

Numerical Simulation and Study of a New Type Vortex Shedder

Zhaoxiang Tian, Xinglin Zhong, Wenkang Zhang, Xuefeng Yang*

School of Chemical Engineering, Sichuan University, Chengdu Sichuan
Email: *yangbras@scu.edu.cn

Received: Jan. 15th, 2018; accepted: Jan. 23rd, 2018; published: Jan. 30th, 2018

Abstract

Vortex shedder is an important component of vortex flowmeter. Its shape has great influence on the measurement range, measurement precision and vortex intensity of vortex flowmeter. In this paper, the flow field of a new type vortex shedder is numerically simulated by Fluent. The new vortex shedder is compared with a commonly used trapezoidal vortex shedder on the stability of Strouhal number (stability of vortex-shedding), vortex strength and irrecoverable pressure loss. The results show that the Strouhal number of the new type vortex shedder can maintain a constant within the larger Reynolds number range, and the stability of Strouhal number is better than that of the trapezoidal vortex shedder. The vortex intensity generated by the new type vortex shedder is much greater than that of the trapezoidal vortex shedder. Within the Reynolds number $Re < 199040$, the irrecoverable pressure loss of the two vortex shedder is almost the same.

Keywords

New Type Vortex Shedder, Vortex Intensity, Stability of Vortex-Shedding, Numerical Simulation, Irrecoverable Pressure Loss

一种新型旋涡发生体的数值模拟与研究

田昭翔, 钟兴林, 张文康, 杨雪峰*

四川大学化学工程学院, 四川 成都
Email: *yangbras@scu.edu.cn

收稿日期: 2018年1月15日; 录用日期: 2018年1月23日; 发布日期: 2018年1月30日

摘要

旋涡发生体是涡街流量计的一个重要构件。它的形状对于涡街流量计的测量范围、测量精度、旋涡脱落

*通讯作者。

文章引用: 田昭翔, 钟兴林, 张文康, 杨雪峰. 一种新型旋涡发生体的数值模拟与研究[J]. 化学工程与技术, 2018, 8(1): 41-49. DOI: 10.12677/hjct.2018.81007

稳定性以及旋涡强度都有很大的影响。本文利用Fluent对设计的一种新型旋涡发生体的流场进行了数值模拟。将该新型旋涡发生体与一种常用的梯形旋涡发生体进行了斯特劳哈尔数稳定性(旋涡脱落稳定性),旋涡强度以及压力损失方面的比较与研究。结果表明该新型旋涡发生体的斯特劳哈尔数在较大的雷诺数范围内都能保持一个常数,斯特劳哈尔数的稳定性也优于梯形旋涡发生体,所产生的旋涡强度比梯形旋涡发生体所产生的旋涡强度大得多。在雷诺数 $Re < 199040$ 的范围以内,两种旋涡发生体的压力损失相差很小。

关键词

新型旋涡发生体, 旋涡强度, 旋涡脱落稳定性, 数值模拟, 压力损失

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

涡街流量计在工业生产中应用广泛,可用于一定流速范围内液体、气体以及蒸汽的测量,也可用于对高腐蚀性的酸,氯化物,盐酸,氢氧化钠,工业废水的测量。

与其它传统的压力流量计相比,涡街流量计具有很多优点:1) 对被测流体的密度和黏度等物性不敏感,同一仪表可用于多种介质的测量;2) 工作温度和压力范围较大;3) 测量精度和稳定性较高。

旋涡发生体是构成涡街流量计的重要部分。旋涡的强度、斯特劳哈尔数稳定性、测量范围、测量精度等都是由旋涡发生体的形状、阻塞比决定的。好的旋涡发生体应该能在较大的雷诺数范围内产生稳定且高强度的涡街。所以旋涡发生体形状的优化研究,对提高涡街流量计的性能有重要的意义。

对旋涡发生体的早期研究一般都是基于实验的方法。Achenbach [1]对圆柱体旋涡发生体进行了实验研究,发现旋涡分离点随着雷诺数的变化并不固定,这导致了斯特劳哈尔数稳定性很差,所以圆柱体不是良好的旋涡发生体。Miau *et al.* [2]研究了T形旋涡发生体,发现后部的延伸板在稳定旋涡脱落方面有重要的作用,并能够提高斯特劳哈尔数稳定性。研究发现延伸板的最佳长度为旋涡发生体宽度的1.56~2.0倍。Coulthard *et al.* [3]对两个T形和一个梯形旋涡发生体的旋涡脱落实验研究表明,T形旋涡发生体的斯特劳哈尔数稳定性更好。Igarashi [4]以空气为介质,在雷诺数 $Re_D = 1.9 \times 10^4 \sim 2.5 \times 10^5$ 范围内实验研究了三种不同的钝体(梯形、带狭缝圆柱、三角半圆形)。该研究最重要的成果就是发现狭缝的存在可以促进旋涡的发生与脱落,并且认为在相同尺寸和雷诺数下带狭缝圆柱发生体的压力损失系数比常规的梯形旋涡发生体小50%。对于阻塞比为0.2~0.267的带狭缝圆柱,狭缝宽度与圆柱直径之比为0.1的时候为最佳。

随着数值计算和流体力学软件的发展,对旋涡发生体后面旋涡的动力学特征已能进行定量和定性的研究,并且能够获得流场的详细信息。Matsunaga *et al.* [5]基于有限差分法,把二维梯形旋涡发生体的模拟结果与激光测速方法得到的结果进行了比较,发现数值计算得到的斯特劳哈尔数与实验值相差很小。Wahed *et al.* [6]使用涡流函数法来研究T形旋涡发生体的绕流,在旋涡发生体后面发现了二次涡的存在。贾云飞等人[7]用Fluent软件中的RNG k- ϵ 模型,研究了二维梯形旋涡发生体的最佳压力探头位置,位于旋涡发生体后方2.8倍旋涡发生体迎流面宽度处,对比发现模拟数据与实验数据的最大误差小于6.439%。Reik *et al.* [8]将数值计算结果与实验结果进行比较后发现RANS模型用来预测旋涡的脱落是可行的。胡岳等人[9]利用Fluent中的Realizable k- ϵ 湍流模型,通过改变尾缘夹角角度、平行部分长度,对具有不同

形状的梯形旋涡发生体的流场进行了数值模拟研究, 结果发现对于迎流面宽度为 28 mm 的旋涡发生体, 在尾缘夹角角度为 45°, 平行部分长度为 4 mm 时, 能够产生最强的涡街信号, 且模拟结果与实验结果基本一致, 这表明了 Realizable k- ϵ 模型应用于涡街流场模拟的可行性。

根据以上的研究结果可知, 一个好的旋涡发生体在旋涡脱落处应该具有较锋利的边缘来固定旋涡的脱落点, 在旋涡发生体后面应该有一定长度的延长板来稳定脱落的旋涡。本文根据以上原则设计了一种新型旋涡发生体, 使用 Fluent 软件对新型旋涡发生体和传统的梯形旋涡发生体的流场进行了模拟计算, 并对两者的斯特劳哈尔数稳定性、旋涡强度、压力损失进行了研究与比较。

2. 涡街流量计的结构与测量原理

涡街流量计是基于卡门涡街原理[10]研制的, 在流动的流体中放置一根轴线与流向垂直的柱形体(旋涡发生体), 当流体沿旋涡发生体绕流时, 会在旋涡发生体下游产生两列不对称但有规律的交替涡列, 如图 1 所示。

实验发现在一定的雷诺数 Re 范围内, 旋涡脱落的频率 f 与流体平均流速 u 之间的关系为[11]

$$f = St \frac{u}{md} \quad (1)$$

式中 u 为管道内平均流速, m/s; St 为斯特劳哈尔数; d 为旋涡发生体迎流面宽度; m 为旋涡发生体两侧弓形流通面积与测量管横截面积之比, 可以用下面的式子表示。

$$m = 1 - \frac{2}{\pi} \left[\frac{d}{D} \sqrt{1 - \left(\frac{d}{D}\right)^2} + \arcsin\left(\frac{d}{D}\right) \right] \quad (2)$$

体积流量 q_v 与旋涡脱落频率存在着以下的正比关系[12]

$$q_v = \frac{\pi D^2 u}{4} = \frac{\pi D^2 m d f}{4 St} = \frac{f}{K} \quad (3)$$

式中 K 为流量计的仪表系数, 在一定雷诺数范围内, K 为一常数。

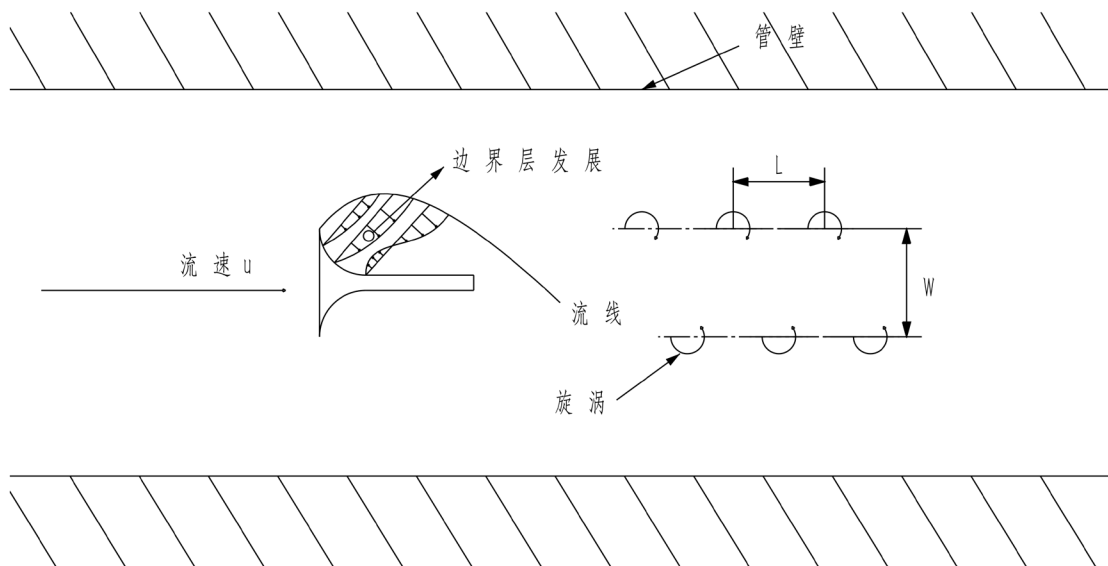


Figure 1. The sketch map of Kármán vortex street
图 1. 卡门涡街示意图

3. 计算模型与模拟结果分析

3.1. 新型旋涡发生体结构

新型旋涡发生体结构的如图 2(a)所示, 迎流面宽度为 14 mm, 总长度为 20 mm, 尾缘宽度为 2 mm, 圆弧半径 R 为 6 mm。在迎流面后方用一个与迎流面相切的圆弧慢慢过渡到平板, 在相切处曲率非常大, 可以产生很大的旋涡强度。随着流体往后流动, 圆弧曲率慢慢减小直到和延伸板相切, 圆弧的存在可以利于旋涡的旋转和发展。旋涡发生体后面延伸板有利于旋涡脱落的稳定。为了比较上的方便, 梯形旋涡发生体结构采用的是贾云飞[7]研究中所使用的梯形结构(图 2(b))。

3.2. 计算模型

两种旋涡发生体流场的计算区域相同(图 3)。管道直径 $D = 50$ mm, 为了保证来流液体流动已充分发展, 旋涡发生体迎流面距管道入口为 $5D$, 为了避免管道出口对旋涡发生体尾部流场的影响, 旋涡发生体距管道出口为 $15D$, 管道总长为 1000 mm。流动介质为水, 压力为 101325 Pa, 密度为 998.2 kg/m^3 , 运动黏度为 $0.001003 \text{ m}^2/\text{s}$ 。

利用 ICEM CFD 对该计算区域进行网格划分, 在旋涡发生体附近进行网格加密, 网格数量为 154588, 导入 Fluent 设置相关参数。入口设置为速度入口, 出口设置为压力出口, 旋涡发生体壁面和管壁面设置为 wall。根据贾云飞[7]和胡岳[9]的研究结果, 发现采用 Realizable $k-\varepsilon$ 模型和 RNG $k-\varepsilon$ 模型来模拟计算旋涡发生体的流场都比较可靠。与 RNG $k-\varepsilon$ 模型相比, Realizable $k-\varepsilon$ 模型加入了对质点旋转的分析, 考虑了黏性力对质点的影响, 所以能够更好地模拟涡街的形成和发展, 故本文也采用 Realizable $k-\varepsilon$ 模型。因为旋涡发生体的壁面作用对于涡街的形成和发展有很大的影响, 所以壁面函数采用加强壁面函数。压力速度耦合方式为 SIMPLIC, 迭代格式设置为二阶迎风格式。旋涡发生体附近设置检测点来检测压力随时间的变化。

4. 流场的模拟结果与分析

4.1. 两种旋涡发生体的涡量云图和压力云图

旋涡发生体的形状对于涡街流量计的尾部流场的有着很大的影响, 在进口速度为 $0.5\sim 7 \text{ m/s}$ 范围内对两种不同旋涡发生体的流场进行模拟计算, 得到了流场的压力云图和涡量云图。图 4 和图 5 分别为 $Re = 49760$ 时新型和梯形旋涡发生体流场的涡量云图和压力云图。可以看出新型旋涡发生体所形成的旋涡尺寸比梯形旋涡发生体的更大, 在压力云图上也能看出新型旋涡发生体流场的压力波动也更大。

4.2. 压力波动频率及斯特劳哈尔数

当流体沿旋涡发生体绕流时, 涡的脱落会造成压力的波动。在一定雷诺数范围内, 涡的脱落频率和流速成正比, 即斯特劳哈尔数是一个常数。旋涡发生体的形状, 流体的种类和流速对涡的脱落频率都有影响。旋涡的脱落频率可以通过监测一定位置处的压力波动来测量。贾云飞[7]发现在梯形旋涡发生体后 2.8 倍迎流面宽度处压力波动信号强度最大。通过观察新型旋涡发生体的压力云图发现, 圆弧形附近处的压力变化较大, 所以在圆弧形附近设置压力监测点。为了保证每个周期有足够多的数据点, 在计算过程中设置的时间步随速度的增加而减小。

根据模拟结果, 得到了速度为 $0.5\sim 7 \text{ m/s}$ 时旋涡发生体流场监测点处的压力波动频率, 并由(1)式计算得到斯特劳哈尔数。两种旋涡发生体的频率与流速的关系以及斯特劳哈尔数与雷诺数的关系分别如图 6 和图 7 所示。

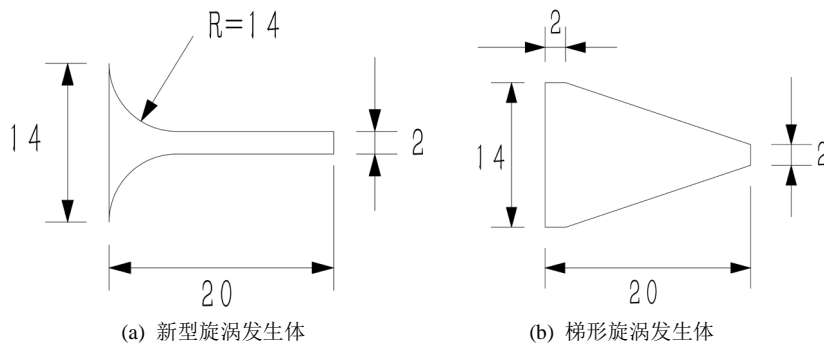


Figure 2. The structure of two kinds of vortexes shedder
图 2. 两种旋涡发生体的结构

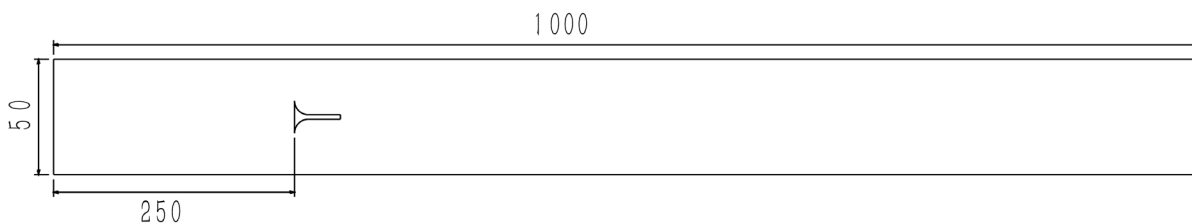


Figure 3. The calculation area of the new type of vortex shedder's flow field
图 3. 新型旋涡发生体流场计算区域

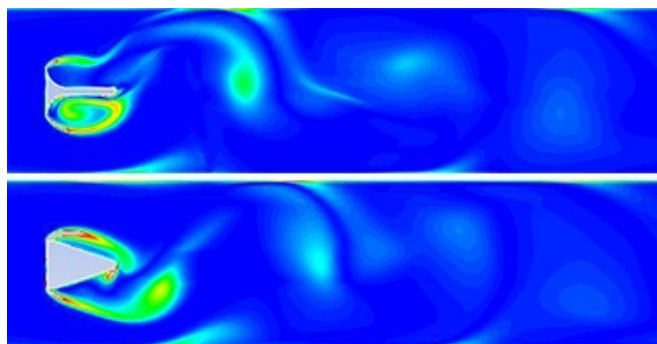


Figure 4. The vorticity cloud graph of the new type of vortex shedder and trapezoidal vortex shedder
图 4. 新型和梯形旋涡发生体流场的涡量云图

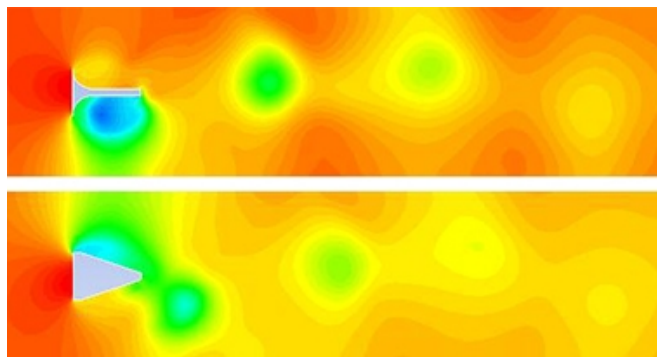


Figure 5. The pressure cloud graph of the new type of vortex shedder and trapezoidal vortex shedder
图 5. 新型和梯形旋涡发生体流场的压力云图

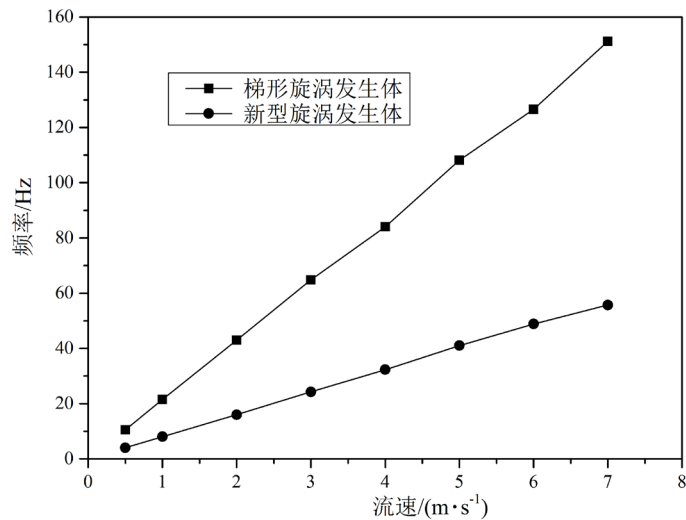


Figure 6. The change relationship of the frequencies with the Reynolds number

图 6. 斯特劳哈尔数频率随速度的变化

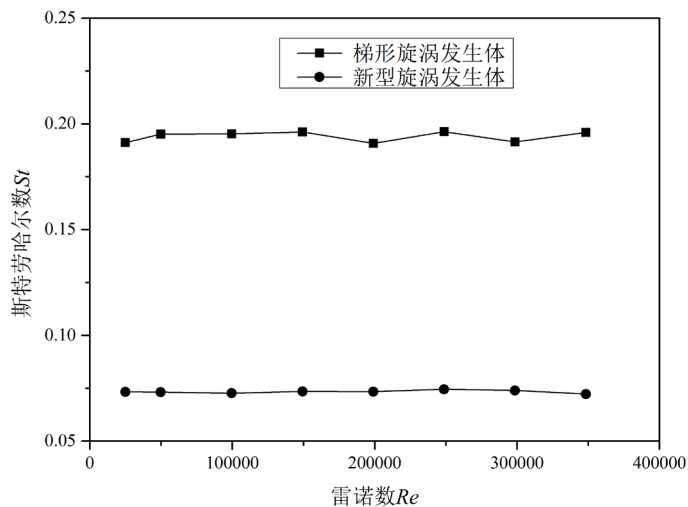


Figure 7. The change relationship of the strouhal number with the Reynolds number

图 7. 斯特劳哈尔数随雷诺数的变化

通过图 6 可以看出, 两种旋涡发生体压力监测点处压力波动频率随速度的变化都有很好的线性度, 但梯形旋涡发生体的波动频率明显高于新型旋涡发生体。图 7 的结果表明新型旋涡发生体的斯特劳哈尔数更加平稳, 在数值上也比梯形旋涡发生体小很多。监测点处压力波动频率和流速的线性关系可用一定雷诺数范围内斯特劳哈尔数 St 的非线性度来描述, 非线性度的表达式[13]为

$$\varepsilon = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|St_i - \overline{St}|}{\overline{St}} \times 100\% \quad (4)$$

式中: ε —非线性度;

St_i —不同雷诺数下的斯特劳哈尔数;

\overline{St} —平均斯特劳哈尔数;

N ——数据点数。

通过(4)式计算得到梯形和新型旋涡发生体的斯特劳哈尔数非线性度分别为 1.1225% 和 0.6803%，新型旋涡发生体的非线性度小于梯形旋涡发生体，即新型旋涡发生体的旋涡脱落更稳定，测量的误差也更小。

4.3. 旋涡强度的比较

旋涡强度也是涡街流量计的一个重要参数，旋涡强度越强，越有利于波动信号的提取。管道的震动会产生一系列的干扰信号，影响压力波动信号的检测。而且旋涡强度也随流速的降低而变弱，增加了波动信号检测的难度。如果能在相同的流速下增大旋涡强度，对提高检测精度、减小干扰信号的影响、降低流量测量下限以及降低对检测仪器的要求都非常有利。

图 8 和图 9 为雷诺数 $Re = 49760$ 时两种旋涡发生体流场监测点的压力随时间的波动曲线。

从图 8 与图 9 可以看出，新型旋涡发生体流场监测点处压力的波动比梯形旋涡发生体强很多。使用 Origin 分别对不同流速下压力随时间的变化的曲线进行快速傅里叶变换，可得到压力波动幅值随雷诺数变化的曲线，如图 10 所示。

从图 10 可以看出，压力波动幅值与 Re 的关系近似于抛物线。相同流速下新型旋涡发生体流场监测点处的压力波动明显强于梯形旋涡发生体，这是因为新型旋涡发生体迎流面与圆弧相切处存在很尖的棱角，加快边界层的分离，而且圆弧的存在可以减小旋涡的旋转阻力，加强了旋涡的旋转速度和强度。

4.4. 永久压降的比较

当流体流过旋涡发生体时，由于黏滞力和边界层分离的作用会造成局部阻力损失。通过检测上游和下游的静压差，就可得到流体流过旋涡发生体的压力损失。为了保证所测压力差为永久压力损失，两个检测点距离设置为 750 mm。两种旋涡发生体的压力损失随雷诺数的变化如图 11 所示。可以看出，压力损失都与流速的平方成正比，在 $Re < 199040$ 时两者的压力损失相差很小，但是随着雷诺数的增大，新型旋涡发生体的压力损失要大于梯形旋涡发生体。考虑到在实际使用中，管道中水的流速一般不超过 3.5m/s，所以两种旋涡发生体的压力损失差别不大。

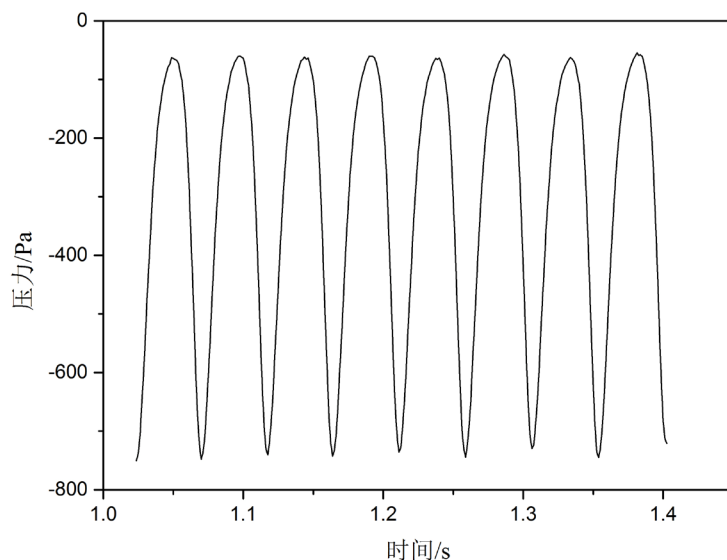


Figure 8. The pressure fluctuation curve of the monitoring point of the trapezoidal vortex shedder's flow field when the Reynolds number is 49760

图 8. 雷诺数 $Re = 49760$ 时梯形旋涡发生体流场监测点压力的波动曲线

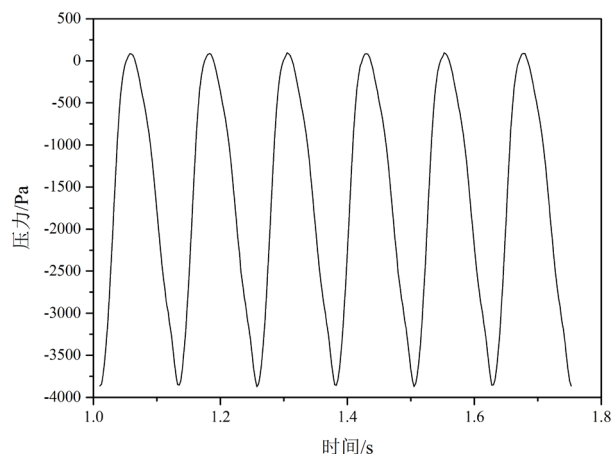


Figure 9. The pressure fluctuation curve of the monitoring point of the new type of vortex shedder's flow field when the Reynolds number is 49760

图 9. 雷诺数 $Re = 49760$ 时新型旋涡发生体流场监测点压力的波动曲线

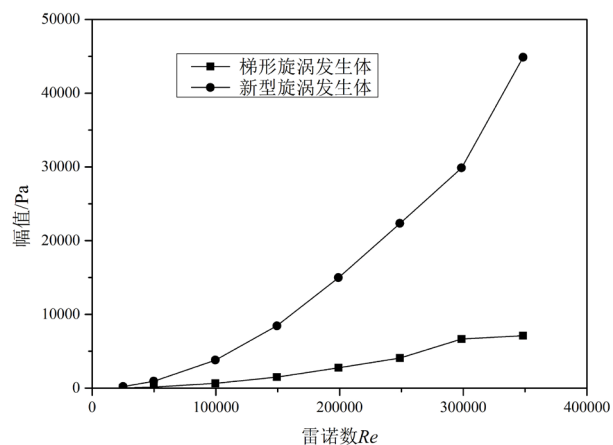


Figure 10. The change relationship of the amplitude of pressure fluctuation with the Reynolds number

图 10. 压力波动幅值随雷诺数的变化

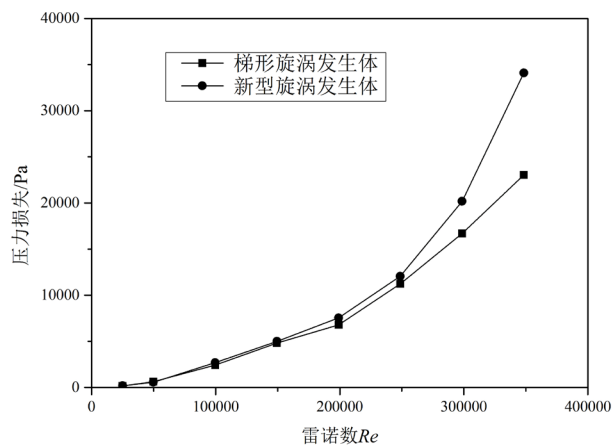


Figure 11. The change relationship of the pressure loss with the Reynolds number

图 11. 压力损失随雷诺数的变化

5. 结论

1) 通过对两种旋涡发生体的模拟与比较,发现在较大雷诺数范围内,新型旋涡发生体的斯特劳哈尔数都为常数($St = 0.07332$)。在相同雷诺数范围内,新型旋涡发生体的斯特劳哈尔数稳定性也好于梯形旋涡发生体,即新型旋涡发生体的旋涡脱落更稳定。所以新型旋涡发生体的测量范围更大,测量的稳定性也好于梯形旋涡发生体。

2) 在雷诺数以及流体介质相同的情况下,对两种旋涡发生体监测点处压力波动大小进行了比较,发现新型旋涡发生体所产生的旋涡强度比梯形旋涡发生体的大得多,不仅更利于旋涡信号的检测,并且能够减小干扰的影响以及降低检测的下限。

3) 在雷诺数不是很大的时候,两种旋涡发生体的永久压力损失相差很小。

参考文献 (References)

- [1] Achenbach, E. (2006) Distribution of Local Pressure and Skin Friction around a Circular Cylinder in Cross-Flow up to $Re = 5 \times 10^6$. *Journal of Fluid Mechanics*, **34**, 625-639. <https://doi.org/10.1017/S0022112068002120>
- [2] Miao, J.J., Yang, C.C., Chou, J.H., et al. (1993) A T-Shaped Vortex Shedder for a Vortex Flow Meter. *Flow Measurement & Instrumentation*, **4**, 259-267. [https://doi.org/10.1016/0955-5986\(93\)90033-F](https://doi.org/10.1016/0955-5986(93)90033-F)
- [3] Coulthard, J. and Yan, Y. (1993) Comparisons of Different Bluff Bodies in Vortex Wake Transit Time Measurements. *Flow Measurement & Instrumentation*, **4**, 273-275. [https://doi.org/10.1016/0955-5986\(93\)90035-H](https://doi.org/10.1016/0955-5986(93)90035-H)
- [4] Igarashi, T. (2008) Flow Resistance and Strouhal Number of a Vortex Shedder in a Circulapipe. *JSME International Journal*, **42**, 586-595. <https://doi.org/10.1299/jsmeb.42.586>
- [5] Matsunaga, Y., Takahashi, S. and Kuromori, K. (1990) Numerical Analysis of a Vortex Flowmeter and Comparison with Experiment. *Flow Measurement & Instrumentation*, **1**, 106-112. [https://doi.org/10.1016/0955-5986\(90\)90033-4](https://doi.org/10.1016/0955-5986(90)90033-4)
- [6] Wahed, A.K.E., Johnson, M.W. and Sproston, J.L. (1993) Numerical Study of Vortex Shedding from Different Shaped Bluff Bodies. *Flow Measurement & Instrumentation*, **4**, 233-240. [https://doi.org/10.1016/0955-5986\(93\)90030-M](https://doi.org/10.1016/0955-5986(93)90030-M)
- [7] 贾云飞, 张涛, 邢娟. 基于 FLUENT 对涡街流量传感器流场仿真及特性研究[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(12): 2683-2685.
- [8] Reik, M., Höcker, R., Bruzzese, C., et al. (2010) Flow Rate Measurement in a Pipe Flow by Vortex Shedding. *Forschung Im Ingenieurwesen*, **74**, 77-86. <https://doi.org/10.1007/s10010-010-0117-0>
- [9] 胡岳, 张涛. 涡街流量计梯形旋涡发生体的研究[J]. 化工自动化及仪表, 2012, 39(5): 580-584.
- [10] Johnson, R., Schniter, P., Endres, T.J., et al. (2002) Blind Equalization Using the Constant Modulus Criterion: A Review. *Proceedings of the IEEE*, **86**, 1927-1950. <https://doi.org/10.1109/5.720246>
- [11] Roshko, A. (1961) Experiments on the Flow past a Circular Cylinder at Very High Reynolds Number. *Journal of Fluid Mechanics*, **10**, 345-356. <https://doi.org/10.1017/S0022112061000950>
- [12] 朱德祥. 流量仪表原理和应用[M]. 上海: 华东化工学院出版社, 1992.
- [13] Venugopal, A., Agrawal, A. and Prabhu, S.V. (2011) Review on Vortex Flowmeter—Designer Perspective. *Sensors & Actuators a Physical*, **170**, 8-23.