

开放

球拍惯性矩的影响 对羽毛球击打过程中拍头速度、 击球位置和毬子速度的影响

H. Towler¹✉, S. R. Mitchell² & M. A. King¹

羽毛球拍的特性如何影响羽毛球击打的性能相对来说还不清楚，进一步的了解可以帮助运动员/教练员选择最合适的球拍。研究人员收集了 20 名经验丰富的羽毛球运动员使用五种摆重 (I_s) 扰动球拍进行一系列正手击球时球拍和羽毛球的三维位置数据 (500 Hz)，这些球拍的摆重范围为 85-106 kg-cm²。使用平衡板和简摆法计算了 I_s ，并使用激光测振仪进行了模态分析，以捕捉每只球拍的基频和远端节点位置。随着 I_s 的增加，发现拍头速度有所降低，平均降低幅度为 0.5%。

I_s 每增加 5 kg-cm²，⁻¹ 就会降低 0.7 m-s，但这并不会导致毬子速度减慢。随着基频节点离毬子顶端越来越近（随着 I_s 的增加），撞击位置也越来越靠近毬子顶端，这在一定程度上证明，参与者可能会下意识地在节点位置撞击毬子，以提供理想的感觉反馈。拍头速度的增加而非毬子速度的增加可能是由于纵向撞击位置的远端增加造成的。

随着 I_s 的增加，有效质量也会增加。此外，剔除拍头速度的变形部分（由于球拍明显弯曲和恢复而增加的拍头速度），增加了与 I_s 关系的效应大小，其中 I_s 越大的球拍变形速度越大。这项研究进一步揭示了经验丰富的羽毛球运动员的击打性能特征，特别是基于球拍特性的击打性能特征。还需要进一步研究，以确认节点位置与纵向撞击位置之间的吻合关系。

在所有球拍类运动中，羽毛球击打产生的物体速度是最快的，据[文献](#)报道，羽毛球击打速度高达 107 m-s⁻¹（文献1），而拍头速度高达 71.5 m-s⁻¹（在拍头[中心](#)的弦床平面上测量）2。了解球拍的特性如何影响羽毛球击打的性能是运动员和教练员感兴趣的问题。

惯性力矩 (MoI) 是球拍的一个重要参数，尤其是球拍握柄端附近的一个轴线的惯性力矩，该轴线与弦床平行，通常称为“挥拍重量”轴线。该轴线的位置（与拍柄末端的距离）因运动项目和器材而异。对于羽毛球拍、网球拍和高尔夫球杆而言，这一距离通常分别为距手柄端 9 厘米、10 厘米（4 英寸）和 36 厘米（14 英寸）。下文中，关于该轴线的 MoI 将称为 I_s 。球拍类运动中常用的 MoI 术语如图 1 所示。需要注意的是， I_s 轴的位置是任意确定的，不同球员和击球方式可能有所不同。羽毛球拍的典型 I_s 值为 90-97 千克平方厘米，质量约为 0.085-0.095 千克^{2,3}。

过去的研究表明，在羽毛球击打³、网球发球^{4,5} 和 高尔夫球击球⁶ 过程中， I_s 与击球挥杆速度之间存在

挥杆速度的降低并不影响击球速度。这可

能是由于 I_{eff} 增加时有效质量增加（对于给定的撞击位置），球运动中，撞击位置与节点位置相吻合^{7,8}，节点位置在球拍

¹英国拉夫堡 LE11 3TS 拉夫堡大学体育、运动与健康科学学院。²电气

英国拉夫堡拉夫堡大学沃尔夫森机械学院制造工程系。电子邮件：✉：H.Towler@lboro.ac.uk

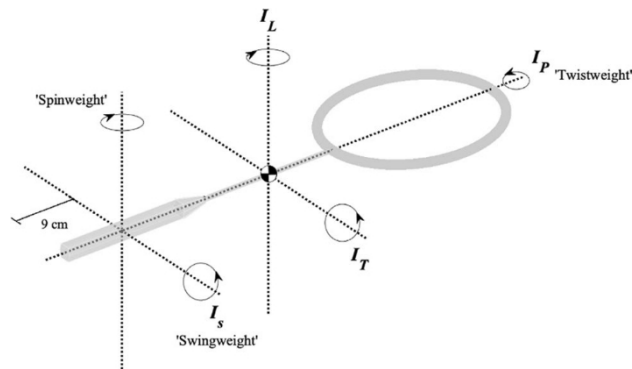


图 1.羽毛球拍的质量惯性矩。主惯性矩 (I_T, I_L, I_P) 指横轴、侧轴和极轴，不同惯性矩的常用术语如图所示。

Schorah 等人¹⁰认为, I_s 越大的机具通常挥杆速度越低, 对于给定的挥杆速度, I_s 越大的机具产生的撞击后物体速度越高。

本研究旨在调查一组经验丰富的羽毛球运动员的 I_s 与拍头速度、击球位置和击球后毬子速度之间的关系。

方法

为了全面了解球拍的机械特性, 进行了一系列机械测试 (第一阶段)。随后, 利用动作捕捉对参与者进行了性能测试, 以了解球拍性能 (惯性矩) 对各种羽毛球击打性能参数的影响 (第二阶段)。

第 1 阶段: 球拍准备。 十个轻质球拍框架 (质量 = 70.4 ± 0.46 g, 质量中心 = 31.16 ± 0.13 cm, $I_s = 73.5 \pm 0.9$ kg cm²) 通过在球拍框架上的指定位置粘贴五条铅带 (Stringers' World, Essex, UK), 定制成五只质量相同但 I_s 增加的球拍 (图 2)。每个位置的铅胶带量是根据球拍的初始上弦 I_s 值、所需的总质量和 I_s 计算得出的, 并使各球拍偏离中心的质量保持一致, 以最大限度地减少对 I_P 的影响。所有球拍都使用相同的握把, 由相同的上弦器上弦, 使用相同的线和张力 (Yonex BG65ti, 28 磅)。

质量用带有三个刻度的天平板计算, 质心通过对手柄端部的力矩计算。关于手柄端部的力矩 (I_h) 用简摆法计算 (图 3; 公式 1)¹¹⁻¹⁶, 并用平行轴定理 (公式 2) 转换到 I_s 轴。振荡时使用高速视频 (50 Hz) 进行测量, 根据之前的建议¹¹, 取 50 次振荡的平均值作为单次振荡的时间 (T)。选择这种装置是因为它重量轻, 摩擦最小。 I_P 使用惯性矩测量装置 (Inertia Dynamics, 美国康涅狄格州) 测定, 将球拍放入为握把定制的外壳中, 并使用聚苯乙烯插入物进行集中。

$$I_h = \frac{T^2 g m d}{4\pi^2} \quad (1)$$

$$I_s = I_h + m x(x - 2d) \quad (2)$$

其中, g 为重力加速度 (厘米·秒⁻²), 为球拍质量 (千克), 为手柄端到 I_s 轴的距离 (厘米), d 为手柄端到质量中心的距离 (厘米)。

在球拍自由悬挂的情况下, 在拍头和拍柄两侧用三根橡皮筋 (假定质量和刚度可忽略不计) 固定球拍 (图 4a), 通过模态分析确定每支球拍的基频。通过对模态数据¹⁷进行二阶多项式拟合, 确定了第一弯曲模态 (基频) 在拍头端的节点位置。通过对基频和节点位置的标准偏差分别为 0.1 赫兹和 1.2 毫米的单个球拍进行五次实验, 测量了该方案的可重复性。实验过程的全部细节见补充材料。

通过在球拍顶端固定 1 千克重物并测量球拍顶端的挠度 (P_1 至 P_2 , z-direction), 采用载荷-挠度试验来量化球拍垂直于弦床的弯曲刚度。球拍被假定为横梁, 以模拟球拍框架 (图 4b)。假定变形较小, 材料行为为线性弹性, 球拍框架的弯曲刚度 (k) 可通过公式 (3) 计算得出:

其中， F 是施加在球拍顶端的力， δ 是施加力后的挠度（Z 方向）。

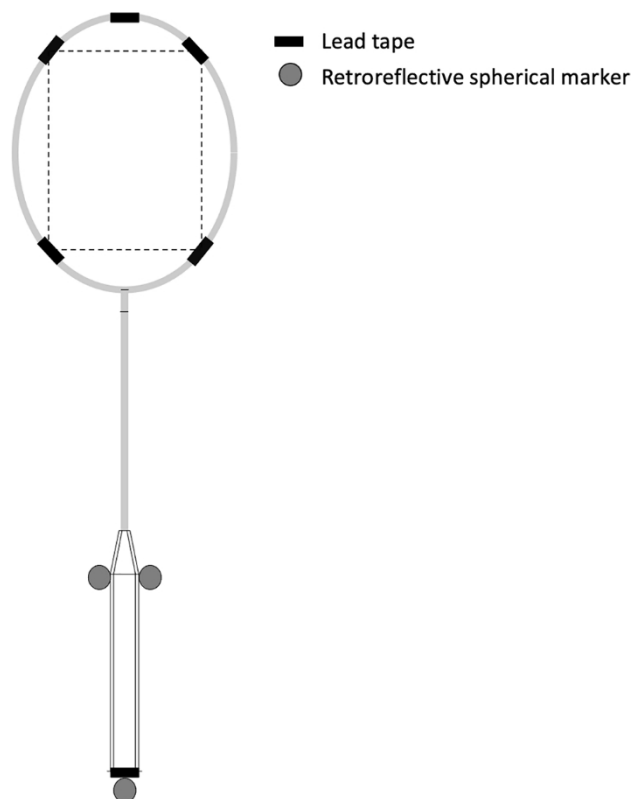


图 2.在球拍上粘贴铅带。铅带被黑色胶带覆盖，因此参与者无法直观地看出球拍的重量。根据所需的 I_y 值，铅带被贴在球拍顶端或手柄底部。

通过制作八根校准棒，确定了 I_y 的计算精度，校准棒的重量范围为 80-115 $\text{kg}\cdot\text{cm}^2$ ，包括羽毛球拍³的典型重量范围（90-97 $\text{kg}\cdot\text{cm}^2$ ）。在比较理论和实验 I_y 值时，发现 I_y 的预测值系统性偏高，但数据的一致性非常好（ $R^2 = 0.9999$ ， $\text{RMSE} = 0.94 \text{ kg}\cdot\text{cm}^2$ ；图 5）。研究中所有对 I_y 的进一步计算都减去了这一偏移量。结果验证了使用摆锤法精确测定 80-115 $\text{kg}\cdot\text{cm}^2$ 范围内装置的 I_y 。该方法对质量中心和摆动时间的微小变化很敏感，因此要获得准确的 I_y 值，必须精确地确定这些值。球拍质量属性的准确性使用误差传播¹⁸进行评估，质量、质量中心和 I_y 值的准确度分别为 $\pm <0.1\%$ 、0.53% 和 0.76%，这被认为是可以接受的。

该研究旨在单独评估 I_y 的影响，但由于球拍的可用性，研究人员决定采用一系列轻质球拍，并增加质量以创建逐渐不同的 I_y 值，同时保持质量、弯曲刚度和极惯性矩相对恒定，并允许质心变化（表 1）。随着 I_y 的增加，模态响应受到影响，基频（第 1 个平面外弯曲模态）降低，远端节点位置（距离拍头中心更远）增加（表 1）。

第 2 阶段： I_y 对羽毛球击球成绩的影响

数据收集。本研究招募了 20 名（16 名男性；4 名女性）经验丰富的羽毛球运动员，其中包括从地区标准到国际标准的运动员（ 19.0 ± 3.7 岁， 1.74 ± 0.07 米， 68.6 ± 8.6 千克）。参赛选手使用五只经 I_y 扰动的球拍、自己的球拍和市售球拍进行了一系列击球练习。根据拉夫堡大学伦理咨询委员会的指导原则，向每位参与者解释了测试程序，并获得了参与者或其父母/监护人（如果未满 18 岁）的书面知情同意。

参赛者被要求完成自我选择的热身运动，就像为比赛做准备一样。球拍顺序采用拉丁方阵设计，即每种球拍在 1-5 号位置的代表人数相同，并随机分配给参与者，以尽量减少学习和/或疲劳可能产生的顺序效应。测试在足够高的实验室中进行，以便选手能够发挥出由国际羽毛球运动员确定的正常技术

。由于对参与者（地区）的最低标准要求，没有进行先验功率分析，因此招募了尽可能多的参与者。

球拍上有球形和胶带（图 6）反光标记，并计入最终报告的 I_s 值。毬子软木底部也贴有反光胶带¹。球拍和毬子的三维位置数据由 18 个摄像头的运动分析系统（Vicon OMG Plc，英国牛津）以 500 Hz 的频率采集。

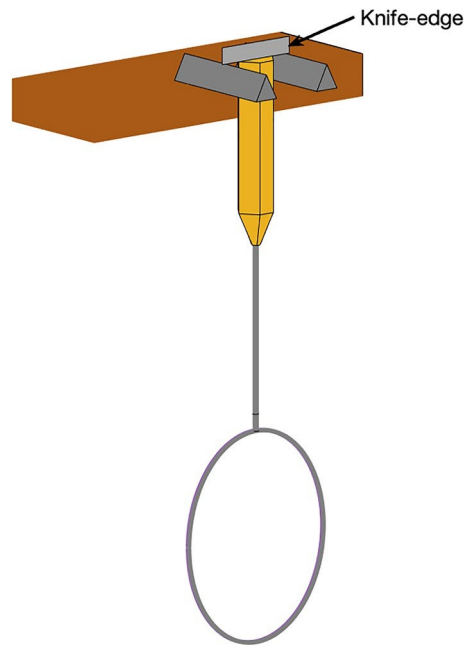


图 3. 简摆装置示意图。

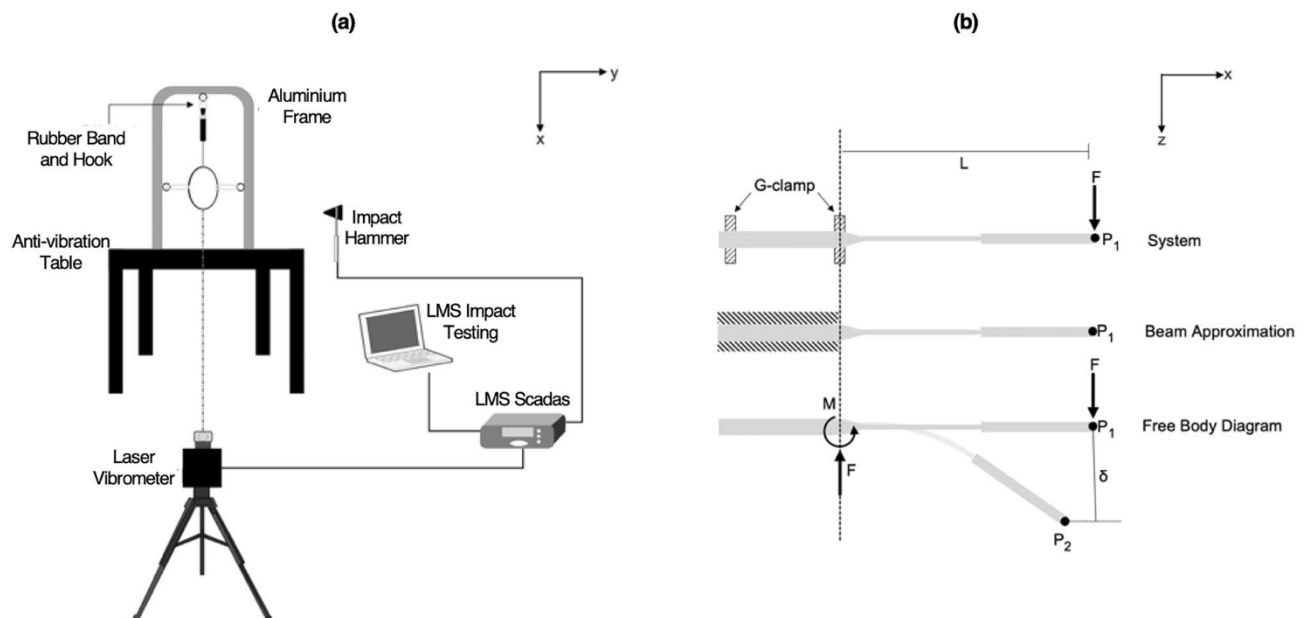


图 4 (a) 试验模态分析装置示意图, (b) 梁近似和载荷-挠度试验示意图。

为了进一步将学习效应降至最低, 参赛者使用自己的球拍和市售球拍进行了一组较少的试验, 每组包括五次最大击打。这些试验未采集数据。然后, 参赛者使用每种球拍进行 15 次击球 (三组, 每组 5 次), 由毽子发射器 (BKL, Badenko, 法国) 每隔 3 秒钟发射一次毽子, 以实现毽子发射的一致性, 这被认为是国际球员在竞技比赛中的提拉击球。参赛者被要求使用正常技术以尽可能快的速度击球。每组之间允许参赛者休息一分钟, 每种情况之间也允许休息五分钟。击球次数

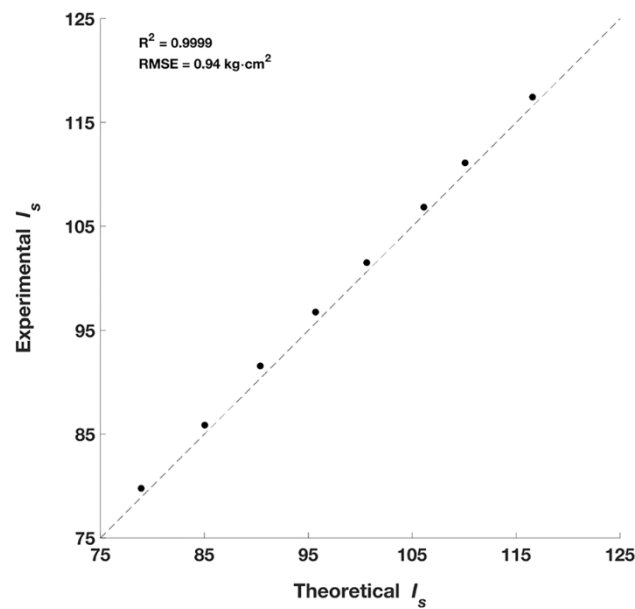


图 5.八根校准棒的理论与实验 I_s 。虚线表示实验值和理论值相等的地方。

球拍	质量特性				刚度特性			
	质量 (克)	COM (cm)	I_s (千克·平方厘米)	I_p (千克·平方厘米)	弯曲刚度 (牛/米)	δ (毫米)	基频 (赫兹)	节点位置 (毫米)
1	93.8	31.48	84.5	1.74	136.3	72.0	54.00	- 1.3
2	94.1	32.29	90.4	1.84	138.9	70.6	52.50	10.4
3	94.0	32.79	95.2	1.77	138.6	70.8	52.00	22.7
4	94.0	33.62	99.6	1.83	137.2	71.5	51.75	29.3
5	94.0	34.52	105.7	1.84	138.8	70.7	51.25	38.3

表 1.球拍属性。节点位置指的是拍框上的第一个平面外弯曲模式，相对于拍头在纵轴上的几何中心，数值越大表示节点位置越靠近拍尖。COM 质量中心， δ - 负载/挠度测试期间的挠度。

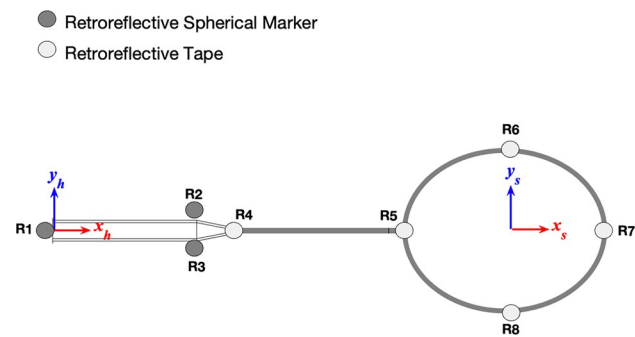


图 6.球拍上的标记示意图，以及手柄 x_h, y_h, z_h 和弦床 x_s, y_s, z_s 坐标系，两个坐标轴都指向读者、

所进行的击打次数（85 次；包括熟悉）代表了 [参赛者](#) 水平的正常训练击打次数/比赛次数^{19、20}。

数据处理。所有运动学变量均在 MATLAB v.2018b（美国纳蒂克，MathWorks, Inc.）毬子的速度、接

触时间以及撞击前和撞击后的阶段均被计算在内。

采用曲线拟合方法¹ 确定, 将基于基本力学原理的 方程应用于撞击前和撞击后阶段的全局位置数据。全局坐标系指向参与者的右侧 (x)、净方向 (y) 和垂直方向 (z)。根据使用高速视频 (15,000 fps) 对自由悬挂的球拍发射毬子进行的测量, 假定撞击持续时间为常数 (1.4 ms)。

通过对拍头中心位置数据进行数值微分, 计算出拍头中心速度。拍头速度计算为作用于瞬时 z_s 方向的拍头中心速度的分量 (图 6), 即球拍仅在平面内运动时拍头速度为零, 而撞击时的拍头速度则通过将撞击前的数据推断到精确的接触时间来计算。为了区分由握把运动引起的拍头速度分量 (即理论上的刚体运动分量) 和由相对于握把的球拍变形引起的拍头速度分量, 通过将静态试验中确定的一个 0.348 米的点投影到 x 轴上, 创建了一个虚拟的刚体拍头中心。 h

-方向 (图 6)。然后计算变形对拍头速度的贡献, 即拍头速度减去虚拟刚性拍头中心速度。使用弦床坐标系的理由见限制部分。

通过表示毬子在弦床平面内的位置和相对于拍头几何中心的位置, 确定撞击位置¹。为了计算出精确的撞击时间的撞击位置, 对撞击前的拍头标记 (R5、R6、R7、R8) 位置数据进行了三次多项式拟合, 并使用之前描述的曲线拟合方法确定了毬子的位置。

为了代表参赛者使用每种球拍的表现, 在拍头速度和毬子速度方面, 计算每位参赛者最快三次试验的平均值。为了确定每种球拍的典型击球位置, 去掉了前五次试验, 以消除熟悉的影响⁵, 并使用其余十次试验的平均值。

统计分析。 统计分析在 SPSS v.27.0 (IBM Corp., Armonk, NY, USA) 中进行。 I_s 对拍头速度、变形行为 (撞击时的最小变形和变形速度)、毬球速度和撞击位置的影响采用单因素重复测量方差分析 (ANOVA) 进行评估, 显著性阈值为 $p < 0.05$ 。效应大小用等平方 (η^2) 确定, 并解释为: 大 ≥ 0.14 ; $0.14 > \eta^2 \geq 0.06$; $0.06 > \eta^2 \geq 0.01$; 微小 < 0.01 ²¹。对数据进行了正态性 (Shapiro-Wilk 检验) 和球形性 (Mauchly's 检验) 评估, 当违反球形性假设时, 采用 Greenhouse-Geisser 校正。对于具有统计意义的主要效应, 进行了 Bonferroni 事后配对 t 检验, 以确定条件之间存在的差异。

成果

在所有 1500 次试验 (每次 300 拍) 中, 拍头速度为 52.0 ± 5.3 (42.2–63.3) $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。发现了一个很大的显著主效应 ($F_{(4,76)} = 10.41$, $p < 0.001$, $\eta^2 = 0.354$; 图 7), 突出了 I_s 与拍头速度之间的反比关系。事后检验显示, 十次成对比较中有五次存在显著差异。关注拍头速度的刚性部分会增加效应大小 ($F_{(4,76)} = 18.60$, $p < 0.001$; $\eta^2 = 0.493$)。此外, I_s 越大的球拍产生的形变也越大 ($F_{(4,76)} = 24.46$, $p < 0.001$; $\eta^2 = 0.565$; 图 8a), 形变速度也越大 ($F_{(4,76)} = 20.11$, $p < 0.001$; $\eta^2 = 0.514$; 图 8b), 也就是说、也就是说, 尽管固有频率较低, 但加速较高惯性力矩所需的较大力矩会产生较大的变形量, 并导致观测到的较高恢复 (变形) 速度。

发现了一个很大的显著主效应 ($F_{(4,76)} = 3.33$, $p = 0.014$, $\eta^2 = 0.149$; 图 9), 突出了 I_s 与纵向撞击位置之间的正相关关系。事后检验表明, 不同条件之间没有显著差异。在 I_s 和内外侧撞击位置之间没有发现明显的主效应 ($F_{(4,76)} = 0.70$, $p = 0.594$, $\eta^2 = 0.036$)。

参赛者的平均毬速为 80.5 ± 8.2 (65.9–98.3) $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。 I_s 没有发现明显的主效应 ($F_{(4,76)} = 0.56$, $p = 0.696$, $\eta^2 = 0.028$; 图 10)。

讨论

结果表明, 虽然 I_s 的增加会导致拍头速度降低和远端撞击位置增加, 但对撞击后的毬球速度没有影响。毬速与之前研究人员^{1,2,22} 报告的类似水平运动员的毬速相似。

在拍头中心, I_s 与拍头速度之间存在明显的反比关系, 且效应大小较大 ($p < 0.001$; $\eta^2 = 0.354$)。 I_s 对拍头速度的影响可能被随着 I_s 的增加而增加的变形分量所补偿, 这是由于在靠近拍尖的地方增加了更大的质量, 导致固有频率降低。关注拍头速度的刚性成分会产生更大的效应 ($p < 0.001$; $\eta^2 = 0.493$)。

。

本研究计算出的最快拍头速度 (拍头中心) 高于以往的文献^{3,23}: $64 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ vs. $\sim 53 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $\sim 45 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。这

很可能是由于参与者的能力，而不是方法上的差异，因为采样频率与本研究非常相似：分别为 4803 赫兹和 50023 赫兹。Kwan 等²³招募了三名不同水平的参与者：精英（全国台湾大学杯第一组）、次精英（全国台湾大学杯第二组）和业余爱好者。Kwan³招募了五名参与者（三名高级和两名新手）。本研究包括可被视为高级（地区）的选手，以及经常参加欧洲羽毛球巡回赛的选手（精英）。

也有可能是球拍上添加的仪器增加了质量和 I_s ，导致拍头速度降低：7 个反向反射标记的质量增加了 13.2 克（从 89.2 克增加到 102.4 克），平衡点降低了 12.1 毫米， I_s 增加了 6.48 千克-平方厘米（从 89.8 千克-平方厘米增加到 96.2 千克-平方厘米）²³。Kwan³没有说明他们的

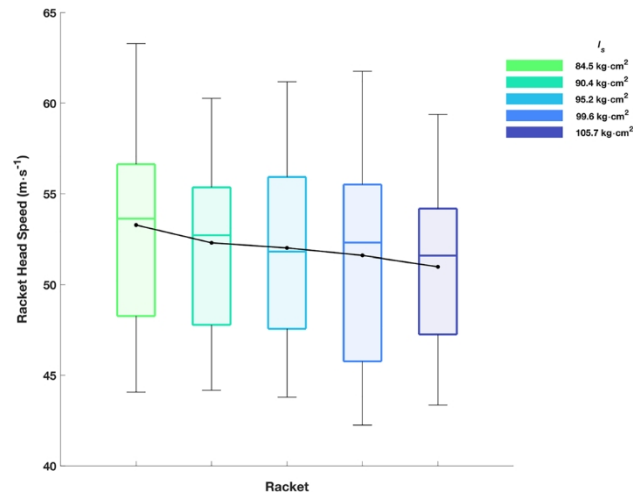


图 7.每种球拍的拍头速度。方框图表示四分位数间距（阴影区域）、中位数（彩色实线）、最小值/最大值（须线）。黑色实线和圆圈代表平均值。

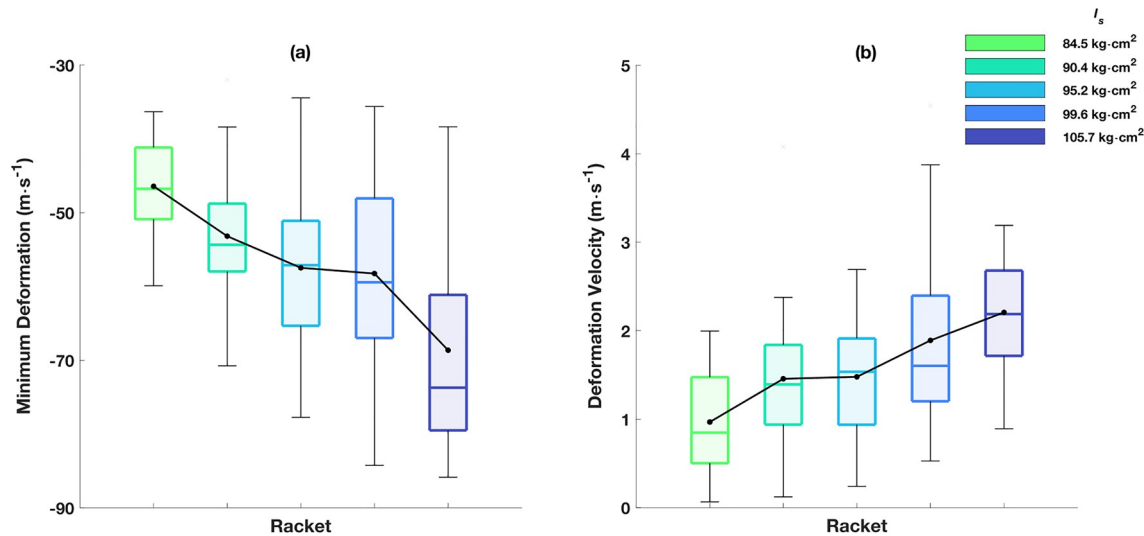


图 8 (a)每支球拍的最大变形量，(b)每支球拍撞击时的变形速度。方框图表示四分位数范围（阴影区域）、中位数（彩色实线）、最小值/最大值（胡须）。黑色实线和圆圈代表平均值。

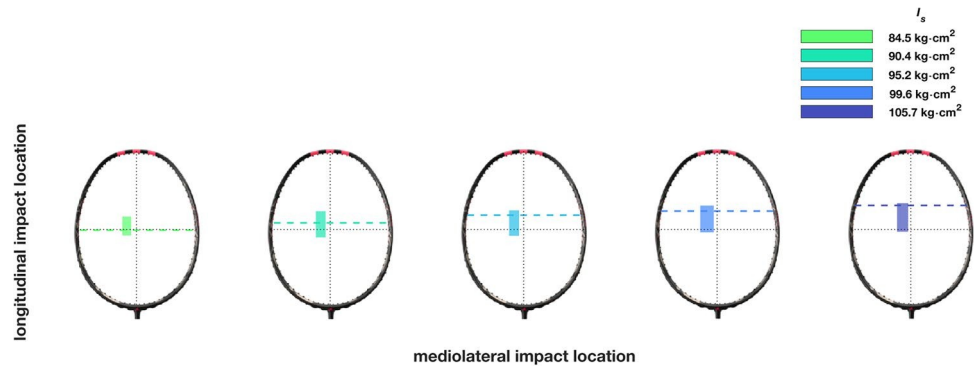


图 9.各球拍的撞击位置。阴影区域分别代表内外侧和纵向的平均值±标准差。虚线代表第一弯曲模式的远端节点位置。

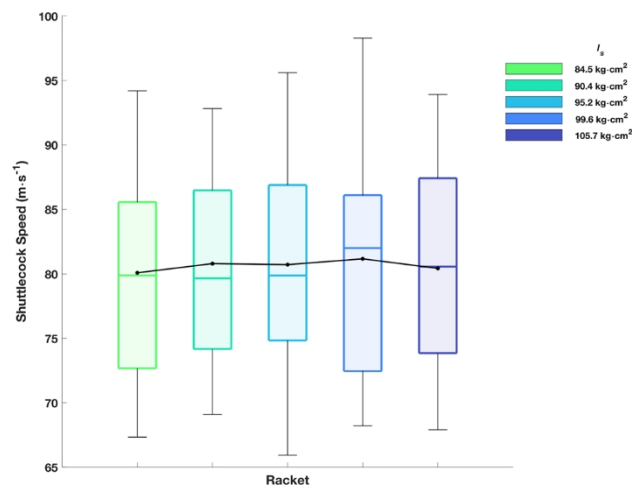


图 10.每种球拍的发球速度。方框图代表四分位数间距（阴影区域）、中位数（彩色实线）、最小值/最大值（胡须）。黑色实线和圆圈代表平均值。

所报告的 I_s 值包括添加的八个反向反射标记，因此可能低估了质量和 I_s ，这可能是拍头速度较慢的原因。本研究在 I_s 轴附近增加了三个球形反向反射标记，而胶带标记增加的质量可以忽略不计。这组标记仅增加了 0.51 千克·平方厘米的 I_s ，并计入了最终质量和 I_s 值。本研究的结论是，虽然贴在拍头上的胶带标记的跟踪精度可能较低，但对质量和 I_s 的影响较小，因此是再现球员使用的真实球拍特性的有利方法。

当关注撞击后的毬球速度时，拍头速度的影响并不存在，没有发现差异。此外，虽然拍头速度随着 I_s 的增加而降低，但平均而言， I_s 越高，球员的纵向撞击位置越大（越远）。这以前被认为是由于低 I_s 球拍的有效质量损失所致（图 11），也可能是由于弧长（球拍手柄到击球位置）增加，击球效率抵消了击球位置上拍头速度的增加³。

以往的研究发现，羽毛球³和网球⁵的击球位置都存在这种变化。研究发现，在网球发球过程中，随着 I_s 的增加，纵向撞击位置的增加会产生较大的效应大小（ $\eta^2 = 0.514$ ）（注意到网球拍的 I_s 定义略有不同）⁵。之所以会产生较大的效应，可能是因为网球发球是一项相对封闭的技术，运动员可以控制来球的轨迹，而且其速度比来毬子的速度慢得多，后者的速度和轨迹由对方运动员决定，从而导致撞击位置的较大变化。此外，由于羽毛球拍的移动速度通常比网球拍快，精英选手的拍头速度可达 60 米·秒⁻¹ 以上，因此击球位置的变化较大也就不足为奇了，中外侧和纵向的标准偏差分别为 9 毫米和 20 毫米（图 9），而网球的标准偏差分别为 11 毫米和 10 毫米⁵。

这种现象有两种可能的解释，与球拍的节点位置和惯性特性有关。首先，球手可能会调整击球时机和技术，使击球位置更靠近第一弯曲模式的节点位置。击球位置更靠近节点位置有两个主要优势：首先，与节点相关的模式（第一弯曲模式）受到的激励较小，因此手部对该频率振动的感受较小，而人类对频率在 50 至 200 Hz²⁴ 之间的振动具有触觉敏感性，羽毛球拍的典型基频在 50-55 Hz 之间。对网球的研究表明，运动员会有意识或下意识地瞄准节点位置^{7,8}。其次，球拍在节点位置与毬子接触时（通过球拍振动）损失的能量较少，大部分振动幅度来自低阶模式²⁵。

球拍顶端质量越大， I_s 越大，球拍顶端的飞行高度越低，因此毬子在弦床上的撞击高度越高，这仍然提供了良好的“感觉”，并且不会被有意识或下意识地补偿。虽然随着 I_s 的增大，纵向撞击位置明显增加，但事后测试结果并不显著，因此无法得出结论，还需要进一步研究不同的研究设计，使用惯性特性相似但节点位置不同的球拍。

更有意义的可能是个人而非群体对 I_s 扰动的反应。虽然总体趋势是 I_s 每增加约 5 kg·cm²，拍头中心的拍头速度就会降低约 0.7 m·s⁻¹，但不同球拍的拍头速度可相差 5 m·s⁻¹，有时 I_s 较高的球拍会产生更大

的拍头速度值。这可能是由于多种原因造成的，包括 I_s 越高的球拍变形速度越快、对 I_s 越高的球拍越熟悉以及技术等。值得注意的是，反向线性关系在某些运动员身上并不存在。

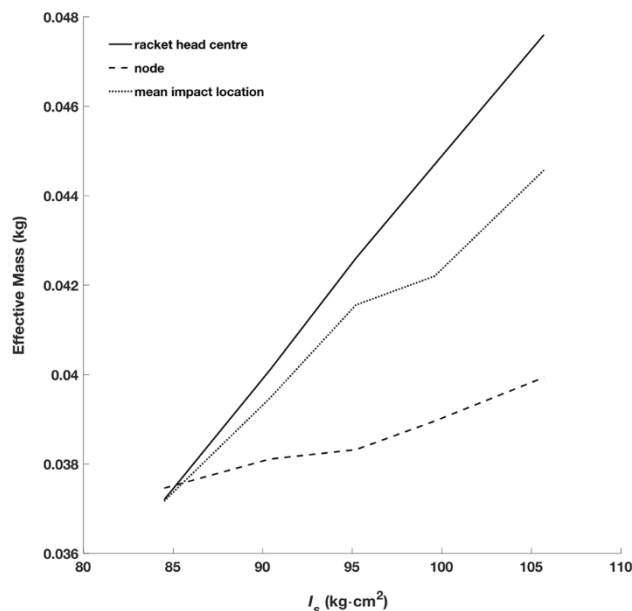


图 11.拍头中心、节点位置和平均撞击位置处撞击的有效质量。所有撞击均假定撞击在纵轴上（内外侧撞击位置 = 0）。

球拍 2 和 3 的拍头速度通常较低，这可能是由于不熟悉 I_s 值极低的球拍，而球拍 2 和 3 更能代表商业范围⁴。因此，在本研究使用的范围内， I_s 和拍头速度之间的关系可能是反线性或反二次方关系，这取决于个人。

以前的研究使用幂律 $V = C/I_s^n$ 来描述 I_s 和执行速度之间的关系，其中 C 是播放器常数，是关系的幂²⁶。 n 值平均为 0.22 ± 0.13 ，低于 Kwan³ 报告的 0.32。类似的 n 值在垒球球拍（0.25）²⁷、高尔夫球杆（0.19）²⁸ 和网球（0.31）⁹ 中也有报道。由于参与者之间的差异很大（-0.05-0.45），而且没有明显的趋势，因此无法确定是否存在依赖于 I_s 的普遍幂律，而先前的研究表明，技术更高超的运动员显示的 n 值更低³。对于羽毛球拍来说，拍头速度和 I_s 之间的线性关系可能并不合适，因为羽毛球拍和手对拍柄端的惯性矩接近 $150 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$ ，拍头速度不会随着 I_s 接近零而变得无限大²⁹。许多运动员在使用最低 I_s 的球拍时，拍头速度较低，这可能是由于对这一范围不熟悉，也可能是缺乏信心。

局限性

为确保对球拍和毬子的跟踪准确无误，采用了适当的方法步骤，包括过滤和曲线拟合。由于反光带的质量可忽略不计，因此优先使用反光带而不是球形标记。理想情况下，每次试验都应测量球拍与毬子的接触时间；然而，在全身捕获量中这是不可能的，因此使用了高速视频中假定的 1.4 毫秒接触时间。这一点的影响可以忽略不计，接触时间减少 0.1 毫秒会导致纵向撞击位置、内侧撞击位置（更内侧）和撞击后的毬球速度分别平均减少 1 毫米、减少 0.5 毫米和增加 $0.13 \text{ 米} \cdot \text{秒}^{-1}$ 。这分别占幅度的 0.4%、0.3% 和 0.2%。

考虑到不同球拍在撞击时的变形方向没有差异（ $F_{(4,76)} = 0.54$, $p = 0.700$ ），通常在撞击时比中性点落后 5-10 毫米之间，即球拍还没有完全恢复，因此有理由使用弦床坐标（ z_s ）系统的法向量来表示拍头速度。手柄上使用的标记（R2 和 R3）距离非常近，因此无法代表握拍的方向（刚体运动），相比之下，拍头标记（R6 和 R8）则有足够的距离。为量化握拍的真实方向而在握拍上添加的仪器，例如在两端粘贴标记的杆，会妨碍参与者的自然挥拍，并影响球拍的惯性特性。

节点位置是根据自由悬挂球拍的数值确定的，这更好地代表了比赛中的状态²⁴，但实际上，手握球拍的状态会改变节点位置，通常会将节点移向拍尖，并在拍柄处向下移动¹⁸。此外，节点线并不是直线，与弦床相比，节点更偏向于拍框的纵向远端，使得节点线呈弯曲状²⁴⁻³⁰。没有对模态分析的准确性

进行评估，只评估了可重复性，但基频与之前报告的 56-62 ^{Hz}_{31,32} 值相似，注意到其他研究报告了夹钳基频^{23,33,34}。

进一步的工作可以评估本研究中所用方案的可重复性。测试不同的球拍顺序是否会产生影响，将有助于了解所发现关系的一致性。之前的高尔夫研究测试了惯性力矩对杆头和球速的影响，参与者参加了多次数据收集，每次都使用了不同的球拍顺序，因此对结果更有信心⁶。最后，需要注意的是，击碎击球是羽毛球运动中的许多击球动作之一，选择球拍来优化某一击球动作的表现（毬球速度）可能会对其他击球动作不利。例如，如果对某一球员而言，高 I_x 的球拍被认为是最佳球拍，这可能会对防守击球或攻网击球产生负面影响，因为在这些击球中，更高的机动性和拍头加速度是最重要的需要。

结论

总之，发现 I_x 与拍头速度之间存在反比关系，但这并没有导致毬球速度的降低，这可能是由于给定撞击位置的有效质量增加，以及随着 I_x 的增加，更远的纵向撞击位置增加。随着 I_x 的增加，更远的撞击位置与第一弯曲模式远端节点位置的增加相吻合，这可能是由于运动员在撞击时下意识地寻求一种理想的“感觉”，即在人类触觉敏感的范围内尽量减少振动。未来的研究应通过消除惯性效应（即球拍的质量属性相同但模式属性不同）来确认节点位置与撞击位置之间的重合，此外还应考虑对惯性力矩的长期适应，而不是急性效应。由于 I_x 受到干扰，还可以评估其他性能因素，如击球准确性或疲劳程度。此外，还应测量运动员的感知数据，预计击球质量/感觉与撞击位置和节点位置之间的距离呈负相关。

一般的研究结果并不能否定存在个人最佳值的可能性，这种方案可用来确定个人最佳值。虽然对 I_x 的总体反应不会导致毬球速度的变化，但对于某些个体而言，选择特定 I_x 值的球拍可能会提高成绩。

数据可用性

由于商业限制，本研究期间生成和/或分析的数据集不对外公开，但可向相应作者索取。

Published online: 28 August 2023

收到：收到：2022年10月7日；接受：2023年6月15日2023年6月15日

参考资料

- McErlain-Naylor, S. M. *et al.* 球拍-底线撞击位置对羽毛球精英选手击球结果的影响。 *J.38*(21), 2471-2478 (2020)。
- Ramasamy, Y., Osman, J., Sundar, V., Towler, H., King, M.A. (2021)。马来西亚羽毛球精英男子运动员正手跳砸时毬球速度的动力学和运动学决定因素。 *Sports Biomech.*
- Kwan, M., 2010. 设计世界上最好的羽毛球球拍。未发表论文（博士）。奥尔堡大学。
- Mitchell, S. R., Jones, R. & King, M. A. 网球发球中的拍头速度与球拍惯性。 *Sports Eng.*3, 99-110 (2000).
- Whiteside, D., Elliott, B., Lay, B. & Reid, M. The effect of racket swingweight on serve kinematics in elite adolescent female tennis players. *J. Sports Sci.*17, 124-128 (2014).
- Turner, J., Forrester, S.E., Mears, A.C., Roberts, J.R. (2020)。高尔夫球杆惯性矩对杆头传递和 高尔夫运动学的影响。第13届ISEA会议论文集，在线，6月22-26日，96。
- Hatze, H. The relationship between the coefficient of restitution and energy losses in tennis rackets. *J. Appl.*9, 124-142 (1993).
- Choppin, S. B., Goodwill, S. & Haake, S. 温布尔登预选赛 比赛中球和球拍的撞击特征。 *Sports Eng.*13(3), 163-170 (2011).
- Cross, R. 通过增加重量定制网球拍。 *Sports Eng.*4(1), 1-14 (2001).
- Schorah, D., Choppin, S. & James, D. 惯性力矩对受限运动挥杆速度的影响。 *Sports Biomech.*14(2), 157-167 (2015)。
- Spurr, J., Goodwill, S., Keeley, J. & Haake, S. Measuring the inertial properties of a tennis racket. *Procedia Eng.*72, 569-574 (2014).
- Brody, H. 网球拍的惯性矩。 *物理教师》*23, 213 (1985年)。
- Brody, H., Cross, R. & Lindsey, C. *The physics and technology of tennis* (Racquet Tech Publishing, 2002)。
- Allen, T., Choppin, S. & Knudson, D. 网球拍性能参数评述。 *Sports Eng.*19(1), 1-11 (2016).
- Allen, T., Dixon, S., Dunn, M. & Knudson, D. 《网球装备和技术对过度运动损伤风险的相互作用》。见 *网球医学* (DiGiacomo, G. 等编著) 61-79 (施普林格, 纽约, 2018年)。
- King, M. A., Glynn, J. A. & Mitchell, S. R. 针对特定对象的计算机模拟模型，用于确定单手网球反手击球时的肘部负荷。 *Sports Biom.*10(4), 391-406 (2011).
- Glynn, J. A., King, M. A. & Mitchell, S. R. A computer simulation model of tennis racket/ball impacts. *Sports Eng.*13, 65-72 (2011).
- Glynn, J.A. (2007). 利用计算机模拟研究单手网球反手击球时的肘部负荷。未发表论文（博士），拉夫堡大学。
- Alcock, A. & Cable, T. 羽毛球单打和双打的比较：心率反应、运动员特征和比赛特征 istics. *Int.J. Perform. Anal.* 体育9(2), 228-237 (2009).
- Abdullahi, Y. & Coetzee, B. 参加非洲羽毛球 锦标赛的男子羽毛球运动员的单打比赛分析。 *Int.J. Perform. Anal.* Sport 17(1-2), 1-16 (2017).
- Cohen, J., (1988). *行为科学的统计功率分析*，第2版。Lawrence Erlbaum Associates.

22. King, M. A., Towler, H., Miller, R. & McErlain-Naylor, S. M. A correlational analysis of shuttlecock speed kinematic determinants in the badminton jump smash.**10**(4), 1248-1261 (2020).
23. Kwan, M., Andersen, M. S., Cheng, C.-L., Tang, W.-T. & Rasmussen, J. Research of high-speed racket kinematics by motion capture.*Sports Eng.***13**, 57-63 (2011).
24. Banwell, G., Roberts, J., Halkon, B. J. & Rothberg, S. Understanding the dynamic behaviour of a tennis racket under the play conditions.*Exp. Exp. Mech.***54**, 527-537 (2014).
25. Cross, R. 影响网球拍振动的因素。 *Sports Eng.***18**, 135-147 (2015).

26. Schorah, D., Choppin, S. & James, D. 惯性力矩和身体轮廓对受限运动挥杆速度的影响。 *Proc. Eng.* **72**, 593-598 (2014).
27. Smith, L., Broker, J. & Nathan, A. 《垒球运动员挥棒速度研究》。 In *Sports dynamics: Discovery and Application* (eds Subic, A. et al.) 12-17 (RMIT University, 2003)。
28. Daish, C. B. *The physics of ball games* (Hodder & Stoughton, 伦敦, 1972 年)。
29. Cross, R. & Bower, R. 挥拍重量对挥杆速度和球拍力量的影响。 *J Sports Sci* **24**(1), 23-30 (2006).
30. Kawazoe, Y. 手持网球拍的实验鉴定和冲击中反弹球速度的预测。 *Theor. Appl. Mech* **46**, 177-188 (1997).
31. Montagny, J., Berlioz, A. & Dufour, R. Transient behaviour of flexible structures. 羽毛球拍应用。 *Mécanique Ind* **4**(2), 113-118 (2003).
32. Gawande, J. S., Pachpore, S. S. & Kale, S. S. 使用模态分析法对羽毛球拍进行失效研究。 *Int. J. Sci. Dev.* **5**(2), 1849-1856 (2017).
33. Kwan, M., Cheng, C.-L., Tang, W.-T. & Rasmussen, J. Measurement of badminton racket deflection during a stroke. *体育工程* **12**, 143-153 (2010).
34. Kwan, M. & Rasmussen, J. 弹性的重要性: 羽毛球拍在击球过程中的偏转。 *J. Sports Sci.* **28**(5), 505-511 (2010).

致谢

该项目由 Marque Makers 提供部分资金, www.marquemakers.com.hk。

作者供稿

构思、方法: H.T.、S.R.M. 和 M.A.K.; 数据收集: 数据处理: H.T.: H.T.; 正式分析和写作-原稿准备: H.T.; 写作-审阅和编辑: S.R.M. 和 M.A.K.; 监督: 所有作者均已阅读并同意手稿的出版版本。

竞争利益

作者声明不存在利益冲突。

其他信息

补充信息 在线版本包含补充材料, 可登录 <https://doi.org/10.1038/s41598-023-37108-x>。

来函和索取资料 请寄 H.T.

转载和授权信息 请访问 www.nature.com/reprints。

出版者注: 《施普林格-自然》杂志对出版地图中的管辖权主张和机构隶属关系保持中立。



开放获取 本文采用知识共享署名 4.0 国际许可协议进行许可, 该协议允许以任何媒介或方式使用、共享、改编、分发和复制本文。

只要您适当注明原作者和来源, 提供知识共享许可协议的链接, 并说明是否进行了修改, 您就可以使用本文的格式。本文中的图片或其他第三方材料均包含在文章的知识共享许可协议中, 除非在材料的署名栏中另有说明。如果材料未包含在文章的知识共享许可协议中, 且您打算使用的材料不符合法律规定或超出许可使用范围, 您需要直接从版权所有处获得许可。要查看该许可的副本, 请访问 <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>。

© 作者 2023