

吴卫国 王自平 刘红光 编

工程力学实验

 江苏大学出版社
JIANGSU UNIVERSITY PRESS

吴卫国 王自平 刘红光 编

工程力学实验

 江苏大学出版社
JIANGSU UNIVERSITY PRESS

镇 江

内容简介

本书根据教育部高等学校基础力学课程教学基本要求,按照本科工程力学实验课程教学大纲,总结学校多年工程力学实验课程教学经验,结合国家相关标准编写而成。本书除涵盖基础力学实验的基本内容外,还包括少量培养学生创新实践能力的拓展内容。本书主要内容为理论力学实验、材料力学性能试验、应变电测理论和实验,以及综合性实验等。

本书可作为工科院校的机械、动力、土木和航空航天等对工程力学实验要求较高的专业的实验课程教材,对于材料、冶金、环境、电气工程等中、少学时专业的学生,可按教学要求选开一部分实验。

图书在版编目(CIP)数据

工程力学实验 / 吴卫国, 王自平, 刘红光编. — 镇江: 江苏大学出版社, 2018. 2
ISBN 978-7-5684-0769-4

I. ①工… II. ①吴… ②王… ③刘… III. ①工程力学—实验—高等学校—教材 IV. ①TB12—33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 033482 号

工程力学实验

Gongcheng Lixue Shiyan

编 者/吴卫国 王自平 刘红光

责任编辑/孙文婷

出版发行/江苏大学出版社

地 址/江苏省镇江市梦溪园巷 30 号(邮编: 212003)

电 话/0511-84446464(传真)

网 址/http://press.ujs.edu.cn

排 版/镇江华翔票证印务有限公司

印 刷/镇江文苑制版印刷有限责任公司

开 本/718 mm×1 000 mm 1/16

印 张/8

字 数/164 千字

版 次/2018 年 2 月第 1 版 2018 年 2 月第 1 次印刷

书 号/ISBN 978-7-5684-0769-4

定 价/24.00 元

如有印装质量问题请与本社营销部联系(电话:0511-84440882)

前 言

工程力学是机械、力学、土木、动力、航空航天等工程技术类专业的基础课程,而工程力学实验是工程技术科学的重要实验课程之一。通过这一教学环节可使学生掌握测定材料性能的试验的基本知识、基本技能和基本方法,以及初步掌握验证工程力学理论的方法,并培养学生的动手能力、分析解决实际工程问题的能力和严肃认真的科学作风。因此,本课程在工程技术类专业学生的理论和实践能力培养过程中具有特殊和重要的地位。

科学技术的不断进步,对人才的综合素质及工程实践能力要求越来越高,对工程力学课程的改革也提出了新的更高要求。近二十年来,工程力学实验课程的改革取得了一系列成果,很多教学研究课题组编写了相应的教材,这些教材都具有较高的水平。本书是在参考大量同类教材,并充分调研工程技术类专业认证对学生能力要求的基础上,结合一线教师多年工程力学实验教学工作的经验编写而成。编写过程中参照了教育部基础力学教学指导委员会针对机械、力学、动力等类专业制定的实验教学基本要求,同时结合了最新颁布的国家相关标准。本书既重在实验原理的讲授,又充分注重学生动手能力和创新能力的培养,语言讲述深入浅出,便于学生预习和自学。

鉴于已有的工程力学实验教材在引导学生学习方面的优越性,本书在内容的编排上将工程力学实验的内容分为绪论、理论力学实验、电阻应变测试基础、材料力学性能试验、应变电测法应用实验和综合性实验,共计六章。在内容的编排上考虑了基本原理、方法和工程实际应用三种类型的合理搭配。

本书的第1章、第4章4.1~4.5节和第6章6.2节由吴卫国编写,第3章和第5章由王自平编写,第2章、第4章4.6节和第6章6.1、6.3~6.5节及附录I由刘红光编写。全书由吴卫国统稿,在编写过程中,笔者从与孙保苍教授、江苏大学工程力学实验中心的部分老师的讨论中受到了很多有益的启发,在此一并表示诚挚的谢意。

本书承蒙江苏大学陈忠安教授审阅,他在百忙之中提出了许多宝贵意见,在此表示深深的感谢。

本书的编写参阅了部分同类教材和公开发行的资料,在此向原作者表示真诚的谢意。

限于编者水平,书中定有疏漏和不足之处,殷切希望广大师生和读者批评指正,不胜感激。

编 者

2018 年 1 月

目 录

第1章 绪 论 / 001

1.1 概 述 / 001

1.2 工程力学实验的内容 / 001

1.3 工程力学实验的标准、方法和要求 / 002

第2章 理论力学实验 / 004

2.1 测定弹簧质量系统刚度和固有频率 / 004

2.2 测定不规则物体重心 / 006

2.3 用三线摆法测定圆盘的转动惯量 / 008

2.4 用等效方法测定非均质物体的转动惯量 / 011

第3章 电阻应变测试基础 / 013

3.1 电测应变片概述 / 013

3.2 测量电桥基本原理 / 020

3.3 应变测量和应力计算 / 024

3.4 电阻应变片的粘贴 / 033

第4章 材料力学性能试验 / 037

4.1 试验设备与仪器 / 037

4.2 金属材料拉伸试验 / 042

4.3 金属材料压缩试验 / 054

4.4 金属材料扭转试验 / 062

4.5 金属材料冲击试验 / 070

4.6 金属材料疲劳试验 / 074

第 5 章 应变电测法应用实验 / 080

- 5.1 桥路组合实验 / 080
- 5.2 纯弯梁正应力实验 / 085
- 5.3 弯扭组合变形实验 / 089

第 6 章 综合性实验 / 094

- 6.1 压杆稳定实验 / 094
- 6.2 应变电测法测定材料弹性常数 E 和 μ 试验 / 098
- 6.3 偏心拉伸实验 / 100
- 6.4 叠合梁正应力测定实验 / 104
- 6.5 预应力梁实验 / 107

参考文献 / 111

附录 I 实验误差分析与数据处理 / 112

附录 II 国家标准 / 119

第1章 绪 论

1.1 概 述

实验是进行科学研究的重要方法之一,科学史上许多重大发明都是依靠科学实验得到的,许多新理论的建立也要靠实验验证。不仅如此,实验对工程力学有更重要的一面,工程力学的理论是建立在将真实材料理想化、实际构件典型化、公式推导假设化的基础之上的,它的结论是否正确以及能否在工程中应用,都必须通过实验验证。在解决工程设计中的强度、刚度等问题时,首先要知道材料的力学性能和表达力学性能的材料常数,而这些常数需要通过材料试验才能测定。在大量的实际工程中,构件的几何形状和载荷都十分复杂,构件中的应力单纯靠计算难以得到正确的数据,因此必须借助实验应力分析的手段才能解决,并且通过实验可以进一步检验理论分析的正确性,检验工程结构设计的安全性和可靠性等。

工程力学实验是根据工程力学课程的需要和近代工程力学的发展引入的基本内容,是工程力学教学中重要的实验教学环节。同时,工程力学实验与工程实际密切相关,是解决许多实际工程问题的重要方法之一,也是科研人员必须掌握的重要手段。因此通过这一教学环节不仅可使学生更加深入地理解工程力学的理论知识,而且可使学生学到测定材料性能的试验的基本知识、基本技能和基本方法,以及初步掌握验证工程力学理论的方法。这对培养学生的动手能力和严谨的科学作风十分重要,并且对培养学生的解决实际工程问题的能力也有重要意义。

1.2 工程力学实验的内容

1.2.1 理论力学实验

理论力学中重心和转动惯量都是重要概念,其实验确定方法具有重要的工程意义,本书讲述的用垂吊法测取不规则物体的重心位置和用称重法测取连杆的重心位置,以及用三线摆法测取物体转动惯量和测取不规则物体定轴转动惯量等实

验是工程中常用的方法;而弹簧质量系统的刚度和固有频率测定实验可以使学生对振动基本参数物理意义及其相互关系的理解,初步掌握这些物理参数的测试方法,对今后的专业课程学习和结构动态分析有着重要的意义。

1.2.2 材料的力学性能的测定

材料的力学性能是指在力的作用下,材料在运动、变形和强度等方面表现出的一些特性,如弹性极限、屈服极限(屈服点)、强度极限、弹性模量、冲击韧性度等。这些强度指标或参数都是构件强度、刚度和稳定性计算的依据,一般要通过实验来测定。随着材料科学的发展,各种新型合金材料、合成材料不断涌现,力学性能的测定方法成为研究新型材料的力学性能的重要方法。

1.2.3 应变电测实验

工程力学的一些理论公式是在某些假设和简化的基础上(如杆件的弯曲理论就以平面假设为基础)推导出来的,通过实验的方法验证这些理论公式的正确性和适用范围可加深对理论的认识和理解,本书中介绍的桥路组合实验、纯弯梁正应力实验和弯扭组合变形实验等,均属于这类实验。这些实验也使学生掌握了应变电测法这一重要的实验方法。而对于新建立的理论 and 公式,实验验证更是必不可少的手段。

1.2.4 综合性实验

在工程问题中,由于很多实际结构的复杂性或构件几何形状的不规则性及受力状态的复杂性,振动计算分析和应力计算并无适用理论以进行精确计算。这时用实验的手段来分析便成为有效的方法。近来虽然可以用有限元法计算,但也要经过适当简化才有可能;对于用有限元法计算的结果的正确性,也要通过实验应力分析加以验证。同时,为了提高学生的整体素质,以及为一些对科学实验有兴趣的学生提供一个发挥和培养创新能力的机会,使学生全面掌握更多工程力学实验方法,本书囊括了一些综合性实验项目。

1.3 工程力学实验的标准、方法和要求

材料及结构的各种力学性能指标如固有频率、屈服极限、强度极限、持久极限等,虽是材料的固有属性,但往往与试样的形状、尺寸、表面加工精度、加载速度、周围环境(温度、介质)等有关。为使实验结果能相互比较,国家标准对试样的取材、形状、尺寸、加工精度、实验手段和方法及数据处理等都做了统一规定。我国国家

标准的代号是 GB,其他国家也有各自的标准,如美国材料与试样协会标准的代号为 ASTM,国际标准的代号为 ISO,需要做国际仲裁试验时,以国际标准为依据。

做工程力学实验首先要做好操作前的准备工作,包括试验机及仪表的准备工作,试样的检测和准备,复习操作规程。在正式实验前先试加载荷,观察其现象,一切正常后,再开始正式实验。实验小组的成员,应分工明确,操作要相互协调。对于破坏性实验,如材料强度指标的测定,考虑到材料质地的不均匀性,应采用多根试样,然后综合多根试样的结果,得出材料的性能指标。对于非破坏性实验,如构件的变形测量,要重复进行,然后综合多次测量的数据得到所需结果。实验完毕,要检查数据是否齐全,并注意清理设备,将实验设备归位。整理实验结果时,应剔除明显不合理的数据,并以表格或图线表明所得结果。若实验数据中的两个量之间存在线性关系,可用最小二乘法拟合为直线,然后进行计算;数据运算的有效数位数要依据实验设备、仪器的测量精度来确定,最后按要求写出实验报告。实验报告应当数据完整,曲线、图表齐全,计算无误,并有讨论和分析。

第2章 理论力学实验

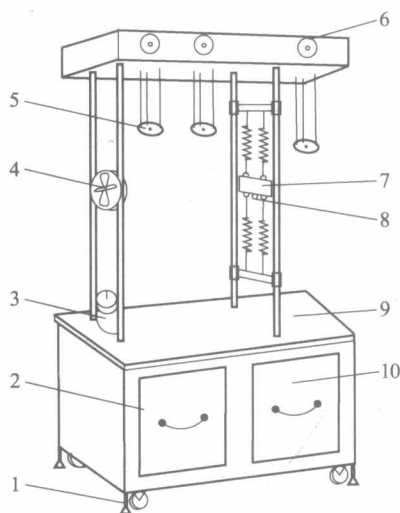
2.1 测定弹簧质量系统刚度和固有频率

2.1.1 实验目的

1. 测试单自由度系统的等效刚度 k 。
2. 计算弹簧质量振动系统的固有频率 f_0 。

2.1.2 实验设备及仪器

ZME-1 型理论力学多功能实验台(见图 2-1), 100 g 砝码 1 个, 200 g 砝码 2 个, 砝码托盘 1 个。



- 1—台面水平调节地撑; 2—抽斗 I (装有连杆、振动载荷、渐加载荷袋和求重心用的型钢模片);
3—调速器; 4—变速风机; 5—三线摆配非均质摇杆; 6—三线摆升降手轮; 7—架控电缆振动模型;
8—刚度测定加载钩; 9—不锈钢工作台面; 10—抽斗 II (装有称重秤、随机工具等)

图 2-1 ZME-1 型理论力学多功能实验台

2.1.3 实验原理和方法

由弹簧质量组成的振动系统,在弹簧的线性变形范围内,系统的变形与所受到的外力的大小呈线性关系。因此,施加不同的力会产生不同的变形,由此计算系统的等效刚度 k 和固有频率 f_0 :

$$k = \frac{F}{\delta} \tag{2-1}$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \tag{2-2}$$

式中: F 为系统所受的外力; δ 为系统的变形量; m 为系统的等效质量。

2.1.4 实验步骤

在架控电缆振动模型(弹簧质量系统)下的砝码托盘上,挂上不同质量的砝码,观察并记录弹簧的变形量。根据弹簧质量系统的变形量及添加的砝码质量,由式(2-1)和式(2-2)计算该系统的等效刚度 k 和固有频率 f_0 。

- 1. 将砝码托盘挂在弹簧质量系统的塑料质量模型下的小孔内,记录此时塑料质量模型上指针所在的初始位置,并定义为 0。已知塑料模型及托盘的质量为 0.138 kg。
- 2. 将 100 g 的砝码放置于砝码托盘上,稳定后,读取并记录指针的偏离位置。
- 3. 逐步增加砝码质量至 500 g,并记录相应的指针偏离位置。
- 4. 画出弹簧质量系统变形量与砝码质量之间的关系曲线,计算等效刚度 k 和固有频率 f_0 。

2.1.5 实验数据处理

根据记录的砝码质量与相应的系统变形量 δ ,按式(2-1)计算系统刚度 k ,求得系统的平均刚度 $\bar{k}$ 。根据平均刚度,按式(2-2)求得系统的固有频率 f_0 。数据处理参见表 2-1。

表 2-1 弹簧质量系统等效刚度及固有频率数据处理表

砝码质量/g	指针位置	变形量 δ /mm	刚度 k /(N/m)	平均刚度 $\bar{k}$ /(N/m)	固有频率 f_0 /Hz
0					
100					
200					

续表

砝码质量/g	指针位置	变形量 δ/mm	刚度 $k/(\text{N/m})$	平均刚度 $\bar{k}/(\text{N/m})$	固有频率 f_0/Hz
300					
400					
500					

2.1.6 注意事项

- 1. 实验前应调节弹簧固定端的调节螺栓使系统的模型保持水平。
- 2. 一定要等弹簧质量系统稳定后再读数。
- 3. 读数时眼睛应平视,尽量减小读数误差。

2.2 测定不规则物体重心

2.2.1 实验目的

- 1. 用垂吊法测取不规则物体的重心位置。
- 2. 用称重法测取连杆的重心位置,并用其计算连杆质量。

2.2.2 实验设备及仪器

ZME-1 型理论力学多功能实验台,型钢组合体,连杆模型,2 kg 台秤,水平仪,支架,积木块。

2.2.3 实验原理和方法

1. 垂吊法求不规则物体的重心

求一非规则型钢的重心,可先将型钢悬挂于任意一点 A,如图2-2a 所示。根据二力平衡公理,重心必然在过悬吊点的铅垂线上,在型钢上画出此线。然后将型钢悬挂于另外一点 B,同样可以画出一条直线。两直线的交点 C 就是重心,如图 2-2b 所示。

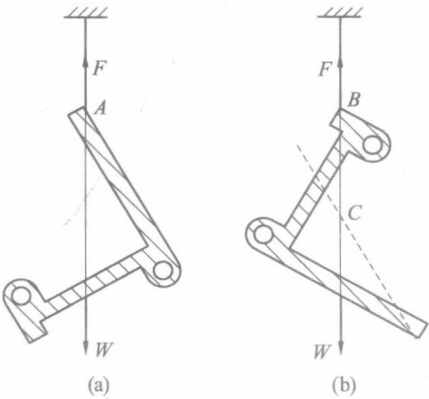


图 2-2 垂吊法求物体重心示意图

2. 称重法求轴对称物体的重心

以均质轴对称连杆为例简述称重法的应用。连杆如图 2-3a 所示, 则其重心必然位于水平轴线上, 因此只需要测定重心距离左侧支点 A 的距离 x_c 。首先测出两个支点间的距离 l , 然后将支点 B 置于台秤上, 保持中轴线水平, 由此可测得 B 处的支反力 F_1 的大小。再将连杆旋转 180° , 如图 2-3b 所示, 仍然保持中轴线水平, 可测得 F_2 的大小。根据平面平行力系, 可以得到下面两个方程:

$$F_1 + F_2 = W$$

$$F_1 \cdot l - W \cdot x_c = 0$$

根据方程, 可以求出重心的位置:

$$x_c = \frac{F_1 \cdot l}{F_1 + F_2} \quad (2-3)$$

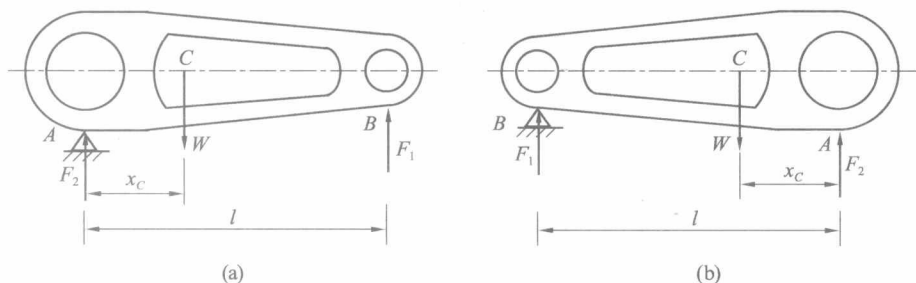


图 2-3 称重法求物体重心示意图

2.2.4 实验步骤

1. 垂吊法

(1) 将型钢组合试件的轮廓描绘在一张白纸上。

(2) 用细绳穿过型钢组合体试件的一个孔, 将其垂吊在 ZME-1 型理论力学多功能实验台顶板前端的螺钉上, 使试件平面铅垂并保持静止。

(3) 使描绘的试件轮廓与试件重叠, 沿着垂线, 用铅笔在白纸上画两个点, 过此两点的直线必然通过试件的重心。

(4) 再用细绳穿过试件的另一个孔, 重复 (2) (3) 两步, 得到另一条重力作用线。

(5) 两次悬吊垂线的交点即该试件的重心。

2. 称重法

(1) 将台秤和支架放置于多功能台面上。

(2) 将连杆的一端放于支架上, 另一端放于台秤上, 使连杆的曲轴孔中心对准

台秤的中心位置。

(3) 根据水平仪,利用积木块调节连杆的中心位置使连杆呈水平状,记录此时台秤的读数。

(4) 取下连杆,记录台秤上积木的质量。

(5) 将连杆转 180° ,重复(3)(4)两步,记录台秤读数。

(6) 测出连杆两支点间的距离。

2.2.5 实验数据处理

垂吊法只需画图,此处的实验数据处理主要针对称重法。将台秤读数记入表 2-2,按式(2-3)计算出重心坐标。

表 2-2 称重法记录表

	总称重/kg	积木称重/kg	净称重/kg	两支点间距/ cm	重心位置 x_c / cm
大头					
小头					

2.2.6 注意事项

- 1. 运用垂吊法,要注意保持试件平面铅垂且处于静止状态。
- 2. 运用称重法,要注意试件应保持水平,连杆两头的圆心应与秤盘重心重合。
- 3. 实验前台秤要调零。

2.3 用三线摆法测定圆盘的转动惯量

2.3.1 实验目的

- 1. 了解并掌握用三线摆法测取刚体转动惯量。
- 2. 分析三线摆摆长对测量结果的影响。

2.3.2 实验设备及仪器

ZME-1 型理论力学多功能实验台,圆盘三线摆,秒表,直尺。

2.3.3 实验原理和方法

转动惯量表示刚体转动时惯性的量度,如同质量是质点惯性的量度一样。可见,掌握转动惯量的概念和测定刚体的转动惯量是十分重要的。

定义质点系内各质点的质量与各质点到轴 O 的距离 ρ 的平方的乘积之和为质点对轴 O 的转动惯量 $J_O = \sum \rho^2 dm$ 。

当质点系为刚体时,上式可写成积分的形式 $J_O = \int \rho^2 dm$ 。转动惯量永远是一个正的标量,单位是 $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ 。它不仅与刚体的质量有关,而且与质量的分布情况有关。下面介绍测试圆盘转动惯量的常用方法——三线摆法的原理。

图 2-4 所示三线摆,均质圆盘质量为 m ,半径为 R ,三线摆悬吊半径为 r 。当均质圆盘做扭转角为小于 6° 的微振动时,测得扭转振动周期为 T 。现在讨论圆盘的转动惯量与微扭转振动周期的关系。

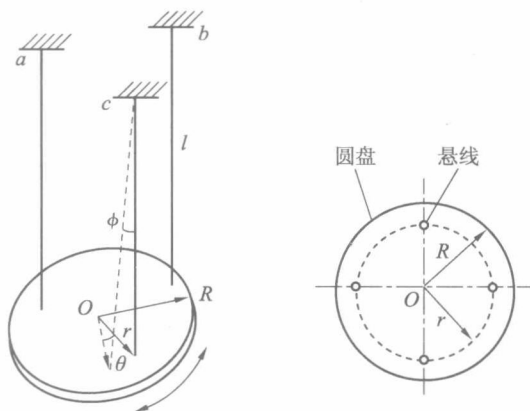


图 2-4 三线摆及圆盘示意图

设 θ 为圆盘的扭转振幅, ϕ 为摆线的扭转振幅,如图 2-4 所示,对于一个微小的位移则有

$$r\theta = l\phi \quad (2-4)$$

在微振动时,有 $\theta = \theta_{\max} \sin \omega_n t$, $\left(\frac{d\theta}{dt}\right)_{\max} = \omega_n \theta_{\max}$,系统的最大动能:

$$T_{\max} = \frac{1}{2} J_O \left(\frac{d\theta}{dt}\right)_{\max}^2 = \frac{1}{2} J_O \omega_n^2 \theta_{\max}^2 \quad (2-5)$$

系统的最大势能:

$$U_{\max} = mgl(1 - \cos \phi_{\max}) \approx \frac{1}{2} mgl\phi_{\max}^2 = \frac{1}{2} mg \frac{r^2}{l} \theta_{\max}^2 \quad (2-6)$$

对于保守系统机械能守恒,即 $T_{\max} = U_{\max}$,得到圆盘扭转振动的固有频率的平方 $\omega_n^2 = \frac{mgr^2}{J_0 l}$,由于 $T = \frac{2\pi}{\omega_n}$,则圆盘的转动惯量:

$$J_0 = \left(\frac{T}{2\pi}\right)^2 \frac{mgr^2}{l} \tag{2-7}$$

式中: T 为三线摆的扭振周期。可见,只要测出周期 T 就可用式(2-7)计算出圆盘的转动惯量,且周期 T 测得愈精确,转动惯量误差就愈小。

2.3.4 实验步骤

- 1. 打开顶板上最右边的转轮锁,转动手轮,使圆盘三线摆下降约 60 cm,锁紧手轮。
- 2. 给三线摆一个初始角(小于 6°),释放圆盘后,使三线摆发生扭转振动,用秒表记录扭转 20 次的时间,算出振动周期 T ,由式(2-7)求出圆盘的转动惯量 J_{0i} 。
- 3. 用不同的线长测三线摆的周期,求出不同线长时圆盘的转动惯量 J_{0i} 。
- 4. 转动右边手轮把圆盘三线摆收回至接近上顶板位置(注意:圆盘接近顶板时,手轮转速要减慢以免线被拉断)。

2.3.5 实验数据处理

已知圆盘的半径 $R = 50\text{ mm}$,厚度 $\delta = 5.3\text{ mm}$,材料密度 $\rho = 7.8\text{ g/cm}^3$,悬线至圆心的距离 $r = 38\text{ mm}$ 。按式(2-7)计算圆盘转动惯量的测量值,按 $J_{th} = \frac{1}{2}mR^2$ 计算圆盘转动惯量的理论值。比较不同线长时圆盘转动惯量的测量值与理论值,分析其误差,并讨论转动惯量的测量值与线长的关系。数据处理参见表 2-3。

表 2-3 圆盘转动惯量测量数据处理表

摆线长度/cm	20 次摆动 时间/s	平均周期 T_i/s	转动惯量/($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)		误差/%
			理论值 J_{th}	实测值 J_{0i}	
20					
30					
40					
50					
60					
70					