

光纤法布里-珀罗传感器偏振互相关解调系统的 复消色差光路设计

宋凝芳, 宋鹏*, 宋镜明, 亢提

北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191

摘要 光纤法布里-珀罗(F-P)传感器被广泛应用于航空发动机的检测中。偏振互相关解调法是最常用的 F-P 腔长解调方法。在偏振互相关解调系统中,光学系统的轴向色差会引起零级干涉条纹的偏移和光强的减小,从而降低解调精度并减小信号幅值,因此分析了光学系统的轴向色差对解调的影响。为了减小光学系统的轴向色差对解调的影响,设计了一种应用于偏振互相关解调仪的复消色差光学系统。该光学系统在光楔长度方向上的轴向色差为 $1.9 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$,最大光程差为 $0.021\lambda_0$ (λ_0 为中心波长),光程差远小于 F-P 腔长。对于特定的解调系统,采用复消色差光路时,零级干涉条纹的测量值偏移量为 $2.85 \mu\text{m}$,小于 CCD 像素宽度的一半,并且 CCD 任意像素的光照度提高了 3.75 倍。

关键词 光纤光学; 光路设计; 复消色差; 光纤法布里-珀罗传感器

中图分类号 TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.1206005

Design of Apochromatic Optical Path in Polarization Cross-Correlation Demodulation System Based on Fiber Fabry-Perot Sensor

Song Ningfang, Song Peng, Song Jingming, Kang Ti

School of Instrumentation Science and Opto-Electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China

Abstract Fiber Fabry-Perot (F-P) sensors have been widely used in the detection of aircraft engines. Polarization cross-correlation demodulation is one of the most common methods for F-P cavity length demodulation. In a polarization cross-correlation demodulation system, the axial chromatic aberration of the optical system will cause the zero-order interference fringe shift and decrease the light intensity, which decreases the demodulation accuracy and the signal amplitude. The effect of axial chromatic aberration of the optical system on demodulation is analyzed. In order to reduce the influence of the axial chromatic aberration of the system on demodulation, an apochromatic optical system used in the polarization cross-correlation demodulation interrogator is introduced. The axial chromatic aberration along the wedge length is $1.9 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$, and the maximum optical path difference is $0.021\lambda_0$ (λ_0 is the central wavelength), which is far less than the F-P cavity length. For a certain demodulation system, the shift of the measured zero-order interference fringe is $2.85 \mu\text{m}$, which is less than half of the pixel width of CCD, and the illuminance of any pixel of CCD is improved by 3.75 times.

Key words fiber optics; optical design; apochromatism; fiber Fabry-Perot sensors

OCIS codes 060.2310; 060.2370; 080.3620

1 引 言

光纤传感器具有结构简单、灵敏度高、可靠性高、抗电磁干扰和易于嵌入材料内部等优点,得到了广泛的

收稿日期: 2017-07-03; 收到修改稿日期: 2017-09-04

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ040877)

作者简介: 宋凝芳(1968—),女,博士,教授,博士生导师,主要从事先进光纤传感和空间光电技术方面的研究。

E-mail: Songnf@buaa.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: songpeng@buaa.edu.cn

研究和应用^[1-3]。光纤法布里-珀罗(F-P)传感器是目前应用最广泛的光纤传感器之一,具有制作工艺简单、稳定性好、测量精度高和动态范围大等优点,非常适用于对航空航天领域中飞行器及发动机等重要元件进行高速检测^[4-6]。

光纤 F-P 传感器的解调方法可以分为强度解调法^[7-9]和相位解调法^[10-12]。强度解调法存在测量范围小和解调精度低的问题,使其应用范围受限。常用的相位解调法包括三波长相位解调法、傅里叶变换法和腔长匹配法。三波长相位解调法在使用前必须进行标定,且只能测量相对值;傅里叶变换法解调速度较慢;腔长匹配法不需要进行标定,且能够测量腔长的绝对值。偏振互相关腔长解调法是最常用的腔长匹配法^[13],解调速度快、受外界环境的影响较小,适用于航空发动机叶片温度应变的高速监测。偏振互相关腔长解调法的核心部件是宽谱光源的斐索干涉仪,为了保证解调精度,光束必须以正入射进入光楔^[14],同时,为了保证光能利用率,光斑尺寸应与光楔尺寸和 CCD 尺寸匹配。在已报道的研究中,选用的光学系统为准直透镜和柱面透镜的组合^[15]或柱面反射镜^[16]。准直透镜和柱面透镜的组合可以使光束近似为正入射,但是存在色差;柱面反射镜虽然不存在色差,但是无法保证光束的正入射。在高精度的解调仪中,入射光的色差也会影响解调。为了减小入射光的色差对解调的影响,需要设计复消色差光学系统来改善解调性能。

本文分析了色差对解调的影响,介绍了复消色差的方法,用复消色差准直透镜组合与复消色差柱面透镜整形系统的光路结构代替原有的光路,既保证了光束的正入射,又减小了色差对解调的影响。利用光学设计软件 ZEMAX 设计优化了光学系统,减小了入射光的色差,提高了解调精度和信噪比。

2 色差对解调的影响

2.1 解调原理

光纤 F-P 传感器偏振互相关解调系统由宽谱光源、耦合器、光纤 F-P 传感器、斐索干涉仪和数据处理模块组成,其结构图如图 1 所示。

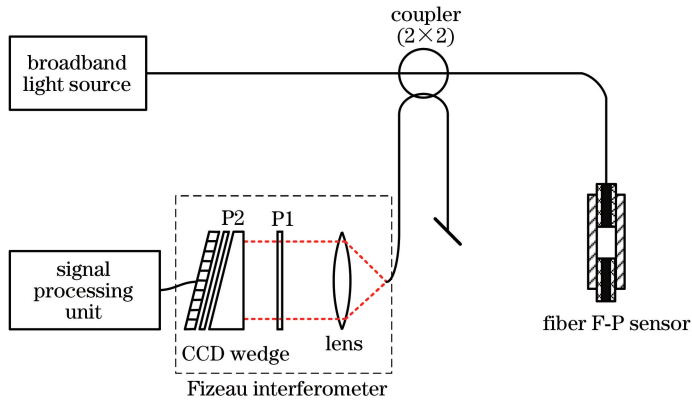


图 1 光纤 F-P 传感器偏振互相关解调系统结构图

Fig. 1 Structural schematic of polarization cross-correlation demodulation system of fiber F-P sensor

宽带光源发出的光耦合进光纤,经过耦合器进入光纤 F-P 传感器,当反射端面反射率很低时,可以形成双光束干涉。干涉后的光依次经过透镜系统和起偏器(P1)后变为线偏振光,线偏振光入射到光楔发生双折射,产生 o 光和 e 光,o 光和 e 光经过检偏器(P2)后发生干涉,其干涉光强为^[17]

$$I = \int_0^{\infty} \frac{2\sqrt{\ln 2}}{\sqrt{\pi} \Delta k} \exp\left\{-\left[\frac{2\sqrt{\ln 2}(k - k_0)}{\Delta k}\right]^2\right\} \cos[k(2h - t)] dk = \exp\left\{-\left[\frac{(2h - t)\Delta k}{4\sqrt{\ln 2}}\right]^2\right\} \cos[(2h - t)k_0], \quad (1)$$

式中 h 为光纤 F-P 腔长; t 为光楔中 o 光与 e 光的光程差; $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ 为主波数,其中 λ_0 为中心波长; k 为波数; $\Delta k = 2\pi\Delta\lambda/\lambda_0^2$, $\Delta\lambda$ 为光源光谱分布的半峰全宽。通过检测干涉条纹的峰值位置可推算出光纤 F-P 腔长。

2.2 入射光色差对解调的影响

解调仪光路采用准直透镜和柱面会聚镜时,入射光可以近似为垂直入射,这便于分析色差对解调的影响。由于不同色光的折射率不同,发生干涉的不同波长的光线入射角也不相同,光学系统的轴向色差示意图如图 2 所示。

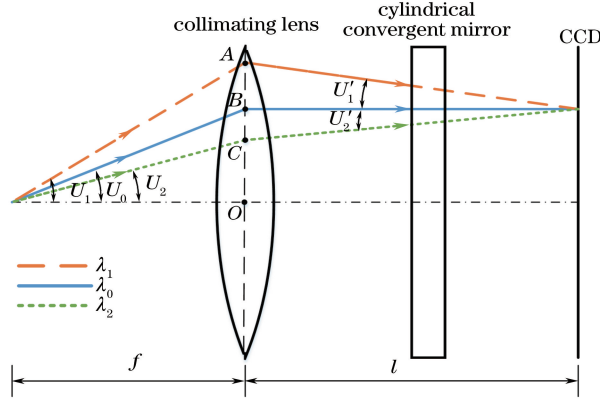


图 2 光学系统轴向色差示意图

Fig. 2 Schematic of axial chromatic aberration of optical system

已知薄透镜光线追迹的公式为

$$n'U' = nU - y\phi, \quad (2)$$

式中 n 和 n' 分别为透镜物空间和像空间的折射率, U 和 U' 分别为透镜物空间和像空间的孔径角, y 为光线在透镜上的高度, ϕ 为透镜的光焦度。根据几何关系可得

$$U_1 = \frac{U_0}{1 + (l/f)\{[n_0 - n(k)]/(n_0 - 1)\}}, \quad (3)$$

式中 U_0 为 λ_0 在物空间的孔径角, U_1 为波长 λ_1 在物空间的孔径角, n_0 为 λ_0 的折射率, f 为透镜对于 λ_0 的焦距, l 为透镜到 CCD 的距离, $n(k) = a + bk$ 为不同波长的折射率(a 和 b 为常数系数)。由薄透镜色差产生的光程差为

$$\delta_1 = D_{AB}(U_1 - U_0 - U'_1) = f(U_1 - U_0)(U_1 - U_0 - U'_1), \quad (4)$$

式中 U'_1 为 λ_1 在像空间的孔径角, D_{AB} 为 A、B 两点的间距。柱面会聚镜产生的光程差为

$$\delta_2 = \frac{dn(k)}{\sqrt{1 - (\sin^2 U')/n(k)^2}} - dn_0, \quad (5)$$

式中 d 为柱面会聚镜的厚度。由于 $U' \approx 0$, 则有

$$\delta_2 \approx dn(k) - dn_0 = db(k - k_0). \quad (6)$$

透镜色差产生的光程差 $\delta = \delta_1 + \delta_2$, 但由于 $\delta_2 \gg \delta_1$, 则有 $\delta \approx \delta_2$ 。当考虑光路色差时, 干涉光强变为

$$I = \int_0^\infty \frac{2\sqrt{\ln 2}}{\sqrt{\pi} \Delta k} \exp\left\{-\left[\frac{2\sqrt{\ln 2}(k - k_0)}{\Delta k}\right]^2\right\} \cos\{k[2h + db(k - k_0) - t]\} dk = \\ (1 + \eta^2)^{-\frac{1}{4}} \exp\left[-\frac{(z\Delta k)^2}{4\gamma(1 + \eta^2)}\right] \cos\left[(2h - t)k_0 + \frac{1}{2}\arctan \eta - \frac{\eta\Delta k^2 z^2}{4\gamma(1 + \eta^2)}\right], \quad (7)$$

式中 $z = 2h + bdk_0 - t$, $\gamma = 4\ln 2$, $\eta = bd\Delta k^2/\gamma$ 。

理想情况下和考虑色差时的低相干干涉条纹如图 3 所示。干涉光强的包络峰值位置由 $2h$ 变为 $2h + bdk_0$, 可见包络峰值位置发生了偏移, 偏移量为 bdk_0 。包络虽然仍为高斯型, 但宽度变大, 且增加了小于 1 的系数, 造成包络的幅值减小, 使干涉条纹的对比度下降, 这对信号检测是不利的。透镜系统的色差引起的光程差会因为公差的存在而变得复杂, 影响算法补偿的效果, 所以使用算法补偿有一定的难度。此外, 若补偿算法过于复杂, 会降低解调速度, 影响对发动机叶片的高速监测。

入射光的色差也会影响干涉条纹的分布。色差的存在使得干涉公式中余弦项的相位增加了反正切函数和多项式函数, 因此干涉条纹不再以零级干涉条纹为轴对称分布, 零级干涉条纹的位置与包络的峰值也不再

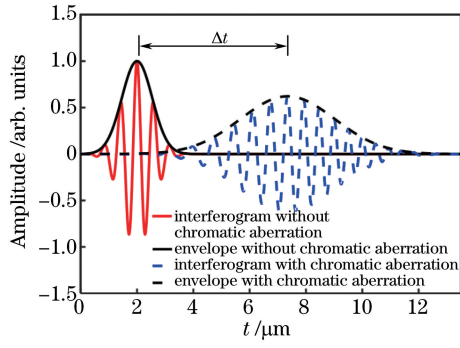


图 3 低相干干涉条纹

Fig. 3 Low-coherence interference fringes

重合。零级干涉条纹的偏移量为

$$\Delta t = bdk_0 - \frac{k_0 - \sqrt{k_0^2 + 4MN}}{2N}, \quad (8)$$

式中 $M = (\arctan \eta - 2bdk_0^2)/2$, $N = \eta \Delta k^2 / [4\gamma(1 + \eta^2)]$ 。此时解调的光纤 F-P 腔长误差为 $\Delta t/2$, 严重影响解调精度。

3 复消色差光学系统的设计

3.1 复消色差的方法

对于采用宽谱光源的解调系统,其消色差系统残留的二级光谱依然会对解调产生影响,因此要采用复消色差的方法,减少乃至消除二级光谱。复消色差准直透镜采用三胶合透镜,光焦度分配满足^[18]

$$\begin{cases} \phi_1 = \phi_0 \frac{\nu_1(P_3 - P_2)}{\epsilon} \\ \phi_2 = \phi_0 \frac{\nu_2(P_1 - P_3)}{\epsilon} \\ \phi_3 = \phi_0 \frac{\nu_3(P_2 - P_1)}{\epsilon} \end{cases}, \quad (9)$$

其中

$$\epsilon = \begin{vmatrix} P_1 & \nu_1 & 1 \\ P_2 & \nu_2 & 1 \\ P_3 & \nu_3 & 1 \end{vmatrix}, \quad (10)$$

式中 ϕ_0 为系统的光焦度, ϕ_1 、 ϕ_2 、 ϕ_3 分别为三个透镜的光焦度, ν_1 、 ν_2 、 ν_3 分别为三个透镜的阿贝系数, P_1 、 P_2 、 P_3 分别为三个透镜的部分色散系数。选择三胶合透镜的玻璃时,要求 ϵ 尽可能大,从而有利于减小每块透镜的光焦度和高级像差。

整形系统采用由柱面透镜组成的伽利略型望远镜系统,整形系统结构俯视图如图 4 所示,该系统可将圆形光斑变为椭圆形光斑。

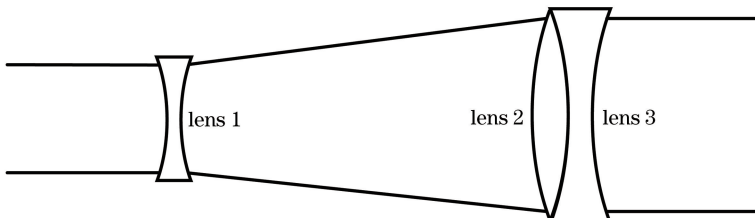


图 4 整形系统结构俯视图

Fig. 4 Top view of shaping system structure

根据折射定律的投影不变性,使用设计球面透镜的方法设计柱面透镜时^[19],各透镜参数需满足

$$\begin{cases} \frac{K}{\Delta\nu} \left(\Delta P + \frac{P_2\nu_3 - P_3\nu_2}{K\nu_1} \right) = \frac{P_1}{\nu_1} \\ \phi_2 = \frac{\nu_2}{K\Delta\nu} \phi_1 \left(1 - \frac{\nu_3}{K\nu_1} \right) \\ \phi_3 = -\frac{\nu_3}{K\Delta\nu} \phi_1 \left(1 - \frac{\nu_2}{K\nu_1} \right) \end{cases}, \quad (11)$$

式中 $K > 0$ 为放大倍数, $\Delta P = P_3 - P_2$ 为透镜 3 与透镜 2 的部分色散系数之差, $\Delta\nu = \nu_3 - \nu_2$ 为透镜 3 与透镜 2 的阿贝系数之差。在放大倍数 K 确定的情况下,根据(11)式中第一个方程选择合适的玻璃组合,再根据后两个方程分配透镜的光焦度。

3.2 光学系统设计

根据设计要求,为了使光斑与光楔和 CCD 的尺寸相匹配,要求光斑为 $29 \text{ mm} \times 1.45 \text{ mm}$ 的椭圆形,得到准直透镜的焦距 $f = (D_1/4\lambda)\pi D_{\text{mf}} = 6.778 \text{ mm}$,其中 D_1 为经准直系统后圆形光斑的直径, D_{mf} 为模场直径,所采用光纤的 $D_{\text{mf}} \approx 3.5 \text{ }\mu\text{m}$,整形系统的放大倍数 $K = 20$,计算可得系统的初始结构参数。利用光学设计软件 ZEMAX 对系统的初始结构进行优化,得到光学系统优化后的参数如表 1 所示,结构俯视图如图 5 所示。

表 1 光学系统优化后的参数

Table 1 Optimized parameters of optical system

Numerical order	Surface type	Glass	Radius /mm	Thickness /mm	Conic coefficient
1	Standard	D-ZF93	2.8750	1.5	-0.505
2	Standard	H-FK71	2.0200	1.5	0
3	Standard	D-K59	-1.7260	1.5	0
4	Standard		-6.1790	1.0	-0.290
5	Biconic	H-BaK3	-16.0760	1.5	251.534
6	Biconic		12.3970	183.0	0
7	Biconic	H-BaK3	-367.8220	1.5	0
8	Biconic	H-FK71	58.6910	4.5	-1.176
9	Biconic		-57.8723		0

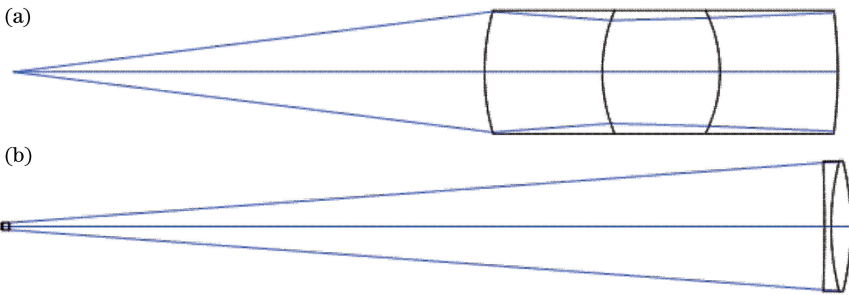


图 5 光学系统结构俯视图。(a)准直系统;(b)整形系统

Fig. 5 Top view of optical system configuration. (a) Collimating system; (b) shaping system

光学系统在光楔长度方向上的光程差如图 6 所示,其中 PX 为归一化入瞳坐标,由图可见,红光和绿光在透镜系统边缘处的光程差最大,约为 $0.021\lambda_0$ 。蓝光($0.486 \text{ }\mu\text{m}$)、绿光($0.588 \text{ }\mu\text{m}$)和红光($0.656 \text{ }\mu\text{m}$)的光程差在大部分区域基本重合,在透镜系统边缘处差值变大,这是由于透镜系统边缘的像差较大。

光学系统在光楔长度方向上的轴向色差如图 7 所示。光学系统在光楔长度方向上的轴向色差为 $1.9 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$,其形状呈 S 状,这是复消色差的鲜明特征。

4 分析与讨论

CCD 任意像素光敏面上的光照度为^[20]

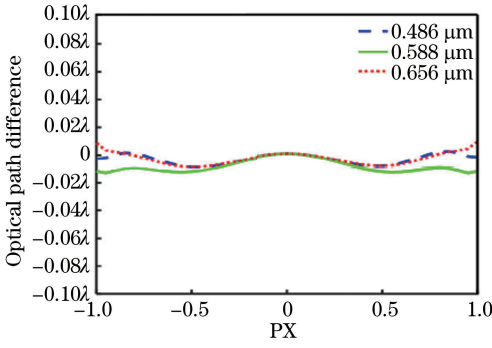


图 6 光楔长度方向上的光程差

Fig. 6 Optical path difference along wedge length

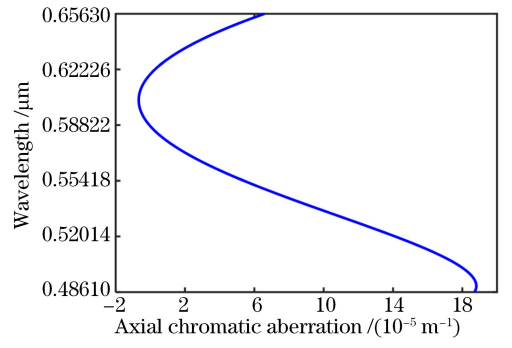


图 7 光楔长度方向的轴向色差

Fig. 7 Axial chromatic aberration along wedge length

$$E' = \frac{\Phi}{4d' \sqrt{\sin \theta}} \left[\frac{n}{\sqrt{z_0^2 + n^2 L^2}} - \frac{n-1}{\sqrt{z_0^2 + (n-1)^2 L^2}} \right], \quad (12)$$

式中 Φ 为 CCD 接收到的光通量, d' 为光束在 CCD 上的投影半宽, θ 为光纤发散角, z_0 为光纤与 CCD 之间的距离, $L=7 \mu\text{m}$ 为 CCD 像素的宽度, $n=\pm 1, \pm 2, \dots, \pm N/2$ 为 CCD 像素的序号, N 为 CCD 像素的个数。采用准直透镜和柱面会聚镜构成的光路形式时, z_0 约为 150 mm; 采用复消色差光路时, z_0' 约为 200 mm。在实际应用中, 二者的 CCD 投影宽度基本相同。存在色差时干涉光强的光通量为 $(1+\eta^2)^{-1/4} \Phi$ 。当准直透镜和柱面会聚镜选用的玻璃为 H-FK61 且厚度为 1.5 mm 时, $(1+\eta^2)^{-1/4}=0.2$ 。采用复消色差光路可以有效提高 CCD 任意像素光敏面上的光照度, 光照度的增量 $e=E'_1/E'_2 \approx 0.75(1+\eta^2)^{1/4}=3.75$, 其中 E'_1 为采用复消色差光路时的光照度, E'_2 为采用准直透镜和柱面会聚镜所构成光路时的光照度。光学系统在光楔长度方向上的波相差最大为 $0.021\lambda_0$, 从而可以求得 $\Delta t=0.0024 \mu\text{m}$, 则零级干涉条纹的移动距离 $\Delta x = \Delta t / [(n_e - n_o) \tan \varphi] = 2.85 \mu\text{m}$, 其中 $\varphi=0.07 \text{ rad}$ 为光楔楔角, n_e 和 n_o 分别为氟化镁晶体中 e 光和 o 光的折射率。零级干涉条纹测量值与理论值的偏移量小于 CCD 像素宽度的一半, 因此色差对解调误差的影响可以忽略。图 8 为采用复消色差光路后的干涉条纹, 插图为零级干涉条纹附近的局部放大, 由图可见, 虽然包络的峰值有所偏移, 但是采用复消色差光路得到的零级干涉条纹与理想情况下的零级干涉条纹基本重合, 并且二者的光强也基本相同, 说明采用复消色差光路可以有效改善解调性能。

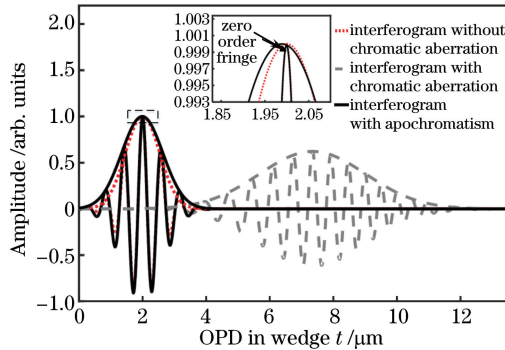


图 8 采用复消色差光路后的干涉条纹

Fig. 8 Interference fringes with apochromatic optical path

5 结 论

针对光纤 F-P 传感器偏振互相关解调系统光路, 分析了光路的色差对解调的影响。色差不仅会使零级干涉条纹发生偏移, 还会减小干涉光强。为了减小入射光的色差对光纤 F-P 腔长解调的影响, 在原有光路的基础上, 设计了复消色差光路, 并利用光学设计软件 ZEMAX 对光路进行设计优化。根据设计要求, 准直透镜组的焦距为 6.78 mm, 整形系统的放大倍数 $K=20$, 使用 ZEMAX 对光路进行分析, 可得光学系统在光楔长度方向上的轴向色差为 $1.9 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$, 最大光程差为 $0.021\lambda_0$ 。零级干涉条纹测量值的偏移量为

2.85 μm , 小于 CCD 像素宽度的一半, 消除了色差对解调精度的影响; 同时, CCD 任意像素光敏面上的光照度提高了 3.75 倍, 信噪比得到了提高。

参 考 文 献

- [1] Jiang J F, Liu T G, Zhang Y M, *et al.* Parallel demodulation system and signal-processing method for extrinsic Fabry-Perot interferometer and fiber Bragg grating sensors[J]. *Optics Letters*, 2005, 30(6): 604-606.
- [2] He Huiling, Zhao Chunmei, Chen Dan, *et al.* Present status of optic fiber sensors[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2004, 41(3): 38-41.
何慧灵, 赵春梅, 陈丹, 等. 光纤传感器现状[J]. *激光与光电子学进展*, 2004, 41(3): 38-41.
- [3] Pei Li, Weng Sijun, Wu Liangying, *et al.* Progress in optical fiber laser sensing system[J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(7): 0700001.
裴丽, 翁思俊, 吴良英, 等. 光纤激光传感系统的研究进展[J]. *中国激光*, 2016, 43(7): 0700001.
- [4] Murphy K A, Gunther M F, Vengsarkar A M, *et al.* Fabry-Perot fiber-optic sensors in full-scale fatigue testing on an F-15 aircraft[J]. *Applied Optics*, 1992, 31(4): 431-433.
- [5] Pulliam W J, Russler P M, Fielder R S. High-temperature high-bandwidth fiber optic MEMS pressure-sensor technology for turbine-engine component testing[C]. *SPIE*, 2002, 4578: 229-239.
- [6] Elster J L, Trego A, Catterall C, *et al.* Flight demonstration of fiber optic sensors[J]. *SPIE*, 2003, 5050: 34-42.
- [7] Wang Tingting, Wang Ming, Li Ming, *et al.* Dual-wavelength demodulation and wavelength optimization for optical fiber Fabry-Pérot sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 25(10): 1297-1301.
王婷婷, 王鸣, 李明, 等. 光纤法布里珀罗腔传感器双波长解调法及波长优化设计[J]. *光学学报*, 2005, 25(10): 1297-1301.
- [8] Cibula E, Đonlagić D. Miniature fiber-optic pressure sensor with a polymer diaphragm[J]. *Applied Optics*, 2005, 44(14): 2736-2744.
- [9] Ma C, Dong B, Gong J M, *et al.* Decoding the spectra of low-finesse extrinsic optical fiber Fabry-Perot interferometers [J]. *Optics Express*, 2011, 19(24): 23727-23742.
- [10] Zhang X M, Liu Y X, Bae H, *et al.* Phase modulation with micromachined resonant mirrors for low-coherence fiber-tip pressure sensors[J]. *Optics Express*, 2009, 17(26): 23965-23974.
- [11] Dändliker R, Zimmermann E, Frosio G. Electronically scanned white-light interferometry: A novel noise-resistant signal processing[J]. *Optics Letters*, 1992, 17(9): 679-681.
- [12] Liu T, Fernando G F. A frequency division multiplexed low-finesse fiber optic Fabry-Perot sensor system for strain and displacement measurements[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2000, 71(3): 1275-1278.
- [13] Jiang Junfeng, Zou Shengliang, Wang Shuang, *at al.* Research on signal-to-noise ratio effect in spatial scanning optical fiber Fabry-Perot sensing demodulation system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(11): 1106003.
江俊峰, 邹盛亮, 王双, 等. 空间扫描型光纤法布里-珀罗传感器解调中信噪比的影响研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(11): 1106003.
- [14] Li Lei, Liu Tiegeng, Jiang Junfeng, *et al.* Birefringent wedges effects on cross-correlation polarization demodulation in optical Fabry-Perot sensors[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2012, 23(1): 67-73.
李磊, 刘铁根, 江俊峰, 等. 光纤 F-P 传感器偏振互相关解调中光楔参数的影响研究[J]. *光电子 • 激光*, 2012, 23(1): 67-73.
- [15] Wang Xiaoyun. Study on non-scanning correlative demodulation system of optical fiber Fabry-Peort sensor[D]. Chongqing: Chongqing Universtiy, 2006: 17-18.
王小云. 光纤法珀传感器非扫描式相关解调系统研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2006: 17-18.
- [16] Duplain G. Low-coherence interferometry optical sensor using a single wedge polarization readout interferometer: US7259862[P]. 2007-08-21.
- [17] Wang S, Liu T G, Jiang J F, *et al.* Zero-fringe demodulation method based on location-dependent birefringence dispersion in polarized low-coherence interferometry[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(7): 1827-1830.
- [18] Li Xiaotong, Cen Zhaofeng. Geometrical • optics • aberrations and optical design[M]. Zhejiang: Zhejiang University Press, 2014: 128-134.
李晓彤, 岑兆丰. 几何光学 • 像差 • 光学设计[M]. 浙江: 浙江大学出版社, 2014: 128-134.
- [19] Chen Liwu. The theoretical study of the optical technology of the engineerization of the interference imaging

spectrometer of the CE-1 satellite[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of Chinese Academy of Sciences, 2006: 125-136.

陈立武. CE-1 成像光谱仪工程化光学技术理论研究 [D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2006: 125-136.

- [20] Meng Xiang'e, Jiang Junfeng, Liu Tiegeng, *et al.* Mathematical model of illumination of CCD in the space scanning optical fiber Fabry-Perot sensor demodulation system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(11): 1128006.

孟祥娥, 江俊峰, 刘铁根, 等. 空间扫描型光纤法布里-珀罗传感解调系统中 CCD 的光照度数学模型研究 [J]. *光学学报*, 2012, 32(11): 1128006.