

文章编号 1004-924X(2016)增-0370-10

活塞式内燃机光学诊断技术综述

贝太学^{1*}, 魏民祥¹, 刘锐¹, 张志敏²

(1. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016;

2. 南昌航空大学 测试与光电工程学院, 江西 南昌 330063)

摘要:在活塞式内燃机燃烧系统的研发中,可视化发动机的设计与光学诊断技术的采用是揭示内燃机工作过程的重要手段。光学诊断技术作为非接触式测量方法,能够在尽可能减少对测试场景干扰的前提下,使测量更精确和深入;同时,对缸内的喷雾形态、速度场以及对碳烟等生成物的测量与分析,能够为三维计算流体动力学提供可靠的实验依据。本文首先介绍了用于光学诊断技术的可视化发动机设计分类,包括早期光学通路的设计、目前可视化发动机的底部开窗式光学发动机和三方向可视光学发动机等;然后根据发动机工作过程中的不同阶段,论述了各种光学诊断技术的应用;最后总结了光学诊断技术的发展动态,指出多种诊断技术的联合运用、一维测量到多维测量的转变是活塞式内燃机光学诊断技术的发展趋势。

关键词:活塞式内燃机;可视化发动机;光学诊断;燃油喷雾;排放

中图分类号:TH74;TK45 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20162413.0370

Summary on optical diagnostic technology of piston type internal combustion engine

BEI Tai-xue^{1*}, WEI Min-xiang¹, LIU Rui¹, ZHANG Zhi-min²

(1. College of Energy and Power, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. School of Measuring and Optical Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

* Corresponding author, E-mail:beitai.xue@126.com

Abstract: In the research and development of piston type internal combustion engine, the design of optical engine and the application of optical diagnostic technology are important means for revealing working process of internal combustion engine. As the non-contact measurement method, the optical diagnostic technology may make measurement more accurate and profound under the precondition where the interference with test scene is reduced as much as possible; simultaneously, for measurement and analysis of resultants including spray pattern in cylinder, velocity field and soot, etc, it may provide reliable experimental basis for three-dimensional computational fluid dynamics. This paper has firstly introduced the design classification of optical engine for optical diagnostic technology, including early design of optical channel, the optical engine with bottom fenestration of the existing engines and

收稿日期:2016-05-07;修订日期:2016-06-18.

基金项目:江苏省普通高校研究生科研创新计划资助项目(No. KYLX_0244);国防预研资助项目(No. 5132501)

three-direction optical engine, etc. Then, according to different stages of working process of engine, it has discussed application of all kinds of optical diagnostic technologies; finally, it summarizes the development trend of optical diagnostic technology, and indicates combined application of several kinds of diagnostic technologies and that the transformation from one-dimensional measurement to multi-dimensional measurement is the development trend of optical diagnostic technology of piston type internal combustion engine.

Key words: piston type internal combustion engine; optical engine; optical diagnostics; fuel spray; discharge

1 引言

对于内燃机缸内工作过程实时参数的测量,长期以来主要依靠传统的热电偶、压电传感器、气体分析仪等带有物理探针的测量仪器来完成,成本较低且使用方便。但是,由于物理探针容易干扰测试场景,测量范围相对有限,且这些传统仪器大多情况下得到的只是宏观的平均物理量,缺乏令人信服的真实数据^[1-2]。而光学诊断技术作为非接触式诊断方法,能够在尽可能减少对测试场景干扰的前提下,保证较高的时空分辨率^[3-4]。

数值模拟是研究发动机工作过程尤其是混合气形成和火焰传播的常用手段^[5-6]。但对于三维模拟计算,进行较为复杂、专业的数值模拟所需的计算资源成本较大,很多方法都不能在发动机工作过程研究中被普遍接受;而一些传统的计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)和热力学模型必须经过参数标定才能获得较为可靠的结果,因此,如何准确地标定模型是模拟计算中的重要问题^[7-9]。

可视化光学诊断技术,作为发动机研发中除传统台架试验和数值模拟之外的一种重要手段,近些年被广泛关注。其基本原理是通过接收光谱或者光学影像的方式,获取发动机工作过程中流场、温度、工质组分等相关信息,用于发动机工作过程的研究与分析。采用可视化研究来获得信息的方式较为直接,尤其是对于喷雾、混合、燃烧、排放物组分的具体分布状态,靠常规台架测试不能或只能间接获取的信息^[10-11],可视化研究可以提供详细的图像或统计结果。而对于模拟计算,可视化研究结果可为模型标定提供依据,特别是对于缸内实际燃烧火焰形态等较为复杂的物理现象,可视化甚至是唯一能够为模拟计算提供精确

标定依据的手段^[12-13],因此可视化研究是 CFD 模拟计算研究的重要基础。

利用光学诊断技术可以对缸内的喷雾形态和速度场进行研究、对生成物中的碳烟等成分进行分析,为三维计算流体动力学提供真实、可靠的实验数据。近年来,光学器件(如激光器、CCD 传感器等)设计技术的提高,促进了光学诊断^[14-17]、可视化发动机在揭示缸内工作过程中的应用,在观测喷雾、燃烧、排放物组分等过程的同时,能够尽量减少对化学反应的干扰。

2 可视化发动机

图 1 所示为应用光学诊断技术对缸内燃烧进行测试与诊断的示意图。

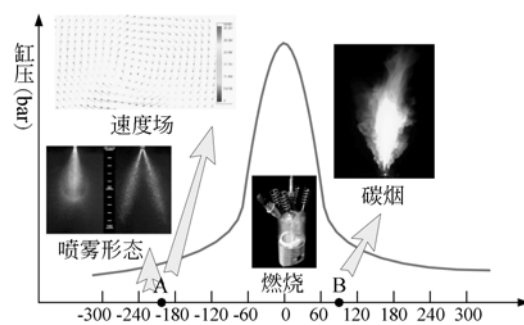


图 1 缸内光学诊断示意图

Fig. 1 Schematic diagram of optical diagnosis in cylinder

为了详细地分析缸内燃烧的工作过程,首先要使发动机的缸体具备用于光学通路的观测窗。研究者开始试图在缸盖上做改造从而完成光路设计,由于测试受限且影响了缸内的正常工作,未能引起广泛应用^[18]。

为了解决使缸体具备用于光学通路的观测窗的问题,国内外学者对可视化发动机开展了一系

列研究^[19-22],特别是与最新的光学测试技术相结合,可使获得的信息量大幅度增加,从而能够进一步分析发动机工作时缸内的各种复杂现象。

2.1 早期发动机光学通路设计

早期光学通路设计主要可以分为以下几类:

(1)在气门上进行改造,将多气门中的一个或两个改造成光学通路,从而完成光信号的进出,这种设计方式由于对进排气过程有改动,所以对缸内燃烧一般会存在较大影响;

(2)在火花塞上进行改造,通过安装光纤,使光信号能够实现缸内的进出,但其可视化范围会受到限制;

(3)在缸盖上进行改造,通过打孔重新设计光线的出入窗口,这种方法比较适合于 2 冲程和早期 4 冲程发动机,这些发动机的气门安装在发动机的侧壁上,替换透明的缸盖比较方便。但对于目前广泛采用的现代 4 冲程发动机而言,进排气门设计有所区别,需要涉及的改动较为复杂^[23]。

2.2 目前可视化发动机的设计分类

为了解决上述几种设计方法中存在的测试范围受限制、影响发动机工作过程等问题,国内外的一些专家、研究学者逐渐提出了以下两种较为合理的可视化发动机设计方案:

(1)底部开窗式可视化发动机

目前,采用较多的是如图 2 所示的底部开窗

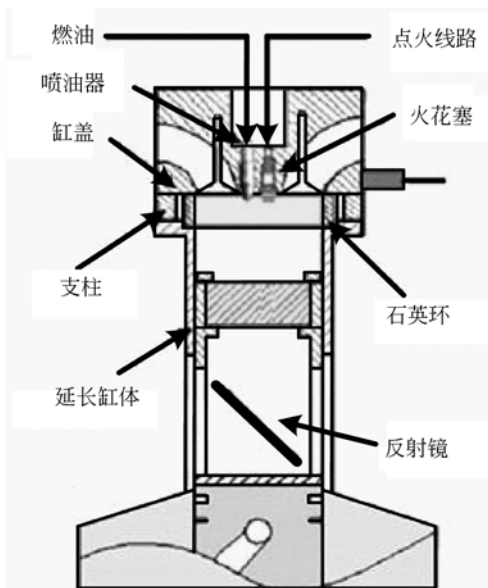


图 2 底部开窗式可视化发动机

Fig. 2 Visualization engine with a bottom window

式可视化发动机^[24]。该发动机把缸体部分加长,改造后的活塞顶端放一块耐高温、高压的石英玻璃,下部位置安装角反射镜,与水平线呈 45 度,并在活塞前下部位置开窗。燃烧室内的燃烧情况可以穿过透明的石英玻璃,再通过反射镜的反射,由侧面窗口就可以较为清晰的观测到。

(2)三方向可视化发动机

在某些小型高速柴油机设计中,要求向活塞凹坑的内部和挤流区位置,都要进行燃油喷射。所以,为了能够在挤流区位置完成光学诊断,设计了如图 3 所示的三方向可视化发动机^[25]。该发动机气缸内的工作状态可以由气缸侧面、顶部、底部 3 个角度去观测。这种设计方式更有利于在火焰的各个断面内进行光学测试。

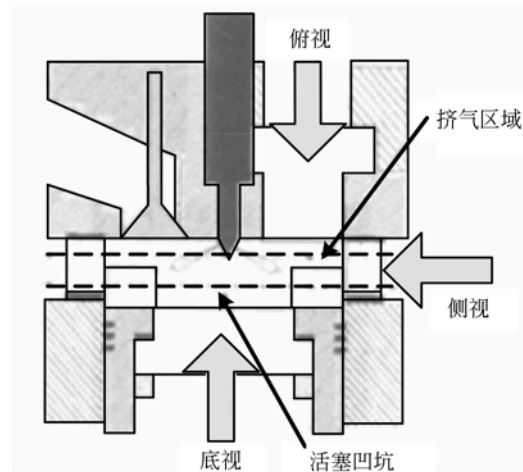


图 3 三方向可视化发动机

Fig. 3 Visualization engine with three directional windows

3 光学诊断技术

要组织稳定和高效的燃烧,需要对燃料的喷注、雾化、混合、扩散及化学反应等物理和化学过程有深入的理解。应用光学诊断技术,发现和掌握规律,是燃烧过程研究的主要任务,也是深化燃烧机理研究的主要方法^[3]。

根据发动机工作过程的不同阶段,首先将所涉及到的光学诊断技术作如下分类:

(1)喷雾诊断技术

喷雾形态诊断:假彩色法、直接或阴影摄影、显微摄影、纹影摄影、激光 CT(Computed Tomo-

graphy)等;

喷雾速度场诊断:粒子成像测速(Particle Image Velocimetry, PIV)、激光多普勒测速(Laser Doppler Velocimetry, LDV)、多普勒全局速度成像(Doppler Global Velocimetry, PDV)等。

(2) 排放诊断技术

碳烟诊断:消光法、散射法、双色法、激光诱导炽光(Laser Induced Incandescence, LII)、发射 CT 法等。

3.1 喷雾诊断技术

完成高效清洁发动机的设计首先要解决的是如何精确测量燃油喷雾的问题^[26-27],有关燃油喷雾的光学诊断技术,这里主要分为对喷雾形态的诊断和对喷雾速度场的诊断。

3.1.1 对喷雾形态的诊断

目前对喷雾形态的诊断主要通过摄影、成像来进行,根据所采用的基本原理不同,可分为假彩色法、直接或阴影摄影、显微摄影、纹影摄影和激光 CT 等。

(1) 假彩色法

假彩色法是早期研究喷雾形态的一种光学方法,使用假彩色法可以用来描述喷雾浓度的分布。该方法是在光源照射下,用 135 底片作为记录介质,将喷雾分布表示成不同的颜色层次,使得到的黑白图像变成彩色图像^[28]。

(2) 直接或阴影成像

直接成像方法是使用高强度的光源对喷雾进行照射,然后用 CCD 相机拍下图像,利用图像处理软件进行数据分析,得到表征喷雾形态宏观特性的参数,这里涉及的参数主要有喷雾的贯穿距离、喷雾锥角等^[29]。如果把光源、喷雾和相机放置在同一条水平线上,由于光线的散射作用,有液滴的地方到达相机的光线强度会相应减弱,此时燃油喷雾将在较亮的背景下出现阴影^[30]。

(3) 显微成像

假彩色法、直接或阴影摄影,这些方法测量的主要是燃油喷雾的宏观形态,显微成像则有所不同,其设计思路是在相机的前部安装一个独立的显微镜头,利用显微镜头对喷雾的微观现象进行直接观测,这种设计更有利于喷雾机理的深入分析和研究^[31]。

(4) 纹影成像

纹影成像方法是通过不同密度的介质对光的

折射率不同来对介质进行成像的光学诊断方法,该方法可以对喷雾的气态、液态两相进行同时测量^[32]。

(5) 激光 CT

激光 CT 法是通过将不同位置的二维图像重组成立体式雾化形态来实现测量的方法,在使用激光 CT 技术测量燃油喷雾时,可以按激光衰减原理及相应的算法求出相对浓度和粒径^[33]。

喷雾形态诊断技术的特点对比如表 1 所示。

表 1 喷雾形态光学诊断技术的比较

Tab. 1 Comparisons of optical diagnostic techniques for spray form

诊断方法	宏观形态观测	微观形态观测	气液两相测量
假彩色法	较好	较差	不可
直接成像	较好	一般	不可
阴影成像	好	一般	不可
显微成像	较好	好	不可
纹影成像	较好	较好	可以
激光 CT	好	较好	不可

3.1.2 对喷雾速度场的诊断

目前测量喷雾粒子速度场^[34]的光学诊断方法主要有以下几种:粒子成像测速、激光多普勒测速、多普勒全局速度成像等。

(1) 粒子成像测速

粒子成像测速是一种可以测得流场速度矢量的基本方法,粒子成像测速的基本原理是:在流场中加入示踪粒子,利用平面激光将流场的某个截面进行连续 2 次照亮,并用 CCD 相机对粒子的散射光进行成像,利用自相关或者互相关算法找出图像中对应小区域的位移矢量,然后除以两帧之间的时间差,从而获得流场的速度矢量^[35]。

(2) 激光多普勒测速

激光多普勒测速的基本原理是利用运动的粒子经过由 2 个交叉激光束形成的探测区时,散射光干涉条纹移动的时间频率与粒子运动速度有一定的函数关系^[36]。该技术采用的是点测量方式,适用于稳态流场的测量,具有良好的方向灵敏度。

(3) 多普勒全局速度成像

多普勒全局速度成像是 1991 年 Komine 等人首先提出的,利用多普勒全局速度成像技术可在薄片光平面内测量流场的三维速度,适用于较恶劣的试验条件^[37]。多普勒全局速度成像是全

场测量技术,能够测量非稳态的瞬态流场。

喷雾速度场诊断技术的特点对比如表 2 所示。

表 2 喷雾速度场光学诊断技术的比较

Tab. 2 Comparisons of optical diagnostic techniques for spray velocity field

诊断方法	多维测量	细节观测	测量方式
PIV	需改进	较好	全场
LDV	不可	较好	单点
PDV	可以	较好	全场

3.2 排放诊断技术

通过光学方法进行有害物质的排放检测,具有精度高、不影响测试环境等优点;同时,在缸内对生成物进行测量和分析,可以为改善着火稳定性,实现稀薄燃烧等提供可靠的实验依据。

排放光学诊断技术的研究,目前针对碳烟的诊断研究涉及较多,开展碳烟检测研究对充分了解碳烟生成机理、控制排放有着重要作用^[38]。碳烟检测的常用方法有以下几种:

(1) 消光法

其基本原理是当光线穿过缸内的碳烟云团时,由于光的散射和吸收,碳烟粒子和光发生作用后光强会有所衰减,导致探测到的能量有所减少。碳烟粒径比气体分子大得多,属于吸收能量很强的介质,对光线的吸收能力远远大于散射,由 Lambert-Beer 公式对光线穿过碳烟粒子云前后光强进行比较,可得出碳烟体积分数^[39]。

(2) 散射法

该方法是通过借鉴消光法的基本原理,同时对散射光的接收进行了补充设计,通过散射和消光的比值得到碳烟粒径的一种测量方法^[40]。

(3) 双色法

消光法和散射法可以完成对碳烟的单点测试,如果想要获得发动机缸内局部位置碳烟的二维分布图像,可以采用这种双色法。该方法可以同时测量缸内的碳烟浓度以及温度分布,其基本原理是利用高温碳烟粒子产生的热辐射,取其中两个波长的辐射能量,建立方程来求解碳烟粒子的温度和表征碳烟浓度的 KL 因子^[41],然后计算

出浓度和温度。

(4) 激光诱导炽光

其基本原理是碳烟粒子被激光照射后,发出辐射,用 CCD 等探测器可以观察到强烈的炽光,炽光的强度与激光照射范围内的碳烟体积分数成正比;碳烟粒子受到激光的作用之后,在一段时间内,温度会逐渐下降,同时炽光信号也会呈下降的趋势,由于碳烟粒径与炽光信号下降的速度有关,所以根据炽光信号下降速率的不同就可以得到碳烟的粒径信息^[42]。

(5) 发射 CT 法

发射 CT 法也是一种用来分析非均匀火焰对象的碳烟浓度和温度分布等信息的常用方法,其基本原理是利用断层扫描技术,接收缸内碳烟粒子的辐射数据^[43]。该方法近些年在缸内火焰观测、碳烟及浓度分析等领域被广泛关注。

碳烟诊断技术的特点对比如表 3 所示。

表 3 碳烟光学诊断技术的比较

Tab. 3 Comparisons of optical diagnostic techniques for smoke

诊断方法	测量场景	基本原理	其他物理量
消光法	单点	吸收	无
散射法	单点	散射	粒径
双色法	二维	热辐射	温度
诱导炽光	二维	热辐射	粒径、温度
发射 CT 法	三维	热辐射	温度

4 发展趋势

在燃烧系统的研发中,可视化发动机的设计与光学诊断技术的采用是揭示发动机工作过程的先进技术。要组织稳定和高效的燃烧,应用燃烧诊断技术,结合数值模拟及传统的实验测量方法,对燃料的喷注、雾化、混合、扩散及化学反应等物理和化学过程进行进一步深入理解,是深化燃烧机理的重要研究方法。

目前,国内外专家学者针对光学诊断的研究,越来越多的关注多种诊断技术的联合运用,通过多种诊断手段同时观测缸内的现象,对喷雾、燃烧等过程中的多重角度观测,可以更为准确的深入理解燃烧机理;此外,一维测量到多维测量的转变也是发动机缸内光学诊断技术的一个重要发展

趋势。

4.1 趋势 1——多种光学诊断技术的联合运用

4.1.1 LIF-PIV 联合运用

在喷雾流场诊断过程中,直接利用粒子图像测速技术只能获得喷雾液滴的流动情况,要了解喷雾和周围环境空气的混合及流动情况,还需要测量环境气体的流场,因此需要在环境气体中添加示踪粒子,通过示踪粒子对入射激光的散射来成像。但是在喷雾场中存在大量的喷雾液滴,这些液滴也能够对激光进行散射,导致无法分开喷雾和环境空气,为了解决这个问题,LI Y 等人^[44]将激光诱导荧光 LIF 和粒子图像测速 PIV 技术相结合,开发了 LIF-PIV 技术。

4.1.2 LII-LIF 联合运用

柴油机排放物中的氮氧化物是由于缸内高温富氧以及接触时间较长而产生的,碳烟是由于缸内高温缺氧而产生的,减少氮氧化物和碳烟一直是一个不可调和的矛盾。激光诱导炽光 LII 技术可以测量柴油机燃烧过程中碳烟分布信息,激光诱导荧光法 LIF 可用于获得生成物组分定性的浓度、温度二维影像,Liu F 等人^[45]将激光诱导荧光和激光诱导炽光技术相结合,在柴油和生物柴油混合燃料的层流扩散火焰上进行了实验研究。

4.2 趋势 2——一维测量到多维测量的转变

4.2.1 喷雾流场测试的三维测量

传统的粒子图像测速 PIV 系统,大多是采用一台摄像机对流场的截面进行采集,因而只能获得两维的速度场信息,而与摄像机垂直方向上的

速度信息无法获得。立体 PIV 技术(Stereoscopic-PIV),是采用多个相机在各个位置分别取相,然后采用合适图像处理算法,将相机获取的速度矢量图进行融合,得到立体空间的速度矢量图的技术^[46]。

4.2.2 碳烟测试的三维测量

碳烟检测的发展趋势是也从一维测量到多维测量发生着转变。Huang Q 等人^[47]采用了 4 个 CCD 摄像机从不同方向获取火焰辐射,针对非对称火焰开展了温度及碳黑浓度同时反演的模拟研究,并较为完整的讨论了该测量方法的抗误差能力。

综上所述,多种诊断技术的联合运用、一维测量到多维测量的转变是目前活塞式内燃机光学诊断技术研究的发展趋势。

5 结束语

燃油喷雾和缸内排放的光学诊断对于高效低排放发动机的设计与开发、以及燃烧机理的研究与优化具有不可或缺的作用。本文对早期和目前较多采用的可视化发动机设计分类,以及目前在喷雾形态、速度场以及碳烟生成物等研究中广泛使用的光学诊断技术进行了综述,分析了各种技术的基本原理、优缺点及使用范围。可以预见,随着光学仪器稳定性的提高以及数据处理算法的改进,各种光学诊断技术在发动机以及相关研究领域中,必将有着更为广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 张志强,贺俊,魏名山,等.某航空活塞发动机回火试验[J].航空动力学报,2013,28(8):1696-1701. ZHANG ZH Q, HE J, WEI M SH. Backfire tests of an aircraft piston engine[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2013, 28(8): 1696-1701. (in Chinese)
- [2] 王振宇,丁水汀,杜发荣.航空重油发动机燃油供给系统动力学模型分析[J].航空动力学报,2012,27(4):846-853. WANG ZH Y, DING SH T, DU F R. Analysis of dynamic modeling of aviation heavy oil piston engine fuel delivery system [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2012, 27(4): 846-853. (in Chinese)
- [3] 李麦亮.激光光谱诊断技术及其在发动机燃烧研究中的应用[D].长沙:国防科学技术大学,2004. LI M L. *Studies on laser spectroscopy technology and its application to combustion diagnosis in jet engine* [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2004. (in Chinese)
- [4] 马晓.应用激光诱导荧光法研究直喷汽油机缸内混合气形成过程[D].北京:清华大学,2010. MA Y. *Research on GDI in-cylinder mixture formation using planar laser-induced fluorescence* [D]. Beijing: Tsinghua University, 2010. (in Chinese)
- [5] 周冬青.双火花塞 LPG 发动机燃烧过程的仿真研

- 究[D], 吉林大学, 2012.
- ZHOU D Q. *The study on LPG combustion process of dual-spark plug ignition by CFD*[D]. Jilin: Jilin University, 2012. (in Chinese)
- [6] 黄琪. 小型高速汽油机双火花塞速燃多工况 VVT 系统研究[D]. 重庆大学, 2009.
- HUANG Q. *Study on dual-spark plugs for rapid combustion and multi-state VVT system of small and high-speed gasoline engine*[D]. Chongqing: Chongqing University, 2009. (in Chinese)
- [7] 王永伟, 魏民祥, 杨海青, 等. 空气辅助缸内直喷发动机正时控制策略[J]. 航空动力学报, 2014, 29(12):2942-2947.
- WANG Y W, WEI M X, YANG H Q. Timing control strategies of air-assisted direct injection engine [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2014, 29(3): 2942-2947. (in Chinese)
- [8] 盛敬, 魏民祥, 刘国满, 等. 基于内禀模态高频积分能量法的煤油发动机爆震因子计算方法[J]. 航空动力学报, 2014, 29(3): 504-510.
- SHENG J, WEI M X, LIU G M. Calculating method of knock factors based on method of intrinsic mode function high-frequency integral energy for kerosene engine [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2014, 29(3): 504-510. (in Chinese)
- [9] 张建良, 秦琦峰, 黄向华, 等. 小型航空二冲程活塞发动机建模及控制器在回路仿真研究[J]. 中国机械工程, 2013, 24(7): 906-910.
- ZHANG J L, QIN Q F, HUANG X H, et al.. Redevach on modeling and ECU in the loop simulation for two stroke piston avro-engine[J]. *China Mechanical Engineering*, 2013, 24(7): 906-910. (in Chinese)
- [10] 莫胜钧. 小型航空点燃式重油活塞发动机点火及火焰传播特性的模拟研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
- MO SH J. *Study on the ignition and flame propagation property of light-weight spark ignition heavy oil aero-engine* [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012. (in Chinese)
- [11] 石允. 小型点燃式二冲程活塞重油发动机混合气形成的模拟研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
- SHI Y. *Study on heavy-fuel mixture formation of light-weight spark-ignition two-stroke engine* [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012. (in Chinese)
- [12] 陈林林. 二冲程煤油发动机性能数值模拟与喷油控制研究[D]. 南京航空航天大学, 2009.
- CHEN L L. *Research on numerical simulation of performance and fuel injection control for two-stroke kerosene engine*[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009. (in Chinese)
- [13] 李冰林. 活塞式煤油发动机点火提前角仿真计算与试验研究[D]. 南京航空航天大学, 2011.
- LI B L. *Simulation and Experimental Study on Spark Advance of Piston Kerosene Engine*[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011. (in Chinese)
- [14] 孔成栋, 于丹, 姚强, 等. 基于彩色火焰图像的铝、硼纳米颗粒燃烧特性[J]. 光学 精密工程, 2015, 23(8):2288-2295.
- KONG CH D, YU D, YAO Q. Combustion characteristics of aluminum and boron nano-particles based on flame color images [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 23(8): 2288-2295. (in Chinese)
- [15] 李国华, 胡志云, 王晟, 等. 基于相干反斯托克斯拉曼散射的二维温度场扫描测量[J]. 光学 精密工程, 2016, 24(1):14-19.
- LI G H, HU ZH Y, WANG SH. 2D scanning CARS for temperature distribution measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(1):14-19. (in Chinese)
- [16] 王晟, 刘晶儒, 胡志云, 等. 用于燃烧场诊断的分子滤波瑞利散射技术[J]. 光学 精密工程, 2011, 19(2):445-451.
- WANG SH, LIU J R, HU ZH Y. Development of filtered Rayleigh scattering for combustion diagnostic application [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(2):445-451. (in Chinese)
- [17] 刘劲松. 基于 CFD 的柴油机喷雾过程模拟计算研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- LIU J S. *The simulation study of diesel spray based on CFD* [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010. (in Chinese)
- [18] 程鹏, 李晓冰, 王伟东, 等. 基于自发拉曼散射射线成像的光学诊断系统开发[J]. 吉林大学学报(工学版), 2012, 42(Z1): 156-160.
- CHENG P, LI X B, WANG W D. Development of an optical diagnostic system based on line imaging spontaneous Raman-scattering light [J]. *Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition)*, 2012, 42(Z1): 156-160. (in Chinese)
- [19] WEAVER C E. *Quantitative laser-based fuel dis-*

- tribution and combustion measurements in port and direct fuel injected spark-ignition engines* [D]. University of Michigan, 2001.
- [20] 孙田. 复合激光诱导荧光定量标定技术及其对柴油喷雾特性研究的应用[D]. 天津:天津大学, 2008.
- SUN T. *Development and Application of Quantitative Calibration Method on the Diesel Sprays Characteristics using Planar Laser Induced Exciplex Fluorescence Technique* [D]. Tianjin: Tianjin University, 2008. (in Chinese)
- [21] 张敬东. 可控自燃光学发动机电子控制系统设计[D]. 长春:吉林大学, 2012.
- SUN J D. *Design of Electronic Control System for Optically Accessible CAI Engine* [D]. Changchun: Jilin University, 2012. (in Chinese)
- [22] GREIS A E, GRÜNFELD G, BECKER M, et al.. Quantitative measurements of the soot distribution in a realistic common rail DI Diesel engine [C]. *The 11th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics*. 2002.
- [23] 程鹏. 基于激光拉曼散射成像测量发动机缸内摩尔分数和温度[D]. 长春:吉林大学, 2013.
- CHENG P. *Laser Spontaneous Raman Scattering line Imaging for Mole Fraction and Temperature Measurements in Internal Combustion Engines* [D]. Changchun: Jilin University, 2013. (in Chinese)
- [24] 王显刚. 生物柴油喷雾, 燃烧和碳烟生成特性及其对柴油机微粒排放影响的研究[D]. 西安:西安交通大学, 2011.
- WANG X G. *Study on Spray, Combustion and Soot Formation Characteristics of Biodiesels and Particulate Emissions from a Diesel Engine Fueled with Biodiesels* [D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2011. (in Chinese)
- [25] 李建新, 段金栋, 张然治. 用于发动机开发的气缸内测试技术[J]. *铁道机车车辆*, 2011, 31(Z1): 313-317. (in Chinese)
- LI J X, DUAN J D, ZHANG R ZH. In-cylinder diagnostic techniques underpinning engine development [J]. *Railway Locomotive & Car*, 2011, 31 (Z1): 313-317. (in Chinese)
- [26] 张全逾, 王俊杰, 柯凤琴. 内燃机燃烧测试分析及实际应用[J]. *公路与汽运*, 2008, 3: 28-30.
- ZHANG Q Y, WANG J J, KE F Q. Test analysis and practical application of internal combustion engine combustion [J]. *Highways & Automotive Applications*, 2008, 3: 28-30. (in Chinese)
- [27] 朱成, 杨海青, 汪明生. 基于CFD分析的二冲程发动机直喷燃烧室方案设计[J]. *航空动力学报*, 2013, 28(12), 2737-2745.
- ZHU CH, YANG H Q, WANG M SH. Design of combustion chamber program of two-stroke direct injection spark ignition engine based on the CFD [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2013, 28(12): 2737-2745. (in Chinese)
- [28] 朱瑞辉, 万敏, 范国滨. 基于金字塔变换的图像融合方法[J]. *计算机仿真*, 2007, 24(12): 178-180.
- ZHU R H, WAN M, FAN G B. An image fuse method based on pyramid transformation [J]. *Computer Simulation*, 2007, 24(12): 178-180. (in Chinese)
- [29] HUANG D L. Gasoline fuel injector spray measurement and characterization [C]. *2008 World Congress Detroit, Michigan*, 2008.
- [30] FAN Q, LI L, HU Z. Spray characteristics of ethanol-gasoline blends from an asymmetric multi-hole injector of DISI engines [C]. *Electric Information and Control Engineering (ICEICE)*, 2011 *International Conference on IEEE*, 2011: 2618-2623.
- [31] 何邦全, 张俊恺. 直喷汽油喷油器喷射过程近场喷雾特性[J]. *内燃机学报*, 2013, 31(5): 425-430.
- HE B Q, ZHANG T K. Near-field characterization of direct injection gasoline sprays from a single-hole injector [J]. *Transactions of CSICE*, 2013, 31(5): 425-430. (in Chinese)
- [32] 安新亮, 何旭, 王丽雯, 等. 应用高速纹影法对汽油机燃烧过程的研究[J]. *内燃机工程*, 2007, 28(2): 1-5.
- AN X L, HE X, WANG L W, et al.. Research on the combustion process of gasoline engine by high-speed Schlieren method [J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2007, 28(2): 1-5. (in Chinese)
- [33] 黄魏迪, 吴志军, 李治龙, 等. 柴油机喷嘴内部几何结构的喷雾贯穿距模型[J]. *内燃机学报*, 2012, 30(2): 124-128.
- HUANG W D, WU Z J, LI Z L. Diesel spray penetration model based on nozzle internal geometry [J]. *Transactions of CSICE*, 2012, 30 (2):

- 124-128. (in Chinese)
- [34] 刘刚. PIV 技术在喷油雾化等流场测量中的运用[D]. 天津:天津大学, 2007.
LIU G. *The Application of PIV Technology in the Measurement on Oil Spray and Other Flow Fields*[D]. Tianjin:Tianjin University, 2007. (in Chinese)
- [35] 董明哲. 新型燃烧方式电控系统设计与 PIV 技术在发动机测量中的应用[D]. 天津:天津大学, 2005.
DONG M ZH. *Design of Electronic Control System for New Combustion and Application of PIV Technology on Engine Measurement* [D]. Tianjin:Tianjin University, 2005. (in Chinese)
- [36] 周健, 黄华. 频谱细化及频谱校正技术在激光多普勒测速仪中的应用[J]. 激光与红外, 2010, 40(2): 144-151.
ZHOU J, HUANG H. Application of frequency spectrum refinement and correction technology in laser Doppler velocimeter [J]. *Laser & Infrared*, 2010, 40(2): 144-151. (in Chinese)
- [37] 张艳艳, 巩轲, 何淑芳, 等. 激光多普勒测速技术进展[J]. 激光与红外, 2010, 40(11): 1157-1162.
ZHANG Y Y, GONG K, HE SH F, *et al.*. Progress in laser Doppler velocity measurement techniques [J]. *Laser & Infrared*, 2010, 40(11): 1157-1162. (in Chinese)
- [38] 姜春, 陈辰, 孙亦鹏, 等. 碳氢火焰中碳黑检测方法评述[J]. 中国科学: 信息科学, 2010, 40(8): 946-958.
LOU CH, CHEN CH, SUN Y P, *et al.*. Review of soot measurement in hydrocarbon-air flames [J]. *Sci. China Tech. Sci.*, 2010, 40(8): 946-958. (in Chinese)
- [39] 何旭, 戴钰杰, 郑亮. 二维消光法在乙烯火焰碳烟浓度测量中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(26): 57-64.
HE X, DAI Y J, ZHENG L. Application of two-dimensional light extinction technique for soot concentration measurement in an axisymmetric laminar diffusion flame [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2012, 32(26): 57-64. (in Chinese)
- [40] BOHREN C F, HUFFMAN D R. *Absorption and Scattering of Light by Small Particles*[M]. Wiley-Vch, 2008.
- [41] HAN Y, PARK W, MIN K. Soot and temperature distribution in a diesel diffusion flame: 3-D CFD simulation and measurement with laser diagnostics[J]. *International Journal of Automotive Technology*, 2011, 12(1): 21-28.
- [42] 陈亮, 成晓北, 颜方沁, 等. 基于改进的详细碳烟模型的柴油燃烧碳烟颗粒物的生成特性[J]. 燃烧科学与技术, 2013, 19(3): 234-240.
CHEN L, CHENG X B, YAN F Q. Soot formation characteristics in diesel combustion process based on an improved detailed soot model [J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2013, 19(3): 234-240. (in Chinese)
- [43] 艾育华, 周怀春. 发射 CT 法同时测量含烟黑火焰的温度与烟黑浓度分布的实验研究[J]. 燃烧科学与技术, 2005, 11(2): 179-182.
AI Y H, ZHOU H CH. Simultaneous measurement of non-uniform temperature and soot volume fraction in sooting flames by emission CT Method [J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2005, 11(2): 179-182. (in Chinese)
- [44] LI T, NISHIDA K, Zhang Y. An insight into effect of split injection on mixture formation and combustion of DI gasoline engines[J]. *SAE Paper*, 2004: 01-1949.
- [45] LIU F, HE X, MA X, ZHANG Q. An experimental and numerical study of the effects of dimethyl ether addition to fuel on polycyclic aromatic hydrocarbon and soot formation in laminar coflow ethylene/air diffusion flames[J]. *Combustion and Flame*, 2011, 158(3): 547-563.
- [46] 鲍晓利. 三维粒子跟踪测速系统中的三维重构技术研究[D]. 大连:大连理工大学, 2013.
BAO X L. *The study on three-dimensional reconstruction method of three-dimensional particle tracking velocimetry*[D]. Dalian:Dalian University of Technology, 2013. (in Chinese)
- [47] HUANG Q X, WANG F, LIU D. Reconstruction of soot temperature and volume fraction profiles of an asymmetric flame using stereoscopic tomography[J]. *Combustion and Flame*, 2009, 156(3): 565-573.

作者简介:



贝太学(1985—),男,山东济南人,博士研究生,2008年于山东建筑大学获得硕士学位,主要从事发动机测试与诊断方面研究。E-mail: beitaixue@126.com



魏民祥(1963—),男,山东青州人,教授,博士生导师,2001年于西安交通大学获得博士学位,主要研究方向为航空活塞发动机测试技术以及车辆智能与自主控制、计算机视觉等方面的研究。E-mail: weimx@nuaa.edu.cn