

文丘里效应测量管在变风量蝶阀中的应用研究

夏正松

上海交通大学附属中学，上海，200439；

摘要：针对变风量（VAV）系统在建筑节能中的重要作用及传统毕托管测量技术的局限性，本研究提出了一种集成文丘里效应测量管的变风量蝶阀设计方案。文章阐述了该VAV蝶阀的工作原理，并完成了结构设计。利用现有高精度测试平台进行实验验证。结果表明：在该测试范围内，该VAV蝶阀的测量精度达到 $\pm 5\% FS$ ，风量测量最大偏差仅为4.61%，且响应迅速。实际应用证明，该设计能有效优化室内环境，并降低风机运行能耗。此集成式VAV蝶阀设计提升了系统控制精度，兼具低压损、高响应速度和结构紧凑等优势，为建筑通风节能提供了高效解决方案。

关键词：文丘里效应测量管；变风量蝶阀；建筑节能

DOI：10.69979/3041-0673.25.12.018

引言

在全球倡导节能减排的大背景下，建筑节能成为关键领域。变风量（VAV）系统作为建筑通风空调领域的重要技术，在建筑节能方面发挥着至关重要的作用。传统的定风量空调系统，无论室内实际需求如何，都保持恒定的送风量，这导致了大量的能源浪费。而VAV系统能够根据室内负荷的变化实时调节送风量，有效降低空调系统与风机的运行能耗，从而实现显著的节能效果，这对于缓解能源紧张、降低建筑运营成本具有重要意义。

风量测量与控制精度是影响VAV系统能效的核心因素。精确的风量测量能够为系统提供准确的运行数据，使控制策略得以精准实施。当风量测量存在较大误差时，系统可能无法根据实际需求调节送风量，导致室内温度、湿度等环境参数不稳定，不仅降低了室内舒适度，还会造成能源的浪费。文丘里管结构简单，无活动部件，抗污染能力强，能够适应VAV系统复杂的运行环境，为解决传统测量技术的局限性提供了新的思路。因此，研究文丘里效应测量管在变风量蝶阀中的应用，对于提升VAV系统的控制精度和节能效果具有重要的现实意义。

本研究旨在实现三个核心目标：首先，设计结构合理的文丘里效应测量管，确保其风量测量准确性并有效放大测量信号；其次，将文丘里效应测量管、蝶阀阀板及执行机构高度集成，开发出一套高效、紧凑的VAV蝶阀系统；最终，通过严谨实验验证该集成系统在测量精度、响应速度等关键性能上相较于传统方法的显著优势。

研究的创新性主要体现在两方面：其一，创造性

地将文丘里效应测量管集成于VAV蝶阀内部，形成一体化结构，这不仅简化了系统布局，更显著提升了测量与阀门控制的效率。其二，系统性地测试了集成蝶阀在不同工况下的精度指标，为该项技术在实际工程中的推广应用奠定了坚实可靠的基础与支撑。

然而，目前常用的传统风量测量技术存在诸多局限性。以皮托管为例，它基于测量流体的全压和静压来推算风速或风量，但其测量精度易受流场干扰的影响。在VAV系统复杂的气流环境中，管道内的气流可能存在湍流、漩涡等不稳定现象，这会使皮托管测量的动压值产生偏差，进而导致风量测量不准确。热式风速仪虽然响应速度较快，但在VAV系统的实际应用中面临着严重的问题。由于VAV系统中的空气可能含有灰尘、杂质等污染物，热式风速仪的传感器容易积灰，这会改变传感器的热交换特性，导致测量结果漂移。而且，部分热式风速仪对腐蚀性气体较为敏感，在一些特殊环境中无法正常工作。

近年来，文丘里效应测量技术在风量测量领域受到了广泛关注。研究表明，文丘里效应测量管的高稳定性与高精度成为研究的热点之一。学者们通过数值模拟和实验研究，深入分析了不同结构参数的文丘里管喉部动压信号的放大效果。研究发现，动压放大器的二次收缩结构能够有效放大喉部动压信号，其放大倍数与收缩比、管道形状等因素密切相关。文丘里效应测量管的动压放大器作用对测量与控制精度的提升机制主要体现在两个方面。一方面，在微小流量情况下，传统的测量传感器难以准确测量。而动压放大器能够将微弱的压差进行放大，

增强微小流量下的压差分辨率，使测量更加准确。另一方面，VAV 系统中的气流存在湍流现象，干扰测量精度。文丘里测量管的特殊结构能够有效抑制干扰，提高测量稳定性，从而提升整个测量与控制系统的精度。

1 文丘里效应及动压放大器原理分析

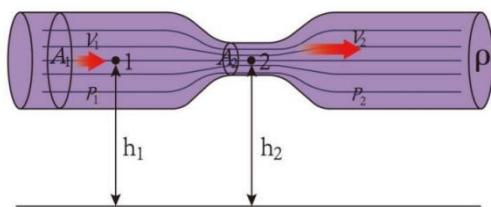


图 1 文丘里效应

在不可压缩、无黏性流体的稳态流动中，流体沿流线的总机械能守恒，见图 1，其表达式为：

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g h_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g h_2$$

式中：P：流体静压（Pa）； ρ ：流体密度（kg/m³）；v：流速（m/s）；g：重力加速度（m/s²）；h：位置高度（m）。在文丘里管中，当管道截面积从入口段（A₁）收缩至喉部（A₂）时，流速增加（v₂ > v₁），导致静压下降（P₂ < P₁）。

连续性方程体现了质量守恒定律，即单位时间内流经不同截面的流体质量相等：

$$A_1 v_1 = A_2 v_2$$

结合伯努利方程，以及等高流体即h₁=h₂，推导出体积流量公式：

$$Q = A_2 \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho[1 - (A_2/A_1)^2]}}$$

通过优化文丘里管的收缩比（A₂/A₁），可实现高灵敏度与低压损的平衡。从该公式可以看出，体积流量Q与文丘里管入口段和喉部的静压差（P₁-P₂）、流体密度以及喉部截面积A₂和入口段截面积A₁的比值有关。在实际应用中，可以通过优化文丘里管的收缩比 $\frac{A_2}{A_1}$ ，在保证测量精度的前提下，实现高灵敏度与低压损的平衡。例如，当收缩比选择适当时，在较小的流量变化下就能产生较大的压差信号，便于测量；同时，合理的收缩比还能降低文丘里管对气流的阻力，减少能量损失。

文丘里管的渐缩渐扩段对流动稳定性有着重要影响。渐缩段使流体加速，将静压转化为动压；渐扩段则使流体减速，动压又逐渐转化为静压。在这个过程中，若渐缩渐扩段的设计不合理，会导致气流在管内出现分离、漩涡等不稳定现象，影响测量精度。例如，渐缩段的收缩角度过大，会使气流在收缩过程中过于剧烈，容易产生湍流；渐扩段的扩张角度过大，则可能导致气流无法顺利附着在管壁上，出现流动分离现象。因此，在设计文丘里管时，需要通过数值模拟或实验研究，确定合适的渐缩渐扩段角度，以保证气流在管内的稳定流动。

动压放大器的设计基于二次收缩结构的原理。在文丘里管喉部之后，增加一个二次收缩段，当流体流经该二次收缩段时，流速进一步增加，动压也随之增大。根据伯努利方程，流速的增加会导致静压进一步下降，从而使喉部与二次收缩段出口之间的压差增大。通过合理设计二次收缩段的结构参数，如收缩比、长度等，可以实现对喉部动压信号的有效放大。

2 基于文丘里效应测量管的变风量蝶阀设计

基于文丘里效应测量管的变风量蝶阀采用集成化设计理念，将文丘里测量段、蝶阀阀板及执行机构有机结合，见图 2。这种集成设计不仅减少了系统的部件数量，降低了安装复杂度，还提高了系统的整体性能。文丘里测量段位于管道的前端，用于测量风量，对测量信号进行放大；执行机构则安装在管道外侧，通过控制蝶阀阀板的开度来调节风量。

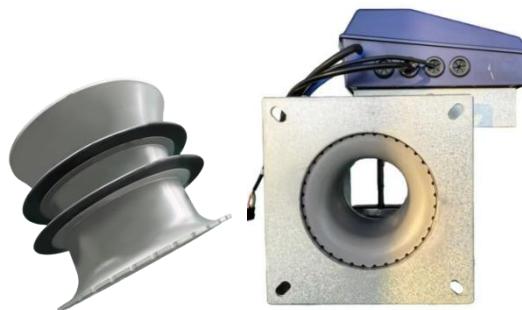


图 2 文丘里测量管与 VAV 蝶阀组成图

风量测量原理： $P_{\text{动压}} = P_{\text{全压}} - P_{\text{静压}} = K \cdot \frac{1}{2} \rho v^2$ ，由此可得流速 $v = \sqrt{\frac{2P_{\text{动压}}}{\rho}}$ ，再根据连续性方程 $Q = Av$ （其中 A 为管道截面积），可以推导出流量公式 $Q = K' A \sqrt{\frac{2(P_{\text{全压}} - P_{\text{静压}})}{\rho}}$ ，在实际测量中，通过测量全压和静压，利用该公式即可计算出风量。

文丘里测量段的设计需要考虑多个因素，如收缩比、渐缩渐扩段的形状和长度等。根据前面所述的原理，选择合适的收缩比以平衡测量精度和压力损失。渐缩段和渐扩段的形状采用流线型设计，以减少气流的阻力和流

动分离现象。同时，文丘里测量段的材料选择也很重要，需要具备良好的耐腐蚀性和机械强度，以适应 VAV 系统的工作环境。

动压放大器的设计重点在于二次收缩结构的参数优化。通过数值模拟和实验研究，确定二次收缩段的收缩比、长度和管径等参数，这样的结构能够在保证气流稳定的前提下，实现对喉部动压信号的有效放大，提高测量精度。蝶阀执行机构是控制蝶阀阀板开度的关键部件。弧形蝶板的气动优化设计对于提高蝶阀的调节性能至关重要。通过 CFD（计算流体力学）模拟分析蝶板在不同开度下的气流流动特性，优化蝶板的形状和轮廓，减少气流阻力，提高调节精度。例如，将蝶板的边缘设计成流线型，能够有效降低气流在蝶板边缘的分离现象，提高蝶阀的流量系数。

执行机构应具备足够的扭矩和响应速度，以快速准确地驱动蝶阀阀板动作。PID 控制器则用于调节执行机构的转速和位置，实现对蝶阀阀板开度的精确控制。根据实验测试和理论计算，选择合适的 PID 参数，使系统在不同工况下都能稳定运行，并且具有良好的动态响应性能。在控制过程中，还需要考虑系统的动态响应特性和抗干扰能力。例如，当系统受到外界干扰（如管道压力波动等）时，PID 控制器能够根据偏差的变化及时调整控制信号，使系统尽快恢复稳定。

3 实验验证与性能分析

测试装置原理如图 3 所示，本试验装置为负压装置，

参照 ANSI/ASHRAE Standard 130-2016^[3]，所配置仪器仪表满足 ASHRAE Standard 41.3-2022 和 GB/T 2624—2006 等标准。经华东国家计量测试中心计量，实验装置在 40~750 Pa 范围内（±0.2%FS 精度）的风阀阻力测试及 70~6000 m³/h 范围内的流量测试，可达±2% FS 的测量精度。

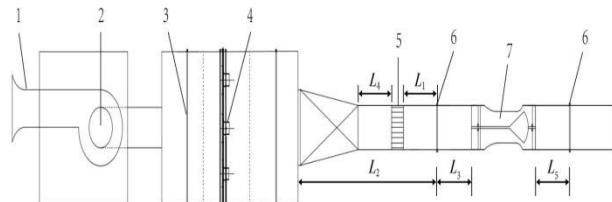


图 3 喷嘴式风阀性能测试试验台

注：L₁ = 1500mm; L₂ = 3495mm; L₃ = 450mm; L₄ = 915mm; L₅ = 450mm，管道直径为Φ 300 mm

1. 空气出风管；2. 风机；3. 整流板；4. 喷嘴；5. 整流段；6. 静压环；7. 被测风阀

试验台在流量测量时，风室中喷嘴的流量由式（3）得出。

$$\sum Q_n = 3600CA\sqrt{2\Delta p^*/\rho}$$

式中 $\sum Q_n$ 为风室中每个喷嘴的空气流量之和，m³/h；C 为喷嘴流量系数；A 为喷嘴的喉部面积，m²； Δp^* 为喷嘴前后静压差，Pa； ρ 为喷嘴喉部空气密度，kg/m³。

通过在试验台上对基于文丘里效应测量管的变风量蝶阀进行测试，得到了实验数据（如下表所示）

表 1 实验结果

序号	大气压力 (Pa)	进口温度 (℃)	进口湿度 (%)	风室压力 (Pa)	ΔP (Pa)	风量 (m ³ /h)	偏差 (%)
1	103718.71	22.14	50.51	85.74	39.71	392.00	-4.42
2	103715.77	22.13	50.57	124.84	69.88	399.00	-2.71
3	103741.44	22.13	50.55	165.11	100.22	405.00	-1.25
4	103736.54	22.13	50.61	301.88	199.58	407.00	-0.76
5	103745.91	22.13	50.61	431.86	299.34	411.00	0.22
6	103747.61	22.13	50.54	302.19	199.89	401.00	-2.22
7	103767.14	22.17	50.46	164.64	100.02	420.00	2.41
8	103795.23	22.18	50.41	123.64	69.72	427.00	4.12
9	103826.73	22.18	50.52	84.84	40.11	429.00	4.61

从实验数据的风量偏差结果来看，所有测试工况下的风量偏差均在较小范围内波动，最大偏差为 4.61%，最小偏差仅为 0.22%。这表明基于文丘里效应测量管的变风量蝶阀在风量测量方面具有较高的精度，能够准确地测量管道内的风量。与传统的风量测量方法相比，其

测量精度有了显著提升。

在不同工况下，风阀的阻力变化也在合理范围内。随着风室压力和 ΔP 的变化，风阀能够稳定地调节风量，且没有出现明显的异常情况。这得益于文丘里测量段和蝶阀执行机构的优化设计。

4 在通风系统中的实际应用

将基于文丘里效应测量管的变风量蝶阀应用于实际通风系统中，能够有效解决传统通风系统在风量测量与控制方面存在的问题。以某大型商业建筑的通风系统为例，该建筑原本采用传统的定风量通风系统，室内环境舒适度差且能耗较高。在改造过程中，引入了本研究设计的变风量蝶阀。

在实际运行过程中，变风量蝶阀根据室内人员数量、室内温度和湿度等参数的变化，实时调节送风量。例如，在人员密集的时间段，室内负荷增加，变风量蝶阀能够迅速响应，增大开度，提高送风量，保证室内空气质量与舒适度；而在人员较少或室内负荷较低时，蝶阀自动减小开度，降低送风量，避免了能源的浪费。

通过在该商业建筑通风系统中的长期运行监测，发现采用基于文丘里效应测量管的变风量蝶阀后，室内环境参数得到了有效控制。室内温度波动范围控制在±3℃以内，大大提高了室内人员的舒适度。

5 结论与展望

文丘里效应测量管结合动压放大器显著提升了VA V系统的控制精度。实验数据表明，在不同工况下，风量测量偏差均在较小范围内，最大偏差仅为4.61%，有

效解决了传统测量技术在精度方面的局限性。动压放大器通过二次收缩结构放大喉部动压信号，增强了微小流量下的压差分辨率，同时抑制了湍流对传感器的干扰，从而提高了测量的准确性。集成化蝶阀设计兼具低压损、高响应与紧凑性优势。文丘里测量段的优化设计和蝶阀执行机构的合理选型，使得风阀在调节风量过程中阻力较小，系统运行更加节能。

在未来的研究中，可以开展更多的现场实验和长期运行监测，收集更多的实际应用数据，为文丘里效应测量管在变风量风阀中的应用提供更充分的实践依据，推动该技术在建筑节能领域的广泛应用和发展。

参考文献

- [1] 王艳华,王富富,张国苗,孟永凯,邓吉琛,王耀勋. 基于文丘里效应的低速风聚风装置结构设计与优化[J]. 机械设计,2024,41(07):53-60.
- [2] 陈硕. 文丘里效应在负压风选中的应用[J]. 机械工程师,2024,(05):110-112,115.
- [3] 翁文兵,朱佳璐,张涛涛. 文丘里定风量阀力学性能实验研究[J]. 暖通空调,2015,45(12):78-81.

作者简介：夏正松(2008-)，男，上海人，高中在读。