

城市轨道交通车辆

地铁车辆异步牵引电机
矢量控制系统研究

秦孝峰

(西安市地下铁道有限责任公司, 陕西 西安 710018)



作者简介：秦孝峰，(1977-)男，工程师，硕士，现在西安地铁从事地铁车辆新车监造、调试及故障分析等技术管理工作。

摘 要：从地铁车辆用矢量控制的基本结构、空转滑行控制、轻负荷再生控制等方面对西安地铁 2 号线车辆交流传动矢量控制系统独特之处进行了分析说明，以了解地铁 2 号线车辆主传动系统矢量分析系统矢量控制框图的基本功能。经过车辆型式试验测试，结果表明该控制系统有良好的动态性能和静态性能。

关键词：矢量控制；异步牵引电机；空转滑行控制；轻负荷再生控制；西安地铁；地铁车辆

中图分类号：U264.1+3；U231 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-128X(2011)06-0054-04

Research on the Asynchronous Motor Vector Control System of the Metro Vehicle

QIN Xiao-feng

(Xi'an Metro Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710018, China)

Abstract: Unique aspects in AC drive vector control system of metro vehicle for Xi'an metro line No.2 were analyzed and illustrated in the light of the basic structure of vector control, slip slide control and light load regeneration control, which presented basic functions of every link in the vector control block diagram. With type test of vehicle, the good dynamic performance and control performance of the control system were validated.

Key words: vector control; asynchronous traction motor; slip slide control; light load regeneration control; Xi'an metro; metro vehicle

0 引言

西安地铁 2 号线作为西安的第 1 条地铁线路，车辆技术人员相对经验不足，因此，具备优良牵引性能的地铁车辆是确保地铁正常开通运营的可靠保障。而稳定可靠的牵引系统意味着可以减少车辆的维护工作量。西安地铁 2 号线在车辆驱动控制上采用矢量控制具有如下优点：①优化空转再粘着的控制性能；②提高轻负荷再生时的再生效率；③提高乘坐舒适性（无扭矩冲击）；④提高匀速驾驶和 ATO 驾驶的精度。本文将描述地铁车辆用矢量控制系统的主要特点与性能。

1 异步牵引电机矢量控制的基本原理

1.1 矢量控制时的扭矩

图 1 为电流矢量的扭矩控制。异步牵引电机发生的扭矩与磁通和二次侧电流（扭矩电流）之积成比例关系，同时，磁通与励磁电流成比例关系。矢量控制时

的扭矩如式 (1)：

$$T = K \times \Phi \times I_q = K' \times I_d \times I_q \quad (1)$$

式中： K 、 K' 为比例常量； Φ 为磁通； I_q 为扭矩电流； I_d 为励磁电流。

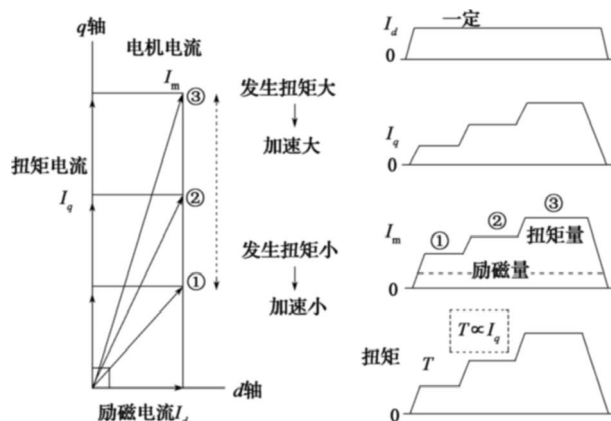


图 1 电流矢量的扭矩控制

异步牵引电机发生的扭矩正比于励磁电流与扭矩电流之积，所以通过分离励磁电流和扭矩电流并进行单独调整，便能够像对直流电机一样对异步牵引电机

收稿日期：2011-05-30；收修改稿日期：2011-07-29

进行控制,无论在正常控制还是在过渡控制中,都能获得灵敏的扭矩控制。

由于异步牵引电机的励磁电感比漏感大,所以在磁通(励磁电流)调节时需要大能量的进出而且所需的时间较长。为此,对于要求反应快速的扭矩控制来讲,通常的解决方法是:在保持稳定励磁电流的情况下调整扭矩电流^[1]。

1.2 电压矢量控制

为了得到规定的励磁电流 I_d 与扭矩电流 I_q ,需把电机的端子电压 V_1 (相当于逆变器的输出电压) 由电机常量设定为规定值。也就是说,异步牵引电机的端电压 V_1 是通过励磁电感电压 V_0 (相当于二次侧电阻的电压) 和电机电流 I_m 产生的电压下降量 V_r 矢量合成获得。相对于电机端子电压 V_1 的 V_0 的位相角 δ 是矢量控制中的重要控制信息^[2],它增加了电压控制的自由度。图2显示了电压、电流的矢量图 (r_1 ——一次侧电阻; l_1' ——漏电感; l_m' ——励磁电感; r_2 ——二次侧电阻; s ——转差率)。

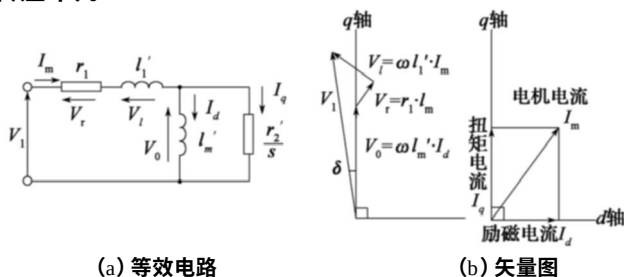


图2 电压、电流的等效电路与矢量图

图3为扭矩调节时电压矢量控制方法。设想一种情况,即保持磁通电流指令 I_{dp} 不变,而将扭矩电流 I_{qp} 变成 I'_{qp} 。此时,将电机电流(指令) I_{mp} 变成 I'_{mp} 。为了不使励磁电流 I_d 发生变化(使磁通保持一定),矢量演算器在保持励磁电感的电压 V_0 不变的情况下,分别把端子电压的大小 V_1 和位相角 δ 修正为 V'_1 与 δ' 。由于磁通不会同时发生变化,因而可以获得高速的扭矩反应。

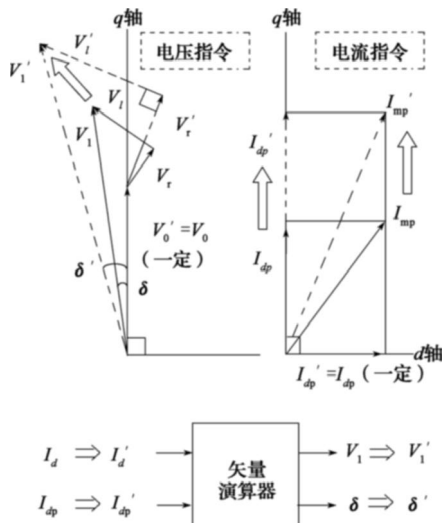


图3 扭矩调节中的电压矢量控制

2 西安地铁2号线车辆矢量控制系统

2.1 西安地铁2号线车辆牵引系统

西安地铁2号线变电站的11 kV三相交流电经过整流器整流、滤波后为地铁车辆提供DC 1500 V电源,每辆动车由1台IGBT二点式逆变器为4台功率为180 kW的异步牵引电机供电,制动斩波器主要是由1个IGBT与制动电阻串联组成。当电机制动时,通过减小变频器的输出频率,使电机转子的速度超前于旋转磁场速度,制动能量将反馈到直流侧,如果这部分能量未被其他牵引车辆消耗,当直流网压高于1.8 kV时,制动斩波器将会以PWM斩波的形式工作,把多余的能量在电阻上消耗掉,当母线低于1.5 kV时,制动斩波器关闭^[3]。西安地铁2号线牵引系统主电路结构图如图4所示。

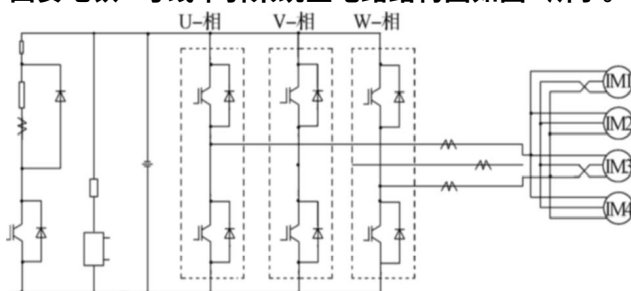


图4 西安地铁2号线牵引系统主电路结构图

2.2 2号线地铁车辆矢量控制基本结构

由于西安地铁2号线地铁车辆牵引逆变器控制要最大限度地使用电源电压,因此,逆变器的设计^[4]考虑了以下情况:①单一系统涵盖所有工作领域的控制系统;②增强在最大电压领域(1个脉冲模式)中的弱磁场控制功能;③适应电机常量波动的扭矩控制。

为实现上述控制要求,需要进行差频矢量控制,图5为能够实现差频矢量控制而设计的控制结构图。它的最大特点是,励磁电流 I_d 为开环控制,只有扭矩电流 I_q 为反馈控制,实际的励磁电流根据逆变器输出电压设定,在车辆特有的最大电压领域(1个脉冲模式)时,自动进入弱磁场控制,差频则通过扭矩电流控制系统的工作得到自动修正。因此,不必切换控制系统

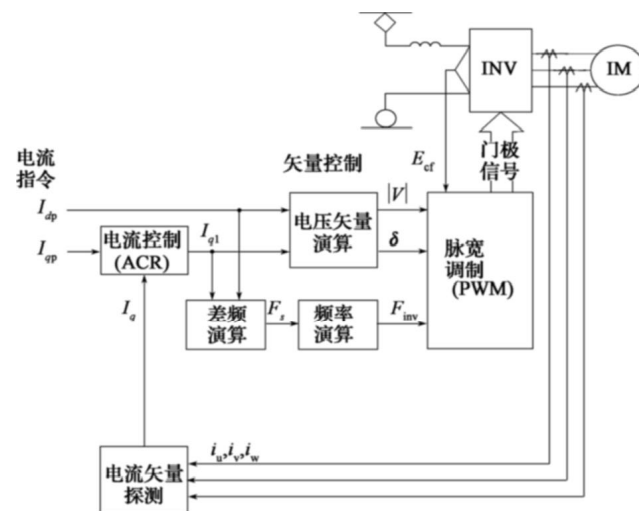


图5 差频矢量控制基本结构图

便可以对整个驾驶领域进行驾驶。这个控制系统不仅可以实现无扭矩冲击的控制,而且还可根据扭矩电流反馈的信息对差频加以调整,具备对电机常量波动所产生的扭矩变化进行自动修正的功能,启动时也不必对差频固定电压控制进行调整,可以缩短调整时间。

西安地铁2号线车辆,通过使用高性能的微处理器,从软硬件方面实现了CPU大演算量的矢量控制。图6显示了车辆特性与矢量控制的关系(图中的电机电流 $I_m = \sqrt{I_d^2 + I_q^2}$)。

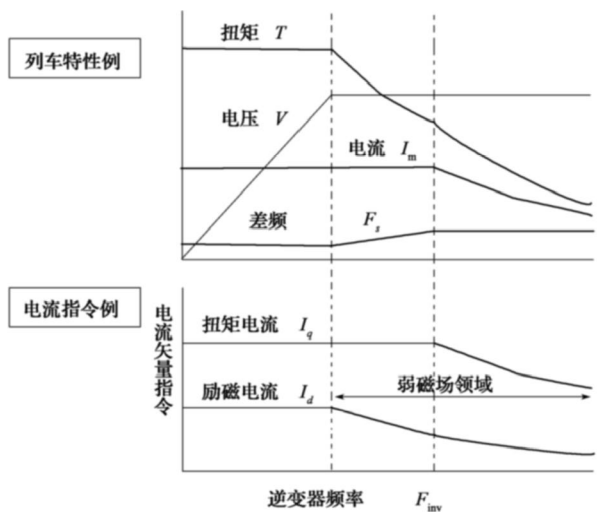


图6 车辆特性与矢量控制图

表1 车辆特性与矢量控制关系

控制特征	项目	固定扭矩	固定电流	车辆特性
运转控制模式输出	扭矩	一定	$\propto 1/F_{inv}$	$\propto 1/F_{inv}^2$
控制指令输出	扭矩	一定	一定	$\propto 1/F_{inv}$
	电流	一定	一定	$\propto 1/F_{inv}$
	励磁	一定	$\propto 1/F_{inv}$	$\propto 1/F_{inv}$
控制变量输出	电压	$\propto 1/F_{inv}$	一定	一定
	PWM	多脉冲模式	单脉冲模式	单脉冲模式
	差频	一定	$\propto 1/F_{inv}$	一定

2.3 应用矢量控制的空转滑行控制

粘着控制对于具有车轮与钢轨之间摩擦的有轨交通来讲是最重要的课题之一。高粘着利用控制的关键是要将车轮与钢轨之间的粘着限界充分利用到极限,以及如何从超过粘着限界后所发生的空转、滑行状态迅速恢复到再粘着状态。由于粘着限界受轨道状态的影响而时刻发生着很大的变化,因此在控制上要求更准确。

空转滑行控制是通过降低电机产生的扭矩,控制其重新恢复再粘着状态。因此,如何尽早发现空转滑行状态,以最小的扭矩减量迅速恢复再粘着状态是提高性能的关键。另外,扭矩缩量的时间累积越小,越能够实现高粘着力控制。因此,对于空转滑行控制来讲,不仅要求高速,而且需要高精度的扭矩控制。

图7显示了空转滑行控制中的扭矩电流缩减关系。

在发生空转时,通过快速缩减扭矩来迅速恢复再粘着,并在探测到再粘着后迅速恢复扭矩,使其回到推定粘着力,以此实现高粘着力控制。即使对于高速复杂的扭矩模式,矢量控制也可以实现良好的扭矩控制。应用矢量控制的空转滑行控制结构图如图8所示。

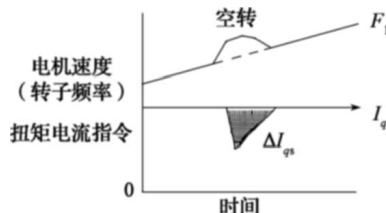


图7 空转滑行控制中的扭矩电流缩减图

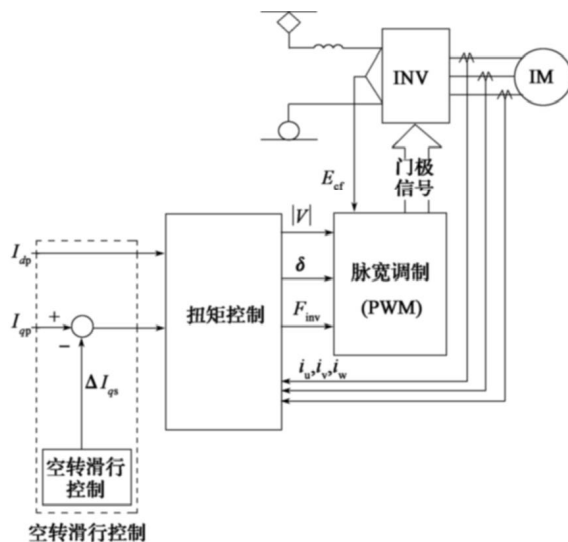


图8 应用矢量控制的空转滑行控制结构

2.4 应用矢量控制的轻负荷再生控制

图9为轻负荷再生

控制中的扭矩电路缩减图。从图中可以看出,在电源轻负荷的再生驾驶时,能够抑制住直流电压的快速上升

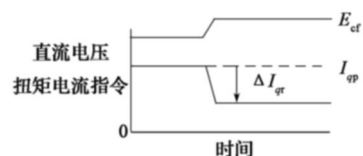


图9 轻负荷再生控制中的扭矩电路缩减图

和过电压保护等产生的再生失效频率。另外,保护动作的回路断路所产生的扭矩冲击也会受到抑制,这将会提高乘坐的舒适性。图10为应用矢量控制的轻负荷再生控制结构图,电制动时,当滤波电容器电压上升时,制动斩波开始动作并抑制滤波电容器电压的上升。然而在制动斩波无法动作的情况下将实施压缩扭矩的轻负荷再生控制。

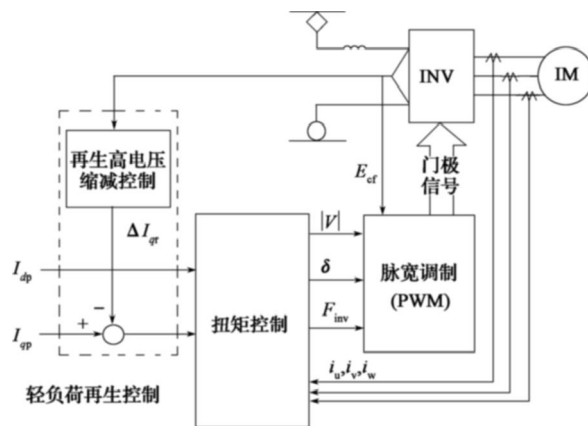
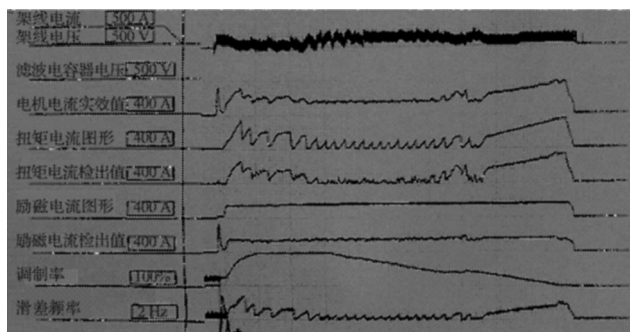


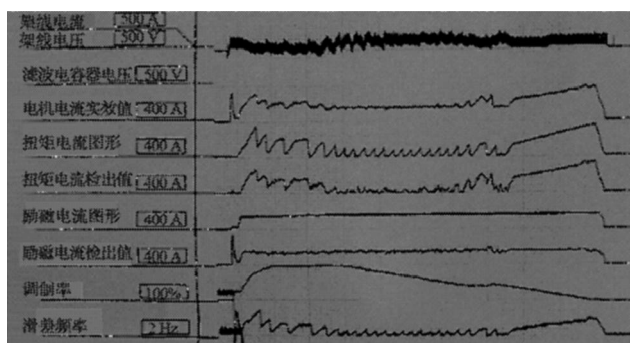
图10 矢量控制的轻负荷再生控制结构图

3 车辆试验结果

在对西安地铁2号线首列车进行牵引性能试验时,测量了相电流、架线电压和电流、滤波电抗器电压、扭矩电流、滑差频率等。图11为车辆牵引系统试验波形图,其中,图11(a)为车辆在4级牵引加速至80 km/h的波形图,图11(b)为车辆运行在60 km/h时实施B7电制



(a) 4 N-80 km/h



(b) 60 km/h-电制动 B7

图 11 牵引系统试验波形图

动直至车辆停止时的波形图。

从图11试验结果可以看出,车辆在牵引和电制动工况下,架线电流、电机电流、线电流、扭矩电流、滑差频率、磁链均达到了理想的结果,电机运行稳定可靠,说明牵引系统的矢量控制设计能够满足车辆正式运营的需要。

4 结语

以西安地铁2号线车辆为研究对象,主要分析了地铁牵引主电路系统和异步电机矢量控制原理、应用矢量控制的空转滑行控制、应用矢量控制的轻负荷再生控制。研究表明,异步电机通过坐标变换,可对励磁电流和力矩电流进行解耦,调控特性好。通过车辆性能方面的试验结果来看,异步牵引电机的矢量控制调速精度高,动态性能非常优良,在外界负载变化的情况下,能够快速得到响应,满足了西安地铁2号线地铁车辆对牵引系统性能的要求。

参考文献：

- [1] 李华德. 交流调速控制系统 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2002.
- [2] 许大中, 贺益康. 电机控制 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2007.
- [3] 崔俊国, 陶生桂. 上海地铁2号线车辆交流传动系统仿真分析 [J]. 机车电传动, 2002 (1): 29-35.
- [4] 陈郭霞, 关振宏, 等. 三电平逆变器电压空间矢量控制方法分析 [J]. 机车电传动, 2007 (6): 34-37.

(上接第53页)

表1 疲劳寿命列表

节点	损伤值	循环次数	对数循环次数	对数循环损伤
218794	1.393E-6	3.160E5	5.8561	-5.8561
569347	1.393E-6	3.160E5	5.8561	-5.8561
557271	9.674E-7	1.024E6	6.0104	-6.0104
206718	9.022E-7	1.108E6	6.0447	-6.0447
206026	8.343E-7	1.199E6	6.0787	-6.0787
556579	8.343E-7	1.199E6	6.0787	-6.0787
568451	8.343E-7	1.199E6	6.0787	-6.0787
217898	8.093E-7	1.236E6	6.0919	-6.0919
262915	2.454E-8	4.075E7	7.6102	-7.6102
613468	2.454E-8	4.075E7	7.6102	-7.6102

4 结论

从寿命分布云图和疲劳寿命列表中可以看出,疲劳寿命最短的节点编号为218794和569347,对应的部位

是牵引电机座支架板上固定牵引电机的螺栓处。218794和569347两个节点可经受的循环次数为3.16E5次。按车辆每天运行12个往返循环计算,构架疲劳寿命为 $316000 \div 12 \div 365 = 72$ 年,远远大于转向架的使用寿命30年,满足设计要求。所以从节省成本的角度,可以为结构轻量化设计提供参考。但针对构架易出现裂纹的位置,可以结合一些优化设计理论,对该位置部件的结构进行优化改进。

参考文献：

- [1] 曾春华. 奇妙的疲劳现象 [M]. 北京: 科学出版社, 1986.
- [2] 刘绍勇. 重庆跨坐式单轨转向架的研制 [J]. 铁道车辆, 2003, 41(9): 18-21.
- [3] 杜子学, 吴洪博. 跨座式单轨车体骨架疲劳寿命分析 [J]. 铁道车辆, 2009(3).
- [4] 姚卫星. 结构疲劳寿命分析 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.