

第2章

设备运行对电网供电质量的影响和测量方法

钱振宇

2.1 问题提出

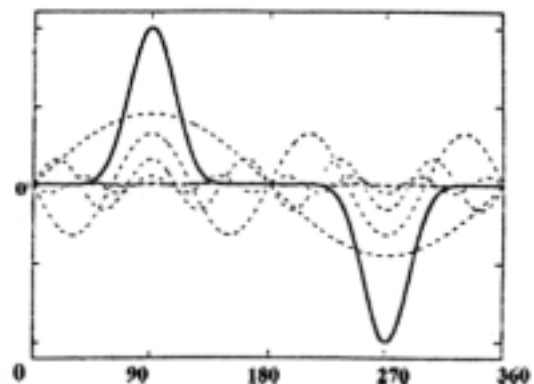
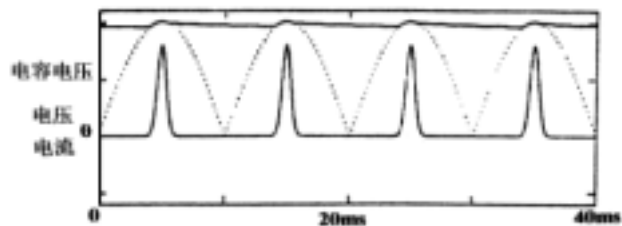
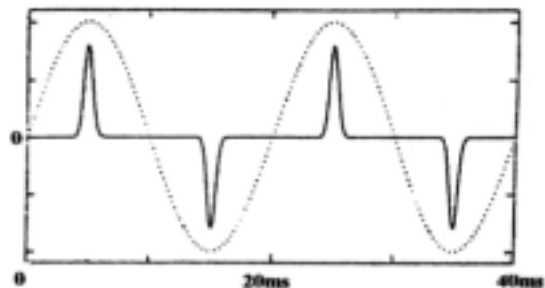
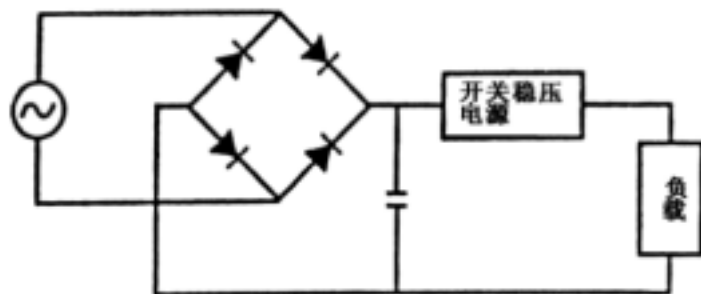
开关电源和可控硅器件的大量应用，一方面提高了人们对电能的利用效率；另一方面，非线性电能转换又在电网中引入了大量谐波电流。它不仅使同一电网中其他用电设备受到干扰、产生故障，还会使电网的中线电流超载，影响输电能力。此外，对电源的通断或相位控制，会引起电流有效值的变化，可导致负载侧的有效值电压产生波动，引起照明灯具产生闪烁，产生视觉不适，甚至诱导产生精神方面的疾病。

作为对电网质量的控制及维护人体健康，我国相继出版了两个标准：GB17625.1《电磁兼容 限值 低压电气及电子设备发出的谐波电流限值（设备每相输入电流 16A）》及GB17625.2《电磁兼容 限值 对额定电流不大于16A的设备在低压供电系统中产生的电压波动和闪烁的限值》（此两标准分别等同于IEC61000-3-2和IEC61000-3-3）。从标准号看，均为强制性标准，特别是在我国开展的强制性产品认证中，有相当一部分电气和电子产品需要进行谐波电流的发射测试，所以值得各相关企业特别注意。

2.2 谐波电流的测量

2.2.1 谐波电流的产生

所有非线性负载都能产生谐波电流，尤其是开关电源、电子镇流器、调速装置、不间断电源和铁磁性设备等。下图是开关电源产生谐波电流的例子。



任何非正弦的周期性波都可以用富里叶级数展开：

$$f(t) = F_0 + \sum_{n=1} H_n \sin(n\omega t + \phi_n)$$

表示为对直流成分（如果有直流成分的话）和各次谐波幅值及相位的测量。

在GB17625.1标准中要求完成对40次以下谐波的测量。

2.2.2 谐波电流的危害

谐波电流在低压电网上可能引发的常见问题有：

电压畸变

谐波电流在供电线路的阻抗上产生的压降将引起线路端子电压的畸变，特别是当线路阻抗含有电抗成分时，电压畸变将加剧。

畸变了供电电压将可能使对谐波敏感的设备产生误动作；谐波电压将直接影响电视的图像质量。

解决的办法是敏感设备不能与产生谐波电流的设备共处一条供电线路中，尤其不能处在谐波电流发生设备的后面，而应当在电源入口处并联供电。

过零噪声

有不少设备要求在电源电压过零时接通设备，以便不产生瞬变过电压，从而减少电磁干扰和对半导体器件的冲击。

当线路上含有高次谐波或瞬变过电压时，使电压过零处的变化率很高，甚至在半周波里出现多个过零点，从而导致过零设备的误动作。

中线过热

在三相星形接法的电路中，每相间的相位差为 120° ，当三相平衡时，中线的合成电流为零，即中线无电流通过。即使三相不平衡时，也只有不平衡电流进入中线。因此，中线的安装截面常比相线减少一半。

但当线路中含有谐波电流时，特别是三次谐波的奇数倍，它们在中线上却是相加的。英国有则报导，相电流为100安培时，中线电流竟达到150安培，亦即中线的电流密度是相线的3倍。因此有人建议中线的截面应当加粗到相线的1倍。

中线的过电流会造成中线过热和中线压降的增加。

对变压器和感应电动机的影响

谐波电流要在变压器的绕组和铁芯上产生损耗。

对感应电动机来说，除了增大电动机的损耗外，谐波还会使感应电动机的转矩发生变化：

谐波次数/相序：1/+；2/-；3/0；4/+；5/-；

6/0；7/+；8/-；9/0；10/+；11/-；12/0；……0序不产生附加转矩；+序产生正向旋转磁场，使转矩加大；-序产生负向旋转磁场，使转矩减小。

+序和-序分量的共同作用可使电动机产生振动而降低电动机的使用寿命。为此，必要时应降低电动机的额定功率来保证电动机的使用寿命。

断路器的误动作

剩余电流断路器（俗称漏电断路器）是根据测量相线和中线的电流之和来动作的，如果电流之和大于额定限值，断路器就将切断电源。当有谐波出现时，漏电断路器就不能准确检测到高频分量之和，从而造成误动作（通常是实际值比测量值来得大，结果是断路器该动作时不动作）。

使校正功率因数的电容器过载

校正功率因数的电容器是用产生相位超前的电流来抵消感应电动机等感性负载所产生的相位滞后的电流。由于电容器对谐波电流呈现比较低的阻抗，使谐波电流有增加趋势，导致电容器过载。

集肤效应

集肤效应在电网频率下的影响很小而被忽略，但在7次以上谐波时将使集肤效应趋于显著，产生附加损耗而过热。必要时应采用多芯电缆来克服这个问题。

2.2.3 GB17625.1标准简介

本标准为其范围内的设备制定谐波电流发射限值；并为其他设备发出的谐波留有适当余地。

· 设备分类

GB17625.1将设备分成四类：

A类：平衡的三相设备；家用电器（不包括划入D类的设备）；电动工具（不包括便携式工具）；白炽灯调光器；音频设备。凡未归入其他三类设备均视为A类设备。

B类：便携式工具；非专用的电弧焊接设备。

C类：照明设备（包括灯和灯具；主要功能为照明的多功能设备中的照明部分；放电灯的独立式镇流器和白炽灯的独立式变压器；紫外线或红外线辐射装置；广告标识的照明；除白炽灯外的灯光调节器）。但照明设备不包括装在复印机、高架投影仪、幻灯机等设备中的灯，或用于刻度照明及指示照明的装置，也不包括白炽灯的调光器。

D类：功率小于或等于600W的个人计算机、计算机显示器及电视接收机。

. 限值要求

各类设备的限值要求详见表1 ~ 表3，其中B类设备的限值是A类设备限值的1.5倍。

表1 A类设备的限值

奇次谐波， n	最大允许谐波电 流， A	偶次谐波， n	最大允许谐波电流， A
3	2.30	2	1.08
5	1.14	4	0.43
7	0.77	6	0.30
9	0.40	8 n 40	0.23 × 8/n
11	0.33		
13	0.21		
15 n 39	0.15 × 15/n		

表2 C类设备的限值

谐波次数n	用基波频率下输入电流的百分数表示的最大允许谐波电流 (%)
2	2
3	$30 \times \dots$, 注
5	10
7	7
9	5
11 n 39 (仅有奇次谐波)	3

注：是电路的功率因数。

表3 D类设备的限值

谐波次数(n)	每瓦允许的最大谐波电流 (mA/W)	最大允许的谐波电流 (A)
3	3.4	2.30
5	1.9	1.14
7	1.0	0.77
9	0.5	0.4.
11	0.35	0.33
13 n 39 (仅有奇次 谐波)	3.85/n	(见表1)

对于C类设备：

有功输入功率 $> 25\text{W}$ 的照明电器，其谐波电流不能超过表6.2的相关限值。

有功输入功率 $\leq 25\text{W}$ 的放电灯，应符合下列要求中的一个：1) 谐波电流不超过表3第二栏中与功率相关的限值。2) 用基波电流百分数表示的3次谐波电流不超过其86%，5次谐波电流不超过其61%；且假定基波电源电压在 0° 时过零，输入电流波形应在 60° 或之前流通，其最后一个峰值（如果半个周期内有几个峰值）在 65° 或之前流通，并在 90° 之前不应停止。

以上测量对于带有内置式调光器的放电灯，在满负荷时进行。

对于D类设备，表3的第2和第3栏数据并用，设备的谐波电流不应超过任何一栏的限值。

比较表1~表3，不难看出，限值数据对C类设备最严，D类设备次之，这与两类设备在日常生活中的大量使用不无关系。

· 特例

下列设备的限值在标准中未作规定：

额定功率小于或等于75W的设备，但照明设备除外。在今后有可能将75W减至50W，这有待各国表决同意。

总功率大于1000W的专用设备。

额定功率小于或等于200W的对称控制加热元件。

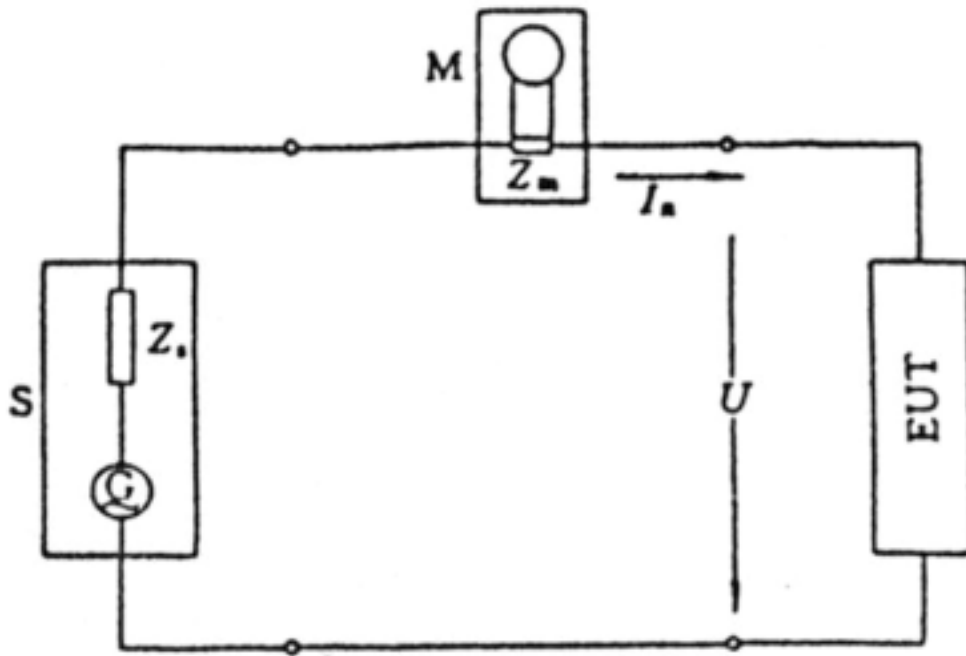
额定功率小于或等于1kW的白炽灯独立调光器。

2.2.4 测量线路与测量方法

· 测量线路

试验仪器由试验电源和有快速富里叶分析功能的时域测量仪器（后者已成为基准测量设备）构成。

单相设备的谐波电流测量线路见下图所示。



在图中，试验电源的电压为试品的额定电压。试验电压的变化范围应保持在额定电压的 $\pm 2\%$ 以内；频率变化要保持在额定频率的 $\pm 0.5\%$ 以内。对三相试验电源，还有一个相位精度问题，要求相间的相位精度在 $120^\circ \pm 1.5^\circ$ 以内。

试验电源的电压谐波含量不应超过以下各值：3次谐波为 0.9% ；5次谐波为 0.4% ；7次谐波为 0.3% ；9次谐波为 0.2% ；2~10次中的偶次谐波为 0.2% ；11~40次谐波为 0.1% 。

试验电源在过零后的 87° 至 93° 内达到峰值，峰值电压应为有效值的 $1.4 \sim 1.42$ 倍。

应避免试验电源内的电感与受试设备中的电容间发生谐振。

此外，还要注意试验电源的内阻抗和测量设备的输入阻抗要足够小，不能由于它们的存在而明显影响试品的谐波电流。

总之，对整个试验线路来说，要求试验电源的输出电压要稳；输出电压的波形要纯；要有稳频功能；还要有足够的峰值电流输出能力。以及整个试验线路的内阻要小。

试验中，谐波电流的限值数据适用于对线电流的测量。但对单相试品，也允许用对中线电流的测试来代替线电流的测试。

· 测量方法

除非另有规定，谐波电流发射试验应在正常工作状态下、预期能产生最大总谐波电流的模式下进行。

对相同的受试设备、一致的试验条件、相同的测试系统、一致的环境条件（如果有关的话），测量的重复性应高于 $\pm 5\%$ 。

当手动或自动地将一台设备投入或退出运行，在开关动作后的第一个10秒内的谐波电流和功率不予考虑。

试验时的待机模式不应超过任何观测周期的10%。此外，试验中若测得的谐波电流小于输入电流的0.6%，或小于5mA，可不必考虑。

2.2.5 标准点评

对标准作如下点评：

标准之所以要求用高品质的试验电源来代替市电电源，是为了排除市电电源本身可能存在的谐波电压和电流的影响。

标准之所以选择谐波电流，而不是选择人们相对熟悉的电源端子的谐波电压测试，是考虑了各地各处的电网阻抗都不相同，即使是同样的谐波电流，在不同阻抗上产生的电压降也各不相同，很难用它来评价电气设备对电网供电质量的影响。反之，设备的阻抗通常都比电网阻抗大得多，因此在不同的电网中由设备引起的基波电流和谐波电流却差不多。这就是说用谐波电流比用电源端子上的谐波电压更能客观和准确地评价设备对电网供电质量的影响。

标准涉及了种类繁多的低压电气和电子设备的基础性电磁兼容性国家标准。它的实施将有助于保持良好的电磁环境，提高我国低压电气、电子产品安全性能，以及这些产品在国内和国际市场上的竞争能力。

2.3 电压波动和闪烁的测量

2.3.1 电压波动和闪烁的产生

电网除了有引起谐波的负载外，还存在一些会自动接通和断开控制的负载（如由温控器和定时器控制的设备），引起电源负载的频繁变化，使电网电压产生波动，对同一电网的照明设备产生影响。灯光的闪烁除了使人烦恼外，还会成为有精神障碍人员发病的诱导因素。严重的电压波动还会使得附近设备（特别是带微处理器芯片的设备）的工作受到干扰。

电压波动不仅取决于电压波动的幅度，还取决于电压变化的频率，它们直接决定了灯光观察人员所感受到的闪烁程度。

2.3.2 GB17625.2标准简介

在GB17625.2标准中，把电压波动和闪烁作为标准的两个考核指标。首先，闪烁的测量能够精确地评定电压波动情况；其次，对电压波动的测量则能更好地反映突然和较大电压变化的影响。后者对闪烁的测量影响很小，但对同一电网的其他设备的工作却是非常有害的。

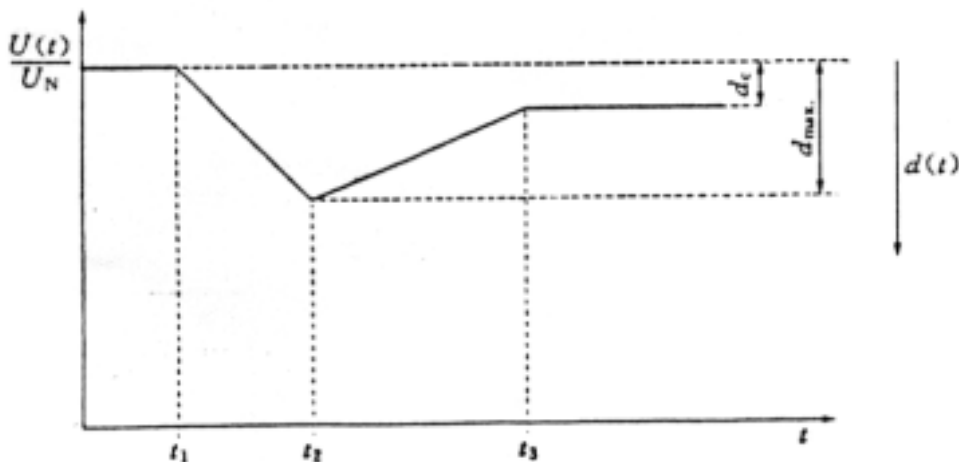
· 电压波动

电压波动有三个指标（见下图）：

相对稳态电压变化特性 d_c ：指两个相邻稳态电压差值与额定电压的百分比值。标准规定不得大于3%。

相对电压变化特性 $d(t)$ ：指电压处在至少为1秒的稳态条件下，各周期期间的电压有效值相对额定电压变化的时间函数。标准规定在超过200ms测量的时间内，其相对稳态电压变动不得大于3%。

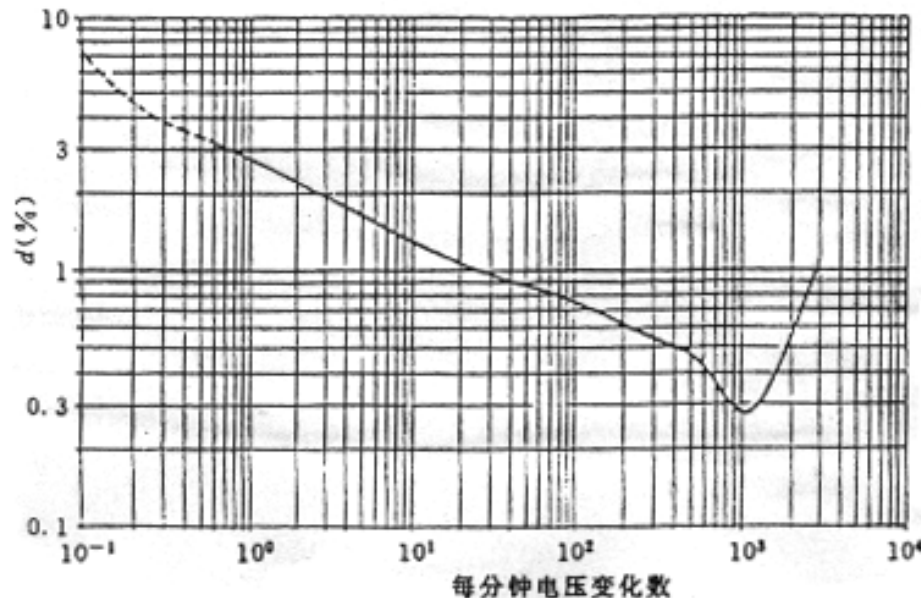
最大相对电压变化特性 d_{max} ：指电压变化特性的最大与最小有效值之差与额定电压的百分比，标准规定不得大于4%。



. 闪烁

分两种情况：

短期闪烁 P_{st} ：是短时间内（10分钟内）所评估出来的闪烁程度，用 $P_{st} = 1$ 作为闪烁刺激的阈值。 P_{st} 实际上是模拟人对50Hz电网、工作在230V交流电压下的60W螺旋灯丝白炽灯，在电压波动下所产生的闪烁的感受程度，见下图所示。



长期闪烁 P_{lt} ：指在较长时间内（2小时内）所评估出来的闪烁程度。标准用 $P_{lt} = 0.65$ 作为闪烁刺激的阈值。

. 限值要求

限值适用于被测设备的电源端。

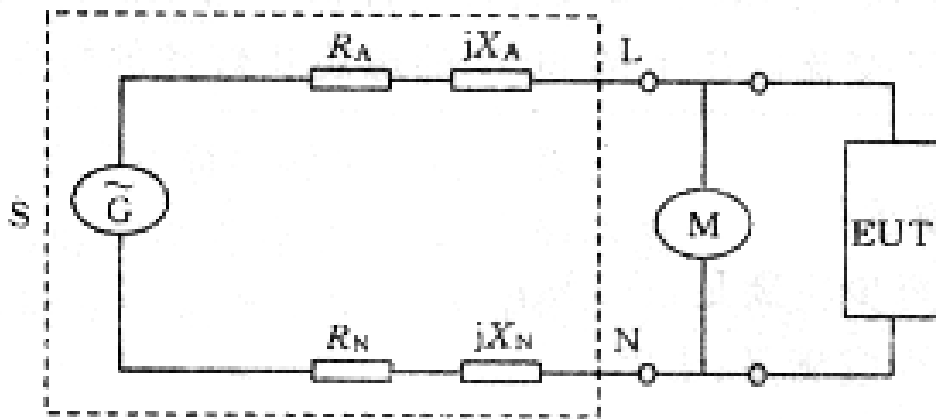
对一次运行时间超过30分钟的设备，一般要作 P_{lt} 评估。

对紧急开关和紧急中断的情况，限值不适用。

当电压变动是由人为开关引起的，或发生率小于每小时一次时，不考虑 P_{lt} 和 P_{st} 。电压波动的三项要求的限值可放宽到上述限值的1.33倍。

2.3.3 测量线路

标准中提到的电压波动和闪烁的评估方法有多种可以替代的方法，分别是直接测量法、模拟法和分析法等等。其中采用闪烁测量仪器的直接测量方法是基准的测量方法。



S—供电电源；G—电压源； $R_A + R_N + j(X_A + X_N)$ —参考阻抗；
M—测量仪；EUT—受试设备；L—相线；N—中线

上图是以单相电路为例的直接测量线路。对线路各部分的要求是：

试验电源：其基本要求和谐波测量相同，另外还要求试验电源本身的最大短时闪烁 P_{st} 应小于0.4。

参考阻抗：由于电网电压的波动与闪烁是负载电流变动在线路阻抗上产生压降而造成的，故测试中必须规定合适的线路阻抗。标准规定单相线路的参考阻抗为 $0.4 + j0.25$ 。

测量设备和测量精度：这里仅指直接测量法的测量设备，它的电流幅值测量精度应在 $\pm 1\%$ 以内。如果不测电流的实部和虚部，而测相位角，则相位的测量误差不得超过 $\pm 2^\circ$ 。相对电压变化的总体测量精度要优于 $\pm 8\%$ 。

对于测量三相电路：

对三相平衡设备，可只测量相线中的某一相对中线的电压波动。

对三相不平衡设备，则要测量每一相对中线的电压波动。

对于三相电路的参考阻抗，作如下规定：

相线阻抗： $R_A = 0.24$ $JX_A = 0.15$

中线阻抗： $R_N = 0.16$ $JX_N = 0.10$

2.3.4 测量方法

用于闪烁测量的观察周期TP为：

对 P_{st} ：TP = 10分钟；

对 P_{lt} ：TP = 2小时。

观察时间应包含被试设备在整个运行周期中产生最不利的连续电压变动。

对 P_{st} 评估：周期应连续重复，除非运行条件另有说明，当被试设备的运行周期小于观察时间时，在设备自动停止后的最小重起动时间应计入观察时间。

对 P_{lt} 评估：当被试设备的运行周期小于2小时，且一般不经常连续使用时，运行周期不应被重复。

2.3.5 标准点评

尽管标准讲述的是测量试品在工作过程中引起电网电压的波动与灯光闪烁，但实际上由于各地各处的电网阻抗情况复杂，无法直接评价，故标准中用了一个“理想”的试验电源。同时标准还指定了一个模拟电网阻抗的电阻和电感的串联电路，测量电流在这个串联电路上的电压变化来代替直接测量由试品工作时在电网上所引起的电压波动和闪烁情况。所以归根结蒂仍然是采取测试电路中的电流变化的办法来完成标准所规定的测试。

2.4 小结

通过对GB17625.1和GB17625.2标准的介绍，以及对测试方法的分析，归结为一点，需要一台电流达到16A的“理想”交流电源（这台电源还应满足被试设备在起动过程中对吸收电流峰值所提出的要求），和一台有快速富里叶分析功能的多功能分析仪器。两台仪器可独立并存，分别使用；也可组合成一台将谐波电流、电压波动和闪烁等多种功能合在一起的测试仪器。其中多功能分析这一部分可完成传统的交流电压、交流电流的有效值和峰值测量；有功功率、无功功率和视在功率的测量；有功电能、无功电能和视在电能的测量；功率因数、相位、频率及峰值系数的测量；还提供谐波（电压谐波、电流谐波）的测量、电压波动和闪烁的测量；波形分析和棒状图显示等功能。配备计算机接口后，更可以自动判断对被试设备的测试结果（通过或不通过）和自动打印测试报告等。