

文章编号: 1001-3806(2004)03-0296-02

# 金属梁挠度的激光全息再现

朱晨<sup>1,3</sup>, 刘永胜<sup>2</sup>, 宋淑萍<sup>1</sup>, 徐舟<sup>1</sup>

(中国民航学院理学院, 天津 300300; 2. 天津理工学院, 天津 300400; 3. 天津大学, 天津 300074)

**摘要:** 在材料力学中, 金属梁的挠曲线是一个微小的位移分布, 无法用常规测量方法精确测量。论述了利用激光全息技术再现金属梁挠度的方法。同时根据挠曲线的数值解, 计算出挠度的理论分布, 计算结果与激光全息实验符合得很好。这表明激光全息技术可为材料的挠度研究提供新的直观、有效的检测方法。

**关键词:** 挠度; 激光全息; 微位移; 精密测量

**中图分类号:** TN247; O438.1 **文献标识码:** A

## Recurrence of the deflection of metal bar by means of holography

ZHU Chen<sup>1,3</sup>, LIU Yong-sheng<sup>2</sup>, SONG Shu-ping<sup>1</sup>, XU Zhou<sup>1</sup>

(1. School of Science, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China; 2. Tianjin Science and Technology Institute, Tianjin 300400, China; 3. Tianjin University, Tianjin 300074, China)

**Abstract:** In the material mechanics, the deflection of metal girder is a minute movement, and can't be measured using the normal regulation. This paper discusses the method of recurrence of the deflection of metal bar by means of holography, and calculates the deflection of metal bar according to the theory of deflection. The computing result is well in accordance with that of the laser holographic experiment, which proves that laser holography is a new intuitional and effective study method for metal material.

**Key words:** deflection; holography; micro-displace; precision measurement

### 引言

在材料力学中, 经常需要研究梁弯曲; 变形后的梁弯曲轴线称为挠曲线, 简称挠曲线。挠曲线反映了材料的力学性质和均匀性, 对材料的研究是至关重要的。在实验室对材料进行小样件研究时, 由于弯曲度很小, 用常规测量方法无法测量, 或无法精确测量(尤其是各点的位移分布), 影响了试验精度。用激光全息技术中的二次曝光技术, 能很好地实现这种微小位移及位移分布的精确测量。

### 1 挠曲线的数学表示

挠曲线示意图见图 1, 此问题的数学表示<sup>[1]</sup>为:

$$\begin{cases} \partial^2 y / \partial x^2 = F(x-l) / EI_z \\ y_{x=0} = 0, (dy/dx)_{x=0} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

基金项目: 中国民用航空总局中青年教师科研基金资助项目(1998303)

作者简介: 朱晨(1957-), 男, 副教授, 硕士, 研究方向为应用物理及光学仪器。

E-mail: czhu@cauc.edu.cn

收稿日期: 2003-06-28; 收到修改稿日期: 2003-09-22

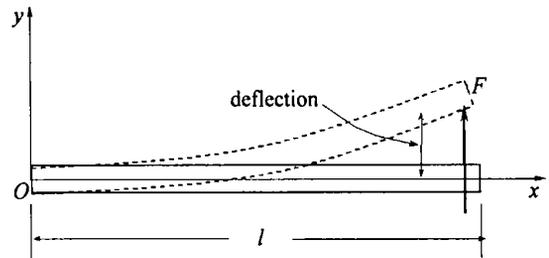


Fig. 1 Illustration of deflection

当位移很小时, 其位移分布的理论解为:

$$y = \frac{F}{EI_z} \left[ \frac{x^3}{6} - \frac{Lx^2}{2} \right], I_z = bh^3/12 \quad (2)$$

式中,  $F$  代表金属梁自由端受到的作用力,  $E$  代表金属材料的弹性模量;  $b$  代表金属梁的宽度,  $h$  代表金属梁的厚度。

如果通过某种手段精确的测出位移分布  $y$ , 是很有意义的: (1) 在位移分布表示式中, 位移与材料特性  $E$  就有了直接联系, 如果能精确地测出位移分布, 或某一点处的位移, 就能精确地计算出材料的  $E$  值; (2) 如果金属梁内出现缺陷, 如裂纹、气泡, 甚至截面尺寸不均匀等, 会导致位移分布异常, 从而在测量过程中被发现<sup>[2~5]</sup>; (3) 作为理论研究的直观验证

性实验,建立起理论研究和试验的桥梁。

## 2 实验方法

### 2.1 全息纪录

全息光路图见图 2,利用激光全息原理中的二次曝光技术,取波长为 632.8nm 的激光,先拍摄一幅加力前的全息图;然后在梁的自由端加力,再拍摄一幅全息图。根据拍摄时的全息实验光路图,图中金属梁表示出的是厚度和宽度,灵敏度矢量方向与金属梁位移方向一致,因此,拍摄的是位移方向的变化。其两幅图的干涉图形,就是金属梁沿位移方向的形变全息图。

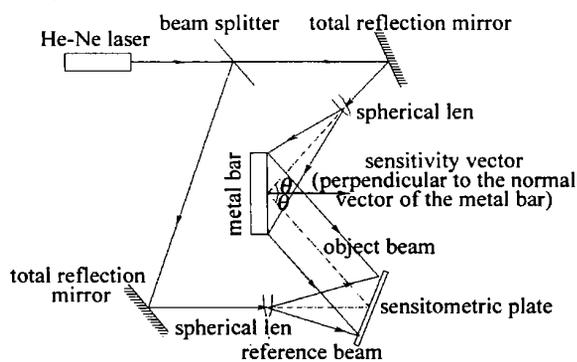


Fig.2 Optical system of holograph

### 2.2 (全息二次成像)理论分析<sup>6]</sup>

设物光为  $U_O$ ,参考光为  $U_R$ ,则位移前合成光强为:

$$I = (U_R + U_O)(U_R^* + U_O^*) = U_R U_R^* + U_O U_O^* + U_R U_O^* + U_R^* U_O = A_R^2 + A_O^2 + U_R U_O^* + U_R^* U_O \quad (3)$$

感光后的振幅透光率为:

$$T = t_0 + \beta I = t_0 + \beta(A_R^2 + A_O^2) + \beta U_R U_O^* + \beta U_R^* U_O \quad (4)$$

再现时用  $U_R$  照射,其透射光为:

$$S = U_R T = U_R [t_0 + \beta(A_R^2 + A_O^2) + \beta U_R U_O^* + \beta U_R^* U_O] = (t_0 + \beta A_R^2 + \beta A_O^2) U_R + \beta A_R A_R^* \times \{ \exp[i(\phi_R' - \phi_R)] U_O + \exp[i(\phi_R' + \phi_R)] U_O^* \} \quad (5)$$

在二次曝光过程中,如果第 1 次曝光的物光波为  $U_{1O}$ ,第 2 次曝光的物光波为  $U_{2O}$ (见图 3),则两次曝光后再现的物光波的合成光波为:

$$H = \beta A_R A_R^* \exp[i(\phi_R' - \phi_R)] U_{2O} +$$

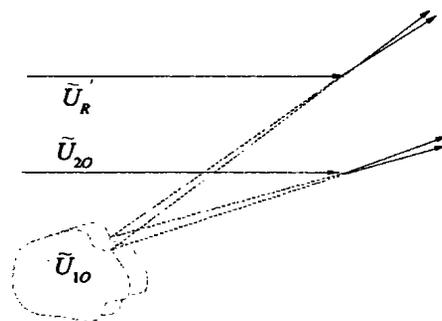


Fig.3 Holographic recurrence

$$\beta A_R A_R^* \exp[i(\phi_R' - \phi_R)] U_{1O} =$$

$$\beta A_R A_R^* \exp[i(\phi_R' - \phi_R)] (U_{1O} + U_{2O}) \quad (6)$$

因此,所观测到的光强分布为:

$$I_H \approx (U_{1O} + U_{2O})(U_{1O}^* + U_{2O}^*) \approx$$

$$U_{1O} U_{1O}^* + U_{2O} U_{2O}^* + U_{1O} U_{2O}^* + U_{1O}^* U_{2O} \quad (7)$$

写成实数形式为:

$$I \approx A_{1O}^2 + A_{2O}^2 - 2A_{1O} A_{2O} \cos(\phi_{2O} - \phi_{1O}) \quad (8)$$

式中,  $(\phi_{2O} - \phi_{1O})$  是两次曝光中物体变形所引入的相位差。这相位差与变形量  $y$  之间的关系可表示为:

$$(\phi_{2O} - \phi_{1O}) = 2\pi y / \lambda \quad (9)$$

按照干涉原理,当两次曝光物体之间的空间距离之差(即挠度)  $y$  满足下列条件时:  $y = k\lambda$ , 其中  $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ , 就会在原始物体的像面上形成亮条纹。于是,金属梁挠度分布情况就用条纹的分布表现了出来。

## 3 结果与讨论

### 3.1 全息再现

用一根长为 177.0mm、厚为 9.3mm、宽为 23.0mm 的铝金属梁,其中的 20mm 夹在夹具上,另一端为自由端,悬臂长度为 157mm,在自由端距顶端约 7mm 处加力,则整条金属梁按照挠度分布规律产生连续位移。

实际拍摄到的条纹分布见图 4。



Fig.4 A hologram of deflection distribution

### 3.2 (挠度)理论计算

$l = 1.5 \times 10^{-1} \text{m}$ ,  $E = 71.0 \text{GPa}$ ,  $I_z = 1.54 \times 10^{-9} \text{m}^4$ ,  $F = 3.43 \text{N}$ ,按照(2)式,计算出理论位移分布规律,见表 1。(下转第 302 页)

主要影响到非傍轴部分的光线,在本实验中对发散角测量结果影响并不大,但对光场分布有一定影响,也可根据光线追迹的方法作进一步修正。如果在测量系统中选用动态范围大的科学级 CCD,就可以避免由于减光片带来的误差。

这些工作本身也是后期编程处理,在整个测量系统建成之后,并不影响测量速度和简便程度。

## 4 结论

(1) 利用半矢量近似的有限元差分方法,详细模拟得到了损耗导引 650nm 掩埋脊型波导量子阱半导体激光器光束的近场分布、远场分布、远场光斑平行和垂直方向的光强分布以及远场发散角的理论计算值。(2) 设计建立了一套满足中大规模生产测试需要的测量系统。从实际测量的数据和分析结果看,实际测量和理论模拟吻合较好,初步达到设计要求,具有简单易行,快速准确的优点。(3) 对该测量系统中存在的主要误差进行了分析,给出了减小 CCD 探测器误差的方法和结果;利用光线追迹法进行了减小或消除光路系统误差的探索,给出了处理测量数

据以减小误差的基本思路和可行方法。

感谢复旦大学材料系江素华博士、曾韦副教授,99 级黄丽、瞿欣、陈柱等在研究过程中给予的帮助和讨论,感谢中国科学院半导体所钟源博士、康香宁博士、邱伟彬博士对本工作的支持。

## 参考文献

- [1] HUANG M F, LEE H Ch, HO J K *et al.* Laser diode for DVD pickup head [J]. Proc SPIE, 1998, 3419: 110~118.
- [2] YANG G W, XU J Y, ZHANG I M *et al.* Theoretical investigation on quantum well lasers with extremely low vertical beam divergence and low threshold current [J]. J A P, 1998, 83(1): 8~14.
- [3] 朱晓鹏. 光波导数值模拟与半导体激光光束性质研究 [D]. 北京: 中国科学院半导体研究所, 2002. 3~10.
- [4] 吕章德, 周国泉, 王绍民. AlGaInP/ GaInP SCH S-SQW 激光器光束质量的矢量矩分析 [J]. 光电子 激光, 2001, 12(6): 549~551.
- [5] BIERWIRTH K, SCHULZ N, ARNDT F. Finite-difference analysis of rectangular dielectric waveguide structures [J]. IEEE Trans Microwave Theory Technol, 1986, 34(11): 1104~1114.
- [6] KIM C M, RAMASWAMY R V. Modeling of graded-index channel waveguide using non-uniform finite-difference method [J]. IEEE J Lightwave Technol, 1989, 7(10): 1581~1589.
- [7] 陈军, 黄鹏. 利用 CCD 准确测量激光远场发散角 [J]. 强激光与粒子束, 1997, 19(4): 552~556.

(上接第 297 页)

表中第 2 列为挠度分布, 第 3 列为光程差与激光波长之比。按照激光全息条纹分布理论, 计算出其理论条纹分布为图 5。

Table 1 Theoretical distribution of displacement and the relevant optical path difference

coordinate / mm	deflection / m	displacement optical path difference ( $\lambda = 632.8\text{nm}$ )
0	0	0.000000
10	4.22E-08	0.066755
20	1.64E-07	0.259824
30	3.60E-07	0.568410
40	6.21E-07	0.981718
50	9.42E-07	1.488951
60	1.32E-06	2.079313
70	1.74E-06	2.742009
80	2.19E-06	3.466241
90	2.68E-06	4.241216
100	3.20E-06	5.056135
110	3.73E-06	5.900204
120	4.28E-06	6.762625
130	4.83E-06	7.632605
140	5.38E-06	8.499345
150	5.92E-06	9.352050

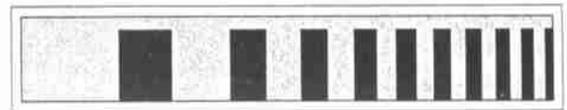


Fig. 5 Deflection distribution by analog computation

## 4 结论

比较图 4 与图 5 可以看出, 实拍条纹与理论计算条纹分布基本一致, 从而证明本文中所提出的方法是切实可行的。同时表明, 激光全息技术的应用, 为金属某些特性的研究提供了新的直观而有效的手段。

## 参考文献

- [1] 赵九江, 张少实, 王春香. 材料力学 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1995. 138.
- [2] 朱晨, 张志津, 徐舟. 用激光全息技术进行飞机发动机活塞杆疲劳检测 [J]. 光电子 激光, 2002(1): 62~64.
- [3] 熊秉衡, 王正荣. 实时全息干涉计量术的发展近况和趋势 [J]. 激光杂志, 1999, 20(3): 3~6.
- [4] 陈笑梅. 利用激光全息光弹实验测量圆盘片的主应力分布 [J]. 湖南师范大学自然科学学报, 2000(4): 27~30.
- [5] 谢宜燕. 激光全息无损检测实验 [J]. 大学物理实验, 2000(3): 47~49.
- [6] 赵凯华, 钟锡华. 光学(下) [M]. 北京: 北京大学出版社, 1982. 150~155.