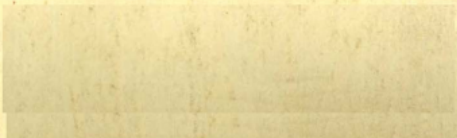


暖通空调译文集

《冶院科技》编辑部

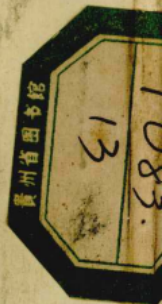


本期编辑：马仁民、王兆丰



编辑：《冶院科技》编辑部

印刷：西安市友谊印刷厂



1.00元

目 录

缩小尺寸的室内气流试验

.....〔西德〕Walter Meog著 冀兆良 程建武译 马仁民校 (1)

集尘器的粉尘捕集性能.....〔日〕木村典夫等著 沈恒根译 (18)

横断流送风机的特点和问题.....〔日〕村田暹等著 陈郁文译 (27)

与通风的效应有关的局部不舒适的特殊问题

.....〔X〕L. Banhdi等著 王丽英译 马仁民校 (40)

室内空气湍流运动的计算

.....R. M. Schmitz, U. Renz著 曹宝山译 马仁民校 (44)

美国住宅地下水热泵系统水量的模拟和测定

.....〔美〕Rohald H. Howell著 冀兆良译 马仁民校 (48)

管内的旋转流.....〔日〕山田丰著 梁守信译 (57)

缩小尺寸的室内气流试验

[西德] Walter Moog 著

袁兆良 程建武译 马仁民校

提 要

本文是关于空调室内流动问题及其预测的研究,通过一相对简单的例子可以看到,要建立数学模型是多么困难,特别是对于实际工程中存在的三维流场,更是如此。

在给出基本定义之后,说明了不同的气流组织型式对室内流动结构的影响。测定和观察的结果发现,流动的微型结构是非常复杂的,因而,似乎不可能建立一个精确的数学模型。在缩小比例的模型中所做的等温和非等温测定,给出了可靠的空间结果。相似理论研究表明,模型试验是一种基本而实用的提高空间确定性的方法,但是,为了精确地再现室内三维流动,尺寸比例为1:1的试验仍然是极重要的。

作者认为,关于室内流动的微型结构的作用及其对舒适感产生的影响,这方面的知识还是相当欠缺的。

1. 导 言

在物理学中,尤其是在动力和热力学问题中,以相似理论为基础的模型试验已被证明是一种行之有效的方法,在不可能对系统原型进行一定的数学物理预测,而且其空间不确定性未给出的情况下,总是需要进行模型试验,只有当采用缩小的模型和模拟装置更经济时,才用缩小的模型和模拟装置进行试验,也就是说这样的试验比1:1的模型试验造价更低。图1给出了模型试验与其它各步骤之间的关系。

相对于空调或通风房间产生的室内空气流动强度来说,室内流动的热力系统似乎是非常复杂的。下面通过简单的圆形非等温自由射流的轨迹计算,可以看到其空间不确定性:

关于水平圆形自由射流的轨迹,不同的作者给出的经验公式如下,其中射流出口温度低于周围环境温度:

$$\text{Regenscheit} \textcircled{2}, \quad \frac{y}{d} = 0.33 \text{mAr} \left(\frac{x}{d} \right)^3 \quad (1)$$

$$\text{Koestel}, \textcircled{3} \quad \frac{y}{d} = \text{Ar} \left(\frac{a}{b} + 1.6K \right) \left(\frac{x}{d} \right)^3 \quad (2)$$

$$\text{Baturin} \textcircled{4}, \quad \frac{y}{d} = \text{Ar} \left(\frac{x}{d} \right)^2 \left(0.72 \frac{x}{d} + 0.31 \right) \quad (3)$$

Mullejens^①,
$$y = \left(0.006 \frac{\Delta\theta}{u_0^2} \right) x^2 \left(\frac{\text{tg}\gamma}{r} x + 1.5 \right) \quad (4)$$

式中: d = 射流直径 = $2r$,

y = 垂直坐标距离,

m = 混合系数 = $0.2 \frac{d}{x}$,

x_0 = 射流核心长度,

Ar = 阿基米德准则 = $\frac{gd\Delta\theta}{u_0^2 T_u}$,

g = 重力加速度,

$\Delta\theta$ = 周围环境温度 - 射流出口温度,

u_0 = 射流出口速度,

T_u = 周围环境温度,

x = 射流水平坐标距离,

$\frac{a}{b} = \frac{(1 + 1/Pr)}{4}$,

Pr = 普朗特准则 = $\frac{\nu}{a}$.

ν = 运动粘度,

a = 导温系数,

$K = \frac{x}{d_0} = 6.5$

γ = 射流扩张角, ($\text{tg}\gamma = 0.24$)

现已知下列数据 (对于高大工业厂房空调),

射流直径 $d = 0.05\text{m}$,

送风出口速度 $u_0 = 10\text{m/s}$,

周围环境温度 $T_u = 295\text{K}$,

送风温差 $\Delta\theta = 10\text{K}$,

求: 当射流水平距离为 10m 处的垂直距离 $y = ?$ (见图 2)

将已知数据分别代入上述 (1) ~ (4) 式, 可计算得 y 值如下:

公 式	$y(\text{m})$	平均值 $\bar{y}(\text{m})$	\bar{y} 的偏差 (%)
(1)	17.56	105	11.66
(2)	202		192
(3)	191		181
(4)	8.6		8.19

上述计算结果已使问题一目了然，即使对于我们所选择的圆形射流这一最简单的射流形式，其空间不确定性也是非常大的，对此，有许多原因可以详细分析。

尽管室内流动很复杂，但已对其进行的一系列研究，找出了这些复杂的计算方法，（计算步骤按图1中的路径5进行）。然而，这类计算都局限于相对简单的房间二维流动结构，且其几何形状也较简单，而所有计算均以斯托克斯微分方程为出发点，该方程概括了作为流动原因的各种力。在近期的研究中，紊流模型的应用使微分方程组扩大——增加了紊流能量传递方程和动能扩散方程。⑥⑦⑧

另一个使数学模型正确有效的条件是：要看到整个室内的流动是送风动量引起的直接流动的一部分，计算结果为等速曲线（如图3所示）。

对于各种气流系统的流场结构，直至目前还没有一个成功的数学模型，因为：

- 1) 模拟计算结果常常与实物原型差别很大；
- 2) 所选取的简单几何形状实际上找不到；
- 3) 计算过程只能用大型计算机完成。

因此，任意通风形式的空调房间，室内流动的模型试验仍是当今获得空间流场的常用手段，所以，必须采用图1中所示的研究途径2或3。这样一来，问题并未变简单，因为复杂的微分方程组导出复杂的无量纲准则数组，从而使模型试验结果的转换关系成为我们所关心的问题。下面将说明模型试验能否进行和在什么条件下进行？——这是目前对原型做一些更确切阐述的唯一方法。

2. 室内流动现象的描述

室内人停留区的空气运动强度，对于人体舒适感具有决定意义的重要性。流动中存在各力之比，它是使空气在一定范围内运动的原因。模型试验的结果、相似理论以及模拟基础的意义和说明，取决于室内情况和所选用的气流系统，所以，下面应先给气流系统下定义：

2.1 气流系统的定义

根据参考文献⑩，大体上对气流系统可作如下划分。

- 1) 切向式气流系统，
- 2) 扩散式气流系统，
- 3) 层流式（平推式）气流系统，
- 4) 微型气候气流系统，
- 5) 喷射式气流系统，

图4中给出上述1)~4)系统在使用上的主要形式，其定义如下：

①切向式气流系统，见图4a

“通过一个或几个风口以任一射流方式进入房间的送风，在沿其轨迹线流动的过程中，与房间的一个或几个内表面相切”。这种系统有三种典型方式分别为：

I，送风经一安装在窗子处的高压诱导器送入房间，见图4a/1。

II，送风通过天花板条缝风口以贴附流动的方式进入房间，见图4a/2。

Ⅲ, 送风以沿壁面径向辐射的方式, 把送风从天花板送入房间。

②扩散式气流系统, 见图 4 b。

送风口设于室内人停留区的上方, 送风通过风口以高速诱导射流的形式进入房间, 且要求送风出口具有合适的动量, 以保证射流空气到达人停留区时其速度已衰减(通过与室内空气混合)到使人不会有吹风感的程度。在人停留区, 十分一致的室内气流波动, 按照其大小和方向是可以控制的。

这就叫做“扩散”。

③层流式气流系统, 见图 4 c

“层流式气流系统可理解为一垂直的或水平的无对流和很少紊流的排挤流动, 流动所具有的惯性力远远大于热作用力或其它干扰力”。

④微型气候气流系统, 见图 4 d

一次风通常总是从稳压室送到空心椅子腿或桌子腿中, 通过一布置在桌子中或椅子后的风管诱导系统, 使室内空气(即二次风)与一次风混合, 诱导比 \dot{V} (一次) : \dot{V} (二次) 近似为 2 : 1。通常送风在出口处与垂直轴线之间保持 $-0^\circ \sim 20^\circ$ 的流动夹角, 送风出流方向必须这样确定, 应使坐着的人的头部不是在直接射流区, 而是在其诱导气流区。射流应具有动量必须按这样的原则确定: 使人停留区的气流方向在各种负荷情况下都是固定不变的。因此, 有如下结论:

1) 在用这种气流系统的房间中, 人停留区的气流是稳定的, 且空气循环产生的大漩涡不会影响人停留区;

2) 经过处理的送风将直接到达人的呼吸区(微型气候区);

3) 利用二次风的混合作用, 可以使坐着的人所在的区域内获得足够好的对流效果。

⑤喷射式气流系统

这种系统专门用于大厅的场合(即高大空间的通风与空调, 例如剧院、电影院), 它可被定义如下:

“喷射空气流动是这样一种系统, 其送风由喷管或类似的风口以旋转或非受限射流的方式送入室内, 单个风口的送风量大, 每平方米地板面积的风量大大地超过 $30\text{m}^3/\text{h}$ 的送风量, 且室内空气的混合是在整个大厅范围内进行。”

到此, 对整个室内的流动现象可以作出解释, 同时, 对各种气流系统的细节问题可详加论述。

2.2 室内空气流动的局部分析

尽管各种气流系统的定义不同, 但就一个房间的流动来说, 存在着共同的特性。除了流动强度的测量技术以外, 室内流动的可视化研究也是非常重要的, 这就是为什么必须采用适当的方法使室内流动成为可见图象的原因。由于气流显示与测定技术的结合, 使室内流动的主要特性可以得以说明如下:

1) 不存在两维或接近两维的室内流动, 每一室内流场都完全是三维流动。

原因: 图 5 所示为一由高压诱导器进行空调的房间, 如果通过平面 I 取一剖面, 其流动似乎是两维的, 只有取一个与流动相垂直的剖面(例如通过平面 II), 才能说明流动是三维

的。

2) 室内流动是不稳定的, 且以形成涡流为特征, 这些旋涡具有以下特性

a 大小不同 (大小不同的旋涡),

b 形状不同 (环形、椭圆形等),

c 持续时间不同,

d 在大多数情况下: 没有固定的地点。

3) 稳定的和非稳定的室内流动区, 其大多数是不固定的。

从上述 1) — 3) 点可看出为什么对这些流动系统作数学处理是非常困难的原因。但对其事实已有所认识:

4) 除非你在送风口的直接范围内测, 而且是测射流的起始段, 否则, 测不出等速曲线。

只有等速范围内, 才可以认为是二维流动, 如图 6.12 所示。

此外, 下述有关室内流动的物理特点, 可见参考资料①。

5) 在测点处, 室内空气速度的连续变化取决于流动强度和方向, 这种强紊流的极限频率将为 1 c/s 。

6) 测定中出现的离中值, 显然只能用统计学的观点进行解释, 测定结果是一正态分布, 因而可利用概率纸, 描绘出流动强度曲线图。

如果对室内流动做更精确的分析, 可进一步认识其一些独有的特点:

7) 气流系统有一些特性, 与室内空气流动测量中出现的离中值 (频率/波幅) 有关。

借助于图 6 和图 7, 对上述事实应解释如下:

在一个试验中, 对室内流动已做了测定, 用的是同一个房间, 其几何形状不变而变化三个送风口, 如图 8 所示, 已做了动量值大小相等条件下的对比试验, 此动量值与送风量和出风口速度有关。送风温差的变化范围在 $0 \sim 8 \text{ K}$ 之间。在离地面一固定高度处, 而且总是在同一测定点处, 利用高精度的风速计, 已经记录下了室内空气运动的强度。如果将三个实验在不同冷负荷情况下的运动强度进行比较, 则有下述论断:

8) 如果增大一个房间的冷负荷和送风温差, 则运动强度的算术平均值几乎不变, 但其波幅和频率将随着冷负荷的增加而增加。

9) 对于第一个试验—扩散式气流系统和第二个试验—切向式气流系统来说, 两个试验系统的波幅和频率是完全不同的。扩散式气流系统表现出波幅比较大, 而且频率也比较高。

10) 混合试验系统即第二个试验, 其波幅和频率几乎完全介于等温情况和最大冷负荷下的波幅与频率之间。

这些运动强度的不同, 很可能也不同程度地影响到人体的舒适感, 但还不能说明那个更好、那个更差。另一方面, 上述 1 ~ 10) 条特别是 8 ~ 10) 条说明对室内流动问题进行数学处理是何等困难, 因而, 我们可以说:

①由于上述提到的现象, 模型试验也有不足之处;

②缩小比例的试验必须给出非常详细的说明。

原因: 室内气流模型试验的目的是要对通风或空调房间的舒适环境做出论证和予演, 如果按相似理论进行试验, 可以更好地认识室内流动这一错综复杂的现象。下面就此加以论述。

3. 室内流动的物理解析

可以看到,按图1中路径3或路径5对室内流动作数学处理的可能性是非常小的。一种行得通的方法是走路径2即一因次分析—无因次数组—模型试验,参考文献①和②中叙述了无因次分析的详细步骤,这里只给出可能的无因次数组结果,据此,对室内流动可作如下描述:

$$\underbrace{Ne, Ar, Re, Re^*}_{\text{速度场}}, \underbrace{\frac{u_0}{nl}}_{\text{速度场}}, \underbrace{Pe, Pe^*}_{\text{温度场}}, \underbrace{Nu, (\Pi_n \dots)}_{\text{速度场和温度场的几何参数}} = 0 \quad (5)$$

式中符号: 速度场 温度场 速度场和温度场的几何参数

$$Ne = \frac{F_N}{\rho u^2 l^2} = \frac{\text{法向力}}{\text{惯性力}} = \text{牛顿特征准则}$$

$$Ar = \frac{g \beta \Delta \theta l}{u^2} = \frac{\text{热浮力}}{\text{惯性力}} = \text{阿基米德准则}$$

$$Re = \frac{u l}{\nu} = \frac{\text{惯性力}}{\text{粘性力}} = \text{雷诺准则}$$

$$Re^* = \frac{u l}{A_r / \rho} = \frac{\text{惯性力}}{\text{紊流粘性力}} = \text{紊流雷诺准则 (紊流影响数)}$$

$$\frac{u_0}{nl_0} = \frac{\text{出风口动量}}{\text{室内某一处动量}} = \text{动量变化准则数}$$

$$Pe = \frac{u l}{a} = \frac{\text{对流}}{\text{导热}} = \text{皮克勒特准则}$$

$$Pe^* = \frac{u l}{A_r / \rho} = \frac{\text{对流}}{\text{紊流导热}} = \text{紊流皮克勒特准则}$$

$$Nu = \frac{\alpha l}{\lambda} = \frac{\text{边界层导热}}{\text{静止流体导热}} = \text{努谢尔特征准则}$$

即使在房间几何结构很简单的情况下,几何准则数也是要考虑的。由方程(5),进行模型试验必须抓住主要的影响因素。

如果描述一物理过程的无因次数中同时有几个都是重要的,那么,模型试验只能按下述方法进行:

- a) 利用部分相似量
- b) 改变物性参数③

在由a)选取部分相似量的过程中,无因次数是根据对该物理过程起主要影响的已知无因次数组中选出的。例如,对于全部或主要是热浮力和惯性力起作用的流动过程,方程(5)可以简化为:

$$(Ar, \Pi_n) = 0 \quad (6)$$

可以知道，这一简化对于垂直层流（从下向上和从上向下的层流系统）是允许的，从而，模型试验可用同种流体进行，也可以在改变物性和（或）相应的基本参数的模型中进行。

此外，根据方程（5），对于等温流动，方程可得以大大简化：

$$(Ne, Re, Re^*, \frac{u_0}{n \cdot l}, \Pi_1, \dots) = 0 \quad (7)$$

在此，还可以就部分相似量提出下式表明模型条件：

$$(Re, Re^*, \frac{u_0}{n \cdot l}, \Pi_1) = 0 \quad (8)$$

从而，使得用其它流体做缩小比例的模型试验成为可能，⑬

在大多数室内流动问题中，可以忽略无因次数方程（5）中与描述流动特征无关的参数，但因按目前所具有的经验，无因次数都是同等重要的⑭，因此，我们必须说明：

缩小模型比例的室内流动试验—除了所提到的两种情况外—并不能导出对象温度和运动强度这类参数值的转换关系。

因此，比例为 1 : 1 的“不合理模型”是绝对需要的。

对于高度 3 ~ 4 m 的一般房间，采用比例为 1 : 1 的模型试验不会带来什么大问题，甚至对制作试验模型来说是比较经济的，但对于大空间（高大工业厂房、剧院、音乐厅等），比例为 1 : 1 的模型试验是不可能的，然而，从下述内容可知，在给定条件下，其它缩小比例的模型试验也是合理可行的，且存在用其它模拟方法的可能性。

4. 模型技术和室内流动试验

在研究被缩小模型的合理试验方法之前，需要对比例为 1 : 1 的模型试验作一说明。就目前来说，这类试验仍是非常昂贵的，例如建造一个设有窗帘、盆景等配备齐全的试验房间。对于有经验的实验工程师来说，在一个空房间里做试验，是比较容易得到结果的，但在有设备的房间做试验就不那么容易，而对没有经验的工程师来说，即使在比例为 1 : 1 的空房间做试验，也有一定的困难，而做有设备的房间的试验就更困难了。然而，我们说，前者的试验对设计工程师了解气流系统的特性更具有指导作用。一般来说，预先做室内流动试验这一点很重要—最好是在工程设计之前做，以避免因设计返工而造成浪费。

4.1 缩小比例的等温模型

进行等温试验，是关于室内流动或室内流动的一些局部问题（如自由射流工况）的试验，所以，在同种流体， $Re = \text{常数}$ 的情况下，不得不把模型内的速度取得很大，因为

$$u_M = u_H \frac{l_H}{l_M} \quad (\text{对 } Re = \text{常数}) \quad (9)$$

式中：u = 流动速度，

H = 原型，

M = 模型

因此，最好用改变物性的方法，原型中流动介质为空气，模型中用水作流动介质，这样，

模型内速度可按式确定:

$$u_M = u_H \frac{l_H}{l_M} \cdot \frac{\nu_M}{\nu_H} \quad (\text{Re} = \text{常数}) \quad (10)$$

式中: ν_M —水的运动粘滞系数,

$$\text{当 } t=20^\circ\text{C} \text{ 时, } \nu_M = 1.004 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

ν_H —空气的运动粘滞系数,

$$\text{当 } t=20^\circ\text{C} \text{ 时, } \nu_H = 15.11 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

从而, 几何尺寸比例具有较大的选择范围, 于是, 模型内速度为

$$u_M = 0.0665 u_H \frac{l_H}{l_M} \quad (11)$$

流动显示研究及教学演示, 选用以水作为流运介质的模型更好一些, 而且较易获得试验结果。有关这方面的知识和经验可查阅参考文献④。

- 自由射流的扩散范围
- 涡流的扩散范围
- 紊流混合强度
- 贴附效应
- 结构物对流场的影响

这些结果和概念对等温流动情况都可转换到以空气作为流动介质的原型上去。这些试验作为基础研究及教学是合适的, 但实际应用却受到限制。

如果主要考虑二维定向势流, 它是一种减压定向流动(如排风罩流动, 层流, 大空间自然通风等类似的流动), 于是, 可利用电路与流场的相似性, 表1列出了这两个势流场对应的相似关系, 下面将引用两个例子来说明这一方法的应用。

表1 势流和电路相似参数及相似方程的比较

	流 动 环 路	电 路
相似参数	压 差 ΔP 质量流量 \dot{m} 流动阻力 W	\cong 电 压 U \cong 电 流 J \cong 电 阻 R
正比关系	$\Delta P \sim \dot{m}$ $\Delta P = W \cdot \dot{m}$	$U \sim J$ $U = R \cdot J$
方 程	$\frac{\partial \dot{m}}{\partial V} = \frac{\partial^2 \phi_s}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \phi_s}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 \phi_s}{\partial Z^2}$	$\frac{\partial J}{\partial V} = \frac{\partial^2 \phi_e}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \phi_e}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 \phi_e}{\partial Z^2}$

V = 体积元

ϕ = 势函数

s = 流场

e = 电场

[例1] 图9为设有Kalite电解槽的生产车间示意图, 车间长约41.00m, 宽为13.00m,

中间高19.00m, 电解槽位于车间内距地面高为5.00m处。直到目前, 车间当然要通风。因次, 在电解槽上方和车间两侧设有通风口, 空气可从车间侧壁上的风口进来, 从屋顶上的风口排出, 由于在电解过程中有水银蒸汽散发, 所以, 自然通风不能满足要求, 现采用通风措施如图9所示。

由于结构上的原因, 排风只能非对称地设置在车间的一侧, 我们必须知道气流怎样才能贯穿到电解槽下方, 形成有害区。

问题的解答: 车间断面(剖面)可用导电纸模拟成一定比例下的几何相似, 对“压力”和“流线”的研究如图10所示。

需要测量速度的“线路”与压力线的测量相对应。图11示出了图9情况的流线, 可以明显地看到, 车间的右侧通风不良。因此, 我们对几种设有屋顶附加排风口和导风板的模型进行了试验, 其中的一个结果由图12为例加以说明, 可以看到, 这个系统能保证车间达到更好的通风效果。⑤

另一些例子及其过程的详细情况在参考文献⑥中叙述。如果要求精度不高的话, 那么, 利用这些简单而投资又不大的方法, 就可以获得令人满意的结果。关于例1中的速度值, 其精度大概是所研究的速度值的 $\pm 30\%$ 。

4.2 缩小比例的非等温模型试验

对许多大厅(大空间)情况的模型试验已经做过, 在最近的研究中, ⑦给出了复杂的数学模型函数。进一步应该考虑的是, 由于上述种种物理关系, 缩小比例的非等温模型试验不能给出对应于运动强度和温度的转换结果。然而, 阿基米德数为常数的非等温试验能够帮助我们获得关于所研究气流系统稳定性的模型知识⑧, 参考文献⑧中详细地叙述了这一过程, 并对各种模型进行了定量分析, 因此, 在送风口安装好后不需作任何调整, 一种模型就构成了一个系列, 从图13a可以看到大厅(大空间)的断面。

其空气流动规律可见图13b, 在比例为1:6.62和阿基米德数为常数的缩小模型中, 已做了关于室内气流稳定性的定性试验, 图13c给出了结果和数值, 如果这些结果转化到原型流场, 大部分误差是可以避免的。因此, 在这种情况下模型试验也是需要的, 对大厅(大空间)系统, 模型技术不能完全给出其空间确定性, 只有从下向上流动的气流系统能够精确地予测大厅(大空间)内的流场。

5. 结 论

室内气流流动往往是复杂的物理系统, 除了某些简单情况外, 想利用数学模型来获得足够的空间流场确定性受到很大限制, 而模型试验对于提高空间流场的确定性却是一种有用的方法。

非等温模型试验只给出了定性分析, 但这对于工程设计和施工是非常重要的。关于空内气流微型结构的影响以及由此引起的对舒适感的影响, 许多因素仍是未知的, 这方面知识的不足还有待完善。

符号说明:

A_g ——紊流变量 (热传导)
 A_0 ——紊流粘度
 a ——导温系数
 d ——射流直径
 F_N ——法向力
 g ——重力加速度
 $K = \frac{X_0}{d} = 6.5$
 H ——原型
 l ——特征长度
 M ——模型
 $m = \text{混合数} = \frac{d}{X_0} = 0.2$
 n ——室内换气次数
 T_u ——环境温度

u ——流速
 u_0 ——空气出风口流速
 X ——水平射流轨迹
 X_0 ——射流核心长度
 y ——垂直坐标
 α ——对流换热系数
 β ——体积膨胀系数
 δV ——体积元
 $\Delta\theta$ ——定性温差
 λ ——导热系数
 ν ——动力粘度
 Π_n ——几何变量
 ρ ——空气密度
 ϕ ——势函数

角标符号: e—电场, s—流场

无因次数:

$$Ar = \frac{g \cdot d \cdot \Delta\theta}{u_0^2 T_u} = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta\theta \cdot l}{u_0^2} = \frac{\text{热浮力}}{\text{惯性力}} = \text{阿基米德准则}$$

$$Ne = \frac{F_N}{\rho u_0^2 l^2} = \frac{\text{法向力}}{\text{惯性力}} = \text{牛顿准则}$$

$$Nu = \frac{a \cdot l}{\lambda} = \frac{\text{边界层导热性}}{\text{静止流体导热性}} = \text{努谢尔准则}$$

$$Pe = \frac{u_0 l}{a} = \frac{\text{对流}}{\text{导热}} = \text{皮克勒特准则}$$

$$Pe^* = \frac{u_0 l}{A_g / \rho} = \frac{\text{对流}}{\text{紊流导热}} = \text{紊流皮克勒特准则}$$

$$Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{\text{运动粘度}}{\text{导温系数}} = \text{普朗特准则}$$

$$Re = \frac{u l}{\nu} = \frac{\text{惯性力}}{\text{粘性力}} = \text{雷诺准则}$$

$$Re^* = \frac{u l}{A_g / \rho} = \frac{\text{惯性力}}{\text{紊流粘度}} = \text{紊流雷诺准则}$$

挪威 E. Rodahl 教授

评 语

- a. 雷诺数和阿基米德数显然是互相冲突的，然而，我想强调说明这样一点，就是当雷诺数超过一定数值时，流动与其无关，正如Steimle教授间接引述的那样。
- b. 利用模型（缩小比例）的主要目的是确定（估算）设计阶段的室内气象参数。目前，模拟技术还没有发展到这样的程度，使我们可以（例如）将模型中的速度转换为原型中的速度且具有足够的精度。然而，模型中的流动图谱对于设计者来说，有很大的定性价值。

利用水模型来研究有限空间中的空气流动也是可能的，由于在水模型中可使用不同的颜色，所以特别适合于作定性研究。

问 题

利用电模拟似乎很有价值。

- a. 此模拟结果是否可用其它方法验证？
- b. 用电模型模拟高大工业厂房中特有的“热天棚”其结果与水模拟或空气模拟的结果是否吻合？

参 考 文 献

1. Moog, W., Ähnlichkeitstheoretische, Überlegungen bei Raumströmungen, Klima+Kaltetechnik, Heft 11/78, S.409/412.
2. Regenscheit, B., Die Archimedes-Zahl, Kennzahl zur Beurteilung von Raumströmungen, Gesundheits-Ingenieur(1970), H.6, S.172/177.
3. Koestel, A., Paths of Horizontally Projected Heated on Chilled Air Jets. Heating, piping and Airconditioning, Jan.1955
4. Baturin, V., V., Ventilation, Pergamon Press Oxford/New York, Vol.B, 1972
5. Müllejan, H. Über die Ähnlichkeit der nicht-Isothermen Strömung und den Übergang in Räumen mit Strahlströmung, Forschungsberichte des Landes NRW, Nr.1656, 1966, Westdeutscher Verlag, Köln.
6. Nielsen, P.V., Berechnung der Luftbewegung in einem zwangsbelüfteten Raum, Gesundheitsingenieur 94 (1973) : 10, s.299/302.
7. Bogosloskij, M., W., and A. Melik Arakeljan, Berechnung der Luftausbreitung im Aufenthaltsbereich klimatisierter Räume, Stadt- und Bauwesen, 1977, Heft 11, S.325/327.
8. Hanel, B., and R.Scholz, Beitrag zur Modellierung zweidimensionaler, isothermer und nichtisothermer, turbulenter Strömungen in Räumen, Luft- und Kältetechnik 1979, 3 and 4.
9. Urbach, D., Modelluntersuchungen zur Strahlströmung, Fortschritt-Berichte der VDI-Zeitschriften, Reihe 6, Energietechnik und Wärmetechnik, Nr.49, 1978.
10. Moog, W., Dimensionierung von Luftführungssystemen, Fortschritt-Berichte der VDI-Zeitschriften, Reihe 6, Energietechnik und Wärmetechnik, Nr.49, 1978.
11. Finkelstein, W., Kitzner, and W.Moog, Messungen von Raumluftgeschwindigkeiten in der Klimatechnik, Heizung-Luftung-Haustechnik 24 (1973), Nr. 2.
12. Moog, W., and F.Sögel, Raumströmungsuntersuchungen für das Projekt Städtische Aachen, Heizung-Luftung-Haustechnik, 1976, Heft, 11 and 12.
13. Moog, W., Leitfaden der Ähnlichkeits- und Analogielehre für Ingenieure, hausinterner Bericht H.Krantz-Lufttechnik, Aachen, E-Nr.3002, 1974.
14. Regenscheit, B. Die Luftbewegung in klimatisierten Räumen, Kältetechnik, Bd.11, 1959, HL, S.3/11.
15. Geist, Chr., Untersuchungen von Strömungsvorgängen unter Anwendung elektrischer Analogie-Modelle, Ingenieurarbeit Fachhochschule Aachen, 1977.

附 图

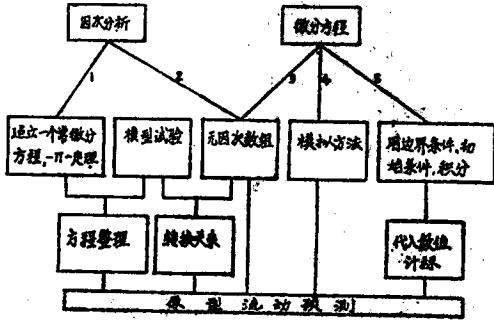


图 1 原型流动预测示意图

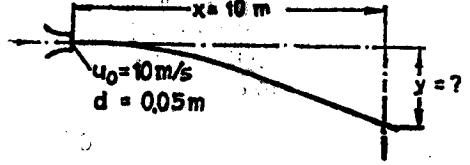


图 2 计算例题示意图

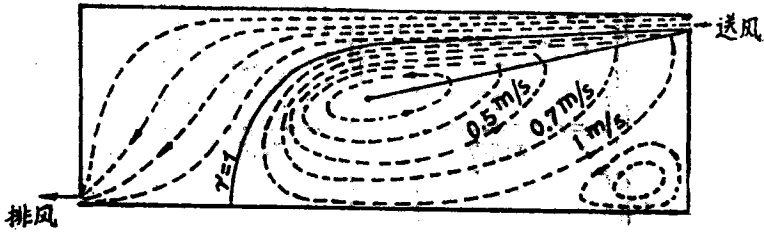
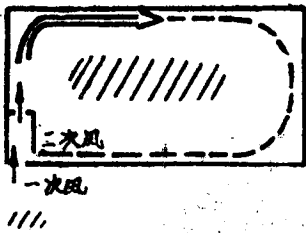
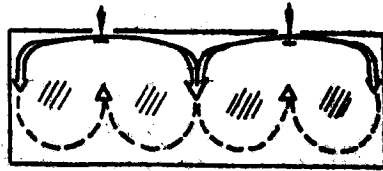


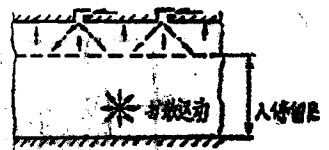
图 3 切向气流流线图



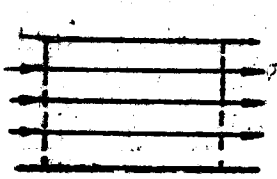
a/1 高压诱导器的切向气流系统



a/2 天花板条缝送风的切向气流系统



b 各风口交替以30—40°(线性排列)分别射流送风



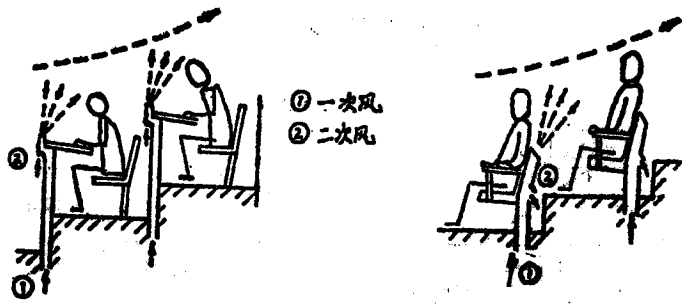
c/1 水平系统



c/2 从上至下



c/3 从下至上



d/1 d/2
用在阶梯教室和剧院的微型气流循环系统

- a—切向式气流系统 b—扩散式气流系统 c—层流式气流系统 d—微型气候气流系统

图4 气流系统示意图

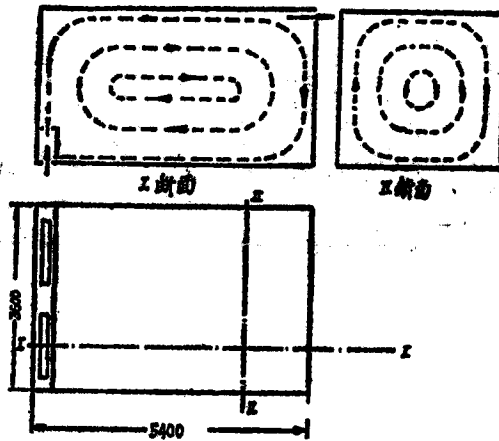


图5 室内流动三维性的说明

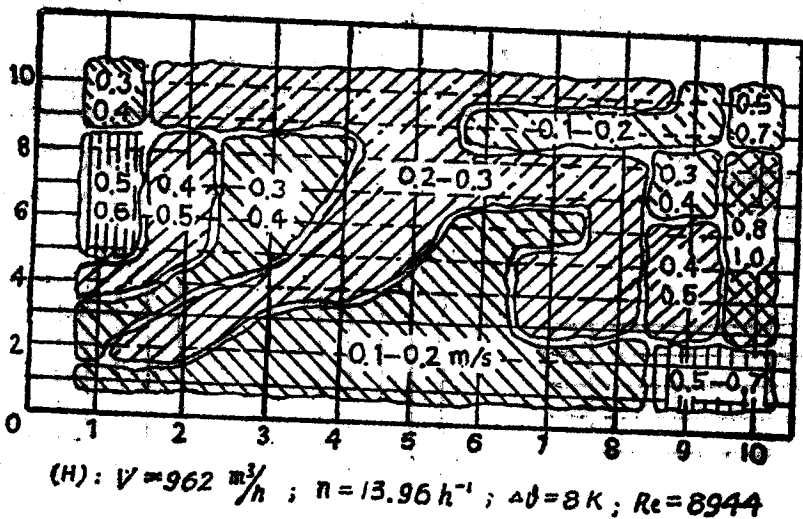


图6 切向气流系统室内气流运动的剖面图 (Re数对应于出风口风速)