

DOI: 10.13382/j.jemi.B2104011

流量平衡法微型风扇气动性能测试技术研究*

彭衡蒂¹ 高童¹ 董双双¹ 李长武² 张东飞² 张洪军¹

(1. 中国计量大学 计量测试工程学院 杭州 310018; 2. 苏州市计量测试院 苏州 215128)

摘要:为了解决微型风扇气动性能测试系统中微小流量测量和流量自动调节问题,提出了基于流量平衡法的微型风扇气动性能测试技术。基于流量平衡法技术原理,分析了流量平衡法管路系统空气动力特性和流量调节特性。由于采用了流量平衡管路设计,在切换不同工作管道时,整个管路系统总体阻抗基本不变,可通过开启不同测量支路来组合调节流量;理论上并联测量支路根据阀门开关,其流量非“1”即“0”,可以非常方便地组合出所需流量。针对所设计的实验装置进行了流量标定实验、流量调节性能实验和微型风扇气动性能试测,实验结果表明,组合流量调节性能符合预期,微型风扇测试中组合流量调节工作正常,证明了流量平衡法适用于微型风扇气动性能测试技术。

关键词:微型风扇;气动性能;层流;流量平衡法;P-Q 曲线

中图分类号: TB937; TN06 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Study on the micro fan aerodynamic performance testing technique with flow balancing method

Peng Hengfu¹ Gao Tong¹ Dong Shuangshuang¹ Li Changwu² Zhang Dongfei² Zhang Hongjun¹

(1. College of Metrology & Measurement Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China;

2. Suzhou Institute of Metrology, Suzhou 215128, China)

Abstract:To solve technical problems of small flow measurement and automatic flow regulating in micro fan aerodynamic performance testing system, a micro fan aerodynamic performance test technology based on the flow balancing method is proposed. Based on the principle of the flow balancing method, the characteristics of aerodynamic and flow regulating of the pipe system are analyzed. Because of adopting flow balancing method, the overall impedance of the pipeline system is basically unchanged when switching on different working channels, and the intended flow rate can be obtained by combining different measuring branches. Theoretically, according to the valve switching on or off, the flow rate of one of the parallel measuring branches is either “1” or “0”, thus it is very convenient to obtain the required flow rate by combining different branches. Experiments were carried out, including flow calibration, flow regulation performance tests and aerodynamic performance test for a micro fan. The results show that flow regulation performance of the combination method meets the expectation, and the combining flow regulation method works well in the micro fan testing experiment, which proves the practicability of the flow balancing method for the micro fan aerodynamic performance testing technique.

Keywords: micro fan; aerodynamic performance; laminar flow; flow balancing method; P-Q curve

0 引言

随着电子设备的小型化、微型化,其散热风扇趋于微型化,微小风量的测量和控制给微型风扇气动性能测试技术提出了新的要求和挑战^[1-4]。

美国通风与空调协会 ANSI/AMCA210/ASHRAE 51《风扇的空气动力性能评定的实验室试验方法》^[5]和中国国家标准 GB/T1236《工业通风机用标准化风道性能试验》^[6]中推荐采用流量喷嘴进行风量测量,多喷嘴组合可获得所需流量测量范围,同时规定在满足流量测量要求情况下也可采用其他流量测量技术。

目前常规参数范围的风扇(风机)测试系统中多数采用喷嘴进行流量测量^[7-9],但标准中给出的流量喷嘴的流出系数计算公式适用于较大雷诺数,当流量很小时,喷嘴雷诺数低于公式适用范围,不再适用。针对这种情况,豆峰^[10]提出在低于雷诺数下限部分仍采用下限雷诺数进行计算,然后在后续标定中予以修正。事实上,对于流量更小的微型风扇测试,即便采用校准方法确定流出系数,流量喷嘴也不再适用,这是因为流量喷嘴喉径太小,难以加工。对于微小气体流量测量,层流流量技术是可行的选择^[11]。层流气体流量测量方法在实验室高精度测量和动态流量测量领域具有难以替代的优势,在高精度粘度测量装置和发动机进气动态流量测量等领域都有重要应用^[12-16]。

风扇测试系统一般采用流量调节阀或改变风扇电机转速来调节流量。由于流量调节阀、被测风扇和辅助风扇特性都是非线性的,流量自动调节与控制会出现调节时间长、准确性不好,甚至不容易稳定的情况^[17-19]。不仅是风扇测试系统,在标准表法流量标准装置中流量调节也会遇到同样的问题,闫瑞锋^[20]等采用大小两个并联风机管路和调节阀与变频调速相结合的方法来实现宽量程流量标准装置中流量调节,总体调节时间为 90 s,超调量小于 5%,这已经是比较好的情况。

如上所述,采用调节阀、变频调速或者两者相结合的方法在气体流量标准装置和风扇测试系统等领域是最常用的两种流量调节方式,也是目前比较实用的方法,但是其调节速度和稳定性经常不令人满意。此外,当测试系

统流量范围很大,单个风扇在很小流量工况下往往工作不稳定,一般需要选配大小两个风扇,增加了设备的复杂性。为解决微小风扇气动性能测试系统中流量测量和流量自动调节问题,本文提出了流量平衡法微型风扇测试技术,分析了该项技术的工作原理,设计了相应测试装置,并进行了试验测试。

1 工作原理和特性分析

1.1 系统组成

流量平衡法微型风扇测试系统的工作原理示意图如图 1 所示。测试系统主要由流量测量管路、流量平衡管路、调节阀、辅助风扇、静压和差压测量仪表,以及控制阀门组成。其中,流量测量管路包含均风腔室和规格不同的多条测量支路(不失一般性,以 4 条为例),采用层流法测量流量,每条测量支路装有 1 个层流元件,分别为 E1、E2、E3 和 E4;流量平衡管路包含平衡支路入口室、4 条平衡支路以及对应的 4 个层流元件,即 e1、e2、e3 和 e4。流量测量管路、流量平衡管路中各支路和层流元件一一对应(规格对应一致),对应流道采用 L 型三通球阀(F1、F2、F3 和 F4)连接,4 个三通球阀出口管路汇集到一起,后接调节阀和辅助风扇。层流元件 E1、E2、E3 和 E4 两侧差压由差压仪表测量,通过差压换算流量,采用 4 个电磁阀(C1、C2、C3 和 C4)切换测量支路。均风腔室末端位置静压由静压仪表进行测量。

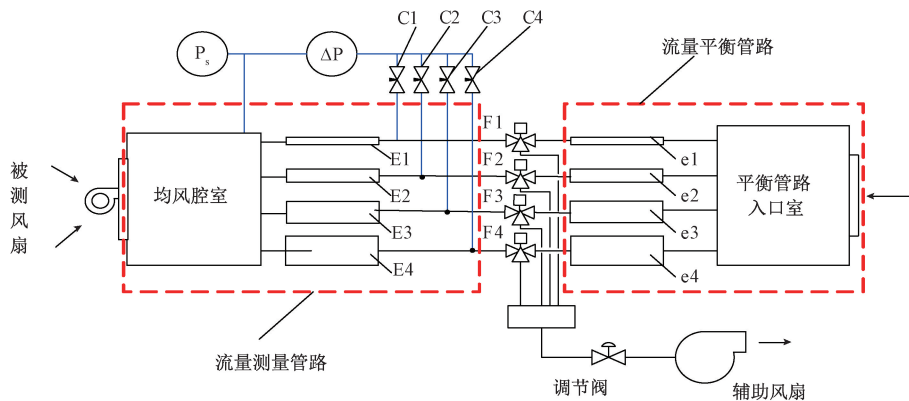


图 1 流量平衡法微型风扇测试系统组成示意图

Fig. 1 Diagram of micro fan test system with flow balancing method

风扇测试过程中,气流经被测风扇后依次进入均风腔室、流量测量管路、三通球阀,汇集后经调节阀和辅助风扇排出。测试操作流程为首先开启被测风扇和辅助风扇,将 4 个三通球阀接通流量测量管路侧,改变调节阀开度使得静压 $P_s = 0$ 。然后,通过控制三通球阀的方向接通不同测量支路,各个流道可单独接通,也可以组合接通以

获得所需要流量点。在各个流量点处分别测量静压和风量,最终获得被测风扇的风压-风量曲线,即 P-Q 曲线。

流量平衡法目的是为了保证不同流量组合时,辅助风扇工况(流量)基本保持不变。实际工作中,三通球阀或者接通测量支路,或者接通平衡支路,测量支路与平衡支路接通和关闭是互补的关系,如果忽略被测风扇的影

响,整个管路系统阻抗保持不变,辅助风扇工况不变。流经整个管路系统的总流量恒定,三通球阀后汇集管路内压力不变,则在各种组合工况下,工作流道中层流元件两侧差压恒定,相当于流经每个层流元件的流量只存在两个值,“0”(通道关闭)或者“1”(此恒定差压所确定的流量值),组合流量就是各测量支路中层流元件流量之和,通过接通不同流量测量支路即可获得比较准确的流量点。

采用层流流量测量技术带来两个好处:1) 该技术适合微小流量测量,从而解决微小风扇测试中流量测量问题;2) 由于其流量与差压成线性关系,使得系统设计更加简单易行。

1.2 管路空气动力特性分析

将系统管路流量和流动阻力进行模型化,得到图 2 所示的系统管路示意图,流体流经每条管道的流量记为测量支路 Q_i 或平衡支路 Q'_i , $i=1\cdots 4$; 某一条测量支路的流动阻力损失(或压降)可分为两部分,一部分是流经层流元件产生的压降 $\Delta P_{1,i}$,另一部分是流经管路和阀门(三通球阀)产生的压降 $\Delta P_{2,i}$ 。其中:

$$\Delta P_{1,i} = \frac{128 \mu L}{n \pi d^4} Q_i \quad (1)$$

式中: μ 为空气动力粘度系数; n 为层流元件中的毛细管根数; d 为毛细管内径; L 为毛细管长度。

记 $R_i = \frac{128 \mu L}{n_i \pi d^4}$, 则式(1)简化为:

$$\Delta P_{1,i} = R_i Q_i \quad (2)$$

$\Delta P_{2,i}$ 的计算比较复杂,分为管路沿程阻力损失和阀门等局部损失,其值与雷诺数相关,可近似采用下式计算,即:

$$\Delta P_{2,i} = \zeta \frac{8\rho}{\pi^2 D_i^4} Q_i^2 \quad (3)$$

式中: ρ 为空气密度; D_i 为管道内径; ζ 为等效阻力系数。

记 $r_i = \zeta \frac{8\rho}{\pi^2 D_i^4}$, 则:

$$\Delta P_{2,i} = r_i Q_i^2 \quad (4)$$

式中: $\Delta P_{1,i}$ 和 $\Delta P_{2,i}$ 分别为线性压降和非线性压降; R_i 和 r_i 称为流动阻抗,类似于电路中的电阻,标记在图 2 中。测量支路与平衡支路的阀门开关是互补的关系,接通的一侧阻抗标记为绿色,未接通一侧标记为红色(注:图中接通哪一侧是任意给出的)。调节阀模型化为可调阻抗 R_v 。实际工作时,流量测量管路入口压力为被测微型风扇静压 P_s ,平衡管路入口压力为大气压(即相对压力为 $P=0$),调节阀之前汇集处压力为 P_b ,阀后压力为 P_0 ,即辅助风扇的抽力。流量测量管路流量为 Q ,流量平衡管路流量为 Q' ,流经辅助风扇的总流量为 $Q_0=Q+Q'$ 。

令 $\Delta P_m = P_s - P_b$, $\Delta P_c = 0 - P_b = -P_b$ 分别为测量管路

和平衡管路的驱动压力差。显然,当被测风扇风压不为 0 时,驱动压力差不同,在两条管路流动阻抗相同的情况下流过的流量是不同的,这样就不是完全的互补关系。因此,为满足近似互补关系,设计中应保证 P_s 数值上远小于 P_b ,即 $|P_s| \ll |P_b|$ 。

在满足 $|P_s| \ll |P_b|$ 情况下,测量管路和平衡管路近似互补,可以保证管路系统总体工况基本不变,理论上可以通过接通不同测量管路实现流量调节,但是,单条管路中阻抗 r 的存在,其非线性影响导致设计过程比较复杂;如果 r 很小,可以忽略,则各条管到中仅有层流元件的线性压损,系统可以真正实现流量叠加法基础上的精确调节。这在实际设计中是可以做到的,方法是采用直径足够大的管道和阀门,管内流速足够低,从而使得 $\Delta P_{2,i}$ 很小,可以忽略。

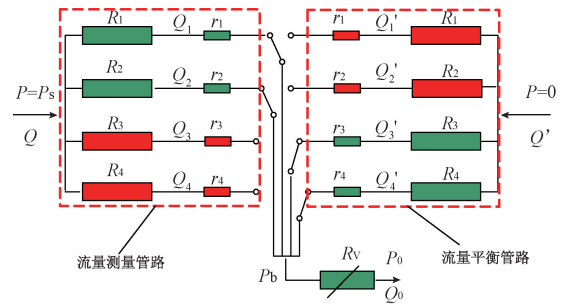


图 2 系统管路模型化简图

Fig. 2 Schematic diagram of piping system model

1.3 理想流量组合调节特性

在 P_s, r 的影响可忽略情况下,管路中阻抗仅为层流元件阻抗。

$$R = \frac{128 \mu L}{n \pi d^4} = \frac{\gamma}{n} \quad (5)$$

式中: $\gamma = \frac{128 \mu L}{\pi d^4}$, 为单根毛细管的阻抗。

在整个测试过程中,管路总体工况不变,测量管路和平衡管路中层流元件两侧差压保持不变, $\Delta P_m = \Delta P_c = \Delta P$,则流经测量管路的流量为:

$$Q = \sum_{i=1}^4 \eta_i Q_i = \sum_{i=1}^4 \eta_i \frac{\Delta P}{R_i} = \sum_{i=1}^4 \eta_i \frac{n_i \Delta P}{\gamma} = \sum_{i=1}^4 \eta_i n_i q \quad (6)$$

式中: η_i 为测量支路接通与否的开关量,接通为 1,未接通为 0; q 为流经单根毛细管的流量, $q = \Delta P / \gamma$ 。

测试过程中工况不变, q 不变, n_i 是固定的,由式(6)可知,流量 Q 仅为开关量 η_i 所确定。

假设 4 个层流元件中毛细管根数的比例关系为 $n_1 : n_2 : n_3 : n_4 = 1 : 2 : 4 : 8$,则可通过接通不同的流道组合出 16 种(包括 0 流量)不同的流量。如果取最小层流元

件的流量 Q_1 为 1 个单位流量,则其他 3 个层流元件流量单位数分别为 $Q_2/Q_1=2$ 、 $Q_3/Q_1=4$ 和 $Q_4/Q_1=8$ 。表 1 为 16 种组合情况下的流量单位数和以最大流量为基准的相对流量。

$$Q' = \frac{Q}{Q_{\max}} \times 100\% \quad (7)$$

表 1 管道组合列表

Table 1 Pipeline combination list

序号	管道编号				组合流量 (Q/Q_1)	相对流量 $Q'/\%$
	(流量单位数 $Q_i/Q_1, i=1\cdots 4$)					
	1(1)	2(2)	3(4)	4(8)		
1	×	×	×	×	0	0.0
2	√	×	×	×	1	6.7
3	×	√	×	×	2	13.3
4	√	√	×	×	3	20.0
5	×	×	√	×	4	26.7
6	√	×	√	×	5	33.3
7	×	√	√	×	6	40.0
8	√	√	√	×	7	46.7
9	×	×	×	√	8	53.3
10	√	×	×	√	9	60.0
11	×	√	×	√	10	66.7
12	√	√	×	√	11	73.3
13	×	×	√	√	12	80.0
14	√	×	√	√	13	86.7
15	×	√	√	√	14	93.3
16	√	√	√	√	15	100.0

注:√表示接通;×表示关闭

2 实验装置及其流量标定

根据图 1 所示测量原理设计了实验测试装置,层流元件中毛细管直径为 1 mm,长度为 80 mm,4 个测量支路中毛细管数分别为 5、10、20、44。均风腔室截面为圆形,内径 120 mm,长度 300 mm。测量支路和平衡支路中,对应 E4、e4 内径为 12 mm,其他均为 10 mm,三通球阀规格均为 DN15,微差压取压管路选用了 4 个二位二通电磁阀。平衡管路入口与风扇测量流道不同,直接面对外来流,因此无需设计与左侧一样的均风腔室,只是在入口设计了滤网以防止较大污染颗粒进入毛细管(左侧测量流道入口处同样设计了滤网)。为了控制阀门动作,设计了简单的手动继电器。

差压测量仪表为 FCO560 微差压校准仪,量程为 $\pm 2\ 500$ Pa,测量精度为读数的 0.05%+0.03 Pa。静压测量仪器为 FCO510 微差压校准仪,其量程为 $\pm 2\ 000$ Pa,测量精度为 $\pm 0.1\%$ 。

在进行管路特性和风扇测试之前,需要进行层流元

件的流量标定。流量标定基于音速喷嘴气体流量标准装置进行,该标准装置为负压法,即采用抽气的型式,装置内含 7 个临界流量喷嘴,装置量程为 0.267 ~ 108.3 L/min,流量测量不确定度为 0.3% ($k=2$)。标定时,将辅助风扇拆下,换为流量标准装置入口连接管,风扇固定法兰拆下,空气直接进入测量支路,因此,入口处静压接近于 0。

从保证准确考虑,每个层流元件需单独标定,但由于流道 1 和流道 2 中层流元件流量小、阻力大,标准装置不能正常工作。另一方面,考虑各层流元件中毛细管规格完全相同(同一批次不锈钢毛细管内径一致性比较好),只是数量不同,因此,考虑对较大的两个流道中层流元件 E4、E3 进行标定,基于两个层流元件的数据进行比对验证,最后确认单根毛细管的流量曲线,可用于所有层流元件。层流元件 E4 中含有 44 根毛细管,流经单根毛细管的流量 q_s 是标准装置读数 Q_s 的 1/44,即 $q_s = Q_s/44$ 。毛细管差压和根据差压计算得出的单根毛细管流量,如表 2 所示,由于毛细管长径比较小,只有 80 倍,毛细管进出口压损和层流流动起始段压降在所测量差压中占比较大(压降与流量的关系不是线性的),因此,流经毛细管的流量与两端压降不是严格线性(图 3)。考虑到标定和测试都在室温(20 ℃)条件下进行,温度基本不变,直接采用多项式进行流量和差压关系拟合是比较实用的方法。可采用 3 次多项式拟合,即:

$$q_f = a_0 + a_1 \Delta P + a_2 \Delta P^2 + a_3 \Delta P^3 \quad (8)$$

式中: q_f 为流经单根毛细管的流量。根据标定数据拟合 4 个系数分别为 $a_0 = -9.973 \times 10^{-4}$, $a_1 = 9.802 \times 10^{-4}$, $a_2 = -4.292 \times 10^{-7}$, $a_3 = 1.649 \times 10^{-10}$ 。

利用式(8)可计算出与测得差压相应的流量,标准流量和拟合值之间的偏差称为拟合偏差。设定满量程差压为 1 000 Pa,根据拟合公式计算出满量程流量 $q_{FS} = 0.714\ 9$ L/min,据此可以给出满量程相对偏差。根据层流元件 E4 测量数据得出的单根毛细管结果如表 2,表 2 中数据显示满量程相对偏差均在 $\pm 1\%$ 以内。表中同时提供了毛细管流动雷诺数 Re ($Re = \rho v d / \mu$, 其中 v 为毛细管内平均流速)以判断流动是否处于层流范围。

采用层流元件 E3 的测量数据对标定公式进行验证,根据标定公式换算得到流量测量值 q_m ,图 3 中 E3 的测量值(即拟合曲线)与标准值(图中“×”符号位置的值)非常接近。计算出测量值 q_m 与标准流量 q_s 之差(即测量误差)和满量程相对测量误差,数据如表 3。由表 3 可见,基于标定公式得出的满量程测量误差不超过 $\pm 1\%$,说明根据层流元件 E4 标定得到的拟合公式完全可以用于其他层流元件。据此,4 个规格的层流元件均采用基于 E4 的单毛细管流量标定结果。

表 2 基于层流元件 E4 的单根毛细管标定数据

Table 2 Calibration data of a single capillary based on laminar flow element E4

差压 ΔP /Pa	标准流量 q_s / (L·min ⁻¹)	雷诺数 Re	拟合值 q_f (L/min)	拟合偏差 $q_s - q_f$ (L/min)	满量程相对偏差 $\frac{q_s - q_f}{q_{FS}} \times 100\%$
6.5	0.006 18	8.7	0.005 37	0.000 81	0.11
10.3	0.009 72	13.7	0.009 03	0.000 68	0.10
16.7	0.015 51	21.9	0.015 23	0.000 28	0.04
33.8	0.031 41	44.4	0.031 61	-0.000 21	-0.03
218.7	0.190 24	269.0	0.194 59	-0.004 35	-0.61
362.5	0.306 59	433.6	0.305 77	0.000 82	0.11
587.0	0.464 52	656.9	0.459 82	0.004 70	0.66
909.5	0.654 76	926.0	0.659 51	-0.004 75	-0.66
1 086.6	0.771 05	1 090.5	0.768 89	0.002 16	0.30

表 3 层流元件 E3 测量数据

Table 3 Testing data of laminar flow element E3

差压 ΔP /Pa	标准流量 q_s / (L·min ⁻¹)	测量值 q_m / (L·min ⁻¹)	测量偏差 $q_m - q_s$ / (L·min ⁻¹)	满量程相对误差 $\frac{q_m - q_s}{q_{FS}} \times 100\%$
14.1	0.013 59	0.012 76	-0.000 83	-0.12
22.3	0.021 38	0.020 69	-0.000 69	-0.10
36.4	0.034 12	0.034 15	0.000 03	0.00
74.5	0.069 09	0.069 73	0.000 64	0.09
519.5	0.418 52	0.415 47	-0.003 05	-0.43
924.9	0.674 51	0.668 90	-0.005 61	-0.78

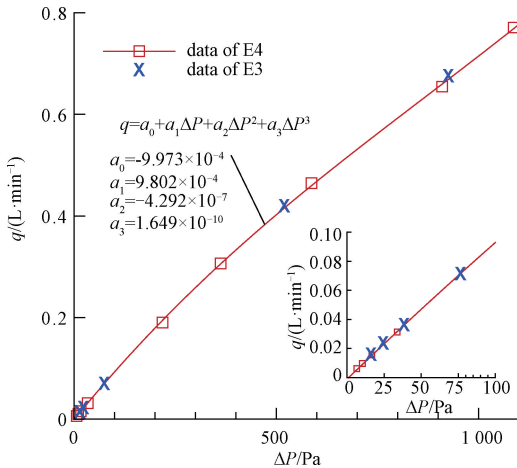


图 3 层流元件 E4 和 E3 标定数据

Fig. 3 Calibration data of laminar flow elements E4 and E3

3 实验结果和分析

3.1 测试系统流量调节特性

首先进行系统流量调节特性实验,即在不安装被测风扇及其固定法兰的情况下进行测试。此时,流量测量管路和流量平衡管路入口条件比较一致,气流静压均接近于 0。取 3 个工况的数据进行分析,其毛细管两侧差压分别为大约 200、500 和 800,数据如表 4,表 4 中第 1 列为

4 个支路叠加所能获得的理论流量,第 2 列为理论上能够获得的最大流量(相对于最大流量) Q'_T ,每个实测工况分别给出了实测流量 Q 、相对流量 Q' 和该工况相对流量与理论相对流量之差,即 $Q' - Q'_T$ 。

表 4 数据显示,对于前 7 个流量组合,各工况相对流量与理论相对流量之差 $Q' - Q'_T$ 很小,非常符合理论预期;对于 $Q/Q_1 = 8.8 \sim 14.8$ 这 7 个流量组合,相对流量与预期值偏差在 $-1.4\% \sim -5.8\%$,为明显的负偏差,且 3 个工况结果比较一致,而偏差较大的原因是这 7 个流量组合中均包括非线性差压占比大的支路 4。支路 4 非线性占比大的原因是因为其流量和流速较大,流速大,则层流元件以外部分管路压降增大较快,层流元件两端压降相对减少。

为了进一步说明管路中压降特性,表 5 为工况 2 (500 Pa)层流元件差压和管路总压降数据,其中, ω 为管路非线性压降占比。

$$\omega = \frac{\Delta P_{total} - \Delta P_E}{\Delta P_{total}} \times 100\% \quad (9)$$

式中: ΔP_{total} 为总压降,由于流量测量管路入口压力为大气压,所以 $\Delta P_{total} = 0 - P_b = |P_b|$, ΔP_E 为层流元件两端差压。

表 5 数据显示,4 条并联支路中层流元件差压是不同的,元件越大(毛细管根数越多)差压就越低,层流元件 E4 的差压明显低于其他元件,说明管路中其他部分压降增大,显然此时通过单根毛细管的流量会较理论预期下降。层流元件 E1 的压降 ΔP_{E1} 比较特殊,出现 $\Delta P_{E1} < |P_b|$ 的情况,其原因是由于支路 1 的流速很低,层流元件以外部分管路几乎不存在压降,并且下游取压腔室内毛细管出口实际为射流流动,根据伯努利方程,此处动压较大,静压降低,测得压降增大,压降数值超过汇集处压力绝对值。可以看出,毛细管根数多的流道,层流元件两端的压降占比小,该管路流量低于理论预期流量,不利于实现流量的准确调节。尽管如此,由于各工况下组合流量点相对一致,不影响实际使用。

表 4 流量调节特性实验数据
Table 4 Data of flow regulating test

理论组合流量		实测工况 1 (200 Pa)			实测工况 2 (500 Pa)			实测工况 3 (800 Pa)		
Q/Q_1	$Q'_T/\%$	$Q/$ ($L \cdot \min^{-1}$)	$Q'/\%$	$Q'-Q'_T/\%$	$Q/$ ($L \cdot \min^{-1}$)	$Q'/\%$	$Q'-Q'_T/\%$	$Q/$ ($L \cdot \min^{-1}$)	$Q'/\%$	$Q'-Q'_T/\%$
1	6.3	0.87	6.3	-0.1	1.94	6.6	0.2	3.03	6.8	0.4
2	12.7	1.75	12.5	-0.1	3.86	13.1	0.4	6.09	13.6	0.9
3	19.0	2.56	18.4	-0.6	5.70	19.3	0.3	8.99	20.0	1.1
4	25.3	3.46	24.8	-0.5	7.56	25.7	0.3	11.84	26.4	1.1
5	31.6	4.24	30.4	-1.2	9.34	31.7	0.0	14.64	32.7	1.0
6	38.0	5.42	38.9	0.9	11.81	40.1	2.1	18.51	41.3	3.3
7	44.3	6.19	44.4	0.1	13.58	46.1	1.8	21.30	47.5	3.2
8.8	55.7	7.09	50.9	-4.8	14.89	50.5	-5.2	22.52	50.2	-5.5
9.8	62.0	8.14	58.4	-3.6	17.04	57.8	-4.2	25.71	57.3	-4.7
10.8	68.4	8.72	62.6	-5.8	18.60	63.1	-5.3	28.33	63.2	-5.2
11.8	74.7	9.78	70.2	-4.5	20.79	70.5	-4.2	31.56	70.4	-4.3
12.8	81.0	10.47	75.2	-5.8	22.39	75.9	-5.1	34.17	76.2	-4.8
13.8	87.3	11.58	83.1	-4.2	24.66	83.6	-3.7	37.47	83.6	-3.8
14.8	93.7	12.74	91.4	-2.2	27.08	91.8	-1.8	41.37	92.3	-1.4
15.8	100.0	13.93	100.0	0.0	29.49	100.0	0.0	44.83	100.0	0.0

表 5 (工况 2, 500 Pa) 层流元件差压和管路总压降数据
Table 5 Differential pressure data of laminar flow elements and total pressure drop of each pipe (working condition 2, 500 Pa)

理论组合流量	支路 1		支路 2		支路 3		支路 4		汇集处静压
	Q/Q_1	$\Delta P_{E1}/Pa$	$\omega/\%$	$\Delta P_{E2}/Pa$	$\omega/\%$	$\Delta P_{E3}/Pa$	$\omega/\%$	$\Delta P_{E4}/Pa$	
0	-	-	-	-	-	-	-	-	-489.5
1	478.2	-	-	-	-	-	-	-	-474.1
2	-	-	476.2	1.1	-	-	-	-	-481.6
3	472.6	-	464.5	1.0	-	-	-	-	-469.3
4	-	-	-	-	464.5	5.0	-	-	-488.9
5	476.3	-	-	-	453.3	4.4	-	-	-474.4
6	-	-	498.8	1.2	481.5	4.6	-	-	-504.8
7	495.9	-	486.7	1.2	470.7	4.5	-	-	-492.7
8.8	-	-	-	-	-	-	407.6	14.9	-478.9
9.8	489.5	-	-	-	-	-	413.2	15.0	-485.9
10.8	-	-	471.3	1.7	-	-	403.9	15.7	-479.3
11.8	485.3	-	478.1	0.9	-	-	409.6	15.1	-482.6
12.8	-	-	-	-	459.3	5.2	407.8	15.8	-484.5
13.8	490.6	-	-	-	466.3	4.7	413.9	15.4	-489.2
14.8	-	-	493.5	1.2	476.9	4.5	422.7	15.4	-499.5
15.8	512.3	-	502.7	1.2	484.8	4.7	428.8	15.7	-508.9

3.2 微型风扇性能测试

采用所开发装置对三款微型风扇进行了压力-流量 (P-Q) 性能测试, 并观察在含有被测风扇时组合流量点是否会发生较大变化。风扇规格型号分别为 6005 (离心式, 开口面积为 $5 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$)、2007 (轴流式, 直径 20 mm , 厚度 7 mm)、4010 (轴流式, 直径 40 mm , 厚度 10 mm)。

中工况 3 (与风扇测试实验工况接近) 数据, 可以看到相对流量点变化很小, 说明在此小压头风扇测试中 (层流元件差压在 700 Pa 左右, 被测风扇静压相对很小), 被测风扇对于流量点的影响是很小的。观察表 6 中 3 个风扇对应的 $Q'-Q'_T$ 数据, 可以看出这 3 个不同规格风扇测量中各相对流量点与理论值偏差比较一致, 说明采用这种流量调节方法对于不同风扇都是适用的。

表 6 为风扇测量结果, 对比表 6 中风扇 6005 和表 4

表 6 微型风扇测试数据
Table 6 Testing data of micro fan

理论组合流量		风扇 2007				风扇 4010				风扇 6005			
Q/Q_1	$Q_T^r/\%$	$Q/$ ($L \cdot \min^{-1}$)	$Q^r/\%$	$Q^r-Q_T^r/\%$	P_s/Pa	$Q/$ ($L \cdot \min^{-1}$)	$Q^r/\%$	$Q^r-Q_T^r/\%$	P_s/Pa	$Q/$ ($L \cdot \min^{-1}$)	$Q^r/\%$	$Q^r-Q_T^r/\%$	P_s/Pa
0	0	0.00	0.0	0.0	5.24	0.0	0.0	0.0	41.5	0.00	0.0	0.0	32.0
1	6.3	0.31	6.3	0.0	4.96	2.54	6.7	0.4	39.0	2.81	6.8	0.5	30.7
2	12.7	0.61	12.5	-0.2	4.67	5.03	13.4	0.7	36.3	5.55	13.4	0.8	29.3
3	19.0	0.88	18.0	-1.0	4.41	7.41	19.7	0.7	34.1	8.22	19.9	0.9	27.6
4	25.3	1.19	24.4	-0.9	4.05	9.79	26.0	0.7	32.3	10.82	26.2	0.9	25.9
5	31.6	1.44	29.5	-2.1	3.75	12.11	32.2	0.6	29.3	13.37	32.3	0.7	24.1
6	38.0	1.86	38.1	0.1	3.05	15.20	40.4	2.4	25.7	16.82	40.7	2.7	21.1
7	44.3	2.09	42.8	-1.5	2.74	17.46	46.4	2.1	22.1	19.32	46.7	2.4	18.9
8.8	55.7	2.48	50.7	-5.0	2.28	18.83	50.1	-5.6	20.8	20.36	49.3	-6.4	18.3
9.8	62.0	2.87	58.8	-3.2	1.86	21.50	57.2	-4.8	17.9	23.33	56.4	-5.6	15.7
10.8	68.4	3.06	62.7	-5.7	1.61	23.56	62.6	-5.8	15.1	25.59	61.9	-6.5	13.4
11.8	74.7	3.40	69.6	-5.1	1.19	26.29	69.9	-4.8	9.8	28.63	69.3	-5.4	11.1
12.8	81.0	3.65	74.7	-6.3	1.00	28.41	75.5	-5.5	6.7	31.04	75.1	-5.9	9.2
13.8	87.3	4.02	82.3	-5.0	0.57	31.42	83.5	-3.8	4.4	34.23	82.8	-4.5	6.6
14.8	93.7	4.39	89.8	-3.9	0.32	34.49	91.7	-2.0	1.9	37.82	91.5	-2.2	3.7
15.8	100.0	4.89	100.0	0.0	0.00	37.61	100.0	0.0	0.3	41.33	100.0	0.0	0.5

将风扇测试数据绘制成 P-Q 曲线,如图 4 所示。采用这种流量平衡法,方便地实现了流量点设定和调节,结

合层流流量测量技术可以准确进行微小流量测量,为微型风扇的气动性能测试提供了先进实用的测试手段。

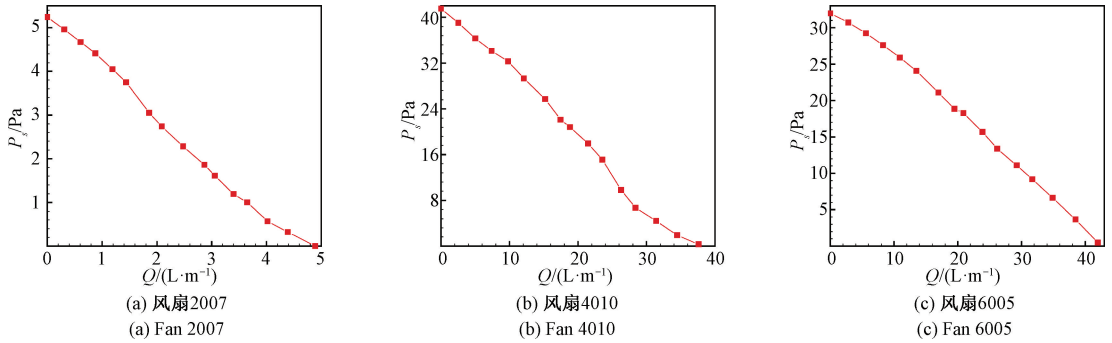


图 4 微型风扇 P-Q 性能曲线
Fig. 4 Miniature fan P-Q performance curves

4 结 论

针对微型风扇 P-Q 性能曲线测试,研究了平衡法流量调节技术,在此基础上开发了流量平衡法微型风扇气动性能测试系统,进行了相关测试和分析,主要结果如下,介绍了流量平衡法微型风扇气动性能测试技术原理,分析了流量平衡法管路系统空气动力特性和流量组合调节特性。由于采用了流量平衡管路设计,在切换不同工作管道时,整个管路系统总体阻抗基本不变,辅助风扇工况不变,因此,可通过开启不同测量支路来组合调节流量,流量调节简单、快速。本文设计了基于层流元件的流量平衡法微型风扇气动性能测试系统,利用音速喷嘴气体流量标准装置进行了流量标定。层流元件流量和差压

之间为线性关系,因此可通过毛细管根数选取来方便地实现不同流量比例的层流元件设计。采用标定单根毛细管流量-差压关系的方法,实现了 4 个不同规格层流元件的标定。本文对流量平衡法微型风扇气动性能测试系统进行了流量调节性能实验研究和实际微型风扇试测。不安装被测风扇情况下流量调节特性实验结果表明,层流元件以外的管路流阻对相对流量有影响,但影响量相对固定,组合流量调节符合预期。微型风扇测试实验中,组合流量调节工作正常,证明了方法的实用性。

参考文献

[1] JU F L, SUN Q R, HOU C L, et al. Test and analysis of air flow rate adaptive performance in a distributed fan ventilation system [J]. Building Services Engineering Research & Technology, 2021, 42(2): 223-236.

- [2] WALSH P A, WALSH E J, GRIMES R. Viscous scaling phenomena in miniature centrifugal flow cooling fans: Theory, Experiments and Correlation [J]. Journal of Electronic Packaging, 2010, 132(2): 021001.
- [3] 谢远成, 欧中红. 电子设备散热技术的发展[J]. 舰船电子工程, 2019, 39(8): 14-18.
XIE Y CH, OU ZH H. Development of heat dissipation technology for electronic equipment[J]. Ship Electronic Engineering, 2019, 39(8): 14-18.
- [4] 尹辉斌, 高学农. 电子器件散热技术现状及进展[J]. 广东化工, 2013, 40(4): 67-68.
YIN H B, GAO X N. Status and progress of electronic cooling technologies[J]. Guangdong Chemical Industry, 2013, 40(4): 67-68.
- [5] Laboratory methods of testing fans for certified aerodynamic performance rating: ANSI /AMCA 210/ASHRAE51-2007[S]. American: ANSI, 2007
- [6] 工业通风机用标准化风道性能试验 GB/T 1236-2017[S]. 北京:中国质检出版社, 2017.
Industrial fan performance testing using standardized airways GB/T 1236-2017 [S]. Beijing: China Quality Inspection Press, 2017.
- [7] 张礼德. 乘用车冷却风扇特征参数性能研究[D]. 长春:吉林大学, 2019.
ZHANG L D. Research on performance of cooling fans characteristic parameters on passenger cars [D]. Changchun: Jilin University, 2019.
- [8] 王福山, 王锡勇, 张照程, 等. 铁路机车散热风扇气动特性仿真与试验验证 [J]. 机械设计, 2020, 37(3): 86-91.
WANG F SH, WANG X Y, ZHANG ZH CH, et al. Simulation and experimental verification of aerodynamic characteristics of the railway locomotive's cooling fans[J]. Mechanical Design, 2020, 37(3): 86-91.
- [9] 豆峰, 谢小芳, 张洪军. 微型散热风扇气动性能测试装置研究[J]. 中国测试, 2019, 45(8): 106-111.
DOU F, XIE X F, ZHANG H J. Research on pneumatic performance test device of micro cooling fan[J]. China Test, 2019, 45(8): 106-111.
- [10] 豆峰. 微型散热风扇气动性能测试技术研究[D]. 杭州:中国计量大学, 2019.
DOU F. Research on the micro cooling fan aerodynamic test technique [D]. Hangzhou: China Jiliang University. 2019.
- [11] WRIGHT J D, COBU T, BERG R F, et al. Calibration of laminar flow meters for process gases [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2012, 25: 8-14.
- [12] 刘灿. 双毛细管测量高温气体粘度的研究[D]. 保定:河北大学, 2014.
LIU C. Study of the dual capillary viscometer in high temperature gas viscosity measurement [D]. Baoding: Hebei University, 2014.
- [13] 徐亚. 气体小流量计量方法研究与标准装置开发[D]. 长沙:中南大学, 2012.
XU Y. Method and standard equipment development of small gas flow rate measurement[D]. Changsha: Central South University 2012.
- [14] 刘臣勇. 气体小流量测试技术研究与应用[D]. 上海:上海交通大学, 2017.
LIU CH Y. Research and application of gas small flow test technology [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2017.
- [15] 王筱庐, 陈玉春, 蒋宇翔, 等. 微小缝隙式层流流量计设计及测量特性研究[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(11): 48-54.
WANG X L, CHEN Y CH, JIANG Y X, et al. Design and measurement characteristics of micro slot laminar flow flowmeter[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(11): 48-54.
- [16] 黄浩钦, 赵鹏, 李国占, 等. 压力位差式层流流量传感技术研究 [J]. 仪器仪表学报, 2020, 41 (7): 72-79.
HUANG H Q, ZHAO P, LI G ZH, et al. Study on the laminar flow sensing technique of pressure potential differential type [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(7): 72-79.
- [17] 王小伟, 黄丽琼, 陈书强. 基于标准表法的高压环道标准装置设计[J]. 工业计量, 2016, 26(6): 37-40.
WANG X W, HUANG L Q, CHEN SH Q. Design of high pressure circuit standard device based on standard table method[J]. Industrial Metrology, 2016, 26(6): 37-40.
- [18] 李方吉, 赵清, 樊建超, 等. 进气道风洞试验分布式流量调节技术与试验验证[J]. 实验流体力学, 2020, 34(4): 74-80.
LI F J, ZHAO Q, FAN J CH, et al. Technology research and test verification of distributed flow regulator for inlet test in wind tunnel [J]. Journal of Experiment in Fluid Mechanics, 2020, 34(4): 74-80.
- [19] 俞志勇, 李青, 王燕杰, 等. 基于 PID 的流量调节阀的设计 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (08): 118-121.
YU Z Y, LI Q, WANG Y J, et al. Design of flow regulation valve based on PID [J]. Computer Measurement & Control, 2016, 24(8): 118-121.
- [20] 闫瑞锋, 徐志鹏. 基于变频风机和流量调节阀的流量

快速节能调节方法研究[J]. 中国计量, 2017(5): 100-102.

YAN R F, XU ZH P. Research on flow fast energy saving regulation method based on variable frequency fan and flow control valve[J]. China Metrology, 2017(5): 100-102.

作者简介



彭衡芾, 2019 年于中国计量大学计量测试工程学院获得学士学位, 现为中国计量大学硕士研究生, 主要研究方向为流量计量技术。

E-mail: 1427009268@qq.com

Peng Hengfu received his B. Sc. degree from China Jiliang University, College of Metrology &

Measurement Engineering in 2019. Now he is a M. Sc. candidate at China Jiliang University. His main research interest includes flow measurement technology.



张洪军(通信作者), 2001 年于香港理工大学获得博士学位, 现任中国计量大学教授, 主要研究方向为流量计量技术、力学计量技术、流体输送技术等。

E-mail: zhanghongjun@cjlu.edu.cn

Zhang Hongjun (Corresponding author) received his PhD degree from the Hong Kong Polytechnic University in 2001. He is now a professor at China Jiliang University. His main research interests include flow measurement, mechanical measurement and fluid delivery technology.