

文章编号 1004-924X(2004)04-0035-04

双极性 PWM 驱动在改善伺服系统低速性能中的应用

周长义, 刘琳, 葛文奇

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要: 低速性能是衡量转台伺服系统性能的重要指标之一, 提高转台低速性能的方法很多, 但都因复杂而影响其在工程中的应用。采用了在工程中简单易行的双极性 PWM 驱动控制来提高系统的低速性能。经分析和计算, 确定了双极性 PWM 驱动的结构和开关频率。实验结果表明双极性 PWM 驱动对改善方位轴伺服系统低速性能具有明显作用。

关键词: 三轴转台; 双极性 PWM 驱动; IGBT

中图分类号: TM384 **文献标识码:** A

Double-pole PWM driving applied to improvement of the low velocity property of servo control system

ZHOU Chang-yi, LIU Lin, GE Wen-qi

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: The low velocity property is an important factor in turn servo system. There are a lot of ways to improve it, but they are all very complex in engineering application. In this paper, double-pole PWM driving is applied to improving the low velocity property of the turn, which is very easy to realize in engineering. After analyzing and calculating, the structure and the open-close frequency of double-pole PWM driving are founded out. The experimental results show that the double-pole PWM driving considerably improves the low-speed performance of the azimuth axis servo control system.

Key words: three-axis turn; double-pole PWM driving; IGBT

1 引言

三轴模拟转台由方位轴、俯仰轴和滚转轴 3 个轴组成, 用来模拟飞机飞行姿态, 进而完成对被测机载光电设备的性能测试。低速特性是转台伺

服系统的重要指标之一。影响低速特性的因素有很多, 其中最主要的是摩擦力矩和电机波动力矩的干扰。对摩擦力矩的干扰, 一般采用摩擦力矩补偿方法, 通常在高性能控制系统中采用提高系统刚度的 PID 控制和其他补偿控制方法, 来降低摩擦力矩对系统低速特性的影响。但这些方法都

需要知道摩擦力矩的准确模型,这在工程实际中是比较困难的。

众所周知,起动摩擦力矩同库伦摩擦力矩之间的差值是关系到系统能否在极低速下运转的主要原因。这个差值越大,系统的低速性能越差。为此,在方位轴伺服系统中加入一个高频颤动信号来改善系统的摩擦特性,达到提高方位轴低速特性的目的。引入高频颤动信号是通过采用双极性 PWM 驱动方法来实现的。

目前,用大功率晶体管 PWM 控制的永磁式直流伺服电动机驱动装置,是高精度伺服控制领域应用得最为广泛的驱动方式。这种驱动方式的优点是:能够实现宽范围的速度和位置控制。PWM 驱动的原理是利用大功率晶体管的开关特性调制固定电压的直流电源,按 1 个固定的频率接通和断开,并根据需要改变 1 个周期内“接通”与“断开”事件的长短,通过改变直流伺服电动机电枢上电压的“占空比”来改变平均电压的大小,从而控制电动机的转速。PWM 驱动分为可逆和不可逆两大类,可逆 PWM 驱动又有双极模式、单极模式和受限单极模式,其中在伺服系统中采用双极模式可逆 PWM 驱动就可以在系统中加入高频颤动信号。

2 双极性 PWM 控制改善系统低速性能的原理

双极性 PWM 驱动在工程中有 H 型和 T 型两种,本文采用了 H 型双极性 PWM 驱动。H 型双极性 PWM 驱动的功率转换电路如图 1 所示。它由 4 个大功率晶体管 IGBT(V_1 、 V_2 、 V_3 、 V_4)和 4 个续流二极管(VD_1 、 VD_2 、 VD_3 、 VD_4)组成。4 个 IGBT 分为两组, V_1 和 V_4 为一组、 V_2 和 V_3 为另一组,同一组的 2 个 IGBT 同时导通、同时关断;两组 IGBT 交替地轮流导通和截止。亦即基极驱动信号 $u_1 = u_4$, $u_2 = u_3 = -u_1$ 。双极性 PWM 驱动的输出电压和电流如图 2 所示。由于允许电枢电流反向,所以双极性 PWM 驱动时电枢电流始终是连续的。

本文以电动机轻载情况为例,对 H 型双极性 PWM 驱动的工作过程进行描述(如图 2)。当 $0 \leq t < t_1$ 时, u_1 、 u_4 为正, V_1 、 V_4 导通; u_2 、 u_3 为负, V_2 、 V_3 截止。当电枢电压大于电机反电势($U_a >$

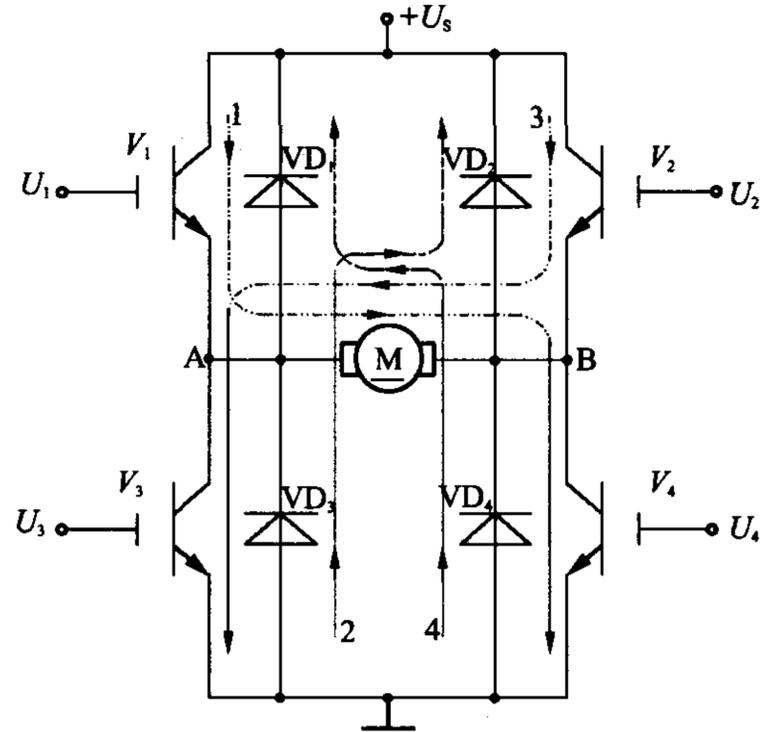


图 1 H 型双极性 PWM 功率转换电路

Fig. 1 Power conversion circuit of H double-pole PWM driving

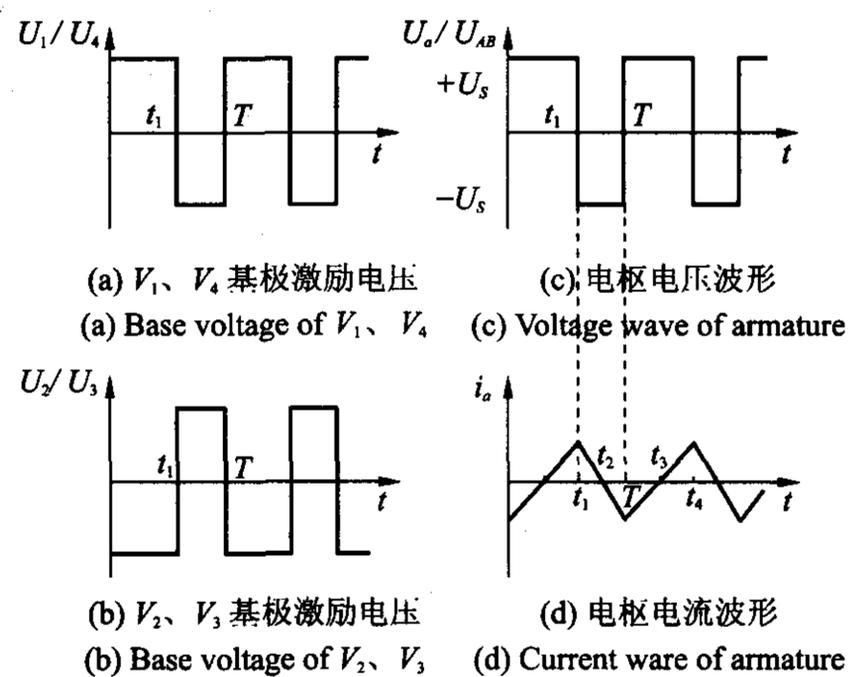


图 2 H 型双极性 PWM 的电压、电流波形(电机负载较轻时)

Fig. 2 Waves of voltage and current of H double-pole PWM with light load

E_g)时,电枢电流 i_a 沿回路 1(经 V_1 和 V_4)从 A 流向 B,电动机工作在电动状态。当 $t_1 \leq t < T$ 时, u_1 、 u_4 为负, V_1 、 V_4 截止; u_2 、 u_3 为正,在电枢电感 L_a 的作用下,电机电流 i_a 沿回路 2(经 VD_3 、 VD_2)继续维持电流在原方向从 A 流向 B,电动机仍然工作在电动状态。受二极管 VD_3 、 VD_2 正向导通电压降的限制, V_2 、 V_3 不能导通。假如在 $t = t_2$ 时刻正向电流 i_a 衰减到零,则在 $t_2 < t < T$ 期间, V_2 和 V_3 在电源 U_s 和反电势 E_g 的作用下导通,电枢电流 i_a 反向流通,亦即 i_a 沿回路 3(经 V_2 、 V_3)从 B 流向 A,电动机工作在反接制动状

态。在 $T < t \leq t_3$ 期间,晶体管基极电压变换极性, V_2 、 V_3 截止,电枢电感 L_a 维持电流 I_a 沿回路 4(经 VD_4 、 VD_1)继续从 B 流向 A,电动机仍工作在制动状态。假如在 $t = t_3$ 时刻,反向电流 ($-i_a$) 衰减到零,那么在 $t_3 < t < t_4$ 期间,在电源电压 U_s 作用下, V_1 、 V_4 导通,电枢电流 i_a 又沿回路 1(经 V_1 、 V_4)从 A 流向 B,电动机又在电动状态。由此可见,即使在轻载情况下,电枢电流仍然是连续的,不会出现电流断续现象,但其工作状态呈现电动和制动交替出现。如果电动机的负载较重,或者最小负载电流大于电流脉动量 Δi_a 。则在工作过程中 I_a 不会改变方向,电动机始终都工作在电动状态,电压和电流波形如图 3 所示。

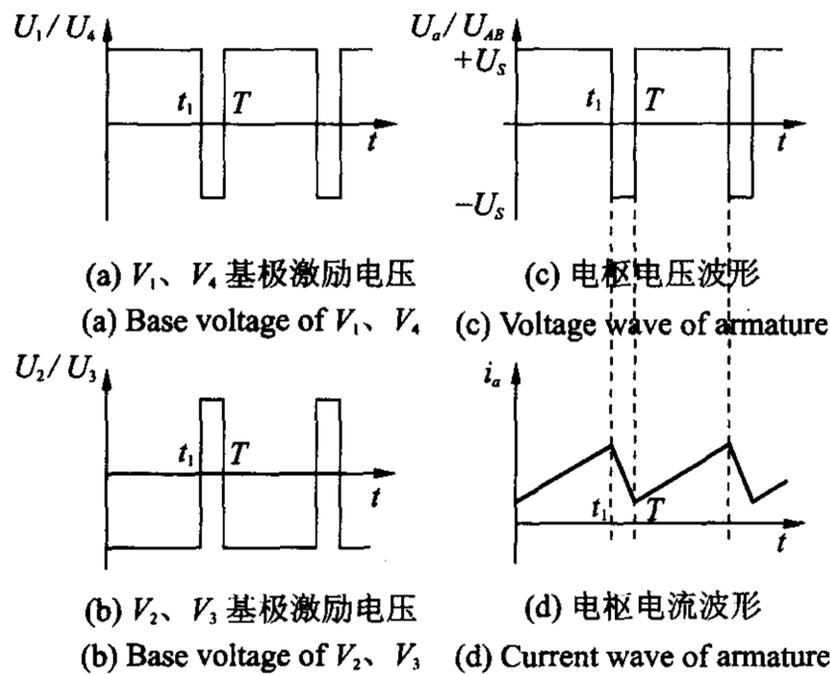


图 3 电机负载较重时的电压、电流波形

Fig. 3 Waves of voltage and current of H double-pole PWM with heavy load

通过上面的分析可知,电动机不论运行在何种工作状态,在 $0 \leq t < t_1$ 期间电枢电压 u_{AB} 总是等于 $+U_s$,而在 $t_1 \leq t < T$ 期间总是等于 $-U_s$,只不过导通的器件不同而已。在轻载情况下的工作过程分析可以说明,双极性 PWM 控制的电枢电流没有断续想象。即使电动机不转,电枢电压瞬时值 u_a 不等于零,而是正、负脉冲电压的宽度相等,电枢回路中流过一个交变的电流 I_a 。这个电流会使电动机发生微振,从而大大地改善负载的摩擦特性、提高系统的低速性能。

3 双极性 PWM 驱动的工程实现

目前,IGBT 栅极驱动方式主要有变压器驱动法、直接驱动法和光藕隔离驱动法。其中变压

器驱动法与其他两种方法相比较具有优点:响应快、利于信号的隔离和驱动功率的传输,缺点是:限制使用频率,但可以通过采用新型驱动模块加以克服。在工程中采用了 SEMIKRON 的 SKHI22AH4 驱动模块。SKHI22AH4 驱动模块就是利用变压器驱动原理,其最大开关频率为 100 kHz,完全解决了限制使用频率问题。同时还具有多种短路、过流等保护功能。一个 SKHI22AH4 模块中有 2 个输入和 2 个输出,1 个输入对应一个输出,每对输入和输出之间在模块内部由变压器隔离。在三轴模拟转台的方位轴的双极性 PWM 驱动中使用了 2 块 SKHI22AH4 模块,分别控制 V_1 和 V_3 、 V_2 和 V_4 ,如图 4 所示。其中 SKHI22AH4 模块的外围电路具有负载短路保护、欠压保护和过热保护的作用。

双极性 PWM 开关频率的合理选择,对于系统性能和电气指标要求的影响是相当重要的。合理的开关频率可以使系统低速平稳特性得到改善、效率得到提高,而且其性能与连续系统时并无差别。但是,开关频率的确定,受到很多相互矛盾的因素决定:

(1)为了改善静摩擦对伺服系统低速性能的影响、使得电动机在零位处于动力润滑状态,则双极性 PWM 工作时考虑微振特性的开关频率应满足公式(1);

(2)为了使开关频率不至于对系统的动态性能产生不良影响,频率应远大于伺服系统本身的通频带 f_c ,一般应满足公式(2);

(3)为了避免引起共振,开关频率应该高于系统中所有回路的谐振频率;

(4)为了提高电动机的利用率,必须限制电流脉动量 ΔI_a ,应该满足公式(3);

(5)开关频率的上限要受到 IGBT 的开关损耗和开关时间的限制;

(6)为防止共态穿通,须引入延时,从而限制了开关频率的上限。

$$f < \frac{K_T U_s}{4L_a T_f}, \quad (1)$$

$$f > (10 \sim 30) f_c, \quad (2)$$

$$f \gg \frac{R_a}{2\pi L_a}. \quad (3)$$

对于三轴模拟转台的方位轴,力矩系数 K_T

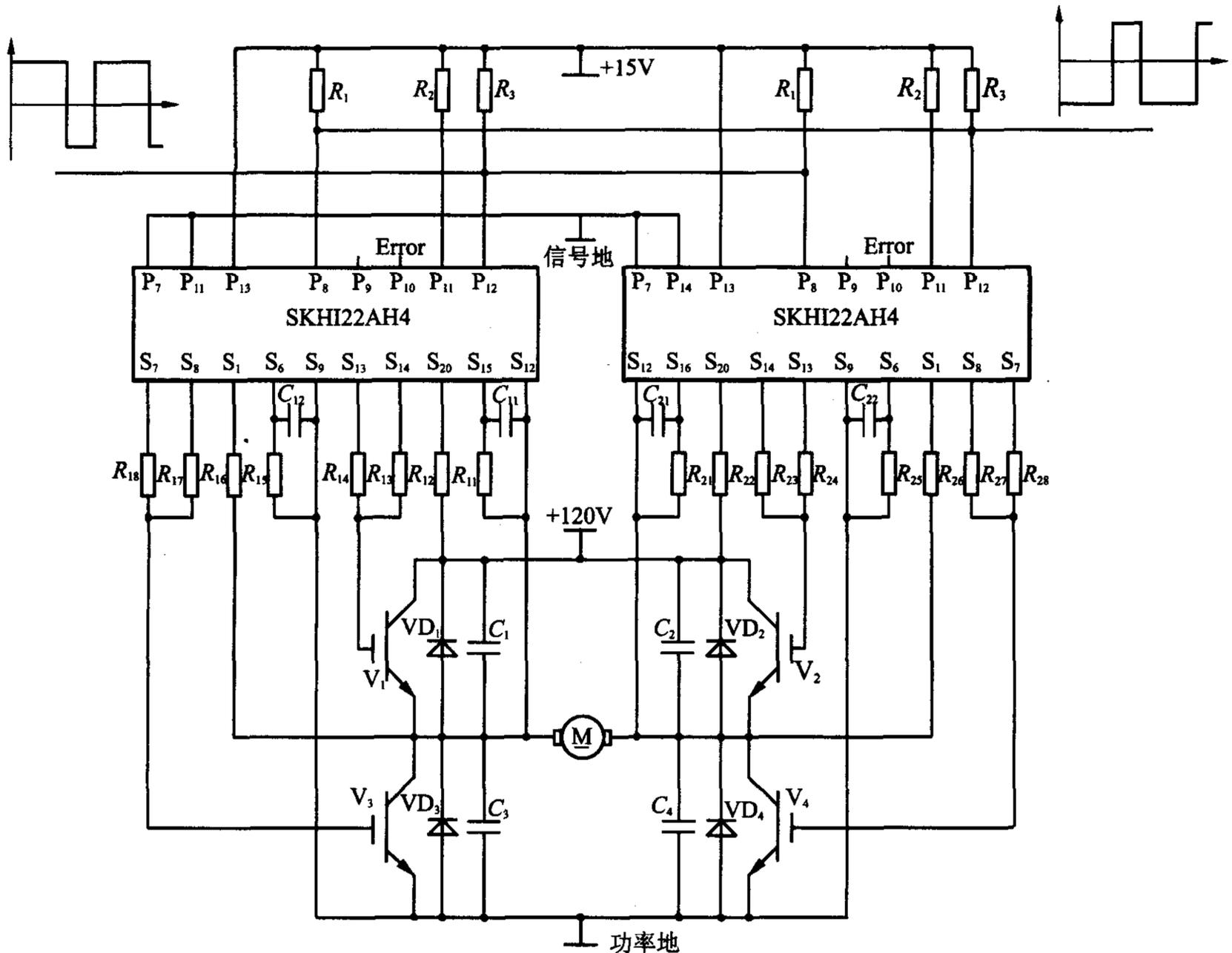


图 4 双极性 PWM 驱动图

Fig. 4 H double-pole PWM driving

$=6.3 \text{ N} \cdot \text{m}/\text{A}$, 固定电压 $U_s = +120 \text{ V}$, 电枢电阻 $R_a = 2.4 \Omega$, 电枢电感 $L_a = 8 \text{ mH}$, 静摩擦力矩 $T_f = 9.7 \text{ N} \cdot \text{m}$, 截止频率 $f_c = 34 \text{ Hz}$ 。为提高电机利用率、降低电枢回路的附加损耗, 应该尽量提高开关频率; 而为提高功率转换效率、减小开关过程中 IGBT 的动态损耗, 应该尽量降低开关频率。实际中, 由于方位轴的转动惯量很大(方位轴的载重为 4.5 t), 所以应侧重于提高功率转换效率。通过计算和综合分析, 方位轴的双极性 PWM 驱动的开关频率定为 400 Hz 。

4 试验结果与结论

在保证速度精度为 $4' / \text{s}$ 的前提下, 采用可逆单极性 PWM 驱动时方位轴的最低平稳速度为 $0.06^\circ / \text{s}$, 而采用双极性 PWM 驱动时方位轴的最低平稳速度为 $0.03^\circ / \text{s}$ 。这说明, 采用双极性 PWM 驱动使得方位轴伺服系统低速性能得到了明显的改善, 并且这种方法在工程中十分简单易行、具有很强的实际应用价值。

参考文献:

- [1] NED M, UNDELAND T M, ROBBINS W P. *Power electronics* [M]. New York: JOHN Wiley & Sons, Inc, 1995.
- [2] 王世杰. IGBT 栅极驱动技术探讨[J]. 光学精密工程, 2000, 8(1): 76-78.
WANG SH J. Technique of IGBT gate driving[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2000, 8(1): 76-78. (in Chinese)
- [3] 秦继荣, 沈安俊. 现代直流伺服控制技术及其系统设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
QING J R, SHEN An-jun. *Modern direct current servo control technique and system design* [M]. Beijing: Machinery Industry Publishing Company, 2002. (in Chinese)
- [4] 陈娟. 伺服系统低速特性与抖动补偿研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2001.
CHEN J. *Study on the velocity properties and jitter compensation for the servo system* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, 2001. (in Chinese)

作者简介: 周长义(1975—), 男, 黑龙江人, 博士生, 主要研究方向为机载光电平台的稳定与跟踪研究。