

# 液氧密度测量技术研究

赵万明

(西安航天动力试验技术研究所, 陕西 西安 710100)

**摘 要:** 液氧/煤油发动机地面试验中, 液氧质量流量通过测量体积流量乘以密度来获得, 密度测量的准确度直接影响质量流量的测量准确度。影响液氧密度的主要因素是密度的计算公式和温度测量的准确性。介绍了液氧密度的获取途径、计算方法, 对影响密度的主要技术问题, 特别是液氧温度测量技术进行了深入研究, 提出采用测温法计算密度, 测温点选在涡轮流量计附近, 传感器选用铠装裸露式 A 级铂电阻, 同时推荐了密度计算公式。

**关键词:** 液体火箭发动机试车; 低温介质; 温度测量; 密度计算

中图分类号: V434

文献标识码: A

文章编号: (2007) 04-0056-07

## Research on liquid oxygen density measurement

Zhao Wanming

(Xi'an Aerospace Propulsion Test Technique Institute, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** In liquid rocket engine testing, propellant mass flow rate was obtained through the product of the volume flow rate and the density. The accuracy of the mass flow rate measurement was closely influenced by the measuring precision of the density. Liquid oxygen density measurement for liquid oxygen/kerosene engine testing was a complex process with lot of technical difficulties. The methods, calculation and major influence factors for liquid oxygen density acquisition were introduced in this paper. As the emphasized point, the liquid oxygen temperature measurement technique was analyzed in detail.

**Key words:** liquid rocket engine testing; cryogenic fluid; temperature measurement; density calculation

### 1 引言

液氧/煤油火箭发动机地面试车中流量的测

量准确度关系到发动机比推力等性能参数的计算。推进剂质量流量一般通过测量体积流量乘以密度来获得, 密度测量的准确度直接影响质量流量的准确性。液氧/煤油发动机使用的氧化剂为低

收稿日期: 2006-12-19; 修回日期: 2007-01-20。

作者简介: 赵万明 (1958—), 男, 研究员, 研究领域为发动机试验测控技术。

温液氧,其密度的测量和常温介质有较大的差异,测量过程中影响精度的因素多、过程复杂、准确测量难度大,介质密度的测量准确度对推进剂质量流量测量精度有显著影响。因此,研究液氧密度测量技术有重要意义。

## 2 介质密度的获得途径

低温液体密度的测量有直接和间接两种方法。直接法一般采用称量法,原理基于阿基米德定律,即称量出浮子质量和浸在低温液体中的体积,通过浮力计算介质密度。直接法测量液氧密度的准确性高。据资料介绍,北京航天试验技术研究所研制了液氧密度标准计量装置。该装置在温度90~100K、压力0.1~0.6MPa范围内,沸点条件下扩展不确定度(扩展系数 $K=3$ 时)不大于 $0.3\text{kg/m}^3$ ,沸点条件之外不大于 $0.5\text{kg/m}^3$ ,达到很高的精度。但由于装置复杂,低温液氧取样要求条件高,适用于计量和试验室,对大容器和快速流动的管路液氧动态密度测量适用性不强,但可用来对间接法测量系统进行校准和结果验证。间接法测量低温液体密度的方法较多,液体火箭发动机试验中,液氧密度一般采用电容式密度传感器测量法和测温、测压计算密度两种方法,这两种方法测量精度虽然比静态称量法低一些,但方法相对简单,基本满足流量测量不确定度要求。下面介绍电容式密度计测量法和测温、测压计算密度法原理,重点介绍测温、测压法计算密度。

### 2.1 电容密度计测量法

电容式密度传感器的结构采用多个同心不锈钢管,实质是一个多层圆柱型电容器。单层圆柱形电容器的电容公式如式(1):

$$C=2\pi\epsilon l/\ln(r_1/r_2)=k\epsilon \quad (1)$$

式中, $C$ 为电容器电容值; $l$ 为圆柱面极板长度; $r_1$ 、 $r_2$ 为圆柱面极板外、内半径; $\epsilon$ 为电介质的介电常数; $k$ 为圆柱形电容器结构系数, $k=2\pi l/\ln(r_1/r_2)$ 。

电容器极板中的介质变化导致它的介电常数 $\epsilon$ 变化,电容值 $C$ 就随之变化。电容式密度计正是利用这个原理测量电容,来计算介质密度。具

体过程是,流经密度计的电介质密度变化时,介质的介电常数发生变化,变化关系如式(2)

$$\epsilon=1+(C-C_0)/A_{\pi} \quad (2)$$

式中, $C_0$ 为真空中传感器的电容值; $A_{\pi}$ 为传感器的结构系数。

$C_0$ 和 $A_{\pi}$ 是密度传感器校准时得到的。传感器结构确定后, $C_0$ 和 $A_{\pi}$ 基本不变,第一次使用前校准一次即可。由于真空中传感器的电容值和空气中电容值相差很小,也可在普通大气压条件下测量 $C_{\text{空气}}$ 代替 $C_0$ 。求出 $\epsilon$ 介电常数后,根据式(3)克劳修斯-莫索谛方程计算密度:

$$\rho=(\epsilon-1)/P(\epsilon+2) \quad (3)$$

式中, $P$ 为比极化率(常数); $\rho$ 为电介质密度。

如果将式(2)、(3)合并,可根据测得的电容,利用式(4)直接计算密度

$$\rho=(C-C_0)/P(3A_{\pi}+C-C_0) \quad (4)$$

电容式密度计测量液氧密度不确定度一般为0.3~0.5%。但电容式密度计配置的二次仪表为电容测试仪,和其它参数测量系统的信号调理器不兼容。同时,密度计和电容测试仪故障率较高,密度传感器又安装在几十立方米容器内部的下封头中心附近,传感器一旦出现故障,维修困难。

随着温度和压力参数测量水平的不断提高,近几年逐渐采用简便、可靠、具有一定精度的测温测压法计算低温介质密度。经试验和计算,测温、测压获取液氧密度和电容式密度计测量精度相差很小,得到广泛应用。在一定的压力范围内液氧密度主要取决于温度,测量中也采取只测温度的方法计算液氧密度。

### 2.2 测温、测压法密度测量方法

液氧/煤油发动机试车中液氧容器和液氧管路的温度和压力不同,密度也不同,应分别进行测量。为了准确测量液氧稳定段流量,一般在液氧主容器内安装分节式电容液面计。同时,在液面计上不同高度安装若干个A级T型热电偶传感器,既可以测量容器内液氧温度,还可以粗略指示液面高度。压力传感器一般安装在容器顶部。液氧主管路上的温度、压力传感器安装在涡轮流量计附近。主管路上的温度传感器选择插入式铠

装 A 级铂电阻或热敏电阻传感器,测量的绝对误差控制在 0.5℃以内。压力传感器选用 0.1 级的普通压力传感器,测量的不确定度在 0.5% 以内。压力传感器安装测压导管,导管的长度选择 0.6~0.8m、内径 6~8mm 较理想。导管通径和长度选择要合适,导管过短,低温通过导管外壁传到传感器上影响传感器的性能。导管过长,引起测量值滞后。用测量温度和压力的方法计算液氧密度,可根据 (5) 和 (6) 两个拟合公式:

$$\rho_0=1513.51569816-3.36413948T-0.009259T^2+\\(20.41793293-0.32679961T+0.00155678T^2) p+\\(-1.66234299+0.02801104T-0.00011895T^2) p^2$$
 (5)

$$\rho_0=1473.59-2.46054T-0.0139811T^2-0.21743p+0.005065Tp$$
 (6)

式中,  $\rho_0$  为计算的液氧密度, kg/m<sup>3</sup>;  $T$  为测量的液氧温度值, K;  $p$  为测量的液氧压力值, MPa。

若不考虑压力因素,可用简化公式 (7) 计算密度:

$$\rho_0=16.593|t|^{0.8115}$$
 (7)

式中,  $\rho_0$  为计算的液氧密度, kg/m<sup>3</sup>;  $t$  为测量的液氧温度, ℃。

公式 (7) 使用范围:  $t=-188.15\sim-168.15\text{℃}$ ;  $p=0.3\sim1.0\text{MPa}$ 。液氧/煤油发动机试车以来一直使用公式 (7) 计算液氧密度。

选取试车过程主管路流量计附近不同压力和温度测量值,用公式 (5) 与 (7) 和公式 (6) 与 (7) 分别计算液氧密度,结果如表 1 和表 2 所示。从表 1 和表 2 看出,公式 (6) 计算结果最大,公式 (5) 计算结果最小,公式 (7) 计算结果处在中间。表 3 选自低温工程《液氧密度标准计量装置》一文中非稳态条件下液氧密度测定结果,表 3 的数据比用三个公式计算结果明显偏大。表 4 列举了温度 90K、压力分别为 0.4MPa、0.6MPa 时三个公式计算的液氧密度值和标准计量装置测定值的比较情况。从表 4 看出,目前使用的测温法公式 (7) 计算结果和液氧密度标准计量装置测定的值相差 4.5~4.9kg/m<sup>3</sup> (约小 0.4%)。如果使用公式 (5)、公式 (6) 也小 0.4% 左右。《液氧密度标准计量装置》一文中介绍,该装置进行了沸点、稳态、非稳态液氧的密度测定,实验共达到 1497 次,测量不确定度达 0.05%,在国际上处于先进水平。经比较,美国 NASA 报告的数据和表 3 数据非常接近,可以用《液氧密度标准计量装置》测定的结果作为标准来检验密度的拟合公式。由于温度对密度的影响程度约 1%,压力对密度影响程度只有 0.04%,用测温法计算液氧密度一般可满足密度测量不确定度要求,但须对公式 (7) 进行修正,修正成公式 (8)

$$\rho_0=16.593|t|^{0.812261}$$
 (8)

表 1 测温测压法与测温法密度计算值比较(1)

Tab.1 Comparison of LOX calculated densities obtained by temperature/pressure measuring and temperature measuring(1)

温度/K	由公式(5)得测温测压法密度/(kg·m <sup>-3</sup> )				由公式(7)得测温法密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	公式(7)与公式(5)密度差/(kg·m <sup>-3</sup> )	
	0.3MPa 时	0.4MPa 时	0.5MPa 时	0.6MPa 时		0.4MPa 时	0.6MPa 时
93	1121.609	1121.952	1122.293	1122.633	1122.980	1.028	0.348
92	1126.697	1127.044	1127.388	1127.731	1128.036	0.993	0.305
91	1131.768	1132.118	1132.466	1132.812	1133.087	0.969	0.274
90	1136.821	1137.175	1137.527	1137.877	1138.132	0.957	0.255
89	1141.856	1142.215	1142.571	1142.925	1143.172	0.958	0.247
88	1146.874	1147.237	1147.598	1147.956	1148.208	0.971	0.251

表 2 测温测压法与测温法密度计算值比较(2)

Tab.2 Comparison of LOX calculated densities obtained by temperature/pressure measuring and temperature measuring(2)

温度/K	由公式(6)得测温测压法密度/(kg·m <sup>-3</sup> )				由公式(7)得测温 法密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	公式(7)与公式(6) 密度差/(kg·m <sup>-3</sup> )	
	0.3MPa 时	0.4MPa 时	0.5MPa 时	0.6MPa 时		0.4MPa 时	0.6MPa 时
93	1123.913	1123.939	1123.964	1123.989	1122.980	-0.958	-1.009
92	1128.959	1128.984	1129.009	1129.033	1128.036	-0.948	-0.997
91	1133.976	1134.001	1134.025	1134.049	1133.087	-0.914	-0.963
90	1138.966	1138.990	1139.014	1139.038	1138.132	-0.858	-0.905
89	1143.928	1143.951	1143.974	1143.998	1143.172	-0.778	-0.825
88	1148.861	1148.884	1148.907	1148.930	1148.208	-0.677	-0.722

表 3 90~100K 温度时非稳态下液氧密度测定结果

Tab.3 LOX densities at 90~100K under unsteady condition

温度/K	压力/MPa	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	最大标准不确定度/(kg·m <sup>-3</sup> )	最大扩展不确定度/(kg·m <sup>-3</sup> )	纯度/(%)
90.00	0.200	1142.15	0.026	0.078	99.70
	0.400	1142.65	0.037	0.111	99.70
	0.600	1143.03	0.038	0.114	99.70
92.00	0.200	1131.98	0.047	0.141	99.69
	0.400	1132.58	0.029	0.087	99.70
	0.600	1132.89	0.041	0.123	99.65

表 4 直接测量与间接法测量液氧密度计算值结果比较

Tab.4 Comparison of LOX densities obtained from direct and indirect measurement

温度/K	压力/MPa	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )							
		直接法	NASA 报告	公式(5)	公式(6)	公式(7)	公式(8)	直接法 与公式 (7)差值	直接法 与公式 (8)差值
90	0.40	1142.65	1142.58	1137.175	1138.990	1138.132	1142.654	4.518	-0.006
92	0.40	1132.58	1132.57	1127.044	1128.984	1128.036	1132.508	4.544	0.072

表 4 列举了修正后的公式 (8) 计算的数据和表 3 数据及 NASA 报告数据的比较, 特别是发动机试车过程稳定段压力为 0.4MPa 时, 三者很接近。另外, 知道液氧压力、温度及纯度, 可以

查 NASA 报告《氧的热物理性能》获得液氧的密度值, 但没有公式 (8) 简捷方便, 推荐使用公式 (8) 计算液氧密度。

表 5 温度、密度对流量计算的影响情况比较  
Tab.5 Influence of temperature and density on the calculated flow rate value

温度/℃	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )		质量流量/(kg·s <sup>-1</sup> ) (体积流量为 250dm <sup>3</sup> /s 时)		公式(7)和公式(8)引起的流量差值/(kg·s <sup>-1</sup> )
	公式(7)	公式(8)	公式(7)	公式(8)	
-182.5	1134.853	1139.359	283.713	284.840	1.127
-183.5	1139.897	1144.427	284.974	286.107	1.133
1℃引起的差值	5.044	5.068	1.261	1.267	

注:温度测量差 1℃时,用公式(7)和用公式(8)引起的流量误差 283.713-286.107=-2.394kg/s,相对误差 -2.394/286.107=0.84%

使用正确的拟和公式和测准液氧温度可以提高密度测量准确性。表 5 列举了温度对密度的影响及密度对流量的影响程度,如果液氧温度测量误差 1℃,又使用目前的密度计算公式(7),将导致-0.84%(约 2.4kg)的流量测量相对误差。

3 液氧温度的准确测量

在压力 0.1~0.6MPa 内液氧的密度主要取决于温度,故测准温度是测准密度的关键。

3.1 温度传感器的选择

工业现场常用三种传感器来测量液氧温度,分别是 T 型热电偶、热敏电阻、铂电阻。

GB2903-82 中规定-200~0℃范围内 A 级 T 型热电偶允差为±0.4℃, B 级允差为±0.75℃, C 级允差为±1.5℃。90 温标规定在-200~850℃范围内, A 级 Pt100 允差为±(0.15+0.002|t|)℃, B 级 Pt100 允差为±(0.3+0.005|t|)℃。热敏电阻的非线性较大,温区窄,在-200~-100℃范围内的误差大约 0.5K 左右,每只传感器的阻值和对应的温度值不一样,没有统一的标准分度表。上述三种类型的传感器,如果选择 A 级产品,从误差指标看相差不大,但实际使用中,测量精度较高的是铂电阻和热敏电阻。原因是热电偶测量时,温度补偿带来一定误差,而且热偶丝和补偿导线之间的连接插头容易在发动机周围变化的温度场形成第二参考点,带来新的测量误差,导致 T 型热电偶实际测量中精度只能达到 0.5~1%。铂

电阻和热敏电阻传感器在测量、校准方法选择合理、测量系统干扰小的条件下,液氧温度测量的绝对误差在±0.5℃左右,甚至达到±0.3℃。故液氧温度选择铂电阻和热敏电阻传感器测量可以达到较高的准确度。

测量液氧管路内温度的传感器必须选用铠装结构,而且常温耐压应大于低温使用压力的 10 倍。从使用经验看,热敏电阻传感器的感温头在测量中应完全浸泡在液氧中。铂电阻传感器可以有二种结构,一种和热敏电阻一样,感温头浸泡在液氧中,另一种是感温头装在封闭的不锈钢管内,感温头和不锈钢管的顶端紧贴,用低温密封胶封住,感温头在低温状态下不会发生位移。封闭铠装铂电阻传感器有很高的耐压及可靠性,但惰性大、测量时须冷透、插入深度有要求,其测量误差大于感温头浸泡式结构传感器,建议液氧管道测温选用感温头浸泡式结构的传感器测量。

液氧容器内温度传感器安装后,不易取出维修,要求结构简单可靠,一般选用 A 级 T 型热电偶测量。选用 T 型热电偶的理由是容器冷透后温度稳定,只要参考点温度测量准确、热偶丝和补偿导线连接处温度稳定、两个热电极的焊接牢固、彼此之间绝缘性好,热电偶测量绝对误差可小于±0.8℃,基本满足精度要求。不用热电阻的原因是热电阻制作、固定困难,需要供激励源,在容器内没有热电偶可靠,而且铂电阻传感器在容器内引线长,线路电阻特别是低温状态下的电阻变化影响测量准确性。如果热电偶测量存在明

显系统误差, 可用热敏电阻临时测量比对、修正热电偶测量结果, 但长期仍建议采用热电偶测量。

### 3.2 热敏电阻测量方法

热敏电阻测量时提供的激励源是微安级电流 (约  $10\mu\text{A}$ ), 电流过大易引起热敏电阻发热, 带来测量误差。微安级的恒流源制作难度大、且不稳定, 一般用恒压源提供激励源。测量电路如图 1 所示。图中配桥电阻  $1\text{k}\Omega$ 、 $40\text{k}\Omega$  应选用精密电阻, 虚框内电路设计在后端的采集装置上。现场的热敏电阻在常温状态下  $20\Omega$  左右, 电桥基本平衡, 测量系统处于初始零位状态 (可在热敏电阻相对的桥臂上增加并联调零电阻, 将零位调到最小)。热敏电阻在液氧温度 ( $-183^\circ\text{C}$ ) 时电阻大约  $40\text{k}\Omega$  左右, 电桥输出较大的信号, 采集装置对电桥输出信号进行调理、采集、计算完成了温度测量。由于热敏电阻在  $-175\sim-185^\circ\text{C}$  范围内灵敏度高, 每变化  $1^\circ\text{C}$ , 电阻变化达  $2\sim 4\text{k}\Omega$ , 有效提高了液氧温区附近的温度测量准确度。

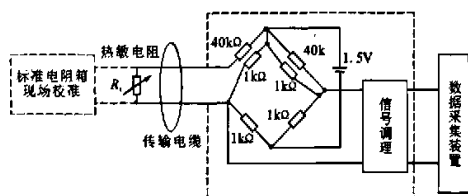


图 1 热敏电阻测量原理图

Fig.1 Principle of thermal resistor measuring

用于低温测量的热敏电阻传感器计量标定时, 一般标液氮和液氧两个定点, 其它点阻值用公式 (9) 计算

$$R_T = R_{T_0} \exp B_n \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \quad (9)$$

式中:  $B_n$  为热敏电阻传感器特性常数, 通过两个定点的温度和对应的阻值可以求出,  $\Omega$ ;  $T$  为  $T$  点温度值,  $\text{K}$ ;  $T_0$  为  $T_0$  点温度值,  $\text{K}$ ;  $R_{T_0}$  为  $T_0$  温度对应的电阻值,  $\Omega$ ;  $R_T$  为  $T$  温度对应的电阻值,  $\Omega$ 。

通过公式 (9), 计算  $-175\sim-185^\circ\text{C}$  范围内每隔  $1^\circ\text{C}$  (或  $0.5^\circ\text{C}$ ) 的阻值, 构成温度-电阻值关系表。现场校准时, 用精密电阻箱按各温度对应的电阻值加载, 在计算机中形成温度-电压幅值分度表, 试验时采集的电压毫伏数查表, 线性插值获得测量的温度值。由于温区窄, 也可以将温度-电压分度表的数用最小二乘法求出斜率计算温度, 但查表的精确度更高一些。

### 3.3 铂电阻测量方法

铂电阻温区宽、线性好、测量方法简单, 得到广泛应用。铂电阻的测量方法有两种, 分别是电桥法和恒流源法。电桥法测量电路如图 2 所示。电桥法测量时必须选用三线制测量, 原因是线路电阻对测量的影响较大。电桥法测量时加载的激励源大小使流过铂电阻的电流  $1\sim 1.5\text{mA}$  为宜。铂电阻恒流源法测量路如图 3 所示。

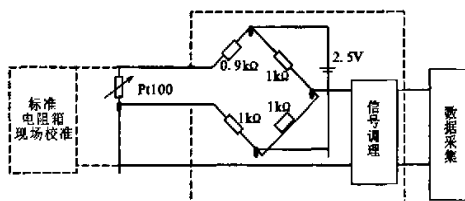


图 2 电桥法铂电阻测量原理图

Fig.2 Principle of Pt resistor bridge measuring

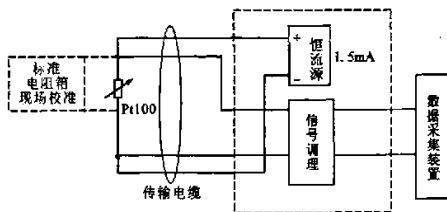


图 3 四线制恒流源法铂电阻测量原理框图

Fig.3 Principle of Pt resistor measuring by the method of 4-wire constant current

恒流源法测量时必须为四线制, 恒流源选用  $1\sim 1.5\text{mA}$ 。由于三线制电桥法其电桥本身存在一定的非线性, 且恒压源的稳定性低于恒流源, 外界因素影响比恒流源法大, 其测量精度低于恒流源法。加之恒流源法现场校准简单, 既有标准的

分度表,又有非常好的线性,在分度表范围内的温度测量,用四线制恒流源是最理想的方法。铂电阻恒流源现场校准时加二档或六档电阻值,用最小二乘法拟合直线(六档和二档计算的斜率相差很小),用公式计算温度。电桥法现场校准时必须加六档以上,加的电阻值一般根据被测温度范围来选择。如测量液氧温度,二档时可选 $-200^{\circ}\text{C}$ 和 $-100^{\circ}\text{C}$ 对应的阻值校准,六档时可选 $-200^{\circ}\text{C}$ 、 $-190^{\circ}\text{C}$ 、 $-180^{\circ}\text{C}$ 、 $-170^{\circ}\text{C}$ 、 $-160^{\circ}\text{C}$ 、 $-150^{\circ}\text{C}$ 对应的阻值校准。如果想取得更高的测量精度,可在被测温度附近选择更多的温度点校准,查表分段插值计算温度。

## 4 传感器安装工艺

真空绝热容器安装传感器时,一般在容器中心位置的上、下封头之间等间距安装若干个温度传感器,既可测量液氧温度,也可粗略知道液面情况。对于非真空绝热液氧主管路流量计附近安装传感器时,要考虑传感器插入深度和分层温度两个因素。用一只传感器测量时插入的有效深度一般为管径的三分之一为宜。发动机预冷过程中,不绝热的液氧管路温度分层明显,从管路中心向外温度逐步升高。刚开始预冷时,产生的气体分布在管路上部分,并向容器排放,管路内温度上高下低。发动机点火大约10秒后,容器内液氧快速流过管路,分层温度趋于一致,但仍有差异。建议主管路内安装长度不同的三只传感器,求三只传感器稳定段测量平均值。以DN300管路为例,可选择插入深度分别为120 mm、100 mm、80 mm的三只传感器,按 $90^{\circ}$ 安装在管道上、下、侧面。一般来说,发动机试车稳定段不同长度的三只传感器之间测量值相差 $0.1\sim 0.4^{\circ}\text{C}$

(含测量误差,且与管径、流速有关),容器内测量温度值低于管路测量值。容器内温度在发动机预冷后上升的现象与管路预冷产生的气体排入容器有关,预冷时间加长,容器内温度逐渐下降并稳定,但有时仍然降不到预冷前温度。

## 5 结束语

目前火箭发动机试验液氧流量测量手段主要是涡轮流量计和分节式电容液面计,无论何种手段均要测量液氧密度。所测液氧密度的准确性直接关系到质量流量的测量准确性,而影响液氧密度测量准确性的主要因素是密度的计算公式和温度测量准确性。为了准确、快捷地获得液氧密度,提出以下建议:

(1) 用测温法计算密度。测温点选在涡轮流量计附近,传感器选用铠装裸露式A级铂电阻,用四线制恒流源提供激励源,恒流源 $1\sim 1.5\text{mA}$ ,传感器的插入深度合适。

(2) 用试车稳定段的温度测量平均值计算液氧密度或用瞬时温度值实时计算液氧密度。

(3) 推荐用公式(8)计算液氧密度。

### 参考文献:

- [1] 李科杰主编. 新编传感器技术手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- [2] 刘瑞敏, 李亚裕, 陈鸿彦, 等. 液氧密度标准计量装置[J]. 低温工程, 2000, (1): 15-21.
- [3] 李亚裕, 张伟, 石纪民. 液氧密度标准计量装置的研制[J]. 低温工程, 2005, (1): 11-16.
- [4] 赵万明. 液氧/煤油发动机试车主要参数测量方法研究[J]. 火箭推进, 2006, 32(5): 51-55.

(编辑: 陈红霞)