

基于编码器测速的双闭环控制系统性能分析

陈思思^{1,2,3} 黄宣琳^{1,2,3} 黄永梅^{1,2} 唐涛^{1,2}

(1. 中国科学院光束控制重点实验室 成都 610209; 2. 中国科学院光电技术研究所 成都 610209;

3. 中国科学院大学 北京 100049)

摘要:为了探究编码器测速对闭环控制系统的影响,更好的利用编码器提高测速和控制效果,首先说明了编码器测速原理,然后分析了差分速度估计法中编码器自身分辨率和采样周期对速度估计的影响,其后对闭环控制系统进行了分析,得出在速度带宽一定的情况下,编码器的采样频率变化对位置信号测量没有影响;而在满足系统带宽的情况下,编码器的采样频率越大,对速度测量造成的误差越大,最后用实验验证编码器采样频率变化对整个闭环控制系统的影响。

关键词:闭环控制; 编码器; 速度测量; 采样频率

中图分类号: TP13 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.80

Performance analysis of double closed loop control system based on encodervelocity measurement

Chen Sisi^{1,2,3} Huang Xuanlin^{1,2,3} Huang Yongmei^{1,2} Tang Tao^{1,2}

(1. Key Laboratory of Optical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;

2. Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Science, Chengdu 610209, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to explore the influence of the velocity measurement with encoder on the closed-loop control system, it is better to use the encoder to improve the speed and control effect. In this paper, the principle of encoder speed is first described. Then, the influence of encoder resolution and sampling period on velocity estimation is analyzed. Then the closed-loop control system is analyzed, the speed bandwidth under the change of encoder sampling frequency has no influence on the position of signal measurement; and to meet the system bandwidth conditions, the encoder sampling frequency is larger, the error caused by velocity measurement is finally verified by experiment, the sampling frequency of the encoder effect of the whole closed-loop control system.

Keywords: closed-loop control; encoder; velocity measurement; sampling frequency

0 引言

速度闭环控制系统因具有可提高伺服系统的调速范围,改善低速平稳性等优点,在对动态性能要求越来越高的伺服系统中,得到了越来越多的应用。测速装置是速度闭环控制系统中的关键部分,其速度分辨能力的高低是实现高精度、大范围速度测量的重要因素^[1-2]。近年来,由于编码器精度的提高,编码器成为了控制系统中速度闭环中常用的速度测量设备,通过检测编码器输出的脉冲信号或正弦信号可以计算出电机转速^[3-5]。对于编码器测速,目前常用的测速方法有M法,T法,M/T法。一般来讲,T法在低速区优于M法,M法在高速区可以得到更好的测

速效果,M/T法理论上可以得到优于前两者的测速精度,但实现方法也比前两种方法复杂^[6]。文献[7]中对T法进行了改进,可使分辨率较低的脉冲编码器达到较高的检测精度;文献[8]对M法编码器进行多次采样,取得多次位置值,再进行差分运算,这样可以有效的抑制随机噪声;不少文献都对测速方法进行改进来提高编码器测速精度^[9],但从编码器的采样频率变化和编码器自身精度变化上分析编码器对测速的文献不多,文献[4]提到编码器采样频率的变化对编码器精度的影响,但只是简单的理论分析。而本文从整个闭环控制系统上分析编码器采样频率变化和自身精度变化对速度环和位置环的影响,并进行仿真分析,最后通过实验验证所分析编码器采样频率的变化对闭

环控系统影响的正确性。

1 速度、位置双闭环模型分析

1.1 编码器测速原理

光电编码器是利用光电效应将光信号转化为电信号并输出的一种传感器,作为速度、位置传感器应用于数字测量系统中,本身并不能直接输出速度值,而要通过测量系统对编码器输出信号进行计算、处理之后才能得出相应的速度值^[10-11]。

增量式数字编码器的工作原理如图1所示。

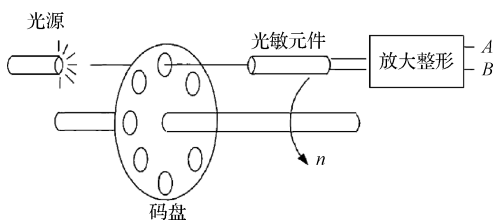


图1 增量式编码器工作原理

该编码器由光源、码盘、光敏元件、放大整形、脉冲输出等部分组成,在一个码盘的边缘上开有相等角度的缝隙(分为透明和不透明部分),在码盘的两边分别安装光源和光敏元件,当码盘随着工作轴一起转动时,每转过一个缝隙就产生一次光线的明暗变化,再经整形放大,可以得到一定幅值和功率的电脉冲输出信号,脉冲数就等于转过的缝隙数,将该脉冲信号送到计数器中进行计数,就能得到码盘转过的角度。

1.2 速度、位置双闭环控制模型

本文的研究对象是旋转音圈电机驱动二维摆镜的闭环控制系统,其电机和负载模型示意图如图2所示,大多数系统都采用速度、位置双闭环控制模式,如文献[12-13],所以本文也采用该控制模式并用编码器测量位置信号,再差分得到速度。由于实际的伺服系统一般比较复杂,含有很多非线性因素,例如摩擦力矩的干扰等,很难精确建立反映系统特性的模型。为了便于实际系统的调试以及控制算法的改进,故将控制对象简化^[14-15]。

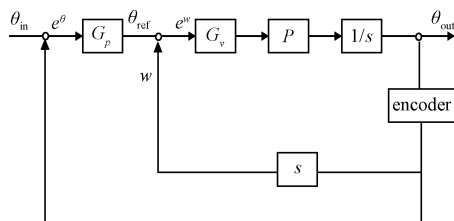


图2 闭环控制系统简化结构

图2中, θ_{out} 、 θ_{in} 分别为系统的输出和输入; G_p 、 G_v 分别为位置环控制器和速度环控制器; P 为电机和负载传递函数; $1/s$ 为积分器, s 为微分器; w 为速度; e^w 、 e^θ 分别为速度误差和位置误差。

整个系统的传递函数为:

$$G = \frac{G_p G_v P}{1 + G_v P + G_p G_v P} \quad (1)$$

则得出位置信号为:

$$\theta_{out} = \frac{G_p G_v P}{1 + G_v P + G_p G_v P} \theta_{in} \quad (2)$$

图2得出速度由位置差分得到为:

$$w = s \cdot \theta_{out} \quad (3)$$

2 差分速度估计方法

转台伺服系统采用的速度估计方法多数是单周期差分^[6],即:

$$v = \frac{p(n) - p(n-1)}{\Delta T} \quad (4)$$

式中: $p(n)$ 、 $p(n-1)$ 为相邻采样时刻的位置信号, ΔT 为采样周期。

设编码器每转的脉冲数为 N ,则编码器自身分辨率为 $R=2\pi/N$,用 $q(t)$ 表示在采样时间 T 的位置,令 $k=1, 2, \dots$,用 $\theta(k)$ 表示 kT 时间的位置,则当前的位置误差可以表示为:

$$|\theta(k) - q(kT)| < R \quad (5)$$

又根据(1)式得出:

$$\frac{\theta(k) - \theta(k-1)}{T} = \hat{v} \quad (6)$$

\hat{v} 表示 T 这段时间的平均速度。

$$\frac{q(kT) - q((k-1)T)}{T} = \hat{v} \quad (7)$$

\hat{v} 表示 T 这段时间的测量速度。

$$\text{设 } q(kT) - q((k-1)T) = mR \quad (8)$$

式中: m 为整数,表示为位置 $q(kT)$ 、 $q((k-1)T)$ 之间的脉冲个数。

根据式(5)可以看出,测量的脉冲数和实际的脉冲相差为 $\delta(0 \leq \delta \leq 1)$ 个脉冲。所以又根据式(8)可以得出:

$$\theta(k) - \theta(k-1) = (m \pm \delta)R \quad (9)$$

所以得出速度误差为:

$$|\hat{v} - v| = \left| \frac{(m \pm \delta)R}{T} - \frac{mR}{T} \right| = \frac{\delta R}{T} \quad (10)$$

根据式(10)可以看出,在编码器自身分辨率一定的情况下,速度误差与脉冲差值 δ 的大小成正比,与编码器的采样周期成反比,且在 $\delta=1$ 时得最大值为 $\frac{R}{T}$;而当编码器采样周期一定时,速度误差与脉冲差值 δ 的大小与自身分辨率 R 均成正比。根据式(5)可以得到,位置信号的测量精度只与编码器的自身分辨率有关,分辨率越高,位置信号测量越准确;而与编码器的采样频率没有关系。

位置差分法的传递函数推导:

把式(4)进行 z 变换得

$$V(z) = \frac{P(z) - z^{-1}P(z)}{\Delta T} \quad (11)$$

得传递函数为:

$$G(z) = \frac{V(z)}{P(z)} = \frac{1-z^{-1}}{\Delta T} \quad (12)$$

由 $z=e^{Ts}$, T 是采样周期, 在这里 $T=\Delta T$, 所以得出传递函数为:

$$G(s) = \frac{s}{1+\Delta T \cdot s} \quad (13)$$

幅频和相频特性分别为:

$$|G(\omega)| = \frac{\omega}{\sqrt{(1+\Delta T^2 \omega^2)}} \quad (14)$$

$$\varphi(\omega) = \frac{\pi}{2} - \arctan(\Delta T \omega) \quad (15)$$

从相频上来看, 采样频率越高, 系统带宽越宽, 越容易满足伺服跟踪系统快速跟踪目标的要求, 所以选取的采样频率不能过小。

3 速度、位置闭环分析

根据图 2, 将速度闭环后, 速度环的传递函数:

$$H_v = \frac{G_v P}{1+G_v P} \approx 1 \quad (16)$$

表示速度闭环的作用是: 改变系统控制对象, 让速度环路到位置环路在低频接近 $1/s$ 。

根据式(2)和式(13), 且令式(13)中的 $\Delta T=T$ 可以把速度表示为:

$$\omega = \frac{s}{1+Ts} \theta_{out} = \frac{s}{1+Ts} \cdot \frac{G_p G_v P}{1+G_v P + G_p G_v P} \theta_{in} \quad (17)$$

为了便于分析系统的鲁棒性, 定义:

$$M = \frac{\omega}{\theta_{in}} = \frac{s}{1+Ts} \cdot \frac{G_p G_v P}{1+G_v P + G_p G_v P} \quad (18)$$

用霍格维茨定义的灵敏度表达式来分析系统的鲁棒性, 灵敏度越低, 鲁棒性越好。灵敏度函数为:

$$S_s^e = \left| \frac{\Delta \varphi(s)/\varphi(s)}{\Delta k/k} \right| \quad (19)$$

式中: $\varphi(s)$, k 分别表示一个函数和这个函数中的一个变量。

现在分析 ω 的变化对整个系统鲁棒性的影响, 由式(10)可知, 编码器采样频率会影响速度的测量, 所以改变采样频率, 就会使速度发生改变。假设采样周期由 T 变到 T' , 则系统的输入 θ_{in} 与角速度 ω 之间的传递函数为:

$$M' = \frac{s}{1+T's} \cdot \frac{G_p G_v P}{1+G_v P + G_p G_v P} \quad (20)$$

将式(18)和式(20)带入到式(19)中, 则可以得到:

$$S_{T'}^M = \left| \frac{\Delta M(s)/M(s)}{\Delta T/T} \right| = \left| \frac{T_s}{1+T's} \right| \quad (21)$$

当 T' 变大时, 灵敏度值变小, 鲁棒性增强; 反之, 当 T' 变小时, 灵敏度值变大, 鲁棒性降低。

综上所述, 可知, 编码器采样频率的变化影响速度测量结果, 从而也影响到系统的灵敏度以及鲁棒性。

4 实验结果

本实验采用的是 18 位的编码器测量二维摆镜的位置与速度, 二维摆镜系统包括方位轴和俯仰轴系统。由于两轴的对称性, 本实验用其方位轴。编码器测量位置的理论精度为: 0.0013° 。

采样频率为 500 Hz 和 2 000 Hz 方位轴的位置误差分别如图 3、4 所示。

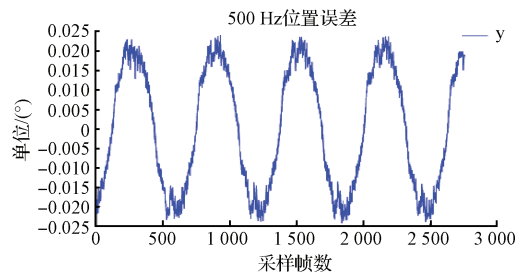


图 3 采样频率为 500 Hz 方位轴的位置误差

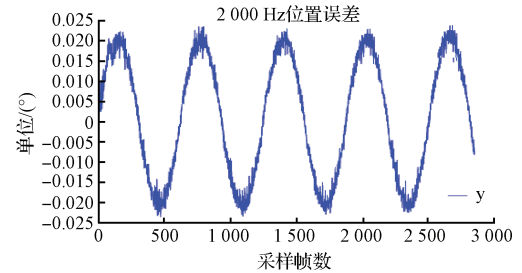


图 4 采样频率为 2 000 Hz 方位轴的位置误差

对比图 3 和图 4 得出方位轴位置误差结果, 如表 1 所示。

表 1 方位轴位置误差结果对比

	采样频率 500 Hz	采样频率 2 000 Hz
误差最大值	0.024	0.024
误差方差	0.015	0.015

从表 1 可以看出在编码器采样频率为 500 Hz 和采样频率为 2 000 Hz 时, 编码器所测位置信号误差没有变化。说明当速度闭环带宽不变的情况下, 编码器采样频率的变化对闭环控制系统的位置环没有影响。

采样频率为 2 000 Hz 和 500 Hz 俯仰轴速度误差分别如图 5、6 所示。

对比图 5 和图 6 可得俯仰轴速度误差结果对比, 如表 2 所示。

表 2 俯仰轴速度误差结果对比

	采样频率 500 Hz	采样频率 2 000 Hz
误差最大值	1.23	1.891
误差方差	0.409	0.509

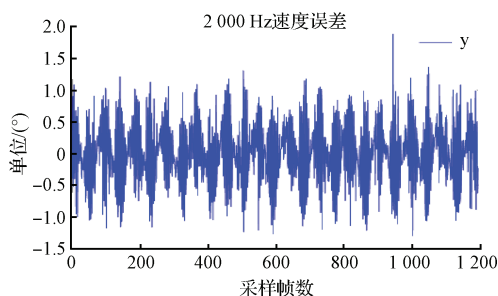


图5 采样频率为2 000 Hz俯仰轴的速度误差

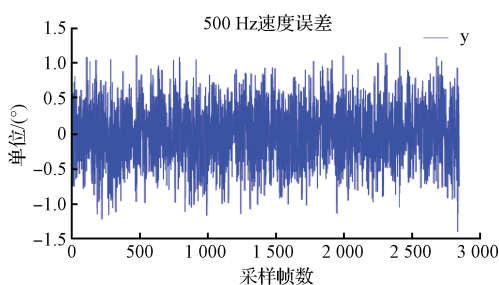


图6 采样频率为500 Hz俯仰轴的速度误差

在采样频率为2 000 Hz和500 Hz的对比中,能看出采样频率为500 Hz的速度误差优于采样频率为2 000 Hz的速度误差。同样也可以证明式(10)的结论。

5 结论

通过对编码器测速原理以及对编码器采样频率变化与自身分辨率变化对速度测量影响分析和实验得出,编码器采样频率越大,对速度造成的误差越大,但是采样频率过小,对闭环控制系统的反应速度影响较大,所以要选取一个合适的采样频率。编码器自身分辨率越小,速度误差越小。编码器采样频率的变化与编码器自身分辨率的低大小对速度环的速度有影响。而通过对闭环控制系统的分析和实验结果得出,当速度闭环带宽不变的情况下,编码器采样频率的变化对控制系统的位置环没有影响。

参考文献

- [1] 吴鸿,陈冲,李超,等.一种基于PSD的转速测量新方法[J].电子测量与仪器学报,2014,28(9):1033-1039.
- [2] 贾建援,柴伟,于大林,等.方位俯仰转台误差参数辨识与指向精度分析[J].仪器仪表学报,2016,37(7):1500-1508.
- [3] 赵长海,万秋华,梁立辉,等.小型高精度航天级光电编码器[J].电子测量与仪器学报,2015,29(8):1224-1230.

- [4] 于海,万秋华,杜颖财,等.编码器动态特性检测高速数据传输系统[J].国外电子测量技术,2013,32(7):49-52,57.
- [5] 刘小康,陈自然,王先全,等.空间精密位移信号软细分方法研究[J].仪器仪表学报,2016,37(3):540-545.
- [6] 文晓燕,郑琼林,韦克康,等.增量式编码器测速的典型问题分析及应对策略[J].电工技术学报,2012,27(2):185-189,209.
- [7] 王少君,刘永强,杨绍普,等.基于光电编码器的测速方法研究及实验验证[J].自动化与仪表,2015,30(6):68-72.
- [8] 黄法军,万秋华,杨守旺,等.光电轴角编码器测速方法现状分析与展望[J].激光与光电子学进展,2013,50(11):31-38.
- [9] 陈燕,刘守山.基于CPLD的光电编码器四倍频电路的设计[J].国外电子测量技术,2015,34(1):45-48.
- [10] 周昂扬,张志安,吴勇.一种M/T混合测速法的研究与实现[J].兵工自动化,2017,36(1):50-54.
- [11] 宋彦.伺服系统提高速度平稳度的关键技术研究及实现[D].长春:中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所),2010.
- [12] 杜璧秀,张淑梅,高慧斌,等.高精度转台速度稳定性研究[J].光电工程,2011,38(3):14-18.
- [13] TIAN J, YANG W, PENG Z, et al. Inertial sensor-based multiloop control of fast steering mirror for line of sight stabilization[J]. Optical Engineering, 2016, 55(11): 111602-111602.
- [14] CAI H, HUANG Y, TANG T, et al. Double speed loops control for high-precision position tracking of position-controlled actuators involving a harmonic drive reducer[J]. Journal of High Energy Physics, 2012, 2012(8):1-15.
- [15] DENG C, MAO Y, RE G. MEMS inertial sensors-based multi-loop control enhanced by disturbance observation and compensation for fast steering mirror system[J]. Sensors, 2016(16):1-12.

作者简介

陈思思,1990年出生,研究生,主要研究方向为精密控制。
E-mail:chensisi13@yeah.net