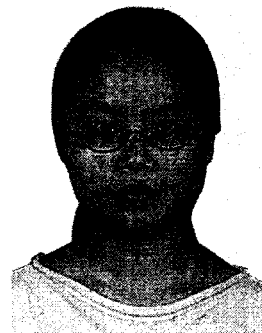


研
究
开
发三电平逆变器电压空间矢量
控制方法分析

陈郭霞, 关振宏, 陶良慧, 蒋启伟, 杨显进

(西南交通大学 电气工程学院, 四川 成都 610031)



作者简介: 陈郭霞(1980-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力电子与电力传动。

摘要: 详细分析了三电平逆变器主电路原理及工作模式, 推导了在不同电压空间矢量三角形分区情况下电压空间矢量作用时间, 并介绍了合成电压空间矢量的工作模式及开关的合理选择方式。在 Matlab/Simulink 环境下通过仿真实现了三电平逆变器电压空间矢量控制, 仿真结果验证了理论的正确性。

关键词: 三电平逆变器; 电压空间矢量; 控制方法

中图分类号: TM464 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-128X(2007)06-0034-04

Analysis on Space Voltage Vector Control Strategy of Three-level Inverter

CHEN Guo-xia, GUAN Zhen-hong, TAO Liang-hui, JIANG Qi-wei, YANG Xian-jin

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: The power circuit principle and working mode of the three-level inverter is analyzed in details. And the operating times of space voltage vector under the different conditions of space voltage vector triangle division is deduced. The working mode and rational selection of switches are given for the combined space voltage vector. The control of the space voltage vector for three-level inverter is realized through the simulation in the Matlab/Simulink. The simulation result proves the correctness of this theory.

Key words: three-level inverter; space voltage vector; control strategy

0 引言

三电平逆变器是多电平逆变器中最简单实用的一种电路, 与传统的二电平逆变器相比, 其电压输出波形更近似于正弦波, 从而谐波含量减小, 脉冲频率降低, 主管耐压降低一半, 电磁干扰大大减轻。三电平逆变器的主要控制方法有3种: 谐波消除PWM法, 开关频率最优PWM法和空间矢量PWM法。相比较而言, 空间电压矢量法有如下优点: 在大范围的调制比内有很好的性能, 无需其他控制方法所需的大量角度数据, 母线电压利用率高等。

1 三电平逆变器拓扑结构及其原理

三电平逆变器主电路, 如图1所示, 每相由4只功率开关管IGBT串联, 每个开关管各并联1个二极管。中点钳位二极管当开关管 VT_{A1} 或 VT_{A4} 断开时, 即导通模式由输出 $+U_d$ 、 $-U_d$ 转变为0时, 钳位二极管起到续流的作用。

收稿日期: 2007-03-24; 收修改稿日期: 2007-07-06

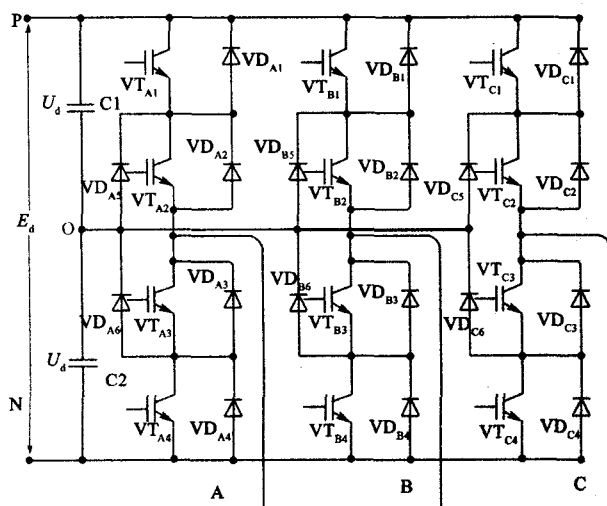


图1 三电平逆变器的拓扑结构

2 三电平电压空间矢量控制 SVPWM 策略

SVPWM 空间矢量控制的基本原则是首先判断参考电压矢量所在扇区号; 然后确定用来合成参考电压矢量的3个系统内部电压矢量; 接着计算各个矢量的

作用时间; 最后确定矢量作用顺序及 PWM 输出。

2.1 空间电压矢量图

由电压空间矢量的定义可知, 当电动机端电压为三相对称的正弦波电压时, 其合成电压空间矢量端点轨迹是一个与电压幅值有关的圆。SVPWM 技术就是以该圆为基准, 用逆变器不同的开关模式所产生的实际电压空间矢量去合成一个理想的等效圆(也称磁链圆), 形成 SPWM 波形。

三电平逆变器的电压空间矢量有 $3^3=27$ 种电压空间矢量, 在电容分压对称时, 其矢量关系如图 2 所示。其中零矢量有 3 个 OOO, PPP, NNN; 内正六边形的每个顶点有 2 种可能的组合, 除去重复的 8 种可能的组合, 三电平逆变器共有 19 种独立的电压空间矢量。如图 2 所示。将 19 个空间矢量按照幅值从小到大的顺序分为 4 类不同的空间矢量: 零电压矢量(幅值为 0); 小电压空间矢量(幅值为 $\frac{E_d}{2}$); 中电压空间矢量(幅值为 $\frac{\sqrt{3}E_d}{2}$)和大电压空间矢量(幅值为 E_d)。

三电平的合成空间电压矢量(也称参考空间电压矢量)定义为

$$U_{ref} = U_A + aU_B + a^2U_C = \frac{E_d}{2}(S_A + aS_B + a^2S_C)$$

式中: $a = e^{j\frac{2\pi}{3}}$; U_A, U_B, U_C 为输入参考电压。

S_A, S_B, S_C 分别为 A、B、C 三相开关状态, 当输出电压为高电平时取“1”, 零电平时取“0”, 低电平时取“-1”。

表 1 为开关状态与电压矢量对照表。

2.2 参考电压矢量所在扇区和区域的划分

三电平变频器能输出 19 种不同的基本空间电压矢量, 除去 1 个零矢量外, 其余 18 个矢量把圆周 360° 等分为 6 个扇区, 每个扇区占 60° 的空间角度。三电平电压空间矢量由 6 个大三角形扇区(I、II、III、IV、V、VI)构成。每个大三角形扇区内相邻电压空间矢量两两相连可得 4 个小三角形区域, 故电压空间矢量可由 24 个小三角形构成, 如图 2 所示。 U_{ref} 所在扇区由其在 $\alpha - \beta$ 坐标轴上的分量 U_α, U_β 决定, 即由 $U_\beta, U_\alpha - \frac{1}{\sqrt{3}}U_\beta, -U_\alpha - \frac{1}{\sqrt{3}}U_\beta$ 三式与 0 的关系决定。由此, 定义变量: $X=U_\beta, Y=U_\alpha - \frac{1}{\sqrt{3}}U_\beta, Z=-U_\alpha - \frac{1}{\sqrt{3}}U_\beta$ 。

若 $X>0$, 则 $A=1$, 否则 $A=0$;

若 $Y>0$, 则 $B=1$, 否则 $B=0$;

若 $Z>0$, 则 $C=1$, 否则 $C=0$ 。

令 $S=A+B \times 2 + C \times 4$, S 即为参考矢量所处扇区号。

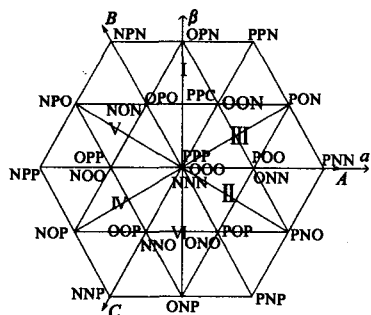


图 2 电压空间矢量及扇区分布图

表 1 开关状态与空间电压矢量对照表

空间矢量类别	电压空间矢量	U_{ref}	开关状态		
			S_A	S_B	S_C
零电压空间矢量	U_0	0	1	1	1
	U_0	0	0	0	0
	U_0	0	-1	-1	-1
小电压空间矢量	U_1	$\frac{E_d}{2}$	1	0	0
	U_1	$\frac{E_d}{2}$	0	-1	-1
	U_2	$\frac{E_d}{2}e^{j\frac{\pi}{3}}$	1	1	0
	U_2	$\frac{E_d}{2}e^{j\frac{\pi}{3}}$	0	0	-1
	U_3	$\frac{E_d}{2}e^{j\frac{2\pi}{3}}$	0	1	0
	U_3	$\frac{E_d}{2}e^{j\frac{2\pi}{3}}$	-1	0	-1
	U_4	$\frac{E_d}{2}e^{j\pi}$	0	1	1
	U_4	$\frac{E_d}{2}e^{j\pi}$	-1	0	0
	U_5	$\frac{E_d}{2}e^{j\frac{4\pi}{3}}$	0	0	1
	U_5	$\frac{E_d}{2}e^{j\frac{4\pi}{3}}$	-1	-1	0
	U_6	$\frac{E_d}{2}e^{j\frac{5\pi}{3}}$	1	0	1
	U_6	$\frac{E_d}{2}e^{j\frac{5\pi}{3}}$	0	-1	0
中电压空间矢量	U_7	$\frac{\sqrt{3}E_d}{2}e^{j\frac{\pi}{6}}$	1	0	-1
	U_8	$\frac{\sqrt{3}E_d}{2}e^{j\frac{\pi}{2}}$	0	1	-1
	U_9	$\frac{\sqrt{3}E_d}{2}e^{j\frac{5\pi}{6}}$	-1	1	0
	U_{10}	$\frac{\sqrt{3}E_d}{2}e^{j\frac{2\pi}{6}}$	-1	0	1
	U_{11}	$\frac{\sqrt{3}E_d}{2}e^{j\frac{3\pi}{2}}$	0	-1	1
	U_{12}	$\frac{\sqrt{3}E_d}{2}e^{j\frac{11\pi}{6}}$	1	-1	0
大电压空间矢量	U_{13}	E_d	1	-1	-1
	U_{14}	$E_d e^{j\frac{\pi}{3}}$	1	1	-1
	U_{15}	$E_d e^{j\frac{2\pi}{3}}$	-1	1	-1
	U_{16}	$E_d e^{j\pi}$	-1	1	1
	U_{17}	$E_d e^{j\frac{4\pi}{3}}$	-1	-1	1
	U_{18}	$E_d e^{j\frac{5\pi}{3}}$	1	-1	1

每个大三角形扇区内的小三角区域划分完全相同,每个扇区可分为A, B, C, D 4个区。由小矢量与零矢量构成的小三角形为A区,由小矢量与中矢量构成的小三角形为B区,由中矢量与大矢量构成的小三角形为C和D区。图3为第Ⅲ扇区三角形分区情况。

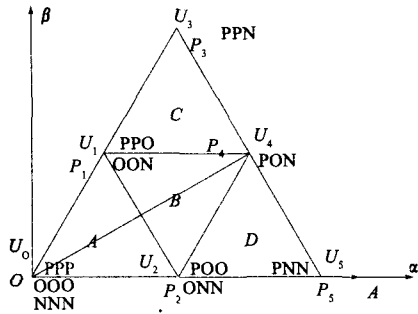


图3 三角形分区

2.3 三电平电压空间矢量作用时间求解

为了减小输出电压的谐波,确定了参考矢量所处的扇区以及在该扇区内的某个具体小三角形区域后,采用NTV(The Nearest Triangle Vectors)原则,用构成该三角形的3个矢量来合成该参考矢量。以Ⅲ扇区为例分析所期望电压 U_{ref} 与逆变器输出电压和开关状态的关系。

①当参考矢量 U_{ref} 落在如图4所示的A区内,即三角形 OP_1P_2 时, U_{ref} 可用与之靠近的3个空间矢量 ($U_1, U_2, 0$) 合成,设 $U_1, U_2, 0$ 矢量作用时间分别为 T_1, T_2, T_0 ; T_s 为采样周期,则有

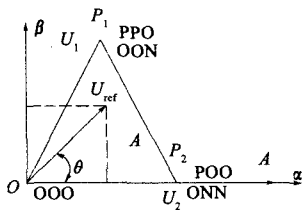


图4 U_{ref} 在A区内

$$\begin{cases} \overline{U}_{ref} T_s = \overline{U}_1 T_1 + \overline{U}_2 T_2 + \overline{U}_0 T_0 \\ T_s = T_1 + T_2 + T_0 \end{cases}$$

从而可求得

$$\begin{cases} T_1 = \frac{4U \sin \theta}{\sqrt{3} E_d} T_s \\ T_2 = \frac{2U(\cos \theta - \frac{\sin \theta}{\sqrt{3}})}{E_d} T_s \\ T_0 = T_s - T_1 - T_2 = \left[1 - \frac{2U}{E_d} (\cos \theta + \frac{\sin \theta}{\sqrt{3}}) \right] T_s \end{cases}$$

式中: θ 为 U_{ref} 的相位角 ($0 \leq \theta \leq 60^\circ$); U 为 U_{ref} 的模; E_d 为直流电源电压值。

②当 U_{ref} 落在如图5所示的B区内,即三角形 $P_1P_2P_4$ 时, U_{ref} 可用与之靠近的3个空间矢量 (U_1, U_2, U_4) 合成,设 U_1, U_2, U_4 矢量作用时间分别为 T_1, T_2, T_4 , 则有

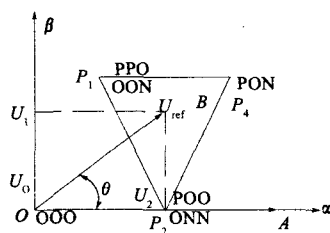


图5 U_{ref} 在B区内

$$\begin{cases} \overline{U}_{ref} T_s = \overline{U}_1 T_1 + \overline{U}_2 T_2 + \overline{U}_4 T_4 \\ T_s = T_1 + T_2 + T_4 \end{cases}$$

从而可求得

$$\begin{cases} T_1 = \left[1 - \frac{2U}{E_d} \left(\cos \theta - \frac{\sin \theta}{\sqrt{3}} \right) \right] T_s \\ T_2 = \left(1 - \frac{4U \sin \theta}{\sqrt{3} E_d} \right) T_s \\ T_4 = T_s - T_1 - T_2 = \left[\frac{2U}{E_d} \left(\cos \theta + \frac{\sin \theta}{\sqrt{3}} \right) - 1 \right] T_s \end{cases}$$

③当 U_{ref} 落在如图6所示的C区内,即三角形 $P_1P_3P_4$ 时, U_{ref} 可用与之靠近的3个空间矢量 (U_1, U_3, U_4) 合成,设 U_1, U_3, U_4 矢量作用时间分别为 T_1, T_3, T_4 , 则有

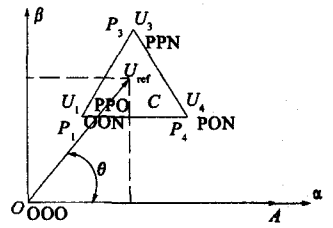


图6 U_{ref} 在C区内

$$\begin{cases} \overline{U}_{ref} T_s = \overline{U}_1 T_1 + \overline{U}_3 T_3 + \overline{U}_4 T_4 \\ T_s = T_1 + T_3 + T_4 \end{cases}$$

从而可求得

$$\begin{cases} T_1 = \left[1 - \frac{U}{E_d} \left(\cos \theta + \frac{\sin \theta}{\sqrt{3}} \right) \right] 2T_s \\ T_3 = \left(\frac{4U \sin \theta}{\sqrt{3} E_d} - 1 \right) T_s \\ T_4 = T_s - T_1 - T_3 = \frac{2U}{E_d} \left(\cos \theta - \frac{\sin \theta}{\sqrt{3}} \right) T_s \end{cases}$$

④当 U_{ref} 落在如图7所示的D区内,即三角形 $P_2P_4P_5$ 时, U_{ref} 可用与之靠近的3个空间矢量 (U_2, U_4, U_5) 合成,设 U_2, U_4, U_5 矢量作用时间分别为 T_2, T_4, T_5 , 则有

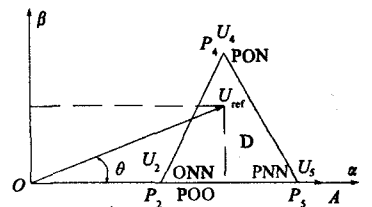


图7 U_{ref} 在D区内

$$\begin{cases} \overline{U}_{ref} T_s = \overline{U}_2 T_2 + \overline{U}_4 T_4 + \overline{U}_5 T_5 \\ T_s = T_2 + T_4 + T_5 \end{cases}$$

从而可求得

$$\begin{cases} T_2 = \left[1 - \frac{U}{E_d} \left(\cos \theta + \frac{\sin \theta}{\sqrt{3}} \right) \right] 2T_s \\ T_4 = \frac{4U \sin \theta}{\sqrt{3} E_d} T_s \\ T_5 = T_s - T_2 - T_4 = \left[\frac{2U}{E_d} \left(\cos \theta - \frac{\sin \theta}{\sqrt{3}} \right) - 1 \right] T_s \end{cases}$$

2.4 空间矢量的工作模式

①当 $U_{ref} \leq \frac{\sqrt{3}E_d}{4}$ 时, 参考矢量 U_{ref} 工作在三角形 A 中, 即 A 模式。

②当 $U_{ref} = \frac{E_d}{2}$ 时, 参考矢量 U_{ref} 工作在三角形 B 中, 即 B 模式。

③当 $\frac{\sqrt{3}E_d}{4} < U_{ref} < \frac{E_d}{2}$, 此时 U_{ref} 在三角形 A、B 间交互, 称为 AB 模式。通过三角形

运算可以得到切换角 θ_1 , 如图 8 所示, $\theta_1 = \arcsin(\frac{\sqrt{3}E_d}{4U_{ref}}) - \frac{\pi}{3}$ 。当

$U_{ref} \sin \theta_1 < U_\beta < U_{ref} \sin(\frac{\pi}{3} - \theta_1)$ 时, 矢量位于 B 中, 否则在 A 中。

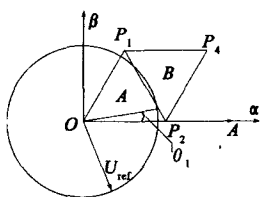


图 8 切换角

④当 $\frac{E_d}{2} < U_{ref} < \frac{\sqrt{3}E_d}{2}$, 此时 U_{ref} 在三角形 B、C、D 间交互, 称为 BCD 模式。同样通过三角形运算可以得到切换角 θ_2 , 如图 9 所示。

$$\theta_2 = \frac{\pi}{6} - \arccos(K + \sqrt{12 - 3K^2})/4, \text{ 其中 } K = \frac{\sqrt{3}E_d}{2U_{ref}}$$

当 $0 \leq U_\beta < U_{ref} \sin \theta_2$ 时矢量位于 D 中;

当 $U_{ref} \sin \theta_2 \leq U_\beta \leq U_{ref} \sin(\frac{\pi}{3} - \theta_2)$ 时矢量位于 B 中;

当 $U_\beta > U_{ref} \sin(\frac{\pi}{3} - \theta_2)$ 时矢量位于 C 中。

⑤ 当 $U_{ref} \geq \frac{\sqrt{3}E_d}{2}$, 此时 U_{ref} 只在三角形 C、D 间交互, 称为 CD 模式。当 $0 \leq U_\beta < \frac{U_{ref}}{2}$ 时, 矢量位于 D 区; 当 $\frac{U_{ref}}{2} < U_\beta \leq \frac{\sqrt{3}U_{ref}}{2}$ 时, 矢量位于 C 区。

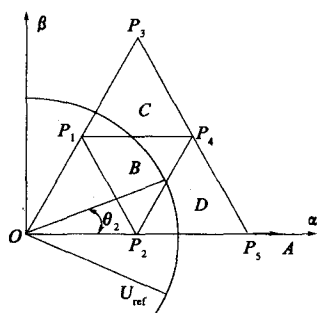


图 9 切换角 θ_2

2.5 开关顺序的选择

在每个 SVPWM 控制周期中, 为了减少逆变器开关元件的开关损耗, 需要合理安排输出电压矢量的作用顺序。输出电压的作用顺序应遵循以下原则:

①每相只能在状态 P 和 O 之间、O 和 N 之间相互切换, 但是不允许在状态 P 和 N 之间直接切换;

②一般不允许二相同时进行状态切换。参考电压矢量位于区域中, 如表 2 所示。

	A	B	C	D
1	POO	POO	POO	PPO
2	OOO	PON	PON	PPN
3	OON	PNN	OON	PPN
4	ONN	ONN	ONN	OON

由于用于合成的 4 个输出矢量的首发矢量都是正小矢量, 这样可以有效地避免扇区切换过程中发生矢量突变, 当然首发小矢量都是负矢量也可以, 只要将表 2 中 4 个输出矢量的次序颠倒一下即可。例如, 如果参考矢量位于三角形 B 中, 输出矢量的次序为:

POO → PON → PNN → ONN → PNN → PON → POO

如果首发矢量采用负的小矢量, 则发送次序为:

ONN → PNN → PON → POO → PON → PNN → ONN

3 仿真

通过以上分析及计算, 采用 Matlab7.0.1 为平台进行仿真分析。根据判断参考电压矢量所在扇区号, 确定系统内部电压矢量; 计算各个矢量的作用时间; 确定矢量作用顺序及 PWM 输出的步骤进行建模仿真。仿真参数如下: 阻感负载的电阻和电感分别为 10 Ω 和 20 mH, 电容 C_1 和 C_2 均为 1 250 μF, 直流侧电压为 3 000 V, 采样周期 T_s 为 0.5 ms, 输出频率为 50 Hz, 调制系数为 0.9。图 10 为相电压的仿真波形图, 图 11 为线电压、线电流和电容电压的仿真波形。

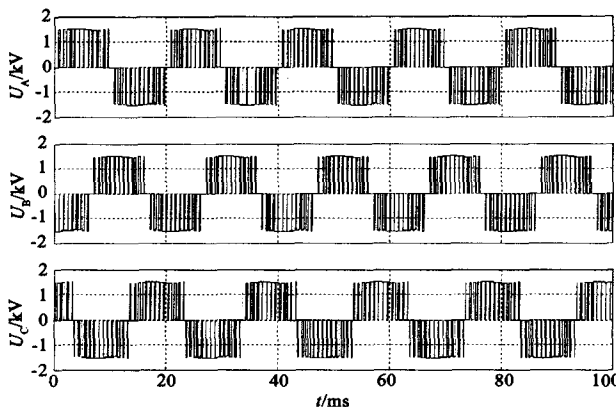


图 10 相电压的仿真波形

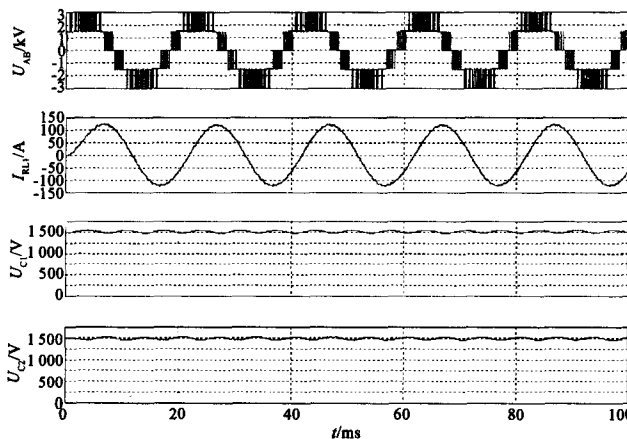


图 11 线电压、线电流和电容电压的仿真波形

4 结论

①空间电压矢量与输出电压之间存在一一对应关系, 利用这些关系可以求出最佳控制方案, 从而使输出电压波形接近于正弦。(下转第 55 页)

3 试验台改进建议

该试验台属于非标设备,在国内没有成熟的产品,也没有太多经验可循,在试验台调试的时候发现了许多问题,虽然有些已得到了改进,但有些由于是前期设计的原因,后期改动困难。在装卸简便、操作方便和提高准确性方面,该转向架试验台还可从以下几方面改进。

①对车轮称重时,该试验台测1个轮重只用了1个称重传感器,由于轮子对轨道的施力不一定一直保持垂直方向,有时施力角度可能会大于该传感器的最大允许角度,这样会造成称重误差加大。如对每个轮子称重时用3个组成一个平面的传感器组来进行测量,这样可大大避免出现误差的可能性。国外有相关设备采用过传感器组来进行测量数据的例子,该方法在本试验台的具体应用需进一步探讨。

②传感器在使用一段时间后都会出现测量误差增大的可能,一般使用一年就要对其进行校验和调整,传统的方法是把传感器拆下来送到专门的检验所去检验,然后再安装上去。由于安装定位对传感器的测量数据有很大影响,传感器反映到系统的实际误差比较误差大,而且无规律可循,这样对以后的维修保养和校验调整带来难度。可采用下面改造方案:生产制造一个标准的刚性转向架,它的各轮重和构架各高度、宽度的数值确定,当要对转向架试验台进行调整校验时,可以把该标准转向架放到试验工位上,控制软件设计一个对比功能,当系统测量数据与标准转向架实际数据相差到一定大小时,软件可以按一定比例关系进行调平调整。这样既可以省去拆下传感器及送检的工作,又尽可能地保证了长期使用该转向架的试验精度问题。不过该方法有待完善。

③试验台在进行模拟加载时,为了保证转向架左右两边同时受力,两加载液压缸的力平衡性应要求尽量高,这样才不会使先受力的一边产生预变形。目前的试验台由于液压阀件精度等方面的影响,两液压加载缸的同步性只能靠软件的控制去逼近。可以通过以下途径来改进:选用更高品质的液压阀件,保证两加载缸动作的同步性。

④该试验台支承轨道是架空在地面上的,每次对转向架进行试验时都要用10t天车起吊配合,这样不但费时费力,频繁地对转向架进行起吊也会使其各部件的间隙产生变化,这样也会影响试验数据。可考虑将该种试验台设计成地下式,即试验轨道与车间地面在一个平面上,并且该轨道接入到车间的轨道线里,这样在对转向架进行试验时,可以轻便、安全地操作,这样改造可大大提高生产效率。

4 结束语

城市轨道交通在我国还处于一个刚刚起步的阶段,相关配套设备、试验台的设计也无经验可循,许多东西还是借鉴国家铁路的经验。在对转向架进行检修时,传统的检修方法只是对其各部件进行保养和更换。由于转向架是一个复杂的弹性体,每个部件性能方面没问题并不能保证转向架的整体性能合乎运行要求,而且频繁地更换部件也会提高检修成本。有了转向架静压试验台,检修时就可通过做模拟试验测试出转向架的综合性能,以便提出合理的调整方法,达到保证转向架性能满足运行要求和节约维修成本的目的。

从2006年初开始至今,已有70多个转向架在该试验台上进行了试验,并对试验数据进行了有效的调整,基本达到预期要求,该试验台的使用为以后添加该类设备积累了大量经验。

由于地铁运输是一个受力动态变化的过程,客流量有时多,有时相对少,偏载规律也很难把握,轨道对转向架的各种冲击也是不可预见的,该转向架静压试验台只是模拟了地铁列车在静载时的承载状况,要对转向架进行更好的调整还需要检修人员通过使用该试验台进行大量的试验来从中摸索规律,找到真实运行时需调整加垫的经验数据。同时要使该试验台更好地发挥作用,检修时还得配合车轮镟床和一系弹簧(人字弹簧)试验台等设备使用,这样才能更好地发挥该试验台的作用。

参考文献:

[1] 邓星钟. 机车传动控制[M]. 武汉: 华中科技大学, 2005.

(上接第37页) ②由于高耐压的IGBT(或IPM)器件的迅猛发展,将不断地在各个场合取代GTO/BJT。

③利用Matlab/Simulink软件建立了整个系统的动态仿真模型,对三电平逆变器空间矢量控制方法进行了仿真,仿真结果证明了该控制方法是有效的,建立的模型是正确的。

参考文献:

[1] Roberto Rojas, et al. An Improved Voltage Vector Control

Method for Neutral-point-clamped Inverters[J]. IEEE Trans. Power Electron., 1995, 10(6).

[2] 陈效国. 三点式逆变器在磁通轨迹控制下主电路的分析[J]. 机车电传动, 1995(6): 13-19.

[3] Akira Nabae, Isao Takahashi Hirofumi Akagi. A New Neutral-Point-Clamped PWM Inverter[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1981, IA-1(5): 518-523.

[4] 王 辉, 聂卫民. 三电平逆变器的发展及应用[J]. 大众用电, 2004(2): 22-24.

[5] 田玉超, 刘 勇, 丛 望. SVPWM控制三电平逆变器算法研究[J]. 应用科技, 2005, 32(3): 34-36.