

旋转齿轮轮齿变形的动态激光散斑测量*

李剑锋 田志仁 路长厚 艾兴

(山东工业大学机械学院 济南 250061)

提要 红宝石脉冲激光器和外同步触发信号结合实现了齿轮轮齿动态散斑图的记录。用精确的时间延时得到齿轮轮齿完整啮合过程的二次曝光散斑图,经图像自动处理系统分析,获得了轮齿完整啮合过程的动态变形。实测值与有限元计算结果的变化趋势一致。

关键词 动态散斑照相,图像处理,齿轮

1 引言

轮齿变形和刚度是研究齿轮传动性能的根本性问题之一,是齿轮动力学的一项重要理论和应用基础^[1~4]。轮齿变形的理论与实验研究进行了很多,但都局限在静态下进行。要精确确定轮齿变形和刚度,只有通过测试实际运转中的齿轮才能实现^[5]。

红宝石激光器与精确的外同步信号、精确的时间延时结合,对旋转齿轮啮合过程进行拍摄,得到了记录轮齿动态变形信息的散斑底片。对散斑底片进行分析,可求得被测轮齿变形。但计量场中杨氏条纹的分布受到光学噪声及衍射晕项的影响,因此,杨氏条纹自动识别中应消除这两个影响。以往杨氏条纹识别处理大都只考虑前者^[6],对消除衍射晕影响的报道则很少。本文采取一种消除衍射晕影响的新方法。

2 面内位移测试原理

实验采用红宝石脉冲激光器^[7],由于脉冲激光器发出的脉冲光持续时间极短(光脉宽为30~50 ns),可以认为在此时间间隔内,物体的变形量保持不变。散斑照相法测量轮齿受载变形如图1所示。

电机转速通过变频器进行无级调速。采用光电测速仪监测齿轮转速,并将信号反馈给变频器,使加载前后的二次曝光中齿轮稳定在同一转速下。

脉冲激光经扩束后,照射到被测齿轮端面。照相机对焦于记录齿轮端面,在轮齿受载变形前后各拍

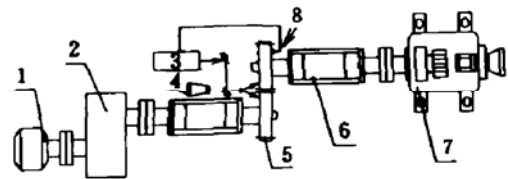


图1 齿轮动态变形测试装置简图

1:磁粉离合器;2:减速箱;3:红宝石激光器;4:相机;
5:被测齿轮;6:主轴箱;7:电机;8:光电传感器

Fig. 1 Test system construction of gear
tooth deformation

1: magnetic loader; 2: gear box; 3: ruby laser; 4:
camera; 5: tested gears; 6: spindle box; 7: motor; 8:
electro-optical sensor

*国家自然科学基金资助项目(59475081)。

摄一次,这样在同一张底片上形成两个散斑图。在底片的小区域内,所记录的两个散斑图样相同,但有一个相对位移,通过计算可求出该小区域的位移值。

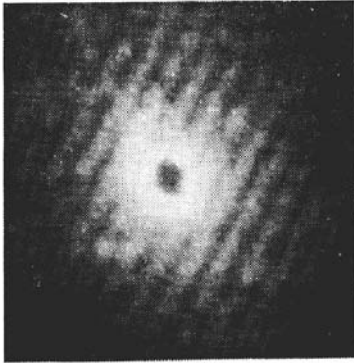


图 2 杨氏条纹图
Fig. 2 Young's fringes

底片经显影处理后,以细激光束照明底片上的小区域,在频谱平面上可计算杨氏条纹间距与方向,图 2 为实验得到的典型散斑杨氏条纹图。亮条纹的条件为^[8]

$$\frac{\pi}{\lambda} \left(\frac{\mu\Omega_1 + \nu\Omega_2}{f} \right) = K\pi \quad K = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

式中 Ω_1 与 Ω_2 为散斑的位移量, λ 为激光波长, μ 与 ν 为频谱平面的坐标, f 为傅里叶透镜的焦距。 $K = 0$ 时为中央亮纹, $K = 1$ 为第一级亮纹,故条纹间隔为

$$P = \frac{\lambda f}{\sqrt{\Omega_1^2 + \Omega_2^2}}$$

散斑位移方向与条纹方向垂直,散斑位移量为

$$\Omega = \sqrt{\Omega_1^2 + \Omega_2^2} = \frac{\lambda f}{P} \quad (2)$$

上述位移是经过透镜放大的值,若记录散斑的放大率为 M ,则被测物表面各点发生的位移值为

$$l = \frac{\Omega}{M} = \frac{\lambda f}{MP} \quad (3)$$

3 图像采集与处理系统

3.1 图像采集系统组成

图像采集系统由 486 微机、He-Ne 激光器、CA-P540 图像采集卡、1881B 型 CCD 电视摄像机、三维精密工作台、控制器等设备组成,图像采集卡的采集速度为 25 帧/秒。系统构成如图 3 所示。

3.2 图像处理

着重讨论衍射晕影响的消除。在与拍摄二次曝光散斑底片完全相同的条件下,拍摄一张单曝光散斑底片,显影处理后将其放置于逐点分析光路中,此时观察屏上所获得的即为衍射晕,其光强可以用 $I_0(x, y)$ 表示。用底片接收,经显影处理后得到的即为衍射晕负片。

物体产生面内位移时,散斑杨氏条纹图的归一化照度公式为^[6,9]

$$I(x, y) = \left[\frac{1 - \nu}{1 + \nu} + \frac{2\nu}{1 + \nu} \cos^2 \frac{\pi}{g} (-x \sin \theta + y \cos \theta) \right] I_0(x, y)$$

其中 ν 为可见度; g 为条纹间距; $I_0(x, y)$ 为衍射晕函数; θ 为条纹与 x 轴的夹角。

令 $f(x, y) = \left[\frac{1 - \nu}{1 + \nu} + \frac{2\nu}{1 + \nu} \cos^2 \frac{\pi}{g} (-x \sin \theta + y \cos \theta) \right]$, 则

$$I(x, y) = f(x, y) I_0(x, y) \quad (4)$$

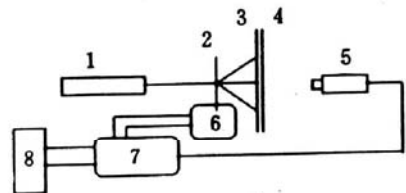


图 3 图像处理系统

1: 氦氖激光器; 2: 散斑底片; 3, 4: 衍射晕负片及观察屏; 5: CCD; 6: 三维工作台; 7: 计算机; 8: 控制器

Fig. 3 Image processing system

1: He-Ne laser; 2: specklegram; 3, 4: negative film and view screen; 5: CCD; 6: three dimensional platform; 7: computer; 8: controller

此即为通常情况下,观察屏上所获得的散斑杨氏条纹图的光强分布。为控制曝光量,底片在 Hurter-Driffield 曲线的线性区段曝光^[10],则光强透过率与光强成反比。如此,衍射晕负片的光强透过率为

$$\tau = \frac{1}{C} \frac{1}{I_0(x,y)} \quad (5)$$

式中 C 为一常数。将衍射晕负片置于观察屏处时(如图 3),观察屏上所得到的光强分布为

$$I'(x,y) = I(x,y)\tau = 1/C \cdot f(x,y) \quad (6)$$

显然,此时在观察屏上所看到的即为消除了衍射晕影响的杨氏条纹图。

4 旋转齿轮轮齿受载变形测量

被测齿轮参数为:模数 $m = 3 \text{ mm}$; 齿数 $Z_1 = 58, Z_2 = 77$; 压力角 $\alpha = 20^\circ$; 齿宽 $b = 10 \text{ mm}$; 精度等级 $\xi = 5$ 。

为了增强激光在被测齿轮表面的定向反射效果,采取了如下措施:在齿轮端面均匀地喷贴一层粒度为 200 目的尼钨微珠;减小入射光与反射光之间的夹角,使其小于 5° 。

被测齿轮受载前后,红宝石脉冲激光器在精确的外同步信号触发下,分别发出两个脉冲光,从而保证了拍摄的是轮齿变形前后同一啮合位置的散斑底片。设定红宝石脉冲激光器的精密时间延时,可获得齿轮轮齿处于不同啮合点时的二次曝光散斑干涉图。采用研制开发的计算机图像处理系统,可得到齿轮完整啮合周期内,轮齿弹性变形的大小和方向。

图 4 为齿轮在一个啮合周期内,轮齿动态变形曲线,齿轮节圆线速度 $v = 9.11 \text{ m/s}$,施加的载荷为 $P = 120 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。齿轮轮齿动态变形实测结果,与静态三维有限元分析软件的计算结果(图 5)对比,前者略大于后者,但轮齿变形规律的总趋势基本吻合一致。

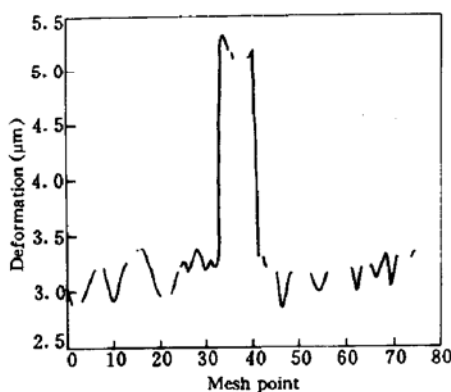


图 4 实测轮齿动态变形

Fig. 4 Tooth dynamic deformation

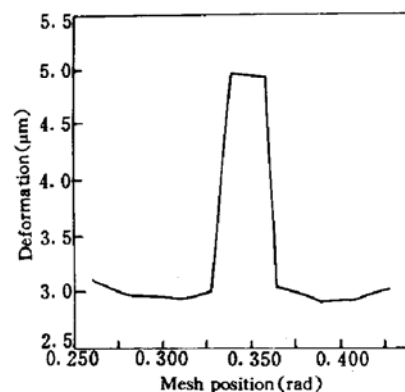


图 5 有限元计算轮齿静态变形

Fig. 5 Tooth deformation by FEM

参 考 文 献

- 1 李华敏. 关于齿轮、链、带等学科的发展方向. 机械传动, 1992, 16(1): 1~5
- 2 唐定国, 陈国民. 齿轮传动技术的现状与展望. 机械工程学报, 1993, 29(5): 35~42
- 3 Khrama A., Singh R.. Interactions between time-varying mesh stiffness and clearance non-linearities in a geared system. *J. of Sound and Vibration*, 1991, 146(1): 135~156

- 4 Kasuba R., Evans J. W.. An extended model for determining dynamic loads in spur gearing. *ASME, J. of Mech. Des.*, 1981, **103**: 399~409
- 5 王寿佑. 轮齿变形 δ 和 C 的确定方法. 山东工学院学报, 1981, **11**(4): 45~60
- 6 Hugo D. Navone, Guillermo H. Kaufmann. Automatic digital processing in speckle photography; comparison of two algorithms. *Appl. Opt.*, 1989, **28**(2): 350~353
- 7 李剑锋, 田志仁, 艾 兴. 齿轮啮合过程动态散斑图的拍摄技术. 山东工业大学学报, 1994, **24**(3): 201~204
- 8 杨国光. 近代光学测试技术. 北京: 机械工业出版社, 1986, 142
- 9 Li Jianfeng, Gao Qi, Tian Zhiren *et al.*. Approach to eliminate the influence of diffraction halo in speckle photographic fringe. *ASME, Advances in Modelling & Analysis, B*, 1995, **34**(1): 19~26
- 10 M. Vest 著, 樊雄文, 王玉洪 译. 全息干涉度量学. 北京: 机械工业出版社, 1984, 53

Deformation Measurement of Rotating Gear Tooth Using Dynamic Speckle Photography

Li Jianfeng Tian Zhiren Lu Changhou Ai Xing

(Shandong University of Technology, Jinan 250061)

Abstract Dynamic speckle photography of the gear tooth has been achieved by combining a pulsed ruby laser with the external synchronizing trigger signal. Double speckle photograms of the whole mesh period of gear tooth are obtained by accurate time delay. Gear tooth dynamic deformation of the whole mesh period is achieved using the automatic image processing. Testing results show that the trends of gear tooth deformation coincide with the calculated ones by the finite element method. The success of the testing provides a new way for the measurement of the rotating gear tooth dynamic deformation.

Key words dynamic speckle photography, image process, gears