

临界喷嘴在真空泵抽速测试及计量中研究和应用

徐法俭^{1*} 刘继睿¹ 袁铮¹ 任昌青¹ 姜云锋² 董钦敏³

(1. 淄博真空设备厂有限公司 淄博 255200; 2. 国家泵类产品质量检验检测中心(山东) 淄博 255200;

3. 沈阳水泵研究所有限公司 沈阳 110869)

Research and Application of Critical Nozzles in Vacuum Pump Speed Testing and Measurement

XU Fajian^{1*}, LIU Jirui¹, YUAN Zheng¹, REN Changqing¹, JIANG Yunfeng², DONG Qinmin³

(1. Zibo Vacuum Equipment Plant Co., Ltd., Zibo 255200, China; 2. National Products Quality Inspection and Testing Center for Pumps (Shandong), Zibo 255200, China; 3. Shenyang Pump Research Institute Co., Ltd., Shenyang 110869, China)

Abstract There are various methods for measuring the pumping speed of vacuum pumps, and their accuracy is affected by methods, instrument accuracy, and other factors. The constant flow method, as one of the methods, is based on the theory of compressible fluids in one element. The article combines the basic theory of one-dimensional compressible fluids with existing testing methods, proposing to use the critical state of the nozzle as the basis for measuring the constant flow rate method. By the appearance of the critical state of the nozzle and the calculation of the critical value, as the benchmark value for measuring the flow rate of the vacuum pump, only environmental parameters need to be measured during the measurement process to determine the flow rate of the vacuum pump, and then determine the pumping speed of the vacuum pump at a specified pressure. This measurement method has a simple device and process, is easy to operate, and the influence of external factors is naturally minimized. It is a reliable and green measurement method. As the most important parameter of vacuum pumps, digital and intelligent measurement is the development direction. Accurate pumping speed measurement is the basis for optimizing vacuum pumps and systems, which will promote the development of vacuum technology.

Keywords One variable gas equation, Critical state, Critical parameters, Measurement nozzle, Subsonic speed, Speed measurement

摘要 真空泵抽速测量有多种方法,其准确度受到方法、仪表精度等影响。其中定流量法作为其中一种方式,其建立在一元可压缩流体理论基础。文章结合一元可压缩流体基础理论与现有测试方法,提出将喷嘴临界状态作为定流量法测量基础。通过喷嘴临界状态的出现以及临界值计算,作为真空泵流量的测量方法基准数值,测量过程中只需要测定环境参数就可以测定真空泵流量,进而计算真空泵在某规定压力下的抽速。该测量方法装置和过程简单,容易操作,外界因素影响自然降低到最低,是一种可靠、绿色测量方法。抽速作为真空泵最重要参量,数字化、智能化测量是发展方向,准确的抽速测定是真空泵及系统优化的依据,将推动真空技术发展。

关键词 一元气体方程 临界状态 临界参数 计量喷嘴 亚音速 抽速测量

中图分类号: TH36

文献标识码: A

doi: 10.13922/j.cnki.cjvst.202311019

抽气速率是真空泵(压缩机)最重要的指标,也是真空泵与真空系统设计、应用、工程中最重要参量^[1]。气体在真空泵入口是低压气体流动状态,

可以分为湍流、黏滞流、分子流等,其流速不能被直接测量,需要通过标准大气压状态流量的测量、推导、计算。

收稿日期: 2023-11-04

基金项目: 泰山产业领军人才工程专项项目(tsls20230603)

* 联系人: E-mail: Xfj1966@126.com

低压气体(包括真空)流量测量原理建立在一元可压缩流体运动理论基础。其原理是气体通过节流装置,产生流动状态的变化和波动,如流速、压力、温度变化,采集参数变动值,通过一元流体运动方程推导计算出气体的流量。流量测量有定压法和定质量流量(值)法等多种方法^[2]。

真空泵抽速测量有多种方法,常见有两种,一是定压法,包括滴定流量测量法、孔板测量法、流量计测量法;二是定值法,包括质量流量计法、喷嘴测量法等^[3]。依据不同的真空泵类型、气量范围选择相应的方法。

喷嘴是最常用的节流装置,也是国际标准、国家、行业标准推荐的真空泵抽速测量装置之一^[4]。喷嘴测量真空泵抽速,依据喷嘴工作状态,分为定压法和定流量法二个阶段^[5]。

在定流量测量阶段,也就是临界状态,只需要测量被测量的真空泵入口压力,就可以经过大气压力的换算,准确测量真空泵(压缩机)入口流量。测量参数少、计算简单、数值准确,很多中小型真空系统采用,也可以作为其它流量测量方法的计量和校准。

1 喷嘴测量抽速工作原理

喷嘴分为收缩喷嘴、扩张喷嘴、拉瓦尔喷嘴等,这些喷嘴可以在工程中常见。依据气体流动状态可以分为亚音速加速管、亚音速扩压管、超音速扩压管、超音速加速管、复合的拉瓦尔喷管等。本文涉及的真空泵抽速测量在亚音速范围内,只讨论亚音速加速管,也就是喷嘴。

图1是亚音速加速管(喷嘴)工作原理图,图中标示了喷嘴轴线不同位置截面上气体的不同流动参量。

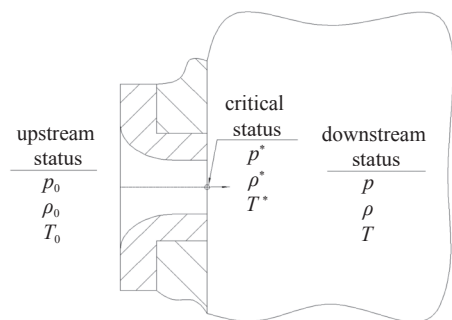


图1 亚音速加速管(喷嘴)工作原理

Fig. 1 Working principle of subsonic acceleration tube (nozzle)

图中: p_0 、 ρ_0 、 T_0 表示喷嘴上游气体状态压强、密度、温度(滞止参数)。在抽速测量过程,这些参数就是环境状态,可以通过仪器直观测量;

p^* 、 ρ^* 、 T^* 表示喷嘴喉部气体状态压强、密度、温度(临界参数),只是作为原理标识,不需要测量;

p 、 ρ 、 T 表示喷嘴下游气体压强、密度、温度(真空环境)状态;下游状态是真空泵抽速与喷嘴流量平衡实现的结果。

在喷嘴轴向流线上不同位置截面建立一元流体伯努利连续方程式:

$$\frac{d\rho}{\rho} + \frac{d\mu}{\mu} + \frac{dA}{A} = 0 \quad (1)$$

式中: ρ 为气体密度, μ 为气流速度, A 为流道面积。

等熵气流方程式:

$$\frac{\mu^2}{2} + \frac{\kappa}{\kappa-1} \frac{p}{\rho} = C \quad (2)$$

式中, κ 为气体绝热指数。

在等熵气流流动方向截面上,分别取滞止参数(喷嘴上游状态参数,环境参数)、临界参数(喷嘴出口参数)、下游参数(喷嘴下游真空、低压环境区)计算,可以得到临界参数与滞止参数的关系:

$$\frac{T_*}{T_0} = \left(\frac{2}{\kappa+1} \right) \quad (3)$$

$$\frac{\rho_*}{\rho_0} = \left(\frac{2}{\kappa+1} \right)^{\frac{1}{\kappa-1}} \quad (4)$$

$$\frac{p_*}{p_0} = \left(\frac{2}{\kappa+1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \quad (5)$$

$$\mu = \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa-1} \frac{p_0}{\rho_0} \left[1 - \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right]} \quad (6)$$

对于喷嘴轴向流线上任一截面,气体质量流量为:

$$\begin{aligned} G &= \rho\mu A = \rho^*\mu^* A \\ &= \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa-1} p_0 \rho_0 \left[\left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}} \right]} \times A \end{aligned} \quad (7)$$

式(7)就是利用喷嘴测量气体流量的基本公式。式(3)、(4)、(5)中包含的滞止参数 p_0 、 ρ_0 、 T_0 就是测试环境状态,可以采用常规方法测量计算。由公式计算出 p^* 、 ρ^* 、 T^* 喉部的临界参量;喷嘴喉部面积 A 是机械加工实现的参数,容易精确实现。将各参量代入式(7),可以计算流经喷嘴的流量(质量流量)。

为了简化公式,设喷嘴下游、上游压强比值为

β , 即:

$$\beta = \frac{p}{p_0}$$

则式 (7) 简化为:

$$G = \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa-1}} p_0 \rho_0 \left(\beta^{\frac{2}{\kappa}} - \beta^{\frac{\kappa+1}{\kappa}} \right) \times A \quad (8)$$

将上游和下游气体状态参数带入式 (8) 就可以计算出流经喷嘴的流量^[6], 这就是真空泵的抽速, 对应下游压力(真空泵入口压强), 就可以计算真空泵体积流量。

2 临界喷嘴在真空泵抽速测定中应用

将图 1 中的喷嘴下游环境接入真空泵的入口, 用真空泵作为实现喷嘴气流喷动的动力, 真空泵抽速与喷嘴流量建立的平衡压力可以作为测量真空泵流量的压力点, 通过计算推导出真空泵在该压力点的抽速。

分析式 (7)、式 (8) 可以发现:

如果喷嘴后部环境压力 $p=0$, 即 $\beta=0$, 也就是喷嘴流体射向绝对真空, 流量 $G=0$, 该状态只是数字描述, 实际不存在;

如果喷嘴后部环境压力 $p=p_0$, 即 $\beta=1$, 也就是喷嘴前后压力相等, 气流速度 $\mu=0$, 也就是没有流动, 流量 $G=0$ 。

所以式 (7)、式 (8) 计算的流量存在最大值。对式 (8) 求导, 可以得到流量极限值的条件是:

$$\beta = \frac{p}{p_0} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (9)$$

可以看出, β 值只与气体种类相关, 如果采用特定气体作为气量标定, β 就是固定值。

将式 (9) 代入式 (8), 得到喷嘴流量值最大值, 即:

$$G_{\text{MAX}} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \times \sqrt{k p_0 p_0} \times A \quad (10)$$

对于空气, 其绝热指数 $k=1.40$, 代入式 (9), 得到 $\beta=0.528$ 。

此时, 喷嘴出口气体流动处于临界状态, 流经喷嘴的气流速度达到音速。从式 (10) 可见, 经过喷嘴的流量最大值只与气体的种类, 即气体物理性质、喉部面积相关, 由上游气体状态参数、喉部几何尺寸决定。

当喷嘴下游压强与喷嘴上游大气环境压强比值为 $\beta=0.528$ 时, 流经喷嘴的气流在出口处达到了临界状态, 气流速度达到音速。这种条件下, 即使

真空泵将喷嘴下游压强降低到更低, 即 $\beta \leq 0.528$ 的任一状态, 喷嘴出口截面上的气体流速不会变化, 仍维持音速不变, 通过喷嘴的空气流量不变。该流量与喷嘴上游入口的气体的性质(等熵指数、气体常数)及热力学状态(温度、压力)有关, 与喷嘴出口(泵入口)的状态无关。

这种临界喷嘴流量恒定现象, 为我们提供拱了一种恒流量(质量流量)测量的节流装置原理。应用此原理, 可以测量真空泵入口流量^[7-8]。此时, 只要测量大气环境状态参量、真空泵入口压力, 就可以计算出真空的抽速(体积流量)。采用这种恒流量节流装置进行真空泵抽速测量, 测试参量少, 只有不同规格喷嘴数量组合。该方法在测试过程中“时间”量纲 [T] 隐藏在“音速”[LT⁻¹] 中, 是物理现象自然形成, 不需要测试, 避免了测试产生的误差。

虽然真空泵抽速概念 [L³T⁻¹] 中有时间量纲 [T], 但是在引入了喷嘴临界状态后, 简化了测量程序, 省去时间量的测量, 更容易实现自动化测量。

采用该方法对已经工程应用的真空泵抽速进行标定可见于参考文献 [9]。

真空行业中, 滴定法是测量真空泵抽速的常用方法, 相关标准也多有采用, 但是滴定法测量装置复杂, 测量过程中有油、水银等参与, 存在污染隐患, 被国际水保公约禁止; 测量过程需要时间参量, 其准确性与操作者熟练程度相关; 在测量中时间短, 精度控制困难, 甚至需要多人同时操作。

3 临界喷嘴在真空泵抽速测定装置中安装及测点

从式 (10) 可以看出, 流经喷嘴的流量有最大值, 其值是喷嘴上游, 也就是环境气体状态参量的函数。测量环境气体状态参量, 喷嘴的流量也就确定了, 结合真空泵入口的压力、温度等, 经过物理量的换算, 就可以计算出流经喷嘴管线的质量流量、体积流量等参数, 从而实现真空泵抽速测量、计量。采用该方法测量真空泵抽速原理科学、装置简单, 过程物理参量少, 误差小, 可以实现真空泵抽速精准测量。通用的真空泵抽速测量装置如图 2。

国家标准 GB/T 13930 水环真空泵和水环压缩机—气量测定方法^[10], 以及机械行业标准 JB/T 7675 往复真空泵^[11]、JB/T 8540 水蒸气喷射真空泵^[12] 等多个标准, 将喷嘴法作为真空泵抽速测量方法之一。

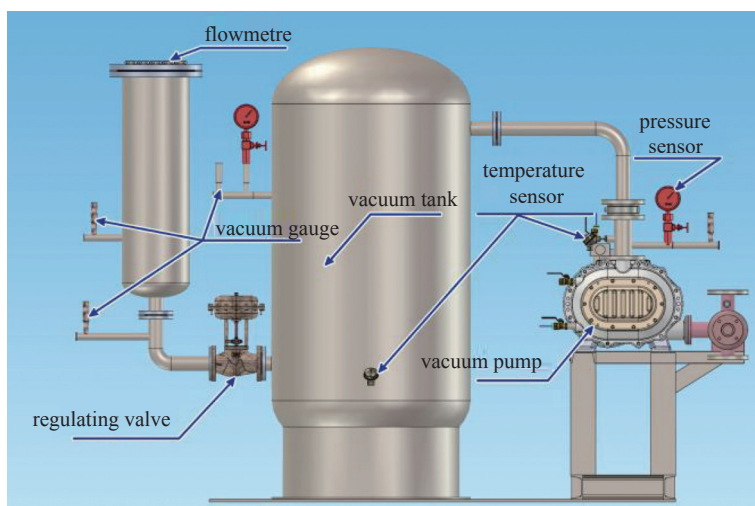


图2 通用的真空泵抽速测量装置

Fig. 2 Universal vacuum pump pumping speed measurement device

喷嘴测量真空泵抽速流程如图3。

从图3看出,只要测量上游(环境)参量(p_0 为

环境压力、 T_0 为环境温度、 φ 为相对湿度),根据式(10),就可以计算真空质量流速。

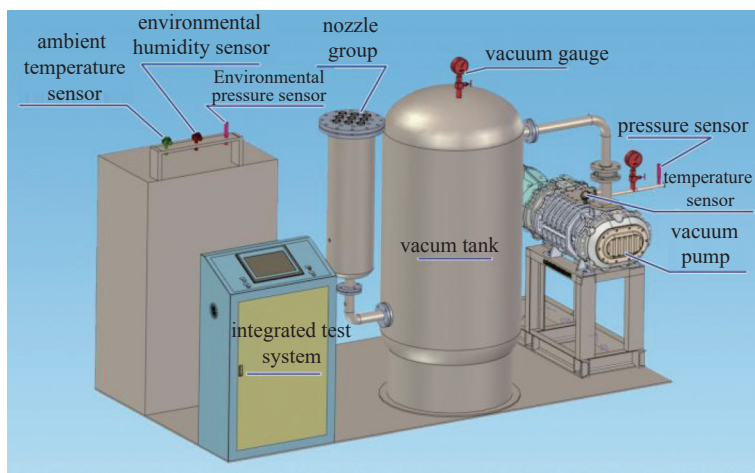


图3 喷嘴测量抽速流程图

Fig. 3 Flow chart of nozzle measurement and pumping speed

在实际测量真空泵抽速的应用中,需要多个不同喷嘴组合起来才能满足被测真空泵抽速要求。多个喷嘴采用轴向平行组装,测量过程中需用喷嘴规格、数量的取舍采用密封盖封口模式,一般不采用阀门启闭,这样可以最大限度满足喷嘴入口状态与环境状态的一致性,避免测量误差。

喷嘴用于真空泵抽速测量分为两个阶段,一是亚音速阶段,二是音速阶段(即 $\beta \leq 0.528$ 时临界状态)。在实际操作中,多以喷嘴的临界状态来测量并计算高真空阶段的真空泵抽速。当 $\beta > 0.528$ 时,真空泵抽速采用孔板或者其它仪器测量计算。

4 临界喷嘴测量真空泵抽速过程

4.1 环境空气密度 ρ_0 测量计算

参考 GB/T13930(文中未加说明的公式和图表引用了该标准并一致),应用喷嘴临界状态测量真空泵抽速。

依据道尔顿定律,将气体分为水蒸气和干空气二部分,如公式:

$$p_0 = p_{H_2O} + p_G \quad (11)$$

$$\rho_0 = \rho_{H_2O} + \rho_G \quad (12)$$

其中:

水蒸气密度为:

$$\rho_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{p_v \varphi \mu_{\text{H}_2\text{O}}}{RT_0} \quad (13)$$

干空气密度为:

$$\rho_G = \frac{(p_0 - p_v \varphi) \mu_{\text{air}}}{RT_0} \quad (14)$$

将环境空气物理参数, 以及式(13)、式(14)代入式(12), 可以得到环境空气密度:

$$\rho_0 = \frac{1}{RT_0} \times [(p_0 - p_v \varphi) \mu_{\text{air}} + p_v \varphi \mu_{\text{H}_2\text{O}}] \quad (15)$$

上述式(11)~(15)中: φ 为空气相对湿度; p_v 为温度 T_0 时水的饱和蒸气压力; $\mu_{\text{H}_2\text{O}}$ 为水蒸汽的摩尔质量; μ_{air} 为干空气的摩尔质量; R 为普适气体常数。

4.2 喷嘴理论质量流量计算

将上面计算的环境气体密度 ρ_0 、测量的环境温度 T_0 代入式(10), 可以计算喷嘴最大理论质量流量。

4.3 测量条件下喷嘴实际质量流量计算

测量时要选用一个或多个不同规格喷嘴组合使用。国家标准 GB/T13930-2010 中, 附录 A (规范性附录) 具体规定了计量喷嘴几何尺寸、在真空泵管路上安装、计算、测试方法等。

以环境空气为真空泵抽速参考气体, 文献 [10] 附录 A (规范性附录) 公式(A.3)、(A.4):

$$G = KG' \quad (16)$$

$$K = K_P K_\beta K_R K_a \quad (17)$$

式中:

K_P 为大气压力换算系数, 式(11)、(12)中已经包含此系数, 取值 1;

K_β 为压力比较正系数, 临界流动 $\beta \leq 0.528$, 临界状态时取值 1;

K_R 为气体换算常数; 式(10)中已经包含此系数, 取值 1;

K_a 为喷嘴效率系数。计算机测试时, 可以采用公式(A.9)、(A.10), 以及图 A.4 查询计算; 因为现代加工条件, 常规计算可以取值 1;

特别注意, 因为式(10)涉及的物理量是喷嘴上游的原始物理量, 与测试环境大气压力、气体常数相一致, 所以式(6)中各个系数取值 1。如果采用查表法归算的喷嘴质量流量, 各个系数需要按照相应公式、图表调整计算。

5 测量流程和步骤

5.1 喷嘴选型规格估算、初选

预估被测真空泵在入口压力为 p (≤ 52 kPa) 时的抽速为 S_i ; 估计空气密度为 1.2 kg/m^3

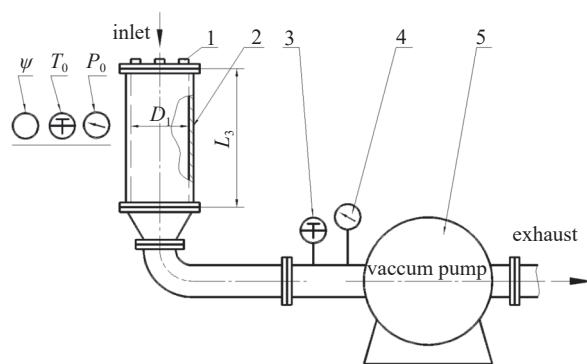
则质量流量为:

$$G_1 = 1.2 S_1 \times \frac{p}{p_0} \quad (18)$$

根据式(10)反推出喷嘴当量面积 $A^{[13]}$, 选用相应面积对应的喷嘴, 或者组合喷嘴(不同规格、数量组合)。为测量真空泵整个工作压力范围抽速, 采用多个喷嘴并联时, 保证整个流程中, $\beta \leq 0.528$ 。

5.2 真空泵抽速测量时需要测量的物理量

使用临界喷嘴测量真空泵抽速时, 测量物理量点位如图 4。



图中: 1 计量喷嘴组; 2 喷嘴组座; 3 温度计; 4 真空计; 5 真空泵; 上游(环境)参量(P_0 环境压力、 T_0 环境温度、 φ 相对湿度)

图4 计量喷嘴测量抽速测量点位

Fig. 4 Measurement points for pumping speed parameters of measuring nozzles

测量条件下的大气压力 p_0 ; 测量条件下的空气的相对湿度 φ ; 喷嘴出口压力(泵入口压力) p ; 喷嘴入口附近的空气温度 T_0 ; 泵的试验转速 n 等。

5.3 操作时的注意事项

应该保持喷嘴表面清洁, 喷嘴的启闭应该使用与喷嘴尺寸相适应的软橡胶或者真空橡胶板, 保证密封性能。不得使用橡胶石棉板等可能产生污染的密封件, 也不得使用真空封泥、油脂类产品。一般不采用对喷嘴入口状态产生影响的阀门。

喷嘴规格选取、组合等应该在实验前估算, 制定初步测量规划。真空计尽量靠近稳压罐直径最大处; 稳压罐的流出管管口尺寸应该不小于真空泵

入口尺寸;管路系统各部位的连接处,不得使用油、密封胶等。

5.4 抽速测量步骤

封闭全部喷嘴,启动真空泵,达到或接近极限真空。

按照由小到大顺序开启喷嘴,记录图4标识的点位数据,包括开启喷嘴的数量、规格、入口真空度(压力) p 、试验转速 n 等;测量记录环境压力 p_0 、环境温度 T_0 、相对湿度 φ 等。每一次喷嘴或者组合变化后,应该稳定一定时间后再记录数据。

5.5 抽速计算

依据式(16)计算质量流量;根据式(15)计算气体密度 ρ_0 。

标准状况下真空泵体积流率为:

$$Q = \frac{G}{\rho_0} \quad (19)$$

式中: Q 为标准状况下真空泵体积流率。

真空泵抽速为:

$$S = Q \times \frac{p_0}{p} \quad (20)$$

式中: S 为真空泵抽速; p 为真空泵入口真空度(压力)。

6 验证和结论

一维几何尺寸决定流量是喷嘴计量和测量的最大特点。现代加工技术下,喷嘴的几何尺寸、精度、光洁度容易实现,也是实现气量测量精度的基础。测量流程避免了时间量纲,测量更简单、直接。

喷嘴方法测量范围宽,可测量 $4 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s} \sim 10^5 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 抽速范围。临界喷嘴装置适合螺杆真空泵、旋片真空泵、往复真空泵、水环真空泵,以及罗茨真空机组的抽速测量,也可以替代滴定装置测量大型高真空泵抽速,如分子真空泵、扩散真空泵等。与其它测量方法一起可以测量真空泵工作压力范围的抽速。

利用喷嘴临界状态的特殊性,简化测量装置和流程,更容易实现测量自动化、智能化。与其它节流方式测量抽速的装置并联安装,可以精准校准计量。

以GSP1500型螺杆干式真空泵为例,首先用喷嘴测量抽速(定值法);再根据喷嘴法所实现的真空度(压力),用定压法做测试比较和验证,2种方法测

量结果见表1。

从表中看出,两种方法测量结果值基本一致,最大差距仅为0.86%。很明显临界喷嘴(定流量法)测量比定压法操作简便。

表1 定值法与定压法测量结果(GSP1500)

Tab. 1 Measurement results of constant value method and constant pressure method (GSP1500)

指标		测量值			
方法	压力值/Pa	82	125	1590	3020
定值法	抽速/(m^3/h)	1286	1274	1278	1290
定压法		1291	1285	1279	1291

文献[14]《真空泵测定气体流量的装置—计量喷嘴》作出结论:当压力小于67000 Pa时,测量重复性相差1%~2.5%;当压力大于67000 Pa时,喷嘴的测量重复性是3%~4.5%。文献[15]《音速喷嘴测量真空泵气量原理和方法》中也有类似的结论:当吸气口压力低于54.66 kPa时,音速喷嘴与标准孔板测量气量的相对误差不大于1.15%;当吸气口压力高于54.66 kPa时,两者的相对误差最大可达3.54%,因为真空泵大多工作压力低于20 kPa,可见计量喷嘴更准确。测量结果的不确定度可参考《音速喷嘴式气体流量标准装置的测量不确定度评定》[16]进行评价。

7 展望

计量喷嘴与现代化测量、数字、智能技术结合,实现真空泵抽速自动测量、计算、判定。与相关产品参数以及数据库结合实现智能化测试,促进真空技术和产业发展,成为“双碳”目标落实的技术装备[17]。

目前,计量喷嘴作为真空泵抽速测量的方法之一,还是只能在专有试验台测试、计量真空泵抽速。对于工程应用中,系统连接的真空泵抽速实现在线测量还没有更好方法;在测试装置中真空泵入口压力测量,气体流动产生的动压影响对于真空泵抽速测量、计量影响都是需要在理论和实践中方面探讨、验证。

使用临界喷嘴测量真空泵抽速还不能实现定压测量;是否可以通过干预喷嘴上游状态,或者喷嘴在线调整直径等方式,实现真空泵入口指定压力,需要我们探讨和研究。

参 考 文 献

- [1] Li L, Xu F J, Pan C X, et al. Research and application of vacuum system in aircraft environmental control test platform[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2014, 34(7): 672–675 (李骊, 徐法俭, 潘成新, 等. 飞机环控试验平台真空系统研究与应用[J]. 真空科学与技术学报, 2014, 34(7): 672–675(in Chinese))
- [2] 达道安. 真空设计手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004
- [3] 刘玉魁. 真空工程设计手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2022
- [4] The First Sub-technical Committee of National Standardization Technical Committee for Industrial Process Measurement and Control. GB/T2624.3–2006, Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full —Part3: Nozzles and Venturi nozzles[S]. Beijing: China standard press, 2006 (全国工业过程测量和控制标准化技术委员会第一分技术委员会. GB/T2624.3–2006, 用安装在圆形截面管道中的差压装置测量满管流体流量第 3 部分: 喷嘴和文丘里喷嘴[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006(in Chinese))
- [5] Li X X. Research and application of measuring the air volume of vacuum pump with metering nozzle[J]. Electromechanical engineering technology, 1982, 2: 16–34 (李享禧. 计量喷嘴测量真空泵气量的研究与应用[J]. 机电工程技术, 1982, 2: 16–34(in Chinese))
- [6] 张也影. 流体力学[M]. 高等教育出版社, 1986
- [7] Ren C Q, Xu F J, Huang Z T, et al. Research on screw dry vacuum-compression system with scene as design input[J]. Vacuum, 2023, 60(3): 46–50 (任昌青, 徐法俭, 黄志婷, 等. 以场景为设计输入的螺杆干式真空-压缩系统研究[J]. 真空, 2023, 60(3): 46–50(in Chinese))
- [8] Xu F J, Liu J R. Research and engineering application of gas measurement method for water ring pump[J]. Vacuum, 2014, 34(4): 88–92 (徐法俭, 刘继睿. 水环泵气量测定方法研究及工程应用[J]. 真空, 2014, 34(4): 88–92(in Chinese))
- [9] Wang D Q. Application of metering nozzle method in vacuum pump measurement[J]. Mining machinery, 1984, 8: 28–31 (王大权. 计量喷嘴法在真空泵测量上的应用[J]. 矿山机械, 1984, 8: 28–31(in Chinese))
- [10] National pump standardization technical Committee (SAC/TC211). GB/T 13930–2010, Methods for the measurement of volume flow of gas of water-ring vacuum pumps and compressors[S]. Beijing: China standard press, 2010 (全国泵标准化技术委员会(SAC/TC211). GB/T 13930–2010, 水环真空泵和水环压缩机 气量测定方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010(in Chinese))
- [11] National Vacuum Technology Standardization Technical Committee(SAC/TC18). JB/T7675–2016, Piston Vacuum Pump[S]. Beijing: Machinery industry press, 2016 (全国真空技术标准化技术委员会(SAC/TC18). JB/T7675–2016, 往复真空泵[S]. 北京: 机械工业出版社, 2016(in Chinese))
- [12] National Vacuum Technology Standardization Technical Committee(SAC/TC18). JB/T8540–2013, Steam jet vacuum pumps[S]. Beijing: Machinery industry press, 2013 (全国真空技术标准化技术委员会(SAC/TC18). JB/T8540–2013, 水蒸气喷射真空泵[S]. 北京: 机械工业出版社, 2013(in Chinese))
- [13] Yan W Q, Hu Y L, Sun M, et al. Design and calculation of single-stage water ring vacuum pump with atmospheric ejector[J]. Vacuum, 2011, 16(1): 57–59 (燕文奇, 胡玉玲, 孙猛, 等. 单级水环真空泵带大气喷射器设计计算[J]. 真空, 2011, 16(1): 57–59(in Chinese))
- [14] Ren D G. Device for measuring gas flow by vacuum pump-metering nozzle[J]. Vacuum and cryogenics, 1997, 6: 115–118 (任德高. 真空泵测定气体流量的装置—计量喷嘴[J]. 真空与低温, 1997, 6: 115–118(in Chinese))
- [15] Liu J Z. Principle and method of measuring vacuum pump gas volume with sonic nozzle[J]. Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Power, 1993, 6: 357–362 (刘景植. 音速喷嘴测量真空泵气量原理和方法[J]. 武汉水利电力大学学报, 1993, 6: 357–362(in Chinese))
- [16] Ma W Y. Evaluation of measure uncertainty for gas flow circular venture tubes standard device[J]. quality and standard, 2020, 19: 112–113 (马维云. 音速喷嘴式气体流量标准装置的测量不确定度评定[J]. 质量与标准, 2020, 19: 112–113(in Chinese))
- [17] Xu F J, Lei C D, Liu B X, et al. Study on energy consumption evaluation method of water ring vacuum pump[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2011, 31(4): 449–452 (徐法俭, 雷春栋, 刘宝新, 等. 水环真空泵能耗评价方法研究[J]. 真空科学与技术学报, 2011, 31(4): 449–452(in Chinese))