

JJF

中华人民共和国国家计量技术规范

JJF ××××—××××

自整角机/旋转变压器模拟器校准规范

Calibration Specification for Synchro/Resolver Simulator

(征求意见稿)

××××—××—××发布

××××—××—××实施

国家市场监督管理总局 发布

自整角机/旋转变压器模拟器 校准规范

Calibration Specification for Synchro/Resolver
Simulator



归口单位：全国电磁计量技术委员会

主要起草单位：

参加起草单位：

本规范委托全国电磁计量技术委员会负责解释。

本规范主要起草人：

X X X（起草人所在单位名称）

参加起草人：

X X X（起草人所在单位名称）

目 录

引言	II
1 范围	1
2 引用文件	1
3 术语和计量单位	1
3.1 自整角机 Synchro	1
3.2 旋转变压器 Resolver	1
4 概述	2
4.1 自整角机	2
4.2 旋转变压器	2
4.3 构造与分类	3
5 计量特性	3
5.1 电角度示值误差	3
5.2 输出线电压示值误差	3
5.3 参考电压示值误差	4
5.4 参考频率示值误差	4
6 校准条件	4
6.1 环境条件	4
6.2 测量标准及其他设备	4
7 校准项目和校准方法	4
7.1 校准项目	4
7.2 校准方法	5
8 校准结果表达	19
8.1 校准证书	19
8.2 数据处理及修约	20
9 复校时间间隔	20
附录 A 校准不确定度评定示例	21
A.1 感应分压比例法电角度示值误差校准结果的不确定度评定	21
A.2 标准表法电角度示值误差校准结果的不确定度评定	23
附录 B 校准原始记录格式	26
附录 C 校准证书内页格式	29

引言

本规程依据国家计量技术规范 JJF 1001—2011《通用计量术语及定义》、JJF 1002—2010《国家计量检定规程编写规则》和 JJF 1059.1—2012《测量不确定度评定与表示》编制。

本规范是首次发布的国家计量校准规范。

自整角机/旋转变压器模拟器校准规范

1 范围

本规范适用于频率范围为 47 Hz~20 kHz 的自整角机/旋转变压器模拟器、同步分解电角度模拟器的校准。

2 引用文件

本规范引用了下列文件：

GB/T 13138-2020 自整角机通用技术条件

GB/T 10241-2007 旋转变压器通用技术条件

凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于该规范；凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本规范。

3 术语和计量单位

3.1 自整角机 Synchro

自整角机是利用自整步特性将转角变为交流电压或由交流电压变为转角的感应式微型电机，在伺服系统中被用作测量角度的位移传感器，也称为“同步器”。它可将转轴的转角变换为电气信号、或将电气信号变换为转轴的转角，实现角度数据的远距离发送、接收和变换，达到自动指示角度、位置、距离和指令的目的。

3.2 旋转变压器 Resolver

旋转变压器是一种输出电压与转子转角保持一定函数关系的感应式微电机，简称“旋变”，也称为“解算器”或“分解器”。旋转变压器的工作原理和普通变压器基本相似，区别在于普通变压器的原边、副边绕组是相对固定的，所以输出电压和输入电压之比是常数，而旋转变压器的原边、副边绕组则随转子的角位移发生相对位置的改变，因而其输出电压的大小随转子角位移而发生变化，输出绕组的电压幅值与转子转角成正弦、余弦函数关系，或保持某一比例关系，或在一定转角范围内与转角成线性关系。旋转变压器在同步随动系统及数字随动系统中可用于传递转角或电信号；在解算装置中可作为函数的解算之用，故也称为解算器。

4 概述

4.1 自整角机

自整角机由定子和转子组成，如图 4.1 所示，它的定子绕组为三相绕组，在空间以 120° 的间隔对称分布，转子为单相绕组。

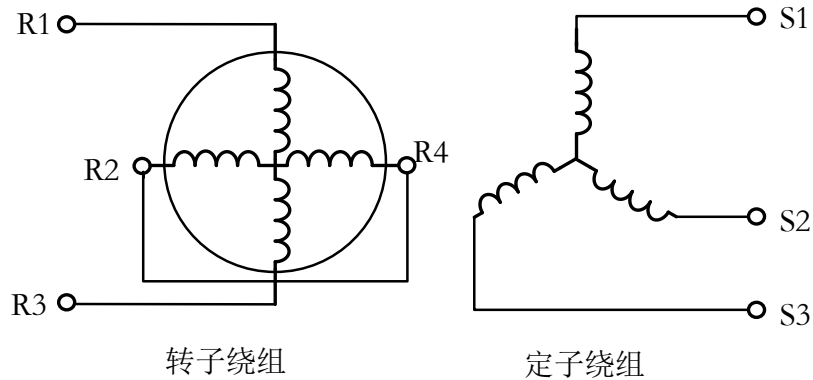


图 4.1 自整角机的结构原理图

当单相转子绕组 R1R3 接正弦交流励磁电压 $V \sin(\omega t)$ 后，定子的三相绕组产生一组感应电势为：

$$\begin{cases} u_{S1-S3}(\theta, t) = kV \cdot \sin \theta \cdot \sin(\omega t + \varphi) \\ u_{S3-S2}(\theta, t) = kV \cdot \sin(\theta + 120^\circ) \cdot \sin(\omega t + \varphi) \\ u_{S2-S1}(\theta, t) = kV \cdot \sin(\theta - 120^\circ) \cdot \sin(\omega t + \varphi) \end{cases} \quad (4-1)$$

式中：

ω —励磁电压的角速度；

θ —自整角机的角位移；

V —初级励磁电压的幅值；

k —变压器的变比；

φ ——初级励磁电压和次级输出感应电压之间的相位角。

4.2 旋转变压器

旋转变压器也是由定子和转子组成，如图 4.2 所示，定子绕组为二相绕组，在空间成 90° 正交对称分布。旋转变压器的初级、次级绕组则随转子的角位移 θ 发生相对位置的变化，因而定子绕组输出电压的大小随转子角位移而发生变化，并且与转子转角成正弦、余弦函数关系。

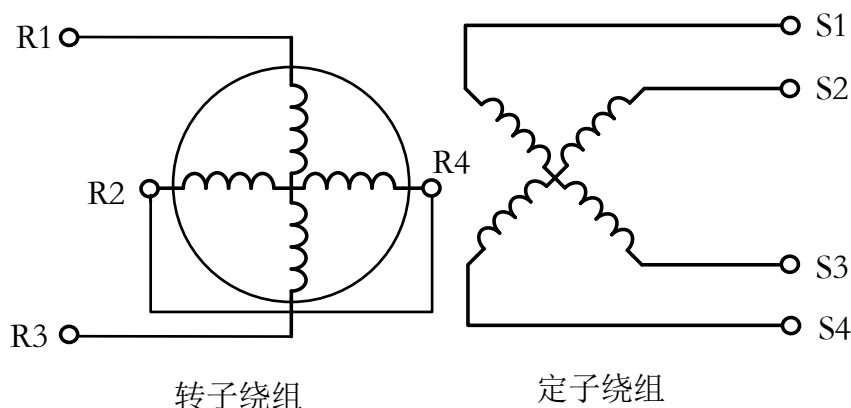


图 4.2 旋转变压器的结构原理图

在旋转变压器转子绕组加入激励信号 $V \sin(\omega t)$ ，因而两相定子绕组输出电压信号为正弦、余弦函数关系：

$$\begin{cases} u_{S1-S3}(\theta, t) = kV \cos \theta \sin(\omega t + \varphi) \\ u_{S4-S2}(\theta, t) = kV \sin \theta \sin(\omega t + \varphi) \end{cases} \quad (4-2)$$

式中：

u_{S1-S3} —余弦相的输出电压，

u_{S4-S2} —正弦相的输出电压，

V —初级励磁电压的幅值，

k —变压器的变比，

φ —初级励磁电压和次级输出感应电压之间的相位角，

θ —变压器转子的转角。

4.3 构造与分类

自整角机/旋转变压器模拟器按结构分为台式和板卡式，按工作原理可以分为数字式和模拟式。

5 计量特性

5.1 电角度示值误差

电角度示值误差为自整角机/旋转变压器模拟器工作在自整角机模式或旋转变压器模式下输出电角度的示值误差。电压范围：2 V~90 V，输出角度范围 $0^\circ \sim 360^\circ$ ，角度示值的最大允许误差为 $\pm (0.0005^\circ \sim 0.01^\circ)$ 。

5.2 输出线电压示值误差

电压范围：2 V~90 V，频率范围：47 Hz~20 kHz，示值的最大允许误差为 $\pm 5\%$ 。

5.3 参考电压示值误差

电压范围：2 V~115 V，频率范围：47 Hz~20 kHz，示值的最大允许误差为±5%。

5.4 参考频率示值误差

频率范围：47 Hz~20 kHz，示值的最大允许误差为±1%。

6 校准条件

6.1 环境条件

- a) 环境温度：(20±3) °C；
- b) 相对湿度：≤80%；
- c) 周围无影响正常工作的电磁干扰。

6.2 测量标准及其他设备

校准用设备应经过计量技术机构检定或校准，满足校准使用要求，并在有效期内。校准装置各参数的测量范围应覆盖被校自整角机/旋转变压器模拟器参数的测量范围；校准装置的扩展不确定度应不大于被校自整角机/旋转变压器模拟器的各参数最大允许误差绝对值的 1/3。

6.2.1 测量标准设备

多盘感应分压器标准；
自整角机/旋转变压器电桥标准；
标准电角度位置指示器。

6.2.2 辅助设备

参考信号源；
数字多用表；
电角度位置指示器；
隔离变压器；
相角电压表或锁相放大器。

注：可依据所选用的校准方法，配置标准测量设备和辅助设备中的一种或多种。例如当频率小于 1 kHz 时，隔离变压器可省略。

7 校准项目和校准方法

7.1 校准项目

- a) 自整角机模拟器电角度示值误差

- b) 旋转变压器模拟器电角度示值误差
- c) 参考电压示值误差
- d) 输出线电压示值误差
- e) 参考频率示值误差

7.2 校准方法

7.2.1 校准前准备

a) 外观及附件检查

自整角机/旋转变压器模拟器的面板、机壳或铭牌上应有产品名称及型号、制造厂名称或商标、出厂编号、测量范围等。所有接线端子、通信端口的标志应清晰明确，无影响仪器正常使用的损伤和缺陷。

b) 工作正常性检查

仪器通电后各项功能正常，显示正常，控制开关及按钮应能正常工作。

c) 预热

校准被校前，校准用标准设备以及配套设备，应按各自的说明书的要求进行开机预热；无要求时，开机预热时间不小于 30 min。

7.2.2 自整角机模拟器电角度示值误差

7.2.2.1 校准方法

自整角机模拟器电角度示值误差可采用感应分压比例法、电桥平衡法或标准表法进行校准。

7.2.2.2 校准点的选取

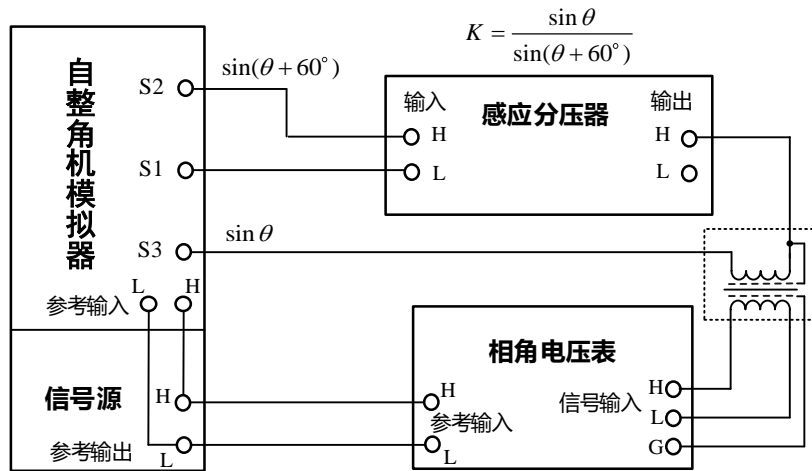
a) 校准频率工作点：一般选取 50 Hz、400 Hz、1 kHz 等，具体根据自整角机模拟器的工作频率范围选取。

b) 校准电压工作点：参考电压一般选取 6V、11.8V、26V、90V、115V 等，线电压一般选取 2V、6V、11.8V、26V、90V，具体根据自整角机模拟器的工作电压范围选取。

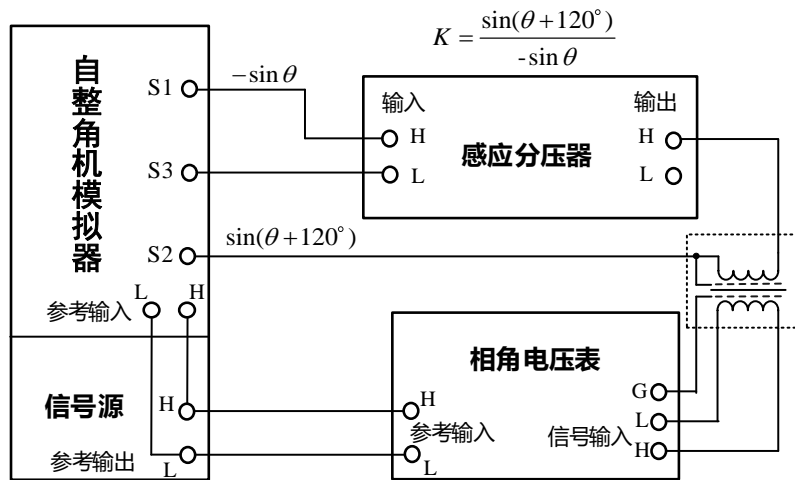
c) 电角度校准点：一般选取电角度 0° ~ 360° 范围内间隔 15° 取 24 或 25 个校准点，或者间隔 30° 取 12 或 13 个校准点。

7.2.2.3 感应分压比例法

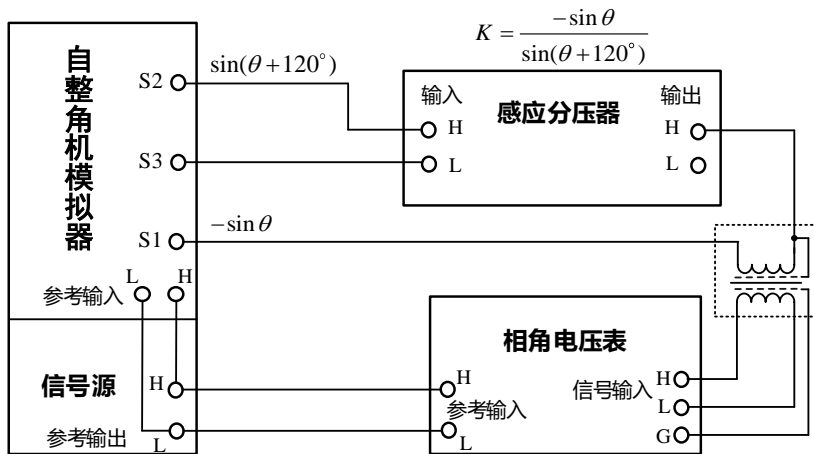
a) 按电角度校准点所处的范围，按图 7.1 (a)、(b) 或 (c) 接线。



(a). 0°- 60° / 180°- 240°



(b). 60°- 120° / 240°- 300°



(c). 120°- 180° / 300°- 360°

图 7.1 感应分压比例法校准自整角机模拟器电角度示值误差原理图

a) 设置自整角机/旋转变压器模拟器工作模式为自整角机模式，建议采用外部参考信号源提供参考信号，若被校仪器有内部参考电压输出功能，采用内部参考信号，则需对参考信号进行校准。按校准工作点设置参考电压的频率和幅值以及输出线电压，确保线电压小于或等于参考电压。

b) 按校准点设置自整角机模拟器的输出电压 V_{L-L} 和角度为 θ 以及感应比例标准的比例 K ，读取相角电压表的同相分量为 ΔV ，并记录于校准原始记录表格。

c) 自整角机模拟器电角度示值误差

示值误差 $\Delta\theta$ 按公式（7-1）计算得：

$$\Delta\theta = \arcsin\left(\frac{\Delta V \sin(120 - \theta)}{V_{L-L} \cos 30^\circ}\right) \begin{cases} 0^\circ \leq \theta \leq 60^\circ \\ 180^\circ \leq \theta \leq 240^\circ \end{cases}$$

$$\Delta\theta = \arcsin\left(\frac{\Delta V \sin(\theta)}{V_{L-L} \cos 30^\circ}\right) \begin{cases} 60^\circ \leq \theta \leq 120^\circ \\ 240^\circ \leq \theta \leq 300^\circ \end{cases}$$

$$\Delta\theta = \arcsin\left(\frac{\Delta V \sin(60 - \theta)}{V_{L-L} \cos 30^\circ}\right) \begin{cases} 120^\circ \leq \theta \leq 180^\circ \\ 300^\circ \leq \theta \leq 360^\circ \end{cases}$$

(7-1)

式中：

$\Delta\theta$ ——被校自整角机模拟器电角度示值误差，(°)；

θ ——被校自整角机模拟器电角度输出标称值（示值），(°)；

ΔV ——相角电压表测得的同相电压分量，(V)；

V_{L-L} ——被校自整角机模拟器输出的线电压，(V)。

7.2.2.4 电桥平衡法

采用两路感应分压器标准 A 和 B 或自整角机/旋转变压器电桥标准，采用电桥平衡法进行自整角机模拟器的校准。

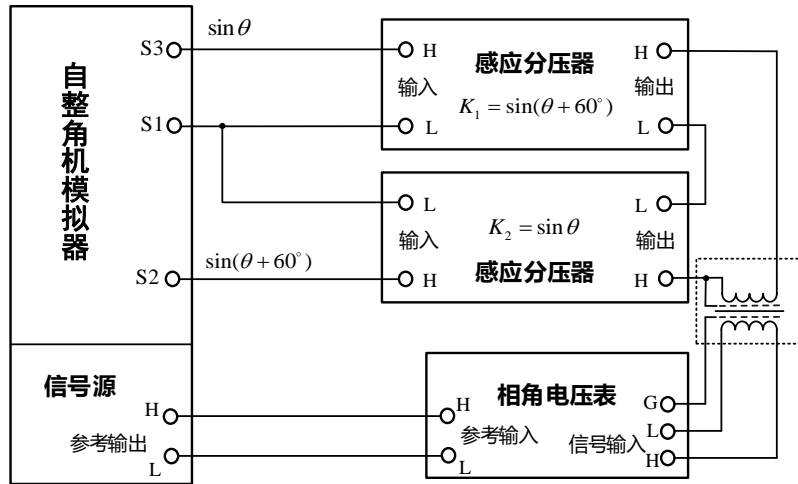
a) 按电角度校准点所处的范围，按图 7.2 (a)、(b) 或 (c) 接线。

b) 设置自整角机/旋转变压器模拟器工作模式为自整角机模式，建议采用外部参考信号源提供参考信号，若被校仪器有内部参考电压输出功能，采用内部参考信号，则需对参考信号进行校准。按校准工作点设置参考电压的频率和幅值以及输出线电压，确保线电压小于或等于参考电压。

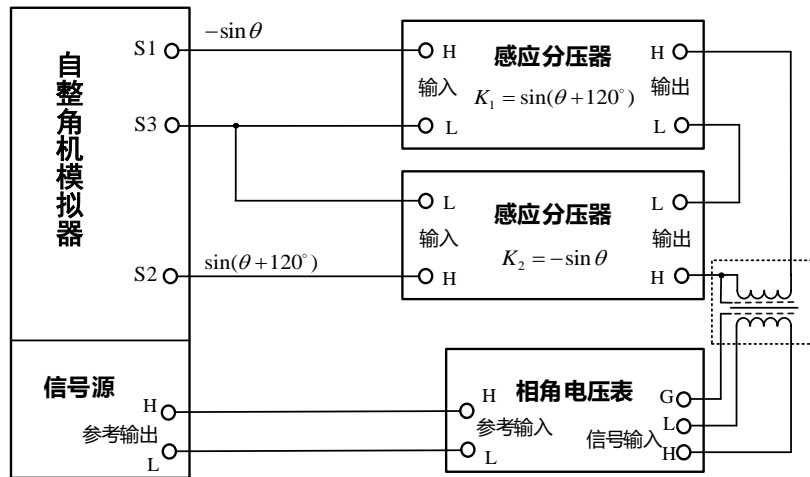
b) 按电角度校准点设置自整角机模拟器输出的线电压 V_{L-L} 和电角度为 θ ，感应分压器

A 和 B 的比例 K_1 和 K_2 或自整角机/旋转变压器电桥的电角度值 θ_S ，待稳定后读取相角电压表的同相分量为 ΔV ，并记录于校准原始记录表格。

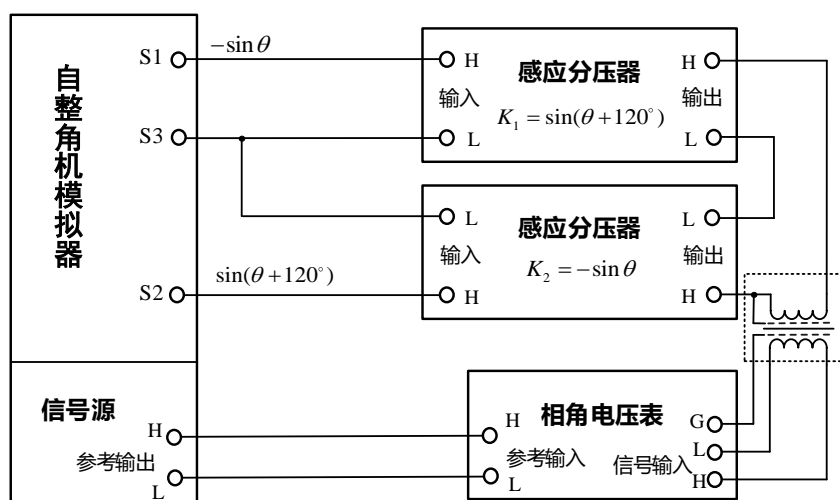
c) 自整角机模拟器电角度示值误差计算



(a). $0^\circ - 60^\circ / 180^\circ - 240^\circ$



(b). $60^\circ - 120^\circ / 240^\circ - 300^\circ$



(c). 120°- 180° / 300°- 360°

图 7.2 电桥平衡法校准自整角机电角度示值误差原理图

示值误差按公式(7-2)计算得 $\Delta\theta$:

$$\Delta\theta = \arcsin\left(\frac{\Delta V}{V_{L-L} \sin 60^\circ}\right) \begin{cases} 0^\circ \leq \theta \leq 60^\circ \\ 180^\circ \leq \theta \leq 240^\circ \end{cases} \quad (7)$$

$$\Delta\theta = \arcsin\left(-\frac{\Delta V}{V_{L-L} \sin 120^\circ}\right) \begin{cases} 60^\circ \leq \theta \leq 180^\circ \\ 240^\circ \leq \theta \leq 360^\circ \end{cases}$$

-2)

式中:

$\Delta\theta$ ——被校旋转变压器模拟器电角度示值误差, (°);

ΔV ——相角电压表的同相分量, (V);

V_{L-L} ——被校旋转变压器模拟器输出的线电压, (V)。

7.2.2.5 标准表法

对于准确度较低的自整角机模拟器, 可以准确度更高的标准电角度位置指示器为标准, 使用标准表法进行校准。

c) 按图 7.3 接线。

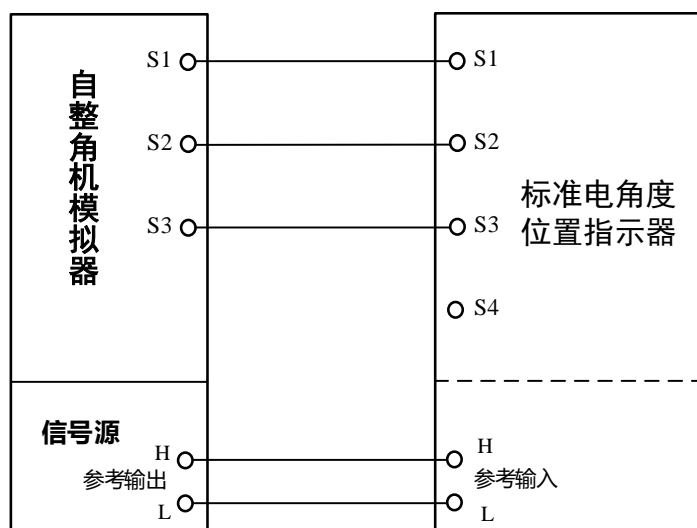


图 7.3 标准表法校准自整角机模拟器电角度示值误差原理图

d) 设置自整角机/旋转变压器模拟器工作模式为自整角机模式，建议采用外部参考信号源提供参考信号，若被校仪器有内部参考电压输出功能，采用内部参考信号，则需对参考信号进行校准。按校准工作点设置参考电压的频率和幅值以及输出线电压，确保线电压小于或等于参考电压。

e) 按电角度校准点设置自整角机/旋转变压器模拟器输出的线电压 V_{L-L} 和电角度 θ ，待输出稳定后，读取标准电角度指示器的电角度 θ_x ，并记录于校准原始记录表格。

f) 自整角机模拟器电角度示值误差计算

示值误差按公式(7-3)计算得 $\Delta\theta$ ：

$$\Delta\theta = \theta - \theta_x \quad (7-3)$$

式中：

$\Delta\theta$ ——被校自整角机模拟器电角度示值误差，(°)；

θ ——被校自整角机模拟器电角度输出标称值（示值），(°)；

θ_x ——坐标电角度指示器测得的标准电角度值，(°)。

7.2.3 旋转变压器模拟器电角度示值误差

7.2.3.1 校准方法

旋转变压器模拟器电角度示值误差可采用感应分压比例法、电桥平衡法或标准表法进行校准。

7.2.3.2 校准点的选取

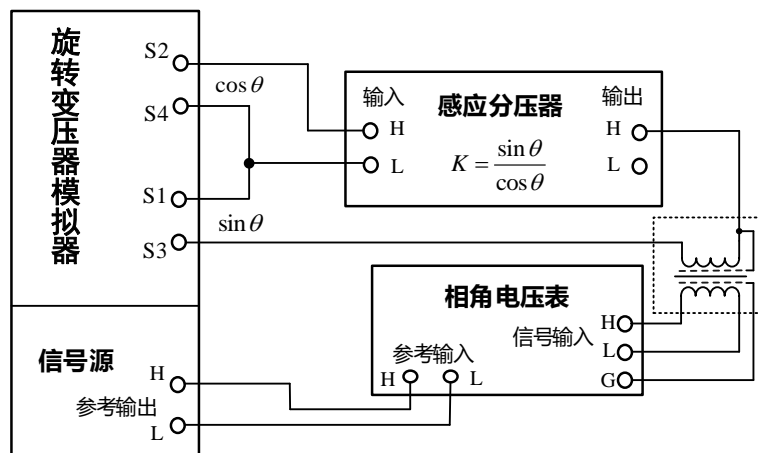
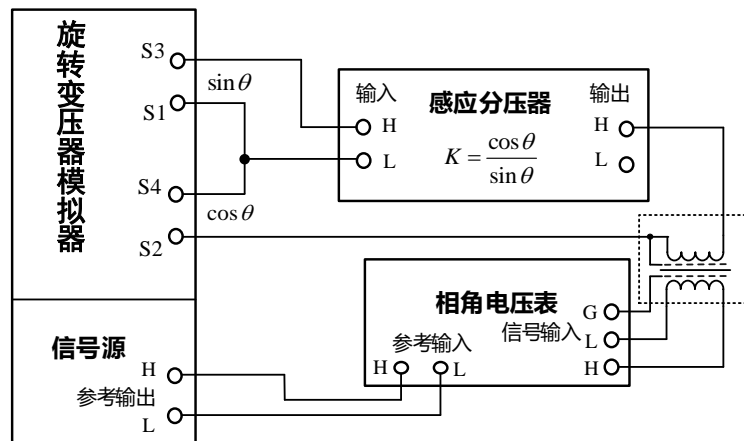
a) 校准频率工作点：校准频率一般可选取 50 Hz、400 Hz、1 kHz、2 kHz、10 kHz、20kHz 等频率点，具体根据旋转变压器模拟器的工作频率范围选取。

b) 校准电压工作点：参考电压一般选取 6V、11.8V、26V、90V、115V 等，线电压一般选取 2V、6V、11.8V、26V、90V 等，具体根据旋转变压器模拟器的工作电压范围选取。

c) 电角度校准点：一般选取电角度 $0^\circ\sim 360^\circ$ 范围内间隔 15° 取 24 或 25 个校准点，或者间隔 30° 取 12 或 13 个校准点。

7.2.3.3 感应分压比例法

a) 根据电角度校准点所处的范围，按图 7.4 (a)、(b)、(c)或(d)接线。

(a). $0^\circ - 45^\circ / 180^\circ - 225^\circ$ (b). $45^\circ - 90^\circ / 225^\circ - 270^\circ$

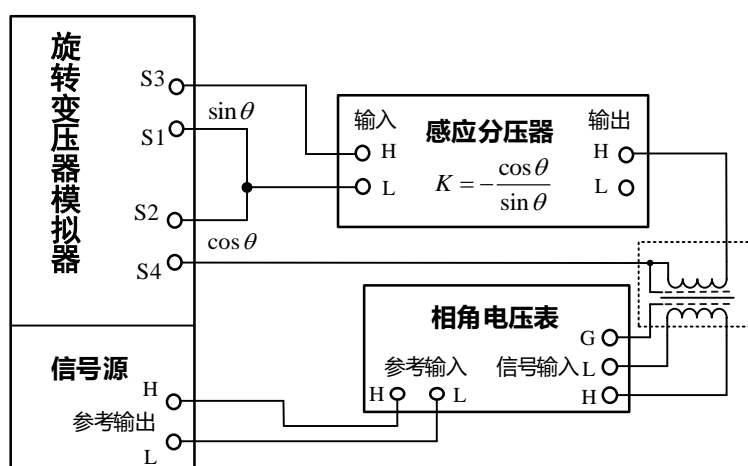
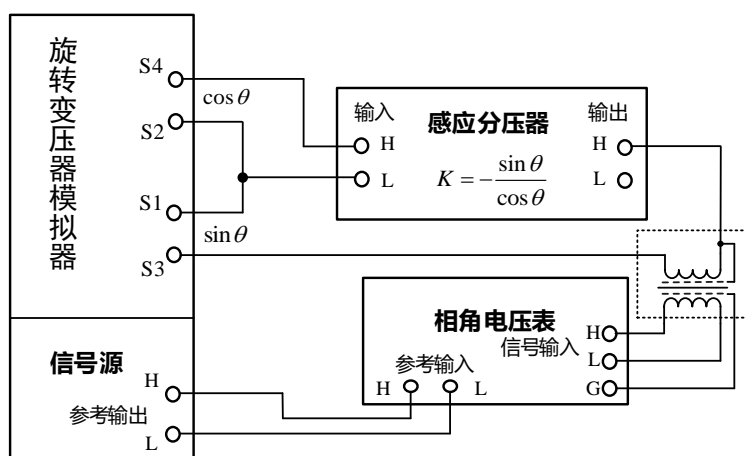
(c). $90^\circ - 135^\circ / 270^\circ - 315^\circ$ (d). $135^\circ - 180^\circ / 315^\circ - 360^\circ$

图 7.4 感应分压比例法校准旋转变压器模拟器电角度示值误差原理图

g) 设置自整角机/旋转变压器模拟器工作模式为旋转变压器模式，建议采用外部参考信号源提供参考信号，若被校仪器有内部参考电压输出功能，采用内部参考信号，则需对参考信号进行校准。按校准工作点设置参考电压的频率和幅值以及输出线电压，确保线电压小于或等于参考电压。

b) 按校准点设置旋转变压器模拟器的输出电压 $V_{L,L}$ 和角度为 θ 以及感应比例标准的比例 K ，读取相角电压表的同相分量为 ΔV ，并记录于校准原始记录表格。

c) 旋转变压器模拟器电角度示值误差

示值误差 $\Delta\theta$ 按公式（7-4）计算得。

$$\begin{aligned} \Delta\theta &= \arcsin\left(\frac{\Delta V \cos(\theta)}{V_{L-L}}\right) \begin{cases} -45^\circ \leq \theta \leq 45^\circ \\ 135^\circ \leq \theta \leq 225^\circ \end{cases} \\ \Delta\theta &= \arcsin\left(\frac{\Delta V \sin(\theta)}{V_{L-L}}\right) \begin{cases} 45^\circ \leq \theta \leq 90^\circ \\ 225^\circ \leq \theta \leq 270^\circ \end{cases} \\ \Delta\theta &= \arcsin\left(-\frac{\Delta V \sin(\theta)}{V_{L-L}}\right) \begin{cases} 90^\circ \leq \theta \leq 135^\circ \\ 270^\circ \leq \theta \leq 315^\circ \end{cases} \end{aligned} \quad (7-4)$$

式中：

$\Delta\theta$ ——被校旋转变压器模拟器电角度示值误差，(°)；

θ ——被校旋转变压器模拟器电角度输出标称值（示值），(°)；

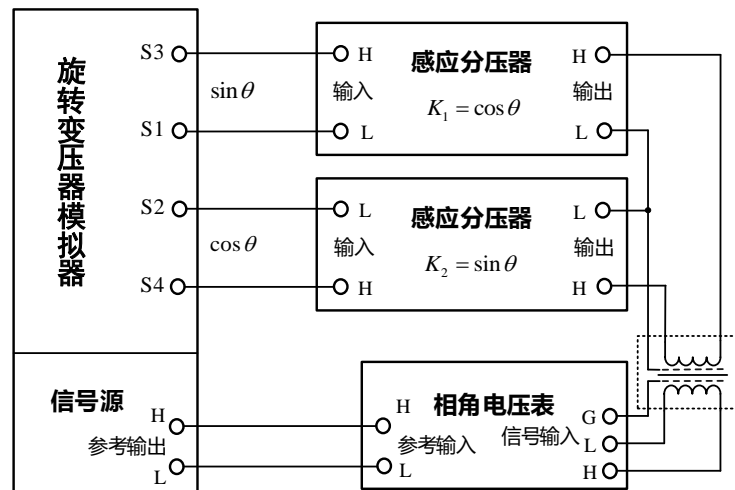
ΔV ——相角电压表的同相分量，(V)；

V_{L-L} ——被校旋转变压器模拟器输出的线电压，(V)；

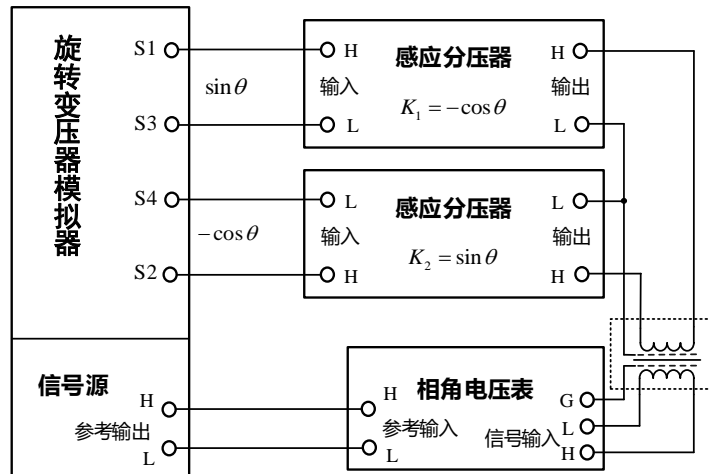
7.2.3.4 电桥平衡法

采用两路感应分压器标准 A 和 B 或自整角机/旋转变压器电桥标准，采用电桥平衡法进行自整角机模拟器的校准。

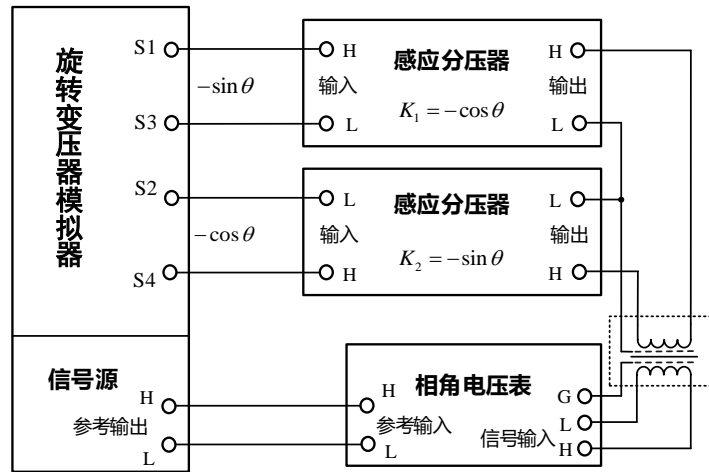
a) 根据电角度校准点所处的范围，按图 7.5 (a)、(b)、(c) 或 (d) 接线。



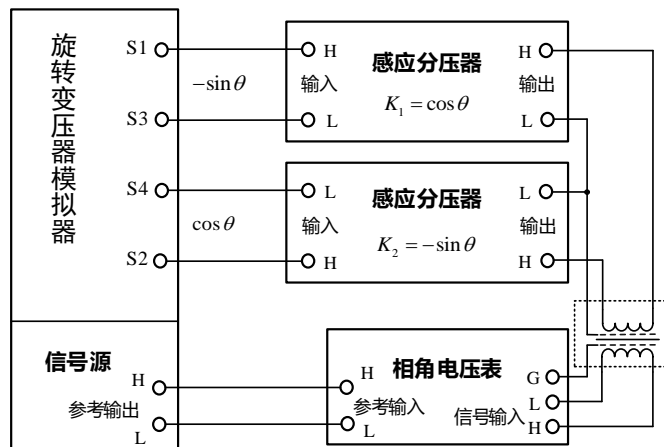
(a). $0^\circ - 90^\circ$



(b). $90^\circ - 180^\circ$



(c). $180^\circ - 270^\circ$



(d). $270^\circ - 360^\circ$

图 7.5 电桥平衡法校准旋转变压器电角度示值误差原理图

b) 设置自整角机/旋转变压器模拟器工作模式为旋转变压器模式，建议采用外部参考信号源提供参考信号，若被校仪器有内部参考电压输出功能，采用内部参考信号，则需对参考信号进行校准。按校准工作点设置参考电压的频率和幅值以及输出线电压，确保线电压小于或等于参考电压。

c) 按校准点设置旋转变压器模拟器的输出线电压 V_{L-L} 和角度为 θ ，感应分压器 A 和感应分压器 B 的比例 K_1 和 K_2 或自整角机/旋转变压器电桥的电角度值 θ_S ，读取相角电压表的同相分量为 ΔV ，并记录于校准原始记录表格。

d) 旋转变压器模拟器电角度示值误差计算

示值误差 按公式 (7-5) 计算得 $\Delta\theta$ ：

$$\Delta\theta = \arcsin\left(\frac{\Delta V}{V_{L-L}}\right) \begin{cases} 0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ \\ 180^\circ \leq \theta \leq 270^\circ \end{cases} \quad (7-5)$$

$$\Delta\theta = \arcsin\left(-\frac{\Delta V}{V_{L-L}}\right) \begin{cases} 90^\circ \leq \theta \leq 180^\circ \\ 270^\circ \leq \theta \leq 360^\circ \end{cases}$$

式中：

$\Delta\theta$ ——被校旋转变压器模拟器电角度示值误差，(°)；

ΔV ——相角电压表的同相分量，(V)；

V_{L-L} ——被校旋转变压器模拟器输出的线电压，(V)。

7.2.3.5 标准表法

对于准确度较低的旋转变压器模拟器，可以准确度更高的标准电角度位置指示器为标准，使用标准表法进行校准。

a) 按图 7.6 接线。

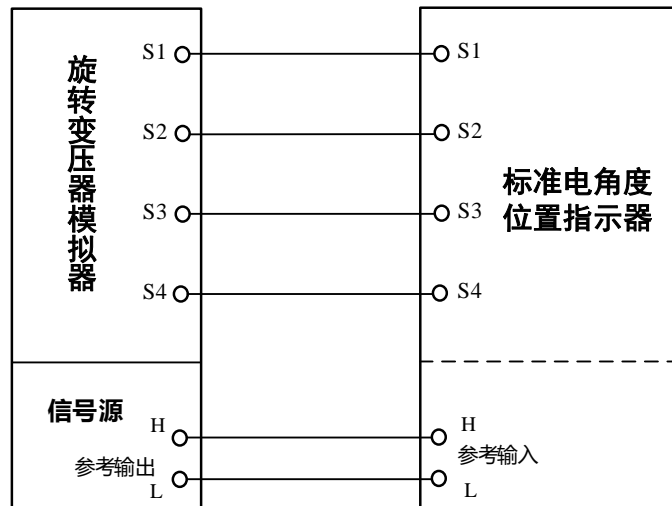


图 7.6 标准表法校准旋转变压器模拟器原理图

b) 设置自整角机/旋转变压器模拟器工作模式为旋转变压器模式，建议采用外部参考信号源提供参考信号，若被校仪器有内部参考电压输出功能，采用内部参考交流电源进行校准，需对参考信号进行校准。按校准工作点设置参考电压的频率和幅值以及输出线电压，确保线电压小于或等于参考电压。

c) 按电角度校准点设置旋转变压器模拟器输出的电角度为 θ ，待输出稳定后，读取标准电角度位置指示器的电角度 θ_x ，并记录于校准原始记录表格。

d) 旋转变压器模拟器电角度示值误差计算

被校仪器的旋转变压器模拟器电角度示值误差 $\Delta\theta$ 按公式（7-3）计算。

7.2.4 输出线电压示值误差

7.2.4.1 校准点的选取。

a) 参考电压工作点：一般选取 26V、115V，具体根据自整角机/旋转变压器模拟器的工作频率范围选取。

b) 线电压校准点：一般选取 2V、6V、11.8V、26V、90V 等，具体根据自整角机/旋转变压器模拟器的工作电压范围选取。

7.2.4.2 数字多用表法

a) 按图 7.7 接线。

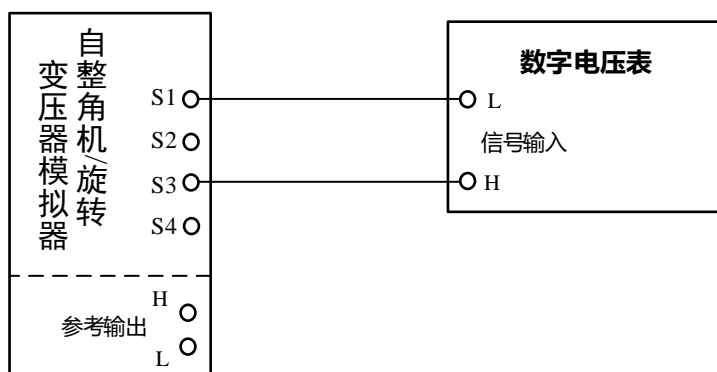


图 7.7 输出参考电压示值误差校准原理图

b) 按参考电压和频率工作点设置自整角机/旋转变压器模拟器的参考电压和频率，然后按线电压校准点设置被校自整角机/旋转变压器模拟器的输出线电压，待输出电压稳定后，记录数字多用表的电压读数 V_{L-L0} 和被校自整角机/旋转变压器模拟器输出的线电压测量值 V_{L-Lx} 于校准原始记录表格。

c) 输出线电压示值误差计算

被校自整角机/旋转变压器模拟器的输出线电压示值误差 ΔV_{L-L} 按公式（7-7）计算。

$$\Delta V_{L-L} = V_{L-Lx} - V_{L-L0} \quad (7-6)$$

式中：

ΔV_{L-L} ——被校自整角机/旋转变压器模拟器输出线电压示值误差，V；

V_{L-Lx} ——被校自整角机/旋转变压器模拟器输出线电压测量示值，V；

V_{L-L0} ——数字多用表测得的标准电压值，V。

7.2.5 参考电压示值误差

7.2.5.1 校准点的选取

若被校仪器有内部参考电压输出功能，输出参考电压校准点：一般选取 2V、6V、11.8V、26V、90V、115V，具体根据自整角机/旋转变压器模拟器的工作电压范围选取。

7.2.5.2 标准表法

a) 按图 7.8 接线。

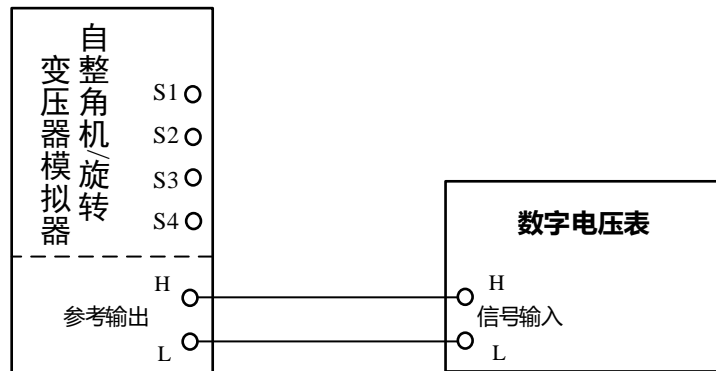


图 7.8 输出参考电压示值误差校准原理图

b) 按校准频率工作点设置被校自整角机/旋转变压器模拟器内部参考信号源的频率，然后按输出参考电压校准点设置输出参考电压，待电压稳定后，记录数字多用表的电压读数 V_{RO0} 和被校自整角机/旋转变压器模拟器的输出参考电压设置值 V_{ROx} 于校准原始记录表格。

c) 输出参考电压示值误差计算

示值误差按公式(7-6)计算得 ΔV_{RO} 。

$$\Delta V_{RO} = V_{ROx} - V_{RO0} \quad (7-7)$$

式中：

ΔV_{RO} ——被校自整角机/旋转变压器模拟器参考电压示值误差，(V)；

V_{ROx} ——被校自整角机/旋转变压器模拟器参考电压示值，(V)；

V_{RO0} ——数字多用表电压测得的标准值，(V)。

7.2.6 参考输出频率示值误差

7.2.6.1 校准点的选取。

若被校仪器有内部参考输出功能，频率工作点：一般选取 50 Hz、400 Hz、2kHz、10 kHz 等，具体根据自整角机/旋转变压器模拟器的工作频率范围选取。

7.2.6.2 标准表法

a) 按图 7.9 接线。

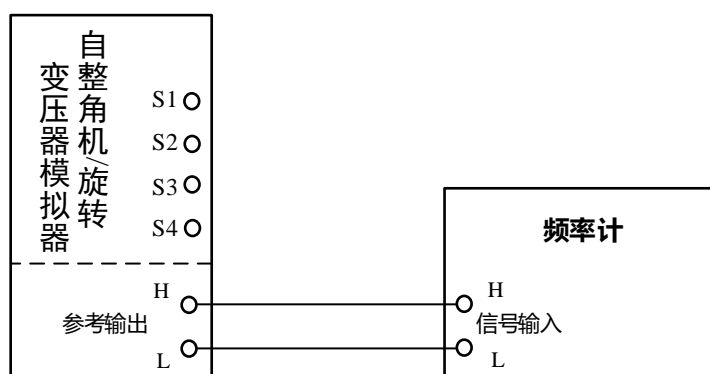


图 7.9 输出参考电压示值误差校准原理图

b) 按校准频率工作点设置被校自整角机/旋转变压器模拟器内部参考信号源的频率，然后按输出参考电压校准点设置输出参考电压，待电压稳定后，记录数字多用表的频率读数 f_{RO0} 和被校自整角机/旋转变压器模拟器的输出参考频率设置值 f_{ROx} 于校准原始记录表格。

c) 输出参考频率示值误差计算

被校自整角机/旋转变压器模拟器输出参考频率示值误差 Δf_{RO} 按公式（7-8）计算。

$$\Delta f_{RO} = f_{ROx} - f_{RO0} \quad (7-8)$$

式中：

Δf_{RO} ——被校自整角机/旋转变压器模拟器参考频率示值误差，Hz；

f_{ROx} ——被校自整角机/旋转变压器模拟器参考频率示值，Hz；

f_{RO0} ——数字多用表频率测得的标准值，Hz。

8 校准结果表达

8.1 校准证书

校准结果应在校准证书（报告）上反应，校准证书（报告）应至少包括以下信息：

- a) 标题，如“校准证书”；
- b) 实验室名称和地址；
- c) 进行校准的地点（如果与实验室的地址不同）；
- d) 证书或报告的唯一性标识（如编号），每页及总页数的标识；
- e) 客户的名称和地址；
- f) 被校对象的描述和明确标识；
- g) 进行校准的日期，如果与校准结果的有效性和有关时，应说明被校对象的接收日

期；

- h) 如果与校准结果的有效性和应用有关时，应对被校样品的抽样程序进行说明；
- i) 对校准所依据的技术规范的标识，包括名称及代号；
- j) 本次校准所用测量标准的溯源性及有效性说明；
- k) 校准环境的描述；
- l) 校准结果及其测量不确定度的说明；
- m) 对校准规范的偏离的说明；
- n) 校准证书和校准报告签发人的签名、职务或等效标识；
- o) 校准结果仅对被校对象有效的声明；
- p) 未经实验室书面批准，不得部分复制证书或报告的声明。

校准原始记录格式见附录 B，校准证书（报告）内页格式见附录 C。

8.2 数据处理及修约

校准数据按四舍五入及偶数法则进行修约，保留的有效位数应使末位数与测量结果不确定度的量值相对应。

9 复校时间间隔

建议复校时间间隔为 12 个月。送校单位也可根据实际使用情况自主决定复校时间间隔。

附录 A 校准不确定度评定示例

A.1 感应分压比例法电角度示值误差校准结果的不确定度评定

A.1.1 测量模型

以感应分压比例法校准自整角机/旋转变压器模拟器的旋转变压器模式，在线电压 11.8V、频率 1 kHz 条件下，旋转变压器模拟器电角度（0°~45°、180°~225°）的电角度示值误差为例进行不确定度评定。校准方法见 7.2.3.3，其误差校准的测量模型可用式（7-4）表示，

$$\Delta\theta = \arcsin\left(\frac{\Delta V \cos\theta}{V_{L-L}}\right) \approx \frac{\Delta V \cos\theta}{V_{L-L}} = \frac{\Delta V}{V_{L-L}} \sqrt{\frac{1}{1+K^2}} \quad (\text{A.1})$$

其中 $K = \frac{\sin\theta}{\cos\theta}$ ， $0 \leq K \leq 1$ ，为感应分压器比率设置值。由（A.1）可得

$$\Delta\theta = \phi - \left(\theta + \frac{\Delta V}{V_{L-L}} \sqrt{\frac{1}{1+K^2}}\right) \quad (\text{A.2})$$

式中：

$\Delta\theta$ ——被校旋转变压器模拟器电角度示值误差，（°）；

ϕ ——被校旋转变压器模拟器电角度示值，（°）；

θ ——感应分压器比例的模拟电角度值，（°）；

K ——感应分压器的比例设置值；

ΔV ——相角电压表测得的同相电压分量，（V）；

V_{L-L} ——被校旋转变压器模拟器输出的线电压，（V）。

各输入量之间不相关，旋转变压器模拟器电角度示值误差测量不确定度传播可用式（A.3）表示：

$$\begin{aligned} u_c(\Delta\theta) &= \sqrt{c^2(\theta) \times u^2(\theta) + c^2(\Delta V) \times u^2(\Delta V) + u_A^2(\theta)} \\ &= \sqrt{c^2(\theta) \times c^2(K) \times u^2(K) + c^2(\Delta V) \times u^2(\Delta V) + u_A^2(\theta)} \end{aligned} \quad (\text{A.3})$$

式中：

$c(\theta) = -(1 + \frac{\Delta V}{V} \sin\theta) \approx -1$ ， $c(\Delta V) = \frac{\cos(\theta)}{V} \leq \frac{1}{V} \approx 0.085$ ，为不确定度分量系数；

$$u(\theta) = c(K) \times u(K) \approx \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{2\pi\theta}{360}\right)^2 + \frac{2}{3} \left(\frac{2\pi\theta}{360}\right)^4\right]} \times u(K) \leq 1 \times u(K), \text{ 为感应分压器比例的模}$$

拟电角度值的不确定度分量；

$u(\Delta V)$ 为相角电压表引入的不确定度分量；

$u_A(\theta)$ 为测量重复性不确定度分量。

旋转变压器电角度示值误差测量不确定度评定如 (A.4) 表示：

$$u_c(\Delta\theta) = \sqrt{u^2(K) + 0.085^2 \times u^2(\Delta V) + u_A^2(\theta)} \quad (\text{A.4})$$

A.1.2 不确定度来源

a. 感应分压器引入的标准不确定度

根据项目研制感应分压器性能指标，1 kHz 下，其电压比例的最大允许误差为 3×10^{-7} ，在整个量程内测量值服从均匀分布，则感应分压器最大允许误差引入的不确定度为：

$$u(K) = \frac{3 \times 10^{-7}}{\sqrt{3}} = 1.7 \times 10^{-7}$$

b. 相角电压表引入的标准不确定度 $u(\Delta V)$

相角电压表引入的标准不确定度 $u(\Delta V)$ 主要来源于相角电压表最大允许误差 $u_1(\Delta V)$ 和相角电压表不同频率或幅值下共模抑制比引入不确定分量 $u_2(\Delta V)$ 。

若采用读差法比较相角电压，2250A 型相角电压表的最小量程为 50mV，该量程电压测量的最大允许误差为 \pm (量程的 0.04%+读数的 0.04%)，约等于 $\pm 20 \mu\text{V}$ ，在此范围内测量值服从均匀分布，则相角电压表最大允许误差引入的标准不确定度

$$u_1(\Delta V) = 20 / \sqrt{3} = 11.5 \mu\text{V}。$$

相角电压表不同频率或幅值下共模抑制比，在 11.8V 线电压下评估，1 kHz 影响量优于 120 dB，读数影响小于 $11.8 \mu\text{V}$ ，按均匀分布考虑，引入不确定度分量为 $u_2(\Delta V) = 6.8 \mu\text{V}$ 。

相角电压表引入不确定度分量为 $u(\Delta V) = \sqrt{u_1^2(\Delta V) + u_2^2(\Delta V)} = 13.4 \mu\text{V}$ 。

c. 电角度校准测量重复性不确定度

旋转变压器电角度校准示值误差测量重复性标准不确定度评定，该项不确定度分量

可以通过连续重复测量 (测量 5 次) 获得, 具体的重复性实验数据见附件 4 所示。0°-45°重复性测试数据见表 A.1 所示, 最大重复性标准差为 0.000044° (0.16 弧秒/ArcSec)。

表 A.1. 旋转变压器模拟器电角度校准示值误差测量重复性数据

次数 角度	1 角度差 (ArcSec)	2 角度差 (ArcSec)	3 角度差 (ArcSec)	4 角度差 (ArcSec)	5 角度差 (ArcSec)	实验标准差 (ArcSec)
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.01
2.0	-0.1	0.1	0.1	0.0	0.1	0.09
4.0	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.04
8.0	0.3	0.3	0.4	0.2	0.3	0.06
12.0	0.1	0.2	0.3	0.1	0.1	0.10
16.0	0.1	0.1	0.3	0.0	0.0	0.11
21.0	0.0	0.2	0.4	0.1	0.1	0.16
25.0	0.0	0.3	0.4	0.3	0.3	0.13
29.5	0.0	0.2	0.3	0.1	0.1	0.10
34.0	0.2	0.5	0.6	0.4	0.3	0.15
38.0	0.2	0.3	0.4	0.2	0.2	0.07
40.0	0.2	0.2	0.4	0.2	0.2	0.08
45.0	-0.1	0.0	0.1	-0.1	0.0	0.10

d. 旋转变压器模拟器电角度示值误差的扩展不确定度

1 kHz 下, 旋转变压器电角度示值误差合成标准不确定度按式(A.4)计算可得

$$u_c(\Delta\theta) = \sqrt{u^2(K) + 0.085^2 \times u^2(\Delta V) + u_A^2(\theta)} = 0.000044^\circ$$

取包含因子 $k=2$, 则扩展不确定度为:

$$U(\Delta\theta) = k \cdot u_c(\Delta\theta) = 0.00009^\circ (k=2)。$$

A.2 标准表法电角度示值误差校准结果的不确定度评定

A.2.1 测量模型

以标准表法校准自整角/旋转变压器模拟器的旋转变压器模式, 在线电压 11.8V、频率 400Hz 工作条件下 30° 校准点的示值误差为例进行不确定度评定。校准方法见 7.2.3.5, 其误差校准的测量模型

$$\Delta\theta = \theta - \theta_x \quad (\text{A.5})$$

式中:

$\Delta\theta$ ——被校旋转变压器模拟器电角度示值误差, ($^{\circ}$);

θ ——被校旋转变压器模拟器电角度输出标称值 (示值), ($^{\circ}$);

θ_x ——标准电角度位置指示器测得的电角度值, ($^{\circ}$)。

各输入量之间不相关, 不确定度传播可用公式 (A.6) 表示。

$$u_c^2(\Delta\theta) = u^2(\theta_x) \quad (\text{A.6})$$

式中:

$u_c(\Delta\theta)$ ——被校旋转变压器模拟器电角度测量示值误差的合成标准不确定度, ($^{\circ}$);

$u(\theta_x)$ ——标准电角度位置指示器引入的标准不确定度, ($^{\circ}$)。

A.2.2 不确定度来源

$u(\varphi_x)$ 的来源如下:

- 标准电角度位置指示器的最大允许误差引入的不确定度 $u_1(\theta_x)$;
- 标准电角度位置指示器的分辨力引入的不确定度 $u_2(\theta_x)$;
- 标准电角度位置指示器角度测量重复性引入的不确定度 $u_A(\theta_x)$ 。

A.2.3 不确定度评定

A.2.3.1 标准电角度位置指示器最大允许误差引入的不确定度 $u_1(\theta_x)$

根据标准电角度位置指示器技术说明书得到最大允许误差为 $\pm 0.0015^{\circ}$, 在此范围内测量值服从均匀分布, 按 B 类评定, 包含因子 $k = \sqrt{3}$, 则标准电角度位置指示器最大允许误差引入的不确定度:

$$u_1(\varphi_x) = \frac{0.0015^{\circ}}{\sqrt{3}} \approx 0.00086^{\circ}$$

A.2.3.2 标准电角度位置指示器角度测量的分辨力引入的不确定度 $u_2(\theta_x)$

根据被校同步分解模拟器技术说明书得到角度测量示值分辨力为 0.0001° , 按 B 类进行评定, 那么其区间半宽度为 $a = 0.00005^{\circ}$, 为均匀分布, 包含因子 $k = \sqrt{3}$, 则被校同步分解模拟器分解模式角度测量的分辨力引入的标准不确定度:

$$u_2(\theta_x) = \frac{a}{k} = \frac{0.00005^\circ}{\sqrt{3}} = 0.000029^\circ$$

A.2.3.3 标准电角度位置指示器角度测量重复性引入的不确定度 $u_A(\theta_x)$

测量结果的重复性引入的标准不确定度通过多次重复测量进行 A 类评定。多次重复测量结果如表 A.2 所示，用贝塞尔公式(A.7)计算实验标准差：

$$u_A(\theta_x) = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (\theta_{xi} - \bar{\theta}_x)^2} \quad (\text{A.7})$$

式中：

$\bar{\theta}_x$ ——被校同步分解模拟器分解模式角度重复测量示值的算术平均值，(°)；

n ——被校同步分解模拟器分解模式角度重复测量次数；

θ_{xi} ——被校同步分解模拟器分解模式角度第 i 次测量示值，V。

表 A.2 被校同步分解模拟器分解模式角度测量重复性测量数据

测量次数	1	2	3	4	5
角度示值/ (°)	30.0012	30.0015	30.0004	30.0007	30.0002
测量次数	6	7	8	9	10
角度示值/ (°)	30.0009	30.0022	30.0021	30.0013	30.0018

校准时取单次测量结果，故测量重复性引入的标准不确定度为：

$$u_2(\varphi_x) = s(\varphi_x) = 0.00069^\circ。$$

A.2.4 合成标准不确定度 $u_c(\theta_x)$

旋转变压器电角度示值误差合成标准不确定度

$$u_c(\theta_x) = \sqrt{u_1^2(\theta_x) + u_2^2(\theta_x) + u_A^2(\theta_x)} = 0.0011^\circ，$$

取包含因子 $k=2$ ，则扩展不确定度为：

$$U(\Delta\theta) = k \times u_c(\Delta\theta) = 2 \times 0.0011^\circ \approx 0.0022^\circ。$$

附录 B 校准原始记录格式

校准原始记录格式

证书编号：XXXXXX-XXXXX 号

第 页，共 页

客户名称				
器具名称				
型号/规格				
出厂编号				
生产厂商				
联络信息				
校准日期	年	月	日	
接收期至	年	月	日	
校准依据/参照				
环境条件及地点：				
温度：	℃		地点：	
湿度：	% RH		其它：	/
使用的计量基（标）准装置（含标准物质）/主要仪器				
名称	测量范围	不确定度/ 准确度等级	证书编号	证书有效期至 (YYYY-MM-DD)

证书编号：XXXXXX-XXXXX 号

第 页，共 页

参考频率输出示值误差

电压设置值(V)	频率设置值(Hz)	频率实测值(Hz)	示值误差(Hz)	不确定度(Hz)

参考电压输出示值误差

频率设置值(Hz)	电压设置值(V)	电压实测值(V)	示值误差(V)	不确定度(V)

线电压输出示值误差：

参考电压 (V)	线电压设置值(V)	线电压实测值(V)	示值误差(V)	不确定度(V)

证书编号: XXXXXX-XXXXX 号

第 页, 共 页

自整角机/旋转变压器模拟器角度示值误差

校准频率(Hz):

参考电压(V):

线电压(V):

电角度标称值(°)	电角度实测值(°)	示值误差(°)	不确定度(°)
0			
15			
30			
45			
60			
75			
90			
105			
120			
135			
150			
165			
180			
195			
210			
225			
240			
255			
270			
285			
300			
315			
330			
345			
360			

校准员:

核验员:

附录 C 校准证书内页格式

证书编号 XXXXXXX-XXXXX

<校准机构授权说明>				
校准结果不确定度的评估和表述均符合 JJF1059.1 的要求。				
校准环境条件及地点：				
温 度	°C	地 点		
相对湿度	%	其 它		
校准所依据的技术文件（代号、名称）：				
校准所使用的主要测量标准：				
名 称	测量范围	不确定度/ 准确度等级	证书编号	证书有效期至 (YYYY-MM-DD)

证书编号 XXXXXX-XXXX

校准结果

表 1 参考频率输出示值误差

电压设置值(V)	频率设置值(Hz)	频率实测值(Hz)	示值误差(Hz)	不确定度(Hz)

表 2 参考电压输出示值误差

频率设置值(Hz)	电压设置值(V)	电压实测值(V)	示值误差(V)	不确定度(V)

表 3 线电压输出示值误差；

参考电压 (V)	线电压设置值(V)	线电压实测值(V)	示值误差(V)	不确定度(V)

证书编号 XXXXXX-XXXX

校准结果

表 4 自整角机/旋转变压器模拟器角度示值误差

校准频率(Hz): 参考电压(V): 线电压(V):

电角度标称值(°)	电角度实测值(°)	示值误差(°)	不确定度(°)
0			
15			
30			
45			
60			
75			
90			
105			
120			
135			
150			
165			
180			
195			
210			
225			
240			
255			
270			
285			
300			
315			
330			
345			
360			

说明:

根据客户要求和校准文件的规定, 通常情况下____个月校准一次。

声明:

1. 仅对加盖“XXXXXX 校准专用章”的完整证书负责。
2. 本证书的校准结果仅对本次所校准的计量器具有效。

校准员:

核验员:

第 X 页 共 X 页