

DIS 光电计时测距实验器, π 系统

冯容士 李 鼎 赵 进 (上海市中小学数字化实验系统研发中心 上海 200072)

摘 要 本文涉及一种用于运动学实验的计时测距系统(以下简称“ π 系统”),由光电计时测距小车、轨道、无线接收模块以及计算机软件组成。“ π 系统”主要用于在实验中测量运动物体(小车)的位移、速度和加速度,为运动学规律的研究提供帮助。本文追溯了“ π 系统”的研发历程,详细介绍了其结构和功能,并给出了教学应用案例。

关键词 旋转传感器 光电计时测距小车 无线接收模块

文章编号 1002-0748(2017)9-0022

中图分类号 G633·7

文献标识码 B

物体的运动规律,是物理学研究的起点。

千百年来,围绕着对物体运动,从最原始的量步法,到现在天体物理领域使用的光谱法,人类发展出了层出不穷的方法和手段。但在 DIS 诞生之前,用于物理实验教学的测量手段则相对贫乏,主要有打点计时器、频闪照相机等。能称得上有点信息技术色彩的,也就是由光电门或光电门组构成的气垫导轨系统了。这些测量手段一方面构造复杂、操作不易,另一方面缺乏实时性,即测量和分析不同步,影响了实验效率,不利于学生对于运动规律的理解和认知。

DIS 诞生之后,研发中心于 2002 年首先通过分体式位移传感器的研发成功,解决了运动学实验中位移和时间参数的实时测量问题,进而通过计算机软件的功能,将位移和时间测量数据通过计算转换成了速度和加速度(见图 1)。DIS 实验系统由此可实时绘制出 $s-t$ 图、 $v-t$ 图和 $a-t$ 图,实现了运动学实验领域的一大突破。随后,研发中心继续聚焦于运动学实验装置的研究,于 2010 年左右完成了 DIS 光电轨道系统的原型设计和专利申报,随后将其推向了一线

教学应用(DIS 光电轨道系统见图 2。DIS 分体式位移传感器和光电轨道系统的介绍详见《物理教学》2012 年 11 月)。

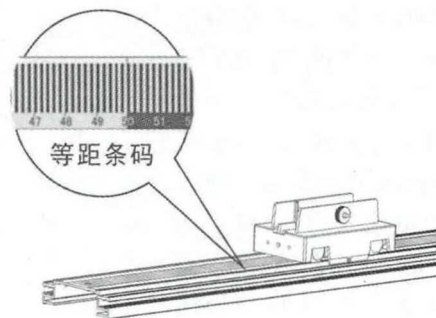


图 2

取得上述研发成果之后,研发中心并未停步。原因并非上述研发成果对教学的支持力度不够。相反,凭借分体式位移传感器,上海乃至全国已经建立起了完整的数字化运动学实验教学体系,打点计时器已经成为古老的传说。光电轨道系统更是独树一帜,将具有时代特色的流行技术——条码识别成功移用到物理实验教学中,对分体式位移传感器形成了很好的补充。该成果在世教联的会议上展出后大受追捧,甚至成了某些美国教学仪器厂家的“克隆”对象。真正促使研发中心在这个方向上继续努力的,是对技术进步和物理之美的不断追求。

大道至简。纷繁芜杂的物质世界最令人感到震撼的,就是其背后出人意料的单纯——无论是规律、方法、手段,只要是接近真理的,就一定是简单的而不是复杂的。正如奥卡姆剃刀原则的表述:如无必要、勿增实体。追求运动学实验手段技术方案的进

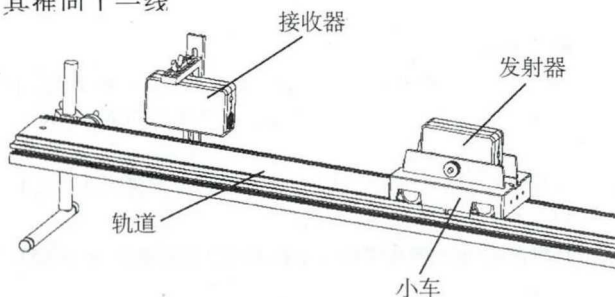


图 1

一步简化,就是对物理之美不断追求的集中体现。这也可以看作研发中心在完成市教委交付的基本任务之后的自主升华。

一、研发思路的形成过程

基于对各种运动测量技术优缺点的充分认识,研发中心决定将 DIS 旋转运动传感器的核心部件——“光电门+轮式挡光片(光栅)”组成的模块移用到轨道小车上,实现“启动就记录”和“运动即测量”。通过抛弃小车对外部测量装置和轨道上特定标识的依赖,让小车本身成为具有计时、测距、数据处理和无线通信功能的综合体。

1. 从光电门到轮式光栅

光电门传感器结构如图 3 所示。其 A 管发射红外线,B 管接受红外线;A、B 间无挡光物体时,电路断开;有物体挡光时电路接通。测量时只要在需要研究的位置上装上光电门传感器,在运动物体上插上宽度一定的挡光片,当运动物体经过光电门传感器时即可根据挡光片的宽度和测得的挡光时间,计算出物体通过光电门所在位置的速度。

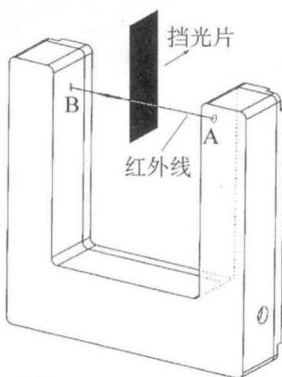


图 3

光电门原理简单、用途广泛,但单个光电门传感器只能用于测量物体运动到某一特定位置时的数据,属于“点”测量。为将“点”测量拓宽为时间段测量,有人使用多个光电门传感器构造出了一个“光电门阵列”。这种手段的确解决了一些问题,比如测量加速度的效果有了提升。但再多的光电门也无法覆盖物体运动的全过程,这种靠增加测量点来解决问题的机械式思维方式也太显笨拙。其实,如果将思维的着重点加以变换,把单片式挡光片变成栅式挡光片(见图 4)或柔性挡光带(见图 5),通过增加挡光次数提供更多的测量数据,即可实现使用一个光电门测量物体的整个运动过程了。上述方式还适合用于运动速度较高或加速度较大的实验。

由此可见,变换思维虽然简

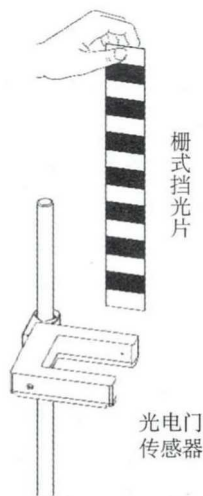


图 4

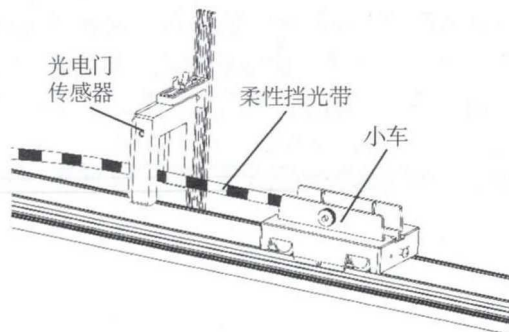


图 5

单,却颇有颠覆力! 让我们把思维变换继续下去,即可用更简约的手段替代拖着尾巴的栅式挡光片和柔性挡光带。其中一个方法,就是通过轮式光栅,把针对直线运动的测量转换为针对旋转运动的测量,从而最大限度地缩小测量装置对空间的占用。

轮式光栅其实就是光栅与轮盘的合体。其构成演变过程见图 6。尽管轮式光栅在工业领域早有应用,但在物理实验教学领域的应用记录,却始于研发中心。2002 年至 2003 年间,研发中心就尝试了将光电门与自制的轮式光栅结合起来,用图 7 所示的方式对小车的运动状况进行测量。

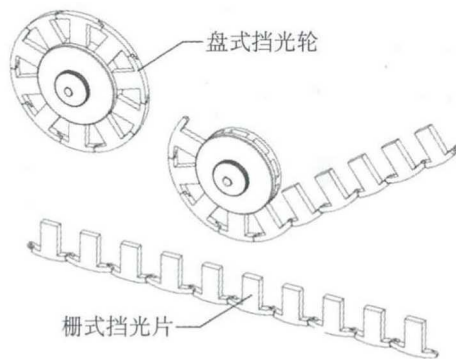


图 6

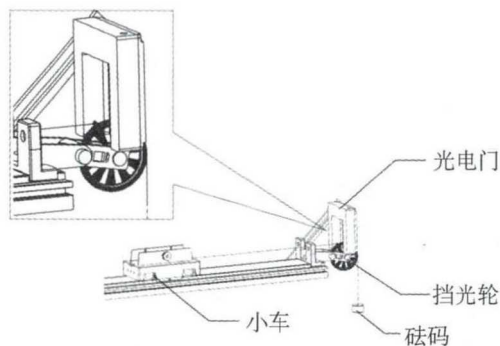


图 7

2. 轮式光栅“上车”,“π”系统诞生

有了上述基础,当我们在进行 DIS 旋转运动传

感器研发的时候,一下子就被旋转运动测量模块的功能所折服了。该模块的核心就是一只微型光电门加一片高精度轮式光栅。在该光栅直径 25.5 mm 的金属盘面上,均匀分布着 500 条狭缝。转动一圈,光电门可按照两路方波的上升沿、下降沿获得 2000 个“挡光、透光”信号。当时我们就意识到:这么精良的器件,除了用于测量旋转运动,显然还可以派别的大用场……

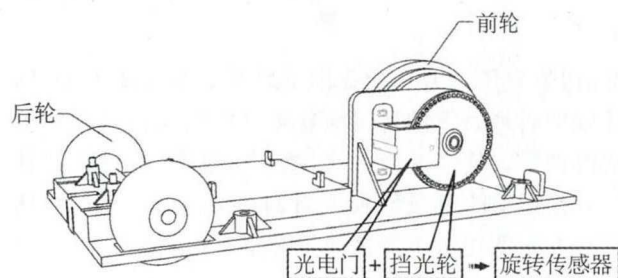


图 8

在研发中心主任冯容士的指导下,我们把该模块的轮式光栅与一个大直径轮盘同轴安装在一起,把该轮盘作为小车的前轮,一辆能够测量自己运动状态的智能化小车的雏形就呈现在眼前了。由图 8 可见,小车有三个车轮,前轮直接带动挡光轮转动。两个后轮为随同轮。

鉴于这一研发思路的核心是将小车的直线运动转换为旋转运动加以测量、研究,而将旋转运动的测量结果再还原为直线运动数据的时候,需要在计算机算法内嵌入 $C = 2\pi r$ 公式,因此我们将其定名为“ π 系统”。

二、 π 系统的定型

从基础设计到最终定型,其间还有相当遥远的路程。研发中心建立 π 系统的模型之后,对之进行了长达四年的配套和完善工作。这些工作主要分为四个方面。

1. π 系统小车

既然研发中心已将工作目标定为“使小车具备自主测量时间、位移和速度等运动学要素的功能”,所以通过功能的模块化,对小车形成了如图 9 所示的结构要求:

(1) 车体

π 系统小车的车体包括车架、外壳和车轮等机械构成。其中,车架需要能让相关的电路安装到位并便于开关使用;外壳除了起到对小车内部结构的封装作用外,还要根据实验用途,预留牵引绳或弹簧

挂钩、磁铁嵌入槽(用于弹性碰撞实验)、尼龙搭扣粘贴凹槽(用于完全非弹性碰撞实验)、配重块固定装置(用于验证牛顿第二定律、动能和动量定理)和若干开关的孔位等;车轮的设计要求更为特殊——小车采用三轮结构,单一的前轮系与轮式光栅同轴安装的大直径宽轮,以保证有足够的摩擦力做到对小车任何微小移动的灵敏响应;双后轮为小直径窄轮,用于支撑车体并尽可能减小滚动摩擦力。

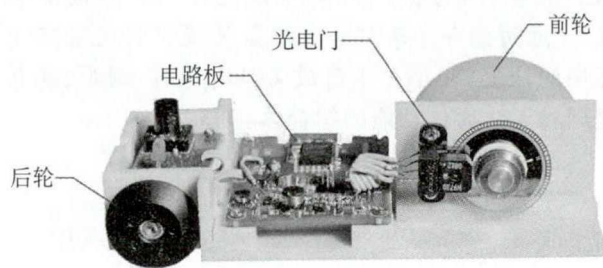


图 9

(2) 电路

π 系统小车的电原理图如图 10 所示。其中,信号处理电路是核心,统辖着其他模块的运行。

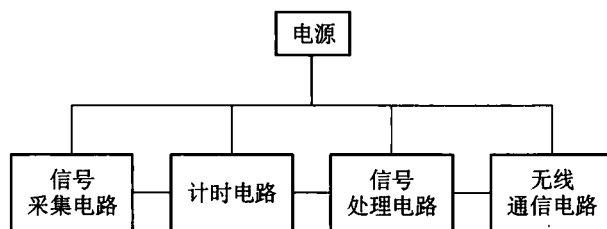


图 10

信号处理电路采用单片机,负责将光电门在轮式光栅转动时获得的“挡光、透光”数据进行初级处理,计算出小车的直线位移数据,并将位移数据与对应的时刻进行编码,提供给无线收发电路并控制后者的数据通信。该电路外接“调零”按钮,可对位移进行人工置零,可将任意点设置为位移测量的起始点。

信号采集电路的核心是光电门。前文所述,与小车前轮同轴安装的轮式光栅上均匀分布着 500 条狭缝,转动一圈可令光电门产生 2000 个“挡光、透光”信号,因此其理论测距分辨率可达 0.4 mm。光电门除能够给出运动距离数据之外,另可通过挡光所形成的方波的相位信息给出运动的方向数据。

计时电路采用石英晶体振荡器,为单片机提供系统时钟。晶体振荡器是实现“启动就记录”和“运动即测量”的核心部件,可以保证光电门与信号处理

电路的时间一致性,并可为计算机提供与位移数据对应的时间信号。

无线通信电路由蓝牙发射模块和指示灯构成,嵌于车体内部。

供电电路由锂电池、开关电路和稳压电路组成。

图 11 所示为研发中心根据上述车体和电路要求设计出的小车结构图。

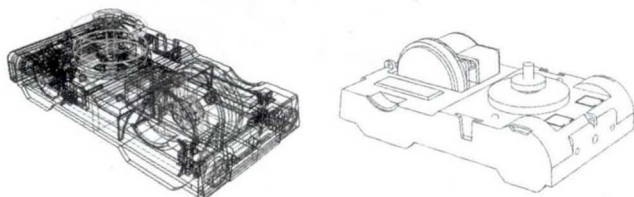


图 11

2. π 系统无线接收模块

无线接收模块用于接收 π 系统小车发射的蓝牙信号,外形和接口类似 U 盘,使用时插入计算机的 USB 接口。

3. π 系统轨道

π 系统小车独特的三轮结构,决定了 π 系统所用的轨道与 DIS 多用力学轨道系统使用的轨道有着显著区别—— π 系统轨道在中心位置设置了一个供单前轮使用的凹槽(见图 12),简称“槽式轨道”。

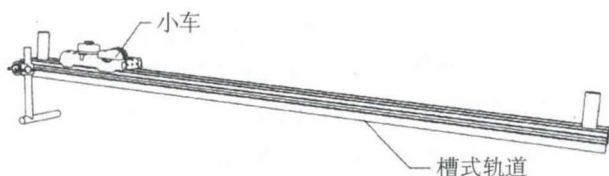


图 12

4. 实验教学软件

π 系统配备有专用软件,可在计算机上实时显示系统的测量数据和计算结果。该专用软件内置公式库和算法库,可对时间、位移等基础数据进行积分等数学运算,能够满足中学和部分大学物理运动学实验数据处理的要求。

π 系统小车的基本运行模式如下:当小车在槽式轨道上运动时,与前轮同轴的轮式光栅转动,光电门将挡光形成的信号输出至控制电路,经过处理后再由通信模块以蓝牙格式输出,接插在计算机 USB 接口上的无线接收模块接收上述蓝牙信号之后,由专用软件将其转换为可视化图形和数据。

π 系统可同时采集两路数据,因而能够在实验中

支持两辆小车并行使用,实时获取两辆小车的“位移-时间”数据,并可依据所获的数据,得出两辆小车速度的变化情况。这项功能用在完全弹性碰撞和完全非弹性碰撞实验之中,满足了测量两车碰撞之后运动状况的实验需求,填补了此领域的国际和国内空白。

三、 π 系统的实验教学应用

1. 联机和调试

将 π 系统应用于实验教学,应遵循以下规程:

将无线接收模块接入计算机,打开 π 系统专用软件;

将 π 系统小车放在轨道上,确保其三个轮子均与轨道处于稳定接触的状态;

打开 π 系统小车上的电源开关,轻按小车上的调零按键,将小车此时所处的位置确定为零点;

轻推小车改变其位置,计算机上即可实时显示小车当前位置与零点之间的距离,并可描绘出“位移-时间”图线。根据所获的数据,还可计算出小车运行的速度、加速度。

2. 实验案例

(1) 验证牛顿第二定律——从 $v-t$ 图求加速度
作为经典力学最基本定律之一,牛顿第二定律的验证要点是测量加速度。

如图 12 所示,将 π 系统小车置于倾斜的槽式轨道上,点击专用软件——“从 $v-t$ 图求加速度”,令小车沿轨道自由下滑,系统即可实时获得 $v-t$ 图线。在图线上选择某一区域,即可在数据窗口中获得该区域内的图线的起始点所对应的初位移、末位移时间差和加速度值(如图 13 所示)。

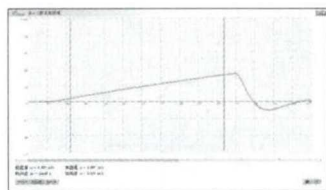


图 13

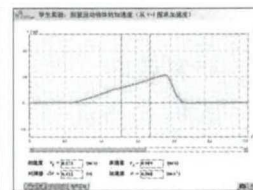


图 14

图 14 所示为使用分体式位移传感器做同一实验所得的实验图象。两者对比可知, π 系统从实验精度和图象线性度上有了较大提升。

(2) 验证动量守恒定律——碰撞中总动量不变
动量守恒定律是最早发现的一条守恒定律,法国哲学家兼数学家、物理学家笛卡尔在这方面做出了重要贡献。验证动量守恒定律也是高中物理实验中的一个经典内容。

如图 15 所示,在槽式轨道上放置两辆质量相同的 π 系统小车。实验时,两小车磁性缓冲器相对,令小车 1 运动并与处于静止状态的小车 2 碰撞,碰撞后两小车交换速度。计算机实时给出每辆小车的“速度-时间”图线,从图象可见弹性碰撞中动量守恒(见图 16)。如果采用尼龙搭扣缓冲器做实验,能够得出非弹性碰撞同样保持动量守恒的结论(见图 17)。

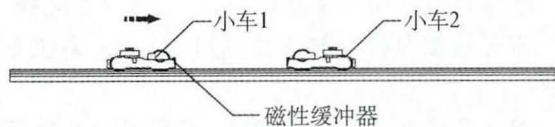


图 15

增大 π 系统小车 2 与轨道间的摩擦力(可将软质摩擦片放在小车前端的轨道上)再做实验,可得到总动量不再保持不变的结论。这表明两车相碰后总动量保持不变是有条件的,即两小车所受外力之和为零。

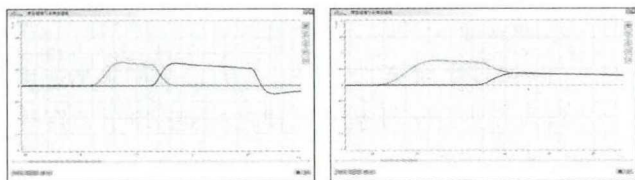


图 16

图 17

使用 π 系统可以连续记录两辆小车运动中的位移及速度变化情况,此功能首先是 DIS 分体式位移传感器系统所不具备的。其次,在碰撞实验中,可避免使用光电门时经常遇到的测量点过于接近或远离碰撞点的问题。这些都是对物理实验教学空白的成功填补。

研发后记

光阴荏苒。早在南北朝时期,相传当时的科学巨擘祖冲之先生就造出了能够自主测距的记里鼓车(如图 18 所示)。人民教育出版社出版 1982 年第一版的《物理》教材中,则给出了轮式测距的插图(如图 19 所示)。

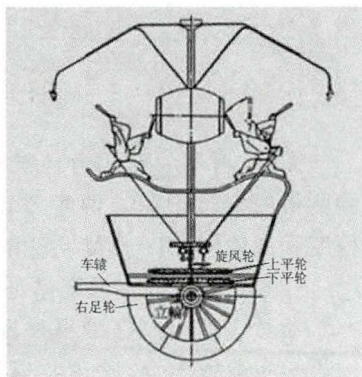


图 18

由此可见,将直线运动距离转化为轮子的周长乘以滚动的次数的思路古已有之。让交通工具具备自主测距能力,先人也早已尝试。

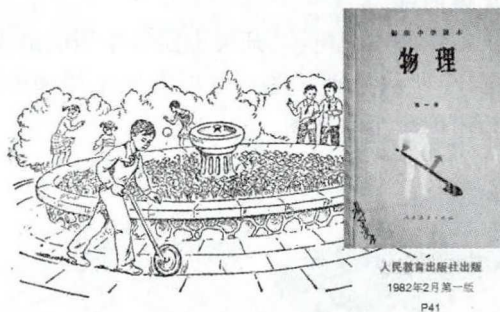


图 19

具体到物理实验,从打点计时器到频闪照相,都是利用外部的测量手段对运动物体进行测量,在上述体系之中,运动物体都是被动的、非智能化的。正是因为认识到物理实验教学领域不应该成为信息技术和思维革新的盲区,DIS 才得以诞生;而 DIS 分体式位移传感器之所以能让运动学实验教学水平有所进步,就在于将无线的信号发射源安装到了运动物体之上,使运动物体参与到了测量系统之中。至于 DIS 光电轨道系统,其所借助的运动物体——光电扫码小车已实现了部分智能化,可以通过与特制轨道系统的互动,实现半自主的计时、测距。而进一步优化运动学实验测量方法的方向,就在于沿着变被动测量为主动测量的路线,抛开外部的测量限制(包括轨道上的条码),强化运动物体——小车针对时间、位移和速度的自主测量功能。于是,就有了本文所述的 DIS 光电计时测距系统—— π 系统。

(本文图:王浩)

参考文献

- [1] 张越,徐在新. 高级中学课本·物理拓展型课程·第一册(试验本). 上海:华东师范大学出版社,2003
- [2] 冯容士,陈燮荣. 物理实验创造技法和实验研究. 上海:上海教育出版社,1998
- [3] 张越,冯容士. 高级中学·中学物理实验手册·高中(试验本). 上海:上海教育出版社,2015