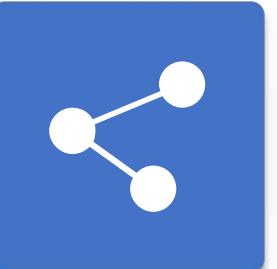




金属材料杨氏模量的测量

The measurement of the Young modulus

浙江大学 物理实验教学中心



1

EXPERIMENT INTRODUCTION 实验简介



杨氏模量（Young's modulus），也称为弹性模量或纵向弹性模量，是衡量材料刚度和弹性特性的重要物理参数之一。它描述了材料在受力作用下沿着加载方向的应力和应变之间的关系，该概念由英国科学家托马斯·杨（Thomas Young, 1773-1829）于1807年提出，因此得名。

杨氏模量的物理意义是在物体的弹性限度内，应力与应变成正比，这个比例常数即为杨氏模量。它是表征材料性质的一个物理量，仅取决于材料本身的物理性质。

杨氏模量是选择机械零件材料的依据之一，也是工程设计中常用的参数。它的测量对于研究各种材料的力学性能具有重要意义，杨氏模量越大，材料越不容易发生形变，反映了材料的刚性。

2

EXPERIMENT OBJECTIVE 实验要求



- 理解杨氏模量的定义以及拉伸法测量杨氏模量的原理。
- 掌握光杆杆测量微小长度的原理
- 学习使用逐差法和数据处理软件处理实验数据，加深对不确定度计算的掌握。

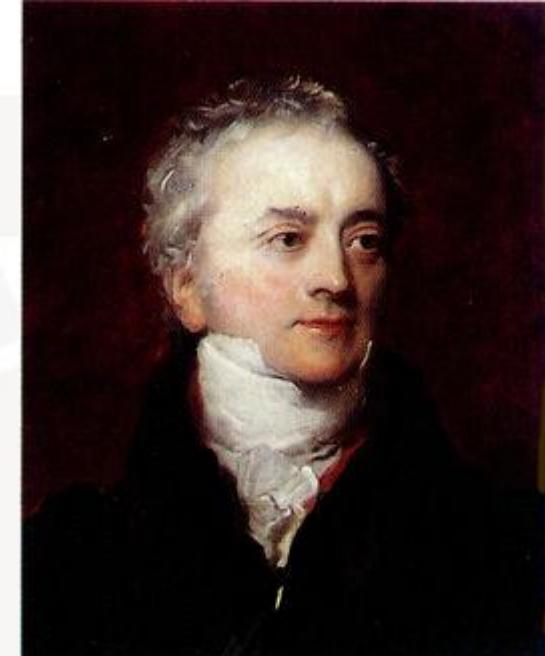
3

EXPERIMENT BACKGROUNDS 实验背景



托马斯·杨 (Thomas Young, 1773–1829) 是英国著名的物理学家、医生、语言学家，被誉为“最后一个百科全书式的人物”。他不仅在光学、力学领域有开创性研究，还涉猎生理学、埃及学等领域。

1801年，他通过著名的杨氏双缝实验，首次用实验证明了光的波动性，为光的波粒二象性理论奠定了基础。他提出人眼通过调节晶状体曲率来观察不同距离的物体，这是对视觉机理的早期科学解释。他成功破译了罗塞达碑的部分象形文字，为古埃及文字的解读提供了关键线索。

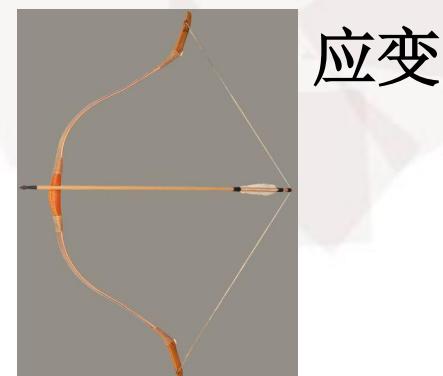
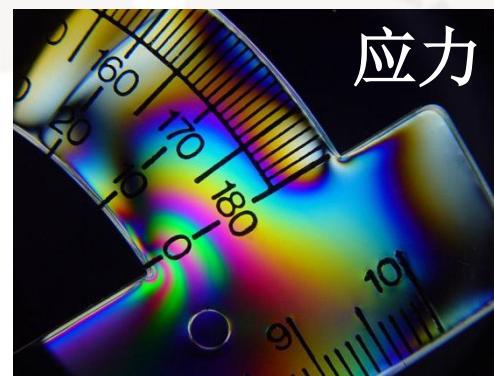


Thomas Young
1773–1829



杨氏模量 (Young's modulus) 是托马斯·杨于1807年提出的材料力学核心概念，用于量化材料在弹性形变范围内的刚度。材料杨氏模量越大，材料刚性越强，越难发生弹性形变，例如钢材的模量远高于橡胶。

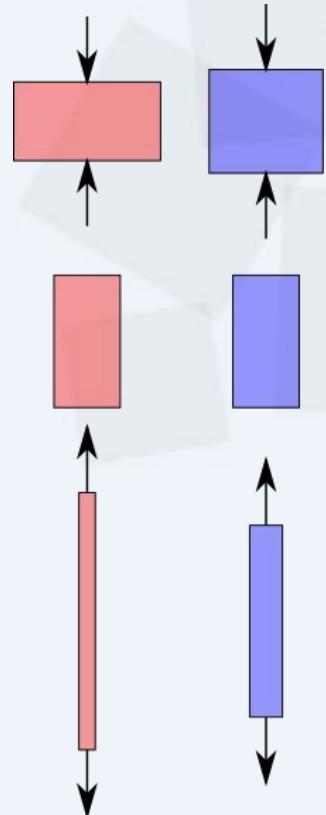
杨氏模量的理论建立在胡克定律（弹性限度内应力与应变成正比）的基础上，但更具体地聚焦于纵向形变，它是机械设计、建筑工程中材料选择的核心参数，直接影响结构的安全性与稳定性。例如，桥梁钢材需高杨氏模量以抵抗形变。杨氏模量的概念还被应用于生物力学（如骨骼强度分析）和材料科学（如纳米材料性能研究）。



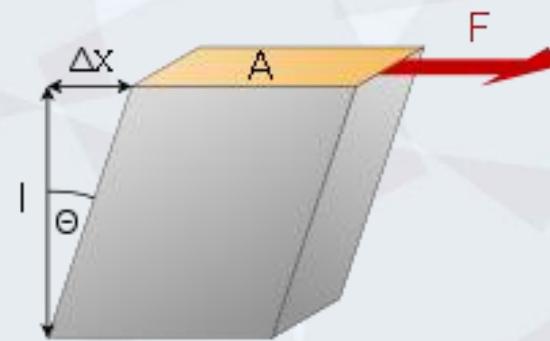


材料的弹性

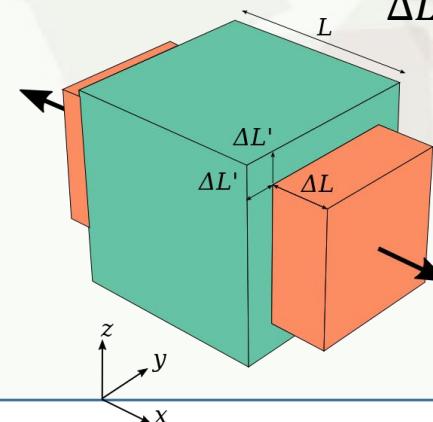
杨氏模量E



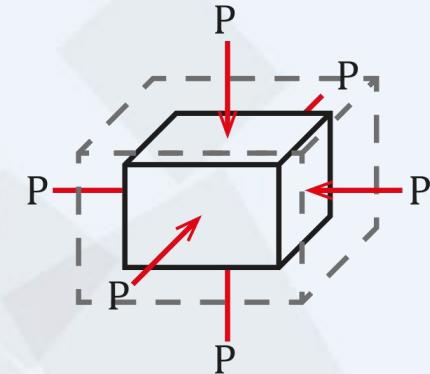
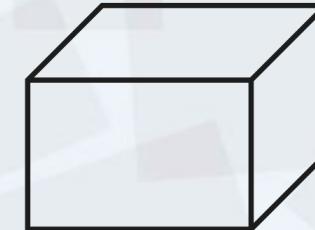
剪切模量G



$$\text{泊松比} \nu \approx -\frac{\Delta L'}{\Delta L}$$



体模量K



均匀、各向同性：

$$E = 2G(1 + \nu) = 3K(1 - 2\nu)$$



常见材料杨氏模量 (10^9Pa)

橡胶	玻璃	铝	铜及合金	钢	碳管、石墨烯	钻石
0.01-0.1	50-90	69	73-127	192-216	1000-1050	1050-1210





连接天空的线缆？大家可以试想一下这种材料的杨氏模量要多大



4

EXPERIMENT PRINCIPLE 实验原理



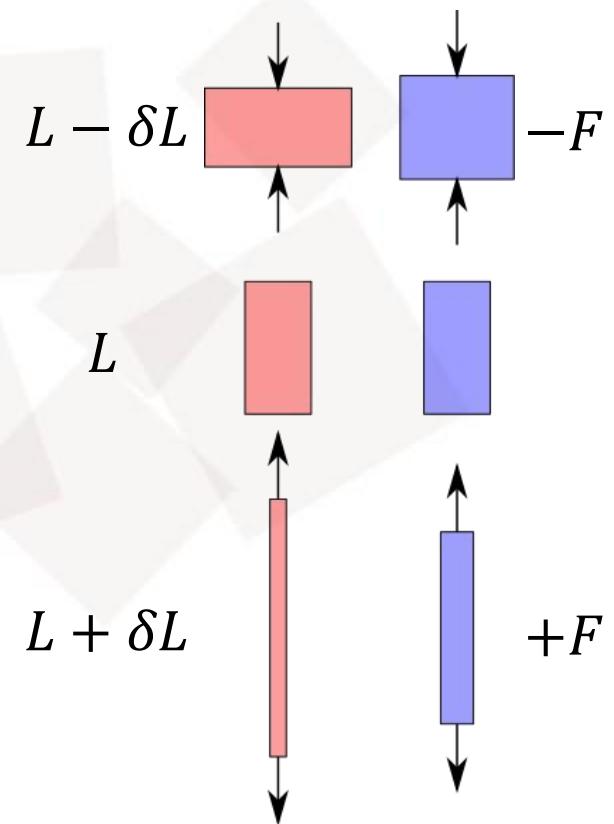
杨氏模量的定义

弹性形变：可逆形变，撤销外力，形变完全恢复

塑性形变：不可逆形变，撤销外力，形变有残余

- **应力：**单位面积上受的垂直力，即 F/S
- **应变：**外力作用的相对形变量，即 $\delta L/L$
- **定义：**在弹性形变范围内，应力和应变的比值

$$E = \frac{F L}{S \delta L} \quad \text{量纲: N/m}^2$$





常见的测量方法

静态法

- 拉伸法
- 扭转法
- 弯曲法

动态法

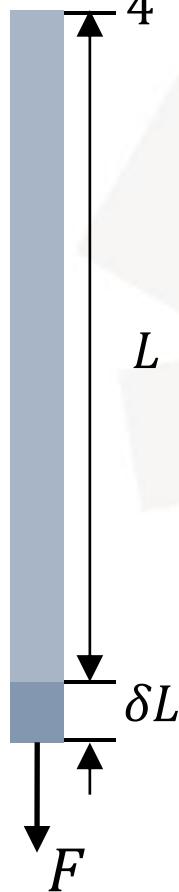
- 弯曲共振法
- 脉冲激振法

波传播法

- 超声波法

拉伸法测金属丝 E

$$S = \frac{1}{4} \pi d^2$$

 $\sim 10\text{-}100\text{ N}$

拉力

 $\sim 1\text{ m}$

金属丝长

怎么测?

$$E = \frac{F L}{S \delta L}$$

金属截面积

金属丝伸长量

直径: $\sim 1.0\text{ mm}$ $\sim 0.1\text{ mm ?}$



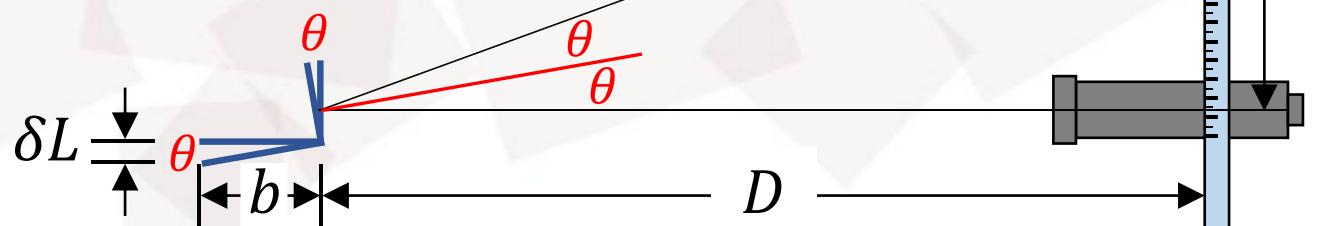
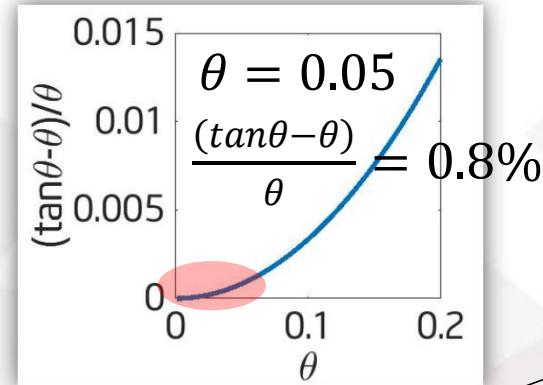
光杠杆的运用

$$\frac{\delta L}{b} = \tan\theta \approx \theta$$

$$\frac{\delta s}{D} = \tan 2\theta \approx 2\theta$$

$$\delta s = \frac{2D}{b} \cdot \delta L$$

小角度近似!



放大倍率



测量模型

$$E = \frac{8DmgL}{\pi d^2 b \Delta s}$$



➤ 已知量

m : 标准砝码

g : 重力加速度标准值

π : 圆周率

➤ 待测量

L : 金属丝总长

D : 光杠杆长臂

b : 光杠杆短臂

d : 金属丝直径

δs : 放大伸长量

➤ 测量仪器

L 和 D : 米尺

b : 游标卡尺

d : 螺旋测微器

Δs : 望远镜中米尺

5

EXPERIMENT APPARATUS 实验装置



1. 支架与固定系统

通常采用双柱支架结构，支架需确保装置底座水平，减少测量误差。通过上下夹具固定金属丝，确保拉伸方向垂直。通过悬挂砝码对金属丝施加拉力，传统装置需手动逐级增减砝码。



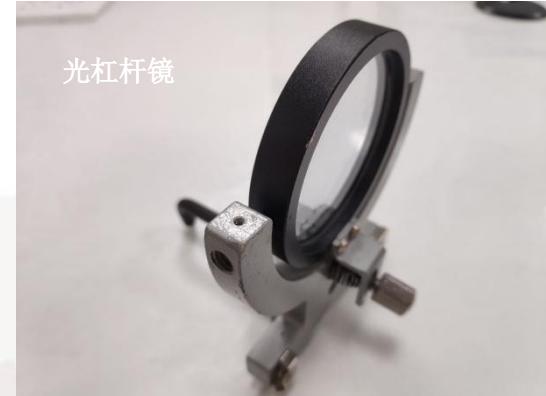
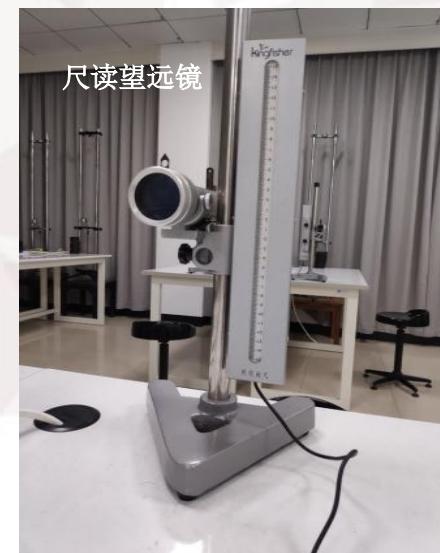
支架

夹具

砝码



2. 光杠杆系统：由光杠杆镜、尺读望远镜组成，利用几何光学原理放大金属丝的微小伸长量（常见的光杠杆放大倍数可达20-50倍）。





3. 螺旋测微计, 游标卡尺, 米尺: 用
于测量金属丝直径等物理量。



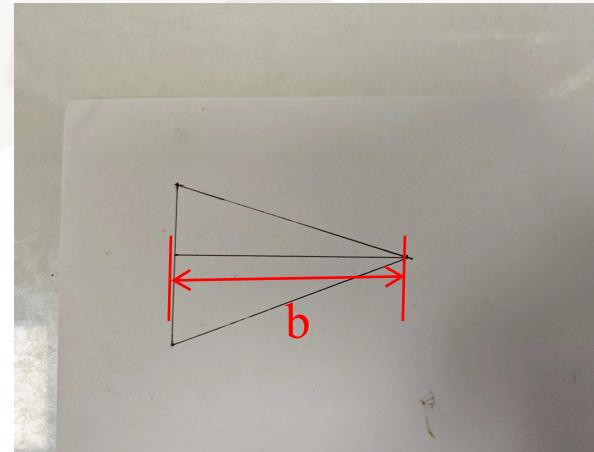
6

PRELIMINARY EXPERIMENT 预备实验



基础物理量测量：

1. 使用螺旋测微计测量金属丝直径 d
2. 使用钢直尺测量金属丝原长 L
3. 使用卷尺测量标尺到光杠杆镜面距离 D
4. 使用游标卡尺测量光杠杆短臂长 b



7

BASIC EXPERIMENT

基本实验



实验步骤

1. 系统调节：支架铅直，金属丝拉直、夹具无接触
2. 光杠杆调节：反射镜面竖直，望远镜对焦、共轴、消视差
3. 连续逐个增加（减少）砝码，金属丝响应，测 Δs
4. 计算杨氏模量和不确定度



原始数据记录：(单位：mm)

	D	b	L	d
1				
2				
3				
4				
5				
6				
平均值				



原始数据记录：(单位：mm)

实验次数	作用力 $F=mg$	标尺读数 (增砝码)	标尺读数 (减砝码)	平均值
1	1kg			
2	2kg			
3	3kg			
4	4kg			
5	5kg			
6	6kg			
7	7kg			
8	8kg			



逐差法分析 Δs

实验次数	砝码 (kg)	标尺读数 _s (增)	标尺读数 _s (减)	平均值
1	1.00			
2	2.00			
3	3.00			
4	4.00			
5	5.00			
6	6.00			
7	7.00			
8	8.00			

$$\Delta s_i = \frac{(s_{i+4} - s_i)}{4}, i = 1, 2, 3, 4$$

$$\bar{\Delta s} = \frac{\sum(\Delta s_i)}{4}$$

$$\Delta_A(\Delta s) = \sqrt{\frac{\sum(\Delta s_i - \bar{\Delta s})^2}{4*3}}$$

$$E = \frac{8DmgL}{\pi d^2 b \Delta s}$$



不确定度的分析

$$E = \frac{8DmgL}{\pi d^2 b \Delta s} \quad (\Delta_A(x) = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n*(n-1)}} , \Delta_B(x) = \frac{\Delta_{\text{xx}}}{p} , \Delta(x) = \sqrt{\Delta_A(x)^2 + \Delta_B(x)^2})$$

依据传导关系（假定测量量不相关）：

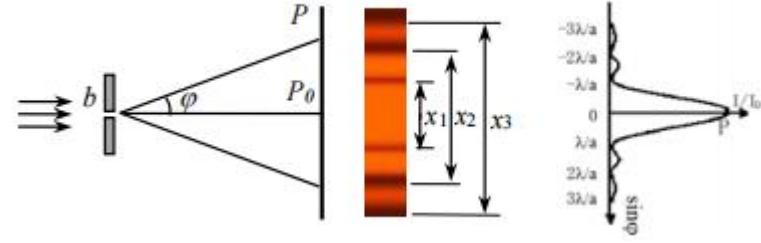
$$\frac{\Delta E}{\bar{E}} = \sqrt{\left(\frac{\Delta m}{\bar{m}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta L}{\bar{L}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta D}{\bar{D}}\right)^2 + \left(\frac{2\Delta d}{\bar{d}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta b}{\bar{b}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta(\Delta s)}{\bar{\Delta s}}\right)^2}$$

结果表达式： $E = \bar{E} \pm \Delta E$ (N/m² 或 Pa)

8

EXPERIMENT EXPANSION

拓展实验



由单缝衍射公式可知，缝宽 b 满足

$$b = k \frac{D}{x} \lambda$$

其中， D 为缝到屏的距离， λ 为光源波长， k 为条纹级数， x 为暗纹位置。

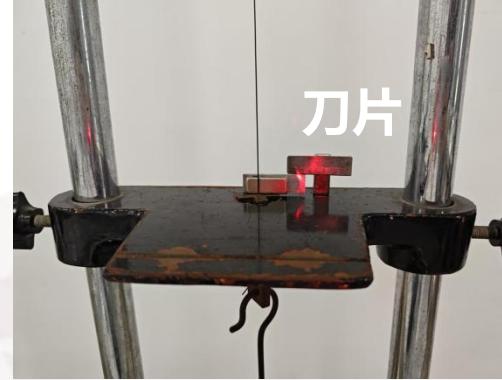


在实验中，我们将一个刀片固定于杨氏模量仪支架上，另外一个刀片固定在下夹具上，随钢丝长度变化下夹具的位置发生变化，刀片位置也发生变化，从而导致两刀片间缝宽发生变化，则暗纹间距会发生相应的改变，结合前页所提到的单缝衍射公式，则钢丝伸长量变化为：

$$\Delta L = \frac{1}{2}(b - b')$$

将钢丝伸长量带入定义式即可求得杨氏模量。

根据此原理，自行设计测量方案和数据表格并完成测量，将测量结果和拉伸法结果进行对比，并分析何种方法 测量更加准确。



9

EXPERIMENT INSPIRATION 实验思考



思考心得

- (1) 思考题
 - 本实验中测量了哪些物理量？分别用什么量具进行测量？有效数字分别是几位？
 - 光杠杆中，增大D和减小b都可以增加放大倍数，那么两者有何不同？是否可以无限放大光杠杆的倍数？
 - 逐差法，作图法，最小二乘法在处理数据时有何不同？
- (2) 实验心得
 - 光杠杆作为一种测量微小长度变化的方法被经常使用
 - 有效数字要把握两头，即读取原始数据时要记住有效位数的含义，表示测量结果是，要注意不确定度和测量结果的有效数字。
 - 掌握数据处理的方法和流程



待测量、量具、光杠杆

$$\frac{\Delta E}{E} = \sqrt{\left(\frac{\Delta m}{m}\right)^2 + \left(\frac{\Delta L}{L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta D}{D}\right)^2 + \left(\frac{2\Delta d}{d}\right)^2 + \left(\frac{\Delta b}{b}\right)^2 + \left(\frac{\Delta(\Delta s)}{\Delta s}\right)^2}$$

放大倍数: ~ 32
 $\tan 2\theta_{max} = 0.026$

待测物理量	物理量范围 (mm)	量具允差 (mm)	相对误差
D	1200.0	1000mm米尺: ± 0.5	0.05%
L	1000.0	1000mm米尺: ± 0.5	0.05%
b	75.00	50分度游标卡尺: ± 0.02	0.027%
d	0.700	螺旋测微器: ± 0.004	0.6%
Δs	4.6	150mm米尺: ± 0.2	5%!



待测量、量具、光杠杆

继续增大?

放大倍数: ~ 45
 $\tan 2\theta_{max} = 0.03$

$$\frac{\Delta E}{E} = \sqrt{\left(\frac{\Delta m}{m}\right)^2 + \left(\frac{\Delta L}{L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta D}{D}\right)^2 + \left(\frac{2\Delta d}{d}\right)^2 + \left(\frac{\Delta b}{b}\right)^2 + \left(\frac{\Delta(\Delta s)}{\Delta s}\right)^2}$$

待测物理量	物理量范围 (mm)	量具允差 (mm)	相对误差
D	1350.0	1000mm米尺: ± 0.5	0.04%
L	1000.0	1000mm米尺: ± 0.5	0.05%
b	60.00	50分度游标卡尺: ± 0.02	0.04%
d	0.700	螺旋测微器: ± 0.004	0.6%
Δs	6.5	150mm米尺: ± 0.2	3%



参考文献

- [1] 李海洋 , 等 , 大学物理实验 I [M]. 高等教育出版社 (2014)
- [2] 国家质量技术监督局计量司. 通用计量术语及定义解释[M]. 中国计量出版社, 2001
- [3] 李艳琴, 赵红艳, 等 , 动力学共振法测量固体杨氏模量[J]. 实验室研究与探索, 28 , 2009 (10)
- [4] 魏勤, 卫婷 , 等 , 超声波法测量金属材料的杨氏模量和剪切模量 [J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 26 , 2012 (1)
- [5] Roebben G , Bollen B, et al , Impulse Excitation Apparatus to Measure Resonant Frequencies, Elastic Moduli, and Internal Friction at Room and High Temperature [J]. Review of Scientific Instruments, 1997, 68(12):4511-4515
- [6] https://en.m.wikipedia.org/wiki/Young's_modulus , etc

谢谢！

The measurement of the Young modulus

MANY THANKS

