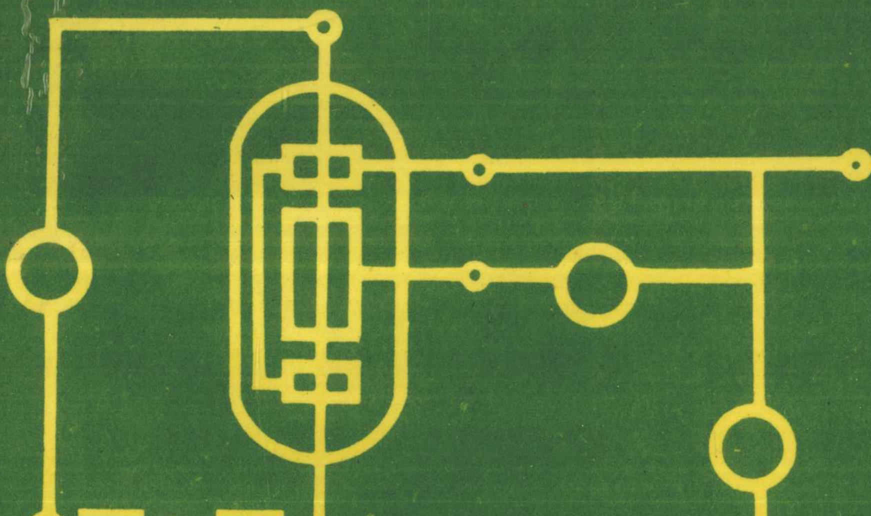
物理实验

LABORATORY PHYSICS

● 潘人培 主编

● 高等学校教学用书



●东南大学出版社

(苏)新登字第012号

内 容 提 要

本书是根据高等工业学校物理实验教学大纲，并参照工科物理实验课程教学基本要求编写的。内容包括：绪论、力学和热学实验、电磁学实验、光学实验、近代与综合物理实验等五部分，共33个实验。大部分实验包括基本内容和提高内容两部分，以适应不同教学要求。书后附录给出了全书实验的仪器配置表。

本书可作为工科各专业的物理实验教材，也可供函授大学电视大学、职工大学使用。

特约编辑　吴宗汉

物 理 实 验

潘人培　主编

东南大学出版社出版

南京四牌楼2号

江苏省新华书店发行　南京上新河印刷厂印刷

开本850×1168毫米　1/32　印张10.375　字数269千字

1986年9月第1版　1993年3月第4次印刷

印数：50001—52300册

ISBN　7—81023—049—2

O·16　　定价：12.00元

前　言

本书是根据高等工业学校物理实验教学大纲，并参照1985年10月重庆会议和1986年5月杭州会议讨论的工科物理实验课程教学基本要求，结合南京工学院物理教研组开设的普通物理实验课程和使用的教材整理编写而成的。

本书内容包括：绪论、力学和热学实验、电磁学实验、光学实验、近代与综合物理实验等五部分，共33个实验。鉴于目前大多数高等工业学校的现状，本书在编写时注意了以下几个方面的问题：

1　本书的总学时数为90学时，较工科物理实验课教学基本要求规定的60学时多50％的内容，以便各校在使用本书时可根据实际情况和实验总学时数予以取舍。

2　按照循序渐进的原则，全书的要求由浅入深，逐步提高。在各实验的编写上为“前详后略”，并注意使各实验相对独立，便于不同循环的安排。

3　本书着重加强基本技能的培养和实验方法的训练。对大多数实验都包括基本内容和选做内容（带＊号）两部分，以适应不同课时（2学时或3学时）的学校和不同水平的学生的需要，便于因材施教。在各部分实验后面，安排了设计性或综合性实验（实验9、21、28、33）。最后安排了四个近代物理实验（实验29、30、31、32），以利于进一步培养和提高学生的实验能力。

4　书后提供了全书实验的仪器配置表。所选的仪器既注意到目前大多数高等工业学校的现有条件，又考虑到新建院校筹建物理实验室的需要。

本书由潘人培主编。参加本书编写的有李士徽（实验19、20、31、32），董宝昌（绪论，实验4、7），钱锋（实验16、17），朱桐华（实验10），赵念泽（实验14），胡建华（实验6），潘人

培(其余22个实验)。李士濂为本书绘制了全部插图。

叶善专，朱桐华对本书作了全面审阅和修改，我们谨向他们以及对在本书使用过程中提出过宝贵意见的同志，一并致以衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中错谬之处在所难免，谨希读者批评指正。

编　者

一九八六年八月

目　　录

第一部分　绪　　论

I　物理实验课的任务

科学实验是科学理论的源泉，是工程技术的基础。作为培养德、智、体、美全面发展的高级工程技术人才的工科大学，不仅应使学生获得比较深广的理论知识，而且要训练学生具有较强的从事科学实验的能力，以适应科学技术不断进步和社会主义建设迅速发展的需要。

物理实验是对学生进行科学实验基础训练的一门独立的必修课程，是学生进入大学后受到系统的实验方法和实验技能训练的开端。本课程的具体任务是：

1. 培养与提高学生的物理实验技能。通过对实验现象的观察、分析和对物理量的测量，学习物理实验知识，加深对物理学原理的理解。

2. 培养与提高学生的科学实验能力。包括：能够通过自学实验教材和参考资料，正确理解实验内容；能够借助教材或仪器说明书，正确使用常用仪器；能够运用物理学理论对实验现象进行初步分析；能够正确记录、分析和处理实验数据，绘制图线，写出合格的实验报告；能够独立完成简单的设计性实验等。

3. 培养与提高学生的科学实验素养。应使学生具有理论联系实际和实事求是的科学作风，严肃认真的工作态度，勤奋研究的探索精神和遵守纪律、爱护公共财产的优良品德。

物理实验课虽然是在教师指导下进行的，但在实验过程中，学生应积极发挥自己的主观能动性去思考问题，进行观察与分析，探讨最佳的实验方法，不断提高自己的实验能力。

Ⅱ　误差和有效数字

有关误差的理论和应用是一门专门的科学，要深入讨论误差，需有丰富的实践经验和较深的数学基础。本节仅介绍有关误差的一些基本知识，学生应着重领会分析误差对确定实验方案，选择实验装置，调节实验仪器以及实验操作，数据处理等的指导意义。并学会一些简单的误差计算和数据处理方法。

一、测量与误差

1. 测量及测量值的误差

物理实验是用实验的方法研究物理的规律。大多数实验是要定量测出有关物理量的大小，从而确定各物理量间的数量关系，以便深入认识物理规律。在定量测量时，有的是将待测量与标准量直接进行比较所得，称直接测量。但更多的待测量是从几个直接测量的结果，按一定的函数关系求出，称间接测量。间接测量比直接测量要复杂些．但基础仍然是直接测量。

无论是直接测量还是间接测量，都是通过一定的实验方法，使用一定的实验仪器，在一定的环境中由实验者去完成。其目的都是希望得到待测量的真(实)值，即客观值。但由于某些原因，例如实验方法不够完善，实验仪器不够精密或调整得不好，测量环境不够稳定以及实验者的某些不足，都会使我们得不到待测量的真值，即测量值(测得值)与真值之间有一差值，这种差值就称为测量值的误差。

设待测量的真值为 a，测量值为 x，则误差

$$\varepsilon = x - a \qquad (1)$$

误差的正负，反映测量值偏离真值的方向。在运算过程中，误差 ε 一般取正值（绝对值）。

由于在测量中误差是必然存在的，因此在测量时应尽量设法减小误差，使得到的测量值最接近于真值，称最佳值（最可信赖值）。但最佳值仍非真值，还应对它的准确程度作出估计，这就需要研究误差的来源、性质以及处理方法等。

2. 系统误差和偶然误差

由于误差的来源和性质不同，一般可分为系统误差和偶然误差两类。通常这两类误差是混在一起出现的，有时也难于严格区分，但在这里我们分别进行讨论。

1) 系统误差　系统误差的特点是具有确定性，即同一待测量进行多次重复测量的结果，误差的符号和绝对值保持恒定，或都大于真值，或都小于真值。其来源主要有以下几方面：

实验方法不够完善　包括实验所依据的理论公式的近似性，或实验条件达不到理论公式条件的要求。

实验仪器不够准确　包括仪器本身的不完善或没有按规定条件调整和使用仪器。

实验者的某些不足（包括不良习惯）也会带来系统误差。例如读电表读数时，头总是偏在右方，致使读数总是偏小。

在分析系统误差时应注意，有些是定值的，不随测量值的变化而变化。有些是积累性的，随测量值的增大而增大。也有些是周期性变化的。

2) 偶然误差(随机误差)　偶然误差的特点是具有随机性，即同一待测量进行多次重复测量的结果，误差的符号和绝对值是变化的，每次的测量值可能大于真值，也可能小于真值，大于或小于真值完全是偶然的。若测量次数足够多，偶然误差就显示出明显的统计规律性。

在多数物理实验中，偶然误差呈正态分布(高斯分布)，如图0-1所示。图中横坐标 ε 表示偶然误差，纵坐标 $f(\varepsilon)$ 表示误差出现的概率，称概率密度分布函数。从图可见：绝对值相等的正负误差出现的机会相等；绝对值小的误差比绝对值大的误差出现的

机会多；误差有一定的范围，超出该范围的误差出现的机会极小，实际上是不存在的。因此，多次测量的偶然误差的算术平均值随着测量次数的增加而越来越趋向于零。同时，测量值的算术平均值越来越趋向于真值，即

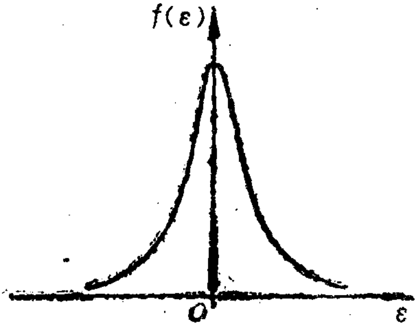


图 0—1

$$\lim_{n\to\infty}\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\varepsilon_i=0$$

$$\lim_{n\to\infty}\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}x_i=a$$

偶然误差的来源，一方面是由于实验时的难以控制的因素引起的，例如空气的流动，温度的起伏，电压的波动等。另一方面是由于人们感觉器官的分辨能力的限制所引起的。同一实验者，在同一实验条件下测量同一物理量，各次结果常有不同，这是因为调节仪器和估计读数时实验者的判断不可能完全正确所致。

由于系统误差和偶然误差的来源不同，性质不同，因此处理的方法也不同。为了减小偶然误差，可以增加测量次数，多次测量的算术平均值可作为测量结果的最佳值(仍非真值)。但在实际测量中，并非测量次数越多越好，在物理实验中，重复测量的次数一般取 6～10 次即可。显然，用多次测量求算术平均值的方法不能减小系统 误差。要减小系统 误差，必须分析 产生误差的原因，改进实验方法，实验仪器，或对实验结果作出修正。

为了更好地理解系统误差和偶然误差的概念，今以打靶为例说明，如图 0-2 所示。图 0-2(*a*)的弹着点比较集中，但都向一侧偏离靶心，这反映了偶然误差较小而系统误差较大的情况。图 0-2(*b*) 虽然弹着点比较 分散，但平均值比较接近靶心，这反映了偶然误差较大而系统误差较小的情况。图 0-2(*c*) 的弹着点比

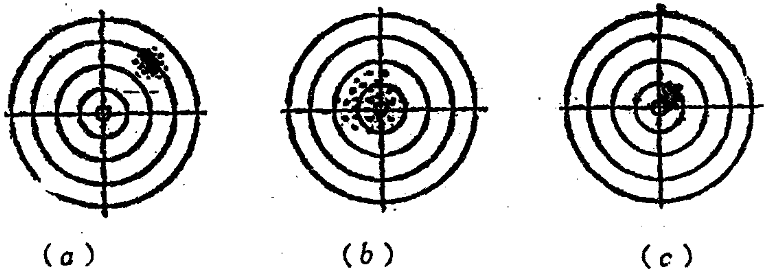


图 0-2

较集中，平均值又比较接近靶心，这反映了系统误差和偶然误差都比较小的情况。如果将图 0-1 和图 0-2 结合在一起，则如图0-3所示。

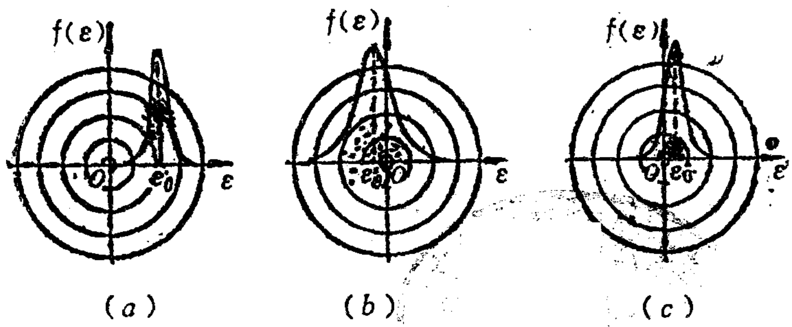


图 0-3

3. 绝对误差和相对误差

根据(1)式，误差$\varepsilon=x-a$，ε是有单位的，其单位和测量值的单位相同，这种有单位的误差称为绝对误差。后面将介绍的平均误差，标准误差，极限误差等都是绝对误差。相对误差是绝对误差与最佳值(平均值，标准值等)的比值。相对误差是没有单位的，常用百分数表示，又称百分误差。

绝对误差可用来衡量相同大小待测量的可靠程度。但衡量不同大小待测量的可靠程度要用相对误差。为了同时能比较相同大小和不同大小待测量的可靠程度，在计算误差时既要计算绝对误差，也要计算相对误差。

二、直接测量值的误差

系统误差的特点是具有确定性，它的产生一般都有较明确的原因。因此可以通过分析，采取适当的措施使之减小到可忽略的程度，或求出修正值。但怎样找到产生系统误差的原因从而采取措施，则要针对具体实验进行。从理论到每个技术细节详加分析，并对仪器设备进行仔细的校验。通过反复实验，比较这些实验结果，加以分析、判断，逐步提高。因此，本节仅讨论偶然误差的处理方法和测量结果的表示方法。

1. 测量列和平均值(算术平均值)

测量列是指在同一测量条件下进行多次测量(称等精度测量)所得到的一组测量值。某物理量的测量列为x_1，x_2，……，x_n，其平均值为

$$\overline{x}=\frac{x_1+x_2+\cdots\cdots x_n}{n}=\frac{1}{n}\sum x_i$$

平均值并非真值，但比任一测量值更可能接近真值，是测量列的最佳值。测量列中各测量值的误差[注]分别为

$$\varepsilon_1=x_1-\overline{x},\ \varepsilon_2=x_2-\overline{x},\cdots\cdots,\varepsilon_n=x_n-\overline{x}$$

平均值既非真值，它与真值间的误差可用平均误差或标准误差表示。

2. 平均误差(平均绝对误差)

测量列的平均误差 测量列的平均误差η可用各测量值的误差的绝对值的算术平均值表示，即

$$\eta=\frac{|\varepsilon_1|+|\varepsilon_2|+\cdots\cdots|\varepsilon_n|}{n}=\frac{\sum|\varepsilon_i|}{n}\quad(2)$$

〔注〕误差是测量值与真值之差，测量值与平均值之差称为偏差。用误差和偏差表示的误差公式是不同的，为求简单，下面不作区别了。

平均值的平均误差　平均值的平均误差$\eta_{\bar{x}}$和测量列的平均误差η之间的关系为[1]

$$\eta_{\bar{x}}=\frac{\eta}{\sqrt{n}} \tag{3}$$

应当注意，测量列的平均误差η和平均值的平均误差$\eta_{\bar{x}}$都不是测量值的实际误差，它只是对一组测量数据和平均值的可靠性的量度。平均误差η小，测量的可靠性就大。反之，则表示测量的可靠性小。其可靠性根据高斯误差理论，平均误差为η时，测量列中任一测量值的误差e_i有57.5%的可能性是在$(-\eta,\ \eta)$区间内。从(3)式可见，$\eta_{\bar{x}}<\eta$，因此，平均值的平均误差落在$(-\eta,\ \eta)$区间内的可能性就更大了。因此，我们可以粗略地把η看成是η的最大误差(误差限)，即认为真值处在$\bar{x}-\eta$和$\bar{x}+\eta$之间。通常将这结果表示为

$$x=\bar{x}\pm\eta \tag{4}$$

3. 标准误差(均方误差)

测量列的标准误差　测量列的标准误差σ是用各测量值的误差的平方的平均值的平方根表示，即

$$\sigma=\sqrt{\frac{e_1^2+e_2^2+\cdots\cdots+e_n^2}{n}}=\sqrt{\frac{\sum e_i^2}{n}} \tag{5}$$

平均值的标准误差　根据高斯误差理论[2]，平均值的标准误差$\sigma_{\bar{x}}$和测量列的标准误差σ之间的关系为

$$\sigma_{\bar{x}}=\frac{\sigma}{\sqrt{n}} \tag{6}$$

和平均误差相似，标准误差为σ时，测量列中任一测量值的

---

〔1〕 李化平，误差与实验数据处理教学中的几个问题，物理，第12卷第一期，1983年1月，第21～28页。

〔2〕 杨述武等编，《普通物理实验》(一、力学、热学部分)，高等教育出版社，1982年，第239～248页。

误差ε_i有68.3%的可能性是在$(-\sigma,\sigma)$区间内。从(6)式可见，$\sigma_{\bar{x}}\leqslant\sigma$，因此，平均值的标准误差落在$(-\sigma,\ \sigma)$区间内的可能性就更大了。通常将这结果表示为

$$x=\bar{x}\pm\sigma \tag{7}$$

平均误差和标准误差都是用来评价偶然误差的，目前多数国家的科学论文都采用标准误差，且多数计算器都有计算标准误差的功能，运算也十分方便。在物理实验中，误差既可用平均误差也可用标准误差表示。至于今后各实验用哪种误差表示，由实验课指导教师根据具体要求指定。

4. 几点说明

1) 极限误差与错误数据的剔除　根据高斯误差理论，测量列中任一测量值的误差在$\pm\sigma$区间内的可能性为68.3%，在$\pm2\sigma$区间内的可能性为95.5%，在$\pm3\sigma$区间内的可能性为99.7%，即在该区间外的可能性仅为0.3%。因此，一般称3σ为极限误差。这表示在测量次数不太多时，测量误差在$\pm3\sigma$区间外的可能性实际上已不存在。如果在测量中某一测量值的误差超出3σ，则可认为该测量值是由于某种错误，例如观察错误，读数错误，记录错误等原因造成的，该值应予剔除。因此，极限误差3σ可作为剔除错误数据的标准。

2) 单次测量值的误差　偶然误差的处理是基于多次重复测量所呈现的统计规律。但在有些实验中，或因不容许，或因不必要，因此对待测量仅测了一次。对于这种单次测量的误差，一般是根据对仪器和测量方法的分析，估计它的最大误差，但所估最大误差最小不能小于分度值[注]的一半。

3) 多次测量的测量值相同时的误差　在有些实验中，对待测量虽然作了多次测量，但测量值都相同或基本相同，这并不表示偶然误差为零，而是因为误差较小，或是因为仪器的灵敏度不

[注] 参阅本书实验一《游标尺、螺旋测微计的原理和使用方法》。

足以反映出误差。因此我们规定，如果多次测量所得的误差小于仪器分度值的一半时，则取仪器分度值的一半作为误差。

4) 误差的有效位数的保留　误差是一种不十分准确的估计值，一般只保留一位有效数字，为了不致缩小误差，对于下一位数字，一律“只进不舍”。

三、间接测量值的误差

在物理实验中，多数物理量都是通过间接测量得到的。间接测量值是将直接测量值代入测量公式求出。间接测量值的误差则由直接测量值的误差通过误差传递公式求出。误差传递公式是将直接测量值的误差(分误差)传递给间接测量值，从而得到间接测量值的误差(总误差)的计算公式。

1. 几个常用的基本运算

设 A、B 为两个互相独立的直接测量值，ΔA 和 ΔB 为其误差。N 为间接测量值，ΔN 为间接测量值的误差。

1) 加法运算　$N=A+B$

在引入误差后得

$$N\pm\Delta N=(A\pm\Delta A)+(B\pm\Delta B)$$

$$=(A+B)\pm\Delta A\pm\Delta B$$

后两项有四种可能的组合。我们从最坏的情况考虑，即可能有的最大误差(误差限)区间为$-(\Delta A+\Delta B)$和$(\Delta A+\Delta B)$，得

$$N\pm\Delta N=(A+B)\pm(\Delta A+\Delta B)$$

故

$$\Delta N=\Delta A+\Delta B$$

相对误差

$$\frac{\Delta N}{N}=\frac{\Delta A+\Delta B}{A+B}$$

2) 减法运算　$N=A-B$

同样考虑可能有的最大误差

$$N \pm \Delta N = (A \pm \Delta A) - (B \pm \Delta B)$$

$$= (A - B) \pm (\Delta A + \Delta B)$$

故 $$\Delta N = \Delta A + \Delta B$$

相对误差 $$\frac{\Delta N}{N} = \frac{\Delta A + \Delta B}{A - B}$$

由上讨论可知：几个直接测量值相加、相减结果的绝对误差，等于各直接测量值绝对误差之和。

3） **乘法运算** $N = AB$

$$N \pm \Delta N = (A \pm \Delta A)(B \pm \Delta B)$$

$$= AB \pm A\Delta B \pm B\Delta A \pm \Delta A\Delta B$$

由于 ΔA、ΔB与A、B 相比可视为微小量，最后一项 $\Delta A\Delta B$ 为二阶微小量，可以忽略不计。又考虑可能有的最大误差，因此

$$N \pm \Delta N = AB \pm A\Delta B \pm B\Delta A$$

$$= AB \pm (A\Delta B + B\Delta A)$$

故 $$\Delta N = A\Delta B + B\Delta A$$

相对误差 $$\frac{\Delta N}{N} = \frac{A\Delta B + B\Delta A}{AB} = \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta B}{B}$$

4） **除法运算** $N = \dfrac{A}{B}$

$$N \pm \Delta N = \frac{A \pm \Delta A}{B \pm \Delta B} = \frac{(A \pm \Delta A)(B \mp \Delta B)}{B^2 - \Delta B^2}$$

$$\doteq \frac{AB \pm B\Delta A \pm A\Delta B}{B^2} = \frac{A}{B} \pm \frac{B\Delta A + A\Delta B}{B^2}$$

故 $$\Delta N = \frac{B\Delta A + A\Delta B}{B^2}$$

相对误差 $$\frac{\Delta N}{N} = \frac{B\Delta A + A\Delta B}{B^2} \div \frac{A}{B} = \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta B}{B}$$

由上讨论可知：几个因子相乘、相除结果的相对误差，等于各因子的相对误差之和。

2． 任意函数的误差传递公式

对于任意函数，设间接测量值N是几个彼此独立的直接测量值A，B，C，……的函数，如下式

$$N=F(A, B, C\cdots\cdots)$$

设ΔA，ΔB，ΔC，……分别为A，B，C，……的误差，ΔN为N的误差，则

$$N\pm\Delta N=F(A\pm\Delta A, B\pm\Delta B, C\pm\Delta C, \cdots\cdots)$$

按泰勒公式展开，并略去二阶小量及以后各项，得

$$N\pm\Delta N=F(A, B, C, \cdots\cdots)\pm\left(\frac{\partial F}{\partial A}\Delta A+\frac{\partial F}{\partial B}\Delta B+\frac{\partial F}{\partial C}\Delta C+\cdots\cdots\right)$$

同样考虑可能有的最大误差，上式各项都取绝对值，得绝对误差

$$\Delta N=\left|\frac{\partial F}{\partial A}\right|\Delta A+\left|\frac{\partial F}{\partial B}\right|\Delta B+\left|\frac{\partial F}{\partial C}\right|\Delta C+\cdots\cdots \quad (8)$$

相对误差

$$\frac{\Delta N}{N}=\left|\frac{\partial F}{\partial A}\right|\frac{\Delta A}{F}+\left|\frac{\partial F}{\partial B}\right|\frac{\Delta B}{F}+\left|\frac{\partial F}{\partial C}\right|\frac{\Delta C}{F}+\cdots\cdots \quad (9)$$

以上两式即计算间接测量误差的误差传递公式。该两式的计算比较简单，合成的总误差可靠性较高，但这样计算的结果将有些偏大。因直接测量值的误差传递给间接测量值时，有互相抵消一些的可能性。但我们是从最坏的情况考虑的，各项都是取的绝对值，得到的是可能有的最大误差（误差限）。因标准误差可以更好地反映测量的离散性，故更多的是采用标准误差传递公式，可以证明绝对误差

$$\sigma_N=\sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial A}\right)^2\sigma_A^2+\left(\frac{\partial F}{\partial B}\right)^2\sigma_B^2+\left(\frac{\partial F}{\partial C}\right)^2\sigma_C^2+\cdots\cdots} \quad (10)$$