

## 文章

## 二维乌格林斯基风力涡轮机的叶片尺寸优化及性能分析

坂本卢克, 福井富宏和森岸浩二

日本京都理工学院机械工程系, 日本京都606-8585;  
m0623016@edu.kit.ac.jp (L.S.); 我@kit.ac.jp (K.M.)  
\*通信信息: fukui@kit.ac.jp

**摘要:** 随着对可再生能源的日益关注, 需要改进垂直轴风力涡轮机 (VAWTs) 的效率。乌格林斯基风力涡轮机是VAWT的一种, 但对该涡轮机的研究很少。以往的研究表明, 乌格林斯基风力涡轮机的最大功率系数达到0.170, 比萨沃尼乌斯型 (0.110) 高54.5%, 该涡轮机在较大的尖速比 (TSR) 范围内保持较高的功率系数。本研究对乌格林斯基风机的两个半圆的尺寸进行了进一步优化, 以获得更高的功率系数。分析了叶片尺寸对叶片性能的影响。采用正则化晶格玻尔兹曼法模拟了涡轮机周围的流动。利用笛卡尔网格的虚拟通量方法模拟了涡轮机的几何形状。根据相邻TSR的输出功率系数和功率系数的平均值进行优化, 以考虑TSR的波动。研究表明, 涡距离越近, 有利于涡的生长, 提高了功率系数。

**关键词:** 垂直轴风力涡轮机 (VAWT); 乌格林斯基风力涡轮机; 萨沃尼乌斯风力涡轮机; 拖动式风力涡轮机

巴格查  
补充资料

引文: 坂本, L.; Fukui, T.;

Morinishi, K. 叶片尺寸

优化和性能

二维乌格林斯基风机的分析

涡轮机。能量2022,15,2478。

<https://doi.org/10.3390/en15072478>

学术编辑: Michał Kulak

and Michał Lipian

收稿日期: 2022年2月22日

接受日期: 2022年3月25日

出版: 2022年3月28日

**出版人注:** MDP I 对已发表的地图和机  
构关系的法律主张保持中立。



版权所有: 由作者提供的©2022。被许可方MDPI, 巴塞尔, 瑞士。本文是一篇在创意委员会署名 (CC BY) 许可的条款和条件下发布的开放获取的文章

[creativecommons.org/licenses/by/](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

4.0/).

## 1. 介绍

风力涡轮机可以根据其旋转轴对非水平轴风力涡轮机 (HAWTs) 和垂直轴风力涡轮机 (VAWTs) 进行分类。根据驱动它们旋转的空气动力, 它们还可以分为拖曳型和升力型 [1]。纵轴拖曳式风力涡轮机, 特别是萨沃尼乌斯风力涡轮机, 经常用于小规模发电。特别是, 这些风力涡轮机可以被描述为具有高扭矩和高自启动功率, 低噪声消耗潜力, 简单和低成本的设计, 可在广泛的风力条件下运行, 和全方位 (独立于风向) [3–5]。近年来, 城市地区的建筑和道路等小规模发电日益受关注 [6–8]。由于上述特点, 轴阻力式风力涡轮机是最适合此应用的风力涡轮机。此外, 难民住区还需要高效、清洁、负担得起和可靠的可再生能源。由于其简单和低成本的设计, 垂直轴拖动式e涡轮机可以成为一个离网可再生能源的选择。

垂直轴提升式风力涡轮机, 包括Darrius和H-VAWT, 比拖曳式风力涡轮机性能更高, 也是全向的 [4]。然而, 由于升力的性质, 它们的扭矩低于阻力式涡轮机, 并且其启动特性也低于阻力型 [4, 5]。因此, 阻力类型更适合于风力并不总是均匀的城市地区的发电。为了改善其启动特性, 以往的研究已经将adrag型风力涡轮机与同型型 [10] 相结合。然而, 尖端速度比 (TSR)

为了获得两种类型的风力涡轮机的最大输出是不同的，提升式涡轮机的峰值TSR高于阻力类型。因此，为了最大限度地提高该组合风力涡轮机的性能，提升型风力涡轮机的直径必须是阻力型风力涡轮机的6-7倍左右，并不适用于小规模发电[ 11]。此外，升降式类型由具有精确尺寸的叶片组成，如NACA叶片，并且比阻力型更复杂，后者可以通过结合弧形板来制造，从而导致更高的制造成本。

然而，一项研究表明，萨沃尼乌斯涡轮机的功率系数一般都小于HAWT [ 12]的一半。这可以用萨沃尼乌斯风圈的特点来解释，它由两个叶片组成。在一个循环中，当一个叶片产生正扭矩时，另一个叶片产生负扭矩。因此，该扭矩总是被抵消负扭矩抑制，导致低功率系数。为了避免这种情况，人们进行了各种研究来寻找更好的vawt设计。其中一个例子是在汽轮机前面安装了屏蔽板[13, 14]。然而，安装障碍物以提高效率会导致风向独立性的丧失，并需要额外的土地面积。因此，修改叶片形状是在保持风向独立性的同时提高效率的一种有效方法。Zhang等人[5]对传统萨沃尼乌斯涡轮机的叶片形状采用二次多项式曲线，将功率系数提高了6%，同时将叶片重量降低了17.9%。Roy等人[ ]开发了一种新型的双叶片萨沃尼乌斯型风力涡轮机，与传统的萨沃尼乌斯型涡轮机相比，其功率系数提高了32.1%。松井等人[ 16]在类似于巴赫型风力涡轮机的双叶片VAWT中引入了子叶片，并通过优化其位置，成功地比传统的萨沃尼乌斯型风力涡轮机提高了50.7%。

乌格林斯基风力涡轮机是一种VAWT，它有一对中心对称的叶片，有两个相同的弧段，不同的直径[ 17]。原始文件声称，乌格林斯基涡轮机比传统的萨沃尼乌斯风力涡轮机表现更好，并在所有角度产生正扭矩。我们的研究证明并证实了该涡轮机比传统的萨沃尼乌斯风力涡轮机性能好54.5%；此外，在 $\lambda = 0.5$ [ 18]下，它在各个角度产生正扭矩。由于其强大的效率，这种涡轮机可以成为未来安装vawt的可行选择。在以往的研究中，最大功率系数的最优尺寸为 $(S, L) = (0.35D, 1.3R)$ ，平均功率系数[ 19]为 $(S, L) = (0.35D, 1.0R)$ 。这些参数证明了最大功率系数为1.5%，相邻叶尖速比的功率系数平均值为5.9%。然而，本研究并未考虑到所有参数，因此仍有可能获得性能更好的参数。此外，还应进一步分析叶片尺寸对性能和流体结构的影响，以备进一步改进。本文作为前人研究的基础上，通过广泛的参数组合来进一步提高汽轮机的效率，重点研究了叶片尺寸和流体结构之间的关系，以预测外观优化和优化后的汽轮机的未来应用。

## 2.数值方法

为了便于并行计算[ 20]的实现，本文采用正则化晶格玻尔兹曼方法（RLBM）作为控制方程。采用虚拟通量法描述笛卡尔网格上涡轮的叶片[21, 22]。多块法用于涡轮机周围的局部精细网格。该模拟是在二维模拟中进行的，已知它可以得到可接受的结果，并与三维模拟具有相同的性能特性[2, 4]。

### 2.1.正则化晶格玻尔兹曼法

RLBM被用作控制流体分析的2D9-速度（D2Q9）模型的控制等量。该方法旨在减少内存使用和模拟高流量

与格点B奥尔兹曼方法[24]相比, 雷诺数不影响精度。  
分布函数 $f_\alpha$ 表示为

$$f_\alpha = w_\alpha (a_0 + b_i e_{\alpha i} + c_{ij} e_{\alpha i} e_{\alpha j}), \quad (1)$$

其中 $w_\alpha$ 为格速度模型(D2Q9模型 $0 = 4/9$ 、 $5-9=1/36$ 所定义的权重系数); 确定 $a_0$ 、 $b_i$ 、 $a$ 和 $c_{ij}$ 以满足以下关系:

$$\sum_\alpha f_\alpha = \rho, \quad (2)$$

$$\sum_\alpha e_{\alpha i} f_\alpha = \rho u_i, \quad (3)$$

$$\sum_\alpha e_{\alpha i} e_{\alpha j} f_\alpha = \frac{c^2}{3} \rho \delta_{ij} + \rho u_i u_j + \Pi_{ij}^{\text{neq}}, \quad (4)$$

其中,  $\rho$ 为流体密度,  $u$ 为流体速度分量,  $c$ 为定义的晶格速度  
作为 $c = \delta x / \delta t$ ,  $\delta_{ij}$ 为克罗内克三角洲,  $\Pi_{ij}^{\text{neq}}$ 是应力的非平衡部分  
张量然后, 平衡分布函数 $f_\alpha^{\text{eq}}$ 和分布函数 $f_\alpha$ 元的非平衡部分表示如下:

$$f_\alpha^{\text{eq}} = w_\alpha \rho \left[ 1 + \frac{3(e_{\alpha i} u_i)}{c^2} + \frac{9(e_{\alpha i} u_i)^2}{2c^4} - \frac{3(u_i u_i)}{2c^2} \right], \quad (5)$$

$$f_\alpha^{\text{neq}} = \frac{9w_\alpha}{2c^2} \left( \frac{e_{\alpha i} e_{\alpha j}}{c^2} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \right) \Pi_{ij}^{\text{neq}}, \quad (6)$$

其中, 平衡分布函数 $f_\alpha^{\text{eq}}$ 通过将麦克斯韦平衡分布函数近似为二次项来表示。最后, 将正则化格玻尔兹曼方程中的时间演化方程表示为

$$f_\alpha(t + \delta t, \mathbf{x} + \mathbf{e}_\alpha \delta t) = f_\alpha^{\text{eq}}(t, \mathbf{x}) + \left( 1 - \frac{1}{\tau} \right) f_\alpha^{\text{neq}}, \quad (7)$$

其中,  $\tau$ 是松弛时间。

## 2.2. 虚拟通量法

虚拟通量法[20, 21], 用于描述笛卡尔网格中的风力涡轮机的形状。选择这种方法是因为它的算法简单, 没有迭代计算, 并且容易纳入RLBM。此外, 在相同的网格分辨率下, 与其他浸没边界方法相比, 该方法可以更准确地描述物体周围的压力场[20, 21]。图1显示了涡轮机上的虚拟边界点的示意图。利用D2Q9模型的RLBM, 在八个方向的离散速度与物体表面的交点处设置虚拟边界点。

首先, 考虑了虚边界 $q$ 上的物理量 $q$ 。对虚拟边界的速度采用无滑移边界条件( $=$ 壁), 其中 $=$ 壁为涡轮叶片壁面的速度。对虚边界 $p_{vb}$ 的压力应用了诺伊曼边界条件( $\partial p_{vb} / \partial \mathbf{n} = 0$ ), 其中 $\mathbf{n}$ 为虚边界壁上的法向量, 证明了表面上的近似压力条件。

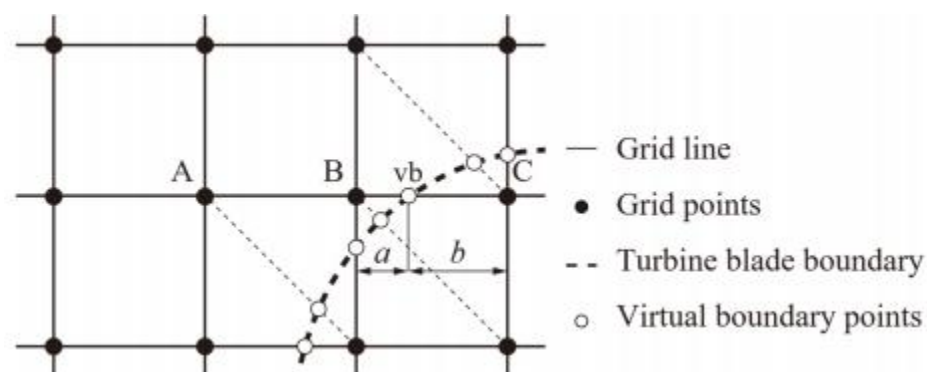


图1.笛卡尔网格上的涡轮叶片边界示意图。

如图1所示，考虑了点C处的分布函数移动了拓扑点B的情况；然而，这种移动被虚拟边界所阻碍。因此，在点C计算虚拟分布函数 $f_{\alpha, vb}$ ，分布函数 $f_{\alpha, B}$ 和平衡分布函数 $f_{\alpha, e, q B}$ 如下：

$$f_{\alpha, vb} = f_{\alpha, e, q vb}^e(u_{vb}, p_{vb}) + (f_{\alpha, B} - f_{\alpha, e, q B}^e) \cdot (8)$$

然后，虚拟分布函数 $f_{\alpha, C}^*$ 以及虚拟平衡分布函数 $f_{\alpha, q C}^*$ 通过内部除法比 $a$ 外推计算和 $b$ 。

$$f_{\alpha, C}^* = \frac{a+b}{a} f_{\alpha, vb} - \frac{b}{a} f_{\alpha, B}, \quad (9)$$

$$f_{\alpha, C}^{eq*} = \frac{a+b}{a} f_{\alpha, vb}^{eq} - \frac{b}{a} f_{\alpha, B}^{eq}. \quad (10)$$

最后，得到了下一步时间步 $f_{\alpha, B}$ 在点“B”处的分布函数从 $f_{\alpha, C}^*$ 和 $f_{\alpha, e, q C}^*$ 如下：

$$f_{\alpha, B} = f_{\alpha, C} + \frac{1}{\tau} (f_{\alpha, C}^{eq*} - f_{\alpha, C}^*). \quad (11)$$

### 2.3. 计算模型

通过数值流体动力学分析，对风力涡轮机不同尺寸的转矩和功率系数进行了讨论，并确定了最佳尺寸。乌格林斯基风圈的原始尺寸如图2所示

a. 半圆部分（段1）相对于风力机直径(D)为0.4，弧部分（段2）的半径等于风力机半径（=D/2）。风力涡轮机的直径如图2中的虚线所示。

图2b显示了用于杠杆化的萨沃尼乌斯风力涡轮机，其中 $e$ 和 $l$ 是叶片直径和重叠，并设置为 $e = 0.2l$ ，这在之前的研究[12]中被认为具有最高的性能

图2c显示了主题块方法的原理图。相对于风力涡轮机的直径D，整体的共同计算域设置为 $30D \times 30D$ ，涡轮机中心的坐标设置为 $(x, y) = (10D, 15D)$ 。从左侧流入的流速恒定，上、下边界的速度和压力梯度均设为零。对右侧流出设置凸出流出条件

最后，Reynolds数量相对于涡轮直径D设置为1000，涡轮为 $\lambda = 0.6$ 每时间步长旋转0.00557。

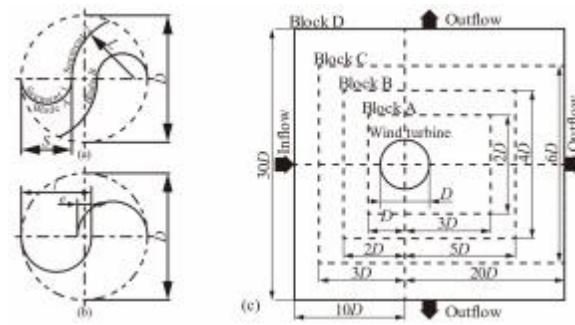


图2.0[o]处(a)乌格林斯基风力机和萨沃尼乌斯风力机(b)的俯视图  
0 [ o]和仿真中使用的多块模型的(c)示意图。

通常，在评估固定旋转的风力涡轮机时，多个tsr是单独评估的。在这种情况下，涡轮在计算域内旋转几次以进行流场发展，然后对每个TSR进行评估。在本研究中，将流场开发所需的计算域的信息导入到下一个TSR的计算中，以减少流场开发所需的革命次数，缩短计算时间。例如，当计算从 $\lambda = 0.7$ 到 $0.5$ ，间隔为 $0.1$ 时，将 $\lambda = 0.7$ 设置为初始TSR，共计算9个周期，将最后3个周期设置为评价周期。在第10个周期开始时，叶片使用一个周期的转速逐渐降低到satisfy $\lambda = 0.6$ 。然后计算6个评价周期，包括3个评价周期。之后，将TSR降低到 $\lambda = 0.5$ ，计算和评价方法与for $\lambda = 0.6$ 相同。从评价周期中获得的输出系数和扭矩系数在过去三个周期中取平均值。

转矩系数 $C_Q$ 、功率系数 $C_P$ 和TSR  $\lambda$ 定义为

$$C_Q = \frac{T}{\frac{1}{2}\rho U^2 R A}, \quad (12)$$

$$C_P = \frac{T \cdot \omega}{\frac{1}{2}\rho U^3 R A} = C_Q \cdot \lambda, \quad (13)$$

$$\lambda = \frac{R\omega}{U} \quad (14)$$

其中 $T$ 为转矩， $U$ 为特征速度， $\omega$ 为角速度， $A$ 为扫掠面积。通过相邻tsr的最大功率系数值和功率系数的平均值来选择最优形状。例如，在 $\lambda = 0.6$ 时相邻TSRs的功率系数的平均值值是在 $\lambda = 0.5$ 、 $0.6$ 和 $0.7$ 时的功率系数的平均值。这样，在固定速模拟中，可以考虑实验过程中由于不均匀流动和角度依赖转矩值引起的T波动。

## 2.4. 验证

对圆柱进行了流量分析，对仿真代码进行了验证。本次分析中使用的计算模型如图3所示。

圆柱体的直径设置为特征长度 $D$ ，计算域在 $x$ 和 $y$ 方向上设置为 $30 D \times 30 D$ ，圆柱体放置在 $(x, y) = (10D, 15D)$ 。具有特征速度的均匀流动从左、上、下、右边界流出。给出了热端对流流出条件，其他流出条件的压力和速度梯度均为0。块A、B、C和D块从最高到最低分辨率为4步多块，每个块的网格宽度分别为 $\delta x_A = 1.0$ 、 $\delta x_B = 2.0 \delta x_A$ 、 $\delta x_C = 4.0 \delta x_A$ 、and  $\delta x_D = 8.0 \delta x_A$ 。雷诺数 $Re = 1000$ ，特征长度 $D$ 的分辨率为128,184,256个细胞。

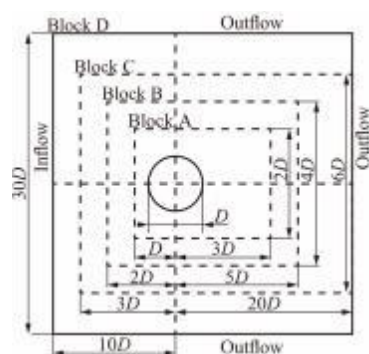


图3.圆柱体周围的流程示意图。

图4 为圆柱体表面的压力系数直径克, 剪应力法向分量的分布图, 剪应力的剪应力切向分量的分布图。可以看出, 圆柱体周围的压力系数值、 $C_{\tau n}$ 值和 $C_{\tau t}$ 值通过增加网格分辨率而收敛。

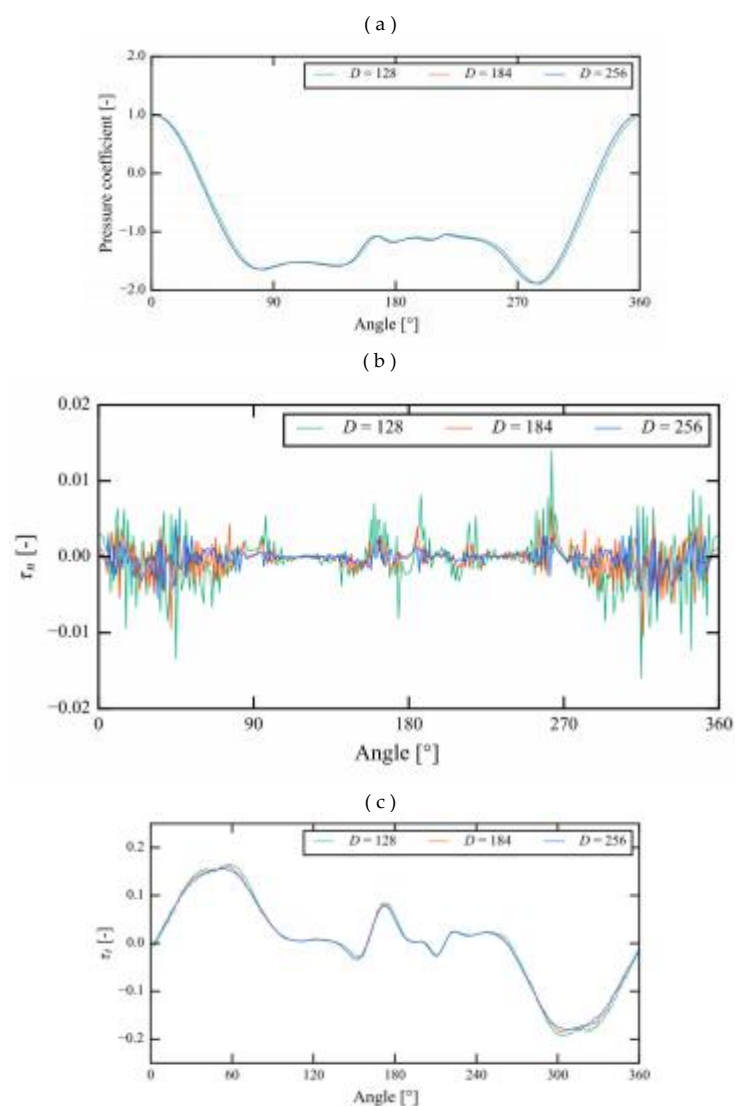


图4.(a)Re=1000汽缸压力系数图、剪切应力法向分量(b)分布图、钢瓶剪切应力切向分量(c)分布图

●



阻力系数 $C_D$ 和升力系数 $C_L$ 在随后维时间450-500中的时间变化如图5所示，斯特鲁哈尔数 $St$ 如表1所示。在图5中，可以看出，阻力系数 $C_D$ 和举升系数 $C_L$ 有周期性的振荡，如表1所示，证实 $St$ 在数量上是有效的。

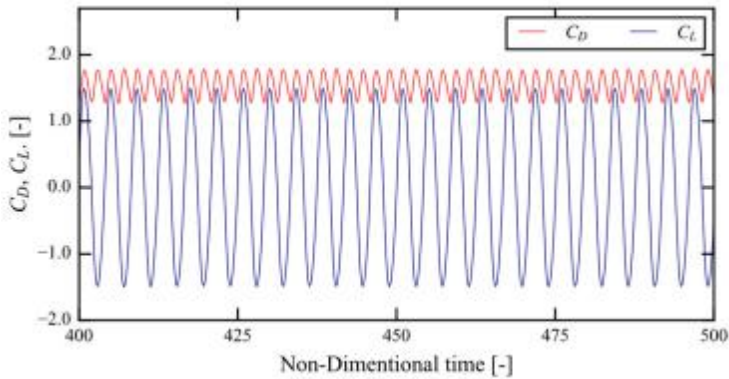


图5.Re=1000的阻力和升程系数的时间历史记录。

表1.段2不同直径 $L$ 的相邻TSR的最大功率系数值和功率系数平均值。

数据提供	&圣多美和普林西比
存在(256个细胞/天)	0.240
Lei[ 26]	0.240
Matsumia[ 27]	0.220
Mittai[ 28]	0.250
斯廷格	0.227

2.5.维里菲阳离子

对图2所示的萨沃尼乌斯涡轮机进行了验证研究 b为雷诺数 $Re = 500$ 在 $\lambda = 0.8$ 。测试采用4个不同的网格进行特征长度 ( $D = 256、360、512、724$ 个单元)。第6次旋转的扭矩系数值表现出与其他研究相同的趋势[4, 5,19].根据边界层厚度理论[ 30]，特征长度所需的网格数量与 $Re$ 的比例成两倍。与 $Re=500$ [1 9]时， $D = 256$ 细胞的平均扭矩系数误差小于3% ]；因此， $D= 360$ 细胞被选择为 $Re = 1000$ 条件。

3.S = 0.30 D和0.40 D模型的优化结果及讨论

本节将讨论优化对片段1和2的影响。用扭矩和功率系数描述了t型涡轮机的性能，压力系数用在压力等值线图中进行可视化。

在之前的研究中进行的优化中，固定了第2段的半径( $L$ )，在未检测的组合中仍有可能识别出性能更好的组合。因此，我们计算了不同半径 $L$ 下的 $S= 0.30D$ 和 $S= 0.40D$ ，这是我们在之前的研究[ 19]中表现最好的两种组合。

图6 显示了不同叶尖速比下的平均功率系数，而节段1是固定在 $S = 0.30D$ 的时候。相邻叶尖速比的功率系数 $nt$ 的平均值如表2所示。在图6中，除 $L= 0.9R$ 外，可以看到在 $\lambda = 0.5$ 和 $0.7$ 处可以观察到平均功率系数的峰值，类似于 $S = 0.35D$  [ 19]的 $L = 1.1R$ 和 $1.2R$ 模型。 $L= 0.9R$ 模型在计算的尖速比下达到较低的平均功率系数，而 $L= 1.2R$ 模型的尖最高。

在 $\lambda = 0.5$ 和 $\lambda = 0.7$ 下，所有计算模型的速度比。从稳定的角度来看，而美国大街。C P of  $L = 1.2R$ 是计算模型中最高的， $L=1.3R$ 模型波动较小，平均功率系数稳定，从 $\lambda = 0.5$ 到 $\lambda = 0.7$ ，如图6所示。

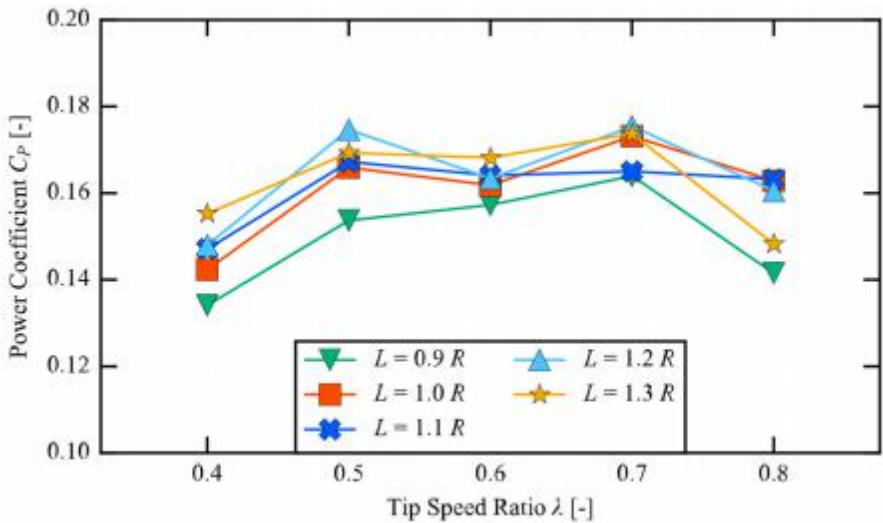


图6.分段采用不同半径的乌格林斯基风力涡轮机模型的功率系数值  
2在动态模拟中的 $S = 0.30D$ 。

表2.段2不同直径L的相邻TSR的最大功率系数值和功率系数平均值。

第2段	最高的C P	大街C P
0.9L	0.164 ( $\lambda = 0.7$ )	0.158 ( $\lambda=0.5-0.7$ )
1.0L	0.173 ( $\lambda = 0.7$ )	0.167 ( $\lambda=0.5-0.7$ )
1.1L	0.167 ( $\lambda = 0.5$ )	0.165 ( $\lambda=0.5-0.7$ )
1.2L	0.175 ( $\lambda = 0.7$ )	0.171 ( $\lambda=0.5-0.7$ )
1.3L	0.174 ( $\lambda = 0.7$ )	0.170 ( $\lambda=0.5-0.7$ )

图7 显示了不同叶尖速比在叶尖段1固定在 $S = 0.40D$ 时的平均功率系数。相邻叶尖速比的平均功率系数和功率系数的平均值如表3所示。特别是， $S = 0.40D$ 的平均功率系数对叶尖速比的特性与 $S = 0.30D$ 和 $0.35D$ [ 19]不同。 $L = 1.3R$ 的峰值为at $\lambda = 0.7$ ，而其他L的峰值为低尖速比（ $\lambda = 0.4$ 或 $0.5$ ）。此外，与其他S值不同， $L = 1.2R$ 和 $1.3R$ 的最大平均功率系数值较低。 $L = 1.1R$ 在 $\lambda = 0.4$ 处的特殊点表明，本研究采用的评价方法不够充分。通常情况下，较低的tsr比较高的tsr需要更多的旋转才能表现出周期性，而6个周期是不够的；因此，没有看到满意的收敛，导致t的情况出现异常值。

表3.段2不同直径L的相邻TSR的最大功率系数值和功率系数平均值。

第2段	最高的C P	大街C P
0.9L	0.176 ( $\lambda = 0.5$ )	0.166 ( $\lambda=0.4-0.6$ )
1.0L	0.181 ( $\lambda = 0.5$ )	0.174 ( $\lambda=0.4-0.6$ )
1.1L	0.182 ( $\lambda = 0.5$ )	0.171 ( $\lambda=0.5-0.7$ )
1.2L	0.174 ( $\lambda = 0.4$ )	0.166 ( $\lambda=0.4-0.5$ )
1.3L	0.165 ( $\lambda = 0.7$ )	0.161 ( $\lambda=0.6-0.8$ )



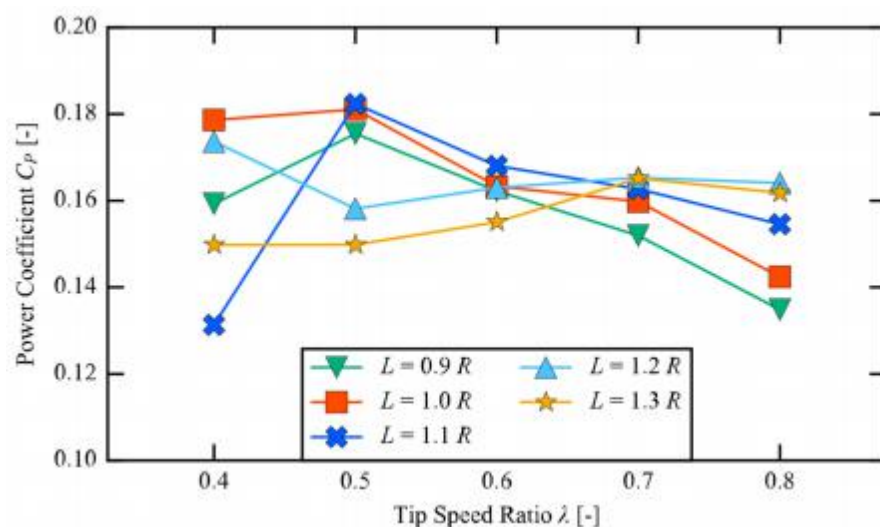


图7各段乌格林斯基风力机模型的功率系数值  
2在动态模拟中的 $S = 0.40D$ 。

图8显示了不同直径 $S$  at  $\lambda = 0.5$  的整个循环的扭矩系数，和图9 显示了在40、90、130和190时的压力分布和在130时的速度轮廓。对于0-70个取值。随着段1直径 $S$ 的增加，可以观察到扭矩系数的增加。如图9所示 扭矩的增加是由于受风面积（扫掠面积）的增加，从而表明 $\lambda = 0.5$ 在这个前进的叶片区域的几何形状占优势。同样，在相同的角度下，段2的顶端扭矩臂的长度随着 $S$ 的增加而增加，而在130 [°]时，段1的边缘涡也随着 $S$ 的增加而增加，分离的涡成为尾流区的负压，使叶片向旋转方向拉动。与 $S = 0.40D$ 相比，与 $S = 0.40D$ 的增长增加，第1段涡的脱离延迟，这进一步增加了拉力。同样，在190[°]时，第2段尖端的边缘涡也增加，涡的增长随着 $S$ 的增加而增加。从130 [°]处的速度等高线图中，聚焦于叶片A和叶片B之间的速度，可以看出具有激光器 $S$ 的模型具有较高的速度。这是因为 $S$ 较大的模型创建了一个喷嘴-ke结构，叶片a和B之间的距离很小，增加了v伊利诺城从左边流入。此外，叶片之间的一些流体流入叶片B段2和刀片段1的边缘涡，这促进了大 $S$ 模型涡的增长。

为了了解边缘涡与扭矩产生的关系，叶片A段1涡与叶片B段2涡之间的距离如表4所示。当 $S$ 增加时，叶片A段1和叶片B段2在几何上更接近。同时，涡-涡距离产生的两端 $t$ 变短，如表4所示。根据两个涡旋生长阶段的压力分布， $S = 0.30D$ 的边缘涡旋压力高于 $0.40D$ 。因此，可以说，对于 $S = 0.30D$ ，涡-涡距离很大，涡之间形成了一个高压区域，抑制了涡的形成和生长。

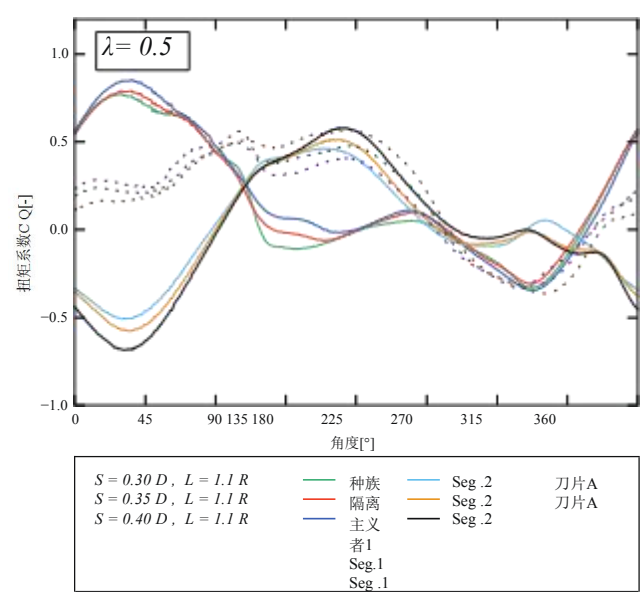


图8.在 $\lambda = 0.5$ 的动态模拟中，具有不同半径的乌格林斯基风力涡轮机模型的功率系数值。

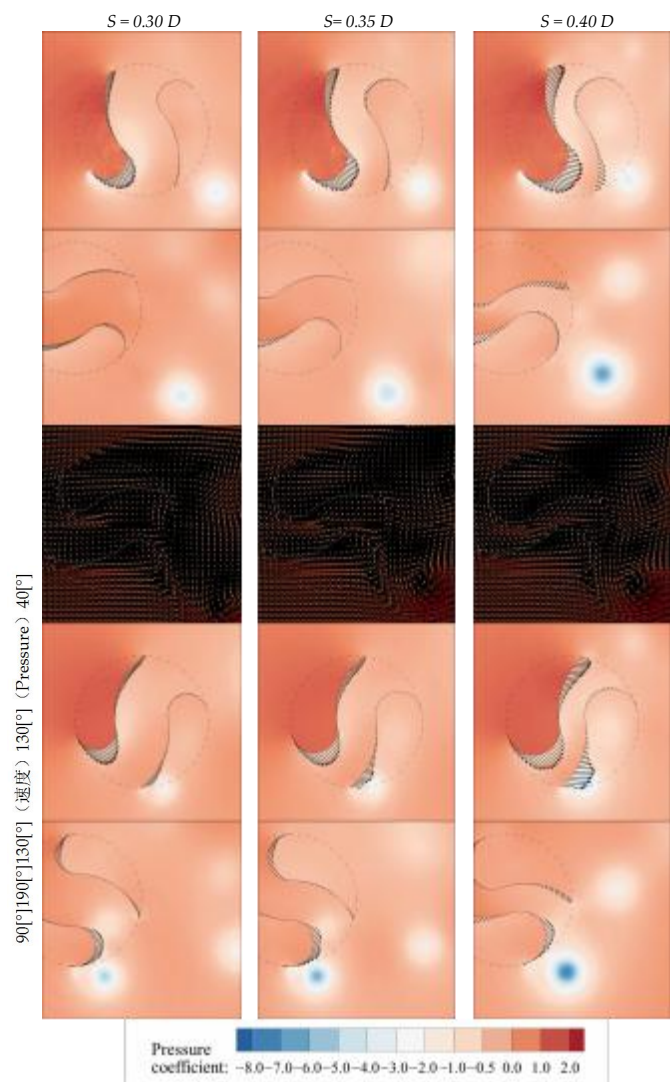


图9。不同段1直径为at $\lambda = 0.5$ 的乌格林斯基模型周围的压力系数分布和速度轮廓。黑色的向量表示在叶片上产生的扭矩。

表4：叶片A段1涡与叶片B段2涡之间的距离。

第1段	涡旋-涡旋距离[D]
S= 0.30D	1.02
S= 0.35D	0.86
S= 0.40D	0.76

与 $\lambda = 0.5$ 的情况一样，图10显示了在 $\lambda = 0.6$ 时不同直径S的整个循环的扭矩系数，以及图11 显示的压分布分别为t 40、90和160[ o]。在40[ o]时，段1在S= 0.40D时，S= 0.40D不像 $\lambda = 0.5$ 时的最大功率。在片段1优化[19]的 $\lambda = 0.6$ 比较中也观察到了这种表型。对于40[ o]，同样to $\lambda= 0.5$ ，S越大，转矩臂长度越长，负转矩增加越多。第1段90，第2段160，to $\lambda= 0.5$ 、S越大，边缘涡的尺寸越大，正转矩越大。本次比较选择的te S= 0.40D模型，段1的直径增大，但段2的半径减小，因此产生的返回转矩小于其他模型。

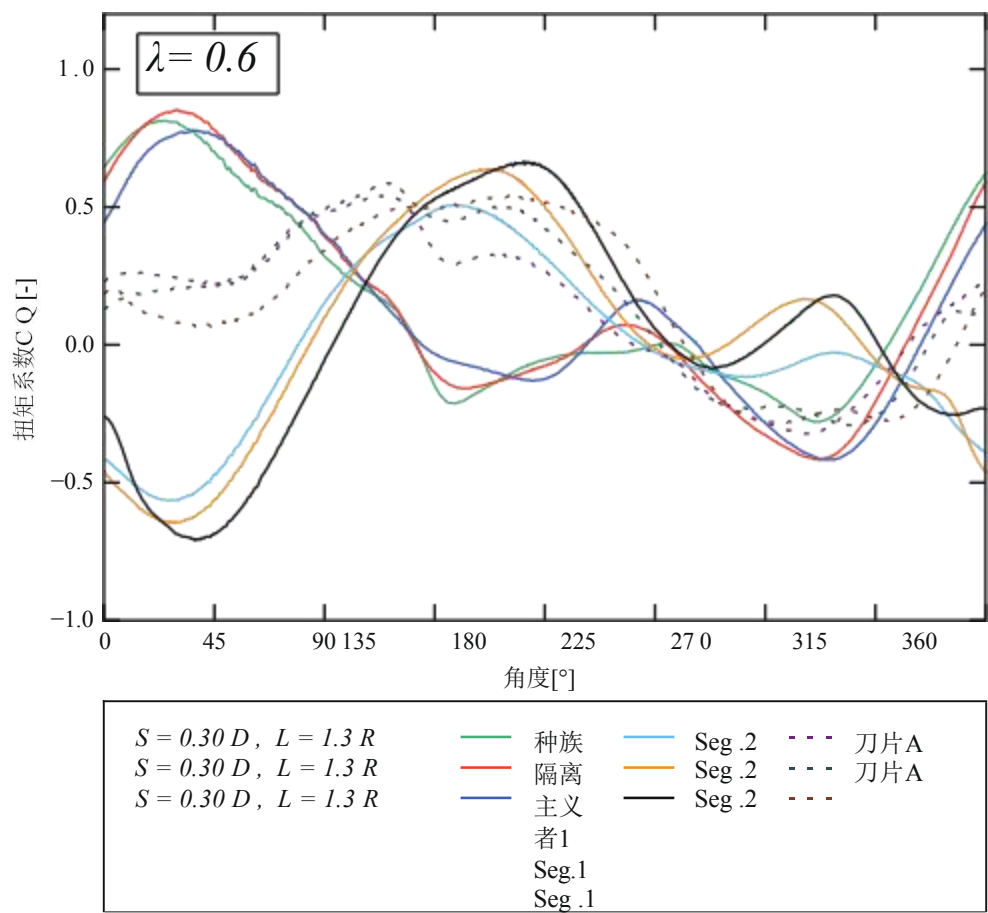


图10.在 $\lambda = 0.6$ 的动态模拟中，具有不同半径的乌格林斯基风力涡轮机模型的功率系数值。

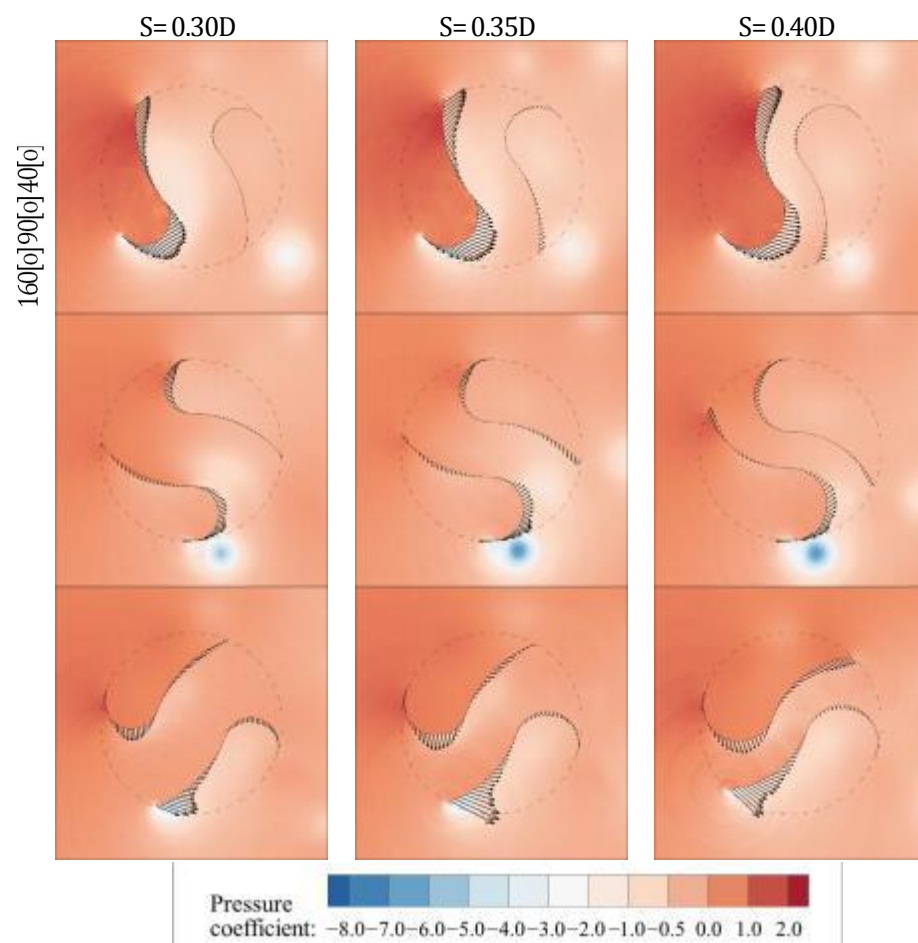


图11。在 $\lambda = 0.6$ 条件下，不同Segment 2直径的乌格林斯基模型周围的压力系数分布。黑色箭头表示在叶片上产生的扭矩矢量。

#### 4. 结论

本文采用正则化晶格玻尔兹曼法和虚拟通量法，模拟了具有不同叶片直径的乌格林斯基风力涡轮机周围的流动。对以往研究的剩余参数进行了计算，以保证[19]的优化。在优化过程中，采用相邻tsr的最大功率系数值和功率系数的平均值来评价最优维数。后一种评价方法用于包括在现实生活条件下发生的叶片速度的波动。

将段1的维度固定为 $S = 0.30D$ 和 $0.40D$ ，考虑不同段2的维度，从 $L = 0.9R$ 到 $1.3R$ ，研究各维度 $S$ 、 $L$ 和TSR对扭矩系数 $CQ$ 和功率系数 $CP$ 的影响。结果表明， $CQ$ 和 $CP$ 一般在 $\lambda = 0.5-0.6$ 时达到峰值，它们的值与 $S$ 、转矩臂长度和涡旋距离相关。然而，在某些情况下，如 $(S, L, \lambda) = (0.40D, 1.1R, 0.4)$ ，并没有确定 $t$ 和 $L$ 值的影响。为确定汽轮机的一般原理，进一步提高其性能，针对叶片形状、重叠比、叶片长度、堵塞率等进行了优化。是被建议的。

本研究提出了关于乌格林斯基风力涡轮机的一些原则：

在第二段2的返回叶片周期中，几何特性占主导地位，而力矩臂长度的增加可能会增加负力矩。

在 $\lambda = 0.5$ 时，第1段前进叶片周期的几何特性占主导地位；然而，受风面积（扫风面积）的增加可能不会影响 $t$  at  $\lambda = 0.6$ 。

在每个段上产生的边缘涡之间的距离可能会影响这些涡的增长。研究表明，较短的距离有利于涡的生长，降低涡的中心压力。

**作者贡献：**概念化出版社，L.S.和T.F.；方法论，L.S.和T.F.；软件，T.F.和K.M.；验证，L.S.；调查，L.S.；资源，T.F.和K.M.；起草，L.S.；写作-评论和编辑，L.S., T.F.和K.M.；可视化，L.S.；监督，T.F.和K.M.；项目管理，T.F.和K.M.；所有作者都已阅读并同意了该手稿的出版版本。

**资助来源：**本研究未获得外部资助。

**知情同意声明：**不适用。

**数据可用性声明：**不适用。

**利益冲突：**作者声明没有利益冲突。

## 参考文献

1. 张成泽；金d；黄，年；白，我；金，s；Baek, J.通过模拟和现场试验分析阿基米德螺旋风力涡轮机的性能。能源公司，2019年，12,4624年。综合参考]
2. 罗伊，美国；在英国，对萨沃尼乌斯风旋翼的设计和发展的数值研究的回顾。续订。维持。能源的牧师。2013, 24, 73–83.综合参考]
3. 利用涡轮机叶片的新设计，改进垂直轴风力涡轮机的自启动能力。可持续发展2021,13,3854。综合参考]
4. 田、W.；宋，B.；范·茨威滕，J.H.；具有新型叶片形状的改良型美国风力涡轮机的计算流体动力学预测。能量2015,8,7915-7929。综合参考]
5. 张先生，B.；歌曲 B.；毛，Z.；田，W.；李，B.；列支敦士登 B. 斯沃尼乌斯风力涡轮机的参数建模方法与优化设计。能量2017,10,301。综合参考]
6. 阿莱莫 A.；埃斯波西托 A.；Milazzo, A.；奥兰多 C.；通过CFD进行风力分析。能源2013,6,6335-6351。[交叉参考]
7. 翼型和垂直轴风涡轮机的空气动力学特性。可持续发展2021,13,4284。综合参考]
8. 穆勒；G.；建筑集成用电阻式垂直轴轴式风力涡轮机。续订。能源公司2017、111、803-814。综合参考]
9. 爱尔兰娜。难民定居点的可再生能源：人道主义情况下的可持续能源获取；国际可再生能源机构；阿拉伯联合酋长国，2019年；第4页。
10. 升拖组合结构VAWT转子起动器静态特性的数值模拟与风洞研究。能量为2021,14,6167。综合参考]
11. 上山，第一期，风力发电机组工程简介，第2期。；Morikita出版：日本东京，2013年；页。53–60。（在日语中）
12. 一、植山；永井，H.；通过实验确定萨沃尼乌斯转子的最佳设计配置。反式Jpn .Soc .机械。Eng .Ser .B 1986, 52, 2973–2981.综合参考]
13. 穆罕默德，M.；Gbor, J.；Elem²r, P.；多米尼克，T.。利用屏蔽返回叶片的障碍物优化萨沃尼乌斯涡轮机。续订。能源公司，2010年，35,2618-2626年。综合参考]
14. El-Askary，华盛顿州；Nasef, M.H.；AbdEL-hamid，A.利用风能以提高萨沃尼乌斯转子的性能。J.风。Ind .空气。2015, 139, 8–15.综合参考]
15. 罗伊，s；对作用于新型萨沃尼乌斯式风力涡轮机上的瞬时力和力矩臂的非定常分析。能量转换器。管理。2016, 121, 281–296.综合参考]
16. 松井；福井；在一种新开发的萨沃尼乌斯转子上的计算流体动力学，通过添加子桶来增加叶尖速比，以产生更高的输出功率系数。J.流体科学。技术技术。2020 , 15, JFST0009.综合参考]
17. 卡任斯基，B.B.低容量无流量水力发电厂；天然气发电厂；莫斯科，俄罗斯，1950年；页。30–32。（在俄语中）
18. 坂本先生，L.；福井，T.。乌格林斯基风力涡轮机的性能评价。《流体工程会议记录》，日本大阪，2020年11月6日。（在日语中）。
19. 坂本，等；二维乌格林斯基风力涡轮机模型性能的数值研究。WIT跨。Ecol .周围环境。2021 , 254,113–124.
20. 正则化晶格玻尔兹曼法在高雷诺数和弯曲边界流动不可压缩流动模拟中的应用。J.流体科学。技术技术。2011, 6, 812–822.综合参考]

- 21.一；强制接触离子流的虚拟通量法的验证。JSME Int.J. Ser.B 2006 , 46,1141–1148.综合参考]
  - 22.福井；流体结构相互作用问题的欧拉方法。压缩。流体，2012、65、92-98年。综合参考]
  - 23.一种关于粘性流体流动的多块晶格玻尔兹曼方法。Int. J.数字器。方法：流体：2002、39、99-120。综合参考]
  - 24.陈；S.；液体流的晶格玻尔兹曼法。安努。Rev .流体机械。1998, 30, 329–364.综合参考]
  - 25.对有限微分晶格玻尔兹曼法的流出物边界条件的研究。Tran. Jpn. Soc .Comput .Eng .Sci .2006, 6, 7–12.
  - 26.雷，一个圆柱体上剪切流的基本差分解。海洋工程师。2000, 27, 271–290.
- CrossRef
- 27.Matsumiya, K.；谷口，N.；用三阶逆风有限微分法对圆柱体周围的二维流动进行数值模拟。反式Jpn .Soc .机械。Eng .Ser .B 1993, 59, 2937–2943.综合参考]
  - 28.米塔尔，美国；库马尔，在雷诺数 $10^3$ 到 $10^4$ 处的光圆柱体的流动诱导振动。J.声音振动。2001 , 245,923–946.综合参考]
  - 29.毒刺，R.M.。；藏J；雷诺数范围下圆柱周围流动的非定常RANS计算。海洋工程师。2014, 87, 1–9.综合参考]
  - 30.计算流体动力学的数值方法；东京大学出版社：东京，日本，1994年；页。174–180.

（日语）