维普资讯 http://www.cqvip.com

城市轨道车辆直线电机牵引控制系统

刘敏杰　　王志平

（广州市地下铁道总公司车辆研发中心）（广东省科学院自动化工程研制中心 ）

摘要：针对轨道交通车辆直线电机运行的特点，研究探讨了直线牵引电机的控制方法；应用新型 32 位 DSP 芯片 TMS320F2812 实现了具体的牵引控制系统方案；通过仿真分析验证了控制系统方案的可行性，对以后实现国产化有一定的参考价值。

关键词：直线电机；TMS320F2812；牵引控制系统

1 引言

近年来，作为非粘着驱动方式的直线牵引电机车辆，在城市轨道交通中的运用越来越受到各国的重视。直线牵引电机可以视为一台旋转电机沿半径方向切开而展平的感应电机，定子（磁铁和线圈）和转子（感应板）分别安装在车辆转向架上和轨道中间的感应轨上，其机理是固定在转向架的一次线圈通过交流电流，产生移动磁场（行波磁场），通过相互作用，使固定在整体道床上的二次感应板(展开的转子)产生磁场，通过磁力(吸引、排斥)实现车辆的运行和制动。本文根据城市轨道交通直线电机的运行特点探讨了其控制方案的实现。

2 直线牵引电机控制策略

2.1 牵引电机的特点和等效电路

城市轨道交通车辆运行特点是站距短而旅行速度高，需频繁启动和停止，启动推力大，高速区域推力小；牵引电机的相应快，动态性能优异，由一台逆变器驱动多台电动机并联工作。工业领域广泛应用于交流异步牵引电动机的矢量控制具有快速的动态响应和稳态性能，但不能直接应用在城轨车辆的直线牵引电机。直线牵引电机必须考虑到：1)因轨道上铺设的感应板结构、材料质量及间隙宽度等的改变引起的直线牵引电机参数的变化；2)在车站、车辆段等位置附近有一感应板作用减弱区域，在该区域内的直线牵引电机性能会发生较大的变化。因此直线电机的等效电路（如图 1）互感 L_m 和二次侧电阻 R_r 变化较大，要实现对直线牵引电机的有效的矢量控制，须根据空气间隙变化和感应板材料质量变化等进行补偿控制。

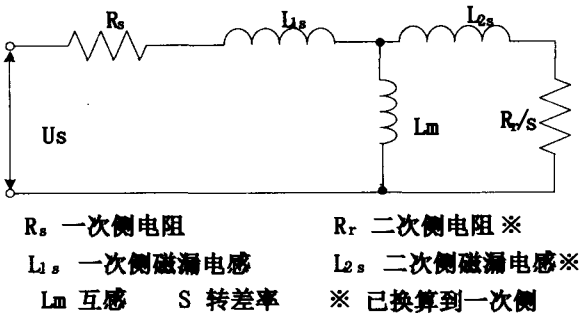

图 1 直线牵引电机等效模型

2.2 矢量控制方法

矢量控制的基本原理是将电机的模型方程参考系转换成同步旋转轴 d-q ，这个轴成 90° 分割相，并以同步速度旋转。磁通量位于 d 轴，一次侧电流矢量可以分解为二次有功电流矢量 I_q 和磁通电流矢量 I_d。将磁通量和牵引力分离，对磁通电流 I_d 单独控制，直到电流 I_q 和 I_d 并分别与参考电流 I_{qref} 和 I_{dref} 相等。

2.3 气隙变化补偿控制

激励电感随空气隙的变化而波动，结果磁通也引起波动。激励电感的波动随励磁电流的波动而决定，因而磁通的波动可由励磁电流变化的补偿来控制。

2.4 感应板质量变化补偿控制

感应板质量的变化引起次级电阻等电机性能的变化,通过转差频率补偿使转矩的波动得到有效控制。

2.5 在线参数校正控制

快速、准确地对直线牵引电机所发生的变化进行校正对于城轨车辆非常重要，理论上感应电压是与 q 轴重合，如果直线电机参数发生了变化，感应电压也

维普资讯 http://www.cqvip.com

会发生偏移。如上所述，对 L_m 和 R_r 进行在线参数校正控制，使其满足：$E_q \to E_{qref}$；$E_d \to 0$。

2.6 最大牵引力跟踪

据直线电机牵引特性，牵引力随 I_q / I_d 变化，一次电流 $I_1 = \sqrt{I_q^2 + I_d^2}$ 为固定值时，如果比值 I_q / I_d 能够保持在 2.0~2.5 左右，则可维持最大牵引力。因 I_d 和 I_q 可分别控制，进而实现最大牵引力跟踪。

2.7 电压空间矢量（SVPWM）

为减少三相绕组中电流的谐波成分，提高电源电压的利用率，采用电压空间矢量技术（SVPWM）。它以三相平衡的正弦波电压供电时交流电机的理想磁通圆为基准，用逆变器不同的开关模式所产生的实际磁通去逼近基准圆磁通，并由它们比较的结果决定逆变器的开关状态，形成 PWM 波形，实现对直线牵引电机的变频调速。

综上所述，直线牵引电机的矢量控制原理如图 2。

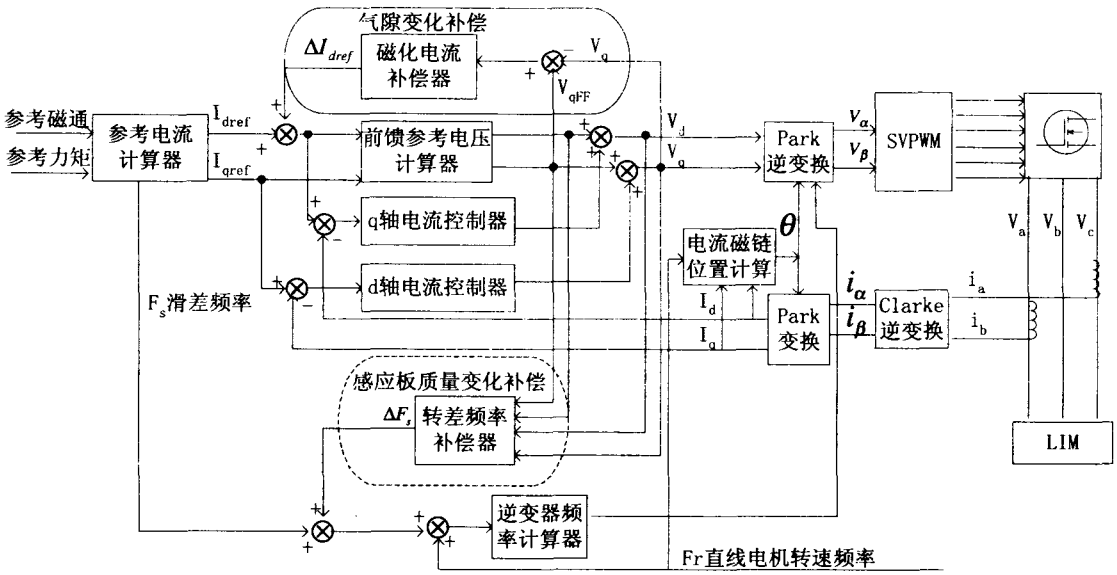

图 2 LIM 矢量控制原理图

3 控制系统硬件实现

控制系统以 32 位定点数字信号处理器 TMS320F2812 为主控芯片，完成电流环、速度环、位置环及各类补偿算法实现与控制。整个系统的硬件构成的控制结构如图 3 所示，使用事件管理器控制逆变器，通过正交编码脉冲电路（QEP）接口检测直线电机转速频率，采用 A/D 单元检测电流信号。

3.1 接口模块

接口模块完成信号的采集及通信，并将其变换成为适合控制器运算的数据格式及与列车控制中心交换数据。

（1）速度检测模块　系统中速度传感器脉冲信号 A、B 输入到 TMS320 F2812 的正交编码电路（QEP），QEP 电路的方向检测逻辑确定哪相脉冲序列相位超前，然后产生一个方向信号作为通用定时器 2（或 4）的方向输入，定时器根据相位超前（或滞后）进行递增（或递减）计数，通过相应的计算公式，得到直线牵引电机的转动频率等参数。

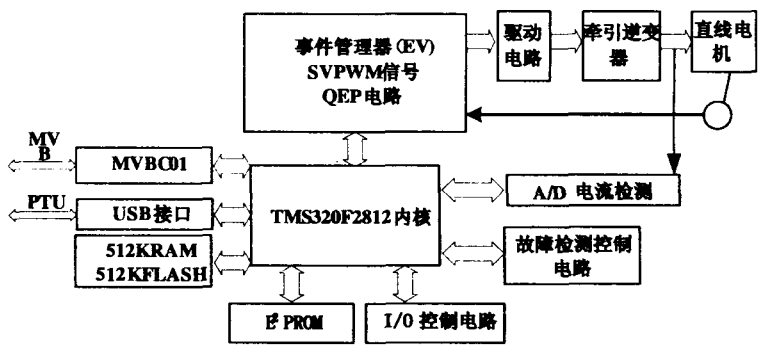

图 3 直线电机牵引控制系统结构图

（2）电流检测模块　采用 2 个 LEM 电路模块分别检测牵引逆变器输出的两相交流电流，通过信号调

维普资讯 http://www.cqvip.com

理电路将电流信号转化为适合 TMS320F2812 的 A/D 变换模块的电压信号，经过数字滤波和定标处理，为矢量控制提供电流反馈信号。

3.2 电压空间矢量（SVPWM）实现

TMS320 F2812 的事件管理器（EV）模块简化了 SVPWM 波形的产生，通过 EV 模块中 3 个比较单元产生 6 路 PWM 控制信号，经过驱动电路控制 IGBT 开关管的导通和关断。

4 控制系统软件实现

系统任务较多，要求及时响应外部事件并且能够对采集数据进行实时预处理，且有自主的管理的能力，顺序结构流程执行的程序难以满足要求。系统采用适合 TMS320F2812 平台的 DSP/BIOS 实时操作系统，它是 TI 公司实时软件技术 eXpressDSP 技术的核心部分。DSP/BIOS 主要包含三方面的内容：多线程内核、实时分析工具、外设配置库。

根据直线电机牵引控制功能，主要划分以下功能模块：引导自检模块、监控模块、通信模块、采集任务初始化模块、触发判断模块、采集任务执行模块、控制算法处理模块、输出控制模块。按各功能模块触发方式和优先级的不同,可将它们划分为 HWI、SWI、TSK 和 IDL 四种线程对象,它们的优先级依次降低。同时,电流和速度采集周期性触发的功能模块将其设定为 PRD 或 CLK 线程对象。同一执行路径的引导自检模块、监控模块仅在程序起始处执行一次，设置成一般的 TSK 线程对象。任务初始化模块、采集任务执行模块、控制算法处理模块、输出控制模块要求有实时的时间响应，设置成 SWI 线程对象。作为决定电流和速度采集过程起始时刻及其它紧急事件的触发模块,因要及时判断触发条件进而实时响应外界触发信号，将其设置为优先级最高的 HWI 线程对象。通信模块，将其分配为 IDL 线程对象。同一线程对象的功能模块优先级可根据各模块执行的频率高低来划分,执行频率越高的功能模块对应线程优先级越高。

5 仿真结果

以广州地铁四号线直线电机车辆参数条件进行仿真，从图 4 可看到，感应板材料质量的及气隙的变化，由于转差频率及励磁电流变化的补偿控制，并没用引起磁通和转矩的波动。最大牵引力跟踪和在线参数校正控制，同常规控制比推力增加了约 20%。

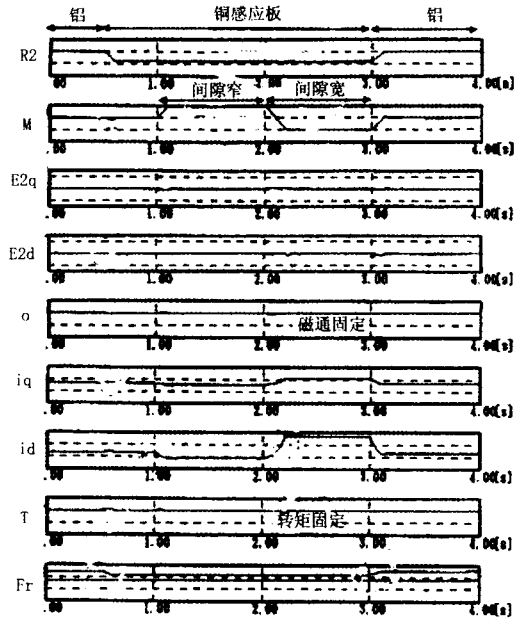

图 4 直线电机参数变化的影响

6 结语

本文研究了广州地铁4号线直线牵引电机车辆的特点，提出了直线电机车辆的牵引控制系统国产化实现方案，并进行了仿真。仿真结果表明，以矢量控制理论为基础，结合直线电机参数变化补偿及最大牵引力跟踪技术，应用 TMS320F2812 新一代 32 位 DSP 构成的数字牵引控制系统具有良好的控制效果。

参考文献

[1] 李永东.交流电机数字控制系统.北京:机械工业出版社,2003:117～255

[2] 徐安.城市轨道交通电力牵引.北京:中国铁道出版社,2005:45～52

[3] 南车四方机车车辆股份有限公司.广州市四、五号线直线电机车辆采购项目投标文件,2004. 技术部分

[4] Texas Instruments.TMS320x281x,280x Peripherals Reference Guide(Rev B),05 Nov 2004

[5] Texas Instruments.TMS320C280x DSP/BIOS Application Programming Interface(API) Reference Guide(Rev A),31Dec 2003

（下转第 43 页）

维普资讯 http://www.cqvip.com

马拉小车，有效克服由于暖通设计带来的设备容量和动力冗余而造成的能源浪费。

（2）设置合理而有效的空调系统

根据人体的舒适性要求，合理依据室外的温湿度设定室内温度设定值。例如：大堂的温度设定值一般比室外温度低 2 度；当室外温度高于 30 度时，大堂的温度设定值比室外温度低 3 度。各楼层走廊的温度设定值始终比大堂低 2 度。各房间的温度由用户根据自己的舒适性需求自行设定。通过上述方式重新设定室内温度设定值，可随着室外温度增高，适当提高温度设定值，每提高 1℃，可减少 9%的能耗。

（3）提高室内温湿度控制精度。

酒店内温湿度的变化与其节能有着紧密的相关性，据美国国家标准局统计资料表明，在夏季将设定值温度下调 1℃将增加 9%的能耗。在冬季将设定温度上调 1℃，则增加能耗为 12%。因此，通过精密的数字控制将各楼层新风机的出口温度控制在设定值 T±0.5℃，以最小的能耗保证舒适性。

4 结语

从空调系统末端设备到冷源系统全面优化，根据物业管理的模式确定空调系统的优化方式，从系统整体而不是局部进行全面分析，找出能耗较大的主要设备及问题所在，有针对性的采取节能措施，分系统、分设备的采用相应的节能方法，就可以取得较明显的节能效果。广东某酒店在空调系统改造前后经比较，节能效果为 27.7%，效果明显。

参考文献

[1] 钱以明. 高层建筑空调与节能. 上海：同济大学出版社，1992

[2] GB50189-93. 旅游饭店建筑热工与空气调节节能设计标准

Technology of the HVAC System Energy Saving in Hotels

Guo Zeyi　Zhang Yanfang

(Automation Engineering R&M Center, Guangdong Academy of Sciences)

Abstract: This paper introduces the design of the HVAC system energy saving in hotels, and analyses the group-control and optimized operation of Air Conditioning System. It presents ways of lifting energy efficiency.

Key words: HVAC; Energy Saving; Frequency Conversion Control; Group-control; Optimized Operation

作者简介：郭泽宜，女，1976 年生，工程师，研究方向：楼宇自动化、弱电系统及工业自动化。

（上接第 3 页）

Traction control system for the linear induction motor of metro vehicle

Liu Minjie[1]　Wang Zhiping[2]

(1.Guangzhou Metro Rolling Stock R&D Center)

（2.Automation Engineering R&M Center, Guangdong Academy of Sciences）

Abstract: Based on the linear induction motor (LIM) running characteristics of the metro vehicle, the control method of the linear induction motor is discussed. The schemes of traction control system are given by using TMS320F2812 chip. The simulation results of traction control system are analyzed, which further proves the feasibility of traction control system. It has some reference value for localization application.

Key words：Linear Induction Motor(LIM); TMS320f2812;　Traction Control System

作者简介：刘敏杰，男，1972 年生，电子信息工程师，工学硕士，主要从事城市轨道车辆控制及检测系统的研究与开发。