

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2021.05.11

基于 TDLAS 直接吸收法的气体压力测量技术研究

张博涵¹, 杨军¹, 魏伟², 谢兴娟¹, 张大治¹, 姜延欢¹

(1. 航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095; 2. 空军装备部驻北京地区第四军事代表室, 北京 100043)

摘要: 针对气体压力无接触测量需求, 开展了基于 TDLAS 直接吸收法的气压测量技术分析。以 CO₂ 为研究对象, 通过开展以朗伯-比尔定律为基础的吸收光谱理论研究, 建立压力测量模型, 并利用 MATLAB 软件对气压测量过程进行仿真, 将仿真结果与 SpectraPlot 结果进行对比, 同时搭建实验系统进行验证。结果显示在 1~2 atm 的气压范围内, 吸光度曲线仿真结果与 SpectraPlot 的结果高度重合, 积分吸光度值最大偏差小于 8%; 压力测量实验结果相对误差呈现随压力增大而增大的趋势, 该结果为以后进一步开展吸收光谱法测量中压气体研究提供了参考。

关键词: TDLAS; 直接吸收法; Simulink; 气体压力; SpectraPlot

中图分类号: TB935

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2021)05-0100-08

Research on Gas Pressure Measurement Technology Based on TDLAS Direct Absorption Method

ZHANG Bohan¹, YANG Jun¹, WEI wei², XIE Xingjuan¹, ZHANG Dazhi¹, JIANG Yanhuan¹

(1. Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 10095, China;

2. The 4th Military Representative Office in Beijing Area of Air Force Equipment Ministry, Beijing 100043, China)

Abstract: In response to the demand for non-contact measurement of gas pressure, a technical analysis of barometric pressure measurement based on the TDLAS direct absorption method was performed. Taking CO₂ as the research object, through the theoretical study of absorption spectrum based on Beer-Lambert law, a pressure measurement model is established, the pressure measurement process is simulated by MATLAB software, and the simulation results are compared with the results of SpectraPlot. Finally, an experimental system was built for verification. The results show that in the pressure range of 1 to 2 atm, the simulation results of the absorbance curve are highly coincident with the results of SpectraPlot, and the maximum deviation of the integrated absorbance value is less than 8%. The relative error of the pressure measurement experiment results shows a trend of increasing with the increase of pressure. This conclusion provides a reference for the future research on the measurement of medium pressure gas by absorption spectroscopy.

Key words: TDLAS; direct absorption method; Simulink; gas pressure; SpectraPlot

0 引言

气体压力是计量测试领域中最重要测量参数之一, 通常由传统的压力传感器进行定点测量, 但受环境和空间的影响很大^[1]。本文考虑利用可调谐半导体激光吸收光谱(Tunable diode laser absorption spectroscopy, TDLAS)^[2]技术进行气体压力检测, 此方法能够以控制温度和电流的方式来改变激光器输出的波长, 调谐后的激光经过待测气室, 可以扫描出一条完整的气

体吸收谱线, 进而从吸收谱线中获得气体的温度、压力、浓度等信息^[3]。目前基于 TDLAS 技术进行气体检测的相关研究中, 多是对痕量气体的检测工作, 其中, 齐汝宾^[3]、李宁^[4]、周荣^[5]、禹迎春^[6]等人进行了 TDLAS 技术气体浓度测量方面的研究; 而此技术在气体压力测量方面的应用较少, 陈祥^[7]等人进行了 TDLAS 技术气体负压测量方面的研究, 但现在还没有对气体中压测量方面的研究成果, 所以若能够探究出吸收光谱技术在气体中压测量中的问题以及实现方法,

收稿日期: 2021-08-16; 修回日期: 2021-09-20

基金项目: 国家自然科学基金(51775526)

引用格式: 张博涵, 杨军, 魏伟, 等. 基于 TDLAS 直接吸收法的气体压力测量技术研究[J]. 计测技术, 2021, 41(5): 100-107.

ZHANG B H, YANG J, WEI W, et al. Research on gas pressure measurement technology based on TDLAS direct absorption method[J]. Metrology and measurement technology, 2021, 41(5): 100-107.

对未来的光谱测量领域是很有意义的。

为了实现气体中压的光谱测量,文章从吸收光谱原理出发,以 CO_2 作为研究对象,建立了基于积分光度的压力测量模型,利用 MATLAB 软件的 Simulink 可视化仿真模块对 CO_2 在近红外波段处的吸收谱线进行仿真,并搭建了实验系统,进行常温环境下的气体中压测量实验,最后将仿真结果与美国光谱数据模拟工具 SpectraPlot^[8] 的结果进行对比和分析;同时依靠仿真流程将实验测量得到的气体吸收谱线结果进行压力反演,得到气体压力结果,并进行了误差分析。

1 TDLAS 直接吸收法测量原理

TDLAS 直接吸收法利用一个低频段的锯齿波或者三角波调制激光输出波长,测量得到气体吸收后的光强信号,依据相关公式计算出气体压强,具体测量原理如图 1 所示。

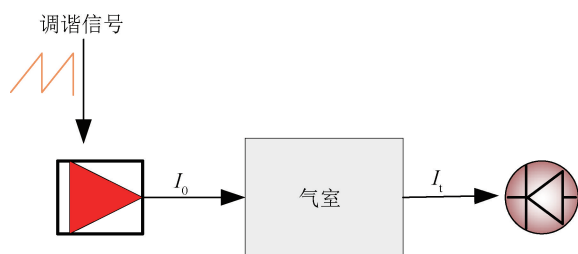


图1 TDLAS 直接吸收法原理

Fig. 1 Principle of TDLAS direct absorption method

1.1 朗伯-比尔定律

利用 TDLAS 技术来实现对气体压力的测量,其理论基础为朗伯-比尔(Beer-Lambert)定律^[9],公式可表达为^[1]

$$I_t = I_0 \cdot \exp(-P \cdot C \cdot S(T) \cdot \Phi(\nu) \cdot L) \quad (1)$$

式中: I_t 为透射光强信号, V; I_0 为入射光强信号, V; P 为气体压强, atm; C 为体积浓度; $S(T)$ 为谱线强度, $\text{cm}^{-2} \cdot \text{atm}^{-1}$; $\Phi(\nu)$ 为吸收线型函数,表示待测气体吸收谱线的形状; ν_0 为激光频率, cm^{-1} ; L 为光程, cm。

1.2 吸收谱线强度

谱线强度 $S(T)$ 是关于气体温度 T 的函数^[10], 公式为

$$S(T) = S(T_0) \frac{Q(T_0)}{Q(T)} \frac{T_0}{T} \exp\left[-c_2 E'' \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right] \times \frac{1 - \exp(-c_2 \nu_0 T)}{1 - \exp(-c_2 \nu_0 T_0)} \quad (2)$$

式中: $S(T_0)$ 为参考温度 T_0 下的谱线强度, $\text{cm}^{-1}/(\text{molec} \cdot \text{cm}^{-2})$, 一般可将 HITRAN 光谱数据库中在 $T_0 = 296 \text{ K}$ 下的谱线强度数值作为参考; $Q(T)$ 为吸收分子的配分函数; $c_2 = hc/k$ (h 为普朗克常数, c 为光速, k 为波尔兹曼常数); E'' 为吸收气体分子跃迁时对应的低能级能量, cm^{-1} ; ν_0 为吸收谱线的中心频率。

式中: 配分函数 $Q(T)$ 常采用拟合的三次多项式来替代, 公式为

$$Q(T) = a + b \cdot T + c \cdot T^2 + d \cdot T^3 \quad (3)$$

式中: 系数 a, b, c, d 因不同的气体和温度取不同的值。

1.3 吸收线型

通常用来表达气体吸收谱线的线型函数有三种: 多普勒(Doppler)线型函数、洛伦兹(Lorentz)线型函数和沃伊特(Voigt)线型函数。其中在压力较大, 温度因素对气体吸收光谱影响较小时多采用洛伦兹线型函数^[3]。本次仿真通过利用洛伦兹线型函数来表达气体吸收过程中的谱线线型。

其函数表达式为^[4-6]

$$\varphi_L(\nu) = \frac{1}{2\pi} \frac{\Delta\nu_L}{(\nu - \nu_0)^2 + \left(\frac{\Delta\nu_L}{2}\right)^2} \quad (4)$$

式中: ν 为激光扫描波长范围; ν_0 为对应谱线的跃迁频率; $\Delta\nu_L$ 为吸收谱的半高宽^[4], cm^{-1} 。

$$\Delta\nu_L = P \sum X_B 2 \gamma_{A-B} \quad (5)$$

式中: A 为待测气体; P 为总压强; X_B 为碰撞干扰气体 B 的摩尔份数; γ_{A-B} 为碰撞加宽系数, $\text{cm}^{-1} \cdot \text{atm}^{-1}$, 大小与温度有关^[4], 其关系式为

$$2\gamma(T) = 2\gamma(T_0) \left(\frac{T_0}{T}\right)^n \quad (6)$$

式中: T_0 为参考温度; $\gamma(T_0)$ 为加宽系数; n 为温度指数, 可从 HITRAN 数据库获得^[4]。

2 系统仿真和实验

2.1 系统仿真模型

利用 Simulink 仿真工具, 对 TDLAS 压力测量系统的各个模块进行仿真, 包括光源模块、吸收池模块、数据采集模块^[12]。总体仿真流程和系统仿真结构如图 2 和图 3 所示。

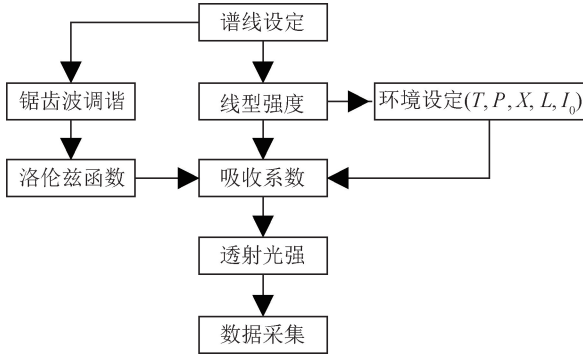


图2 仿真流程图

Fig. 2 Simulation flow chart

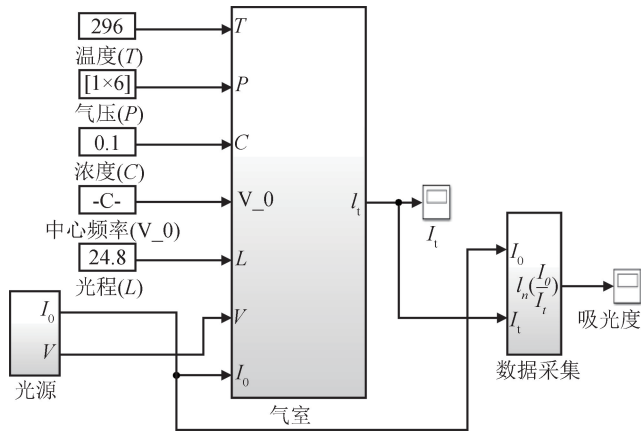


图3 TDLAS气体压力测量系统仿真结构图

Fig. 3 Simulation structure diagram of gas pressure measurement system based on TDLAS

2.1.1 光源模块

光源仿真模块包含谱线设定和锯齿波调谐,如图4所示。利用50 Hz的低频锯齿波作为调谐信号,调谐后的激光强度和激光频率的数学模型可表达为

$$\begin{aligned} \nu_t &= \nu_0 + A_m \cdot a_\nu \\ I_t &= I_0 + A_m \cdot b_I \end{aligned} \quad (7)$$

式中: ν_t 为激光器的输出频率, cm^{-1} ; ν_0 为中心频率, cm^{-1} ; I_t 为输出光强, V; I_0 为基础光强, V; A_m 为锯齿波的幅度; a_ν, b_I 分别为频率和光强随调谐信号变化的系数。

设置基础光强信号为 2.5 V, 锯齿波幅值设置为 $-1 \sim 1$ V, 周期为 20 ms, 系数 b_I 设置为 1, ν_0 设置为 $4989.9714 \text{ cm}^{-1}$, 系数 a_ν 设置为 0.45。

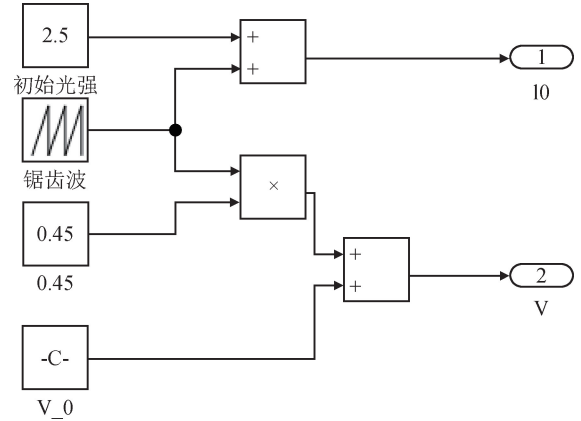


图4 光源仿真模块

Fig. 4 Light source simulation module

2.1.2 气室模块

气室模块包含洛伦兹函数仿真、线型强度仿真和环境设定。主要依据 CO_2 气体在 $4989.9714 \text{ cm}^{-1}$ 处的洛伦兹吸收谱线线型函数进行设计,模拟密闭气室中的气体吸收的过程。根据式(3)~式(5)建立谱线强度函数 $S(T)$, CO_2 配分函数 $Q(T)$ 和线型函数 $\Phi(\nu)$ 仿真模型,如图5所示。根据 HITRAN 光谱数据库选择 CO_2 吸收谱线的相关参数,并根据实验室条件设定吸收气体环境参数,如表1所示。

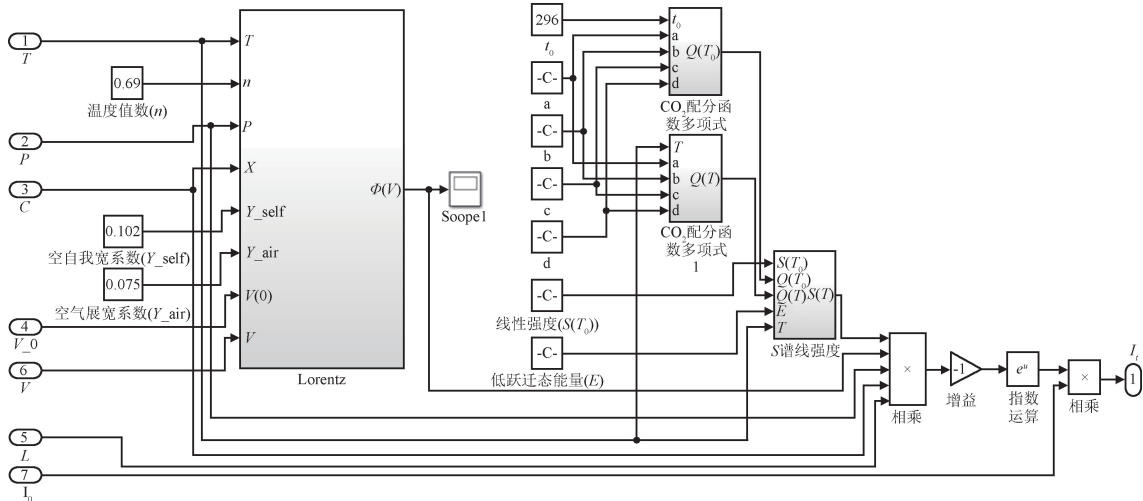


图5 气室模块

Fig. 5 Air chamber module

表1 参数设定
Table.1 Parameter setting

ν_0/cm^{-1}	$S(T_0)/$ $(\text{cm}^{-1} \cdot \text{molec}^{-1} \cdot \text{cm}^2)$	$\gamma_{\text{self}}/$ $(\text{cm}^{-1} \cdot \text{atm}^{-1})$	$\gamma_{\text{air}}/$ $(\text{cm}^{-1} \cdot \text{atm}^{-1})$	E''/cm^{-1}	$\delta_{\text{air}}/$ $(\text{cm}^{-1} \cdot \text{atm}^{-1})$	n_T	P/atm	T/K	C	L/cm
4989.97	1.319×10^{-21}	0.102	0.075	106.129	-6.098×10^{-3}	0.69	0.75 ~ 2	296	10%	24.8

2.1.3 数据处理模块

数据处理单元包含透射光强信号采集和气体吸光度计算两部分，如图6所示。其吸光度表达式为^[1]

$$A = -\ln(\frac{I_t}{I_0}) \tag{8}$$

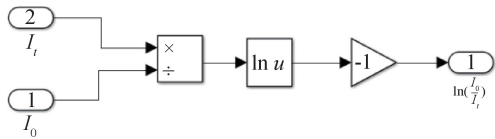


图6 数据采集模块
Fig.6 Data acquisition module

2.2 实验系统

根据仿真模型，搭建了如图7所示的实验系统进行实验测量，将测量得到的吸收谱线信号 I_t 进行处理，并进行压力反演。根据式(1)和式(8)，可得压力计算表达式

$$\int_{-\infty}^{+\infty} -\ln(\frac{I_t}{I_0}) d\nu =$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} P \cdot C \cdot S(T) \cdot \Phi(\nu) \cdot L \cdot d\nu = P \cdot C \cdot S(T) \cdot L$$

$$\Downarrow$$

$$P = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} -\ln(\frac{I_t}{I_0}) d\nu}{C \cdot S(T) \cdot L} \tag{9}$$

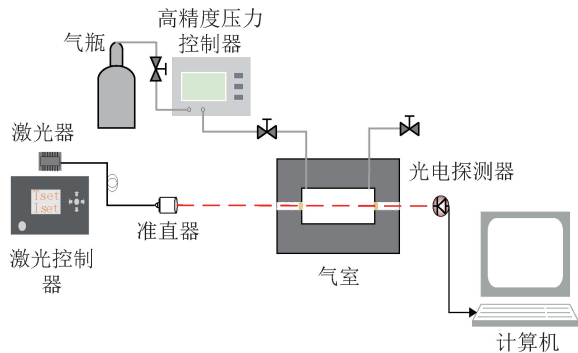


图7 TDLAS 直接吸收法压力测量实验系统
Fig.7 Pressure measurement experimental system based on TDLAS direct absorption method

3 结果

3.1 仿真结果

1) 线型曲线和吸收谱线

根据上述压力测量仿真模型，得到压力变化引起的洛伦兹线型函数曲线仿真结果如图8所示，当激光经过气室，得到 CO₂ 吸收光谱仿真结果如图9所示。可以看出随着压力的增加，洛伦兹线型函数峰值不断减小，吸收谱线的信号强度减小。

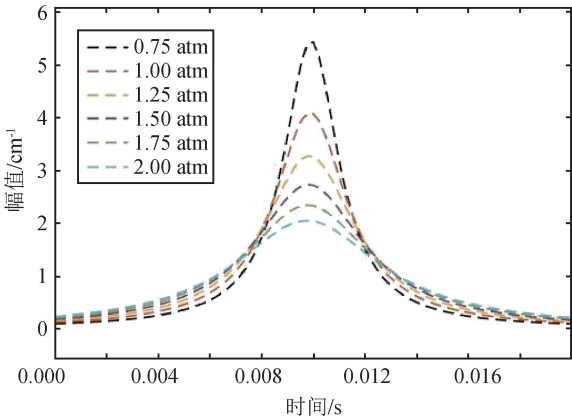


图8 洛伦兹线型函数仿真图
Fig.8 Lorentz linear function simulation diagram

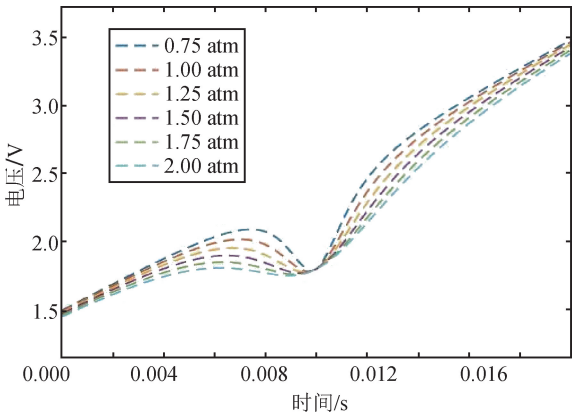


图9 吸收谱线仿真图
Fig.9 Simulation diagram of absorption spectrum

2) 吸光度曲线

由数据采集模块输出的数据为气体吸光度值，将

仿真得到的吸光度曲线和 SpectraPlot 的吸光度曲线进行对比,如图 10 所示,可以看出仿真结果与 SpectraPlot 结果有很好的重合度,证明了此仿真模型的可行性。此外,随着压力的增加,谱线展宽越来越大,而且在 $\nu = \nu_0$ 时,吸光度值达到峰值,即 0.3 左右,气体吸收现象比较明显。

3) 积分吸光度

将上述的吸光度-频率曲线进行积分,得到的曲线积分面积即为积分吸光度^[13]。计算得到各压力下的积分吸光度值,结果如表 2 所示。然后将积分吸光度与压力进行曲线拟合,拟合结果如图 11、图 12 和表 3 所示。

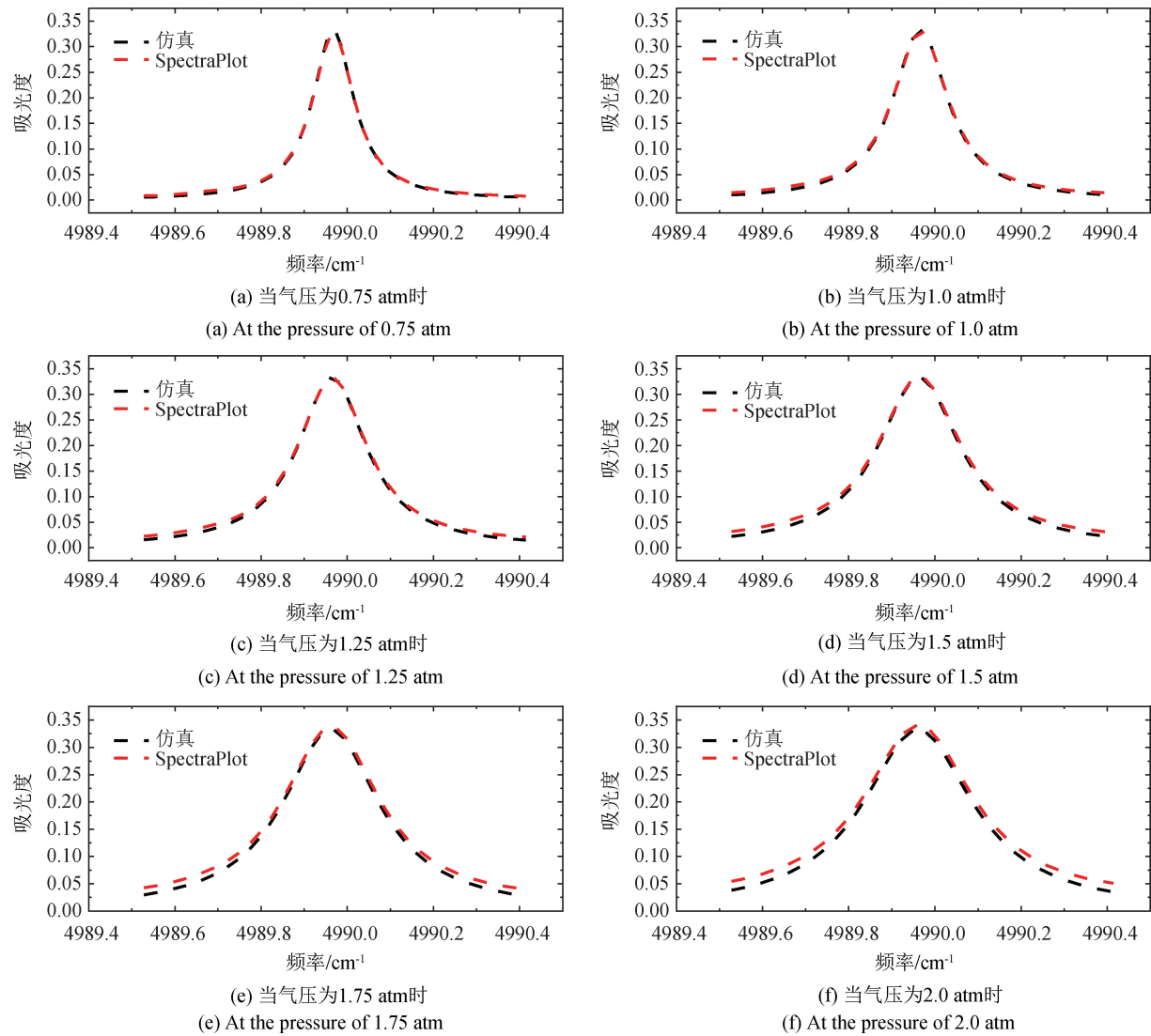


图 10 296 K 温度下仿真结果与 SpectraPlot 结果

Fig. 10 Different pressure simulation results and SpectraPlot results at 296 K

表 2 积分吸光度计算结果

Table. 2 Integral absorbance calculation result

<i>P</i> /atm	仿真结果	SpectraPlot	相对偏差/%
0.75	0.05574	0.05725	2.643
1.00	0.07209	0.07481	3.639
1.25	0.08737	0.09165	4.67
1.50	0.10161	0.10779	5.737
1.75	0.11485	0.12328	6.837
2.00	0.12715	0.13815	7.968

由以上数据可知,随着压力的增大,积分吸光度值也以正比例关系增加,同时仿真结果与 SpectraPlot 结果的误差也在变大,最小相对误差为 2.6%,最大相对误差不到 8%,拟合曲线的斜率相差 0.0076。

仿真结果相对偏差随压力增大而增加的主要原因为:在压力较大的情况下,仿真选择的洛伦兹线型函数限制了气体吸收谱线的峰值吸光度,减弱了相邻谱

线的相互影响，致使积分吸光度计算误差变大。

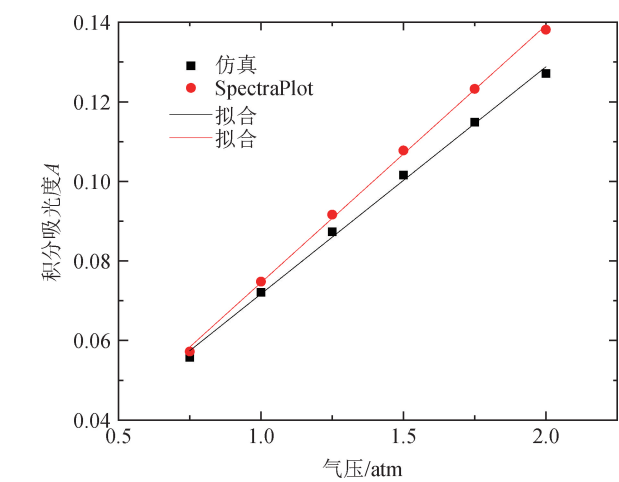


图 11 积分吸光度对比图
Fig. 11 Integral absorbance comparison chart

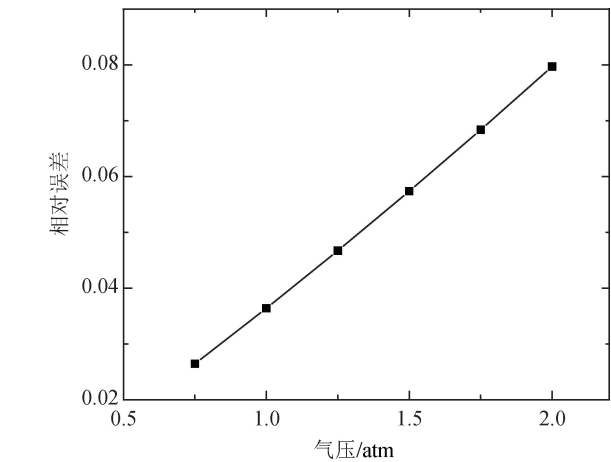


图 12 积分吸光度仿真结果相对误差
Fig. 12 Relative error of integral absorbance simulation results

表 3 积分吸光度-压力拟合结果

拟合方程		R^2
仿真	$A = 0.01463 + 0.0571 \cdot P$	0.99731
SpectraPlot	$A = 0.00986 + 0.0647 \cdot P$	0.99908

3.2 实验结果

利用图 7 中的实验系统，进行常温条件下的压力测量实验，测得气体吸收后的光强信号如图 13 所示。

利用多项式拟合的方式从测量得到的吸收谱线信号中拟合背景基线，根据式(8)可以得到吸光度曲线，结果如图 14 所示。由图可知：随着压力增大，谱线展

宽也随之变大，这与仿真结果一致；吸光度曲线两侧波动比较大，这会导致数据函数拟合结果产生较大误差，所以选择曲线中间的数据点进行拟合，拟合结果如图 15 所示。

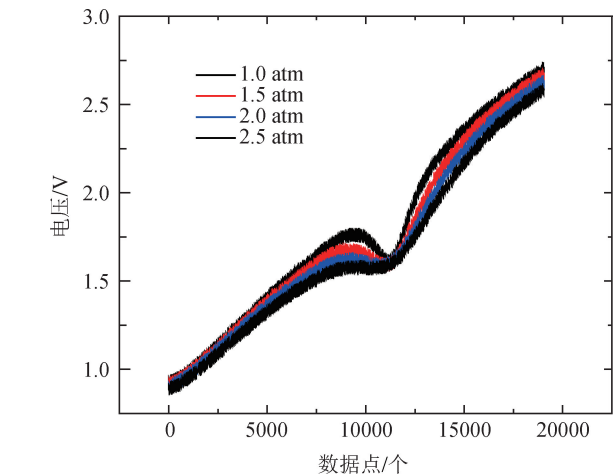


图 13 吸收信号曲线
Fig. 13 Absorption signal curve

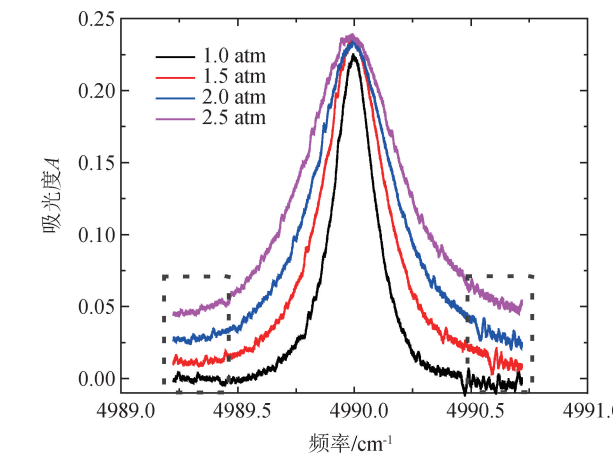


图 14 吸光度曲线
Fig. 14 Absorbance curve

对图 15 拟合得到的线型函数进行频率积分，得到各个压力下的积分吸光度值，根据式(9)和仿真过程中的参量(表 1)，计算得到压力值，如表 4 所示。

表 4 压力测量结果

实际压力/atm	测量压力/atm	相对偏差/%
1.0	0.969	3.10
1.5	1.4362	4.25
2.0	1.8529	7.36
2.5	2.2182	11.27

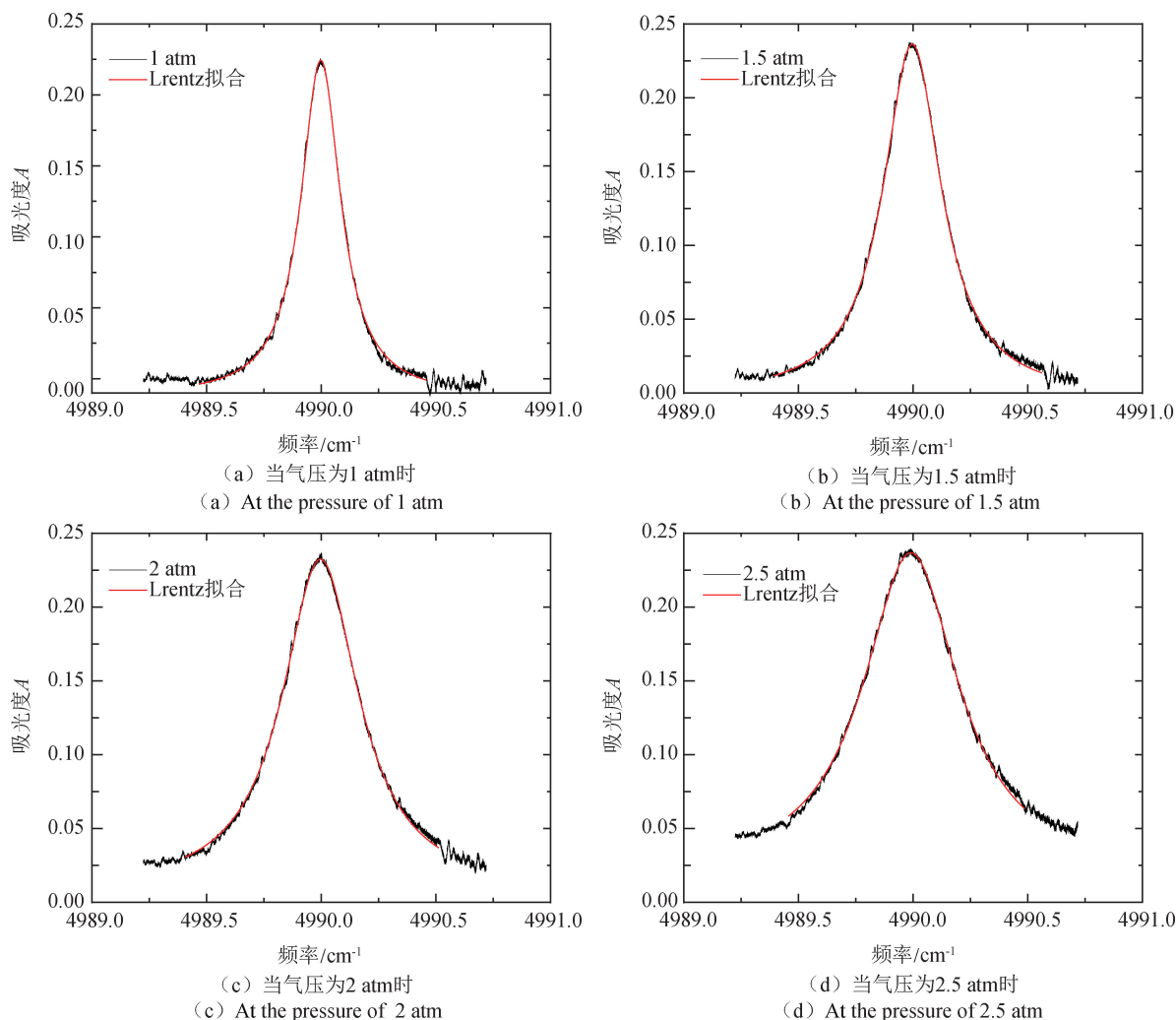


图15 不同压力吸光度曲线 Lorentz 函数拟合

Fig. 15 Lorentz function fitting results of absorbance curves at different pressures

由表4可以看出, 常温环境下, 随着压力的增大, 测量结果相对偏差也在增加, 主要是因为: 当压力增大时, 相邻吸收谱线的影响程度加大, 吸光度曲线被横向拉宽变得平缓, 偏离零基线, 导致其洛伦兹函数拟合误差变大, 从而使计算得到的压力结果随之增大。

4 结论

本文对基于 TDLAS 直接吸收法的 CO_2 气体压力测量原理进行了阐述, 利用 Simulink 工具进行了理论仿真, 提供了相应的参数选择, 并搭建实验系统进行了实验。结果表明: 在中压阶段, 随着压力的增加, 气体吸收谱线间的相互影响程度加深, 测量相对误差增加。研究过程对推动吸收光谱技术在气压测量领域的应用具有重要意义。而如何解决在压力较大的气体环境下, 吸光度曲线偏离零基线的问题和提高光谱技术

测量精度的问题将是未来的研究重点。

参考文献

- [1] 宫学程, 杨军. 基于 TDLAS 的压力测量技术[J]. 计测技术, 2019, 39(3): 8-13.
GONG X C, YANG J. Pressure measurement technology based on TDLAS[J]. Metrology and measurement technology, 2019, 39(3): 8-13. (in Chinese)
- [2] PENG Z M, DING Y J, LU C, et al. Calibration-free wavelength modulated TDLAS under high absorbance conditions[J]. Optics Express, 2011.
- [3] 齐汝宾, 赫树开, 李新田, 等. 基于 HITRAN 光谱数据库的 TDLAS 直接吸收信号仿真研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2015, 35(1): 172-177.
QI R B, HE S K, LI X T, et al. Simulation of TDLAS direct absorption based on HITRAN database[J]. Spectroscopy and spectral analysis, 2015, 35(1): 172-177. (in Chinese)

- [4] 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: 121 – 126.
LI N, WANG F, YAN J H, et al. The tunable diode laser absorption spectroscopy for gas concentration measurement [J]. Proceedings of the CSEE, 2005: 121 – 126. (in Chinese)
- [5] 周荣, 杨兵初, 陶少华. 基于谱线线型函数的气体浓度检测技术[J]. 光谱学与光谱分析, 2015, 35(4): 881 – 884.
ZHOU M, YANG B C, TAO S H. Detection technique for gas concentration based on the spectral line shape function [J]. Spectroscopy and spectral analysis, 2015, 35(4): 881 – 884. (in Chinese)
- [6] 禹迎春, 王晗, 王志敏, 等. 基于 QCL-TDLAS 的 NH_3 浓度测量仿真研究[J]. 应用光学, 2020, 41(6): 1255 – 1261.
YU Y C, WANG H, WANG Z M, et al. Simulation study of NH_3 concentration measurement based on QCL-TDLAS[J]. Journal of applied optics, 2020, 41(6): 1255 – 1261. (in Chinese)
- [7] 陈祥, 阚瑞峰, 杨晨光, 等. 基于 TDLAS 技术的空气气压精确测量[J]. 光电子: 激光, 2015, 26(4): 719 – 723.
CHEN X, KAN R F, YANG C G, et al. Precise measurement of air pressure using tunable diode laser absorption spectroscopy technology [J]. Journal of optoelectronics · laser, 2015, 26(4): 719 – 723. (in Chinese)
- [8] CHRISTOPHER S, GOLDENSTEIN A, MILLER R, et al. SpectraPlot. com: Integrated spectroscopic modeling of atomic and molecular gases [J]. Journal of quantitative spectroscopy and radiative transfer, 2017, 200: 249 – 257.
- [9] 李劲松. 朗伯 – 比尔定律实验教学设计研究[J]. 大学物理实验, 2015, 28(6): 55 – 57.
LI J S. The study of teaching design on lambert-beer law in college physics experiments education [J]. Physical experiment of college, 2015, 28(6): 55 – 57. (in Chinese)
- [10] 王超, 王飞, 邢大伟, 等. 利用可调谐半导体激光吸收光谱技术对燃烧环境中的 CO 在线测量[J]. 燃烧科学与技术, 2014, 20(2): 176 – 180.
WANG C, WANG F, XING D W, et al. In situ measurements of CO concentration in combustion environment based on tunable diode laser absorption spectroscopy [J]. Journal of combustion science and technology, 2014, 20(2): 176 – 180. (in Chinese)
- [11] GAMACHE R R, KENNEDY S, HAWKINS R, et al. Total internal partition sums for molecules in the terrestrial atmosphere [J]. Journal of molecular structure, 2000.
- [12] 李晗, 刘建国, 何亚柏, 等. 可调谐二极管激光吸收光谱二次谐波信号的模拟与分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(4): 881 – 885.
LI H, LIU J G, HE Y B, et al. Simulation and analysis of second-harmonic signal based on tunable diode laser absorption spectroscopy [J]. Spectroscopy and spectral analysis, 2013, 33(4): 881 – 885. (in Chinese)
- [13] 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.
NIE W, KAN R F, YANG C G, et al. Increment Relationship and its Application of Three Tooth Thickness Parameters of Cylindrical Gear [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(9): 9 – 29. (in Chinese)

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2021.05.12

液体火箭发动机试验流量测量系统可靠性评定

杨懿, 郭亚男, 王永鹏, 贾志杰, 陈文丽, 吕守国, 吉喆

(北京航天试验技术研究所, 北京 100074)

摘要: 针对液体发动机可靠性评定的研究现状, 从性能可靠性和结构可靠性两个维度对流量测量系统的可靠性进行评定。给出了测量系统性能可靠性的定义, 将测量数据视为正态分布, 通过区间估计的方法计算单侧可靠性置信下限。给出了测量系统结构可靠性的定义, 根据流量测量系统串联可靠性框图, 将指数寿命失效型试验信息转换为二项成败型试验信息。采用 L-M 法(Lindstrom-Maddens), 结合查表和线性插值法求解结构可靠性置信下限。该测量系统可靠性评估方法对行业内测量技术人员具有重要的参考意义。

关键词: 液体火箭发动机试验; 流量测量系统; 性能可靠性; 结构可靠性; L-M 法

中图分类号: TB937

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2021)05-0108-06

Reliability Evaluation of Flow Measurement System for Liquid Rocket Engine Test

YANG Yi, GUO Yanan, WANG Yongpeng, JIA Zhijie, CHEN Wenli, LYU Shouguo, JI Zhe

(Beijing Institute of Aerospace Test Technology, Beijing 100074, China)

Abstract: Based on current the are research status of liquid engine reliability evaluation, the reliability of flow measurement system is evaluated from two dimensions which performance reliability and structure reliability. The definition of measurement system performance reliability is present. Measurement data is regarded as normal distribution and the confidence limit of one-sided reliability is calculated by interval estimation. The definition of structural reliability of measurement system is also presented. According to the series reliability diagram of flow measurement system, the exponential life-failure test information is transformed into binominal success-failure test information. The (L-M) Lindstrom-Maddens method combined with look-up table and linear interpolation method is used to solve the lower confidence limit of structural reliability. The reliability evaluation method of measurement system would serve as important reference for technicians in the industry.

Key words: Liquid rocket engine test; flow measurement system; performance reliability; structure reliability; L-M method

0 引言

液体火箭发动机试验中, 液体推进剂的流量数据是计算发动机比冲量的重要数据, 测量数据的准确性和可靠性关系到对火箭的运载能力和射程的评估^[1]。流量测量系统的高可靠性是保障系统长期正常、稳定工作, 测量数据满足试验任务书要求的重要基础。

在可靠性研究和实践领域, 一般从结构可靠性和性能可靠性两个维度对产品/系统的可靠性进行评估。性能可靠性一般是指产品/系统在规定工作条件下、规

定工作时间内, 其性能参数满足规定的容许限要求的概率^[2-3]。如导弹的射程、着弹点的准确度, 测量系统的数据准确度等等。结构可靠性一般是指产品/系统保持正常工作、性能满足规定要求的能力^[4]。在发动机试验中, 测量系统的性能可靠性与结构可靠性是同等重要的。性能可靠性是测量系统能够投入使用的前提和保障测量数据质量的重要基础。结构可靠性是保障测量系统能够长久、正常运行的重要基础。在测量系统的工作寿命周期内, 不仅需要具备优越的性能可靠性, 还需要具备保持其性能可靠性的能力。多位研究人员对产品的性能可靠性、功能可靠性评估方法进行

收稿日期: 2021-07-15; 修回日期: 2021-09-29

引用格式: 杨懿, 郭亚男, 王永鹏, 等. 液体火箭发动机试验流量测量系统可靠性评定[J]. 计测技术, 2021, 41(5): 108-113.

YANG Y, GUO Y N, WANG Y P, et al. Reliability evaluation of flow measurement system for liquid rocket engine test[J]. Metrology and measurement technology, 2021, 41(5): 108-113.

了研究。

陈保家等人^[5]从轴承运行数据中提取状态信息和设备的阈值信息,采用基于比例协变量和 Logistic 回归模型相结合的可靠性评估方法求解故障率和协变量函数,并不断更新故障率函数信息,从而提高航空发动机轴承运行可靠性评估精度和可信性。但是由于航天产品试验的测量系统一般由多个组成单元或者设备构成,彼此之间的测量原理、测量参数类型存在差异,确认测量系统的阈值信息存在较大的困难,该方法不适用于对测量系统可靠性的评估。

张翌等人^[6]采用故障树方法分析多个影响测量系统可靠性的因素,给出了影响因素的重要度排序,并对测量系统进行故障诊断,有效提高了系统的平均无故障时间和连续工作时间。但是该方法重点在于实现测量系统的定性分析,缺少对测量系统性能可靠性的分析,也未给出系统可靠性的定量评价方法。

叶亮等人^[7]根据轴承的数据特征,采用不同的指标描述轴承振动性能,建立不同指标和振动性能可靠性之间的关系。采用基于信息理论和概率统计的方法计算、分析轴承振动性能的可靠度。其研究的重点是基于数据特征来描述性能可靠性,对本文有一定启发。该方法并未考虑结构功能可靠性对产品可靠性的影响,而且当发动机在多工况下试验时,流量的变化必然导致数据表征指标相应变化,增加了评估的难度,并不适用本文的研究方向。

张根保等人^[8]将机电产品分解成最小的元动作单元,将产品性能可靠性问题转化为元动作单元性能可靠性问题。根据元动作单元内部零件和结构的依赖耦合关系,建立随机过程和元动作单元性能可靠性分析模型,分析产品性能退化与特定功能之间的关系。该方法适用于对机械产品的结构可靠性评估,缺少对性能数据的分析。而测量系统性能可靠性指标主要以大量实测数据为基础,对实测数据的合理分析是判断性能可靠性的主要依据。

综上所述,单从结构可靠性或者性能可靠性对液体火箭发动机试验流量测量系统的可靠性进行分析是远远不够的。需要将性能可靠性和结构可靠性结合起来,实现航天产品试验测量系统可靠性的定量分析。本文给出了行业背景下测量系统性能可靠性和结构可靠性的定义,将试验数据作为性能可靠性的衡量指标,将测量系统组成单元的失效数作为结构可靠性的

衡量指标。从性能可靠性和结构可靠性两个维度对液体火箭发动机流量测量系统的可靠性进行评估。对行业内技术人员评估测量系统指标具有重要的参考价值。

1 流量测量系统

在液体火箭发动机试验中,流量测量系统一般由涡轮流量计、信号发生器、二次仪表和数据采集系统组成^[9]。系统原理组成如图1所示。

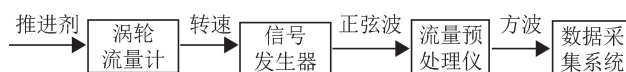


图1 流量测量系统图

Fig. 1 Diagram of flow measurement system

流量参数的基本测量原理:推进剂经过贮箱增压后,推动涡轮流量计的叶轮转动。转动叶轮切割信号发生器所产生的磁力线,生成正弦波式感生电动势。当管路横截面积不变时,感生电动势的频率与推进剂流速成正比。频率和被测流量的线性关系为

$$Q = A + Bf \quad (1)$$

式中: Q 为通过传感器的体积流量, L/s ; A, B 为传感器常数; f 为传感器输出频率, Hz 。

2 流量测量系统可靠性定义及评定方法

2.1 测量系统性能可靠性定义

根据引言中性能可靠性的定义,针对测量系统的特殊性,需要对其性能可靠性的定义进行相应的扩充,其定义如下。

测量系统性能可靠性是指在规定时间内和规定的条件下,测量系统工作正常,系统输出的测量数据满足所规定的允许限度要求的能力或概率。其中,规定时间是指系统完成试验测量任务所需的时间。规定条件是指系统工作时所处的符合对应要求的全部外界条件,如环境、温湿度、振动等。正常工作是指系统的各项组成单元均工作正常。

2.2 性能可靠性评定方法

大量的试验统计数据表明,液体火箭发动机性能参数(推力、比冲、流量、混合比等)一般服从正态分布^[2]。因此,设系统的性能 $X \sim N(\mu, \sigma^2)$, 其中, μ, σ

未知。对 X 取容量为 n 的样本 $x_1, x_2, \dots, x_n$, 通常要求系统的性能参数保持在容许的偏差范围之内, 则

$$X_0 - \Delta X \leq X \leq X_0 + \Delta X \quad (2)$$

式中: X_0 为性能参数的额定值; ΔX 为性能参数容许的偏差范围。

可以得到

$$\begin{aligned} X_U &= X_0 + \Delta X \\ X_L &= X_0 - \Delta X \end{aligned} \quad (3)$$

式中: X_U 为性能参数的容许上限; X_L 为性能参数的容许下限。

在可靠性理论中, 根据产品/系统的功能定位, 对性能参数的要求大致可以分为3类^[10]:

1) 单侧下限参数性能可靠性

$$R_{\text{下}} = P(X \geq X_L) = 1 - \Phi\left(\frac{X_L - \mu}{\sigma}\right) \quad (4)$$

2) 单侧上限参数性能可靠性

$$R_{\text{上}} = P(X \leq X_U) = \Phi\left(\frac{X_U - \mu}{\sigma}\right) \quad (5)$$

3) 双侧参数性能可靠性, 即 $X_L \leq X \leq X_U$ 。

$$\begin{aligned} R_{\text{双}} &= P(X_L \leq X \leq X_U) \\ &= \Phi\left(\frac{X_U - \mu}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{X_L - \mu}{\sigma}\right) \end{aligned} \quad (6)$$

一般情况下, 只能通过产品的有限次试验或者有限个系统试验测试数据得到性能 X 的样本均值 $\bar{X}$ 与样本标准差 S 。以样本均值 $\bar{X}$ 与样本标准差 S 分别替代 μ, σ 求得性能可靠性的点估计。

区间估计的推导方法为^[2]

$$P(X \geq X_L) = P\left(\frac{X - \mu}{\sigma} \geq \frac{X_L - \mu}{\sigma}\right) \geq R_L$$

等价于

$$\frac{X_L - \mu}{\sigma} \leq -\Phi^{-1}(R_L)$$

令,

$$k = \frac{\bar{X} - X_L}{S}, k_R = \Phi^{-1}(R_L)$$

则有,

$$P(\bar{X} - k \cdot S \leq \mu - k_R \cdot \sigma) = P[P(X \geq X_L) \geq R_L]$$

通过调整变换得到

$$\bar{X} - k \cdot S \leq \mu - k_R \cdot \sigma$$

等价于

$$\frac{\bar{X} - \mu}{\mu/\sqrt{n}} + k_R \sqrt{n} \leq k \sqrt{n} \quad (7)$$

其中, $\frac{\bar{X} - \mu}{\mu/\sqrt{n}} + k_R \sqrt{n}$ 服从自由度为 $n-1$, 非中心度

$\delta = k_R \sqrt{n}$ 的 t 分布, 记为 $T'(n-1, \delta)$ 。

在置信水平 γ 下, 计算 $P[T'(n-1, \delta) \leq k \sqrt{n}] = \gamma$, 即 $P[T'(n-1, k_R \sqrt{n}) \leq k \sqrt{n}] = \gamma$ 。

由上述分析可知, 当给定置信度 γ , 已知参数 k, n 时, 即可求出 k_R , 从而求得性能可靠性单侧下限 $R_L = \Phi(k_R)$ 。由于求解计算的过程较为复杂, 可以通过查表的方式进行求解。求解方法如下:

1) 计算出样本均值 $\bar{X}$ 与样本标准差 S , 根据给定的容许限 X_L 或者 X_U , 计算 $k = (\bar{X} - X_L)/S$ 或者 $k = (X_U - \bar{X})/S$ 。

2) 根据给定的置信水平 γ , 样本量 n 和 k 值, 对于单侧置信下限可靠度, 可以查参考文献[11], 求解 k_R 值, 从而可得到置信下限可靠度 $R_L = \Phi(k_R)$ 。对于双侧置信下限估计, 可以查参考文献[12]求得近似解。

2.3 测量系统结构可靠性定义

根据引言中结构可靠性的定义, 针对测量系统的特殊性, 其结构可靠性的扩充定义为:

测量系统结构可靠性是指测量系统各组成单元在规定的时间内和规定的条件下正常工作的概率。其中, 规定时间是指测量系统在系统调试、正式试验等程序中的工作时间。规定条件主要是指测量系统需要满足试验任务书规定的相关要求。

2.4 结构可靠性评定方法

在液体火箭发动机试验以及系统调试等过程中, 影响流量测量系统结构可靠性的因素主要有以下几个方面:

1) 涡轮流量计的轴承、叶轮等部件长时间受气流、低温介质的高速推动, 容易损坏。

2) 受液氧、液氢等低温介质的影响, 涡轮流量计外接信号发生器频繁处于温差变化较大的环境中, 严重影响信号发生器的工作稳定性。接插件暴露在空气中, 冷凝现象也影响了接插件的可靠性。

基于上述原因, 对流量测量系统的结构可靠性进行研究和分析, 对提高流量测量系统可靠性具有重要的意义。氢氧火箭发动机试验流量测量系统可靠性框图如图2所示。

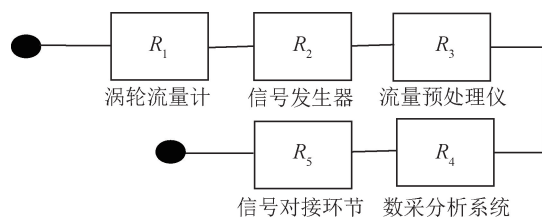


图2 流量测量系统可靠性框图

Fig.2 Reliability block diagram of flow measurement system

图2中,信号对接环节主要是指流量测量系统在运行过程中,设备接插件(如流量计信号发生器的插头、流量预处理仪的插头等)的对接状态。根据以往的统计数据显示,接插件的对接状态也是影响流量测量系统是否正常工作的重要因素之一。因此,本文将信号对接环节作为影响系统可靠性的因素,纳入可靠性框图中。

从图2可知,流量测量系统结构可靠性为一般串联系统。工程应用中一般采用L-M法对系统可靠性进行近似求解。根据串联型系统可靠性的性质,系统的可靠性由组成系统的最薄弱单元决定^[2]。

图2中,涡轮流量计、信号发生器、流量预处理仪($R_1 \sim R_3$)的单元失效类型为寿命型,数采分析系统(R_4)和信号对接环节(R_5)的失效类型为成败型。为便于可靠性试验信息的折合,需要将不同失效类型数据转换为相同失效类型数据。本文将指数寿命型试验信息转换为二项成败型试验信息。文献[13-14]介绍了指数型与成败型试验数据的折合转换方法,本文不再赘述。

L-M法的基本原理^[10]为:设系统由 k 个单元组成,试验数据为 (n_i, F_i) ,其中, $i = 1, 2, \dots, k, n_i$ 为第 i 个单元的试验次数, F_i 为第 i 个单元的失效试验次数。则系统可靠性最大似然估计为

$$\hat{R} = \prod_{i=1}^k \frac{n_i - F_i}{n_i} \quad (8)$$

将系统各组成单元的试验次数按照从小到大的顺序排列, $\{n_{(1)}, n_{(2)}, \dots, n_{(k)}\}$ 为将 $n_i, (i = 1, 2, \dots, k)$ 重新进行排列后的数据集,取系统等效试验次数为

$$n_{(1)} = \min\{n_{(1)}, n_{(2)}, \dots, n_{(k)}\} \quad (9)$$

系统等效失败次数为

$$F = n_{(1)} \left(1 - \prod_{i=1}^k \frac{n_i - F_i}{n_i}\right) \quad (10)$$

设 $[F]$ 为不超过 F 的整数部分,在给定置信水平

γ 时,通过公式(11),(12)计算 R_1 和 R_2 。再采用线性插值法,得到失败次数为 F 时的系统可靠性置信下限 R_L 。

$$\sum_{x=0}^{[F]+1} \binom{n_{(1)}}{x} R_1^{n_{(1)}-x} (1-R_1)^x = 1-\gamma \quad (11)$$

$$\sum_{x=0}^{[F]} \binom{n_{(1)}}{x} R_2^{n_{(1)}-x} (1-R_2)^x = 1-\gamma \quad (12)$$

3 案例分析

以某型号发动机试验为例,对流量测量系统可靠性进行评定。

3.1 测量系统性能可靠性评定

根据任务书的要求,在某工况下,液氧额定流量为5.200 L/s,下限为5.096 L/s,上限为5.304 L/s,给定置信水平 $\gamma = 0.9$ 。选取该工况下10个子样的液氧流量数据,如表1所示。

表1 液氧流量数据表

Table.1 Data sheet of liquid oxygen flow

取样点/s	流量数值/(L·s ⁻¹)
47.62	5.190
47.63	5.144
47.64	5.196
47.65	5.203
47.66	5.163
47.67	5.170
47.68	5.222
47.69	5.269
47.70	5.180
47.71	5.259

根据子样数据计算得到 $\bar{X} = 5.1996$ L/s,实验标准差 $s = 0.0404$ L/s。 $k_1 = (\bar{x} - l)/s = 2.5660$, $k_1 = (u - \bar{x})/s = 2.5859$ 。

可靠度估值

$$\begin{aligned} \hat{R} &= \Phi\left(\frac{u - \bar{x}}{s}\right) - \Phi\left(\frac{l - \bar{x}}{s}\right) \\ &= \Phi(2.5859) - \Phi(-2.5660) \\ &= 0.9901 - (1 - 0.9895) \\ &= 0.9796 \end{aligned}$$

根据 $n = 10, \gamma = 0.9, k_1 = 2.5660, k_2 = 2.5859$,

查《正态分布双侧容许限系数表》得到 $p_1 = 0.00745$, $p_2 = 0.00726$ 。计算得到测量系统性能可靠性下限 $R_L = 1 - (p_1 + p_2) = 0.98529$ 。

3.2 测量系统结构可靠性评定

取置信水平 $\gamma = 0.9$, 测量系统各组成单元的等效试验数据如表 2 所示。

表 2 流量测量系统各组成单元等效试验数据表

Table. 2 Equivalent test data of each unit of flow measurement system

单元名称	成功次数 x_i	失败次数 F_i	失败原因	等效试验次数 n_i
涡轮流量计 ($i = 1$)	900.0007	2	叶轮、轴承磨损	902.0007
信号发生器 ($i = 2$)	799.0007	2	累计工作时间长, 元器件老化; 冷凝造成接插件短路	891.0007
流量预处理仪 ($i = 3$)	898.0007	1	设备后面板接插件损坏	899.0007
数采分析系统 ($i = 4$)	704.0000	1	调试过程中长时间运行造成死机	705.0000
信号对接环节 ($i = 5$)	764.0000	1	接插件频繁插拔导致损坏	765.0000

根据表 2 的数据, 将系统各组成单元的试验数按照从小到大的顺序排列 $\{705.0000, 765.0000, 891.0007, 899.0007, 902.0007\}$, 取系统等效试验次数为 $n_{(1)} = 705.0000$ 。则最大似然估计为

$$\hat{R} = \prod_{i=1}^k \frac{n_i - F_i}{n_i} = 0.99173$$

等效失败次数 F 为

$$\begin{aligned} F &= n_{(1)} \left(1 - \prod_{i=1}^k \frac{n_i - F_i}{n_i} \right) \\ &= 705.0000 \times (1 - 0.99173) \\ &= 5.83035 \end{aligned}$$

根据公式(11)、(12)得到

$$\begin{aligned} \sum_{x=0}^{5+1} \binom{705}{x} R_1^{705-x} (1 - R_1)^x &= 1 - 0.9 \\ \sum_{x=0}^5 \binom{705}{x} R_2^{705-x} (1 - R_2)^x &= 1 - 0.9 \end{aligned}$$

求解上述方程得到 $R_1 = 0.98511$, $R_2 = 0.98688$ 。

根据($F = 6$, $R_1 = 0.98511$)和($F = 5$, $R_2 = 0.98688$), 采用线性插值法求得当失效数 $F = 5.83035$ 时, 置信下限 $R_L = 0.98521$ 。

4 总结

测量系统的性能可靠性和结构可靠性是衡量测量系统的两个重要的指标。本文从性能可靠性和结构可靠性两个维度评定液体火箭发动机试验流量测量系统可靠性。

1) 根据试验任务书给出的流量上下限值, 以及试验数据的分布特征, 采用双侧性能可靠性方法, 计算得到性能可靠性置信下限, 得到性能可靠性的下限值为 0.98529。虽然高于试验任务书对发动机的可靠度要求(0.98000), 但是还有较大的提升空间。

2) 建立流量测量系统可靠性框图以及串联系统的特征, 将流量测量系统组成单元中指数失效型数据转换为成败型失效数据, 采用 L-M 法和线性插值法计算得到系统结构可靠性置信下限为 0.98521。其结果虽然满足要求, 但是还存在较大的优化余地。表 2 中的失败次数和失败的原因为提高测量系统结构可靠性指明了方向。提高产品质量、加强设备和零部件使用寿命的分析以及及时更换接插件等方法是提高结构可靠性的手段。

综上所述, 虽然本文所采取的可靠性评估方法只得出了系统可靠性的近似解, 但是针对测量系统的特殊性, 上述评估方法对行业内测量技术人员合理评价测量系统可靠性、研究提高系统可靠性方法提供了重要的参考。

参考文献

- [1] 郭霄峰, 李耀华, 陈鸿彦, 等. 液体火箭发动机试验[M]. 北京: 中国宇航出版社, 1990.
GUO X F, LI Y H, CHEN H Y, et al. Liquid rocket engine test[M]. Beijing: China Aerospace Publishing House, 1990. (in Chinese)
- [2] 谭松林, 李宝盛. 液体火箭发动机可靠性[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2014.
TAN S L, LI B S. Reliability of liquid rocket engine [M]. Beijing: China Aerospace Publishing House, 2014. (in Chinese)
- [3] 孙有朝, 张永进, 李龙彪, 等. 可靠性原理与方法(上、下册)[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
SUN Y Z, ZHANG Y J, LI L B, et al. Reliability principles and methods (Volumes I and II) [M]. Beijing: Science Press,

2016. (in Chinese)
- [4] 周正伐. 可靠性工程技术问答 200 例[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2013.
- ZHOU Z F. 200 questions and answers on reliability engineering technology [M]. Beijing: China Aerospace Publishing House, 2013. (in Chinese)
- [5] 陈保家, 邱光银, 肖文荣, 等. 航空发动机转子轴承运行可靠性评估方法[J]. 西安交通大学学报, 2018, 52(10): 41–48.
- CHEN B J, QIU G Y, XIAO W R, et al. Evaluation method for operational reliability of aeroengine rotor bearing[J]. Journal of xi'an jiaotong university, 2018, 52(10): 41–48. (in Chinese)
- [6] 张翌, 石利霞, 李海涛, 等. 光学镜片透反射率测量系统可靠性评估[D]. 长春理工大学, 2019.
- ZHANG Z, SHI L X, LI H T, et al. Reliability evaluation of optical lens transmittance and reflectivity measurement system [D]. Changchun University of Technology, 2019. (in Chinese)
- [7] 叶亮, 夏新涛, 常振, 等. 滚动轴承振动性能保持可靠性与不确定性关系的动态评估[J]. 航空动力学报, 2020, 35(11): 91–103.
- YE L, XIA X T, CHANG Z, et al. Dynamic evaluation of the relationship between reliability and uncertainty of rolling bearing vibration performance [J]. Journal of aeronautical dynamics, 2020, 35(11): 91–103. (in Chinese)
- [8] 张根保, 张定飞, 冉琰, 等. 基于 Gamma 和混合 Copula 的元动作单元性能可靠性分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2021, 48(4): 113–125.
- ZHANG G B, ZHANG D F, RAN Y, et al. Performance reliability analysis of meta action unit based on gamma and hybrid copula[J]. Journal of hunan university (natural science edition), 2021, 48(4): 113–125. (in Chinese)
- [9] 杨懿, 陈宇泽, 陈文丽, 等. 小波包分解在液体火箭发动机试验流量数据去噪中的应用[J]. 质量与可靠性, 2020, 6: 1–5, 11.
- YANG Y, CHEN Y Z, CHEN W L, et al. Application of wavelet packet decomposition in denoising of liquid rocket engine test flow data [J]. Quality and reliability, 2020, 6: 1–5, 11. (in Chinese)
- [10] 赵宇, 杨军, 马小兵. 可靠性数据分析教程[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2009.
- ZHAO Y, YANG J, MA X B. Reliability data analysis course[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2009. (in Chinese)
- [11] 国家市场监督管理总局. GBT4885–85 正态分布完全样本可靠度单侧置信下限[S]. 北京: 中国标准出版社, 1985.
- State administration for market supervision. GBT4885–85 One sided lower confidence limit of normal distribution complete sample reliability [S]. Beijing: Standards Press of China, 1985. (in Chinese)
- [12] 国家市场监督管理总局. GB/T14438–93 正态分布双侧统计允许限系数表[S]. 北京: 中国标准出版社, 1993.
- State Administration for market supervision. GB/T14438–93 Table of normal distribution bilateral statistical allowable limit coefficient[S]. Beijing: Standards Press of China, 1985. (in Chinese)
- [13] 王学, 冯志刚, 高普云, 等. 寿命型到成败型数据的等效折算[J]. 机械强度, 2009(2): 240–244.
- WANG X, FENG Z G, GAO P Y, et al. Equivalent conversion of life type to success failure type data [J]. Mechanical strength, 2009(2): 240–244. (in Chinese)
- [14] 陆祖建, 杨艳妮, 张仕念, 等. 系统可靠性评定中的数据转换[J]. 质量与可靠性, 2010(6): 20–23.
- LU Z J, YANG Y N, ZHANG S N, et al. Data conversion in system reliability evaluation[J]. Quality and reliability, 2010(6): 20–23. (in Chinese)