

文章编号:1008-1542(2009)02-0099-04

# 不同间距的五圆柱体绕流的流体动力特性研究

吕树慧,王爱坤,咸立芬,赵玺蛟

(河北科技大学理学院,河北石家庄 050018)

**摘要:**利用边界元方法对不同间距的五圆柱体绕流问题进行研究——即边界元方法在水利方面的应用,得到了不同间距的五圆柱体绕流的速度场、内点的压力场、边界的压力分布以及各圆柱体所受到的黏性摩擦阻力。为了提高计算的精度,在边界积分离散化时采用线单元法,并用混合单元法对边界角点进行了处理。计算结果合理,处理问题方便、简捷,方法适应性强。

**关键词:**边界元方法;压力场;流场;黏性摩擦阻力

**中图分类号:**O635 **文献标识码:**A

## Study on dynamical properties for five different distance cylinders

LV Shu-hui, WANG Ai-kun, XIAN Li-fen, ZHAO Xi-jiao

(College of Sciences, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang Hebei 050018, China)

**Abstract:** The author used the boundary element method to research the five different distance cylinders circumfluence problems, that is, the application of boundary element method to in the hydraulic engineering. The velocity field, the pressure field and the cohesive friction resistance of every cylinder were calculated. To improve the precision of calculation, line element and mingle element methods were adopted. The result is reasonable and the method is convenient, simple and adaptable.

**Key words:** boundary element method; pressure field; flow field; cohesive friction resistance

在流体力学中,多体绕流问题占有十分重要的地位,它在化学工程、水利工程、生物工程中都有着广泛的应用。由于绕流场的位置和形状的复杂性,求解解析解是很困难的,甚至是不可能的,因此数值求解就成为十分重要的手段。处理这类问题,常常用到有限差分方法或有限元方法。这些方法各有自己的长处,但对一些问题,又分别表现出各自的弱点。例如:有限差分方法适应性较差,不便于统一处理非本质边界条件,有时因边界条件处理不当而影响计算的稳定性。有限元方法具有适应各类复杂边界条件的优点,但是一般需要输入的信息较大,计算繁杂。求解黏性流体问题的边界元方法<sup>[1]</sup>,适宜此类问题的研究。这种方法最显著的优点是降低维度,减少计算量,可以将内点和边界点的物理量分开计算,当边界上的物理量给出或求出后,便可分别求出任意内点的各物理量,而无需对区域内部进行总体求解。在计算时,个别点的错误并不会影响其他点的正确性<sup>[1]</sup>。在不可压缩黏性流体的计算中,特别对低雷诺数黏性流动,边界元方法具有很大的优越性。

对流体力学的多体绕流问题,文献[2]对两圆柱体内流的流场和压力场及绕流物受到的黏性摩擦阻力作了分析,文献[3]对三圆柱绕流的流场和压力场及绕流物受到的黏性摩擦阻力作了分析,文献[4]和文献[5]对2种柱体(圆柱体和椭圆柱体)的组合流场和压力场及绕流物受到的黏性摩擦阻力作了分析,文献[6]对三椭圆柱绕流的流场和压力场作了分析。以上都显示出用边界元方法处理此类问题具有很大的优越性。

笔者采用边界元方法首次对不同间距的五圆柱体绕流问题进行了数值求解,得到了速度场、内点的压力

收稿日期:2009-02-16;责任编辑:王士忠

基金项目:河北省科技厅科技攻关计划项目(05213549);河北科技大学青年基金资助项目(2006JC-17)

作者简介:吕树慧(1975-),女,山西天镇人,讲师,硕士研究生,主要从事计算物理方面的研究工作。

场及边界的压力分布,并且在上部和下部2个圆柱体中心之间距离 $s$ 分别等于6,8,10,12 m的情况下,对流场中不同位置的压强和外边界压力情况进行了比较,同时还计算出了各圆柱体所受到的黏性摩擦阻力。计算结果合理,处理问题方便、简捷,方法适应性强。

## 1 问题的数学描述

把流体看作不可压缩黏性流体,对不可压缩黏性流体控制方程用加权余量法进行处理,得到如下的等价积分方程<sup>[1]</sup>。

### 1.1 不可压缩黏性流体边界积分方程

$$c(X) v_k(X) = n_i(X_0) T_{ij} (W^k(X - X_0))_0 v_j(X_0) d_0 - n_i(X_0) T_{ij} (V(X_0))_0 w_j^k(X - X_0) d_0 + n_i(X_0) v_j(X_0) v_i(X_0) w_j^k(X - X_0) d_0 - v_i(X_0) \frac{\partial w_j^k(X - X_0)}{\partial x_{j0}} v_j(X_0) d_0, \quad (1)$$

$$c(X) p(X) = - n_i(X_0) q^i(X - X_0) T_{ij} (V(X_0))_0 d_0 + n_i(X_0) q^i(X - X_0) v_i(X_0) v_j(X_0) d_0 + \frac{2}{Re} n_i(X_0) \frac{\partial q^i(X - X_0)}{\partial x_{j0}} v_j(X_0) d_0 + v_i(X_0) \frac{\partial q^i(X - X_0)}{\partial x_{j0}} v_j(X_0) d_0, \quad (2)$$

当 $X = X_0$ 时, $c(X) = 1$ ,当 $X \rightarrow \infty$ 时, $c(X) = \frac{1}{2}$ 。 $T_{ij}$ 为与基本解 $W^k$ 对应的应力张量。

### 1.2 不可压缩黏性流体的边界积分方程的离散化形式

取常数单元,将边界 $\Gamma$ 分成 $N$ 个小段,将区域 $\Omega$ 分割成 $E$ 个小单元 $\Omega_r(r = 1, 2, \dots, E)$ ,设每个单元上变量值为常数,并取中点值,于是得到方程的离散化形式:

$$c v_k = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^2 L_{kij} n_i v_j - \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^2 M_{kj} t_j + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^2 M_{kij} v_i v_j n_i - \sum_{r=1}^E \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 N_{kij} v_{ie} v_{je}, \quad (3)$$

$$c p = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^2 R_j t_j + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^2 S_{ij} n_i v_j. \quad (4)$$

式中: $k=1, 2$ ;  $i = 1, \dots, N$ ;  $i, j$ 是2个坐标分量标号; $r$ 是边界上的第 $r$ 个单元; $i$ 为内部第 $i$ 个三角区域; $v_k$ 是第 $k$ 点的速度; $v_j$ 是第 $j$ 点的速度; $v_{ie}, v_{je}$ 是第 $e$ 块三角单元上的形心速度; $t_j$ 是第 $j$ 点的应力分量; $L_{kij}, M_{kj}, N_{kij}, R_j, S_{ij}$ 为纯几何系数。

## 2 计算结果分析

取外边界为矩形,长、宽各为20 m,10 m,以矩形的中心为坐标原点,并取 $x$ 轴为水平对称轴方向, $y$ 轴为垂直对称轴方向,外边界为速度边界,其速度为 $v_{0x} = 0, v_{0y} = 1 - y^2/h^2$  (m/s)。置于其中5个直径为2 m的圆柱体绕流场中,在低雷诺数的情况下,研究4种不同状态的绕流状况,即上部和下部2个圆柱体中心之间距离 $s$ 分别等于6,8,10,12 m等各种情况的流场和压力场,以及各个圆柱体所受到的黏性摩擦阻力。

### 2.1 流场

流场见图1、图2,绕流图与真实物理规律一致。在流场中,对于4种情况,当圆柱体上下对称的时候,流场也是上下对称的。

### 2.2 压力场

图3-图6为5个圆柱体在上部、下部2个圆柱体中心之间距离 $s$ 分别等于6,8,10,12 m时, $y$ 分别等于1.5,4.5,-1.5,-4.5 m位置时的压力分布比较。对于上述4种情况,由图3-图6可知,各压力分布总体趋势是一致的,各段面上总体趋势是由正压区过渡到负压区,由于圆柱体分布具有对称性, $y$ 分别等于1.5,-1.5 m的压力分布曲线重合在一起, $y$ 分别等于4.5,-4.5 m压力分布曲线重合在一起。对上述4种情况,都有4处压力相等的点。对于上述4种情况,压力相等点的位置也有所不同, $P$ 分别为8,6,5,3 Pa。可见上部和下部2个圆柱体中心之间距离越大,各位置压力相差越小。由于绕流物位置不同,不同情况的压力分布也相应发生了变化,从图3-图6中可以看出,上部和下部2个圆柱体中心之间距离越大,压力分布图

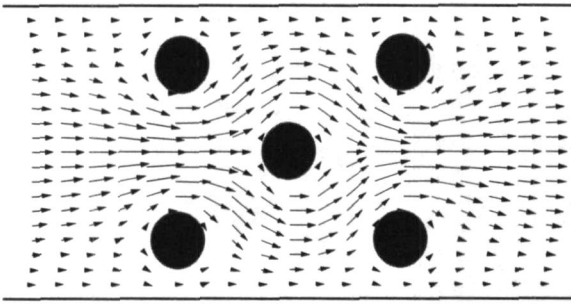


图 1 两圆柱体中心的距离为 8 m  
Fig. 1 Flow field as  $s=8$  m

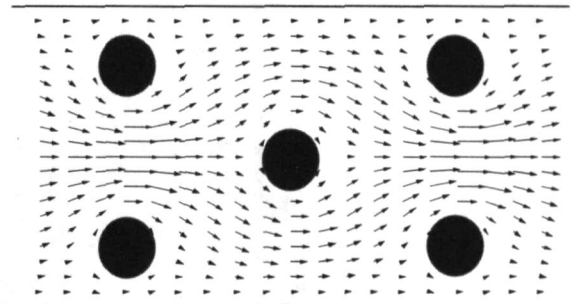


图 2 两圆柱体中心的距离为 12 m  
Fig. 2 Flow field as  $s=12$  m

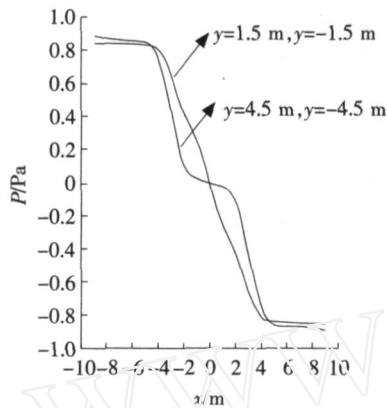


图 3 两圆柱体中心的距离为 6 m  
Fig. 3 Pressure field as  $s=6$  m

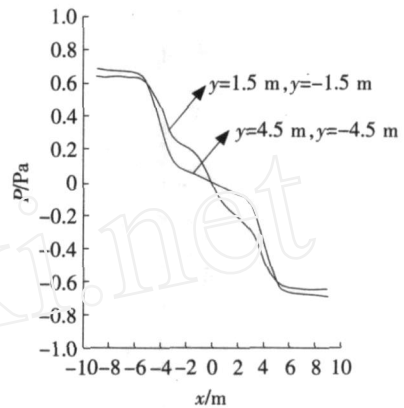


图 4 两圆柱体中心的距离为 8 m  
Fig. 4 Pressure field as  $s=8$  m

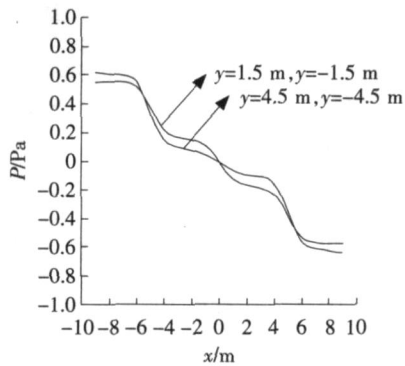


图 5 两圆柱体中心的距离为 10 m  
Fig. 5 Pressure field as  $s=10$  m

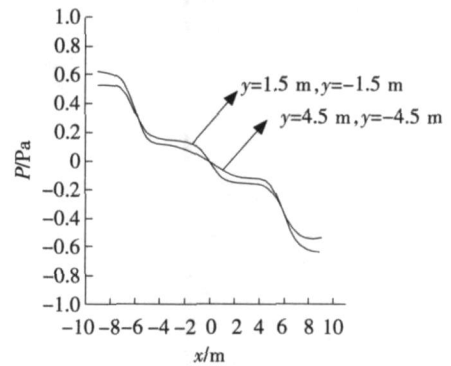


图 6 两圆柱体中心的距离为 12 m  
Fig. 6 Pressure field as  $s=12$  m

越密集。图 7 - 图 10 分别为绕流物位置不同时,纵坐标相同时的压力分布情况。图 7 - 图 10 的纵坐标分别为 1.5 m 和 4.5 m 及上下边界时的压力分布图的比较。由于绕流物的几何形状及分布状况的对称性,所以这个段面上的压力分布有明显的对称性,各压力分布总体趋势是一致的,各段面上总体趋势也是由正压区过渡到负压区。从图 7 - 图 10 可以看出,对于同一位置,上部和下部 2 个圆柱体中心之间距离越大,压力越小。压力分布这种合理性变化,正是由于绕流物在流场中的分布改变而引起的。

### 2.3 黏性摩擦阻力

黏性摩擦阻力情况见表 1。

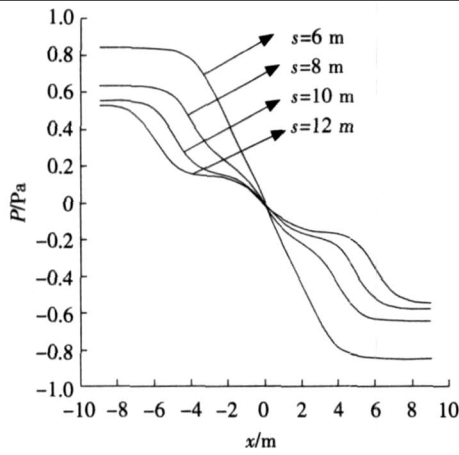


图7 流场中  $y=1.5\text{ m}$  处的压力场分布  
Fig. 7 Pressure field as  $y=1.5\text{ m}$

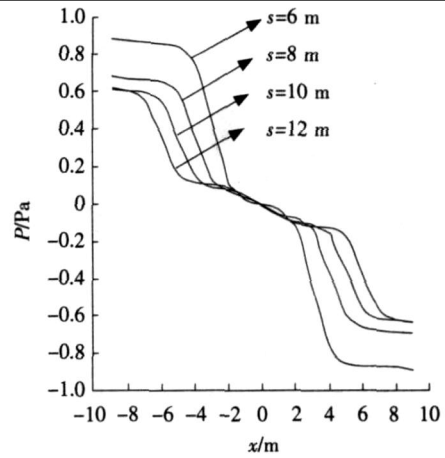


图8 流场中  $y=4.5\text{ m}$  处的压力场分布  
Fig. 8 Pressure field as  $y=4.5\text{ m}$

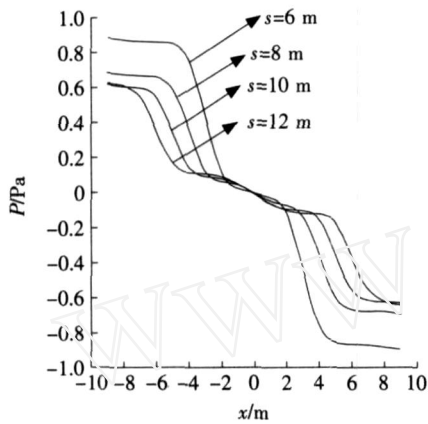


图9 上边界  $y=5\text{ m}$  处的压力场分布  
Fig. 9 Pressure field as  $y=5\text{ m}$

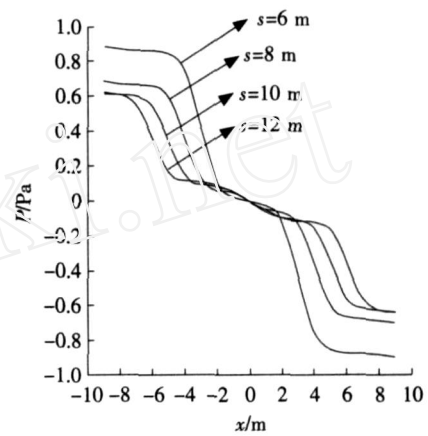


图10 下边界  $y=-5\text{ m}$  处的压力场分布  
Fig. 10 Pressure field as  $y=-5\text{ m}$

表1 黏性摩擦阻力

Tab. 1 Cohesive friction resistance

N

项 目	上下两圆柱水平中心之间的距离			
	6 m	8 m	10 m	12 m
中心圆柱体	- 0.188 130	- 0.153 761	0.109 284	0.201 341
右上圆柱体	0.077 893	- 0.074 730	- 0.220 767	- 0.450 320
左上圆柱体	0.630 175	0.065 586	- 0.002 207	- 0.120 056
左下圆柱体	0.651 143	0.077 275	- 0.055 429	- 0.116 688
右下圆柱体	0.065 649	- 0.014 550	- 0.447 094	- 0.689 140

由表1可知,中心圆柱体上所受到的黏性摩擦阻力随上部和下部2个圆柱体中心之间距离的增大由方向向左而逐渐变为方向向右(见图1,图2所示)。其余4个圆柱体所受到的黏性摩擦阻力随上部和下部2个圆柱体中心之间距离的增大由方向向右而逐渐变为方向向左,并且逐渐增大,呈现出明显的规律性。

### 3 结 语

在多连通区域如此复杂的情况下,计算出不同间距五圆柱体绕流的速度场、内点的压力场、边界的压力分布以及各圆柱体所受到的黏性摩擦阻力,显示了用边界元方法处理此类问题的优越性。在实际应用中(如桥墩设计、生物工程)具有很好的参考价值。

(下转第108页)

### 3 讨论

1) 在本标准中增加主要有效成分酸枣仁皂苷 A 和黄酮类物质的鉴别,以快速鉴别酸枣仁药材的真伪。

2) 总灰分、酸不溶性灰分、浸出物和重金属的检查,能够反映中药材受生长环境和污染等因素的影响情况。根据考察结果,建议在质量标准制订中增加如下检查项: $w$ (总灰分) 10.0%, $w$ (酸不溶性灰分) 2.0%,冷浸法  $w$ (浸出物) 8.0%,热浸法  $w$ (浸出物) 22.0%, $w$ (重金属)  $1 \times 10^{-6}$ 。

3) 酸枣仁药材的浸膏提取实验表明,影响提取效果的主要因素有提取温度、提取时间、提取剂浓度及提取剂用量。以酸枣仁皂苷 A 的含量为考察指标,采用  $L_9(3^4)$  正交试验,对酸枣仁皂苷的提取工艺进行优化,正交试验的结果显示最优工艺条件是提取时间为 3 h,提取剂质量分数为 75%,提取剂用量为 80 mL,提取温度为 90 。

4) 在标准中增加 HPLC 测定酸枣仁的主要有效成分酸枣仁皂苷 A 含量的方法,可以更好地控制酸枣仁药材的质量,也符合中国中药标准现代化的要求。

5) 在酸枣仁指纹图谱中,以 6 号峰为参照物峰(S),计算酸枣仁指纹图谱的各共有峰的相对保留时间的  $RSD < 3.0\%$ ,符合指纹图谱的技术要求。在共有峰中,1 号峰、9 号峰、10 号峰的相对峰面积都超过总峰面积的 10%。其中 10 号峰的相对峰面积占总峰面积的 38%以上,其面积差值未超过 20%;1 号峰的相对峰面积占总峰面积的 27%以上,其面积差值未超过 20%;9 号峰相对峰面积占总峰面积的 18%以上,其面积差值未超过 25%,均符合指纹图谱的技术要求。

6) 采用“中药指纹图谱相似度评价软件”对不同批次、不同产地酸枣仁药材的评价结果表明,编号为 1, 2, 3, 4, 5, 10 的河北产酸枣仁药材具有良好的相关性,相似度均在 0.910 以上。其他产地的酸枣仁药材相似度差别较大,表明产地、气候和生态环境等可能影响到酸枣仁药材的成分,这也为研究生态环境对中药材成分的影响提供了理论参考。

7) 本研究旨在通过对酸枣仁药材的质量研究,建立有效控制酸枣仁药材质量的理化检验标准,为酸枣仁药材的标准化研究提供科学依据。经实验,本标准能有效控制酸枣仁药材的内在质量。

#### 参考文献:

- [1] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典(一部)[M]. 北京:化学工业出版社,2005.
- [2] 谷建军. 酸枣仁药性考[J]. 中医研究,2005,18(5):59-60.
- [3] 郑 晔,钱苏瑜,游自立. 酸枣仁药理作用研究进展[J]. 四川生理科学杂志,2006,28(1):35-37.
- [4] 任风芝,栾新慧,赵毅民. 酸枣仁药理作用及其化学成分的研究进展[J]. 基层中药杂志,2001,15(1):46-47.
- [5] 郑玉胜,刘永刚,张宏桂,等. 卷柏药材的 HPLC 指纹图谱的研究[J]. 北京中医药大学学报,2006,29(12):851-853.
- [6] 张志斐,袁志芳,张兰桐,等. 河北道地药材酸枣仁 HPLC-ELSD 指纹图谱研究[J]. 中草药,2007,37(8):1247-1250.

(上接第 102 页)

#### 参考文献:

- [1] 杨德全,赵忠生. 边界单元法的原理方法及应用[M]. 北京:北京理工大学出版社,2002.
- [2] 杨德全,吕树慧. 对绕两柱体内流问题的流场和压力场的研究[J]. 内蒙古民族师院学报,2001,16(4):347-352.
- [3] YANG De-qian, LV Shu-hui. Bounday element method for solving flow field and pressure field around multi-cylinder[J]. Boundary Element Techniques,2002,20:95-100.
- [4] 吕树慧,赵玺蛟. 对三柱体绕流流场和压力场的研究[J]. 河北科技大学学报,2006,27(1):22-24.
- [5] 赵玺蛟,吕树慧,咸立芬. 三柱体绕流的数值分析[J]. 河北科技大学学报,2005,26(增刊):23-24.
- [6] 李春芝,张国华,杨德全. 三圆柱体绕流场和压力场的边界元分析[J]. 内蒙古民族大学学报,2003,18(1):1-6.

# 开拓进取 不断创新