

趣谈球类运动的物理

阎守胜[†]

(北京大学物理学院 北京 100871)

摘要 文章集中在球类运动中球的飞行和滚动所涉及到的物理. 选择了几个人们可能感兴趣的问题, 如表面粗糙度和尺寸对球飞行的影响, 弧线球和飘球的成因, 投篮的角度和速度, 斯诺克球台的库高和保龄球球道上油的作用, 做了定性或半定量的讲述. 文章作者认为, 物理研究有助于运动水平的提高, 在物理教学中也有助于激发学生的学习兴趣.

关键词 球, 空气阻力, 边界层, 马格纳斯力, 摩擦, 旋转

Interesting physics in ball games

YAN Shou-Sheng[†]

(School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract This paper focuses on the physics related to ball movement in different sports. Several phenomena are described qualitatively or semi-quantitatively, including the influence of size and roughness when a ball travels in the air, the contributing factors for curved flight and floating serves in volleyball, how the angle and speed affect basketball shots, how the height and material of a pool table's edge affect the performance, and the importance of the oil pattern in a bowling lane. The author believes that physics can be used to improve a player's performance, and its application to ball games can inspire more interest in physics education.

Keywords ball, air resistance, boundary layer, Magnus force, friction, rotation

篮球、排球、足球、乒乓球、网球、台球和高尔夫球等球类运动是参与人数众多、深受喜爱的体育运动, 运动的普及和提高关乎全民的身体素质, 也关系到国家的荣誉. 在提高运动水平方面, 除去要有广泛的群众基础外, 基础研究和由此产生的创新也是十分重要的.

笔者对球类运动物理的兴趣是从一个具体问题开始的, 即假如足球守门员大力开球, 同样的角度和初速度, 表面光滑的球和表面粗糙的相比, 哪一个飞得更远? 笔者和被问到的大多数人一样, 基于直觉, 认为飞行时光滑球所受空气阻力较小, 选择了前者, 可惜回答是错误的. 少数人认为问题必含玄机, 选择了后者, 但也说不出原因. 笔者为找寻问题的解答, 在阅读相关书籍和文献的过程中, 逐渐涉及到其他的球类. 本文集中在球的飞行和滚动方面, 选择了读书所得的几个片段和大家分享, 文章就从上面的问题开始.



图1 足球运动员在大力开球

1 表面光滑的球和表面粗糙的相比, 哪一个飞得更远

对球类飞行动力学的研究, 开始得较早, 工作也

2008-05-13 收到

[†] Email: ssyan@pku.edu.cn

较多的是对高尔夫球所做的研究.早在1910年,著名物理学家 J. J. Thomson 就发表了这方面的研究论文^[1],相继的研究工作导致了为让球飞得更远,在球的表面上采用了布满小凹痕(dimple)的设计.事实上一个表面光滑的球,职业选手击出后的飞行距离,大约只是布满凹痕球的一半.回到我们接触较多的足球,按竞赛规则要求,球的外壳必须是用皮块并通过预先穿好的针眼缝合在一起的.针眼总数约2000个,缝线凹槽深度约1—2mm,球面上的这些缝线凹槽同样对球的飞行有重要影响.守门员大力开球,将球踢到对方半场是很平常的事,但是如果用光滑球,没有缝线凹槽的功劳,恐怕就不太容易做到了.粗糙的表面可降低空气阻力的道理涉及“边界层”的概念.

对于空气、水和油等具有黏性的实际流体,描述其动力学行为的是 Navier - Stokes 方程(简称为 N - S 方程),针对具体的问题,给出相应的初条件和边条件,原则上可得到解答.由于这是一组非线性的二阶偏微分方程组,且具体问题的边条件往往又十分复杂,仅在少数特定情况下才可解.利用沉降的小球测量油的黏性系数 η 是我们熟悉的例子,这是雷诺数 $Re \ll 1$ 的极端情形, $Re = \rho v d / \eta$, 其中 ρ 是流体的密度, v 是流速, d 是物体相关的特征长度,这里是球的直径.很小的雷诺数意味着面对的问题属黏性显著占优势的情形,或流体有很高的黏性系数,或对平常流体当问题涉及的尺度很小的时候,此时 N - S 方程因惯性力项可全部略去而可解,在小球沉降情形,得到的是我们熟悉的描述小球所受阻力大小的 Stokes 方程.

在球类运动中,涉及的流体是空气,如果将水的黏性系数定为1,重机油的约为60,而空气的则是1/60,属低黏性流体,相应的雷诺数很大,约在 10^5 的量级.在大雷诺数情形,对 N - S 方程的求解是十分困难的课题.如果因黏性系数小而将方程中相应项完全略去,相当于将流体视为无黏性的理想流体,方程可解,但得到的结果往往与实验观测不符,如不略去黏性力项,方程又难于求解.1904年,德国科学家普朗特(L. Prandtl)引入“边界层”的概念^[2],解决了这一难题,是近代流体力学的重大发展之一.

边界层理论的基本想法是,在黏性系数很小的情形,可将整个流场分做两部分处理,黏性只表现在附着于物体表面上的边界层内;从表面向外,边界层中气流的速度从零逐渐加大到与外部气体流速相同,不同速度层间存在摩擦损耗.对于边界层以外的流体,

则完全略去黏性力的影响,用理想流体的理论处理,并将得到的解作为边界层外缘的边条件,这样整个问题可得到解决.边界层的厚度 δ 约等于 $d/Re^{1/2}$, 其中 d 为球的直径.对于足球,取 Re 为 1×10^5 , $\delta \sim 1\text{mm}$, 这和足球表面的缝线槽深相近,可以预期,缝线槽的存在会对球的空气动力学有重要的影响.

图2(a)给出了在完全略去空气的黏性并将其视为理想流体时球周围流线的截面图.这里为简单起见,将流线直观地理解为一小块空气所走的路径.准确地讲,在这种意义下得到的是流体的迹线,表达同一时刻空间各点流速的方向的流线和迹线,仅在定常流动(steady flow)即流动情况不随时间改变时才是相同的.对于图中 i, j 两条平行等距的相邻流线,在接近球体 A 点(流体力学中习惯称之为驻点)时,间距开始缩小,在 B 点处间距最小,其后逐渐加大,恢复到平行等距.在定常流动情形,单位时间流过相邻流线间任一截面的流体质量总是相等的,由此可以知道,从接近球的前端 A 点到球的顶端 B 点,或底部 D 点,气流是加速的,气流进而向 C 点流动,此时是减速的.按照我们熟悉的伯努利(D. Bernoulli)定理, A, C 两点处气体压强要比 B, D 两点高,但是从对称性的考虑,在气流中的球体感受到的净压强为零,没有阻力作用在球上.

图2(b)是球体表面有边界层存在的情形,在图中边界层用虚线画出.从 A 到 B 和图2(a)一样,边界层和外部气流都是加速的,尽管边界层中存在黏性摩擦导致的能量损耗,倾向于使层内的流体减速,但由于 A 点压强高于 B 点,在压强差的推动下,边界层气流会沿球面前进.从 B 到 C 情况则不同,此时压强是增加的,边界层失去了推动力,无法到达 C 点,而是在 S 点(流体力学中称之为分离点)处和球面分离.分离后的气流是不规则的,形成处于湍流状态的尾流.气流速度进一步增加,边界层中摩擦损耗更大,边界层和球面的分离发生得更早,因而有更宽的尾流.

上述边界层和球面发生分离,存在尾流的状态,是球在飞行中所受阻力的主要来源,因为此时球前后端之间存在压强差, A 点附近气体的压强要大于分离点间的压强,气流在流动方向上对球有作用力,流体力学称之为压强阻力或形状阻力.此外,边界层内的黏性摩擦也会导致能量的损失,产生摩擦阻力,这两种力合在一起构成对球运动的总阻力.

球体所受空气阻力比例于速度 v 的平方变化,一般写为:

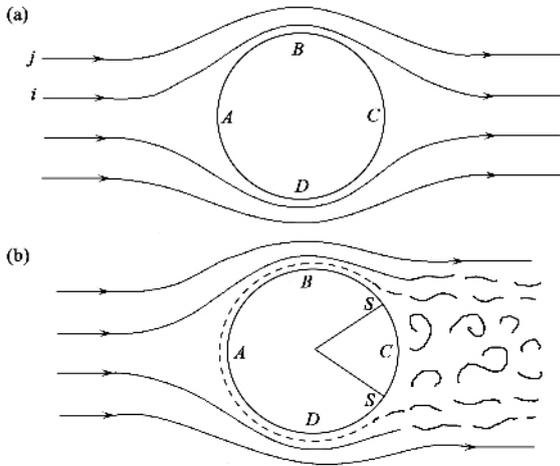


图2 球体周围的流线 (a)理想流体情形 (b)有边界层存在的情形

$$F_d = (1/2)C_d \rho A v^2$$

图3给出了表面光滑度不同的球的空气阻力系数 C_d 随雷诺数 Re 的变化曲线^[31]。可以看到,不论对哪一种光滑度的球,在球速超过相应的临界雷诺数或临界速度后,空气阻力系数急剧下降,原因是此时边界层失稳,层外流速快的气流和接近球面速度较慢的气流混合,推动他们流向球的后端,导致分离点 S 相互接近,尾流变窄 A, C 点之间压差降低,空气阻力下降。这样本节提出的问题的答案是,表面粗糙的球临界雷诺数或临界速度较低,原因是粗糙的表面有助于边界层和外部气流的混合,这正是高尔夫球表面凹痕和足球表面缝线凹槽所起的作用。当然从图3看,即使对表面粗糙的球,在速度(比例于雷诺数)高到一定程度后,空气阻力系数会超过表面光滑的球,粗糙的表面还是使空气阻力系数增加的情况会有所不同。

2 弧线球和弧圈球

足球运动员在罚直接任意球或角球时踢出的弧线球(也常称为香蕉球),在空中划出美妙的曲线,绕过人墙飞入球门,令人叹为观止。从力学原理知道,球的转向必定是受到侧向力的结果;从运动员踢弧线球的脚法,我们可以推断,这种力一定和球的旋转有关。

图4给出了球顺时针旋转时周围流线分布的示意。为简单起见,未将边界层画出。从 A 到 B 和上节所述相同,边界层不会脱离球面。但从 B 到 C ,尽管此时流体失去了压强差的推动,边界层最终会和球

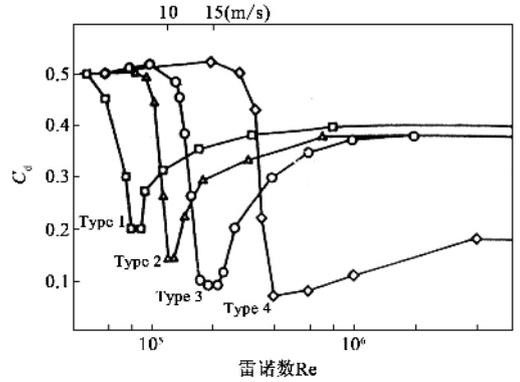


图3 表面光滑度不同的球空气阻力系数随雷诺数的变化^[31] (图中 Type 4 为光滑球, Type 1, 2, 3 的 k/d 值分别为 12.5×10^{-3} , 5.0×10^{-3} 和 1.5×10^{-3} , 其中 k 为粗糙物的高度 d 为球的直径. 图上边标出的是排球速度为 10m/s 和 15m/s 的相应位置)

表面分离,但由于球的转动,球表面运动方向和气流速度方向一致,会带动着黏附于其上的边界层运动,边界层与球面的分离会推后发生。在球的下方,球表面运动方向和外部气流方向相反,表面层与球面的分离会提前,分离点向 D 点移动。这样,在球转动时,流线以及分离点的位置过渡到非对称的形式,气流也因此在经过球后发生了转向。

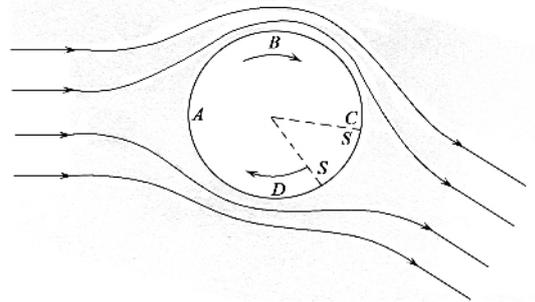


图4 旋转球体周围的流线

对于图4给出的情形,不难判断侧向力作用的方向。气流在经过旋转的球后,附加了一个向下的动量,由于体系总动量是守恒的,那么球应该感受到一个升力,得到同样大小的向上的动量,飞行轨道因此会发生弯曲。这一现象最早由德国物理学家 H. Magnus 在 1852 年通过在流体中旋转圆柱体受力的实验观察到,通常称为马格纳斯效应,并将相应的侧向力称为马格纳斯力。直到 20 世纪初,边界层以及流体与表面分离的概念建立后,人们对这种力产生的原因才有了正确的了解。

马格纳斯力的大小比例于气流的速度 v 和球的旋转频率 f ,当然也和球的大小有关,同样的旋转频

率,直径大的球周向速度大.知道了空气阻力和马格纳斯力的表达式,即可计算球的飞行轨道,例如,可以知道在罚直接任意球时,球要有怎样的旋转才能绕过人墙.

在乒乓球运动中,弧圈球是运动员广为采用的技术之一,正手拉加转弧圈球和前冲弧圈球都是强烈上旋的,球上端的周向速度与气流速度相反,马格纳斯力与图4情形不同,是向下的,球的飞行弧线因而降低,且在着台后会急剧前冲下滑,很有威力.

3 飘球

在排球运动中,发球可以直接得分或破坏对方的一传,是唯一不受他人制约的技术,历来受到重视.发飘球的技术兴起于上世纪60年代,包括上手飘球、勾手飘球和后来发展起来的跳发飘球,由于球飞行轨迹特有的不确定性,忽左忽右,或上飘或下沉,接球方难以应付,成为重要的发球技术,其机理也为人们所关注.

从运动员的实践可以归结出发出飘球的两条要领:一是击球要快速有力,球的初速度要大到一定的程度;二是作用力一定要通过球心,球在运动中不旋转或转动很慢.风洞实验表明^[4],速度从3m/s增加时,球的飘晃距离逐渐加大,在10—15m/s时达到最大,是球在飞行中发生明显飘晃的速度,晃距可达0.5—0.6m.速度再高,到16m/s时,晃距明显减小.这样,发球时球离手的速度确实要高一些,使球在过网后速度仍能保持在10m/s或更高,这样效果最好.

对于飘球产生机制的分析,在缺乏对排球所受空气阻力随速度变化关系测量数据的情况下,可参照已有的对不同表面粗糙度球的实验结果进行讨论.从排球的直径(21cm)和空气的密度、黏性系数,可以算出速度10—15m/s对应的雷诺数为 $(1.3—2.0) \times 10^5$,从图3看,这正是表面粗糙度 $k/d = 1.5 \times 10^{-3}$ 和 5×10^{-3} 圆形球空气阻力系数曲线达到临界速度的范围,其中 d 为球的直径, k 为粗糙部分的高度.如将 d 取为排球的直径,相应的 k 值分别为0.3mm和1mm,和球皮及接缝的不平整度相比还算合理.这样,对于“下坠型”的飘球,一般可理解为排球在飞行中,球速降低,当低到接近临界速度值时,随着速度的进一步减小,阻力急剧加大,是导致球偏离预定轨道突然下沉的原因.

排球的表面,标准的是由18块球皮构成,每3

块成一组,这导致组中4条接缝的走向大体一致,组间近似垂直排列.在上述风洞实验中,作者对球的悬挂采取了对称和不对称两种方式,悬挂点在3块球皮交接点的球为不对称球.在速度从8m/s到20m/s之间,他们发现不对称球的晃动更加积极,摆动的突然变化也更多.

球的飘晃或摆动,都是受到侧向力作用的结果.如上一节的讲述,这种侧向力和边界层的行为有关.实际上如普朗特书中所述^[2],一些看起来似乎很不重要的情况,诸如表面上的轻微粗糙度,来流中多少带有一些涡旋等等,常常会显著地影响分离点的位置.如前所述,球并不旋转或转动很慢,边界层分离点位置的改变和其分布的不对称会是容易理解的.例如,相对于气流与接缝垂直,气流沿接缝流动时边界层的分离点会更向后推一些.在临界速度附近,边界层中的气流从层流转变为湍流,球表面状况对分离点位置的影响会更强烈一些.上述分析应该是一般称为“飘荡型”飘球的成因,也是飘晃距离在球速为10—15m/s时达到最大的理由.

4 小球和大球

1921年,英国高尔夫球管理委员会规定球的最大质量为1.62英两(45.93g),最小许可直径为1.62英寸(41.1mm),1931年美国高尔夫球协会对于球重,选择了和英国相同的规定,但是最小许可直径却定为1.68英寸(42.7mm),大于英国的规定.这样美国的球可以在英国用,英国的球却违反美国的规定.高尔夫球界开始了小球和大球之争.

人们也许认为,美式球的最小许可直径只比英式的大不到2mm,差别小于4%,但是与直径的平方成比例的截面积却加大了7%,击球者很容易意识到这一点.少部分球员认为这会增加击球时的信心,有利于打出好球,但是大多数球员隐约感到大球飞行得不是很理想,比赛起来更困难一些.实验和理论的研究表明在射程和侧风的影响方面两种球是有一些差别,但是对中等水平的球员,只要没有成见,用大球对他们的比赛成绩并没有什么影响.1968年,英国高尔夫球协会决定在他们主管的各类比赛中使用大球,今天这已成为通用的规则,主要的原因是职业球员每年要在不同的国家进行巡回比赛,对于球的尺寸应该有统一的标准,采用大球是争议最少的选择.

现代的小球和大球问题出现于乒乓球运动.由

于中国和其他欧亚国家的努力,到上世纪90年代初,乒乓球运动的水平已有很大的提高,球的速度和旋转强度已加大到使每分球的回合次数明显减少,人们逐渐失去了看球的兴趣,电视转播的收视率也随之下降.为提高其观赏性,2000年2月23日国际乒联特别大会通过,从当年10月1日起将球的直径和重量从原来的38mm 2.5g,改为40mm和2.7g.对于球的直径和重量的选择,除去球的截面积加大了约11%,观众能看得更清楚一些外,更重要的是要适当地降低球速和旋转,这里,分寸的掌握是最困难的.

在新规定出台前,国际乒联委托中国乒协对不同直径和重量的球对击球速度和旋转的影响进行了实验.和原来的小球(称为A)对比,选了直径40mm的两种大球,一种称为B,重2.79g,另一种称为C,重量和A相同.测量结果表明,在正手攻球和正手扣杀情形下,大球B速度下降2%—4%,大球C则为8%—13%,在拉球旋转程度(转数/秒)方面,B比A下降13%,C比A下降21%.对于这些结果背后的物理原因,实验报告中没有讨论和分析^[5].

对于速度变化的原因,实际上可粗略地从空气阻力的角度得到一些了解.空气阻力的大小与球的截面积成正比,因而产生的减速度比例于 d^2/M , M 为球的质量.简单的计算表明,大球B应该是用和A同样厚度的材料制作的,重量有相应的增加,因而 d^2/M 数值与A相同,这和B速度下降较小一致,球C的 d^2/M 数值加大了11%,也和球C速度降低的比率相近.在旋转程度方面,如果球表面的线速度相同,仅只直径有别,旋转速度的变化约5%,不足以解释B比A下降13%的结果,恐怕还要考虑旋转时大球边界层摩擦损耗的增加,球C和球B的差别,应该和球B的球壳较薄,弹性稍差有关,因为乒乓球运动员都知道,球拍上的海绵层薄时弹性差,拉球的旋转性减弱.

大球重量最后选择为比球B稍轻一些.从给出的实验结果,用内插的方法可以推断,球速的降低约为4%—7%,旋转的减弱约为15%,两方面都有所降低,但都不过分.从近期的比赛看,小球变大球,再加上每局改为11分制,在提高球赛的观赏性方面是十分成功的,比赛的回合增多,特别是由于速度和旋转的减弱,削球手又回来了,乒乓球确实变得更加好看了.

5 什么角度投篮最准

篮球的表面上有缝线凹槽,且截面积较大,从前几节的讨论,读者也许会预期,对本节问题的回答,多半又要涉及边界层的行为了.实际上空气阻力对篮球飞行的影响较小,原因是球的飞行速度相对较慢.典型的数值为6—9m/s,飞行的时间较短,一般在1s左右,球也要更重一些.这样,在讨论什么角度投篮最准时,我们可以先完全略去空气阻力的存在,然后再看阻力带来的修正.



图5 小巨人姚明在投篮

篮筐离地的高度是3.05m,假如站在罚球线附近投篮,球距篮筐中心水平距取为 $L=4.1\text{m}$,设篮筐比运动员手中球的中心高 $h=0.61\text{m}$,考虑到球的初始位置要高过投篮者的头顶,这相当于假定投篮者身高约1.83m左右,为普通的篮球爱好者.把球看成为质点,用有关抛物运动的公式,可以得到如图6所示的,为使篮球通过篮筐中心,球出手的速度 v_0 和角度 θ_0 之间的关系曲线^[6].考虑到球必须在其轨道下降阶段进入筐内,特别是球有一定的大小,直径稍大于篮筐的半径,球飞行的路线不可过于平直,最小投射角 θ_0 应该大于 42.5° .也是由于球有一定的大小,且直径比篮筐的小, v_0 固定时 θ_0 有一定的宽容度, θ_0 给定时, v_0 也可稍有变化.考虑这些因素,再加上低的 v_0 意味着投篮时用力也少一些,最佳的投射角是图6中最低速度对应的角度 θ_{0m} ,对于上述设定的 L/h 值, θ_{0m} 为 49.2° .在 L 取值为3到7.6m(稍远于3分球线)的范围内,运动员一般采用不碰篮板的直接进篮方法,考虑到运动员身高不同, h 取值为0.3到1.2m,得到的 θ_{0m} 在 45° 到 55° 之间,在距离和球员的高度增加时, θ_{0m} 趋近 45° .在距离 L 相等时,小 h 值对应的 v_0 和 θ_0 的宽容度要大一些,这

对高个球员较为有利.

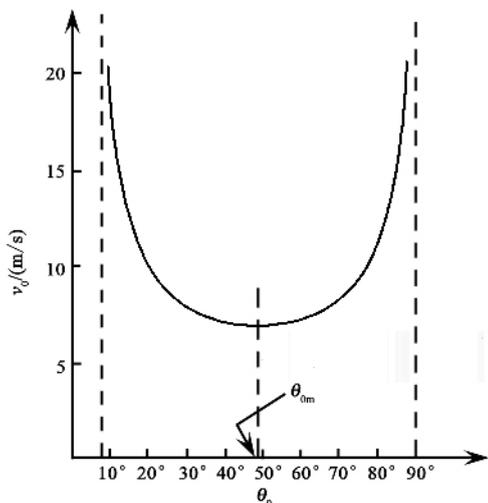


图6 在给定条件下篮球出手的速度 v_0 和角度 θ_0 之间的关系曲线(取自文献[6])

为克服空气阻力的影响,投球的速度要稍有增加,大约在5%左右.另外特别值得关注的是,球在飞行中,相对于上升的部分,在空气阻力的作用下,球的下落部分会变得要陡一些,这增加了投球时 v_0 和 θ_0 的宽容度,对运动员反而是有帮助的.

6 台球桌的库高有什么讲究

以丁俊辉为代表的中国军团在台球运动中的崛起,提升了国人对这一运动项目的关注,书店里也增加了许多有关台球运动的书籍.每一本书都有关于“器材”的一节,会给出球台的长、宽、高度,以及开始时球的摆位等,唯独找不到称为库的台边的高度.库是台面四周的边框,边框为木制,高出台面,上部贴有标准弹性的胶条,呈 Γ 形,外覆羊毛绒台面呢.实际上,库高度的选择是很有讲究的.

假如通过球心用杆在水平方向击球,即图7中取 $x = r$ 为球的半径,球的底部 D 点相对于台面向右滑动,球会受到与台面间摩擦力 F 的作用,摩擦力与球的滑动方向相反,其作用一方面是产生减速度,使球的滑动速度 v 放慢,另一方面是相对于球心的力矩 $F \times r$,使球转动,且角速度 ω 比例于时间增加.当 $v = \omega \times r$ 时,球不再滑动,纯粹以滚动的形式向前运动.

若要避免球在初始阶段的滑动,击球点要高于球心,即 $x > r$,如图7所示.如果 x 选得合适,球可以从一开始就以滚动的形式运动.击打的作用同样是两方面:一方面使 D 点向右运动;另一方面又由

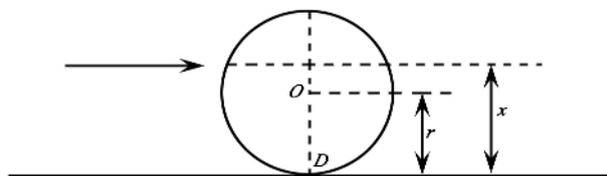


图7 水平方向击打台球示意

于力不通过球心使球顺时针旋转,后果是 D 点向左运动.球无滑动,只有转动的条件是在球受到击打的瞬间 D 点与台面间没有初始的相对运动(因此这里不涉及摩擦力),这要求有合适的 x 值,使 D 点的瞬间行为有如不动的转轴.从上述两作用相抵消出发,利用 D 点不动的条件,可以得到

$$x = (7/5)r = (7/10)d,$$

其中 $d = 2r$ 是球的直径,击球点应在高于台面,等于球直径的 $7/10$ 处.

英式斯诺克台球的直径约为 5cm , x 应为 3.5cm ,这是球台库高的尺寸.这样的选择,使球碰到岸时会平稳地反射,以滚动的形式运动.由于没有滑动,能量损失显著减小,相应的也减弱了速度的降低.由于同样的原因,这一位置也是运动员在正常击球时常选择的击球点.

7 保龄球球道的玄机

相对于台球,对在球道中保龄球运动的分析要复杂一些.首先是球道的摩擦系数,并不能简单地处理为常数,其次,对有指孔保龄球的重量和直径,规则虽有限定,但并不要求球是完全均匀和对称的.事实上,在用树脂材料做的保龄球中,包有形状各有差异的重物块,这使对通过球心、取向不同的轴,球的回转半径有差别,以及球心和质心位置的不重合.结果是在讨论球的转动时,转动惯量张量不能对角化.对于制作考究、高质量的球,这种差别限制在小的范围内,例如,对任意两轴的回转半径之差不能大于 0.20cm ,球心和质心的距离必须控制在小于或等于 1mm .数值模拟计算表明,这种小的差别对球的运动轨迹仍有明显的影响.

保龄球员都知道,投出的球应为曲线球,或称为钩球(hook),右手投球的球员投出的球要从1号瓶(头瓶)和3号瓶间斜角切入,这样容易造成球瓶的斜倒和横倒,全中的概率最大.除去投出的球要有一定的初速度和侧向旋转外,模拟计算表明,沿球道摩擦系数的变化是最重要的因素.

保龄球的球道宽 42 英寸,相当于 1.06m,从犯规线到瓶区中心的 1 号瓶点长度为 60 英尺,相当于 18.28m,用 39—42 块木板条拼成. 球员投球的助走道和球道的前 20 英尺,以及球道的置瓶区用枫木制成,枫木非常坚硬,能承受 16 磅球在其表面产生的持续不断的、近 130 kg/cm^2 的冲击力. 球道的中段采用硬度相对较低的松木,松木有较好的纹理,摩擦系数会高一些. 但是实际上决定球道摩擦系数变化的关键因素是对球道表面上油的情况,上油安排的不同,可以改变比赛的难度,在比赛中也要注意由于球把油带出所引起的球道状况的变化.

上油区一般如图 8 中灰色区所示,宽度为球道宽的 $4/5$,长度从犯规线算起,为 40 英尺. 按照规则,球道的摩擦系数不能超过 0.39,上薄层油区域,摩擦系数的典型值为 0.04,不上油区的摩擦系数一般不超过 0.20. 对于投球的初速度和旋转程度,取中等水平的球员的数值,分别为 8m/s 和 30rad/s (相当于每秒转 4.77 圈). 图 8 是在上述情况下,在球的差别较大的两种状态(如图(a)(b)所示)时,对保龄球运动轨迹进行模拟计算的结果^[7],图 8 中箭头所示为球角速度的方向.

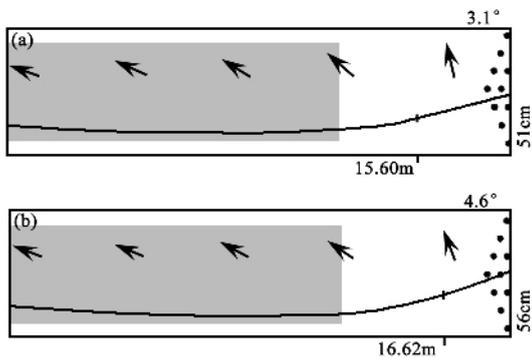


图 8 保龄球运动轨迹模拟计算结果(a)转动惯量为标量,回转半径取低值 6.2cm,球的质心和球心重合(b)转动惯量为张量,绕 3 个主轴的回转半径取高的数值,分别为 6.9、7.1、7.1cm,球的质心和球心相距 0.7mm

从图 8 给出的结果可以看出,不管球的质心和球心是否重合,以及转动惯量是否为张量对球的运动轨迹有影响,并使图 8(a)和 8(b)中球路的细节有差别,但最重要的因素是薄层油所引起的球道摩擦系数的变化. 图中球路可理解为,在上油区球道影响很小,球路大体为直线,离开上油区,球道摩擦系数突然增加,摩擦力使球的路径在趋近瓶区时发生偏转,最终以理想的 $3\text{—}5^\circ$ 斜角切入. 如果整个球道都上油,摩擦系数为常数且很低,球路会很直,接近瓶区时偏转不够;反之,如果都不上油,摩擦系数高,

球路会偏转,但因滚动开始得过早,也难于以理想的角度击瓶.

8 结束语

首先,从中学物理和大学基础物理教学的角度,球类运动的物理在提高学生学习和加深对问题的理解方面都是很有助益的. 在跑动中运球的篮球运动员,除非要变换速度和方向,否则只要垂直向下拍球. 跑动中的投篮和立定投篮不同,要根据跑动的速度和方向调整投篮的瞄准点,因为球离手时,携带有球员跑动的速度. 跑动中的球员觉得球是垂直向下或向上运动时,在场外观众的眼里,实际上球是向斜前方运动的. 在力学教学中,对于引入运动坐标系和惯性原理的概念,学生在球场上的这些体验是很好的切入点. 本文讲到的有关球的运动和碰撞的一些问题,也会是基础物理教学中学生很感兴趣的习题或实例.

其次,从运动员和教练员的角度,了解球类运动背后的物理重要吗? 本文讨论过投篮的准确度,投篮时球出手的角度随球员与篮框间的距离有所变化,在出手角度确定后,篮球通过篮心和刚好擦着框边进入篮框,按照数值计算的结果,出手时球速的差别小于 1%,初速度取值的宽容度实际上是很小的. 可是我们注意到,通过刻苦的练习和摸索,球员可具有很好的运动的和肌肉的记忆,一个职业球员在没有干扰,或练习中投篮的命中率可达 70% 或更高. 作为物理学家,我们可以说,一方面,从优秀运动员投篮的角度、速度、手法等可以检验和修正理论分析所用的物理模型;另一方面,运动员了解相关的道理后,在练习中会更加自觉,缩短摸索的过程.

第三,运动水平的提高,需要有创新. 以乒乓球为例,据统计^[8],在中国乒乓球队处于领先地位的 20 世纪 50 年代到 80 年代前期,世界公认的技术创新共 29 项,其中属于中国的有 22 项,占总数的 75.9%,但从 1988 年到 1999 年,在公认的 7 项创新技术中,中国只有 1 项,占有率下降到 14.3%,和在这一阶段中国乒乓球队在重要比赛上出现败绩,留有遗憾是一致的. 这些技术创新,尽管大部分是靠运动员和教练员在实践中探索得到的,显然还需要从理论上得到说明和提升,当然也还需要研究人员提出建议,发展新的技术. 在这两方面,物理研究均占据重要的地位.

最后,对于球类运动物理的研究,总的来讲,美欧

国家开展较多,主要集中在他们的热门项目上,如高尔夫球、网球、垒球、足球和台球,有系统深入的文章,也出版了一些相关的书籍。从已发表的文章和书籍看,在提高研究水平方面,物理学家的积极参与应该是很帮助的。例如,英国物理学会出版的《足球的科学》(The Science of Soccer)一书的作者 J. Wesson,他的研究生涯开始于实验原子和等离子体物理,继而转到理论物理领域,退休前踢足球。美国出版的《垒球的物理》(The Physics of Baseball)一书的作者 R. K. Adair 是耶鲁大学研究基本粒子的理论物理学教授,美国科学院院士,当然也是个垒球的球迷。相对而言,国内的研究,特别是在深度方面要差一些,尤其是对于我们的优势项目,如乒乓球,相关的研究工作只能靠我们自己,更需要从理论和实验方面加强。笔者撰写本文主要的目的,是为引起读者的关注,希望国内的物理学家能参与球类运动和其他运动项目的物理

研究,为提高我国的运动水平做出贡献。

致谢 感谢首都体育学院阎守扶教授对本文初稿的审阅和提出很好的修改意见;感谢贾秋萍女士在资料等方面给予的帮助。

参考文献

- [1] Thomson J J. Nature, 1910, 85: 251
- [2] 普郎特等著,郭永怀,陆世嘉译. 流体力学概论. 北京:科学出版社, 1966
- [3] Fröhlich C. Am. J. Phys., 1984, 52: 325
- [4] 蒋晔,陆阿明. 中国体育科技, 2005, 41: 87
- [5] 张晓蓬. 不同直径和重量的乒乓球对击球速度和旋转影响的实验报告. 可在 www. gb. cri. cn 网站中找到
- [6] Brancazio P J. Am. J. Phys., 1981, 49: 356
- [7] Fröhlich C. Am. J. Phys., 2004, 72: 1170
- [8] 苏丕仁. 南都学坛(自然科学版), 2001(3): 92

· 书评和书讯 ·

科学出版社物理类新书图书推荐

书名	作(译)者	定价	出版日期
普朗特流体力学基础(翻译)	H. 欧特等著,朱自强等译	89.00	2008年6月
纳米薄膜分析基础(影印)	T. L. Alford	68.00	2008年6月
液晶物理学(影印)	P. G. de Gennes	98.00	2008年6月
临街现象理论(影印)	J. J. Binney	89.00	2008年6月
软凝聚态物质(影印)	Richard A. L. Jones	46.00	2008年6月
量子力学原理(第四版)(影印)	P. A. M. Dirac	58.00	2008年6月
基本粒子物理学的规范理论(影印)	T. P. Cheng	96.00	2008年6月
介观物理导论(第二版)(影印)	Y. Imry	56.00	2008年6月
冲击相变	唐志平	58.00	2008年5月
晶体振荡器	赵声衡	62.00	2008年5月
凝聚态物理的格林函数理论	王怀玉	78.00	2008年5月
惯性聚变物理	沈百飞	75.00	2008年5月
激光的衍射及热作用计算(修订版)	李俊昌	68.00	2008年5月
微纳米 MOS 器件失效机理与可靠性理论	郝跃,刘红侠	78.00	2008年3月
磁性量子理论——材料的磁学性能(第三版)(影印)	R. M. White	68.00	2008年2月
半导体物理电子学(第二版)(影印)	Sheng S. Li	98.00	2008年2月
碳纳米管——从基础到应用(影印)	A. Loiseau	90.00	2008年2月
统计力学(第二版)(影印)	F. Schwabl	96.00	2008年2月
量子统计力学(第二版)	张先蔚	52.00	2008年2月
输运理论(第二版)	黄祖洽	68.00	2008年1月
聚变能及其应用	邱励俭	96.00	2007年12月
相互作用的规范理论	戴元本	68.00	2005年7月

凡购书者免邮费,请按以下方式联系我们:

电话 010-64017957 64033515 电子信箱: mlhukai@yahoo.com.cn yandeping@cspg.net

通讯地址 北京东黄城根北街16号 科学出版社 100717 联系人: 胡凯 鄢德平 主页: http://www.sciencep.com