

文章编号: 1671-6612 (2021) 02-258-05

# 内蒙古某耐寒测试机库供暖形式探讨与研究

皮英俊<sup>1</sup> 杨晋<sup>2</sup>

(1. 同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司 上海 200092;  
2. 青岛海信日立空调营销股份有限公司 上海 266590)

**【摘要】** 耐寒测试机库作为一种特殊的高大空间,其供暖形式一直是暖通空调设计领域的难点。结合了数种飞机维修及测试机库的常用供暖形式,通过分析其各自的优缺点,提出“强制对流供暖”更适合作为耐寒测试机库的供暖形式。通过计算流体力学方法得出侧送风双层暖风机供暖形式供暖效果好,能源消耗低,是本机库供暖形式的最优解决方案,也为其它机库的设计提供参考。

**【关键词】** 维修机库;供暖形式;强制对流供暖;数值模拟

中图分类号 TU832.5 文献标识码 A

## Study on Heating Methods for an Attendant Hangar in Inner Mongolia

Pi Yingjun<sup>1</sup> Yang Jin<sup>2</sup>

(1. Tongji Architectural Design(Group) Co., Ltd, Shanghai, 200092;

2. Qingdao Hisense Hitachi Air-conditioning Marketing Co., Ltd, Shanghai, 266590)

**【Abstract】** The attendant hangar is a kind of high space building. The heating method for a attendant hangar is the key point for a HVAC design. By summarizing common heating methods and analyzing the advantages and disadvantages of each heating system, we found that the forced-convection heating is the best heating method for this attendant hangar. By adopting the computational fluid dynamics method, the horizon warm air heating is a better way of the forced-convection heating. It also provides reference to for the design of other attendant hangars.

**【Keywords】** attendant hangars; heating methods; forced-convection heating; numerical simulation

作者简介:皮英俊(1989.01-),男,硕士,中级工程师,E-mail: 13pyj@tjad.cn

通讯作者:杨晋(1994.05-),男,本科,助理工程师,E-mail: 877657933@qq.com

收稿日期:2021-03-23

## 0 引言

随着航空航天事业的迅速发展,为满足民航客机停留及维修需求,机库建设日益增多。机库具有面积大,高度高的空间特点,根据等级不同,一般机库的建筑面积从2000m<sup>2</sup>到50000m<sup>2</sup>不等<sup>[1]</sup>,空间净高一般为25m~30m<sup>[2]</sup>。本项目所阐述的耐寒测试机库除了满足机库的基本使用需求外,仍需满足飞机极寒测试的需求。因此,其选址于冬季室外供暖设计温度为-31.6℃的内蒙古呼伦贝尔海拉尔<sup>[3]</sup>,机库平面图如图1所示。

高大空间的供暖方案选择一直是供暖设计领

域的重难点。而极寒测试机库不仅空间尺寸远大于常规高大空间<sup>[4]</sup>,其还具有以下特点:(1)冬季室外供暖设计温度低,冬季极端最低温度低于-40℃;(2)外门面积大,一般机库外门宽度近似等同于外墙宽度,高度为14~20m不等;(3)飞机出入机库,大门需完全敞开,室内温度会在大门敞开的时段内迅速下降。因此,可以通过以下两点来考量耐寒测试机库供暖效果的优劣:(1)工作区温度能否达到供暖室内设计温度16℃<sup>[5]</sup>;(2)机库大门关闭后,室内温度能否快速回归设计温度。在日常使用过程中,机库大部分时间处于无飞机进

出的稳定状态。工作区温度是此种状态下考量机库供暖形式的重点。本文对工作区域室内设计温度进行重点分析, 对温度回复速度进行定性分析。

国内外对于高大空间供暖形式的研究已较为成熟, 但其研究对象的空间高度一般为 12~18m<sup>[6-11]</sup>。但对于空间净高为 25~30m 的机库来说, 这些供暖方式的可行性仍需进一步的研究。本文将围绕耐寒测试机库的供暖形式进行探讨, 通过对比分析, 并借助 CFD 模拟的方式, 提出一种适合本耐寒机库使用的供暖方式, 也为其它机库的供暖设计提供参考。

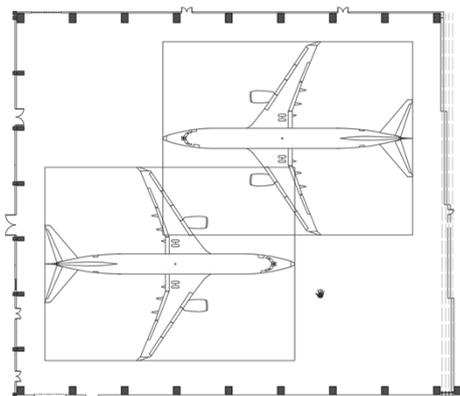


图 1 内蒙古某机库平面图

Fig.1 The attendant hangar plan

## 1 机库建筑常用供暖形式

高大空间的供暖方式可分为自然对流供暖方式, 强制对流供暖方式以及辐射供暖方式<sup>[12]</sup>。下文将基于高大空间的供暖方式, 并结合耐寒测试机库的特点, 对机库的常用供暖方式进行对比分析。

### 1.1 自然对流供暖

自然对流供暖以热水或蒸汽为热媒, 通过散热器将热媒的热量散发至房间内。此种供暖形式系统简单、造价低。但散热器只能布置在墙边, 对于机库这种大空间来说, 中心区域的温度很难把控。另外, 由于热空气上浮, 室内垂直温度场会出现比较明显的温度梯度, 很难达到理想的供暖效果。

### 1.2 强制对流供暖

强制对流供暖的主要方式是暖风机供暖。常见的暖风机供暖方式为暖风机顶送风供暖。通过安装在机库桁架位置的暖风机向下送热风, 强制循环室内空气。相对于散热器供暖来说, 此种形式可以更好地保证工作区的温度, 且可以实现室内温度的迅

速提升。其缺点是会产生较强烈的吹风感, 且无法解决高度上温度梯度的问题。

### 1.3 辐射供暖

辐射供暖方式分为热水(燃气)辐射板供暖和燃气红外辐射供暖。辐射板一般分为顶板辐射和地板辐射两种形式。辐射板在获得相同热舒适的前提下, 一般可降低 2~4℃ 的室内计算温度, 是一种较为节能的方式, 且由于主要通过辐射进行供暖, 相较于对流换热, 温度梯度小。但由于辐射板温度较低, 故其用量和造价都相对较高。此外, 辐射板室内升温较慢, 飞机进出机库后, 需要较长时间才能恢复室温。地板辐射由于辐射面离工作区近, 相较于顶板辐射来说, 热舒适更好。但地板辐射对施工工艺要求较高, 施工难度大, 且机库地面相较于一般建筑来说, 需要承受更重的荷载, 辐射管埋深更深, 传热效率降低。另外, 地板辐射维修难度较大, 若出现漏点, 需要开挖大范围地面, 维修时长且代价较大。

燃气红外辐射供暖属于高温辐射供暖, 利用可燃气体通过发生器产生红外线实现供暖。燃气红外采暖具有舒适度好、升温迅速等优点。但由于采用天然气作为燃料, 安全要求高, 有发生火灾甚至爆炸的危险。对于耐寒测试机库来说, 此做法有较大的安全隐患。

从经济性、适用性和安全性考虑, 强制对流供暖更适合本耐寒测试机库使用。下文将着重对强制对流供暖及暖风机供暖进行分析, 并提出一种新的暖风机供暖方式。

## 2 CFD 模拟分析

### 2.1 数值模拟

#### 2.1.1 物理模型

本文通过建立机库三维模型, 采用计算流体力学 (computational fluid dynamics, CFD) 的方法对机库暖风机送风进行研究。

机库长宽均为 60m, 高 26m, 在四面外墙、顶面及地面设置空调热负荷。本次模拟主要比较暖风机顶送风暖风机供暖及侧送风双层暖风机供暖两种工况。顶送风暖风机一般设置于机库桁架内, 本机库桁架底标高为 24m, 故在顶送风工况下, 将暖风机送风口高度设置为 24m。侧送风暖风机均匀布置在机库南北两侧壁面上, 由于机库宽度为 60m,

单侧送风机覆盖需要超过 30m, 参考其他高大空间研究成果, 暖风机需双层布置, 布置高度分别为 6m 和 11m, 向下倾斜, 送风角度分别为 24° 和 30° [7]。机库剖面如图 2 所示。

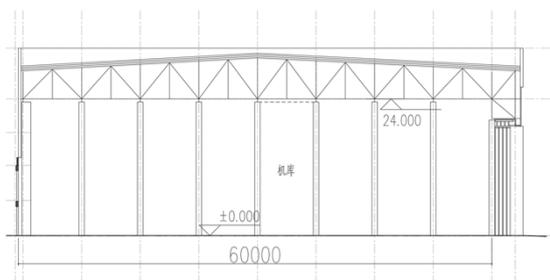


图 2 机库剖面图

Fig.2 The attendant hangar section

### 2.1.2 数学模型

本文采用计算流体力学软件 Fluent 对模型进行模拟计算。流体假定为不可压缩理想气体。采用 Realizable  $k-\epsilon$  两方程模型, 用标准壁面函数处理流体与壁面交接区域, 自然对流采用 Boussinesq 假设。控制方程包括连续性方程、能量方程、动量方程、紊动方程及耗散率方程。

采用 PISO 算法对压力-速度耦合方程进行求解。为了获得精确的解, 降低数值解的震荡, 均采用二阶迎风格式进行计算, 各项控制方程收敛残差不高于  $10^{-4}$ 。

将机库各壁面设置为第三类边界条件, 并相应设置不同的热流密度。计算采用结构化网格, 在暖风机进排风口、壁面等位置进行局部加密处理, 网格如图 3、图 4 所示。

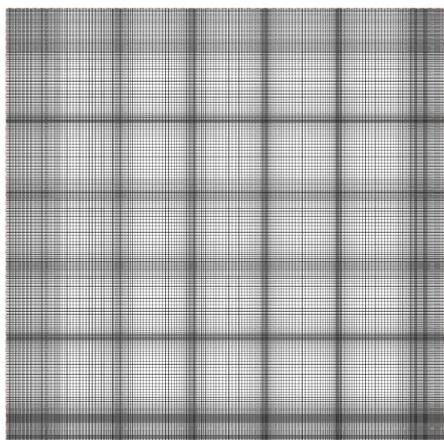


图 3  $z=13m$  截面网格划分图

Fig.3 Mesh partition maps on  $z=13m$

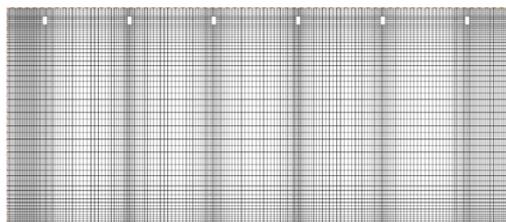


图 4  $x=28m$  截面网格划分图

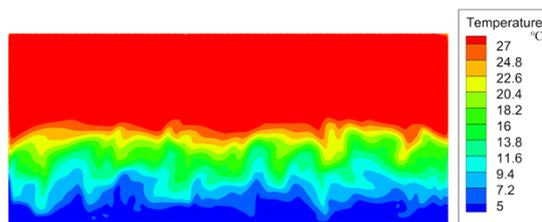
Fig.4 Mesh partition maps at  $x=28m$

## 2.2 模拟结果

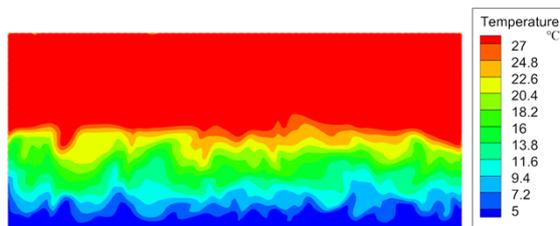
### 2.2.1 顶送风暖风机供暖

顶送风暖风机供暖条件下, 热源集中于上部向下送风。由图 5 (a) 和 5 (b) 可以看出, 当暖风机安装于上部区域时, 由于热空气上浮, 空间内温度呈明显的上热下冷分布。且由于空间高度较高, 工作区 ( $z=1.5m$ ;  $z=4.5m$ ) 平均温度分别为 7°C 和 9°C, 温度分布详见图 5 (c)、5 (d)。

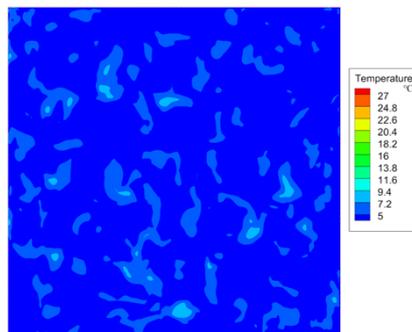
顶送风暖风机供暖条件下, 工作区 ( $z=1.5m$ ;  $z=4.5m$ ) 环境风速基本都在 0.7m/s 以下, 速度分布详见图 5 (e)、5 (f)。



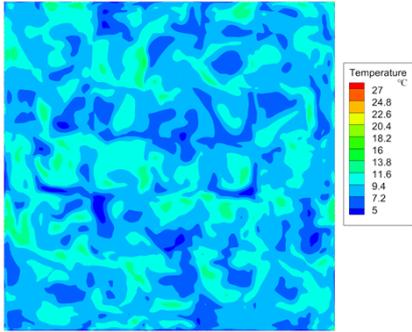
(a)  $x=28m$  截面处的温度分布云图



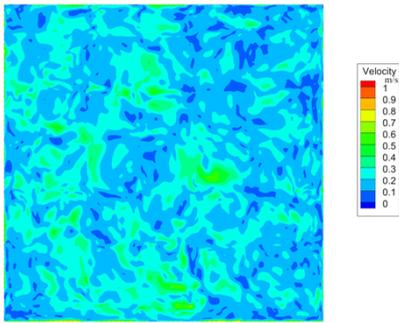
(b)  $y=30m$  截面处的温度分布云图



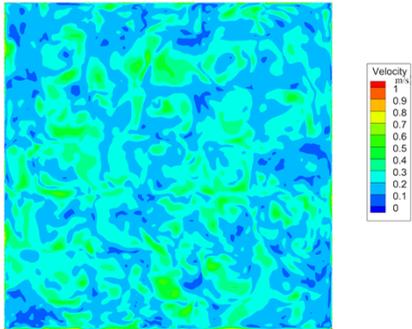
(c)  $z=1.5m$  截面处的温度分布云图



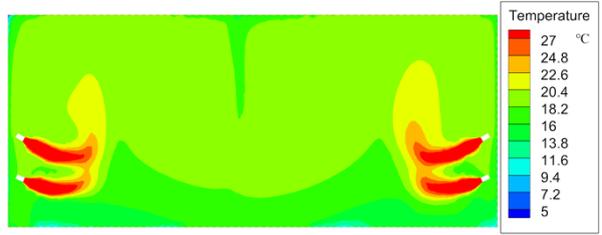
(d)  $z=4.5\text{m}$  截面处的温度分布云图



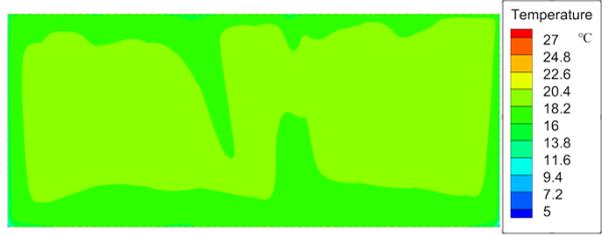
(e)  $z=1.5\text{m}$  截面处的速度分布云图



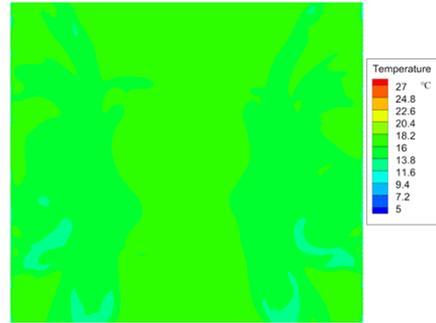
(f)  $z=4.5\text{m}$  截面处的速度分布云图



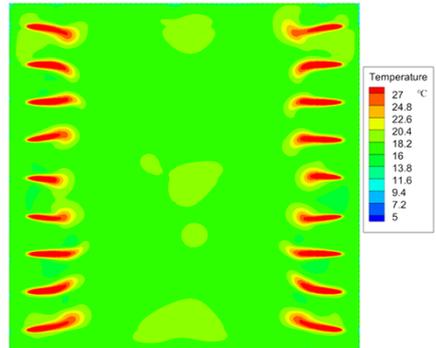
(a)  $x=28\text{m}$  截面处的温度分布云图



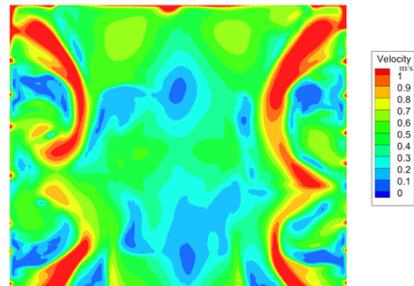
(b)  $y=30\text{m}$  截面处的温度分布云图



(c)  $z=1.5\text{m}$  截面处的温度分布云图



(d)  $z=4.5\text{m}$  截面处的温度分布云图



(e)  $z=1.5\text{m}$  截面处的速度分布云图

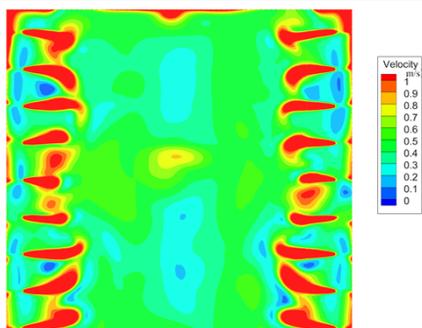
图 5 顶送风暖风机供暖温度分布云图

Fig.5 Numerical results for vertical warm air heating

### 2.2.2 侧送风双层暖风机供暖

侧送风双层暖风机供暖条件下, 暖风机从两侧向机库内送风。由图 6 (a) 和 6 (b) 可以看出, 在侧送的情况下, 暖风机送出的热风向下 5~6m 左右之后, 热空气开始上浮。整个空间区域温度较为均匀, 垂直温度梯度不显著。

侧送风双层暖风机供暖条件下, 工作区 ( $z=1.5\text{m}$ ;  $z=4.5\text{m}$ ) 环境风速为 0.3~0.9m/s, 在两侧靠近风机位置区域, 风速超过 1m/s。速度分布详见图 6 (e)、6 (f)。



(f)  $z=4.5m$  截面处的速度分布云图

图 6 侧送风双层暖风机供暖温度分布云图

Fig.6 Numerical simulation results for horizontal warm air heating

### 2.2.3 两种送风方式比较

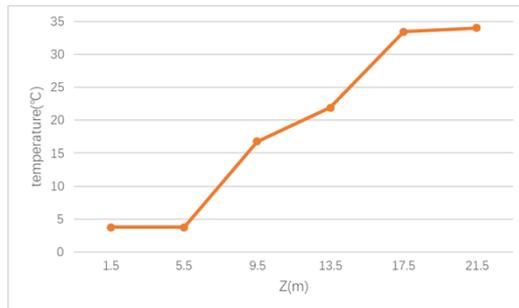
两种送风方式下,垂直方向各截面平均温度如图 7 所示。从图 7 (a) 可以看出,在近地面工作区,平均温度小于  $10^{\circ}C$ 。在  $10m$  高左右,平均温度可达到  $16^{\circ}C$  左右。对于高度超过  $20m$  的机库来说,顶送风效果十分有限。由于热源设置于机库上部,垂直温度梯度大于  $1^{\circ}C/m$ ,上热下冷的情况较为严重。不仅工作区温度达不到设计要求,高处温度过高也造成了能源的大量浪费。

从图 7 (b) 可以看出,侧送风双层暖风机状态下,整个空间的温度分度十分均匀。由于热源设置于机库两侧向下吹风,极大程度上减轻了热空气上浮的影响,整个空间的垂直温度梯度小于  $0.2^{\circ}C/m$ 。工作区温度大于  $16^{\circ}C$ ,可满足设计要求。

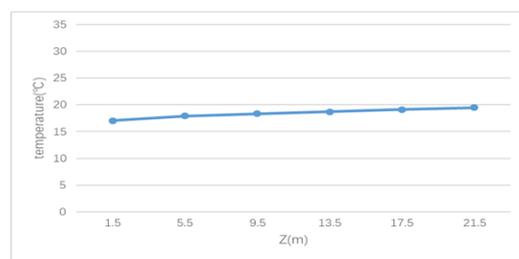
从速度分布云图可以看出,顶送风暖风机供暖方式的速度分布要低于侧送风双层暖风机供暖方式,且整个空间的速度分布也更佳均匀。

从模拟结果看出,侧送风双层暖风机供暖方式的供暖效果要明显优于顶送风暖风机供暖方式。(1)顶送风方式在机库高度过高的情况下,工作区很难达到设计温度;而侧送风方式热源设置在机库两侧中下部,工作区温度可满足设计要求。(2)顶送风方式由于存在较大的垂直温度梯度,会造成顶部非工作区温度过高,造成能源的浪费;而侧送风整个空间温度分布均匀,相对于顶送风方式来说,更加节能。但侧送风形式暖风机会占用一部分的室内空间,且靠近送风机位置附近的环境风速大于  $1m/s$ ,对本文所述耐寒测试机库项目来说,此两点对机库正常使用无影响。对于其他机库来说,使用此种送风方式前,需对环境风速及风机安装位置进行考

量,以免影响机库的正常使用。



(a) 顶送风垂直方向平均温度分布



(b) 侧送风垂直方向平均温度分布

图 7 温度分布云图

Fig.7 The temperature distribution

### 3 结论

通过对比几种机库的供暖形式可以看出,对于耐寒机库来说,从安全性、适用性和经济性的角度出发,强制对流供暖优于自然对流供暖及辐射对流供暖。顶送风暖通机供暖方式对普通高大空间来说有较好的供暖效果。但通过模拟结果可以发现,由于机库尺寸大于常规高大空间,顶送风暖风机供暖方式效果并不理想。侧送风双层暖风机供暖方式不仅工作区温度可满足设计要求,且垂直温度梯度低,有较好的节能效果。在不影响机库正常使用的情况下,本耐寒测试机库应优先选用侧送风双层暖风机供暖的形式。但是,其使用会占用一些空间位置,且其工作区环境速度也大于顶送风暖风机供暖。对环境风速要求较高的机库,如喷漆机库等,需对此供暖方式的风速影响进行考量,以免影响机库的正常使用。

本文分析的过程中,对于机库关闭大门升温速度这一点的阐述,仅通过供暖原理对升温速度定性分析。在今后的研究中,希望可以对不同供暖形式的升温速度进行量化分析,并基于此对建筑能耗进行对比分析。

(下转第 284 页)