

文章编号: 1671-6612 (2020) 02-243-08

# 亲子乐园空调送风方式的数值模拟研究

杨萍<sup>1</sup> 吕洁<sup>1</sup> 李晶<sup>2</sup>

(1. 沈阳工业大学 沈阳 110870; 2. Msc Software 北京 100102)

**【摘要】** 大型综合室内亲子乐园属于高大空间, 设有游乐设施和游戏的特殊性使得对空间的舒适性要求一致, 但是送风气流受阻严重, 室内存在较多气流死角, 影响室内空气质量和儿童健康。因此其空调设计不仅需要考虑温度、风速的空间均匀度, 还要考虑各点的空气龄和 PMV-PPD 指标。以天津某亲子乐园为研究对象, 利用 scSTREAM 软件对适用于该房间的辐射供冷加新风、置换通风、混合通风三种空调方式的送风效果进行数值模拟分析, 从流场的均匀性、人员的热舒适性等方面对模拟结果进行探讨, 研究结果表明辐射供冷加新风方式的空间均匀性和 PMV 指标最佳, 混合通风方式的空气龄最小。

**【关键词】** 亲子乐园; scSTREAM 模拟; 送风方式; 温度场; 速度场; 舒适性; 送风温度  
中图分类号 TU83 文献标识码 A

## Numerical Simulation Study on Air Supply Mode of Air Conditioning in Parent-child Park

Yang Ping<sup>1</sup> Lu Jie<sup>1</sup> Li Jing<sup>2</sup>

(1. Shenyang University of Technology, Shenyang, 110870; 2. Msc Software, Beijing, 100102)

**【Abstract】** The large-scale integrated indoor parent-child park belongs to the high-altitude space. The special features of the rides and games make the space comfort requirements consistent, but the airflow is severely blocked, and there are more airflow corners in the room, which affects indoor air quality and children's health. Therefore, its air conditioning design not only needs to consider the spatial uniformity of temperature and wind speed, but also consider the air age and PMV-PPD indicators at each point. This paper takes a parent-child paradise in Tianjin as the research object, and uses the scSTREAM software to numerically simulate the air supply effect of the three types of air conditioning methods: radiant cooling, fresh air replacement, mixed ventilation and air conditioning, which is suitable for the uniformity of the flow field. The simulation results are discussed in terms of the thermal comfort of the personnel. The results show that the spatial uniformity and PMV index of the radiant cooling and fresh air method are the best, and the air age of the mixed ventilation method is the smallest.

**【Keywords】** Parent-child paradise; scSTREAM simulation; Air supply method; Temperature Field; Velocity field; Comfort; Supply air temperature

## 0 引言

随着生活水平的提高和室外污染的日益严重, 大型综合室内亲子乐园逐渐增多。由于该建筑形式为高大空间, 安装较多高大规模的游乐设施, 导致存在较多气流死角, 对送风气流有较强阻挡, 高空

成为人的活动区域, 且成人和幼儿同处一室, 人员密度较大, 幼儿的活动强度较大, 室内逗留时间较长。这些特殊性在选择空调送风方式时应着重考虑。

有研究表明, 幼儿在运动状态中适合的热舒适

温度低于幼儿在运动状态下的热舒适温度,在不同的室内热环境条件下,幼儿对室内热湿环境的生理及行为的反应,与成人相比较为明显<sup>[1]</sup>。幼儿由于皮肤表皮薄,其毛细血管丰富,血管网接近表皮,因此流经皮肤的血流量比成人多,散热也会加快,对外界的温度的变化更为敏感<sup>[2]</sup>。经调研,现有亲子乐园存在的问题主要有吹风感较强、室内温度和速度超标、室内空气质量不良等。因此,亲子乐园的空调送风方式的选择需要考虑送风的有效性和均匀性以及热舒适性等评价指标,本文选择温度场、速度场、PMV-PPD 和空气龄作为评价指标,利用 scSTREAM 模拟技术对天津市某亲子乐园进行模拟,通过模拟分析为亲子乐园空调送风方式的选择提供参考。

## 1 物理模型及预处理

### 1.1 物理模型

根据天津市某亲子乐园的建筑尺寸,并对空调房间的游乐设施、游客加以简化,建立如图 1 所示的数值模拟物理模型,根据亲子乐园的室内负荷及新风量确定风口尺寸。按亲子乐园情况假设室内随机布置 20 人,其位置分布根据亲子乐园的特点进行分配。亲子乐园建筑面积为 116.9m<sup>2</sup>,建筑高度为 5.4m,人体物理尺寸经过简化处理,相关尺寸表格详见表 1。

表 1 各个模型几何尺寸

Table 1 Geometry size of each model

送风方式	项目	尺寸/m	数量
—	儿童	0.7×0.3×0.4	7
—	成人	1.8×0.3×0.4	13
—	吊顶高度	4.8	1
辐射供冷加新风	新风口	0.54×0.45	2
	排风口	0.30×0.20	2
置换通风	送风口	0.54×0.45	6
	回风口	0.30×0.20	2
混合通风	送风口	0.20×0.20	8
	回风口	0.30×0.20	2

由于建筑内部的游乐设施形状复杂,数量较多,因此在建模过程进行了简化,用简单的几何体表示,以代号 2、3 的模型代表高大型游乐设施,娱乐设施 2 的尺寸为 2000×2000×2500(长×宽×高),娱乐设施 3 的尺寸为 2800×2400×2500; 以代号 1、

4 的模型代表中空式游乐设施,其中娱乐设施 1 主要有支柱以及顶板构成,底部为开放式空气可以由四面进入,整个模型的尺寸为 2400×2400×1100,底部空间为 400×400×500,娱乐设施 4 属于半开放式,空气的进出只有一面,建筑尺寸为 2000×2000×2500,单位 mm。通过模拟设施周围以及中空娱乐设施内部的温度场和速度场,分析游乐设施对送风气流的阻挡影响,建筑简化模型如图 1 所示。

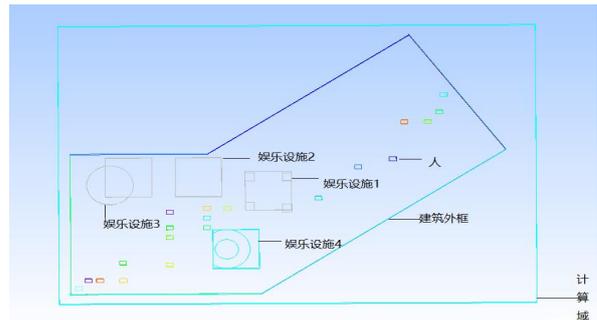


图 1 建筑物理模型

Fig.1 Building physical model

### 1.2 送风方式预处理

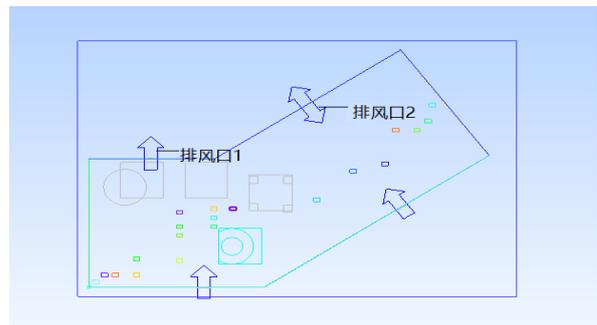


图 2 辐射供冷加新风模型

Fig.2 Radiant cooling plus fresh air model

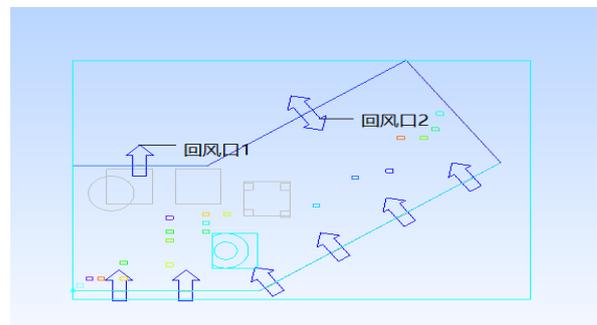


图 3 置换通风模型

Fig.3 Displacement ventilation model

本文采用了三种送风方式,根据送风方式以及建筑负荷确定三种送风方式的建筑模型,并进一步对三种送风方式的送风效果进行模拟,三种送风方

式的模型分别如图 2、图 3、图 4 所示。

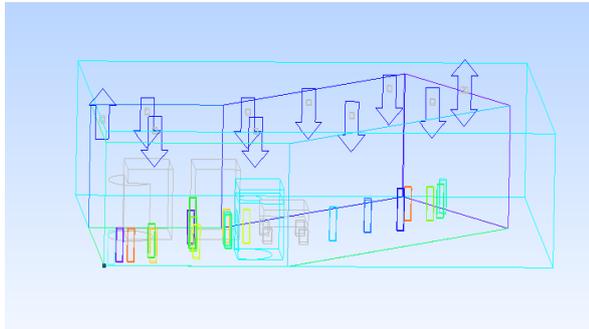


图 4 混合通风模型

Fig.4 Mixed ventilation model

根据亲子乐园空气流动的特征对室内空气条件, 作出以下假设:

- (1) 室内气体为粘性、常温、低速、不可压缩理想气体, 稳态紊流;
- (2) 室内气体符合 Boussinesq<sup>[3]</sup>假设, 流体中的粘性耗散忽略不计;
- (3) 室内气体符合气体状态方程的等压流动;
- (4) 室内空气在房间计算区域的固体壁面边界取无滑移速度边界;
- (5) 亲子乐园内部为完全封闭, 不考虑漏风;
- (6) 由于窗面积小, 忽略窗对建筑的影响, 考虑各界面辐射影响。

## 2 数学模型

根据室内条件的假设, 在模型的模拟求解中采用 scSTREAM 软件中的 Standard k-eps model 湍流模式, 控制方程有连续性方程、动量方程、能量方程、湍流脉动动能方程 ( $k$  方程) 和湍流能量耗散率方程 ( $\epsilon$  方程), 利用 VF method 的方法对模型进行求解。VF 法与通量法不同, 是一种利用角系数计算热辐射的方法, 视图因子定义在黑体的两个表面之间, 由它们的形状和相互位置决定, 利用角系数, 可以计算曲面之间的能量传递。

## 3 边界条件设置

三种送风方式风口速度的大小参照实用供热空调设计手册中规范进行设计, 送风温度的设置根据室内负荷计算所得。

### 3.1 辐射供冷加新风方式

采用冷却顶板, 通过辐射方式直接作用于物体的表面, 会增加人体的辐射换热, 减少对流换热,

并且冷顶板可使头冷脚暖, 更符合人体热舒适性<sup>[4]</sup>。

- (1) 新风口: 设为 Velocity-Inlet, 个数为 2, 速度为 0.343m/s, 沿  $y$  轴正方向, 温度为 18℃;
- (2) 排风口: 设为 Outflow, 设 2 个, 排风口 1 速度为 2.135m/s, 沿  $y$  轴正方向, 排风口 2 按压力设置, 目的是保持室内压力平衡, 风口方向垂直于所在墙面;
- (3) 壁面条件: 外窗忽略为墙体, 由于亲子乐园位于建筑首层, 有两面外墙, 将内、外墙设计为绝热, 人体温度设为 37℃;
- (4) 辐射板: 根据室内冷负荷, 采用顶部辐射供冷, 供冷量为 65W/m<sup>2</sup>, 则辐射板的表面温度为 20℃。
- (5) 娱乐设施: 设为 obstacle, 设置为绝热边界条件。

3.2 置换通风方式

置换通风采用的是空气从侧墙底部靠近地板的位置送入室内, 以近似层流的活塞流状态缓慢向上移动<sup>[5]</sup>, 可达到保障室内空气质量的效果为人们营造节能、环保舒适健康的环境。

- (1) 送风口: 设为 Velocity-Inlet, 个数为 6, 速度为 0.48m/s, 温度为 18℃;
- (2) 回风口: 设为 Outflow, 设 2 个回风口, 回风口 1 速度为 3.28m/s, 沿  $y$  轴正方向, 回风口 2 按压力设置, 目的是保持室内压力平衡, 风口方向垂直于所在墙面;
- (3) 壁面条件: 外窗忽略为墙体, 由于亲子乐园位于建筑首层, 有两面为外墙, 内墙设计为绝热, 人体温度设为 37℃;
- (4) 娱乐设施: 设为 obstacle, 设置为绝热边界条件。

3.3 混合通风方式

混合通风方式采用上送上回方式, 以较大风速送风。

- (1) 送风口: 设为 Velocity-Inlet, 个数为 8, 速度为 2.1m/s, 温度为 18℃;
- (2) 回风口: 设为 Outflow, 有 2 个回风口, 回风口 1 速度为 3.3m/s, 沿  $y$  轴正方向, 回风口 2 按压力设置, 目的是保持室内压力平衡, 风口方向垂直于所在墙面;
- (3) 壁面条件: 外窗忽略为墙体, 由于亲子乐园位于建筑首层, 有两面为外墙, 内墙设计为绝热, 人体温度设为 37℃;
- (4) 娱乐设施: 设为 obstacle, 设置为绝热边界条件。

### 3.3 混合通风方式

混合通风方式采用上送上回方式, 以较大风速送风。

- (1) 送风口: 设为 Velocity-Inlet, 个数为 8, 速度为 2.1m/s, 温度为 18℃;
- (2) 回风口: 设为 Outflow, 有 2 个回风口, 回风口 1 速度为 3.3m/s, 沿  $y$  轴正方向, 回风口 2 按压力设置, 目的是保持室内压力平衡, 风口方向垂直于所在墙面;
- (3) 壁面条件: 外窗忽略为墙体, 由于亲子乐园位于建筑首层, 有两面为外墙, 内墙设计为绝

热，人体温度设为 37℃；

(4) 娱乐设施：设为 obstacle，设置为绝热边界条件。

### 4 亲子乐园模拟结果分析

本文采用 scSTREAM 软件，常被用来求解气流及温度分布，由于数值模拟方法成本低，可对建筑的温度场、速度场等进行模拟预测，为空调设计合理提供了依据<sup>[6]</sup>。

#### 4.1 温度场和速度场模拟分析

由于亲子乐园属于高大空间，游乐设施较高，导致室内高空区域也是人员活动区域，因此需要检验温度和风速的空间均匀性。下面通过模拟结果分析三种送风方式不同截面温度及速度的分布状况。

考虑儿童玩耍时会由于游乐设施而处于不同的高度，截图选取儿童活动较多出现的平面，分别为 Z=0.7m、Z=1.5m、Z=2.8m、Z=3.8m。在不同送风状态下不同平面的平均温度分布见图 5。选取人员停留较长截面 Z=1.5m 处三种送风方式的温度分布云图分别如图 6、图 7、图 8 所示。

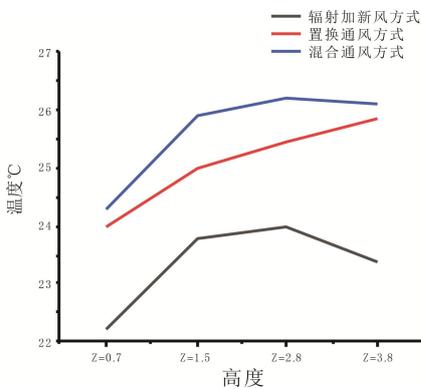


图 5 不同高度处三种送风方式的温度分布图

Fig.5 Temperature distributions of three air supply modes at different heights

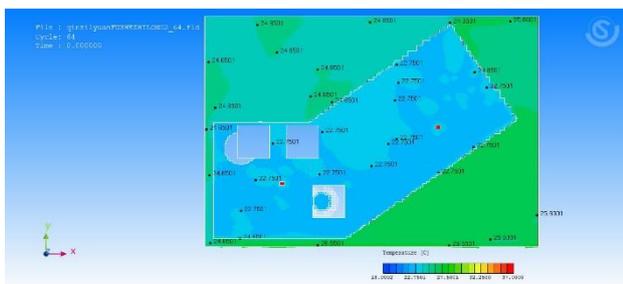


图 6 Z=1.5m 截面辐射供冷加新风方式温度分布云图  
Fig.6 Z=1.5m section radiation supply cooling plus fresh air mode temperature distribution cloud contour

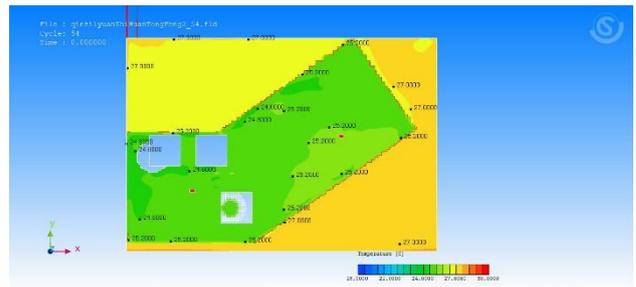


图 7 Z=1.5m 截面置换通风方式温度分布云图  
Fig.7 Z=1.5m section displacement ventilation method temperature distribution cloud contour

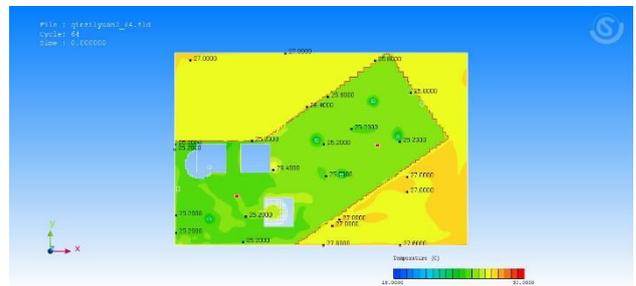


图 8 Z=1.5m 截面混合通风方式温度分布云图  
Fig.8 Z=1.5m cross-section mixing ventilation temperature distribution cloud contour

由图 5 可以看出，三种送风方式都能满足室内的温度要求，三种送风方式在垂直方向的温差都在 2℃之内，没有产生垂直方向温度分层严重的现象。但从图 6 至图 8 中可以观察到辐射供冷加新风方式与置换通风方式的温度分布较均匀，混合通风方式的温度均匀性有待改善。三种送风方式的速度场同样选取三个不同高度的截面进行分析，模拟结果如图 9~17 所示。

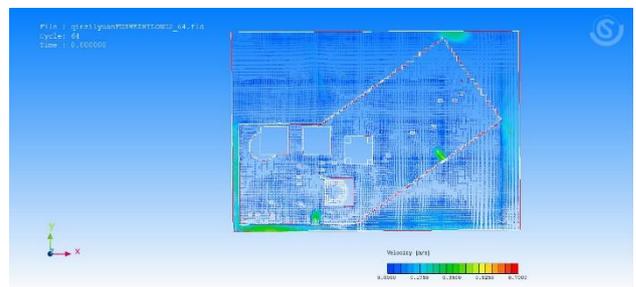


图 9 Z=700mm 截面辐射供冷加新风方式速度分布云图  
Fig.9 Z=700mm section radiant cooling plus fresh air mode velocity distribution cloud contour

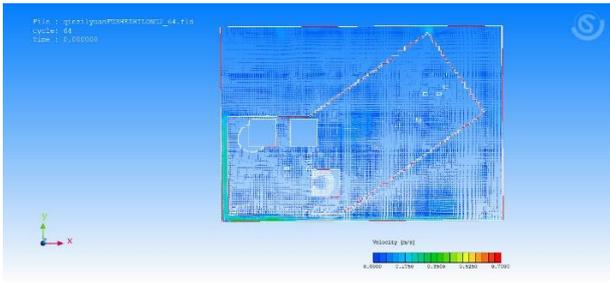


图 10 Z=1500mm 截面辐射供冷加新风方式速度分布云图  
**Fig.10 Z=1500mm section radiation supply cooling plus fresh air mode velocity distribution cloud contour**

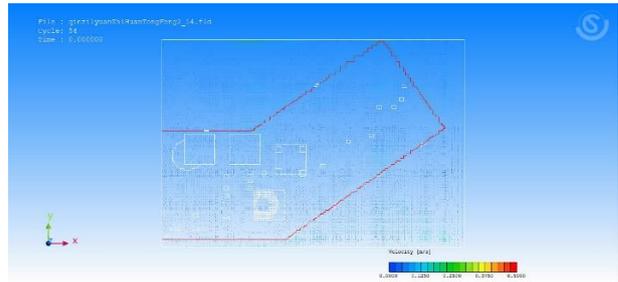


图 14 Z=2800mm 截面置换通风方式速度分布云图  
**Fig.14 Z=2800mm section displacement ventilation mode velocity distribution cloud contour**

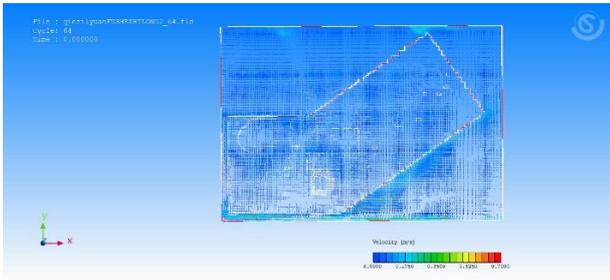


图 11 Z=2800mm 截面辐射供冷加新风方式速度分布云图  
**Fig.11 Z=2800mm section radiation supply cooling plus fresh air mode velocity distribution cloud contour**

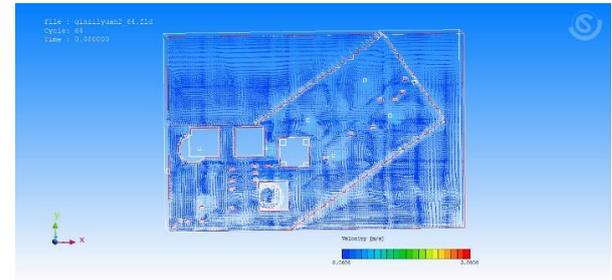


图 15 Z=700mm 截面混合通风方式速度分布云图  
**Fig.15 Z=700mm section mixing ventilation speed distribution cloud contour**

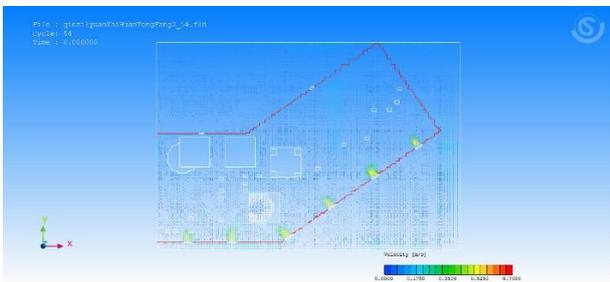


图 12 Z=700mm 截面置换通风方式速度分布云图  
**Fig.12 Z=700mm section displacement ventilation mode velocity distribution cloud contour**

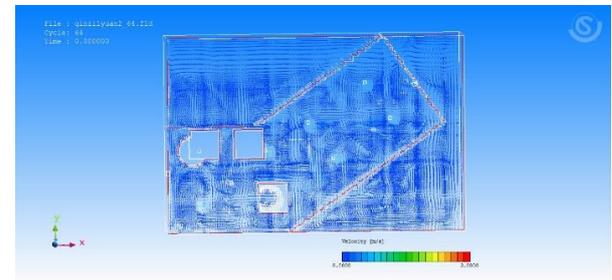


图 16 Z=1500mm 截面混合通风方式速度分布云图  
**Fig.16 Z=1500mm section mixing ventilation speed distribution cloud contour**

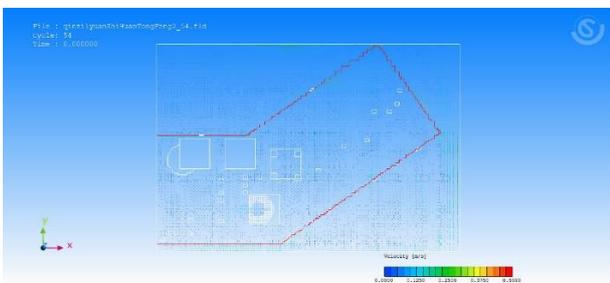


图 13 Z=1500mm 截面置换通风方式速度分布云图  
**Fig.13 Z=1500mm section displacement ventilation mode velocity distribution cloud contour**

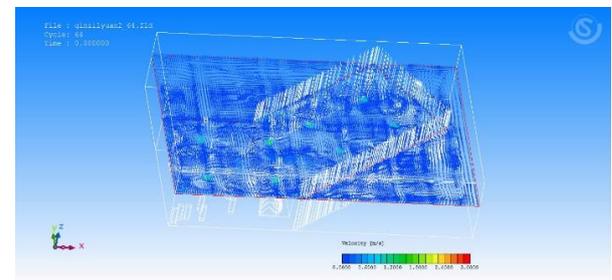


图 17 Z=2800mm 截面混合通风方式速度分布云图  
**Fig.17 Z=2800mm section mixing ventilation speed distribution cloud contour**

由以上三种送风方式不同高度的速度云图特别是图 9、图 12、图 15 可以看出, 辐射供冷加新

风方式的速度最小，分布最均匀，置换通风方式的速度较大值出现在风口侧，由于出风速度都控制在 0.5m/s，因此不存在吹风感，混合送风方式相比于另两种送风方式的速度分布不够均匀。

#### 4.2 PMV-PPD 和空气龄模拟分析

由于 PMV 指标用于评价稳态热环境，考虑了环境要素和人体要素，比单纯考虑温度、风速全面；空气龄指标用于评价空气环境送风有效性，因此对三种送风方式下的 PMV 值以及空气龄等指标进行了模拟，模拟云图如图 18~26 所示。

《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》规定：供暖与空气调节室内的热舒适性按照《中等热环境 PMV 和 PPD 指数的测定及热舒适条件的规定》采用 PMV 和 PPD 进行评价<sup>[7]</sup>。



图 18 Z=700mm 截面辐射供冷加新风方式 PMV 分布云图  
Fig.18 Z=700mm section radiant cooling plus fresh air mode PMV distribution cloud contour



图 19 Z=1500mm 截面辐射供冷加新风方式 PMV 分布云图  
Fig.19 Z=1500mm section radiant cooling plus fresh air mode PMV distribution cloud contour

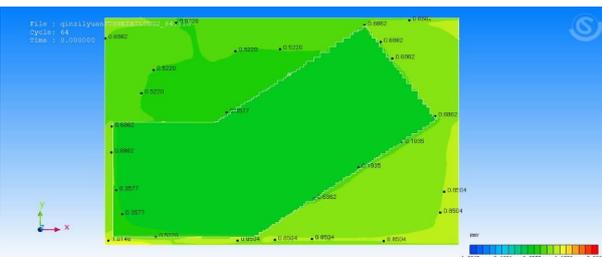


图 20 Z=2800mm 截面辐射供冷加新风方式 PMV 分布云图  
Fig.20 Z=2800mm section radiant cooling plus fresh air mode PMV distribution cloud contour



图 21 Z=700mm 截面置换通风方式 PMV 分布云图  
Fig.21 Z=700mm section displacement ventilation method PMV distribution cloud contour

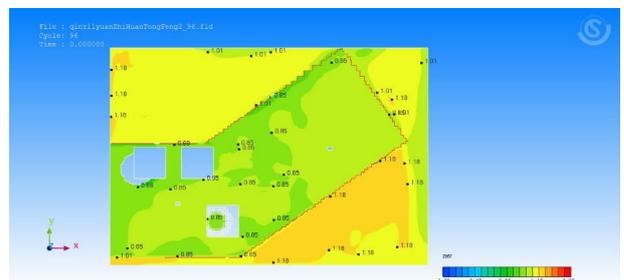


图 22 Z=1500mm 截面置换通风方式 PMV 分布云图  
Fig.22 Z=1500mm section displacement ventilation method PMV distribution cloud contour

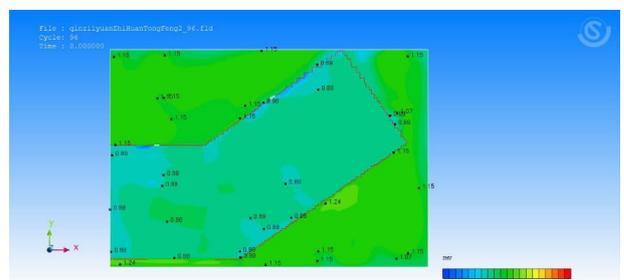


图 23 Z=2800mm 截面置换通风方式 PMV 分布云图  
Fig.23 Z=2800mm section displacement ventilation method PMV distribution cloud contour

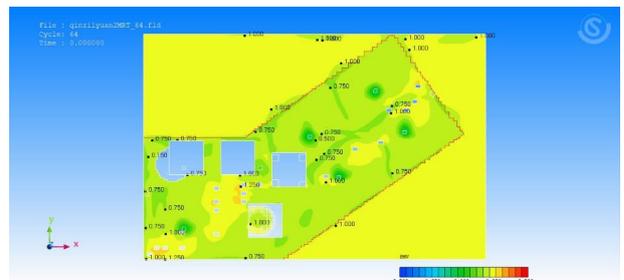


图 24 Z=700mm 截面混合通风方式 PMV 分布云图  
Fig.24 Z=700mm section mixed ventilation PMV distribution cloud contour

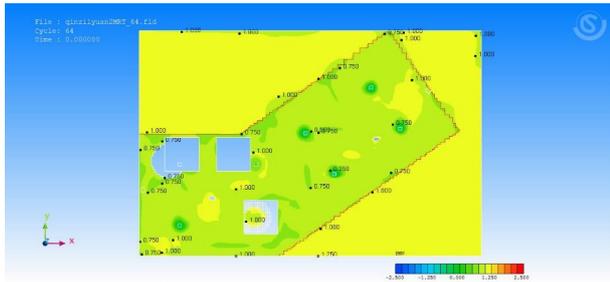


图 25 Z=1500mm 截面混合通风方式 PMV 分布云图

Fig.25 Z=1500mm section mixed ventilation PMV distribution cloud contour

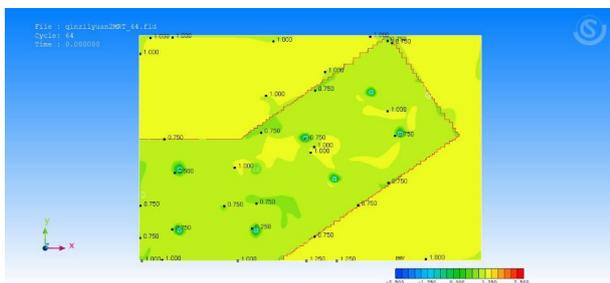


图 26 Z=2800mm 截面混合通风方式 PMV 分布云图

Fig.26 Z=2800mm section mixed ventilation PMV distribution cloud contour

由模拟云图可以显示室内舒适性,由三种送风方式在截面 Z=0.7m 处的截图,图 18、图 21、图 24 可以看出采用辐射供暖加新风方式时娱乐设施 4 内部的 PMV 值为 0.3577,属于适中舒适的范围;采用置换通风方式时娱乐设施 4 内部的 PMV 值为 0.68,根据表 2<sup>[8]</sup>判断此时处于稍微暖和状态;采用混合通风方式时游乐设施 4 内部 PMV 值为 1.00,处于稍微暖和状态。在截面 Z=1.5m 处的截图,图 19、图 22、图 25 可以看出采用辐射供暖加新风方式时娱乐设施 4 内部的 PMV 值为 0.522,属于适中舒适的范围;采用置换通风方式时娱乐设施 4 内部的 PMV 值为 0.85,处于稍微暖和状态;采用混合通风方式时游乐设施 4 内部 PMV 值为 1.00,处于稍微暖和状态;用相同的方式比较截面 Z=2.8m 处的云图 20、图 23、图 26 可得辐射供冷加新风方式室内的 PMV 值变化幅度最小并且 PMV 值都处于 0.5 以下,属于适中舒适的范围,而其它两种送风方式的 PMV 值变化幅度较大,舒适性不如辐射供冷加新风方式。

由以上模拟结果分析可得辐射供冷加新风的 PMV 值的变化范围,均小于 0.5,符合国家在《民

用建筑供暖通风与空气调节设计规范》中对 PMV 的规定,所以三种送风方式中辐射供冷加新风方式的舒适性更强,更加符合亲子乐园建筑的设计需求。

表 2 PMV 指标

Table 2 PMV indicators

PMV	3	2	1	0	-1	-2	-3
热感觉	热	暖	适	中	凉	快	冷

将三种送风方式 PMV 模拟结果统计为柱状图,如图 23。从图中可明显看出,三种送风方式中辐射供冷加独立新风系统的 PMV 值均小于 0.5,处于适中舒适状况。从图 18 中可明显看出,三种送风方式中辐射供冷加新风系统的 PMV 值均小于 0.5,处于适中舒适状态。

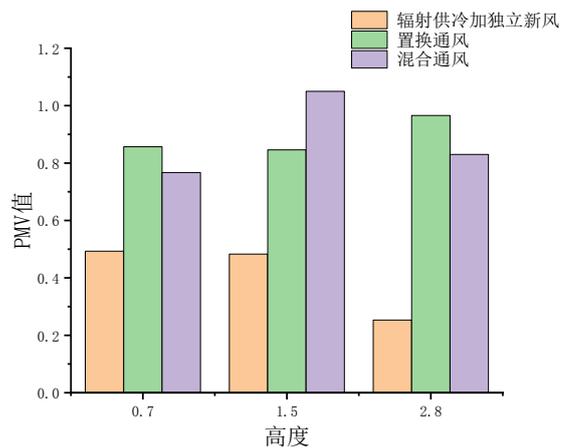


图 27 不同送风方式 PMV 值

Fig.27 PMV values for different air supply modes

PPD 指数为预测处于热环境中群体对热环境不满意的投票平均值<sup>[9]</sup>。PPD 的结果可以由 PMV 的值进行计算的得出,计算可得不同截面处辐射供冷加新风方式的 PPD 都在 10%之下,置换通风方式的 PPD 在 20%之上,混合通风方式的 PPD 三个截面中最小为 20%左右,最大值在 30%左右。由不满意度百分比可得辐射供冷加独立新风方式是三种方式中不满意度最低的送风方式。

空气龄表示室内某点的空气在室内滞留的时间,可用于判断室内空气的新鲜程度,空气龄越小,表明空气越新鲜<sup>[10]</sup>。模拟三种送风方式下的空气龄结果如图 28。

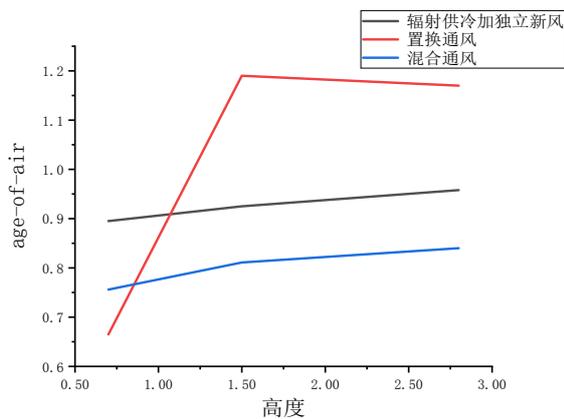


图 28 不同送风方式的空气龄

Fig.28 Air age of different air supply modes

从图 32 可以看出三种送风方式下混合通风的空气龄较小,辐射供冷加新风方式次之,两种送风方式的空气龄指数都小于 1,而置换通风方式的空气龄指数变化较大,这是由于置换通风的送风速度较小导致的。

## 5 结论

通过采用 scSTREAM 软件对亲子乐园三种送风方式进行数值模拟分析可得:

(1) 三种送风方式都可满足亲子乐园关于温度和风速的需求,无明显吹风感。但是从均匀性方面考虑辐射制冷加独立新风形式均匀性最好。

(2) 由 PMV 值以及 PPD 可得三种送风方式中辐射供冷加独立新风系统的热舒适性最好,可以保证游乐设施内部也处于舒适的程度。

(3) 由于置换通风受游乐设施的阻挡影响以及自身送风速度较低的缘故,导致空气龄较高,相比之下,送风速度较大的混合通风方式的空气龄是三者中最小的,辐射供冷加新风次之。

由于表示空气扩散指标的均匀性、热舒适性指

标 PMV-PPD、送风有效性指标空气龄三者亲子乐园建筑的设计中起着同等重要的作用,综上所述,三种送风方式中,从送风温度场和速度场的分布以及 PMV-PPD、空气龄等方面综合考虑,辐射供冷加独立新风的送风方式相比于其它两种送风方式更加适合亲子乐园建筑。

## 参考文献:

- [1] 李思芸.夏热冬冷地区典型城市幼儿热舒适分析研究[D].重庆:重庆大学,2016.
- [2] Fanger P O. Thermal comfort Analysis and applications in environmental engineering[J]. Thermal Comfort Analysis & Applications in Environmental Engineering, 1970.
- [3] 赵彬,李先庭,彦启林.用零方程湍流模型模拟通风空调室内空气流动[J].清华大学学报(自然科学版),2001,41(10):109-113.
- [4] 武雁林.辐射冷顶板表面发射率的研究和室内热环境分析[D].长沙:湖南大学,2013.
- [5] 周文慧,刘东,王康.办公建筑内地板送风和置换通风模式对室内环境质量影响的数值模拟对比研究[J].建筑节能,2012,40(1):10-13.
- [6] 李静.典型布局下的建筑室内自然通风[J].建筑技术,2012,43(12):1124-1126.
- [7] GB50736,民用建筑供暖通风与空气调节设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [8] 刘思煦.冬季住宅室内空气环境的数值模拟研究[J].绿色建筑,2017,9(2):45-50.
- [9] ASHRAE Standard 55-2004, Thermal environmental conditions for human occupancy[S]. Atlanta:ASHRAE, 2004.
- [10] 高月芬,刘兆,邹小全,等.某地铁屏蔽门系统岛式站台的室内环境分析[J].制冷与空调,2018,18(8):47-50.