



装备学院·学术专著

燃烧场吸收光谱 断层诊断技术

宋俊玲 洪延姬 等编著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

本书得到总装备部“1153”人才工程资助。

燃烧场吸收光谱 断层诊断技术

宋俊玲 洪延姬 王广宇 潘虎 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

燃烧场吸收光谱断层诊断技术/宋俊玲等编著. —
北京:国防工业出版社,2014.11
ISBN 978-7-118-09820-4

I. ①燃… II. ①宋… III. ①航空发动机燃烧—
技术测量 IV. ①V231.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 287416 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 10 3/4 字数 170 千字

2014 年 11 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 66.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

PREFACE

前言

随着航空航天技术的不断发展和国防建设需求的日益增长,发动机燃烧流场诊断和性能评估受到越来越多的关注。高效的燃烧流场测量手段,可以有效促进航空、火力发电和污染监控等行业的发展。可调谐半导体激光吸收光谱技术(TDLAS)作为一种光学诊断技术,能够满足非侵入、实时和长效测量的要求,并且测量信息丰富,可以得到在线瞬态流场的温度、压力、流速、组分浓度等信息。

TDLAS 技术是基于视线效应的测量,测量结果为沿光路上的平均值,不能反映流场的内部信息,然而在实际流场中,沿着光线传播方向存在梯度变化,本书以 TDLAS 技术为基础,根据被测流场性质和测量需求,以获得非均匀流场内部信息为目标,通过结合相关测量方法,得到流场温度、组分浓度等一维分布和二维分布结果。本书系统介绍了 TDLAS 测量非均匀流场的基本原理和测量方法,分析了吸收谱线参数、光线数目、光线布局等因素对测量结果的影响,并列举了相关测量和仿真实例,使读者更易理解 TDLAS 测量流场的相关理论和方法。

全书共 6 章,第 1 章为绪论,第 2 章为激光与吸收光谱基础知识,第 3 章介绍非均匀流场一维测量方法,第 4 章介绍滤波反投影算法的流场二维测量,第 5 章介绍代数重建算法的流场二维测量,第 6 章介绍二维测量中的光线分布优化方法。

本书的主要内容是宋俊玲在攻读博士期间的研究成果,其余部分取自国内外的相关著作与文献。全书由宋俊玲和洪延姬负责制定编著大纲和写作方案。第 1 章由宋俊玲和洪延姬撰写,第 2 章由潘虎撰写,第 3~6 章算法部分由宋俊

玲撰写,实验部分由王广宇撰写。激光推进及其应用国家重点实验室的屈东胜、刘昭然、辛明原、段金虎、彭颂基、陈庚、杨波、刘毅等同志在文献收集、插图绘制、书稿校正等方面做了大量工作,在此表示感谢。

由于时间仓促、水平有限,书中难免存在许多缺点和不足,希望读者批评指正。

编著者
2014年8月

CONTENTS

目录

第1章 绪 论

1.1 燃烧流场测量方法	1
1.1.1 测量方法分类	1
1.1.2 光谱学测量方法	2
1.2 激光吸收光谱技术的发展	4
1.2.1 激光器	4
1.2.2 分类	5
1.3 均匀流场诊断研究进展	6
1.4 非均匀流场一维诊断研究进展	9
1.5 非均匀流场二维诊断研究进展	10
1.5.1 基本原理	10
1.5.2 实验研究	11
1.5.3 算法研究	17
1.6 本书梗概	20
参考文献	21

第2章 激光与吸收光谱

2.1 激光及传播特性	27
2.1.1 Gauss 光束及传播特性	28
2.1.2 ABCD 定理	29
2.2 激光与物质相互作用	32
2.2.1 发射与吸收	32

2.2.2	谱线	34
2.2.3	Einstein 理论	35
2.3	分子光谱的线型	36
2.3.1	Lorentz 线型函数	36
2.3.2	Gauss 线型函数	37
2.3.3	Voigt 线型函数	38
2.3.4	Dicke - narrowing 效应	39
2.4	线型分子的能级结构	40
2.4.1	线型分子的振动能级	41
2.4.2	线型分子的转动能级	41
2.4.3	线型分子振转跃迁的选择定则	43
2.5	吸收光谱技术	44
2.5.1	激光腔内吸收光谱	44
2.5.2	光腔增强吸收光谱	44
2.5.3	光腔衰荡光谱	45
2.5.4	傅里叶变换光谱	47
2.6	吸收光谱的应用	47
2.6.1	流场温度和组分浓度测量	47
2.6.2	流场速度测量	51
2.6.3	谱线选线原则	52
2.6.4	多谱线测量方案	53
	参考文献	55

第3章 非均匀流场一维诊断方法

3.1	最小二乘法求解温度/浓度非均匀分布方法	57
3.1.1	形状拟合法	58
3.1.2	分区法	60
3.2	最小二乘法数值仿真举例	61
3.2.1	计算模型及谱线选择	61
3.2.2	仿真结果	63
3.3	最小二乘法实验举例	64
3.4	TDLAS 气体质量流量测量仿真	66
3.4.1	速度测量基本原理	67

3.4.2	计算模型	68
3.4.3	质量流量测量仿真模块	69
3.5	质量流量数值仿真举例	70
3.5.1	流场分布	70
3.5.2	隔离段质量流量仿真结果	71
3.5.3	进气道唇口质量流量仿真结果	74
3.6	超声速流场气体参数测量	76
3.6.1	实验模型	76
3.6.2	数值模拟结果	77
3.6.3	实验测量结果	78
	参考文献	81

第4章 滤波反投影算法的流场二维测量

4.1	计算机断层扫描技术的发展	82
4.2	基本原理	84
4.2.1	傅里叶切片定理	84
4.2.2	滤波反投影算法	85
4.3	扇形光束重建	87
4.3.1	扇形光束到平行光束的重排	87
4.3.2	等角采样的重建公式	90
4.3.3	等距采样的重建公式	93
4.4	数值仿真举例	94
4.4.1	气体分布模型	94
4.4.2	Gauss 温度场重构	95
4.4.3	投影数目对重建结果的影响	98
4.4.4	噪声对重建结果的影响	99
4.5	应用举例	100
4.5.1	实验系统搭建	100
4.5.2	实验测量结果	102
	参考文献	103

第5章 代数重建算法的流场二维测量

5.1	图像重建的离散模型	105
5.2	奇异值分解	107
5.3	代数重建算法	108
5.3.1	ART 基本形式	108
5.3.2	ART 其他形式	110
5.4	最优准则	112
5.4.1	最小二乘准则	112
5.4.2	最大均匀性准则和平滑准则	113
5.4.3	最大熵准则	115
5.5	FBP 与 ART 重建算法的比较	115
5.6	光线分布参数对 ART 算法的影响	115
5.6.1	光束旋转角度的影响	115
5.6.2	光线数目对重建结果的影响	117
5.7	虚拟光线方法	121
5.7.1	虚拟光线方法的思想	121
5.7.2	非对称分布流场重建结果	122
5.8	应用举例	126
5.8.1	实验装置	126
5.8.2	吸收谱线拟合	128
5.8.3	温度场和浓度场重建结果	129
	参考文献	132

第6章 光线分布优化方法

6.1	平行光束分布优化	133
6.1.1	流场分布模型	133
6.1.2	投影光线矩阵分析	133
6.1.3	光线分布等价形式	134
6.1.4	光线分布优化形式	137
6.1.5	温度分布对重建结果的影响	139
6.2	扇形光束分布优化	141

6.2.1	物理模型及光线分布原则	141
6.2.2	不同发射位置的优化结果	142
6.2.3	发射数目的对重建结果的影响	145
6.2.4	与平行光束投影结果的比较	148
6.2.5	实验验证	150
6.3	非规则光线分布	153
6.3.1	光线分布优化方法	154
6.3.2	气体分布模型及目标函数	155
6.3.3	ASA 与 SQP 优化光线分布	156
6.3.4	与其他光线分布结果的比较	158
	参考文献	160

第1章

绪 论

随着航空航天技术的不断发展和国防建设日益增长的需求,发动机燃烧流场诊断和性能评估受到越来越多的关注。高效的燃烧流场测量手段,可以有效促进航空、火力发电和污染监控等行业的发展。在发动机研究中,燃烧气体参数的测量对于发动机燃烧室诊断和性能评价具有重要意义。

1.1

燃烧流场测量方法

1.1.1 测量方法分类

燃烧的定义是产生热或同时产生光和热的快速氧化反应,也包括只伴随少量热没有光的慢速氧化反应。在本书中,我们将针对燃烧中快速反应部分的诊断方法进行探讨。

燃烧流场诊断是指利用已有手段采集能反映燃烧系统工作进程的各种信息,主要包括压强、温度、速度、浓度及其随时间和空间的分布,火焰峰的位置与传播速度,火焰结构与反应流场的显示,粒子尺寸分布,固体燃料燃烧表面与亚表面状况及其化学结构,排放物的温度分布、组分浓度等。进行燃烧流场诊断的意义:在科学研究中有助于分析反应机理,对理论模型和数值模型进行验证;在工程应用中有助于发展替代能源和新技术,提高燃烧系统安全性,提升发动机性能;在节能减排中,通过监测可以有效地提高燃烧效率,降低能源损失,减少 NO_x 、 SO_x 和颗粒物等污染物的排放。

常用的燃烧实验诊断技术可以分为接触式和非接触式两类。接触式测量方法包括气动式速度探针、气体取样探针、热电偶温度探针,大多数的检测手段具有维护成本高、响应速率慢、灵敏度低、不便于携带和安装等缺点。此

外,许多探测设备无法满足在高超飞行中高温、高速的恶劣环境下长时间工作要求,且侵入式的探针会破坏被测流场,对流动产生干扰,不利于流场参数的测量。在发动机进气道中,吸入的环境气体温度通常被记录并与标准温度相比较。常用的测量设备为热电偶,但是空气中的水蒸气经过压缩,将释放相变潜热到空气中,增加了温度,降低进入发动机的气体密度,在低温恶劣环境中,当进气道入口处气流速度高于飞行速度时,气流流经时会出现空气膨胀温度降低,发生结冰现象,如图 1-1 所示^[1],此时采用热电偶测量温度存在一定偏差。

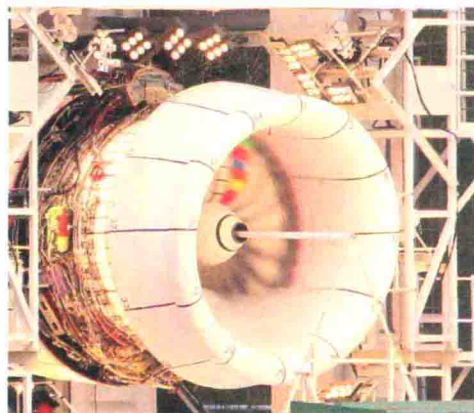


图 1-1 发动机进气道结冰现象

非接触式测量方法主要指各类光学测量方法,包括普通摄影法、干涉法、纹影法、阴影法、光谱法等。其优点是能够满足非侵入、实时和长效测量的要求,并且测量信息丰富,可以得到在线瞬态流场的温度、压力、流速、组分浓度等信息。

1.1.2 光谱学测量方法

激光光谱法诊断燃烧流场的本质是激光与物质相互作用。当激光与燃烧场中的粒子、分子、自由基作用时,会由于各种线性和非线性效应产生拉曼散射、瑞利散射、米散射、荧光等信号,这些信号携带了燃烧场的温度、密度、组分浓度等信息。与传统的接触法测量技术相比,它对燃烧场几乎没有扰动,可以精确测量真实的燃烧过程;测量信息丰富,可以在线测量瞬态燃烧场;空间(微米量级)和时间(纳秒量级)分辨率高,可以测量瞬时一维、二维及三维燃烧场信息;具有可视性,形象直观,结合图像处理与图像显示等手段,可以模拟与显现燃烧场在不同燃烧条件下的变化特性^[2]。

光谱法可以分为散射法、发射光谱法和吸收光谱法三类,散射是指定向传播的光束在通过光学性质不均匀的介质时将偏离原来的方向,向四面八方散开的现象,散射法分类如图1-2所示。

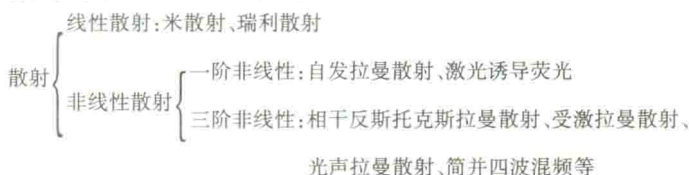


图1-2 散射法分类

下面介绍两种典型的散射测量方法。

(1) 相干反斯托克斯拉曼散射 (Coherent Anti-Stokes Raman Scattering, CARS) 的基本原理是频率为 ν_p 的泵浦束和频率为 ν_s 的探测束借助几何匹配技术聚焦到燃烧火焰区,激光通过三阶非线性极化率同介质相互作用,产生频率为 ν_s 的振荡偏振,并发射 CARS 信号,CARS 信号的频率为泵浦束频率与拉曼频移之和。CARS 技术的优点是能有效消除荧光和非相干背景光的干扰,信噪比高,与可见光自发拉曼散射法相比,所需的激光脉冲能量可低一个量级,数据率高。

(2) 激光诱导荧光 (Laser-Induced Fluorescence, LIF) 是指当激光通过燃烧火焰时,调整激光的输出频率,使之和待测原子或分子的某一上下能级之间的共振跃迁频率相同,通过共振吸收将待测分子从某一电子基态激励到某一激发态,激发态的粒子向下跃迁,产生荧光信号。LIF 技术包括激光诱导预分离荧光 (Laser-Induced Predissociative Fluorescence, LIPF) 和平面激光诱导荧光 (Planar Laser-Induced Fluorescence, PLIF)。LIPF 技术的优点是在较高压力环境下也可定量测量温度等参量,缺点是荧光效率低;PLIF 技术荧光效率较高,可测量二维燃烧场信息,但需考虑燃烧环境的影响。

发射光谱包含原子或分子的荧光光谱和等离子体发射光谱。原子或分子通过吸收光子而被激发到能量较高的能态,通过辐射的或者非辐射的方式释放能量而返回基态。原子或分子通过自由发射返回基态所发射的光称为荧光。本书将激光诱导荧光光谱划分在光散射中,这里不再介绍。

发射光谱技术的另一个典型代表是激光等离子体发射光谱分析技术。等离子体是指电离度大于1%的电离介质,其共同特征是其中的电子数与离子数基本相同。等离子体发射光谱是指等离子体在高温和高度电离状态下发射的光谱。激光等离子体发射光谱在许多场合得到重要应用,如利用激光火花等离子体的发射光谱对气体、火焰等进行气体元素分析;利用激光等离子体的高温可使物质蒸发与汽化,对于金属、陶瓷、高聚物等,特别是那些难熔的元素,可以

采用激光等离子体发射光谱进行多元素痕量分析。

吸收光谱是指当一束光穿过介质时,其强度会因分子吸收而衰减所形成的谱线。吸收光谱法具有光谱分辨率高、检测灵敏度高的特点。在传统吸收光谱技术中,光谱的分辨率一方面受到谱线展宽效应的限制,另一方面又受到仪器分辨率的限制。当使用线宽很窄的激光光源时,光谱的分辨率主要决定于被测分子的谱线展宽效应,不再受到光谱仪器的限制,因此,激光吸收光谱具有很高的光谱分辨率。根据 Beer - Lambert 定律,吸收强度随着吸收光程的增加而增加,通过提高吸收光程亦可提高检测灵敏度。此外,利用很窄的激光谱线可得到很小的光谱间隔,增加检测灵敏度。

利用吸收光谱方法可以对燃烧区域内温度、组分浓度等信息进行测量。本书将重点介绍利用激光吸收光谱方法测量燃烧流场温度和组分浓度的断层诊断方法。

1.2

激光吸收光谱技术的发展

1.2.1 激光器

激光吸收光谱测量技术的研究始于 20 世纪 60 年代中期,早期大都采用盐铅激光器,但由于其设备复杂,价格昂贵,且需要在低温下运转,制约了测量技术的发展。随着光电技术的发展,特别是近红外波段半导体激光器的大规模商用化,半导体激光器具有体积小、寿命长、电光转换效率高和价格低廉等优势,成为气态物质检测的理想光源,从而促进了激光吸收光谱诊断研究工作的发展。目前,用于气体参数测量的可调谐半导体激光器包括可调谐分布反馈激光器(Distributed Feedback Laser,DFB)、垂直腔面发射激光器(Vertical Cavity Surface Emitting Laser,VCSEL)和外腔半导体激光器(External Cavity Diode Laser,ECDL)。其中,DFB 激光器波长调谐范围较窄,约为 0.2nm,通过温度调谐可以达到 4nm 范围^[3];ECDL 激光器^[4]具有很宽的调制范围,达到几十纳米,但是调制频率不高,偏振噪声大,不适用于气体的快速测量;VCSEL 激光器^[5]的电流调谐范围为 5 ~ 6nm,适用于同时扫描多条吸收谱线。

图 1-3 给出了目前利用二极管激光器在红外波段可以检测的气体的组分,包括 O₂、H₂O、CO₂、CH₄、NO、NH₃ 等大量常见的种类,还包括 OH 等燃烧中

非常重要的中间产物。

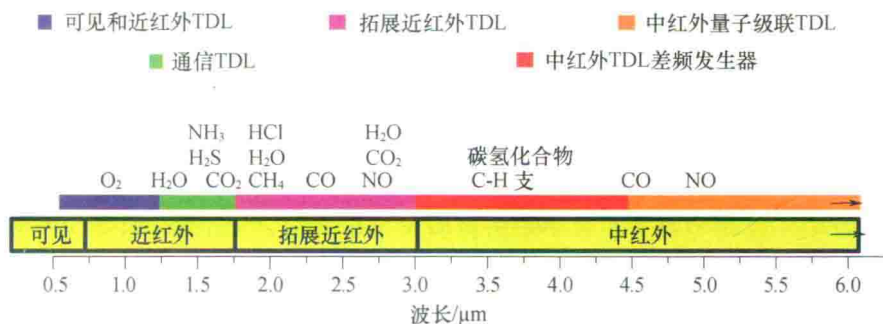


图 1-3 二极管激光器在红外波段可以检测的气体组分^[6]

1.2.2 分类

基于可调谐半导体激光吸收光谱(Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy, TDLAS)测量气体温度和组分浓度的方法主要有三种:直接吸收法(Direct Absorption Spectroscopy, DAS)、波长调制法(Wavelength Modulation Spectroscopy, WMS)和频率调制法(Frequency Modulation Spectroscopy, FMS)。

DAS 是指激光器对气体吸收谱线在频域上进行扫描,通过将测量得到的衰减后的激光强度与参考激光强度进行对比,从而得到光谱的吸收信号。利用 DAS 测量气体的温度和浓度时,不需要通过标准气体进行校准,但是需要确定激光参考强度作为基线,用于确定最终的吸收面积。1996 年, Baer 等人^[7]在测量的吸收信号中截取无吸收部分两端信号,然后利用多项式拟合得到基线。随后, Furlong^[8]、Zhou^[9]和 Liu^[10]等人均采用此方法得到吸收谱线的基线。DAS 是拟合整个吸收谱线,两条谱线吸收面积的比只是温度的函数,因此,该方法适用于气体的组分和压强随时间变化的情况。此外,直接吸收方法通常用于光谱参数的测量和验证^[4,11],如吸收谱线强度、展宽系数等都可以从吸收线型中获得。

1963 年, Arndt^[12]采用傅里叶(Fourier)分析方法,研究了洛伦兹(Lorentz)线型的谐波信号,并给出了 $1f$ 和 $2f$ 项的表达式。1965 年, Wilson^[13]数值仿真得到了高斯(Gauss)和 Lorentz 吸收线型的三次谐波信号,开启了 WMS 的研究。1981 年, Reid 和 Labrie^[14]实验测量了 Lorentz、Gauss 和 Voigt 线型的二次谐波信号,测量得到调制指数等于 2.2 时所有线型出现峰值,与理论分析结果相一致。然而,这些早期研究未考虑激光强度的影响,这种假设只适用于小调制深度的情况。1993 年, Philippe 和 Hanson^[15]在 WMS 理论方面做出了突破性工作。通

过计算 Voigt 线型的 $1f$ 和 $2f$ 分量,理论上给出了谐波的表达形式,分析了激光调制幅度和调制深度的影响。扫描 O_2 吸收谱线,利用 WMS 测量了激波管内气体温度、压强和速度。

2006 年, Li 等人^[16]拓展了大调制深度下的 WMS 理论。实验测量了 WMS 下激光器参数,如激光器功率和频率间的相位延迟、调制深度、线型调制幅度的关系,用于高压下气体参数测量。研究表明,相位延迟随着调制频率的增加迅速增加,当调制频率大于 50kHz 后趋势逐渐变缓,线性调制振幅与调制深度呈现较好的线性关系。同时,分析了非线性调制振幅和相位偏移对测量结果的影响。

由于利用 WMS 测量气体温度和浓度时获得的是相对值,测量结果需要经过标准气体进行标定。为实现免标定, Li^[17] 和 Rieker 等人^[18] 分别在 2007 年和 2009 年通过建立仿真模型,在相同激光参数下得到实验测量结果的绝对值。2011 年, Peng 等人^[19] 采用二阶泰勒 (Taylor) 展开式表示激光强度,利用二阶算法测量 NH_3 的组分浓度,有效提高了浓度测量的精度。为减弱激光强度对测量结果的影响,2011 年, Chang 等人^[20,21] 采用 $1f$ 归一化 $2f$ 信号的方法 (WMS- $2f/1f$), 测量了高超声速进气道隔离段的质量流量。仿真过程中发现 WMS- $2f/1f$ 信号在调制指数介于 0.9 ~ 1.1 之间时信号最大。2013 年, Sun 等人^[22] 采用固定波长 WMS- $2f/1f$ 方法实现了在高压环境中对气化炉温度的实时监测。气化炉采用粉末状煤块或液体乙醇作为燃料,产生一种包含 H_2 、 CO 、 H_2O 和 CO_2 的合成气体。

FMS 和 WMS 两者在系统构成上较为相似,但波长调制使用的调制频率远远小于线宽,一般在几千赫到几十千赫,搭建系统设备可以采用通用的商品化产品,如锁相放大器、探测器等。FMS 使用的调制频率则等于或者大于线宽,达到上百兆赫,各种噪声已降低到可以忽略的水平,因此可以达到最高的检测灵敏度。但是 FMS 的实现技术难度大,检测结果分析比较复杂,其对应的高频探测器等设备价格昂贵^[23,24],因此本书只介绍 DAS 和 WMS 技术。

1.3

均匀流场诊断研究进展

对于气体探测,特别是对燃烧或推进流场的应用来说, TDLAS 测量技术具有高灵敏度、高谱分辨率、快时间响应以及鲁棒性和非侵入特性,已经成为

强有力的诊断工具之一。TDLAS 技术是基于视线效应的测量,利用两条吸收谱线可以得到沿着光路上气体温度和浓度的平均值。近年来,国际上陆续开展将 TDLAS 技术应用于发动机地面测试设备的研究及验证,包括航空发动机进气道、超燃冲压发动机隔离段/燃烧室、脉冲爆震发动机 (Pulse Detonation Engine, PDE)、内燃机等温度、组分浓度、密度和速度等多参数测量。

1977 年, Hanson 等人^[25]证明了采用可调谐半导体红外光谱激光器可以对燃烧气体性质实现在线测量。Philippe 和 Hanson^[15]在 1993 年首次实现了对燃烧场和推进流场温度、组分浓度和质量流量的实时测量。

1996 年, Allen 等人^[26,27]采用近红外半导体激光传感器对冲压发动机、富氧燃烧室和飞行试验中的温度、气体组分浓度和速度进行了测量,研究了非均匀流动对 Doppler 频移的影响,但仿真的最大速度只有 150m/s ^[28]。

2000 年, Sanders 等人^[29]利用半导体激光器探测了脉冲爆震发动机的燃烧参数。随后,可调谐半导体激光 (Tunable diode laser, TDL) 传感器应用于超燃冲压发动机燃烧室地面测试系统,质量流量传感器用于商用航空发动机的地面测试和样机的飞行试验。

2005 年, Mattsion 等人^[30]发展了用于脉冲爆震发动机燃烧室的 TDL 温度传感器,如图 1-4 所示。4 个波长激光采用光纤耦合器耦合到一根单模光纤,并用准直器接入 PDE 燃烧室侧壁,激光束穿过 PDE 燃烧室后通过多模光纤接收,经过光栅将 4 个波长激光分开,并由不同的探测器分别测量。测量系统采用全光纤耦合,电子设备可以远离发动机,以减少机械振动对测量结果的干扰。

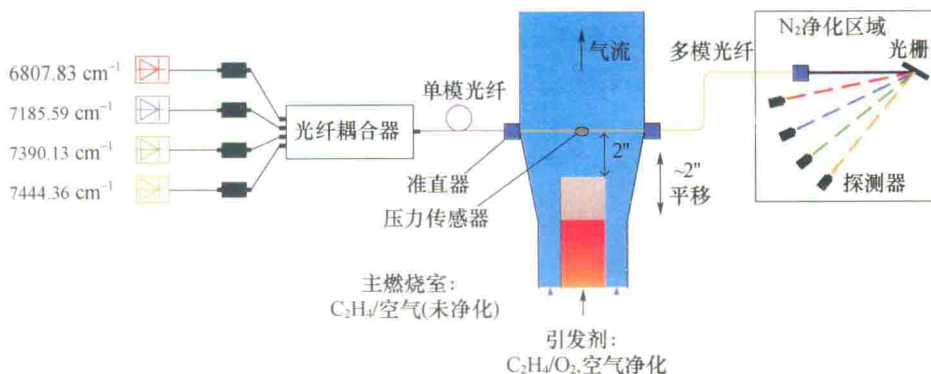


图 1-4 TDL 温度传感器安装于 PDE 燃烧室