

# 基于激光扫描的大尺寸圆锥体几何测量系统

周 森 郭永彩 高 潮

(重庆大学光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400030)

**摘要** 针对大尺寸圆锥体工件的几何形貌, 提出将三维激光扫描和虚拟环境引导定位结合的快速几何参数测量系统。该系统由两个固定的激光扫描仪高速获取工件两端上表面的关键轮廓, 并依据端面特点构造垂直和水平的虚拟基准面, 从而生成三维虚拟测量模型; 通过高度特征变化识别端面端点位置, 结合空间投影和最小二乘原理拟合出端面的圆心位置和直径大小; 由空间圆心几何关系计算出锥体高和半角。利用该系统对几种典型的大尺寸圆锥体进行检测, 得到端面直径和锥体高的检测分辨力为  $10\ \mu\text{m}$ , 检测精度为  $100\ \mu\text{m}$ , 锥体半角检测分辨力为  $0.001^\circ$ , 检测精度为  $0.010^\circ$ 。实际运行结果表明, 该设计系统结合人机交互界面, 能很好满足在线生产中在大尺寸锥体工件几何参数检测要求。

**关键词** 测量; 大尺寸圆锥体工件; 三维激光扫描; 虚拟基准面; 几何测量; 多传感器融合

**中图分类号** TB92; TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0508008

## Development of a Laser-Based Geometric Measurement System for Large-Scale Conical

Zhou Sen Guo Yongcai Gao Chao

(Key Laboratory of Optoelectronic Technology and Systems, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

**Abstract** According to the characters of large-scale conical workpieces, a novel rapid on-machine geometric measurement system integrating three-dimensional (3D) laser scanning and virtual environments is proposed. In the system, key parts of upper surface of two ends of workpiece are fast captured by two static laser scanners. Vertical and horizontal virtual datum planes are respectively established based on the characters of end planes in order to construct 3D virtual measurement space. The positions of end points are then identified and located by the respect of their height features. Thus, both the center and the diameter of end planes can be obtained by the use of space projection theory and least square method. The height and the taper half-angle can be calculated by the geometric relationship of the center of end planes in 3D measurement space, respectively. The experiments on several typical large-scale conical workpieces are performed. Results indicate that the system can offer the resolution less than  $10\ \mu\text{m}$ , measuring precision over  $100\ \mu\text{m}$  to the height and the diameter, and it can offer the resolution less than  $0.001^\circ$ , measuring precision over  $0.010^\circ$  to the taper half-angle. According to the actual operation results, this proposed measuring system based on human-computer interaction can be well acceptable for application as on-line geometric detection for large-scale conical workpieces in industrial production.

**Key words** measurement; large-scale conical workpiece; 3D laser scanning; virtual measurement datum; geometric measurements; multi-sensors fusion

**OCIS codes** 120.4630; 120.4640; 120.1880; 120.2830; 140.3430

**收稿日期**: 2013-11-18; **收到修改稿日期**: 2013-12-23

**基金项目**: 教育部重点科研项目(1081741)、重庆市自然科学基金项目(CSTC. 2008BB3169)

**作者简介**: 周 森(1986—), 男, 博士研究生, 主要从事激光测量、信号处理、智能控制等方面的研究。

E-mail: zhousen@cqu.edu.cn

**导师简介**: 郭永彩(1963—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事环境和生命科学为应用背景的光电信息技术等方面研究。

E-mail: ycguo@cqu.edu.cn

# 1 引 言

长期以来,大尺寸圆锥体工件在船舶、航空航天、现代汽车制造、国防工业中得到了广泛的应用<sup>[1-2]</sup>。大尺寸圆锥体工件的几何参数直接关系到最终产品的合成和使用质量,这使得对大尺寸圆锥体工件的高效率、高精度的检测扮演着重要的角色<sup>[3-4]</sup>。传统的检测方法主要采用接触式测量,通常是建立在一定的测量平台上使用正弦规、游标卡尺、百分尺和量棒等工具,或者采用接触式传感器的三坐标测量机(CMM)等<sup>[5-6]</sup>。传统测量方法速度相对较慢,很难满足现阶段生产检测的要求。随着机器视觉的发展,摄影测量、线激光、激光跟踪仪等非接触的测量方法得到了更多的关注<sup>[7-10]</sup>。激光扫描方式由于能在极短的时间内获取大量的测量点,已经被广泛地应用到三维(3D)形貌检测、几何尺寸检测、大型设备缺陷检测等领域<sup>[11-12]</sup>。而大尺寸工件往往超出仪器测量范围,或者无法获取重要的隐藏部位信息,引导和定位多传感器在工件的关键部位测量方式也在系统设计中更多地采用。以多传感器融合多站点信息的策略为大尺寸圆锥体的几何参数测量提供新的思路<sup>[13]</sup>。

本文针对在线移动的大尺寸圆锥体工件的几何特征,利用两个固定的激光扫描仪高速获取锥体两端面上表面的关键部分轮廓,并在虚拟环境下构造水平和垂直的虚拟基准面,从而建立虚拟三维测量模型。在三维测量空间内,利用高度变化特征识别和定位锥体大端面和小端面关键部位的端点位置,再结合空间投影方法和最小二乘原理由端点拟合出端面圆心位置和直径大小,最后通过空间圆心的几何关系求出锥体高和半角。该系统结合人机交互界面实现了对大尺寸圆锥体工件的在线快速、非接触、无损和精确检测。

# 2 三维测量模型

## 2.1 三维扫描测量过程

图1显示了激光扫描仪的扫描测量原理图。激光扫描仪利用二维激光三角法原理,可并行测量目标在X轴和Z轴的截面信息。如图1所示,当激光源发射光束经过准直透镜汇聚后,由圆柱体物镜扩散为固定长度的线激光束,照射到被测物体上后发生漫反射,反射光经过Ernostar物镜和接收透镜聚焦在CCD像面上,生成二维的被测物体表面轮廓,调整目标沿X-Y方向移动,则可获取整个被测物体的三维表面信息。

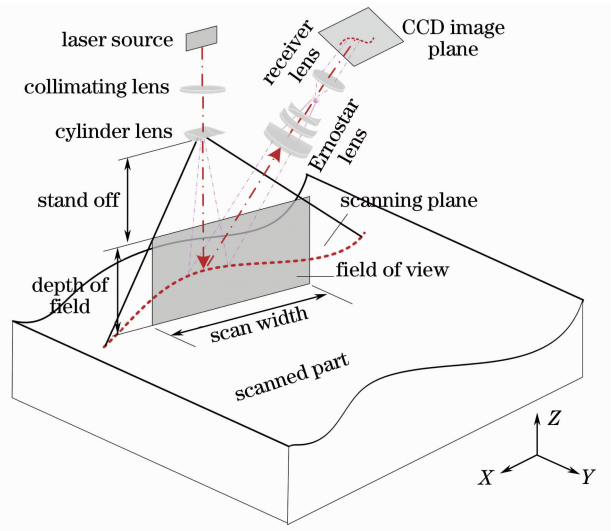


图1 激光扫描测量原理

Fig.1 Principle of laser scanning

图2显示了理想状态下,大尺寸圆锥体工件扫描测量模型。在理想状态下,大尺寸圆锥体的大端面和小端面的圆心连线平行于理想水平面。系统仅对工件两端上表面关键部位进行扫描,以此保证测量的高效性。同时采用具有较高垂直度和光滑的上表面的挡块来分别与锥体大端面和小端面完全接

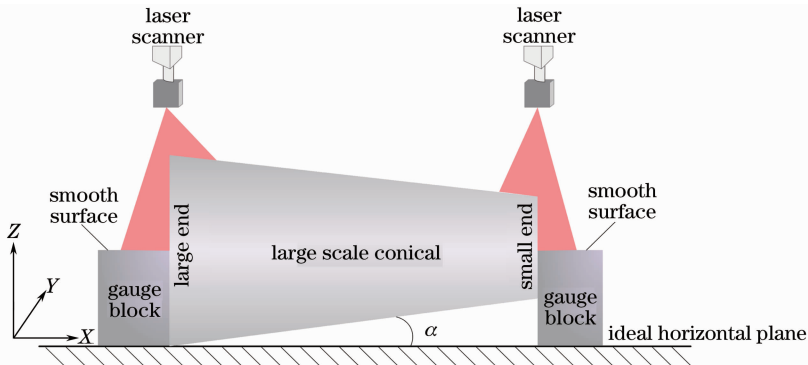


图2 三维测量模型

Fig.2 3D measurement mode

触。对称协调式的两个激光扫描仪由支架分别固定在锥体大端和小端面的正上方,在理想状态下,保持扫描仪发出光束相互平行,并且垂直于挡块的上表面。系统通过沿  $Y$  轴方向移动锥体工件,来扫描获取关键部位的上表面轮廓。

## 2.2 建立虚拟基准面

系统对大尺寸圆锥体工件在虚拟环境中分别建

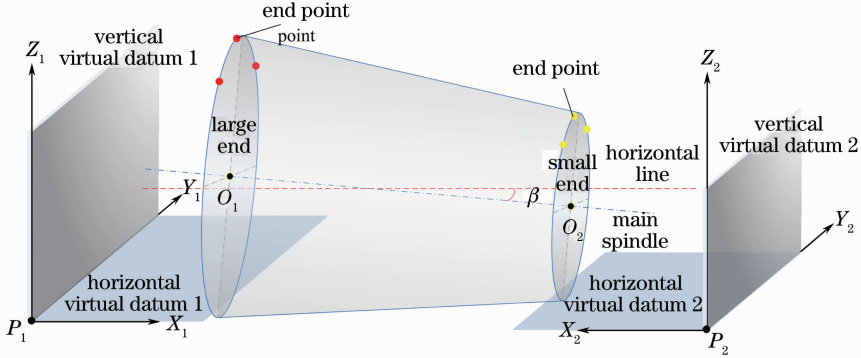


图 3 虚拟基准面

Fig. 3 Virtual datum plane

如图 3 所示,针对位置固定的单一激光扫描仪系统  $U(X_1, Y_1, Z_1)$ ,虚拟基准面可根据被标定的测量点生成。假设水平和垂直虚拟基准面的交线为  $Y_1$  轴,则  $Y_1$  轴即为标定测量点在三维测量空间的连线。若坐标原点为连线起始点  $P_1$ ,则垂直虚拟基准面可表示为

$$X_1 = 0. \quad (1)$$

同时在标定测量点上建立水平虚拟基准面,即

$$Z_1 = 0. \quad (2)$$

类似地,小端的扫描仪坐标系统  $U(X_2, Y_2, Z_2)$ ,其垂直和水平虚拟基准面分别表示为  $X_2=0$  和  $Z_2=0$ 。

在虚拟检测环境中基准面可以自适应工件两端面的不同直径,能很好地解决工件在安装测量过程中主轴与理想水平线存在一定夹角  $\beta$  的问题。

## 3 端点群的识别和定位

锥体工件大端面和小端面端点群的精确定位是对其几何参数精确测量的关键。在工业制造中,工件表面轮廓加工的自由性和多样性为工件端面端点检测和识别带来一定的困难<sup>[2]</sup>。本系统中根据工件大端面和小端面的端点在其最近邻域内的高度变化特征来识别定位工件端点的位置。在线测量中,对锥体工件的放置很难达到理想状态,即图 3 中夹角  $\beta$  为 0。而锥体工件由于固定措施的保证,相对位置和姿态一般处于一定的小范围内波动,因此本系统根据实际情

况设定安装夹角  $\beta$  的公差范围为  $-5^\circ \leq \beta \leq 5^\circ$ 。

立垂直和水平的虚拟基准面(图 3)。在系统测量中,虚拟基准面的建立可以容易识别定位大端面和小端面的端点和圆心的空间位置,很好地形成一个虚拟的三维测量空间。另外,由于锥体的主轴在系统自动放置或测量过程中,很难保证一直与理想水平线平行,而虚拟基准面是固定不变的,能作为非常精确的基准参考。

况设定安装夹角  $\beta$  的公差范围为  $-5^\circ \leq \beta \leq 5^\circ$ 。

### 3.1 大端面端点群

在二维坐标系  $U(X_1, Z_1)$  中,若假设激光扫描仪对工件大端上表面轮廓第  $i$  次扫描,确定在第  $i$  次扫描线上的工件大端面的端点位置  $Q_i^1$ ,如图 4 所示。由于挡块的上表面为光滑平面,其任意相邻两测量点不存在明显的高度变化,即在  $Z_1$  轴方向上的变化量近似为 0;而对于大端的端点  $Q_i^1$  另一边的工件表面,任意相邻两测量点的高度在理想状态下呈现线性减少现象,即在  $Z_1$  轴方向会出现一定量的变化。根据上述分析可知,通过端点最近邻域内的高度差变化规律可以定位到端点的位置。系统可从挡块表面出发沿  $X_1$  轴方向查找,实现快速地识别和定位大端端点的位置。

由图 4 可知,对于锥体工件大端上表面轮廓的第  $i$  次扫描线,当  $\beta=0^\circ$  或  $0^\circ < \beta \leq 5^\circ$  时,采集轮廓类似;而当  $-5^\circ \leq \beta < 0^\circ$  时,若测量工件截面为实体时,会出现其他拐点,若测量工件截面不为实体时,则点  $G_i^1$  和点  $Q_i^1$  之间的测量点在  $Z_1$  轴方向变化量全部为 0。在拐点的最近邻域内构造判别函数,表达为

$$\Delta U_{Z_1} = U_{Z_1}(i, \omega + v + 1) - U_{Z_1}(i, \omega + v), \quad -l \leq v \leq l, \quad (3)$$

式中  $\omega$  为定位拐点位置,  $2l$  为设定邻域长度。

大端面的端点查找定位算法步骤为:

1) 从当前第  $i$  扫描线起始测量点出发沿  $X_1$  轴方向跟踪查找拐点  $G_i^1$ ;

2) 以测量点最近邻域内判断函数  $\Delta U_{Z_1}$  是否满足。当  $-l \leq v \leq 0$  时,  $\Delta U_{Z_1} \approx 0$ , 并且当  $0 < v \leq l$  时,  $|\Delta U_{Z_1}| > \Delta_1$ , 其中  $\Delta_1$  是相对于挡块的上表面粗糙度设定的阈值; 直至查找到满足条件的测量点标记为拐点  $G_i^1$ , 跳转到步骤 3);

3) 从拐点  $G_i^1$  出发, 沿  $X_1$  轴方向查找定位端点  $Q_i^1$ , 以测量点最近邻域内判断函数  $\Delta U_{Z_1}$  是否满足。

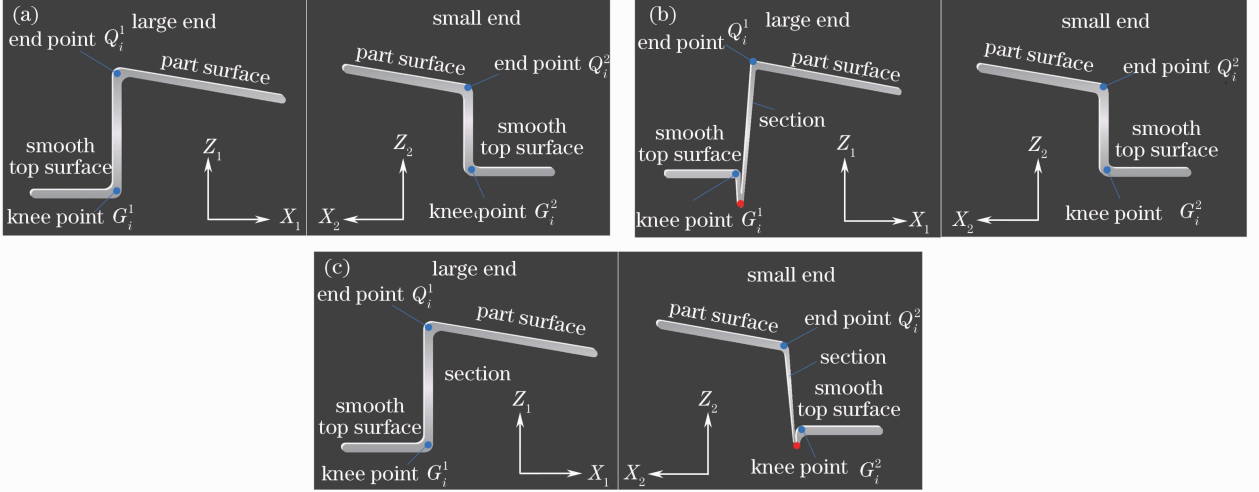


图 4 端点定位模型。(a) 理想状态  $\beta=0^\circ$ ; (b) 非理想状况  $-5^\circ \leq \beta < 0^\circ$ ; (c) 非理想状况  $0^\circ < \beta \leq 5^\circ$

Fig. 4 Modeling and location of end points. (a) Ideal state  $\beta=0^\circ$ ; (b) non-ideal state  $-5^\circ \leq \beta < 0^\circ$ ; (c) non-ideal state  $0^\circ < \beta \leq 5^\circ$

### 3.2 小端面端点群

在二维坐标系  $U(X_2, Z_2)$  中, 假设激光扫描仪对工件小端上表面轮廓第  $i$  次扫描, 查找在第  $i$  次扫描线上的工件小端面端点位置  $Q_i^2$ , 如图 4 所示。与大端面端点定位原理相类似, 相邻的测量点在挡块的上表面沿  $Z_2$  轴方向上变化近似为 0, 而在端点另一边的工件表面上, 具有连续的变化特性, 理想状态下呈线性增加。同时, 当  $\beta=0^\circ$  或  $-5^\circ \leq \beta < 0^\circ$  时, 采集轮廓相似; 而当  $0^\circ < \beta \leq 5^\circ$  时, 若测量工件截面为实体时, 会出现其他拐点, 若测量工件截面不为实体时, 则拐点  $G_i^2$  和端点  $Q_i^2$  之间的测量点在  $Z_2$  轴方向全部为 0。由上述分析, 可在拐点的最近邻域内构造判别函数  $\Delta U_{Z_2}$ , 表达为

$$\Delta U_{Z_2} = U_{Z_2}(i, w + v + 1) - U_{Z_2}(i, w + v), \quad -l \leq v \leq l, \quad (4)$$

式中  $w$  为定位拐点位置,  $2l$  为设定邻域长度。

系统对小端面端点在线查找定位算法为:

1) 从当前第  $i$  扫描线起始测量点出发沿  $X_2$  轴方向查找拐点  $G_i^2$ ;

2) 以测量点最近邻域内判断函数  $\Delta U_{Z_2}$  是否满足。当  $-l \leq v \leq 0$  时,  $\Delta U_{Z_2} \approx 0$ , 并且当  $0 < v \leq l$  时,  $|\Delta U_{Z_2}| > \Delta_1$ ; 直至查找到满足条件的测量点

当  $0 < v \leq l$  时,  $\Delta U_{Z_1} < 0$ , 并且  $\Delta_1 \leq |\Delta U_{Z_1}| < \Delta_2^1$ , 其中  $\Delta_2^1$  为  $\beta$  设定为  $-5^\circ$  时在大端截面上的相邻测量点沿  $Z_1$  轴最小的变化量; 第一个满足上述条件的测量点标定为大端面端点  $Q_i^1$ 。

4) 重复步骤 1)~3) 在线对每个扫描线操作, 即可以获得大端的端点群  $Q^1$ 。

标记为拐点  $G_i^2$ , 跳转到步骤 3);

3) 从拐点  $G_i^2$  出发, 沿  $X_2$  轴方向定位端点  $Q_i^2$ ; 在测量点最近邻域内判断函数  $\Delta U_{Z_2}$  是否满足下列条件: 当  $0 < v \leq l$  时,  $\Delta U_{Z_2} > 0$ , 并且  $\Delta_1 \leq |\Delta U_{Z_2}| < \Delta_2^2$ , 其中  $\Delta_2^2$  为当  $\beta$  设定为  $5^\circ$  时小端的截面上相邻测量点沿  $Z_2$  轴的最小变化量; 检测到第一个满足上述条件的测量点标定为小端的端点  $Q_i^2$ 。

4) 重复步骤 1)~3) 在线对每个扫描线操作, 即可以得到小端的端点群  $Q^2$ 。

大端面和小端面的端点定位算法都是在二维空间的搜索算法, 仅需要极少的运行时间, 可以很好地实现在线实时的跟踪定位。

## 4 系统工作原理

### 4.1 端面圆心定位模型

在三维测量空间, 一个空间圆面由空间平面和球体所构成。假设对于一空间圆面定位的端点  $Q_i(x_i, y_i, z_i)$ , 由于端点不一定处于理想空间平面上 (图 5), 所以模型首先对端点进行处理来拟合空间平面, 接着再将各个端点投影到拟合的空间平面上, 得出投影点  $Q'_i(x'_i, y'_i, z'_i)$ , 再由这些投影点拟合成球体, 从而可得出理想空间圆面的圆心位置和半径大

小<sup>[14-15]</sup>。

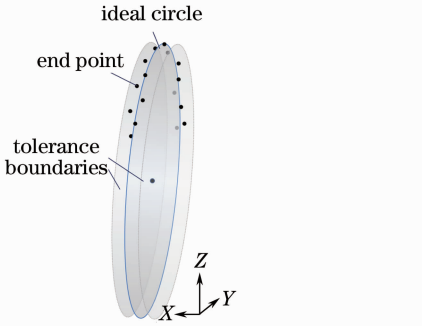


图 5 理想空间圆重构的公差界限

Fig. 5 Tolerance boundaries of the reconstructed circle in space

空间圆心定位模型具体步骤为 1) 利用最小二乘法对上述定位端点  $Q_i(x_i, y_i, z_i)$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) 拟合构成空间平面方程

$$z = ax + by + c. \quad (5)$$

根据最小二乘法原理构造收敛函数为

$$f(a, b, c) = \sum_{i=1}^n (ax_i + by_i + c - z_i)^2. \quad (6)$$

利用收敛性质生成极值函数：

$$\frac{\partial f}{\partial a} = 0, \quad \frac{\partial f}{\partial b} = 0, \quad \frac{\partial f}{\partial c} = 0, \quad (7)$$

由(7)式可得出空间平面参数  $a, b$  和  $c$ , 并求出空间平面的法向向量  $t$  坐标为  $(a, b, -1)$ 。

2) 根据端点的投影点  $Q'_i(x'_i, y'_i, z'_i)$  满足空间平面方程和平行于平面法向向量性质, 可构造出

$$z'_i = ax'_i + by'_i + c, \quad (8)$$

$$\frac{x'_i - x_i}{a} = \frac{y'_i - y_i}{b} = \frac{z'_i - z_i}{-1}, \quad (9)$$

由(8)、(9)式可计算出各投影点在三维空间的位置。

3) 利用端点投影点  $Q'_i(x'_i, y'_i, z'_i)$  拟合生成的球心也为理想空间圆面的圆心  $O(x_o, y_o, z_o)$ , 球体半径为空间圆面半径  $R$ , 则被拟合的球体表达式为

$$(x'_i - x_o)^2 + (y'_i - y_o)^2 + (z'_i - z_o)^2 = R^2. \quad (10)$$

同时球心  $O(x_o, y_o, z_o)$  在空间平面上可得

$$z_o = ax_o + by_o + c, \quad (11)$$

由(10)式可化为

$$x'_i{}^2 + y'_i{}^2 + z'_i{}^2 - 2(x'_i x_o + y'_i y_o + z'_i z_o) + (x_o^2 + y_o^2 + z_o^2 - R^2) = 0, \quad (12)$$

令  $\eta = x_o^2 + y_o^2 + z_o^2 - R^2$ , 根据最小二乘法准则和(11)式的球心条件约束可对球体参数构造目标函数

$$f(x_o, y_o, z_o, \eta, \lambda) = \sum_{i=1}^n [x'_i{}^2 + y'_i{}^2 + z'_i{}^2 + \eta - 2(x'_i x_o + y'_i y_o + z'_i z_o)]^2 - \lambda(ax_o + by_o + c - z_o). \quad (13)$$

再由收敛性质生成极值函数

$$\frac{\partial f}{\partial x_o} = 0, \quad \frac{\partial f}{\partial y_o} = 0, \quad \frac{\partial f}{\partial z_o} = 0, \quad \frac{\partial f}{\partial \eta} = 0, \quad \frac{\partial f}{\partial \lambda} = 0, \quad (14)$$

从(14)式可求出空间圆的圆心  $O(x_o, y_o, z_o)$  和半径  $R$ , 从而完成了对整个空间圆的测量模型。

系统分别对大尺寸锥体的大端面和小端面已获取的端点群分别操作, 可拟合出大端端面圆心  $O_1$  和小端面圆心  $O_2$  以及相对的半径  $R_1$  和  $R_2$ 。

#### 4.2 圆锥体高和半角

大尺寸圆锥体的高为大端面圆心和小端面圆心的距离, 这需要将坐标系  $U(X_1, Y_1, Z_1)$  和  $U(X_2, Y_2, Z_2)$  统一成全局坐标系  $U(X, Y, Z)$ 。由第 2.1 节描述可知, 大尺寸圆锥体两端的激光扫描仪发出的光束处于相互平行的状态, 这使得局部坐标系的  $X_1$  轴和  $X_2$  轴能定义处于同一直线上。而虚拟水平基准面 1 和虚拟水平基准面 2 分别包含  $X_1$  轴和  $X_2$  轴, 那么两个虚拟水平基准面能定义在同一平面上, 并且平面为长度为垂直虚拟基准面 1 和 2 的距离  $l_{\text{static}}$ 、宽

为锥体大端面的直径, 如图 6 所示。因此全局坐标系  $U(X, Y, Z)$  被看作为局部坐标系  $U(X_1, Y_1, Z_1)$  的延伸, 而  $U(X_2, Y_2, Z_2)$  上的测量点可以线性移位而转换到全局坐标系  $U(X, Y, Z)$  中, 可表示为

$$\begin{cases} X = X_1 = -X_2 + l_{\text{static}} \\ Y = Y_1 = Y_2 \\ Z = Z_1 = Z_2 \end{cases}. \quad (15)$$

在测量大尺寸圆锥体工件前, 需确定垂直虚拟测量基准面 1 和 2 之间的固定距离  $l_{\text{static}}$ 。因此采用标准的圆柱体工件对系统进行校准, 其圆柱体工件两端圆心之间的标准长度为  $l_{\text{standard}}$  已由三坐标测量机高精度测量<sup>[16]</sup>。圆柱体工件在系统测量过程中尽量保证夹角  $\beta'$  非常小, 工件两端的圆心在  $U(X, Y, Z)$  全局坐标系中分别为  $O'_1(x'_1, y'_1, z'_1)$  和  $O'_2(x'_2, y'_2, z'_2)$ 。若  $O'_1$  到垂直虚拟基准面 1 位移为  $l'_1$ ,  $O'_2$  到垂直虚拟基准面 2 位移为  $l'_2$ , 则可得固定距离  $l_{\text{static}}$  为

$$l_{\text{static}} = l'_1 + l'_2 + l_{\text{standard}} \cdot \cos \beta' = l'_1 + l'_2 + \sqrt{l_{\text{standard}}^2 - (z'_1 - z'_2)^2}, \quad (16)$$



参考(15)式和(16)式可将局部坐标系  $U(X_1, Y_1, Z_1)$  和  $U(X_2, Y_2, Z_2)$  转化到全局坐标系  $U(X, Y, Z)$  中。

如图 6 所示,当测量大尺寸圆锥体工件时,在全局坐标系  $U(X, Y, Z)$  中,工件大端面和小端面的圆心分别为  $O_1(x_1, y_1, z_1)$  和  $O_2(x_2, y_2, z_2)$ , 则在三维

空间里圆锥体的高为

$$h = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2}, \quad (17)$$

则圆锥体的半角表达为

$$\alpha = \arctan \frac{R_1 - R_2}{h}. \quad (18)$$

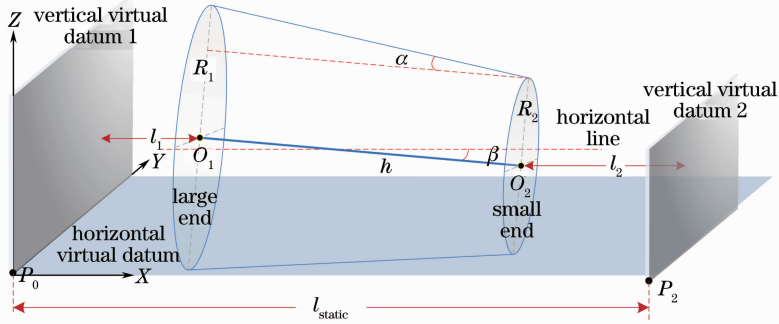


图 6 全局圆锥体工件定位系统

Fig. 6 Global conical workpiece positioning system

## 5 实验及分析

### 5.1 实验装置

基于激光扫描的大尺寸圆锥体工件几何参数检测系统可被使用在在线生产的锥体工件的几何尺寸检测中。实验装置(图 7)主要由激光扫描仪系统、两

个光电开关、高精度导轨、步进电机驱动系统、气动驱动系统、V 型支撑台,移动台和远程操作系统组成。

实验测试中,激光扫描仪选择 KEYENCE 公司的 LJ-G080 型号,其发出的条状光束长度为 32 mm,基准距为 80 mm,测量视场深度和深度分辨率为 46 mm 和  $1 \mu\text{m}$ ,视场宽度和宽度分辨率分别为 39 mm

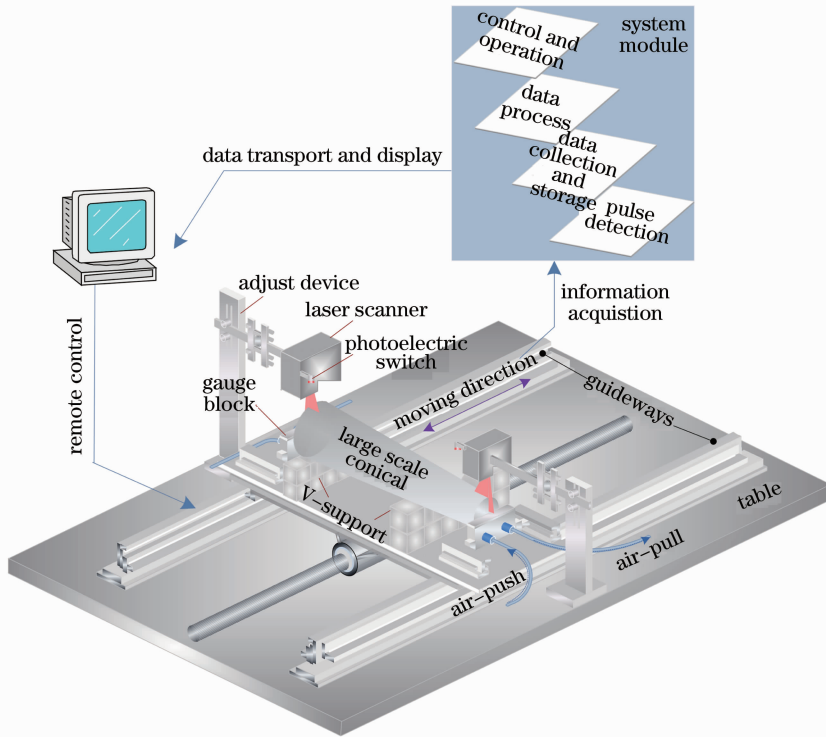


图 7 大尺寸圆锥体工件几何尺寸检测系统图

Fig. 7 Geometry dimensional measuring system for large scale conical

和  $10\ \mu\text{m}$ , 扫描仪测量触发间隔是  $3.8\ \text{ms}$ 。光电开关为 KEYENCE 公司的 FS-V30 型号。系统远程操作系统是基于 VC++6.0 工作软件, 运行的计算机为 Intel Core 2 的  $2.26\ \text{GHz}$  CPU 和  $3\ \text{GB}$  RAM。

## 5.2 实验测试

实验测试前首先设定两个光电开关各自的阈值, 光电开关阈值设定的参考面为各自相互靠近的 V 型支撑台上表面, 从而判断工件是否已经达到被测位置。然后采用已由三坐标测量机精密测量几何尺寸的标准圆柱体工件对整个系统进行校准, 求出

4.2 节中的  $l_{\text{static}}$ 。本次测试实验采用的校准工件的长度为  $500.061\ \text{mm}$ , 直径为  $(100.021 \pm 0.05)\ \text{mm}$ 。所有的测试实验被执行在恒定温度  $20\ ^\circ\text{C}$ 。为了验证系统的精度和稳定性, 选择两种典型的圆锥体工件, 其几何形状和参数分别如图 8 和表 1 所示。

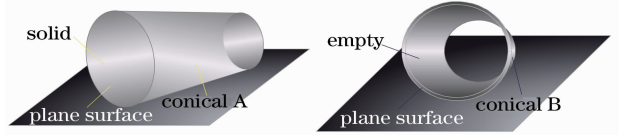


图 8 圆锥体工件 A 和 B 的几何形状

Fig. 8 Different geometries of conical A and B

表 1 由三坐标测量机测量的圆锥体工件几何参数

Table 1 Parameters of conical workpieces measured by CMM

Conical	Diameter (large end) /mm	Diameter (small end) /mm	Height /mm	Half-angle	Type of end
A	385.134	251.328	506.061	$7.531^\circ$	Solid
B	371.347	248.569	492.508	$7.105^\circ$	Empty

### 5.2.1 端点定位可行性测试

为了验证端点定位算法是否可行, 实验中对圆锥体工件 A 的大端面标定端点做了测试。测试实验中, 工件 A 以  $40\ \text{mm/s}$  的速度移动。由于工件在移动过程中, 很难确定是否为同一标定端点, 所以测试时选择标定端点邻域区域作为测试对象, 其中邻域内其他端点较标定端点变化较小。图 9 显示了对大端面标定端点重复 10 次定位的结果。从图 9 可以看出端点定位误差沿 X 轴低于  $10\ \mu\text{m}$ , 沿 Z 轴低于  $5\ \mu\text{m}$ 。由于是在二维空间处理, 端点定位算法花费时间低于  $1\ \text{ms}$ 。

### 5.2.2 圆心定位可行性测试

为验证圆心定位算法的可行性和精确度, 实验中对圆锥体工件 A 和 B 的大端面和小端面圆心分别进行了定位。

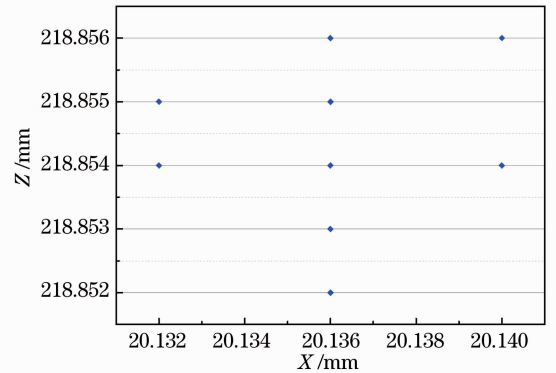


图 9 10 次工件 A 的端面圆心定位结果。

(a) 大端面; (b) 小端面

Fig. 9 10 repetitive data of marked end point of conical A

由 4.1 节可知, 获取到的端面端点越多, 即沿 Y 轴采集间隔越小, 定位圆心的精度越高, 但是系统处理数据花费的时间越多。本测试中, 为了满足一定的

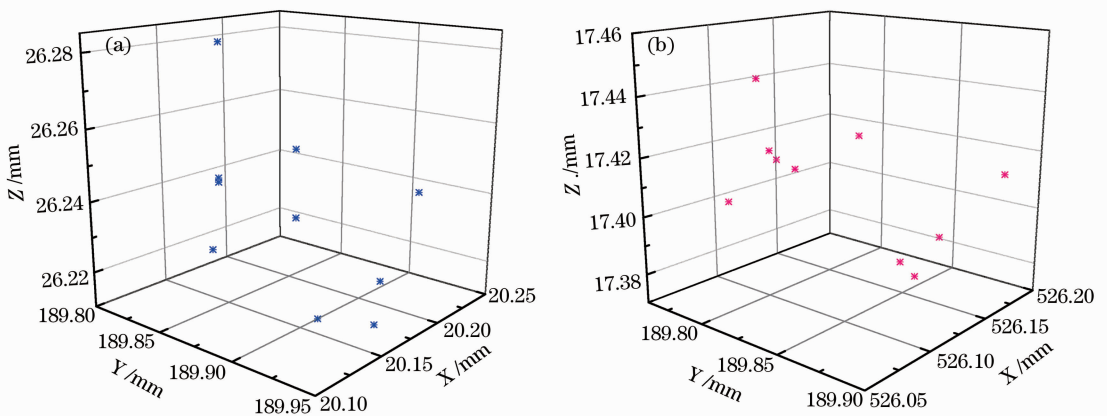


图 10 圆锥体工件 A 标记端点 10 次重复测量数据

Fig. 10 10 repetitive localization data of the center of end planes of conical A. (a) Large end; (b) small end

测量精度和速度要求,设定沿 Y 轴采集间隔为 2 mm,采集 16 个端点。图 10 和图 11 显示了对工件 A 和 B 的大端面和小端面圆心重复 10 次测量定位的结果。

从图 10 和图 11 可知,在三维测量空间中,圆心聚焦在一定的范围内,定位的误差低于 100  $\mu\text{m}$ 。

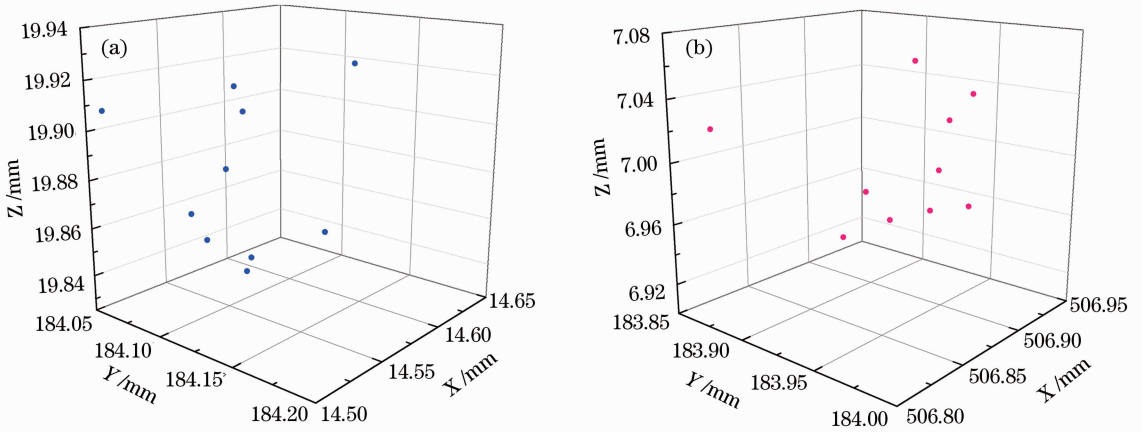


图 11 10 次工件 B 的端面圆心定位结果

Fig. 11 10 repetitive localization data of the center of end planes of conical B

### 5.2.3 几何尺寸测量精度和稳定性

表 2 显示了对工件 A 和 B 的几何尺寸 10 次重复测量结果。从表 2 可以看出,工件 A 和 B 的大端面直径、小端面直径、锥体高的均方根误差均低于

100  $\mu\text{m}$ ,相较于平均值的最大偏差小于 100  $\mu\text{m}$ ;锥体半角的均方根误差均低于 0.005°,最大的偏差均小于 0.010°。系统测试的精度满足设计的要求,稳定性较好。

表 2 圆锥体工件 A 和 B 的几何尺寸测量结果

Table 2 Results of dimensional measurements of conical A and B

Time	Conical A				Conical B			
	$2R_1/\text{mm}$	$2R_2/\text{mm}$	$h/\text{mm}$	Half-angle	$2R_1/\text{mm}$	$2R_2/\text{mm}$	$h/\text{mm}$	Half-angle
1	385.106	251.244	506.063	7.534°	371.286	248.512	492.517	7.105°
2	385.064	251.317	506.051	7.526°	371.317	248.496	492.485	7.108°
3	385.092	251.336	506.042	7.528°	371.342	248.472	492.541	7.110°
4	385.122	251.213	506.049	7.537°	371.306	248.504	492.473	7.107°
5	385.148	251.389	506.036	7.530°	371.273	248.523	492.528	7.103°
6	385.075	251.311	506.071	7.529°	371.324	248.531	492.508	7.106°
7	385.094	251.230	506.085	7.533°	371.352	248.509	492.553	7.108°
8	385.151	251.327	506.067	7.532°	371.246	248.483	492.498	7.104°
9	385.096	251.261	506.015	7.533°	371.269	248.504	492.471	7.105°
10	385.168	251.276	506.073	7.536°	371.285	248.536	492.521	7.103°
Average	385.111	251.293	506.055	7.532°	371.300	248.507	492.510	7.106°
Root mean square error	0.042	0.068	0.020	0.003°	0.064	0.072	0.029	0.003°

系统的测量时间分为触发和采集时间、端点定位时间、圆心定位时间、几何尺寸计算时间以及传输显示时间。单次触发、采集、端点定位、传输显示可以在线实现,在上述硬件上共花费约 50 ms;由于需要 16 个采集触发,则需要 800 ms,再加上圆心定位和尺寸计算时间约为 500 ms,那么整个系统测量时间低于 2 s。

### 5.3 误差分析

系统测量的误差产生原因主要由以下几个部

分:激光扫描仪、系统机械装置、锥体工件两端上表面、校准工件、定位算法、光照噪声和环境温度。由于测试环境中温度和光照几乎不变,所以在本小节部分,主要考虑激光扫描仪本身误差、工件安装误差的影响。

#### 5.3.1 激光扫描仪误差

激光扫描仪的误差是由于扫描仪扫描深度的不同,光束偏离了工件测量表面的径向方向,以及扫描仪本身温度的升高引起的。由表 2 中工件 A 和 B



的大端面直径的均方根误差小于小端面直径可以看出,当扫描深度增加时,测量误差也会增大。另外扫描仪自身温度的升高是由于系统长时间运行产生的。为了检测激光扫描仪温度升高对端点定位误差的影响,在 8 h 的系统运行中对 5.2.1 小节中的端点进行观测。如图 12 所示,时间采集的间隔为 0.5 h,可以看的出在 0~6 h 内,端点的定位波动较小,而在 7~8 h 内,端点定位的不确定度增加,这是因为温度升高后,采集轮廓的边缘出现了热噪声和边缘效应<sup>[17-18]</sup>。在实验测试过程中,0~8 h 内端点定位的精度都满足系统设计的要求。

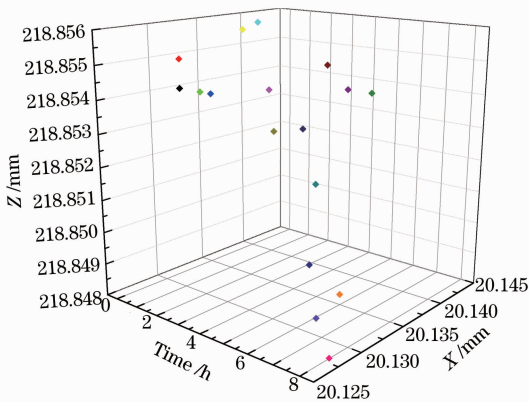


图 12 运行时间对标定端点定位的影响

Fig. 12 Influence of working time on the localization of marked end point

### 5.3.2 工件安装误差

由第 3 节可知,系统设定安装夹角  $\beta$  的公差带为  $-5^\circ \leq \beta \leq 5^\circ$ ,这是由于圆锥体工件相较于其它几何形状的工件很难保证夹角  $\beta$  处于一个极小的状态。在测量过程中,圆锥体工件受到工件的在线放置、工件的重力、系统外力等产生的影响,需尽可能地保证 V 型支撑台靠近工件本身的贝塞耳点,减少安装误差和运动误差的影响<sup>[19]</sup>。

## 6 结 论

本文描述了一种基于三维激光扫描和虚拟环境定位引导的新型快速大尺寸圆锥体工件几何参数在线检测系统。该系统首先利用两个固定的激光扫描仪高速获取工件大端面和小端面上表面关键部位的轮廓信息,根据端点邻域内高度变化特征来识别端面的端点群在已建立的虚拟三维测量空间中的位置,再由空间投影方法和最小二乘原理由端点拟合得到大端面和小端面的直径大小和空间圆心位置,最后通过空间圆心的几何关系求出锥体高和半角,

从而完成圆锥体几何参数的测量。实际测试中,系统对几种典型的大尺寸锥体工件进行检测,得到端面直径和锥体高的检测分辨力为  $10 \mu\text{m}$ 、检测精度为  $100 \mu\text{m}$ 、锥体半角检测分辨力为  $0.001^\circ$ 、检测精度为  $0.010^\circ$ 。系统的整体测量时间小于 2 s。研究结果对规则工件几何尺寸在线检测具有很好的参考价值。

## 参 考 文 献

- 1 Peggs G N, Maropoulos P G, Hughes E B, *et al.*. Recent developments in large-scale dimensional metrology[J]. Proc the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Engineering Manufacture, 2009, 233(6): 571-595.
- 2 Estler W T, Edmundson K L, Peggs G N, *et al.*. Large-scale metrology-an update [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2002, 51(2): 587-609.
- 3 Qiu Zurong, Shi Zhaoyao, Li Yan. Research on the development of measurement technology mechanical manufacture [J]. Mechanical Engineering, 2010, 46(14): 1-11.  
裘祖荣, 石照耀, 李 岩. 机械制造领域测量技术的发展研究[J]. 机械工程学报, 2010, 46(14): 1-11.
- 4 Weckenmann A, Estler T, Peggs G, *et al.*. Probing systems in dimensional metrology [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2004, 53(2): 657-684.
- 5 Wang Yuhui, Ni Jinping, Ma Weihong, *et al.*. On-line size measurement of conical parts based on computer vision [J]. Heavy Machinery, 2005, (2): 4-6.  
王宇辉, 倪晋平, 马卫红, 等. 基于计算机视觉的锥体零件尺寸在线检测算法[J]. 重型机械, 2005, (2): 4-6.
- 6 Zong Yujian. Sevel surveying methods of outer taper [J]. Metrology and Measurement Technique, 2007, 34(4): 10-11.  
宗玉娟. 测量锥体外锥度的几种方法[J]. 计量与测试技术, 2007, 34(4): 10-11.
- 7 Zhang Xuping, Wang Jiaqi, Zhang Yixin, *et al.*. Large-scale three-dimensional stereo vision geometric measurement system [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3): 0315002.  
张旭苹, 汪家其, 张益昕, 等. 大尺度三维几何尺寸立体视觉测量系统实现[J]. 光学学报, 2012, 32(3): 0315002.
- 8 Wang Zhong, Su Ye, Liu Xinbo, *et al.*. An approximation hole center positioning method by rotating laser displacement sensor [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39 (6): 0608001.  
王 仲, 苏 野, 刘新波, 等. 回转激光位移传感器逼近式孔定位方法[J]. 中国激光, 2012, 39 (6): 0608001.
- 9 Liang Xu, Wang Junhua, Xu Min. Research on improving accuracy of large radius of curvature measurement using surface profiler[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(7): 071202.  
梁 旭, 王军华, 徐 敏. 提高轮廓仪对大曲率半径表面形貌测量精度的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(7): 071202.
- 10 Zhang Dejin, Li Qingquan, He Li. A new method for laser rut depth measurement [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33 (1): 0112005.  
张德津, 李清泉, 何 莉. 一种新的激光车辙深度测量方法研究[J]. 光学学报, 2013, 33(1): 0112005.
- 11 Xu Ke, Zhou Peng, Yang Chaolin. On-line detection technique of tiny surface defects for metal plates and strips based on photometric stereo[J]. J Mechanical Engineering, 2013, 49(4): 25-29.  
徐 科, 周 鹏, 杨朝林. 基于光度立体学的金属板带表面微小缺陷在线检测方法[J]. 中国机械工程, 2013, 49(4): 25-29.
- 12 Peng Yifan, Tao Yiyang, Yu Chao, *et al.*. Three-dimensional

- display interaction device based on infrared structured light[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(4): 0412005.
- 彭祎帆, 陶毅阳, 于超, 等. 基于红外结构光的三维显示用交互装置[J]. 光学学报, 2013, 33(4): 0412005.
- 13 Zhang Fumin, Qu Xinghua, Ye Shenghua. Multiple sensor fusion in large scale measurement [J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(7): 1237-1240.
- 张福民, 曲兴华, 叶声华. 大尺寸测量中多传感器的融合[J]. 光学精密工程, 2008, 16(7): 1237-1240.
- 14 Zhang Ruifeng, Li Shiliang. High precision measurement method of parameters of space circle based on line structured light[J]. Electronic Measurement technology, 2011, 34(10): 76-79.
- 张瑞峰, 李士亮. 基于线结构光的空间圆高精度测量算法[J]. 电子测量技术, 2011, 34(10): 76-79.
- 15 Hu Minzheng, Xi Juntong. Two-axis turntable calibration in three-dimensional structured light measurement system [J]. J Shanghai Jiaotong University, 2010, 44 (4): 506-511.
- 胡民政, 习俊通. 面向结构光三维测量的两轴转台标定[J]. 上海交通大学学报, 2010, 44 (4): 506-511.
- 16 Zhou Sen, Guo Yongcai, Gao Chao. Dynamic length measuring system for large scale workpieces [J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(11): 2472-2478.
- 周森, 郭永彩, 高潮. 用于大尺寸工件的动态长度测量系统[J]. 光学精密工程, 2012, 20(11): 2472-2478.
- 17 Shen Hong, Hu Jun, Yao Zhenqiang. Analysis and control of edge effects in laser bending[J]. Opt & Lasers in Eng, 2010, 48 (10): 305-315.
- 18 Ding Xiaokun, Liu Tiegeng, Song Dianyou. Impact of accuracy of laser spot quality in laser triangulation long-term continuous measuring based on PSD[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(2): 0208006.
- 丁小昆, 刘铁根, 宋殿友. 激光光斑质量对基于PSD的激光三角法长时间连续测量精度的影响[J]. 中国激光, 2012, 39(2): 0208006.
- 19 Wu Xiaoyan, Yu Yingjie, Lü Lijun. Review on non-destructive detection of inner defects of object[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(4): 040002.
- 伍小燕, 于瀛洁, 吕丽军. 物体内部缺陷无损检测技术综述[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(4): 040002.

栏目编辑:何卓铭