

# 机载光电平台低速问题研究

侯云海<sup>1,2</sup>, 王志达<sup>1</sup>, 胡晓光<sup>3</sup>

(1. 长春工业大学 电气与电子工程学院, 长春 130012;

2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130022; 3. 松原油田供电公司, 松原 138000)

**摘要:** 机载光电平台伺服系统(AOEP)在低速时因受载机的姿态变化、振动和风阻转矩的影响, 会对光电平台中观测设备的清晰成像产生明显的干扰。本文首先对机载光电平台的影响因素进行了分析, 特别对电机在零位时的转速和位置颤动原因进行了理论阐述, 提出了双模式 PWM 功率控制方案, 采用工控机和 IPM 驱动模块等构成了一个机载光电平台伺服系统。通过在实际课题中的测试实验, 表明了对抑制系统零速的位置颤抖有较好的控制作用, 对其它伺服系统低速及定位性能有特殊需求的电力拖动系统 also 具有很高的实用价值。

**关键词:** 光电平台; 位置颤动; 伺服系统; 双极模式

中图分类号: TP273

文献标识码: A

文章编号: 1672 - 9870 ( 2007 ) 03 - 0056 - 04

## Study on Low-Speed Problem of Airborne Opto-Electronic Platform

HOU Yunhai<sup>1,2</sup>, WANG Zhida<sup>1</sup>, HU Xiaoguang<sup>3</sup>

(1. School of Electric & Electronic Engineering, Changchun University of Technology Changchun 130012;

2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences Changchun 130022;

3. Power-Supply Corporation of Oil Field in SongYuan Songyuan 138000)

**Abstract:** The problem of stabilization and position control for the AOEP system at low speed is influenced by the torque of friction, etc. And it will obviously influence the effect of observation equipments in AOEP system. In this paper, a control scheme with PWM mode based on the double-pole drive circuit and servo control system composed of the computer and IPM drive module is presented to deal with the low speed. By practical test, it shows that the design has the better effect to restrain the position quiver in low speed. At the same time, it has the better value to the servo system which has the special requirements to low speed and position.

**Key words:** Opto-Electronic Platform; position quiver; servo system; double-pole mode

近几年, 机载光电平台被广泛地应用于军事领域和公安、消防以及环境监控、海难救助等民用领域。由于机载光电平台系统装载在飞机上, 载机的姿态变化、振动和飞行中的风阻力矩会造成视轴指向不稳定, 从而对光电平台中观测设备的清晰成像产生显著影响; 而系统在低速工作时, 当系统运转速度低于某一临界值时, 其运动速度呈现脉动, 即出现低速不平稳现象。在一定的误差范围内, 光电平台的稳定以及最低平稳速度将是衡量机载光电跟

踪设备的重要标志, 因此低速抖动问题是机载光电平台伺服系统研制的主要课题之一。

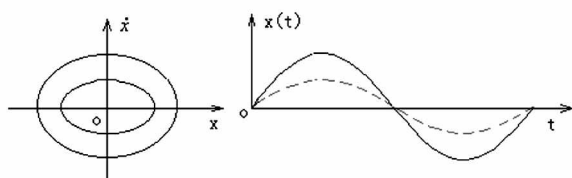
实际工作和理论研究发现, 光电平台伺服系统的硬件驱动电路, 亦是影响低速平稳性的重要因素。大功率晶体管 PWM 控制的直流伺服电机驱动装置, 是高精度伺服控制领域应用的最为广泛的驱动形式。研究 PWM 驱动装置的特性, 各种工作模式及供电电源对其输出特性的影响等, 对低速及定位性能有特殊要求的电力拖动系统的实现都具有很

高的实用价值。

## 1 光电平台中的摩擦非线性分析

当光电平台伺服系统极低速运行或零点定位时,由于系统摩擦、间隙等非线性因素的影响,有可能存在自激振荡的现象。如果这种自激振荡是稳定的,则可用非线性系统的相平面法表示为一个稳定的极限环。在直接驱动的 PWM 光电平台伺服系统中,亦即电机是直接驱动负载而不是通过齿轮减速驱动负载的,宏观上并没有产生自激振荡的间隙效应,因此我们认为摩擦非线性是产生自激振荡主要因素。

摩擦非线性可用库仑摩擦模型的滞—滑特性(静-动摩擦)来描述:因为任一物体都不是绝对光滑的,所以微观上,在两个接触物体之间,每个物体的表面可以想象为由一系列锯齿(mountains)组成,这些锯齿在表面上互相嵌入,而锯齿高度、互相渗透程度以及齿峰之间的距离则依赖于两个接触物体之间的润滑程度。当两个物体之间没有相对运动时,摩擦力是位置的函数,用“滞”特性(静摩擦)来描述,此时可用传动机构的间隙效应来解释两个物体之间的运动关系。当滑动体 A 正向转动  $\theta_c$  而未越过间隙  $b$  时,两物体之间没有相对运动,这相当于伺服系统的死区段,之后两物体之间有相对运动,“滞”特性被打破,这种相对运动用“滑”特性(动摩擦)来描述,即摩擦力是速度的函数。PWM 直流伺服系统在极低速运行或零点定位时,“滞”特性(静摩擦)和“滑”特性(动摩擦)决定一个最小运动距离  $x$ ,如果 PWM 直流伺服系统的主动力矩不能克服这个最小运动距离  $x$ ,则系统将发生振荡,即仪器反复滑动。若为稳定的自激振荡,则可用非线性系统的相平面法表示为一个稳定的极限环,如图 1 所示<sup>[1-3]</sup>。



(a) 相平面图 (b) 自由运动解

图 1 稳定的极限环

Fig.1 The stable limit cycle

其数学表达式为:

$$\frac{\dot{x}_2}{A} + \frac{x^2}{\omega_n} = 1 \quad (1)$$

其中,  $A = \dot{x}_0^2 + \omega_n^2 x_0^2$  自激振荡的振幅,  $\omega_n$  为频率,  $\dot{x}, x$  为初始条件。

## 2 双极模式 PWM 功放的低速特性

由于 PWM 直流伺服系统的低速非线性主要由摩擦力矩产生,对其抑制即是对摩擦力矩的补偿。单极模式下的电流脉动比较小,有利于电动机的换向和减小热损耗,但在系统低速运行或过零时,由于电动机无零位振颤效应,不能克服由摩擦引起的系统低速抖动以及零位时的极限环效应。双极模式在一个执行周期内作用到电机电枢上的电压极性是正负交替的,可以有效克服 PWM 直流伺服系统的低速抖动和零位极限环<sup>[4]</sup>,双极 PWM 放大器硬件电路如图 2 所示。

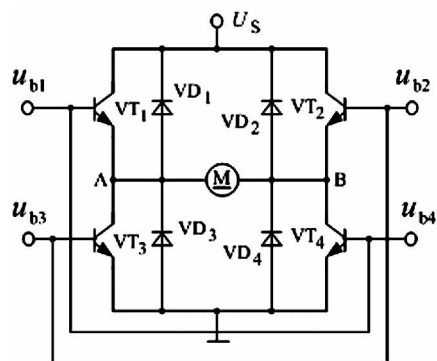


图 2 H 型双极 PWM 功率放大硬件电路

Fig.2 The H-type power amplifying circuit of PWM wave

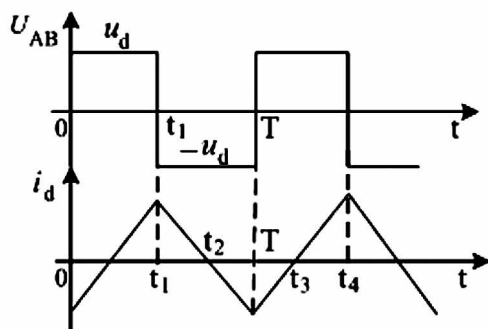


图 3 H 型双极模式 PWM 电压、电流波形

Fig.3 The wave form of voltage and current for H-type and double-pole mode

图 2 中基极 PWM 驱动信号  $u_{b1} = u_{b4}$ ,  $u_{b2} = u_{b3}$ ,  $u_{b1} = u_{b2}$ , 执行周期  $T$ , 大功率晶体管  $VT_1$ 、 $VT_4$  同时工作,  $VT_2$ 、 $VT_3$  同时工作,  $VD_1$ 、 $VD_2$ 、 $VD_3$  和  $VD_4$  是续流二极管。H 型双极 PWM 工作模式在低速或零位时电机两端的输出电压  $U_{AB}$  和电流  $i_d$  波形如图 3 所示。可以看到电流  $i_d$  是一个周期为  $T$  的三角波,其表达式为:

$$i_d = \begin{cases} (2\frac{t}{T} - \frac{1}{2})\Delta i_{d.\max} & 0 \leq t < \frac{T}{2} \\ (1 - \frac{2t}{T} + \frac{3}{2})\Delta i_{d.\max} & \frac{T}{2} \leq t < T \end{cases} \quad (2)$$

若适当地选择执行周期  $T$ , 这个电流会在电机中引起微振, 相当于动态润滑, 大大减小了或消除了“滞”特性(静摩擦)和“滑”特性(动摩擦)决定的最小运动距离  $x$ , 这就大大改善了系统的摩擦特性, 进而抑制极限环现象。

### 3 双极模式 PWM 电机运行时的微振特性分析

在带有摩擦的伺服系统中, 启动转矩同摩擦转矩之间的差值是关系到系统能否在极低转速下运行的主要原因, 这个差值越大, 系统低速性能越差。为了提高系统的低速性能, 常常在系统中加入一个高频颤动信号来改善摩擦特性, 而双极 PWM 系统在零位时正具有这种有利于克服静摩擦力矩的高频微振特性<sup>[5]</sup>。

电动机转矩平衡方程式为:

$$T_M = J \frac{d\omega_M}{dt} + B\omega_M \quad (3)$$

式中  $J$ —电动机转动惯量与负载转动惯量之和;

$B$ —粘性阻尼系数;

$\omega_M$ —电动机的角速度。

反映的频率特性为:  $\frac{\omega_M(j\omega)}{T_M(j\omega)} = \frac{1}{J(j\omega) + B}$

当  $\omega$  很高时,  $J(j\omega) \gg B$ , 此时电机的高频特性可以精确的近似为

$$\frac{\omega_M(j\omega)}{T_M(j\omega)} \approx \frac{1}{J(j\omega)}$$

即  $T_M(j\omega) = J(j\omega)\omega_M(j\omega)$ ,

$$T_M = J \frac{d\omega_M}{dt} = \frac{d^2\theta_M}{dt^2} \quad (4)$$

式中  $\theta_M$ —电动机零位微振时的角位移。

又由电机的转矩公式

$$T_M = (2\frac{t}{T} - \frac{1}{2})K_T\Delta i_{a.\max} \quad 0 \leq t < \frac{T}{2}$$

$$T_M = (-\frac{2t}{T} + \frac{3}{2})K_T\Delta i_{a.\max} \quad \frac{T}{2} \leq t < T \quad (5)$$

得到电机的转速表达式

$$\omega_M(t) = \frac{K_T}{J} (\frac{t^2}{T} - \frac{1}{2}t) \Delta i_{a.\max} \quad 0 \leq t < \frac{T}{2}$$

$$\omega_M(t) = \frac{K_T}{J} (-\frac{t^2}{T} + \frac{3}{2}t - \frac{T}{2}) \Delta i_{a.\max} \quad \frac{T}{2} \leq t < T \quad (6)$$

进一步得到电机角位移表达式

$$\theta_M(t) = \frac{K_T}{J} (\frac{t^3}{3T} - \frac{1}{4}t^2) \Delta i_{a.\max} \quad 0 \leq t < \frac{T}{2}$$

$$\theta_M(t) = \frac{K_T}{J} (-\frac{t^3}{3T} + \frac{3}{4}t^2 - \frac{T}{2}t + \frac{T^2}{12}) \Delta i_{a.\max} \quad \frac{T}{2} \leq t < T$$

综合上式可得到电机在零位时的转速最大颤动量和最大角位移为:

$$\Delta \omega_{M.\max} = \frac{K_T u_s T^2}{16 J L_a} = \frac{\omega_0}{16} \cdot \frac{T^2}{T_m T_e} \quad (8)$$

$$\Delta \theta_{M.\max} = \frac{K_T u_s T^3}{96 J L_a} = \frac{\omega_0}{96} \cdot \frac{T^3}{T_m T_e} \quad (9)$$

式中  $K_T$ —电机转矩系数;

$T_m$ —电机机械时间常数;

$T_e$ —电机电磁时间常数;

$\omega_0$ —电机理想空载转速;

由式(8)、(9)可以看出, 电机在零位时的转速和位置颤动与开关频率有关。所以根据系统的精度要求, 只要选择合适的开关频率, 满足系统的高频振荡转矩, 则可克服系统的摩擦力矩, 减小伺服系统的死区, 改善低速平稳性。

### 4 机载光电平台 PWM 直流伺服控制系统的构成

数字化的 PWM 伺服系统组成如图 4。控制计算机采用工控机 Pentium III 6140, 具有 5 个 ISA 总线插槽和 4 个 PCI 总线插槽。通过 PCI-134 串口卡采集编码器数据; PCI-1780 定时/计数卡产生 PWM 波后, 向功率级发送 PWM 波以及方向信号; 由 PCI-1716 A/D 卡, 读取测速机信息<sup>[6]</sup>。

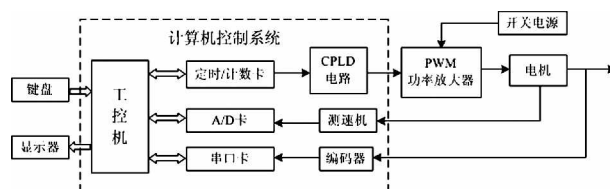


图 4 系统硬件结构框图

Fig.4 The hardware block of system

### 5 系统控制软件

系统的软件流程图如图 5 所示。

### 6 实验结果及结论

在位置和速度闭环的条件下, 取输入信号为单位斜坡信号, 分别针对单极和双极的情况进行了实验, 测得的位置曲线如图 6、7 所示。可以看出在低速情况下, 双极模式 PWM 控制时系统输出曲线较平滑, 较好的减小了静摩擦力矩造成的系统死区范围, 零速时的微振特性大大改善了系统的低速性能。

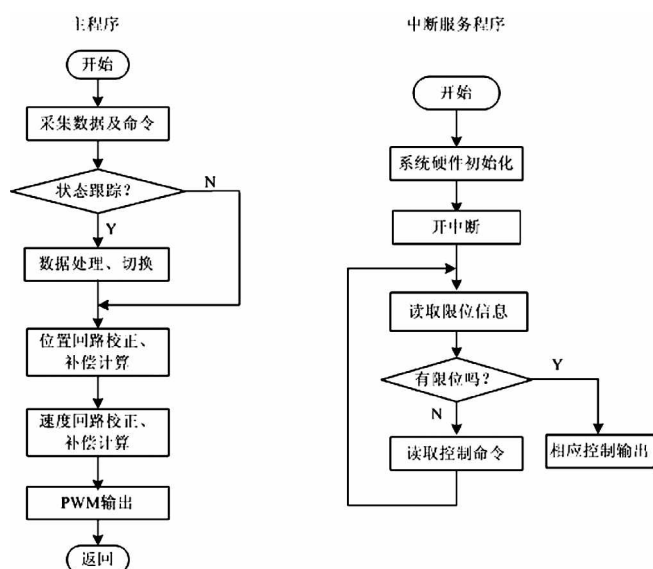


图5 系统控制程序流程图

Fig.5 The flow chart of control programme

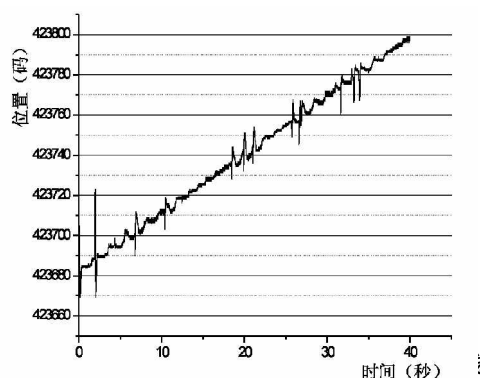


Fig.6 The position curve of servo system at low speed with double-pole mode

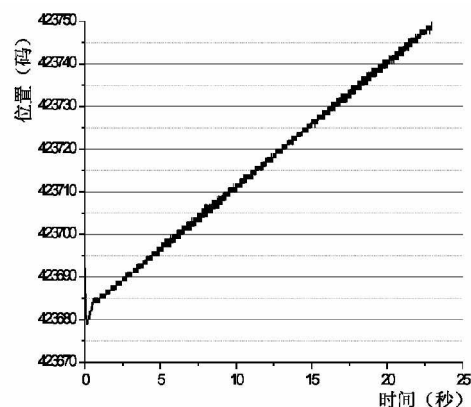


图7 双极情况下伺服系统低速时的位置曲线

Fig.7 The position curve of servo system at low speed with single-pole mode

## 参考文献

- [1] Armstrong B , Dupont P , Caudes de Wit C. A Survey of Models , Analysis Tools and Compensation Methods for the Control of Machines with Friction [ J ]. Automatica , 1994 , 30 ( 7 ) : 1083 - 1138.
- [2] Bernard W , and Eugene W. Adaptive Inverse Control , Stanford University , California , 1996 : 114.
- [3] Torben A. " The servo system of the EISCAT svalbard antenna , " SPIE , 2479 , 1995 : 301 - 312.
- [4] 陈娟. 伺服系统低速特性与抖动补偿研究 [ D ]. 长春 : 中科院长春精密机械与物理研究所. 2001.
- [5] 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, 1999.
- [6] 毕永立. 多框架光电平台控制系统研究 [ D ]. 中国科学院研究生院博士学位论文, 2003 .

(上接第 65 页)

被测件的转动惯量相对误差为:

$$\mu_{Jd} = 2 \times 13.0 \times 3 \times 10^{-5} = 7.8 \times 10^{-4}$$

#### 4 结论

按公式(4)通过大量数值计算,可得到 $\mu_{Jd}$ 随 $K_1$ 、 $K_2$ 变化的情况,并由此概括出如下几点主要结论:

(1) 若 $T_0$ 测量精度为 $1 \times 10^{-5}$ 秒,且 $\mu_{T_0} \leq 2 \times 10^{-5}$ ,则 $K_1$ 、 $K_2$ 应取大于0.3,可保证 $\mu_{Jd} < 1 \times 10^{-3}$ (认为 $\mu_{J_s} = 0$ );

(2)  $J_{0max} < 3.3J_d$  托盘的转动惯量,否则会造成误差超限。这一点对弹丸小转动惯量的测量,要特别注出;

(3) 标准件的转动惯量 $J_s > 0.3 J_0$ ;

(4) 被测件的转动惯量 $J_d \geq J_s$ ,这对标准件惯量的确定有实际意义。

## 参考文献

- [1] 车英,李占国,陈礼华. 弹丸转动惯量测试系统及其误差分析 [ J ]. 兵工学报, 2000, 21(1): 42 - 44.
- [2] 李化义,张迎春,李葆化. 高精度转动惯量测量仪分析与设计 [ J ]. 计量学报, 2004, 25(3): 17 - 18.
- [3] 于辉,曲铁平. 实验测试转动惯量的方法与分析 [ J ]. 沈阳工业学院学报, 2003(03): 69 - 71.
- [4] 顾强,张亚,孙运强. 弹体的质量、质心及质偏测试系统 [ J ]. 弹箭与制导学报, 2003(3): 6 - 8.
- [5] 李慧鹏,唐文彦,张春富,等. 导弹转动惯量测试系统及误差分析 [ J ]. 兵工学报, 2007(2): 86 - 89.