文章编号: 1001-5078(2006)03-0184-03

用激光扫描投影法检测核燃料模拟组件变形

先登飞[1],韩震宇[1],陈万良[1],李绍卓[2]
(1. 四川大学制造科学与工程学院,四川 成都 610065; 2. 第二炮兵装备研究院,北京 100085)

摘 要:鉴于核燃料组件变形水下检测的需求,本文提出了一种基于激光扫描投影的模拟组件整体轮廓变形检测系统的原理和实现方法:首先在光路部分分析了组件的变形情况及其各自的评价标准,以及位移测量法和 CCD成像法的局限性;在数据采集和软件算法上,着重对信号调理部分采用的特殊整形方法和引入相对测量以提高系统精度作了介绍;最后给出了一批静态尺寸测量数据,对测量精度作了验证。

关键词:激光扫描投影;信号调理;相对测量;脉冲计数
中图分类号: TN206 **文献标识码**: A

Measuring Simulated Nucleus Fuel Modules' Distortions with Laser Scan and Projection Method

XIAN Deng-fei[1], HAN Zhen-yu[1], CHEN Wan-liang[1], LI Shao-zhuo[2]
(1. College of Manufacturing Science and Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;
2. The Second Artillery Equipment Research Institute, Beijing 100085, China)

Abstract: For the requirement of the nucleus fuel module's underwater distortion measurement, we advanced a kind of principle and realization method for its whole figure distortion measurement system based on the laser scan and projection in the paper: Firstly, several module's distortions and their estimation standards, the displacement measurement and CCD imaging methods' shortages are analyzed in optical section; Then for data acquirement and arithmetic sections, we introduced a special method in the signal adjustment and the comparative measurement for advancing system precision mainly; Finally, a group of static measurement data was given to validate the accuracy.

Key words: laser scan and projection; signal adjustment; comparative measurement; pulses countering

1 引 言

在核电站,核燃料以组件形式放入反应堆中,燃料组件是由若干根燃料棒及控制棒导向管通过上下管座组装而成。燃料组件工作在高温、高压、高辐射循环水中,由于装配应力及热应力等因素的影响,燃料棒会产生局部变形,整个组件的外形也会发生变化,严重时将会影响控制棒正常插入,危及反应堆安全运行。为此,在一定时间间隔内,必须对组件进行定期检测,提醒工作人员及时地更换燃料组件。由于燃料组件的高热、高辐射,因此检测一般都是在水下进行,主要是检测组件的整体变形(局部的变粗、变细、弯曲以及整体的扭曲、弯曲、倾斜等等)。

对物体外形轮廓及变形量的测量,通常采用位移传感器逐点测出物体相对于某几个基准平面或基准曲面的相对位移。但该测量方法所需要的测试时间较长,不适合对大尺寸物体的变形测量。而使用 CCD成像技术能够观测被测物体的表面缺陷,可对平面物体进行尺寸测量,但该方法对环境光源的要求较高,更关键的是不能精确计算被测空间物体的整体外形尺寸。本文提出了利用平行光对物体进行投影的测量方法,该方法虽然不能获得燃料组件在空间上的精确尺寸,但可以对组件的整体轮廓变形给出一个准确的结果,且平行光的光源使用激光,其与被测物体间可有较大的测量间距,测量结果的精度、稳定性和抗干扰性较高,可以满足系统要求。

2 测量原理

测量原理示意图见图 1,模拟组件为 16根直径 10mm、长度 500mm的不锈钢圆棒按间距 3mm排列成方阵,通过上下管座固定构成。半导体激光器发

作者简介:先登飞(1982 -),男,四川大学机械电子工程系 2003级硕士研究生,研究方向是机电一体化。
收稿日期: 2005-07-14

© 1994-2006 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

出的激光束经平面镜反射后,投射在高速旋转的八棱镜上,反射光束经过 f·θ透镜后就得到一组相互平行、从上向下动态扫描组件的平行光束。再经汇聚透镜后汇聚到光电管处,把带有组件信息的光影信号转换成电脉冲信号,透光区为高电平,遮光区或阴影区为低电平。图 1的下半部分为光电管处输出的电脉冲信号波形图,其中遮光区是由光路系统产生的:因为从八棱镜反射出去的光束只有一部分能够经过透镜,在透镜有效接收范围外的光束存在时间就是遮光区宽度,这个宽度值在光路系统各部件及其相互位置关系确定好之后,就不会再发生变化。其他光束存在时间则构成了透光区宽度,这也是本测量系统的有效测试范围,其中的四个低电平脉冲对应四排燃料棒的组合轮廓投影。由于图 1中测量的结果只是一个截面轮廓,为了得到组件的完整轮廓形貌和整体变形,我们采用步进电机驱动测头沿组件轴线做上下扫描运动,采用这种"切片"的方法最后通过重组就会得到完整的组件轮廓。为减小空间测量误差,在激光束出射方选用特殊的 f·θ透镜,使得激光束从上向下以一个相对恒定的速度扫描组件,其前提是八棱镜的转速相对稳定。

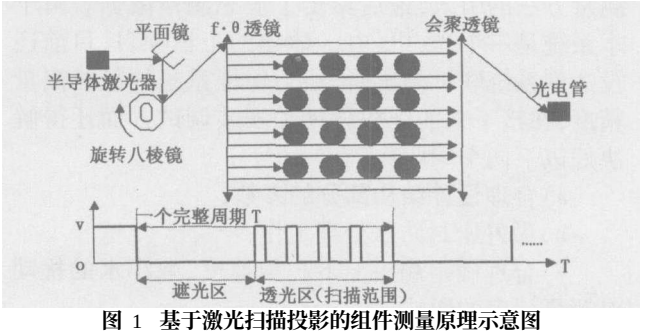

图 1　基于激光扫描投影的组件测量原理示意图

对组件各部分扫描后得到的组件变形分类情况及评价方法如图 2所示。通过计算燃料棒轴向的最大变形量可确定其弯曲变形量 (图 2a);Δx的大小可以反应上管座的扭曲变形量 (图 2b);ΔY和 Δθ的大小可以在两个相互垂直的方向上分别反应上管座的倾斜变形量 (图 2c)。

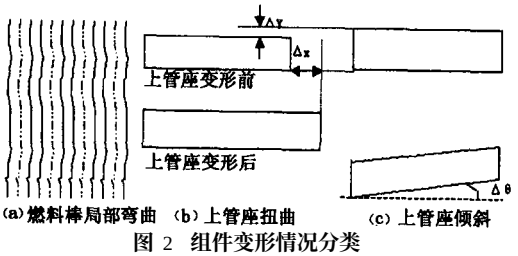

图 2　组件变形情况分类

3　系统实现

本系统采用 ATMega128单片机前端计数、控制步进电机带动侧头做上下扫描运动,上位计算机负责变形量计算、组件轮廓恢复显示等工作。测量时,系统中信号的流向是这样的:光影信号经过光电管变成 5V左右电信号,通过脉冲整形电路后进入计数器电路,计数器数据被单片机读取后送上位机。下位机模块框图如图 3所示。激光传感器准矩形波产生子模块前面已介绍,由于激光束光斑是有一定直径的,因此在激光束跟被测物的交界处、以及激光束从透光到遮光的这一过渡区里面,从光电管出来的信号强度都是一个从最大到最小的连续变化的值,反之从遮光区到透光区也一样,即脉冲波形的上升沿及下降沿都不是理想的跳变。不仅如此,信号幅值还会随光电管电源、激光器强度的波动而跟着变化。因此在信号调理模块中对其整形时,不能简单地用原始信号跟 2.5V电压比较。解决方法是在比较器 U3前端加一采样保持电路 U2(见图 4),实时跟踪信号幅值,在原始信号上升沿由施密特触发器 U1产生一采样脉冲送入 U2,其输出总是当前周期幅值的一半,再用这幅值的一半与原始信号进行比较,这样就消除了光电管电源、激光器强度的波动而带入的误差。其它电路的实现都是很常见的方法,在此不再详述。

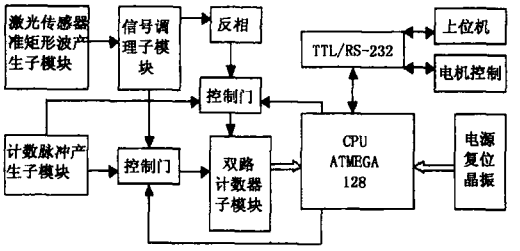

图 3　脉宽比值测量电路原理框图

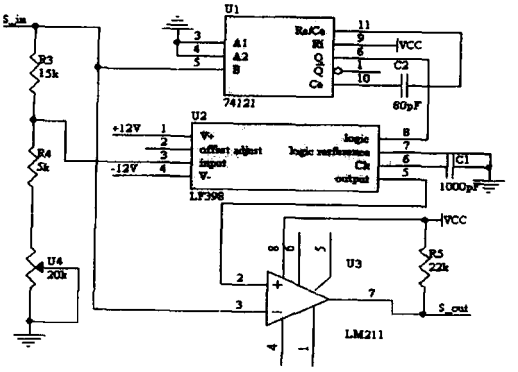

图 4　信号调理子模块原理图

4　精度分析

鉴于本检测系统的复杂性,影响最终测量精度的环节很多。其中光影信号产生部分属于光学内容;驱动测头上下扫描组件的结构部分属于机械学领域;而信号采集部分乃是电子学的研究方向。要保证系统最终精度,这其中各个环节都不能忽视,由于篇幅所限在此不便逐一详述,下面对其中信号采集部分和软件算法上采取的特殊措施做简要介绍:

由图 1中的光电管处输出信号波形可知:两排燃料棒间的间隙 (未变形时为 3mm)对应的脉冲很

© 1994-2006 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 1 部分静态测量数据

测量次数 \ 被测棒 (mm)	Φ1.8		Φ5		Φ10		Φ15	
	修正前	修正后	修正前	修正后	修正前	修正后	修正前	修正后
1	1.7237	1.8271	4.9592	4.9946	10.0047	10.0047	15.0374	14.9975
2	1.7226	1.8260	4.9629	4.9983	10.0019	10.0019	15.0390	14.9991
3	1.7232	1.8266	4.9605	4.9959	10.0025	10.0025	15.0369	14.9970
4	1.7205	1.8240	4.9626	4.9980	10.0045	10.0045	15.0372	14.9974
5	1.7231	1.8265	4.9594	4.9948	10.0015	10.0015	15.0392	14.9993
平均	1.7225	1.8260	4.9609	4.9963	10.0030	10.0030	15.0379	14.9981
误差	-0.0775	0.0260	-0.0391	-0.0037	0.0030	0.0030	0.0379	-0.0019

窄,若计数脉冲频率太低则会带入较大的误差;另外对脉冲计数总会存在 ±1的固有误差,若计数脉冲频率选得太低则这个固有误差也会相对增大。因此不能用单片机的内部计数器 (最高只能达到 16MHz),而采用外部高速专用计数器 MC74F161芯片 (在工作电压为 5V,环境温度为 25℃时最高计数频率可达 100MHz),高稳定度的计数脉冲由 40MHz的有源晶振提供。

由于八棱镜驱动电机转速不可能是理想的恒定不变,因此激光束上下扫描的线速度也会随之波动,若直接采用公式:$D = v \cdot \Delta t$, (其中:D为被测物尺寸,v为激光束扫描线速度,Δt为扫描时间),这样产生的误差我们是无法消除的。为消除八棱镜驱动电机转速不稳定带入的误差,本系统采用了简单而实用的相对测量技术:已知标准棒直径为Φ,待测直径Φ,标准棒脉宽 w,待测直径脉宽 W,则待测直径 Φ可由公式 $\Phi = W/w \cdot \Phi$ 求得。由于计数脉冲的高稳定性,脉宽 w、W就可等价于脉冲数 n、N。由图 1中脉冲波形可知,遮光区宽度在系统装配完成后是一个固定不变的值,即其本身就是一个很好的标准棒,因此在第一次测量时可按如下两个步骤进行:

a)用一个已知尺寸的物体来标定遮光区宽度:$Z = N/n \cdot y$, 其中:N为遮光区脉冲数,n为已知尺寸脉冲数,y为已知尺寸,Z为遮光区宽度值。然后把 Z存入单片机 ROM中;

b)用遮光区宽度测量计算被测物尺寸:$B = N/n \cdot Z$,其中:N为被测物脉冲数,n为遮光区脉冲数,Z为遮光区宽度值,B为被测物尺寸。即先选用一已知尺寸的物体作为标准棒来标定遮光区宽度;再以遮光区宽度为标准棒来标定被测物。由于遮光区宽度是一不变值,所以在以后的测量中第一步就可以省去,当然时间久了若需要还要求对遮光区宽度值重新标定。

在做静态测量 (滑板不作上下扫描)时,发现存在测大尺寸偏大、小尺寸偏小的系统误差,不过我们通过实际测量数据,拟合出误差曲线再对测量数据进行补偿后达到了较好的效果。表 1是用 Φ10mm的标准棒来标定遮光区,并以遮光区作标准测量 Φ1.8、Φ5、Φ10、Φ15的一批数据,可见经过补偿消除系统误差后的效果确实不错,由于是用 Φ10mm标定遮光区宽度的,所以它本身的测量就不用标定效果都达到了 3μm的精度。

5 结束语

本文给出了用激光扫描投影来检测核燃料模拟组件变形的原理和实现方法,通过对组件的弯曲、扭曲、倾斜三大变形分类及其评价,激光束动态扫描投影原理和分层切片扫描技术的分析,可知该方法是可行的。同时提出了为提高测量精度而在数据采集部分采取的两大措施:单片机外部高频计数和相对测量方法的引入,最后给出了静态测量数据。由于本系统是一个光、机、电一体化的工程项目,目前还没达到系统联机调试阶段,为保证系统的最终测量精度,在接下来的结构设计和安装调试方面还得解决好以下四个问题:

a)合理设计结构部分的参数;

b)做好密封防水处理工作;

c)合理确定测头上下扫描速度,减小水的扰动对测量精度的影响;

d)安装调试时一定要保证好测头发射部分跟接收部分透镜主光轴的同轴度。

参考文献:

[1] 陈海清. 现代实用光学系统 [M]. 武汉:华中理工大学出版社, 2003, 05.

[2] 杨杰,王毅. 激光扫描测径技术原理 [J]. 试验与研究, 2003, 04(2).

[3] 马潮,詹卫前,耿得根. Atmega8原理及应用手册 [M]. 北京:清华大学出版社, 2003, 03.

[4] 费立泰. 误差理论与数据处理 [M]. 北京:机械工业出版社, 2000, 05.

[5] 李承志. 激光扫描动态测量管外径的研究 [J]. 激光技术, 1994, 10(5): 303 - 305.

[6] 马国欣. 激光扫描测量直径 [J]. 光电工程, 2004, 02(2): 45 - 47.

[7] 阎晓峰. 激光扫描测量及其应用 [J]. 激光与红外, 1995, 25(3): 30 - 32.

[8] 苏大图. 光学测试技术 [M]. 北京:理工大学出版社, 1996, 09.

© 1994-2006 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net