

基于自发拉曼散射线成像的光学诊断系统开发

程 鹏¹, 李晓冰², 王伟东³, 蒋俊光³, 池俊成⁴, 李 国⁴, 郭英男¹

(1. 吉林大学 汽车仿真与控制国家重点实验室,长春 130022; 2. 长春奥普光电技术股份有限公司,长春 130031; 3. 中国科学院长春应用化学研究所,长春 130011; 4. 中国人民解放军装甲兵技术学院 车辆工程系,长春 130052)

摘要: 开发了一套基于激光自发拉曼散射线成像的光学诊断系统。设计了一种具有2级串联光学环腔的激光脉冲展宽外整形光路,将激光能量为400 mJ、峰值功率为0.4 GW和半高宽为6.5 ns的尖脉冲变为120 mJ、小于0.02 GW、大于35 ns的宽低脉冲,有效地避免了气体裂解、光学元件和石英窗口损坏及可燃气体点燃等现象的发生,提高了弱的拉曼散射信噪比。设计的扩束器和缩束器可以将8 mm直径的原始激光在10 m后的激发区内形成1 mm直径的平行激发光源。设计了一套组合消色差透镜组,可以最大限度地将66 mm长的散射光束缩小10倍变为6.6 mm高的实像,与ICCD的最大纵向高度匹配。使用ICCD内配的DDGTM实现了激光器与ICCD之间的时序同步。通过多通道气体拉曼光谱实验验证了该系统的实用性。该系统可应用在光学发动机中混合气浓度场和温度场的定量测定。

关键词: 光学诊断; 自发拉曼散射; 线成像; 激光脉冲整形; 气体

中图分类号: TK314 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2012)Sup. 1-0156-05

Development of an optical diagnostic system based on line imaging of spontaneous Raman-scattering light

CHENG Peng¹, LI Xiao-bing², WANG Wei-dong³, JIANG Jun-guang³,
CHI Jun-cheng⁴, LI Guo⁴, GUO Ying-nan¹

(1. State Key Laboratory of Automobile Simulation and Control, Jilin University, Changchun 130022, China; 2. Changchun UP Optotech Co. Ltd., Changchun 130031, China; 3. Changchun Institute of Applied Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130011, China; 4. College of Automotive Engineering, Academy of Armored Force Technology of PL A, Changchun 130052)

Abstract: An optical diagnostic system based on line imaging of spontaneous Raman-scattering (SRS) light has been developed. Designed a nanosecond-long laser pulse external face lifting optics by means of two series multiple optical ring-cavities converts a 400 mJ energy, 0.4 GW peak power, 6.5 ns-long input laser pulse into an approximately 120 mJ, 0.02 GW, 35 ns-long (FWHM) output laser pulse. In laser spontaneous Raman scattering excitation gas experiments, it could avoid effectively strong laser induced plasma spark and optical components/window damage in the focused beam path and laser igniting flammable gas, so that it improved substantially the signal to noise ratio of the weak signal levels generated by the Raman effect. Designed a beam expanding device and a beam shrinking device

收稿日期: 2011-12-08.

基金项目: “973”国家重点基础研究发展计划项目(2007CB210004);吉林省科技发展计划项目(20090566).

作者简介: 程鹏(1964-),男,博士研究生,研究员. 研究方向:内燃机测试技术. E-mail: chengpeng@jlu.edu.cn

converts 8 mm diameter original laser into 1 mm diameter parallel laser. Designed composite achromatic lens converts 66 mm long scattering light into 6.6 mm high real image to match with the ICCD vertical height at maximum limit. Using the DDG™ in ICCD carries out the timing synchronization between laser and ICCD. The experiment of gas Raman spectrum with multiple channel tests and verifies the system practicability. Furthermore, the system can be applied to quantitative measurement of density and temperature of residual and fresh charge mixing in an optical engine using spontaneous Raman scattering method.

Key words: optical diagnostic; spontaneous Raman scattering; line imaging; laser pulse face lifting; gas

0 引言

基于激光的燃烧诊断技术具有非接触性和时空分辨的能力,已被广泛应用于对各种复杂环境下燃烧过程的研究中^[1-3]。但目前国内都是先将激光束用聚焦镜聚焦形成束腰(长 1 mm 左右),并将其放于被探测区域上,然后再由光学收集系统将该束腰上的拉曼散射光收集到光谱仪中色散,最后成像在 CCD 上被采集记录。显然,如果想探测其它区域上的物理信息,必须同时移动聚焦镜和光收集系统的位置,或者移动燃烧装置的位置,这就造成了在具有湍流、浓度和温度梯度变化的燃烧场中多点检测非实时性问题。

另外,在燃烧过程的 SRS 实验中,一般采用脉冲激光作为激发光源,一方面是因为脉冲激光输出能量较大,另一方面需与具有时序关系的燃烧系统(如发动机)进行工作循环上的同步,具有循环分辨能力,而且不影响整体燃烧过程。可是气态的 SRS 信号非常弱(约为激发光强的 10^{-12}),为了得到高质量的 SRS 数据必须提高脉冲激光的能量来改善系统的信噪比。但是过高的脉冲激光会造成聚焦区域上的气体裂解、激光束路径上的光学元件和石英密封窗口的损坏以及直接点燃可燃待测气体^[4-6]。

针对以上两方面的问题,本文开发了一套激光脉冲整形系统,它在保证激光基本能量不变的前提下,将原始高能尖峰脉冲展宽成宽而低的脉冲,并形成约 1 mm 直径、66 mm 长的激发线光源。又相应地设计了一套线光学成像收集系统。利用一台调 Q 的 Nd:YAG 激光器和一套成像光谱仪加 ICCD 系统在自制的气体样品池中完成了基于线成像的激光拉曼光谱检测混合气体浓度的实验,为在实际光学发动机中利用 SRS 技术实现缸内浓度和温度定量测量提供前期基础。

1 光学系统设计

1.1 气体 SRS 测试系统组成

图 1 示出了利用激光诱导气体 SRS 光学诊断系统的光学布置图。

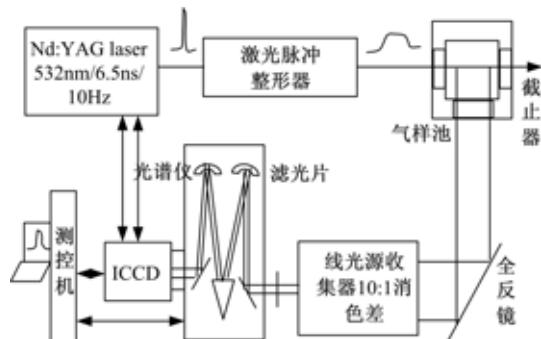


图 1 基于激光自发拉曼散射线成像的光学诊断系统框图

Fig. 1 The SRS line image optical diagnostic system setup

SRS 光源为白俄罗斯 LOTIS LII 公司的 LS-2137U 型调 Q 的闪光灯泵浦 Nd: YAG 激光器。它可以分别输出 1064、532、355 nm 和 266 nm 四种波长的脉冲激光。虽然 SRS 信号强度与波长成反比,但为避免燃烧气体中紫外波段所产生的激光感生荧光效应干扰,本实验选用 532 nm 为激发波长。当泵浦灯能在 45 J 时,激光器输出较稳定的 400 mJ 能量、峰值功率约 0.4 GW、半高宽(Full width at half maximum intensity, FWHM)为 6.5 ns 的尖脉冲激光,光束发散角小于 0.8 mrad。所设计的激光脉冲整形器主要由激光扩束器、激光脉冲展宽器和激光缩束器组成。所设计的气样池允许充入 5 个大气压的混合气体,有激光出入射石英窗口和散射光输出石英窗口。使用全反镜的目的是完全模拟实际光学发动机上的光路形式。光谱仪为美国 Bruker 公司的 Surespectrum 500 is/sm 型成像光谱仪,主要特点是它可以按纵向空间位置进行复合光的色散,

即光谱仪狭缝纵向位置与 ICCD 像面的纵向位置一一对应,允许多通道光谱信号采集。ICCD 为英国 Andor 公司的 iStar DH 720-18F-03 增强型 CCD,其内部配有数字延迟发生器 DDGTM,CCD 传感器尺寸为 256 像素(纵向)×1024 像素(横向),最小像素为 $26 \mu\text{m} \times 26 \mu\text{m}$,它与光谱仪联合使用。测控计算机完成三台设备间的时序控制及采集分析光谱信号。

1.2 激光脉冲展宽整形光路设计

设计了一套纳米级激光脉冲展宽整形系统,如图 2 所示。它可以将 FWHM 为 6.5 ns,峰值功率为 0.4 GW 的激光脉冲展宽整形到大于 35 ns,小于 0.02 GW 的宽低幅值脉冲,整形前后面积相同,保持能量不变,整个光程($L_1 + L_2$)约 10 m。

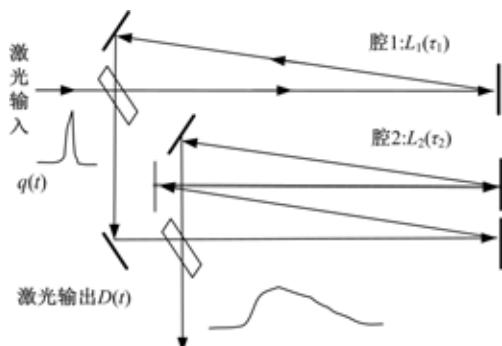


图 2 二级激光脉冲展宽器

Fig. 2 Two series laser pulse stretching

原理模型如图 3 所示,由 45° 分束镜、 45° 入射反射镜和 0° 入射反射镜组成光学环腔。

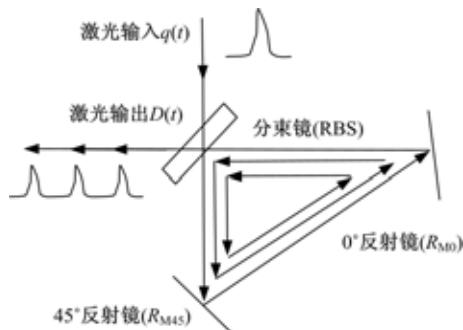


图 3 激光脉冲展宽原理

Fig. 3 Schematic diagram of laser pulse stretching

当一个原始脉冲激光 $q(t)$ 经过分束比为 R_{BS} 的分束镜时,一部分脉冲激光被反射输出,另一部分进入光学环腔进行腔内循环。每次循环都有部分输出和部分反射回腔内,这样在输出得到许多被时间延迟的低幅值的若干小脉冲激光 $D(t)$ 。为了进一步将这些小峰值脉冲合并成一个脉冲,必

须经过二个或更多的光学环腔。如果原始激光脉冲功率为 1 J,则需要 3 个光学环腔。经过数值模拟优化设计和实际测量结果可知,分束比 R_{BS} 可在 $30\% \sim 50\%$ 内选取,腔间的延迟时间 τ_{i+1}/τ_i 为 2, 第一腔的 τ_1 应取原始激光的 FWHM。由于镜片尺寸和质量以及手工调整激光合束等因素影响,原激光能量为 400 mJ 时,经过激光脉冲整形器后已变为 160 mJ,但它足以激发出气体的拉曼光谱。

1.3 线光源收集器的设计

由于所用 CCD 的最大纵向尺寸为 6.6 mm,所以设计了一套消色差物镜组光学收集系统,如图 4 所示。其物像缩小倍数为 10 : 1,可以将 66 mm 长的光线等比例地变为 6.6 mm 的实像。其畸变小于 1% ,前工作距为 600 mm,物镜口径为 80 mm,可最大效率地接受散射光,相对口径比为 1 : 8,与所用光谱仪相匹配。



图 4 消色差物镜组光学收集系统光路原理图

Fig. 4 Schematic diagram of composite achromatic lens light collection system

2 光谱仪、ICCD 和激光器参数设置

2.1 系统参数选取原则

如果 CCD 有效横向宽度为 W_{det} ,倒线色散为 $\frac{d\lambda}{dx}$,待测物质带宽为 $\Delta\lambda$,那么, $W_{det} \frac{d\lambda}{dx} \geqslant \Delta\lambda$ 。

由于待测物质从 CO_2 到 H_2O 的带宽为 89.5 nm,因此,选取 $\Delta\lambda=110 \text{ nm}$,必须使用 150 g/mm (波长范围 320 nm)光栅可以满足全检测要求。

如果入射狭缝宽度为 W_{slit} ,光谱仪横向放大倍数 M_{spec} ,最大光谱分辨率为 ∂_λ ,那么,
 $W_{slit} M_{spec} \frac{d\lambda}{dx} \leqslant \partial_\lambda$ 。因为 CO_2 需要最小的光谱分辨率 $\partial_\lambda = 3.4 \text{ nm}$,对于使用 150 g/mm 光栅时,狭缝宽度 $W_{slit} = 200 \mu\text{m}$ 时,可以满足测试精度要求。

如果空间分辨为 Δx ,收集光学的放大倍数为 M ,那么, $W_{slit} = M\Delta x$,可见,为了能够分辨出 CO_2 的双峰,空间分辨 $\Delta x=2 \text{ mm}$ 。为了获得更小的空间分辨,就必须选择更小的狭缝宽度,但会使拉曼信号强度更小。

在本实验中, $W_{\text{det}} = 18 \text{ mm}$, $M = 0.1$, $M_{\text{spec}} = 1$, $\Delta x = 2 \text{ mm}$, $\Delta \lambda = 110 \text{ nm}$, $\partial_{\lambda} = 3.4 \text{ nm}$ 。另外, 如果被成像光束的长度为 l , CCD 的纵向高度为 h_{det} , 那么, $\frac{h_{\text{det}}}{M} \geq M_{\text{spec}} \cdot l$, 因此, 可能最大的成像散射光束的长度为 66.56 mm。

2.2 ICCD 和激光器之间的同步

在 SRS 实验中, 为了准确地捕获到每个激光脉冲激发气体后所产生的自发拉曼散射光, 就必须保证激光器与 ICCD 采集系统的同步。在所用 ICCD 内配备有数字延迟发生器 DDGTM, 首先将 ICCD 和激光器分别设置到外触发方式, 后用激光器的泵浦灯同步输出触发 ICCD, 将 ICCD 中 DDGTM 的 OUTPUT A 信号触发激光器的 Q-开关。OUTPUT A 延迟时间设置为 140 μs, 为激光器最佳的 Q 开关时间。经实验, CCD 门延迟时间为 140.14 μs, 门脉宽设置到 40 ns。图 5 示出了测试系统同步时序图。

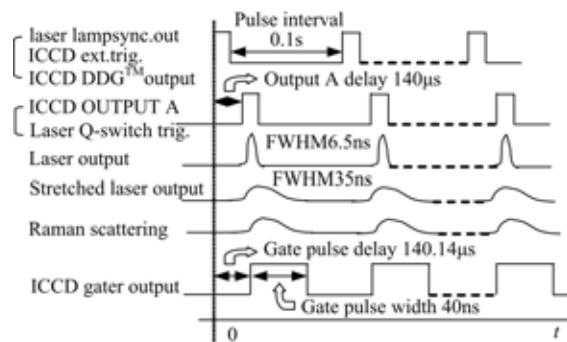


图 5 测试系统同步时序图

Fig. 5 Timing chart of the data acquisition

2.3 ICCD 多通道设置

ICCD 的纵向高度为 6.656 mm, 考虑到该系统的 SRS 信号的信噪比及最大化空间分辨能力, 将其纵向分为 10 个通道。即将被探测区域上约 66 mm 按 6.6 mm 区分成 10 个小的探测区域, 在 CCD 上可以分别读取每个区域长度上的光谱信息, 实现线成像的气体 SRS 实验。通道数的增多意味着信噪比和信号强度的下降, 与具体的实验条件有关。提高信噪比, 细分探测区域将是系统开发的后续工作之一。

3 实验结果及分析

3.1 相同压力不同混合气质量分数的多通道光谱数据

在气样池中充入 0.3 MPa 的不同质量分数

的 CO₂ 和 N₂ 混合气体。图 6 示出了 $w(\text{CO}_2) = 5\%$ 和 $w(\text{N}_2) = 95\%$ 两种气体混合时的原始三维拉曼光谱曲线。表 1 示出了在该压力下, 两种气体峰面积的标准偏差 $A_{\text{STD-CO}_2}$ 和 $A_{\text{STD-N}_2}$ 随不同质量分数的变化情况。每个峰值面积的标准偏差都是在 10 个探测区域上的统计数据。

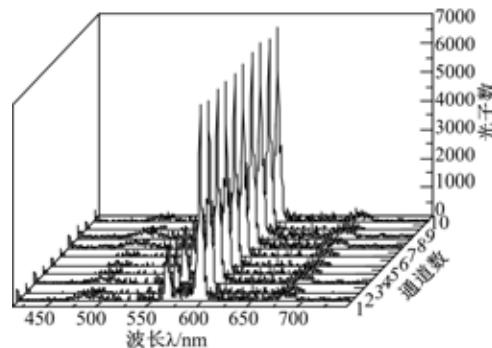


图 6 三维拉曼光谱曲线

Fig. 6 Three dimension Raman spectrum

可见, 随着质量分数的增加, 每种物质的 SRS 光谱的峰面积的标准偏差逐渐减小, 精确度随之提高。将 66 mm 长的探测区分为每个 6 mm 左右的 10 个等间距的区域进行 SRS 光谱采集时, 通过峰值值计算出的质量分数可以达到 2% 的测量精度。

表 1 0.3 MPa、不同质量分数的 2 种气体 SRS 光谱峰面积的标准偏差

Table 1 Standard deviation of SRS spectrum area of CO₂ and N₂ at 0.3 MPa

$w(\text{CO}_2)/\%$	0	5	13	25	30	100
$A_{\text{STD-CO}_2}$ 值	0	1.95	1.84	1.63	1.56	0.71
$w(\text{N}_2)/\%$	100	95	87	75	70	0
$A_{\text{STD-N}_2}$ 值	0.72	0.76	0.80	0.83	0.88	0

3.2 不同压力、相同混合气质量分数的多通道光谱数据

在气样池中充入 $w(\text{CO}_2) = 5\%$ 和 $w(\text{N}_2) = 95\%$ 两种气体, 进行 5 种不同压力的 SRS 实验。表 2 示出了两种气体峰面积的标准偏差 $A_{\text{STD-CO}_2}$ 和 $A_{\text{STD-N}_2}$ 随不同压力变化情况。每个峰值面积的标准偏差都是在 10 个区域上的统计数据。

可见, 随着压力的减低, 每种物质的 SRS 光谱的峰面积的标准偏差逐渐增大, 精确度随之下降。但低于 1 个大气压时也可以测量到气体物质的 SRS 光谱数据。如何进一步提高该系统的精确度是今后的主要研究内容。

表 2 $w(\text{CO}_2) = 5\%、w(\text{N}_2) = 95\%$ 不同压力时 2 种气体 SRS 光谱峰面积的标准偏差

Table 2 Standard deviation of SRS spectrum area of CO_2 and N_2 at 5% CO_2 and 95% N_2 mixing gas

$p/10^5 \text{ Pa}$	0.5	1	2	3	4
$A_{\text{STD-CO}_2}$ 值	2.87	2.53	2.21	1.95	1.82
$A_{\text{STD-N}_2}$ 值	1.95	1.68	1.34	0.76	0.62

4 结 论

(1) 所设计的激光脉冲整形器可以将峰值功率为 0.4 GW、FWHM 为 6.5 ns 的尖激光脉冲展宽整形为小于 0.02 GW, 大于 35 ns 脉宽的宽低激光脉冲, 并形成直径为 1 mm 左右平行激发光束, 在 SRS 实验中未发生气体裂解、光学元件和石英窗口损毁现象。

(2) 所设计的散射光收集系统可以将长度为 66 mm 的光束, 缩小 10 倍形成 6.6 mm 高的实像, 与 CCD 的纵向探测宽度相对应, 其消色差透镜组的 $F^\#$ 与光谱仪 $F^\#$ 的相匹配, 可最大程度地收集 SRS 散射光。

(3) 开发使用 ICCD 的内部 DDGTM, 实现了激光器与 ICCD 之间的同步。在保证可接受的 SRS 信噪比的前提下, 进一步提高该系统的空间分辨能力是今后的研究工作之一。

(4) 通过不同压力和质量分数 CO_2 和 N_2 混合气体的 SRS 实验, 验证了该系统的实用性, 具有

一定的时空分辨能力, 为进一步在光学发动机上的 SRS 实验提供了前期基础。

参考文献:

- [1] Barlow R S, Miles P C. A shutter-based line-imaging system for single-shot Raman scattering measurements of gradients in mixture fraction[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2000, 28: 269-277.
- [2] Marcus Schmid, Max Kaiser. Optical investigations on partially premixed diesel combustion for different operating parameters[J]. SAE, 2008-01-0041.
- [3] Gittins C M, Shenoy S U. Measurements of major species in a high pressure gas turbine combustion simulator using Raman scattering[J]. AIAA, 2000-0772.
- [4] Chen Y L, Lewis J W L. Visualization of laser-induced breakdown and ignition[J]. Optics Express, 2001, 9: 360-372.
- [5] Smith J Ray. Instantaneous temperature and density by spontaneous Raman scattering in a piston engine [J]. Laser Probes for Combustion Chemistry, 1980, A80-44139.
- [6] Zhao H, Zhang S. Quantitative measurements of in-cylinder gas composition in a control auto-ignition combustion engine[J]. Meas Sci Technol, 2008, 19: 015409.