

# 纸带下落过程中所受阻力的讨论

杨 君

(北京教育考试院 北京 100083)

(收稿日期:2016-09-26)

**摘要:**电磁打点计时器是中学物理教学的常用仪器,在实验过程中,纸带下落过程中受到摩擦阻力以及打点针对纸带冲击所带来的阻力,会对实验精度产生影响.从2016年高考北京卷和全国卷的物理试题切入,对纸带在运动过程中所受阻力进行了分析,建立了两种阻力大小的模型,并讨论了不同阻力模型对纸带运动的影响.

**关键词:**打点计时器 摩擦阻力 高考

打点计时器是一个能够按照相同的时间间隔,在纸带上连续打点的仪器,可用于记录做直线运动物体的位置和时间,作为一个基本仪器,在中学物理教学中广泛使用.目前在中学阶段,实验室一般会配备两种类型的打点计时器,电火花打点计时器和电磁打点计时器.由于两类打点计时器接入的电源不同,从安全角度考虑,目前中学广泛使用的为电磁打点计时器.电磁打点计时器使用的是学生电源,电压一般在6V以下.由于打点针对运动纸带的冲击和摩擦,对纸带的运动产生明显的阻力,对实验结果的可靠性和准确性产生较大影响.本文从2016年高考北京理综卷第21题以及全国理综卷(课标I)第22(2)题出发,对“验证机械能守恒定律”实验中,纸带在运动过程中所受阻力进行了分析,建立了两种阻力大小的模型,并讨论了不同阻力模型对纸带运动的影响.

## 1 试题及分析

**【试题1】**[2016年高考北京理综卷第21(5)题]利用如图1所示装置做“验证机械能守恒定律”实验.

某同学想用下述方法研究机械能是否守恒:在纸带上选取多个计数点,测量它们到起始点O的距离h,计算对应计数点的重物速度v,描绘 $v^2-h$ 图像,并做如下判断,若图像是一条过原点的直线,则重物下落过程中机械能守恒.请你分析论证该同学的判断依据是否正确.

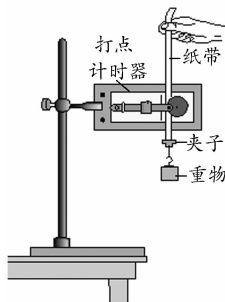


图1 试题1题图

**参考答案:**该同学的判断依据不正确.在重物下落h的过程中,若阻力f恒定,根据

$$mgh - fh = \frac{1}{2}mv^2 - 0$$

得

$$v^2 = 2 \frac{mg - f}{m} h = 2 \left( g - \frac{f}{m} \right) h$$

可知, $v^2-h$ 图像就是过原点的一条直线.要想通过 $v^2-h$ 图像的方法验证机械能是否守恒,还必须看图像的斜率是否接近 $2g$ .

本题立意在于纠正考生在平时实验中容易忽视的问题.大部分考生在使用图像处理数据时,作出 $v^2-h$ 图像后,经拟合,若图像为一条过原点的直线,即认为重物下落过程中机械能守恒.产生这类错误的主要原因是考生在实验过程中不能从实验的实际情况出发,未考虑到可能产生误差的相关因素的影响.

高中物理实验大多为验证性实验,即已知物理规律及对应实验应呈现的结果,在此前提下设计实

验,在误差允许的范围内验证物理规律的正确性.因此在实验过程及分析中应注意以下两点.

(1) 不可直接运用物理规律来分析实验过程和现象,这是逻辑错误.如在此问中,由  $mgh = \frac{1}{2}mv^2$ ,  $v^2 = 2gh$ ,可知  $v^2 - h$  图像为过原点的直线,即判断该同学判断依据正确!或在相关计算过程中,认为动能变化  $\Delta E_k = mg\Delta h$  等.

(2) 物理规律是理想化、模型化的结果,然而在实际实验中,误差是不可避免的,实验结果永不可能与物理规律完全吻合,只能是在误差允许范围内验证物理规律.

**【试题 2】**[2016 年高考全国理综卷(课标 I) 第 22(2) 题] 某同学用图 2(a) 所示的实验装置验证机械能守恒定律,其中打点计时器的电源为交流电源,可以使用的频率有 20 Hz, 30 Hz 和 40 Hz. 打出纸带的一部分如图 2(b) 所示.

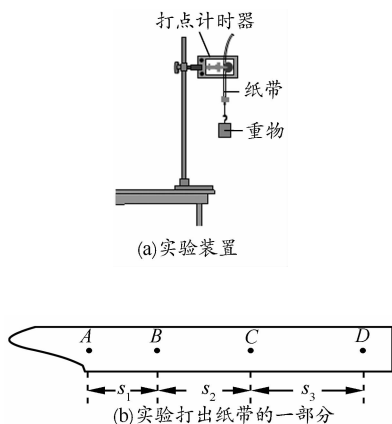


图 2 试题 2 题图

已测得  $s_1 = 8.89 \text{ cm}$ ,  $s_2 = 9.50 \text{ cm}$ ,  $s_3 = 10.10 \text{ cm}$ ; 当地重力加速度大小为  $9.80 \text{ m/s}^2$ , 实验中重物受到的平均阻力大小约为其重力的 1%. 由此推算出  $f$  为 \_\_\_\_\_ Hz.

答案: 40.

试题主要考查考生对匀变速直线运动规律的理解以及必要的数学运算能力. 做匀变速直线运动的物体在连续相等的时间间隔内, 位移差为一恒量, 即

$$\Delta s = aT^2 = \frac{a}{f^2}$$

从图 2(b) 可看出

$$s = s_2 - s_1 = s_3 - s_2 = 0.6 \times 10^{-2} \text{ m}$$

由牛顿第二定律可知

$$a = \frac{mg - f}{m} = 0.99g$$

综上, 容易算出  $f = 40 \text{ Hz}$ .

## 2 两种阻力模型

进行调节后的打点计时器, 在实验中, 打点时纸带仍受到阻力作用. 下面对纸带在运动过程中所受阻力进行分析, 建立两种阻力大小的模型, 并讨论不同阻力模型对纸带运动的影响.

**模型 1:** 纸带下落过程中所受阻力恒定, 且与重物质量成正比.

模型 1 与试题 2(全国卷) 的模型相符. 其实也与试题 1(北京卷) 的模型相符. 证明如下.

$v^2 - h$  图像为过原点的直线, 即

$$v^2 = kh$$

等式两端对时间求导

$$\frac{d(v^2)}{dt} = \frac{d(kh)}{dt}$$

得

$$2v \frac{dv}{dt} = k \frac{dh}{dt}$$

由

$$a = \frac{dv}{dt} \quad v = \frac{dh}{dt}$$

得

$$2va = kv$$

即

$$a = \frac{k}{2}$$

可知, 若纸带下落过程中加速度恒定, 则合外力恒定, 并进一步可知阻力恒定. 由  $a = \frac{f - mg}{m}$ , 可得

$$f = \left(1 - \frac{k}{2g}\right)mg$$

即纸带所受阻力  $f$  与重物质量  $m$  成正比. 此情形下, 纸带做匀加速直线运动, 下落的  $v - t$  图像如图 3 所示.

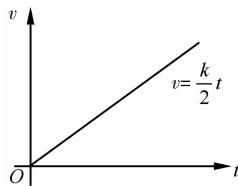


图 3  $f$  与  $m$  成正比时的  $v - t$  图

**模型 2:**纸带下落过程中,设纸带所受阻力  $f$  与下落速度  $v$  成正比,即  $f = kv$ .

设重物质量为  $m$ ,由

$$a = \frac{mg - f}{m} \quad a = \frac{dv}{dt}$$

得 
$$\frac{dv}{dt} = \frac{mg - kv}{m}$$

对上式变形并积分得

$$\int_0^v \frac{dv}{mg - kv} = \int_0^t \frac{dt}{m}$$

$$-\frac{1}{k} \ln(mg - kv) \Big|_0^v = \frac{t}{m}$$

$$\ln \frac{mg - kv}{mg} = -\frac{kt}{m}$$

$$v = \frac{mg}{k} (1 - e^{-\frac{kt}{m}})$$

$$a = \frac{dv}{dt} = -\frac{mg}{k} \left(-\frac{k}{m}\right) e^{-\frac{kt}{m}} = g e^{-\frac{kt}{m}}$$

如图 4 所示,由上述两式做出的  $v-t$ 、 $a-t$  图像可知,若纸带所受阻力  $f$  与下落速度  $v$  成正比,则纸带做变加速运动,加速度逐渐减小,速度趋于一最终速度  $\frac{mg}{k}$ .

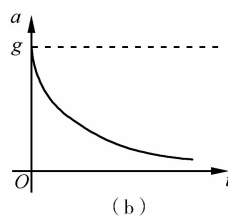
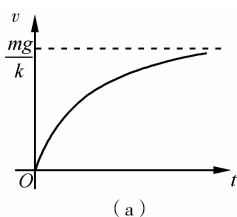


图 4  $f$  与  $v$  成正比时的  $v-t$  和  $a-t$  图

### 3 结论

综上,在运用打点计时器做“验证机械能守恒定律”实验中,若重物所受阻力与其重力成正比,则重物做匀加速直线运动;若重物所受阻力与其运动速度成正比,则重物做加速度逐渐减小的加速运动,最终趋于一个稳定速度.相比而言,重物所受阻力与其运动速度成正比更接近实际情况.实际操作过程中,纸带的运动情况也更符合模型 2 所呈现的结果,即随着时间的增加,重物及纸带速度逐渐趋于一稳定的速度  $\frac{mg}{k}$ .所以在做实验过程中,选取纸带进行数据分析时,应尽可能选取纸带较靠前的部分,这部分纸带对应的重物所受阻力较小,重物下落过程中机械能也更近似守恒.

## Discussion on the Resistance during the Falling of Paper Tape

Yang Jun

(Beijing Education Examinations Authority, Beijing 100083)

**Abstract:** Electromagnetic dotting timer is a common experimental instrument in middle school. In the experimental process, the experiment precision is often affected by the friction resistance and the resistance brought by the dotting needle. Through the analysis of questions in Beijing and the national college entrance examination, the resistance of paper tape is analyzed; two models of resistance are established; and discussed the effects of different resistance model to the movement of the paper tape.

**Key words:** electromagnetic dotting timer; resistance; college entrance examination