

Technical White Paper

用于工业固定和移动应用中安全传感的毫米波雷达



Thomas Schneider and Matthieu Chevrier

摘要

工业自动化通过提高效率、减少人为错误和提高生产率，给制造、物流和其他行业带来了颠覆性的变化。然而，复杂机械和自主系统的集成也带来了新的安全挑战。随着自动化系统变得越来越复杂，确保操作员、维护人员甚至机械本身的安全已成为一个至关重要的问题。新型 IEC TS 61496-5 提供了电敏防护设备 (ESPE) 的设计指南，本文档重点介绍利用 TI 的毫米波雷达技术设计此类 ESPE 的技术方案。

在各种类型的 ESPE 中，雷达安全传感器因其稳健性、准确性以及在光学或红外传感器可能失效的严苛环境中有效运行的能力而日益受到重视。德州仪器 (TI) 的 IWR6843 雷达传感器和 LP87745 电源管理集成电路 (PMIC) 是开发符合 IEC TS 61496-5 标准的雷达安全系统的重要组件。本技术白皮书探讨了这些组件在固定和移动工业场景中的应用，并重点介绍了 ISO 13849。

内容

1 简介.....	1
1.1 电敏防护设备 (ESPE) 的监管需求.....	2
1.2 不同类型的电敏防护设备 (ESPE).....	2
2 雷达传感器在工业应用中的优势.....	2
3 安全概念评估/分析.....	3
3.1 系统要求.....	6
3.2 传感架构的注意事项.....	8
3.3 传感器级架构.....	11
4 IEC TS 61496-5 功能测试结果.....	15
5 其他注意事项.....	16
5.1 振动.....	16
5.2 时钟.....	16
6 结语.....	16
7 参考资料.....	17

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 简介

本文档讨论了根据 IEC TS 61496-5 标准，使用 IWR6843 毫米波传感器和 LP87745 PMIC 器件的 3 类雷达保护器件可能的子系统概念选项。假定所有其他元件和互连都符合所需的安全目标。对于移动应用中的用例，安全功能还应支持符合 ISO 13849 的 PL d 标准。

电敏防护设备 (ESPE) 适用于有人身伤害风险的机器。其通过在人员陷入危险境地之前使机器恢复到安全状态来提供保护。

IEC 61496 制定了 ESPE 要求，旨在保护个人免受危险机械操作的伤害。这些系统可检测到指定区域内是否存在人员或物体，并启动保护措施，如停止机器运动或切断电源，以防止人员受伤。该标准适用于各种 ESPE 技术，包括 LiDAR、摄像头和雷达传感器。

1.1 电敏防护设备 (ESPE) 的监管需求

在欧盟 (EU) 机械指令中规定了一系列 C 类机器标准，以便这些机器能够在欧盟销售。请参阅要求提供 ESPE 保护的两项机械 C 类标准的示例：机器人和门。两者都提供了不同的安全规定方法，包括安全保护、安全传感器或扭矩限制。重点关注第一种方案，特别是这两项标准 (ISO 13855 和 EN 12978) 如何指向 IEC 61496 标准 (请参阅图 1-1)。自 2023 年 8 月起，ESPE 标准新增涵盖“雷达保护器件”(IEC TS 61496-5) 的新扩展项。

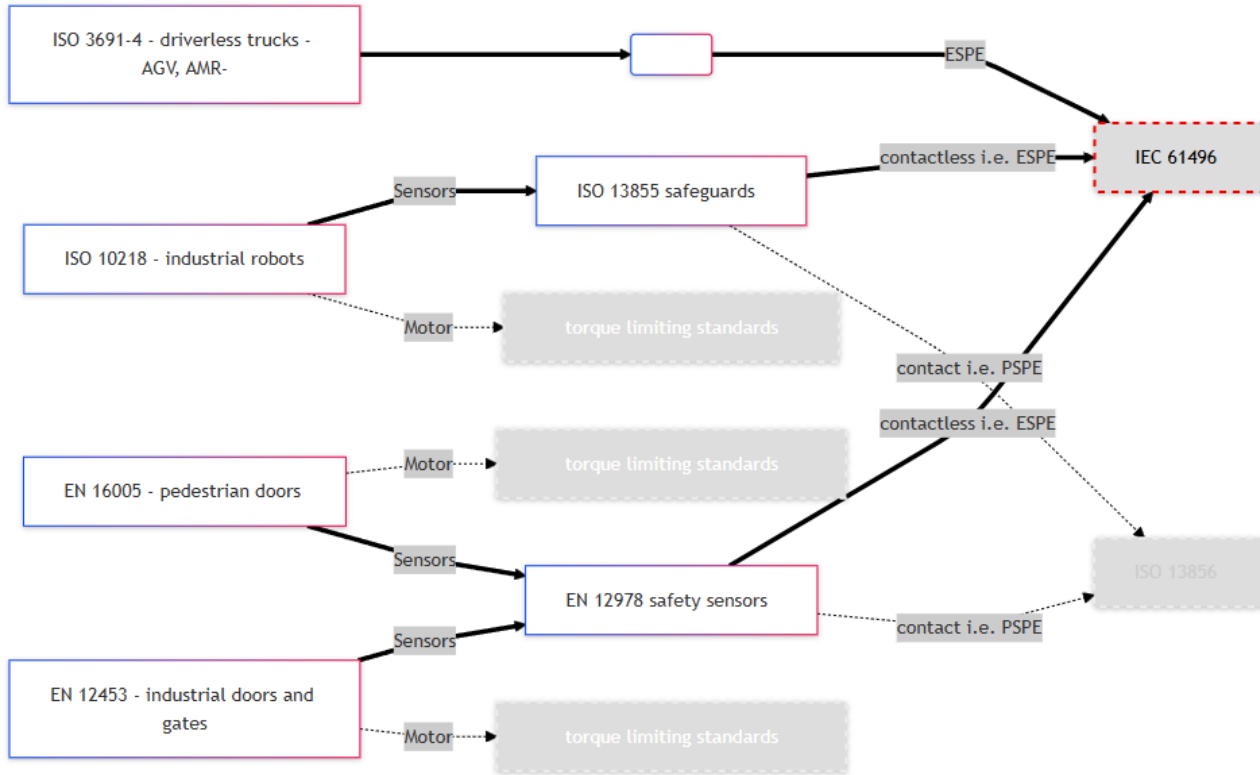


图 1-1. 安全标准的相互作用

1.2 不同类型的电敏防护设备 (ESPE)

IEC 61496 规定了电敏防护设备 (ESPE) 的标准，概述了确保在工业环境中安全操作的一般要求和特定传感技术。

IEC 61496 的结构：

- IEC 61496-1：本节提供了适用于所有类型 ESPE 的通用原则和性能要求，可作为安全设备设计和功能的基础框架。
- IEC 61496-2 到 5：这些部分重点介绍 ESPE 系统中使用的特定技术，分类如下：
 - IEC 61496-2：有源光电保护器件 (AOPD) — 利用光束进行检测。
 - IEC 61496-3：响应漫反射的有源光电保护器件 (AOPDDR) — 依靠光反射进行物体检测。
 - IEC TS 61496-4：基于视觉的保护器件 (VBPD) — 采用摄像头或图像处理技术进行区域监控。
 - IEC TS 61496-5：雷达保护器件 (RPD) — 使用雷达波检测物体是否存在和移动，是光学系统的可靠替代品

2 雷达传感器在工业应用中的优势

与其他类型的 ESPE 相比，雷达传感器具有多项优势，是固定和移动工业应用的理想选择：

- 环境稳健性：雷达传感器可在多尘、潮湿环境和极端温度下可靠运行。
- 材料穿透性：雷达能够检测到塑料或木材等非金属障碍物后方的物体，从而提高检测的可靠性。
- 远距离探测和高精确度：雷达传感器能有效地以高精确度探测到不同距离的物体。

- 抗环境干扰能力：雷达技术受阳光、雾气或反光表面等环境因素的影响较小，而这些因素会对其他类型的传感器造成损害。
- 多功能性：雷达传感器可部署在各种应用中，既可以保护固定机械，也可以确保 AGV 或 AMR 等移动设备的安全运行。3D 和对运动的高灵敏度可实现重启预防安全功能。

这些特点使雷达安全传感器成为极具吸引力的解决方案，有助于各行业在提高安全性的同时保持运行效率。

前三种传感技术 (AOPD、AOPDDR 和 VBPD) 依赖于光学原理，因此容易受到环境因素的影响而降低性能。其中包括：

- 太阳眩光：强烈的阳光会使传感器饱和，从而降低其有效性。
- 焊接电弧：快速出现的明亮闪光会使光学系统混乱或暂时失灵。
- 遮挡物：烟雾、灰尘颗粒 (如木屑、织物纤维) 和其他空气传播物质会散射或遮挡光线，影响探测精度。

任何对一种光学传感器产生不利影响的环境条件都会影响所有基于光学的技术，因为它们都依赖于光线。在这种情况下，IEC TS 61496-5 中定义的雷达保护器件 (RPD) 提供了一种可靠的替代方案。雷达系统的运行不受视觉条件的影响，因此非常适合光学传感器可能失效的严苛环境。

除了这些雷达普遍具有的特点之外，TI 毫米波雷达传感器结合了调频连续波 (FMCW) 调制和多输入多输出 (MIMO) 天线模式，提供了一种独特的批量感知存在的能力。这种组合使雷达传感器不仅能检测到人员何时进入危险区域，还能检测到人员是否仍在危险区域内，而其他光学传感器可能难以提供这种传感器输出。

3 安全概念评估/分析

本特定安全概念评估和分析的重点是雷达传感部分。但是，为了满足电敏防护设备 (ESPE) 的要求，必须对其余模块做出假设。

本概念分析中使用的 IWR6843 器件包括用于三个发送器和四个接收器的整个毫米波模块和模拟基带信号链，以及客户可编程 MCU 和 DSP (请参阅图 3-1)。IWR6843 是一款符合功能安全标准的器件，专为功能安全应用而开发。安全文档有助于使 IEC 61508 功能安全系统设计符合 SIL 3 标准。

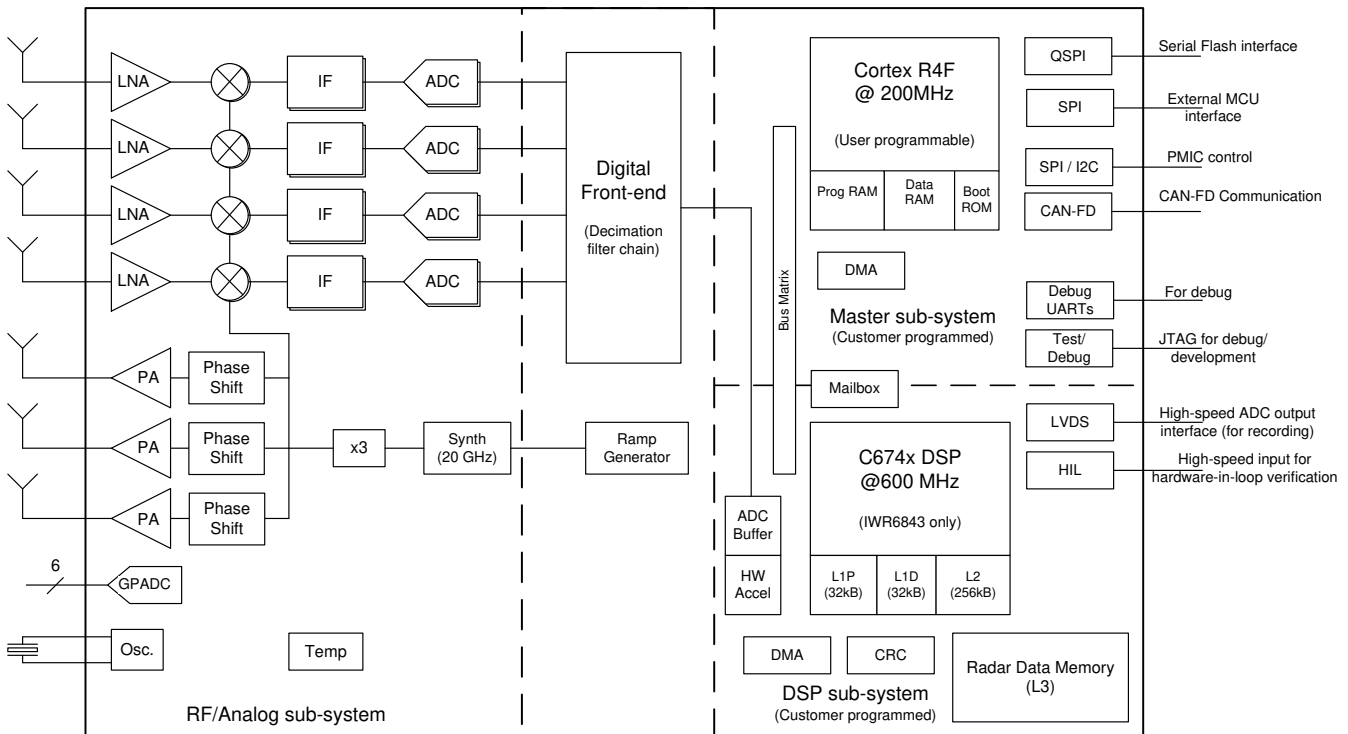


图 3-1. IWR6843 方框图

TI 提供了图 3-2 中所示的基本配套资料，这些资料是系统成功通过 FuSa 认证所必需的。基本 FuSa 配套资料仅在客户索取时通过[安全资源](#)向其披露。

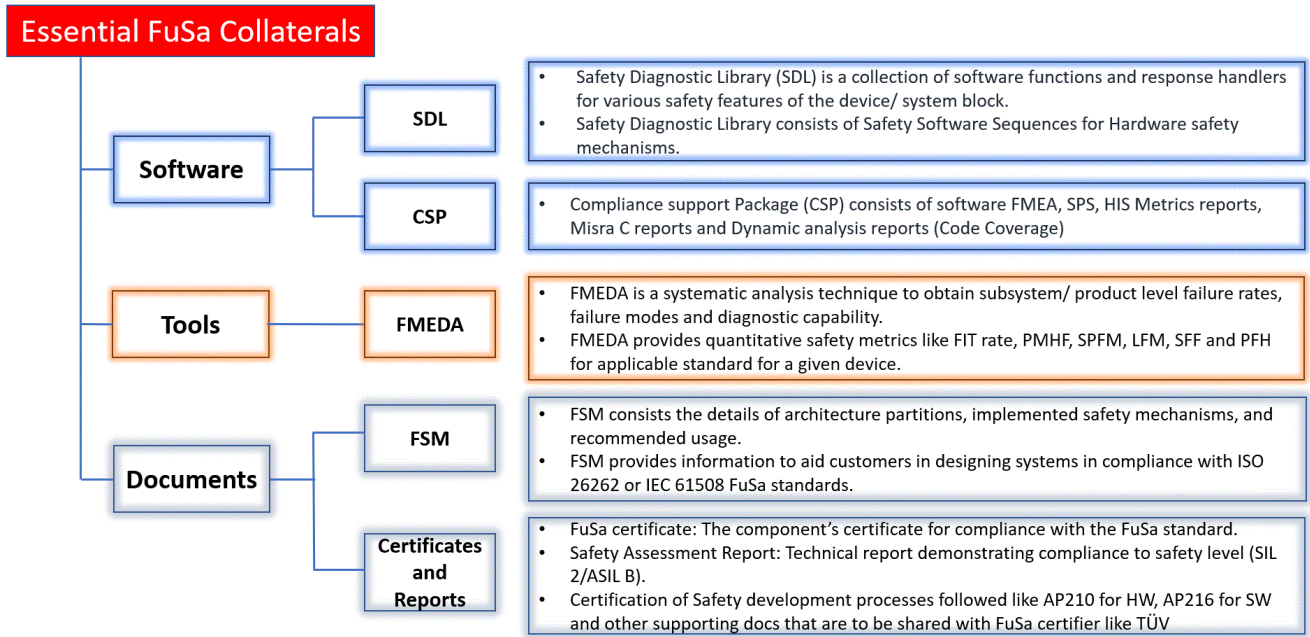


图 3-2. 基本 FuSa 配套资料

毫米波软件诊断库 (SDL) 是一个函数集合，用于访问 TI 毫米波传感器各种安全机制的安全功能和响应处理程序。这些功能有助于开发涉及功能安全的软件应用程序。毫米波 SDL 发布包包含合规性支持包 (CSP)。合规性支持包 (CSP) 是 TI 为客户提供的证据，用于证明软件组件是通过严格的功能安全软件开发流程开发而成。CSP 旨在帮助您完成对集成系统的认证工作。

所使用的 LP87745-Q1 PMIC 器件 (请参阅 图 3-3) 旨在满足各种工业雷达应用中 IWR 毫米波器件的电源管理要求。LP87745-Q1 是一款符合功能安全标准的器件，专为功能安全应用而开发。可提供辅助 IEC 61508 和 ISO 26262 标准认证的安全文档。

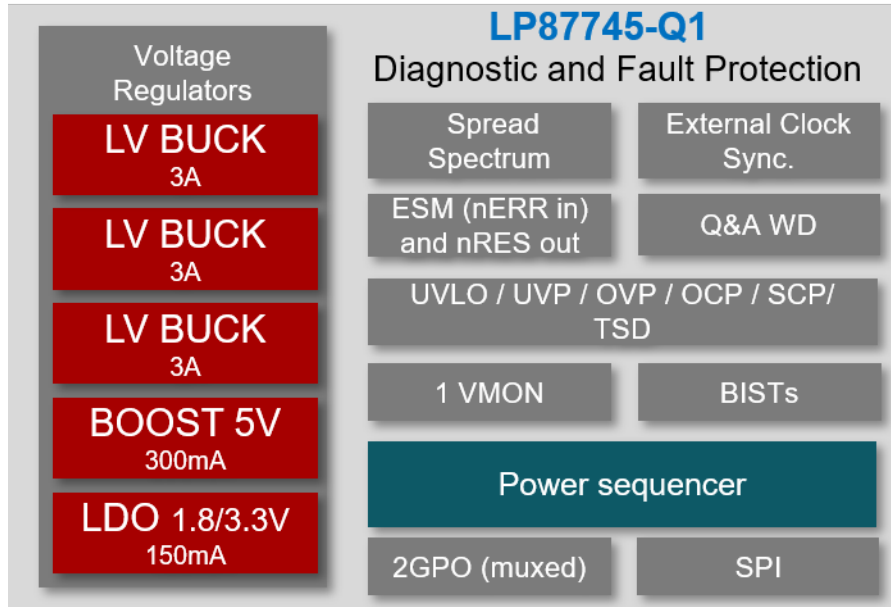


图 3-3. LP87745-Q1 方框图

3.1 系统要求

欧盟机械指令为机械安全奠定了基础，想在欧洲确保机械定位和操作安全的组织可将其作为起点。它为预防事故和促进工作场所安全提供了一种积极主动的方法。

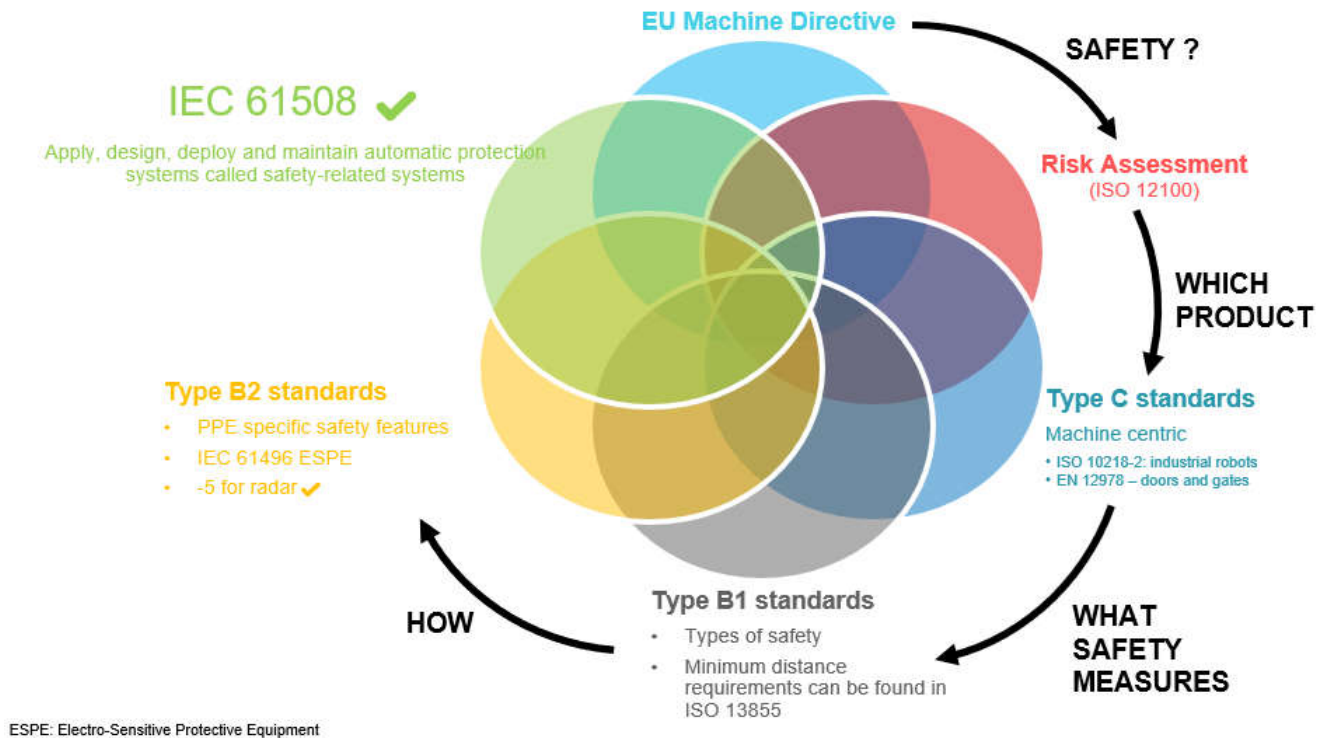


图 3-4. 欧洲的定位安全：从欧盟机械指令开始

3.1.1 固定用例

由于使用高速、重负载和锋利的工具，工业机器人的运行通常会存在风险。确保这些机器人附近的人类操作员的安全至关重要。IEC 61496 是规范电敏防护设备 (ESPE) 设计和应用的国际标准，为使用安全传感器等器件实施的安全措施提供框架。

雷达传感器非常适合检测是否进入危险区域，提供可调的保护区。雷达传感器的放置位置应覆盖机器人的工作区域，确保监控到所有潜在的入口点。可以定义不同的区域，如 图 3-5 所示。

如果有人进入黄色警告区，系统会降低机器人的速度，在发出警告的同时使机器人能够继续运行。在指定的安全时间内，如果有人闯入红色危险区，系统会启动机器人紧急停止，以防止造成伤害。

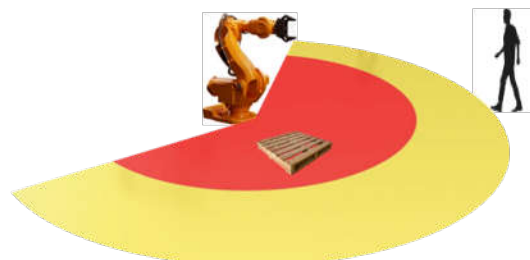


图 3-5. 工业机器人 (更安全的人员存在检测)

安全评估是设计工业机器人应用的关键步骤，尤其是在人类工人与机器人近距离接触的无防护环境中。下面是一个高度简化的安全评估和计算示例。对于此特定示例，考虑工业机器人的情况，并根据典型机械臂、速度、停止时间与典型人类工人的速度进行风险评估，为考虑的安全时间提供背景信息。

关键定义

- **停止区：**

机械臂达到其运动的最远距离时，机器人可能撞到人类的区域。

UR10 机械臂伸展距离：1.0m

-> 停止区：1.0m

- **减速区：**

机器人必须减速的区域，防止以最大速度移动的人类在机器人停止期间进入停止区域。

最大人类速度：3.6m/s (13km/h)

最坏情况下的停止时间：1,250ms (1.25 秒)

减速区必须大于 $3.6\text{m/s} * 1,250\text{ms} + 1\text{m} = 5.5\text{m}$

-> **目标减速区**：6.0m (向上取整以留有余量)。

- **安全时间计算**

安全时间是考虑系统反应延迟所需的余量。

安全时间约等于 (目标减速区域 - 最小减速区域) / 最大人类速度

$0.5\text{m}/3.6\text{m/s} = 138.9\text{ms}$

为了提供额外的安全余量，安全时间向上取整为 **100ms**，这看起来是一个切合实际的值。

这一简化的安全评估强调了在定义关键安全参数时了解机器人能力和人类因素的重要性。在此示例中，主要结果包括：

- **停止区**：1.0m

- **目标减速区**：

6.0m

- **安全时间**：

100ms

3.1.2 移动用例

对于移动用例，请考虑一个用于在仓库运输货物的自主移动机器人 (AMR) 举例。环境是动态的，工人经常四处走动。目标是在不影响机器人运行效率的前提下，防止碰撞并确保工人安全。可配置雷达传感器以创建多个检测区域。如 图 3-6 中所示，在黄色“减速区”内，它能检测到中等距离的物体或人员，从而提示 AMR 减速并发出视觉或听觉警报。在红色的“停止区”内，它会检测到距离较近的物体或人员，从而触发立即停止，以避免碰撞。

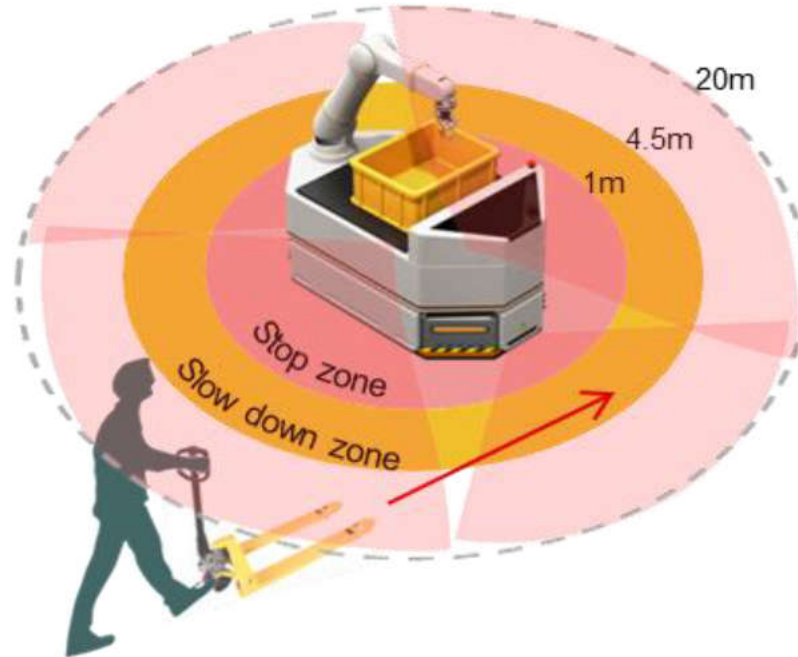


图 3-6. 移动机器人 (安全人员存在检测)

ISO 3691-4 标准规定了无人驾驶工业卡车 (包括 AMR) 的安全要求和验证。

根据 ISO 3691-4，在自主移动机器人的预定路径中检测人员的安全相关部分也应符合 IEC 61496 标准。

移动机器人应配备用于检测人员的 ESPE，根据 ISO 13849-1 标准，所要求的最低 PL 等级为 PL d。

3.2 传感架构的注意事项

本节探讨了各种传感架构的优缺点，为了解雷达安全传感器的系统级设计奠定基础。根据配置和设计方法对这些架构进行分类。

3.2.1 系统级架构

3.2.1.1 具有空间分集的双静态

在此设置中，两个不同的传感器在物理上是分开的，感应区域由其各自视场的重叠部分确定。其主要优点是可以尽可能减少依赖性故障注入器 (DFI)，而主要缺点是成本最高且安装复杂。

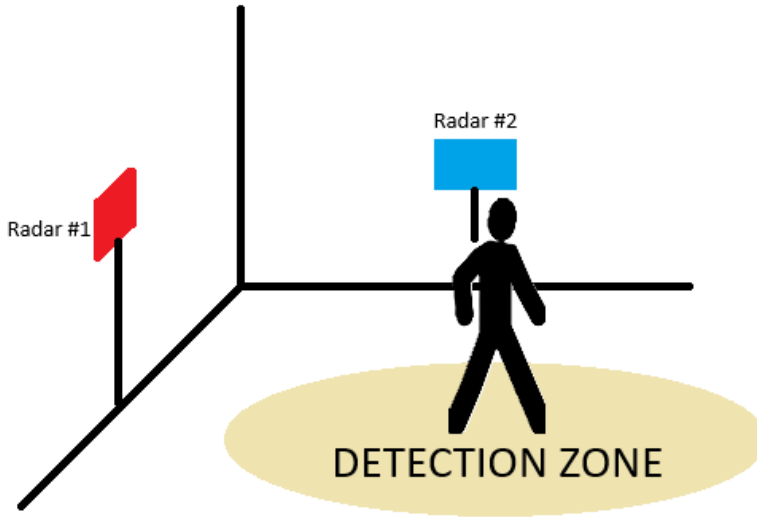


图 3-7. 具有空间分集的双静态设置

3.2.1.2 共置双静态 (两个传感器产品)

两个雷达传感器置于同一物理位置，形成重叠的视场。由于两个传感器安装在一起，因此降低了安装成本。但与单静态配置相比，硬件成本仍然较高。

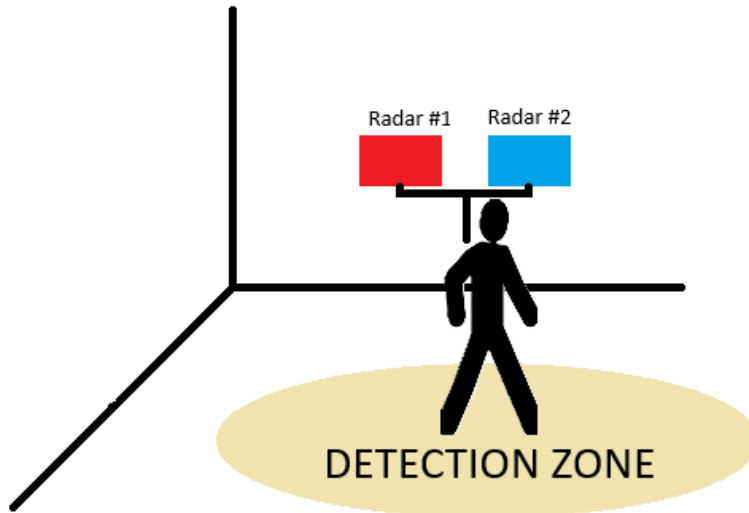


图 3-8. 共置双静态设置 (两个传感器产品)

具有耦合效应的环境因素（如支撑结构的机械振动）会增加新的依赖性故障注入器 (DFI)。一种缓解策略是使用信噪比 (SNR) 测量或板载振动传感器来检测和管理由振动引起的故障。

3.2.1.3 共置双静态 (单传感器产品, 双 IWR6843)

一个雷达传感器包含两个集成的 IWR6843 雷达芯片。

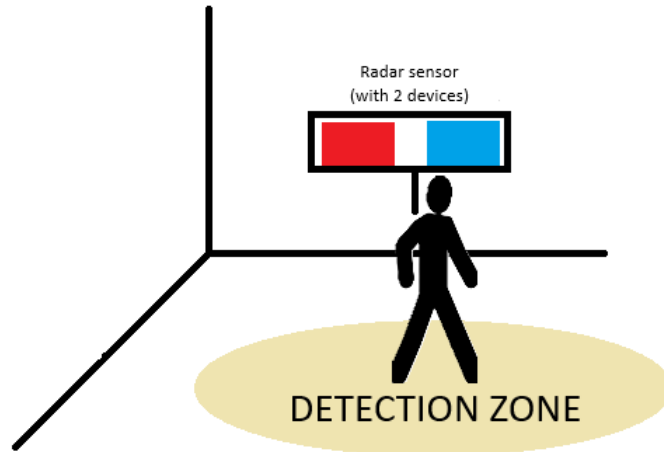


图 3-9. 共置双静态设置

单一产品可以降低采购和部署难度。但由于采用双芯片配置，物料清单 (BoM) 成本较高。

新的依赖性故障注入器 (DFI) 可能是共享电源资源故障（例如，影响两个芯片的电源问题）。一种缓解策略是确保雷达传感器在断电时进入安全状态。

3.2.1.4 单静态 (单传感器产品, 单 IWR6843)

单个雷达传感器使用一个 IWR6843 芯片，作为单静态雷达系统运行。这是一种对硬件要求很低、成本效益很高的解决方案。

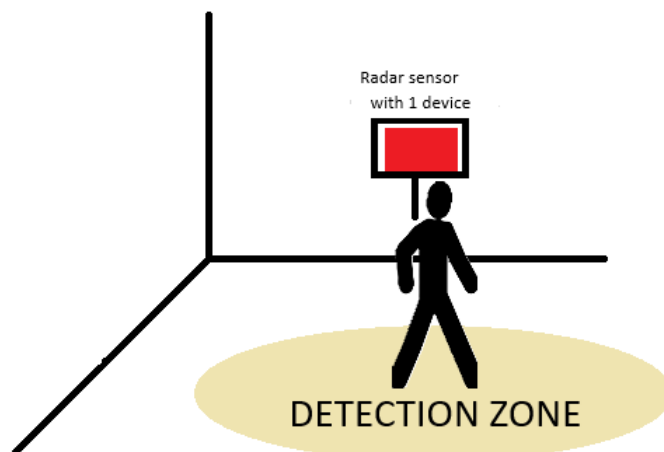


图 3-10. 单静态设置

但是，由于采用单传感器设计，该解决方案存在视场覆盖范围有限的缺点。在使用单一器件时，管理安全诊断与功能代码之间的交互也更加复杂。

3.2.1.5 总结

每种传感架构都有各自独有的优缺点。配置的选择取决于具体的应用要求，同时还要兼顾成本、复杂性、视场覆盖范围和容错等权衡因素。了解这些权衡因素对于设计稳健有效的雷达安全系统至关重要。

在接下来的几节中，我们将重点介绍单静态架构（单传感器产品，单 IWR6843），因为其记录了雷达级别的完整测量集。

3.2.2 潜在故障监测

从安全架构来看，一个关键的注意事项是考虑 IEC 61496 的要求。IEC TS 61496-5 强制实施 3 类 ESPE，IEC 61496-1 使用以下措辞定义了 3 类 ESPE：

“在未检测到不会导致 RPD 危险故障的单个故障的情况下，RPD 内部发生的其他故障不应导致危险故障。”

满足这一要求的传感器有多种架构方法，其中包括：

- SIL 2, HFT=1 (根据 61508)：对于 HFT=1，IEC 61508 规定“不得考虑其他措施 [...]，如诊断”
- CAT 3 (根据 ISO 13849) 规定“并非所有器件都必须在物理上冗余”
- CAT 2 (根据 ISO 13849)，具有诊断功能的诊断结果

由于具有传感元件物理冗余的第一种方案与之前称为“共置双稳态”的方案等效，因此本白皮书未涵盖此方案。

接下来的几节将讨论另外两种方案，这些方案强调和利用传感器级的冗余和多通道，并利用监测和故障注入功能。

请注意，截至撰写本白皮书时，安全手册中描述的器件级安全机制的某些方面仍受保密协议约束，因此未在本文中阐述。

3.3 传感器级架构

固定和移动用例所需的性能级别均为 Pld。根据 ISO 13849-1 标准的定义，PLd 可通过使用 2 类 (Cat 2) 或 3 类 (Cat 3) 架构 (请参阅图 3-9) 来实现。

ISO 13849-1 标准中的“类别”定义了抗故障能力。对于 Cat 2，这将是单通道加诊断，如图 3-11 中所示。对于 Cat 3，这将是双通道加诊断架构，并且不累积故障。

指定的架构不能仅被视为电路图，也应视为逻辑图。对于 3 类，这意味着不一定所有器件均具有物理冗余，但可以通过冗余方法确保故障不会导致安全功能丧失。对第 3 类结构的主要相关理解是，每个单一故障都不会导致安全功能丧失。可以接受在故障情况下转入安全状态。因此，对于失效防护应用而言，单故障容错的要求并不一定意味着必须实现双通道系统。此外，具有高标准监控的单通道系统也可满足 Cat 3 的要求，该系统可通过专用停用路径对故障做出足够快的响应，以避免进入危险状态。

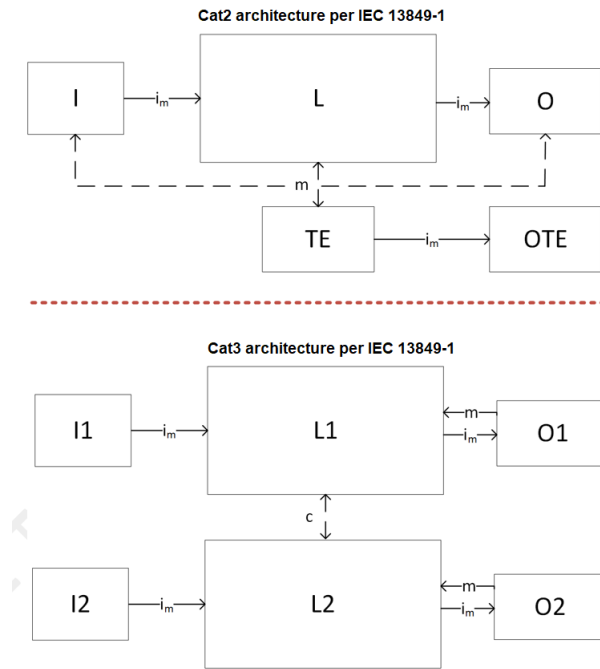


图 3-11. 符合 IEC 13849-1 标准的 2 类和 3 类的指定架构

在传感器级别，PLd 有两种可能的主要架构：

- 逻辑双通道方法，利用 IWR6843 独特的硬件架构，结合安全 PMIC LP87745，可以实现 CAT 3
- 软件多样性方法和更高的诊断功能，结合安全 PMIC LP87745，至少可以实现 CAT 2

3.3.1 CAT 2 的传感器级架构

诊断是在安全环境中需要考虑的一个重要方面。TI 的毫米波器件包括硬件和固件元件，可对其模拟和数字部分进行诊断。这些内置功能通过固件 API 向用户公开。这有助于用户构建其软件来编程和使用这些 API，以实现其最终产品的安全目标。提供了一个安全诊断库 (SDL)，用于访问这些内置诊断和监控功能。

在功能模式下，当大于或等于检测能力 (如 IEC 61496 相关部分所规定) 的人体部位进入或处于检测区域时，ESPE 应发出适当的输出信号进行响应。

在诊断模式下，IWR6843 使用诊断功能测试信号链。在诊断模式期间，OSSD 保持与之前传感模式相同的状态。[图 3-12](#) 显示诊断活动调度的两个选项。

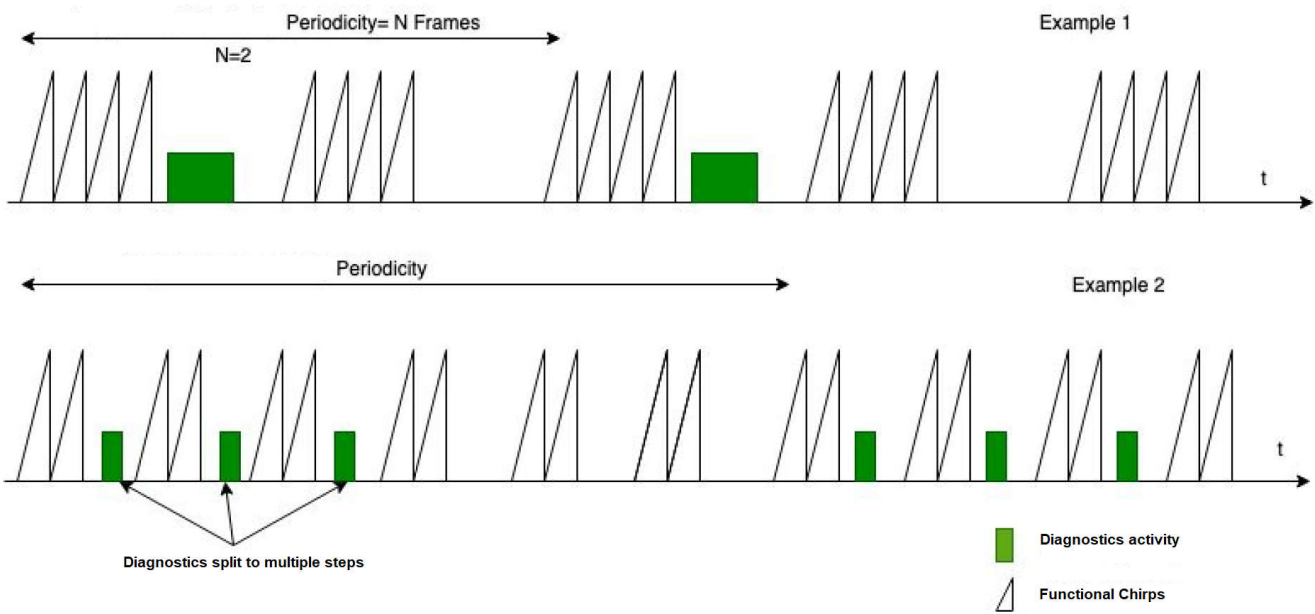
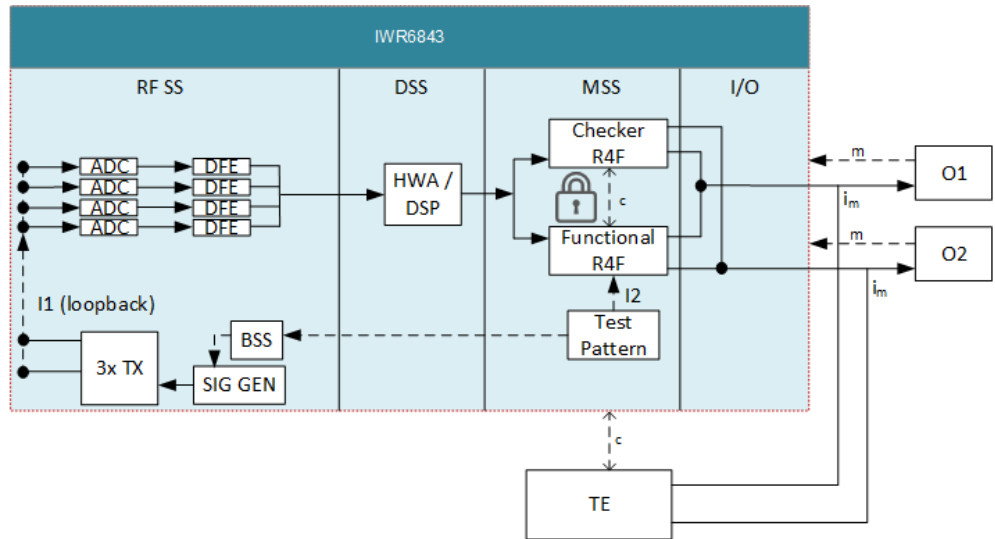


图 3-12. 诊断调度

除了诊断和监控功能之外，IWR6843 还可以进入环回模式。当没有正在进行功能线性调频脉冲时，BSS 可以安排环回测试数据 (I1) 收集。然后将处理后的输入数据 I1 与来自 R4F 锁步内核的输入 I2 (存储器中的查找表) 进行比较 (请参阅图 3-13)。



Key
 i_m interconnecting means
 c cross monitoring
 $I1, I2$ input device, e.g. sensor
 The dashed lines represent reasonably practicable fault detection.
 TE Test Equipment
 DFE Digital Front End
 HWA Hardware Accelerator
 DSP Digital Signal Processor
 L1, L2 logic
 m monitoring
 O1, O2 output device, e.g. main contactor or drive system

图 3-13. Cat 2 架构的概念方框图

为确保电源输出功率轨处于所需的电压范围内，需要对电源进行电压监控。图 3-14 显示如何使用外部电压监控器和集成在 PMIC 中的 Q&A 看门狗来实现此功能。需要使用此 Q&A 看门狗来监控 IWR6843 的功能。1.0V 电源轨可通过内部 ADC 进行测量和监控，因为此电源轨是独立的，仅用于功率放大器、低噪声放大器和混频器。

在此概念中，所选的 PMIC 为 LP87745，可选的电压监控器为 TPS3703。值得一提的是，所有这些器件都有安全手册和其他安全文档。

MSS 处理器通过消息与 DSS 通信（请参阅图 3-14）。运行主软件应用的 MSS 通过 SPI 向 LP87745 更新 Q&A 看门狗计时器。

其还会从 PMIC 检查 nERROR 信号。如果软件周期过长或出现 nERROR 信号，则 LP87745 会触发 PMIC_nINT 信号，使输出进入安全状态。

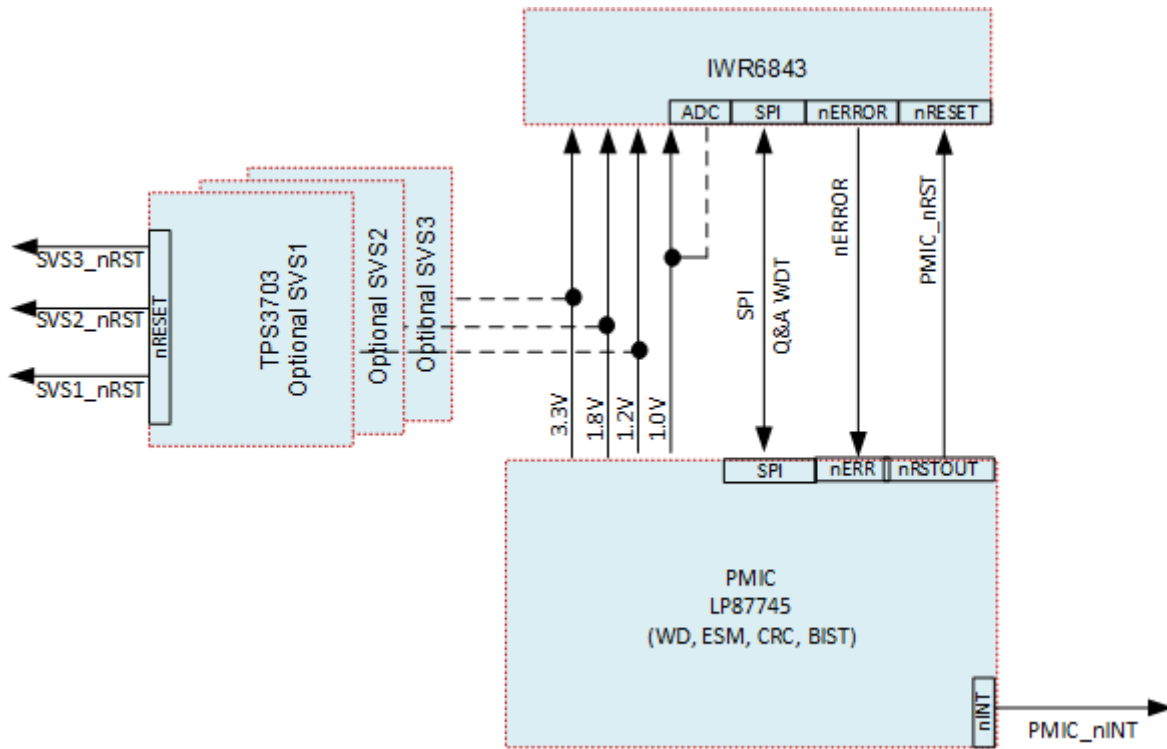


图 3-14. 电源和外部测试设备 (TE)

3.3.2 Cat 3 的传感器级架构

除了上述 Cat 2 架构的内置监控和诊断功能以及外部测试设备监控功能外，IWR6843 还可在 Cat 3 架构中实施逻辑冗余处理链，如 图 3-15 所示。

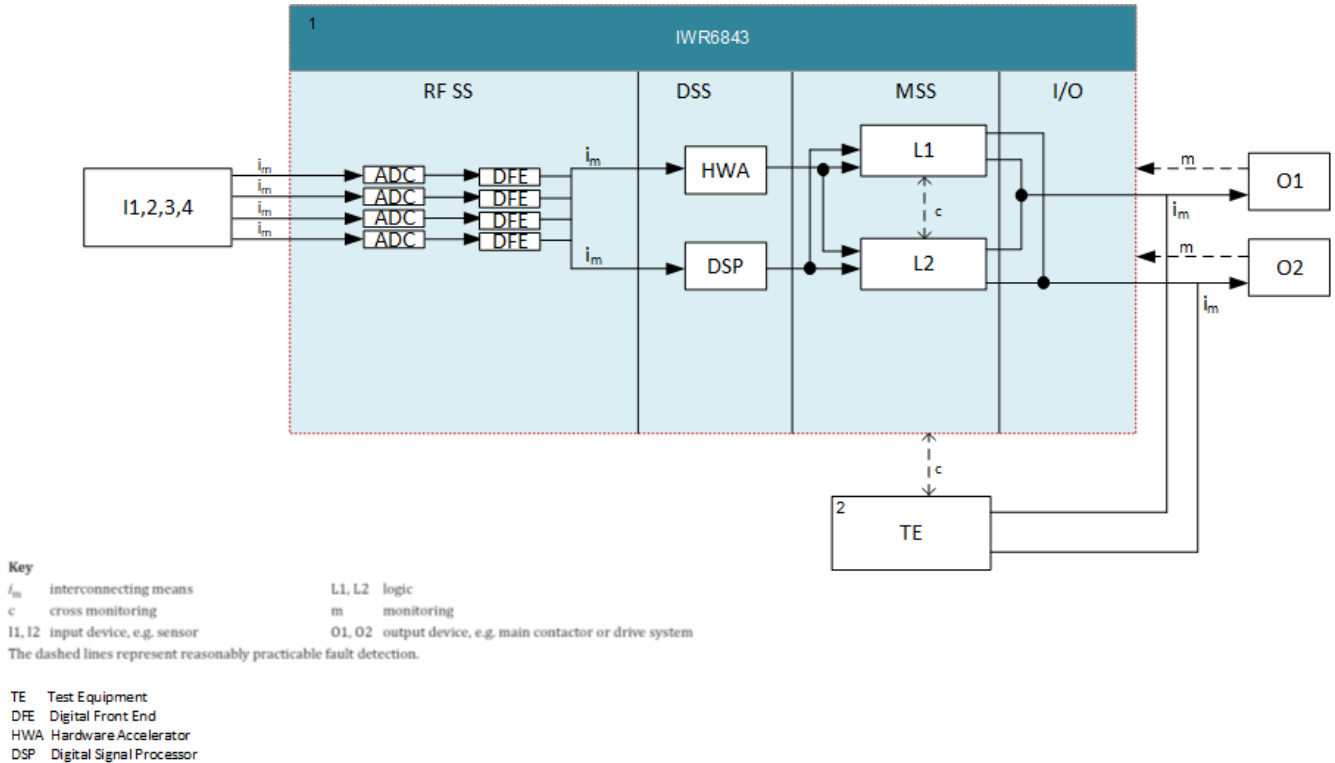


图 3-15. Cat 3 架构的概念方框图

IWR6843 器件提供不同的处理节点来实现雷达处理。IWR6843 有两个处理节点，即硬件加速器 (HWA) 和数字信号处理器 (DSP)。从 HWA 和 DSP 最多可处理四个不同的输入信号。对于 Cat 3，毫米波检测处理链可同时使用这两个节点，并对计算结果进行交叉检查。交叉检查将由可在锁步模式下运行的 R4F 内核执行。应使用两个不同的任务处理来自 HWA 和 DSP 的数据。然后将任务 1 和任务 2 的结果进行比较。如果出现不匹配之处，则应向 PMIC 发出错误信号，并将输出置于安全状态。

目前，毫米波软件开发工具包 (SDK) 和雷达工具箱等软件交付物均未实现和支持这种针对 Cat 3 的冗余处理。因此，这种软件架构必须由客户实现。

4 IEC TS 61496-5 功能测试结果

IEC TS 61496-5:2023 是为使用雷达保护器件 (RPD) 的安全相关系统制定的新安全标准，该系统使用调频连续波 (FMCW) 传输来检测是否有人。该标准定义了一系列功能测试，以确保在指定条件下传感器功能正常和检测完整性。标准中列出的测试包括但不限于：

- 检测功能
- 响应时间
- 位置精度
- 其他 RPD 共存
- 检测区域内物体的干扰
- 检测区域外物体的干扰
- 人为干扰
- 来自其他无线电来源的干扰

可在[雷达工具箱](#)中查看有关已执行测试和结果的详细信息。

5 其他注意事项

5.1 振动

需要考虑的一个要点是振动对检测能力的影响，此内容超出本文档涵盖的范围。如果不对传感器的振动进行补偿，则会向所有目标添加一个多普勒偏移，相当于振动矢量的径向分量。这可能会导致目标显示为静态或静态目标显示为移动。应专门针对这种情况进行安全评估。

解决这一问题的可能方法是以下之一：

- 在印刷电路板上安装加速度计，提供振动估值
- 用于振动估值的背景场景分析

以下是与这些主题相关的部分文献参考：

- F. Hau, F. Baumgärtner 和 M. Vossiek, "Influence of vibrations on the signals of automotive integrated radar sensors", 2017 年 *IEEE MTT-S International Conference on Microwaves for Intelligent Mobility (ICMIM)*, 日本名古屋, 2017 年, 第 159-162 页, doi: 10.1109/ICMIM.2017.7918881
- (Poole 等人, 2022 年, 第 183 页) 图 2. Diagram of the frame-level correction/deconvolution algorithm at the core of the proposed real-time vibration compensation scheme

5.2 时钟

IWR6843 的器件特定数据表规定，晶体频率容差应为 $\pm 50\text{ppm}$ ，这些容差包括初始频率容差、温度老化漂移和因负载电容不正确而导致的频率拉动。

如果上述任何一项的实际故障可能导致晶体漂移超过 $\pm 50\text{ppm}$ ，则应注意，IWR6843 中唯一的独立时钟监控器是 RCOSC，它只能提供百分之几的精度诊断。有关更多信息，请参阅 [IWR6843、IWR6443 单芯片 60 至 64GHz 毫米波传感器数据表](#) 中的 [监控和诊断机制](#) 部分。因此，应考虑使用外部监控器，其中一种选择是在引脚 N7 (MCU_CLK_OUT) 上输出高于 20MHz 时钟的输出时钟，以避免 IF 频段出现杂散（而不是 A14 上的 OSC_CLK_OUT，因为 OSC_CLK_OUT 只监控切片输出，而不是整个时钟树）。一个简单的 MCU 配备精心挑选的额外晶体（用于实现双计数器），就能帮助实现这一目标。

6 结语

德州仪器 (TI) 的安全毫米波雷达传感器提供先进的解决方案，可在动态环境中保护人员安全并确保工业机器人及移动机器人的安全操作。它们能够适应不断变化的条件并可靠地检测出潜在危险，因此在现代工业环境中不可或缺。这些系统遵循 IEC 61496 标准，既安全又高效，促进了和谐的人机协作。

7 参考资料

德州仪器 (TI) 安全配套资料涵盖了广泛的主题，包括：

1. [雷达功能安全使能器](#)
2. 德州仪器 (TI)：TUEV 证书，表明以下各项可以用于安全应用：[IWRxx43 TUV SUD 功能安全证书](#)
3. 安全文档（例如，FMEDA、安全手册）。如需获取这些文件，请联系您的 TI 销售代表。
4. 软件诊断库 (SDL)：
 - 可联系您当地的 TI 销售代表获取毫米波软件诊断库
 - 诊断和监控实验室说明如何利用毫米波软件诊断库 (SDL)：https://dev.ti.com/tirex/explore/node?node=A__ANWVDLrVeqRU8HDYJZ-Q8w__radar_toolbox__1AsIXXD__LATEST
5. 编译器、链接器和编译器资格认证工具包 (cq_kit) 中的其他工具
6. 有助于加快上市的第三方产品：
 - a. 安全 RTOS，例如来自 WHIS 的产品
 - i. [WITTENSTEIN High Integrity Systems](#)
 - b. 根据保密协议提供的免费 RTOS 可让您更轻松过渡到经过安全认证的 RTOS，例如安全 RTOS。
7. 应用支持及上述各项的安全相关示例用法：
 - a. 诊断监控参考，为所有示例提供 SDL 之上的封装器示例
 - b. 61496-5 功能安全测试
 - i. https://dev.ti.com/tirex/explore/node?node=A__AAORdOaF-chtRs1PKEV2xQ__radar_toolbox__1AsIXXD__LATEST&search=61496
 - c. 在线研讨会：
 - i. [功能安全基础在线研讨会](#)
 - ii. [针对合规性和可靠性的安全软件策略](#)
 - iii. 德州仪器 (TI)：[实现毫米波传感器的功能安全](#)
8. 其他资源：
 - a. [毫米波传感器的功能安全](#)
 - b. 德州仪器 (TI)：[使用毫米波雷达传感器且符合功能安全标准的系统设计指南](#)
 - c. 德州仪器 (TI)：[TI 毫米波和 IEC 61496-5 功能测试](#)
 - d. 德州仪器 (TI)：[毫米波诊断和监控参考设计指南](#)

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