

Analysis of EMU Air Conditioning System inside the Temperature Profile of the Flow Field

Jia-Twu Lee, Chih-Hung Huang, Wen-Long Yu

Department of Environmental Science and Engineering, National Pingtung University of Science and Technology, Pingtung
Email: yyh1315@gmail.com

Received: May 14th, 2012; revised: Jun. 19th, 2012; accepted: Jun. 27th, 2012

Abstract: With the development in economy, urban public transportation tends to pay attention to be safer, faster, more stable, coupled with the increasing importance in global environmental awareness; EMU car is comfortable or not will have a significant impact on passengers' travel, especially on commuters'. The objective of this study is not only make the process of car passengers enjoy a comfortable ride journey, but also improving the EMU energy efficiency of air conditioning systems. This study uses CFD software to simulate the EMU car's air conditioning system, the temperature variations of kinetic energy. Air-conditioning outlet (inlet) is set to 2, and exports (outlet) is set to 4; air velocity range of 0.1 m/s, 0.2 m/s, 0.3 m/s, 0.4 m/s, ITU body temperature set to 30°C, 38°C; air conditioning temperature setting is 22°C, 25°C, the human body the best standards of comfort, the temperature set to 28°C (301 K). The simulation results show that: 1) The lower temperature location is near air conditioning outflow system. The higher temperature is on both sides of the EMU; 2) At the same wind speed, when the temperature profile is setting lower, the contours of the flow field is more intensive; 3) Inside temperature changes directly affect the comfort of the passengers in the car more stable temperature gradient, the higher the comfort. The simulation results show that increasing the wind speed can reduce the temperature and speed up the time to let it more efficiency, not decreasing the temperature setting.

Keywords: Temperature Flow Field; CFD; Optimum Temperature Standards; Feeling of Comfort

捷运电联车车厢内空调系统 对温度流场变化之分析

李嘉塗, 黄志宏, 余汶龙

国立屏东科技大学环境工程与科学系(所), 屏东
Email: yyh1315@gmail.com

收稿日期: 2012年5月14日; 修回日期: 2012年6月19日; 录用日期: 2012年6月27日

摘要: 随着经济日渐富裕与发展观光的需求, 未来可以期待对大众运输捷运系统的需求愈益明显。旅客对交通服务的需求是安全、快速与舒适。因此, 本研究目标能让旅客在搭乘过程中享有舒适体感, 提升服务满意。本研究采用 CFD 软件, 仿真捷运电联车车厢内空调系统, 温度动能的变化情形。冷气送风口(inlet)设为 2 个, 出口(outlet)设为 4 个; 风速设定范围为 0.1 m/s、0.2 m/s、0.3 m/s、0.4 m/s, 电联车体温度设为 30°C、38°C; 空调温度的设定为 22°C、25°C, 人体最佳舒适标准, 温度设定为 28°C(301 K)。经过多次尝试, 模拟结果如下: 1) 离送风口越近, 温度越低, 低温由送风经车厢中间再向两侧扩散, 形成车厢中间较低温, 两侧较高温的温度流场; 2) 在同一风速下, 温度设定越低, 较低温的温度流场面积会缩小, 温度流场的等温线会越密集; 3) 车厢内温度变化直接影响车内旅客的舒适感, 等温梯度越平稳, 舒适感越高。由模拟实验的结果得知, 加大风速, 可加快降低温度的时间, 扩散较为良好, 不用调低温度设定, 较为省电。

关键词: 温度流场; CFD; 适温标准; 舒适感

随着都市化的日益发展,人口不断向都会区高度集中,愈发对大众运输需求的高度依赖,捷运是各国解决城市里交通问题的一大法宝武器,而能提出有效改善捷运车厢里空气的质量,正是作者群们做此项模拟研究的最大目的。前人曾经做过大型体育馆的空调改善,本研究想要在移动的车厢中做相似的模拟研究,目前研究的热点在于温度与压力,希望能找到最有效率的空调冷气系统设计,让人们感受到最佳舒适感(影响舒适感的因子,除了温度,还需考虑到湿度)的室温存在。因此,本研究做车厢的实测时,加入了湿度的测量。

1. 引言

大众捷运系统是民众生活必须,在大型都会区交通网络更是与民众生活紧密相关。根据研究,冷气温度调高1℃,可以节省6%的电力^[1];人的一生中有90%的时间处于广义的室内空间,因此室内环境是否舒适,则会对人体健康、舒适度及工作效率有很大影响^[2];电联车车厢内的温度与民众搭车时间舒适感有直接关系,实在是不可忽视的关键因子。冷气温度调得适当,人体感受则为舒适;由尤其在上下班尖峰时段,旅客众多,影响乘客舒适感。空调设备运转须靠电力,如何能在最短时间内^[3],让电联车内空间舒适凉爽,提高省电效率,是本研究的目标。

为了找出舒适温度的室内空间与兼顾合理用电需求,本研究采用市面上贩卖的“计算流体学”CFD (computational fluid dynamic, CFD)商业软件包^[4]。为了获得准确的结果,我们运用足够的网格密度,在合理的CPU的时间内,计算出离散尺度的空间范围^[5]。同时,选定在不同条件下,进行室内空调适温标准的追求的模拟实验,探讨之主要目的如下:

- 1) 探讨不同空调温度下,室内空间温度流场变化之情形。
- 2) 针对不同风速设定时,风速快慢影响到达适温标准之情形。
- 3) 探讨温度与湿度两者,影响人体舒适感的关系。

2. 实验方法

本研究应用市面贩卖之 CFD 商业软件包,针对

电联车车厢内空调系统对温度流场变化做仿真,利用计算流体力学 CFD 模拟流体的流动、热的传递(温度的变化)等物理现象,来探讨车内空调温度到达适温标准之时间快慢与扩散分布的情形,并且依流场特性设定统御方程式、网格系统及计算收敛后,计算出整个流场的温度流场变化情形、车内温度到达适温标准之时间快慢等结果。一般 CFD 商业软件主要包含三大部分: 1) Gambit; 2) Fluent; 3) Tecplot。Fluent 求解器本身就附带有比较强大的后处理功能^[4]。本研究将使用前三种软件为工具,以下针对前两种软件(Gambit、Fluent 与 Tecplot)于此研究中,应用及设定。

本研究所使用之商业软件包 Fluent6.3.26,数值模拟上主要可分为有限元素法(finite element method, FEM)和有限体积法(finite volume method, FVM)两种。其中, FVM 是从有限差分法(finite difference method, FDM)所衍生, FDM 在数值运算上的处理是取每个元素点的平均值,由于会有某些点的数值过大及过小所产生的数值误差问题,后来便产生了现在 CFD 泛用的 FVM^[6]。在数值运算上, FVM 是取每个体积的平均值来求解,比 FDM 更能减少计算误差。

2.1. 理论分析

流体力学是连续介质力学的一门分支,是研究流体(包含气体及液体)现象以及相关力学行为的科学^[7]。本研究运用流体力学的理论架构是纳维-斯托克斯方程,简称 N-S 方程。它包含速度 $\mathbf{v} = (u, v, w)$ 、压强 p 、密度 ρ 、黏度 η , 和温度 T 等变量,经简化找出适用的微分公式,我们俗称为统御方程式^[7]。其所衍生出的实验基本假设是:代入 Fluent 统御方程式中,运用的基本方程式(U, V, W 三个方向的动能方程式)如下:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \phi) = \frac{\partial}{\partial x_i}(\Gamma\phi) + S \quad \text{统御方程式(1)}$$

三个方向的动能方程式,其中 ρg_i 和 F_i 分别为 i 方向(分 X、Y、Z 三个方向)

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i$$

动能方程式(2)

为了简化流场的设计做一些基本假设,而本研究

所做的假设如下：1) 流体为牛顿流体。2) 流体为不可压缩流体。3) 流场为非稳态。4) 流体性质如黏度、密度与扩散系数为定值。5) 两流体进行混合只有浓度变化，没有化学反应^[8]。车厢之配置，长 66 m，宽 3 m，高 2 m，共 3 节车厢，每节车厢有 4 个门，车厢顶端有两排带状，冷气排风口，但不相连，也就是每一个排风口都是独立的。

本研究的边界条件与初始条件设定：1) 于冷气送风口面设定入口边界(temperature inlet)，给定常数范围为 0.2 m/s、0.3 m/s、0.4 m/s，且给定冷气入口温度，分别为 23℃、24℃、25℃三种温度。2) 于车门出口面设为出口边界(outflow)，一般而言，在分析具黏滞性流体问题时，出口条件的给定比较困难，方法之一是将出口流面放置在合宜的位置，使其该处的各种物理量变化较小。3) 壁面边界条件(wall)，壁面是流场中最常见的边界设定状况。对于具有黏滞性的流体而言，采用不滑动黏附条件，及壁面处流体速度与壁面上该处的速度相同^[9]。另外，给定所有车厢壁面温度皆为 28℃，其它未特别提及之参数值，皆以本软件之默认参数值为主。fluent 求解器代入计算得知。

2.2. 实际电联车厢实测数据

以台湾高捷公司实际营运中的电联车厢为例，测量时间为 2011.03.11 午后，研究者参考黄志宏、李嘉涂，2011 年的仿真实验，空调系统的降温效能，至少要在开始降温初始时间后，900 秒内的适温扩散时间内，就要取得最佳的适温标准，以达到人体感觉的舒适度的效果^[10]。研究者操作得测量条件有三项：1) 测点共有五点。2) 每点测试时间间距 15 分钟(可得 2 种数据)，也就是前测测量完，经过 15 分钟后，再进行后测。3) 包含停车 4 分钟在内，本实验共取得 3 × 5 = 15 个数据，所需时间 5 × 19 = 95，实际花费约 2 小时。

以下为实际测得电联车厢的温度与湿度变化之情形(表 1)。

3. 结果与讨论

3.1. 车厢内部仿真之温度变化

图 1 是车厢基本架构图。图 2 代表数据收敛情形，结果是可以信赖的。图 3 与图 4 风速为 0.2 m/s、0.4 m/s，温度为 22℃、25℃之车厢温度分布图。车厢内部之温

Table 1. Five points of time and temperature table
表 1. 五点测点的经过时间与温度变化总表

时间	测点	实测温度	车内相对湿度	车内人数
17:25 (行车中)	点 1	22.7℃	79.3%	23
	点 2	22.8℃	87.0%	
	点 3	23.3℃	88.5%	
	点 4	24.1℃	84.0%	
	点 5	23.6℃	81.3%	
17:35 (约停 4 分钟 后关门, 再车)	点 1	24.4℃	64.9%	24
	点 2	24.5℃	66.2%	
	点 3	24.4℃	66.0%	
	点 4	24.6℃	65.6%	
	点 5	24.6℃	64.7%	
17:44 (行车中)	点 1	23.3℃	56.3%	8
	点 2	23.6℃	56.7%	
	点 3	23.2℃	58.1%	
	点 4	24.8℃	58.3%	
	点 5	24.8℃	56.3%	

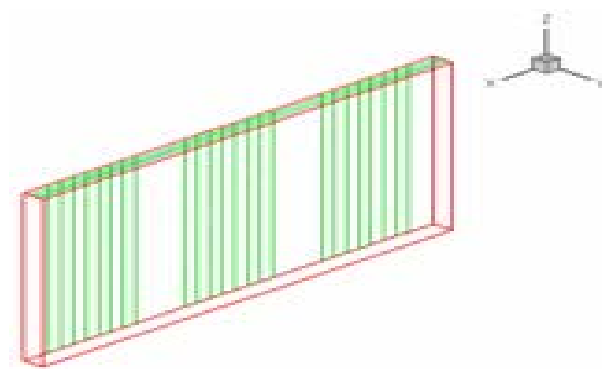


Figure 1. Carriage basic chart
图 1. 车厢基本架构图

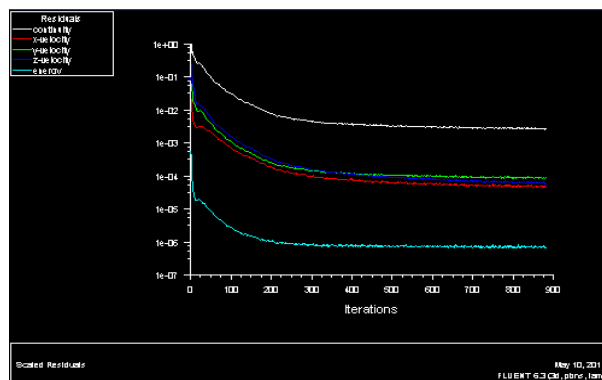


Figure 2. Temperature flow field changes in residual shown in figure
图 2. 温度流场变化残差显示图

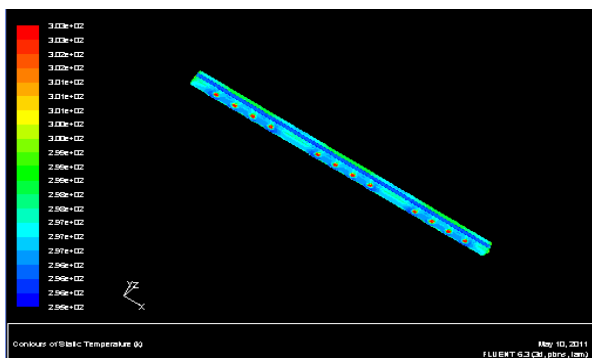


Figure 3. Air-conditioned wind speed is 0.2 m/s, temperature, flow temperature of 22°C field distribution
图 3. 冷气风速为 0.2 m/s, 温度为 22°C 之温度流场分布图

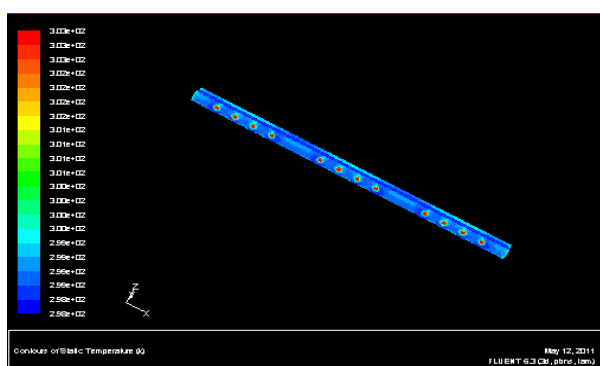


Figure 4. Air-conditioned wind speed of 0.4 m/s, temperature of 25°C temperature flow field distribution
图 4. 以冷气风速为 0.4 m/s, 温度为 25°C 之温度流场分布图

度流场分布, 车厢两侧温度略高, 车门的温度最高。图 4 为提高风速至 0.4 m/s, 流场分布与上述相同, 但经过相同时间, 室内平均温度则明显低于上述情况。比较图 3 与图 4 为提高风速至 0.4 m/s, 温度降低情形更为明显。但风速度过高, 会产生不舒适之感觉。从 tecplot 图形所呈现 X 方向切面及 Z 方向切面之温度分布图在图 5~7 及 18, 两侧车门附近温度略高于车厢内部; 下层温度略高于上层温度。

3.2. 车厢内部仿真之流场之分布

从 tecplot 图形所呈现气流走向图。图 8 为车厢冷气气场侧面流线图, 箭头方向显示气流吹送方向, 气场流线是由上往下, 碰底部在往上, 涡流式的循环。图 9 更明显显现气流由中间往下, 碰到底部再沿着两边往上循环。捷运车厢长条型送风设计, 是很好的设计, 可以短时间达到降温效果, 在旅客尖峰的上下班时间, 能使乘客感到舒适体感。红色代表速率较大。

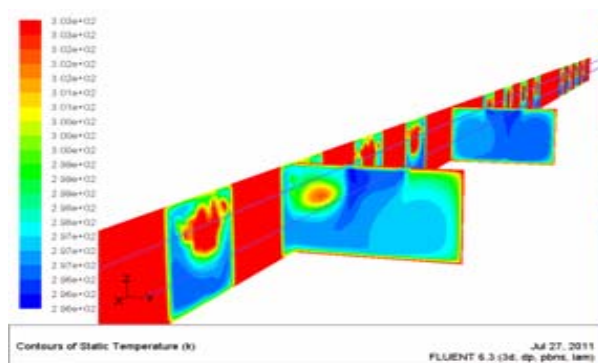


Figure 5. Air-conditioned wind speed of 0.2 m/s, temperature 22°C, the temperature distribution of compartment section
图 5. 冷气风速为 0.2 m/s, 温度为 22°C, 车厢切面温度分布图

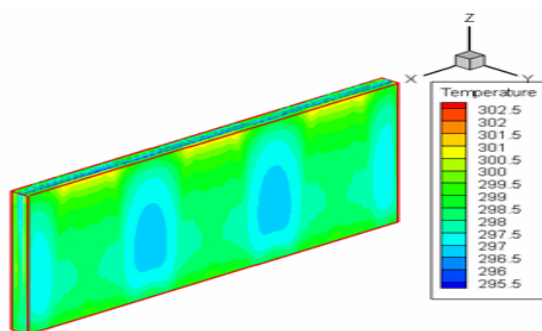


Figure 6. Air-conditioned wind speed 0.2 m/s, the temperature is 22°C Y direction section temperature distribution
图 6. 冷气风速为 0.2 m/s, 温度为 22°C, Y 方向切面温度分布图

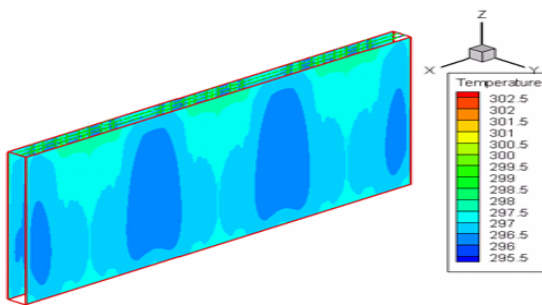


Figure 7. Air-conditioned wind speed of 0.3 m/s, temperature of 22°C Y direction section temperature distribution
图 7. 冷气风速为 0.3 m/s, 温度为 22°C, Y 方向切面温度分布图

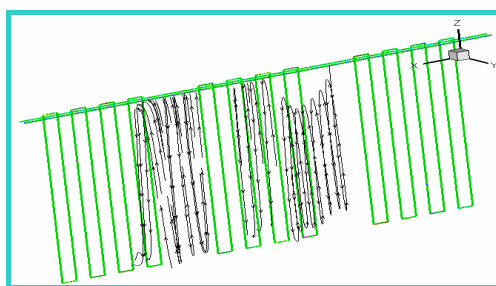


Figure 8. Air-velocity aspect flow of the chart
图 8. 冷气气场流线图

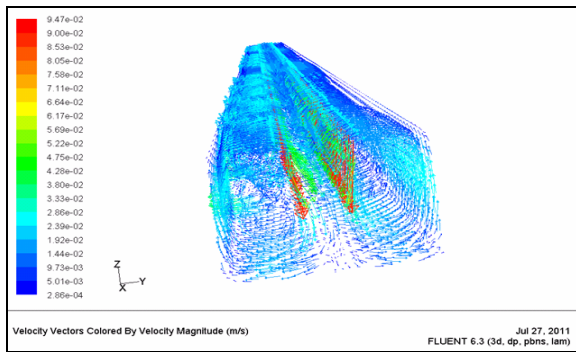


Figure 9. All air-velocity flow of EMU of the chart
图 9. 冷气流场流线图

3.3. 比较不同风速仿真之压力图

图 10 及图 11 为气压分布情形，显示下层气压高于上层气压。图 12 为切面压力分布图，显现两旁压力较大，中间压力较小。

3.4. 比较不同风速仿真之 X 速度在 Z 方向切面向分布图

图 13 与图 14 为风速分布情形，显示出风口风速最高，向两侧扩散。由 tepolt 图显现，颜色较为深红，在 0.3 m/sec 之送风下，X 方向的速度，明显提高。由于风速提高，X 方向风速提高，可增加 X 方向之扩散。

3.5. 比较不同风速仿真之 Y 方向速度分布图

由图 15 及图 16 显现，颜色较为浅绿，在 0.3 m/sec 之送风下，Y 方向的速度，则明显提高。由于风速提高，Y 方向风速提高，可增加 Y 方向之扩散。

3.6. 车厢内仿真速度分布

由图 17、18 可以看出，中间两条冷气入口，速度较大，右边因靠门速度也较大，左边因密闭，风速较缓慢，可以很明确显示气流是涡漩状。

3.7. 车厢内仿真 XYZ 不同方向轴速度分布

风速设定为 0.1 m/s，温度设 22°C，X、Y、Z 不同方向轴的方向图见图 19~21。由图 19~21，X、Y、Z 不同方向轴的方向图可以看出，除了 X 方向轴的图形出现速度分布，少部分异常外，Y 轴与 Z 轴的速度分布皆明显成规律状分布，可谓成功的模拟出 X、Y、Z 轴不同方向的速度分布情形。

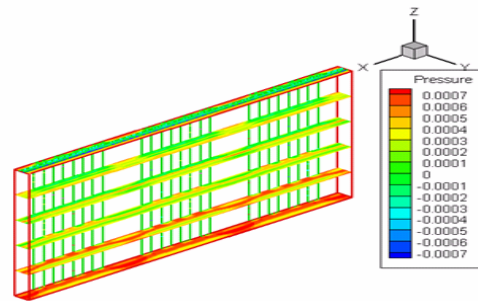


Figure 10. Wind speed 0.2 m/sec, the Z-direction section pressure distribution map
图 10. 风速为 0.2 m/sec, Z 方向切面压力分布图

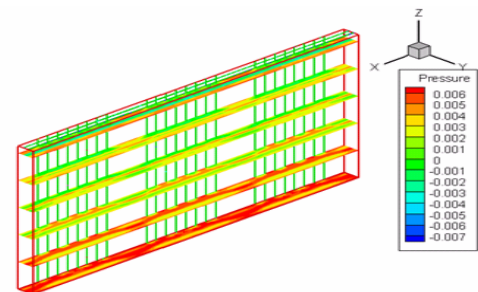


Figure 11. Wind speed 0.3 m/sec, the z-direction section pressure distribution
图 11. 风速为 0.3 m/sec, Z 方向切面压力分布图

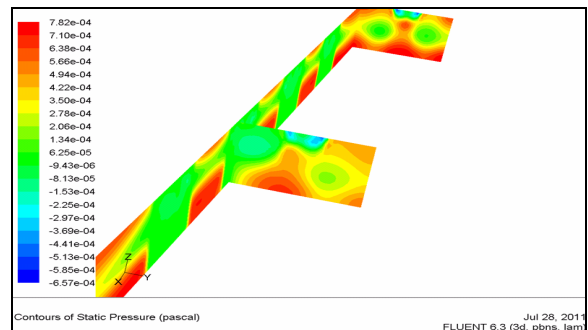


Figure 12. air-conditioned wind speed of 0.2 m/s, temperature 22°C compartment section pressure force distribution
图 12. 冷气风速为 0.2 m/s, 温度为 22°C 车厢切面压力分布

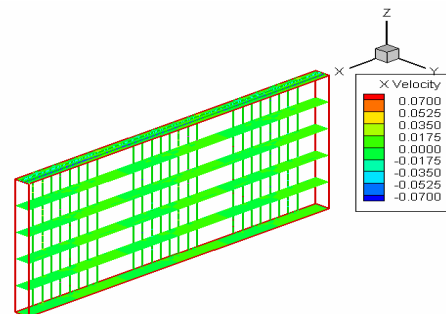


Figure 13. Wind speed 0.2 m/sec speed X Z direction section speed distribution Map
图 13. 风速为 0.2 m/sec, X 速度在 Z 方向切面速度分布图

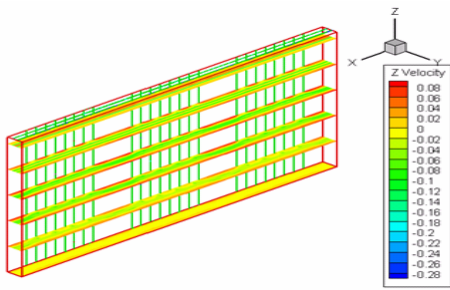


Figure 14. Wind speed 0.3 m/sec, X-speed cut speed in the Z direction layout
图 14. 风速为 0.3 m/sec, X 速度在 Z 方向切面速度分布图

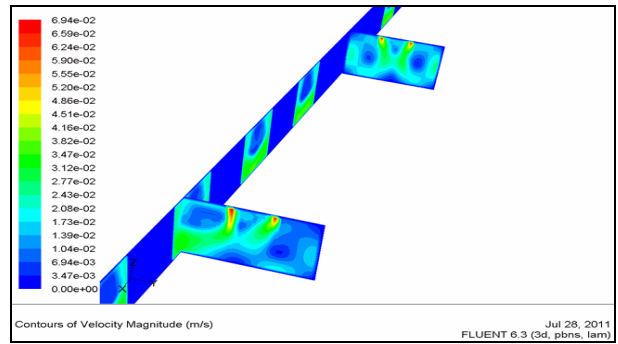


Figure 18. Wind speed 0.2 m/sec, the carriage section speed distribution
图 18. 风速 0.2 m/sec, 车厢切面速度分布

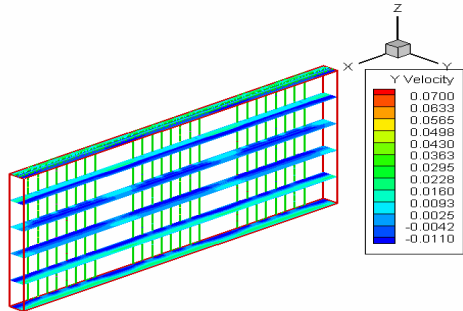


Figure 15. Wind speed 0.2 m/sec, Y speed cut speed distribution in the Z direction
图 15. 风速为 0.2 m/sec, Y 速度在 Z 方向切面速度分布图

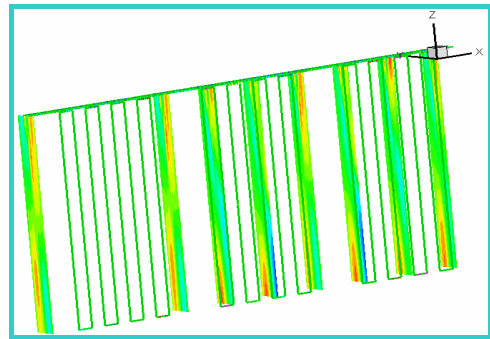


Figure 19. X-direction velocity maps
图 19. X 轴方向的速度图

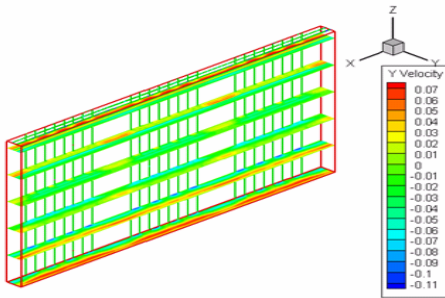


Figure 16. Wind speed 0.3 m/sec, y speed cut speed distribution in the Z direction
图 16. 风速为 0.3 m/sec, Y 速度在 Z 方向切面速度分布图

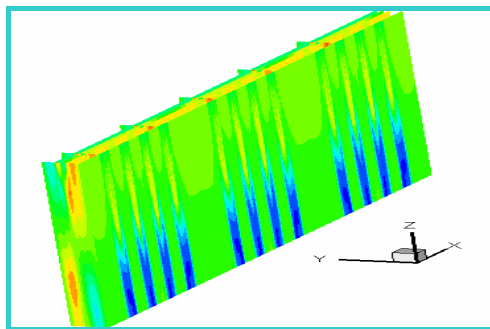


Figure 20. Y-direction velocity maps
图 20. Y 轴方向的速度图

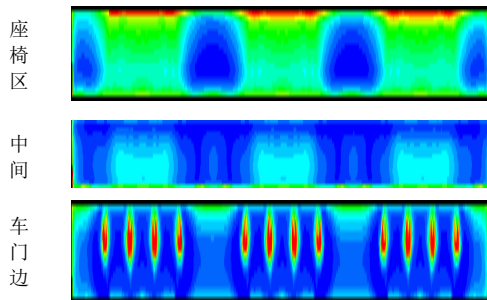


Figure 17. Wind speed is set to 0.1 m/s, the temperature setting of 22°C Y-axis cut surface temperature maps
图 17. 风速设为 0.1 m/s, 温度设定为 22°C, Y 轴方向切面温度分布图

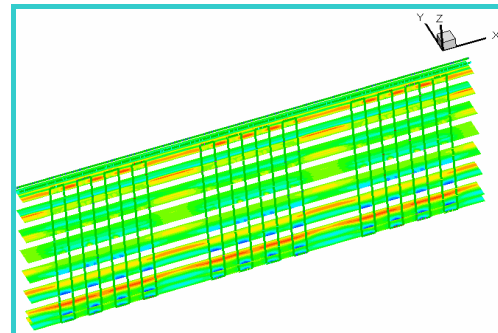


Figure 21. Z-direction velocity maps
图 21. Z 轴方向的速度图

3.8. 高雄捷运电联车厢实际之测点分布情形

车厢内空调温度直接影响乘车旅客舒适感。电联车厢实际测点分布情形，总共有五个测点，分别测量温度与湿度。另外以 15 分钟的间隔做前测与后测，外加停车 4 分钟的时间，共得 15 个数据(如表 1)。测量当天为假日午后，人潮较多，实际所花的时间约两小时。

由车厢内温度的实测值可知，靠近车门的测点点 4、点 5，温度较高；车厢两端与远离车门的测点点 1、点 2、点 3，温度较低。可能原因是因为车门时常开关，人员进出频繁，冷气容易流失出去。

由温度实测值与仿真图比较可知，车厢两端与远离车门的另一侧温度较低，靠近车门的一侧温度较高，两者的温度变化情形相同，符合我们实验当初的期望。由湿度实测值与仿真图比较可知，车厢内五个测点的湿度，湿度梯度皆呈平稳状况。

因此，相对湿度如越稳定，舒适感就会越高，符合我们实验当初的期望。

4. 结论

4.1. 依本仿真实验之结果，得到下列结论

1) 离送风口越近，温度越低，低温由送风口经车厢中间再向两侧扩散，形成车厢中间较低温，两侧较高温的温度流场。

2) 在同一风速下，温度设定越低，较低温的温度流场面积会缩小，温度流场的等温线会越密集。

3) 车厢内温度变化直接影响车内旅客的舒适感，等温梯度越平稳，舒适感越高。

4.2. 解决方案

天气持续高温炎热，用电量节节攀升，应设法实行电联车节约省电方案。

方案一：加装隐藏式风扇，增加冷气扩散至车箱

各角落的速度，减少用电量，却可以达到快速适温的效果。

方案二：加大风速，可加快降低温度的时间，扩散较为良好，不用调低温度设定，较为省电。

4.3. 建议

1) 研拟电联车运行阶段空调设定模式最适方案，落实教育司机员节能观念，并依最适方案执行。

2) 建议读者做后续研究时，可以探讨“改变风速设定导致温度流场变化的相关”与“电联车关门发车，车厢内空气流场达到最适温度之时间”的方向。

参考文献 (References)

- [1] Keelung News. Keelung environmental protection agency, 2007. <http://www.tnews.cc/024/newscon1.asp,number=3563>
- [2] J.-Z. Yu. The indoor humidity and temperature influence on the comfort index study. Pingtung: National Pingtung University of Science and Technology, 2010.
- [3] C.-H. Huang, J.-T. Lee, W.-C. Yu and W.-L. Yu. Study of the temperature flow field change by air-conditioning system in a indoor circular stadium. International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks (CECNet), Xianning, 16-18 April 2011: 3568-3671.
- [4] R. J. Wang, K. Zhang and G. Wang. Fluent technology base and its application. Beijing: Tsinghua University Press, 2007.
- [5] M. G. Vega, K. M. A. Diaz, J. M. F. Oro, R. B. Tajadura and C. S. Morros. Numerical 3D simulation of a longitudinal ventilation system: Memorial tunnel case. Tunneling and Underground Space Technology, 2008, 23(5): 539-551.
- [6] Z.-L. He. The average family of indoor air pollution emission diffusion simulation. Pingtung: National Pingtung University of Science and Technology, 2010.
- [7] Wikipedia, 2011. <http://www.wikipedia.tw>
- [8] T. Lim. With a translucent media space temperature field measurement and numerical simulation. Pingtung: National Pingtung University of Science and Technology, 2010.
- [9] J. Schabacker, M. Bettelini and C. Rudin. CFD study of temperature and smoke distribution in a railway tunnel with natural ventilation system. The 3rd International Conference on Tunnel Fires and Escape from Tunnels, Washington DC, 9-11 October 2001.
- [10] 黄志宏, 李嘉塗. Study of the temperature flow field change by air-conditioning system in a circular indoor gymnasium[J]. 建筑学, 2012, 2(1): 7-14.