

体育运动中的力学原理

余家荣

如果你是位体育迷的话,那么对于球类中的“香蕉球”、“勾手飘球”、“上旋球”、“下旋球”等等一定十分熟悉,对于体操或跳水运动中的各种空翻、转体、腾越动作非常欣赏,但这些怪球、好球是如何打出(或踢出)的,这些优美高难度动作是如何设计的?其中可有学问呢!它与力学原理关系密切,下面通过一些具体事例来说明。



一、抛射体运动与铅球的投掷

抛射体运动是一种重要的曲线运动。在体育运动中各种投掷器械的运动,以及人体蹬离器械或地面而形成的腾空运动都属于抛射体运动。其中跳高、跳远可看成是抛射点与落地点在同一水平面的抛射体运动;铅球、手榴弹等投掷器械的运动,可视为抛射点高于落地点的抛射体运动;而篮球的投篮一般说来可认为是抛射点低于落地点的抛射体运动。

对铅球运动员来说,他最关心的是如何使铅球投得更远,那么哪些因素将影响铅球水平抛射距离呢?由图1可看出影响铅球水平抛射距离 S 的因素有出手高度 H (铅球出手时离地面的高度),出手角 θ 和出手时的初速度 v_0 三个。将铅球的运动分解为垂直地面的匀变速运动和水平的匀速运动,并考虑到铅球的抛射点 A 高于落地点 D 的特点可求得 S 与 H 、 v_0 、 θ 的关系为:

$$S = v_0 \cos \theta \left[\frac{v_0 \sin \theta}{g} + \sqrt{\frac{v_0^2 \sin^2 \theta}{g^2} + \frac{2H}{g}} \right] \quad (1)$$

而最佳出手角 θ_m 与 H 、 v_0 的关系为:

$$\sin \theta_m = \frac{v_0}{\sqrt{2v_0^2 + 2gH}} \quad (2)$$

由式(2)可知,当抛射点高于落地点时,最佳出手角 θ_m 一般小于 45° ,当 H 不变时, v_0 越大 θ_m 越接近 45° ,而当 v_0 一定时, H 越大, θ_m 越小。

式(1)表明铅球的水平射程 S 取决于初速度 v_0 ,出手高度 H 和出手角 θ 三个因素,那么这三个因素中哪一个对水平射程影响最大呢?实践表明,为了获得较大的水平射程,提高铅球出手速率 v_0 最有效,因此运动员在训练中应把主要精力放在提高出手速率上。

二、角动量守恒与人体空中转体运动

角动量守恒是物理学重要的守恒定律之一,在人体运动时,它是支配包括空翻和转体在内的一切动作的基本物理原理。众所周之,差不多所有最复杂的跳水动作不是多次的空翻,就是空翻与转体相结合。所谓空翻就是运动员绕着通过腰的水平轴旋转,而转体

则是绕着从头到脚的垂直轴旋转。在人体空中转体运动中,运动员所做的空翻和转体相结合的动作称为“旋”,现在“旋”式转体在体操和跳水运动中被广泛地采用。

下面我们运用角动量守恒定律来分析“旋”式转体。当一刚体绕任意轴 PP' 转动时(图2),它绕 x 、 y 、 z 轴的角动量分量可写成:

$$\begin{aligned} L_x &= J_{11}\omega_x - J_{12}\omega_y - J_{13}\omega_z \\ L_y &= -J_{21}\omega_x + J_{22}\omega_y - J_{23}\omega_z \\ L_z &= -J_{31}\omega_x - J_{32}\omega_y + J_{33}\omega_z \end{aligned} \quad (3)$$

式(3)中, L_x 、 L_y 、 L_z 分别为对 x 、 y 、 z 轴的角动量分量, J_{11} 、 J_{22} 、 J_{33} 分别为刚体对 x 、 y 、 z 轴的转动惯量,而 $J_{12} = J_{21} = \Sigma xz(\Delta m)$, $J_{23} = J_{32} = \Sigma yz(\Delta m)$, $J_{13} = J_{31} = \Sigma xy(\Delta m)$,其中 Δm 为刚体的质量元,它们与刚体对 xoy 、 $yozy$ 、 xoz 平面的质量分布有关。

我们在讨论人体空中转体时,往往采用通过人体质心的直角坐标系,当跳水运动员双脚同时蹬离跳板时(图3),运动员的身体保持对 $yozy$ 平面的对称性,因而 J_{12} 、 J_{21} 、 J_{13} 、 J_{31} 均为零,又因为人体的比例,一般地说是前后的尺度即 y 坐标总是小于左右的尺度即 x 坐标,更远小于上下的尺度即 z 坐标,所以 $J_{13} = J_{31} \approx 0$,当人体腾空后,

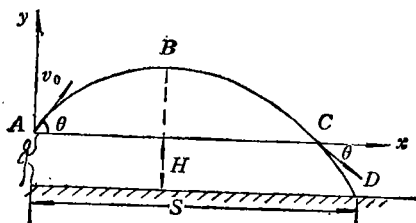


图 1

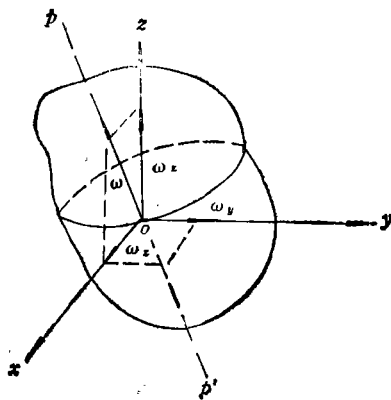


图 2

若忽略空气的阻力,只有重力作用于人体的质心,则对质心而言外力矩 $H = 0$,所以人体在空中的转动必然符合角动量守恒,因而得到:

$$\begin{aligned} L_x &= J_{11}\omega_x = L_{x_0} = J_{11}\omega_{x_0} \\ L_y &= J_{22}\omega_y = L_{y_0} = J_{22}\omega_{y_0} \\ L_z &= J_{33}\omega_z = L_{z_0} = J_{33}\omega_{z_0} \end{aligned} \quad (4)$$

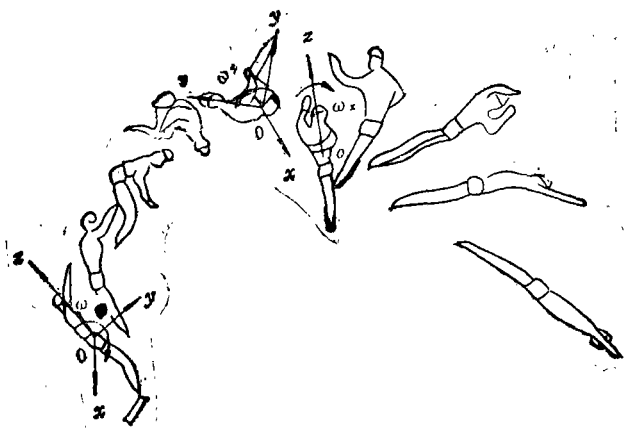


图 3

式(4)中 J_{11}, J_{22}, J_{33} 分别为蹬离跳板时,人体对 x, y, z 轴的转动惯量而 $\omega_{x_0}, \omega_{y_0}, \omega_{z_0}$ 分别为该瞬间绕 x, y, z 轴的角速度。又考虑到运动员蹬离跳板时仅获得对 x 轴的角速度 ω_{x_0} ,而 $\omega_{y_0}, \omega_{z_0}$ 均为零,所以:

$$\begin{aligned} \omega_x &= \frac{J_{110}}{J_{11}} \omega_{x_0} \\ \omega_y &= 0 \\ \omega_z &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$

只要运动员始终保持对 yoz 平面的对称性,运动员在空中只有绕 x 轴的转动,由于人体是可变刚体系,运动员可以在空中屈体或伸展身体来改变对 x 轴的转动惯量,从而获得对 x 轴不同的角速度。

当运动员空翻一周后迅速举起右手(图3),这时人体不再保持对 yoz 平面的对称性,因而 J_{11} 和 J_{33} 不为零,由式(3)和角动量守恒可得到:

$$L_x = -J_{13}\omega_x + J_{33}\omega_x = L_{x_0} = J_{33}\omega_{x_0}$$

由于运动员在蹬离跳板时,并未获得对 x 轴的角速度,因而得 $L_x = -J_{13}\omega_x + J_{33}\omega_x = 0$ 。

$$\text{即} \quad \omega_x = \frac{J_{13}}{J_{33}} \omega_{x_0} \quad (6)$$

以上讨论表明,当运动员迅速举起右手时,他就获得了绕 x 轴转动的角速度,这时运动员一面继续空翻,同时又绕着 x 轴转动,空翻和转体同时进行,这就是当前国内、外体操和跳水比赛时,大家所看到运动员所做的“旋”式转体。

三、伯努利方程与球类运动

伯努利方程是能量(机械能)守恒原理或功能原理在稳恒流动流体中的一种表述,它既适用于流管也适用于流线,伯努利方程关于流速大处压强小,流速小处压强大的重要结论在球类运动中得到广泛的应用。下面将阐述伯努利方程在排球和足球运动中的应用。

排球发球技术中的飘球,由于球体在空中左右、上下晃动,使接球者对排球的飞行路线难以判断,从而造成接球失误,所以飘球具有较强的攻击性。那么飘球是如何形成的呢?一个训练有素的运动员一定知道发飘球时要特别注意两点。第一在击球时,力量要集中,作用力的方向必须通过球体重心,不使球产生旋转;第二击球要突然、短促。第一点就是要求运动员击球时手和球的接触面积要尽量小,发飘球时,一般把排球的气嘴部位朝前,你若细心的话,一定会注意到发球时,运动员不断在转动着球,似乎在寻找什么,其实就是在寻找气嘴位置,使手在

击球时与较软的、弹性较大的球面接触(图4)。(由于气嘴较重而使排球的重心 O' 和球心 O 不重合,重心 O' 稍偏于球的气嘴一边。)这种击球方式使球体的接触表面产生很大的单位面积压力,因而使排球产生很大弹性形变。第二点就要求运动员击球时,手与球的接触时间要尽量短。

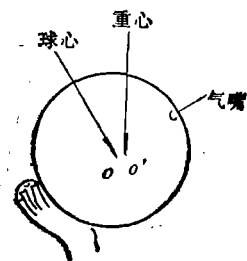


图 4

由于运动员的大力击球,使球体产生了很大的“凹陷”变形,在极短时间内,球体内部气体压强将增加,而使球体的其余部分产生“凸起”变形,(图5(a)),当球体在恢复原形过程中(这时手已脱离与球体的接触),凸出的部分又压迫内部的气体,内部气体又作用于凹陷的部分,最后使凹陷的部分又超过了原来的形状变成局部的凸起,而原来凸起的部分反而向内凹陷,而产生

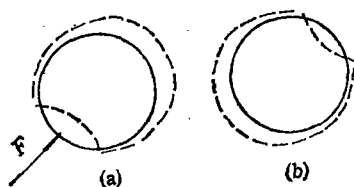


图 5

当然任何击球动作都会造成球体变形,但是其他发球动作手与球体接触时间较长,在这段时间内,球体的凹陷部分变形的弹性力就会作用于击球者之手,而手又以反弹力作用于球使球加速前进,因此不会引起球体自身的振动。

[272—107○]科技奖励

综合类 张忠奎、林明智、陈万才主编

大 32 开 160 千字 202 页 平装 定价: 6.30 元

1992 年 8 月出版 ISBN7-03-002600-4/Z · 160

本书是一部论述科技奖励问题的著作。作者在介绍大量国内外科技奖励资料的基础上,剖析了科技奖励的本质、作用,总结了国外科技奖励工作的经验,并系统地介绍了我国科技奖励工作的发展过程、阐明了我国科技奖励工作的现状、特点和奖励的申报、评审及授奖等问题。本书运用系统论、信息论和控制论的观点和方法对科技奖励系统进行了分析。

读者对象: 科技战线上的各级领导干部,从事科技奖励管理工作的人员,科技人员

[263—081⑧]煤的燃烧与气化

工业技术类 [美] L.D. 斯穆特 P.J. 史密斯著
傅维标等译

32 开 350 千字 494 页 平装 定价: 13.10 元

1992 年 8 月出版 ISBN7-03-002720-5/TB · 84

本书着重讨论煤的燃烧与气化过程的数学模型,详细地讨论了湍流运动与化学反应之间的相互作用。本书讨论了粉煤炉及固定床、流化床的燃烧与气化过程。内容包括: 固态矿物燃料的处理过程及性质,煤粒着火与挥发分析出,炭的非均相反应,实际火焰中煤的燃烧及气化,煤处理过程的模拟,综合模型的评价,基本模型方程,湍流,气相燃料的化学与湍流,辐射传热,湍流煤燃烧系统中 NO_x 污染物的生成,湍流流动中颗粒和液滴的反应,煤反应产物的化学和湍流,每章末均附有习题。



由于球体的振动,会对周围空气产生作用,从而改变周围空气流线的形状。凸起一侧就会挤压空气,使空气流线变密,而凹陷一侧空气流线变稀,如图 6 所示。由于球体上方空气流线变密,下方空气流线变疏,因而球体上方 A 点处流速 v_A 大于球体下方 B 点处流速 v_B 。由于空气密度很小,在高度仅为排球直径之差时,压头差值 $\rho g(h_A - h_B)$ 很小,可以忽略。由伯努利方程可知球体上下方空气形成一个压强差,排球在

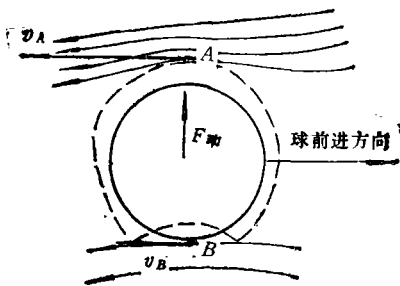


图 6

向前运动时受到一个与前进方向垂直的动升力 $F_{\text{动}}$,方向如图 6 所示,在 $F_{\text{动}}$ 作用下,排球就向上飘动。

当球体形成图 7 所示的反形变时,球体下方空气流线变密,上方流线变疏, $v_A < v_B$,由伯努利方程可知,排球受到向下的 $F_{\text{动}}$ 而使球体向下飘动。

由于球体振动因而凹、凸方向不断改变,空气对球的作用力 $F_{\text{动}}$ 不断改变方向(始终指向球凸起的一

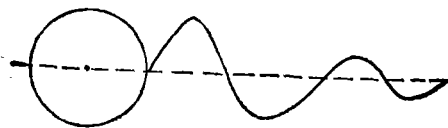


图 8

面),因而造成排球上下飘动着前进(图 8),如果发球时的角度有所变化,则可形球体其他方向的飘动。

在观看足球比赛时,有时看到运动员从正面射门但球不是直线前进,而是呈弧形曲线绕过后卫射向球门,这就是所谓的香蕉球。人们不竟会问球怎么会呈弧线运动呢? 原来运动员踢球时作用力不是通过球的重心而是作用在球的侧面,这样球就旋转着前进。由于球体的旋转,带动着球体附近的空气一起旋转,而形成球体周围空气速度的不对称性如图 9 所示。球上方 D 处空气流速为 $v_D = v + v_T$,球下方 C 处的空气流速 $v_C = v - v_T$,可见 $v_D > v_C$,则由伯努利方程知球在前进中受到向上动升力 $F_{\text{动}}$,球的运动轨迹如图 9 所示。当运动员从不同角度踢球时,就可以踢出不同方向的香蕉球。

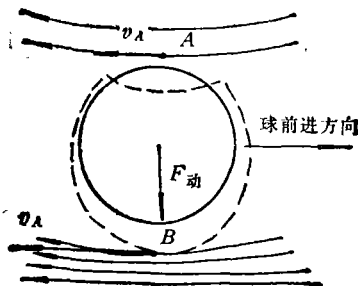


图 7

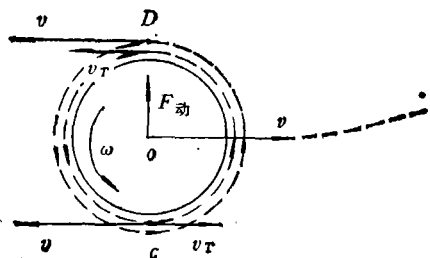


图 9

综上所述,体育运动与力学原理关系的确密切,如果你细心地观察的话,一定会在更多体育运动中,发现我们熟悉的力学原理。参考文献(略)。