

文章编号 1004-924X(2007)07-1077-07

基于双光栅尺的高速高精度位移测量方法

节德刚,刘延杰,孙立宁,陈智超,蔡鹤皋

(哈尔滨工业大学 机器人研究所,黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:提出了一种基于双光栅尺的高速高精度位移测量方法。在分析光栅尺测量原理的基础上,探讨双光栅尺信号的切换合成;通过对莫尔条纹电子细分计数脉冲切换误差的分析,研究减小切换合成误差的方法;采用可编程逻辑器件FPGA设计信号处理电路,并通过逻辑、时序仿真,验证了本方法的可行性。实验结果表明:此方法在光栅尺移动速度 >1 m/s时,具有10 nm分辨率,可满足新一代运动定位系统对高速高精度位移测量的要求。

关键词:位移测量;双光栅尺;切换合成;FPGA

中图分类号:TH822 **文献标识码:**A

A high speed and high precision displacement measurement method using double grating scales

JIE De-gang, LIU Yan-jie, SUN Li-ning, CHEN Zhi-chao, CAI He-gao

(*Robotics Institute of Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China*)

Abstract: A high speed and high precision displacement measurement method based on double grating scales was presented, and the signal's switching and merge of double grating scales was discussed based on the analysis of measuring theory of grating scale. By analysis of the subdivision error of Moire fringe, the error of the count impulse's switch process was decreased. A signal process circuit was designed using the programmable logic device-FPGA, and the feasibility of method was proved through the logical and timing simulation by the design software of FPGA. Experimental results show that while the maximum allowable moving speed of grating is grater than 1 m/s, the measurement resolution is 10 nm. It can satisfy the system requirements of high speed and high precision displacement measurement.

Key words: displacement measurement; double grating scale; switching and merging; FPGA

1 引言

高速高精度位移测量技术在面向集成电路(IC)封装和微机电系统(MEMS)制造等领域有

着广泛的应用^[1-6]。位移测量的高速和高精度是两个相互制约的指标,其中,作为位移测量装置的传感器是限制高速与高精度共存的重要环节。例如,作为位移传感器的单个光栅尺的分辨率可达到纳米级,但由于受信号检测的扫描频率限制,单

收稿日期:2006-09-15;修订日期:2007-03-21.

基金项目:国家“973”计划资助项目(No. 2003CB716202);黑龙江省科技攻关计划资助项目(No. GC05A509)

个光栅尺检测的最大允许速度往往与其测量分辨率成反比,要想实现纳米级位移的精密测量,系统运动速度会受到光栅位移传感器测量极限速度的限制(一般 $<200\text{ mm/s}$);要实现对高速度运动的系统进行位移测量,测量步距又受到光栅位移传感器分辨率的限制(一般 $>0.5\ \mu\text{m}$)。可见,单个光栅位移传感器同时满足高速和高精度的位移测量是十分困难的。解决高速高精度位移测量的办法一般只能从提高位移传感器的性能着手,这种方法需要高密度的标尺刻线、复杂的光电扫描系统、高精度的电子元器件,实现起来比较困难。目前,大多数光栅尺测量技术集中在提高单个光栅尺的测量精度及分辨率的研究^[7-9],文献[10]提出一种高分辨率、高频响的光栅纳米测量细分方法—动态跟踪细分法,得到在 5 nm 分辨率测量时, 100 kHz 的频响速度,但测量允许速度仅为 0.5 mm/s ,仍无法提高测量的允许速度。

本文提出一种基于双光栅尺的高速高精度位移测量方法。通过对光栅尺测量原理和切换误差的分析,研究双光栅尺信号切换合成及减小切换合成误差的方法。采用可编程逻辑器件 FPGA 设计信号处理电路,电路的逻辑、时序仿真和实验研究验证了本方法的有效性。本方法的研究成果可满足新一代运动定位系统对高速高精度的要求,在 IC 封装、超精密加工等领域应用具有显著价值。

2 光栅尺测量原理

光栅尺测量的基本原理为:标尺与扫描掩模之间的相对移动,在光源照射下形成莫尔条纹,莫尔条纹经过光电传感器转换为近似的正余弦电信号,就是原始的光栅扫描信号。然后采用不同的电子细分法,得到不同测量步距的计数脉冲信号,脉冲信号一般是两路正交的信号,这两路信号接入后续的可逆计数电路,计数器的计数值再乘以测量步距则为光栅尺的位移测量值。

光栅尺测量的最大允许移动速度是由光栅尺的输出频率及光栅扫描信号的信号周期决定的,它们有如下关系:

$$V_{\max} = f_{\max} \cdot sp, \quad (1)$$

式中, V_{\max} 为光栅尺最大允许移动速度,单位: mm/s ; f_{\max} 为光栅尺最大输出频率,单位: kHz ; sp

为光栅信号的信号周期,单位: μm 。

由式(1),在光栅信号的信号周期不变的前提下, V_{\max} 与光栅尺输出频率成正比。测量步距对应着分辨率,若提高电子细分电路的细分倍频数,则分辨率提高(测量步距减小),由于受到电子细分电路的响应频率及后续计数电路的输入频率的限制,随着细分倍数的提高,光栅尺的输出频率下降,则测量的最大允许速度下降,所以光栅尺的测量步距与测量的最大允许移动速度 V_{\max} 成反比。因此,用于高速测量的光栅尺(最大允许移动速度 $\geq 1\text{ m/s}$),其分辨率一般为微米级($0.1\sim 2\ \mu\text{m}$),而用于低速测量的光栅尺(速度 $\leq 500\text{ mm/s}$),分辨率可达到纳米级($1\sim 50\text{ nm}$)^[11]。

3 双光栅尺测量信号的切换合成方法

单个光栅尺在位移测量时存在高速测量与高分辨率测量的矛盾,但高速、高精度定位系统在定位时刻的速度并不高,而在定位前存在高加速启动、高速运动的过程,因此本方法可采用两个不同性能的光栅尺(双光栅尺)来完成上述情况的测量:一个适于高速状态下、低分辨率测量的光栅尺(粗光栅尺),一个适于低速状态下、高分辨率测量的光栅尺(精光栅尺)。在系统运动过程由高速转为低速的时刻,把双光栅尺的计数脉冲作切换,计数值作合成,以获得定位时刻高分辨率的位移测量值。

如图 1 所示,梯形曲线为系统在一个运动周期 t_s 内的运动速度 V 曲线。系统开始运动时,粗光栅尺和精光栅尺也同时开始测量系统的位移变化情况。由于单个光栅尺具有最大允许移动速度与其分辨率成反比的特性,因此,在加速过程时段 1、匀速过程(速度为 V_0)时段 2 和系统运动速度 V 大于精光栅尺的最大允许移动速度 V_{\max} 的减速过程时段 3 中,粗光栅尺的测量信号有效,而精光栅尺的测量信号无效;在 $V < V_{\max}$ 的减速时段 4 中,精光栅尺的检测信号有效。双光栅尺测量值切换合成方法采用双光栅尺双重计数方式,即在高速运动阶段(在加速过程时段 1、匀速过程时段 2 和 $V > V_{\max}$ 的减速过程时段 3 中),由粗光栅尺的计数脉冲作为位移测量信号,此时利用粗光栅尺具有较高的测量允许移动速度的特性,使满量程获得较大的最大允许测量速度($> 1\text{ m/s}$);当

系统进入低速运动时刻(在 $V < V_{\max}$ 的减速过程时段 4 中),以精光栅尺的计数脉冲信号作为位移测量信号,此时利用精光栅尺具有高分辨率的特性,使系统在末端定位点的测量分辨率达到纳米级。

双光栅计数脉冲切换方法为:首先确定切换的速度阈值为 V_{\max} ,在高速状态下(图 1 中速度降至 V_{\max} 前的时段 1、2 和 3),用粗光栅尺作位移测量的同时对粗光栅的测量信号作速度检测,当判断出 V 降至切换速度阈值 V_{\max} 后,用一个粗光栅计数脉冲的上升沿触发清零信号,快速清零精光栅计数器,此后的低速状态(图 1 中时段 4),即精光栅尺清零后,精光栅尺的测量计数值有效。双光栅尺计数脉冲的切换过程,实际上是在某一刻(粗光栅计数脉冲上升沿出现的瞬间)快速清零精光栅计数器的过程。

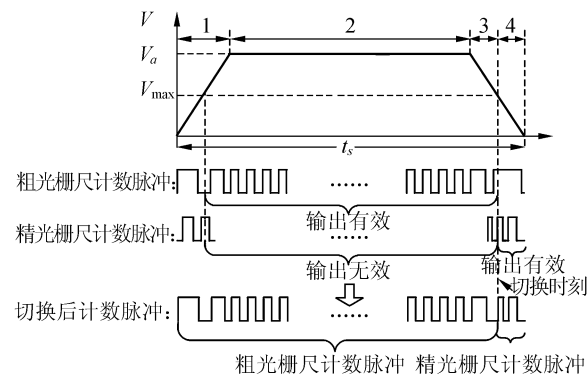


图 1 双光栅尺计数脉冲的切换过程

Fig. 1 Switch process of double grating scales' count impulse

在切换时刻,即快速清零精光栅计数器的瞬间,将粗光栅的计数值锁存。设粗光栅的计数值为 a ,切换时刻的锁存值为 c ,精光栅的计数值为 b ,且假设粗光栅尺分辨率为精光栅尺分辨率的 n 倍。则双光栅计数值的合成方法为:在全程 $V > V_{\max}$ 的时段 1、2 和 3 中,由于精光栅计数值无效,位移测量的输出信号为粗光栅尺的计数值 a ,此过程以精光栅尺分辨率为单位,作运算 $a \times n$ 后输出;在 $V < V_{\max}$ 的时段 4 中,位移测量输出值为精光栅计数值 b 与粗光栅锁存值 c 的叠加,此过程以精光栅尺分辨率为单位,作运算 $c \times n + b$ 后输出。合成过程的原理见图 2。

双光栅尺信号切换合成法的硬件实现原理

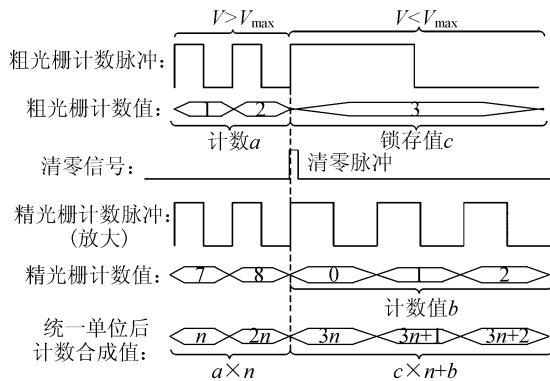


图 2 双光栅计数值合成处理原理图

Fig. 2 Schematic of the signal's switching and merging of double grating scales

如图 3。双光栅尺输出的 A、B 两路正交脉冲信号接入后续电路,后续电路首先对 A、B 两路正交脉冲信号进行通用的四倍频,辨向处理,再送往可逆计数器。速度判断模块实时地将速度检测值与 V_{\max} 比较,符合切换条件后,触发精光栅计数器清零,合成模块完成上述的合成运算,最后通过接口电路把最终处理所得的结果反馈给控制系统,作为位移测量值。

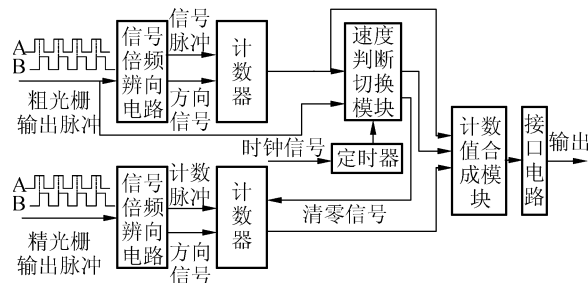


图 3 双光栅尺信号切换合成法的硬件原理图

Fig. 3 Schematic of the hardware implementation to the signal's switching and merging of double grating scales

4 双光栅尺计数脉冲切换的误差分析

由于受到光栅制造、传感器设计的限制,光栅尺测量不可避免地存在测量误差^[12]。测量误差大体上可分为刻尺误差的系统误差及一个莫尔条纹信号周期内的随机误差,随机误差又以电子细分误差为主。本方法在切换时刻的误差主要有两方面:(1)粗光栅计数脉冲上升沿的重复性误

差;(2)切换时刻硬件时延引入的误差。下面分析这两种误差,并提出减小误差的合理方法。

4.1 粗光栅计数脉冲上升沿的重复性误差

莫尔条纹信号经过电子细分就会有细分误差,一般情况下,把电子细分后的计数脉冲信号作为测量信号,此时粗光栅计数脉冲上升沿的重复性误差就是细分误差。细分误差主要是由莫尔条纹信号偏离理想状态而引入的随机误差。理想情况下光栅系统输出的莫尔条纹信号应是幅值稳定的正交、正余弦信号,信号中任何偏离这一假设的情况均可能带来细分误差,如信号的正弦性、信号幅值的稳定性、两路信号的正交性等误差都会经过电子细分反映到最终位移测量结果上,从而影响测量的精度^[13]。

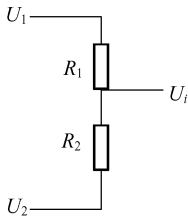


图 4 莫尔条纹电阻链细分原理图

Fig. 4 Schematic of the Moiré fringe's resistance chain subdivision

当采用电阻链进行电子细分时(如图 4),如果莫尔条纹信号叠加有三次谐波(信号的非正弦性),则细分后便会引入细分误差。设理想的正交、正余弦基波信号为 $U_1 = \sin\omega t$, $U_2 = -\alpha \cos\omega t$,则经过图 4 移相电阻链细分后的移相信号可写成:

$$U_i = \frac{\sqrt{R_1^2 + R_2^2}}{R_1 + R_2} \sin(\omega t - \varphi), \quad (2)$$

其中,

$$\varphi = \arctan(R_1/R_2). \quad (3)$$

设三次谐波的系数为 α ,则带有非正弦性的两相正交信号应写成: $U_1' = (\sin\omega t + \alpha \sin 3\omega t)$, $U_2' = -(\cos\omega t + \alpha \cos 3\omega t)$,经过图 4 后的移相信号应写成:

$$U_i' = \frac{\sqrt{R_1^2 + R_2^2}}{R_1 + R_2} [\sin(\omega t - \varphi) + \alpha \sin(3\omega t - \varphi)]. \quad (4)$$

显然,使 U_i' 为零的相角不再是 φ 。这将使细分信号的位置发生变化,即产生细分误差。设移相角的偏移是 $\Delta\varphi$,那么使 U_i' 等于零的移相角为:

$$\varphi' = \omega \cdot t = \varphi + \Delta\varphi, \quad (5)$$

由式(5),使 $U_i' = 0$ 的 φ' 应满足下面公式:

$$\sin(\varphi' - \varphi) + \alpha \sin(3\varphi' - \varphi) = 0, \quad (6)$$

由式(6)解得 $\Delta\varphi$ 的表达式为:

$$\tan(\Delta\varphi) = \frac{\alpha \sin 4\varphi'}{\alpha \cos 4\varphi' - 1}, \quad (7)$$

由式(7)可看出, φ' 在 0° 、 90° 、 180° 、 270° 上不存在三次谐波引起的移相角偏差,即不存在细分误差,但在信号周期的其他位置上,细分误差是不可避免的。

本方法采用双光栅尺测量信号的切换合成值作为测量值,因此粗光栅尺计数脉冲上升沿的重复性误差将影响本方法的测量精度,为提高本方法的测量精度,应最大程度减小粗光栅尺测量的随机误差—细分误差。由于实际的光栅扫描信号的非理想性及各种电子细分方法的优劣性,经过电子细分后细分误差是不可避免的。由于莫尔条纹信号在信号周期的过零处不存在细分误差,因此不对莫尔条纹信号做细分,就可得到信号周期过零处的计数脉冲上升沿。也就是说,可以不对莫尔条纹信号进行电子细分,直接将莫尔条纹信号经过滤波,整形后接入后续的计数电路使用。本测量方法对粗光栅尺的分辨率要求不高,可对粗光栅尺的莫尔条纹信号不做电子细分,以提高粗光栅尺的计数脉冲上升沿的精度,从而提高双光栅尺信号切换合成法的测量精度。

4.2 切换时刻硬件时延引入的误差

在使用电子器件实现双光栅信号切换过程中,由于存在硬件的响应时延,导致响应粗光栅的一个计数脉冲上升沿触发,然后快速清零精光栅计数器的这个过程必然存在时延(可称为清零时延 t)。如图 5 所示, t 的大小成为切换误差的主要因素。若 t 过大,则会导致在时间 t 内,系统已运动数个精光栅尺的测量步距,造成较大的切换误差。为使切换误差最小,必须把清零时延 t 引入的误差控制在一个精光栅尺的测量步距内,此时信号切换的关键在于将 t 控制在 V_{\max} 速度下的一个精光栅计数脉冲的周期内。因此,在设计实现电路时主要考虑的是选择快速的脉冲上升沿触发方式以达到最小的清零时延 t 。

ASIC(专用集成电路)具有用户现场可编程,响应快速,特别是信号硬中断的特点,符合切换误差对硬件的要求,用可编程芯片完成双光栅尺信

号的检测、切换、合成是较佳的方案。

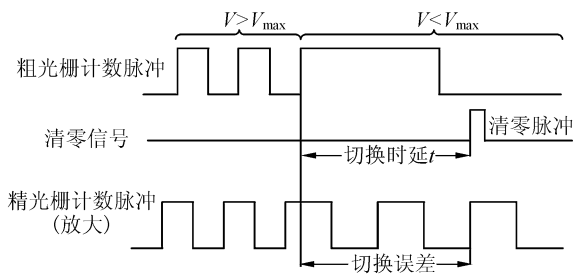


图 5 清零时延状态下的切换误差

Fig. 5 Error of switch process with delay time at zero clearing moment

5 基于 FPGA 的电路设计、仿真

FPGA(现场可编程门阵列)是专用集成电路(ASIC)中集成度最高的一种。运用 FPGA 芯片针对图 3 的实现原理图进行了各电路模块的设计。设计的电路模块可通过 FPGA 开发软件的仿真功能,检验逻辑、时序的正确性。

双光栅尺信号处理电路板卡如图 6 所示。采用 Max+plus II 开发软件设计的电路模块包括:

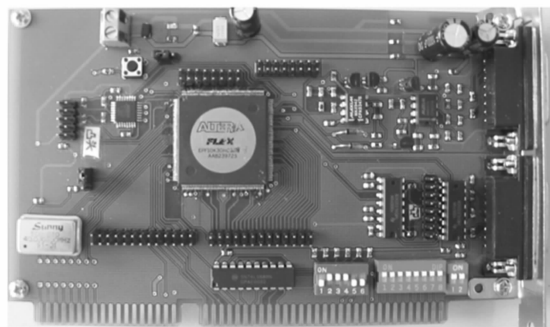


图 6 双光栅信号处理板卡

Fig. 6 Dual grating signal process board

双光栅尺信号的四倍频计数、辨向模块;双光栅尺信号的速度判断模块;双光栅尺计数值的切换合成模块。利用 Max+plus II 的时序仿真功能对设计电路进行综合仿真。仿真中设定粗光栅尺分辨率为精光栅尺 50 倍,采用 40 MHz 的全局时钟,设计脉冲发生电路,以模拟双光栅尺各自输出的两路 A、B 正交脉冲信号,通过改变发出脉冲的频率,来模拟系统运动速度的变化情况。仿真结果如图 7, (1)为仿真时间, (2)为粗光栅计数值 a ,

(3)为粗光栅锁存计数值 c , (4)为精光栅计数器清零脉冲, (5)为精光栅计数值 b , (6)为双光栅尺计数值的合成值。

由仿真结果可见,当速度降至切换速度阈值 V_{max} 后,在粗光栅计数值发生跳变的瞬间(粗光栅计数脉冲上升沿),精光栅计数器被清零。仿真结果显示,清零脉冲的时延 t 非常小,并没有超过此刻的一个精光栅计数脉冲周期,说明采用 FPGA 作为硬件实现电路能满足切换时刻的时延要求。(6)中的合成值亦符合设计的逻辑要求。仿真结果验证了双光栅测量信号切换合成的有效性。

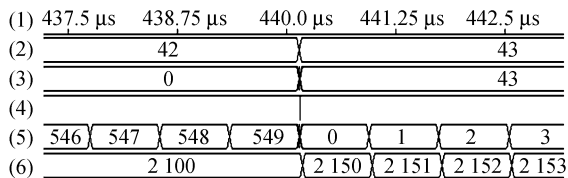


图 7 双光栅信号切换合成值仿真图

Fig. 7 Simulation graph of switching and merging of dual grating signals

6 实验研究

实验系统构成如图 8 所示,由直线运动平台、粗光栅、精光栅、双光栅尺信号处理电路板卡和嵌入式数字 I/O 板卡组成。本研究基于日本 YOKOGAWA 公司 LM_TM 系列直线运动平

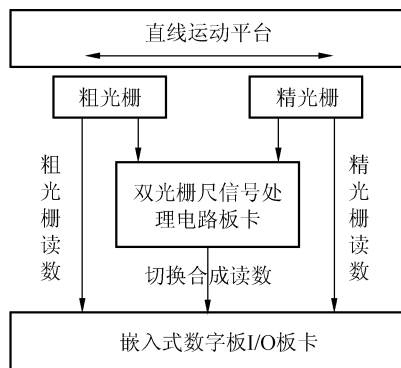


图 8 实验系统构成

Fig. 8 Structure of experimental system

台;采用英国 RENISHAW 公司的 RGH25U 型读数头 0.5 μ m 分辨率数字量输出作为粗光栅,采用英国 RENISHAW 公司的 RGH25F 型读数头 10 nm 分辨率数字量输出作为精光栅,并用自

行研制的双光栅尺信号处理电路板卡;采用深圳摩信公司的 MCT8000F 型运动控制器作为嵌入式数字 I/O 板卡。在恒温、隔振的环境下,直线运动平台以 500 mm/s 的最大速度沿轴向运动 10 mm,粗光栅和精光栅读取的位移脉冲信号经双光栅尺信号处理电路板卡切换合成,粗光栅读数、精光栅读数和切换合成读数分别由嵌入式数字 I/O 板卡存储记录。直线运动平台的位移测量如

表 1 直线运动平台的位移测量

Tab. 1 Motion position measurement of linear table

采样时间 /ms	运动速度 /mm/s	粗光栅 读数/ μm	精光栅 读数/ μm	切换合成 读数/ μm
2.0	3.0	2.5	2.73	2.5
5.5	42.0	58.5	57.05	58.5
20.5	465.0	468 3.0	425.88	465.0
22.0	505.0	549 6.5	435.52	549 6.5
24.5	448.0	630 9.5	440.36	630 9.5
38.0	66.0	978 2.5	530.52	978 2.5
41.5	23.0	987 7.5	561.26	987 7.63
45.0	17.0	996 5.5	649.34	996 5.85
160.5	0.0	999 9.5	683.21	999 9.71
338.0	0.0	999 9.5	683.29	999 9.99

表 1 所示,精光栅最大允许移动速度是 30 mm/s。当平台运动速度上升且 >30 mm/s 时,切换合成模块只输出粗光栅 $0.5 \mu\text{m}$ 分辨率位移读数;当平台运动速度下降到 30 mm/s 时,开始粗/精光栅读数脉冲切换合成,并输出合成后的 10 nm 分辨率位移读数。因此,基于双光栅尺高速高精度位移的测量获得了满意的效果。

7 结 论

本文针对光栅位移传感器最大允许移动速度与高精度测量的矛盾,提出一种基于双光栅尺的高速高精度位移测量方法,采用双光栅尺计数脉冲的切换合成,实现高速高精度位移测量。通过对双光栅测量原理和切换误差的分析,设计了信号处理电路;电路的逻辑、时序仿真验证了本方法的可行性。实验研究表明:此方法在光栅尺移动速度 >1 m/s 时,具有 10 nm 分辨率。本方法的研究成果可满足新一代运动定位系统对高速高精度的要求,在 IC 封装、超精密加工等领域的应用具有显著价值。

参考文献:

- [1] SCIAMMARELLA C A. Overview of optical techniques that measure displacements; Murray Lecture[J]. *Experimental Mechanics*, 2003, 43(1): 1-19.
- [2] LIEW L A, RAJ R. Manufacturing and applications of polymer and ceramic MEMS from a novel material-process for harsh environments[C]. *Smart Structures and Materials 2003 Conference*, 2003: 2-6.
- [3] ZHAO B. Micro-measurement using grating microscopy[J]. *Sensors and Actuators*, 2000, 80: 256-264.
- [4] 节德刚,刘延杰,孙立宁,等. 一种宏微双重驱动精密定位机构的建模与控制[J]. *光学 精密工程*, 2005, 13(2): 171-178.
JIE D G, LIU Y J, SUN L N, *et al.*. Modeling and control of a macro-micro dual-drive ultra-precision positioning mechanism[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(2): 171-178. (in Chinese)
- [5] 孙立宁,马立,荣伟彬,等. 一种纳米级二维微定位工作台的设计与分析[J]. *光学 精密工程*, 2006, 14(3): 406-411.
Sun L N, MA L, RONG W B, *et al.*. Micro/nano technology and fine mechanics design and analysis of a 2-DOF nanopositioning stage[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(3): 406-411. (in Chinese)
- [6] 楚中毅,崔晶,孙立宁,等. 双重驱动 2-DOF 平面并联机器人系统的研究[J]. *光学 精密工程*, 2006, 14(3): 456-462.
CHU ZH Y, CUI J, SUN L N, *et al.*. Research of a novel dual-driven 2-DOF planar parallel robot[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(3): 456-462. (in Chinese)
- [7] PEDRO M, SILVA B. An overview and a contribution to the optical measurement of linear displacement[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2001, 1(4): 322-332.
- [8] SUN J, WANG W. An optical interferometry system for measuring three-dimensional displacements[J]. *Instru-*

ment and Experiment Technology, 2004, 47(5): 711-714.

- [9] 苏绍璟,刘辉,吕海宝,等. 纳米级位移分辨率双光栅系统的多普勒分析[J]. 光学精密工程, 2003, 11(1):17-20.
SU SH J, LIU H, LU H B, *et al.*. Doppler analysis for double-grating displacement measurement system with nanometer resolution[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 11(1): 17-20. (in Chinese)
- [10] 余文新,胡小唐,邹自强. 一种高分辨率和高频响的光栅纳米测量细分方法[J]. 天津大学学报, 2002, 35(1):1-4.
YU W X, HU X T, ZOU Z Q. A subdivision method with high resolution and high response speed in grating-based nanometrology[J]. *Journal of Tianjin University*, 2002, 35(1): 1-4. (in Chinese)
- [11] 卢国纲. 直线位移传感器发展的回顾和当今产品[J]. *WMEM*, 2005(2):78.
LU G G. The development retrospect and nowadays product of the linear displacement sensor[J]. *WMEM*, 2005(2):78. (in Chinese)
- [12] 纪刚,叶军. 一种可弥补信号缺陷的细分方法[J]. 光学精密工程. 1997, 5(1):91-94.
JI G, YE J. A divide method remedying signal defects[J]. *Opt. Precision Eng.*, 1997, 5(1):91-94. (in Chinese)
- [13] 林鹏,陈小强,袁祥辉,等. 粗光栅线位移测量系统细分误差补偿前后的精度分析[J]. 计量学报, 2002, 23(1):26-29.
LIN P, CHEN X Q, YUAN X H, *et al.*. Precision analysis on the coarse grating linear encoder before and after eliminating the subdivision error[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2002, 23(1): 26-29. (in Chinese)

作者简介:节德刚(1978—),男,黑龙江人,博士,主要研究方向为机器人智能控制、高速高精度定位技术。E-mail: joshjie@hit.edu.cn