

# 多功能建筑火灾人员安全疏散模拟

王厚华<sup>1</sup>, 李慧<sup>1</sup>, 熊杰<sup>2</sup>

(1. 重庆大学 城市建设与环境工程学院, 重庆 400045; 2. 成都基准方中建筑设计事务所, 成都 610015)

**摘要:** 针对一多功能综合办公楼建筑模型, 设定最不利的火灾场景. 依据火灾烟气危险状态判据临界值, 采用场-网复合模型模拟预测建筑火灾烟流运动特性, 获得人员逃生可用安全疏散时间(ASET). 采用重庆大学自主开发的应用软件《高层建筑人员疏散行动时间预测系统》确定人员所需安全疏散时间(RSET). 比较人员所需安全疏散时间和人员可用安全疏散时间, 对火灾建筑中人员能否安全疏散做出评价, 并提出保证人员安全疏散的措施.

**关键词:** 火灾; 场-网复合模型; 疏散时间; 安全评价

**中图分类号:** TU 998.12

**文献标识码:** A

## Simulation of Safety Evacuation in Multi-building Fire

WANG Houhua<sup>1</sup>, LI Hui<sup>1</sup>, XIONG Jie<sup>2</sup>

(1. Faculty of Urban Construction and Environmental Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. Ji Zhun Fang Zhong Architectural Design Associates, Chengdu 610015, China)

**Abstract:** Based on a multi-functional office building model, the most unfavorable fire scenario was simulated. According to fire smoke emergency critical value, a hybrid field-network model was established to simulate the fire smoke flow properties in building and the available safe egress time (ASET) was obtained. The required safe egress time (RSET) was calculated by the evacuation simulate system developed independently by Chongqing University. The occupant safety evacuation in building fire is evaluated through a comparative study of the RSET and the ASET, and measures are proposed about the safety evacuation.

**Key words:** fire; hybrid field-network model; evacuation time; safety evaluation

法结合, 对人员疏散安全性进行评价, 是保证建筑物火灾安全急需解决的关键问题. 建筑火灾烟流运动特性预测常用的模拟方法有场模拟和网络模拟. 场模拟可以提供烟气流场中各物理量分布的详细信息, 具有很高的求解精度, 但对计算机的性能要求很高, 运算时间很长, 对于边界条件非常复杂、受限空间很多的多功能建筑, 单一的场模拟非常困难, 实际上很难实现. 网络模拟把建筑物的每一个受限空间视为一个节点, 各节点间通过烟气流通过路径连接, 假设每一个节点内部烟气的状态参数均匀, 火灾过程的发展表现为构成建筑物的各节点内部参数的变化. 对于受限空间体积相差不大的建筑, 网络模拟可以在较短的时间内足够准确地预测出各节点火灾烟流特性参数随时间的变化, 文献[1-2]详细地介绍了网络模型各计算方程式及其求解方法. 在此基础上开发出的计算机软件《建筑物火灾烟流特性预测系统》已经历了多次实验验证并申请了国家专利. 但是网络模拟不能详细地提供着火室内烟气的物理量分布. 对于多功能建筑, 各受限空间体积相差很大, 此时仍然视大体积受限空间为单元体, 采用网络模拟将不可能获得可信的结果. 文献[3]构建了场模型和网络模型之间的连接平台, 将场-网单独模拟的结果相互作为彼此交界面的边界条件, 实现了场-网复合模拟, 模拟结果经历了实尺寸实体实验的验证. 场-网复合模拟发挥了两种模型的优势, 克服了计算代价高、误差大的缺点. 模拟结果与实验结果充分证实: 场-网复合模拟比单独使用网络模拟的计算更精确, 效果更好.

本文所提出的安全疏散评价的思想是: 先对着火室进行场模拟, 求出温度场, 然后以场模拟的计算结果作为网络模拟的边界条件, 再对整栋建筑进行网络模拟. 采用场-网复合模拟可得出各节点温度、

利用烟流运动特性预测模拟和疏散分析两种方

收稿日期: 2009-04-27

基金项目: 重庆市重点攻关科技资助项目(CSTC 2006AB2004)

作者简介: 王厚华(1952—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为建筑防排烟、建筑节能、强化传热.

E-mail: whhxinxiang@yahoo.com.cn

烟气浓度、CO<sub>2</sub>浓度、CO 浓度随时间的变化规律. 依据模拟结果得到火灾危险状态判据临界值到达的时间<sup>[4]</sup>,该时间即为人员可用安全疏散时间(ASET). 采用重庆大学自主开发的应用软件《高层建筑人员疏散行动时间预测软件》确定人员所需安全疏散时间(RSET)<sup>[5]</sup>. 比较 RSET 和 ASET,对多功能建筑内人员安全疏散做出评价.

1 建筑模型

模拟对象为某综合办公楼建筑,该建筑共四层,

选取其中第二和第三层进行模拟,其建筑平面图如图 1 所示. 建筑层高 3 m,楼梯间设有防火门,防火门尺寸为 2 m×1.5 m. 各房间单侧门尺寸为 2 m×1 m,双侧门尺寸为 2 m×1.5 m,普通玻璃窗尺寸为 1.2 m×1.8 m,窗体下沿距地高度均为 0.6 m.

假定 10 号房间节点与 9 号走廊节点相连的门关闭,其他房间面向走廊的门全开;随机设定 1 号、5 号、13 号、23 号、32 号房间窗户开启,其余窗关闭;假定火灾过程中左侧楼梯间防火门始终处于关闭状态,人员只能通过右侧楼梯间疏散. 运用图论原理,构造建筑物换气树<sup>[6]</sup>,如图 2 所示.

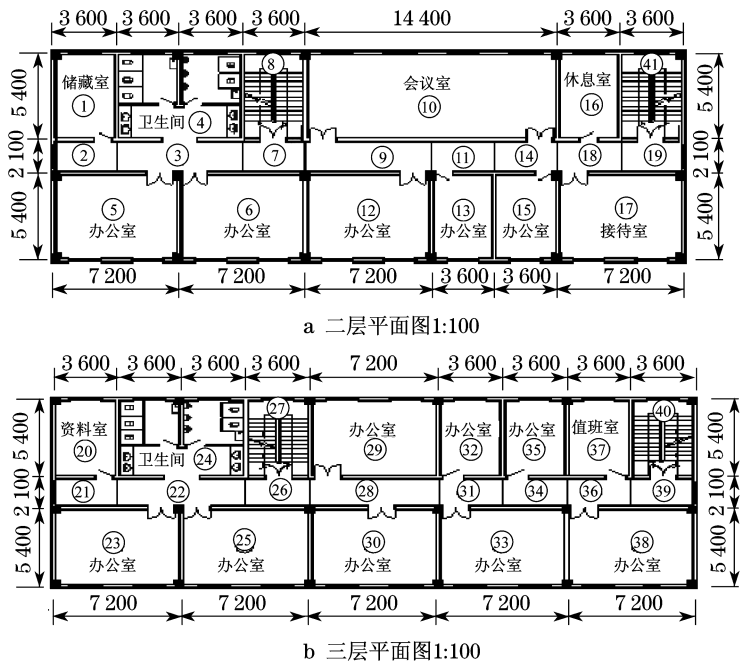


图 1 模拟建筑平面图(单位:mm)  
Fig.1 The plan of simulated construction(unit:mm)

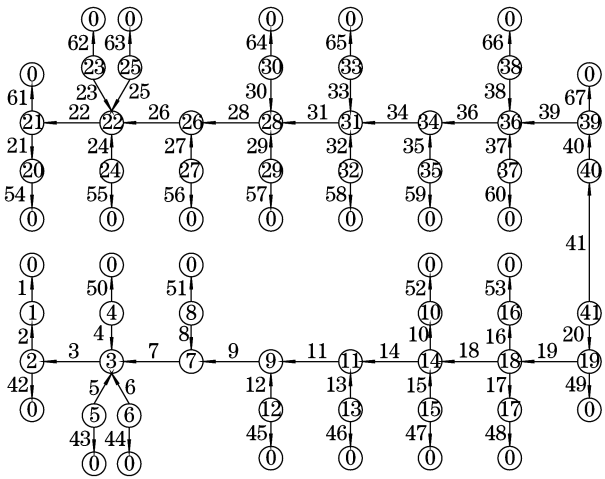


图 2 建筑物换气树  
Fig.2 Building air flow tree

2 场-网复合模拟

2.1 模拟工况

假设该建筑为自然排烟情况,无防排烟及补风措施. 室外视为标准大气压,无风,气温为 20 ℃. 墙体均视为混凝土结构,厚度 240 mm,导热系数 λ 为 0.8 W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>,体积比热容 C 取 1 700 KJ·m<sup>-3</sup>·K<sup>-1</sup>;普通门窗材料导热系数 λ 取 0.108 W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>,体积比热容 C 取 538 KJ·m<sup>-3</sup>·K<sup>-1</sup>. 所有墙体都划分为 5 个节点. 对于敞开的门、窗以及划分走廊节点的虚开口,辐射透过率皆为 1,关闭的门,辐射透过率为 0,而关闭的普通玻璃窗则为 0.7.

## 2.2 着火室场模拟

火灾发生地点存在随机性,着火室设定应考虑最不利情况,根据假定,火灾过程中左侧楼梯间防火门始终处于关闭状态,人员只能通过右侧楼梯间疏散,因此设定着火室为16号房间,这样得到的模拟计算结果偏保守,但同时偏安全.16号房间面积为 $19.44\text{ m}^2$ ,一般装修,火源强度设定为 $125\text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ ,热释放速率以 $t^2$ 火形式增长<sup>[4]</sup>,火焰蔓延为中速火灾发展形式,其火灾发展系数值取为 $0.011\text{ 27}\text{ kW}\cdot\text{s}^{-2}$ ,计算得热释放速率达到稳定状态时间约为 $480\text{ s}$ ,最大热释放速率为 $2\text{ 400}\text{ kW}$ .基于 $t^2$ 火形式将火源简化为分段火源,简化后的火源热释放速率随时间变化规律见表1.

表1 着火室火源热释放速率  
Tab.1 Fire heat release rate in fire room

时间/s	0	120	300	480	1 200
热释放速率/kW	0	160	1 000	2 400	2 400

依据所建立的建筑物换气树以及所设定的输入条件,对着火室应用软件Fluent进行场模拟.火源设置于房间正中心,由于火源设置项无木材选项,只能通过木材挥发份-空气混合物(wood-volatiles-air)近似代替,根据木材燃烧特性将木材质量损失换算成相同质量的木材挥发份,采用用户定义功能(user define function,UDF)编写程序设置火源随时间的变化规律.

烟气湍流流动采用带浮力修正 $k-\epsilon$ 模型,以SIMPLEC算法计算,湍流燃烧采用耗-散(eddy-dissipation)模型求解以便于快速收敛.与外界开口的窗户设为具有微小风速的速度入口边界条件,与内走廊连接的门设为具有回流的压力出口边界条件,同时将门横向划分为10个窄条,各窄条高度均为 $0.2\text{ m}$ ,计算过程中监测各窄条平均压力值以及平均温度值.时间步长取为 $10\text{ s}$ ,模拟总时间 $1\text{ 200 s}$ 共120步.场模拟和网络模拟所得着火室平均温度比较如图3所示.

由图3可见,场模拟值略高于网络模拟值,两者平均误差为 $10.3\%$ ,最大误差为 $22.7\%$ .主要原因是着火室采用网络模拟时假设其内部烟气的状态参数瞬间混合均匀,忽略了实际热量传递的时间延迟,导致计算中过高估计着火室通过开口所损失的热量,使得网络模拟所得着火室平均温度偏低.实体实验证实了场模拟结果更接近于实测结果<sup>[7]</sup>.

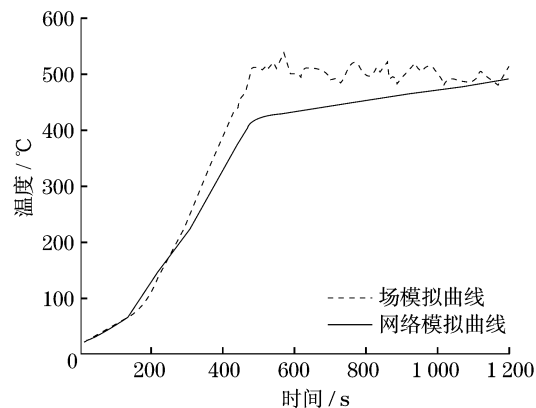


图3 着火室平均温度比较

Fig.3 Comparison of the fire room temperatures

## 2.3 网络模拟

将模拟获得的着火室烟流参数以及门开口热交换参数导入自主开发的应用软件《建筑物火灾烟流运动特性预测系统》中<sup>[1-2]</sup>,进行场-网复合模拟计算.通过软件Fluent模拟中监测门开口上的各个窄条的平均压力值以及平均温度值,即可计算得出着火室通过门与相邻走廊间的质量和热量交换.此时,以着火室节点相邻的18号节点作为假想火源,利用着火室场模拟所得的通过门开口流入相邻走廊节点的热量流量作为假想着火室的火源条件<sup>[7]</sup>,各节点烟气浓度、CO浓度、CO<sub>2</sub>浓度仍然采用网络模拟;将着火室与相邻走廊节点之间设定为无质量流量交换,并将着火室场模拟所得室内平均温度导入着火室节点参与网络模拟的耦合求解,从而完成对整栋建筑的网络模拟.模拟结果详见文献<sup>[4]</sup>.

## 3 可用安全疏散时间计算

火灾烟气对人的直接危害主要体现在三个方面<sup>[8]</sup>:高温、遮光性和毒性.因此从三个方面的特征参数给出火灾烟流危险状态临界值来作为火灾烟气达到危险状态的判据.其中:烟气临界温度 $78\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;CO<sub>2</sub>临界质量浓度为 $0.046\text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ;CO临界质量浓度为 $0.002\text{ 7 kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ <sup>[4]</sup>.任一条件超过临界值,即判定人员处于不安全状态.根据模拟计算结果烟气温度最先超过临界温度<sup>[4]</sup>,因此从着火时刻到达临界温度时刻的时间段就是可用安全疏散时间(ASET)<sup>[9]</sup>.

从对走廊节点烟流特性模拟计算可以看出,距离着火室越远的节点,其烟气温度、CO<sub>2</sub>浓度、CO浓度越低.18号节点最靠近着火室且紧邻楼梯间,其烟

气温度、 $\text{CO}_2$ 浓度、 $\text{CO}$ 浓度最大,也是保证二层人员安全疏散的关键节点,因此若要保证该层人员安全疏散,就要保证在离出口最远的1号节点的所需安全疏散时间(RSET)内18号节点上述各项指标均小于相应的安全判据,任何一项指标不满足安全判据则认为该建筑楼层是不安全的.根据软件模拟结果得到18号节点在第410 s(时间步长为第41步)时,达到火灾烟流危险状态临界值,即二层各节点人员可用安全疏散时间为410 s.对于三层人员安全疏散,其最为关键的是41号楼梯间节点,模拟过程中,41号节点温度均未达到临界值,可以认为三层各节点人员疏散可用安全时间均为1 200 s,即为总模拟时间.

#### 4 所需安全疏散时间计算

##### (1) 火灾报警时间和人员疏散预动作时间

本文利用文献[10]计算火灾探测器报警时间.模拟建筑着火室的净高度为3 m,假设火源中心与探测器距离为1.2 m,房间初始温度为20℃,采用标准探测器,其动作温度为68℃,计算火灾报警时间取整为150 s,此时火源热释放速率为300 kW.

采用事先录制好声音的广播系统.在疏散预动作时间的确定上,本文将人员在建筑物内所处的初始位置分为火灾室、火灾层、非火灾层三种情况,并据此假设不同位置的人员采用不同的疏散预动作时间.其中火灾室疏散预动作时间设定为60 s,火灾层疏散预动作时间设定为120 s,非火灾层疏散预动作时间设定为180 s.

##### (2) 人员密度设定

假设该建筑正处于工作日期间,人员较多容易发生火,此时建筑物安全疏散处于最不利时刻.取人员密度为 $0.3^{[11]}$ ,而人员构成则为成年人.

##### (3) 人员流动系数设定

结合当前国内外的研究成果和工程的实际情况,疏散模型中的人员疏散参数保守取值如下:房间开口人员流动系数为 $1.5 \text{ 人} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ [12],走廊与楼梯间前室开口人员流动系数为 $1.4 \text{ 人} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ .

##### (4) 人员移动速度设定

人员流动的水平速度取自由流动的较低值 $V = 1.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;人员涌入走廊以后,在走廊尽头出现滞流流动状态,人流行动缓慢,人员流动的水平速度取为 $V = 0.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;楼梯间人员移动速度取为 $V = 0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ [12].

将上述数据输入《人员疏散行动时间预测软件》中,即可完成人员疏散行动时间的计算.人员疏散路线为:首先从房间撤离进入走道,然后沿走道撤至疏散楼梯间,最后沿楼梯间疏散至室外.由图4~图5可得,人员在16 s内全部完成从房间撤至走道,在第二层走道上人员在第14 s时达到最大值,随后走道人员大量聚集在楼梯间,第80 s后,走道人员下降趋势减缓,出现人员疏散停滞,这说明走道疏散拥堵现象严重,导致疏散速度明显放缓.

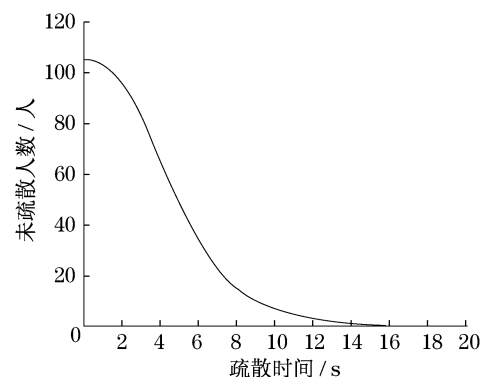


图4 第二层房间人数聚集曲线

Fig.4 People gathering in the rooms on the second floor

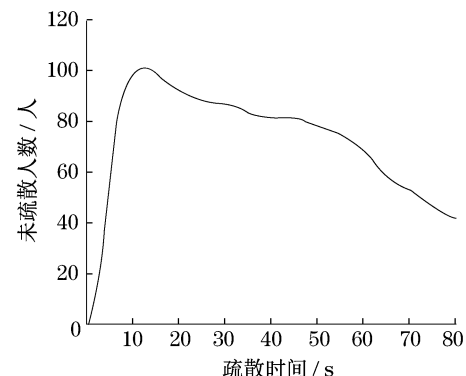


图5 第二层走道人数聚集曲线

Fig.5 People gathering in the corridor on the second floor

计算火灾报警时间取整为150 s,火灾层疏散预动作时间设定为120 s,疏散软件计算得出第二层人员总疏散行动时间为248 s.于是可得第二层人员疏散所需时间为518 s,而可用安全疏散时间为410 s,因此第二层人员不能全部完成安全疏散.由于三层人员疏散可用安全时间为1 200 s,因此第三层人员能全部完成安全疏散.

采用自然排烟且模拟建筑左侧楼梯间防火门关闭是着火层人员不能安全疏散的主要原因.其应对措施是,应保证火灾发生时,两侧楼梯间防火门处于

开启状态.如模拟建筑仅设计了一个楼梯间,则应增设消防排烟系统,以满足安全疏散的要求.排烟系统最佳排烟量的设计,也可以采用本模拟方法得以实现<sup>[13]</sup>.

## 5 结论

本文以火灾建筑内的人员作为被保护对象,针对一多功能综合性办公建筑,设定了最不利的火灾场景,采用场-网复合模拟的方法计算得出建筑内各节点的烟流特性参数随时间的变化规律.依据火灾烟气危险状态判据临界值,确定了室内人员逃生可用安全疏散时间 ASET;采用自主开发的应用软件《高层建筑人员疏散时间预测系统》计算出室内人员逃生所需安全疏散时间 RSET.比较 ASET 和 RSET,得出了设定火灾场景下人员不能安全疏散的结论.根据模拟计算结果,分析了影响人员安全疏散的因素.

前期的研究结果证实<sup>[3,7]</sup>:场-网复合模拟预测火灾建筑内的烟气运动特性比单一网络模拟具有更高的准确性,因此本文采用的模拟预测方法丰富和发展了火灾烟流理论.现有资料尚未发现采用烟流运动特性模拟与人员疏散模拟相结合的安全评价方法,其研究成果对建筑火灾安全性能评价具有重要参考价值.由于组织大型模拟疏散实验的困难性,本文疏散模拟的正确性尚待验证.

### 参考文献:

- [1] 王厚华,方赵嵩.建筑物火灾烟流特性预测系统的研究进展(上)[J].暖通空调,2008,38(5):1.  
WANG Houhua, FANG Zhaosong. Development on research of building fire smoke-flow property prediction systems(part I)[J]. Journal of HV & AC, 2008, 38(5):1.
- [2] 王厚华,刘希臣,张明.建筑物火灾烟流特性预测系统的研究进展(下)[J].暖通空调,2008,38(8):4.  
WANG Houhua, LIU Xicheng, ZHANG Ming. Development on research of building fire smoke-flow property prediction systems(part II)[J]. Journal of HV & AC, 2008, 38(8):4.
- [3] 王厚华,熊杰,胡洋.建筑火灾烟流温度的场-网复合模拟[J].同济大学学报:自然科学版,2008,36(9):1255.  
WANG Houhua, XIONG Jie, HU Yang. Hybrid field-network model for temperature of building fire smoke[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2008, 36(9):1255.
- [4] 熊杰.多功能高层建筑火灾安全评价系统研究[D].重庆:重庆大学城市建设与环境工程学院,2008.  
XIONG Jie. Study on safety performance evaluation system in multifunctional high-rise building[D]. Chongqing: Chongqing University. Faculty of Urban Construction and Environmental Engineering, 2008.
- [5] 王厚华,郭丹,郭勇.建筑物人员疏散行动时间的预测研究[J].中国安全科学学报,2006,16(11):54.  
WANG Houhua, GUO Dan, GUO Yong. Research on the prediction of evacuation action time for personnel in building[J]. China Safety Science Journal, 2006, 16(11):54.
- [6] 杨洪.图论常用算法选编[M].北京:中国铁道出版社,2000.  
YANG Hong. Graph theory selected commonly used algorithm[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2000.
- [7] 胡洋.多功能高层建筑火灾烟流运动特性预测研究[D].重庆:重庆大学城市建设与环境工程学院,2007.  
HU Yang. Research on forecasting properties of firesmoke flow in multilayer and multifunctional building[D]. Chongqing: Chongqing University. Faculty of Urban Construction and Environmental Engineering, 2007.
- [8] 邱旭东,高甫生,王砚玲.高层建筑火灾时烟气危害性及危险度评价[J].哈尔滨工业大学学报,2006,38(3):392.  
QIU Xudong, GAO Fusheng, WANG Yanling. Evaluation of smoke harm and fatalness in high-rise building fire[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2006, 38(3):392.
- [9] 郭丹.基于烟流理论的建筑火灾安全疏散动态模拟研究[D].重庆:重庆大学城市建设与环境工程学院,2006.  
GUO Dan. Building fire safety evacuation dynamics simulation based on the plume theory[D]. Chongqing: Chongqing University. Faculty of Urban Construction and Environmental Engineering, 2006.
- [10] 范维澄,孙金香,陆守香.火灾风险评估方法学[M].北京:科学出版社,2004.  
FAN Weicheng, SUN Jinxiang, LU Shouxiang. Fire risk assessment methodology[M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [11] Gupta A K, Yadav P K. SAFE-R: a new model to study the evacuation profile of a building[J]. Fire Safety Journal, 2004, 39:539.
- [12] Hasofer A M, Thomas I. Analysis of fatalities and injuries in building fire statistics[J]. Fire Safety Journal, 2006, 41:2.
- [13] 王厚华,韩武松,何晟.建筑物走廊机械排烟量性能化研究[J].暖通空调,2007,37(9):65.  
WANG Houhua, HAN Wusong, HE Sheng. Performance research on mechanical exhaust smoke volume in building corridors[J]. Journal of HV & AC, 2007, 37(9):65.