



物理实验丛书 WULISHIYAN CONGSHU

气垫导轨实验

沙振舜 马葭生 编



上海科学技术出版社

物理实验丛书

* * *

气垫导轨实验

沙振舜 马葭生 编

上海科学技术出版社

内 容 提 要

本书系根据我国高等院校普通物理力学实验中有关气垫导轨实验内容以及结合南京大学和华东师范大学在气垫导轨实验教学的经验编写而成。全书共分四章。前两章主要介绍气垫导轨的结构及其测量系统以及气垫导轨实验技术,后两章分别介绍气垫导轨实验和误差分析。此外,在附录中还列出了国内生产的气垫导轨的规格、性能与生产单位,以便于读者查阅。

本书可供大专院校、中等专科学校、中学教师及有关从事物理实验的科技工作者参考。同时对理工科高年级学生、研究生也有一定的参考价值。

物 理 实 验 丛 书

气 垫 导 轨 实 验

沙振舜 马葭生 编

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路450号)

新华书店上海发行所发行 江苏溧水印刷厂印刷

开本 787×1092 1/32 印张 5.25 字数 114,000

1984年1月第1版 1984年1月第1次印刷

印数: 1—5,100

书号: 13119·1109 定价: (科五)0.61元

出版说明

物理学是一门以实验为基础的科学。每个物理概念的确立以及原理和定律的发现无不具有坚实的实验基础,而且只有经过实验的检验,才能得到公认。所以,物理实验在物理学中起着非常重要的作用。

为了实现我国四个现代化的要求,需要迅速培养大批科学技术专门人材。在整个物理学的教学过程中,物理实验是培养物理工作者和其他科学技术专门人材不可缺少的组成部分。可是在物理实验的教学中,深感这方面书籍的不足,以及实验仪器和实验设备的缺乏。鉴于上述情况,为了提高物理实验的水平,适合我国的实际情况,推广实验中的新技术、新仪器和新方法,我们请国内有关高等院校从事物理实验教学时间较长、经验丰富的教师编写这套《物理实验丛书》。

本丛书内容包括当前我国高等院校正在开设和准备开设的普通物理实验。每一分册集中介绍一个专题。本丛书采用章节式的实验参考书编写方式,注意到专题的系统性与完整性,中间插入有关的实验,并有备查的附录,内容简明扼要,重点突出。此外,为了适应科研部门和工矿企业实验工作者的需要,还适当增加了一些实际应用的内容。本丛书不但可供大专院校物理专业师生参考,亦可供中等专科学校和中学物理教师以及科研单位与工矿企业从事物理实验工作的技术人员参考。

本丛书已拟定的普通物理实验方面的分册有:《力学实验》、《静电实验》、《几何光学实验》、《物理光学实验》、《电磁学实验》、《热学实验》、《真空实验》、《气垫导轨实验》等,将陆续出版。

前 言

科学技术的发展日新月异,过去我们还不太熟悉的气垫导轨,如今已成为一种新颖的实验设备出现在许多学校、研究所和工厂的实验室了。由于气垫导轨在实验中的一些特有优点——它的直观性、精确性和实验内容的多样性,使它愈来愈多的受到普通物理实验工作者和师生们的欢迎。目前,气垫导轨不仅成为大专院校实验室的“常规武器”,而且,也将成为中学的物理实验设备。因此,在气垫导轨的生产和使用日益增多的情况下,编写一本《气垫导轨实验》书籍,帮助实验工作者熟悉和使用这种实验设备,将是一件十分有益的工作。

考虑到本书的主要目的是帮助实验工作者使用这种实验设备来探讨有关的力学规律,所以在选材上着重介绍在成品气垫导轨上进行各项具体实验的内容和方法,至于有关气垫实验中一些专门问题的探讨、气垫导轨制造的工艺问题将略而不谈。

气垫导轨作为实验设备使用,在国外至少已有 20 年的历史了。最早是 1962 年,在美国物理教师协会(AAPOT)的年会上,莱登(R.B.Leighton)表演了气轨,这种气轨是槽形气轨,滑块在槽中滑动,故当时称为直线气槽(linear air trough)。大约在 70 年代初国内开始研制气垫导轨装置,起先是由天津大学和北京大学设计制作,随后天津四十二中学校办工厂进行了批量生产,现在国内生产厂家已不下十多处,型式和性能也在不断改进和提高。目前,不少院校已在气垫导轨方面开设了许多实验,并且收到了较好的效果。但鉴于国内尚缺乏

这方面的资料,我们编写此书,借以“抛砖引玉”。由于我们对气垫导轨实验工作做得还不够,缺点和错误在所难免,希望读者批评指正。

本书在编写过程中得到南京大学物理系沙家止、潘元胜、钱国良、俞超等老师,华东师范大学物理系力学实验室、热学实验室有关同志,教育部高等教育司胡秀荣同志,教育部供应司秦牧民同志的帮助,许多生产气垫导轨的单位也提供了不少资料,特别是华东师范大学教学仪器厂的陈关根同志为本书提供了许多实物图片,这里一并表示感谢。

东北师范大学物理系杨述武副教授在百忙中审阅了全书初稿,并提出了不少宝贵意见,在此一并表示谢意。

本书第一章的第3、4、5节,第三章的第4、8、9、11、12、13节,第四章的全部由马葭生同志执笔,其他部分由沙振舜同志执笔。

编者

1983年2月

目 录

前言	
绪论	1
第一章 气垫导轨的结构及其测量系统	4
§ 1 导轨与滑块的结构	4
§ 2 气源	11
§ 3 光电测量系统	14
§ 4 火花记录系统	21
§ 5 频闪照相系统	26
§ 6 气轨的使用与维护	31
第二章 气垫导轨实验技术	34
§ 1 气垫导轨的调平与准直	34
§ 2 滑块运动的初速度与加速度的获得和控制	38
§ 3 几种附加调节	41
§ 4 几个物理量的测量	45
第三章 气垫导轨实验	52
§ 1 速度的测量	52
§ 2 利用火花记录系统测量速度	56
§ 3 研究物体在斜面上的运动	60
§ 4 用火花记录法测量重力加速度	63
§ 5 碰撞实验——验证动量守恒定律	65
§ 6 恢复系数的研究	71
§ 7 验证机械能守恒定律	74
§ 8 粘滞性阻尼常数的测量	79
§ 9 气垫导轨平直度的测量	85

§ 10	磁铁的相互作用 力与势能关系	90
§ 11	简谐振动实验	99
§ 12	阻尼振动实验.....	104
§ 13	受迫振动实验.....	110
§ 14	势能曲线的研究.....	116
§ 15	观测多普勒效应.....	121
§ 16	物体在流体中的运动的实验.....	126
第四章 气垫导轨实验误差分析		132
§ 1	粘滞性摩擦阻力所引起的系统误差	132
§ 2	导轨不平直所引起的系统误差	135
§ 3	光电计时中的系统误差	137
§ 4	光电测量中速度、加速度、位置和时间的关系	140
结束语		145
附录		148
1	国产气垫导轨的规格、性能与生产单位	148
2	数字毫秒计及其他时间记录仪器	151
3	气源	155
4	气垫导轨部件和附件名称	156
5	低摩擦装置简介	157

绪 论

气垫导轨是一种新型的力学实验仪器,简称气轨。它是一根一端封闭的中空直导轨,导轨的表面有一排排小孔,压缩空气从一端进入导轨,由小孔喷出,从而在导轨表面与滑块之间形成一层很薄的“气垫”或“气膜”。被考察的物体——滑块则“漂浮”在气垫上,它不和导轨表面接触。当滑块在导轨表面运动时,不存在通常意义上的接触摩擦力,只有很小的空气粘滞性阻力和周围空气阻力,故滑块的运动可以近似地看作是无摩擦的运动。在气垫导轨上做实验,减小了摩擦力引起的误差,使实验结果基本上接近理论值。使用这种仪器,使我们能够直观、定量而且较精确地研究物体的许多运动规律,从而收到良好的实验效果。它不仅可以用作课堂演示,又可用作学生实验。

气垫实验中,滑块之所以能漂浮在导轨上,是因为气膜内的平均气压高于大气压,由于气膜内平均气压 $\bar{P}$ 与大气压 P_0 之间存在的压力差,从而对滑块产生了一个向上的作用力 N ,当 N 等于滑块的重量 W 时,滑块就能漂浮在导轨上。在平衡状态,滑块可以稳定地浮在某一高度上,一般气膜厚度 δ 大约在 $10 \sim 200$ 微米之间,视气流量的大小而不同。流量与气膜厚度的三次方成正比^①。

气膜厚度(或滑块浮高)直接影响滑块运动时所受到的粘滞性阻力。气膜越厚,粘滞性阻力越小。所以严格说来,不能

① 刘启才(武汉大学):“普通物理实验设备改进摘选”,1980.9。

把滑块在气垫导轨上的运动作为理想的无摩擦运动。实际上, 不仅存在粘滞性阻力, 还有周围空气对滑块的阻力和气流的水平分速度造成的作用力, 而且, 这些阻力是随滑块速度而变化的。气垫导轨上某些实验误差较大的部份原因正是由于忽略了这些阻力。但这些阻力终究比其他力学实验仪器或机械接触摩擦力小得多, 只要使用得当, 它仍不失为定量研究许多物理现象的一种良好的工具。

利用气垫导轨, 配以计时仪器和其他辅助设备, 可以研究力学中许多现象和运动规律。我们将在本书第三章中就其中主要的实验项目加以介绍。

气垫导轨实验实际上是气垫技术在力学实验中的应用。所谓气垫技术就是把具有一定压力的空气围封在某物体下面, 形成一层气垫, 利用这层气垫产生的静压力支承该物体, 使它可以移动或行驶的一门新兴技术。二十世纪四十年代以来, 气垫技术随着科学技术的发展也在飞跃发展, 气垫装置层出不穷。1959年世界上第一条载人气垫船——桑德斯罗1号(见图0-1)航行成功以来, 气垫技术有了很大的发展, 出现了

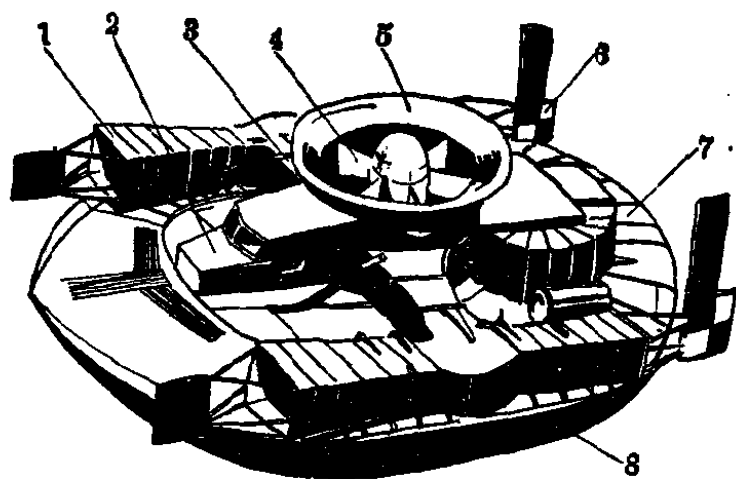


图 0-1

1-控制气道; 2-驾驶舱; 3-支管; 4-进气空叶; 5-函管; 6-空气舵;
7-浮箱; 8-围裙

形形色色的气垫装置。近年来,气垫技术在工业、国防、交通运输和科学技术等方面得到了广泛的应用。例如,利用气垫可以轻巧地搬运笨重货物(见图0-2),这就是用来搬运货物的气垫平台车。在机械制造业上,利用气垫导轨代替液压导轨,可以在机床的转台上将工件转到合适的角度进行加工。空气轴承中由于用气膜代替了滚珠,使其转速大大提高,如风动磨头的转速高达6~10万转/分,牙科钻头的转速高达30~50万转/分。此外,利用气垫技术的还有气垫火车(见图0-3)、气垫船等高速运载工具以及飞机的气垫起落装置(见图0-4)。以上这些气垫装置的共同优点是可以减少磨损,延长使用寿命,提高速度和机械效率。因此,气垫技术越来越受到人们的重视。



图 0-2

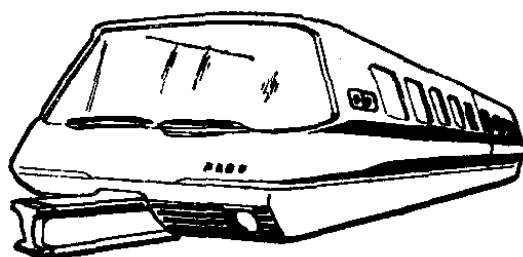


图 0-3

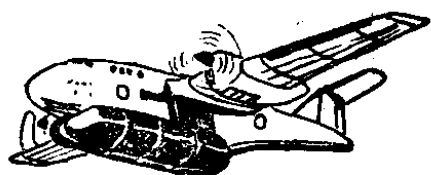


图 0-4

本书附录中所介绍的气垫平台或气桌,即是和气垫船类似的一种实验用气垫装置。可以预料,研究气垫实验反过来又可以了解气垫装置的某些运动特性。总之,气垫这门新技术有着广阔的发展前途,它在生产和生活中会得到越来越广泛的应用,通过气垫实验将会增加许多关于气垫技术的感性认识。

第一章 气垫导轨的结构 及其测量系统

气垫导轨的实验装置由导轨、滑块、气源和测量系统四部份组成, 装置全貌如图 1-1 所示, 现分别叙述如下。

§ 1 导轨与滑块的结构

一、导轨结构

气垫导轨的主体是一根平直、光滑的空心导轨, 称为轨身, 上面均匀地钻有小孔。其外形如图 1-1 所示。国内目前都采用截面为三角形的空心的铝合金型材制成, 国外也有用有机玻璃(perplex)制成的(印度气轨^①和 Philips Harrao 公司

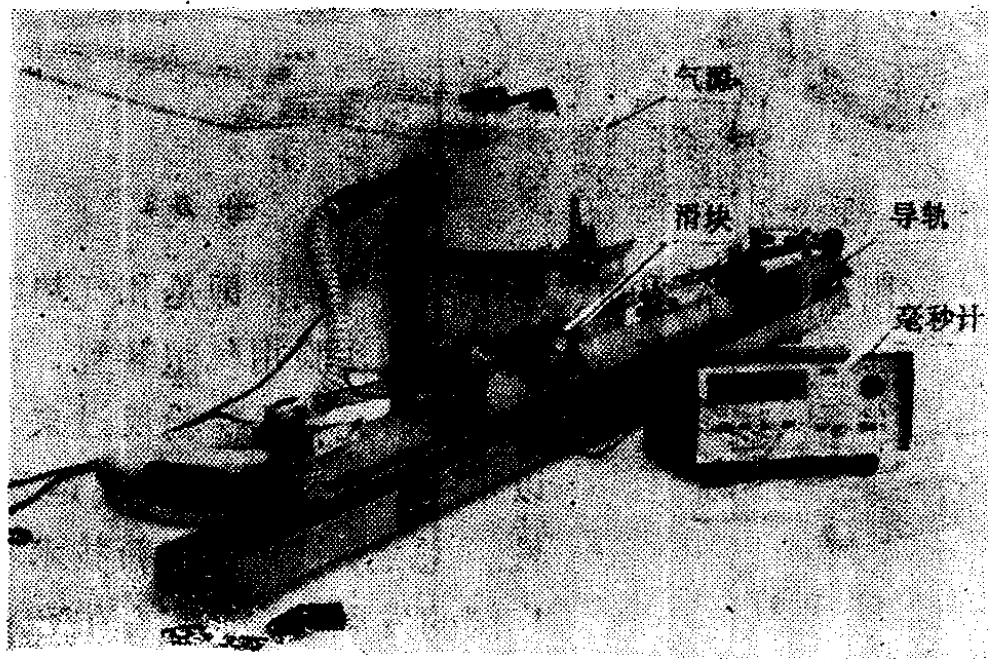


图 1-1 导轨与滑块结构

① B.Saraf(印度): «Physics through experiment», 2(1979).

导轨 ①), 这种气轨不会产生涡电流, 没有磁阻尼、特别适合于做磁力以及能量关系的实验。

导轨的两个相邻轨面成 90° 角, 轨面经过精刨 ②, 平直而光洁, 每个轨面上钻有两排等距离的喷气孔, 各排气孔的间距为 20~25 毫米。孔径大小会影响气轨的浮重和浮高性能。究竟孔径是大一些好, 还是小一些好, 要综合考虑到气源的供气量, 导轨管腔的大小和导轨的长度等因素来决定。测试表明, 在供气充足的条件下, 选用孔径大一些的导轨将有利于提高滑块的浮高。目前, 国内导轨的孔径一般采用 0.5 毫米, 但也有用 0.6、0.7 毫米的, 可根据供气的条件来决定。在加工中, 应保证小孔与轨面垂直 ③, 导轨的全长有 1.2~3 米等多种规格。

导轨一端用端盖封闭, 另一端装有进气接头, 上有进气接套, 三通进气管(或 T 形进气管), 用软管或波纹管(或特制的消音消振管)与气源相接, 并且可向管腔送入压缩空气。

为了提高轨面的硬度, 增强耐磨性, 防止铝合金型材的电化锈蚀, 对型材表面进行阳极氧化处理。有的还进行淬火处理。

为了增强刚性, 使导轨不易变形, 在铝型材导轨下装有支承梁, 它是气轨的基座。

气垫导轨必须有较好的平直度始能正常工作, 导轨出厂的平直度一般应小于 $5 \text{ 丝} \cdot \text{米}^{-1}$ 。所以, 使用和保管期间, 爱护。

① Philips Harras 公司产品样本。

② 有的采用刮研或铣加工, 但这两种加工方法所形成的表面几何形状不好, 造成气膜厚度不均。也有用磨削的, 但加工发热大, 切削应力也大。

③ 小孔如和轨面不垂直, 喷出的气流将会产生和轨面平行的切向分力, 影响滑块的正常运动。为了检查成品导轨的小孔是否和轨面垂直, 可以用水做喷射试验, 看喷出的水柱是否垂直。

轨面, 保证平直度是很重要的。早期导轨的平直度是不可调的(固定式), 近来生产的导轨多数为平直度可调式。不可调式气轨的支承梁有的用工字钢, 有的则用圆形无缝钢管, 导轨和支承梁用树脂粘合剂粘在一起。这种气轨由于支承梁本身较重, 材料内应力以及铝合金型材的膨胀系数不同(即双金属热效应), 易造成形变, 而且一旦变形, 又无法调节, 所以已逐渐淘汰。

可调式气垫导轨的支承梁是用冷拉矩形钢管或铝合金中空梁制成。用管状型材使得其自重造成的弯曲减小。整个导轨通过两排直立螺栓安装在支承梁上, 如图 1-2 所示。必要时, 可用这些螺栓对导轨的平直度分段进行调节。

在支承梁下面有三个呈三角形分布的支脚螺钉, 用来调节导轨的水平。其中一个单支脚螺钉用来调节导轨的纵向水平; 双支脚螺钉用来调节导轨的横向水平。

在轨面两端用螺钉固定发射架座, 其上装有缓冲弹簧 *a* 和橡皮筋发射架 *b*, 如图 1-3 所示。滑块在气轨两端与缓冲弹簧(或钢丝弹簧)碰撞, 可作往复运动。此外, 还有安装火花输送线 *c* 的绝缘板 *d* (用有机玻璃制成) 以及拉紧弹簧 *e*。

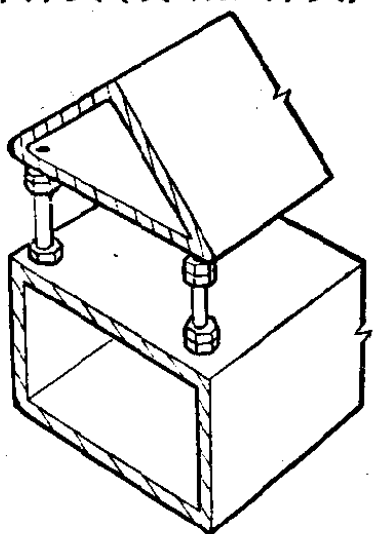


图 1-2

在轨面一侧下部粘贴有一条刻度尺 *f*, 以便用来确定滑块运动的距离。在另一侧轨面下部则可粘贴火花记录纸。

在气垫导轨被封死的一端, 设置一气垫滑轮。气垫滑轮俗称气滑轮, 它是气轨的重要附件。气垫滑轮的原理与滑块在气轨上的运动相似, 只不过前者是由于气

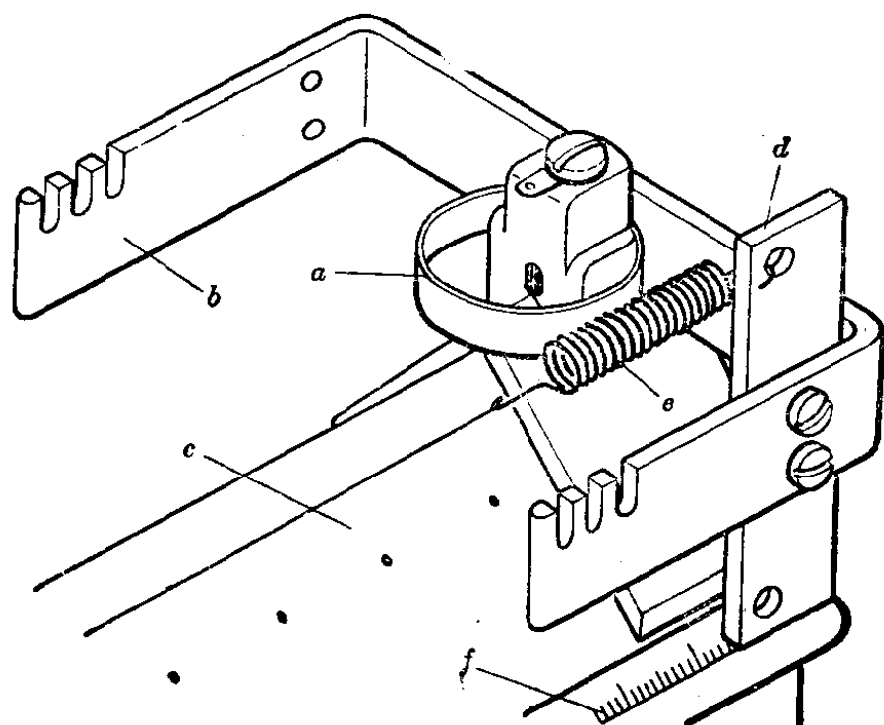


图 1-3

膜减少了滑轮的转动摩擦，而气垫导轨则是减少了滑块的滑动摩擦。气垫滑轮有直接轨面式和空气轴承式两种。直接轨面式又叫气浮飘带。这种气滑轮是一个空心的圆轮，或是一个空心的弯钩，如图 1-4(a) 及图 1-4(b) 所示。圆轮内腔与气轨管腔相通，圆轮的外表面有几排细小的喷气孔，压缩空气由小孔喷出，实验中，用涤纶薄膜带或磁带代替线，跨过圆轮，连接滑

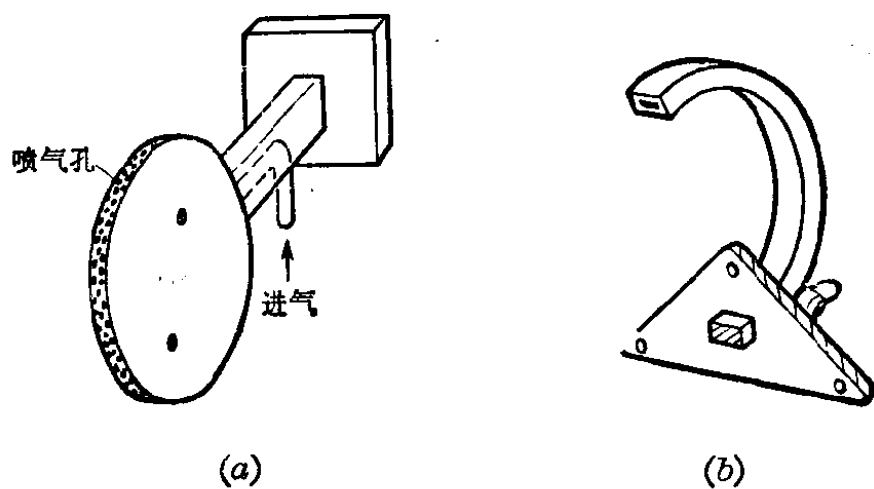


图 1-4

块和重物(或砝码)。圆轮是不转动的,只是薄膜带由于气垫的“漂浮”作用而在气滑轮上滑动。

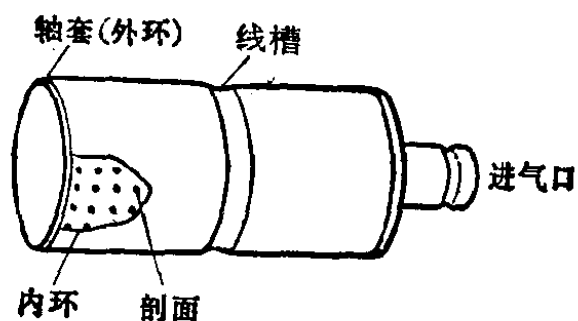


图 1-5

空气轴承式气滑轮是一个桶形轴承,外环套在一个有许多小孔的空心轴上(又称内环),如图 1-5 所示。轴内送

入压缩空气,小孔喷气,在轴套与气轴(即外环与内环)间形成一层很薄的“气垫”,从而使外环能自由地近乎无摩擦地转动。外环上刻有线槽,用以跨线。可以采用丝线或尼龙线。轴套的转动惯量可根据其具体形状、质量和大小计算,或由实验求得,并可换算成等效的折合质量,加到滑块运动系统上,具体计算方法可参阅有关实验。

除上述气垫滑轮外,还有两种可供气轨选用的滑轮:即微型滚珠轴承和顶针式轻滑轮。顶针式轻滑轮使用的是钟表摆针压入有机玻璃轮,总重量只有十分之几克,滑轮支承在钟表玻璃轴承上。

现将几种滑轮比较如下:

1. 轴承式气滑轮:外环质量较大,因而转动惯量较大,实验中必须进行折算。内环小孔加工的形位公差要求很严,小孔轴心应严格通过内环的轴心,否则,喷气时会产生附加的切向分力,使外环越转越快,一些轴承式气滑轮的使用效果不好,往往正是由于这一原因。此外,这种气滑轮对气源要求也很高,必须要有足够的气压(一般达 $1 \text{ 公斤} \cdot \text{厘米}^{-2}$ 以上)。

2. 轨面式气滑轮:飘带的材料较难选择,一些塑料薄膜、尼龙或涤纶薄膜,使用一次就会产生静电,影响第二次使用。

其次, 飘带总有几十毫克以上的质量, 在做牛顿第二定律和机械能转化实验时, 飘带逐渐移到挂砝码的一端, 从而使力 F 成为变量, 造成计算的困难。最后, 使用时气量不易控制, 气量大, 飘带容易被吹起, 气量小, 搞不好, 反而造成直接的滑动摩擦。所以, 目前轨面式气滑轮的使用也不是十分成功的。

3. 顶针式轻滑轮: 质量小, 转动惯量也小, 摩擦力一般也很小, 因而加工装配理想的顶针滑轮是比较理想的。虽则这种滑轮转动时总要消耗一些能量, 其中一部份变为滑轮的动能, 一部份克服轴承的摩擦力转化为热能, 但因质量很小, 这种能量的损耗在很多实验中可以忽略不计。

二、滑块

滑块又叫滑行器, 其一般形状如图 1-6 所示。长度有 7~22 厘米多种规格。材料有铝合金型材和角铁两种。为了满足一些特殊情况下的使用要求, 也有采用塑料制成的。

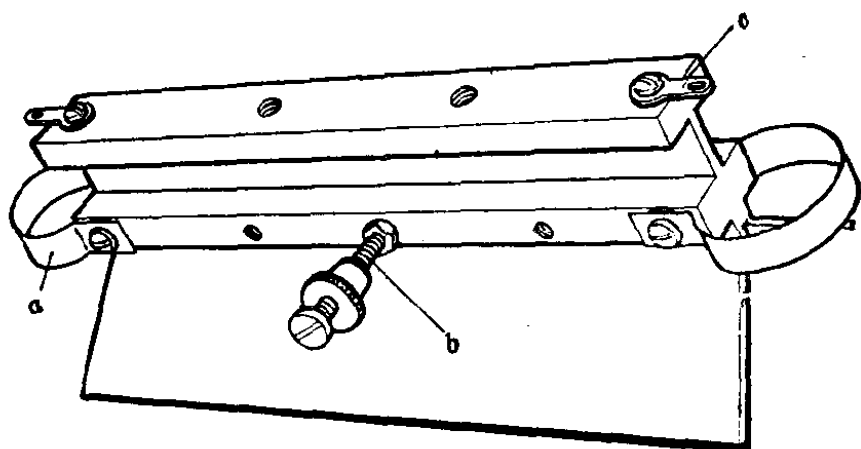


图 1-6

滑块的内表面必需经过精细加工, 以保证与导轨的两个侧面精密吻合。使用中, 导轨和滑块是作为偶件配合使用的, 不得任意互换。如果由于某种原因使滑块的内表面受到损伤, 补救的办法是用 300 (或 4 个 0 的) 细砂纸, 贴在气轨的两侧, 砂面向上, 把滑块按在砂纸上往返轻轻地摩擦, 直到其