

# 具有硬件加速功能的 TI MCU 的开箱即用 Edge AI 演示



## 摘要

Edge AI 直接使嵌入式器件具有智能功能，可在不依赖于云连接的情况下实现低延迟、安全和可靠的决策。在工业应用中，这意味着更快的响应速度、更好的数据隐私和更大的系统自主性。本指南介绍了德州仪器 (TI) 的新型 Edge AI 硬件和工具，并提供了智能信号分类器的开箱即用演示。该演示展示了如何使用我们的工具快速构建可对正弦波、方波和锯齿波形进行分类的简单应用。

## 内容

|                         |    |
|-------------------------|----|
| 1 简介.....               | 2  |
| 2 TMS320F28P55x.....    | 2  |
| 3 Edge AI Studio.....   | 2  |
| 4 开箱即用演示 (智能信号分类器)..... | 3  |
| 4.1 数据集.....            | 4  |
| 4.2 模型训练.....           | 7  |
| 4.3 部署到 TI 硬件.....      | 12 |
| 5 总结.....               | 13 |

## 插图清单

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| 图 3-1. Edge AI Studio.....      | 3  |
| 图 4-1. Model Composer 工作流程..... | 3  |
| 图 4-2. 正弦波.....                 | 4  |
| 图 4-3. 锯齿波.....                 | 4  |
| 图 4-4. 方波.....                  | 5  |
| 图 4-5. 文件夹路径.....               | 6  |
| 图 4-6. 不同的模型尺寸.....             | 7  |
| 图 4-7. 新建示例屏幕截图.....            | 8  |
| 图 4-8. “Capture” 选项卡.....       | 8  |
| 图 4-9. 模型选择选项卡.....             | 9  |
| 图 4-10. 锯齿波 STFT.....           | 9  |
| 图 4-11. 正弦波 STFT.....           | 10 |
| 图 4-12. 真空清洁器和电弧 STFT.....      | 10 |
| 图 4-13. 训练结果.....               | 11 |
| 图 4-14. 混淆矩阵.....               | 11 |
| 图 4-15. “Compile”选项卡.....       | 12 |
| 图 4-16. “Deploy” 选项卡.....       | 12 |
| 图 4-17. 已编译模型的文件夹.....          | 13 |

## 商标

C2000™ is a trademark of Texas Instruments.

所有商标均为其各自所有者的财产。

## 1 简介

德州仪器 (TI) 提供各种 MCU 和处理器，从实时微控制器到高性能应用处理器和毫米波传感器件，不一而足。无论您是构建低功耗边缘节点还是支持 AI 的高级系统，TI 都能提供可扩展的解决方案，以满足各种设计需求。

要了解我们的完整 Edge AI 产品系列以及了解 TI 如何实现边缘智能（从开发工具到部署），请访问我们的 [Edge AI 技术页面](#)，您可以在其中找到 TI 的 Edge AI 的完整案例。

本文档重点介绍了我们的 Edge AI 微控制器，并探讨了基于这些器件的完整开箱即用演示。在执行复杂的 AI 模型时，MCU 往往不够，尤其是在功耗和延迟预算有限的情况下。为了满足工业用例严苛的性能和效率要求，为机器学习 (ML) 工作负载配备专用硬件加速至关重要。TI 全新的 Edge AI 硬件平台配备了专门的加速器，该加速器经过优化，可高效运行神经网络，从而缩短推理时间并降低系统功耗。

作为对硬件的补充，TI 推出了 Edge AI Studio，这是一种完全集成的图形开发环境，可简化整个 ML 流水线。从数据收集和标记到模型训练、优化和部署到受支持的 TI 边缘器件上，Edge AI Studio 可通过基于 GUI 的无代码界面简化每个步骤。因此，AI 专家和嵌入式开发人员能够快速高效地构建强大的边缘智能解决方案。

## 2 TMS320F28P55x

**TMS320F28P550SJ** 是 C2000™ 系列中率先集成硬件神经处理单元 (NPU) 的器件，其定位是实时控制系统中 Edge AI 的尖端平台。此 MCU 基于强大的 C28x DSP 内核，融合了确定性控制、高级信号处理和片上机器学习推理，可在电源、运动和工业系统中实现更智能、更自主的嵌入式应用。集成 NPU 旨在加速量化神经网络推理、显著降低 CPU 开销并实现预测性维护、电机故障检测、传感器分类和故障检测等实时 AI 用例。虽然 TMS320F28P550SJ 包含用于加速的专用 NPU，但请务必注意，仍然可以在 C2000 MCU 上完全在软件中编译和运行所有 Edge AI 模型，而无需任何专用的 NPU 硬件。

以下资源可供客户开始评估电弧故障检测、系统故障和电机故障检测：

- [机器学习电弧故障检测用户指南](#)
- [基于人工智能 \(AI\) 的太阳能应用中用于直流电弧检测的可订购硬件](#)
- [借助支持边缘 AI 的 MCU 优化实时控制系统中的系统故障检测](#)
- [采用嵌入式 AI 模型的电机故障检测](#)

## 3 Edge AI Studio

**Edge AI Studio** 旨在加速 TI 处理器和微控制器上 Edge AI 开发的一系列图形和命令行工具。无论是使用 TI Model Zoo 中的模型还是利用您自己的模型进行概念验证开发，Edge AI Studio 都能为您提供所需的工具。

- **Model Composer** 是一个完全集成的解决方案，用于收集和注释数据，训练和编译模型，以便在实时开发平台上部署。Model Composer 拥有各种示例解决方案，并配有演示数据集，无需导入您自己的任何数据即可测试工具链。Model Composer 还支持自带数据 (BYOD)，因此可利用定制数据对 TI Model Zoo 中的模型进行重新训练，从而提高精度和性能。Model Composer 可用作基于云的应用程序来执行基于视觉的任务，也可用作云和桌面应用程序来执行实时控制任务。
- **Model Analyzer** 是一项适用于视觉应用的免费在线服务，支持在远程访问开发板上评估加速深度学习推理。使用 Model Analyzer，只需几分钟即可登录、部署模型并获得各种性能基准。
- **Model Maker** 是一款命令行端到端模型开发工具。Model Maker 包含用于数据集处理、模型训练和编译的功能。专家级用户可以使用这些工具来打造自己的模型。

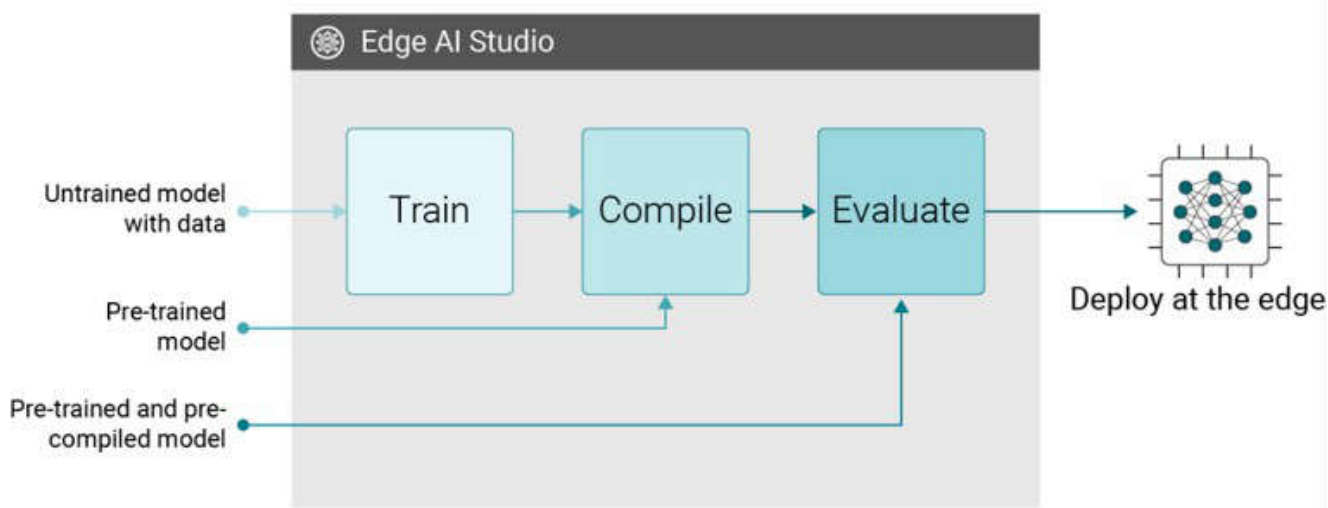


图 3-1. Edge AI Studio

#### 4 开箱即用演示 ( 智能信号分类器 )

此演示旨在简单介绍 TI 的边缘 AI 工具链和产品。我们的软件旨在作为一个起点和工程工具，而不是生产就绪型示例。此示例是一种通用时间系列“Hello World”型演示，旨在介绍 AI 模型的数据收集、训练、编译和执行工作流程。此演示的整个工作流程都是使用 Model Composer 创建的，后者是一款基于 GUI 的工具，包含在 Edge AI Studio 工具集中。

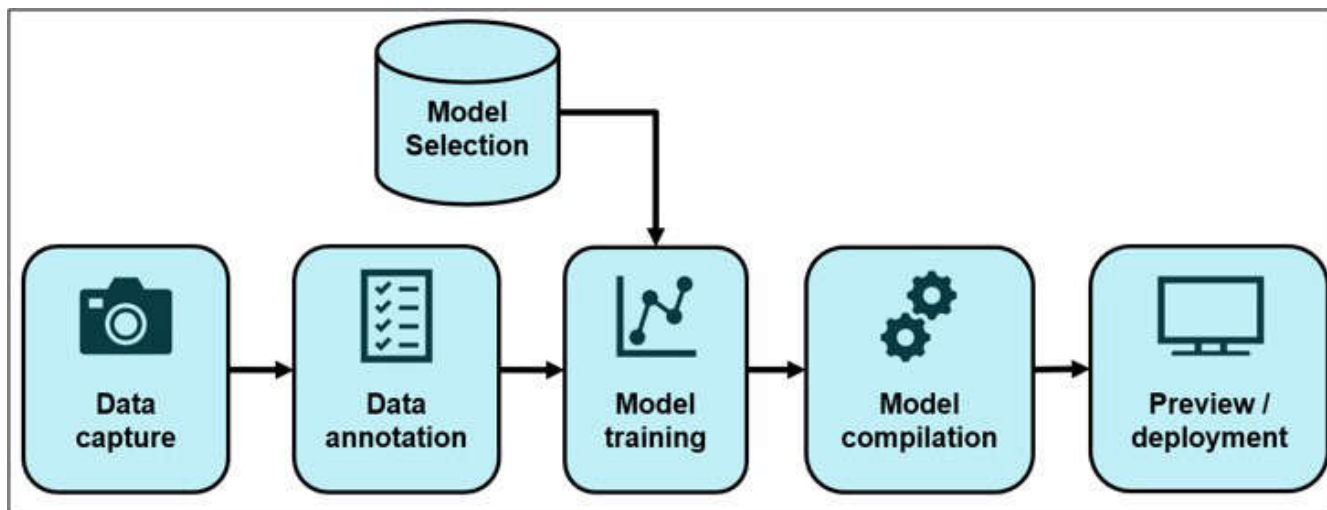


图 4-1. Model Composer 工作流程

## 4.1 数据集

此演示包括一个准备好的示例数据集，其中包含三个不同幅度和噪声水平下的不同周期性信号：正弦波、方波和锯齿波。

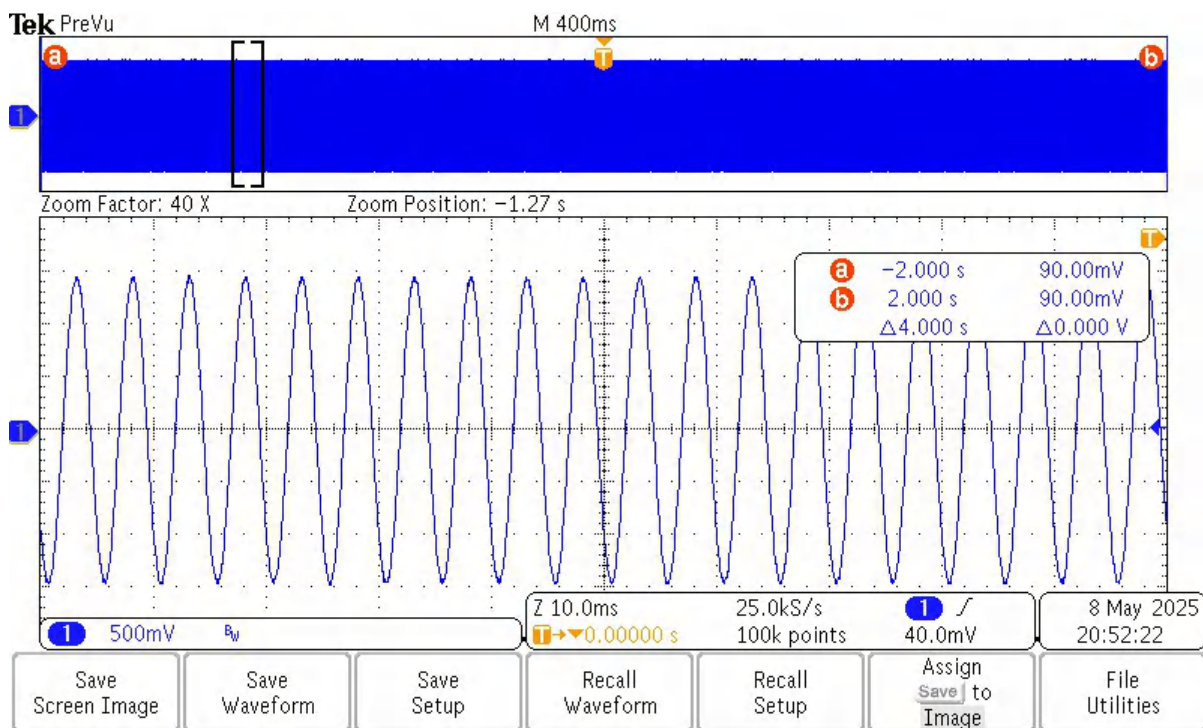


图 4-2. 正弦波

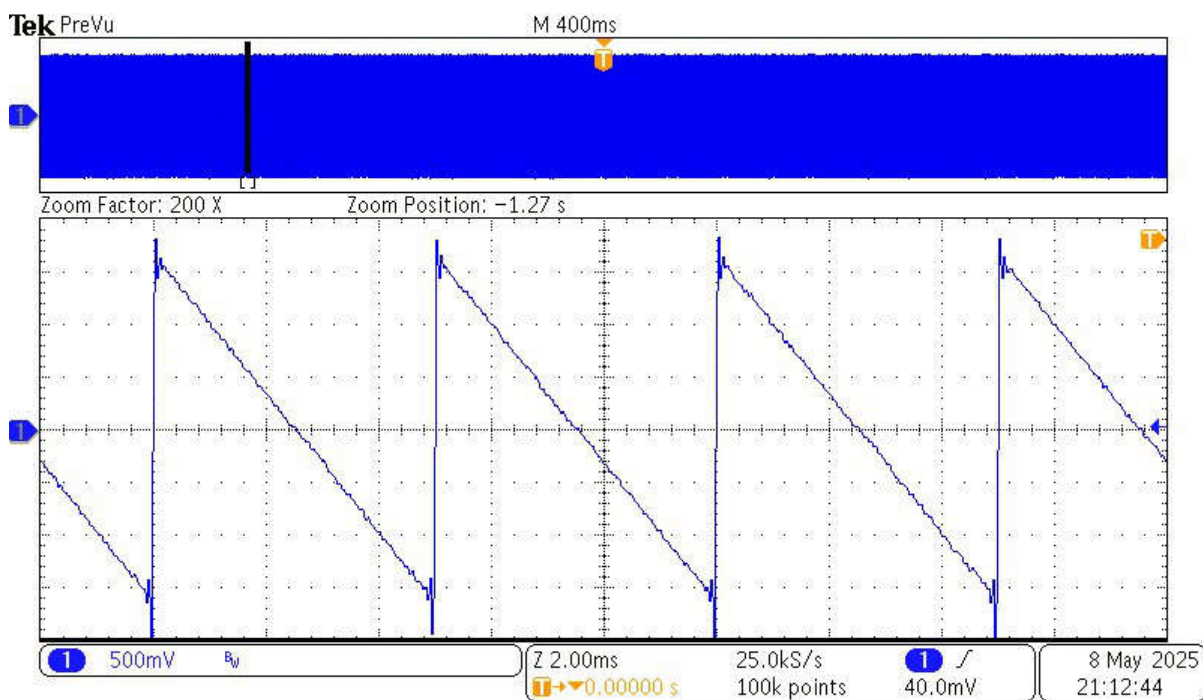


图 4-3. 锯齿波

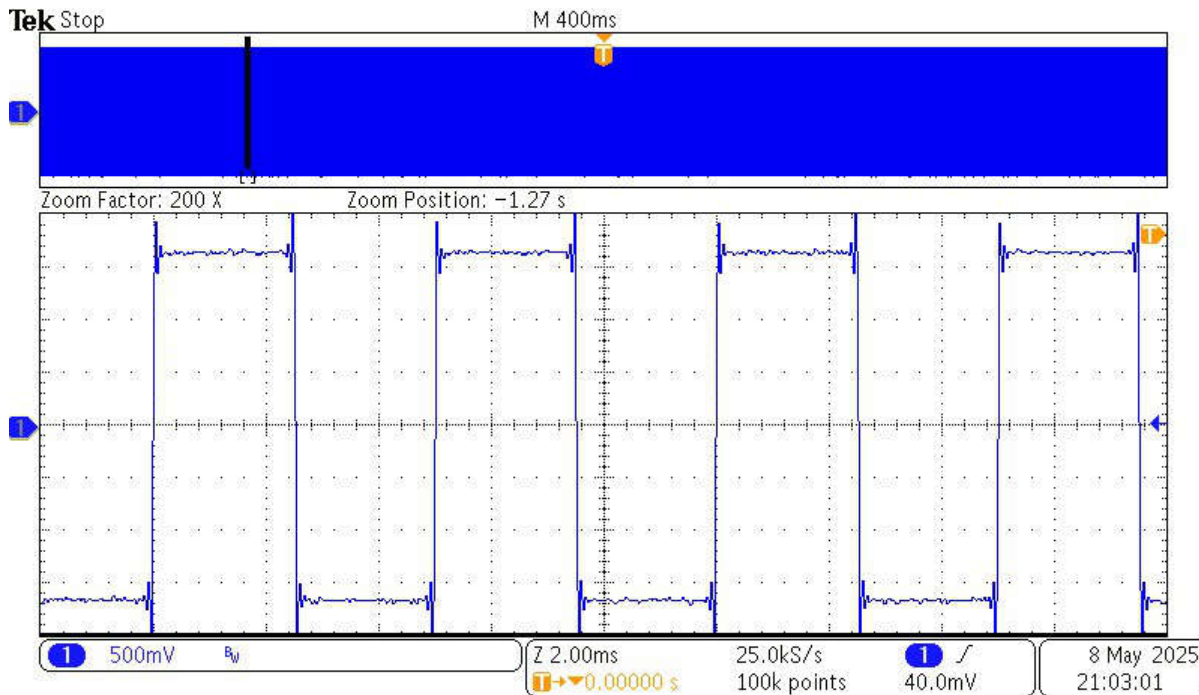


图 4-4. 方波

#### 4.1.1 数据收集方法

成功的机器学习训练需要大型数据集。建议的最低起始位置是每个分类类拥有数千个质量示例。数据的质量和多样性至关重要。TI 提供具有自动类标记功能的参考设计和用于分析数据集质量的软件，以帮助工程师评估边缘 AI 应用。

高质量数据：

- 采样率：以远高于目标信号的奈奎斯特频率进行采样
- 稳态：标记帧不能在标记类之间转换可用的最高分辨率

数据搜集：可以使用代表最终电路设计和实际应用的数据来训练最终 AI 模型。可以从实验室收集的数据开始调整整个信号链，包括模型和模拟电路设计。在此示例中，我们收集了三种不同类别的周期性信号数据：正弦波、方波和锯齿波。它们保存在三个单独的文件夹中

##### 4.1.1.1 收集过程

理想情况下，通过最终应用中使用的模拟前端和传感器收集数据。提供了 F28P55 处理器的 [MCU 控制中心工具开发人员指南](#)，用于将 PC 设置为 LaunchPad 连接以进行数据流式传输。

C:\ti\c2000\C2000Ware\_5\_05\_00\_00\driverlib\f28p55x\examples\transfer\transfer\_ex3\_customlog\_export\_sci\_logArrays 处的示例可用于将传感器数据数组流式传输到主机 PC 上自动生成的 GUI。然后，数据可导出到 CSV。

### 4.1.2 数据格式

必须将数据集配置到包含两个名为类和注释的目录的数据集文件夹中。对于每个分类，类目录都包含一个文件夹，文件夹中含有每一列都填充有数据的 CSV 文件。多通道类需要多个数据列。注释文件夹包含三个文本文件：`instances_test_list.txt`、`instances_train_list.txt` 和 `instances_val_list.txt`。Model Composer 使用这些文件将数据集拆分为训练集、测试集和验证集。建议 50% 的文件在培训列表中、30% 在验证列表中及 20% 在测试列表中。架构的可视化如图 4-5 所示。

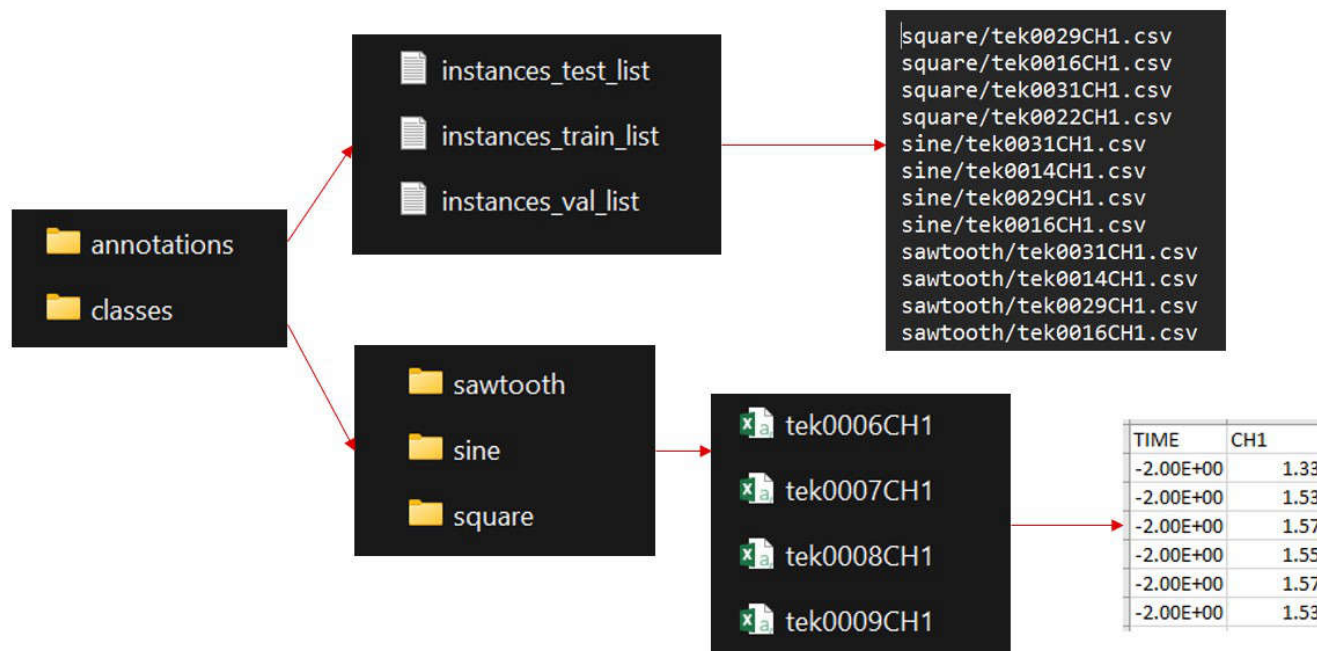


图 4-5. 文件夹路径

## 4.2 模型训练

本节介绍了通过 Edge AI Model Composer 上传数据、训练和编译模型的过程。客户可以使用 TinyML Model Maker 的命令行工具来微调模型参数和修改模型。

本演示具有四种不同大小的通用时间序列神经网络模型，可用于各种时间序列分类任务。

The screenshot shows the 'Model selection' section of the Edge AI Model Composer. It includes a slider for 'Choose a trade-off between accuracy and performance' ranging from 'Higher Accuracy' to 'Faster Performance'. Below the slider, there are two radio buttons: 'Use Recommended' and 'Use Selected Model' (which is selected). To the right, there is a 'Model' dropdown menu. The dropdown is open, showing a list of model sizes: 'TimeSeries\_Generic\_13k\_t', 'TimeSeries\_Generic\_6k\_t', 'TimeSeries\_Generic\_4k\_t', and 'TimeSeries\_Generic\_1k\_t' (which is highlighted in red). Below the dropdown, there is a link that says 'I don't see my model...'. On the left side of the interface, there are three metrics listed: 'Flash Usage (Bytes): 3367', 'Inference Time (us): 1311', and 'SRAM Usage (Bytes): 6224'.

图 4-6. 不同的模型尺寸

## 使用 Model Composer 的步骤：

1. 登录 <https://dev.ti.com/modelcomposer/>
2. 点击"Example Project", 在 Task 下选择"Generic Time Series", 在 Tools 下选择"MCU Analytics Backend v1.0.1", 在 Sample Dataset 下选择"hello\_world\_example\_DSG"。为项目命名, 然后点击"New Project"。

Step 1 : Filter Task ( Optional )

Step 2 : Select Task

Task Type

☐ Anomaly Detection
 ☐ Classification
 ☐ Detection
 ☐ Segmentation
 ☒ Time Series

Application Domain

☒ Appliances
 ☒ Automotive
 ☒ Digital Power
 ☒ Motor Control
 ☒ Vision

Sensors

☒ Accelerometer
 ☒ Camera

Task

I do not see my task...

ARC Fault  
 Blower Imbalance  
**Generic Time Series Classification**  
 Motor Fault

Tools \*

MCU Analytics Backend v1.0.1

Sample Dataset \*

hello\_world\_example\_dsg

Project Name \*

Write Project Name Here

\*Name Available

Example Project

图 4-7. 新建示例屏幕截图

3. "Capture"选项卡用于数据可视化、标记和导入。页面顶部的选项卡可用于迭代项目。在左侧菜单中选择一个文件会显示该数据文件的可视化效果。渲染选项显示在右侧。可以使用"Import Data"按钮导入其他数据。在创建新的通用时间序列项目时, 该按钮还可用于导入您自己的数据集。

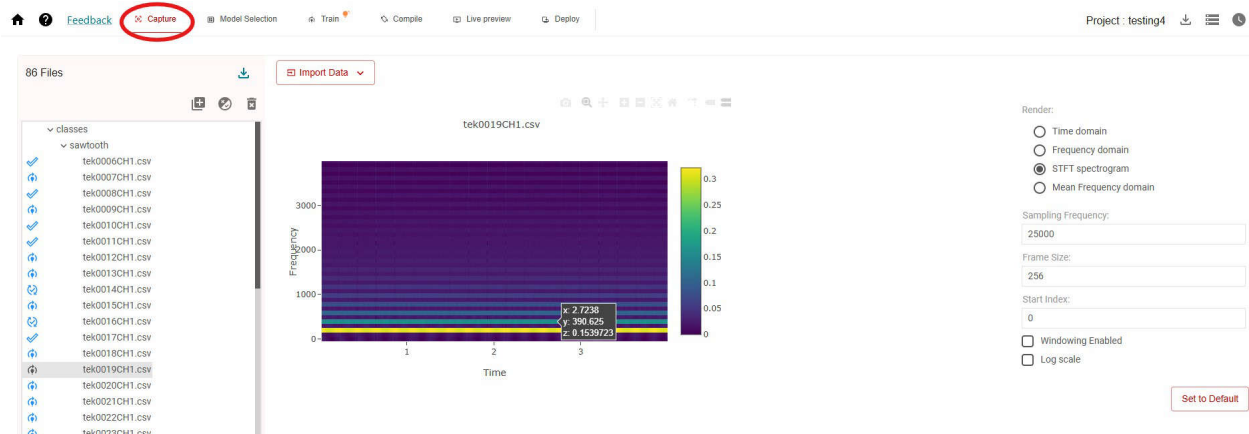


图 4-8. "Capture" 选项卡

- 使用页面顶部的链接转到模型选择选项卡，然后选择目标器件和模型。滑块可用于选择推荐的器件，用户也可以手动选择器件。对于本示例，建议使用 F28P55，该器件使用 TI 的神经处理单元 (NPU)。

### Device selection

Choose a trade-off between cost and performance

Lower Cost

Faster Performance

☐ Use Recommended

OR

☒ Use Selected Device

Device

F280015

OR

Device

F28P55

### Model selection

Choose a trade-off between accuracy and performance

Higher Accuracy

Faster Performance

☐ Use Recommended

OR

☒ Use Selected Model

Model

TimeSeries\_Generic\_13k\_t

OR

Model

TimeSeries\_Generic\_1k\_t

☐ C2000™ 32-bit MCU, 1x C28x + 1x CLA, 150-MHz, 1.1-MB flash, 5x ADCs, CLB, AES and NNPU

☐ Flash Usage (Bytes): 3367

☐ Inference Time (us): 1311

图 4-9. 模型选择选项卡

- 包含的模型都是通用时间序列模型。例如，**1k\_t** 是用于较简单分类任务的最小模型。**13k\_t** 是用于较复杂任务的最大模型。
- 闪存和推理时间估算值显示在模型选择选项的下方。这些可用于确定适合您的应用的模型和器件。
- 使用顶部的链接导航至培训页面，然后选择您的预处理选项。

#### 4.2.1 预处理选项

- 预处理通用时间序列数据通常使神经网络能够更准确地对信号进行分类。此过程称为特征提取。**FFT** 和其他操作的目标是隔离特定相关信号特有的功能。在此简单示例中，您可以通过下图看到锯齿波具有独特的 **STFT** 光谱图与正弦波的 **STFT**。较复杂的信号、非周期性信号（如真空和电弧故障）具有独特的时变频谱图。把 **FFT** 数据帧连接在一起，使神经网络可以更轻松地识别信号的独特时变频率特征。

tek0019CH1.csv

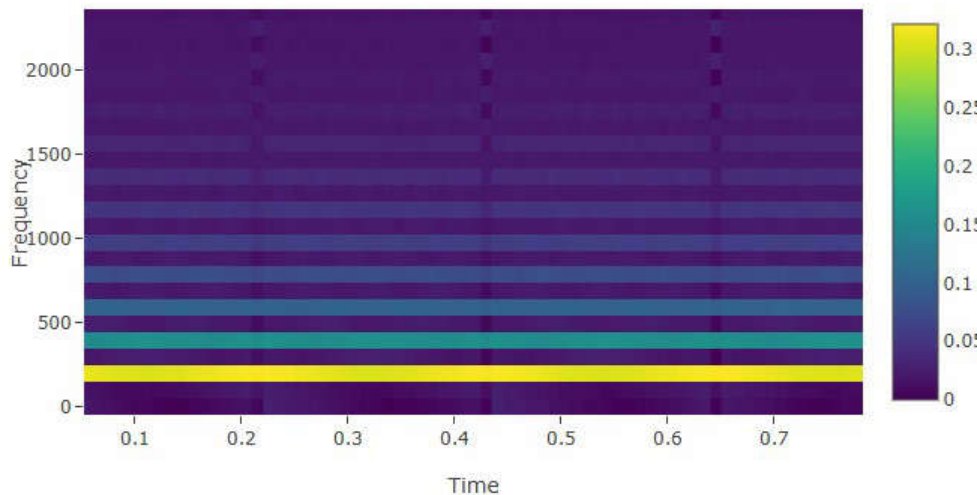


图 4-10. 锯齿波 STFT

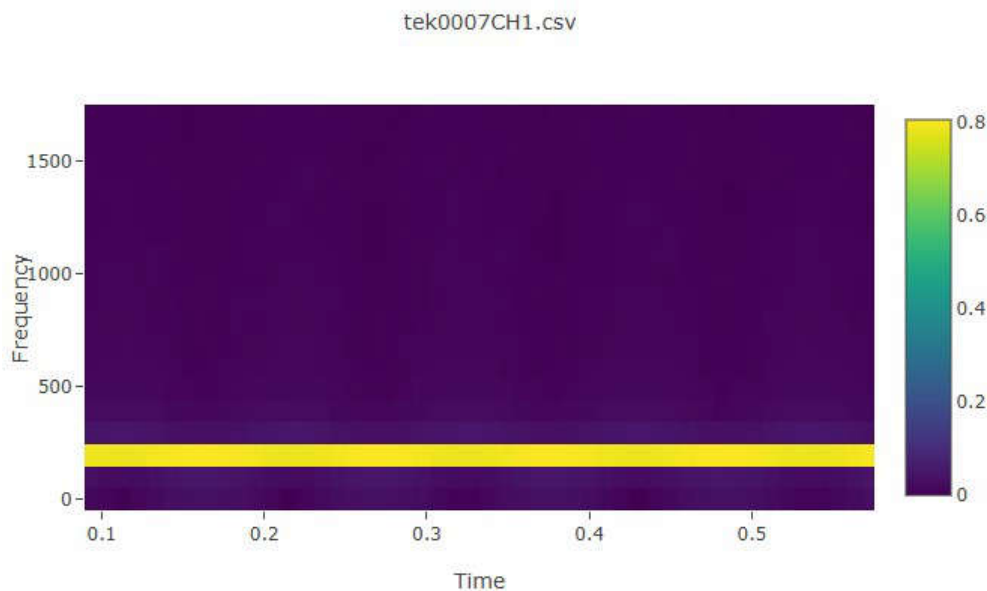


图 4-11. 正弦波 STFT

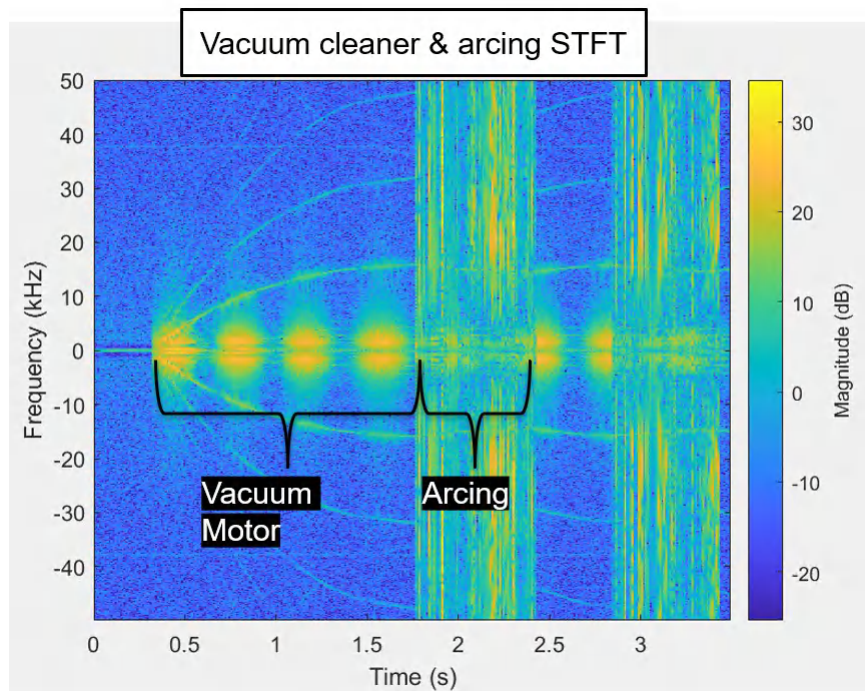


图 4-12. 真空清洁器和电弧 STFT

2. 在"Train"选项卡中, 在训练前配置预处理参数。有九种预配置和一个自定义选项。选择预设后, 所有参数字段都会更新。用户可以进一步调整这些参数以提高性能。提供了如下下拉选项:
  - a. 预处理预设: 从多种预配置中选择。
  - b. 变换: 这是应用于原始时间序列数据的变换。
    - 快速傅里叶变换: (FFT) 用于提取频率信息。支持的 FFT 大小均为 2。输出大小等于 1/2 帧大小。如果此选项被选中, 则要连接的帧必须为 1。
    - FFT 区间: ( 获取 FFT 输出并将其合并到与每帧特征大小参数相等的多个区间中 )
    - RAW ( 原始时间序列数据 )
  - c. 帧大小: ( 输入样本的数量 )
  - d. 每帧特征大小: ( 每个数据帧的区间数量, 区间越多, 精度越高, 但代价是模型更大 )

- e. 要连接的帧：连接缓冲器中过去输入帧的区间。这使得模型能够检测整个频谱范围内的时变变化。帧越多，为模型提供的上下文就越多，但代价是模型更大。
  - f. 通道数：传感器通道数量
3. 选择所需的选项后，点击 **Train**。所选模型会处理训练和验证数据。结果会在训练完成后显示。
  4. 训练结果会在模型优化完成后显示。



图 4-13. 训练结果

5. 还会使用测试数据集生成混淆矩阵，用于识别神经网络可能会混淆哪些类。在这个简单的示例中，正确识别了 100% 的数据文件。

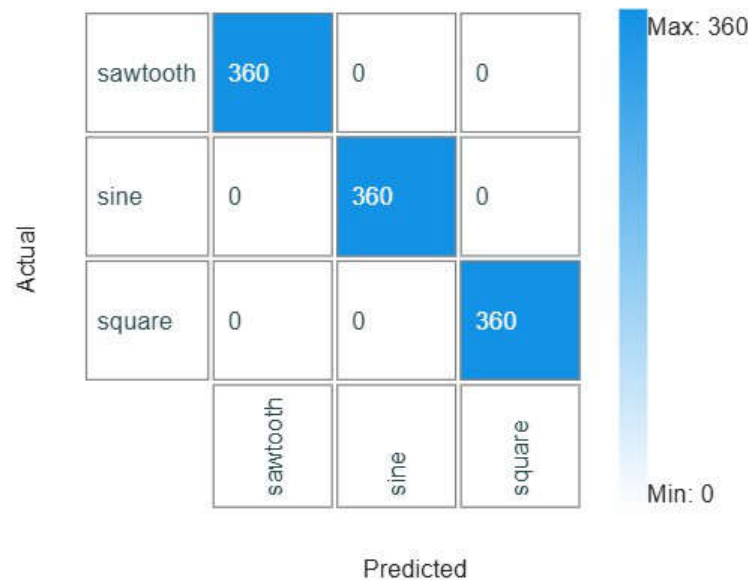


图 4-14. 混淆矩阵

6. TI 使用量化感知训练，这种训练首先对模型进行全精度训练，然后量化模型参数并重新训练模型。这种方法可保持高精度并显著减小模型大小。

## 4.3 部署到 TI 硬件

### 4.3.1 TVM 编译器

该工具在软件后端使用，来根据您选择的处理器生成优化的可执行代码。如果使用带有 TI 神经处理单元 (NPU) 的器件，生成的函数调用将自动利用与主 MCU 内核并行的加速器。可以选择编译参数下的"forced soft NPU preset"来禁用此选项。有关编译器和"自带模型"功能的更多信息，请参见 [https://software-dl.ti.com/mctools/nnc/mcu/users\\_guide/](https://software-dl.ti.com/mctools/nnc/mcu/users_guide/)。在"Compile"选项卡上，验证是否正确选择了活动模型和器件，然后按下"Start Compiling"。可以使用"export compiled model"按钮来导出编译后的模型。

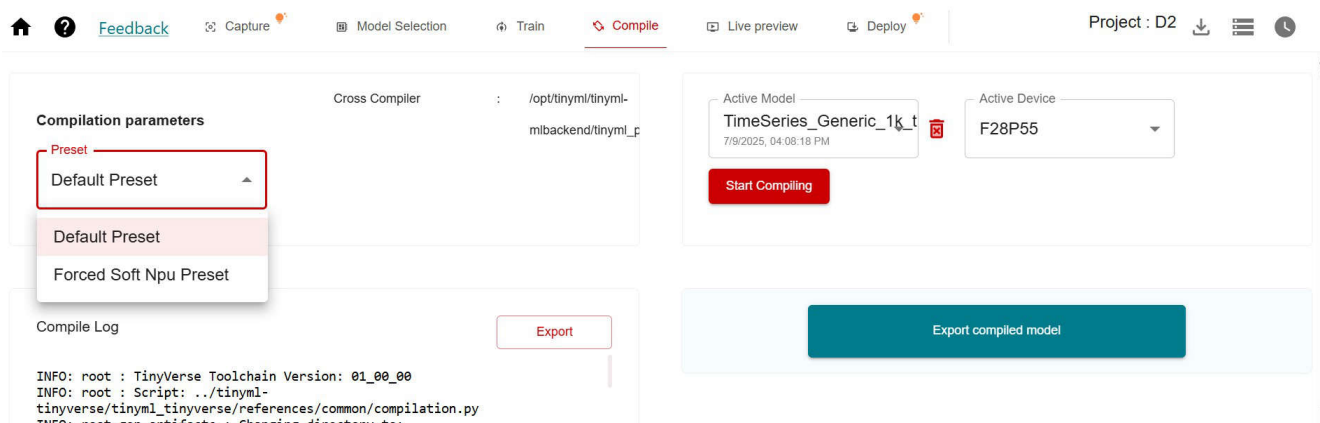


图 4-15. "Compile"选项卡

### 4.3.2 模型执行

- “Deploy”选项卡提供了以下选项：导出已编译模型以部署到目标器件，或者导出经过训练的模型以供其他工程工具进行进一步分析

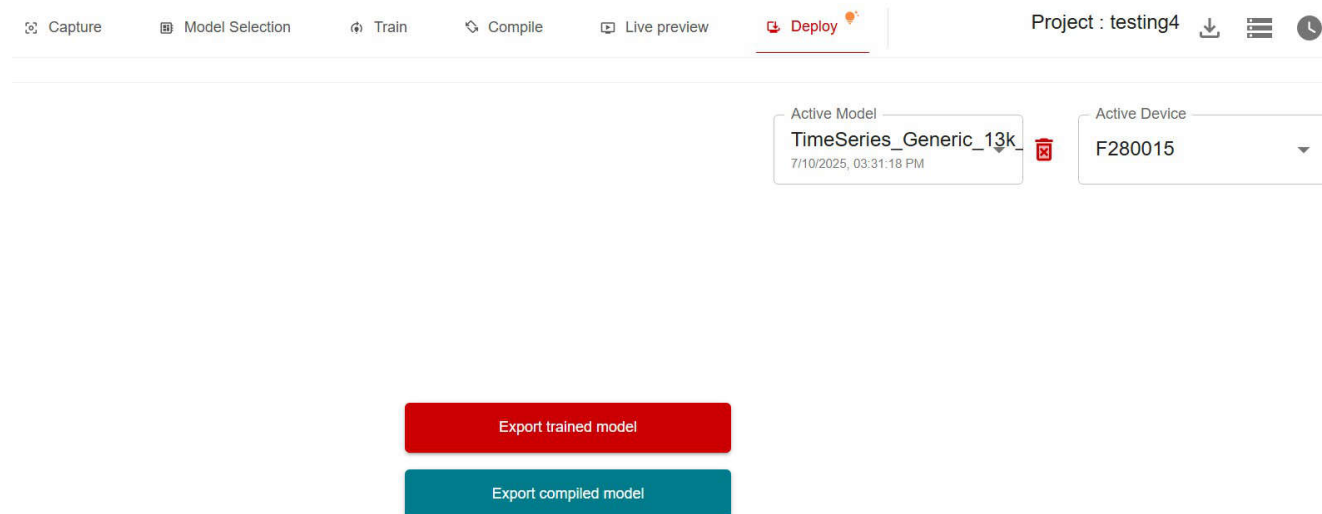


图 4-16. “Deploy”选项卡

- 已编译模型的文件夹包含使用 C2000 5.04 或更高版本的 SDK 运行模型所需的所有配置和代码

|                                                                                                          |                      |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
|  artifacts              | File folder          |
|  golden_vectors         | File folder          |
|  post_training_analysis | File folder          |
|  LICENSE                | Text Document        |
|  model_aux              | C Header Source File |

图 4-17. 已编译模型的文件夹

将经过训练的模型导入 CCS 项目的步骤：

- 打开 Code Composer Studio 并导航至 **File->Import project->**。
  - 选择此文件夹  
`\\ti\\c2000\\C2000Ware_5_05_00_00\\libraries\\ai\\feature_extract\\c28\\examples\\ex_motor_fault_dataset_validation_f28p55x`
- 从已编译模型下载中导入必要的文件
  - 解压缩已编译模型
  - 将 **artifacts** 文件夹复制到导入的项目中并覆盖原始文件。
  - 将 **test\_vector.c** 和 **user\_input config.h** 从已编译模型目录内的 **golden\_vector** 目录复制到项目中。它们会覆盖原始的 **test\_vector** 和 **user\_input\_config.h** 文件。
- 接下来，重新构建项目。
- 连接 F28P55 LaunchPad 或控制卡。连接器件调试器后，按“Debug”以验证模型特征提取和神经网络

## 5 总结

此演示的目的是指导客户了解德州仪器 (TI) 的 Edge AI 软件和硬件功能。它设计为实践探索工具，用于演示关键功能和开发流程。本演示并非用作实际工业生产用例，而是展示开发人员可为其应用构建的基本要素。

## 重要通知和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、某特定用途方面的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他功能安全、信息安全、监管或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的相关应用。严禁以其他方式对这些资源进行复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 的销售条款](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款/TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

邮寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265  
版权所有 © 2025，德州仪器 (TI) 公司