同,否则无法实现高效和稳定的运行。本节将以广州地铁4号线和日本东部丘陵线的控制框图为例,分别对轮轨式和磁悬浮式列车的牵引系统和控制策略进行介绍。

#### 3.1 广州地铁4号线

广州地铁4号线是我国第一个采用直线感应电机驱动的地铁,采用轮轨交通方式。系统采用矢量控制算法,可以快速地实现转矩响应,降低负载波动造成的影响,牵引系统的控制框图如图8所示<sup>[37]</sup>。

广州地铁4号线的控制系统在矢量控制中增加了前馈和补偿算法,目的是解决感应板阻抗变化、气隙变化、感应板缺失等问题<sup>[37]</sup>。当感应板阻抗和气隙发生变化时,造成 $d$ 轴实际电流较大的变化,因此根据 $d$ 轴电流实际值和参考值的差值分别对转差频率和 $d$ 轴参考电流进行修正,使得 $d$ 轴电流实际值跟踪参考值,从而抑制直线感应电机的推力波动。当感应板缺失时,电机电流增加,为了防止逆变器和电机的过流,在矢量控制中会根据实际电流值是否超过设定阈值,对 $d$ 轴参考电流进行调整,从而防止触发保护和避免造成安全问题。而针对边端效应,通常也会在矢量控制中对 $d$ 轴的参考电流,以及电压矢量进行补偿。

这种矢量控制算法会使转差频率发生改变,从而使得电机的法向力出现波动,影响磁悬浮车辆的

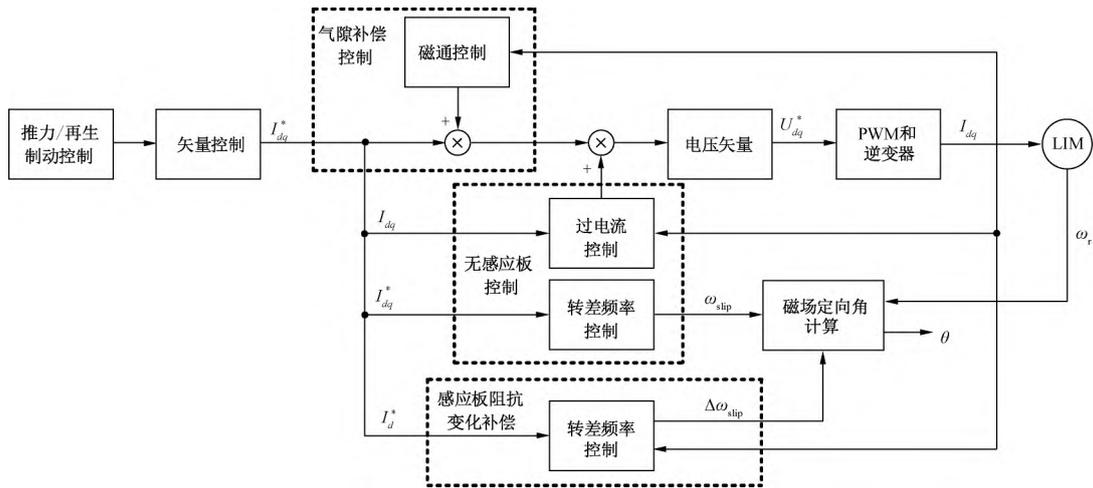


图8 广州地铁4号线牵引系统控制框图

悬浮稳定,通常只适用于轮轨车辆。

### 3.2 日本东部丘陵线

日本东部丘陵线是一条中低速磁浮线路,该系统采用了恒转差频率的矢量控制方法,控制框图如图9所示<sup>[45]</sup>。对于磁悬浮列车而言,法向力的控制尤为重要。为了有效抑制法向力的过大变化,减小悬浮系统对推进系统的干扰,在控制中保持转差频率为一个常数,在满足推力的条件下,法向力波动尽量减小,否则将严重影响车辆的安全运行<sup>[47-48]</sup>。实现方法是在控制中采用固定的转差频率,以直线感应电机稳态方程为基础,结合给定的推力和电机参数,进而得到矢量控制用的参考电流,如下式:

$$\left. \begin{aligned} F_x &= \frac{3\pi}{2\tau} \cdot \frac{L_m^2 R_r}{\omega_{sl} L_r^2} i_{qs}^2 \\ i_{qs} &= \frac{\omega_{sl} L_r}{R_r} i_{ds} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: \$F\_x\$ 为参考推力; \$\omega\_{sl}\$ 为转差频率<sup>[43]</sup>。恒转差频率矢量控制是典型的基于直线感应电机稳态模型的控制方式,控制系统稳态性能好,输出平稳,但其动态性能较差,例如当参考指令值发生突变时,系统响应速度较慢。

日本东部丘陵线还采用电压前馈的方式进行补偿,补偿信号被前馈到电流PI控制器的输出,用以保持电流环控制的稳定,公式如下<sup>[45]</sup>:

$$\left. \begin{aligned} \Delta u &= \left( \omega_e A + R_s \frac{B}{A} \right) \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{I^*}{U_{dc}} \\ A &= \sqrt{B^2 + C^2} \\ B &= \frac{\omega_{sl} R_r L_m^2}{R_r^2 + \omega_{sl}^2 L_r^2} \\ C &= L_s - \frac{\omega_{sl}^2 + L_r L_m^2}{R_r^2 + \omega_{sl}^2 L_r^2} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中: \$\Delta u\$ 为补偿电压值; \$I^\*\$ 为参考电流值。

## 4 新型控制策略

相比于旋转感应电机,直线感应电机由于自身结构的特殊性,在列车运行时存在固有的缺陷,例如效率较低、电机参数较大变化等。而随着微处理器性能的提升,针对这些问题,多种新型的控制算法被研究并提出,本节将进行介绍。

### 4.1 损耗优化控制

由于直线感应电机的效率较低,使得研究如何减小损耗和提升效率在能源和经济领域具有积极意义。

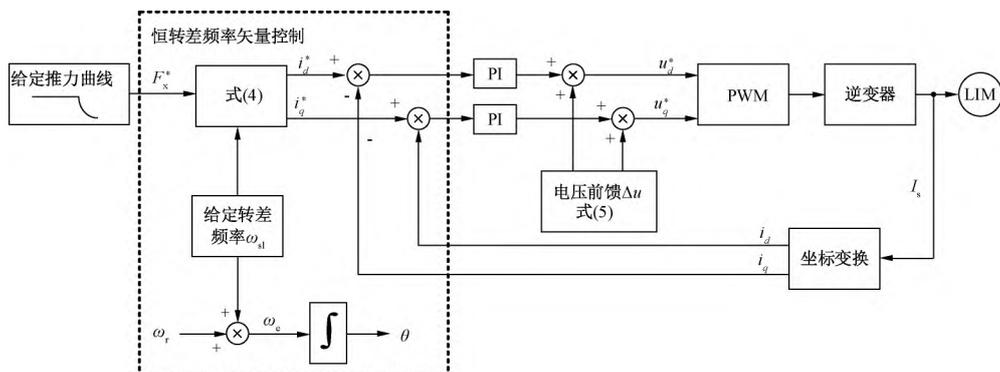


图9 日本东部丘陵线牵引系统控制框图

义。而电机的可控损耗包括铁损和铜耗,损耗优化控制是通过对铁损和铜耗进行调节,从而降低电机总损耗,通常可以分为模型法和搜索法,以及混合法<sup>[49]</sup>。模型法是根据直线感应电机的数学模型推导出损耗方程,确定损耗最低的运行点,例如磁链、电流等,优点是计算速度快,不会产生推力波动,但缺点是需要准确的电机参数和运行条件,否则达不到损耗最低的效果。搜索法是在稳定条件下,不断改变参考电流或磁链等,实时测量电机的输入功率,直到其最小为止,即损耗最低,该方法的优点是不受电机参数影响,减小边端效应的影响,但缺点是收敛速度较慢,而且测量精度的要求较高。

除了对电机本体的损耗进行优化,目前的研究也从不同的角度进一步优化直线感应电机的损耗。针对电机的法向力,文献[50]将法向力与车重及摩擦损耗相结合,得到新的损耗函数用于计算最小损耗;文献[41]将法向力纳入损耗函数,并用一个可变的权重因子来衡量法向力的影响,这是由于损耗优化控制会间接影响电机的法向力,这样做可以适用于磁悬浮系统的控制;针对整个驱动控制系统,文献[51]考虑了逆变器损耗并用待优化的变量进行表示,并提出了三级优化结构,从电机参数、控制算法参数和系统级评估方面进行优化,同时针对高阶方程的求解问题,采用了Newton-Raphson搜索方法迭代进行求解。基于搜索法,文献[52]采用黄金分割算法,并且在负载变化时保持最优的运行条件,同时不需要重新启动搜索算法,保证了较快的搜索速度。与迭代缩短率不同的Fibonacci算法相比,黄金分割算法是一种等速对称搜索方法,每次的搜索点取在区间长度的0.618倍处或0.382倍处,容易实现并且效果较好。

基于损耗优化控制,在效率较低的直线感应电机牵引系统中,研究方向可以采用混合法,结合上述两种方法的特点,从而兼顾较快的搜索速度和较低参数依赖性<sup>[53]</sup>;处理器的发展可以采用多种先进的数学算法,使得计算结果更加精确;损耗优化的范围不仅局限于电机本体,而是整个系统,同时考虑多种限制因素,从而实现综合性能最优。

#### 4.2 参数辨识控制

由于边端效应等影响,直线感应电机参数会发生较大的变化,从而影响基于磁场定向的矢量控制,降低输出性能。面对上述问题,需要对直线感应电机的参数进行辨识,而参数辨识方法主要包括离线法和在线法<sup>[54]</sup>。离线法得到的是电机的稳态参数,不能追踪在运行过程中的参数变化;而在线法则是利用一定的控制算法,实时计算运行中的电机参数,

并将其作为反馈量用于系统的矢量控制。通常采用离线法得到静止工况下的参数,然后采用在线法对运行中的参数进行修正。

对于离线参数辨识,文献[54]首先向直线感应电机通入单相直流电压来获得初级电阻,然后依次通入单相高频交流电压和单相低频交流电压,来依次获得互感、次级漏感、初级漏感和次级电阻,该方法与空载堵转方法相比,计算准确性更高。

对于在线参数辨识,文献[55]采用模型参考自适应的方法对其中的励磁电感参数进行参数辨识。首先建立了直线感应电机的状态观测器,进而根据Lyapunov稳定性理论推导出辨识算法,同时对反馈增益矩阵进行设计,从而在保证系统稳定性的基础上,兼顾了辨识速度和精确性。文献[56]则设计了基于PI调节的励磁电感辨识算法,相比于文献[55]的单比例算法准确性更好。文献[57]则对次级电阻进行在线辨识,通过稳定性分析表明,除了转差很小,接近为0时,均可以进行辨识。

基于参数辨识理论,研究方向会向着收敛快速性、结果精确性、抗干扰性发展,以及实现多参数的辨识,从而更好地应对直线感应电机列车运行中的不同工况,降低参数变化带来的影响,实现更稳定的控制。

#### 4.3 模型预测控制

随着微处理器性能的发展,借助强大计算能力的模型预测控制得以迅速发展。模型预测控制具有三个要素,即预测模型、代价函数和滚动优化。预测模型用于预测未来时刻的系统输出;代价函数用于描述预测的输出与参考值之间的差异;滚动优化即在每个采样周期内对可能的开关状态进行遍历,通过最小化代价函数得到未来时刻的最优状态序列,并在下一采样时刻执行序列中第一个状态。与各种常用的直线感应电机控制策略相比,模型预测控制可以通过代价函数实现多目标的最优控制,如损耗、开关频率和谐波,并且不需要线性控制器和脉宽调制,控制指令直接作用到每一个开关状态,具备动态响应快的天然优势。因此模型预测控制非常适合于直线感应电机轨道交通这种对动态响应要求高的场合,同时也与多种控制算法相并行,如无传感器算法等。

针对用于直线感应电机轨道交通的模型预测控制策略,近年来相关研究不断发展。文献[58]针对代价函数中权重系数的选取进行研究,提出了两种不同的方法进行选择,包括将磁链控制目标视为代价函数中的硬约束,以及用定义的共轭推力项替换磁链项,使得两个不同的控制目标具有相同的单位,从而省略权重系数的选取。文献[59]基于两个和

三个电压矢量的调制策略与模糊控制策略相结合,研究了三种不同的搜索方法,通过预先排除许多不合适的电压矢量和组合来帮助减少计算负担。

作为近年来发展迅速的控制算法,模型预测控制理论的多目标优化、响应快速的特点,使得其非常适合应用于直线感应电机轨道交通,通过代价函数和权重因子,易于实现性能的综合最优,同时算法的简化、预测结果的精确化也是目前的发展方向。

## 5 结 语

直线感应电机轨道交通逐渐得到广泛的发展,本文从直线感应电机的应用、存在的特殊问题和控制策略等方面,详细阐述了研究现状和研究成果,为轨道交通领域的发展提供帮助和支持,总结如下:

1) 相比于采用旋转感应电机的车辆,采用直线感应电机的车辆由于具有独特的优势,例如爬坡性能、曲线性能、噪声等,适合于未来轨道交通的发展方向;

2) 由于直线感应电机自身的结构特点,在列车运行中存在诸如气隙变化、初次级偏移等特殊问题,分析了这些问题对电机性能及参数的影响,并通过仿真进行了验证;

3) 在控制策略方面,以广州地铁4号线和日本东部丘陵线为例,说明了在现有牵引控制中针对这些特殊性已有的解决方案,但是仍有很大的发展空间,同时介绍了几种新型控制策略。

针对直线感应电机交通的牵引控制技术,本文对未来的展望如下:

1) 在列车运行中,气隙变化、初次级偏移等特殊工况可能会同时发生,因此在牵引控制系统中需要实现精确快速的判断,并实施针对性的控制,从而减小对控制系统和列车舒适度的影响;

2) 随着微处理器性能的不不断提升,针对这些特殊问题,可以对原有的控制系统进行优化和改进,或者采用新型的控制算法,例如变转差频率控制、损耗优化和参数辨识等,从而实现系统的高效运行,同时例如预测控制等依托控制器性能的控制方法也可以更容易地实现,为控制系统提供更多更好的解决方案。

## 参考文献

[1] 吕刚.直线电机在轨道交通中的应用与关键技术综述[J].中国电机工程学报,2020,40(17):5665-5675.  
 [2] 闫长安.莫斯科单轨铁路的供电系统[J].现代城市轨道交通,2005(4):58-60.  
 [3] 李益民.直线电机与磁浮驱动[M].成都:西南交通大学出版社,2018:105-111,128.  
 [4] Niimi Motonori.Ten years commercial operation of LINIMO

(HSST System) in Aichi Pref.,Japan [C]//23rd International Conference on Magnetically Levitated systems and Linear Drivers, 2016.

[5] 赵斌.北京地铁八通线工程设计综述[J].地铁与轻轨,2003(3):12-14.  
 [6] 游高祥.广州地铁6号线直线电机车辆技术及与4号线和5号线车辆的区别[J].机车电传动,2012(02):49-53.  
 [7] 张军.我国大型城市轨道交通主干网采用A型车的必要性[J].现代城市轨道交通,2013(01):5-9,13.  
 [8] HAN H S,LEE J M,KIM B S.Mandatory vehicle performance tests of the urban maglev,ECOBEE [C]//23rd International Conference on Magnetically Levitated systems and Linear Drivers, 2016.  
 [9] 孙金栋,李静,魏一聪,等.北京地铁4号线大兴线车内噪声水平调查与分析[J].铁道车辆,2020,58(10):34-36,6.  
 [10] 漆瑾.直线电机车辆与传统旋转电机车辆的性能对比分析[J].南昌高专学报,2008(2):158-160.  
 [11] IDIR K,DAWSON G E,EASTHAM A R. Modeling and performance of linear induction motor with saturable primary[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2002,29(6):1123-1128.  
 [12] ABDELQADER M,MORELLI J,PALKA R,et al.2-D quasi-static fourier series solution for a single coil of a linear induction motor [C]//2016 IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (CEFC). 2016.  
 [13] 刘建强.直线电机轨道交通牵引传动系统研究[D].北京:北京交通大学,2008.  
 [14] LV G,YAN S,ZENG D,et al.An equivalent circuit of the single-sided linear induction motor considering the discontinuous secondary[J].IET Electric Power Applications,2019,13(1):31-37.  
 [15] XU W,ZHU J G,ZHANG Y,et al.Equivalent circuits for single-sided linear induction motors[J].IEEE Transactions on Industry Applications,2010,46(6):2410-2423.  
 [16] HU D,XU W,DIAN R,et al.Loss Minimization Control of Linear Induction Motor Drive for Linear Metros[J].IEEE Transactions on Industrial Electronics,2018,65(9):6870-6880.  
 [17] FUJII N,KAYASUGA T,HOSHI T. Simple end effect compensator for linear induction motor[J].IEEE Transactions on Magnetics,2002,38(5):3270-3272.  
 [18] FUJII N,HOSHI T,TANABE Y. Methods for Improving Efficiency of Linear Induction Motor for Urban Transit[J].Jsmc International Journal,2004,47(2):512-517.  
 [19] KARIMI H,VAEZ-ZADEH S,RAJAEI SALMASI F. Combined vector and direct thrust control of linear induction motors with end effect compensation [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2016,31(1):196-205.  
 [20] ALONGE F,CIRRINCIONE M,PUCCI M,et al.Input-output feedback linearization control with on-line MRAS-based inductor resistance estimation of linear induction motors including the dynamic end effects [J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2016,52(1):254-266.  
 [21] VAEZ-ZADEH S,SATVATI M R. Vector control of linear induction motors with end effect compensation [C]//Proceedings of the Eighth International Conference on Electrical Machines and

- Systems, IEEE, 2005.
- [22] MOUSAEI A, SHARIFIAN M. Design and optimization of a linear induction motor with hybrid secondary for textile applications [C]//2020 28th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), 2020.
- [23] LEE B J, KOO D H, CHO Y H. Investigation of linear induction motor according to secondary conductor structure [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45(6): 2839-2842.
- [24] 李文竹. 直线感应电动机气隙变化对电机性能影响的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2006.
- [25] ZHOU D, CUI C, ZHAO L, et al. Running stability of a prototype vehicle in a side-suspended HTS maglev circular test track system [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, 27(1): 1-7.
- [26] 赵佳. 高温超导直线感应电机设计研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
- [27] GANG L, ZHOU T, ZENG D. The influence of the secondary thickness on the air-gap magnetic field and losses of the linear induction motor [C]//2019 12th International Symposium on Linear Drives for Industry Applications (LDIA), 2019.
- [28] YU H, FAHIMI B. A novel detection technique of non-uniform airgap in frictionless linear induction transportation systems [C]//IEEE Vehicle Power & Propulsion Conference, 2015.
- [29] NAKATANI S, SANNOMIYA K, OKAMORI D, et al. Experimental confirmation of speed and air gap control with only linear induction motor for levitation [C]//2019 12th International Symposium on Linear Drives for Industry Applications (LDIA), 2019.
- [30] 吕刚, 范瑜, 李国国, 等. 基于解耦策略的直线感应牵引电机法向力自适应最优控制[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(9): 73-79.
- [31] 吕刚, 陈致志, 杨镜, 等. 次级非中心位置工况双边直线电动机有限元分析[J]. 微特电机, 2020, 48(4): 28-31.
- [32] LV G, LIU Z, SUN S. Analysis of torques in single-side linear induction motor with transverse asymmetry for linear metro [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2016, 31(1): 165-173.
- [33] 崔宸昱. 真空管道 HTS 侧浮列车驱动系统研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- [34] HAO D, LIANG G. Dynamic analysis of the single-sided linear induction motor with discontinuous secondary [C]//17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2014.
- [35] 刘可安, 田红旗, 刘勇. 直线感应电机过无次级感应板区检测[J]. 浙江大学学报(工学版), 2016, 50(12): 2409-2417.
- [36] 闫少强. 感应板缺失时城轨交通直线感应电机特性的解析计算与分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
- [37] 魏凯, 尚敬. 轨道交通直线感应电机驱动控制技术[J]. 大功率变流技术, 2014(4): 40-45.
- [38] 王穗生, 计敏良. 地铁列车无感应板区间直线电机过电流问题的控制与优化[J]. 机车电传动, 2015(3): 80-81, 83.
- [39] 臧宇. 两种直线电机吊挂形式对直线电机地铁车辆动力学性能影响的比较研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
- [40] 刘高坤. 电磁力对直线电机地铁车辆动力学性能的影响[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
- [41] HU D, XU W, DIAN R, et al. Loss minimization control strategy for linear induction machine in urban transit considering normal force [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(2): 1536-1549.
- [42] 刘思嘉, 范瑜, 李硕, 等. 直线感应电机法向力与切向力解耦控制[C]//2013年轨道交通电气与信息技术国际学术会议(EITRT2013), 2013.
- [43] 尚敬, 杨大成, 廖长鑫, 等. 磁悬浮列车直线感应电机恒转差频率磁场定向控制[J]. 大功率变流技术, 2010(1): 54-58.
- [44] 魏凯. 基于低速磁悬浮列车的直线感应电机的控制研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2007.
- [45] MIYASHITA I, OHMORI Y. Current control for thrust force controlling inverter of HSST [C]//13th International Conference on Magnetically Levitated systems and Linear Drivers, Illinois: Argonne National Laboratory, 1993.
- [46] 陈特放, 邓江明, 唐建湘, 等. 磁浮直线感应电机的PI自适应电流可变速率频率鲁棒控制[J]. 电工技术学报, 2014, 29(7): 154-162.
- [47] 杨影, 陶生桂, 吴志红, 等. 磁浮列车直线感应电机控制的仿真研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2006(2): 244-248.
- [48] 徐崇庶, 正田英介, 藤崎敬介. 磁悬浮车辆驱动装置控制方式的研究[J]. 电气传动, 1995(1): 23-28.
- [49] BAZZI A M, KREIN P T. Review of methods for real-time loss minimization in induction machines [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2010, 46(6): 2319-2328.
- [50] 吕刚, 孙守光, 马云双. 城轨交通中直线感应牵引电机的效率最优控制[J]. 电机与控制学报, 2009, 13(4): 490-495.
- [51] XU W, HU D, LEI G, et al. System-level efficiency optimization of a linear induction motor drive system [J]. China Electrotechnical Society Transactions on Electrical Machines and Systems, 2019, 3(3): 285-291.
- [52] 任晋旗, 李耀华, 王珂. 直线异步电动机的损耗模型与效率优化控制[J]. 电工技术学报, 2009, 24(12): 68-73.
- [53] CHAKRABORTY C, HORI Y. Fast efficiency optimization techniques for the indirect vector-controlled induction motor drives [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2003, 39(4): 1070-1076.
- [54] 吕刚, 杨琛. 直线感应电机离线参数辨识及关键辨识参量研究[J]. 电机与控制学报, 2020, 24(2): 55-62.
- [55] REN J Q, LI Y H. MRAS based online magnetizing inductance estimation of linear induction motor [C]//International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2007.
- [56] 王惠民, 张颖, 葛兴来. 基于全阶状态观测器的直线牵引电机励磁电感在线参数辨识[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(20): 6101-6108.
- [57] 刘可安, 田红旗, 刘勇. 轨道交通直线感应电动机牵引系统精确瞬时速度检测技术研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(21): 161-169.
- [58] XU W, ZOU J, LIU Y, et al. Weighting factorless model predictive thrust control for linear induction machine [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(10): 9916-9928.
- [59] ZOU J, WEI X, ZHU J, et al. Low-complexity finite control set model predictive control with current limit for linear induction machines [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(12): 9243-9254.