

## 简介

作者: Amey Panse, Microchip Technology Inc.

在三相交流（Alternating Current, A/C）系统中，反相和单相（即缺相）是最常见的故障。反相故障通常是由于系统安装或维护期间的人为错误而引起，单相故障是由于电线断裂、机械故障、触点磨损、保险丝熔断或热过载而引起。这些故障会导致系统运行不安全，可能造成系统严重损坏和故障，进而对操作人员造成潜在伤害。因此，三相交流系统需配备相序和缺相监视单元。该监视单元在检测到故障后会通知系统采取后续措施来保护负载。

本应用笔记介绍了为三相交流电源实现相序和缺相检测系统的方案，并使用 PIC18F56Q24 单片机演示了在仿真的三相交流系统电源上检测相序和缺相故障的过程。该演示基于 PIC18F56Q24 Curiosity Nano 开发板、Curiosity Nano 转接板和 MikroElektronika Click boards™。补充固件是使用 MPLAB® 代码配置器（MPLAB Code Configurator, MCC）和 MPLAB X 集成开发环境（Integrated Development Environment, IDE）基于 PIC18F56Q24 单片机进行开发的。

PIC18-Q24 单片机系列配备了带计算功能的 10 位模数转换器（Analog-to-Digital Converter with Computation, ADCC）、过零检测器（Zero-Cross Detector, ZCD）、定时器、通用异步收发器（Universal Asynchronous Receiver Transmitter, UART）和串行外设接口（Serial Peripheral Interface, SPI）外设，这些外设对于实现相序检测应用至关重要。与传统的非单片机解决方案相比，ZCD 与 10 位 ADCC 外设的组合提供了一种可靠、高效且高性价比的多相交流电源相序检测方案。

## 特性

本应用笔记涵盖以下内容：

- 用于三相相序检测应用的 PIC18-Q24 单片机特性概述
- 三相相序检测应用概述
- 三相交流电源仿真器
- 相序检测和缺相检测的演示固件

## 固件

可访问 MPLAB Discover 门户获取基于 PIC18F56Q24 实现的应用程序代码。



Click to view code examples on MPLAB DISCOVER

# 目录

简介.....	1
特性.....	1
固件.....	1
1. PIC18-Q24 系列概述.....	4
1.1. 相关器件.....	4
1.2. 过零检测器（ZCD）.....	4
1.3. 带计算功能的模数转换器（ADCC）模块.....	4
2. 相序检测基础知识.....	6
2.1. 三相电源.....	6
2.2. 相序检测和反相.....	6
2.3. 缺相或单相检测.....	7
2.4. RMS 电压测量.....	7
3. 应用概述.....	9
4. 三相信号仿真和数据可视化.....	10
4.1. 三相正弦信号仿真.....	10
4.2. 数据可视化器.....	12
5. 硬件概述.....	13
5.1. 硬件工具.....	13
5.2. 硬件设置.....	14
5.3. 单片机引脚配置详细信息.....	14
6. 应用实现.....	16
6.1. 应用固件.....	16
6.2. 固件模块.....	18
6.3. 单片机外设配置.....	21
6.4. 程序和数据存储器要求.....	21
6.5. 使用的软件工具.....	22
7. 演示设置和操作.....	23
7.1. 演示设置.....	23
7.2. 数据可视化器配置.....	24
7.3. 用户输入.....	31
7.4. 应用输出指示.....	32
7.5. 演示操作.....	32
8. 面向实时应用的相序检测.....	35
9. 结论.....	36
10. 参考资料.....	37

11. 附录.....	38
11.1. 代码配置器.....	38
12. 版本历史.....	46
Microchip 信息.....	47
Microchip 网站.....	47
产品变更通知服务.....	47
客户支持.....	47
Microchip 器件代码保护功能.....	47
法律声明.....	47
商标.....	48
质量管理体系.....	48
全球销售及服务网点.....	49

## 1. PIC18-Q24 系列概述

### 1.1. 相关器件

PIC18-Q24 系列单片机搭载 PIC18 8 位 CPU，运行频率最高 64 MHz，同时配有 8x8 硬件乘法器、16/32/64 KB 程序闪存、1/2/4 KB 数据 SRAM 和 512B EEPROM，并且提供 28/40/44/48 引脚封装。该系列器件适用于传感器连接、实时控制和通信应用。

图 1-1. PIC18-Q24 系列单片机概览

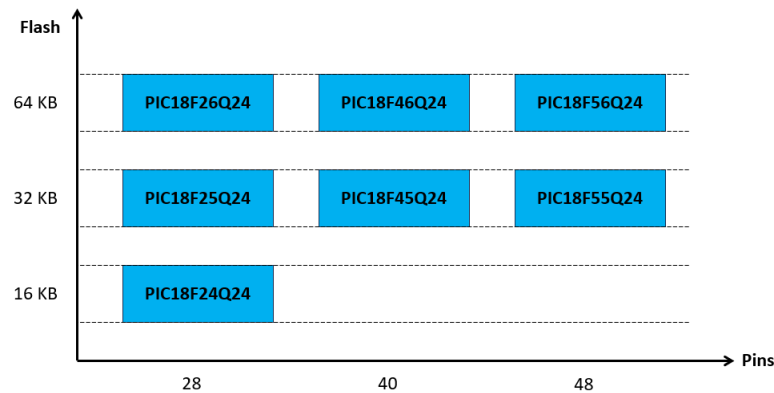


图 1-1 按不同的引脚数和闪存大小对 PIC18-Q24 系列单片机进行了划分：

- 垂直向上迁移无需修改代码，因为这些器件的引脚彼此兼容，可提供相同甚至更多的功能
- 水平向左迁移会减少引脚数，可能减少可用的功能



**重要：**本应用笔记适用于 PIC<sup>®</sup> 系列 8 位单片机中配备 10 位 ADCC 和两个 ZCD 外设实例的所有器件。

### 1.2. 过零检测器（ZCD）

ZCD 模块用于检测交流信号何时越过 ZCD 阈值。该模块可在上升沿、下降沿或两个边沿产生中断，方便用户有效利用该模块来检测交流相的过零点。

ZCD 模块可用于为以下用途（但不限于以下用途）监视交流波形：

- 交流周期测量
- 精确的长期时间测量
- 调光器相位延时驱动
- 低电磁干扰（Electromagnetic Interference, EMI）周期切换

### 1.3. 带计算功能的模数转换器（ADCC）模块

PIC18-Q24 系列单片机提供 10 位逐次逼近寄存器（Successive Approximation Register, SAR）ADC，最多 30 个通道，采样率最高 300 ksp/s，分辨率为 10 位。此外，还支持单端模式 ADC 操作，在该模式下，ADC 测量所选输入与地之间的电压。

内置的计算功能提供平均值计算、参考电压比较和阈值比较等后处理功能。该模块可根据对结果采用的后处理方式，选择累加更多采样或停止转换。ADCC 可根据需要配置为以下五种计算模式之一：

- 平均
- 突发
- 累加
- 突发平均
- 低通滤波器

## 2. 相序检测基础知识

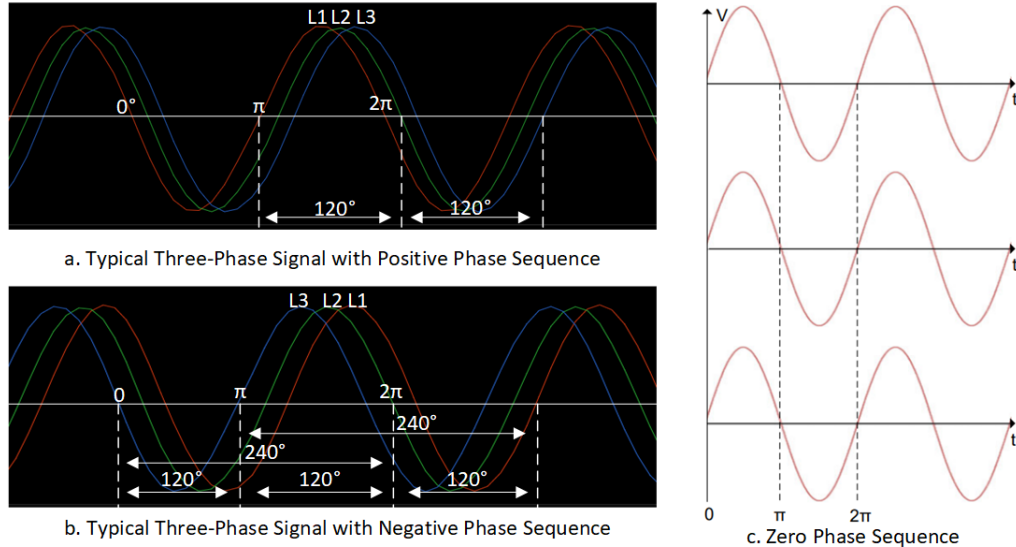
本章简单概述三相电源系统及其相关故障。

### 2.1. 三相电源

三相电源系统是全球最常见的发电、输电、配电和用电方式。

三相电源由三个交替变化的相组成，通常表示为 L1、L2 和 L3。所有三相产生的交流电压相对于地电位具有相等的幅值和频率。所有三相电压彼此之间存在  $120^\circ$  相移，如图 2-1a 所示。

图 2-1. 典型的三相信号



### 2.2. 相序检测和反相

三相电源的三个相（通常分别标记为 L1、L2 和 L3）会按照特定的顺序周期性地相继达到各自的峰值电压，这种顺序称为相序。

反相是指与正相序对比，三相电源中的任意两相互换了位置。反相故障是由于设备安装和调试/维护过程中的人为错误而引起。

通过监视三相电源的相序，可以检测出相位反转故障。

在三相交流系统中，需遵循正确的相序才能正确驱动负载，从而确保负载按预期工作。当三相交流电源的相序不正确时，所连接的三相负载可能会反向运行或异常运行，进而造成系统损坏。

三相电源存在以下三种可能的相序：

- 正相序
- 负相序或反相序
- 零相序

通过测量三个正弦信号之间的相移（以时间为单位），可以监视三相电源的相序。

#### 2.2.1. 正相序

在正相序情况下，三相电源的三条线上的电压依次经历完整的  $360^\circ$  变化，其中 L2 相比 L1 相滞后  $120^\circ$ ，L3 相比 L1 相滞后  $+240^\circ$ 。L1-L2-L3 的顺序被定义为正相序。

图 2-1a 显示了三相电源的正相序，其中 L1 相、L2 相和 L3 相按照顺序周期性地相继达到各自的峰值电压。

### 2.2.2. 负相序

在负相序/反相序情况下，三相电源的三条线上的电压依次经历完整的  $360^\circ$  变化，其中 L3 相比 L1 相滞后  $120^\circ$ ，L2 相比 L1 相滞后  $+240^\circ$ 。L1-L3-L2 的顺序被定义为负相序/反相序。

图 2-1b 显示了三相电源的负相序/反相序，与正相序对比，其中的 L2 相与 L3 相互换了位置。

### 2.2.3. 零相序

如果 L1 相、L2 相和 L3 相彼此平行，则称为零相序。

图 2-1c 显示了零相序，其中 L1 相、L2 相和 L3 相彼此平行。

## 2.3. 缺相或单相检测

单相（即缺相）是三相系统中非常常见的一种电气故障，具体是指三相电源中的任意一相缺失。缺相故障是由于保险丝熔断、热过载、导线断裂、导线接触不良或机械故障而引起。如果未能及时检测到三相系统中的缺相故障，所连接的负载和基础设施可能会遭受严重损坏。

通过测量每相的均方根（Root Mean Square, RMS）电压或使用 ZCD 外设监视各相的过零点，可以检测三相电源的缺相故障。

如果三相电源中任意一相的 RMS 电压为 0，则判定为缺相。对于基于 ZCD 的实现，如果在特定时间段内未检测到任意一相的过零点，则判定为缺相。

图 2-2 显示了三相电源的单相故障。L2 缺相，L3 相比 L1 相滞后  $240^\circ$ ，这与三相信号在正常情况下的  $120^\circ$  相位差不一致。

图 2-2. L2 缺相的三相信号

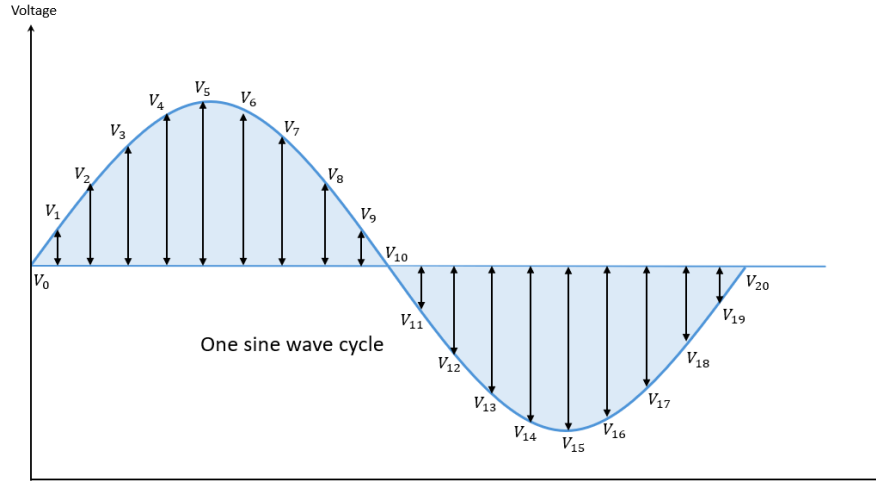


## 2.4. RMS 电压测量

对于交流电源，RMS 等于能够在阻性负载中产生相同平均功耗的直流电流值。RMS 值给出了交流电源的等效直流测量值。从数学上讲，均方根的定义为均方（一组数字平方后的算术平均值）的平方根。在交流信号中，RMS 可定义为一个周期内瞬时值平方的积分。

在应用中，计算 RMS 电压的方法是，对三相输入信号的某一相上的一组数字进行平方，然后取算术平均值。

图 2-3. 用于计算 RMS 电压的示例信号



RMS 电压的计算公式如下：

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{\sum V_n^2}{N}}$$

其中，

- N 为总采样数
- n 为采样编号，可能值为 1、2、3、4...n

$$V_n = ((ADCC\_STEP\_SIZE) * (ADCCOUT_n))^2$$

其中，

- $V_1$ 、 $V_2$ 、 $V_3$ ... $V_n$  表示采样数据点的电压 (mV)
- $ADCCOUT_n$  为每个采样输入信号的等效数字输出值
- ADCC 步长如下：

$$ADCC\_STEP\_SIZE = \frac{V_{ref}}{2^R}$$

其中，ADCC 以 3.3V 为参考电压 ( $V_{ref}$ )，并使用逐次逼近法提供 10 位二进制结果，所以 ADCC 的分辨率 (R) 等于 10。

因此，ADCC 步长值如下：

$$ADCC\_STEP\_SIZE = \frac{3.3V}{2^{10}} = 0.00322V = 3.22 \text{ mV}$$



### 3. 应用概述

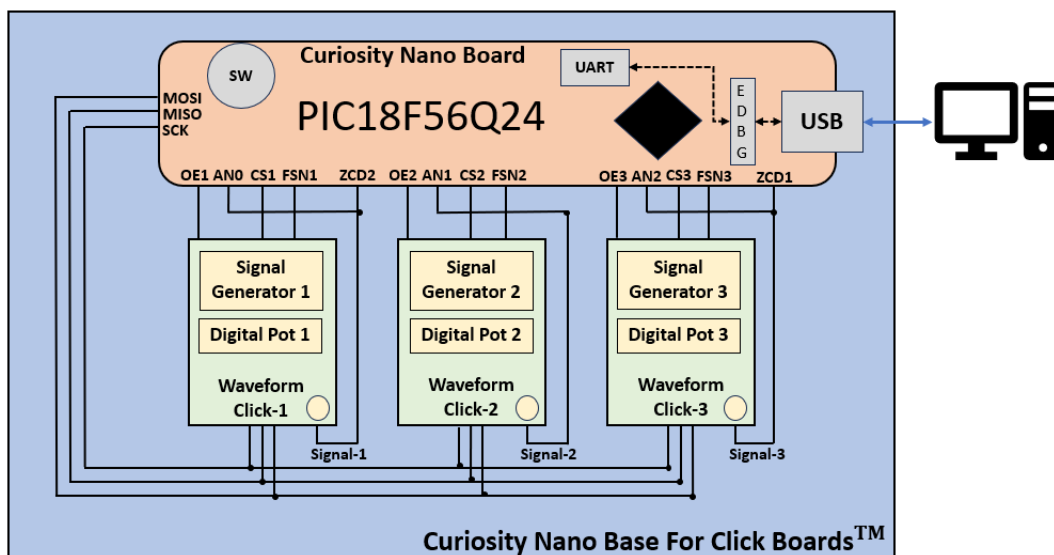
本应用展示了如何使用 PIC18F56Q24 单片机对仿真的三相交流电源进行相序检测、缺相检测和 RMS 电压测量。

本应用中使用三块 MikroElektronika Waveform Click 板来仿真三相信号。Waveform Click 板可生成具有所需幅值、相位和频率的正弦信号。本应用使用 Waveform Click 板生成三个频率为 50/60 Hz、相位差为 120° 的 3.3V 正弦信号，以用作交流电源。此外，为了展示各种故障，本应用可在运行时重新配置 Waveform Click 板以更改输出信号。

本应用使用数据可视化工具通过通用异步收发器（UART）接口与应用固件交互。数据可视化工具用于实时监视和报告反相和缺相状态，另外还用于发送仿真器命令，以使用 Waveform Click 板重现各种故障。

图 3-1 给出了相序检测应用的框图。

图 3-1. 应用概览



为了在 50 Hz 与 60 Hz 工作模式之间进行选择，使用了板上 Curiosity Nano 开关。系统在上电后会保持在频率选择模式，持续 10 秒钟。系统默认以 50 Hz 频率启动，但可在电路板上电后通过按下开关进行切换。频率切换结果可在数据可视化器的仪表板窗口中进行查看。

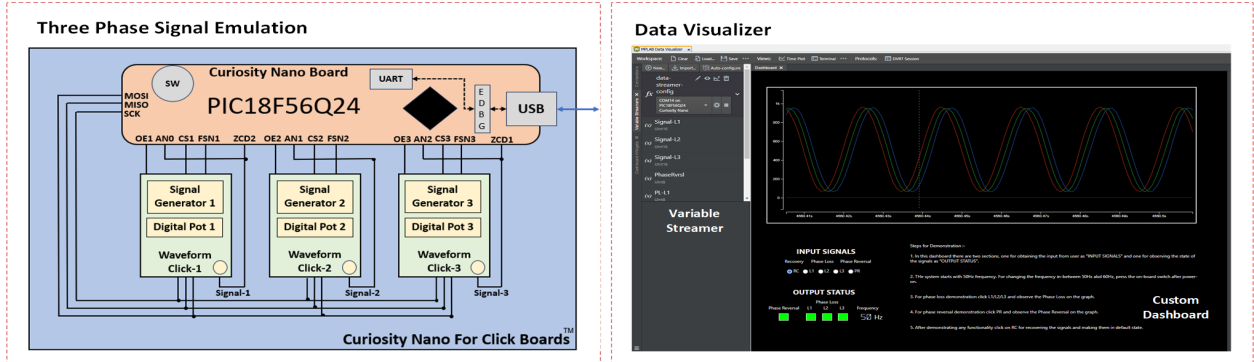
应用会持续监视三相电源的反相和缺相故障。仪表板窗口中会不断更新三相信号的相序和缺相检测结果。

当从仪表板接收到要求演示缺相和反相故障的用户输入后，应用会更新 Waveform Click 板的配置，从而通过 Waveform Click 板生成具有所需故障的三相信号。

此外，当从仪表板接收到要求从故障恢复的命令后，应用会消除故障。

## 4. 三相信号仿真和数据可视化

图 4-1. 三相信号仿真的概念图和数据可视化



### 4.1. 三相正弦信号仿真

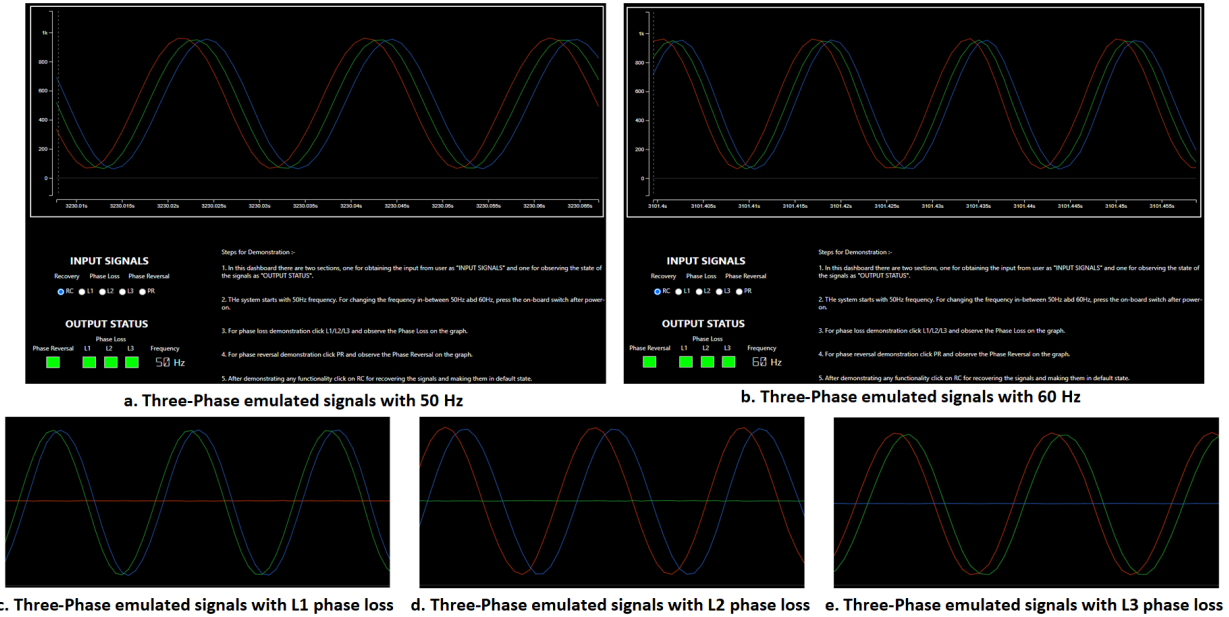
在本应用中，相序检测器的输入是三相交流输入。本应用的主要功能是检测相序和缺相故障，以及计算输入电源的 RMS 电压。

如[应用概述](#)一章所述，在演示中使用波形仿真器来代替三相电源。为了演示应用，仿真的信号需具备以下特性：

- 三相信号（L1-L2-L3）
- 可配置幅值
- 可配置相移
- 可配置频率

为了实现上述特性，使用了三块 MIKROE Waveform Click 板来组装成一个三相仿真器。Waveform Click 板可生成具有可配置频率、相位和幅值的正弦波形。三块 Waveform Click 板用于生成需具有  $120^\circ$  相移的三相正弦信号，作为相序检测系统的输入。仿真的三相正弦信号可在运行时更改波形配置，有助于高效地展示实现的相序检测系统的所有特性。

图 4-2. 仿真的信号



- 图 4-2a 展示了用于应用演示的仿真三相信号。三个信号的频率均为 50 Hz，彼此之间存在  $120^\circ$  相移。
- 图 4-2b 展示了频率为 60 Hz 的仿真三相信号。
- 图 4-2c 展示了 L1 缺相的仿真三相信号。三个信号的频率有所不同：L1 为 0 Hz，L2 和 L3 为 50 Hz。
- 图 4-2d 展示了 L2 缺相的仿真三相信号。三个信号的频率有所不同：L2 为 0 Hz，L1 和 L3 为 50 Hz。
- 图 4-2e 展示了 L3 缺相的仿真三相信号。三个信号的频率有所不同：L3 为 0 Hz，L1 和 L2 为 50 Hz。

## 4.2. 数据可视化器

数据可视化器是 Microchip 开发的一款可定制工具（PC 软件），用于通过指定的通信接口处理和可视化来自单片机的数据。数据可视化器可以从嵌入式调试器数据网关接口（Data Gateway Interface, DGI）和/或串行通信端口等各种来源接收数据。

本节概述了本演示中使用的数据可视化器的主要模块和功能。

- **串行端口**

数据可视化器可通过标准 PC 串行端口连接到目标板。串行端口数据在图形和终端中视为无符号的 8 位数据。在本应用演示中，波特率设置为 230400。

- **图形**

图形模块是一个绘图工具。该模块可同时绘制来自不同来源（如滑动条输入、功率测量输入和串行端口）的多个信号。该演示图形用于显示三相仿真器信号。

- **定制仪表板**

仪表板模块是一个可定制的图形用户界面（Graphical User Interface, GUI）面板，既可用于与目标应用之间收发数据，也可用于控制和显示应用固件参数。仪表板区域放置了按钮、标签和滑动条等元素以构成 GUI。每个元素可关联一个端点，以发送或接收值。例如，滑动条的源能够以数值形式输出滑动条的位置，随后发送至应用固件。选中 Show Endpoints（显示端点）选项时会显示端点。

- **数据流协议**

数据流发送器负责接收传入的原始数据流并将其拆分成多个数据流。数据流格式由用户提供的配置文件指定。配置文件是一个用逗号分隔的文本文件，每行指定一个数据变量。

有关数据可视化器的详细信息，请参见《MPLAB®数据可视化器用户指南》。

## 5. 硬件概述

本应用使用了 Microchip 开发工具包来进行演示。这样可以加快开发和部署相序检测应用演示的过程。

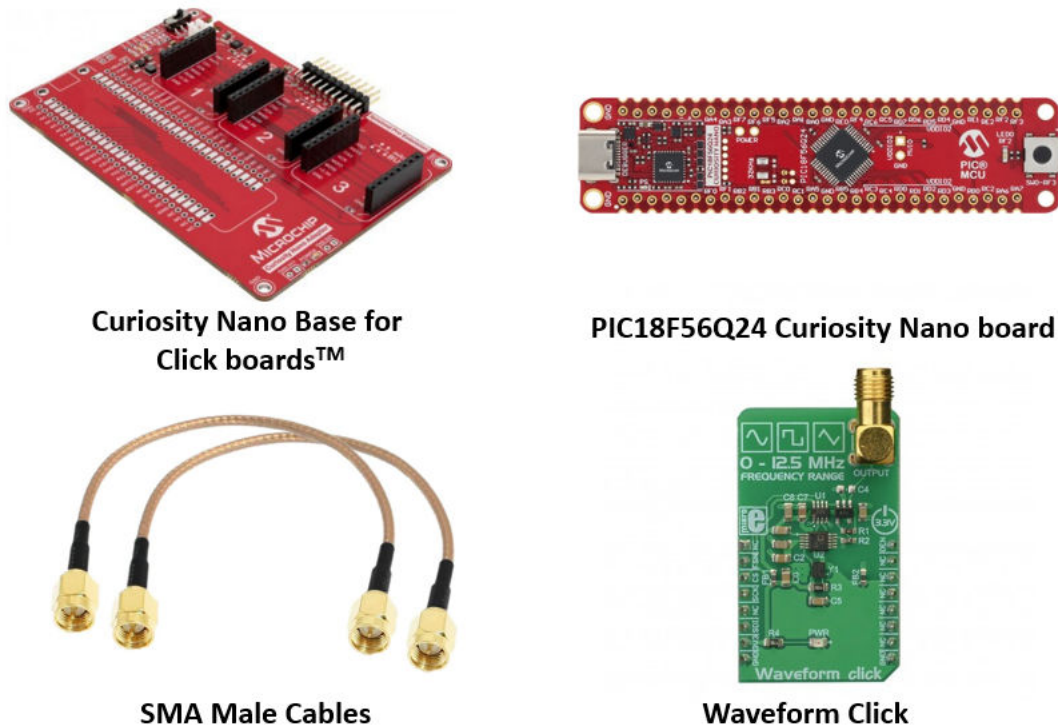
### 5.1. 硬件工具

相序检测演示器使用以下硬件：

- [PIC18F56Q24 Curiosity Nano 板](#)  
Curiosity Nano 板可以轻松评估 PIC18F56Q24 单片机。该板还提供了全面的编程和调试功能，方便开发人员使用嵌入式调试器（EDBG）模块轻松完成整个开发过程。
- [适用于 Click 板的 Curiosity Nano 基板](#)  
每款 Curiosity Nano 板均与适用于 Click 板的 Curiosity Nano 基板兼容。该基板包含一个适配所有 Curiosity Nano 板的插座和三个 mikroBUS™ 插座以及一个 Xplained Pro 扩展板连接器，方便开发人员轻松扩展其设计。
- [三块 MikroElektronika Waveform Click 板](#)  
Waveform Click 板由信号发生器（AD9833）和数字电位器（AD5227）组成。Waveform Click 板可生成频率最高 12 MHz 的各类信号，其中包括正弦波形。输出信号可通过 SMA 连接器获得，这样就能使用同轴屏蔽线缆。本应用使用 Waveform Click 板仿真三相交流电源。
- [SMA（超小型 A 版）公头线缆](#)  
SMA 连接器是一种半精密同轴射频连接器，采用螺钉式耦合机构，是适用于同轴线缆的最小化连接器接口。SMA 线缆用于将 Waveform Click 板生成的输出连接到 Curiosity Nano。

图 5-1 显示了用于实现本应用的硬件。

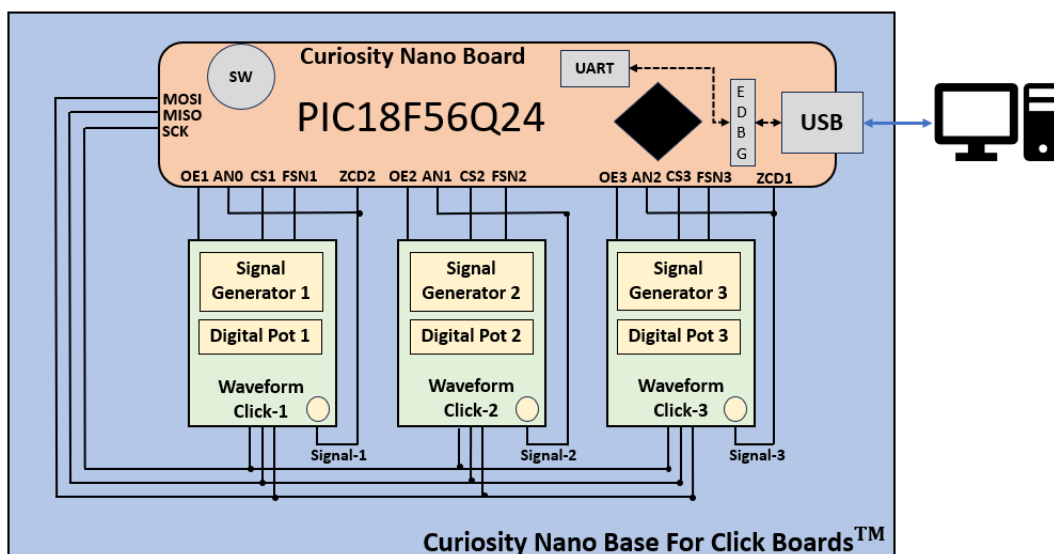
图 5-1. 使用的硬件



## 5.2. 硬件设置

按照图 5-2 所示连接三相序检测应用所需的硬件开发板。

图 5-2. 硬件设置



将 PIC18F56Q24 Curiosity Nano 板安装在适用于 Click 板的 Curiosity Nano 基板上。

使用 SMA 公头线缆将 Waveform Click 板的输出连接到相应的 ZCD 输入和 ADCC 通道输入。

使用数据可视化工具演示相序检测应用。使用定制仪表板的图形视图显示 Waveform Click 板生成的三相波形，以提供仿真的三相电源系统的视觉反馈。使用数据可视化器的定制仪表板功能针对应用来设计仪表板。仪表板显示故障状态。此外，用户还可以在仪表板中向仿真器发送命令来仿真任何特定的故障情况。

数据可视化器与 PIC18F56Q24 单片机之间使用 Curiosity Nano 板上的 USB-UART 桥接器接口进行通信。

## 5.3. 单片机引脚配置详细信息

下表列出了用于三相序检测应用的 PIC18F56Q24 单片机的引脚配置详细信息。

表 5-1. 引脚配置详细信息

单片机引脚	引脚配置	外设配置	引脚功能
RC0	SPI-MOSI	SPI	Waveform Click 板 SPI1-MOSI
RC1	SPI-SCK	SPI	Waveform Click 板 SPI1-SCK
RB4	UART RX	UART	UART2 RX
RB5	UART TX	UART	UART2 TX
RF3	软件输入	GPIO	Curiosity Nano 板上的按钮
RB0	模拟输入	ZCD	ZCD1 输入
RC2	模拟输入	ZCD	ZCD2 输入
RA0	模拟输入	ADC	至 ADC-AN0 的 Waveform Click 板 1 输出
RA1	模拟输入	ADC	至 ADC-AN1 的 Waveform Click 板 2 输出
RA2	模拟输入	ADC	至 ADC-AN2 的 Waveform Click 板 3 输出
RA5	SPI-CS1 (输出)	GPIO	Waveform Click 板 1, AD5227 片选
RA4	SPI-FSN1 (输出)	GPIO	Waveform Click 板 1, AD9833 片选
RF5	OEN1 (输出)	GPIO	Waveform Click 板 1 输出使能
RF4	SPI-CS2 (输出)	GPIO	Waveform Click 板 2, AD5227 片选

表 5-1. 引脚配置详细信息 (续)

单片机引脚	引脚配置	外设配置	引脚功能
RC4	SPI-FSN2 (输出)	GPIO	Waveform Click 板 2, AD9833 片选
RF6	OEN2 (输出)	GPIO	Waveform Click 板 2 输出使能
RE0	SPI-CS3 (输出)	GPIO	Waveform Click 板 3, AD5227 片选
RC6	SPI-FSN3 (输出)	GPIO	Waveform Click 板 3, AD9833 片选
RF7	OEN3 (输出)	GPIO	Waveform Click 板 3 输出使能

## 6. 应用实现

应用固件基于 PIC18F56Q24 单片机开发，并使用 MCC Melody 和 MPLAB X IDE 生成。

实现的固件在 PIC18F56Q24 Curiosity Nano 开发板上执行。

使用定时器、串行外设接口（SPI）、UART、ADCC 和 ZCD 等 MCU 外设实现三相电源相序检测功能。

Timer4（TMR4）用于每 1 ms 调度一次任务，其配置为每 1 ms 产生一次中断。

Timer2（TMR2）配置为每 20 ms 产生一次溢出中断，用于测量两次 ZCD 中断的间隔时间，从而计算三相输入各相之间的相移。

SPI 用于集成 Waveform Click 板以生成三相仿真信号，其配置为主模式，6 MHz SPI 时钟，SPI 数据模式 2。

UART 用于主机与应用设置之间的通信，其配置为 230400 波特率。

ADCC 用于在数据可视化器上重现输入信号（用于演示），以及用于三相 RMS 电压测量，其配置有 2 MHz ADC\_CLK（ADCC 时钟）。

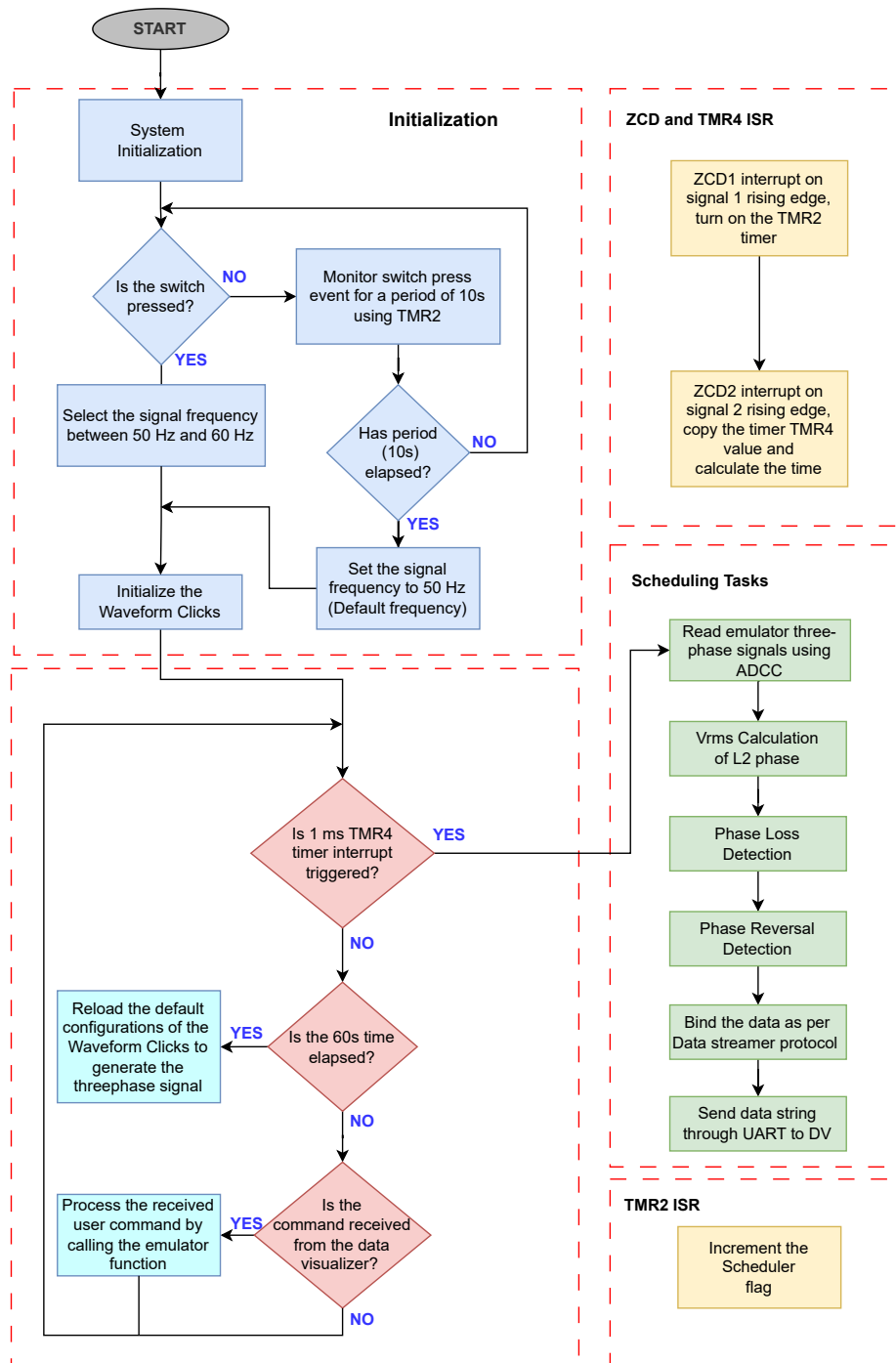
两个 ZCD 实例用于检测三相输入信号的过零点，其配置为在信号上升沿产生中断。

### 6.1. 应用固件

[图 6-1](#) 下面显示了相序检测器应用的固件执行流程。



图 6-1. 应用程序代码流程



## 6.2. 固件模块

整个应用固件分为五个模块：

- 初始化
- 反相检测逻辑
- 缺相检测逻辑
- 任务调度程序
- 仿真器功能

每个模块在固件中都有不同的职责。

### 6.2.1. 初始化

固件首先执行单片机及其外设的初始化。相序检测器应用使用 SPI、定时器、UART、ADCC、GPIO 和 ZCD 等单片机外设。系统的初始化配置如下：

表 6-1. 单片机外设配置详细信息

外设	SPI1	UART2	ADCC	TMR2	TMR4	ZCD1 和 ZCD2
配置	SPI 时钟 (6 MHz)	波特率 (230400)	分辨率 (10 位)	定时器时钟 (500 kHz)	定时器时钟 (16 MHz)	ZCD 使能
	SPI 主模式	奇偶校验位 (0)	ADC 时钟 (2 MHz)	定时器模式 (计满返回脉冲)	定时器模式 (计满返回脉冲)	ZCD 中断 (上升沿)
	数据模式 2	停止位 (1)	采样频率 (1 kHz)	定时器周期 (20 ms)	定时器周期 (1 ms)	逻辑输出极性 (不反相)

### 6.2.2. 反相检测逻辑

ZCD 和定时器外设用于计算三相信号之间的相移。PIC18F56Q24 器件提供两个 ZCD 外设实例，在本应用中均被使用。三相信号的 L1 相和 L3 相连接至 ZCD 外设以进行过零检测。ZCD 外设配置为在检测到信号上升沿时产生中断。单片机的定时器外设用于测量 L1 相过零中断和 L3 相过零中断的间隔时间。

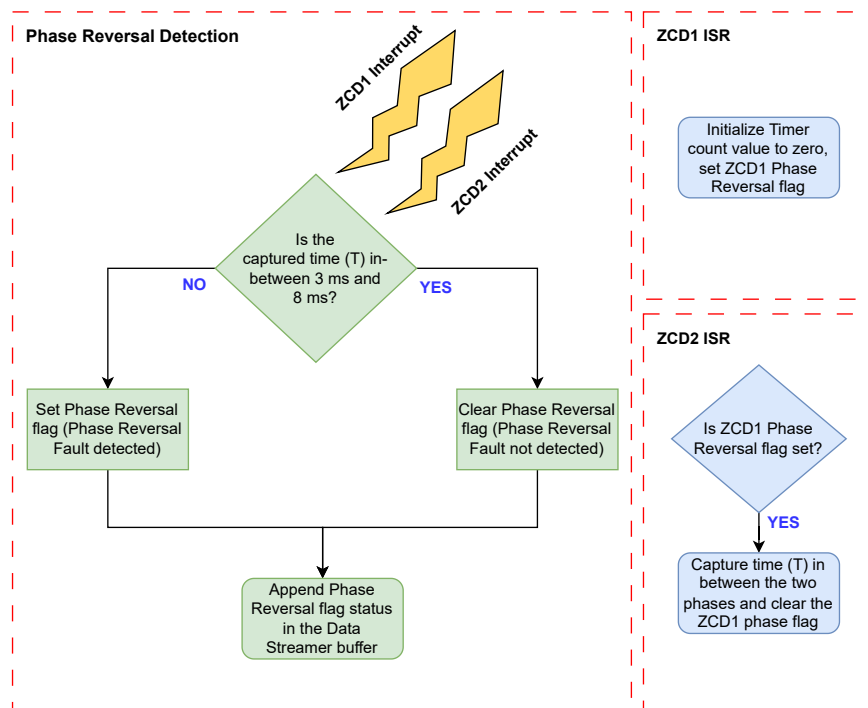
ZCD 模块持续监视三相电源的 L1 相和 L3 相。通过比较 L1 相过零中断和 L3 相过零中断的间隔时间与正相序三相信号上计算出的时间来识别反相故障。

上述计算从时间角度提供了一种在正相序和负相序条件下识别三相信号之间相移的方法。

- 三相信号的频率为 50 Hz，三相信号彼此之间存在 120°相移。
- 信号周期 = 1/信号频率，即  $1/50 = 20$  ms
- 经历完整的 360°变化所需的时间为 20 ms
- 三相信号中存在 120°相移的两个信号的间隔时间为 6.66 ms  
**注：**当频率为 60 Hz 时，该间隔时间为 5.55 ms。
- 使用通用方法计算正相序各信号之间的间隔时间，即 L1 与 L2、L2 与 L3 或 L3 与 L1 = 6.66 ms
- 当三相信号中存在 120°相移的两个信号的间隔时间为 6.66 ms 时，即称为正相序
- 通过比较三相信号的实际间隔时间与正相序信号的间隔时间来检测反相故障

图 6-2 显示了反相检测应用固件执行流程。

图 6-2. 反相检测



### 6.2.3. 缺相检测逻辑

RMS 电压测量可精确测量三相正弦信号的电压，并确保精确监视三相正弦信号。这将有助于识别单相故障情况。

ADCC 外设用于计算 RMS 电压。PIC18F56Q24 器件提供带计算模式的 10 位 ADC。

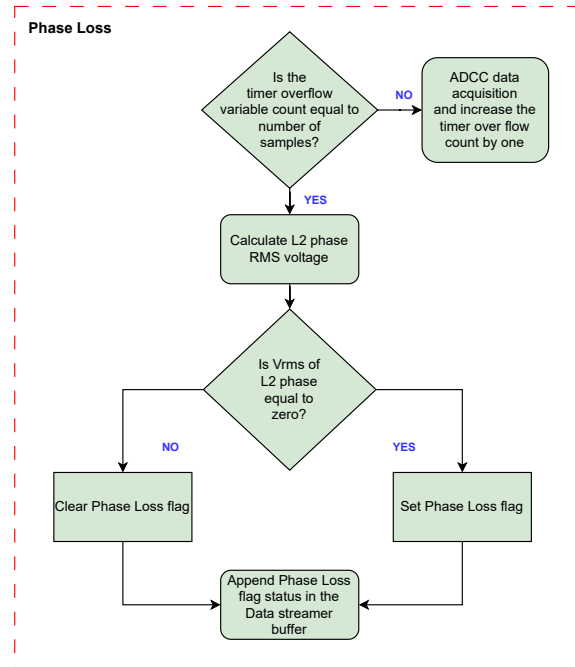
Waveform Click 板将生成幅值在 0V 与 3.3V 之间的仿真三相正弦信号。三相信号的 L1 相、L2 相和 L3 相连接至 ADCC 通道，ADCC 测量交流信号的瞬时值并给出数字等效值。

**注：**对于交流市电电源，必须将电源的三相正弦信号缩小并进行电压转换，以符合 ADCC 输入范围要求。

应用固件对 50 Hz 和 60 Hz 交流信号进行 35 次瞬时采样。然后使用平均法计算这些采样的 RMS 电压值。

图 6-3 给出了缺相计算 API 的固件执行流程。计算出的 RMS 电压值用于检测缺相事件。

图 6-3. 缺相流程图



#### 6.2.4. 任务调度程序

Timer4 (TMR4) 每 1 ms 调度一次任务来执行以下功能:

- 测量仿真器三相信号
- $V_{rms}$  计算
- 缺相检测
- 反相检测
- 根据数据流协议绑定并生成数据数组

本应用使用数据可视化器显示三相交流信号的图形视图和故障状态。仿真的三相信号的三个相 (L1、L2 和 L3) 作为 ADC 外设的输入。转换后的数字数据通过 USB-UART 接口发送到数据可视化器, 以便在数据可视化器上重现仿真的三相信号。

数据流数组由三相仿真信号的瞬时数字值、测量的频率以及故障状态通过数据流协议组成。

用户可以从数据可视化器发送命令来演示三相序检测器的功能。单片机通过 USB-UART 接口从数据可视化器接收用户命令, 从而在运行时改变三相信号的幅值 (用于演示缺相) 和相位 (用于演示反相)。

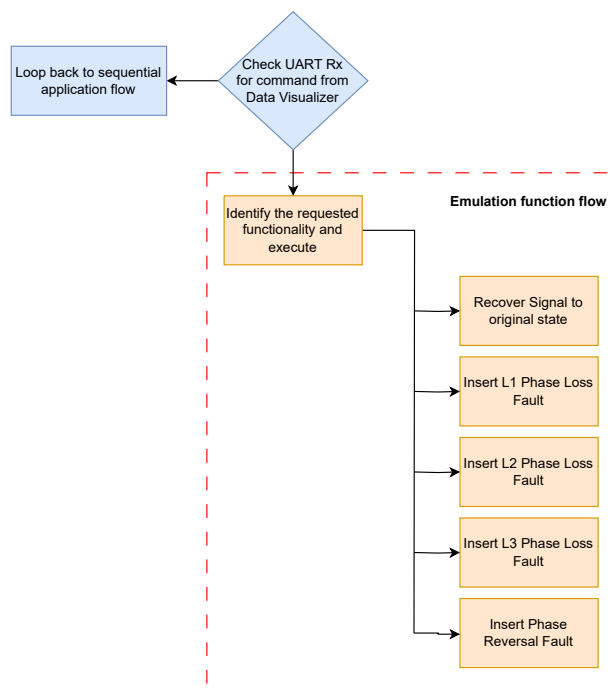
#### 6.2.5. 仿真器功能

仿真器功能部分处理应用演示所需的用户命令。该固件部分处理以下仿真器功能:

- 仿真无故障的三相信号
- 通过丢失 L1 相来仿真缺相故障
- 通过丢失 L2 相来仿真缺相故障
- 通过丢失 L3 相来仿真缺相故障
- 通过将相序更改为 L1-L3-L2 来仿真反相故障
- 从故障中恢复三相信号并按先前的配置值生成信号

通过 SPI 串行接口将所需的配置值发送到 Waveform Click 板来执行仿真器功能。

图 6-4. 仿真器流程图



### 6.3. 单片机外设配置

表 6-2 详细说明了 PIC18F56Q24 单片机的工作条件以及配置的各种外设。

表 6-2. 单片机外设配置

参数	值
MCU	PIC18F56Q24
MCU 时钟	64 MHz
MCU 工作电压	3.3V
中断调度配置	循环调度
SPI	SPI1
SPI 时钟	6 MHz
SPI 模式	2
UART	UART2
UART 波特率	230400
定时器	TMR2 和 TMR4
定时器时钟	500 kHz 和 16 MHz
ADCC 时钟	2 MHz
ZCD	ZCD1 和 ZCD2
ZCD 中断	上升沿中断

使用 MPLAB 代码配置器生成简单易懂的 C 代码，并将其无缝插入应用固件中。更多信息，请参见附录部分。

### 6.4. 程序和数据存储器要求

表 6-3 详细给出了使用 MPLAB X IDE 生成应用固件时的程序和数据存储器要求：

表 6-3. MPLAB<sup>®</sup> 及各种编译器优化的存储器要求

优化	程序存储器 (字节)	数据存储器 (字节)
-O0	20631 (31.5%)	453 (11.1%)
-O1	17913 (27.3%)	453 (11.1%)
-O2	17823 (27.2%)	453 (11.1%)
-O3	15827 (24.3%)	441 (10.8%)
-Os	13849 (21.1%)	441 (10.8%)

## 6.5. 使用的软件工具

在整个应用固件开发过程中使用了 Microchip 的 MPLAB X IDE、编译器和图形代码生成器，以提供轻松无忧的用户体验。以下工具链用于演示应用：

### MPLAB X 平台：

- [MPLAB X IDE v6.20](#)
- [XC8 编译器 v2.46](#)
- [MPLAB 代码配置器 \(MCC\) v5.4.1](#)
- [Microchip PIC18F-Q 系列器件支持 v1.24.430](#)
- [Data Visualizer v1.3.1331](#)

**注：**为了运行演示，应当安装上述版本或更高版本的工具。本示例未针对更早的版本进行测试。

## 7. 演示设置和操作

### 7.1. 演示设置

以下步骤说明了使用 PIC18F56Q24 单片机实现三相序检测的硬件设置过程。

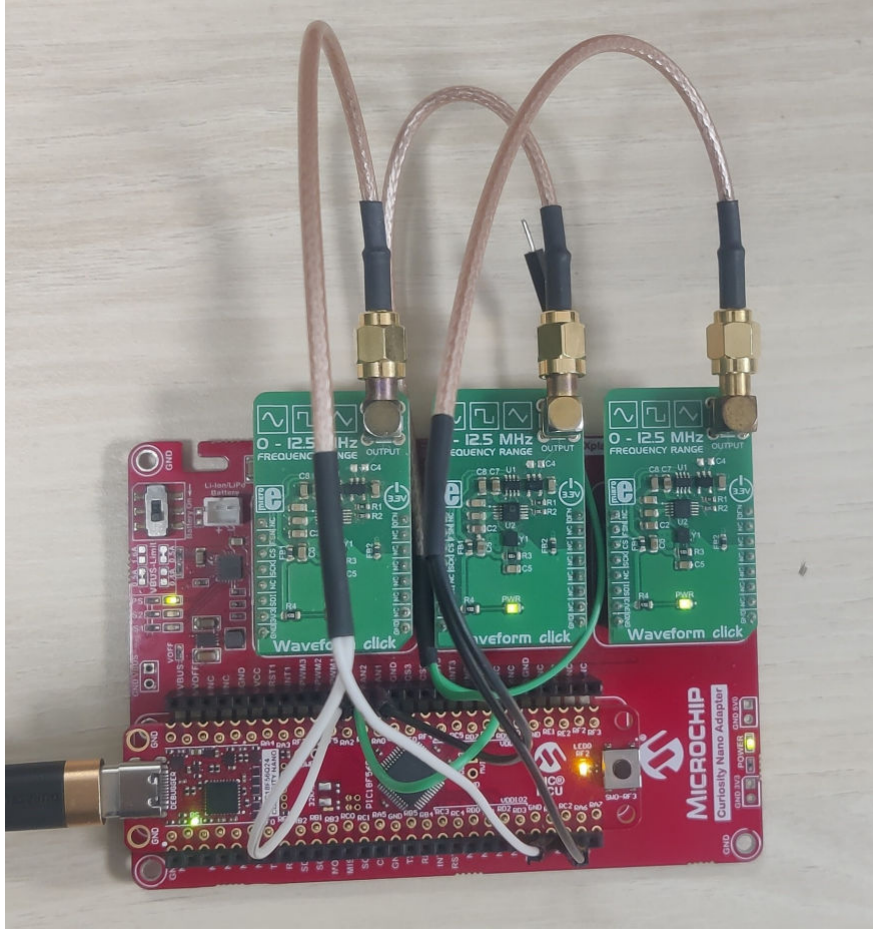
1. 将 PIC18F56Q24 Curiosity Nano 板插入适用于 Click 板的 Curiosity Nano 基板的 Curiosity Nano 插槽中。  
**注：**插入 Curiosity Nano 板时，请参照 Curiosity Nano 基板上的标记对准方向。
2. 将三块 Waveform Click 板插入 Curiosity Nano 基板上的三个 mikroBUS 插槽（插槽 1、插槽 2 和插槽 3）。
3. 使用 SMA 连接器将 Waveform Click 板的 SMA 输出连接到相应的单片机 I/O 引脚，如表 7-1 所示。
4. 将 Waveform Click 板输出连接到 ADC 和 ZCD 的输入。
  - Waveform Click 板 1 的信号 1（波形颜色——红色）连接到 RA0（ADC AN0 输入）和 RC2（ZCD2 输入）
  - Waveform Click 板 2 的信号 2（波形颜色——绿色）连接到 RA1（ADC AN1 输入）
  - Waveform Click 板 3 的信号 3（波形颜色——蓝色）连接到 RA2（ADC AN2 输入）和 RB0（ZCD1 输入）
5. 使用 Type-C USB 线缆将 Curiosity Nano 板连接到主机（PC）。
6. 如需获取固件和十六进制文件，请参见[固件](#)部分。
7. 要对单片机上的应用固件进行编程，请参见 PIC18F56Q24 Curiosity Nano Hardware User Guide。

表 7-1. mikroBUS™ 插槽与单片机之间的连接

mikroBUS™ 引脚	单片机引脚
Waveform Click 板 1 输出信号连接器（SMA）	RA0 和 RC2
Waveform Click 板 2 输出信号连接器（SMA）	RA1
Waveform Click 板 3 输出信号连接器（SMA）	RA2 和 RB0

图 7-1 显示了三相序检测器演示所需的硬件设置。

图 7-1. 使用 PIC18F56Q24 Curiosity Nano 板的演示设置



## 7.2. 数据可视化器配置

演示应用时，使用数据可视化器工具作为图形用户界面来显示仿真的三相电源波形和输出状态，以及接收用户输入。

固件包中提供了预配置的数据流送器文件和定制仪表板文件。以下步骤用于配置数据可视化器。

**注：**这两个文件附在 `phase-sequence-detection-of-ac-supply Discover` 示例中。有关详细信息，请参见 [固件](#) 部分。

本演示使用数据可视化器的以下模块：

- 串行端口
- 定制仪表板
  - 元素标签
  - 图形
  - 状态指示
  - 单选按钮组
- 数据流

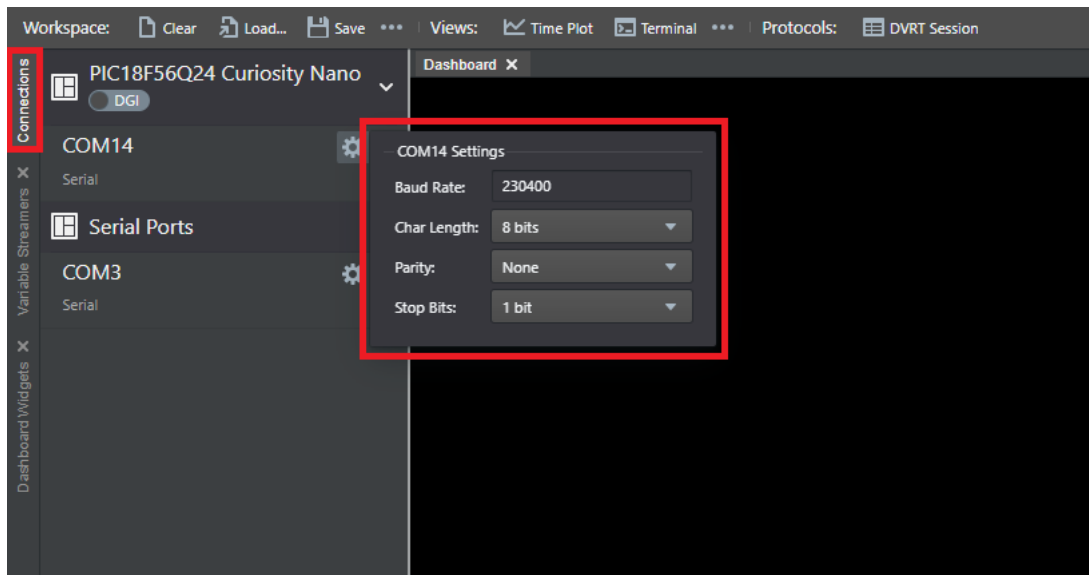
### 数据可视化器串行端口配置

配置串行端口以与 Curiosity Nano 板通信：



1. 要打开串行端口控制面板窗口，应从工具栏中打开 **MPLAB Data Visualizer**，然后在左侧找到 **Connections**（连接）选项卡。
2. 展开该选项卡并单击 **Serial Ports**（串行端口），如图 7-2 所示。
3. 将波特率设置为 230400，奇偶校验设置为无，停止位设置为 1。

图 7-2. 串行端口窗口



## 数据流送器

在数据流送器控制面板中配置用于连接的数据流送器以及定制仪表板窗口：

1. 要打开数据流控制面板，应从工具栏中打开 **MPLAB Data Visualizer**，然后在左侧找到 **Variable Streamers**（变量流送器）选项卡。
2. 展开该选项卡并单击随后出现的 **Import**（导入）选项卡，如图 7-3 所示。
3. 单击 **Import** 选项卡后，选择固件包中提供的数据流送器文件所在的路径。

图 7-3. 数据流送器

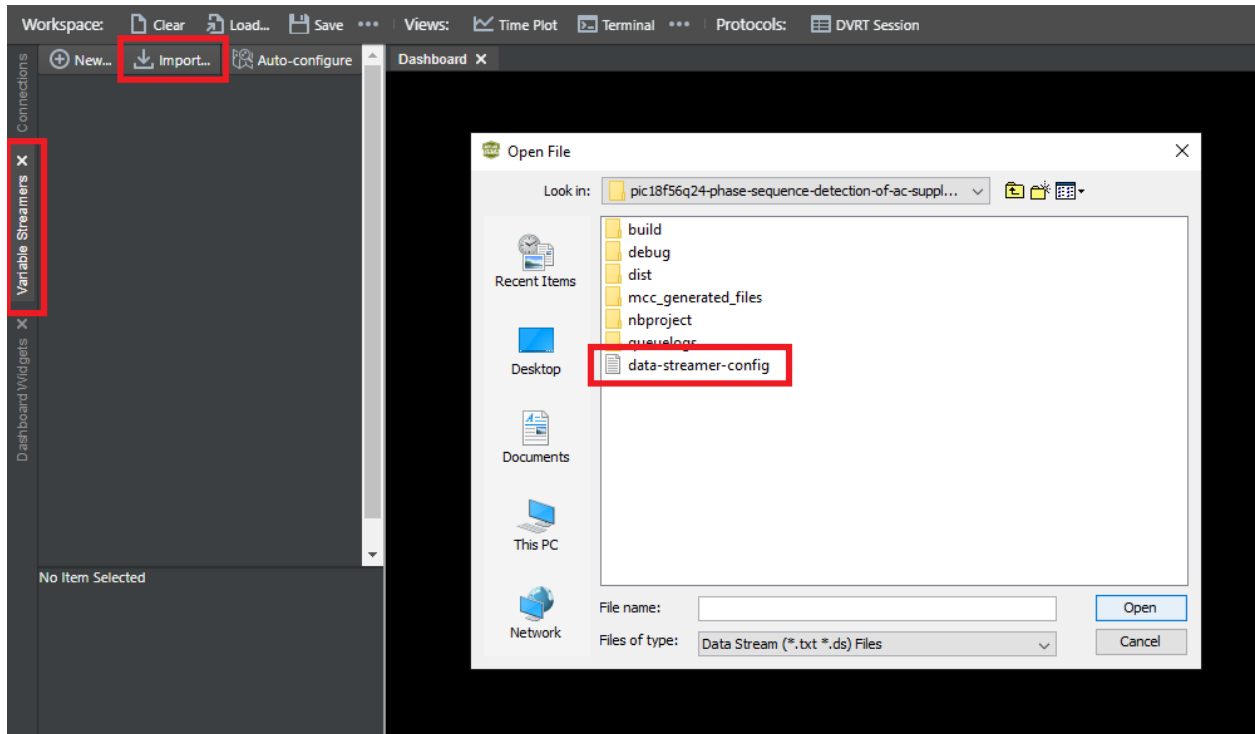
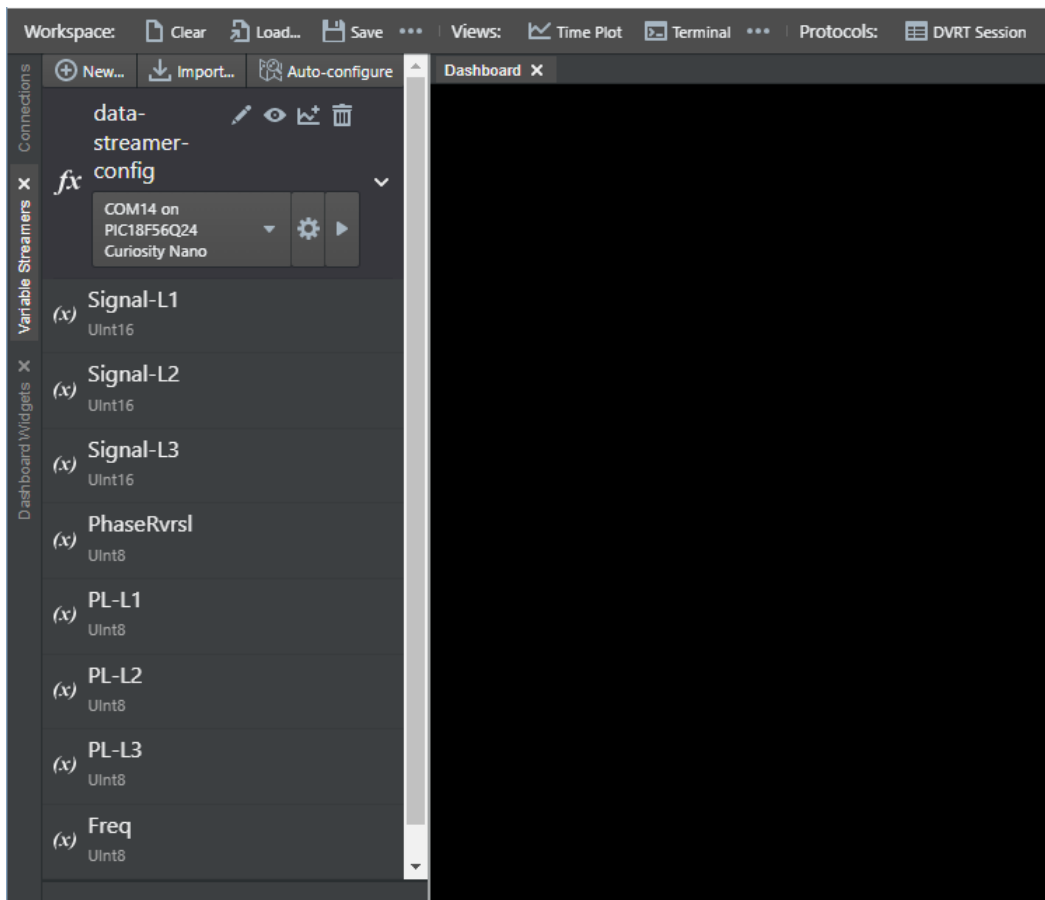


图 7-4. 数据流送器中的变量



### 定制仪表板配置

配置定制仪表板窗口以显示输出并接收用户输入：

1. 要打开数据流控制面板，应从工具栏中打开 **MPLAB Data Visualizer**，然后在左侧找到 **Dashboard Widgets**（仪表板小部件）选项卡。
2. 展开该选项卡并单击随后出现的 **Import** 选项卡，如图 7-5 所示。
3. 单击仪表板窗口中的 **Load**（加载）按钮，然后选择主机提供的定制仪表板文件所在的路径，如图 7-6 所示。

图 7-5. 定制仪表板窗口

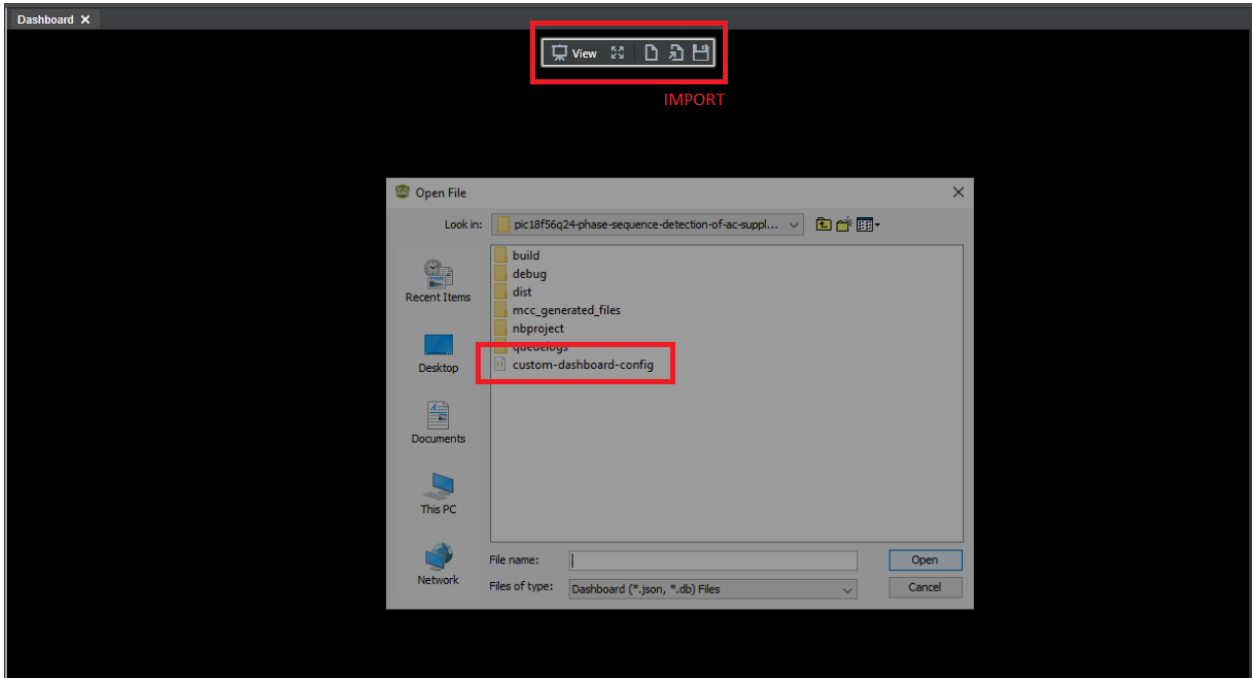
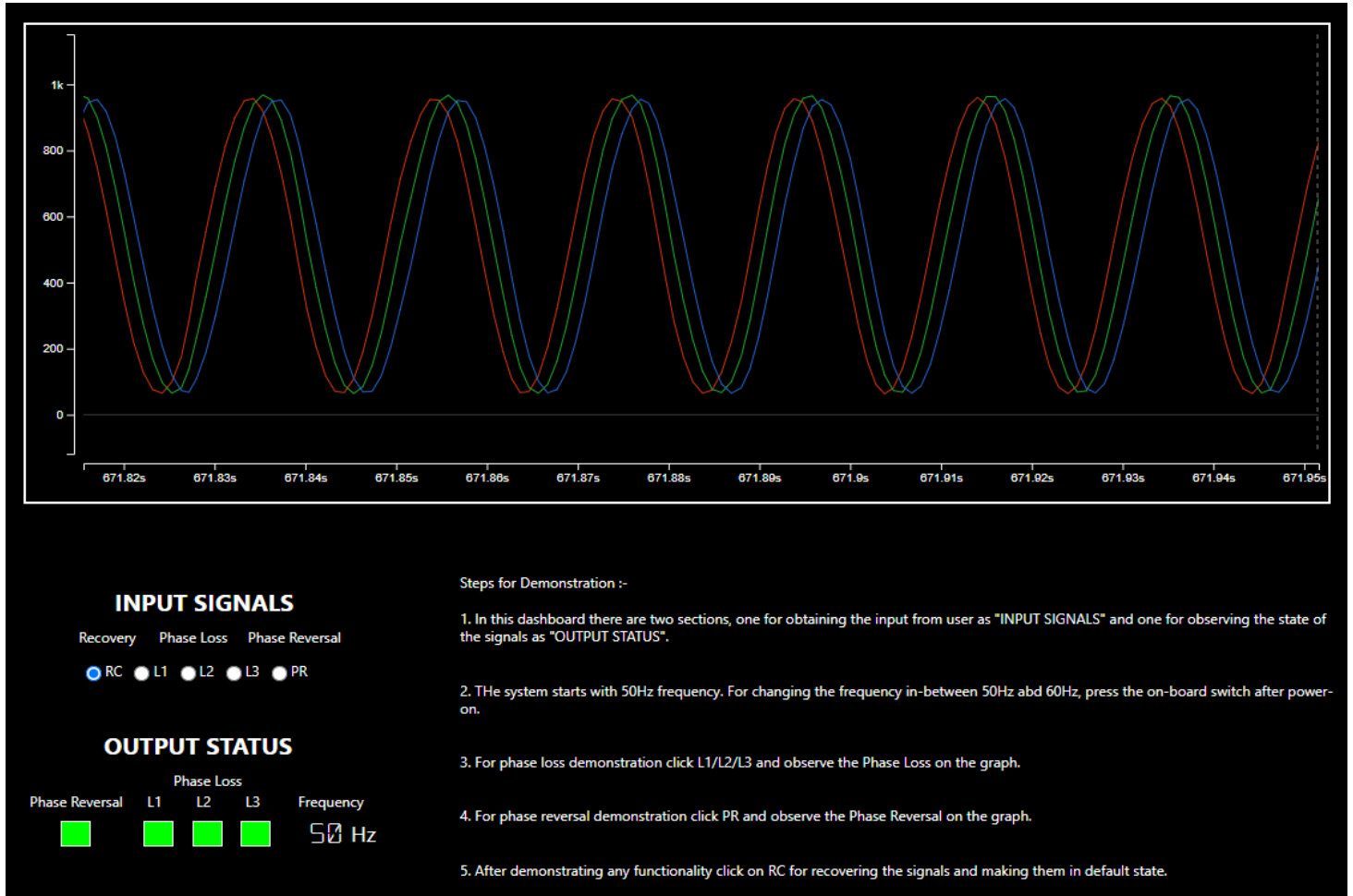


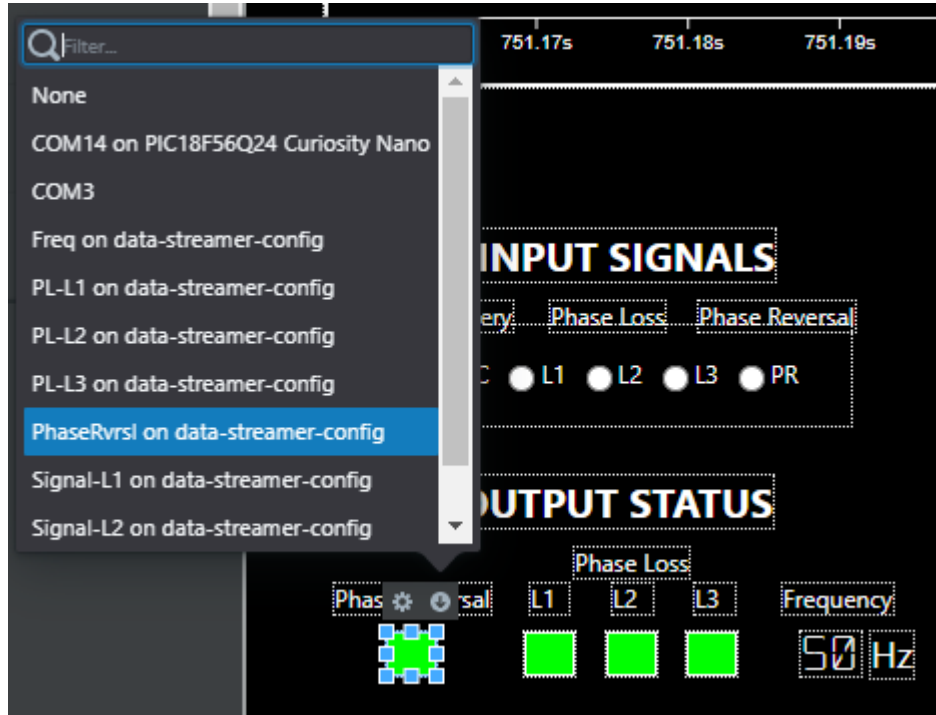
图 7-6. 加载仪表板文件后的定制仪表板



下面说明了数据流送器控制面板与仪表板 I/O 窗口之间所需的连接：

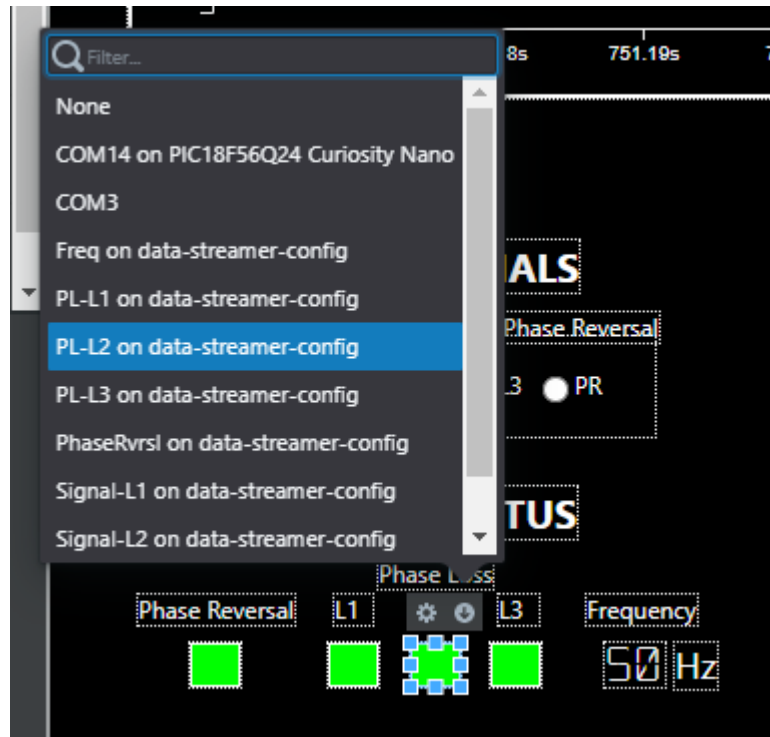
1. 从下拉选项中选择 **PhaseRvrsI** 输入。

图 7-7. 配置反相输入



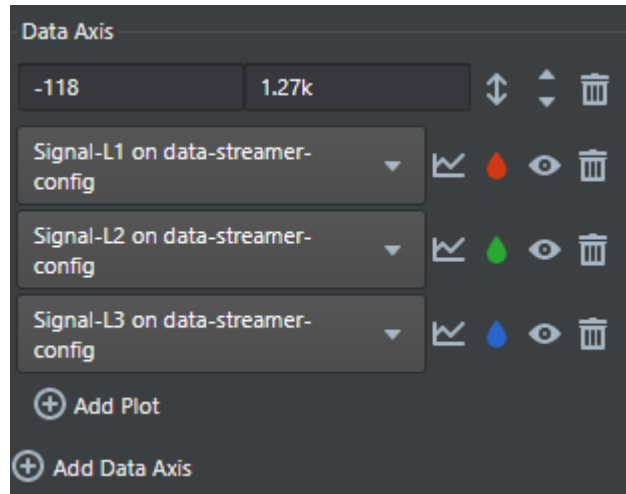
2. 从下拉选项中选择相输入。对所有三个缺相状态指示（PL-1、PL-2 和 PL-3）重复执行该步骤。

图 7-8. 配置缺相



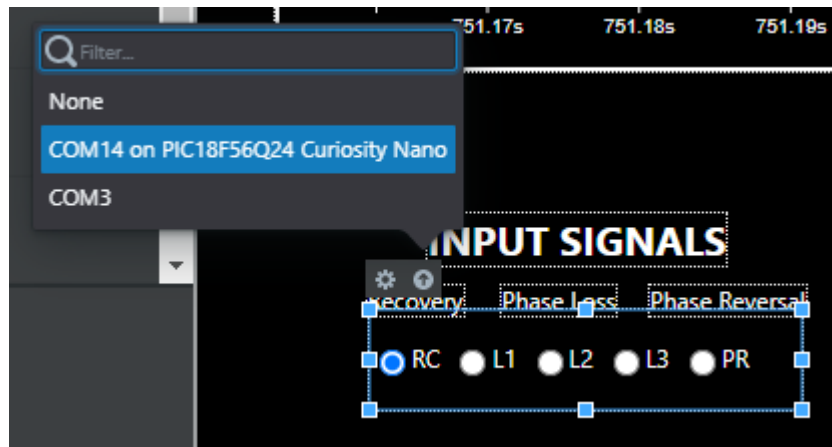
3. 单击图形窗口后仪表盘窗口右侧会弹出一个窗口。将三个信号分别配置在三个不同的信号输入上。另外，分别为三个波形选择三种不同的颜色。

图 7-9. 在图形窗口中配置信号



4. 配置单选按钮，用于选择通过 UART 发送数据的串行端口输入。

图 7-10. 配置用户输入



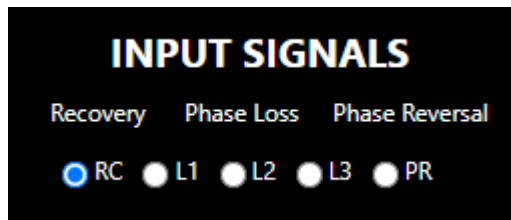
### 7.3. 用户输入

本节说明了数据可视化器的定制仪表板窗口中可用于演示反相和缺相故障的用户输入选项列表。

- 从故障中恢复三相电源：
  - 选择 **RC** 按钮可从缺相故障或反相故障中恢复三相信号
- 在 L1 相上插入缺相故障：
  - 选择 **L1** 可仿真三相信号上的 L1 缺相故障，即禁用三相信号中的 L1 相
- 在 L2 相上插入缺相故障：
  - 选择 **L2** 可仿真三相信号上的 L2 缺相故障，即禁用三相信号中的 L2 相
- 在 L3 相上插入缺相故障：
  - 选择 **L3** 可仿真三相信号上的 L3 缺相故障，即禁用三相信号中的 L3 相
- 插入反相故障：
  - 选择 **PR** 可仿真三相信号上的反相故障，即将三相信号的顺序改为 L1-L3-L2

图 7-11 显示了用于相序检测演示的用户输入选项。

图 7-11. 仪表板 I/O 窗口中的用户输入选项

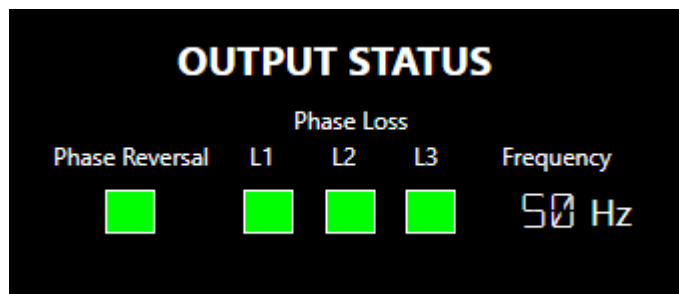


## 7.4. 应用输出指示

- 反相状态指示：
  - 应用在运行时更新反相状态。反相状态指示在正相序时显示绿色，在检测到反相故障时显示红色。
- 缺相状态指示：
  - 应用在运行时更新缺相状态。缺相状态指示在没有缺相故障时显示绿色，在检测到缺相故障时显示红色。
- 工作频率 (Hz)：
  - 显示三相信号的频率

图 7-12 显示了用于相序检测器演示的应用输出状态指示。

图 7-12. 仪表板窗口中的应用输出状态指示



## 7.5. 演示操作

1. 按照[演示设置](#)部分提供的说明连接硬件并准备演示设置
2. 按照[数据可视化器配置](#)部分提供的说明配置数据可视化器
3. 单击 **Serial Port Connect** (串行端口连接) 按钮
4. 单击 CuriosityNano 板上的 **SW0** 按钮并为三相信号选择合适的频率。所选频率随后显示在定制仪表板窗口中。
5. 通过单击右上角的 +/- 放大符号放大或缩小图形窗口中的图形
6. 通过单击仪表板上的 **L1** 单选按钮插入缺相故障，即禁用三相信号中的 L1 信号以仿真缺相输入。[图 7-13](#) 显示了具有 L1 缺相故障的三相信号以及仪表板上的 L1 缺相状态指示。  
同理，单击仪表板上的 **L2** 或 **L3** 单选按钮可以插入 **L2** 和 **L3** 的缺相故障，即禁用相应的信号以仿真缺相输入。[图 7-14](#) 和 [图 7-15](#) 分别显示了具有相应缺相故障的三相信号；相应的缺相状态指示出现在仪表板上。
7. 通过单击仪表板上的 **PR** 单选按钮插入反相故障，即将三相信号的顺序更改为 L1-L3-L2。[图 7-16](#) 显示了反相输入以及仪表板上的反相状态指示。



图 7-13. L1 缺相的三相输入信号

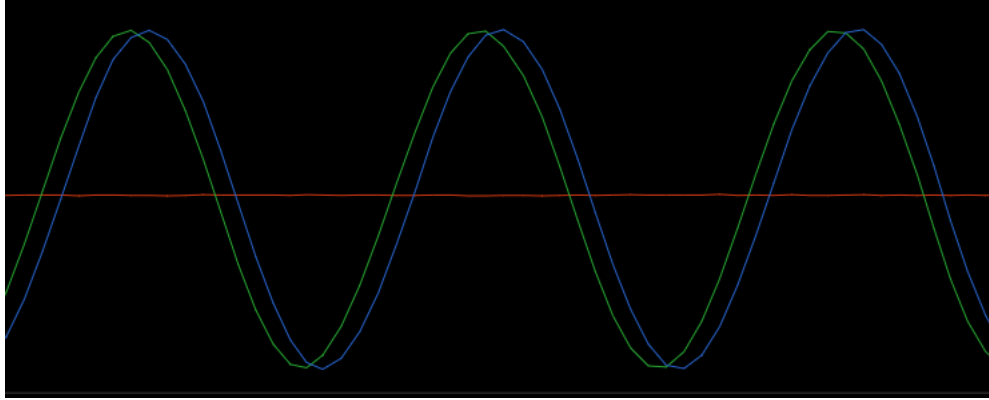


图 7-14. L2 缺相的三相输入信号

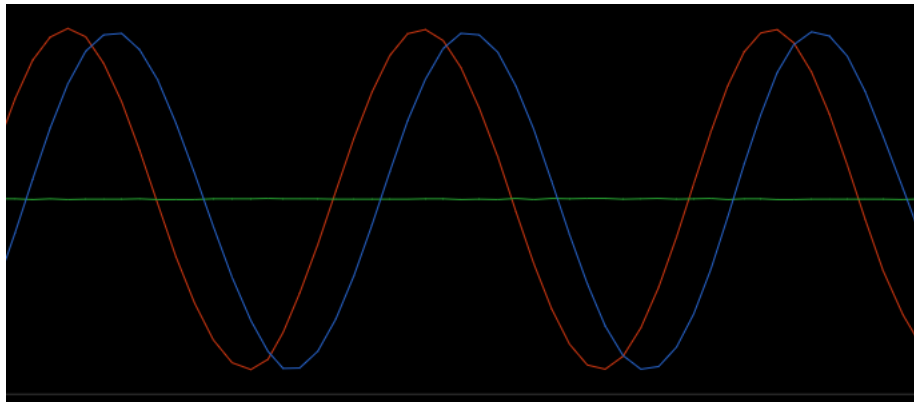


图 7-15. L3 缺相的三相输入信号

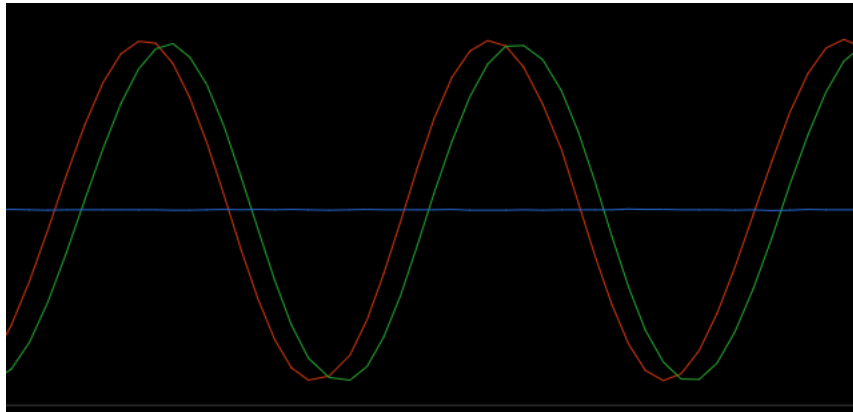
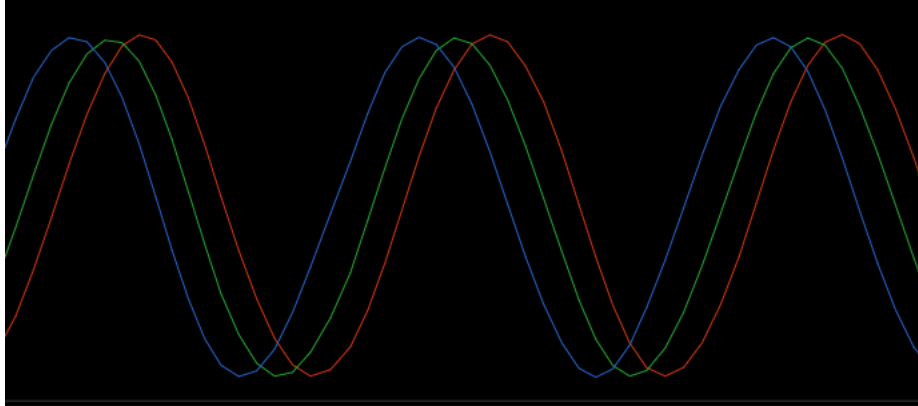


图 7-16. 具有反相故障的三相输入信号



更多信息，请参见[用户输入](#)一节。

## 8. 面向实时应用的相序检测

相序检测解决方案适用于多种实时应用，其中包括：

- 白色家电
- 用于多相交流系统的相序表
- 用于电梯的监视继电器
- 自动扶梯
- 泵
- HVAC 系统
- 灌溉设备
- 石油化工设备

## 9. 结论

本应用笔记介绍了使用 PIC18F56Q24 单片机的 ZCD、UART、ADCC 和定时器外设实现的三相交流电源相序检测仿真模型。此外，文中还介绍了如何使用 PIC18F56Q24 Curiosity Nano 开发板、Curiosity Nano 转接板和 Waveform Click 板对三相交流电源进行反相和缺相故障检测以及 RMS 电压测量。

与仅使用 ADCC 的传统方法相比，使用过零检测可以更快速、更精确、更可靠地检测相序，因为省去了与 ADCC 相关的计算时间。此外，单片机内置 ZCD 外设可节省电路板空间和物料成本，使应用更高效，更具性价比。PIC18F-Q24 单片机的 ZCD 外设与一系列模拟和高级数字外设搭配使用，非常适合用来实现监视交流电源反相和单相故障的应用。

## 10. 参考资料

- [PIC18-Q24 产品系列页面](#)，Microchip Technology Inc.
- [PIC18F26/45/46/55/56Q24 Data Sheet](#) (DS40002503B)，Microchip Technology Inc.，2023 年
- [Curiosity Nano Base for Click boards Hardware User Guide](#) (DS50002839B)，Microchip Technology Inc.，2019 年
- [Waveform Click 板产品页面](#)，MikroElectronica d.o.o.
- 《[MPLAB®数据可视化器用户指南](#)》(DS50003001E\_CN)，Microchip Technology Inc.，2023 年

## 11. 附录

### 11.1. 代码配置器

本节提供通过 Microchip 代码配置器（MCC）生成初始化代码的步骤。

#### 11.1.1. MCC 配置

实现三相序检测演示需配置以下外设：

- Timer2（TMR2）
- Timer4（TMR4）
- UART1
- SPI1
- ZCD1
- ZCD2
- ADCC
- 引脚模块

##### 1. Timer2:

Timer2 配置为 20 ms，以 MFINTOSC\_500kHz（预分频比为 1:64）作为时钟源，用于调度执行相序检测的时间。图 11-1 显示了 Timer2 配置窗口。

图 11-1. Timer2 配置窗口

The screenshot shows the configuration window for TMR2, divided into several sections:

- Software Settings:**
  - Custom Name: Timer2
  - Timer Dependency Selector: TMR2
- Hardware Settings:**
  - Enable Timer:
  - Control Mode: Roll over pulse
  - External Reset Source: T2INPPS pin
  - Start/Reset Option: Software control
- Timer Clock:**
  - Clock Source: MFINTOSC\_500KHz
  - Enable Clock Sync:
  - Clock Frequency (Hz): 500000
  - Polarity: Rising Edge
  - Prescaler: 1:64
  - Enable Prescaler O/P Sync:
  - Postscaler: 1:1
- Timer Period:**
  - Time Period (s): 0.000128 <= 0.02 <= 0.032768
  - Actual Period (s): 0.020096
- Interrupt Settings:**
  - TMR Interrupt Enable:
  - Callback Function Rate (s): 0

## 2. Timer4:

Timer4 配置为 1 ms，以 4 分频的系统时钟（预分频比为 1:64）作为时钟源，用于计算三相输入中两个信号之间的相移。图 11-2 显示了 Timer4 配置窗口。

图 11-2. Timer4 配置窗口

The screenshot shows the configuration window for TMR4, divided into several sections:

- Easy View** (selected) and **Register Initialization** tabs.
- Software Settings**: Custom Name (Timer4), Timer Dependency Selector (TMR4).
- Hardware Settings**: Enable Timer (checked), Control Mode (Roll over pulse), External Reset Source (T4INPPS pin), Start/Reset Option (Software control).
- Timer Clock**: Clock Source (FOSC/4), Enable Clock Sync (unchecked), Clock Frequency (Hz) (16000000), Polarity (Rising Edge), Prescaler (1:64), Enable Prescaler O/P Sync (unchecked), Postscaler (1:4).
- Timer Period**: Time Period (s) (0.000016 <= 0.001 <= 0.004096), Actual Period (s) (0.001008).
- Interrupt Settings**: TMR Interrupt Enable (checked), Callback Function Rate (s) (0).

### 3. UART2:

UART2 配置为 230400 波特率并允许中断，用于应用与数据可视化器之间的通信。图 11-3 显示了 UART2 配置窗口。



图 11-3. UART2 配置窗口

UART2 x

Easy View

Configuration Settings

Custom Name

Requested Baudrate

Calculated Baudrate

Baud Rate Error (%)

Parity

Data Size

Stop Bits

Flow Control Mode

Redirect Printf to UART  Ensure Redirect to Printf is enabled for only one UART driver.

Interrupt Settings

Interrupt Driven

Dependency Selector

UART PLIB Selector

#### 4. SPI1:

SPI1 配置为 6 MHz 速度和模式 2，用于连接信号模拟器模块。图 11-4 显示了 SPI1 配置窗口。

图 11-4. SPI1 配置窗口

## 5. ZCD1:

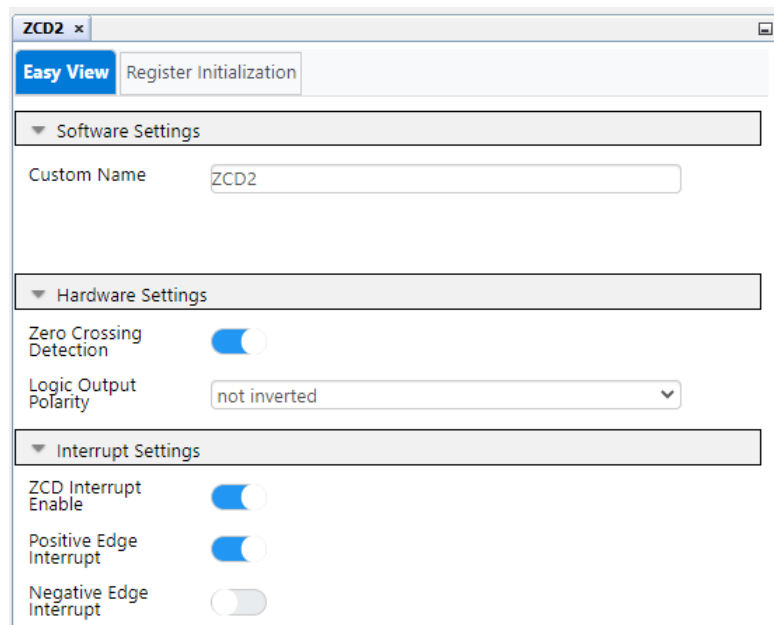
ZCD1 配置为允许上升沿检测中断，用于检测三相信号的相位。图 11-5 显示了 ZCD1 配置窗口。

图 11-5. ZCD1 配置窗口

## 6. ZCD2:

ZCD2 配置为允许上升沿检测中断，用于检测三相信号的相位。图 11-6 显示了 ZCD2 配置窗口。

图 11-6. ZCD2 配置窗口



## 7. ADCC:

ADCC 配置为轮询模式，用于测量三相信号以在数据可视化器上重现信号、计算 RMS 电压以及检测单相故障。图 11-7 显示了 ADCC 配置窗口。

图 11-7. ADCC 配置窗口

The screenshot shows the ADCC configuration window with the following settings:

- ADCC x** (tab)
- Easy View** (button) | Register Initialization (text)
- Software Settings** (expanded section)
  - Custom Name: ADCC
- Hardware Settings** (expanded section)
  - Enable ADC:
  - Operating Mode: Basic\_mode
  - Result Alignment: right
  - Positive Reference: VDD
  - Negative Reference: VSS
  - Auto-conversion Trigger: disabled
  - Enable Continuous Operation:
  - Stop on Interrupt: ADGO not cleared
  - Enable Double Sample:
  - Acquisition Count: 0 <= 100 <= 8191
  - Acquisition Time: 1.563 us
  - Positive Input Channel: ANA0

8. 引脚模块:



## 12. 版本历史

版本	日期	说明
A	2024 年 3 月	文档初始版本

## Microchip 信息

### Microchip 网站

Microchip 网站 ([www.microchip.com](http://www.microchip.com)) 为客户提供在线支持。客户可通过该网站方便地获取文件和信息。我们的网站提供以下内容：

- **产品支持**——数据手册和勘误表、应用笔记和示例程序、设计资源、用户指南以及硬件支持文档、最新的软件版本以及归档软件
- **一般技术支持**——常见问题解答 (FAQ)、技术支持请求、在线讨论组以及 Microchip 设计伙伴计划成员名单
- **Microchip 业务**——产品选型和订购指南、最新 Microchip 新闻稿、研讨会和活动安排表、Microchip 销售办事处、代理商以及工厂代表列表

### 产品变更通知服务

Microchip 的产品变更通知服务有助于客户了解 Microchip 产品的最新信息。注册客户可在他们感兴趣的某个产品系列或开发工具发生变更、更新、发布新版本或勘误表时，收到电子邮件通知。

欲注册，请访问 [www.microchip.com/pcn](http://www.microchip.com/pcn)，然后按照注册说明进行操作。

### 客户支持

Microchip 产品的用户可通过以下渠道获得帮助：

- 代理商或代表
- 当地销售办事处
- 应用工程师 (ESE)
- 技术支持

客户应联系其代理商、代表或 ESE 寻求支持。当地销售办事处也可为客户提供帮助。本文档后附有销售办事处的联系方式。

也可通过 [www.microchip.com/support](http://www.microchip.com/support) 获得网上技术支持。

### Microchip 器件代码保护功能

请注意以下有关 Microchip 产品代码保护功能的要点：

- Microchip 的产品均达到 Microchip 数据手册中所述的技术规范。
- Microchip 确信：在正常使用且符合工作规范的情况下，Microchip 系列产品非常安全。
- Microchip 注重并积极保护其知识产权。严禁任何试图破坏 Microchip 产品代码保护功能的行为，这种行为可能会违反《数字千年版权法案》(Digital Millennium Copyright Act)。
- Microchip 或任何其他半导体厂商均无法保证其代码的安全性。代码保护并不意味着我们保证产品是“牢不可破”的。代码保护功能处于持续发展中。Microchip 承诺将不断改进产品的代码保护功能。

### 法律声明

提供本文档的中文版本仅为了便于理解。请勿忽视文档中包含的英文部分，因为其中提供了有关 Microchip 产品性能和使用情况的有用信息。Microchip Technology Inc. 及其分公司和相关公司、各级主管与员工及事务代理机构对译文中可能存在的任何差错不承担任何责任。建议参考 Microchip Technology Inc. 的英文原版文档。

本出版物及其提供的信息仅适用于 Microchip 产品，包括设计、测试以及将 Microchip 产品集成到您的应用中。以其他任何方式使用这些信息都将被视为违反条款。本出版物中的器件应用信息仅为您提供便利，将来可能会发生更新。您须自行确保应用符合您的规范。如需额外的支持，请联系当地的 Microchip 销售办事处，或访问 [www.microchip.com/en-us/support/design-help/client-support-services](http://www.microchip.com/en-us/support/design-help/client-support-services)。

Microchip “按原样”提供这些信息。Microchip 对这些信息不作任何明示或暗示、书面或口头、法定或其他形式的声明或担保，包括但不限于针对非侵权性、适销性和特定用途的适用性的暗示担保，或针对其使用情况、质量或性能的担保。

在任何情况下，对于因这些信息或使用这些信息而产生的任何间接的、特殊的、惩罚性的、偶然的或间接的损失、损害或任何类型的开销，Microchip 概不承担任何责任，即使 Microchip 已被告知可能发生损害或损害可以预见。在法律允许的最大范围内，对于因这些信息或使用这些信息而产生的所有索赔，Microchip 在任何情况下所承担的全部责任均不超出您为获得这些信息向 Microchip 直接支付的金额（如有）。如果将 Microchip 器件用于生命维持和/或生命安全应用，一切风险由买方自负。买方同意在由此引发任何一切损害、索赔、诉讼或费用时，会维护和保障 Microchip 免于承担法律责任。除非另外声明，在 Microchip 知识产权保护下，不得暗或以其他方式转让任何许可证。

## 商标

“Microchip”的名称和徽标组合、“M”徽标及其他名称、徽标和品牌均为 Microchip Technology Incorporated 或其关联公司和/或子公司在美国和/或其他国家或地区的注册商标和商标（“Microchip 商标”）。有关 Microchip 商标的信息，可访问 [www.microchip.com/en-us/about/legal-information/microchip-trademarks](http://www.microchip.com/en-us/about/legal-information/microchip-trademarks)。

ISBN: 979-8-3371-0912-1

## 质量管理体系

有关 Microchip 质量管理体系的信息，请访问 [www.microchip.com/quality](http://www.microchip.com/quality)。



# 全球销售及服务网点

美洲	亚太地区	亚太地区	欧洲
<b>公司总部</b> 2355 West Chandler Blvd. Chandler, AZ 85224-6199 电话: 480-792-7200 传真: 480-792-7277 技术支持: <a href="http://www.microchip.com/support">www.microchip.com/support</a> 网址: <a href="http://www.microchip.com">www.microchip.com</a>	<b>澳大利亚 - 悉尼</b> 电话: 61-2-9868-6733 <b>中国 - 北京</b> 电话: 86-10-8569-7000 <b>中国 - 成都</b> 电话: 86-28-8665-5511 <b>中国 - 重庆</b> 电话: 86-23-8980-9588 <b>中国 - 东莞</b> 电话: 86-769-8702-9880 <b>中国 - 广州</b> 电话: 86-20-8755-8029 <b>中国 - 杭州</b> 电话: 86-571-8792-8115 <b>中国 - 香港特别行政区</b> 电话: 852-2943-5100 <b>中国 - 南京</b> 电话: 86-25-8473-2460 <b>中国 - 青岛</b> 电话: 86-532-8502-7355 <b>中国 - 上海</b> 电话: 86-21-3326-8000 <b>中国 - 沈阳</b> 电话: 86-24-2334-2829 <b>中国 - 深圳</b> 电话: 86-755-8864-2200 <b>中国 - 苏州</b> 电话: 86-186-6233-1526 <b>中国 - 武汉</b> 电话: 86-27-5980-5300 <b>中国 - 西安</b> 电话: 86-29-8833-7252 <b>中国 - 厦门</b> 电话: 86-592-2388138 <b>中国 - 珠海</b> 电话: 86-756-3210040	<b>印度 - 班加罗尔</b> 电话: 91-80-3090-4444 <b>印度 - 新德里</b> 电话: 91-11-4160-8631 <b>印度 - 浦那</b> 电话: 91-20-4121-0141 <b>日本 - 大阪</b> 电话: 81-6-6152-7160 <b>日本 - 东京</b> 电话: 81-3-6880-3770 <b>韩国 - 大邱</b> 电话: 82-53-744-4301 <b>韩国 - 首尔</b> 电话: 82-2-554-7200 <b>马来西亚 - 吉隆坡</b> 电话: 60-3-7651-7906 <b>马来西亚 - 槟榔屿</b> 电话: 60-4-227-8870 <b>菲律宾 - 马尼拉</b> 电话: 63-2-634-9065 <b>新加坡</b> 电话: 65-6334-8870 <b>台湾地区 - 新竹</b> 电话: 886-3-577-8366 <b>台湾地区 - 高雄</b> 电话: 886-7-213-7830 <b>台湾地区 - 台北</b> 电话: 886-2-2508-8600 <b>泰国 - 曼谷</b> 电话: 66-2-694-1351 <b>越南 - 胡志明市</b> 电话: 84-28-5448-2100	<b>奥地利 - 韦尔斯</b> 电话: 43-7242-2244-39 传真: 43-7242-2244-393 <b>丹麦 - 哥本哈根</b> 电话: 45-4485-5910 传真: 45-4485-2829 <b>芬兰 - 埃斯波</b> 电话: 358-9-4520-820 <b>法国 - 巴黎</b> 电话: 33-1-69-53-63-20 传真: 33-1-69-30-90-79 <b>德国 - 加兴</b> 电话: 49-8931-9700 <b>德国 - 哈恩</b> 电话: 49-2129-3766400 <b>德国 - 海尔布隆</b> 电话: 49-7131-72400 <b>德国 - 卡尔斯鲁厄</b> 电话: 49-721-625370 <b>德国 - 慕尼黑</b> 电话: 49-89-627-144-0 传真: 49-89-627-144-44 <b>德国 - 罗森海姆</b> 电话: 49-8031-354-560 <b>以色列 - 霍德夏沙隆</b> 电话: 972-9-775-5100 <b>意大利 - 米兰</b> 电话: 39-0331-742611 传真: 39-0331-466781 <b>意大利 - 帕多瓦</b> 电话: 39-049-7625286 <b>荷兰 - 德卢内市</b> 电话: 31-416-690399 传真: 31-416-690340 <b>挪威 - 特隆赫姆</b> 电话: 47-72884388 <b>波兰 - 华沙</b> 电话: 48-22-3325737 <b>罗马尼亚 - 布加勒斯特</b> 电话: 40-21-407-87-50 <b>西班牙 - 马德里</b> 电话: 34-91-708-08-90 传真: 34-91-708-08-91 <b>瑞典 - 哥德堡</b> 电话: 46-31-704-60-40 <b>瑞典 - 斯德哥尔摩</b> 电话: 46-8-5090-4654 <b>英国 - 沃金厄姆</b> 电话: 44-118-921-5800 传真: 44-118-921-5820
<b>亚特兰大</b> 德卢斯, 佐治亚州 电话: 678-957-9614 传真: 678-957-1455 <b>奥斯汀, 德克萨斯州</b> 电话: 512-257-3370 <b>波士顿</b> 韦斯特伯鲁, 马萨诸塞州 电话: 774-760-0087 传真: 774-760-0088 <b>芝加哥</b> 艾塔斯卡, 伊利诺伊州 电话: 630-285-0071 传真: 630-285-0075 <b>达拉斯</b> 阿迪森, 德克萨斯州 电话: 972-818-7423 传真: 972-818-2924 <b>底特律</b> 诺维, 密歇根州 电话: 248-848-4000 <b>休斯顿, 德克萨斯州</b> 电话: 281-894-5983 <b>印第安纳波利斯</b> 诺布尔斯维尔, 印第安纳州 电话: 317-773-8323 传真: 317-773-5453 电话: 317-536-2380 <b>洛杉矶</b> 米慎维荷, 加利福尼亚州 电话: 949-462-9523 传真: 949-462-9608 电话: 951-273-7800 <b>罗利, 北卡罗来纳州</b> 电话: 919-844-7510 <b>纽约, 纽约州</b> 电话: 631-435-6000 <b>圣何塞, 加利福尼亚州</b> 电话: 408-735-9110 电话: 408-436-4270 <b>加拿大 - 多伦多</b> 电话: 905-695-1980 传真: 905-695-2078			