

光电编码器信号处理技术的研究进展

Researching Development of Photoelectric Encoder Signal Processing Technology

刘 杨¹ 吕恒毅² 谭立国¹ 陈兴林¹ 宋申民¹

(哈尔滨工业大学航天学院¹,黑龙江 哈尔滨 150001;中国科学院长春光学精密机械与物理研究所²,吉林 长春 130033)

摘 要: 光电编码器是以莫尔条纹计数为基础的高精度数字化测角设备,在航空航天领域得到越来越多的应用。为提高光电编码器在恶劣环境下的性能,分别介绍了光电编码器信号处理的原理、关键技术、典型应用以及新的动向;同时,对具有代表性的处理技术进行了分析与比较,揭示了其处理方式向数字化、智能化发展的趋势;最后针对国内外关键技术的现状,扼要阐述了其未来的发展方向。

关键词: 光电编码器 信号处理 自适应 数字化 智能化

中图分类号: TP212.14 **文献标志码:** A

Abstract: The photoelectric encoder is the highly precise digital angle measurement device that is based on counting the Moire fringes, it has been widely used in aviation and aerospace areas. In order to enhance the performance of the photoelectric encoder in hash environment, the principle of signal processing, critical technologies, and typical application as well as the latest development of the encoder are introduced respectively. In addition, the representative processing technologies are analyzed and compared, this reveals that digitizing and intelligent are its developing trends. In accordance with the current global status of critical technologies, its developing directions in future are described briefly.

Keywords: Photoelectric encoder Signal processing Adaptive Digitizing Intelligent

0 引言

高精度光电编码器是一种集光、机、电于一体的数字测角装置^[1-2],是当代自动化领域最基础、应用最广泛的检测元件之一。自 21 世纪以来,随着航空航天技术的飞速发展,对光电编码器的精度、分辨力、智能性和环境适应性提出了更高的要求^[3],但受国内材料学和加工技术等限制,光机实现方法事倍功半,效果不佳。而光电编码器信号处理系统具有软硬件结合的特点,方式灵活多变,为上述性能的实现提供了很好的平台,前景广阔。

1 原理概述

高精度绝对式光电编码器输出信号通常包括粗码、中精码和精码三部分,对应的输出信号分别为梯形波、三角波和正弦波。虽然不同的编码方式会导致码盘上的刻划以及输出信号的时序存在本质上的区别,但信号形式却基本一致。以长春光机所研制的 23 位绝对式光电轴角编码器为例^[4],典型的信号处理系统原理框图如图 1 所示。

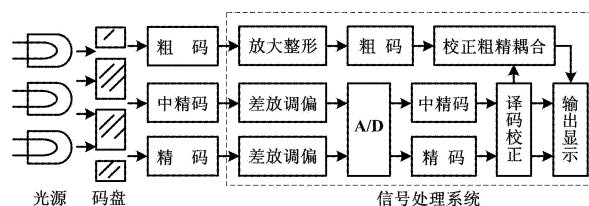


图 1 光电编码器信号处理框图

Fig. 1 Block diagram of photoelectric encoder signal processing system

随着编码器信号处理技术的发展,光电编码器各功能模块的形式可能出现不同程度的变化。这些变化使系统内部的组成与结构不断地优化,从而使编码器朝着高精度、高分辨率、数字化和智能化的方向发展。

2 关键技术现状

在高精度绝对式光电编码器信号处理系统中,粗码的译码和细码的细分是获取高精度、高分辨率位置信息的基础和关键环节,也是编码器信号处理系统中的核心功能。

2.1 粗码译码

矩阵式编码满足“小型化”的要求,且具有很高的可靠性,因此,它被广泛地应用到高精度编码器的粗码编码中,适合在航空航天领域应用。8 位矩阵码盘的码道刻划示意图如图 2 所示^[5]。其中 a_1 、 a_2 、 b_1 、 b_2 、 c_1 、 c_2 、 c_3 、 c_4 为编码器各读数头的读出信号。

国家自然科学基金资助项目(编号:60710002)。

修改稿收到日期:2010-07-07。

第一作者刘杨,男,1982 年生,现为哈尔滨工业大学控制科学与工程系在读博士研究生;主要从事信号处理和故障诊断方面的研究。

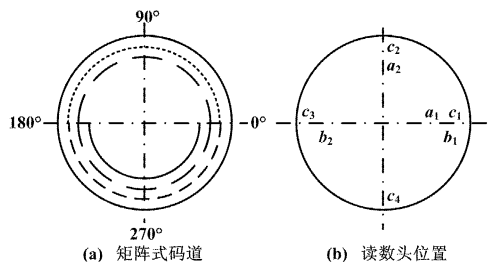


图2 码道刻划示意图

Fig.2 Schematic of carving of coding tracks

与之相应的格雷码如式(1)所示,其中, $A_1 \sim A_8$ 为8位格雷码(A_1 为最高位)。

$$\begin{bmatrix} A_8 \\ A_7 \\ A_6 \\ A_5 \\ A_4 \\ A_3 \\ A_2 \\ A_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1 \bar{a}_1 \bar{a}_2 + c_2 \bar{a}_1 a_2 + c_3 a_1 a_2 + c_4 a_1 \bar{a}_2 \\ c_2 \bar{a}_1 \bar{a}_2 + c_3 \bar{a}_1 a_2 + c_4 a_1 a_2 + c_1 a_1 \bar{a}_2 \\ c_3 \bar{a}_1 \bar{a}_2 + c_4 \bar{a}_1 a_2 + c_1 a_1 a_2 + c_2 a_1 \bar{a}_2 \\ c_4 \bar{a}_1 \bar{a}_2 + c_1 \bar{a}_1 a_2 + c_2 a_1 a_2 + c_3 a_1 \bar{a}_2 \\ b_1 \bar{a}_1 + b_2 a_1 \\ b_2 \bar{a}_1 + b_1 a_1 \\ \bar{a}_1 a_2 + a_1 \bar{a}_2 \\ a_1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

根据如式(2)所示的格雷码与自然二进制码转换关系^[6],便可以得到自然二进制位置信息。

$$X_{k+1} = A_{k+1} \oplus X_k \quad X_1 = A_1 \quad (2)$$

由于粗码原始信号较弱,且不是严格的方波信号,因此,需通过预处理电路将粗码原始信号放大并整形为幅值满足要求的数字信号。

依据译码的数学逻辑关系,早期出现了一种直观的译码方式,即硬件逻辑译码^[5]。这种译码方法的思想是利用数字门电路实现译码逻辑。以粗码低四位为例,硬件逻辑译码电路如图3所示。

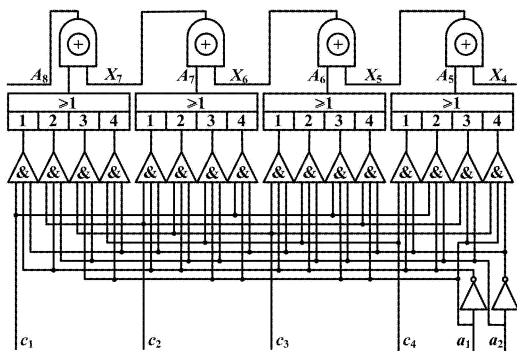


图3 硬件逻辑译码电路图

Fig.3 Hardware logical decoding circuit

硬件逻辑译码的优点是思路清晰、原理简单,缺点是大量的数字逻辑门电路不仅增大了电路的体积,降

低了可靠性,且存在“竞争冒险”问题,在编码器换相时易引入粗大误差,危害译码稳定性^[7],同时给电路硬件设计调试和校正环节带来不必要的负担。

鉴于硬件译码的各种弊端,数字化软件译码应运而生,其原理是依据译码数学逻辑关系进行软件编程和译码。该方法克服了硬件译码的种种弊端,被广泛应用于军工和民用领域。

2.2 光电信号细分

编码器精码刻划间隙宽度有限,因此,为获得高分辨率位置信息,必须进行电子学细分。细分方法有直接细分、鉴相细分、移相细分和幅值分割细分四种。前两者分别存在细分等级低和对匀速性要求较高的缺点,应用范围有限;而后两者是细分技术发展过程中典型的工程应用方法,在此分别予以介绍。

2.2.1 移相细分

在串联电阻的两端加上交变信号,基于电压合成的相移作用,在中间抽头处将得到相移信号,多路并联可得细分信号。移相电阻链细分原理如图4所示。

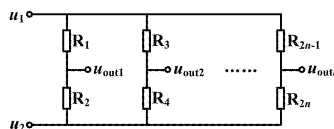


图4 移相电阻链细分原理图

Fig.4 Principle of the phase-shifting resistor chain subdivision

依据电路原理,有:

$$\frac{(u_1 - u_2)}{(R_1 + R_2)} = \frac{(u_1 - u_{out1})}{R_1} \quad (3)$$

令: $u_1 = \sin\theta, u_2 = \cos\theta$, 则

$$u_{out1} = k_1 \sin\theta + (1 - k_1) \cos\theta = K_1 \sin(\theta + \varphi_1) \quad (4)$$

式中: $k_1 = R_2 / (R_1 + R_2)$; $K_1 = \sqrt{k_1^2 + (1 - k_1)^2}$; $\varphi_1 = \arctan(R_1 / R_2)$ 。

由此可见,输出信号 u_{out1} 的相位角 $(\theta + \varphi_1)$ 由 φ_1 决定。令目标细分间隔为 $\Delta\varphi$, 则根据 $\varphi_2 = \varphi_1 + \Delta\varphi$, 可求出对应的电阻值比例。以此类推,可得到所有电阻值比例,组成电阻链,从而实现等间隔细分。

移相细分的缺点是随着细分数的增加,电路中电阻等元器件数量增高使细分电路变得复杂;“电阻噪声”和“电阻容差”等因素的存在使得移相电阻链细分电路的时间、空间稳定性较差,难以实现稳定的高倍细分;从原理上看,该方法对细分信号的完整性、等幅性和正交性要求均较高,进一步给高倍细分带来困难。因此,该方法仅适用于10~40细分。

2.2.2 幅值分割细分

幅值分割细分是一种基于信号幅值比较的细分方

法。传统的幅值细分是用一系列电压比较电路实现的,但是细分数的增加会导致电路复杂。因此,出现了一种数字化的软件幅值比较方法。然而,由于细分信号为正弦信号,在等相位间隔细分下,幅值的分割灵敏度不同,引入了较大的细分误差。针对上述情况,出现了两种幅值分割细分法,即构造正切细分和构造三角函数细分。其中,前者是目前较为热门的细分方法,应用比较广泛。

构造正切细分法的原理是首先对编码器输出的四路精码信号 $[U_0, U_{90}, U_{180}, U_{270}]$ 作差分(U_0 和 U_{180} 作差分, U_{90} 和 U_{270} 作差分)并放大,得到两路等幅、正交的细分信号 $ESIN$ 和 $ECOS$;然后对 $ESIN$ 和 $ECOS$ 进行A/D量化,得到 $ESIN_{\Delta}$ 和 $ECOS_{\Delta}$ 并送入处理器;最后,根据构造正切软件细分算法进行精码细分。

软件细分的步骤为首先把一个光栅周期按细分信号相位和幅值关系分为8份,每份为 45° ;然后在每个 45° 内依据 Tan 值进行进一步的插值细分,其中, $Tan = ESIN_{\Delta}/ECOS_{\Delta}$,由于 Tan 函数在 $[0, 45^{\circ}]$ 区间内的分割灵敏度近似均匀,因此细分误差很小;最后,通过软件查表得到对应的角度值。值得注意的是,在某些区间里, Tan 可能趋近于无穷,因此采用 $cTan$ 进行计算。这种细分方法电路规模小、速度快、精度高、细分数大(500~4 000),是目前应用最为广泛的方法。同时,其对信号质量要求依然较高。

在构造三角函数细分法中,首先,为获得线性度较好的分割函数,需构造三角函数 $\Phi = |ESIN_{\Delta}| - |ECOS_{\Delta}|$ 。该函数模型逼近三角波,具有很好的线性特性。构造三角函数细分的算法类似于构造正切函数细分法,其分割函数为:

$$\Phi = -\frac{8}{3\pi}\cos 2\theta - \frac{8}{35\pi}\cos 6\theta - \frac{8}{99\pi}\cos 10\theta + \dots \quad (5)$$

傅里叶展开式为:

$$F(\Phi) = -\frac{8}{3\pi}\cos 2\theta - \frac{8}{27\pi}\cos 6\theta - \frac{8}{75\pi}\cos 10\theta + \dots \quad (6)$$

得到线性误差为:

$$\Delta\Phi = \Phi - F(\Phi) = -0.0215\cos 6\theta - 0.082\cos 10\theta + \varepsilon \quad (7)$$

因此,引入的细分误差 $\Delta\Phi/F(\Phi) < 0.3\%$ 。在构造三角函数细分法中,低细分数时可直接细分;高细分数时可通过软件查表实现逐点误差补偿,实现高精度细分。

3 主流趋势与进展

随着编码器在航空航天领域的广泛应用,环境适应性差的问题日益突出。因此,基于“智能性”和“自适应性”的改进层出不穷,这在一定程度上提高了光

电编码器的可靠性和寿命,扩展了其适用范围。

3.1 光电信号强度补偿

空间温度的剧烈变化和光电器件的老化,严重影响了编码器光电信号的强度,导致粗码译码和精码细分的失败,因此,必须对编码器光电信号的强度进行补偿。

3.1.1 浮动基准补偿

粗码低位信号为近似梯形波,当信号强度减弱时,由于传统电路中比较电平恒定,导致整形后的信号占空比严重失调,带来粗大误差;且由于通光圈处光电器件与码道处光电器件所处的环境相同,使得其输出信号的变化趋势也相同,因此,将通光圈电流信号经采样、放大处理后作为比较电平,能够很好地保持粗码低位信号的占空比,避免了粗大误差的出现。

3.1.2 温漂补偿

发光二极管和光电三极管存在温度漂移^[8],这是引起编码器信号强度变化的主要因素。两者的温漂曲线如图5所示。

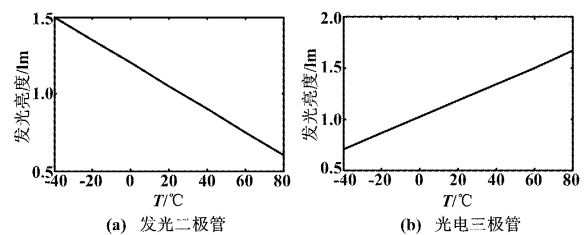


图5 光电器件温漂曲线

Fig. 5 Temperature drift of photoelectronics

从图5中可以看出,发光二极管呈负温度特性,光电三极管呈正温度特性,两者搭配使用,可以在一定程度上补偿编码器信号强度,但是无法达到完全匹配。本文通过计算得到匹配的差值,选择具有对应温度特性的热敏电阻作进一步补偿,使发射和接收端基本完全匹配。这样,编码器信号处理系统便对温度变化具有了自适应性,提高了其工作适用温度范围。

3.1.3 闭环控制补偿

随着IT产业的飞速发展,参数可控器件不断出现,具有代表性的可控增益放大器和数字电位计被广泛地应用到高精度编码器的信号强度补偿中,其原理简单,效果好。幅值闭环控制补偿原理如图6所示。

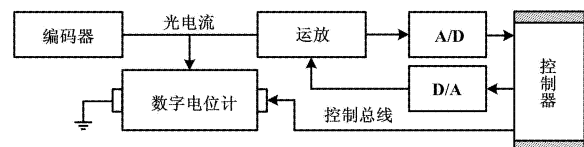


图6 幅值闭环控制补偿原理图

Fig. 6 Principle of amplitude closed-loop control compensation

这是一种基于闭环自动控制的信号强度补偿方法,其通过嵌入式软件控制运放和数字电位计实现。该方法具有调试简单和维护方便的特点。在空间应用中,该方法还可以依据遥测信息,利用软件在轨重注技术进行修改,实用性强。

3.2 光电信号正交补偿

精码四路信号相位彼此相差 90°,在理想情况下,要求 $a = b = c = w/4$ (w 为莫尔条纹一个周期的宽度),从而保证四路信号严格正交。莫尔条纹细分硬件示意图如图 7 所示。

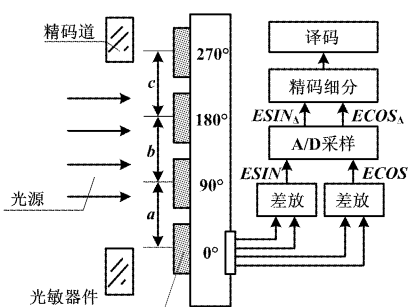


图 7 莫尔条纹细分硬件示意图

Fig. 7 Hardware of Moiré fringe subdivision

由于器件装调精度的限制,往往使 $a \neq b \neq c \neq w/4$,同时,各光敏接收器件以及后续电路性能的差异性和不均匀性,造成了用于细分的信号 $ESIN_{\Delta}$ 和 $ECOS_{\Delta}$ 不严格正交。这将导致精码译码中细分区间的划分不均匀,带来不同程度的细分误差。基于此,国内外科学工作者进行了深入的研究,并提出了一些补偿方法。

3.2.1 向量校正

向量校正方法是利用加在变阻器两端的交变信号的合成移相作用^[9],通过调节变阻器抽头得到补偿信号,从而对非正交信号进行补偿的一种方法。向量校正原理如图 8 所示。

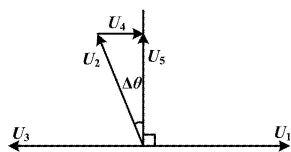


图 8 正交性偏差向量校正原理图

Fig. 8 Vector correction for orthogonal deviation

令 $U_1 = ESIN = A \angle \theta$, $U_2 = ECOS = B \angle (\theta + \Delta\theta)$, A, B 为幅值。通过调整电路参数得到补偿向量 U_4 ,再根据向量关系 $U_5 = U_2 + U_4$,将 U_2 和 U_4 通过硬件合成得到 U_5 ,保证 U_5 与 U_1 正交,从而达到对细分信号 $ESIN$ 和 $ECOS$ 进行正交补偿的目的。最后,通过调整电阻器使两路细分信号幅值相等,从而进行后续的细

分。该方法电路简单、装调方便、校正效果明显,能够很好地保证信号的正交性与等幅性,实用性强。

3.2.2 软件补偿

软件补偿法是一种基于细分信号相位差测量的补偿方法^[10]。首先,在一个信号周期内对细分信号进行等间隔采样;然后,通过数学方法计算其相位差,从而得到两路信号的正交偏差;最后,在细分时利用软件对其进行在线实时补偿。

令细分信号的正交偏差为 β ,则实际获得的两路细分信号可表示为:

$$\begin{cases} ESIN = A(\sin\alpha + 1) \\ ECOS = A[1 - \cos(\alpha + \beta)] \end{cases} \quad (8)$$

为得到与 $ESIN$ 理想正交的信号 $ECOS_{\perp} = A(1 - \cos\alpha)$,将 $\cos(\alpha + \beta)$ 进行泰勒展开,如式(9)所示。

$$\cos(\alpha + \beta) = \cos\alpha + (-\beta\sin\alpha) + \frac{\beta^2(-\cos\alpha)}{2} + \dots \quad (9)$$

取其一阶形式,则有:

$$ECOS = A(1 - \cos\alpha + \beta\sin\alpha) \quad (10)$$

截断误差为:

$$\gamma < \frac{A}{2!}(-\beta^2\cos\alpha) \quad (11)$$

可见,在相位偏差 β 不大的情况下,截断误差很小,由此证明该方法是合理的,于是得到:

$$ECOS_{\perp} = ECOS - A\beta\sin\alpha \quad (12)$$

式中 $ECOS/A$ 和 $\sin\alpha$ 均已知,只要测量出正交偏差 β ,便可以按照上式在软件中将其补偿,从而得到理想的正交细分信号 $ESIN$ 和 $ECOS_{\perp}$ 。正交偏差 β 的获取方法很多,比较直接的是内积法。令 $GSIN = \sin\alpha$, $GCOS = \cos(\alpha + \beta)$,则 $GSIN$ 与 $GCOS$ 正交偏差也为 β ,二者点积 D 为:

$$D = \int_t^{t+2\pi} \sin\alpha \cdot \cos(\alpha + \beta) d\alpha = -\pi\sin\beta \quad (13)$$

在 Matlab 中,相位与点积的关系曲线如图 9 所示。

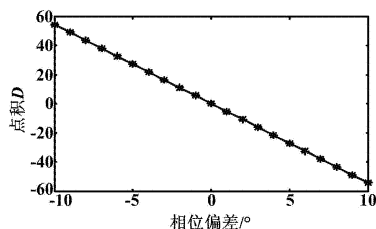


图 9 相位与点积的关系曲线

Fig. 9 Relational curve of ship of inner product and phase

由图 9 可以看出,在正交偏差 $\beta \in [-10^\circ, 10^\circ]$ 区间内,点积与相位偏差基本呈线性关系。通过最小二乘法

拟合并列表存储在硬件电路中,以供正交补偿所用。

值得一提的是,为保证等间隔采样,长春光机所的熊文卓副研究员提出了一种基于锁相倍频技术的自适应采样频率获取方法^[10],成功地解决了采样间隔不等造成的测量偏差。相位偏差的软件补偿实际上是一种后补偿方式,在 10° 以内的偏差范围内有较好的补偿效果;当正交偏差较大时,由于截断误差的存在和信号相移对等幅性的影响,不宜采用该方法进行补偿。

4 基于图像识别的编码器

基于图像识别的编码器是 NASA 研制的一种全新的、以图像处理技术为基础的绝对式光电编码器^[11-14]。它打破了以往的基于莫尔条纹计数的计量原理,采用计算图像质心移动量的方式来获得位置信息,最高可达 27 位分辨率,其目前已成功应用于 NASA 的精密制导传感器、扫描反射镜转台、干涉仪的扫描转台和六自由度平台等项目中。图像编码器组成原理框图如图 10 所示。

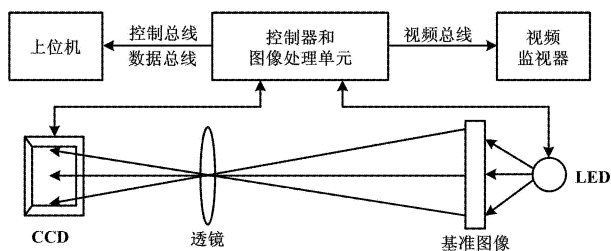


图 10 图像编码器组成原理框图

Fig. 10 Compositional principle of image encoder

图像编码器系统由控制和图像处理器、图像监视模块、面阵 CCD、光学模块和 LED 光源组成。在 LED 光源照射下,当前位置对应的编码器刻划图像被投影到光学系统,并传输到 CCD 表面,CCD 完成信号的光电转换并通过总线将图像数据上传给图像处理器,在图像处理单元中利用图像识别技术对图像进行判别和细分,得到当前位置信息。

基于图像识别的光电编码器拥有传统编码器无可比拟的优势。它涵盖了高精度微制版技术、光学成像技术、面阵 CCD 光电转换技术和图像处理与识别技术等;编码不受光栅信号的制约,可实现超高分辨力(高出传统编码器 40 倍);同时,编码器精度仅由每个基准信号的质心位置决定,容易获得高精度;此外,编码器可在低于 -100°C 的空间环境下正常工作。鉴于此,图像编码器将被陆续应用于 NASA 的哈勃空间望远镜类仪器、对地观测系统、红外干涉望远镜和亚毫米波的探测等项目中。

5 结束语

航空航天领域中高温差、高湿度、强烈震动等恶劣环境条件对光电编码器的应用提出了挑战,为了提高光电编码器的精度和适应性,其信号处理方法成为最佳的技术突破点。纵观国内外技术现状,随着嵌入式技术的发展,基于信号补偿的数字化和智能化解码方法已成为主流的发展趋势,而“图像编码器”作为一种全新的技术,也将成为实现超高分辨率和超高精度的有效途径。

本文通过对现有光电编码器信号处理技术的分析,希望能为国内从事相关技术的同行提供一定的参考,为国家国防事业做贡献。

参考文献

- [1] 贝治发,丁林辉. 绝对式智能多圈编码器[J]. 光学精密工程, 1995,3(4):32-36.
- [2] 孔智勇,赵红颖,熊文卓,等. 采用衍射、干涉技术提高光电轴角编码器的测角精度和分辨率[J]. 光学精密工程,2001,9(3):260-264.
- [3] 董莉莉,熊经武,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):198-202.
- [4] 熊经武,万秋华. 23 位绝对式光电轴角编码器[J]. 光学机械,1990(2):52-60.
- [5] 曹振夫. 小型绝对式矩阵编码器[J]. 光学机械,1985(5):65-70.
- [6] 叶盛祥. 光电位移精密测量技术[M]. 成都:四川科学技术出版社,2003.
- [7] Mancini D, Auricchio A, Brescia M, et al. Encoder system design: strategies for error compensation[C] // Proceedings of SPIE, Telescope Control System III, 1998,3351:380-386.
- [8] 喻洪麟. 光电编码器温度漂移与补偿方法[J]. 光子学报,1996,25(1):15-19.
- [9] 熊文卓,孔智勇,张炜. 光电轴角编码器光电信号正交性偏差的相量校正方法[J]. 光学精密工程,2007,15(11):1745-1748.
- [10] 罗刚,熊文卓. 光电轴角编码器光电信号正交偏差的测量和补偿方法[J]. 传感技术学报,2008,21(11):1853-1857.
- [11] Leviton D B. Ultra-high resolution, absolute, Cartesian electronic auto-collimator[C] // Proceedings of SPIE, Recent Developments in Traceable Dimensional Measurements II, 2003,5190:468-475.
- [12] Leviton D B. Recent advances and applications for NASA's new, ultra-high sensitivity, absolute, optical pattern recognition encoders[C] // Proceedings of SPIE, Imaging Technology and Telescopes, 2000, 4091:375-384.
- [13] Leviton D B. New ultra-high sensitivity, absolute, linear, and rotary encoders[C] // Proceedings of SPIE, Photonics for Space Environments VI, 1998,3440:100-111.
- [14] Leviton D B, Kirk J, Lobsinger L. Ultra-high resolution cartesian absolute optical encoder[J]. Proceedings of SPIE, Recent Developments in Traceable Dimensional Measurements II, 2003, 5190: 111-121.