

中华人民共和国国家标准

GB/T 14598.118-1—XXXX/IEC/IEEE 60255-118-1:2018

量度继电器和保护装置 第 118-1 部分：电力系统同步相量-测量

Measuring relays and protection equipment—
Part 118-1: Synchrophasor for power systems - Measurements

(IEC/IEEE 60255-118-1:2018, IDT)

(征求意见稿)

XXXX - XX - XX 发布

XXXX - XX - XX 实施

国家市场监督管理总局
中国国家标准化管理委员会

发布

目 次

前言	V
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语、定义、符号和缩略语	1
3.1 术语和定义	1
3.2 符号和缩略语	2
4 同步相量测量	2
4.1 输入和输出量	3
4.2 电力系统信号	3
4.3 被测量定义	3
4.3.1 同步相量相位角	3
4.3.2 同步相量被测量	3
4.4 频率被测量定义	4
4.5 频率变化率被测量定义	4
4.6 测量时间同步	4
5 测量符合性评估	4
5.1 PMU 测量能力	4
5.2 测量评估	5
5.2.1 同步相量测量评估	5
5.2.2 频率和 ROCOF 测量的评估	5
5.2.3 测量响应时间和延时时间	5
5.2.4 上冲和下冲	5
5.2.5 测量报告延迟	7
5.2.6 测量和运行错误	7
5.3 测量报告	7
5.3.1 概述	7
5.3.2 报告速率	7
5.3.3 报告时刻	7
5.4 测量符合性	8
5.4.1 性能类别	8
5.4.2 符合性验证	8
6 测量符合性试验与评估	8
6.1 试验注意事项	8
6.2 参考及试验条件	8
6.3 稳态符合性	9

6.4	动态符合性—测量带宽	11
6.5	动态符合性—系统频率斜坡变化期间的性能	13
6.6	动态符合性—相位和幅值阶跃变化时的性能	14
6.7	PMU 报告延迟符合性	15
7	文档要求	15
附录 A (资料性附录)	时间标签与动态响应	17
A.1	动态响应	17
A.2	时间标签	17
A.3	幅值阶跃试验示例	19
A.4	PMU 时间输入	19
附录 B (资料性附录)	参数表示和定义应用示例	21
B.1	简介	21
B.2	非平稳正弦波的表示	21
B.3	定义的应用示例简介	22
B.3.1	概述	22
B.3.2	示例 1: 标称频率下的稳态	22
B.3.3	示例 2: 恒定非标称频率下的稳态	22
B.3.4	示例 3: 电力信号的相位和幅值振荡	23
B.3.5	恒定的、非零的频率变化率	23
B.4	从同步相量中重构电力系统的正弦信号	24
附录 C (资料性附录)	PMU 的评估和试验	25
C.1	概述	25
C.2	TVE 测量评估	25
C.3	TVE 中的相位幅值关系和对时	26
C.4	对阶跃输入信号的响应评估	27
C.5	谐波畸变试验信号的相位	29
C.6	ROCOF 限值	29
C.6.1	概述	29
C.6.2	推导	30
C.7	PMU 报告延迟	30
附录 D (资料性附录)	参考信号处理模型	32
D.1	概述	32
D.2	基本同步相量估计模型	32
D.3	低通滤波器群延时时间的时延补偿	33
D.4	正序相量、频率和 ROCOF	33
D.5	相量的 P 类参考模型	34
D.6	P 类滤波器的详述	34
D.7	相量的 M 类参考模型	36
D.8	数据速率降低模型	38
D.9	参考模型中的权衡	38

D.9.1	对非标称频率分量的抗扰性, 报告延迟和时间对齐	38
D.9.2	响应时间以及同步相量, 频率和 ROCOF 的测量准确度	39
附录 E (资料性附录)	利用 PMU 的采样值输入进行同步相量测量	41
E.1	概述	41
E.2	采样值的生成	41
E.3	使用采样值时同步相量的误差来源	42
E.4	性能	42
E.4.1	概述	42
E.4.2	稳态性能考虑因素	42
E.4.3	动态性能考虑因素	43
E.4.4	延迟	43
E.5	性能要求的建议变更	43
附录 F (资料性附录)	环境影响下 PMU 评估试验子集 (建议)	44
附录 G (规范性附录)	稳态 PMU 准确度扩展规范	45
G.1	概述	45
G.2	适用条件	45
G.3	准确度规范	45
G.4	使用示例	46
G.5	首选准确度范围	46
G.6	试验问题	46
G.6.1	提高准确度的试验	46
G.6.2	电流超过连续热额定值时的试验	46
G.6.3	环境因素	47
附录 H (资料性附录)	发电机电压和发电机功角测量	48
H.1	概述	48
H.2	测量方法	48
H.3	输入信号	48
H.4	测量过程	48
附录 I (规范性附录)	PMU 带宽级别扩展	50
I.1	概述	50
I.2	带宽确定	50
I.3	增强型带宽级别	50
I.4	试验问题	50
参考文献	52

前 言

GB/T 14598《量度继电器和保护装置》分为以下若干部分：

- GB/T 14598.1 电气继电器 第23部分：触点性能；
- GB/T 14598.2 量度继电器和保护装置 第1部分：通用要求；
- GB/T 14598.3 电气继电器 第5部分：量度继电器和保护装置的绝缘配合要求和试验；
- GB/T 14598.6 电气继电器 第十八部分：有或无通用继电器的尺寸；
- GB/T 14598.8 电气继电器 第20部分：保护系统；
- GB/T 14598.23 电气继电器 第21部分：量度继电器和保护装置的振动、冲击、碰撞和地震试验 第3篇：地震试验
- GB/T 14598.24 量度继电器和保护装置 第24部分：电力系统暂态数据交换(COMTRADE)通用格式；
- GB/T 14598.26 量度继电器和保护装置 第26部分：电磁兼容要求；
- GB/T 14598.27 量度继电器和保护装置 第27部分：产品安全要求；
- GB/T 14598.121 量度继电器和保护装置 第121部分：距离保护功能要求；
- GB/T 14598.127 量度继电器和保护装置 第127部分：过/欠电压保护功能要求；
- GB/T 14598.149 量度继电器和保护装置 第149部分：电热继电器功能要求；
- GB/T 14598.151 量度继电器和保护装置 第151部分：过/欠电流保护功能要求；
- GB/T 14598.300 微机变压器保护装置通用技术要求；
- GB/T 14598.301 微机型发电机变压器故障录波装置技术要求；
- GB/T 14598.302 弧光保护装置技术要求；
- GB/T 14598.303 数字式电动机综合保护装置通用技术要求。

本文件为GB/T 14598第118-1部分。

本文件按照GB/T 1.1—2020给出的规则起草。

本文件使用翻译法等同采用IEC 60255-118-1:2018量度继电器和保护装置 第118-1部分：电力系统同步相量-测量（英文版）。

本文件的插图采用IEC 60255-118-1:2018的原图，部分插图可能与我国的制图标准有差异，但并不影响理解。

与本文件中规范性引用的国际文件有一致性对应关系的我国文件如下：

- GB/T 14598.2—2011 量度继电器和保护装置 第1部分：通用要求（IEC 60255-1:2009，IDT）。

本文件由中国电器工业协会提出。

本文件由全国量度继电器和保护设备标准化技术委员会（SAC/TC154）归口。

本文件主要起草单位：***。

本文件主要起草人：**。

本文件首次发布。

量度继电器和保护装置 第118-1部分：电力系统同步相量-测量

1 范围

GB/T 14598的本文件适用于电力系统所用的同步相量测量系统。本文件定义了同步相量、频率、频率变化率的测量，描述了三个测量量的时标和同步要求。本文件规定了在静态和动态条件下评估这些测量值的方法以及对标准的符合性要求。本文件定义的相量测量单元（PMU），可以是一个独立的物理单元，也可以是一个物理单元内的功能单元。本文件不限定PMU的硬件、软件的实现方式和相量、频率及频率变化率的计算方法。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

IEC 60255-1 量度继电器和保护装置 第1部分：通用要求（Measuring relays and protection equipment – Part 1: Common requirements）

IEEE Std C37.90™ 与电力设备相关的继电器和继电器系统的IEEE标准（IEEE Standard for Relays and Relay Systems Associated with Electric Power Apparatus）

3 术语、定义、符号和缩略语

下列术语、定义、符号和缩略语适用于本文件。

文中用到的ISO、IEC和IEEE维护术语数据库地址如下：

——IEC 百科全书网址：<http://www.electropedia.org/>

——ISO 在线浏览平台网址：<http://www.iso.org/obp>

——IEEE 标准在线词典网址：<http://ieeexplore.ieee.org>

3.1 术语和定义

3.1.1

频率误差 frequency error (FE)

在同一时刻频率测量值与参考值之间的差异。

3.1.2

闰秒 leap second

为保持协调世界时UTC接近于平太阳时，对协调世界时进行调整，所增加或减少的1秒。

3.1.3

被测量 measurand

被测的物理的或电气的量、特性或状态。

3.1.4

奈奎斯特频率 Nyquist frequency

频率—其大小等于离散信号处理系统采样频率的一半。

3.1.5

相量 phasor

正弦量的复数等价表示，其复数模为余弦波幅值，复数角（极坐标形式）为余弦波相位角。

3.1.6**相量数据集中器 phasor data concentrator**

相量测量系统中的数据集中器（DC）。

3.1.7**相量测量单元 phasor measurement unit (PMU)**

设备或多功能设备中的功能模块，能够根据电压和/或电流信号和时间同步信号产生同步相量、频率和频率变化率（ROCOF）估计值。

3.1.8**频率变化率误差 rate of change of frequency error (RFE)**

在同一时刻频率变化率测量值与参考值之间的差异。

3.1.9**参考 reference**

〈属于或关于〉时间、量值、波形特性或波形，用于与其它时间、量值、波形特征或波形进行比较或对其进行评估。

注：这种类型的实体可能是、也可能不是理想的实体。

3.1.10**同步相量 synchrophasor (synchronized phasor)**

表示基波交流信号的相量，其幅值为基波幅值的均方根值，相位是基波信号相位角与标称频率（与UTC时间同步）对应相位角之间的差。

3.1.11**综合矢量误差 total vector error (TVE)**

同一时刻，相量测量值与参考值之差的归一化值。

3.2 符号和缩略语

BCD：二进制编码表示的十进制数（binary coded decimal）

fps：每秒帧数（frames per second），同步相量数据帧传输速率

f_0 ：系统标称频率，为50 Hz或60 Hz

ω_0 ：系统标称角速度（ $2\pi f_0$ ），单位为弧度/秒

f_{in} ：输入信号的基波频率；输入信号的频率测量值，通常等于或非常接近标称值（50 Hz或60 Hz），但是在大扰动或试验期间会有明显变化

F_s ：测量数据报告频率，单位为每秒帧数（fps），与Hz（1/s）相同

GNSS：全球导航卫星系统（global navigation satellite system）

GPS：全球定位系统（global positioning system）

IRIG-B：美国靶场仪器组时间码-B型码（Inter-Range Instrumentation Group-B）

PPS：秒脉冲（pulse per second）

ROCOF：频率变化率（rate of change of frequency）

SCADA：监控与数据采集（supervisory control and data acquisition）

SOC：世纪秒（second of century）

THD：总谐波畸变（total harmonic distortion）

THD+N：总谐波畸变加噪声（total harmonic distortion plus noise）

UTC：协调世界时（coordinated universal time）

4 同步相量测量

4.1 输入和输出量

如图1所示，输入量是时间信号、电力系统电压和电流信号。时间信号应提供足够精确的UTC时间，使PMU能够满足规定的性能要求。时间信号应满足PMU制造商规定的输入要求。附录A列出了通用的时间信号格式。

电压和电流信号应通过电缆以模拟量形式或通过由制造商规定的通信回路以数据包的形式提供给PMU。这些信号代表交流电力系统信号。

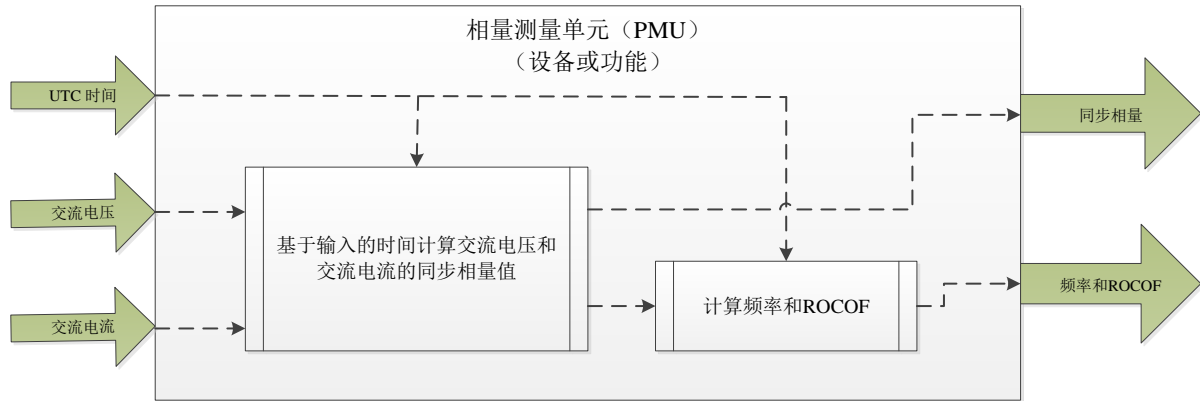


图1 输入量和输出量

输出量是由PMU产生的同步相量、频率和ROCOF的估计值。这些值通常带有一个时间戳，即测量时刻。PMU制造商可以提供额外的模拟和数字的输入量和输出量，但不在本文件范围内，不作考虑。

4.2 电力系统信号

交流电网电压或电流信号建模等式如下：

$$x(t) = X_m(t) \cos[\theta(t)] + D(t) \dots \dots \dots (1)$$

式中：

T ——以秒为单位的时间，其中 $t=0$ 与UTC秒翻转一致；

X_m ——正弦交流信号的峰值；

θ ——正弦交流信号的角度位置，单位为弧度；

D ——对信号有附加作用的干扰信号，包括但不限于谐波、噪声、直流偏移和带外干扰。

注1：干扰信号 D 不会出现在被测量定义中，因为它包含的附加干扰已经在同步相量计算中被衰减或滤除。

注2： X_m 、 θ 和 D 是时间的连续函数，由符号 (t) 表示。

4.3 被测量定义

4.3.1 同步相量相位角

同步相量相位角 $\phi(t)$ 是角度位置 $\theta(t)$ 与由标称频率 f_0 决定的相位之间的差值：

$$\phi(t) = \theta(t) - 2\pi f_0 t \dots \dots \dots (2)$$

注： θ 的角速度通常接近于由电力系统标称频率 f_0 产生的角速度， f_0 为 50 Hz 或 60 Hz。同步相量通常以数字采样或报告的形式提供，其报告速率大大低于电力系统标称频率（例如，对于标称频率为 50 Hz 或 60 Hz 的系统，对应每秒 10 个报告）。采样理论依赖于采样率大于 120 采样点/秒来重建 60 Hz 信号而不产生混叠。从 θ 中减去 $2\pi f_0 t$ 得到同步相量的相位角 $\phi(t)$ ，当频率接近标称值时，同步相量的相位角 $\phi(t)$ 的角速度趋于零。这可以使得同步相量以相对较低的速率报告，而无混叠。例如，当 $f_0=60$ Hz 时，当电力系统基波频率在 55 Hz~65 Hz 之间时，同步相量以 10 帧/秒上送不会出现混叠。在本文件中，术语“报告”和“上送”可以互换使用。

4.3.2 同步相量被测量

同步相量被测量是一个复数，可以用极坐标形式表示：

$$X(t) = \left(\frac{X_m(t)}{\sqrt{2}}, \phi(t) \right) \dots\dots\dots (3)$$

或者，同步相量被测量也可以用直角坐标形式表示：

$$X(t) = (X_r(t), X_i(t)) \dots\dots\dots (4)$$

其中实部 (X_r) 和虚部 (X_i) 是：

$$X_r(t) = \frac{X_m(t)}{\sqrt{2}} \cos[\phi(t)] \dots\dots\dots (5)$$

$$X_i(t) = \frac{X_m(t)}{\sqrt{2}} \sin[\phi(t)] \dots\dots\dots (6)$$

注1: $X_m(t)$ 、 $\theta(t)$ 和 $D(t)$ 的定义足够表示时域信号和所有被测量的期望值。离散的期望测量值可以通过令 $t=nT$ 从连续时间被测量中提取，其中 n 是整数， T 是以秒为单位的测量值报告周期（即报告速率的倒数）。

注2: 附录 B 中给出了被测量定义的应用示例。

4.4 频率被测量定义

频率被测量反映电力系统交流信号的角速度，单位为Hz。它与电力系统基波信号角位置的关系如式(7)所示：

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\theta(t)}{dt} = f_0 + \frac{1}{2\pi} \frac{d[\phi(t)]}{dt} \dots\dots\dots (7)$$

4.5 频率变化率被测量定义

ROCOF被测量反映电力系统交流信号的角加速度，单位为Hz/s。它与电力系统交流信号角速度的关系如式(8)所示：

$$\text{ROCOF}(t) = \frac{df(t)}{dt} = \frac{1}{2\pi} \frac{d^2\theta(t)}{dt^2} = \frac{1}{2\pi} \frac{d^2\phi(t)}{dt^2} \dots\dots\dots (8)$$

4.6 测量时间同步

PMU应能够从可靠且准确的时钟源接收时间，如全球导航卫星系统(GNSS)，它可以提供足够精确的时间跟踪到UTC，以保证综合矢量误差(TVE)、频率误差(FE)和频率变化率误差(RFE)保持在要求范围内。所有测量量应以足够的准确度与UTC时间同步，以满足本文件的要求。1 μ s的时间误差对应60 Hz系统的0.022°相位误差和50 Hz系统的0.018°相位误差。0.57°(0.01弧度)的相位误差会导致1%的TVE，见式(9)。1%的TVE相当于60 Hz系统的时间误差 $\pm 26 \mu$ s，50 Hz系统的时间误差 $\pm 31 \mu$ s。强烈建议使用一个可靠的时钟源，时钟源的时间、频率和频率稳定性优于1%TVE所对应时钟性能的10倍。时钟源还应能提供与UTC时间的同步状态和闰秒变化的指示。

对于每一次测量，PMU都应打上时间标签，包括测量时的时间和时间品质。测量的时间标签在100年的时间跨度内的分辨率应至少为1 μ s。时间状态应包括时间品质，该品质清楚地表明UTC时间追溯状态、时间准确性和闰秒状态。报告和记录的时间及时间品质应来自PMU时间标签，并按要求转换格式和内容。

5 测量符合性评估

5.1 PMU 测量能力

PMU应能计算并上送同步相量、频率和ROCOF估计值，详见第4章中的定义和描述。估计值应包括单相相量、正序相量或两者兼有，可供用户选择。测量评估、报告时刻和评估标准详见第5章。试验说明和评估限值详见第6章。测量实际上是对某个值的估计；在本文件中，术语“测量”和“估计”可以互换使用。

PMU性能应通过TVE、FE和RFE公式将测量值与参考值进行比较来确定，公式定义见5.2.1和5.2.2。参考值由试验时所用的规定信号的被测量定义来确定。

5.2 测量评估

5.2.1 同步相量测量评估

同步相量参考值和PMU估计值可能在幅值和相位上都有差异。虽然幅值和相位可以单独规定，但在本文件中，幅值和相位上的差异被统一考虑，视为综合矢量误差（TVE）。TVE表示同一时刻参考值和PMU估计值之间的差异，并以被测量参考值为基准进行归一化。

综合矢量误差（TVE）的定义如式（9）所示。

$$TVE(n) = \sqrt{\frac{(\hat{X}_r(n) - X_r(n))^2 + (\hat{X}_i(n) - X_i(n))^2}{(X_r(n))^2 + (X_i(n))^2}} \dots\dots\dots (9)$$

式中：

$\hat{X}_r(n)$ 和 $\hat{X}_i(n)$ ——第 n 个报告，PMU估计值的实部和虚部；

$X_r(n)$ 和 $X_i(n)$ ——第 n 个报告，参考值的实部和虚部；

n ——报告时刻的报告编号（一系列离散报告中的第 n 个报告）。

同步相量测量值应使用式（9）的TVE准则进行评估。

5.2.2 频率和ROCOF测量的评估

应使用PMU提供的测量值（measured）与参考值（ref）之间的差值对频率和ROCOF的测量进行评估，差值分别定义为FE和RFE，单位分别为Hz和Hz/s：

$$\text{频率测量误差：FE}(n) = f_{\text{measured}}(n) - f_{\text{ref}}(n) \dots\dots\dots (10)$$

$$\text{ROCOF测量误差：RFE}(n) = (df/dt)_{\text{measured}}(n) - (df/dt)_{\text{ref}}(n) \dots\dots\dots (11)$$

测量值和参考值应为同时刻的值，该时刻由测量值的时间标签和参考方程的解分别给出。

5.2.3 测量响应时间和延时时间

测量响应时间是输入信号发生阶跃变化前后两个稳态测量状态之间的转换时间。其值为两个时刻的差值，即当PMU输入发生阶跃变化时，测量值超出规定准确度限值的时刻与重新进入并保持在该限值内的时刻的差值（见图C.5）。该值应通过向PMU的输入信号施加相位或幅值的正阶跃或负阶跃变化来进行测量。在阶跃变化前后，输入信号应保持稳定状态。试验期间，仅改变输入信号发生阶跃的参数。准确度限值分别是相量、频率和ROCOF测量值各自对应的TVE、FE和RFE值。限值要求详见6.6。响应时间应由准确度评估值TVE、FE和RFE确定，而不是由阶跃时刻或者阶跃参数本身确定。

测量延时时间是指从PMU输入发生阶跃时刻开始到测量量的阶跃参数达到初始值与最终值间的中值时刻为止的时间间隔（见图C.5）。阶跃时刻和测量时刻都使用UTC时间刻度。试验延时时间的测量值应通过对PMU输入信号施加相位或幅值的正阶跃或负阶跃变化来确定。在阶跃变化前后，输入信号应保持稳定状态。本试验期间，输入信号的唯一变化应为发生阶跃的一个或几个参数。幅值阶跃时，用幅值测量值比较，相位角阶跃时，用相位角测量值比较。

评估测量延时时间的目的是验证同步相量的时间标签（测量时间）是否已正确补偿滤波系统的群延时时间。这里期望PMU提供的时间标签已经包含了对滤波系统群延时时间进行的适当补偿，从而使延时时间接近于零。

根据定义，阶跃变化是瞬时的。但是，如果施加信号的变化速度足够慢，导致时间的应用引入了显著的不确定性，则应使用阶跃中点时间作为阶跃时刻。附录C详细说明了一种评估阶跃输入响应时间和延时时间的方法。

5.2.4 上冲和下冲

上冲和下冲是相位阶跃或幅值阶跃在转换前后的偏差，相对于阶跃大小，上冲量和下冲量是有限的，图2a)和图2b)图解说明了上冲和下冲的确定。图2后面的文字对插图的元素进行了描述。

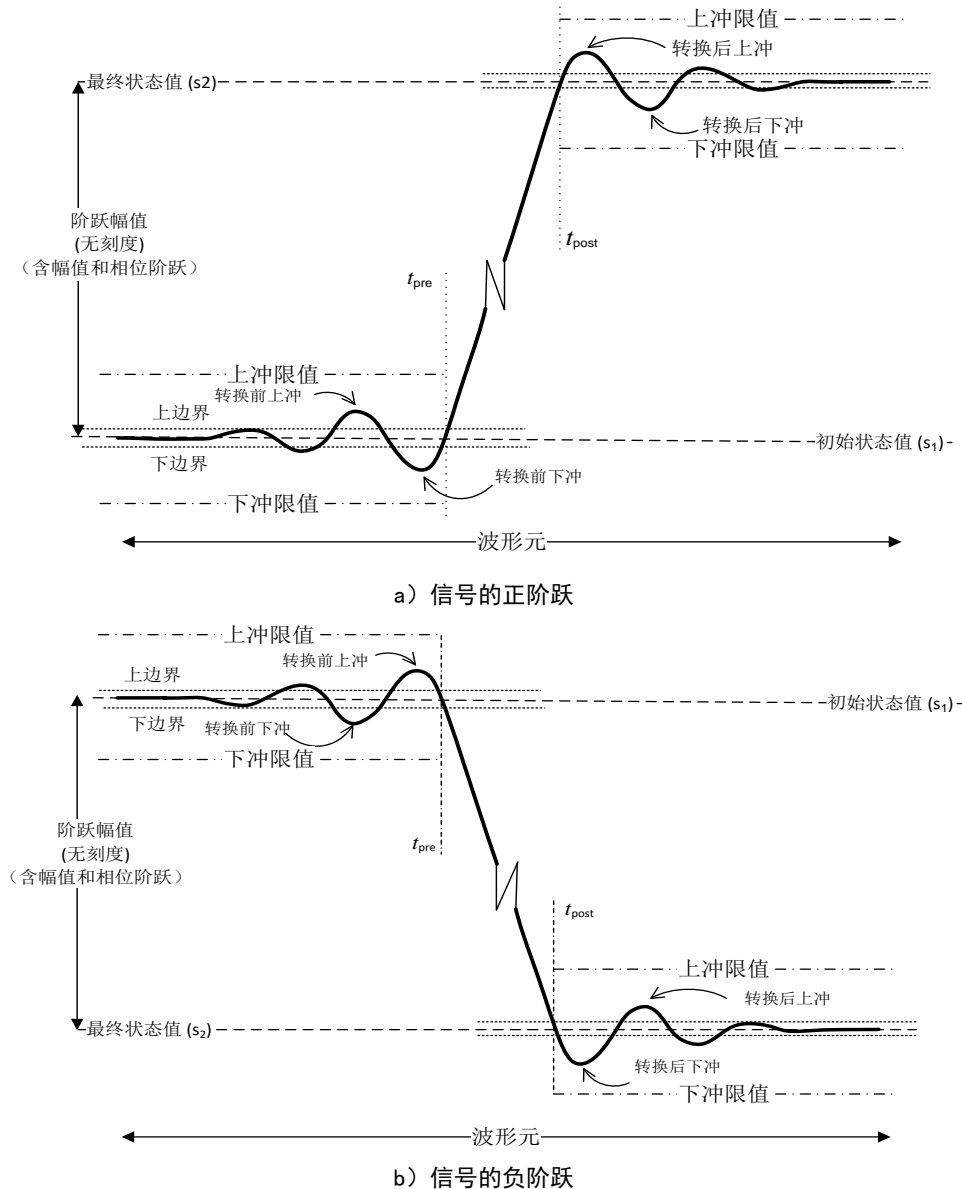


图2 阶跃转换示例

为规定上冲和下冲，从PMU输出构建的波形中定义以下参数。

- a) 波形元：所分析波形的持续时间（间隔），包括转换前和转换后的时间。波形元周期应为试验时报告速率响应时间限值的4倍加上2 s。
- b) 状态值：图2中的 s_1 和 s_2 。初始状态值 s_1 定义为波形元第一个1 s数据的平均值。最终状态值 s_2 是波形元最后1 s数据的平均值。
- c) 阶跃幅值：状态值 s_1 和 s_2 之间的差异。同步相量阶跃试验规定了输入信号的转换（见表8）。
- d) 状态边界：波形初始状态和最终状态的上限值和下限值规定为阶跃幅值的 $\pm 0.5\%$ ：
 - 1) 对于幅值阶跃，状态边界是状态值 $\pm 0.05\%$ 幅值，即10%幅值阶跃的 $\pm 0.5\%$ ；
 - 2) 对于相位阶跃，状态边界为状态值 $\pm 0.05^\circ$ ，即 10° 相位阶跃的 $\pm 0.5\%$ 。
- e) 转换前和转换后的时刻（ t_{pre} ， t_{post} ）及转换时段：
 - 1) t_{pre} 是指波形最后一次穿过初始状态值的上边界的时刻（对于正阶跃）或下边界的时刻（对于负阶跃）。转换前期为 t_{pre} 之前的时间段，不包括 t_{pre} ；
 - 2) t_{post} 是指波形第一次穿过最终状态值下边界的时刻（对于正阶跃）或上边界的时刻（对于负阶跃）。转换后期为 t_{post} 之后的时间段，包括 t_{post} 。
- f) 上冲量：在转换前和转换后，高于上边界的相对最大波形值。
 - 1) 转换前上冲量是转换前达到上边界上方的最大值与初始状态值 s_1 之间的差值。

- 2) 转换后上冲量是转换后达到上边界上方的最大值与最终状态值 s_2 之间的差值。
上冲量应以阶跃大小的百分比进行报告。转换前和/或转换后的上冲量不得大于上冲限值。
- g) 下冲量：在转换前和转换后，低于下边界的波形值。
- 1) 转换前下冲量是转换前达到下边界以下的最小值与初始状态值 s_1 之间的差值。
- 2) 过渡后下冲量是转换后达到下边界以下的最小值与最终状态值 s_2 之间的差值。
下冲量应以阶跃大小的百分比进行报告。转换前和/或转换后的下冲量不得大于下冲限值。

5.2.5 测量报告延迟

测量报告延迟是指从系统发生一个事件到该事件在数据中上送时刻之间的延时时间。延迟包括许多因素，例如收集数据进行测量的窗口、估计方法、测量滤波、PMU处理时间以及事件在报告间隔内发生的位置。报告速率和性能类别通常是最大的因素，因为这些因素将决定测量窗口、滤波和事件报告间隔的长度。

本文件中，PMU报告延迟定义为数据时间戳指示的数据报告时刻与PMU输出数据的时刻（通信接口信息第一位的输出时刻）之间的最大时间间隔。

5.2.6 测量和运行错误

PMU应能指示测量过程中遇到的内部问题。该指示应包括PMU可检测到的错误，包括A/D出错、内存溢出、计算溢出和可能导致测量错误的任何其它情况。

示例：当采用IEEE C37.118.2的报告格式时，由状态字的第14位（PMU异常位）来指示（此时所有测量错误状态和运行错误状态合成为一个错误指示位）。

5.3 测量报告

5.3.1 概述

对同步相量、频率和ROCOF的测量，应保证它们能够以一个恒定速率 F_s 上送。当测量速率大于每秒一次时， F_s 为每秒次数（整数）；当测量速率等于或小于每秒一次时， F_s 为两次测量之间的时间间隔（整秒数）。三个测量值应在同一时刻采集并上送。报告时刻应均匀分布，使报告之间的间隔相同。PMU可以与上述三个测量量同步进行其它测量，例如布尔状态、波形采样或其它计算数据。

5.3.2 报告速率

PMU应支持一个或多个数据报告（记录或输出）速率，该速率为系统标称频率的约数或倍数。表1列出了50 Hz和60 Hz系统的标准报告速率。制造商应申明PMU支持的报告速率，在这些报告速率下PMU应符合本文件要求。PMU应至少支持表1中的一个报告速率。

表1 PMU 标准报告速率

系统频率	50 Hz				60 Hz						
报告速率 (F_s 每秒帧数 (fps))	10	25	50	100	10	12	15	20	30	60	120

允许支持其它报告速率。如果支持多种速率，则实际使用的速率是由用户选择的。低于10帧/秒的速率不受本文件动态要求的约束。这意味着不需要滤波，因此可以从较高速率的数据流中按照每n个采样样本直接抽取来提供较低速率的数据（小于10帧/秒）。

5.3.3 报告时刻

在本文件中，一个数据帧或一帧数据是一组同一个时间戳的同步相量、频率和ROCOF测量值。术语“帧”用于将其与“采样点”区分开，“采样点”理解为模拟量波形上的点。

对于报告速率N帧/秒，其中N是正整数，报告时刻应在每秒均匀间隔，帧号0（编号0到N-1）与UTC秒翻转一致（例如，与GPS提供的1 PPS一致）。这些报告时刻（时间标签）用于确定同步相量的瞬时值。

如果使用小于1帧/秒的速率，则应在整时（xx:00:00）上有一个报告，之后根据所选速率在没有闰秒的情况下均匀间隔，报告之间的秒数为整数。如果出现闰秒，则该小时中的最后一个间隔应相应变长或变短。

5.4 测量符合性

5.4.1 性能类别

按性能类别评估是否符合要求。本文件定义了两类性能：P类和M类。

一般来说，P类比M类具有更短的测量延迟时间、更窄的频率范围和更低的谐波信号抑制要求，并且没有带外信号抑制要求。M类允许更长的延迟，允许更多的滤波以满足更宽的频率范围要求，并增加谐波和带外信号抑制要求。

P类适用于需要快速响应的应用，如保护应用。例如，P类参考模型滤波器（附录D）的阶跃响应是单调的（无上冲和下冲），并且在一个周期内完全稳定。

M类适用于可能受到带外干扰引起的混叠信号不利影响、但是不要求低测量报告延迟或短阶跃响应时间的应用。例如，M类参考模型滤波器（附录D）的阶跃响应具有一定的上冲和振铃，并且与P类模型相比，测量报告延迟显著增加。

这两个类别的设计并不表示其中任何一个类别对于特定的应用是足够的或是必需的。用户应选择符合应用要求的性能类别。用户应权衡考虑频域性能和时域性能。

所有符合性要求均由性能类别规定。PMU应在满足某一性能类别规定的所有要求的情况下，才能被视为符合本文件中该类别的要求。如果供应商同时提供P类和M类性能，性能类别可由用户选择。

5.4.2 符合性验证

为符合本文件的要求，PMU应能提供满足第6章所列要求的同步相量、频率和ROCOF测量值。这些要求由性能类别和报告速率来规定。为符合要求，所有测量应满足给定类别和报告速率的所有要求。

供应商应选择标称电压和标称电流等级。这些等级应与IEEE标准C37.90或IEC 60255-1中的推荐等级一致。参考和试验条件见6.2。关于评估和试验的其它讨论见附录C。

用于验证与本文件性能要求符合性的试验装置或系统应可溯源至国家标准，与试验要求相比，“试验不确定度比”至少为10（例如，在TVE要求为1%的情况下，提供的测量准确度应为0.1%）。

供应商应根据第7章的要求提供文件。

6 测量符合性试验与评估

6.1 试验注意事项

第6章详述了测量符合性试验及性能的限值。针对每一个试验，给出了描述参考试验信号的表达式，由此可以计算得到同步相量、频率和ROCOF值。对试验中不同类别和报告速率的误差范围提出了要求。所有误差范围都可以使用基本计算算法实现，其中包括PMU误差和噪声裕量。这些算法在附录D中进行了阐述。这些算法仅供参考和示例，不作推荐。

稳态试验和测量带宽试验都要求在幅值和频率恒定的条件下确定测量值。为防止暂态效应影响测量，在每次试验信号改变后应提供足够的稳定时间。

6.2 参考及试验条件

除按试验要求变化的参数之外，其它所有参数设置为参考条件，所有符合性试验均应在该条件下进行。试验中的参考条件是指在试验时不变化的量值。

所有试验的标准参考条件如下：

- a) 标称电压；
- b) 标称电流；

- c) 标称频率;
- d) 电压、电流、相位和频率恒定;
- e) THD + N < 基波的 0.2% (其中 N 代表噪声);
- f) 所有干扰信号含量 < 基波的 0.2%。

假设电压和电流信号均为模拟量。在本文件发布时,通常期望PMU为这种类型。附录E对信号为数字式的情况进行了讨论。在本文件的后续版本中可能包含用于数字采样值试验的具体要求。

报告速率(F_s)低于10帧/秒的测量量不受动态性能要求的限制。除带外抑制外,此类测量量应满足所有稳态要求(表2)。本要求适用于5.4.1中描述的所有性能类别(P类和M类)。

除另有规定外,所有符合性认证的试验均应在标准实验室试验条件下进行,应满足:

- 温度 $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- 湿度 < 90%。

对环境试验条件进一步的讨论和参考见附录F。

在6.3中, f_{in} 是基波分量的频率,通常为50 Hz或60 Hz,但在试验过程中可能偏离标称值。此外, f_0 始终表示标称频率,为50 Hz或60 Hz。同样地, $\omega_0=2\pi f_0$ 始终为以弧度/秒表示的标称角速度。

6.3 稳态符合性

稳态符合性可通过将在稳态条件下获得的同步相量、频率和ROCOF估计值与 X_r 、 X_i 、频率和ROCOF的相应参考值进行比较来确认。稳态条件是指试验信号的幅值、频率和相位角,以及所有其它影响量在测量期间稳定时间不应小于5 s。对于非标称频率,即使试验信号相位角恒定,同步相位角也会改变。相量、频率和ROCOF的试验方法应相同。表2和表3规定了稳态试验的条件和性能要求。附录G对PMU试验以及符合性认证提出了更高准确度和更大电流范围的要求。

表2 稳态同步相量测量要求

影响量	参考条件	PMU在给定TVE范围内的最小影响量范围			
		P类性能		M类性能	
		范围	TVE最大值 %	范围	TVE最大值 %
信号频率	频率= f_0	$\pm 2.0\text{ Hz}$	1	$F_s < 10$ 时, $\pm 2.0\text{ Hz}$ $10 \leq F_s < 25$ 时, $\pm F_s/5$ $F_s \geq 25$ 时, $\pm 5.0\text{ Hz}$	1
电压信号幅值	100%额定值	80%至120%额定值	1	10%至120%额定值	1
电流信号幅值	100%额定值	10%至200%额定值	1	10%至200%额定值	1
谐波畸变(单次谐波)	< 0.2% (THD)	1%, 单次谐波至50次	1	10%, 单次谐波至50次	1
如下所述的带外干扰	< 0.2%输入信号幅值		无	$F_s \geq 10$ 时, 10%输入信号幅值 $F_s < 10$ 时, 不作要求	1.3

带外干扰试验:
 输入试验信号频率 f_{in} 在 $f_0 \pm (F_s/2 \text{ 的 } 10\%)$ 之间变化,最大变化范围在 $\pm 5\text{ Hz}$ 。
 范围区间: $F_s \leq 100$ 时, $f_0 - 0.1(F_s/2) \leq f_{in} \leq f_0 + 0.1(F_s/2)$; $F_s > 100$ 时, $f_0 - 5 \leq f_{in} \leq f_0 + 5$ 。
 其中:
 F_s ——相量报告频率(单位为Hz);
 f_0 ——系统标称频率(单位为Hz);
 f_{in} ——输入试验信号的基频(单位为Hz)。
 每个报告速率的通带定义为 $|f - f_0| < F_s/2$ 。滤波器通带外的干扰信号是频率为 f 的信号,其中: $|f - f_0| \geq F_s/2$ 。
 通过在基波电力信号上叠加符合要求的单频正弦波,来确认对带外抑制的符合性。最小正弦频率范围应为10 Hz至二次谐波($2 \times f_0$),不包括通频带。这些频率应包括频率 $f_0 \pm F_s/2$ 、10 Hz、二次谐波($2 \times f_0$)和足够的频率点,以清楚地确定响应。这应包括数个频率点,在通带限值频率附近的频率间隔按指数规律越靠近限值频率越变窄,如下所示:
 ——频率点低于通带使用频率 $f = f_0 - F_s/2 - (0.1\text{ Hz} \times 2n)$,当 $n = 0, 1, 2, \dots$ 直到 $f \leq 10\text{ Hz}$;
 ——频率点高于通带使用频率 $f = f_0 + F_s/2 + (0.1\text{ Hz} \times 2n)$,当 $n = 0, 1, 2, \dots$ 直到 $f \geq 2 \times f_0\text{ Hz}$ 。
 对于 $F_s = 2 \times f_0$ 的特殊情况,频率从0到 $2 \times f_0$ 的点都属于带内,因此带外试验将从二次谐波到三次谐波进行;即 $2 \times f_0 \leq f \leq 3 \times f_0$ 。

当频率偏离标称频率时，相位角会发生旋转。因此，围绕圆的相位角准确度被频率范围试验时的相位旋转所覆盖。相位角可以与发电机转子角相关，而发电机转子角也可以与同步相量的相位相关，见附录H。

对于信号频率试验和幅值试验，输入信号应由式（12）、式（13）和式（14）表示：

$$X_a = X_m \cos(2\pi f_{in}t) \dots\dots\dots (12)$$

$$X_b = X_m \cos(2\pi f_{in}t - \frac{2\pi}{3}) \dots\dots\dots (13)$$

$$X_c = X_m \cos(2\pi f_{in}t + 2\pi/3) \dots\dots\dots (14)$$

式中：

- X_a, X_b, X_c ——A相、B相、C相信号；
- X_m ——输入信号幅值；
- f_{in} ——输入信号频率，单位为Hz。

对于谐波畸变试验，输入信号应由式（15）、式（16）和式（17）表示：

$$X_a = X_m \cos(2\pi f_0t) + X_m k_x \cos(2\pi n f_0t) \dots\dots\dots (15)$$

$$X_b = X_m \cos(2\pi f_0t - 2\pi/3) + X_m k_x \cos(2\pi n f_0t - 2\pi n/3) \dots\dots\dots (16)$$

$$X_c = X_m \cos(2\pi f_0t + 2\pi/3) + X_m k_x \cos(2\pi n f_0t + 2\pi n/3) \dots\dots\dots (17)$$

式中：

- X_m ——输入信号幅值；
 - f_0 ——电力系统标称频率，单位为Hz；
 - k_x ——谐波幅值因子，n是谐波次数。
- 谐波相序见表C.1。

对于带外干扰试验，输入信号应由式（18）、式（19）和式（20）表示：

$$X_a = X_m \cos(2\pi f_{in}t) + X_m K_x \cos(2\pi f_i t) \dots\dots\dots (18)$$

$$X_b = X_m \cos(2\pi f_{in}t - 2\pi/3) + X_m K_x \cos(2\pi f_i t - 2\pi/3) \dots\dots\dots (19)$$

$$X_c = X_m \cos(2\pi f_{in}t + 2\pi/3) + X_m K_x \cos(2\pi f_i t + 2\pi/3) \dots\dots\dots (20)$$

式中：

- X_m ——输入信号幅值；
- f_{in} ——以Hz为单位的电力系统输入信号的频率（可能不是标称值50 Hz或60 Hz）；
- k_x ——干扰频率幅值因子；
- f_i ——以Hz为单位的干扰频率。

对于所有稳态试验，在报告时间标签 $t=nT$ 时（其中n是整数，T是相量报告间隔），PMU应产生相量测量：

$$X(nT) = (X_m/\sqrt{2}) \angle (2\pi \Delta f nT + p2\pi/3) \dots\dots\dots (21)$$

式中：

- 对于A相和正序， $p=0$ ；
- 对于B相， $p=-1$ ；
- 对于C相， $p=1$ 。

Δf 是偏移频率， $\Delta f=f_{in}-f_0$ 。

相应的频率和ROCOF测量值：

$$f(nT) = f_0 + \Delta f \dots\dots\dots (22)$$

$$\Delta f(nT) = \Delta f \dots\dots\dots (23)$$

$$ROCOF(nT) = 0 \dots\dots\dots (24)$$

表3 稳态频率和 ROCOF 测量要求

影响量	参考条件	符合性误差要求			
		P类		M类	
频率信号	频率= f_0 相位角恒定	范围： $f_0 \pm 2.0$ Hz		范围： $F_s \leq 10$ 时， $f_0 \pm 2.0$ Hz $10 \leq F_s < 25$ 时， $\pm F_s/5$ $F_s \geq 25$ 时， ± 5.0 Hz	
		FE 最大值	RFE 最大值	FE 最大值	RFE 最大值
		0.005 Hz	0.4 Hz/s	0.005 Hz	0.1 Hz/s
谐波畸变（同表2）（单次谐波）	<0.2%THD	单次谐波含量1%，至50次谐波		单次谐波含量10%，至50次谐波	
		FE 最大值	RFE 最大值	FE 最大值	RFE 最大值
	$F_s > 20$	0.005 Hz	0.4 Hz/s	0.025 Hz	不作要求
	$F_s \leq 20$	0.005 Hz	0.4 Hz/s	0.005 Hz	不作要求
带外干扰（同表2）	<0.2%输入信号幅值	不作要求		干扰信号为信号幅值的10%	
				FE 最大值	RFE 最大值
		无	无	0.01 Hz	不作要求

6.4 动态符合性—测量带宽

应通过对输入信号的幅值和相位的正弦波调制的扫频来保证同步相量测量带宽的最小要求。具体是将（调制）正弦信号施加到三相平衡输入信号（电压和电流）的幅值和相位角上，按照表4和表5对三相平衡输入信号进行调制。数学上，输入信号可由式（25）、式（26）和式（27）表示：

$$X_a = X_m [1 + k_x \cos(2\pi f_m t)] \times \cos[2\pi f_0 t + k_a \cos(2\pi f_m t - \pi)] \dots\dots\dots (25)$$

$$X_b = X_m [1 + k_x \cos(2\pi f_m t)] \times \cos[2\pi f_0 t - 2\pi/3 + k_a \cos(2\pi f_m t - \pi)] \dots\dots\dots (26)$$

$$X_c = X_m [1 + k_x \cos(2\pi f_m t)] \times \cos[2\pi f_0 t + 2\pi/3 + k_a \cos(2\pi f_m t - \pi)] \dots\dots\dots (27)$$

式中：

- X_m ——输入信号幅值；
- f_0 ——电力系统标称频率，单位为Hz；
- f_m ——调制频率，单位为Hz；
- k_x ——幅值调制因子；
- k_a ——相位角调制因子。

对应于上述三相输入的正序信号由式（28）给出：

$$X_1 = X_m [1 + k_x \cos(2\pi f_m t)] \times \cos[2\pi f_0 t + k_a \cos(2\pi f_m t - \pi)] \dots\dots\dots (28)$$

由于所描述的信号是三相平衡信号，故无负序（ X_2 ）和零序（ X_0 ）分量。

在报告时间标签 $t=nT$ （其中n是整数，T是相量报告间隔），PMU应产生以下相量：

$$X(nT) = \left(\frac{X_m}{\sqrt{2}}\right) [1 + k_x \cos(2\pi f_m nT)] \angle [p2\pi/3 + k_a \cos(2\pi f_m nT - \pi)] \dots\dots\dots (29)$$

式中：

- 对于A相和正序， $p=0$ ；
- 对于B相， $p=-1$ ；
- 对于C相， $p=1$ 。

相量值的误差应满足表4要求。

在此试验期间还应确定频率和ROCOF的测量性能。对于上述定义的输入信号，当报告时刻 $t=nT$ 时，频率、频率偏差和ROCOF分别由式（30）、（31）和式（32）给出：

$$f(nT) = f_0 - k_a(f_m)\sin(2\pi f_m nT - \pi) \dots \dots \dots (30)$$

$$\Delta f(nT) = -k_a(f_m)\sin(2\pi f_m nT - \pi) \dots \dots \dots (31)$$

$$\text{ROCOF}(nT) = d[f(nT)]/dt = -k_a(2\pi f_m^2)\cos(2\pi f_m nT - \pi) \dots \dots \dots (32)$$

表4提供了调制试验时 f_m , k_x 和 k_a 的变化范围。调制频率应按照表4规定的范围以0.2 Hz或更小的步长变化。TVE、FE和RFE应在至少5 s或两个完整的调制周期内（以两者中较大者为准）进行测量，并确定最大值。最大值是在给定的报告速率下整个试验期间观察到的最高值。该最大值应在给定报告速率下P类和M类规定的限值内。此处给出的试验确保PMU带宽至少与指定范围一样宽。附录I介绍了确定和报告实际PMU测量带宽的试验和要求。

表4 使用调制试验信号的同步相量测量带宽要求

调制等级	参考条件	PMU在给定TVE限值内的最小影响量范围			
		P类		M类	
		范围	TVE最大值	范围	TVE最大值
$k_x=0.1$ $k_a=0$	100%额定信号幅值, 标称频率 f_0	调制频率0.1 Hz至 $\min(F_s/10, 2 \text{ Hz})$	3%	调制频率0.1 Hz至 $\min(F_s/5, 5 \text{ Hz})$	3%
$k_x=0$ $k_a=0.1$	100%额定信号幅值, 标称频率 f_0		3%		3%

表5 调制试验下的频率和ROCOF性能要求

频率和ROCOF性能限值	符合性误差要求					
	P类			M类		
报告速率 F_s Hz	F_r Hz	FE 最大值 Hz	RFE 最大值 Hz/s	F_r Hz	FE 最大值 Hz	RFE 最大值 Hz/s
10	1	0.03	0.6	2	0.12	2.3
12	1.2	0.04	0.8	2.4	0.14	3.3
15	1.5	0.05	1.3	3	0.18	5.1
20	2	0.06	2.3	4	0.24	9.0
25	2	0.06	2.3	5	0.30	14
30	2	0.06	2.3	5	0.30	14
50	2	0.06	2.3	5	0.30	14
60	2	0.06	2.3	5	0.30	14
100	2	0.06	2.3	5	0.30	14
120	2	0.06	2.3	5	0.30	14
公式	$\min(F_s/10, 2)$	$0.03 \times F_r$	$0.18 \times \pi \times F_r^2$	$\min(F_s/5, 5)$	$0.06 \times F_r$	$0.18 \times \pi \times F_r^2$

注1: 调制试验范围内的最大频率 (F_r) 由报告速率 (F_s) 决定, P类和M类的上限分别为2 Hz或5 Hz, 如表4中“范围”所示。

注2: 最大允许误差的公式基于频率或ROCOF测量在调制频率范围内达到的峰值。对于频率, 该值为 $0.1 \times F_r$, 对于ROCOF, 该值为 $0.1 \times 2\pi \times F_r^2$, 其中0.1是调制的因子。为了试验符合性, 请使用表中给出的舍入值, 而非公式。

注3: 误差范围是这些最大值的百分比: P类的FE限值为30%, M类的FE限值为60%; 两个类别中RFE限值均为90%。

频率和ROCOF跟踪经过调制的信号，并反映基波信号和调制的综合结果。两个测量量的误差都只占其测量值的一小部分，但由于ROCOF（相位的二阶导数）变大，因此预期误差也大。如给定公式所示，频率偏差的幅值随调制频率线性增加，ROCOF随调制频率平方增加。

6.5 动态符合性—系统频率斜坡变化期间的性能

系统频率变化期间的测量性能需要用系统频率呈线性斜坡变化的三相平衡输入信号（电压和电流）进行试验。在数学上，输入信号可以用式（33）、式（34）和式（35）表示。

$$X_a = X_m \cos[2\pi f_0 t + \pi R_f t^2] \dots\dots\dots (33)$$

$$X_b = X_m \cos [2\pi f_0 t - 2\pi/3 + \pi R_f t^2] \dots\dots\dots (34)$$

$$X_c = X_m \cos [2\pi f_0 t + 2\pi/3 + \pi R_f t^2] \dots\dots\dots (35)$$

式中：

X_m ——输入信号的幅值；

f_0 ——电力系统标称频率，单位Hz；

R_f ——（即： df/dt ）频率斜坡率，单位为Hz/s（本试验中为恒定值）。

上述三相输入对应的正序信号定义见式（36）：

$$X_1 = X_m \cos[2\pi f_0 t + \pi R_f t^2] \dots\dots\dots (36)$$

这个信号是平衡信号，所以没有负序和零序分量。

在报告时间标签 $t=nT$ （其中n为整数，T为相量报告间隔）时，PMU应产生相量测量值：

$$X(nT) = \left(\frac{X_m}{\sqrt{2}}\right) \angle [p2\pi/3 + \pi R_f (nT)^2] \dots\dots\dots (37)$$

式中：

对于A相和正序， $p=0$ ；

对于B相， $p=-1$ ；

对于C相， $p=1$ 。

在斜坡试验中，报告时间标签 $t=nT$ 时试验信号的频率、频率偏差和ROCOF的参考值分别由式（38）、式（39）和式（40）给出：

$$f(nT) = f_0 + (R_f)(nT) \dots\dots\dots (38)$$

$$\Delta f(nT) = (R_f)(nT) \dots\dots\dots (39)$$

$$d[f(nT)]/dt = R_f \dots\dots\dots (40)$$

表6和表7给出了每个性能类别的斜坡试验频率范围、斜坡速率、测量排除区间和测量误差范围。频率范围同稳态频率试验（见表2）。排除区间从测量评估中删除了斜坡的一部分，在此期间，非线性过渡或测量限值可能会影响测量。

试验应包括正负频率斜坡。每个斜坡应在表6规定的范围内以恒定的斜坡速度连续延伸。靠近频率限值的斜坡测量部分不包括在评估中。由于斜坡是连续的，并且在两个界限之间有一个恒定的速度，所以在频率限值处或之外才会有非线性过渡过程。

排除区间 $t_{exclusion}$ 是基于估计相量的时间窗。这由报告速率和性能类别决定，如下所示：

$$t_{exclusion} = n/F_s$$

式中：

n ——2（P类）或7（M类）；

F_s ——报告速率。

在斜坡开始处应有一个排除区间，以排除从稳态起始频率到斜坡变化的频率的转换，在斜坡结束处也应有一个排除区间，以排除从斜坡变化的频率到稳态终止频率的转换。起始排除区间是信号从起始频率限值到斜坡频率变化点开始的斜坡部分。终点排除区间是终点频率限值处的斜坡部分。结束点应包括在排除区间内（即区间的终点不包括在评估中）。由于报告是离散的，如果报告时刻与频率到达限值的

时刻重合，则应额外丢弃2个（P类）或7个（M类）报告。（间隔为 n/F_s 长，如果一个报告点恰好位于终点频率处，则包括 $n+1$ 点）。

例如，考虑一个系统频率为60 Hz，报告速率 $F_s=30$ fps的情况。对于P类，频率范围为 ± 2 Hz，排除区间 $t_{\text{exclusion}}=2/F_s=0.067$ s。正向斜坡试验将从58 Hz稳态信号开始，上升到62 Hz稳态信号。排除区间是两个报告周期，因此，如果一个报告时刻恰好与频率变化起始时刻（58 Hz处）重合，则该报告和接下来的两个报告将被丢弃。同样地，如果一个报告时刻恰好与频率达到终值62 Hz的时刻重合，则该报告和之前的两个报告将被丢弃。由于斜坡速率为1 Hz/s，因此不包括58.067 Hz及以下、61.933 Hz及以上的测量值。负向斜坡试验将从62 Hz稳态信号开始，并向下斜坡至58 Hz稳态，因此同样地，将从评估中丢弃相同的测量和频率。对于M类测量，除了排除区间为 $t_{\text{exclusion}}=7/30=0.233$ s及试验频率限值为 ± 5 Hz外，原理与P类相同。正向斜坡应从55 Hz开始，上升到65 Hz。应丢弃与频率到达限值时刻重合的报告及随后的7个报告。55.234 Hz到64.767 Hz区间之外（含两端）的测量值被丢弃。负向频率斜坡的丢弃范围相同。

表6 频率斜坡下的同步相量性能要求

试验信号	参考条件	影响量试验限值，PMU应在给定TVE限值内 ^a				
		斜坡率 (R_f) (正向和负向斜坡)	性能类别	排除区间	斜坡范围	最大TVE
线性频率斜坡	试验过程中，信号幅值为100%额定值，其中一个非丢弃点的频率为标称频率 f_0	± 1.0 Hz/s	P类	$2/F_s$ 和 $2/f_0$ 中的较大值	± 2 Hz	1 %
			M类	$7/F_s$ 和 $7/f_0$ 中的较大值	$\pm (F_s/5)$ Hz和 ± 5 Hz中的较小值 ^b	1 %
^a 最小范围。不包括排除区间乘以斜坡率。 ^b 对于 $F_s = 12$ fps，斜坡范围应为 $\pm 7/3$ Hz，以使结果中有整数个样本。						

表7 频率斜坡试验对频率和 ROCOF 的性能要求

信号规格	参考条件	排除区间	符合性的误差要求			
			P 级		M 级	
斜坡试验-同表6	100%额定幅值和0弧度基准角	同表6	最大 FE	最大 RFE	最大 FE	最大 RFE
			0.01 Hz	0.4 Hz/s	0.01 Hz	0.2 Hz/s

6.6 动态符合性—相位和幅值阶跃变化时的性能

应通过对三相平衡输入信号（电压和电流）施加平衡的阶跃变化来确定幅值和相位阶跃变化期间的性能。

$$X_a = X_m[1 + k_x u(t)] \times \cos[2\pi f_0 t + k_a u(t)] \dots \dots \dots (41)$$

$$X_b = X_m[1 + k_x u(t)] \times \cos[2\pi f_0 t - 2\pi/3 + k_a u(t)] \dots \dots \dots (42)$$

$$X_c = X_m[1 + k_x u(t)] \times \cos[2\pi f_0 t + 2\pi/3 + k_a u(t)] \dots \dots \dots (43)$$

式中：

- X_m ——输入信号的幅值；
- f_0 ——电力系统标称频率，单位Hz；
- $u(t)$ ——单位阶跃函数；
- k_x ——幅值阶跃幅值；
- k_a ——相位阶跃幅值。

此试验是两个稳态之间的转换，用于确定测量中的响应时间、延时时间和过冲量。应采用表8中规定的阶跃函数，测量值应满足表8和表9的要求。测量量见图C.5所示，响应时间和延时时间定义见5.2.3。

响应时间由表2和表3中的稳态误差限值来确定。这些限值中，TVE为1%、|FE|为0.005 Hz、|RFE|为0.4 Hz/s（P类）和0.1 Hz/s（M类）。

表8 输入阶跃变化的相量性能要求

阶跃描述	参考条件	最大响应时间、延时时间和过冲量					
		P 级			M 级		
		响应时间 s	延时时间 s	最大上冲/下冲	响应时间 s	延时时间 s	最大上冲/下冲
幅值 ± 10%, $k_x = \pm 0.1$, $k_a = 0$	阶跃起始和结束时所有的参考条件设置为标称值	$2/f_0$	$1/(4 \times F_s)$	阶跃幅值的5%	$7/F_s$ 和 $7/f_0$ 中的较大值	$1/(4 \times F_s)$	阶跃幅值的10%
相角 ± 10°, $k_x = 0$, $k_a = \pm \pi/18$	阶跃起始和结束时所有的参考条件设置为标称值	$2/f_0$	$1/(4 \times F_s)$	阶跃幅值的5%	$7/F_s$ 和 $7/f_0$ 中的较大值	$1/(4 \times F_s)$	阶跃幅值的10%

表9 输入阶跃变化的频率和 ROCOF 性能要求

阶跃描述	参考条件	最大响应时间			
		P 类		M 类	
		频率响应时间 s	ROCOF响应时间 s	频率响应时间 s	ROCOF响应时间 s
幅值试验见表8	同表8	$4.5/f_0$	$6/f_0$	$14/F_s$ 和 $14/f_0$ 中的较大值	$14/F_s$ 和 $14/f_0$ 中的较大值
相位试验见表8	同表8	$4.5/f_0$	$6/f_0$	$14/F_s$ 和 $14/f_0$ 中的较大值	$14/F_s$ 和 $14/f_0$ 中的较大值

6.7 PMU 报告延迟符合性

如5.2.5定义，PMU报告延迟是数据时间戳指示的数据报告时刻与PMU输出数据的时刻之间的最大时间间隔（表示为通信接口点输出消息第一位的第一次转换）。PMU报告延迟的要求见表10。延迟应至少精确到0.002 s。

表10 PMU 报告延迟

性能类别	PMU最大报告延迟 (s)
P类	$2/F_s$ 和 $2/f_0$ 中的较大值
M类	$7/F_s$ 和 $7/f_0$ 中的较大值

注：延迟时间受限于同步相量计算至少需要一个周波的时间。

应至少观察PMU输出20 min，以确定最大延迟。如果所需的最大报告延迟出现上升或下降趋势，则应进一步观察PMU输出延迟的最大值，直到观察到局部最大值、趋势线的斜率变为零或超过最大允许报告延迟为止。见C.7的讨论。

7 文档要求

供应商应提供符合本文件要求的文件，包括以下信息：

- 性能类别；
- 满足性能类别的测量量；
- 可选的报告速率；

- 电压和电流标称值；
- 用于频率和 ROCOF 测量的输入；
- PMU 定值；
- 性能试验结果；
- 试验设备说明；
- 试验环境条件。

附录 A (资料性附录) 时间标签与动态响应

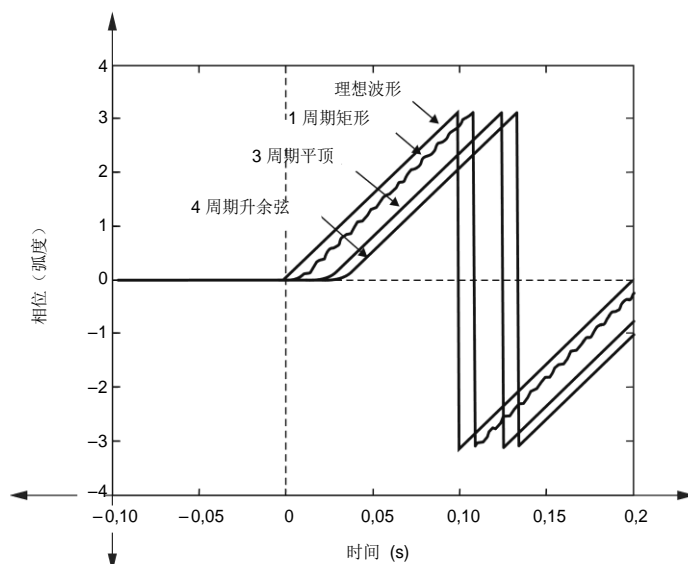
A.1 动态响应

相同的PMU（具有相同的硬件电路和算法）在任何条件下得出的相量测量应相同。但是，不同算法或不同模拟电路的两个PMU，在瞬时状态下（幅值、相位角或频率变化时）对于相同的相量测量，得出的结果会有所不同。第6章中详细描述的试验要求和测量评估要求，保证了稳态和暂态条件下的测量具有可比性。

A.2 时间标签

相量测量是正弦信号相量的估计值。信号估计是在特定时刻进行，并将该时刻标记为相量的时间标签。相量估计需要对一段时间间隔内对波形进行采样，这样会引起困惑，即在这个时间窗内哪个时刻才是相量的正确时标。时间标签被定义为估计相量表示的参考相量的时间。众所周知，同步相量实际上是在观察窗口上对正弦波参数的估计。估计值涵盖一小段时间，因此估计值代表正弦波参数的某种“平均值”，这些参数在观察窗口期间可能会发生变化。在大多数情况下，相量估计最好使用估计窗口中心的时间来表示。这取决于设计人员为保证幅值和相位角的正确表示按照5.2定义的TVE评估建立的评估流程。

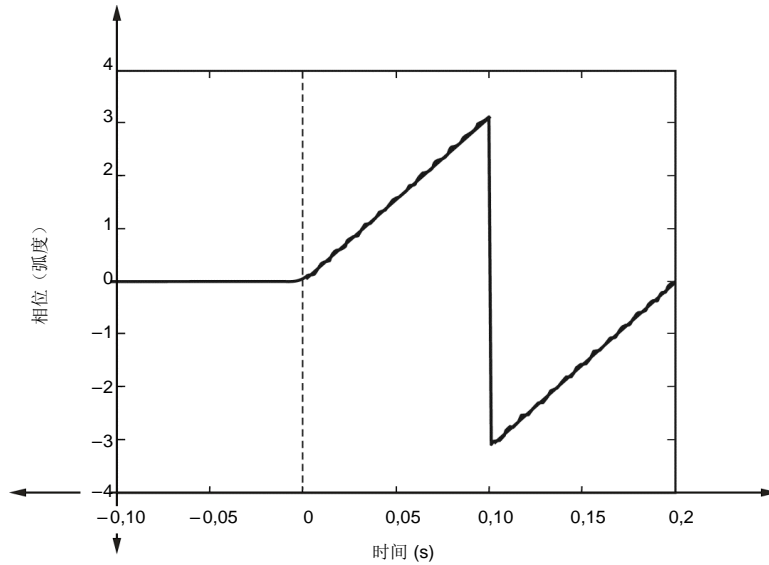
如果电力系统频率不等于标称值，则相量将发生旋转，如图A.1所示。虽然这是稳态条件（如6.3所定义），但是显而易见，相量相位角的瞬时值由时间标签的选择和与实际测量算法相关的固有群延时时间确定。这种行为可以用图A.1举例说明，图中在 $t = 0$ 处频率发生阶跃跳变，从 f_0 跳变到 $f_0 + 5$ Hz。曲线展示了由三种不同算法在没有群延时时间补偿时得到的估计值。



注：在 $t=0$ 处，频率阶跃大小为+5 Hz。

图A.1 无群延时时间补偿的频率阶跃试验相位响应

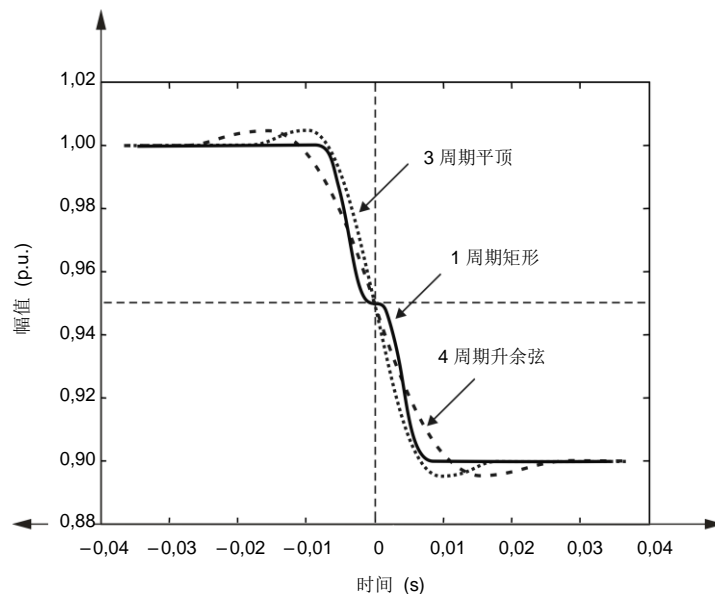
通过5.2中定义的TVE，消除了非标称频率相位角的歧义，并确保了不同PMU之间的兼容性。所有对群延时时间的补偿或其它的估计缺陷应由制造商完成。图A.2显示了群延时时间补偿后的多个设备输出（来自图A.1）。在图A.2中，所有设备的响应紧密跟随，四条迹线几乎没有区别。



注：理想曲线+3种算法，对应图A.1。

图A.2 群延时时间补偿后的频率阶跃试验相位响应

图A.3显示了上述同样的三种算法在10%的幅值负阶跃的条件下有群延时时间补偿后产生的结果。结果表明即使群延时时间得到补偿，响应也会有差异。但是这种差异非常小，且由于实际采样率比图中所示慢得多，在大部分数据上传送速率下难以察觉。响应集中在 $t = 0$ 阶跃处，它们满足P类在180 fps（以及所有较低报告速率）的响应时间要求，以及所有过冲要求。



注：群延时时间已经得到补偿，对应图A.2。电压或电流的标么值(p.u.)为基于参考值的归一化值(V/V_{ref} 或 I/I_{ref})。

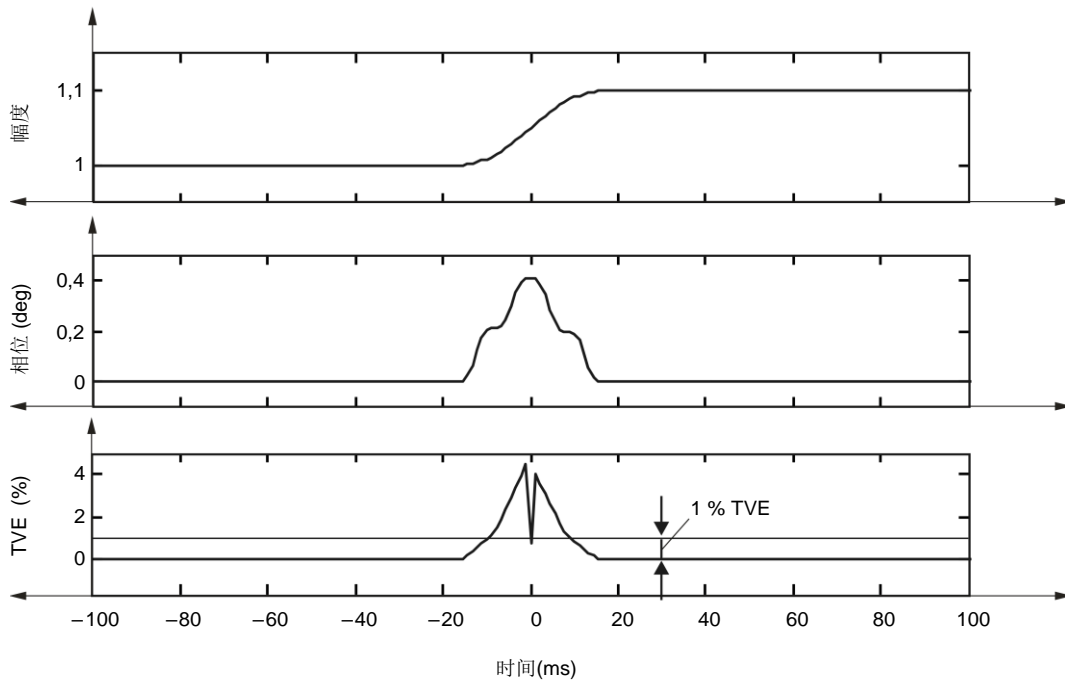
图A.3 3种不同算法的幅值阶跃试验结果

基于具有对称或反对称系数的有限冲激响应(FIR)滤波器的群延时时间等于窗口长度的一半(时间标签在窗口中心)。无限冲激响应(IIR)滤波器，非对称FIR滤波器，基于优化的算法可能会拉长尾部边沿，使时间响应不对称。此外，如图A.3所示，“暂态”行为将根据用于相量估计的算法类型不同

而变化，本文件不强制要求单独的测量算法，而是定义了各种条件下的性能以及使用TVE作为主要工具来保证相量测量设备性能。

A.3 幅值阶跃试验示例

使用附录D中给出的P类算法获得的模拟幅值阶跃试验的结果如图A.4所示。5.2中定义的TVE限值由细水平线表示。很明显，在稳态条件下，模拟PMU响应保持在规定的TVE要求范围内。但是，在阶跃期间，TVE明显超过稳态要求。因此，6.6中的性能要求没有规定在P类和M类设备在阶跃前后特定时间段内的最大TVE。



注：10%阶跃，P类算法。

图A.4 幅值阶跃试验示例

A.4 PMU时间输入

PMU需要UTC时间同步源。时间源可以直接由如GPS的时间广播或使用标准时间码的本地时钟提供。本地对时通常使用IRIG-B码，可以提供电平偏移、1 kHz幅值调制信号或双相曼彻斯特调制格式（调制类型2，B2xx）。如果使用幅值调制信号，则可能需要补充秒脉冲序列以实现所需的准确度。通常都会提供IRIG-B幅值调制格式，因而也是最容易实现的。较新的曼彻斯特格式与光纤和数字系统更兼容，无需额外信号即可提供完全同步。也可以使用其它形式的精确时钟源，例如使用IEEE 1588-2008的标准以太网。详述如下：

1 PPS

定时系统的共同特征是以每秒1个脉冲（1PPS）的速率组成的正脉冲序列。脉冲的上升沿与时钟的秒变化一致，并提供非常精确的时间参考。脉冲宽度从5 μ s到0.5 s，信号通常为5.0 V，驱动50 Ω 负载。1 PPS定时信号必须与另一个系统（如串行定时消息或IRIG-B）一起使用，以提供全时同步。

IRIG-B

IRIG-B在美国陆军白沙导弹靶场指挥官委员会出版的IRIG标准200-04中有详细描述。时间用一年中的天数按照二进制编码的十进制（BCD）格式提供，以秒为单位每秒1次，并提供可选的二进制秒计数。

该标准允许许多配置，表示为Bxyz，其中x表示调制技术，y表示消息中包含的计数，z表示间隔。最常用的形式是B122，具有年时间的BCD编码，并且在1kHz载波上进行幅值调制。传号（高电平）幅值的峰值应在1 V至6 V之间，传号-空号幅值比为10:3，见参考文献[2]。共有27位控制位供给用户分配，补足标准码以守时之用。时间码格式为：

<sync> SS:MM:HH:DDD <control><binary seconds>

其中：

<sync> ——同步标记
 SS ——一分钟内的秒(00到59，闰秒为60)
 MM ——一小时内的分钟(00到59)
 HH ——一天内的小时，24小时制(00到23)
 DDD ——一年中的日(001至366)
 <control> ——由27个二进制控制字符组成的控制块
 <binary seconds> ——一天中的秒，以二进制表示，17位

IRIG-B除了指定的时间码外，还包括27个用于用户提供信息的控制位。在先前的同步相量相关标准中，从IEEE Std 1344.-1995[3]到IEEE Std C37.118.1™-2011[4]，详细说明了这些位的分配，以便能够将世纪、非顺序变化（闰秒和夏令时）、本地时间偏移和时间质量编码到消息中。IEEE PC37.237中也开始使用它标记时间标签和记录事件发生时刻，这也是其更符合未来发展的一个兼容性的场景。

IEEE 1588

IEEE Std 1588-2008使得通过以太网(IEEE Std 802.3)等网络连接的设备的对时精度优于1 μs。IEC/IEEE 61850-9-3[6]和IEEE Std C37.238指定了一个IEEE 1588功能的子集，支持利用以太网通信架构的电力系统保护、控制、自动化和数据通信应用。一些商用以太网交换机，主时钟和从时钟已经实现了C37.238功能，并展示了这种性能。这两个标准都可以通过IEEE-SA网站获得。这些标准可能会更新及修订，建议读者检查最新版本，并确保设备符合带有兼容要求的版本。

附录 B
(资料性附录)
参数表示和定义应用示例

B.1 简介

附录B比较了本文件和IEEE Std C37.118.1 标准中关于同步相量、频率和ROCOF 测量的定义,论述了它们在数学上是等价的,即使在语义表达上有所不同。同时提供了一些示例,说明第5章中给出的同步相量、频率和ROCOF定义方程的应用。它们适用于电力系统信号分析中常见的信号,并包括第6章中规定的用于性能验证的试验信号。文中还给出了基于同步相量重建电力系统正弦波形的方法。

B.2 非平稳正弦波的表示

电压和电流波形通常表示为频率接近系统标称值的正弦波或余弦波,幅值几乎是恒定的,相位角由特定参考时间确定。实际上,幅值、频率和相位角在时间上不断变化,正弦信号是非平稳的。这些在正弦信号上的参数以及附加干扰都会出现变化,如式(1)所示。相位函数 $\theta(t)$ 包括频率和相位角。这些参数可以根据预期用途进行不同的定义。

在本文件中,定义了 $\theta(t) = 2\pi f_0 t + \phi(t)$ 来强调一个事实:同步相量的相位角就是在给定时刻相对于系统标称频率的相位角。频率的任何变化都作为相位的变化包括在其中,如下例所示。

先前的同步相量标准IEEE Std C37.118.1,在正弦相位 $\theta(t)$ 的定义中,将频率变化作为单独项包括在内。该标准定义了 $\theta(t) = 2\pi f_0 t + 2\pi \int g dt + \phi$,实际的正弦频率定义为 $f(t) = g(t) + f_0$ 。在此定义中,相位角 ϕ 对于单次计算是恒定的,但是对于连续计算可能是不同的。这种不定的积分形式不能得出清晰的相位值的估计。

这两种定义非平稳相位的方法是等价的,只是它们的语义表达不同。将两个相量值设置为相等(使 $\phi = \phi_0$ 表示其为固定值):

$$2\pi f_0 t + \phi(t) = \theta(t) = 2\pi f_0 t + 2\pi \int g dt + \phi_0 \dots \dots \dots (B.1)$$

$$\phi(t) = 2\pi \int g dt + \phi_0 \dots \dots \dots (B.2)$$

本文件中的频率定义和IEEE Std. C37.118.1是相同的(相位的导数除以 2π)。将两个定义设置为相等(在右侧显示IEEE Std. C37.118.1的公式):

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d[\theta(t)]}{dt} = f_0 + \frac{1}{2\pi} \frac{d[\phi(t)]}{dt} = f(t) = g(t) + f_0 \dots \dots \dots (B.3)$$

$$g(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d[\phi(t)]}{dt} \dots \dots \dots (B.4)$$

可以看到 $g(t)$ 是由标称频率引起的相位变化之外的相位角的变化率,它是由于标称频率引起的相位变化的补充,我们称之为“偏移频率”。相反,我们可以解出 $\phi(t)$:

$$\phi(t) = 2\pi \int_{t_0}^t g(\tau) d\tau + \phi(t_0) \dots \dots \dots (B.5)$$

这表明变化的相位角是偏移频率函数的积分加上一个常数。给定偏移频率或时变相位都可以推导出另一个参数。例如,当系统频率与标称频率的恒定差值 $g(t) = \Delta f$ 时,可以计算相位函数 $\theta(t)$:

$$\phi(t) = 2\pi \int_{t_0}^t g(\tau) d\tau = 2\pi \int_{t_0}^t \Delta f d\tau = 2\pi \Delta f (t - t_0) + \phi(t_0) \dots\dots\dots (B.6)^{1)}$$

同步相量相位角是在时间 $t=t_0$ 处从角度 $\phi(t_0)$ 开始的线性斜坡。
关于这些方法和频率定义的进一步讨论可以在 [9] 中找到。B.3 给出了应用这些定义的具体例子。

B.3 定义的应用示例简介

B.3.1 概述

重新引用第4章定义的基本正弦信号公式是：

$$x(t) = X_m(t) \cos[2\pi f_0 t + \phi(t)] + D(t) \dots\dots\dots (B.7)$$

同步相量定义为复数：

$$X(t) = \left(\frac{X_m(t)}{\sqrt{2}}, \phi(t) \right) = \frac{X_m(t)}{\sqrt{2}} e^{j\phi(t)} \dots\dots\dots (B.8)$$

在B.3.2至B.3.5的推导中，使用了同步相量的复指数形式。

B.3.2 示例1：标称频率下的稳态

所有参数都是常量。在这里， $X_m(t) = \frac{X_m}{\sqrt{2}}$ ， $\phi(t) = \phi$ ，频率 $f(t) = f_0$ ， $ROCOF(t) = 0$ ， $D(t) = 0$ 。

即同步相量是 $X(t) = (X_m/\sqrt{2})e^{j\phi}$ ，是信号和参考波之间的恒定相位差。

B.3.3 示例2：恒定非标称频率下的稳态

下面这些参数是常数， $X_m(t) = \frac{X_m}{\sqrt{2}}$ ， $\phi(t) = \phi$ ， $ROCOF(t) = 0$ ， $D(t) = 0$ 。非标称频率是

$$f(t) = f_0 + \Delta f \dots\dots\dots (B.9)$$

其中 Δf 是标称频率的偏移量。

通过对式 (7) 积分得到正弦相位：

$$\theta(t) = \int_0^t 2\pi f(t) dt = 2\pi f_0 t + 2\pi \Delta f t + \phi_0 \dots\dots\dots (B.10)$$

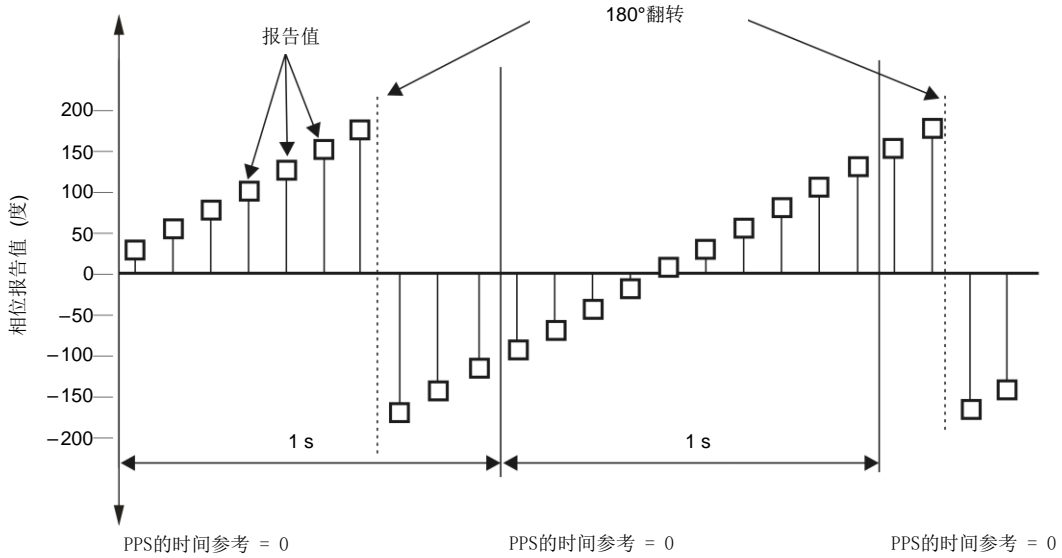
其中 ϕ_0 是 $t=0$ 时的相位。

然后，根据式 (2)， $\phi(t) = 2\pi f_0 t + 2\pi \Delta f t + \phi_0 - 2\pi f_0 t = 2\pi \Delta f t + \phi_0$ ，因此同步相量是

$$X(t) = \frac{X_m}{\sqrt{2}} e^{j(2\pi \Delta f t + \phi_0)} \dots\dots\dots (B.11)$$

该同步相量将以均匀速率 Δf Hz/s 旋转，这是实际频率和标称频率之差。如图B.1中所示，表明当 $\Delta f > 0$ 时，不断增加的相位角值。

1) 采标注：公式编号为“B.6”且后续公式编号依次增加，原文公式编号不连续，误为“B.7”。



图B.1 对偏离标称频率的工频正弦波进行采样

B.3.4 示例3：电力信号的相位和幅值振荡

在该示例中,对基本正弦电力系统信号的幅值和相位角进行正弦调制。这些调制在信号中表示为:

$$x(t) = X_m[1 + k_x \cos(2\pi f_m t)] \cos[2\pi f_0 t + k_a \cos(2\pi f_m t - \pi)] \dots \dots \dots (B.12)$$

示中:

- f_m ——以Hz为单位的调制频率;
- k_x ——幅值调制因子;
- k_a ——相位调制因子。

对于此示例,我们要求 $f_m < f_0$, $k_x < 1$, $k_a < 1$ 。这消除了无关解的可能性,是电力系统应用最好的代表。在这个例子中,相位和幅值调制是 180° 的反相位;这不是普遍的要求,而是双机彼此产生振荡关系的表达。

在此示例中:

$$X_m(t) = X_m[1 + k_x \cos(2\pi f_m t)], \phi(t) = k_a \cos(2\pi f_m t - \pi), D(t) = 0。$$

那么同步相量是:

$$X(t) = X_m/\sqrt{2}[1 + k_x \cos(2\pi f_m t)]e^{j[k_a \cos(2\pi f_m t - \pi)]} \dots \dots \dots (B.13)$$

频率是余弦参数的微分(式(7)):

$$f(t) = f_0 + \frac{1}{2\pi} \frac{d[k_a \cos(2\pi f_m t - \pi)]}{dt} = f_0 - k_a \frac{2\pi f_m}{2\pi} \sin(2\pi f_m t - \pi) \dots \dots \dots (B.14)$$

对频率求导得出ROCOF(式(8))

$$ROCOF(t) = \frac{df(t)}{dt} = -k_a \frac{(2\pi f_m)^2}{2\pi} \cos(2\pi f_m t - \pi) \dots \dots \dots (B.15)$$

同步相量在幅值和相位上振荡,与电力信号相同。频率和ROCOF仅响应相位调制而振荡。在幅值振荡($k_x \neq 0$ 和 $k_a = 0$)下,频率和ROCOF是恒定的;在相位振荡下($k_x = 0$ 且 $k_a \neq 0$),所有测量量都振荡。此示例显示了6.4中动态性能调制试验的参考参数值的推导。

B.3.5 恒定的、非零的频率变化率

此示例中 $X_m(t) = \frac{X_m}{\sqrt{2}}$, $D(t) = 0$, $ROCOF(t) = R_f \neq 0$ 均为恒定值。

对式（8）ROCOF进行积分以得到 $f(t)$ ，我们得到：

$$f(t) = \int_0^t R_f d\tau = R_f t + f_a \dots\dots\dots (B.16)$$

式中 f_a 是 $t=0$ 时的频率。该式描述了频率的线性变化，对 $f(t)$ 进行积分可以得到 $\theta(t)$ ：

$$\theta(t) = \int_0^t 2\pi f(\tau) d\tau = 2\pi \int_0^t (R_f \tau + f_a) d\tau = 2\pi(R_f \frac{t^2}{2} + f_a t) + \phi_0 = \pi R_f t^2 + 2\pi f_a t + \phi_0 \dots\dots\dots (B.17)$$

式中 ϕ_0 是 $t=0$ 时的相位角。

同步相量相位角 $\phi(t) = \pi R_f t^2 + 2\pi(f_a - f_0)t + \phi_0$ ，因此同步相量为：

$$X(t) = \frac{X_m}{\sqrt{2}} e^{j(\pi R_f t^2 + 2\pi(f_a - f_0)t + \phi_0)} \dots\dots\dots (B.18)$$

同步相量在时间 $t = 0$ 时具有初始相位角 ϕ_0 ，其相位角从 $t=0$ 起始以速率 $\pi R_f t^2 + 2\pi(f_a - f_0)t$ 按抛物线增加。频率 $f(t) = f_a + R_f t$ 是线性斜坡。

此示例显示了6.5中动态性能系统频率斜坡试验的参考参数值的推导。

B.4 从同步相量中重构电力系统的正弦信号

可以使用同步相量的参数来重建除干扰 $D(t)$ 之外的原始正弦信号（由同步相量保持）。分别给出在式（5）和式（6）中定义的实部值 $X_r(t)$ 和虚部值 $X_i(t)$ （直角坐标），正弦信号表示如下：

$$x(t) = X_m(t) \cos[(2\pi f_0 t) + \phi(t)] = \sqrt{2}X_r(t) \cos(2\pi f_0 t) - \sqrt{2}X_i(t) \sin(2\pi f_0 t) (B.19)$$

使用三角式： $\cos(a + b) = \cos(a) \cos(b) - \sin(a) \sin(b)$

离散时间测量值可以理解为连续时间测量值通过设置 $t = nT$ 采样得到，其中 n 是整数， T 是以秒为单位的测量报告周期。

附录 C
(资料性附录)
PMU 的评估和试验

C.1 概述

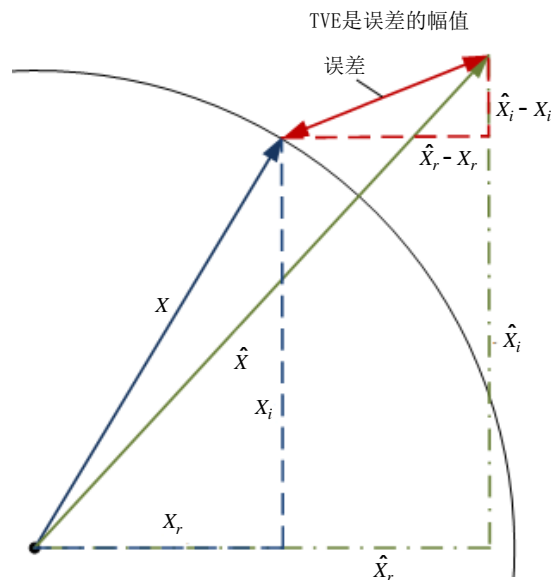
附录C包括了几个与评估PMU准确度相关的主题。附录C首先论述了综合矢量误差 (TVE)，随后探讨了幅值误差和相位误差与TVE度量的关系。关于对PMU幅值和相位阶跃响应的详细论述将有助于评估者理解用于进行阶跃试验的推荐方法。稳态谐波畸变试验的输入信号由等式确定，同时用一张表格展示出了其对称分量（正序，负序和零序相位）的相位关系。附录C在最后探讨了ROCOF的限值以及某些试验未对ROCOF误差限值进行规定的原因。

依照本文件，有很多方法可以用来实施PMU试验。如果实施正确，这些方法都将产生相同的结果。IEEE 合格评定程序 (ICAP) 颁布了同步相量测量成套试验规范 [10]，该规范依照ICAP认证计划，规定了用于合格评定的总体试验方法。

C.2 TVE测量评估

综合矢量误差 (TVE) 是PMU同步相量估计值和由描述被测量的评估公式所决定的参考值之间的差值的度量。

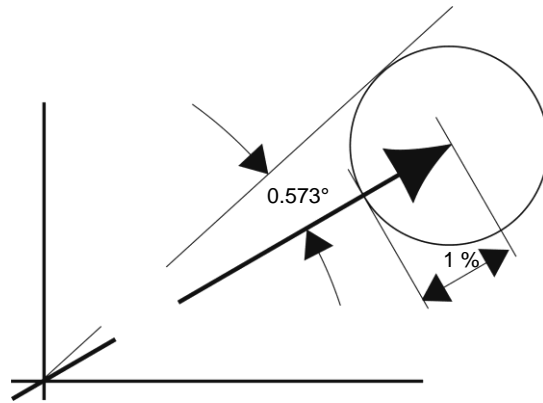
TVE将幅值误差和角度误差合并为了一个单一量。该误差准则允许将所有的误差源合并在一起，包括时间同步、相量角度和相量幅值估计误差。TVE由式 (9) 所定义。在合格性试验中，参考值是由规定的试验信号通过数学方法确定的，该试验信号由试验设备如实地产生并施加于PMU上。试验设备可以通过校准来确定参考值是否符合指定的10:1的测量不确定度比例的准则。图C.1展示了幅值误差和相位误差合并为综合矢量误差度量的原理。



图C.1 综合矢量误差

在图C.1中， X 是同步相量参考值，由实部 X_r 和虚部 X_i 表示。 \hat{X} 是同步相量估计值，由实部 \hat{X}_r 和虚部 \hat{X}_i 表示。

本文件为文中大部分性能试验的TVE值建立了1%的准则。这个1%准则可以被形象化为一个画在相量末端的小圆圈。当相位误差为0时，最大幅值误差为1%；当幅值误差为0时，最大角度误差为 0.573° 。如果观测到的采样值落在圆内，测量就是符合要求的。图C.2展示了这个圆，为了清晰起见，它的尺寸被极度夸大。



图C.2 显示在相量末端的 TVE 的 1%准则

C.3 TVE中的相位幅值关系和对时

综合矢量误差（TVE）结合了幅值误差和相位误差。TVE的值能通过下列公式由幅值和相位误差直接确定：

$$TVE = \sqrt{2(1 + ME) (1 - \cos(PE)) + ME^2} \dots\dots\dots (C.1)$$

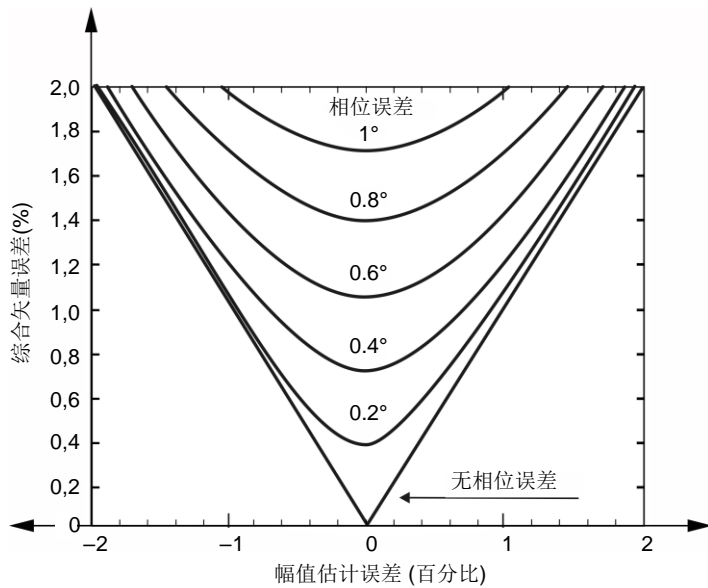
其中ME为幅值误差（单位是 pu）：

$$ME = \frac{\sqrt{\hat{X}_r(n)^2 + \hat{X}_i(n)^2} - \sqrt{X_r(n)^2 + X_i(n)^2}}{\sqrt{X_r(n)^2 + X_i(n)^2}} \dots\dots\dots (C.2)$$

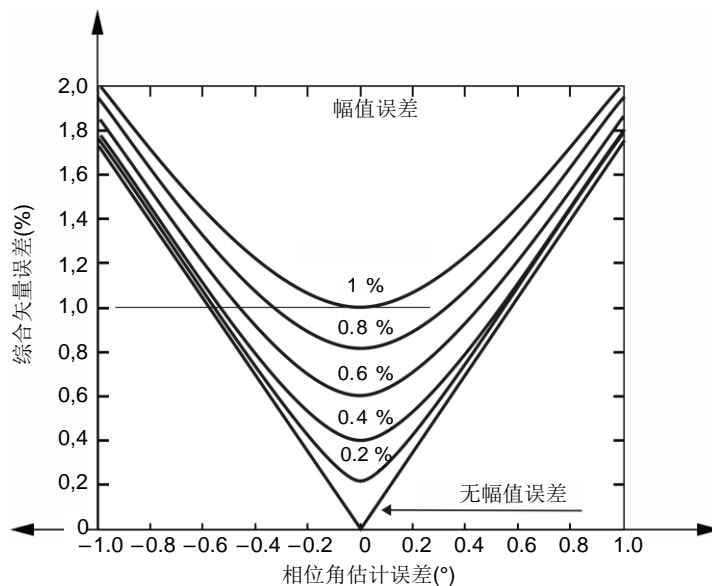
PE为相位误差（单位是度或弧度）：

$$PE = \text{atan}(\hat{X}_r, \hat{X}_i) - \text{atan}(X_r, X_i) \dots\dots\dots (C.3)$$

图C.3显示了当相位误差不同时，作为幅值的函数的TVE的变化曲线；图C.4显示了当幅值误差不同时，作为相位的函数的TVE的变化曲线。每个参数对另外一个参数都有着相同的抛物线状的影响，区别仅存在于TVE的截距值的不同。



图C.3 不同相位误差时，幅值的函数 TVE

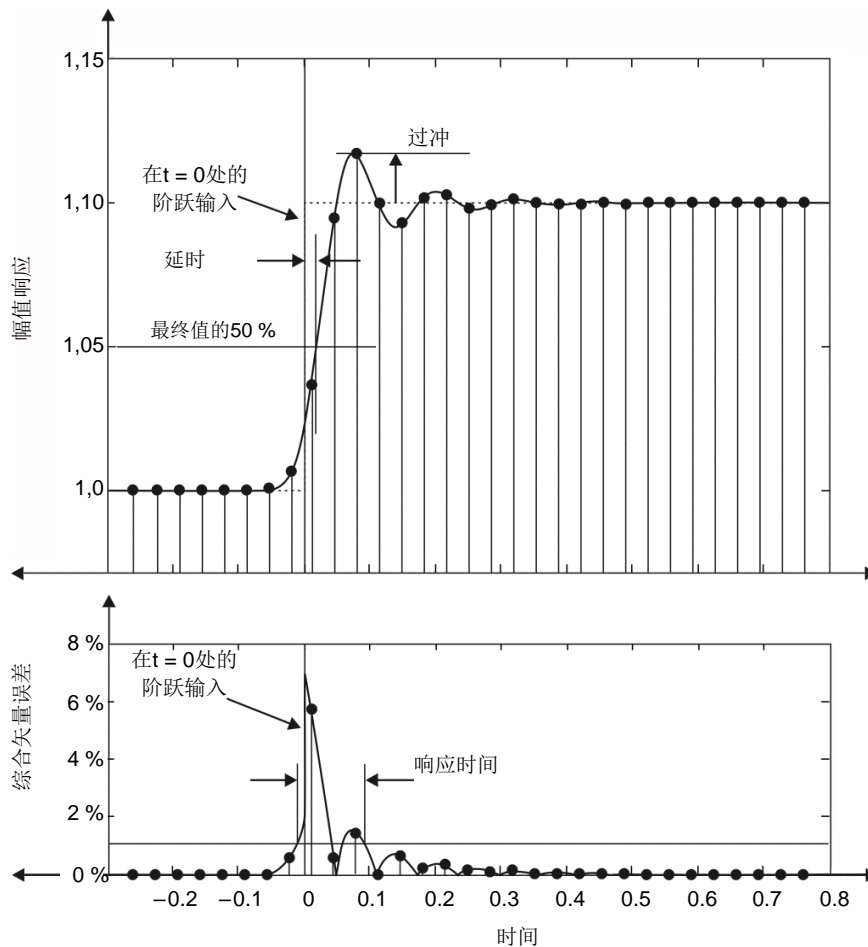


图C.4 不同幅值误差时，相位的函数 TVE

相位角由电力系统信号与取得时间同步的、频率为标称值的参考信号间的关系所决定。如果这个参考信号有了时间平移，电力系统信号的角度也将有相同的时间平移，从而在估计的相位角中产生了误差，所以定时误差可以直接转化为相位误差。TVE 的计算与在给定电力系统频率下的测量幅值和相位有关。因此，不同系统频率下的定时误差会导致TVE的不同。当系统频率为50 Hz时，一个周期为20 ms；当系统频率为60 Hz时，一个周期为16.67 ms。在50 Hz 频率下，相位角的1° 变化相当于时长55.6 μs；在60 Hz 频率下，相位角的1° 变化相当于时长46.3 μs。能够产生1% TVE 误差的定时误差（当幅值误差为0时），在50 Hz 频率下为±31.7 μs，在60 Hz 频率下为±26 μs。

C.4 对阶跃输入信号的响应评估

与PMU报告间隔相比，PMU响应时间和延时时间较小。标准规定的响应时间（表8中的P类）应小于3个报告间隔，而延时时间应小于1/4个报告间隔。由于报告的数据点正好落在规定的测量点上的概率很小，因此仅仅用单步试验来确定这些点是不够的。为达到这一结果，可以将一系列的阶跃试验点施加在与报告时刻相对不同的时间点上。这个“等效时间采样”方法可以实现所需的测量分辨率。实际上，这一技术移动了施加阶跃的时刻，从而得到了测量点来“填充”测量曲线。PMU测量报告位于与UTC时间秒相对固定的时间点上，因此通过移动报告间隔的一小部分，可以得到测量曲线上不同点的报告。将这些阶跃和响应的测量点返回到对应的参考点并进行组合，从而给出了时间分辨率小于报告间隔的阶跃响应结果。这一技术能控制单位阶跃函数 $f_1(t)$ 中的阶跃时刻 t 和报告时刻的关系。调整单位阶跃函数的阶跃时刻，使其正好对应报告时刻，进行一次阶跃试验。然后，进行一系列阶跃试验，每次单位阶跃函数的阶跃时刻正好对应报告时刻加上报告间隔的一小部分（该部分持续变长）。因此，如果 t_r 是常规报告时刻， T 是报告间隔， n 是被执行的试验数量，那么第一次试验可以用函数 $f_1(t_r)$ 来执行。下一次试验用 $f_1(t_r+T/n)$ ，再一次试验用 $f_1(t_r+2T/n)$ ，以此类推，直到第 n 次试验时，用函数 $f_1(t_r+(n-1)T/n)$ 来执行。将相同点上的阶跃对齐，将与阶跃时刻距离相同的测量点组合，交错呈现最终的测量点。这给出了一个时间分辨率为 T/n 的等效测量阶跃响应。一般来说，要精确测量PMU响应时间、延时时间和过冲百分比，可以取 $n=10$ （然而对低报告速率的情况，取 $n=10$ 时，测量结果可能只是中等准确度，因此，为了得到交错测量点，应使用更高的试验次数，例如 $n=20$ ）。为了确定这些测量点的边界，应在两个 F_s/n 测量点间采用线性插值法。上冲和下冲应在波形转变的两边测量。在同步相量阶跃试验案例中，波形是由被测PMU所报告的相量幅值或相位的序列，而过渡是在幅值或相位中的一个阶跃变化。



图C.5 利用在 $t=0$ 时的幅值阶跃来进行阶跃变化测量的例子

在图C.5中，报告值由在垂直线顶端的沿着波形的小圆点所表示。连续的响应时间线通过如上描述的等效时间采样来决定。响应延时时间等于测量值达到幅值或相位阶跃变化的50%处的时间。响应时间是从测量值的插值超出规定的准确度限值时刻起至其重新进入并保持在限值内的时刻止的时段。

图C.5对响应时间、延时时间和上冲的测量进行说明。响应时间由误差测量决定（这里指TVE的测量，但FE和RFE的测量做法类似）。延时时间和上冲由处于阶跃状态的参数曲线决定。最大过冲可能高于也可能低于最终值（对应正阶跃或负阶跃），而延时时间可能是正值也可能是负值（由于响应是基于估计的相量/频率/ROCOF的值，因此50%的响应时间可能会与实际阶跃输入的时间有一些不同）。

C.5 谐波畸变试验信号的相位

对于稳态试验中的输入信号，6.3中做了数学上的规定。三相输入信号以正序呈现。对于带外干扰信号试验，干扰信号也被规定为正序。然而，对于谐波畸变试验来说，谐波信号并非总是正序的。

对于谐波畸变试验，应使用三相平衡系统。随着注入谐波次数的变化，谐波相序将从正序到负序再到零序循环。换句话说，当每一相的基波电力信号在正方向上过零时，被注入的谐波信号也应在正向上过零。在此情况下，第2次谐波将会是负序的，第3次谐波将会是零序，而第4次谐波将会是正序。这个循环会如之前所述重复下去，第5次谐波又会是负序，以此类推，正如表C.1所示。

表C.1 三相平衡系统中的谐波相序

谐波	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
相序	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0
谐波	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
相序	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0
谐波	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
相序	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0
谐波	46	47	48	49	50										
相序	+	-	0	+	-										

C.6 ROCOF限值

C.6.1 概述

M类的RFE限值并不是为了谐波畸变试验和带外干扰信号试验而设立的。由于使用ROCOF测量的应用需求在本文件发布之时并未得到足够好的发展，因此不足以确保能够在这些试验中只设立关于ROCOF的有用的限值而没有在相量和频率测量方面的不合理的约束。为了最好地服务用户群体，本文件重点介绍相量和频率测量，它们的使用已经被很好地确立并且被广泛接受。然而对于那些正弦干扰信号，例如规定用于带外干扰信号试验和谐波试验的信号，FE限值也隐含着RFE的限值，C.6中探讨了这一关系。

如果在频率和ROCOF测量中不使用滤波，那么频率误差（FE）的限值也意味着ROCOF误差（RFE）的限值，如下式：

$$|RFE| = |FE| \times 2\pi \times |f_{int} - f_0| \dots\dots\dots (C.4)$$

式中：
 f_{int} ——干扰信号频率或其它别名；
 f_0 ——系统标称频率。

例如，对于 $f_0=50$ Hz的二次谐波（100 Hz），频率差（100-50）为50 Hz，产生的隐含限值为7.85 Hz/s。换句话说，由于100 Hz谐波的注入，一个处于FE限值上的带有0.025 Hz频率误差的PMU将产生7.85 Hz/s的ROCOF误差（RFE）。

再例如， $f_0=60$ Hz的20次谐波，其频率为1 200 Hz。如果按照附录D所述，以960 sps的速率对该谐波进行采样，其频率将被混叠到240 Hz（=1 200 - 960），在此情况下的频率差为180 Hz（240 - 60）。在频率误差为0.025 Hz时，由于此谐波的注入而导致的隐含RFE限值为28.3 Hz/s（ $180 \times 2\pi \times 0.025$ ）。

这个与FE和RFE限值相关的推论是基于在ROCOF计算中没有使用滤波的假设。滤波将会在ROCOF中产生额外的延时时间，它会使得测量量无法对齐，或者需要推迟报告测量量集合，或者需要单独报告ROCOF。基于如上所述的原因，本文件支持具有最小相位延时时间、时间上能够对齐的测量量集合，因此不考虑在ROCOF计算中使用滤波。

在为相量测量所指定的相同频率范围内，频率和ROCOF的测量应符合限值要求。然而，绝大部分频率和ROCOF的测量都能在一个更宽的频率范围内成功进行。鼓励供应商扩展它们的测量报告以覆盖最大的可行范围。

C.6.2 推导

正弦干扰信号（单一频率，低幅值的正弦波）可以用能够进行相量计算的余弦基波的（相等的）角度和幅值调制的组合来表示。

注：幅值调制会产生相位的和差边带，而窄带角度调制所产生的和差边带，一条为同相，一条为反相。当两种调制存在于相同的频率和幅值上时，反相分量会与同相分量互相抵消，因此只剩下了单边带，这与添加的单一频率信号所产生的频段相同。

正弦干扰信号表示如下：

$$X = A_F [1 + A_M \cos(\omega t)] \times \cos[\omega_0 t + A_a \cos(\omega t)] \dots \dots \dots (C.5)$$

式中：

ω —— 干扰信号频率；

ω_0 —— 系统标称频率。

A_M 是单频干扰信号的幅值。反相抵消需要的条件为 $A_b = A_M$ 。调幅对频率没有影响，因此将其忽略。因为频率是余弦幅角的导数（见4.4节），所以此调制信号的频率为：

$$f(t) = 1/2\pi[\omega_0 - \omega A_a \sin(\omega t)] = f_0 - f_M A_a \sin(\omega t) \dots \dots \dots (C.6)$$

调制信号的频率与标称频率（ f_0 ）相比，峰值偏差为：

$$\Delta F = f_M A_a \dots \dots \dots (C.7)$$

其中 ΔF 与 f_M 的单位相同，例如若 f_M 单位是Hz，那么 ΔF 的单位也是Hz。对调制信号的频率求导，得到如下ROCOF（见式C.8）：

$$\text{ROCOF}(t) = -f_M A_a 2\pi f_M \cos(\omega t) \dots \dots \dots (C.8)$$

带入式C.7，得到最大ROCOF误差：

$$\text{ROCOF} = 2\pi \times \Delta f \times f_M \dots \dots \dots (C.9)$$

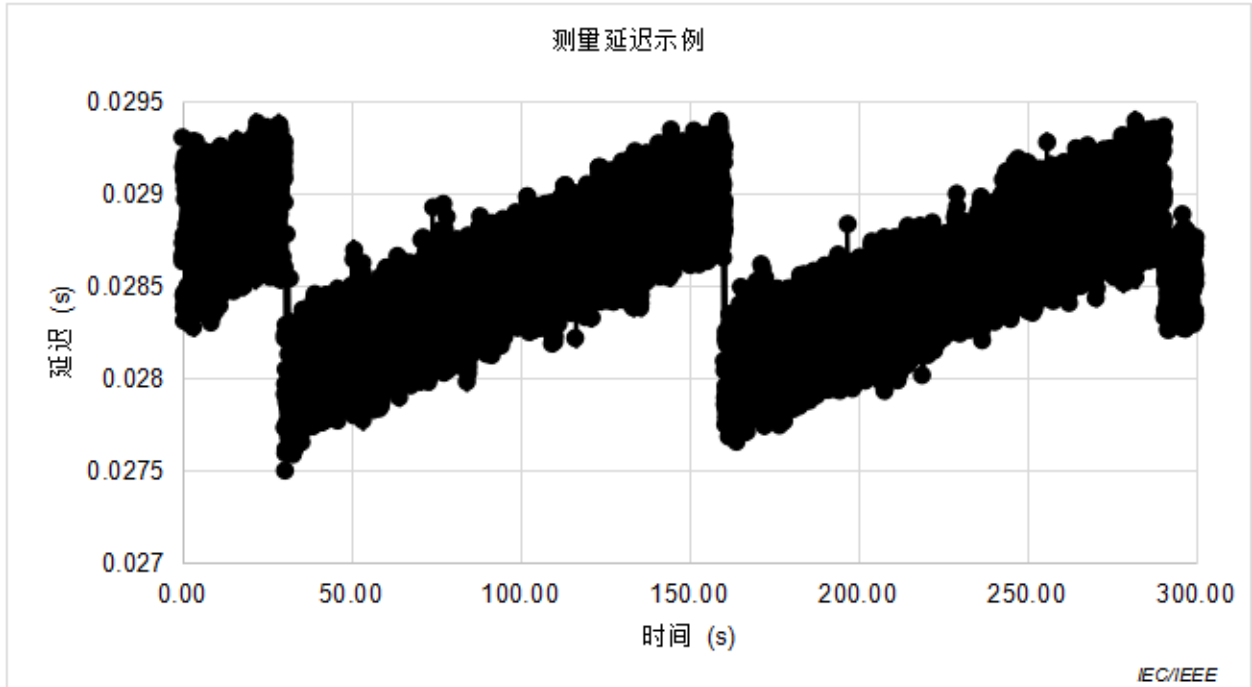
在此推导式中，调制频率 f_M 为系统频率 f_0 和（混叠的）干扰信号频率 f_{int} 二者间的差。此外，由于此处的ROCOF是干扰信号产生的不期望的结果（例如，ROCOF应该为0），因此 $RFE = \text{ROCOF}$ 。

C.7 PMU报告延迟

PMU报告延迟可以被认为从测量完成到PMU发送测量值的最大时间间隔。通过比较PMU报告中的时间戳与报告开始离开输出端口（见5.2.5和6.7节）的时间差值来评估此次延迟。直接测量报告离开PMU输出端的时间可能比较困难，然而它可以被间接测量出来，即测量直接连在被测PMU输出端的系统的输

入端的报文到达时间。在此配置下的端到端的传输时间是很小的，而且恰好在此试验所允许的2 ms不确定度的范围内。

在典型的PMU测量中，产生报告的时钟严格遵守UTC时间，但用于驱动报告通信系统的时钟往往不是严格遵守UTC时钟的。这一现象造成的影响是测量延迟很可能随时间漂移。由于此原因，测量延迟测试要求持续到能够确定它的最大值。



图C.6 PMU 报告延迟范例（实际的PMU测量）

图C.6是在300 s的时间区间内的PMU报告延迟测量的图表。测量以30/s的速率进行。图中宽的黑线条表明短时间内的变化大约为0.75 ms的峰—峰值。此外，在图中还可看出有一个总体的正漂移，大约每130 s进行重置。在每次重置之前所观测到的局部最大值即为用于报告延迟的值。图中这个例子有一个正向的漂移趋势，因此最大值出现在每次重置之前。当然还有一种可能的情况是在时间轴上有一个负向的漂移趋势，在这种情况下，最大值将恰好在每次重置之后出现。本文件要求至少20 min的观测时间窗口，用以确定测量延迟是否已达到局部最大值或者确定延迟是呈现向上的趋势还是向下的趋势。如果在前20 min内未能达到局部最大值，并且报告延迟呈现向上和向下的趋势，那么根据6.7的要求，试验应继续进行直达到达到局部最大值为止。

附录 D
(资料性附录)
参考信号处理模型

D.1 概述

本附录介绍了用于开发和验证本文件中性能要求的参考信号处理模型。该模型的引入只是出于知识介绍的目的，并不意味着是估计同步相量的唯一（或推荐）方法。介绍该模型的目的是在了解性能要求和确认其可实现性方面建立共识。

D.2包括了用于一般同步相量推导的参考模型。此模型与D.5和D.7中介绍的算法所对应的模型相同。

D.3探讨了PMU输出的时间补偿，因此相量，频率和ROCOF的估计与时间戳对齐。

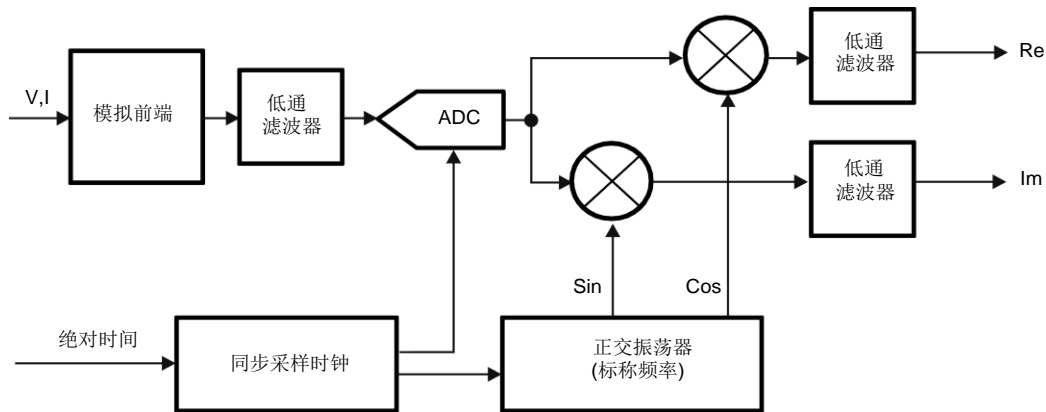
D.4描述了基于三个单相相量估计值估计出正序相量以及基于正序相量估计出频率和ROCOF的方法。

D.5、D.6和D.7描述了P类和M类参考模型，并包含了滤波器的详细描述。D.8探讨了一种使用滤波和抽取法来降低PMU数据速率（报告速率）的方法。

D.9描述了PMU设计人员需要考虑的折衷方案，这些折衷会影响噪声抗扰度、报告延迟以及相量，频率和ROCOF估计的时间匹配。本小节还讨论了与PMU响应时间相关的相量，频率和ROCOF估计的准确度和噪声抗扰度。

D.2 基本同步相量估计模型

图D.1显示了在PMU内执行的典型处理步骤。它假设固定频率采样与绝对时间参考同步，然后与标称频率载波复数相乘。其它实现方法如频率跟踪采样、频率跟踪载波或非线性估计等同样可行，并且是标准所允许的。根据算法和窗口的不同，此转换的输出可能以原始采样率或更低的速率进行。



图D.1 PMU 相量单相信号处理模型

假设电力信号的单相采样集合为 \$\{x_i\}\$，则在第 \$i\$ 个采样时间的同步相量估计 \$X(i)\$ 为：

$$X(i) = \frac{\sqrt{2}}{G} \times \sum_{k=-N/2}^{N/2} x_{(i+k)} \times W(k) \times \exp(-j(i+k)\Delta t\omega_0) \dots\dots\dots (D.1)$$

$$G = \sum_{k=-N/2}^{N/2} W(k) \dots\dots\dots (D.2)$$

式中：

- G ——增益;
- ω_0 ——角频率, $\omega_0=2\pi f_0$, f_0 是电力系统标称频率 (50 Hz或60 Hz);
- N ——FIR滤波器阶数 (滤波器抽头数量等于 $N + 1$);
- Δt ——采样间隔 (1/采样频率);
- x_i —— $t = i\Delta t$ 时刻的波形采样值, 其中 $t=0$ 时刻对应每1s的翻转时刻;
- $W_{(k)}$ ——低通滤波器系数 (取决于P或M类滤波器)。

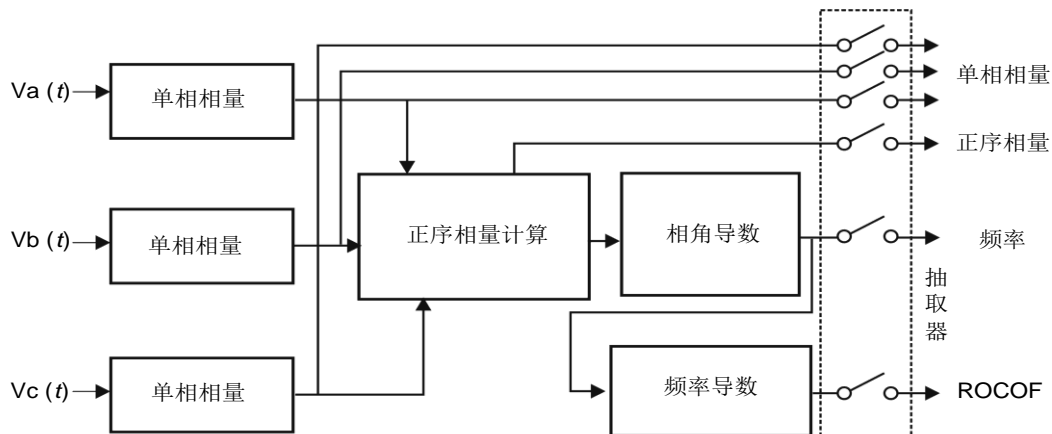
式D.1表示了了在图D.1中所示的复数解调和低通滤波过程。其中 $\exp(-j(i+k)\Delta t\omega_0)$ 为欧拉方程, 它包含了如图D.1所示的正交振荡器(正弦和余弦)与输入的乘法运算。如图D.1所示, 低通滤波器 ($W_{(k)}$) 可以单独应用于复数解调器的实部和虚部输出。

D.3 低通滤波器群延时时间的补偿

PMU输出的时间戳代表了具有等效相量、频率和ROCOF的电力系统信号施加于PMU 输入端口的时间。所有这些估计必须针对PMU处理延时时间进行补偿, 包括模拟量输入滤波、采样和估计群延时时间。如果采样时间标签都被补偿了所有的输入延时时间, 则只要滤波系数在整个滤波窗口上对称, 那么在估计窗正中间的样本的时标就可以被用来作为用于相量估计 (输出) 的时标。附录D中介绍的P类和M类算法都采用了这种群延时时间补偿方法。

P类和M类低通滤波器的滤波系数在下面的D.6和D.7中列出。FIR滤波器的滤波器阶数由滤波器中的元件数量决定, 该阶数为滤波器中的元件 (抽头) 数减一。例如, 使用16个样本/周期的1周期傅里叶滤波器的阶数是 $N=16-1=15$ 阶。附录D中提供的示例使用的都是阶数为偶数的滤波器 (抽头数为奇数)。最终的滤波器群延时时间为采样周期的整数倍, 即 $G_d=N/2 \times \Delta t$ 。

D.4 正序相量、频率和ROCOF



注：图中所示的所有处理均以模数转换器(ADC)采样速率进行；报告速率是通过在系统输出端重新采样(抽取阶段)产生的。

图D.2 完整的PMU信号处理模型

通过使用对称分量变换方式来计算图D.2所示的通常情况下的正序电压相量。随后根据正序相位角的变化率来计算频率[9]。由于相位角随实际频率与标称频率之间的差变化, 因此该方法得到的结果较标称值会有偏移。该频率估计法使用以PMU的波形采样率进行的内部估计的相位角 (不是PMU所报告的抽取后的相位角)。为了估计频率, 需使用两个相位角, 一个在估计点 (i) 之前, 一个在点 (i) 之后。可以通过频率估计算法得到第i个相位估计点的频率, 如式 (D.3) 所示:

$$\Delta F(i) = [\theta(i+1) - \theta(i-1)] / [4\pi \times \Delta t] \dots \dots \dots (D.3)$$

式中:

- $\theta(i)$ ——第*i*个正序相量估计 $X(i)$ 的角度;
- $\theta(i+1)$ ——第*i*个估计之后的下一个相量估计的角度;
- $\theta(i-1)$ ——前一个估计的角度。

当使用同样的角度估计时, ROCOF的估计可通过式(D.4)计算:

$$DF(i) = [\theta(i+1) + \theta(i-1) - 2\theta(i)] / [2\pi \times \Delta t^2] \dots \dots \dots (D.4)$$

第*i*个频率估计与第*i*个相量估计精确对应。实现的方法是通过等待下一个内部相量估计角 $\theta(i+1)$, 随后利用第*i*个相量的前一个角度和后一个角度来计算频率。当第*i*个相量, 频率和ROCOF一起报告时, 报告应延时时间直至下一个内部相量可用。此延时时间为一个内部采样周期(Δt), 该时间很短。还有很多其它的频率和ROCOF估计方法同样满足本文件的要求, 如二阶拟合或加权最小二乘法。但所有方法都需要折衷, 这将在D.9中讨论。像这样的简单有限差分方程使用广泛, 但同时也对噪声十分敏感。

D.5 相量的P类参考模型

此处介绍的P类相量估计算法使用固定长度的两周波三角加权FIR滤波器, 它不会因不同的PMU报告速率而变化。该参考算法使用16个样本/周期的采样率, 对于60 Hz系统, 采样率为 $60 \times 16 = 960$ 个样本/秒; 对于50 Hz系统, 采样率为 $50 \times 16 = 800$ 个样本/秒。该算法可以通过使用如图D.3所示的三角形窗口系数(滤波器阶数 $N = 2 \times (16-1) = 30$)来实现, 或者可以分两个阶段来实现, 第一阶段使用一个周期的傅里叶变换, 第二阶段在一个周期内进行均匀平均(级联箱式滤波器方法)。只要采样时间针对输入延时时间得到补偿, 那么位于窗口中心的时间戳将产生一个相量估计, 其相位随实际电力系统频率变化, 并且不需要进一步的相位或延时时间校正。但是, 对于非标称频率下基于频率估计得到的最终相量, 需要对其幅值进行校正。

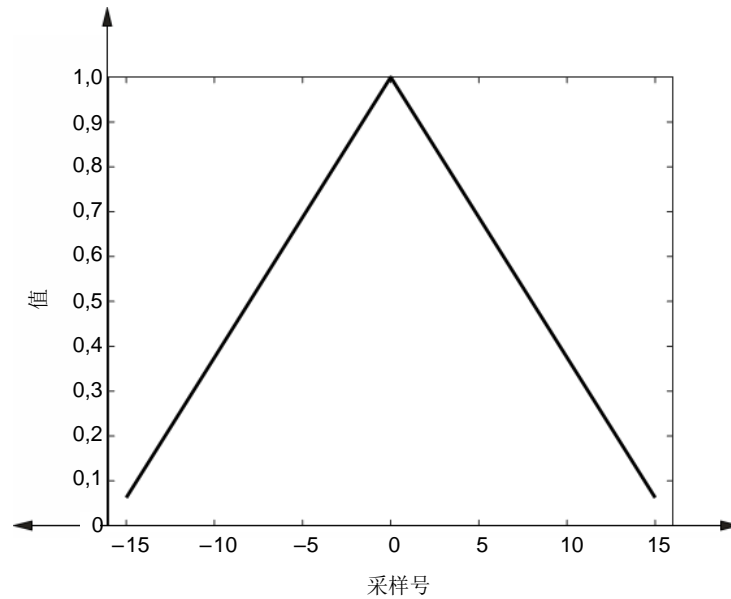
D.6 P类滤波器的详述

P类滤波器系数 $W(k)$ 定义为:

$$W(k) = \left(1 - \frac{2}{N+2} |k|\right) \dots \dots \dots (D.5)$$

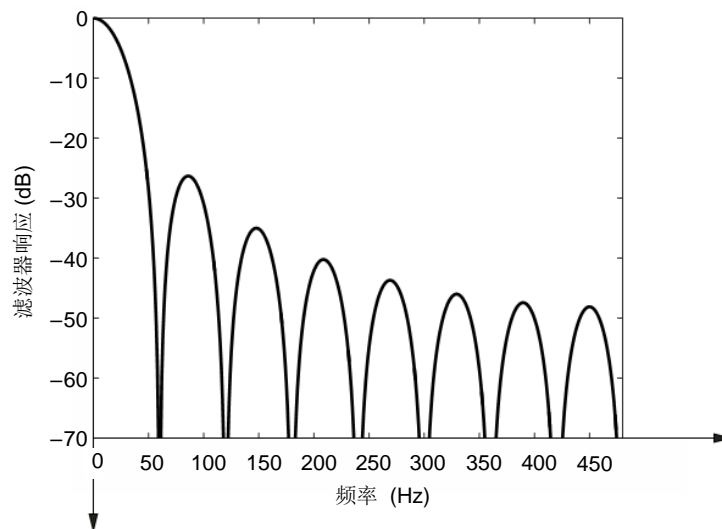
式中:

- k —— $-N/2$ 到 $N/2$ (只能为整数);
 - N —— 滤波器阶数(在每周期16次采样的采样频率的示例中, $N = (16-1) \times 2 = 30$)。
- 这些滤波器系数如图D.3所示。

图D.3 P类滤波器系数示例 ($N = 2 \times (16-1) = 30$)

在标称频率下，P类滤波器对于除了带外抑制的所有情况都是有效的。对于非标称频率，估计周期与信号的实际周期不匹配。相位估计是准确的，因为信号以估计值时标为中心。然而，幅值估计会滚降并且需要补偿。当信号变换匹配系统频率时，谐波抑制的效果非常好。当不匹配时，例如在非标称频率下，谐波就不能被完全抑制，这样会在频率和ROCOF估计过程中引起一些问题。

当实际信号频率偏离标称频率 f_0 时，相量幅值会发生滚降。结果为 $(\sin(x)/x)^2$ 的函数曲线，由图D.4中所示的2周波低通滤波器响应所决定。



注：示例中显示标称频率 $f_0 = 60$ Hz，采样频率 $f_{\text{sampling}} = 16 \times 60 = 960$ Hz，滤波器阶数 $N = 2 \times (16-1) = 30$ 。

图D.4 作为频率的函数的P类滤波器响应

在有限的频率范围内，可以通过将相量幅值除以测量频率处的P类滤波器响应来补偿该偏差。此算法可以通过利用窗口中心的估计来精确地计算在所有频率上的相位角。通过将幅值除以实际信号频率对应的正弦函数值来对幅值进行补偿。由于二周波三角窗口相比标准的单周波矩形窗口能产生更快的幅值滚降，因此频率偏差以1.625的额外因子扩展以增加补偿（该因子通过实验得出），如以下式所示：

$$\hat{X}(i) = \frac{X(i)}{\sin\left(\pi \frac{(f_0 + 1.625\Delta F(i))}{2f_0}\right)} \dots\dots\dots (D.6)$$

式中：

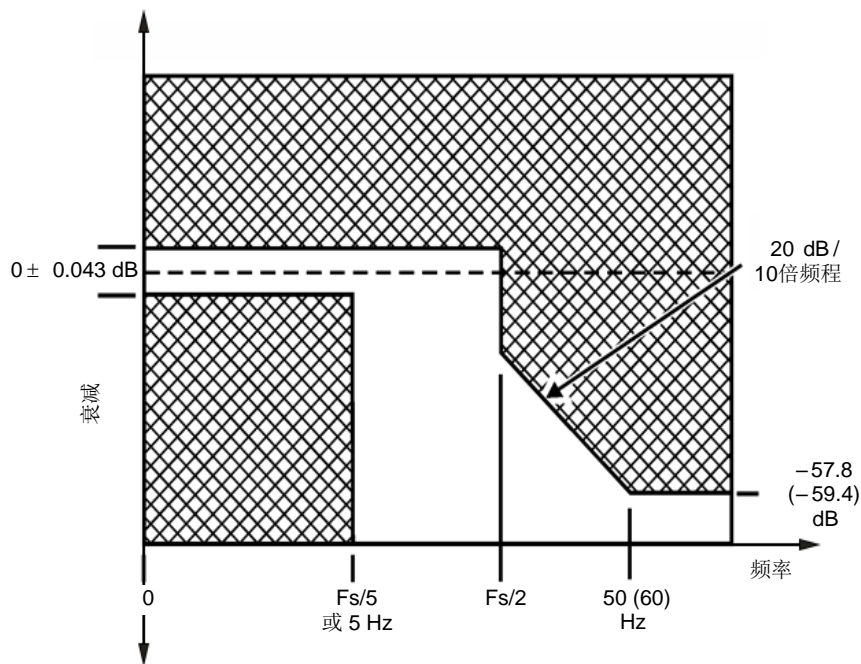
$\Delta F(i)$ ——在点*i*处计算的频率与标称频率的偏差。

式 (D.6)、(D.3) 和 (D.4) 分别用于P类模型中的同步相量、频率和ROCOF估计。

D.7 相量的M类参考模型

P类和M类模型之间的主要区别在于，对于既定的报告速率，M类模型对滤波有所要求，其目的是使高于奈奎斯特频率的信号能够得到显著衰减。该滤波将会导致更长的报告延时时间，但它也能降低混叠的可能性，并且在噪声和干扰信号存在的情况下，尤其是在稳态带外干扰信号试验中，它可以改善频率估计。由于对滤波有要求，因此M类模型可以产生更高的准确度，这一事实也反映在技术要求中。

M类模型对于带通和带阻滤波的要求如图D.5所示。该图是基于表2和表4中给出的M类模型的要求，图中的转折频率与报告速率相关。该掩模是用来作为设计参考滤波器时的掩模。有限冲激响应（FIR）滤波器用于实现线性相位响应。参考滤波器系数是通过使用众所周知的“砖墙”滤波器设计方法获得的，该方法基于与海明（Hamming）窗相乘的“sinc”函数 $\frac{\sin(x)}{x}$ 。为满足频率响应的要求，应对滤波器阶数（长度）进行调整。该模型假定正确实现了前端缩放、抗混叠滤波器、A/D转换器以及足够的采样率（在此示例中设置为960 Hz）。



注：频率响应曲线在非阴影区域内。

图D.5 M类的参考算法滤波器频率响应的图像掩模规定

对于图D.5，滤波器响应应保持在阴影区域之外。

通过式D.7可生成滤波器系数向量：

$$W(k) = \frac{\sin\left(2\pi \times \frac{2F_{fr}}{F_{sampling}} \times k\right)}{2\pi \times \frac{2F_{fr}}{F_{sampling}} \times k} h(k) \dots\dots\dots (D.7)$$

式中：

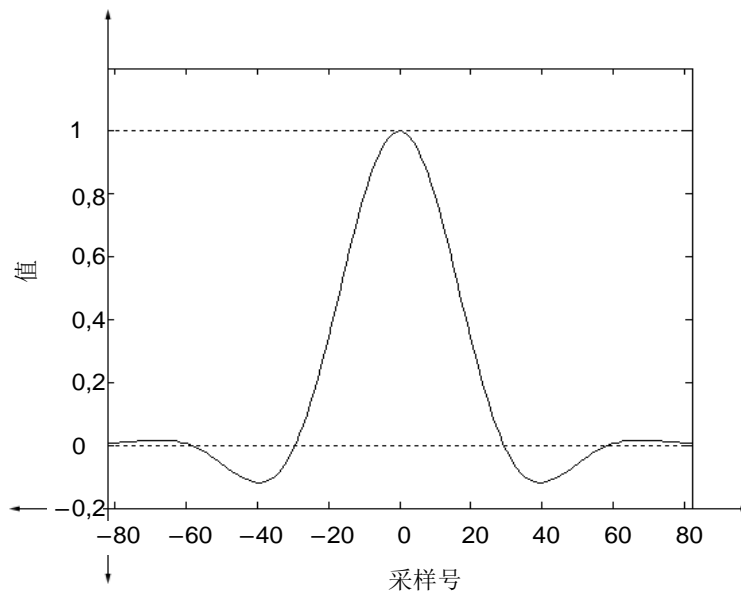
K —— $N/2$ 到 $N/2$ ；

F_{fr} ——来自表D.1的低通滤波器参考频率；

$F_{sampling}$ ——系统的采样频率（60 Hz参考模型的采样频率为960个样本/秒）；

$h(k)$ ——海明函数；

$W(0)$ —— 1（注意当 $k = 0$ 时， $W = 0/0$ ，这是不合理的，应该用1代替）。



注： $F_s = 60$ fps, $F_{sampling} = 960$ Hz, $N = 164$ 。

图D.6 M类滤波器系数示例

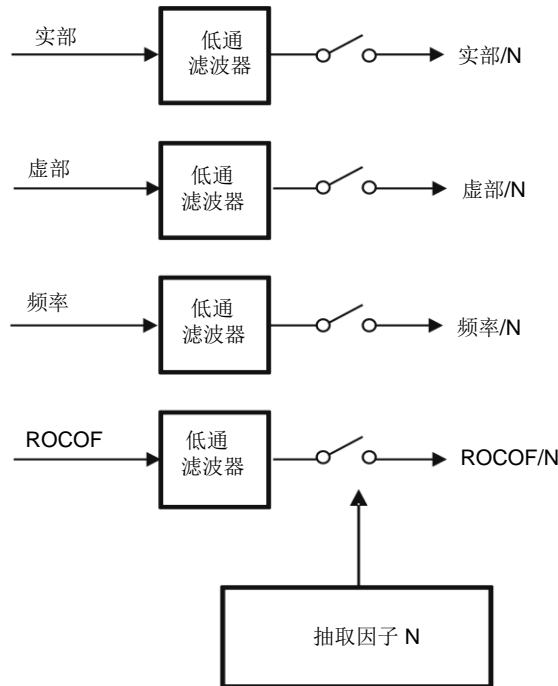
表D.1展示了用于生成滤波器系数的输入参数，滤波器系数用于验证本文件中的限值。这只是出于知识介绍的目的，并不表示是唯一（或推荐）的滤波器。

表D.1 M类低通滤波器参数

报告速率 F_s		滤波器参考频率 F_{fr} (Hz)	滤波阶数 N
50 Hz	10	1.779	806
	25	4.355	338
	50	7.75	142
	100	14.1	66
60 Hz	10	1.78	968
	12	2.125	816
	15	2.64	662
	20	3.50	502
	30	5.02	306
	60	8.19	164
	120	16.25	70

D.8 数据速率降低模型

图D.1 和图D.2 中所示的参考模型可用于直接生成表1（见5.3.2）中所示的任何输出速率。如果PMU在内部以高速率产生相量、频率和ROCOF并在输出端降低数据流，则可以使用类似的滤波器对M类输出进行进一步的抽取（获得更低的速率），如图D.7所示。当需要来自同一PMU的多速率输出时以及在使用相量数据集中器（PDC）的情况下，可以采取该方法。值得注意的是，本文件中针对M类滤波器所规定的带外抑制的要求同样适用于由PMU和PDC所产生的较低频率（抽取后）的同步相量数据流。因此，预计由PDC生成的抽取后的输出数据（较低速率）应与PMU生成的数据保持可比性（具有相同的动态行为）。相同的方法也可用于P类模型，但不需要额外的滤波。P类模型的数据减少可以通过简单的1/N重采样（例如，从每N个样本中取一个样本）来完成。



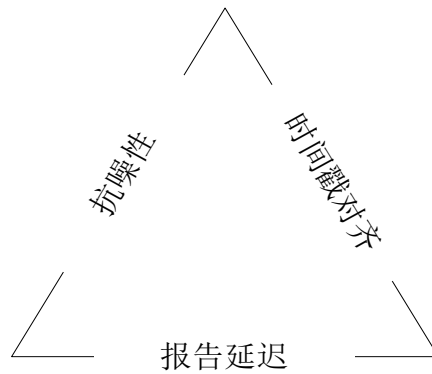
图D.7 数据速率降低信号处理模型

D.9 参考模型中的权衡

D.9.1 对非标称频率分量的抗扰性，报告延迟和时间对齐

PMU的设计者和用户需要考虑影响相量、频率和ROCOF估计的三个相互关联的因素。如图D.8所示，这三个因素是：

- 对噪声的抗扰性，如谐波、间谐波（带外干扰信号）或输入信号的调制；
- 相量，频率和ROCOF估计与相量估计的时间戳对齐；
- 报告延迟（完成估计并准备从PMU传输的时间）。



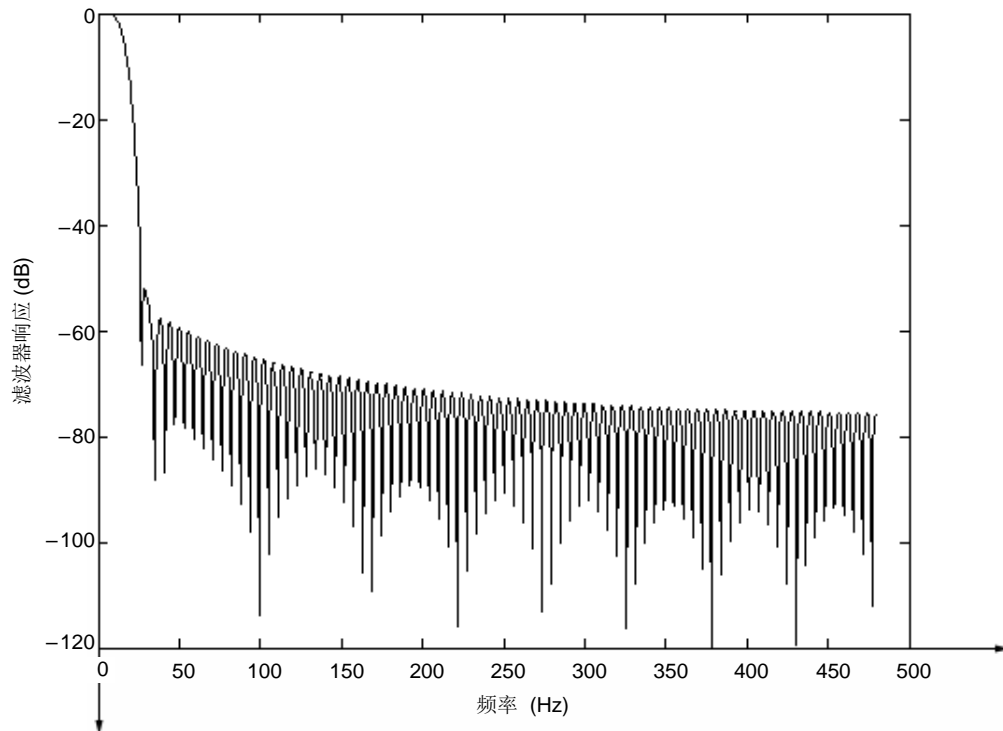
图D.8 影响估计的因素

PMU参考模型被设计为具有相对短的报告延迟以及在相量，频率和ROCOF估计之间具备良好的时间一致性。但良好的时间一致性和短延迟特性是以牺牲一些抗扰性为代价的，如图D.8所示。该模型旨在验证PMU性能限值，相对容易理解和实施，并为实际的PMU留出余地，不是为了说明理想的解决方案。

D.9.2 响应时间以及同步相量，频率和ROCOF的测量准确度

当信号中存在非基波分量时，同步相量，频率和ROCOF的测量准确度会直接受参考滤波增益和频率响应的影响。特别是对于超过奈奎斯特频率（所应用的报告速率值的一半）的频率分量，应该将其衰减。

图D.9显示了在报告速率 $F_s = 60$ fps，数据采样频率为960 Hz时的参考滤波器的增益/频率响应。从图中可看出，高于30 Hz的奈奎斯特频率时，衰减水平超过了50 dB。

图D.9 参考滤波器幅值频率响应，报告速率 $F_s = 60$ fps

假设电压信号为基频信号，并且附加了二次谐波分量。在应用了参考算法进行解调之后，二次谐波分量将转换为高于奈奎斯特频率的两个频率分量—60 Hz分量和180 Hz分量。二次谐波对同步相量、频率和ROCOF测量准确度的影响取决于参考滤波器在这两个特定分量上所能提供的衰减：衰减越高，测量准确度越高。同样的原理也适用于任何非基波分量。

模型参考滤波器可以被设计使其具有快速响应时间（ $F_s = 60$ fps时， 10° 相位阶跃响应时间为66 ms），同时具有良好的同步相量测量准确度。通过增加高于奈奎斯特频率部分的衰减水平，可以获得更好的频率和ROCOF测量准确度的数据，但这样做的代价是牺牲同步相量测量响应时间，使响应变慢。

附录 E

(资料性附录)

利用 PMU 的采样值输入进行同步相量测量

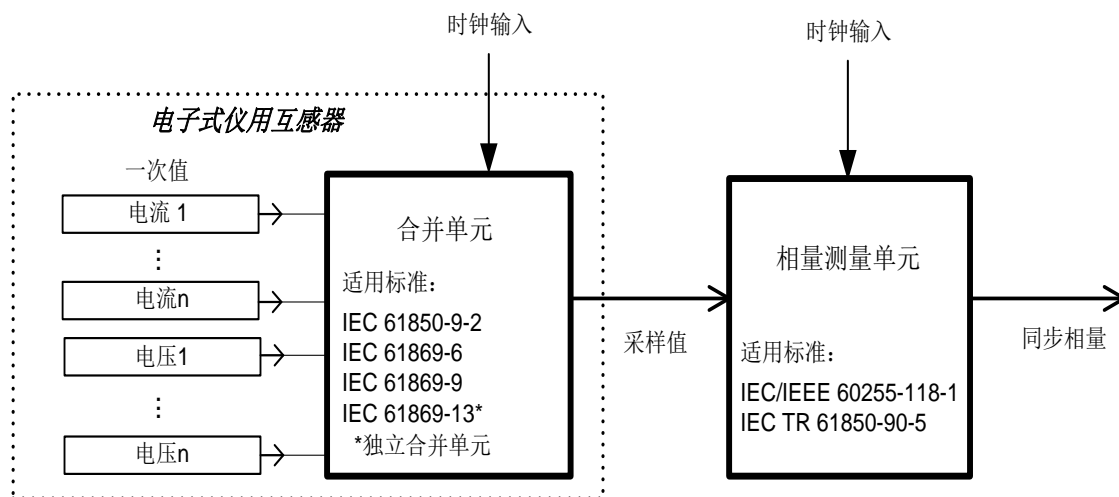
E.1 概述

通常，同步相量测量装置（PMU）通过互感器直接与交流模拟电力系统信号连接。然而，这并不是唯一的实现方式。PMU可以接收带时间戳的数字样本流，称为“采样值”（SV），来作为电力系统信号，其中模拟到数字的转换直接集成到电子式互感器（EIT）或“独立合并单元”（SAMU）中。这会导致不同的PMU输入要求以及本文件中对PMU性能要求的变更。附录E概述了这些变更对PMU性能的影响，并提出了需要在本文中进行的变更。

E.2 采样值的生成

有很多种方法以数字波形样本流的形式提供电力系统信号。采样方法的考虑因素包括采样率、采样分辨率、输入滤波、采样定时和噪声处理。为简化起见，假定相关标准所要求的限制都已经得到满足。

涉及采样值生成和分发的标准或技术报告有：IEC 61869-6[11]、IEC 61869-9[12]、IEC 61869-13[13]、IEC 61850-9-2[14]和IEC TR 61850-90-5[15]。电子式仪用互感器（EIT或SAMU）包含产生采样值所需的输入保护、滤波和A/D转换。在EIT或SAMU内部实现的逻辑设备和合并单元（MU）可以组合来自电压和电流EIT设备的样本，提供一个时间标签，并将处理将样本值发送给应用所需的通信。应用将样本用于各种任务，如故障定位、故障记录、继电保护以及同步相量估计。如图E.1所示。



图E.1 以采样值作为输入的同步相量

IEC 61869-9 规定的采样值具有以下特性（对于 60 Hz 系统）。

——值是具有固定比例系数的 32 位整数：

- 电压：1 LSB（最低有效位）为 10 mV；
- 电流：1 LSB（最低有效位）为 1 mA；
- 采样抖动 <math>< 4 \mu\text{s}</math>。

——测量值按比例缩放到电力系统一次侧。

——数据速率为每秒 4 800 或 14 400 个样本。

——SV 数据帧可能包含：

- 多个测量通道；
- 每帧 1 到 6 个连续样本。

在变电站应用中，SV 消息只包含一个亚秒级时间戳字段。合并单元（MU）的时钟输入通常只按几分之一秒提供采样绝对时间。为了完成同步相量所需的完整的世纪秒时间戳（SOC），需要给PMU提供时钟输入。从MU到PMU的延时时间必须小于400 ms，以确保正确地设置SOC。如果合并单元提供一个完整的时间戳，例如发送到变电站以外区域的SV（如IEC 61850-90-5所定义），则PMU可以在没有图E.1所示的本地“时钟输入”的情况下运行。另一种可能性是使用IEC 61850-9-2中定义的可选时间戳字段。允许使用带有完整SOC信息的可选时间戳，但可能并非所有SAMU都支持它，因为在IEC 61869-13中没有明确提及。强烈建议用于PMU的SAMU设备支持IEC 61850-9-2中定义的可选时间戳字段。

E.3 使用采样值时同步相量的误差来源

IEC标准中给出的采样值准确度规范包含了端到端的所有误差，即从互感器一次侧到数字端口输出带时间戳的信息全过程，包括时间同步系统带来的所有的误差。

具有模拟量输入的传统PMU的前端由输入保护元件、互感器或分流器、模拟量比例缩放和A/D转换器组成。PMU在这一部分出现的误差包括“静态误差”和“线性和噪声误差”。静态误差包括前端滤波器滚降、缩放比例误差以及模拟回路延时时间和A/D采样的延时时间。一般来说，静态误差主要影响TVE，是相位偏移和幅值误差的结果。线性和噪声误差包括来自电路元件的热噪声、A/D量化以及转换算法中的近似值。它们主要影响频率和ROCOF误差。

带外抑制和带宽要求主要是同步相量估计算法的一个函数，尽管“静态”误差的存在可能对估计性能提出了更严格的要求。

E.4 性能

E.4.1 概述

使用SV输入时，符合性试验只包括PMU的算法部分，因为前端已经移到EIT/SAMU。E.4.2 至E.4.4讨论了模拟和 A/D 前端、PMU 功能信号处理之间（现在为分开的）的误差分配。

E.4.2 稳态性能考虑因素

稳态条件包括恒定的幅值、相位角和频率以及不变的干扰。然而，当频率偏离标称值时，测得的相位角将以恒定速率变化。这些是6.3中所述的条件。

- a) 在标称幅值和频率下，仅用同步相量估计算法就应达到 $TVE \leq 0.01\%$ 。在标称频率下的转换算法非常精确，几乎没有误差。降低的要求基本上将“标称状态下”性能的责任转移到合并单元的标准，并包括所有固定或静态模拟误差（量值和相位，包括时间），这些误差如今控制着集成 PMU “标称状态下”的性能。
- b) PMU 信号幅值范围试验在标称频率下进行，幅值可低至 10%。鉴于 EIT/SAMU 报告的规定范围，这不应导致采样分辨率降低，因此 PMU 应具有与标称值相同的准确度。因此，这些试验的建议限值为 $TVE \leq 0.01\%$ 。
- c) 对于频率范围试验，“非标称”频率误差与 DSP 算法有关，与前端的增益和相位误差无关。因此，通过将前端误差移动到 MU，性能不会得到实质性的改善。在本文件中，0.5%的 TVE 分配给本试验中的前端误差。因此，频率范围试验的新限值应为 $TVE \leq 0.5\%$ 。
- d) 稳态条件下的频率和 ROCOF 准确度主要由噪声和带外信号决定。噪声的主要来源是前端，在这种情况下，前端移动到 EIT/SAMU，并有效地从试验中去除。但是，稳态试验是使用信号频率范

围试验进行的，由于算法的原因可能会产生误差，因此建议将这些限值降低到 0.5%（即减为二分之一）。

- e) 对于谐波畸变和带外干扰信号试验，由于性能主要由同步相量估计算法决定，而同步相量估计算法不会随着前端的不同而改变，因此建议保持现有的限值。
- f) 建议 PMU 制造商申明所要求的 EIT/SAMU 归一化信噪比与工作信号电平的关系，以满足本文件正文中规定的频率误差（FE）和频率误差变化率（RFE）的要求。有关合并单元信噪比规范的更多详细信息，请参见 IEC 61869-6。

E.4.3 动态性能考虑因素

动态条件是幅值、相位角、频率或ROCOF发生变化。这些是6.4、6.5和6.6中所述的条件。

- a) 同步相量动态性能特性主要由同步相量算法决定，而不是 A/D 性能。例如，滤波器决定阶跃变化的响应时间以及上冲/下冲和稳定时间。因此，不宜改变动态相量响应要求。
- b) 同样，动态频率和 ROCOF 响应也主要由计算算法控制。这两者都受到噪声的影响，传统 PMU 的动态信号要求中已经考虑了噪声的影响。这种差异不大，因此不建议更改性能需求。

E.4.4 延迟

延迟是指从测量时间开始到应用接收到测量结果的时间。PMU报告延迟在6.7和C.7中进行了描述。

- a) 延迟几乎完全由以太网网络延时时间和 PMU 的性能控制。对于性能试验，建议将 6.7 中定义的延迟余量增加 2 ms，以覆盖最大 EIT/SAMU/MU 延迟。
- b) EIT/SAMU/MU 中的延时时间不应超过 IEC 61869-9 中定义的限值 2 ms，因为这将增加整个 PMU 系统延迟。

E.5 性能要求的建议变更

表E.1 建议性能要求变更汇总表

要求	TVE	FE	RFE	说明
6.3 稳态幅值和频率范围	标称频率下，为 0.01% （包括幅值范围试验） 全频率范围下，为 0.5 %	降低到 FE = 0.5 %	降低到 FE = 0.5 %	对于 FE 和 RFE，PMU 制造商宜声明使 PMU 符合要求所需的最大信噪比
6.3 稳态 TVE、谐波和带外	没有变化	没有变化	没有变化	
6.4、6.5、6.6 带宽、斜坡、阶跃	没有变化	没有变化	没有变化	误差主要是由于 PMU 的 DSP 特性，和其它误差来源相比，这个特性占绝对主导地位
6.7 延迟	裕度增加 2 ms	裕度增加 2 ms	裕度增加 2 ms	

附录 F

(资料性附录)

环境影响下 PMU 评估试验子集 (建议)

在多种环境影响下,对PMU的所有功能进行完整试验将是极其繁重的工作。基于对各种PMU要求如何受环境影响的理解而选择的试验子集更合适。

在进行PMU功能试验中,建议对环境影响条件进行以下试验子集:

标称频率和标称幅值下的稳态,在最低额定温度和最高额定温度下,温度跨度适宜。

$F_s=f_0$ (50 Hz或60 Hz), 100%额定幅值,在最低和最高温度下进行以下试验:

——幅值范围, 10%和 120%或 200% (仅限终点);

——双向频率斜坡试验;

——相位调制试验, $f_{mod} = 5$ Hz;

——延迟试验。

使用M类响应,以设备的最大报告速率进行试验,除非设备仅提供P类响应才可使用P类。

对于所有其它环境影响量,被试设备/试验系统宜配置为在参考条件下测量稳态TVE: $F_s = f_0 = 50$ 或60 Hz, 100%额定幅值, M类, 最大报告速率。

该子集是基于这样的观察:第6章中的其它试验主要受数字信号处理(DSP)特性的影响,不会受到环境方面任何程度的显著影响,以至于环境方面的影响不能被上面列出的试验所揭示。

该试验子集基于以下观察:第6章中的其它试验主要受数字信号处理(DSP)的影响,且不应受到环境影响的显著影响,且在任何程度上,都不能被上述试验所显示。

附 录 G
(规范性附录)
稳态 PMU 准确度扩展规范

G.1 概述

PMU可获得比第6章要求更高的准确度或更宽的范围测量能力的认证。本附录G提供了在稳态条件下规定和证明PMU准确度的方法，比第6章要求的更详细。这些方法包括：

- 除 TVE 外，单独对幅值和相位准确度的规定；
- 比 1%TVE 规则要求更高的准确度测量规定；
- 对不同的输入信号幅值范围的准确度规定，尤其是超过 PMU 连续热额定值的短期电流；
- 对改进的频率测量准确度的规定。

满足第6章和第7章中基本总体要求的任何PMU都可以使用本附录的方法进行认证。

G.2 适用条件

应在表G.1指定的试验条件下，对根据附录G要求进行扩展准确度认证的PMU进行试验。该测量能力试验应建立在单个输入的基础上；不同的输入不要求具有相同的扩展测量能力。除非另有说明，否则应使用6.2和6.3中的参考试验条件。未有意引入谐波或带外信号。

表G.1 扩展准确度试验条件

增强型测量	条件	范围
输入电压	标称频率	供应商声明的电压范围
输入电流	标称频率	供应商声明的电流范围
输入信号频率	标称电压（或电流）	标称频率，或由供应商声明

注1：在某些情况下，根据第6章进行的认证试验包括可用于根据表G.1扩展准确度认证的试验点。根据指定的条件，这可以是一个单点（例如，一个标称频率的电压），也可以是一个宽范围。

如果电压和（或）电流超出第6章指定的幅值范围，则需要额外的试验以证明符合性。

注2：当频率和幅值都规定了扩展范围时，6.2详细说明了如何分别试验这些参数。试验点的数量取决于指定的范围，并应遵循IEEE同步相量测量成套试验规范[10]中给出的示例。

G.3 准确度规范

准确度应描述为指定条件下允许的最大TVE，并可选择单独的幅值和相位误差。也允许扩展频率测量准确度规范。

准确度应按如下方式表示（粗体部分为强调内容）：

字母“A”和在规定的测量条件下的TVE（以百分比表示）。

括号中的百分比内容为可按如下方式表示：

- 字母“Am”和一个表示幅值准确度的数字（以百分比表示）；
- 字母“Ph”和一个表示相位准确度的数字（以度为单位）。

频率测量的准确度可选择用如下方式表示：

字母“F”和一个表示频率准确度的数字（以赫兹为单位）。

此方法的使用示例如下，并带有含义描述：

- A0.1 - 在指定条件下的最大误差为 0.1% 的 TVE；
- A1.0 (Am1 Ph0.1) - 最大误差为 1% 的 TVE、1% 的幅值和 0.1° 的相位；
- F0.0005 - 频率误差最大为 0.0005 Hz（通常在电压信号中规定）。

G.4 使用示例

规范提高的准确度时，应带上电压、电流、频率、测量等级和报告速率的相应选择，以及“稳态条件下”的标注。例如（粗体用于强调而非必需）：

M类, 60 Hz, $F_s = 30$; 稳态条件下

(69 V) (± 0.5 Hz) - A0.1, F0.0005

(0.1-20 A) - A0.25 (Am0.2 Ph0.01)

P类, 50 Hz, $F_s = 50$; 稳态条件下

(90-110V和180-220V) - A0.02 (Am0.02Ph0.01)

注：在这种情况下，没有规定电流准确度。可能该PMU没有测量电流；或者该PMU也测量电流，电流准确度符合供应商在其它地方规定的P类或M类的标准要求。

再举个更复杂的例子，对于一个规格为69 V, 5 A且带有20倍额定电流测量范围的PMU：

M类, 60 Hz, $F_s = 60$; 稳态条件下

(69V) - A0.02

(0.02-20A) - A0.02 (Am0.02 Ph0.01)

(20-50A) - A0.05 (Am0.05 Ph0.01)

(50-100A) - A0.2 (Am0.2 Ph0.02)

G.5 首选准确度范围

首选准确度范围按1:2:5递进；即，范围值是 $A \times 10^y$ ，其中A是1或2或5，y是整数。例如，范围可以是0.01-5.0或0.02-10.0。不鼓励使用其它范围限值，但也不禁止使用。

G.6 试验问题

G.6.1 提高准确度的试验

用于试验PMU的标准系统可能无法提供符合附录G要求的评估所需的准确度，尤其是在更高准确度等级下。对于此种情况，可能需要额外的专用设备。试验机构应在签订合同之前评估所需的能力以及是否具备必要的设备，从而根据附录G的要求进行一致性试验。对于任何准确度等级，试验系统应至少具有4:1的试验不确定度比（TUR）。例如，对于A0.1级别，试验系统应至少具有0.025%²⁾ TVE的试验不确定度比。

G.6.2 电流超过连续热额定值时的试验

在电流大于标称值时试验PMU应考虑PMU的短期热输入电流额定值。因此，这些试验通常需要使用短期的高电流激励来试验PMU，通常持续一秒钟或更短时间。这些试验在许多方面与斜坡试验相似，因为它们包括受电流阶跃干扰的结果区间。因此，在评估PMU输出数据时，应在激励的开始和结束时提供排除的区间。斜坡试验所指定的排除区间（P类为2个周期，M类为7个报告间隔）是合适的，前提是试验源

2) 采标注：“0.025%”，原文误为“0.04%”。

能够在不超过一个周期的一小部分的间隔内改变试验电流水平。如果试验源稳定时间长于此，则还应考虑其稳定时间（例如，通过将排除区间延长与源稳定时间相等的量）。

试验设备，例如设计用于试验保护继电器的设备，通常能够为此类试验提供所需的电流和持续时间，但它们可能无法提供所需的准确度。可能需要额外的专用设备。试验机构应在签订合同之前评估所需的能力以及是否具备必要的设备，以便根据附录G的要求进行一致性试验。

G.6.3 环境因素

虽然本文件未规定环境要求，但许多PMU功能在设备中实现，这些设备确实规定了符合环境标准。必须仔细考虑是否宜在一系列环境影响条件（特别是温度）下或仅在标称（实验室）条件下进行试验。更高准确度水平上的性能可能会受到温度及其他环境条件的影响，这取决于PMU装置的设计。

附录 H

(资料性附录)

发电机电压和发电机功角测量³⁾

H.1 概述

电力系统动态性能相关信号的实时同步采集,为电力系统的广域动态监测、控制和保护提供了依据。电压、电流同步相量估计是跟踪电力系统动态性能所需的一组重要信号。但是,还有许多其它相关的信号,包括同步电机的转角、功角和转速。

尽管这些其它信号的采集超出了本文件的范围,但本附录旨在说明相量测量可与其它测量技术结合使用的方法,以供电力系统同步相量测量在未来的研究。

H.2 测量方法

发电机功角的测量可采用以下两种方法之一。也可使用其它方法。

- a) 电气计算方法:发电机的内电势和发电机功角可根据直轴电抗 X_d 、交轴电抗 X_q 以及代表机端电压和电流的实时 PMU 或 SCADA 数据测量得出。由于 X_d 和 X_q 的值可能随发电机运行条件的不同而变化,这种计算方法可能会产生误差。
- b) 转子位置测量方法:发电机的内电势角和发电机功角可根据转子位置和机端电压角进行校准。该方法准确度较高,可适用于电力系统受干扰时发电机功角的实时测量。因此,转子位置测量方法是测量发电机功角和频率的有效方法。

H.3 输入信号

对于内电势和发电机功角的测量,PMU的输入信号包括发电机的机端电压和电流,以及代表转子位置的信号,所有这些信号都基于同一个时间基准。

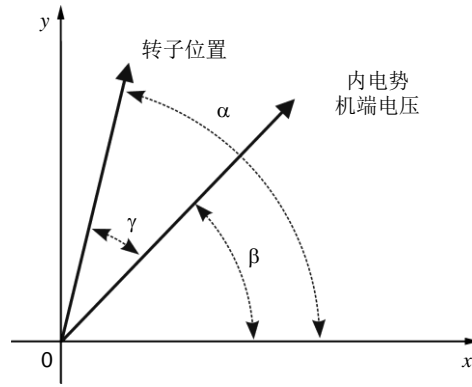
H.4 测量过程

发电机的转子位置可通过光学方法或电磁学方法进行监测。在光学测量方法中,可以使用某种轴编码器。在电磁学方法中,在转子上的任意位置加上一个专用槽,在定子上加一个传感器,就可以产生周期性脉冲信号。通过比较转子位置信号和参考时间信号,可以计算出发电机的转子位置角(α)。当发电机空载运行时,发电机的功角为零,转子位置信号与内电势角之间的任何偏移量可按如下方式进行校准。

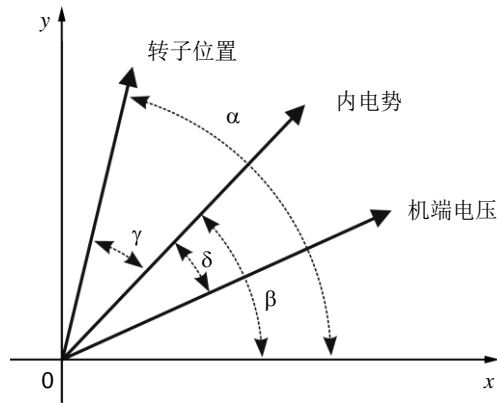
在空载条件下,发电机机端电压角与发电机内电势角相同。图H.1中,相对于参考时间信号进行测量,机端电压在空载下的相角用角度 β 表示。转子位置用角度 α 表示,它取决于轴编码器的位置或发电机转子上的槽。可以得到角 α 和 β 之间的角偏移量(γ)。这个角度 γ 保持不变,除非物理机器中的某些东西被改变;例如,线圈组件在维护期间被重建。

当机器带载时,角度 γ 不会改变。因此,当发电机运行时,内电势的角度可以从已知的转子角度和校准偏移 γ 计算出来。如图H.2,电压角 β 由 α (可观察到)减去 γ 得到。发电机功角 δ 由内电势角 β 与发电机端电压之差给出,如图H.2所示。

3) 附件 H 的概念和原理由中华人民共和国标准化委员会 WAMS 和 SJTB 工作组 SAC 82 提供,北京,中国。[16]



图H.1 空载时的相量图



图H.2 发电机带载相量图

附 录 I
(规范性附录)
PMU 带宽级别扩展

1.1 概述

附录I建立了一个验证PMU在比6.4要求更宽的带宽下运行时的性能的流程。附录I.2至I.4详细说明了要求、试验和文档。如果PMU要通过扩展带宽认证，则试验和标注应符合附录 I 的要求。

测量带宽由6.4中规定的测量带宽试验确定。在这个试验中，幅值或相位调制为10%的标称值，TVE与3%的限值进行比较。对于10%的调制，3% TVE表示3 dB的信号衰减。在本文件正文中，M类试验只需运行到 $f_s/5$ 和5 Hz两者中的较大值，P类试验只需运行到 $f_s/10$ 和2 Hz两者中的较大值。这只能证明PMU带宽满足这些最低要求，但不能确定实际带宽。

1.2 带宽确定

应使用6.4中规定的信号对PMU进行试验。试验条件见表I.1。

表I.1 扩展带宽试验的条件

条件	范围
幅值调制水平	$k_x = 0.1, k_a = 0$
相位调制水平	$k_x = 0, k_a = 0.1$
参考条件	标称频率，100%额定信号幅值

这些调制试验应在调制频率 f_m 从0.1 Hz或更低的频率开始进行，以0.2 Hz或更小的步长下逐步增加，直到TVE最大值达到0.03（3%），调制水平和参考条件如表I.1所规定。TVE最大值应为至少5 s内或两个完整调制周期（以两者中的较长者为准）内测得的最大值。带宽是TVE保持在3%以下的最高调制频率。报告的带宽是由幅值和相位调制试验所确定的带宽中较小的一个。

1.3 增强型带宽级别

准确度等级应规定为幅值和相位带宽频率的最小值。用TVE表示如下（以粗体表示强调）。

字母“**BW**”和调制频率（单位：Hz），在规定的测量条件下。

本规范的法示例与规范说明如下所示。

BW11.8 - 调制频率为11.8 Hz的条件下进行幅值和相位调制，TVE值小于等于3%，测量带宽确定为11.8 Hz。

1.4 试验问题

PMU的标准试验系统可能无法提供评估是否符合可选类别所需的准确度，特别是在较高准确度等级下。可能需要额外的专用设备。在根据性能类别提供一致性试验之前，试验设备应评估所需的能力以及

是否能够接触到必要的设备。对于任何准确度等级，试验系统宜至少具有4:1的试验不确定度比(TUR)。对于这些试验，3%的TVE要求试验系统至少具有0.75%⁴⁾的TVE TUR。

4) 采标注：“0.75%”，原文误为“0.3%”。

参 考 文 献

- [1] IEEE Std 1588™, IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Network Measurement and Control System
- [2] IRIG STANDARD 200-04, IRIG Serial Time Code Formats 4
- [3] IEEE Std 1344™, IEEE Standard for Synchrophasors for Power Systems
- [4] IEEE Std C37.118.1™, IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems
- [5] IEEE Draft Std PC37.237™, Draft IEEE Standard for Requirements for Time Tags Created by Intelligent Electronic Devices
- [6] IEC/IEEE 61850-9-3, Communication networks and systems for power utility automation - Part 9-3: Precision time protocol profile for power utility automation
- [7] IEEE Std C37.238™, IEEE Standard Profile for Use of IEEE 1588 Precision Time Protocol in Power System Applications
- [8] IEEE Std 1012™, IEEE Standard for Software Verification and Validation
- [9] B.Boashash, "Estimating and Interpreting The Instantaneous Frequency of a Signal - Part 1: Fundamentals," Proceedings of the IEEE, Vol. 80, No. 4, pp. 520-538, April 1992
- [10] IEEE Synchrophasor Measurement Test Suite Specification, Version 2, 2015, <http://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=7274476>
- [11] IEC 61869-6, Instrument transformers - Part 6: Additional general requirements for low-power instrument transformers
- [12] IEC 61869-9, Instrument transformers - Part 9: Digital interface for instrument transformers
- [13] IEC 61869-13, Instrument transformers - Part 13: Standalone merging unit 5
- [14] IEC 61850-9-2, Communication networks and systems for power utility automation - Part 9-2: Specific communication service mapping (SCSM) - Sampled values over ISO/IEC 8802-3
- [15] IEC TR 61850-90-5, Communication networks and systems for power utility automation - Part 90-5: Use of IEC 61850 to transmit synchrophasor information according to IEEE C37.118
- [16] Synchrophasor Measurement Standard, WAMS & Time Synchronization Working Group of SAC 82, China (PRC), 2010
- [17] Brigham, E. O. The Fast Fourier Transform, Inc., New York, Prentice Hall, 1974
- [18] IEC 61850-3, Communication networks and systems for power utility automation - Part 3: General requirements
- [19] IEEE Std 115™, IEEE Guide for Test Procedures for Synchronous Machines; Part I: Acceptance and Performance Testing; Part II: Test Procedures and Parameter Determination for Dynamic Analysis
- [20] IEEE Std 1613™, IEEE Standard for Environmental Testing Requirements for Communications Networking Devices Installed in Electric Power Substations
- [21] IEEE Std C37.111™, IEEE Standard Common Format for Transient Data Exchange (COMTRADE) for Power Systems
- [22] IEEE Std C37.118™-2005, IEEE Standard for Synchrophasors for Power Systems
- [23] IEEE Std C37.118.1a™-2014, IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems - Amendment 1: Modification of Selected Performance Requirements

[24] IEEE Std C37.118.2™, IEEE Standard for Synchrophasor Data Transfer for PowerSystem

[25] IEEE Std C57.13™, IEEE Standard Requirements for Instrument Transformers

[26] Wicker, S. B. ERROR CONTROL SYSTEMS for Digital Communications and Storage, Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1995

[27] IEEE Std 181™, IEEE Standard for Transitions, Pulses, and Related Waveforms
