

《平抛运动演示器通用要求》（征求意见稿）编制说明

1 起草工作简要经过

1.1 任务来源

“探究平抛运动的特点”是高中物理学生必做的实验，普通高中物理课程标准（2017版）在必修2模块中要求：“通过实验探究并认识平抛运动的规律。会用运动合成与分解的方法分析平抛运动。体会将复杂运动分解为简单运动的物理思想。能分析生产生活中的抛体运动。”根据上述标准要求，高中物理教材对实验的要求是：“能够描绘连续运动轨迹，在水平和竖直方向上分析其运动规律”。

如上所述原因，鉴于现有的实验仪器种类较多，但能够完成课堂演示用的实验仪器并不规范。为了保证教学质量，需对适合演示器制定产品标准。为此，“全国教育装备标准化技术委员会力学、热学分技术委员会”于2022年4月印发了教育行业标准力学、热学第一批制修订计划。由山东远大朗威科技股份有限公司（以下简称山东远大）承担制定《平抛运动演示器》行业标准的任务，项目编号：Jyzblr-2022-06。

1.2 起草本标准做的准备工作

起草人通过查阅相关资料，并与业内专家进行了广泛的交流，了解并分析了20世纪80年代以来能进行平抛运动实验的教具方案及技术特点，以及可以用于运动体轨迹显示的方案（包括的产品或者自制教具）：

a) 教具方案：

- 电晕潜影式：在高压电场中火花放电，在钢板书写的油印蜡纸上产生静电潜影，用粉笔灰显影，来源于山东省的自制教具，后来成为“运动轨迹显示仪”产品；
- 运动轨迹液点显示仪：由运动体定频喷射清水，在水写纸上显示，曾经是产品；
- 使用喷水方式，储水器上部空气与大气相连，使下部喷出的水流压强基本稳定而保持水平初速度，水流为细小的层流，形成连续的轨迹，在有二维直角坐标系的立式图板前面经过，从坐标上读出平抛轨迹的坐标。这曾经是2004年浙江省的自制教具，在21世纪初高中物理教科书中被作为平抛运动的演示教具，曾经获第六届全国优秀自制教具评选二等奖；
- 二维空间一时间描迹仪：在高压电场中电火花放电，由誊印蜡纸（碳粉纸）转印到白纸上，可做平抛、验证向心力、简谐振动实验。现在还有此产品；
- 平抛运动实验器：钢球从平抛轨道上抛出后在立式图板不同位置用水平挡板将钢球截住，在相应位置描点，手工连接轨迹曲线，现在还是学生实验仪器；
- 使用幼儿用磁板的方案，磁性笔在磁板表面划过显示轨迹，在磁板背面用磁钢消除轨迹，能重复使用，轨迹较粗；早就有过这种自制教具；
- 使用计算机实验数据采集系统，由二维运动传感器作平抛物体，采集数据后在计算机上显示轨迹和数据，由计算机处理数据；
- 使用近紫外LED频闪发光，照射在光影画布上产生荧光，约5m秒后自动消失。2016年出现了使用这种方案的自制教具（浙江省），用于轨迹显示（平抛、自由落体、弹簧振子图像）。

b) 显示技术:

- 电火花描迹仪: 使用电子电路产生脉冲高压, 击穿 20mm 空气隙, 在记录纸上形成黑点, 曾经是产品;
- 使用电火花计时器, 由电火花放电将碳粉纸上的碳粉转印到白纸上产生黑点, 现在广泛用在学生实验中;

目前能够完成平抛运动常规的实验器材有如下几种: 1、平抛竖落仪, 同时释放平抛和自由下落的两个小球, 观察两小球的落地同时; 2、用频闪照相机(或数码摄像机)拍摄记录平抛运动物体的轨迹, 把图像放在方格纸上, 进行人工分析; 3、用二维运动传感器测出小球运动过程中坐标值, 在软件上显示不同时刻的位置, 并使用计算机软件进行分析, 得出水平方向和竖直方向的投影点, 并分析其运动规律; 4、用电磁定位系统测出小球运动过程中的平面坐标值, 通过计算机软件进行数据处理与分析, 得出在水平与竖直方向上的运动规律。

起草人自 2004 年起, 参与制造并试验了三代借助于传感器的平抛运动实验产品, 第一代平抛运动实验器可测量平抛运动小球初速度、抛出距离及下落时间; 第二代产品通过超声波测距技术, 实时测量记录平抛运动物体在平面中的坐标值, 并通过软件描绘出运动轨迹, 该实验方案在人教社物理教材必修 2 中有所介绍。第三代产品采用电磁波定位技术, 相比于超声测距技术, 第三代产品在精度及稳定性上都有所提升。起草人对平抛运动演示器的应用有足够的研究和良好的知识储备, 特别是对于实验领域二维测量最新技术的应用有着足够的了解, 具备了编写相关产品标准的能力。

2 平抛运动演示器在教学中的用途和要求

2.1 基础知识

高中物理平抛运动内容是建立在几方面知识基础上的:

——惯性定律: 物体在没有受到合外力作用时总保持静止或匀速直线运动状态;

——牛顿第二定律: 表达式 $F = ma$, 写成 $a = \frac{F}{m}$, 当 $F \rightarrow 0$ 时, $a \rightarrow 0$, 就是惯性定律。

牛顿第一定律是第二定律的特例, 因此力是改变物体运动状态的原因, 不是维持物体运动的原因。物体运动状态包括速度的大小和方向。这是力学部分重要的基本概念。

物体作匀加速直线运动的运动路程: $s = \frac{1}{2}at^2$, 如果是自由落体运动, 加速度

$a = 9.8\text{m/s}^2$, 记为 g (重力加速度), 因此自由落体运动的下落高度: $h = \frac{1}{2}gt^2$ 。

曲线运动的条件: 存在与物体运动的速度方向成角度的力作用, 物体运动速度的方向和大小都改变。

运动的合成与分解:

- 正交方向两个分运动都是匀速运动, 合运动是一直线, 两个分运动速度不同, 斜率不同;
- 正交方向两个分运动, 其中一个是匀速运动, 另一个是匀加速运动(加速度为正), 合运动是一曲线, 向匀加速运动方向偏转;
- 正交方向两个分运动, 其中一个是匀速运动, 另一个是匀减速运动(加速度为负), 合运动是一曲线, 向匀加速运动的反方向偏转;
- 还可使上述两个分运动中的一个为变加速运动(加速度正、负变化), 合运动是一向两侧弯曲变化的曲线。

如果运动合成与分解的教具如能有这样的功能，那么对运动合成内容的掌握能更深入一点。

合运动的分解是运动合成的逆过程，是寻找形成合运动的原因，也是研究平抛运动的前奏。

2.2 研究平抛物体运动的过程

首先观察平抛运动的轨迹图像，从轨迹的形状，结合上述基础知识，并且根据产生平抛运动的过程，可知道：

- a) 由于物体没有动力，因此物体被抛出后在水平方向是依靠惯性运动，根据惯性定律，应该是匀速运动；
- b) 地球上的一切物体都受到地球引力（表现为重力）作用，物体被抛出后由于没有支撑物，必然要下落。因此平抛物体的轨迹必然是曲线运动。根据第二定律，向下分运动是匀加速运动，并且加速度应该等于重力加速度，那么是自由落体运动。

以上是根据已经学过的基础知识的分析过程。

平抛运动实验仪器是要验证上述分析过程是否符合实际的工具。

因此平抛运动实验仪器要求：

- a) 有起始阶段的完整轨迹；
- b) 有二维坐标系，能对平抛运动在纵、横两个方向的分运动进行分析；
- c) 经过对轨迹在纵坐标分量的分析：
 - 1) 首先验证了在相等的时间间隔，运动距离的纵坐标符合平方关系，这就是验证了平抛物体竖直方向是匀加速运动；
 - 2) 横坐标方向在相等的时间间隔通过的距离相等，因此验证了平抛物体在水平方向是匀速运动。
- d) 但是到此验证还没有完：匀加速运动不一定是自由落体运动。要验证平抛运动在竖直方向的分运动是自由落体运动，需要计算在竖直方向的加速度。如果此加速度 $a = g$ ，那么就验证了平抛运动在竖直方向的分运动是自由落体运动。
- e) 通过作平抛运动的物体的下落过程时间信息和下落的高度信息，计算加速度；如果轨迹缺乏时间信息，则需要与其他教具（例如平抛竖落仪）比对，得到此结论。如果有时间信息并且可用，摄像时背景需有标度尺，显示实际的高度信息。如果既有时间信息又有与其对应轨迹点的坐标值，可以通过公式计算，得到结论。知识体系见附录。

3 技术方案

3.1 原理和方案

首先需要显示平抛运动开始阶段的完整轨迹，否则没有最初的形象化概念。这里强调首先需要对平抛运动轨迹的整体有个认识后再来研究。

此处之所以强调“起始阶段”，是因为下落物体如果不遇到障碍物将一直下落，显然因为教具大小有限，能够显示的轨迹只是开始阶段的一部分，不需要（也不可能）是全部。

还需要有坐标才能进行分析。坐标原点应该是在物体开始做平抛运动位置的坐标。

轨迹可使用频闪轨迹（离散）或者连续轨迹。

人教社教材推荐了两种实验方案，第一种：物体经过相等时间间隔所到达的位置就是频闪轨迹（当然频闪的频率是固定的），因此各时间间隔相等。到达的位置需要在坐标系中读取，并且应该是实际距离（不是放大或缩小了的距离）。在此方案中需要有平抛物体运动

的时间信息。第二种：先研究其中一个方向的运动规律，再研究另一个方向的运动规律。可用频闪轨迹，也可用连续轨迹。在这两种方案之后，教材又介绍了拓展学习，“用传感器和计算机描绘物体做平抛运动的轨迹”，介绍了传感器测量位置的原理及实验结果。与常规方案不同的是，传感器描绘的平抛运动轨迹是先测量出抛体在运动过程中，相同时间间隔时的坐标值，然后在设定的坐标系内再描绘出轨迹点。即是先有数据后有图像的一个过程。所以其分析方法，除了直观的观察之外，可以直接利用数据（坐标值与时间信息）计算出在两个方向上的速度或加速度。当然计算的方式可以用计算机完成，也可以用手工完成。

演示实验需要简明，因此宜在相等的时间间隔轨迹处用明显的标志线标出，那么将会很明显看到在竖直方向相等的时间间隔的下落高度符合平方关系，这就验证了在竖直方向是匀加速运动（但是还未验证就是自由落体运动）。再读出在轨迹通过坐标上竖直方向各相等时间间隔标志处的横坐标，发现是间隔相等的，因此验证了在水平方向是匀速运动。

因为连续轨迹中没有时间信息，频闪轨迹如果不标出频闪频率则也没有时间信息。要验证平抛运动的物体在竖直方向是自由落体运动，就需要与确定是自由落体运动的其他教具[例如平抛竖落仪，二维时间—空间描述仪（能计算出竖直方向的加速度值）也可使用]配合，才能最终得出结论。

3.2 显示技术

以上共有 10 种显示方案，其中有的可见度太小，用于学生实验可以，用于演示实验不适合。适合于演示实验的显示技术一直是一个问题。要求如下：

a) 可见度：

不仅显示内容可见度适合，而且还要求板面适合，例如使用油印蜡纸版面则较小。可见度还不仅是大小，还有对比度，需适合在普通光照条件的室内使用。

b) 能方便地反复使用：

例如水写纸方案，虽能重复使用，但是在一堂课时间内如果纸不能干燥就无法再用，除非换纸，这就不方便了。

c) 消耗性费用低。

d) 快速，使用方便。例如胶卷照片需要在暗室中冲洗底片，印照片，烘干，并且可见度小，这就无法推广。

4 技术内容和方案

4.1 技术方案

根据上述分析，确定本文件的技术方案四种：

a) 使用计算机实验数据采集系统方案：

由传感器采集实验数据，由计算机显示轨迹图像、坐标和显示数据、分析。

b) 常规方案：

- 1) 频闪轨迹；使用近紫外 LED 照射光影画布产生荧光点；
- 2) 连续轨迹；使用同上的光影画布（连续照射）或者磁板；
- 3) 摄像，得到频闪照片，可使用频闪光源或者数码相机摄像后用软件处理。都需有坐标。

4.2 适合于演示实验的措施

适合于演示实验需要简明，直观，快速。因此基本要求如下：

a) 能形成起始部分的完整轨迹，作用是：

- 1) 观察平抛运动轨迹是曲线，以及曲线的弯曲方向，有利于运用已学知识分析平抛运动的特点；
 - 2) 便于进行坐标分析，得出平抛运动在竖直和水平两个方向分运动的特点。
- b) 轨迹与坐标的配合，可采取不同的方法：
- 1) 平抛物体的轨迹刚好通过纵坐标成平方关系的距离，但这不容易做到。例：如果要求频闪轨迹通过纵坐标为 1cm、4cm、9cm、16cm 的点，则频闪频率应为 22.14Hz，并且误差不大于 0.1Hz。
如果纵坐标是一些小数则不容易读数，并且不容易计算。学生实验可用，演示实验不合适。
 - 2) 如果立板纵向尺寸为 600mm，频闪频率为 10Hz~12Hz 时下落距离如下：

表 1 下落距离

频率 Hz	下落时间 s	频次	下落距离 mm
10	0.1	1	49
10	0.2	2	196
10	0.3	3	441
10	0.4	4	784
11	0.090909	1	40.5
11	0.181818	2	161.9
11	0.272727	3	364.5
11	0.363636	4	647.9
12	0.083333	1	34.0
12	0.166667	2	136.1
12	0.250000	3	306.3
12	0.333333	4	544.4
12	0.416667	5	850.7

所以对频率的最低要求是 12Hz，可显示 4 个相等间隔时间，加上 0 点，图像上有 5 个点。10Hz 和 11Hz 只能显示 3 个。如果频率误差在 $\pm 0.1\text{Hz}$ ，则下落距离误差约在 2%。如果在 $\pm 0.2\text{Hz}$ ，则下落距离误差约在 4%。计算略。误差不宜再大。所以，推荐使用频率为 12Hz~25Hz。用传感器测量的数据，因技术方面的原因，频率要求大于等于 50Hz。

- 3) 频闪轨迹的频率能调节。
- 4) 在轨迹通过纵坐标为平方关系的距离时，同时标出横坐标，即如图 1，则用于演示实验就很清晰。这就需要调节平抛物体的水平初速度，可调节物体在平抛轨道上的位置。
- 5) 坐标的单位应该是厘米。但是图 1 中纵坐标符合平方关系时不一定是整数（例如 1cm、4cm、9cm、16cm、...），因此本文件要求另加不同颜色的标志线（是在坐标线之外的标志线）。

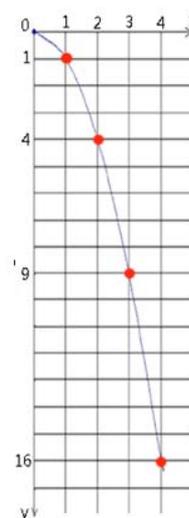


图 1 用于演示实验很清晰

- 6) 连续轨迹只需调节物体在平抛轨道上的初始位置，即调节水平初速度。
- c) 匀加速运动不一定就是自由落体运动，因此实验中上述步骤还不够。解决方法：
- 1) 验证竖直方向是自由落体运动的方法首先是计算加速度，如果加速度等于重力加速度就可以了。计算的条件是有时间信息，并且坐标上的距离是实际距离(而不是用直尺测量照片或图像中经放大或缩小的距离)。
 - 2) 用计算机的方案，由于有时间信息，因此能够通过计算演示，另一个条件是得到坐标的实际距离，因此需要规定坐标误差。
 - 3) 频闪轨迹如果有频闪频率的显示，并且有误差控制，那么只需坐标值是实际长度即可。如果频闪频率没有标示，或者误差较大，则无法通过计算验证。
 - 4) 连续轨迹没有时间信息，因此无法计算。剩下的可行方案只有使用配套教具，例如平抛竖落仪。二维空间一时间描述仪也可用。
 - 5) 摄像方案是指使用频闪光源，或者还有用数码相机摄像后用软件分解成单帧图片再重叠生成类似于频闪照相那样的图像。如果不是准确知道频闪频率，或者误差较大，就只能使用配套教具验证。

如果使用的频闪光源知道频闪频率，并且误差符合要求，则在拍摄时背景中需要有标尺指示实际距离。

4.3 结构

考虑是演示实验仪器，有可见度要求，因此推荐立板尺寸为 $0.6\text{m} \times 0.6\text{m}$ 。

结构方面还有几个关键：

- a) 平抛轨道（或者弹射装置）方向应水平；
- b) 坐标原点应在抛体在开始作平抛运动位置的中心，见图 2（图中 O 点）；

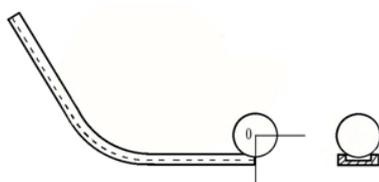


图 2 物体开始做平抛运动位置的中心

- c) 弹射装置，不同的档位调节抛体的初速度，并且应保证抛体水平抛出；
- d) 纵横坐标的垂直度，横坐标的水平方向的误差；
- e) 立式图板的平面度，与水平面垂直，有调节和校准装置；
- f) 关于坐标线的要求；
- g) 有回收装置；
- h) 关于软件的要求。软件包括：
 - 1) 计算机方式使用的软件；
 - 2) 频闪照片方式，在屏幕上显示后需要另加坐标。
 规定了软件的可靠性、基本功能和易用性的基本要求。

4.4 实验误差

4.4.1 用计算机的方案

4.4.1.1 下落高度误差

4.4.1.1.1 计算方法

竖直方向下落高度： $h = \frac{1}{2}gt^2$ ，根据间接测量误差传递关系，下落高度的相对误差应该是 $\frac{\Delta h}{h} = \frac{\Delta g}{g} + 2\frac{\Delta t}{t}$ ，但是这里的 g 不存在误差（现在并没有测量 g ，并且 g 也不可能变化），所以应该是 $\frac{\Delta h}{h} = 2\frac{\Delta t}{t}$ 。

4.4.1.1.2 竖直方向相等时间运动距离

如果物体的频闪频率与采样频率不一致，那么误差必然是周期性的，在时间间隔的最小公倍数时误差最小。

可做一个试验：以下是两个边长不一样的方格，重叠时左面对齐，其余方格线一般都不可能对齐，有误差。但是在某一个位置又是对齐的（图3中红色箭头处），之后又产生误差，是周期性的。这是一种数学规律。因此如果平抛物体的频闪频率与采样频率不一致，也必然存在这种现象。

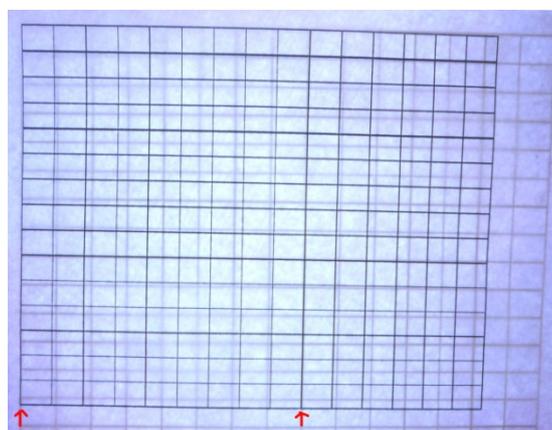


图3 边长不同的方格的周期性重合

坐标误差 2mm 的含义：如图4，如果没有误差，图中深色轨迹点中心应该在图中坐标 0 处。由于有误差，轨迹点中心可能在以 0 为圆心的区域内，即横坐标为（-2，2）和纵坐标为（-2，2）的范围内，那么轨迹点可能的范围为图4中的灰色区域。

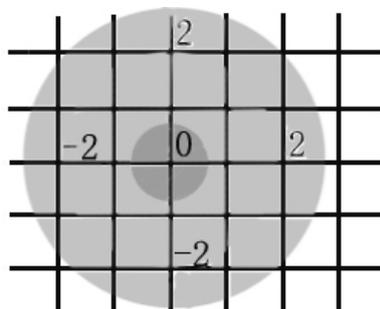


图4 坐标误差 2mm 的含义示意图

当然这是最大误差，实际不一定有这么大。
计算 2mm 坐标误差引起的竖直方向误差，如表 2。

表 2 1~4 点竖直误差

时间 s	下落距离 mm	竖直误差 mm	相对误差 %	以第 4 点为基准的 相对误差 %
0.05	12.25	2	16.3	1.0
0.10	49	2	4.1	1.0
0.15	110.25	2	1.8	1.0
0.20	196	2	1.0	1.0
平均	—	—	5.8%	—

计算 2mm 坐标误差引起的竖直方向误差，如表 3。假设第四点的水平距离为 300mm。

表 3 1~4 点水平误差

时间 s	移动距离 mm	水平速度 m/s	水平误差 mm	相对误差 %	以第 4 点为基准的 相对误差 %
0.05	75	1.5	2	2.6	0.67
0.10	150	1.5	2	1.3	0.67
0.15	225	1.5	2	0.89	0.67
0.20	300	1.5	2	0.67	0.67
平均	—	—	—	1.37	—

如果 $\frac{\Delta t}{t} \leq 2\%$ ，那么在水平方向相等时间间隔运动距离均匀不大于 3% 能够达到。

4.4.1.1.3 验证竖直方向下落距离误差

设：按测量时间间隔相等的第 1、2、3、4 轨迹点中心内的纵坐标 h_1 、 h_2 、 h_3 、 h_4 ，以 h_4 为计算基准，按下式计算附基准 h_1 、 h_2 、 h_3 的应有的位置：

$$h_1 = \frac{1}{16} h_4 \quad h_2 = \frac{1}{4} h_4 \quad h_3 = \frac{9}{16} h_4$$

计算竖直方向下落距离的相对误差：

用钢直尺测量第 1、2、3 点实际下落距离 $h_{1测}$ 、 $h_{2测}$ 、 $h_{3测}$ ，计算 $h_{1测}$ 、 $h_{2测}$ 、 $h_{3测}$ 与 h_1 、 h_2 、 h_3 的相对误差：

$$\delta_1 = \frac{h_{1测} - h_1}{h_1} \times 100\% , \quad \delta_2 = \frac{h_{2测} - h_2}{h_2} \times 100\% , \quad \delta_3 = \frac{h_{3测} - h_3}{h_3} \times 100\%$$

δ_1 、 δ_2 、 δ_3 各点应小于 5%。

4.4.1.1.4 验证竖直方向加速度

4.4.1.1.4.1 竖直方向加速度试验方法不需要按 $g_i = 2K_i$ ，即不需要计算 g_i 。因为 g 不可能改变，实验中没有测量 g 。实验中需要验证竖直方向匀加速运动的加速度是 g ，原因是因为没有理由说匀加速运动的加速度一定是 g 。而这里 g 的误差是由 h 倒算的结果。但 h

是有误差的， $\frac{\Delta h}{h} = 2 \frac{\Delta t}{t} + \frac{\Delta h}{h} \cos \alpha$ 。如果再按照 $g = \frac{2h}{t^2}$ 倒算，那么 $\frac{\Delta g}{g} = \frac{\Delta h}{h} + 2 \frac{\Delta t}{t} =$

$4 \frac{\Delta t}{t} + \frac{\Delta h}{h} \cos \alpha$ ，其中有重复计算。

需要观察竖直方向的加速度是多大。按研究的最后一点的下落距离计算加速度：如果共研究 4 点，那么 $a = \frac{2h_4}{t_4^2}$ ，式中： h_4 ——观察研究轨迹的最后一次下落距离， t_4 ——观察研究轨迹的最后一次下落时间。

4.4.1.1.4.2 t_4 的获得

(1) 常规频闪方案

根据标准 6.7 条测得的频闪频率，按标准 (6) 式计算每次频闪的时间间隔，再乘以在第 4 观察点处共有 A 轨迹点的数量，得出 t_4 的值。

(2) 计算机实验数据采集系统方案

用相对误差不大于 0.1% 的光电门传感器测量从开始运动到第 4 轨迹点的下落时间。

4.4.1.1.4.3 计算竖直方向加速度和与重力加速度的相对误差

按标准 (7)、(8) 式计算。

使用准确度不低于 0.1 级的频率表，按 (7) 式计算，加速度 a 的相对误差：

$\frac{\Delta a}{a} = \frac{\Delta h_4}{h_4} + 2 \frac{\Delta t_4}{t_4}$ ，根据表 3 第 4 点的相对误差为 0.81%，如果 300mm 长钢直尺的绝对误差为 $\pm 0.15\text{mm}$ ，则相对误差为 0.08%， $\frac{\Delta h_4}{h_4} = 0.89\%$ ， $\frac{\Delta t_4}{t_4} = 0.1\%$ ，则 $\frac{\Delta a}{a} \leq 3\%$ 没有问题。

4.4.1.1.5 水平方向相等时间运动距离

因为第 4 点相对误差最小，因此只需以第 4 点为基准，用钢直尺测量第 4 点的水平运动距离 s_4 ，计算第 1、2、3 点应有的运动距离（为第 4 点运动距离的 1/4、2/4、3/4）的相对误差。

设第 1、2、3、4 点的水平运动距离分别为 s_1 、 s_2 、 s_3 、 s_4 ，以 s_4 为基准，则 $s_1 = \frac{1}{4} s_4$ ， $s_2 = \frac{2}{4} s_4$ ， $s_3 = \frac{3}{4} s_4$ 。 s_1 、 s_2 、 s_3 为副基准。

用钢直尺测量第 1、2、3 点的水平运动的实际距离 $s_{1\text{测}}$ 、 $s_{2\text{测}}$ 、 $s_{3\text{测}}$ ，再计算 $s_{1\text{测}}$ 、 $s_{2\text{测}}$ 、 $s_{3\text{测}}$ 与 s_1 、 s_2 、 s_3 的相对误差：

$$\delta_{1\text{水平}} = \frac{s_{1\text{测}} - s_1}{s_1} \times 100\% , \quad \delta_{2\text{水平}} = \frac{s_{2\text{测}} - s_2}{s_2} \times 100\% , \quad \delta_{3\text{水平}} = \frac{s_{3\text{测}} - s_3}{s_3} \times 100\%$$

$\delta_{1\text{水平}}$ 、 $\delta_{2\text{水平}}$ 、 $\delta_{3\text{水平}}$ 各点最大应小于 3%。

4.4.2 常规方案

4.4.2.1 频闪频率误差为 $\frac{\Delta t}{t}$ 。具体的绘制轨迹方式例如使用近紫外 LED 照射光影画布，存在一个从 LED 发光到光影画布产生荧光的时间间隔。产生荧光不可能早于接收到闪光，必然是延时的，因此 (1) 轨迹位置不可能有负误差；(2) 荧光位置必然在开始照射结合受到光照的

位置。由于闪光有一段持续时间，而物体在运动，所以轨迹点必然是向运动方向被拉长的。如果轨迹点基本是圆的，则可忽略此误差，并且这个延时也很难测量。

4.4.2.2 竖直方向相等时间运动距离

计算由频闪误差引起的下落距离误差如下：

12Hz	±0.1Hz	-1.64%~1.68%
	±0.2Hz	-3.25%~3.41%
	±0.3Hz	-4.81%~5.19%
25Hz	±0.1Hz	-0.80%~0.80%
	±0.2Hz	-1.58%~1.62%
	±0.3Hz	-2.36%~2.44%
	±0.4Hz	-3.12%~3.27%

因此如果规定试验误差不大于5%，就不需要再规定频闪误差，频闪误差由生产企业掌握。如果实验误差大，减小频闪误差即可。

与使用计算机的方案相比，常规方案没有附加的坐标误差（2mm）。

4.4.2.3 验证竖直方向加速度

如果规定此项误差不大于3%没有问题。

4.4.2.4 水平方向相等时间运动距离

与使用计算机的方案相比，常规方案没有附加的坐标误差（2mm）。

因此此项误差仅由频闪误差引起。规定变化与2.5%没问题。

4.5 环境试验

环境试验仪规定了运输和贮存中需要具有的环境适应性：堆码和包装状态自由跌落。

5 关于本文件的名称和范围

考虑到平抛运动演示器方案较多，本文件仅对必须的基本要求作规定，因此较适合于作为通用要求，建议名称改为“平抛运动演示器通用要求”。

本文件作为平抛运动演示器通用要求，规定了用计算机的方案和常规方案。采用其他设备拍摄频闪照片可参照。

6 试验方法和检验规则

6.1 试验方法

6.1.1 试验方法中基本都是常规试验，对实验误差和软件试验说明如下：

6.1.2 因为是演示实验仪器，频闪轨迹点是直径并非很小的圆，严格说应以圆心处为测量点，但是实际上只要在轨迹点位置上，稍有偏差并没有影响，并且由于种种原因存在误差：

——频闪频率误差；

——采样频率与传感器频率不一致时，在两者频率的最小公倍数的整数倍时误差最小，误差呈周期性变化，有误差最大的时候；

——距离测量误差。

并且实验中最关心的是下落距离较大时的误差。因此本文件规定的试验方法以下落距离最大（例如16单位）为基准。如果以下落距离最小（例如1单位）为基准，那么在计算下落距离最大（例如16）时，误差也被放大了16倍。试验方法详见实验误差部分。其中测

量频率可用 0.1 级频率表。用计算机的方案可用相对误差不大于 0.1% 的光电门传感器。虽然这是教学仪器，但是比较方便。经过检定符合此误差要求的可用。

6.1.3 本文件规定了用计算机的方案，采样频率不小于 50Hz，原因是：本标准要求的坐标值误差为 2mm。当抛体开始抛出并下落距离是 2mm 时，下落的时间是 0.02s（见图 5），此时如果要采集到数据，采样频率应为 50Hz。从理论上推演，采集到的第一个点越接近坐标原点，分析的结果会越准确，所以，综合考虑采样频率不小于 50Hz。试验方法采用观察在平抛运动中竖直方向 200mm 距离内应不少于 10 个轨迹点，说明如下：

$$\text{按 } t = \frac{1}{f}, h = \frac{1}{2}gt^2 \text{ 计算（式中：} t \text{ 为下落时间，} f \text{ 为采样频率，} h \text{ 为下落距离，} g \text{ 为}$$

重力加速度，计算结果如图 5。图中 n 为次数。

g	f	n	t (s)	h (m)	$h+0.002$ (m)
9.8	50	1	0.02	0.0020	0.0040
9.8	50	2	0.04	0.0078	0.0098
9.8	50	3	0.06	0.0176	0.0196
9.8	50	4	0.08	0.0314	0.0334
9.8	50	5	0.10	0.0490	0.0510
9.8	50	6	0.12	0.0706	0.0726
9.8	50	7	0.14	0.0960	0.0980
9.8	50	8	0.16	0.1254	0.1274
9.8	50	9	0.18	0.1588	0.1608
9.8	50	10	0.20	0.1960	0.1980
9.8	49.5	1	0.02	0.0020	0.0040
9.8	49.5	2	0.04	0.0080	0.0100
9.8	49.5	3	0.06	0.0180	0.0200
9.8	49.5	4	0.08	0.0320	0.0340
9.8	49.5	5	0.10	0.0500	0.0520
9.8	49.5	6	0.12	0.0720	0.0740
9.8	49.5	7	0.14	0.0980	0.1000
9.8	49.5	8	0.16	0.1280	0.1300
9.8	49.5	9	0.18	0.1620	0.1640
9.8	49.5	10	0.20	0.2000	0.2020

图 5 采样频率换算为 200mm 距离内轨迹点数量的计算用图

从图 5 中可知，在 200mm 下落距离内，如果采样频率为 50Hz，则有 10 个轨迹点。如果采样频率低于 50Hz，则不可能有 10 个轨迹点。考虑 5.2.3.2 条规定的采集所的坐标值允许误差 2mm，此方法也适用。

此方法的可靠分辨力为 1Hz。如果采样频率为 49.5mm，当误差为 +2mm 时，则在 $h < 200$ mm 范围内，不可能有 10 个轨迹点，而当误差为小于 +2mm 或者为负时，有可能有 10 个点。但是实际上对实验效果没有影响。

6.1.4 关于平抛轨道水平段和弹射装置的水平方向。在图板位置校准以后，横坐标应当于水平面平行。要求平抛轨道水平段与横坐标平行，采用将钢球放在平抛轨道水平段上，能随遇平衡（不自由滚动）。弹射装置采用旋转 90°，横坐标方向向下，用重锤线校准，使图板面与重垂线平行，并且横坐标与重锤线平行，固定。这是弹射物体。如果弹射装置的弹射方向与横坐标平行，则轨迹也应与横坐标平行，因为此时重力方向与横坐标平行，所以物体被弹射以后不可能作曲线运动。

6.1.5 竖直方向加速度。因为平抛运动中竖直方向受到的力为重力，竖直方向加速度不会改变，因此按第四点下落距离计算。

6.1.6 软件比较简单，本文件对软件的试验仅在可靠性、功能性和易用性三方面，在安装

和使用中试验，并没有进行严格的软件测试。

6.2 检验规则

根据定型产品批量生产的特点，出厂检验项目中以下项目不检（仅在定型试验时检）：

- 总体要求；
- 软件要求；
- 环境试验。

所检项目多数是抽样检验。

以下项目需要全数检验：

- 测量范围和误差；
- 频闪轨迹；
- 立板的平面度；
- 立板的垂直度；
- 平抛轨道、弹射装置水平方向。

考虑各项目如有缺陷对实验的影响，只有软件的易学、易懂、易操，以及环境试验为 B 缺点，其余都为 A 缺陷

7 国内外有关标准对比

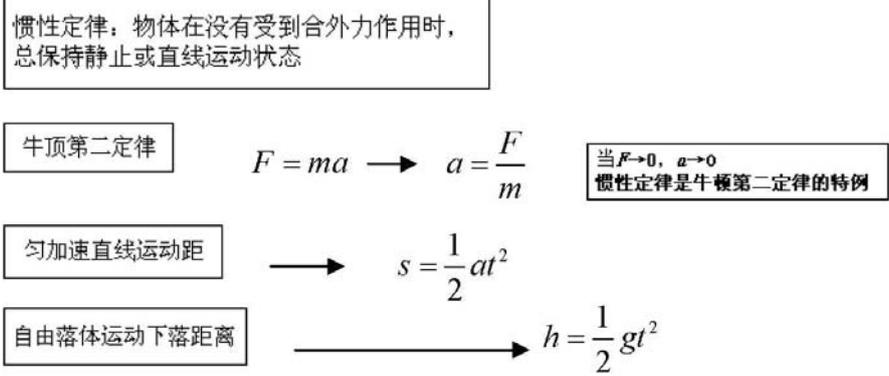
没有平抛运动演示器的有关标准。

附录：平抛运动的知识体系

起草人

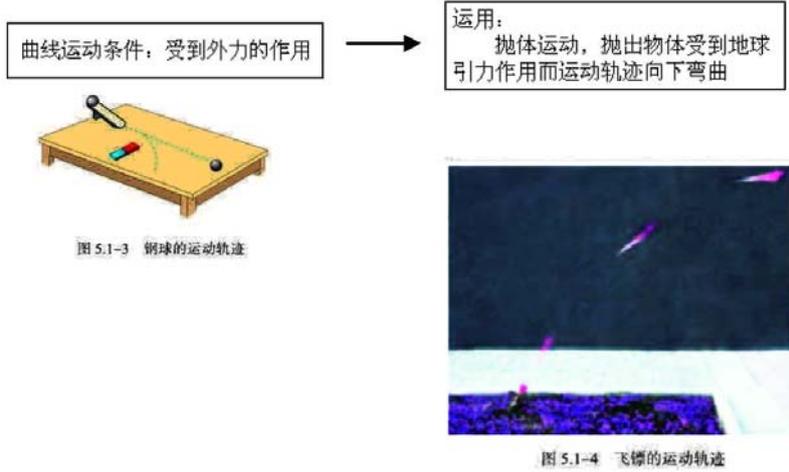
二〇二三年八月二十日

1 基础知识

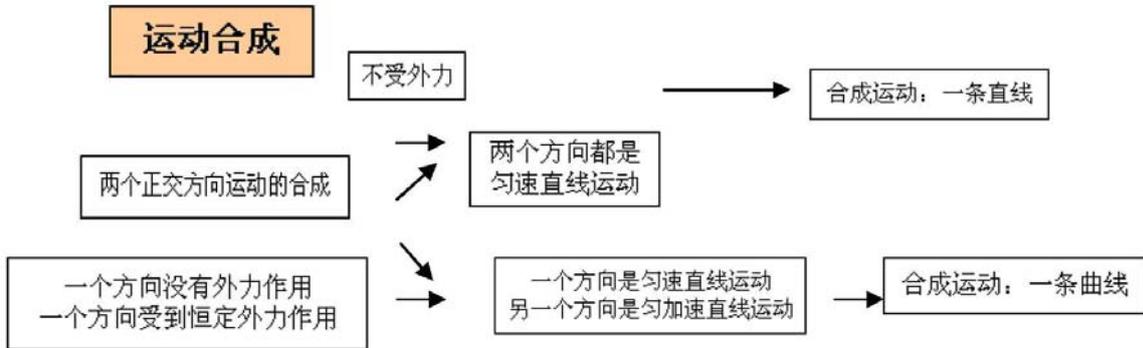


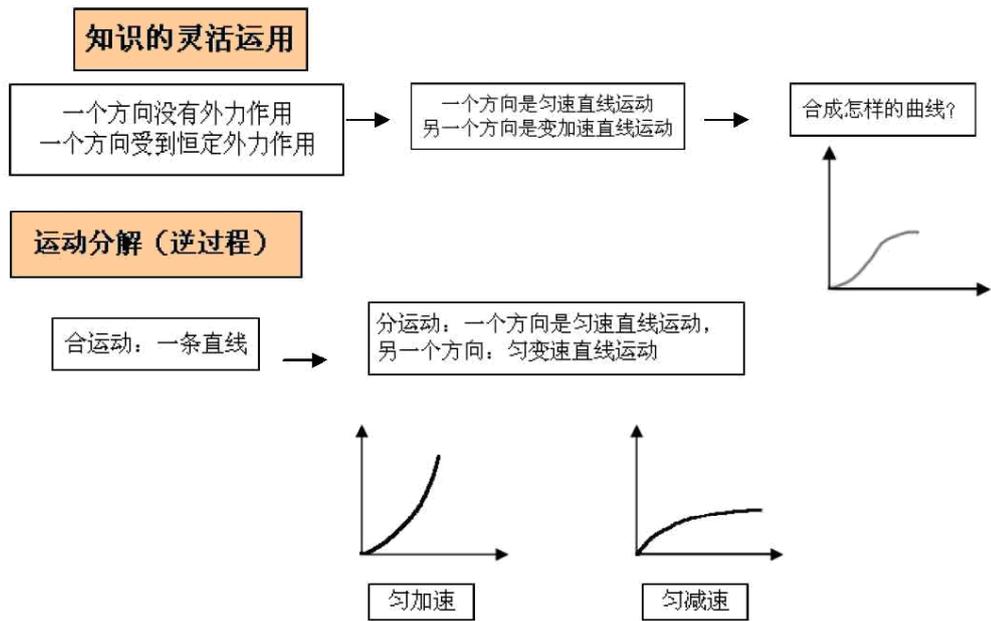
2 预备知识

(1) 曲线运动



(2) 运动的合成与分解





3 研究平抛运动

