

基于 TDLAS 的飞机燃油箱氧浓度测试技术研究^{*}

李卢丹 姜宏伟 蒋红娜
(中国飞行试验研究院 西安 710089)

摘要: 针对飞行试验中狭小空间燃油箱氧浓度实时、精确测量需求,首先分析了日前飞行试验中应用的氧浓度测试系统存在的问题,提出基于 TDLAS 技术实现燃油箱氧浓度测试;其次,通过系统内部结构优化设计实现气液分离与小型化,最终体积较现有设备缩小了十倍以上,并采用波长调制技术与温度/压力补偿算法,提升系统在机载环境下的氧浓度检测能力;并通过地面及飞行试验,验证了系统的可靠性,最大测量误差为 0.28%,达到机载氧浓度测量国际先进水平,为后续各型号惰化系统鉴定奠定基础。

关键词: 氧浓度测量;激光吸收光谱技术;飞行试验

中图分类号: TN06 V217 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 590.5020

Research on oxygen concentration measurement technology of aircraft fuel tank based on TDLAS

Li Ludan Jiang Hongwei Jiang Hongna
(Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China)

Abstract: According to the real-time and accurate measurement of oxygen concentration in narrow space during flight test, the existing problems of oxygen concentration measurement system used in flight test are analyzed firstly, TDLAS is proposed to measure the oxygen concentration of fuel tank. Secondly, the internal structure of the system is optimized to achieve gas-liquid separation and miniaturization. The final volume is more than ten times smaller than the existing equipment, and the wavelength modulation technology and temperature/pressure compensation algorithm are used to improve the oxygen concentration detection capability of the system in the airborne environment. Finally, the reliability of the system was verified through ground and flight tests. The maximum measurement error is 0.28%, reaching the international advanced level of airborne oxygen concentration measurement, laying the foundation for the subsequent identification of various types of inerting systems.

Keywords: oxygen concentration measurement; laser absorption spectrum counting; flight test

0 引言

飞机燃油箱爆炸一直严重威胁航空安全。环球航空 800 航班因中央油箱爆炸,造成机上人员全部罹难,燃油箱上部空间聚集的氧气是事故的主要原因。对于现代军/民机而言,保障燃油箱的安全既是保障军用飞机的战斗力,也是保障民用飞机安全的主要方式之一,燃油箱氧浓度是燃油箱安全性的关键指标。CCAR25.981(c)对民机燃油箱惰化系统各舱室氧气浓度做出明确要求^[1],GJB3212《飞机燃油系统飞行试验要求》中要求“军机燃油系统鉴定必须对飞机全包线飞行条件下燃油箱上部空间氧浓度进行实时测量,以保证其在规定的数值内。”^[2]因此,必须开展飞机燃油

箱氧浓度测试技术研究,研制出适用于各类机型的通用化机载氧浓度测试设备。

飞行试验中,由于飞机姿态实时变化,设备安装空间狭小,机载环境复杂,对燃油箱氧浓度进行准确测量具有很大的难度。在国外,对机载燃油箱氧浓度测试技术有较多的研究,技术最为成熟的为美国 Oxigraf 公司,该公司设计的基于可调谐半导体激光吸收光谱技术(tunable semiconductor laser absorption spectroscopy, TDLAS)的氧浓度测试设备历经几代发展并装机使用,对于民用飞机,允许国内租借设备,但实行技术封锁,且禁止军用,因此燃油箱氧浓度测试设备国产化需求愈发强烈。

我国现有自主研发的燃油箱氧浓度测试设备是基于电

收稿日期:2022-11-08

^{*} 基金项目:国防科工局军工院所基础研究稳定支持计划(WD-2020-2)项目资助

化学原理的^[3],其体积庞大仅适用于大型运输机;经过对国外先进机载氧浓度测试设备的调研,提出将 TDLAS 技术^[4]的氧浓度测试技术用于飞行试验,该技术可实现设备的小型化。在国内 TDLAS 传感器理论和工程应用的研究探索工作已具备一定的储备,但产品多为民用,不能适应机载复杂环境且测试精度达不到飞行试验要求^[5-9]。为了推进 TDLAS 技术在飞行试验上的应用,获取准确、可靠的氧浓度数据,本文在探索光谱吸收技术基本原理与特性的基础上,开展燃油箱氧浓度测试系统设计、集成与地面及飞行试验验证,攻克温度压力大幅变化、油气混合环境下高精度气体浓度实时测量难题,研制出一套小型化、通用化机载燃油箱氧浓度测试系统,为飞行试验安全提供可靠保障。

1 测量原理

TDLAS 气体浓度检测技术中的核心原理是 Beer-Lambert 定律^[10-11],如图 1 所示。

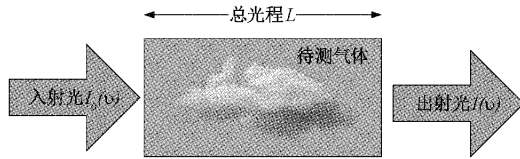


图 1 气体吸收的比尔朗伯定律

当一束强度 I_0 的光束通过充满待测气体的区域,其波长 ν 下的相关光强度会因介质分子吸收而衰减。入射光在通过厚度为 L 的吸收区域后,其出射光强 I 满足如下关系式:

$$I = I_0 \exp[-a(\nu)LC] \tag{1}$$

其中, $I_0(\nu)$ 是入射光强, $I(\nu)$ 出射光强, $a(\nu)$ 是波长 ν 下单位浓度单位长度的介质吸收截面(有时称为吸收系数), L 是吸收路径总光程, C 是待测气体浓度。比尔朗伯定律给出一种通过测量光强变化实现浓度检测的理论基础。在此基础上,不同的气体成分具有独特的吸收中心峰,通过红外光谱吸收中心峰来区分不同气体成分,激光器来回扫描发射待测气体吸收峰频率的红外光,当红外光被待测气体充分吸收后,接收到的出射光含有待测气体的浓度信息。TDLAS 技术属于直接测量技术,直接分析探测器接收到的含有待测气体浓度信息的光信号,通过差分吸收法或谐波检测法反演出待测气体浓度^[12-14]。

2 测试系统设计与实现

基于 TDLAS 技术设计的燃油箱氧浓度测试系统总体框架如图 2 所示,包含 4 个功能模块:光源控制模块、气体吸收模块、信号接收模块与数据处理模块。

2.1 光源控制模块

光源控制模块是整个系统的入口,包含可调谐半导体激光器、波形发生器和温控模块。依据氧气吸收光谱,并结

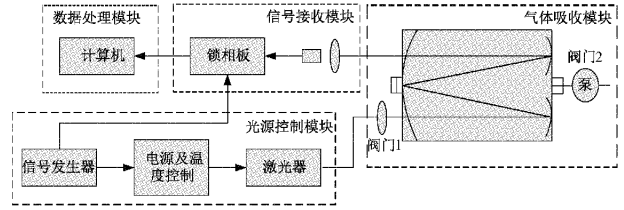


图 2 油箱氧浓度测试系统总体框架

合氧气的谱线吸收强度以及成熟的商业激光光源,选择 760 nm 的激光作为系统光源。半导体激光器在正常工作情况下,注入的一部分电功率会转化为热量。由于半导体激光器体积小等原因,很难及时散热,导致芯片温度升高,最终引起输出波长漂移。因此,必须通过温控模块对半导体激光器的工作温度予以控制^[15-16],具体而言,热敏电阻实时采集半导体激光器的工作温度,将采集到的信号送入到温度控制电路中,与预设的温度值进行比较,温度控制电路根据比较的结果控制加热致冷器件进行加热或致冷,实现对当前的温度进行调节,使半导体激光器工作在预设的恒温状态下。通过以上设计使得激光器发射出的红外光具有良好的单色性、周期性和稳定性。

2.2 气体吸收模块

该模块主要是通过将被测气体抽取出来,经过气室后获取浓度信息,其核心就是气室的设计与实现。为了在有限的体积内测量氧气浓度,实现大范围的气体浓度探测,本文采用怀特池^[17-18]技术,实现多次反射,以便在较小的空间内达到有效测量光程,如图 3 所示。

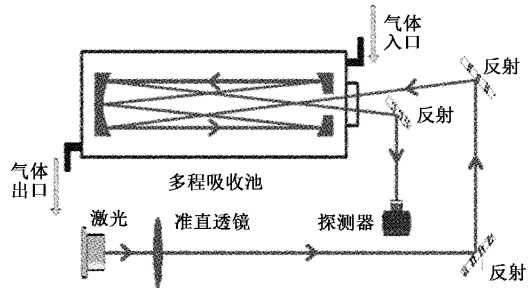


图 3 长光程池结构

要达到理想的测试效果,需要 50 cm 的有效光程。本文采用了基于赫里奥特结构的微型腔设计技术,如图 4 所示,通过在两片相距 6 cm 的凹面反射镜之间实现 9 次反射,实现约 54 cm 的测量光程。凹面镜直径约 2 cm,在反射面镀近红外高反射膜,并加镀保护层。

当取样泵开始工作时,样气从油箱中抽出进入气室,氧浓度测试系统的进气口为三通阀门,可以使设备具备正常和吹扫两种工作模式,设备正常工作模式下,样气直接进入气液分离过滤器,将样气中的液态油滴滤除,然后通过针型过滤器,可以将剩余的微小颗粒和微小油雾滤除;设备在吹扫模式下能够给进气口加压,正常工作进气口阀门关闭,吹扫阀门打开,使用纯净的氮气对设备进行吹扫,保证设备测

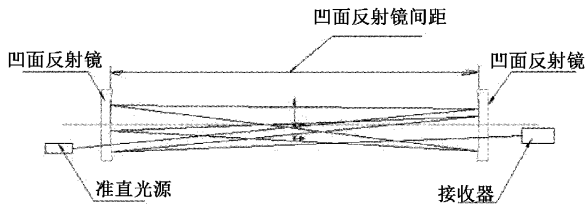


图 4 微型气室光路

试精度,吹扫结束后气体从出气口输出。该系统样机模型如图 5 所示。

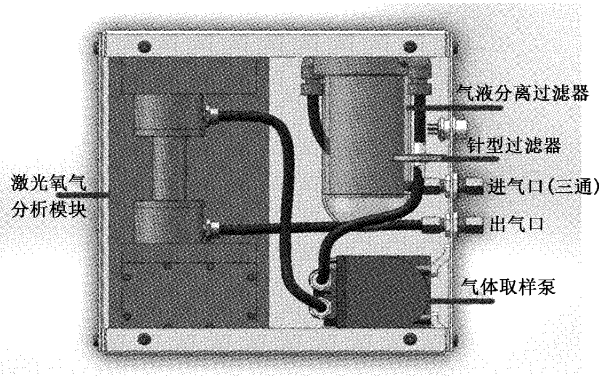


图 5 氧浓度测试系统结构图

2.3 信号接收与数据处理模块

本文对信号接收及数据处理模块的设计主要是为了提升复杂机载环境下的气体浓度测量精度。

首先通过波长调制技术提高系统对微弱信号的检测能

力,原理是将相对频率较高的正弦波信号加载到低频锯齿波信号上,利用混频信号对激光器件进行调制。此时,信号光受到了高频正弦信号的调制作用,而噪声信号则没有发生调制作用,数据处理过程中便可以利用傅里叶变换分析频域内与调制信号频率相同,或者整数倍信号的幅值来反演气体浓度值,即可有效避免非调制信号的干扰,提高测量精度。为了其有效性,利用 Simulink 对系统进行仿真,模型如图 6 所示。

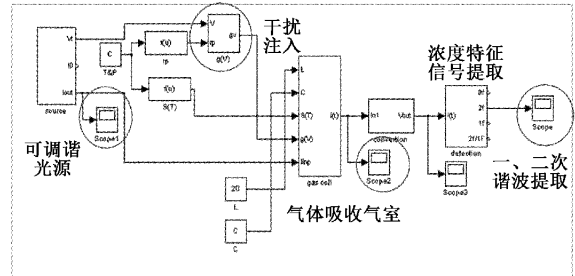


图 6 基于 Simulink 的浓度测试系统模型

首先采用 50 Hz 的低频锯齿波信号和 10 kHz 的高频正弦波调制信号对光源进行调制仿真;其次设置吸收谱线模型参数,得到一定浓度下的调制后的吸收谱线,如图 7 所示;最后对吸收谱线进行傅里叶展开,提取其 1、2 次谐波数据,从仿真结果可以得到二次谐波与吸收谱线具有一致性,如图 8(a)所示。进一步设置不同浓度进行仿真,分别提取其 2 次谐波,其峰值与设置的浓度值成正比,如图 8(b)所示,证明了波长调制的有效性。

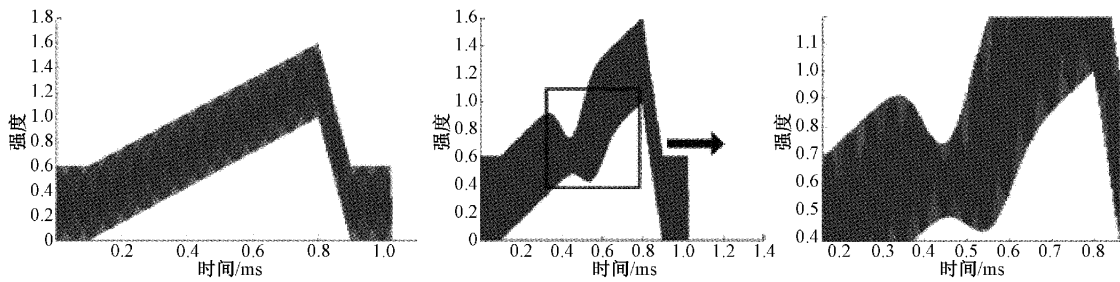


图 7 调制吸收谱线

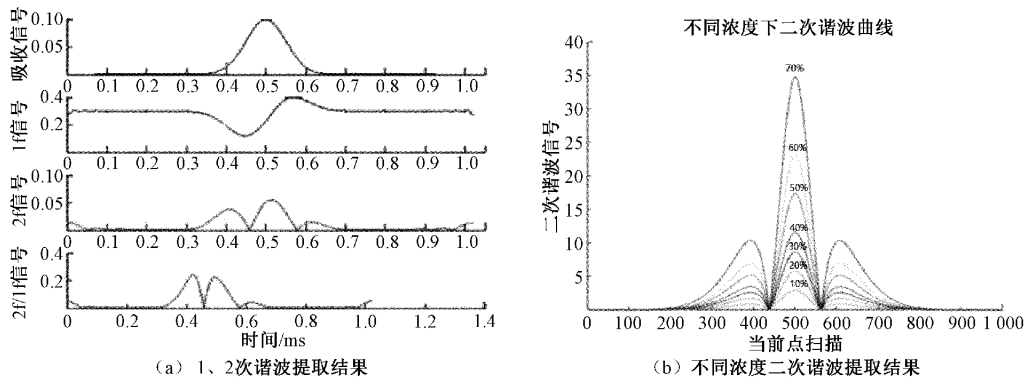


图 8 仿真过程及结果

并且针对飞行试验环境下温度、压力大幅变化的特点,通过四次样条插值对温度、压力进行补偿^[19],最终完成浓度信息的计算,实现(10~120)kpa,(-40~70)℃范围内氧浓度的实时精确测量。

3 试验验证

3.1 地面试验

依据以上设计方案研发的测试系统整机尺寸含气嘴在内为 200 mm×198.3 mm×100 mm,较目前飞行试验中使用的电化学氧浓度测试系统体积缩小了十倍以上。在实验室模拟飞行试验环境搭建验证平台,现场照片如图 9 所示。

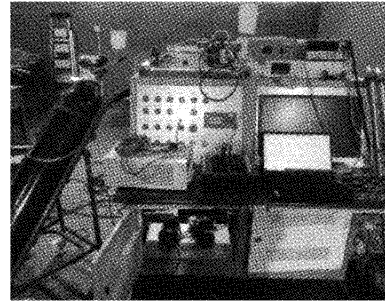


图 9 实验室氧浓度测试系统验证

首先使用 0.3%、10.02%、20.9% 的标准气瓶对系统进行了恒压试验、恒温试验,实验数据见表 1、2。

表 1 恒压试验测量结果

温度/℃	0.3%浓度实测值	绝对误差/%	10.2%浓度实测值	绝对误差/%	20.9%浓度实测值	绝对误差/%
-40	0.21	-0.09	9.77	-0.25	20.68	-0.22
-15	0.40	0.10	9.80	-0.22	20.82	-0.08
0	0.22	0.08	9.78	-0.24	20.75	-0.15
15	0.34	0.04	9.92	-0.10	20.83	-0.07
70	0.22	-0.08	10.11	0.09	20.69	-0.21

恒压(97.5 kPa),(-40~70)℃最大绝对误差 0.25%

表 2 恒温试验测量结果

压力/kPa	0.3%浓度实测值	绝对误差/%	10.2%浓度实测值	绝对误差/%	20.9%浓度实测值	绝对误差/%
10	0.18	-0.12	9.78	-0.24	20.81	-0.09
25	0.23	-0.07	9.80	-0.22	20.74	-0.16
50	0.21	-0.09	9.94	-0.08	20.97	0.07
90	0.40	0.10	9.86	-0.16	21.12	0.22
120	0.36	0.06	10.18	0.16	21.18	0.28

恒温(22℃),(10~120)kPa最大绝对误差 0.28%

其次进行无油条件温压复合试验,使用 10.02% 浓度标气,测试系统在温度压力同时变化情况下浓度测量结果

如表 3 所示。

此外,为了验证设备对油液的过滤效果,进行了油气

表 3 无油条件温压复合试验测量结果

压力/kPa	-40℃浓度 实测值	绝对 误差/%	-15℃浓度 实测值	绝对 误差/%	0℃浓度 实测值	绝对 误差/%	70℃浓度 实测值	绝对 误差/%
10	10.10	0.08	9.81	-0.21	10.25	0.23	10.14	0.12
25	10.06	0.04	9.91	-0.11	9.97	-0.05	9.82	-0.2
50	9.96	-0.06	10.09	0.07	10.14	0.12	10.25	0.23
90	10.09	0.07	10.05	0.03	9.81	-0.21	9.85	-0.17
120	10.12	0.10	9.85	-0.17	10.27	0.25	10.16	0.16

最大绝对误差 0.25%

混合条件温压复合试验,标气为 10.02% 的油气混合物,系统温度设置为 -15℃、45℃,压力设置为 25 kPa,保持 10 min,进行测量,数据如表 4 所示。

通过充分的地面试验,验证了本文设计的氧浓度测试系统的可靠性及测量精度,其在(10~120)kpa,(-40~70)℃范围内,最大绝对误差为 0.28%,并且可以充分过滤

表 4 恒温试验测量结果

温度/℃	25 kPa 浓度实测值	绝对误差/%
-15	10.15	0.13
45	10.10	0.08
最大绝对误差 0.13%		

被测气体中混合的油液,可实现气液混合条件下氧浓度的精确测量。

3.2 飞行试验验证

为了进一步验证该系统在机载环境下的功能及性能,将该系统搭载于某型机,与目前飞行试验中准确度与认可度最高的基于电化学原理的氧浓度测试系统进行对比对试飞,同时测量同一油箱的氧浓度,测量结果如图 10 所示。

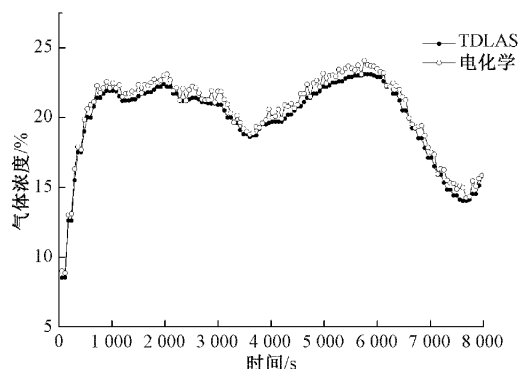


图 10 电化学原理与氧浓度测试系统飞行试验结果对比

通过试验数据可以看出,两套测试系统的试验结果高度吻合,各项技术指标满足测试需求。这标志着成功研制出适用于狭小空间的燃油箱氧气浓度测试系统,可实现压力、温度同时大幅变化情况下气体浓度动态实时测量。

4 结 论

本文针对飞行试验中狭小空间燃油箱氧浓度测量问题,基于 TDLAS 的气体浓度测量原理,设计了具有微型气室结构的氧浓度测试系统,并通过波长调制技术与温度、压力补偿算法提升系统在复杂机载环境下的信号检测能力及测量精度。最后经过地面试验及飞行试验验证,表明了系统可实现在气液混合条件下氧浓度的高精度实时测量,构建了较为完备技术体系,形成高端国产化测试系统,为飞机设计鉴定提供数据支持,并有利于提高武器装备的安全性。

参考文献

- [1] 中国民用航空局. 运输类飞机适航标准 CCAR-25-R4[S]. 北京:中国民用航空局,2011.
- [2] 飞机燃油系统飞行试验要求 GJB 3212-1998[S]. 北京:国防科学技术工业委员会,1998.
- [3] 吕美茜,赵昊罡,魏锦洲,等. 基于电化学原理的飞机燃油箱氧浓度机载测量技术[J]. 测控技术,2020,39(7): 18-23.
- [4] CHEN X, YANG C G, HU M, et al. Highly-sensitive NO, NO₂, and NH₃ measurements with an open-multipass cell based on mid-infrared wavelength modulation spectroscopy[J]. Chinese Physics B,2018, 27(4):254-261.
- [5] 聂伟,阚瑞峰,杨晨光,等. 可调谐二极管激光吸收光谱技术的应用研究进展[J]. 中国激光,2018, 45(9): 9-29.
- [6] 刘宁. TDLAS 燃烧检测系统的研制与煤气燃烧过程的研究[D]. 北京:北京科技大学,2021.
- [7] 陈亚婧,邱爽,徐立军. 多谱线 TDLAS 测温中谱线选择的实验研究[J]. 电子测量与仪器学报,2017, 31(12):1948-1952.
- [8] 陈剑虹,孙超越,林志强,等. 基于 TDLAS 技术的 CO₂ 浓度检测方法研究[J]. 电子测量与仪器学报,2022, 36(6):229-235.
- [9] 张浩,王玲,邹彩虹,等. TDLAS 系统中信号降噪方法的仿真分析[J]. 激光杂志,2022,43(7):31-38.
- [10] 蒋红娜,姜宏伟. 飞行试验中混合气体浓度测试技术研究[J]. 电子测量技术,2021(44):7-11.
- [11] 马修真,袁志国,杨乐乐,等. 基于 TDLAS 技术的气体浓度在线监测系统[J]. 船舶工程,2019(41): 143-145.
- [12] 王志芳. 光谱吸收式多种类痕量气体检测系统优化设计研究[D]. 秦皇岛:燕山大学,2020.
- [13] SUN K, CHAO X, SUR R, et al. Analysis of calibration-free wavelength-scanned wavelength modulation spectroscopy for practical gas sensing using tunable diode lasers[J]. Measurement Science and Technology,2013,24(12): 5203.
- [14] 刘丽丽,赖倍贤,王尹秀,等. 基于谐波的红外激光调制光谱特性研究[J]. 大气与环境光学学报,2014,9(3): 210-214.
- [15] 张龙,陈建生,高静,等. 大功率半导体激光器驱动电源及温控系统设计[J]. 红外与激光工程,2018,47(10): 102-108.
- [16] 徐辉. TDLAS 呼吸气检测温控系统结构优化与控制软件设计[D]. 济南:山东大学,2020.
- [17] SCHAPKAITZ E, KHOZA P. Performance evaluation of the white cell precursor channel on the Sysmex XN hematology analyzer in HIV specimens[J]. Journal of Clinical Laboratory Analysis,2018,32(4):e22335.
- [18] 穆永吉,陈远,余俊,等. 一种多次反射怀特池的研究与设计[J]. 光学技术,2014,40(4):345-348.
- [19] 马砺,范新丽,张朔,等. 基于 TDLAS 技术的 CH₄ 气体检测与温度补偿方法[J]. 光谱学与光谱分析,2021, 41(11):3632-3638.

作者简介

李卢丹,硕士,工程师,主要研究方向为飞行试验机载测试及传感器技术。