

大连海运学院自编讲义

船舶柴油机测试技术

杜荣铭 张朝芳

船舶柴油机测试技术

大连海运学院



前 言

本书是根据大连海运学院轮机管理专业的教学大纲要求编写的。

本书适用于轮机管理专业选修教材(学时为36~40小时),也可供做为船舶柴油机管理技术人员阅读。本书从船舶的实际需要出发,主要介绍了柴油机测试方面的基本理论、技能和方法。全书共七章二十八节,主要内容包括误差理论、温度、压力、转速、扭矩、动态压力以及烟度、排气等测量方法与测试仪表。

本书第一、五、六、七章由杜荣铭副教授编写,第二、三、四章由张朝芳工程师编写,全书由杜荣铭副教授主编,钱耀鹏教授主审。

由于水平有限,时间短促,在体系、内容和编写方法都将存在着许多缺点和错误,希望广大读者批评并给予指正。

1989年2月28日

第一章 测量和误差分析	1
第一节 测量	1
第二节 测量仪表的质量指标	6
第三节 测量误差的基本概念	10
第四节 直接测量误差分析	14
第五节 间接测量误差分析	31
第二章 温度测量	44
第一节 稳定温度测量	44
第二节 瞬时温度测量	79
第三节 零部件温度测量	82
第三章 压力测量	89
第一节 压力的基本概念和单位	89
第二节 液体和气体介质中的压力测量	92
第三节 弹性压力计	94
第四节 最高爆发压力表	99
第四章 转速测量	105
第一节 平均转速的测量	105
第二节 瞬时波动转速测量	
第三节 转速表的校验	
第五章 扭矩测量	
第一节 水力测功器	
第二节 电力测功器	
第三节 扭矩仪	
第四节 测功器特性的比较	
第六章 柴油机动态压力的测录	
第一节 动态压力测录的目的和	
第二节 机械示功器	03-

第三节	气电式示功器
第四节	电子示功装置
第五节	柴油机上止点的确定
第六节	示功图的整理计算
第七节	示功图测量中误差分析与示功装置比较
第八节	喷射系统工作状态的测试
第七章	烟度测量与排气成份分析
第一节	烟度测量
第二节	排气成份分析

第一章 测量和误差分析

测量技术是研究有关测量方法和测量工具的一门科学技术。根据测量对象的差异可分成力学测量、电学测量、长度测量、热工测量等等。柴油机测试技术是专门研究柴油机诸参数测量的方法和仪表的科学技术，其测量范畴主要包括热工测量和力学测量。

任何测量都是由测量者使用一定的仪器，在一定的环境条件下，按一定的测量方法和程序进行的。尽管被测量在一定条件下具有客观存在的确定值（真值），但是，由于测量者、仪器本身、测量方法和环境条件等因素的影响，无法获得真值，只能得到接近于真值的近似值（测量值），测量值与真值之差称为误差。任何测量都存在着误差，这是绝对的，不可避免的。因而任何测量所得到的测量结果都必须指出其误差范围，否则该测量结果便无任何意义。误差分析就是研究在测量中所产生的误差的性质、大小、产生原因，并对测量结果作出评价。

第一节 测量

一、测量的基本方程式

测量是人类对自然界的客观事物取得数量观念的一种认识过程。在这一过程中，借助于专门的设备，通过试验方法求出以所采用的测量单位来表示的未知量的数值——即为取得任一未知参数而做的全部工作。根据这一命题测量应包括误差分析等计算工作在内。

通常，所谓测量指用试验的方法将被测物理量与另一同名的作为单位的物理量相比较，以确定两者间的比值。可用基本测量方程式表示为：

$$X = A \cdot \mu$$

式中：X—未知物理量

μ —测量单位

A—未知物理量的数值

如果我们选择另一测量单位 μ_1 ，则：

$$\therefore X = A_1 \cdot \mu$$

$$\therefore A_1 = A \cdot \mu / \mu_1$$

二、测量的意义

在所有的自然科学和工程技术领域中所进行的一切研究活动，其目的无非是探求客观事物的质与量的变化关系。在研究质与量的关系中离不开测量。科学技术的发展与测量技术的不断完善是紧密相关的，测量技术推动着科学技术的发展，并使之应用于技术实践中。著名的科学家门捷列夫说：“科学始于测量”。实验测量不仅能定性地验证理论分析的正确性，而且还能够定量的验证理论结果正确性和可靠程度。

测量是判断事物质量指标的重要手段。任何质量指标都要通过一定的数量来表示，例如运行中柴油机的运转质量究竟如何？是否达到了预期的质量指标？可通过测量柴油机的运转功率、燃油消耗率、烟度和排放等参数进行判断。

测量也是生产过程自动化的先决和必要条件。例如近代普遍采用的柴油机监控技术，其关键环节在于正确而可靠的测量。

即使对在人工监视下的柴油机，有关运转参数的正确测量仍然是管理和调整柴油机的主要依据。没有测量管理工作就会陷入盲目性，必将导致重大事故发生。

由于测量技术在科学研究和生产实践中的重要意义，现在它已发展成为一专门学科。测量技术的状态反映了一个国家的经济发展和科学技术水平。

近代，微型计算机在工程技术中的普及，开拓了测量技术的应用和发展。测量与数值处理的结合把测量技术推向了高的层次，成为柴油机发展中的两大支柱。

三、测量方法

按照不同的观点测量方法可以有不同的分类。例如按照精度观点测量可分为实验测量和工程测量两种。前者，测量精度较高，其使用仪器多数具有校正曲线；后者，测量精度较低，其所用仪表多数没有校正曲线。

误差理论指出测量方法不同，所产生的误差及误差分析均不同。因而通常为了研究测量过程中所产生的误差，有必要把测量方法按测量结果产生的方式进行分类。按这一观点测量可分为直接测量法和间接测量法。

1、直接测量法

凡被测量的数值可直接从所使用的测量仪表读得的称为直接测量法。如用温度表测量冷却介质的温度，用压力表测介质的压力等均为直接测量法。

这种测量法常使用以下几种方法：

1) 直读法 可直接从所使用的仪表上测得被测量的绝对值。如用温度计、压力表、转速表测量温度、压力和转速等。

2) 差值法 测量仪表的读数为两个被测量的差值。如用热电偶温度计测温时，所得到的测量结果为被测温度与热电偶冷端温度的差值。

3) 零值法 将被测量对测量仪表的影响用同类已知量来抵消，则被测量便等于已知量。如使用自动电位差计测量热电偶所产生的热电势时，就是利用由电位差测量电桥产生的已知电位差来使热电势得到平衡而实现。

4) 代替法 用已知量代替被测量，使两者对测量仪表的影响相同，则已知量即为被测量。

2、间接测量法

被测量的数值不能直接从测量仪表测得，而是先要测得与被测量有固定函数关系的直接测量的量，然后通过公式运算才能求得被测量。如柴油机输出轴的有效功率 P 便是通过测出输出轴的扭矩 M 和转速 n 后，再应用下述公式运算求得：

$$P = \frac{M \cdot n}{9550} \text{ (KW)}$$

式中： M —输出轴扭矩 (N—m)

n —输出轴转速 (r/min)

四、被测量

在柴油机实验中所测试的参数大体上可归纳为：转速、扭矩（功率）、流量（耗量）、压力、温度、应变、位移（升程）、振动、噪声、烟度及排放等。这些被测参数称为被测量或被测信号，测量结果称为数据。

柴油机的被测量按其性质的不同可分为确定性信号和非确定性信号两类。

1、确定性信号

确定性信号可以用明确的数学关系式相当精确的描述，根据其是否有规律的重复出现可分为同期信号和非同期信号两类。

1) 周期信号 周期信号是以一定时间间隔重复出现的信号。在柴油机测试中这种信号多以工作循环为周期重复出现。如燃烧室中燃气的压力和温度、排气支管中排气压力等。正弦信号是最简单的一种周期信号，它是由单一频率组成的；复杂周期信号是周期信号的一种普遍形式，它是由不同频率的正弦信号叠加而成，它是由不同频率的正弦信号叠加而成，其频率比为有理数。在数学表达式上复杂周期信号用傅里叶级数表示。

2) 非周期信号 这种信号的变化有一定的规律性，但非周期性。如柴油机过渡工况时，其转速、扭矩、排烟烟度等随工况的变化即为非周期信号。瞬态信号是一种非周期信号，如柴油机过渡工况下的冲击振动、噪声、转速等。这种瞬态信号的数学表达式是一个复函数，它既包含有幅值信号又包含有相位信息。

2、非确定性信号

非确定性信号具有随机特点，每次测量结果都不相同，也不能预测，因此又称随机信号。这种信号不能象确定性信号那样用明确的数学关系式来表达，但多次测量结果具有共同的统计特性，因而随机信号可以用概率统计特性来描述。

五、测试系统

柴油机测试系统通常由三个基本环节组成：感受—传递—显示。如图1—1所示。

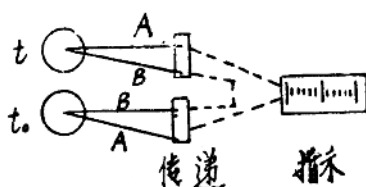


图1—1 测试系统基本组成

1、感受件

感受件（传感器、一次元件）直接与被测对象发生联系，但并不一定直接接触。感受件在测量中所起的作用是感受被测参数的变化，随之在其中产生一个内部变化，并向外界输出相应的信号。如水银温度计感受被测介质的温度变化，并按此发出与之相应的水银柱位移信号。

在测试系统中，感受件是一个十分重要的环节，作为一个良好的感

受件必须满足以下两个条件：

1) 它只能随被测参数的变化而发生内部变化，其它非被测参数的变化不应使它发生内部变化。

2) 它的输出信号与被测参数之间呈单值函数关系，即一个确定的输出信号只能与被测参数的一个值相对应。

实际上感受件完全满足以上要求并非易事，尤其是第一个条件。当由此而产生的误差超过允许限值时，可用理论计算或其它补偿措施（如在测量线路上加一补偿装置）加以消除。这方面的具体措施将在有关仪表中陆续介绍。

2、传递件

传递件（中间件）是连接感受件与显示件之间的环节。它的作用是把感受件输出的信号，根据显示件的要求进行传递、放大、变换和运算等项处理，变成显示件接受的信号。因而传递件具有以下功能：

1) 单纯传输不进行任何变换处理，此时仅相当于电缆。

2) 放大 当感受件输出信号过小时需进行放大。放大机构可采用机械式（杠杆、齿轮）或电子式（电子电路）。

3) 变换 把感受件输出信号转换成适于显示的形式。如在单元组合仪表中把各种感受件的不同输出信号转变成统一数值范围的气、电信号。

4) 运算 具有运算器作用

3、显示件

显示件（二次元件）直接与测量人员发生联系。它的作用是根据感受件输出的信号向测量人员指出被测参数在数量上的大小。根据显示件的显示方式，可分以下几种仪表：

1) 指示式仪表 是以指针（或液面、光线）和标尺（或刻度盘）的相对位置来显示被测参数的瞬时值。

这种仪表只能记录被测参数的瞬时值，而不能记录被测参数随时间的变化过程。

2) 记录式仪表 是指将测定值记录在随时间而连续移动的纸上的仪表。这种仪表除了以记录笔的运动来反映被测参数的变化外，还需要另一个反映时间信号的运动部件（如等角速度转动的滚筒等）。

记录式仪表按记录方式不同可分为笔写式和打印式两种。前者连续记录被测参数的变化，但因需克服尖与纸的摩擦力，故精度较差；后者

测量精度较高但记录不连续。

3) 积算式仪表(累计式仪表) 积算式仪表可显示被测参数在一定时间间隔内的累计总量。如果计流量表可显示在测量时间间隔内流过的总流量。

4) 数字式仪表 是一种把测量结果自动进行数字显示的仪表。这种仪表不仅可避免观察者的视读误差,提高测量准确度而且它还为数值的自动化处理创造了条件。数字频率计、数字显示电压表等是典型的数字式仪表。目前这种仪表已得到广泛的使用。

5) 信号式仪表 这种仪表可不必显示被测参数的瞬时值。但当被测参数的数值达到或超过某规定限值时,该仪表可自动发出警报,如光、声等信号,以便采取必要措施达到防护的目的。通常,这种仪表与保护装置联动,实现机组的自动防护系统。如柴油机的滑油压力降低到某一规定限值时,该仪表即可发出相应的警报。

6) 调节仪表 调节仪表能根据被测参数与规定值间的偏差情况,发出调节信号使被测参数的数值保持在预定范围内。这种仪表除了具有测量功能外,尚具有自动调节的功能。

测量仪表按其用途还可分为范型仪表和实用仪表两类。

范型仪表是准备用以复制和保持测量单位,或是用来进行各种测量仪表校验和刻度工作的仪表。这类仪表的准确度很高,对它保存和使用有较高的要求。

实用仪表是供实际测量使用的仪表,它又可分为实验室用仪表和工程用仪表。前者必须要供给关于它们读数的校正曲线或数值表,使用时应考虑周围环境对示值的影响(如温度、压力、磁场、振动等),其测量结果具有较高的准确度。后者并不需要校正资料,它们的准确度是事先根据其结构、制造和运用条件定出。对它的要求是动作迅速、使用简单、可靠,其测量结果应能满足工程测量误差所允许的范围。

第二节 测量仪表的质量指标

测量仪表品种繁多。当为了完成某项任务而需选用仪表时,必须事先作好调查研究工作。这种调查研究工作主要从两方面进行:一方面应详细了解被测参数的性质和测量要求,如被测参数的种类,变化范围,要求精度,测量速度,测点位置及周围环境等;另一方面要查阅有关产品手册了解仪表的各种性能数据,结合实验条件的特点选择满意的仪表。

仪表的性能数据是评价仪表工作质量的标准。这些质量指标大致可分为静态特性和动态特性两类。

一、静态特性

测试仪表的静态特性是指当输入信号不随时间变化（常量）时，其输出信号与输入信号之间的关系。属于静态特性的主要质量指标如下：

1、量程

量程是仪表能测量的最大输入量与最小输入量之间的范围，亦称测量范围。指示型仪表刻度盘上的终值与起始值所限定的范围称示值范围或刻度范围。量程比刻度范围多了个允许误差量。

在选择仪表时首先要对被测量的数值有一个大致的估计，务使被测量值落在仪表量程之内，最好落在仪表的三分之二量程附近，以避免仪表遭受损坏，或使仪表的精度降低。

2、灵敏度S

灵敏度是输出信号变化量 ΔY 与相应的输入信号变化量 ΔX 的比值，即 $S = \Delta Y / \Delta X$ 。

3、分辨率

仪表所能检测出的被测参数的最小变化称分辨率，亦称鉴别阈。

4、线性度（非线性误差 L_N ）

当仪表的理论特性曲线为直线时，线性度用来表示实际特性曲线和理论特性曲线之间的符合程度，亦称非线性误差，用 L_N 表示。如图1—2所示。

$$L_N = \frac{\Delta L_{\max}}{Y_{\max}} \times 100\%$$

式中： $\Delta L_{\max} = (Y_{\text{act}} - Y_{\text{theo}})_{\max}$

是在全量程范围内实际特性曲线与理论特性曲线间的最大偏差值；

$Y_{\max}$ —满量程输出值

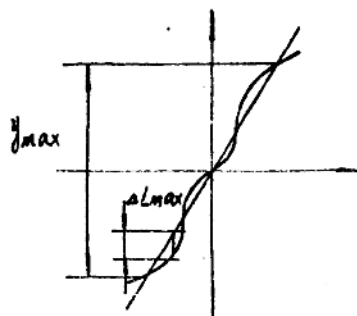


图 1—2 线性度

5、滞后误差 H_y

仪表的输入量从起始量程增至最大量程的测量过程称之为正行程，输入量由最大量程减至起始量程称为反行程。在同一输入量时，正反行程造成输出值的差值称滞后差用 ΔH 表示，如图1—3所示。全量程中

最大滞后差 $\Delta H_{\max}$ 与满量程输出值 $y_{\max}$ 之比值称滞后误差。即：

$$H_y = \frac{\Delta H_{\max}}{y_{\max}} \times 100\%$$

滞后误差是由于仪表内部的摩擦力、间隙及机械材料、电气元件的滞后特性造成的。

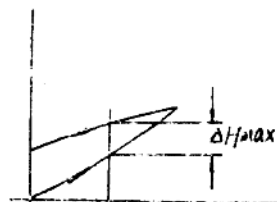


图 1-3 滞后误差

6、重复性

重复性表示在同一测量条件下，对同一数值的被测量进行重复测量的一致程度。

$$\text{令重复性误差 } R_N = \frac{\Delta R_{\max}}{y_{\max}} \times 100\%$$

式中： $\Delta R_{\max}$ — 全量程中最大的重复性差值

$y_{\max}$ — 满量程输出值

重复性还可以用来表示仪表在一个相当长的时间内，维持其输出特性恒定不变的性能。因此，仪表的重复性和稳定性是同一个意思。

7、精度

仪表的精度概念目前国内外还没有统一的规定。通常有以下几种概念：

1) 精密度 在测量中所测数值重复一致的程度。并不包含是否逼近真值概念。精密度主要取决于偶然误差的大小（后述）。

2) 准确度 准确度指测量值与真值的偏离程度。准确度越高表示测量值越逼近真值。但它不含测量值是否重复一致的概念。准确度主要取决于系统误差的大小。

3) 精确度 精确度是精密度与准确度的综合指标，简称精度。它是由与其概念相反的测量不精确度来表示的。测量不精确度指包括所有系统误差和随机误差的综合极限误差所表达的测量结果与被测真值间差别的程度。

4) 精度等级 在我国仪表的精度通常用精度等级来表示。精度等级通常以允许误差的大小来表示。允许误差指仪表读数允许的最大绝对误差折合为该仪表量程的百分数。即

$$\text{允许误差 } \delta_y = \pm \frac{A_f}{A_a - A_b} \times 100\%$$

式中: Δf —允许的最大绝对误差

A_a, A_b —仪表刻度的上限与下限值

例如, 一温度计的刻度是从 -30°C — $+120^{\circ}\text{C}$, 允许的最大绝对误差为 $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$, 其允许误差 δ_y 为:

$$\delta_y = \pm \frac{1.5}{120 - (-30)} \times 100\% = \pm 1\%$$

则该仪表的精度等级为“1.0”级。

工程用仪表通常为 0.5 ~ 4 级; 实验室用仪表为 0.2 ~ 0.5 级; 范型仪表在 0.2 级以上。仪表的精度等级一般都标记在仪表的刻度盘上。

二、动态特性

测试仪表的动态特性是指当输入信号随时间变化时, 输出与输入信号之间的关系。当测试系统的输入信号为随时间变化的信号时, 其相应的输出信号亦为随时间变化的信号。由于仪表本身的“惯性”与“阻尼”, 因而必然产生滞后现象, 使得测量值与真值之间存在幅值与相位差异, 即动态误差, 如图 1-4 所示。图中曲线 a 系输入信号 $x_i = A \sin \omega t$, 曲线 b 系输出信号 $x_o = B \sin(\omega t + \varphi)$, 可见输出信号存在幅差 $\Delta x = (A - B)$, 相位差 φ 。在理想情况下, $B = A$, $\varphi = 0$, 即不存在动态误差。

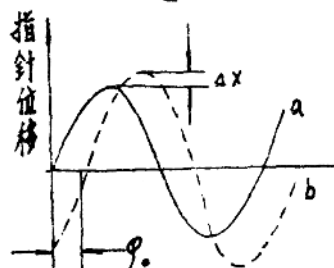


图 1-4 测量系统对正弦信号的响应

1、阶跃响应特性

当测量系统的输入信号为阶跃信号时,

其对应的输出特性称阶跃响应特性。若输入信号在 t_0 时刻突然阶跃到另一稳定状态, 输出信号不能立刻达到输入值, 而要经过一段时间后才能达到输入对应值。这种差异称过渡响应动态误差。根据其输出信号的响应状态可有三种情况, 如图 1-5 所示。

1) 周期性阻尼波动 输出信号以衰减波动状态逐渐趋近于输入信号, 如曲线 a 所示。此时相当于欠阻尼情况。

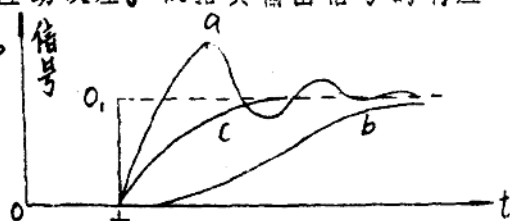


图 1-5 测试系统的阶跃响应特性

2) 无波动缓慢趋于输入量

如曲线 b 所示。此时相当于过阻尼情况。

3) 无波动迅速趋于输入量 如曲线 c 所示。此时相当于临界阻尼情况。

由上述分析可知，在欠阻尼和过阻尼情况下输出信号的响应时间均较长，只有在临界阻尼情况下，输出信号的响应时间最短，阶跃响应特性最好。另外，经研究知仪表的阶跃响应特性还与仪表的自振频率有关，自振频率越高；阶跃响应特性越好。对一般使用的仪表，要求在以对应仪表全刻度 $2/3$ 的量突然加在仪表上，仪表指针由 0 移至平衡位置的 $\pm 1.5\%$ 范围内所需时间应为 4 秒，此时的阻尼称为临界阻尼。

2、频率响应（频响）特性

当输入信号以频率 f 变化时，其输出信号的振幅和相位差随频率 f 而变化的特性称频率响应（频响）特性。在理论上可以证明仪表的传递函数 $H(j\omega)$ 是频率的函数，代表仪表的频率响应特性。

因为根据定义，传递函数 $H(j\omega) = \frac{X_0}{X_1} = \frac{B \sin(\omega t + \varphi)}{A \sin \omega t}$

式中： $X_0 = B \sin(\omega t + \varphi)$ 为输出信号

$X_1 = A \sin \omega t$ 为输入信号

由于传递函数 $H(j\omega)$ 可以写成复数形式 $H(j\omega) = R(\omega) e^{j\varphi\omega}$ ，即可分解为幅频特性 $R(\omega)$ 和相频特性 $\varphi\omega$ 两部分。因此传递函数 $H(j\omega)$ 可称为仪表的频响特性。

由上分析可知，在这种情况下输出信号与输入信号相比必然存在幅差与相位差，即存在稳态响应动误差。

经研究知，仪表的频响特性仍然与仪表的阻尼和自振频率有关。阻尼过大或过小均影响频响特性，存在一个最佳阻尼；采用阻尼器，在适当范围内可减小幅差，但却使相位差增大；仪表的自振频率越高，其频响特性越好，即产生的稳态响应动误差越小。提高仪表的自振频率是消除动态误差的最有效途径。为此，可提高测量元件的刚度和减少运动部件的质量，但刚度提高使仪表灵敏度下降，运动质量降低引起强度下降。因此，机械式仪表无法大幅度提高自振频率，一般不适于动态参数的测量。这也是目前柴油机测试中少用电测仪表的原因之一。

第三节 测量误差的基本概念

一、真值与测量值

任何一个被测量客观上都存在一个唯一确定的值，这个值称为真值。真值是未知量，测量的目的就在于力图得到被测量的真值。但事实上由于受到测量方法、测试仪表、周围环境以及测试人员的水平等因素的影响和限制，真值是无法得到的，因此真值是纯理论上的定义值。测量所得到的测量结果称测量值，测量值 X 与真值 A 之差称为测量值的误差，简称误差。即：

$$\text{误差} = X - A$$

二、研究误差的意义

在任何测量中，误差都是不可避免的存在着。随着科学技术的发展和人们认识水平的提高，虽可将误差控制得越来越小，但终究不能完全消除它。为了充分认识并进而减小或消除误差，必须对测量过程中始终存在着的误差进行研究。

研究误差的意义为：

- 1、正确认识误差的性质，分析误差产生原因，以消除或减小误差。
- 2、正确处理测量和实验数据，合理计算所得结果，以便在一定条件下得到更接近于真值的数据。
- 3、正确组织实验过程，合理设计仪器或选用仪器和测量方法，以便在最经济条件下得到理想的结果。

三、误差的分类

误差通常按其性质、表示方法和产生原因进行分类。

1、按误差性质分

1) 系统误差 在同一条件下，多次测量同一量值时，其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称系统误差。前者称恒值系统误差；后者称变值系统误差。

系统误差决定 测量的准确度，它说明测量结果偏离被测量真值的程度。

2) 偶然误差(随机误差) 在同一条件下，多次测量同一数值时，绝对值和符号以不可预见方式变化着的误差，称偶然误差或随机误差。偶然误差决定测量的精密度。它的数值越小，测量结果的精密度越高。

3) 粗大误差(疏失误差、过失误差、粗差) 由测量者在测量过程中的过失而产生的显然与事实不符的误差称粗大误差。粗大误差具有明显不合理性，应予排除。

2、按误差的表示方法分

1) 绝对误差 设被测量的真值为 A ，其测量值为 X ，则绝对误差 ΔX 为：

$$\pm \Delta X = X - A$$

2) 相对误差 绝对误差 ΔX 与测量值 X 之比值称为相对误差，以百分比表示。

$$\text{相对误差 } \delta = \frac{\Delta X}{X} \times 100\%$$

相对误差 δ 通常用来评价测量精度，它比绝对误差更为确切。

3、按误差产生的原因分

- 1) 仪器误差 由所使用的测量仪器所产生的误差。
- 2) 人员误差 由测量者主观原因所产生的误差。
- 3) 环境误差 由测量环境诸因素的影响所产生的误差。
- 4) 方法误差 由测量方法不完善（如采用近似测量方法）所造成的误差。

四、有效数字和计算法则

在测量结果数据处理和运算中，用几位数字来表示测量结果和计算结果是非常重要的。有效数字的位数与误差有密切联系，但两者并不属于同一问题。初学者往往认为只要数值中小数点后面的位数越多，这个数据就越准确。这种想法是错误的。其错误在于：

1) 小数点后的位数仅与所采用的单位有关，它本身不牵涉到准确度。如油桶中的燃料重量为 10.05 公斤—50.01005 吨的测量精度完全相同。

2) 任一测量均存在误差，对于某种测量手段，必然存在着相应的误差，计算结果的准确度应与测量精确度相适应，高于或低于测量准确度的计算精度都是错误的。

因而，对测量和计算结果必须用与其测量精度相适应的有效数字来表示。所谓有效数字指用来表征测量或计算结果的数字串，除其最末位数欠准（通常不超过正负一个单位的绝对误差）外，其余各位数字均为准确无误。

1、有效数字位数的取法

有效数字位数的确定原则应根据有效数字的特性，即除其最末位数

欠准外，其余各位数字均应准确无误。

1) 由仪表的分辨率来确定位数 根据人们视觉的判断能力，一般应只保留一位可疑数字，即以仪表最小分格的十分之一来确定有效数字的位数。如用最小刻度为 1°C 的普通水银温度计测量大气温度，则该水银温度计的有效数字仅为三位。例 14.3°C ，前两位“14”准确无误，而末位数“3”系估计而来，虽欠准确，但对测量结果还是有意义的，因为这表示测量值的估计误差不超过 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ ，实际温度是在 14.2°C 与 14.4°C 之间。通常把测量结果写为 $14.3 \pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 。

2) 有效数字的位数应与仪表精度相适应 有效数字的位数不应超越仪表的精度，如上例水银温度计取四位有效数字（例 14.33°C ）；但也不能低于仪表的精度，如上例温度计若恰好为 14°C 而只取二位有效数字，此时应仍取为三位，即记为 14.0°C 。因为若只取二位 14°C 则表示温度误差为 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ，即大气温度在 $13^{\circ}\text{C} \sim 15^{\circ}\text{C}$ 之间，而记为 14.0°C 表示温度误差为 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ ，这与仪表的精度相适应。

在确定有效数字位数时，应特别注意“0”这个数字的作用，有时“0”可以为有效数字，有时也可以不是有效数字，如某长度测量结果的有效数字为三位 3.20 毫米，如以米为单位则记为 0.00320 米，前面三个“0”并不是有效数字，为避免混淆应记为 3.20×10^{-3} 米，有效数字仍为三位。由此，应根据具体情况确定数字“0”的作用。

3) 计算公式中的 $\sqrt{2}$ 、 π 、 e 等数学常量的有效数字的位数可以认为是无限的，可根据实际需要确定。

2、有效数字的计算法则

在数据处理中，经常需要运算一些精度不同的数值。此时必须遵循一定的规则进行计算，既可以节省时间又可以避免因计算过繁引起的错误。有效数字的计算法则可归纳如下：

1) 记录测量值时，只保留一位欠准数字；

2) 除另有规定外，欠准数字表示末位有 ± 1 个单位误差；

3) 当有效数字位数确定后，其余数字应一律舍弃。舍弃的原则是：凡末位有效数字后面的第一个数大于 5，则在欠准数字上加 1，小于 5 则舍弃不计。若等于 5 且其前一位数字为奇数，则加 1，为偶数时则舍弃不计。

4) 若第一位有效数字大于或等于 8，在计算有效数字的位数时，可多计一位。如 8.876 在计算有效数字时可看成五位有效数字，即作为