

CFD 在体育馆比赛大厅空调方案中的应用

采用CFD（计算流体力学）软件对比赛大厅内的空气流场分4 个不同的方案进行模拟研究分析，结果表明比赛区域采用双排风管旋流风口上送，下部回风结合侧高墙排风的方式能较好的满足设计要求。

1. 引言

比赛大厅的比赛区域和观众区域是体育馆的核心，而其气流组织是体育馆空调设计中的重点，特别是当比赛区域的气流流速要求比较严格时，其气流组织更是空调设计中的难点。

好的气流组织不仅是温、湿度场达到要求的基础，而且大大减少空调能耗。随着计算机技术和计算流体力学的发展，在大空间内采用CFD 来模拟预测室内温湿度和气流组织等方法越来越得到应用。

2. 工程简述

本体育馆总建筑面积为17600 平方米，建筑高度28.3m，可容纳观众4671 人，其中固定坐席3019 座，临时1643 坐席座，可举办地区性和全国单项比赛及全民健身运动赛事（图1 为体育馆鸟瞰效果图）。体育馆主要包括比赛大厅（包含比赛场地、观众厅）、训练大厅、观众集散大厅以及体育馆附属的办公室、接待休息室等。



图1 体育馆鸟瞰效果图

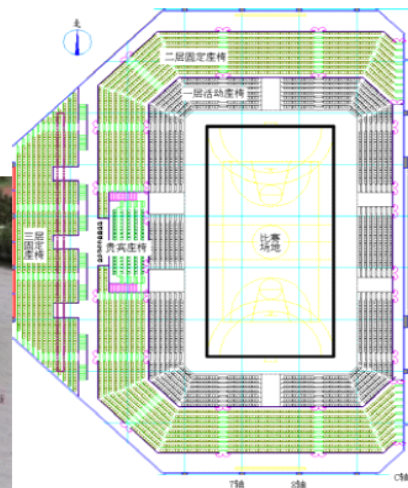


图2 标高16m的俯视图

体育馆比赛区域的气流流速必须达到小球比赛的要求（比赛区域上空9m 内风速小于0.2m/s）。结合甲方的要求及土建条件，观众区域采用座椅送风，底排侧面回风，比赛区域初步设计4 个空调系统方案：Case1，采用单排喷口侧送下部回风（兼排风）；Case2，采用单排喷口侧送顶部排风、下部回风；Case3，采用双排旋流风口上送下部回风（兼排风）；Case4，采用双排旋流风口上送侧高墙排风、下部回风。

3. 比赛大厅模型建立

3.1 几何模型

比赛大厅一层设置7 排活动座椅和一个40mX20m 比赛场地；二层布置9 排固定座椅和5排贵宾座椅；三层布置12 排固定座椅，比赛上空最高高度为28.3m（图2 是相对地平标高16 m 的俯视图）。

为了简化分析，对比赛大厅作如下假设：

- 1) 平面中一排座椅送风口简化为一个长条送风口；
- 2) 贵宾座椅等同于一般固定座椅；
- 3) 三层固定座椅对空间气流组织的影响忽略；
- 4) 屋顶简化为平屋面，最高标高为 27.9m；
- 5) 比赛大厅南北方向完全对称分布；
- 6) 室内空气气流按不可压缩粘性流体考虑。

以地平面8轴和C轴的交点为原点，设定比赛大厅的北向为X轴正方向，东向为Y轴正方向，高度方向为Z轴正方向，简化后的物理模型如图3所示。

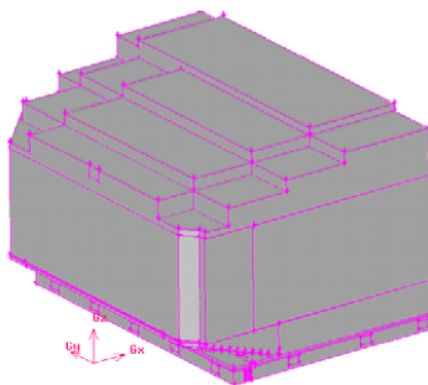


图 3 物理模型侧视图

3.2 控制方程[1]

质量守恒方程(连续方程):

微元体中流体质量的增加=流入该微元体的净质量

动量守恒方程:

微元体中流体动量的增加=作用在微元体上各种力之和

能量守恒方程:

微元体中热力学能的增加=进入微元体的净热流量+体积力与表面力对微元体做的功
 针对体育馆分区送风气流组织的模拟分析，采用标准 K-E 方程得到了较好的效果[2]。

3.3 计算条件

比赛区域初步设计4个空调系统方案的计算条件见表1所示。

表 1 不同模拟工况下的设置计算条件

计算条件	Case1	Case2	Case3	Case4
比赛区域送风方式	单排侧送，5个0.5X0.5m的喷口，间距4.6m	单排侧送，5个0.5X0.5的喷口间距4.6m	双排下送，10个0.7X0.7的旋流风口,间距5.6m	双排下送，10个0.7X0.7的旋流风口,间距5.6m
观众区送风风速（m/s）	0.2139103	0.2139103	0.1715984	0.1715984

比赛区送风风速 (m/s)	2.666667	2.666667	1.70068	1.70068
观众厅回风口	贵宾席 1 个 1.6X1m、西侧 观众厅2 个 1.6X1m、 南侧5 个 1.6X1m 风口	贵宾席 1 个 1.6X1m、西侧 观众厅2 个 1.6X1m、 南侧5 个 1.6X1m 风口	贵宾席 1 个 1.6X1m、西侧 观众厅2 个 1.6X1m、 南侧4 个 1.6X1m 风口	贵宾席 1 个 1.6X1m、西侧 观众厅2 个 1.6X1m、 南侧5 个 1.6X1m 风口
观众厅回风口 风速 (m/s)	贵宾席 0.954861 其他 0.992063	贵宾席 0.954861 其他 0.992063	贵宾席 0.954861 其他 0.896991	贵宾席 0.954861 其他 0.896991
比赛区域回风口	东侧 2 个 1.6X1m 风口	东侧 2 个 1.6X1m 风口	东侧 2 个 1.6X1m、西侧 2个1.6X1m、 南侧1 个 1.6X1m 风 口	东侧 2 个 1.6X1m、西侧 2个1.6X1m
比赛区域回风口风速 (m/s)	0.833333	0.138889	0.9375	0.104167
排风口设置	/	2 个1X1m 屋 顶排风口	/	1 个2X1.5m 高侧墙排风口
排风量占比赛 区域送风量百 分比		90%		80%

为了更好地进行各种工况的对比分析，首先沿Z 轴方向对比赛区域上空切割4 个典型断面（即 $z=0.5\text{m}$ ， $z=3\text{m}$ ， $z=6\text{m}$ ， $z=9\text{m}$ ），进行气流流场判断，若基本符合比赛大厅室内的气流流场要求，再对模拟工况进一步分析。

4. 计算分析

4.1 Case1 模拟分析

Case1 工况的物理模型如图4 所示，靛蓝色区域表示比赛送风区域，红色为回风和活动座椅区域，蓝色为座椅送风区域。

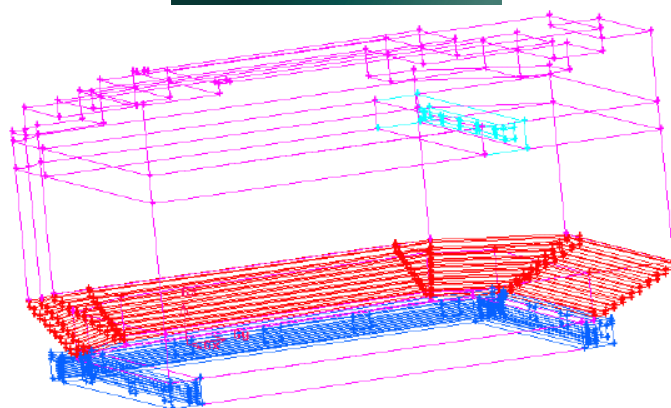


图 4 Case1 物理模型透视图

图 5~8 为典型断面上的速度云图分布，在比赛大厅内气流速度大于0.5m/s（大球比赛）时，云图中不显示。

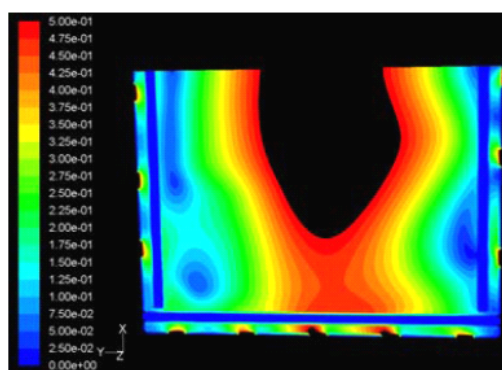


图 5 Z=0.5m 流场云图

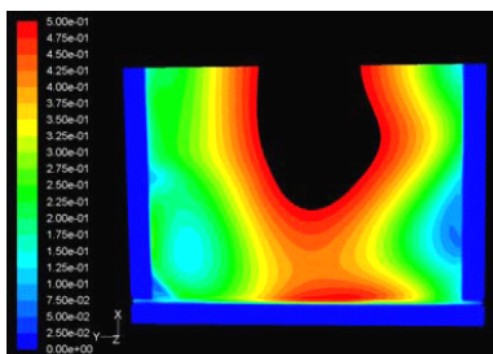


图 6 Z=3m 流场云图

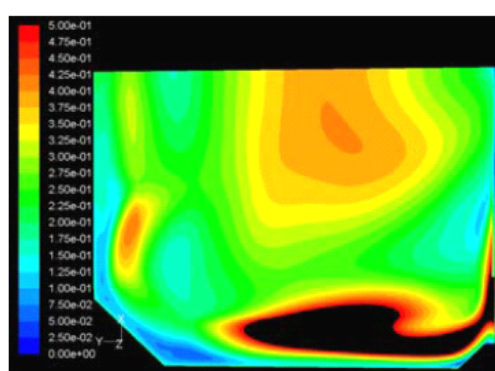
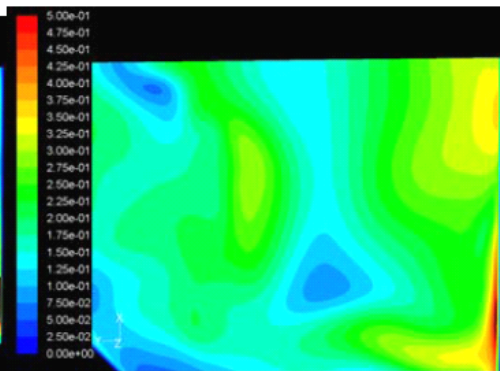


图 7 Z=6m 流场云图



8 Z=9m 流场云图

从图 5~8 可以很容易地看出，比赛区域气流速度大部分大于0.2m/s 风速的要求，这种空调送风方式不能满足比赛要求。

4.2 Case2 模拟分析

Case2 的物理模型同Case1（加单独屋顶排风）。以下图9~12 为典型断面上的速度云图分布。

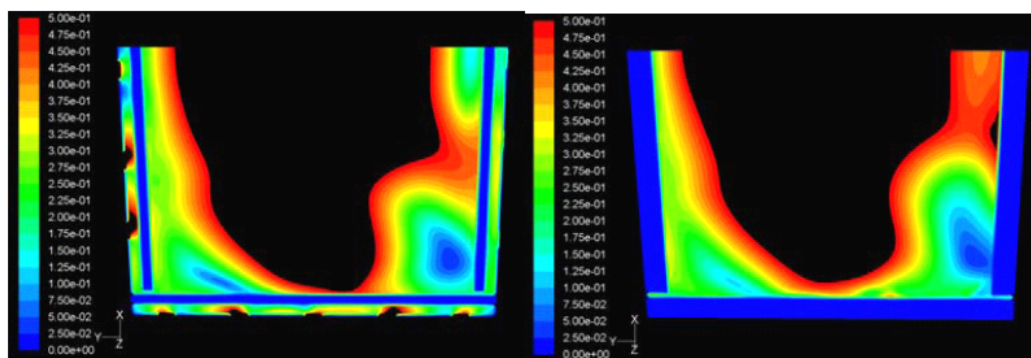


图 9 Z=0.5m 流场云图

图 10 Z=2m 流场云图

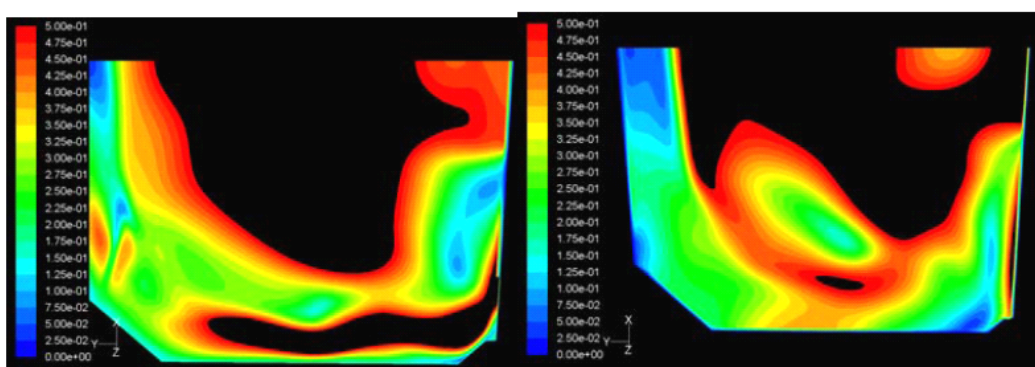


图 11 Z=5m 流场云图

图 12 Z=9m 流场云图

从图9~12 速度流场云图得出，由于增加了屋顶风机，使得比赛区域内的气流更加紊乱，这种空调送风方式不能满足比赛要求。

4.3 Case3 模拟分析

Case3 工况的物理模型如图13 所示，靛蓝色区域表示比赛送风区域，红色为回风和活动座椅区域，蓝色为座椅送风区域。

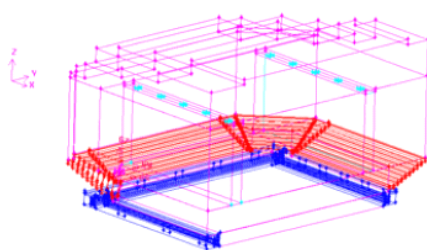


图 13 Case3 物理模型透视图

以下图 14~17 为典型断面上的速度云图分布。

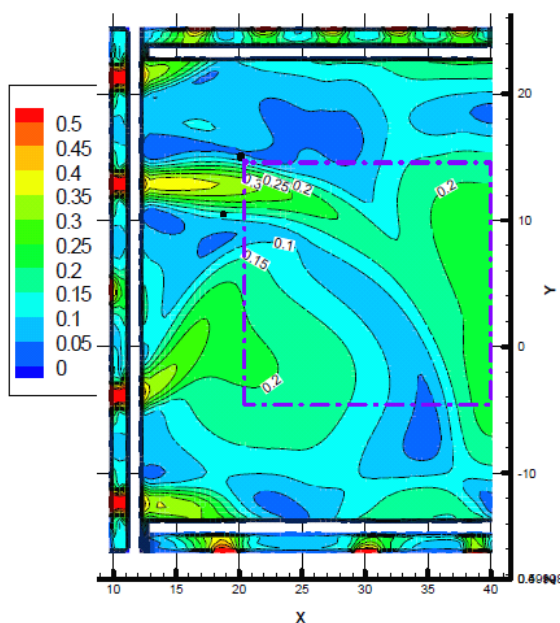


图 14 Z=0.5m 流场云图

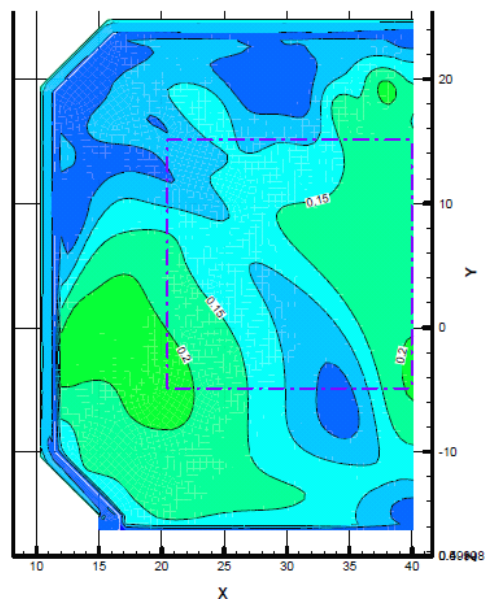


图 15 Z=3m 流场云图

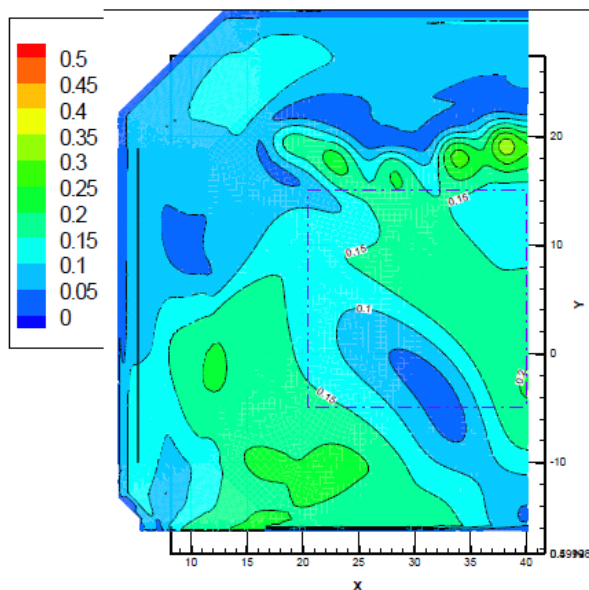


图 16 Z=6m 流场云图

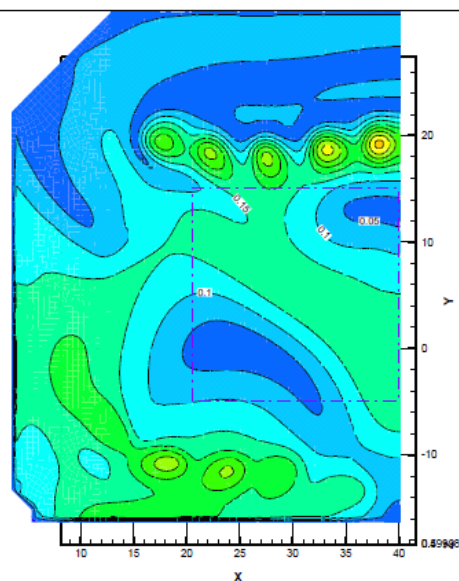


图 17 Z=9m 流场云图

从图14~17 不同高度的速度流场云图得出，比赛区域基本满足风速小于0.2m/s的要求（紫色矩形框内为比赛边界），可作为小球比赛时的送风方式。

4.4 Case4 模拟分析

Case4 工况的物理模型如图14 所示（侧墙增加排风口）。以下图18~21 为典型断面上的速度云图分布。

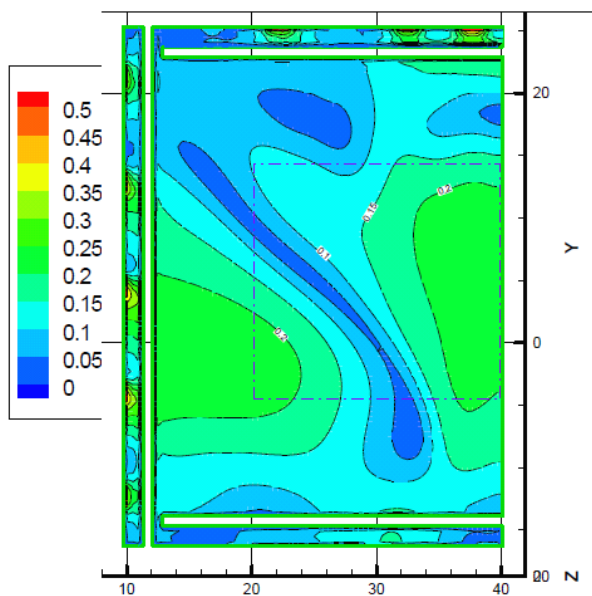


图 18 Z=17m 流场云图

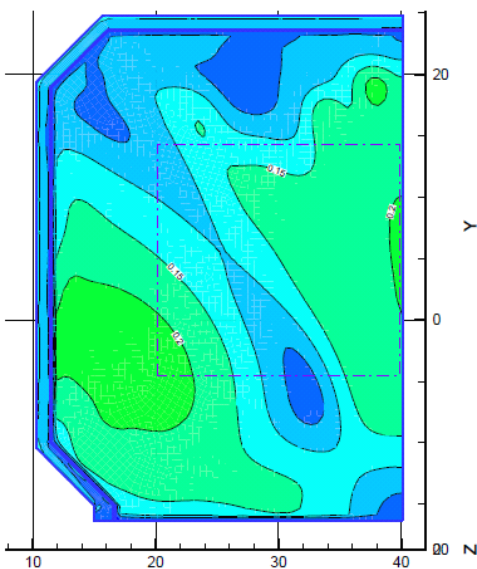


图 19 Z=3m 流场云图

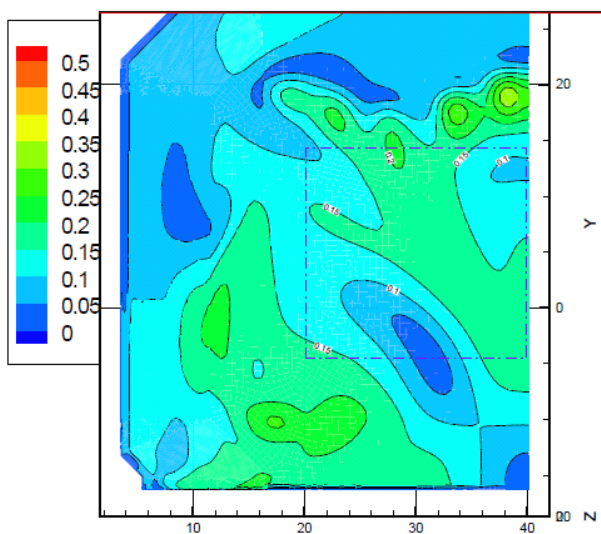


图 20 Z=6m 流场云图

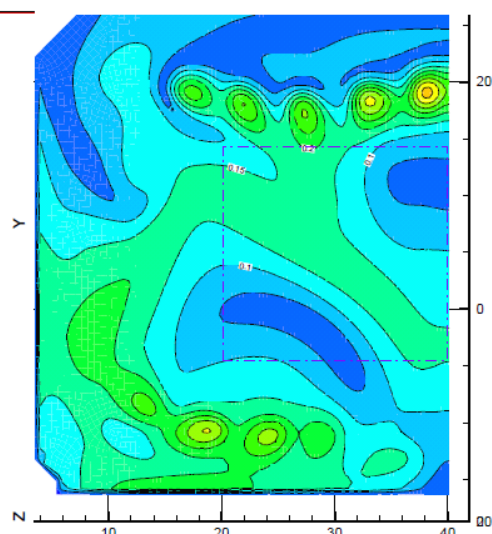
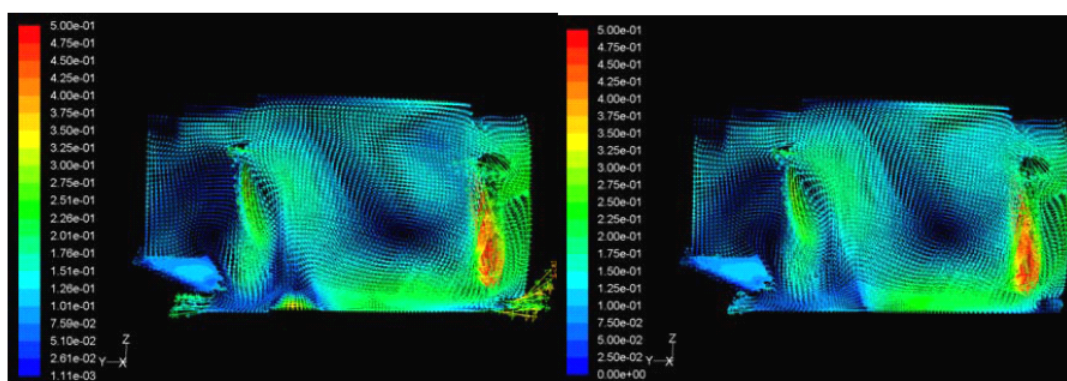


图 21 Z=9m 流场云图

从图 18~21 不同高度的速度流场云图得出，比赛区域基本满足风速小于 0.2m/s 的要求（紫色矩形框内为比赛边界），可作为小球比赛时的送风方式。

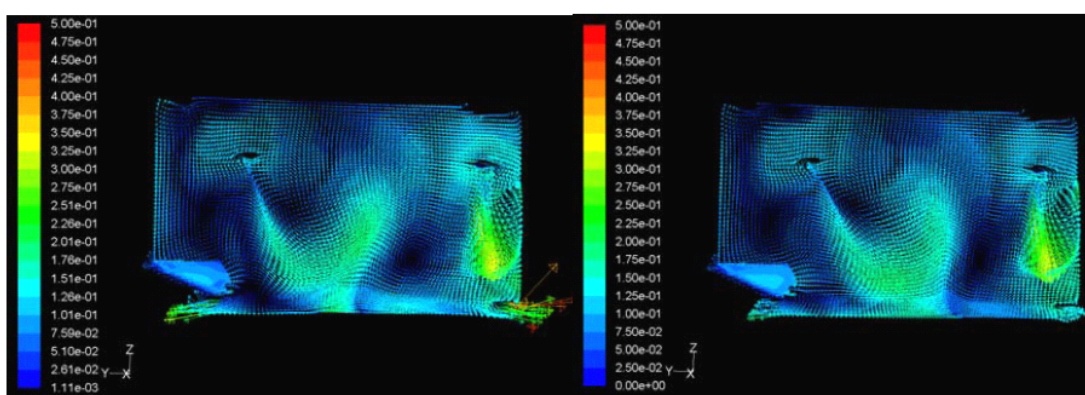
4.5 Case3 与Case4 的对比分析

在上述分析中可知，这两种送风方式都能满足比赛送风的要求，在观众区域的风速分布差不多。为了进一步分析比较Case3 与Case4 工况，沿X 轴方向对比赛区域上空切割3 个典型断面（即， $X=20.1\text{m}$ ， $X=30.1\text{m}$ ， $X=40.1\text{m}$ ），对比分析两种空调系统方案的气流流场分布。以下图22~24 为三个典型断面上的速度矢量图。



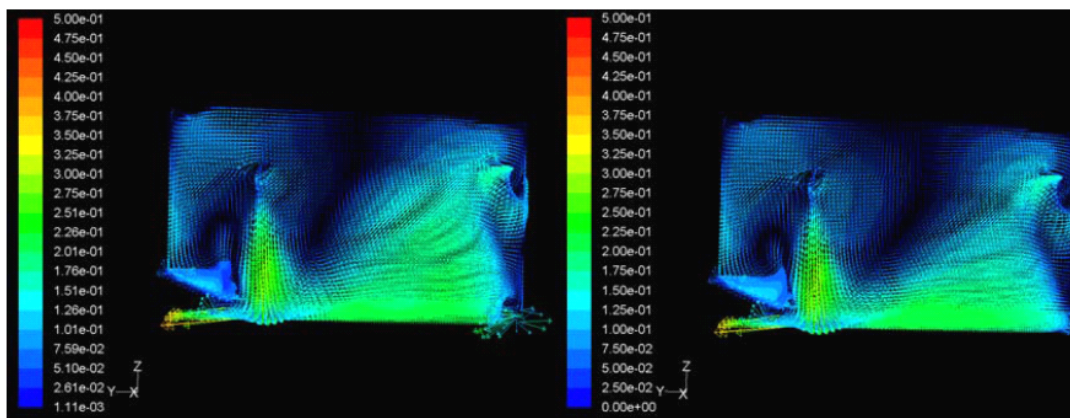
(a) case3 X=20.1m 流场矢量图 (b) case4 X=20.1m 流场矢量图

图 22 X=20.1m 流场矢量图



(a) case3 X=30.1m 流场矢量图 (b) case4 X=30.1m 流场矢量图

图 23 X=30.1m 流场矢量图



(a) case3 X=40.1m 流场矢量图 (b) case4 X=20.1m 流场矢量图

图 24 X=40.1m 流场矢量图

从矢量图 22~24 可以看到, Case4 的气流场比 Case3 分布的均匀, 特别是在比赛区域, 气流涡流区域面积小于Case3 工况。所以本次模拟得出最优空调系统方案为Case4。

5. 结论

通过 CFD 计算软件对室内气流进行模拟分析, 可以快速地预测室内气流分布, 为空调系统方案的设计提供理论支持。