

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.064

大型拖拉机驾驶室热舒适性评价

杨晓^{1,2} 毛恩荣^{1,2} ZHANG Jianshun³ 宋正河^{1,2} 金晓萍^{1,2} 杜岳峰^{1,2}

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 现代农业装备优化设计北京市重点实验室, 北京 100083;

3. 雪城大学机械与计算机工程学院, 雪城 NY 13244)

摘要: 针对国内大型拖拉机驾驶室热舒适性差的问题,在对热舒适性影响因素分析的基础上,选取进风风速、风温和出风角为研究因素,采用 ANSYS 18.1-Fluent 软件进行正交仿真,并基于仿真结果进行了人体热舒适性评价。仿真结果表明,整个驾驶室降温过程平稳有效,驾驶室内温度可调节范围为 18~22℃,驾驶员周围风速为 0.2 m/s,耗时 21 min 后驾驶室温度达到人体最适温度且人体各热舒适性指标均处于人体热舒适性区间内。正交仿真结果表明,空调风速和风温对降温效果影响显著,出风角对降温效果影响不显著。人体局部温度的仿真结果表明,在第 41 秒时人体脸部温度开始下降,头部首先进入舒适区,10 min 时人体各部分进入舒适区并在第 21 分钟人体各主要部分达到最舒适点,满足人体对降温速度的要求。若持续降温,在 50 min 后驾驶室平均温度进入人体不舒适过冷区。人体热舒适性评价曲线表明,平均投票数评价曲线成直线下下降趋势,说明所设计驾驶室的温度场能以较快速度达到人体舒适区;不满意百分数评价曲线呈现先下降后升高的趋势,表明整个降温过程人体首先从过热区进入舒适区,若继续降温则会进入寒冷区,再次对人体产生不舒适。综上,仿真结果符合驾驶室内的实际降温情况和人体生理反应过程,为温度智能控制系统和驾驶室空气净化系统的设计提供了一定参考依据。

关键词: 驾驶室; 最小能量原理; 热舒适性; 平均投票数; 不满意百分数

中图分类号: S219.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)S0-0470-07

Cab Thermal Comfort Assessment of High-power Tractor

YANG Xiao^{1,2} MAO Enrong^{1,2} ZHANG Jianshun³ SONG Zhenghe^{1,2} JIN Xiaoping^{1,2} DU Yuefeng^{1,2}

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Beijing Key Laboratory of Optimized Design for Modern Agricultural Equipment, Beijing 100083, China

3. College of Engineering and Computer Science, Syracuse University, Syracuse NY 13244, USA)

Abstract: With the dramatically growing use of agricultural high-power tractors, comfort of cab is an important problem in China. Because of the indirect impact with low comfort of the cab, the productivity is restricted. Health of tractor drivers was also undermined by low comfort of the cab. According to the least energy principle, the factors of comfort cab were defined. One of them was the thermal comfort. The simulation and dynamic assessment of comfort tractor cab were studied. The results showed that during the whole period of cooling process, the wind speed was 0.2 m/s which was accorded with the comfort demands and the minimum of temperature in the cab was 18℃. Firstly, the governing equations that contained CFD and thermal comfort assessment equations were deduced. The equation temperature and the monitor temperature were less different so that comfort zone theory could be used in cab thermal comfort design. In order to get the best value of parameters, the orthogonal simulation test was used. The speed and temperature of wind were significant to the cooling effects and the angel was not significant to the cooling effects according to the simulation results. The temperature of head zone began to decline at 41 s initially and went into the comfort zone firstly. At 10 min during the cooling period, each limb of tractor driver felt comfort and the most comfortable was at 21 min. This cooling result could be set default value in intelligent control system. After 50 min, the temperature of tractor cab would be into the uncomfortable cold zone if cooling was continued. Then the dynamic comfort process was calculated by predicted mean vote and predicted percentage dissatisfied. Because the predicted mean vote was declined

收稿日期: 2018-07-16 修回日期: 2018-08-18

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0700101)

作者简介: 杨晓(1989—),男,博士生,主要从事农业机械人机工程研究,E-mail: nongdagogogo@cau.edu.cn

通信作者: 毛恩荣(1961—),男,教授,博士生导师,主要从事农业机械设计、液压传动和自动控制研究,E-mail: gxy15@cau.edu.cn

rapidly, the feeling of drivers became better rapidly. Predicted percentage dissatisfied declined firstly and ascended after 50 min. It was showed that the comfort feeling was in a time segment if cooling was continued. The assessment results also confirmed the correctness of the simulation results. The simulation results also provided certain reference basis for intelligent temperature control and air cleaning design of high-power tractor cab.

Key words: cab; least energy principle; thermal comfort; mean vote; percentage dissatisfied

0 引言

拖拉机驾驶室热舒适性指驾驶员在进行作业时对驾驶室内部热环境所做的主观满意性评价,包含物理、生理和心理3个方面。

长期以来,我国大型拖拉机在驾驶室舒适性方面的技术基础研究不足,忽略了热舒适性的要求,而国外早已在温度场、速度场和人体热舒适性等方面进行了研究^[1-8]并形成一套热舒适性评价体系^[9],其主流驾驶室的侧壁上均配备了空调系统,以改善田间作业时驾驶员的热舒适性。这使得我国相距国外驾驶室 Command View III 设计要求相差较远,驾驶室没有空调,扬尘也很大^[10-11],造成驾驶员舒适性很差,影响了田间作业效率和驾驶员身体健康。因此实现驾驶室自主化 Command View III 设计,破解完全依赖进口、受制于人的瓶颈意义重大。

本文以美国 John Deere 公司 7R/8R 系列大功率拖拉机舒适型驾驶室为设计依据,在计算流体力学的基础上对温度场因素进行正交仿真,并在此基础上应用人体热舒适性评价理论进行驾驶员生理和心理评价,以提高夏季大型拖拉机驾驶员的热舒适性。

1 驾驶室热舒适性的分析建模

1.1 基于最小能量原理的驾驶室舒适性分析

最小能量原理是自然界普遍真理之一^[12],近些年也逐步应用在布局设计等方面,例如在矿井通风^[13-14]、织物模型^[15]、热舒适性设计^[16]、实验设计^[17]、液压系统^[18]、太阳能^[19]、工艺优化^[20]等领域得到了创新应用。

人和驾驶室组成一个人机系统,基于能量最小理论,此系统会使用最小的能量达到稳定的平衡状态。

具体到人和驾驶室组成的系统,其总能量 E_0 可看成由人机驾驶室系统当前状态的能量和驾驶员自身损耗的能量两部分组成,即

$$E_0 = E' + Q \quad (1)$$

式中 E_0 ——人和驾驶室系统的总能量

E' ——人机驾驶室系统当前状态的能量

Q ——人机驾驶室系统自身消耗的能量

其中 Q 又可以分为驾驶员对驾驶室操作系统

做的功 W_{pull} 、热舒适性引起的驾驶员热损失 Q_{loss} 和噪声、振动、驾驶室空气质量等因素等引起驾驶员的其他消耗 Q_{other} 。其中 Q_{loss} 和 Q_{other} 之和为微环境对总能量造成的能量损耗。

最小能量表达式为

$$\min(E_0) = \min(E' + Q) = \min(E' + W_{\text{pull}} + Q_{\text{loss}} + Q_{\text{other}}) \quad (2)$$

舒适型驾驶室最优设计就是当人机驾驶室系统自身消耗的能量 Q 最小时的设计,即

$$\min(Q) = \min(W_{\text{pull}} + Q_{\text{loss}} + Q_{\text{other}}) \quad (3)$$

这部分问题分别属于人机工程原理中驾驶室最优布局问题和最优微环境舒适性问题,也是舒适型驾驶室的必要条件,即

$$\text{舒适型驾驶室} \Rightarrow \min(W_{\text{pull}} + Q_{\text{loss}}) \Leftrightarrow$$

最优布局 + 最优微环境

由此可见,最优微环境舒适性体现在驾驶室微环境各参数控制在人体最优范围,包括驾驶室温度和空气质量两部分。本研究针对驾驶室空气流动变化规律,应用人体热舒适性理论进行驾驶室空调设计及驾驶员热舒适性评价。

1.2 驾驶室热舒适性控制方程

驾驶室人机微环境可分为热舒适性和空气质量两方面,其中热舒适性涉及的流场控制方程分为5部分:连续性方程、动量方程、能量方程、湍流方程和人体热舒适性评价方程。这5个方程与仿真方法和仿真结果关联紧密:前4个方程确定了驾驶室温度场的变化规律;最后1个方程反映了驾驶员对温度场的舒适度。

1.2.1 连续性方程(质量守恒方程)

驾驶室流场连续性方程的表述为流入(流出)的空气质量等于驾驶室中空气质量的增加量(减少量),即

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = S_m \quad (4)$$

式中 ρ ——空气密度, 1.29 kg/m^3

t ——时间, s

\mathbf{v} ——空气微元的速度矢量, m/s

S_m ——流入(流出)驾驶室的空气质量, kg

1.2.2 动量方程(N-S方程)

动量方程表述为空气微元上的合力等于流体质

量与加速度的乘积,即

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \nabla \cdot (\rho v v) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + \rho g + F \\ \tau = \mu \left(\nabla v + \nabla v^T - \frac{2}{3} \nabla \cdot v I \right) \end{cases} \quad (5)$$

式中 p ——微元体静压, Pa

g ——重力加速度矢量, 9.8 m/s^2

F ——微元体受到的外力, N/m^3

τ ——微元体应力张量, N/m^3

μ ——空气动力粘度, 取 $1.8 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$

I ——单位张量

1.2.3 能量方程

根据能量守恒可得

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (v(\rho E + p)) = \nabla \cdot (k' \nabla T - hJ + \tau \cdot v) + S_h \quad (6)$$

式中 E ——微元体能量, J/m^3

k' ——热导率, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$

T ——流体温度, K

J ——空气的热通量, W

h ——显焓, J S_h ——体积热源, J/m^3

1.2.4 湍流方程

目前湍流理论模型很多,在工程应用上使用最多的是 Standard $k-\varepsilon$ 模型。它由湍流脉动动能 k 方程和湍流耗散 ε 方程组成。该模型具有稳定、计算量合适、高精度等优点,所以应用最为广泛。本文采用 Standard $k-\varepsilon$ 湍流模型

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k v_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon \sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] - \rho \overline{v'_i v'_j} \frac{\partial v_j}{\partial x_i} - g_i \frac{\mu}{\rho Pr} \frac{\partial \rho}{\partial x_i} - \rho \varepsilon - \frac{2\rho \varepsilon k}{a} + S_k \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon v_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \rho C_\mu \frac{k^2}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} \left(-\rho \overline{v'_i v'_j} \frac{\partial v_j}{\partial x_i} + C_{3\varepsilon} G_b \right) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \end{cases} \quad (7)$$

式中 k ——微元体湍流动能, J/m^3

i, j —— x, y, z 方向(分别对应 1, 2, 3)

v_i, v_j ——微元体在 i, j 方向的速度, m/s

ε ——微元体耗散率, W/kg

Pr ——Prandtl 常数, 取 0.85

a ——声速, 取 340 m/s

S_k, S_ε ——外来的能量密度, W/m^3

$C_\mu, C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, \sigma_k, \sigma_\varepsilon, G_b$ ——经验常数, 分别取 0.09、1.44、1.92、1.0、1.3、0

式中 $C_{3\varepsilon}$ 流向垂直于重力时取 0, 流向平行于重力时

取 1。

1.2.5 人体热舒适性评价方程

根据人在作业时驾驶室湿度、身体姿态、负荷、和服装等因素,采用驾驶员四肢的平均温度可进行非均匀热环境下的人体热舒适性计算^[9]。美国 ASHRAE 协会采用预测平均投票数 PMV 和预测不满意百分数 PPD 这两个指标对人体热舒适性进行心理和生理评价。本研究假设季节为夏季,相关参数和服装的选择均采用夏季参数。

PMV 是表征人体热反应(冷热感)的评价指标,代表了同一环境中大多数人的冷热感觉的平均值,是根据人体热平衡计算的。当人体内部产生的热等于在环境中散失的热量时,人处于热平衡状态。PMV 为 0 时意味着室内热环境为最佳热舒适状态。ISO7730 对 PMV 的推荐值为 $[-0.5, 0.5]$ 。PMV 指数可由人体活动的代谢率、服装的隔热值、空气温度、平均辐射温度、相对空气流速及空气湿度计算得到^[9]。

PPD 表示当人群处于所设计的驾驶室中,不舒适人群的比例,其可由 PMV 计算得到,相关计算式为

$$\begin{cases} P_{MV} = (0.303e^{-0.036M} + 0.028) L_T \\ P_{PD} = 100 - 95 \exp(-0.3353P_{MV}^4 - 0.2179P_{MV}^2) \end{cases} \quad (8)$$

式中 P_{MV} ——预测平均得票数

L_T ——人体热负荷, W/m^2

P_{PD} ——预测不满意百分数, %

由式(8)可见 PPD 值最小为 5%, 当其小于 10% 时认为符合人体舒适性设计要求,即设计范围为 $[5\%, 10\%]$ 。

1.2.6 人体等效温度与监测温度

国外对假人温度传感器进行了比较深入的研究^[9]。由于假人用乳胶制成,温度传感器在假人内部,所以导致假人测量的温度比实际人体感知的温度高;同时又因为不同季节太阳辐射量不同和穿衣差异的缘故,使得人体热舒适区域会产生较大差异。为了消除相同季节下穿衣差异和假人乳胶热阻的影响,人体温度应该用等效温度来表征。

$$t_{eq} = t_s - R_T q_T'' \quad (9)$$

式中 t_{eq} ——假人的等效温度, $^{\circ}\text{C}$

t_s ——假人的实测温度, $^{\circ}\text{C}$

q_T'' ——假人的热损失, W/m^2

R_T ——总热阻,包括衣服和坐垫等, $\text{K}\cdot\text{m}^2/\text{W}$

q_T'' 和 R_T 均可以查表确定,由于本研究基于夏季,所以参数均为夏季值。但是由于仿真时没必要采用假人来监测温度,夏季穿衣对人体温度影响较

小,可忽略。所以可认为监测器测量的温度就是等效温度,可用等效温度热舒适性范围分析监测温度的热舒适性。

2 驾驶室温度场仿真

2.1 驾驶室仿真条件

2.1.1 驾驶室三维模型的简化

依据收集的资料,采用 $2\text{ m} \times 2\text{ m} \times 2.5\text{ m}$ 的驾驶室设计,其中剩余的空间为以后设计做准备,如安

装空气净化系统等。空调有 3 个间距 200 mm 的出风口和一个回风口。为了简化仿真,将不必要的元素和不必要的曲面去除,如方向盘和显示屏等,如图 1 所示。

2.1.2 仿真参数的设定

采用 ANSYS 18.1 版本的计算流体力学 Fluent 模块进行流场仿真和人体热舒适性评价,其中空气视为理想不可压缩气体,仿真参数相关设置见表 1。

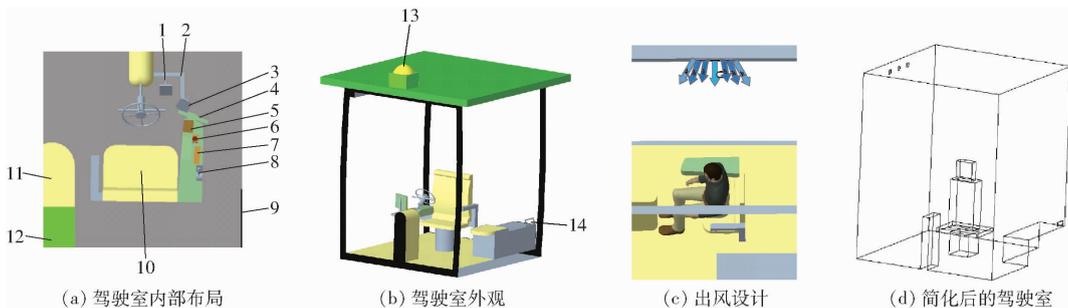


图 1 驾驶室布局及仿真简化图

Fig. 1 Layout and simplification sketch of cab

1. 刹车踏板 2. 移动电脑托架 3. 油门踏板 4. 电子显示屏 5. 按钮区 I 6. 智能手柄 7. 按钮区 II 8. 手刹
9. 空调出风口 10. 座椅 11. 副驾驶座椅 12. 储物箱 13. GPS 14. 回风口

表 1 仿真参数及边界条件设置

Tab. 1 Settings of simulation parameters

参数/方法	数值/方式
有限元方法	自适应四面体
研究状态及方式	瞬态、3 核并行计算
湍流模型	Standard $k-\varepsilon$
压力速度算法	Coupled, $g = -9.8\text{ m/s}^2$
收敛条件	每个瞬态残差均小于 10^{-3}
自适应时间步长/s	10
单位步长最大迭代次数	60
仿真时间/s	3 600
出风口尺寸/(mm × mm)	3 个均为 50×50
回风口尺寸/(mm × mm)	150×50
初始温度/°C	全局 30
温度监测位置	面前、脑后、左右手、左右脚
其他参数	Fluent 的默认值

2.2 正交仿真设计

仿真有效避免了实物试验时产生的测量误差和由设备原因产生的各种不可避免的误差甚至是错误。同时由于驾驶室三维模型比较简单,有限体积法的误差也比较小,所以驾驶室温度场仿真具有可行性。

根据 GB/T 13877.2—2003 中对拖拉机驾驶室空调设计的要求,采用 $L_9(3^4)$ 正交表进行空调出风口风速、出风角和风温的三因素三水平正交试验,回风口风速采用经验法进行设计,保证驾驶室空气能形成有效流动即可,试验设计见表 2。

表 2 正交仿真设计及仿真结果

Tab. 2 Design and results of orthogonal test

序号	空调出风口风速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	风温/ °C	出风角/ (°)	回风风速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	平均温度 $T/^\circ\text{C}$	制冷效果 $\Delta T/^\circ\text{C}$
1	0.50	18	10	1.00	24.25	5.75
2	0.50	20	20	1.00	25.32	4.68
3	0.50	22	30	1.00	26.52	3.48
4	0.75	18	30	1.50	23.17	6.83
5	0.75	20	10	1.50	23.77	6.23
6	0.75	22	20	1.50	25.15	4.85
7	1.00	18	20	2.00	21.49	8.51
8	1.00	20	30	2.00	23.32	6.68
9	1.00	22	10	2.00	24.17	5.83

表 2 中平均温度 T 和制冷效果 ΔT 的计算方法为

$$\begin{cases} T = \frac{\sum T_i}{6} \\ \Delta T = 30 - T \end{cases} \quad (10)$$

式中 T_i ——第 i 个监测点在第 30 分钟时的温度,°C

2.3 仿真结果及其方差分析

监测驾驶员面前、脑后和双手双脚的实时温度,将制冷效果作为目标值,经过瞬态并行仿真计算后,9 个仿真结果均达到收敛要求,正交试验设计及仿真结果如表 2 所示。

仿真数据方差分析结果见表 3。由此可知,方

差模型符合显著性要求,可以进行后续的因素分析。出风口风速和风速概率均显著,说明这两个因素对制冷效果影响很明显,并且是正向影响。出风角的影响却不明显,这是由于驾驶室空间比较小,不同角度下的流场差异不明显导致的。将出风角并入误差重新计算方差后得到新的显著性概率 P' 比合并之前的显著性概率 P 更明显,说明出风角对制冷效果的影响确实很小。

表3 方差分析结果

Tab.3 Results of variance analysis

项目	第Ⅲ类平方和	自由度	均方差	F	P	P'
模型	16.677	6	2.78	30.11	0.032*	0.002*
截距	310.23	1	310.23	3360.70	<0.001	<0.001
风速	8.47	2	4.23	45.87	0.021*	0.002*
风温	8.00	2	4.00	43.36	0.023*	0.002*
出风角	0.20	2	0.10	1.10	0.476	
误差	0.18	2	0.09		>0.05	>0.05
总计	327.09	9				
修正后的总计	16.86	8				

注: * 表示该因素对降温效果影响显著。

根据试验分析的结果,第7组试验降温接近10℃,制冷效果最明显且符合驾驶员周围风速处于0.127~0.25 m/s之间和降温幅度的要求,故选择出风口风速1 m/s、出风角20°和风温18℃时的仿真数

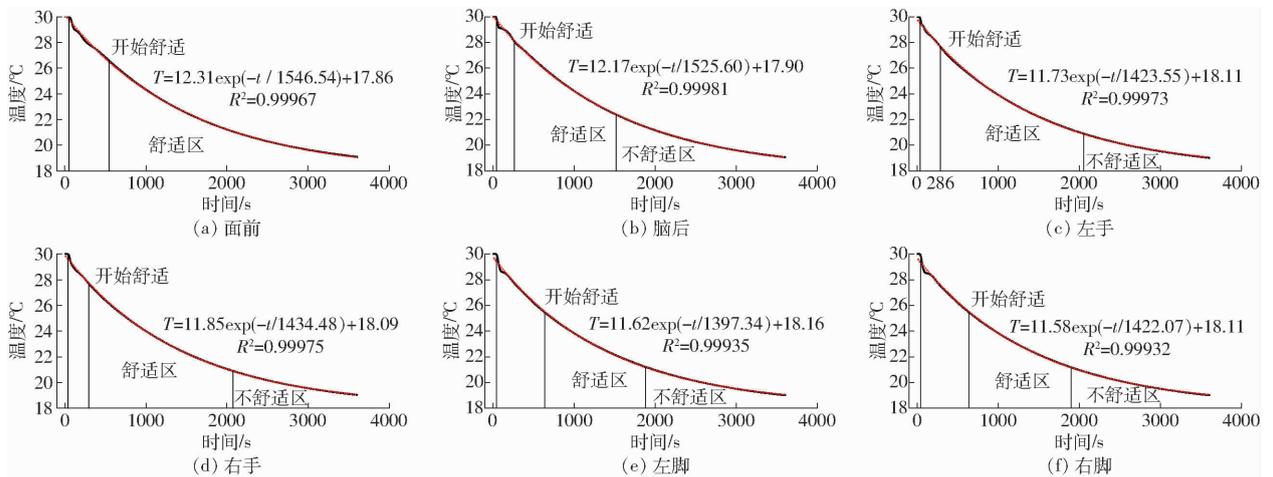


图2 各检测点温度变化

Fig.2 Changes of temperature at six monitors

据进行后续温度场仿真数据分析。

风先接触到驾驶室另一侧侧壁,随后逐渐向驾驶员区域过渡。有效避免了空调直吹驾驶员时造成的人体不舒适,并且在驾驶室内部形成垂直方向的温度梯度,符合人体对温度垂直方向变化感受敏感的规律,提高了降温效率。

3.2 最舒适区流场分析

夏季最舒适区指的是温度在23℃左右,故可将温度控制系统的最优值设置为23℃,此时的时间为

3 驾驶室流场仿真结果分析

3.1 驾驶员四肢降温曲线

根据瑞典国家生命科学中心制定的人体热舒适性温度区间^[9],可将驾驶室整个降温过程分为开始降温、舒适区、最舒适点和不舒适区4个过程,各监测点温度变化见图2。驾驶员头部和四肢对操纵拖拉机很重要,首先分析头部和四肢周围的温度变化。根据降温曲线的回归方程可知,各测点的温度以指数衰减,使得温度下降过程既平稳又同步,不会对人体产生过大的温差,所需时间也少,符合人体舒适性要求。

如图2所示,人体面前、脑后、左右手和左右脚的温度在41 s左右时开始下降,经过266 s脑后部分首先进入舒适区,300 s后双手进入舒适区,最后在636 s时双脚进入舒适区。整个过程大约持续10 min左右,驾驶员能用较短的时间进入舒适区。脸部舒适区最大,经过1 h仍然处于舒适区;双脚舒适区最小,30 min后进入偏冷的不舒适区。双手的舒适区处于脸部和双脚之间,满足驾驶员操纵拖拉机的舒适性要求。若持续降温,驾驶室平均温度最低可达到18℃。

由于空调出风采用侧壁水平出风的设计,使得

21 min。下面将从速度场和温度场分析驾驶室风速和整体温度分布。驾驶室整体速度场和温度场如图3所示。

速度场矢量见图3a,可知驾驶室速度分布均匀,速度在0.2 m/s左右,没有明显的漩涡,符合人体对风速的舒适性要求。温度场见图3b,驾驶室整体温度处于23℃左右,符合人体对温度的要求。故将温度智能控制系统的默认值设置为23℃、风速

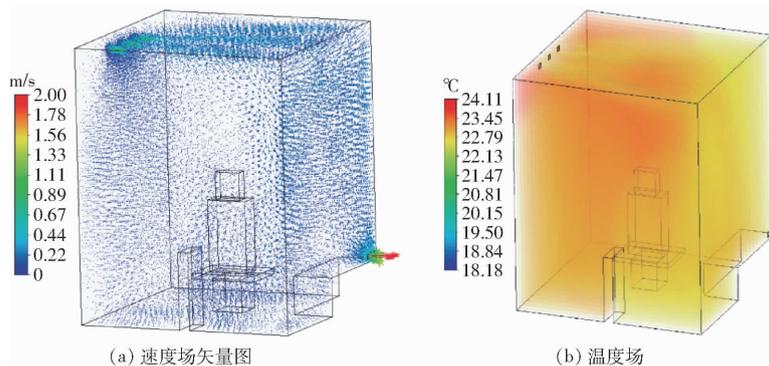


图3 驾驶室整体流场

Fig.3 Flow field of whole tractor cab

1 m/s、风温 18℃ 和出风角 20° 是可行的。

4 基于 PMV - PPD 的热舒适性评价

4.1 热舒适性评价指标和参数设定

根据 ISO7730 的计算方法,选择 PMV - PPD 作为热舒适性评价指标。查询相关表格可确定驾驶拖拉机时式(8)中的相关参数,其值如下:工作负荷为 140 W/m²;相对湿度 50%;服装选择短裤和短袖,热阻取 0.628 J;驾驶室平均温度和风速根据仿真结果确定,则可得到不同时刻 t 的 PMV - PPD 曲线。计算软件采用 ANSYS Fluent 中 Thermal Comfort v1.0 计算。

4.2 热舒适性评价指标计算结果分析

驾驶室舒适性曲线见图4。由图可知 15 min 后驾驶员整体从不舒适过热区进入舒适区(PMV 为 0.5),第 21 分钟时达到最舒适点(PMV 为 0)。若继续降温,在第 50 分钟后进入不舒适寒冷区,整个舒适过程持续 35 min。PMV 曲线下落最快,说明降温过程很明显,同时 PPD 曲线也较快达到小于 10% 的区域,说明降温过程平稳,人体可以接受。随着降温的持续,PPD 曲线呈现上升趋势,在第 50 分钟时温度过低导致了人体不适应(PMV 为 -0.5),这是由于人体本身的生理结构决定的,既不能太热也不

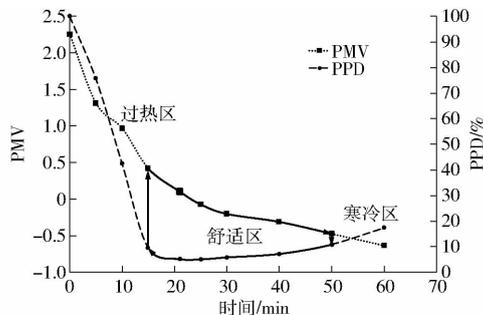


图4 驾驶室热舒适性动态曲线

Fig.4 Thermal comfort curves of tractor cab

能太冷,整个舒适过程能维持 35 min。证明了仿真结果与实际情况相符合,间接地说明了本次温度场及流场仿真分析的可靠性。

5 结论

(1) 正交仿真得出了驾驶室空调最优设计参数分别为出风口风速 1 m/s、出风角 20° 和风温 18℃,其中风速和风温起显著作用。

(2) 降温曲线和流场分析表明,人体四肢在 5 min 左右逐渐进入舒适区。而且在第 21 分钟时最舒适区风速场和温度场(23℃)对人体很舒适。

(3) PMV - PPD 的评价结果表明驾驶室空调能使驾驶员较快进入热舒适性区。若持续降温,整个舒适过程能维持 35 min。

参 考 文 献

- 1 MOYER E S, HEITBRINK W A, JENSEN P A. Test for the integrity of environmental tractor cab filtration systems[J]. Journal of Occupational and Environmental Hygiene, 2005, 2(10): 516 - 523.
- 2 BOHM M, BROWÉN A, NOREN O, et al. Evaluation of the thermal environment in tractor cabs[C]//International Conference on Environmental Ergonomics IV, 1990: 144 - 146.
- 3 TURNQUIST P K, THOMAS J C. The subjective response of males to comfort under controlled tractor cab environment[J]. Transactions of the ASAE, 1976, 19(3): 402 - 404.
- 4 RUŽIĆ D, ČASNJI F. Agricultural tractor cab characteristics relevant for microclimatic conditions[J]. Journal of Applied Engineering Science, 2011, 9(2): 323 - 330.
- 5 GUPTA C P, ABBAS A, BHUTTA M S. Thermal comfort inside a tractor cab by evaporative cooling system[J]. Transactions of the ASAE, 1995, 38(6): 1667 - 1675.
- 6 LUNDSTRÖM D, NEVARANTA T, HANSON L, et al. Visualization of comfort and reach in cab environment[C]//40th Annual Conference of the Nordic Ergonomics Society, 2008.

- 7 金信琴,王大印. 浅析工程机械驾驶室人机工程学发展现状及趋势[J]. 黑龙江科技信息, 2013(7):104-118.
JIN Xinqin, WANG Dayin. The develop trend of engineering machinery cab with ergonomics[J]. Scientific and Technological Innovation, 2013(7):104-118. (in Chinese)
- 8 郑艳玲. 人机工程学在轿车驾驶室设计中的应用研究[D]. 长春:长春理工大学,2008.
ZHENG Yanling. The application study of man-machine engineering in sedan's cab[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology,2008. (in Chinese)
- 9 NILSSON H O. Comfort climate evaluation with thermal manikin methods and computer simulation models[M]//National Institute for Working Life. Sweden; University of Gavle, 2004.
- 10 钟文杰,徐红梅,徐奥. 基于 CATIA 的拖拉机驾驶室人机系统舒适性分析与评价[J]. 江苏大学学报(自然科学版),2017, 38(1):47-51.
ZHONG Wenjie, XU Hongmei, XU Ao. Comfort analysis and evaluation of man-machine system in tractor cab based on CATIA [J]. Journal of Jiangsu University (Nature Science Edition), 2017,38(1):47-51. (in Chinese)
- 11 章倩,朱思洪. 拖拉机驾驶室舒适性满意度情况调查研究[J]. 拖拉机与农用运输车,2009,36(5):3-5.
ZHANG Qian, ZHU Sihong. Investigation and research on satisfaction about tractor cab comfort [J]. Tractor and Farm Transporter, 2009,36(5):3-5. (in Chinese)
- 12 乔木,王鹏. 最小能量原理在概率统计中的应用[J]. 长春工业大学学报(自然科学版),2013,34(6):610-611.
QIAO Mu, WANG Peng. Application of least energy principle in probability statistics[J]. Journal of Changchun University of Technology (Nature Science Edition), 2013,34(6):610-611. (in Chinese)
- 13 尹士兵,舒荣华,张鸣鲁. 基于最小能量原理的平衡图调节法在矿井通风系统优化中的应用[J]. 安全与环境学报,2016, 16(5):120-124.
YIN Tubing, SHU Ronghua, ZHANG Minglu. Application of the mining ventilation system optimization by using equilibrium diagram adjustment method based on the principle of minimum energy[J]. Journal of Safety and Environment, 2016,16(5): 120-124. (in Chinese)
- 14 张黔生,谢贤平. 基于最小能量原理的矿井通风优化研究[J]. 中国安全生产科学技术,2007(6):56-59.
ZHANG Qiansheng, XIE Xianping. Study of mine ventilation optimization based on minimum energy principle[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2007(6):56-59. (in Chinese)
- 15 崔海蓉. 基于最小能量原理的机织织物模型与方法[D]. 南京:南京理工大学,2004.
CUI Hairong. Model of woven fabrics based on the principle of minimum energy[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology,2004. (in Chinese)
- 16 HUA Y C, GUO Z Y. The least action principle for heat conduction and its optimization application[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 105: 697-703.
- 17 SHI C, YU W, LI S, et al. Application and experiment on the least-action principle of explosive welding of stainless steel/steel [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2014, 21(6): 625-629.
- 18 BERNSTEIN I B, FRIEMAN E A, KRUSKAL M D, et al. An energy principle for hydromagnetic stability problems [C] // Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1958, 244(1236): 17-40.
- 19 KUSANO K, SUZUKI Y, NISHIKAWA K. A solar flare triggering mechanism based on the Woltjer-Taylor minimum energy principle[J]. The Astrophysical Journal, 1995, 441: 942-951.
- 20 DAUTZENBERG J H, VEENSTRA P C, van der WOLF A C H. The minimum energy principle for the cutting process in theory and experiment[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 1981, 30(1): 1-4.