

文章编号: 1003-501X(2009)08-0001-04

数字光电跟踪系统定位时的自激振荡及其抑制

陈娟^{1,2}, 王建立²

(1. 长春工业大学 电气与电子学院, 长春 130012;

2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 光电对抗部, 长春 130033)

摘要: 由于某些非线性的影响, 数字光电跟踪系统定位精度大大降低, 因此相应的非线性补偿方法研究势在必行。本文以数字化光电跟踪系统为研究对象, 首先进行了电视跟踪定位时影响定位精度的等效间隙非线性分析, 给出了两种主要非线性的理论表达式, 即量化非线性和光电探测器滞后非线性, 然后采用描述函数法对实测定位自激振荡进行了定量分析, 最后确定了双极工作模式的 PWM 功率驱动器。在实际的数字化光电跟踪系统定位实验研究中, 定位误差的最大峰-峰值小于 22.23", 表明双极 PWM 驱动器的零位振荡特性, 对数字控制系统的自激振荡起到了很好的抑制作用。

关键词: 光电跟踪系统; 自激振荡; 补偿; PWM

中图分类号: TP275

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1003-501X.2009.08.001

Positioning Self-oscillation and Its Restraint in a Digital Optoelectronic Tracking System

CHEN Juan^{1,2}, WANG Jian-li²(1. *Electronic and Electric School, Changchun University of Technology, Changchun 130012, China;*2. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*)

Abstract: For a specified digital optoelectronic tracking system, we analyze a kind of equalized clearance nonlinearity generated by the quantification and optoelectronic sensor delay when the system is in TV tracking mode. Two main theoretical expressions of nonlinearity are shown. Then, the measured self-oscillation is characterized with the description function. The double mode PWM driver is used in the digital optoelectronic tracking system. In positioning experiments, the maximum peak-peak value of positioning error is less than 22.23". The results show that zero-jitter feature of the double mode PWM driver can greatly restrain the self-oscillation nonlinearity.

Key words: optoelectronic tracking system; self-oscillation; compensation; PWM

0 引言

为实现激光反卫光电跟踪系统对恒星的精确定位, 要求地面数字跟踪系统伺服工作在凝视工作方式且具有很高的定位精度, 而定位时的自激振荡问题一直是提高系统跟踪精度的一个重大障碍。

为实现精确定位, 可采用软件控制补偿技术, 其实质是改变系统连续部分的传递函数, 使系统在定位时不满足自激振荡形成的条件, 而气悬浮、磁悬浮等机械方法是提高跟踪系统的润滑程度^[1]。在数字控制系统中外加一频率为采样频率整数倍的正弦信号, 可以消除一定模式的极限环^[2-4]。本文以数字化光电跟踪系统为研究对象, 通过实验测定了定位自激振荡波形, 并用描述函数法对其进行了定量描述。进行了双极工作模式 PWM 驱动器对数字光电跟踪系统定位自激振荡抑制研究。实验证明, 该 PWM 驱动器的零位振

收稿日期: 2008-11-02; 收到修改稿日期: 2009-03-20

基金项目: 中科院三期创新基金资助项目(065X32C060)

作者简介: 陈娟(1962-), 女(汉族), 吉林长春人。研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事光电跟踪与计算机控制的研究。

E-mail: stjanzhy@hotmail.com。

颤特性, 相当于在定位时给系统加入了动力润滑, 克服了摩擦力, 进而提高了定位精度。

1 数字光电跟踪系统中的自激振荡

典型的数字化光电跟踪伺服系统组成如图 1 所示。

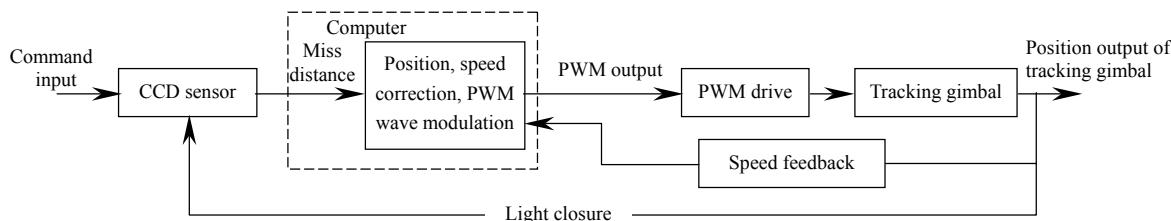


图 1 数字化光电跟踪系统组成方框图

Fig.1 Diagram of the optoelectronic tracking system

它由 CCD 光电传感器、位置回路校正、速度回路校正、等效复合控制补偿环节、单极工作模式的 PWM 功率放大器以及被控跟踪架组成。由 CCD 传感器和信号处理电路组成的传感器系统, 通过光学闭会将输入信号与输出信号比较得到位置误差(脱靶量)。位置校正放大环节、速度校正放大等由计算机实现, PWM 功率放大环节可近似看作比例环节, 被控对象是跟踪架转台, 光电编码器给出位置信息。

由于某种非线性性的存在, 数字光电跟踪伺服系统定位时产生了自激振荡。图 2 是检测到的自激振荡波形, 振幅 A 近似为 43 code (每个 code 代表 $1.24''$), 频率 ω 为 $20 \text{ Hz}(2 \times 10^8 \text{ code/s})$, 基准线是 14 code。

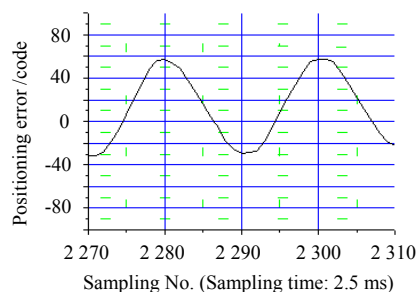


图 2 定位时的自振荡波形测量图

Fig.2 Measured positioning self-oscillation

2 自激振荡产生的原因——等效间隙非线性

控制系统中的间隙非线性一是增大了系统的稳态误差, 相当于死区的影响; 二是使系统过渡过程的振荡加剧, 甚至使系统变为不稳定, 这可以用间隙特性在正弦信号的作用下的输出波形来解释^[4]。对于图 1 所示的数字化光电跟踪伺服系统, 产生自激振荡的可能原因, 是系统中的量化噪声和传感器滞后两种主要非线性综合表现出的等效间隙非线性。

2.1 量化非线性

数字控制系统中的量化误差源包括 A/D 转换误差; 参数和系数的存贮误差以及乘法运算所产生的截尾或舍入误差。A/D 量化非线性可视为多个带死区继电器特性并联而成的等效非线性; 参数和系数的存贮精度受存贮单元字长的制约, 因此会产生量化误差; 用定点或浮点所表示的小数的运算中, 将产生截尾量化误差。

2.2 光电传感器滞后非线性

光电传感器的数学模型包括延时环节和采样保持环节。延时环节 $e^{-s\tau}$ 给系统带来的相位滞后为 $\varphi = -\omega\tau$, 采样保持环节 $(1 - e^{-s\tau_0})/s$ 带来的相位滞后为 $\varphi = -\omega\tau_0/2$, 其中 ω 是系统位置开环的剪切频率。当 ω 、 τ 以及 τ_0 已知时, 系统的相位滞后值可以求出。

3 用描述函数法描述定位时的自激振荡

当两个非线性环节串联时, 需先求出各自的非线性函数, 然后根据等效的非线性特性求出总的描述函数。对于图 1 所示的数字化光电跟踪伺服系统, 非线性环节的串联次序为一个延时、采样保持非线性环节与死区非线性环节相串联, 其等效的非线性环节为既有延时滞后又有死区的非线性特性, 故总的描述函数

为一个间隙非线性特性。

图 1 的非线性系统结构如图 3 所示, 其中间隙非线性特性的参数未知, 现在系统存在自激振荡, 并已知其振荡幅值和频率, 根据描述函数的分析方法, 在振荡点可以求出间隙特性的典型参数。

已知间隙非线性特性的描述函数为

$$N(A) = \frac{K}{\pi} \left\{ \left[\frac{\pi}{2} + \arcsin\left(1 - \frac{2b}{A}\right) \right] + j \frac{4Kb}{\pi A} \left(\frac{b}{A} - 1 \right) \right\} \quad (1)$$

其中 $A \geq b$ 。在实际应用中, 常引入相对描述函数的概念, 即将描述函数中部分非线性参数分离出来, 乘到线性部分中去, 描述函数所剩部分的非线性参数都以相对值的形式出现。即:

$$N(A) = \frac{K}{\pi} \left\{ \left[\frac{\pi}{2} + \arcsin\left(1 - \frac{2b}{A}\right) + 2\left(1 - \frac{2b}{A}\right) \sqrt{\frac{b}{A} \left(1 - \frac{b}{A}\right)} \right] + j \frac{4b}{A} \left(\frac{b}{A} - 1 \right) \right\} = K_0 N_0(A) \quad (2)$$

式中: $K_0 = \frac{K}{\pi}$ 为尺度系数, $N_0(A) = \left[\frac{\pi}{2} + \arcsin\left(1 - \frac{2b}{A}\right) + 2\left(1 - \frac{2b}{A}\right) \sqrt{\frac{b}{A} \left(1 - \frac{b}{A}\right)} \right] + j \frac{4b}{A} \left(\frac{b}{A} - 1 \right)$ 为相对描述函数, 相对负倒数描述函数为 $-\frac{1}{N_0(A)}$ 。把 $\frac{b}{A}$ 作为一个变量, 此时得到 $-\frac{1}{N_0(A)}$ 的标准化曲线当 $\frac{b}{A}$ 从 1 变到 ∞ 时, $-\frac{1}{N_0(A)}$ 的全部函数值可以预先算出来。采用相对描述函数后, 系统的特征方程改写为

$$1 + K_0 G(j\omega) N_0(A) = 0 \quad (3)$$

产生自振荡的条件为

$$K_0 G(j\omega) = -\frac{1}{N_0(A)} \quad (4)$$

系统线性部分的频率特性为

$$K_0 G(j\omega) = \frac{K_0 \cdot 1600 (0.28j\omega + 1) (0.30j\omega + 1)}{j\omega (2.4j\omega + 1) (2.5j\omega + 1) (0.0028j\omega + 1)} \quad (5)$$

则

$$\frac{K_0 \cdot 1600 (0.28j\omega + 1) (0.30j\omega + 1)}{j\omega (2.4j\omega + 1) (2.5j\omega + 1) (0.0028j\omega + 1)} = -\left\{ \left[\frac{\pi}{2} + \arcsin\left(1 - \frac{2b}{A}\right) + 2\left(1 - \frac{2b}{A}\right) \sqrt{\frac{b}{A} \left(1 - \frac{b}{A}\right)} \right] + j \frac{4b}{A} \left(\frac{b}{A} - 1 \right) \right\}^{-1} \quad (6)$$

将幅值 $A=43$ code, 频率 $\omega=2 \times 10^8$ code/s 带入式中, 通过 Matlab 仿真, 方程两边的实数与虚数对应相等, 可以求得 K_0 和 b 值。由式(6), 得 $b/A=0.0528$, $K_0=1185$ code, 所以间隙非线性的两个特征值: $K=1.03^\circ$, $b=2.49$ code(3.08"), 等效的间隙特性表达式为

$$N(A) = \frac{1.03^\circ}{\pi} \left\{ \left[\frac{\pi}{2} + \arcsin\left(1 - \frac{4.98}{43}\right) + 2\left(1 - \frac{4.98}{43}\right) \sqrt{\frac{2.49}{43} \left(1 - \frac{2.49}{43}\right)} \right] + j \frac{9.96}{43} \left(\frac{2.49}{43} - 1 \right) \right\} \quad (7)$$

4 间隙非线性的补偿

PWM 功率放大器工作在双极模式^[4]时, 由于零位时的电流、转矩的特殊性质, 可以改善伺服跟踪系统的定位精度。

H 型双极 PWM 工作模式在定位时流过电机的电流 i_a 是一个周期为 T 的三角波。 i_a 产生电磁转矩, 而产生电机零位振颤时的角位移 θ_M 和转速颤动量 ω_M 。电机在零位时转速的最大颤动量 $\Delta\omega_{MZ.max}$ 为

$$\Delta\omega_{MZ.max} = \frac{T}{8J} K_T \Delta i_{a.max}$$

电机在零位时的最大角位移 $\Delta\theta_{MZ.max}$ 为

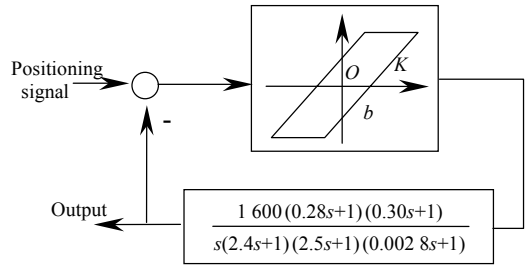


图 3 非线性系统结构

Fig.3 Diagram of the nonlinear system

$$\Delta\theta_{MZ,max} = \frac{T^2}{48J} K_T \Delta i_{a,max}$$

其中: J 为电机与负载的转动惯量, K_T 为电机的转矩系数。
若适当地选择开关周期 T , 电流会在电机中引起微振, 相当于动态润滑, 大大减小了间隙非线性, 进而抑制了定位时的自激振荡。

PWM 功率放大器工作在双极驱动模式, 使数字光电跟踪系统工作在电视跟踪方式。当 CCD 传感器捕获到目标后, 使目标(即光学动态靶标)固定, 从方位伺服系统获得的定位实验结果见图 4, 定位误差的最大峰峰值小于 18 code (22.23")。与图 2 中的峰-峰值 80 code 比较, 双极驱动模式时的 PWM 功率放大器工作零位时在电机中引起的微振, 可以改善系统的定位精度, 抑制了由等效间隙非线性引起的自激振荡。

5 结 论

数字化光电跟踪系统中定位时的等效间隙非线性特性相当于模拟齿系传动控制系统中的间隙非线性。实验结果表明, 采用双极工作模式的 PWM 驱动器, 定位误差的最大峰峰值小于 22.23", 双极 PWM 驱动器的零位振颤特性, 对数字控制系统的自激振荡起到了很好的抑制作用。研究这种等效间隙非线性特性及其补偿技术, 为进一步提高数字光电跟踪系统的定位精度提供了很好的技术支持。

参考文献:

- [1] 翟军红, 王红宣, 陈娟, 等. 大口径光电望远镜风阻力矩自抗扰补偿[J]. 光电工程, 2007, **34**(12): 12-14.
ZHAI Jun-hong, WANG Hong-xuan, CHEN Juan, *et al.* Active disturbance rejection controller to compensate the wind disturbance for the optoelectronic telescope with large aperture [J]. **Opto-Electronic Engineering**, 2007, **34**(12): 12-14.
- [2] 汪达兴, 杜福嘉. 大型天文望远镜摩擦传动系统低速特性的研究[J]. 光学 精密工程, 2006, **14**(2): 274-277.
WANG Da-xing, DU Fu-jia. Study on the low speed property of friction transmission system in large telescope [J]. **Opt. Precision Eng.**, 2006, **14**(2): 274-277.
- [3] 王广雄. 数字控制系统中的量化自振荡及其避免[J]. 信息与控制, 1990, **19**(3): 45-49.
WANG Guang-xiong. Quantification self-oscillation and its compensation in the digital control system [J]. **Information and Control**, 1990, **19**(3): 45-49.
- [4] 陈娟. 数字化光电跟踪系统定位极限环的研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2003.
CHEN Juan. Study on the limit positioning cycle in the digital electronic tracking system [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2005.
- [5] 范大鹏, 张智永, 范世珣, 等. 光电稳定跟踪装置的稳定机理分析研究[J]. 光学 精密工程, 2006, **14**(4): 673-675.
FAN Da-peng, ZHANG Zhi-yong, FAN Shi-xun, *et al.* Static mechanism analysis of the optoelectronic tracking instrument [J]. **Opt. Precision Eng.**, 2006, **14**(4): 673-675.

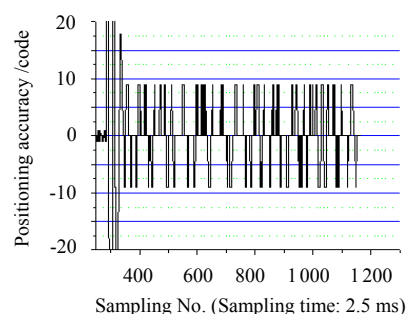


图 4 间隙非线性补偿后的定位实验结果

Fig.4 Positioning experimental result after the clearance nonlinear compensation