

文章编号 1004-924X(2008)10-1815-07

基于光纤的三维电子散斑干涉测量系统设计

周文静,于瀛洁

(上海大学 精密机械工程系,上海 200072)

摘要:为了实现物体三维变形非接触式测量,设计了基于电子散斑干涉技术的三维变形测量系统。该系统采用了一分五型分束光纤,这根光纤在系统中起到分光和传光的作用,使系统所需器件比一般的设计系统要少。为了获得变形的量化数值,系统将电子散斑技术与相移技术结合在一起,由压电陶瓷引入相移,并采用“4+1”相移算法计算变形量。该系统可以实现面内及离面变形的独立测量,进而实现物体三维变形的测量。文中对带缺陷的木板进行了加热变形测量,检测其面内、离面变形的敏感度;然后对钢板进行了应力三维变形的测量,得其离面变形量为 $5\ \mu\text{m}$ 。结果表明,设计的测量系统可以实现各种变形的测量。

关键词:电子散斑干涉技术;三维变形测量;系统设计;分束光纤;相移技术

中图分类号:TH744.3 **文献标识码:**A

Design of 3D ESPI system by optical fiber

ZHOU Wen-jing, YU Ying-jie

(Department of Precision Mechanical Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: In order to realize the non-contact measurement for three-dimensional deformation of a tested object, a three-dimensional deformation measurement system based on Electronic Speckle Pattern Interferometry (ESPI) was designed. The designed system used a one-to-five type fiber to split and propagate light to simplify the measurement system structure, and a ESPI was combined with the phase-shifting technique to get the quantitative deformation measurement. A PZT was used to shift the phase, the deformation results were calculated by “4+1” phase-shifting algorithm. Experimental results show that the designed system can realize in-plane and out-plane deformation measurements respectively, then three-dimensional deformation measurement of the tested object can be obtained. The sensitivities of in-plane and out-plane deformations of a wood block with a hollow defect were tested by heating, and the three-dimensional deformation of a steel plate was measured also, its out-plane deformation is about $5\ \mu\text{m}$. These experimental results show that the designed system can measure all kinds of deformations.

Key words: Electronic Speckle Pattern Interferometry(ESPI); three dimensional deformation measurement; system design; beam-splitting fiber; phase-shifting technique

收稿日期:2007-10-08;修订日期:2008-03-25.

基金项目:上海市科委科技攻关资助项目(No. 075115001)

1 引言

电子散斑干涉技术 (Electronic Speckle Pattern Interferometry, ESPI) 和数字散斑 (图像) 相关技术 (Digital Speckle Correlation Method, DSCM)^[1-4] 是非接触应力应变测量的重要技术方法。两者相比, DSCM 只需要采集图像, 易于实现, 是目前得到重点关注的方法, 但数据处理要求较高; 而 ESPI 装置相对复杂, 但数据处理简单、易于实现、精度高^[5-12], 因此两种技术方法目前都有研究和应用^[13-14]。在 ESPI 方面, 2D ESPI 仪器开发和应用较多, 3D ESPI 仪器的开发以德国 DANTEC ETTEMEYER 公司为代表, 已经研制出多种 ESPI (2D 或 3D), 可以进行物体的三维变形、应力/应变无损检测等, 显示了此技术的实际应用价值。由于此类产品化仪器不多, 价格非常昂贵, 在实际生产中还未得到充分应用, 便携式的 3D ESPI 仍是需要重点开发的测量仪器。在 3D ESPI 系统中, 为了实现 3D 测量, 需要三束光照射物体表面。为了获得这三束光, 文献系统多采用分立元件或多个激光器^[11, 15], 系统中元件一般较多, 对系统调整和稳定性要求很高。本文利用一分五型光纤进行分光、传光, 并将相移技术与电子散斑干涉技术结合, 设计了一种 3D ESPI 系统, 可以实现面内和离面测量, 并将二者结合在一起, 实现物体三维变形的测量。该系统器件少, 易于携带。

2 基于一分五型光纤的 3D ESPI 系统设计

图 1 为设计的基于一分五型光纤的 3D ESPI 系统。激光器提供激光光源, 激光光束经过调整进入光纤耦合器, 获得 5 束光束。光束 10 由扩束准直器扩束准直后通过遮挡开关进入能量分光镜; 光束 11 和 13 被放置在水平面内并关于物体表面法线对称照射被测物体, 其中光束 13 的输出端口粘贴有 PZT 相移器 16, 以便将相移引入光束 13 内, 构成面内水平方向变形检测系统; 光束 12 和 14 被放置在竖直面内并关于物体表面法线对称照射被测物体, 其中光束 14 的输出端口粘贴

有 PZT 相移器 15, 以便将相移引入光束 14 内, 构成面内垂直方向变形检测系统。在光束 11、12、13、14 的输出端位置分别放置遮挡开关 19、20、18、17, 控制变形检测的顺序执行。本系统中, 光束 10 作为离面测量时的参考光束, 一般采用能充满 CCD 孔径的平行光束。为了加工方便, 一分五型光纤可采用等分光比的, 同时为了实现参考光束 (图 1 中光束 10) 和从物体散射回来的物光强度匹配, 可以在参考光路中增加可调衰减片调节光强。

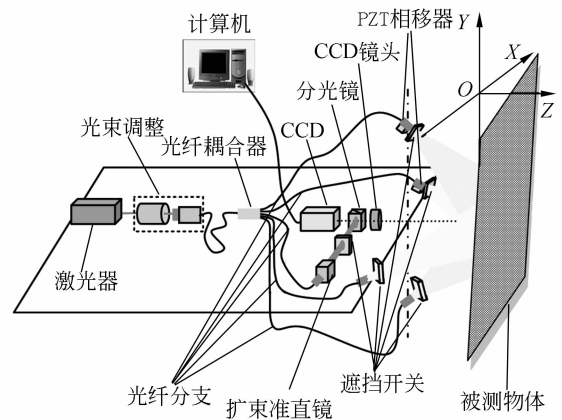


图 1 基于一分五型光纤 3D ESPI 系统原理示意图
Fig. 1 Sketch map of 3D ESPI system on 1-5 type fiber

本设计的特点是:

- (1) 使用一个激光器提供光源;
- (2) 采用一分五型光纤进行分光、传光, 减少系统误差环节, 提高系统的稳定性;
- (3) PZT 相移器微动带动光纤沿光纤轴向移动, 将相移引入光束中。散斑图像采用“4+1”相移算法进行处理, 获得量化变形数据;
- (4) 共用测量面内单方向变形的一对相干光束中的一束引入相移的光束, 因此利用两个 PZT 相移器进行相移的引入, 便可满足系统所需的引入相移的光束。
- (5) 通过遮挡开关控制五束分支光纤的开关, 将面内变形检测 ESPI 系统和离面变形检测 ESPI 系统整合到同一个坐标系中, 完成测量三维变形测量的 ESPI 系统, 可实现一维、二维、三维变形的单独测量。

3 3D ESPI 系统测量物体变形方法

3.1 面内变形的计算

在面内水平方向,即 X-Z 面内,光束 11 和 13 对称照射物体,位相与变形关系为:

$$\Delta\varphi_x = \frac{4\pi}{\lambda}u\sin\theta, \quad (1)$$

式中, θ 为照射光束与物体表面法线夹角, u 为面内水平方向的变形, λ 为激光波长。

在面内竖直方向,即 Y-Z 面内,光束 12 和 14 对称照射物体,位相与变形关系:

$$\Delta\varphi_y = \frac{4\pi}{\lambda}v\sin\alpha, \quad (2)$$

式中, α 为照射光束与物体表面法线夹角, v 为面内竖直方向的变形, λ 为激光波长。

3.2 离面变形的计算

在上面的装置中,仍在水平方向通过遮挡开关的控制使光束 10 和 13 照射物体,此时,光束 10 和 13 构成为离面变形检测系统,则有方程:

$$\Delta\varphi_{xz} = \frac{2\pi}{\lambda}[w(1+\cos\theta)+u\sin\theta], \quad (3)$$

式中, θ 为照射光束与物体表面法线夹角, u 为面内水平方向的变形, w 为离面方向的变形, λ 为激光波长。

则三维变形的量化方程组为:

$$\begin{bmatrix} \Delta\varphi_x \\ \Delta\varphi_y \\ \Delta\varphi_{yz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{4\pi}{\lambda}\sin\theta & & & \\ & \frac{4\pi}{\lambda}\sin\alpha & & \\ & \frac{2\pi}{\lambda}\sin\alpha & \frac{2\pi}{\lambda}(1+\cos\alpha) & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix}. \quad (4)$$

4 3D ESPI 系统建立

图 2 所示为实际建立的实验系统示意图,图 3 为相移出射光束的结构示意图,图 4 为实验系统正视图的照片。

在实验中,主要器件包括:台湾敏通公司的 MTV-1881EX 型 CCD 摄像机 ($f=25\text{ mm}$ 、 $F=1:1.4$ 的 CCD 镜头),上海激光所的氦-氖激光器 (输出波长为 632.8 nm,型号为 1 000,输出功率 $\geq 30\text{ mW}$ (实际输出功率约为 24 mW 左右),横

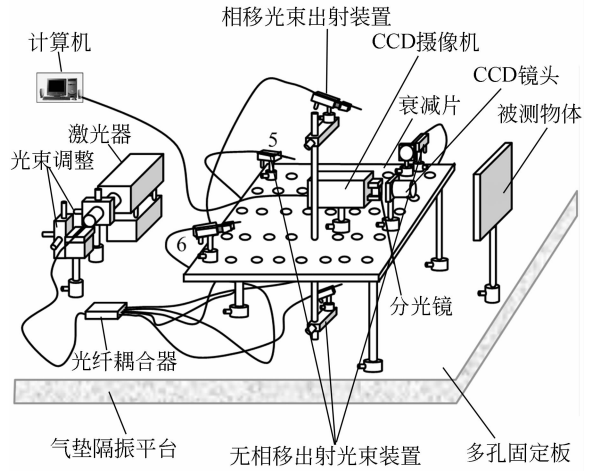


图 2 实验系统示意图

Fig. 2 Sketch map of testing system

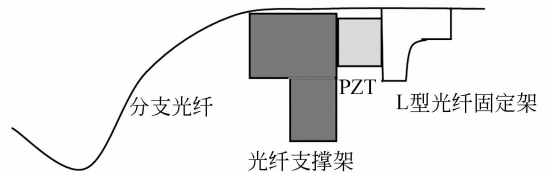


图 3 相移出射光束结构示意图

Fig. 3 Sketch map of phase shifting of fiber

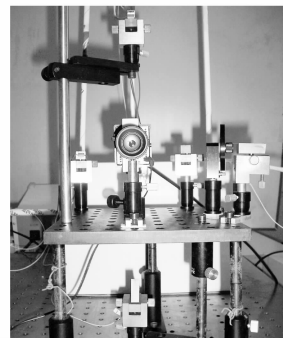


图 4 系统实物照片

Fig. 4 Photo of testing system

向模式 TEM00), OPTIWORKS (SHANGHAI) CO., LTD 制作的一分五型光纤 (各分支光纤的能量接近平均分配), 德国大陆公司的 PZT 相移器 (移相范围为 10 μm , 其移相有一定的非线性, 因此实验中尽量利用了中、低区, 减少移相误差), PZT 电源控制器 (哈尔滨博实公司提供)。

系统在进行变形检测前,要对系统的采集装置和照射光束装置进行调整和标定。因为面内变形检测 ESPI 系统中,要求保证面内水平和垂直方向上 4 束照射物体表面的光束分别在竖直平面和水平平面内关于物体表面中心法线两两对称照射物体。因此,调整的目的主要有 3 点:保证水平方向内 2 束分支光束关于物体表面中心法线对称、保证垂直方向内 2 束分支光束关于物体表面中心法线对称、获取需要的尺寸用于入射角度的标定。

在系统调整中,以两条直线构成一个平面及等三角形等几何原理为理论依据进行调整(详略)。通过调整,一方面保证了照射光束的对称性,同时获得了式(4)中 $\theta=11.63^\circ, \alpha=30.63^\circ$ 。

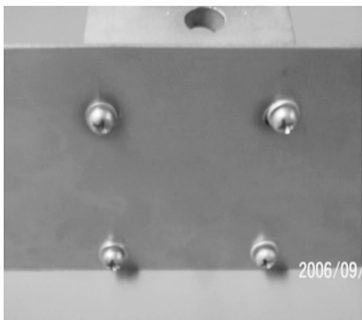
5 3D ESPI 系统实验

5.1 表面凹形缺陷检测

本文首先采用图 5(a)所示木板作为检测样



(a)带缺陷的木板
(a) Wood block with defect

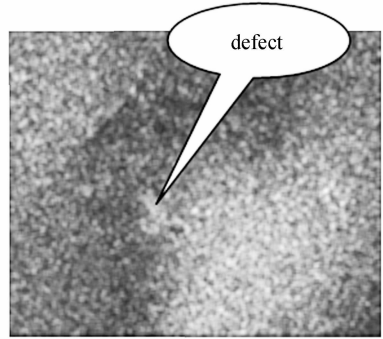


(b)受应力的钢板
(b) Steel plane with stress

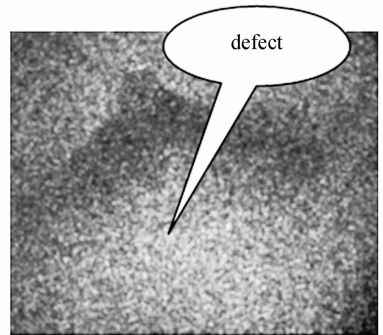
图 5 测试样本

Fig. 5 Objects under test

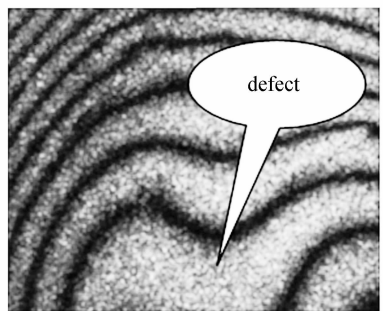
本,样本中的表面有一个凹形缺陷。实验中,采用加热方式使样本变形,连续采集多幅图像,时间间隔为 1 s。以第一帧为参考帧,后续散斑图像依次与参考散斑图像进行互相关运算,得到一组有规律的条纹变形图像(对应的是变形相位的正弦函数)。分别取水平、垂直和离面方向的共 3 幅图像显示缺陷,如图 6 所示。



(a) X 轴方向面内变形图
(a) In-plane deformation for X axis



(b) Y 轴方向面内变形图
(b) In-plane deformation for Y axis



(c) Z 轴方向离面变形图
(c) Out-plane deformation for Z axis

图 6 表面凹形缺陷变形监测结果

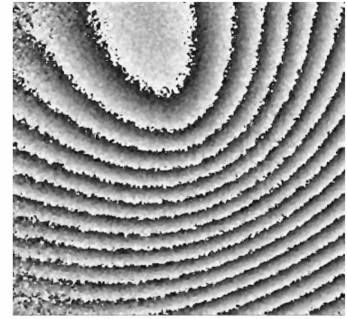
Fig. 6 Deformation measurements of surface defects of tested wood block

通过上述图像对缺陷的显示,可以看到,对于缺陷的检测,离面系统的检测最为明显,面内系统的检测由于面内变形较小,根据条纹变形对缺陷检测不是很明显。

5.2 物体三维变形测量

本文选择图 5(b)所示不锈钢板作为测试样板。实验中,给样本中央以顶球形式施加力。系统分别在变形前通过面内水平(X方向)、竖直(Y方向)、离面(Z方向)三方向的变形检测系统,采用四步相移采集 4 幅散斑图像,在被测样本受力后,再通过 3 个系统分别采集多幅散斑图像,利用“4+1”相移算法进行数据处理^[16],得到的变形包裹位相数据(对应的是变形相位的反正切函数)如图 7 所示;

将图 7 所对应 3 组面内变形数据统一到同一坐标系中用向量表示,结果如图 8 所示。将 X、Y、Z 三方向的变形整合到同一坐标系内,则可以得到物体的三维变形曲面,如图 9 所示,离面变形近 5 μm 。



(c) Z 轴方向离面变形

(c) Out-plane deformation for Z axis

图 7 钢板应力变形检测结果

Fig. 7 Deformation measurements of stresses of tested steel plate

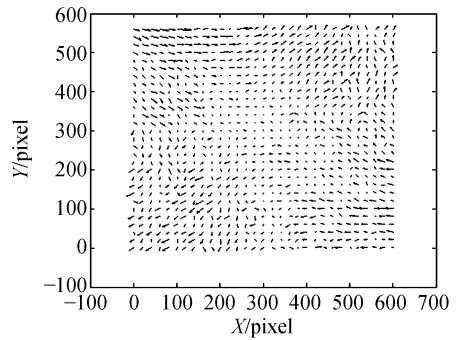
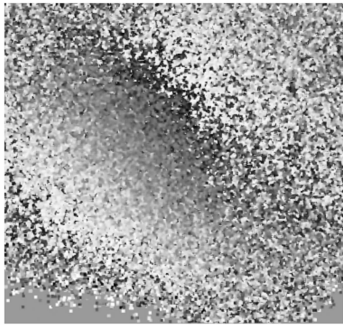


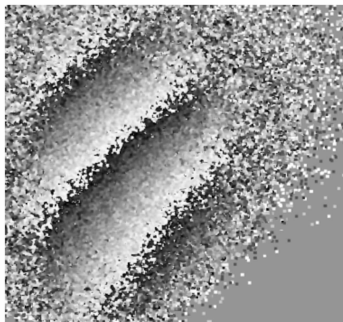
图 8 面内 X 和 Y 轴方向变形向量图

Fig. 8 Vector map of in-plane deformations for X axis and Y axis



(a) X 轴方向面内变形

(a) In-plane deformation for X axis



(b) Y 轴方向面内变形

(b) In-plane deformation for Y axis

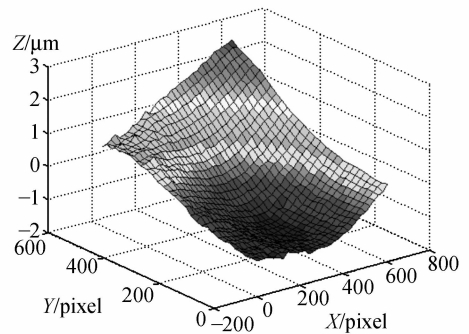


图 9 三维变形曲面图

Fig. 9 Curved map with three dimensional deformation

6 结 论

设计的 3D ESPI 系统采用一分五型光纤进

行分光、传光,将激光束直接分为 5 束分支照射光束,仅一套光纤调整装置,使系统调整更加方便、光路布置更加简单;将 PZT 相移器粘贴于光纤出口端,通过驱动 PZT 的微动直接带动光纤移动引入相移,简单、方便;由于一分五型光纤的使用和 PZT 相移器的合理应用,加上光纤的柔性特点,使光路调整变得简单易操作;利用遮挡开关控制变形检测的顺序,快捷、方便,可实现 1D、2D、3D

变形的单独测量;若控制好遮挡开关响应速度和采集图像的时间差,可以实现动态 3D 变形的测量。系统中,最好采用保偏一分五型光纤,以防止光纤弯度过大,引起输出光斑变化,即模式变化;测量过程中,光纤不易大幅度移动,以防输出光束产生移动。同时,系统测量结果的对比和系统的进一步优化是下一步工作重点。

参考文献:

- [1] MA S P, JIN G C. Digital speckle correlation method improved by genetic algorithm[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2003, 16(4): 366-373.
- [2] THOMAS F B. Three-dimensional deformation field measurement with digital speckle correlation[J]. *Appl. Opt.*, 2003, 42(34): 6783-6796.
- [3] 姚学锋,林碧森,简龙晖,等. 立体摄影术与数字散斑相关方法相结合用于研究三维变形场[J]. *光学技术*, 2003, 29(4): 473-479.
YAO X F, LIN B S, JIAN L H, *et al.*. Three-dimensions deformation field measurement combining digital speckle correlation technology with stereo photography[J]. *Optical Technique*, 2003, 29(4): 473-479. (in Chinese)
- [4] 柴东,王亮亮,于瀛洁. 基于 ESPI 技术的物体缺陷自动识别技术[J]. *光学精密工程*, 2005, 13(增): 173-178.
CHAI D, WANG L L, YU Y J. Automatic defect detection based on ESPI[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(Supp.): 173-178. (in Chinese)
- [5] MOORE A J, LUCAS M, TYRER J. An electronic speckle pattern interferometer for two-dimensional strain measurement[J]. *Meas. Sci. Technol.*, 1996, 7(12): 1740-1747.
- [6] 侯立周,强锡富. 数字散斑干涉技术在形貌测量中的应用及进展[J]. *宇航计测技术*, 1999, 19(3): 45-50.
HOU L ZH, QIANG X F. Application of digital speckle interferometric technique to topographic measurement and its development[J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*, 1999, 19(3): 45-50. (in Chinese)
- [7] TAKEMOTO S. Holography and electronic speckle pattern interferometry in geophysics[J]. *Opt. Lasers Engng.*, 1996, 24: 145.
- [8] LUCIA A C, ZANETTA P M, FACCHINI M. Electronic Speckle Pattern Interferometry Applied to the Study and Conservation of Paintings[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 1997, 26(2-3): 221-233.
- [9] 孙平,王海峰,张熹. 三维电子散斑干涉技术及其应用研究[J]. *光学学报*, 2003, 23(7): 840-844.
SUN P, WANG H F, ZHANG X. Study on Three-Dimensional ESPI and Its Application[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23(7): 840-844. (in Chinese)
- [10] AMALIA M, RAYAS JUAN A, *et al.*. Three-dimensional deformation measurement from the combination of in-plane and out-of-plane electronic speckle pattern interferometers[J]. *Appl. Opt.*, 2004, 43(24): 4652-4658.
- [11] KOLENOVIC E, OSTEN W, KLATTENHOFF R, *et al.*. Miniaturized digital holography sensor for distal three-dimensional endoscopy[J]. *Appl. Opt.*, 2003, 42(25): 5167-5172.
- [12] YANG L X, ETTEMEYER A. Strain measurement by three-dimensional electronic speckle pattern interferometry: potentials, limitations and applications [J]. *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers*, 2003, 42(5): 1257-1266.

- [13] SVANBRO A, SJODAHL M. Complex amplitude correlation for compensation of large in-plane motion in digital speckle pattern interferometry [J]. *Appl. Opt.*, 2006, 45(34):8641-8647.
- [14] SUN Y F, JOHN H L P. Study of optimal subset size in digital image correlation of speckle pattern images[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2007,45(9):967-974.
- [15] KRUPKA R, WALZ T, ETTEMEYER A. Fast and full-field measurement of brake squeal using pulsed ESPI technique[J]. *Opt. Eng.*, 2003,42(5): 1354-1358.
- [16] KAO C C, YEH G B, LEE S S, *et al.*. Phase-shifting algorithms for electronic speckle pattern interferometry[J]. *Appl. Opt.*, 2002,41(1):46-54.

作者简介:周文静(1975—),女,江西人,博士,讲师,主要研究方向为数字显微全息技术。E-mail:lazybee@shu.edu.cn

● 下期预告

谐衍射/折射太赫兹多波段成像系统设计

刘 英^{1,2},潘玉龙³,王学进³,孙 强¹,卢振武¹,张红鑫¹,刘 华¹

(1. 中国科学院长春光机与物理研究所,应用光学国家重点实验室,长春 130033;

2. 中国科学院研究生院,北京 100049; 3. 第二炮兵工程设计研究院,北京,100011)

为了获取足够的目标信息,充分利用太赫兹波的科学价值,而又能避免宽光谱色差和结构的复杂性,建立了谐衍射/折射太赫兹多波段成像系统。文中利用谐衍射元件独特的色散性质,将谐衍射透镜应用于 $14\sim 50\ \mu\text{m}$ 太赫兹成像系统中,使系统在 $15.8\sim 16.2\ \mu\text{m}$, $18.5\sim 20\ \mu\text{m}$, $23\sim 25\ \mu\text{m}$, $30.5\sim 33.5\ \mu\text{m}$ 和 $46\sim 50\ \mu\text{m}$ 5个谐振波段内的轴向像差最大为 $0.75\ \text{mm}$ 。各谐振波段内的放大率是波长的函数,图像重构时将引起像元的配准误差,利用光学二组元法设计的变焦结构成功地解决了这一问题。设计结果表明:系统像高恒定为 $6.74\ \text{mm}$;变焦结构还具有很好的差补偿作用;在 $10\ \text{lp/mm}$ 时,光学传递函数在5个谐振波段内均达到衍射极限。实现了轻小、便携、易加工的设计要求。