

文章编号: 1671-6612 (2019) 03-337-06

基于移动载荷引燃的 高速列车火灾人员安全疏散研究

李 盎 毕海权 秦 萍 苟琦林

(西南交通大学机械工程学院 成都 610036)

【摘要】 针对列车移动载荷作为引火源导致车内火灾发展蔓延的情形,采用数值模拟方法建立车厢火灾燃烧及人员疏散模型,研究了引火源燃烧特性对列车火灾发展、烟气分布及人员疏散的影响。结果表明:车厢火灾发展主要取决于引火源的火灾增长系数,而引燃周围可燃材料的时间主要取决于引火源最大火源功率;从温度的角度分析,为保证着火车厢人员安全疏散,引火源不得超过150kW;引火源为超快速发展时,着火车厢疏散时间的修正系数K可取1.25~1.35;快速发展时K可取1.1~1.3。

【关键词】 高速列车;火灾蔓延;烟气分布;人员疏散

中图分类号 U453.5 文献标识码 A

Study of Evacuation in High-speed Train Fire Based on Moving Loads Ignition

Li Ang Bi Haiquan Qin Ping Gou Qilin

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031)

【Abstract】 The numerical simulation method is used to establish combustion and evacuation models for the compartment fire ignited by moving loads. The influences of combustion characteristics of the ignition sources on train fire development, smoke distribution and evacuation are studied. The results show that: the development of compartment fire mainly depends on the fire growth coefficient of the fire source, and the igniting time of the combustible material depends mainly on the maximum heat release rate of the ignition source; based on the analysis of temperature distribution, to ensure the safety of the people, the ignition source can be no more than 150kW; when the ignition source is extra-fast development, the correction coefficient of the evacuation time is recommended to be 1.25~1.35, while in the rapid development that can be 1.1~1.3.

【Keywords】 high-speed train; fire spread; smoke distribution; heat release rate; evacuation

0 引言

由于纵火、电气着火、人员无意识行为等原因,列车火灾时有发生。车内电气设备通常位于车厢端部,火源不会对乘客区域造成直接危害,且配备有火警探测装置,能探测火灾阴燃阶段的火情,从而能及时采取应急措施。人员携带的易燃易爆液体和行李均属于列车火灾的移动载荷,

由于人员无意识行为使得移动载荷燃烧,并作为引火源引燃座椅、窗帘等列车可燃内装材料,火势快速蔓延,对人员造成直接伤害。而车厢环境密闭,火灾发生于车内时,高温有害烟气快速充满整个车厢,对乘客的安全疏散造成极大威胁。因此针对列车移动载荷作为引火源的火灾蔓延过程及人员安全疏散问题进行研究具有重要意义

基金项目:国家重点研发计划(高速列车火灾燃烧特性及火灾条件下列车运行环境与疏散耦合技术研究 2016YFB1200403-B-01)

作者简介:李盎(1992.08-),女,在读硕士研究生, E-mail: lxsalh@126.com

通信作者:毕海权(1974.12-),男,博士,教授, E-mail: bhquan@163.com

收稿日期:2018-05-10

义。

目前，对于列车火灾人员疏散的研究，主要从烟气流动数值计算、疏散演练、疏散仿真等方面展开。在烟气流动数值计算方面，中山大学莫善军^[1]、北京交通大学王盟^[2]、张文海^[3]等基于数值模拟，对车厢内不同火灾情形下烟气环境进行分析；疏散演练方面，西班牙学者 JACapote^[4]、西南交通大学的林瑞焯^[5]、李琦^[6]等针对车内不同火灾情形下人员疏散进行演练，得到了人员预动作时间、车内行走速度、疏散设备取用安装时间等基础数据；疏散仿真方面，西南交通大学的杜璐露^[7]、同济大学马金宁^[8]等运用 Pathfinder、BuildingEXODUS、FDS Evac 等疏散仿真软件对不同疏散模式下的人员疏散过程进行仿真，分析得出影响疏散的主要因素。

以往对车内火灾的人员疏散研究中，通常将火源简化为稳态火或 t^2 火，没有结合具体的引燃和蔓延过程，因而计算得到的烟气分布与实际情况存在一定差别。本文通过 FDS 建立列车火灾燃烧计算模型，分析不同引火源条件下车内火灾的发展和烟气分布情况；并利用 FDS Evac 对不同火灾发展条件下的人员疏散过程进行仿真，分析能见度分布对车内人员疏散的影响。

1 计算模型与条件设置

1.1 烟气流动数值计算模型

(1) 物理模型及边界条件

本文以我国 CRH 系列某车型标准二等座车厢为模型，边界条件的设置及测点布置情况，如图 1 所示。引火源位置处于列车中部座椅下方；温度、CO 浓度以及能见度测点以 5m 间隔布置于中部走道的人员特征高度（1.6m）位置。

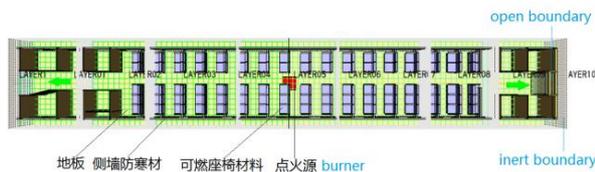


图 1 车厢火灾计算模型

Fig.1 Compartment fire calculation model

(2) 材料参数设置

车内可燃材料燃烧性能参数，按照 ISO5660—

1 标准要求，通过锥形量热仪测得。主要材料的热释放速率（HRR）、产烟率、CO 产率如表 1 所示。

表 1 高速列车主要可燃材料燃烧试验结果

Table 1 Combustion test results of main combustible material of high-speed train

部件	材料	HRR kW/m ²	产烟率 kg/kg	CO 产率 kg/kg
地板	胶合板	257.6	0.043	0.053
平顶板	HPL+蜂窝	153.7	0.084	0.176
座椅	聚氨酯泡沫	349.2	0.060	0.004
	碳纤维塑料	296.6	0.097	0.164
空调软管	氯丁橡胶	39.1	0.007	0.13
防寒材	碳纤维棉	44.1	0.050	0.265
密封胶条	硅橡胶	216.3	0.102	0.286

(3) 引火源的火源功率

引火源火灾的初期增长阶段可以采用“时间—平方火灾 (t -square fire)”模型来描述，如式 (1):

$$Q = \alpha t^2 \tag{1}$$

式中， α 表示火灾增长系数，kW/s²； t 表示起火后的时间，s。对于易燃液体渗漏或泼洒后起火，火势按照超快速发展， $\alpha=0.1876\text{kW/s}^2$ 。对于行李着火情形，瑞典 Malardalen 大学^[9]、天津消防研究所均对旅客行李进行燃烧试验，结果表明，行李燃烧火灾发展介于快速火 ($\alpha=0.04689\text{kW/s}^2$) 和中速火 ($\alpha=0.01127\text{kW/s}^2$) 之间。不同种类及质量的移动载荷对应的火源发展及热释放速率如表 2 所示。

表 2 引火源功率设置

Table 2 Setting of ignition source

序号	火源发展	引火源种类	最大 HRR
1		350ml 汽油	100kW
2	超快速增长	480ml 汽油	150kW
3		600ml 汽油	200kW
4		运动背包	100kW
5		公文包	150kW
6	快速增长	箱包 (较小)	200kW
7		箱包	250kW
8		帆布包	300kW

1.2 人员疏散仿真模型

(1) 人员疏散路径

在列车停止前，着火车厢人员应首先向非着火

车厢转移, 当火灾发生在车厢中部时, 车内人员向两端端门疏散, 人员疏散仿真物理模型及人员疏散路径如图 2 所示。

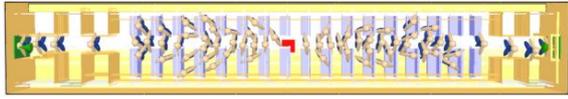


图 2 车厢中部火灾人员疏散模型

Fig.2 Evacuation model of the compartment middle fire

(2) 人员参数设置

根据 GBT 33668—2017《地铁安全疏散规范》^[10]中对人员行走速度的建议值, 中南大学李修柏^[11]对于高速列车人员比例的调研结果以及西班牙铁路部门^[4]对高速列车火灾疏散预动作时间(识别火情及反应时间)的疏散演练结果进行人员参数的设置, 如表 3 所示。

表 3 人员参数设置

Table 3 Setting of person parameter

人员类型	成年	成年	老年	老年	未成年
	男	女	男	女	
行走速度 m/s	1.25	1.05	0.76	0.76	0.76
人员比例	57.7%	32.8%	2.38%	1.74%	4.84%
预动作时间 s	服从平均值为 12s, 标准差为 8s, 最大值 26s, 最小值 1.5s 的正态分布				

2 火灾发展及烟气分布分析

2.1 热释放速率变化

车内火灾热释放速率的变化分为引火源自身燃烧和周围可燃材料被引燃后的燃烧两部分。不同引火源条件下的热释放速率变化如图 3 所示。

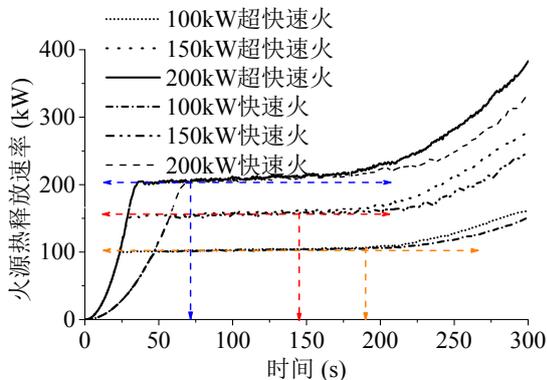


图 3 不同引火源条件下 HRR 变化

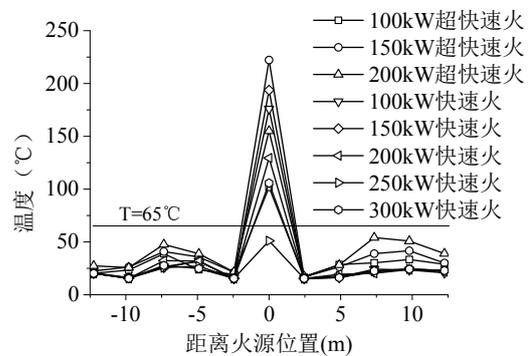
Fig.3 HRR growth under different ignition source conditions

由图 3 分析可知: (1) 引火源的火灾增长系数对其它可燃物被引燃的时间影响不大, 而引火源火灾增长系数越大, 引燃后的热释放速率增长也越快, 即火势蔓延越迅速; (2) 随着引火源稳定阶段最大火源功率的增加, 周围材料被点燃所需的时间越短。

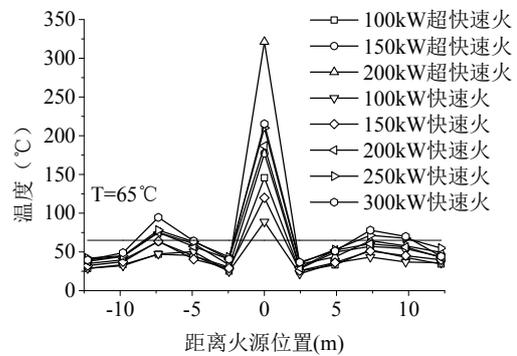
2.2 车内烟气分布

(1) 温度分布

空气温度过高会导致热冲击(中暑)和烧伤, 人员一般无法呼吸高达 65℃ 的空气^[12]。不同时刻人员高度处温度分布情况如图 4 所示。



(a) t=50s



(b) t=100s

图 4 不同引火源条件人员高度处温度变化

Fig.4 Temperature variation of different ignition source conditions at personnel height

由图 4 分析可知, 人员疏散路径上距离火源 7.5m 处温度高于其它非火源位置, 这是由于烟气流动至该位置时, 受到列车内部结构的遮挡, 烟气向下扩散。100s 以后, 当引火源最大热释放速率为 200kW 及以上时, 距离火源 7.5m 处温度达到 65℃ 以上, 会对经过的人员造成伤害。而对于人员路径上其它位置, 200s 以内人员特征高度处温度基本保持在安全范围内, 且增长相对缓慢。

(2) CO 浓度分布

当 CO 浓度达到 2000ppm 时, 2 小时内人体会出现不适。因此, CO 浓度为 2000ppm 以下时, 判定烟气毒性在安全范围内。车内 CO 含量随火势发展而不断积累, 200s 时车内人员特征高度位置 CO 浓度分布如图 5 所示。

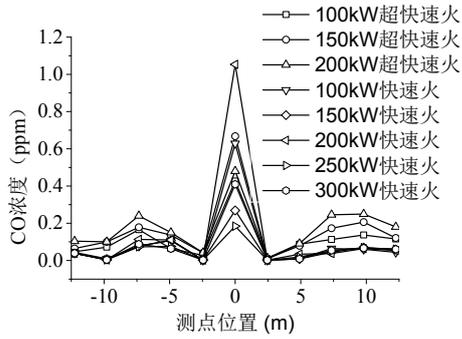


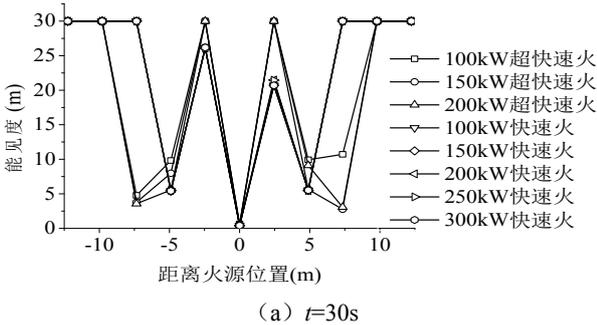
图 5 t=200s 时离火源不同位置 CO 浓度分布

Fig.5 The CO concentration distribution at different position of fire source at t=200s

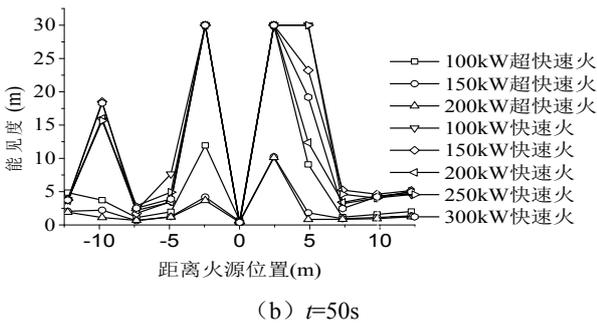
对于不同的引火源条件, 从烟气毒性的角度进行分析, 200s 以内 CO 浓度远小于 2000ppm, 不会对人员造成伤害。

(3) 能见度分布

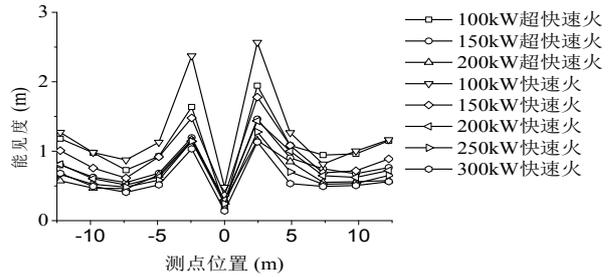
能见度是影响人员步行速度的重要因素, 当能见度小于 2m 时, 人的运动速度将会降至 0.3m/s, 相当于蒙上眼睛的行走速度^[12]。不同时刻人员高度处能见度分布情况如图 6 所示。



(a) t=30s



(b) t=50s



(c) t=100s

图 6 不同引火源条件人员高度能见度分布

Fig.6 Visibility distribution of different ignition source conditions at personnel height

疏散路径上, 能见度在距离火源 5~7.5m 范围内最先下降。引火源发展越快, 能见度下降越迅速, 100s 时, 着火车厢内人员疏散路径上能见度基本下降到 2m 以下, 严重影响人员疏散的步行速度。

3 疏散时间计算

3.1 疏散时间理论计算

车内疏散过程中, 人员主要在过道处发生拥堵。疏散过程可以分为过道处的停留等待区和通过过道到达端门的移动区, 如图 7 所示。

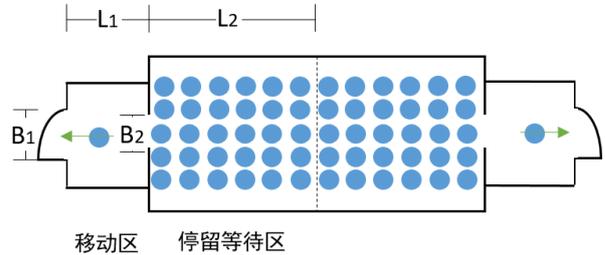


图 7 人员过程疏散简化

Fig.7 Simplified process of personnel evacuation

全部人员从着火车厢疏散到相邻车厢的时间可以表达为:

$$T = T_s + T_m = T_s + T_t + T_q = 2\sqrt{\sum A} + \max(\sum \frac{l}{v}) + \frac{P}{\sum NB} \quad (3)$$

式中, T_s 表示火灾发生到人员确认火情并作出行动反映的时间; T_m 表示疏散行动时间, 包括步行时间 T_t , 通过出口的时间 T_q ; A 表示火灾区域面积, m^2 ; l 表示步行最大距离, m ; v 为步行速度, m/s , 车内疏散主要集中在座椅区, 人员步行速度可取为 $0.5m/s$; P 为疏散人数 (人); N 表示出口流出系数, 通常取 $1.2\sim 1.5$ 人/ $(m \cdot s)$; B 表示出口有效宽度, 在车内疏散过程中, 过道对人员疏散的

影响远大于端门, 因此该有效宽度应取过道宽度。

通过公式计算人员疏散时间为:

$$T = 2\sqrt{\sum A + \max(\sum \frac{l}{v})} + \frac{P}{\sum NB} \quad (4)$$

$$= 2\sqrt{3.2 \times 24.5} + \frac{3.08 + 9.12}{10.520.51.2 \times} + \frac{86}{x} = 110.69 \text{ (s)}$$

3.2 人员疏散仿真模拟

由于人员疏散具有很大的随机性, 对于疏散时间的计算, 需要多次计算取平均值。本文对同一种工况进行 20 次重复计算, 得到非火灾条件下平均人员疏散时间为 116.675s。通过公式计算结果与模拟结果进行对比, 两者误差为 5.13%。总体而言, 对于人员疏散时间的计算, 应当结合经验公式及仿真模拟结果取较大值。

4 烟气分布对人员疏散的影响分析

4.1 温度分布对人员安全疏散的影响

由上文可知, 在疏散时间内, 疏散路径上温度达到了危险状态, 且测点 3 的温度总是先于其他测点升高。故视测点 3 温度达到 65℃ 的时间为车内温度达到危险状态的时间, 如表 4 所示。

表 4 车内温度分布达到危险状态时间

Table 4 The time when temperature distribution in the compartment reaches to the dangerous state

引火源	150kW 以下	200kW 快速	250kW 快速	300kW 快速	200kW 超快速
温度达到危险状态时间	200s 以上	83.4s	79.5s	77.4s	55s

由表 4 可知, 引火源最大热释放速率在 150kW 以内时, 人员疏散过程中不会由于烟气的高温产生灼伤, 引火源条件对应的移动载荷为 480ml 以内的汽油和公文包大小以内的行李。

4.2 能见度分布对疏散时间的影响

为体现不同火源发展条件下的能见度对人员疏散时间的影响, 本文定义人员疏散时间计算修正系数为 K , K 的表达式为:

$$K = \frac{RAST_{Q=Q^*}}{RAST_{Q=0}} \quad (5)$$

分子代表火源热释放速率为 Q^* 时人员平均疏散时间; 分母代表无烟气时人员平均疏散时间。不同引火源条件下人员所需疏散时间如表 5 所示。

表 5 不同引火源条件下疏散时间

Table 5 Evacuation time under different ignition sources

引火源 条件	热释放速率 (kW)	疏散时间 (s)		K
		平均值	标准差	
无火源	0	116.68	8.55	1
	100	142.70	21.66	1.223
	150	152.70	22.08	1.309
超快速	200	155.80	26.06	1.335
	100	127.76	10.57	1.095
	150	139.09	17.78	1.192
快速	200	139.83	16.27	1.198
	250	143.19	17.82	1.227
	300	149.87	24.85	1.285

由表 5 可知, 引火源发展越快、火源功率越大, 人员所需安全疏散时间越长。对于中部着火的典型工况, 车厢内人员能在 200s 以内全部转移到相邻车厢。相比较于没有烟气的情况, 引火源为超快速增长时, 车内疏散人员疏散时间应乘以 1.25~1.35 的系数; 快速增长时, 应乘以 1.1~1.3 的系数。

5 结论

本文对不同引火源条件下高速列车车厢中部火灾发展、烟气分布及人员疏散过程进行分析, 得到以下结论:

(1) 车厢火灾发展速率主要取决于引火源的火灾增长系数, 引火源发展越快, 车厢火灾发展越快; 而引火源的最大火源功率越大, 周围材料被点燃所需的时间越短。

(2) 当引火源最大热释放速率超过 150kW 时, 疏散过程中, 车内温度将对人体造成创伤。因此, 建议车站对 480ml 以上的液体及公文包及以上体积的行李加强安全检查。

(3) 对于引火源为超快速增长火源情形, 车内人员疏散时间的修正系数 K 可取 1.25~1.35; 引火源为快速增长时, 修正系数 K 可取 1.1~1.3。

参考文献:

[1] 莫善军, 李子荣, 周南江, 等. 基于 Phoenics 列车车厢火灾烟气数值模拟研究[J]. 铁路计算机应用, 2013, (22): 1-10.
 [2] 王盟. 列车车厢内火灾烟气运动的数值模拟与分析研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2006.
 [3] 张文海, 杨胜州. 基于 FDS 列车车厢火灾烟气危害分析

- 研究[J].工业安全与环保,2013,39(12):57-60.
- [4] J A Capote D Alvear. Analysis of evacuation procedures in high speed trains fires[J]. Fire Safety Journal, 2012,49:35-46.
- [5] 林瑞焜.高速列车火灾安全疏散研究[D].成都:西南交通大学,2011.
- [6] 李琦.长大铁路隧道火灾模式下人员疏散试验研究[J].中国铁道科学,2015,36(6):78-83.
- [7] 杜璐露.高速列车人员疏散研究[D].成都:西南交通大学,2008.
- [8] 马金宁.地铁列车火灾中的人员疏散仿真研究[J].灾害学,2010,(25):146-149.
- [9] Mia Kumm.Carried Fire Load in Mass Transport Systems[J]. Journal of Chemical Physics, 2010,106(405):39-43.
- [10] GB 33668—2017,地铁安全疏散规范[S].北京:中国标准出版社,2017.
- [11] 李修柏.特长高速铁路隧道火灾人员疏散研究[D].长沙:中南大学,2013.
- [12] 张念.高海拔特长铁路隧道火灾燃烧特性与安全疏散研究[D].北京:北京交通大学,2013.

(上接第 302 页)

5 结论

本文针对变风量空调系统中送风量——房间温度,送风温度——房间相对湿度两个控制回路之间的耦合现象,在系统建模的基础上采用PID神经网络解耦控制和交叉解耦控制算法,通过仿真和加载到实际空调系统运行,结果对比分析得出,PID神经网络解耦控制和交叉解耦控制技术都具有较好的解耦控制效果。但PID神经网络解耦控制可以使系统更快速的达到稳定,并在设定值小范围内波动,效果更好。

参考文献:

- [1] 俞丽华,汪洪军.恒温恒湿科学实验室的空调系统设计[J].制冷与空调,2018,32(5):511-514,527.
- [2] 徐玮,张九根,杨伟斌,等.自适应遗传算法在变风量空调系统解耦控制中的应用[J].仪表技术与传感器,2017,(4):95-99,103.
- [3] Zhang H, Zhao W. Decoupling control of steering and driving system for in-wheel-motor-drive electric vehicle[J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2018,101:389-404.
- [4] 徐颖,谢林柏.多变量时滞系统的伴随解耦控制[J].控制工程,2017,24(5):927-932.
- [5] 冯增喜,任庆昌.MFAC和前馈补偿组合的VAV系统解耦控制仿真[J].计算机仿真,2014,31(9):402-406.
- [6] 王茹,陶泽炎.基于模糊前馈解耦的变风量空调控制方法研究[J].计算机测量与控制,2015,23(2):450-453,456.
- [7] 白辰,樊垚,任章,杨鹏.基于模糊神经网络的MIMO系统自适应解耦控制[J].北京航空航天大学学报,2015,41(11):2131-2136.
- [8] 汪炼,张向南.洁净区温湿度自控系统的内膜PID前馈补偿解耦算法研究[J].自动化技术与应用,2016,35(5):24-30.
- [9] 麦雪凤.智能解耦控制在过程控制实验装置上的设计与实现[J].实验室研究与探索,2017,36(5):139-143,263.
- [10] Meng Q, Yan X, Ren Q, et al. Variable air volume air-conditioning experiment system with advanced controls[J]. Indoor & Built Environment, 2016,25(1):114-127.
- [11] Zhong Z, Xu X, Zhang X, et al. Simulation Based Control Performance Evaluation of a Novel Fuzzy Logic Control Algorithm for Simultaneously Controlling Indoor Air Temperature and Humidity Using a Direct Expansion (DX) Air-conditioning (A/C) System[J]. Procedia Engineering, 2017,205:1792-1799.
- [12] 刘拴强,刘晓华,江亿.温湿度独立控制空调系统中独立新风系统的研究(1):湿负荷计算[J].暖通空调,2010,40(1):80-84.
- [13] 马燕.UPFC控制策略研究及交叉解耦控制器设计[D].鞍山:辽宁科技大学,2015.