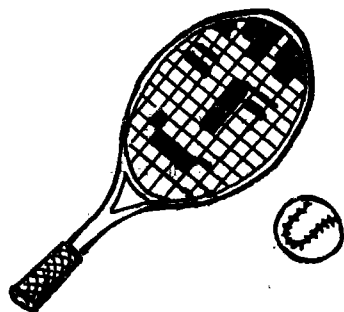


网球拍中的几个物理问题

金 仲 辉

(中国农业大学 北京 100094)



网球运动员都梦想拥有一把理想的网球拍,使他们成为赛场中的胜利者,甚至夺冠于温布尔顿网球赛.那么怎样的一把网球拍才是理想的呢?一把较完美的球拍,它的重量较轻并具有最小的空气阻力,以致运动员能以较小的力挥动它几小时;且当球拍击中球时,运动员的手或手臂没有不愉快的振动感觉;球拍是“有力的”,即以适度的球拍速度能给予网球很高的速率.为了设计一把理想的网球拍和更有效使用它,必须了解网球拍中的一些物理问题.在讨论这些问题之前,还需对网球本身有所了解.在网球运动的规则中,对网球的大小、重量、色彩、负载下形变和回弹有着比较严格的规定.例如,为了得到正式比赛的认可,要求网球从100英寸(每英寸等于2.54厘米)的高度垂直落到混凝土表面上时,它的回弹高度不超过58英寸和不低于53英寸.显见,网球在回弹中几乎失去它的 $1/2$ 能量,这种要求无疑影响着球拍的设计.

一、球拍头部的网状弦

网球拍头部都用拉紧了的网状弦构成,而不用弹性膜,这是为了大大减小空气的阻力.用一张纸覆盖在弦平面上或不盖纸,你在这两种情况下分别挥动一下球拍就可明了这个道理.

球拍的网状弦作为一种介质,吸收了入射网球动能的大部分,然后将该能量的一部分再返回给网球.我们可以做这样一个试验,将一个木质球(它比网球吸收更少的形变能)垂直落至一球拍头部固定的、水平放置的网状弦平面上,测得木质球的回弹高度比为0.93至0.95.这说明网状弦所耗散能量比吸收能量小得多.从而,绷得较紧的网状弦(较小的弦平面形变)拍球时产生较低的球速率.我们可以想像网状弦平面是一根弹簧,于是施加一负荷,由平面形

变可确定这根弹簧的倔强系数 k .如果 k 和网球的质量 m (58克)是已知的,我们

可估计出球在弦上停留时间为 $\pi\sqrt{m/k}$ (对应于简谐振动半个周期).实验说明,停留时间的估计值(例如5毫秒)与实际的测量值是一致的.

网状弦在储存和返回能量的能力上,它的弹性性质是很重要的.因为比较细的弦更富于弹性,所以厂家已采用较细的弦来改进球拍的性能,肠线(由牛的肠制成)是弦的好材料,它在绷紧下有良好的弹性.也有些球拍的网状弦是用合成材料做成的.总之,做成的网状弦应具有最佳的抗拉强度、弹性和抗磨力.

二、打击中心

在你用网球拍击球时,一般情况下球拍可能有两种运动,即由于满足动量守恒球拍反冲形成的平动和满足角动量守恒球拍将围绕质量中心而转动.球拍的大部分在网球入射方向上运动,但球拍把手端将在网球回弹方向上运动.如何使手握住的把手处上述两种运动相互抵消,从而使手感觉到的振动最小(手受到球拍的作用力最小)和减少回弹网球能量的损失呢?由刚体转动定理可知,用球拍击球时,击球点在打击中心处就可达到上述目的.通过下面的讨论,可以求得球拍把手端至打击中心的距离.

球拍可看作是一物理摆,使它绕以穿过把手端的轴、并且平行于网状弦平面摆动来测定这个摆的谐振周期 T ,从而推得球拍绕上述的轴的转动惯量 I 为

$$I = \left(\frac{T}{2\pi}\right)^2 m_0 g a$$

其中, m_0 为球拍质量、 a 为把手端至质量中心

的距离, g 为重力加速度. 如果入射的网球击中球拍后, 动量改变为 Δp , 那么质量为 m_0 的球拍反冲速度 $v = \Delta p / m_0$. 如果球击点与质量中心间距为 b , 球拍将以角速度 $\omega = b\Delta p / I_0$ 转动, 其中 I_0 为球拍绕穿过质量中心的轴的转动惯量. 由于 a 为质量中心至把手端的距离, 所以在把手端处, 平动和转动相互抵消的条件是 $v = \omega a$. 于是有

$$I_0 = \frac{b\Delta p}{\omega} = \frac{bvm_0}{\frac{v}{a}} = abm_0.$$

由转动惯量的平行轴定理, 有

$$I = I_0 + m_0 a^2$$

将 I 和 I_0 值代入上式有

$$\left(\frac{T}{2\pi}\right)^2 m_0 g a = abm_0 + m_0 a^2.$$

最后得球拍把手端与打击中心之间的距离为

$$a + b = \left(\frac{T}{2\pi}\right)^2 g.$$

近年来网球拍的设计, 使打击中心接近球拍头部网状弦区的中心.

三、球拍振动

网球击中球拍时, 可引起球拍框架的振动. 图 1 绘出了两种情况下球拍框架的振动方式. 图 1a 表示球拍把手被固定在一台钳上的振动方式, 图 1b 表示球拍自由悬挂下的振动方式. 为了测定上述两种振动方式的频率, 将一小片薄的压电薄膜贴在球拍的喉部. 当球击在球拍各个位置时测量它的振动输出. 测量结果说明, 前者基频约为 20—50Hz, 后者最小频率范围为 100—200Hz. 还测量了手持球拍情况下球拍的振动频率. 发现当球拍被击中喉部附近或远端, 甚至在手握得非常紧的情况下, 没有低频成分. 于是得出的结论是, 一个自由悬挂的球拍是球场上的球拍的更好的实验室近似. 框架振动的振幅取决于球拍和球之间的相对速度、框架的倔强系数和球击点至球拍头部节点(球击在此点, 球拍框架振动的振幅最小)之间的距离. 我们可以用简易方法测定节点的位置, 用二个手指夹住框架顶点, 沿着球拍纵轴打击网状弦的不同位置, 当击中节点时, 手感到的

振动最小. 图 2 说明振动振幅对打击点的依赖关系, 仔细看振动讯号的起始部分, 会发现节点以上和以下的振动位相差 π .

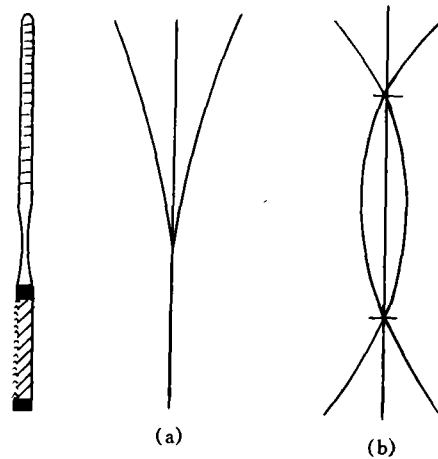


图 1 网球拍振动模式

a. 球拍把手被台钳固定 b. 球拍自由悬挂

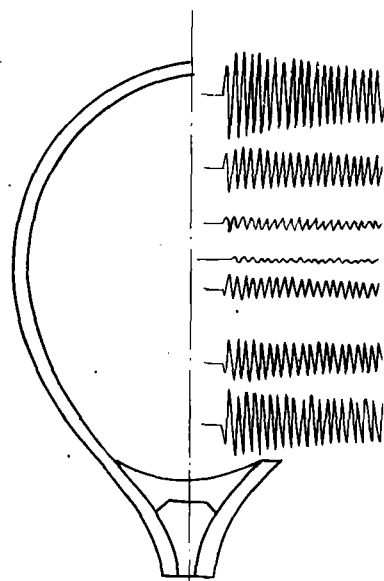


图 2 沿着一个自由悬挂球拍的纵轴不同点把击下, 框架振动的情况, 在节点处二侧振动位相差 π

许多厂家为他们的球拍框架能迅速抑制振动而大做广告, 用了他们的产品会使你感觉良好、不伤害手臂等等. 也有人在球拍喉部弦上放置一些小橡皮豆、弹性螺杆或其他物体来减少框架的振动. 这些做法纯粹是心理上的作用, 实际上并不能迅速减小框架的振动. 对于

迅速减小振动振幅的最好方法是人的手,而不是用某些特殊材料做成的球拍框架.图3显示一个手握球拍的振动情况(a)和自由悬挂同一球拍的振动情况(b).由以上讨论可知,球击点落在球拍头部的节点处是理想的情况.

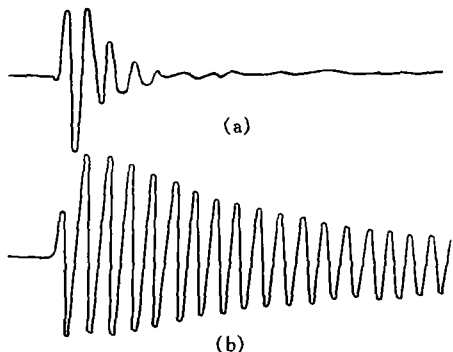


图3 手握球拍(a)和自由悬挂同一球拍(b)振动衰减比较

四、球拍质量

运动员都希望寻找这样的球拍,用最小的力,得到最大的球速度.两体运动学告诉我们,球拍质量越大,施于球的速度越大.但是球拍质量过大,显然不适合于网球运动.一个垒球运动员,在一次完全的比赛中挥动球棒次数可能是10—15次,而一个网球运动员却要挥动球拍几百次.近年来的趋势是采用质量较小的球拍,20余年以前传统的木质球拍质量为420克左右,近年来市场上最新产品的球拍质量仅为280克左右,它们多半用合成材料(通常是碳纤维)制成.使用结果表明,质量显著减少的球拍和传统木质球拍有相同的效力.

在同样挥动球拍的情况下,球的回弹速率取决于球击点的位置.如果球精确地击在球拍的质量中心,将没有能量转化成球拍振动.球拍设计者尽量将质量中心移向球拍头部的中心,以增加球的回弹速率.但是,有时球击在球拍中心之外,甚至在球拍框架平面上两个主轴之外,在这种情况下为了减小球拍转动,从而减少球拍转动能,增加球的回弹速率,可加大两个主轴的转动惯量.通常增加框架周边的重量或使得球拍头部宽度更宽些来增加轴的转动惯量.球拍制造者将网球发射至一静止的、自由

悬挂的球拍头部的不同点,并测量球回弹速率与入射速率的比值 e ,它的典型值范围为0.5(球击点接近球拍质量中心)至0.2(球击点远离轴).

五、网球的回弹速率

实验室中的网球拍是静止的,而在网球场中球拍是以可与网球入射速率相比较的速率运动的.若以 v 和 v' 分别表示网球的入射速率和回弹速率,以 v_0 表示击球点处球拍的速率,则由 e 值的定义,有

$$e = \frac{v' - v_0}{v_0 - v},$$

其中 v 相对于 v' 和 v_0 来说为负值.由上式得

$$v' = -ev + (1 + e)v_0.$$

显而易见, e 值越大, v' 也就越大;另外,对确定的 e 值(即确定的击球点)来说, v 和 v_0 的绝对值越大,则 v' 越大.而 $v_0 = \omega r$, r 为挥动半径,即挥动球拍时,球拍支点至击球点间的距离, ω 为挥动球拍的角速度.由此可见,在 ω 一定条件下,加长球拍的长度可使击出的球更有力量.据德国“世界报”1995年4月24日报道,世界著名网球运动员张德培两年前在比赛中使用加长了1英寸的碳素球拍(使球拍长度达71厘米)后,使他的比赛成绩大为提高,例如他的发球得分的次数从1993年的256次增加到1994年的366次,1995年又增加到522次.他的世界排名也从第8位上升到第4位.当然 r 值大小还取决于击球的方式,例如双手朝后,一般支点非常靠近球拍把手端部,而一个手向前就有比较长的挥动半径.

综上所述,一把理想的网球拍将是重量较轻、把柄较长;在网球拍一定重量下,框架边缘占有较大重量;球拍头部较宽,且头部网状弦应采用有最佳抗拉强度、弹性和抗磨力的较细的弦线制成.在设计球拍时,尽量使球拍质量中心、打击中心和节点三者接近在一起.运动员使用网球拍时,尽量使击球点落在上述区域,以使在同样条件下,击出的球更有力.