

文章编号:1004-7220(2010)04-0375-05

## 棒球击球碰撞过程中的动力学分析

蒋泉<sup>1,2</sup>, 许薇<sup>1</sup>, 龚江泳<sup>3</sup>, 戴海峰<sup>1</sup>, 唐伟<sup>1</sup>

(1. 南通大学 建筑工程学院,南通 226019; 2. 南京航空航天大学 航空宇航学院,南京 200016; 3. 南通大学 体育科学学院,南通 226019)

**摘要:**目的 通过对棒球击球过程进行深入分析,建立简单有效的动力学模型,为球员训练提供理论依据。**方法** 根据冲量矩理论,对多刚体铰接模型进行动力学分析,获得关于棒球击出速度的封闭线性方程组;通过求解得出数值解。**结果** (1)通过计算得到棒球击出速度与不同初始球、棒速度的关系;(2)铝质球棒击出速度远大于木质球棒;(3)恢复系数对棒球击出速度影响较大,对击球甜区和碰撞中心位置无影响。**结论** 利用动力学方程得出了各种条件下的棒球击球过程的数值结果,所得数值与参考文献中的实验数据一致,证明了动力学分析的正确性;分析过程简单,教练员和球员易于理解,可直接应用于棒球训练的理论指导。

**关键词:** 棒球; 动力学分析; 生物力学; 碰撞测试; 动力学模型

**中图分类号:** R318.01 **文献标志码:** A

## Dynamic analysis on impacting during baseball batting

JIANG Quan<sup>1,2</sup>, XU Wei<sup>1</sup>, GONG Jiang-yong<sup>3</sup>, DAI Hai-feng<sup>1</sup>, TANG Wei<sup>1</sup> (1. School of Civil Engineering, Nantong University, Nantong 226019, China; 2. College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 3. School of Sports Science, Nantong University, Nantong 226019, China)

**Abstract: Objective** By a thorough analysis of the baseball batting to provide a theoretical instruction for baseball players with a simple and efficient dynamic model. **Method** Based on the moment of impulse theory, the closed form linear equations were derived by the dynamic analysis of the hinged multi-rigid body model. The numerical results would be obtained after solving the equations. **Results** (1) The batting speeds have been obtained by the numerical calculation under various conditions of different initial speeds of the baseball and bat; (2) The knockout speeds of wood bats are much smaller than the aluminum ones; (3) The coefficient of restitution has the significant effect on the batting speeds, and has no effects on sweet spot and center of position. **Conclusions** The numerical results are consistent with the data of experiments in reference. The calculating procedure is easy for baseball coaches and players to understand and can be applied in the training of baseball batting directly.

**Key words :** Baseball; Dynamic analysis; Biomechanics; Impact testing; Dynamic model

棒球运动是世界上很多国家的热门运动之一,我国棒球运动在近年来取得了非常喜人的成绩。在国内,近几年大约有 50 多所大学成立了棒球队。“今日美国”节目曾对运动项目难度做了一个评选,棒球的击球被选为最难的动作。事实上,在棒球运

动中,从力学观点来看,一个击球手击球时,所关心的一些数据为:(1)球被击出的速度;(2)击球点处于何处能最大限度地将能量传递到球上,即击出速度最大;(3)击球点在何处时,球棒对击球手的冲击最小<sup>[1]</sup>。这里指出,对满足上述第 2 点的击球位置,

收稿日期:2010-06-08; 修回日期:2010-07-21

基金项目:江苏省“青蓝工程”青年骨干教师培养计划,南通大学“创新人才基金项目”。

作者简介:蒋泉(1974-),男,博士研究生,研究方向:生物力学,固体力学。

通讯作者:蒋泉,副教授, Tel:(0513)85012655; E-mail:jiang.q@ntu.edu.cn。

称之为“击球甜区(Sweet Spot, SS)”,而满足第3点的击球位置称为“碰撞中心”(Center of Percussion, COP)。事实上,从后面计算可以看出这两个位置并不是重合的。棒球击球手在击球时是将击球点控制在某个最佳区域,从而取得最佳的击球性能。

为了取得良好成绩,避免球员受伤,棒球研究人员、教练和运动员对如何提高击球水平越来越重视。在早期的棒球运动动力学研究中,Brody<sup>[2]</sup>采用一个简单的物理模型对球棒上SS位置进行了讨论。但其模型过于简单,与现有实验数据相比误差较大;近期,Handee等<sup>[3]</sup>对多种球棒的动、静态力学性能进行了详细的研究;Nathan<sup>[4]</sup>对影响球棒性能的因素进行了分析,指出球棒击球性能依赖于棒、球初始速度等因素;Shenoy等<sup>[5]</sup>利用动态有限元对不同材质的球棒击打性能进行了研究,并与其设计的实验进行了对比;Vedula等<sup>[6]</sup>利用有限元和实验手段对击球过程中SS、COP以及其他因素之间的关系进行了分析;吴俊昌等<sup>[7]</sup>通过对棒球运动员的击球过程进行试验,从恢复系数入手,研究了铝质与木质球棒击球性能的异同。

相比较而言,国内对棒球运动方面的研究较少,一般集中在棒球投手投掷运动研究<sup>[8]</sup>、运动损伤<sup>[9-10]</sup>及中国棒球运动发展等方面的研究<sup>[11]</sup>,涉及棒球运动过程的动力学问题未见讨论。目前,国外研究棒球运动过程的力学分析和研究方法比较复杂,涉及因素比较多,棒球教练员、运动员不容易理解,分析方法难以应用到棒球训练的理论指导中。本文着重于寻求一种击球过程力学分析的简单有效模型和计算方法,更容易地应用到实际训练中。

## 1 球、棒碰撞过程的动力学模型及基本方程

实际棒球的击球过程十分复杂,该系统包含球、球棒及击球队员。棒球运动员在击球时通过身体重心移动和绕躯干转动来获得动量及动量矩,以助于击球和起动跑垒。系统中的各部分在严格意义上并不是理想的刚体或者弹性体。以往文献在处理棒球运动动力学问题时,一般将球棒视为自由刚体或者绕手腕作定轴转动的刚体<sup>[2-3]</sup>,导致动力学模型过于简单;甚至有些文献仅仅给出实验数据,并未建立球、棒碰撞过程的动力学模型。

通过对本校业余棒球选手击打过程影像的详细

分析,忽略次要因素,兼顾模型的简单有效,以及基于教练员、运动员易于理解的考虑,建立了更符合实际情况的球棒、手臂的铰联接模型(见图1),即球棒与手臂视为刚体,通过铰链链接,绕手腕和肩附近作定轴转动。事实上,运动员实际击球动作为双手持棒,本文模型将左右、上前臂做了一定程度上的简化,用一个刚体来代替。因此,本文后面所述的等效手臂长度并非实际长度,为双手腕连线与双肩肩连线中点的距离。

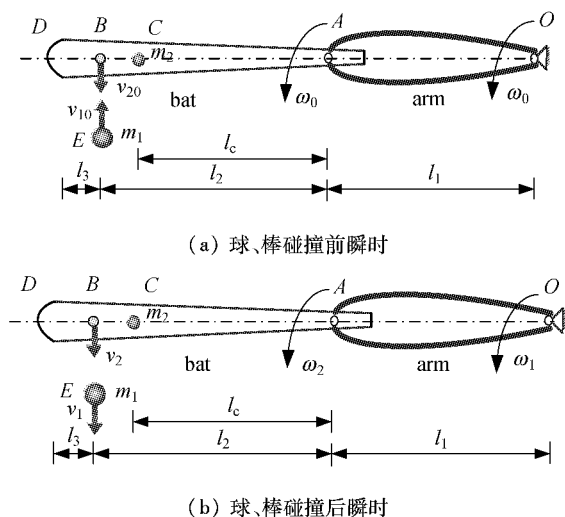


图1 棒球击球的碰撞过程动力学分析模型

Fig.1 Dynamic model of baseball batting (a) Instant before batting, (b) Instant after batting

图1所示的球、棒碰撞(击球)前后瞬时动力学简化模型图中,OA为等效手臂刚体,AD为球棒,在A处通过铰链联接;B为击球位置,C为球棒质心位置;棒球E质量为 $m_1$ ,球棒AD质量为 $m_2$ ,所有尺寸如图1所示。

由于肌力矩作用,在球、棒碰撞前瞬时,手臂OA与球棒AD的角速度均达到 $\omega_0$ ;球速为 $v_{10}$ (见图1a)。击球点B与质心C的速度可写成:

$$v_{20} = (l_1 + l_2)\omega_0, \quad v_{c0} = (l_1 + l_c)\omega_0 \quad (1)$$

球、棒碰撞后瞬时,令手臂OA与球棒AD的角速度分别为 $\omega_1$ 和 $\omega_2$ ,球速为 $v_1$ (见图1b)。根据速度合成定理<sup>[12]</sup>,B与C处的速度分别为:

$$v_2 = l_1\omega_1 + l_2\omega_2, \quad v_c = l_1\omega_1 + l_c\omega_2 \quad (2)$$

相应地,手臂OA、球棒AD与球E在碰撞前瞬

时对  $O$  点动量矩分别为:

$$\begin{aligned} L_{10} &= J_0 \omega_0, \quad L_{20} = J_c \omega_0 + m_2 v_{c0} (l_1 + l_c) \\ L_{30} &= -m_1 v_{10} (l_1 + l_2) \end{aligned} \quad (3)$$

式中,  $J_0$  为  $OA$  对  $O$  点的等效转动惯量;  $J_c$  为球棒对质心  $C$  的转动惯量。碰撞后瞬时, 上述三者对  $O$  点动量矩为:

$$\begin{aligned} L_1 &= J_0 \omega_1, \quad L_2 = J_c \omega_2 + m_2 v_c (l_1 + l_c) \\ L_3 &= m_1 v_1 (l_1 + l_2) \end{aligned} \quad (4)$$

根据碰撞假定<sup>[12]</sup>, 碰撞力为一般力的几百甚至上千倍, 碰撞时仅需考虑碰撞力, 其他力忽略不计。因此, 文中碰撞时有限肌力矩并未纳入考虑范围。根据碰撞过程的冲量矩定理, 有:

$$L_{10} + L_{20} + L_{30} = L_1 + L_2 + L_3 \quad (5)$$

考虑球  $E$  与球棒  $AD$  子系统对  $A$  点的冲量矩定理, 同样可得:

$$L'_{20} + L'_{30} = L'_2 + L'_3 \quad (6)$$

式中,  $L'_{20}$ 、 $L'_{30}$ 、 $L'_2$  和  $L'_3$  分别为球棒和球在碰撞前后瞬时相对于  $A$  点的动量矩, 即:

$$L'_{20} = J_c \omega_0 + m_2 v_{c0} l_c, \quad L'_{30} = -m_1 v_{10} l_2 \quad (7)$$

$$L'_2 = J_c \omega_2 + m_2 v_c l_c, \quad L'_3 = m_1 v_1 l_2 \quad (8)$$

考虑球与球棒之间碰撞的恢复系数  $k$ , 则有:

$$k = \frac{v_1 - v_2}{v_{10} + v_{20}} \quad (9)$$

如果球与球棒的初始速度均为已知, 根据式(5)、(6)以及(9)即可得到击球后瞬时的球棒与球的速度, 即  $v_1$ 、 $\omega_1$  以及  $\omega_2$ 。考虑到此3个未知速度解析解比较复杂, 本文未直接给出显式表达式, 但在后面算例中给出了数值函数解。

另外, 考虑球  $E$  与球棒  $AD$  这一子系统, 碰撞前瞬时, 球与球棒动量为:

$$P_{10} = m_1 v_{10}, \quad P_{20} = m_2 v_{c0} \quad (10)$$

碰撞后瞬时的动量为:

$$P_1 = m_1 v_1, \quad P_2 = m_2 v_c \quad (11)$$

根据动量定理, 有如下关系:

$$I = (p_{10} + p_{20}) - (p_1 + p_2) \quad (12)$$

式中,  $I$  为手腕对上述子系统的冲量。前面指出, 如果击球点为 COP, 即碰撞中心时, 根据定义, 此时球棒对手腕无冲击, 此时有  $I = 0$ 。利用此条件, 可以得到击球中的 COP 位置, 从而为提高球员训练水平、避免运动受伤提供理论基础。

## 2 算例结果与分析

棒球运动中, 球棒种类繁多, 不但有职业比赛使用的木棒, 而且有业余选手使用的金属铝棒, 甚至还包括复合材料球棒。为了深入研究球棒击球动力学表现, 比较不同球棒之间的力学性能, 提高棒球运动员的训练水平, 本节给出了不同球棒(以木棒和铝质球棒为例)在不同条件下的计算结果。

### 2.1 木质球棒数值结果与分析

以国内某品牌棒球为例, 测得质量  $m_1 = 144.5$  g; 取另一品牌木质球棒, 实验室测得球棒全长  $l_2 + l_3 = 0.853$  m;  $l_c = 0.590$  m;  $m_2 = 898.5$  g; 转动惯量  $J_c = 0.045$  kg·m<sup>2</sup>; 手臂等效转动半径  $l_2$  约在 0.3 ~ 0.5 m, 本文取  $l_1 = 0.40$  m。为了使动力学模型中的手臂转动惯量更接近实际情况, 本文中的手臂等效转动惯量  $J_0$  需要综合考虑上臂、前臂以及上躯干的效应。对运动员, 取成年人人体惯性参数(国家标准 GB/T 17 245-2004)上限, 计算得到手臂等效转动惯量, 约为  $J_0 = 1.35$  kg·m<sup>2</sup>。根据文献[7], 取球棒与球碰撞之间的恢复系数  $k = 0.26$ 。

利用上述数据, 通过式(5)、(6)和(9)即可得出击球后手臂和球棒的角速度以及击球点的速度大小。例如, 在初始球速和挥棒速度分别为  $v_{10} = 110$  km/h,  $v_2 = 90$  km/h 条件下, 上述函数式分别为:

$$\omega_1 = \frac{26.86(0.0069 + l_2)(1.86 + 0.061l_2 + l_2^2)}{(0.0069 + l_2)(2.34 - 0.089l_2 + l_2^2)} \quad (13)$$

$$\omega_2 = \frac{6.02(0.0069 + l_2)(1.01 - l_2)(9.25 + l_2)}{(0.0069 + l_2)(2.34 - 0.089l_2 + l_2^2)} \quad (14)$$

$$v_1 = \frac{30.67(2.77 - l_2)(0.0069 + l_2)(0.48 + l_2)}{(0.0069 + l_2)(2.34 - 0.089l_2 + l_2^2)} \quad (15)$$

将所给数据代入前面线性方程组, 得出棒球在不同条件下的击出速度  $v_1$ 。图2给出了在初始挥棒速度  $v_{20} = 95$  km/h、不同初始球速在不同击球点上的击出球速  $v_1$ ; 图3给出了在初始初始球速  $v_{10} = 110$  km/h、不同初始挥棒速度与不同击球点上的击出球速  $v_1$ 。从图2和图3可以看出, 对于同一击球

点,初始球速越大,初始挥棒速度越大,棒球击出速度越大。图2和图3的数值结果与文献[7]中实验测得结果吻合,验证了本文动力学模型的正确性。

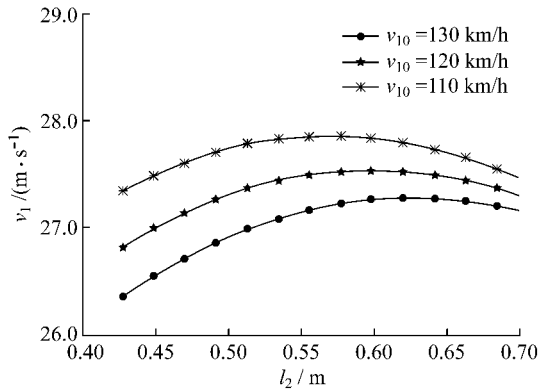


图2 不同初始球速度下,棒球击出速度与击球点的关系  
Fig.2 The relationship between the knockout speeds and the hitting points at different initial speeds of baseball

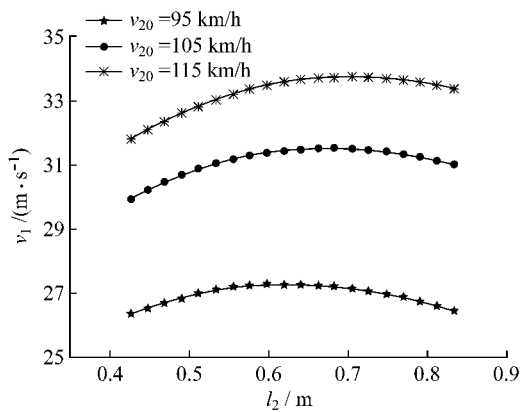


图3 不同初始挥棒速度下,棒球击出速度与击球点的关系  
Fig.3 The relationship between the knockout speeds and the hitting points at different initial speeds of baseball bat

根据前面动力学方程(1)~(12),同样可以得到不同条件下SS和COP相对于球棒的位置(相对位置均以棒球近端A点为参考点计算,如图4和5所示)。在图4中,根据SS和COP随初始球速变化曲线,SS点位置随碰撞前初始球速增加而向球棒近端移动;图5显示运动员臂长越大,SS同样更靠近球棒近端。而碰撞中心COP与上述两个因素无关,是一个定值;本文的COP点的数值结果与文献[2]和[12]中所给碰撞中心计算公式计算得到结果一致。如图5所示,在运动员等效臂长为0.27m左

右,SS和COP位置重合,此位置是最理想的击球点。这种情况只有在运动员臂长较短或屈肘很大的条件下才能出现。事实上,这两种条件很难出现,据此来获得理想击球位置实际并不现实。

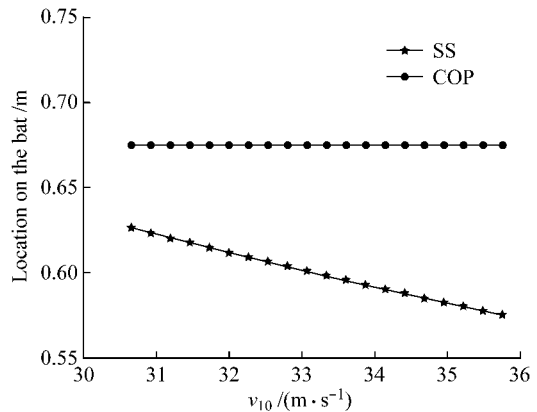


图4 SS和COP点相对于球棒的位置与初始球速之关系  
Fig.4 The relationship between the location of SS and COP on the bat and the initial speeds  $v_{10}$

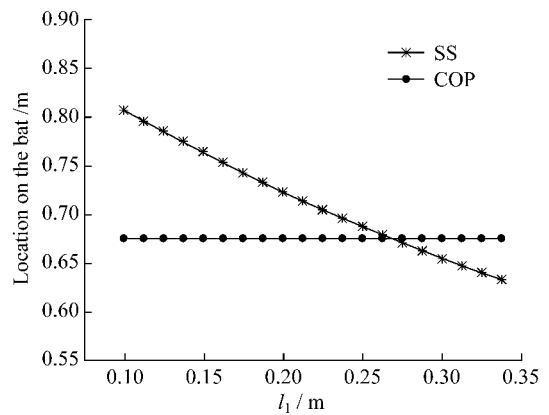


图5 SS和COP点相对于球棒的位置与运动员臂长之关系  
Fig.5 The relationship between the location of SS and COP on the bat and length  $l_1$

## 2.2 铝质球棒数值计算结果

本文同样给出了一些铝质球棒的数值算例。以某品牌国产铝质球棒为例,经测量,其质量、质心位置以及转动惯量与木质球棒相差不大;但是球棒与球的碰撞的恢复系数经观察与前面木质球棒有很大的区别。因此,本文中的相关物理量与文献[7]一致,取铝质球棒的质量、质心位置以及转动惯量取为与木质球棒相同的数值,而球与棒的恢复系数选  $k = 0.41$ 。同样地,通过公式(5)、(6)和(9),击球后

手臂和球棒的角速度以及击球点和球棒质心处的速度大小通过线性方程可以很容易得到。以初始球速和挥棒速度  $v_{10} = 110 \text{ km/h}$ ,  $v_{20} = 90 \text{ km/h}$  为例,得到函数式如下:

$$\omega_1 = \frac{27.06(0.0062 + l_2)(1.51 + 0.078l_2 + l_2^2)}{(0.0062 + l_2)(1.92 - 0.081l_2 + l_2^2)} \quad (16)$$

$$\omega_2 = \frac{9.54(0.0062 + l_2)(0.75 - l_2)(6.55 + l_2)}{(0.0062 + l_2)(1.92 - 0.081l_2 + l_2^2)} \quad (17)$$

$$v_1 = \frac{30.67(2.66 - l_2)(0.0062 + l_2)(0.55 + l_2)}{(0.0062 + l_2)(1.92 - 0.081l_2 + l_2^2)} \quad (18)$$

由式(15)和(18),得到球相同初始球速和挥棒速度下,铝质和木质球棒击出球速沿球棒分布的数值结果(见图6)。由图6看出,在相同条件下,铝棒的击出速度远大于木质球棒,其数值结果与文献[7]、[8]一致。在使用铝质球棒击球时,增加了棒球运动的危险性,而且将会出现更高概率的本垒打。这与强调技巧及安全的棒球运动精神相悖,所以也是在职业棒球比赛中使用木质球棒的主要原因。

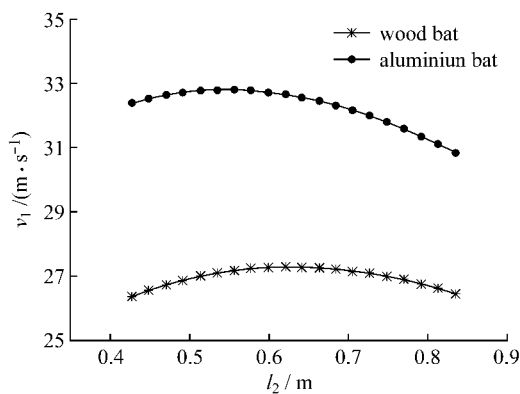


图6 相同条件下,铝质与木质球棒击出速度与击球位置关系  
Fig. 6 The knockout speeds of aluminum and wood bat under the same condition

本文同时给出了恢复系数对最大击出速度以及击球位置 SS 与 COP 的影响(见图7、8)。通过图7算例看出,随着恢复系数的增大,棒球击出速度增大,此结果与文献[7]实验结果一致。图8显示,恢复系数对 SS 和 COP 位置没有影响。因此,在规则允许的前提下,运动员应尽可能选择恢复系数较

大的球棒。

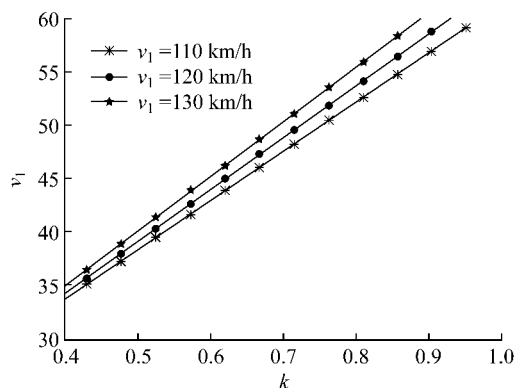


图7 最大击出速度  $v_1$  与恢复系数  $k$  之关系  
Fig. 7 The relationship between the maximum knockout speeds ( $v_1$ ) and the coefficient of restitution( $k$ )

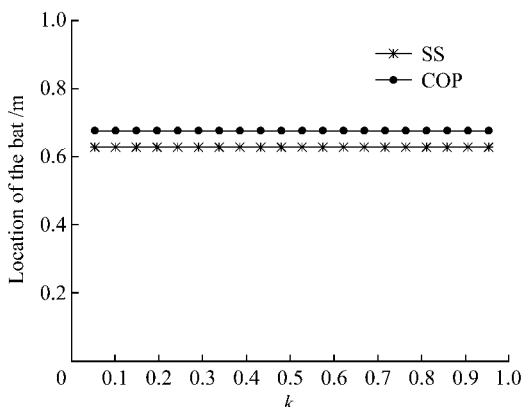


图8 SS 和 COP 位置与恢复系数  $k$  之关系  
Fig. 8 The relationship between the location of SS and COP on the bat and the coefficient of restitution( $k$ )

### 3 结 语

本文通过二刚体铰接的动力学模型对棒球击球过程进行了分析,所建模型简单、有效并且接近实际情况;分析过程和方法易于理解和应用;数值结果与文献[7]中实验数据一致。研究表明,球与球棒的初始速度越大,球被击出速度越大;击球位置 SS 与球与棒速有关,而碰撞中心 COP 点与速度无关;恢复系数对棒球击出速度影响很大,而对 SS 与 COP 点位置没有影响。本文动力学模型和分析方法对棒球运动训练、球棒选择以及避免运动伤害具有实际的指导作用。

(下转第 384 页)