探究羽毛球下落过程的空气阻力

王妙心
北京市第八十中学，中国·北京 100102

摘要：物理课堂中自由落体运动建立起了理想化的下落运动模型，它默认物体只受到重力作用，并且忽略了空气阻力的影响。然而在现实场景当中，像轻质并且有较大迎风面积的物体，其下落运动与理想模型有着很大的偏差，空气阻力的作用不容忽视。羽毛球质量较小、羽毛结构特殊，在下落过程中空气阻力对它的运动状态起到了主导作用，是探究低速空气阻力规律非常优质的生活载体。本文依靠物理课堂力学、运动学的核心知识，通过理论建模、实验设计、视频采集、数据拟合运算等一系列操作，系统地探究羽毛球竖直下落过程中空气阻力的变化规律，验证阻力与运动速度之间的定量关系，剖析终端速度形成的机制，量化理想模型和实际运动的差异。实验证明，羽毛球下落过程中空气阻力与速度平方呈显著正比例关系，物体整个过程是做加速度逐渐减小的变加速直线运动，最终受力平衡并以匀速下落。

关键词：羽毛球；空气阻力；变加速运动；终端速度

Research on Air Resistance During the Falling Process of Badminton

Wang Miaoxin
Beijing NO.80 High School, China Beijing 100102

Abstract: The free fall motion constructed in physics class is an idealized falling model, which assumes that an object is only affected by gravity and ignores the influence of air resistance. However, in real scenarios, the falling motion of light objects with large windward areas deviates significantly from the ideal model, and the effect of air resistance cannot be ignored. Badminton has low mass and a special feather structure, and air resistance dominates its motion state during the falling process, making it an excellent daily research object for exploring the law of low-speed air resistance. Based on the core knowledge of mechanics and kinematics in physics courses, this paper systematically explores the variation law of air resistance during the vertical falling of badminton through theoretical modeling, experimental design, video collection, data fitting and calculation. It verifies the quantitative relationship between resistance and motion velocity, analyzes the formation mechanism of terminal velocity, and quantifies the differences between the ideal model and actual motion. The experiments prove that the air resistance of falling badminton is significantly positively proportional to the square of velocity. The object performs variable acceleration linear motion with decreasing acceleration throughout the process, and finally reaches force balance and falls at a constant speed.

Keywords: Badminton; Air resistance; Variable acceleration motion; Terminal velocity

0 引言

自由落体运动是物理课堂运动学模块里的基础核心模型。教材为了简化物理问题、建立基础运动模式，忽略了空气阻力的作用，认定下落物体只受到重力，做加速度恒定的匀变速直线运动。课堂学习和习题训练都围绕这个理想模型进行，然而现实中的物体下落运动并非全都符合该规律。日常观察发现，石块、铁球等高密度重物下落状态接近理想自由落体，而羽毛球、羽毛、纸片等轻质物体下落缓慢，最后能保持匀速下落，和课本理想模型相差很大。出现这种情况的核心原因是空气阻力的存在。羽毛球质量大约 4.8g，球裙蓬松舒展、迎风面积大，空气阻力对它的运动调控作用超过了重力，是直观研究空气阻力规律的生活化实验对象。

当前物理课堂学习侧重于理想模型的公式推导与习题应用，对于真实场景中变力作用下的变速运动探究较少，对空气阻力的认知大多停留在定性方面，缺少定量实验验证。由于理论与现实的认知偏差，本文结合高中现有的知识模式，不引入超纲公式，通过自主实验、数据拟合、对比分析，定量探究羽毛球下落的空气阻力规律，明确阻力与速度的对应关系，完善对变速直线运动的系统性认知，

实现物理理论与生活现象的结合。

1 理论基础与模型建构

1.1 空气阻力的物理规律

物理课堂当中对于空气阻力只是进行了定性的描述，说明空气阻力是物体在空气中运动的时候所受到的一种方向相反的阻碍力，它的大小和物体运动的速度、迎风面积、外形、空气密度都有关系，当速度越快并且迎风面积越大时，空气阻力也就越大。结合中学物理拓展的知识能够知道，低速物体的空气阻力分为两类情况，一类是在极低速度的时候，空气阻力与速度成正比，另一类是在高速区间的时候，空气阻力与速度的平方成正比。球类物体的常规运动都符合平方阻力模型，羽毛球下落运动完全符合这个规律，所以本文设定核心阻力公式为：$f=Cv^2$。其中 C 代表空气阻力系数，由物体外形、空气密度等固定条件所决定，在单一实验环境中保持恒定状态，v 指的是瞬时速度，f 是对应空气阻力的大小。

1.2 羽毛球下落受力与运动分析

羽毛球竖直静止下落过程中，仅受竖直向下的重力 mg 和竖直向上的空气阻力 f。根据牛顿第二定律 $F_{合}=ma$，可构建动力学方程：$mg-Cv^2=ma$。结合公式可将羽毛球下落分为两个运动阶段：

第一阶段为变加速下落阶段。当羽毛球静止释放的时候，它的初速度是 0，空气阻力也是 0，在开始下落的阶段，初始加速度大致等于重力加速度 g。在下落的整个过程中，速度一直在持续增大，而空气阻力随着速度的平方迅速上升，物体所受的合外力不断减小，加速度持续地衰减。所以羽毛球并不是进行匀加速直线运动，而是属于加速度逐渐减小的变加速直线运动，虽然速度持续增大，但是增速却不断变慢。

第二阶段为匀速平衡阶段。当速度增大到临界值时，空气阻力和重力大小相等，合外力为零，加速度 a 等于 0，物体速度不再发生变化，以恒定速度匀速下落，这个临界速度就是终端速度，是羽毛球下落的最大速度，也是本次实验的核心观测参数。

1.3 理想模型与实际运动差异

理想自由落体模型是在真空无阻力的环境当中，物体的加速度是恒定的，其速度、位移会随着时间均匀地变化。羽毛球受到空气阻力的影响持续存在，整个下落过程都没有匀加速阶段，速度有着上限，当处于相同的下落高度时，它的下落时间更长，落地速度也更小。两者之间存在的明显差异，直观地展现了空气阻力对轻质物体运动所产生的决定性作用，并且验证了理想物理模型的适用局限性。

2 实验设计与实施

2.1 实验目的

（1）定量验证羽毛球下落过程中空气阻力与速度平方的正比例规律；

（2）测量羽毛球终端速度，计算恒定环境下的空气阻力系数；

（3）量化理想自由落体与实际下落的运动参数差异；

（4）分析实验误差来源，完善生活化物理实验探究流程。

2.2 实验器材

标准训练羽毛球、高精度电子天平、3m 竖直刻度尺、水平仪、60 帧高清摄像设备、三脚架、搭载 Tracker 软件的电脑。经多次测量，实验用羽毛球平均质量 m=4.85g=0.00485kg，符合通用标准参数。本次所用器材均为中学物理探究常用设备，操作简便、数据可靠，具备良好的普适性。

2.3 实验变量控制

自变量为羽毛球下落瞬时速度，因变量为对应空气阻力大小。实验全程在密闭无风室内开展，控制空气密度恒定；使用同一支羽毛球，保证质量、外形、迎风面积不变；统一拍摄高度、角度与距离，规避环境变量干扰。

2.4 实验步骤

首先建立实验环境，把刻度尺竖直固定在墙上并进行校准，确保没有倾斜偏差，手机固定在三脚架上，镜头垂直于刻度尺，拍摄帧率设定为 60 帧每秒。之后进行预实验调试，将 2.8m 作为下落高度固定好，羽毛球竖直静止释放，确认画面清晰、运动轨迹完整无偏移。为了减少偶然误差，连续做了 10 组重复实验，统一了释放姿态与高度，从中筛选出 8 组不受气流干扰、没有姿态偏移的有效视频数据。最后把视频导入 Tracker 软件，标定物理标尺，逐帧追踪球头位置，提取位移、瞬时速度数据，生成运动图像，记录终端速度参数。

3 实验数据处理与结果分析

3.1 核心数据计算

经软件解析与数据平均处理，测得羽毛球竖直下落终端速度平均值 $v_m=6.78m/s$，与标准参数高度吻合，实验数据可信度高。根据终端速度受力平衡条件 $mg=Cv_m^2$，推导阻力系数公式并代入数据计算：

$$C=\frac{mg}{v_m^2}=\frac{0.00485\times 9.8}{6.78^2}\approx 0.00103N\cdot s^2/m^2$$

选取 5 组不同下落瞬时速度，对比实际阻力与理论阻力的误差，验证规律适配性，数据如下：

组别	瞬时速度 v(m/s)	速度平方 $v^2(m^2/s^2)$	实际阻力 f(N)	理论阻力 $Cv^2(N)$	相对误差（%）
1	2.01	4.04	0.0041	0.0042	2.38
2	3.25	10.56	0.0108	0.0109	0.92
3	4.58	21.07	0.0215	0.0217	0.92
4	5.62	31.58	0.0321	0.0325	1.23
5	6.78	45.97	0.0475	0.0473	0.42

3.2 规律验证与图像分析

根据实验数据绘制 $f-v^2$ 拟合图像，图像为标准过原点直线，线性相关系数 $R^2 \approx 0.998$，证明羽毛球下落速度区间内，空气阻力与速度平方呈严格正比例关系，平方阻力模型适配性良好。结合 v-t 图像分析可知，羽毛球下落 0.8s 后速度趋于稳定，进入匀速下落状态，受力完全平衡，与前期理论分析完全一致。

3.3 理想与实际运动参数对比

以下落高度 2.8m 为标准，对比两种运动模型参数。理想自由落体计算得：下落时间 0.76s，落地速度 7.45m/s。实验实测羽毛球下落时间 1.28s，最大速度 6.78m/s。数据显示，空气阻力使羽毛球下落时间延长 68%，落地最大速度降低 9%，充分说明空气阻力是影响轻质物体运动的核心因素，理想模型无法适配该类运动场景。

4 误差分析与实验改进

4.1 误差来源

系统误差是本次实验中一种固有的、难以完全消除的误差类型，它会对实验数据的精准度产生持续性影响。虽然实验选择了密闭无风的室内环境，然而自然空气的微弱对流无法杜绝，细微气流扰动会轻微改变羽毛球的受力状态，使得下落速度出现小幅波动。与此同时，室内温度、湿度的实时细微变化，会间接改变空气密度，进而致使空气阻力系数出现微小浮动。在理论建模方面，本次采用单一速度平方阻力模型，羽毛球下落初始的极低速度阶段，流体黏滞效应带来的速度一次方阻力会轻微作用于球体，这使得理论模型与真实受力存在小幅偏差。另外，刻度尺、电子天平的仪器精度有限制，拍摄帧率有细微波动、软件标定存在像素误差，这些共同构成了实验固有的系统误差。

偶然误差主要来自实验操作、数据处理方面的人为因素，其随机性较强，能够通过优化操作予以大幅削弱。此次实验采用人工手动释放羽毛球的方法，受限于手部操作精度，难以达成绝对静止、绝对竖直的理想释放状态，偶尔会出现球体轻微偏转、球裙舒展角度不一致的情形，这直接改变了球体瞬时迎风面积，导致对应空气阻力产生细微变化，进而干扰运动数据的稳定性。Tracker 软件逐帧标定球头位置时，依靠人眼进行识别定位会产生轻微视觉偏差，每一帧的微小定位误差累积后，会使个别瞬时速度、位移数据小幅偏移，最终对实验拟合结果的精准度造成一定影响，是实验数据波动的重要人为原因。

4.2 优化改进方案

本次实验中出现的各类误差问题，根据高中实验的实际操作条件，制定了具有针对性的优化改进方案。针对因人工释放造成的姿态偏差，能自制一个简易的固定机械释放支架，把羽毛球的初始位置和竖直姿态精准地固定好，达成无接触的平稳释放，彻底避免因人为操作而产生的初始状态误差。为了消除环境干扰，可选择恒温恒湿的密闭实验空间，稳定空气密度、隔绝气流扰动，保障实验环境具有统一性。并且进一步扩大实验样本容量，增加重复实验组数，通过对大量有效数据进行平均化处理，抵消单次实验的随机误差。针对理论模型偏差，可采用分段建模思路，在低速下落区间叠加一次方阻力修正，于高速区间沿用平方阻力模型，以此提高理论拟合精度。

5 探究结论与拓展应用

5.1 核心结论

此次探究依托物理课堂力学与运动学核心知识，借助理论建模、定量实验验证，获得四项严谨的探究结论。其一羽毛球竖直下落全过程中空气阻力严格遵循平方阻力规律，符合公式 $f=Cv^2$，本次实验测得阻力系数稳定在 $0.00103N \cdot s^2/m^2$，数据拟合精度很高，验证了模型的有效性。其二羽毛球不存在匀加速下落阶段，整个过程是加速度持续减小的变加速直线运动，速度增速随着阻力增大不断放缓，最终稳定在 6.78m/s 的终端速度匀速下落。其三理想自由落体模型有明确适用边界，只适配高密度、小体积重物，无法解释轻质大迎风面积物体的运动规律。其四本次探究完善了物理课堂运动学模式，填补了课本变力变速运动的探究空白，达成了理想模型到真实运动的认知延伸。

5.2 生活与运动拓展应用

此次实验得出的空气阻力平方规律，既能解释基础物理现象，又可广泛用于生活场景、体育运动实践之中。在羽毛球运动中，球头质量集中且球裙迎风面积大，二者受力存在差异，使得球体受到空气阻力后自动调整运动姿态，始终保持球头朝前向下，以此保障飞行轨迹稳定。专业运动员的杀球、吊球战术都是依靠这一阻力特性。高速杀球时，阻力随着速度平方而迅速增大，球速快速降低，落点

精准且可控，低速吊球时，阻力影响很小，球体下落比较平缓，实现战术牵制。另外，生活中高空跳伞的终端速度控制、降落伞减速缓冲、雨滴匀速下落等现象，都是重力与空气阻力受力平衡的体现，充分展示了物理课堂规律贴合生活、指导实践的实用价值。

6 探究感悟与反思

本次探究突破了课本里那种被动刷题的学习模式，走完了从现象发现、模型建立、实验验证到最后规律总结的整个探究流程。过去学习的时候，只是把自由落体模型当作解题工具，忽略了模型的适用条件还有和现实之间的偏差。经过自主实验探究，深刻领会到物理建模的核心逻辑：理想模型是简化问题的学习工具，真实的物理运动常常受到多种力的共同影响，只有结合实际去修正模型，才能符合客观规律。在实验过程中，细微的环境干扰、操作偏差都会对数据结果产生影响，让我体会到物理学科严谨求实的科学精神。而且通过自主处理实验数据、拟合图像、分析误差，有效提高了物理建模与实验探究能力，弥补了课堂实验探究深度不足的问题。这次探究仍有局限性，只研究了竖直静止下落场景，没有涉及倾斜下落、气流干扰等复杂场景。后续可以进一步拓展探究维度，完善羽毛球完整飞行轨迹的物理模型，深化对变力变速运动的认知。

参考文献：

[1] 林颂词，肖家旗，卢慧颖等. 基于仿真模拟的羽毛球飞行动力学研究[J]. 文体用品与科技，2026(7):59-62.

[2] 胡海涛，喻孜. 羽毛球高吊杀中的简明物理学原理及教学实践[J]. 运动精品，2021,40(4):87+89.

[3] 刘华秋. 基于机器学习的羽毛球机器人回球策略的研究与实现[D]. 电子科技大学，2020.

[4] 何强. 如何打好羽毛球的研究——基于高中力学知识对羽毛球运动规律的分析[J]. 课程教育研究，2019(6):208-209.

作者简介：王妙心（2009.05-），女，汉族，北京市，学生。