

流体中自由下落物体运动特性分析实验装置开发

The Development of Experimental Apparatus for Free Falling Object's Movement Characteristic Analysis in Fluid

景东山

Dongshan Jing

平顶山职业技术学院, 中国·河南 平顶山 467000

Pingdingshan Vocational and Technical College, Pingdingshan, Henan, 467000, China

【摘要】针对流体力学中某些抽象复杂的理论知识,利用传统的实验设备验证和演示缺乏自动化及学生创新思维的培养。开发高速CCD配合采用模式匹配算法的运动控制器,达到实时追踪监测流体中自由下落物体的运动状况,然后通过获得的照片组进行后期处理,计算物体下落的速度、位置与时间的关系。与前期利用流体力学公式预测的结果进行互相验证,查找实验误差产生的原因并修正理论或调整相关参数。该实验装置通过教学实践证明能实时呈现试验结果,提升实验结果的准确性,有利于培养学生的创新能力。

【Abstract】Aiming at some abstract complex theories in fluid mechanics knowledge, the lack of automation in traditional experimental apparatus' validation and demonstration, and for the need of the cultivation of students' innovative thinking. In this paper, the development of motion controller composed by high speed CCD using pattern matching algorithm is achieved, in order to get the real-time movement condition of the free falling object in fluid, and then with the help of the post-processing of obtained photos, to count object's falling speed, position and time. Comparing with the early predicted results by means of fluid mechanics formula to validate each other, to find the causes of experimental error and correct theory or adjust the relevant parameters. Through the teaching practice, it proves that the experimental device can display the real-time results, improving the accuracy of experimental results, which is beneficial to cultivate the students' innovation ability.

【关键词】自由下落;流体;高速CCD;线性滑轨;模式匹配;实时处理

【Keywords】free falling; fluid; high-speed CCD; linear slide rail; pattern matching; real-time processing

【DOI】<https://doi.org/10.26549/gcjsygl.v3i1.1394>

1 引言

物体在流体中的运动状况在工程上一直是重要的课题,从深海中的潜水艇到空中的飞机,都必须精密计算阻力及黏滞力^[1]。为了研究及验证流体与物体交互作用后所产生的流体力学现象,开发流体中自由下落物体运动特性分析实验装置,其目的是希望学生可以观察并记录到物体在流体中的运动状况,由实验获取运动物体周围的液体流动场、两者之间的阻力及黏滞力系数等。利用高速CCD配合运动控制器达到实时监测流体中运动的物体,再经由公式计算可以获得各物体材料表面性质,以及与液体的交互作用时的状况。

2 系统总体设计

2.1 实验架构

流体力学实验前,首先利用流体力学公式^[2](1)及物体运动公式(2),经计算导出流体阻力的解析解,然后选择不同形状、不同材料之物体,代入数值计算方程式中,经过模拟而得出在不同时间下落距离及速度,由此学生可以对物体的运动进行预测。最后学生运用我们设计的实验量测装置,通过影像实时处理以及伺服实时运动的方式,追踪流体中运动的物体,获得实验结果后再与原始数值计算数据进行比较。

$$p + \rho gh + \frac{1}{2} \rho v^2 = C \quad (1)$$

式中 p 、 ρ 、 v 分别为流体的压强、密度和速度; h 为垂直高度; g 为重力加速度, C 表示常量。

$$\sum F = m \frac{dv}{dt} = V_{ob} \rho_{ob} g - V_{ob} \rho_f - \frac{1}{2} C_d \rho_f A v^2 \quad (2)$$

式中 m 为物体质量; ρ_{ob} 为物体密度; ρ_f 为流体密度; V_{ob} 为物体体积; C_d 为阻力系数; A 为物体投影面积; g 为重力加速度; v 为流体速度。

前期预测:实验前学生必须通过前述的流体力学公式,利用流体中阻力的解析解,计算模拟出预期的落下距离对速度的关系。因为方程本身为隐函数,所以必须通过叠代与查表交互验证^[3],利用数值方法才能求解该非线性运动模型。利用计算出的运动模型,设计出滑轨移动的原始脚本。如果模拟出来的结果是准确的,当滑轨运动时,物体便可以落在影像的正中间。

后期验证:教学时我们希望学生从实验中验证理论,所以我们利用程序解析解模拟出来的脚本,由前期预测处理后的数据,再让马达跟着脚本运动。当滑台向下落时,相机同时进行拍照,然后再由获得的照片组进行后期处理,计算下落的速度、位置与时间的关系。

在照片组中,运动的球体可能因为外界的干扰因素,而导

致物体会稍微飘移并带有随机干扰数据,学生要学习从混乱的数据中分析出有用的数据信息。另外在每张照片球体的位置都有不同的区域坐标,怎样把区域坐标转换成绝对系统坐标,需要经过方程式的贴近似合,这样才能使数据能够较为平滑且利于后续分析。

但是如果学生脚本偏差太大,会有球体跑出感兴趣区域^[4](ROI),因此本试验装置架构,会利用拍照出来的即时影像进行闭合回路伺服运动调整。通过高速(125fps)摄影机的影像采集能力,搭配NI软件与硬件间高速且稳定的联系,再辅以NI Motion and Vision 高速的影像处理速度,让程序能在8ms之内迅速分析图像中球体的位置,并在时限内即时的回馈到运动控制系统上,此高效系统能将球体一直维持在图像中心附近。

这样学生能把数据经过简单处理就能得出精准的运动路径以及时间的关系,并求出精准的速度。最后再把获得的数据与前述前期预测的结果相互验证^[5],发现实验误差产生的原因,再进行修正理论或是相关参数的调整,从而达成利用简单的球体自由下坠,验证流体力学公式的教学目的^[6]。

2.2 物体在流体中的运动关系

2.2.1 流体力学分析

物体在流体中做自由下落运动时,会同时受到与运动方向相同的自身重力,以及与运动方向相反的反作用力。因此,物体受力由反作用力、浮力以及阻力组成^[7],其中阻力与运动速度有关。物体自由落入流体时,起初物体重力效应较大,为加速运动,当落下速度愈快,阻力也愈大,使得重力与反作用力趋于平衡,运动持续一段时间,物体会匀速运动,此时物体所受合力为零,此刻速度即为终端速度。

2.2.2 阻力系数与雷诺数

不同形状的物体,其阻力系数、雷诺数与其表面粗糙度有关^[8],虽然阻力系数不为常数,在一般要求的场合,雷诺数的变化可忽略,可视为常数,雷诺数与球形物体的阻力系数关系如图1所示。以光滑圆球为例,阻力系数约为0.5。

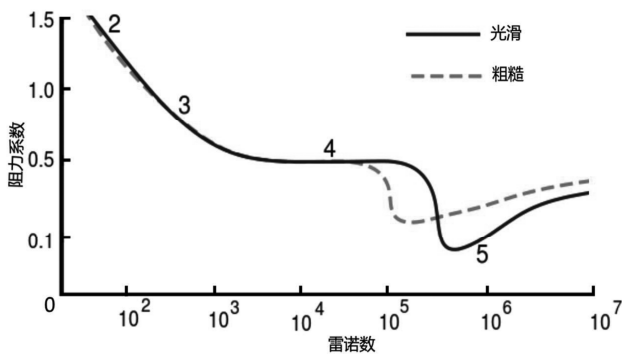
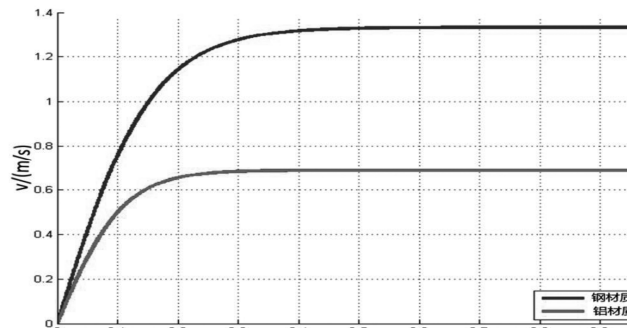


图1 雷诺数与球形物体的阻力系数关系

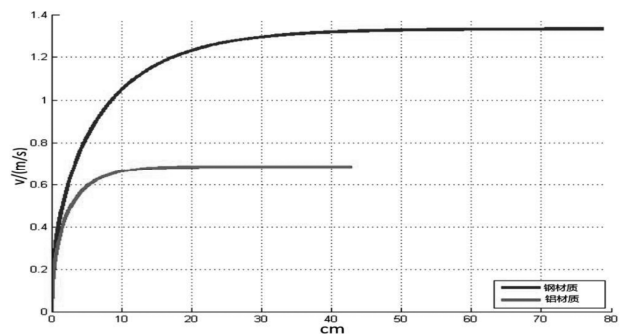
2.2.3 球体运动轨迹模拟

由于将阻力系数设为定值,可通过运算软件模拟物体从

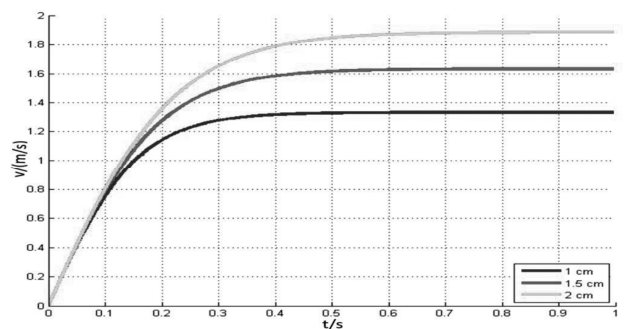
流体自由下落开始至终端速度的运动过程。终端速度值、行程距离、到达终端时间,这些重要数据是选择实验装置中的马达、架构机台的依据,也是最终利用马达及CCD进行实时监控实际运动情形的重要参考资料。图2是针对大小不同、材质不同的圆球在水中作的模拟曲线^[9]。



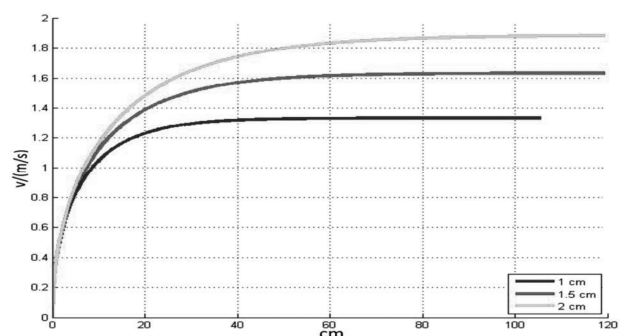
(a)不同材质球体在水中时速度与时间关系



(b)不同材质球体在水中时速度与距离关系



(c)不同大小球体在水中时速度与时间关系



(d)不同大小球体在水中时速度与距离关系

图2 材质与大小不同的圆球在水中模拟的状态曲线

3 影像获取与伺服运动控制

3.1 运动机构及模式匹配算法

本系统通过实时的影像伺服技术,追踪流体中自由下落的物体。实验台的硬件设计分为线性滑轨以及高速CCD两部分,见图3。为了追踪自由落体的高速运动,线性滑轨使用行程为2cm的特殊规格,马达最高速为3000rpm,可用行程为1000mm。搭配NI运动轴控制器的高扭力400W伺服马达及驱动器可以完美的设计加减速,让滑台可以高速的垂直落下以及稳定刹车,同时能让相机稳定的捕捉液体中物体的位置。影像伺服方面利用高效率的模式匹配算法^[9],此种算法在良好的情况下可以实现低时间复杂度。

我们将要追踪的物件模板与当前相机捕捉的影像做比较,计算并抓取当前物体的位置。当物体自由地落入感兴趣区域时,便会启动马达追踪物体,并传回马达编码器即时速度并记录时间,完成一次下落动作后绘制速度与时间关系图,进而获得物体运动状况。利用已知物体的信息,对于已经储存的图像再次分析,对于实验最终结果做一次最后的修正^[10],以期待实验的结果能更准确,更贴近实际实验情况。

图4为程序执行模式匹配算法后运行结果的人机界面,因球体在水中有时会因为初速度偏移,有多余的X或Y方向速度分量,导致球体会在水中晃动或旋转,为了能即时算出偏移量并呈现在图表^[10]上,以期待实验结果能够更准确地呈现,同时让学生能学习使用影像追踪的功能,提升实验结果的准确性。

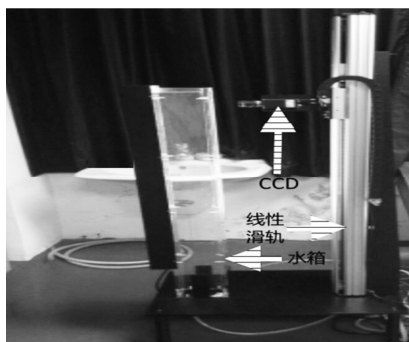


图3 试验设备实物

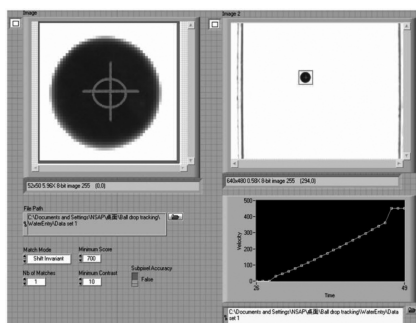


图4 人机界面及实际运作结果

3.2 实时位置监测与实时运动反馈程序架构

为了平行处理CCD采集影像以及运动控制两个工作任务,因此程序采用两段式生产者/消费者(Producer/Consumer)模式架构^[11],程序初始化后,CCD以最高频率拾取(125 fps)图像,经由影像队列传送到图像处理分析模块进行简易的分析处理,获得球体当前所处位置,最后经过严密的数学计算得出所需的运动控制,再将第二个运动队列传送到运动控制返回通道中做脚本控制的微调。

4 结语

本研究开发的流体力学试验设备,利用NI模组化的视觉化处理,搭配运动控制卡和高速机械视觉相机,通过LabVIEW高效的软件编程功能,实现试验结果的图形化界面实时显示。该实验装置能够大幅的提升学生实验的效率,提升试验数据的可信性以及实验的可靠度,有助于培养学生的创新能力。

参考文献

- [1]祝会兵,戴文琰,李建.工程流体力学实验教学的改革与创新[J].宁波大学学报,2008,30(2):107-109.
- [2]毛根海,章军军.应用流体力学实验[M].北京:高等教育出版社,2008.
- [3]刘建龙,谭超毅,曾美玲.流体力学实验课程教学改革[J].中国电力教育,2009,29(1):123-124.
- [4]李轶明.自由落体下落速度振荡现象的研究[J].实验流体力学,2014,28(5):7-12.
- [5]吴班.流体力学实验教学改革探讨[J].唐山学院学报,2007,20(2):105-106.
- [6]赵存有,刘训涛,曹贺.工程流体力学课程创新实践平台的构建[J].实验技术与管理,2013,30(9):63-67.
- [7]束秀梅,李华南,罗媛媛.流体力学实验教学改革与实践[J].实验室研究与探索,2011,30(7):310-312.
- [8]MARTIN R, DELPLANQUE J P. The role of air entrainment on the outcome of drop impact on a solid surface[J]. Acta Mech, 2008, 201(1-4): 105-118.
- [9]NISHIO N, YAMANA K, YAMAGUCHI Y, et al. Large-scale SPH simulations of droplet impact onto a liquid surface up to the consequent formation of Worthington jet[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2009, 63(12): 1435-1447.
- [10]蒋昌波,邓斌,汤寒松,等.液滴自由下落与液面冲击过程的三维数值模拟[J].水动力学研究与进展,2013,28(6):665-674.
- [11]克勤.关于流体力学教学内容改革的探索[J].力学与实践,2002,24(5):70-71.
- [12]郑捷庆,张军,邹峥,等.工程流体力学任务式实验教学模式[J].中国现代教育装备,2007,9(12):101-102.
- [13]赵存友,陈国晶,常录.深化《工程流体力学》课程建设推进创新型人才培养[J].黑龙江教育:高教研究与评估,2011,65(3):45-46.