

矿用电缆绝缘监测 PD 信号降噪新方法的研究

马星河¹ 马利¹ 周涛² 汪旭东¹

(1. 河南理工大学 电气工程与自动化学院 焦作 454000; 2. 中国平煤神马集团 能源化工研究院 平顶山 467000)

摘要: 在矿用高压电缆的绝缘在线监测系统中,提取的局部放电(PD)信号很容易被各种噪声和干扰所覆盖,对监测系统的准确性带来很大的影响。本文提出了一种基于特征向量算法(EVA)的改进盲均衡(BE)和自动形态学阈值(AMT)相融合的降噪方法。首先通过盲均衡自动选择一个平衡信号揭示 PD 脉冲,然后 AMT 根据均衡信号确定阈值,从而达到降噪的目的。通过实验室与现场实际测试,结果表明,通过使用所提出的方法,可以在受严重噪声污染的信号中有效地提取 PD 脉冲,并尽可能地保存了信号的完整性。

关键词: 盲均衡;形态学;矿用电缆;降噪

中图分类号: TM85 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1050

Study on new method of on-line monitoring of PD signal noise insulation cable for mine

Ma Xinghe¹ Ma Li¹ Zhou Tao² Wang Xudong¹

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;

2. Energy and Chemical Institute, China Pingmei Shenma Group, Pingdingshan 467000, China)

Abstract: The extracted partial discharge (PD) signal is easy to be covered by all kinds of noise and interference in the insulation condition of mine high voltage cable online monitoring system and have a great impact on the accuracy of the monitoring system. This paper puts forward an algorithm, based on feature vector (EVA), which integrates improved automatic blind equalization (BE) and automatic morphological threshold (AMT) methods for noise reduction. Choosing a balance signal to reveal the PD pulse by automatic blind equalization method firstly, and then using AMT to determine the threshold according to the balanced signal, so as to achieve the purpose of noise reduction. Through the laboratory and field practical tests, the results show that the proposed method is efficient and saves signal integrity as far as possible for extracting PD signals in severe noise pollution signals.

Keywords: blind equalization ; morphology ; mine cable ; de-noising

1 引言

在我国,随着煤矿开采技术的不断发展和电力负荷的不断增加,对矿用高压电缆的使用带来了巨大的挑战。因此,矿用电缆有效的在线绝缘监测对煤矿安全生产与高效运行意义重大^[1]。然而在对实际的现场局部放电信号检测中,常常被周围大量的干扰和噪声所淹没。这些干扰与噪声来源于不同的地方,并表现出不同的分布特征,如正弦性、周期性和随机性^[2]。因此有效地消除噪声是矿用电缆局部放电检测的关键所在。

在过去的几十年里,研究人员提出了很多信号处理的方法用于 PD 脉冲信号的提取。主要包括短时傅里叶变换

(STFT)^[3];小波变换(WT)^[4]和盲源分离(BSS)^[5]等。其中 SFTF 是一种基于窗函数的变换,使用范围受其变换性质的局限,不是一个自适应方法,同时,它不能准确的反应信号的频率情况^[6],这会导致在宽频带区域很难区分 PD 脉冲与噪声。而 WT 的有效性依赖于小波函数的选择^[7],小波函数的选择不当,将会直接导致降噪性能的失效。BSS 主要被应用于 GIS 设备中含噪声 PD 信号的分离,然而 BSS 的应用需要多个传感器,数量必须大于 PD 信号的来源数,但是,在线监测电缆绝缘时,PD 源的数量是未知的,因此该方法是不太可能实现的。

为了解决上述方法的局限性,本文提出了融合基于特征向量算法的盲均衡(BE)与自动形态学阈值(AMT)的方

法用于PD信号降噪。并通过实验室模拟及现场测试分析,证明了该方法可以很好地抑制正弦噪声与高斯噪声。

2 基于EVA的BE算法

2.1 盲均衡算法

盲均衡是指均衡器能够不借助训练序列,而仅仅依靠所接受到的信号序列即可对信道进行自适应均衡,使输出的序列尽可能接原始序列,从而揭示源信号^[8]。图1中虚线内为单输入单输出(SISO)BE系统模型示意图。其中原始信号为独立同分布的非高斯随机信号,设单个随机变量为S,当随机变量S的均值为零时,随机变量S的高阶累积量与相应矩的关系为 $c_2 = E[s^2(k)]$; $c_3 = E[s^3(k)]$; $c_4 = E[s^4(k)] - 3\{E[s^2(k)]\}^2$;假设三阶累积量为零,而四阶累积量为非零,不同阶数的累积量能够揭示一个信号的信号特征。例如二阶累积量与方差有关,四阶累积量与峰度有关,其中四阶累积量被广泛应用。

图1中的源信号经过符合信道(即时不变系统FIR) $b(k)=[b(0)\cdots b(n)]$,其中 n 为滤波阶数。在线性失真后,与零均值高斯信号混合,构成一个混合信号,表示为:

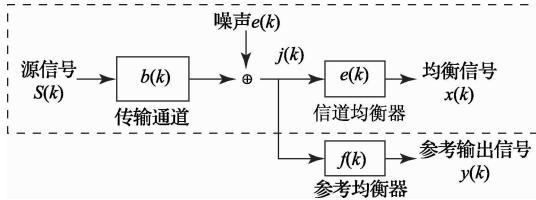


图1 EVA系统模型

$$j_k = b(k) * s(k) + g(k) \quad (1)$$

式中: $*$ 表示卷积算子。混合信号经过线性均衡器从而重建平衡信号,表示为:

$$x(k) = e(k) * j(k) \quad (2)$$

为了精确的对信号进行恢复,构造一种只包括一个非零幅值分量的脉冲均衡组合

$$u(k) = b(k) * e(k) = \delta(k - k_0) \quad (3)$$

式中: $u(k)$ 为合并后的系统, k 为时间延迟; $\delta(k)$ 狄克拉 δ 函数。经过合并均衡后的平衡信号依据均方误差(MSE)定义为:

$$MSE(e, k_0) = E\{[x(k) - s(k - k_0)]^2\} = \min \quad (4)$$

它的优势在于可以恢复信号的时间延迟。由于PD信号的时间延迟是不可避免的,这将有损于PD信号的在线监测,另一个优势在于它只需要一个传感器。这样的特点能够满足实际情况下对PD信号的在线监测。

2.2 基于EVA的改进盲均衡算法

上节提到四阶累积量,其最大绝对值为

$$\max |c_4^i(0,0,0)| \quad \text{s. t.} \quad r_{xx}(0) = r_{ss}(0) \quad (5)$$

式中: c_4^i 为平衡信号的四阶累积量; r_{xx} 和 r_{ss} 分别为自相关的平衡信号与源信号;(0,0,0)和(0)表示时间滞后为零。

高斯信号 $E[s^4(k)] = 3\sigma^4$;四阶累积量 $c_4 = E[s^4(k)] - 3\{E[s^2(k)]\}^2$;那么四阶累积量 $c_4 = 3\sigma^4 - 3\{\sigma^2\}^2$;其结果为零。因此四阶累积量可用于测量非高斯信号。本文采用四阶累积量作为局部放电信号去噪的准则,同时为了提供一个理想的操作与收敛速度,采用特征向量算法(EVA)。其结构图如图1所示。与盲信号恢复原理相比,添加了参考均衡器,其作用主要是用来生成隐含信号,作为迭代过程的基础,从而找到最佳的均衡信号。其中 $S(k)$ 为 k 时刻的原始信号; $b(k)$ 为信道的冲击响应; $g(k)$ 为加性高斯白噪声序列(AWGN); $j(k)$ 为接收信号的数据序列; $e(k)$ 为建模为FIR滤波器的均衡器的冲击响应; $f(k)$ 为参考系统的冲击响应; $x(k)$ 为经信号处理后恢复的源信号(对源信号的一种估计); $y(k)$ 为参考系统输出。

实际上,盲信号恢复有很多种解决方法,常用的是Shalvi提出的盲卷积准则^[9],表示为:

$$\max |e^T C_4^y e| \quad \text{s. t.} \quad e^T R_{jj} e = \sigma_s^2 \quad (6)$$

式中: T 为函数的共轭转置; R_{jj} 为接收信号的自相关矩阵, C_4^y 可表示如下:

$$C_4^y = E\{[y(k)]^2 j j^T\} - E\{[y(k)]^2\} E\{j j^T\} - E[y(k)j] E[y^T(k)j^T] - E[y^T(k)j] E[y(k)j^T] \quad (7)$$

这种方法是在参考均衡器的输出和接收信号上运用了统计特征。通过优化式(1),我们可以得到一个广义的特征向量问题,即:

$$C_4^y e_{EVA} = \lambda R_{jj} e_{EVA} \quad (8)$$

系数向量 $e_{EVA} = [e_{EVA}(0), \dots, e_{EVA}(n)]^T$ 能够通过选择的特征向量 $R_{jj}^{-1} C_4^y$ 获得最大特征值 λ ,如果合并后的脉冲响应 $u(k) = b(k)f(k)$ 只有一个最大值,那么这种方法是有效的。

$$|u(k)| \begin{cases} = \max |u(k)| & k = k_m \\ < \max |u(k)| & k \neq k_m \end{cases} \quad (9)$$

式中: k 为时间常数。

3 自动形态学阈值

形态学滤波器(MF)是自动形态学阈值(AMT)的基础,本文利用MF自动创建阈值,从而消除噪声^[10-11]。MF的实现是基于数学形态学,其中数学运算应用到信号和结构元素(SE)中,从而提取形态特征。设 x_n 为一维信号 $x = (0, 1, 2, \dots, N-1)$, s_n 为结构元素 $s = (0, 1, 2, \dots, M-1)$;定义 \ominus 为腐蚀运算; \oplus 为膨胀运算; \circ 为开运算; \bullet 为闭运算;

$$(X \ominus S)_n = \min(X_{(n+m)} - S_n) m \in 1, 2, \dots, M-1 \quad (10)$$

$$(X \oplus S)_n = \min(X_{(n-m)} - S_n) m \in 1, 2, \dots, M-1 \quad (11)$$

$$(X \circ S)_n = (X \ominus S) \oplus S \quad (12)$$

$$(X \bullet S)_n = (X \oplus S) \ominus S \quad (13)$$

通过上述操作符提取的特征给予不同的提取形状,其中腐蚀运算降低正峰值并扩大负峰值;膨胀运算增加正峰

值并降低负峰值;开运算在保持负峰值的情况下降低正峰值;闭运算在在保持正峰值的同时减少负峰值。这是 MF 的一些基本细节过程。

在数学形态学中,开运算与闭运算可以分别保持负峰值与正峰值不变。因此本系统运用开运算构造负波封,闭运算构造正波封;正负波封值分别构造自动阈值的上下限从而去除噪声,这种方法的主要优点就是阈值是基于在正负两侧的振幅自动调整的。关于结构元素的形状,本系统选用扁平状 SE^[12],由于其简单的形状应用不会对分析产生太大影响。在选择 SE 形状后,其长度的选择是影响阈值确定的另一个重要问题。研究表明当 SE 长度短于或等于脉冲的间隔时,脉冲可以成功的被提取出来。但在实际情况中,无法确定脉冲的时间间隔,并且由于 PD 现象的随机性,PD 脉冲的时间间隔各不相同,无法试图去确定其时间间隔。因此本文提出自动形态学阈值(AMT)的方法,去确定波封的脉冲振幅。通过利用数学形态学提取结构元素与 PD 信号重叠的能力来确定波封。这与提取所有脉冲时间间隔是完全不同的。然后波封用于计算阈值的上限与下限,从而去除噪音。AMT 流程图如图 2。

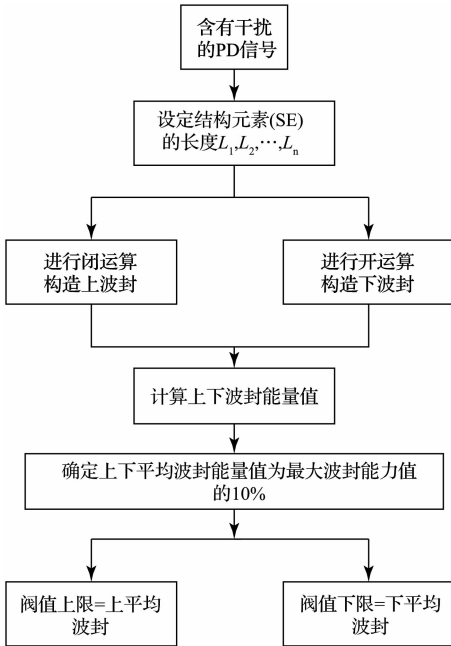


图 2 AMT 方法流程图

4 改进的 PD 信号自动去噪方法

本系统使用了一种改进的 EVA 算法和自动形态学阈值相融合的方法对 PD 信号中的噪音进行去除。通过改进的 EVA 算法去除正弦噪音,接着通过自动形态学阈值消除高斯噪音,采用这种相融合的方法可以有效避免单一方法去噪效果不明显和提取 PD 脉冲信号不完整的缺陷,从而有效提高了矿用电缆在线绝缘监测的准确性,该算法的

具体流程图如图 3 所示。

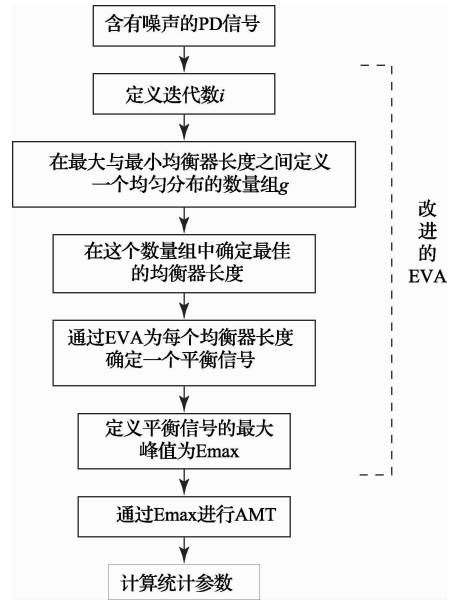


图 3 PD 信号去噪流程图

如图 3 所示,在 EVA 中通过迭代过程产生均衡信号,在这个过程中,均衡器的长度选择至关重要,其长度的选择不当,会直接导致不平衡信号的产生。因此本文提出了自动选择均衡器长度的方法,在 EVA 定义自相关矩阵 R_{jj} 和交叉累积量矩阵 C_d^{yj} ;

$$R_{jj} = \frac{\sum_{k=n}^{N-1} j j^T}{N-n} \tag{14}$$

$$C_d^{yj} = \frac{\sum_{k=n}^{N-1} y^2(k) j j^T}{N-n} \left(\frac{\sum_{k=n}^{N-1} y^2(k)}{N-n} R_{jj} - \left(\frac{\sum_{k=n}^{N-1} y(k) j}{N-n} \right) \left(\frac{\sum_{k=n}^{N-1} y^T(k) j^T}{N-n} \right) \right) \tag{15}$$

式中: $j^T = [j(k), j(k-1), \dots, j(k-n)]$; T 为传递函数; n 为均衡器长度。

接着定义一个均匀分布的数量组 g ,在最大与最小均衡器长度区间内去分配不同的均衡器长度,这是为了确保选中的均衡器长度覆盖到不同的区间,从而确定最优的均衡器长度。一旦确定了均衡器长度,EVA 将依照此均衡器长度去除正弦噪音,之后选择平衡信号的最大峰值 E_{max} 作为最佳平衡信号,在混合信号中提取 PD 脉冲。经过 EVA 处理,正弦噪音可以被有效处理。EVA 也可以通过重新选择平衡信号的方法来先消除高斯噪音,但去噪效果不好,因此本文应用 AMT 方法消除剩余的高斯噪音。

5 实验室及现场降噪效果测试分析

5.1 实验室降噪模拟分析

由于矿用高压电缆供电等级一般为 6 kV,因此在实验

室中以 6 kV 尖端放电模拟构造局部放电信号,并通过 MATLAB 仿真向放电信号加噪,然后通过本文所提出的方法进行降噪分析。模拟实验所使用的尖端模型其针尖与面板之间的距离为 5 mm,为了避免实验安全隐患,通过使用降压变压器采集放电信号。实验室放电模型如图 4。

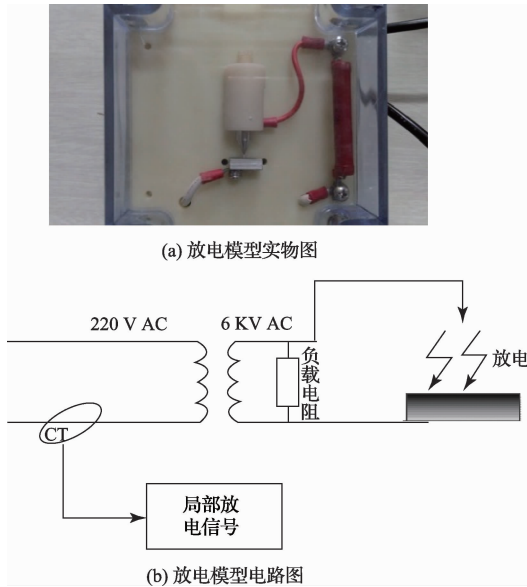


图 4 局部放电模型图

为选择标准时,具有最高峰度值的最优平衡信号可用于提取 PD 脉冲。从图 5(d)可以看出所提取的信号在相位角上与 PD 源信号基本相同。由于高斯信号仍然是最优的平衡信号,需要通过自适应选择 AMT 的上下限来进一步降噪,结果如图 5(e)所示。

5.2 现场模拟测试分析

为了进一步验证该方法的有效性,在煤矿现场通过对 6 kV 绝缘损坏矿用电缆进行测试,再次分析本方法对 PD 信号的降噪能力。测试装置图如图 6 所示。



图 6 现场测试图

本次实验为 6 kV 绝缘击穿实验,为了保证实验安全可靠地进行,测试波形通过远距离后台软件采集完成。如图 7 所示。

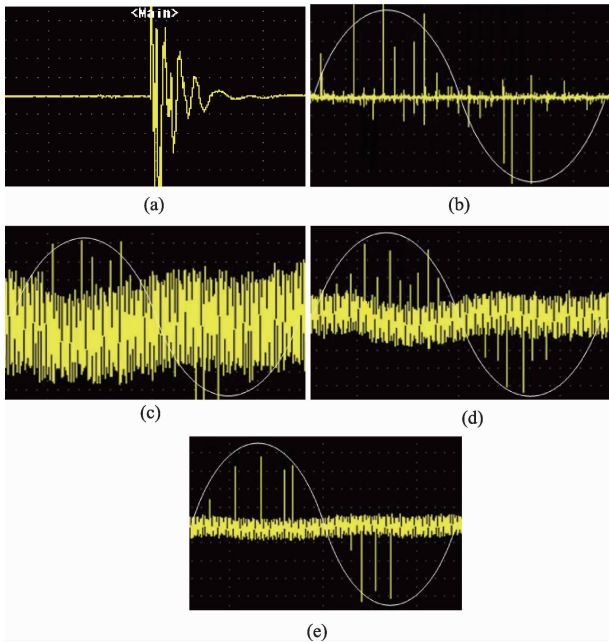


图 5 去噪效果图

如图 5 所示。其中(a)为放电波形图;(b)为源信号;(c)为添加正弦与高斯噪声的混合信号,其通过 EVA 选择均衡器长度,从而生成一系列用于提取 PD 信号的平衡信号,其中有一些是不能揭示 PD 信号的,然而当使用峭度作

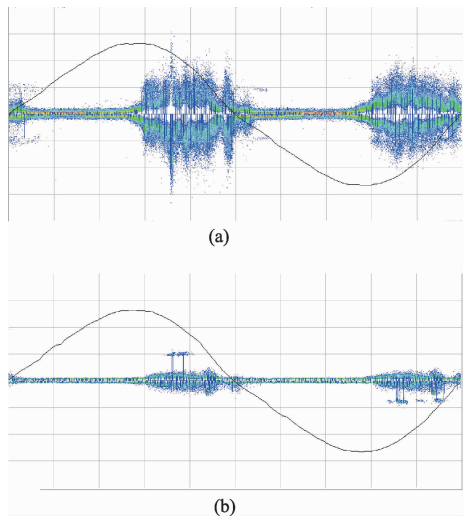


图 7 现场去噪测试结果

如图 7 所示图 7(a)为原始带噪放电波形。图 7(b)为降噪后波形。从上图即使正弦噪声信号的幅值大于 PD 信号,也可以通过 EVA 方法提取 PD 脉冲,这是由于正选正弦噪声的四阶累积量值低于 PD 信号。

6 结 论

本文提出了一种基于 EVA 的盲均衡算法和 AMT 相

融合的矿用电缆在线监测 PD 信号干扰抑制新方法,首先通过 BE 产生均衡信号来提取 PD 脉冲,接着根据平衡信号确定阈值对 PD 脉冲进一步降噪。经过实验室模拟与煤矿现场测试分析,表明该方法对正弦噪声与高斯噪声有很好的抑制效果,在矿用电缆绝缘在线监测系统中可以有效的提取被噪声污染的 PD 脉冲信号。

参考文献

- [1] 梁增元. 煤矿低压电缆绝缘状态检测与寿命评估[J]. 煤炭技术, 2012, 31(03): 81-82.
- [2] 姚林朋, 王辉, 钱勇, 等. 应用 VC 理论结构风险最小原则的局部放电信号消噪方法[J]. 高电压技术, 2011, 37(5): 1172-1179.
- [3] LUO G, ZHANG D, KOH Y, et al. Time - frequency entropy-based partial-discharge extraction for nonintrusive measurement[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(4): 1919-1927.
- [4] 唐明, 梁得亮, 王青山, 等. 矿用电缆局部放电监测的最优二代小波包基降噪[J]. 西安交通大学学报, 2013, 47(12): 32-37.
- [5] TANG J, LI W, LIU Y L. Blind source separation of mixed PD signals produced by multiple insulation defects in GIS[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(1): 170-176.
- [6] AL-BADOUR F, SUNAR M, CHEDED L. Vibration analysis of rotating machinery using time - frequency analysis and wavelet techniques[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2011, 25(6): 2083-2101.
- [7] LI J, JIANG T Y, GRZYBOWSKI S, et al. Scale dependent wavelet selection for de-noising of partial discharge detection [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2010, 17(6): 1705-1714.
- [8] 隋天宇, 张宝华, 李宇, 等. 一种自适应均衡器最优阶数确定算法[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(5): 1187-1194.
- [9] 李晓晖, 傅攀. 基于一维盲源分离的滚动轴承故障诊断[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(6): 535-542.
- [10] 张彬, 张业宏, 李明彩. 小波变换与形态学运算相结合的脉搏波检测算法[J]. 电子测量技术, 2011, 34(6): 23-25.
- [11] 王有元, 张大伟, 陆国俊, 等. 融合形态学-复小波变换的 PD 干扰信号抑制方法[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(3): 707-713.
- [12] 杨丽雯, 曾朝阳, 张永继. 一种基于数学形态学的灰度图像边缘检测方法[J]. 国外电子测量技术, 2012(2): 27-30, 38.

作者简介

马星河, 1979 年生, 博士后, 副教授, 主要研究方向为矿山电气控制新技术等方面的教学与工作。
E-mail: maxinghe@hpu.edu.cn.

普源精电示波器项目获国家火炬计划立项

日前, 科技部发布了《科技部关于下达 2015 年度国家星火计划、火炬计划项目的通知》。普源精电公司(以下简称: RIGOL)申报的“深存储高带宽数字示波器的产业化”项目正式被科技部列为国家火炬计划项目, 标志着 RIGOL 的示波器产品产业化应用方面迈出了坚实的一步。

据悉, 火炬计划项目是以国内外市场为导向, 以国家、地方和行业的科技攻关计划、高技术研究计划成果以及其他科研成果为依托, 以发展高新技术产品、形成产业为目标, 择优评选并组织实施的高科技产业化项目。他体现了国家对行业领导企业在技术创新方面的重视, 他不仅将促进行业领导企业的技术发展, 也将通过行业领导企业促进、带动全行业的发展。

RIGOL 是一家专业从事测量仪器研发、生产、销售的国家高新技术企业, 是世界领先的电子测量仪器制造企

业。数字示波器是 RIGOL 创业伊始即确定的重点研发产品, 历时十几年的积累, 目前已经拥有以 DS6000 为行业技术典范, 以 MSO/DS1000Z、DS1000E 为普及的多条产品系列。数字示波器不仅在带宽、采样率等关键指标上填补国内空白, 还先后数次获得国际大奖, 领先国际舞台; 在产品销售方面, 也远销全球 60 多个国家和地区, 受到工程师们的广泛喜爱。

除了数字示波器之外, RIGOL 的电子测量产品还包括函数/任意波形发生器、数字万用表、可编程直流电源、频谱分析仪、射频信号源、数据采集开关系统等。RIGOL 拥有所有产品的核心知识产权, 现已申请专利总数达 493 项, 已申请发明总件数达 392 件, 且其中多项专利及发明均已被授权。