

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2023.06.11

涡轮流量计时间常数校准技术研究

张永胜¹, 党静², 于小丽¹

(1.航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095; 2.空装驻北京地区第四军事代表室, 北京 100166)

摘要: 为了校准涡轮流量计的时间常数, 建立液体阶跃流量试验装置, 该装置利用螺杆泵输送流体形成平台流量, 采用内啮合齿轮泵输送流体形成阶跃流量分量, 通过控制高速电磁阀的开启与关闭实现阶跃流量分量与平台流量的叠加, 最终产生阶跃流量。利用皮托管对阶跃流量产生时间进行评估, 结果表明阶跃流量上升时间小于9 ms。在不同阶跃工况下对涡轮流量计开展时间常数校准试验, 结果表明: 涡轮流量计时间常数并非固定值, 且受平台流量影响较大, 具有随前平台流量增大而减小的趋势, 受阶跃流量幅度影响较小; 在小流量范围内, 实际测量得到的动态流量系数与理论模型推导得到的动态流量系数偏差较大, 而在大流量范围内二者较为吻合。最后对时间常数校准结果进行了不确定度评估, 最大扩展不确定度约为10 ms($k=2$)。研究成果有助于评估流量计动态特性, 有望提高非稳态流量测量的准确度。

关键词: 阶跃流量; 平台流量; 涡轮流量计; 时间常数; 不确定度

中图分类号: TB93 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-5795 (2023) 06-0092-08

Experimental study on time constant calibration technology of turbine flowmeter

ZHANG Yongsheng¹, DANG Jing², YU Xiaoli¹

(1.Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China;

2.The Fourth Military Representative Office stationed in Beijing, Beijing 100166, China)

Abstract: In order to calibrate the time constant of the turbine flowmeter, a liquid step flow test device was established. The device uses a screw pump to transport fluid to form a platform flow, and an internal meshing gear pump to transport fluid to form a step flow component. The step flow component is superimposed on the platform flow by controlling the opening and closing of the high-speed solenoid valve, and the step flow is generated ultimately. The generation time of the step flow was evaluated by using a pitot tube, and the result showed that the rise time of the step flow was less than 9 ms. The time constant calibration tests of turbine flowmeter were carried out under different step conditions, and the results showed that the time constant of the turbine flowmeter was not invariable, and was greatly affected by the steady flow before the step flow, with a trend of decreasing with the increase of the steady flow before the step change, and the time constant was less affected by the step flow amplitude. In the small flow range, the dynamic flow coefficient obtained from actual measurement deviated significantly from the theoretical model derivation, while in the large flow range, the two were more consistent. Finally, the uncertainty of the calibration result of the time constant was evaluated, and the maximum expanded uncertainty was about 10 ms ($k=2$). The research results are helpful for evaluating the dynamic characteristics of flowmeters and are expected to improve the accuracy of unsteady flow measurement.

Key words: step flow; turbine flowmeter; time constant; uncertainty

收稿日期: 2023-10-07; 修回日期: 2023-11-09

基金项目: 国家“十三五”计量技术基础科研项目(JSJL2017205A005)

引用格式: 张永胜, 党静, 于小丽. 涡轮流量计时间常数校准技术研究[J]. 计量技术, 2023, 43(6): 92-99.

Citation: ZHANG Y S, DANG J, YU X L. Experimental study on time constant calibration technology of turbine flowmeter[J]. Metrology & Measurement Technology, 2023, 43(6): 92-99.



0 引言

涡轮流量计通过测量叶轮的转速来计算管道中流体介质体积流量^[1-3]，稳定流动条件下，涡轮流量计具有量程宽、精度高、压损小、重复性好等优点，广泛应用于生产制造和科研试验等领域的液体流量测量。与贸易结算领域关注累积流量不同，生产制造和科研试验领域更加关注流量的动态变化过程。在航空发动机研制试验中，涉及大量燃油动态流量的测量问题^[4]，例如点火时瞬时供油量的测量、加减速时燃油流量变化的测量等。燃油流量的瞬态测量多采用涡轮流量计实现，涡轮流量计自身的动态特性优劣直接影响上述瞬态流量测量的准确程度。

国内外相关学者通过流体仿真与试验开展了对涡轮流量计在阶跃流量下动态响应特性的研究^[5-9]。英国布鲁内尔大学针对小口径涡轮流量计，利用快速变截面孔板产生阶跃流量，开展了负阶跃流量条件下的试验研究，涡轮流量计动态响应近似为指数变化。南京大学开展了涡轮流量计理论建模和试验验证，结果表明涡轮流量计阶跃稳定时间不大于 100 ms。上述研究多以理论分析和模拟仿真为主，测试试验较为简单，未对时间常数不确定度进行分析。

针对涡轮流量计实流条件下时间常数校准方法不完善的问题，研究并建立了正阶跃流量试验发生装置，对阶跃流量的上升时间进行评价，之后开展涡轮流量计时间常数校准试验，并进行测

量不确定度评定，为推动流量计时间常数测量技术发展提供有力支撑。

1 试验原理及装置

1.1 工作原理

阶跃流量试验装置原理图如图 1 所示。平台流量和阶跃流量分量叠加产生标准阶跃流量；流体介质为 3#白油，通过螺杆泵输送流体形成平台流量，系统中配备 2 台螺杆泵，产生的平台流量范围为 10 ~ 200 L·min⁻¹，螺杆泵扬程为 3 MPa；螺杆泵出口安装蓄能器，滤除平台流量脉动；通过内啮合齿轮泵输送工作流体形成阶跃流量分量，阶跃流量分量的调节范围为 4 ~ 20 L·min⁻¹，扬程可达 3 MPa；阶跃流量泵出口并联安装 4 支高速电磁阀，开启电磁阀后阶跃流量分量即可与平台流量叠加，根据试验需要确定开启电磁阀数量；在阶跃流量分量与平台流量叠加位置上游安装节流组件，使节流组件上下游压差在 2 MPa 以上，确保阶跃流量分量的充分叠加；在阶跃流量分量与平台流量叠加位置下游和待测涡轮流量计上游安装皮托管，用于监测阶跃流量的上升时间；涡轮流量计后方安装科里奥利质量流量计，用于实现阶跃变化前后稳定流量的测量；最后工作流体回流至油箱。

1.2 性能验证

形成阶跃流量的高速电磁阀开启时间小于 4.5 ms，动作重复性优于 0.05 ms，单支电磁阀在压差为 3 MPa 条件下的流量为 6 L·min⁻¹。皮托管内安装两支动态压力传感器，分别测量皮托管内流体总

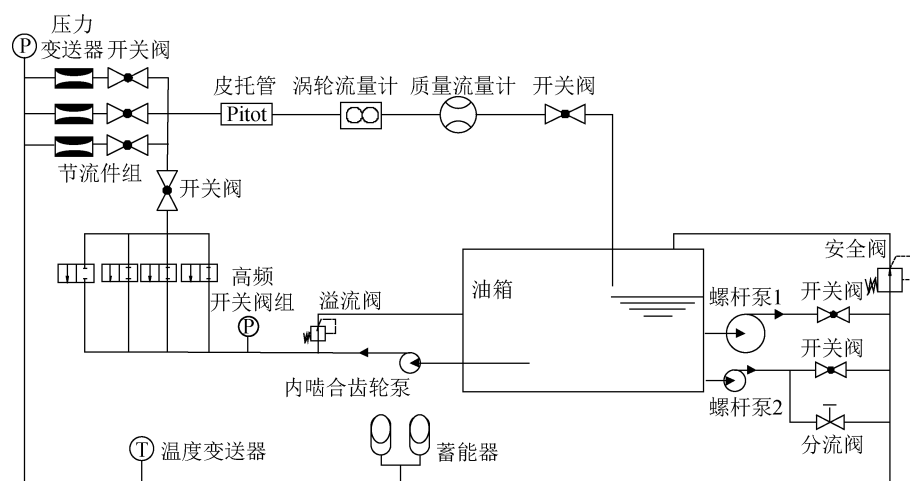


图 1 阶跃流量试验装置原理图

Fig.1 Schematic diagram of step flow test device

压与静压，进而计算流体动压和流速，两支动态压力传感器的响应频率大于 20 kHz，响应时间小于 0.05 ms；阶跃流量的上升时间 t_{95} 为从总压传感器开始响应，到动压响应值达到阶跃幅度的 95% 所需的时间。阶跃变化前稳定流量为前平台流量，阶跃变化后稳定流量为后平台流量，前、后平台流量均为瞬时流量。利用科里奥利质量流量计实现前、后平台流量的测量，质量流量计的测量不确定度优于 0.2% ($k=2$)。试验装置内各类仪器信号采样频率均不低于 20 kHz。

阶跃过程中科里奥利质量流量计示值和动压曲线如图 2 所示，其中， q 为瞬时体积流量， p 为此流量时对应的动压， q_0 为前平台流量， Δq 为阶跃幅值。不同工况下阶跃流量上升时间分布如图 3 所示。试验结果表明，试验装置平台流量覆盖 10 ~

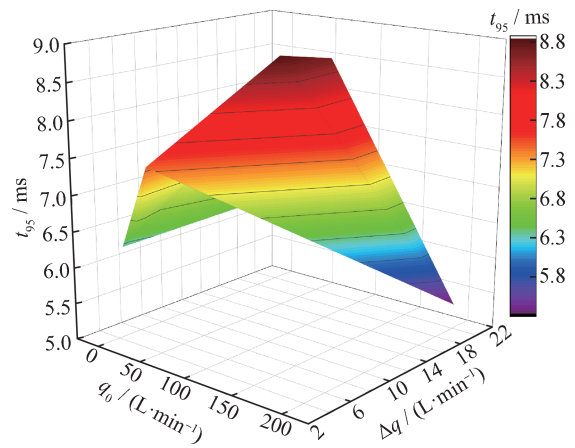


图3 阶跃流量上升时间分布图
Fig.3 Rise time distribution of step flow

200 L·min⁻¹，阶跃幅度范围为 4 ~ 20 L·min⁻¹，阶跃流量上升时间分布在 5.3 ~ 8.8 ms 范围内，各工况上升时间重复性最大值为 2.1 ms。

2 时间常数校准

2.1 理论模型

流体冲击涡轮流量计叶轮时，会对叶轮产生驱动力矩，同时叶轮也受到多项阻力矩的影响。叶轮力矩分析图如图 4 所示，其中 T_d 为流体对叶片的驱动力矩， T_h 为轮毂侧面受到的流体粘性阻力矩， T_w 为轮毂端面受到的流体粘性阻力矩， T_l 为叶片顶端受到的流体粘性阻力矩， T_b 为叶片轮轴与轴承之间存在的机械阻力矩， T_m 为磁电信号检出器产生的磁电阻力矩， ω 为叶轮转速， R_0 为涡轮流量计壳体半径， R_l 为叶轮半径， R_h 为轮毂半径， V_z 为流体平均流速。

根据牛顿运动定律，涡轮流量计的运动方程可表示为^[10]

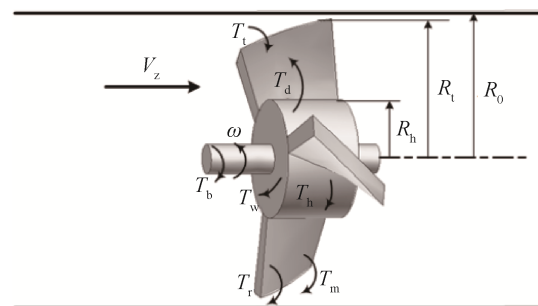
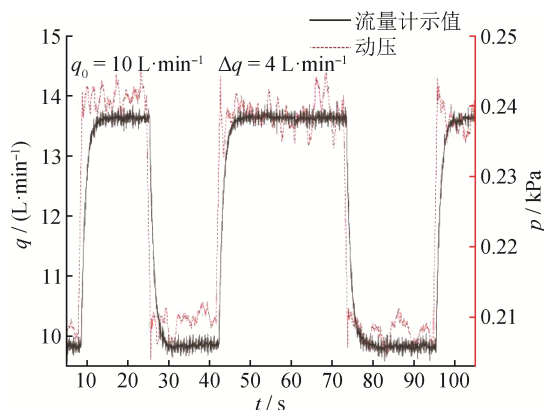
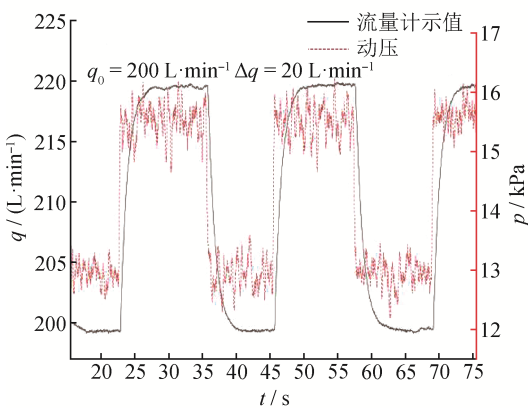


图4 叶轮力矩分析

Fig.4 Analysis of Impeller torque



(a) 前平台流量为 10 L·min⁻¹，阶跃幅度为 4 L·min⁻¹
(a) At steady flow before change of 10 L·min⁻¹ and step amplitude of 4 L·min⁻¹



(b) 前平台流量为 200 L·min⁻¹，阶跃幅度为 20 L·min⁻¹
(b) At steady flow before change of 200 L·min⁻¹ and step amplitude of 20 L·min⁻¹

图2 阶跃过程中科里奥利质量流量计示值和动压曲线图

Fig.2 Coriolis mass flow meter indication and dynamic pressure curve during step process

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_d - T_{rf} - T_b - T_m \quad (1)$$

式中： J 为叶轮转动惯量； T_{rf} 为流体对叶轮产生的阻力矩， $T_{rf} = T_h + T_w + T_t$ 。

叶轮驱动力矩可表示为

$$T_d = r\rho Av(v \tan \theta - r\omega) \quad (2)$$

式中： r 为涡轮流量计有效半径， ρ 为流体密度， A 为流通面积， v 为平均流速， θ 为叶片与轴的夹角。

在忽略阻力矩影响的情况下，涡轮流量计的运动方程可简化为

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{r\rho Av}{J} (v \tan \theta - r\omega) \quad (3)$$

设定 $B = r\rho Av / J$ ，将涡轮流量计输入的瞬时体积流量 $q_{in}(t) = v(t)A$ 和输出的瞬时体积流量 $q_{out}(t) = f(t) / K = \omega(t)Z / 2\pi K$ 代入式(3)，得传递函数 $G(s)$ 为^[11]

$$G(s) = \frac{q_{out}(s)}{q_{in}(s)} = \frac{1}{\frac{1}{Br}s + 1} \frac{Z \cdot \tan \theta}{2\pi K Ar} \quad (4)$$

式中： Z 为叶片个数， K 为仪表系数， s 为复变量。

则时间常数 τ 可由式(5)计算。时间常数并非恒定值，与瞬时体积流量成反比。

$$\tau = \frac{1}{Br} = \frac{J}{r^2 \rho Av} = \frac{J}{r^2 \rho} \cdot \frac{1}{q} \quad (5)$$

2.2 试验对象

针对三支涡轮流量计进行时间常数校准试验，流量计编号分别为1#、2#和3#，三支涡轮流量计口径分别为14、22、24 mm，流量范围分别为7.6 ~ 76 L·min⁻¹、19 ~ 190 L·min⁻¹和34 ~ 340 L·min⁻¹。时间常数校准试验工况如表1所示。

表1 时间常数校准试验工况

Tab.1 Time constant calibration test conditions

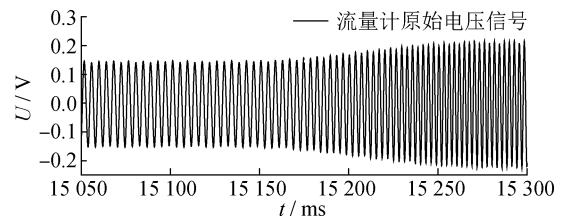
编号	口径 / mm	前平台流量 q_0 / (L·min ⁻¹)	阶跃幅度 Δq / (L·min ⁻¹)
1#	14	10、20、30、40、50、60、70	5、10
2#	22	30、50、70、90、110、130、150、170	10、20
3#	24	40、60、80、100、120、140、160、180、200	10、20

2.3 试验方法

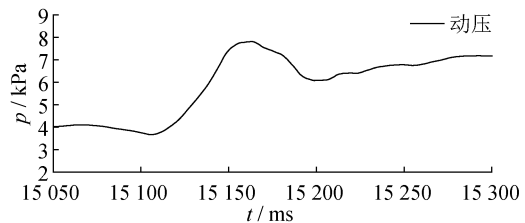
首先将平台流量调至需要的前平台流量，再调节阶跃流量泵转速，形成所需阶跃流量分量，

然后开始采集涡轮流量计原始信号和质量流量计电流信号，控制高速电磁阀组动作，在前平台和后平台阶段稳定流量均维持10 s以上，确保前平台和后平台流量达到稳定状态，试验中记录三次以上阶跃变化过程中的信号输出，利用每次阶跃变化进行时间常数计算。

涡轮流量计原始信号为几百毫伏的电压信号，阶跃过程中涡轮流量计原始信号 U 和动压 p 曲线图如图5所示，可以看出在流量正阶跃突变时，涡轮流量计输出信号幅值增强，频率变大。



(a) 流量计原始电压信号
(a) Flowmeter original voltage signal



(b) 动压曲线
(b) Dynamic pressure curve

图5 阶跃过程中涡轮流量计原始信号和动压曲线图
Fig.5 Original signal of turbine flowmeter and dynamic pressure curve in step process

数据处理时，需要将涡轮流量计原始信号转换为频率信号来表征流量变化。涡轮流量计原始信号曲线如图6所示，是较为规律的正弦周期信

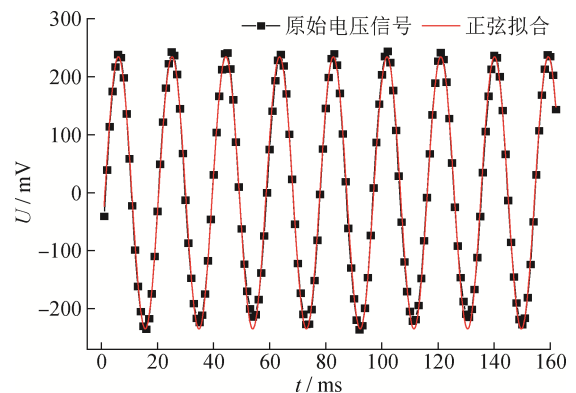


图6 涡轮流量计原始信号正弦拟合曲线

Fig.6 Sine fitting curve of turbine flowmeter original signal

号。数据处理过程中, 查找原始信号中一系列峰值、下降过零点、谷值、上升过零点四个特征点及对应时刻, 相邻两特征点的时间差为1/4旋转周期, 依次获得不同时刻叶轮旋转周期, 进而计算不同时刻叶轮转动频率。三支涡轮流量计叶片数量为4~6片, 为了降低叶片机械差异引入的影响, 试验前在稳态流量下进行原始信号波形筛选, 保证连续4~6个波形之间无明显差异。

数据处理时, 将原始信号转换为频率 f 信号, 图7~图9分别为三支流量计不同阶跃过程中的响应曲线。时间常数为涡轮流量计在阶跃流量响应过程中, 从自身信号开始发生变化到变化量达到信号阶跃幅值的63.2%所用的时间。

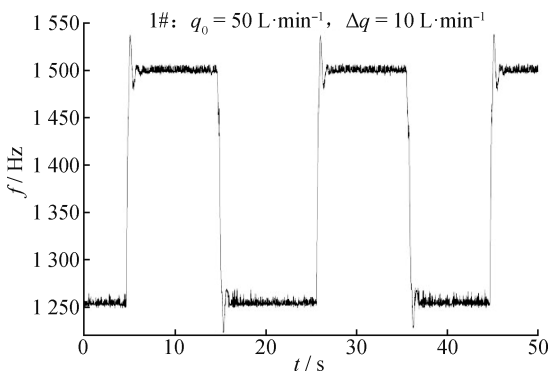


图7 1#流量计, 当 $q_0 = 50 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, $\Delta q = 10 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 时的响应曲线
Fig.7 Response curve of 1# flowmeter at $q_0 = 50 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ and $\Delta q = 10 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$

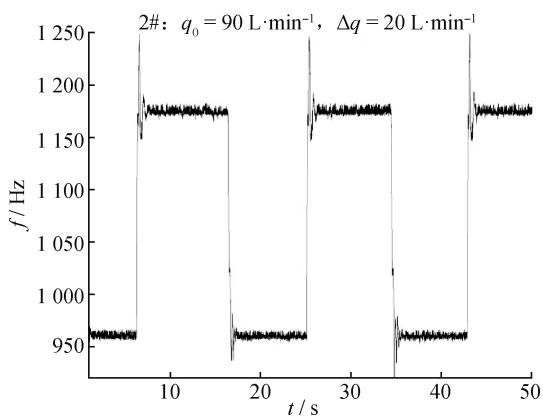


图8 2#流量计, 当 $q_0 = 90 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, $\Delta q = 20 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 时的响应曲线
Fig.8 Response curve of 2# flowmeter at $q_0 = 90 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ and $\Delta q = 20 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$

通过作图法直接获取每个上升阶跃过程中流量计信号开始变化时刻 t_0 , 信号变化达到 $0.632\Delta f$ 对应的时刻 $t_{0.632}$, 两者之差即为流量计在该工况下

的时间常数 τ 。涡轮流量计时间常数示意图如图10所示, 其中 f_0 和 f_1 分别为前、后平台流量计输出频率。利用阶跃过程响应曲线获取各次测试的时间常数, 取平均值作为本工况下涡轮流量计的时间常数, 并采用极差法计算时间常数重复性。

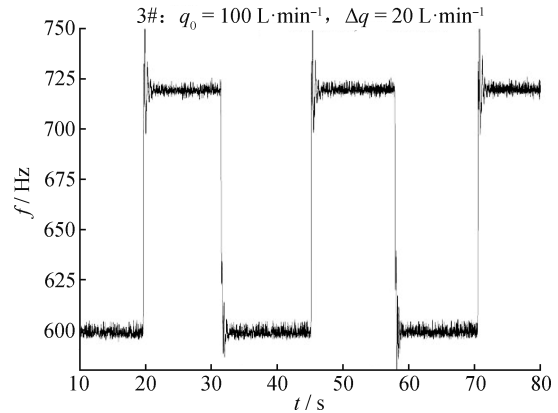


图9 3#流量计, 当 $q_0 = 100 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, $\Delta q = 20 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 时的响应曲线
Fig.9 Response curve of 3# flowmeter at $q_0 = 100 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ and $\Delta q = 20 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$

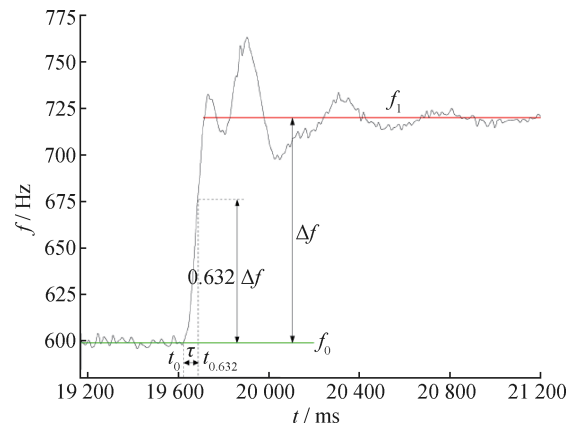


图10 涡轮流量计时间常数示意图

Fig.10 Schematic diagram of time constant of turbine flowmeter

2.4 试验结果

图11~图13分别为三支涡轮流量计时间常数随流量变化曲线。1#涡轮流量计时间常数范围为98.0~173.7 ms, 重复性最大值为8.6 ms; 2#涡轮流量计时间常数范围为40.5~93.6 ms, 重复性最大值为3.8 ms; 3#涡轮流量计时间常数范围为38.2~88.4 ms, 重复性最大值为6.9 ms。各工况下, 各流量计的重复性均不超过对应时间常数的10%。

三支涡轮流量计的时间常数随流量变化具有相同的趋势, 均为随前平台流量增大而减小, 与

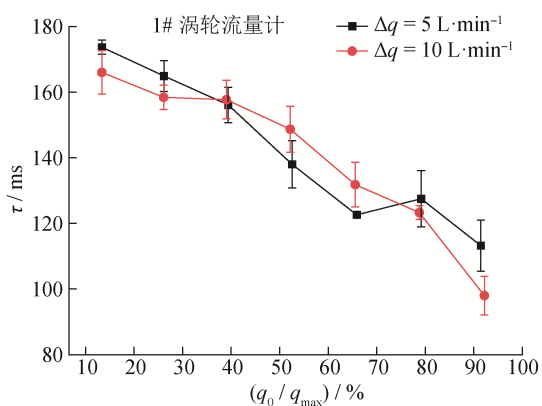


图 11 1#涡轮流量计时间常数随平台流量变化曲线
Fig.11 Curve of time constant of 1# turbine flowmeter with platform flow

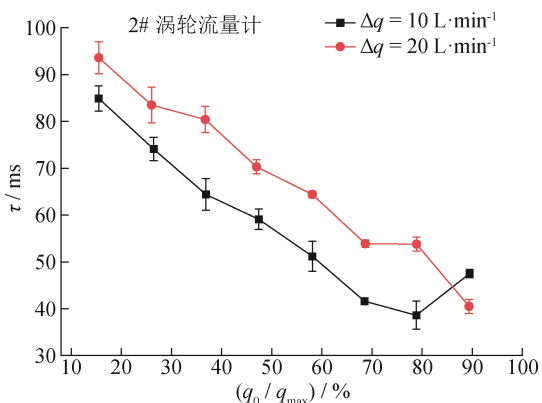


图 12 2#涡轮流量计时间常数随平台流量变化曲线
Fig.12 Curve of time constant of 2# turbine flowmeter with platform flow

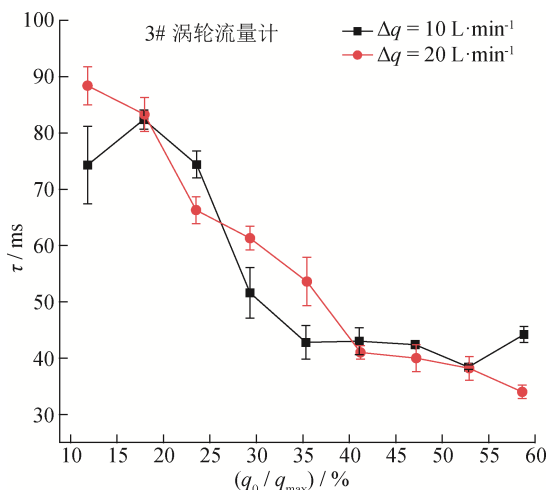


图 13 3#涡轮流量计时间常数随平台流量变化曲线
Fig.13 Curve of time constant of 3# turbine flowmeter with platform flow

式(5)中时间常数与流量成反比趋势一致。1#流量计前平台流量为13%时,时间常数约为170 ms,

前平台流量为92%时,时间常数约为106 ms,前者约为后者的1.6倍;2#流量计前平台流量为15%时,时间常数约为89 ms,前平台流量为85%时,时间常数约为44 ms,前者约为后者的2.0倍;3#流量计前平台流量为12%时,时间常数约为81 ms,前平台流量为59%时,时间常数约为39 ms,前者约为后者的2.1倍。

时间常数与流量成反比,两者乘积可定义为动态系数 K_d ^[12]。流量计动态系数流量变化趋势如图14所示。结果显示动态系数 K_d 并非定值,其随着流量增大而逐渐增大并趋于稳定。理论模型忽略了流体对叶轮产生的阻力矩、轴承的机械阻力矩和磁电信号检出器产生磁电阻力矩的影响,而实际上,在小流量范围内,上述三者对叶轮的影响无法忽略,导致实际测量得到的动态流量系数与理论模型推导得到的动态流量系数偏差较大;在大流量范围内,上述三种阻力矩影响比重下降,实际测量得到的动态流量系数与理论模型推导得到的动态流量系数较为吻合。

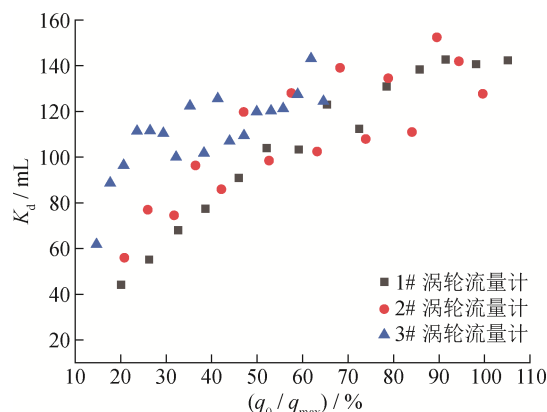


图 14 流量计动态系数流量变化趋势
Fig.14 Variation trend of dynamic factor of flowmeter with flow

3 测量不确定度评估

3.1 数学模型

直接从流量计阶跃响应曲线中获取时间常数 τ ,计算公式为^[13-18]

$$\tau = t_{0.632} - t_0 \quad (6)$$

式中: t_0 为涡轮流量计信号开始变化时刻, $t_{0.632}$ 为涡轮流量计输出信号到达信号幅值的63.2%的时刻。由式(6)可知,涡轮流量计时间常数测量不确定度主要包括 t_0 时刻获取引入的不确定度 $u(t_0)$ 、 $t_{0.632}$ 时刻获取引入的不确定度 $u(t_{0.632})$ 和时间常数

重复性 E_r 引入的不确定度 $u(E_r)$ 。

3.2 不确定度分量分析

3.2.1 t_0 和 $t_{0.632}$ 时刻获取引入的不确定度

涡轮流量计原始信号向频率转换过程中,以相邻波峰-向下过零点-波谷-向上过零点四个特征点进行转换, t_0 时刻在 $1/4$ 叶片周期 T 内均匀分布,可得

$$u(t_0) = \frac{T}{4\sqrt{3}} = \frac{1}{4f_0\sqrt{3}} \quad (7)$$

式中: f_0 为前平台涡轮流量计频率信号。

三支流量计在最小流量点前平台频率分别为255、316、242 Hz,则 t_0 时刻获取引入的不确定度 $u(t_0)$ 分别约为0.56、0.46、0.60 ms。

$t_{0.632}$ 时刻的涡轮流量计频率高于 t_0 时刻的涡轮流量计频率,则 $u(t_{0.632}) < u(t_0)$,保守认为 $u(t_{0.632}) = u(t_0)$ 。

3.2.2 重复性引入的不确定度 $u(E_r)$

取时间常数平均值作为最终结果,各工况试验次数为 $n=3$,重复性引入的不确定度可表示为

$$u(E_r) = E_r / \sqrt{n} = E_r / 1.732 \quad (8)$$

三支涡轮流量计时间常数重复性最大值分别为8.6、3.8、6.9 ms,引入的不确定度 $u(E_r)$ 分别为5.0、2.2、4.0 ms。

3.2.3 试验装置上升时间引入的不确定度 $u(t_r)$

经试验验证,试验装置上升时间 t_r 分布在5.3~8.8 ms范围内,按均匀分布计算,上升时间引入的不确定度可表示为

$$u(t_r) = (8.8 \text{ ms} - 5.3 \text{ ms}) / 2\sqrt{3} = 1.1 \text{ ms} \quad (9)$$

3.3 不确定度汇总

涡轮流量计时间常数校准不确定度汇总表如表2所示,计算得到三支流量计时间常数扩展不确定度 $U(k=2)$ 分别为10.4、5.1、8.5 ms。

表2 涡轮流量计时间常数校准不确定度汇总表

编号	$u(t_0)$	$u(t_{0.632})$	$u(E_r)$	$u(t_r)$	合成标准不确定度 u	扩展不确定度 $U(k=2)$
1#涡轮流量计	0.6	0.6	5.0	1.1	5.2	10.4
2#涡轮流量计	0.5	0.5	2.2	1.1	2.6	5.1
3#涡轮流量计	0.6	0.6	4.0	1.1	4.2	8.5

4 结论

建立了阶跃流量试验装置,对三支不同型号的涡轮流量计开展了时间常数校准试验,获得流量计在各工况下的时间常数,并对试验结果进行了不确定度分析,得到以下结论:

1) 阶跃流量试验装置前平台流量为10~200 L·min⁻¹,阶跃流量幅度为4~20 L·min⁻¹,阶跃流量上升时间小于9 ms;

2) 涡轮流量计时间常数随前平台流量增大而减小,时间常数随流量变化可达1.6倍以上,各工况下的时间常数重复性较小,不超过对应时间常数的10%。在小流量范围内,实际测量得到的动态流量系数与理论模型推导得到的动态流量系数偏差较大,在大流量范围内,二者较为吻合;

3) 涡轮流量计时间常数不确定度主要包括 t_0 时刻获取引入的不确定度、 $t_{0.632}$ 时刻获取引入的不

确定度和时间常数重复性引入的不确定度,前两项可通过涡轮流量计前平台频率进行估算,试验中各工况下的时间常数扩展不确定度最大值约为10 ms($k=2$);

4) 所提出的涡轮流量计时间常数校准方法具有技术借鉴意义,为其他类型流量计的时间常数校准技术研究提供了参考,且有助于指导流量计动态特性评估,也为后续的流量计非稳态流量测量补偿修正提供了技术支撑。

参考文献

- [1] 唐洪武,唐立模,陈红,等. 现代流动测试技术及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
TANG H W, TANG L M, CHEN H, et al. Modern flow measurement technology and application [M]. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese)
- [2] 苏彦勋,杨有涛. 流量检测技术[M]. 北京: 计量质检出版社, 2012.
SU Y X, YANG Y T. Traffic detection technology [M].

- Beijing: China Quality Inspection Press, 2012. (in Chinese)
- [3] 王池, 王自和. 流量测量技术全书[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012.
WANG C, WANG Z H. Complete book of flow measurement technology [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2012. (in Chinese)
- [4] 刘珠博. 航空发动机试车中燃油流量的瞬态测量[C]//中国航空学会. 航空实验测试技术学术交流会论文集. 雅安, 2005: 75-79.
LIU Z B. Transient measurement of fuel flow in aeroengine trial [C]//Chinese Society of Aeronautics and Astronautics. Proceedings of the Academic Exchange Conference on Aviation Experimental Testing Technology. Yaan, 2005: 75-79.
- [5] CLARK C. Step response tests on turbine flowmeters in liquid flows[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 1997, 211(4): 321-330.
- [6] DŽEMIĆ Z, ŠIROK B, BIZJAN B. Turbine flowmeter response to transitional flow regimes[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2017, 59: 18-22.
- [7] YUAN Y, ZHANG T H. Research on the dynamic characteristics of a turbine flow meter [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2017, 55: 59-66.
- [8] LEE B, CHEESEWRIGHT R, CLARK C. The dynamic response of small turbine flowmeters in liquid flows[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2004, 15: 239-248.
- [9] 张永胜, 于小丽, 刘彦军. 脉动流量下涡轮流量计动态特性流体仿真研究[J]. 计测技术, 2020, 40(4): 27-30.
ZHANG Y S, YU X L, LIU Y J. Study on dynamic characteristics of turbine flowmeter under pulsating flow by fluid simulation [J]. Metrology & Measurement Technology, 2020, 40(4): 27-30. (in Chinese)
- [10] 张桂夫, 王鲁海, 朱雨建, 等. 基于PIV测量的涡轮流量计响应分析[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(10): 2381-2387.
ZHANG G F, WANG L H, ZHU Y J, et al. Turbine flowmeter response analysis based on PIV measurement [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(10): 2381-2387. (in Chinese)
- [11] WANG B, ZHANG N, CAO Q W, et al. Evaluation approach to dynamic characteristic of turbine flowmeters considering calibration system response [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2018, 64: 126-132.
- [12] SHU W Q. Dynamical modeling of turbine flow meters [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2005, 54(5): 2090-2092.
- [13] 国家质量监督检验检疫总局. 测量不确定度评定与表示: JJF 1059-2012[S]. 北京: 中国质检出版社, 2012.
State Administration for Market Regulation. Evaluation and expression of uncertainty in measurement: JJF 1059-2012 [S]. Beijing: China Quality Inspection Press, 2012. (in Chinese)
- [14] 王松涛, 赵俭, 金振涛. 蓝宝石光纤黑体腔时间常数测量的不确定度分析[J]. 工业计量, 2013, 23(3): 53-54.
WANG S T, ZHAO J, JIN Z T. Analysis of uncertainty in measuring the time constant of sapphire fiber blackbody cavity [J]. Industrial Metrology, 2013, 23(3): 53-54. (in Chinese)
- [15] 郝晓剑, 张根甫, 咎清波. 基于半导体激光器的热电偶时间常数测试系统及不确定度分析[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(8): 1-5.
HAO X J, ZHANG G F, ZAN Q B. Thermocouple time constant test system and uncertainty analysis based on semiconductor lasers [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(8): 1-5. (in Chinese)
- [16] 梁志国. 数字存储示波器上升时间的测量不确定度评定[J]. 计量学报, 2012, 33(6): 555-558.
LIANG Z G. The uncertainty evaluation of rise time of digital storage oscilloscopes [J]. ACTA Metrologica Sinica, 2012, 33(6): 555-558. (in Chinese)
- [17] 梁伟, 韦铁平, 杨晓翔. 超大量程力传递系统不确定度评定研究[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(4): 35-42.
LIANG W, WEI T P, YANG X X. Study on uncertainty evaluation of force transfer system with a super-large range [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(4): 35-42. (in Chinese)
- [18] 潘洋, 周立任, 冯建. 一种新型低值宽带无感分流器时间常数测量方法[J]. 计量学报, 2019, 40(6): 946-951.
PAN Y, ZHOU L R, FENG J. A new method for the measurement of time constant of low value wide band non-inductance current shunt [J]. ACTA Metrologica Sinica, 2019, 40(6): 946-951. (in Chinese)

(本文编辑: 刘圣晨)



第一作者: 张永胜 (1980—), 男, 河北雄安人, 正高级工程师, 硕士, 主要研究方向为流量测量校准技术研究。