

高频位相型曲面变形光栅的转移工艺研究^{*}

邹大庆 谢惠民 戴福隆

(清华大学工程力学系, 北京 100084)

摘要: 本文研究了在室温和 85℃ 温度环境下高频位相型曲面变形光栅的转移工艺。实验结果表明: 通过这种方法可以复制出高质量的曲表面试件变形栅, 并具有灵敏度高、条纹质量好、方法简便、可用于工业现场等优点。为云纹干涉法对曲面变形问题的研究提供了重要的手段。

关键词: 变形光栅 曲面 高温云纹干涉法

The Study of the Replicating Technique of the High Frequency Phase Style Deformed Gratings from a Curve Surface

Zou Daqing Xie Huimin Dai Fulong

(Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract This paper presents the study of the deformed gratings replicating technique from a curve surface at the room temperature and 85℃. The double deposited metal-film phase style holographic gratings of high frequency (1200 l/mm) is used. High quality copies of the curve surface deformed holographic gratings can be obtained with this method. It has the advantages of high sensitivity, high quality fringes and being easier to operate. It can be applied to the measurement of the curve surface deformation in situ. It developed a new moiré interferometry technique in the measurement of deformation of the curve surface, even in the high temperature conditions.

Keywords: deformed grating, curve surface, high temperature moiré interferometry

一、引言

云纹干涉法是 80 年代兴起的一种现代光测力学方法, 高频位相型全息光栅是云纹干涉法进行物体变形测量的基本元件。迄今为止, 已在复合材料、陶瓷等新型材料的研究中得到了成功的应用, 在平面变形的测量中云纹干涉法显示出其灵敏度高、量程大、条纹质量好等优点^[1]。目前, 云纹干涉法对于物体曲面表面变形方面的问题的研究工作还不多, 通常的方法是在试件的表面取一小块近似平面。曲面变形问题的研究, 尤其是在一定环境温度下的曲面变形现场测量, 如电厂主蒸汽管道的蠕变监测等, 已受到普遍关注。文献[2]曾采用失配云纹法, 以耐高温的 40 l/mm 光栅作为基本元件监测了主蒸汽管道的表面蠕变变形, 它具有无损、全

场、实时等优点, 较传统的卡尺测点测量方法在精度方面也有优势, 但是, 其灵敏度低, 测量周期很长。文献[3]曾采用柱面光波双对称入射的云纹干涉法研究圆柱曲面的表面变形, 该方法受限于实验室内隔震台环境。高温全息光栅的出现为云纹干涉法, 对这一问题的研究提供了基本元件^[4], 变形栅转移技术的发展又为其走出实验室提供了条件^[5]。本文研究了在室温及 85℃, 高频位相型曲面(圆柱面)变形光栅(约 1200 l/mm)的转移工艺, 并获得了衍射效率高、条纹质量好、可用于云纹干涉系统中观测分析的变形分析光栅。使得云纹干涉法对曲面变形的测量研究, 尤其是在一定温度环境下的测试方法得到了发展。该方法具有灵敏度高、条纹质量好、全场、无损等优点, 操作简便易行, 现场

* 为国家自然科学基金资助项目

几乎不需要任何仪器设备。这使得这一研究走出实验室成为可能。

二、实验原理及步骤

实验过程按如下顺序进行:

- a) 在不锈钢平片表面制作耐高温全息光栅(如图 1, 图 2);
 - b) 将该金属光栅片点焊于圆柱形金属管的外表面(如图 3);
 - c) 用硅橡胶复制该曲面变形光栅, 得到含有光栅变形信息的硅橡胶光栅(如图 4);
 - d) 将硅橡胶变形光栅再次复制, 并镀铝膜得到高衍射率的平面分析光栅(如图 5);
 - e) 在云纹干涉系统中观测其结果。
- ### 1. 高温全息光栅的制作

图 1 可动光源制作全息光栅光路

RW 是带有斜角的旋转模块; BE 为扩束镜; BS 为 1:1 分光镜; M_1, M_2, M_3 为反射镜; SP 为光栅记录平面。

图 2 双镀层光刻法制栅工艺过程

1—抛光; 2—镀膜 C_1 ; 3—涂光刻胶; 4—制作全息光栅;
5—镀膜 C_2 ; 6—去胶, 形成由 C_1-C_2 组成的双镀层金属栅。

采用旋转光源技术和双镀层光刻法制栅工

艺^[4], 在厚度为 0.15mm 的不锈钢平片表面制得高衍射率无散斑的高质量的高频位相型金属光栅, 它具有长期耐高温和耐氧化的特点, 并可以用于多次转移拷贝而不损坏。

图 3

2. 试件及工况

将金属栅片点焊于圆柱形金属的外表面, 如图 3 所示, 管子的截面尺寸是按照电厂主蒸汽管道选取的。分两种工况, 即常温和 85℃, 这是针对测试工作是在主蒸汽管道停机时进行, 而此时管道受阀门余汽的影响温度为 85℃左右。

3. 转移曲面变形光栅

硅橡胶转移方法, 具有操作简单、转移光栅表面质量好、易于脱膜及弹性模量低、展成平片时对光栅的变形影响小等优点, 具体步骤如下(如图 4、图 5):

a) 首先, 将铍青铜片(0.13mm)的表面用细砂纸打磨去掉其表面的氧化层, 然后用耦联剂处理该表面;

b) 室温硫化硅橡胶(106# 或 107#)与固化剂(正硅酸乙酯)和催化剂(二月硅酸二丁基锡)按照 100:5:2 的比例混合搅匀, 放在离心式沉淀器上去除气泡, 将以上备好的硅橡胶涂在铍青铜片的表面, 并用事先准备好的模子将其紧密地压附在试件栅上(如图 4 所示), 在硅橡胶的固化过程中模子方便地起到了固定的作用, 避免错位产生气泡, 并可以使硅橡胶的厚度尽量地薄, 对于 85℃工况时, 铍青铜片与模子之间贴有一层特殊的胶纸, 胶纸遇热软化, 大大

地减少了铜片与模子之间的摩擦力, 以免影响铜片的纯弯曲变形, 待硅橡胶完全固化后启开模子, 取下转移好的硅橡胶变形栅;

c) 在室温下, 利用铍青铜片和硅橡胶良好的弹性, 将它展平, 并用环氧树脂胶将其转移拷

贝在玻璃平片上(如图 5), 在环氧树脂栅的表面可以容易地镀上一层铝膜($0.1\mu\text{m}$) 以提高其反射效率, 制成最终分析用的高衍射效率变形光栅, 便于在云纹干涉系统中进行观察和分析。

(a) (b) (c)
图 4

(a) (b) (c)
图 5

(a) 常温转移 U 场条纹图;

(b) 85°C 工况转移 U 场条纹图。

图 6

三、结果分析及结论

两种工况下得到的可用于云纹干涉系统中进行分析的平面栅片, 衍射效率高, 条纹质量好(见图 6), 多次转移证明了该方法具有良好的重复性, 它反映了原曲面变形试件栅的信息。

根据变形试件栅的变形信息, 若利用铍青铜片的弹性常数以及它和金属管材料的线膨胀系数, 就可以方便地计算出转移过程中由于弯曲和温度影响带来的栅格变形的误差, 并可以
(下转第 8 页)

$$\begin{cases} 30\psi'_{11} + 10\psi'_{12} + 42\psi'_{21} + 6\psi'_{22} = 5\Psi_{\alpha_1} + \Psi_{\alpha_2} + 2\Psi_{\beta_1} \\ 10\psi'_{11} + 57\psi'_{12} + 8\psi'_{13} + 42\psi'_{21} + 48\psi'_{22} = 4(\Psi_{\alpha_2} + \Psi_{\beta_2} + \Psi_{\gamma_2}) + 3\Psi_{\beta_1} \\ 8\psi'_{12} + 27\psi'_{13} + 6\psi'_{21} + 36\psi'_{22} = \Psi_{\beta_2} + 5\Psi_{\gamma_1} + \Psi_{\gamma_2} \\ 7\psi'_{11} + 7\psi'_{12} + \psi'_{13} + 18\psi'_{21} = \Psi_{\alpha_1} + \Psi_{\beta_1} + \Psi_{\gamma_2} \\ \psi'_{11} + 8\psi'_{12} + 6\psi'_{13} + 18\psi'_{22} = \Psi_{\beta_2} + \Psi_{\alpha_2} + \Psi_{\gamma_1} \end{cases}$$

对以上方程组求解,并略去结果中的撇,终得

$$\begin{cases} \psi_{11} = \Psi_{\alpha_2} + \Psi_{\beta_2} + \Psi_{\gamma_1} - 8\psi_{12} - 6\psi_{13} - 18\psi_{22} \\ \psi_{12} = 0.125\Psi_{\beta_2} + 0.625\Psi_{\gamma_1} + 0.125\Psi_{\gamma_2} - 3.375\psi_{13} - 0.75\psi_{21} - 4.5\psi_{22} \\ \psi_{13} = 0.1\Psi_{\beta_1} - 0.2\Psi_{\alpha_2} - 0.1\Psi_{\beta_2} + 0.17\Psi_{\gamma_1} + 0.23\Psi_{\gamma_2} - 2\psi_{21} + 0.8\psi_{22} \\ \psi_{21} = 0.05\Psi_{\alpha_1} + 0.59\Psi_{\alpha_2} - 0.36\Psi_{\beta_1} + 0.38\Psi_{\beta_2} + 0.06\Psi_{\gamma_1} - 0.7\Psi_{\gamma_2} \\ \psi_{22} = 0.05\Psi_{\alpha_1} + 0.68\Psi_{\alpha_2} - 0.42\Psi_{\beta_1} + 0.41\Psi_{\beta_2} - 0.09\Psi_{\gamma_1} - 0.85\Psi_{\gamma_2} \end{cases} \quad (7)$$

这样,便可由测量得到的 $\Psi_{\alpha_1}, \dots, \Psi_{\gamma_1}$ 求出诸 ψ 在相应的变形镜上预先加上大小相等,符号相反的相位差,以实现宽视场多层共轭补偿。

三、结 论

多层共轭校正可使自适应光学系统的视场角有较大幅度的增加,实施这一方案的关键是探测光学相位畸变的三维分布。本文考虑了大气相关长度对分层的依赖,给出系统应具有的子孔径数,需要进行探测的方向数与大气分层数及所希望实现的视场角大小的关系。对只有两层湍流的简单模型,建立了待求位相与实测相位相关联的超定方程组,按最小二乘原理导出相应的正则方程组,并首次进行了求解。

参考文献

- 1 J M Beckers Increasing the size of the isoplanatic patch with multiconjugate adaptive optics in Proc ESO Conf (M. H. Ulrich ed.), Vol 30: 693~703 (1988)
- 2 阎吉祥 周仁忠 俞信 分层校正自适应光学等晕区计算 光学学报 12(6): 545~547 (1992)
- 3 Yan Jixiang Zhou Renzhong Yu Xin, Problems with multiconjugate correction Optical Engineering, 33(9): 2942~2944 (1994)
- 4 A J Jankevics Wide field of view adaptive optics Proc SPIE, 1543: 438~448 (1991)
- 5 C Dustin B M Welsh Atmospheric turbulence sensing for multiconjugate adaptive optics system. Proc SPIE 1542: 76~87(1991)
- 6 J C Dustin B M Welsh Analysis of multiconjugate adaptive optics J. Opt. Soc. Am. A 11(1): 394~408(1994)

(上接第 4 页)

加以修正以便得到曲面变形试件栅的真实变形情况。

这使得云纹干涉法在曲面变形研究方面,尤其是在有一定较高温度环境下的曲面变形研究得到发展。由于转移工艺操作简便,现场几乎不需要任何仪器设备,环境适应性强。随着本文研究工作的深入,该方法将得到广泛的应用。

四、致 谢

本文得到国家自然科学基金的资助,得到清河热电厂梁宝益高级工程师的帮助,表示感

谢。

参考文献

- 1 戴福隆等 现代光测力学 科学技术出版社
- 2 谢惠民 戴福隆 吴学安 测量高温主蒸汽管道蠕变的云纹法研究 力学学报 Nov., 1994, 744~751
- 3 戴福隆 任晓辉 钟国成 曲面位移场测量的云纹干涉法 中国力学学会第六届全国实验力学会议文集 北京大学出版社 上海, 1989, 11
- 4 谢惠民 袁杰 戴福隆 高温全息光栅的制作工艺研究 光学技术 No. 3, 1993, 14~16
- 5 Yilan Kang, Yinyan Wang and Youquan Jia New Technique of Rapid Specimen Grating Making Experimental Techniques Nov./Dec 1993 31~32