



居住建筑外窗窗口气密性能现场检测方法探讨

中国建筑科学研究院 徐选才[★]

北京市建筑设计研究院 梁 晶

摘要 从不同操作者采用惯常检测法对同一个外窗窗口气密性能现场比对检测结果的分析入手,对惯常检测法进行了研究。结合我国居住建筑外窗特征和现有检测设备的情况,提出了综合不确定度 20% 的控制目标,明确规定了检测过程中室外风速和附加渗透风量的限值及各分项检测参数的不确定度控制指标。

关键词 居住建筑 外窗 气密性能 现场检测 惯常检测法 不确定度

Field test method of air leakage through installed exterior windows in residential buildings

By Xu Xuancai[★] and Liang Jing

Abstract The commonly-used test method is questioned through the comparison of two sets of data yielded respectively in the field tests of air leakage through the same installed exterior window by different testers. Combining with the features of exterior windows generally used in residential buildings and the condition of current measuring apparatus, puts forward the overall uncertainty of 20% as a control object, and specifies the limited values of outdoor wind velocity and additional air leakage and the uncertainty control objectives of different measured parameters.

Keywords residential building, exterior window, air-tightness performance, field test, commonly-used test method, uncertainty

[★] China Academy of Building Research, Beijing, China

①

0 引言

我国工程实践表明,外窗窗口墙和窗框的结合部位常因施工简单粗糙而透风严重。为了强化建筑工程节能控制,在《采暖居住建筑节能检验标准》(JGJ 132—2001)的修订稿(报批稿)中,特将外窗窗口气密性能列为强制性检验条文。外窗窗口气密性能检验既包括对外窗本身的渗透性能的检验,也包括对外窗窗口墙与外窗窗框结合部位的密封性能的检验,所以具有现实意义。

我国对外窗窗口气密性能的关注始于最近几年。国内某单位在这个领域做了开创性的工作,研制成功的 MCDX-M 型建筑门窗气密性能现场检测设备,有力地配合了各地建筑工程质量监督部门

的监督管理工作,获得了良好的社会效益。但由于国家尚未颁布相应的现场检测标准,所以各有关质检部门只能参照《建筑外窗气密性能分级及检测方法》(GB/T 7107—2002)中的有关规定进行检测。实践表明,目前工程检测中采用的外窗窗口气密性能现场检测方法(本文暂称“惯常检测法”)尚有待商榷。

①☆ 徐选才,男,1962 年 2 月生,大学,教授级高级工程师
100013 北京市朝阳区北三环东路 30 号中国建筑科学研究院环能院

(010) 84285106 64517691 (0) 13601150403

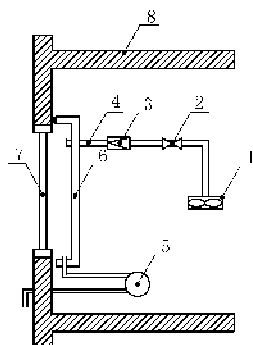
E-mail: xxxcabr@163.com

收稿日期:2007-06-18

修回日期:2008-02-21

1 现场检测装置及惯常检测法工作原理

现场检测装置由风速传感器、压差控制箱、便携式工业控制机组成,检测过程自动化。在内径为 80 mm 的风量管中心位置布置一个热球风速传感器,以该传感器测得的风速来确定风量的大小。受检窗内外压差采用压差传感器检测,环境压力和温度采用空盒压力表及附属温度计检测。检测系统构成如图 1 所示。检测前,先用塑料薄膜密封受检外窗窗口,并按图 1 安装检测设备,接着采用手触法充气检漏,然后依次检测内外压差分别为 10, 50, 100 Pa 时系统的漏风量,最后根据相关公式^[1]将压差为 100 Pa 时的漏风量换算成压差为 10 Pa 时的值,该值即为所求。



1 送风机或排风机 2 风量调节阀 3 流量计或风速计 4 送风或排风管 5 差压表 6 密封板或塑料膜 7 受检外窗 8 墙体围护结构
图 1 外窗窗口气密性能检测系统构成

2 惯常检测法的比对试验

检测数据的准确性和可复现性是检测方法的重要考核指标,那么,惯常检测法是否具有这种特征呢?为此,安排了一组现场比对检测试验。2006 年笔者分别委托北京地区最具权威的两家工程质量检测机构 A 和 B 对某外窗窗口气密性能进行了对比检测。该外窗为单玻推拉 PVC 塑钢窗,洞口尺寸 1 730 mm×2 000 mm(宽×高),状态良好,其外形如图 2 所示,检测结果如表 1 所示。

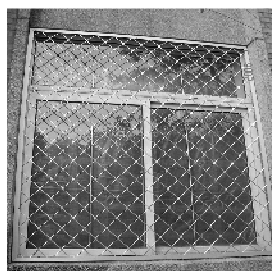


图 2 受检试验外窗

由表 1 中数据可见,若以 A 的检测结果为基准,则 B 的检测结果是 A 的 1.55 倍,判定结果一个是 3 级窗而另一个为 4 级窗。对于同一幢外窗在检测环境条件基本相同的情况下,采用相同的检测方法、检测设备和操作程序,仅操作人员不同,检测结果会相差如此悬殊!同时,由于不知道检测结果的误差范围,所以,受检外窗窗口气密性能指标究竟是多少,尚不清楚。带着这一问题,笔者对惯常检测法进行了全环节的分析。

表 1 外窗窗口气密性能对比检测结果

检测单位	单位漏长 指标/(m³/ (m·h·10 Pa))	单位面积 指标/(m³/ (m²·h·10 Pa))	气密性能 等级/
A	1.500	3.160	4 级
B	2.337	4.917	3 级

3 惯常检测法的问题分析

在对惯常检测法研究的基础上,发现只要通过适度的完善和补充,使用该方法得到的检测结果的准确性和可复现性均可以满足工程检测的要求。

3.1 渗透风量检测方法问题

惯常检测法在检测渗透风量时,采用风管中心风速法,它通过将一热球风速传感器插入风量管的中心,以该点的风速作为风量管的平均风速,然后再以此风速乘以风量管的面积,从而得出通过风量管的风量。这种检测风量的方法是值得商榷的,因为风量管内中心点处的风速并不是风量管内的平均风速,而且二者之间的差别和管内的流态有关^[2]。为了提高检测精度,笔者认为不仅要热球风速传感器的测速误差进行标定,而且还要对风量管和热球风速传感器的组合进行综合标定,从而建立风管中心风速和管中风量的对应关系。本文称这种检测风量的方法为标准风量管法。

3.2 附加渗透风量是否需要检测的问题

在惯常检测法中,假定检测系统的附加渗透风量为零。实际上检测系统附加渗透风量所占外窗窗口渗透风量的比例对最终检测结果的影响较大,尤其是在检测系统误差较大的情况下。塑料薄膜和墙面的粘贴质量、风管和塑料薄膜以及管道间连接部位的气密程度都直接影响最终的检测结果。但由于惯常检测法事先假定附加渗透风量为零,所以导致检测系统的附加渗透风量因操作者而异、因现场而异,而且无从考证。这也是不同的操作者使用相同的设备、采用相同的方法对同一外窗实施检

测而结果相差悬殊的原因之一。

3.3 室外环境风速是否需要限定的问题

惯常检测法未对室外风速条件提出要求。在外窗窗口气密性能检测过程中,要对受检外窗两侧的空气静压差进行检测,在布置测压管的室外端时,应尽量减少室外风速影响,以保证工况稳定、测量值的准确。但在室外有风的情况下,检测系统测得的压差往往和受检外窗两侧的实际压差存在差异,因为检测系统测得的压差为静压差,而受检外窗两侧的实际压差可能为全压差。为了减小室外风速的影响,有必要对室外风速提出一定的限制。本文假定检测工作压差为 50~100 Pa,平均压差为 75 Pa。在这种前提下,可以计算出不同风级条件下风的动压占平均检测工作压差(75 Pa)的比例,如表 2 所示。

表 2 室外风速动压占平均检测工作压差的比例

风级	风速/(m/s)	动压/Pa	所占比例/%
1	1.5	1.4	1.9
2	3.3	6.5	8.7
3	5.4	17.5	23.3
4	7.9	37.4	49.9
5	10.7	68.7	91.6

表 2 数据说明,如果不对室外风速进行限定,则会出现风速大时测得的数据大,风速小时测得的数据小的情况。

3.4 风量的计算式问题

在 GB/T 7107—2002 中,采用式(1)来换算不同压差条件下的风量。在外窗窗口气密性能现场检测中,惯常检测法也采用了相同的处理方法,即先测出受检外窗内外压差为 100 Pa 时的渗透风量,然后再通过式(1)换算出 10 Pa 下渗透风量值。

$$L_2 = \left(\frac{\Delta p_2}{\Delta p_1} \right)^{\frac{2}{3}} L_1 \quad (1)$$

式中 L_1, L_2 分别为对应压差 Δp_1 和 Δp_2 下外窗的渗透风量, m^3/h 。

式(1)采用了固定的幂指数(即 2/3)。笔者认为,因为窗本身的缝隙特征与外窗窗口墙和窗框结合部位的缝隙特征是不同的,同时外窗安装质量的差异也会影响该幂指数的变化,所以对于所有的外窗窗口不宜采用同一个幂指数,而采用变幂指数的做法将更能切合实际情况。

4 检测数据不确定度的控制目标

在外窗窗口气密性能检测过程中,所涉及的检

测参数有风量、压差、室外温度、大气压力、外窗洞口尺寸,所监测的参数为室外风速,而风量和压差的不确定度对最终结果影响最大。参考 ASTM E 783—91^[9]和《组合式空调机组》(GB/T 14294—93),同时兼顾我国现有外窗窗口气密性能检测设备的实际情况和现场检测具体应用的情况,提出了表 3 的推荐值。

表 3 检测数据不确定度的控制目标

检测内容	不确定度控制目标	
	绝对不确定度	相对不确定度
压差	$\leq 2.5 \text{ Pa}$	$\leq 5\%$ (测量值)
风量		$\leq 13\%$ (测量值)
室外大气压	$\leq 200 \text{ Pa}$	
室外温度	$\leq 1 \text{ }^\circ\text{C}$	
室外风速	$\leq 0.25 \text{ m/s}$	
外窗尺寸	$\leq 3 \text{ mm}$	

5 检验对象需求与对策分析

居住建筑中主要使用的外窗洞口规格如表 4 所示(共列出 10 种),规格宽度为 700~2 400 mm,高度为 1 500~2 400 mm,单窗洞口面积为 1.05~5.76 m^2 。表 4 中所列外窗洞口规格基本囊括了我国居住建筑中常用的外窗洞口规格,所以具有一定的代表性。

表 4 常用外窗洞口规格

外窗洞口尺寸		面积/ m^2
宽/mm	高/mm	
700	1 500	1.05
800	1 500	1.20
1 000	1 500	1.50
1 200	1 500	1.80
1 500	1 500	2.25
1 200	1 800	2.16
1 800	1 800	3.24
2 400	1 800	4.32
2 100	2 400	5.04
2 400	2 400	5.76

根据我国现行建筑节能标准 JGJ 26—95, JGJ 134—2001 和 JGJ 75—2003,在新建、改建和扩建居住建筑中外窗的气密性能指标均要达到 GB/T 7107—2002 中规定的 3 级或 4 级的水平。而根据《采暖居住建筑节能检验标准》(JGJ 132—2001) 修订稿(报批稿)的规定,外窗窗口墙和窗框的结合部位不得漏风。在这种情况下,各种不同规格的 3 级和 4 级外窗,在正常情况下单窗的合理渗透量有多大? 计算中取单位面积分级指标值作为

计算依据,为比较起见,同时也计算了 1,2,5 级外窗渗透风量的大小。计算结果表明,在外窗内外压差为 10 Pa 的情况下,对表 4 中 10 种规格的外窗而言,允许渗透风量上限值为:3 级窗 7.9~43.2 m³/h,4 级窗 4.7~25.9 m³/h,也即允许渗透风量随外窗面积和级别的不同而变化。如果考虑到建筑开发商可能使用的外窗的气密性能指标有的达到 5 级,而有的可能为 1 级,所以实际工程中单窗渗透风量的可能变化范围为 1.6~103.7 m³/h。实际上,按照受检外窗内外压差为 10 Pa 来进行检测的话,无论是对压差传感器还是对风量检测装置的不确定度均要求甚高,所以必须提高管内平均风速,以降低检测条件对仪器、仪表的精度要求。

由式(1)可计算出压差分别为 50 Pa 和 100 Pa 的情况下,表 4 中 10 种 1~5 级外窗的允许渗透风量。通过计算可知,当受检窗内外压差提高到 50 Pa,采用内径 80 mm 的风量管检测时,如果管内平均风速的不确定度控制在 0.1 m/s 之内,则由此所造成的风量检测不确定度为 13.1%,如果进一步改用内径 40 mm 的风量管,则管内平均风速将达到 3.05~4.84 m/s,若将风量检测不确定度按 10%控制的话,则管内平均风速的不确定度只要达到 0.3 m/s 即可。说明随着管内风速的提高,风速检测装置的绝对不确定度也可以适量放宽。以上分析说明,对于表 4 中外窗正常渗透风量的检测,只需要采取两种简单的措施,其一将受检外窗两侧的压差提

高到 50~100 Pa,其二是必要时改变风量管的管径,便可以保证风量检测的不确定度低于 10%。

事实上,为了得出受检外窗的渗透风量,还必须对检测系统的附加渗透风量进行现场标定检测。因为检测系统在现场安装时,无论是风量管与塑料薄膜的结合部位,还是塑料薄膜与墙表面的结合部位,都不可避免地存在缝隙,导致漏风。由于附加渗透风量的存在会给检测结果带来额外的误差,所以,ASTM E783—91 对检测中的附加渗透风量给予了高度关注,并且给定附加渗透风量为外窗窗口渗透风量的 10%。GB/T 7107—2002 也提到了附加渗透风量的检测问题,但对附加渗透风量所占的比例并没有具体规定。考虑到现场检测的实际条件与实验室相差甚远,所以本文建议将检测系统的附加渗透风量放宽到外窗窗口渗透风量的 20%。由于附加渗透风量绝对值很小,要想在这样小的渗透风量条件下测准风量,风量检测装置的不确定度至关重要。下文将对附加渗透风量的大小和风量检测装置的不确定度进行分析讨论。

若以居住建筑中常用的最小规格的外窗尺寸(700 mm×1 500 mm)为例,可以发现,此规格的外窗不仅允许渗透风量小,而且检测时允许附加渗透风量更小。对于此规格的外窗,在内外压差为 50 Pa 时,3 级和 4 级窗的允许附加渗透风量(按允许渗透风量的 20%计算)和风量管内的上下限平均流速值列于表 5。

表 5 规格为 700 mm×1 500 mm 外窗的允许附加渗透风量估算值和风量管内的上下限平均流速值

风量管直径/ mm	流通面积/ mm ²	4 级窗渗透风量/ (m ³ /h)	管内下限平均流速/ (m/s)	3 级窗渗透风量/ (m ³ /h)	管内上限平均流速/ (m/s)
40	1 256	2.76	0.61	4.60	1.02

由表 5 可知,在受检外窗内外压差为 50 Pa 时,即使对于内径 40 mm 的风量管,下限平均流速仅为 0.61 m/s,若按平均风速值的 13%来控制风量检测不确定度的话,则平均风速检测的绝对不确定度应控制在±0.079 m/s。若将内外压差提高到 70 Pa,则管内下限平均流速为 0.77 m/s,平均风速的检测不确定度应控制在±0.100 m/s。我国现有检测实验条件表明,当管内平均流速不小于 0.77 m/s(即流量 3.5 m³/h)时,13%的风量检测不确定度是可以保证的。所以,当检测附加渗透风量时,受检外窗内外压差应调整到 70~100 Pa。

综上所述,为提高检测系统的准确度,而又便于现场操作,本文建议将受检外窗的检测压差确定

为 70,80,90,100 Pa 四个工况。

6 综合不确定度分析与控制措施

对图 1 所示检测系统的综合不确定度进行分析。

6.1 检测数据处理

1) 在室外风速满足要求、检测工况稳定的条件下,分别检测受检外窗内外压差、空气流量、室外大气压、室外温度,根据检测结果可拟合曲线方程,如式(2)所示。

$$Q = a\Delta p^c \quad (2)$$

式中 Q 为现场检测条件下检测系统本身的附加渗透风量或总空气渗透量, m³/h; Δp 为受检外窗的内外静压差, Pa; a, c 为拟合系数。

2) 将实际状态下 10 Pa 压差时渗透风量转换为标准空气状态下的值,即

$$Q_s = \frac{293}{101.3} \frac{B}{(z+273)} Q_{s0} \quad (3)$$

式中 Q_{s0} , Q_s 分别为现场检测条件和标准空气状态下,受检外窗内外压差为 10 Pa 时检测系统本身的附加渗透风量或总空气渗透量, m^3/h ; B 为检测现场的大气压力, kPa ; z 为检测装置附近的室内空气温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

3) 计算内外压差为 10 Pa 时,标准空气状态下外窗窗口渗透空气量,即

$$Q_{st} = Q_s - Q_{st0} \quad (4)$$

式中 Q_{st} 为标准空气状态下,受检外窗内外压差为 10 Pa 时受检外窗窗口的空气渗透量, m^3/h ; Q_{st0} 为标准空气状态下,受检外窗内外压差为 10 Pa 时受检外窗窗口(包括检测系统在内)的总空气渗透量, m^3/h ; Q_s 为标准空气状态下,受检外窗内外压差为 10 Pa 时检测系统的附加渗透风量, m^3/h 。

4) 计算外窗窗口单位面积空气渗透量,即

$$q_s = \frac{Q_{st}}{A_w} \quad (5)$$

式中 q_s 为标准空气状态下,受检外窗内外压差为 10 Pa 时外窗窗口单位面积空气渗透量, $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$; A_w 为受检外窗窗口的面积, m^2 , 当外窗形状不规则时应计算其展开面积。

6.2 综合不确定度分析^①

由上文可知,从开始检测到最终得到受检外窗窗口单位面积空气渗透量,共经历四步。下面将逐一予以不确定度分析。

1) 第一阶段,该阶段的总不确定度来源于检测风量和检测压差的方程拟合不确定度、风量管整体标定装置的不确定度、风量管风量修正曲线拟合不确定度和压差检测不确定度。经过计算,该阶段的总不确定度可以控制为 13.6%。

2) 第二阶段,该阶段的总不确定度主要来源于大气压力检测不确定度、室外空气温度检测不确定度和第一阶段风量检测不确定度的传递。由于前两者的值较小,可以忽略不计,所以,通过误差传递计算,第二阶段的总不确定度仍然可以用 13.6% 来估计。

3) 第三阶段,该阶段的主要不确定度来源于总渗透风量的不确定度和附加渗透风量的不确定

度。根据计算,第三阶段的总不确定度可以控制在 19% 以内。

4) 第四阶段,该阶段也即数据处理到最后阶段,该阶段不确定度代表了整个检测和数据处理过程的总不确定度。本阶段的不确定度主要来源于前述各不确定度的传递和外窗窗口面积的测量不确定度。计算表明,由于外窗尺寸的测量不确定度较小,所以,综合不确定度可控制在 20% 以内。

6.3 综合不确定度控制措施

为了把外窗窗口气密性能的检测综合不确定度控制在 20% 之内,除检测时室外风速不得超过 2 级,检测系统的附加渗透风量所占外窗窗口渗透风量的比例不得超过 20% 外,最为关键的是任何工况下风量的检测不确定度应控制在检测值的 13% 之内。为实现这一目标,可以采用如下四条措施:

1) 实施检测时将受检窗内外的压差提高到 70~100 Pa; 2) 对于规格小的外窗和密封性能优于 4 级的外窗,可采用内径小于 80 mm 的标准风量管进行检测; 3) 在激光风洞^②中对热球风速传感器进行标定时,采用分段标定、加密标定测点,然后逐段拟合修正曲线; 4) 在风量实验台上对配有热球风速传感器的每只风量管进行综合标定,以消除因管道中心测点风速不等于管道内平均风速而引起的误差。

7 结论

7.1 由国内某单位研制的 MCDX-M 型建筑门窗气密性能现场检测设备以及与该检测设备相伴随的现场检测方法(即惯常检测法)为居住建筑外窗窗口气密性能现场检验奠定了良好的基础,但尚需要继续完善。

7.2 对惯常检测法提出了四条主要完善技术措施: 1) 在检测渗透风量时采用标准风量管法代替风速法; 2) 在检测过程中对系统的附加渗透风量也一同实施检测; 3) 对检测过程中室外风速提出了限定; 4) 风量的幂函数计算公式应由现场检测数据拟合产生。

(下转第 111 页)

① 徐逸才,梁晶.《居住建筑节能检验标准》专题论证报告之四:外窗窗口气密性能现场检测方法的研究,2007

② 郎四维.激光风速标定装置及其精度分析.中国建筑科学研究院专题研究报告,1980