

文章编号:1001-8360(2011)04-0046-07

牵引直线感应电机推力优化控制的研究

顾 贇, 杨中平

(北京交通大学 电气工程学院,北京 100041)

摘 要:本文利用涡流损耗分析的方法,推导了考虑纵向边端效应的直线感应电机动态数学模型。通过对直线电机控制特点的分析,设计了 LIM 矢量控制器。在此基础上,提出了一种以推力最大为目标的牵引直线感应电机推力优化控制方法。Matlab/Simulink 仿真结果与直线电机牵引传动实验平台的实验结果表明,采用优化控制后直线电机在输入一定时能够提高输出推力,输入功率越小推力提高越明显,同时系统具有良好的调速性能,验证了本方案在牵引直线电机控制上的可行性。

关键词: 直线电机轨道交通; 直线感应电机; 推力优化; 矢量控制

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1001-8360.2011.04.007

Torque-optimized Control Strategy for Linear Induction Motor Drive

GU Yun, YANG Zhong-ping

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

Abstract: The dynamic LIM mathematical model inclusive of the longitudinal end-effect is derived by analysis of eddy current losses. The field orientation control scheme is developed through further analysis of the difference of linear motor and rotary motor control. On this basis, the linear induction motor traction thrust optimization control method is derived with the objective to acquire the maximum thrust. The Matlab/Simulink simulation results and experimental results of the linear motor traction and drive test platform show as follows: After applying optimization control, the thrust output of the linear motor is raised corresponding to a certain input; the smaller the input power, the more obvious the thrust output lifting; and the system demonstrates good speed control performance. These results verify the feasibility of the proposed scheme in linear traction motor control.

Key words: linear metro; linear induction motor(LIM); torque-optimized control; vector control

20 世纪 80 年代中期,加拿大多伦多 Scarborough (1984 年)和温哥华 SkyTrain(1985 年)这两条直线电机轨道交通线路在世界上率先开通后,这种新型的轨道交通方式很快便引起世界城市轨道交通界的关注。与采用旋转电机牵引的轨道交通方式相比,直线电机轨道交通方式具有隧道断面积小、列车爬坡能力强、过小半径曲线能力强等显著优点。因此,紧随加拿大之后,美国、马来西亚、日本等国也先后开通了直线电机轨道交通线路,截至 2008 年 8 月,世界上共开通了 12

条这种方式的线路^[1-2]。其中,包括我国的第一条直线电机地铁——广州地铁 4 号线和 2008 年奥运前开通的北京机场线。

对于在城轨列车上应用的牵引电机来说,控制期望为输入能量最小的情况下输出最大的动力,如传统牵引旋转电机,理想运行情况为:输入功率最小时输出转矩最大。由于直线牵引电机直接输出运行方向上的力,而不同于旋转电机输出旋转切线方向上的转矩,因此我们提出本研究的目标——输入功率 P_{in} 一定时输出最大推力 F 。

对于大力发展城市轨道交通包括牵引直线电机地铁的中国来说,研究如何在一定输入功率下提高牵引

收稿日期:2009-11-03;修回日期:2010-08-27
基金项目:台达电力电子科技发展基金计划(ERE02006015)
作者简介:顾 贇(1986—),女,湖南永州人,硕士。
E-mail:07122004@bjtu.edu.cn

直线电机的推力具有十分重要的意义。

针对于旋转感应电机转矩的提高,国内外已作过一些研究,效果比较好的是美国 O. Wasynczuk 提出的基于电机矢量控制的全负载分段式转差频率控制,对负载变化特别是转子电阻变化的影响进行了一些理论分析,并进行了仿真验证和简单的速度响应比较实验^[3]。

针对于直线感应电机推力的提高,现存文献只有少量的关于改进电机本身结构的研究,如在满足一定约束条件下,把单位电机的体积或重量获得最大的推力作为优化目标,以极对数、气隙长度、初级槽高度、初级槽宽度、电枢绕组电流密度等变量作为优化变量进行优化设计^[4]。

纵观国内外直线电机推力优化领域的研究情况,可以看出还未形成完整的控制理论,更缺乏仿真和实验的有力验证。

本文首先搭建了考虑边端效应的 LIM 动态数学模型和矢量控制模型,提出了基于约束条件下的 LIM 推力优化控制方法。基于 Matlab 仿真平台,研究了直线电机的变频调速性能和恒输入下的推力优化性能。同时本文对优化方案进行实验验证,结果表明了该方案的有效性。

1 直线感应电机的变频调速

1.1 直线电机的动态数学模型^[5]

为了分析方便,工程上一般对直线感应电机做如下理想化假定:①忽略空间和时间谐波,电机各相绕组结构对称;②忽略磁路饱和;③忽略铁芯损耗;④不考虑频率和温度变化对绕组电阻的影响。

当直线感应电机的初级进入到一个新的次级区域时,新的次级区域会有一个磁场穿过,使空气气隙磁场强度增加;当初级离开时,次级磁场会消失。初级进入和离开时次级磁场的变化会在次级区域里产生涡流,这个涡流会产生一个磁场去削弱本区域内气隙磁场的

变化,这种效应称为动态边端效应。图 1 是考虑边端效应时直线感应电机(LIM)的 d-q 轴等效电路,由于边端效应的影响,在 d 轴的等效电路激磁支路中引入了一个与电机速度成反比的系数 Q, LIM 的 q 轴等效电路与普通旋转电机(RIM)的 q 轴等效电路相同,也就是说 LIM 的 q 轴等效电路不受边端效应的影响,它的参数也不随 LIM 边端效应的变化而变化。

根据图 1 的 d-q 轴等效电路,可以得到同步旋转坐标系下 LIM 的电压和磁链方程

$$u_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + R_r \cdot f(Q)(i_{ds} + i_{dr}) + p\psi_{ds} - \omega_e \psi_{qs} \quad (1)$$

$$u_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + p\psi_{qs} - \omega_e \psi_{ds} \quad (2)$$

$$u_{dr} = R_r \cdot i_{dr} + R_r \cdot f(Q)(i_{ds} + i_{dr}) + p\psi_{dr} - \omega_s \psi_{qr} = 0 \quad (3)$$

$$u_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + p\psi_{qr} - \omega_s \psi_{dr} = 0 \quad (4)$$

$$\psi_{ds} = L_{ls} \cdot i_{ds} + L_m[1 - f(Q)](i_{ds} + i_{dr}) \quad (5)$$

$$\psi_{qs} = L_{ls} \cdot i_{qs} + L_m(i_{qs} + i_{qr}) \quad (6)$$

$$\psi_{dr} = L_{lr} \cdot i_{dr} + L_m[1 - f(Q)](i_{ds} + i_{dr}) \quad (7)$$

$$\psi_{qr} = L_{lr} \cdot i_{qr} + L_m(i_{qs} + i_{qr}) = 0 \quad (8)$$

$$f(Q) = \frac{1 - e^{-Q}}{Q} \quad (9)$$

$$Q = \frac{DR_r}{(L_{lr} + L_m)v} \quad (10)$$

电磁推力为

$$F_e = \frac{3\pi n_p}{2\tau} (\psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds}) \quad (11)$$

式(1)~式(10)中, p 表示微分算子 d/dt ; v 是电机的速度; D 是电机初级的长度。边端效应系数 Q 与速度 v 成反比。当电机速度为零时电机初级的长度 D 可以认为无穷大,此时边端效应可以忽略。随着电机速度的增大可以认为电机初级长度 D 减小,边端效应的影响增加,这会减小激磁电流。边端效应的量化表达式为图 1 中 d 轴等效电路的修正激磁电感和与其串联的激磁电阻,修正的激磁电阻代表由边端效应引起的次级感应电流损耗,其表达式为 $R_r \cdot f(Q)$ 。

1.2 直线电机的矢量控制

从实际应用来看,日本已开通的直线电机线路中,大阪南港试验线、大阪 7 号线和东京都营 12 号线的车辆都采用转差频率控制。从神户海岸线开始,福冈 3 号线、部分东京 12 号线的车辆都采用了动态响应速度快、可对电机电流进行瞬时控制的矢量控制方式。目前,牵引直线电机变频调速系统一个重要的发展方向为矢量控制,其基本原理与旋转电机相似,直线电机与旋转电机矢量控制的不同,主要表现在以下 3 个方面^[6]:

(1) 计算模块的不同。通过上一节的理论分析,建

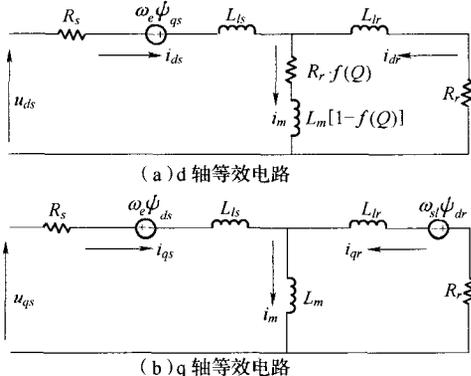


图 1 LIM 等效电路

立了直线感应电机在同步旋转坐标系上的动态数学模型,在同步旋转坐标系下,若规定 d 轴沿着转子磁链矢量 ψ_r 的方向,而转子磁链在 q 轴方向上没有分量,即 $\psi_{dr} = \psi_r, \psi_{qr} = 0$ 。通过式(1)~式(11)整理可得到转差和磁链的计算公式为

$$\omega_s = \frac{L_m i_{qs}}{T_r \psi_{dr}} \quad (12)$$

$$\psi_{dr} = \frac{[L_m - L_r f(Q)] R_r}{[L_r - L_m f(Q)] P + R_r [1 + f(Q)]} \cdot i_{ds} \quad (13)$$

式中, P 为微分算子; $L_r = L_{lr} + L_m$ 。

其中,转差角频率的表达式和旋转电机一样,而计算模块上直线电机与旋转电机最主要的差别是转子磁链的不同。

(2)为了使直线电机的控制更加精准,需要进行模块的补偿。由上一节的公式推导得到推力的表达式为

$$F_e = \frac{3\pi n_p L_m [1 - f(Q)]}{2\tau} \left[\psi_{dr} i_{qs} - \frac{L_r^2 f(Q)}{L_r [1 - f(Q)]} i_{ds} i_{qs} \right] \quad (14)$$

由于边端效应的存在,电磁拉力不再和 i_{qs} 成正比,式(14)中的第二项称作动态制动力,是由边端效应涡流损耗造成的。在低速时,动态纵向边端效应的影响较小,可以忽略。高速时则需要通过 i_{qs} 进行补偿以提高推力因边端效应减小的部分。由式(14), i_{qs}^* 可写成

$$i_{qs}^* = PI \left\{ F_e - \frac{3\pi n_p}{2\tau} \frac{L_m [1 - f(Q)]}{L_r - L_m f(Q)} \psi_{dr} i_{qs} \right\} \quad (15)$$

式中, PI 为微分积分算子,在仿真中对 i_{qs}^* 进行式(15)中第二项的补偿。

(3)电压解耦模块^[7]。由式(1)和式(2),d、q轴分量间存在耦合现象,即初级电流的励磁分量 i_{ds} 不能由初级电压的 d 轴分量单独控制,推力分量 i_{qs} 也不能由初级电压的 q 轴分量 u_{qs} 独立控制。

电压解耦算法的本质就是在 d、q 轴电流控制器的输出信号 u_{ds}^* 、 u_{qs}^* 处分别加上解耦项 \hat{u}_{ds} 、 \hat{u}_{qs} ,使初级电压

$$u_{ds}^* = u_{ds}^{**} + \hat{u}_{ds} =$$

$$R_s i_{ds} + R_r f(Q) (i_{ds} + i_{dr}) + p \psi_{ds} \quad (16)$$

$$u_{qs}^* = u_{qs}^{**} + \hat{u}_{qs} = R_s i_{qs} + p \psi_{qs} \quad (17)$$

解耦项 \hat{u}_{ds} 、 \hat{u}_{qs} 与直线电机中两轴之间的耦合电压项相抵消。

由式(5)和式(7)、式(6)和式(8)分别得到

$$\psi_{ds} = L_s - \frac{2L_m f(Q)}{1 + f(Q)} \quad (18)$$

$$\psi_{qs} = \left(L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \right) i_{qs} \quad (19)$$

则解耦项

$$\hat{u}_{ds} = -\omega_e \left(L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \right) i_{qs} \quad (20)$$

$$\hat{u}_{qs} = \omega_e \left[L_s - \frac{2L_m f(Q)}{1 + f(Q)} \right] i_{ds} \quad (21)$$

式中, $L_s = L_{ls} + L_m$ 。

2 直线电机的推力优化控制

对于本文的研究目标(输入功率 P_{in} 一定时输出推力 F 最大),假设电机参数不变,在一定的电机次级速度 v_r 下, U_s 与 I_s 成正比, $\cos\phi$ 为一定值。因此,若能保持在任一 v_r 下, I_s 一定 F 最大,则可实现 P_{in} 一定 F 最大。后面优化方法的推导将重点讨论 I_s 和 F 的关系。

由于直线感应电机次级为感应板,相当于短路的绕组,即次级电压为零。采用转子磁场定向后,q轴上转子磁链为零。并且,考虑在电机驱动系统中,电磁时间常数远小于机械时间常数,优化在一个电磁周期内,因此效率优化控制策略可以基于直线电机的稳态模型来实现。

满足上述条件后,将电机数学模型进行整理推导。由式(3)得

$$i_{dr} = -\frac{f(Q) i_{ds}}{1 + f(Q)} \quad (22)$$

由式(8)得

$$i_{qr} = -\frac{L_m}{L_r} i_{qs} \quad (23)$$

将式(22)、式(23)分别代入式(5)、式(6)得

$$\begin{aligned} \psi_{ds} &= [L_s - L_m f(Q)] i_{ds} + L_m [1 - f(Q)] i_{dr} \\ &= \frac{L_s + L_s f(Q) - 2L_m f(Q)}{1 + f(Q)} \cdot i_{ds} \end{aligned} \quad (24)$$

$$\psi_{qs} = i_{qs} \left[L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \right] \quad (25)$$

将式(24)和式(25)代入式(9)得

$$F_e = K \frac{L_m}{L_r} \frac{L_m + L_m f(Q) - 2L_r f(Q)}{1 + f(Q)} i_{ds} i_{qs} \quad (26)$$

式中, $K = \frac{3\pi}{2\tau} \cdot \frac{n_p}{2}$ 。

由式(7)得

$$\psi_{dr} = \frac{L_m - L_r f(Q)}{1 + f(Q)} \cdot i_{ds} \quad (27)$$

将式(23)和式(27)代入式(4)得

$$\omega_s = \frac{R_r}{\psi_{dr}} i_{qs} = \frac{R L_m}{L_r} \frac{1 + f(Q)}{L_m - L_r f(Q)} \frac{i_{qs}}{i_{ds}} \quad (28)$$

当输入初级电流的幅值不变,即

$$|i_s| = \sqrt{i_{ds}^2 + i_{qs}^2} = \text{恒值} \quad (29)$$

在满足式(29)的条件下使得目标值推力表达式(26)的值为最大,根据 Lagrange 算法,要求 $i_{ds} = i_{qs}$,此时

$$\omega_d = \frac{R_r L_m}{L_r L_m - L_r} \frac{1+f(Q)}{f(Q)} = C \quad (30)$$

对于旋转电机来说,由于转差频率最小允许值是一个关于转矩的函数^[4],如果转矩超出一定值后,转差频率仍然按式(30)进行控制,则定子磁链幅值将会超过额定值。若要保持定子磁链幅值不变,只能增大转差频率,定子电流幅值随之增大,因此,在一定转矩下,应将转差频率控制为尽量小,则输入电流会尽量小,同时保证定子磁链满足其限幅值。

根据直线电机推力与转差类似的关系式,设在某一推力值临界值 $F_{e,bp}$ 后,转差按式(30)控制会使磁通超过额定值,则给定约束条件

$$|\psi_s| = \sqrt{\psi_\varphi^2 + \psi_{ds}^2} < \psi_{\max} \quad (31)$$

将式(24)和式(25)代入式(31)得

$$|\psi_s| = \sqrt{\left[\frac{L_s + L_s f(Q) - 2L_m f(Q)}{1+f(Q)} \right]^2 i_{ds}^2 + \left(L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \right) i_{\varphi}^2} \quad (32)$$

由式(26)和式(28)得

$$R_r \frac{[1+f(Q)]^2}{[L_m - L_r f(Q)][L_m + L_m f(Q) - 2L_r f(Q)]} \frac{F_e}{\omega_d} \frac{1}{K} \quad (33)$$

$$i_{\varphi}^2 = -\frac{L_r^2}{L_m^2 R_r} \frac{L_m - L_r f(Q)}{L_m + L_m f(Q) - 2L_r f(Q)} \omega_d F_e \frac{1}{K} \quad (34)$$

将式(33)和式(34)代入式(31)得

$$|\psi_s| = \sqrt{F_e} \sqrt{\frac{d}{\omega_d} + e\omega_d} < \psi_{\max} \quad (35)$$

式中

$$d = \frac{R_r [L_s + L_s f(Q) - 2L_m f(Q)]^2}{[L_m - L_r f(Q)][L_m + L_m f(Q) - 2L_r f(Q)]} \frac{1}{K}$$

$$e = \frac{L_r^2}{R L_m^2} \left(L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \right) \frac{L_m - L_r f(Q)}{L_m + L_m f(Q) - 2L_r f(Q)} \frac{1}{K}$$

若 $|\psi_s| = \psi_{\max}$, 则由式(35)得

$$\omega_d = \frac{\psi_{\max}^2 - \sqrt{\psi_{\max}^4 - 4deF_e^2}}{2eF_e} \quad (36)$$

即当 $F_e > F_{e,bp}$ 后, ω_d 与速度和推力有关。

令推力较小时的转差公式(30)和较大时的转差公式(36)相等即可得出临界推力公式,该临界点受直线电机等效电路参数大小及边端效应的影响。

$$F_{e,bp} = \frac{C}{d + eC^2} \quad (37)$$

因此,本文的推力优化方案为:在式(37)所确定的推力临界点之前,控制 $\omega_d = -\frac{R_r L_m}{L_r L_m - L_r} \frac{1+f(Q)}{f(Q)}$, 在临界点之后,控制 $\omega_d = \frac{\psi_{\max}^2 - \sqrt{\psi_{\max}^4 - 4deF_e^2}}{2eF_e}$ 的分段

优化,这样提高了可优化的推力范围。

3 仿真和实验

3.1 仿真研究

本文借助 MATLAB/SIMULINK 仿真软件包,对图 1 所示的直线电机进行了建模,如图 2 所示。其参数如表 1 所示(根据 1813B-4.5AL3 型直线感应电机进行空载及堵转试验而得)。

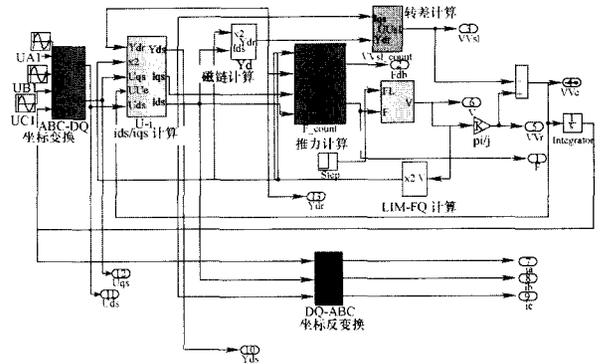


图 2 LIM 仿真模型

表 1 直线感应电机参数

参数	数值	参数	数值
额定线电压	380 V	初级电阻	35.8 Ω
堵动电流	1.2 A	初级漏感	234.15 mH
额定频率	50 Hz	次级电阻	223.42 Ω
额定速度	4.5 m/s	次级漏感	234.15 mH
堵动推力	40 N	励磁电感	375.9 mH

直线电机的矢量控制如 1.2 节所述。

速度给定 0.72 m/s, 负载阻力给定 20 N(稳态时, 推力 $F =$ 负载阻力, 稳态实验测得 i_{ds}, i_{qs} 大小, F 模块进行仿真计算得到推力即负载阻力大小)。仿真结果如图 3 所示, 实际速度很快跟踪上给定速度, 电流平稳。初级相电流峰值 1.627 A。

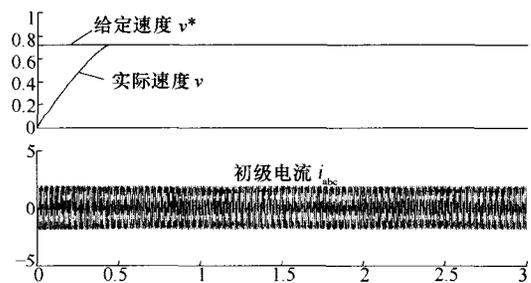


图 3 模拟恒负载阻力时直线电机试验系统的起动波形

0~2 s 速度给定 0.72 m/s, 2~5 s 速度给定 0.9 m/s, 负载阻力 20N。仿真结果如图 4 和图 5 所示, 速度可快速跟踪给定值, 初级 d、q 轴电流跟踪其给定值

效果良好;在突加给定速度过程中,初级 d 轴电流值基本保持不变,受 q 轴电流影响较小,控制性能良好。

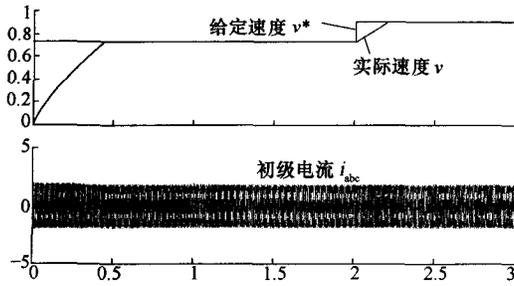


图 4 速度变化时速度、电流仿真结果图

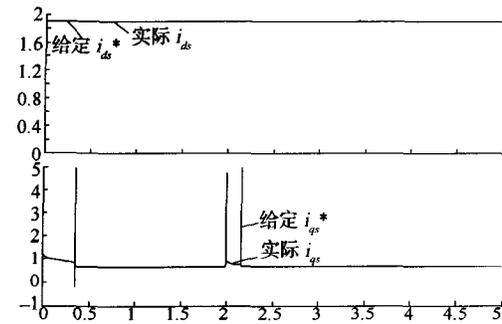


图 5 速度变化时 d、q 轴电流仿真结果图

对本文的推力优化方法的验证,首先进行一个反证,由式(26)和式(29)可得

$$|i_s| = \sqrt{i_{ds}^2 + i_{qs}^2} \geq \sqrt{2} i_{ds} i_{qs} = \sqrt{2} \frac{1}{KL_m L_m + L_m} \frac{1+f(Q)}{f(Q)-2L_r f(Q)} F_e \quad (38)$$

在优化控制下,当推力保持一定输入电流的减小可反证输入一定输出推力的增大。

速度给定 0.72 m/s,负载阻力 20 N。矢量控制启动,2 s 时转换为推力较小时的优化控制方法, $i_{ds}^* \sqrt{i_{ds}^* \times i_{qs}^*}$ 。仿真结果如图 6 和图 7 所示,采用优化控制后,推力 F 稍有波动后维持不变,速度跟随性良好,输入初级相电流峰值由 1.63 A 减小到 1.29 A (有效值由 1.15 A 减小到 0.91 A)。

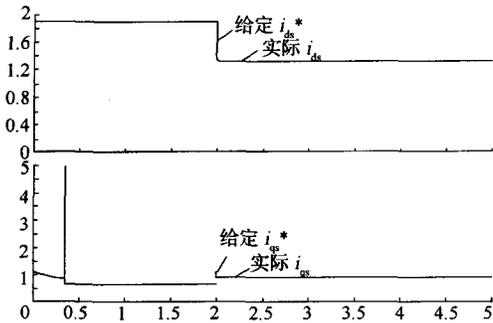


图 6 优化时 d、q 轴电流仿真结果图

由式(37)得到本研究中电机控制的临界推力为

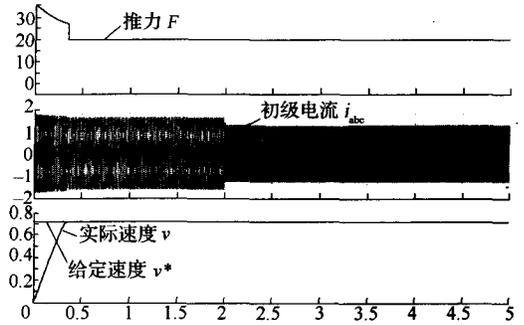


图 7 优化时推力、初级电流、速度仿真结果图

33.9 N。

其次,采用本文的优化方法所得到的输入功率-推力曲线与传统矢量控制仿真比较如图 8 所示。由图 8 可知,在输入功率 P_{in} 一定时推力 F 可明显提高,且 P_{in} 越小优化效果越明显, F 最多可提高约 30%。

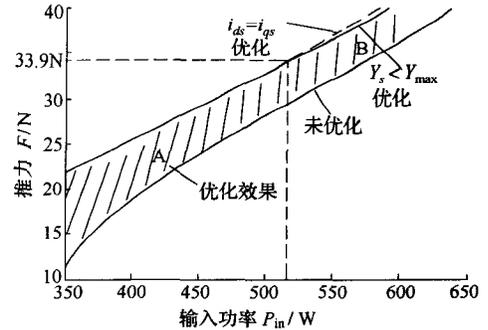


图 8 推力-输入功率仿真优化结果图

A 区域为切换点之前,控制 $\omega_s = \frac{R_r L_m}{L_r} \frac{1+f(Q)}{L_m - L_r f(Q)}$, 使得 P_{in} 一定 F 最大,优化程度最大;B 区域为切换点之后,保证 $Y_s < Y_{max}$, 控制 $\omega_s = \frac{\psi_{max}^2 - \sqrt{\psi_{max}^4 - 4deF_e^2}}{2eF_e}$, P_{in} 一定 F 提高,优化程度比 A 区域稍低。

3.2 实验研究

设计用于直线电机推力优化控制研究的实验系统示意图如图 9 所示。该系统包括:用于采集反馈量和产生控制脉冲的 DSP 实验板和控制开关,交-直-交变频器和直线电机系统。

与城轨交通牵引传动系统类似,该实验平台主电路部分同样采用不控整流、可控三相桥逆变;控制部分同样采用 DSP 数字处理,输出 SVPWM 脉冲波以控制开关管的形式;电机部分同样采用短初级长次级,推力直接产生在运行方向带动支撑小车的形式。

直线电机系统实物如图 10 所示,包括:环形支撑轨道(尺寸 5×3.5 m)、小车和电机(初级和次级感应板)。其特点为:①环形轨道结构,可保证电机长时间

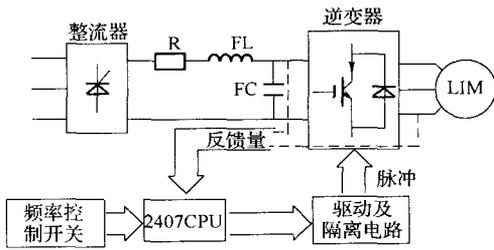


图 9 实验平台系统示意图

稳定运行,从根本上弥补了传统直线型轨道的不足,并能够模拟列车运行在直线段或弯道等不同线路条件下;②可模拟地铁参数变化。初级与次级之间的气隙可以调节,轨道上的感应板可由铝板换成铜板以模拟地铁列车加、减速时对不同感应板材料的需要;③设计了两台在机械上互挂的直线电机,可进行一台电机牵引一台电机作为负载的互馈实验,以模拟牵引直线电机拖动列车负载。

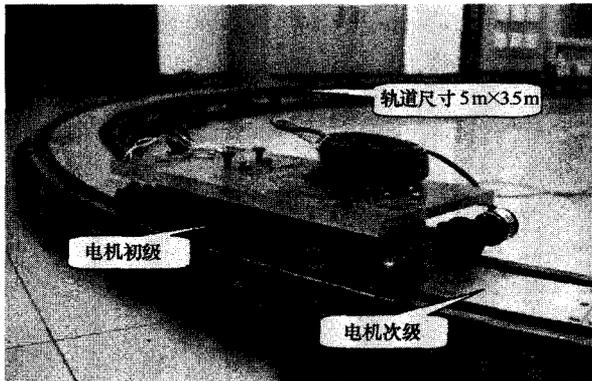


图 10 直线电机系统实物图

DSP 实验板、控制开关和交-直-交变频器实物如图 11 所示。变频器采用 F2000-G Series 矢量型变频器,其额定输入为:380 V、50/60 Hz 三相交流电,17 A 额定输出电流,7.5 kW 额定功率,频率范围 0~650 Hz。DSP 板为 TMS320LF2407-DSP 控制板。

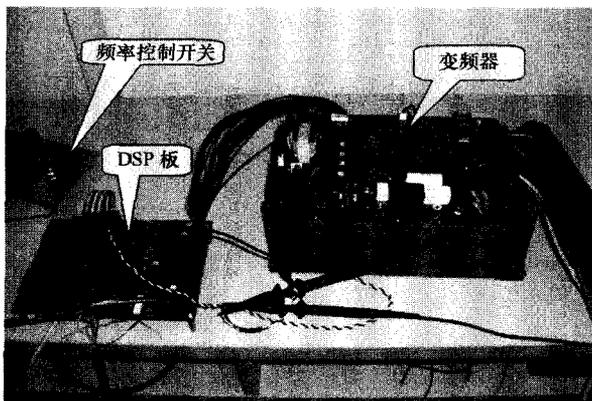


图 11 控制-变频部分实物图

为了实现对直线电机推力的优化控制,DSP 系统需要采样变频器直流电压、电机的相电流和电机转速,实时完成空间矢量 SVPWM 的计算,并输出电机所需的频率和电压。其中,优化和补偿部分以小模块的形式添加到中断程序中,软件的主体框架为直线电机的矢量控制系统,整个系统软件主要包括主程序和中断程序。

与图 3 进行比较,速度给定 0.72 m/s,负载阻力约为 20 N。电机启动实验结果如图 12 所示,其放大图如图 13 所示。实际速度可无超调跟踪上给定速度。测得初级相电流峰值 1.62 A(通道 3 中电流测量为 10 mV 对应 1 A,图 13 中测得初级相电流峰值为 32.4 mV,即峰值 16.2 mV 对应 1.62 A)。

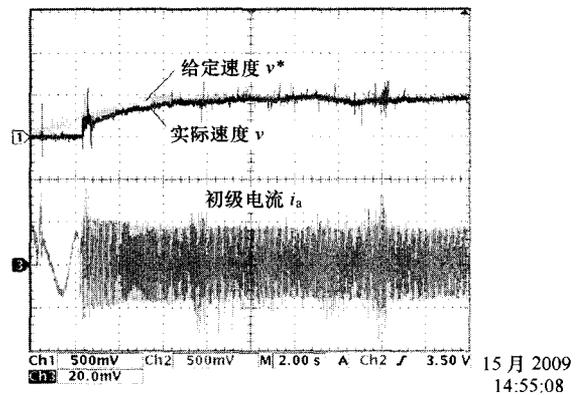


图 12 启动性能实验结果图

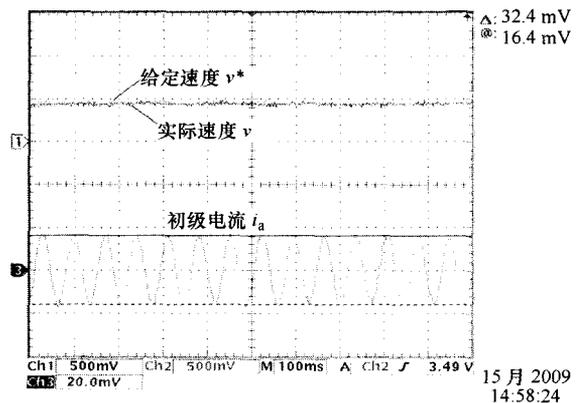


图 13 启动性能实验结果放大图

与图 6、图 7 的仿真结果图进行比较,实验速度给定 0.72 m/s,负载阻力约为 20 N。矢量控制启动,一定时间转换为推力较小时的优化控制方法。实验结果如图 14 所示,采用优化控制后, i_{ds} 和 i_{qs} 波动不大,系统保持稳定。初级相电流峰值由 1.62 A 减小到 1.28 A。推力一定输入电流的减小反证了输入功率一定输出推力的增大。

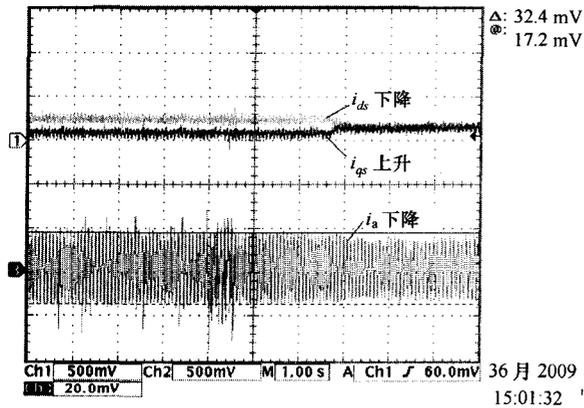


图 14 优化实验结果

4 结论

直线感应电机在轨道牵引领域得到越来越广泛的应用,对其进行输入功率一定,输出推力优化的控制研究具有十分重要的意义。本文致力于这一目标,理论推导了包括 LIM 动态数学模型、矢量控制器以及优化算法三个部分,并通过实验和仿真进行了验证。当负载阻力为 20 N,速度为 0.72 m/s 时,仿真和实验结果都表明,采用优化控制后初级电流将减小 21.0%;当输入功率由 350 W 逐渐上升到 600 W,优化后的推力将提高 30%(350 W 处)~3%(600 W 处)。根据仿真结果,在磁通达到限幅值的临界推力点 33.9 N 前后,采用分段控制方案可保证推力的提高,只是临界点之后推力提高幅度由于磁通的限制而有所下降。

目前实验装置可实现推力一定输入电流减少的反证,今后可进一步进行动态实验以观察输出推力的提高。并且,实验装置可加以完善,如减小反应板连接处的间隙、改进电机转向架结构等;两台电机互馈控制,一台模拟列车负载,一台模拟牵引电机,使系统可模拟

(上接第 45 页)

(4) 技术标准

[1] 全国文献工作标准化技术委员会第七分委员会. GB/T 5795—1986 中国标准书号[S]. 北京:中国标准出版社,1986.

2.1.2 专著中的析出文献

其著录项目和格式为:

[序号] 析出文献主要责任者. 析出文献题名[文献类型标志]//专著主要责任者. 专著题名:其他题名信息. 版本项. 出版地:出版者,出版年:析出文献的页码.

(1) 会议文集、论文集、汇编

[1] 张玉心. 重载货车高摩擦系数合成闸瓦的研制和应用[C]//中国铁道学会. 国际重载运输协会制动专题讨论会论文集. 北京:中国铁道学会,1988:242.

列车运行全过程的电机控制等等。以期进行更深的城市轨道交通中牵引直线电机控制的研究。

参考文献:

- [1] 杨中平. 日本直线电机地铁的发展[J]. 都市快轨交通, 2006,19(1): 11-15.
YANG Zhong-ping. Development of Linear Metro in Japan [J], Urban Rapid Rail Transit, 2006,19(1): 11-15.
- [2] 杨中平. 日本直线电机地铁技术问答[J]. 都市快轨交通, 2006,19(2): 96-99.
YANG Zhong-ping. Typical Questions and Answers to Japanese Linear Motor Metro[J], Urban Rapid Rail Transit, 2006,19(2): 96-99.
- [3] Wasynczuk O, Sudhoff S D, Hansen I G. A Maximum torque per ampere control strategy for induction motor drives[J]. IEEE Trans,1998,13(2): 163-169.
- [4] 张振红,李锐. 永磁直线同步电动机优化设计及算法比较[J]. 长冶学院学报,2005,22(5):45-47.
ZHANG Zhen-hong, Li Rui. Optimization Design of Permanent Magnet Linear Synchronous Motor and Compare of Algorithm[J]. Jindongnan Teachers College Journal, 2005, 22(5):45-47.
- [5] J Duncan, C Eng. Linear induction motor equivalent circuit model[J]. IEE Proc., 1983, 130(1).
- [6] G. Kang, K. Nam. Field-oriented Control Scheme for Linear Induction Motor With the End Effect[J]. IEE Proc.-Elect. Power App,2005,152(6): 1565-1572.
- [7] 刘建强,郑琼林. 直线电机车辆牵引传动系统研究[J]. 都市快轨交通,2006,19(2):72-75.
LIU Jian-qiang, ZHENG Qiong-lin. Study on the Traction and Drive System of the Linear Motor Vehicle[J]. Urban Rapid Rail Transit,2006,19(2):72-75.

(责任编辑 聂清立)

[2] HUNNINGHAKS G W, GADEK J B, SZAPIEL S V, et al. The Human Alveolar Macrophage[C]// HARRIS C C ed. Cultured Human Cells and Issues in Biomedical Research. New York: Academic Press,1980:54-56.

2.2 连续出版物中的析出文献

“连续出版物”是一种载有卷期号或年月顺序号、计划无限期地连续出版发行的出版物。主要包括期刊、报纸等。其析出文献的著录项目和格式为:

[序号]析出文献主要责任者. 析出文献题名[文献类型标志]. 连续出版物题名:其他题名信息,年,卷(期):页码.

(下转第 58 页)