

石英管壁厚激光扫描在线检测系统研究

徐熙平 张国玉 付秀华 安志勇 李成志 杨继兴

(长春理工大学, 吉林长春, 130022)

摘要 基于光电传感和激光扫描检测技术, 本文提出了一种石英管壁厚激光扫描在线检测系统, 采用激光后扫描方法对以一定角度入射到石英管侧面, 经其内外表面反射后的两束激光光束的空间位置进行测量, 解决了石英管壁厚非接触在线测量问题。文中详细论述了系统的总体结构、检测原理及信号处理系统。通过实验对系统的测量精度进行了验证, 结果表明系统测量精度达 $\pm 0.01\text{mm}$ 。

关键词 仪器仪表技术; 石英管; 激光扫描; 壁厚测量; 在线检测

中图分类号 TN247

石英管的壁厚尺寸是衡量其质量优劣的重要参数之一, 用于光纤外皮管的石英管壁厚尺寸直接影响光纤的特性和寿命, 所以在其生产过程中, 必须实时监控壁厚参数使之控制在公差范围内。生产石英管一般采用中频炉对空心石英坨料进行加热后再由牵引轮拉伸的方法, 其壁厚是由牵引速度和空心坨料中的空气压力决定的。鉴于石英管生产具有高温、易碎且不易采用接触法测量的特点, 故采用具有高速、高精度和非接触测量等优点的激光扫描检测技术^[1, 2]来测量其壁厚, 可满足检测要求。通过将测量结果数字量由 D/A 转换器转换成模拟量, 再将此模拟量输入 PID 调节器, 对石英管生产设备的牵引轮或风机的电机进行控制, 实现了生产石英管监测与闭环控制的目的。

1 总体结构与测量原理

系统总体结构如图 1.1 所示, 半导体激光器 1 作为光源, 其高斯光束经准直、扩束和整形光学系统 2 后, 形成 $10\text{mm} \times 0.15\text{mm}$ 准直线状光束, 其以一定的角度入射到石英管侧面上, 这束光线被分为两部分, 一部分被石英管外表面反射, 另一部分经外表面折射后入射到内表面上, 被反射再次入射到外表面, 折射后形成一个平行于外表面反射光线的折射光线。这两束平行光线的空间位置与石英管的壁厚有关。光线经接收光学系统 3 和平面反射镜 4 后,

汇聚到多面体旋转反射镜(转镜)反射面上, 由于转镜的旋转使得两束光线经平面反射镜 5 反射后以一定的时间间隔分别入射到接收光电传感器光敏面上, 光电器件输出两个携带有被测壁厚信息的光强脉冲信号, 经光电子学系统采集和数据处理后, 其测量结果可直接数字显示或送入计算机显示、存贮和打印。

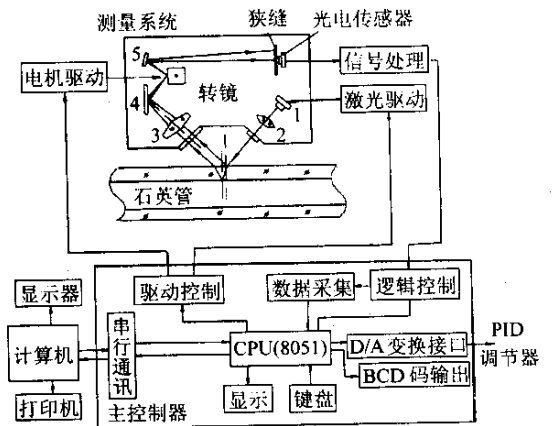


图 1.1 系统总体结构框图

Fig. 1.1 Overall structure of the system

系统测量原理如图 1.2 所示, 当半导体激光光束以一定角度 α 入射到石英管上时, 形成如图 1.2(a) 所示的光路。由反射定律形成一束与入射光线对称的反射光线 OC, 同时有一部分光在管壁内折射, 折

射角为 θ ,根据折射定律则有 $\sin\theta = \frac{1}{n}\sin\alpha$ 关系成立 (n 为石英管折射率)。在石英管壁内的光线入射到内表面 A 处时 ,同样遵循反射和折射定律 ,形成的内反射光线会再次入射到外表面 ,根据折射定律形成与 OC 平行的光线射出。设石英管的壁厚为 h ,根据几何关系由 $\triangle OAB$ 和 $\triangle OBC$,可以求出 BC 值 ,

$$BC = 2K_\alpha h \tag{1.1}$$

式中 , $K_\alpha = \tan\left[\arcsin\left(\frac{1}{n}\sin\alpha\right)\right] \cdot \cos\alpha$.

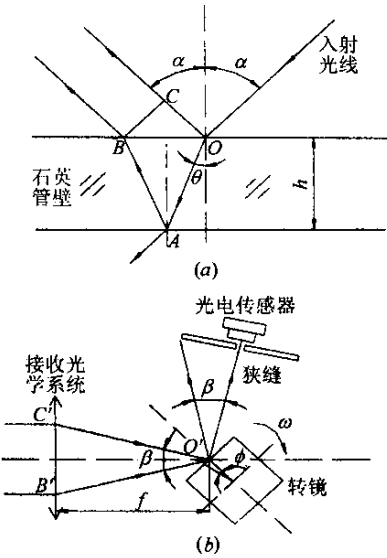


图 1.2 测量原理分析图

Fig.1.2 Scheme of the measuring principle

由总体结构图可知 ,从石英管外、内表面反射的两束光线被接收光学系统接收后 ,会聚到转镜反射面上 ,当转镜旋转时 ,使得两束光线依次被接收光电传感器接收 ,如图 1.2 (b) 所示。由于转镜的转角 ϕ 与反射光线的转角 β 有 $\beta = 2\phi$ 关系。则扫描时间 $t = \frac{\phi}{\omega} = \frac{\beta}{2\omega}$ (ω 为转镜角速度) ,当接收光学系统焦距为 f 时 ,在 $\triangle O'B'C'$ 中 ,可求出 $\beta = 2\arctan\left(\frac{C'B'}{2f}\right)$,并根据 $BC = B'C'$,则有

$$t = \frac{1}{\omega} \arctan\left(\frac{K_\alpha \cdot h}{f}\right) \tag{1.2}$$

(1.2) 式即为被测石英管的厚度 h 与扫描时间 t 的函数关系。如果转镜转速为 $N(\text{r/min})$,则有 $\omega = 2\pi/60$ 关系。用 t 表示 h 并消除 ω 则

$$h = \frac{f}{K_\alpha} \tan\left(\frac{\pi N}{30} \cdot t\right) \tag{1.3}$$

从 (1.3) 式可以看出 ,数据处理系统只要能够准确

地测出 t 值就可以计算出厚度结果。

2 信号采集与计算机实时数据处理系统设计

信号采集电子学系统是将两个反映石英管厚度的光信号转换为电脉冲信号。由于激光光束具有一定的光斑几何尺寸而非理想点光源 ,光电传感器输出的信号非理想的脉冲信号 ,因此采用二次微分电路处理后得到理想的测量信号波形。再由逻辑电路进行处理取出两脉冲信号的上升沿 ,形成一个表示壁厚的方波脉冲信号 ,测量信号形成如图 2.1 所示。

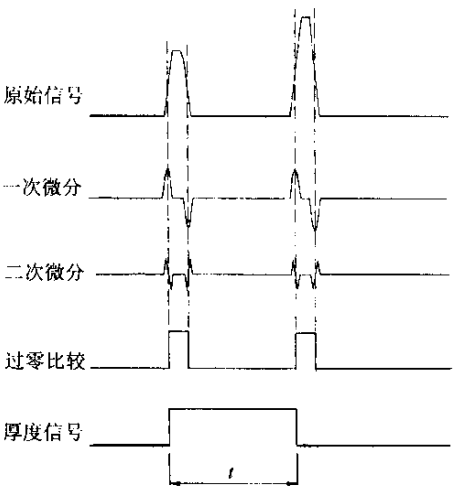


图 2.1 测量信号形成过程图

Fig.2.1 Diagram of the measured signal in its processing

计算机实时处理电子学系统采用高频脉冲(频率为 f_N) 对得到的方波信号进行计数。如计数值为 m 则信号对应的扫描时间 $t = \frac{m}{f_N}$,代入 (1.3) 式可得被测石英管的壁厚值。本系统包括硬件电路与软件程序两部分。硬件主要由扫描电机驱动控制、信号处理、数据采集、键盘和显示等单元电路组成 ,同时为实现闭环控制需要 ,设计了 D/A 变换等接口。软件主要包括汇编语言为主的控制、数据处理和显示等内容。

3 测量结果与误差分析

利用上述系统 ,对一组经过计量部门标定的石英管试件进行了静态测试 ,其结果如表 3.1 所示。

由表 3.1 可知 ,本系统测量误差优于 $\pm 0.01\text{mm}$,重复性精度达 $\pm 0.005\text{mm}$. 系统的主要误差来源一是由于被测试件放置角度误差。当试件放置平面与参考面不平行 ,存在 $\Delta\alpha$ 角度误差 ,就会使 K_α 产生 $\Delta K_\alpha = \left(\frac{\cos 2\alpha}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}} + \frac{\sin 2\alpha}{4\sqrt{(n^2 - \sin^2 \alpha)^3}}\right)$

· $\Delta\alpha$ 的变化 ,由(1.3)式可以求出石英管壁厚的测量误差值

$$\Delta h_{\alpha} = \frac{-f \cdot \tan(2\pi N \cdot t)}{K_{\alpha}^2} \times \Delta K_{\alpha} \quad (3.1)$$

表 3.1 测量结果

Tab.3.1 The measured results

序号	标定值 h_s/mm	测量平均值 h_m/mm	测量误差 $\Delta h/\text{mm}$	重复性精度 $\pm 2\sigma/\text{mm}$
1	2.001	1.999	-0.001~-0.003	± 0.003
2	5.073	5.071	-0.002~-0.004	± 0.003
3	7.102	7.100	-0.000~-0.003	± 0.004
4	10.032	10.034	0.004~ 0.003	± 0.003
5	13.060	13.064	0.005~ 0.003	± 0.005
6	15.531	15.528	-0.002~-0.004	± 0.003
7	17.655	17.660	0.003~ 0.005	± 0.004
8	19.975	19.970	-0.006~-0.004	± 0.003

由 $n = 1.457\ 28$, $\mu\alpha = 49^{\circ}$,可求出 $K_{\alpha} = 0.392\ 7$.当 $f = 156.00\text{mm}$ 、 $N = 1\ 500\text{r/min}$ 、 $t = 300\mu\text{s}$ 、 $\Delta\alpha = 0.5^{\circ}$ 时 ,由(3.1)式可以求出 $\Delta h_{\alpha} = -0.006\ 6\text{mm}$.由于被测石英管是运动的 ,入射角总会存在一定的误差 ,所以此项误差无法消除 .通过调整检测系统与石英管生产设备拉伸、导向与定位机构的相对位置 ,可以保证 $|\Delta\alpha| \leq 0.5^{\circ}$.二是扫描转镜的转速不稳定产生的扫描时间误差 .由(1.3)式可以求出转镜转速对厚度影响关系

$$\Delta h_N = \frac{f\pi t}{30K_{\alpha}} \left[1 + \tan^2\left(\frac{\pi Nt}{30}\right) \right] \cdot \Delta N \quad (3.2)$$

当 $\Delta N = 0.2\text{r/min}$,其它参数不变情况下 , $\Delta h_N = 0.002\ 5\text{mm}$.本系统转镜采用磁滞同步电机驱动 ,其转速与电机电源驱动频率有严格比率关系 .采用高频振荡器分频方法得到此驱动频率 ,电机转速误差可控制在 $|\Delta N| \leq 0.2\ \text{r/min}$.同时此高频振荡器的输出频率还作为测量时间的基频 ,那么测量时间误差 Δh_t 就与 Δh_N 有负相关系而抵消 .另外 ,在线测量过程中 ,石英管测量部位温度达 200°C 左右 ,其折射率会增加 ,发生了 $\Delta n = 2.5 \times 10^{-3}$ 的变化 ,从而造成 K_{α} 的变化量 $\Delta K_{\alpha} = -0.001$.根据实际测量值对 K_{α} 进行修正 ,可消除 Δn 影响 .接收光学系统还会存在一定的安装误差 ,但可以通过调整光学系统位置消除掉 .

4 结论

本文提出的石英管壁厚激光扫描在线检测系统 ,解决了石英管、普通玻璃管、平板玻璃及其它透明材料管材和板材厚度尺寸检测问题 .该系统壁厚测量范围为 $2\sim 20\text{mm}$,测量精度 $\pm 0.01\text{mm}$,采样速度快每秒达 100 次 ,并具有非接触自动在线检测等特点 .已在石英管生产线上得到应用 ,实践证明检测系统工作稳定可靠 .

参 考 文 献

1 Zhang Guoyu et al. Theoretical analysis for the characteristics of a laser-scanned measuring system. SPIE , 1996 2899 338~347
2 杨国光. 近代光学测试技术. 江苏 :浙江大学出版社 ,1997. 352~386

A QUARTZ-TUBE THICKNESS LASER-SCANNING
ON-LINE INSPECTING SYSTEM

Xu Xiping Zhang Guoyu Fu Xiuhua An Zhiyong Li Chengzhi Yang Jixing
(Changchun University of Science and Technology , Changchun , 130022)

Abstract Based on the laser-scanning inspecting principle and optoelectronic sensor technigue , a quartz-tube thickness laser-scanning on-line inspection system was presented. Dimensional positions of two laser beams formed by the reflected beams from a beam incident to the outer face of the quartz-tube and then reflected respectively by the inner and outer surfaces of the tube , are measured. As a result , non-contact on-line measurement of the quartz-tube thickness was achieved. In this paper , the working principle , the overall structure and the real-time signal processing system of the system were described. The measuring precision of the system is verified by experiment attaining $\pm 0.01\text{mm}$.

Key words instrument and metering , quartz-tube , laser-scanning , thickness measurement , on-line inspection