

# 泵试验的水温和水密度修正

窦 昱

(陕西动力机械设计研究所, 陕西 西安 710100)

**摘 要:** 介绍了泵闭式试验系统和相关标准对试验介质的要求, 论述了泵试验对水温的控制要求, 给出了常温清水的密度和饱和蒸汽压依随温度的拟合公式, 对正确应用泵相似换算定律和水密度修正做了详细地阐述, 结合发动机泵试验的特点, 提出了经济的水温控制建议。

**关键词:** 泵试验; 相似定律; 水温; 水密度修正

中图分类号: V434.212

文献标识码: A

文章编号: (2006)01-0059-04

## Water temperature and correction of water density in pump tests

Dou Yu

(Shaanxi Power Machine Design and Research Institute, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** This paper introduces the closed pump test system and related standard requirements of pump test medium, the controlling requirements of water temperature in pump test. The formula of water density and saturated vapor pressure versus temperature is presented. The correct use of the affinity laws and water density correction is discussed in detail. A suggestion on economical water temperature control is put forward based on the characteristics of engine pump tests.

**Key words:** pump test; affinity laws; water temperature; water density correction

### 1 引言

泵试验是发动机研制生产中重要的环节, 获得准确的泵性能数据对泵设计和改进意义重大。常温清水是最常用的泵试验介质, 进行泵的水力试验可以获得泵的扬程、功率、效率与泵流量间

的关系曲线, 也可获得净正抽吸压头特性。由于发动机每台泵都要经过试验, 因此试验中对试验介质提出了一些规定, 水温的限制是其中之一。文中对这一问题做了分析, 并对数据处理中正确应用水密度修正值进行了阐述, 给出了经济合理的水温控制要求。

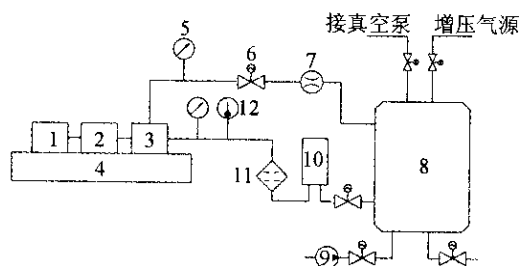
收稿日期: 2005-07-25; 修回日期: 2005-11-24。

作者简介: 窦昱 (1970—), 男, 高级工程师, 研究领域为泵设计与试验。

## 2 试验系统简介

发动机泵试验采用闭式试验系统，试验原理见图 1。闭式试验系统中的液体与外界气体隔绝，单独构成封闭循环系统，其优点是汽蚀试验的精度高，能够试验有灌注压力要求的泵。

试验时，由拖动电机拖动泵运转，在规定转速和流量下完成对泵输入功率、出口和入口压力的测量，通过数据处理后给出泵的扬程、效率与流量的关系曲线，给出泵的 NPSH 曲线。扭矩仪一般能完成扭矩和转速的同步测量，真空泵和增压系统可以控制泵的入口压力，是闭式试验台完成泵汽蚀试验的重要设备。



1—拖动电机；2—扭矩仪；3—被试泵；4—试验底座；  
5—压力表；6—阀；7—流量计；8—水箱；9—加水泵；  
10—稳定器；11—过滤器；12—温度计

图 1 泵闭式试验系统原理图

Fig.1 Schematic diagram of closed pump test system

## 3 试验介质的相关规定

多数国家针对泵试验都制定了相应的规范，如我国标准 GB3216-89《离心泵、混流泵、轴流泵和漩涡泵试验方法》等效采用了 ISO2548-1973 (E)《离心泵、混流泵、和轴流泵验收试验规范-C 级》和 ISO3555-1977 (E)《离心泵、混流泵、和轴流泵验收试验规范-B 级》，其中规定的常温清水特性见表 1。

发动机泵试验中采用闭式试验系统，用自来水试验，泵入口采用 200 目过滤器，符合标准的规定。

表 1 常温清水特性

Tab.1 The characteristics of water at ambient temperature

特 性	单 位	最 大
温 度	℃	40
运动粘度	m <sup>2</sup> /s	1.75×10 <sup>-6</sup>
密 度	kg/m <sup>3</sup>	1050
不吸水的游离固体含量	kg/m <sup>3</sup>	2.5
溶解于水的固体含量	kg/m <sup>3</sup>	50

## 4 水的密度和汽化压力

GB3216-89 给出了 0~50℃的水密度和汽化压力数表 (GB3216-89 中 47℃的汽化压力 1032.9kgf/m<sup>2</sup> 有误，应为 1082kgf/m<sup>2</sup>)。在 0~40℃内，水的密度取 1000kg/m<sup>3</sup>，误差不会超过 0.8%；0~50℃内，误差最大可达 1.2%。标准中对常温清水未建议作密度修正，但对密度变化显著的，标准建议取平均值，按公式 (1) 计算

$$r_m = \frac{r_{ep} + r_{ip}}{2} \quad (1)$$

式中， $r$  为密度，kg/m<sup>3</sup>； $m$  为平均值； $ip$  为泵入口； $ep$  为泵出口。

对泵的汽蚀试验，除满足流动相似条件外，还需保证泵的热力学相似，因此用热水作试验得到的汽蚀特性比用冷水作试验得到的结果要准确一些，汽蚀试验的水温控制不超过 50℃。通常计算中我们都采用标准数据，但这时应给出水温的测量精度，参考文献[2]建议性能试验和汽蚀试验时，水温测量应精确到 1K，因此泵试验中水温的测量精度也非常重要。在 GB3216 中规定“水的温度测量应在吸入管路离泵不超过 25 倍管径处测量，测温传感器的有效部分插入泵吸入管路中的深度应不少于吸入管径的 1/8”。发动机泵试验中，温度测量精确到 0.2K。

对标准中水的饱和蒸汽压和密度数据 (0~50℃) 按最小二乘法拟合，密度、饱和蒸汽压与温度间拟合见公式 (2)，常系数见表 2，公式计算值与拟合数据点偏差的绝对值密度最大为 0.0940kg/m<sup>3</sup>，饱和蒸汽压最大为 6.759Pa

(0.00069m 水头)。

$$p(t) = a_1 + a_2(t-25) + a_3(t-25)^2 + a_4(t-25)^3 + a_5(t-25)^4 \quad (2)$$

式中,  $p$  为压强, Pa;  $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$  为常数;  $t$  为水温,  $^{\circ}\text{C}$ 。

表 2 拟合公式系数表

Tab.2 Coefficients of the fit formula

系 数	密度/(kg/m <sup>3</sup> )	饱和汽压/Pa
$a_1$	$0.997045 \times 10^3$	$0.316864 \times 10^4$
$a_2$	-0.260972	$0.188754 \times 10^3$
$a_3$	$-0.525265 \times 10^{-2}$	$0.492192 \times 10^1$
$a_4$	$0.411922 \times 10^{-4}$	$0.732691 \times 10^1$
$a_5$	$0.590979 \times 10^{-6}$	$0.589525 \times 10^{-3}$
计算值与拟合数据点偏差的绝对值最大值	$0.939976 \times 10^{-1}$	$0.675871 \times 10^1$

实际的泵试验中, 大多数的试验水温在  $8^{\circ}\text{C} \sim 40^{\circ}\text{C}$  间, 因此, 如果不对水的密度作修正, 建议取水密度为  $996.0 \text{ kg/m}^3$ , 密度的误差小于  $0.4\%$ 。

## 5 数据处理

泵的扬程定义为泵出口与入口总水头的差, 在忽略出入口静水头差的情况下, 扬程按公式 (3) 计算:

$$H = \left( \frac{p_{\text{ep}}}{r_t g} + \frac{u_{\text{ep}}^2}{2g} \right) - \left( \frac{p_{\text{ip}}}{r_t g} + \frac{u_{\text{ip}}^2}{2g} \right) = \frac{p_{\text{ep}} - p_{\text{ip}}}{r_t g} + \frac{u_{\text{ep}}^2 - u_{\text{ip}}^2}{2g} \quad (3)$$

式中,  $H$  为泵的扬程, m;  $u$  为流速, m/s;  $g$  为重力加速度,  $\text{m/s}^2$ ;  $t$  为  $t$  温度下的。

泵的净正抽吸压头按公式 (4) 计算:

$$NPSH = \frac{p_{\text{ip}} + p_{\text{atm}} - p_v}{r_t g} + \frac{u_{\text{ip}}^2}{2g} \quad (4)$$

式中,  $NPSH$  为净正抽吸压头, m; atm 为大气压力;  $v$  为蒸汽压;

泵的输入功率按公式 (5) 计算:

$$P = M \omega \quad (5)$$

式中,  $P$  为轴功率, W;  $M$  为扭矩, N m;  $\omega$  为角速度, rad/s。

根据泵的相似定律, 将扬程换算到规定转速和实际工质时, 按公式 (6) 计算:

$$H_{\text{sp}} = H \left( \frac{n_{\text{sp}}}{n} \right)^2 \quad (6)$$

式中,  $n$  为转速, r/min;  $n_{\text{sp}}$  为规定的。

采用 Pa 为单位时, 按公式 (7) 计算:

$$H_{\text{sp}} = \left( \frac{p_{\text{ep}} - p_{\text{ip}}}{r_t g} + \frac{u_{\text{ep}}^2 - u_{\text{ip}}^2}{2g} \right) \left( \frac{n_{\text{sp}}}{n} \right)^2 r_L g \quad (7)$$

式中,  $L$  为实际抽吸液体的。

泵的净正抽吸压头按公式 (8) 换算:

$$NPSH_{\text{sp}} = NPSH \left( \frac{n_{\text{sp}}}{n} \right)^2 \quad (8)$$

泵的输入功率按公式 (9) 换算:

$$P_{\text{sp}} = P \left( \frac{n_{\text{sp}}}{n} \right)^3 \frac{r_L}{r_t} \quad (9)$$

应用公式 (6) 和公式 (8) 时, 一定要注意扬程和净正抽吸压头的单位为 m, 否则, 在因外部条件改变需作密度修正时, 会引入额外的修正。如某型泵性能试验时, 对水的密度根据温度修正, 扬程单位为 Pa, 按公式 (10) 计算, 净正抽吸压头按公式 (11) 换算:

$$H' = \left( \frac{p_{\text{ep}} - p_{\text{ip}}}{r_{1000} g} + \frac{u_{\text{ep}}^2 - u_{\text{ip}}^2}{2g} \right) \left( \frac{n_{\text{sp}}}{n} \right)^2 \frac{r_L}{r_t} \quad (10)$$

$$NPSH'_{\text{sp}} = \left( \frac{p_{\text{ip}} + p_{\text{atm}} - p_v}{r_{1000} g} + \frac{u_{\text{ip}}^2}{2g} \right) \left( \frac{n_{\text{sp}}}{n} \right)^2 \frac{r_{1000}}{r_t} \quad (11)$$

式中, 1000 为水密度为  $1000 \text{ kg/m}^3$ 。

这里忽略了两点: 第一, 在应用相似定律时, 泵扬程单位采用 m, 此时其数值与泵抽送的液体无关, 而扬程单位采用 Pa 时, 其值与液体的密度相关; 第二, 在进行单位换算时, 水的密度取  $1000 \text{ kg/m}^3$ , 在进行相似换算时, 水的密度取  $r_t$ 。如果不对水的密度修正, 公式 (10) 与公式 (7) 等价, 公式 (11) 与公式 (8) 等价。但按公式 (10)

和公式(11)应用对密度根据温度所作的修正却改变了公式(7)和公式(8)的物理内涵,为了更明确的说明这一问题,将公式(10)、公式(11)恒等变形为公式(12)和公式(13):

$$H' = \left( \frac{p_{ep} - p_{ip}}{r_t g} + \frac{u_{ep}^2 - u_{ip}^2}{2g} \times \frac{r_{1000}}{r_t} \right) \left( \frac{n_{sp}}{n} \right)^2 r_L g \quad (12)$$

$$NPSH'_{sp} = \left( \frac{p_{ip} + p_{atm} - p_v}{r_t g} + \frac{u_{ip}^2}{2g} \times \frac{r_{1000}}{r_t} \right) \left( \frac{n_{sp}}{n} \right)^2 \quad (13)$$

很明显,这样对速度水头做出了额外的修正,

扬程相差  $\left( 1 - \frac{r_{1000}}{r_t} \right) \frac{u_{ep}^2 - u_{ip}^2}{2g} \left( \frac{n_{sp}}{n} \right)^2 r_L g$ , 净正抽

吸压头相差  $\left( 1 - \frac{r_{1000}}{r_t} \right) \frac{u_{ip}^2}{2g} \left( \frac{n_{sp}}{n} \right)^2$ , 由于  $\left( 1 - \frac{r_{1000}}{r_t} \right)$

值很小(40 时,值为 0.00786),使人们忽略了对公式(7)和公式(8)物理内涵认识上的不足之处。因此在处理泵试验数据时,扬程单位应采用 m,最后再进行单位换算。

## 6 泵试验中的水温控制

综上所述,泵试验的水温控制在不超过 40℃ 范围内,采用足够精度的测量设备,可以获得满意的泵性能和汽蚀试验测量结果,当泵的功率很大时,在试验中的水温升便不容忽视,统计泵单项试验(性能或汽蚀)中的水温升,确定合理的水温升  $\Delta t$ ,在试验前将水温控制在  $(40 - \Delta t)^\circ\text{C}$  以下。

针对目前的泵功率最大值统计,在实际的泵试验运行中,每试一台泵,根据外界条件(气温、

运转时间)的不同,水温约升高 2.5℃,一个单项(性能或汽蚀)试验,在采集数据的时间段内,大部分试验的水温升最大为 1.4℃,为满足技术条件要求的水温上限,在一个工作日的试验中间,必须排空水箱的 20m<sup>3</sup> 水,重新加入地下水,加满水需要 1.0h。如果技术条件要求的水温上限较低,就会造成水资源的浪费和工作效率的下降,在夏季,这一矛盾尤为突出,因此制定合理的泵试验水温,具有显著的经济效益。

## 7 结论

综上所述,有以下结论:

- (1) 遵循标准,将水温控制在 40℃ 以下,温度测量精确到 1K,可以获得足够精度的泵性能试验数据,不会影响试验结果的正确性。
- (2) 泵试验数据换算中,扬程和净正抽吸压头单位采用 m,最后再进行单位换算。
- (3) 泵试验技术条件中,可以将试验前的水温限制在  $(40 - \Delta t)^\circ\text{C}$  以下。

## 参考文献:

- [1] GB3216-89 离心泵、混流泵、轴流泵和漩涡泵试验方法[S].
- [2] 亚列缅科. 泵试验[M]. 姚兆生译. 北京:机械工业出版社,1980.
- [3] 朱宁昌. 液体火箭发动机设计(下)[M]. 北京:宇航出版社,1994.

(编辑:马 杰)