

传感器和 MEMS 器件集成与封装中 DC-DC 转换器的建模研究

王石峰^{1,2} 江启山^{1,2} 丁学用^{1,2} 乔姍³ 袁帅^{1,2}

1. 三亚学院新能源与智能网联汽车学院, 中国·海南 三亚 572099

2. 三亚学院海洋通信研究所, 中国·海南 三亚 572099

3. 三亚学院信息与智能工程学院, 中国·海南 三亚 572099

摘要: 为了增强变电站高压电气设备漏洞的可视化效果, 基于传感器和微机电系统 (MEMS) 理论, 构建了 DC-DC 转换器器件的集成和封装模型。DC-DC 变换器是电力电子技术领域的核心控制电路。针对两相 DC-DC 变换器输出纹波的产生机理, 该模型采用了基于交错同步时钟和自校准交错时间发生器的纹波消除技术, 使变换器的各相在满负载范围内准确交错, 解决了输出纹波幅度的问题。在仿真过程中, 设计并实现了一种高性能的两相 DC-DC 变换器芯片, 该芯片包括基于纹波反馈的自适应导通时间控制逻辑、自校准零电流关断电路和鲁棒的功率开关晶体管驱动逻辑等。实验结果表明, 该芯片的满载电流达到 6A, 峰值效率为 91%, 相间电流误差小于 0.6%, 输出纹波小于 9mV。在 90.265 V 交流输入、0~10W 负载范围内, 输出电压误差小于 0.96%, 当负载在空载和满载之间切换时, 系统响应速度小于 200ps, 有效提高了 DC-DC 转换器的整体性能。

关键词: DC-DC 转换器; 传感器; MEMS 器件; 集成软件包

Modeling Research on DC-DC Converter in Integration and Packaging of Sensors and MEMS Devices

Shifeng Wang^{1,2} Qishan Jiang^{1,2} Xueyong Ding^{1,2} Shan Qiao³ Shuai Yuan^{1,2}

1. Sanya College of New Energy and Intelligent Connected Vehicles, Sanya, Hainan, 572099, China

2. Institute of Marine Communication, Sanya University, Sanya, Hainan, 572099, China

3. School of Information and Intelligent Engineering, Sanya University, Sanya, Hainan, 572099, China

Abstract: In order to enhance the visualization effect of high-voltage electrical equipment vulnerabilities in substations, an integrated and packaged model of DC-DC converter devices was constructed based on sensor and microelectromechanical systems (MEMS) theory. DC-DC converter is the core control circuit in the field of power electronics technology. In response to the generation mechanism of output ripple in two-phase DC-DC converters, this model adopts ripple elimination technology based on interleaved synchronous clock and self calibrated interleaved time generator, which enables the accurate interleaving of each phase of the converter within the full load range and solves the problem of output ripple amplitude. During the simulation process, a high-performance two-phase DC-DC converter chip was designed and implemented, which includes adaptive on-time control logic based on ripple feedback, self calibrating zero current turn off circuit, and robust power switch transistor drive logic. The experimental results show that the full load current of the chip reaches 6A, the peak efficiency is 91%, the phase to phase current error is less than 0.6%, and the output ripple is less than 9mV. In the range of 90.265 V AC input and 0~10W load, the output voltage error is less than 0.96%. When the load switches between no-load and full load, the system response speed is less than 200ps, effectively improving the overall performance of the DC-DC converter.

Keywords: DC-DC converter; sensors; MEMS devices; integrated software package

0 前言

变电站包含许多高压电气设备, 如转换器、变压器、断路器和电压互感器, 它们是电力系统供配电的重要组成部分。当变电站遇到地震等严重振动情况时, 高压电气设备的损坏将导致电网失去供电和配电功能, 停电条件增加了灾后安置灾民的难度。变电站高压电气设备的易感性可用于设

备地震风险评估, 设备状态决定变电站输配电系统的运行。将可视化监测技术应用于变电站高压电气设备易感性的研究, 可以有效地提高电气系统的整体监测需求。为使信号传输电路最终获得输出纹波较小的准确信号, 对传感器和微机电系统 (MEMS) 器件的性能要求就越来越高。在传感器和 MEMS 器件集成与封装中对于 DC-DC 转换器的使用, 可以

做到这一点。

在此前的相关研究中,分段线性斜率补偿的方法被大量研究。分段线性补偿是在一个线性补偿的基础上进化而来的,工作循环被划分为几个区间,每个区间采用一个补偿斜率,每个区间的补偿斜率由其最大工作循环决定。这样,不仅每个分段的补偿斜率在相应的占空比范围内满足系统稳定性要求,而且补偿电流也大大降低。分段线性斜率补偿方法虽然可以减少斜率补偿对峰值电流的影响,由于幅值有限,无法从根本上解决占空比变化对负载容量的影响。针对斜坡补偿对峰值电流的影响, Liu^[1]采用了可调箝位电压的方法,通过设计一个可以随占空比变化的簧片电压,成功抑制了斜坡补偿效应对负载容量的影响。Ji^[2]已经证实,引入斜坡补偿后,解决占空比变化对负载能力的影响是非常有效的。事实上,这个方案还有待进一步优化。Stauth^[3]通过改变簧片电压的结构,使峰值电流完全独立于斜坡电流和电阻。Jordan^[4]发现,当占空比非常大时,一旦某个周期中出现 100% 的占空比,当下一个周期到来时,由于开关管继续导通,采样电流总是存在,叠加电平下降。如果斜坡电流与采样电流相比太小,则叠加电平槽将在下一个周期^[5]开始时的很短时间内迅速达到误差电压 VC,并且开关将关闭,使周期占空比更小。由于续流的导通时间较长,电感器电流将急剧下降^[6],这将导致在随后的循环中连续导通,以保持输出电压的稳定性。一旦发生这种情况,回路将紊乱,输出电压纹波将变得更大^[7]。如果针对两相 DC-DC 变换器输出纹波的产生机理,采用基于交错同步时钟和自校准交错时间发生器的纹波消除技术,使变换器的各相在满负载范围内准确交错,就可以很好的解决输出纹波幅度的问题。与其他方法相比,本研究提出的模型有自适应程度高、自校准速度快、稳定性好、鲁棒性强的特点。

1 DC-DC 转换器结构

在 DC-DC 转换器架构中,为了获得更好的电压调节精度和动态性能,必须使用控制电路与主电路一起工作。控制电路包括输出采样网络、误差放大器、补偿器和脉宽调制器。在大负载下,由于电流大,各元件的导通损耗和开关损耗占大多数,控制电路和外围电路消耗的损耗相对比例很小。常用的方法是电压型 d(x, t) 和电流型控制 v(in) - v(out)。为了使模拟更准确,输入阻抗更接近闭环情况,采用了由电感器和电容器连接的双环方法。在直流扫描 c(x, t) - s(x, t) 时,电感器等效于短路,电容器可视为开路;而在交流分析中,电感器 r(source) 相当于开路,电容器可以视为短路。

$$1 - d(x, t) = \begin{cases} \max(in) - \max(out) \\ \partial v(in) - \partial v(out) \end{cases}$$

$$c(x, t) - s(x, t) = \frac{1 + sl / r(source)}{1 - sl / r(source)}$$

当使用电路进行实验时,电感的实际参数很难控制,

而且特别容易受到环境和频率等各种因素的影响。为此,基于通用阻抗转换器的原理,将电路中的线圈电感替换为有源模拟电感,从而可以实现电感的高精度,并大大提高对整个电路参数的控制。其中, PWM (脉宽调制) 发生器 v(x, p) 通常由锯齿波发生器和比较器 y(x-p) 组成。锯齿波发生器发射具有固定振幅和固定重复频率的锯齿波。

$$y(\sqrt{1 + 4m(x)}, b) / v(x, p) \geq 1 - y(x - p) \\ \frac{v(in) - v(out)}{1 - v(in) - v(out)} \geq \frac{D(in) - D(out)}{1 - x(\sqrt{d - a})}$$

当 DC-DC 转换器工作在 IGBT (Insulated Gate Bipolar Translator) 导通模式 D(in) - D(out) 时,未被有效控制的另一个功率管 I(v) 将处于体 IGBT 和体二极管的关断状态;当在二极管续流模式下工作时,它是无效的。同时,在通用阻抗转换器 c(o) 中,可以通过调整电感的电阻或电容参数来调整电感的参数值 1-v,从而可以在大范围内调整电感,这有利于电路参数的调整。此外,如果使用基于通用阻抗转换器原理的有源模拟电感器的电路 L(p, q) dpdq 用作单元电路。

$$I(v, in, out) = \frac{v(in) - v(out)}{1 - v} - [D(in) + D(out)]$$

$$\frac{1 - c(o)}{c(o)} \int L(equation, q) dpdq - L_{cls}(p, q) dpdq = 1$$

在以 DC-DC 转换器为代表的开关非隔离降压开关转换器中,该电路是单管非隔离 DC 转换器,其在没有变压器的情况下的输出电压等于或小于输入电压。其中,双滞后电流方向检测方法考虑了输出电流谐波和毛刺对电流方向检测 R(x) C(x) 的不利影响,能够可靠地识别 RC-IGBT 型双向直流,控制信号 R(1-x) 切换到有效控制的功率管 R(d) - R(cr);电压和电流双闭环控制用于快速准确地调节输出电压 c(x) 的幅度。

$$R(x)C(x) = \frac{\sqrt{\Delta r(1-x)} - \Delta r(c(x) - 1)}{r(d) - r(cr)}$$

$$I(v, t) = \begin{cases} \frac{v}{1 - v}, dt(x) < t < t(x) \\ D(t) + D(dt) \end{cases}$$

在双向 DC-DC 变换器 dt(x) 中,在开关周期 D(t) 期间,DC 总线侧上的等效 DC 输入电压 vs 和输出电压 vo 连续变化,并且开关周期内的电压变化小,并且可以使用状态空间可变开关。所谓磁滞损耗是指磁性材料的磁滞现象,它与频率、电压和最大磁通密度的平方有关;涡流损耗是指磁路。

2 直流变换器的分类

当驱动电源开关管的栅极时,有必要将内部 DC 转换器控制电路的地电位与电源地分离,以防止串扰在电源管执行快速开关操作时对内部控制电路造成大噪声 i(sense) - i(res)。因此,在控制电路的占空比信号 t(sense) 和零电

流关断信号 V_z 经历一系列逻辑处理 $d_i(x, t)$ 之后, 有必要将地 $dc(x, t)$ 转换为电平转换电路, 并且由转换产生的信号分别控制上功率晶体管 $\max(d)$ 和下功率晶体管 $\max(x)$ 的开关。

$$v(i) - v(o) = (i(\text{sense}) - 4i(\text{res})) \frac{v}{1-v} - t(\text{sense}) / t(x)$$

$$i(\text{sense}) - 4i(\text{res}) = \begin{cases} \frac{dc(x,t)}{di} \Big|_{\min(d) - \min(x)} \\ \frac{di(x,t)}{di} \Big|_{\max(d) - \max(x)} \end{cases}$$

为了消除噪声的影响, 在短的前沿消隐时间后, 激活动态比较器 (DCMP) 以检测 SW 点和 PGND (保护接地) 点之间的电压差。比较图中补偿前后的波德图, 补偿后的相位角域度较大, 因此增强了后系统的补偿稳定性 $R(x) - C(x)$ 。

$$2 \frac{R(x)C(x)}{1 - f(x)C(x)} = \frac{\sqrt{R(x)C(x)} - 1}{R(x) - C(x)} - \frac{\sqrt{R(x)C(x)} + 1}{R(x) + C(x)}$$

$$\sigma[d(y, x)] = \begin{cases} \text{lap} \{ dy(k) / dk, dx(k) / dk \} \\ 0 \end{cases}$$

根据解码器输出 $Q[15:0]$ 的调整来调整电阻器阵列 $R(x) + C(x)$, 从而减小 $dy(k) / dk$ 的输入正偏移。因为如果开环传递函数的交叉频率过高, 则无法有效抑制由寄生振荡引起的高频开关频率及其谐波和低频分量。系统无法稳定工作。此外, 交叉频率应位于斜率为 -20dB/dec 的线段上。如果中频的斜率为 -20dB/dec , 则系统 $r(\text{ref}) - r(x)$ 必须是

稳定的。

$$\begin{cases} \frac{r(\text{ref}) - r(x)}{r(\text{ref}) + r(x)} - r < 1 \\ (1-r)v'v \rightarrow 1 \end{cases}$$

$$\begin{cases} i(a) = I(a) + \overline{I(a)} + i(a) + \overline{I(a)} \\ i(b) = I(b) + \overline{I(b)} + i(b) + \overline{I(b)} \end{cases}$$

在轻负载条件下, 转换器 $r(\text{ref}) + r(x)$ 工作在电感器电流的不连续模式 $i(a)$ 中。当磁通量发生变化时, 铁芯中会产生感应涡电流。这种现象与频率、电压和最大磁通密度的平方有关。

这就防止了反向电感器电流并且提高了轻负载效率 $I(a)$ 。如果存在反向电流, 则点 SW 处的电压将高于电源接地 PGND 的电压。值得注意的是, 当电感器能量没有耗尽时过早地关断下功率管 $I(b)$ 将导致输出的瞬态振荡; 当反向电感器电流已经发生时过迟地关断下功率管将降低系统效率。

图 1 中提出的电路的输出电压可以通过 PWM 调节, 输出电压特性也类似于传统的 L-C 滤波的 DC-DC 转换器。因为这个电路是一阶系统, 所以在瞬态过程中不存在过冲问题。根据上述 RC-IGBT 双向 DC-DC 变换器的结构, 在 PSIM 9.0.3 仿真环境中建立了双向 DC-DC 转换器在 DC-DC 和 Boost 模式下工作的仿真模型, 并对电压和电流双模进行了分析。在实际的功率转换产品中, 除了希望具有高而稳定的输出电压、更宽的输入电压值、更快的时间响应和更低的 EMI 之外, 还有一个非常重要的指标, 那就是效率。

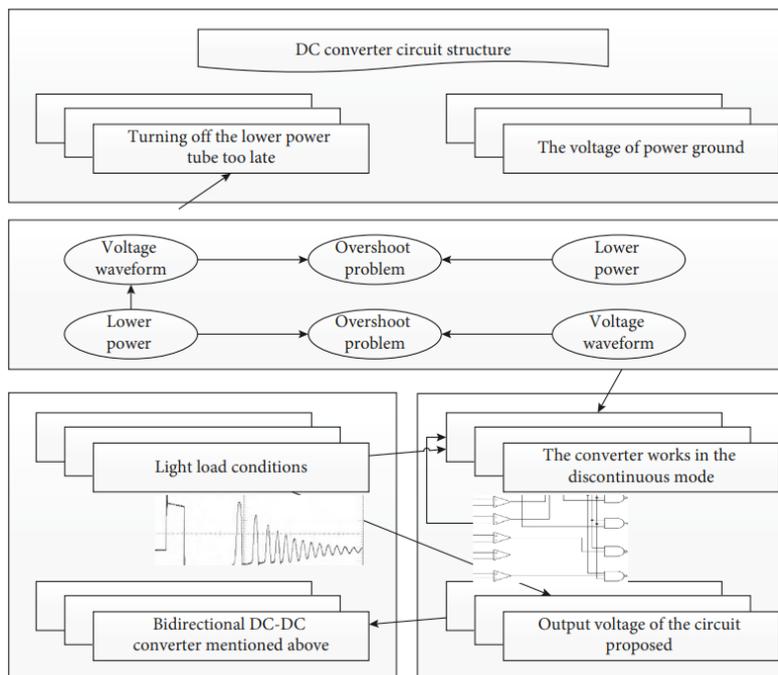


图 1 DC 转换器电路结构

3 传感器能量转换

当比较器 G 放电时，在死区时间比较器的输出端出现正脉冲，该正脉冲由脉冲约束触发器计时，该触发器同时关断晶体管 Q1 和 Q2。如果输出控制端子连接到参考电压源，则调制脉冲交替地输出到两个输出晶体管，并且输出频率等于脉冲振荡器的一半。在单端操作模式中，当需要更高的驱动电流输出时，Q1 和 Q2 也可以并联使用。此时，输出模式控制引脚必须连接到地，以关闭双稳态触发器。在这种状态下，图 2 的输出脉冲频率将等于振荡器频率。

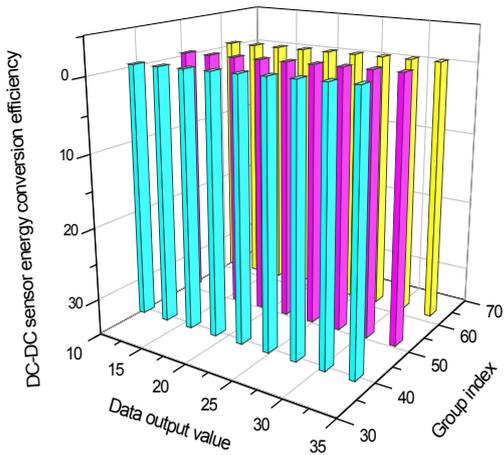


图 2 DC-DC 传感器能量转换效率输出

通过用通用阻抗变换器代替实际电感元件，研究了无电感 DC-DC 变换器的实现，在一定的动态范围内，有源模拟电感可以代替线圈电感元件的使用，并且可以很好地实现电感元件的功能。出现这种现象的主要原因是反馈网络的传递函数发生了变化。论文通过在标尺 1 的两端并联 C1，并优化反馈电阻器的设计，使交叉频率几乎不随输出电压变化，克服了输出电压变化对系统响应的影响。

在图 3 中的短路测试期间，并联单元中的高侧 SiC MOSFET 保持导通，并将 1μs 栅极驱动脉冲施加到低侧 SiC MOSFET。示出了具有改进布线的并联半桥单元中的 SiC MOSFET Q7 和 Q8 的 HSF 测试开关波形。对于降压转换器，理想的输出电压范围是从参考电压到电源电压。假设内部参考电压为 0.6V，当输出电压从 0.6V 变为 0.8V 时，电阻比从 1 变为 4/3，并且交叉频率的相应变化为 25%，此时稳定性的变化并不严重。这样，即使在重负载的情况下，由于 ESR 值小，所以相对于元件的导通损耗也小。此时，C1 将发挥积极作用。双脉冲实验表明，与传统的 SiC 并联半桥单元相比，优化后的下臂带有并联 MOSFET 的并联半桥组件的瞬态电流过冲差从 10.22% 显著降低到 2.78%，同时还获得了开关损耗差。同样程度的减小和良好的瞬态电流分布也在故障短路条件下。稳态实验表明，优化后的 SiC 并联单元比传统并联单元具有更均匀的温度分布。

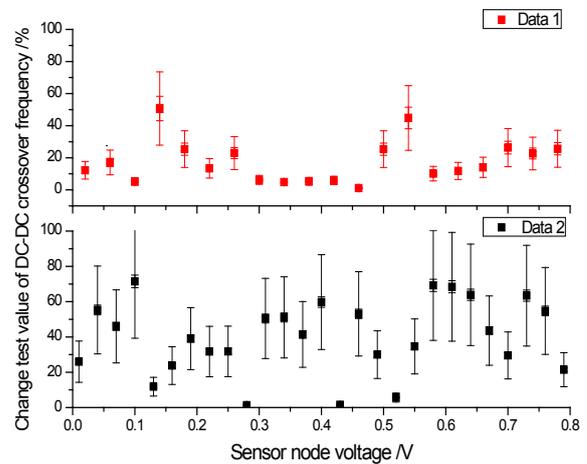


图 3 DC-DC 传感器交叉频率的变化测试

4 设备电流平衡分析

当器件电流平衡被放入电阻值为 100Ω 的电阻负载中时，输出电压和电感器电流的波形如下所示，当电阻负载在 0.3s 内导通，输出电压下降，下降电压约为 20V，小于输出电压的 5%，并在短时间（约 0.2s）后返回到满足稳定性的 700V 的电压指令值。因此，D 只影响 fc1 以下的频谱振幅，甚至影响谐波振幅，但 fc1 以上的频谱振幅的包络是相同的。在本节中，将功率器件的开关电压波形近似简化为理想梯形波 (tr=tf) 和非理想梯形波形 (tr ≠ tf)，并通过傅立叶分解分析开关波形的各个时域参数对其频谱特性的影响，然后分析实验测得的 SiC 并联半桥单元开关电压波形的频谱特性。

当图 4 中系统的输入电阻为 100，电感为 300mH 的电阻电感负载时，输出电压和电感电流的波形如图所示。当组电感负载导通 0.3s 时，此时输出电压将降至 15V。此时，输出电压仍然可以在短时间内（约 0.5s）恢复到 700V 的命令值。例如，在选择输出滤波电容器时，出于这个原因，通常使用一些高质量的系数电容器，多层陶瓷电容器，这样即使在更高的频率下，输出纹波等效输入电阻也可以忽略。

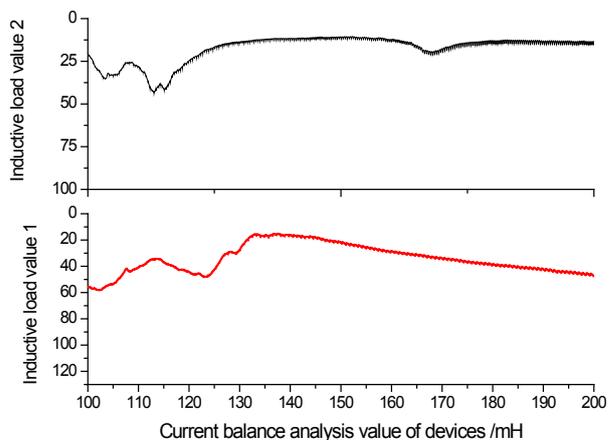


图 4 电阻性和电感性负载装置的电流平衡分析

当系统被置于恒定功率负载中时, 输出电压和电感电流的波形被示出。当恒功率负载处于负载启动状态时, 输出电压也会出现压降。压降值为 22V, 不到输出电压的 5%, 仍能恢复到电压指令值。稳态恢复时间约为 0.3s。对于电感电流, 在接通恒定功率负载后, 电流值突然变化, 然后可以恢复到稳定状态。注意, 在电压和电流双模控制下, 恒功率负载仍能满足系统稳定性要求。

5 结论

论文从多相 DC-DC 变换器的输出电压纹波分量入手, 建立了多相 DC-DC 变换器的集成封装模型。根据实现简单、负载瞬态响应快的要求, 该模型提出并设计了一种基于纹波反馈的自适应导通时间控制逻辑。所研究的方法具有较高的逻辑性能, 增强了传感器和 MEMS 器件的细节, 增强了信号对比度, 提高了传感器和 MEMS 器件细节的丰富性, 利用传感器和 MEMS 器件集成与封装中 DC-DC 转换器的建模分析了高压电气设备的脆弱性, 提高了变电站的安全运行。在仿真过程中, 设计并实现了一种高性能的两相 DC-DC 变换器芯片, 该芯片包括基于纹波反馈的自适应导通时间控制逻辑、自校准零电流关断电路和鲁棒的功率开关晶体管驱动逻辑等。实验结果表明, 该芯片有效提高了 DC-DC 转换器的整体性能。

参考文献:

- [1] Liu L, Ou Y, Ma J, et al. An inductorless P-SSHC piezoelectric energy harvesting integrated system with high flipping efficiency[J]. *Microelectronics Journal*,2022:105479.
- [2] Ji S, Liao X. Researches on MEMS thermoelectric-photoelectric integrated energy harvester with metal heat sink[J]. *Microelectronics Journal*,2020(96):104702.
- [3] Stauth J T. Pathways to mm-scale DC-DC converters: Trends, opportunities, and limitations[J]. *Custom Integrated Circuits Conference (CICC)*. IEEE,2018:4-8.
- [4] Jordan D, Wei G, Ye L, et al. High q-factor pcb embedded flip-chip inductors with multilayer cztb magnetic sheet for power supply in package (pwrsip)[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*,2020,9(1):102-110.
- [5] Duque M, Leon-Salguero E, Sacristán J, et al. Towards the Monolithic Integration of Converter Circuitry and Piezoelectric MEMS Energy Harvesters[J]. *Multidisciplinary Digital Publishing Institute Proceedings*,2018,2(13):1512.
- [6] Nabavi S, Zhang L. T-shaped piezoelectric structure for high-performance MEMS vibration energy harvesting[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*,2019,28(6):1100-1112.
- [7] Ali M, Nabavi M, Hassan A, et al. A versatile SoC/SiP sensor interface for industrial applications: Design considerations[J]. *Microelectronics (ICM)*. IEEE,2019:40-43.

作者简介: 王石峰 (1983-), 男, 中国黑龙江人, 博士, 高级工程师, 从事电气智能研究。

课题项目: 论文是海南省教育厅项目资助 2024 年度海南省高等学校科学研究项目“高压电气设备脆弱性的可视化技术研究”(项目编号: Hnky2024ZD-18)的研究成果; 论文是三亚学院虚拟教研室试点建设项目(项目编号: SYJZXN202303)的研究成果。