

# 法瑞风管系统送风效率及节能效果分析

**摘要** 法瑞风管系统——学名纤维织物空气分布系统，广泛应用于体育、会展、商业、工业等各类领域场所中，起到均匀送风及提高送风效率和节能的作用。在很多大空间封闭场所内使用可大大提高送风效率，起到明显的节能效果。本文从理论公式、CFD 模拟、工程实测分析验证法瑞风管系统送风的原理和特性，并与传统散流器送风进行比较，得出法瑞风管系统送风效率更高且节能的结论。

**关键词** 法瑞风管系统 纤维织物空气分布系统 送风效率 轴心速度衰减 温度分布 孔板 送风

## 0 引言

法瑞风管系统——学名纤维织物空气分布系统，广泛应用于体育、会展、商业、工业等各类领域场所中，起到均匀送风及提高送风效率和节能的作用。在很多大空间封闭场所内使用可大大提高送风效率，起到明显的节能效果。作为一种新型的送风系统，我司率先于国内对其送风的原理和模式进行了系统的分析和理论研究，通过CFD 模拟实验及大空间气流组织实验证理论体系的正确性，并在工程实例中测得了对应的数据结果。

法瑞风管系统一般为圆管上开一排或多排均匀分布的小孔，风流通过小孔时形成多股小射流，然后混合汇聚，沿管长方向成线性均匀送出。为研究小孔的出风原理，需分析单孔的入流条件，分析其流动特征，再研究各孔射流的相互影响，找出相似的出风模式并套用相应的计算公式。

## 1 理论分析

在空调系统中，送风口空气的射流是形成室内不同气流组织的主要因素。由于送风末端的不同、射流空气温度与室内空气温度的不同可形成不同类型的送风口射流。一般来说，空调中的送风口射流的雷诺数通常都远大于30，及送风口射流均为紊动射流。其流动的外部结构如图1 所示。A—外窗表面积。其中，有些数据代表的意义相联系才有意义，未受到外界空气卷吸影响而保持原来出口流速的中心部分称为核心区（图中的ACB 区），对全部控制点都要进行观测。之后的部分称为发展区。

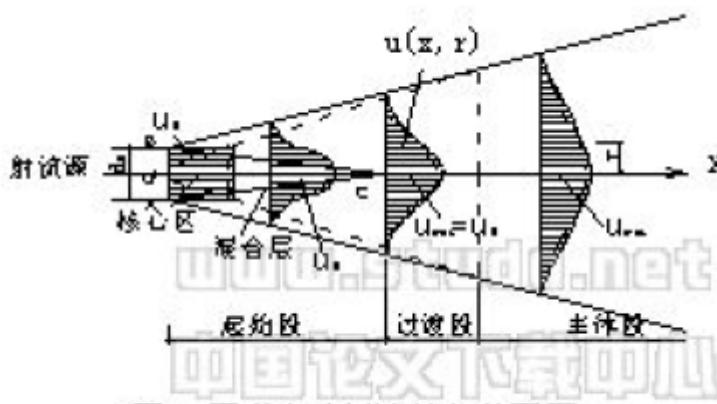


图1 圆形紊动射流外部分区图

从出口至核心区末端的部分为起始段，紊动充分发展以后的部分为主体段，起始段与主体段之间为过渡段。根据文献[1]，由于起始段和过渡段相对较短，与室内空气流动密切相关的是射流的主体段工程中关心的时均特性主要由如下三个指标来描述：轴心速度衰减，射流扩展角以及断面速度分布。

法瑞风管送风形式，按单孔可视为非等温自由射流（暂不考虑贴附和受限射流），按轴

向方向可视为非等温平面自由射流，其射流类型与孔板送风相类似，可视为孔板送风的一种特殊类型。根据文献[1]，对于非等温射流，轴心温度的分布规律与轴心速度一样，是决定室内空气分布的重要因素。根据动量传递和能量传递的类比关系，易知非等温自由射流轴心温差衰减和轴心速度衰减规律相似，可用类似的公式描述。

根据文献[2]孔板送风方式的送风气流可以看作是圆形平行射流的叠加，叠加原理如图2所示。

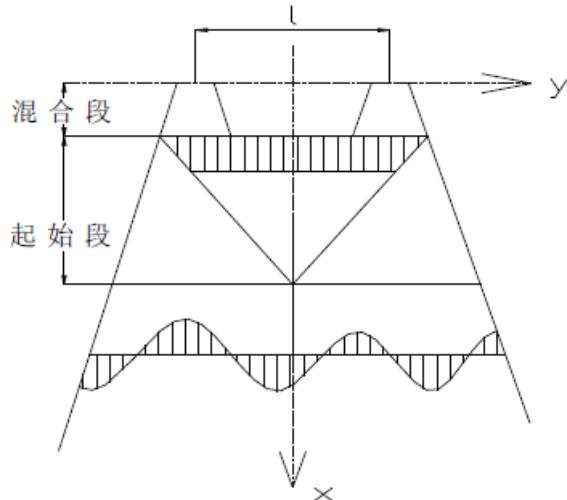


图 2 平行射流的叠加

对平行射流叠加的情况下气流速度的计算目前大都是经验公式或半经验半理论公式。其中最典型最常用的经验公式就是：

$$u = 1.13u_0 \frac{0.48}{ax} \sqrt{A} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{y}{cx}\right)^2\right] \quad (1)$$

式中  $u$ —点  $(x, y)$  处的速度， $\text{m/s}$ ；

$u_0$ —孔口的出流速度， $\text{m/s}$ ；

$a$ —紊流系数；

$A$ —孔口面积， $\text{m}^2/\text{s}$ ；

$c$ —实验常数，可取  $c=0.082$ 。

对于圆形平行射流组，其求解区域的横向宽度与主流方向的长度相比是小量，并且其横向速度梯度很大。因此，我们可以看作是二维稳态薄剪切层流动。根据文献[3]有人根据Prandtl 混合长度理论，求出了自由圆形射流紊流的解析解：

$$u = \frac{3.705du_0\sqrt{\pi}}{\left(1 + \frac{l^3}{4\pi^3 I^2 x}\right)x} \left[ 1 - \frac{l^3}{4\pi^3 I^2 x} \cos\left(2\pi \frac{y}{l}\right) \right] \quad (2)$$

式中  $d$ —孔口直径， $\text{m}$ ；

$l$ —两孔中心的距离， $\text{m}$ ；

$I$ —Prandtl混合长度， $\text{m}$ ；

其中, Prandtl混合长度与射流发展进程成比例:

$$I = c x \quad (3)$$

$c^2$  是公式 (2) 中唯一的经验常数, 它可以由实验来确定。

根据公式 (1) 和 (2) 计算, 当风速5m/s 时, 在点 (4.94, 0) 处风速达到0.3m/s (工作区要求风速)。

对于传统送风系统, 采用方形、圆形散流器最为普遍。而从方形、圆形散流器送出的送风射流为锥形射流, 其射流是轴对称的如图3。

即可视为各向轴对称的自由射流, 自由射流的轴心速度衰减规律可用下列公式描述:

式中:  $H_0$ : 送风口等效宽度, m;

$Kn$ : 非等温修正系数;

$K_2$ : 温差衰减比例系数;

$Ar_0$ : 阿基米德数;

$\Delta t_0$ : 送风温度和回风温度之差, K;

$g$ : 重力加速度, m/s<sup>2</sup>

$T$ : 房间平均绝对温度, K

根据公式计算可知当风速5m/s 时, 在点 (5, 0) 处风速为0.17m/s, 若考虑浮力的影响则风速更低。

比较可知, 传统送风系统送风时速度衰减应该比法瑞风管系统更快, 而温度分层由于受到扩散角的影响更不明显。

## 2 模拟计算

为论证公式及分析各因素对两种不同送风方式的送风均匀性的影响, 我们分别对法瑞风管系统送风和传统散流器送风进行CFD 模拟研究。

### 2.1 法瑞风管系统送风速度、温度分布CFD 模拟

本实验模拟同一根布袋风管, 夏季送冷风。

模型参数:

房间规模:  $5 \times 5 \times 5$ m, 风管直径406mm, 居边偏上布置, 斜下向条缝送风, 孔口宽25mm, 风速5 m/s, 方向4: 30, 下回风。夏季送风温度15 度, 室温25 度。

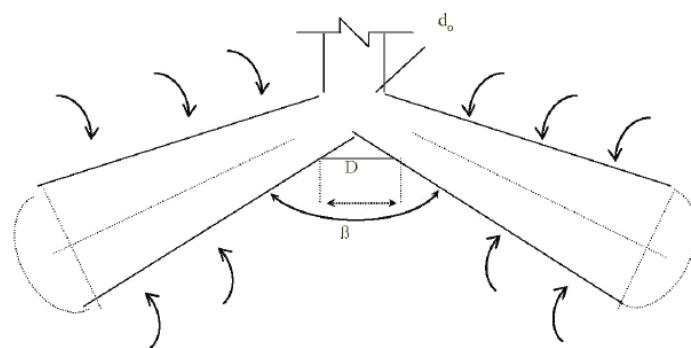


图 3 锥形射流

即可视为各向轴对称的自由射流, 自由射流的轴心速度衰减规律可用下列公式描述:

$$\frac{V_m}{V_0} = K \frac{\sqrt{A_0}}{x} K_n$$

$$K_n = [1 \pm \frac{2.5K_2}{K^2} Ar_0 (\frac{x}{\sqrt{A_0}})^2]^{1/3} \quad Ar_0 = \frac{g \Delta t_0 H_0}{T V_0^2}$$

式中:  $H_0$ : 送风口等效宽度,  $m$ ;

$Kn$ : 非等温修正系数;

$K_2$ : 温差衰减比例系数;

$Ar_0$ : 阿基米德数;

$\Delta t_0$ : 送风温度和回风温度之差,  $K$ ;

$g$ : 重力加速度,  $m/s^2$

$T$ : 房间平均绝对温度,  $K$

根据公式计算可知当风速5m/s 时, 在点 (5, 0) 处风速为0.17m/s, 若考虑浮力的影响则风速更低。

比较可知, 传统送风系统送风时速度衰减应该比法瑞风管系统更快, 而温度分层由于受到扩散角的影响更不明显。

## 2 模拟计算

为论证公式及分析各因素对两种不同送风方式的送风均匀性的影响, 我们分别对法瑞风管系统送风和传统散流器送风进行CFD 模拟研究。

### 2.1 法瑞风管系统送风速度、温度分布CFD 模拟

本实验模拟同一根布袋风管, 夏季送冷风。

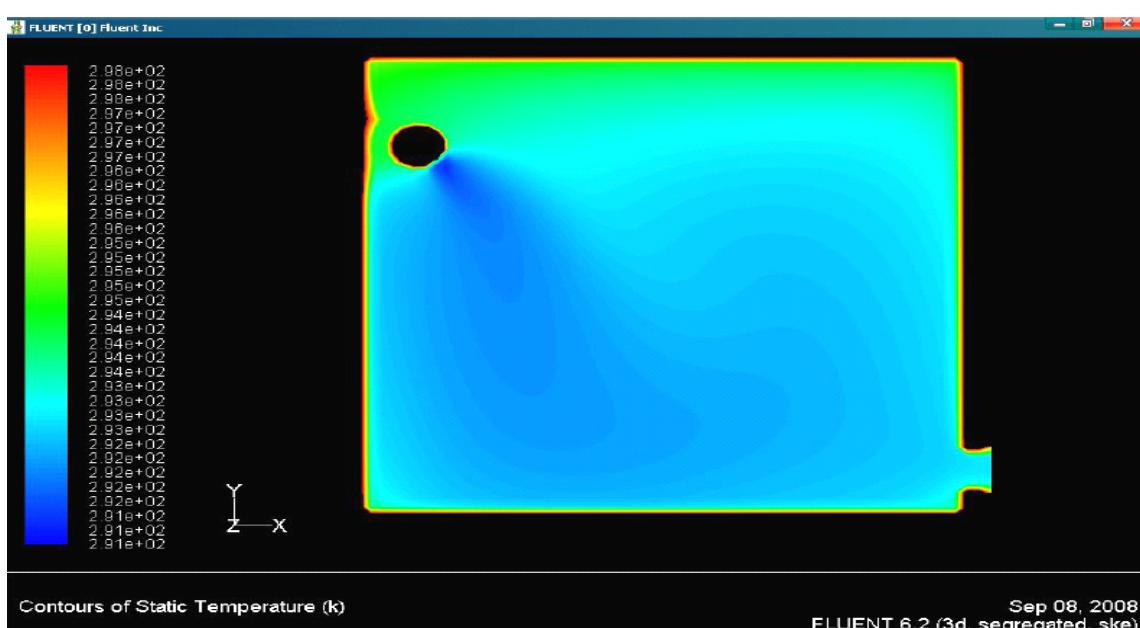
模型参数:

房间规模:  $5 \times 5 \times 5m$ , 风管直径406mm, 居边偏上布置, 斜下向条缝送风, 孔口宽25mm, 风速5 m/s, 方向4: 30, 下回风。夏季送风温度15 度, 室温25 度。

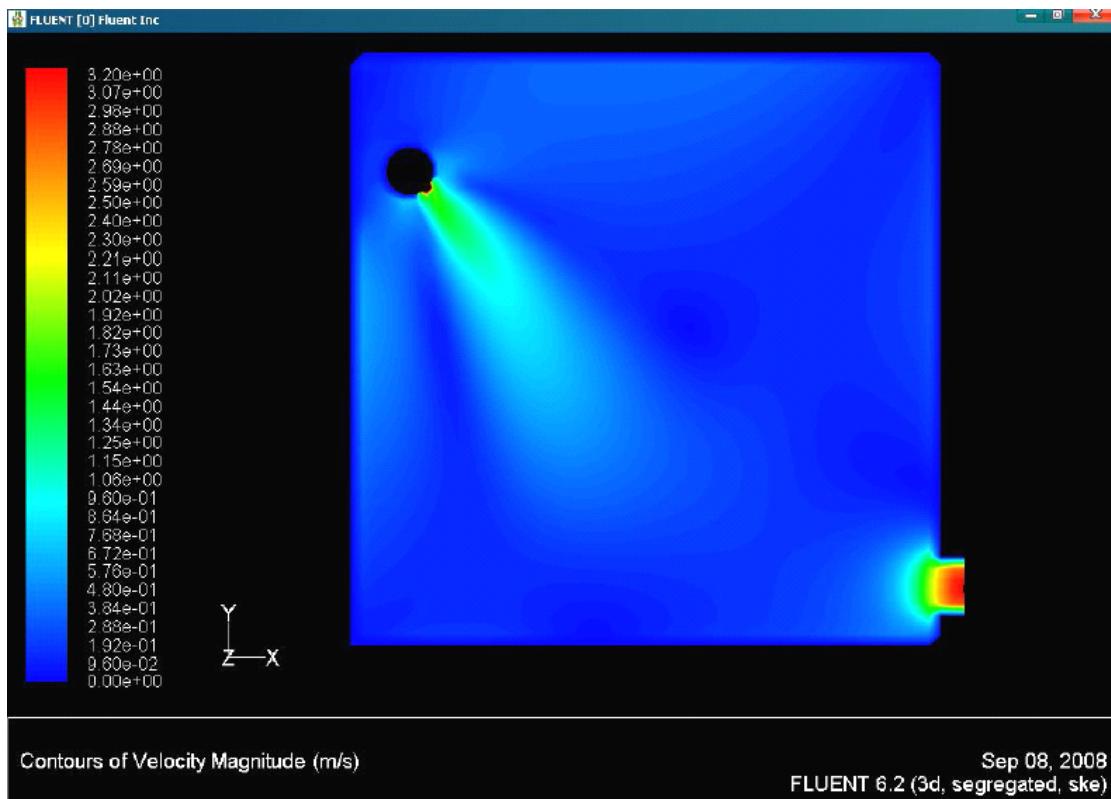
建立模型

CFD 模拟:

温度分布



### 速度分布

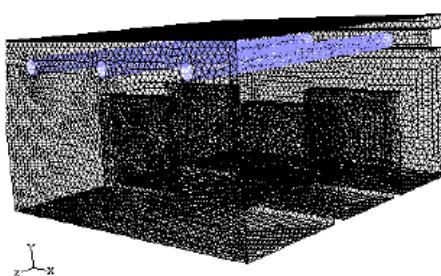


从实验结果可知，距地面1.5m高处，气流面平均速度为0.29m/s，面平均温度25.2℃。

最大气流速度0.32 m/s，最小气流速度0.24 m/s，最大速度差0.08 m/s。

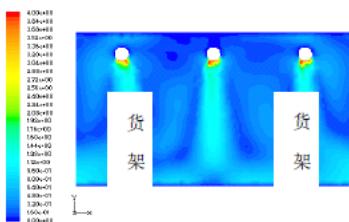
最高气流温度25.7℃，最低气流温度24.9℃，最大温度差0.8℃

以上数据为理想状态下的模拟结果，再以实际案例进行模拟，如以某超市为模板建立简化模型图5：

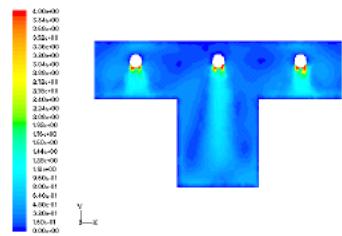


若干支管连接在送风主管上形成支状管网系统，货架和支管处于垂直，避免有气流被阻隔在两货架之间。

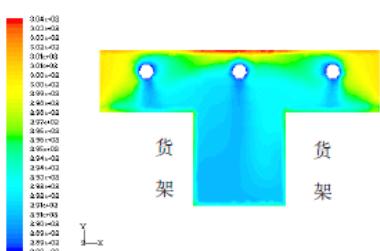
z=3 时速度场分布



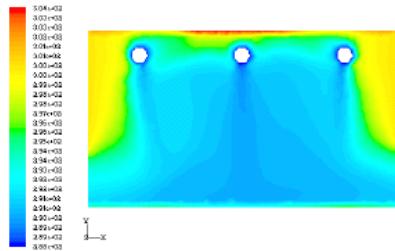
z=5 时速度场分布



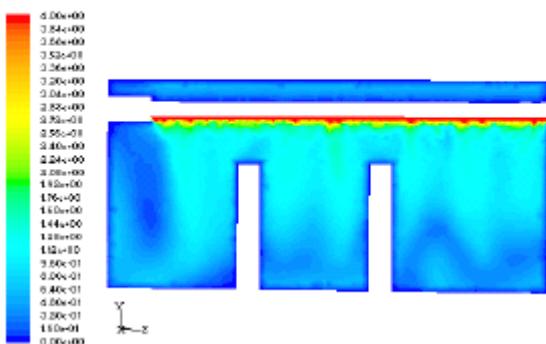
z=3 时温度场分布



z=5 时温度场分布



X=1.5 时速度场分布

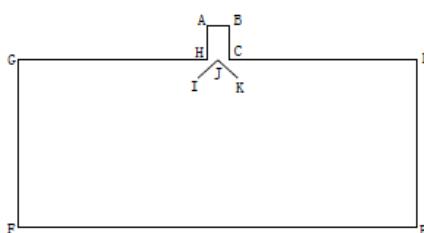


从模拟结果看，距地面1.5m高处，气流面平均速度为0.31m/s，面平均温度25.1°C。最大气流速度0.35 m/s，最小气流速度0.26 m/s，最大速度差0.09 m/s。最高气流温度25.8°C，最低气流温度24.7°C，最大温度差1.1°C

与之前的模拟结果比较，室内有障碍物时，速度及温度分布都受到影响，但不影响模拟结果与理论结果相似的结论。

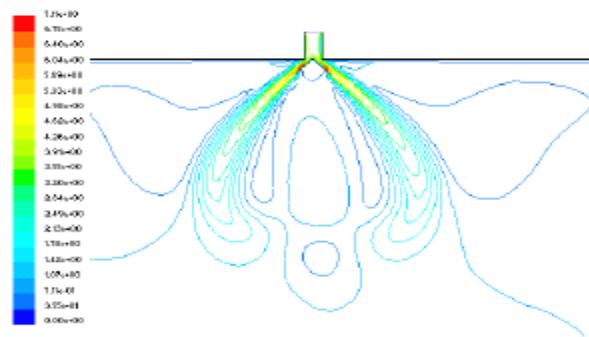
## 2.2 传统散流器送风速度、温度分布CFD 模拟

建立模型如图6 所示：

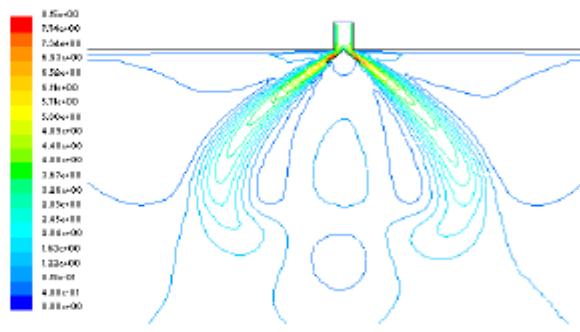


CFD 模拟截图

速度分布



温度分布



从模拟结果看，距地面1.5m高处，气流面平均速度为0.28m/s，面平均温度25.4℃。最大气流速度0.42m/s，最小气流速度0.19m/s，最大速度差0.23m/s。最高气流温度26.6℃，最低气流温度24.2℃，最大温度差2.4℃

### 2.3 对比结果

如此可得对比结果法瑞风管系统送风效率更高，均匀性更好，且在工作区域平均温度更低（送冷风）。

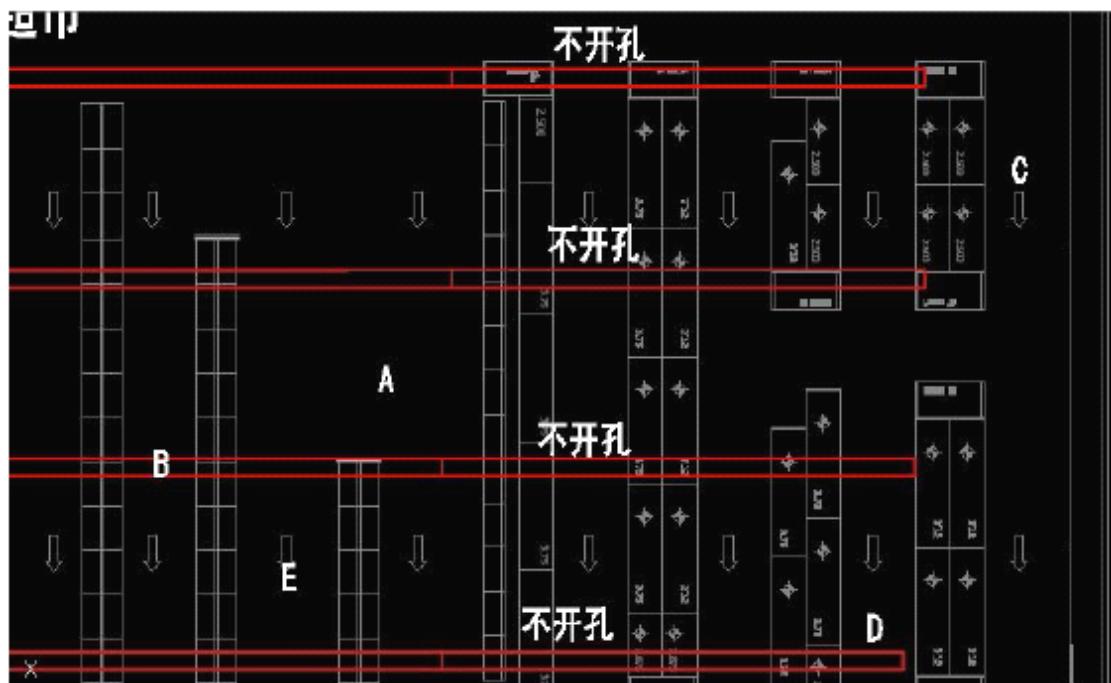
### 3 结果检验

为检验模拟结果的可靠性，我们以现实中的项目实测结果与模拟结果相比较。

以某超市武汉两个分店为例，分别以S1、S2表示，S1采用法瑞风管系统送风，S2采用传统风管系统送风。两店设计单位面积负荷均为300W/m<sup>2</sup>，总送风风量、新风风量、回风风量、排风风量基本相同。两店采用相同品牌主机和风柜，夏季冷冻水送回水温度相同。设计环境参数相同，送风温度均为15℃，设计环境温度均为25℃。

S1店：

设计图纸，在随机区域取5个监测点（A-E），检测各点不同高度上的速度及温度。



## 汇集成表

高度 度/°C	0.1	1	1.5	1.7	2.0
A	27.1	25.7	25.2	24.9	27.7
B	26.9	25.4	24.7	25.1	25.6
C	29.6	27.1	26.5	28.2	27.7
D	27.4	26.2	25.1	24.8	24.1
E	27.2	25.5	24.9	25.2	26.7

高度 度/m/s	0.1	1	1.5	1.7	2.0
A	0.11	0.15	0.33	0.34	0.28
B	0.35	0.12	0.20	0.22	0.21
C	0.41	0.23	0.35	0.19	0.13
D	0.14	0.49	0.27	0.24	0.24
E	0.09	0.21	0.31	0.27	0.18

表中红色数字为偏离过大数据，计算平均值时忽略不计。

由表可知除离外墙较近的C点温度较高外其它点测得温度均在标准范围内,且数值分布比较均匀。1.5米高处平均温度为25.28℃。

S2 店:

同样在随机区域取5个监测点(1-5),检测各点不同高度上的速度及温度。

得下表

高度 温度/°C	0.1	1	1.5	1.7	2.0
A	25.6	24.6	24.1	23.7	25.4
B	26.1	26.4	26.2	25.8	24.9
C	27.9	28.1	28.3	28.8	30.8
D	22.3	24.2	23.6	24.5	26.1
E	29.1	27.9	27.2	27.5	31.4
高度 速度/m/s	0.1	1	1.5	1.7	2.0
A	0.07	0.41	0.46	0.43	0.28
B	0.22	0.24	0.20	0.22	0.06
C	0.57	0.15	0.18	0.19	0.22
D	0.44	0.47	0.45	0.39	0.33
E	0.13	0.16	0.41	0.14	0.23

表中红色数字为偏离过大数据，计算平均值时忽略不计。

由表可知，数值分布差别较大，1.5米高处平均温度为25.88°C。

则S2店1.5米高处平均温度比S1店高0.6°C。

#### 4 结论

综合上述分析，采用法瑞风管系统比传统散流器送风更加均匀，轴心速度衰减更慢，

温度分层更加明显，对能量利用效率更高。鉴于同样的设备采用法瑞风管系统送风可将工作面温度降低0.3~0.8°C，则配合设计更小的冷量、风量，可为使用方节省能耗10%~15%。

#### 参考文献

- [1] 朱春. 送风孔板阻力系数模拟研究 2010
- [2] 张文胜. 孔板送风方式下密闭小室内气流分布的研究
- [3] 王来, 孔板送风静压箱静压分布规律的实验研究, 制冷学报, 1991