

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2106958

飞行试验中混合气体浓度测试技术研究

蒋红娜 姜宏伟

(中国飞行试验研究院 西安 710089)

摘要: 飞行试验中飞机会产生混合可燃性气体,气体浓度的变化给飞行试验安全带来极大安全隐患。针对传统测试方法响应时间长、精度低等局限性,当前新机种新飞行任务对气体浓度测试提出了更高需求。根据型号任务需求,通过对测试环境、气体成分和当前气体浓度测量技术进行分析,确定了混合气体浓度测试总体技术方案,研制了新型机载混合可燃性气体浓度测试系统,实现了气体浓度实时高精度测量。主要阐述了测试系统原理和设计方案,详细介绍了基于时分复用背景噪声去除技术,分别进行了地面和飞行试验验证,经数据分析,系统状态稳定,功能正常,测试数据各项指标均能满足型号任务测试需求。

关键词: 飞行试验;混合气体;气体浓度;测试技术

中图分类号: V241.01;TN06 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 590.30

Research on measurement technology of mixed gas concentration in flight test

Jiang Hongna Jiang Hongwei

(Chinesc Flight Test Establishment,Xi'an 710089, China)

Abstract: In flight test, the aircraft will produce mixed combustibile gas, and the change of gas concentration will bring great security risks to flight test safety. In view of the limitations of traditional test methods, such as long response time and low accuracy, the new aircraft and new mission put forward higher requirements for gas concentration test. According to the requirements of the model task, through the analysis of the test environment, gas composition and current gas concentration measurement technology, the overall technical schme of mixed gas concentration test is determined, and a new airborne mixed combustibile gas concentration test system is developed, which realizes the real-time and high-precision measurement of gas concentration. This paper mainly expounds the principle and design scheme of the test system, and introduces in detail the background noise removal technology based on time division multiplexing. The ground and flight tests are carried out respectively. After data analysis, the system is stable and functions normally, and all indexcs of the test data can meet the requirements of the model task test.

Keywords: flight test;gas mixture;gas concentration;test technology

0 引言

我国某型飞机在进行特定科目飞行试验时,舱内会聚集易燃易爆性混合气体。随着试验时间累积,舱内可燃性气体浓度不断升高,有超过安全阈值的可能,存在爆炸风险,影响飞行安全。通过对1 kg火药燃烧产物及比例分析,产生的可燃性气体主要有一氧化碳和氢气,还有少量甲烷,其与空气中的氧气混合后一定条件下会发生爆炸。如果甲烷和二氧化碳的浓度低于4%,则被视为安全值,浓度达到4%~17%,则比较容易被引爆,一旦浓度超过17%,则非常容易被引爆,即使是一个电火花或者482℃的高温

也可引爆舱内的火药废气^[1]。因此需对舱内可燃性气体浓度进行地面测试和试飞测试,根据试验结果改进机体的引气、排气设计。因此需开展飞行试验中混合可燃性气体浓度的在线测量技术研究^[2]。国内外日前对机上气体浓度测量仍采用先收集、飞行结束后在地面进行测量分析的方法。传统方式最大的缺点是不具有实时性,而测量精度和时效性是气体浓度测量最重要的两个指标。考虑到被测对象位于机体内部,可利用空间有限;被测对象为多种气体混合,在舱内扩散,分布情况复杂。舱内温度、气压、振动的变化以及产生的灰尘,对测试原理选取与系统设计带来挑战。

本文通过已知气体成分,充分考虑测试环境,结合测试

需要进行气体浓度测量技术研究,突破传统测量方法,实现机上气体浓度实时测量,保障飞行任务安全高效完成。

1 测试需求分析

混合气体浓度专用测试系统的主要功能需满足舱内多个测量点能够同时实现 CO、H₂、CH₄、O₂ 等多种气体的测量^[3]。由机载测试系统对浓度测试数据采集编码,实现实时监控以及飞行后数据处理分析。

测试气体技术指标要求如表 1 所示。

如表 1 中,要求反应时间 ≤ 5 s,相当于实时测量,必须采取原位测量。对日前常用的几种气体分析方法从检测范围、响应时间、稳压和振动影响、以及稳定性等方面进行充分比较,如表 2 所示,针对测试环境和测试要求,提出以

表 1 混合气体测试技术指标

测量对象	CO	CH ₄	H ₂	O ₂
量程/%	0~100	0~50	0~5	0.3~25
精度/%FS	± 5	± 5	± 5	± 5
响应时间/s	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5
气体温度/°C	-40~70			

TDLAS 激光吸收光谱技术为基础^[4],结合热导技术^[5]完成飞行试验过程中机体舱内混合可燃性气体浓度的测试。测试环境苛刻,高温、高振动,TDLAS 激光吸收光谱技术响应时间快,易实现温度和压力补偿,受振动影响小。但由于氢气吸收光谱特性,无法采用激光吸收光谱技术,所以选择目前成熟的热导氢电化学测量方法。

表 2 混合气体测试技术指标

原理	红外光谱法	电化学法	催化燃烧法	激光光谱法
检测范围/%	0.1~100.0	0.1~100.0	0.1~100.0	0.1~100.0
响应速度	数秒~几十秒	数秒~几十秒	数秒~几十秒	毫秒~数秒
温压影响	有,易补偿	有,不易补偿	有,难补偿	有,易补偿
振动影响	小	大	小	小
背景气干扰	较小	较大	大	小
稳定性	好	一般	差	好
适应环境/°C	-40~70	-20~50	-20~50	-50~350(探头)
高温环境测量方式	抽取式	抽取式	抽取式	原位扩散式
适用对象	CO ₂ 、CH ₄ 、CO 等	O ₂ 、SO ₂ 、H ₂ 等	CO、CH ₄ 等	CO、CH ₄ 、O ₂ 等

2 测试原理

比尔朗博定律^[6]给出一种通过测量光强变化实现浓度检测的理论基础。如图 1 所示,当一束光穿过气体时,特定气体对特定波长的光具有吸收作用,气体浓度与光强

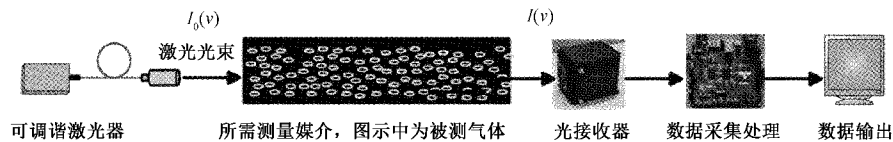


图 1 气体光谱吸收测试原理

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,就像“指纹”一样将它们分离开,从而实现 1 对 1 成分浓度检测^[8]。根据 HITRAN 数据库的吸收光谱,选取与被测气体(CH₄、CO 和 O₂)对应的吸收峰波长(1 653、1 566 和 760 nm),如图 2 所示,设计光源模块,完成气体浓度的测量。

H₂ 气体浓度分析采用目前最成熟的热导技术。氢气的对称结构使其吸收谱线的强度极低,难以使用光学方法进行直接测量。热导氢检测技术是基于不同气体具有不

同的热导率及混合气体热导率随其被测成分含量变化这一物理特征制作的。

$$I(v) = I_0 \exp[-a(v)LC] \quad (1)$$

其中, $I(v)$ 为出射光强, $I_0(v)$ 为入射光强, $a(v)$ 为波长 v 下介质吸收系数, L 吸收路径总光程, C 待测气体浓度。

同的热导率及混合气体热导率随其被测成分含量变化这一物理特征制作的。由于氢气相比其他气体的热导系数有明显的特异性,因此一般采用热导法来分析氢气^[9]。具有响应速度快和测量稳定的优点,但由于一些气体的热导系数不同,会对测量结果有干扰。例如甲烷的热导系数也明显高于空气和 CO,因此会对测量产生一定的干扰,需要测量甲烷后对测量结果进行补偿^[10]。

3 测试系统方案设计

根据对测试对象和测试环境的分析,系统采用激光吸

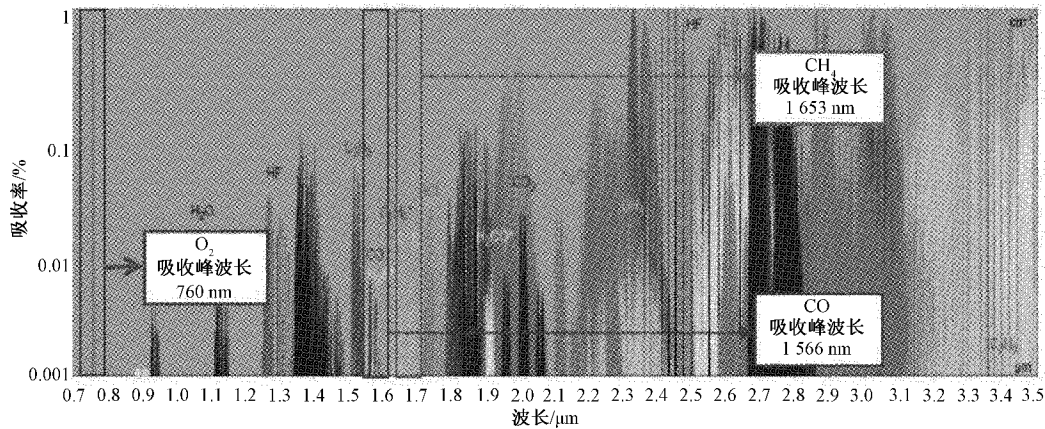


图2 被测气体吸收光谱图

收光谱和热导技术,其中CO、CH₄和O₂采用激光吸收光谱技术,将测量气室安装在舱内,实现原位测量^[11];氢气采用热导技术,利用高温真空抽气泵将舱内气体抽取出来,

送入热导分析仪进行分析。

系统组成如图3所示,由系统主机、光路组件、耐高温气室、取样系统等部件组成。

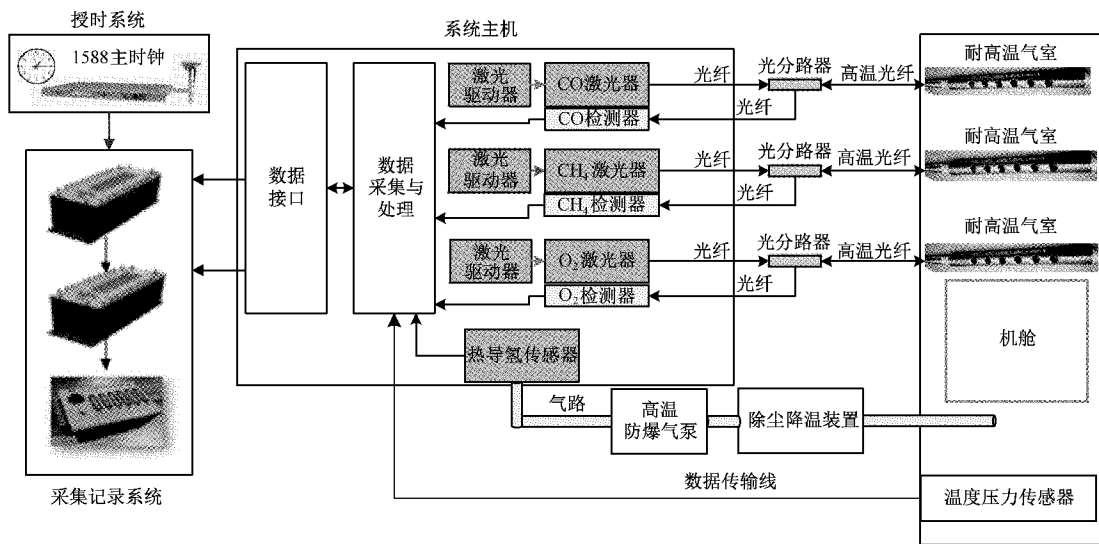


图3 混合气体测试系统总体架构设计

在实际工程应用中,背景粉尘环境和噪声干扰将对光强产生较大的影响,从而在计算吸收谱线时会产生误差,影响系统精度。通过对干扰源的特征分析,将干扰分为直流干扰和交流干扰。分别针对性的采取光路时分复用和波长调制技术,消除干扰,提高精度^[12]。

如图4所示,在一路气室中,对光源驱动模块进行时分复用设计,设置参考驱动段和检测驱动段,参考驱动段不进行特定气体的吸收波长调制,用来获取存在直流类干扰下的光强数据,结合检测驱动段的测得数据,进行差分运算,最终得到去除背景噪声后的有效信号^[13]。

对于频率较低噪声信号,设计对光源驱动进行高频调制,其光强和波长会产生相应的调制效应,可有效去除低频噪声信号^[14]。

4 方案试验验证

系统的试验验证分为实验室地面验证和飞行试验验证。实验室搭建系统验证平台如图5所示。重点针对机载环境适应性进行试验验证,通过试验系统可测得任务所需气体浓度数据。

针对关键技术验证与分析,分别对时分复用光源驱动技术、波长调制技术及温度补偿后的系统精度进行综合分析,试验采用4%、8%、12%、15%和18%比例的标准甲烷气瓶注入测试系统,根据测试获取的数据分析其精度,试验结果如图6所示,黑色曲线代表气体浓度实时测量值,从图中曲线数据可以看出,平均测量浓度与已知标准浓度基本相符。对每组测量数据的最大误差和平均误差进行

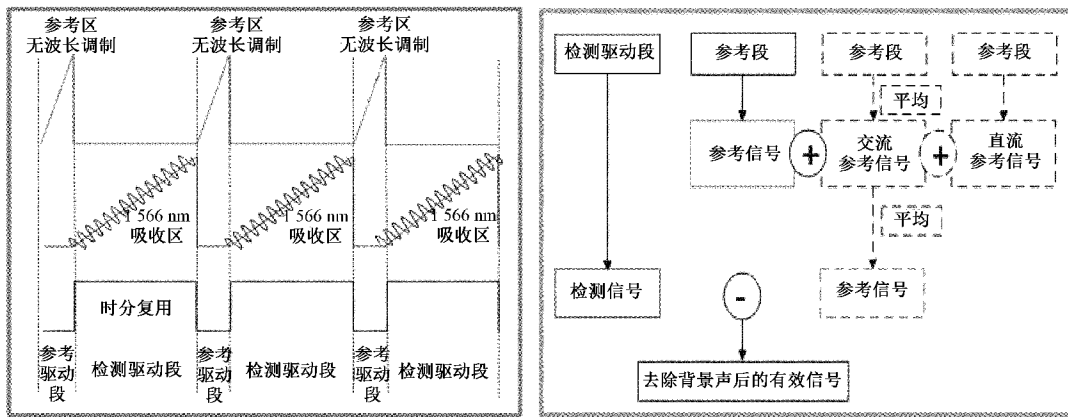


图 4 基于时分复用背景噪声去除技术

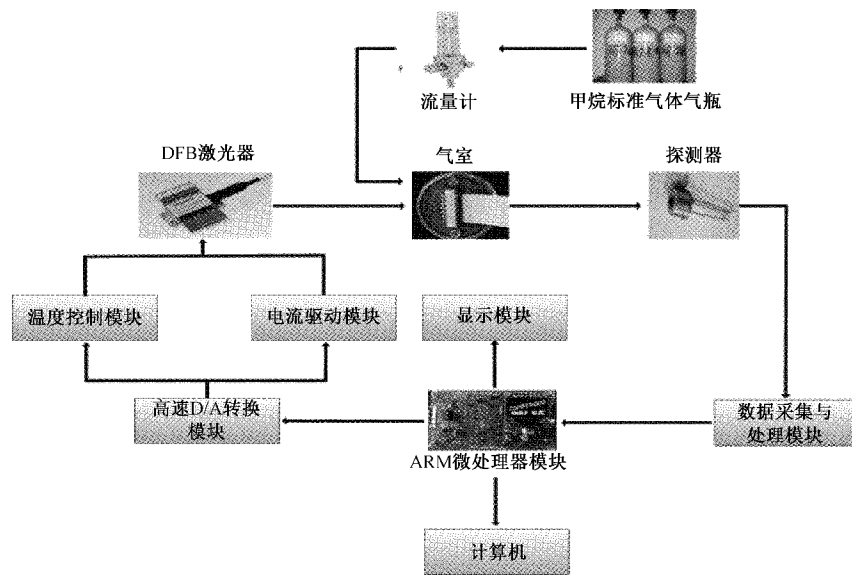


图 5 实验室气体浓度测试系统验证平台

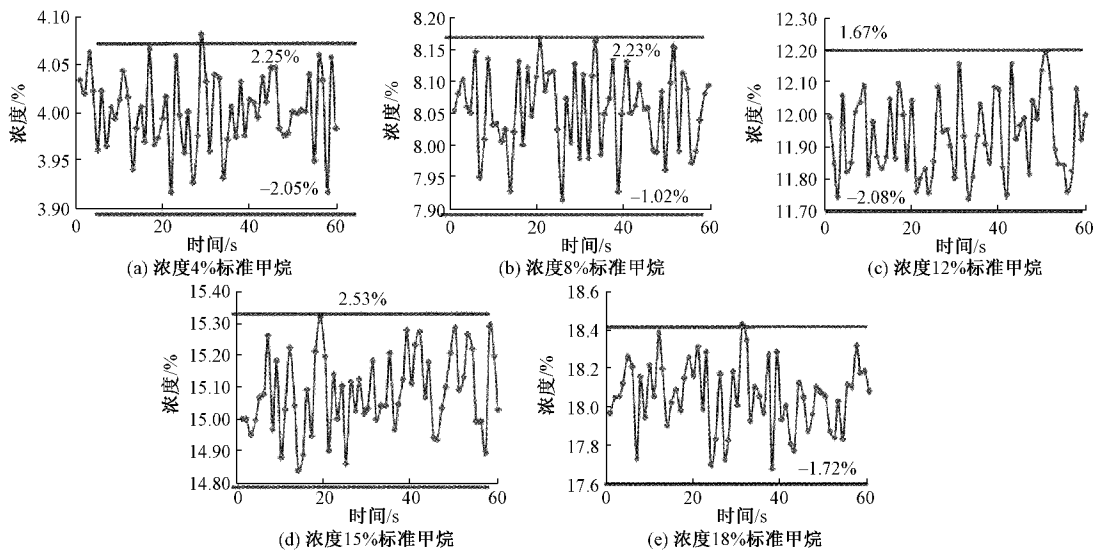


图 6 实验室测试数据及误差分析

计算,如图中直线所示,其中最大误差为2.53%,最大平均误差为2.36%,系统精度小于3%,满足任务所提5%的要求^[15]。

进行10余架次不同高度下的飞行试验验证,其中一组6 000 m高度飞行试验数据如表3所示。

表3 飞行试验验证数据

测量对象	CO	CH ₄	H ₂	O ₂
浓度/%	1.75	0.08	0.58	11.35
精度/%FS	±1.13	±1.52	±0.95	±0.88
响应时间/s	2.0	2.5	3.5	4.6
测试结论	合格	合格	合格	合格

经飞行试验验证,测得所需气体浓度数据,与厂家提供燃烧产物理论数据(气体体积浓度已知)及不同高度下空气中氧气(一定条件下不同高度氧气浓度已知)浓度做对比参考,测试结果与实际相符,系统测试准确度和响应时间测试结果满足指标要求。

5 结 论

依托于某型机专项试飞任务采用建模-设计-验证思路,首次将基于TDLAS吸收光谱技术应用于飞机上气体浓度测试,实现高精度实时测量,为飞机的排气口优化设计提供数据支撑。测试空间狭小,环境复杂,面临很多技术难题,如测试方案设计、测点的选取、背景干扰去除及温度压力补偿等。本文重点介绍了测试方案和背景去干扰设计方法。由于测试环境恶劣,为保证响应时间,实行了原位测量,导致光学传感探头比较容易受损,清理困难,如果试验密集,必然会频繁更换传感探头,增加试验成本。未来需优化设计方案,解决传感探头保护、维护等问题。当前测试方案研究和试验结果,具有重要的意义,更进一步为飞机气体浓度测试技术研究提供了技术储备,对于未来复杂试飞测试系统的设计具有重要的借鉴意义。

参考文献

[1] 王骏. 爆炸混合性气体或蒸气的分类研究[J]. 电器应用, 2021, 40(3):53-56.
 [2] 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(S1): 143-145.

[3] 魏丽军,黄俊. 基于DSP的甲烷浓度检测系统的研究与设计[J]. 电子测量技术, 2017, 40(5):197-200.
 [4] 张志荣,夏滢,董凤忠,等. 利用可调谐半导体激光吸收光谱法同时在线监测多组分气体浓度[J]. 光学精密工程, 2013, 21(11):2771-2777.
 [5] 黄为勇,董敏明,任子暉,等. 采用热导传感器检测气体浓度的新方法研究[J]. 传感技术学报, 2006(4): 973-975.
 [6] 辛伍红. 朗伯-比尔定律的适用条件与限制[J]. 化工时刊, 2020, 34(7):49-51.
 [7] 袁帅,王广真,付德慧,等. 光子光谱多组分气体分析仪的交叉干扰特性研究[J]. 光子学报, 2021, 50(4): 206-214.
 [8] 查申龙,刘锬,谈图,等. 光子光谱技术在多组分气体浓度探测中的应用[J]. 光子学报, 2017, 46(6):14-19.
 [9] 凌云峰,杨楠,文吉延,等. 热导传感器在氢气测量中的影响因素研究[J]. 节能技术, 2020, 38(3):266-269.
 [10] 张奇,聂飞. 基于热导原理的氢浓度测试系统设计[J]. 仪表技术与传感器, 2018(2): 86-88.
 [11] 李宁,王飞,严建华,等. 利用可调谐半导体激光吸收光谱技术对气体浓度的测量[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(15):121-126.
 [12] 兰羽,周茜. 激光外差探测中外差信号检测方法研究[J]. 国外电子测量技术, 2012, 31(4): 38-41.
 [13] 戴峰,常建华,房九龙,等. 差频产生中红外光源及甲烷气体光谱检测[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(9): 1447-1452.
 [14] 王迪,倪子颜,王明吉,等. 调制噪声下激光检测气体吸收光谱信号处理研究[J]. 光子学报, 2019, 48(3): 147-154.
 [15] 卢伟业,朱晓睿,李越胜,等. TDLAS直接吸收法和波长调制法在线测量CO₂的比较[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(7): 155-160.

作者简介

蒋红娜,工学硕士,高级工程师,主要研究方向为机载测试系统传感器研发及校准技术。

E-mail:jianghongna_2009@163.com

姜宏伟,工学博士,研究员,主要研究方向为机载测试系统传感器及校准技术。

E-mail:19024286@qq.com