

文章编号: 1671-6612 (2021) 05-761-05

液氢低温压力传感器校准技术研究

赵珊珊 李 星 耿亚璋

(北京航天试验技术研究所 北京 100074)

【摘要】 旨在针对液氢低温压力传感器进行校准技术研究, 利用我所自行研制的液氢低温压力传感器校准装置, 在(20~80) K温区范围内实现对液氢低温压力传感器的连续可变温度校准, 分析校准温度的改变对液氢低温压力传感器校准结果的影响, 并将上述校准结果同常温校准结果相比较, 发现传感器在液氢温区下校准同常温下校准的校准结果存在较大偏差: 相比于常温校准, 液氢温区校准的液氢低温压力传感器的非线性、迟滞、重复性和精度均有明显提高。

【关键词】 液氢; 低温; 压力传感器; 校准

中图分类号 V-4-55 文献标识码 A

Research on Calibration Technology of Liquid Hydrogen Cryogenic Pressure Sensor

Zhao Shanshan Li Xing Geng Yazhang

(Beijing Institute of Aerospace Testing Technology, Beijing, 100074)

【Abstract】 This paper aims to study the calibration technology of liquid hydrogen cryogenic pressure sensor, using the liquid hydrogen cryogenic pressure sensor calibration device developed by our institute, continuous variable temperature calibration of liquid hydrogen cryogenic pressure sensors in the (20~80) K temperature range. Analysis of the effect of changes in calibration temperature on the calibration results of liquid hydrogen cryogenic pressure sensors, and compare the above calibration results with the normal temperature calibration results, found that there is a big deviation between the calibration results of the sensor in the liquid hydrogen temperature and the normal temperature: compared with the normal temperature calibration, the liquid hydrogen temperature calibration of the liquid hydrogen cryogenic pressure sensor has a significant improvement in non-linearity, hysteresis, repeatability and accuracy.

【Keywords】 liquid hydrogen; cryogenic; pressure sensor; calibration

0 引言

随着我国航天飞行器的快速发展, 提出了超低温环境条件下(如液氢: 20K; 液氮: 77K; 液氧: 90K)压力参数测量需求。目前, 低温压力测量可以采用常温压力传感器加引压管的方式或者采用低温压力传感器来测量。但是常温压力传感器用于低温测量时引压导管的存在使得压力测量响应缓慢, 存在明显滞后, 无法获得压力的高频脉动值,

甚至在测量低温流体的稳态压力时也会与实际测量点的压力值有差别^[1]。由于在不同温度条件下, 受传感器敏感元件材料热胀冷缩、内部结构和制造工艺的影响, 致使传感器产生零点漂移和灵敏度温度漂移^[2-4]。一般传感器难以在大范围内进行零点温漂和灵敏度温度补偿, 因此对传感器的测量结果有很大影响^[5-7]。

目前, 我国绝大多数的低温压力传感器仍是在

项目基金: 国防军工技术基础科研项目: 航天液体发动机试验低温、水击压力传感器现场校准技术研究(JSJC2013203A001)

作者简介: 赵珊珊(1987.03-), 女, 硕士, 工程师, E-mail: shanshanzhao0318@163.com

通讯作者: 李 星(1988.10-), 男, 硕士, 工程师, E-mail: 785164332@qq.com

收稿日期: 2021-03-18

室温条件下进行校准的，只有少部分精度要求非常高的压力传感器才在低温条件下进行校准，这与传感器实际使用工况相差甚远。据统计由传感器温度性能影响给试车数据分析带来的误差最大已达 10%。所以开展超低温环境下低温压力传感器校准技术研究是十分必要的。

近年来，液氮、液氢温区低温压力传感器校准装置被逐渐研制出来：中国电子科技集团公司第十六研究所的胡锐等人研制了一种在（79~150）K 温区范围内连续可调的低温压力传感器校准系统，该系统采用液氮为冷源的制冷方式，其控温精度不大于±2K^[8]；西安航天动力试验技术研究所的李正兵等人研制了一种在（80~300）K 温区范围内连续可调的低温压力传感器校准系统，该系统同样采用液氮为冷源的制冷方式，该校准装置的扩展不确定度为 0.3%（ $k=2$ ）^[9]；西安航天动力试验技术研究所的李智等人研制了一种在（77~293）K 温区范围内连续可调的低温压力传感器校准系统，该系

统的不确定度优于 1%（ $k=2$ ）^[10]；北京航天试验技术研究所的李星等人研制了一种在（20~80）K 温区范围内连续可调的低温压力传感器校准系统，该系统的控温精度不大于±0.2K，这也是我国首次在液氢温区范围内实现对低温压力传感器的连续可变温度校准，但该文着重介绍其核心部分即恒温试验腔内温度场的均匀分布，对于低温压力传感器的校准结果并未提及^[11]。因此，本文针对液氢低温压力传感器进行校准技术研究，旨在提高低温压力测量结果的精度，确保压力数据溯源的准确性和可靠性，为推动我国航天飞行器的快速发展提供技术保障。

1 低温压力传感器校准装置

低温压力传感器现场校准装置主要由压力标准源、低温介质加注和排放系统、试验系统、温度控制系统、数据采集系统、配气系统、抽空系统组成，校准装置原理图如图 1 所示。

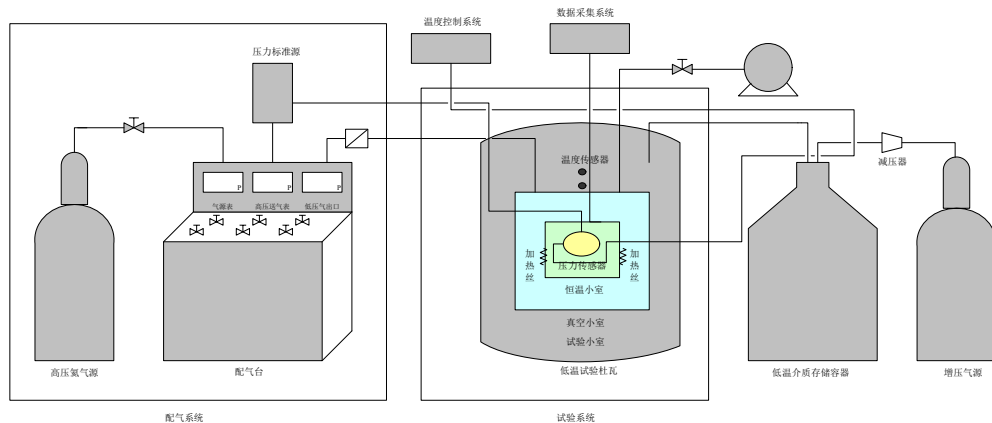


图 1 液氢低温压力传感器校准系统原理图

Fig.1 Schematic diagram of calibration system for liquid hydrogen cryogenic pressure sensor

在该系统中，被测液氢低温压力传感器安装在恒温试验小室中，试验小室置于盛有液氢低温介质中的试验杜瓦中，由氢气压力标准源对传感器的校准压力进行调节，传感器供电、信号输出由低温密封插座引出。试验小室为双层结构，分为真空小室和恒温小室，试验时安装压力传感器后，真空小室和装有压力传感器的恒温小室均充入氢气置换后保压，加注液氢低温介质换热平衡后测量，然后抽掉真空小室氢气，恒温器开始控温，测量不同温度点压力传感器的输出，过程中壁温温度传感器测量压力传感器温度，装有压力传感器的真空小室持续氢气保压作为传热介质。

校准时，采用液氢低温介质作为冷源，并以电加热为辅助手段。通过温度控制系统进行温度控制，利用压力标准源对液氢低温压力传感器输出恒定的压力值，通过数据采集系统对传感器进行数据采集。

液氢低温压力传感器校准装置的具体技术指标如下：

- (1) 液氢低温压力传感器校准压力范围：(0.1~21) MPa；
- (2) 校准温度范围：(20~80) K；
- (3) 液氢恒温系统温度波动度：≤1.0K/30min；
- (4) 液氢恒温系统温度允差：±2.0K；

(5) 液氢低温压力传感器校准装置不确定度:
 $U=0.3\%$, ($k=2$)。

2 低温性能测试

2.1 液氢低温压力传感器校准温度压力点的选取

在液氢低温压力传感器校准的过程中, 在 (20 ~ 80) K 温区范围内选取 12 个校准温度点, 包括: 20K、23K、25K、27K、30K、35K、40K、45K、50K、60K、70K、80K; 在 (0.1 ~ 21) MPa 压力范围内选取 10 个校准压力点, 包括: 0.1MPa、0.5MPa、2MPa、5MPa、8MPa、10MPa、12MPa、15MPa、18MPa、21MPa。对于上述的 12 个校准温度点, 每个温度点都对上述 10 个压力点进行 6 次校准循环。

2.2 液氢低温压力传感器校准数据处理

2.2.1 传感器的工作直线

为了实际使用的方便, 往往用一条工作直线来代替实际的校准曲线。工作直线反映了传感器的输入和输出之间的关系, 可以用下面的特性方程 (1) 表示 (文中所涉及公式、计算方法及相关原理均参照中国航天科技集团公司标准 Q/QJA 406-2016《压力传感器超低温性能测试方法》) [12]:

$$Y = a + bX \quad (1)$$

传感器工作直线是根据校准数据采用最小二乘法来确定的。根据校准数据可以按下列公式求得直线方程的截距 a 和斜率 b 。

$$b = \frac{K \sum_{i=1}^K X_i Y_i - \sum_{i=1}^K X_i \sum_{i=1}^K Y_i}{K \sum_{i=1}^K X_i^2 - (\sum_{i=1}^K X_i)^2} \quad (2)$$

$$a = \frac{\sum_{i=1}^K X_i^2 \sum_{i=1}^K Y_i - \sum_{i=1}^K X_i \sum_{i=1}^K X_i Y_i}{K \sum_{i=1}^K X_i^2 - (\sum_{i=1}^K X_i)^2} = \bar{Y} - b\bar{X} \quad (3)$$

$$\bar{X} = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K X_i \quad (4)$$

$$\bar{Y} = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K Y_i \quad (5)$$

2.2.2 传感器的非线性 δ_L

非线性是指在规定条件下, 传感器校准曲线与工作直线的不一致性。计算公式见公式 (6)。

$$\delta_L = \frac{\Delta L_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (6)$$

式中: ΔL_{\max} 为校准曲线与工作直线的最大偏差 (绝对值); Y_{FS} 为传感器的满量程输出 (理论值)。

2.2.3 传感器的迟滞 δ_H

迟滞是指传感器在相同工作条件下全测量范围校准时, 正、反行程校准曲线间的最大差值。在数值上用最大差值对满程输出的百分比来表示, 可用公式 (7) 求出。

$$\delta_H = \frac{\Delta H_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (7)$$

式中: ΔH_{\max} 为正、反行程校准曲线间的最大差值。

2.2.4 传感器的重复性 δ_R

重复性是指传感器在相同的工作条件下, 输入按同一方向作全测量范围连续变动多次时, 特性曲线的不一致性。计算公式见公式 (8)。

$$\delta_R = \frac{t_{0.95} S_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (8)$$

式中: S_{\max} 为正、反行程各校准点子样标准偏差的最大值; $t_{0.95}$ 为置信度为 95% 的 t 分布因子, 与校准循环次数 R 有关, 其数值如表 1 所示。

表 1 置信度为 95% 的 t 分布因子与校准循环次数 R 的关系表

Table 1 The relationship between the t -distribution factor with 95% confidence and the number of calibration cycles R							
R	2	3	4	5	6	7	8
$t_{0.95}$	12.706	4.303	3.182	2.776	2.571	2.447	2.365

标准偏差采用贝塞尔法计算。正、反行程第 i 个校准点的子样标准偏差 S_{ci} 、 S_{fi} 见公式 (9)、(10)。

$$S_{ci} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^R (Y_{cij} - \bar{Y}_{ci})^2}{R-1}} \quad (9)$$

$$S_{fi} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^R (Y_{fij} - \bar{Y}_{fi})^2}{R-1}} \quad (10)$$

2.2.5 传感器的精度 U

传感器的精度是传感器各校准点正、反行程的实际输出值对于工作直线的偏差在规定的置信度

下皆不超过的一个极限范围。计算公式见公式 (11)。

$$U = \text{Maxm}(B_{ci} + 0.95S_{ci}), (B_{fi} + 0.95S_{fi})m \quad (11)$$

式中: Max 为选最大值的函数符号; B_{ci} 为第 i 个校准点正行程平均值与该值最小二乘之差的绝对值; B_{fi} 为第 i 个标准点反行程平均值与该值最小二乘之差的绝对值。

通常,用相对精度 U_r 来表示传感器的综合性能。计算公式见公式 (12)。

$$U_r = \frac{U}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (12)$$

2.3 液氢低温压力传感器校准结果分析

液氢低温压力传感器的各项校准结果如表 2 所示,为了更加直观的考察校准温度参数对液氢低

温压力传感器校准结果的影响,我们对各校准结果受校准温度参数影响的情况绘制了相应的曲线,如图 2-图 5 所示。

结合表 2 及图 2-图 5,我们可以很明显的看出:在 (20~80) K 温区范围内,校准温度参数对校准的结果没有明显的影响;但当校准温度上升到 298K 时,我们可以看出各项校准结果均出现明显增大。

对比 20K 和 298K 的校准结果,发现常温下校准液氢低温压力传感器同液氢温度下校准液氢低温压力传感器,传感器的非线性增大 77.8%;迟滞增大 75.9%;重复性增大 112.5%;精度增大 88.7%。由此可见,对于液氢低温压力传感器而言,校准温度参数对其校准结果有较大影响。

表 2 不同校准温度点下液氢低温压力传感器的校准结果

Table 2 Calibration results of liquid hydrogen cryogenic pressure sensor on different calibration temoerature

校准温度点/K	线性方程	非线性	迟滞	重复性	精度
20	$Y=687P-630$	0.185%	0.029%	0.024%	0.195%
23	$Y=687P-582$	0.147%	0.029%	0.024%	0.160%
25	$Y=686P-551$	0.214%	0.029%	0.019%	0.214%
27	$Y=685P-529$	0.140%	0.036%	0.030%	0.157%
30	$Y=685P-505$	0.112%	0.043%	0.019%	0.148%
35	$Y=684P-477$	0.182%	0.036%	0.024%	0.182%
40	$Y=683P-463$	0.133%	0.036%	0.019%	0.150%
45	$Y=682P-453$	0.126%	0.036%	0.017%	0.137%
50	$Y=682P-448$	0.186%	0.036%	0.017%	0.186%
60	$Y=681P-442$	0.192%	0.043%	0.017%	0.206%
70	$Y=680P-445$	0.142%	0.043%	0.015%	0.160%
80	$Y=679P-438$	0.151%	0.036%	0.017%	0.151%
298	$Y=662P-309$	0.329%	0.051%	0.051%	0.368%

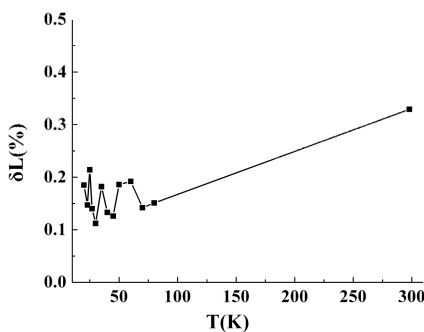


图 2 不同校准温度对液氢低温压力传感器非线性的影响
Fig.2 Influence of different calibration temperatures on nonlinearity of liquid hydrogen cryogenic pressure sensor

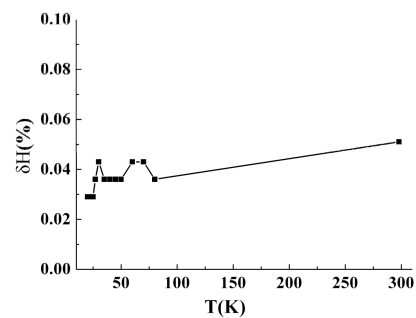


图 3 不同校准温度对液氢低温压力传感器迟滞的影响
Fig.3 Influence of different calibration temperatures on hysteresis of liquid hydrogen cryogenic pressure sensor

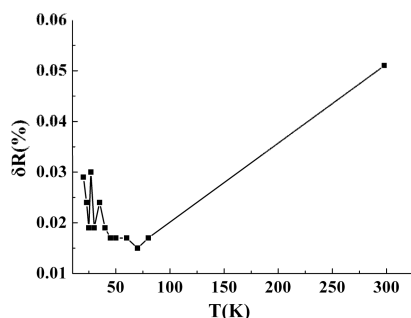


图 4 不同校准温度对液氢低温压力传感器重复性的影响

Fig.4 Influence of different calibration temperatures on repeatability of liquid hydrogen cryogenic pressure sensor

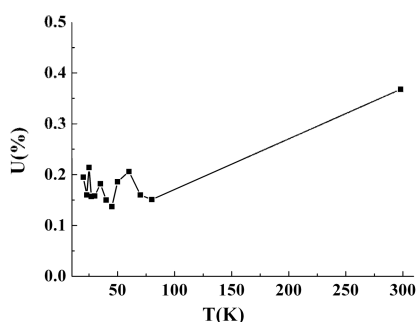


图 5 不同校准温度对液氢低温压力传感器精度的影响

Fig.5 Influence of different calibration temperatures on longitude of liquid hydrogen cryogenic pressure sensor

3 结论

本文针对液氢低温压力传感器进行校准技术研究,利用我所自行研制的液氢低温压力传感器校准装置,在(20~80)K温区范围内实现对液氢低温压力传感器的连续可变温度校准;通过改变校准的温度参数,结合传感器的非线性、迟滞、重复性、精度等静态性能测试结果,并将上述校准结果同常温校准结果相比较,发现液氢低温压力传感器在常温校准时较液氢温区校准时,其校准结果存在较大偏差:对比 20K 和 298K 的校准结果,发现常温下

校准液氢低温压力传感器同液氢温度下校准液氢低温压力传感器,传感器的非线性增大 77.8%;迟滞增大 75.9%;重复性增大 112.5%;精度增大 88.7%。由此可见,对于液氢低温压力传感器而言,校准温度参数对其校准结果有较大影响。对于压力参数精度要求较高的场合,液氢低温压力传感器应在液氢温区进行校准,可有效的减少由于校准温度参数的影响带来的传感器压力参数测量结果的误差。

参考文献:

- [1] 胡立荣,王东方,兰玉岐.低温压力传感器校准系统研制与应用[J].低温工程,2013(4):60~64.
- [2] 王志敏.压力传感器的温度补偿[J].自动化与仪表,2007(9):18-20.
- [3] 徐鹏,孙玲.压力传感器温度漂移补偿的应用分析[J].中国水运,2012(1):105-106.
- [4] 邹其利,滕纲,李小换,等.压力、温度复合传感器技术研究[J].仪表技术与传感器,2009:175-177.
- [5] 李小换,邹其利,张世名.超低温薄膜压力传感器的研究[J].仪表技术与传感器,2009:171-174.
- [6] 李小换,张世名,邹其利,等.灵敏度温度自补偿薄膜压力传感器的研制[J].遥测遥控,2007,(28):153-157.
- [7] 郭涛,熊继军,张文栋.压阻式压力传感器的温度特性研究[J].测试技术学报,2004,(18):229-231.
- [8] 胡锐,张俊峰.低温压力传感器校准装置研制[J].低温技术,2016,(1):34-37.
- [9] 李正兵,李永斌,田宝云,等.可调低温压力传感器校准装置实现[J].火箭推进,2016,(4):103-109.
- [10] 李智,滕科嘉,李锐华.液氧煤油发动机地面试验低温压力传感器校准系统设计[J].低温工程,2017(6):56-62.
- [11] 李星,赵珊珊,王东方.20-80K低温压力传感器校准系统的研制[J].低温工程,2017(4):62-67.
- [12] Q/QJA 406-2016,压力传感器超低温性能测试方法[S].北京:中国航天标准化与产品保证研究院,2017.