

Simulation Analysis of Fire Warning in Bus Engine Compartment Based on PyroSim

Hongguo XU; Na LI; Hongfei LIU*; Guojun WANG

School of Transportation, Jilin University, Changchun 130022, China
Email: hongfeiliu@jlu.edu.cn

Abstract: The engine compartment is an area with high incidence for bus fire. Its structure is complex and it is bad for the monitoring condition. It is difficult to be detected in the early stage of fire. When danger is observed, it is difficult to be controlled, which cause heavy losses. So, three kinds of fire model for bus engine compartment was developed. With PyroSim simulation, it was found that the position where above the engine compartment and away from the rear of the radiator is effective for monitoring the temperature and smoke. After the bus engine compartment fire started, the position of sensors is of importance to detect fire early and protect the safety of life and property. This electronic document defines the format of papers published in the academic conference proceedings.

Keywords: traffic engineering; fire warning; PyroSim; bus engine compartment

基于 PyroSim 的客车发动机舱火灾预警仿真分析

许洪国, 李娜, 刘宏飞*, 王郭俊

吉林大学交通学院, 长春, 中国, 130022

Email: hongfeiliu@jlu.edu.cn

摘 要: 发动机舱是客车火灾的高发区。由于其结构复杂, 监测条件不良, 在起火初期不易被发觉。当起火危险被观测到时, 火势往往已很难控制, 极易造成重大损失。为此, 建立三种客车发动机舱火灾模型, 运用 PyroSim 仿真分析发现, 靠近发动机舱后部且远离散热风扇的上方位置, 可有效地监测温度和烟度的大小。客车发动机舱起火后, 舱内的传感器位置对及时发现汽车火灾、保障生命财产安全具有重要意义。

关键词: 交通工程; 火灾预警; PyroSim; 客车发动机舱

1 引言

随着交通基础设施建设的日益完善, 交通运输行业取得了突飞猛进的发展, 公路客运量和客运周转量也大幅增长。客车作为必不可少的交通工具, 极大方便了人们的出行。交通运输业繁荣发展的同时也带来了许多安全问题, 其中汽车的消防安全问题尤为突出^[1]。2008 年至 2012 年, 我国平均每年发生汽车火灾 1.2 万余起, 给人民带来了巨大的财产损失, 严重的还会危及人身安全^[2]。客车具有车体空间大、车内乘员密集、车厢内可燃物多、燃烧速度快等特点, 且多数行驶在高速公路等消防困难的地段。因此, 客车一旦发生火灾, 其危险程度及脱险难度都会大大提升^[3], 不仅会带来巨大的财产损失, 还会带来无法挽回的生命损失。

发动机舱是客车火灾的高发区域。据相关统计数据, 客车火灾 60~70% 都是从发动机舱开始的^[4]。基于 PyroSim 建立客车发动机舱模型, 通过仿真分析以确定发动机舱内的最佳预警位置, 从而建立客车发动机舱内火灾预警系统。在客车火灾发生初期做好预警以降低火灾的危害程度, 对于减少人员伤亡和财产损失具有重要的现实意义^{[5][6]}。

基金项目: 国家自然科学基金车辆道路协同安全状态演进(51078167)

2 PyroSim 模型

燃烧是可燃物与氧化剂发生的一种剧烈的氧化反应,通常伴有光、烟或火焰。火灾是在时间和空间上失去控制的燃烧造成的灾害。火灾一旦发生,火源附近的流体受力和热的驱动,流动速度会大大加快,摆动的频率及振幅也会随流速的增加而增加,形成紊乱、不规则的湍流流场^[7]。湍流是一种高度复杂的三维非稳态且带有旋转的不规则运动,速度、压力、温度等都随时间与空间发生随机的变化。值得注意的是,尽管湍流运动是流体微团的运动,但远未达到分子水平。因此无论湍流运动多么复杂,非稳态的纳维-斯托克斯方程对于湍流的瞬时运动仍然是适用的。

纳维-斯托克斯方程(Navier-Stokes equations),描述粘性不可压缩流体动量守恒的运动方程,简称 N-S 方程。N-S 方程反映了粘性流体(真实流体)流动的基本力学规律,在流体力学中有十分重要的意义。在直角坐标系中,其矢量形式为:

$$\rho \frac{dv}{dt} = -\nabla p + \rho F + \mu \Delta v \quad (1)$$

N-S 方程具体表达形式^[8]为:

$$\begin{aligned} \rho \frac{dv}{dt} &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \rho Y + \mu \Delta v \\ \rho \frac{dw}{dt} &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \rho Z + \mu \Delta w \\ \rho \frac{du}{dt} &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \rho X + \mu \Delta u \end{aligned} \quad (2)$$

其中, ∇ 是拉普拉斯算子; ρ 是流体密度; p 是压力; u 、 v 、 w 是流体在 t 时刻,在点 (x, y, z) 处的速度分量。 X 、 Y 、 Z 是外力的分量; 常数 μ 是动力粘性系数。

湍流的模拟方法有三种,分别是直接数值模拟方法(Directly Numerical Simulation,简称 DNS),雷诺时均法(Reynolds-averaged Navier-stokes equations,简称 RANS)和大涡模拟法(Large Eddy Simulation,简称 LES)。其中 DNS 的应用受到计算机容量及速度的限制,目前仅用于小尺寸、低雷诺数空间的流动情况,尚无法用于工程实际; RANS 只能给出湍流的平均运动和相应的平均物理量,而不能给出需要的脉动量,且其缺乏普适的湍流模型,因此准确性较差^[9]; 而 LES 的基本思想,是通过精确求解某个尺度以上的所有湍流尺度的运动,从而捕捉许多非稳态、非平衡过程中出现的大尺度效应和拟序结构;同时,相对于直接数值模拟法又解决了计算量巨大的问题,是目前最具有潜力的湍流数值模拟方向。这也是 PyroSim 模拟算法的理论基础^[10]。

Thunderhead Engineering PyroSim 是一款用于消防模拟的场模拟软件,是在 FDS 基础上建立的火灾预、后处理仿真软件,用来建立消防模拟,并对火灾中烟气的运动、温度和毒气浓度进行预测和分析,被广泛应用于各种隧道、建筑物的火灾建模^[11]。这里旨在利用 PyroSim 对客车发动机舱火灾模型进行仿真,获取发动机舱在发生火灾时温度的分布状况和烟雾的流动情况,寻求最佳预警点,从而为降低火灾危害程度提供指导性建议。

3 客车发动机舱模型

经调查研究发现,大多数的火灾都是由温度异常引起的;客车的火灾故障大多是因为发动机舱内的高温金属热表面接触到意外跌落的杂物、泄露的油品或脱落老化的绝缘层引起的。当这些可燃材料达到自身燃点后发生阻燃形成火灾。客车正常行驶时,发动机内气体燃烧做功,燃烧室内气体温度可达 2500℃ 左右,排出的废气温度较高,可使排气管外外壁达到 400~500℃,而山区行车时可达 500~700℃,此时发动机的缸壁温度也会达到 150~370℃;这些热金属表面可以为可燃物燃烧提供初始的能量,成为潜在的危险源^[12]。除此之外,发动机舱内存在复杂、繁琐的电缆,电缆绝缘层的老化、破损以造成短路,也极易导致火灾发生^[13]。

以客车某型号后置发动机所在的发动机舱为研究对象,其内部部件布置俯视图,如图 1 所示,其中忽略了电缆。

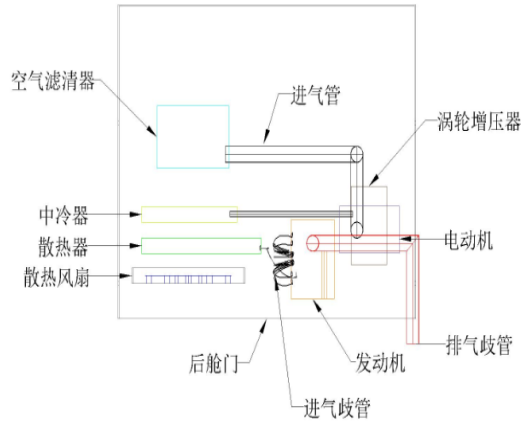


Fig.1 Top view of engine compartment layout
图 1 发动机舱内部件布置俯视图

利用 CAD 建立了简化模型，为展示内部构造，隐藏了发动机后壳，如图 2 所示，图中黄色板块为电缆层^[14]。考虑到火源位置对火灾的发展有较大的影响，设定了三种仿真模型 A、B、C，各模型火源位置如图 2 所示。

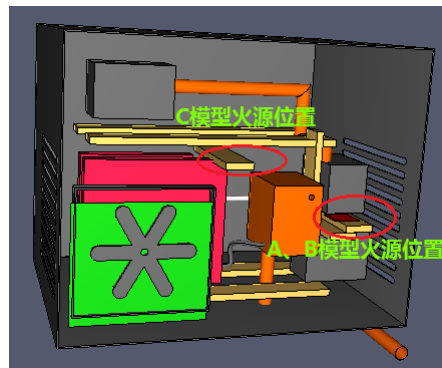


Fig.2 Engine compartment with the rear door
图 2 发动机后壳的箱体模型

考虑到边界通风条件对火灾的发展也有较大的影响，A、B、C 模型的边界条件见表 1。OPEN 表面仅用于模型的边界，表示与外界开放与联通，INERT（惰性）表面通常用来表示温度不随反应而改变，即地面和模型后表面的温度变化可忽略，而 SUPPLY（供风）表面表示向模拟区域注入空气。

Table 1 Boundary conditions for model A, B and C

表 1 A、B、C 三种模型的边界条件

	A 表面	B 表面	C 表面
上	OPEN	OPEN	OPEN

下	OPEN	INERT	INERT
左	OPEN	SUPPLY, 风速 为 3.0m/s	SUPPLY, 风速 为 3.0m/s
右	OPEN	SUPPLY, 风速 为 3.0m/s	SUPPLY, 风速 为 3.0m/s
前	OPEN	OPEN	OPEN
后	OPEN	INERT	INERT

模型尺寸为 $X \times Y \times Z = 3\text{m} \times 2.5\text{m} \times 2.5\text{m}$ 。为更加详细了解各个位置的温度和烟度变化情况，设定了大量的热电偶和烟度探测器，数量均为 $6 \times 6 \times 6 = 216$ 个，其中热电偶排布顺序为 $Y \times Z \times X = 6 \times 6 \times 6$ ，如图 3 所示。烟雾探测器为 $Z \times Y \times X = 6 \times 6 \times 6$ ，如图 4 所示。此外，还设置了 $y=0.35\text{m}$ 和 $z=0.4、1.0、1.7\text{m}$ 的切片用以反映火场中温度和烟度的实时变化状态。仿真时间均为 60s。

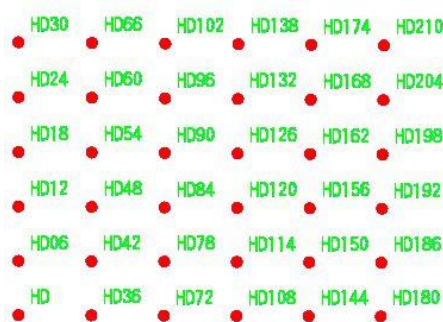


Fig.3 Thermocouple layout at engine rear door
图 3 发动机后舱门的热电偶布置图

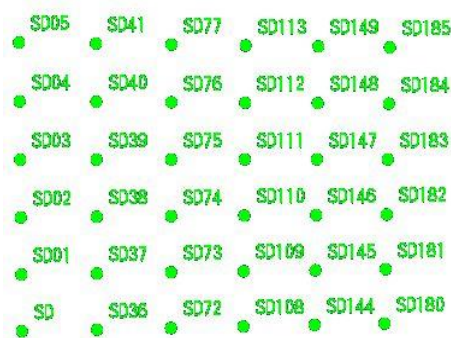
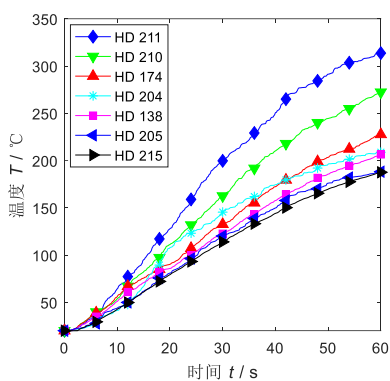


Fig.4 Layout of smoke detector at engine rear door
图 4 发动机后舱门的烟度探测器布置图

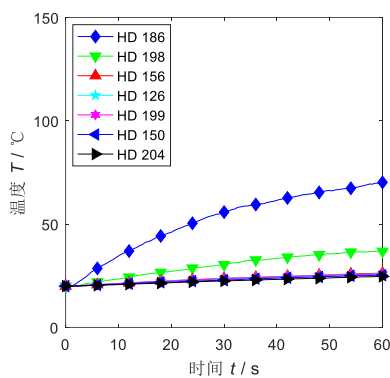
4 仿真结果与分析

4.1 温度

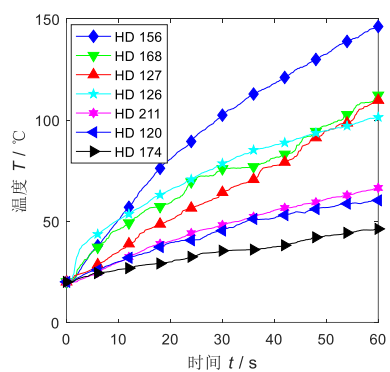
温度是火势发展的重要评价指标，但由于热电偶的数量众多，无法逐一分析，因此选取仿真时间为 60s 时温度最高的 7 个热电偶作为特征热电偶，对此进行分析，其温度与时间的关系曲线如图 5 所示。



a) A 模型



b) B 模型



c) C 模型

Fig.5 Diagram of temperature and time of characteristic thermocouple
图 5 特征热电偶的温度与时间关系图

模型 A 与模型 B 除了边界条件不同,其他设定相同。由图 5a)、图 5b)可知,二者的仿真结果存在很大的差异。在 60s 时, B 模型中,温度高于 24°C 的热电偶有 11 个,且除恰好位于火源中心的 HD192 (为绘图清晰,图 5 的 B 模型图剔除了 HD192) 外,温度普遍偏低,最高温度为 70°C 左右,但同一时间 A 模型中的所有热电偶的温度均高于 24°C,且有 153 个热电偶的温度在 70°C 以上。

模型 B 与模型 C 除火源位置不同,其他设定完全相同。图 5b)、5c)表明,二者的仿真结果仍有很大的不同。其中 C 模型的温度普遍高于 B 模型。这可能是由于 B 模型的火源设定在涡轮增压器的下面的电缆表面上,而涡轮增压器的材质为合金,并不利于火源的传播和蔓延,但 C 模型的火源所在的电缆表面的上方仍然是电缆,更适合火源的传播和蔓延,形成新的火源 (高温点)。

各模型在仿真时间为 60s 时 $y=0.35\text{m}$ 和 $z=0.4、1.0、1.7\text{m}$ 的温度切片如图 6 所示。

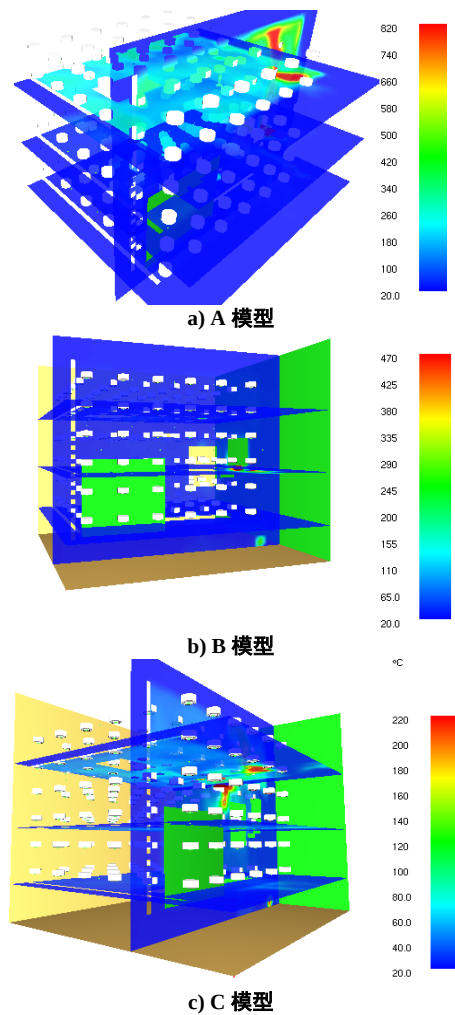


Fig.6 Temperature distribution of slices at 60s
图 6 60s 时切片上的温度分布图

由图 6a)、图 6b) 可见, B 模型与 A 模型相比, 由于边界条件的改变, 火源的进一步发展受到了限制; 无论是水平方向还是竖直方向, B 模型都远不如 A 模型那样迅猛剧烈。此外, 特征热电偶的所在位置也有一定的区别, 除共同包括 HD204 外, B 模型的特征传感器与 A 模型相比, 位置要更加远离通风口, 即向空气运动的方向进行了偏移。这表明空气的流动对火灾仿真中温度的大小和空间分布都有着重要的影响。不同的供风环境必然带来不同的燃烧结果, 但二者的特征热点偶的位置仍然相距很近。这说明在供风环境的改变下, 仍有一些位置具有独特的位置优势, 可以作为预警时传感器的优先选择点。从模型 A、B 仿真结果来看, 后置发动机的后机盖附近, 远离散热风扇的位置条件更好, 这一观点在图 6b)、图 6c) 得到了进一步的认证。

以上事实说明可燃物聚集的地方一旦起火, 往往带来更加严重的后果, 因此在进行预警时, 对于布线情况复杂的位置要更加注意; 另一方面, B 模型的火源离右侧供风表面近, 而 C 模型中的火源几乎位于发动机箱的左右中心, 供风效果相互抵消, 因此发展更为迅猛; 此外, 虽然 C 模型的火源位置离散热风扇和冷却散热器很近, 但几乎所有的特征热电偶仍都在远离散热风扇且靠近发动机后盖的位置。这再一次验证了这一位置的优良特性。

4.2 烟度及可见度

烟雾是火灾的前兆和伴随产物,是火灾过程中的重要物理现象。可见度又称能见度,指观察者离物体多远时仍然可以清楚看见该物体。气象学中,能见度被定义为大气的透明度,而在火灾模型中,影响大气透明度的最主要因素便是燃烧时产生的烟雾^{[15][16]},因此可见度切片可以直观生动的体现出火场中烟雾的分布状况。与温度分析相似,选取仿真时间为 60s 时烟度最高的 7 个烟度探测器作为特征烟度探测器,其烟度与时间的关系曲线如图 7 所示。各模型在仿真时间为 60s 时 $y=0.35\text{m}$ 和 $z=0.4、1.0、1.7\text{m}$ 的可见度切片如图 8 所示。

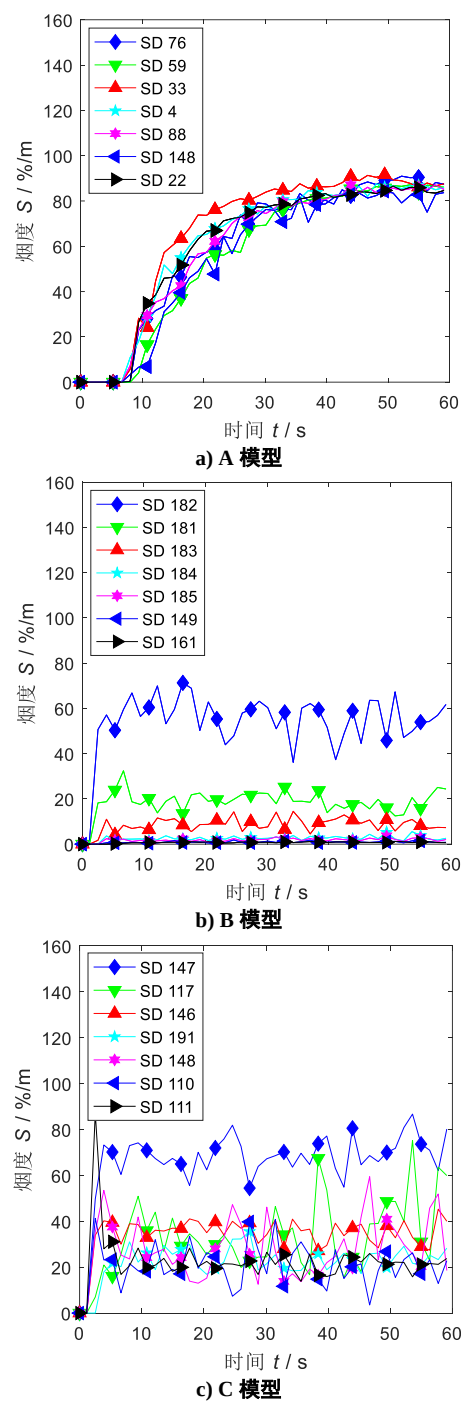


Fig.7 Diagram of smoke and time of characteristic smoke detector
图 7 特征烟度探测器的烟度与时间关系图

A 模型与 B 模型关于烟气浓度的对比分析，可由图 7a)、图 7b)得知，A 模型的烟气浓度普遍高于 B 模型。这可能是因为当外部为开放表面时，外部空气流动缓慢；即如果客车静止不动，此时模型内的流体运动只受火势发展的影响，换气速度缓慢，烟气容易聚集；而当外部存在供风表面时，换气速度加快，不利于烟气的汇聚。

将 B 模型与 C 模型进行对比分析，由图 7b)、图 7c)可以发现火源位置对烟雾浓度也有着至关重要的影响。

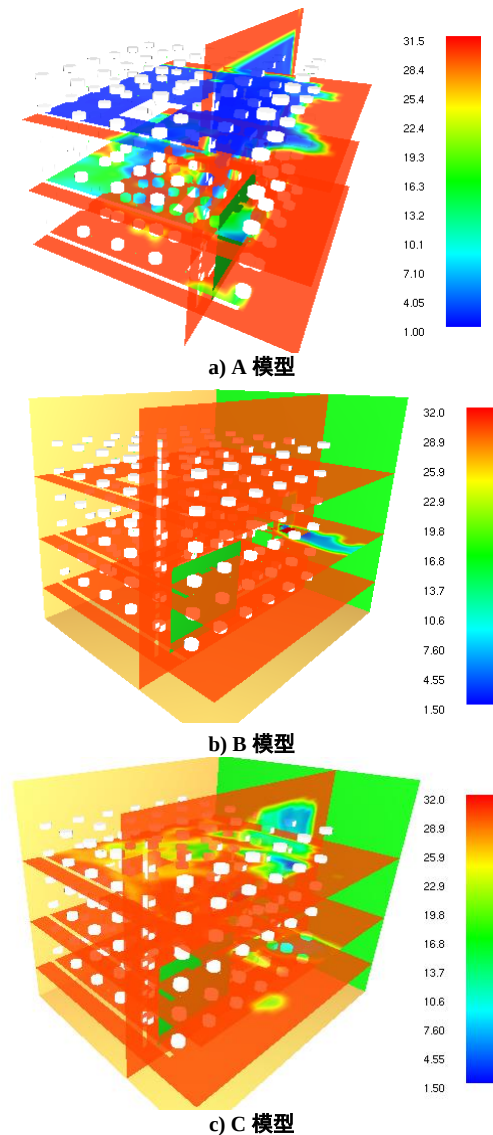


Fig.8 Smoke distribution of slices at 60s
图 8 60s 时切片上的烟度分布图

这一猜想通过图 8a)、图 8b)得到了证实；此外，从图 8 不难发现，运作中的散热风扇对烟气的聚集有强烈的抵制效果。无论是散热风扇的前方还是后方，空气流动速度都很快，因此不适合在散热风扇的工作区内安装烟度探测器。

火源离供风表面近时，燃烧时产生的烟雾易被流动的空气稀释、吹散，不利于烟雾聚集，如图 8b)；但当火源所在区域受供风表面影响小时，烟雾的浓度就会迅速上升，能见度迅速下降，如图 8c)；此外，C 模型的火源所在区可燃物密集，有利于火势的传播和壮大也是烟雾浓度增加的另一重要原因。

综合图 7、图 8 可以发现,由图 7 和图 8 可知,离散热风扇距离较远的发动机箱的右上角的烟雾浓度始终保持在较高水平,可以看出这一区域具有非常明显的位置优势,是布置烟度探测器的理想区域。

5 结论

火场内高温流体的分布主要受到火源位置、散热风扇位置和边界通风条件三个因素影响。首先,发动机舱内一旦起火,火源附近的流体会因力和热的驱动而向上升,因此舱内上方的流体温度往往高于下方的流体;其次,散热风扇附近流体运动速度较快,不利于热量的积累,温度鲜有明显提升;此外,发动机后置的客车的运动状态改变,发动机舱的边界条件也会随之改变,气体流入的速度不同,仿真结果也会随之改变。经仿真分析,发现在以上三种仿真模型的条件,靠近发动机舱后部且远离散热风扇的上方位置,在温度监测上有着良好的位置条件。

与温度分析相似,火场中的烟雾分布也主要受火源位置、散热风扇位置和边界通风条件的影响,且影响机制十分相似,因此对烟雾仿真结果分析发现,靠近发动机舱后部且远离散热风扇的上方位置,对于烟度监测来说,也同样是更合理的选择。

发动机舱内布线复杂的地方一旦起火,火势发展会更加迅速,产生的后果也更加严重,因此可以在布线复杂的位置附近适当的增添热电偶和烟度探测器。

致谢 (Acknowledgement)

本论文的工作是在我的导师许洪国教授的悉心指导下完成的,许洪国教授严谨的治学态度和科学的工作方法给了我极大的帮助和影响,在此衷心的感谢许洪国教授。此外,刘宏飞教授在学习和生活上都给了我极大的关心和宝贵的建议,王郭俊同学也对此论文工作给予了热情的帮助,在此向他们表达我的感激之情。

参考文献 (References)

- [1] Pan Yiping. Numerical simulation of fire heat release rate curve for large passenger cars [J]. Science and Technology Innovation Report, 2012 (9): 10-10.
潘一平. 大型客车火灾热释放速率曲线的数值模拟研究[J]. 科技创新导报, 2012(9):10-10.
- [2] Zhang Yongfeng, Huang Hao, Cao Liying. Analysis of the present situation of automobile fire in China [C] 2014 Proceedings of the Annual Conference of Chinese Fire Protection Association. 2014.
张永丰, 黄昊, 曹丽英. 我国汽车火灾现状分析研究[C] 2014 中国消防协会科学技术年会论文集. 2014.
- [3] Huang Yuanjie. Fire risk of large passenger cars and its technical precautions [J]. Journal of the Armed Police Academy, 2009, 25 (10): 54-56.
黄远杰. 论大型客车火灾危险性及其技术防范措施[J]. 武警学院学报, 2009, 25(10):54-56.
- [4] Du Jianhua, Tu ran, Huangfu Chenxin, et al. Bus engine compartment fire simulation research on combustion characteristics of [J]. Fire Science and Technology, 2016 (4): 455-460.
杜建华, 涂然, 皇甫趁心,等. 客车发动机舱火灾燃烧特性模拟研究[J]. 消防科学与技术, 2016(4):455-460.
- [5] Cygankiewicz J. Determination of Critical Conditions of Spontaneous Combustion of Coal in Longwall Gob Areas / Wyznaczenie Warunków Krytycznych Samozapalania Węgla W Zrobach Ścian[J]. Archives of Mining Sciences, 2015, 60(3):761-776.
- [6] Zhang X H, Guan Y X, Fang Z, et al. Fire Risk Analysis and Prevention of Urban Comprehensive Pipeline Corridor[J]. Procedia Engineering, 2016, 135:462-467.
- [7] Wang X, Fleischmann C, Spearpoint M. Assessing the influence of fuel geometrical shape on fire dynamics simulator (FDS) predictions for a large-scale heavy goods vehicle tunnel fire experiment[J]. Case Studies in Fire Safety, 2016, 5(C):34-41.
- [8] He Zhixia. Numerical method and application of thermal fluid [M]. Mechanical Industry Press, 2014.
何志霞. 热流体数值计算方法与应用[M]. 机械工业出版社, 2014.
- [9] L. Prandtl K. Oslo, K. Watiqi, Ludwig Hart, et al. Introduction to fluid mechanics [M]. Science Press, 1981.
L.普朗特, K.奥斯瓦提奇, K.维格哈特,等. 流体力学概论[M]. 科学出版社, 1981.
- [10] Zhang Zhaoshun. Theory and application of large eddy numerical simulation of turbulence [M]. Publishing House of Tsinghua University, 2008.
张兆顺. 湍流大涡数值模拟的理论和应用[M]. 清华大学出版社, 2008.
- [11] Codescu S, Panaitescu V, Popescu D, et al. Study and Improvement of Road Tunnels Fire Behavior Using Pyrosim[J]. Applied Mechanics & Materials, 2014, 657:790-794.
- [12] Gao Yanyan, Du Jianhua, Zhang Cheng Cheng, et al. Fire warning method experiment for temperature analysis in passenger compartment [J]. Journal of Huaqiao University (NATURAL Edition), 2014, 35 (6): 601-604.
高艳艳, 杜建华, 张认成,等. 客车发动机舱内温度分析的火灾预警方法实验[J]. 华侨大学学报(自然版), 2014, 35(6):601-604.
- [13] Ju W H. Study on Fire Risk and Disaster Reducing Factors of Cotton Logistics Warehouse Based on Event and Fault Tree Analysis ☆[J]. Procedia Engineering, 2016, 135:418-426.
- [14] Lv Shuran, Yang Kai. Simulation of fire and escape: PyroSim+Pathfinder Chinese course and engineering application, [M]. Chemical Industry Press, 2014
吕淑然, 杨凯. 火灾与逃生模拟仿真:PyroSim+Pathfinder 中文教程与工程应用[M]. 化学工业出版社, 2014.

- [15] Adjiski V. Possibilities For Simulating The Smoke Rollback Effect In Underground Mines Using Cfd Software / Možnosti Simulace Zpětného Proudění Kouře V Hlubinných Dolech Pomocí Cfd Softwaru[J]. Geoscience Engineering, 2014, 60(2):8-16.
- [16] Fu R W, Xu Z S. Research on the Effects of Charring on the Polymer Combustion Process ☆[J]. Procedia Engineering, 2016, 135:336-342.