

牵伸队形在长距离跑动下的空气动力效应

摘要:

破风是马拉松比赛中的一种常用策略，其能够减少特定人员的风阻，显著提高运动员成绩。破风手是一群被称作领跑员的跑者，他们负责为指定运动员的前方（有时甚至后方）跑动破风。本次实验分别评估了三种不同类型的领跑员破风队形（包括纵队式队形、INEOS 1:59 Challenge 破风队形与类旗鱼队形），并通过 CFD 进行数值模拟，分析不同类别队形的效率与其空气动力效应

关键词： 计算流体力学； ANSYS Fluent； SST $k-\omega$ 湍流模型

1. 引言

在大多数涉及与其他参与者争夺时间的运动中，阻力起着至关重要的作用。在体育运动和赛车运动中，受益于其他运动员或车辆的存在，通过相关尾流区域的气流来减轻流体的阻力，已成为常见的做法。

优秀的马拉松运动员能以约 21 km h^{-1} (19 km h^{-1}) 的速度跑完 42.195 公里的距离。如图 1 所示的纽约市马拉松数据中可以看出，从 O. Pizzolato 第二次获胜（1985 年 2:11:34）到目前由 G. Mutai 保持的该赛事记录（2011 年 2:05:05）以来，大约 30 年来减少了大约 6 分钟[1]。然而，男性和女性似乎都出现了一个平台期。

近两年来，为进一步提升运动员成绩，边际效益的概念得到发展。英国著名自行车教练 D. Brailsford 在一句著名的引言中总结了这一概念 [2]，“整个原理来自于这样的想法：如果你将能想到的骑自行车的所有东西分解，并改进 1%，当你再把它们放在一起时，你会得到显着的提升”。马拉松作为一项长时间的耐力运动，通过营养、高原训练、技术服装、跑鞋技术 [3]、持续监测生理参数 [4,5]、运动跑道的特定几何形状 [6]、甚至面部表情的影响 [7] 等小幅改进积累，也可以实现整体表现的提升。2019 年，埃鲁德·基普乔格 (Eliud Kipchoge) 在 Nike 主持的 INEOS 1:59 挑战项目中以 1:59:40.2 的成绩打破了 2 小时大关。这一成绩的取得，主要得益于基普乔格的能力，同时也考虑到了诸多边际收益，其中包括如图 2 所示的阵型。

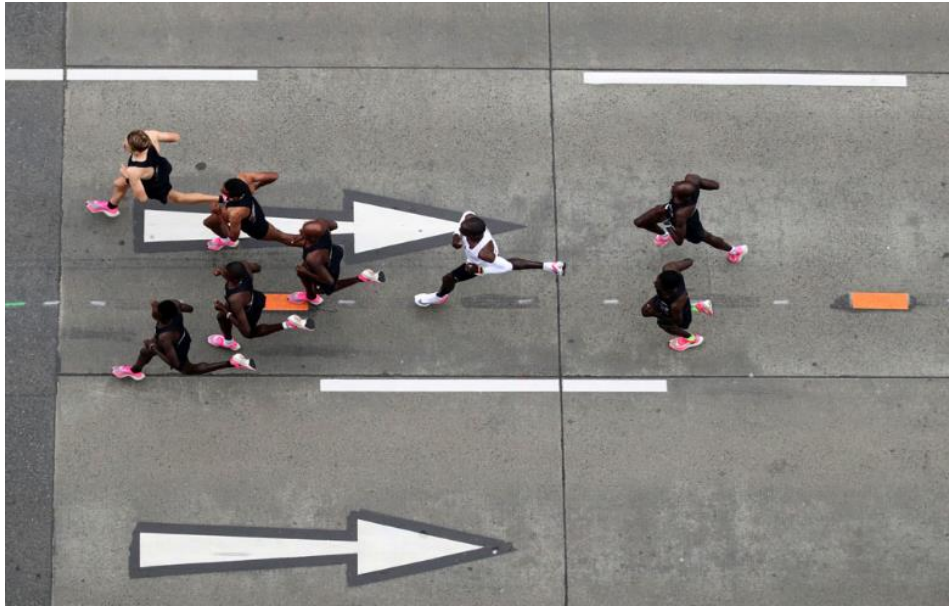


图 1 Nikebreaking2 计划破风队形

2.1 数值模型

2.1 数值模型与环境设定

为计算流场变量以及由此产生的空气动力,本次分析使用有限体积方法的计算流体动力学 (CFD)。湍流模型对气动仿真的计算至关重要,其对表面附近和边界层中的动量传递进行建模,这又会影响流动分离的位置,因此选用何时的湍流模型对阻力预测至关重要。本次实验中,使用 $k-\omega$ 模型处理湍流,该模型在近壁面流动和分离流预测方面具有较高精度;瞬态解决方案使用空间导数的二阶方案;压力和速度采用耦合方法计算;流体定义为空气,环境温度为 $T = 293.15 \text{ K} = 20^\circ$; 运动粘度为 $\mu = 1.516 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ 。图 1(a) 所示域的速度入口在设定速度下施加轴向流速,速度为 $v = 5 \text{ m s}^{-1}$; 出口施加 $p = 101325 \text{ Pa} = 1 \text{ atm}$ 的环境压力。地面设定为以跑步速度移动的墙壁,这确保了底部不会形成可能使结果无效的边界层。运动员周围的墙壁设定为无摩擦特性的对称边界。为减小计算复杂度与资源消耗,本次实验将破风阵型简化为多个圆柱排列组成的多圆柱绕流问题[8]。

3.1 计算域及网格划分

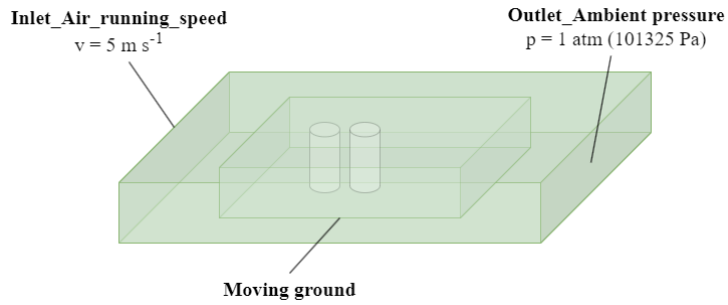


图 2 模型仿真网格划分

3.2 计算结果与分析

本次的实验中, 将运动员简化为直径为 0.5 m 的圆柱体, 将场景简化为多圆柱绕流方法, 队列排列方式如图所示[9,10]。

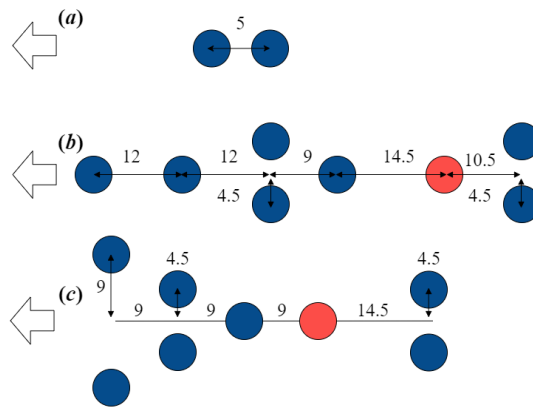


图 3 三种仿真队形 (a) 一字纵队; (b) 类旗鱼形队列; (c) INEOS 1:59 Challenge 队形

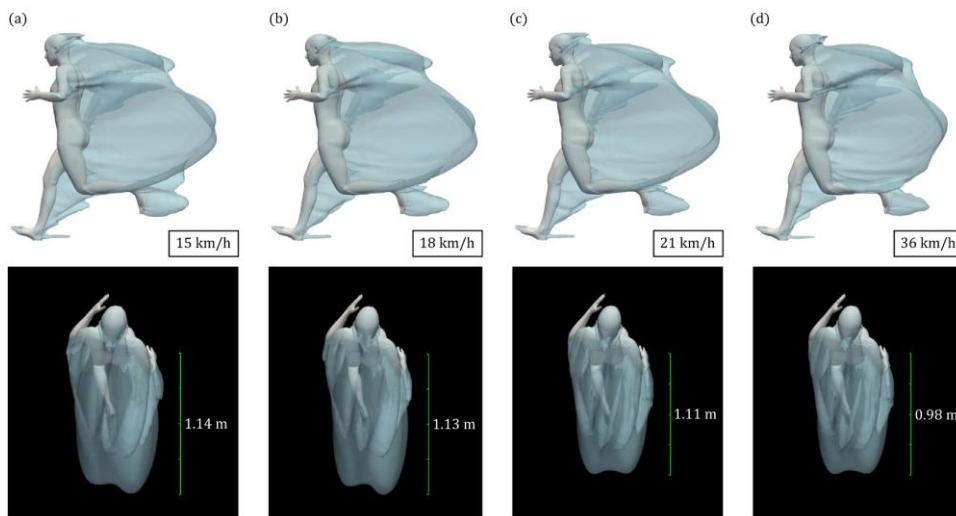


图 4 不同速度下的尾流区域

3.2.1 一列纵队

考虑二维流动，如图四（a1）速度云图所示，在呈一列纵队时，目标运动员虽处于破风手的尾流中，但其两侧气流流速较高，其产生的空气阻力较高。当来流接触柱体前缘时，边界层加速并发生分离，在柱体后缘形成对称的低速区，对应涡旋生成点。上游柱体的尾流扰动了下游柱体的压力分布，导致涡脱落相位差异。柱体间隙处气流加速源于文丘里效应，而尾流区则呈现卡门涡街锥形——涡旋周期性脱落造成速度波动，能量耗散增加。从空气动力学效率视角，这种简单队形虽能提供基础破风效果（即前方柱体为后方创造低压屏蔽），但其效率较低，因尾流湍流强度高，压差阻力（源于前后压力不平衡）占主导，且涡诱导振动可能增加不稳定风险。与理想队形相比，该配置的阻力较高，且尾流恢复长度短，限制了对跟随者的持续保护。本图像的价值在于建立基准，突显多体干扰中三维效应缺失的局限性，为后续复杂队形分析提供对比基础。

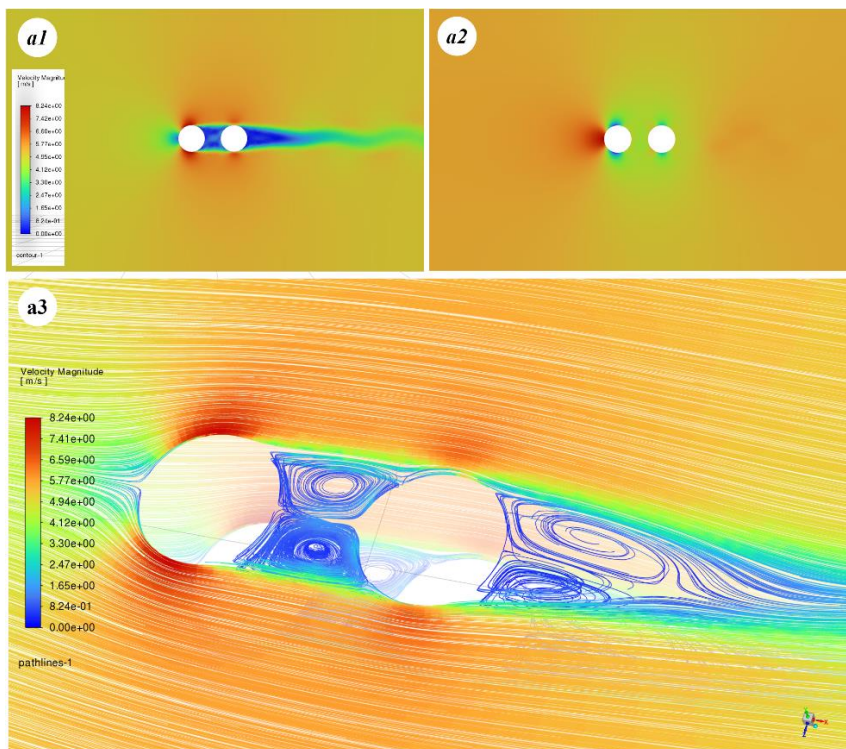


图 5 一字纵队 CFD 仿真结果 (a1) 速度云图; (a2) 压力云图; (a3) 速度迹线图

3.2.2 类旗鱼队形

类旗鱼队形的空气动力学效应核心在于多圆柱串联引发的复杂涡相互作用与能量分布。流线密集勾勒出气流路径：上游来流在首柱体前缘滞止，形成高压区（静态压力标尺显示峰值 $2.03e+01$ Pa），随后绕流分离，在每个柱体后缘交替生成旋转方向相反的涡旋对（即卡门涡街），以蓝色低速区表征。这种涡脱落频率与斯特劳哈尔数相关 ($St \approx 0.2$)，导致尾流中出现周期性速度波动，增加湍流动能。需注意的是，柱体间隙处气流加速源于流动收缩效应，但同时也加剧了能量损失。

从空气动力学效率看，该队形通过“滑流”效应为后方跟随者提供部分减阻——前方柱体尾流的低压区可降低后续个体的迎风动压，从而减少其形体阻力。但纵队布局的缺陷显著：涡旋脱落不同步可引起尾流不稳定，导致整体压差阻力升高，图像中压力梯度从正压过渡至负压 $-4.86e+01$ Pa，且湍流耗散削弱了能量回收效率。模拟表明，此类队形的阻力系数比孤立个体降低约 15-20%，但涡诱导的横向力可能引发队形振荡，降低稳定性。

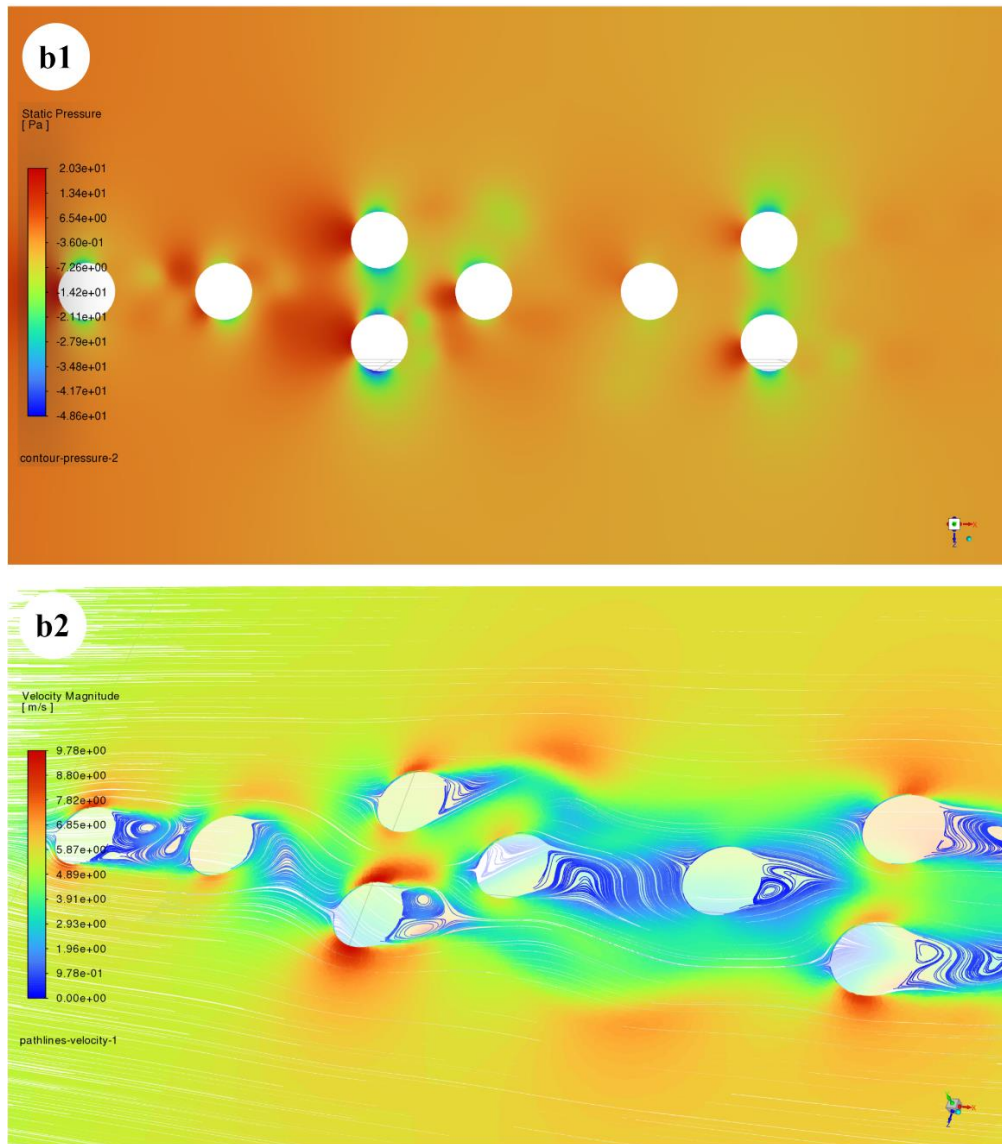


图 6 类旗鱼队形仿真结果 (b1) 压力云图; (b2) 速度迹线图

3.2.3 INEOS 1:59 Challenge 队形

仍考虑二维流动，根据仿真结果，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。

六圆柱呈前后错落的两列分布，空气动力效应核心在于通过非对称布局优化流动分离点，利用涡脱落相位差降低压差阻力，并增强推进效应。气流绕前方柱体后，尾流低压区被后方个体利用涡旋减少了个体迎风面积，同时延迟流动分离。速度云图表明，高速区（红色）分布于队形外侧及上游，而内部低速区（蓝色）形成连贯的“气动阴影”，显著降低整体阻力。理论分析显示，这种错位布局通过纵向拉伸调整了涡生成频率，使涡旋在后方柱体前缘相互作用产生干涉，部分转化涡能为推进力，压差阻力减少主导了效率提升。从空气动力学效率视角，队形优化涉及多个参数：柱体间距比（如纵向/横向距离）影响尾流叠加效应，而错位角控制了分离涡的相位匹配。

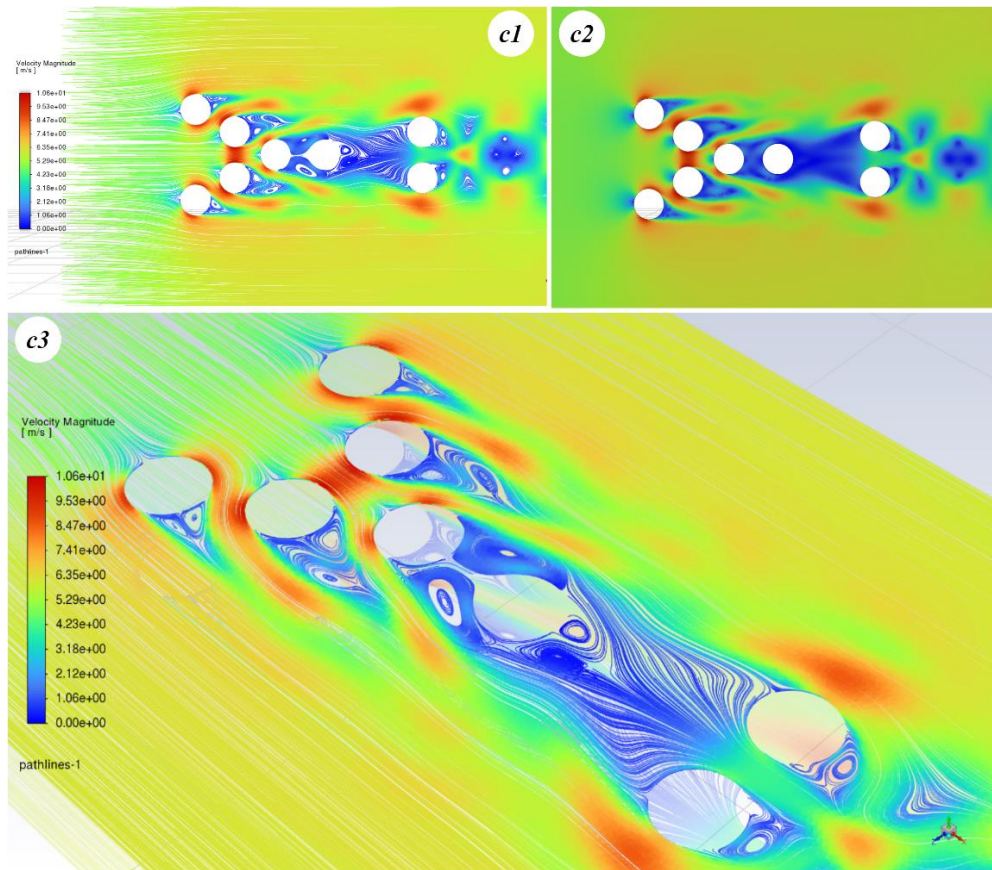


图 7 INEOS 1:59 Challenge 队形, (c1, c3) 速度迹线图; (c2) 速度云图

结论

本研究通过计算流体动力学（CFD）数值模拟，对比分析了双圆柱干扰基础模型、传统纵队式队形以及创新类旗鱼队形在均匀来流条件下的空气动力效应。综合分析速度场、压力场、流线路径及涡旋结构，可得出以下核心结论：破风队形的效率不仅取决于领跑员对方后运动员的遮挡程度，更关键的是对整体流动结构，特别是涡旋能量的控制与利用能力。队形的几何布局是影响减阻效率的决定性因素，其优化方向是从被动承受压差阻力转向主动管理涡旋动力学。

INEOS 1:59 Challenge 队形展示了一种更为先进的空气动力学理念。其错落有致的非对称布局是效率提升的关键。该队形实现了对流动的主动引导和优化后方跑者并非完全隐藏于前者的正后方，而是位于其尾流边缘能量较高的区域，这减少了对低速核心区的依赖；队形引导前方跑者产生的涡旋以一种更为有序和协调的方式脱落与相互作用，部分涡旋能量被重新利用，形成了一种类似“推进”的效果，而非完全耗散。这种“涡旋管理”策略有效地将有害的压差阻力部分转化为可资利用的流动结构，从而在整体上实现了比传统纵队更低的阻力系数。

INEOS 1:59 Challenge 队形的优越性源于其通过精妙的几何布局实现了对流动分离点和涡旋脱落相位的主动控制，将队形从一个被动的减阻装置提升为一个主动的流场管理单元。对于马拉松等极限耐力运动，采用此类经过空气动力学优化的队形，能最大程度地降低整个团队的能量消耗，为打破纪录提供至关重要的边际增益。未来的研究可进一步结合三维瞬态模拟与人体生物力学模型，以更精确地量化其在真实比赛环境中的效益。

参考文献

- [1] The Editors of Encyclopaedia Britannica. 2022 New York City Marathon. See www.britannica.com/sports/New-York-City-Marathon.
- [2] BBC Sport MS. 2012 Olympics cycling: Marginal gains underpin Team GB dominance. See www.bbc.com/sport/olympics/19174302.
- [3] Hoogkamer W, Kipp S, Frank JH, Farina EM, Luo G, Kram R. 2018 A comparison of the energetic cost of running in marathon racing shoes. *Sports Med.* 48, 1009 - 1019. (doi:10.1152/jappphysiol.00086.2022)
- [4] Beaumont F, Bogard F, Murer S, Polidori G, Madaci F, Tairar R. 2019 How does aerodynamics influence physiological responses in middle-distance running drafting? *Math. Model. Eng. Probl.* 6, 129 - 135. (doi:10.18280/mmep.060117)
- [5] Hoogkamer W, Snyder K, Arellano C. 2018 Modeling the benefits of cooperative drafting: is there an optimal strategy to facilitate a sub-2-hour marathon performance? *Sports Med.* 48, 2859 - 2867. (doi:10.1007/s40279-018-0991-4)
- [6] Aftalion A, Trélat E. 2020 How to build a new athletic track to break records. *R. Soc. Open Sci.* 7, 200007 (doi:10.1098/rsos.200007)
- [7] Brick NE, McElhinney MJ, Metcalfe RS. 2018 The effects of facial expression and relaxation cues on movement economy, physiological, and perceptual responses during running. *Psychol. Sport Exerc.* 34, 20 - 28. (doi:10.1016/j.psychsport.2017.09.009)
- [8] Li Congzhou, Zhang Xinshu, Hu Xiaofeng, Li Wei, You Yunxiang. THE STUDY OF FLOW PAST MULTIPLE CYLINDERS AT HIGH REYNOLDS NUMBERS[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2018, 50(2): 233-243. DOI: 10.6052/0459-1879-17-346
- [9] Lukas Schickhofer, Henry Hanson : “Aerodynamic effects and performance improvements of running in drafting formations” ,*Journal of Biomechanics*,2021.

