
基础物理实验 A(1)

基础物理实验(1)(PD)

课程资料

2025 春

I 课程须知	1
I-1 基本信息	1
I-2 课程安排	1
I-3 课程要求	2
II 实验讲义	3
II-0 数据分析与不确定度评定基础	3
II-1 摩擦系数	10
II-2 粘弹性	13
II-3 阻尼振动和受迫振动	18
II-4&5 耦合摆	25
II-6 迈克耳孙干涉仪	40
II-7 晶体学	50
II-8&9 傅里叶光学实验	60

基础物理实验室

2025年1月

II 实验讲义

II-0 数据分析与不确定度评定基础

(改编自朱鹤年先生编著的教材：新概念基础物理实验讲义，清华大学出版社，2013年)

1. 物理量与测量

科学实验离不开对现象的观察，也离不开对表征状态或过程的物理量的测量。

国际计量局在《A concise summary of the International System of Units (8th edition, 2006)》的页首写道：“Metrology is the science of measurements, made at a known level of uncertainty, in any field of human activity”^[1]。这说明了测量的普遍性和重要性，也说明了在测量结果中评定不确定度的必要性。物理实验中，定性和半定量观测固然重要，但基于对物理量科学测量的定量研究通常更为重要。

国际计量学通用名词术语《VIM 2007》中定义：测量是用实验方法获得量的量值的过程。可测量的量 (measurable quantity) 是“现象、物体或物质的可以定性区别和定量确定的属性”^{[2]16}。

物理实验中，不仅要明确测量对象，恰当地选择测量方法，正确完成测量的各步骤，还要学习误差理论和实验数据处理的基本概念，学会能对多数测量表示出完整的测量结果，包括给出确定置信水平的不确定度。

完整的测量结果表示中，必须包括测量所得的被测量的量值和测量单位，一般应给出不确定度。必要时还需写出对测量结果有作用的影响量的值。如测电流计内阻时写出室温 $t = 20.0 \pm 1.0^\circ\text{C}$ ，因为温度是测内阻的重要影响量。测量对象、测量单位、测量方法和测量不确定度曾被称为测量的四个要素。

2. 误差的定义、分类及简要处理方法

2.1 测量误差 (error of measurement) 的定义

通常说误差是测量结果 y 和被测量的真值或约定真值 Y_t 之差 dy

$$dy = y - Y_t \quad (1)$$

真值是理想的概念。只有定义严密时通过完善的测量才可能获得或接近之，它一般无从得知。因此一般不能计算误差，只在少数情况下用准确度高的实际值作约定真值时才能计算误差。

误差的普遍性。由于测量仪器不准确、原理或方法不完善、环境条件不稳定、人员操作不熟练等原因，任何测量结果都可能有误差。虽一般真值未知而不能计算误差，但能分析它产生的主要因素，减小或基本消除某些误差分量对测量的影响。对结果中未能消除的误差分量，要估计出它们的极限值或表征其分布特征的参量，如标准偏差。误差的普遍性要求我们重视对误差的分析，重视不确定度评定，尽可能完整地表示测量结果。

2.2 误差的分类及简要处理方法

误差主要分为两类：随机误差和系统误差。它们的性质不同，应分别处理。

2.2.1 随机误差 (random error)

随机误差的定义

随机误差是重复测量中以不可预知方式变化的测量误差分量。电表轴承摩擦力矩的变动、螺旋测微计的测头压紧力在一定范围内变化、操作读数时在一定范围内随机变动的视差影响、数字仪表末位取整数时的随机舍入过程等，都会产生一定的随机误差分量。

随机误差分量是测量误差的一部分，其大小和符号虽然不知，但在相同条件下对同一稳定被测量的多次重复测量中，它们的分布常常满足一定的统计规律。随机误差分布绝大多数是“有界性”的，大多数有抵偿性，相当多的有单峰性，即绝对值小的误差出现的概率较大。

算术平均值 (arithmetic mean or average)

II-1 摩擦系数

(2012 年第 13 届亚洲物理奥林匹克竞赛实验试题)

1. 引言

由于摩擦力的作用，绕过一个圆柱的细绳的两端的力会不同，如图 1 所示。为悬住细绳一端悬挂的物体，在绕过梁的细绳的另一端施加的力可以比物体的重量小。随着细绳在圆柱上缠绕的圈数的增加，另一端所需施加的最小力会以令人吃惊的速度减小。正是基于此，水手通过将缆绳在码头上的驳桩上缠绕很多圈来固定住船只。

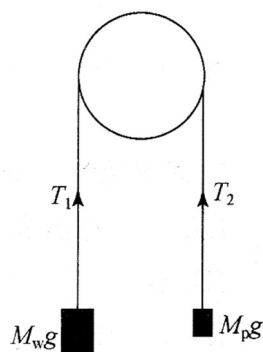


图 1 摩擦力示意图

2. 实验目的

探究负载 $W = M_w g$ 、最小平衡力 $P = M_p g$ 以及缠绕角 θ （细绳与一个或多个圆柱接触部分对圆柱轴心所张角度之和）三者之间的关系。

3. 实验仪器

- (1) 中间竖直放置着一根钢管、其四周水平放置着四根钢管的架子；
- (2) 装在盒内的砝码，包含：500 g，200 g 两个，100 g，50 g，20 g 两个，10 g，5 g；
- (3) 带挂钩的砝码组，每件砝码质量均为 100 g，砝码挂钩的质量也为 100 g；
- (4) 质量为 M_u 的砝码；
- (5) 塑料秤盘。其质量用电子天平称量；
- (6) 白色粗绳(忽略质量)；
- (7) 黑色细绳(忽略质量)；
- (8) 电子天平，量程为 600 g，分辨力为 0.01 g，由插线板上的 USB 插口供电。按右下角“开关”键开机，待自检结束、屏幕显示 0.00，左下角显示单位为 g 之后再使用。(本实验只有秤盘需要用它称量。)
- (9) 完整的实验装置。

注意：不要触摸细绳可能触及到的钢管的表面，因为油脂可能改变表面的摩擦系数。

II-2 粘弹性

(根据 2018 年第 49 届国际物理奥林匹克竞赛实验试题改编)

1. 引言

(1) 弹性材料

当固体材料受到外力时会发生形变。对于小的外力 F ，形变与外力成正比（胡克定律）并且是可逆的，外力被移除后材料恢复到初始形状。

使用应力和应变的概念可方便地描述这一性质。应力 σ 定义为单位面积 S 受到的外力 F ，应变 ϵ 定义为长度的相对变化量，即：

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (1)$$

$$\epsilon = \frac{l - l_0}{l_0} \quad (2)$$

其中 l_0 和 l 分别是材料的原始长度和最终长度。形变很小的材料的弹性行为符合胡克定律，应力 σ 与应变 ϵ 成正比，即：

$$\sigma = E\epsilon \quad (3)$$

比例系数 E 称为杨氏模量。

(2) 粘弹性材料

胡克定律所描述的弹性行为是一种近似，仅对**足够小的形变**有效。对于更大的形变，材料会达到**塑性状态**，并逐渐变得不可逆。这种情况下，材料内部的分子运动开始不受约束，其行为类似于粘性流体。也就是说，如果拉伸或者压缩超过了弹性极限，材料会逐渐地变得像流体。这种既有弹性性质也有粘性流体的特征称为粘弹性。

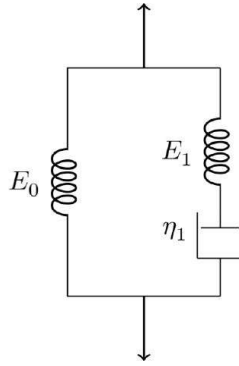


图 1 描述线性粘弹性的标准线性固体模型[1]

描述线性粘弹性的唯象模型称为**标准线性固体模型**，如图 1 所示，其中弹簧代表纯弹性部分，罐子代表纯粘性部分。

用该模型描述粘弹性材料时，需分开考虑弹性行为和粘性行为。产生应变 ϵ 的总应力 σ 是纯弹性应力 σ_0 和粘弹性应力 σ_1 之和，而这两项应力对应着相同的应变，即：

$$\sigma = \sigma_0 + \sigma_1 \quad (4)$$

$$\epsilon = \epsilon_0 = \epsilon_1 \quad (5)$$

其中纯弹性应力项 σ_0 和应变 $\epsilon_1 (= \epsilon)$ 满足胡克定律：

$$\sigma_0 = E_0 \epsilon_1 = E_0 \epsilon \quad (6)$$

此外，粘弹性应变 ϵ_1 通常建模为纯弹性应变 ϵ_1^e 和纯粘性应变 ϵ_1^v 之和，而二者受到的应力相同 $\sigma_1 = \sigma_1^e = \sigma_1^v$ ：

II-3 阻尼振动和受迫振动

1. 实验目的

振动是自然界的普遍运动形式。机械简谐振动——物体（质点）在平衡位置附近做往复的运动，其位移按余（正）弦规律随时间变化，是最简单、最基本的振动。相应地，电流、电压、电场强度和磁场强度围绕某一平衡值做周期性变化，称为电磁振动或电磁振荡。

各种振动的物理机制可能不同，但它们具有共同的特征。本实验借助波耳共振仪探究阻尼振动、受迫振动以及共振的基本规律。实验的主要目的为：

1. 观测不同阻尼对简谐振动的影响，了解阻尼振动。
2. 分析受迫振动的基本规律，测试幅度—频率特性和相位—频率特性。
3. 探究受迫振动的瞬态过程：振动系统在共振频率信号激励下从静止到稳态的过程。

2. 实验仪器

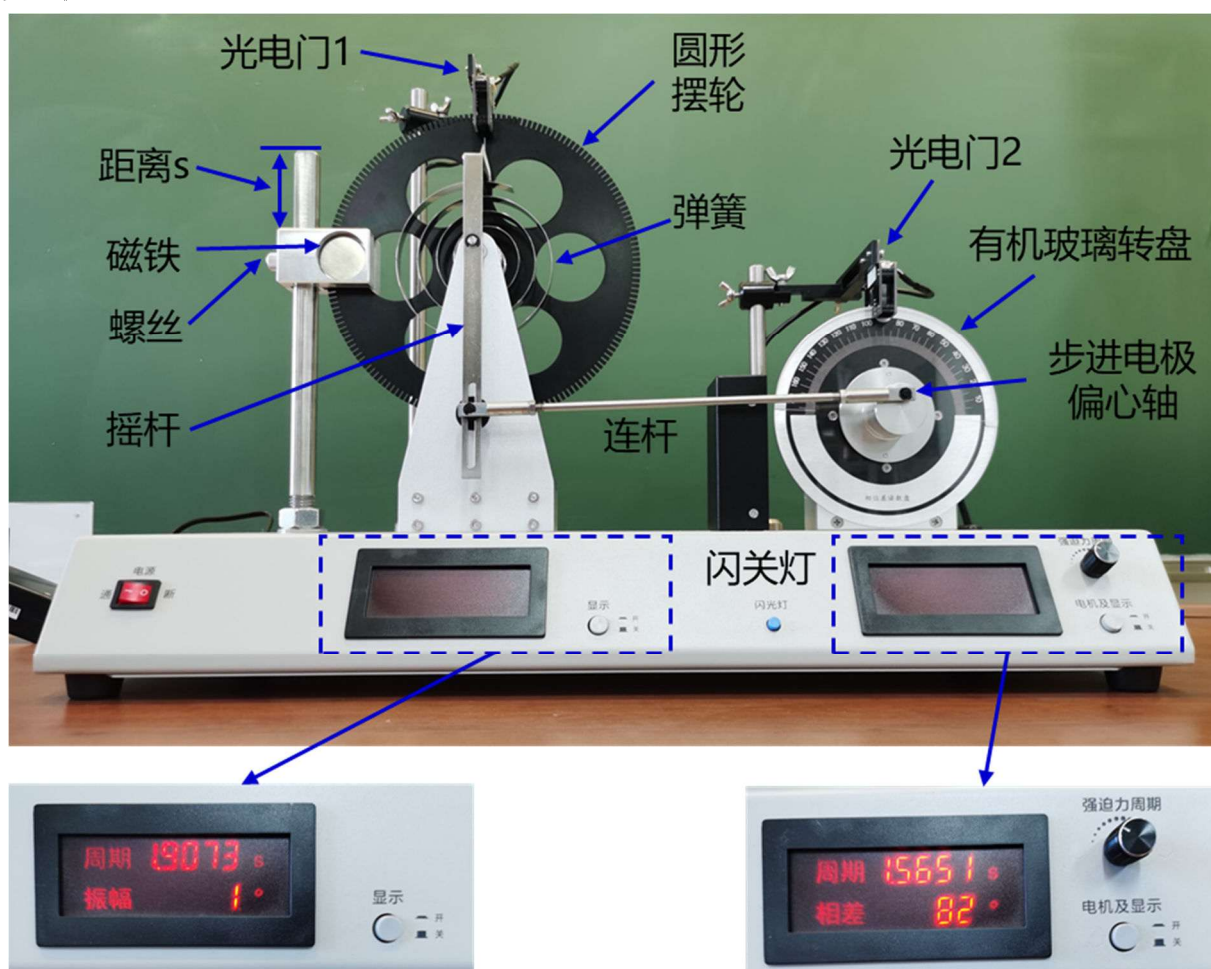


图1 波耳共振仪

本实验所用仪器是专门研究振动的波耳共振仪，仪器结构如图1所示。

圆形摆轮与弹簧连接，构成待测振动系统。弹簧的另一端固定在摇杆上方。

摆轮边沿有一圈周期为 2° 的槽形缺口，光电门1通过测定缺口移动的个数来测量振动的幅度。摆轮有一长缺口，在摆轮完全不受外激励、静止时，长缺口位于竖直位置（平衡位置的标志），它是摆轮振动周期和振幅测量的参考点，也是控制受迫振动时闪光灯开关、并测量受迫振动与激励信号之间相位差的参考点。

在无阻尼的情况下，用手拨动摆轮使其偏离平衡位置后松手，由摆轮和弹簧构成的振动系统即开始自

II-4&5 耦合摆

1. 引言

《费曼物理学讲义》第一卷第 21 章“谐振子”的开头部分讲到[1]:

在学习物理学时,通常分成力学、电磁学、光学等一系列课程,一门课程接着一门课程地学习。但是,有一件奇怪的事情却一再出现,即在物理学的不同课程中,甚至在其他学科中,出现的方程式往往是一样的。因此,这些不同领域的很多现象具有相似之处。举一个简单的例子,声波的传播在很多方面就与光波的传播类似。如果我们深入地研究声学,就会发现很多内容与我们深入研究光学时是相同的。所以,对一个领域中某种现象的研究可以扩大我们对另一个领域的认识。最好从一开始就认识到这种扩大是可能的,否则人们就可能对为什么要花这么多的时间和精力来研究看来仅仅是力学中的很小一部分,感到不可理解。

谐振子可以与很多其他领域的现象相对应。虽然在力学中分析的是弹簧振子、小振幅的单摆等现象,但实际上是在研究一种**微分方程**。这种方程在物理学和其他学科中反复出现,是值得我们认真研究的。包含这个方程的现象还有:谐振电路中电荷的来回振荡,音叉产生声波的振动,原子中的电子产生光波的类似振动,恒温器控制温度的伺服系统方程,化学反应中一些复杂的相互作用,菌落在养料供给和细菌产生的毒素的共同作用下的繁殖和生长,狐狸吃兔子、兔子吃青草等。所有这些现象都遵循一些相似的方程式,这就是为什么我们要深入地研究机械振子的原因。这些方程称为**常系数线性微分方程**,其包含几项之和,每一项都是因变量对自变量的微商再乘以一个常数 a_i ,即:

$$a_n \frac{d^n x}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} x}{dt^{n-1}} + \cdots + a_1 \frac{dx}{dt} + a_0 x = f(t) \quad (1)$$

该方程称为 **n 阶常系数线性微分方程**。

2. 实验目的

本实验所涉及的耦合摆以及与耦合摆类似的耦合弹簧振子、耦合扭摆是基础研究和工程应用的重要基本模型。如固体物理学中用弹簧振子链为模型来模拟晶格振动,研究晶体的热力学和载流子输运特性。耦合摆或耦合扭摆作为基本模型,还广泛应用于地震、化学催化、生物大分子链等方面的研究。

实验目的:

1. 推导单摆、双耦合摆、三耦合摆直至五耦合摆的动力学方程,求解它们振动的**固有频率和模式**,并理解这两个概念。
2. 将上述推导的结论推广到 **N** 耦合摆,由动力学方程求解振动的固有频率、模式和色散关系。
3. 用实验的方法测试耦合摆的固有频率。
4. 观察并测试耦合摆在固有频率驱动力激励下的振动模式(即摆球振幅与位置的关系),通过三角函数拟合得到振动波长。再对若干组固有频率和波长值做直线拟合,验证耦合摆的色散关系。
5. 观察和测试通频范围之外的振动在耦合摆中的传播规律。
6. 学习利用示波器的快速傅里叶变换(FFT)功能对信号进行频谱分析。
7. 练习三角函数拟合方法。

本实验不需要评估不确定度。