

光电轴角编码器测速方法现状分析与展望

黄法军^{1,2} 万秋华¹ 杨守旺¹ 赵长海¹

(¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)
² 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 光电轴角编码器是一种先进的数字测角传感器,利用光电轴角编码器进行测速具有高精度、高分辨率、高可靠性等优点,可以满足现代精密伺服系统的需求。首先介绍了光电编码器的原理及其应用;然后通过对国内外各种测速方法的介绍和比较,分析各种方法的优缺点和适用范围;最后针对光电轴角编码器测速方法某些关键技术,也对其未来的发展趋势进行了扼要阐述。

关键词 测量;速度;光电轴角编码器

中图分类号 TP216 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP50.110004

Current Situation and Trend of Velocity Measurement with Photoelectric Shaft Encoder

Huang Fajun^{1,2} Wan Qiuhua¹ Yang Shouwang¹ Zhao Changhai¹

(¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Photoelectric shaft encoder is an advanced digital angle transducer. Velocity measurement can meet the demands of modern precision servo control system using photoelectric encoder with the advantages of high precision, high resolution and high reliability, therefore, the research has been a popular topic. we introduce the principle and application of photoelectric shaft encoder. Then the applicability, advantages and drawbacks are presented by introducing and comparing various velocity measurement methods. At last, the development trend of velocity measurement methods with photoelectric shaft encoder is prospected.

Key words measurement; velocity; photoelectric shaft encoder

OCIS codes 120.3940; 120.7250; 120.4640

1 引言

光电轴角编码器作为一种先进的位置传感器,具有精度高、体积小、抗干扰、使用寿命长等优点,得到了广泛的应用^[1]。在一些精密的控制系统中,诸如稳健控制^[2]、基于模型的误差补偿^[3]、机器人控制、高精度闭环调速系统等应用中,需要精确测量系统的速度,并且对测速精度、测速分辨率和时间延迟提出了更高的要求,传统的模拟测量方法已经无法满足需求。因此,国内外利用光电轴角编码器进行速度测量的研究逐渐发展起来。本文在介绍光电轴角编码器的基本原理及常用测速方法的基础上,着重介绍和比较了国内外几种具有代表性的新型测速方法。

收稿日期: 2013-05-24; 收到修改稿日期: 2013-07-26; 网络出版日期: 2013-10-15

基金项目: 中国科学院知识创新工程领域前沿项目

作者简介: 黄法军(1988—),男,硕士研究生,主要从事光电位移精密测量技术及光电编码器方面的研究。

E-mail: huangfj1988@126.com

导师简介: 万秋华(1962—),女,研究员,博士生导师,主要从事光电位移精密测量技术及光电编码器等方面的研究。

E-mail: wanqh@ciomp.ac.cn(通信联系人)

2 光电轴角编码器原理

光电轴角编码器主要由光源、码盘、狭缝、主轴和光电元件组成,如图 1 所示。

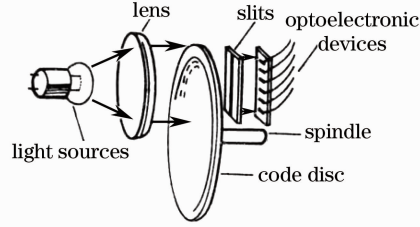


图 1 光电轴角编码器组成

Fig. 1 Structure of photoelectric shaft encoder

当编码器主轴带动码盘转动时,码盘和狭缝相对运动产生莫尔条纹。光电元件将光信号转变为电信号,通过处理电路放大后形成了莫尔条纹光电信号:

$$U_1 = U \sin\left(\frac{2\pi x}{p}\right), \quad (1)$$

$$U_2 = U \cos\left(\frac{2\pi x}{p}\right), \quad (2)$$

式中 U_1 、 U_2 为编码器两路正余弦信号, U 为信号幅度, x 为编码器的位移。上述光电信号经过电子学处理后,输出到计算机或显示设备,即可实现角度的控制和测量。

根据代码形成方式的不同,传统的光电轴角编码器可以分为增量式和绝对式两种^[1]。绝对式编码器码盘对应每一个分辨率区间有唯一的编码,对应每个角位移有唯一的输出,具有固定的编码,无累计误差,抗干扰能力强。增量式编码器对应每一个分辨率输出一个脉冲信号,计数器对脉冲计数,计算出相对于基准零位的角位移,其体积小、价格低、结构简单。近年来又出现了准绝对式编码器^[4],在增量式编码器码盘上增加了固定零位,因而也具有了某些绝对式编码器的优点。三种编码器有其各自的优缺点及使用范围^[5-6]。

3 光电轴角编码器测速方法现状

经过几十年的发展,利用光电轴角编码器进行速度测量发展出了较多方法,有些已经取得了广泛的应用。

3.1 常用测速方法

目前常用的测速方法有 M 法, T 法和 M/T 法^[7-9], 分别介绍如下。

1) M 法:在一定时间 T_s 内记录编码器输出脉冲的个数。设编码器每圈输出脉冲数为 P , 在固定时间 T_s 测得的脉冲数为 M_1 , 如图 2 所示, 则编码器转速为

$$v = 360 \times \frac{M_1}{P \times T_s} [(\text{°})/\text{s}]. \quad (3)$$

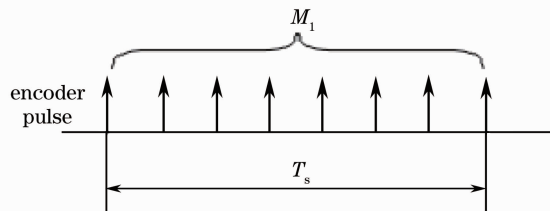


图 2 M 法测速原理

Fig. 2 Velocity measurement principle of M method

M 法测速的量化误差为 $\frac{1}{M_1}$, 因此 M 法适用于高速系统测速。

2) T 法:测量两个编码器输出脉冲的间隔时间来确定速度。同样设编码器每圈输出脉冲数为 P , 高速

时钟频率为 F_c , 如图 3 所示, 每两个输出脉冲检测到的时钟脉冲数为 M_2 , 则编码器速度为

$$v = 360 \times \frac{F_c}{P \times M_2} [(\circ)/s]. \quad (4)$$

T 法测速的量化误差为 $\frac{1}{M_2}$, 因此 T 法适用于低速系统测速。

M/T 法: 是 M 法和 T 法的结合, 同时测量编码器脉冲数和产生这些脉冲数的时间, 在整个速度范围内均有较好的准确性。如图 4 所示, 记录时钟脉冲数为 M_4 , 编码器输出脉冲数为 M_3 , 则编码器速度为

$$v = 360 \times \frac{F_c \times M_3}{P \times M_4} [(\circ)/s]. \quad (5)$$

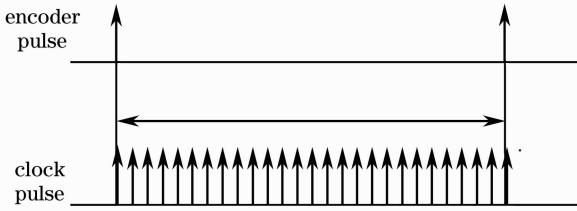


图 3 T 法测速原理

Fig. 3 Velocity measurement principle of T method

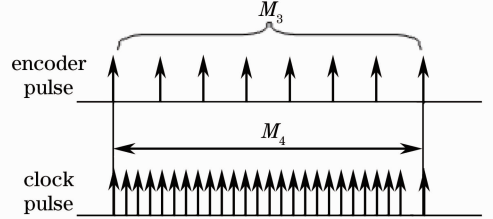


图 4 M/T 法测速原理

Fig. 4 Velocity measurement principle of M/T method

除此之外, 基于 M 法、T 法改进的测速方法还有变 M/T 法、高速高精度连续测量法^[10]等常用测速方法。

通过以上分析可知, 常用测速方法原理简单, 易于实现, 因此获得了广泛的应用。但其存在误差较大、检测时间较长、易受干扰、无法直接测量加速度等缺点。为了更好地满足伺服控制系统对速度测量的要求, 克服上述缺点, 国内外研究人员又提出了新型测速方法。

3.2 国外测速方法现状

在伺服控制系统中, 例如伺服电机控制、机器人关节控制以及大型仪器控制等^[11-12], 常用编码器输出的位置信息进行测速, 最简单的方法就是利用两次离散的位置值进行差分运算得到速度。但直接差分会放大随机噪声, 无法得到较好的结果。

加拿大 Ryerson 大学的 Liu^[13]在差分运算的基础上进行滤波。将光电轴角编码器进行多次采样, 取得多次位置值, 再进行差分运算就可以有效抑制随机噪声。经过分析计算, 得到速度及误差估计公式:

$$\hat{v}_j = \frac{\theta(k) - \theta(k-j)}{jT}, \quad (6)$$

$$|\hat{v}_j - v_j| < \frac{2R}{jT}, \quad (7)$$

式中 T 为采样时间, R 为编码器分辨率, \hat{v}_j 为估计速度, v_j 为实际速度。 j 越大精度越高, 但是后向差分的点的数量不是越多越好, 数量过多会带来测速延时过大的问题。因此, 必须同时考虑测速精度和时间延迟的问题。Jaritz 等^[14]通过研究得到: 当编码器输出分辨率为 655360, 采样频率为 2500 Hz 时, 令 $j=3$ 是最好的选择。Liu^[13]通过实验分析得到, 合理选择参数, 可以将误差限制在 1% 以内。该测速方法可以合理均衡精度与时间延迟, 并且计算简便, 应用广泛。

为了更好地消除随机噪声, 加拿大 McGill 大学的 Belanger^[15]提出了一种依据 Kalman 滤波器的测量速度和加速度的方法, 首先建立 Kalman 滤波器的数学模型:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + \Gamma w(t) \\ y(t) = \theta_m = Cx(t) + e(t) \end{cases}, \quad (8)$$

式中 $x(t) = [x_1(t), x_2(t), x_3(t)]^{-1}$, $x_1(t)$, $x_2(t)$, $x_3(t)$ 分别代表位置、速度和加速度; $w(t)$ 表示统计独立, 均值为 0 的高斯白噪声; 标量输出 $y(t)$ 等于编码器转过的最小分辨率的次数 θ_m ; $e(t)$ 为系统量化误差; A , C , Γ 为系数矩阵。

在测速系统中, 为了估计速度与加速度, 建立如下模型:

$$\begin{cases} \dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \omega \\ y = [1 \ 0 \ 0]x + e(t) \end{cases} \quad (9)$$

通过 Belanger^[15]所做的实验分析,应用 Kalman 滤波器可以有效滤除噪声,估计系统速度与加速度。这与通常测速方法相比有了一定改进。

有时需要同时测量速度与加速度,因此 Tilli 等^[16]在 2001 年提出一种基于改进的状态观测器的速度测量方法。其系统包括两种观测器,一种仅给出系统速度估计,另一种则可以同时获得速度与加速度。两种观测器的框图如图 5 所示。

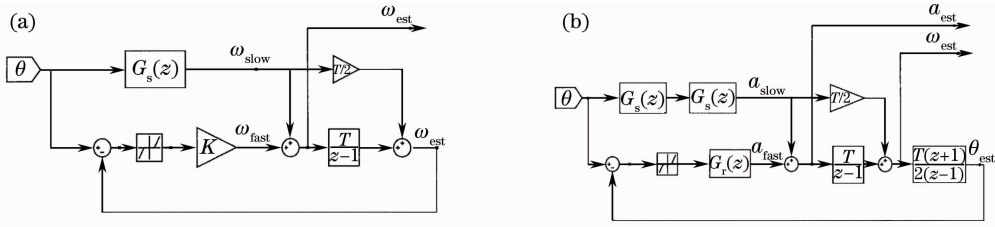


图 5 两种观测器框图

Fig. 5 Structure of the speed/acceleration estimators

图 5 中 ω_{est} 为系统速度, α_{est} 为系统加速度,

$$G_s = \frac{s}{\tau s + t} \Big|_{s = \frac{z-1}{Tz-1}} = \frac{z-1}{\left(\tau + \frac{T}{2}\right)\left(\tau - \frac{T}{2}\right)}, \quad (10)$$

$$G(z) = \frac{T}{z-1} \frac{T(z+1)}{2(z-1)}, \quad (11)$$

$$G_r(z) = \frac{k(z-z_0)}{z-z_p}. \quad (12)$$

通过一系列的仿真与实验证明,采用改进的状态观测器进行速度与加速度估计获得了良好的效果,具有优秀的噪声抑制性能。该方法对于高分辨率光电轴角编码器同样适用。

随着人工神经网络的发展与完善,芬兰 Helsinki 大学的研究人员将人工神经网络应用于编码器加速度测量的研究中^[17]。将反向传播(BP)神经网络和基于自适应神经网络的模糊推理系统(ANFIS)进行级联,

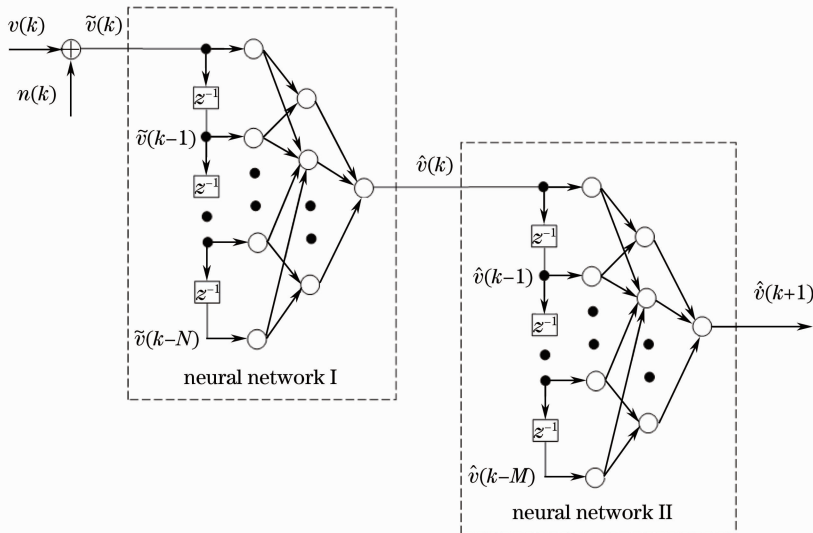


图 6 BP 和 ANFIS 神经网络结构图

Fig. 6 Structure of the BP and ANFIS neural networks

前者对速度信号中噪声信号进行滤波,后者进行进一步滤波并给出一步前项预测,即系统加速度。系统框图如图 6 所示。

在该结构中, N 和 M 为两个神经网络的阶数,输出 $\hat{v}(k+1)$ 为一步前项预测加速度。这种方法可以在前级输出经过滤波处理的速度值,对于某些需要速度反馈的控制系统来说尤为重要。加速度的获取是一步前项预测得到的结果,克服了其他基于低通滤波器的测速理论不可避免的时间延迟。另外,区别于多项式微分测速方法,该方法对输入信号没有严格的要求,使用范围广泛。实验验证表明,在无学习数据的情况下,仍然可以有效滤除噪声,得到平滑的加速度曲线,超调量与误差均控制在合理范围内。通过多步学习可以进一步提高效果,加速度误差从 24% 降低到 15%。

为了平衡测速系统性能指标,如时间延迟和测速精度,Janabi-Sharifi 等^[18]提出了一种离散时间适应窗速度估计方法。这种方法的优点在于可以同时考虑噪声抑制、时间延迟、测速精度和可靠性等参数,不需要因为提高其中一个而牺牲其他方面的性能。根据图 7 所示速度概率密度分布,选取速度估计误差最小情况下的窗口大小并给出了最优一阶适应窗口的公式和求解步骤。

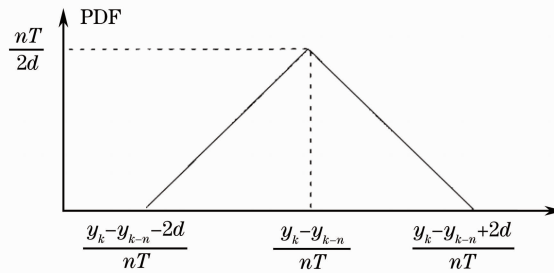


图 7 窗口长度为 n 的速度概率密度函数(PDF)

Fig. 7 Probability density function (PDF) of velocity for window of length n

他们通过实验验证了此方法的有效性,与其他方法相比在精度与时间延迟方面具有一定优势,可以使各种性能指标达到相对均衡的水平。

此外,Baser 等^[19]在分析各种测速方法的基础上,提出了一种混合测速方案。他们综合了改进的一阶适应窗(MAW)、改进的二阶适应窗(EAW)和固定脉冲(FP)三种理论,也取得了较好的测速性能。

3.3 国内测速方法现状

国内利用光电轴角编码器进行速度测量的研究同样活跃。上海交通大学的宋刚等^[20]分析了引起量化误差和编码器脉宽误差的各种因素,在上述测速方法的基础上提出了恒基准脉冲数测速法,同时进行了脉宽补偿,消除了光电轴角编码器的脉宽误差,提高了测速精度。此速度测量方法转速为

$$n = 60 \times \frac{f_1 m}{KZN} (\text{r/min}), \quad (13)$$

测量转速时总误差为

$$\epsilon = \frac{1}{N} + \sum_{i=1}^m \Delta\beta_i / (m\beta), \quad (14)$$

式中 Z 为编码器每圈脉冲数, m 为一个采样周期内编码器脉冲理论值, N 为基准脉冲数, K 为编码器倍频数, β 为平均脉宽。通过实验验证,此方法可以获得较为理想的测速效果,测速精度得到明显提高。

上海交通大学的焦东升等^[21]又提出了基于正交编码器高精度测速方法,在分析了 M 法测速的测量误差和分辨率的基础上提出了一种改进的变 M 法,同时测量正交的两组脉冲序列的上升沿和下降沿,在不改变光电编码器制造工艺和采样周期的前提下,极大地减小了转速和转角的测量误差。选用 TRD-GK1000-RZ 增量式正交光电编码器进行测速实验,实验结果相对误差均方根值从 M 法的 0.0452% 降低到 0.0121%。其测速原理如图 8 所示。

对于正交光电轴角编码器,其输出的正交 A、B 两相脉冲同时输入,在脉冲上升沿和下降沿都进行计数,这样检测到光电编码器输出脉冲个数为通常 M 法的 4 倍,编码器转速为

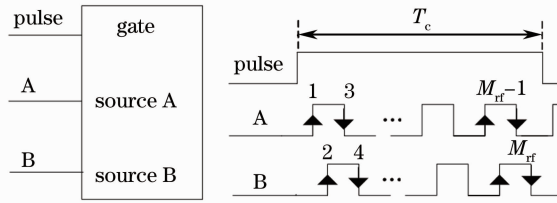


图 8 变 M 法测速原理

Fig. 8 Velocity measurement principle of alterable M method

$$n = \frac{60M_{rf}}{4PT_c} \text{ (r/min)}, \quad (15)$$

式中编码器每圈输出脉冲数为 P ，在固定时间 T_s 测得的脉冲数为 M_{rf} 。

北京交通大学的文晓燕等^[22]在 2012 年根据 M 法和 T 法测速原理提出了一种针对低分辨率编码器的连续中断 T 法测速方法，该方法容易实现，可以较大程度地利用编码器输出脉冲、提高测速响应速度。其测速原理如图 9 所示。

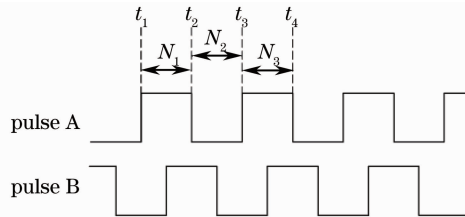


图 9 连续中断 T 法测速原理

Fig. 9 Velocity measurement principle of consecutive interrupt T method

在 t_1 和 t_2 时刻分别检测到脉冲 A 的上升沿和下降沿，并且得到 $t_1 \sim t_2$ 之间的输出脉冲计数值 N_1 ，在 t_3 时刻检测上升沿得到 $t_2 \sim t_3$ 之间的输出脉冲计数值 N_2 ，此时可以得到转速

$$n = \frac{60f_c}{P(N_1 + N_2)}. \quad (16)$$

在 t_4 时刻得到计数值 N_3 ，再依据计数值 N_2 和 N_3 计算转速为

$$n = \frac{60f_c}{P(N_2 + N_3)}. \quad (17)$$

后续脉冲沿来临时，计算方式依此类推。通过实验分析得到测速结果，电机转动频率从 5 Hz 一直到接近零转速都能跟踪给定值，只有非常接近零速时跟踪出现误差。当转速过零后，调节过程恢复比较平稳的状态。

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所的孟中等^[23]提出了正交基函数多项式实时拟合在轴角编码器测速中的应用。其通过 Schmidt 正交化法，引入一组基函数，得到正交多项式，避免了常规拟合下法方程组病态概率高、拟合解误差大的不足，保证了改进算法下法方程组的良态性，得到具有较小误差的最小二乘解，提高了角度滤波精度，进而也提高了测速精度。

设 n 阶正交基函数拟合多项式为

$$Q(x) = a_0^* q_0^*(x) + a_1^* q_1^*(x) + \dots + a_n^* q_n^*(x), \quad (18)$$

式中 $a_k^* = \frac{(q_k, f)}{(q_k, q_k)}$ ， q_k^* 由递推公式求出：

$$\begin{cases} q_0^*(x) = 1 \\ q_1^*(x) = x - a_1 \\ \dots \\ q_{k+1}^*(x) = (x - a_{k+1})q_k(x) - \beta_k q_{k-1}(x) \end{cases}, \quad (19)$$

$$d_k = \sum_{i=1}^m [q_k^*(x_i)]^2 \quad (k = 0, 1, \dots, n), \quad (20)$$

$$\alpha_{k+1} = \frac{1}{d_k} \sum_{i=1}^m x_i [q_k^*(x_i)]^2, \beta_k = \frac{d_k}{d_{k-1}} \quad (k = 1, 2, \dots, n-1; n < m). \quad (21)$$

通过某光电跟踪测量系统实验验证,编码器采样周期设为 20 ms,滑动窗长度为 75 点,误差的标准偏差由常规拟合的 $0.02815^\circ/\text{s}$ 降低到 $0.01343^\circ/\text{s}$,提高了测速精度。

前文介绍了几种国内外新型的测速方法,按其本质而言可以将编码器测速方法分为两类,一类是在一定时间内对编码器脉冲进行计数的方法,如文献[7-10]和文献[20-22];第二类是对编码器输出的位置信息进行计算处理后,得到系统速度,如文献[13,15-18,23]。前者主要用在增量式编码器应用场合,后者则用在绝对式编码器的应用场合。

新型测速方法对比常用的 M 法, T 法的优势在于可以有效去除噪声,提高测速精度,减小误差和时间延迟。如文献[15-17]的方法,可以在得到速度的同时,给出加速度信息,满足了某些需要加速度反馈的伺服控制系统的需要。文献[18]的方法则可以平衡测速精度、噪声抑制、时间延迟和可靠性等参数,得到最优的速度反馈。另一方面,新型测速方法在提高精度、减小误差的同时,由于采用较为复杂的算法,如文献[15, 17, 23],增加了计算量和相应的时间延迟,提高了系统对硬件的要求。

4 光电编码器测速方法发展趋势

随着光电轴角编码器的发展与成熟,利用光电轴角编码器进行速度测量的方法不断涌现。而现代各种精密伺服控制系统对速度精度、速度平稳性、时间延迟等性能指标要求不断提高。因此设计高精度、高分辨率、响应快的测速系统显得尤为重要。未来测速系统将主要向着以下几个方面发展。

首先,未来测速系统需要实现高精度和高分辨率。目前测速系统的精度与光电轴角编码器的精度、分辨率及动态响应速度密切相关。如何利用低分辨率编码器实现高精度、高分辨率的速度测量是一个需要解决的现实问题。未来的研究可以采用更为有效的算法,甚至可以同时对编码器莫尔条纹光电信号采样来突破编码器的分辨率的限制来提高测速精度。

其次,精密伺服系统需要更小的时间延迟来保证速度平稳性,特别是在大型经纬仪、天文望远镜等速度极低的场合,对测速的平稳性和实时性提出了更高的要求。因此测速系统必须具备较短的响应时间。这就要求采用更高的采样频率、更为简洁的算法和更为快速的硬件来降低速度延迟,达到实时测速的目的。

另外,测速系统需要具备更强的抗干扰能力、更广的测速范围、更为低廉的硬件价格等。这就要求科研人员不断进行研究,推进光电轴角编码器测速的发展,以迎合未来不断提升的需求。

5 结束语

利用光电轴角编码器进行速度测量的研究已经得到较大发展,各国研究人员将新的理论应用其中,速度测量的新方法不断涌现。这些方法有其各自的优缺点,适用范围各不相同。今后的研究,需要在现有的测速方法的基础上,结合各种理论,提出新型测速方法,使之具有更为广阔的应用前景。

参 考 文 献

- 1 Dong Lili, Xiong Jingwu, Wan Qiuhua. Development current situation and trend of photoelectric encoder [J]. Optics and Precision Engineering, 2000, 8(2): 198-201.
董莉莉,熊精武,万秋华.光电轴角编码器的发展动态 [J]. 光学精密工程, 2000, 8(2): 198-201.
- 2 Ohnishi K, Shibata M, Murakami T. Motion control for advanced mechatronics [J]. IEEE/ASME Trans Mechatronics, 1996, 1(1): 56-97.
- 3 Bernstein N L, Lawrence D A, Pao L Y. Friction modeling and compensation for haptic interfaces [C]. Proceedings of the First Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, 2005. 290-295.
- 4 Yang Tianjin, Cao Xiangqun, Lin Bin. Developing current situation and the trend of photoelectric-angular encoder [J].

- 2005, 27(1):90—95.
- 杨天瑾, 曹向群, 林 斌. 光电轴角编码器的发展现状分析及展望[J]. 光学仪器, 2005, 27(1): 90—95.
- 5 Zhao Yong, Shu Xianyu, Zhang Qichan. Phase subdivision of absolute coding grating and application in displacement measurement [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(8): 0812005.
- 赵 勇, 苏显渝, 张启灿. 绝对编码光栅的相位细分及其在位移测量中的应用[J]. 光学学报, 2011, 31(8): 0812005.
- 6 Zhu Fan, Wu Yiming, Liu Changchun. Eliminating influence of grating encoder's eccentricity and vibration to moiré fringes signal by four reading heads [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(4): 0412008.
- 朱 帆, 吴易明, 刘长春. 四读头法消除码盘偏心 and 振动对叠栅条纹相位测量的影响[J]. 光学学报, 2011, 31(4): 0412008.
- 7 Qin Jirong, Shen Anjun. Contemporary DC Servo Controls Technology and Its System Design [M]. Beijing: China Machine Press, 1991.
- 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, 1991.
- 8 R C Kavanagh, J M D Murphy, M G Egan. A high performance positioning system using improved digital speed sensing [C]. Proc 3rd Euro Conf Power Electronics and Applications, 1989. 997—1002.
- 9 T Ohmae, T Matsuda, M Kamiyama. A microprocessor-control high-accuracy wide-range speed regulator for motor drives [J]. IEEE Trans Ind Electron, 1982, 29(3): 207—211.
- 10 Zhao Yan. The Research of Velocity Measurement with Encoder [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2003. 5—20.
- 赵 岩. 编码器测速方法的研究 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2003. 5—20.
- 11 K Kaneko, R Horowitz. Repetitive and adaptive control of robot manipulators with velocity estimation [J]. IEEE Trans Robotics and Automation, 1997, 13(2): 204—217.
- 12 P R Belanger, P Dobrovolny, A Helmy. Estimation of angular velocity and acceleration from shaft encoder measurements [J]. International J Robotics Research, 1998, 17(11): 1225—1233.
- 13 G Liu. On velocity estimation using position measurement [C]. Proceedings of the Control Conference, 2002. 1115—1120.
- 14 A Jaritz, M W Spong. An experimental comparison of robust control algorithms on a direct manipulator [J]. IEEE Trans Control Systems Technology, 1996, 4(6): 627—640.
- 15 Belanger P R. Estimation of angular velocity and acceleration from shaft encoder measurements [C]. 1992 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1992. 585—592.
- 16 A Tilli, M Montanari. A low-noise estimator of angular speed and acceleration from shaft encoder measurements [J]. IEEE Automatika, 2001, 42(3): 169—176.
- 17 X Z Gao, S J Ovaska. Acceleration signal estimation using neural networks [J]. IEEE Meas Sci Technol, 2001, 12(10): 1611—1619.
- 18 F Janabi-Sharifi, V Hayward, C J Chen. Discrete-time adaptive windowing for velocity estimation [J]. IEEE Trans Control System Technology, 2000, 8(6): 1003—1009.
- 19 Ozgur Baser, Ergin Kilic, E Ilhan Konukseven. A hybrid method to estimate velocity and acceleration using low-resolution optical incremental encoders [C]. 2010 International Conference on Signals and Electronic Systems, 2010. 57—60.
- 20 Song Gang, Qin Yuexia, Zhang Kai, *et al.*. Approach and realization to improve the measuring accuracy with low resolution encoder [J]. J Shanghai Jiaotong University, 2002, 36(8): 1169—1172.
- 宋 刚, 秦月霞, 张 凯, 等. 基于普通编码器的高精度测速方法 [J]. 上海交通大学学报, 2002, 36(8): 1169—1172.
- 21 Jiao Dongsheng, Zhang Xiubin, Ying Junhao, *et al.*. The research of velocity measurement based on orthogonal photoelectric encoder [J]. Microcomputer Application, 2010, 26(10): 13—15.
- 焦东升, 张秀彬, 应俊豪, 等. 基于正交编码器高精度测速方法的研究 [J]. 微型电脑应用, 2010, 26(10): 13—15.
- 22 Wen Xiaoyan, Zheng Qionglin, Wei Kekang, *et al.*. Typical issue analysis and corresponding strategy for incremental encoder speed measurement [J]. Trans China Electrotechnical Society, 2012, 27(2): 185—189.
- 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.
- 23 Meng Zhong, Zhang Tao, Zheng Xiujun. Application of real time polynomial fitting based on orthogonal basis function algorithm to encoder rate measurement [J]. Optics and Precision Engineering, 2006, 14(2): 303—307.
- 孟 中, 张 涛, 郑秀筠. 正交基函数多项式实时拟合在轴角编码器测速中的应用 [J]. 光学精密工程, 2006, 14(2): 303—307.