

文章编号 1004-924X(2008)08-1429-07

基于 PSD 的地下管线探测装置设计与分析

沈林勇, 李亚旻, 章亚男, 钱晋武

(上海大学 机电工程与自动化学院, 上海 200072)

摘要:将位置敏感器件(PSD)和其它元器件相组合,组成了介入式测量装置。通过使测量装置沿管道行进,获得管道内若干个测量点的方位,进而拟合得到地下管线的方位。该探测装置不受地下管线埋藏深度、密集程度和周围环境的影响,适用于内径为80~130 mm、弯曲半径为50~1 000 m的管线。通过探测摆角的实例,得出实际测量值在水平方向上的测量误差为7.45%,竖直方向上的测量误差为1.07%。

关键词:位置敏感器件,非开挖,地下管线,介入式测量

中图分类号:TP242.3;TP212.12 **文献标识码:**A

Design and analysis of underground pipeline detecting system based on PSD

SHEN Lin-yong, LI Ya-min, ZHANG Ya-nan, QIAN Jin-wu

(College of Mechatronics Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: With combination of a Position Sensitive Device(PSD) and other components, a kind of detecting system in interposition was developed for detecting underground pipeline. The system detected the orientation data at different measuring sites to obtain the orientations of underground pipeline by walking along the pipeline, which could be used in those pipeline with inter diameter of 80~130 mm and bend diameter of 50~1 000 m ignoring the burying depth, the concentration of pipeline and other environments. The analyzing results of experiment show the relative error of the detecting method is 7.45% in horizontal orientation and 1.07% in vertical orientation.

Key words: Position Sensitive Device(PSD), trenchless, underground pipeline, interposition measurement

1 引言

近年来,现代非开挖技术在我国得到日益广泛的应用。在非开挖施工中,需要对铺设的地下管线位置形状进行检测,以确保新铺设的管线不会损坏原有的管线,也防止新铺设的管线被未来的铺设工程所破坏。但目前国内外采用的地下管

线检测方法存在着诸如定位精度不高,探测误差随挖掘深度的增加而显著加大、探测深度不够、对地下管网密集交错的区域探测困难等问题。因此,有必要探索一种新的测量方法,对已有的地下管道进行精确位置探测。

本课题组研究了一种新的非开挖地下管线三维探测机器人^[1],让探测机器人沿管道内部前进,通过角度传感器获得管道内各个测量点的角度,

收稿日期:2007-12-15;修订日期:2008-02-15.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 50475182);上海市重大科技攻关项目(No. 04dz12011);上海市第二期重点学科基金资助项目(No. Y0102)

再由几何关系推导出各测量点之间的位置关系，并拟合得到整条地下管线的曲线^[2]。

通过前期的研究，目前该三维探测机器人已经能够通过角度传感器测量管道内各个测量点的倾角和摆角，并计算出管线位置。该机器人对管线倾角的测量较为准确，但对于摆角的测量不够准确，原因是用来测量摆角的传感器是采用测量大地磁场的原理工作，这种传感器易受到周围环境中磁性物质和电磁场的干扰，而影响测量结果。为解决这一问题，本文采用 PSD(Position Sensitive Device)来测量摆角，从而获得更精确的测量结果。

2 测量原理

如图 1 所示，在进行地下管线探测时，收放线机构拖动传感头在管道内行进，传感头将采集到的信号发送给下位机，再通过上位机得到拟合曲线。

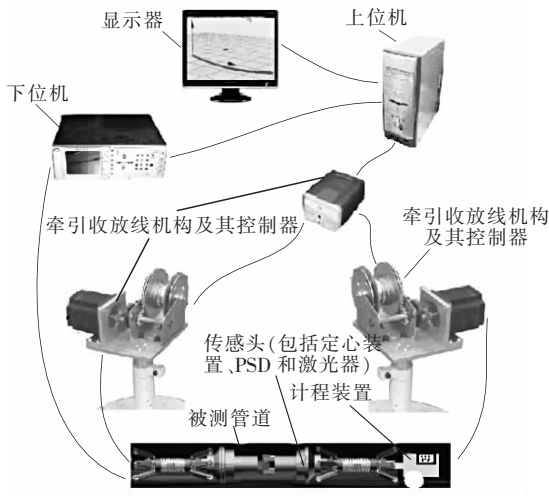


图 1 系统概念图

Fig. 1 Concept illustration of system

PSD(Position Sensitive Device)是一种基于横向光电效应的新型的半导体光电位置敏感探测器，除了具有光电二极管阵列和 CCD 的定位性能外，还具有灵敏度高、分辨率高、响应速度快和电路配置简单等特点^[3-4]，可用于非接触的位移测量系统^[5]。本文利用 PSD 检测出管道弯曲引起激光入射位置在 PSD 上的变化值，由该变化值推出管道弯曲引起的角度变化。

其方法是将 PSD、激光器和管道中的定心机构等结构部件组合起来^[6]，通过测量管道中心轴线上相邻两测量点切线方向的变化角度，获得每个测量点切线的摆角，继而通过计算获得管线的空间位置信息^[7]。

2.1 测量原理

用 PSD 测管线形状的工作原理如图 2 所示，传感器有两个定心机构，一个用来固定激光器，一个用来固定 PSD。激光的发射方向为管道的切线方向；PSD 的横轴应与水平面平行，PSD 的传感平面应与被测管道轴心线垂直；且激光发射点与 PSD 的传感平面需保持固定不变的距离。

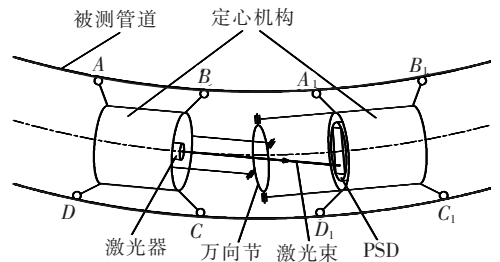


图 2 PSD 测量原理图

Fig. 2 Measuring principle illustration of PSD

图 2 中，ABCD 是经过简化的固定激光器的定心机构，A₁B₁C₁D₁ 是经过简化的固定 PSD 的定心机构，万向节用于保证激光器与 PSD 之间距离不变，并能随管道弯曲而相对转动。如图 3 所

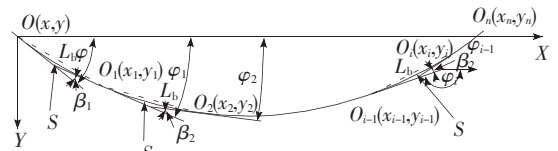


图 3 地下管线方位角

Fig. 3 Azimuths of underground pipeline

示，通过得到每两个测量点的切线间的夹角 β_i 和起始点的摆角 φ ，计算出每个测量点相对于起始点的位置，其递推式为公式(1)。

$$\begin{cases} x_i = x_{i-1} + L_b \cos\left(\varphi_{i-1} + \frac{\beta_i}{2}\right) \\ y_i = y_{i-1} + L_b \sin\left(\varphi_{i-1} + \frac{\beta_i}{2}\right) \end{cases}, \quad (1)$$

式中： x_{i-1}, y_{i-1} — O_{i-1} 点的坐标；

x_i, y_i — O_i 点的坐标；

φ_{i-1} — $i-1$ 点处切线的摆角；

- φ_i — i 点处切线的摆角;
- β_i — $i-1$ 点处切线与 i 点处切线间的夹角;
- L_b —相邻两测量点之间的距离;
- S —相邻两测量点之间的管道弧长。

由于管道弯曲半径很大,因此认为 $L_b \approx S$ 。由式(1),根据初始点的坐标和两测量位置之间的切线夹角 β_i 可递推出第 $i+1$ 点的坐标值。

2.2 管道内两个测量点切线之间偏转夹角计算

(1)管道仅在平面内弯曲时切线之间的偏转夹角 β_i

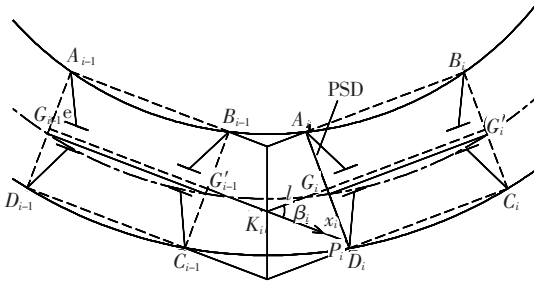


图 4 偏转角度 β_i 的计算原理图

Fig. 4 Principle illustration of calculating deflection angle β_i

如图 4 所示,定心机构的几何中心线 $G_{i-1}G'_{i-1}$ 与管道中轴线相割。由于定心机构 ABCD 的定心作用,可以用 $G_{i-1}G'_{i-1}$ 代替测量点的切线,通过光斑在 PSD 水平轴的位置值 x 和激光发射点与 PSD 接触面之间的距离值 l ,求出每两个测量点之间的夹角 β_i 。由图 4 中 $\Delta K_i G_i P_i$ 的几何关系可得:

$$\beta_i = \arctan \frac{G_i P_i}{G_i K_i} = \arctan \frac{x_i}{l}. \quad (2)$$

由于管道弯曲半径很大,可以认为 β_i 很小,所以:

$$\beta_i = \arctan \frac{x_i}{l} \approx \frac{x_i}{l}, \quad (3)$$

式中: x_i —第 i 个测量点处,光斑在 PSD 传感平面水平轴上的位置值;

l — K 与 PSD 接触面之间的距离。

(2)管道在空间内弯曲时切线之间在水平面内的偏转夹角 β_i

同理可推出管道在空间内偏转时水平面内的偏转夹角 β_i 。由图 5 中的几何关系可得:

$$\begin{cases} k_{i-1} g_i = K_{i-1} G_i \cos \theta_i \\ k_{i-1} p_i = K_{i-1} P_i \cos \theta_i \\ g_i p_{i-1} = \sqrt{(x_i^2 + y_i^2) - (G_i g_i - P_{i-1} p_{i-1})^2} \end{cases}, \quad (4)$$

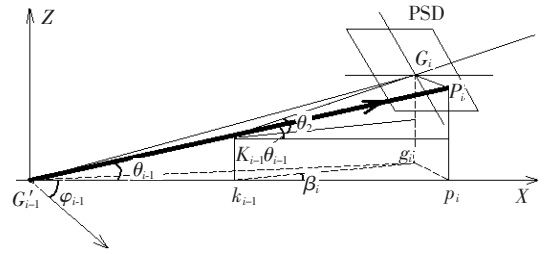


图 5 管道在空间弯曲时切线之间的偏转夹角 β_i 的计算原理图

Fig. 5 Principle illustration of calculating deflection angle β_i between tangents when pipeline bends in space

$$\text{因为 } \cos \beta_i = \frac{k_{i-1} g_i^2 + k_{i-1} p_{i-1}^2 - g_i p_{i-1}^2}{2k_{i-1} g_i \cdot k_{i-1} p_{i-1}},$$

故

$$\beta_i = \arccos \frac{2l^2 (1 - \sin \theta_i \sin \theta_{i-1}) - (x_i^2 + y_i^2)}{2l^2 \cos \theta_i \cos \theta_{i-1}}, \quad (5)$$

式中, θ_{i-1} —管道在 $i-1$ 点时的倾角;

θ_i —管道在 i 点位置的倾角;

x_i, y_i —第 i 个测量点处,光斑在 PSD 传感平面上的坐标值。

3 测量装置的结构设计

本装置的设计要满足激光器、PSD 的定心和适应管道径向尺寸的变化要求。

该装置的工作管道公称直径为 100 mm,装置需适应的管径变化范围为 80~130 mm。定心和变径功能由六爪定心机构来实现。六爪定心机构利用弹簧力同时驱动若干定心爪,使多个定心爪同时伸缩,从而达到改变结构径向尺寸的目的^[8]。又由于这些定心爪完全相同且沿圆周均匀布置,因此,定心爪末端的滚轮必然处于同一圆周

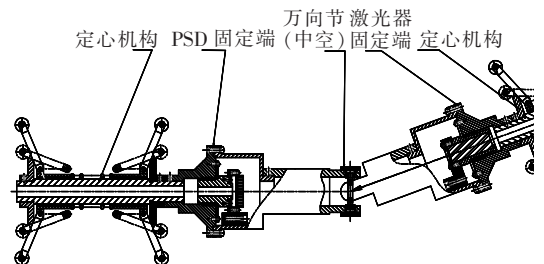


图 6 测量系统结构图

Fig. 6 Structure diagram of measuring system

上,从而达到定心和变径的目的。由万向节连接两个定心机构,并能随管道弯曲作相对转动。为了不影响激光束通过,将万向节设计为中空。由固定 PSD 的重锤摆机构实现 PSD 的横轴与水平面平行。系统结构如图 6 所示。

4 误差分析

4.1 PSD 分辨率引起的测量误差

根据 PSD 的原理,在一定的光强范围内,光强越强,PSD 的分辨率越高;同时由于光强随激光器与 PSD 距离的增加而减弱,因此在测量不同弯曲半径的管道时,需根据激光器与 PSD 之间的距离调节激光器的强度,使之在 PSD 允许光强范围内尽量大。此外,PSD 的分辨率还与激光束落在 PSD 上的光斑尺寸有关。在光强尽可能大、光斑尽可能小的情况下,本文采用的 PSD 分辨率为 $6.84 \mu\text{m}$ 。

4.2 定心机构的定心原理误差

本课题采用的机械结构是将激光器发射点和 PSD 的中点固定在定心机构两端中心点的位置。如果定心机构两端的中心点不在管道的中轴线上,就说明系统测量的不是管道中轴点的位置。如图 7 所示。

图 7 中 A、B、C、D 是定心机构与管道内壁的接触点,GG' 是定心机构的中心轴线,FF' 是管道中轴线的割线。GG' 与 FF' 之间的距离为 Δ_1 , FF' 与切线之间的距离为 Δ_2 。

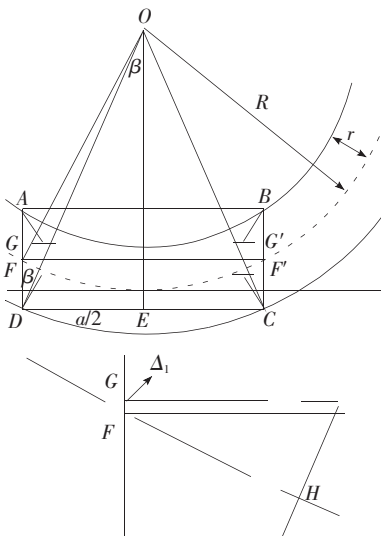


图 7 计算 Δ_1 和 Δ_2 的原理图

Fig. 7 Principle illustration for calculating Δ_1 and Δ_2

$$\Delta_1 = GD - FD = r - \frac{r \cdot (R+r)}{\sqrt{(R+r)^2 - \left(\frac{a}{2}\right)^2}}, \quad (6)$$

$$\Delta_2 = R - EF' = R - \sqrt{R^2 - \left(\frac{a}{2}\right)^2}, \quad (7)$$

$$\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 = \left[r - \frac{r \cdot (R+r)}{\sqrt{(R+r)^2 - \left(\frac{a}{2}\right)^2}} \right] + \left[R - \sqrt{R^2 - \left(\frac{a}{2}\right)^2} \right], \quad (8)$$

式中: a —定心机构的长度;

r —管道半径;

R —管道弯曲半径。

由此结果可以看出,定心机构的几何中心并不在管道的中轴线上,而是相差了 Δ 的距离,即用割线代替了切线。若两个定心机构定心偏差相等,则割线与切线平行,偏差不会影响测量结果;若由于管道的内径变化,使得定心机构的定心偏差相等,则割线与切线不平行,偏差将会引起测量结果的误差,且此误差是不能消除的。

4.3 定心机构的加工误差

由于定心机构在管道中的定心精度与管道的尺寸和形状有关,较难用实验的手段测量机构的精度,所以这里采用零件的加工精度来预估机构的精度。定心机构误差分析示意图如图 8 所示。

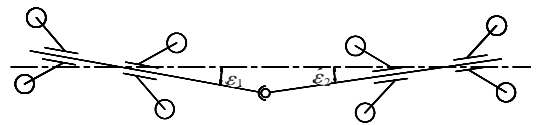


图 8 定心机构误差分析示意图

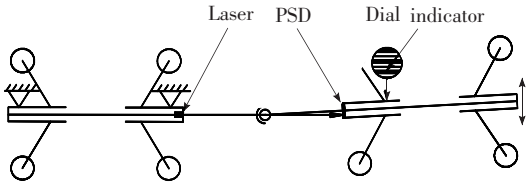
Fig. 8 Error analyzing illustration of center locating device

定心机构的加工误差主要存在于定心机构上轴径较大及存在相对运动的部件的配合位置。如无油衬套、撑爪耳座之间的配合公差。本设计的机械加工精度为 6 级,考虑到上述加工误差和定心机构的长度,可计算出定心机构的最大角度偏差为 0.0095° (即 $\arctan(\epsilon/a)$)。当 $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 0.0095^\circ$ 时,如图 7 可知由加工引起的角度偏差 $\Delta\beta_m$ 最大为 0.019° 。

4.4 测量传感系统的角度误差实验分析

测量系统中,除了定心机构以外的部件(包括

激光器、PSD 的固定机构、方向连接机构等),对角度测量的精度可用如图 9 所示的实验系统进行测量获得。其方法是将安装有激光器等机构的一端固定,使安装 PSD 等机构的一端分别沿 X 和 Y 方向移动,测量出位移和 PSD 的读数,可获表 1 所示的测量系统的角度测量误差。



(a) 实验示意图

(a) Schematic illustration of experiment



(b) 实验照片

(b) Picture of experiment

图 9 测量传感系统的角度误差实验

Fig. 9 Experiment for angle error of measuring sensor system

表 1 分别沿 X 轴、Y 轴实际测量的角度

Tab. 1 Angles measured along X and Y axes

测量点 <i>i</i>	沿 X 轴移动	沿 Y 轴移动
	$(x_1 - x_0/d) \times 180^\circ/\pi$	$(y_1 - y_0/d) \times 180^\circ/\pi$
1	2.86 25±0.003 18	2.773 9±0.004 13
2	2.137 3±0.002 23	2.074 3±0.004 92
3	1.417 0±0.001 02	1.387 8±0.006 00
4	0.702 7±0.001 07	0.700 5±0.003 16
5	-0.709 7±0.001 27	-0.700 8±0.005 34
6	-1.427 1±0.002 16	-1.409 7±0.002 71
7	-2.144 1±0.001 32	-2.117 1±0.005 28
8	-2.86 43±0.004 33	-2.838 9±0.005 78

4.5 误差对测量结果的影响

由 2.1 节的内容可以看出,每个测量点的坐标都跟之前的测量点坐标有关系,也就是说这种测量原理的误差是累计的。由曲线拟合公式可递推出第 *n* 个测量点的坐标值:

$$\begin{cases} x_n = x_0 + S\cos\left(\varphi_0 + \frac{\beta_1}{2}\right) + S\cos\left(\varphi_0 + \frac{\beta_1}{2} + \frac{\beta_2}{2}\right) + \dots + S\cos\left(\varphi_0 + \frac{\beta_1}{2} + \frac{\beta_2}{2} + \dots + \frac{\beta_n}{2}\right) \\ y_n = y_0 + S\sin\left(\varphi_0 + \frac{\beta_1}{2}\right) + S\sin\left(\varphi_0 + \frac{\beta_1}{2} + \frac{\beta_2}{2}\right) + \dots + S\sin\left(\varphi_0 + \frac{\beta_1}{2} + \frac{\beta_2}{2} + \dots + \frac{\beta_n}{2}\right) \end{cases} \quad (9)$$

每个测量点的误差 $\Delta\beta_i$ 均对后面的测量值有影响:

$$\begin{cases} dx_n = -\frac{S}{2} \sum_{i=1}^n \left[\sin\left(\varphi_0 + \frac{\beta_1}{2} + \frac{\beta_2}{2} + \dots + \frac{\beta_i}{2}\right) + \sin\left(\varphi_0 + \frac{\beta_1}{2} + \frac{\beta_2}{2} + \dots + \frac{\beta_{i+1}}{2}\right) + \dots + \sin\left(\varphi_0 + \frac{\beta_1}{2} + \frac{\beta_2}{2} + \dots + \frac{\beta_n}{2}\right) \right] \Delta\beta_i \\ dy_n = \frac{S}{2} \sum_{i=1}^n \left[\cos\left(\varphi_0 + \frac{\beta_1}{2} + \frac{\beta_2}{2} + \dots + \frac{\beta_i}{2}\right) + \cos\left(\varphi_0 + \frac{\beta_1}{2} + \frac{\beta_2}{2} + \dots + \frac{\beta_{i+1}}{2}\right) + \dots + \cos\left(\varphi_0 + \frac{\beta_1}{2} + \frac{\beta_2}{2} + \dots + \frac{\beta_n}{2}\right) \right] \Delta\beta_i \end{cases} \quad (10)$$

式中:

dx_n —*x* 方向上测量值的总偏差;

dy_n —*y* 方向上测量值的总偏差。

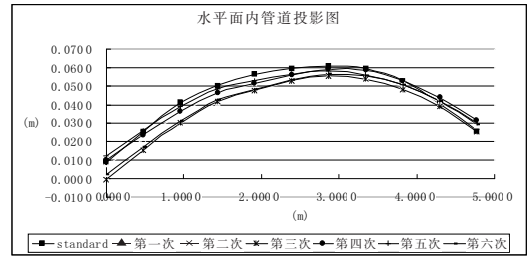
5 管道内测量实例

为验证该测量传感头的实际性能,将测量传感头放入如图 10 所示的一条长 5 m 左右,管道直径 0.1 m 的管道内部往返测量 6 次,并根据已知的管道起点和终点位置进行误差补偿,获得管道在水平面内的投影图和管道在竖直平面内的投影图,分别如图 11(a)、(b)所示。其中,水平方向的测量误差为 7.45%,竖直方向的测量误差为 1.07%,可反映管道的实际弯曲情况。



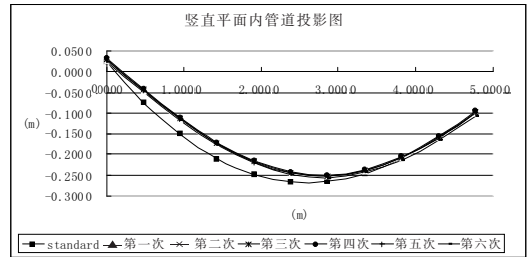
图 10 实测管道及实验场景

Fig. 10 Pipeline measured and experimental scene



(a) 水平面内管道投影图

(a) Projection drawing of pipeline in horizontal plane



(b) 竖直面内管道投影图

(b) Projection drawing of pipeline in vertical plane

图 11 管道二维投影图

Fig. 11 Two-dimension projection drawings of pipeline

6 结 论

本文针对目前非开挖施工的需要,提出了一种精密测量地下管道的方法。通过测量地下管道

内两点间切线的偏转角度,获得管道内各点的坐标,进而拟合得到管道方位。该方法不受地下管线埋藏深度、密集程度以及周围环境的影响,可测量任意埋藏深度的地下管道,适用于内径 80~130 mm、弯曲半径 50~1 000 m 的管道。

参考文献:

- [1] 袁绍杰,沈林勇,章亚男,等.一种新型地下管线方位测量与重建方法[J].上海大学学报,2006,12(6):552-556.
YUAN SH J, SHEN L Y, ZHANG Y N, *et al.*. A new method for measuring and reconstructing position of underground pipelines [J]. *J. Shang Hai University*, 2006,12(6):552-556. (in Chinese)
- [2] 钱晋武,孙流川,沈林勇,等.非开挖地下管线探测中的弯曲变形检测装置研究[J].光学精密工程,2005,13(2):179-184.
QIAN J W, SUN L CH, SHEN L Y, *et al.*. On sensing apparatus for bending deformation in trenchless underground pipeline detection [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(2):179-184. (in Chinese)
- [3] DE B M, VERBEEK P W, STEENVOORDEN G K, *et al.*. The PSD transfer function [J]. *Electron Devices*, 2002,1(49):202-206.
- [4] 李云飞,司国良,郭永飞.科学级 CCD 相机的噪声分析及处理技术[J].光学精密工程,2005,13(增):159-163.
LI Y F, SI G L, GUO Y F. Noise analyzing and processing for scientific grade CCD camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005,13(Supp.):159-163 (in Chinese).
- [5] MYUNG K S, HEE S Y, KYI H P. Study on comparing the signal processing of a linear CCD with a PSD for displacement measurement [J], *IEEE Conference Publishing*, 2004,11(18/19):762-766.
- [6] 张岳,郝丽,柳华,等.激光显示的原理与实现[J].光学精密工程,2006,14(3):402-405.
ZHANG Y, HAO L, LIU H, *et al.*. Principle and realization of laser display technique [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(3):402-405. (in Chinese)

- [7] 吴启恩,李江雄,柯映林.空间曲线型微系管道曲率检测器[J].光电工程,2005,32(5):38-41.
WU Q E, LI J X, KE Y L. Curvature sensor for inspecting curved small-diameter pipes[J]. *Optics Electronic Engineering*, 2005, 32(5):38-41. (in Chinese)
- [8] 徐小云,颜国正,丁国清,等.管道机器人适应不同管径的三种调节机构的比较[J].光学精密工程,2004,12(1):60-65.
XU X Y, YAN G ZH, DING G Q, *et al.*. Comparative study of three regulating mechanisms for pipeline robot to suit different pipe diameters[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 2(1):60-65. (in Chinese)

作者简介:沈林勇(1962—),男,上海人,副研究员,主要研究方向为微机械和机器人技术的应用。E-mail:Shenlycn@163.com

● 下期预告

反应烧结碳化硅表面改性的初步研究

王彤彤^{1,2},高劲松¹,王笑夷¹,陈红¹,郑宣鸣¹,范镝¹,申振峰^{1,2}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 光学技术研究中心,吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院,北京 100039)

应用电子束蒸发硅,霍尔离子源电离甲烷,并辅助沉积的方法在反应烧结碳化硅(Reaction Bonded Silicon Carbide, RB SiC)基底上沉积了碳化硅(SiC:H)改性薄膜。XRD(X-ray Diffraction)测试表明制备的碳化硅改性薄膜为 α 相。通过控制沉积速率,制备了硬度在9.781~13.087 GPa,弹性模量在89.344~123.413 GPa的碳化硅改性薄膜。比较同样条件下镀制银膜的抛光良好微晶玻璃和经过精细抛光的改性RB SiC,得到了两者有相近反射率的结果。附着力实验表明,制备的薄膜和基底有良好的结合。在温度冲击实验下,制备的薄膜无龟裂和脱落。