

Research on the Application of Radiant Heating in Aircraft Maintenance Workshop

Yongan Li, Chuanyang Zhao, Xiaoxin Chen, Xuelai Liu

Shandong Jianzhu University, Jinan Shandong
Email: sdjglya@163.com

Received: Dec. 24th, 2016; accepted: Jan. 7th, 2017; published: Jan. 12th, 2017

Abstract

In this paper, aiming at the special environment of aircraft maintenance workshops required, taking a certain aircraft maintenance workshop in Shandong as an example, this paper analyzes the characteristics of radiant floor heating and ceiling radiant heating temperature field formed. Research presents the radiant floor heating and radiant heating roof coupling approach in the aircraft maintenance workshop, which eliminates the asymmetry of the single radiant heating methods, and effectively solves the problem of big color change due to big temperature gradient in the painting, paint withdrawal process of the plane. It is very important for enhancing the level of aircraft maintenance, so as to ensure the safe operation of the aircraft.

Keywords

Aircraft, Floor Radiation, Ceiling Radiation, Maintenance Workshop

辐射供暖在飞机维修车间中的应用研究

李永安, 赵传阳, 陈晓欣, 刘学来

山东建筑大学, 山东 济南
Email: sdjglya@163.com

收稿日期: 2016年12月24日; 录用日期: 2017年1月7日; 发布日期: 2017年1月12日

摘要

本文针对飞机维修车间所要求的特殊环境, 以山东某飞机维修车间为例, 在理论与实践的结合上, 分析了地板辐射供暖和顶板辐射供暖所形成温度场的特点。研究提出了在飞机维修车间采用地板辐射供暖和顶板辐射供暖耦合的方式, 这种方式消除了单一辐射供暖方式的不对称性, 有效地解决了飞机在喷漆、

退漆过程中因温度梯度大造成色彩变化大的技术难题，这对于提升飞机维修水平，保证飞机安全运行非常重要。

关键词

飞机，地板辐射，顶板辐射，维修车间

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

改革开放以来，我国的民航事业得到了快速发展，飞机数量直线上升，航空运量持续快速增长，航线网络不断扩大，机队运输能力显著增强，机场、空管等基础设施建设取得了重大进展。航空运输在实施“一带一路”战略、实现小康社会中发挥的作用将越来越大。据预测，在未来 20 年时间里，中国国内航空客运周转量年平均增长率将达 7.1%。到 2033 年，中国国内航空市场将占同期全球航空客运量的 11.9%。由此飞机的维修量急剧上升，并对飞机维修车间的室内环境提出了更高的要求，比如，飞机退漆、喷漆是飞机维修和定期检修的重要项目，飞机在退漆和喷漆时都需要适宜的温度条件。如果达不到喷漆的适宜温度或者飞机表面温度场变换较大，都将导致飞机退漆困难、喷漆不均匀、漆干后飞机表面不同部位存在色差[1] [2]。因此，采用先进的技术手段，创造适宜的飞机维修车间室内环境对于提高飞机维修水平，延长飞机寿命均具有重要的意义。

据了解，地板辐射采暖可以使供暖房间内底部温度较高，这是由于底层空气靠近辐射采暖板，并随着高度的上升温度逐渐降低，但下部热空气的上升会使房间顶部温度较高。根据地板辐射采暖这种分层供暖的特性，人员活动在 2 m 以下区域范围内的使用较好，在欧洲寒冷地区这种特性在广场、足球场等得到了很好的利用。由于飞机维修车间是属于高大空间，辐射供暖适用。

2. 机库辐射供暖模型的建立

2.1. 机库基本情况

本文以山东某飞机维修车间为例来进行分析。该机库由机库维修大厅、北侧附楼、东侧办公区组成，其总建筑面积为 25,300 m²。其中机库维修大厅建筑面积为 9600 m²，长度为 120 m，宽 80 m，网架下弦高 25 m。北侧附楼地下一层、地上 3 层，建筑面积为 1500 m²。东侧办公建筑面积 14,200 m²。该维修机库主要承担飞机 C 检及以下各级定检和航线的维护等任务，可同时容纳三架 B747 飞机入库维修。图 1 为机库大厅首层平面图[3]。

2.2. 供暖空调系统

机库维修大厅供暖系统：低温地板辐射配合暖风机供暖，供回水温度为 60℃/45℃，室内设计温度为 14℃，室内体感温度可以达到 16℃，供暖设计热负荷为 2100 kw。

附楼供暖系统：使用自备锅炉房提供 90℃/65℃ 的热水进行供暖，其热负荷为 1300 kw。

机库维修大厅空调系统：设置 2 套直接蒸发式空调，空调室外机设在附楼屋顶，室内机设在地下室空调机房内，空调管通过通行管沟接至空调地井，用专用接头通过软管接至飞机内部人员工作区附近。

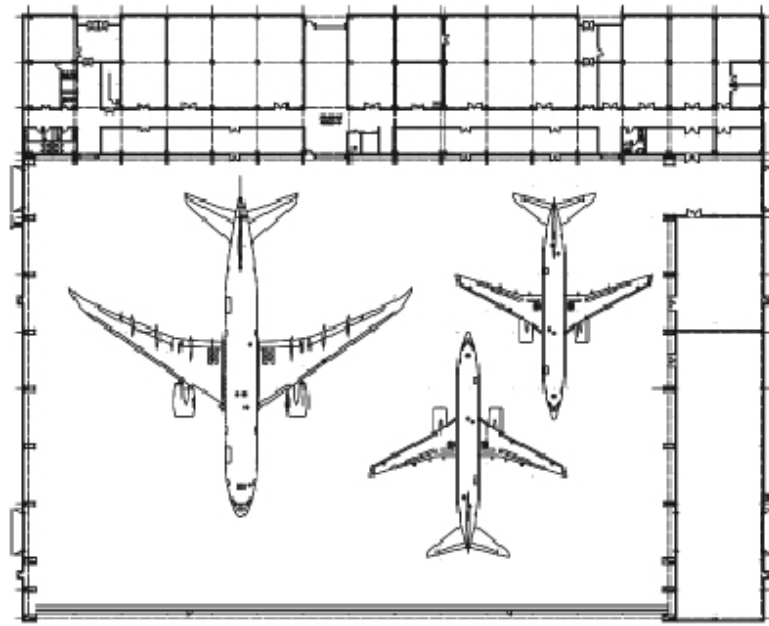


Figure 1. First floor plan of hangar hall
图 1. 机库大厅首层平面图

在油箱和地沟等位置设置了机械通风系统用于快速排放出在检测和维修过程中散发出对人体和环境有害的物质和气体，保证检修工作的顺利进行。

附楼空调系统：夏季制冷使用多联机，机库工作人员使用可移动式空调器，其制冷室外机部分设在附楼屋顶上面。

2.3. 机库几何模型的建立

为研究机库辐射供暖条件下温度场、速度场建立几何模型，尺寸为114 m×80 m×25 m的长方体大空间。机库大门尺寸为80 m×20 m。

2.4. 湍流模型

湍流流动是在自然界广泛存在的一种流动方式也是最为常见的一种流动方式，其流动过程中的换热方式是对流换热。飞机维修车间的流态经过计算属于紊流。所以本文选择的模型是三维紊流不可压缩模型[4] [5]。

经分析研究，飞机维修车间内质量、能量、动量守恒控制方程的通用形式如下[6] [7]。

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho U\phi) = \text{div}(\Gamma_{\phi}\text{grad}\phi) + S_{\phi} \quad (1)$$

式中： $\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t}$ 为非稳态项； $\text{div}(\rho U\phi)$ 是对流项； $\text{div}(\Gamma_{\phi}\text{grad}\phi)$ 为扩散项， ϕ 为通用变量，可以代表 u ， v ， w ， T 等求解变量； Γ_{ϕ} 为广义扩散系数； S_{ϕ} 为广义源项。

表 1 中， μ_{eff} 为空气的有效粘性系数，且 $\mu_{\text{eff}} = \mu_l + \mu_t$ ； μ_l 为空气的层流粘性系数； μ_t 为空气的湍流粘性系数； u 、 v 、 w 分别为 x 、 y 、 z 方向上的速度； p 为空气的压力； h 为空气的焓； g_x 、 g_y 、 g_z 分别为 x 、 y 、 z 方向上的重力加速度； ρ_{ref} 为空气的参考密度； σ_h 为 h 的当量普朗特数； S_h 为单位体积的发热量。

Table 1. Interior air flow control equation of zero equation turbulence model
表 1. 零方程湍流模型的室内空气流动控制方程

S_ϕ	ϕ	Γ_ϕ
1	0	0
u	μ_{eff}	$-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial u}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial v}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial w}{\partial x}\right) + g_x(\rho - \rho_{\text{ref}})$
v	μ_{eff}	$-\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial u}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial v}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial w}{\partial y}\right) + g_y(\rho - \rho_{\text{ref}})$
w	μ_{eff}	$-\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial u}{\partial z}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial v}{\partial z}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial w}{\partial z}\right) + g_z(\rho - \rho_{\text{ref}})$
h	$\frac{\mu_t}{\sigma_h}$	S_h

下面是辐射积分方程的具体形式:

$$\frac{dI(\mathbf{r}, s)}{ds} + (a + \sigma_s)I(\mathbf{r}, s) = an^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\mathbf{r}, s) \Phi(s, s') d\Omega' \quad (2)$$

式中 \mathbf{r} 是位置向量, s' 是散射方向, s 是沿程长度, a 是吸收系数, n 是折算系数, σ_s 是散射系数, σ 是斯蒂芬-玻耳兹曼常数 ($5.672 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$), I 是辐射强度, T 是当地温度, Φ 是相位函数, Ω' 是空间立体角。

对通用方程式(1)的源项 S_ϕ 进行线性化处理, $S_\phi = S_c + S_p \phi_p$ ($S_p \leq 0$), 则离散方程为如下形式:

$$a_p \phi_p = a_E \phi_E + a_W \phi_W + a_N \phi_N + a_S \phi_S + a_T \phi_T + a_B \phi_B + S_c \Delta x \Delta y \Delta z \quad (3)$$

本文采用 Reynolds 时均方程的湍流数值模拟方法, 湍流模型采用的数学表达式如下:

$$\mu_t = 0.03874 \rho \nu l \quad (4)$$

式中, ν 表示速度, l 表示离墙体的最近距离。

将室内空气湍流流动的控制微分方程(1)表示为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \phi) + \text{div}(\rho u \phi - \Gamma_\phi \cdot \text{grad} \phi) = S_\phi \quad (5)$$

式中, ϕ 代表流动的速度、焓(温度)等物理量。

3. 基于辐射供暖的机库热环境分析

地板辐射采暖与室内环境是通过对流和辐射传热进行换热, 室内空气之间的导热可以基本忽略。辐射换热量主要取决于维护结构表面、加热板、人体及室内飞机等设备的表面温度, 各表面的几何形状, 相对位置及其辐射黑度等特性。对流换热量主要取决于地板附近空气对流作用的强弱。值得注意的是, 人体与周围环境换热量的一半以上是以辐射方式进行的。

本文以上述方程为基础, 结合实测数据, 应用 CFD 软件, 对地板辐射、顶板辐射以及两者有机结合方式条件下, 飞机维修车间内的温度场进行分析。

3.1. 地板辐射供暖结果分析

从机库流场的温度分布图(图 2)可以看出, 机库大厅内的温度分布较为均匀, 即飞机检修和人体活动的区域温度分布较为均匀, 并且温度云图呈对称形状, 这是由于机库的热源是温度较为均匀的辐射地板。

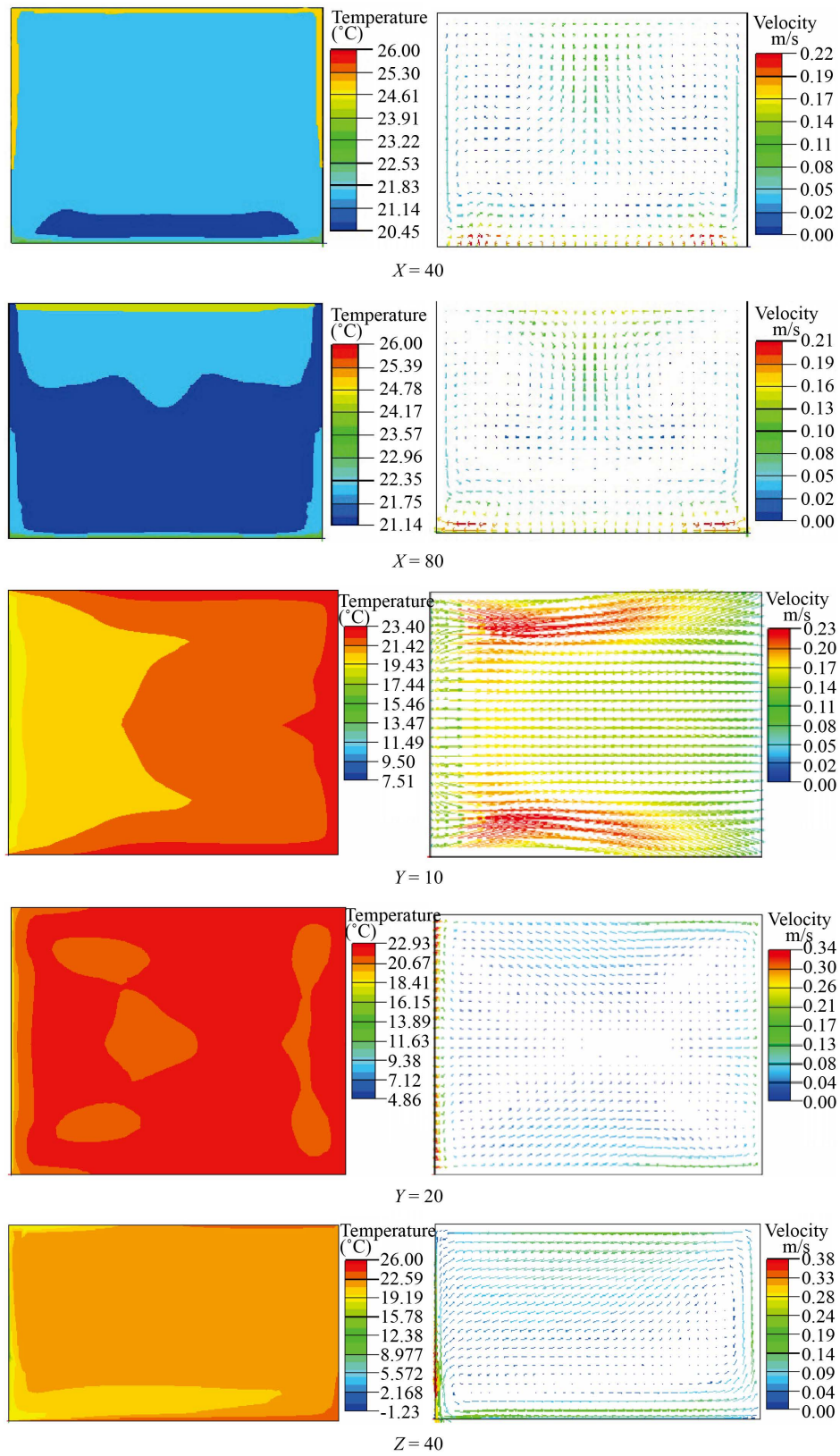


Figure 2. Temperature and velocity distribution of radiant floor heating
图 2. 地板辐射供暖温度与速度分布

由于密度差引起的大空间自然对流影响,机库内整体的垂直温度分布情况是地面附近温度由于靠近辐射板,温度比较高,这个高度正好人体脚部的位置,人体脚部对于环境温度最为敏感,而脚部温度恰好比较高,所以这种供暖方式对身处辐射环境中工作的人员健康较为有利的[8]。但随着高度上升温度先是逐渐下降然后慢慢上升,到达机库顶部时温度梯度变大。

由图 3 可见,机库内人员活动区域和维修部的流速较小,仅在各个壁面附近的边界层内有较高的速度分布,这是由于地板辐射采暖的主要换热方式是辐射传热,经研究得知,机库辐射供暖的辐射换热量占总供热量的 65%左右,对流换热量占总换热量的 30%左右[9]。

上升的气流到达机库顶部时,开始向下运动,与继续上升的气流形成小规模涡流,使得维修车间内气流形式为两个大循环。由于靠近机库大门的位置,温度较低,流速较快。因此,为减小气流下降速度,提高机库内温度场的均匀性,应该对机库大门采取一定的措施,减少冷风的渗透,这样也有利于节能[10]。

3.2. 顶板辐射供暖结果分析

从图 3 还可看出,机库大厅内的温度有明显的分层现象。整个机库大厅内的温度分布与地板辐射供暖温度场相反,人体活动和飞机检修的高度温度较低,随着高度的增加温度逐渐上升,顶棚的温度最高。地面和墙壁由于他们自身的温度较低,和它们对流换热后,温度也降低。人体活动的区域温度梯度为 $1^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 。机库内飞机由于体型庞大,在喷漆、退漆过程中需要分布一致的温度环境,因此这种形式的供暖方式是不适合的。

从截面 $X = 40$ 和 $X = 80$ 的云图可以看出,由于受到顶棚辐射板加热的效果,顶棚处的空气温度较高,空气密度比其它地方要小,这些密度较低的气体沿着顶板向四周扩散,由于热量集中于机库较高的部位,属于无效热量,造成了大量的能源浪费。由截面 $Z = 40$ 的云图可以看出,在机库大厅的外墙温度较低,这个低温区域沿着外墙延伸到顶板。这个区域的形状同截面的外形比较吻合,说明模拟的结果与实际结果较为接近。

3.3. 两种辐射采暖结果分析

在 $X-Z$ 面的俯视图划分如下的网格,取出五个测点进行分析室内的温度场,这样取的几个测点比较有代表性,如图 4 所示。

由图 5 得到不同的两种温度场特性,地板辐射采暖的机库其温度场特点是靠近地面辐射板的边界层温度较高,然后随着高度的增加逐渐降低,机库整体温度是下部温度较高,辐射地板的表面与其周围的换热温差较小,机库上部的温差较大,这是由于大空间对流导致的。而顶板辐射采暖的温度场特性是上部温度较高,从上到下呈倒温度梯度,温度分层现象比较明显[11],机库下部温度较低,人员工作和飞机周围温度整体比地板辐射采暖的情况下要低,这是由于它和地板辐射采暖的热源位置不同引起的,由于顶板的温度较高导致它与机库内的空气换热温差大,温度场分布不均匀。

经过上面的分析,可以看出,在飞机维修车间应该采用地板辐射采暖与顶板辐射采暖相结合的办法,这样就会使整个机库的温度场分布均匀,使喷漆、退漆在较为稳定的温度环境中进行。

4. 结论

- 1) 使用地板辐射供暖的机库室内温度分布比较均匀,工作区的温度梯度较小,为 $1^{\circ}\text{C}/\text{m}$,机库顶端由于大空间对流换热,温度梯度较大。
- 2) 采用顶板辐射采暖的机库内,温度分层现象明显,顶部温度梯度较大,工作区整体温度较地板辐

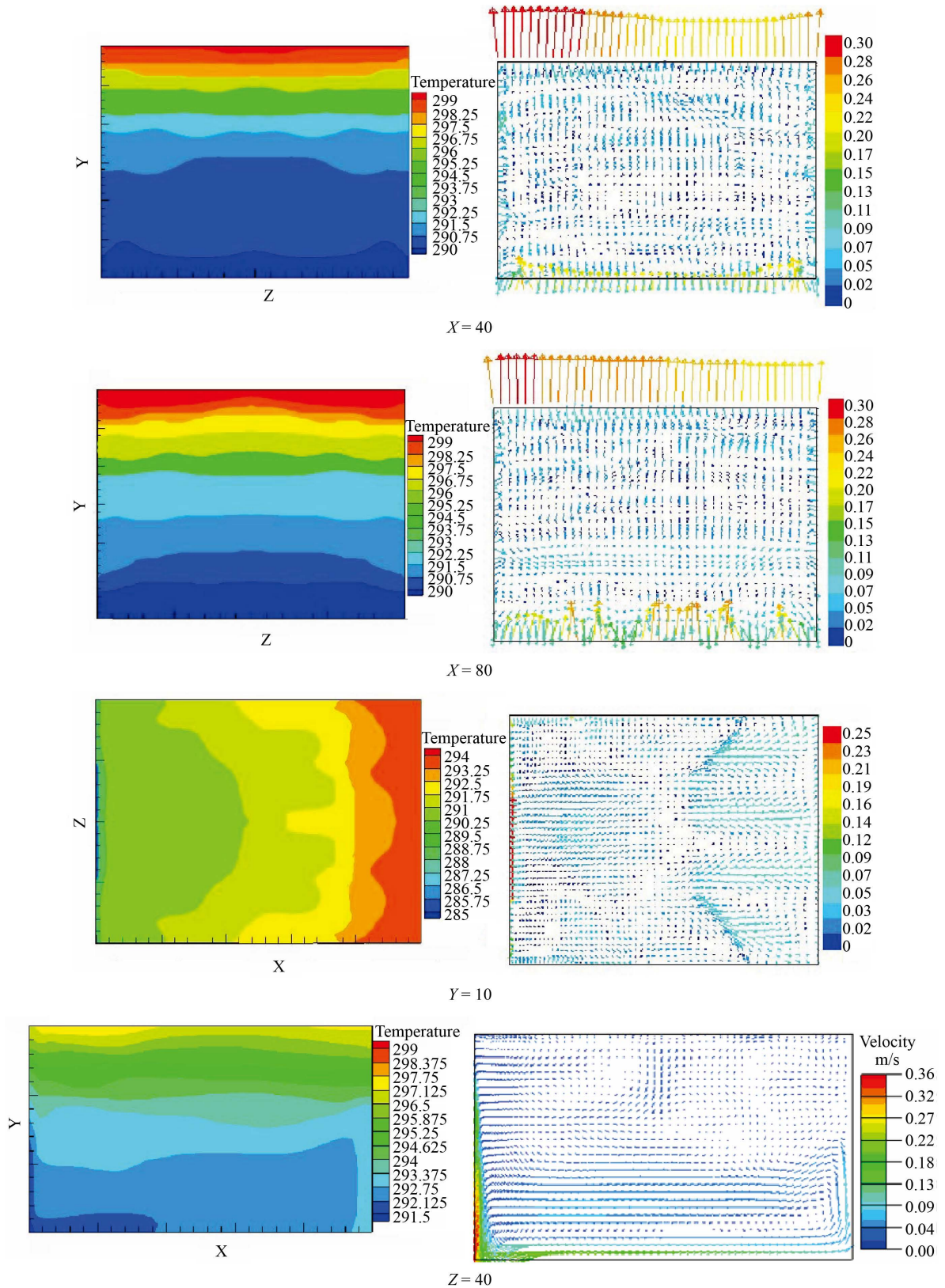


Figure 3. Temperature and velocity distribution of roof radiant heating
图 3. 顶板辐射供暖温度与速度分布

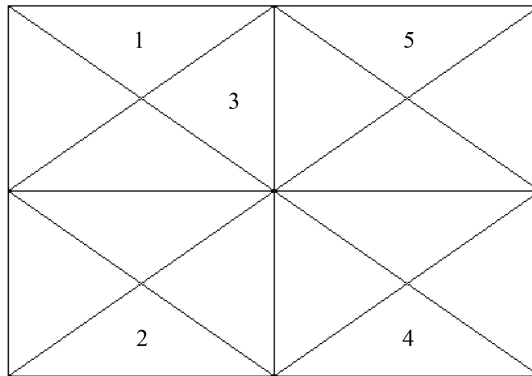
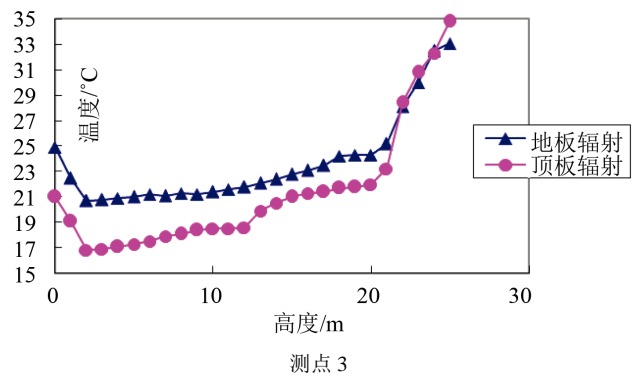
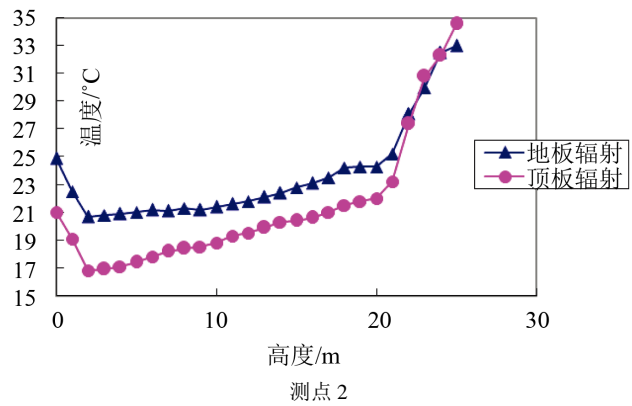
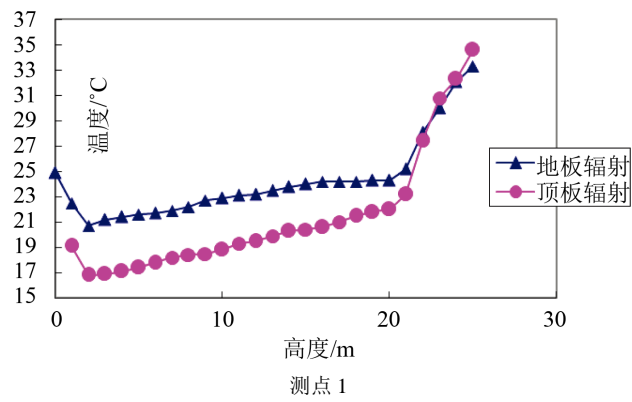


Figure 4. Distribution of temperature measuring points
图 4. 温度测点分布



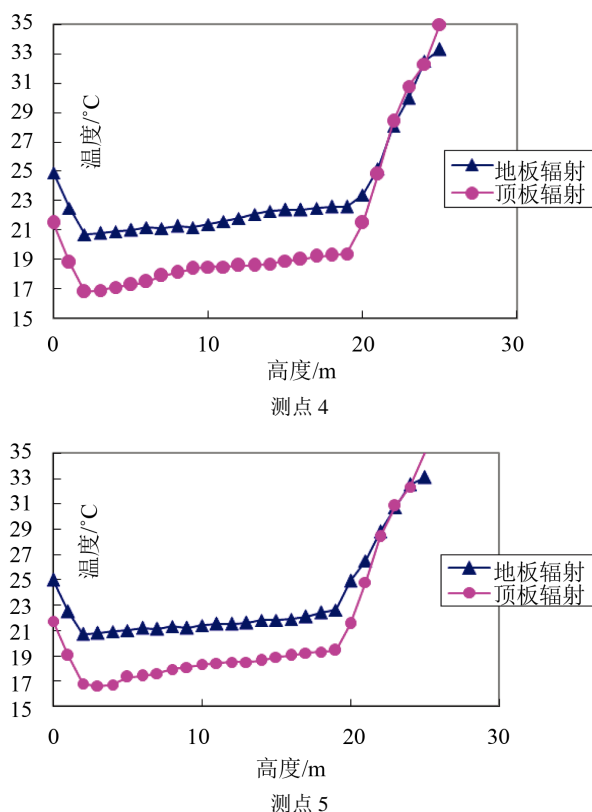


Figure 5. Comparison of two kinds of radiant heating temperature
图 5. 两种辐射供暖温度对比

射采暖要低,基本满足要求。但是其温度较高的区域集中在机库的顶端,造成大量能源的浪费,在机库等高大空间内使用不合适。

3) 应该采用地板辐射供暖与顶板辐射供暖相结合的方式,这样就会使整个机库的温度场分布均匀。尽管机库内的飞机体型庞大,但也能使喷漆、退漆的过程都处在较为稳定的温度环境中,可有效消除辐射的不对称性,从而不会导致飞机机身的色彩变化。

参考文献 (References)

- [1] 李永安. 低温热水地板辐射采暖系统设计[J]. 建筑热能通风空调, 2002, 21(1): 62-65.
- [2] 中国航空工业集团公司. 飞机喷漆机库设计规范(GB 50671-2011) [S]. 北京: 中国计划出版社, 2012.
- [3] 赵传阳. 辐射空调在飞机维修车间的应用研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东建筑大学, 2014.
- [4] Ferro, A., Kopperud, R. and Hildemann, L. (2004) Source Strength for Indoor Human Activities That Resuspend Particle Mass. *Environmental Science & Technology*, **38**, 1759-1764. <https://doi.org/10.1021/es0263893>
- [5] Sundell, J. (1996) What We Know, and Don't Know, about Sick Building Syndrome. *ASHRAE Journal*, **38**, 51-57.
- [6] 陶文铨. 数值传热学[M]. 第2版. 西安: 西安交通大学出版社, 2003.
- [7] 陶文铨. 计算流体力学与传热学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [8] 丁秀娟. 浅谈衣服热阻对人体热舒适的影响[J]. 建筑节能, 2009, 37(2): 27-29.
- [9] 冯晓梅. 低温地板辐射供暖特性参数的研究[J]. 暖通空调, 2004, 34(1): 1-4.
- [10] 向立平. 空调客车内气流分布特性及动态热舒适性研究[D]: [博士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2011.
- [11] 王雪. 冷却顶板和太阳辐射对置换通风系统影响的模拟与分析[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2005.

期刊投稿者将享受如下服务：

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：hjce@hanspub.org