



國際科學技術大學

錦河

# 电机试验与测试技术



# 主要内容

- ◆ 测量误差
- ◆ 误差的传递
- ◆ 误差的处理
- ◆ 测量模式的选择
- ◆ 测试方案的选择
- ◆ 思考题

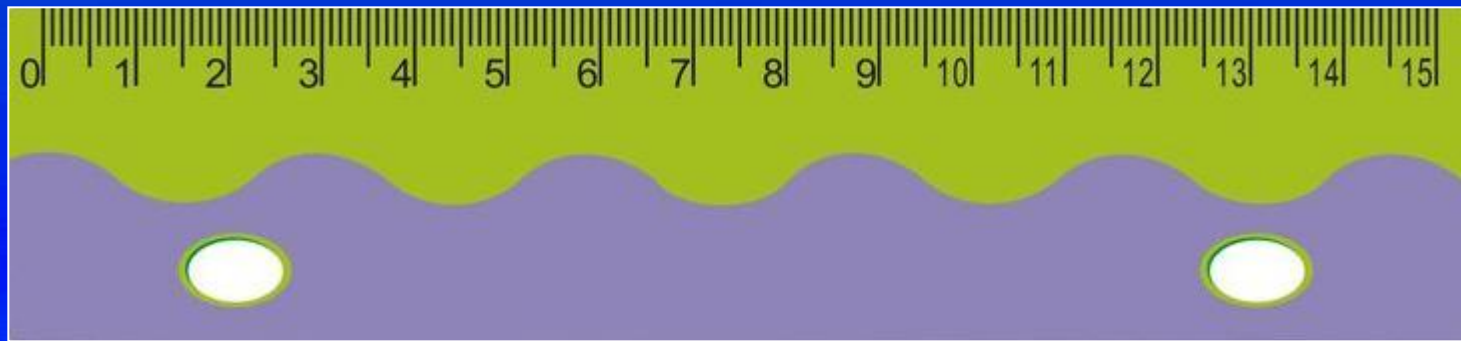


# 测量误差

- 误差的表示
- 误差的分类
- 误差的来源
- 误差的传递
- 误差的处理

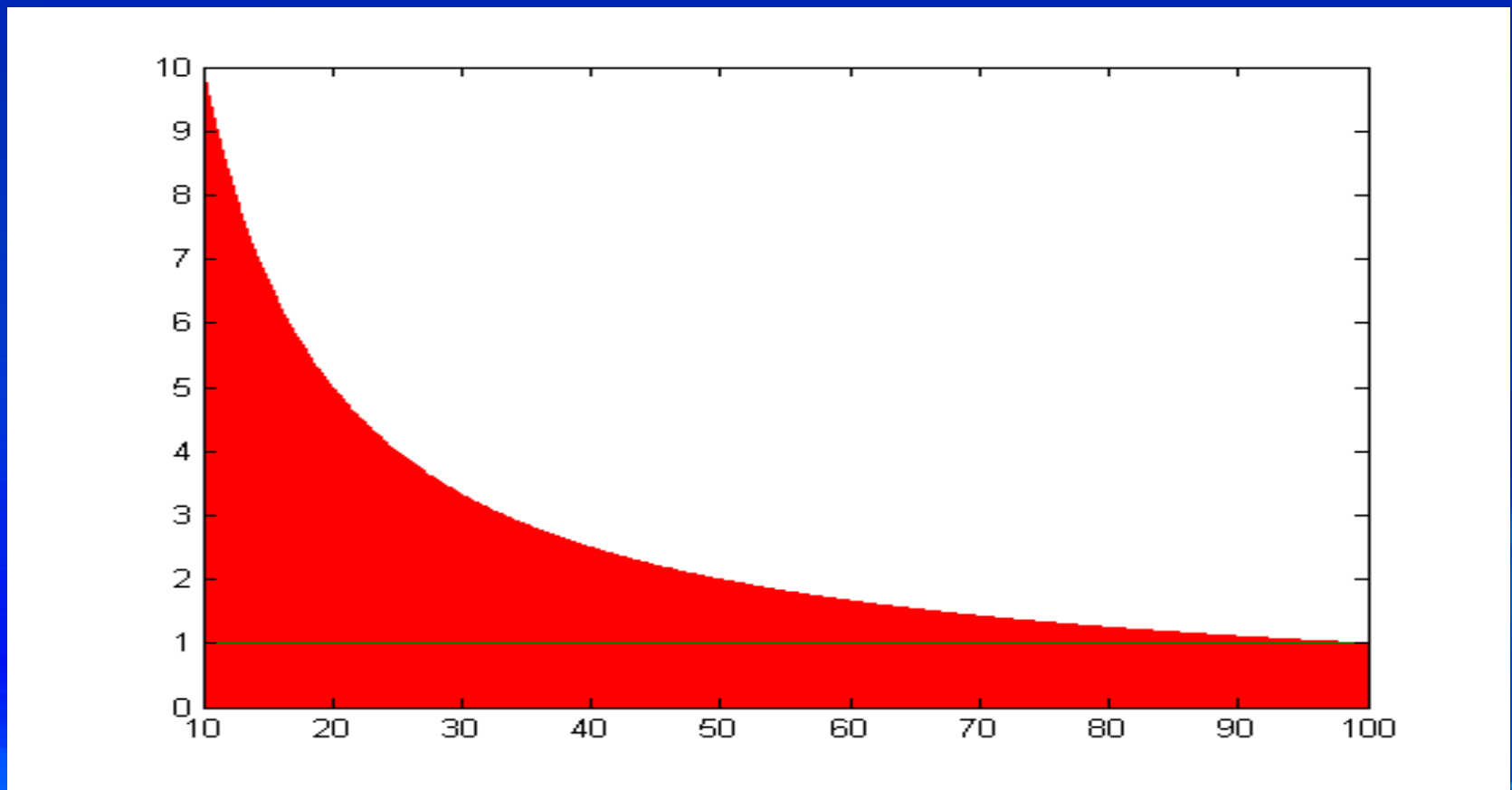
# 测量误差-误差的表示

- 真值（约定真值）
- 绝对误差（示值误差）
- 相对误差
- 引用误差（最大引用误差）



# 测量误差-误差的表示

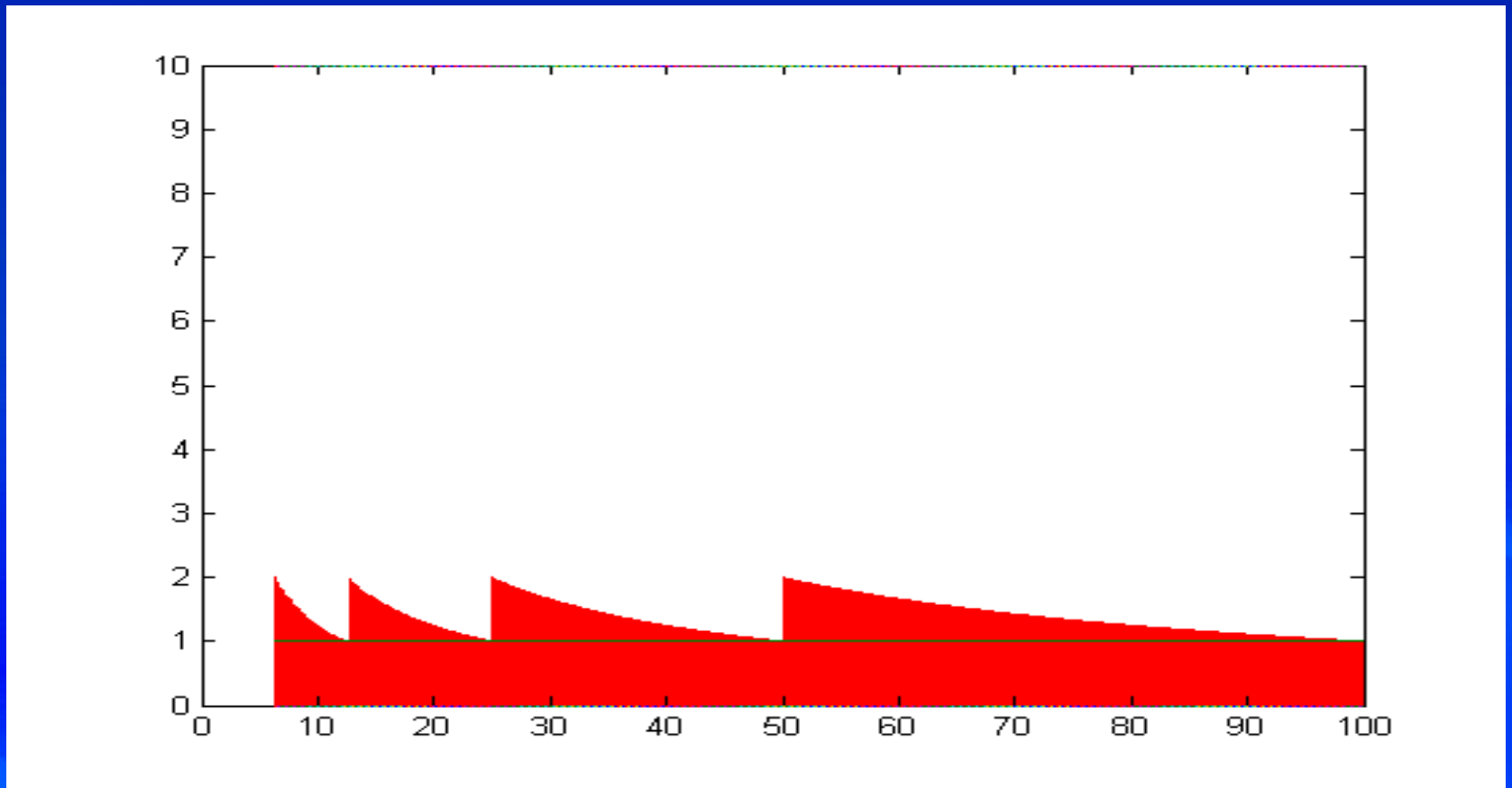
同一准确度等级下，相对误差、引用误差与测试点的关系图





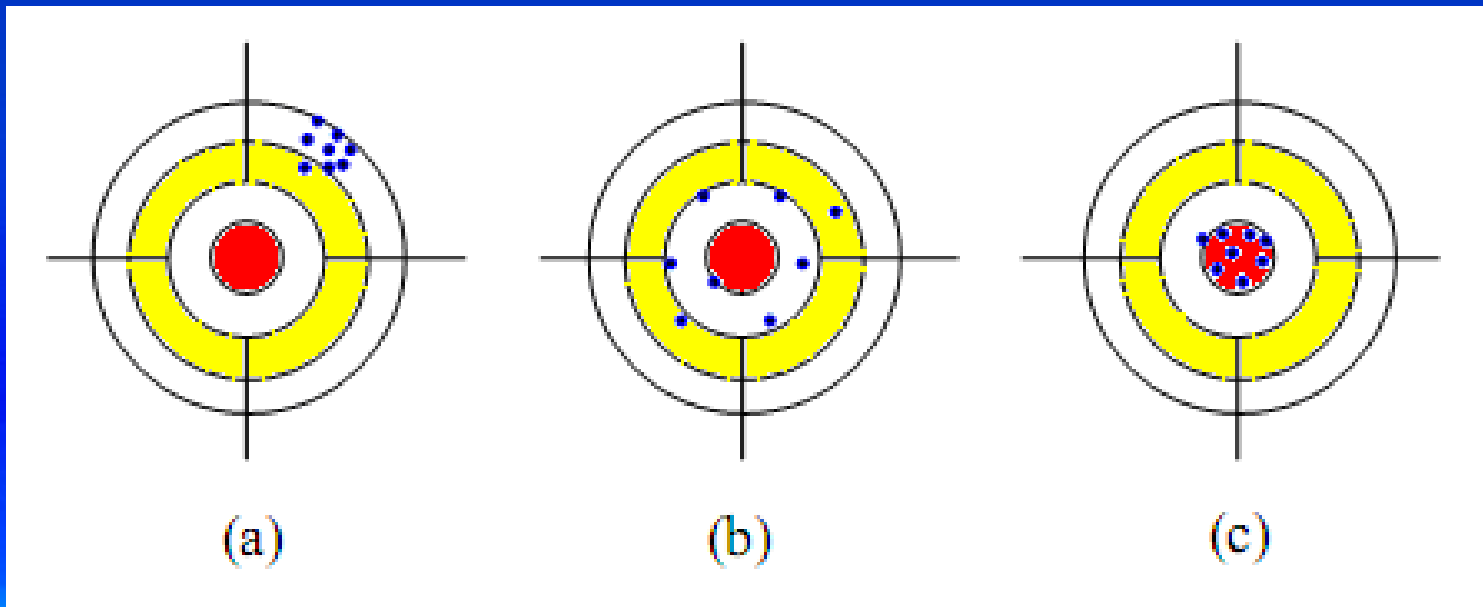
# 测量误差-误差的表示

同一准确度等级下，分档后的相对误差、引用误差与测试点的关系图



# 测量误差-误差的分类

- 系统误差
- 偶然误差
- 过失误差



# 测量误差-误差的来源



- 装置误差
- 环境误差
- 人员误差
- 方法误差



# 误差的传递

	数学运算关系 $\alpha = f(A, B, C \dots)$	绝对误差 = $\Delta\alpha$	相对误差 $E = \frac{\Delta\alpha}{\alpha}$
1	$\alpha = nA$	$n\Delta A$	$\frac{\Delta A}{A}$
2	$\alpha = A + B + C + \dots$	$\Delta A + \Delta B + \Delta C + \dots$	$\frac{\Delta A + \Delta B + \Delta C + \dots}{A + B + C + \dots}$
3	$\alpha = A - B - C - \dots$	$\Delta A + \Delta B + \Delta C + \dots$	$\frac{\Delta A + \Delta B + \Delta C + \dots}{A - B - C + \dots}$
4	$\alpha = \frac{B}{A}$	$\frac{A\Delta B + B\Delta A}{A^2}$	$\frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta B}{B}$
5	$\alpha = \frac{A - B}{A}$	$\frac{A\Delta B + B\Delta A}{A^2}$	$\frac{B\Delta A}{A(A - B)} + \frac{\Delta B}{A - B}$
6	$\alpha = A \cdot B$	$B\Delta A + A\Delta B$	$\frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta B}{B}$
7	$\alpha = \text{Cos}A$	$\text{Sin}A \cdot \Delta A$	$\text{tg}A \cdot \Delta A$

# 误差的传递

- 例1.  $X=A-B-C$  误差传递—求电机杂散耗

电机效率为92%， $X$ 为杂散耗， $A$ 为输入功率， $B$ 为输出功率， $C$ 为杂散耗外的其它损耗

假设真值为： $A=1000$ ， $B=920$ ， $C=75$ ，则真值为5.

假设上述测量误差为1%，可求出 $X$ 的相对误差为： $\pm 385\%$

- 例2.  $X=B/A$  误差传递—直接法求电机效率

$X$ 为效率， $A$ 为输入功率， $B$ 为输出功率，假设测量误差为1%，可求出 $X$ 的相对误差为： $\pm 2\%$

- 例3.  $X=(A-B)/A$  误差传递—损耗法求电机效率

$X$ 为效率， $A$ 为输入功率， $B$ 为损耗

假设真值为 $A=1000$ ， $B=80$ ，则真值为0.92

假设功率测量误差为1%，可求出 $X$ 的相对误差为： $\pm 0.174\%$

假设 $A$ 的测量误差为1%，要求 $X$ 的相对误差为0.5%，则对 $B$ 的精度要求为3%。

# 误差的处理

- 平均法
- 绘图法
- 曲线法

# 误差的处理

- 平均误差

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^n |X_i - X_0|}{n}$$

- 标准误差

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - X_0)^2}{n}}$$

- 可几误差

$$r=0.6745\delta$$

世界上多数国家的物理实验和正式的科学实验报告都是用标准误差评价数据的

# 平均与同步

## 平均的应用

应用了计算机技术的测试设备，可非常方便的将平均法植入测试设备，而观测者只需要一次读数。

测量是有误差的定量过程，我们无法获知被测量的真值，但是，偶然误差符合高斯分布，我们可以通过平均法减小偶然误差。

# 平均与同步

测量是有误差的定量过程，我们无法获知被测量的真值，但是，偶然误差符合高斯分布，我们可以通过平均法减小偶然误差。

对于电机试验而言，电压、电流、功率等参量本身也是一个不稳定的量。在输入条件不变的情况下，其波动一般符合一定的规律，即有周期性。



# 平均与同步

平均处理可减小测试系统的偶然误差，可提高测试结果的精密度，对于稳定的测量对象，平均点数越多越好。

平均处理可减小周期波动信号的读数波动，平均点数应与一个或多个波动周期对应的点数相符，或远远大于波动周期对应的点数。

对非周期波动信号采用平均处理，会降低测试系统的响应速度，且会造成重要测试数据的丢失。

# 平均与同步

## 同步的应用

同步也就是同步测量。主要用于存在相互关联的变化量的测量。

同步是定性的一个说法，实际测量中，不存在真正的同步。也就是说，被同步的信号总是存在时间差。关键在于这个时间差是否能够满足对测试结果的要求。

# 平均与同步

## 同步的应用

对于电机试验而言，符合线性叠加原理的参量，对同步的要求较低，如用两表法测量三相有功功率，一般精确到**100mS**就足够了。满足矢量叠加原理的参量，对同步的要求较高，如在三相三线制中，通过两相电压的测试求取第三相电压，一般要求精确到**uS**级或更高。

# 平均与同步

## 同步的应用

三相三线制中，同步测量两相电压可求出第三相电压。

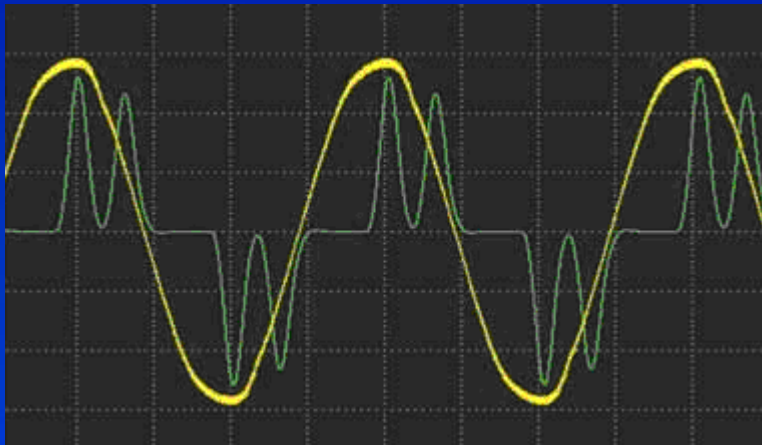
方法一、采用高速采集的计算机测试系统，可用两个传感器测量出三相电压。

方法二、采用指针式仪表，根据同步原理，可用两个传感器、三个仪表的方式测量出三相电压。

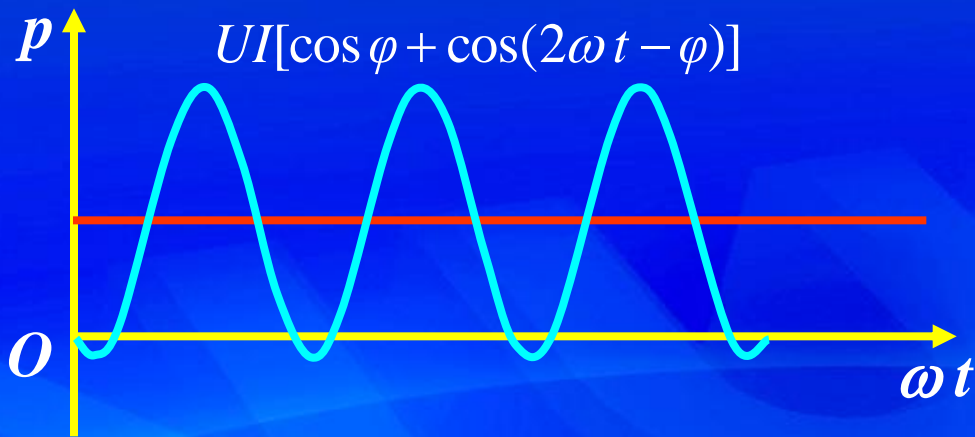
上述两种方法，在原理上等效。

# 平均与同步

## 同步的应用



单相变频器输入  
电压和电流波形



单相变频器输出  
功率波形



# 平均与同步

## 同步的应用

变频器的输入功率与输出功率在瞬时状态下，没有明确的数学关系，还与整理电路、支撑电容及负载的变化等有关。

在外部条件恒定的情况下，变频器的输出功率和输入功率在一个周波内的平均值为恒定值，且输出功率与输入功率的比值为变频器的效率。



# 平均与同步

## 同步的应用

三相电机的输入功率与输出功率在外部条件恒定时，输入功率与输出功率均为恒定值，避免了转矩脉动，且输出功率与输入功率的瞬时比值为恒定值。

三相电机的输入功率或输出功率变化时，变化的瞬间，由于电机惯性的存在，输入功率与输出功率不再满足稳定状态下的关系。

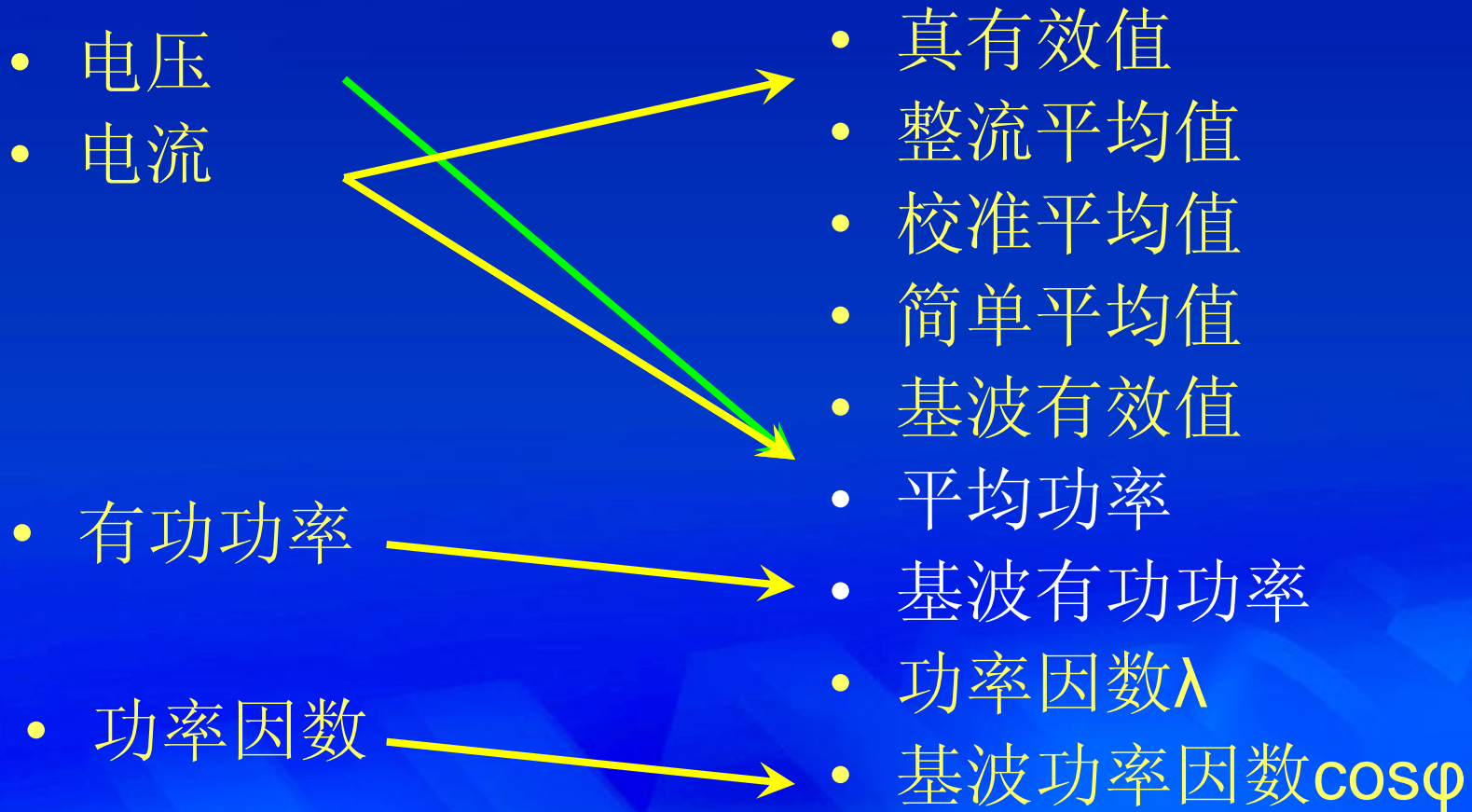
# 平均与同步

## 同步的应用

对于平均值符合数学关系的参量，在平均的基础上使用同步测量，其结果较准确。

最小平均时间为一个周波，当外部条件波动，造成一个周波内的均值仍有较大波动时，可适当延长平均时间。

# 测量模式的选择



# 测试方案的选择



# 曹冲称象

## 测试原理

$$A=a_1+a_2+a_3+\dots+a_n$$



# 曹冲称象

## 误差分析

$$\Delta A = \Delta a_1 + \Delta a_2 + \Delta a_3 + \dots + \Delta a_n$$

$$E = \Delta A / A$$

$$= (\Delta a_1 + \Delta a_2 + \Delta a_3 + \dots + \Delta a_n) / A$$

$$\approx n a_1 / A$$



# 曹冲称象

## 方案评价

- 在船上标刻度，采用了差值原理，具有较高的精度
- 测试结果的误差相当于测试设备的误差
- 多次测量减小了偶然误差
- 1800年后，该方法被用于国防科大磁悬浮加载试验

# 测试方案的选择

- 定性分析
- 定量分析
- 根据定量分析的误差大小决定测试方案

# 测试方案的选择

- 案例

电机效率求取。

可用设备：

0.5级电功率测试仪；0.2级扭矩测试仪；0.1级转速测试仪；并假设损耗计算误差小于2%。

# 测试方案的选择

•方案一：输入输出法

运算公式：

$$\eta = P_2 / P_1$$

误差传递公式：

$$\Delta\eta / \eta = \Delta P_2 / P_2 + \Delta P_1 / P_1$$

误差：

1%

采用输入输出法运算效率，效率精度取决于测试系统精度，相对误差等于输入输出功率的相对误差之和。

# 测试方案的选择

方案二：损耗分析法

运算公式：

$$\eta = (P_1 - P_3) / P_1 = 1 - P_3 / P_1$$

误差传递公式：

$$\Delta\eta / \eta = ((P_3 / (P_1 - P_3)) * (\Delta P_1 / P_1 + \Delta P_3 / P_3))$$

误差：

假设效率真值=0.8。

$$\Delta\eta / \eta = 0.25 * (\Delta P_1 / P_1 + \Delta P_3 / P_3) = 0.63\%$$

假设效率真值=0.95。

$$\Delta\eta / \eta = 0.053 * (\Delta P_1 / P_1 + \Delta P_3 / P_3) = 0.13\%$$

采用损耗分析法运算效率，精度与电机效率密切相关，效率越高，精度越高，且精度可超越测试设备精度。

# 测试方案的选择

## GB755明确指出

除非另有规定,否则电机效率保证值是根据测定各项损耗的方法确定的。当方法可以选择时,则对效率测试结果的评价应根据所选方法可达到的准确度和被试电机的型式与效率水平而定。\*

直接测定输出、输入功率以求取效率或总损耗时,测量的不准确度在效率的误差中直接显现出来,(例如功率测量准确度低于1%时,效率误差可能达2%,或者说总损耗误差可达输入功率的2%)。小型电机或电机效率较低(例如低于80%)\*时,这一方法是可取的,而试验则大为方便。如上述电机和其他电机直接测定损耗再计算效率,则可得到较高的准确度。

### 7.2 校准电机试验

需要测量损耗的电机与网路分开,如由原电动机拖动,则予以脱开,另由一台校准电动机将被试电

\* \* 有些国家使用间接法的基础是以效率水平90%为界,而另一些国家主张用一个较低值,例如70%。我国考虑使用间接法的基础是以效率水平80%为界。



# 测试方案的选择

《IEC61800可调速电力传动系统标准》亦指出

用于各单个系统部件和整套传动系统的通用效率计算公式为：

$$\text{效率}(\eta)\% = \frac{\text{输出功率}(P_{\text{out}})}{\text{输入功率}(P_{\text{in}})} \times 100\% \quad \text{或}$$

$$\text{效率}(\eta)\% = \frac{[\text{输入功率}(P_{\text{in}}) - \text{损耗}(P_{\text{loss}})]}{\text{输入功率}(P_{\text{in}})} \times 100\% \quad \text{或}$$

$$\text{效率}(\eta)\% = \frac{\text{输出功率}(P_{\text{out}})}{[\text{输出功率}(P_{\text{out}}) + \text{损耗}(P_{\text{loss}})]} \times 100\%$$

在这三个公式中，根据可利用的测量点确定出一种选择。通常，采用第二个或第三个公式确定单项损耗，可以获得更高的精确度。在这种情况下，因为电缆损耗常常不在系统供应商的控制之下，所以这

# 思考题

双馈电机试验中，发电状态下，出现定子功率与转子功率之和小于电网功率，有哪些可能原因？

# 原理图



# 试验数据

电网 P 1 (KW)	2598.3	2608.3	2597.8	2611.6	2603.5	2603.8	2600.8
定子 P 2 (KW)	2171.5	2180.38	2178.3	2183.1	2175.77	2198.2	2176.8
转子 P 3 (KW)	422.97	427.54	425.95	428.18	426.62	427.44	427.35
P2+P3-P1	-3.83	-0.38	6.45	-0.32	-1.11	21.84	3.35

# 定性分析

假设电网功率为 $P_1$ ，定子输出功率为 $P_2$ ，转子输出功率为 $P_3$ ，变频器输出功率为 $P_4$ 。

令 $P_5 = P_3 - P_4$ ，即 $P_4 = P_3 - P_5$

按照能量守恒定律，必然有： $P_2 + P_4 = P_1$

即： $P_2 + P_3 - P_1 = P_5$

一般的理解， $P_5$ 为变频器的损耗，且损耗为正值。

得到： $P_2 + P_3 - P_1 > 0$

那么，上表中 $P_2 + P_3 - P_1 < 0$ ，是否一定违背了能量守恒定律呢？



# 定性分析

类似现象：

旋转中的电机，输入突然开路，输入功率等于零，电机并不会马上停下来。

运动中的物体，本身积蓄了动能。输入开路后，积蓄的动能释放，维持电机旋转。

转子变频器的母线支撑电容积蓄了电能。



# 定性分析

认为 $P_2+P_3-P_1<0$ 违背了能量守恒定律的观点，是因为忽略了支撑电容这个能量源。

# 定量分析

为了简化分析，假设系统运行在稳定状态。对P5的测量误差进行分析。

运算公式： $P5=P2+P3-P1$

误差传递公式：

$$\Delta P5/P5=(\Delta P2+\Delta P3+\Delta P1)/(P2+P3-P1)$$

从试验记录看： $P2 \approx 5/6 * P1$ ， $P3 \approx 1/6 * P1$ ；根据VACON提供的数据，转子变频器损耗约2%，

$$P5 \approx 0.02 * P3 \approx 0.02/6 * P1 \approx 0.02/5 * P2$$

# 定量分析

误差： $\Delta P5/P5$

$$\approx 250 * \Delta P2/P2 + 50 * \Delta P3/P3 + 300 * \Delta P1/P1$$

三套功率测试系统的相对误差均为0.5%。

误差： $\Delta P5/P5 = \pm 300\%$

实际损耗为  $2\% * P3 \approx 8.5\text{kW}$ ，即P5测量结果可能范围是： $-17\text{kW} \sim +34\text{kW}$ 。

表中所有数据均在误差允许范围之内。

# 处理措施

基于本试验系统的目的不在于测量变频器损耗。根据误差处理的原则，本系统三个功率具有一定的关联性，已经采用了同步测量。建议通过下述手段提高精度，尽可能使数据符合规律。

措施一：提高转子变频器的稳定性

# 处理措施

措施二：采用平均功能，减小偶然误差

# 处理措施

措施三：改变测量原理在转子变频器的网侧增加一套测试系统

根据误差传递理论，在转子变频器的网侧增加一套同等精度的测试系统，约可提高**6**倍精度。



# 总 结

- ◆ 测试模式是前提
- ◆ 测试设备是基础
- ◆ 数学公式、误差传递理论是工具
- ◆ 好的试验方法，可提高试验精度
- ◆ 好的误差处理方法，可提高试验精度
- ◆ 试验方法不当，量变引起质变，可能导致  
错误结论



國際科學技術大學

錦河

谢谢各位!

