



基于恒压法的汽车整车漏风量测试系统流量计算

李亚, 赵鑫, 李振亮, 许玮
(天津科技大学机械工程学院, 天津 300222)

摘要: 设计了基于恒压法的汽车整车漏风量测试系统. 采用标准孔板作为节流件, 通过测量节流件上下游的压力差、干球温度和湿球温度等基础数据, 经过计算可得到整车漏风量. 在分析测量原理的基础上, 详细给出了计算漏风量的公式和方法, 并进行了实验. 实验结果表明, 该计算方法稳定可靠, 可满足测量要求.

关键词: 汽车; 漏风量; 恒压法; 计算方法

中图分类号: U467.5⁺21

文献标志码: A

文章编号: 1672-6510(2013)01-0059-04

Flow Rate Calculation in the Auto Air Leakage Volume Test System Based on Constant Pressure Method

LI Ya, ZHAO Xin, LI Zhenliang, XU Wei

(College of Mechanical Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China)

Abstract: An auto air leakage volume test system based on constant pressure method was designed. Using standard orifice plate as throttle device, after testing some original data such as the differential pressure between both sides of the throttle device, temperature of the dry-bulb and the wet-bulb, and so on, the auto air leakage volume can be calculated. The formulas and methods involved were demonstrated in detail and the experiment was designed based on an analysis of the measurement theory. According to the result of the experiment, this method proved stable and reliable and can satisfy the requirement of the measurement.

Key words: auto; air leakage volume; constant pressure method; calculation method

在汽车生产过程中, 要对汽车整车漏风量进行测试, 以提高和改进汽车的设计, 最终提高汽车空调的工作性能. 常用的气密性检测方法有多种^[1-2]. 针对车体的气密性检测主要有两种^[3]: 恒压法和减压法. 恒压法即向车体内部加压, 在充入车体的空气量与车体漏气量之间可以建立起所需要的压力平衡, 此时空气的流量就是车体的漏气量, 充气量越小, 气密性就越好; 减压法即向车体内部加压, 一直到建立其预定的压力为止, 然后关闭进气阀, 内部即衰减, 测定从预定的高压压力值降低至低压压力值所需要的时间, 时间越长, 气密性就越好.

国内的相关研究者提出过汽车空调风道空气泄漏的检测方法^[4], 主要用流量传感器来测量风量. 由于其风量值是直接从流量传感器上读得, 使用者并不能对参数进行修改和校正, 在长时间使用后易产生误

差; 而且, 空调的工作性能不仅与风道的空气泄漏量有关, 还受到整车漏风量的影响.

以节流装置作为检测件的流量测量方法是目前应用最为广泛的方法, 其中孔板流量计的使用最为普遍^[5]. 其测量原理是使流体经过节流装置, 部分压力能转化为动能从而产生差压, 然后根据差压、流体密度等参数计算出流量. 经典的节流件有孔板、喷嘴、文丘里管等, 可以测量液、气、蒸汽等, 很多都已形成标准, 得到国际计量组织的认可.

虽然孔板流量计应用较为广泛, 但是流量计算涉及的公式和参数较多, 其取值方法和计算过程又根据现场环境、测试实验的不同而有所差异, 也未见文献将其用于整车漏风量测量. 因此, 总结出一套风量计算公式和方法显得极为重要. 本文采用恒压法, 利用标准孔板作为节流装置, 通过测量差压、温度等基础

数据, 经过计算得出整车漏风量, 并进行了实验.

1 汽车整车漏风量的测量原理

测试系统的结构如图 1 所示, 包括变频电机、鼓风机、风道、干湿球温度计、孔板、差压计、计算机、电控柜等. 鼓风机、孔板、汽车车室通过风道相连接, 图 2 为测试现场. 系统工作时, 鼓风机把空气经由孔板吹入车内, 气流通过孔板会出现压力差, 差压计 2 用来测量孔板两侧的压力差, 一端接入孔板的上游, 另一端接入孔板的下游; 气流进入车内会使车内的压力上升, 差压计 1 用来测量车内静压与车外环境的压力差, 一端连接大气, 另一端连接汽车车内. 随着鼓风机转速的增加, 车内静压和车的漏风量也会增加. 电控柜中包含控制器, 变频电机在其 PID 输出调节的控制下, 带动鼓风机使车内静压稳定, 从而整车漏风量就会稳定, 此时, 通过孔板测得的空气流量就为整车的漏风量.

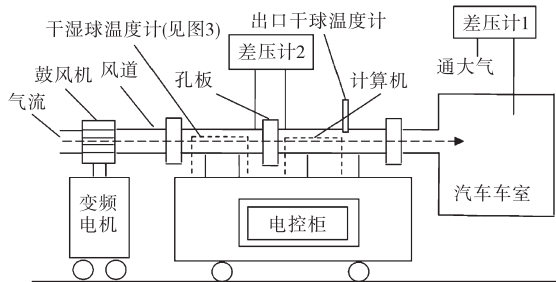


图 1 测试系统结构
Fig. 1 Structure of the test system



图 2 测试现场
Fig. 2 Test site

计算空气流量还要用到现场环境的空气密度值, 为此, 用干湿球温度计来测量干、湿球温度, 间接来求空气密度. 如图 3 所示, 该装置主要由测温箱、入口干球温度计、入口湿球温度计、棉纱布、风机、供水箱和连通管构成. 在图 1 中的出口干球温度计是用

来对算得的气体密度进行校正. 工作时, 风机负责把待测气体引入测温箱并使热湿交换达到平衡, 然后, 气体通过两支温度计之后排入大气. 两支温度计分别测量干球温度和湿球温度. 测量湿球温度的温度计外套一层棉纱布, 把棉纱布的下端浸入水中, 下面的水与供水箱连通. 随着水的蒸发, 供水箱可以持续不断地向其中供水.

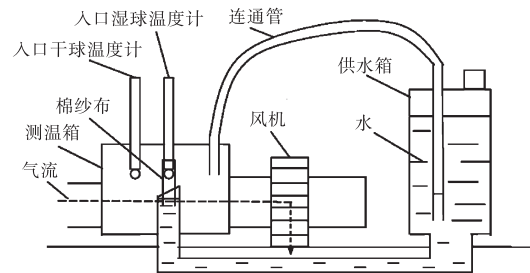


图 3 干湿球温度计
Fig. 3 Dry and wet bulb thermometer

2 漏风量的计算方法

2.1 流量公式

根据流体的连续性方程、伯努利方程和绝热过程方程, 可以得到可压缩流体的流量计算公式:

$$\begin{cases} q_m = \frac{C\varepsilon}{\sqrt{1-\beta^4}} \times \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{2\rho_1 \Delta p} \\ q_v = \frac{C\varepsilon}{\sqrt{1-\beta^4}} \times \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho_1}} \end{cases} \quad (1)$$

式中: q_m 为质量流量, kg/s; q_v 为体积流量, m^3/s ; C 为流出系数; ε 为可膨胀性系数; d 为节流件开孔直径, m; β 为直径比, $\beta = d/D$; D 为管道内径, m; ρ_1 为被测流体密度, kg/m^3 ; Δp 为节流件两侧的差压, Pa.

在流量方程式中, 参数主要分为两大类: $d, \beta, \rho_1, \Delta p$ 为实测量; C, ε 为统计量. 节流件开孔直径 d 和管道内径 D 可以直接测量, 进而算出直径比 β . 差压 Δp 是节流件上下游的压力差, 由差压计来测得. 被测流体密度 ρ_1 是由干湿球温度计(图 3)通过测量干球温度和湿球温度, 再经过计算得出的. 流出系数 C 不是实测的量, 要根据设备的相关参数(孔板尺寸、取压位置、管道雷诺数等)计算而得. 可膨胀系数 ε 是对流体通过节流件时密度变化引起流出系数变化的修正.

2.2 流出系数

流出系数的定义为

$$C = \frac{\text{实际流量}}{\text{理论流量}}$$

节流件是孔板,管道内径 $D = 150.2 \text{ mm}$,采用角接取压法,简化后的里德-哈利斯/加拉赫(Reader-Harris/Gallagher)公式^[6]为

$$C = 0.5961 + 0.0261\beta^2 - 0.216\beta^8 + 0.000521 \left(\frac{10^6 \beta}{Re_D} \right)^{0.7} + (0.0188 + 0.0063A)\beta^{3.5} \left(\frac{10^6}{Re_D} \right)^{0.3} \quad (2)$$

式中: $\beta = d/D$ 为直径比; Re_D 为管道雷诺数; $A = (19000\beta/Re_D)^{0.8}$;

为了计算流出系数 C ,要先算出管道雷诺数. 雷诺数是表征流体流动特性的一个参数,其计算公式为

$$Re_D = \frac{4q_m}{\pi\mu D} = \frac{4q_v}{\pi\nu D} \quad (3)$$

式中: μ 为流体动力黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; ν 为流体运动黏度, m^2/s .

待测空气的动力黏度为 $0.0175 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ (参考文献[6]). 把式(3)代入式(2)可得出流出系数. 至此可知,要想求出雷诺数和流出系数必须先得出流体的流量,而求出流量又要先算出雷诺数和流出系数,看似相互矛盾,实则只要用一个循环算法即可完成计算,见2.5节.

2.3 可膨胀系数

可膨胀系数是对流出系数在可压缩行流体中密度变化的修正,其定义为

$$\varepsilon = \frac{4q_m \sqrt{1-\beta^4}}{C\pi d^2 \sqrt{2\Delta p} \rho_1} \quad (4)$$

对于孔板,由于流体膨胀既是轴向又是径向的,不能采用上述公式,要由经验公式^[6]计算(公式适用范围是 $p_2/p_1 \geq 0.75$):

$$\varepsilon = 1 - (0.351 + 0.256\beta^4 + 0.93\beta^8) \left[1 - (p_2/p_1)^{1/\kappa} \right] \quad (5)$$

式中: κ 为等熵指数; p_2 为节流件下游侧压力,取 $B - \Delta p$, $B = 101325 \text{ Pa}$ 为标准大气压, Δp 为节流件两侧的差压; p_1 为节流件上游侧压力,取 B .

气体流过节流件时发生收缩然后膨胀,静压降低,使密度发生变化,其过程很快,可用理想的一维等熵膨胀表示.

$$\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^\kappa = \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^\kappa \quad (6)$$

文中将气体看作理想气体,有^[7]

$$\kappa = \frac{C_p}{C_p - 8.3143} \quad (7)$$

式中: $C_p = a_0 + a_1 T + a_2 T^2 + a_3 T^3$, 为气体的比定压热容,其中 a_0 、 a_1 、 a_2 、 a_3 为温度系数 ($a_0 = 28.15$, $a_1 = 1.967 \times 10^3$, $a_2 = 4.801 \times 10^6$, $a_3 = -1.966 \times 10^9$); T 为空气的热力学温度, K .

把式(7)代入式(5),即可得到可膨胀系数.

2.4 流体密度

实验中的被测流体为空气. 因此,要求出实验环境下空气的密度,并且以孔板为界,分为入口空气密度和出口空气密度.

测试系统用3个温度计分别测量入口干球温度 t_1 、入口湿球温度 t_2 和出口干球温度 t_3 ,再经过计算得出空气密度.

首先,求出入口湿球温度下的饱和水蒸气分压力^[8] $p_{q,b}$:

当 $t_2 = 0 \sim 200 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,有

$$\ln p_{q,b} = a_4/T_2 + a_5 + a_6 T_2 + a_7 T_2^2 + a_8 T_2^3 + a_9 \ln T_2 \quad (8)$$

式中: $a_4 - a_9$ 为温度系数 ($a_4 = -5800.2206$, $a_5 = 1.3914993$, $a_6 = -0.04860239$, $a_7 = 0.41764768 \times 10^{-4}$, $a_8 = -0.14452093 \times 10^{-7}$, $a_9 = 6.5459673$); T_2 为入口湿球热力学温度.

然后,利用 $p_{q,b}$ 计算水蒸气分压力^[8]:

$$p_q = p_{q,b} - F(t_1 - t_2)B \quad (9)$$

式中: $F = 0.00001 \left(65 + \frac{6.75}{v} \right)$ 为计算中间值; v 为风速,取 4 m/s . 空气的流速会影响热湿交换的程度,易使湿球温度变得不准确. 当空气流速 $v \geq 2.5 \sim 4 \text{ m/s}$ 时,湿球温度趋于稳定^[8].

这样就可以算出入口空气密度^[8](单位为 kg/m^3):

$$\rho_1 = 0.00348 \frac{B}{T_1} - 0.00132 \frac{p_q}{T_1} \quad (10)$$

式中, T_1 为入口干球热力学温度.

最后,再用出口干球温度修正所得结果,算出出口空气密度:

$$\rho_3 = \rho_1 \frac{T_1}{T_3} \quad (11)$$

式中, T_3 为出口干球热力学温度.

需要说明的是,系统中有两个干球温度计,虽然在同一室内,但是也可能会有细微差别,据此可算出两个空气密度值. 用入口空气密度算出的风量为入口风量,用出口空气密度算出的则为出口风量.

2.5 流量计算的循环算法

要想求出雷诺数和流出系数必须先得出流体

的流量,而求出流量又要先算出雷诺数和流出系数,这就需要用一个循环算法来完成.计算过程如图4所示.

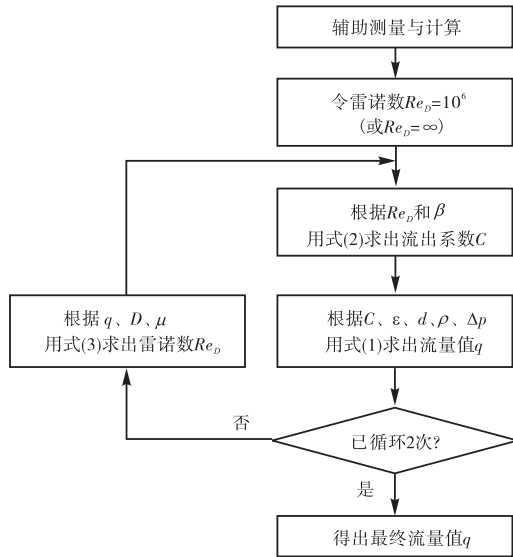


图4 循环算法的计算流程
Fig. 4 Calculation process of loop algorithm

其中,辅助测量和计算包括管道内径 D 、节流件开孔直径 d 、直径比 β 、入口干球温度 t_1 、入口湿球温度 t_2 、出口干球温度 t_3 、节流件两侧差压 Δp 、动力黏度 μ 、工作状态下空气的密度 ρ 等参数.

3 实验

整车漏风量实验是测量车内在不同静压值下的漏风量大小,每个静压值称为一个工况.表1为某轿车整车漏风量的实验结果.风道内径为150.2 mm,选用直径为95 mm的孔板.

表1 某轿车漏风量实验结果
Tab. 1 Test results of a car's air leakage volume

车内静压 $\Delta p_i/\text{Pa}$	差压 $\Delta p/\text{Pa}$	出口空气密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	出口风量 $Q/(\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1})$
3.8	39.0	1.143 1	25.5
20.2	77.0	1.152 7	199.1
46.0	237.4	1.129 7	350.4
63.8	349.2	1.112 2	427.4
83.0	473.6	1.085 6	503.8

可以看出,出口风量随着车内静压的增大而增大.该测量结果与日本原装(佐竹)环模实验室所测结果基本吻合(见图5),证明了结果的可靠性.设备

是按照国家标准 GB/T 2624—2006 设计、制造、安装和使用的,所以无需校准,根据流量方程即可确定输出信号(差压)与流量的关系^[6],测量精度可达3%.

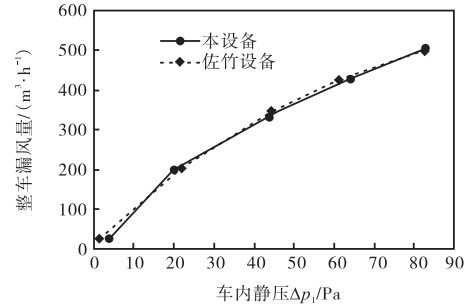


图5 车内静压-整车漏风量曲线
Fig. 5 Curve of in-car static pressure-air leakage volume

4 结语

本文将恒压气密性检测法应用在整车漏风量测量中,设计了汽车整车漏风量测试系统.经实验验证,该系统工作稳定,计算结果准确可靠,满足测量要求.由于采用的节流件为标准孔板,可根据所测风量大小更换孔板的尺寸,所以本方法的适用范围较广;而且漏风量测量是基于孔板上下游差压、干球温度和湿球温度等基础数据,经计算得出的,所以中间参数可修改和校正.

参考文献:

- [1] 彭光正,纪春花,葛楠.气密性检测技术现状及发展趋势[J].机床与液压,2008,36(11):172-174.
- [2] 黎启柏,卢广权.气体泄漏检测方法及其工程应用[J].机床与液压,2005(11):130-132.
- [3] 苏晓峰,程建峰,韩增盛.高速列车气密性研究综述[J].铁道车辆,2004,42(5):16-19.
- [4] 田韶鹏,杨莉玲,徐达伟,等.HVAC风道空气泄漏检测方法研究[J].汽车技术,2009(5):50-52.
- [5] 孙淮清.关于我国孔板流量计发展和展望[J].自动化仪表,2007,28(增刊):30-32,39.
- [6] 孙淮清,王建中.流量测量节流装置设计手册[M].2版.北京:化学工业出版社,2005:6-58.
- [7] 朱明善,刘颖,林兆庄,等.工程热力学[M].2版.北京:清华大学出版社,2011:54-55.
- [8] 薛殿华.空气调节[M].北京:清华大学出版社,1991:3-26.

责任编辑:常涛