

# 棒 球 中 的 物 理 学

申兵辉 祁 铮

(中国农业大学应用物理系 北京 100094)



在棒球运动风靡全球的今天,物理学工作者当然不会满足于能够解释为什么天空是蓝色的以及为什么星星会闪烁等诸如此类的现象.与乒乓球和网球的情形类似,空气动力学原理在棒球中起着重要的作用.然而,棒球是由一块块的皮革缝合而成,既不能看成是理想的光滑球体,也不可作为极端粗糙的球体来对待.专业棒球手的球棒是木制的,业余棒球手允许使用铝制球棒,但不管哪种球棒,都不是严格的具有简单力学特性的刚性柱体.因此,从物理学的角度来认识棒球运动并不是一件容易的事.不过,依靠一些模型化的近似处理,我们仍然能够运用物理学原理对棒球运动作些解释.

范德梅尔发展了反质子的冷却技术,使得CERN很快建成了270GeV质子和270GeV反质子的对撞机SPS.鲁比亚领导的UA1实验组于1983年先后发现了 $W^+$ 、 $W^-$ 和 $Z^0$ 粒子(参见本刊1(1994)5和2(1995)5).随后对它的质量和特性作了更精密的测量,测量结果再一次证明了粒子物理的标准模型的正确性.

对t夸克的寻找不那么简单,经历了一个十分艰苦而漫长的过程(参见本刊5(1995)12).为了寻找t夸克,从1978年开始,世界各地先后建造了几台能量不同的高能加速器,20余台规模不同的探测设备,数千名物理学家和工程技术人员通过广泛的国际合作,对物质结构进行大规模的深入探索.终于在1995年,美国费米实验室的CDF和DO实验组在质子-质子对撞机Tevatron上证实了t夸克的存在.而t夸克的质量竟高达 $\sim 176\text{GeV}$ (几乎和金原子一样重),这是人们没有预料到的.

到目前为止,对希格斯粒子的实验寻找都没有成功.人们期望建造能量更高的加速器,美国超导超级对撞机(SSC)流产后,人们把希

## 一、棒球在空气中的运动

作用于棒球上的空气阻力与其自身的重力有相同的量级,我们估计作用于截面为A的球上的空气阻力与球速的平方成正比,与截面积及空气的密度成正比,可表示如下:

$$F_d = C_d \rho v^2 / 2$$

这里, $C_d$ 是一个无量纲的比例系数,与雷诺数有关,通常由实验确定.一般此系数小于1.

这是一个很不错的模型,对于乒乓球和棒球,实验测得的空气阻力确实与 $v^2$ 成正比.当运行速度小于 $27\text{m/s}$ 时,测得 $C_d \approx 0.5$ ,职业棒球手击出的球速度可达 $54\text{m/s}$ ,这时 $C_d \approx$

寄托在CERN的LHC上.LHC将是一台10TeV质子和10TeV质子的对撞机,按目前的计划,该机器将于2005年建成并投入运行(参见本刊4(1993)15).

粒子物理学100年的发展史,是一系列新粒子和新现象的发现史.粒子物理学从孕育、诞生、成长,已经发展成了一门物理学的前沿学科.粒子物理的标准模型建立以后得到了越来越多的实验验证.到目前为止,还没有发现任何和标准模型相抵触的实验事实.诚然,粒子物理学依然存在许多疑惑,例如,t夸克为什么比其他夸克重得多?为什么夸克和胶子始终被禁闭在强子中?希格斯粒子是不是真正存在?夸克和轻子是不是还有第四代、第五代、...?随着实验上获得越来越精密的数据,标准模型还能不能符合得很好?这些问题将有待于下一世纪的粒子物理学的发展.

理论上对标准模型的扩展,如超对称理论、大统一理论、弦理论、夸克和轻子的次结构等至今还没有在实验上找到确凿的证据.这些将是下一个100年的故事了.

0.3, 且当球速更高时, 此数值基本保持恒定。

多数情况下, 棒球速度介于  $27\text{ m/s}$  与  $54\text{ m/s}$  之间, 这个速度区间的情况最复杂, 而这种复杂性同时也大大丰富了棒球运动本身。当棒球在空气中作低速飞行时, 空气平缓绕过球体表面, 这时球表被一层静止的空气 (称为 Prandtl 边界) 所覆盖; 球后面的空气作典型的涡旋运动。举一个形象化的例子: 用手轻轻抛出一个低速球, 如果球速低于  $22\text{ m/s}$ , 那么附在球上的一个蚜虫甚至感受不到丝毫的微风, 但球速到达  $54\text{ m/s}$  时, 边界层的空气大部分被吹散, 球后的空气变为湍流, 这时, 这个蚜虫就必须抓紧球面抵御狂风了。

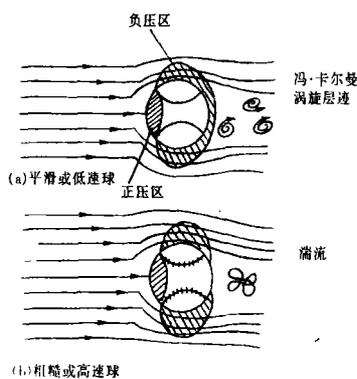


图 1

球体在空气中运动时, 受到的阻力不仅与其速度有关而且和表面的光滑程度有关。如图 1 所示, 球速较低时, 不管其表面的光滑度怎样, 空气相对于球体都作层流运动, 在球前产生一个正压区, 而由球侧 (由于空气的加速运动) 一直延伸至球后存在一个负压区, 球后的空气作冯·卡尔曼涡旋运动, 因此产生显著的阻力。当球速增大到一个临界值时, 球体周围的空气会由层流变为湍流, 称为阻力转换。对于表面非常粗糙的球体, 阻力转换在速度为  $11\text{ m/s}$  时就发生了, 但对于光滑的球体, 这种转换将推迟到  $78\text{ m/s}$ 。湍流情形下虽然球前的压强仍为正值, 但球侧和球后的负压区域将减小, 空气阻力也会随之减小。因此, 与我们的直觉相反, 湍流存在时表面粗糙的球受到的阻力反而小。图 2a

显示了一个表面均匀的粗糙球体其阻力系数随速率的变化, 转换发生在  $31\text{ m/s}$  处, 同时给出了对棒球 (表面光滑度适中) 在风洞中测得的平均有效阻力系数。从图中可以看出, 速率较小时, 空气对棒球和粗糙球体的阻力系数几乎相等,  $C_d \approx 0.5$ 。在阻力转换区, 表面粗糙球体的阻力系数随速度的增加急剧下降, 而棒球由于它的制作方法使它的表面既非光滑又非粗糙, 因此在转换区间阻力系数随速度的变化较平缓, 且明显大于粗糙球体的阻力系数。图 2b 显示了从图 2a 导出的棒球受到的阻力随速率的变化。约在  $42\text{ m/s}$  处阻力与其自身的重力相等。

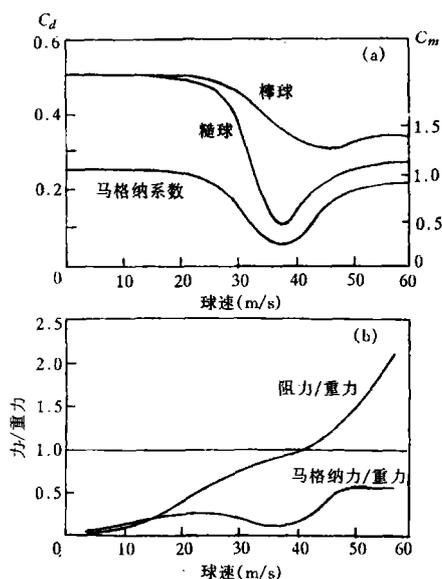


图 2

利用这个阻力曲线, 并考虑球体回旋带来的很小的修正, 我们可以对以特定初速度和发射角射出的球体计算它的轨道。我们知道, 在真空中, 水平射程与投出初速度的平方成正比, 但考虑空气阻力后, 对于初速度大于  $31\text{ m/s}$  的棒球, 最大水平射程与其初速度成直线关系:  $L = 61 + 3.4(v - 31)$ 。这里,  $L$  为水平射程, 以米为单位。例如, 一个以  $49\text{ m/s}$  的初速度击出的棒球, 在真空中可以水平飞行  $246\text{ m}$ , 但在空气中仅能到达  $122\text{ m}$  远。并且, 对应的发射角也不同, 真空中为  $45^\circ$ , 空气中约为  $35^\circ$ 。利用这些不同速度下产生不同阻力的特性, 击球手还可

以击出各种不同的战术球。

据统计,棒球比赛的得分中有 30% 是靠本垒打赢得,因此提高本垒打的成功率直接影响棒球比赛的成绩。击球手击出的长距球水平距离每增大 1%,可提高 10% 的本垒打概率。如此看来,高度与温度两个因素也不能忽略,它们影响空气密度与粘滞度,从而影响空气阻力的大小。实际上海拔高度每增加 300m 或温度每升高 22℃ 都可使水平距离增大 2%(可使本垒打的概率提高 20%)。因此,如果比赛是在高海拔地区或炎热的气候中进行,一个击球手尽可能多地击出一些远程球,则可以改善比赛成绩。

## 二、曲线球

专业投球手投出的球都是旋转的,这样球在空气中会沿曲线行进,这种现象称为马格纳效应。这是由于旋转的球体在运动中受到一个与速度方向垂直的力,称为马格纳力。假如一个投球手向本垒(投手距本垒 18m)投出一个绕竖直轴以 30rad/s 旋转、平均速率为 31m/s 的球,则该球在这段距离中将侧向偏离约 0.5m。

为了在实验上研究马格纳效应,通常采用风洞系统,即让球体静止而空气作相对运动。在棒球场上即为假设棒球静止空气由本垒向投手运动(如图 3 所示,图中箭头方向为棒球旋转的方向),三垒一侧的球面减慢了空气的流动速度,根据伯努力原理,负压的幅度减小了,形成负压的区域也相应地被减小了,气流更早些离开球表。一垒一侧的空气将被加速,负压增大。两侧的压强差造成了一个指向一垒的侧向压力,这就是马格纳力。

如果投球手投出的是一个更快、转速更大、更加光滑的球,三垒一侧的空气与球面的相对速度增大(处于阻力转换区),产生湍流并吹散边界气流层,更紧密地环抱于球体周围,较迟离开球面(参看图 1),使得这一侧负压区变大。在球面与空气相对速度较小的一垒一侧,空气仍将平缓地绕过边界层,此边界层将气流与球表隔离开来,因此该侧的空气更早地离开球面。结果,作用于球体上的压力将指向三垒,球后的空气稍稍偏向一垒,而球体本身将偏向三垒!

这个现象是 50 年代在风洞实验中发现的,称为“反马格纳”效应。

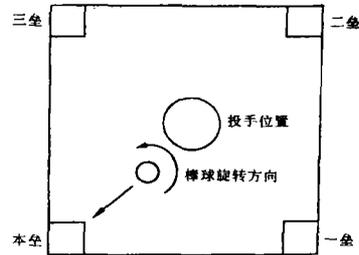


图3 棒球运动中垒及投手位置示意图

上述有关马格纳效应的分析只是定性的,但是我们可以做一些推测。牛顿在早期的研究中曾指出:马格纳力与旋转球体两侧受到的阻力差成正比,假定阻力与速率的平方成正比(这在速率处于阻力转换区两侧时符合得很好),马格纳力可用下式表示:

$$F_m \propto [F_d(v + \omega r) - F_d(v - \omega r)] \rightarrow C_m \rho A \omega r v / 2$$

其中  $\omega$  为角频率,  $r$  为球半径,  $C_m$  为马格纳系数。经实验确定,在速率较低时  $C_m$  约为 1。  $C_m$  及马格纳力随速率的变化曲线分别由图 2a 和图 2b 所示。上述马格纳力的表达式及图 2b 的曲线仅在速率低于 22m/s 时得到了实验验证。但从定性意义上,它仍然很有价值。例如,图 2b 成功地解释了下列现象:在马格纳力较阻力与重力都小的情况下,它足以使一个慢球到达本垒时横向偏离 0.6m,但在速度为 400m/s 时仅偏转 0.1m 左右。这与图 2b 中的马格纳力曲线符合得很好,因为速度为 40m/s 附近正好对应马格纳力的极小值位置。

## 三、击球与投球

研究击球过程中肌肉、肌腱和骨骼间的相互作用机制,本是生理学家的事情。但是,通过简单的分析,物理学家能够描述出在这个过程中能量向球棒传递的一些特点。假设击球手是一个行家,并忽略由手腕产生的扭矩,则按平常的弧线,球棒上击球点的峰值速率为 31m/s,这将产生一个 110m 远的本垒打。

击球手从开始动作到结束大约需 0.18s。因此,如果球较快,球到达途中一半位置时,击

球手就应该动作(当然也可不击,这依赖于击球手对来球的判断)。如图4所示,人体作用于球棒的功率在击球前30ms达到峰值,约为6.8kW,然而,据统计每6kg的肌肉最大可产生1kW的功率,所以手及手腕的贡献是微不足道的。能量的绝大部分来源于胸部和大腿部的肌肉群。即使如此,如果不考虑贮存机制仍然很难解释这样的能量传递。看来,实际情况是击球手在动作早期蕴藏能量于身体的转动中,最后通过手臂强有力的动作将能量在击球过程的最后50ms内释放出来。实战录像证实了这一点。

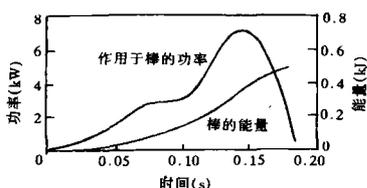


图4 击球过程中人体作用于球棒上的功率以及球棒得到的能量

同样,可用一个模型说明投球过程中的能量传递。假设球体在2.5m的距离内被均匀加速,那么要想产生43m/s的初速(以便到达本垒时保持40m/s的速度),作用于球上的力必须有45N,产生的加速度约为重力加速度的40倍。在这0.11s的加速过程中的平均功率约为1.1kW,因此,能量同样不能仅仅来源于手臂,必须靠胸部及腿部的肌肉群提供。

#### 四、球棒与棒球

棒球的特点建立了击球手与投球手、球棒与棒球间微妙的平衡关系。如果棒球从3m高落到水泥地板上,它仅能反弹起约0.9m,由此可估算出它的恢复系数为 $\sqrt{0.9/3} \approx 0.55$ 。可见,棒球并不是理想弹性的球体。不仅如此,实验表明,它的恢复力也不是线性的(不满足胡克定律)。如果把一个直径为7.35cm的棒球看成线性弹性球体,并假设碰撞过程将其压缩到原来直径的一半,则可计算出碰撞需要2ms。而实际情况是,一个本垒打将投手投过来的40m/s的棒球以50m/s的速度击出,仅需1ms左右,且大部分的动量传递发生在0.6ms内。

木质球棒与速率较高的棒球的恢复系数大

约相等,约为0.45,而铝质球棒的恢复系数高达0.9。碰撞过程中木质球棒产生的形变与棒球的形变之比为2%。铝质球棒产生的形变与球体形变之比为10%。由此可计算击球后返回的能量与总碰撞能的百分比,对于木质球棒为 $2\% \times 0.45^2 + 98\% \times 0.45^2 = 20\%$ 。对于铝质球棒为 $10\% \times 0.9^2 + 90\% \times 0.45^2 = 26\%$ 。所以,在其他条件不变的情况下,由铝制球棒击出的球,初速更大。棒球规则要求职业球员只能使用木质球棒,而业余球员可以使用铝质球棒。由于铝质球棒的刚性好于木质球棒,因此用它击出的球更远。所以我们有理由相信,如果允许职业球手使用铝质球棒,可以大大增加本垒打的成功率。也许这样会打破攻防的平衡,使职业棒球运动的可观看性大大降低,所以规则要求职业球员只能用木制球棒。

给出恢复系数后,许多人假设球棒为具有一定质量和一定转动惯量的刚体并计算了球与挥动的球棒碰撞过程中的能量传递。但实际球棒也不是刚性的,简单的实验就可证明:用小锤轻轻敲一下0.85m长的木质球棒,测得球棒以180Hz的频率振动,还能同时确定它产生声波的波长。在这方面, Lonnie van Zandt充分考虑了木质球棒的柔性所带来的碰撞的复杂性,作了更细致的计算。他计算出他的球棒的前20个谐波频谱仅与实验结果相差1%。

总之,像其他大多数体育运动一样,棒球运动有其自身的复杂性,要作精确计算几乎是不可能的。况且,这方面的实验数据实在少得可怜。不过作为物理学工作者,我们应该假设,棒球运动经过一百多年的发展,一个有经验的职业球员在比赛中的动作已经非常接近于完美。这样,棒球比赛本身就是我们丰富的数据来源。这使得我们能够从物理学的角度来理解这项运动,因为估算是物理学家的看家本领之一,正如著名物理学家费米所说的那样,一个合格的物理学家应该能够估计任何事物到有用的程度。

(编译自 Robert K. Adair, *The Physics of Baseball*, *Physics Today*, 26(May 1995))