

Sealing Performance of Rural Housing in Beijing

Yiwen Jian¹, Zan Zhu¹

1. Department of Building Environment and Facility, Beijing University of Technology, BJUT, Beijing, China

1.jianyiwen@bjut.edu.cn

Abstract: Understanding of sealing performance of rural housing is very important in reducing energy consumption for heating demand. This paper illustrates the identification of infiltration rates through windows and doors in rural housing through temperature measurements. Room air temperatures were measured hourly from 2009-02-08 to 2009-02-17 in one rural housing in Beijing. During the measuring period, there is no one living in this house and all the windows and doors have been closed. The room air temperatures were simulated using DeST-h. The infiltration rate at each hour was identified by minimizing the gap between the measured temperature and the simulated temperature.

Keywords: rural housing; sealing performance; measured temperature; simulated temperature; DeST software

北京地区农村住宅门窗气密性能的研究

简毅文¹, 朱 赞¹

1. 北京工业大学建筑环境与设备工程系, 北京, 中国, 100124

1.jianyiwen@bjut.edu.cn

摘 要: 农村住宅门窗气密性能的研究有助于从定量角度分析和把握农村住宅节能设计和研究中的主要问题。本文以北京房山区的某户农宅为研究对象, 2009 年 2 月, 在该住宅无人居住的情况下, 对住宅房间室温进行逐时的连续测试, 并根据 DeST 方法的温度求解理论算式, 通过测试房间实测室温与模拟室温的分析比较, 逐时确定出房间的通风换气次数, 以此研究分析农村住宅门窗的气密性能。

关键词: 农村住宅; 气密性能; 实测室温; 模拟室温; DeST 软件

1 引言

伴随着新农村建设的不断推进, 降低农村建筑的能源消耗、尤其是北方农村住宅的采暖能耗, 并提供健康舒适的室内环境已经引起了越来越广泛的关注。

研究者对农村住宅的节能研究大都从农宅室内热环境和能耗的调研着手^[1-3]。文献[3]的调研结果表明, 农宅的采暖能耗量较大, 大多数为 20~25 kgce/a, 最高甚至超过了 35 kgce/a, 但采暖效果却并不明显, 对应于 3.7℃的室外平均温度, 采暖房间的平均室温仅有 11.5℃。对此, 文献[4]总结产生上述问题的主要原因如下:

➤ 农村住宅围护结构的保温性能差。外墙仍主要已 37 粘土砖墙为主, 无保温; 外窗主要为木制或铝合金的单层玻璃窗; 外门都是单层木门; 地面没有保温措施。

➤ 农村住宅大多由村里的工匠凭经验结合户主的要求来完成设计, 并指导施工。这种手工业的建造方式以及农宅门、窗材料的选择使得农宅的门窗密封不严, 再加上建筑平面布局的不合理, 导致农宅“撒气漏风”的现象严重。

因此, 研究分析农宅在实际使用状态下门窗的气密性能, 有助于从定量角度明确农宅“撒气漏风”现象对房间热状况的影响程度, 分析和把握农村住宅节能设计和研究中的主要问题。

目前, 确定房间气密性能的方法主要有示踪气体法和气压法。示踪气体法是在室内释放某种气体, 用浓度测量仪跟踪测量示踪气体浓度的衰减规律, 通过计算, 得出该房间与外界的换气次数, 也就可以得出房间气密性的结果^[5]。气压法是利用风机增压与减压的原理, 在建筑物的内外之间人为地造成压力差, 测定一系列压差下的空气渗透量, 从而确定建筑房间的气密性能^[6]。这两种方法都带有

人为控制的因素,难以实现对房间渗透风量的连续测试。此外,还有通过计算流体力学(CFD)方法对单通路建筑自然通风状况的研究,但由于空气运动的脉动特性,CFD方法无法反映出多通路的实际住宅内房间的自然通风状况^[7]。因此,现有的方法尚不能完全用来研究农宅在实际使用状态下室外空气的渗透状况,也即农宅门窗的气密性能。

为研究分析连续状态下的房间自然通风状况,文献[8]提出了一种通过室温测试反推计算确定住宅自然通风状况的近似方法。在此基础上,本文以北京房山区的某户农宅为研究对象,2009年2月,在该住宅无人居住的情况下,对房间室温进行逐时的连续测试,并根据DeST方法的温度求解理论算式,通过模拟室温与实测室温的分析比较,逐时确定农宅房间的通风换气次数,并分析比较通风换气次数计算结果与室外风速的相互关系,以此深入地研究分析农村住宅门窗的气密性能。

2 研究方法

采用的热环境模拟分析软件是DeST-h,DeST基于状态空间法建立数学模型,考虑室内外各种扰量的综合作用后,DeST中房间室温的计算式如下:

$$t_s(\tau) = \int_{-\infty}^{\tau} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \varphi_{ij} e^{\lambda_i(\tau-\eta)} q_j(\eta) d\eta \quad (1)$$

式中: t_s —房间室温,℃; q_j —影响房间室温的各个扰量,包括外温、太阳辐射、邻室室温、天空有效辐射、房间通风换气量以及室内发热量等; λ_i —状态空间法中房间的空间特征值向量; φ_{ij} —采样后各个扰量对房间室温的影响系数; n —空间特征值向量的维数; m —外温、太阳辐射等扰量的数量^[9]。

对于房间与外界通风换气次数未知的情况,将通风换气热交换量 q_N 对房间温度的影响与其它扰量的影响分开,即变换公式(1),得到新的计算式为:

$$t_s(\tau) = t_a(\tau) + \Delta t(\tau) \quad (2)$$

式中:

$$t_a(\tau) = \int_{-\infty}^{\tau} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \varphi_{ij} e^{\lambda_i(\tau-\eta)} q_j(\eta) d\eta \quad (3)$$

$$\Delta t(\tau) = \int_{-\infty}^{\tau} \sum_{i=1}^n \varphi_i e^{\lambda_i(\tau-\eta)} q_N(\eta) d\eta \quad (4)$$

对公式(4)进行积分并代入公式(2),可得到:

$$t_s(\tau) = \hat{t}_a(\tau) + \psi_0 q_N(\tau) \quad (5)$$

式中:

$$\hat{t}_a(\tau) = t_a(\tau) + \sum_{i=1}^n \Delta t_i(\tau - \Delta \tau) e^{\lambda_i \Delta \tau} + \psi_1 q_N(\tau - \Delta \tau) \quad (6)$$

$$\psi_0 = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta \tau \varphi_i}{(\Delta \tau \lambda_i)^2} (e^{\Delta \tau \lambda_i} - \Delta \tau \lambda_i - 1) \quad (7)$$

$$\psi_1 = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta \tau \varphi_i}{(\Delta \tau \lambda_i)^2} ((\Delta \tau \lambda_i - 1) e^{\Delta \tau \lambda_i} + 1)$$

又房间通风换气的热交换量为:

$$q_N(\tau) = \rho c_p V R (\tau) (t_{out}(\tau) - t_s(\tau)) \quad (8)$$

式中: t_{out} 为外温; R 为房间逐时的通风换气次数; V 为房间体积; c_p 为室内空气定压比热; ρ 为室内空气密度。

根据公式(8),公式(5)最终转换为:

$$t_s(\tau) = \frac{\hat{t}_a(\tau) + \psi_0 V R (\tau) \rho c_p t_{out}(\tau)}{1 + \psi_0 V R (\tau) \rho c_p} \quad (9)$$

根据上述的分析,首先通过模拟软件DeST,计算确定除当前时刻通风换气以外的各个扰量对房间室温的影响程度。在此基础上,根据实测室温 t_m ,按照 $|t_m - t_s|$ 最小的原则逐时地求出房间与外界的通风换气次数 R ,以此分析在门窗关闭条件下的房间自然通风状况,也即农宅门窗的气密性能^[8]。

3 研究对象

3.1 建筑及围护结构描述

研究对象为北京房山区的某户农宅,该住宅坐北朝南,由个房间组成,住宅的平面布局如图1所示。

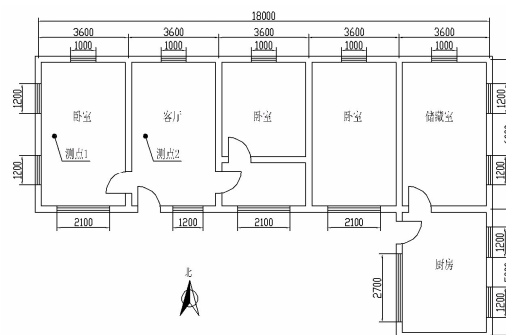


图1: 研究对象的平面布局

该农宅层高2.7米,外墙为普通的37粘土砖墙,外墙的传热系数通过热计量实验测得为 $1.47 \text{ W/m}^2 \cdot \text{℃}$;外窗为普通的木框单玻窗,传热系数取值为 $5.7 \text{ W/m}^2 \cdot \text{℃}$;屋顶的基本做法为:150mm厚的钢筋混凝土+120mm厚的炉渣+200mm白灰+防水毡布;传热系数计算值近似为 $1.27 \text{ W/m}^2 \cdot \text{℃}$;

地面为水泥沙浆地面。

3.2 室温测试

室温测试房间为住宅西端头的卧室及其相邻的客厅，采用 0.5℃ 测试精度的 RR001 温度自记仪连续记录房间室温，测试房间及自记仪的位置如图 1 所示。自计仪放置于室内的阴凉干燥处，避免了太阳辐射和房间内热源对室温读数的影响。

自记仪的读数时间间隔为 30 分钟，室温的测试时间为 2009-02-8~02-17。

3.3 室内发热描述

住户反映，2 月 8 号之前，住户开启运行了采暖设施；2 月 8 号之后，室内基本无人居住，住户只是在期间的某个时间段内返回房间做短暂停留，也即，此时房间内不存在人员、照明灯具及家电设备的发热。

3.4 室外气象参数描述

外温和水平面的太阳总辐射由 Vantage Pro1 型号的小型自动气象站逐时记录得到，水平面的太阳散射辐射由 TBD-1 型号的散射辐射表逐时记录得到。

不能忽略屋面与大气层之间的长波辐射换热（有效辐射）的影响。屋面与大气层之间的有效辐射以等价综合外温的变化来表示，引用文献[10]的理论研究结果，考虑外表面总换热系数 $23.3 \text{ W/m}^2 \cdot \text{℃}$ 的情况，由室外干球温度的记录数据，逐时插值计算得到有效辐射等价综合外温的逐时变化。

4 计算结果分析

在上述调查测试的基础上，针对测试的卧室房间，运用本文中公式（9）的方法，研究分析该房间在无人居住情况下的冷风渗透状况，也即门窗的气密性能。同时，考虑通风换气次数初始值设定以及住户采暖加热房间所导致的计算误差，本文的研究只针对 2009-02-12~2009-02-17 的计算结果。

4.1 密闭室温计算

定义在除通风换气量外的各个扰量（外温、太阳辐射、有效辐射等）作用下的房间室温为密闭室温。于是，首先不考虑通风换气对房间热环境的影响，通过模拟软件 DeST-h，计算确定农宅各个房间密闭室温的逐时变化趋势，并对所测试的卧室房间，将模拟的房间密闭室温与实测室温和外温的变化相比较，如图 2 所示。

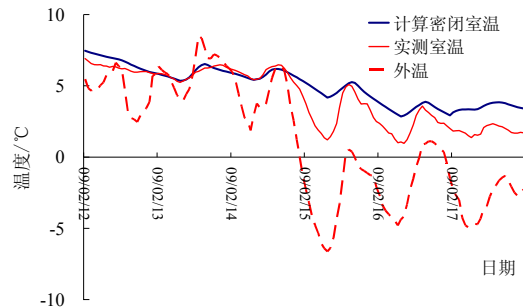


图 2：房间密闭室温与实测室温、外温的比较

图 2 表示测试房间密闭室温的计算结果几乎总高于房间的实测室温。由此可以推断，由于未考虑通风换气的影响，邻室室温的模拟计算结果与其实变化值之间同样存在较大的误差，而房间热状况除了受到外温、太阳辐射的影响外，还会受到邻室室温的影响。因此，还需要分析邻室室温计算偏差对测试房间密闭室温的修正，否则无法获得测试房间计算室温与实测室温一致的变化趋势。

4.2 密闭室温修正

图 3 表示出做为邻室的客厅房间室温实测值与计算值的偏差。

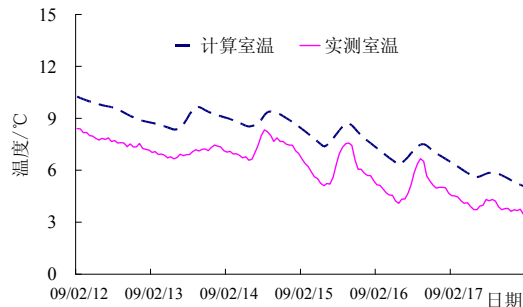


图 3：邻室室温实测值与计算值的比较

依照 DeST 温度求解的理论方法，邻室室温计算值与实测值的差异对测试房间室温的影响程度采用公式（10）计算如下：

$$\Delta t_l(\tau) = \int_{-\infty}^{\tau} \sum_{i=1}^n \varphi_i e^{\lambda_i(\tau-\eta)} (t_{l,s}(\eta) - t_{l,m}(\eta)) d\eta \quad (10)$$

式中： Δt_l —修正邻室室温所导致房间室温的变化，℃； $t_{l,m}$ —邻室实测室温； $t_{l,s}$ —邻室计算室温； λ_i —状态空间法中房间的空间特征值向量； φ_i —邻室室温对测试房间室温的影响系数； n —空间特征值向量的维数。

在上述基础上，计算分析邻室室温偏差对测试房间密闭室温的修正，如图 4 所示。图 5 则表示修正邻室室温的影响后，测试房间模拟密闭室温与实测室温和外温的比较。

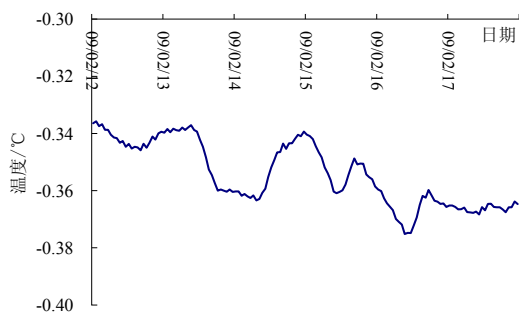


图 4: 邻室室温偏差的修正

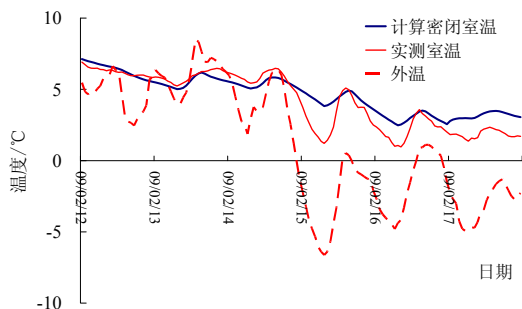


图 5: 修正邻室影响后, 密闭室温与实测室温、外温比较

4.3 通风换气次数计算

合理地确定了各个扰量的作用后, 在图 5 的基础上, 重新计算分析房间通风换气的影响。同样按照公式 (9) 的通风换气次数调节原则, 逐时地分析和比较房间计算室温 and 实测室温, 并确定房间通风换气次数的变化趋势, 分别如图 6 和图 7 所示。

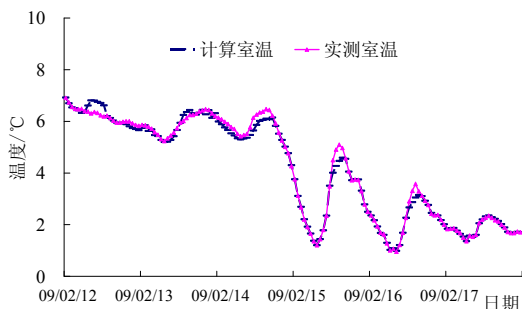


图 6: 测试房间计算室温与实测室温的比较

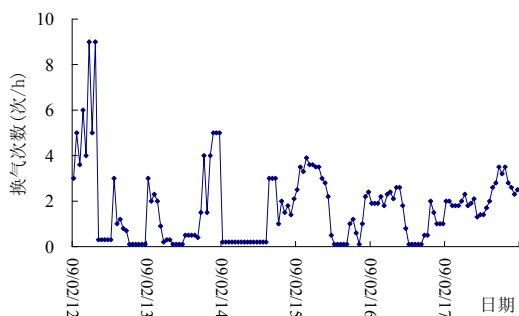


图 7: 测试房间计算通风换气次数的变化
图 6 表示出测试房间模拟计算室温与实测室温

在总体上一致的变化趋势, 计算时间内室温模拟计算误差的最大值、平均值及方差分别为 0.63°C 、 0.05°C 和 0.17°C , 模拟室温与实测室温的一致性表明各个扰量的确定以及房间通风换气次数的计算有可能是合理的。

图 7 的结果反映出在无人居住情况下的房间自然通风状况, 也即农宅门窗的气密性能。2 月 13 号后的室温计算误差较小, 此时房间通风换气次数的计算值接近真值, 计算结果主要在 $0.5\sim 5$ 次/h 的范围内变化。因此, 农村住宅房间门窗的密闭性能较差, 房间漏风撒气现象的严重导致了冬季室内环境的恶劣和采暖能耗的增加。

5 结论

本文通过房间室温测试的方法, 根据 DeST 理论方法的温度求解算式, 反推计算得出北京地区某户农宅房间逐时的通风换气次数, 并通过房间实测室温与模拟室温的分析比较、房间计算通风换气次数与室外风速相互关系的分析, 说明通风换气次数计算结果的可靠性。

研究表明, 北京地区农村住宅门窗的气密性能差, 门窗密闭情况下房间的通风换气次数可以到达 5 次/h, 房间漏风撒气现象比较严重。因此, 在农村住宅节能工作的研究和实践中, 不能忽视农村住宅门窗气密性能的改善和增强。

致 谢

感谢清华大学建筑节能研究中心 DeST 研发中心吴如宏先生提供室外气象参数。

References (参考文献)

- [1] CHEN Shuqin, LI Nianping, LE Di, Research on Energy Utilization Structure of Rural Residence[J], Energy Conservation Technology, 2005, 23(6), P483-487 (Ch).
陈淑琴, 李念平, 乐地, 等.农村住宅能源使用结构的分析研究[J].节能技术, 2005, 23 (6): P483~487.
- [2] ZHENG Zhuling, LI Yonghong, YANG Xudong, Study on Energy Efficiency of Rural Residential Building in Beijing[J], Building Science, 2008, 24(4), P9-14 (Ch).
郑竺凌, 李永红, 杨旭东.北京市农村住宅节能研究[J].建筑科学, 2008, 24 (4): P9~14.
- [3] JIAN Yiwen, ZHU Zan, SHI Xingwang, Study on Indoor Environment of Rural Houses in Beijing[J], Building Science, 2010, 26(6), P40-43 (Ch).
简毅文, 朱 赞, 施兴旺. 北京地区农宅室内环境的研究[J].建筑科学, 2010, 26 (6): P40~43.
- [4] Tsinghua University Building Energy Research Center, 2008 Annual Report on China Building Energy Efficiency[R], China Architecture and Building Press, 2008(Ch).
清华大学建筑节能研究中心.中国建筑节能年度发展研

- 究报告 2008[R].北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [5] LI Xiaofeng, Zhu Yingxin, Natural ventilation study of a meeting room with the tracer gas technique[J], HV&AC, 1997, 27(4), P7-10 (Ch).
李晓峰, 朱颖心. 示踪气体浓度衰减法在民用建筑自然通风研究中的应用[J].暖通空调, 1997, 27 (4): P7~10.
- [6] Qian Meili, On-Site Detection Method for Air-Tight Property of Buildings[J], Housing Materials & Applications, 2000 (2), P39-40 (Ch).
钱美丽. 建筑物气密性能现场检测方法[J].房材与应用, 2000(2): P39~40.
- [7] JIANG Yi, CHEN Qingyan, Study of Natural Ventilation in Buildings by Large Eddy Simulation[J]. Wind Eng and Indu Aerodynamics, 2001, 89: P1155-1178.
- [8] JIAN Yiwon, JIANG Yi, Identification of Ventilation Rates in Residential Buildings through Temperature Measurement [J], Journal of Tsinghua University (Science and Technology),, 2003, 43 (6), P836-839 (Ch).
简毅文, 江亿. 通过实测室温确定住宅的自然通风状况[J]. 清华大学学报, 2003 , 43 (6) : P836-839
- [9] DeST Group of Tsinghua University, Building Environmental System Simulation and Analysis—DeST [M], China Architecture and Building Press, 2006(Ch).
清华大学 DeST 开发组. 建筑环境系统模拟分析方法-DeST[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006
- [10] Yan Qishen, Zhao Qingzhu, Building Thermal Process [M], China Architecture and Building Press, 1986(Ch).
彦启森, 赵庆珠. 建筑热过程[M] .北京: 中国建筑工业出版社, 1986.