

光纤腔动态谐振响应特性

徐鹏飞¹, 张建辉¹, 孟祥然¹, 马可贞¹, 赵宇¹, 张文栋^{1,2}, 薛晨阳¹, 闫树斌¹

(1. 中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室 电子测试技术国家重点实验室, 山西 太原 030051; 2. 太原理工大学 信息工程学院, 山西 太原 030024)

摘要: 光纤环形谐振腔的动态响应特性对其传感应用具有重要影响。为了抑制动态响应, 利用多光束干涉原理对其产生原因进行了分析; 通过实验测试得到了动态响应的临界振荡条件, 并进一步分析了光功率对该临界条件的影响, 实验结果与理论分析一致。同时, 针对动态响应对谐振特性的干扰问题, 测试了激光器调制参数对动态响应下振荡强度的影响, 为传感系统中的误差评估提供了参考依据。

关键词: 光纤环形谐振腔; 动态响应; 振荡现象; 光纤传感

中图分类号: TN214 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)03-0599-06

Characteristics of fiber ring resonator dynamic response

Xu Pengfei¹, Zhang Jianhui¹, Meng Xiangran¹, Ma Kezhen¹, Zhao Yu¹,
Zhang Wendong^{1,2}, Xue Chenyang¹, Yan Shubin¹

(1. Key Laboratory of Instrumentation Science and Dynamic Measurement Ministry of Education; Science and Technology on Electronic Test & Measurement Laboratory, North University of China, Taiyuan 030051, China;
2. College of Information Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: The dynamic response of fiber ring resonator has an important effect on the sensing applications. To suppress the dynamic response, the reason of dynamic response was analyzed by the multi-beam interference theory and the critical oscillation conditions of dynamic response were obtained. Furthermore, experiments were designed to analyze the effect of excitation power on the oscillation conditions and the experimental results agreed with the theoretical analysis well. Meanwhile, to avoid of the interference coming from dynamic response, the effect of modulation parameters on the oscillation intensity was made. It provides a reference for the estimation of error in the sensor system.

Key words: fiber ring resonator; dynamic response; oscillation phenomenon; fiber sensing

收稿日期: 2012-07-22; 修订日期: 2012-08-27

基金项目: 国家自然科学基金(91123036、61275166、61178058); 山西省自然科学基金(201011003-2)

作者简介: 徐鹏飞(1988-), 男, 硕士生, 主要从事光学谐振腔方面的研究。Email: xupengfei1205@126.com

导师简介: 闫树斌(1975-), 男, 副教授, 硕士生导师, 博士, 主要从事光 MEMS 传感器件方面的研究。Email: shubin_yan@nuc.edu.cn

0 引言

光纤环形谐振腔是一种利用光纤制作而成的光学谐振腔^[1-2]。凭借其简单的结构和良好的光学特性,被广泛地应用于光纤滤波器、光纤激光器、高分辨率光谱分析仪等多种领域。同时,根据光纤谐振腔的谐振特性,当外界环境因素(如温度、压力、湿度等)变化时,会造成谐振谱线的谐振点漂移或输出幅度变化。通过跟踪检测谐振谱线的变化量可以解算得到对应环境因素的变化量,从而实现各种传感应用。基于光纤环形谐振腔的各种应用都以其稳态响应为基础^[3-5],要求谐振腔的谐振谱线在工作过程中稳定无畸变。但在实际应用中,光纤环形谐振腔的动态响应会造成谐振谱线的特征参数恶化,如谐振点偏移、谐振谷底强度变化以及谱线线宽增大等^[6],给系统工作引入误差及噪声,严重影响系统性能,甚至导致系统功能难以实现^[7]。因此,对光纤环形谐振腔的动态响应特性进行深入研究具有重要意义。通过研究动态响应的产生条件和特性,采取相应的控制措施就可以有效避免谐振谱线发生畸变,维持稳定的谐振特性和谱线参数,保证谐振腔的稳态响应,为开展基于光纤谐振腔的各种应用研究奠定基础。

1 基本原理

光纤环形谐振腔的整体结构如图 1 所示,光在谐振腔中的传播过程为:入射光 E_1 经过耦合系数为 κ 、损耗系数为 γ 的耦合器 C_1 后,一部分光直接输出,记为 E_3 ;另一部分耦合进入谐振腔中,记为 E_2 。

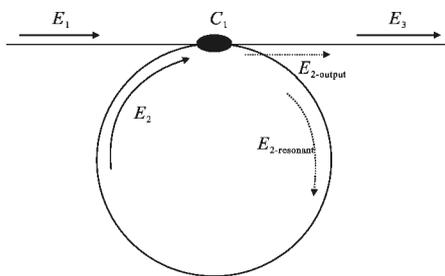


图 1 光纤环形谐振腔结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of fiber ring resonator

其中, E_2 在谐振腔内每传播一圈就有部分光通过耦合器 C_1 耦合输出,其在输出端口的光场记为 $E_{2-output}$,另一部分继续在谐振腔中传播,记为 $E_{2-resonant}$, $E_{2-resonant}$

在腔内的传播过程与 E_2 相同。如此循环,经过 n 圈后输出的光记为 $E_{2-output}^n$ 。在谐振腔中绕行不同圈数的光在输出端叠加,并与 E_3 发生干涉,形成多光束干涉输出。

为了研究谐振腔的动态响应特性,需要对激光器进行频率调制,调制波形选用三角波。考虑到三角波上升沿与下降沿的对称性,这里只考虑三角波上升沿的情形。设激光器输出光的中心频率为 f_0 ,相位为 θ_0 ,激光扫频速度为 k_m ,则激光器输出光场可以表示为:

$$E_1 = E_0 e^{j[2\pi f_0 t + \int_0^t 2\pi k_m t dt + \theta_0]} \quad (1)$$

其中,

$$k_m = \frac{V_{p-p}}{1/(2f_m)} \quad Z = 2f_m V_{p-p} Z \quad (2)$$

式中: V_{p-p} 为三角波电压峰-峰值; f_m 为三角波频率, $Z=10 \text{ GHz/V}$ 为激光器频率扫描系数。在谐振腔中,直接耦合输出的光场与绕行 n 圈后输出的光场分别为^[8-11]:

$$E_3 = E_1 \sqrt{(1-\kappa)} \sqrt{(1-\gamma)} \quad (3)$$

$$E_{2-output}^n = \kappa(1-\gamma) \sqrt{(1-\alpha)} [\sqrt{(1-\kappa)} \sqrt{(1-\gamma)} \cdot \sqrt{(1-\alpha)}]^{n-1} e^{j\pi} E_1(t-n\tau) \quad (4)$$

公式(3)和(4)可以简化为:

$$E_3 = E_1 P = E_0 P e^{j[2\pi f_0 t + \int_0^t 2\pi k_m t dt + \theta_0]} \quad (5)$$

$$E_{2-output}^n = E_0 T^2 \sqrt{(1-\alpha)} e^{j[2\pi(f_0 + \frac{k_m t}{2})t + \theta_0 + \pi]} \cdot R^{n-1} e^{-j[2\pi(f_0 n \tau + k_m n \tau - \frac{k_m n^2 \tau^2}{2})]} \quad (6)$$

式中: $T = \sqrt{\kappa} \sqrt{(1-\gamma)}$ 为耦合传输系数; $P = \sqrt{1-\kappa} \cdot \sqrt{1-\gamma}$ 为直接传输系数; $R = \sqrt{1-\kappa} \sqrt{1-\gamma} \sqrt{1-\alpha}$ 为光纤环内谐振传输系数。

公式(6)中 α 为谐振腔传输损耗系数, τ 为光在谐振腔中传播一圈的时间, $e^{j\pi}$ 是由于 E_3 和 $E_{2-output}^n$ 在谐振状态时满足最佳干涉相消条件,故相位相差 π ^[12]。则在谐振腔中绕行不同圈数输出的叠加光场 $E_{n-output}$ 为:

$$E_{n-output} = E_0 T^2 \sqrt{(1-\alpha)} e^{j[2\pi(f_0 + \frac{k_m t}{2})t + \theta_0 + \pi]} \cdot \sum_{n=1}^N R^{n-1} e^{-j[2\pi(f_0 n \tau + k_m n \tau - \frac{k_m n^2 \tau^2}{2})]} \quad (7)$$

因此,耦合器输出端的总光场为^[13]:

$$E_{\text{output}} = E_{n\text{-output}} + E_3 = E_0 e^{j[2\pi(f_0 + \frac{k_m t}{2})t]} \left\{ P - T^2 \sqrt{(1-\alpha)} \sum_{n=1}^N R^{n-1} e^{-j2\pi(f_0 n \tau + k_m n \tau - \frac{k_m n^2 \tau^2}{2})} \right\} e^{j\theta_0} \quad (8)$$

归一化后的谐振腔输出强度表达式为:

$$W = \left| \frac{E_{\text{output}}}{E_0} \right|^2 = \left| P - T^2 \sqrt{(1-\alpha)} \sum_{n=1}^N R^{n-1} e^{-j2\pi(f_0 n \tau + k_m n \tau - \frac{k_m n^2 \tau^2}{2})} \right|^2 \quad (9)$$

从公式(9)中可以得到,谐振腔输出光强只与谐振输出分量 $E_{n\text{-output}}$ 及其与 E_3 的相位差有关,即 $\sum_{n=1}^N R^{n-1} \cdot e^{-j2\pi(f_0 n \tau + k_m n \tau - \frac{k_m n^2 \tau^2}{2})}$ 项。其中, $E_{2\text{-output}}$ 与 E_3 的相位差可表示为:

$$\Delta\theta_n = -\pi + 2\pi n(f_0 \tau + k_m \tau) - \pi k_m n^2 \tau^2 = [2n(f_0 \tau + k_m \tau) - 1]\pi - \pi k_m n^2 \tau^2 \quad (10)$$

当发生稳态响应时, E_3 与 $E_{2\text{-output}}$ 各光束在同一时刻发生干涉,达到最佳干涉相消条件,形成对称、平滑的谐振曲线。此时,相位差应满足下式:

$$\Delta\theta_n = \pi(2m \pm 1), m \text{ 为正整数} \quad (11)$$

由于在谐振腔中传播的光每绕行一圈就会产生附加损耗,因此,传播圈数 n 为一有限值。对于特定谐振腔,其单圈传播时间 τ 一定,则相位差 $\Delta\theta_n$ 与激光扫频速度 k_m 有关。在公式(10)中, $[2n(f_0 \tau + k_m \tau) - 1]\pi$ 是 π 的奇数倍。对于 $\pi k_m n^2 \tau^2$ 项,当 k_m 较小时,该项可忽略,则 $\Delta\theta_n$ 能够近似满足公式(11)中的最佳干涉相消条件,即形成稳态响应;而当 k_m 较大时,该项对相位差 $\Delta\theta_n$ 造成的影响不可忽略,且随着传播圈数 n 的增大而产生更强的影响作用,这导致 E_3 与 $E_{2\text{-output}}$ 各光束无法在同一时刻发生最佳相消干涉,而是根据 k_m 的变化,先后与 $E_{2\text{-output}}$ 光束发生干涉,最终产生动态响应,使稳态响应下均匀、对称的谐振谱线发生“过冲”畸变,即出现振荡现象,导致谐振腔的谐振参数改变。

由以上分析可知,对于特定谐振腔,激光扫频速度 k_m 是影响其产生动态响应的主要因素,而 k_m 又由激光器的调制频率 f_m 、调制电压 V_{p-p} 和扫频系数 Z 共同决定,其中扫频系数作为激光器的本征参数为一固定值。因此,可以围绕激光器调制频率和调制电压两个参数对谐振腔动态响应的产生条件进行研究。在实际应用中,可以通过对以上参数的调控实现

对振荡现象的抑制和消除,维持谐振腔的稳态响应。

2 实验与讨论

2.1 光纤谐振腔的动态响应特性

为了研究光纤谐振腔的动态响应特性及其产生条件,设计并搭建了如图 2 所示的实验系统。其中,激光光源为 New Focus 公司半导体可调谐激光器 Model 6300-LN,波长范围为 1520~1570nm,线宽小于 300 kHz,扫频系数为 10 GHz/V;光功率放大器为掺铒光纤放大器;光纤环形谐振腔由 2x2 分束器构成,耦合系数 κ 为 10%,插入强度损耗 γ 为 7.08%,光纤环的长度为 1.5 m,传输损耗系数 α 为 0.14%;信号发生器为斯坦福 Model DS345;光电探测器为 New Focus 公司可调光电探测器 Model 2053,带宽为 10 MHz,最大转换增益为 18.8×10^6 V/W。

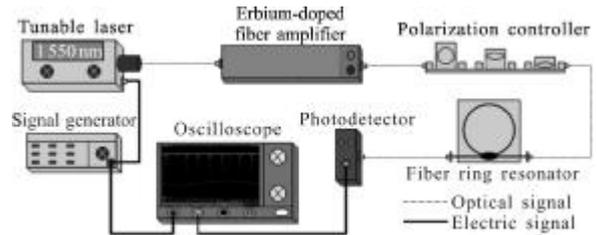


图 2 光纤环形谐振腔动态响应测试系统

Fig.2 Schematic diagram of measuring system for dynamic response of fiber ring resonator

实验中,激光器中心波长设置为 1550 nm,同时使用信号发生器产生三角波对其进行频率调制。为得到较大的光功率,使用掺铒光纤放大器对激光进行放大。然后,通过偏振控制器调控谐振谱线的偏振态,使输出谐振信号只有一种本征偏振态。当激光器调制信号频率为 100 Hz,峰-峰值为 0.5 V 时,可以得到如图 3 所示的谐振曲线。此时谐振腔处于稳态

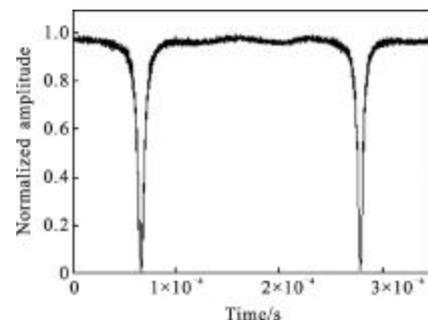


图 3 $f_m=100$ Hz, $V_{p-p}=0.5$ V 时的谐振曲线

Fig.3 Resonance curve when $f_m=100$ Hz, $V_{p-p}=0.5$ V

响应状态,在谐振点处输出光功率降低到最小值,且以谐振点为中心,谱线平滑对称。

随着调制信号频率和幅值的增加,谱线的谐振状态会出现变化。当频率增加为 1.2 kHz,峰-峰值增加为 0.7 V 时,谐振谱线出现如图 4 所示的振荡现象。在原来对称的谐振谱线一侧出现过冲,且输出光强度在多次衰减振荡后逐渐趋于稳定,重新达到稳态响应时的强度。在动态响应下,谐振腔出现的振荡现象严重破坏了谱线的谐振特性,使平滑对称的谱线发生畸变。这将对以谐振腔为核心敏感单元的传感系统产生严重影响,会在系统信号测量和解算中引入误差或错误。

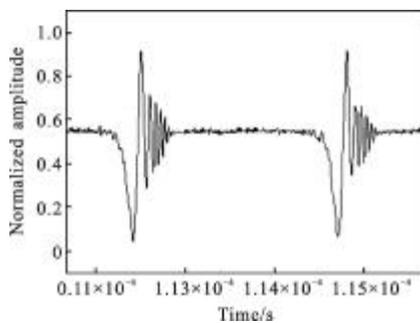


图 4 $f_m=1.2$ kHz, $V_{p-p}=0.7$ V 时发生振荡的谐振曲线

Fig.4 Resonance curve with oscillation phenomenon when

$f_m=1.2$ kHz, $V_{p-p}=0.7$ V

2.2 谐振腔动态响应产生条件分析

根据上述理论分析,激光器的扫频速度 k_m 影响谐振腔的动态响应特性。对于频率扫描系数 Z 一定的激光器,则其调制信号的电压 V_{p-p} 及频率 f_m 是影响动态响应产生条件的两个主要因素。试验中,通过分别控制参量 V_{p-p} 和 f_m 的变化,使谐振腔达到临界振荡状态。实验测得,出现临界振荡时扫描电压和频率的关系曲线,如图 5 所示。从图中数据可知,随着调制信号电压的增大,产生临界振荡所需的调制频率随之减小;同样,当调制信号的频率较大时,只需要较小的调制电压就能够产生振荡现象。对实验测试数据进行曲线拟合,得到了在该实验系统下调制电压 V_{p-p} 与调制频率 f_m 近似满足关系式:

$$f_m = 370 V_{p-p}^{-0.94} \quad (12)$$

对于 k_m 有:

$$k_m \approx 370 Z \quad (13)$$

即当 k_m 满足上述条件时,谐振腔发生临界振

荡。对于图 5,当调制信号幅度和频率处于曲线以上区域时,谐振腔表现出动态响应特性;反之,则表现出稳态响应特性。

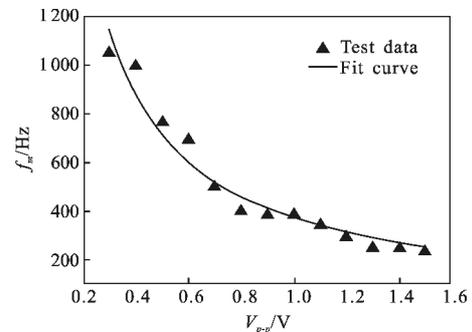


图 5 临界振荡时 V_{p-p} 与 f_m 的关系

Fig.5 Relationship between V_{p-p} and f_m when critical oscillation occurs

在上述测试基础上,通过改变入射到光纤环中的光功率大小,对功率分别为 2 mW、8 mW 和 25 mW 的激光激发下的临界振荡条件进行测试,得到如图 6 所示的关系图。实验表明,当光功率增大时,发生振荡所需要的调制电压和频率都会减小,即在光功率较大时,谐振腔更容易发生振荡,产生动态响应;反之,则更易于维持稳态响应。故除了调制电压和调制频率外,谐振腔的动态响应特性还受到光功率的影响。因此,在实际应用中,可以通过控制光功率的大小来抑制动态响应的产生。

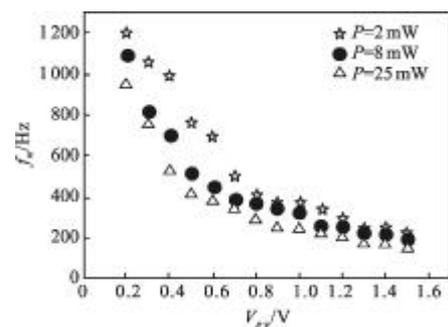


图 6 不同光功率下的临界振荡条件

Fig.6 Critical oscillation conditions at different excitation powers

在满足临界振荡条件下,激光器的调制频率和调制电压对谐振腔的动态响应特性依然有显著影响,主要表现在谐振谱线的过冲畸变和衰减振荡两个方面。如图 7 所示,在谐振腔的动态响应谱线中,振荡峰的个数和振荡峰的强度是动态响应的两个主要特点。由于振荡峰的个数与第一阶振荡峰的强度

有直接关系,且随着第一阶振荡峰的强度增大而增加。因此,这里定义参量 ρ 来表征谐振谱线振荡的强弱,称为振荡强度。

$$\rho = \frac{\Delta V}{V_0} \quad (14)$$

式中: V_0 为谐振谱线稳定时的输出强度; ΔV 为第一阶振荡峰的过冲强度。

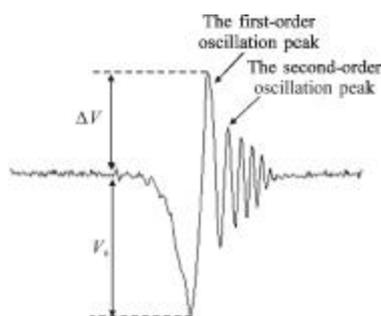


图7 振荡强度示意图

Fig7 Schematic diagram of oscillation intensity

根据对振荡强度 ρ 的定义,在上述实验系统中,通过改变激光器的调制频率和调制电压来测试谐振腔在动态响应时的振荡强度。实验测试了当调制电压分别为 0.3 V、0.6 V 和 1.5 V 时,不同调制频率下振荡强度的大小,得到如图 8 所示的关系曲线。在三种不同的调制电压下,振荡强度均随着调制频率的增大而增强,且在增大到一定强度时保持稳定;调制电压越小时,谐振腔越能更好地保持稳态响应。另一方面,当调制频率一定时,振荡强度会随着调制电压的增大而显著增强。实验表明,当谐振腔处于动态响应状态时,激光器调制参数还会影响谐振谱线的振荡强度。通过测试不同参数下振荡强度的变化,可以为评估谱线畸变所造成的传感测量误差提供参考依据。

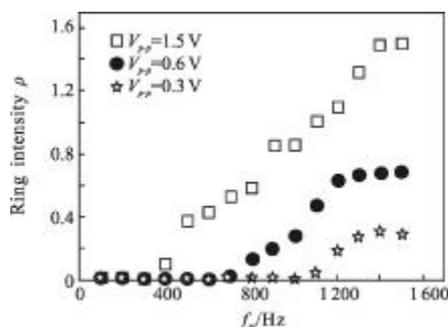


图8 振荡强度与 V_{p-p} 和 f_m 的关系

Fig.8 Relationship between oscillation intensity and modulation parameters V_{p-p} and f_m

3 结论

通过理论分析光纤环形谐振腔动态响应产生的原因,针对其主要影响因素 k_m 展开测试分析。实验测试了激光器调制电压和调制频率对动态响应的影响,获得了谐振腔临界振荡时调制参数之间的关系,测试结果与理论分析一致。进一步分析测试了光功率对临界条件的影响,为抑制动态响应提供了新的途径。同时,引入振荡强度表征动态响应的强弱,分析了调制参数对振荡强度的影响,为谐振腔传感系统的误差评估提供了参考依据。

参考文献:

- [1] Stokes L F, Chodorow M, Shaw H J. All-single-mode fiber resonator [J]. *Optics Letters*, 1982, 7(6): 288-290.
- [2] Feng Zhang, John W Y Lit. Direct-coupling single-mode fiber ring resonator[J]. *J Opt Soc Am A*, 1988, 5(8): 1347-1355.
- [3] Ioannidis Z K, Radmore P M, Giles I P. Dynamic response of an all-fiber ring resonator[J]. *Optics Letters*, 1988, 13(5): 422-424.
- [4] Faramarz E Seraji. Steady-state performance analysis of fiber-optic ring resonator [J]. *Progress in Quantum Electronics*, 2009, 33: 1-16.
- [5] Faramarz E Seraji. Dynamic response of a fiber-optic ring resonator: analysis with influences of light-source parameters [J]. *Progress in Quantum Electronics*, 2009, 33: 110-125.
- [6] Diqing Ying, Huilian Ma, Zhonghe Jin. Dynamic resonance characteristic analysis of fiber ring resonator[J]. *Optical Fiber Technology*, 2009, 15: 15-20.
- [7] Diqing Ying, Huilian Ma, Zhonghe Jin. Dynamic characteristics of R-FOG based on the triangle wave phase modulation technique[J]. *Optics Communications*, 2008, 281: 5340-5343.
- [8] Tang Quan'an, Ma Xinyu. Experimental study on fiber ring resonator in resonator fiber optic gyroscope[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 1998, 27(4): 33-36. (in Chinese)
汤全安, 马新宇. 谐振式光纤陀螺中环形谐振腔的实验研究[J]. *红外与激光工程*, 1998, 27(4): 33-36.
- [9] Yan Shubin, Zhao Min, Liu Zheng, et al. All-solid integrated optical waveguide gyro[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(5): 921-925. (in Chinese)
闫树斌, 赵敏, 刘正, 等. 芯片级全固化集成光波导陀螺

- [J]. 红外与激光工程, 2011, 40(5): 921-925.
- [10] Feng Lishuang, Hong Lingfei, Du Zhefeng, et al. Research on the theory and experiment of double-frequency modulation for MOG [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2008, 21(2): 341-345. (in Chinese)
冯丽爽, 洪灵菲, 杜哲峰, 等. 微光学陀螺双频率调制理论与实验研究[J]. 传感技术学报, 2008, 21(2): 341-345.
- [11] Yang Zhihui, Ma Huilian, Zheng Yangming, et al. Frequency locking technique in digital closed-loop resonator fiber optic gyro[J]. Chinese Journal of Lasers, 2007, 34(6): 814-819. (in Chinese)
- 杨志怀, 马慧莲, 郑阳明, 等. 谐振式光纤陀螺数字闭环系统锁频技术[J]. 中国激光, 2007, 34(6): 814-819.
- [12] Ma Huilian, Jin Zhonghe, Ding Chun, et al. Influence of spectral linewidth of laser on resonance characteristics in fiber ring resonator [J]. Chinese Journal of Lasers, 2003, 30(8): 731-734. (in Chinese)
马慧莲, 金仲和, 丁纯, 等. 激光器线宽对光纤环形谐振腔谐振特性的影响[J]. 中国激光, 2003, 30(8): 731-734.
- [13] Diqing Ying, Huilian Ma, Zhonghe Jin. Ringing phenomenon of the fiber ring resonator[J]. Applied Optics, 2007, 46(22): 4890-4895.

下期预览

航天相机碳纤维外罩结构及模态分析和试验

初昶波, 柴文义, 张昊苏, 贺天兵, 汶德胜

(中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119)

摘要: 采用高强度的碳纤维复合材料 T300 设计、制造了具有较复杂外形和多级斜挡光环的航天相机外遮光罩并简要介绍了制造工艺过程。运用有限元法完成了模态分析, 利用现有工装联接碳纤维外罩完成了模态测试, 得到了其径向模态及其振型, 并给出了试验频响函数图。通过比较有限元分析和试验测试数据表明, 有限元分析模型与实际产品各阶模态误差均在 2.3% 以内。由此可见, 碳纤维外罩结构合理, 采用的有限元分析方法可行, 该方法如扩展到大型航天相机动力学建模过程, 将对设计相机整机结构具有指导意义。