

电缆局放检测振荡波测试系统仿真与开发

刘 鸿 刘 磊 林 圣 褚继峰 李舒成 陈旭东 孙晓菲

(西南交通大学电气工程学院 成都 611756)

摘要: 针对目前用于电力电缆绝缘检测的振荡波测试系统,大部分文献只对其简要的工作原理及其现场测试情况进行了阐述。基于已有的工作基础,分析了系统的组成结构、参数设置及具体工作原理,并在仿真平台中搭建了系统模型,模拟局放发生及检测过程;在仿真的基础上,研究出了一套小型振荡波测试系统,通过人为设置电缆尖端缺陷,对系统进行了试验。从试验结果来看,所研制系统成功模拟了振荡波测试系统的工作过程,并且采集到了局放信号,且局放信号的分布特性符合尖端放电的特性,证明了该系统的有效性。

关键词: 电力电缆;故障诊断;测试系统;局部放电;振荡波;仿真

中图分类号: TM930.2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4017

Simulation and development of oscillating wave test system for cable PD testing

Liu Hong Liu Lei Lin Sheng Chu Jifeng Li Shucheng Chen Xudong Sun Xiaofei

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China)

Abstract: For recent oscillating wave test system (OWTS) which is used for cable insulation detection, most literatures mainly focus on its brief working principle and field tests. Based on the existing work, the structure, the parameter settings and the detail working principle of OWTS are further analyzed, meanwhile, with the Simulink, OWTS model is built and the process of the partial discharge (PD) signals occurring and detection is simulated; On the base of simulation, a small OWTS is successfully developed, by setting cable point defects artificially, the system was tested and the result shows that the developed system successfully simulates the working process of OWTS and collects the PD signals in accordance with point discharge characteristics, which proves the effectiveness of the developed system.

Keywords: power cable; fault diagnosis; test system; partial discharge; oscillating wave; simulation

1 引言

在电力电缆使用过程中,由于一系列因素可使电缆在负荷运行中绝缘强度会逐渐降低,电缆中存在局部放电(简称局放)现象时会造成其绝缘性能逐步劣化^[1-2],前期表现为局部缺陷,且不易被察觉,随着非贯穿性局放程度加深进而导致电缆绝缘击穿,是造成电缆绝缘破坏的主要因素,查找排除比较困难^[3-4]。所以,在电缆发生不可逆故障之前检测出其绝缘薄弱环节并采取相应的补救措施,才能够有效减少由故障带来的损失。

现有的电力电缆绝缘检测方法主要以离线检测为主,可分为直流耐压测试与交流耐压测试,但都有相对不足之处^[5-7]。目前,一些国家推出的基于振荡波测试系统(OWTS)的电缆局部放电检测方法^[8],对设备的容量需求较小,且振荡波电压下检测出的电缆局部放电信号,除放电

量有一定差异外,其它方面与工频交流电压下的局部放电分布有很强的相似性^[9-10],能够作为电缆工频运行时局部放电的等效依据,是目前国际上公认的电缆绝缘检测的最有效方法之一,同时,也是电力权威机构一致推荐的电缆绝缘检测的最佳方法^[11]。因此,本系统模拟电缆局部放电发生及检测过程,优化分析振荡波测试系统的组成结构和参数设置,通过人为设置电缆尖端缺陷,进行了振荡波测试系统的工作过程仿真,验证了系统的测试效果。

2 局部放电特征及 OWTS 原理

2.1 局部放电时频域特征

局部放电是指导体之间的绝缘被部分桥接而发生的电气放电,而非贯穿性的放电。

时域特征:局放信号具有极窄的时域分布,持续时间通常在 $1 \mu\text{s}$ 以下,具有陡峭的上升沿,信号中高频分量非常

丰富。通常局放信号的时域表征模型有 4 类。

1) 单指数衰减模型:

$$f(t) = Ae^{-(t-t_0)/\tau} \quad (1)$$

2) 双指数衰减模型:

$$f(t) = A(e^{-1.3t/\tau} - e^{-2.2t/\tau}) \quad (2)$$

3) 单指数衰减振荡模型:

$$f(t) = Ae^{-t/\tau} \sin(2\pi f_c t) \quad (3)$$

4) 双指数衰减振荡模型:

$$f(t) = A(e^{-1.3t/\tau} - e^{-2.2t/\tau}) \sin(2\pi f_c t) \quad (4)$$

式中: A 是信号幅值, t_0 是信号发生时刻, τ 是衰减系数, f_c 是信号振荡频率。

频域特征: 局部放电信号属于高频信号, 其能量从 kHz~MHz 的范围内均有分布, 但从实际检测中所识别的局放信号看, 其频率信息大部分在 50 kHz~50 MHz, 考虑到振荡波以及其他噪声干扰对局放检测的影响, 一般选取该频带范围作为相关局放检测电路的带通参数。

2.2 OWTS 原理

OWTS 分为振荡波发生电路及信号检测电路两部分, 振荡波发生电路是整个测试系统的主电路, 包含高压直流电源、半导体开关、限流电阻、谐振电感以及被测电缆^[12], 是高压振荡波以及高频局放信号流经的主回路。信号检测电路包含高压分压电路以及信号调理电路, 负责监测电缆电压以及局放信号的采集、分析与储存, 结构原理如图 1 所示。

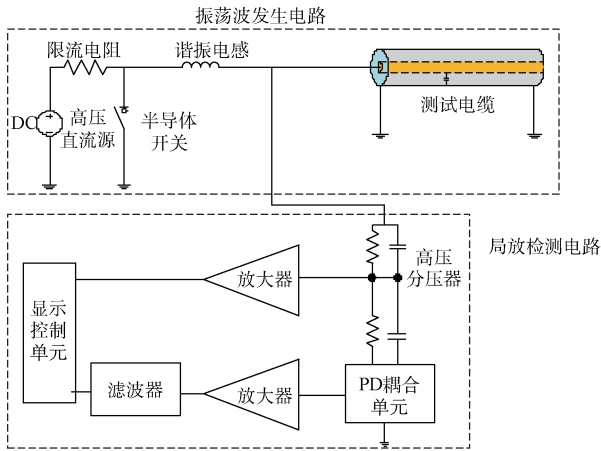


图 1 振荡波测试系统原理

2.2.1 OWTS 发生电路

振荡波发生电路主要功能是产生高压振荡波, 周期性地激发绝缘缺陷局部放电, 进而对其进行检测, 整个过程可分为充电过程与放电过程^[13]。

充电过程: 初始情况下, 高压半导体开关断开, 高压直流电源对电缆充电, 回路等效为一个 RLC 零状态响应, 如图 2 所示。

由基尔霍夫电压定律可得电缆电压:

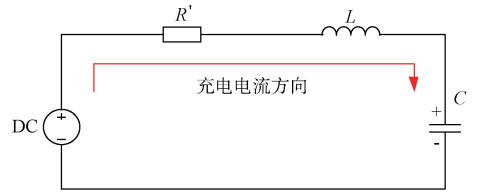


图 2 RLC 零状态响应

$$u_c = \left[\frac{1}{p_1 - p_2} (p_2 e^{p_1 t} - p_1 e^{p_2 t}) + 1 \right] u_s e(t) \quad (5)$$

式中: $\alpha = \frac{R'}{2L}$ (阻尼系数), $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ (谐振角频率),

$$p_1 = -\alpha + \sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2}, p_2 = -\alpha - \sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2}.$$

为使电缆平稳充电, 应使电路处于过阻尼状态, 需满足:

$$\alpha > \omega_0 \rightarrow R' > 2\sqrt{\frac{L}{C}} \quad (6)$$

此时电缆电压 u_c 的稳态分量与直流电源 u_s 有关。

放电过程: 当监测到电缆电压达到系统预先设置的电压时, PC 控制高压半导体开关快速导通, 电容开始放电, 此时电路等效为一个二阶零输入电路。如图 3 所示。

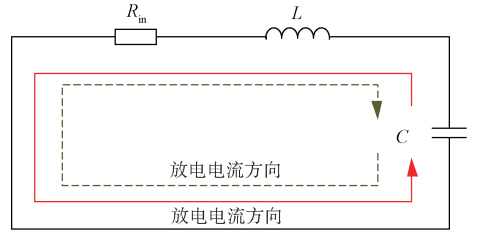


图 3 RLC 零输入响应

图 3 中 R_m 为电感电阻, 同样, 依据电路初始条件及基尔霍夫电压定律可得电缆电压:

$$u_c = \frac{U_0}{p_2 - p_1} (p_2 e^{p_1 t} - p_1 e^{p_2 t}) \quad (7)$$

式中: $\alpha = \frac{R_m}{2L}$ (阻尼系数), $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ (谐振角频率),

$$p_1 = -\alpha + \sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2}, p_2 = -\alpha - \sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2}.$$

为使放电过程中振荡波发生, 电路应处于欠阻尼状态, 需满足:

$$\alpha < \omega_0 \rightarrow R_m < 2\sqrt{\frac{L}{C}} \quad (8)$$

此时电缆电压为:

$$u_c = \frac{\omega_0 U_0}{\sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}} e^{-\alpha t} \cos(\sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2} t - \theta) \quad (9)$$

式中: θ 为振荡波初始相位角, 振荡波角频率 C_a , 电缆电压呈指数型衰减振荡, 其频率为:

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} \quad (10)$$

在振荡波衰减过程中, 若绝缘缺陷处的电压超过其局

部放电起始电压 U_i , 则产生局部放电信号, 因而在振荡波衰减的前几个周波中, 能够周期性地检测到局部放电的发生。

2.2.2 信号检测电路

信号检测电路负责对局部放电信号进行采集与处理, 并送至上位机进行分析, 同时对主回路振荡波信号进行监测, 从而得到局放信号与振荡波在幅值及相位上的关系。信号检测电路结构分为高压分压电路与信号调理电路, 其中, 信号调理电路又包含信号耦合、放大滤波及采集电路。

高压分压电路将主回路振荡波电压进行分压, 便于后续测量。考虑杂散电容以及温升等影响, 采用阻容式分压器, 以适应不同频率不同幅值信号的分压。

信号调理电路的前端为局放耦合单元, 其目的在于将局放信号从振荡波电压以及干扰信号中耦合出来, 需要良好的高通特性, 并且根据组成原件的不同可分为 R 型电路、RC 型电路及 RLC 型电路。后续信号处理的主要功能

为进一步去除系统中的干扰, 包括白噪声干扰、窄带干扰^[14]等, 同时, 将局放信号进行放大, 以便后续的采集及观察。信号处理的具体过程根据需要依次分为高通滤波、前置放大、低通滤波、后置放大, 其中高通滤波及低通滤波相应的截止频率分别为 50 kHz、50 MHz, 阶数在 8 阶左右。由于局放信号的原始大小不确定, 因此前置放大倍数设置为 10 倍, 后置放大倍数设置为 0~1 000 倍可调。调理后的信号经采集卡送至上位机进行分析处理, 可用于判断局放信号的幅值、相对于振荡波的相位、局放源个数及位置等信息。

3 仿真及结果分析

3.1 模型建立

根据各电路的设计依据, 在 Simulink^[15] 平台下搭建了振荡波测试系统的仿真模型, 局放信号的产生采用经典的三电容气隙局部放电模型。具体实现电路如图 4 所示。

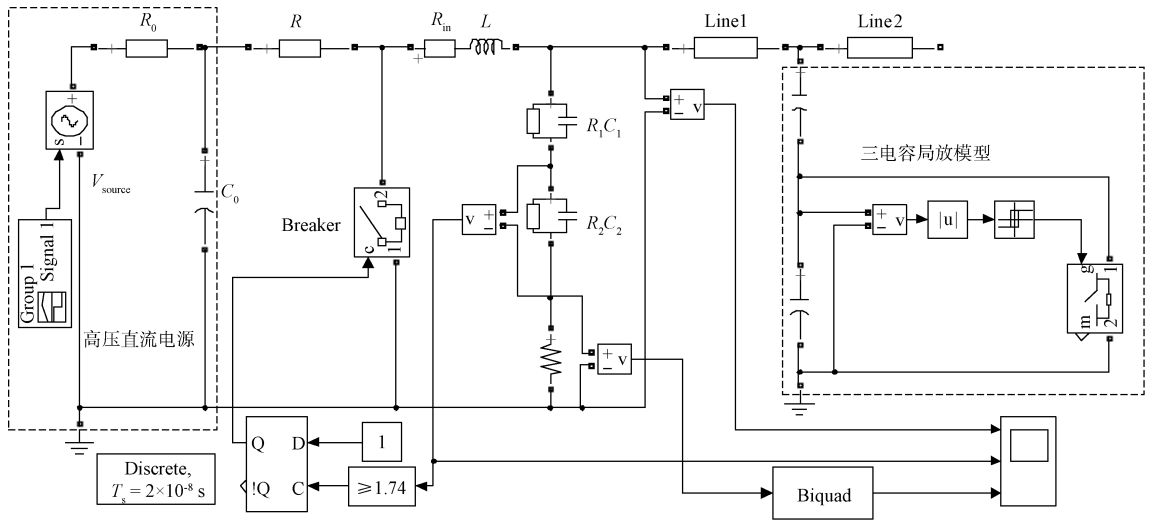


图 4 振荡波测试系统仿真电路

3.2 模型仿真

以 10 kV 交联聚乙烯绝缘电缆为测试对象, 其长度 $Line1=0.3$ km, $Line2=0.2$ km, 局放发生在 Line1 处。经查询, 10 kV 交联电缆单位长度等效电容为 $0.24 \mu\text{F}/\text{km}$, 因此电缆总电容为 $C=0.12 \mu\text{F}$, 谐振电感及其内阻分别为 $L=0.25$ H 及 $R_m=4.16 \Omega$, 局放耦合单元采用纯电阻的形式, 设其等效阻抗为 $Z_0=37.7 \Omega$, 选取合适的阻容参数将分压比设置为 $K=\frac{1}{10\ 000}$, 滤波模块采用 8 阶带通滤波, 其带宽设置为 $B=50$ kHz~50 MHz, 限流电阻 $R=10\ 000 \Omega$, 电源电压 $U=17.4$ kV, 局放起始电压设置为 $U_i=13$ kV, 仿真时长 0.006 s, 采样频率 $F_s=50$ MHz。仿真结果如 5 所示。

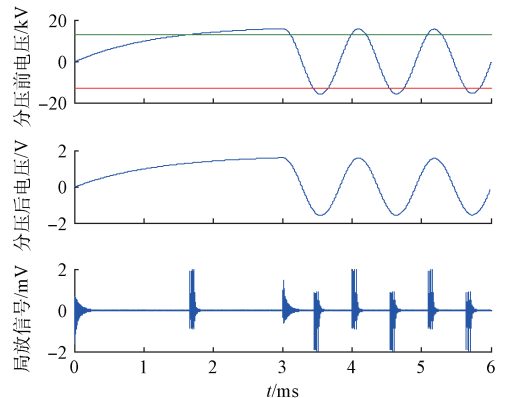


图 5 仿真结果

初始阶段, 半导体开关断开, 系统模拟电缆充电过程, 在电缆电压达到 U 之前, 电缆不断过阻尼充电。当充电至 U 时, 开关闭合, 此时电缆电容放电, 回路振荡, 振荡频率约为 $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = 918.88 \text{ Hz}$, 符合之前的分析。经分压后的振荡波, 其相位与主回路电压相同, 幅值降低为 $K = \frac{1}{10\ 000}$ 倍, 便于测量。局放信号经耦合及滤波后得到识别, 表现出周期放电的特性。半个振荡波周期局放信号放大后如图 6 所示。

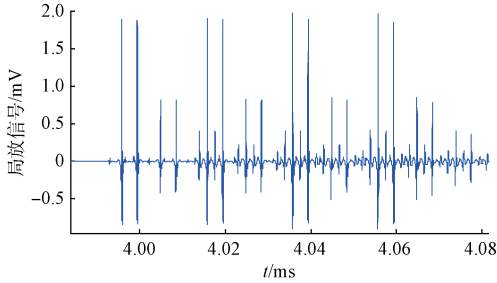


图 6 半个振荡波周期内多次放电

可以看出, 电缆绝缘缺陷在半个振荡波周期内, 只要该点电压高于其击穿电压, 就会持续地击穿、恢复, 表现为多次局部放电, 通过对局放信号幅值的标定, 可判断绝缘缺陷的严重程度。结合单次击穿产生的一组局放信号, 利用行波法可判断局放源的位置。

4 系统开发与测试

依照上述分析及仿真验证, 在实验室搭建振荡波测试系统小型试验装置, 其整体结构如图 7 所示。

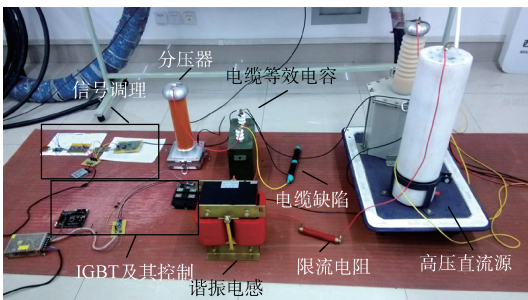


图 7 振荡波测试系统实物

设计最高电压 3 kV, 系统限流电阻 $R = 300 \text{ k}\Omega$, 谐振电感 $L = 0.2 \text{ H}$, 内阻 $R_m = 1.5 \text{ }\Omega$, 半导体开关选择 3.3 kV 高压 IGBT, 采取红外控制的方式控制 IGBT 的导通及关断。采用 $2 \text{ }\mu\text{F}$ 高压电容代替电缆电容, 同时截取长度 30 cm 的 0.6/1 kV 三芯交联电缆, 并联至高压电容两端, 通过人为设置电缆绝缘缺陷, 模拟尖端放电, 信号检测部分采用分压比 $K = \frac{1}{1\ 000}$ 的阻容式分压器, 局放耦合单元

采用纯电阻的形式, 其等效阻抗为 $Z_0 = 112 \text{ }\Omega$, 局放信号经滤波放大后接入示波器显示, 信号采样率为 40 MHz, 电压最高升至 2.8 kV。电缆充电过程呈过阻尼状态, 并最终稳定在 2.8 V 左右, 符合上述仿真结果。通过示波器观测到电缆电压充满后, 控制 IGBT 导通, 系统产生振荡波, 激发电缆缺陷放电。

电缆电压经过分压后, 从 2.8 V 开始振荡, 说明电缆电压最高升至了 2.8 kV, 振荡频率利用示波器检测约为 251 Hz, 符合计算结果, 验证了所设计系统的有效性。同时, 在振荡波的前几个周期中, 区别于噪声干扰, 距离振荡波正负半周某固定相位附近, 周期性地出现了脉冲信号, 符合局放信号的分布特征。调节示波器扫描时基, 观察振荡波上升以及下降过程中的单个脉冲信号, 信号持续时间极短, 在微秒级, 且振荡剧烈, 属于高频脉冲。从其时域波形特征来看, 近似于式 (3) 及 (4) 中的局放衰减振荡模型, 而其它的噪声干扰则不具有该特征, 说明该信号属于局放信号。在 0~2.8 kV 电源电压范围内, 共进行了 20 次振荡波试验。统计所有局部放电信号, 尖端局放信号相对于振荡波的相位分布图如图 7 所示。在振荡波正半周的放电幅值整体大于负半周放电幅值, 但正半周的放电次数却低于负半周的放电次数, 这跟针尖缺陷的特性有关; 正半周放电的相位集中在 $22^\circ \sim 90^\circ$ 附近, 负半周放电的相位集中在 $180^\circ \sim 260^\circ$ 附近, 符合尖端放电的分布特性, 即从另一方面验证了所研制系统的有效性。

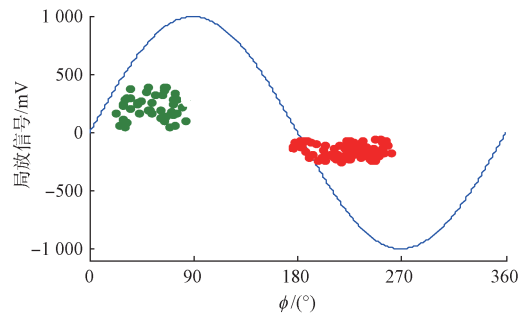


图 8 尖端放电相位分布

5 结论

本文针对振荡波测试系统, 从理论上分析了其组成结构、参数设置及工作原理, 并在 Simulink 仿真平台下搭建了系统模型, 仿真电缆局部放电发生以及局放信号的检测。基于仿真分析, 通过设置电缆缺陷, 利用在实验室开发的小型振荡波测试系统, 成功实现了电缆局放检测的全过程, 进一步验证了所设计系统的有效性, 为后续检测应用工作提供了依据。

参考文献

- [1] 姚林朋, 徐颖敏, 钱勇, 等. 基于关联规则的 XLPE 电缆局部放电模糊识别研究[J]. 电工技术学报, 2012,

- 27(5):92-98.
- [2] 李通,谢庆,张宏伟,等.基于信号稀疏分解的局放超声阵列定位法研究[J].仪器仪表学报,2015,36(6):1301-1310.
- [3] 李旭涛,周凯,万利,等.基于 TEV 法的电缆终端局部放电状态监测装置的研制[J].电力系统保护与控制,2013,41(12):98-103.
- [4] 王广柱,贾春娟,张立斌.一种带钢铠的低压电力电缆故障精确定位新方法[J].电力系统自动化,2014,38(3):161-165.
- [5] 王福忠,董鹏飞,董秋生,等.煤矿 6 kV 动力电缆绝缘在线监测系统研究[J].电子测量与仪器学报,2015,29(9):1398-1405.
- [6] 余英,薛荣,黄荣辉,等.10 kV 电缆振荡波局放测试的理论分析与试验研究[J].高压电器,2014,50(7):88-93.
- [7] 王鹏,吴广宁,罗杨,等.脉冲电容器绝缘老化和直流局部放电测试系统[J].仪器仪表学报,2012,33(6):1268-1274.
- [8] 张龙,王笑棠,黄晨曦,等.不同频率振荡波电压下 XLPE 电缆局部放电特性的研究[J].高压电器,2015,51(11):128-133.
- [9] 彭发东,刘斌,庞小峰,等.阻尼振荡波下检测 XLPE 电缆局部放电和耐压与工频的等效性综述[J].高压电器,2013,49(7):116-121.
- [10] 张龙,黄晨曦,张伟,等.交流和振荡波电压下 XLPE 电缆典型缺陷局部放电特性研究[J].高压电器,2015,51(8):43-48.
- [11] 常文治,葛振东,时翔,等.振荡电压下电缆典型缺陷局部放电的统计特征及定位研究[J].电网技术,2013,37(3):746-752.
- [12] 李婧,黄晨曦,郭金明,等.30 kV 阻尼交流振荡波测试系统用新型电力电子开关的研制[J].电气技术,2015(12):42-46.
- [13] 郭琦,赵子玉.用于电力电缆局部放电检测的振荡波测试系统的研制[J].电网技术,2012(1):1-5.
- [14] 张宇辉,段伟润,李天云.局部放电信号中抑制周期性窄带干扰的逆向分离方法[J].电工技术学报,2015,30(6):232-239.
- [15] 叶焰杰,陈怀海,贺旭东,等.基于 MATLAB/Simulink 多输入多输出随机振动试验模拟研究[J].国外电子测量技术,2016,35(1):39-43.

作者简介

刘鸿,1992 年出生,硕士研究生,研究方向为电缆故障诊断及定位。

E-mail:bk20102666@my.swjtu.edu.cn

刘磊,1993 年出生,博士研究生,研究方向为电力系统继电保护。

E-mail:331811693@qq.com

林圣,1983 年出生,博士,副教授,研究方向为输配电网故障诊断。

E-mail:slin@home.swjtu.edu.cn

泰克推出 ONFI 闪存标准测试解决方案

包括 ONFI 4.0 标准一致性测试软件及使用 Nexus 插补器 (Interposers) 完成高效探测

2016 年 11 月 17 日,泰克公司日前为开放的 NAND 闪存接口(ONFI)标准推出测试解决方案。ONFI 4.0 测试解决方案适用于泰克高性能示波器,包括在 ONFI 总线上分析 DDR2/3 模式的软件,以及基于插补器(Interposers)的高效探测解决方案。

ONFI 标准由 ONFI 工作组发布,旨在简便于把 NAND 闪存整合到消费电子和计算平台中。ONFI 4.0 规范引入不断进化的 NV-DDR3 接口,其工作电压为 $V_{ccQ}=1.2\text{ V}$,不仅提高了性能,还改善了功耗,并把 NV-DDR2 和 NV-DDR3 I/O 速度扩展到 667 MT/s 和 800 MT/s,增加了 ZQ 校准功能。

由于速度提高和电压下降,处理 ONFI 总线的设计人员面临着诸多挑战,如保证一致性,调试定时问题,获得信号。通过 TEK-PGY-ONFI 软件,设计和测试工程师可以测试 ONFI 接口是否满足 ONFI 总线定时参数,并自动测量 Command、Address、Data in 和 Data out 业务。TEK-PGY-ONFI 软件中的细节视图功能通过进行标注,把

ONFI 波形的每个电气测量指标与模拟波形关联起来,帮助用户调试定时问题。

密集封装和高数据速率给 NAND 闪存器件中的高保真信号接入带来了挑战。泰克支持各种不同的机械外形,包括带有插口的探头设计、直接连接探头设计、已获专利的边缘探头设计,可以满足异常紧张的机械要求。其提供了插补器(Interposers)和探头 S 参数模型,用于建模或生成应用到示波器中的反嵌滤波器。

TEK-PGY-ONFI 软件在带宽为 4 GHz-33 GHz 的泰克 MSO/DPO70000 系列示波器上运行,推荐在测试中使用 P7500 或 P7300 系列探头。有些客户在进行 ONFI 测试时,可能很难或根本不能接入信号,因此泰克推荐使用 Nexus 开发的 ONFI 152 球形 NAND Flash Edge 高保真插补器(Interposers),实现信号接入,同时保持信号完整性。

最新推出的 TEK-PGY-ONFI 软件完善了泰克为其他内存技术提供的全面解决方案,包括 eMMC, UFS 和 DDR4。