维普资讯 http://www.cqvip.com

文章编号:1671-4598(2006)11-1480-03　　中图分类号:TP31　　文献标识码:B

城轨车辆直线电机牵引控制系统国产化的研究

刘敏杰，林　攀
(广州市地下铁道总公司车辆研发中心，广东 广州　510380)

摘要：针对城市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 及实时多任务操作系统 DSP/BIOS 实现了具体的牵引控制系统方案；该系统采用独特的补偿控制算法、最大牵引力跟踪和在线参数校正，提高了车辆直线电机运行的稳定性和牵引力；通过仿真分析验证了该控制系统方案的可行性，对以后直线电机车辆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

Localization Study on Traction Control System for LIM of Metro Vehicle

Liu Minjie, Lin Pan
(Guangzhou Metro Rolling Stock R&D Center, Guangzhou　510380, China)

Abstract: Based on the linear induction motor (LIM) running characteristic of the metro vehicle, the control method of the linear induction motor is probed. The schemes of traction control system are given by using TMS320F2812 chip and the DSP/BIOS realtime multitask operating system. The LIM runs more stably and efficiently by using a special compensative control algorithms and tracing the most traction and revising parameter online; Relative simulate results of traction control system are analyzed, which further proves the feasibility of traction control system, it has some reference value for localization.

Key words: Linear induction motor (LIM); TMS320F2812; traction control system

0　引言

近年来，作为非粘着驱动方式的直线电机，在城市轨道交通车辆中的运用越来越受到各国的重视。直线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，与普通旋转感应式电机的原理一样，只不过其运动方式由旋转变为直线运动，但仍构成了感应电动机的作用机能。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。随着广州地铁 4 号线我国第一条直线电机驱动的城市轨道交通线建设，将会有更多的直线牵引电机车辆在我国城市轨道交通线运行。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。

1　直线牵引电机控制策略

1.1　直线牵引电机的等效电路

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个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。由此可知，直线电机的等效电路（如图 1 所示）互感 L_m 和二次侧电阻 R_r 变化比较大，要实现对直线牵引电机的有效的矢量控制，必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。

1.2　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 $d-q$ 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。

1.3　气隙变化补偿控制

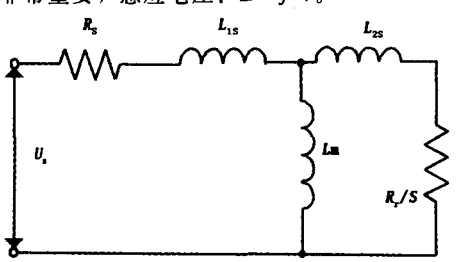
激励电感随空气隙的变化而波动，结果磁通也引起波动。激励电感的波动随励磁电流的波动而决定，因而磁通的波动可由励磁电流变化的补偿来控制。

1.4　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，通过转差频率的补偿使转矩的波动得到有效的控制。

1.5　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，感应电压：$E=j\omega\phi$。



R_s，一次侧耳电阻；R_r 二次侧耳电阻 *；L_{1s}—次侧耳磁漏电感；L_{2s}二次侧耳磁漏电感 *；L_m 互感；S 转差率；* 已换算到一次侧

图 1　直线牵引电机等效模型

收稿日期:2006-04-12;　**修回日期**:2006-05-19。

作者简介:刘敏杰(1972-),男,广东广州人,工学硕士,主要从事城市轨道车辆控制技术等方向的研究。

中华测控网
chinamca.com

维普资讯 http://www.cqvip.com

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：$E_q \rightarrow E_{qref}$；$E_d \rightarrow 0$。

1.6 最大牵引力跟踪

根据直线电机牵引特性，牵引力随 I_q/I_d 变化，当一次电流 $I_1=\sqrt{I_q^2+I_d^2}$ 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。

1.7 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 所示。

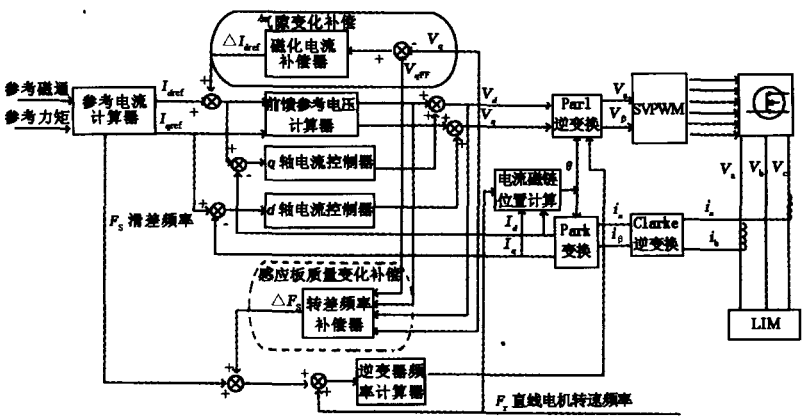


图 2　LIM 矢量控制原理图

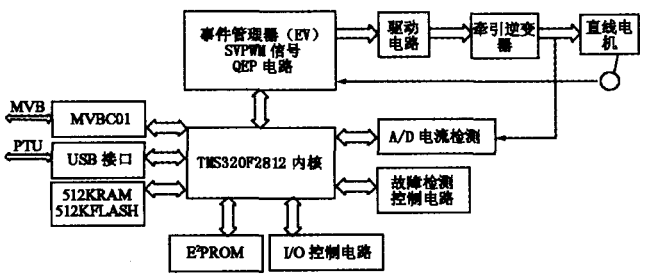


图 3　直线电机牵引控制系统结构图

2 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。由于 TMS320F2812 的高集成度、高性能的特点，使得控制系统具有控制精度高，硬件简单，可靠性能高等优点，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。

2.1 TMS320F2812 性能特点

TMS320F2812 运算速度快，工作时钟频率达 150 MHz，指令周期可达 6.67 ns 以内，低功耗。采用哈佛总线结构，具有强大的操作能力、迅速的中断响应和处理以及统一的寄存器编程模式。可实现 16×16 位和 32×32 位乘累加操作和 16×16 位的两个乘累加操作。

片内 256K×8 位 FLASH，36K×8 位 RAM，具有代码安全保护。外部存储器接口可实现多达 1M 存储器的扩展。外部扩展模块（PIE）可支持 96 个外部中断，45 个中断可用。

两个增强的事件管理器模块（EVA、EVB），提供了一整套用于运动控制和电机控制应用的功能和特性。每个事件管理模块包括通用定时器（GP）、比较单元、捕获单元以及正交编码脉冲电路（QEP）。

外围设备包括 3 个 32 位的 CPU 定时器，16 通道 12 位 ADC（单个转换时间为 200 ns，单路转换时间为 60 ns），它不仅具有串行外围接口（SPI）和两个串行通信接口（SCI），还有改进的局域网络（eCAN）、多通道缓冲串行接口（McBSP）和串行外围接口模式。

2.2 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，如图 4 所示。

（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。

（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。

2.3 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，如图 4 所示，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 主管的导通和关断。SVPWM 生成由特定的寄存器分别进行控制：配置 ACTRx 寄存器确定比较引脚的极性，根据电压矢量相位置查转换模式表，写入相应的值；TICON（11～13）控制生成对称或不对称的 PWM 波形；死区时间设置由 DBTCON 完成；COMCONx 控制 PWM 输出或高阻态输出，可在系统出现故障

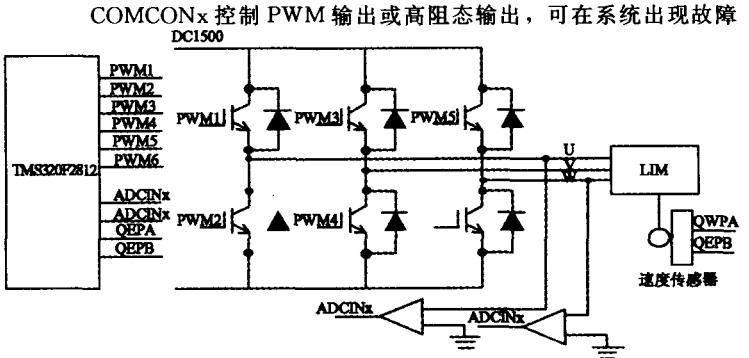


图 4　接口模块结构图

中华测控网
chinamca.com

维普资讯 http://www.cqvip.com

时及时保护。3 个比较寄存器 CMXP1～3 分别对应何时开通 U、V、W 三相，其值的大小由电压矢量的相位置决定，当定时器的记数值等于 CMXP1～3 的值时，就会改变空间矢量对应的控制信号的输出。

3 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 3 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。根据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。

4 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 5 可看到，感应板材料质量及气隙的变化，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。图 6 表明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%。

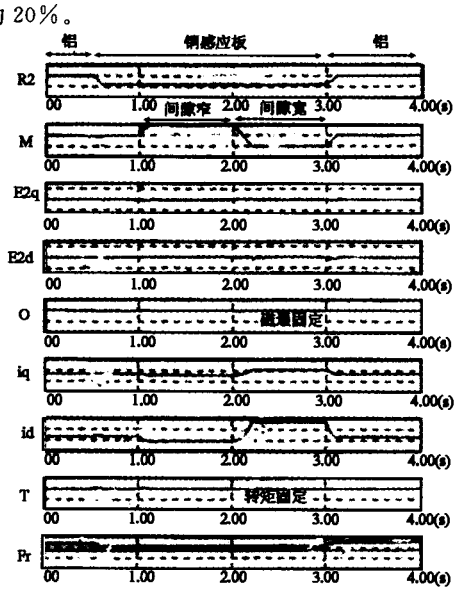


图 5 直线电机参数变化的影响

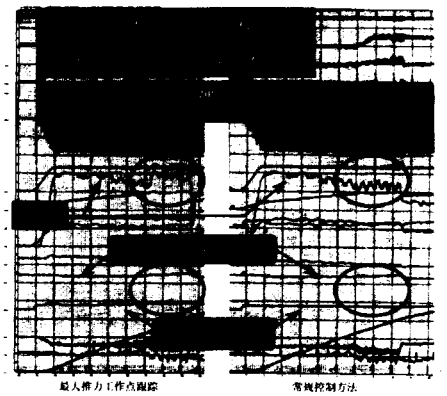


图 6 在线参数校正及最大牵引力跟踪

5 结束语

作者研究了广州地铁 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 及实时操作系统 DSP/BIOS 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[M]. 北京：机械工业出版社，2003.

[2] 徐 安. 城市轨道交通电力牵引[M]. 北京：中国铁道出版社，2005.

[3] 陈伯时，陈敏逊. 交流调速系统[M]. 北京：机械工业出版社，第二版，2005.

[4] 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[R]. 南车四方机车车辆股份有限公司，2004.

[5] Texas Instruments. TMS320x281x，280x Peripherals Reference Guide (Rev B) [Z]. 2004.

[6] Texas Instruments. TMS320C280x DSP/BIOS Application Programming Interface (API) Reference Guide (Rev A) [Z]. 2003.

[7] 苏奎峰，吕 强. TMS320F2812 原理与开发 [M]. 北京：电子工业出版社，2005.

(上接第 1479 页)

参考文献：

[1] 阳春华，沈德耀. 集气管压力的智能控制设计与实现 [J]. 小型微型计算机系统，1999，20 (7)：550－554.

[2] 李春华. 焦炉集气管压力多变量模糊控制系统 [J]. 煤炭学报，2001，26 (2)：195－198.

[3] 郝 榕，刘小强，等. 自适应模糊控制在集气管压力控制中的应用 [J]. 计算机工程与设计，2000，21 (2)：54－57.

[4] 张化光，何希勤. 模糊自适应控制理论及其应用 [J]. 北京：北京航空航天大学出版社，2002.

[5] 梁 坚，杨永臻. 一种多模态自适应模糊控制器 [J]. 重庆大学学报 (自然科学版)，1995，18 (6)：82－87.

[6] 李士勇. 模糊控制、神经控制和智能控制论 [M]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学出版社，2002.

[7] 王 景，刘良栋，王作义. 在线规则自适应模糊控制算法及其应用 [J]. 控制理论与应用，1996，16 (5)：770－772.

[8] 孙 伟. 焦炉集气管压力系统智能控制策略 [J]. 中国矿业大学学报，2000，29 (5)：503－505.

中华测控网
chinamca.com