

文章编号: 0258-7025(2010)06-1445-05

一种可调谐光滤波器非线性实时标定方法研究

梁 霄 刘铁根 刘 琨 江俊峰 张以谟

(天津大学精密仪器与光电子工程学院光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要 提出了一种实时的可调谐光滤波器(TOF)非线性标定方法。基于可调谐光滤波器的输出特性构建了可调谐光滤波器非线性实时标定系统。采用最小二乘多项式拟合法建立了可调谐光滤波器波长-电压响应曲线,用于描述光滤波器的非线性特性。采用带波长阻隔的 F-P 标准具测试了可调谐光滤波器的波长随机误差,结果表明采用参考波长值可使可调谐光滤波器波长随机误差降低 37%~95%。将这种实时标定方法应用于气压传感系统,可明显提高传感器的波长定位精度,降低系统误差,实现高灵敏度气压传感。

关键词 测量;光纤传感;实时;非线性标定;可调谐光滤波器;F-P 标准具

中图分类号 TN253;TP212.14 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103706.1445

Method of Real-Time Calibration for Tunable Optical Filter Nonlinearity

Liang Xiao Liu Tiegeng Liu Kun Jiang Junfeng Zhang Yimo

(Key Laboratory of Opto-Electronics Information and Technical Science, Ministry of Education, College of Precision Instrument & Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract A real-time calibration method is proposed for investigation of tunable optical filter (TOF) nonlinearity. Based on the transmission characteristic of TOF, nonlinearity real-time calibration system is established. Using least mean square algorithm, the relationship between wavelength and voltage of the TOF can be obtained. Thus the nonlinearity of the TOF can be described. The wavelength random error of the TOF is measured by using wavelength blocked F-P etalons. The result shows that wavelength random error of the TOF can be reduced by 37%~95% with reference wavelength. Combined with the method, the wavelength precision in gas pressure sensing system is obviously improved in position accuracy, system error and high sensitivity.

Key words measurment; fiber sensing; real-time; nonlinear calibration; tunable optical filter; F-P etalon

1 引 言

光纤滤波器^[1]是光波分复用光通信系统和传感系统中基础的关键器件之一。作为一种很重要的光纤滤波器,可调谐光滤波器(TOF)^[2]可以从许多不同波长的输入光信号中,根据需要选择特定波长的光信号通过。伴随着波分复用技术的飞速发展,可调谐光滤波器技术也在不断发展,并且由于其具有调谐范围

大、透射带宽窄等诸多优点,现已成功应用于光纤传感^[3]、光纤通信^[4]及光谱分析^[5]等诸多领域。

可调谐光滤波器一般采用压电陶瓷(PZT)驱动光滤波器腔体,使两个平行端面距离发生微变化,从而实现对光滤波器透射波长的连续调谐。在电场激励下,PZT发生机械形变即逆压电效应^[6],正是这种效应致使光滤波器腔长发生变化,最终完成对波

收稿日期: 2010-03-22; 收到修改稿日期: 2010-04-26

基金项目: 国家 973 计划(2010CB327802)、国家自然科学基金(60627002, 60577013)、中国博士后科学基金(20090460690)、教育部博士点新教师基金(200800561020, 200800561022)、天津市应用基础重点项目(06YFJZJC00400)和天津大学青年教师培养基金(TJU-YFF-08B47)资助课题。

作者简介: 梁 霄(1986—),男,硕士研究生,主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: liangxiao718@tju.edu.cn

导师简介: 刘铁根(1955—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事光纤传感和光电检测等方面的研究。

E-mail: tgliu@tju.edu.cn(通信联系人,中国光学学会会员号:S040130032S)

长的选择。由于 PZT 的驱动电压和微位移之间的关系是非线性的,导致驱动电压和光滤波器透射波长、自由光谱范围以及 3 dB 带宽之间的关系也是非线性的。

本文提出了一种可调谐光滤波器非线性的实时标定方法。根据可调谐光滤波器的输出特性构建了可调谐光滤波器非线性实时标定系统。采用最小二乘多项式拟合法^[7]建立可调谐光滤波器的波长-电压响应曲线以描述光滤波器的非线性特性,利用带波长阻隔的 F-P 标准具为系统提供参考波长。采用这种非线性实时标定方法可以明显提高波长定位精度。将此实时标定方法引入光纤 F-P 气压传感系统中,可以大幅降低传感器透射波长检测的随机误差。

2 基本原理与系统构成

若有一束宽带光垂直入射到两面反射率都很高的平行平板上,当波长满足

$$\lambda_0 = \lambda_0^{(m)} = \frac{2n'h}{m}, (m = 1, 2, \dots) \quad (1)$$

时,透射光的强度达到极大^[8],每个带各对应一定的波长 $\lambda_0^{(m)}$ 和一个相应的整数干涉序 m 。当两个端面之间的距离 h 和介质折射率 n' 一定时, F-P 腔可作为 F-P 标准具,由(1)式可知,此时的透射波长为定值,在标准具的透射方向上会形成透射梳状谱;当两端面之间的折射率 n' 一定,而应力、温度等原因致使端面距离 h 发生变化时, F-P 腔的透射中心波长会发生漂移,通过检测波长漂移量便可解调出应力、温度等外部变量。图 1 是透射波长范围为 1530~1565 nm 的 F-P 标准具的透射梳状谱,其中 1550.103 nm 处为此标准具的波长阻隔。

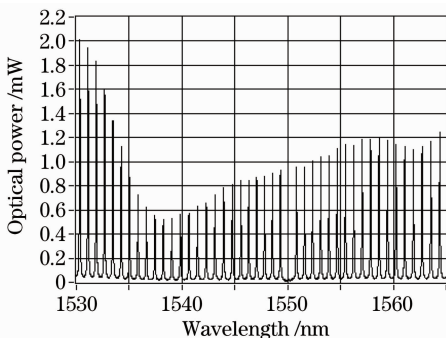


图 1 F-P 标准具的部分透射梳状谱

Fig. 1 Partial transmission spectrum of F-P etalon

由(1)式可写出相邻两个透射波长值的计算公式

$$\begin{cases} \lambda^{(m)} = \frac{2n'h}{m}, \\ \lambda^{(m+1)} = \frac{2n'h}{m+1}, \end{cases} \quad (m = 1, 2, \dots) \quad (2)$$

(2)式是一个二元一次方程组,利用这一方程组可以推出干涉级次 m 以及 F-P 标准具的腔长 h 。当折射率 $n' = 1$ 时,结果为

$$\begin{cases} m = \frac{\lambda^{(m+1)}}{\lambda^{(m)} - \lambda^{(m+1)}}, \\ h = \frac{\lambda^{(m)} \lambda^{(m+1)}}{2[\lambda^{(m)} - \lambda^{(m+1)}]}, \end{cases} \quad (m = 1, 2, \dots) \quad (3)$$

(3)式具有重要意义:通过检测 F-P 腔相邻两个透射波长值,便可计算出 F-P 的腔长。(3)式在基于 F-P 腔的温度、应力应变等多种传感系统中都可使用。

由于可调谐光滤波器的波长选择作用是基于逆压电效应的,因此,透射波长和驱动电压之间的关系是一一对应的,采用波长-电压曲线可以刻画可调谐光滤波器的波长响应特性。

基于 F-P 标准具的可调谐光滤波器非线性实时标定系统如图 2 所示,系统主要由可调谐激光器与光功率模块(图中标号 1 部分), F-P 标准具模块(图中标号 2 部分),可调谐光滤波器测试模块(图中标号 3 部分)以及数据采集与处理模块(图中标号 4 部分)组成。当利用光开关使 F-P 标准具模块和可调谐光滤波器测试模块连接时,可完成对可调谐光滤波器的非线性标定。理论上只要 F-P 标准具两个端面之间的距离 h 和介质折射率 n' 一定,标准具的透射光谱就不会改变。但是由于温度、振动等原因,标准具的透射波长并不是完全稳定的,会随着环境的变化产生一定的漂移。图 2 的实验系统可以降低这种不稳定性。当利用光开关使 F-P 标准具模块和可调谐激光器与光功率模块连接时,便可对标准具的参数重新测量,从而实时标定光滤波器的非线性,大大降低了系统误差。

系统工作时,可调谐光滤波器测试模块通过数据采集卡(DAQ)与计算机相连,可调谐激光器与光功率模块通过 USB-GPIB 转换卡与计算机相连,最终通过计算机完成对数据的采集和处理。

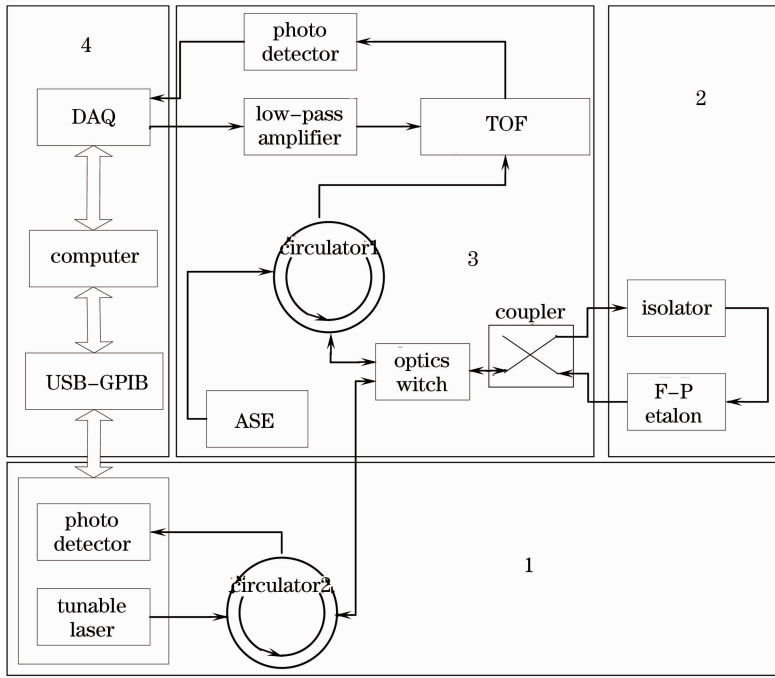


图 2 可调谐光滤波器非线性实时标定系统

Fig. 2 Nonlinearity real-time calibration system of TOF

3 实验及数据处理

3.1 多项式拟合法标定可调谐滤波器非线性

假设给定实验数据点 $(x_i, y_i) (i = 0, 1, \dots, m)$, Φ 为所有次数不超过 $n (n \leq m)$ 的多项式构成的函数类, 现求一个多项式

$$p_n(x) = \sum_{k=0}^n a_k x^k \in \Phi, \quad (4)$$

使所求曲线与给定点 $(x_i, y_i) (i = 0, 1, \dots, m)$ 的距离平方和为最小, 则称 $p_n(x)$ 为最小二乘拟合多项式。

当实验中采用锯齿波驱动滤波器时, 每一时刻都会产生一个与驱动电压相应的透射波长值。采集一组实验数据, 记为 $(v_1, \lambda_1), (v_2, \lambda_2), \dots, (v_N, \lambda_N)$ 。利用这一组实验数据可以建立一个最小二乘拟合多项式来分析可调谐光滤波器的波长-电压关系, 即

$$\lambda_k = \sum_{i=0}^N a_i v_i^k, (k = 1, 2, \dots) \quad (5)$$

式中 λ_k 为透射波长, v_k 为对应的驱动电压, N 为正整数, $\{a_i\}$ 为采用最小二乘法由实验数据计算得到的多项式拟合系数。

应用(5)式, 可以得到如图 3 所示的可调谐光滤波器波长-电压关系拟合曲线, 图中圆点表示实验测量数据即不同波长及其对应的驱动电压值, 曲线是测量数据的二次拟合曲线。取 10000 组实验数据进行计算, 当采用二次拟合时, 平均拟合误差为

16.6 pm; 采用线性拟合时, 平均线性拟合误差达 187.3 pm。因此, 最小二乘法多项式拟合法可以大大降低拟合误差。由图 3 可以看出, 在一定范围内, 光滤波器的波长-电压关系拟合曲线可以近似线性处理, 但是对于精密测量或是宽谱范围调谐, 这种非线性往往会造成较大误差。

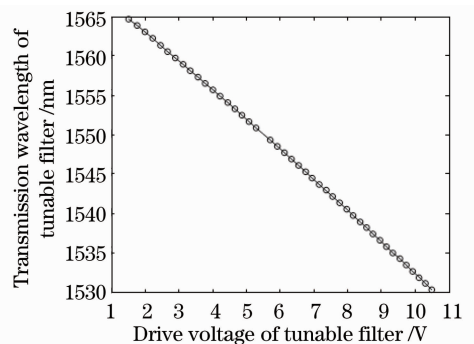


图 3 可调谐光滤波器波长-电压最小二乘拟合曲线

Fig. 3 Least-squares fitting curve of TOF

实验中采用功率加权法^[9]来定义光滤波器各透射中心波长。在众多数据处理算法中, 功率加权法简单有效, 其优点是构造了数据的线性组合, 使信息得以集中。设波长 λ_i 对应的透射光功率值为 P_i , 利用功率加权法求得的中心波长值 λ_D 为

$$\lambda_D = \frac{\sum P_i \lambda_i}{\sum P_i}, \quad (6)$$

采用功率加权法计算中心波长时,其结果与所选数据点数即取点窗口的大小有关。实验时选择步长为 12 pm,10000 组实验数据多项式拟合平均误差如图 4 所示,图中各点表示实验数据的平均计算结果。可以看出,当窗的大小在一定范围内变化时,拟合标准差变化不大;当窗过大时,标准差明显增大,这主要是因为所选窗口包含了相邻波形。当取点窗口大小为 108 pm 时标准差最小,为 16.6 pm,因此选择这一窗口进行光滤波器的非线性标定。

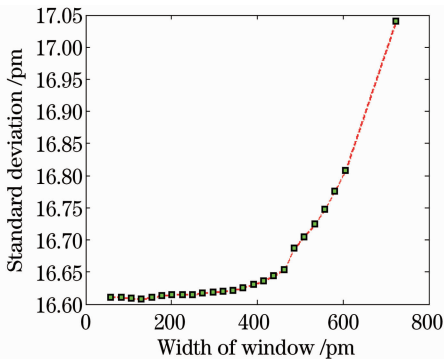


图 4 取点窗口大小对拟合误差的影响曲线

Fig. 4 Window size's impact on fitting error

3.2 F-P 标准具的可调谐光滤波器非线性标定

采用图 2 的系统进行可调谐光滤波器特性测

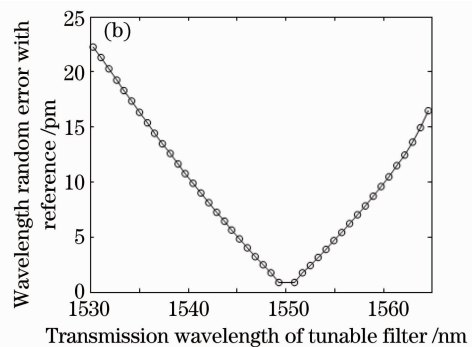
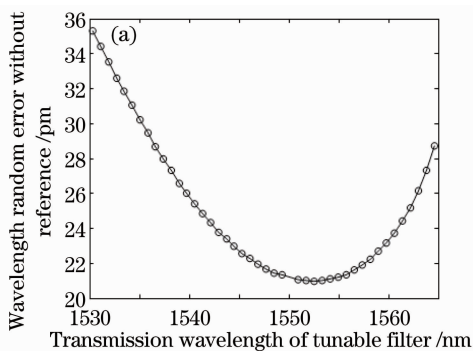


图 5 波长定位误差对比。(a)没有参考波长时的波长定位误差;(b)有参考波长时的波长定位误差

Fig. 5 Comparison of wavelength random errors. (a) wavelength random error without reference;

(b) wavelength random error with reference

从实验过程和实验结果可以看出,波长间隔越小拟合精度越高,波长定位误差越小;而波长阻隔决定了波长定位误差最小的波长位置,因此可以根据实际需要选取不同波长阻隔的 F-P 标准具。另外,若想在多个波长位置得到较高的波长定位精度,可以采用具有多个阻隔波长的 F-P 标准具为实验提供多个参考波长。因此,本文提出的可调谐光滤波器非线性标定方法对各参数 F-P 标准具有广泛适用性,可以根据实际需要选取合适参数的标准具。

图 2 所示的基于 F-P 标准具的可调谐光滤波器

试。实验所用的 F-P 标准具波长阻隔约为 1550.103 nm,当可调谐光滤波器在锯齿波电压驱动下扫描时,设定电压上升沿和下降沿的时间之比为 9:1,连续扫描 10000 个周期,记录每周期上升沿中 F-P 标准具所有中心波长对应的驱动电压值。利用这些电压值,根据(5)式计算相应波长值的随机误差,所得结果如图 5 所示,图中各点代表实验中不同波长值对应的波长定位随机误差。

当 F-P 标准具不提供参考波长时,相同拟合次数下各透射波长的定位误差如图 5(a)所示,误差范围在 21~35 pm 之间,最小误差出现在 1553 nm 左右;当以 F-P 标准具的波长阻隔 1550.103 nm 作为参考波长时,相同拟合次数下其他透射波长的定位误差如图 5(b)所示,最大误差仅为 22 pm,最小误差能降低至 1 pm 左右,并且波长定位误差随着所测中心波长与参考波长的距离增加而增大。通过两幅图的对比可知,采用参考波长比不采用参考波长的波长定位误差降低了 37%~95%。因此,采用 F-P 标准具为可调谐光滤波器非线性标定提供参考波长可以大大提高波长定位精度,降低由于滤波器非线性对实验造成的影响,起到了对可调谐光滤波器非线性的标定作用。

非线性实时标定系统可以达到很高的波长定位精度。将这套系统应用于应力应变等实际测量中,可以获得很好的效果。

4 非线性实时标定系统在压力传感器中的应用

膜片式微型光纤 F-P 腔气压传感器的原理与 F-P 标准具类似,只是其 F-P 腔长随气压的变化而变化。气压传感器的 F-P 腔长和外部气压是线性关系^[10],而由(3)式的第 2 式看出利用相邻波长位

置可以计算 F-P 腔长。因此,可通过测量传感器的相邻透射波长计算出传感器的外部气压值。

根据光纤 F-P 腔气压传感器的原理,可将可调谐激光器非线性实施标定系统引入到气压测试中对传感器的 F-P 腔透射波长进行实时标定,以实现气压传感器 F-P 腔长的实时标定。实验证明,不采用实时标定系统时,根据 10000 组数据得到的传感器 F-P 腔平均腔长为 $65.4266 \mu\text{m}$,均方差为 $0.2566 \mu\text{m}$;采用实时校正系统时,得到的平均腔长为 $65.5244 \mu\text{m}$,均方差为 $0.0002 \mu\text{m}$ 。对比两组结果可以看出,引入实时校正系统比不引入实时校正系统的波长随机误差降低了 99.92%。

除了应用于气压传感系统,可调谐光滤波器非线性实时标定系统还可用于动态应变传感系统^[11]、温度应变传感系统^[12]、光纤气体传感系统^[13,14]以及混合式光纤传感系统^[15]等其他工程项目中。

5 结 论

提出了一种基于 F-P 标准具的可调谐光滤波器非线性实时标定方法,并搭建了可调谐滤波器非线性实时标定系统。带波长阻隔的 F-P 标准具为可调谐光滤波器提供参考波长,采用最小二乘拟合多项式建立可调谐光滤波器的波长-电压拟合曲线。实验表明,当取点窗口大小为 108 pm 时,采用 F-P 标准具的参考波长使可调谐光滤波器的波长随机误差降低了 37%~95%,大大提高了波长定位精度。将可调谐光滤波器非线性实时标定系统引入光纤 F-P 腔气压传感系统中,波长随机误差降低了 99.92%,传感系统灵敏度得到了极大的提高。此标定方法对不同参数的 F-P 标准具具有广泛的适用性,并且还可用于光纤气体传感系统等其他光纤传感系统中。

参 考 文 献

- Liu Zhuolin, Zhang Weigang, Jiang Meng *et al.*. Configuration and development of fiber optical filter[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(3): 540~546
刘卓琳,张伟刚,姜 萌等. 光纤滤波器的原理、结构设计及其进展[J]. 中国激光, 2009, **36**(3): 540~546
- Y. N. Ning, A. Meldrum, W. J. Shi *et al.*. Bragg grating sensing instrument using a tunable Fabry-Perot filter to detect wavelength variations[J]. *Meas. Sci. Technol.*, 1998, **9**(4): 599~606
- Li Fang, He Jun, Xu Tuanwei *et al.*. Fiber laser sensing technology and its applications [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, **38**(6): 1025~1032
李 芳,何 俊,徐团伟等. 光纤激光传感技术及其应用[J]. 红外与激光工程, 2009, **38**(6): 1025~1032
- Li Yefang, Wang Xiaoxu, Liu Hua. The application of wavelength division multiplexer in fiber communication [J]. *Physics and Engineering*, 2007, **17**(5): 26~28
李叶芳,王晓旭,柳 华. 波分复用器在光纤通信中的应用[J]. 物理与工程, 2007, **17**(5): 26~28
- Wang Yan, Liang Dakai, Zhou Bing. Measurement of steel corrosion in concrete structures by analyzing long-period fiber grating spectrum character [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2008, **28**(11): 2660~2664
王 彦,梁大开,周 兵. 基于光纤光栅光谱分析的混凝土结构钢筋锈蚀监测[J]. 光谱学与光谱分析, 2008, **28**(11): 2660~2664
- W. Qingming, Z. Qiming, X. Baomin *et al.*. Nonlinear piezoelectric behavior of ceramic bending mode actuators under strong electric fields[J]. *J. Appl. Phys.*, 1999, **86**(6): 3352~3360
- J. H. Mathews, K. D. Fink. Numerical Methods Using MATLAB[M]. Fourth Edition, Zhou Lu, Chen Yu Transl. Beijing: Public House of Electronics Industry, 2005. 203~215
马修斯,芬克. 数值方法(MATLAB版)[M]. 第4版,周 璐,陈 渝译. 北京:电子工业出版社,2005. 203~215
- Max Born, Emil Wolf. Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light Seventh[M]. Expanded Edition, Yang Xiasun Transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2007. 299~315
马科思·玻恩,埃米尔·沃耳夫. 光学原理:光的传播、干涉和衍射的电磁理论[M]. 第七版,杨葭荪译. 北京:电子工业出版社, 2007. 299~315
- Jing Wencai, Wang Guanghui, Liu Kun *et al.*. Application of weighted wavelength algorithm on the demodulation of a fiber Bragg grating optical sensing system[J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2007, **18**(9): 1022~1025
井文才,王光辉,刘 琨等. 功率加权法用于光纤 Bragg 光栅特征波长检测[J]. 光电子·激光, 2007, **18**(9): 1022~1025
- Shi Xiaojing, Chen Deyong, Wang Junbo *et al.*. Research of a novel micromachined resonant pressure sensor[J]. *Chinese J. Sensors and Actuators*, 2009, **22**(6): 790~793
史晓晶,陈德勇,王军波等. 一种新型微机械谐振腔式压力传感器研究[J]. 传感技术学报, 2009, **22**(6): 790~793
- Liu Kun, Jing Wencai, Liu Tiegeng *et al.*. Application of Fabry-Perot tunable filter nonlinearly rectification in dynamic strain sensing system [J]. *Chinese J. Sensors and Actuators*, 2008, **21**(7): 1264~1268
刘 琨,井文才,刘铁根等. F-P 可调谐光滤波器的非线性校正动态应变传感中的应用[J]. 传感技术学报, 2008, **21**(7): 1264~1268
- Rao Yunjiang, Li Hong, Zhu Tao *et al.*. High temperature strain sensor based on in-line Fabry-Perot interferometer formed by hollow-core photonic crystal fiber[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(6): 1484~1488
饶云江,黎 宏,朱 涛等. 基于空芯光子晶体光纤的法-珀干涉式高温应变传感器[J]. 中国激光, 2009, **36**(6): 1484~1488
- Jia Dagong, Liu Kun, Jing Wencai *et al.*. Method of gas detection based on intra-cavity erbium-doped fiber laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(9): 2384~2387
贾大功,刘 琨,井文才等. 基于环腔光纤激光器的气体检测方法[J]. 中国激光, 2009, **36**(9): 2384~2387
- K. Liu, W. C. Jing, G. D. Peng *et al.*. Wavelength sweep of intracavity fiber laser for low concentration gas detection [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2008, **20**(18): 1515~1517
- Liu Kun, Liu Tiegeng, Jiang Junfeng *et al.*. Research of hybrid fiber physical and chemical sensing system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(s2): 299~305
刘 琨,刘铁根,江俊峰等. 一种混合式光纤物理和化学传感系统[J]. 中国激光, 2009, **36**(s2): 299~305