

以长跑倒三角为例的破风阵型研究

李一德、郭锐冰、付华钰

行健-力 2

摘要：当今马拉松比赛中，破风阵型作为提高长跑成绩的关键因素备受关注。本研究以基普乔格马拉松破 2 倒三角阵型为对象，通过数值仿真和实操实验验证了多个圆柱排列形成的破风阵型的有效性。

一、引言

在现代马拉松运动中，如何最大限度地降低空气阻力以提升选手的表现一直是研究的重要课题。破风阵型作为一种有效的战术策略，旨在通过减少选手在运动过程中受到的空气阻力来提高长跑成绩。本研究以基普乔格马拉松破 2 倒三角阵型为例，通过数值仿真和实操实验系统地探讨了多个圆柱排列形成的破风阵型对阻力的影响。通过对比单个圆柱和多个圆柱的阻力特性，我们发现多个圆柱排列时尾流效应显著减弱，这意味着马拉松选手若能巧妙地利用破风阵型，将能显著减少阻力并有望提升其竞赛成绩。

二、问题描述

如图 1，倒三角阵型每组有 5 人以 V 字形跑在基普乔格身前，另有 2 人分别跑在基普乔格身后的左右两边。这是在挑战团队对不同阵型进行实验后得到的最佳破风阵型，可以最大的减少挑战者的阻力。¹本研究将分析多个圆柱或双圆柱排列相较于单个圆柱在减少尾流效应上的优势，以此来验证破风阵型在理论和实际中的效果。



图 1 基普乔格马拉松阵型

¹ 赵瑞琪_NB12596:《基普乔格"破 2"背后揭秘:41 人配速团队,镭射激光辅助,赛道还专门设计》,《网易体育》, 2019-10-12 17:03:13。

三、数值仿真

1、马拉松队形

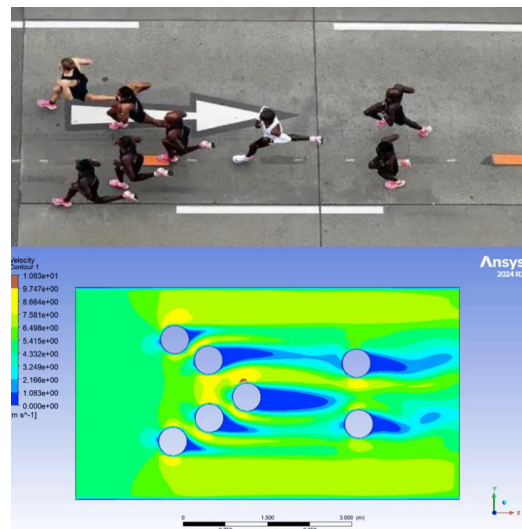


图 2 马拉松队形及其数值仿真

圆柱直径（m）	入口速度（m/s）	湍流强度	湍流粘度比
0.5	5	5%	10

表 1 马拉松队形模拟参数

考虑二维流动，我们将每位破风手简化为圆柱，在标准大气环境中进行数值仿真。假设运动场地的风速为零，其他仿真参数详见表 1。根据图 1 显示的数值仿真结果，可以明显观察到在“尾流”区域，流速较低且该区域呈现出较宽且延伸的特征。在运动过程中，选手若能站在这样的尾流区域内，将会显著减少其所受到的空气阻力。因为尾流区域的速度较小，运动员受到的阻力将大大减少。

2、大雁队形

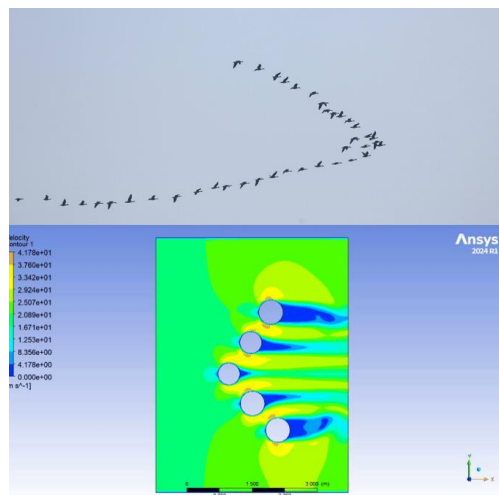


图 3 大雁队形及其数值仿真

圆柱直径 (m)	入口速度 (m/s)	湍流强度	湍流粘度比
0.5	20	5%	10

表 2 大雁队形模拟参数

仍考虑二维流动，我们将大雁简化为圆柱，在标准大气环境中进行数值仿真。模拟参数见表 2。根据图 2 所示的数值仿真结果，我们并不能得到“大雁排成人字飞行会省力”的结论。经过查阅，我们得知雁群是利用人字形队形，利用领飞头雁翅膀两侧产生的上升气流，有效节省体力和增强飞升能力，使得长途迁徙更为高效。其原理与马拉松破风不同。²

3、一字纵列队形

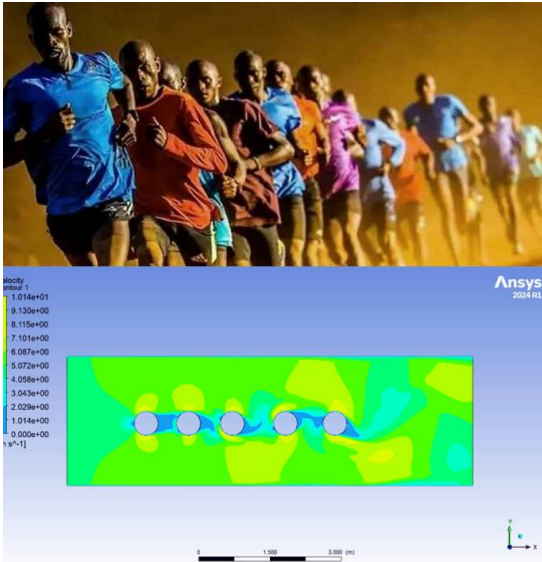


图 4 一字纵列队形及其数值仿真

圆柱直径 (m)	入口速度 (m/s)	湍流强度	湍流粘度比
0.5	5	5%	10

表 3 一字纵列队形模拟参数

仍考虑二维流动，我们将选手简化为圆柱，在标准大气环境中进行数值仿真。模拟参数见表 3。将图 4 的仿真结果与图 2 的破风阵型进行对比，可以看出图 2 的尾流区域不仅更大，而且风速更小，故倒三角的破风阵型确实具有更好的减小阻力效果，对选手成绩的提高大有帮助。

² 王振东：《为什么大雁排成人字飞行会省力？》，《澎湃新闻·澎湃号·湃客》，2022-12-11 09:12。

四、水槽实验

1, 实验步骤:

- (1) 固定样品 (图 5)
- (2) 打开激光, 照亮粒子 (图 6)
- (3) 调节相机等设备; 调整流速等参量 (图 7)
- (4) 放入网格参照物, 标定坐标 (图 8)
- (5) 调整相机频率等参量; 测量 (图 9)
- (6) 计算机计算流场质点的速度, 导出结果

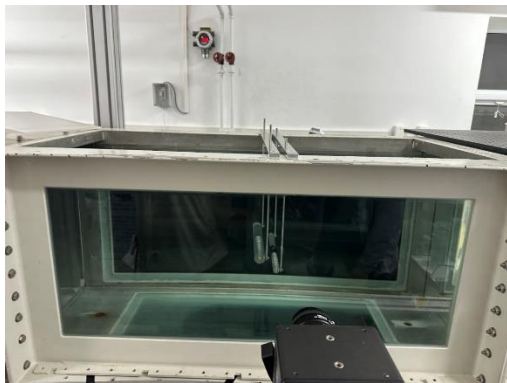


图 5 固定样品

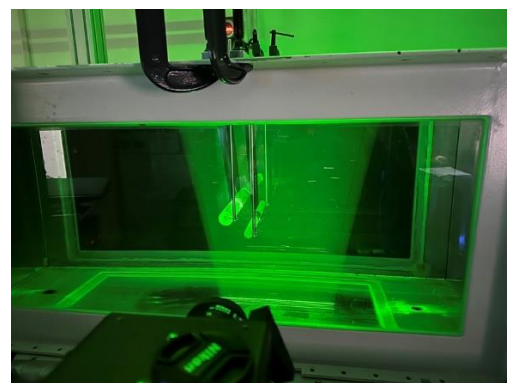


图 6 打开激光, 照亮粒

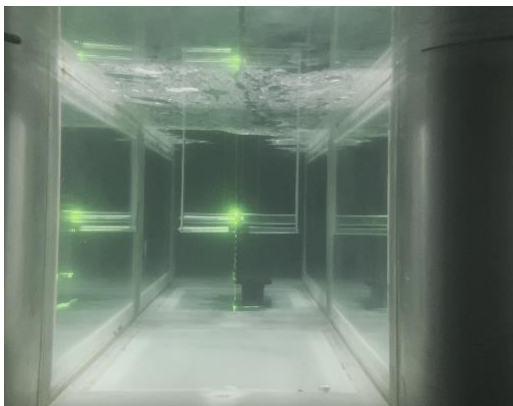


图 7 调节相机等设备; 调整流速等参量

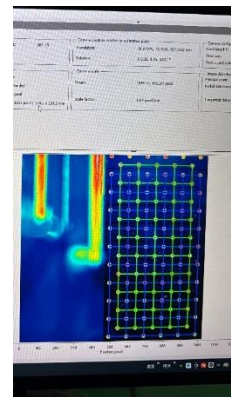


图 8 放入网格参照物, 标定坐标

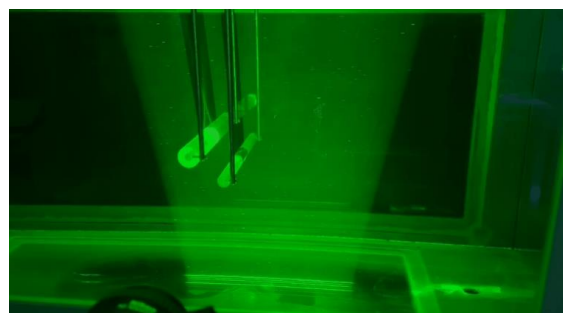


图 9 调整相机频率等参量; 测量

2, 实验数据分析

本次实验在水槽中进行, 采用粒子成像速度场仪 (Particle Image Velocity, PIV) 来计算流场。由于实际问题需要在空气中考察, 根据粘性流动的相似性, 需要设置流场参数使雷诺数与实际空气中的雷诺数一致。即满足

$$U_{\text{water}}L_{\text{water}}/\nu_{\text{water}} = U_{\text{air}}L_{\text{air}}/\nu_{\text{air}}$$

不妨假设人在空气中跑步的速度为 5 m/s, 人的特征尺寸为 0.5 m, 空气的运动粘性系数为 $1.5 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ 。在水槽实验中, 圆柱样品的直径为 2.5cm, 在实验室环境下(温度 26℃)水的运动粘性系数为 $1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 。为了保证雷诺数量级上一致, 选取水槽中水的来流速度为 0.5m/s。

3, 实验结果

实验结果如图 10 所示。可见单个圆柱的尾流较小, 但是当侧前方出现了另外一个圆柱的时候该圆柱的尾流就会大幅增加。该实验能很好地解释仿真结果。对于倒三角形的马拉松阵列, 在两个侧前方均有一名运动员, 两侧的作用可以使尾流更大。此外, 根据仿真的结果, 侧前方的多个圆柱产生的尾流会逐级放大。因此该实验结果很好地解释了倒三角阵型能产生更低的阻力。

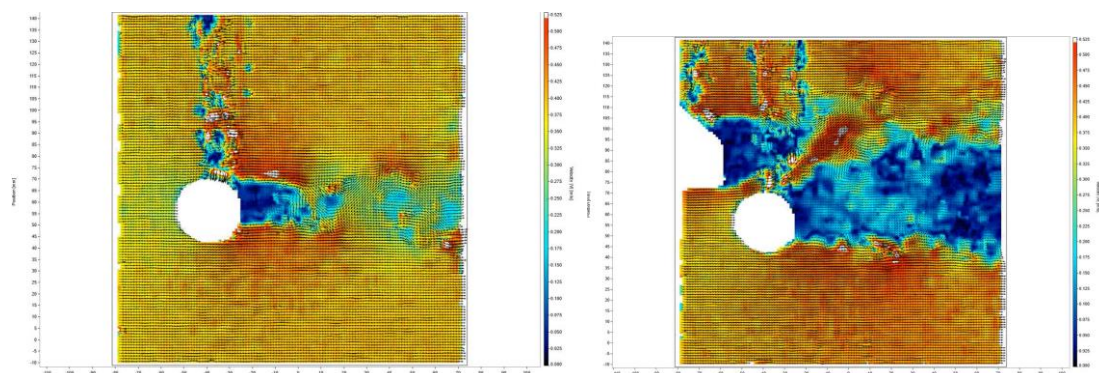


图 10 实验结果

五、理论分析

一般来说，针对两个相同圆柱的情况（称为双圆柱问题），存在一些经典的解析解。然而，当圆柱数量增加到三个或更多时，除了特定的几何排列，通常情况下很难获得精确的解析解。多圆柱的情况下，流场变得更为复杂，涉及到更多的干扰和相互作用效应，使得解析求解变得非常困难甚至不可行。此时，通常会采用数值方法（如计算流体力学方法）来模拟和分析流场，以获得解决方案的近似解，或是采用设计实验的方法来解决问题。³

我们尝试给出解决多圆柱绕流问题的解答。

考虑二维流动，并假设有 n 个圆柱，各圆心位置在 (x_i, y_i) ， $i=1, 2, \dots, n$ ，各圆柱半径为 r_i 。

有连续方程：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0$$

运动方程：

$$\rho \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \rho \mathbf{F} + \nabla \cdot \mathbf{P}$$

能量方程：

$$\rho \frac{dU}{dt} = \rho q + \nabla \cdot (k \nabla T) + \nabla \cdot (\mathbf{v} \cdot \mathbf{P}) - \mathbf{v} \cdot \nabla P$$

再联立本构方程与气体的状态方程，得到基本方程组。

本问题的边界条件即为圆柱表面的无滑壁条件及远场边界条件。

一般情况下无法求出解析解，若考虑两个圆柱直径相同为 D 的双圆柱情况，则可以得到如图 11 所示的解析解。

速度场的一般形式可以表达为：

$$u(x, y) = U \left[1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{n^2} \cos\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \frac{\sinh\left(\frac{n\pi(D/2-y)}{L}\right)}{\sinh\left(\frac{n\pi D}{2L}\right)} \right]$$

其中，

- L 是两个圆柱的中心距离；
- D 是圆柱的直径；
- U 是远场流速。

图 11 双圆柱情况下的解析解

³ 李聪舟，张新曙：《高雷诺数下多柱绕流特性研究》，《力学学报》，2018 年 3 月。

六、小结与个人感悟

综上所述，本研究通过数值仿真分析了倒三角、人字形和一字纵列三种不同破风阵型的流动效果，验证了马拉松运动中倒三角阵列的优越性。结合实验与理论分析，本研究深入剖析了这一效应的产生原因，为马拉松运动中破风阵型的优化提供了流体力学解释。

在本次实验中，本人负责数值仿真工作，并与郭锐冰同学在老师和学长的帮助下共同完成了实验研究。通过此次研究，本人受益匪浅。我熟悉了 Ansys 软件进行 CFD 研究的工作流程，并且熟练掌握了 Fluent 模块的基本操作。这不仅增强了我对软件的使用能力，还加深了对数值仿真在工程应用中的理解。同时，对流体力学实验有了更加深入的认识，能够更好地将理论知识与实际操作相结合。实验过程中，团队合作精神得到了充分的体现，每位成员的积极参与和无私奉献，使得研究得以顺利进行。

致谢

感谢贾老师和罗雨辰学长对于本研究中涉及的实验的帮助，感谢苏佑天学长对本人仿真软件的指导，感谢许老师对本课程的指导与本次研究的支持！

参考文献

- [1]. P. K. Sinha and D. Rockwell :“Flow around two circular cylinders in a side-by-side arrangement”, Journal of Fluid Mechanics, 1981.
- [2]. Lukas Schickhofer, Henry Hanson :“Aerodynamic effects and performance improvements of running in drafting formations” ,Journal of Biomechanics,2021.
- [3]. M. M. Zdravkovich: "Flow around two circular cylinders in tandem arrangement", Journal of Fluid Mechanics, 1969.
- [4]. 赵瑞琪_NB12596:《基普乔格"破 2"背后揭秘:41 人配速团队,镭射激光辅助,赛道还专门设计》，《网易体育》，2019-10-12 17:03:13。
- [5]. 李聪舟，张新曙：《高雷诺数下多柱绕流特性研究》，《力学学报》，2018 年 3 月。
- [6]. 王振东：《为什么大雁排成人字飞行会省力？》，《澎湃新闻·澎湃号·湃客》，2022-12-11 09:12。