



# 力学教学实验用的气垫导轨\*

天津大学物理教研组

在普通物理教学的力学实验部分,例如运动学定律、牛顿三定律、动量守恒定律等等,由于摩擦力的影响和测量方法的不够精确,往往难于在实验室里给以直观的验证和演示,以致这部分教学内容显得抽象难懂;因此,改进实验室设备,革新教学实验的内容和方法,使实验教学更好地配合理论教学,努力做到“理论与实际的统一”,为我国工农业生产和科学技术的发展服务,是物理课教育革命中的一个重要环节。

在伟大领袖毛主席教育革命路线的指引下,我们本着自力更生的精神,最近制成两台作力学实验和演示用的气垫导轨。由导轨轨面上的小孔中喷出空气,使在导轨上滑行的物体(滑块)与导轨轨面之间存在一层空气膜,利用这层空气膜作为润滑剂,让滑块漂浮在导轨之上运动,这就消除了通常意义的接触摩擦力,滑块的运动成了“无摩擦”的运动。当然,滑块运动的阻力还是有的,这主要是滑块与导轨之间空气膜的粘滞力、滑块与其周围空气的阻力,不过这些阻力比起通常的接触摩擦力要小得多。

利用这种气垫导轨,可以进行多种验证力学原理的实验和课堂演示。这些实验和演示,效果都较好。下面介绍气垫导轨的构造、几个注意到的问题、计时与测速装置,以及几个典型的实验。

## 一、导轨的构造

我们所制的气垫导轨有两种型式。一种是凹槽式的,简称“气槽”;一种是凸轨式的,简称“气轨”。二者的原理和效用是一样的,而气轨比气槽在构造和加工

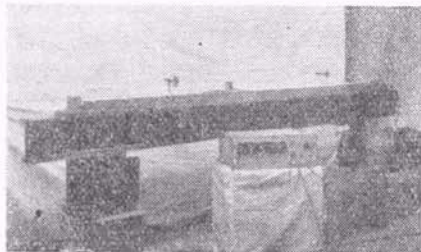


图1 气槽全貌

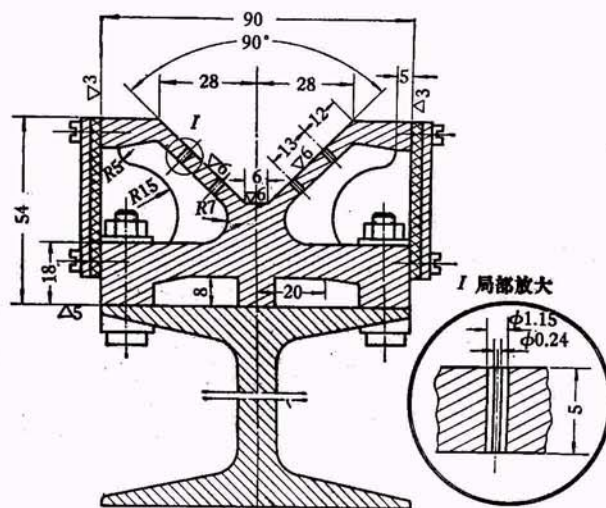


图2 气槽剖视图

工艺方面都比较简单些,但因我们对气轨的检验工作还做得不多,所以下面以气槽为主进行说明。

气槽的全貌如图1,剖视如图2。它的凹槽部分是用铝合金铸造而成的。全长2米,宽90毫米。气槽的两个槽面成90°角,每一个槽面有直径0.24毫米的气孔两排,两个槽面共四排气孔。各排上气孔的间距都是25毫米,其分布情况,如图3所示。气槽的侧面和端面

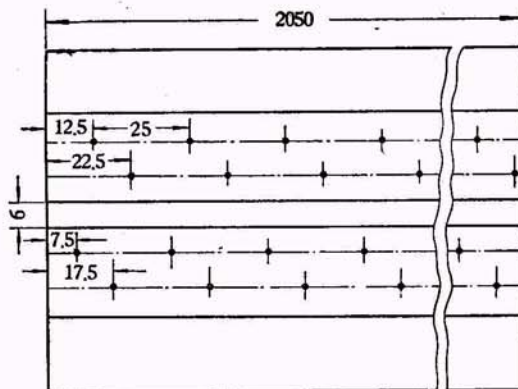


图3 气孔分布

\* 1973年9月24日收到。

用薄钢板加橡皮垫密封，内部形成空心管道。压缩空气从一端输入，从槽面上的气孔喷射出来（直径0.24的气孔是怎样制成的，以及这些孔为什么这样分布等问题，下一节介绍）。

为了防止气槽变形，我们在铝铸件的管道内部，设置了一些加强筋，并把整个导轨固定在一根工字钢梁上。梁下设有调节水平的装置。

滑块的形状如图4。滑块长250毫米，用钢制的，质量约2.1公斤，用铝制的质量约0.7公斤，其主要的加工面是与气槽槽面相配合的两个平面。这两个平面同槽面一样，表面光洁度要求达到▽6（钝削后最好研磨一下）。滑块不论用钢或用铝制作，都能滑行得很好，其中钢质的重滑块更好，可能是因它的这两个配合平面光洁度高一些的缘故。

滑块的顶面钝成平面，以备加载砝码，或放置其它附件。例如在滑块上固定两个遮光片（其距离可调），则可以利用光电门测量滑块的瞬时速度。

在气槽的两端装置两个缓冲弹簧，在滑块两端也装置两个同样的缓冲弹簧（可拆卸），则可使滑块在气槽中往复运动，还可用做弹性碰撞实验。缓冲弹簧用铜簧发条制成，弯成U字形，一个软的装在外面，一个硬的装在里面，如图5所示。设置两层弹簧片的目的是使碰撞时非弹性损失最小，且能经受较大冲力。

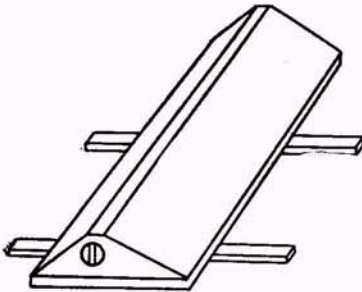


图4 滑块形状

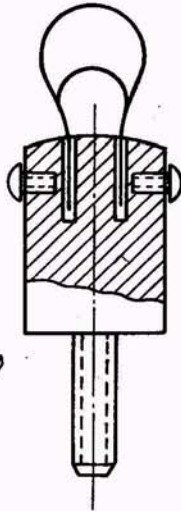


图5 缓冲弹簧

凸轨式气垫导轨（气轨）的外形，如图6所示，其剖面如图7所示。是用长1.58米、宽50毫米、厚5毫米的等边角铝，打直径0.4毫米的孔后，粘结在矩形型钢管上而成。此矩形型钢管的作用与上述气槽中的工字梁相同。加工的方法主要是：

1. 将角铝用细砂纸打光，调直。
2. 进行划线、打眼，气孔的分布与图3同。但用0.4毫米的钻头钻孔之前，先用1毫米的钻头从里向外打直径1毫米的孔，深约4.5毫米，然后用0.4毫米钻头打同心孔通至表面。

第1期

3. 将角铝用环氧树脂粘结在型钢上。粘结剂的配方是：6101\* 环氧树脂10份，加200\* 低分子量聚酰胺树脂6份，另外加干Al粉1—2份。Al粉的作用：（1）作为填充剂，（2）改变粘结剂颜色，（3）提高粘结剂的机械强度。

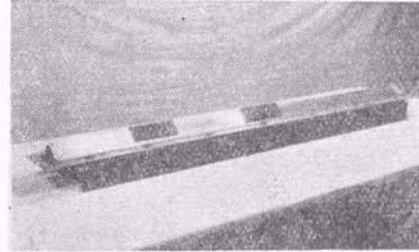


图6 气垫导轨外形

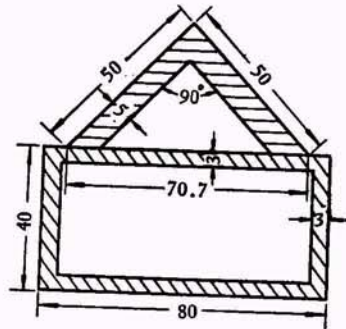


图7 导轨剖面图

## 二、几个注意到的问题

1. 气槽面上的气孔必须是很小的。2米长的气槽，共有气孔324个，但实际上，只有滑块覆盖着的那些气孔中喷出的气体起着漂浮滑块的作用；其它各孔喷出的气体都不起作用，不过，其总的气导却是相当大的。把每一个气孔看成是一根毛细管，按泊谟叶公式，算出每一个孔的气导后，可以估计出所需空气压缩机的气流量。计算每一气孔的气导的泊谟叶公式是：

$$g = \frac{\pi}{8\eta} \cdot \frac{r^4}{L} \bar{P}$$

式中 $\eta$ 为空气的粘滞系数， $r$ 为毛细管半径， $L$ 为毛细管长度， $\bar{P}$ 为毛细管内平均压强。显而易见，若气孔的半径稍微增大，气导就增加很多。此时要维持气槽内部的压强，势必要求空气压缩机能供应大得多的气流量，而使用这样一个大得不相称的空气压缩机来供气是不适当的，同时，气导太大，还会出现气槽内两端的压强不均匀的现象。

我们所制的气槽的气孔直径是0.24毫米，使用一台0.184立方米/分的空压机，在空压机的表压力为1.5大气压时，足可以使重2.1公斤的滑块和加载上2.5公斤重的附件一同漂浮起来。直接打这样的小孔

是很困难的,我们采取了下述办法:在槽面上先打 1.1 毫米的孔,然后嵌入外径为 1.15 毫米、内径为 0.24 毫米、长为 5 毫米的不锈钢毛细管,这样,做成后的气孔直径就是 0.24 毫米了。截毛细管的方法是:先把毛细管切成大段,然后把许多大段的毛细管平行地插入用熔融的锌浇铸成的锌管中。再用车床截成长 5 毫米的小段,最后,用酸洗去锌,得到截短了的毛细管,用油石把二端磨成圆角,嵌入到气槽中去。嵌入之前,可用 0.1 毫米钨丝捅一捅管孔,保证毛细管畅通。

如果气源的供气量足够,也可以打稍大的孔。在我们所制的气轨上,就是用钻头直接打 0.4 毫米的孔的,也得到较为满意的结果。

2. 气槽表面和滑块表面互相配合要有较好的光洁度。简单的理论分析表明,从毛细管喷出的气流,在滑块与气槽很窄的间隙中间是以片流的形式流出的。这种在滑块与气槽之间的粘滞性气流,和大气产生了压差,正是这个压差对滑块形成“浮力”。当“浮力”与滑块的重量平衡时,滑块与气槽面之间就保持一定的间隙距离,也就是使滑块在气槽上漂浮一定的高度。

设滑块长为  $a$ , 宽为  $b$  ( $a \gg b$ ), 同气槽接触的面与水平面的夹角为  $\theta$ , 滑块重量为  $mg$ , 滑块面与气槽面的间隙距离为  $\Delta$ , 滑块下气体流量为  $Q$ , 则经过适当的简化以后,可得平衡时的关系式:

$$Q = \frac{1}{6} \frac{mg}{\eta b^2 \cos \theta} \Delta^3,$$

式中  $\eta$  为空气的粘滞系数。可见,对于浮起一定重量  $mg$  的滑块来说,要使滑块与气槽之间的间隙  $\Delta$  加大,就必须增大气流量,而气流量  $Q$  与间隙  $\Delta$  的三次方成正比;对于一定的气流量  $Q$  来说,则滑块愈重,间隙愈小。所以如果滑块与气槽的面不够密合,或面上有凹凸不平之处,则当滑块与气槽面脱离接触而漂浮时,其实际的间隙是相当大的,这就又要求有很大的气流量;反之,若气流量  $Q$  不足,则某些凸出部分仍可能接触,不能达到“无摩擦”的目的。

实际上,滑块与气槽槽面的间隙在  $10\mu - 50\mu$  之间,视气流量大小而不同。把气槽槽面磨到  $\nabla 6$ , 滑块也磨到这样的光洁度,就能得到很好的结果。如果滑块加以研磨,例如达到  $\nabla 7$  效果更好,这个要求并不难做到。

3. 导轨表面应该有较好的平直度。从以上的分析,可以看到当滑块下的气流量一定时,滑块与气槽槽面保持一定的间隙距离。当导轨表面不平时,滑块沿着这种不平的导轨与导轨保持一定的间距滑行,将是一会儿上坡,一会儿下坡,就不能匀速或匀加速运动了。

我们所制的气槽,在安装到工字架上以后,最大不平度在 0.05 毫米以内,松紧连接气槽与工字梁的螺栓,还可在小范围内调整。当气槽与水平倾斜 0.2 毫弧度时,滑块即能自由下滑作匀加速运动。

4. 气槽面上的气孔按图 3 排列,而不是四孔并列,这是考虑到当滑块沿槽面滑行时,它下面覆盖的气孔数目,即支撑滑块的气注数目至多只增减一个。例如当滑块长 250 毫米时,则按图 3 的排列,在滑行中滑块下面始终有 39 注气流支撑着,这对于滑块的平稳运动是有利的。同时,如果四注气流并列,则由于伯努利效应引起的压强变化较显著,也对滑块的平稳滑行有影响。

5. 滑块在槽面上滑行,接触摩擦力等于零,但仍存在阻力,这阻力主要是滑块与气槽面之间空气层的粘滞力,即内摩擦力。这种粘滞力与摩擦力的性质不同,是与速度成正比的,其阻尼系数同空气粘滞系数、滑块底面积、以及滑块与槽面的间隙有关。间隙愈大,阻尼系数愈小。我们用两根细弹簧拉住滑块,弹簧的另一端分别固定在气槽的两端,观察滑块在水平面上作谐振动情况,测得谐振动衰减的时间常数为 245 秒,阻尼系数为  $4.08 \times 10^{-3}$ /秒(弹簧的阻尼包括在内)。这种阻尼力实际上是很小的。

虽然阻尼力与速度成正比,但实验时滑块的速度不宜太小,因为速度太小,各种外界因素的影响(如压强不均匀,气流量不稳定等),都比较显著,实验误差较大。对于钢质滑块,速度以大于 30 厘米/秒为宜,对于铝质滑块速度以大于 60 厘米/秒为宜。

6. 从我们实验的情况看来,气垫导轨的气源,压强并不需要太高,而气流量则以大一些为好,所以如果能找到一种风压较高的小型鼓风机以代替空压机是很节约的。我们曾试用一种罗茨鼓风机接在气槽上作气源,此鼓风机的风压为 0.2 公斤/(厘米)<sup>2</sup>, 风量为 0.25 米<sup>3</sup>/分,同样能使滑块浮起来,不过还没有作充分详细的实验。

### 三、计时与测速装置

利用气垫导轨进行运动学和动力学的教学实验和演示,应该相应地改善测量时间的装置。为了直接测量滑块在导轨的不同位置上的瞬时速度,我们采用了光电门和频率计数仪(数字式毫秒仪)。光电门是用一个 3 伏聚光小灯泡和一个硫化镉的光敏电阻组成的,它们分别装在两个硬塑料管子里,可以固定在导轨的任意位置上。通常,聚光泡发出的光照射在光敏电阻上,光敏电阻呈现低阻状态。当滑块运动到这个位置时,光被滑块上固定的遮光片挡住,光敏电阻呈现高阻状态,遮光片穿过以后又恢复原状,于是加在光敏电阻的电压给出一个脉冲,这个脉冲接到毫秒仪里作为开门讯号开始计时。当第二个遮光片穿过光电门时,又给出第二个脉冲作为关门讯号使毫秒仪停止计时,这时毫秒仪上显示的数字,就是从第一个遮光片穿过光电门至第二个遮光片穿过光电门所经历的时间  $\Delta t$ 。

这两个遮光片的距离若为  $\Delta x$ , 则滑块速度  $v = \frac{\Delta x}{\Delta t}$ .

$\Delta x$  可调节得很小, 例如 10 厘米、5 厘米、2.5 厘米等等, 显然这个速度  $v$  与滑块经过光电门时的瞬时速度是很接近的. 为了测量滑块在两个不同位置的速度, 我们在一个导轨上设置了两个光电门, 用一个简单的三极管“或”门把它们连系起来, 使滑块无论经过那个门都能使毫秒仪计时(线路如图 8 所示), 也可以在滑块上固定一个遮光片, 那么, 所记的时间就是滑块从一个门到另一个门所经过的时间.

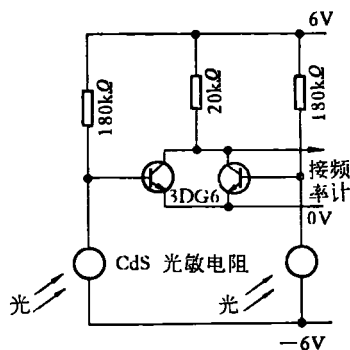


图 8 开关线路

也可以用教学仪器厂生产的电动秒表来计时, 但这时光电门输出的脉冲需要加功率放大才能推动电磁继电器动作.

还可以采用其他的计时方法, 例如类似于过去的电动音叉法或滴墨水的办法, 用脉冲高压火花在一张记录纸上打点, 两点之间的时间是一定的. 这种方法, 用于研究滑块的位移与时间的关系是很合适的.

#### 四、利用气垫导轨进行的教学实验

利用气垫导轨可以进行多种教学实验, 进行课堂演示的项目更多. 例如演示惯性运动, 把导轨调成水平以后, 则滑块沿导轨的运动是匀速的, 用眼看不出速度的减慢, 用毫秒仪测任意两点的瞬时速度, 其差值在

1% 以内, 这就很有说服力了.

用导轨进行斜面运动的实验是很直观的. 实验时先把导轨从水平位置调成斜面位置, 例如使导轨的一端升高约 1 厘米, 造成角度约  $18'$  的斜面, 再把电门放置在相距为  $s$  (约 1 米) 的距离, 测量滑块通过两个光电门时的瞬时速度  $v_1$  和  $v_2$ , 则按照运动学公式

$$v_2^2 - v_1^2 = 2as,$$

可求出滑块沿斜面的加速度为:

$$a = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2s}.$$

改变两个光电门的距离  $s$ , 可验证加速度  $a$  为一常量.

利用气垫导轨进行动量守恒定律的验证也是很直观简易的. 例如, 用两个质量相等的滑块, 两端装缓冲弹簧, 使一个滑块静止, 一个滑块以一定速度运动, 进行弹性碰撞. 碰撞以后, 运动滑块变为静止, 静止滑块变为运动. 用光电门测出碰撞前后的两个速度, 它们是接近相等的, 这就验证了动量守恒定律和弹性碰撞中机械能也守恒的关系. 还可以在滑块一端装一块橡皮泥, 则碰撞以后, 两个滑块连在一起运动, 成为完全非弹性碰撞. 测出碰撞前后的速度, 也可以验证动量守恒定律.

增加一些适当的附件, 还可以进行牛顿第二定律、第三定律、阻尼振动、受迫振动等各种运动规律的验证和表演, 在此不一一列举了.

在我们的这项工作中, 得到许多兄弟院校的鼓励和支持, 天津冶金材料研究所的师傅们给了我们很大的帮助, 在此表示感谢.

#### 参 考 文 献

- [1] Neher, H. V., and Leighlon, R. B., *Linear Air Trough*, *American Journal of Physics*, 31 (1963), 205.
- [2] J. L., Steril, *Linear Air Trough—A Modification*, *American Journal of Physics*, 30 (1962), 839.
- [3] Shrader, E. F., *Two Quantitative Lecture Demonstration Concerning Linear Momentum*, *American Journal of Physics*, 33 (1965), 784.