

文章编号:0254-0096(2018)02-0324-07

# 卡门涡街风力发电机结构优化的分析计算

周云龙, 刘起超

(东北电力大学能源与动力工程学院, 吉林 132012)

**摘 要:** 设计一种新型风力发电机, 利用 Fluent 对卡门涡街流场特性进行分析计算, 对比速度值对发电机结构进行优化设计。选取截面为梯形、圆形、方形和三角形的 4 种阻流体对比分析, 得出截面为梯形的阻流体最优。改变梯形阻流体的特征长度与管道高度的尺寸比以及梯形几何参数, 对比分析  $y$  方向速度峰值, 得出最优的尺寸比为 0.35, 底角为  $60^\circ$ , 等效高度为 0.5。通过提取和分析阻流体后不同位置的  $y$  方向速度峰值, 得出当旋转轴与阻流体距离为 2~3 倍阻流体特征长度时, 发电机可得到最佳的功率输出。

**关键词:** 结构; 截面形状; 尺寸比; 位置; 卡门涡街; 阻流体

**中图分类号:** TK83

**文献标识码:** A

## 0 引 言

随着环境问题和能源危机的日益加剧, 以风电、太阳能等为代表的新能源逐渐得到关注。目前的风力发电技术较单一, 也存在很多问题。一些学者开始研究其他形式的风力发电技术, 如包道日娜等<sup>[1]</sup>研究了可调节功率的伞形风力发电机, 并对其性能进行了实验验证。

卡门涡街是自然界中普遍存在的一种现象, 可利用其周期性变化进行发电。Sanchez-Sanz 等<sup>[2]</sup>论证了在小棱柱后的尾流中利用周期性作用力发电的可行性。Taylor 等<sup>[3]</sup>设计了一个利用鳍形压电聚合物来将流动的动能转换为电能的装置。Akaydin 等<sup>[4]</sup>研究了利用压电悬臂横梁从圆柱绕流的尾流中获取电能的方法。李赛伟等<sup>[5]</sup>在涡街中放入一个一端固定、一端自由摆动的叶片, 利用叶片上下表面压力差设计新型风力发电机。文 晟等<sup>[6]</sup>利用亥姆赫兹谐振腔和压电复合薄圆板设计了小型的风力压电俘能器。

虽然对卡门涡街发电装置的研究已取得一定成果, 但仍缺少结构优化方面的研究, 且发电方式主要集中在压电转换方向, 发电效率较低。本文利用电磁原理设计一种新型卡门涡街风力发电

机, 对其结构优化计算, 期望为装置的制造提供指导意义。

## 1 发电机物理模型

本文设计的卡门涡街风力发电机结构如图 1a 所示, 主要包括管道、阻流体、磁铁、旋转轴和线圈平板 5 部分。风从管道左侧进入, 经过阻流体形成卡门涡街。线圈平板水平放置在管道中间, 磁铁固定在管道壁面, 在线圈平板所在区域产生磁场。

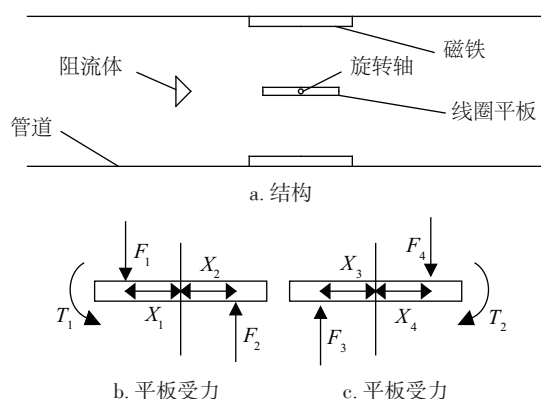


图1 装置结构简图及平板受力示意图

Fig. 1 The schematic diagram of the structure of the equipment and the force sketch map of coil plate

线圈平板受力如图 1b、图 1c 所示。在图 1b

收稿日期: 2015-12-28

通信作者: 周云龙(1960—), 男, 博士、教授, 主要从事新型风力发电技术方面的研究。neduzyl@163.com

中,以旋转轴为中心,旋涡作用在线圈平板左右两侧合力分别为  $F_1$  和  $F_2$ ,合力作用点与旋转轴距离为  $X_1$  和  $X_2$ 。由  $F_1$  和  $F_2$  产生逆时针转矩  $T_1$ ,如式(1)所示。

$$T_1 = F_1 X_1 + F_2 X_2 \quad (1)$$

在该转矩作用下线圈平板绕旋转轴逆时针转动。随着旋涡移动,作用在线圈平板上的作用力方向变化,如图 1c 所示,此时产生顺时针转矩  $T_2$ ,计算方法同式(1)。在该转矩作用下线圈平板绕旋转轴顺时针运动。 $T_1$  和  $T_2$  的周期性产生使线圈绕旋转轴上下振动,通过线圈的磁通量变化,产生感应电流。

## 2 基本理论

流体从非流线型物体流过,在阻流体两侧出现边界层的形成和分离,使均匀水平流动变为周期性变化的涡旋流动。流动稳定后,旋涡脱落频率保持稳定。旋涡脱落频率可用斯坦顿数  $St$  表示,如式(2)所示。

$$St = \frac{fd}{V} \quad (2)$$

式中,  $f$  ——旋涡脱落频率, Hz;  $d$  ——阻流体特征长度, m;  $V$  ——进口速度, m/s。

流动的类型通过雷诺数  $Re$  确定,用式(3)计算。

$$Re = \frac{\rho V d}{\mu} \quad (3)$$

式中,  $\rho$  ——流体密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $\mu$  ——动力粘度,  $\text{kg/m} \cdot \text{s}$ 。

## 3 数值计算方法

### 3.1 模型建立及网格划分

计算域为一个长 0.5 m, 宽 0.1 m 的矩形,阻流体截面形状分别为梯形、圆形、三角形和正方形。以水平方向为  $x$  方向,垂直方向为  $y$  方向。

定义阻流体尺寸比  $R$ ,用式(4)表示:

$$R = \frac{d}{D} \quad (4)$$

式中,  $R$  ——阻流体尺寸比;  $D$  ——管道特征长度, m。

文献[7]指出,结构对称的阻流体产生更大的压力波动和速度波动,因此选择对称结构的阻

流体。

模型建立和网格划分用 GAMBIT 实现。网格划分采用结构化四边形网格,在阻流体四周以及旋涡主要存在的中间区域局部加密,其他部分采用相对稀疏的结构网格。为了保证计算的可靠性并节省时间,初次将计算域划分为 47725 个网格,之后对网格数加倍,两次计算得到的  $St$  基本一致,说明初次划分的网格数量已满足计算需要。

### 3.2 条件设置

本文采用非稳态计算,计算材料为空气。文献[8]指出,在湍流模型中, $k-\varepsilon$ 模型引入湍流耗散率  $\varepsilon$ ,在湍流的计算中优于零方程和一方程模型。但标准  $k-\varepsilon$ 模型假定粘度系数是相同的,这种假设使得该模型在用于强旋流或弯曲流线流动时会产生一定的失真,而 RNG  $k-\varepsilon$ 模型通过修正湍动粘度,考虑了平均流动中的旋转及旋流流动情况,符合本研究的流动情况。文献[9]对 3 种湍流模型进行对比,结果表明 RNG  $k-\varepsilon$ 模型最佳,因此选择 RNG  $k-\varepsilon$ 模型。湍流参数选择湍动能  $k$  和湍动耗散率  $\varepsilon$ ,计算方法参考文献[8]的公式。选择速度入口和流动出口为边界条件,本文取 5、7、10、13、15、17 m/s 为进口速度。压力和速度的耦合采用 SIMPLEC 算法以在保持计算精度前提下提高迭代过程中解的收敛速度,对流和扩散通量计算采用 QUICK 格式,时间步长为  $2 \times 10^{-5}$  s。

## 4 模拟结果及分析

### 4.1 模型正确性验证

旋涡的脱落频率是卡门涡街的一个重要特性,可以此判断结果的正确性。本文建立与文献[10]中实验相同的模型,对相同工况进行计算。记录压力随时间的变化,对其做快速傅里叶变换得到旋涡脱落频率为 57 Hz,如图 2 所示。文献[10]中通过实验得到脱落频率为 62 Hz,误差仅 8.06%。这表明该计算方法得到的结果较准确,可用于以后的研究。

### 4.2 速度云图和波动曲线分析

图 3a 为三角形阻流体,  $R=0.20$ ,进口速度 5 m/s 时的瞬时速度云图。从图中可看出水平均匀来流经过阻流体,在阻流体两侧形成一对旋涡,一个为高

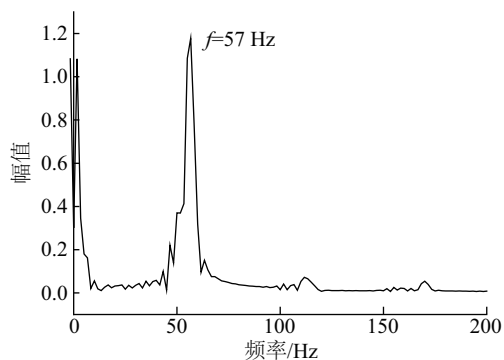
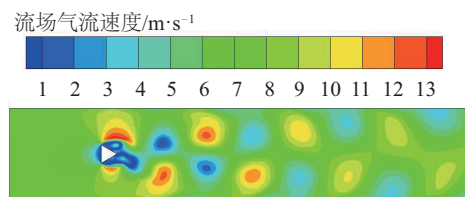
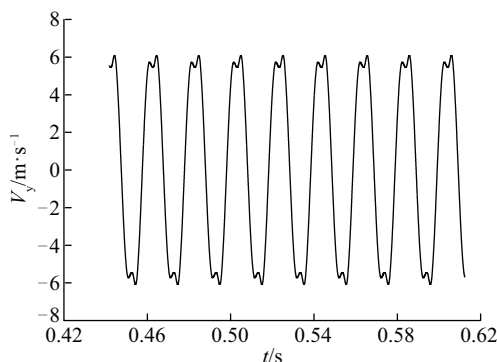


图2 频率谱图

Fig. 2 Frequency spectra



a. 瞬时速度云图



b. y方向速度波动

图3 瞬时速度云图及y方向速度波动

Fig. 3 The contour of the instantaneous velocity and the variation in the velocity in y direction

速旋涡,一个为低速旋涡。旋涡经过阻流体后分离,在来流作用下沿来流方向运动。随着旋涡运动,前后两对旋涡间距不变,高速旋涡的速度降低,低速旋涡的速度升高,旋涡的涡流变得不明显。从图中还可看出分离后旋涡的速度明显大于进口速度,这说明在稳定流动中加入一个阻流体可起到压缩能量的作用。这是因为阻流体使管道截面积减小。该研究流体为低速空气,为不可压缩流体。根据连续性方程,密度不变时,截面积减小,速度增大。

图3b为三角形阻流体, $R=0.20$ ,进口速度5 m/s

时管道中心线距入口0.2 m处y方向速度 $V_y$ 随时间的变化。由图3b可知,当流动稳定后, $V_y$ 的大小和方向呈周期性变化,进而产生周期性变化的作用力。该作用力使线圈平板切割磁感线运动,将流体动能转换成电能。这表明本文研究的装置理论上可行。

#### 4.3 阻流体截面形状优化计算

图4a为 $R=0.20$ 时不同形状阻流体在不同来流速度下的 $St$ 数。由图4a可看出在研究的4种形状中,梯形、三角形和方形阻流体形成的卡门涡街 $St$ 较稳定,圆形阻流体形成的卡门涡街 $St$ 波动最大。旋涡脱落频率不稳定会降低发电机性能,因此,梯形、三角形和方形阻流体较好。由式(1)可知,来流速度和特征长度不变时, $St$ 越大,旋涡脱落频率越大。旋涡脱落频率影响线圈平板的振动频率,影响装置发电量。因此选择相同来流速度下 $St$ 较大的阻流体,梯形和三角形阻流体较好,梯形最佳。

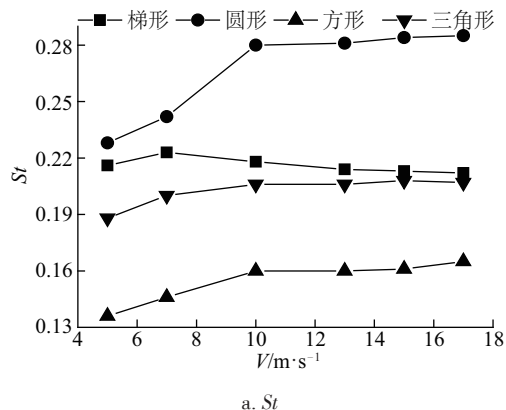
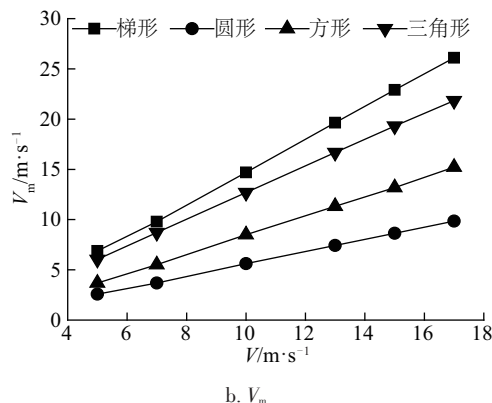
a.  $St$ b.  $V_y$ 图4 不同形状阻流体的 $St$ 和y方向速度峰值随来流速度的变化曲线

Fig. 4 Variation in the Stanton number and velocity in y direction with inlet velocity for different bluff bodies

定义  $V_m$  为  $y$  方向速度峰值。图 4b 为  $R=0.20$  时不同形状阻流体在不同来流速度下的  $y$  方向速度峰值。由图可知,不同来流速度下,梯形和三角形阻流体产生的旋涡  $V_m$  大于来流速度,梯形最大。方形和圆形阻流体产生的旋涡  $V_m$  小于来流速度。速度与作用在线圈平板上的力成正比,直接影响发电机输出的电量。因此选择梯形阻流体可获得最多电量。

分析图 4 得出,梯形阻流体性能最优。因此,本文选择梯形为优化对象,做进一步的研究。

#### 4.4 阻流体尺寸比率优化计算

图 5 为不同来流速度下,  $R=0.10$  时,梯形阻流体后形成的卡门涡街稳定后的瞬时速度云图。从图 5 中可看出,当  $R=0.10$  时,在管道中间区域形成了一个低速带。当  $V=5$  m/s 时,低速带区域较靠后,距进口约 0.2 m。随着来流速度的增加,低速带区域前端逐渐向阻流体靠近,当  $V$  达到 7 m/s 时低速带区域范围保持稳定,区域前端延伸到阻流体背风面。这是因为阻流体尺寸比率太小,来流对脱落的旋涡影响较大。当高速旋涡从阻流体脱落后,直接在来流速度的作用下向后移动并且迅速靠近壁面,在阻流体后形成一条带状低速区域。本文设计的发电机线圈初始位置在管道的中心线上,该现象不利于发电机的工作,应增大阻流体形状比率。

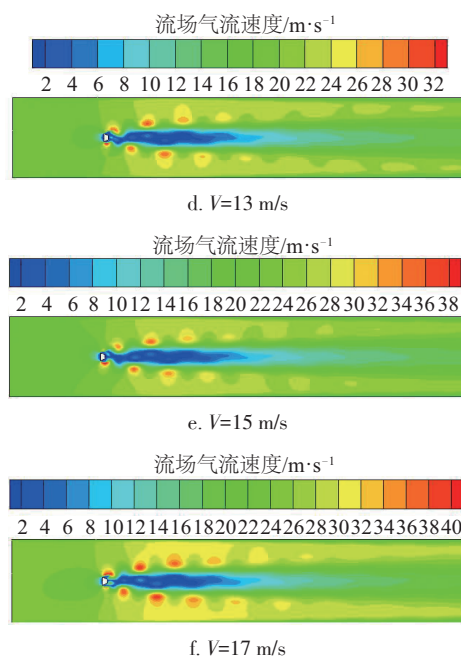
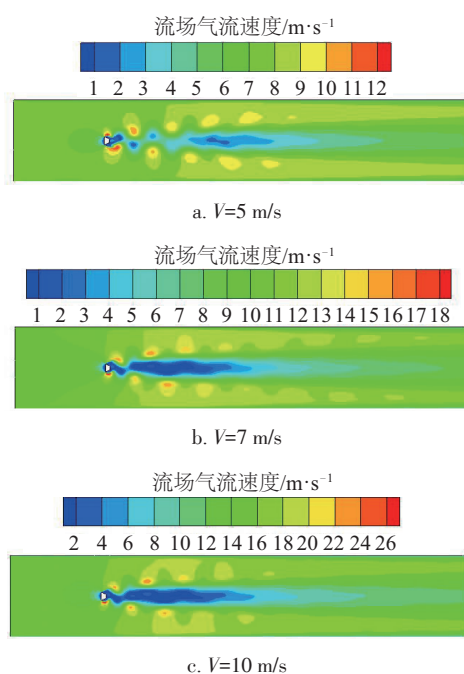


图 5  $R=0.10$  时不同来流速度下瞬时速度云图

Fig. 5 The contour of the instantaneous velocity for different inlet velocity when  $R$  is 0.10

图 6 为  $R$  取 0.20、0.30、0.35 时阻流体在  $V=5$  m/s 时的瞬时速度云图。由图 6 可知当  $R$  取 0.20、0.30、0.35 时,在管道中心线区域都存在高速

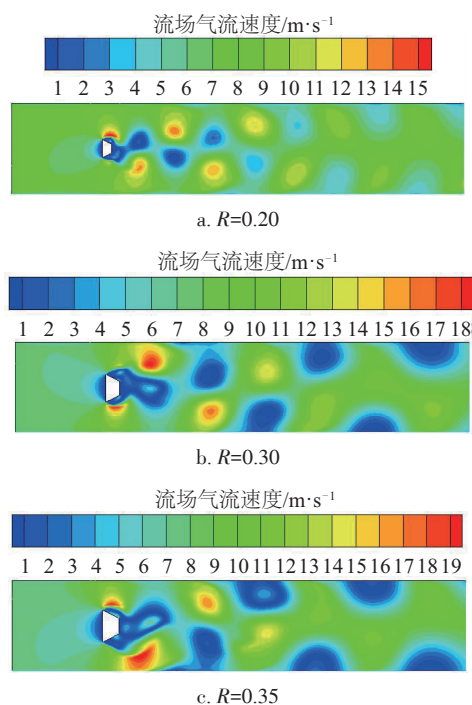


图 6  $R$  取 0.20、0.30、0.35 和  $V=5$  m/s 时的瞬时速度云图

Fig. 6 The contour of the instantaneous velocity when  $R$  is 0.20, 0.30, 0.35 and inlet velocity is 5 m/s



旋涡,这种流场能够推动笔者设计的卡门涡街风力发电机发电。随  $R$  增大,旋涡大小逐渐增大,旋涡个数逐渐减小。当  $R$  取 0.35 时,仅在靠近阻流体的区域存在旋涡和加速作用,离阻流体较远区域则不太明显。

图 7 为  $R$  取 0.20、0.30、0.35 时阻流体在不同来流速度下管道中心线距进口 0.2 m 处  $y$  方向速度峰值。由图 7 可知随着  $R$  增大,该点速度峰值增大,且均大于对应的来流速度。这说明在稳定流动中加入一个阻流体可起到加速作用。这个加速作用不但可减小启动风速,还可增加电能的输出。

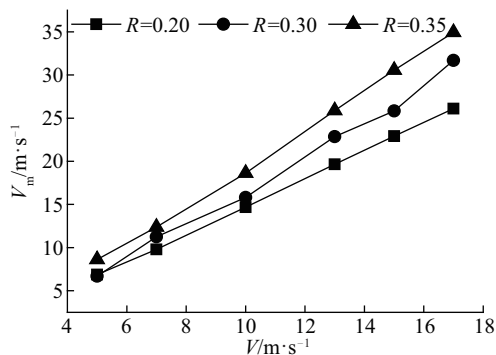


图 7 不同尺寸比率下  $y$  方向的速度峰值随时间变化曲线

Fig. 7 Variation in the maximum velocity in  $y$  direction with inlet velocity for different  $R$

图 8 为  $R=0.36$  时流动稳定时的瞬时速度云图。结果表明,当  $R$  取 0.36 及以上时,涡街效应急剧减弱,阻流体后形成很大的低速区域。

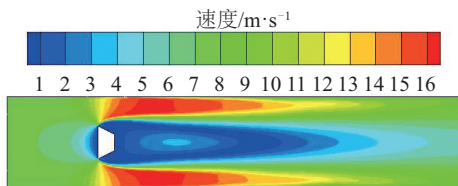


图 8  $R=0.36$  和  $V=5$  m/s 时的瞬时速度云图

Fig. 8 The contour of the instantaneous velocity when  $R$  is 0.36 and inlet velocity is 5 m/s

综合图 6~图 8 可得,  $R=0.35$  为最佳尺寸。随  $R$  继续增大,流体能量损失过多,旋涡效应减弱,在来流作用下漩涡直接向下游移动,上下两个漩涡之间相互作用减弱,不能形成涡街。综合以上因素,当  $R=0.35$  时最佳。Hai-Dang Tam Nguyen 等<sup>[11]</sup>以双三角形阻流体为研究对象得出当  $R$  取 0.33 时产生的压力波动幅度最大,本文研究结果与之相近。

#### 4.5 阻流体几何尺寸优化计算

阻流体的几何尺寸对旋涡的形成有重要影响。图 9 为进口速度 10 m/s 时距进口 0.2 m 处的  $V_m$  随梯形底角  $\beta$  和等效高度  $H$  的变化曲线。由图 9 可知,当底角为  $10^\circ \sim 50^\circ$  时,该处的  $V_m$  几乎为零。这是因为底角太小,2 个漩涡之间相互作用弱,不能产生涡街。当底角为  $60^\circ$  时,流场中存在涡街且  $V_m$  达到最大,为 19.6 m/s。随着底角的增大,  $V_m$  逐渐减小。因此,当梯形阻流体两底角为  $60^\circ$  时最佳。

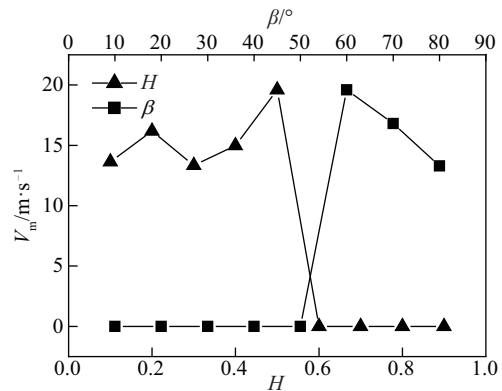


图 9  $y$  方向速度峰值随梯形底角  $\beta$  及等效高度  $H$  的变化曲线

Fig. 9 Variation in the maximum velocity in  $y$  direction with the base angle and equivalent height of trapezoidal

定义梯形的等效高度为  $H$ , 用式(5)表示:

$$H = \frac{h}{d} \quad (5)$$

式中,  $h$ ——梯形短边长度, m。

当  $H$  为 0.1~0.5 时,流场中存在涡街,当  $H$  为 0.5 时,  $V_m$  取得最大值。继续增大  $H$ ,  $V_m$  急剧降低,当  $H$  取 0.6 以上时,  $V_m$  几乎为零,此时流场中的涡街消失。因此当  $H$  为 0.5 时最佳。

#### 4.6 线圈平板位置优化计算

在相同工况下,发电机输出电能的大小和发电机所在位置的流体速度大小成正比。线圈的最佳位置应使旋转轴处于最大速度处。

定义旋转轴的无因次位置  $G$ , 用式(6)表示:

$$G = \frac{L}{d} \quad (6)$$

式中,  $L$ ——旋转轴和阻流体的距离, m。

图 10 为  $R=0.35$  时管道中心线上不同位置处的  $y$  方向分速度幅值图。从图 10 可看出,在来流速度相同时,随着  $G$  逐渐增大,  $y$  方向的速度幅值先增

大,在  $G=3$  时达到最大,然后逐渐降低并趋于平缓。考虑到线圈平板自身的面积,将旋转轴置于  $G$  为 2~3 范围内可使线圈平板所在区域的速度最大。

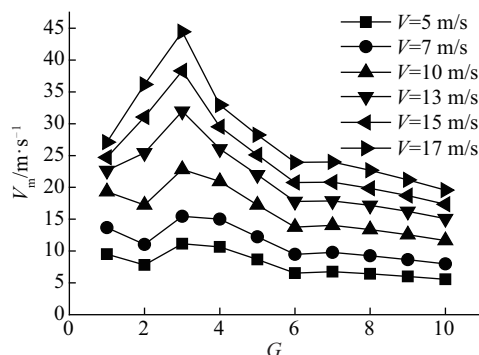


图 10 不同速度下不同位置的  $y$  方向速度幅值

Fig. 10 Variation in the maximum velocity in  $y$  direction with locations for different inlet velocities

## 5 结 论

本文利用 Fluent 数值模拟对所研究的卡门涡街发电机进行模拟分析及优化,得出以下结论:

- 1) 卡门涡街可在线圈平板上产生周期性变化的作用力,该力使线圈平板切割磁感线运动发电;
- 2) 在截面为梯形、圆形、方形和三角形 4 种阻流体中,梯形最佳;
- 3)  $R=0.35$  时,阻流体对来流的加速作用最好;
- 4) 当底角  $\beta$  取  $60^\circ$  时  $y$  向速度幅值最大;
- 5) 当等效高度  $H$  取 0.5 时  $y$  向速度幅值最大;
- 6) 当  $G$  为 2~3 时,线圈平板所在区域速度最大。

### [参考文献]

- [1] 包道日娜, 张晓阳, 王元玥, 等. 伞形风力发电机伞形机构的设计与实验验证[J]. 太阳能学报, 2013, 34(9): 1551—1555.
- [1] Bao Daorina, Zhang Xiaoyang, Wang Yuanyue, et al. The design and test of umbrella capacity contral mechanism[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2013, 34(9): 1551—1555.
- [2] Sanchez-Sanz M, Fernandez B, Velazquez A. Energy-harvesting microresonator based on the forces generated by the Kammon street around a rectangular prism[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2009, 18(2): 449—457.
- [3] Taylor G W, Burns J R, Kammann S A, et al. The energy harvesting Eel: a small subsurface ocean/river power generator[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2001, 26(4): 539—547.
- [4] Akaydin H D, Elvin N, Andreopoulos Y. Wake of a cylinder: A paradigm for energy harvesting with piezoelectric materials[J]. Experiments in Fluids, 2010, 49(1): 291—304.
- [5] Li Saiwei, Sun Zhiqiang. Harvesting vortex energy in the cylinder wake with a pivoting vane[J]. Energy, 2015, 88: 783—792.
- [6] 文 晟, 张铁民, 卢玉华, 等. 基于卡门涡街原理的谐振型风力压电俘能器研究[J]. 传感技术学报, 2013, 26(9): 1303—1308.
- [6] Wen Sheng, Zhang Tiemin, Lu Yuhua, et al. Study on a wind piezoelectric energy harvesting based on resonance and Karman vortex street[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2013, 26(9): 1303—1308.
- [7] Miao J J, Liu T W. Vortex flowmeter designed with wall pressure measurement[J]. Review of Scientific Instruments, 1990, 61(10): 2676—2681.
- [8] 王福军. 计算流体力学分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004, 124—125, 215—216.
- [8] Wang Fujun. Analysis of computational fluid dynamics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004, 124—125, 215—216.
- [9] Venugopal A, Agrawal A, Prabhu S V. Influence of blockage and shape of a bluff body on the performance of vortex flowmeter with wall pressure measurement[J]. Measurement, 2011, 44(5): 954—964.
- [10] Wang D A, Chiu C Y, Pham H T. Electromagnetic energy harvesting from vibrations induced by Karman vortex street[J]. Mechatronics, 2012, 22(6): 746—756.
- [11] Tam Nguyen Hai-Dang, Pham Huy-Tuan, Wang Dung-An. A miniature pneumatic energy generator using Karman vortex street[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2013, 116(4): 40—48.

## ANALYSIS AND CALCULATION OF STRUCTURE OPTIMIZATION OF WIND TURBINE USING KARMAN VORTEX STREET

Zhou Yunlong, Liu Qichao

*(College of Energy and Power Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China)*

**Abstract:** A new wind turbine was designed and the characteristics of Karman vortex flow field was studied numerically using Fluent. The optimization design of the wind turbine was conducted by comparing speed values. The comparative analyses of four kinds of fluid impeding body with different cross-section, such as trapezoidal, circular, square and triangular sections were carried out. It is found that the fluid impeding body with trapezoidal shape cross-section is the best. Changing the size ratio of the characteristic length of the trapezoidal fluid impeding body and the pipe height as well as the geometric parameters of trapezoidal shape, comparatively analyzing the peak value of speed in Y direction, the best size ratio of 0.35, the base angle of  $60^\circ$  and the equivalent height of 0.5 can be obtained. Through extracting and analyzing the peak value of speed of y direction in different location behind fluid impeding body, the results showed when the distance between the axis and the fluid impeding body is 2-3 times of the characteristic length of the fluid impeding body, the best power output can be got.

**Keywords:** structure; shape; ratio; location; Karman vortex street; bluff body