

# 基于时基脉冲同步的变电站电压信号无线远传镜像装置设计

张进<sup>1,2</sup>, 丁玉柱<sup>1,2\*</sup>, 曾慈文<sup>1,2</sup>, 毛学锋<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>国网湖南超高压变电公司, 湖南 长沙

<sup>2</sup>变电智能运检国网湖南省电力有限公司实验室, 湖南 长沙

收稿日期: 2025年11月14日; 录用日期: 2025年12月16日; 发布日期: 2025年12月24日

## 摘要

本文在总结分析现有变电站现场高压试验提取电网PT参考电压方法的基础上, 提出一种新型的基于时基脉冲同步的变电站电压信号无线远传镜像装置。该装置通过采集电网电压后, 利用绝对时间的时机标注获取信号采集、处理和传输的时间差, 通过脉冲离散方法将模拟信号脉冲化, 以利于硬件电路的高精度锁相同步, 利用脉冲数相移, 实现时间差的同步, 从而实现高精度跟踪和复原电网PT参考电压。精度检验实验和现场应用实践表明该系统完全满足国家电网公司企业标准Q/GDW540.1-2010《变电设备在线监测装置检验规范》要求。

## 关键词

高电压试验, 脉冲同步, 信号复原, 现场校验

# Design of Wireless Remote Transmission Mirroring Device for Substation Voltage Signals Based on Time-Based Pulse Synchronization

Jin Zhang<sup>1,2</sup>, Yuzhu Ding<sup>1,2\*</sup>, Ciwen Zeng<sup>1,2</sup>, Xuefeng Mao<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>State Grid Hunan Extra High Voltage Substation Company, Changsha Hunan

<sup>2</sup>Substation Intelligent Operation and Inspection Laboratory of State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd., Changsha Hunan

Received: November 14, 2025; accepted: December 16, 2025; published: December 24, 2025

\*通讯作者。

文章引用: 张进, 丁玉柱, 曾慈文, 毛学锋. 基于时基脉冲同步的变电站电压信号无线远传镜像装置设计[J]. 电气工程, 2025, 13(4): 116-126. DOI: 10.12677/jee.2025.134013

## Abstract

Based on the analysis and summary of existing methods for extracting grid PT reference voltage during on-site high-voltage tests in substations, this paper proposes a novel wireless remote mirroring device for substation voltage signals based on time-based pulse synchronization. After collecting grid voltage, this device utilizes absolute time stamping to obtain the time differences in signal acquisition, processing, and transmission. It converts analog signals into pulses through a pulse discretization method, facilitating high-precision phase-locked synchronization of the hardware circuit. By utilizing pulse number phase shift, it achieves synchronization of time differences, thereby realizing high-precision tracking and restoration of grid PT reference voltage. Accuracy testing experiments and field application practices have shown that this system fully meets the requirements of the enterprise standard Q/GDW540.1-2010 "Inspection Specification for Online Monitoring Devices of Substation Equipment" issued by the State Grid Corporation of China.

## Keywords

High Voltage Test, Pulse Synchronization, Signal Restoration, On-Site Verification

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

氧化锌避雷器是一次设备的保护设备, 根据运行经验, 其泄漏电流和阻性电流为微安级, 当其增量超过 50% 时, 需要对避雷器进行检修[1]。避雷器带电测试是其状态检修的主要手段, 通过测量避雷器阻性电流及泄漏电流, 与上年同期测试数据进行对比, 可以辅助判断避雷器的运行状态。常用的带电测试方法是以 PT 电压向量投影法来获得测试参数。即通过同步采集 PT 电压信号与避雷器泄漏电流信号, 通过电流信号和电压信号的夹角投影计算获得阻性电流。

为了获取 PT 电压参考, 带电测试人员现场需要打开 PT 柜接入电压取样信号线, 由于 PT 柜端子排多, 可能出现错接端子排而导致试验数据错误, 影响试验效率; 同时可能在接线过程造成 PT 电压二次侧短路进而导致继保误动作。同时由于 PT 柜往往和被试设备之间的距离较远, 远距离接线、走线对变电站高压正常运行和试验人员的安全带来极大危险。为了规避风险, 目前有通过检修电源及感应电压作参考进行阻性电流测试, 但是由于参考信号和实际的电压值和相位存在较大误差, 测量结果往往偏离真实情况, 带来过检修或欠检修情况。不能真实反映避雷器状态。

鉴于上述实验方法存在的缺陷, 急需开发一种远端信号同步装置。当前已有 GPSDO 技术, 数据远传技术, 对时同步技术等。GPSDO 技术是通过授时时钟和高稳定性晶振来实现的同步, 其成本高昂, 仅芯片成本就超过 4000 元/片, 且长时间工作温漂严重, 甚至失去同步; 数据远传技术通过高速数据传输来缩短通信迟滞, 实际上并未实现真正的同步, 最长时延可达数十毫秒; 对时同步是基于信号同步的两端同时通过北斗或 GPS 授时进行对时, 在双方对时完成后, 约定一定的延时(往往延时在秒级水平)后对两端的信号进行比较修正, 因此其同步频率和实时性不足[2]。因此为解决当前已有技术的缺点本文提出设计了一种基于时基脉冲同步的变电站电压信号无线远传镜像装置。该系统能够将 PT 柜内的电压无线高精度地镜像映射到试验现场, 一次接线多点多次使用, 无需重复接线走线, 安全可靠、操作方便。可用于

对现行各类需要高精度同步系统电压的各类高压试验。

## 2. 时基脉冲同步正弦信号远端镜像原理

电网稳态运行时，其电压信号是稳定的，即其电压大小、频率和相位是稳定不变的。设某采集点时刻，电压幅值大小为  $U_0$ ，相位为  $\theta_0$ ，频率为  $\omega$ ，则此后电压任意时刻  $t$  的实时大小  $U$  为：

$$U = U_0 \sin(\omega t + \theta_0) \quad (1)$$

此时通过连续采集一段时间的电压信号，然后解算出  $U_0$ ，相位  $\theta_0$ ，频率  $\omega$ ；假设 PT 柜端的采样时的绝对时间为  $T_0$ ，解算传输到试验现场端的绝对时间为  $T_1$ ，两者的时间差  $\Delta t$  为：

$$\Delta t = T_1 - T_0 \quad (2)$$

那么此时试验场端的电压要想和电网电压完全同步，则试验场端此后电压任意时刻  $t$  的实时大小  $U'$  为：

$$U' = U_0 \cos(\omega t + \omega \Delta t + \theta_0) \quad (3)$$

此时 PT 柜端的电压  $U$  和试验场端的电压  $U'$  实现了完全的同步。

特别地，当  $\theta_0 = 0$  时，即在电压过零点时开始采用，PT 柜端的电压  $U$  和试验场端的电压  $U'$  则变成：

$$U = U_0 \cos(\omega t) \quad (4)$$

$$U' = U_0 \cos(\omega t + \omega \Delta t) \quad (5)$$

### 2.1. 波形转换及锁相倍频脉冲离散

如图 1 所示，黑色为电压  $U$  曲线，由于其为变化信号，处理难度较大，可以将其变换成同周期同相位的方波信号，实现波形的转换，这样有利于数字化处理。

进一步将方波信号离散成 4000 个脉冲的离散脉冲信号，且第一个脉冲的上沿和方波的上升沿对其，最后一个脉冲的下沿和方波的下沿对齐。每一个脉冲的相位相隔  $0.09^\circ$ 。当  $U$  的幅值为  $U_0$  时，则第  $n$  个脉冲的相位为  $0.09 n$ ，则对应的幅值为  $U_0 \sin(0.09 n)$ 。这样就将模拟电压信号变成了幅值和脉冲数相关的数字信号。

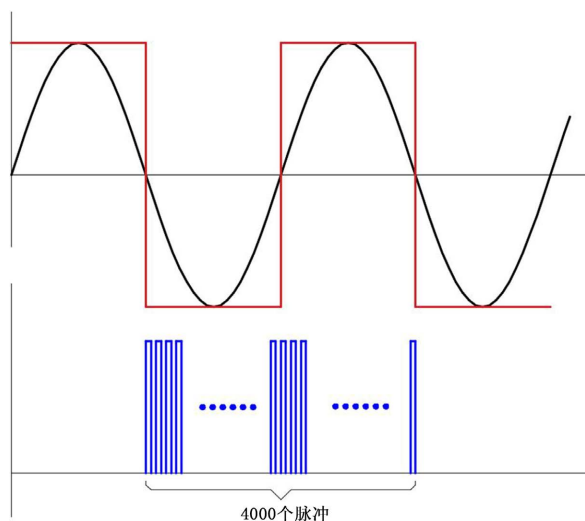


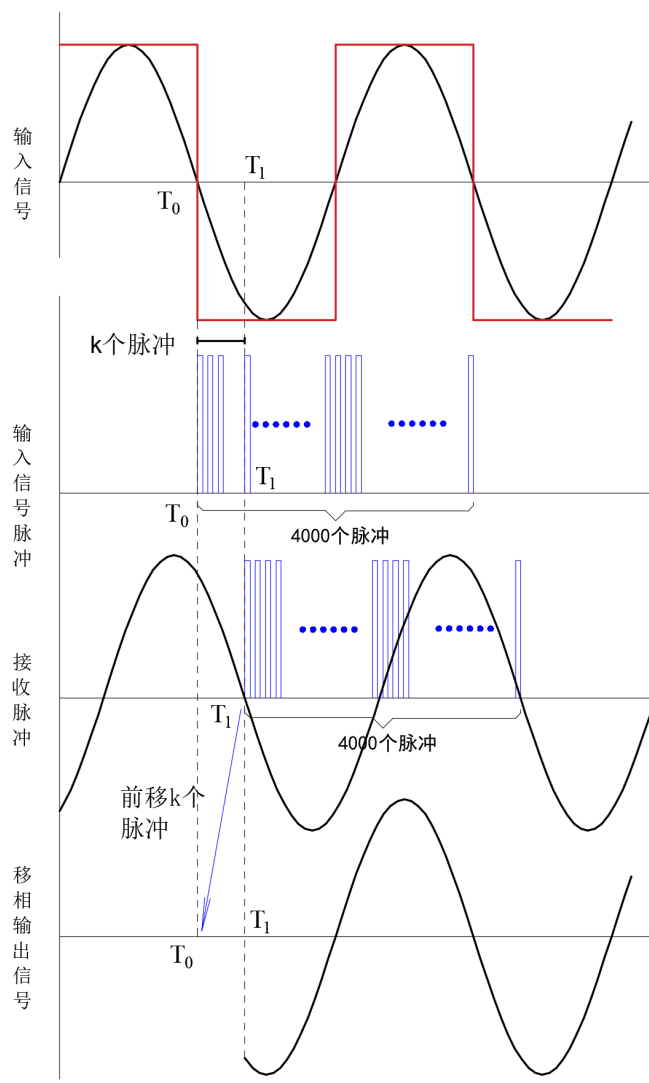
Figure 1. Waveform conversion and discretization with frequency doubling pulses

图 1. 波形转换和倍频脉冲离散

## 2.2. 时基标注及移相复原

假设 PT 柜端的采样时的绝对时间为  $T_0$ ，试验现场端接收到信号的绝对时间为  $T_1$ ，则两者相差  $k$  个脉冲，则  $k$  值为：

$$k = \frac{2000\omega\Delta t}{\pi} \quad (6)$$



**Figure 2.** Time-based annotation and phase shift restoration  
**图 2.** 时基标注及移相复原

然后，试验现场端将接收信号前移  $k$  个脉冲后，从  $k+1$  个脉冲对应的电压进行输出，则此时输出电压和电网电压实现同步，如图 2 所示。

## 3. 电压信号无线远传镜像装置设计

### 3.1. 系统组成及原理框图

本文所设计的镜像装置采集的电网电压信号为 PT 输出信号，该信号通过阻抗隔离后输入后端信号

调理电路,经波形闭环、锁相倍频后经微处理器处理后通过无线输出给装置端。装置端收到信号后,通过波形整形后通过压控输出电路经阻抗隔离电路输出,具体如图3所示。这里时基授时模块采用 SKYLAB 高性能、多系统双频 SKG123L 模块,该模块能同时支持 GPS 和北斗高精度授时,授时精度 $\pm 15$  ns。无线通信采用 433M 通信,实现 2 km 范围内变电站区域的全覆盖通信。

其中,阻抗隔离模块是为实现传感器输出阻抗和后端信号调理电路阻抗匹配而增设的中间环节,能有效减小信号失真,具备输入阻抗高输出阻抗低的特点。波形变换模块是将参考信号的正弦波形转化成可供后续电路处理的方波信号。锁相倍频电路将输入的方波信号进行 4000 倍的倍频处理,然后输入微处理器,微处理器通过北斗读取绝对时间后将时间戳赋予首个脉冲,进行时间同步。接收端接收到发送端发出的数据后,将接收时通过北斗读取的绝对时间戳赋予接收到的首个脉冲,然后根据看时间差计算相移脉冲数  $k$ ,然后相移脉冲数  $k$  后,从  $k + 1$  个脉冲开始控制输出电压信号,实现和电网电压的同步。输出的信号需经波形整形和阻抗隔离模块进行调理,滤除高次谐波,确保仅工频基波信号输出。

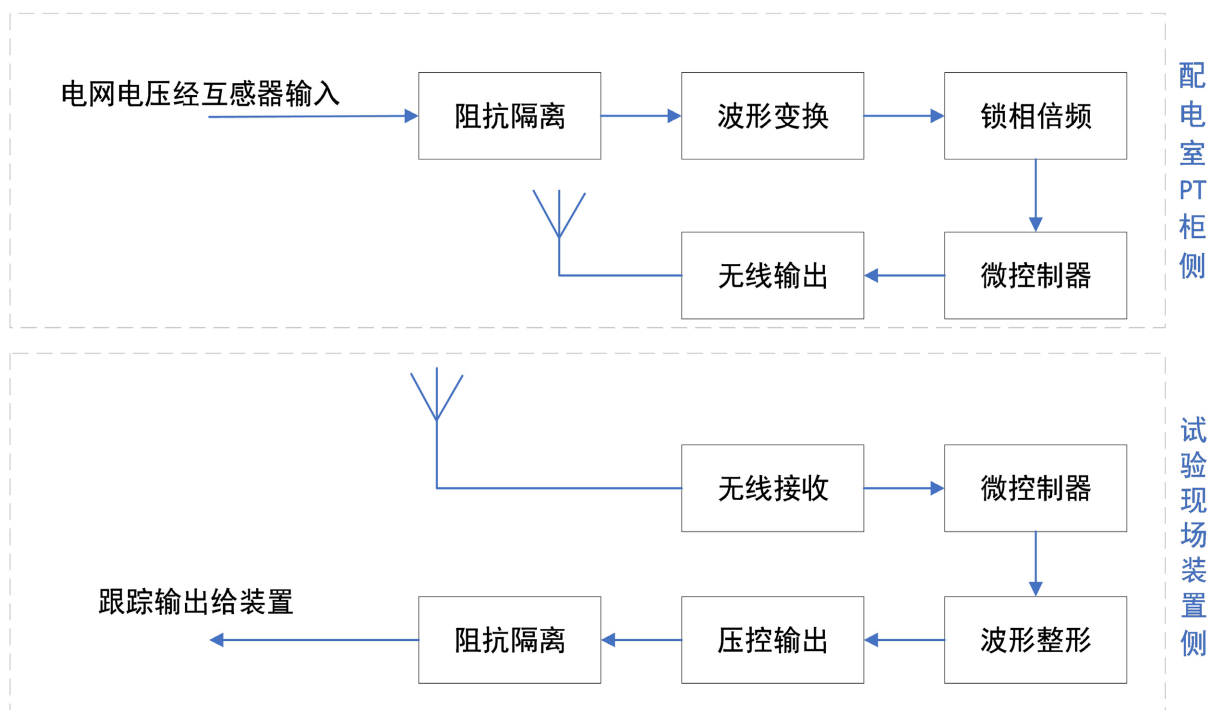


Figure 3. Principle block diagram of the system  
图 3. 系统组成原理框图

## 3.2. 系统重要环节硬件设计

### 3.2.1. 阻抗隔离电路

不同厂家不同型号的传感器输出阻抗不尽相同,为了使系统与大部分传感器输出阻抗匹配,需对输出信号接口进行阻抗隔离,实现传感器和系统之间的阻抗匹配,保证信号在采集和处理过程中不失真[3]。

阻抗隔离模块电路原理图如图4所示,该电路通过 AD620 构成的跟随器与前端外部传感器接口。AD620 输出通过 OP07 运放构成的跟随器与后续电路接口。这样充分利用 AD620 高输入阻抗和 OP07 的低输出阻抗实现电路外部与内部之间的阻抗匹配。

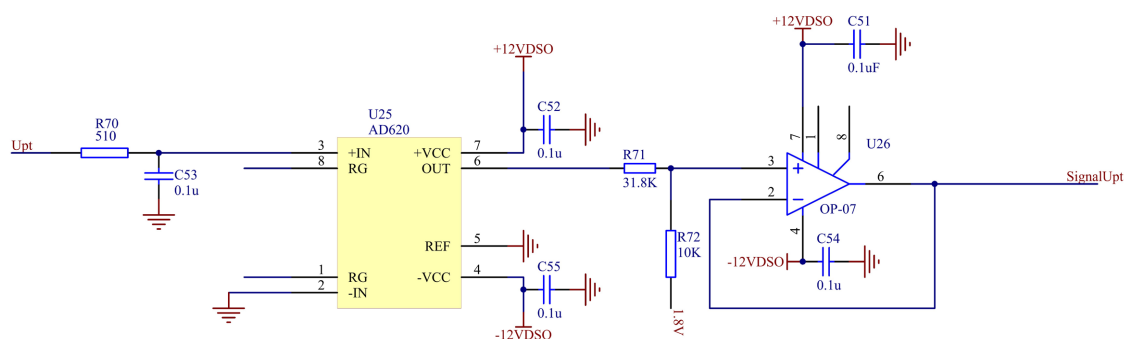


Figure 4. Schematic diagram of impedance isolation circuit  
图 4. 阻抗隔离电路原理图

### 3.2.2. 波形变换电路

输入信号为正弦信号，若直接对该信号进行倍频处理，则其电路结构复杂，且信号易受电磁干扰造成频率波动，进而造成后续鉴相及电流输出相位误差较大，因此需将该正弦信号转化成不易受干扰且易于数字处理的方波信号。该转化电路如图 5 所示。

波形转化电路由两级电路构成，前级电路作为电路输入级，由 OP07 运放搭建的电压跟随器构成。输入输出信号先经过阻容滤波，再由两个反向并联的二级管限幅，最后输入后级电路。后级电路由差动比较器 LM311 搭建信号比较电路，经过电压比较输出方波信号，再经限幅后输出，供后续电路处理使用。

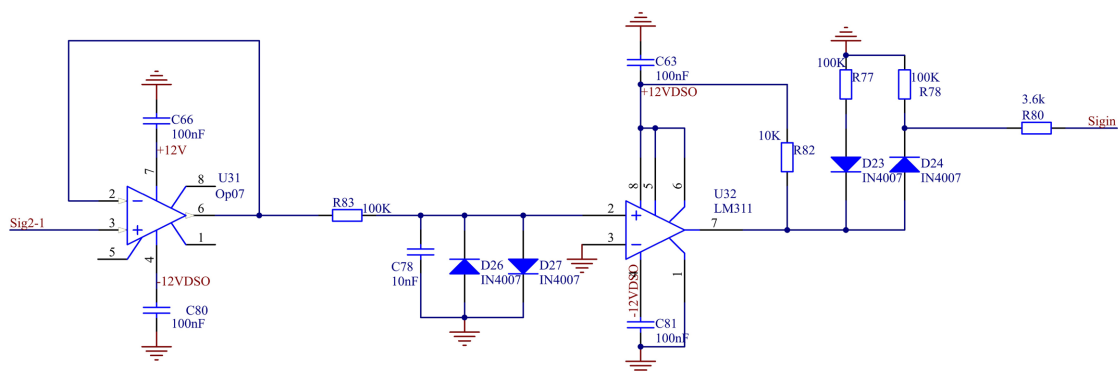


Figure 5. Waveform conversion circuit  
图 5. 波形变换电路

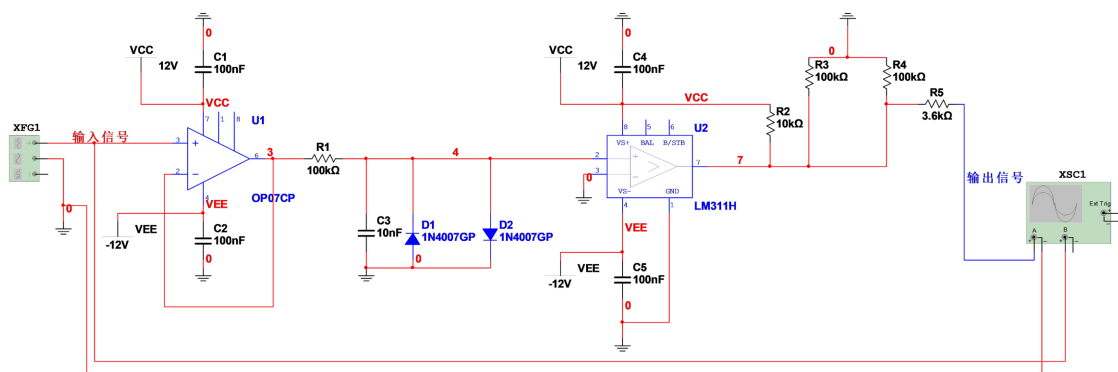


Figure 6. Simulation model of waveform conversion circuit  
图 6. 波形变换电路仿真模型

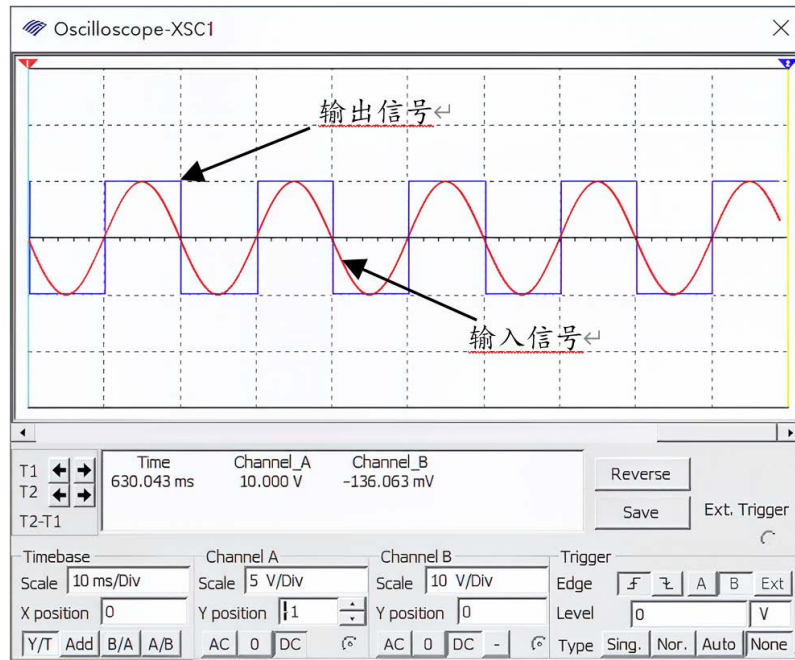


Figure 7. Simulation result of waveform transformation circuit  
图 7. 波形变换电路仿真结果

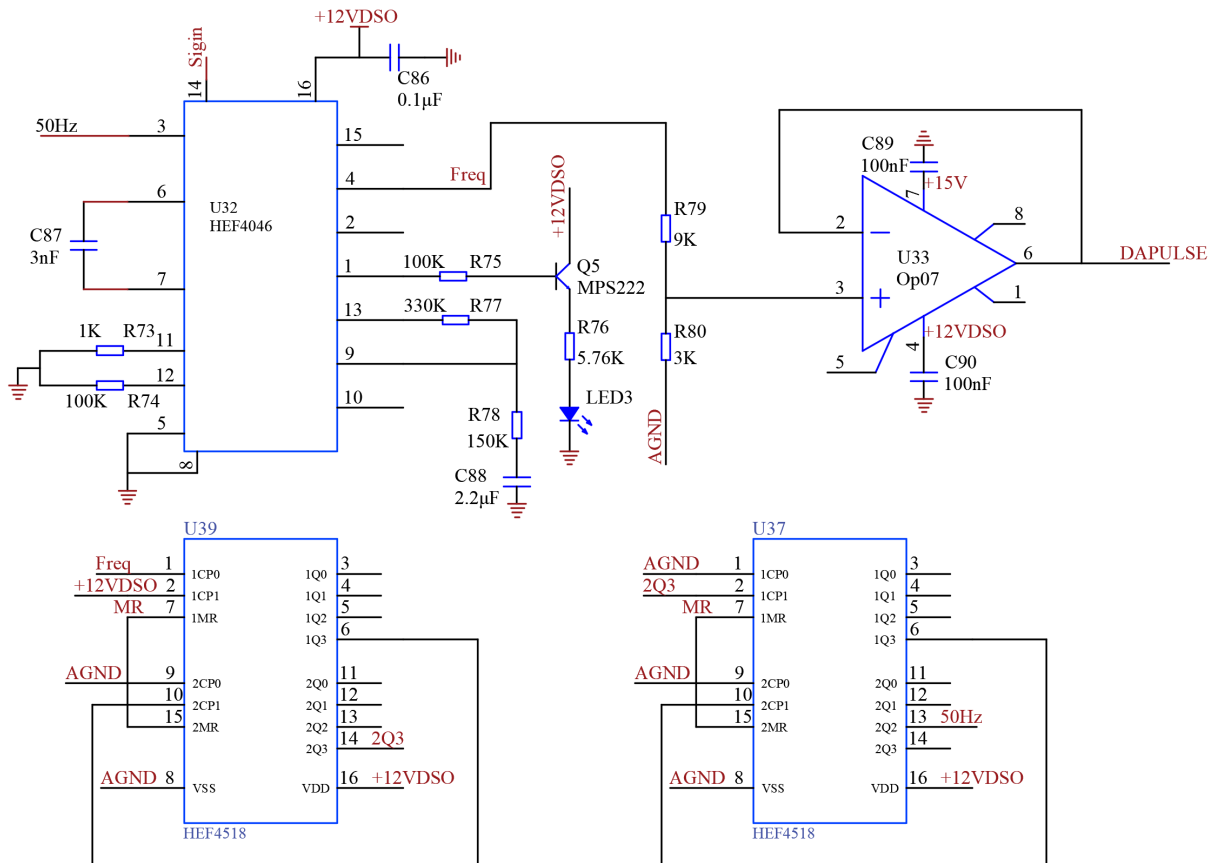


Figure 8. PLL (phase-locked loop) circuit  
图 8. 锁相倍频电路

为验证该电路的功能和性能，于 Multisim 软件中构建该电路的仿真模型，如图 6 所示，正弦输入信号由信号发生器模拟产生，由模拟示波器观察输入信号和输出信号波形。仿真结果如图 7 所示，图中蓝色方波为输出信号，红色正弦波为输入信号，从图中可以看出输入输出信号频率完全一致，几乎没有发生相移，因此不会引入相位误差，可以满足系统高精度相位控制需求。

### 3.2.3. 锁相倍频电路

为确保输出电流信号能准确跟踪参考信号并实现  $0.1^\circ$  相移分辨率的相移控制目标，可将参考信号的一个周期进行 4000 等分，每一等分则为  $0.09^\circ$  相角，微处理器通过计数等分数就可精确控制输出电流与参考信号之间的相位关系。为实现这一等分的目的，需将原信号进行倍频处理。鉴于参考信号已经在前级电路中转化成了方波信号，因此本部分只需对方波信号进行倍频处理形成一个脉冲序列，脉冲序列的每一个脉冲则代表一个等分，将这些脉冲序列输入微处理器，则微处理器可通过计数器计量脉冲数获知参考信号当前相位，并通过控制从第  $k$  个脉冲输出实现调整电压之间的相位差，实现输出信号和电网信号的高精度同步。

为实现以上功能，本部分采用锁相环 PLL 倍频电路进行倍频处理。锁相环电路为自动闭环控制系统，能够实现输出信号与输入信号的精确同步，即输入方波信号的上升沿即为倍频后第一个脉冲的上升沿，如此则不会在倍频过程中出现相位误差[4]。锁相环 PLL 电路由锁相芯片 HEF4046 及外围阻容器件构成，锁相电路如图 8 所示，输入的低频参考信号经倍频后形成高频方波信号，该高频信号通过十进制分频器 HEF4518 级联实现 4000 分频，并将分频后的信号输入到鉴相器，通过锁相电路的自动闭环控制，实现对参考信号的跟频和锁相。同时该高频信号通过电阻分压实现电平转换，并经 OP07 构成的跟随器输出至微处理器。

## 4. 验证性试验

为检验所设计的基于时基脉冲同步的变电站电压信号无线远传镜像装置现场的信号同步精度是否满足现场要求，需进行相应的系统精度检验实验。同时，为了检验系统现场实际应用效果，需选择实际变电站现场进行校准实验。这里功率分析仪采用德国 Zimmer 的 LMG641 型功率分析仪，该设备具有四通道高精度同步测试功能，通道同步精度小于 1 ns，频率带宽从 DC 到 10 MHz，测量精度 0.005%。

### 4.1. 系统精度检验实验

为了检验系统相位和频率跟踪精度，特设计如图 9 所示试验方案，该方案通过信号发生器模拟电网电压信号，该信号通过 PT 输入口直接输入系统，利用功率分析仪双通道分别跟踪信号发生器输出的模拟电压信号和装置输出电压信号波形，获取二者的频率和相位差。信号跟踪的频率精度及相位精度校验结

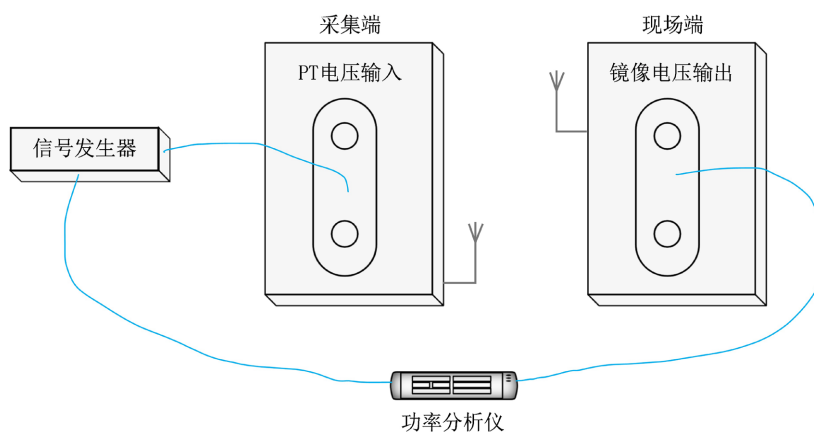


Figure 9. Scheme diagram of precision verification experiments  
图 9. 装置精度检验实验方案

果分别如表 1、表 2 所示。

**Table 1.** Result of frequency tracking accuracy verification

**表 1.** 频率跟踪精度检验结果

设定值(Hz)	输出值(Hz)	相对误差(%)
50.30	50.28	0.04
50.20	50.023	0.06
50.10	50.11	0.02
50.00	50.00	0.00
49.90	49.90	0.00
49.80	49.82	0.04
49.70	49.73	0.06

**Table 2.** Result of phase tracking accuracy verification

**表 2.** 相位跟踪精度检验结果

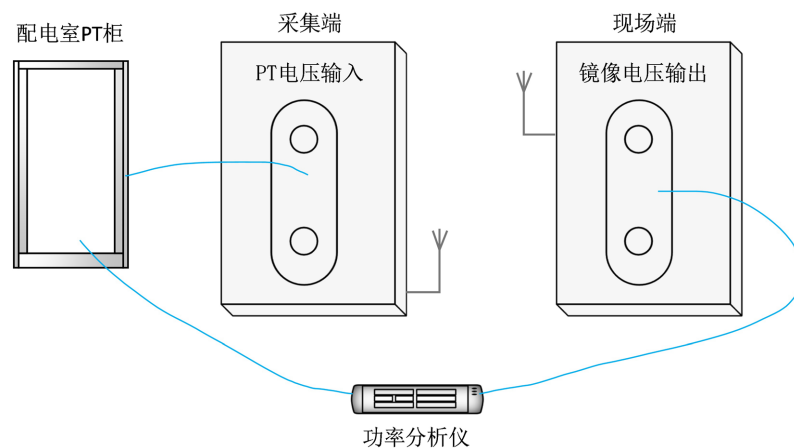
设置值(°)	输出值(°)	相对误差(%)
360.00	0.05	0.01
45.00	45.08	0.17
90.00	90.07	0.08
135.00	135.08	0.06
180.00	180.07	0.04
225.00	225.08	0.03
270.00	270.07	0.02
315.00	315.09	0.03

从表 1 和表 2 看出, 镜像装置能够很好地跟踪并复原信号发生器发出的信号, 频率跟踪精度小于 0.06%, 相位跟踪精度小于 0.17%, 满足电网对信号源精度要求, 可以进行现场部署使用。

## 4.2. 现场应用试验

现场校验试验回路及接线图具体如图 10 所示。图中有 2 路电压信号: 一是现场镜像装置实时输出的电压信号; 二是通过走线从 PT 柜取出的电压信号, 利用功率分析仪双通道分别跟踪这两路信号, 测试两路信号的频率和相位的一致性。检验结果如表 4 所示。其中相位测试时, 始终以电网电压正向过零点为参考零相位, 用装置的相位与该相位比较, 计算装置相位相对电网电压的相移动。

通过表 3、表 4 可以看出, 装置在现场使用时能够高精度跟踪和复现电网电压, 频率最大误差不超过 0.02%, 相位误差不超过 0.09°, 精度优于实验室测试, 这是由于电网电压频率相对稳定, 基本稳定在 50 Hz, 因此有一两个脉冲的跟踪变化对频率精度影响很小, 而相位误差基本在一个脉冲角度当量 0.09° 范围内, 这是由于锁相电路存在寄生容性和寄生感性而可能起始脉冲延迟造成的。但总体上不管是频率精度还是相位精度皆满足国家电网公司企业标准 Q/GDW540.1-2010《变电设备在线监测装置检验规范》要求。



**Figure 10.** On-site verification test circuit and wiring diagram  
**图 10.** 现场校验试验回路及接线图

**Table 3.** On-site verification result of frequency tracking  
**表 3.** 频率跟踪精度验证结果

电网电压频率(Hz)	装置频率(Hz)	相对误差(%)
50.00	50.00	0.00
50.01	50.01	0.00
50.00	50.00	0.00
50.00	50.01	0.02
50.03	50.02	0.02
50.00	50.00	0.00
50.01	50.01	0.00

**Table 4.** On-site verification result of phase tracking  
**表 4.** 相位跟踪精度验证结果

电网电压相位(°)	装置相位(°)	绝对误差(°)
0.00	0.05	0.05
0.00	0.07	0.07
0.00	0.07	0.07
0.00	0.09	0.09
0.00	0.09	0.09
0.00	0.08	0.08
0.00	0.06	0.06
0.00	0.08	0.08

## 5. 结束语

本文所述基于时基脉冲同步的变电站电压信号无线远传镜像装置采用基于时基脉冲同步的方法对电网电压的跟踪复现，有效克服了模数数模转换中的误差和干扰，即使在高压、超高压变电站强电磁干扰环境中依然能保持良好的同步性能，现场实际应用结果表明频率误差不超过 0.06%，相位误差不超过

0.09°, 应用数据表明系统满足国家电网公司企业标准 Q/GDW540.1-2010《变电设备在线监测装置检验规范》要求。目前, 该校验系统已在湖南省超高压公司得到了成果应用, 该装置的应用有效解决了该单位现场高压试验电网电压取信号的难题, 并为今后广域区域线路故障同步定位、直流偏磁电流流向监控、容性设备监测[5], 绝缘在线监测等提供了有效的高精度的无线同步源, 但当前装置主要基于变电站范围内的同步覆盖, 更广区域的同步需要进一步探讨广域网络的通讯同步。

## 参考文献

- [1] 余龙龙. 交流避雷器用监测器工频电流试验方法探讨[J/OL]. 电瓷避雷器: 1-12. <https://link.cnki.net/urlid/61.1129.TM.20250716.1920.002>, 2025-07-17.
- [2] 王鹏. 基于 FPGA 的绝对时间同步系统的设计研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2007.
- [3] 陶然, 沈培锋, 陈挺, 等. 数字化模型下的气体绝缘封闭开关设备特高频信号反演实际放电量方法[J]. 上海交通大学学报, 2025, 59(6): 800-811.
- [4] 诸荣臻, 潘意杰, 唐中. 一种低功耗倍频延迟锁相环设计[J]. 微电子学与计算机, 2022, 39(12): 93-99.
- [5] 周泽正, 李青, 詹洪炎, 龚金龙. 容性设备在线监测装置现场校验系统的开发[J]. 计算机测量与控制, 2016, 24(12): 45-48.