doi:10.3969/j.issn.1005－0329.2025.02.008

变风量系统用智能风阀流量检测模型

黄瑶瑶[1],李灵至[1],蔡　慧[1],蔡文剑[2],尹招琴[3]
（1 中国计量大学 机电工程学院,杭州 310018;2 浙大宁波理工学院 信息科学与工程学院,浙江宁波 315100;
3. 中国计量大学 计量测试与仪器学院,杭州 310018）

摘　要:针对现有智能风阀流量检测模型无法准确描述阀片角度和风流量之间关系的问题,基于伯努利方程分析阀片角度与流量系数之间的函数关系,由于风阀阀片的转动会不可避免地改变管道内的气流分布,阀片角度的改变将影响流量系数,进而在流量检测模型中加入阀片角度补偿,利用回归分析形成一种新的风阀流量检测模型,根据平均皮托管测得的压差和对应的风阀阀片角度即可计算得到风阀流量值。并提出一种参数获取方法,根据风阀的流量范围设定风机频率范围,利用最小二乘法拟合得到参量值,进行模型验证,若流量检测误差小于 10%,则参量设定准确。基于智能风流量校准平台分别对直径为 100,150 mm 的圆形风阀和尺寸为 200 mm×120 mm 的方形风阀共 3 种型号的智能风阀进行试验验证,结果表明,基于新的流量检测模型,3 种不同型号的智能风阀的最大流量检测误差分别是 10%,6.1% 和 6.6%,在阀片角度为 0°～70°的范围内,改变输入风量仍可以实现准确的流量检测,有效解决了现存的流量检测问题,证明了新构建的流量检测模型具有较好的可行性和普适性。流量检测的准确度将直接影响智能风阀的运行效果和流量控制的精确度,新模型的构建为变风量系统的精准控制和性能提升提供了技术支撑。

关键词:变风量系统;智能风阀;流量检测;模型构建;参量获取
中图分类号:TU831　　**文献标志码:**A

A smart damper air flow measurement model for the variable air volume system

HUANG Yaoyao[1], LI Lingzhi[1], CAI Hui[1], CAI Wenjian[2], YIN Zhaoqin[3]
（1.College of Mechanical and Electrical Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China;
2.College of Information Science and Engineering, NingboTech University, Ningbo 315100, China;
3.College of Metrology Measurement and Instrument, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China）

Abstract: In response to the problem that existing smart damper air flow measurement models cannot accurately describe the relationship between damper angle and air flow. Based on the Bernoulli equation to analyze the functional relationship between damper angle and flow coefficient. The rotation of the damper blade inevitably changes the airflow distribution inside the pipeline. The change in damper angle will affect the flow coefficient. The damper angle compensation is added to the flow measurement model. A new air flow measurement model is built using regression analysis. The flow value can be calculated based on the pressure difference measured by the average pitot tube and the corresponding damper angle. This paper proposes a parameter acquisition method, which sets the frequency range of the fan based on the flow range of the damper, fits the parameter values using the least squares method, and verifies the model. If the flow measurement error is less than 10%, the parameter setting is accurate. Experimental verification was conducted on circular dampers with diameters of 100, 150 mm, as well as square dampers with dimensions of 200 mm × 120 mm, based on the smart air flow calibration platform. The results indicate that based on the new flow measurement model, the maximum flow measurement errors of the three different models of dampers are 10%, 6.1%, and 6.6%. Accurate flow measurement can still be achieved by changing the input air volume within the range of 0°～70° valve angle, effectively solving the existing problem of flow measurement. This proves the feasibility and universality of the new air flow measurement model. The accuracy of flow measurement will directly affect the operation effect of smart dampers and the precision of flow control. The building of the new model provides technical support for precise control and performance improvement of variable air volume systems.

Key words: VAV system; smart damper; flow measurement; model building; parameter acquisition

收稿日期: 2024－05－11　**修回日期:** 2024－12－12
基金项目: 国家自然科学基金项目（11972335）;浙江省教育厅一般科研项目（Y202353705）

0 引言

空调系统主要分为变风量系统和定风量系统。定风量系统操作简单，但高能耗，因此，具有节能降耗[1-3]、提高室内空气质量[4]等优势的变风量系统成为了发展趋势。风阀是变风量系统中最关键的设备之一，通过它来调节送风量。过度通风会造成能源浪费[5]，而通风量不足会导致室内空气品质下降[6]。显然，风阀的控制效果将影响系统能耗和室内舒适度，而精准控制的前提是实现准确的流量检测，因此，构建一个准确的流量检测模型具有重要的研究意义。

风速传感器作为风阀的关键部位之一，其类型与性能将直接影响系统风量的检测和控制质量[7]。目前，风阀大部分采用皮托管式风速传感器，其结构简单，使用方便。ZHANG 等[8]优化了平均皮托管的形状，提高了计量特性。VINOD 等[9]基于平均皮托管采用回归分析的方式预测了流动系数。MU 等[10]研究了一种新型蝶阀的开启位置、压差和流量三者之间的关系。CUI 等[11]引入了一个压力系数，通过回归分析修正压力系数，减小了检测误差。ZHANG 等[12]通过回归分析建立了风阀全开时的流量检测模型。可见，回归分析适用于流量检测模型的建立且效果较好。目前，仍未建立一个完善的流量检测模型，随着人们对风阀性能的要求越来越高，实现流量准确检测的诉求也变得更为迫切，急需构建一个准确的风阀流量检测模型。准确检测流量可以确保设备的高效稳定运行，为变风量系统的风量控制提供模型支撑。

为了构建准确的风阀流量检测模型，本文利用伯努利方程，在流量公式中引入与流量系数相关的新变量，形成新的风阀流量检测模型。并且对新的流量检测模型进行试验验证，证明了该模型在不同风阀中的适用性。

1 风阀流量检测存在的问题

目前，风阀流量检测方法主要针对阀片角度为 0°的情况[12]，模型如下式所示：

$$Q = 3\ 600 \times K_p \left(D_p - D_{pb} \right)^{1/2} \tag{1}$$

式中，Q 为风阀流量，m^3/h；K_p 为皮托管系数；D_p 为压差，Pa；D_{pb} 为压力测量偏差（包含压差零漂），Pa。

根据式（1）计算不同阀片角度时的流量值，其与实际流量值之间的相对误差计算式如下：

$$\eta = \frac{Q_f - Q}{Q} \times 100\% \tag{2}$$

式中，Q_f 为实际流量值，m^3/h。

图 1 示出直径 150 mm 的圆形风阀流量和实际流量对比。当阀片角度为 0°时，误差在 5% 以内，改变阀片角度，误差增大，最大甚至达到 30%，可见式（1）模型只适用于阀片角度较小的情况。实际中，风阀阀片往往不会固定在 0°，因此，如果将阀片角度考虑到流量模型中，将有效提高检测的准确度。

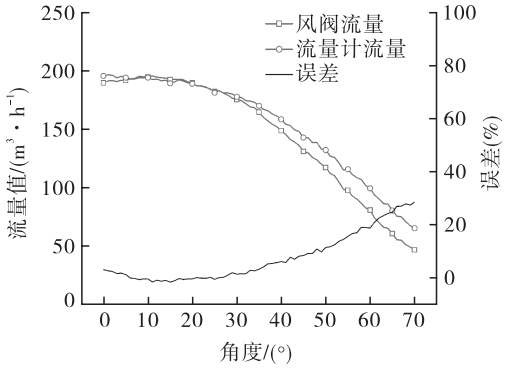


图 1 风阀流量和实际流量对比

Fig.1 Comparisons between damper flow and actual flow

2 计及阀片角度的流量检测模型

通过测量流速计算风流量，公式如下：

$$Q = sv \tag{3}$$

式中，s 为风阀的横截面积，m^2；v 为气流速率，m/s。

采用平均皮托管对气流速率进行测量[13]，通过两根软管将其与压差传感器连接，检测迎风口的总压和侧面口的静压，并在输出端产生平均压差。基于伯努利方程，当气流流经风阀时，由于风阀阀门的阻力，气流的速度会增加，从而导致风阀的压差改变，利用测得的平均压差可以计算出气流速率，其公式如下：

$$v = 2D_p / \rho \tag{4}$$

式中，ρ 为流体密度，kg/m^3。

由于风阀的表面粗糙度等因素会影响气流的流动特性，因此引入了流量系数[9]，使计算模型更好地适应实际工程中的复杂情况，式（4）修改为：

$$v = C\left(2D_p / \rho\right)^{1/2} \tag{5}$$

式中，C 为流量系数。

根据式(3)和式(5)可得流量的计算公式为:

$$Q = sC\left(2D_p / \rho\right)^{1/2} \tag{6}$$

由于流体密度和风阀横截面积在相同环境下保持不变,但由图 1 可知,风阀流量的检测误差会随阀片角度的增大而增大,由于不同的阀门开度会对空气流动产生不同的阻力和扰动,影响了风流场分布,导致流量系数改变,进而认为流量系数与阀片角度之间存在一定的函数关系。

根据式(6)可得:

$$sC\sqrt{\frac{2}{\rho}} = \frac{Q}{\sqrt{D_p}} \tag{7}$$

引入一个新变量 u,定义 u 为:

$$u = sC\left(2 / \rho\right)^{1/2} \tag{8}$$

变量 u 也是一个关于阀片角度的变量,可用下式表达:

$$u = f\left(\theta\right) \tag{9}$$

式中,θ为阀片角度,(°)。

由于压差传感器往往存在零漂,则流量计算公式为:

$$Q = u\left(D_p - D_{p0}\right)^{1/2} \tag{10}$$

式中,D_{p0} 为压差传感器零漂,Pa。

只要获取变量 u 的计算公式,即可建立风阀的流量检测模型。

3 试验验证

3.1 试验平台

基于智能风流量校准平台进行试验,如图 2 所示。设备由空腔和出风口、电控箱、主控制器、风机和风速传感器组成。

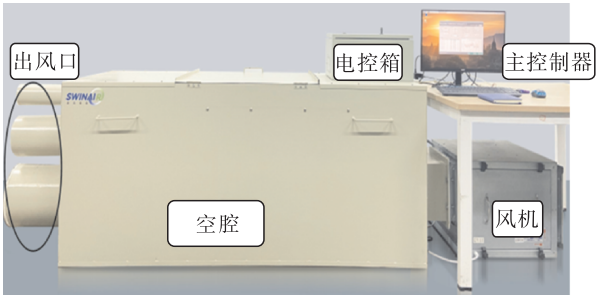


图 2 智能风流量校准平台

Fig.2 Smart air flow calibration platform

设备的内部结构如图 3 所示,设备由 3 个整流器分为 3 个腔室。进风口连接风机,风阀放置在中室的支架上,移动进风口整流器使其紧贴风阀,风阀另一侧紧贴中间整流器。中间整流器处放置的亚克力板上有与试验风阀直径相同的孔,设备共有 3 个不同直径的出风口,根据风阀流量范围选择出风口,将另外两个出风口堵上。出风口安装风速传感器,由于管道截面的流速分布是不平均的,流速从中心向边缘递减[14],试验时将风速传感器放至管道直径的 1/3 处,既避免了管道壁部分的风速不稳定和壁层效应的影响,又保证了流速接近平均值,同时试验前通过风量罩对风速传感器进行校准,确保了测量的准确性,将其检测值作为标准流量值。

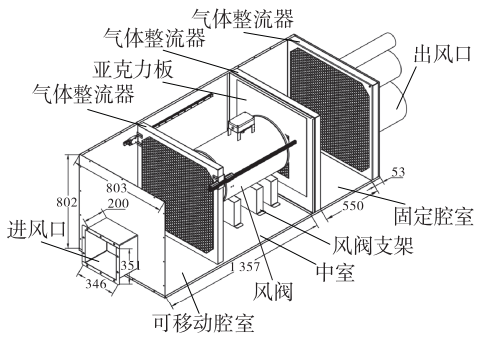
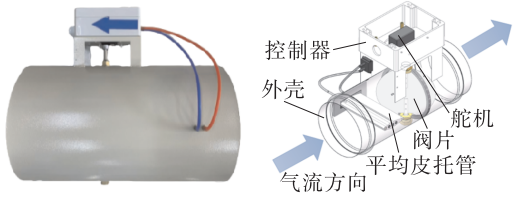


图 3 智能风流量校准平台内部结构

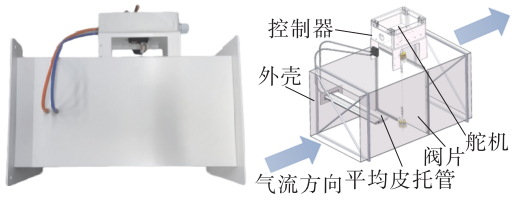
Fig.3 Internal structure of the smart air flow calibration platform

3.2 智能风阀介绍

研究对象是一种智能风阀,分为圆形和矩形两种,由平均皮托管、压差传感器、控制器和阀片等组成,如图 4 所示。



(a)圆形智能风阀



(b)矩形智能风阀

图 4 智能风阀

Fig.4 Smart damper

图 5 示出直径为 100 mm 的圆形风阀俯视图。定义θ为阀片角度,当θ=0°时,风阀全开;当θ=90°时,风阀全关。

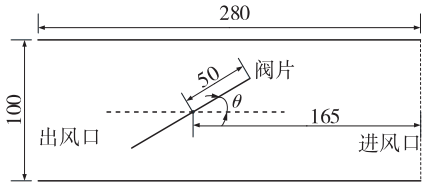


图 5　直径为 100 mm 的圆形风阀俯视图

Fig.5　Vertical view of circular damper with a diameter of 100 mm

3.3　试验步骤

当输入风量过大时，管道内的压强会急剧升高，过小则无法维持足够的通风，因此通风系统存在最小通风量[15-22]。当阀片角度大于 70°时，风阀流量几乎都低于最小流量，且出于节能的理念，应尽可能减小阀片角度，因此只研究阀片角度为 0°～70°的情况。

基于模型推导和试验平台设置，试验步骤设定如下。

步骤 1：将风机频率设置为 0 Hz，即风机不转动，读取此时压差传感器的示数为零漂，根据风阀的流量范围确定频率范围。

步骤 2：设置频率为最小频率，阀片角度为 0°，每隔 1 s 记录流量和压差，共采集 30 组，取平均值。

步骤 3：转动阀片，每次转动角度为 1°，记录数据，直到阀片角度为 70°。

步骤 4：增大频率，每次增加 5 Hz，重复步骤 2 和 3，直到频率为最大频率。

步骤 5：整理分析数据。

3.4　参量获取方法

由于变量 u 一定存在参数，因此需要设计一种参量获取的方法，以确定不同风阀的流量计算公式。

首先，设置频率范围，并测量压差传感器的零漂。

其次，调整频率为中间频率，中间频率的计算公式如下：

$$f_{\text{middle}}=\frac{1}{2}\left(f_{\max}+f_{\min}\right) \tag{11}$$

式中，$f_{\max}$，$f_{\min}$ 分别为设置频率的最大值和最小值，Hz。

将阀片角度从 0°转动到 70°，得到变量 u 的变化曲线并对其进行拟合，获取参量的值。

若流量检测误差都小于 10%，那么参量设置正确，反之则重新调整参量。

减小频率，重复以上步骤，得到新的参量值。与上一个参量求平均值，设为新的参量，计算检测误差是否都在 10% 以内。

参量获取流程如图 6 所示。

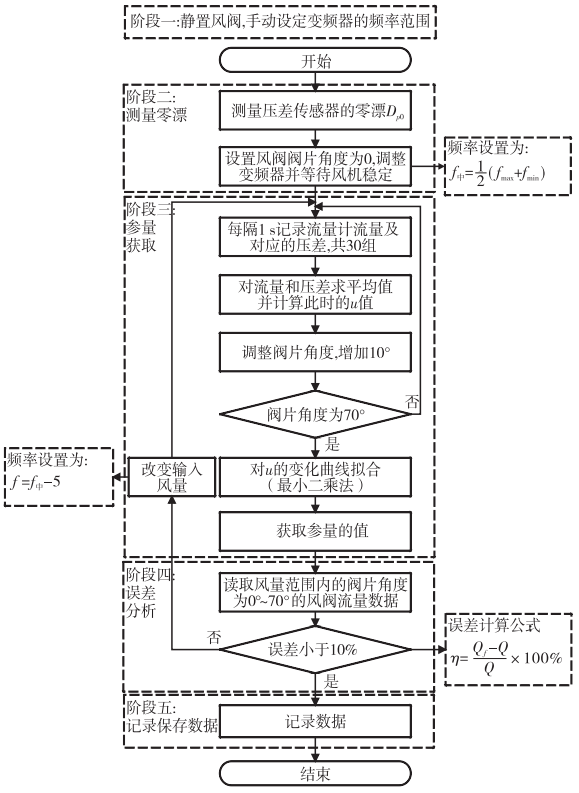


图 6　参量获取流程图

Fig.6　Parameter acquisition flowchart

4　试验结果与讨论

4.1　试验结果

根据式（10），u 的计算公式也可表示为：

$$u=Q/\left(D_p-D_{p0}\right)^{1/2} \tag{12}$$

试验采用直径为 150 mm 的圆形智能风阀，压差传感器的零漂为 0.01 Pa，变量 u 随阀片角度变化曲线如图 7 所示，证明了阀片角度会影响流量系数。

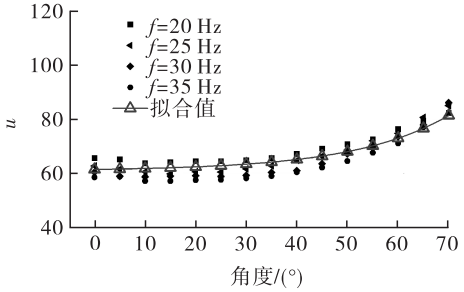


图 7　变量 u 的拟合曲线图（d=150 mm）

Fig.7　The variation curve of u (d=150 mm)

采用指数函数对变量 u 的变化曲线进行拟合，如图 7 所示。拟合公式为：

$$u=0.5e^{\theta/18.9}+61 \tag{13}$$

根据式(10)得到流量检测公式如下:

$$Q=\left(0.5e^{\theta/18.9}+61\right)\left(D_p-0.01\right)^{1/2} \tag{14}$$

采用决定系数 R^2 对曲线拟合效果进行分析,其计算公式为:

$$R^2=\frac{SSR}{SST}=1-\frac{SSE}{SST} \tag{15}$$

式中,SSR 为回归平方和;SSE 为残差平方和;SST 为总离差平方和。

此时决定系数 R^2 为 0.97,拟合效果良好。构建流量检测模型为:

$$Q=\left(Ae^{\theta/B}+F\right)\left(D_p-D_{p0}\right)^{1/2} \tag{16}$$

式中,A,B,F 为待获取参量。

新模型计算流量与实际流量对比如图 8 所示,误差都在 6.6% 以内。

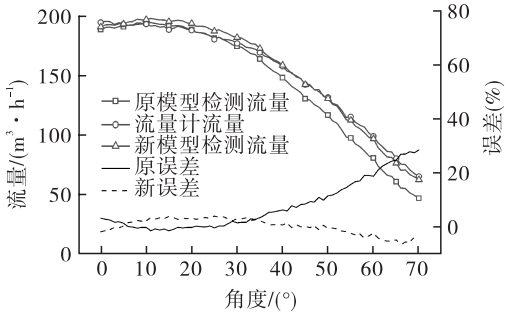


图 8 新模型检测流量与实际流量对比

Fig.8 Comparisons between new damper flow and actual flow

实际通风系统中一般通过改变风机频率或者阀片角度来调整室内输入风量,因此改变风机频率进行试验,根据式(14)计算风阀流量,并绘制其与实际流量之间的相对误差曲线,如图 9 所示,所有误差都在 10% 以内,新的流量检测模型适用于不同的风机频率,具有较好的可行性。

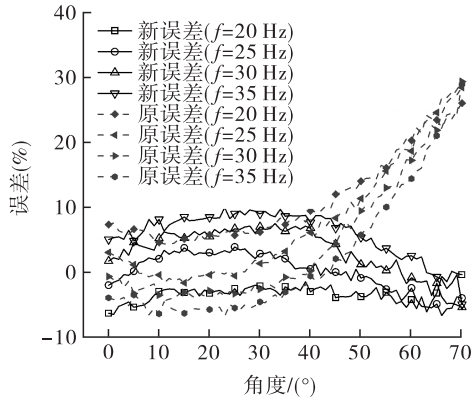


图 9 不同输入风量下的风阀流量检测误差曲线

Fig.9 Measurement error of damper flow under different air flow

4.2 不同型号风阀模型验证

为验证模型的适用性,对直径 100 mm 的圆形风阀进行试验验证,该压差传感器零漂为 0.1 Pa,变量 u 随阀片角度变化的曲线如图 10 所示,采用指数函数对其进行拟合,拟合公式如下:

$$u=0.2e^{\theta/19.1}+30 \tag{17}$$

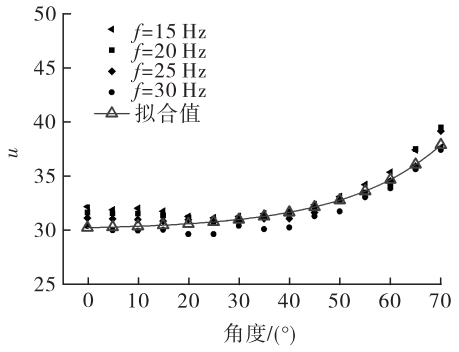


图 10 变量 u 的拟合曲线图(d=100 mm)

Fig.10 The variation curve of u (d=100 mm)

决定系数 R^2 为 0.96,流量检测公式如下:

$$Q=\left(0.2e^{\theta/19.1}+30\right)\left(D_p-0.1\right)^{1/2} \tag{18}$$

检测误差曲线如图 11 所示,所有误差都在 6.1% 以内,证明了新流量检测模型也适用于该型号的风阀。

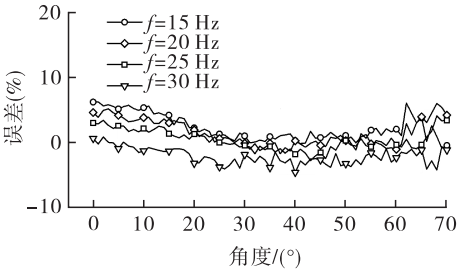


图 11 不同输入风量下的风阀流量检测误差曲线

Fig.11 Measurement error of damper flow under different air flow

进一步,对尺寸为 200 mm×120 mm 的方形风阀进行建模,拟合曲线如图 12 所示,拟合公式如式(19)所示,压差传感器零漂为 0 Pa。

$$u=0.5e^{\theta/19.2}+95.2 \tag{19}$$

该风阀的流量检测模型为:

$$Q=\left(0.5e^{\theta/19.2}+95.2\right)\sqrt{D_p} \tag{20}$$

决定系数 R^2 为 0.96,风阀流量和实际流量之间的相对误差如图 13 所示,检测误差均在 6.6% 以内。

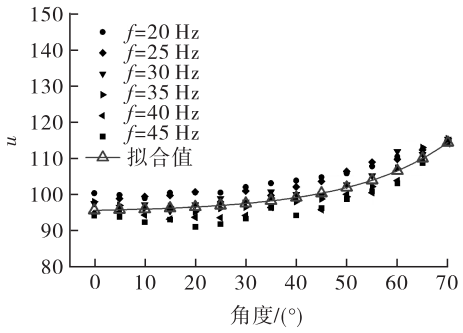


图 12　变量 u 的拟合曲线图（200 mm×120 mm）

Fig.12　The variation curve of u（200 mm×120 mm）

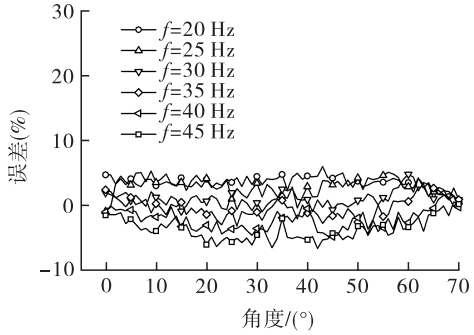


图 13　不同输入风量下的风阀流量检测误差曲线

Fig.13　Measurement error of damper flow under different air flow

新流量检测模型加入阀片角度补偿，很好地提高了流量检测的准确度，不同阀片角度下的误差保持在 10% 以内，具有可行性和普适性。

5　结论

（1）为了进一步提高流量检测的准确性，基于分析流量系数与阀片角度之间的函数关系，进而构建了新的风阀流量检测模型，在阀片角度为 0°～70°的范围内，改变输入风量仍能保证风阀流量与实际流量的相对误差在 10% 以内，有效提高了风阀流量检测的准确度。

（2）基于智能风流量校准平台对新的流量检测模型进行试验验证，直径为 100，150 mm 的圆形风阀和尺寸为 200 mm×120 mm 的方形风阀的最大流量检测误差分别为 10%，6.1% 和 6.6%，证明了该模型可以适用于不同型号的智能风阀，具有较好的适用性。

（3）新构建的流量检测模型是研究智能风阀流量控制的基础，未来将对更多型号的智能风阀进行研究，通过物理场推导和仿真，进一步对新模型的物理机理进行分析。

参考文献：

[1] LIU C，SU Z G，ZHANG X Y.A data-driven evidential regression model for building hourly energy consumption prediction with feature selection and parameters learning[J].Journal of Building Engineering，2023，80：107956.

[2] 陈剑波，郭春璐，陈付齐 . 夏热冬冷地区户式辐射空调住宅建筑能耗分析[J]. 流体机械，2020，48（4）：68－71.
CHEN J B，GUO C L，CHEN F Q.Energy consumption analysis of residential building with household radian air conditioning system located in hot summer and cold winter region[J].Fluid Machinery，2020，48（4）：68－71.

[3] 陈文华，黄伟稀，梁赟 . 船舶空调系统及设备节能运行技术研究[J]. 流体机械，2021，49（1）：97－104.
CHEN W H，HUANG W X，LIANG Y.Study on energy saving technology of shipboard air-conditioning system and equipment[J].Fluid Machinery，2021，49（1）：97－104.

[4] 孟庆龙，王文强，葛俊伶 . 变风量空调系统控制策略仿真与实验研究[J]. 建筑科学，2020，36（2）：44－50.
MENG Q L，WANG W Q，GE J L.Simulation and experimental research on control strategies for the VAV air-conditioning system[J].Building Science，2020，36（2）：44－50.

[5] CHEN C M，LIU F，LIU S M，et al.A novel method for designing general and local ventilation systems for a manufacturing plant[J].Energy and Buildings，2023：113612.

[6] PENG Z，CHENG Y F，JIANG M Z，et al.Potential combination strategies to establish a low-energy ventilation system for school buildings in the cold climate zone of China/a demand-oriented review[J]. Journal of Building Engineering，2023，76：107065.

[7] YEO U H，LEE S Y，PARK S J，et al.Determination of the optimal location and the number of sensors for efficient heating，ventilation，and air conditioning system operation in a mechanically ventilated pig house[J].Biosystems Engineering，2023，229：1－17.

[8] ZHANG J L，LI W，LIANG R B，et al.Numerical and experimental research on pentagonal cross-section of the averaging pitot tube[J].Measurement Science and Technology，2017，28（7）：075003.

[9] VINOD V，CHANDRAN T，PADMAKUMAR G，et al. Calibration of an averaging pitot tube by numerical

simulations[J].Flow Measurement & Instrumentation, 2012,24:26 – 28.

[10] MU Y D,LIU M S,MA Z X.Research on the measuring characteristics of a new design butterfly valve flowmeter [J].Flow Measurement and Instrumentation,2019,70: 101651.

[11] CUI C,CAI W J,CHEN H R.Airflow measurements using averaging pitot tube under restricted conditions [J].Building and Environment,2018,139:17 – 26.

[12] ZHANG H,CAI H,ZHANG X,et al.A universal calibration device for an air flow sensor of the VAV terminal unit[J].Sensors,2022,22(15):5797.

[13] 魏明明.皮托管测量风速时GUM评定不确定度的偏差修正[J].仪器仪表学报,2019,40(6): 146 – 154.
WEI M M. Deviation correction of GUM evaluation uncertainty in the wind speed measurement by pitot tube[J].Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019,40(6):146 – 154.

[14] 蔡勤,刘敦利,胡鹤鸣.充分发展状态下管道流速分布研究[J].计量学报,2020,41(12A):37 – 40.
CAI Q,LIU D L,HU H M.Study on velocity distribution of pipeline under fully developed condition[J].Acta Metrologica Sinica,2020,41(12A):37 – 40.

[15] 张锡德,王开发,戴景义,等.乙烯裂解气压缩机高压缸干气密封泄漏原因分析及解决措施[J].流体机械,2023,51(9):79 – 85.
ZHANG X D,WANG K F,DAI J Y,et al.Cause analysis of dry gas seal leakage on high pressure cylinder of ethylene cracking compressor and solutions [J].Fluid Machinery,2023,51(9):79 – 85.

[16] 陈金鑫,丁雪兴,陆俊杰,等.基于CNN-VIT模型的非接触式机械密封多源故障状态识别方法[J].流体机械,2024,52(9):98 – 107.
CHEN J X,DING X X,LU J J,et al.Multi-source fault state recognition of non-contact mechanical seal based on CNN-VIT model[J].Fluid Machinery,2024, 52(9):98 – 107.

[17] 白兰坤,张琴,邱丹.离心式压缩机干气密封控制系统的优化设计及应用[J].液压气动与密封,2024, 44(11):29 – 34.
BAI L K,ZHANG Q,QIU D.Optimal design and application of dry gas seal control system for centrifugal compressor[J].Hydraulics Pneumatics & Seals,2024, 44(11):29 – 34.

[18] 曹伟烨,杨冬旭,李祥,等.基于SH波的埋地管道泄漏监测方法[J].压力容器,2023,40(3):16 – 20.
CAO W Y,YANG D X,LI X,et al.Leakage monitoring method of buried pipeline based on SH wave[J]. Pressure Vessel Technology,2023,40(3):16 – 20.

[19] 朱国栋.压力容器筒体在计及轴向力或弯矩作用下开孔补强方法[J].压力容器,2023,40(2): 35 – 45.
ZHU G D.Design methods for opening reinforcement at cylinders considering axial force or bending moment[J]. Pressure Vessel Technology,2023,40(2):35 – 45.

[20] 丛琳,张勇.基于多目标回归的空调负荷预测方法[J].江苏大学学报(自然科学版),2024,45(4): 470 – 475.
CONG L,ZHANG Y.Forecasting method of air conditioning load based on multi-objective regression [J].Journal of Jiangsu University(Natural Science Eidtion),2024,45(4):470 – 475.

[21] 葛凤华,蔡鸿志,张源.基于TRNSYS的主动式建筑相变蓄冷空调系统模拟[J].江苏大学学报(自然科学版),2024,45(3):330 – 336
GE F H,CAI H Z,ZHANGY.Simulation of phase change cold storage air conditioning system for active building based on TRNSYS[J].Journal of Jiangsu University(Natural Science Eidtion),2024,45(3): 330 – 336.

[22] ANAND P,SEKHAR C,CHEONG D,et al. Occupancy-based zone-level VAV system control implications on thermal comfort,ventilation,indoor air quality and building energy efficiency[J].Energy and Buildings,2019,204:109473.

作者简介:黄瑶瑶(2000),女,硕士研究生,主要从事通风系统风平衡研究,E – mail:1800102217@cjlu. edu.cn。

通信作者:蔡慧(1980),男,博士,教授,主要从事空调系统的研究,通信地址:310018 浙江省杭州市钱塘区学源街258号中国计量大学机电工程学院,E – mail:caihui@cjlu.edu.cn。

本文引用格式:
黄瑶瑶,李灵至,蔡慧,等.变风量系统用智能风阀流量检测模型[J].流体机械,2025,53(2):58 – 64.
HUANG Y Y,LI L Z,CAI H,et al.A smart damper air flow measurement model for the variable air volume system[J].Fluid Machinery,2024, 53(2):58 – 64.