

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2015.05.12

浅析音速喷嘴装置中喷嘴间的相互影响

李鹏¹, 暴冰², 李春辉³

(1. 北京市计量检测科学研究院, 北京 100029; 2. 河南省计量科学研究院, 河南 郑州 450008; 3. 中国计量科学研究院, 北京 100013)

摘 要: 目前采用音速喷嘴作为传递标准的气体流量标准装置被国内外检测机构广泛使用。在使用时, 将根据需要的流量使用单个或多个喷嘴组合。与国外音速喷嘴的实际应用相比较, 国内装置在喷嘴的安装方式、结构排列和上游设计方面多有不同。在对装置进行不确定度评定时, 需要考虑喷嘴间相互影响(包括数量和位置等)对流量不确定度的影响。本文基于国内两套音速喷嘴法气体流量标准装置, 利用单个、多个喷嘴的组合, 测得两组相近流量点下涡轮流量计仪表系数, 计算出不同组合的仪表系数偏差。本文考虑了实验时各组实际体积流量差值的影响, 利用曲线拟合的方法, 拟合出涡轮流量计仪表系数特性曲线, 给出拟合方程式。将流量不同带来的影响剔除, 最终给出喷嘴间相互影响带来的偏差, 两套装置得出由此影响带来的不确定度为 0.02% 和 0.07%。因此, 在对音速喷嘴装置进行不确定度分析时应考虑这一分量。此外, 通过相近流量不同喷嘴的组合对流量计进行检测, 可以发现和找出喷嘴的问题, 也是一种装置期间核查的好办法。

关键词: 音速喷嘴; 拟合曲线; 喷嘴组合; 不确定度; 相关性

中图分类号: TB937

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2015)05-0052-05

Interaction Between Sonic Nozzles in Device

LI Peng¹, BAO Bing², LI Chunhui³

(1. Beijing Institute of Metrology, Beijing 100029, China; 2. Province Institute of Metrology of Henan, Zhengzhou 450008, China; 3. National Institute of Metrology, Beijing 100013, China)

Abstract: At present, the nozzle as gas flow transfer standard device is widely used in domestic and foreign testing organizations. In application, the selection of a single nozzle, a couple of nozzles or several nozzles depends on the required flow. Compared with the practical application of sonic nozzles abroad, domestic plants are different in such aspects as nozzle installation method, structure arrangement and the upstream design. In uncertainty evaluation, the interaction(numbers and positions)between nozzles should be considered. Two sets of sonic nozzle gas flow standard device from Beijing and Henan are chosen to measure two groups of similar flow points with turbine flow meter and calculate the deviation coefficients of different combinations of instruments. The uncertainty from this phenomenon is 0.02% and 0.07% respectively. Obviously, because of the nozzle processing, installation and use, two sets of sonic nozzle by means of experimental results are quite different. So the uncertainty analysis for the sonic nozzle device should consider this component. The job for evaluation of the standard device can be more scientific and accurate in this way.

Key words: sonic nozzle; fitting curve; nozzle combination; uncertainty; correlation

1 研究背景

我们习惯将临界流文丘里管称为音速喷嘴。关于音速喷嘴的结构和流出系数测定的研究早在 20 世纪 50 年代就已开始。通过持续地研究, 人们利用多个喷嘴

的组合实现更大范围流量的测量。此时, 喷嘴的数量和位置及流出系数, 即喷嘴之间的相互影响是需要考虑的。

1986 年, 波音公司设计了一套流量传递标准, 使用 162 个有相同喉径的音速喷嘴。试验得出单个喷嘴流出系数的不确定度为 0.07%, 喷嘴组合的不确定度为 0.05%, 而且从理论上讲可以同时使用更多相同喉部尺寸的音速喷嘴^[1]。福特公司设计了类似试验, 分别使用了 5 个不同构造的喷嘴组合, 在

收稿日期: 2015-06-02

作者简介: 李鹏(1983-), 男, 硕士, 工程师, 从事压力气体流量研究。

三个不同时间段进行了 15 次试验研究长期的重复性。在管道中的单个喷嘴与多喷嘴室的试验结果没有明显差异。由于温度测量和压力测量的系统因素影响,在不确定度与喷嘴数量之间出现了相关性。而且在高雷诺数下确有种现象或相关性导致了不确定度增加^[2]。

韩国学者对喷嘴间的相关性进行了研究^[3-4]。首先,他们将 7 个同喉部尺寸的喷嘴紧密安装在一个圆盘上,只要喷嘴中心间距与喉部直径比 $L/d \geq 3.7$ 而且喷嘴与盘边缘距离 $\geq 2.3d$,多个喷嘴组合的效果可以通过单一喷嘴测量得到。试验结果也认为喷嘴的间距可以比 $4.4d$ 更小。其次,还将三个不同喉径的喷嘴安装在一个圆盘上,喷嘴间距在 $2.1d$ 且喷嘴距盘边缘 $1.5d$ 时,大喉径喷嘴对小喉径喷嘴没有影响(d 为最大喉径的喷嘴)。

NIST 使用喷嘴作为流量传递标准,利用 3 次不同喷嘴的盘状排布方式,通过 4 步将流量基准量值传递至天然气流量标准,最终实现对工作计量器具的量传^[5]。

在国内,音速喷嘴法气体流量标准装置被广泛应用。国内装置与上述应用喷嘴技术的国外装置相比有很大的不同,国外在使用喷嘴时将其全部安装在一个圆盘上(见图 1),再将整个圆盘安装到管路中,根据需要的流量设计相应圆盘。

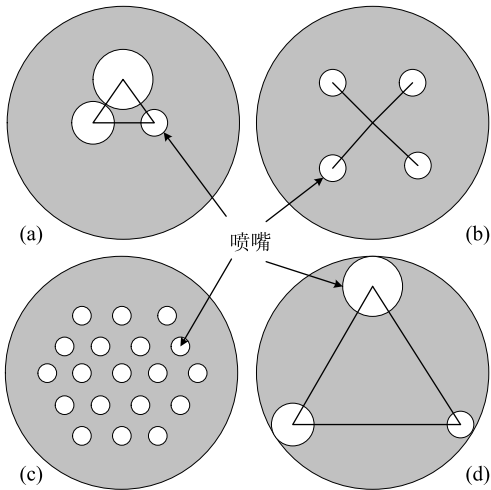


图1 国外用于研究喷嘴组合的实验盘示意图

国内装置在喷嘴的排布方式上,是将每个喷嘴独立安装,竖直或横向一字排列。根据 ISO9300: 2005,当测量大流量时,可以组合使用多个不同位置相对独立的喷嘴^[6]。此外,为了检测不同口径的工作计量器具,装置设计一般会设计多条检测管线。因此,不同喉径的组合使用及不同位置喷嘴的使用对流量不确定度的影响值得分析和研究。

2 实验内容

通常,装置设置的音速喷嘴数量在满足被检流量计的最大最小流量和任意一点流量的条件下应尽可能少。这势必会采取多个喷嘴组合的方式。被检流量计的任一流量点可由不同的数量和位置的喷嘴进行组合,喷嘴间的影响应加以考虑。

为了对上述情况进行分析,我们选取了国内两套音速喷嘴法气体流量标准装置(以下简称装置 1 和装置 2)进行实验,装置结构模型见图 2。

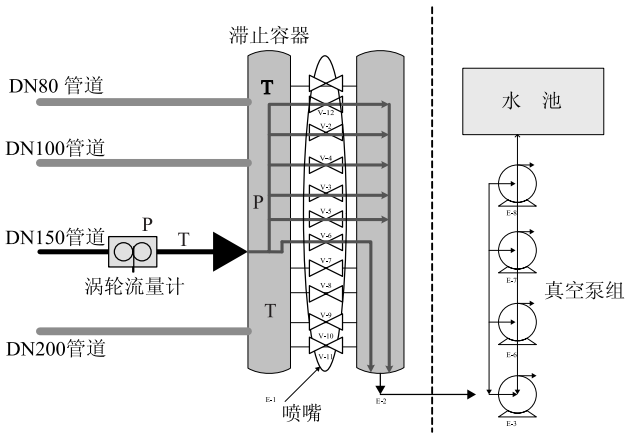


图2 装置示意图

根据喷嘴的喉径尺寸和标定的流出系数,分别计算出两套装置每个喷嘴的体积流量(环境条件为标准状态温度 20℃,大气压力 101.325 Pa),然后根据表 1、表 2 的计算值组合出 7 组相近体积流量的不同喷嘴组合,见表 3、表 4。按照选定的流量点进行试验,得到流量计仪表系数。装置 1 根据表 3 喷嘴组合检测一台 DN150、流量范围 80 ~ 1600 m³/h 的涡轮流量计。装置 2 根据表 4 喷嘴组合检测一台 DN150、流量范围 80 ~ 1000 m³/h 的涡轮流量计。

表 1 装置 1 喷嘴参数

喷嘴编号	喷嘴喉径/m	流出系数	体积流量/(m ³ ·h ⁻¹)
1	0.0022	0.9781	2.66
2	0.0031	0.9755	5.20
3	0.0043	0.9810	10.25
4	0.0062	0.9920	21.43
5	0.0085	0.9835	40.30
6	0.0120	0.9912	80.74
7	0.0170	0.9895	160.87
8	0.0240	0.9908	320.94
9	0.0339	0.9919	640.50
10	0.0340	0.9897	640.96
11	0.0340	0.9901	644.63

表 2 装置 2 喷嘴参数

喷嘴编号	喷嘴喉径/m	流出系数	体积流量/(m ³ ·h ⁻¹)
1	0.0014	0.9553	1.01
2	0.0019	0.9512	1.98
3	0.0027	0.9652	4.04
4	0.0038	0.9845	8.08
5	0.0054	0.9871	16.18
6	0.0076	0.9819	32.04
7	0.0108	0.9862	64.28
8	0.0152	0.9762	127.05
9	0.0152	0.9761	127.06
10	0.0215	0.9871	256.19
11	0.0304	0.9914	514.10

表 3 装置 1 喷嘴组合形式

喷嘴组合 1		喷嘴组合 2	
喷嘴编号	体积流量/(m ³ ·h ⁻¹)	喷嘴编号	体积流量/(m ³ ·h ⁻¹)
6	80.74	1-2-3-4-5	79.84
7	160.87	1-2-3-4-5-6	160.58
8	320.94	1-2-3-4-5-6-7	321.44
9	640.50	10	640.96
1-9	643.16	1-10	643.62
9-11	1285.12	10-11	1285.59
8-9-11	1606.06	8-10-11	1606.52

表 4 装置 2 喷嘴组合形式

喷嘴组合 1		喷嘴组合 2	
喷嘴编号	体积流量/(m ³ ·h ⁻¹)	喷嘴编号	体积流量/(m ³ ·h ⁻¹)
5	64.28	6-7-8-9-10-11	63.34
3	127.06	5-6-7-8-9-10-11	127.62
2	256.19	3-5-6-7-8-9-10-11	254.66
1	514.10	2-3-4	510.30
3	127.06	4	127.05
3-6	159.09	4-6	159.08
3-1	641.16	4-1	641.15

3 数据与分析

分析 7 组喷嘴组合实验得到的涡轮流量计仪表系数,可以计算出仪表系数的偏差在 -0.05% ~ 0.01% 之间。

在实验前选择流量点过程中,只是根据理论计算推算出体积流量近似相等的 7 组组合形式。每组实验得出的实际体积流量有 0.03% ~ 1.11% 差值(见表 3)。根据涡轮流量计的仪表系数特性曲线可知,其仪表系数不是一个常数,而是随流量变化在一定范围内变化。所以由于实验的流量偏差引起的仪表系数变化应加以考虑。

通常的做法是利用表 5 左侧的体积流量值和涡轮流量计仪表系数进行曲线拟合,得出仪表的特性曲线,同时计算出流量与仪表系数的关系方程式,再分别计算出表 5 右侧体积流量值对应的拟合仪表系数。这样可以计算出仪表系数随流量值变化而产生的影响大小。

表 5 装置 1 测量结果

喷嘴组合 1			喷嘴组合 2		
喷嘴编号	体积流量/(m ³ ·h ⁻¹)	仪表系数/m ⁻³	喷嘴编号	体积流量/(m ³ ·h ⁻¹)	仪表系数/m ⁻³
6	80.84	3759.350	1-2-3-4-5	79.94	3757.300
7	161.09	3754.520	1-2-3-4-5-6	160.81	3754.170
8	321.36	3741.260	1-2-3-4-5-6-7	321.86	3740.820
9	640.67	3741.200	10	641.04	3742.100
9-1	643.86	3742.010	10-1	644.21	3741.110
9-11	1280.30	3745.590	10-11	1280.56	3744.680
9-8-11	1597.86	3735.010	10-8-11	1598.27	3735.180

图 3 曲线为流量值 80 m³/h 附近截取的一段拟合

曲线, a 点和 b 点是实际的实验点。图中 c 点和 b 点的垂直段为同一流量点下的实际偏差。剔除实验流量不同的影响, 最终可以得到不同喷嘴组合的实验偏差, 结果见表 6。

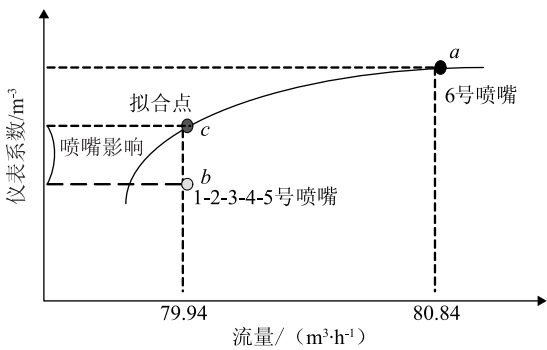


图3 截取的部分拟合曲线

表6 剔除流量影响后的测量结果

组合1 喷嘴编号	组合2 喷嘴编号	实验偏差/%	流量差影响/%	喷嘴间影响 $D_{SN}/\%$
6	1-2-3-4-5	-0.05	-0.01	0.04
7	1-2-3-4-5-6	-0.01	0.01	0.02
8	1-2-3-4-5-6-7	-0.01	-0.02	0.01
9	10	-0.02	0.02	0.04
9-1	10-1	-0.02	0.00	0.02
9-11	10-11	-0.02	0.00	0.02
9-8-11	10-8-11	0.01	0.00	0.01

前三组实验为单一喷嘴与多个喷嘴对同一流量点检测的比较。多个喷嘴组合比单一喷嘴测得的仪表系数小, 这种影响随着流量的增大而减弱。第四组实验为两个同一流量的单一喷嘴安装在不同位置的实验, 距离管道较远处测得的仪表系数小, 这一现象随着流量的增加而减弱。后三组实验结果也验证了这一点。

在检测过程中, 很多流量点的测量都是通过两个或多个喷嘴组合完成的, 所以应考虑这一喷嘴间相互影响带来的不确定度。同时, 在实验中应尽可能使用距离实验直管线更近的喷嘴或喷嘴组。本次实验以喷嘴组合1的仪表系数为参考值, 即 K_{ref} , 基于相同流量下喷嘴组合2测量得到的仪表系数 K , 可得到喷嘴组合影响参数 D_{SN} 。

$$D_{SN} = (\frac{K}{K_{ref}} - 1) \%$$

(1)

依据式(1)计算得到的喷嘴组合影响参数可求得喷嘴相互影响的不确定度, 即

$$u_{SN}(c) = \frac{\max |D_{SN}|}{2}$$

(2)

本装置喷嘴相互影响的不确定度为 0.02%。本装置的标准不确定度为 0.15%, 喷嘴相互影响不确定度小于装置不确定度的三分之一, 装置不确定度分析中可不考虑该项影响。

第一次实验后, 发现同一流量下测得的仪表系数偏差很大, 前三组数据尤为明显。根据公式(1)和(2)计算出装置2喷嘴相互影响的不确定度为 0.14%, 大于本装置的标准不确定度 0.15% 的三分之一。实验后对装置进行了问题查找。在对每个实验用到的喷嘴进行清洗维护时, 发现 6 号喷嘴被污垢部分堵塞。处理后再次对流量组合进行第二次实验, 同一流量下的实验数据的偏差明显好于第一次。剔除流量差的影响, 该装置小流量的喷嘴间相互影响明显大于大流量下的影响。根据公式(1)、(2), 计算出本装置喷嘴相互影响的不确定度为 0.07%。喷嘴相互影响不确定度大于装置不确定度的 1/3, 装置不确定度分析中应考虑该项影响。表 7、表 8 分别为装置 2 和剔除流量影响后的测量结果。

表7 装置2 测量结果

喷嘴组合1			喷嘴组合2		
喷嘴编号	体积流量 / (m³ · h⁻¹)	仪表系数 / m⁻³	喷嘴编号	体积流量 / (m³ · h⁻¹)	仪表系数 / m⁻³
5	63.99	5935.596	6-7-8-9-10-11	63.19	5952.412
3	126.71	5944.117	5-6-7-8-9-10-11	125.26	5927.193
2	255.35	5942.212	3-5-6-7-8-9-10-11	254.00	5922.085
1	508.92	5937.700	2-3-4	509.44	5942.330
3	126.71	/	4	126.70	/
3-6	159.13	5919.872	4-6	159.16	5922.085
3-1	640.05	5942.709	4-1	640.48	5938.994

表8 剔除流量影响后的测量结果

组合1 喷嘴编号	组合2 喷嘴编号	第一次实验偏差/%	第二次实验偏差/%	流量差影响/%	喷嘴间影响	$D_{SN}/\%$
5	6-7-8-9-10-11	0.28	0.12	0.01	0.27	0.11
3	5-6-7-8-9-10-11	-0.29	0.13	-0.01	0.28	0.14
2	3-5-6-7-8-9-10-11	-0.16	0.07	0.00	0.16	0.07
1	2-3-4	0.08	-0.06	-0.01	0.09	0.05
3	4	/	0.01	0.00	/	0.01
3-6	4-6	0.04	-0.04	0.01	0.03	0.06
3-1	4-1	-0.07	-0.03	0.00	0.07	0.02

4 结论

1) 同一喷嘴装置采用多个喷嘴组合的方法对被检表进行检定实验, 多个不同喉部尺寸的喷嘴之间存在相互影响。由于喷嘴加工、安装和使用影响, 不同音速喷嘴装置间多个喷嘴组合的实验结果是不同的。所以在对音速喷嘴装置进行不确定度分析时应引入这一不确定度分量, 这样, 标准装置的评价工作以及流量计校准的结果才更加科学和准确。

2) 喷嘴间的相互影响在流量小时更为明显, 所以在使用装置检测小流量时, 选择单个喷嘴进行实验可以减小对实验结果的影响。

3) 通过不同喷嘴组合的喷嘴对流量计进行检测, 可以发现和找出喷嘴的问题。装置在使用时, 检测一些常用流量点都使用固定喷嘴或喷嘴组合, 所以长期使用某一喷嘴可能对其造成影响。在进行喷嘴装置设计时, 可以考虑同时安装几个相同口径的喷嘴, 既可以交替使用, 也可以通过组合的方式对装置进行核查。

(上接第 22 页)

从某型发动机本架次以前 6 个月同 62 个飞行架次的飞参数据中, 提取高压转子转速等 18 个双发高相关参数构成训练集。训练集规模为 648762, 均为发动机正常工作状态下的飞参数据。以本架次飞参数据中的 18 个双发高相关参数构成测试集。NSVDD 参数 C 和 σ 分别设置为 0.5 和 0.05, 异常检测结果如图 7 所示。除 2827 s 到 2833 s, 2880 s 到 2883 s 秒等少数时段外, 其它飞行过程都检测出了参数不一致异常。地面排查查明异常现象原因为右发动机单个热电偶出现性能故障, 更换热电偶后试车, 异常现象消除。

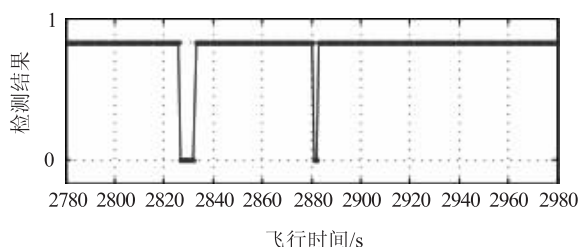


图 7 转速排气温度匹配度检测

5 结论

异常检测是航空发动机监控的重要研究内容之一, 然而飞参数据样本分布不均衡、数量大且随时间不断积累, 使得传统异常检测方法难以适用。本文将在线

参考文献

- [1] Stevens RL. Development and Calibration of the Boeing 18 Kg/s (40lbm/sec) Airflow Calibration Standard [C] // International Symposium on Fluid Flow Measurement. American Gas Association, ISFFM, 1986.
- [2] Richard W. Caron, Investigation into the Accuracy of Multiple Critical Flow Venturis Mounted in Parallel within a Common Plenum [C] // 4th International Symposium on Fluid Flow Measurement. ISFFM, 1999.
- [3] Yong Moon Choi. Interference effects between sonic nozzles [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 1997, 8(2): 113–119.
- [4] Yong Moon Choi. Interference effects of three sonic nozzles of different throat diameters in the same meter tube [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 1999, 10: 175–181.
- [5] Aaron N Johnson. U. S. National Standards for High Pressure Natural Gas Flow Measurement [S]. NISTSP, 2008.
- [6] GB/T21188–2007/ISO9300: 2005 用临界流文丘里喷嘴测量气体流量 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
- [7] 国家质量监督检验检疫总局. JJF1024–2010 临界流文丘里喷嘴法气体流量标准装置校准规范 [S]. 北京: 中国计量出版社, 2010.

SVDD 算法引入到航空发动机异常检测, 在对比分析现有在线 SVDD 算法性能的基础上, 采用 NSVDD 算法进行了发动机典型异常检测, 结果验证了 NSVDD 算法在发动机异常检测中的有效性。

参考文献

- [1] Kobayashi T, Simon D L. Integration of on-line and off-line diagnostic algorithms for aircraft engine health management [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2007, 129: 986–993.
- [2] 赵连春, 杰克·马丁利. 飞机发动机控制—设计、系统分析和健康监视 [M]. 北京: 航空工业出版社, 2011.
- [3] 孙文柱, 曲建岭, 袁涛, 等. 基于改进 SVDD 的飞参数据新异检测方法 [J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(4): 932–939.
- [4] Tax D, Laskov P. Online SVM learning: from classification to data description and back [J]. Neural networks and signal processing, 2003, 1: 499–508.
- [5] Hua X, Ding S. Incremental learning algorithm for support vector data description [J]. Journal of software, 2011, 6(7): 1166–1173.
- [6] Tavakkoli A, Nicolescu M, Nicolescu M, et al. Efficient background modeling through incremental support vector data description [C] // International Conference on Pattern Recognition, Tampa FL, 2008: 1–4.
- [7] Theljani F, Laabidi K, Zidi S, et al. Systems monitoring based on dynamic classification with SVDD [C] // International conference on systems, signal and devices. Hammamet Tunisia; 2013: 1–7.