

足球也科学：力道与旋转

曹则贤

(中国科学院物理研究所 北京 100190)

又是世界杯时节,几亿球迷围坐在电视机前,欣赏四年一度的足球狂欢.当那圆圆的足球一次次划出优美的曲线然后优雅地钻入网窝,球迷们在欢呼或者悲伤之时,可曾为足球那常常是出人意料的飞行轨迹而惊讶?

足球的飞行涉及很多复杂的物理,特别是流体力学的内容.当守门员眼睁睁看着足球脱手的时候,他应该知道这是神奇的物理在起作用.一些发达国家对于球类在空气中的飞行行为是当作一门严肃科学对待的^[1],实际上它可以看作是空气动力学和流体力学在娱乐领域的应用.如果大家留心一下的话可能会注意到,舞蹈、冰上运动、游泳、球类运动等如今都成了专门的应用物理学分支,其研究成果并不局限于增强娱乐.配合当前的世界杯比赛,Physics Today 本月专门编发了一篇关于足球力道与旋转的文章^[2].与此同时,European Journal of Physics^[3]和 New Scientist 也刊登了相关的研究文章以饕兼爱足球与科学的人们.

当足球在空气中飞行时,会感受到由于压差以及来自足球表面与粘性的空气相互作用所产生的阻力.在边界层里(这是 Prandtl 在二十世纪初提出的概念^[4]),粘滞力非常重要.在边界层部分,空气相对于球表面的速度自在表面处的零值过渡到自由气流里的值.边界层在球的前端处最薄,在尾端处最厚;边界层最终会不断地自球上分离,在尾流中留下复杂的带涡旋的流体花样(见图 1).足球轨迹的诸多不可思议处就取决于边界层在何处分离.落实到力学术语,空气的压缩与同球面的粘滞作用造成了对足球的迎面阻力(drag force,也译成拖曳力),为 $\frac{1}{2}\rho AV^2$ 乘上一个系数 C_D .当然, $\frac{1}{2}\rho AV^2$ 的一部分还提供对足球的托升,可表示为 $\frac{1}{2}\rho AV^2$ 乘上一个系数 C_L .这里, A 是球的截面积, V 是飞行速度, ρ 为空气密度.

流体力学的关键参数为雷诺数, $Re = VD/\nu$, 其

中 V 是质心速度, D 是球状物体的直径, ν 是空气的运动学粘滞系数.将牛顿第二定律运用到物体周围运动的粘滞流体上就得到了 Navier-Stokes 方程.该方程相对于尺度 D 和时间 D/V 无量纲化以后,剩下的唯一参数是雷诺数,它决定了流体动力学行为.就足球来说,足球遇到的阻力和托升,或者 C_D 和 C_L , 依赖于雷诺数(空气性质)和足球的角速度(运动员的脚法).一般的拖曳造成的阻力都大于球身自重,因此大学基础课里忽略空气阻力的做法对于实际的球轨迹的研究来说,是不可取的.

图 2 所示为拖曳系数 C_D 对速度(对应雷诺数)的依赖关系.当球的速度达到某个临界值时,系数 C_D 会突然变小,即发生阻力骤退现象(drag crisis, 有人直译为拖曳危机).这个现象的物理图像是——暂不考虑转动——无转动的足球,低速时周边的气流是层流,而在高速时是湍流.湍流发生时,边界层同层流情形相比会拖长, C_D 也相应地变小.足球发生阻力骤退时,气流的雷诺数小于 2×10^5 , 因此对应一般中程传球的速度(约 12m/s),足球运动时造成的气流已经是湍流.任意球和角球意味着更大的初始速度,更不易揣测的足球径迹,所以是较佳的进球机会,也就特别激动人心.

成功的任意球要求初始速度很快,这样守门员没多少时间反应.此外,球应该还是旋转的,在空中划过一道弧线.以一定角速度旋转的球将后侧的空气向一侧搅动,相应地,空气作用在足球上有反方向的力(Magnus 力),指向 $\omega \times V$ 的方向.灵活的守门员一般能扑住不转的球,但对于旋转的球却可能无法应对,这是因为香蕉球不仅沿着曲线飞行,而且还 dip(下降,下降后又升起).一个优秀的足球运动员要能踢出既快且旋的球,但这两者之间却是竞争的:大的初始速度要求脚的用力穿过球心,而高速旋转则要求触球位置是偏心的.高质量的任意球能达到 600rpm.

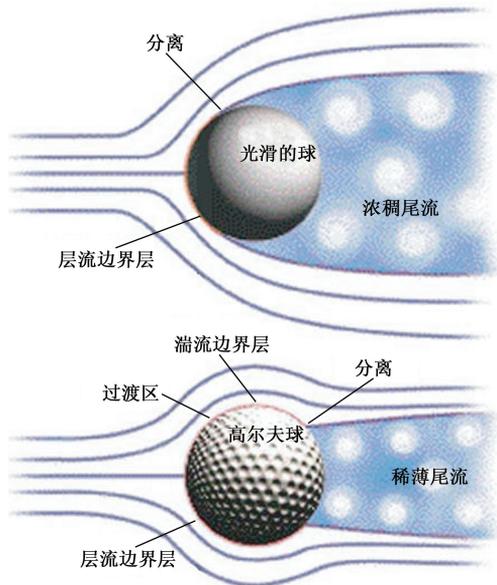
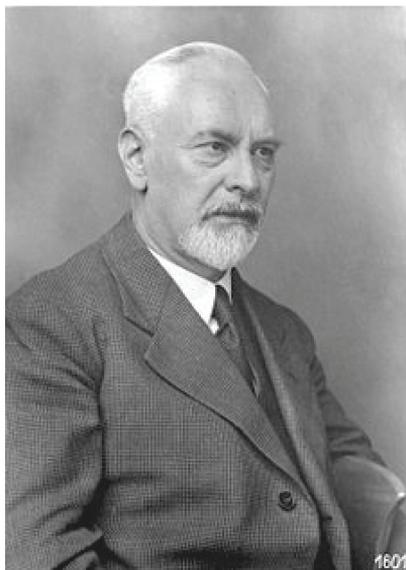


图1 Ludwig Prandtl 和他提出的边界层概念。粘性流体流过物体,周边的一层气体的速度从物体表面的零速过渡到远处的自由气流的数值,依赖于流速,粘连在物体表面的流体在适当的地方会从物体上分离

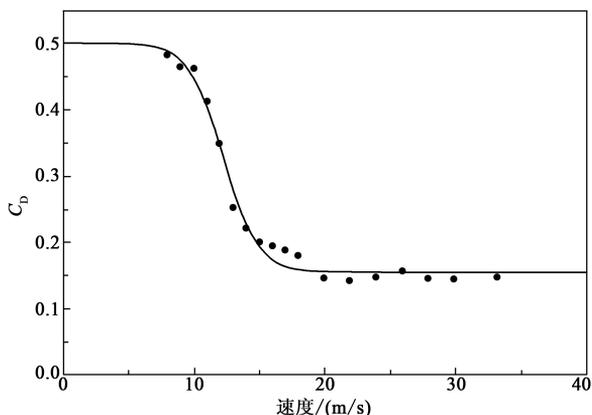


图2 阻力骤退。当雷诺数到达某个临界值时,气流从层流变成湍流,对飞行物体的拖曳系数 C_D 迅速减小。图中曲线为团队精神足球上得到的非旋转时 C_D 对球速的依赖关系(见参考文献[2])。注意球速和雷诺数有一一对应关系,雷诺数 10^5 对应的足球速度约为 7m/s

因为是拖曳造成的阻力,可以想见阻力同球表面的形貌有关系。表面有沟纹的球,其发生阻力骤退的雷诺数要小,更利于飞远。高尔夫球的表面上就有密排的小凹坑,极大地减小了飞行遭遇的阻力(图1)。据说小凹坑排列方式的专利申请申请人每年得到千万美元的专利费。近年来足球的表面设计也经历了变迁(图3),以前是32个面皮(12个五边形+20个六边形)缝制的标准足球;2006年世界杯改用Adidas的团队精神足球,有14个热粘合的面;而本次比赛用球是Adidas的Jabulani(祖鲁语,普

天同庆)足球,有8个热粘合的面,表面有浅的凹槽。Adidas Teamgeist(团队精神)足球的 C_D 和 C_L 值已经有了研究结果(这可不是容易的活,测量要用到轨迹分析加风洞实验,数据分析要用到空气动力学和流体力学计算)。今年世界杯使用的普天同庆足球,科学家们还没来得及确定其 C_D 和 C_L 值。那就让运动员们先用实践积累数据吧,好在好的足球运动员需要的是球感而不是 Navier-Stokes 方程的数值解。只是,使用新设计的比赛用球,再加上高海拔场地上的高球速,不知这次世界杯足球赛会引起怎样的狂欢与悲伤,让我们一边欣赏一边理解。



图3 足球的表面。(左)由32块多边形皮缝制的标准足球,(中)由14块皮热粘合而成的Adidas团队精神足球和(右)由8块皮热粘合而成的Adidas普天同庆足球

参考文献

- [1] Wesson J. The Science of Soccer, IOP, Bristol, UK 2002
- [2] Goff J E. Physics Today, 2010, (7):62
- [3] Goff J E, Carré M J. Eur. J. Phys., 2010, 31: 775
- [4] Anderson J D Jr. Physics Today, 2005, (12):42