可实现多点测量的波分复用光纤氢气传感系统

李建中,刘振清,雷江波,刘 俊

(中国工程物理研究院流体物理研究所,四川 绵阳 621900)

摘 要:随着实际应用的发展,核电站、飞行器发动机、气体燃料等领域均提出了进行大数量点数氢气监测的要求,但目前已有的光纤氢气传感系统仅能实现单点测量。为解决上述问题,将波分复用技术和光纤氢气传感技术相结合,设计了一种可实现多点测量的波分复用光纤氢气传感系统,阐述了该系统的基本原理、光路结构和技术优势,并从理论上分析了进行多点氢气监测的可行性。根据理论分析的结果,基于已有器材搭建了一套 4 通道的波分复用光纤氢气传感系统,同时设计了一套实验装置并利用该装置对传感系统进行了验证实验。通过对光纤链路各节点传输光光谱和传感头反射信号光功率的测试,验证了所提出的新型氢气传感系统不仅可以实现多点测量,而且各测点具有较好的独立性和性能,1 小时内测量稳定性优于±1%,测量范围达到了 0~4%,基本误差优于±2%。理论分析和实验结果对于研究大数量点数氢气测量技术及系统极具参考意义。

关键词:光纤光学; 光纤氢气传感; 钯; 波分复用; 气室

中图分类号:O436 **文献标志码**:A **DOI**:10.3788/IRLA201645.1117003

Wavelength Division Multiplexed optical fiber hydrogen sensing system for multi-point measurement

Li Jianzhong, Liu Zhenqing, Lei Jiangbo, Liu Jun

(Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: As the investigation deepened, it is necessary to detect the hydrogen concentration with large quantities of points, in the field of nuclear power station, aerocraft engine, gaseous fuel, et al, but the existing optical fiber hydrogen sensing systems are able to measure only one point at a time. A Wavelength Division Multiplexed (WDM) optical fiber hydrogen sensing system was proposed for the detection of multi-point hydrogen. The topology, principle and advantage of WDM optical fiber hydrogen sensing system were expatiated, and the technical feasibility of the novel system was introduced in detail. According to the analysis, a WDM optical fiber hydrogen sensing system was assembled with four measuring channels using the components well developed in the telecommunication industry, and an additional scheme was also developed for the hydrogen experiment. The results show that the novel optical fiber hydrogen sensing system is able to measure multi-point hydrogen simultaneously, and different measuring channels do not interfere with one another by measuring spectral evolvement and

收稿日期:2016-03-12; **修订日期**:2016-04-13

基金项目:国家自然科学基金(11272298);中国工程物理研究院科学技术发展基金(2015B0401079,2014B0101001)

作者简介:李建中(1982-),男,副研究员,硕士,主要从事光电测试及光纤传感技术方面的研究。Email:jianzhong265@163.com

power of the optical signal. The performance test shows that good stability (less than ±1% in an hour) and small error (less than ±2%) are achieved within the measuring range from 0 to 4%. The research results will provide a valuable reference for the optical fiber hydrogen sensing system to measure the hydrogen concentration with large quantities of points.

Key words: fiber optics; optical fiber hydrogen sensing; palladium; Wavelength Division Multiplexed; gas chamber

0 引 言

在核电站、航天/航空飞行器的发动机、潜艇燃料、电站汽轮发电机机组等领域,氢气及含氢材料作为关键的工业原料得到了广泛应用。氢气具有易燃易爆的特性,其浓度在空气中所占比例达到 4%~75%时即有可能引起事故[1-2],因此氢气的不确定性泄漏可能对设备和所处环境产生破坏。由于氢气的上述特性,在所有使用氢气的设备及所处场所中均需要对氢气及其浓度进行监测 [3],以便及时发现异常情况。

光纤传感技术[4-9]在氢气监测方面具有极为突出的优势,例如对被测环境干扰小、体积小、重量轻、可安装在狭小空间内、灵敏度高和环境适应性好。国外目前有较多的研究机构进行光纤氢气传感技术的研究,并在仪器研发和应用方面取得了很大的进展,但与理想的氢气传感系统的差距仍然较大。国内进行光纤氢气传感技术研究的单位较少,由于其重要性,目前已有更多的单位开始进入该领域并取得了一定的进展,但仍然较少见到商品化的产品及其实际应用。

进行氢气监测的各类应用场合均提出了多点监测的要求,例如对多个部件或在多个位置进行监测,但在国内外的相关研究中,目前已见报道的光纤氢气传感系统仅能单点测量,即 1 套系统仅能对 1 个点进行氢气监测,更多点数的监测需要通过多套系统的叠加实现。采用简单的叠加方式时,随着监测点数增多,所需整套测量系统的成本、体积和复杂度均大幅增加,甚至达到难以接受的程度(如数十点监测时),因此急需研制一种基于单套系统即可实现对待测对象或待测区域进行大数量点数监测的新型光纤氢气传感系统。

文中对微透镜型光纤氢气传感系统的工作原理进行了阐述,以此为基础,设计了一种可实现多点测量的波分复用光纤氢气传感系统,对其光路结构和实现多点测量的可行性进行了分析,并利用所设计的实验装置对该系统的多点测量能力进行了详细的验证,为在国内研究多点光纤氢气传感技术提供了参考。

1 基本原理

微透镜型光纤氢气传感系统[8]通常采用图 1 所示的光路结构,主要由光源、2×2 光纤耦合器、功率计、光纤传感头等部分组成。光源发出的直流探测光经过 2×2 光纤耦合器注入其后端的两根尾纤,其中一根尾纤不经过监测点,作为参考光直接接入光功率计,另一根尾纤将另一部分探测光功率输出至监测点处的传感头。传感头的光纤端面镀有一层钯膜,从而注入传感头的探测光会在其端面产生反射,且反射率跟氢气浓度存在一定的比例关系。经传感头反射后,载有氢气信息的反射光作为信号光反向传输至耦合器,并经由耦合器前端的尾纤输出至光功率计,由于其功率与钯膜反射率一一对应,从而可通过检测信号光的功率获取到氢气信息。

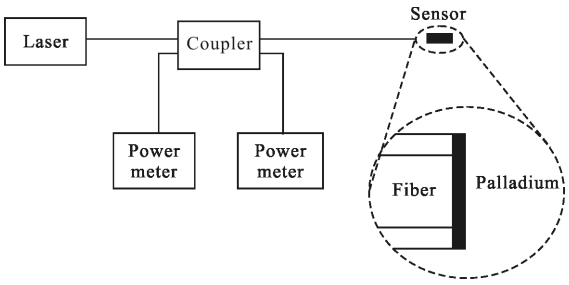

图 1 微透镜型光纤氢气传感系统的光路结构

Fig.1 Scheme of the micro mirrored optical fiber sensing system

利用钯制作光纤氢气传感头[9],是因为钯在各种气体中仅与氢气发生反应,不受其他气体的干扰。已

有研究表明,钯膜反射率是氢气浓度的非线性函数,随着氢气浓度增加反射率逐渐减少,假设无氢气时反射率为 1,则当氢气浓度为 4%时反射率降为 0.8,当氢气浓度为 10%时反射率降为 0.6[8]。

图 1 所示系统可通过信号光功率直接检测出监测点的氢气浓度,也可利用同步记录的参考光功率,两者相除并用其比值表征氢气浓度,从而可将两条光路的公共影响因素(光源不稳定、光路振动、温漂等)消除,以增强测量的准确度和可靠性。

2 波分复用光纤氢气传感系统的光路结构

图 1 所示的光纤氢气传感系统仅能实现 1 个点的测量,为满足对待测对象或待测区域进行多点监测的需求,文中将波分复用技术[10]与光纤氢气传感技术相结合,探索了一种波分复用光纤氢气传感系统,其结构如图 2 所示。图 2 中除光纤延迟线和光纤传感头外,虚线框内的全部模块可被集成在一套主机里。图 2 中各个光纤传感头放置在需要进行监测的各个位置即监测点处,主机放置在远离监测点的本地,两者间通过多段光纤延迟线进行信号传递,从而使测量人员远离通常较为危险的监测环境。

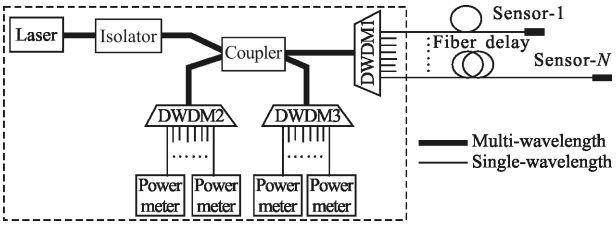

图 2 波分复用光纤氢气传感系统的光路结构

Fig.2 Scheme of the wavelength division multiplexed optical fiber hydrogen sensing system

宽带光源输出谱宽和功率均足够大的探测光,通过隔离器后注入 2×2 光纤耦合器后端的两根尾纤,并将其第一根尾纤接入密集波分复用器(Dense Wavelength Division Multiplexer,DWDM)。由于 DWDM 具有波长分割和窄带滤波的功能(N 通道 DWDM 相当于 N 个不同中心波长的光纤窄带滤波器),因此输入 DWDM1 的一路宽谱探测光被分割(解复用)成波长不同的多路窄带探测光,且各路探测光的中心波长为 DWDM1 各通道的中心波长,同时光路总数等于 DWDM1 的通道数 N。N 路窄带探测光通过 N 根光纤延迟线传输至不同位置处的 N 个光纤传感头,并在所处位置监测氢气及其浓度。探测光被各个光纤传感头反射,且反射率与传感头所处位置的氢气浓度成一定的比例,从而反射回原光路的激光可作为信号光,用于后续处理得到氢气信息。N 路信号光经过 DWDM1 后被重新复用成 1 路信号光,经过 2×2 光纤耦合器后进入 DWDM2,再次被分割成 N 路信号光。N 路信号光分别进入相应的功率计,对各自检测得到的功率进行处理,即可得到各个位置的氢气数据。

2×2 光纤耦合器后端的第二根尾纤不经过监测点,直接将一部分探测光注入 DWDM3 并被分割成波长不同的 N 路窄带激光,作为 N 路参考光直接接入光功率计,从而可以通过相除处理的方法将两条光路的公共影响因素消除。

图 2 中的 3 个 DWDM 具有相同的通道数量、各通道中心波长、通道带宽等参数,从而探测光、信号光、参考光等三种光信号各自包含的 N 路激光可以通过 DWDM 通道编号(对应不同中心波长)一一对应,即某路探测光与具有相同波长的一路信号光和一路参考光对应。此外,由于 DWDM 的窄带滤波功能,每种光信号包含的 N 路激光均为具有不同中心波长的窄带光,在光谱域上相互之间并无交叠部分,从而各个测量通道不会相互干扰。

图 2 所示的波分复用光纤氢气传感系统在多点测量方面具有较为突出的优势:仅仅通过增加 3 个 DWDM,便可采用一套系统实现多点测量,同时测点数量可随着 DWDM 通道数量的增加而增加,易于调整;DWDM 为光纤通信领域的常用器件,可有 1×4(1 路分为 4 路,后同)、1×8、1×16、1×32 等多种规格,技术成熟,价格便宜;N 个传感头共用 1 台主机,共享所需器材,大幅度节省了器材数量、系统体积和成本,监测点数量越多,节省幅度越大;激光器为光纤氢气传感系统中成本占比最高的器材,该系统利用 DWDM 的波长分割功能将一个宽谱激光器输出的激光分成多路(具体数量等于 DWDM 通道数),起到了多台激光器同样的效果。

3 氢气传感实验装置及实验流程

设计并搭建了一套实验装置,用于进行氢气传

感实验和传感系统性能标定,其结构如图 3 所示,包含光纤氢气传感系统、标准气、气室、流量计、氢气分析仪等，其中光纤氢气传感系统和传感头之间通过普通光纤进行连接,气室各接口、氢气分析仪、流量计、气瓶等模块之间通过密封通气管进行连接。

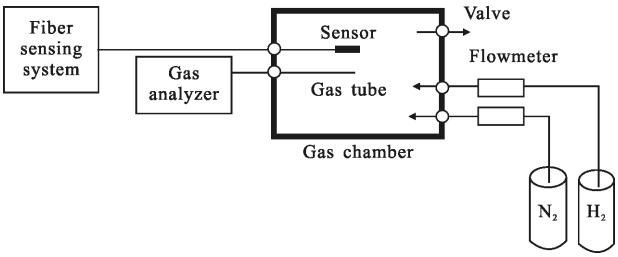

图 3 光纤氢气传感实验装置

Fig.3 Experimental setup for the optical fiber hydrogen sensing

气室为一个密封容器，氢气和氮气可通过密封通气管充入气室，以配置不同浓度的氢气作为待测源。多个光纤氢气传感头通过特制接口伸入气室内部并加以固定,以感应气室内部的氢气信息。流量计用于初步校准和控制注入气室的各种气体的具体数量，氢气分析仪利用标准电化学传感器对气室中的氢气浓度进行精确测定并提供标定光纤传感器的标准数据。

在实验测试时,具体操作流程如下所述:打开气室阀门,使用氮气充分冲洗气室,排出杂散气体;关闭气室阀门，用气瓶减压阀和流量计控制氢气瓶和氮气瓶的通气流量，根据测试需要在气室中配置不同浓度的待测氢气；利用氢气分析仪得到气室中精确的氢气浓度;光纤传感头感应到氢气信息,通过数据处理得到传感系统在每个测量点的响应值，再根据氢气分析仪得到的标准值对所测数据进行标定。

4 实验结果

利用 EDFA 放大器输出的自发辐射光作为宽带光源,并使用已有的 4 通道 DWDM(通道间隔1.6 nm,−0.5 dB 带宽 0.5 nm,4 个通道 Ch1~Ch4 的中心波长依次为 1 549.32 nm、1 550.92 nm、1 552.52 nm 和 1 554.13 nm)，搭建了图 2 所示的 4 通道波分复用光纤氢气传感系统。设计并加工了一批图 4 所示的光纤氢气传感头(图 4(a))和测试气室(图 4(b)),对 4 通道波分复用光纤氢气传感系统的多点测量能力进行了探索和验证实验，并利用前期研制的单点光纤氢气传感系统(结构如图 1 所示,已经过标定和实际应用)进行对比实验。各路参考光和信号光的功率可利用功率计控制软件实时显示并存储在电脑上，便于进行后续处理和分析。

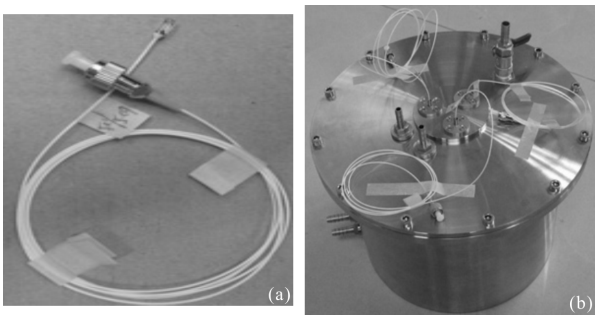

图 4 光纤氢气传感头和测试气室

Fig.4 Appearance of the optical fiber hydrogen sensing probe and gas chamber

EDFA 输出 116 mW 的自发辐射 (宽谱) 探测光并传输至 2×2 耦合器，将耦合器输出尾纤接入光谱仪(为避免损坏光谱仪,使用可调衰减器对其功率进行衰减后再接入光谱仪),得到 DWDM1 输入宽谱探测光在 1 550 附近的光谱如图 5 所示。

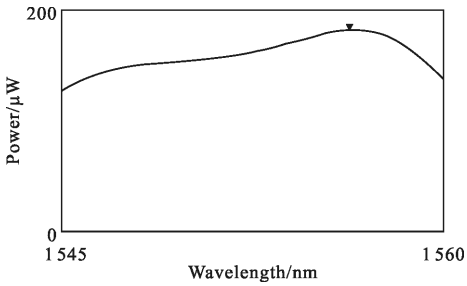

图 5 DWDM1 输入信号的光谱

Fig.5 Spectrum of the DWDM1′s input signal

图 5 所示宽谱探测光经过 DWDM1 后,将 DWDM1 的 4 根输出尾纤 Ch1~Ch4 依次接入光谱仪,其光谱分别如图 6(a)~6(c)所示,可见由于 DWDM 的波长分割和光谱域窄带滤波功能,该路宽谱探测光被分割成中心波长依次为1 549.32 nm、1 550.92 nm、1 552.52 nm 和 1 554.13 nm 的 4 路窄带探测光。经功率计检测，图 6 所示 4 路窄带探测光的功率依次为 3.659 mW、3.519 mW、3.515 mW 和 3.689 mW,同时 −0.5 dB 谱宽均为 0.5 nm,各自间隔 1.6 nm,与 DWDM1 的参数相对应。此外,从图 6 中可看出,一根尾纤里仅

传输一个波长的光信号,彼此间不会产生干扰。

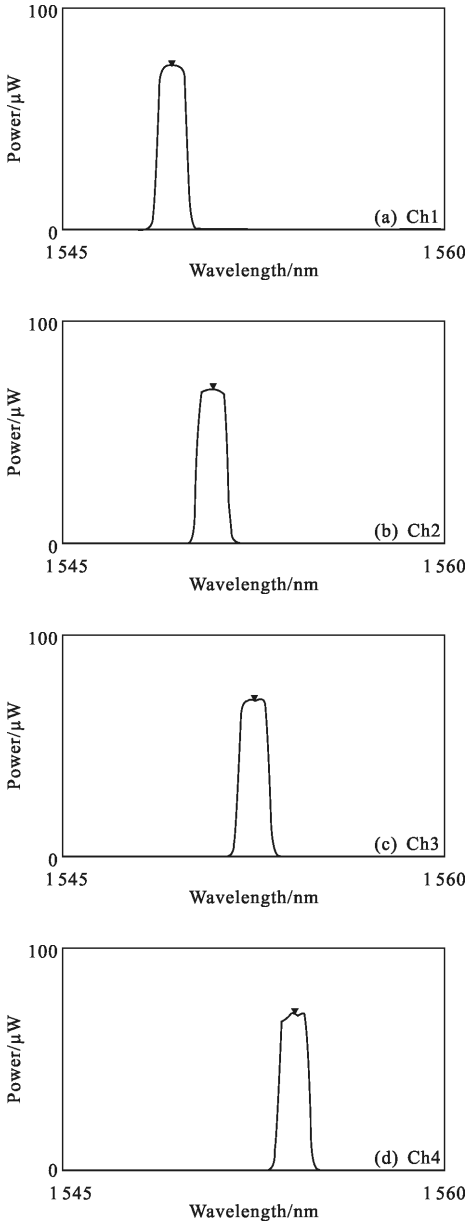

图 6 DWDM1 输出信号的光谱

Fig.6 Spectrum of the DWDM1′s output signal

4 路窄带探测光通过 4 根光纤延迟线传输至不同位置处的 4 个光纤传感头，被各个光纤传感头的反射膜反射,形成 4 路信号光(其光谱与图 6 所示一致) 并反向传输回本地光路。4 路信号光反向经过 DWDM1 后被重新复用成 1 路信号光,其光谱如图 7 所示。与图 5 相比所示的宽谱探测光相比,图 7 所示的信号光光谱与之存在较大差异，虽然 1 路激光里同样包含了 4 个波长的激光信息，但图 7 中 4 路信号光在光谱域中是相互分开的,各路光的−0.5 dB 谱宽均为 0.5 nm 且各自间隔 1.6 nm (与 DWDM1 的参数相吻合),并未相互干扰。

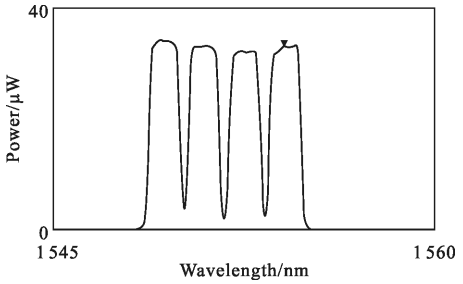

图 7 经过 DWDM1 重新复用后的信号光光谱

Fig.7 Spectrum of the sensing signal multiplexed by DMDM1

被 DWDM1 重新复用成 1 路的信号光通过 2×2 耦合器传输至 DWDM2，经过再次波长分割和光谱域窄带滤波后,图 7 所示的 4 个传感头反射回的 4 路信号光(被 DWDM1 合成 1 路)被 DWDM2 再次分隔开,并通过其 4 根尾纤分别输出。4 路信号光的光谱与图 6 所示一致，在光谱域中同样是完全分隔开的,且一根尾纤里仅传输一个波长的光信号,不会产生干扰。

综上所述，根据图 5~图 7 所示的系统各节点的光谱信息,多路激光经过 DWDM 的复用(合束)和解复用(分束,即波长分割和光谱域窄带滤波)功能,在图 2 所示的波分复用光纤氢气传感系统中无相互干扰的进行功率传输和氢气信息感应,因此,该系统用于氢气的多点测量在技术上完全可行。此外,各路信号光分别通过各自的光功率计进行功率监测,对其数据分别进行处理后便可得到各个测量点的氢气信息。

利用图 3 所示的实验方案进行实际的氢气传感实验，并首先测试气室中未通入氢气时传感头返回光功率的稳定性,即测量零值稳定性,该指标可综合反映激光功率、耦合器分束比、DWDM 各通道插损、钯膜反射率等关键指标在环境因素(温度和振动)干扰下的稳定度。对 4 通道波分复用光纤氢气传感系统各测量通道的信号光功率 $P_{sig-i}(i=1,2,3,4)$连续采集 1 h 的数据,并在该段时间内同步的对参考光功率 $P_{ref-i}(i=1,2,3,4)$连续采集数据。系统某个测量通道的信号光功率 R_{sig-1} 随时间的变化趋势如图 8 所示,信号光实时功率与该段时间内平均功率的差异值占平均功率值的比例 R_{sig-1}(百分比) 如图 9 所示,同时经计算可得图 9 所示数据的标准偏差为 0.33%,最大

偏差为-0.79%。利用该测量通道参考光功率 P_{ref-1} 的数据计算比值 P_{sig-1}/P_{ref-1}，实时比值与该段时间内平均比值的差异值占平均比值的比例 $R_{sig-1/ref-1}$ (百分比)如图 10 所示，同时经计算可得图 10 所示数据的标

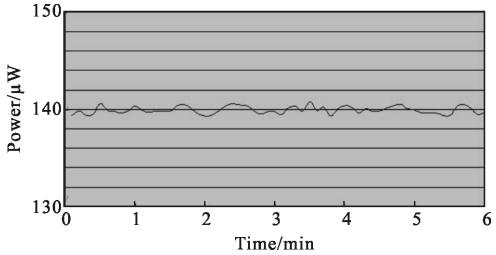

图 8 1 小时内信号光功率随时间的变化趋势

Fig.8 Change of optical power of the sensing signal vs time in an hour

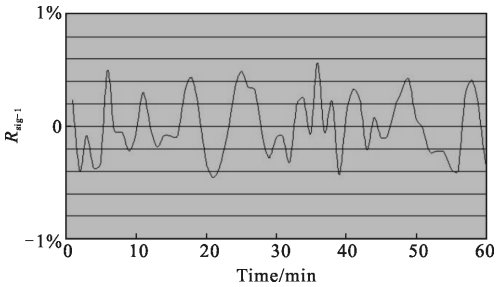

图 9 1 小时信号光实时功率与平均功率的差异

Fig.9 Differences between real-time power and average power of the sensing signal in an hour

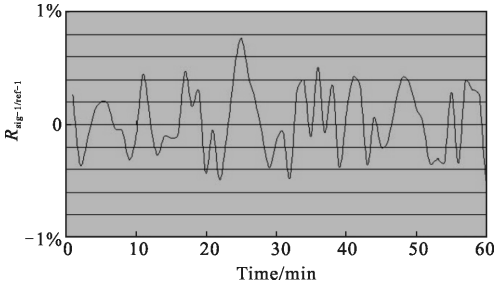

图 10 1 小时内信号光功率和参考光功率的实时比值与平均比值的差异

Fig.10 Differences between real-time ratio and average ratio of the signal power to referenced power in an hour

准偏差为 0.27%，最大偏差为 0.56%。从图 9 和图 10 可知，通过相除处理的方法将两条光路的公共影响因素消除后，P_{sig}/P_{ref} 的测量稳定性优于 P_{sig} 的稳定性，更适宜于用于氢气监测。此外，经过实验验证，4 通道波分复用光纤氢气传感系统其余三个测量通道的测试数据与该通道基本一致，测量稳定性均优于±1%。

将 4 通道波分复用光纤氢气传感系统的两个传感头放入气室，单点光纤氢气传感系统的 1 个传感头作为对比件也放入气室，并在气室中充入 2%的氢气，进行验证实验。将 DWDM1 的两根尾纤(对应测量通道 Ch1 和 Ch3)连接接入气室中的两个传感头，另外两根尾纤(对应测量通道 Ch2 和 Ch4)连接放置在空气(经检测氢气含量为零)中的两个传感头，气室无氢气和充入 2%氢气两种状态下各个传感头的信号光功率 P_{sig} 如表 1 所示。

表 1 无氢气和通入 2%氢气时的测试数据

Tab.1 Test data for the detection of 0 and 2% hydrogen

Sensor number	P_{sig}(no H_2) /μW	P_{sig}(2% H_2) /μW	Fluctuation of P_{sig}
Ch1(in the gas chamber)	139.386	122.269	-12.28%
Ch2(in the air)	135.727	135.216	-0.38%
Ch3(in the gas chamber)	131.918	116.011	-12.06%
Ch4(in the air)	138.909	138.987	0.06%
Single-point optical fiber hydrogen sensing system (in the gas chamber)	936.806	826.169	-11.81%

由表 1 可知，气室中未充入氢气时，4 通道波分复用光纤氢气传感系统的 4 个传感头反射回的信号光功率基本一致。当气室中充入 2%的氢气时，4 通道波分复用光纤氢气传感系统测量通道 Ch1 和 Ch3 的信号光功率大幅度减小，变化比例为 12.28%和 12.06%，而测量通道 Ch2 和 Ch4 的信号光功率并未出现较大幅度变化，仅有小于测量稳定性±1%的正常波动，表明 Ch2 和 Ch4 并未受到 Ch1 和 Ch3 的干扰。作为对比件，单点光纤氢气传感系统的信号光功率也大幅度减小，变化比例为 11.81%，与波分复用光纤氢气传感系统 Ch1 和 Ch3 的检测值基本一致，其差异(3.98%和 2.12%)来源于两套系统各自的测量误差。表 1 所示实验结果验证了波分复用光纤氢气传感系统不仅可以实现多通道测量，而且各通道具有测量独立性，不会互相干扰。

为测试波分复用光纤氢气传感系统的测量范围和基本误差，使用图 3 所述的实验方案在 0~4%(当浓度超出 4%时，已可认为处于非常危险的状态，需要报警并进行相关处理)范围内配置了多个氢气浓度进行

测试,且每个浓度测试 3 次,其测量通道 Ch1 的测试结果如表 2 所示, 其余 3 个通道的数据与之基本一致。表 2 中,Hydrogen Concentration 指氢气分析仪利用标准电化学氢气传感器检测得到的气室内标准氢气浓度;Standard Data 表示针对氢气分析仪获得的标准氢气浓度,波分复用光纤氢气传感系统经过标定得到的对应数值, 表征传感系统的标准结果;Testing Order 为测试编号;P_{sig}/P_{ref} 为波分复用光纤氢气传感系统检测得到的信号光功率 P_{sig}、参考光功率 P_{ref} 以及两者的比值,表征该系统在此次实验中对气室内氢气浓度的实时检测值, 同时对比值做了归一化处理,从而可以直接表示实时氢气浓度值下的系统检测值占无氢气时系统测量零值的百分比;Error 表示各次检测结果与标准结果的百分比误差。

表 2 0~4%量程范围内的传感系统测试数据

Tab.2 Test data of the sensing system within the measuring range from 0 to 4%

Hydrogen concentration	Standard data	Testing order	P_{sig}/P_{ref}	Error
0%	1	1	1	–
		1	0.993 5	0.52%
0.3%	0.988 4	2	0.976 3	–1.22%
		3	0.995 4	0.71%
		1	0.925 6	–1.30%
0.93%	0.937 8	2	0.939 6	0.19%
		3	0.948 1	1.10%
		1	0.887 9	1.17%
1.96%	0.877 6	2	0.862 6	–1.71%
		3	0.882 2	0.52%
		1	0.830 5	0.61%
3.47%	0.825 5	2	0.822 1	–0.41%
		3	0.823 8	–0.21%
		1	0.809 5	–0.54%
4.05%	0.812 9	2	0.815 5	0.20%
		3	0.813 8	–0.01%

从表 2 中可以看出, 系统可以在 0~4%范围内实现对氢气的检测,且各点测量误差均小于 2%。此外,4.05%氢气浓度时系统检测值占测量零值的 81.29%,与已见报道的研究“无氢气的时候假设反射率为 1,则当氢气浓度为 4%时反射率降为 0.8”相吻合。

5 结 论

文中对微透镜型光纤氢气传感系统的工作原理进行了说明, 以此为基础提出了一种波分复用光纤氢气传感方案, 并从理论上分析了该方案进行多点氢气监测的技术可行性。文中还阐述了一种用于进行氢气传感的实验装置,详细介绍了其总体结构、所需器材和实验操作流程, 为检测各类型氢气传感器的性能提供了参考。

依据理论分析的结果,设计并基于已有器材搭建了一套 4 通道波分复用光纤氢气传感系统,同时利用所设计的氢气传感实验装置进行了验证实验,详细测试光纤链路各节点的传输光光谱变化、测量稳定性、测量范围、基本误差等指标。实验结果验证了波分复用光纤氢气传感系统不仅可以实现多通道的测量,而且各通道具有较好的测量性能和测量独立性。

参考文献:

[1] Sumida S, Okazaki S, Asakura S, et al. Distributed hydrogen determination with fiber optic sensor [J]. ***Sensors and Actuators B: Chemical***, 2005, 108(1–2): 508–514.

[2] Zhou Feng, Qiu Sunjie, Luo Wei, et al. Design of reflective all-fiber hydrogen sensor [J]. ***Acta Optica Sinica***, 2013, 33 (11): 1106003. (in Chinese)
周峰, 邱孙杰, 罗炜, 等. 一种反射型全光纤氢气传感器的设计[J]. 光学学报, 2013, 33(11): 1106003.

[3] Sekhar P K, Zhou Jie, Post M B, et al. Independent testing and validation of prototype hydrogen sensors [J]. ***International Journal of Hydrogen Energy***, 2014, 39: 4657–4663.

[4] Bevenot X, Trouillet A, Veillas C, et al. Hydrogen leak detection using an optical fibre sensor for aerospace applications[J]. ***Sensors and Actuators B***, 2000, 67: 57–67.

[5] Li Qiang, Wang Zhi, Huang Zejia, et al. Multi-parameters SMS optical fiber sensing by employing SCBSS signal processing technique [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2014, 43(10): 3383–3387. (in Chinese)
李强, 王智, 黄泽铗, 等. 基于 SCBSS 信号处理技术的 SMS 多参量光纤传感系统 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43 (10): 3383–3387.

[6] Li Jianzhong, Li Zeren, Zhang Denghong,et al. Open-loop detection of fiber optic current transducer [J]. ***Infrared and***

Laser Engineering, 2014, 43(5): 1648-1653. (in Chinese)
李建中, 李泽仁, 张登洪, 等. 基于开环检测系统的全光纤电流互感器研究 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(5): 1648-1653.

[7] Guan Xiangyi, Zhao Lili, Zhu Lin, et al. Application of optical fiber sensors in measurement of belt transmission parameters [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2013, 42 (11): 3127-3131. (in Chinese)
关祥毅, 赵丽丽, 朱琳, 等. 光纤传感器在带传动参数测量中的应用 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(11): 3127-3131.

[8] Sun Yan. Research on micro-mirror optical fiber hdrogen sensor [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2010: 15-18. (in Chinese)
孙艳. 微透镜型光纤氢气传感器的实验研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010: 15-18.

[9] Zhang Yi, Zhuang Zhi, Li Qisheng, et al. Temperature compensation type optical fiber hydrogen concentration measurement technique [J]. ***Chinese Journal of Scientific Instrument***, 2012, 33(7): 1573-1578. (in Chinese)
张毅, 庄志, 黎启胜, 等. 一种温度补偿式光纤氢气检测技术[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(7): 1573-1578.

[10] Li Jianzhong, Liu Shouxian, Liu Jun, et al. Research on multiplex technology and experiment of multiplexed photonic doppler velocimetry[J]. ***Chinese Journal of Lasers***, 2014, 41 (11): 1105009. (in Chinese)
李建中, 刘寿先, 刘俊, 等. 多路复用光子多普勒测速复用方案分析及实验研究[J].中国激光, 2014, 41(11): 1105009.