

电机试验与测量

湖南银河电气有限公司
国防科学技术大学

主要内容

**1.变频电量
的测量**

**2.AnyWay
简介**

**3.国家标准
对测量的要求**

**4.异步电机
效率计算**

**5.误差传递
与电机试验**

1、变频电量的测量

1.1、引言

1.2、完美的互感器

1.3、傅里叶变换

1.4、变频测量现状

1.1、引言

- ◆ 测量五要素
- ◆ 变频电量的定义
- ◆ 变频电量与工频电量的比对

测量五要素

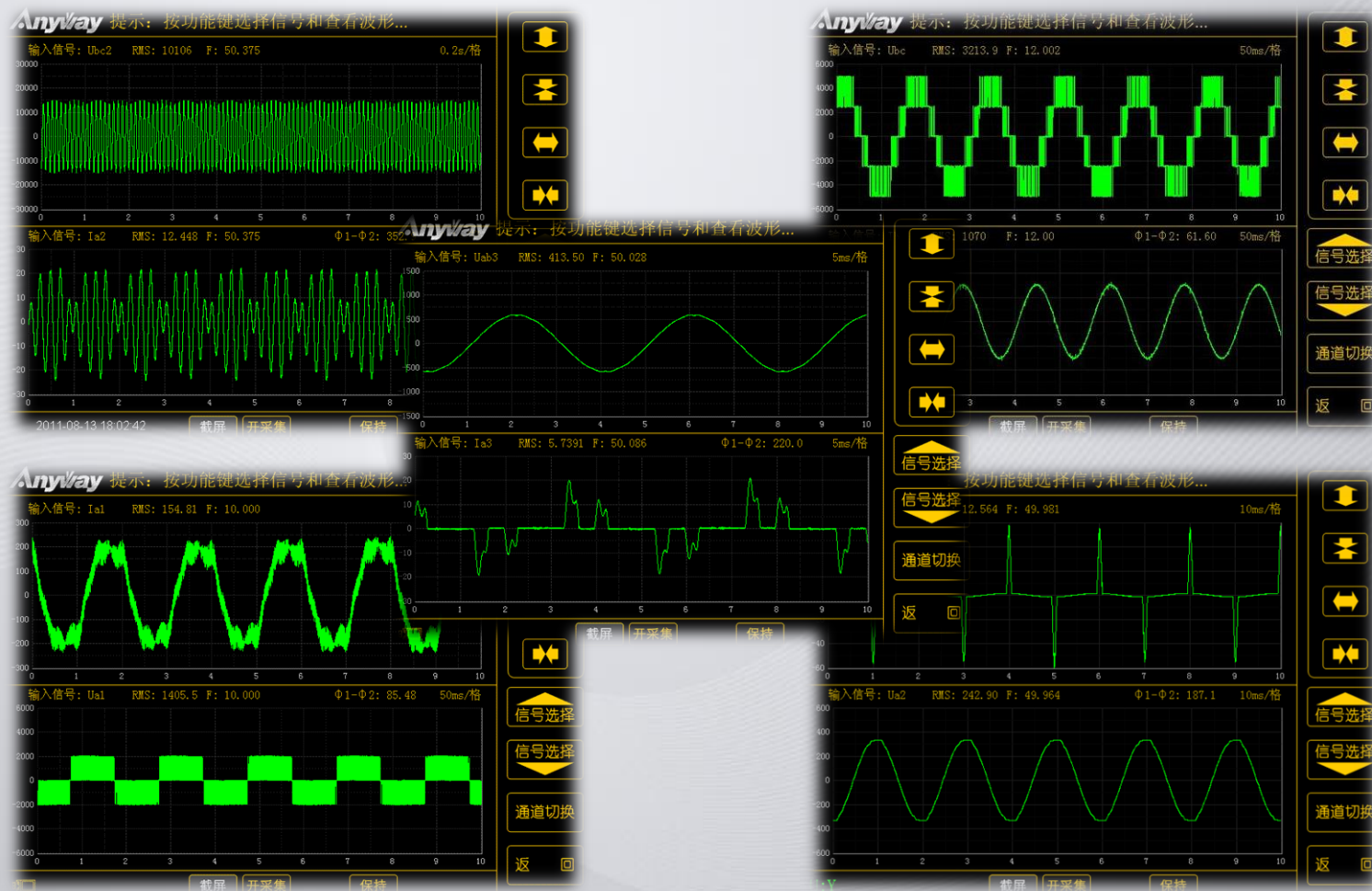
通用五要素

- 观测者
- 测量对象
- 测量仪器
- 测量方法
- 测量条件

变频测量五要素

- 人是主角，计算机辅助
- 幅值、频率、相位、基波、谐波、真有效值等等
- 带微处理器的数字式系统
- 同步测量、数值、波形、图表等等
- 电磁兼容

变频电量的定义



变频电量的定义

定义

- 变频电量泛指频率可变的电压、电流及其合成的功率等信号。
- 在电力领域，主要针对由于电力电子调速设备的广泛应用而引申出来的**区别于工频正弦电信号**的一个概念。

特征

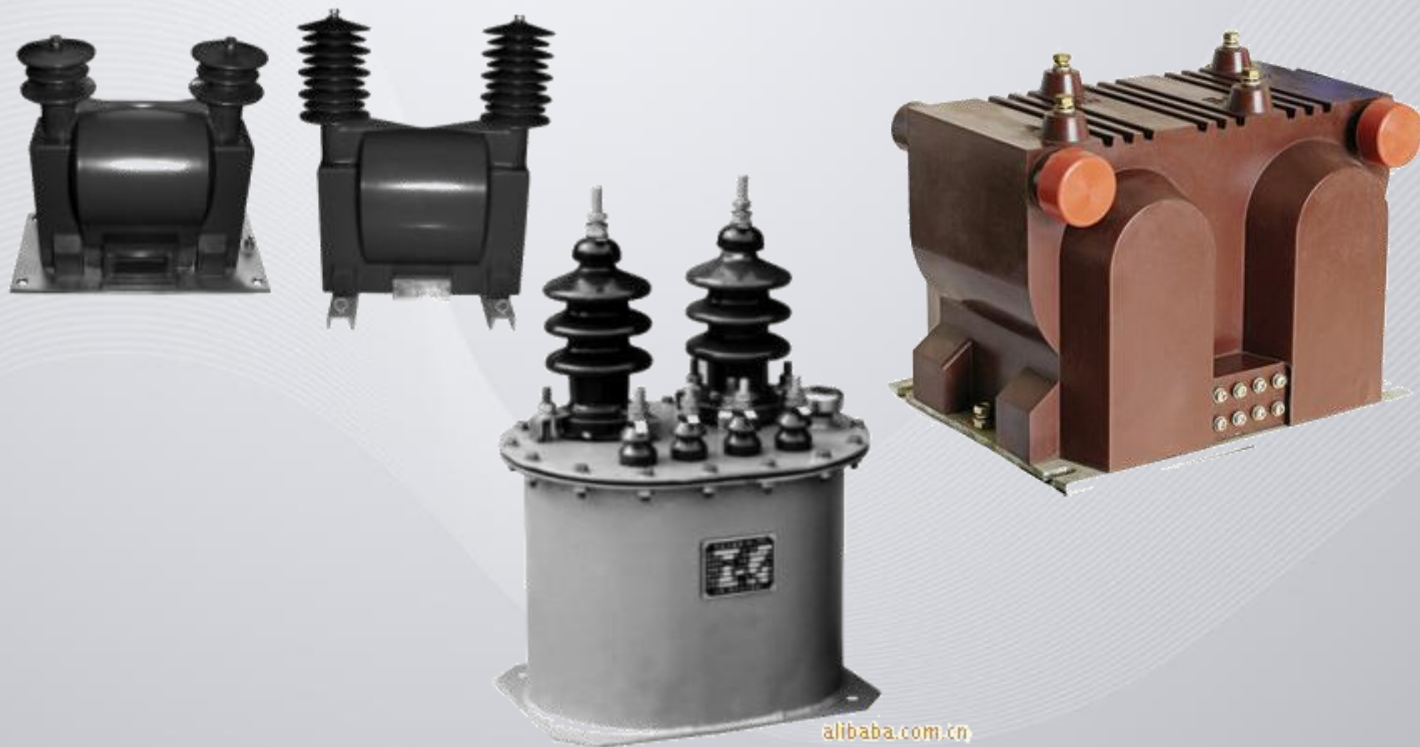
- **幅值**范围大，可以从几伏变化到几万伏，从几安变化到几千安。
- **基波频率**范围宽，从0.1Hz到400Hz甚至更宽。**带宽**约为开关频率的6倍。
- **相位**范围宽，功率因数在-1~1间任意变化。
- 往往是非正弦、高畸变，**谐波**含量丰富。

变频电量与工频电量的比对

频率固定与频率变化的区别，对于测试设备而言，在于频率的适用范围，也就是常说的带宽指标，是工频测量的延拓。

工频电量频率成分单一，变频电量频率成分复杂。因此，变频电量测试设备毫无例外都需要采用频域分析手段，主要分析方法---傅里叶变换

1.2、完美的互感器



alibaba.com.cn

1.2、完美的互感器

- ◆完善的标准与规程
- ◆齐全的量程与准确度等级
- ◆适合工业应用

完善的标准及规程



GB1207电压互感器标准

GB1208电流互感器标准



**JJG313测量用电流互感器
检定规程**

**JJG314测量用电压互感器
检定规程**

齐全的量程及准确度等级

电压测量范围：几V~几百kV

电流测量范围：几A~几十kA

**0.001级~0.5级，
普通级、S级、保护级**

适合工业应用

- 1、二次输出信号大：100V、5A
- 2、限定二次输出负荷：弥补互感器的缺陷
- 3、量程方案：原副边换挡技术
- 4、指标齐全：明确的比差和角差
- 5、明确的使用条件：明确的额定频率
- 6、电磁兼容性好：铁芯的利弊
- 7、电气隔离：隔离电压可达几百kV

二次输出信号大

- 可不可以小？
- 是不是仪表的需要？
- 大的弊端是什么？
- 为什么要这么大？

结论1：
二次输出信号大有利于提高抗干扰能力

限定一次输出容量

- 是不是越小越好？
- 限定负荷有什么好处？

注1：额定二次电流 5 A，额定负荷 7.5 VA 及以下的互感器，下限负荷由制造厂规定；制造厂未规定下限负荷的，下限负荷为 2.5 VA。

注2：额定负荷电阻小于 $0.2\ \Omega$ 的电流互感器下限负荷为 $0.1\ \Omega$ 。

注3：制造厂规定为固定负荷的电流互感器，在固定负荷的 $\pm 10\%$ 范围内误差应满足本表要求。

结论2：
限定负荷弥补了励磁电流带来的非线性

完善的量程方案

- 原边换挡
- 副边换挡
- 原副边结合换挡
- 不可替代

结论3：
完善的量程方案是宽范围测试的必要条件

明确的比差和角差

表 1 测量用电流互感器的误差限值

准确度 级 别	比值误差 (±)					相位误差 (±)				
	倍率 因数	额定电流下的百分数值				倍率 因数	额定电流下的百分数值			
		5	20	100	120		5	20	100	120
0.5	%	1.5	0.75	0.5	0.5	(′)	90	45	30	30
0.2		0.75	0.35	0.2	0.2		30	15	10	10
0.1		0.4	0.2	0.1	0.1		15	8	5	5
0.05		0.10	0.05	0.05	0.05		4	2	2	2
0.02		0.04	0.02	0.02	0.02		1.2	0.6	0.6	0.6
0.01		0.02	0.01	0.01	0.01		0.6	0.3	0.3	0.3
0.005	10 ⁻⁶	100	50	50	50	10 ⁻⁶ (rad)	100	50	50	50
0.002		40	20	20	20		40	20	20	20
0.001		20	10	10	10		20	10	10	10

结论4：
在功率测量中角差指标不可忽视

明确的额定频率

- 额定频率下准确度指标明确
- 非额定频率下准确度指标不明确

1 范围

本规程适用于额定频率为 50 Hz（或 60 Hz）的 0.001 级～0.5 级的测量用电流互感器（以下简称为电流互感器）的首次检定、后续检定和使用中检验。

结论5：
应该明确准确度适用的频率范围

铁芯的利弊

- 弊：非线性、易饱和
- 利：放大被测对象的磁感应强度，等效于抑制了环境磁场的影响。

结论6：
磁敏感设备要特别注意磁场的
影响

电气隔离

- 电磁隔离
- 隔离电压可达几百kV

结论7：
优良的电气隔离是安全测量的前提

互感器适用于工业现场的7个特性

- 1、二次输出信号大有利于提高抗干扰能力
- 2、限定负荷弥补了励磁电流带来的非线性
- 3、完善的量程方案是宽范围测试的必要条件
- 4、在功率测量中角差指标不可忽视
- 5、应该明确准确度适用的频率范围
- 6、磁敏感设备要特别注意磁场的影响
- 7、优良的电气隔离是安全测量的前提

实践证明，互感器的上述特性，加上正确使用，可以很好的满足于工频测量。



变频测量设备，应该囊括工频测量，上述要求对变频测量设备同样有效。

互感器适用于工业现场的7个特性

- 1、二次输出信号大有利于提高抗干扰能力
- 2、限定负荷弥补了励磁电流带来的非线性
- 3、完善的量程方案是宽范围测试的必要条件
- 4、在功率测量中角差指标不可忽视
- 5、应该明确准确度适用的频率范围
- 6、磁敏感设备要特别注意磁场的影响
- 7、优良的电气隔离是安全测量的前提

工业环境下变频电量高精度测量需 要考虑的六个问题

- 1、二次输出信号大有利于提高抗干扰能力**
- 2、完善的量程方案是宽范围测试的必要条件**
- 3、在功率测量中角差指标不可忽视**
- 4、应该明确准确度适用的频率范围**
- 5、磁敏感设备要特别注意磁场的影响**
- 6、优良的电气隔离是安全测量的前提**

1.3、傅里叶变换



一种特殊的积分变换，它能将满足一定条件的某个函数表示成正弦基函数的线性组合或者积分。

傅里叶变换的条件

✓ **足够高的采样频率**

最高频率成分的2倍，与基波频率无关

✓ **整周期截断**

基波周期的整倍数，与谐波无关

➤ **要求足够大的存储容量**

➤ **要求足够快的运算速度**

不符合要求的实例

日置HIOKO3193

Thd只取100次，在基波60Hz，开关频率5kHz时，变频器pwm的Thd测量结果接近0.

横河WT3000

采样频率是基波频率的3000倍，当开关频率3kHz，基波频率低于5Hz时，违背采样定理，分析结果混乱。

1.4、变频测试现状

- ◆ 电压传感器现状
- ◆ 电流传感器现状
- ◆ 仪表现状
- ◆ 系统现状

霍尔传感器

霍尔传感器+外置电阻

电阻分压器

电压传感器现状

- 二次输出：10V以内

LEM

Voltage Transducer LV 200-AW/2/6400 $V_{PN} = 6400 \text{ V}$

t_r Response time @ 90 % of V_{PN} 500 μs



- 电气隔离： 磁隔离，12kV

带宽：0.35/500 μs =700Hz

50Hz角差： $\Delta\varphi = -\arctan \frac{f}{f_H} = -\arctan \frac{50}{700} \approx 4^\circ = 240'$

霍尔传感器 +外置电阻

电磁感应原理
霍尔效应原理
电压电流变换
高导磁铁芯



- 二次输出：10V以内
- 量程方案：原边换挡
- 指标：无角差指标，实际影响较大。
- 频率范围：DC~700Hz。
- 磁敏感：安装要求高
- 电气隔离：电磁隔离，12kV

• 用于6kV以上变频测试

电阻分压器

欧姆定理



- 二次输出：灵活
- 量程方案：可副边换挡
- 指标：比差大于1%
- 频率范围：较宽
- 磁敏感：不敏感
- 电气隔离：无

• 直流接地系统较多应用

霍尔传感器
磁通门传感器
罗氏线圈
无感分流器

电流传感器现状

霍尔传感器

电磁感应原理
霍尔效应原理
高导磁铁芯



- 二次输出：500mA以内
- 量程方案：原边换挡
- 指标：无角差指标，实际影响较小。
- 频率范围：-3db带宽，100kHz
- 磁敏感：较敏感
- 电气隔离：穿心

• 应用最广

磁通门传感器

电磁感应原理

磁通门技术

高导磁铁芯



- 二次输出：500mA以内
- 量程方案：原边换挡
- 指标：指标优异。
- 频率范围：-3db带宽，100kHz
- 磁敏感：较敏感
- 电气隔离：穿心

• 部分集成商用于替代换挡

罗氏线圈

电磁感应原理
安培环路定律



- 二次输出：500mA以内
- 量程方案：一般不考虑
- 指标：无角差指标，积分器导致相位特性较差。
- 频率范围：0.1Hz~1MHz
- 磁敏感：敏感
- 电气隔离：穿心

• 工业现场非计量类测量

无感分流器

欧姆定律

NORMA 4000/5000

本操作手册

- 二次输出：75mV以内
- 量程方案：原边换挡

用分流器测量

⚠⚠ 警告

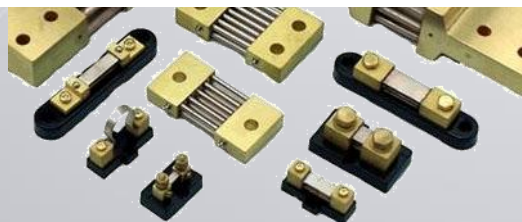
有触电致死的危险。不要碰触传感接线端。分流器上的传感接线端带有与电源连接相同的电压。

分流器未被隔离。切勿碰触分流器的传感接线端。

分流器的连接导线应尽量短，以免产生噪声电压。

⚠⚠ 警告

有触电致死的危险。碰触未连接到接地点的连接线、内部电路和测量装置可能会导致受伤。



- 国际基准、实验室使用

NORMA
YOKOGAWA

仪表现状



FLUKE
NORMA5000

FFT能力不足！



YOKOGAWA
WT3000

NORMA
YOKOGAWA

系统现状

- 1、缺乏完善的电磁兼容措施！
- 2、换挡成本高！
- 3、缺乏传感器匹配，
仪表的性能不能正常体现！

2. AnyWay简介



宽带功率分析仪

宽带功率传感器



下行光纤

上行光纤

AnyWay 变频功率测试系统 **主要特点**

1 /

前端数字化
无需二次设计

2 /

无缝量程转换

4 /

低功率因数

3 /

宽频带

5 /

系统精度

1

前端数字化

由于在传感器内部就将被测信号数字化，没有信号传输环节的损失与干扰，无传输距离的限制，无需专设电缆沟弱电层，并方便网络化、智能化应用。

2

3

4

5

前端数字化



5-1

1

无缝量程切换

2

Anyway在传感器内部设置8个换档，采用无缝量程切换技术，用户无需关注档位设置，并且转换量程过程中，数据不丢失。

3

此外，AnyWay具有20倍的瞬间过电流能力，可以承受电机直接启动时的瞬间大电流。

4

5

大大减少了传统测试系统大量的换占地面积、节约了用户的设备投入资金，减少在试验过程中的误操作和劳动强度。

宽幅值范围



2

5-2

1

宽频带

0.1Hz~400Hz范围内，基波测量精度满足标称指标

2

电压 (-3db) 带宽 : 100kHz

3

电流 (-3db) 带宽 : 30kHz

4

5

宽频率范围

0.1~400Hz

5-3

1

低功率因数

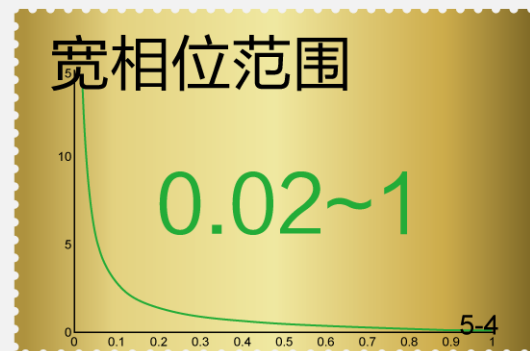
角差小，是目前唯一一款提供低功率因数下功率测量精度指标的变频电量测量设备。

2

3

4

5



1

系统精度

传感器精度就是系统精度

2

宽幅值、频率、相位范围内采用最低精度标称，一个精度指标涵盖全范围。

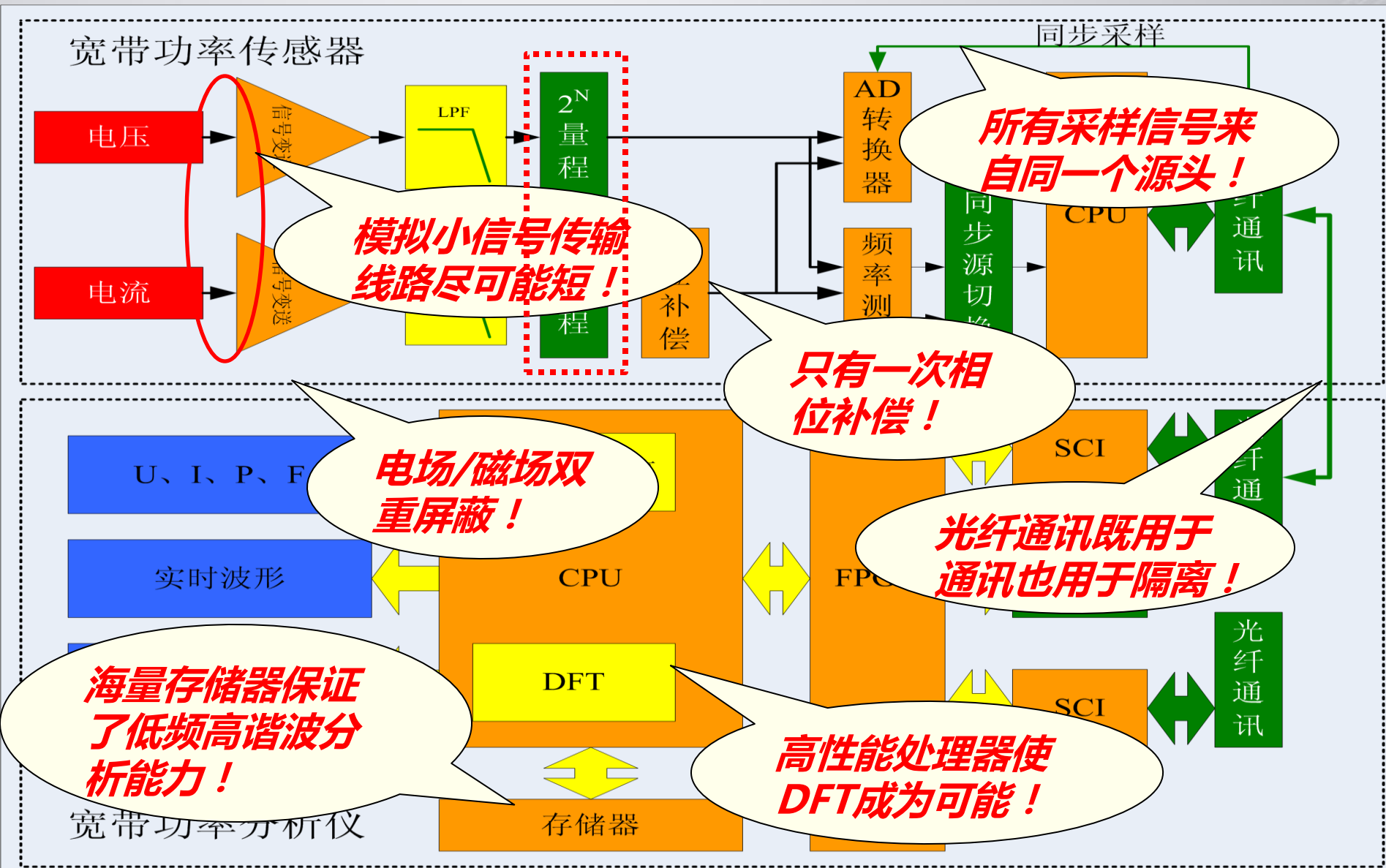
3

4

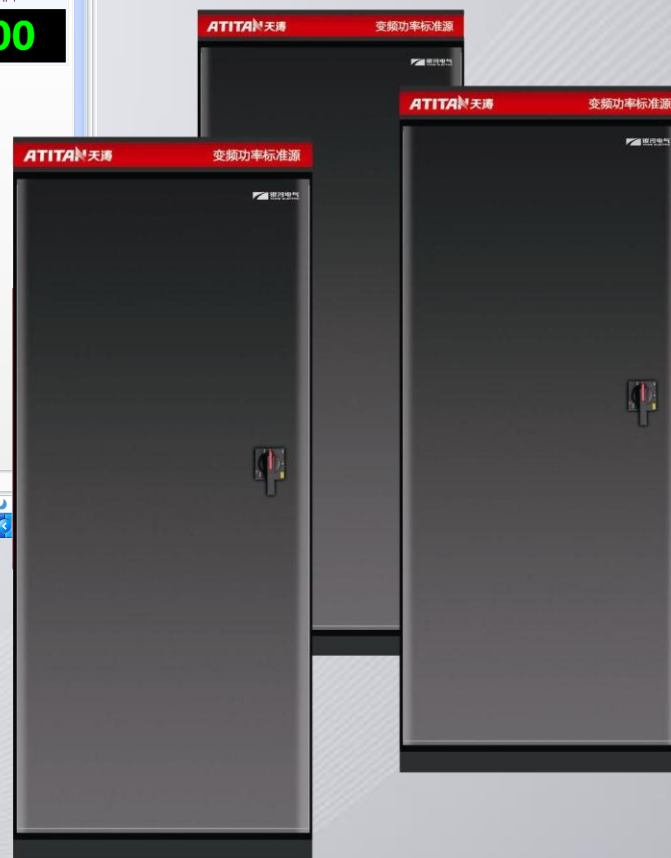
5



AnyWay 变频功率测试系统 原理简图



AnyWay 变频功率测试系统 检定及溯源



ATITAN鉴定之前

- 计算机检定系统进行一致性及稳定性测试
 - 工频检定幅值线性度
- 工频全范围校准
- 变频检定频率特性

FLUKE6100覆盖范围内变频
比对，绘制幅频曲线和相
频曲线

ANTIAN鉴定之后

- 计算机检定系统进行一致性及稳定性测试
 - 工频检定幅值线性度
- 工频全范围校准
- 变频检定频率特性

ATITAN覆盖范围内变频比对
，绘制幅频曲线和相频曲
线

工频

- 电压0~10kV，17档
- 电流0~4000A，31档
- 互感器准确级：0.01级
- 仪表准确级：0.02级

变频

- 电压：0~10kV
- 电流：0~500A
- 频率：5~400Hz
- 相位：0~360°
- 准确级：0.05级

- AnyWay变频功率传感器检定规程
- 自主研发的变频电量信号发生器
- 20~100Hz/3500A电流源
- 20~100Hz/10kV电压源
- 每台传感器40个试验项目，全部实现计算机自动检定，所有试验过程采用20次/每秒记录数据，自动出具检定报告

AnyWay 变频功率测试系统 计算机检定系统

试验类型管理

★	试验类型
>	模拟板运行耗电试验
	模拟板正确性试验
	模拟板档位切换试验
	模拟板零点噪声试验
	模拟板频率检测试验
	模拟板电压谐波失真试验
	模拟板电流谐波失真试验
	模拟板线性度试验
	模拟板零点噪声稳定度试验
	模拟板测量稳定度试验
	数字板待机耗电试验
	数字板运行耗电试验

模拟板运行耗电试验

试验名称: 模拟板运行耗电试验 试验进度: 0/1

试验倒计时

00:00:20

功率分析仪档位控制

D0

IP:

信号源输出

信号源ID:

信号源量程选择:

数据采集

曲线类型:

 启动

 上一步

 下一步

 记录挂接

 记录

 停止

 窗口大小

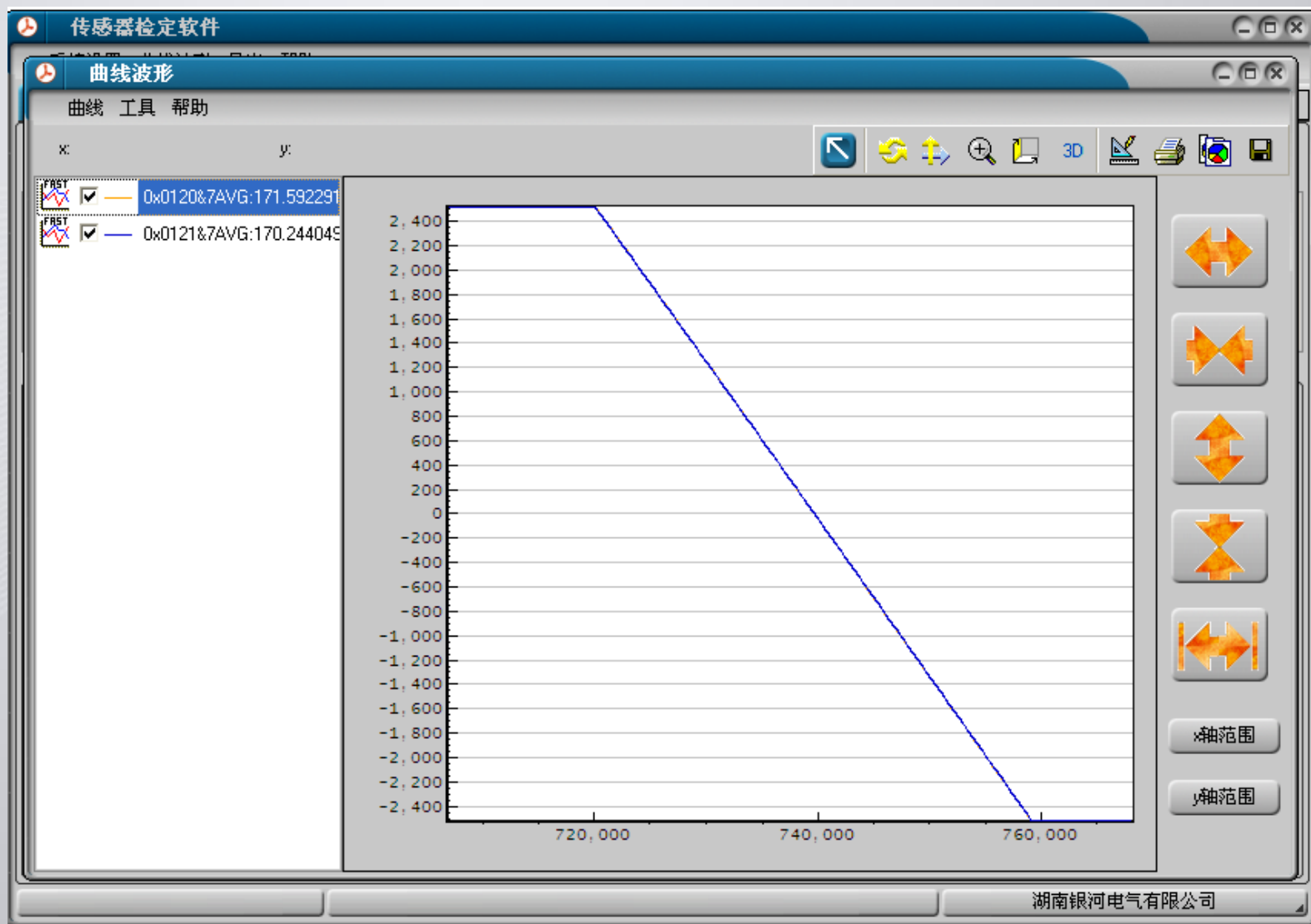
 退出

新增

删除

退出

AnyWay 变频功率测试系统 计算机报表系统



3、国家标准 对测量的要求



GB755

试验中所使用的测试仪表及其附件,如仪用互感器、分流器以及电桥,除非另有协议,其准确度应不低于 0.5 级;三相功率表及低功率因数功率表的准确度应不低于 1 级。

选用仪表时应注意使读数在有效量程以内,小于一格的数值占实际读数的百分比应极小,且应易于估计。

有可调节电刷的电机,电刷应置于相应规定定额时的位置。空载试验时,电刷可以放在中性轴线上。

转速可以用闪光测频法、数字计数计或转速表测定。在测定转差时,其同步转速应根据试验电源的频率来确定。

未明示系统准确度

未明确低功率因数时传感器的角差要求
量程的选择没有量化



GBT1032

4.2 试验电源

4.2.1 电压

4.2.1.1 电压波形

试验电压的谐波电压因数(HVF)应不超过(见 GB 755—2000 中 6.2.1.1):

0.03——N 设计电动机(见 JB/T 8158);

0.02——未加说明的其他电动机。

热试验时,试验电源的谐波电压因数(HVF)应不超过 0.015。

4.2.1.2 电压系统的对称性

三相电压系统的负序分量应小于正序分量的 0.5%,且零序分量的影响应予消除(见 GB 755—2000 中 7.3.1)。

4.2.2 频率

4.2.2.1 频率偏差

试验期间,电源频率与规定频率之差应在规定频率的 $\pm 0.3\%$ 范围内。频率的偏差会直接影响到用 A 法和 B(B1)法测得的效率值。

4.2.2.2 频率的稳定性

试验期间不允许频率发生快速变化,因为频率快速变化不仅影响被试电机,也会影响到输出测量装置。测量期间频率变化量应小于 0.1%。



GBT1032

4.3 测量仪器

4.3.1 概述

因为大多数仪器的准确度等级通常以满量程的百分数表示。因此,应尽量按实际读数的需要,选择低量程仪表。

影响仪器测量结果准确度的因素:

- a) 信号源负载;
- b) 引接线校正;
- c) 仪器的量程、使用条件和校准。

4.3.2 电量测量仪器

通常,电量测量仪器的准确度应不低于 0.5 级(满量程)(兆欧表除外)。用 B(B1)法(见 10.4)测定电机效率时,为保持试验结果的准确性和重复性,要求仪器的准确度等级不低于 0.2 级(满量程)。

一般说来,电子仪器是多用途的,与无源仪器(非电子式)相比,有非常大的输入阻抗,无需因仪器自身损耗而修正读数。但高输入阻抗仪器对干扰更为敏感。应依实践经验,采取减少干扰的措施。

4.3.3 仪用互感器

测量用仪用互感器的准确度等级应不低于 0.2 级(满量程)。

4.3.4 转矩测量仪

一般试验用转矩测量仪(含测功机和传感器)的准确度等级应不低于 0.5 级。



GBT1032

采用 B(B1)法(见 10.4)测定效率时,转矩测量仪的准确度等级应不低于 0.2 级(满量程)。

4.3.5 转速与频率测量仪

转速表读数误差在 ± 1 r/min 以内。频率表的准确度等级应不低于 0.1 级(满量程)。

4.3.6 电阻测量仪

绕组的直流电阻用双臂电桥或单臂电桥,或数字式微欧计测量,准确度应不低于 0.2 级。

4.3.7 温度测量仪

温度测量仪的最大允许误差为 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 。

4.4.3 功率测量

应采用两表(两台单相功率表)法测量三相电动机的输入功率,也可采用一台三相功率表或三台单相功率表测量输入功率。

如仪器仪表损耗影响试验结果的准确性,可按附录 A 对仪器仪表损耗及其误差进行修正。



GBT22670

4.2 测量仪器

测量仪器除应符合 GB/T 1032—2005 中 4.3 规定的要求外,当由变频器供电试验时,还应符合下列要求:

应使用测量电流、电压有效值的仪表和有功功率表。尤其在输入-输出法中,测量结果的准确度取决于功率表、转矩和转速测试设备的准确度。

考虑到谐波产生损耗的作用,应仔细选择测试设备,使其能在相应频率范围内有足够的准确度,以下是对互感器、传感器以及分流电路等测试设备所要求的频率范围 f_r :

$$f_r = 10f_1 \text{——对六阶梯波变频器}$$

$$f_r = 6f_p \text{——对 PWM 变频器,最高为 100 kHz}$$

式中:

f_1 ——最高额定频率;

f_p ——最高脉冲频率(载波频率)。

不足之处

- 未明示系统准确度
- 未明确低功率因数时传感器的角差要求
- 量程的选择没有量化
- 部分描述用词不准确

误区（一）

数据不稳定时，可采用同步测量消除影响。

习惯思维：两个量都在变化，那么，要对其状态进行确认，就应该采用同时读数的方法。

信号系统：只有无记忆系统才能具备上述特点。电机不是无记忆系统。

4、异步电机效率计算

4.1、试验过程

4.2、效率计算方法简介

4.3、B法计算效率

4.1、试验过程

空载试验

热试验

负载试验

空载试验

- 1、在负载试验后进行
- 2、输入功率稳定后记录数据
- 3、125%~空载电流不稳定的点
- 4、参数：U、I、P、 θ (R)

主要目的

- 1、获取风摩耗和铁耗之和
- 2、根据风摩耗与铁耗与负载无关，铁耗由电压决定，进行铁耗和风摩耗的分离

负载试验

- 1、定子绕组温度与热试验时相同
- 2、150%~25%依次取点
- 3、参数：U、I、P、T_d、n、f、 θ_t 、 θ_f
- 4、推荐采用埋置检温计法测温度

主要目的

- 1、计算定子铜耗、转子铜耗，剩余损耗
- 2、由剩余损耗计算负载杂散损耗

热试验

- 1、直接负载法
- 2、降低电压法
- 3、降低电流法
- 4、定子叠频法

主要目的

- 1、获取稳定温升，作为空载试验和负载试验的温度参考。

4.2、效率计算方法

12种方法

A法：输入-输出法

B (B1) 法：损耗分析及输入-输出法**间接测量杂散损耗**

C (C1) 法：损耗分析及回馈法间接测量杂散损耗

E法：损耗分析及**直接法测量负载杂散损耗**

E1法：损耗分析及**推荐负载杂散损耗**

F法：等值电路及直接法测量负载杂散损耗

F1法：等值电路及推荐负载杂散损耗

G法：降低电压负载法及直接法测量负载杂散损耗

G1法：降低电压负载法推荐负载杂散损耗

H法：圆图法

4.3、*B*法计算效率

- 1、空载试验+热试验：确定风摩耗和铁耗
- 2、负载试验+热试验：确定定子铜耗
- 3、负载试验+空载试验+热试验：转子铜耗
- 4、负载试验+热试验+扭矩仪修正：剩余损耗
- 5、线性回归分析：负载杂散损耗

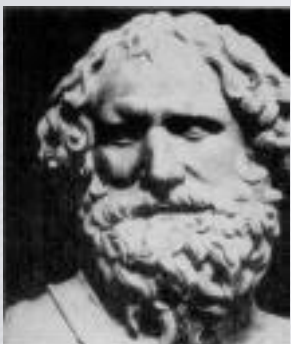
误区(二)

直接法比间接法准确

思维习惯：

- 直接测量的值可信；
- 环节越少，结果越可信。

阿基米德测皇冠的含金量

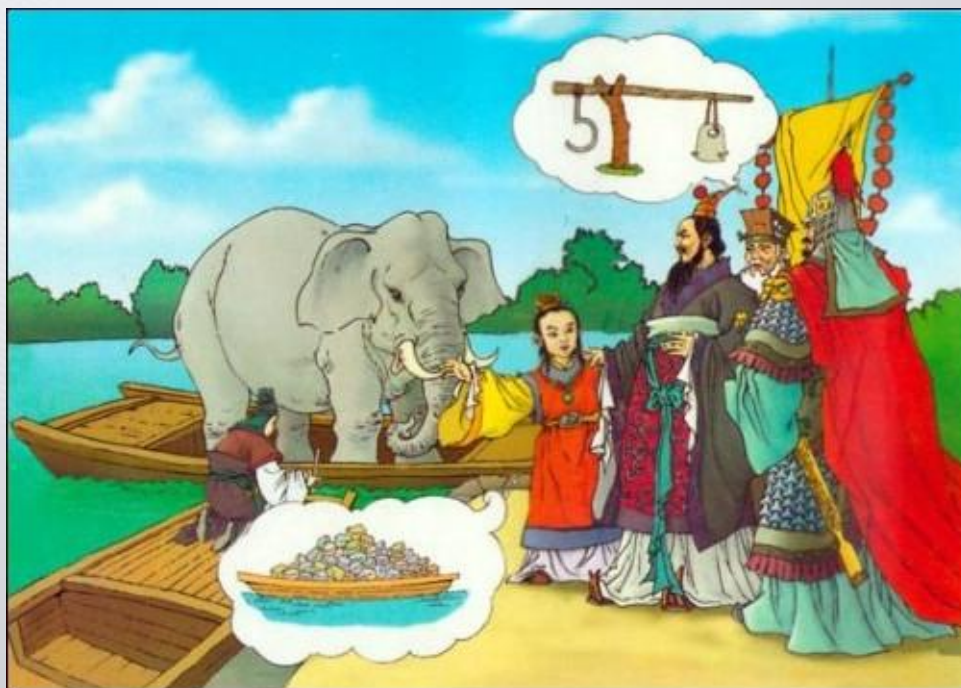


浮力原理

利用浮力原理辨别皇冠是否纯金，并因此发现了浮力原理。



曹冲称象



间接法用于现代精确测量

**比较法检定互感
器的比差和角差**

**电桥原理精确
测量电阻**

12种效率计算方法中有11种是间接法

GB755明确指出：

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%）¹¹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。

5. 误差传递 与电机试验

$$dy = \frac{\partial y}{\partial x_1} dx_1 + \frac{\partial y}{\partial x_2} dx_2 + \frac{\partial y}{\partial x_3} dx_3 + \dots$$

误差传递原理

测量中，某些结果，要通过一系列的测量操作步骤并分析运算后获得的。而其中的每一个步骤可能发生的误差都会对分析结果产生不同程度的影响。

$$y = f(x_1, x_2, x_3, \dots)$$

$$dy = \frac{\partial y}{\partial x_1} dx_1 + \frac{\partial y}{\partial x_2} dx_2 + \frac{\partial y}{\partial x_3} dx_3 + \dots$$

例1

例1：A法计算效率： $\eta = p_1/p_2$

$$d\eta = \frac{\partial \eta}{\partial p_1} dp_1 + \frac{\partial \eta}{\partial p_2} dp_2 = -\frac{p_2}{p_1^2} dp_1 + \frac{1}{p_1} dp_2$$

$$re = \frac{d\eta}{\eta} = d\eta \frac{p_1}{p_2} = -\frac{1}{p_1} dp_1 + \frac{1}{p_2} dp_2$$

假设 p_1 、 p_2 的准确度为0.5级，那么效率的相对误差为 $\pm 1\%$

例2

例2：功率计算中电压、电流、相位的误差传递， $P=UI\cos\varphi$

$$dP = I \cos \varphi dU + U \cos \varphi dI + UI \sin \varphi d\varphi$$

$$re = \frac{dP}{P} = \frac{dU}{U} + \frac{dI}{I} + \tan \varphi d\varphi$$

当功率因数为1时， $\tan\varphi=0$ ，误差由U、I决定。

当功率因数接近0时， $\tan\varphi$ 接近无穷大， φ 的微小误差将引起P的很大的误差！

例3

例3：损耗分析法求效率

$$\eta = 1 - \frac{P_{Fe}}{P_1} - \frac{P_{fw}}{P_1} - \frac{P_{cu1}}{P_1} - \frac{P_{cu2}}{P_1} - \frac{P_s}{P_1}$$

$$\frac{d\eta}{\eta} \approx d\eta = -\frac{dP_{Fe}}{P_1} - \frac{dP_{fw}}{P_1} - \frac{dP_{cu1}}{P_1} - \frac{dP_{cu2}}{P_1} - \frac{dP_s}{P_1}$$

由于各种损耗的比例均很小，其误差与P1的比值更小。初略估计，假设电机效率为95%，每项损耗均匀分布，各占1%，假设各项损耗的计算误差为**5%**，效率的误差为**0.1%**。

例4

例4：B法中的杂散耗计算

$$P_L = P_1 - P_2 - (P_{Fe} + P_{fw} + P_{cu1} + P_{cu2})$$

$$\frac{dP_L}{P_L} = \frac{dP_1}{P_L} - \frac{dP_2}{P_L} - \frac{dP_{Fe}}{P_L} - \frac{dP_{cu1}}{P_L} - \frac{dP_{cu2}}{P_L}$$

假设电机效率为95%，P1和P2的相对误差为0.2%，每项损耗均匀分布，各占1%，假设各项损耗的计算误差为**5%**，PL的误差为**83.5%**。

结语

- 1、电机试验是专业性非常强的一门科学，除了对测量设备有较高的要求之外，试验人员的经验及操作方法都会对试验结果产生较大的影响。
- 2、电机试验人员很难熟练掌握试验要求与技巧，研制融汇国家标准和实践经验于一体的计算机试验系统，具有非常大的现实意义。
- 3、规范试验方法，明确各种试验方法的适用范围，明确各种试验方法对试验结果带来的不确定度，明确测量数据的不准确对结果带来的影响程度，是科学、准确评价电机能效的重要基础工作。