

研究论文

旋流腔结构对涡流二极管性能及 流动影响的数值模拟

尹俊连, 王循明, 焦磊, 王乐勤
(浙江大学化工机械研究所, 浙江 杭州 310027)

摘要: 为了探讨旋流腔结构对涡流二极管正向流动和反向流动的影响, 分别采用 RNG κ - ϵ 湍流模型和 κ - ϵ 湍流模型进行了数值模拟, 模拟结果与实验数据吻合良好。在此基础上, 计算分析了旋流腔结构型式及几何尺寸对正向流动和反向流动的影响, 并得到了旋流腔的优化结构。结果表明: 渐缩型旋流腔反向阻力系数最大; 薄板型正向阻力系数最小; 渐缩型综合性能最佳, 可以在原型基础上提高 30%。渐缩型旋流腔中心高度应根据等流速设计原则, 其最佳值略小于轴向出口管直径的 1/4。

关键词: 涡流二极管; 旋流腔; 阻力系数; 优化

中图分类号: TQ 056.2

文献标识码: A

文章编号: 0438-1157 (2009) 06-0000-0

Numerical simulation of effect of swirling chamber structure on performance and flow in vortex diode

YIN Junlian, WANG Xunming, JIAO Lei, WANG Leqin

(Institute of Chemical Machinery, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang, China)

Abstract: Numerical simulations employing RNG κ - ϵ turbulent model and κ - ϵ turbulent model respectively were made to investigate the effect of swirling chamber structure on the forward flow and reverse flow. Numerical results were in good agreement with experimental data. Based on the numerical simulation, computations with different structures and geometrical parameters were performed for both flow directions. The optimal structure was obtained. The results showed that the converging chamber had the largest resistance for the reverse flow, the thin cylindrical chamber had the smallest resistance for the forward flow. As to the overall performance, the converging one is the best, with an increase of 30%. The height of the chamber center should be designed following the equivalent velocity principle, and the best value was slightly less than 1/4 of the diameter of the axial pipe.

Key words: vortex diode; swirling chamber; resistance coefficient; optimization

引 言

涡流二极管作为流体控制中的一个重要元件, 在核工业中有着广泛的应用, 其性能直接决定着系

统运行的稳定性和成本。其基本原理如图 1 所示, 流体按图 1 (a) 正向流动时, 流动阻力系数很小, 而按图 1 (b) 反向流动时, 由于切向速度的存在流场会形成旋涡, 阻力系数很大。其性能的评价指

2008-12-03 收到初稿, 2009-02-27 收到修改稿。

联系人: 焦磊。第一作者: 尹俊连 (1984-), 男, 博士研究生。

基金项目: 中国博士后科学基金项目 (20080431323)。

Received date: 2008-12-03.

Corresponding author: JIAO Lei. E-mail: hj_wlq4@zju.edu.cn

Foundation item: supported by the Postdoctor Science Foundation of China (20080431323).

标^[1]为： $D=Eu_r/Eu_t$ 。为了寻找最优的结构设计，国内外进行了大量的结构优化工作，较为成熟的有 Zobel^[2]、Catherine^[3] 和 SIDO 类型。涡流二极管所有的结构设计中均包括轴向出口管、旋流腔和切向进口管 3 部分。由于大多数的设计是基于经验的^[4-5]，各部分对其总体性能的影响规律还不清楚。Kulkarni 等^[6]对轴向出口管和切向进口管进行了实验和数值方面的研究，但是关于旋流腔结构型式及参数的研究目前还尚未有报道。本文在实验研究的基础上结合数值模拟方法对旋流腔结构及参数进行了研究，主要考察了不同结构型式的旋流腔及其几何参数对总体性能的影响规律，目的在于寻找旋流腔结构的最佳设计参数。

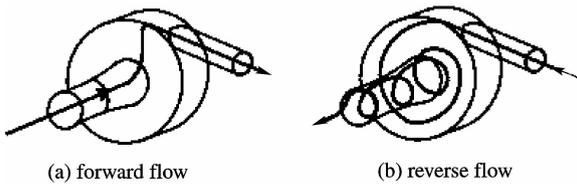


图 1 涡流二极管原理

Fig. 1 Principle of flow in vortex diode

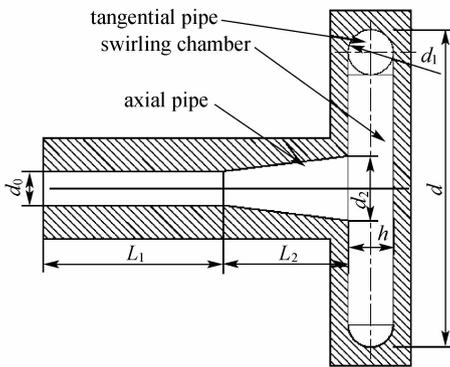


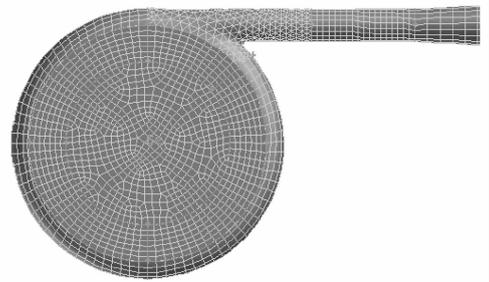
图 2 涡流二极管几何模型

Fig. 2 Geometry model of vortex diode

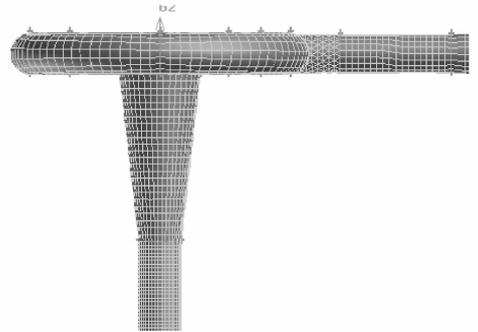
1 数值计算及验证

涡流二极管由切向进口管、旋流腔和轴向出口管组成(图 2)。本文的前处理在 Gambit 上进行，采用分区的混合网格，旋流腔与切向出口管连接处为四面体单元，其余部分为六面体单元。网格生成如图 3 所示。

如图 1 所示，流体的反向流动为复杂的非轴对称的涡旋运动，具有较强的各向异性和不稳定性^[7]，属于复杂剪切流的一种。在旋流问题的湍流模型选择中有 RNG $\kappa-\epsilon$ 湍流模型和 RSM 模型，



(a) view of X-Y plane



(b) view of Y-Z plane

图 3 计算网格

Fig. 3 Grid generation

RNG $\kappa-\epsilon$ 湍流模型在 $\kappa-\epsilon$ 模型基础上进行了有旋修正，RSM 模型直接对各个雷诺应力项进行模化，二者都适合于旋流问题，但是考虑到雷诺应力模型的计算耗时较多，本文选择 RNG $\kappa-\epsilon$ 湍流模型，近壁采用非平衡壁面函数，其控制方程见文献[8]。根据涡流二极管反向流动的实际情况做以下合理假设：①工作介质为液态水；②定常流动；③不考虑传热的影响。

流体的正向流动类似于通过两个 90° 的弯头，为各向同性的湍流运动，本文采用标准 $\kappa-\epsilon$ 湍流模型。

边界条件设置为：两种流动条件下进口均设置为速度进口边界，其值由实验中流量计测量结果计算得出；出口均设置为压力出口，由压力传感器读数得出；标准壁面。

方程的求解在 FLUENT6.2 上进行，计算过程中由于出口处有较大的回流出现，收敛难度较大。本文根据旋流的衰减特性^[9]，建模中轴向出口管加长 400 mm，从而避开回流区。此外，压力和速度耦合采用 SIMPLE^[10] 算法，压力项的离散采用 PRESTO 格式，动量、湍动能和耗散率各项均采用二阶迎风格式。

为了验证模型及数值方法的准确性，本文进行了相应的实验，并与计算结果进行了对比（图 4）。从图中可以看出，在实验的 Reynolds 数 (Re) 范围内，反向流动的模拟较为准确，误差在 2% 以内，而正向流动的误差在 10% 以内。总体而言，两种流动的计算误差都在允许的范围之内，可以据此为后续的优化计算打下基础。

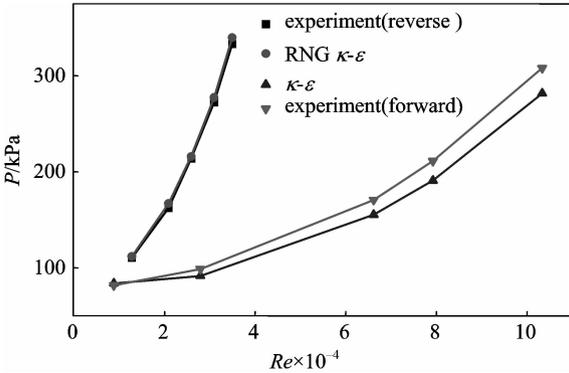


图 4 模拟结果和实验数据的对比

Fig. 4 Comparison of simulated results and experimental data

2 计算结果与分析

2.1 旋流腔结构型的优化

在传统的涡流二极管的设计中，旋流腔的高度与进口管的直径相同（图 2）。但是在正向流动的计算过程中发现旋流腔内存在着较大的二次旋涡，这些旋涡的存在势必造成较大的流动损失，因此按照其流型设计了“薄板”型的旋流腔；此外，在流动控制元件的发展中，锥管结构是最早使用^[11]的，据此，本文还对“渐缩”型的旋流腔（锥角为 3°）进行了计算。3 种结构如图 5 所示，其中薄板型的高度与渐缩型最小高度相等。计算结果如图 6~图 8 所示。从中可以看出，反向流动时，渐缩型的效果最好；正向流动时，薄板型的效果最好；总体效果而言，渐缩型的最好。

反向流动时，整个流体处在一个离心力场中，整个流场由自由涡和强制涡组成，能量的损失主要是由强制涡引起的。速度的切向分量越大，强制涡的强度随之越大，压降也就越大^[12]。从图 9 中可以看出，在强制涡区，渐缩型的切向速度最大，薄板型次之，原型最小。从原型到渐缩型的转变过程中，在相同 Reynolds 数下，由于空间的缩小，切向速度向轴向速度的转换变难，因此压降最大，而薄板型由于在腔体外围与上下盖板的过渡处阻碍了

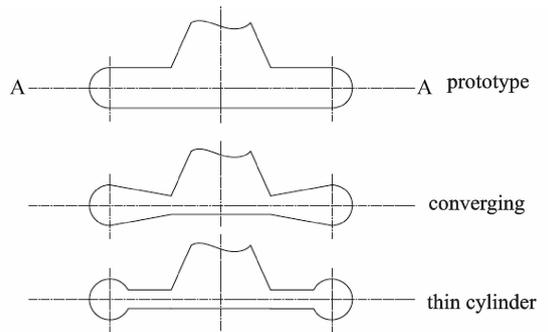


图 5 不同旋流腔的结构

Fig. 5 Structural sketch of different swirling chambers

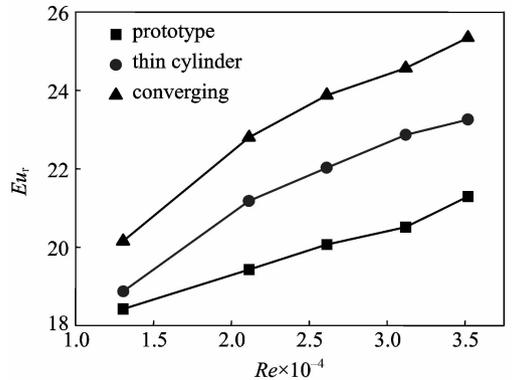


图 6 反向阻力系数随 Reynolds 数的变化

Fig. 6 Plot Eu_r vs Re for reverse flow

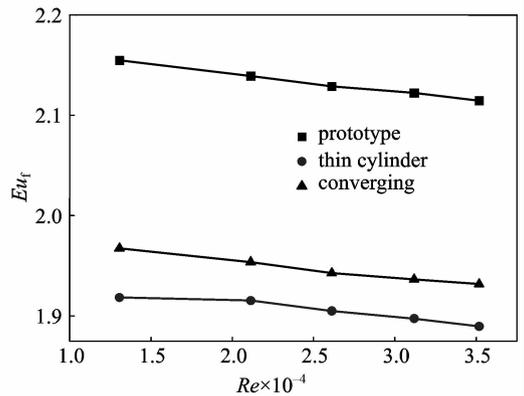


图 7 正向阻力系数随 Reynolds 数的变化

Fig. 7 Plot Eu_f vs Re for forward flow

切向速度的发展，从而压降略小。

正向流动时，3 种结构的半截面的速度矢量分布如图 10 所示。由于流体冲击的作用和较大的腔体空间，原型的内部流场中存在较大的二次旋涡 [图 10 (a)]。当腔体厚度减薄后，随着流动空间的减小，腔体中间没有旋涡的生成，而只在腔体外围形成了局部二次流，因此流动损失减小 [图 10 (b)]，而渐缩型内的流动则介于二者之间。但是

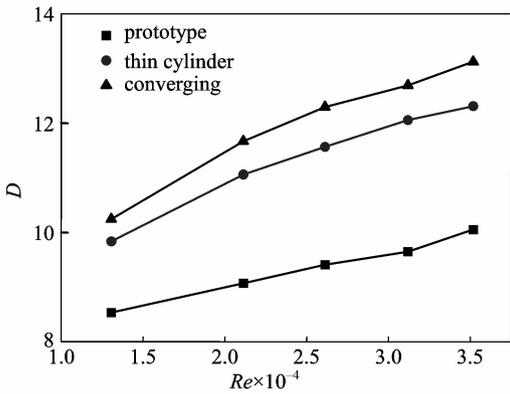


图 8 D 随 Reynolds 数的变化

Fig. 8 Plot diodicity value vs Re for both flow conditions

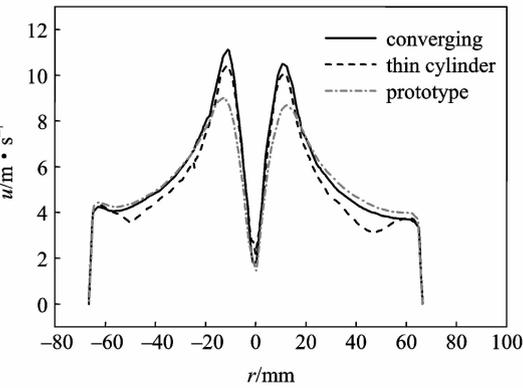


图 9 旋流腔 A-A 截面切向速度沿半径的变化

Fig. 9 Tangential velocity profiles over chamber cross-section A—A

从总体效果综合衡量，渐缩型旋流腔比原型提高约 30%。

2.2 渐缩型旋流腔高度的优化

在上述渐缩型旋流腔的设计中，根据正向流动时流体从轴向出口管过渡到旋流腔内不出现较大的旋涡，有

$$\pi d_2^2 / 4 = \pi d_1 h \tag{1}$$

由于旋流腔的切向出口管只有一个，流动是非对称的，在靠近切向出口管的范围内，流体径向速度较大。考虑此不均匀性的影响，在 $h/d_2 = 0.25$ 附近分别取 0.20、0.24 和 0.30 进行了对比计算(图 11)。从图中可以看出， $h/d_2 = 0.24$ 时效果最佳。当 h/d_2 较大时，空间的增大在正向流动时引起较大的旋涡，使正向阻力增大；同时反向流动时强制涡的强度减弱，使反向阻力减小。当 h/d_2 较小时，反向阻力系数可以得到提高，但是正向流动会存在流体加速引起的流动损失，从而使总体性能下降。因此在腔体的设计中 h/d_2 存在一个最优值，

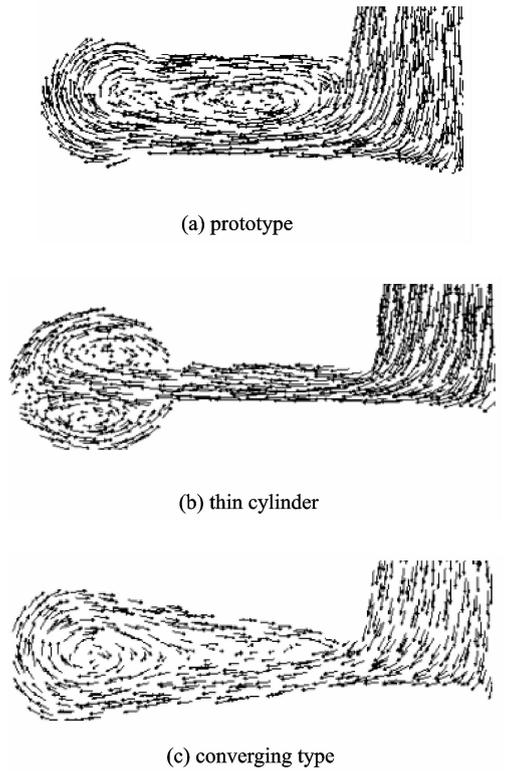


图 10 3 种腔体中正向流动的速度矢量图

Fig. 10 Velocity vectors for forward flow in three chambers

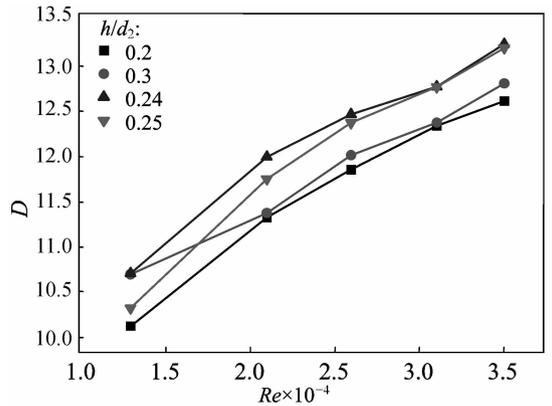


图 11 不同高度旋流腔的 D 值比较

Fig. 11 Comparison of diodicity values for different chambers with different heights

其值略小于轴向出口管直径的 1/4。

3 结 论

本文通过数值模拟的方法对影响涡流二极管正向及反向流动阻力特性的旋流腔结构进行了优化研究。结果表明：渐缩型旋流腔的反向阻力系数最大；薄板型的正向阻力系数最小；渐缩型的总体性能比原型提高约 30%。在渐缩型的旋流腔设计中，

存在旋流腔高度和轴向出口管直径的最佳比值, 其值略小于 0.25。由于本文采用的二极管结构比较粗糙, 轴向出口管和切向进口管与腔体的连接处没有进行细致的设计, 总体性能较差, 因此还需要进一步的优化工作。

符号说明

D ——反向阻力系数与正向阻力系数之比

d, q_2 ——分别为旋流腔直径轴向出口管与旋流腔连接处直径, mm

Eu_l, Eu_r ——分别为正向阻力系数、反向阻力系数

h ——旋流腔高度, mm

p ——压力, kPa

Re ——Reynolds 数

r ——旋流腔的半径, mm

u ——切向速度, $m \cdot s^{-1}$

References

- [1] Guo Yanhua (郭彦华), Jing Shan (景山), Wu Qiulin (吴秋林), Chen Jing (陈靖), Song Chongli (宋崇立). Performance of vortex diode pump. *J. Chem. Eng. Chinese Univ.* (高校化学工程学报), 2004, **55** (10): 1625-1630
- [2] Zobel R. Experiments on a hydraulic elbow. *Mitt. Hydraul. Inst. Munich.*, 1930, **8** (19): 1-47
- [3] Syred N, Grant J, Sidhu B S. A thin chamber vortex diode: US, 4, 112, 977. 1978-9-12
- [4] Wada T, Takagi M, Shimizu A. Study on a fluidic pump with vortex diodes//*Fluid Control and Measurement*. Tokyo: Pergamon Press, 1986: 421-426
- [5] Hideki Yoshitomi, Tsutomu Wada, *et al.* The effects of design parameters on vortex diode pump performance//*Japanese Mechanical Society Essays*. Japan: Japanese Mechanical Society, 1989: 3434-3439
- [6] Kulkarni A A, Ranade V V, Rajeev R, *et al.* CFD simulation of flow in vortex diodes. *AIChE Journal*, 2008, **54** (5): 1139-1152
- [7] Gallaire F, Chomaz J M. Instability mechanisms in swirling flows. *Physics of Fluids*, 2003, **15** (9): 2622-2639
- [8] Wang Fujun (王福军). Analysis Computational Fluid Dynamics—Theory and Application of CFD Software (计算流体动力学分析——CFD 软件原理与应用). Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 124-125
- [9] Kreith F, Sonju O K. The decay of a turbulent swirl in a pipe. *J. Fluid Mech.*, 1965, **22** (2): 257-271
- [10] Tao Wenquan (陶文铨). Numerical Heat Transfer (数值传热学). Xi'an (西安): Xi'an Jiaotong University Press, 2005: 203-211
- [11] Priestman G H, Tippetts J R. Development and potential of power fluidics for process flow control. *Chem. Eng. Res. Des.*, 1984, **62**: 67-80
- [12] Yang Z Y, Priestman G H. Internal flow modelling of vortex throttles. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 1991, **205** (C6): 405-413