

非接触测量激光光学探头*

邹振书 李喜增 张景和 高清峰

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春 130022)

胡家升

(大连理工大学物理系, 大连 116023)

摘要 阐明了激光三角测量的原理, 推导了有关的公式, 对影响测量精度的诸因素进行了分析。介绍了基于三角测量原理的非接触激光光学探头的设计, 给出了实验结果, 展望了应用前景。

关键词: 三角测量; 激光探头; 非接触测量

1 引言

随着科学技术和工业生产的发展, 对表面轮廓、几何尺寸、粗糙度、各种模具及自由曲面的测量工作越来越多, 精度要求越来越高。目前进行这种测量多半是采用探针式的接触方法, 而接触方法有很多的局限性, 它不适于测量由易被擦伤的软质材料构成的高精度表面; 不适于测量易污染的材料; 也不适于在恶劣环境下进行测量。因此研究非接触式的测量方法是十分重要的, 也是测量工作所迫切需要的。

基于光学三角测量原理的非接触测量方法, 随着半导体激光器和横向效应的位敏探测器的长足发展, 越来越被人们所重视, 其测量系统结构简单, 体积小、重量轻, 测量精度高, 并可在线进行测量, 它完全可以弥补接触式测量的不足之处。它既用来测量厚度、位移等, 又可作为三坐标测量机上的探头, 对待测件表面轮廓、粗糙度等进行扫描测量。

本文阐明了三角测量的原理, 推导了有关的公式, 介绍了我们研制的非接触激光探头, 分析了提高测量精度的因素, 展望了这种非接触探头的应用前景。

收稿日期: 1997年3月11日

* “八五”攻关课题

2 三角测量的原理

光学三角测量装置被作为距离传感器以及用于三维坐标测量系统,通过连续测量,可感知位移变化或者测量诸如厚度、表面轮廓及物体高度等物理尺寸。光学三角测量的原理如图 1 所示,从光源发出的光束经照明光学系统聚焦到被测表面 S 上,形成光强分布均匀的小光斑,被待测表面散射光的一部分经过成像透镜成像在光电探测器上。成像光点在光电探测器上的位置是探头和被测表面之间距离的函数,当被测表面接近或离开探头时,在光电探测器上成像光点位置将产生横向位移,通过检测其像点的位移变化便可求得物体表面位移变化。下面我们分析物件表面位移 Δ 与光电探测器上成像光点偏离中心距离 δ 之间的关系。

由图 2 我们求得:

$$\begin{cases} y = \Delta \sin \theta \\ x = -\Delta \cos \theta \end{cases} \quad \begin{cases} y^* = \delta \sin \varphi \\ x^* = -\delta \cos \varphi \end{cases} \quad (1)$$

由放大率公式可知:

$$\frac{y^*}{y} = \frac{d_1 + x^*}{d_0 - x} = \frac{d_1 - \delta \cos \varphi}{d_0 + \Delta \cos \theta} \quad (2)$$

整理得:

$$\frac{\delta \sin \varphi}{\Delta \sin \theta} = \frac{d_1 - \delta \cos \varphi}{d_0 + \Delta \cos \theta} \quad (3)$$

(3) 式可改写为:

$$\delta = d_1 \Delta \sin \theta / [\Delta \sin (\theta + \varphi) + d_0 \sin \varphi] \quad (4)$$

$$\Delta = d_0 \delta \sin \varphi / [d_1 \Delta \sin \theta - \delta \sin (\theta + \varphi)] \quad (5)$$

由几何成像公式可证明^[1-2]:

$$y^* = \frac{d_0}{d_1} \tan \theta \cdot x^* \quad (6)$$

(6) 式说明成像光点的坐标 y^* 与 x^* 是线性关系,即像的轨迹是一直线,对不同的 Δ , 像点是沿着这条直线移动。要想达到理想的成像效果,光电探测器必须沿着这条直线放置。 φ 角满足于:

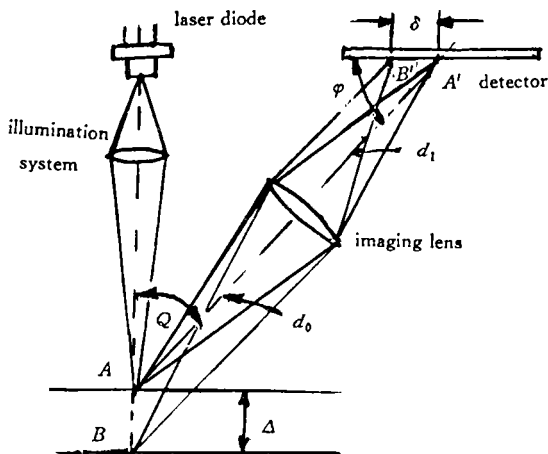


Fig. 1 Scheme principle of optical triangulation

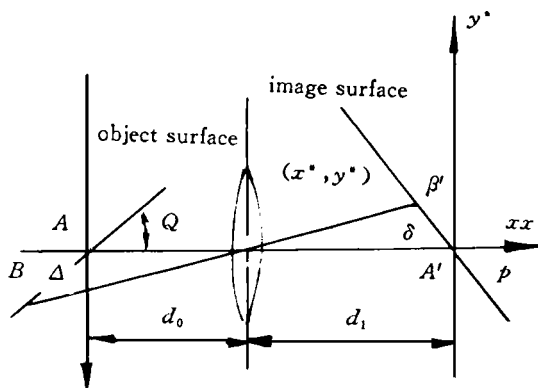


Fig. 2 Object-image relationship of laser probe

$$\tan\varphi = \frac{d_0}{d_1} \tan\theta = \frac{1}{m} \tan\theta \tag{7}$$

m 为成像物镜的放大率。(4)、(5)、(7) 式满足于任何表面位移 Δ 。当 Δ 很小时, 即在小位移情况下测量, 则有:

$$\delta = d_1 \Delta \sin\theta / (d_0 \sin\varphi) = m \cdot \frac{\sin\theta}{\sin\varphi} \cdot \Delta \tag{8}$$

对于(8)式我们可表示为:

$$\delta = K \Delta \tag{9}$$

其中 $K = m \cdot \sin\theta / \sin\varphi$ 是一常数。(9) 式说明在小位移测量中, $\Delta \sim \delta$ 呈线性关系。在实际测量中, 对一给定的 Δ , 其 δ 由(4)式决定, $\Delta \sim \delta$ 并非线性关系。设二者的差为 R , 则有:

$$R = \frac{d_1 \Delta \sin\theta}{d_0 \sin\varphi + \Delta \sin(\theta + \varphi)} - m \Delta \frac{\sin\theta}{\sin\varphi} \tag{10}$$

定义 P 为线性偏差, 那么:

$$P = R / (K \Delta) = - \Delta \sin(\theta + \varphi) / [D \sin\varphi (m + 1) + \Delta \sin(\theta + \varphi)] \tag{11}$$

其中 $D = d_0 + d_1$, 由(11) 式明显地看出: 在 D 、 Δ 、 θ 不变的情况下, m 越小, P 越小; 在 D 、 Δ 、 m 不变的情况下, θ 越大, P 越小; 在 Δ 、 m 、 θ 不变的情况下, D 越大, P 越小; 在 m 、 θ 、 D 不变的情况下, Δ 越小, P 越小。通过上述分析可以说明, 在三角测量中, 可以通过缩小测量范围, 增大成像物镜的共轭距, 增大三角测量系统的角度, 缩小成像物镜的放大倍率, 力求达到近似于线性的测量结果。

三角测量装置的结构通常有两种形式, 一种是图 1 所示的称为垂直照射方式, 另一种如图 3 所示的称为对称斜照射方式。两种结构形式各有其优缺点, 从测量精度考虑, 对漫射表面而言, 当物面位移量为 Δ 时, 对称斜照射形式中光点的位移量是 $\Delta / \cos\theta$ 。在垂直照射形式中, 光点位移量与物面位移量是相同的。因此对同一光点位移量, 反映在待测面的位移量上, 对称斜照射形式要比垂直照射形式的小, 因而对称斜照射形式的测量分辨率要高于垂直照射形式的。但对称斜照射形式随待测面的位移, 其照射点产生偏移, 影响测量精度, 所以对称斜照射形式的测量范围不能大。垂直照射形式在待测面纵向发生位移时, 照射光点将不会发生变化, 因而可有较大的测量范围。从探头的结构上考虑, 垂直照射形式易于做得小而紧凑。因此在工程应用中, 垂直照射形式应用较为广泛。我们研制的非接触三角测量探头选用的是垂直照射形式。

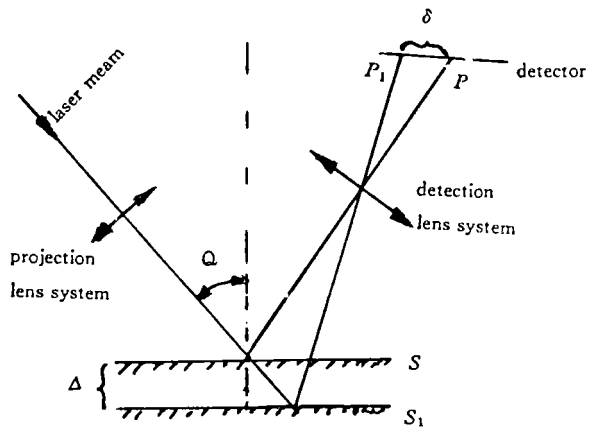


Fig 3 Triangulation of symmetric and oblique model

3 非接触激光探头的设计

激光探头由于具有非接触测量的特点, 容许放在距被测对象较远的地方, 在各种场合及测量范围等方面有更大的选择余地, 这给设计带来了极好的灵活性, 根据不同测量精度要求及不

同的被测对象可以设计不同指标要求及形式的探头。

作为非接触激光探头的光源必须具有高能量密度,重量轻的特点,这样才能使探头小型化,以代替接触式探头与坐标测量机组合进行扫描在线测量。鉴于此,我们选用日本 Sharp 公司生产的半导体激光二极管(LT 027MD),激光波长 $0.78 \mu\text{m}$,正常输出功率 7mW 。

其位移探测器一般可选用横向效应的位置敏感探测器(PSD)和电子耦合器件(CCD)阵列两种。两种器件各有其优缺点:PSD 可进行连续测量,分辨率高,处理电路比较简单,响应速度快,但线性较差需进行校正。CCD 阵列由于受象素大小及间隔的限制,分辨率比较低,其运算电路是数字运算电路,较 PSD 模拟运算电路复杂,响应速度慢,但线性比较好。考虑到分辨率的要求及结构简单。我们选择日本 Hamamatus 公司生产的一维 PSD(S3931)作为光电位移探测器,其受光面积 $1 \times 6 \text{mm}^2$ 。

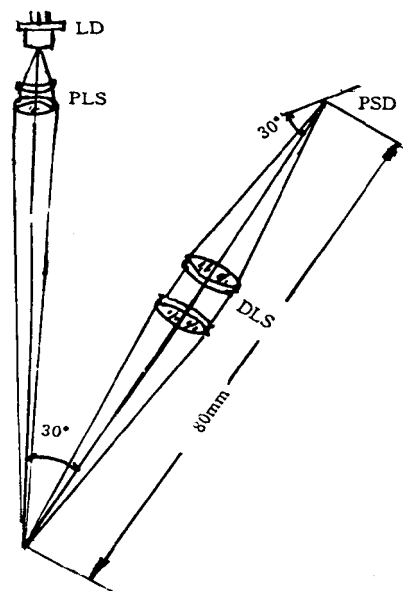
在一定的分辨率要求下,应尽量使照明光斑尺寸小,以达到高精度的测量,可尽量降低由于待测面的面形特征对测量结果产生的误差。我们设计的探头其聚焦到待测面上的光斑尺寸是 $25 \mu\text{m}$ 。

由前面的推导可知,照明系统与接收系统之间的夹角越大,线性偏差越小,分辨率越高,但考虑到探头的结构尺寸和接收能量的多少,必须适当的选择其夹角,我们在设计中选择其夹角 $\theta = 30^\circ$;因而 PSD 与接收系统光轴的夹角 $\varphi = 30^\circ$ 。接收系统的共轭距选为 80mm 。放大倍率为 1,采用两个对称的双胶合物镜组成。

综上所述,我们设计的非接触三角测量激光探头的技术指标及结构参数如下:

整体尺寸:	$80 \times 75 \times 15 \text{ (mm}^3\text{)}$
分辨率:	$2 \mu\text{m}$
光源:	激光二极管(LT027MD)
照明光斑:	$25 \mu\text{m}$
探测器:	PSD(S3931) $1 \times 6 \text{(mm}^2\text{)}$
工作距离:	20mm
测量范围:	$\pm 2 \text{mm (18} \sim 22 \text{mm)}$

图 4 是探头的光学系统结构图,探头的整体尺寸及主要技术指标与报道的国外同类产品水平相当^[3,4],重量只有 150g 。



LD: laser diode;

PLS: projection lens system;

DLS: detection lens system;

PSD: position sensitive detector

Fig 4 Optical system of laser probe

4 测量结果及误差分析

用我们所研制的非接触三角测量激光探头及电子学处理系统分别对铝切削件及白纸进行了位移测量。其位移量是采用分辨率为 $0.5 \mu\text{m}$ 的 Nikon 数字微测量计(日本产)标定。表 1 是测试物为白纸的表面位移量与输出电平之间关系的测试

结果。位移量是相对探头工作距离而言, 接近探头为负, 远离探头为正。采用线性校正软件标定探头电子学测量系统, 最后直接显示出探头所测位移量。通过反复测量测出引起输出电平最小示值变化的位移量, 其测量结果见表 2, 由表 2 可以看出所设计探头的分辨率优于 $2 \mu\text{m}$ 。把测试物固定在探头测量范围内四个不同位置上反复测量, 其结果见表 3, 从测量结果中可看出其测量重复性很好, 测量精度相当于国外同类型产品。

Table 1 Relationship between displacement and output voltage level

output voltage level	1000	900	800	700	600	500	400	300	200	100
relative displacement (μm)	2.4375	2.1165	1.8340	1.5800	1.3455	1.1130	0.8830	0.6585	0.4350	0.2155

Table 1

continue

Output voltage level	10	- 100	- 200	- 300	- 400	- 500	- 600	- 700	- 800	- 900	- 1000
relative displacement (μm)	0.0000	- 0.2160	- 0.4215	- 0.6260	- 0.8280	- 1.0375	- 1.2390	- 1.4335	- 1.6230	- 1.8095	- 2.0140

Table 2 Measuring data of probe resolution

number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
measuring value (μm)	1.5	1.5	2.0	1.5	1.5	2.0	1.5	1.5	1.5	2.0

Table 3 Measuring results of probe repetition precision

real value (mm)	measuring value (mm)										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	average
- 1.700-	1.703-	1.705	1.705-	1.704-	1.702-	1.703-	1.705-	1.704-	1.705-	1.705-	1.704
- 0.018-	0.019-	0.019-	0.019-	0.017-	0.017-	0.019-	0.019-	0.019-	0.017-	0.017-	0.018
0.118	0.115	0.115	0.115	0.115	0.115	0.115	0.113	0.113	0.113	0.113	0.114
1.880	1.881	1.881	1.881	1.881	1.881	1.881	1.878	1.881	1.881	1.881	1.881

下面分析一下影响测量结果的一些因素。

1. PSD 的非线性。PSD 虽然具有较高的分辨率, 但其线性较差, 尤其在接近边缘处其测量误差较大, 为了减少由于 PSD 的非线性引起较大的测量误差, 通常在系统的设计中注意使在 PSD 上像点位置变化距中心不超过半长度的 $2/3$ 处, 以便利用其线性较好的中间一段有效区域。另外在测量中还发现 PSD 对温度及光照强度变化的稳定性较差, 这可以通过电子学处理系统及相应的软件加以改善。

2 被测面的影响。由于被测面的倾斜、凹凸变化, 表面颜色、加工方法、光泽度的变化一般可使接收能量发生几倍、甚至几十倍的剧烈变化。例如被测面反射率不均匀, 那么光斑散射的光量也不均匀, 因而在 PSD 上形成的像点能量分布也就不均匀。由于 PSD 是检测在其表面上成像光斑能量分布的中心位置, 当成像光斑的几何中心与能量分布中心有偏差的话, 导致测量结果必然有偏差。在系统的光学设计中应尽量使其照射到被测面上的光斑小, 接收光学系统接

收的能量在整个通光孔径内比较均匀,从而减少由于被测面反射率不均匀产生的测量误差。即使对反射率相同的表面,由于表面特征的突变,使接收系统接收的光量发生较大的变化,也将影响测量结果。此外表面的倾斜也将使接收光量发生变化,影响测量结果,实验中对被测面 $\pm 30^\circ$ 的倾斜进行了有效测量。

3 电子学处理系统产生的误差。从 PSD 两端输出的电流是微弱的信号,需进行预放处理,然后进行 I - V 转换、加法、减法处理,最后进行 A/D 变换。各环节性能的偏差都将给测量结果带来误差。在 $\pm 2\text{mm}$ 测量范围内,若要求分辨率为 $2\ \mu\text{m}$,对模拟处理电路中电压输出最大值为 $\pm 5\text{V}$ 的情况下,则要求其漂移必须小于 $\pm 5\text{mV}$,因此对电路的稳定性要求很高,在电子线路的设计中应尽可能地选择高精度、性能稳定的元器件,降低噪声,提高抗各种干扰的能力。关于电子学数据处理方面的讨论将在另文中进行。

5 非接触三角测量激光探头的应用

非接触三角测量激光探头可代替接触式探头单独使用,对固定的点、特征线、表面粗糙度、尺寸等进行非接触测量。将它安装在三坐标测量机上,通过探头的扫描能准确地给出物体的表面轮廓。在工厂自动化检测及产品质量评价中具有十分可观的实用价值。下面就其应用举几个方面。

1) 厚度测量。用两个探头相对地放置,将被测物放在中间,分别测量出两个探头到正对被测物之间的距离,由测量值及两个探头之间的距离便可知被测物之厚度。若被测物是薄板,则可以让薄板在两个探头之间运动,从而测出薄板厚度的偏差。这种测量不仅适用于热轧、冷轧生产线,而且也适用于橡胶、塑料、造纸及其它各种厚膜、薄膜等生产线的厚度及均匀性的自动测量。

2) 表面粗糙度、外形尺寸测量。表面粗糙度是衡量产品质量优劣的重要指标之一。利用非接触三角测量激光探头,使被测件(如钢板)沿垂直于探头轴方向移动,扫描测出面形其微变化,获得表面粗糙度信息。将探头沿与被测物表面平行方向扫描,即可检测截面的外形。测量中采用电子学系统自动报警告知操作人员探头是否达到了工作距离,然后自动控制探头的升降,使其保持在测量范围内。还可用它来检测大规模集成电路芯片及旋转唱盘的振动等。

3) 表面轮廓测量。把非接触三角测量激光探头安装在三坐标测量机上,通过扫描工作台的两维移动,探头的上下升降,经过计算机对测量数据进行处理,给出被测面三维立体图。更重要的是用它可以对由软质材料构成的物体进行测量,如对汽车改型中的油泥模型车的测量,为汽车改型提供可靠的数据。

4) 特征线识别。把非接触三角测量激光探头安装在三坐标测量机上,利用扫描可对肉眼可见的特征线进行识别,这给模具制造提供了一个简捷的手段。具体测量方法是,将探头对准特征线左右摆动进行连续测量,一面反复横交特征线,一面实现特征线的跟踪。探头在跨越特征线摆动测量中,因特征线处有一定的深度,因此在特征线处输出信号与其它地方输出信号必然有较大的差异,将这有差异的位置数据记录下来,由同时对特征线的跟踪,最后画出特征曲线。测量过程可自动进行,与采用接触探头测量相比较而言,它不仅可节省操作人员的工作量,而且可以提高测量精度。

6 综 述

利用三角测量原理研制的非接触激光探头, 具有体积小、重量轻、结构简单、测量方便等特点, 可代替接触探头实现在线实时非接触测量, 完成了接触探头所不能进行的一些测量工作(如对软质材料、高温材料等的测量), 满足了工业生产线在线快速检测的要求, 因此在自动计量及检测中将发挥着重要的作用。这种非接触三角测量激光探头存在的不足之处是, 只能测量漫射面, 接收部分散射光, 测量精度易受被测表面特征的影响; 使用 PSD 作为位移探测器对温度及受光量变化的稳定性差, 由于三角测量本身的非线性, 因而在整个测量范围内分辨率有较大的差异。

参加此项工作的还有: 杨芳珍、袁雅珍、杨桂芹、阮锦等。

参 考 文 献

- [1] Francois Blais Practical Consideration for a Design of a High precision 3-D Laser Scanner System. Proc SPIE, 1988, **959**: 225~ 245
- [2] E JL. Design of Optical Triangulation Derices Optics & Laser Technology, 1989, **21**: (5): 335~ 338
- [3] Amir Modjarrad Non-Contact Measurement Using a Laser Scanning Probe Proc SPIE, 1988, **1012**: 229~ 239
- [4] Hamamatus Technical Data

Laser Optical Probe for Non-contact Measurements

Zou Zhensu, Li Xizheng, Zhang Jinghe, Gao Qingfeng
(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022)

Hu Jiasheng

(Dept of Physics, Dalian University of Technology, Dalian 116023)

Abstract

In this paper the principle of laser triangulation technique is described, the related formulae are derived, the factors which affect the measurements accuracy of triangulation technique are analysed. We introduce the design of non-contact laser optical probe based on the triangulation technique, give the experimental results, review the applications of triangulation technique.

Key words: Triangulation, Laser probe, Non-contact measurements

邹振书 男, 1942 年出生, 1965 年毕业于山东大学物理系, 副研究员。主要从事光学信息处理及全息术、干涉计量与激光技术等领域的工作。负责的“光学成像多光谱显微术研究”课题获 1990 年度中国科学院科技进步二等奖, 参加的 863 高技术课题“逆合成孔径雷达及总体技术研究”课题获中国科学院长春分院科技进步三等奖。先后在国内科技刊物上发表 20 多篇论文。