羽毛球杀球和切球后的羽毛球速度衰减

Eric Collet[1, 2, *]

[1] 雷恩大学，法国国家科学研究中心，雷恩物理研究所（IPR）– UMR 6251；法国雷恩 35000。[2] 法国大学研究院（IUF）；法国巴黎 75231

*任何通信事宜请联系作者

电子邮箱：eric.collet@univ-rennes.fr

收稿日期 xxxxxx 接收发表日期 xxxxxx 发表日期 xxxxxx

摘要

本文基于对在羽毛球场上使用高速摄像机拍摄的视频进行分析，报告了高水平选手和国际级选手击出杀球和切球后羽毛球速度的衰减情况。羽毛羽毛球的轨迹显示，其速度呈指数衰减，飞行时间则随距离呈指数增长，这与羽毛球在高阻力作用下的运动方程相符。羽毛球的初速度可超过 500 千米/小时，并且每飞行 ≈3.35 米就会减半，具体取决于以速度等级表征的羽毛球物理参数。视频显示，塑料羽毛球比羽毛球更耐用，但在高速下会发生变形。由此导致其阻力系数随速度增加而下降，使其不适合高水平比赛。研究还表明，左手持拍选手击出的切球，或右手持拍选手击出的反手切球所产生的旋转，会使羽毛球减速。

关键词：羽毛球、杀球、速度、阻力、飞行时间

1. 引言

羽毛球中的杀球和劈吊是战术击球，通常在场地后场打出，而且常常能够得分。杀球凭借力量和速度击出，也是羽毛球成为世界上速度最快运动项目的一大传奇来源：P. Tan 创下女子纪录，达到 438 千米/小时；S. Rankireddy 则创下男子纪录，达到 565 千米/小时。许多研究都聚焦于羽毛球的特殊轨迹，这些轨迹是由轻质（≈5 g）、细长（≈7 cm）的粒子所承受的强大空气动力阻力造成的（1-8）。这种阻力对于使羽毛球保持在场地界限内至关重要，因为它会大幅降低羽毛球的速度（9-16）：初速度为 ≃240 km/h（67 米/秒）的羽毛球，可在 ≃0.6 秒内减速至 ≃25 km/h（6.9 米/秒）。正如多项生物力学研究所强调的那样，羽毛球的速度取决于选手、球拍与羽毛球之间的能量传递（17-22）。

本文对国际级选手和精英选手完成杀球后，羽毛球和塑料羽毛球的轨迹及速度衰减进行了定量分析。文章还讨论了羽毛球物理参数，尤其是其质量所产生的影响。根据行星上的大气条件，这些参数可以按需调整，以确保相似的比赛条件。文章还分析了切球和反切球对速度衰减的影响，涵盖右手持拍选手和左手持拍选手。基于实验结果和理论结果，文章讨论了一些战术结论。考虑到预期读者，本文同时采用常用的速度单位（千米/小时）和公制单位（米/秒）。

表 1. 不同速度等级羽毛球的终端速度 V_T，按不同来源测得，并列出质量 m 和半径 R。

速度等级	AS20 76/V2	AS20 77/V3	AS20 78/V4	Mavis 300
m（克）	5.10(2)	5.25(2)	5.45(2)	5.30(5)
R（厘米）	3.35(5)	3.35(5)	3.35(5)	3.30(2)
V_T(米/秒)	6.19(2)	6.34(2)	6.48(2)	6.05(2)

2. 方法A Phanto

m Miro 3a10高速摄像机被用于羽毛球场，以拍摄高帧率视频（3000 fps），记录羽毛球轨迹。视频分辨率提升至 1280×800 像素，每帧曝光时间为333 μs。文章还使用了一台佳能相机，拍摄帧率设为500 fps（1920×1080 像素）。这些视频记录了精英国家级和国际级选手在球场上完成的击球，拍摄地点为雷恩举行的2025年法国国际羽毛球锦标赛（IFB）期间，以及一次专门为本研究安排的训练场次。Tracker（23、24）是一款免费的Java视频分析工具，用于跟踪羽毛球轨迹并提取速度曲线或飞行时间曲线。

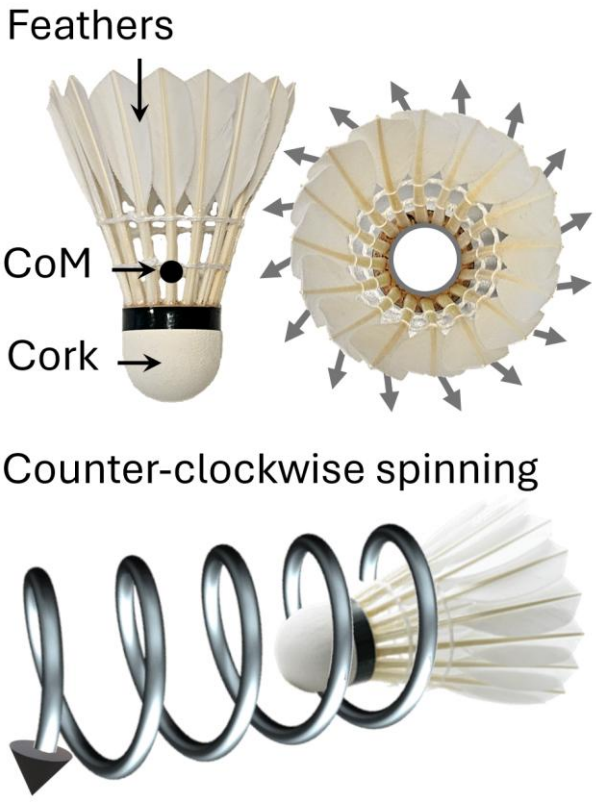

图1。羽毛羽毛球的结构。16根羽毛上的气流（箭头所示）会诱导其自然地逆时针旋转。

3. 阻力与羽毛球'的速度等级 图1展示了羽毛球的羽毛结构

羽毛球由一组发散的羽毛梗组成，其末端位于裙部的收拢端，并在端环处连接在一起。羽毛球不具有镜像对称性，属于手性物体（25）。由于16根羽毛插入球托的方式，羽毛上的气流使这些飞行物在空气中传播时自然地逆时针旋转。质量中心（质心）位于羽毛球的对称轴上，靠近球托。

多篇论文基于风洞测量、视频分析或模拟研究了羽毛球的空气动力学（1-8、13、15、26、27）。许多论文给出了羽毛球的运动方程，本文采用：

$$m\frac{d\vec{V}}{dt} = m\vec{g} - \overrightarrow{F_D} \quad (1)$$

其中，$\vec{g}$ 为重力，m为羽毛球的质量，$\vec{V}$ 为其速度，$\overrightarrow{F_D}$ 为阻力。阻力取决于空气密度 ρ、羽毛球的横截面（πR^2）（半径为R）以及阻力系数C_D。该方程为：

$$m\frac{d\vec{V}}{dt} = m\vec{g} - \frac{C_D}{2}\pi R^2 \rho V\vec{V} \quad (2)$$

Peastrel等人研究了羽毛球垂直下落时的终端速度（28）。重力使羽毛球加速，从而增大阻力，直到重力与阻力达到平衡。随后，羽毛球在自由落体过程中达到终端速度 $\overrightarrow{V_T}$。此时速度保持恒定（$\frac{d\vec{V}}{dt} = 0$），且与 $\vec{g}$ （2）方向相反（$\overrightarrow{V_T}$），由此可得：

$$V_T = \sqrt{\frac{2mg}{C_D\rho\pi R^2}} \quad (3)$$

典型取值为 m=5.25 g、ρ=1.2 kg m^{-3}、 πR^2=35 cm^2 和 C_D=0.6，对应的终端速度为 V_T≈24 km/h（或 6.5 米/秒）。

在地球上，ρ 会随各种参数而变化，例如大气压、海拔、温度或湿度。空气密度越高，阻力越大，这会显著影响V_T和羽毛球的飞行距离。为了确保世界各地不同地点的比赛条件相近，羽毛球的参数（质量、半径和/或 C_D）会根据大气条件进行调整。世界羽毛球联合会（BWF）使用速度等级不同的羽毛球，速度等级从较慢的 75（或 V1）到较快的 79（或 V5）不等。表 1 展示了塑料羽毛球（Mavis 300）和不同速度等级（76/V2 至 78/V4）的羽毛羽毛球 Yonex AS20 的V_T 测量值变化。此处使用的 AS20 羽毛球半径相近。其质量逐渐增加，与速度等级和V_T的增加相对应。

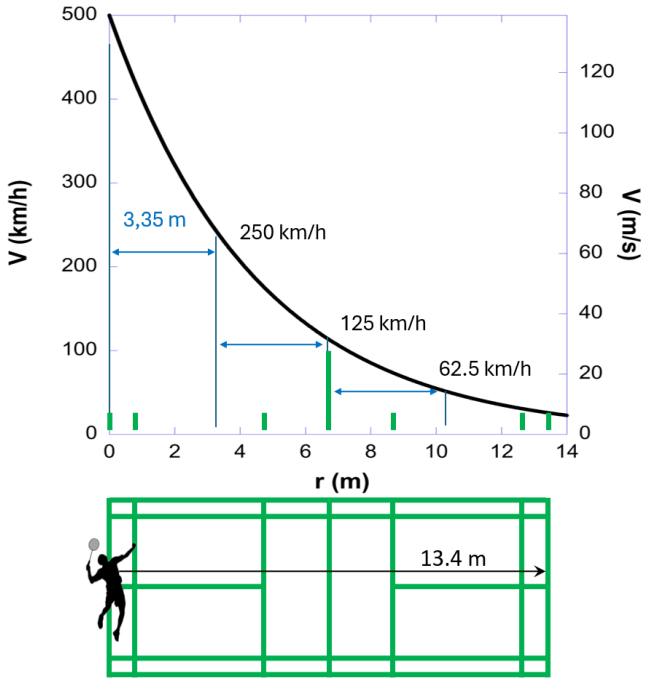

图2. 初速度为 500 千米/小时（≈139 米/秒）、速度减半距离 $L_{1/2}$≈3.35 米时，羽毛球沿球场运动的速度理论指数衰减。

4. 羽毛球速度的指数衰减

4.1 羽毛球速度的理论衰减

让我们来考虑一个速度达到 500 千米/小时的羽毛球，这一速度常见于比赛报道中。由于自由落体时速度为 V_T≈25 千米/小时时的阻力 F_D 等于重力，而 $F_D \propto V^2$，，扣杀后羽毛球所受阻力约为重力的 400 倍。此时高速运动下重力可以忽略不计。因此，运动方程可简化为阻力方向与速度方向相反：

$$m\frac{dV}{dt} = -\frac{1}{2}\rho\pi R^2 C_D V^2 \qquad (4)$$

引入羽毛球在 dt 时间内移动的无穷小距离 dr=Vdt 后，可将 (4) 重写为：

$$\frac{dV}{V} = -\frac{1}{2m}\rho\pi R^2 C_D dr \qquad (5)$$

对 (5) 积分可得：

$$V(r) = V_0 \exp\left(-\frac{\rho\pi R^2 C_D}{2m} r\right) = V_0 \exp\left(-\frac{r}{L}\right) \qquad (6)$$

方程（6）描述了初始速度为 V_0 时，羽毛球速度随距离 r 增加而呈指数衰减的过程。$L = \frac{2m}{\rho\pi R^2 C_D}$ 称为空气动力学长度，典型值为 L≈4.5 米（2）。对于普通读者，使用 $L_{1/2} = \frac{2}{e}L$≈3.35 m 更为方便，这就是特征速度减半距离。图2展示了根据方程（6）得出的理论速度衰减：羽毛球从羽毛球场底线出发，初始速度为 V_0=500 千米/小时（139 米/秒）。球场长 13.4 米 ≈ $4L_{1/2}$，这意味着羽毛球速度到达球网时降为原来的四分之一（125 千米/小时），到达球场另一端底线时降为原来的十六分之一（≈31 千米/小时），接近 V_T。此时，若要准确描述其轨迹，就不能再忽略重力。因此，方程（6）描述轨迹的适用范围值得商榷。

图 3a 展示了羽毛球 Yonex AS50 77/V3 在一次杀球后的质心轨迹（该球由 T. Jr. Popov 在 IFB 2025 期间击出）。

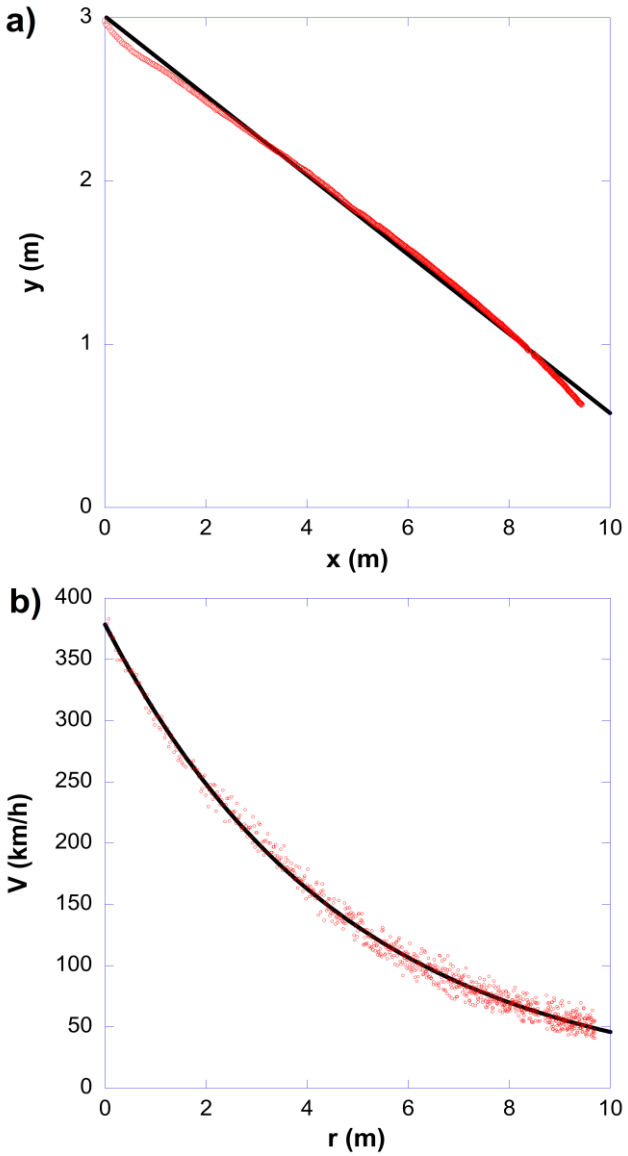

图3. a) 羽毛球轨迹：x 是沿球场方向的坐标，y 是海拔。b) 速度随距杀球点距离 r 的衰减（圆点）。黑线为指数拟合。

（x,y）轨迹是通过视频分析提取的，其中 x 表示沿球场长轴方向的水平距离，y 表示羽毛球的海拔。击球方向向下，目标是击中球场。该轨迹与一条直线轨迹（黑线）相当接近。在 300 ms 的飞行时间内，y 坐标受到重力影响。然而，飞行 9.5 m、历时 300 ms 后，y 坐标与直线轨迹仅相差 10 cm。这小于自由落体在重力作用下经过 300 ms 飞行时间的位移，$\frac{1}{2}gt^2 = 45\ cm$。事实上，由于受到显著的阻力，在空气中运动的羽毛球并非自由落体。

图3b显示了羽毛球速度衰减 V(r) 随其与球拍撞击点之间距离 r 的变化。根据方程（6）给出的指数定律，对 V(r) 进行拟合（黑色曲线），结果与实验数据相当吻合，并得出初速度 V_0=379(1) 千米/小时和空气动力学长度 L =4.73(2) 米。L 接近理论值，但可能会因羽毛球的特性以及比赛中可能遭受的损坏而有很大差异，因为这些因素会改变阻力。

总体而言，可以认为方程（6）相当准确地描述了高初速度杀球后的羽毛球轨迹，适用范围可达前 10 米。

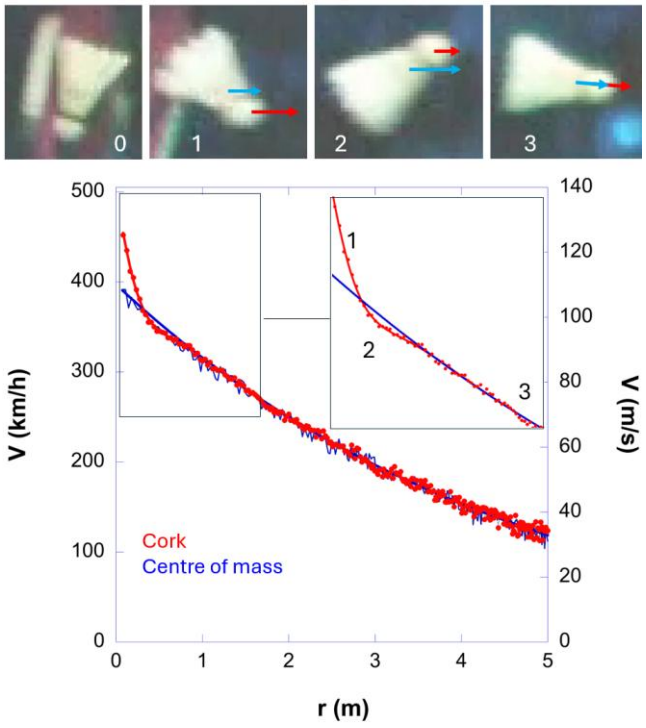

图4。羽毛球质心和球托的速度（蓝色和红色箭头）；杀球后，随着取向从近乎垂直（0）变为近乎水平，二者的速度发生变化。当球托的速度大于（1）或小于（2）质心速度时，二者的速度在沿羽毛球轴线取向后相等（3）。

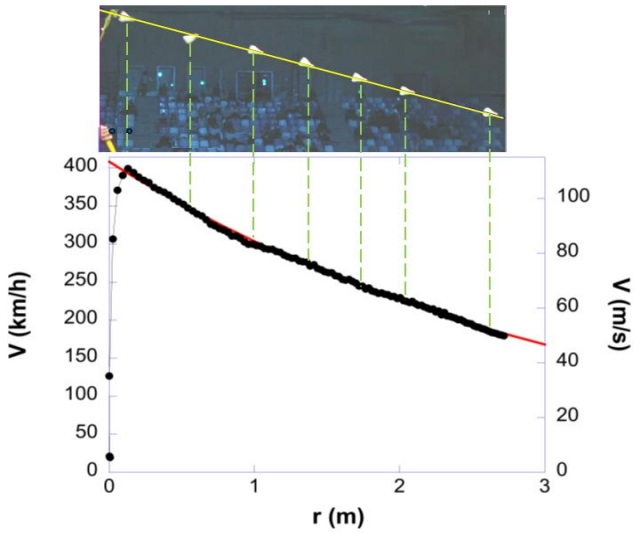

图 5。质心速度偏离指数定律（红色拟合线）。当羽毛球轴线未沿轨迹（黄色线）方向对齐时，减速度更大。

4.2 速度指的是什么？球托还是质心（*CoM*）。

鉴于羽毛球并非一个质点，人们可能会想知道应该测量哪种速度。应该考虑质心的速度，还是球托的速度？图4展示了 A.S. Rasmussen 在 IFB 2025 期间使用 Yonex AS50 77/V3 完成一次扣杀后，这两种速度的变化情况（视频1）。对质心速度进行指数定律拟合（蓝色曲线），与数据相当吻合，并得出初速度 V_0=396(1) 千米/小时和空气动力学长度 L=4.17(2) 米。由于羽毛球的取向从近乎垂直变为水平，球托的速度在最初一米内明显偏离指数定律：球托的初速度远高于质心的速度（图4中分别为 451(1) 千米/小时和 396(1) 千米/小时）。最后，一旦羽毛球的轴线与轨迹对齐，两种速度便会趋于一致（在实验误差范围内）。鉴于世界羽联规则以球托撞击球场的位置判定得分，人们或许会想，考虑球托的速度是否比考虑质心的速度更恰当。下文中，V_0 指质心的初速度。

图5近距离展示了羽毛球质心在最初2.5米范围内的速度变化（由 C.- L. Wang 在 IFB 2025 比赛视频2中击出的球）。数据表明，质心速度相较于指数速度衰减拟合（红色曲线）呈现阻尼振荡。计时器与 V(r) 之间的相关性表明，当羽毛球轴线未与轨迹方向对齐时，减速更明显。Cohen等人将羽毛球的这一翻转过程解释为其轴线逐渐与速度方向对齐（2）。图4显示，在如此高的速度下，振荡分量会在 ≈1 米内衰减。

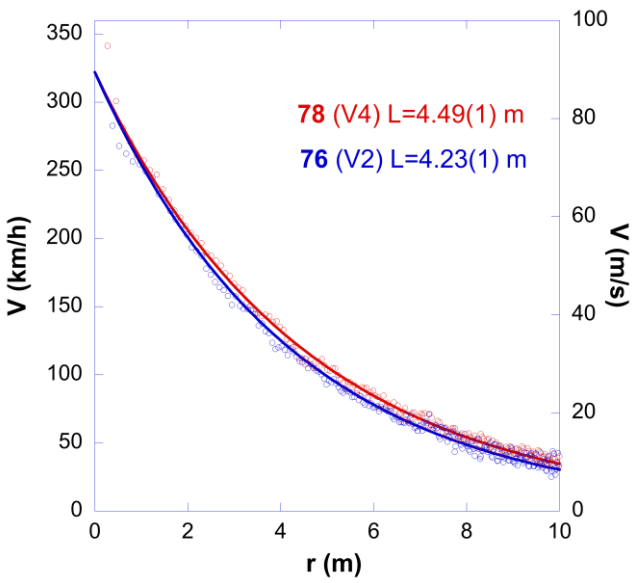

图6。Yonex AS20 羽毛球杀球后的速度衰减。与慢速等级（76/V2，L=4.23(1) m）的羽毛球相比，快速速度等级（78/V4，L=4.49(1) m）的羽毛球具有更高的空气动力学长度。

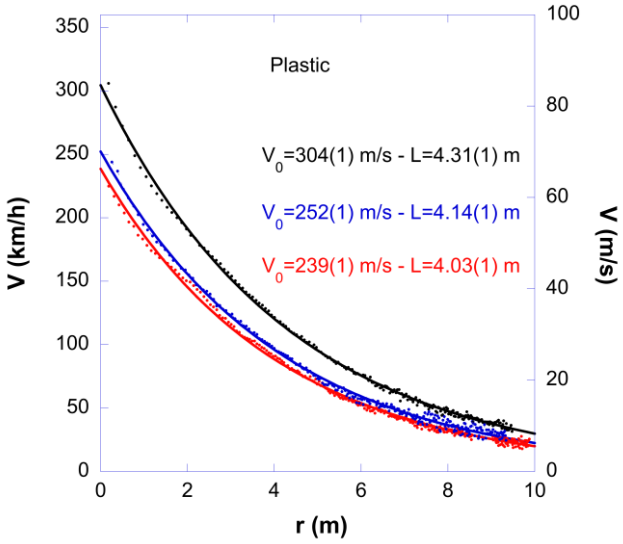

图7。不同初始速度 V_0 下，塑料 Yonex Mavis 300 羽毛球杀球后的速度衰减。用方程（6）拟合 V(r) 曲线表明，空气动力学长度 L 随 V_0 增大而增加。

图5显示，羽毛球在撞击球拍后的最初10厘米内加速度极大。速度在1.3毫秒内从21千米/小时增至399千米/小时，对应的加速度约为8000 g！测得的初速度（399千米/小时）略高于拟合曲线在距撞击点10厘米处给出的数值（396千米/小时）；而将拟合曲线外推至撞击点，得到的 V_0=409 千米/小时远高于实测的21千米/小时。因此，要精确测量 V_0，必须以 ≈ 1 厘米的精度确定撞击点，因为速度每厘米会衰减 ≈1 千米/小时。

4.3 “快速”与“慢速”羽毛球

羽毛球速度等级的变化如何影响 V(r) 曲线？图6显示了两只速度等级分别为 76/V2 和 78/V4 的 Yonex AS20 羽毛球在不同杀球后测得的速度衰减（表1）。将实验曲线拟合到方程（6）后，得到两次击球相近的初始速度（≈320(2) 千米/小时）。与 76/V2（L=4.23(1) 米）相比，78/V4 的空气动力学长度更大（L=4.49(1) 米）。事实上，高速羽毛球的减速度更低、平均速度高于低速羽毛球。这些羽毛球的形状相似，其空气动力学长度和减速度的差异源于质量（表1）；相对于空气动力学长度而言，它们的质量比例基本合理。

4.4 塑料羽毛球

比赛中使用的羽毛羽毛球的主要问题是容易在比赛过程中损坏。因此，为了保持其飞行特性，需要频繁更换。过去几十年间，由塑料制成的合成羽毛球逐渐出现，在休闲比赛中具有耐用性、成本效益和一致性方面的显著优势（15）。塑料羽毛球的裙部主要由尼龙制成，正变得越来越受非竞技羽毛球运动的欢迎，因为其柔韧性使其更加耐用。然而，这种柔韧性也导致其飞行质量不如羽毛羽毛球。多项研究表明，合成羽毛球的阻力系数会随速度增加而降低，这是由于高速下气压导致裙部发生较大变形（3-5、10、13、26）。最近的一项计算研究（29）证实，裙部的横截面积会随飞行速度增加而减小，从而使阻力相较于未变形羽毛球显著降低。当速度超过某一范围后，裙部变形呈现非轴对称形状，并且其变形速率随速度显著增加。

塑料羽毛球 Mavis 300 的终端速度低于羽毛羽毛球的终端速度（表1）。因此，与羽毛 AS20 羽毛球相比，预计其空气动力学长度更短。图7显示了其在不同初始速度 V_0 下的速度衰减。将 V(r) 曲线与方程（6）拟合后表明，空气动力学长度随初始速度增加而增大：当 V_0=239 千米/小时时为 L=4.03(1) m，当 V_0=304 千米/小时时为 L=4.31(1) m。这证实了阻力



图8. 塑料羽毛球以高速撞击球拍后，其裙部会发生变形，形状呈三角形或方形，具体取决于初速度。随着羽毛球减速并旋转，其初始形状会在≈3 米内恢复。

随初始速度增加而减小。视频3和图8展示了塑料羽毛球如何因气压作用于柔性裙边而发生变形：其初始形状具有16重对称，杀球后变为方形或三角形。羽毛球横截面和阻力系数的变化会降低阻力。当羽毛球减速时，裙部上的气压降低，其初始形状在≈3 米内几乎恢复，但羽毛球的半径以及由此产生的阻力仍取决于速度（3-5、10、13、26）。这些在真实条件下直接于羽毛球场测得的数据，证实了先前的实验和理论分析，即塑料羽毛球裙部的变形会导致阻力系数随初始速度发生变化。

5. 切球和反切球对速度衰减的影响 切球是另一种战术技巧，知

使羽毛球产生旋转并改变回球角度。Kitta 对羽毛羽毛球进行了实验（1），并得出结论：与不旋转的羽毛球相比，旋转的羽毛球受到的阻力略大。近期一项研究解释了为什么左手选手（LH）的切球比右手选手（RH）的切球更有效（25），这是由羽毛球的手性所致（图1）。羽毛的螺旋排列使羽毛球在空中飞行时自然产生逆时针旋转。视频4显示，右手球员打出的切球会使羽毛球自然地逆时针旋转。相反，左手球员打出的切球会使羽毛球产生相反的顺时针旋转：此时，羽毛上的气流会阻止旋转，而

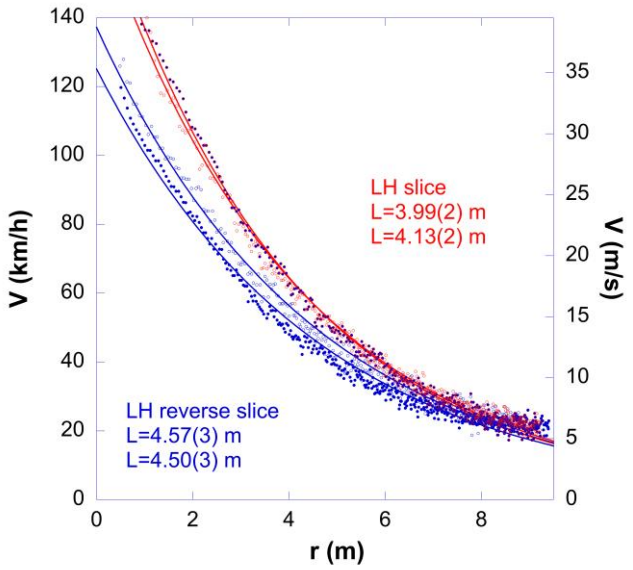

图9. AS20 V3/77 羽毛球的速度衰减。与左手反切球（<L>≈4.06 米）相比，左手球员切球的空气动力学长度更短（<L>≈4.53 米）。

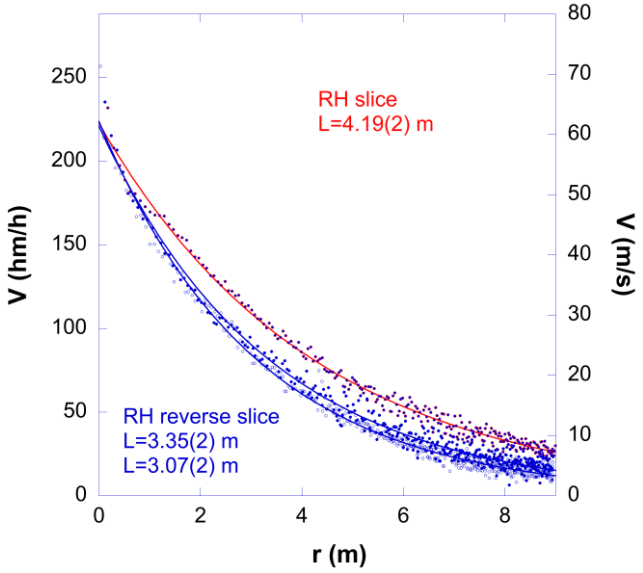

图10. AS20 76/V2 羽毛球的速度衰减。与右手球员切球（<L>≈4.19(2) 米）相比，右手反切球的空气动力学长度更短（<L>≈3.21(2) 米）。

羽毛球最终会自然地逆时针旋转。因此，在左手球员打切球时，羽毛球从顺时针旋转转为逆时针旋转的过程中，部分动能会转化为转动能，从而进一步减慢羽毛球。反过来，左手球员打出的反手切球会使羽毛球自然地逆时针旋转，而右手球员打出的反手切球则会使羽毛球从顺时针旋转转为逆时针旋转。

图9比较了左手球员切球和反切球后羽毛球速度的下降情况。V(r) 曲线显示，与左手反切球相比，左手切球的速度下降得更快，这可从曲线拟合方程（6）的结果看出：左手切球的空气动力学长度为 <L>≈4.06 m，短于左手反切球的 <L>≈4.53 m。图10显示，右手球员的情况恰好相反（击球使用 AS20 76/V2 羽毛球）：拟合结果显示，右手切球的空气动力学长度（L≈4.19 m）长于右手反切球（<L>≈3.21 m）。图9和图10表明，与右手切球或左手反切球所产生的自然逆时针旋转相比，左手切球或右手反切球所产生的相反方向的顺时针旋转，能更有效地减缓羽毛球速度，这与近期的对称性分析（25）一致。

6. 结论与经验教训 本研究表明，可以

以较高的准确度，将羽毛球在杀球或切球后的速度变化描述为随距离呈指数衰减。通过速度等级描述羽毛球的空气动力学特性，可以根据当地的大气条件调整羽毛球。速度衰减非常快，速度每经过 ≈3.35米就会减半，这对比赛有着重要影响，并且对选手或教练而言具有很高的参考价值。

图2显示，速度衰减在最初1米内非常明显。从底线以500千米/小时的速度进行杀球，等同于在底线前方1米处以≈400 千米/小时进行杀球。因此，对于处于防守位置、必须挑球并面对对手杀球的选手而言，将对手逼至场地后场具有重要的战术意义。

从羽毛球飞行时间的角度来看，这一点更加有趣；飞行时间可通过对方程（6）进行积分得到：

$$t(r) = \frac{L}{V_0}\left(\exp\left(\frac{r}{L}\right) - 1\right) \qquad (7)$$

Figure 11 shows the
测得羽毛球使用 AS20 78/V4 时，飞行时间与距离 t(r) 的关系。用公式 (7) 拟合数据后，得到该次击球的 V_0=300(1) 千米/小时，空气动力学长度 L=4.48(2) 米，这与图6中另一次击球的结果再次十分吻合。图11显示，飞行时间

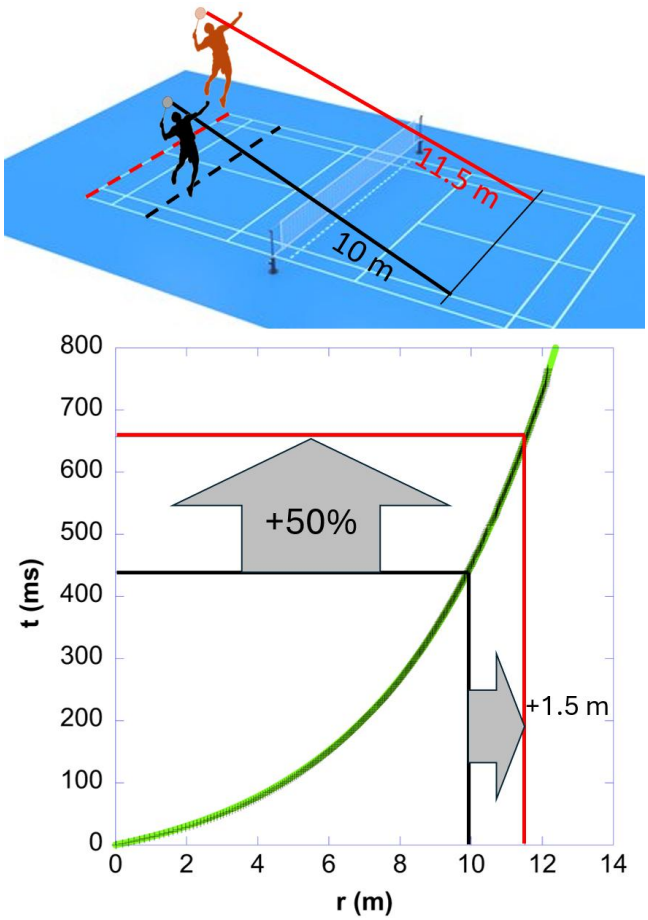

图11. 初速度为≈300 千米/小时的AS20 78/V4羽毛球在杀球后的飞行时间。11.5米杀球的飞行时间比10米杀球增加了≈+50%。

当初速度为 300 千米/小时时，飞行 10 米所需时间从 ≈440 毫秒增加至飞行 11.5 米所需的 ≈660 毫秒。这也凸显了将杀球者逼向场地后场的重要性。事实上，对于给定的初速度 V_0，将击球距离从 10 米增加到 11.5 米，会使防守杀球的反应时间增加 50%。

出于可持续发展的考虑，世界羽联推动从传统羽毛球转向合成羽毛球，这一倡议带来了可能影响比赛的装备变化。塑料羽毛球的飞行特性取决于初速度，其空气动力学长度也会随之变化，因此难以控制其轨迹。正因如此，尽管塑料羽毛球的耐用性颇具吸引力，却无法完全复现高品质天然羽毛球精准的飞行表现。近期，碳制新型合成羽毛球已进入市场（30）。因此，将这一代羽毛球的飞行特性和速度衰减与传统羽毛球进行比较，将会很有意义；目前，传统羽毛球仍是飞行质量的基准。

致谢

E.C. 谨向 B. Kersaudy、A. Lièvre、E. Gautier 和 C. Allaire 致谢，感谢他们作为选手参与本研究；同时感谢 M. Dureault、K. Nakamura 和 A. Gauthier 提供技术支持。作者还感谢世界羽联、法国羽毛球联合会，尤其感谢 C. Grandamas 在雷恩举办的 IFB 2025 期间提供进入球场的机会。E.C. 还要感谢 Gillian Clark 和 Steen Pedersen 进行富有成效的讨论。

参考文献

1. Kitta S、Hasegawa H、Murakami M、Obayashi S. 高雷诺数下带旋转羽毛球的空气动力学特性。《Procedia Engineering》。2011;13:271-7。2. Cohen C、Texier BD、Quéré D、Clanet C. 羽毛球物理学。《New J ournal of Physics》。2015;17(6):063001。3. Chan CM、Rossmann JS. 羽毛球空气动力学：实验与理论的综合研究。《Sports Engineering》。2012;15(2):61-71。4. Verma A、Desai A、Mittal S. 羽毛球空气动力学。《Journal of Fluids and Structures》。2013;41:89-98。5. Mehta RC. 运动球体、羽毛球和标枪的空气动力学。《Scholars Journal of Engineering and Technology》。2023;11(02):4-10。6. Chen LM、Pan Yh Fau - Chen Y-J、Chen YJ. 羽毛球轨迹研究。(1303-2968 (Print))。7. Texier BD、Cohen C、Quéré D、Clanet C. 羽毛球动力学。《Procedia Engineering》。2012;34:176-81。8. Goff JE. 运动投射物空气动力学近期研究综述。《Sports Engineering》。2013;16(3):137-54。9. Texier BD、Cohen C、Dupeux G、Quéré D、Clanet C. 运动场地尺寸。《New Journal of Physics》。2014;16(3):033039。10. Cohen C、Darbois Texier B、Quéré D、Clanet C. 羽毛球物理学。第一部分：空气动力学。2011。第 M10.008 页。11. Phomsoupha M、Laffaye G. 羽毛球中的扣杀击球速度随技术水平呈线性变化。《Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering》。2014;17(sup1):140-1。12. Hubbard M，编者。羽毛球的旋转动力学，1997。13. Cooke AJ. 羽毛球空气动力学。《Sports Engineering》。1999;2(2):85-96。14. Cooke A. 羽毛球轨迹的计算机模拟。《Sports Engineering》。2002;5(2):93-105。15. Woo T、Alam F、Kootsookos A. 羽毛球的科学发展。《Sustainability and Sports Science Journal》。2024;2(3):149-65。16. Zhou L. 羽毛球的空气动力学特性与轨迹分析。《Acta Bioeng Biomech》。2024;26(4):29-37。17. Phomsoupha M、Laffaye G. 羽毛球科学：比赛特征、人体测量学、生理学，视觉体能与生物力学。《运动医学》（奥克兰，新西兰）。2015;45(4):473-95。18. Li S、Zhang Z、Wan B、Wilde B、Shan G. 身体姿势及其训练效果对羽毛球杀球的影响。《Journal of Sports Sciences》。2017;35(4):310-6。19. Ramasamy Y、Usman J、Sundar V、Towler H、King M. 精英马来西亚男子羽毛球运动员正手跳杀中羽毛球速度的运动学与动力学决定因素。《Sports Biomechanics》。2024;23(5):582-97。20. Ramasamy Y、Wei YM、Towler H、King M. 精英马来西亚男子羽毛球运动员跳杀的个体内变异。《Applied Sciences》。2025;15(2):844。21. McErlain-Naylor SA、Towler H、Afzal IA、Felton PJ、Hiley MJ、King MA. 球拍与羽毛球的撞击位置对精英选手羽毛球杀球击球结果的影响。《Journal of Sports Sciences》。2020;38(21):2471-8。22. Aguinaldo AL、Escamilla RF. 棒球投球过程中连续身体运动与肘外翻负荷的诱导功率分析。《Sports Biomechanics》。2022;21(7):824-36。23. Brown D、Cox AJ. 视频分析的创新应用。《The Physics Teacher》。2009;47(3):145-50。24. https://opensourcephysics.github.io/tracker-website/T. 25. Collet E. 左手与右手羽毛球切球：手性羽毛球的旋转方向相反及马格努斯效应。《Comptes Rendus Physique》。2024;25:1-15。26. Alam F、Chowdhury H、Theppadungporn C、Subic A. 羽毛球空气动力学特性的测量。《Procedia Engineering》。2010;2(2):2487-92。27. Reistad N. 羽毛球的加加速度与垂直下落。《European Journal of Physics》。2022;43(5):055804。28. Peastrel M、Lynch R、Armenti A. 羽毛球垂直下落时的终端速度。《American Journal of Physics》。1980;48(7):511-3。29. Zala D、Dechiraju H、Mittal S. 合成材料羽毛球的流体–结构相互作用的计算分析。《Physics of Fluids》。2024;36(1)。30. Tan KJZ、Goh WX、Boey D、Aziz L、Ozaki H、Nakashima H 等。新型合成羽毛球对羽毛球运动表现及运动员感知的影响。《Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology》。2025。