

AN13091

电动车辆牵引电机功率逆变器控制参考平台

第 1 版——2021 年 3 月 19 日

应用笔记

1 首字母缩略语

表 1.首字母缩略语

| 首字母缩略词 | 定义 |
|--------|------------|
| PIM | 功率逆变器模块 |
| VCU | 整车控制单元 |
| ECU | 电子控制单元 |
| TC | 牵引力控制 |
| SDK | 软件开发套件 |
| SBC | 系统基础芯片 |
| SPI | 串行外设接口 |
| MCU | 微控制器单元 |
| IGBT | 绝缘栅极双极性晶体管 |
| GD | 门极驱动器 |
| ASIL | 汽车安全完整性等级 |
| RDC | 旋变数字转换器 |
| SiC | 碳化硅 |
| CMF | 共模故障 |



2 概述

恩智浦电动车辆功率逆变器控制参考平台提供硬件参考设计、系统基本软件和完整的系统功能安全支持，以此为基础可开发用于电动车辆的符合 ASIL-D 标准的完整、高压、大功率牵引电机逆变器。

该参考平台已被设计成一个评估原型，在 320 V 电源电压下运行时，它能提供 150 kW 峰值输出功率和 96% 以上的电气效率。

该硬件参考平台由 4 个板组成：

- 系统控制板
 - 从 IGBT 过渡到 SiC 时，可使用同样的设计和元器件
- 功率级驱动板
 - GD3100 可以用于驱动 IGBT 和 SiC
- 电流传感器板
- 车辆接口板

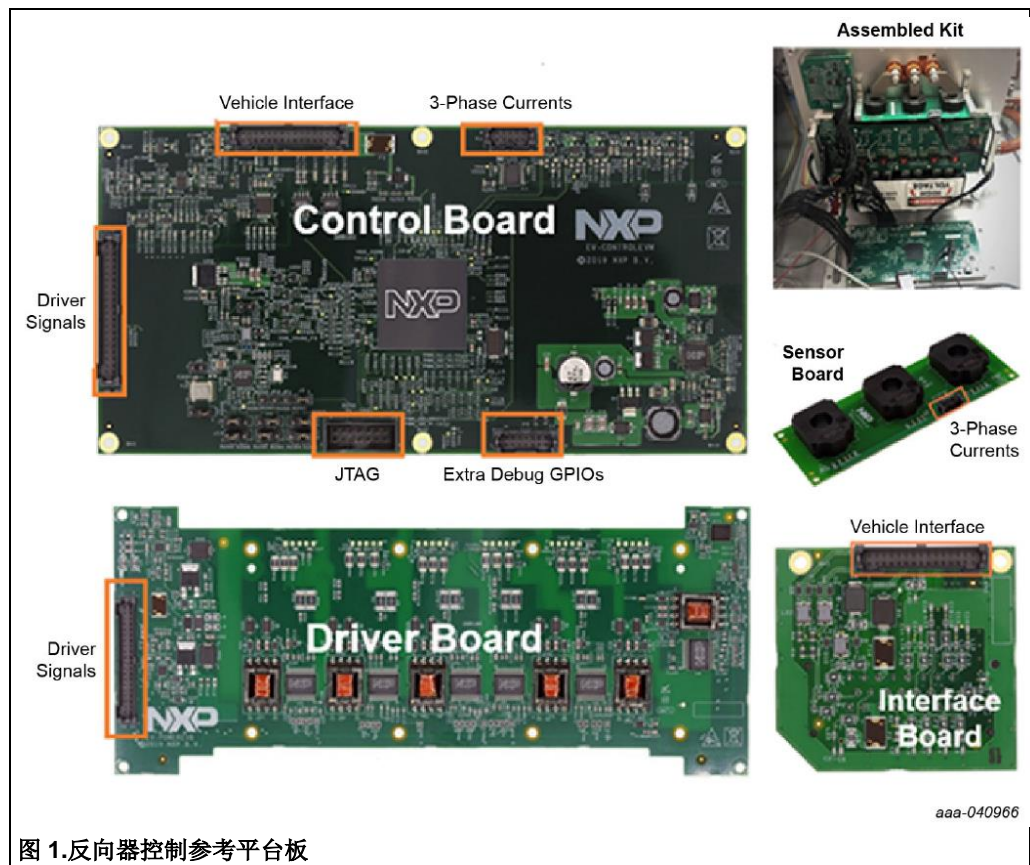


图 1.反向器控制参考平台板

系统控制板：

- 该板包含 3 个关键的恩智浦集成电路。
 - MPC5775E 是一款 32 位 Power Architecture®双核 ASIL-D MCU，面向电机控制，提供高达 264 MHz/内核的性能、CSE 安全性、eTPU 定时器、软件旋变器和高度可扩展的解决方案。
 - FS6500 系统基础芯片(SBC)为 MCU 供电，优化能耗并提供低压侧监测和保护。
 - TJA1051 收发器适用于汽车行业的高速 CAN 应用，为 MPC5775E 和 CAN 协议控制器提供差分发送和接收功能。

功率级驱动板：

- 此板专为 [Fuji M653 IGBT](#) 模块而设计。它具有用于 IGBT 和 SiC MOSFET 的高级单通道栅极驱动器 GD3100。集成电流隔离和低导通电阻驱动晶体管提供高充电和放电电流、低动态饱和电压及轨到轨栅极电压控制。该设备自主管理严重故障，并通过 INTB 引脚和 SPI 接口报告故障和状态。栅极电压通过隔离变压器和反激控制器提供。

此套件设计为与额定 800 A/750 V 的 Fuji M653 IGBT 模块（从 Fuji Electronics 单独购买）的接口。

系统基本软件包括：

- 底层 SDK 设备驱动程序
- 软件开发抽象层
- 系统功能服务层，用于简化参考控制硬件上的定制电机控制应用软件开发

可选：

- AMMCLIB（高级电机控制函数库）
- 平台功能安全管理库（2021 年第三季度上线）

恩智浦特色器件

- **GD3100** 隔离式高压 IGBT/SiC 栅极驱动器，<2 μs 短路保护
- **MPC5775E** 高级电机控制 ASIL-D MCU
- **FS65** 稳健的 ASIL-D 安全 PMIC，具有故障静默和 0 等级能力
- **TJA1051T/3** 冗余高速 CAN 总线接口

特性和功能安全优势

- 用于 100 kW 级功率逆变器的系统控制三相设计套件
- 为 ASIL-D 安全要求设计的高效系统 BOM
- 高度优化的基础软件支持，提供逆变器服务层、驱动程序和 SDK
- ±0.1° 高精度软件旋变数字转换器(RDC)，利用先进的电机控制软件消除用于角度和速度计算的外部硬件接口。也可用于冗余目的
- 以高达 ±15 A 的电流驱动各种 IGBT 和 SiC 功率器件
- <2 μs iSense 兼容两级 IGBT 过流保护和软关断
- 5 kV 电流信号隔离，与高达 1700 V 的 IGBT 兼容
- 用于电机旋变器和输出电流传感器的标准信号接口
- 用于栅极驱动器的冗余低边和高边供电，以实现高水平的功能安全

- 多个冗余电路对栅极驱动器故障进行监测，以确保安全状态
- 确保安全状态可用性的关键安全路径
- 支持 VCU 和一般用途的冗余 CAN 总线接口
- 采用 9 V 至 16 V 单电源供电（可定制高达 36 V）
- 可选 LDO（独立于 FS65 SBC）为低压域中的低边栅极驱动器供电，以实现功能安全

应用

- 电动车辆电机功率逆变器
- 高压 UPS 电源逆变器
- 替代能源功率逆变器

其他文档

- 支持套件用户手册(UM11298)
- 基本软件用户手册（UM11317 - [此处](#)提供，购买套件附送）
- 安全应用包（2021 年第三季度提供）
- 硬件设计包（原理图和布局）（[此处](#)提供，购买套件附送）
- 系统概念验证原型测试结果（[此处](#)提供，购买套件附送）

参考平台概念图

参考平台由三个基本要素构成：

- **安全**
 - 从单个元件到系统级，大幅减少 ASIL-D 系统开发的工作量。
- **硬件**
 - 为 ASIL-D 安全要求设计的高效系统 BOM
- **软件**
 - 高度优化和生产就绪的驱动程序，可用作构建块来实现任何客户特定的电机控制策略。

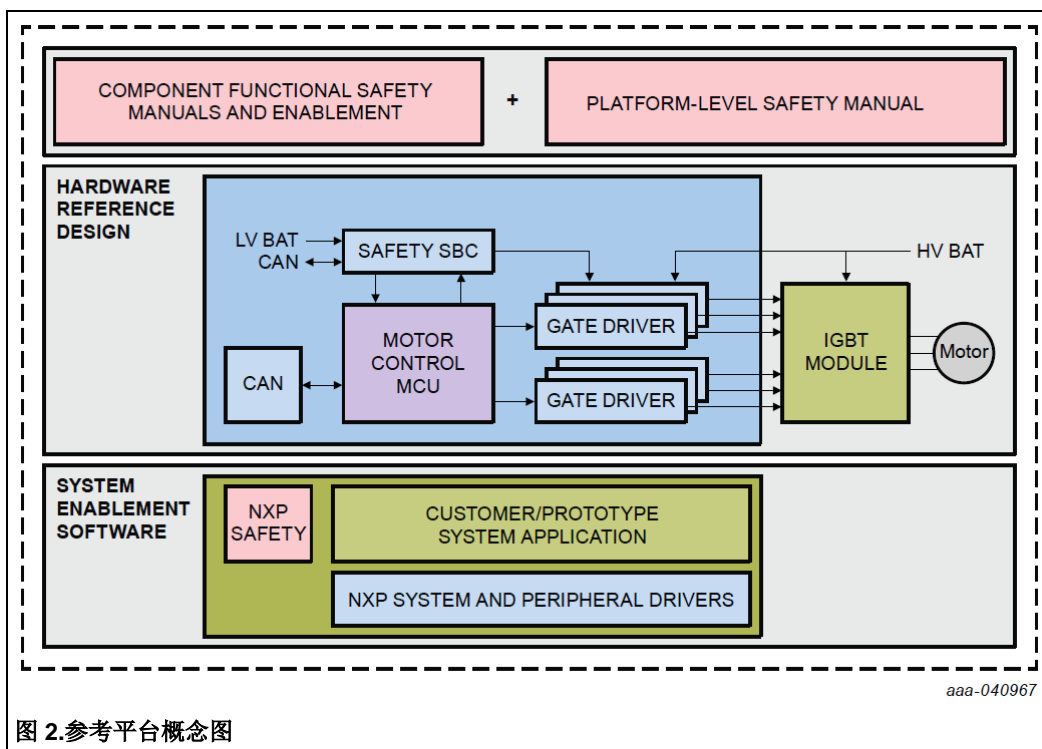


图 2.参考平台概念图

3 硬件和软件功能框图

3.1 参考平台系统概述

该参考设计是为混合动力电动汽车和电动汽车牵引控制系统实现的高压逆变器解决方案。它包括高效系统集成、保护、冗余性、增强安全性和电源灵活性，可安全高效地驱动 IGBT 或 SiC 功率模块。

图 3 展示了平台架构并突出显示了硬件元件。隔离式栅极驱动器将高压电源与低压控制信号在电流上隔离。

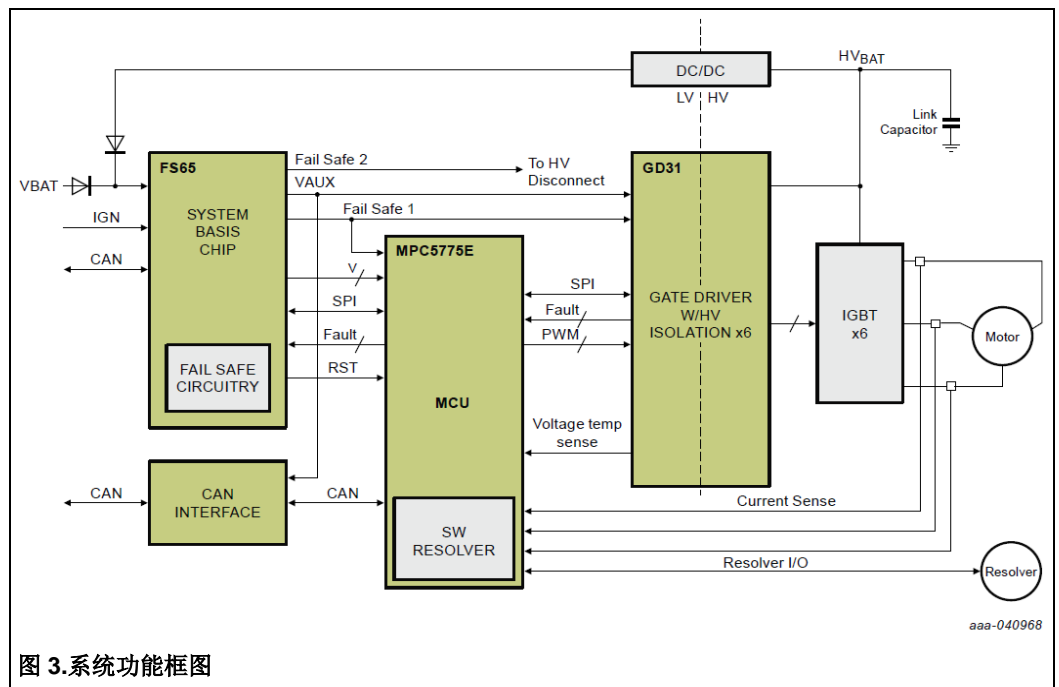


图 3. 系统功能框图

3.2 逆变器系统基本软件

电源逆变器模块(PIM)支持软件套件在 MPC5775E¹ MCU 上执行，使得用户提供的电机控制应用软件可以通过一组 API 函数例程和嵌入式基本电机控制服务来控制系统配置和操作。

软件开发套件(SDK)为配置 MCU 抽象层和开发电机控制应用软件提供了一个易于使用的环境。

3.3 具有可选功能安全支持的软件功能框图

图 4 显示了多核 MCU 上运行的系统安全软件的高层概览。安全关键软件在锁步 CPU 上执行。定期检查所有硬件安全措施有无潜在故障。

¹ 软件 100%兼容 MPC5777C

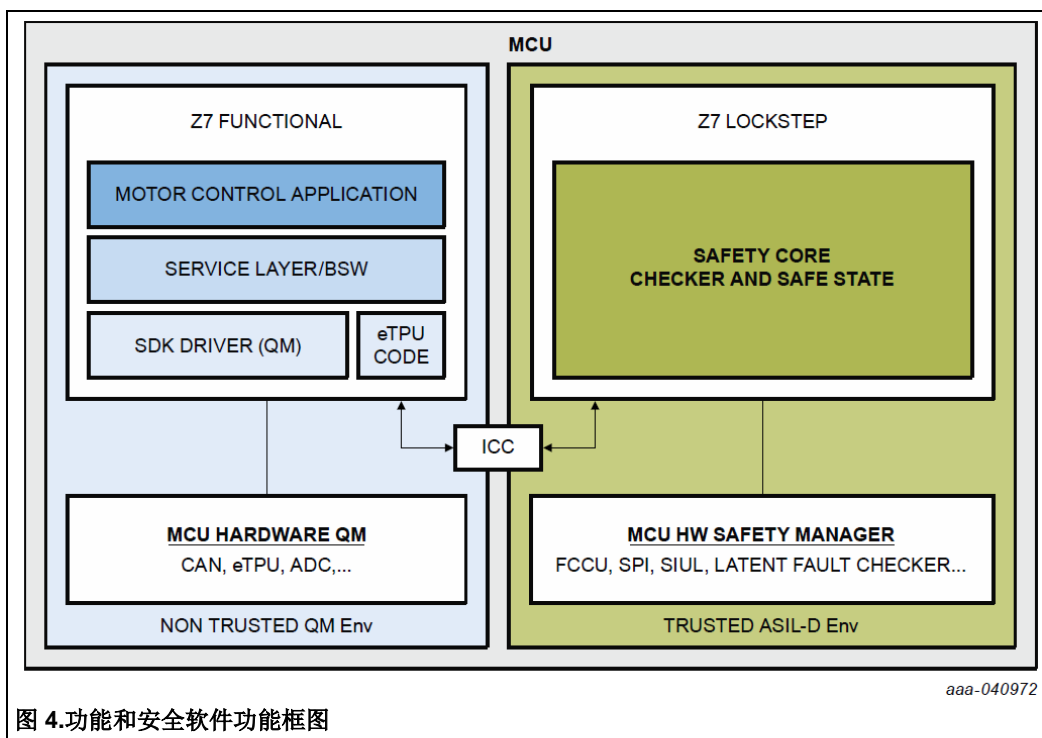
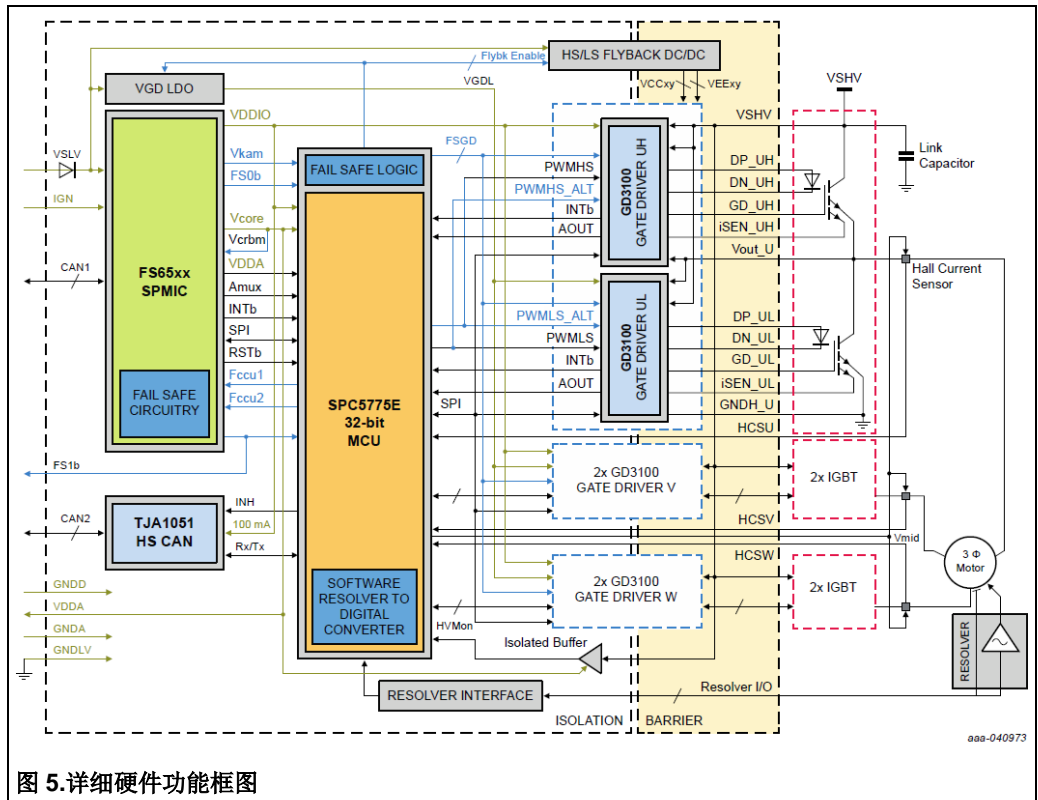


图 4.功能和安全软件功能框图

4 平台系统架构和设计

4.1 参考平台硬件描述

逆变器系统平台架构包括一个 MPC5775E 高级电机控制 32 位锁步 MCU，该 MCU 连接到 6 个 GD3100 隔离式 IGBT 栅极驱动 IC，并由 FS65 安全和电源管理 IC (SBC) 提供支持。图 5 所示系统功能框图展示了系统中硬件元件的架构。



MPC5775E 是一款符合 ASIL-D 标准的高性能 32 位 Power Architecture 微控制器(MCU)。共有三个 e200z7 主机处理器内核，其中两个以锁步运行。

系统基础芯片 FS65 (SBC) 为 MPC5775E 提供电源管理、看门狗功能、故障安全功能和受保护的输出。SBC 通过 SPI 与 MCU 通信。FS65 芯片符合 ASIL D 功能安全要求(ISO 262622)。

系统通信通过双 CAN 总线接口实现：一个与 FS65 集成并连接到车辆控制单元(VCU) (车辆 CAN)，另一个是独立的 TJA1051T/3 CAN 收发器 (私有 CAN)²。

系统平台由 FS65 IC 检测到的 5 V 输入信号激活，随后平台中的其他 IC 上电，系统开始初始化。

² 私有 CAN 可用于一般用途

为实现最高级别的功能安全，独立于 FS65 SBC 的可选 LDO 为低压域的低边栅极驱动器供电。在高压域，栅极驱动器电源电压由 DC-DC 反激式电压转换器产生，该转换器可将主电源线电压提升至 15 V-18 V（相对于 IGBT 发射极电压）。

三对高边和低边 IGBT 栅极驱动器(GD3100)输出信号组（U、V、W）与外部 IGBT 功率器件接口，进而驱动交流电机的三相输入。每个 GD3100 栅极驱动器都包括用于监测 IGBT 温度、高压电源电平、IGBT 去饱和及 IGBT 集成电流感测单元（如有）的输入。隔离缓冲器为 MCU 提供高压电源电平的快速反馈。GD3100 自主管理严重故障，并通过 INTB 引脚和 SPI 接口向 MCU 报告故障和状态。GD3100 能够直接驱动大多数 IGBT 或 SiC MOSFET 的栅极。它包含自测、控制和保护功能，支持设计高可靠性系统 (ASIL/SIL)。

三个传感器输入信号将霍尔电流传感器输出直接连接到 MCU，以监测电机控制所需的电机相电流。来自 MCU 的输出电压参考提供一个中间电平电压信号，供霍尔电流传感器使用。该平台还包括用于将电机的旋变器信号连接到 MCU 中的软件旋变数字转换器的电路，用以检测电机控制所需的电机位置。

利用 MCU 上运行的逆变器系统支持软件，用户提供的电机控制应用软件可以通过一组 API 函数调用和嵌入式基本电机控制服务来控制系统配置和操作。软件开发套件为开发电机控制应用软件提供了一个易于使用的环境。

4.2 平台 I/O

[表 2](#) 列出了平台 I/O。更详细信息可以在平台硬件设计包中找到。

表 2.平台 I/O

| 名称 | 类型 | 说明 |
|--------|---------|---|
| VSLV | 模拟输入 | 初级低压电源（典型值 12 V） |
| GND_LV | 接地 | 低压接地（12 V 电源返回） |
| GNDD | 接地 | 数字接地 |
| CAN1H | 模拟输入/输出 | CAN1 输出高电平 |
| CAN1L | 模拟输入/输出 | CAN1 输出低电平 |
| CAN2H | 模拟输入/输出 | CAN2 输出高电平 |
| CAN2L | 模拟输入/输出 | CAN2 输出低电平 |
| IGN | 模拟输入 | 逆变器系统激活输入(K15) |
| FS1b | 模拟输出 | 故障安全输出（低电平有效，开漏结构）在启动时和检测到故障条件时置为低电平，与内部 FS0B 故障安全控制信号相比，前者具有可配置的延迟或持续时间。 |
| VSHV | 模拟输入 | 高压电源 |
| GNDH_x | 接地 | 用于栅极驱动器对的 3x 高压接地信号，“x” = U、V、W |

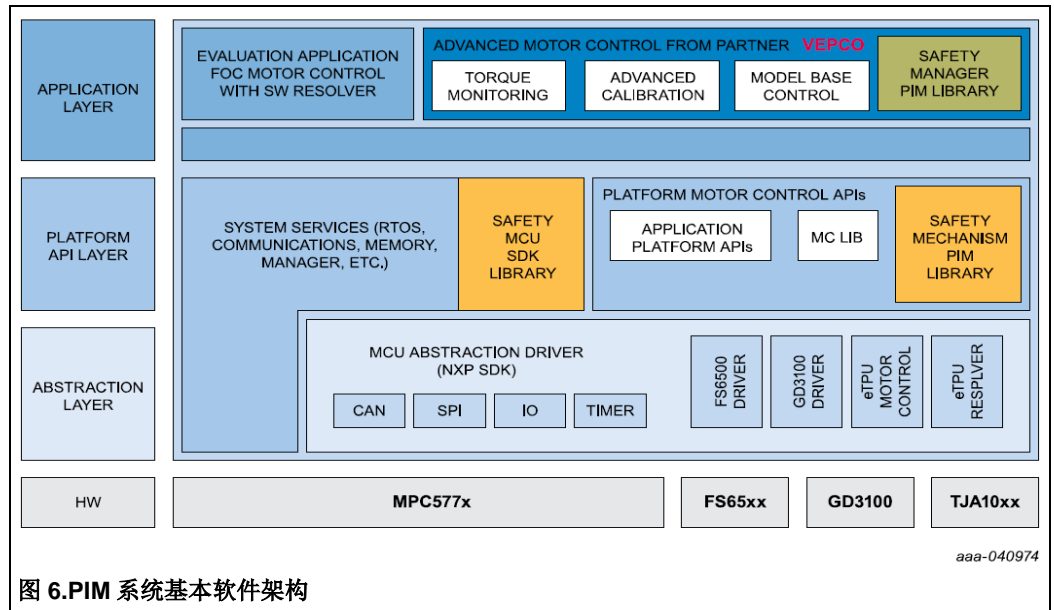
表 2.平台 I/O (续)

| 名称 | 类型 | 说明 |
|-------------|---------|---|
| Vout_x | 模拟输入 | 用于栅极驱动器对的 3x 输出信号, “x” = U、V、W |
| GD_xH | 模拟输出 | 用于栅极驱动器对的 3x 高边 IGBT 栅极驱动输出, “x” = U、V、W |
| GD_xL | 模拟输出 | 用于栅极驱动器对的 3x 低边 IGBT 栅极驱动输出, “x” = U、V、W |
| DP_xH | 模拟输入/输出 | 用于栅极驱动器对的 3x 高边 IGBT 二极管 P 侧连接, “x” = U、V、W |
| DN_xH | 模拟输入/输出 | 用于栅极驱动器对的 3x 高边 IGBT 二极管 N 侧连接, “x” = U、V、W |
| DP_xL | 模拟输入/输出 | 用于栅极驱动器对的 3x 低边 IGBT 二极管 P 侧连接, “x” = U、V、W |
| DN_xL | 模拟输入/输出 | 用于栅极驱动器对的 3x 低边 IGBT 二极管 N 侧连接, “x” = U、V、W |
| iSEN_xH | 模拟输入 | 用于栅极驱动器对的 3x 高边 IGBT iSense 输入, “x” = U、V、W |
| iSEN_xL | 模拟输入 | 用于栅极驱动器对的 3x 低边 IGBT iSense 输入, “x” = U、V、W |
| HCSx | 模拟输入 | 用于栅极驱动器对的 3x 霍尔电流传感器输入, “x” = U、V、W |
| Vmid | 模拟 | 电源电压中点(0-5V) |
| VDDA | 电源 | 模拟电源(5 V) |
| AGND | 接地 | 模拟接地 |
| RSL_Sx | 模拟输入 | 4x 旋变器感测信号 Sx (0-12V), “x” = 1、2、3、4 |
| RSL_Rx | 模拟输出 | 旋变器驱动信号 Rx (0-12V), “x” = 1、2 |
| RSL_DRV_SHD | 接地 | 旋变器驱动信号屏蔽 |
| RSL_SNS_SHD | 接地 | 旋变器感测信号屏蔽 |
| RTDx_SIG | 模拟输出 | RTDx 旋变器信号(0-5V), “x” = 1、2 |
| RTDx_RTN | 接地 | RTDx 旋变器感测返回, “x” = 1、2 |

4.3 软件架构

逆变器软件架构(如图 6 所示)为实现更高级电机控制应用软件提供了基础,它主要由三层组成:

- 应用层
- 平台 API 层(中间件)
- 抽象层



4.3.1 应用层

应用层包括一组由电机控制应用软件³运行的函数调用，用于控制逆变器平台硬件的运行。软件开发人员可以使用这些 API 构建自己的电机控制应用软件。

关于向应用层提供的应用平台 API 服务详细列表，请参阅反向器控制参考平台套件附带的 *UM11317 - PIM 软件用户手册*（[此处](#)提供，购买套件时附送）。

4.3.2 平台 API 层

平台 API 层是基础软件(BSW)中间件层，由系统服务例程、应用平台 API 和电机控制库组成。

系统服务包括用于周期性任务操作的 OS 服务，为系统操作提供服务。系统服务还处理用于系统状态转换的系统操作管理器组件和用于故障管理的故障管理器组件。

应用平台 API 包括用于通用输入和输出功能的例程。通用输入输出功能包括所有感测功能 API，用以获取相电流、总线电压和电机温度的模拟感测结果。平台 API 层为应用层提供透明性以处理低级驱动程序。

电机控制库是为应用层提供的所有电机控制和数学函数的库集。

关于向平台 API 层提供的应用平台 API 服务详细列表，请参阅 *UM11317 - PIM 软件用户手册*（[此处](#)提供，购买套件时附送）。

³ FOC 和电机控制策略取决于客户/应用，对于此特定 PIM，它由 Vepco 提供。

4.3.3 抽象层

抽象层是对 MCU 内部外设的逆变器平台硬件级控制、电机控制和旋变器功能的 MCU eTPU⁴ 时序模块、FS65 系统基础芯片及 GD3100 IGBT 栅极驱动器的抽象。

抽象层由恩智浦软件开发套件(SDK)提供的 MCU 底层软件驱动程序、FS6500 软件驱动程序、GD3100 软件驱动程序和 eTPU 电机控制函数集 ([此处](#)) 组成。

逆变器套件随附的软件包与 MPC5775E 的 RTM 3.0.0 SDK 更新以及 FS6500 和 GD3100 的独立驱动程序一起运行。eTPU 控制集与软件包一起打包，也可以通过 eTPU 函数集链接 ([此处](#)) 下载。

MCU_IO 软件组件提供时钟初始化、外设初始化和应用启动的所有设置。

eTPU 软件库是针对 MPC577x MCU 进行了高度优化的低级驱动程序。它们应该被视为黑盒元素。

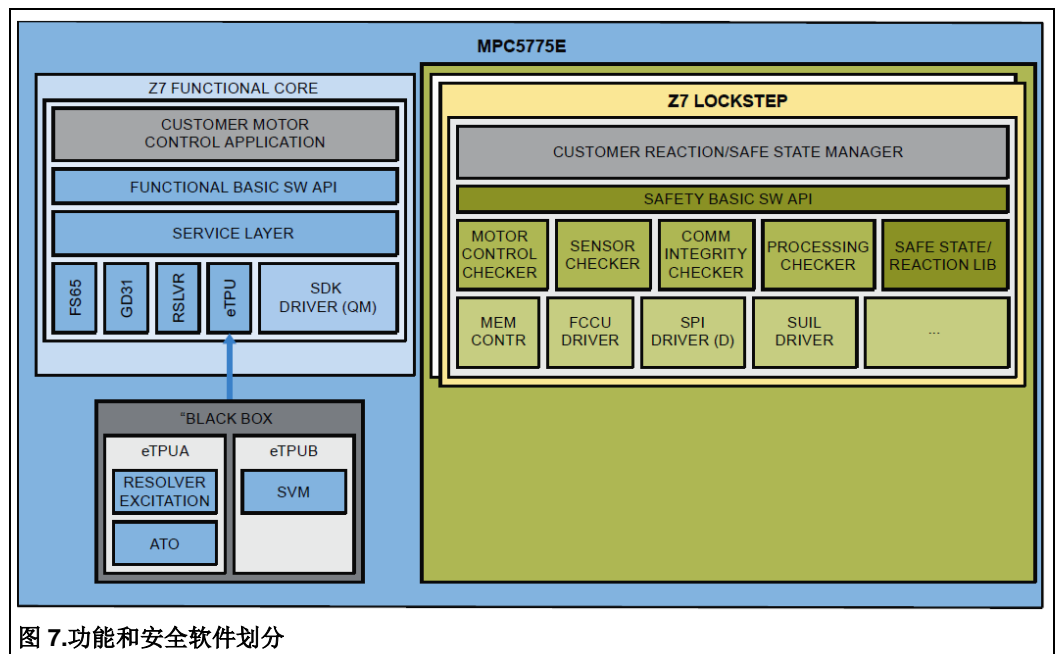


图 7. 功能和软件划分

有关电机控制服务功能的详细说明，请参阅 *UM11317 - PIM 软件用户手册* ([此处](#) 提供，购买套件时附送)。

4.4 MPC5775E MCU

主要功能

MPC5775E 提供的片上模块包括以下功能：

- 4 增强型定时器处理单元(eTPU)，一种可编程内核，用于将低级重复性任务从 CPU 转移出来

- 三个双发 32 位 CPU 内核复合体(e200z7)，其中两个以锁步运行
 - 符合 Power Architecture 嵌入式规范
 - 指令集增强允许变长编码(VLE)，可选的 16 位和 32 位指令混合编码，减少代码大小
 - 在两个计算内核上：信号处理扩展(SPE1.1)指令支持数字信号处理(DSP)
 - 单精度浮点运算
 - 在两个计算内核上：16 KB I-Cache 和 16 KB D-Cache
 - 内核之间的硬件缓存一致性
- 4 MB 片上 Flash 存储器
- 支持在编程和擦除操作期间读取，以及多个块和 EEPROM 仿真
- 512 KB 片上通用 SRAM，包括 64 KB 备用 RAM
- 两个 64 通道多通道直接存储器访问控制器(eDMA)
- 双核中断控制器(INTC)
- 交叉开关架构，支持从具有端到端 ECC 的多个总线主控器同时访问外设、Flash 存储器或 RAM
- 错误注入模块(EIM)和错误报告模块(ERM)
- 四个受保护端口输出(PPO)引脚
- 具有可编程内核的高级定时器（最多三个增强型时间处理器单元(eTPU)）
- 增强型模块化输入/输出系统(eMIOS)支持 32 个统一通道，每个通道能够执行单操作、双操作、脉宽调制(PWM)和模数计数器操作
- 多达两个增强型队列模数转换器(eQADC)模块：
 - 每个 eQADC 模块有两个独立的模拟转换器
 - 支持总共 70 个模拟输入引脚，可通过片外多路复用器扩展至 182 个输入
- 多达四个独立的 16 位 Sigma-Delta ADC (SDADC)以太网(FEC)
- 两个支持 12 通道的 SENT 接收器(SRX)模块
- 五个解串串行外设接口(DSPI)模块
- 五个增强型串行通信接口(eSCI)模块
- 四个控制器局域网(FlexCAN)模块
- 两个支持 FD 的 M_CAN 模块
- 故障收集和控制单元(FCCU)
- 时钟监控单元(CMU)
- 篡改检测模块(TDM)
- 加密服务引擎(CSE)
 - 符合安全硬件扩展(SHE)功能规范 1.1 版安全功能
 - 包括对用于 MAC 验证的密钥使用标志的软件可选增强，并增加了用于安全密钥的内存插槽数量
- 符合 IEEE-ISTO 5001-2003 标准的 Nexus 开发界面(NDI)，部分支持 2010 标准
- 片上稳压器控制器(VRC)，从高压电源产生核心逻辑电源电压
- 用于 Flash 存储器的片上稳压器
- 自检能力

安全功能

- IP 的复制：双核架构减少了系统级别组件复制的需求，并降低了整体系统复杂性。
- 处理元件的复制：对于双锁步 z7 内核（内核 1 和检查器）及高速缓存控制器，通过锁步方法确保功能安全性。硬件会检测两个锁步 z7 内核的输出的任何偏差，并发出可能故障的信号。
- 通过纠错或检测降低以下集成易失性和非易失性存储器的故障影响：
 - Flash 存储器
 - SRAM
 - FlexCAN
 - MCAN
 - ENET
 - 缓存和缓存标记
 - eDMA 传输控制描述符(TCD) RAM
 - eTPU
- 存储器保护单元(MPU)，用于设备生成的所有存储器引用的硬件访问控制。
- 时钟和电源的生成与分配由专用监视器进行监督。
- 内置自测功能（例如 MBIST 和 LBIST）是以硬件实现，可检测一般潜在故障，从而降低重合故障（多点故障）的风险。
- 故障收集和控制单元(FCCU)负责收集故障通知并作出反应。
- CMF 通过一套控制和缩减措施来处理，涉及系统级方法（如温度和非功能信号监测）、物理分离和多样性。
- 外设的功能安全性通过应用级（系统级）措施（例如将一个传感器连接到不同 I/O 模块、通过传感器融合进行传感器验证等）来确保。为此，芯片会确保外设的冗余使用受到保护，不受 CMF 影响。
- 内部（和外部）看门狗或超时措施的使用。
- 建议使用专用机制来检查错误反应路径的功能（例如通过应用控制的故障注入）。

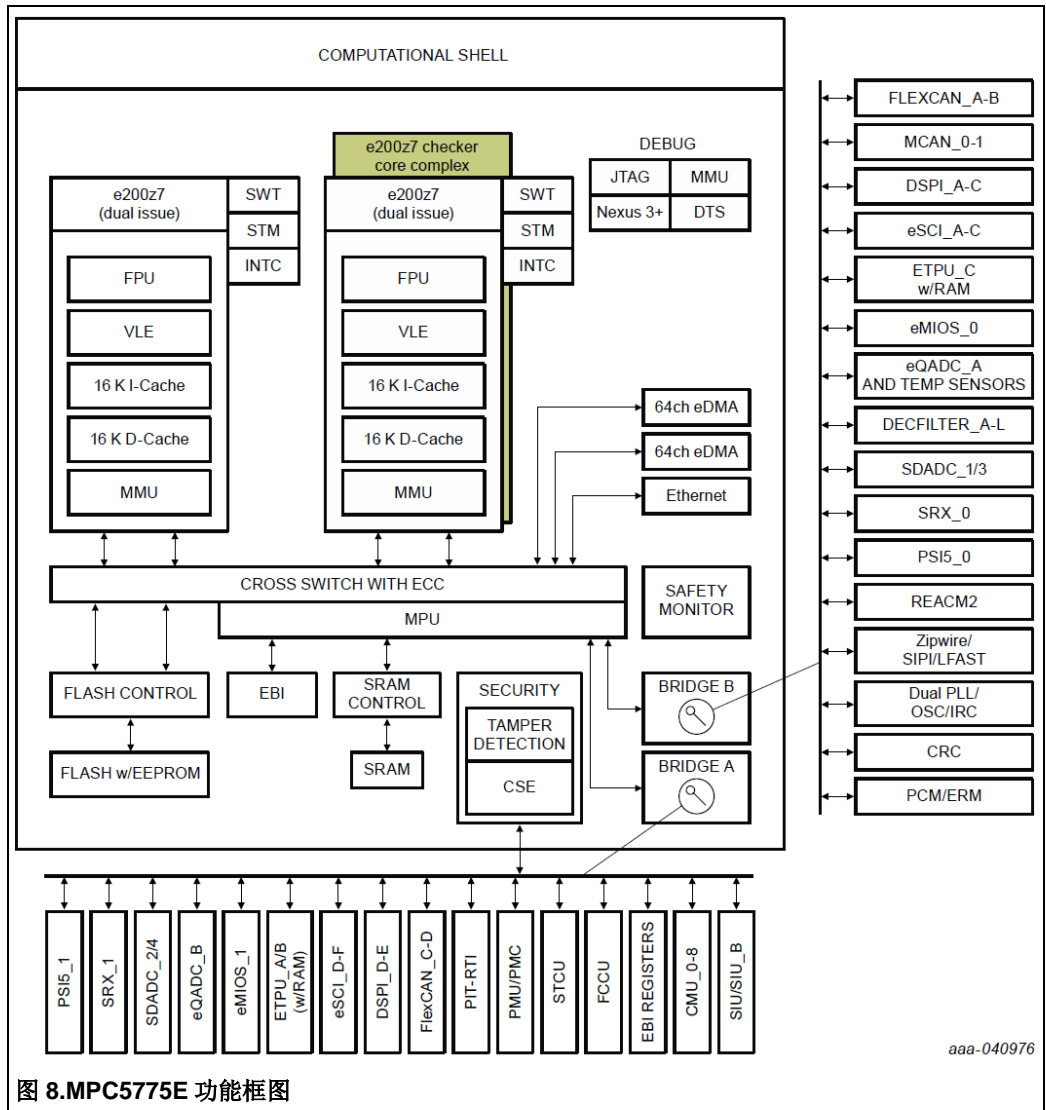
MPC5775E 安全内核以延迟锁步模式(LSM)运行，支持达到最高安全水平。检查器内核接收延迟两个时钟周期的所有输入。检查器内核的输出与主内核的输出进行比较。

任何差异都被标记为错误并由 FCCU 处理。

FCCU 提供硬件通道以收集错误，并在 MPC5775E 发生故障时将设备带入安全状态。FCCU 提供两个错误输出信号（ERROR0 和 ERROR1）用于指示外部故障（即送至 SBC⁵）。

图 8 显示了 MPC5775E 的顶层功能框图。功能框图的目的是展示功能模块通过交叉开关的一般互连。

5 系统基础芯片：电源、通信收发器和诊断功能的组合



欲了解更多信息，请参阅恩智浦提供的 MPC5775E 数据手册和安全手册 [\(此处\)](#)。

4.5 FS6523 安全 PMIC

FS6523 SMARTMOS 设备是多路输出电源集成电路，包括 CAN 灵活数据(FD)和/或 LIN 收发器。该设备专门用于汽车市场。

它拥有多个开关和线性稳压器，包括低功耗模式(32 μA)，并提供多种唤醒功能。先进的电源管理方案可在很宽的输入电压范围（低至 2.7 V）和输出电流范围（高达 2.2 A）内保持高效率。

FS6523 SPMIC 包含可配置的故障安全/故障静默安全行为和功能，具有两个故障安全输出。FS6500/FS4500 SPMIC 可以作为面向安全系统分区的一个完整部分加以集成。这些设备达到了很高的完整性安全等级（最高达 ASIL D）。

内置 CAN FD 接口符合 ISO11898-2 和-5 标准。LIN 接口符合 LIN 协议规范 2.0、2.1、2.2 和 SAEJ2602-2。

主要功能

- 电池电压感测和 MUX 输出引脚
- 高度灵活的 SMPS 预调节器，支持两种拓扑：同相降压-升压拓扑和标准降压拓扑
- 利用 SMPS (0.8 A、1.5 A 或 2.2 A) 或 LDO (0.5 A) 为 1.0 V 至 5.0 V MCU 内核供电的系列器件
- 专用于辅助功能或为传感器供电 (VCCA 跟踪器或独立) 的线性稳压器，5.0 V 或 3.3 V
- 专用于 MCU 模数转换参考电压或 I/O 电源(VCCA)的线性稳压器，5.0 V 或 3.3 V
- 低功耗模式下可提供 3.3 V 保活内存电源
- 长持续时间定时器，1.0 秒分辨率，计时最长 6 个月
- 低功耗模式下提供多个唤醒源：CAN、LIN、IO、LDT
- 5 个可配置 I/O

[图 9](#) 所示为 FS6523 的功能框图

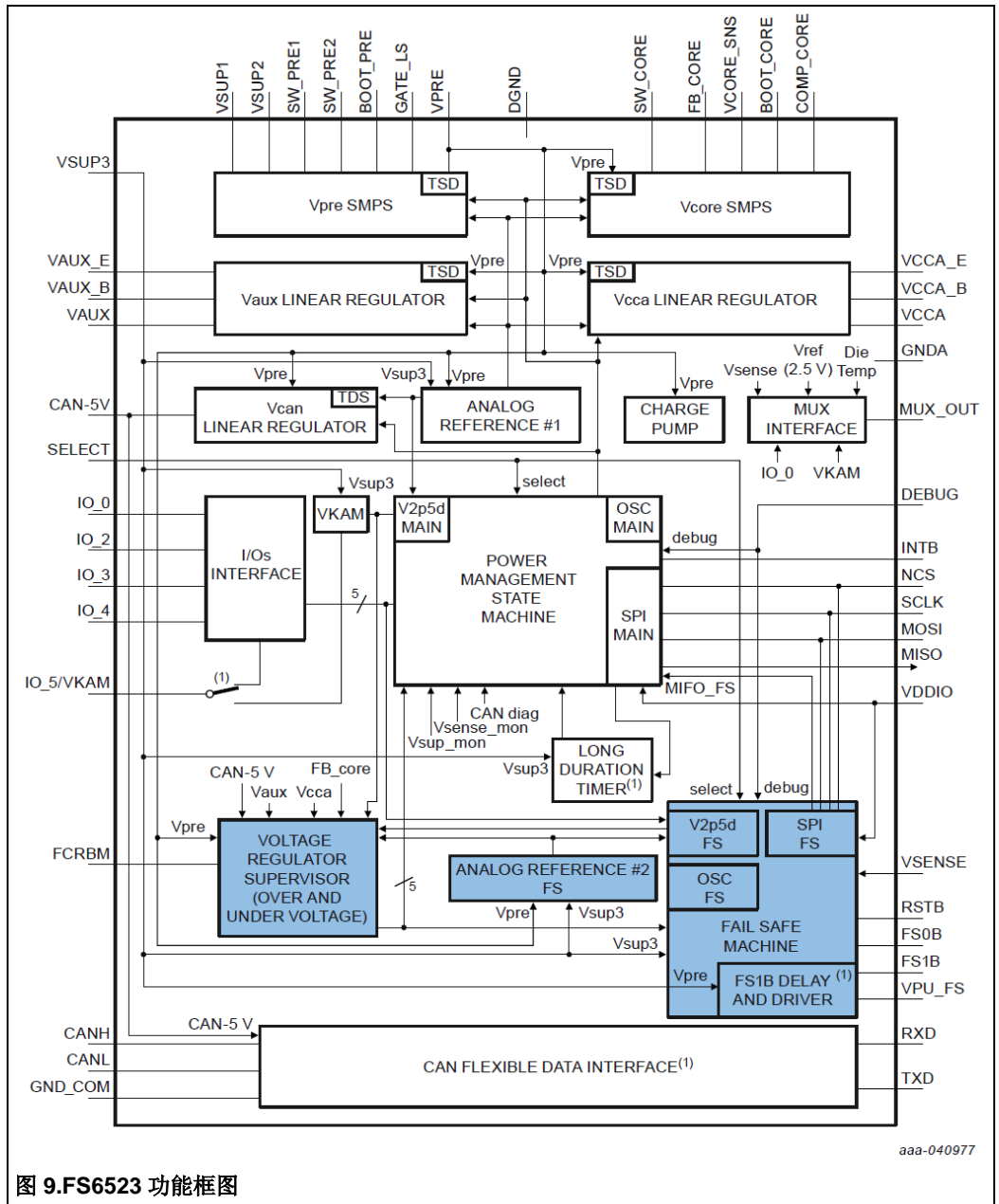


图 9.FS6523 功能框图

欲了解更多信息，请参阅恩智浦提供的 FS6523 数据手册（[此处](#)）。

4.6 MC33GD3100 隔离式高压 IGBT 栅极驱动器

MC33GD3100 是一款高级单通道栅极驱动器，适用于 IGBT 和 SiC 功率器件。集成电流隔离和低导通电阻驱动晶体管提供高充电和放电电流、低动态饱和电压及轨到轨栅极电压控制。

电流和温度感测可尽可能地减少故障期间的 IGBT 应力。精确且可配置的欠压锁定(UVLO)可提供保护，同时确保栅极驱动电压有足够的裕量。

MC33GD3100 自主管理严重故障，并通过 INTB 引脚和 SPI 接口报告故障和状态。它能够直接驱动大多数 IGBT 和 SiC MOSFET 的栅极。它包含自测、控制和保护功能，支持设计高可靠性系统(ASIL C/D)。该器件满足汽车应用的严格要求，完全符合 AEC-Q100 1 级标准。

主要功能

- SPI 接口支持安全监控、可编程性和灵活性
- 低传播延迟和极小 PWM 失真
- 集成电流信号隔离（高达 8 kV）
- 集成栅极驱动功率级能够提供 15 A 峰值拉电流和灌电流
- 完全可编程的主动米勒钳位
- 兼容负栅极电源
- 兼容电流感测和温度感测 IGBT
- 集成软关断、两级关断、主动钳位和用于波形整形的分段驱动
- CMTI > 100 V/ns
- 兼容 200 V 至 1700 V IGBT/SiC，功率范围 > 125 kW
- 工作温度范围：-40°C 至 125°C
- 外部爬电距离(CPG)：> 7.8 mm
- 工作频率 > 40 kHz
- 提供 5.0 V 和 3.3 V 容压 MCU 接口

安全功能

- 通过 ASIL D ISO26262 功能安全要求认证，支持全面诊断
- 电流、DESAT 和温度感测输入以及用于 IGBT/SiC 监测的 ADC 报告
- 快速短路保护、过流保护、温度警告和关断
- 通过中断引脚快速响应故障
- 所有模拟和数字电路的内置自检
- 芯片间通信的持续看门狗监控
- 强制死区
- 低压侧和高压侧所有电源的过压和欠压监测
- 低压侧和高压侧的故障安全状态管理引脚
- VGE 实时逐周期监测

安全和监管批准

- 符合 DIN V VDE V 0884-10 的加强隔离
- 耐受 5000 V rms（1 分钟）隔离，符合 UL 1577 标准
- CSA 组件验收通知 5A
- AEC-Q100 1 级汽车认证

[图 10](#) 显示了 MC33GD3100 的功能框图

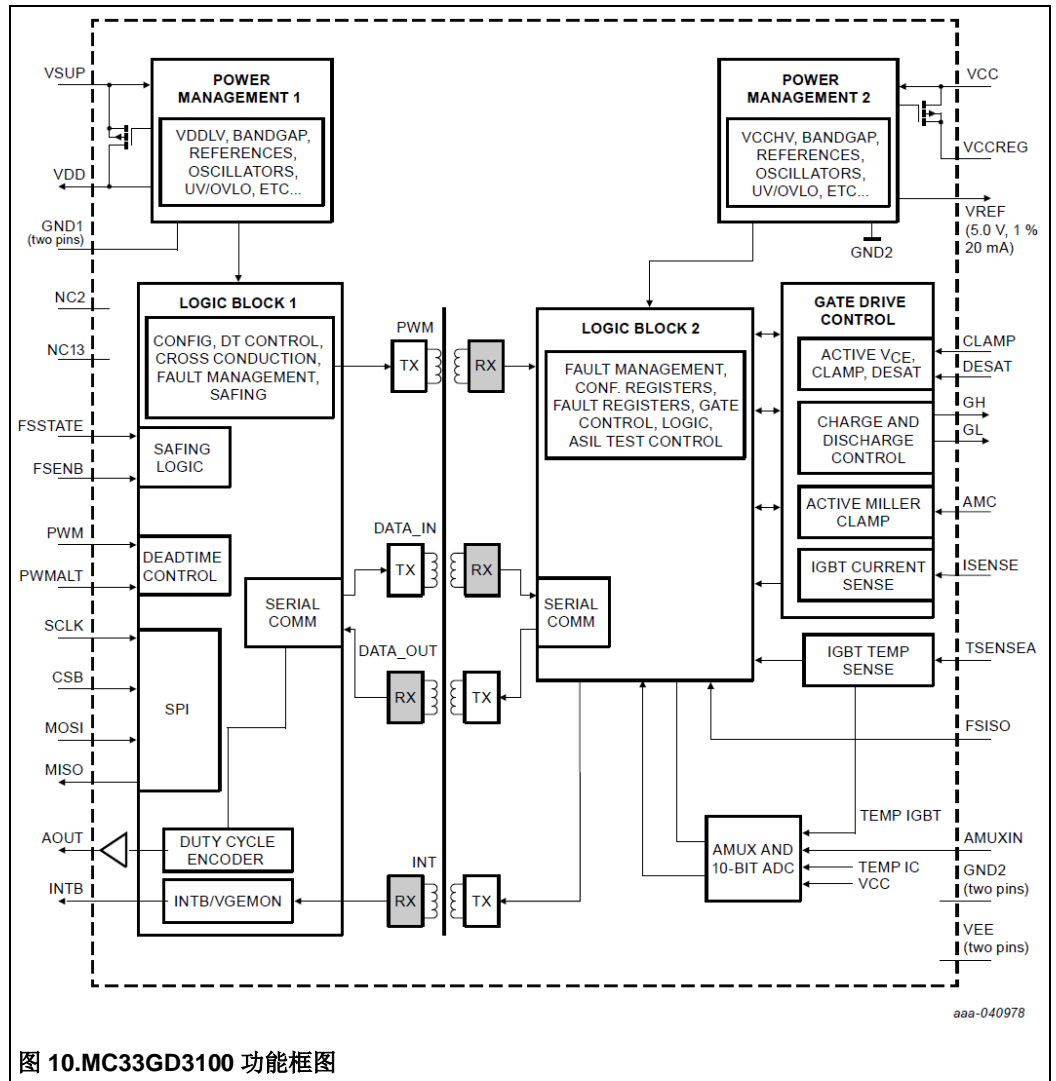


图 10.MC33GD3100 功能框图

欲了解更多信息，请参阅恩智浦提供的 MC33GD3100 数据手册（[此处](#)）。

4.7 TJA1051T/3 高速 CAN 收发器

TJA1051 是一款高速 CAN 收发器，可在控制器局域网(CAN)协议控制器和物理双线 CAN 总线之间提供接口。该收发器专为汽车行业的高速 CAN 应用而设计，可为带有 CAN 协议控制器的 MCU 提供差分发送和接收功能。

TJA1051 属于恩智浦半导体的第三代高速 CAN 收发器，与 TJA1050 等第一代和第二代器件相比有显著改进。它提供更好的电磁兼容性(EMC)和静电放电(ESD)性能，另外具有如下功能：

- 电源电压关闭时，其无源行为对 CAN 总线而言很理想
- 极低功耗待机模式，并具有总线唤醒功能
- 能够直接连接到电源电压为 3 V 至 5 V 的微控制器

TJA1042 实现了现行 ISO11898 标准（ISO11898-2:2003、ISO11898-5:2007）和即将更新的 ISO 11898-2:2016 版本中定义的 CAN 物理层。在 ISO11898-2:2016 的更新版本（包括 CAN FD 和 SAE J2284-4/5）发布之前，它规定了定义环路延迟对称性的附加时序参数。这种实现支持 CAN FD 快速阶段以高达 5 Mbit/s 的数据速率可靠地通信。

这些功能使 TJA1051 成为所有类型的 HS-CAN 网络的出色选择，适合不需要待机模式且可通过总线唤醒的节点。

主要一般功能

- 完全符合 ISO 11898-2:2003 标准
- CAN FD 快速阶段数据速率高达 5 Mbit/s 的时序保证
- 适合 12 V 和 24 V 供电系统
- 低电磁辐射(EME)和高电磁干扰耐受能力(EMI)
- VIO 输入允许与 3V 至 5V 微处理器直接相连
- 提供 SO8 封装和无铅 HVSON8 封装(3.0 mm # 3.0 mm)，具有改进的自动光学检测(AOI)能力
- 深绿产品（无卤；符合危险物质限制(RoHS)）
- 符合 AEC-Q100 标准

可预测和故障安全行为功能

- 所有电源条件下的功能行为均可预测
- 收发器在未上电时脱离总线（零负载）

保护功能

- 总线引脚具有高 ESD 保护能力
- 在汽车应用环境下总线引脚具有瞬态保护
- 以发送数据(TXD)为主的超时功能
- VCC 和 VIO 引脚提供欠压检测
- 热保护

欲了解更多信息，请参阅恩智浦提供的 TJA1051 数据手册 [\(此处\)](#)。

5 功能操作

电源逆变器控制参考平台经过优化，能够以有效的物料清单(BOM)提供最高效率和最高安全标准。

该平台已在与 Vepco (<http://www.vepcotech.com>)合作构建的概念验证 150kVA 硬件功率逆变器原型上实现和验证。

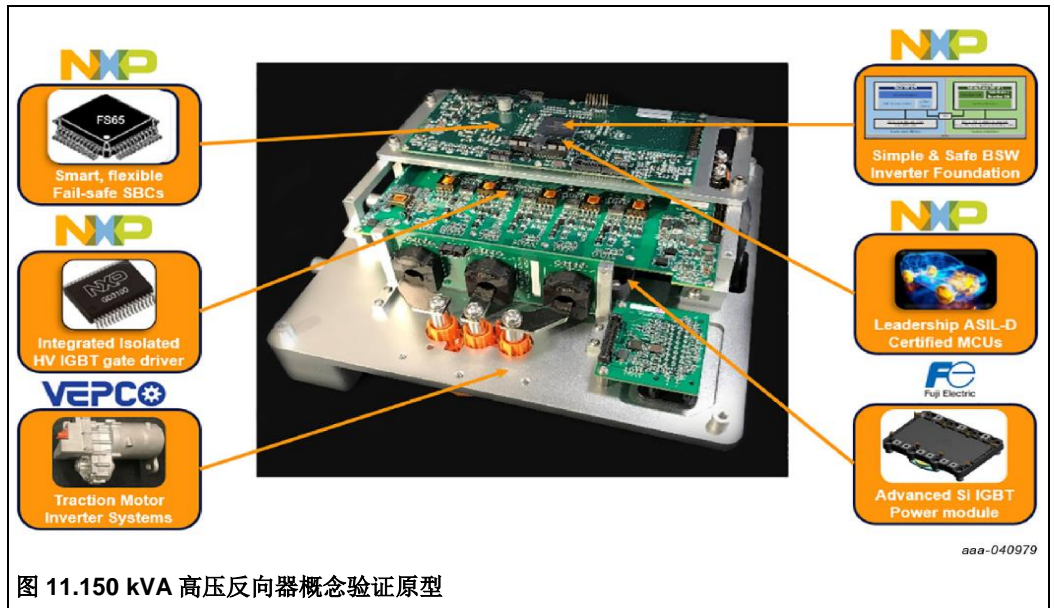


图 11.150 kVA 高压反向器概念验证原型

一般而言，电机的输出功率水平必须在 100-150 kW 左右，功率逆变器控制参考平台（以下用通用术语“功率反向器模块” (PIM)来指称)的首要功能是为 EV/HEV 车辆的牵引电机提供不同控制策略。

该单元的主要功能是将直流电源输入（通常来自高压电池）转换为三相交流电源输出，以便驱动电机并通过实现闭环反馈控制策略来精确控制电机的扭矩输出。

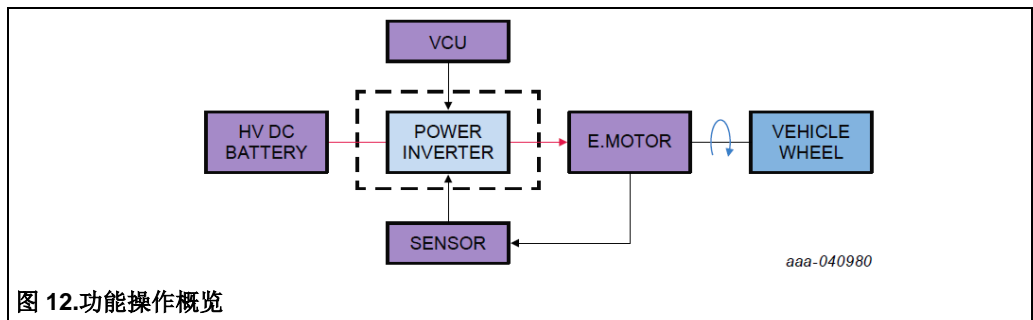


图 12.功能操作概览

典型工作条件可以描述如下：当驾驶员启动电动汽车时，PIM 在启动模式下上电并执行系统初始化和一些安全自检。如果在启动模式期间没有发生故障，则 PIM 接下来进入正常模式。此时，PIM 已准备好解释来自 CAN 总线的命令，电机已准备好根据驾驶员的命令向车轮输出扭矩。然后，PIM 根据从 VCU 接收到的命令连续驱动电机。当 PIM 检测到系统故障或任何部分故障时，它便进入降级模式并转为安全状态，以防止发生任何危险事件。最后，当车辆断电时，PIM 进入关断模式。

5.1 系统控制流程

从功能角度看，如图 13 所示，PIM 在逻辑上可以分为四个子系统：

- 车辆控制单元(VCU)接口
- MCU 和软件控制
- PWM 信号到功率输送
- 传感器反馈

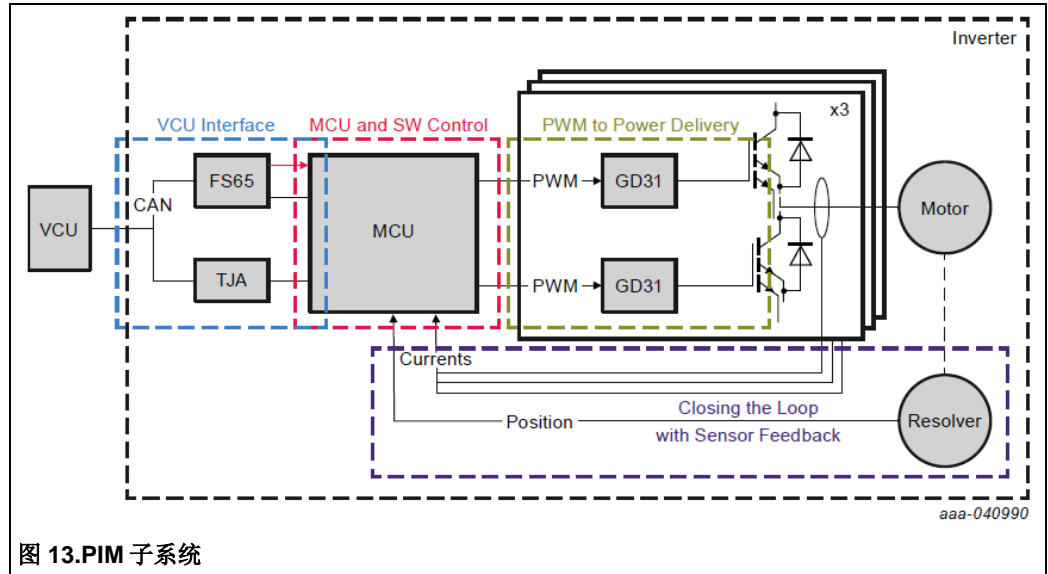


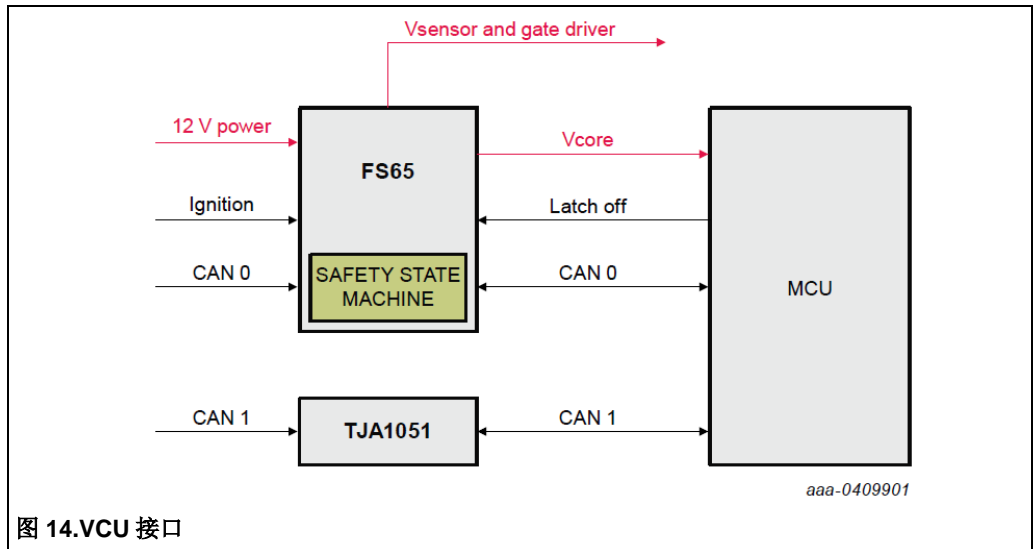
图 13. PIM 子系统

5.1.1 VCU 接口

点火信号由 VCU 提供给该接口用于上电。VCU 接口提供了两条与 VCU 通信的路径，这为 VCU 控制提供了冗余以保障功能安全，同时还保证了通信的完整性。

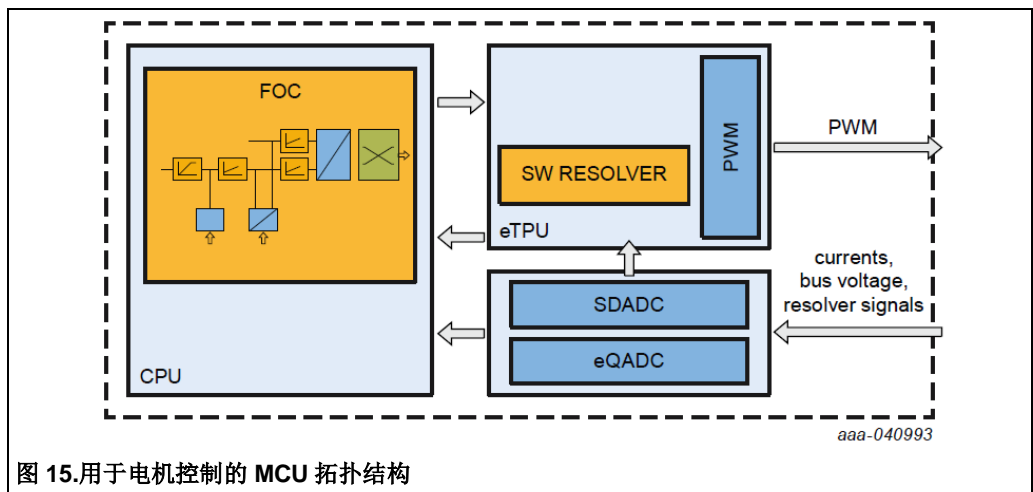
- FS65 CAN 接口
- TJA1051 CAN 接口

VCU 接口由 FS65 功能组成，包括为所有传感器、驱动器、MPC5775E 和通信供电。VCU 接口还允许系统进入安全状态。如果需要，它也可以像上锁/解锁系统一样工作。



5.1.2 MCU 和软件控制

CPU 是系统的核心，MPC5775E 运行 FOC 电机控制软件，从而为设计提供一些关键优势。MCU 可以针对不同用例配置为不同的拓扑结构。逆变器套件使用了一个这样的拓扑结构，如图 15 所示，以使 CPU 免于执行主电机控制任务。图 15 显示了一个典型 PMSM FOC 应用的模块互连，它在基于传感器的模式下工作，并使用 eTPU 电机控制库函数。



MPC5775E 设备上用于电机控制的关键模块是增强型时间处理单元(eTPU)。这款可编程定时器协处理器使用 eTPU 电机控制库函数集，能够生成三相 PWM 互补输出、模拟信号测量触发和同步信号，以及处理旋变器反馈信号。

在 CPU 上运行控制算法的同时，使用 eTPU 模拟 PWM 外设和 SD ADC 进行旋变器处理，这样内核可以不用执行部分电机控制任务，而是执行更重要的控制环路工作并支持更高的开关频率。

5.1.3 eTPU

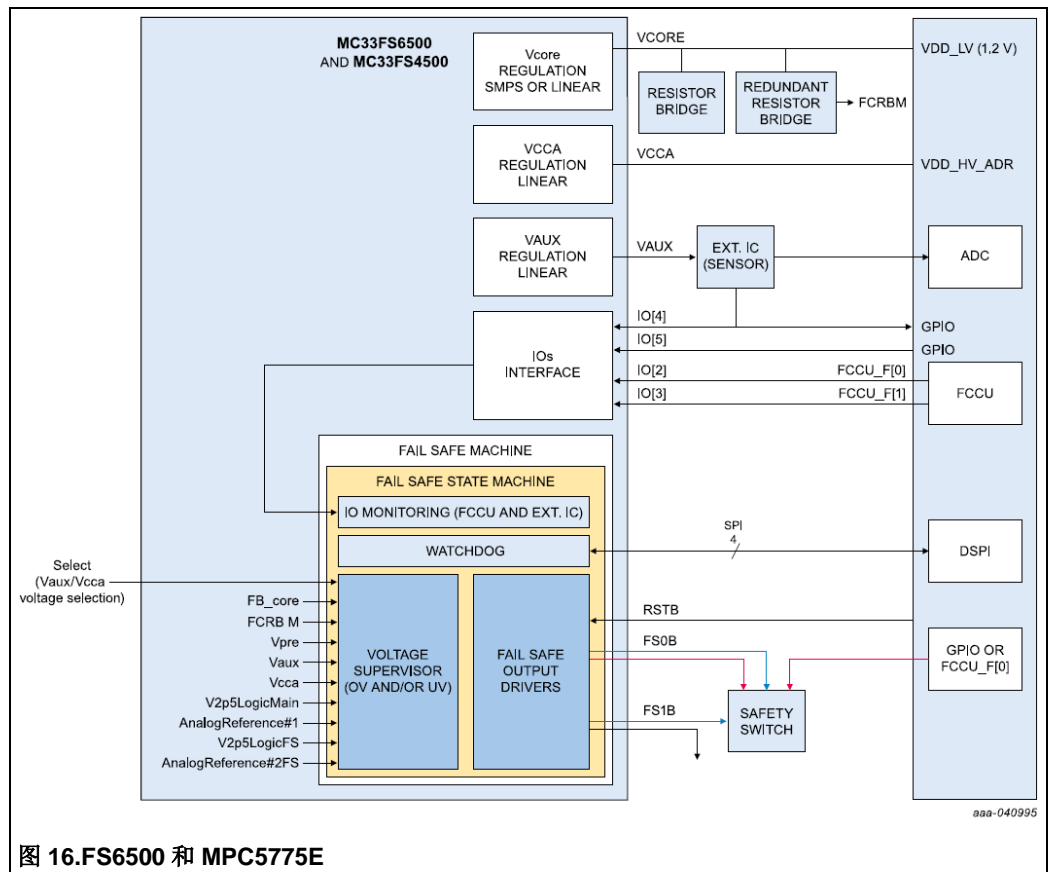
增强型时间处理单元(eTPU)是一种可编程 I/O 控制器，拥有自己的内核和存储器系统，能够独立于 CPU 执行复杂的时序和 I/O 管理。eTPU 用作协处理器，专门执行高级计时功能，例如独立于 CPU 处理复杂的发动机控制、电机控制和通信任务。

我们开发了一个新的复杂 eTPU 函数库，使 eTPU 能够驱动电机控制应用。与其前身——电机控制函数集 (set3 和 set4) 相比，此库向前迈进了一步。

除了 PMSM FOC 控制之外，MCU 还管理逆变器以及 FS6500 和 GD3100 的系统控制，以实现系统安全状态。这是通过 FS6500、MPC5775E 和 GD3100 之间的安全状态逻辑连接实现的。

5.1.4 MPC5775E 与 FS6500 集成

将 FS6500 与 MCU 集成可为反向器系统提供安全监控功能。图 16 显示了安全监测的工作原理。



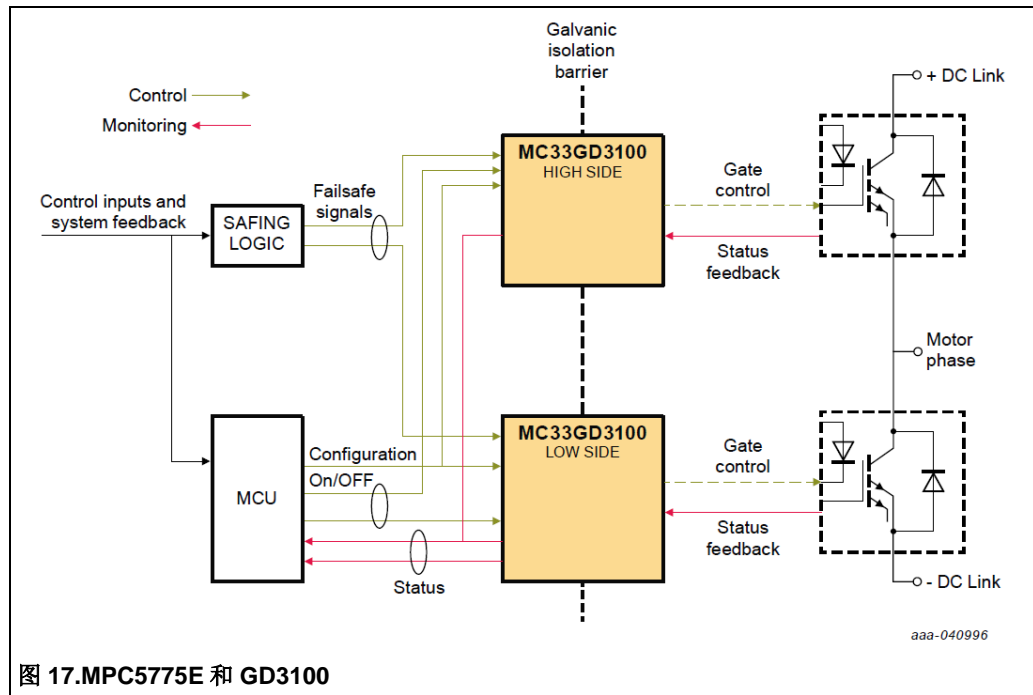
MCU 监测：FS6500 IO_2:3 可以监测 MPC5775E 的故障收集控制单元(FCCU)引脚。

冗余监测：FS6500 IO_4:5 可以监测外部 IC 的错误输出引脚，与 MPC5775E 形成冗余。

冗余安全引脚(FS0b): FS0b 提供冗余系统故障安全路径, 以实现高水平的功能安全。第二故障安全引脚(FS1B)提供了一种在故障后以可配置延迟置安全路径为有效的方法。

5.1.5 MPC5775E 与 GD3100 集成

将 GD3100 与 MCU 集成可为 GD3100 提供 PWM 更新, 并为反向器系统提供安全监控功能。图 17 显示了控制和安全监测的工作原理。



GD3100 确保功率 FET 的激励。该模拟器件确保外部 FET 以电源电压驱动。

GD3100 的配置是通过 SPI 模块实现的。GD3100 允许通过 SPI 命令设置和锁定不同工作模式。SPI 命令还根据内部监控电路和故障检测逻辑报告 GD3100 的状况。MPC5775E 通过故障信号 GD3100 引脚检测栅极驱动器故障状态。

5.2 软件旋变器

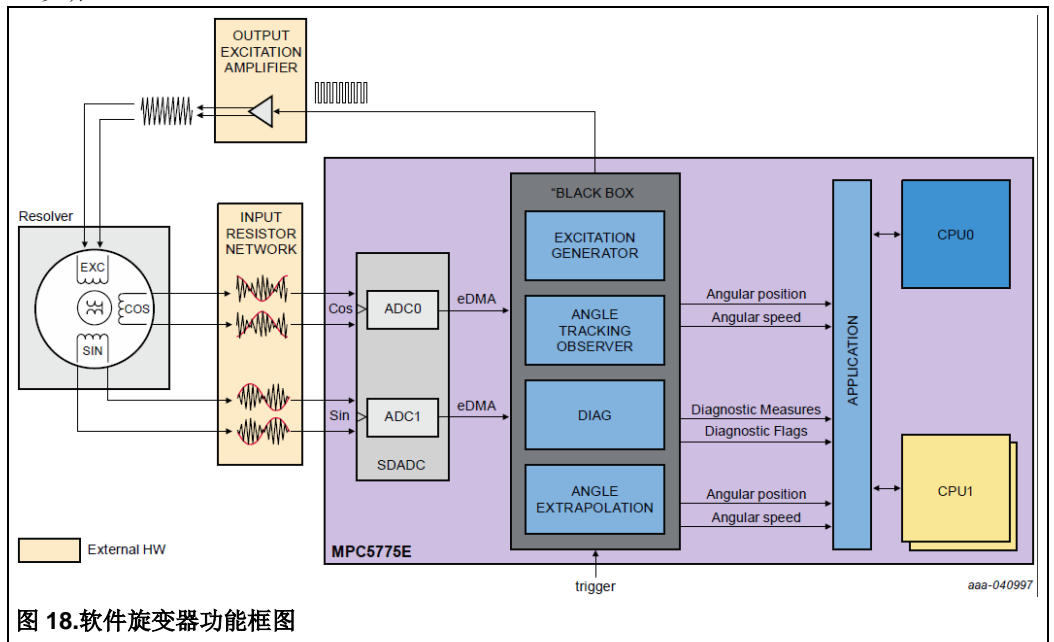
PIM 系统实现了与旋变器的软件接口。旋变器软件在专用定时器内核(eTPU)上执行, 以便主内核可以专注于更高级别的任务。处理是利用 eTPU 在 MCU 内的软件中完成, 因此无需在电机旋变器和 MCU ADC 之间使用基于软件的旋变器外部硬件接口。

旋变器数字接口 eTPU 函数(RESOLVER)使用一个 eTPU 通道生成 50% 占空比的 PWM 输出信号, 然后通过外部低通滤波器传送并用作旋变器激励信号。在旋变器位置传感器中, 此激励信号由实际电机角度的正弦和余弦调制。反馈的正弦和余弦信号由片上 ADC 采样, 转换结果可以通过 eDMA 传输到 eTPU DATA RAM。然后, eTPU 函数 RESOLVER 处理旋变器输出信号的数字样本。电机角位置、角速度、转数计数器和诊断是正弦和余弦反馈信号处理的结果。

有关 eTPU 旋变器实现及其配置的更多信息, 请参阅 eTPU RDC 和 RDC Checker 用户指南 ([此处](#))。

具体而言，软件旋变器在 SD-ADC 的帮助下处理旋变器输出(sin/cos)，并利用专用内核进行计算：

- 角位置
- 角速度
- 旋变器激励
- 诊断



从应用层的角度来看，软件旋变器功能被视为一个硬件模块。

6 安全概念概述

6.1 简介

本节概述电动车辆高压牵引反向器的系统安全概念。为了帮助设计功能安全的 EV/HEV 车辆，本部分介绍一个基于恩智浦元器件的牵引逆变器安全概念示例。

有关 ISO26262 流程第 3 部分和第 4 部分的更多信息，请参阅以下应用笔记：[高压牵引逆变器的功能安全概念](#) ([此处](#)) 和 [恩智浦系统安全解决方案：高压牵引逆变器](#) ([此处](#))。

6.2 牵引反向器的安全上下文

牵引逆变器是电动汽车的主牵引系统。它根据车辆控制单元的扭矩请求加速主牵引电机并提供再生制动 ([图 19](#) 和 [图 20](#))。

对于电池驱动的电动汽车，电机一般通过一个简单的变速箱（变速比为 8:1 到 10:1）直接安装到车轮上。此类系统的主要安全隐患是意外牵引、意外制动和高压触电。汽车制造商以不同方式解决这些问题，其 ASIL 等级为 ASIL-B 到 ASIL-D 不等。

在此分析中，安全目标为：

- **SG1:** 避免过加速扭矩超过 50 Nm 或要求扭矩的+5% (ASIL-D, FTTI=200 ms)
- **SG2:** 避免过制动扭矩超过 50 Nm 或要求扭矩的+5% (ASIL-D, FTTI=200 ms)

[图 19](#) 和 [图 20](#) 显示了一个典型牵引逆变器系统。

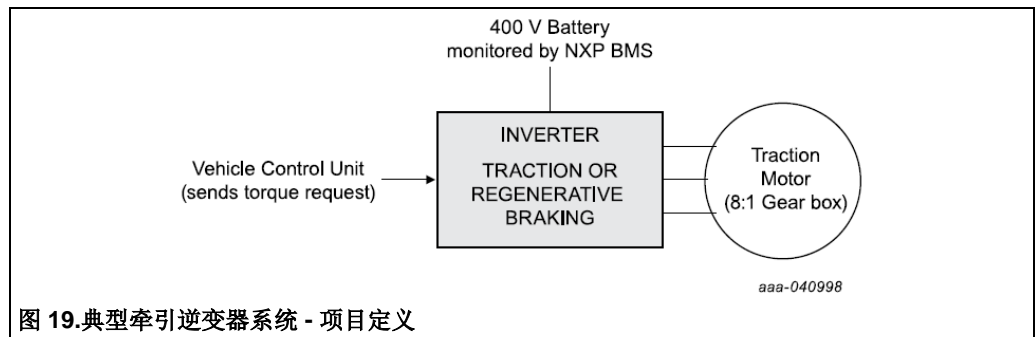


图 19. 典型牵引逆变器系统 - 项目定义

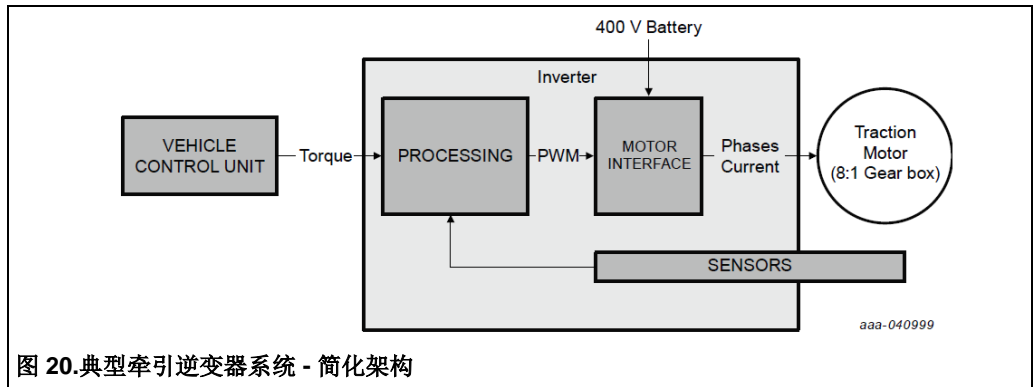


图 20. 典型牵引逆变器系统 - 简化架构

典型牵引逆变器系统控制流程为：

- 扭矩命令通过 CAN 从 VCU 发送到逆变器。
- 该扭矩命令由处理单元接收。
- 处理单元根据该命令和系统状态计算下一个 PWM 占空比。
- 电机接口根据接收到的 PWM 开启/关闭电机相位。
- 处理单元测量系统状态（电流、位置、速度、电压）以闭合环路并纠正错误。

这种简化架构解释了恩智浦牵引解决方案的安全概念。有关 ISO26262 方法的更详细说明（从安全目标到功能、技术、硬件和软件要求），请参阅恩智浦提供的安全包。

6.3 执行者-检查者处理架构

在处理域中，通信故障和计算故障是最有可能违反安全目标 SG1 和 SG2 的行为。本文档不涉及通信故障。此类系统的安全机制通常是 CAN 命令中的标准完整性检查者，以保证所接收命令的完整性以及发送方和接收方的可用性。

该系统用于防止计算故障的架构是“执行者-检查者”架构（图 23）。执行者利用复杂的算法实现主要功能要求，例如面向现场的控制、高级控制技术和数学功能。检查者检测不安全状况，并将系统带入安全状态。这种分配降低了安全系统的复杂性，因为所有安全要求都分配给了检查者，而执行者则专注于系统性能。在 ISO26262 词汇表中，这意味着分配给执行者的安全要求是 QM（质量管理），而分配给检查者的安全要求是 ASIL-D。在本研究中，检查者的功能和要求被分组到一个称为安全管理器的系统模块中。

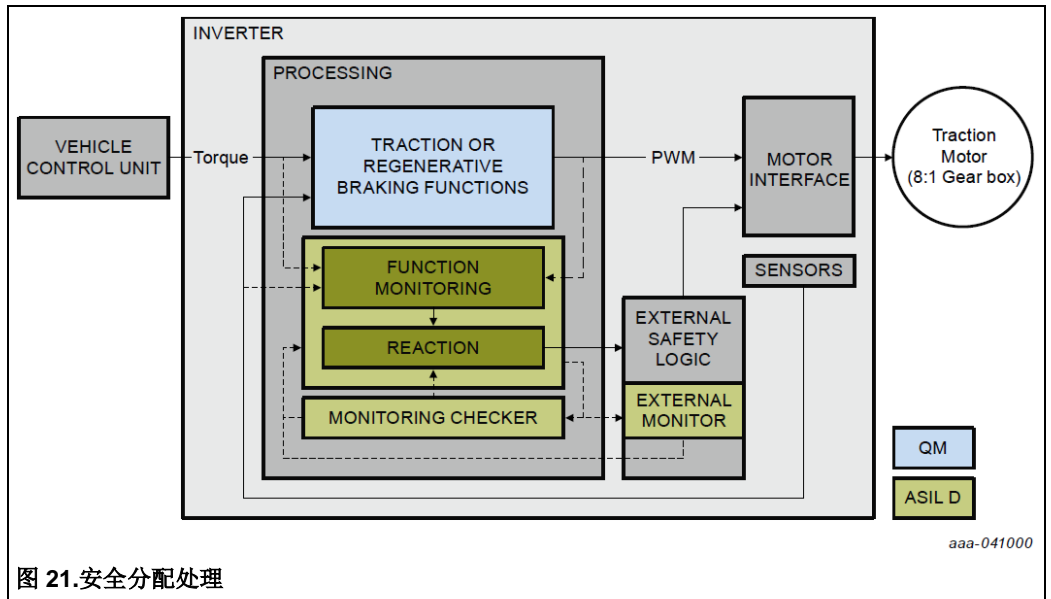


图 21.安全分配处理

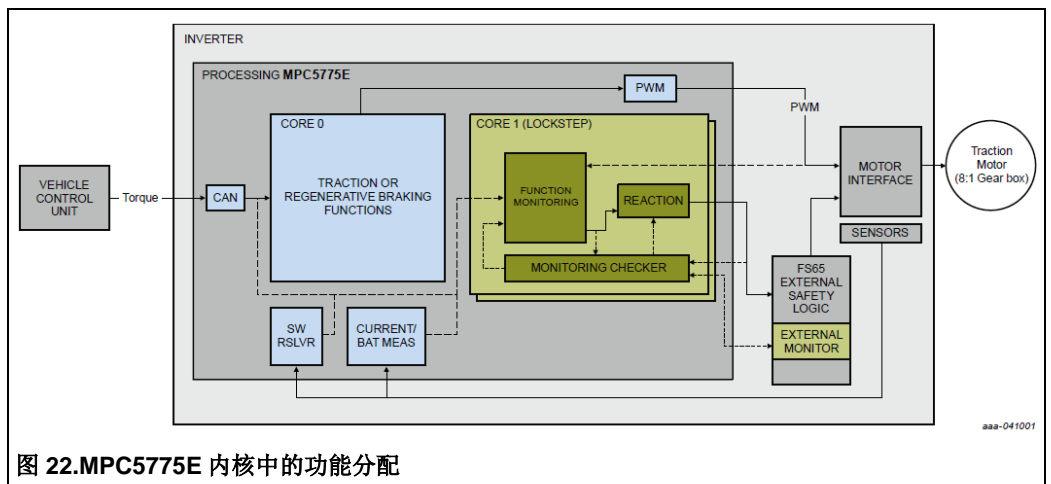


图 22.MPC5775E 内核中的功能分配

功率逆变器的安全运行时框架是一个灵活的模块化函数库，允许客户根据恩智浦安全运行时框架实施安全管理器要求。

6.4 永磁电机的电机接口安全概念

新一代电动汽车的一个制约因素是永磁同步电机产生的高反电磁场(BEMF)。在高速行驶时，当PMSM相位处于开路状态时（图23），所产生的BEMF电压可能高于电池电压，这会导致车辆产生再生电流和意外制动扭矩。为防止这种危险，系统必须作出反应，将半桥的高边（三相短路高边 3PSHS）（图24）或低边（三相短路低边 3PSLS）（图25）短路（安全状态）。

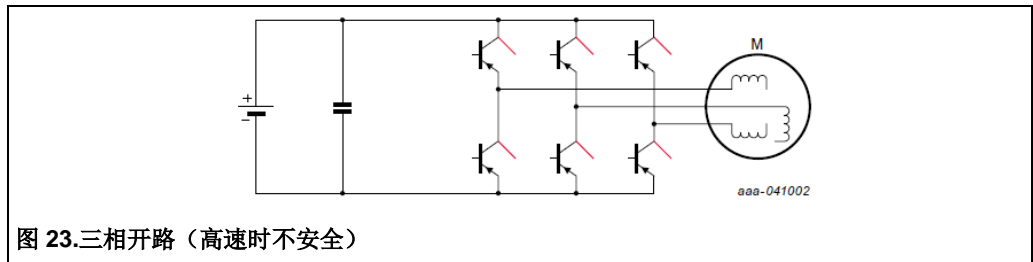


图 23.三相开路（高速时不安全）

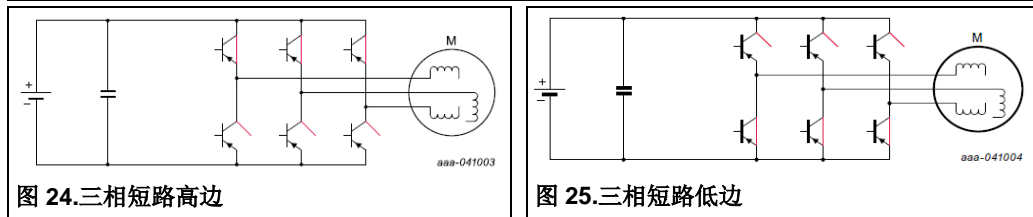


图 24.三相短路高边

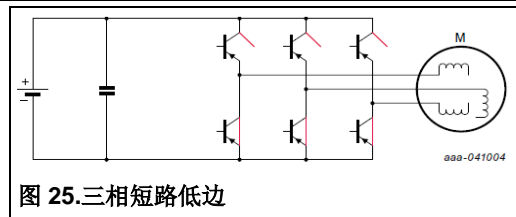
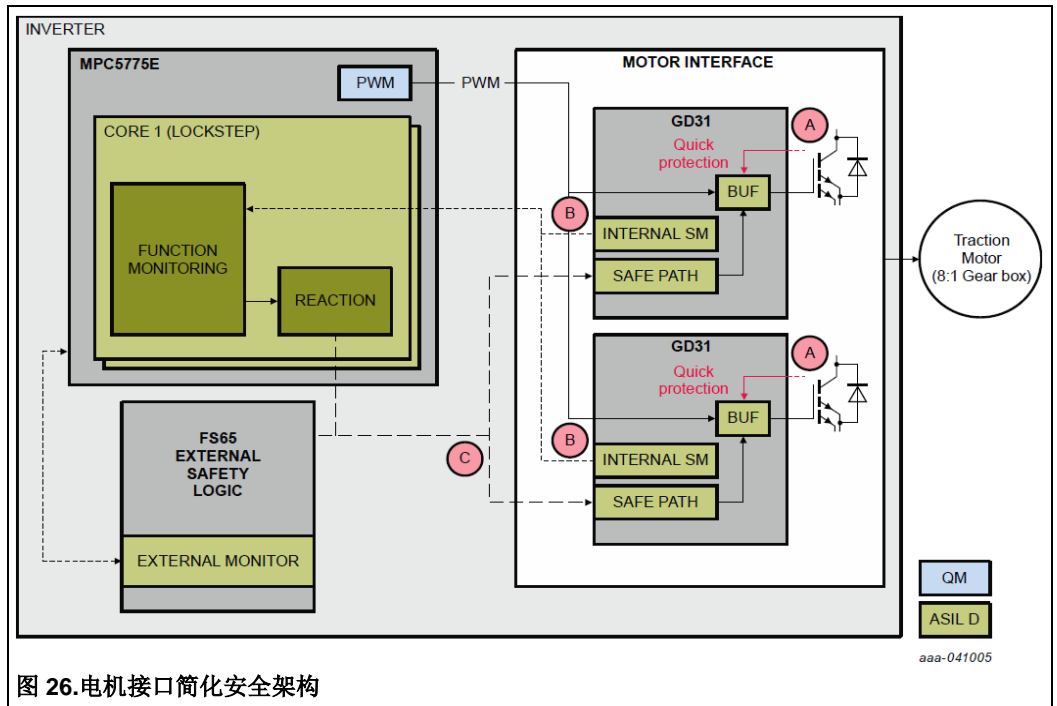


图 25.三相短路低边

这些应用特定的要求可转化为以下架构：

- **高边和低边驱动桥控制的独立架构**：如果单点故障导致高边和低边均不可用，系统将无法做出适当反应。
- **快速短路保护（图 23）**：短路可能会永久损坏整个电桥，使系统处于不安全状态。此类故障速度太快，无法由 MCU 处理。因此，GD3100 必须检测并防止短路。
- **通过高水平诊断提供适当反应（图 24）**：电机接口故障可能发生在很多不同方面（电机相位、IGBT、栅极驱动器、分立元件、散热）。每个方面可能需要作出不同的反应才能使系统恢复到安全状态。高边短路故障需要三相短接到电池(3PSHS)，而高边开路故障需要三相高速短接到地(3PSLS)。GD3100 设计为根据 ASIL-D 流程进行高级诊断，能够检测 99% 的自身故障，也能检测其他系统故障（电机和 IGBT），并通过冗余接口向 MCU 安全管理器报告故障。
- **反应通道（图 25）**：报告故障后，MCU 安全管理器决定哪种安全状态最合适。冗余 GD3100 通道允许通过专用引脚控制安全状态。决策和反应必须在 FTTI ~100 μ s 内做出。



恩智浦栅极驱动器 GD3100 是该架构的一个关键器件，与竞争器件相比具有以下优势：

- 直接控制 IGBT/SiC，无需升压器，从而降低整体故障率，并通过栅极驱动器直接控制安全路径
- 快速短路保护（IGBT $<2 \mu\text{s}$ ，SiC 更快），关断波形整形管理避免破坏性过冲(SSD 2LTO)
- 高诊断覆盖率：GD3100 专为汽车 ISO26262 流程而设计。该器件的诊断功能包括对内部故障的高诊断覆盖率、内置自测(BIST)功能、看门狗定时器和 CRC 功能

6.5 通信和传感器安全概念

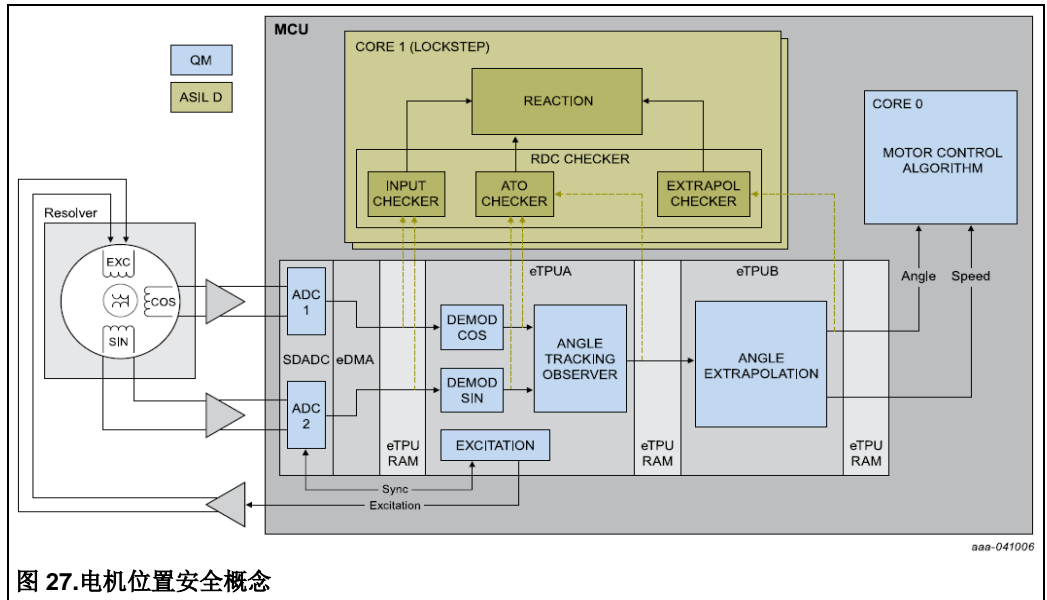
为了闭合环路，电机控制算法使用相电流、电机角度位置和电池电压。错误的传感器采集会直接影响作用于电机的命令。为了满足传感器的安全要求，必须能够诊断采集链中的任何故障（传感器、放大、模数转换和传感器数据预处理）。本文档仅以电机位置为例。方法类似于电流和电池电压。

系统使用电机轴上安装的机械旋变器、放大链和软件旋变器(eTPU)。eTPU 使用处理器和定时器通道的组合来处理复杂的时序事件。这种架构的优点是避免了内核 0 上的计算周期消耗。

流程链在图 27 中以蓝色表示：

- eTPU 创建一个激励信号以激励线圈的初级。
- 两个相移 90 度的线圈测量该信号的正弦和余弦。接收到的激励因轴角度而异。

- Sigma delta ADC 同步测量激励信号的两个信号。结果被放入 eTPU RAM 进行处理。
- 对信号进行解调，利用跟踪观测器模型计算角度和速度。为了提高精度，外推角度以纠正由于采集时间到处理结束时间之间的延迟而导致的误差。
- 该角度由电机控制算法使用。

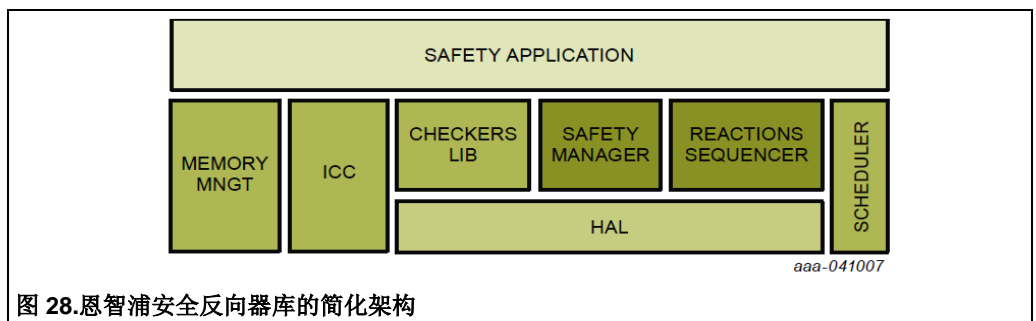


RDC Checker 库将数据输入到安全内核并执行诊断，诊断结果传递到流程链以诊断所有可能的故障。

输入检查器检查原始值以计算激励信号与过零、最大和最小幅度以及单位矢量的同步。它能检测 99% 的放大、线圈、激励链、SD-ADC 硬件故障。

ATO Checker 以与 eTPU 跟踪模型不同的方式计算角度并运行一些合理性检查。它检测 eTPU 计算故障。类似地，外推检查器实施安全机制以检测角度外推函数的故障。

RDC Checker（以及电机接口、MCU LL 安全等）是随硬件解决方案分发的恩智浦安全反向器库的一部分。它是一个灵活的模块化库，允许客户根据自己的安全情况调整恩智浦假设。



6.6 安全支持的可交付成果

处理、电机接口和电机位置安全概念是恩智浦电动汽车牵引系统安全架构的三个简化示例。在 NDA 下向客户提供的 FSC（功能安全概念）和 TSC（技术安全概念）应用笔记中提供了更详细的说明，包括可追溯要求、ASIL 分配和分解、状态机及故障分析。客户可以根据自己的应用需求灵活调整这些概念。它们作为恩智浦电动车辆功率逆变器参考平台的一部分在硬件和软件中实现 [\(此处\)](#)。

此外，为了简化复杂硬件、软件和系统安全机制的使用，恩智浦还提供了一个特定应用库来加速客户的安全开发。请联系恩智浦销售代表获取更多信息。

7 一般电气特性

除非另有说明，TA = -40 °C 至 125 °C，VSLV 范围从 FS65 VSUP_UV_L 规格到 36 V。
所有电压均以地为参考。

表 3. 电气特性

| 符号 | 参数 | 值 | 单位 | 备注 |
|---------------------------|--------------------|-------------|------|--|
| VSLV | 初级低压电源 | 12 (4.5-18) | V | 低电平范围受 LDO 选择的限制；采用反激式转换器设计调整，高电平范围可扩展至 36 V |
| I _{VSLV_PWM_ON} | VSLV 工作电流（PWM 切换） | 1.2 | A | |
| I _{VSLV_PWM_OFF} | VSLV 工作电流（PWM 不切换） | 500 | mA | |
| VSHV | 高压电源 | 340 | V | |
| Fly_PWM | 驱动器隔离电源频率 | ~260 | kHz | |
| HV_GD_VCC | 驱动器隔离正电源电压范围 | 18 | V | |
| HV_GD_VEE | 驱动器隔离负电源电压范围 | -8 | V | |
| PWM_DEAD | 死区 | ≅3 | μs | |
| HV_OV | 过压保护 | 420 | V | |
| HV_UV | 欠压保护 | 250 | V | |
| IGBT_OT | 过温保护 | 135 | C | |
| IGBT_OC | 过流保护 | 1500 | Arms | |
| IGBT_DESAT | 去饱和保护 | 9 | V | |
| Motor_max_speed | 电机过速 | 10000 | rpm | |

8 平台和配件订购信息

表 4. 订购信息

| 标识符 | 名称 | 说明 |
|-----------------------------------|-----------------------|--|
| 此处 提供 | EV 功率逆变器控制参考平台 | 参考设计硬件套件包括： 1. MCU 控制板， 2. IGBT 驱动器板， 3. 传感器板， 4. 接口板 5. 软件包 |
| 此处 提供 | 电动车辆功率逆变器控制参考平台快速入门指南 | 概述如何组装和设置反向器参考平台套件操作的高层指南 |
| UM11298 (此处) | 电动车辆逆变器支持套件用户指南 | 逆变器参考平台套件的组装、设置和操作的详细指南 |
| AN13091 (此处) | 逆变器平台设计指南应用笔记 | 描述逆变器平台系统架构、设计和工作特性 |
| 购买套件附送 | 平台硬件设计包 | 逆变器参考平台的原理图、BOM 清单和布局 |
| 购买套件附送 | 逆变器参考平台软件包 | 平台软件组件： 1. 带服务层和驱动程序的基本软件 2. 平台软件开发套件 3. 基本电机演示应用软件（二进制） 4. 逆变器 GUI（需要 Python） |
| — | 逆变器安全软件库和安全状态管理软件 | 2021 年第三季度提供 |
| UM11552 (此处) | PIM SiC 软件用户手册 | 平台软件架构和功能操作概述 |
| 购买套件附送 | 平台安全概述 | 平台安全解决方案的高层概述 |
| — | 安全设计指南应用笔记 | NDA 安全包（2021 年第三季度提供） |
| 此处 提供 | 逆变器原型系统测试结果 | Vepco 逆变器原型测试总结 |
| 此处 提供 | 牵引电机功率逆变器系统评估原型 | 采用恩智浦参考平台的逆变器原型实现（Vepco 提供） |
| — | 平台组件 | 请参阅相应组件数据手册 |

9 参考资料

以下是可以获得有关恩智浦相关产品和应用解决方案信息的 URL：

表 5.

| NXP.com 支持页面 | 说明 | URL |
|--------------------|--------|---|
| EV 功率逆变器控制参考平台 | 工具汇总页面 | https://www.nxp.com/design/designs/ev-power-inverter-control-reference-platform:RDPWRINVERTER |
| GD3100 | 产品汇总页面 | http://www.nxp.com/GD3100 |
| MC5775E | 产品汇总页面 | https://www.nxp.com/products/processors-and-microcontrollers/power-architecture/mpc55xx-5xxx-mcus/ultra-reliable-mpc57xx-mcus/mpc5775b-and-mpc5775e-microcontrollers-for-battery-management-systems-bms-and-inverter-applications:MPC5775B-E |
| FS6523 | 产品汇总页面 | https://www.nxp.com/products/power-management/pmics-and-sbcs/safety-sbcs/grade-1-and-grade-0-safety-power-system-basis-chip-with-can-flexible-data-transceiver:FS6500 |
| TJA1051 | 产品汇总页面 | https://www.nxp.com/products/interfaces/can-transceivers/can-with-flexible-data-rate/high-speed-can-transceiver:TJA1051 |
| Fuji M653 | 产品汇总页面 | https://www.fujielectric.com/products/semiconductor/model/igbt/ev_hev_module.html |
| Vepco Technologies | 网站 | http://www.vepcotech.com/ |

10 修订记录

表 6.修订记录

| 文档 ID | 发布日期 | 数据手册状态 | 更改说明 | 取代版本 |
|-------------|----------|---------------------|------|------|
| AN13091 v.1 | 20210319 | 电动车辆牵引电机功率逆变器控制参考平台 | 无 | 无 |
| 变更内容 | 初版 | | | |

11 Legal information

11.1 Definitions

Draft — A draft status on a document indicates that the content is still under internal review and subject to formal approval, which may result in modifications or additions. NXP Semiconductors does not give any representations or warranties as to the accuracy or completeness of information included in a draft version of a document and shall have no liability for the consequences of use of such information.

11.2 Disclaimers

Limited warranty and liability — Information in this document is believed to be accurate and reliable. However, NXP Semiconductors does not give any representations or warranties, expressed or implied, as to the accuracy or completeness of such information and shall have no liability for the consequences of use of such information. NXP Semiconductors takes no responsibility for the content in this document if provided by an information source outside of NXP Semiconductors. In no event shall NXP Semiconductors be liable for any indirect, incidental, punitive, special or consequential damages (including - without limitation - lost profits, lost savings, business interruption, costs related to the removal or replacement of any products or rework charges) whether or not such damages are based on tort (including negligence), warranty, breach of contract or any other legal theory. Notwithstanding any damages that customer might incur for any reason whatsoever, NXP Semiconductors' aggregate and cumulative liability towards customer for the products described herein shall be limited in accordance with the Terms and conditions of commercial sale of NXP Semiconductors.

Right to make changes — NXP Semiconductors reserves the right to make changes to information published in this document, including without limitation specifications and product descriptions, at any time and without notice. This document supersedes and replaces all information supplied prior to the publication hereof.

Suitability for use — NXP Semiconductors products are not designed, authorized or warranted to be suitable for use in life support, life-critical or safety-critical systems or equipment, nor in applications where failure or malfunction of an NXP Semiconductors product can reasonably be expected to result in personal injury, death or severe property or environmental damage. NXP Semiconductors and its suppliers accept no liability for inclusion and/or use of NXP Semiconductors products in such equipment or applications and therefore such inclusion and/or use is at the customer's own risk.

Applications — Applications that are described herein for any of these products are for illustrative purposes only. NXP Semiconductors makes no representation or warranty that such applications will be suitable for the specified use without further testing or modification. Customers are responsible for the design and operation of their applications and products using NXP Semiconductors products, and NXP Semiconductors accepts no liability for any assistance with applications or customer product design. It is customer's sole responsibility to determine whether the NXP Semiconductors product is suitable and fit for the customer's applications and products planned, as well as for the planned application and use of customer's third party customer(s). Customers should provide appropriate design and operating safeguards to minimize the risks associated with their applications and products. NXP Semiconductors does not accept any liability related to any default, damage, costs or problem which is based on any weakness or default in the customer's applications or products, or the application or use by customer's third party customer(s). Customer is responsible for doing all necessary testing for the customer's applications and products using NXP Semiconductors products in order to avoid a default of the applications and the products or of the application or use by customer's third party customer(s). NXP does not accept any liability in this respect.

Hazardous voltage — Although basic supply voltages of the product may be much lower, circuit voltages up to 60 V may appear when operating this product, depending on settings and application. Customers incorporating or otherwise using these products in

applications where such high voltages may appear during operation, assembly, test etc. of such application, do so at their own risk. Customers agree to fully indemnify NXP Semiconductors for any damages resulting from or in connection with such high voltages. Furthermore, customers are drawn to safety standards (IEC 950, EN 60 950, CENELEC, ISO, etc.) and other (legal) requirements applying to such high voltages.

Export control — This document as well as the item(s) described herein may be subject to export control regulations. Export might require a prior authorization from competent authorities.

Evaluation products — This product is provided on an "as is" and "with all faults" basis for evaluation purposes only. NXP Semiconductors, its affiliates and their suppliers expressly disclaim all warranties, whether express, implied or statutory, including but not limited to the implied warranties of non-infringement, merchantability and fitness for a particular purpose. The entire risk as to the quality, or arising out of the use or performance, of this product remains with customer. In no event shall NXP Semiconductors, its affiliates or their suppliers be liable to customer for any special, indirect, consequential, punitive or incidental damages (including without limitation damages for loss of business, business interruption, loss of use, loss of data or information, and the like) arising out of the use of or inability to use the product, whether or not based on tort (including negligence), strict liability, breach of contract, breach of warranty or any other theory, even if advised of the possibility of such damages. Notwithstanding any damages that customer might incur for any reason whatsoever (including without limitation, all damages referenced above and all direct or general damages), the entire liability of NXP Semiconductors, its affiliates and their suppliers and customer's exclusive remedy for all of the foregoing shall be limited to actual damages incurred by customer based on reasonable reliance up to the greater of the amount actually paid by customer for the product or five dollars (US\$5.00). The foregoing limitations, exclusions and disclaimers shall apply to the maximum extent permitted by applicable law, even if any remedy fails of its essential purpose.

Safety of high-voltage evaluation products — The non-insulated high voltages that are present when operating this product, constitute a risk of electric shock, personal injury, death and/or ignition of fire. This product is intended for evaluation purposes only. It shall be operated in a designated test area by personnel that is qualified according to local requirements and labor laws to work with non-insulated mains voltages and high-voltage circuits. The product does not comply with IEC 60950 based national or regional safety standards. NXP Semiconductors does not accept any liability for damages incurred due to inappropriate use of this product or related to non-insulated high voltages. Any use of this product is at customer's own risk and liability. The customer shall fully indemnify and hold harmless NXP Semiconductors from any liability, damages and claims resulting from the use of the product.

Translations — A non-English (translated) version of a document is for reference only. The English version shall prevail in case of any discrepancy between the translated and English versions.

Security — Customer understands that all NXP products may be subject to unidentified or documented vulnerabilities. Customer is responsible for the design and operation of its applications and products throughout their lifecycles to reduce the effect of these vulnerabilities on customer's applications and products. Customer's responsibility also extends to other open and/or proprietary technologies supported by NXP products for use in customer's applications. NXP accepts no liability for any vulnerability. Customer should regularly check security updates from NXP and follow up appropriately. Customer shall select products with security features that best meet rules, regulations, and standards of the intended application and make the ultimate design decisions regarding its products and is solely responsible for compliance with all legal, regulatory, and security related requirements concerning its products, regardless of any information or support that may be provided by NXP. NXP has a Product Security Incident Response Team (PSIRT) (reachable at PSIRT@nxp.com) that manages the investigation, reporting, and solution release to security vulnerabilities of NXP products.

11.3 Trademarks

NXP — wordmark and logo are trademarks of NXP B.V.

Notice: All referenced brands, product names, service names and trademarks are the property of their respective owners.

表

| | | | |
|-----------------|----|---------------|----|
| 表1.首字母缩略语 | 2 | 表4.订购信息 | 35 |
| 表2.平台I/O | 9 | 表5. | 36 |
| 表3.电气特性 | 34 | 表6.修订记录 | 37 |

图

| | | | |
|------------------------------|----|----------------------------|----|
| 图1.反向器控制参考平台板 | 2 | 图16.FS6500和MPC5775E | 24 |
| 图2.参考平台概念图 | 5 | 图17.MPC5775E和GD3100 | 25 |
| 图3.系统功能框图 | 6 | 图18.软件旋变器功能框图 | 26 |
| 图4.功能和安全软件功能框图 | 7 | 图19.典型牵引逆变器系统 - 项目定义 | 27 |
| 图5.详细硬件功能框图 | 8 | 图20.典型牵引逆变器系统 - 简化架构 | 28 |
| 图6.PIM系统基本软件架构 | 11 | 图21.安全分配处理 | 29 |
| 图7.功能和安全软件划分 | 12 | 图22.MPC5775E内核中的功能分配 | 29 |
| 图8.MPC5775E功能框图 | 15 | 图23.三相开路（高速时不安全） | 30 |
| 图9.FS6523功能框图 | 17 | 图24.三相短路高边 | 30 |
| 图10.MC33GD3100功能框图 | 19 | 图25.三相短路低边 | 30 |
| 图11.150 kVA高压反向器概念验证原型 | 21 | 图26.电机接口简化安全架构 | 31 |
| 图12.功能操作概览 | 21 | 图27.电机位置安全概念 | 32 |
| 图13.PIM子系统 | 22 | 图28.恩智浦安全反向器库的简化架构 | 32 |
| 图14.VCU接口 | 23 | | |
| 图15.用于电机控制的MCU拓扑结构 | 23 | | |

目录

| | | |
|-----------|--------------------------------|-----------|
| 1 | 首字母缩略语 | 2 |
| 2 | 概述 | 2 |
| 3 | 硬件和软件功能框图 | 6 |
| 3.1 | 参考平台系统概述 | 6 |
| 3.2 | 逆变器系统基本软件 | 6 |
| 3.3 | 具有可选功能安全支持的软件功能框图 | 6 |
| 4 | 平台系统架构和设计 | 8 |
| 4.1 | 参考平台硬件描述 | 8 |
| 4.2 | 平台I/O | 9 |
| 4.3 | 软件架构 | 10 |
| 4.3.1 | 应用层 | 11 |
| 4.3.2 | 平台API层 | 11 |
| 4.3.3 | 抽象层 | 12 |
| 4.4 | MPC5775E MCU | 12 |
| 4.5 | FS6523安全PMIC | 15 |
| 4.6 | MC33GD3100隔离式高压IGBT栅极驱动器 | 17 |
| 4.7 | TJA1051T/3高速CAN收发器 | 19 |
| 5 | 功能操作 | 21 |
| 5.1 | 系统控制流程 | 22 |
| 5.1.1 | VCU接口 | 22 |
| 5.1.2 | MCU和软件控制 | 23 |
| 5.1.3 | eTPU | 24 |
| 5.1.4 | MPC5775E与FS6500集成 | 24 |
| 5.1.5 | MPC5775E与GD3100集成 | 25 |
| 5.2 | 软件旋变器 | 25 |
| 6 | 安全概念概述 | 27 |
| 6.1 | 简介 | 27 |
| 6.2 | 牵引反向器的安全上下文 | 27 |
| 6.3 | 执行者-检查者处理架构 | 28 |
| 6.4 | 永磁电机的电机接口安全概念 | 29 |
| 6.5 | 通信和传感器安全概念 | 31 |
| 6.6 | 安全支持的可交付成果 | 33 |
| 7 | 一般电气特性 | 34 |
| 8 | 平台和配件订购信息 | 35 |
| 9 | 参考资料 | 36 |
| 10 | 修订记录 | 37 |
| 11 | Legal information | 38 |

注意：关于本文档及相关产品的重要说明详见“法律信息”一节。

© NXP B.V. 2021。

保留所有权利。

欲了解更多信息，请访问：<http://www.nxp.com>

如需获取销售办事处地址，请发送电子邮件至：salesaddresses@nxp.com

发布日期：2021年3月19日

文档编号：AN13091