

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2015.02.01

基于 CARS 的高温燃气温度测量技术

赵俭

(中航工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 介绍了 CARS 温度测量的基本原理、国外在该技术方面的研究进展以及国内各机构在 CARS 方面的研究情况, 分析了各技术分支的优缺点, 希望能够在国防科技领域的高温燃气温度测量中较好地发展与应用这项技术, 以解决高温测量的难题。

关键词: 激光; CARS; 高温; 燃气; 测量

中图分类号: TB942

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2015)02-0001-05

High Gas Temperature Measuring Technology Based on CARS

ZHAO Jian

(Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: The principle of CARS temperature measurement and the research progress at home and abroad are introduced in this paper. Advantages and disadvantages of some technology branches are analyzed. It is hoped that this technology can be developed and applied better in national defence science and technology fields, in order to solve problems of high temperature measurement.

Key words: laser; CARS; high temperature; gas; measurement

0 引言

在航空航天等国防科技领域, 高温燃气温度是关键的测试参数, 对于武器型号的性能评价、状态监控具有重要意义。随着武器型号的不断发展, 所需测量的燃气温度越来越高, 基于物理探针的接触式测量技术遇到了测温上限的困扰。基于 CARS(相干反斯托克斯拉曼散射光谱)、RS(瑞利散射光谱)、PLIF(平面激光诱导荧光)、TDLAS(可调谐半导体激光吸收光谱)等激光诊断的非接触式测量技术, 由于不受测温上限的限制, 受到了国内外研究者的重视, 相关研究工作已大面积展开。其中, CARS 技术具有高的信号转换效率和空间相关性, 可有效地抑制高干扰燃烧体系的背景噪声, 并且可实现高空间和高时间分辨, 这些是其它的光学诊断所无法比拟的。

1 CARS 的基本原理

CARS 是一种基于三阶非线性拉曼散射的非线性光

学效应。1928 年, 印度物理学家拉曼发现, 当单色光入射到介质时, 散射光中除了包括频率与入射光相同的瑞利光之外, 还包括强度比瑞利光弱得多, 频率与入射光频率不同的散射光, 这种现象后被称为拉曼散射现象, 这种频率不同的散射光被称为拉曼散射光。拉曼散射光的频率对称分布于瑞利光频率的两侧, 频率低的称为斯托克斯线, 频率高的称为反斯托克斯线。拉曼散射线与瑞利散射线之间的频率差与入射光频率无关, 而与介质分子的振、转能级有关, 与入射光强度和介质分子浓度成正比。

当作用于拉曼介质的激光脉冲频率为 ω_1 和 ω_2 ($\omega_1 > \omega_2$), 它们的频率差等于样品分子的拉曼频率 ω_R 时, 分子振动即为共振相干受迫振动, 这两束高强度的相干辐射通过激发分子系统产生媒质极化就可以产生出频率为 $\omega_1 - \omega_2 + \omega_3 = \omega_{\text{CARS}}$ 的新的相干辐射, 即为 CARS 光谱信号。 ω_3 为探测光的频率。探测光经常与泵浦光(频率为 ω_1)简并, 采用同样的频率, 因而在实际当中, 探测光也常被称为泵浦光, 而另一束入射光(频率为 ω_2)则被称为斯托克斯光。CARS 过程的能级跃迁如图 1 所示。相干反斯托克斯拉曼散射由双频率入射激光激励分子跃迁从而产生拉曼谱线, 它与三阶非线性极化率 $\chi^{(3)}$ 有关。

收稿日期: 2014-09-30

作者简介: 赵俭(1973-), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事特种条件下温度测量技术和动态温度校准技术研究。

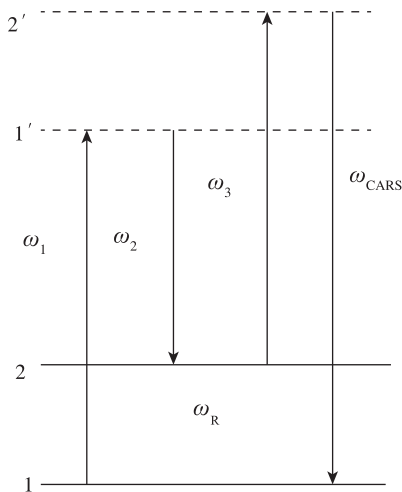


图1 CARS 能级跃迁示意图

根据麦克斯韦方程组和物质方程,在满足一定的相位匹配的条件下,CARS 信号的强度 I_s 为

$$I_s = \frac{\omega_s^2}{n_1^2 n_2 n_s} |\chi_{\text{CARS}}^{(3)}|^2 I_1^2 I_2 L^2 \quad (1)$$

式中: ω_s 为 CARS 信号光的频率; n_1 为频率为 ω_1 的入射光在介质中的折射率; n_2 为频率为 ω_2 的入射光在介质中的折射率; n_s 为 CARS 信号光在介质中的折射率; $\chi_{\text{CARS}}^{(3)}$ 为介质的三阶非线性极化率; I_1 为频率为 ω_1 的入射光的强度; I_2 为频率为 ω_2 的入射光的强度; L 为介质中产生 CARS 信号的区域长度。

由式(1)可见,介质的三阶非线性极化率决定了 CARS 信号的强度,而三阶非线性极化率可表示为

$$\chi_{\text{CARS}}^{(3)} = \chi_{\text{R}}^{(3)} + \chi_{\text{NR}}^{(3)} \quad (2)$$

式中: $\chi_{\text{R}}^{(3)}$ 为共振极化率; $\chi_{\text{NR}}^{(3)}$ 为非共振极化率,可认为是一个常数。

共振极化率的表达式可通过密度矩阵的方法求得:

$$\chi_{\text{R}}^{(3)} = \frac{8\pi^2 \varepsilon_0 c^4 \Delta_j}{h\omega_2^4 (\omega_j - \omega_1 + \omega_2 - i\Gamma_j)} \left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right)_j \quad (3)$$

式中: ε_0 为介质的真空介电常数; Δ_j 为拉曼跃迁上下能级间粒子数密度差; ω_j 为拉曼跃迁频率; Γ_j 为拉曼线宽; $\left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right)_j$ 为拉曼散射截面。

由式(3)可见,三阶非线性极化率正比于 CARS 过程所涉及能级间的粒子数密度差,而粒子数的布局与温度密切相关。在热力学平衡状态下,服从玻尔兹曼分布,这是 CARS 测量温度的基础。

2 国外研究进展

国外对于 CARS 技术的研究始于 20 世纪 70 年代后期,美国、德国、法国、英国、日本、加拿大和俄罗

斯等国都在此方面开展了大量的研究工作。

1978 年,美国联合技术研究中心(UTRC)的 A. C. Eckbreth 提出了著名的 BOXCARS 相位匹配技术,并与 J. A. Shirley 等人在此基础上衍生出平面 BOXCARS 和三维交叉布置的折叠 BOXCARS。平面和折叠 BOXCARS 相位匹配方式的提出,大大地提高了 CARS 的空间分辨能力。与此同时, A. C. Eckbreth 还与 R. J. Hall 等共同完成了氮气、一氧化碳和二氧化碳等组分的 CARS 测量与光谱仿真工作^[1]。这些工作为 1980 年后 CARS 的应用和发展奠定了基础。另外,UTRC 在应用研究方面也做了大量的工作,1980 年前后, A. C. Eckbreth 等人通过对氢气/空气预混火焰、航空发动机燃烧室和涡轮的燃烧流场、多烟尘燃烧流场以及发动机羽流的温度测量,证明了 CARS 对发动机燃烧温度场的测量能力。但此时的 CARS 测量能力还有很多不足,尽管使用叠加脉冲方式,信号质量尤其是信噪比仍不高。在实际发动机燃烧流场中,非共振背景的处理技术、发射噪声的处理技术和数据拟合技术等方面都有待提高。随后, R. J. Hall 等改进了高压下的 CARS 光谱理论仿真模型,并得到了二氧化碳和水在一定压力下的理论 CARS 光谱^[2],为在高压下应用 CARS 技术奠定了基础。A. C. Eckbreth 等人提出的多色 CARS 概念和方法,则使同时测量多种组分或同时测量多种参数成为可能。

UTRC 对 CARS 技术的进步做出了突出贡献,提出了多项有价值的关键技术,但 UTRC 的研究存在两方面的不足:①对于 CARS 准确性的研究是通过在管式电炉中与热电偶测温的对比来实现的,未考虑实际的燃烧系统与空气存在差别可能给 CARS 准确性带来复杂的影响;②代表其最高应用水平的 CARS 在超声速燃烧测量中的应用未实现高时间分辨测量,未能解决非稳态火焰中 CARS 测量的时间分辨问题。

NASA 兰利研究中心(LRC)的研究工作主要在于 CARS 的实际应用方面,尤其是在超声速燃烧研究中的应用。1980 年代中期,针对 CARS 应用于实际燃烧系统时信噪比偏低的问题, R. R. Antcliff 等人对 CARS 应用于湍流火焰测量时非共振背景噪声的抑制方法进行了研究。他们还将火焰温度的测量结果与理论计算结果进行了比较,测量温度比计算结果高 400 K 左右^[3],二者之间的差异与湍流温度场的不均匀有关。这些研究具有很强的发动机燃烧测量应用背景。从 1980 年代中期至 1990 年代中期, O. J. Jr. 和 R. R. Antcliff 等人对超声速燃烧流场的 CARS 测量技术进行研究,在一个

超声速燃烧模拟装置中使用多色 CARS 同时测量氮气、氧气的浓度和温度,并用 CFD 方法对测量结果进行了校验。在超声速燃烧的 CARS 测量方面,R. R. Antcliff 等人使用参考光路,消除光源脉冲稳定性的影响,改善了 CARS 信号的质量,另外,还利用共振 CARS 信号的偏振特性改善了信噪比,但他们未能实现对超声速燃烧分析极为重要的时间分辨测量,其测量结果仍是时均值。Lucht 提出了双泵浦 CARS 测量技术,2005 年,S. A. Tedder 等人采用该技术,成功地测量了超声速燃烧场中的温度以及氮气、氧气和氢气的浓度^[4],双泵浦 CARS 测量技术的优点是,可以同时得到两种组分的 CARS 光谱。NASA 兰利研究中心还和威廉玛丽学院合作研究了 CARS-IRS 技术,该技术将 CARS 测量技术与 IRS 测量技术相结合,不仅可以测量温度以及氮气、氧气和氢气的浓度,还可以同时测量两种组分的速度,非常适合于超声速反应流的研究^[5]。

1988 年,密西西比州立大学的 F. Y. Yueh 提出了双色宽带多组分测量技术^[6]。1994 年,F. Y. Yueh 等人又提出可以从基带的线宽得出转动温度,而通过宽带光谱线型得到振动温度的新方法,继双色宽带多组分测量技术的提出后,再次对 CARS 的关键技术进步做出贡献。密西西比州立大学的研究侧重于技术的发展和理论方案的论证,注重 CARS 技术细节的研究,他们所探索的关于 CARS 准确性、相位匹配及对应用方案的设计等课题,对于今天的 CARS 研究仍有重要的参考意义。美国代顿系统研究实验室的 W. B. Roh 和法国的 J. P. Taran 联合提出的单脉冲宽带 CARS 技术,使得用 CARS 进行有时间分辨意义的测量成为可能,具有里程碑式的意义。

1980 年代初期,德国的 K. Knapp 等人测量了激波管中氮气的振动温度,D. U. Wellhausen 等人测量了低压下受微波激发的氮气振动温度,对用 CARS 技术测量热力学非平衡系统的温度进行了研究。在 1980 年代至 1990 年代中后期的十多年来,德国的研究者提出了一系列独特的 CARS 测量方法。A. Leipertz 等提出了基于傅立叶分析的转动 CARS 测量方法。R. Brakel 等报告了偏振 CARS 的测量,信号采集和滤波时考虑了 CARS 的偏振特性。Marowsky 等提出了通过相位差抑制非共振背景的技术。B. Large 等研究了激光的时间相干性对测量的影响,并且研究了 CARS 数据处理技术的改进,对非共振三阶非线性极化率进行了校正。1998 年,M. Fischer 等测量了超声速喷管出口的振动和转动温度,观察到了化学和热力学非平衡现象,再次

证明了 CARS 对非平衡态温度的测量能力。

1997 年,德国维尔茨堡大学的 W. Kiefer 等人用脉宽小于 100fs 的激光得到了不同激发波长情况下碘蒸气中的时间分辨 CARS 光谱信号,从实验上证明了飞秒时间分辨 CARS 光谱应用的可行性。在对得到的时间分辨光谱进行深入的动力学分析之后,他们于 1998 年在气相苯/甲苯混合物中进行了同样的实验^[7],并且在苯和甲苯的振动模式中间发现了一个新的瞬态强信号。2000 年以后,他们又对不同的样品进行了时间分辨 CARS 光谱的测量和分析^[8],并建立了相应的理论模型。

法国、英国、俄罗斯、日本以及加拿大等国也在 CARS 测温技术研究方面做了大量的工作。1980 年代中期,法国 ONERA(法国国家航天航空研究中心)的 M. Pealat 和 J. Bonnet 等人研究了 CARS 光谱由振转能级分布决定的本质,并从理论上区分 CARS 所测温度对应的振动和转动自由度,致力于将 CARS 技术用于非平衡过程测量的研究。1990 年代以后,ONERA 也开始重视 CARS 在各种燃烧流场中的应用技术,对突扩流、超声速燃烧流场等进行了 CARS 测量。1993 年,英国 R-R 公司的 D. R. Williams 等人利用 CARS 技术进行液体火箭发动机羽流温度和组分的测量,并与理论计算结果进行了比较。1980 年代,俄罗斯的 A. A. Deviatov 等人利用 CARS 技术,研究在非平衡环境中振动能级被激发的氮气分子的动力学过程,并研究了振动能级的布居数变化。1990 年代,S. Dlaskov 等人使用 CARS 研究了激波后的燃烧和变化过程。研究表明,CARS 对激波后与燃烧相关的非平衡化学反应过程具有较强的测量能力,测量的温度范围为 2000 ~ 4500K。日本的 Y. Matsunot 在激波管中测量了氢气 CARS 强度与温度和压力的关系。S. Fuji 等分别报告了在湍流火焰、钝体绕流火焰以及扩散火焰中 CARS 的测量结果,并且对背景抑制技术、信号滤波技术和测量准确性进行了研究。S. Fuji 等提出,让 CARS 信号和激光在两片双色镜间反射,从而达到滤波的目的^[9]。加拿大的研究者分别在硬件和方法上探索 CARS 测量的噪声处理,激光时间特性对 CARS 测量的影响以及光谱的仿真等。1980 年代中后期,D. R. Snelling 等研究了测量噪声对结果的影响和修正方法。1980 年代末,M. J. Deen 等报告了使用电子外插法进行动态温度测量的 CARS 系统设计及性能模拟。D. R. Sneling 等介绍了用于 CARS 测量的探测器的非线性和图像均匀性研究^[10]。

进入 21 世纪以来,在 CARS 技术的研究方面,世界各国多以应用研究为主。2000 年, J. Y. Hwang 等利用 CARS 技术对硅土扩散火焰的温度和氢氧基分子分布进行了五次测量,每次测量都是对连续得到的 100 个光谱取平均,得到的实验标准偏差小于 2.5%,这一结果说明了测量结果具有较小的分散性。2002 年, A. D. Cutler 等人利用氮气 Q 支 CARS 光谱在一个简化的超燃装置中进行了温度测量^[11],得到的平均温度比 CFD 计算结果高约 150K。同年, F. Grisch 等人采用 CARS 与 LIF、DFWM 技术相结合,对几种火焰的温度和气体浓度进行了测量,并将实验结果进行了对比分析,结果表明,火焰最高温度 2160K,测量误差约为 50K。2004 年, F. Chaussard 等人采用 CARS 方法对火箭发动机温度进行测量,空间分辨率 1mm,测量误差不超过 50K,测量不确定度在 6% ~ 8% 之间^[12]。

从国外的研究进展来看, CARS 的理论模型、测量方法以及应用技术等方面都取得了显著的成果。在世界各国的共同努力下, CARS 测温技术已经发展到了一个相对较高的水平。同时,随着飞秒激光等新技术的发展,也带动了 CARS 技术的不断进步。

3 国内研究进展

国内对于 CARS 技术的研究起步较晚,在 1995 年以前,对 CARS 技术的研究多以理论分析计算为主,主要集中在对测量原理、测量方法以及理论光谱计算的初步探讨上。直到 20 世纪 90 年代中期以后,国内对 CARS 技术尤其是温度测量技术的实验和理论研究才开始全面展开。国内开展 CARS 技术研究的单位主要有中科院力学所、西安近代化学研究所、西安核技术研究所、国防科技大学、北京理工大学以及哈尔滨工业大学等。

中科院力学所的赵建荣、杨仕润对 CARS 技术在国内的发展起到了很大的推动作用。1990 年,他们用宽带 CARS 技术测量了高温空气的温度及其实时升降过程,结果明显地优于有滞后效应的常规热电偶测试方法^[13]。他们还将 CARSFT 理论光谱软件移植到小型机上进行计算和应用研究,利用 CARS 技术同时测量氢氧燃烧火焰的浓度和温度^[14],将 CARS 测量技术应用于超声速燃烧研究中,并对多点同时测量、激光的相位匹配技术、光谱仿真等进行了研究。中科院力学所在利用氢气 S 支和氧气 Q 支 CARS 同时测温和测组分浓度的研究方面,具有较高的水平。

国防科技大学的周进、李麦亮等从 2000 年前后开始进行 CARS 技术研究,并针对液体火箭发动机燃烧过程和超声速燃烧研究的需要,重点对 CARS 测温的准确性、高时间分辨测量进行了探索。研究了压力对实验 CARS 光谱的影响,探索了对湍流场测量十分重要的单脉冲测量技术,在超声速燃烧和液体火箭发动机燃烧流场中得到了有时间分辨意义的测量结果,为 CARS 测温技术的进一步应用和发展提供了重要的参考^[15]。

2000 年 ~ 2001 年,北京理工大学的闫军等人对 CARS 在炸药测温中的可行性进行研究,并设计了试验方案。另外,闫军等人还对氮的 Q 支 CARS 光谱进行了理论计算,得到了不同温度下的光谱,并探讨了拉曼线宽对光谱的影响。结果表明,在拉曼线宽较小时,光谱的分辨率很高且对温度敏感,利用这种技术测量爆温可达到很好的准确度^[16]。

2001 年,西安近代化学研究所的李春喜等人将 CARS 技术应用于固体推进剂燃烧火焰的实时诊断中,提出了 CARS 在推进剂燃烧诊断中的几个关键问题^[17]。2003 年,李春喜等人利用 CARS 测量了双基推进剂燃烧时的火焰温度,结果表明,燃烧火焰平衡区的 CARS 实验拟合温度数值与相应的热力学计算温度值基本吻合^[18]。2004 ~ 2005 年,郝海霞等人对用 CARS 进行固体推进剂火焰温度测量时,烟尘、C₂ 基、激光强度等对测温结果的影响机制进行了深入的研究^[19]。

2003 年 ~ 2004 年,西北核技术研究所的胡志云等人采用单脉冲非稳腔空间增强探测 CARS 技术,测量了常压下固体推进剂火焰的温度以及氮气的浓度。结果表明,该技术具有较高的空间分辨率,横向空间分辨率约为 0.1 mm,纵向空间分辨率约为 3 mm,火焰温度测量结果的不确定度小于 5%^[20]。2009 年,胡志云等人采用 10 Hz 重复频率运转的宽带 CARS 实验系统,测量了常压和 2 MPa 背景压力下固体推进剂的燃烧场,获得了较高信噪比的单次脉冲氮气 CARS 实验谱,用 CARS 理论计算软件拟合 CARS 实验谱给出了固体推进剂瞬态燃烧场温度和氮气浓度随高度的分布。结果表明,氮气 CARS 谱测量温度的相对不确定度优于 4%;在较低浓度范围内,测量组分浓度的相对不确定度优于 5%^[21]。2013 年,张立荣等人通过模块化设计和有针对性的抗振动设计,研制了一台可用于发动机现场测试、结构紧凑的集成化 CARS 诊断系统,并利用该系统测量了超声速燃烧室出口喷流的温度,获得了单脉冲 CARS 温度拟合结果和温度随时间的变化。

测量结果显示, 不稳定燃烧状态下的温度抖动范围大于稳定燃烧状态, 但平均温度低于稳定燃烧状态, 表明不稳定燃烧的效率相对较低^[22]。

2000 年以来, 哈尔滨工业大学的夏元钦等人开始致力于飞秒 CARS 技术的研究, 建立了飞秒 CARS 的理论模型, 搭建了飞秒 CARS 测温装置, 并初步实现了燃烧温度场的测量, 有效地提高了 CARS 温度测量的时间分辨力。2011 年, 夏元钦、王梓等人研究了飞秒 CARS 显微成像技术, 并探索了该技术在分子超快动力学中的应用^[23]。同年, 吴倩倩在对 CARS 理论系统研究的基础上, 建立了氮气、一氧化碳、氢气等燃烧场相关气体的 Q 支振动 CARS 和 S 支转动 CARS 的光谱计算模型, 计算出了它们的理论 CARS 谱线, 并引入了时间分辨 CARS 光谱计算模型^[24]。2013 年, 夏元钦、李金钊等人开展了飞秒时间分辨 CARS 和飞秒单脉冲 CARS 两种测温方法的研究, 并分别建立了相应的理论模型。利用空间及频域滤波装置提高了 CARS 信号的信噪比, 通过有效减少非共振背景噪声, 得到了延迟时间分别为 200 fs, 500 fs, 1ps 和 2ps 的 CARS 信号^[25]。

国内研究者对 CARS 技术的研究虽相对较少, 很多问题还亟待解决, 但对应用研究十分重视, 对不同条件下燃烧火焰的温度测量有十分深入的研究, 在超声速燃烧、火箭发动机诊断和固体推进剂燃烧测量方面的应用研究方面具备了较高的水平。

4 结论与展望

与传统的接触式温度测量技术相比, CARS 测温技术具有测温上限高、不干扰流场和温场、时间和空间分辨力高等优点, 是未来武器型号研制中必不可少的燃烧诊断工具。从国外的技术发展趋势来看, CARS 技术作为一种新型的测温技术, 必将逐步取代传统测温技术, 具有广阔的应用前景。目前, 我国已有多家单位在 CARS 技术方面投入研究, 并取得了一定的研究成果。

经过数十年的发展, CARS 测量技术已经取得了实质性的进展, 测量理论基本成熟, 在应用技术方面也取得了许多突破。随着 CARS 测量技术研究的继续深入, 时间分辨力问题、准确性问题、环境适应性问题等将会逐渐得到解决。随着这些关键问题的解决, 基于 CARS 的高温燃气温度测量技术, 在燃烧诊断、状态监测中所起到的作用将会越来越突出, CARS 技术也将会被注入越来越多的活力, 从而推动科技的发展。

参 考 文 献

- [1] Fischer M, Magens E, Weisgerber H, et al. CARS Temperature Measurements on an Air Breathing Ram Jet Model [C]//36th Aerospace Science Meeting & Exhibit. Reno: AIAA, 1998: 1-10.
- [2] Eckbreth A C, Anderson T J. Dual Broadband CARS for Simultaneous, Multiple Species Measurements [J]. Applied Optics, 1985, 24(1): 3731.
- [3] Chan Bong Park, Hideaki Nakane, Nobuo Sugimoto, et al. Algorithm Improvement and Validation of National Institute for Environmental Studies Ozone Differential Absorption Lidar at the Tsukuba Network for Detection of Stratospheric Change Complementary Station [J]. Applied Optics, 2006, 45(15): 3561-3576.
- [4] Tedder S A, Byrne S O, Danehy P M, et al. CARS Temperature and Species Concentration Measurements in a Supersonic Combustor with Normal Injection [C]//43rd Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno: AIAA, 2005: 1-16.
- [5] Tedder S A, Bivolaru D, Danehy P M, et al. Characterization of a Combined CARS and Interferometric Rayleigh Scattering System [C]//45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno: AIAA, 2007: 1-8.
- [6] Yueh F Y, Beiting E J. Simultaneous N₂, CO₂ Measurements and H₂ Multiplex CARS in Combustion Environments Using a Single Dye Laser [J]. Applied Optics, 1988, 27(15): 3233-3243.
- [7] Rubner O, Schmitt M, Knopp G, et al. Femtosecond Time-Resolved CARS Spectroscopy on Binary Gas-Phase Mixtures: A Theoretical and Experimental Study of the Benzene/Toluene System [J]. Phys. Chem. A 1998, 102: 9734-9738.
- [8] Siebert T, Schmitt M, Grafe S, et al. Ground state vibrational wave-packet and recovery dynamics studied by time-resolved CARS and pump-CARS spectroscopy [J]. Raman Spectrosc, 2006, 37: 397-403.
- [9] Kim J I, Hwang J Y, Lee J, et al. Numerical and Experimental Study on Silica Generating Counter Flow Diffusion Flames [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2005, 48: 75-81.
- [10] Papac M J, Dunn-Rankin D, Stipe C B, et al. N₂ CARS Thermometry and O₂ Lif Concentration Measurements in a Flame under Electrically Induced Microbuoyancy [J]. Combustion and Flame, 2003, 133: 241-254.
- [11] Singh J P, Yueh F Y. Study of N₂ CARS Spectra of a Coal-Fired Flow Facility [C]//24th Plasmadynamics & Lasers Conference. Orlando: AIAA, 1993: 1-10.

依据上述原则,对 $8\text{ m} \times 10\text{ m} \times 10\text{ m}$ 空间的三个定标墙给出了如图 7 所示的校准方案:方案中每面定标墙摆放 4 个标准尺,为了保持数据闭合,在墙 1、墙 3 之间又增加了一个标准尺,标准尺总共摆放了 13 个位置。经实验验证,该方案与每面定标墙只摆放一个标准尺相比,校准精度大大提高了,完全满足 0.05 mm 的校准要求。

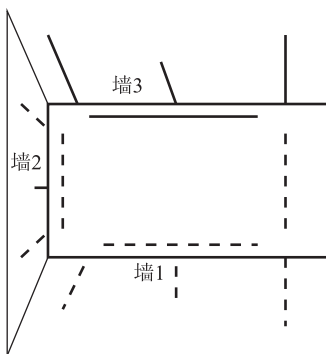


图7 标准尺的摆放方案

本文提出了一种汽车碰撞试验定标墙的现场校准方法,利用摄影测量系统与标准尺,通过合理布局实现了定标墙的高精度校准。上述现场校准方法已应用于长春一汽-大众汽车有限公司的定标墙的校准,通过对标准尺的位置、数量及姿态的优化,采用常用的摄影测量系统对 DMAS 的定标墙进行校准,定标墙现场校准误差小于 0.05 mm ,完全满足 $0.1 \text{ mm} + 1 \times 10^{-4} L$ 的测量要求,由此进一步证明该校准方案切实可行。

- [1] 颜燕. 汽车碰撞试验及数据处理方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2008.
- [2] 黄虎, 常健, 何稚桦, 等. 汽车侧面碰撞试验探讨[J]. 上海工程技术大学学报, 2002, 16(2): 105 - 109.
- [3] 郑祖丹, 胡伟强, 吴斌, 等. 汽车碰撞测力墙的研制[J]. 上海汽车, 2014, 11(2): 105 - 109.

[25] 李金钊. 飞秒 CARS 在燃烧测温中的应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013: 1-55.