

自行车运动流体力学深度解析：从理论到实践的性能优化指南

摘要

本报告旨在为自行车运动中的流体力学原理提供一个详尽的、基于科学数据和工程实践的分析框架。流体阻力在骑行中扮演着决定性的角色，尤其是在中高速骑行时，其对前进的抵抗作用远超其他阻力来源。报告将从流体阻力的基础方程式出发，深入解析其核心参数，并引入衡量整体气动性能的关键指标—— C_dA （阻力面积）。通过对骑行系统（骑手与自行车）各部分阻力贡献的量化分析，本报告明确了提升性能的优先级。最终，报告将提供基于科学原理的、最具成本效益的实践优化策略，包括姿势调整、器材选择和个人装备升级，并为读者提供系统性的学习路径和前沿的科学研究方法（如风洞测试与CFD模拟）。本报告旨在帮助骑行者将流体力学的理论知识转化为可量化的竞技优势，实现从物理原理到竞技表现的跨越。

第一部分：自行车运动中的核心流体力学原理

自行车运动本质上是人与机器共同克服前进阻力的过程。在这些阻力中，流体阻力，尤其是空气阻力，占据了主导地位。本部分将系统性地阐述自行车运动中涉及的流体力学基础，为后续的性能优化分析奠定理论基础。

1.1 流体阻力：本质与构成

在自行车前进的过程中，主要的外力可以分为重力、地面反作用力、轮胎与地面的摩擦力（包括滚动阻力）以及空气施加的力。当自行车以一般速度行驶时，空气阻力已是反抗前进的最大外力，其作用方向与前进方向相反。随着速度的提升，空气阻力的主导地位愈发显著，甚至远超其他阻力来源¹。因此，所有旨在提升骑行速度的优化，其核心都是围绕如何有效减小空气阻力展开。

流体阻力主要由两部分构成：压差阻力(Pressure Drag)和摩擦阻力(Friction Drag)。压差阻力源于物体前后表面的压力差异。当流体流过一个物体时，在其前方的迎风区域，流速降低，压力升高；而在其后方，由于气流与物体表面分离，形成一个低压的尾流区。前后方的压力差产生了推向后方的阻力，这对于骑手等几何形状复杂的“钝体”而言，是其阻力的主要来源，通常占总阻力的约80%³。相比之下，摩擦阻力则由流体层与物体表面之间的粘性剪切力产生，是流体层以不同速度滑过时产生的阻力。对于自行车骑行而言，摩擦阻力是次要的阻力来源，约占总阻力的20%⁴。

1.2 核心方程式： $FD=21\rho v^2ACd$ 的深度解析

流体阻力的大小可通过以下核心方程式进行估算：

$$FD=21\rho v^2ACd$$

该公式中的每一个参数都具有特定的物理意义，并对应着不同的性能优化策略：

- **FD**: 流体阻力，是我们需要努力减小的目标。
- **ρ (rho)**: 空气密度。空气密度越大，物体穿越它时就越困难⁵。空气密度随海拔升高而降低，因此在高海拔地区骑行，空气阻力会相对较小，这正是高海拔赛道成绩往往更快的原因之一³。
- **v**: 相对速度。该参数是影响空气阻力最重要的变量，因为阻力与速度的平方 (v^2) 成正比⁵。这意味着当车速从每小时10公里增加到每小时100公里时，所受的空气阻力会增加100倍，而非10倍⁵。当速度超过每小时80公里时，空气阻力会成为赛车所面临的最大阻力来源，并超过轮胎的滚动阻力⁵。
- **A**: 迎风面积(或投影面积)。阻力与迎风面积成正比，即迎风面积越大，阻力越大⁵。对于自行车骑手而言，这是通过调整骑行姿势来减少阻力的核心目标。
- **Cd**: 阻力系数。这是一个无量纲值，取决于物体的形状、表面粗糙度和雷诺数。流线型物体(例如飞机机翼)的阻力系数较低，而钝体(例如自行车骑手)的阻力系数则较高。优化车架、轮组和个人装备的设计，其主要目的就是降低Cd⁵。

克服空气阻力所需的功率(P)与速度(v)之间的关系尤为值得关注。根据功率的定义，克服阻力的功率可表示为 $P=FD \times v$ 。将阻力公式代入，可得： $P \propto v^2 \times v = v^3$ 。这表明，克服空气阻力所需的功率与速度的立方成正比⁷。这一指数关系意味着，在高速骑行时，即使是微小的速度提升也需要不成比例地大幅增加功率投入。因此，通过气动优化来减少阻力，往往比单纯地提高功率输出更具效率，尤其是在高竞技水平下，每一个功率瓦数的节省都至关重要。

1.3 流体状态与边界层理论

流体(如空气)在物体表面流动时，其状态可分为层流和湍流两种。层流是一种平滑、有序的流动，

流体粒子沿着相互平行的层运动，相邻层之间很少发生混合⁹。湍流则是一种不规则、混乱的流动，流体微团会产生各种尺度的涡流和漩涡⁹。

流体与固体表面相邻的薄层被称为边界层。边界层内的流速从物体表面的零(无滑移边界条件)逐渐增加，直到达到主流体的速度¹⁰。边界层可以是层流，也可以是湍流。

一个重要的空气动力学现象被称为“拖曳危机”(drag crisis)。正如前文所述，骑行者被视为“钝体”，其阻力主要由压差阻力贡献，而压差阻力的大小取决于物体后方低压尾流区的大小。气流分离点越靠后，尾流区就越小，压差阻力也就越低³。研究表明，粗糙的表面(例如某些特殊织物纹理)能够诱导边界层从不稳定的层流状态提前转变为湍流状态³。尽管湍流边界层会略微增加摩擦阻力，但它能够更长时间地附着在物体表面，从而显著延迟气流分离。通过这种方式，物体后方的低压尾流区得以大幅缩小，最终显著降低总的压差阻力³。这一原理是现代气动骑行服和装备设计背后的关键，它利用了表面纹理来控制边界层，以实现整体的减阻效果。

第二部分:骑行系统总阻力的量化与分析

为了有效地进行气动优化，首先需要理解骑行系统总阻力的构成。本部分将拆解骑行系统(骑手与自行车)的总阻力来源，并量化不同部分的贡献，以突出性能优化的关键点。

2.1 系统总阻力的来源构成

对自行车骑行系统进行整体分析，其总空气阻力主要由两大部分构成:骑手自身和自行车及其组件。

- 骑手:骑手的身体是整个系统中最大的阻力来源，其迎风面积和不规则的形状导致了巨大的压差阻力。在平路骑行时，骑手贡献了总阻力的75%至80%¹¹。
- 自行车及其组件:自行车本身及其所有部件，包括车架、轮组、车把、传动系统等，贡献了总阻力的约20%至25%¹¹。在自行车组件中，轮组是重要的阻力来源，约占总阻力的10%至15%¹¹。

将上述构成以表格形式呈现，可以更直观地理解各部分的阻力贡献比例。

阻力来源	占总阻力比例(估算)
骑手	75% - 80%

自行车及组件	20% - 25%
其中:轮组	10% - 15%

这一量化分解揭示了一个核心事实:对骑行表现影响最大的不是昂贵的器材,而是骑手自身的形态。因此,任何有效的气动优化策略都必须将重点放在骑手身上。

2.2 核心性能指标:CdA

在空气动力学中,为了方便地评估一个物体的整体气动性能,通常将阻力系数(Cd)和迎风面积(A)这两个关键参数合并为一个单一的指标:CdA,其单位为平方米(m2)³。

CdA是一个综合性的指标,它将物体的形状(Cd)和大小(A)的影响融合在一起。CdA值越低,意味着物体穿过空气时所受的阻力越小,在相同的功率输出下,能够以更快的速度前进。对于自行车运动而言,CdA的降低直接转化为同等功率下的速度提升或同等速度下的功率节省⁴。

根据研究,不同骑行者的典型CdA值如下:

- 职业计时赛(TT)选手:0.17至0.22 m2
- 公路大组赛选手:0.24至0.28 m2
- 休闲骑行者:0.30至0.35 m2⁴

这些数据表明,即使是相对较小的CdA降低,也能对竞技表现产生显著影响。例如,一项研究表明,在40公里计时赛中,CdA值仅降低2%就能节省约30秒的完赛时间¹³。对于更长距离的赛事,如180公里的铁人三项,通过更好的姿势和装备可以节省数分钟的时间¹³。

第三部分:实践指南:基于流体力学的性能提升策略

基于上述流体力学原理和阻力来源的量化分析,本部分将提供具体、可量化的性能优化实践指南,并进行成本效益分析,帮助骑行者做出理性的投资决策。

3.1 最具成本效益的优化:骑行姿势

鉴于骑手是总阻力的最大来源, 姿势调整是减小迎风面积(A)和优化气流流线(降低Cd)最直接、最有效且成本最低的方式¹⁴。这是一项零成本但高回报的投资。

关键姿态细节包括:

- 收拢肩部与背部: 将肩膀向内卷起, 使上身形成一个更紧凑的流线型结构, 以减小迎风面积¹⁵。同时保持背部挺直, 避免过度弯曲, 以形成一个平顺的气流通道¹⁶。
- 收起头部: 专注于将头部收起, 使其尽可能地与背部齐平, 而不是高高抬起。这能显著减少头部作为独立钝体所产生的空气阻力¹⁵。
- 弯曲肘部: 在骑行中, 保持肘部微曲并向内收紧, 而不是向外伸展。这不仅能让手臂作为有效的减震器吸收路面冲击, 还能进一步减小迎风面积, 提高平衡性¹⁶。

骑行姿势的改变带来的气动增益是巨大的。一项研究表明, 相比常规的坐姿和站姿, 采用前倾的“抽车”姿势能将CdA值分别减少23%和26%¹⁷。这些量化数据明确表明, 在任何器材升级之前, 优化骑行姿势是实现性能飞跃的最高效和最经济的途径。任何无法长时间保持气动姿势的骑行者, 其在器材上的投入都是无效的¹⁸。

3.2 器材的空气动力学优化

在姿势优化到位的基础上, 器材的升级能够提供额外的气动收益。

- 车架与组件: 现代气动公路车的设计核心在于流线型管材, 以最小化迎风面积并降低Cd。例如, 某些车架的下斜管采用弧尖形前端和流线曲面, 引导气流平顺滑过, 同时通过凹槽设计容纳水壶, 以减少水壶与车架之间产生的乱流¹⁹。其他优化还包括一体化全内走线和深度增加的座管, 以避免空气乱流的产生²⁰。
- 轮组: 轮组是自行车上最重要的气动组件之一, 其对总阻力的贡献可达10%至15%¹¹。深框轮组通过其流线型轮廓有效降低了阻力系数。此外, 在侧风条件下, 深框轮组还能产生一种独特的“航行效应”(Sailing Effect), 即侧风通过流经轮组时产生的推力, 进一步为骑行者提供前进的推力, 从而降低总阻力²⁰。
- 个人装备: 气动头盔和骑行服是重要的气动装备。气动头盔通常采用流线型设计, 以减少头部阻力²²。例如, 一项测试显示, Oakley Velo Mach头盔在40公里/小时的速度下, 相比基线能节省8.11瓦的功率²²。骑行服则利用了“拖曳危机”的原理, 采用特殊纹理的织物来诱导边界层转变为湍流, 从而减小整体压差阻力³。除了这些主要装备, 气动袜等小件物品也因其极高的投资回报率而受到职业选手的青睐¹²。

3.3 成本效益分析: 投资回报的理性决策

在进行气动优化投资时，应遵循“收益递减”原则，从最高效的手段开始。

- 1. 第一优先级:骑行姿势与柔韧性训练。这是零成本但收益最大的优化。柔韧性训练，尤其是放松腿筋和臀部，有助于长时间保持低风阻的姿势¹⁵。
- 2. 第二优先级:个人装备。气动骑行服、气动头盔、气动袜等，这些投资成本相对较低，但回报率高。
- 3. 第三优先级:轮组。轮组的升级通常能带来显著的CdA节省，相比于车架，其效费比更高¹⁸。
- 4. 第四优先级:车架。虽然购买气动整车通常比定制自行车更具成本效益²³，但单纯升级车架的CdA节省可能不如预期，在总阻力中的占比也相对较小¹²。

以下表格对不同优化方案的效费比进行了对比，为骑行者的投资决策提供了依据。

优化项	成本(估算)	CdA节省(估算)	投资回报(ROI)
骑行姿势	免费/低成本	极高(>20%)	极高
气动骑行服	中等	较高(~4-11%)	高
气动头盔	中等	中等	中等偏高
气动轮组	较高	较高(~5-10%)	较高
气动车架	很高	较低(~2-3%)	中等偏低

第四部分:专业学习与科学研究方法

对于希望深入理解流体力学并将其应用于自行车运动的骑行者，构建坚实的理论基础和了解前沿研究方法至关重要。

4.1 理论基础的构建:专业学习路径

- 流体力学基础:流体力学是所有空气动力学应用的基石。建议从基础课程如《流体力学》入门²⁴，其旨在教授流体力学的基本概念、理论和应用，为后续学习空气动力学等课程打下坚实基础。推荐教材包括张德良的《计算流体力学教程》和John D. Anderson的《计算流体力学入门》²⁶。

- 空气动力学应用:在掌握流体力学基础后,可进一步学习《空气动力学》课程,该课程重点讲解流体与物体之间的相互作用力,以及飞行器气动部件的特性²⁷。此外,查阅权威学术期刊是了解前沿研究的有效途径,例如中国的《空气动力学学报》和国际期刊《航空航天科学进展》(Progress in Aerospace Sciences)²⁸。

4.2 科学验证的工具:风洞测试与CFD模拟

风洞测试和计算流体力学(CFD)是自行车空气动力学研究的两大核心工具,它们在设计、优化和验证过程中发挥着互补的作用。

- 风洞测试:风洞是目前测量空气动力学阻力最精确和最有效的方法³。它通过在可控环境中产生气流来模拟运动员的高速运动。风洞测试通常用于验证运动员和模型的阻力,并帮助运动员确定其阻力最小的姿势³。然而,风洞测试也存在局限性,如风洞洞壁和模型支架可能对气流产生干扰,导致测量数据失真³¹。为了解决这些问题,研究人员会使用活动地板或在模型前通过吸入方式控制边界层³。
- 计算流体力学(CFD):CFD是利用计算机对流体流动进行数值模拟的方法。其优势在于能够快速、低成本地进行大规模的虚拟测试和设计迭代,尤其适用于复杂几何模型的优化³²。然而,CFD模拟结果与风洞实验数据之间通常存在偏差,例如,一项研究发现,自行车车架的CFD模拟值约为风洞实验值的50%,轮组的模拟值约为70%³¹。这表明CFD需要通过风洞实验数据进行修正和校准,才能得到更接近真实情况的结果。

风洞测试和CFD模拟是相辅相成的。CFD用于初步设计和大量的方案筛选,以快速找出最有潜力的设计方向;而风洞测试则用于对最终设计进行精确验证和性能测量。

以下表格对两种主流研究方法的优劣势进行了对比。

维度	风洞测试	计算流体力学(CFD)
成本	极高	相对较低
效率	较低(耗时)	极高(可快速迭代)
精度	最高(最接近真实情况)	依赖模型与边界条件,需实验校准
局限性	存在洞壁、支架干扰;难以模拟复杂运动;成本高昂	模拟结果可能与真实情况存在偏差;需要强大的计算资源

4.3 额外洞察: 自行车平衡的非流体力学原理

为了全面理解自行车的动力学, 除了流体力学外, 其平衡原理也值得关注。自行车维持平衡的根本原因是将倾倒变为转向³⁴。当自行车开始倾倒时, 通过前轮轨迹(转向轴延长线与地面交点和前轮与地面接触点之间的距离)的物理特性, 前轮会因重力作用而自动转向, 将重心重新移回车体中间, 从而恢复平衡³⁴。此外, 车轮的“陀螺效应”——即旋转物体在外力矩作用下产生进动, 而非直接倒下——也在一定程度上帮助维持了平衡³⁴。尽管有研究表明陀螺效应并非自行车平衡的唯一或主要因素, 但它确实是自行车动力学中一个重要的物理现象。

结论

本报告详尽地分析了流体力学在自行车运动中的核心作用, 并提供了从理论到实践的完整优化框架。研究表明, 空气阻力是决定骑行性能的关键因素, 尤其是在中高速骑行时。通过对骑行系统阻力来源的量化, 可以明确地得出结论: 骑手自身是最大的阻力来源, 因此, 任何旨在提升气动性能的投资, 都应首先从自身姿态优化开始。

姿势调整是最高效且最具成本效益的减阻手段, 其收益远超同等投入下的器材升级。在姿态优化到位后, 理性的器材投资应遵循效费比原则, 从高回报率的个人装备(如气动服、头盔)开始, 其次是轮组, 最后才是车架。

最终, 自行车运动的性能提升不仅是力量的较量, 更是科学与智慧的胜利。通过深入学习流体力学的理论, 并利用风洞测试与CFD模拟等科学工具进行验证, 骑行者可以将物理原理转化为可量化的竞技优势, 从而在追求卓越的道路上走得更远、更快。

附录: 参考文献

- ³⁴ url:
<https://in.iphy.ac.cn/emagazine/detail.php?id=38213&c=69>
- ³⁵ url:
<https://patents.google.com/patent/CN201254269Y/zh>
- ⁵ url:
<http://www.ctcc.com.cn/newsview.aspx?id=2750>

- ⁶ url:
<https://zh.khanacademy.org/computing/computer-programming/programming-natural-simulations/programming-forces/a/air-and-fluid-resistance>
- ¹ url:
<https://zh.wikipedia.org/zh-cn/%E8%87%AA%E8%A1%8C%E8%BB%8A%E5%8F%8A%E6%91%A9%E6%89%98%E8%BB%8A%E7%9A%84%E5%8B%95%E5%8A%9B%E5%AD%B8>
- ³⁶ url:
https://www.huangpi.gov.cn/ztl_33/ggwszsxxgk_mh/202208/t20220812_2022312.html
- ⁹ url:
<https://xsj.cstam.org.cn/cn/article/pdf/preview/10.6052/1000-0879-20-041.pdf>
- ¹⁰ url:
<https://www.ansys.com/zh-cn/simulation-topics/what-is-laminar-flow>
- ¹⁹ url:
<https://patents.google.com/patent/CN204489069U/zh>
- ²⁰ url:
<https://www.bikework.cn/index/show?id=51&catname=hbrand>
- ¹⁵ url:
<https://www.scienceinsport.com/sports-nutrition/zh/josh-tarling-becoming-more-aerodynamic-on-the-bike/>
- ³⁷ url:
https://www.hlj.gov.cn/hljapp/c116063/202410/c00_31774428.shtml
- ³ url:
<http://tykx.xml-journal.net/cn/article/pdf/preview/10.16469/j.css.202212006.pdf>
- ¹⁷ url:
<https://www.sportscience.com.tw/article/detail/%E8%87%AA%E8%A1%8C%E8%BB%8A%EF%BC%8C%E5%8F%AA%E6%9C%89%E5%8A%9F%E7%8E%87%E6%98%AF%E9%97%9C%E9%8D%B5%E5%97%8E>
- ³² url:
<http://kqdlxxb.xml-journal.net/cn/article/pdf/preview/10.7638/kqdlxxb-2023.0128.pdf>
- ³³ url:
<https://www.hexagonmi.com.cn/sjygc/36754.html>
- ³⁷ url:
https://www.hlj.gov.cn/hljapp/c116063/202410/c00_31774428.shtml
- ¹⁶ url:
<https://news.cctv.com/2021/12/08/ARTILrDqi0F9MadXzEumJVGk211208.shtml>
- ²⁷ url:
<https://www.chinaooc.com.cn/course/662c332cbb5c5a802599da7d>
- ⁷ url:
<https://docs.velogicfit.com/zh/di-04-jie-kong-qi-dong-li-xue/aero-basics>
- ³⁸ url:
<https://www.umflint.edu/zh-CN/chs/exercise-science/>

- ³⁹ url:
<https://www.xuetangx.com/course/bsu04021002810/>
- ³¹ url:
[http://web.sanlien.com.tw/ad/san_tech.nsf/foundationview/9A22A214D6C6DABD482588B5002C5DAC/\\$FILE/34_%E8%87%AA%E8%A1%8C%E8%BB%8A.pdf](http://web.sanlien.com.tw/ad/san_tech.nsf/foundationview/9A22A214D6C6DABD482588B5002C5DAC/$FILE/34_%E8%87%AA%E8%A1%8C%E8%BB%8A.pdf)
- ³ url:
<http://tykx.xml-journal.net/cn/article/pdf/preview/10.16469/j.css.202212006.pdf>
- ²⁸ url:
<https://www.sciengine.com/ActAeroS/home>
- ²⁹ url:
<http://www.gmachineinfo.com/articledetail.aspx?id=102>
- ²³ url:
<https://ccache.cc/zh/blogs/newsroom/which-type-of-road-bike-is-best>
- ⁴⁰ url:
<https://zh.wikipedia.org/zh-cn/%E6%BB%BE%E5%8B%95%E9%98%BB%E5%8A%9B>
- ² url:
<https://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E8%87%AA%E8%A1%8C%E8%BB%8A%E5%8F%8A%E6%91%A9%E6%89%98%E8%BB%8A%E7%9A%84%E5%8B%95%E5%8A%9B%E5%AD%B8>
- ²⁶ url:
<https://www.icourse163.org/course/NUDT-1470408186>
- ⁷ url:
<https://docs.velogicfit.com/zh/di-04-jie-kong-qi-dong-li-xue/aero-basics>
- ⁴ url:
<https://www.rule28.com/blogs/thoughts/the-physics-of-cycling-aerodynamics-a-technical-guide>
- ³⁰ url:
https://www.researchgate.net/publication/352037344_Cyclist_aerodynamics_through_time_Better_faster_stronger
- ²⁴ url:
<https://www.xuetangx.com/course/thu07021002421/>
- ²⁵ url:
<https://www.techtitude.com/cn/engineering/postgraduate-certificate/fluid-mechanics>
- ⁴¹ url:
<https://blog.flocycling.com/aero-wheels/flo-cycling-studying-tires-part-7-solving-for-cd-a-1/>
- ⁴² url:
<https://www.wheelscience.com/pages/aero-v-weight>
- ¹³ url:
<http://www.aero-coach.co.uk/learn>
- ²² url:
<https://www.cyclingnews.com/features/best-aero-cycling-helmets/>

- ⁸ url:
<https://www.trainerroad.com/forum/t/aero-bikes-do-they-actually-make-a-difference/97376?page=4>
- ¹¹ url:
https://www.researchgate.net/publication/305080752_Comparison_of_the_Aerodynamic_Performance_of_Five_Racing_Bicycle_Wheels_by_Means_of_CFD_Calculations
- ¹² url:
https://www.reddit.com/r/cycling/comments/1333rhd/at_which_point_does_an_aero_bike_make_a_difference/
- ¹⁴ url:
<https://www.sportperformancebulletin.com/nutrition/supplements/cycling-aerodynamics-why-riding-technique-is-more-important-than-aero-kit>
- ²¹ url:
<https://blog.trek bikes.com/en/2020/07/15/how-much-does-bike-aerodynamics-really-matter/>
- ¹⁸ url:
<https://www.trainerroad.com/forum/t/aero-gains-question/92533>
- ¹⁰ url:
<https://www.ansys.com/zh-cn/simulation-topics/what-is-laminar-flow>
- ⁵ url:
<http://www.ctcc.com.cn/newsview.aspx?id=2750>
- ³ url:
<http://tykx.xml-journal.net/cn/article/pdf/preview/10.16469/j.css.202212006.pdf>
- ¹⁵ url:
<https://www.scienceinsport.com/sports-nutrition/zh/josh-tarling-becoming-more-aerodynamic-on-the-bike/>
- ¹⁷ url:
<https://www.sportscience.com.tw/article/detail/%E8%87%AA%E8%A1%8C%E8%BB%8A%E5%8F%8A%E6%91%A9%E6%89%98%E8%BB%8A%E7%9A%84%E5%8B%95%E5%8A%9B%E5%AD%B8>
- ³¹ url:
[http://web.sanlien.com.tw/ad/san_tech.nsf/foundationview/9A22A214D6C6DABD482588B5002C5DAC/\\$FILE/34_%E8%87%AA%E8%A1%8C%E8%BB%8A.pdf](http://web.sanlien.com.tw/ad/san_tech.nsf/foundationview/9A22A214D6C6DABD482588B5002C5DAC/$FILE/34_%E8%87%AA%E8%A1%8C%E8%BB%8A.pdf)
- ³ url:
<http://tykx.xml-journal.net/cn/article/pdf/preview/10.16469/j.css.202212006.pdf>

Works cited

1. 自行车及摩托车的动力学 - 维基百科, accessed September 21, 2025,
<https://zh.wikipedia.org/zh-cn/%E8%87%AA%E8%A1%8C%E8%BB%8A%E5%8F%8A%E6%91%A9%E6%89%98%E8%BB%8A%E7%9A%84%E5%8B%95%E5%8A%9B%E5%AD%B8>

2. 腳踏車及機車的動力學 - 維基百科, accessed September 21, 2025,
<https://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E8%87%AA%E8%A1%8C%E8%BB%8A%E5%8F%8A%E6%91%A9%E6%89%98%E8%BB%8A%E7%9A%84%E5%8B%95%E5%8A%9B%E5%AD%B8>
3. 冬季运动项目气动减阻的风洞实验研究进展 - 体育科学, accessed September 21, 2025,
<http://tykx.xml-journal.net/cn/article/pdf/preview/10.16469/j.css.202212006.pdf>
4. The Physics of Cycling Aerodynamics: A Technical Guide - Rule 28, accessed September 21, 2025,
<https://www.rule28.com/blogs/thoughts/the-physics-of-cycling-aerodynamics-a-technical-guide>
5. CTCC中国汽车场地职业联赛官方网站 - TCR China, accessed September 21, 2025,
<http://www.ctcc.com.cn/newsview.aspx?id=2750>
6. 空气和流体阻力(文章) | 力 - 可汗学院, accessed September 21, 2025,
<https://zh.khanacademy.org/computing/computer-programming/programming-natural-simulations/programming-forces/a/air-and-fluid-resistance>
7. 空气动力学基础 | Velogic Docs, accessed September 21, 2025,
<https://docs.velogicfit.com/zh/di-04-jie-kong-qi-dong-li-xue/aero-basics>
8. Aero bikes do they actually make a difference - Page 4 - Equipment - TrainerRoad, accessed September 21, 2025,
<https://www.trainerroad.com/forum/t/aero-bikes-do-they-actually-make-a-difference/97376?page=4>
9. 漫话湍流边界层中的涡旋结构 - 力学与实践, accessed September 21, 2025,
<https://lxsj.cstam.org.cn/cn/article/pdf/preview/10.6052/1000-0879-20-041.pdf>
10. 什么是层流? | Ansys, accessed September 21, 2025,
<https://www.ansys.com/zh-cn/simulation-topics/what-is-laminar-flow>
11. (PDF) Comparison of the Aerodynamic Performance of Five Racing Bicycle Wheels by Means of CFD Calculations - ResearchGate, accessed September 21, 2025,
https://www.researchgate.net/publication/305080752_Comparison_of_the_Aerodynamic_Performance_of_Five_Racing_Bicycle_Wheels_by_Means_of_CFD_Calculations
12. At which point does an aero bike make a difference? : r/cycling - Reddit, accessed September 21, 2025,
https://www.reddit.com/r/cycling/comments/1333rhd/at_which_point_does_an_aero_bike_make_a_difference/
13. Learn about aerodynamics with AeroCoach, accessed September 21, 2025,
<http://www.aero-coach.co.uk/learn>
14. Cycling aerodynamics: why riding technique is more important than aero kit!, accessed September 21, 2025,
<https://www.sportsperformancebulletin.com/nutrition/supplements/cycling-aerodynamics-why-riding-technique-is-more-important-than-aero-kit>
15. 乔希-塔林- 让自行车更符合空气动力学原理 - Science In Sport, accessed September 21, 2025,
<https://www.scienceinsport.com/sports-nutrition/zh/josh-tarling-becoming-more>

- [-aerodynamic-on-the-bike/](#)
16. 自行车骑行干货：骑行姿势与自行车调整 - 新闻频道- 央视网, accessed September 21, 2025,
<https://news.cctv.com/2021/12/08/ARTILrDqi0F9MadXzEumJVgk211208.shtml>
 17. 自行車, 只有功率是關鍵嗎- Sportscience 運動科學網, accessed September 21, 2025,
<https://www.sportscience.com.tw/article/detail/%E8%87%AA%E8%A1%8C%E8%BB%8A%E8%BC%8C%E5%8F%AA%E6%9C%89%E5%8A%9F%E7%8E%87%E6%98%AF%E9%97%9C%E9%8D%B5%E5%97%8E>
 18. Aero Gains question - Equipment - TrainerRoad, accessed September 21, 2025,
<https://www.trainerroad.com/forum/t/aero-gains-question/92533>
 19. CN204489069U - 符合空气动力学的自行车车架 - Google Patents, accessed September 21, 2025, <https://patents.google.com/patent/CN204489069U/zh>
 20. STORCK - 首页品牌 - BIKE+WORK佰客屋, accessed September 21, 2025,
<https://www.bikework.cn/index/show?id=51&catname=hbrand>
 21. How much does bike aerodynamics really matter? - Trek Blog, accessed September 21, 2025,
<https://blog.trekbikes.com/en/2020/07/15/how-much-does-bike-aerodynamics-really-matter/>
 22. Best aero helmets: The fastest helmets, wind-tunnel tested - Cycling News, accessed September 21, 2025,
<https://www.cyclingnews.com/features/best-aero-cycling-helmets/>
 23. 哪种公路自行车最好? - ccache, accessed September 21, 2025,
<https://ccache.cc/zh/blogs/newsroom/which-type-of-road-bike-is-best>
 24. 流体力学- 清华大学- 学堂在线, accessed September 21, 2025,
<https://www.xuetangx.com/course/thu07021002421/>
 25. 流体力学- 大学课程, accessed September 21, 2025,
<https://www.techitute.com/cn/engineering/postgraduate-certificate/fluid-mechanics>
 26. 计算空气动力学_国防科技大学, accessed September 21, 2025,
<https://www.icourse163.org/course/NUDT-1470408186>
 27. 空气动力学(上 - 课程- 国家高等教育智慧教育平台, accessed September 21, 2025,
<https://www.chinaooc.com.cn/course/662c332cbb5c5a802599da7d>
 28. Acta Aerodynamica Sinica - SciEngine, accessed September 21, 2025,
<https://www.sciengine.com/ActAeroS/home>
 29. 航空航天领域顶级外文期刊介绍| www.gmachineinfo.com | 全球机械文献资源网, accessed September 21, 2025,
<http://www.gmachineinfo.com/articledetail.aspx?id=102>
 30. Cyclist aerodynamics through time: Better, faster, stronger | Request PDF - ResearchGate, accessed September 21, 2025,
https://www.researchgate.net/publication/352037344_Cyclist_aerodynamics_through_time_Better_faster_stronger
 31. 自行車風洞測試車架與輪組之風阻量測 - 三聯科技, accessed September 21, 2025,
[http://web.sanlien.com.tw/ad/san_tech.nsf/foundationview/9A22A214D6C6DABD482588B5002C5DAC/\\$FILE/34_%E8%87%AA%E8%A1%8C%E8%BB%8A.pdf](http://web.sanlien.com.tw/ad/san_tech.nsf/foundationview/9A22A214D6C6DABD482588B5002C5DAC/$FILE/34_%E8%87%AA%E8%A1%8C%E8%BB%8A.pdf)

32. 智能空气动力学若干研究进展及展望唐志共朱林阳向星皓何磊赵瞰王岳青钱炜祺袁先旭Some, accessed September 21, 2025, <http://kqdlxxb.xml-journal.net/cn/article/pdf/preview/10.7638/kqdlxxb-2023.0128.pdf>
33. 空气动力学解决方案 - 海克斯康, accessed September 21, 2025, <https://www.hexagonmi.com.cn/sjygc/36754.html>
34. 历经1935960小时, 我们破解了自行车平衡的奥秘- 物理所电子期刊, accessed September 21, 2025, <https://in.iphy.ac.cn/emagazine/detail.php?id=38213&c=69>
35. 水上自行车- CN201254269Y - Google Patents, accessed September 21, 2025, <https://patents.google.com/patent/CN201254269Y/zh>
36. 经常骑暴汗减脂的动感单车, 你的膝关节受得了吗? - 黄陂区人民政府, accessed September 21, 2025, https://www.huangpi.gov.cn/ztlz_33/ggwszsxxgk_mh/202208/t20220812_2022312.html
37. 正确的骑行姿势, 你知道吗 | 运动是良医, accessed September 21, 2025, https://www.hlj.gov.cn/hljapp/c116063/202410/c00_31774428.shtml
38. 运动科学学士学位| 密歇根大学弗林特健康科学学院, accessed September 21, 2025, <https://www.umflint.edu/zh-CN/chs/exercise-science/>
39. 运动训练学- 北京体育大学- 学堂在线, accessed September 21, 2025, <https://www.xuetangx.com/course/bsu04021002810/>
40. 滚动阻力- 维基百科, 自由的百科全书, accessed September 21, 2025, <https://zh.wikipedia.org/zh-cn/%E6%BB%BE%E5%8B%95%E9%98%BB%E5%8A%9B>
41. Studying Bike Tires Part 7 – Solving for CdA - FLO Cycling Blog | Carbon Wheels, accessed September 21, 2025, <https://blog.flocycling.com/aero-wheels/flo-cycling-studying-tires-part-7-solving-for-cda-1/>
42. Aero v Weight | Aerodynamic Carbon Wheels - Wheelscience, accessed September 21, 2025, <https://www.wheelscience.com/pages/aero-v-weight>