

桥梁结构实验与检测

大连理工大学 桥梁工程实验室

2011.9

课程简介

- 2学分，36学时，课程24学时，实验12学时。
- 考察课程，实验报告，实验要求。
- 安排：1~5、7周
- 周一：7、8节，周四：3~4节
- 授课教师：谭岩斌

参考教材

- 《桥梁结构试验（第2版）》 章关永 人民交通出版社
- 《桥梁检测与加固》 王国鼎 袁海庆 陈开利等 人民交通出版社
- 《桥涵工程试验检测技术》 王建华 孙胜江 人民交通出版社

实验课要求

- 实验与听课不同，它的特点是同学们在教师的指导下自己动手，独立地完成实验任务。通常，每个实验的学习都要经历3个阶段。

实验课要求

- 1.实验的准备
- 实验前必须认真听讲老师对实验内容的简介，理解实验目的、依据、方法、结论。以实验目的为中心，搞清楚实验原理(包括测量公式)、操作要点、数据处理及其分析方法等。

实验课要求

- 2.实验的进行
- 内容包括仪器的安装与调整，实验操作，读数与数据记录，计算与分析实验结果，以及结论分析等。
- 进入实验室，要遵守实验室规则。实验过程中对观察到的现象和测得数据要及时进行判断，判断它们是否正常与合理。实验过程中可能会出现故障，在教师的指导下，分析故障原因，学会排除故障的本领。实验完毕，做好仪器设备的整理工作。

实验课要求

■ 3.编写实验报告

- 编写实验报告，是对实验进行全面总结分析的一个过程，必须予以充分重视。通常，实验报告分为3个部分。
- 第一部分：实验目的和原理。目的：说明本实验的目的。原理：在理解的基础上，用简短的文字扼要地阐述实验原理，用图表示原理图。写出实验所用的主要公式，说明式中各物理量的意义和单位，以及公式适用条件(或实验必要条件)。
- 第二部分：实验记录。此部分在实验课上完成。不要任意处记录。修改为杠改。
- 第三部分：数据处理与计算。计算结果与误差计算:计算时先将文字公式化简，再代入数值进行运算。误差计算要预先写出误差公式。
- 实验讨论及作业:对实验结果进行分析讨论(对实验中出现的说明和讨论)，以及写出实验心得或建议等，完成教师指定的作业题。

实验课要求

- 实验报告是实验工作的总结，是经过对实验操作和观察测量、数据分析以后的永久性的科学记录。编写实验报告有助于锻炼逻辑思维能力，把自己在实验中的思维活动变成有形的文字记录，发表自己对本次实验结果的评价和收获。实验报告可供他人借鉴，促进学术交流。因此，编写实验报告要求做到书写清晰、字迹端正、数据记录整洁、图表合适、文理通顺、内容简明扼要。统一为A4纸大小，并独立装订。

实验课要求

- 4.遵守实验规则
- ①学生应在课程表规定时间内进行实验，不得无故缺席或迟到。
- ②学生在每次实验前对安排要做的实验应进行预习
- ③实验前应细心观察仪器构造，操作应谨慎细心，严格遵守各种仪器仪表的操作规则及注意事项。尤其是电学实验，线路接好后先经教师或实验室工作人员检查，经许可后方可接通电路，以免发生意外。
- ④实验完毕前应将实验数据交给教师检查，实验合格者教师予以同意通过。余下时间在实验室内进行实验计算与做作业题，待下课后方可离开。
- ⑤实验时应注意保持实验室整洁、安静。实验完毕应将仪器、桌椅恢复原状，放置整齐。
- ⑥如有仪器损坏应及时报告教师或实验室工作人员，并填写损坏单，注明损坏原因。赔偿办法根据学校规定处理。

学习的基本要素

- 知识

- 技能

- 智慧

智慧

- $101-102=1$
- 挪动一个数字，使等式成立？

- $101-102=1$

- $101-10^2=1$

实验（试验）课的目的

- 学习实验的基本理论、方法、法规。
- 加深对理论知识的理解。
- 培养动手操作能力。
- 启发创造力。

绪论

- 生产实践与实验科学

试验的分类（目的）

- 科学研究性试验

 - 验证理论方法（跨海大桥）

 - 探索新的问题（挑月桥）

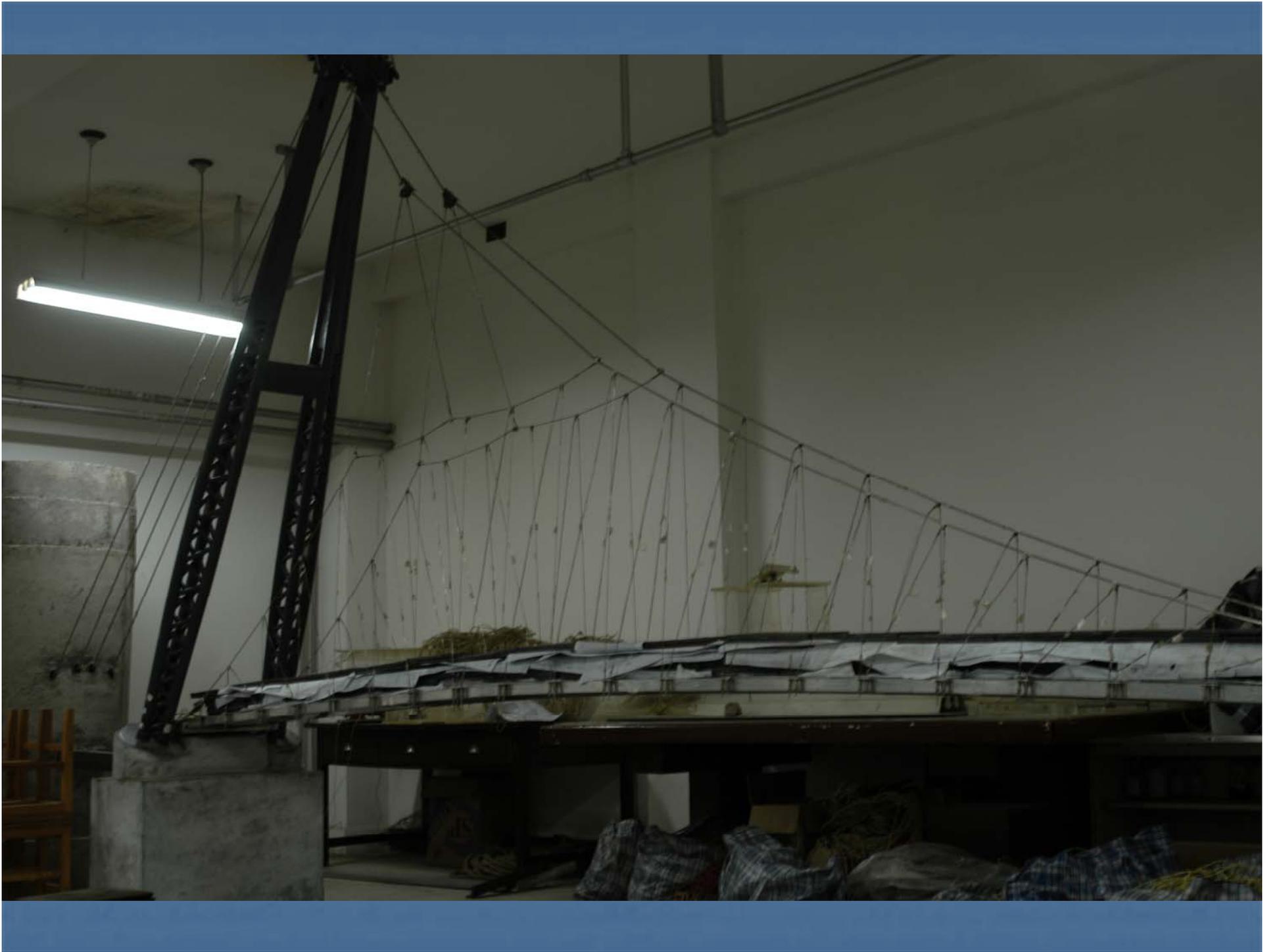
 - 为制定新的设计规范提供依据

- 生产性试验

 - 新桥的检测和鉴定（结构和材料）

 - 既有桥梁的检测和鉴定（维护、存在问题）





试验的分类（对象、内容）

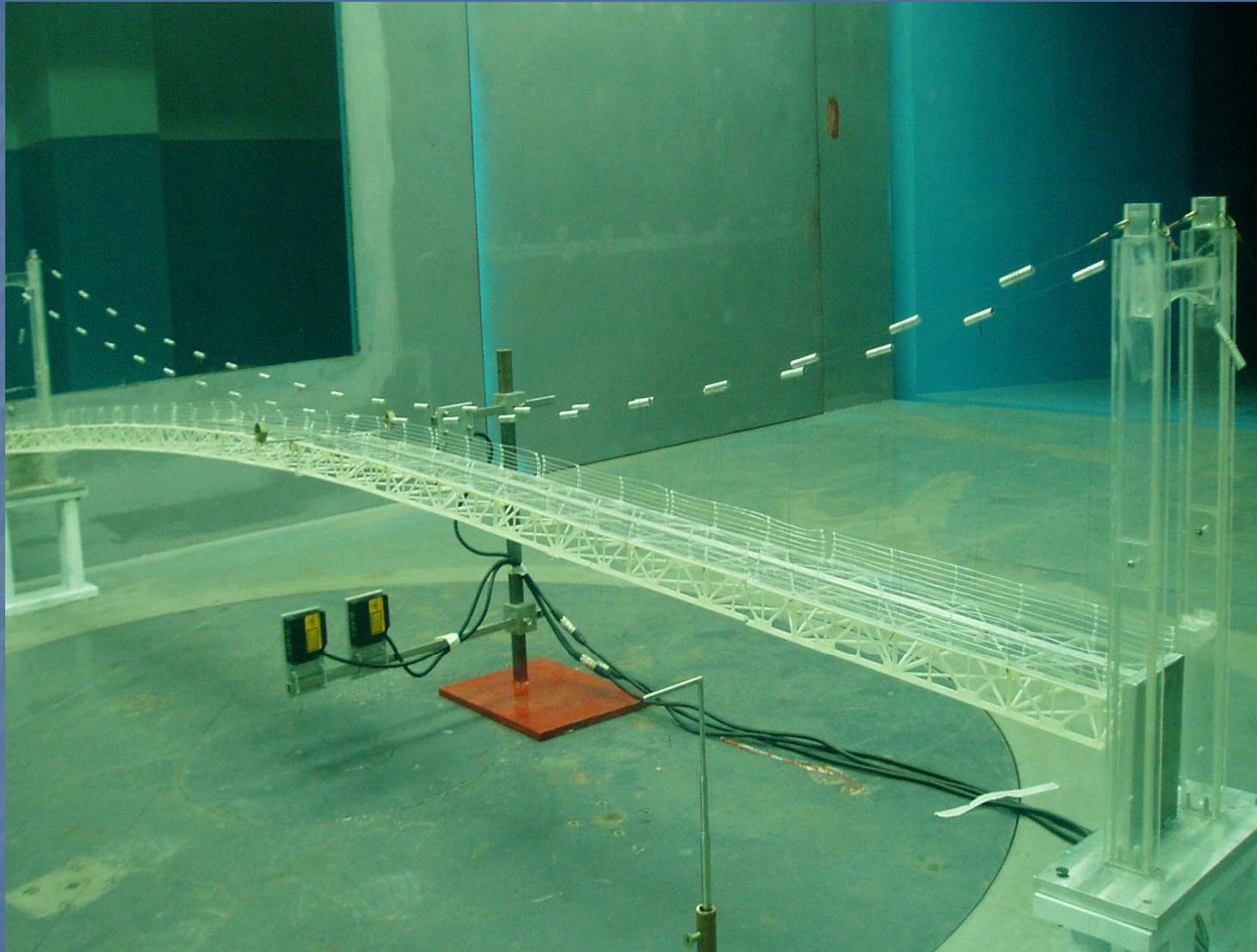
- 原型试验和模型试验
- 静力试验和动力试验

原型和模型试验









静力试验



动力试验



桥梁结构试验的设计

- 总体组织

- 1.明确试验目的

- 2.阅读有关文献

- 3.收集设计、计算资料

- 4.拟定试验方法

- 5.测试仪器设备的准备和试验人员的组织

- 试验方案的制定
 1. 试验目的以及测量要求
 2. 加载方法
 3. 测试内容
 4. 测量方法
 5. 试验程序
 6. 试验进度
 7. 人员的组织和分工
 8. 安全措施

试验数据的整理与试验报告的编写

- 试验过程中原始记录完整真实
- 试验报告的主要内容
 - 1.介绍试验目的、要求及依据
 - 2.试验实施情况（包括：试验荷载、加载方式、测试内容、测点布置和测试仪器等）
 - 3.试验测量数据结果，各种关系曲线及相关分析）
 - 4.对试验结果的综合分析
 - 5.结论
 - 6.试验和报告的日期，主持参加单位，试验单位资质及人员名称，主持人签名

实验科学的特点

- 法律性
(标准, 单位, 方法, 管理, 责任)
- 通用性
- 严谨性 (系统与逻辑)
- 规范性 (程序、结果)
- 真实性

计量法规

- 中华人民共和国计量法
(一九八五年九月六日)
- 国家标准 《量和单位》
- 《通用计量术语及定义》
- 《测量不确定度评定与表示》
- 国家标准 《数值修约规则》(GB 8170-87)

计量单位

- 法定计量单位
- 国际单位制

SI基本单位

量的名称	单位符号
长度	m
质量	kg
时间	s
电流	A
热力学温度	K
物质的量	mol
发光强度	cd

导出单位

量的名称	单位符号
角	rad
立体角	sr
频率	Hz
力	N
应力	Pa
能（功，热量）	J
功率	W
电量	C
电压	V

SI词头

因数	词头名称	符号
10^9	吉	G
10^6	兆	M
10^3	千	k
10^{-2}	厘	c
10^{-3}	毫	m
10^{-6}	微	μ
10^{-9}	纳	n

基本概念

- 量：现象、物体或物质可定性区别和定量确定的属性。
- 量制：彼此间存在确定关系的一组量。
- 基本量：在给定量制中约定地认为在函数关系上彼此独立的量。
- 导出量：在给定量制中由基本量的函数所定义的量。

基本概念

- 单位：为定量表示同种量的大小而约定地定义和采用的特定量。
- 单位制：为给定量制按给定规则确定的一组基本单位和导出单位。
- 量值：一般由一个数乘以测量单位所表示的特定量的大小。
- 测量：以确定量值为目的的一组操作。
- 计量：实现单位统一、量值准确可靠的活动。

基本概念

- 真值：与给定的特定量的定义一致的值。
- 1.量的真值只有通过完善的测量才有可能获得。
- 2.真值按其本性是不确定的。
- 3.与给定的特定量定义一致的值不一定只有一个。

基本概念

- 误差：测量结果减去被测量的真值。
- 相对误差：测量误差除以被测量的真值。
- 随机误差：测量结果与在重复性条件下，对同一被测量进行无限多次测量所得结果的平均值之差。
- 系统误差：在重复性条件下，对同一被测量进行无限多次测量所得结果的平均值与被测量的真值之差。

测量与误差

- 测量包含两个必要的过程，一是对许多物理量进行量测;二是对测量的数据进行处理。
- 在实验前，必须对所观测的对象进行分析研究，以确定实验方法和选择具有适当精度的测量仪器。在实验后，对测得的数据加以整理、归纳，用一定的方式(列表或图解)表示出它们之间的相互关系，并对实验结果给予合理的解释，做出正确判断。

测量与误差——测量分类

- 测量：以测量出某一物理量值为目的的一系列有意识的科学实践活动。
- 按测量方法的不同，测量可分为直接测量和间接测量
- 按测量条件的不同，测量又分为等精度测量和不等精度测量。

测量与误差——测量分类

- 直接测量是把一个量与同类量直接进行比较以确定待测量的量值。一般基本量的测量都属于此类，如用米尺测量物体的长度，用天平称铜块的质量，用秒表测量单摆的周期等。仪表上所标明的刻度或从显示装置上直接读取的值，都是直接测量的量值。

测量与误差——测量分类

- 在物理实验中，能够直接测量的量毕竟是少数，大多数是根据直接测量所得数据，根据一定的公式，通过运算，得出所需要的结果。例如，直接测出单摆的长度 l 和单摆的周期 T ，应用公式 $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ ，以求重力加速度 g ，这种测量称为间接测量。

测量与误差——测量分类

- 对某一量 N 进行多次测量，得 k 个数值：如果每次测量都是在相同的条件下进行的，则没有理由认为所得的 k 个值中，某一个值比另一个值要测得准确些。在这种情况下，所进行的一系列测量称为等精度测量。
- 所谓相同条件的含义，是指同一个人，用同一台仪器，每次测量的周围条件都相同(如测量时环境、气温、照明情况等未变动)。这种情况就可认为各测量值的精确程度是相同的。

测量与误差——测量分类

- 对某一量 N ，进行了 k 次测量，得到 k 个值：如果每次测量的条件不同，那么这些值的精确程度不能认为是相同的。在这种情况下，所进行的一系列测量叫做不等精度测量。
- 例如，同一实验者用精度不同的3种天平称量某一物体质量 m ，得到3个值 m_1 、 m_2 、 m_3 ，或者用3种不同的方法测量某一物质的密度 ρ ，得3个值 ρ_1 、 ρ_2 、 ρ_3 ，这都是不等精度测量。

测量与误差——误差及分类

- 用实验方法去研究事物的客观规律，总是在一定的环境(温度、湿度等)和仪器条件下进行的，由于测量条件(环境、温度、湿度等)的变化以及仪器精度的不同，因而在任何测量中，测量结果 N 与待测量客观存在的真值 N' 之间总存在着一定的差异。测量值 N 与真值 N' 的差值叫做测量误差 ΔN ，简称误差。即

$$\Delta N = N - N'$$



- 任何测量都不可避免地存在误差，所以，一个完整的测量结果应该包括测量值和误差2个部分。真值是理想的概念，一般说来是不可能确切知道的。既然测量不能得到真值，那么怎样才能最大限度地减小测量误差，并估算出误差的范围呢？要回答这些问题，首先要了解误差产生的原因及其性质。误差主要来源于？

- 仪器误差
- 环境误差
- 人员误差
- 方法误差

- 为了便于分析，根据误差的性质把它们归纳为“系统误差”和“随机误差”两大类。

■ 1.系统误差

- 系统误差的特征是:在同一条件下,多次测量同一量值时绝对值和符号保持不变;或在条件改变时,按一定规律变化的误差。系统误差在某些情况下对测量结果的影响还比较大,因此研究系统误差产生的原因,发现、减小或消除系统误差,使测量结果更加趋于正确和可靠,是误差理论的重要课题之一,是数据处理中的一个重要的内容。

系统误差产生的原因

- ①测量装置方面的因素。
- ②测量方法方面的因素。
- ③环境方面的因素。
- ④测量人员方面的因素。

系统误差服从的规律

- ①不变系统的误差。
- ②线性变化的系统误差。
=
- ③周期性变化的系统误差。
- ④复杂规律变化的系统误差。

系统误差的发现

- 提高测量精度，首要问题是发现系统误差，然而在测量过程中形成系统误差的因素是复杂的，目前还没有能够适用于发现各种系统误差的普遍方法，只有根据具体测量过程和测量仪器进行全面的仔细分析，针对不同情况合理选择一种或几种方法加以校验，才能最终确定有无系统误差。

发现系统误差的常用方法

- ①实验对比法。
- ②理论分析法。
- ③数据分析法。

系统误差的减小和消除

- 在实际测量中，如果判断出有系统误差存在，就必须进一步分析可能产生系统误差的因素，想方设法减小和消除系统误差。由于测量方法、测量对象、测量环境及测量人员不尽相同，因而没有一个普遍适用的方法来减小或消除系统误差。下面简单介绍几种减小和消除系统误差的方法和途径。

系统误差减小和消除的方法

- ①从产生系统误差的根源上消除。
 - ②引入修正项消除系统误差。
 - ③采用能消除系统误差的方法进行测量。
-
- 无论采用哪种方法都不可能完全将系统误差消除，只要将系统误差减小到测量误差要求允许的范围以内，或者系统误差对测量结果的影响小到可以忽略不计，就可以认为系统误差已被消除。

随机误差(又称偶然误差)

- . 该种误差是由于感官灵敏度和仪器精密程度的限制，周围环境的干扰以及伴随着测量而来的不可预料的随机因素的影响而造成的。它的特点是大小无定值，一切都是随机发生的，因而把它叫做随机误差。

随机误差出现服从的统计规律

随机误差出现服从以下统计规律。

- ①单峰性。
- ②对称性。
- ③有界性。
- ④抵偿性。

根据上述特性，通过多次测量求平均值的方法，可以使随机误差相互抵消。算术平均值与真值较为接近，一般作为测量的结果。

随机误差的表示

- 随机误差用误差范围来表示，它可由误差理论估算出来，其表示方法有标准误差、平均误差和极限误差等。它们的区别仅在于概率大小的不同。对于初学者来说，首先需要的是建立误差概念以及学会用对实验结果进行评价的简单误差来进行误差估算。有些函数袖珍计算器有标准误差的计算程序，可以直接进行标准误差的计算，具体的用法可参阅计算器的使用说明书。

误差与错误

- 误差

- 错误

误差的表示形式

- 误差的表示形式有绝对误差和相对误差2种。
- 绝对误差 $\pm\Delta N$ 表示测量结果 N 与真值 N' 间的相差范围，正负号“ \pm ”表示 N 可能比 N' 大或小。由测量结果 N 及其绝对误差 ΔN 可以看出真值所在的可能范围为 $N-\Delta N \leq N' \leq N+\Delta N$ ，或简写为 $N'=N\pm\Delta N$ 。
- 仅仅根据绝对误差的大小还难以评价一个测量结果的可靠程度，还需要看测定值本身的大小，为此引入相对误差的概念。相对误差表示绝对误差在所测物理量中所占的比重，一般用百分比表示。例如，测量一长度时得 $1\ 000\ \text{m}$ ，而绝对误差为 $1\ \text{m}$ ，测另一长度时得 $100\ \text{cm}$ ，而绝对误差为 $1\ \text{cm}$ ，后者的相对误差为 1% ，而前者为 0.1% ，所以我们认为前者较后者更可靠。

- 完整的测量结果，不仅要说明所得数值N及其单位，还必须说明相应的误差，用以下的标准形式表示：

$$N'=(N\pm\Delta N)(\text{单位})$$

$$E=\Delta N/N'\times 100\%$$

N-测量值

N'-真值

- 不标明误差的测量结果，在科学上是没有价值的。

误差的估算方法

- 一、单次直接测量的误差估计
- 二、多次测量平均值的误差
- 三、间接测量误差的估算

测量不确定度

- 不确定度

表征合理地赋予被测量之值的分散性，与测量结果相联系参数。

- 标准不确定度

以标准差表示的测量不确定度。

- 实验标准差

对同一被测量作 n 次测量，表征测量结果分散性的量 s 可按下式计算：

标准不确定度的评定

- 标准不确定度的A类评定
用对观测列进行统计分析的方法，来评定标准不确定度。
- 标准不确定度的B类评定
用不同于对观测列进行统计分析的方法，来评定标准不确定度。
- 合成标准不确定度
当测量结果是由若干个其他量的值求得时，按其他各量的方差或（和）协方差算得的标准不确定度。

有效数字

- 一般来说，实验所处理的数值有2种：一种是没有误差的准确值(如测量的次数，公式中的纯数等)；另一种是测量值。
- 测量值总含有一定的误差，因此它的数据就不应无止境地写下去。例如，测量值 $1.394\ 23 \pm 0.002$ ，由误差可知其第三位小数可能是2到6之间的数字，因此第三位小数“4”是不可靠的，在它以下的数字就没有表示出来的必要。上面实验结果应写成 1.394 ± 0.002 ，其中“1”、“3”和“9”是可靠数字，最后一位“4”是可疑数字。一般规定，数值中的可靠数字与所保留的1位(或2位)可疑数字，统称为有效数字。

有效数字

- 测量结果用有效数字表示，可以反映测量的准确度。
- $L=(26.4 \pm 0.2)\text{mm}$
- $L=(26.40 \pm 0.02)\text{mm}$

- $26.4=26.40$
- $26.4 \neq 26.40$

数字的截尾运算

- “四舍五入”
- “尾数大于五进，小于五舍，等于五时取偶”

尾数大于五进，小于五舍

- 如按四舍五入来截尾时，数字2可能是由下面这列数
1.5,1.6,1.7,1.8,1.9,2.0,2.1,2.2,2.3,2.4截尾而得到。撇开1.5这个数不计，其他几个数的平均正好为2，加1.5后，其平均数就比2偏小。如按前述规定，则2是由
1.5,1.6,1.7,...,2.0,...,2.4,2.5截尾得到，平均正好是2。截尾时尾数的进与舍机会均等，这就更合理了。

逢五取偶

- “逢五取偶”是为了避免重复进位而设得。
- 2.444 45这个数来讲，如按“逢五取奇”来舍取，则第一次要取5位有效数字，截尾时写作2.444 5；第二次再进一步截尾成4位有效数字时，将为2.445等等。这就与直接截尾成4位数时所得的2.444相矛盾，故规定所需截去的尾数正好等于5时，截尾后的最后1位应取偶数。

口诀

- 四舍六入五考虑，五后非零则进一，五后全零看五前，五前偶舍奇进一，不论数字多少位，都要一次修约成。

根据截尾原则，截尾成4位有效数字

- 2.345 26
- 2.345 50
- 2.346 50
- 2.347 50

- 2.345 26 → 2.345
- 2.345 50 → 2.346
- 2.346 50 → 2.346
- 2.347 50 → 2.348

数字的科学记数法

- 在乘除和开方等运算中，对数字采用科学记数常常是比较方便的。所谓数字的科学记数法即是将数字分成两部分，第一部分表示有效数字，书写时只在小数点前保留1位数，如3.46,5.894等;第二部分表示单位，以10的几次幂来表示，如 10^{-8} , 10^4

数据的处理方法

- 一、列表法
- 二、图解法
- 三、逐差法
- 四、最小二乘法(线性回归)

图解法

次序	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
U/V	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00	8.00	9.00	10.00
I/mA	2.12	4.10	6.05	7.85	9.70	11.83	13.78	16.02	17.86	19.94

①选点。用两点法

②求斜率。直线方程为，将A和B两点坐标值代入，便可计算出斜率。

③求截距。
$$b = \frac{x_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad a = \frac{x_2 y_1 - x_1 y_2}{x_2 - x_1}$$

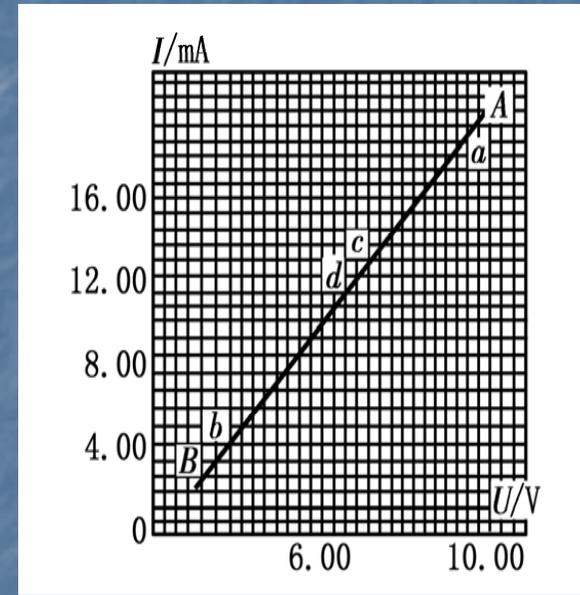


图1-1 电流与电压关系

第一，计算点只能从直线上取，不能选用实验点的数据。

第二，在直线上选取计算点时，应尽量从直线两端取，不应选用两个靠得很近的点。

逐差法

- 在2个变量间存在多项式函数关系，且自变量为等差级数变化的情况下，用逐差法处理数据，既能充分利用实验数据，又具有减小误差的效果。
- 具体做法是将测量得到的偶数组数据分成前后2组，将对应项分别相减,然后再求平均值。

逐差法

- $m=kx$

- $$\overline{\Delta x_i} = \frac{(x_2 - x_1) + (x_3 - x_2) + \cdots + (x_{10} - x_9)}{9} = \frac{(x_{10} - x_1)}{9}$$

$$\frac{(x_{10} - x_5) + (x_9 - x_4) + (x_8 - x_3) + (x_7 - x_2) + (x_6 - x_1)}{5}$$

- 即将上述数据分成后组和前组，然后对应项相减求平均值

最小二乘法（线性回归）

- 回归法首先要确定函数的形式。函数形式的确定一般是根据理论的推断或者从实验数据变化的趋势而推测出来。如果推断物理量 y 和 x 之间的关系是线性关系，则可以把函数的形式写成
- $y=A+Bx$
- 自变量只有 x 一个，故称为一元线性回归。这是方程回归中最简单最基本的问题。
- 回归法可以认为是用实验数据来确定方程中的待定常数。在一元线性回归中确定常数 A 和 B ，相当于在作图法中求直线的截距和斜率。

最小二乘法（线性回归）

- 偏差的平方和为最小

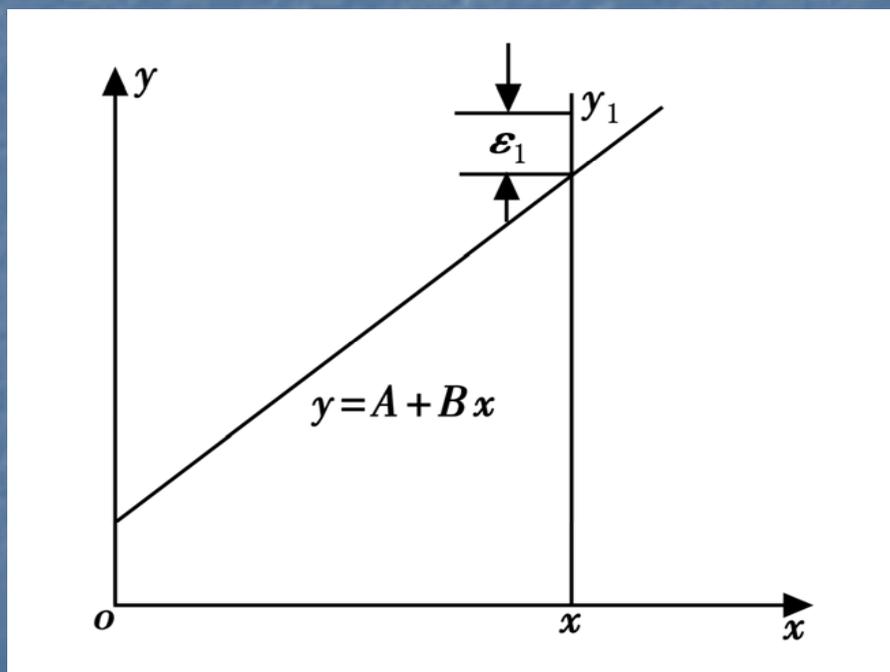


图1-2 直线 $y=A+Bx$

$$\begin{cases} A = \bar{y} - B\bar{x} \\ B = \frac{\overline{x \cdot y} - \bar{x}\bar{y}}{\overline{x^2} - \bar{x}^2} \end{cases}$$

令 \bar{x} 表示 x 的平均值，即 $m\bar{x} = \sum_{i=1}^m x_i$

\bar{y} 表示 y 的平均值，即 $m\bar{y} = \sum_{i=1}^m y_i$

$\overline{x^2}$ 表示 x^2 的平均值，即 $m\overline{x^2} = \sum_{i=1}^m x_i^2$

\overline{xy} 表示 xy 的平均值，即 $m\overline{xy} = \sum_{i=1}^m x_i y_i$

最小二乘法（线性回归）

- 用回归法处理数据最困难的问题在于函数形式的选取。函数形式的选取主要靠理论上的分析，在理论还不清楚の場合，只能靠实验数据的趋势来推测。这样，对于同一组实验数据，不同的人员可能取不同的函数形式，得出不同的结果。

最小二乘法（线性回归）

■ 相关系数r（一元线性回归）

$$r = \frac{\overline{xy} - \bar{x} \cdot \bar{y}}{\sqrt{\left(x^2 - \bar{x}^2\right)\left(y^2 - \bar{y}^2\right)}}$$

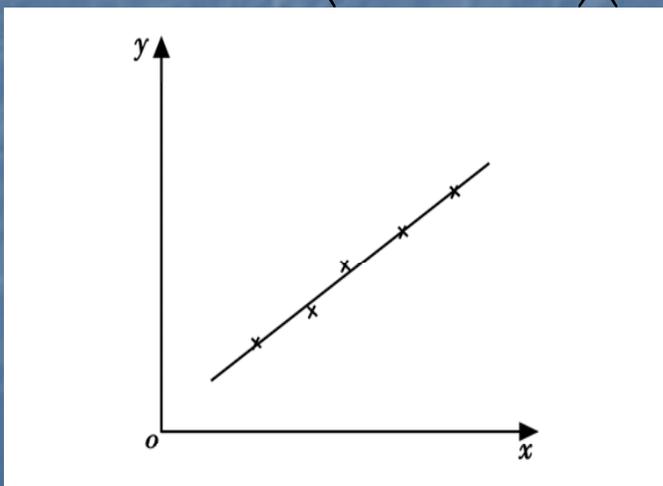


图1-3 密集分布(r值接近于1)

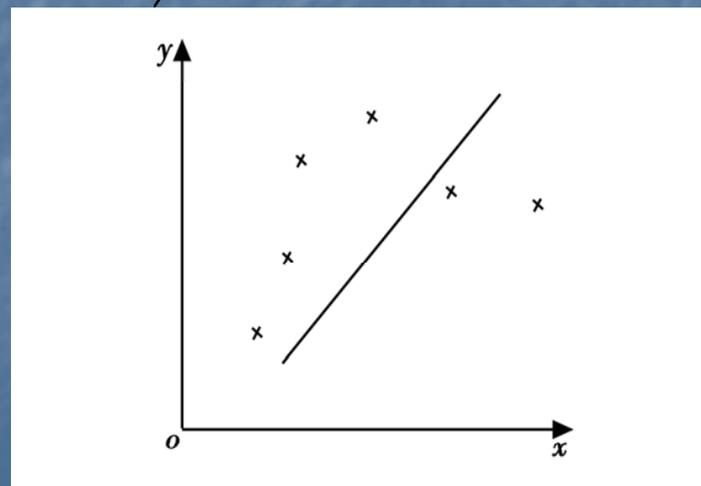


图1-4 分散分布(r值接近于零)