

文章编号: 1671-6612 (2019) 01-074-6

方形吸顶散流器平送风射程的探讨

王重超¹ 吴虎彪²

- (1. 航天智慧能源研究院/上海航天智慧能源技术有限公司 上海 201201;
2. 同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司 上海 200092)

【摘要】 分析了方形吸顶散流器送风特点和射流特性, 介绍了3种散流器射程的计算方法, 实验分析了计算方法的可靠性。结果显示, 自由紊动射流近似算法, 计算公式较为简单, 计算误差较小, 在工程中具有较高的应用价值。

【关键词】 方形散流器; 射流射程; 送风特点; 射程

中图分类号 TU831 文献标识码 A

Discussion on Throw of Square Ceiling Diffuser of Flat Air Supply

Wang Zhongchao¹ Wu Hubiao²

- (1. Aerospace Smart Energy Institute/Shanghai Aerospace Smart Energy Technology Co., Ltd., Shanghai, 201201;
2. Tongji Architectural Design (Group) Co., Ltd., Shanghai, 200092)

【Abstract】 The air supply characteristics and jet characteristics of the square ceiling diffuser were analyzed. 3 kinds of calculation methods on diffuser throw are introduced, and the reliability of the calculation method is analyzed by the experiment. The approximate calculation result shows that the free turbulent jet has a simple calculation formula and a small calculation error, which has a high engineering application value.

【Keywords】 Square ceiling diffuser; Jet characteristics; Air supply characteristics; Throw

0 引言

散流器是应用最为广泛的空调末端风口之一, 其射流特性是影响室内气流分布和空调系统效果的重要因素。虽然有部分学者对散流器的射流机理有过一些模拟和实验研究^[1], 但是相关资料中针对其送风特点和射流特性叙述不够充分。射程是散流

器最主要的参数之一, 各种设计手册和厂家样本的数据差距较大, 使得暖通工程师在设计或施工过程中常常无所适从。因此, 对散流器射程的研究十分必要。

1 散流器平送风射流特性和送风特点

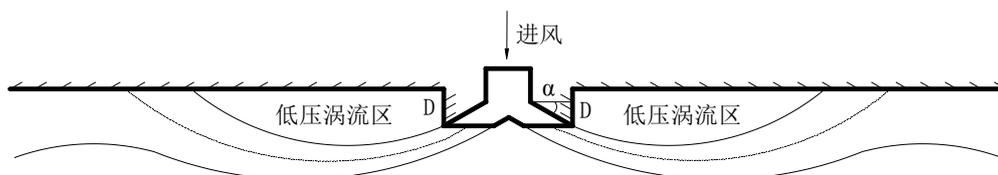


图1 散流器出口角度较小时, 平送风射流示意图

作者(通讯作者)简介: 王重超(1986.05-), 男, 硕士研究生, 工程师, E-mail: wangzc@aseri.com.cn

收稿日期: 2018-04-13

Fig.1 Airflow jet diagram of the diffuser with a small outlet angle

当吸顶散流器的出流方向与顶棚所成的角度 α 较小时, 射流卷吸受房间顶棚的限制, 从而影响了射流边界层的自由发展, 射流半径及速度亦不能按自由紊动射流的规律发展, 而是发展到一定程度后受顶棚的限制会渐变为贴附射流。此时, 吸顶散流器的射流即不是严格意义上的自由紊动射流, 也不是贴附射流, 而是出口射流在经过一段空气卷吸之后逐渐形成贴附射流, 其射流特性示意图 1。

吸顶散流器一般安装在顶棚使用, 当吸顶散流器的出流角度较小时, 气流从散流器出口射出, 卷吸房间内的空气, 由于受顶棚的影响, 射流一侧的

卷吸空气量有限, 这样就会在靠近顶棚处形成一个低压涡流区, 从而使射流的方向发生改变, 在横截面上主射流逐渐贴近顶棚。当靠近顶棚一侧没有空气卷吸时, 则射流与顶棚碰撞, 小部分气流回到涡流区, 大部分气流贴附顶棚形成贴附射流。根据吸顶散流器射流的对称性及其送风特点, 平送风射流如图 2 所示。

通过上述对吸顶散流器送风特点的分析, 吸顶散流器的送风射流可以分为三个阶段: 自由射流段、发展段和贴附射流段。在发展段里, 射流与顶棚相撞, 且射流会逐渐变为贴附射流。

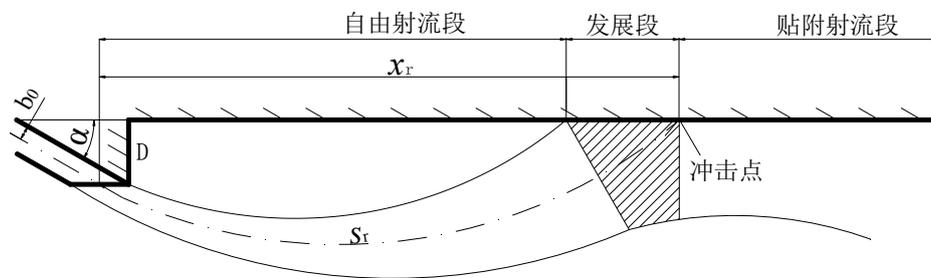


图 2 吸顶散流器平送风射流示意图

Fig.2 Schematic of ceiling diffuser flat air jet

2 散流器射程计算

2.1 方法 1: 散流器射流速度衰减方程式法

目前工程中最常用的散流器平送风时射程的计算公式是 P.J.杰克曼提出的。他指出散流器射流速度的衰减方程式为^[1]:

$$\frac{u_x}{u_0} = \frac{K\sqrt{F}}{x + x_0} \quad (1)$$

式中, u_x 为距散流器中心水平距离 x 处的最大风速, m/s; u_0 为散流器的送风速度, m/s; K 为送风口常数, 多层锥面型散流器为 1.4; 平盘式散流器为 1.1; F 为散流器的有效面积, m^2 ; x_0 为自散流器中心算起到射流外观原点的距离, 对于多层锥面型为 0.07m。

该公式被收录到很多参考书和设计手册中, 是设计师在设计选型中采用最多的公式。但是利用该公式得到的射程结果与很多厂家样本数据存在较大差距。

2.2 方法 2: 自由紊动射流近似计算法

前人对无限空间淹没紊流射流的研究也较成熟。吸顶散流器射流的特点与冲击射流存在相似性。冲击射流可分成三个不同的流动区域, 即自由射流区、冲击区、壁面射流区。在自由射流区, 其流动特性与自由射流相同; 在冲击区, 射流经历了显著的弯曲, 产生很大的压力梯度, 在该区末几乎变成平行于壁面的流动, 进入壁面射流区^[6]。壁面射流区也可认为是贴附射流。散流器射流与冲击射流都是气流与壁面冲撞然后形成贴附射流。冲击射流中冲击高度已知, 所以自由射流的长度已知, 在吸顶散流器送风中, 自由射流的长度为未知数, 与吸顶散流器的结构和布置有关。但在冲击点之后, 两种射流均形成了贴附射流。与冲击射流相比, 区别在于吸顶散流器是由于空气卷吸形成的低压作用而造成射流中流线的弯曲最终与壁面成一定的角度相撞, 然后形成贴附射流。

由于散流器的出风角度较小, 将散流器平射流

的全程近似看作均是贴附射流。图 3 为无限空间淹没紊流射流结构。研究表明，射流主体段的参数变化与 $\alpha x_0/d_0$ 有关。 x_0 为由极点至给定断面的距离； α 为无量纲紊流系数，其数值的大小决定于风口形式并与射流的扩散角 θ 有关，即 $\tan \theta = 3.4\alpha$ 。

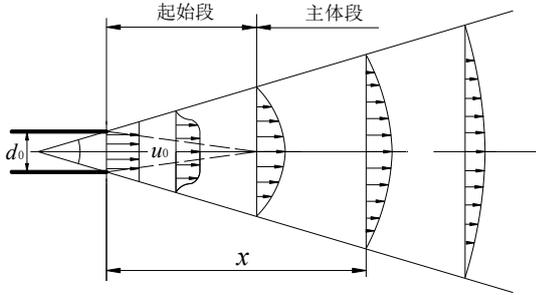


图 3 自由射流

Fig.3 Free jet schematic diagram

射流主体段轴心速度的衰减规律，经典地表示为：

$$\frac{u_x}{u_0} \approx \frac{0.48}{\alpha x} \quad (2)$$

式中， u_x 为由风口到射流计算断面距离为 x 处的轴心速度， m/s； u_0 为风口的平均速度， m/s； x 为至计算断面的距离， m。

由式 (2) 可见，当风口形式一定，除 d_0 为几何尺寸外， $0.48/\alpha$ 为射流的衰减特性。设 $m=0.48/\alpha$ ，将 d_0 用风口的出风面积 F_0 表示，则：

$$\frac{u_x}{u_0} = \frac{m d_0}{x} = \frac{1.13 m \sqrt{F_0}}{x} = \frac{m_1 \sqrt{F_0}}{x} \quad (3)$$

式中， d_0 为风口几何尺寸， m； F_0 为风口出风面积， m^2 ； m 为风口的轴心衰减系数。

将贴附射流近似看作是无限空间自由紊动射流的一半，即自由紊动射流为两个贴附射流在空间上的叠加，其出风口面积为 $2F_0$ ，则其风速衰减的计算式为

$$\frac{u_x}{u_0} = \frac{m_1 \sqrt{2F_0}}{x} \quad (4)$$

式中， m_1 为特征系数^[8]。

将散流器平射流的全程近似看作均是贴附射流，这样就可以利用上述公式近似计算散流器的射

程了。

2.3 方法 3：冲击射流模型理论计算法

将散流器平送风射程分为从出口到冲击点的距离 x_r 和贴附射流距离 x_c 。

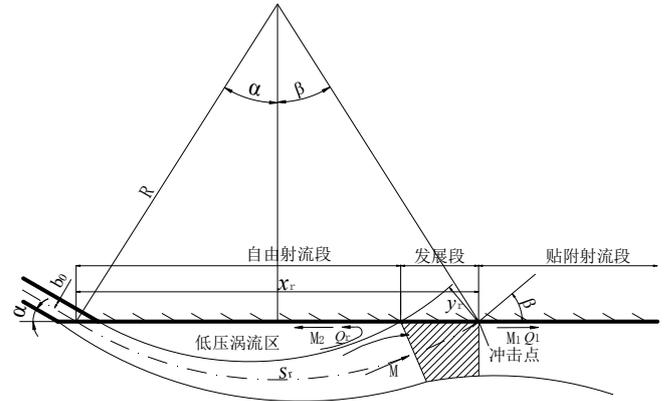


图 4 吸顶散流器平送风射流分析

Fig.4 Diagram of flat air jet of ceiling diffuser

根据吸顶散流器平送风与冲击射流的相似性，可以将冲击射流的贴附段长度计算方法应用于散流器贴附段长度计算中来。

前人对冲击射流的研究表明，冲击距离对冲击点之后的轴心速度的衰减影响不大，可以忽略，且 u_0/u_x 与 $x/2b_0$ 成良好的线性关系。则有：

$$u_x/u_0 = \sigma_2/(x_c/2b_0) \quad (5)$$

式中， σ_2 为贴附射流段扩散系数； $2b_0$ 为出风口宽度； x_c 为射流轴心速度距冲击点的距离。

则射流贴附射流段气流的射程为：

$$x_c = \frac{2\sigma_2 b_0 u_0}{u_x} \quad (6)$$

有学者研究表明，吸顶散流器出风口安装在距顶棚距离为 D 的位置，射流以出流角度 α 射出，射流出口的初速度为 u_0 。射流由于空气卷吸作用发生弯曲，射流轴心轨迹近似半径为 R 的圆弧。射流在冲击点处与顶棚撞击，角度为 β 。在冲击过程中，根据质量和动量守恒，很小一部分空气回到低压涡流区，大部分气流会在冲击点之后形成贴附射流。其冲击点之前的长度为^[9]：

$$x_r = \frac{2\sigma_1 b_0 \sin \alpha}{3\alpha} \left(\frac{1}{4\cos^2\left(\frac{\alpha+\pi}{3}\right)} - 1 \right) \quad (7)$$

则吸顶散流器送风的射程为:

$$x = x_r + x_c = \frac{2\sigma_1 b_0 \sin \alpha}{3\alpha} \left(\frac{1}{4\cos^2\left(\frac{\alpha+\pi}{3}\right)} - 1 \right) + \frac{2\sigma_2 b_0 u_0}{u_x} \quad (8)$$

式中, σ_1 为自由射流段扩散系数, 径向自由紊动射流取 7.86^[6]; σ_2 为贴壁射流段扩散系数。根据自由紊动射流和贴壁射流的理论分析, 可以获得

$\sigma_1 = \sqrt{2}\sigma_2$ ^[7], 其值可从相关资料中查得。射程终速度 u_x 取 0.5m/s。则气流射程的计算变得相对简单, 仅与散流器的结构和出风口速度有关。

3 射程的验证

为验证散流器的射程, 特设计了此实验。实验所在的房间长 15m, 宽 10m, 高 6m, 如图 5 所示。散流器出风口角度 α 为 39°。将散流器安装于房间吊顶的正中间, 测试了不同工况下散流器的射程, 同时比较了不同工况下射程实验值、方法 2 及由方法 3 计算获得的计算值之间的差异。



图5 实验室内景图

Fig.5 Laboratory interior view

为保证实验中散流器出风的均匀性、稳定性和对称性, 空气分布器前设置了静压箱形辅助段, 其截面风速设计满足 $v < \sqrt{D_k/b}$ ^[10]。同时为保证静压箱内气流的均匀, 在气流入口侧安装了整流板。方形散流器通过一个尺寸与其喉部尺寸一致, 长度

为面积当量直径 D_k 的试验短管安装在静压箱上, 试验短管上设计有一个圆锥的导流入口。静压箱形辅助段设计图见图 6。在静压箱形辅助段中, 静压箱形辅助段的高、宽为 1.2m, 静压测量截面距风口安装板距离为 0.05m。散流器实验安装图见图 7。

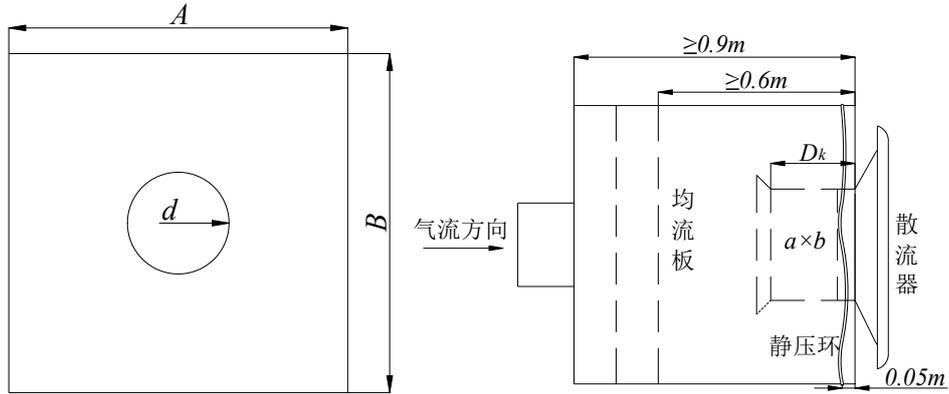


图 6 静压箱形辅助段设计图

Fig.6 Design drawing of auxiliary section of static pressure box

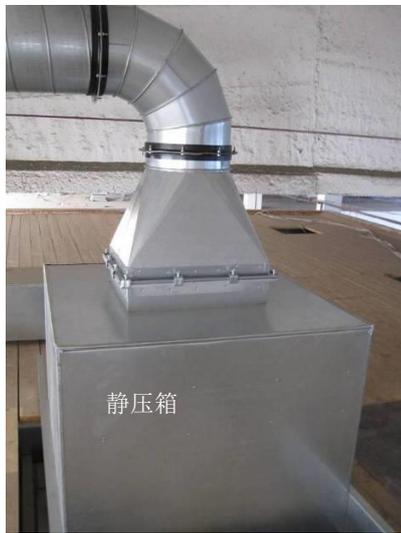


图 7 散流器实验安装图

Fig.7 Installation diagram of the diffuser in the experiment

图 8 为方形吸顶散流器喉部尺寸为 240mm×240mm 时射程与风速关系曲线。如图所示，冲击射流模型理论计算值及自由紊动射流近似计算法的计算值所获得的射程与风速均呈良好的线性关系，方法 2 和方法 3 计算值与实验获得的值能较好的相符合。由方法 2 自由紊动射流近似计算法计算获得的射程值与实验值的最大误差为 9.17%；方法 3 冲击射流模型理论方法 3 计算值与实验值的最大误差为 3.10%。

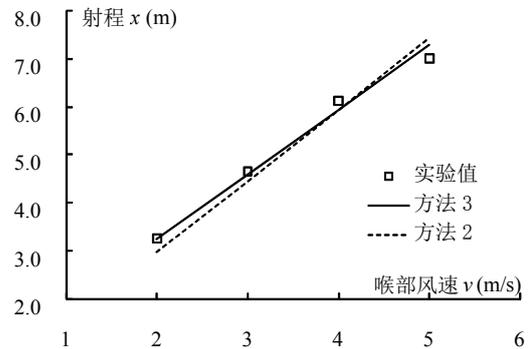


图 8 尺寸为 240mm 时，射程与风速关系曲线

Fig.8 Curve of the relationship between throw and wind speed with the throat size of 240mm

图 9 为喉部风速为 2m/s 时，各不同规格方形吸顶散流器射程的实验值、方法 3 冲击射流模型理

论模型计算值及由方法2自由紊动射流近似算法计算获得的计算值之间的比较。由方法2自由紊动射流近似算法计算获得的射程值与实验值的最大误差为9.17%；模型理论计算值方法3与实验值的最大误差为2.78%。

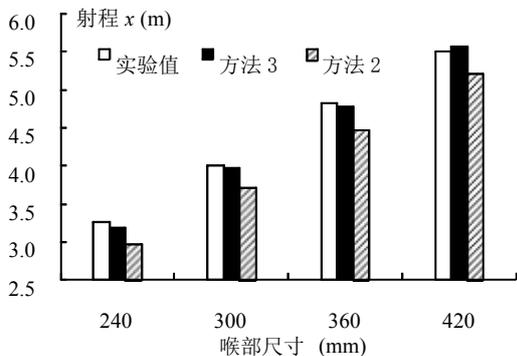


图9 风速为2m/s时,各风口的射程值

Fig.9 Throw value of each diffuser when the wind speed is 2m/s

4 结论

(1) 冲击射流模型可以很好地描述方形散流器平送风射流特性。通过实验测试结果发现,不同喉部风速和不同规格的方形散流器,方法3冲击射流模型理论模型计算法得到的计算结果均具有较高的准确性,计算值与实验值最大的误差为

3.10%。

(2) 自由紊动射流近似算法在工程中具有较高的应用价值。方法2自由紊动射流近似算法得到的射程值与实验值的最大误差为9.17%,也具有一定的可靠性,误差在工程允许的范围内;同时计算公式较为简单,在工程中具有较高的应用价值。

参考文献:

- [1] 刘刚,吴春燕.方形散流器风口速度场数值模拟[J].东华大学学报(自然科学版),2003,29(6):27-29.
- [2] 傅斌,李晓东.对方形散流器送风口的数值描述方法及应用[J].黑龙江商业大学学报(自然科学版),2004,20(2):162-166.
- [3] 项琳琳,董涛.方形散流器气流组织模拟研究[J].建筑热能通风空调,2017,36(2):54-57.
- [4] 由世俊,刘艳玲,史学增,等.热力式散流器性能的实验研究[J].流体机械,2000,28(9):54-56.
- [5] 黄翔.空调工程[M].北京:机械工业出版社,2007.
- [6] 余常昭.紊动射流[M].北京:高等教育出版社,1993.
- [7] N Rajaratnam. Turbulent Jets[M]. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam. 1976.
- [8] 赵荣义,范存养,薛殿华,等.空气调节(第四版)[M].北京:中国建筑工业出版社,2009.
- [9] 吴虎彪.方形吸顶散流器平送风等温射流特性研究[D].上海:上海理工大学,2011.
- [10] JG/T 20—1999,空气分布器性能实验方法[S].北京:中国标准出版社,1999.

(上接第73页)

4 结论

根据传统蚊香干燥技术的缺陷与局限,提出一种混流式蚊香热泵干燥系统。

通过对不同影响因素进行分析,划分较优运行参数范围。结果表明,送风温度对系统性能的影响大于截面风速,随着送风温度升高,系统性能评价指标 COP 与 SMER 呈先增大后减小趋势。

综合实际生产要求,确定进料端送风温度为 55℃,截面风速为 1.1m/s,出料端送风温度为 70℃,

截面风速为 1.3m/s,确定合理的干燥室结构参数,干燥室长度为 25m,回风位置为距离进料端 7m 处。

实测结果显示,采用热泵干燥方式比传统燃煤干燥节能 36.21%,比燃气干燥节能 47.47%。

参考文献:

- [1] PERERA C O, RAHMAN M S Heat pump dehumidifier drying of food[J]. Trends in Food Science & Technology, 1997,8:75-79.
- [2] Chou S K, Hawlader M N A, Ho J C, et al. Performance

- of a heat pump assisted dryer[J]. International Journal of Energy Research, 1994,18:605-622.
- [3] 张春路,杨亮,曾潮运.热泵干衣机仿真与优化[J].制冷学报,2015,36(6):41-46.
- [4] 许立方.列车检修库移动式空调研究[D].成都:西南交通大学,2016.
- [5] Baines P G, Carrington C G. Analysis of rankine cycle heat pump driers[J]. International Journal of Energy Research, 1988,7(12):495-510.
- [6] 刘精宇,殷瑞钰,蔡九菊.某钢铁企业产电和购电采用折标煤系数的研究[J].东北大学学报,2014,35(6):824-826.