

约阿希姆策勒 (Joachim Zeller)

2.3 对于气密性的要求

2.3.1 建筑节能法规规定的极限值

2009 版建筑节能法规 (EnEV 2009) 附件 4 对新建建筑规定了气密性极限值。它要求, 按 DIN EN 13829:2001-01 在内外压差为 50Pa 时, 测出的空气体积流量与建筑物采暖或制冷空气体积比值不得超过如下限值:

- 没有机械通风的建筑 3.0 h⁻¹ 和
- 有机械通风的建筑 1.5 h⁻¹

上述极限值的规定始于 1998 年 8 月, 并同等适用于居住建筑和非居住建筑。

2009 年版建筑节能法规的上述要求与以前不同, 只适用于需要将气密性用于单位耗能计算的建筑 (第 6 款 (1), 第 3 句)。对于所有其他新建建筑, 仍然适用第 6 款的定性要求“传热围护结构包括缝隙应根据公认技术规则进行耐久性密封”。这样就给专家和执法人员提供了灵活空间。

自从 1998-2009 制定了上述尺度的定量要求以来, 许多人认为, 气密性高于 3.0 h⁻¹ 或 1.5 h⁻¹ 即使在今天也不符合公认技术规则, 再者 DIN 4108-7 已经给出了这个极限值 (见下文)。

建筑节能法规对于建筑物的测量准备没有具体要求 (参见第 3 章)。

建筑节能法规的测量要求

针对已竣工的建筑, 即从建筑法的验收时间点开始。

部分机械通风的建筑

所谓部分通风的建筑, 例如在一栋办公建筑内, 办公室通过窗户通风, 而会议室则安装了新风系统。在居住建筑上 (例如集资建房) 可能有的住房有新风系统, 有的没有。

对于这种有的区域有新风系统、有的区域没有新风系统的情况, 应遵守建筑节能法规规定的体积权重平均极限值。对于每个区域是否还要求遵守各自极限值的问题, 专家们各持己见 (参见 3.2.2)。

在一个有新风系统的区域也可能存在没有专门通风路径的空间: 比如位于送、回风空间之间的过道属于过渡区, 所以也算作机械通风区域 (极限值 1.5 h⁻¹)。而对于忘记接入新风系统的房间 (例如储物间经常被遗忘) 也不应提高极限值。

2.3.2 测量气密性的义务

新建建筑

按照《建筑节能法》, 如果新建建筑已计划安排“气密性检测”, 则允许在能源证书中计算采暖能源需求时采用较低的通风散热损失。一经写进能源证书中, 则必须在气密性外围护结构完工后进行检测。

下列情况要求提供检测证明:

- 按机械通风计算采暖能源需求的居住建筑 (建筑节能法规附件 1 第 2.7 条)

- 采用逐月计算方法时, 换气次数取 0.6 h⁻¹ (DIN 4108-6, 表 D.3, 第 8.1 行)

- 在能源证书中, 取 DIN V 18599 第 2 部分表 4 气密性等级 I 的非居住建筑。

气密性证明要求检测整栋建筑。在多住户建筑内仅检测个别住房, 或者在办公建筑内仅检测外立面的一个部分是不够的 (参见第 3.2.2 节)

既有建筑

既有建筑的能源证书不要求进行气密性测试。

但是如果进行气密性测试并遵守《建筑节能法》对于新建建筑的极限值, 就可以像新建建筑一样, 在能源证书的采暖能源需求计算中取较小的通风散热损失。

2.3.3 DIN 4108-7 的极限值

DIN 4108-7:2011 “现行气密性标准要求”一节开头就摘引了当时的建筑节能法规:

“对建筑气密性的标准要求执行现行的《建筑节能法》的相应规定”。例如, 如果 2012 版《建筑节能法》对气密性提出了更严格的要求, 这些要求便在标准中自动生效。

由于 2009 版《建筑节能法》取消了通用的定量要求, 在标准中 (与草案不同) 增补了一节, 以弥补这个缺失:

“如《建筑节能法》没有特别要求, 《建筑节能法》中规定的新建建筑和对整个外围

护结构的气密性进行了改造的既有建筑，按 DIN EN 13829:2001-02 方法 A 测量的 50Pa 压差下的换气次数不应超过如下数值：

- 没有机械通风的建筑 3.0 h⁻¹ 和
- 有机械通风的建筑 1.5 h⁻¹

与《建筑节能法》不同，DIN 4108-7 引述检测标准 DIN EN 13829 方法 A 的方式，对建筑物的测试准备提出了明确要求。对体型系数较小的大型紧凑型建筑，也对外围护结构气密性提出了最低标准：

“对于内部体积大于 1500m³ 的建筑或部分建筑，需要按照 DIN EN 13829:2001-02 评价外围护结构的透气性 q₅₀，并不允许超过 3.0 m³/(h·m²)。”

2.3.4 DIN 4108-7 推荐的最高值

德国标准 DIN “气密性”专业委员会在编制 DIN 4108-7 时认为，采用机械通风的建筑物在 50Pa 差压下的换气次数不应该超过 1 h⁻¹。这就又回到了第一版标准（DIN V 4108-7:1996）在 1996 年已经给出的极限值。但又想避免标准的要求高于《建筑节能法》的要求。

于是在标准中把这个更严格的要求作为推荐值，并给出了物理学上有根据的理由（参见第 2.4 节）。

专家还认为，可自动调节的外墙通风口（ALD）不能进入测量范围，而是应该通过临时封堵将其排除在外，并相应降低换气次数最高限值。这些考虑的结果列在标准表 1 中。该表推荐了建筑测量准备工作，并根据不同通风系统推荐了 50Pa 压差下的换气次数最高值。

不管标准表 1 怎么说，都必须按照测量标准 DIN EN 13829 方法 A 做好建筑物的测量准备工作。

专家们对于测量过程中对外墙进风口封堵程度的争议，通过标准的相应规定得到了部分弱化。标准规定，如采用与 DIN EN 13829 不同的方法封堵外墙进风口，就应提高表 1 中的要求。

表 2.3.1 中列出的通风系统不是都合适的：比如采用自由通风的建筑，不可关闭的外墙进风口，根据其尺寸设计，在冷天会增加通风散热损失，使室内空气太干

燥；在温和天气又会造成通风不足。仅开窗通风对许多用户是不合适的，因为当用户不在时房间就得不到充分通风。

2.3.5 特殊证书规定的极限值

对于有（德国质量保证和认证研究所）“节能建筑”RAL 质量标识（RALGZ965）或被动房研究所颁发的“经过质量检测的被动房”证书的建筑，适用以下极限值：

- RAL 的能效标准：n₅₀ = 1.0 h⁻¹
- 被动房：n₅₀ = 0.6 h⁻¹

2.3.6 定性要求 防止有害的泄漏点

建筑节能法规 2009 第 6 款要求，“对传热外围护结构包括缝隙按照公认技术规则进行耐久性密封。”DIN 4108-2 也有类似定性要求。

在 DIN 4108-7 有这样的警示：“即使遵守了上述极限值，气密层的局部瑕疵仍有可能造成对流性潮湿损伤。所以，遵守极限值并不意味着能够充分证明细部构造如节点或穿墙口得到了正确设计和施工。”

表 2.3.1：推荐的建筑物测试准备和按 DIN 4108-7 表 1 推荐的 n₅₀ 压差下的最高换气次数

通风系统		外墙进风口形式 (ALD)	对外墙进风口 (ALD) 和回风格栅 (ALG) 的处理方式	n ₅₀ 时的最高换气次数 h ⁻¹
自由通风	仅开窗通风	无	无规定	3.0
		通过 ALD 横向通风	不可关闭	无措施
	可关闭		关闭 ALD	3.0
	自动调节		封堵 ALD	1.5
	排风井通风	不可关闭	ALD 无措施 封堵 ALD	1.5
		可关闭	关闭 ALD / 封堵 ALD	1.5
自动调节		封堵 ALD 和 ALG	1.5	
机械通风	排风机	可关闭	封堵 ALD	1.0
		自动调节	封堵 ALD	1.0
	送、排风装置	无	封堵排风口 / 出风口、进风口 / 新风管道	1.0

这类“瑕疵”当然必须避免，在人员逗留区会引起干扰性渗风的不密封也必须避免。

建筑实践表明，许多不密封既不会引起渗风，也不会造成结露霉变。因不密封造成的损伤一般可以从检测到的泄漏点找到根源。但是预测可能的损伤或者可靠排除损伤风险肯定是不可能的。在比亚辛（Biasin），策勒（Zeller）的文章中提到了对于泄漏影响和评价的不同观点。

那些要求检测是否遵守气密性定性要求的专家们必须审慎权衡。一栋满足气密性定量要求的房子不一定就没有气密性缺陷，也不是测出的任何气流都代表存在缺陷。

气密层位置

没有哪项规定说必须通过哪种建筑构件层来实现气密性。DIN 4108-7 建议在保温围护结构的房间一侧设置气密层。

没有禁止在房间一侧用石膏板构筑气密性。但是 DIN 4108-7:2001 年版指出，房间一侧的盖板由于经常有穿墙孔，不合作为气密层。最新版标准则要求对穿墙口和节点采取特殊措施。为了保证耐久的气密性，需要采取专门措施防止节点处出现开裂（奥斯瓦尔德，阿布尔（Abel））。

2.3.7 专门约定

在合同中对气密性及其检测作出补充或详细约定是有意

义的。这里可以提供几个例子：

- 由于建筑节能法规从 2009 年开始只对“经过气密性检测的建筑”提出定量要求，紧迫建议对其他建筑在合同中约定合适的极限值。
- 对于采用机械通风的建筑，在合同中约定 DIN 4108-7 的“推荐最高值”是有意义的。
- 对于《建筑节能法》未规定极限值的情况，业主应该安排检测证明气密性。检测应该在气密层还能接触的时候进行，这样修复费用不会太高。
- 对于被动房应该约定由被动房研究所和 RAL 节能建筑质量协会要求的 $n_{50} \leq 0.6 \text{ h}^{-1}$ 的极限值，或者根据负责实现被动房标准的设计师的要求取更小的值。
- 对于有多个使用单位的建筑（如多户居住建筑），除满足《建筑节能法》要求外，对每个使用单位提出补充要求是有意义的。比如可以在合同中规定，每套住宅必须遵守建筑节能法规的极限值，必要时也可以给一个追加量。



作者

约阿希姆·策勒

物理学硕士

气密性、通风、保温、低能耗建筑和被动房领域自由职业工程师和咨询专家（比布拉赫）

参考文献

[Biasin, Zeller] Karl Biasin und Joachim Zeller: „Luftdichtigkeit von Wohngebäuden – Messung, Bewertung, Ausführungsdetails.“ 3. Auflage, VWEV Energieverlag Frankfurt 2002

[DIN 4108-2] „Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz.“ Beuth Verlag Berlin 2011-10

[DIN 4108-6] „Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 6: Berechnung des Jahresheizwärme- und des Jahresheizenergiebedarfs.“ Beuth Verlag Berlin 2003-06

[DIN 4108-7:2011] „Wärmeschutz und Energieeinsparung in Gebäuden. Teil 7: Luftdichtheit von Gebäuden – Anforderungen, Planungs- und Ausführungsempfehlungen sowie –beispiele.“ Beuth Verlag Berlin 2011-01

[DIN V 4108-7:1996] „Wärmeschutz im Hochbau - Teil 7: Luftdichtheit von Bauteilen und Anschlüssen - Planungs- und Ausführungsempfehlungen sowie –beispiele. Vornorm“ Beuth Verlag Berlin 1996-11

[DIN EN 13829] „Bestimmung der Luftdurchlässigkeit von Gebäuden – Differenzdruckverfahren.“ Beuth Verlag Berlin 2001-02

[DIN V 18599-2] „Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 2: Nutzenergiebedarf für Heizen und Kühlen von Gebäudezonen.“ Beuth Verlag Berlin 2007-02

[EnEV 2009] „Verordnung zur Veränderung der Energieeinsparverordnung – Vom 29. April 2009“, in Verbindung mit „Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung – EnEV) - Vom 24. Juli 2007“

[FLiB 2002] „FLiB informiert: Beiblatt zur DIN EN 13829.“ FLiB e.V. Kassel Oktober 2002

[Oswald, Abel] Rainer Oswald und Ruth Abel: „Hinzunehmende Unregelmäßigkeiten bei Gebäuden.“ Bauverlag Wiesbaden und Berlin, 2. überarbeitete Auflage 2000

[Passivhaus-Institut] „Kriterien für Passivhäuser mit Wohnnutzung - Zertifizierung als „Qualitätsgeprüftes Passivhaus.“ Veröffentlicht unter www.passiv.de

[RAL-GZ 965] „Güte- und Prüfbestimmungen für energieeffiziente Gebäude – RALGZ 965“ Ausgabe April 2009. kostenloser download unter www.effiziente-gebäude.de

[Zeller 2011] Joachim Zeller: „Anforderungen an die Luftdichtheit. Die novellierte DIN 4108-7 empfiehlt strengere Höchstwerte.“ Holzbau – die neue Quadriga, Heft 4, 2011

More Than 20 Years of International Experience

Blower Door Tests ■

Air Permeability Tests ■

Thermography ■

Door Fan Tests ■

Leakage Detection ■

Smoke Tests ■

Ingenieurbüro
consulting engineering firm **n₅₀**

Helleböhnweg 48 ■ 34134 Kassel ■ Germany
Phone +49(0)561/32583 ■ info@n50.de ■ www.n50.de

UNIVERSAL TOOL FOR VENTILATION MEASUREMENT.



Made in Germany

Wöhler DC 410^{FLOW}

PRESSURE DIFFERENTIAL & FLOW METER

- Pressure resolution of 0.01 Pa
- Broad variety of velocity probes
- Differential temperature with two probes
- Humidity and barometric pressure sensor included
- Technician friendly one hand operation with 4 button keypad
- Highly accurate with „no drift technology“

WÖHLER

The Measure of Technology

www.wohler-international.com
Tel. +49 2953 73-279

约翰内斯·韦尔纳 (Johannes Werner), 马迪耶斯·莱迪希 (Mattias Laidig)

2.4 关于气密性要求的建议

2.4.1 总结

本文借助 DIN EN 832 的一个公式, 说明建筑物外围护结构和机械辅助通风作为一个偶合系统是如何影响年通风散热损失和采暖负荷设计的。

- 对采用高效热回收送排风系统的建筑, 换气次数上限取 $n_{50} = 1.0 \text{ h}^{-1}$ 是适当的, 目标值取 $n_{50} = 0.6 \text{ h}^{-1}$ 更有意义。在测量误差为 10% 时, 送回风质量流量必须进行平衡调节。透气率 $n_{50} < 0.3 \text{ h}^{-1}$ 时, 建筑措施已不再能够产生重大影响。
- 对采用排风装置的建筑, 建筑物外围护结构规定上限值为 $n_{50} = 1.0 \text{ h}^{-1}$ 是适当的。如新风分配有良好的稳定性, 则选目标值 $n_{50} \leq 0.6 \text{ h}^{-1}$ 是有意义的。
- 对采用排风装置的建筑, 室外空气渗透量应该至少取设计工况下排风机输送风量的 75%, 取 100% 是完全有意义的。

非常密封的建筑物外围护结构与设计的通风技术相结合, 无疑为优化室内空气质量、提高能效和改善舒适性创造了条件。

2.4.2 气密性是按需送风的前提条件

2.4.2.1 气密性具有法定性质

建筑物外围护结构气密

性是功能上的需要 (防止建筑物损伤和冷风渗透, 隔音等) (策勒 2004)。在德国将其引入建筑法也已经有三十多年了 (DIN 4108-2:1981)。对于新建建筑, 建筑节能法规 2009 规定气密性上限为 $n_{50} \leq 3 \text{ h}^{-1}$, 对采用机械通风的建筑规定气密性上限为 $n_{50} \leq 1.5 \text{ h}^{-1}$, 而标准对后者明确推荐了更低的数值。由于 DIN 4108-2:2003 提出的定性要求 (“外围护结构必须按照公认技术规则进行耐久性密封”) 也适用于老建筑改造, 在改造工作中同样必须注意外围护结构和改造部分结构缝的气密性。即使对于老建筑还没有公认的透气性极限值, 也应该注意, 有些建筑类型和建设年代的建筑本来就很密封 (潘茨豪泽 (Panzhauser) 1993) (海因茨 (Heinz) 2000), 在改造时不费工夫就能达到新建建筑的标准。对于不受用户控制通风措施的设计, 引入建筑法的 DIN 4108-2:2003 提请参照 DIN 1946-6 2009 版。

2.4.2.2 保障通风是健康居住的前提条件

对德国既有居住建筑的一项有代表性的调查发现 (布拉西 (Brasche) 2003), 21.9% 的住房存在可见的损伤, 如湿斑、霉斑或霉变; 14.2% 的潮湿损伤和 5.8% 的霉变与通风有关; 这里还未考虑肉眼看不到的隐蔽损伤。

调查也证明了专业医学文献中描述的住宅中的潮湿

损伤和霉变损伤对健康的有害影响; 在这种居室中, 患哮喘、过敏或经常性感冒疾病的风险明显增加。这是一个在德国住宅上带有普遍性的问题。

这项研究表明, 不受用户控制的连续通风 (特别是不受用户控制的机械排风装置) 是最重要的、普遍通用的措施, 它可以显著降低通风不良引起潮湿损伤的风险。这又再次证明, 在不考虑冷风渗透条件下, 从设计角度采取措施, 保障采暖季换气次数的必要性 (DIN 4108-2:2007)。今天用得越来越多的热回收平衡新风系统, 在这个方面至少具有和排风装置同等的价值。

2.4.3 机械通风和渗风的联合作用

升力、风 (自由通风) 和风机产生的压差是所有空气流动的驱动力。所以自由通风和机械通风相互对抗就不足为奇了。DIN V 4108-6:2003 从 DIN EN 832 引用了一个公式, 用来模拟内外渗漏的空气体积流量: V'_x 受到建筑物体积 V 、气密性 n_{50} 、屏蔽系数 e 和 f 以及反映通风设备送 (V'_{sup})、排 (V'_{ex}) 风体积流量差的失衡系数 V'_{dis} 的影响。

公式 1

$$V'_x = \frac{V \cdot n_{50} \cdot e}{1 + \frac{f}{e} \cdot \left[\frac{V'_{\text{sup}} - V'_{\text{ex}}}{V \cdot n_{50}} \right]^2}$$

通过建筑物的总体积流量是 V'_x 和通风系统体积流量 V'_f 之和。为了描述通风散热损失，采用了能量当量体积流量 V'_{eq}

公式 2

$$V'_{eq} = V'_f \cdot (1 - \eta_v) + V'_x$$

η_v 是从乏气传给新风的热回收率。将公式除以建筑物体积 V 可以得到与换气次数 n 类似的公式 ($n = V'/V$)。改写后的公式 2 与改写后的公式 1 合并成公式 3

公式 3

$$n_{eq} = n_f \cdot (1 - \eta_v) + \frac{n_{50} \cdot e}{1 + \frac{f}{e} \cdot \left(\frac{n_d}{n_{50}}\right)^2}$$

n_d 表示送风和排风换气次数之差 (失衡换气次数)。

建筑物在采暖季的通风散热损失 QV ，就可以借助采暖度日数 $\{(\Theta_i - \Theta_c) \cdot t\}$ 做如下近似计算。

公式 4

$$QV = H_v(\Theta_i - \Theta_c) \cdot t$$

根据空气比热容 c_a 和空气密度 ρ_a 可以计算一栋建筑的单位通风散热损失 H_v

$$H_v = V'_{eq} \cdot c_a \cdot \rho_a \cdot 0.34 \cdot V'_{eq} [W/K]$$

2.4.4 采用热回收平衡新风系统时通风散热损失

下面将讨论通风散热损失与建筑物气密性、热回收率和住宅新风系统失衡的关系及其影响。

这里还应注意，随着送、排风质量流量比例的变化，热回收率 η_v 不再是常数。例如，质量流量减少时回风的冷却就强，相反就弱；新风存在相同的比例。按照 VDI 1994，排风冷却程度即冷却系数 P_1 可以用无量纲温度变化与送、排风比热容比表示。若送、排风比热容相近，则体积流量比相当于比热容比。

公式 5

$$P_1 = \frac{1 - e^{\frac{k \cdot A}{\dot{W}_1} \left(\frac{\dot{W}_1}{\dot{W}_2} - 1\right)}}{1 - \frac{\dot{W}_1}{\dot{W}_2} \cdot e^{\frac{k \cdot A}{\dot{W}_1} \left(\frac{\dot{W}_1}{\dot{W}_2} - 1\right)}}$$

\dot{W}_1 为排风比热容流率， \dot{W}_2 为送风比热容流率， k 和 A 为传热系数和板式热交换器面积。对加热系数 P_2 得出相似的关系式。对于热回收率 η_v 必须采用相应的函数来描述失衡运行状态。(韦尔纳 2001) 和 (穆勒 (Mueller) 2000) 等文献对更详细的关系做了阐述。对于采用机械通风 ($n_f = 0.4 \text{ h}^{-1}$) 和对流板式换热器进行气气热回收 ($\eta_{平衡} = 80\%$)

80%) 的建筑，借助公式 5 在图 2.4.1 中介绍了按公式 3 计算得出的能量当量换气次数 n_{eq} 和按公式 4 计算得出的单位通风散热损失的关系。

- 建筑物不同气密性的曲线组在平衡质量流量平面两侧呈几何对称形态 (正分叉在这里没有表述); 此时, 排风过剩系数 (负系数) 和送风过剩系数 (正系数) 的能量相等。
- 最小通风散热损失在图上的位置取决于建筑物的气密性。在气密性特别好的建筑物上, 当失衡率在 $\pm 10\%$ 以内时, 通风散热损失最小。考虑到质量流量的现场测量精度在 $\pm 10\%$ 左右, 在平衡质量流量时达到最佳节能潜力洼地。随着气密性变差, 这个洼地的范围会扩大。
- 将建筑物外围护结构透气性控制在不超过 $n_{50} = 0.6 \text{ h}^{-1}$, 是保证采用热回收通风系统能效的必要条件。

当 $n_{50} = 0.5 \text{ h}^{-1}$ 时, 单位面积年通风散热损失为 $7.5 \text{ kWh/m}^2\text{a}$; 如允许将气密性界限提高 30%, 则达到 $n_{50} = 1.0 \text{ h}^{-1}$ 。若提高 65% 以上, 则通过热回收减少通风散热损失和气密性变差增加的热损失之间没有关联性了。

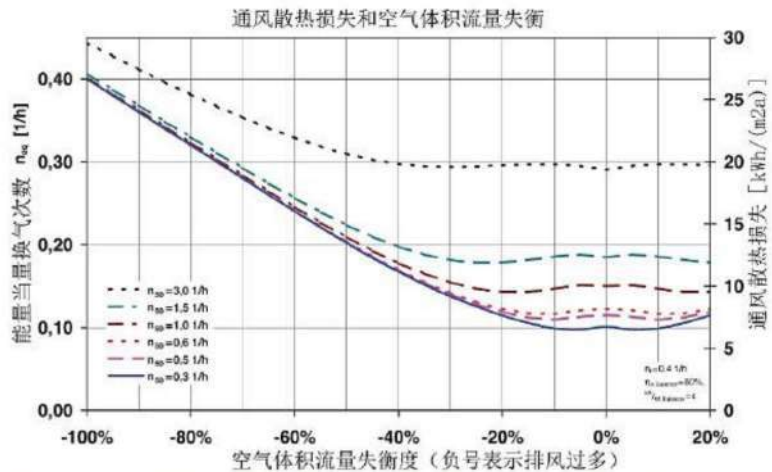


图 2.4.1: 在建筑物外围护结构不同气密性条件下, 送、排风质量流量失衡对能量当量换气次数和单位面积通风散热损失的影响 ($n_f = 0.4 \text{ h}^{-1}$, $\eta_{平衡} = 80\%$, kA/W , 平衡=4, 负百分数表示排风过多)。

如果将系统调到完全平衡，则在考虑测量误差后体积流量最大偏差为±10%；在极端情况下，失衡 20%不会对建筑物通风散热损失产生太大影响。如果失衡更大，则即使外围护结构有良好的气密性通风散热损失也会显著增加；随着热回收率的提高，曲线的这种走向更加明显（穆勒 2000）。

2.4.5 气密性对采用热回收新风系统时采暖负荷的影响

在完全平衡的系统上，公式 3 中的渗风份额就比较简单。渗风换气次数可用下式表示

公式 6

$$n_x = n_{50} \cdot e$$

如果在设计采暖负荷时，将年平均渗风系数提高将近 2.5 倍，则单位渗风损失 q'_{inf} 为

公式 7

$$q'_{inf} = 2.5 \cdot 0.34 \cdot n_{50} \cdot e \cdot dT_{\text{设计工况}}$$

当建筑物处于中等挡风位置（依据 EN 832e = 0.07）和温差为 $dT_{\text{设计工况}} = 30 \text{ K}$ 时，渗风造成的采暖负荷在 1–16W/m²之间。

按照《建筑节能法》标准，新建建筑设计采暖负荷为 40W/m²。根据建筑实践，取渗风影响占设计采暖负荷的 10%，则在这种条件下 $n_{50} = 1.0 \text{ h}^{-1}$ 应该是允许透气

表 2.4.1: 设计工况下单位面积渗风负荷与建筑物气密性 n_{50} 的关系

气密性 n_{50}	h^{-1}	3.0	1.5	1.0	0.6	0.3
设计工况下的渗风负荷 q_{inf}	W/m^2	16	8	5	3	1.5

率的上限。

对于利用新风辅助采暖的被动房，目标值应该取 $n_{50} = 0.3 \text{ h}^{-1}$ ，因为在被动房上可输入的采暖功率被限制在最大 14 W/m²（韦尔纳 2006）。

2.4.6 采用排风装置的建筑物

2.4.6.1 建筑物外围护结构的气密性

图 2.4.1 所示-100%失衡率的情况表示建筑物采用了排风装置；当然 n_{50} 在这里必须理解为通过开启的室外空气通道 ($n_{50, +ALD}$) 产生的透气率。透气率最大为 $n_{50, +ALD} = 1.5 \text{ h}^{-1}$ 时，能量当量换气次数 $n_{\text{eq}} = 0.4 \text{ h}^{-1}$ 相当于排风机产生的换气次数为 $n_{\text{r}} = 0.4 \text{ h}^{-1}$ 。

此时，建筑物内负压非常大，以至几乎在任何时间，在建筑物外围护结构上所有（设计的和非设计的）开口只有空气向内流入。当在特定气候条件下，建筑物外立面存在较高差压时，可能会通过部分开口有空气流出（仅在此时建筑物换气次数会大于排风机产生的换气次数）。但是这种现象很少出现，在年能量平衡中影响很小。

然而，当透气率 $n_{50, +ALD} = 3.0 \text{ h}^{-1}$ 时， n_{eq} 已经比 n_{r} 大约 10%。此时，风机产生的负压在较长时间里已经不能阻止附加的向外渗风。它也表明，此时外墙进风口之间的风量

分布受到气候影响很大。位置不利房间的新风供应减少，其他房间的新风量增加。在韦尔纳 1995 的文章里已经指出了这方面的影响。

如果尺寸合理的外墙进风口对压力测试结果 n_{50} 的影响大约为 $n_{50, +ALD} = 1.0 \text{ h}^{-1}$ ，则可认为建筑物外围护结构本身一定具有非常好的气密性 ($n_{50} \approx 0.5 \text{ h}^{-1}$)。从带排风装置建筑物的能量平衡和气候不相关性角度看，DIN V 4108-7 对建筑物泄漏规定的允许极限值 $n_{50} = 1.5 \text{ h}^{-1}$ 显然太高了。

对于多层独户住宅的排风装置，限制通风空间高度无论如何是有意义的。例如，可以将不通风地下室在底层高度上进行隔离。通过在底层设置外墙进风口，并且其通流截面可以随室外温度降低而变小，就可以在多层空气场中减小空气升力的影响。

2.4.6.2 采用排风装置时外墙进风口的尺寸设计

利用 2.4.3 节介绍的关系，也可以描述排风装置外墙进风口和建筑物外围护结构泄漏的共同作用。在这种情况下，排风过剩系数为 100%，公式 2 中的热回收率为 0，所以能量当量体积流量等于机械排风体积流量和向外渗风量之和。

自由泄漏不能按需分配到送风区的房间，所以漏入的室外空气中只有很小一部分可以计入建筑物的目标通风量。从过渡区和回风区漏入的空气，以短路形式从送风区的卧室和起居室擦肩而

过。这就要求，大部分室外空气通过设计的外墙进风口进入室内。然而，当 DIN 4108-7 允许的气密性偏差在 $n_{50} = 1.5 \text{ h}^{-1}$ 时，从设计之外的不密封处进入的室外空气大约占到一半。而当要求外墙进风口进风份额大于 50% 时，气密性应该 $n_{50} < 1.0 \text{ h}^{-1}$ ，只有当 $n_{50} = 0.5 \text{ h}^{-1}$ 时，其份额才能达到 75%，从而保证送风区得到可靠通风。功能间的排风受不密封位置的影响很小。

随着建筑物气密性的改善，在有气候干扰压力时的进风分布稳定性也提高，因为此时建筑物内的负压大于气候干扰压力。详细分析可以参见李希尔 (Reichel) 1999 的文章。

所以，把外墙进风口的进风份额设计的高一些是有意义的，而且在气密性良好的建筑上本来就是必须的。如果房屋建成后发现有些房间的气密性没有设计要求的那么好，也只要把外墙进风口关小一点就行了；否则在一些气密性好的房间，为了保证通风还需要另开通风口。采用排风装置的建筑在设计外墙进风口时，不考虑向内渗风一般是有意义的，尽管这与 DIN 1946-6:2009 的要求相违背。即使各个房间有不均匀的渗风，增加外墙进风口的进风份额仍然可比较合理地分配体积流量。

在对机械通风建筑物进行必要的压力测试时，可以在外墙进风口开启状态测量对建筑物功能非常重要的进风份额，并与外墙进风口关闭状态下的测量结果做比较，

这样做增加的工作量不是很大。

2.4.7 没有机械通风的建筑物

在窗户关闭时，没有机械通风装置建筑物的渗风换气次数也可按公式 2 计算 ($\eta_v = 0$)。考察同样受到中度挡风的建筑，便可得到表 2.4.2 给出的换气次数；与 EN832 的公式相比，设计工况下换气次数取 2.5，风力较小时取 0.5。

假如在无渗风现象、节能和空气清洁之间取一个折衷，从而将恶劣气候条件下窗户关闭时的换气次数限制到卫生需要的尺度，则得出换气次数上限为 $n_{50} = 3 \text{ h}^{-1}$ 。

同样可以看到，如果没有机械通风的建筑的透气性太小，就会要求用户增加开窗通风。鉴于此，对于这类建筑就应该增加一项最小透气性要求。所以在现行系统标准“住宅通风”(DIN 1946-6:2009)中，要求所有建筑都必须有不受用户控制的可靠防潮通风系统；然而建筑节能法规只是提到了这份标准，所以该标准本身没有被纳入建筑法。

即使建筑物有较高的透气性 ($n_{50} \approx 0.5 \text{ h}^{-1}$)，在气候作用力较小的情况下，还需要用户开窗进行主动通风，以防潮气问题。在模型试验

中就已发现，不可调进风口是一种不能令人满意的解决方案，因为采暖季渗风体积流量波动在 5 倍以上。菲斯特教授在详细的流体力学和热力学模型上得出了相同的结果 [菲斯特 1993]，该模型在一栋实体建筑上做过检测。气密性外围护结构与有针对性设置的进风口(外墙进风口)相结合，在无机机械通风的建筑上可以取得最佳效果。

然而，今天一项对德国既有建筑有代表性的调查结果表明(布拉西 2003)，仅利用固定式被动通风口而不辅以驱动式措施，不可能显著降低通风不良造成潮气损伤的风险。

所以，没有机械辅助保证基本通风的建筑，可能已经不符合当前的技术水平。

2.4.8 总结和展望

- 对于没有机械通风的建筑物，按照《建筑节能法》和 DIN 4108-7，将换气次数上限定在 $n_{50} = 3 \text{ h}^{-1}$ 是正确的。对于外围护结构气密性好的建筑，设计安装外墙进风口是有意义的。将最小透气率(包括被动式外墙进风口)定在 2 h^{-1} 是适当的；应在建筑合同中约定 DIN 1946:0 的适用性。仅通过被动式通风不能显著减少潮气损伤，所以还需要用户主动开窗通风；根据现行法律，应该给用户书面指导。

表 2.4.2: 自由渗风引起的换气次数与建筑物气密性的关系 $n_{50}(e = 0.07)$

建筑物气密性 n_{50}	1/h	5.0	3.0	1.5	0.6
气候作用力小的条件下的换气次数	1/h	0.18	0.10	0.06	0.02
年平均换气次数	1/h	0.35	0.21	0.11	0.04
设计工况下的换气次数	1/h	0.88	0.52	0.28	0.10

- 老标准 DIN V 4108-7:1998 规定的气密性极限值 $n_{50} = 1 \text{ h}^{-1}$ ，不仅对于有热回收送排风系统的建筑，而且对于采用排风装置的建筑，都比现行标准和《建筑节能法》规定的极限值 $n_{50} = 1.5 \text{ h}^{-1}$ 有意义。现行标准作为建议给出了极限值 $n_{50} \leq 1 \text{ h}^{-1}$ ；从使用功能上看，应该争取做到 $n_{50} \leq 0.6 \text{ h}^{-1}$ 。所以，在建筑合同中以私法形式约定功能上需要的极限值是有意义的。
- 对于与居住建筑有相同换气次数的其他建筑，上述极限值和目标值也是有意义的。
- 本文介绍了在考虑空气体积流量测量误差和机械通风实现卫生需要的换气次数条件下，从功能角度推导出必要的建筑物外围护结构气密性的方法。采用这种方法，也可以针对其他必要的换气次数，计算出对建筑物气密性的合理要求。
- 对于特殊用途建筑，应该在设计阶段具体确定对该建筑的气密性要求。例如，对于有惰性气体气氛的建筑，应该在权衡增加惰性气体运行费用和提高气密性产生的增量成本后，确定气密性要求。

参考文献

[DIN EN 832] Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden – Berechnung des Heizenergiebedarfs, Wohngebäude. Beuth Verlag Berlin 2003

[DIN 1946-6:2009] Raumluftechnik –Teil 6: Lüftung von Wohnungen – Allgemeine Anforderungen, Anforderungen zur Bemessung, Ausführung und Kennzeichnung, Übergabe/ Übernahme (Abnahme) und Instandhaltung. Beuth Verlag Berlin 2009

[DIN 4108-2:1981] Wärmeschutz im Hochbau – Wärmedämmung und Wärmespeicherung; Anforderungen und Hinweise für Planung und Ausführung. Beuth Verlag Berlin 1981

[DIN 4108-2:2003] Wärmeschutz und Energieeinsparung in Gebäuden – Mindestanforderungen an den Wärmeschutz. Beuth Verlag Berlin 2003

[DIN V 4108-6:2003] Wärmeschutz und Energieeinsparung in Gebäuden – Berechnung des Jahresheizwärme- und des Jahresheizenergiebedarfs. Beuth Verlag Berlin 2003-06

[DIN 4108-7:2011] Wärmeschutz und Energieeinsparung in Gebäuden – Luftdichtheit von Gebäuden. Beuth Verlag Berlin 2011

[DIN V 4108-7:1996] Wärmeschutz im Hochbau – Luftdichtheit von Bauteilen und Anschlüssen. Beuth Verlag Berlin 1996

[EnEV 2009] Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung – EnEV) – Bundesgesetzblatt Teil I Nr. 23, Bonn 30. April 2009

[Brasche 2003] Brasche, S., Heinz, E., Hartmann, T., Richter, W., Bischof, W.: Vorkommen, Ursachen und gesundheitliche Aspekte von Feuchteschäden in Wohnungen – Ergebnisse einer repräsentativen Wohnungsstudie in Deutschland. Bundesgesundheitsblatt 46, August 2003

[Feist 1993] Feist, Wolfgang: Passivhäuser in Mitteleuropa. Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt 1993

[Heinz 2000] Heinz, Ehrenfried: Kontrollierte Wohnungslüftung, Verlag Bauwesen, Berlin 2000

[Müller 2000] Müller, Sascha: Betriebsverhalten von Wohnungslüftungssystemen – Konzeption eines Messsystems für Feldmessungen. Diplomarbeit. FH Esslingen, 2000

[Panzhauser 1993] Panzhauser, E., u. a.: Die Luftwechselzahlen in Österreichischen Wohnungen; Technische Universität Wien im Auftrag des Österreichischen Bundesministeriums für Bauten und Technik F 827 (1993)

[Reichel 1999] Reichel, Dirk: Zur Zuluftsicherung von nahezu fugendichten Gebäuden mittels dezentraler Lüftungseinrichtungen. Diss. an der Universität Dresden 1999

[VDI 1994] Verein Deutscher Ingenieure: VDI-Wärmeatlas - Berechnungsblätter für den Wärmeübergang, 7. Ausgabe, VDI-Verlag Düsseldorf 1994

[Werner 1995] J. Werner, U. Rochard, J. Zeller, M. Laidig: Messtechnische Überprüfung und Dokumentation von Wohnungslüftungsanlagen in hessischen Niedrigenergiehäusern. Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt 1995

[Werner 2001] Werner, J., S. Müller: Lüftungswärmebilanz von Gebäuden – Einfluss von Luftdichtheit, Wärmebereitstellungsgrad und Massenstrombalance. In: VDI-Berichte 1591, VDI-Verlag GmbH Düsseldorf 2001

[Werner 2004] Werner, J.: Wohnungslüftung. In RWE Bauhandbuch, 13. Auflage, VWEW Energieverlag 2004

[Werner 2006] Werner, J.: Konzeption und Auslegung von Frischlufttheuzungen. In Tagungsband zum Fachforum Lüftungstechnik, OTTI Regensburg 2006

[Zeller 2004] Zeller, J.: Luftdichtheit der Gebäudehülle. In RWE Bauhandbuch, 13. Auflage, VWEW Energieverlag 2004



约翰内斯·韦尔纳
物理学硕士
图宾根 eboek 工程师
事务所员工
建筑热物理和通风技术专家



马提亚斯·莱迪希
物理学硕士
图宾根 eboek 工程师
事务所总经理
通风技术专业设计师
和设备部件开发专家



✓ no residential toxins
no pollutants in the
ambient air



✓ save energy
with a **SIGA**-sealed
house, you can save a
lot of energy for heating in
the winter and for cooling
in the summer over a
lifetime



✓ protection for your home
against air pollution



PROTECTION FOR YOUR HOME AND THE ENVIRONMENT

SIGA house-tight

air and windtightness system
free of domestic toxins

- ✓ permanently reduce
your energy consumption
- ✓ no building damage
- ✓ no draught

contact us:
NOW!
export@sigach
and become a
SIGA-distributor!

www.sigach

SIGA  Stick with us.®

3. 建筑物外围护结构透气性测试

约阿希姆·策勒 (Joachim Zeller)

3.1 测量原理

概述

利用一台风机在建筑物内建立相对于户外大气的负压或正压。选择风机转速，建立理想的差压（10-100 Pa）。测量风机输送的空气体积流量。它和通过建筑物不密封处漏入的流量相等。该渗漏流量就是衡量建筑物透气性的一个尺度。

在正、负压条件下，以不同的差压值进行测量。通过平衡计算得出 50Pa 差压下的体积流量，也就是标准中所谓的渗漏流量。

特征值

将渗漏流量除以建筑物净体积，得出 50Pa 差压下的换气次数 (n_{50})。这个特征值不仅在德国而且在国际上是最常用的。尤其在描写气密性和通风之间的关系时，例如在计算气候引起的内渗外泄造成的换气次数时，这个特征值是很合适的。

当然，“换气次数”这个名称存在被混淆的危险。比如，在自然气候条件下，由于气候对建筑物的压力较小，缝隙换气次数只有 50Pa 差压下换气次数的四分之一到四十分之一（参见第 2.4 节）。

将渗漏流量除以建筑物外围护结构表面积，得出透气性 (q_{50})。它描述了密封措施的质量。大型建筑由于

体型系数较为有利，50Pa 差压下的换气次数都比较小，而利用透气性也可以评价这类建筑气密性外围护结构的质量。

将 50Pa 差压下的渗漏流量 (m^3/h) 减半，得到当量渗漏面积 (cm^2)。在 50Pa 差压下，通过一块薄板上该尺寸的锋利孔洞流过的空气量，与通过建筑物外围护结构的空气量相同。当然，实际孔洞面积往往会大一些，因为建筑物外围护结构不是一块薄板，气流通过建筑物外围护结构经常有一段较长的路程。

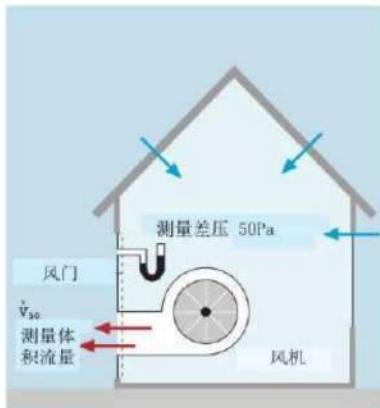


图 3.1: 利用一台风机建立负压。在不同压力下，同时在风机处测量差压和体积流量。此时，通过渗风效应可以使泄漏点暴露出来。

体积流量 — 质量流量

在稳态工况下，即建筑物内压力不变时，通过建筑物外围护结构的质量流量（实测值，如 kg/h）与风机输送的质量流量相同。在非稳态工况下，建筑物内的空气量会增加或减少。体积流量（实测值， m^3/h ）则不同。比如，如果室内空气温度比室外高，由于室外空气密度大，楼内处于负压时透过建筑物外围护结构流入的空气体积流量就比风机向外排出

的体积流量小。

在分析测量数据时，需要将所有体积流量换算到标准条件（20 °C，1013 hPa）。此外，在计算时还需要考虑，通过某一特定开口时，不仅体积流量，而且质量流量都与流动空气的密度有关。所以，作为测量结果给出的特征值，几乎与测量时间点的气候条件无关。

鼓风机

一般使用“鼓风机”测量。利用可调节的框架将尼龙布密封地套在大门入口或阳台门框内。尼龙布上的开口处有一个弹性领圈，便于气密性安装风机。风机吸风侧的开口作为文丘里喷嘴用于测量体积流量。



图 3.2: 已安装的鼓风机图（照片：BlowerDoor GmbH）

泄漏

在 50Pa 差压下, 也可利用风速测量仪 (热线风速仪) 查找缝隙、接头和穿墙口。寒冷天气下, 也可利用热成像仪对采暖建筑进行渗漏点定位和建立档案。这种方法主要在房间位置很高, 手无法触碰外部建筑构件, 而查找面又很大或者法庭审理需要出示影响资料时有帮助。

有时也用示踪气体 (“冒烟” 的硫酸) 查漏。

极少情况下, 例如能从外部够着密封部位时, 通过在室内正压下释放烟雾, 从外部定位渗漏点。

50Pa 是多少?

之所以选择 50Pa 作为参照差压, 是因为在此差压下气候引起的压力差一般可以忽略不计。而这样的压力又不会担心对建筑造成损坏。虽然粘贴的薄膜在 50Pa 差压下可能会被撕开, 但是如果出现这种情况也只能说明薄膜粘贴不牢, 即使不做压力测试也维持不了多久。

50Pa 压力相当于:

- $50\text{N/m}^2 = 5\text{kp/m}^2$ (口语里叫每平方米 5 公斤),
- $33\text{ km/h} = 9\text{m/s}$ 风速或 5 级风产生的滞止压力,
- 5 mm 水柱
- 标准大气压 $1013\text{ hPa} = 101300\text{ Pa}$ 的两千分之一;
- 往上爬两层楼可以感知的压差。

测量标准

在德国, 一般按照欧洲

标准 EN 13829 (DIN EN 13829) 进行测量。该标准被纳入了德国标准, 所以前面加了一个 “DIN”。在进行与建筑节能法规 2009 和 DIN 4108-7 相关的测量时, 均采用 EN DIN 13829 的方法。建筑气密性专业协会 (FLiB) 发表了对该标准的解释和补充说明 (FLiB 2002)。

此外, 还有国际标准 ISO 9972。该标准在编写时以 EN 13829 为范本。该标准增加了一些有意义的补充说明, 但有些补充内容由于对一些参照值定义不明确, 会导致产生不明确的特征值。该标准修订版作为 EN ISO 9972 草案将于 2012 年夏季颁布。预计 ISO 将来会替代 EN 13829。

如无专门说明, 下文介绍的测量方法和测量结果分析均依据 DIN EN 13829。章节编排和公式编号与标准基本一致。

3.2 测量方法

3.2.1 测量仪器

首先需要差压测量仪和体积流量测量装置来测量外围护结构的表面压差。它们是常用测量装置 (风门) 的组成部分。

按照 EN 13829, 压力测量仪的精度必须达到 $\pm 2\text{Pa}$ 。FLiB 建议对压力测量仪每两年做一次标定, 或至少做一次检测 (FLiB 2002)。

一般在一侧布置压力测量探头, 另一侧布置数据采集装置。

按照 EN 13829, 体积流量测量装置的精度必须达到 $\pm 7\%$ 。FLiB 建议每 4 年做一次标定, 或者做一次检测 (FLiB 2002)。

在常用的鼓风机上 (如 Minneapolis, Infiltec), 风机吸入侧构成测量喷嘴。为了测量体积流量, 需要测量在喷嘴和风机吸入侧之间的差压, 并借助换算公式或换算表将其换算到体积流量。带不同数量开孔或孔径的流量孔板可以使测量范围与建筑物良好匹配。

此外还需要一台温度计, 测量室内外温度, 以便将测量结果换算到标准工况。对温度计测量精度的要求不是很严, 因为温度对测量结果的影响很小。标准要求测量精度为 $\pm 1\text{ K}$, FLiB 的说明书建议每 4 年做一次标定或做一次检测。

3.2.2 需要测试的建筑物部分

按照 EN 13829, 需要测试的建筑物部分包括 “全部主动加热、制冷或机械通风的房间”。但是, 也可以和委托方商量确定需要检测的建筑物范围。比如对无菌房间检测时, 可仅限于一个房间 (如果对单个房间测试, 就需要使用专用设备, 因为用一台风门检测如此小的体积流量可能精度不够)。

如果以检查是否遵守建筑节能法规要求为检测目的, 则检测范围应该包括按建筑节能法规提供计算证明时包括的全部房间, 即作为系统边界的传热外围护结构 (DIN 4108-6) 内的所有房间。这

里特别是指装有散热器、地板采暖或墙壁辐射采暖的所有房间，以及在传热外围护结构内、通过空气连通或户间传热得到采暖的所有其他房间。

认真设计的建筑，系统边界是具有良好的保温性能、并具有良好的气密性的外围护结构。这里有两个例子 (FLiB 2002):

例子 1: 如果保温层和气密层位于吊顶上面的坡屋面层内，则该吊顶处于系统边界内。测量时需要打开吊顶人孔，并将吊顶层上面的体积计入建筑物净体积。

例子 2: 一个暖通机房（比如在地下室内）虽然被锅炉和管道余热加热，但是如果它位于建筑节能法规定义的系统边界外边，则不在测量范围内。依据 EN 13829，该机房不属于主动采暖。

当气密性建筑物外围护结构的位置不明确，或者与系统边界不一致时，选择哪部分建筑进行测试的决策就比较困难。比如像坡屋面的吊顶，(FLiB 2002) 建议把吊顶人孔关上，吊顶上面的空间不计入楼内体积。概言之：不直接采暖的房间（即没有散热器等采暖用具）和位于建筑节能法规定义的系统边界以外的房间，或者位于气密性外围护结构以外的房间，不进行气密性测试。

暖通设备间有一个与外部联通的不可关闭的燃烧空气进风口，而设备间内的锅炉运行又与室内空气关联。FLiB 对于 EN 13829 的解释

中推荐了一种实用解决方案：在压力测试时关闭暖通设备间的门，设备间的体积不计入建筑物净体积。这种处理方式比较合理，因为在建筑物使用过程中设备间的门一般都是关着的。

对建筑物进行**分段测量**是允许的。这在大型建筑物的测量提供了方便，因为它不需要太大的风机功率了。不过，测量之中会有一部分“内部渗漏”，即有一部分气体会跑到建筑物其他区域去。

只要分段测量得出的加权平均值低于建筑节能法规要求的极限值，就算满足要求。而超过极限值时，就难以分析内部渗漏对测量结果的影响有多大。虽然利用保护压力进行补充测量可以得出内部渗漏的份额，但往往不如多用几台风机对一栋建筑做整体测量更简单。

如果建筑物各部分之间没有连通门，则不能将整栋建筑作为一个区域测量，而必须分段测量（采用或不采用保护压力）。例如采用开放式连廊的居住建筑就是这种情况 [Simons]。

当由于少算通风散热损失（有或没有通风装置），建筑节能法规要求检测气密性时，就必须对系统边界内的全部体积进行气密性检测。法规对抽样测量个别房间，甚至个别外立面区段的可能不予考虑。与投资建筑保温产生的费用节约相比，测量费用无足挂齿。

在住人情况下的节能改造

需要在住人情况下进行建筑节能改造时，一般无法以合理的工作量对整栋建筑进行测量。所以，在目前已经结束的由德国能源署 (dena) 和复兴信贷银行 (kfw) 主导的“既有低能耗建筑”示范项目上，确定了一种特殊处理办法：

依此，只需检测 20% 的住房，其中至少有一套顶层住房，一套标准层住房和一套底层住房。每栋楼的检测最多不超过 12 套住房。

按照相应住房体积得出的换气次数 n_{50} 加权平均值必须遵守建筑节能法规的极限值，单个数据最多允许高出 30%。

3.2.3 测量时间点

EN 13829 要求在建筑物外围护结构完工后检测。建筑节能法规规定的测量必须符合标准，即在建筑物外围护结构完工后进行。

只有当建筑构件气密层尚能接触时，才能以适当的费用进行修复。

理想的测量时间点是，气密性建筑物外围护结构包括所有穿墙口已经完工，但地面工程（保温、隔音、地坪）以及可能已设计的房间一侧的覆板（如石膏板）还没有做。在采用气密性粘胶（薄膜，密封毡）时，固定覆板的支架必须已经安装，这样在负压下粘胶不会被撕裂。

建筑外部结构内侧的石膏板和建筑物底层地板构造

是否属于 EN 13829 定义的“建筑物外围护结构”，是有争议的。但是对于建筑实践而言，气密层在以后的施工中受到损伤的危险大不大，这个问题可能更加实际。如果该危险不大，在上述状态下的测量就可以作为建筑节能法规要求的验收测量。

把气密性外围护结构的施工进度在时间上协调到恰好在完工时所有节点仍然可供使用，在建筑实践中是很难做到的。所以，业主必须决定，是否愿意放弃简单修复的可能性，是否准备在测量时间点问题上违反 EN 13829 的规定，或者是否愿意安排两次测量和为此付费（当然第二次测量费用要低一些，因为体积计算已经有了，仅限于查找大的渗漏点）。

如果在建筑物外围护结构完工前进行测量，在检测报告中不允许有“按照 DIN EN 13829 进行检测”的文字。建议测试人员在商务谈判和检测报告中，提请业主“按照建筑节能法规进行必要的验收检测”。

验收检测

这个词有多重含义。“按照建筑节能法规进行的验收检测”必须符合 EN 13829 的要求，所以只有在建筑物外围护结构完工后才允许检测。

但是，“验收检测”也可以是对施工人员完成工作量的纪录，当后来发生气密层粘胶损伤时，可以与他前面的工作划清界线。这种检测只要气密性粘胶完工就可以进行。其他工种作业区的不密封处

需做临时封堵。这种检测在时间点和建筑物准备上不符合标准要求。

门的缺失

经常有建筑物外围护结构已经完工，但缺少户门或地下室门的情况。

只要缺少户门，就不能进行建筑节能法规意义上的验收检测。虽然在测量时可以对门进行临时封堵，但有可能这种封堵比以后安装的门的关闭缝和安装缝更严实。以后的测量结果也就可能会变差。

相反，如果只缺地下室的门，— 假定地下室的窗在一定程度上是密封的 — 则可采取以下补救措施：由于缺少地下室门，就把地下室纳入检测范围。而在计算体积时，只计算建筑节能法规规定的系统边界内的体积，也就是不采暖地下室的体积不加入到建筑物体积上。如果这样做能够满足建筑节能法规要求，整体结果就比较可靠。安装门以后结果只会更好，而不会变差。实际上，发生的变化一般是测不出来的。

3.2.4 气候条件

风机产生的压差必须显著大于测量时风和热升力造成的自然压差，这个条件对测量精度非常重要。所以，EN13829 规定自然压差不允许大于 5 Pa（参见第 3.2.8 节）。

热升力造成的内外压差为

$$\Delta p_{Th} = 0.04 \text{ Pa} / (\text{Km}) \cdot h \cdot \Delta T$$

式中：

Δp_{Th} ：热升力造成的室内外压差 Pa

h ：从零压区往上测出的高度 m

ΔT ：室内外温差 K

当高度 h 和温差的乘积为

$$h \cdot \Delta T = 5 \text{ Pa} / 0.04 (\text{Pa} / (\text{K m})) = 125 \text{ K m 时,}$$

便达到了 5 Pa。如果零压区在建筑物的中间高度，则建筑物高度与温差的乘积最大为两倍，即 250 K m

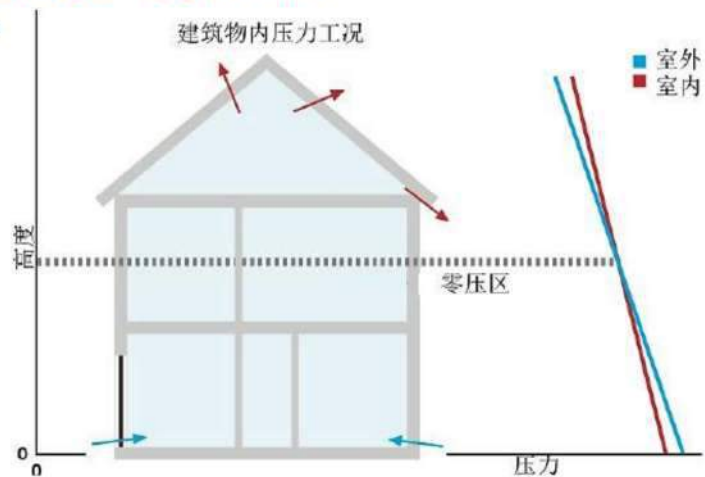


图 3.3: 示意图描述了采暖建筑在冬季的压力工况。曲线没有比例关系：绝对气压约为 100000 Pa, 建筑物上下压差为 100 Pa (8.5 m 高度), 自然压差约为 3 Pa (距离零压区 3 m, $\Delta T = 25 \text{ K}$)

3. 建筑物外围护结构透气性测试

(EN13829 错认为是 500 K m, ISO 9972 纠正该错误)。所以, 当温差较大时, 建议推迟检测。

热升力造成的自然压差

大气压力随着高度增加而降低, 而且空气密度越大降低越快。由于热空气比冷空气轻, 在相同高度上, 大气压力下降幅度在热空气时比冷空气小。所以冬季采暖建筑室内压力随高度变化的幅度比室外小。

在零压区的某个高度上, 静风时室内外压力相同。如果不是, 则通过建筑物外围护结构不密封处的气流会使压力恢复平衡。

在冬季, 零压区以下建筑物内为负压, 以上为正压。所以建筑物下部的泄漏会

造成由外向里渗风(内渗), 而建筑物上部则由内向外渗风(外渗)。泄漏点离零压区越远, 压差越大, 流速越高。

在某一高度上存在的室内外压差被称为自然压差。

零压区的高度取决于渗漏点的分布。如果大的渗漏点集中在下面, 则零压区也在下面。例如打开户门时, 零压区会自动调整到这个开口的高度, 即位于建筑物底层。原则上, 在产生的压差下, 零压区会自动调节到内外渗风质量流量相同为止。

即使在有风时, 在产生的压差下, 建筑物内的压力也会自动调节到内外气流质量流量达到平衡为止。当然, 在有风时的零压区不在水平位置, 而是会发生某种变形。

风垂直吹向中部墙体时引起的静压为

$$\Delta P_{st} = \rho / 2 \cdot v^2$$

式中

ΔP_{st} : 静压 Pa

ρ : 空气密度 (约 1.2 kg/m³)

v : 风速 m/s

在下述情况下达到 5Pa 极限值

$$v = (2 / \rho \cdot 5Pa)^{0.5} = 2.9 \text{ m/s}$$

这个 3 m/s 的近地风速相当于气象风速 6 m/s, 相当于四级风 (Bft)。标准将 3 级风力 (Bft) 作为极限值, 大于该风力时应该推迟测量。

重要的是测量人员应该知道, 这个气象条件只是推荐值。而规定的最大自然压差 5Pa 是有约束力的。

3.2.5 建筑物的测量准备工作

概述

热能发生器和机械通风系统 (住宅新风系统、抽油烟机、卫生间排风机等) 必须停用。为了可靠防止烟气侵害, 装在测试建筑部分以外其他地方的热能发生器也要停用 (例如在另一套住宅内), 位于测试建筑部分的不使用室内空气运行的热能发生器同样也要停用。清除开放式火点的炉灰。

开启测试建筑部分的所有房门。按照 EN 13829, 建筑物内的压力差不允许大于所产生压差的 10%。使用最

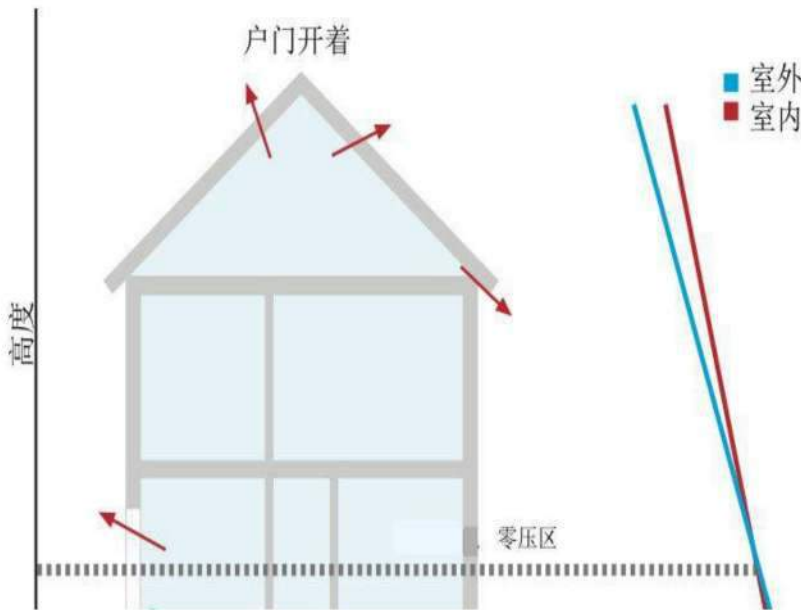


图 3.4: 开启户门时, 零压区自动调整到开门的高度。

大流量为 8000 m³/h 的一台风门时，基本可以始终遵守这个条件——在一扇全开的门的位置压降约为 2Pa，即为所产生 50Pa 差压的 4%。

所有有意保留的向外开口（窗、门、烟囱）都要关闭。

封堵连续运行（例如住宅）新风系统的进出风口。也可以对新风主机位置的风道或室外进风和排风口进行封堵（这样可能更简单些）。

如果缺少水封或水封还没有灌水，还需要封堵下水道。

方法 A 和 B

EN 13829 介绍了两种测量方法，它们在建筑物外围护结构上有意保留的不可关闭的开口封堵方面有差别。**方法 A** 简单的被描述为“在使用状态测量”，而**方法 B** 则为“建筑物外围护结构测量”。这里的使用状态，是指采暖季建筑物在使用期间，外围护结构上开口的状态。这里经常被误解，它不是指“工程进度”。这两种方法都要求建筑物外围护结构已经完工（参见 3.2.3）。建筑物外围护结构内有意保留的不可调节的开口，例如通往电梯井的排烟口或烟囱背通风口，保持开启状态，而方法 B 则要求封堵。

采用排风机时的自由通风口和外墙风口在方法 A 上需要关闭，而方法 B 则要求封堵。

短时间运行的通风装置

（如卫生间的排风机，抽油烟机），标准未予明确阐述。按照 FLiB 的说明书（FLiB 2002），采用方法 A 时需要关掉，采用方法 B 时需要临时封堵。

建筑物状态的文件记录

建筑物外围护结构上的窗、门和其他开口的状态，以及测量时做的临时封堵（不管是谁干的）都要做好现场记录并写入检测报告。

3.2.6 安装风机和压力测量仪表

EN 13829 规定，在最低楼层高度上测量建筑物的压差，以便可以测量到热升力造成的自然压差。

即使对风机安装位置没有明确规定，风门还是应该安装在最低楼层，否则就应该在最低楼层增加一套建筑物压力测量装置（比如在窗缝内装一根毛细传压管）。

如有可能请将风门装在通向露台的门内，这样也可以检测户门的气密性。

如何在某个特定高度位置测量压差？

对于热升力造成的压差可以采用以下办法：测量仪表始终显示在传压管穿过建筑（传热）外围护结构高度位置上的压力。假如风门位于二楼，而传压管的末端一直向下延伸到底层高度，这样测到的还不是底层高度上的压差。在温度变化趋于稳定的状态，即传压管内和周边环境温度相同时，测到的压

差是风门内传压管穿墙高度位置上的压差。原因是，传压管内空气柱的压力被传压管外空气柱的相同压力补偿了。

在未达到热稳定状态时，实测压力虽然由于传压管端部向下延伸而发生了变化，但是测量值是没有说服力的，因为它取决于尚在变化的传压管内温度。所以，EN 13829 建议水平敷设传压管。

总结：为了测量建筑物某个特定高度上的压差，传压管必须在此高度上向外引出。比如可以用毛细管来实现，它可以弯曲后嵌入窗户凹槽，然后再关闭窗口。

传压管端部不允许放在风机气流内。此外，楼外传压管端部应该通过一个可插接的 T 接头或者用一个多孔盒子做防风处理。有风时，应该与房子和其他障碍物保持一定距离。

对多个压力测点求平均值

如果在建筑物不同位置安装多个压力测点，并对测量值求平均值，就可以减小风的干扰。在这种情况下，在按 3.2.8 节测量自然压差时，也必须考虑全部压力测点。为此必须对所有测点的自然压差测量值求平均，或者必须对每个测点记录自然压差，然后按照 3.3.2 节从相应的测量数据中减去这个数值。

可以在一台压力测量仪上接多根传压管。它们从外部引向建筑物的不同位置。这里非常重要的一点是，所有传压管长度和壁厚要相同，否则

最短或者最厚的传压管端部的压力将起主导作用。这种（必然）相对较长的传压管要有一定的截面积，以免压力测量受到太大的阻尼影响。

用这种方式测出的压差不是压力的算术平均值，而是某种形式的加权平均值：传压管端部的不同压力，会造成空气在传压管内流动。由此引起的压降并非一定是在所有传压管内相同的：比如当风吹到建筑物外立面上时会产生正压，而经常会在其他三个外立面上产生负压。此时，其他三根传压管的总空气量会流过迎风侧的传压管。迎风侧传压管内的压降就特别大，而迎风侧风压对测量结果的贡献就不可理喻的小。

所有传压管应该水平敷设，并有遮阳。否则传压管内外空气温差，在不同高差下会导致测量误差。

3.2.7 查漏

在大约 50Pa 下进行单点测量，可以对建筑物气密性质量获得初步印象。

在大约 50Pa 负压下，对整个建筑物外围护结构走一遍，检查渗漏、有缺陷的临时封堵和未关严的窗户等。这种初步检查是 DIN EN 13829 规定的，按规定只需定位和记录大的渗漏点。

但是根据与测量委托方的约定，有时也必须定位中等甚至是微小的渗漏点。纠正建筑物准备工作中的缺陷（比如关闭内倾的窗户），并记录下最终的建筑物准备情

况。发现的大型渗漏点，以及根据委托内容发现的中型和微型渗漏点都要做好书面记录。

3.2.8 调零和测量自然压差

压力测量仪使用前，应检查零点，并根据需要调整。大多数电子式压力测量仪有自动调零功能。机械式压力测量仪可以用改锥调零。拔掉所有传压管，让所有入口（通过室内空气）短路。常用压力测量仪的压力室入口有部分是联通的——有时候可以在前端辨识，有时候藏在仪器背后。所以在不确定的时候，对一个压力室调零时可以把其他压力室的传压管也拔掉。调零后机械式仪表的位置（即它的斜度）不再允许变动。

调零后把传压管重新插到仪表上。

测量自然压差时，风机保持关闭状态，关闭风机通道。在 30 秒时间内，以一定的时间间隔记录测量的自然压差。建筑物处于负压状态时，测量值用负号标注。在数据分析计算所产生的压差时，需要所有测量值的平均值 Δp_{01} 。

此外，还需要计算所有正压差 Δp_{01+} 的平均值和所有负压差 Δp_{01-} 的平均值。如果其中有一个值大于 5 Pa，则按照 EN 13829 的规定就不允许进行测量。

在差压测量系列完成后，测量自然压差。所有测点 Δp_{02} 的平均值同样是数据分析需要的。如果正压测量值 Δp_{02+}

的平均值或负压测量值 Δp_{02-} 的平均值大于 5Pa，测量无效。

3.2.9 差压测量系列

在风机不同调节状态，测量建筑物外围护结构压差和风机输送的体积流量。按照 EN 13829 的要求，必须至少采集 5 个测量点的数据，两个测量点间隔不得超过 10Pa。最大压差必须至少为 50Pa，推荐 100Pa。最小压差为 10Pa，或 5 倍的自然压差，如果自然压差比测量压差大的话。

对于德国常用的 50Pa 分析方法，如果在更高压力下测量，测量误差会变小。所以在有风或热升力较大的情况下，应该在规定的最高 50Pa 测量数据基础上，在更高压力下采集更多的测点数据。

由于负压和正压测量结果经常不一致，不仅应该在负压下做系列测量，也应该在正压下做系列测量。这样不仅可以补偿具有阀门特性的开口，而且可以部分补偿风和热升力的影响。

3.3 数据分析

3.3.1 基础尺寸

在测量前应计算好数据分析需要的基础尺寸（建筑物体积，以及体积大于 1500 m³ 大型建筑的外围护结构面积），以便现场估计测量结果。

检测报告需要可查验的基础尺寸计算数据。所以照抄 CAD 程序给出的计算结果是不够的。

楼内体积 V

将建筑物检测部分所有房间的净地坪面积乘以平均净层高得出楼内体积。体积计算结果应做好记录，能经得起检测。净地坪面积计算按 DIN 277-1。它是按内尺寸计算得出的面积。计入净地坪面积的还有楼梯间、净断面积大于 1 m^2 的管道井、电梯井和高度小于 1.5m 空间的面积。

净空间高度为建筑完工状态下，地板上沿到楼板下沿的尺寸，即使测量时还没有安装吊顶或地坪。

EN 13829 意义上的楼内体积 V 相当于在 DIN 277-1 中定义的净体积。

按照 FLiB 的规定，托梁和可见的椽条等不能从楼内体积中扣除 (FLiB)。

外围护结构面积

只要被检测的一栋建筑物或部分建筑楼内体积大于 1500 m^3 ，在数据分析时也需要外围护结构的面积。这里指包容被检测楼内体积的所有墙壁、楼板和地板的面积。这里也包括与土壤接触的建筑构件或者建筑物内房间与房间的分隔墙，比如与隔壁联排别墅交界的房间与房间分隔墙。

与按 DIN 4108-6 计算传热损失不同，这里均采用内尺寸。所以，外围护结构面积与几乎始终位于建筑构件内侧的气密层面积非常吻合。

与外墙连接的内墙或中间楼板的端面积不从外围护结构面积中扣除。

3.3.2 泄漏流量计算和密度修正

分别对负压和正压测量数据进行分析。主要有两个目的：

- 通过平衡计算得到一条尽可能与测点相匹配的泄漏曲线，以便能够换算到任何压差（也可以专门换算到 50Pa ）。

- 密度修正就是为了计算标准工况（ $200\text{C}, 1013 \text{ hPa}$ ）下的体积流量。这里需要注意，通过某一特定泄漏点的体积流量或者质量流量都与流过该泄漏点的空气密度有关。按照 EN 13829，在修正时不考虑空气动态黏度。

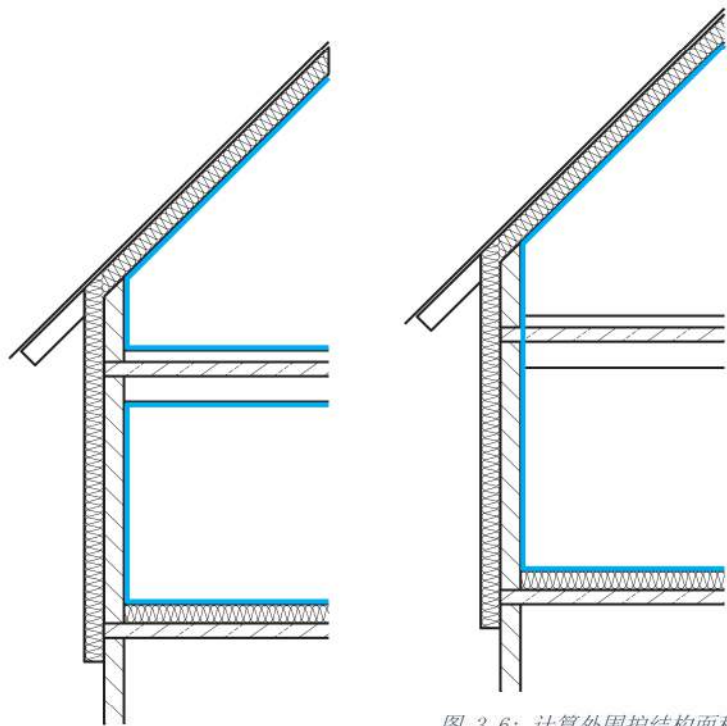


图 3.5: 计算楼内体积时 (DIN 277-1 的净体积 NRI) 采用内尺寸。

图 3.6: 计算外围护结构面积时采用外尺寸。

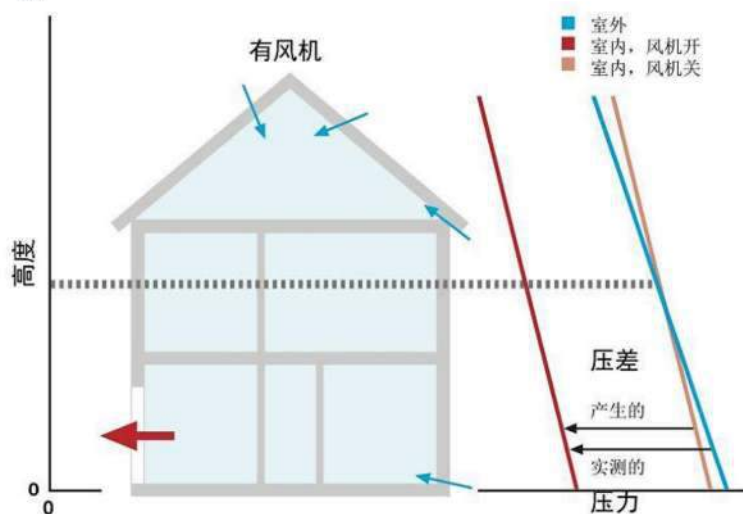


图 3.7: 随着风机的运行，楼内压力将减少风机产生的压差部分。将实测压差减去自然压差（注意前置符号，负压时始终是负号），得出风机产生的压差。

3. 建筑物外围护结构透气性测试

首先，将每个测点的实测压差 Δp_m 减去自然压差（参见3.2.8）（注意前置符号），得出风机产生的压差 Δp 。也就是将压差计算到零压区的高度。

$$\Delta p = \Delta p_m - 0.5(\Delta p_{0.1} + \Delta p_{0.2}) \quad (1)$$

根据体积流量测量装置的测量原理，必须对每个测点，从体积流量读数 \dot{V}_r 计算出实测体积流量 \dot{V}_m 。

$$\dot{V}_m = f(\dot{V}_r) \quad (2)$$

举例：测量喷嘴

采用一个测量喷嘴时，适用：

$$\dot{V}_m = \dot{V}_r \left(\frac{\rho_0}{\rho_G} \right)^{0.5} \quad (2a)$$

式中

ρ_0 : 标准工况下的空气密度
 ρ_G : 风机位置的空气密度（负压时为 ρ_i ，正压时为 ρ_e ）

测量喷嘴既不测量体积流量，也不测量质量流量。

（风机处）实测体积流量需换算为通过建筑物外围护结构的体积流量：

$$\dot{V}_{env} = \dot{V}_m \left(\frac{\rho_i}{\rho_e} \right) \quad (3)$$

对于正压测量适用公式（4）：

$$\dot{V}_{env} = \dot{V}_m \left(\frac{\rho_e}{\rho_i} \right)$$

对通过建筑物外围护结构的体积流量 \dot{V}_{env} 和风机产生的压差进行对数处理。利用最小方差法，按照公式（5）得出流动系数 C_{env} 和流动指数 n 。

$$\dot{V}_{env} = C_{env} (\Delta p)^n \quad (5)$$

对于平衡计算的说明

如果按照 DIN EN 13829 参考性附件 C（非约束性）进行平衡计算，在压力较小时，对数处理后的测量值对测量结果的影响大于压力较高时的情况。为了抵消这种影响，在平衡计算时可以用体积流量的平方对测量数据做权重处理：

对每个测点 i 的测量数据做对数处理：

$$x_i = \ln(\Delta p_i)$$

$$y_i = \ln(\dot{V}_i)$$

相应的权重为体积流量的平方：

$$g_i = \dot{V}_i^2$$

计算权重平均值：

$$\bar{x} = \frac{\sum_i (g_i x_i)}{\sum_i g_i} \quad (C.2)$$

$$\bar{y} = \frac{\sum_i (g_i y_i)}{\sum_i g_i} \quad (C.3)$$

于是，流动指数 n 和流动系数 C 的对数为：

$$n = \frac{\sum_i g_i (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_i g_i (x_i - \bar{x})^2} \quad (C.7)$$

$$\ln(C) = \bar{y} - n\bar{x} \quad (C.8)$$

流动系数 C_{env} 需要换算到标准工况（20°C, 1013 hPa），

以便获得泄漏系数 C_L 。

对于正压测量适用公式（6）：

$$C_L = C_{env} \left(\frac{\rho_e}{\rho_0} \right)^{1-n} \quad (6)$$

对于负压测量适用公式（7）：

$$C_L = C_{env} \left(\frac{\rho_i}{\rho_0} \right)^{1-n} \quad (7)$$

式中

ρ_i : 室内空气密度
 ρ_e : 室外空气密度
 ρ_0 : 标准工况下的空气密度

由此，按公式（8）得出泄漏流量 \dot{V}_L ：

$$\dot{V}_L = C_L (\Delta p)^n \quad (8)$$

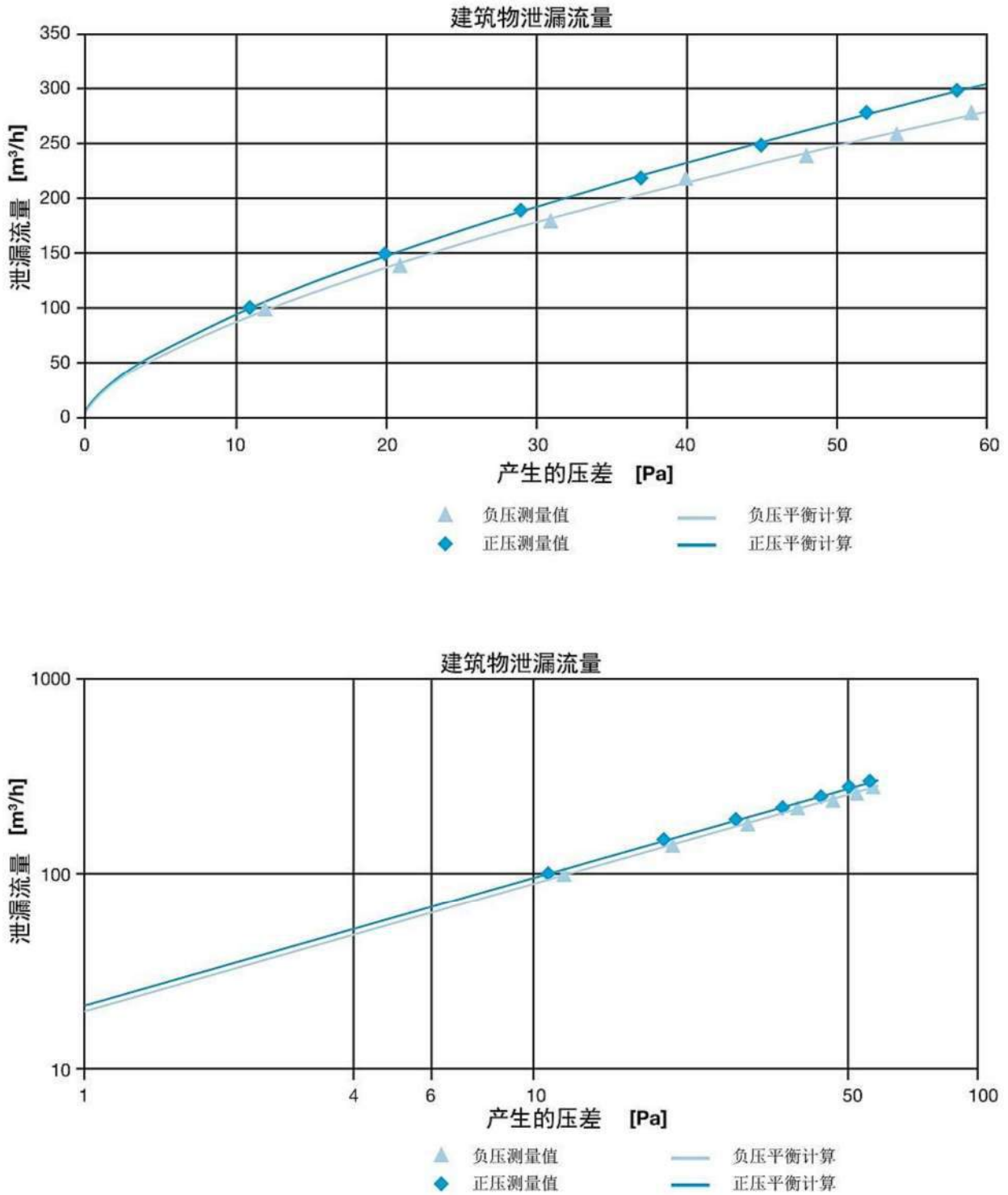


图3.8: 一条泄漏曲线在线性标尺中的例子(上)和在通常的双对数表中的例子(下)

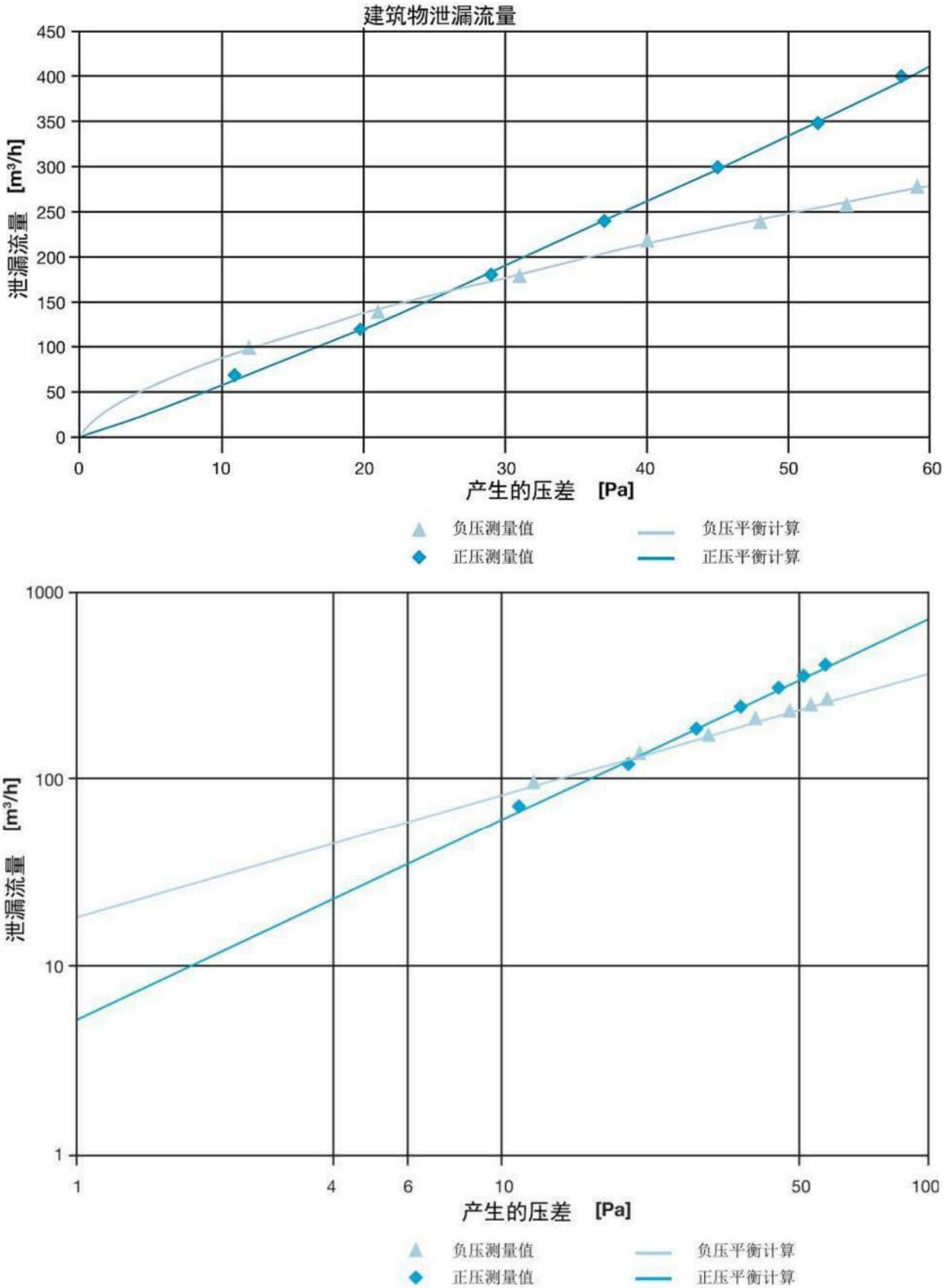


图3.9: 一条有疑问的泄漏曲线例子。在上图的线性表述立刻可以看出，正压曲线的曲度是错的。而在下图的双对数图上只反映出两条直线的差异。

总结：采用喷嘴测量时的密度修正

将公式 (2a) 至 (8) 合并得出用喷嘴测量体积流量时的泄漏流量：

负压测量：

$$\dot{V}_L = \dot{V}_r \left(\frac{\rho_i}{\rho_e} \right)^{0.5} \left(\frac{\rho_0}{\rho_e} \right)^{n-0.5}$$

正压测量

$$\dot{V}_L = \dot{V}_r \left(\frac{\rho_e}{\rho_i} \right)^{0.5} \left(\frac{\rho_0}{\rho_i} \right)^{n-0.5}$$

式中

\dot{V}_L : 泄漏流量

\dot{V}_r : 体积流量表计读数

ρ_i : 室内空气密度

ρ_e : 室外空气密度

ρ_0 : 标准工况下的空气密度

检测报告需要有测点和计算的平衡曲线示意图。为了避免示意图和数字结果出现矛盾，应该在泄漏流量曲线上，以泄漏流量 \dot{V} 为纵坐标，产生的压差 Δp 为横坐标来表示。而不是像标准规定的那样，为通过建筑物外围护结构的体积流量 \dot{V}_{env} 。

泄漏曲线一般用双对数方式表述。而在分析测量结果时用线性方式比较有利，因为这样可以更好的评价流量指数。

空气密度计算

按 DIN EN 13829，在计算密度 ρ 时忽略水蒸气含量。于是按照标准附件 B 得出：

$$\rho = \frac{p_{bar}}{287,055 \cdot T}$$

式中

p_{bar} : 气压表大气压力

T : 绝对温度 K

取距离海平面高度上的气压表大气压力计算就够了（例如取施工图底层地坪高度）。气候引起的高气压和低气压忽略不计。

3.3.3 推导值 / 特征值

在德国，透气性测量结果参照国际常用的 50Pa 压差。

首先按公式 (8) 计算出 50Pa 时的泄漏流量：

$$\dot{V}_{50} = C_L (50Pa)^n$$

将泄漏流量 \dot{V}_{50} 除以室内体积 V 或建筑物外围护结构面积 A_E （参见 3.3.1），得出常用的特征值：

$$n_{50} = \frac{\dot{V}_{50}}{V} \quad (10)$$

或

$$q_{50} = \frac{\dot{V}_{50}}{A_E} \quad (11)$$

式中

n_{50} : 50Pa 下的换气次数 h^{-1}

q_{50} : 50Pa 下的透气性 $m^3/(hm^2) = m/h$

V : 室内体积

A_E : 外围护结构面积 (E = envelope)

FLiB 建议，检测报告结果用上述两个数值表示。

当量泄漏面积

人们希望知道在测量后

实际泄漏面积有多大，然后可以估计出有多少泄漏点造成了最后的总泄漏量。

但是，实际泄漏面积是无法用测量技术采集的。因为泄漏点的几何形状和流体力学型态是未知的。不过，可以用当量泄漏面积作为比较尺度。它是在测量压差下（例如 50Pa），与建筑物外围护结构有相同空气通过量的一个孔洞面积。

ISO 9972 对“泄漏面积”给出了一个定义：在相同参考压力下，与建筑物外围护结构有相同空气通过量的一个对流动有利的孔洞面积：

$$A_L = C_L \left(\frac{\rho_0}{2} \right)^{0.5} (\Delta p_r)^{n-0.5} \quad (13)$$

(ISO 9972:2006 公式 13)

式中

A_L : 泄漏面积

C_L : 泄漏系数，此处为 $m^3/s/Pa^n$

Δp_r : 参考压力（德国通常为 50Pa）

对于流动有利的孔洞假设当然是不太现实的。按照另一种定义，是计算薄板上的锐角孔洞面积（奥尔默 (Orme) 等)：

$$A_{eq} = \frac{1}{0,61} C_L \left(\frac{\rho_0}{2} \right)^{0.5} (\Delta p_r)^{n-0.5} \quad (14)$$

式中

A_{eq} : 当量泄漏面积

C_L : 泄漏系数，此处为 $m^3/s/Pa^n$

对于德国通用的参考压差 50Pa，得出：

$$\begin{aligned} A_{eq} &= \frac{1}{0,61} C_L \left(\frac{1,2 \text{ kg} / \text{m}^3}{2} \right)^{0,5} (50 \text{ Pa})^{n-0,5} \\ &= \frac{1}{0,61} C_L (50 \text{ Pa})^n \left(0,6 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)^{0,5} \left(50 \frac{\text{kg}}{\text{s}^2 \cdot \text{m}} \right)^{-0,5} \\ &= \dot{V}_{50} \frac{1}{0,61} \left(\frac{0,6}{50} \right)^{0,5} \left(\frac{\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2}{\text{kg} \cdot \text{m}^3} \right)^{0,5} \end{aligned}$$

$$A_{eq} = 0,5 \text{ cm}^2 \frac{\dot{V}_{50}}{\text{m}^3 / \text{h}}$$

分区测量

如果对一栋建筑采用分区测量，例如对于居住建筑按户测量，则整栋建筑的测量结果是每个单项测量结果的权重平均值：

$$\begin{aligned} n_{50,ges} &= \frac{\dot{V}_{50,ges}}{V_{ges}} = \frac{\dot{V}_{50,1} + \dot{V}_{50,2} + \dot{V}_{50,3} + \dots}{V_1 + V_2 + V_3 + \dots} \\ &= \frac{V_1 n_{50,1} + V_2 n_{50,2} + V_3 n_{50,3} + \dots}{V_1 + V_2 + V_3 + \dots} \end{aligned}$$

3.3.4 检测报告

检测报告必须包含以下内容：

a) 概述：

检测合同规定的工作范围（例如基本测试，即仅检查大型泄漏；扩大的检测包括查找中小型泄漏）。
建筑物地址
建设年代（也可以估计）
检测日期

b) 引用的标准：

（如按照 EN 13829 方法 A 测量，参照 EN 13829 方法 A 测量）

在参照 EN 13829 测量时：罗列与标准偏差的事项。

c) 检测的建筑物部分：

文字介绍（如包括地下室空间，不包括坡屋顶吊顶部空间，只有住宅 xx 号）。

采暖、通风和空调设备类型和状态（如采暖锅炉位于检测体积外面，起居室内不使用室内空气的壁炉，利用排风机通过外墙透气口通风...）。

楼内体积，需要时提供外围护结构面积。

可验证的体积和外围护结构面积计算文件。

所有开口的状态（如外墙通风口和排风口已封堵，外门已关闭，屋面上人孔已关闭，内门和通往地下室的门处于开启状态）。

文字介绍临时封堵情况（如外墙上留出的抽油烟机安装孔已做临时封堵，新风机主机位置新风口和排风口做了临时封堵）。

d) 测量技术

使用的测量仪器

风机安装位置

e) 测量数据

自然压差

室内外温度

风力或风速，需要时提供风压

产生的压差和体积流量

泄漏曲线示意图

流量系数，流量指数，正压和负压测量时的泄漏系数

50Pa 时的换气次数，测量误差

必要时提供 50Pa 时的透气性或更多的数据

3.4 测量精度和误差计算

EN 13829 给出测量误差计算过程不完整。下面给出的计算过程是作者和 FLiB 同事讨论后提出的。与 FLiB 书第一卷第一版相比，第二版做了一个小的改动，现在的误差项 b 比原来小了一些。

建议在检测报告中用百分数 ($\pm t\%$) 形式给出测量误差，精确到个位。

3.4.1 负压或正压时体积流量 V50 测量误差

用下式计算泄漏流量 \dot{V}_{50} 的总误差 (%)：

$$s = \max(\sqrt{a^2 + b^2 + e^2}, d) + g$$

式中

- s 泄漏流量的误差百分数
- a 体积流量测量误差造成的泄漏流量误差百分数
- b 建筑物压力测量误差造成的泄漏流量误差百分数
- d 泄漏流量统计误差百分数
- e 密度修正误差造成的泄漏流量误差百分数
- g 可能存在的阀门特性所造成的泄漏流量误差百分数

每项误差可按以下方式计算：

a: 体积流量测量误差造成的泄漏流量误差百分数

这里可以直接填入制造厂提供的体积流量测量装置误差百分数。按照 DIN EN 13829，该误差不得大于 7%。

例如：a = 0.07

b: 建筑物压力测量误差造成的泄漏流量误差百分数

根据误差传递法则，这里不采用建筑物压力测量误差百分数，而是它的倍数。

建议：

这里不用测量得出的流量系数，而是取一个标准值 0.65。

分析在 50Pa 压差下的测量误差。如果测量时未达到 50Pa，则按照达到的最大压差分析误差。

建筑物压力测量误差由建筑物压力测量本身的误差和自然压差测量误差组成。

$$b = 0,65 \cdot \frac{\sqrt{e(50Pa)^2 + e(p_0)^2}}{50Pa}$$

式中

$e(50Pa)$ ：50Pa 是的压力测量误差 (Pa)，标准值为 2Pa

$e(p_0)$ 自然压差测量误差

阵风会造成测量时自然压差波动。可以取下面的最大值作为自然压差测量误差：

- 测量前后自然压差差值的一半
- 风压的一半

$$e(p_0) = \max\left(\frac{|\Delta p_{0,1} - \Delta p_{0,2}|}{2}, \frac{1}{2} \cdot \frac{\rho}{2} v^2\right)$$

式中

v：测量物体高度上的风速，可以选择：
— 直接测量或
— 从 bft 风力推导出气象风速，减半后得出 v。

总计得出

$$b = n \cdot \frac{\sqrt{e(50Pa)^2 + \max\left(\frac{|\Delta p_{0,1} - \Delta p_{0,2}|}{2}, \frac{\rho}{4} v^2\right)^2}}{50Pa}$$

按照 DIN EN 13829，压力测量仪器必须满足如下要求：

$$e(\Delta p) \leq 2Pa$$

举例：

BfT 风力 3 级时，查表的气象风速为 4.5m，

$$v \approx 2m/s$$

$$p = (1.2/2 \cdot 4) Pa = 2.4 Pa$$

$$b = 0,65 \cdot \frac{\sqrt{(2Pa)^2 + \left(\frac{1}{2} \cdot 2,4Pa\right)^2}}{50Pa} = 0,03 = 3\%$$

d: 泄漏流量统计误差百分数

按照 DIN EN 13829 公式 (C.17)，对 \dot{V} 的置信区间长度减半，并除以 \dot{V} ，便可得到 d。于是就得出

$$d = \frac{1}{2} \left(e^{I_y \ln(\Delta p)} - e^{-I_y \ln(\Delta p)} \right)$$

e: 密度修正误差造成的泄漏流量误差百分数

根据 DIN EN 13829，在计算空气密度时可以不考虑空气相对湿度。由此造成的误差在 1% 以下（例如在 20°C 和相对湿度 100% 时为 0.9%）。

根据标准，大气压力可以不予考虑。在 1000 米高度测量时密度计算误差为 10%。测量误差允许在 7% 左右。

根据 DIN EN 13829，不考虑动态黏度的影响。范例计算结果为，负压测量时误差在 -1.5% 和 3.4% 之间。如果进行负压和正压两项测量，误差会更小。

建议：

如果在测量期间给出了，并在计算中采用了实际气压表计压力或根据地理高度得出的平均大气压力，则：

$$e = 2\%$$

否则

$e = 5\%$

进行负压和正压两项测量的优点是考虑了 g 系数（见下文）。

g: 因某种可能的风机特性造成的误差百分数

负压和正压测量结果往往存在差异。建议:

在进行负压和正压两项测量时, 取:

$g = 0\%$

否则

$g = 7\%$

3.4.2 平均值 \dot{V}_{50} 测量误差

如按 DIN EN 13829 建议进行负压和正压两项测量, 得出的泄漏流量 \dot{V}_{50} 是两项测量结果 \dot{V}_{50u} 和 \dot{V}_{50o} 的平均值。于是, 泄漏流量测量误差为:

$$s_{ges} = \frac{1}{2 \cdot \dot{V}_{50}} \sqrt{(s_u \dot{V}_{50u})^2 + (s_o \dot{V}_{50o})^2}$$

式中

- s_{ges} : 平均值误差
- s_u : 负压测量误差
- s_o : 正压测量误差

3.4.3 推导值的误差

一个推导值的总误差 (n_{50} , q_{50} 或 w_{50}) 可按下式计算:

$$t = \sqrt{s^2 + f^2}$$

式中

- t : 推导值的误差百分数
- f : 基础尺寸的误差百分数 (V , A_E 或 A_F)

测量误差与几何尺寸计算没有关联。即使考虑了建筑尺寸偏差, 也不会有太大的误差。但是, 对于某些特定面积和体积是否可以纳入计算范围存在异议, 从而导

致不同专家会得出不同的计算结果。对此可以用 f 来考虑这方面的影响:

$f = 3\%$

如果与 DIN EN 13829 不同, 而是依据 FLiB 的手册或者《建筑节能法》从外体积估算内体积, 则:

$f = 12\%$

最后得出的总误差

静风时以体积流量测量误差为主, 为 7%。于是, 50Pa 换气次数误差在 8%左右。在 4 级风力条件下, 总测量误差一般不超过 10%。

3.5 对于测量人员的提示

3.5.1 对于经常发生的误解的更正

对体积计算建档是义务

许多检测服务商会认为, 把委托方提供的建筑物内体积写入检测报告就够了。但是根据 EN 13829 第 7 节, 检测报告必须包括可验证的体积计算数据。这项规定究竟有多大意义, 有例为证: 不同检测人员给出的体积最大偏差达两倍。

地坪构造不可计入体积

在保温标准很高的建筑上如被动房, 最下面采暖楼层的地坪构造占了相当大的体积。如果在做地坪前做气密性试验, 有些检测人员采用了检测时的净尺寸, 而不是设计净尺寸。也就是他们把设计的地坪构造体积计入了建筑物内体积。

最好还是取竣工后的尺寸, 这样测量结果也就不受

地坪工程进度的影响了 (这栋建筑不会由于有了地坪构造而更加密封。)

查找大型泄漏是义务

为了把检测服务报价做的尽量便宜, 一些检测人员放弃查找渗漏点。但是 EN 13829 要求在选择的最大压差下 (负压时从楼内查找) 对“整个建筑物外围护结构查找大型渗漏和临时封堵的缺陷”。

不做这种渗漏检查, 会存在风险, 例如窗户没有关严或者施工队偷偷盖住渗漏点。

即使采用方法 B, 建筑物外围护结构也必须已经竣工

方法 A 和 B 的差异不在施工进度, 而在于如何对待设计的通风口。这一点已经在 3.2.5 节做了详尽介绍。

假如建筑物外围护结构尚未竣工, 则这种测量原则上不符合标准要求。

即使采用方法 A, 通风机组也必须封堵

测量标准第 5.2.2 节介绍了“建筑构件”的处理方式; 第 5.2.3 节介绍了“采暖、通风和空调系统”的处理方式。如果谁只读了 5.2.2, 可能会认为采用方法 A 时不需要对通风系统封堵。而实际上根据第 5.2.3 节规定, 不管采用何种方法, 都要封堵“机械通风装置的通风口”。

非测量服务人员必须封堵泄漏

有时候在测试报告中说明, 已对发现的渗漏进行了封堵。但常常没有说清楚是

进行了临时封堵还是耐久性封堵。

如果用粘贴胶条方式进行了耐久性封堵，则在测试报告中不需提及。否则有人就会问，为什么检测人员担负了施工任务？

如果是临时封堵，则检测结果没有多少价值。这种测量无论如何是不能证明已遵守了标准要求的。必要时应该计算出，采用这种封堵方式时，每个渗漏点对测量结果的贡献（“逐步封堵”的测量方法）。

封堵应该有文字记录

检测报告中虽然按规定写明了采用方法 A 或者 B，但经常没有文字说明测量时有哪种形式的封堵。于是测试报告就不可验证了。

按照标准规定进行逐项封堵之所以特别重要，是因为如何按方法 A 或 B 进行封堵是存在意见分歧的。

3.5.2 对于测量服务人员的其他提示

服务范围 and 薪酬标准

气密性检测的工作量在项目与项目之间差别很大。当已经存在通风系统或者在外围护结构竣工前进行测试时，检测人员往往很难估算建筑物测试准备工作量。所以建议按照建筑物测试准备工作量结算或者让施工单位完成准备工作。后一项是必须的，如果通风系统已经安装，并且检测人员不能操作的话。

工作量在很大程度上取

决于渗漏查找规模及其文件记录。事先约定渗漏检查范围是个好办法。这样就可以比如约定“基本检测”，该检测仅包括规定的大型不密封点的查漏。“在扩大的检测”中，也可以包括查找中小型渗漏。反复出现的同类渗漏（比如阳台门下部安装缝的进气）可以只进行归总记录。

第三级是带有鉴定性质的测量。这里经常需要澄清一些特殊问题，比如出现霉变的原因或修复渗漏点的工作量。这类检测的工作量一开始是无法预估的，所以只能按实际工作量结算。

必要的风机功率

在报价前必须澄清，是否可以用现有的检测设备进行测量。首先要估计需要的最大风机功率。可以按下式计算：

$$\dot{V}_H = V \cdot n_{50, \max}$$

式中

\dot{V}_H : 需要的风机最大体积流量

V: 建筑物内体积（报价时大致估计）

$n_{50, \max}$: 50Pa 差压下最大允许换气次数

但是也需要考虑，能够测量的 50Pa 差压 $n_{50, \max}$ 下最小换气次数是多少，并由此得出最小体积流量：

$$\dot{V}_L = V \cdot n_{50, \min} \left(\frac{10}{50} \right)^n$$

式中

\dot{V}_L : 可测量的最小体积流量

例如，如果希望还能够按照标准测量极限值的 1/6

数值，即从 10Pa 开始测量，就需要一个允许测量 1/20 最大体积流量 V_H 的测量装置。

所以常用的鼓风机往往无法测量单个房间（如无菌室）。

封堵通风装置

在主机位置封堵进气和排气口，比封堵每个房间的送回风口要简单。用气球方法比较好，把瘪的气球放入风口，然后充气。

委托方进行不允许的临时封堵

有的委托方在测试日期前自己对估计的渗漏点进行了封堵。在定量测试前，应该告诉他们，这种状态下的测量不符合测量规定，建议拆除已做的封堵。

如果他不同意，则测量照常进行。把不允许的封堵和与标准的偏差写进检测报告，并指出这种条件下的测量结果缺少说服力。

快速找到开着的窗户

启动风机后如果发现体积流量超大，或者根本达不到要求的 50Pa 压差，则说明存在大型渗漏。经常是有窗户开着或者未关严。

为了找到不密封点，可以让风机开着，然后到每个房间的门，如果是多住户建筑就到每个户门。在开门时脸朝着房间方向，一般根据气流情况能感知到门后的房间有没有大型渗漏。例如在户门处有抽风时，可以到房间里继续寻找，如果感觉不到气流就查下一个户门。

记录测量范围

在采用可调节测量范围的测量装置时（例如在常规风门上安装流量孔板），就存在向数据分析软件输入错误孔板数据或读错刻度而造成虚假测量结果的危险。所以紧迫建议将使用的流量孔板单独记录在手写报告中，这样可以在办公室审核检测结果的数量级。



作者

约阿希姆·策勒

物理学硕士

气密性、通风、保温、低能耗建筑和被动房领域

的自由职业工程师和咨询专家（比伯拉赫）

正压测量时不要忘记在风机吸风侧方向安装软管

采用 Minneapolis 风门做正压试验时，必须从风机压力测量装置向外，也就是朝着风机吸风口方向引出一根软管。

像测量范围一样，应该将软管连接写在记录本上，因为事后很难再回忆是否安装了软管。

如果发现忘了接软管，则还用计算方式修正测量结果。此时必须从风机压力读数中减去当时的建筑物压力。

不按顺序调节楼内压力

在气密性好（即 n_{50} 较小）的建筑上，改变风机电压后需要很长时间才能达到楼内压力稳定。就像用大面积薄膜做气密封时，在施加压力时薄膜有时会改变位置一样（比如超市屋面里的薄膜在正压时的表现）。

为了保证测量精度，需要等待足够长的时间。如果进行一个从最小压力到最大压力的连续系列测量，则测量的所有体积流量都太小。如果从最大压力开始，

测量值又太大。而这种系统误差又不一定能从测量曲线上识别。

所以建议，不按逐步上升或下降的压力顺序测量，而是交替调节风机电压的升降。此时，如果没有等待足够时间，从测量值的离散度就可以看出来。

采用全自动测量装置时情况更加复杂，需要加倍小心。因为它通过改变体积流量将压力调节到额定值的。使用者必须参照操作手册或者向制造厂咨询，明确如何保证只有当建筑物压力达到稳定时才开始测量。

参考文献

[Biasin, Zeller] Karl Biasin und Joachim Zeller: „Luftdichtigkeit von Wohngebäuden– Messung, Bewertung, Ausführungsdetails.“ 3. Auflage, VWEW Energieverlag Frankfurt 2002

[Bolender] Torsten Bolender: „Messnorm ISO 9972 – Unterschiede zur Messnorm EN 13829.“ Tagungsband 2. Europäisches Blower Door-Symposium, Energie- und Umweltzentrum Springe 2007

[Charlesworth] Peter S. Charlesworth: „Air Exchange Rate and Airtightness Measurement Techniques – An Application Guide.“ AIVC, GB Coventry 1988

[DIN 277-1] „Grundflächen und Rauminhalte von Bauwerken im Hochbau - Teil 1: Begriffe, Ermittlungsgrundlagen.“ Beuth Verlag Berlin 2005-02

[DIN V 4108-6] „Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 6: Berechnung des Jahresheizwärme- und des Jahresheizenergiebedarfs.“ Beuth Verlag Berlin 2003-06

[DIN 4108-7] „Wärmeschutz und Energieeinsparung in Gebäuden. Teil 7: Luftdichtheit von Gebäuden, Anforderungen, Planungs- und Ausführungsempfehlungen sowie Beispiele.“ Beuth Verlag Berlin 2001-08

[DIN EN 832] „Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden - Berechnung des Heizenergiebedarfs- Wohngebäude (enthält Berichtigung AC:2002); Deutsche Fassung EN 832:1998.“ Beuth Verlag Berlin 2003-06

[DIN EN 13829] „Bestimmung der Luftdurchlässigkeit von Gebäuden – Differenzdruckverfahren.“ Beuth Verlag Berlin 2001-02

[FLiB 2002] „FLiB informiert: Beiblatt zur DIN EN 13829.“ FLiB e.V. Kassel Oktober 2002

[ISO 9972] „Thermal performance of buildings – Determination of air permeability of buildings – Fan pressurization method.“ CH Geneva 2006

[Orme u.a.] Malcolm Orme, Martin Liddament, Andrew Wilson: „An Analysis and Data Summary of AIVC's Numerical Database.“ AIVC Technical Note 44, GB Coventry 1994

[Simons] Paul Simons: „Messstrategien für die Luftdichtheitsmessung von Mehrfamilienhäusern.“ Tagungsband 2. Europäisches Blower Door-Symposium, Energie und Umweltzentrum Springe 2007

[Zeller u.a.] Zeller, Dorschky, Borsch-Laaks, Feist: „Luftdichtigkeit von Gebäuden. Luftdurchlässigkeitsmessungen mit der Blower Door in Niedrigenergiehäusern und anderen