技术文章

ADI赋能工业PC解决方案——实现稳健的智能边缘计算

随着工业智能化与智能边缘计算技术快速演进，工业PC (IPC)作为智能边缘核心算力载体，广泛应用于工厂自动化、医疗设备等领域。一些应用场景对高清视频高速传输、宽输入范围稳定供电、系统鲁棒性与安全防护提出了严苛的技术指标。传统工业PC软硬件设计方案越来越难以满足行业对于高精度、高可靠性、小型化的发展需求。

工业计算设备（包括工业PC和平板电脑）能够提供所需的灵活性和集成度，打造柔性工厂和智能基础设施，并推动所有自动化领域的数字化转型。面向可持续人工智能与边缘计算的发展需求，ADI推出完整的工业PC解决方案。本文将围绕I/O接口、电源系统、数字内核三大核心要素展开介绍。

工业PC未来及应用类型

面向未来的自动化体系中，工业PC是不可或缺的组成部分，图1三张图形象展示了**工业PC三大核心价值：智能边缘、泛在自动化与高可靠计算**。作为硬件载体，它为人工智能与边缘处理提供灵活平台，带来全新业务洞察，打造智能边缘。凭借着互联能力与软件可配置特性，自动化能力得到了广泛部署，同时工业PC具备高可靠计算能力，满足了各类场景的定制化应用需求。



图1. 未来自动化与工业PC

工业PC涵盖独立面板式、箱式、机架安装式及嵌入式面板等多种形态，已在众多领域实现广泛的应用，如图2所示。不同行业也对设备提出差异化需求：基础设施应用依赖广泛的连接；工厂自动化需要高度可配置的能力；运动控制越来越依赖于AI；医疗健康领域对稳健性和安全性提出严格要求，以此保障人员与设备安全。

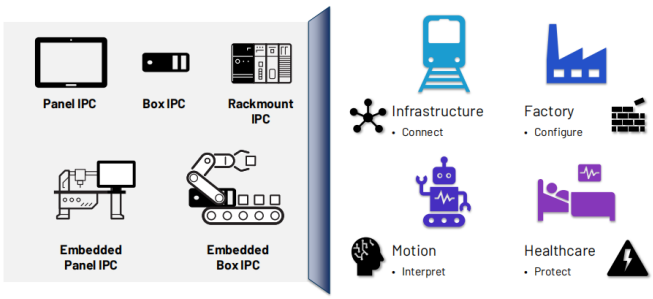


图2. 工业PC的应用

工业PC的信号链由三大要素组成，如图3所示，分别是I/O接口，电源系统和数字内核构成：

- **I/O接口：**面向无处不在的互联自动化，提供丰富的接口实现设备互联。接口覆盖以太网、RS 232/RS 485、USB、视频、模拟I/O和数字I/O；
- **电源系统：**赋能智能边缘。工业电源IC包括电源调节器、保护、状态监测和负载点电源POL (Point-of-Load)；
- **数字内核：**面向可持续人工智能与边缘计算，涵盖核心运算处理、安全加密防护、PCIe交换开关以及以太网交换机，这些为可持续AI与边缘计算提供底层数字硬件支撑。

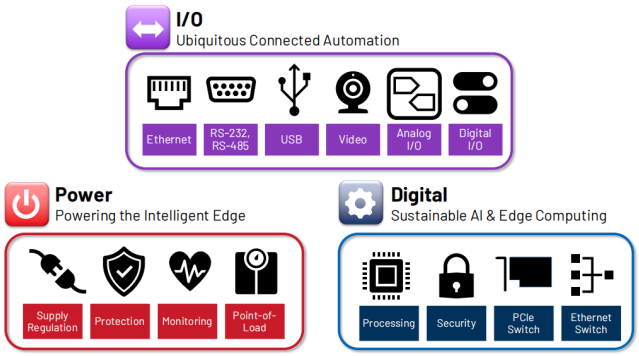


图3. 工业PC信号链的组成

自动化接口解决方案

连接是实现无处不在的自动化，也是改变世界的关键要素。工业PC需要同时兼容传统与新兴的各类连接解决方案，如图4所示。不仅需要UART、RS-232、RS-485接口适配大量外设设备，满足基础设施场景下现有终端与传统通信设备的接入需求，同时还需要支持USB2.0/USB3.x、CAN、以太网，满足设备本地诊断调试、软件与固件升级等运维需求。

除此之外，新一代互联方案进一步扩展了连接能力，包含单对以太网(Single-Pair Ethernet)、时间敏感网络TSN、数据供电(Power Over Data)以及无线连接(Wireless Connectivity)，全面覆盖多元化、高实时性的工业互联场景需求。



UARTs for RS-232, RS-485
USB 2.0, USB 3.x
CAN
Ethernet

Single-Pair Ethernet
Time-Sensitive Networking
Power Over Data
Wireless Connectivity



图4. 传统和新兴的连接方式

一、传统现场通信接口

医疗工业PC需要配置丰富接口，支撑各类外设与网络接入，如图5所示，其中绿色为以太网接口，蓝色为Video/GMSL（视频/千兆媒体串行链路接口），紫色为USB，UART接口。以太网实现本地访问、网络及云端服务对接；Video与GMSL接口适配远程显示器、摄像头；传统USB、UART接口兼容通用PC外设以及医疗诊断监测类专用设备。

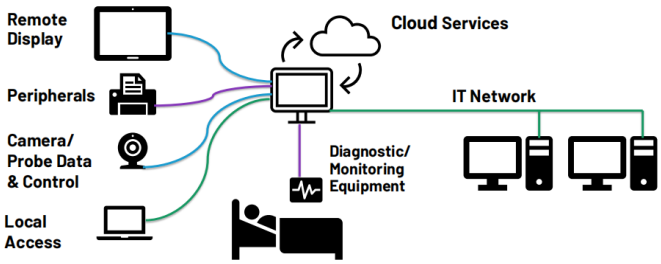


图5. 工业PC与医疗/PC的通信接口示意

对工业PC I/O端口实施电气隔离，可提升系统可靠性，图6示例了工业/医疗工业PC I/O端口电气隔离的作用与医疗设备隔离的标准要求。电气隔离通过阻断电流与危险电压实现人员与数据保护，同时保证信号正常传输；可有效抵御浪涌、ESD等瞬态电压，抑制电压偏移，降低电磁干扰影响。

在外设存在带电风险、工业PC接地或浮空的工况下，电气隔离可抑制噪声以电磁干扰的形式耦合进入电路，避免隔离后其余电路受到干扰。对于医疗健康这类特殊应用场景，设备需要满足IEC 60601 1:2005 Ed.3.0+A1+A2标准的防护要求，隔离器件需要管控漏电流，耐受除颤冲击、浪涌与ESD电压。

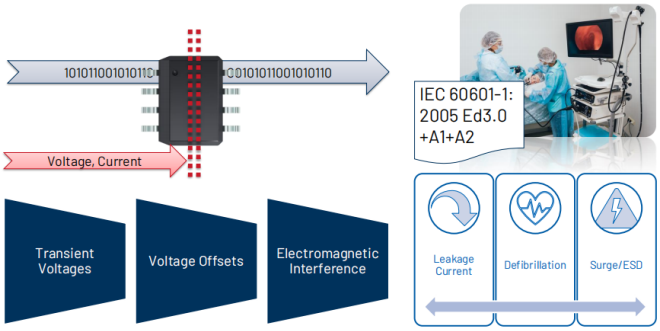


图6. 图示I/O端口隔离作用

ADI iCoupler数字隔离器（如ADUM341E）提供安全、高可靠的电气隔离解决方案，图7示例了数字隔离内部结构。该技术通过处理工艺在标准晶圆上集成芯片级平面变压器，在晶圆上方沉积额外的聚酰亚胺绝缘层，并搭配金线圈构成平面变压器初级线圈。次级线圈可由芯片顶层金属铝层实现，也可以在绝缘层工艺前额外制备金线圈，这使得iCoupler隔离可与各种特性结合。

该iCoupler®隔离技术将通信收发器与隔离DC-DC转换器集成于标准SOIC封装。片上平面变压器配合开关键控调制OOK (On-Off Keying)，实现隔离条件下双向数字信号传输。

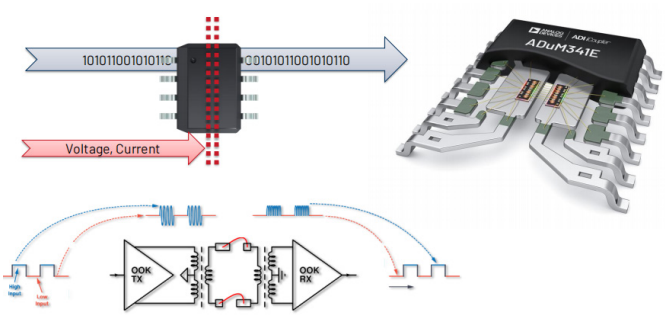


图7. I/O端口防护–iCoupler数字隔离器示例

ADI拥有数十年的连接创新经验，支持工业PC的各种接口需求，图8是ADI工业隔离总线接口产品线，覆盖RS232/485、隔离USB、隔离CAN、高抗扰隔离RS485。

- **非隔离RS 232/RS 485多协议收发器：**LTC2873，小型化，高集成度，单芯片引脚可切换RS 232 / RS 485 / RS 422；内置±26kV HBM高ESD防护；
- **隔离RS 485/RS 422收发器：**ADM2795E，5kVrms隔离，业界首款通过IEC Level4四级EMC浪涌认证，总线±42V故障耐压；无需外部TVS防护器件。该器件隔离收发器集成系统级ESD保护额外提供高压及浪涌防护，强化工业通信可靠性。
- **磁隔离USB2.0：**ADuM3166，iCoupler® 3.75kVrms磁隔离，实现USB2.0全速率隔离，支持480Mbps高速、12Mbps全速、1.5Mbps低速传输。该USB隔离器件兼具即插即用能力与电路防护能力，用于工业USB采集、仪器、工控电脑隔离。
- **隔离CAN/CAN FD收发器：**ADM3055E，5kVrms隔离，片内集成隔离isoPower隔离电源；支持CAN FD最高8Mbps，支持软件可控终端电阻、远程唤醒。提供配套评估工具，可借助Arduino规格板在现有网络中便捷测试。

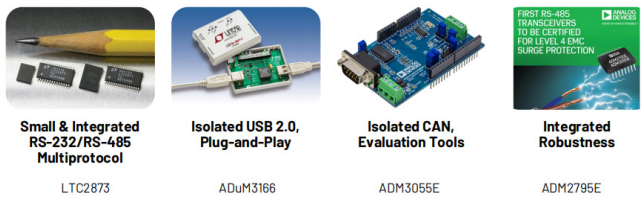


图8. ADI各类连接产品

二、工业以太网解决方案

如图9所示，传统的是基于RS-485、模拟I/O及IO-Link实现现场通信，当前架构正全面向工业以太网迭代。随着10BASE-T1L单对以太网技术落地，现场仪器可通过以太网交换机直连自动化控制器，省去了传统IO模块转接环节，简化了系统架构，这意味着工业PC也需要增强以太网功能，以适应未来的工业自动化。

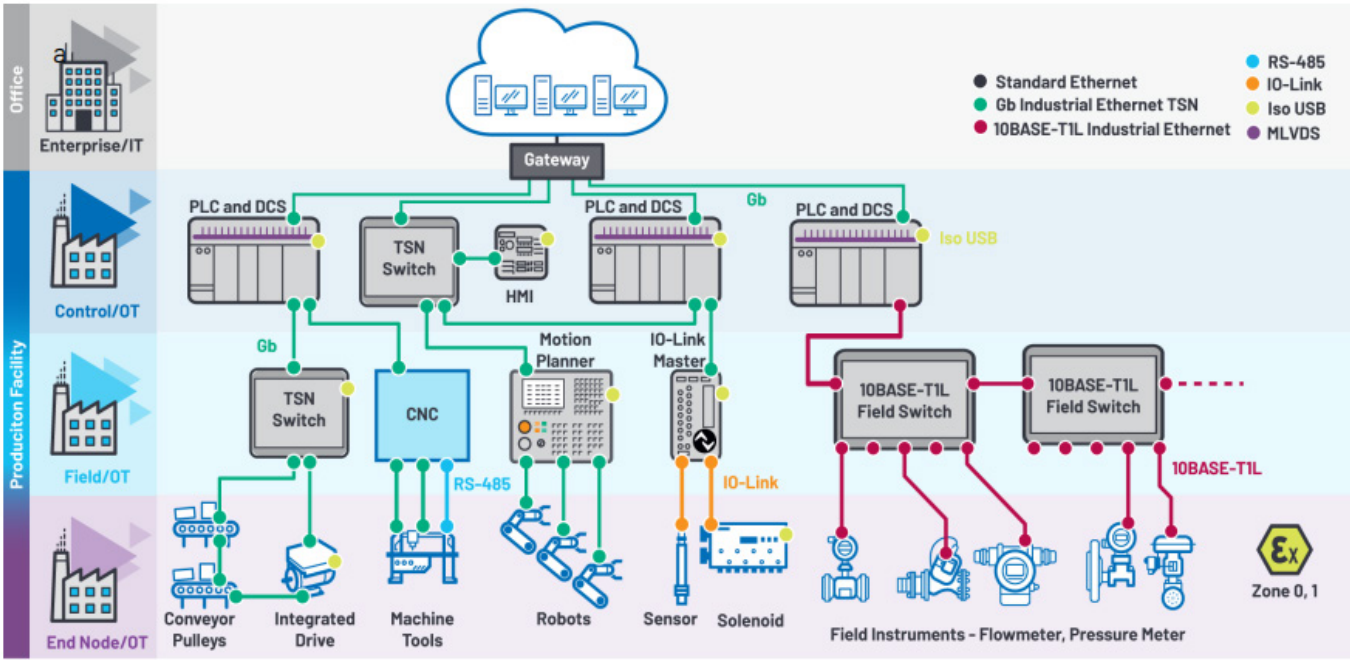


图9. 工厂自动化通信架构

以太网TSN交换机解决方案

“以太网至边缘”是一个完整的基于以太网的生态系统，从云端一直连接到现场设备。它依赖所谓的现场交换机或边缘交换机，可集成时间敏感网络并嵌入工业PC中。ADI新一代ADIN6310（如图10）工业时间敏感网络TSN交换机芯片，面向IEC/IEEE 60802工业自动化、IEC/IEEE 61850电力自动化标准，支持多套时间同步协议（IEEE 802.1AS、IEEE 1588）；支持Netconf/YANG网络配置管理；具备IEEE 802.1CB帧复制消除、HSR/PRP无缝故障转移等高可用冗余机制，同时支持安全启动Secure Boot，保障设备通信可靠性与固件安全。

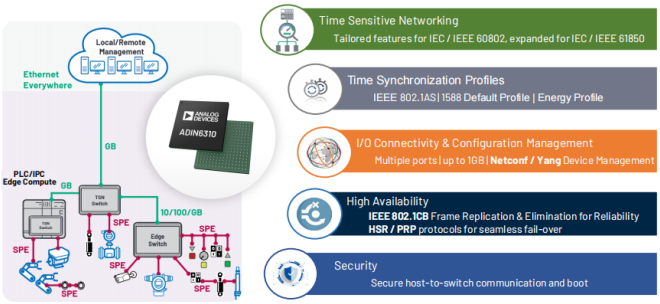


图10. ADIN6310工业以太网芯片方案

工业以太网PHY（物理层）解决方案

工业PC以太网端口需同其他接口一样具备高鲁棒性，以满足过程控制与工厂自动化应用，需兼顾EMC的稳健性与宽温度工作能力。紧凑型设备要求小尺寸封装和低功耗，以避免出现散热问题。而控制自动化对低延迟有明确需求，ADI ADIN1200（10/100速率）与千兆级ADIN1300以太网PHY，如图11所示，可实现低延迟传输，适配上述工业应用需求。

ADIN1200为百兆快速以太网物理层(PHY)芯片，5 mm×5 mm LFCSP-32，典型功耗139 mW，MII接口收发总延迟300 ns；

ADIN1300为千兆以太网PHY芯片，6 mm×6 mm LFCSP-40，典型功耗330 mW，RGMII接口收发总延迟290 ns。

两款器件均面向工业场景，兼顾低延迟、低功耗、小封装、宽温域、优异EMC鲁棒性。

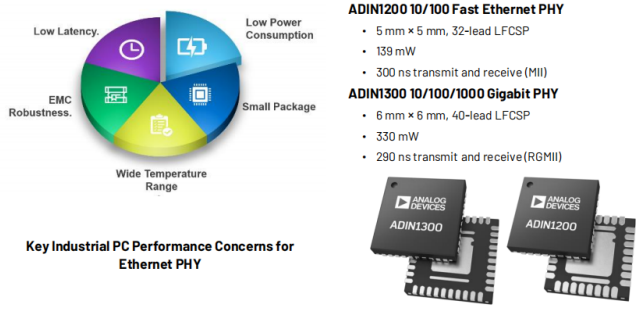


图11. ADI物理层芯片规格

三、工业输入输出I/O

面向工厂自动化的工业PC往往需要本机直接集成工业I/O，PCIe I/O卡正是实现该能力的主流硬件方案。该类设备需要支持4-20 mA电流环路。模拟输入输出需配置由ADC/DAC、开关、多路复用器、放大器及基准电压源构成模拟前端。流量计、压力传感器、温度测量仪器等现场仪器，需要接入电流或电压模拟输入和输出、热电偶2-3-4线RTD或数字输入和输出。

ADI提供更专用、更高集成度的解决方案，如图12所示，其中AD5755-1用于模拟输出，AD4111、AD7124-4面向模拟输入。

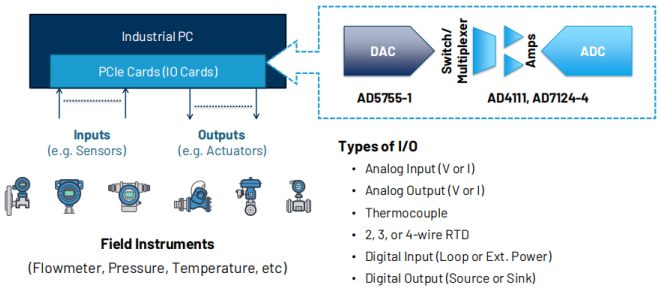


图12. 工业PC的I/O硬件框图

软件可配置工业I/O

如图13所示，针对工业设备多样化的I/O适配需求，ADI软件可配置I/O方案提供一站式支撑。AD74115H是一款SWIO软件可配置I/O，单颗IC集成了模拟前端、ADC、DAC及数字I/O开关，搭配一组外部元件即可支持多种连接。

该方案不仅能够全面提升系统运行性能，更具备显著的商业优势：可减少元件数量、降低装配成本、降低库存成本、提升通道密度；依托单一硬件设计实现多场景复用，大幅压缩研发测试与运维成本，同时显著提升整机系统的通道密度与集成度。

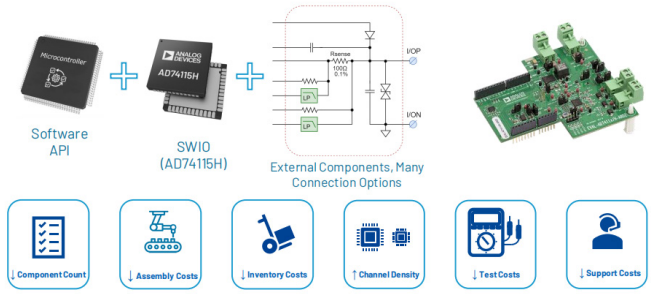


图13. ADI软件可配置I/O系统架构

四、高速视频SERDES接口（GMSL千兆多媒体串行链路）

图14是多芯线缆LVDS方案和单线缆MIPI CSI-2+SerDes方案。在医疗健康应用中，传统工业PC的视频接口方案已难以满足需求，在采用LVDS传感器接口方案中，尽管其传输距离数米，但线缆的衰减可能会将分辨率限制在1080p。针对搭载MIPI CSI-2接口的传感器，光纤隔离传输可有效优化信号传输性能，但4K+分辨率的传输距离可能受到严重限制，因此需要SerDes技术来延长传输距离。

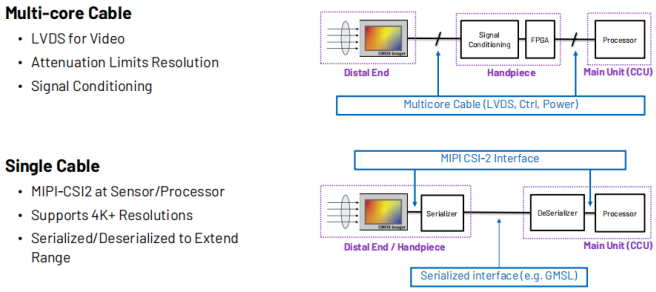


图14. 内窥镜视频传输架构对比

ADI GMSL技术

ADI千兆多媒体串行链路技术为高分辨率视频连接提供了简化的解决方案，图15分别展示了摄像头/传感器到处理器、处理器到显示器两类GMSL典型链路架构。该技术具备高度可配置的串行化和解串行化互连，通过单线同时传输实时数据、控制信号和电力。通信链路主要分为两类：一类是从摄像头或传感器到处理单元，例如工业PC；另一类链路是从处理单元到显示器。该技术已在汽车行业得到广泛应用，目前正被推广至其它多个市场。

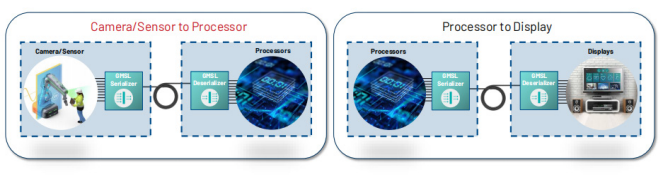


图15. GMSL串行链路应用架构

GMSL千兆多媒体串行链路凭借多项核心技术优势，为边缘AI与高级感知应用提供高效的解决方案，图16列出了四大优势：高效、高精度、可扩展、安全可靠。通过单根同轴电缆或双绞线可减少布线基础设施，并支持高达12Gbps的速率，视频控制信号和电力同时传输，拓扑结构支持传感器数据聚合和视频分路。GMSL可支持精密应用，GMSL2可适配800万像素的摄像头或4K显示屏，新一代GMSL3可支持1500万像素的摄像头和4K+显示屏。

GMSL具备优异的系统扩展性与兼容性，支持3Gbps、6Gbps、12Gbps多档位速率配置，且向后兼容前代GMSL。此外，实时链路诊断、数据完整性检查和实时自适应均衡等特性可确保安全性。同时，GMSL还满足严格的EMI/EMC要求，并具有符合ASIL B功能安全要求的选项。

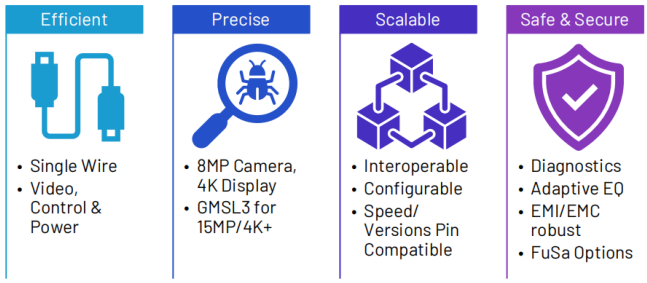


图16. GMSL技术优势

电源技术解决方案—赋能智能边缘

工业PC是一种灵活、多功能的硬件平台，涉及的电源种类较多，图17详细示例了需要的形态，涵盖保护元件、外设充电元件、多类型电压调节和转换元件、电源监控、监测功能以及LED驱动器等辅助元件，部分功能器件可整合集成到模块中。

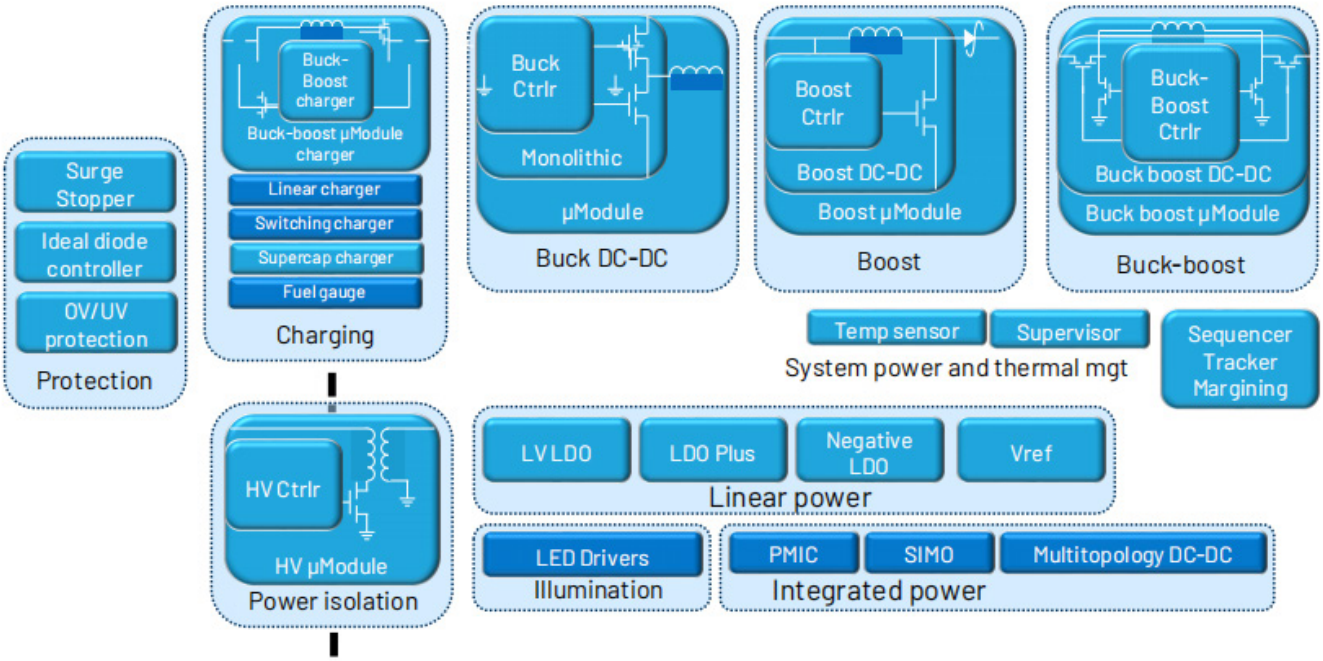


图17. 工业PC电源树器件框图

电源保护—反向保护和多路优先管理

图18所示了电源保护芯片LTC4357和多路电源优先级管理器LTC4417。电源保护芯片以防极性反接，避免损坏电源或负载。多路电源优先管理器芯片按照电源路径优先级排序管理电源，选择优先级最高的有效电源，并支持快速切换以避免出现反向电流，尽量减少输出电压降。

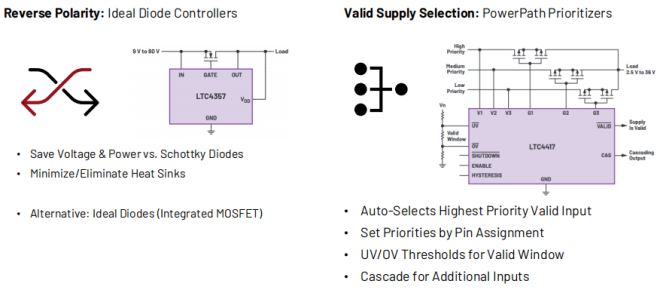


图18. 工业输入电源保护方案

电源保护—故障处理

工业PC及各类工业系统需抵御现场常见电源浪涌，维持设备持续可靠工作。传统的过压和过流保护依赖于电容、瞬态电压抑制器、TVS、保险丝、二极管和电感，此类解决方案一般体积庞大、不准确，且故障长时间存续时保险丝可能会熔断。

如图19所示，ADI保护控制器可阻断欠压-过压窗口之外的电压，具有1.5%精度的可调阈值。借助ADI的浪涌抑制器，系统可以在输入电压浪涌期间或负载变化时不间断运行；若故障持续存在，它会断开负载与电源的连接，该器件还可集成理想二极管控制器。

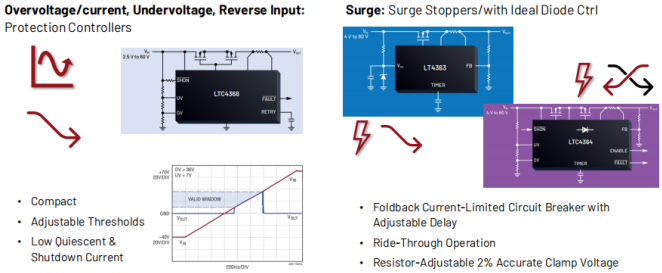


图19. 电源故障保护控制器

电源调节器

工业PC可依据场景需求适配多规格输入电压，常规工况下兼容9V至36V宽压输入，即使标称电压为12V或24V也可使用。对于电信和汽车应用，还需支持48V输入电压。设备供电可采用机架式工业电源集中供电，或通过AC-DC主电源转换器对独立的IPC供电。

图20示例了一款升降压调节器，无论输入电压高于或低于稳定输出电压，均可保障系统稳定工作。这种转换器效率高，可取代基于变压器的DC-DC拓扑方案，支持更宽的输入电压范围，在非隔离应用场景下还能进一步优化尺寸。

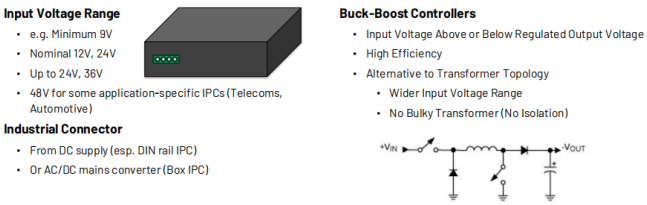


图20. 升降压调节器

图21是LTC3789和LT8390示例。其中LTC3789是高性能四开关升降压Buck-Boost调节器，最高输入电压40 V；器件采用单电感与单检测电阻设计，以节省空间并简化布局；单芯片最大输出功率可达150 W，支持多器件并联实现扩容，转换效率最高可达98%。

LT8390面向低EMI电磁兼容场景，采用峰值电流模式控制，最大输入电压60 V；可通过扩频调制或降频至150kHz来抑制电磁干扰。

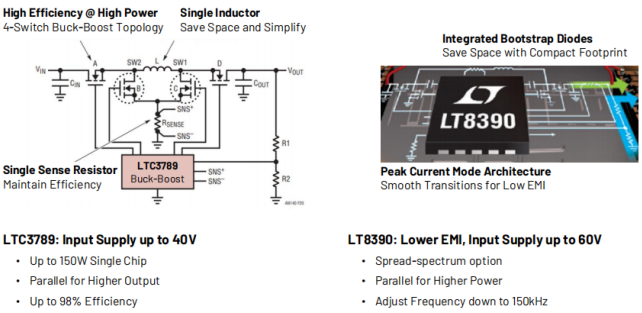


图21. 四开关升降压方案

工业PC处理器及PCIe板卡供电方案

针对PCI Express板卡上FPGA及数据采集模块的供电设计，仅依托LTC3789的高效升降压能力仍无法满足全部工程需求。ADI µModule电源系列可提供多元化集成供电配置，包括4开关降压-升压转换器和单输入电源。以LTM4712为例，如图22所示，其超薄µModule可以安装在PCB背面，可大幅优化板卡空间布局，既可为板载其他功能器件预留布局空间，也可直接缩减整体PCB面积。

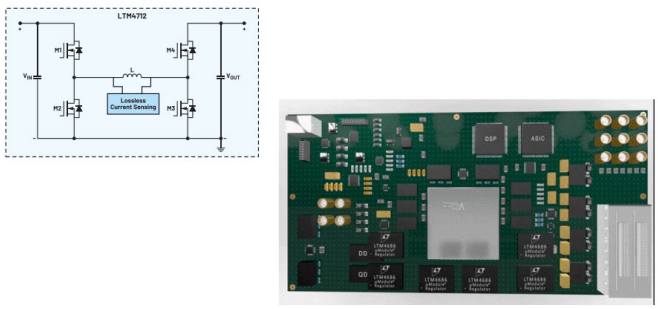


图22. 工业PC处理器及供电方案

处理器解决方案—赋能可持续人工智能与边缘计算

“智能边缘”已成为行业熟知的核心技术理念，如图23所示，ADI在现实与数字世界之间搭建互联桥梁，依托感知、解析、通信、学习、决策与执行的完整核心能力模块，ADI助力边缘端实现更高水平的自主性、可持续性、互联能力与安全性能，通过深度的客户合作、丰富的应用专业知识和先进的产品，打通模拟与数字的界限。



图23. ADI智能边缘应用场景

工业PC处理器

如图24所示，工业PC从x86处理器转向灵活ARM平台的过程中会遇到许多问题，软件面临首次迁移到Linux环境的需求，旧式外设需要新的驱动程序支持。同时，控制软件需要大幅优化迭代，以适应多核ARM处理。针对边缘AI算力需求，系统结合RISC-V架构的协处理器或增加专门负责DSP、GPU、MPU的核心，以满足AI任务的算力要求。

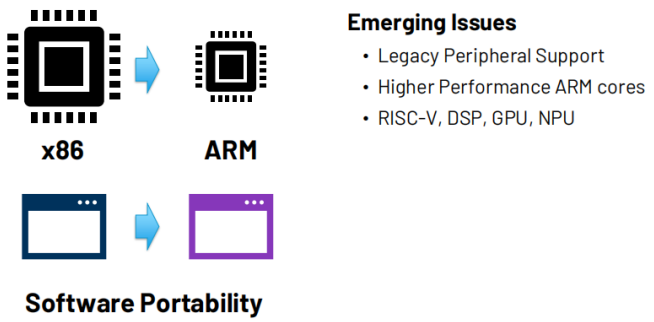


图24. 工业PC处理器

软件支持：CodeFusion Studio

ADI长期深耕硬件技术研发，为有效解决平台迁移过程中的各类软件适配难题，全新推出CodeFusion Studio一站式开发环境，全面适配全系模拟与数字技术产品。如图25所示，包含一个集成开发环境、配套软件开发套件与函数库、端到端安全工具等全套支撑工具，并提供完善的处理器适配支持，构建了完整、高效的软硬件协同开发体系。

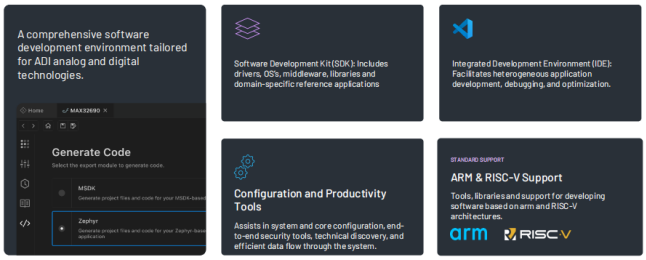


图25. CodeFusion Studio开发环境组成

基于ARM架构的微控制器及原型开发平台：AD-APARD32690-SL

在硬件开发层面，可依托AD-APARD32690-SL原型开发板，如图26所示，完成各类技术外设的驱动原型开发。该板卡配备适配性连接器，可直连多款ADI评估板，搭载MAX32690 ARM-Cortex-M4 MCU，包含加密支持和安全引导，具备硬件安全防护功能。其Zephyr的软件框架可用来开发不受硬件绑定的应用程序代码，以用于MAX32690系列中的其它MCU或其它ARM处理器。

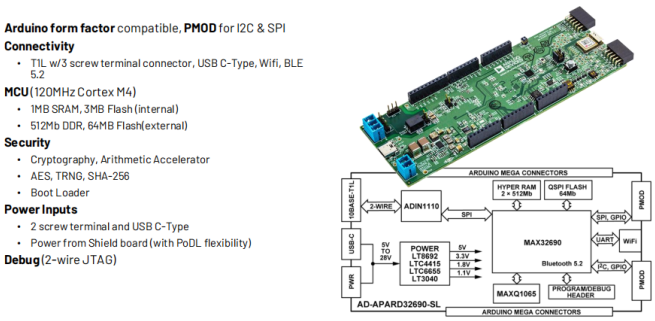


图26. AD APARD32690-SL原型开发板硬件规格与系统框图

结束语

工业PC作为智能边缘场景的核心，正面临接口多样化、宽域供电、高速视频传输、软硬件跨平台迁移等多重设计挑战。ADI依托完整的信号链产品矩阵，从传统隔离总线接口、工业TSN以太网、软件可配置工业I/O、GMSL高速SERDES，到全套电源保护与稳压方案，再到配套软件开发与原型硬件平台，覆盖工业PC从感知、互联到算力供电的全链路设计需求。

ADI助力开发者打造高性能、高稳健、可扩展的工业PC智能边缘计算方案，解决传统设计中的诸多痛点，为边缘感知与计算提供核心支撑，加速工厂自动化、医疗设备等多领域的智能化开发。

访问ADI在线支持社区，与ADI技术专家互动。提出您的棘手设计问题、浏览常见问题解答，或参与讨论。

ez.analog.com/cn

ADI EngineerZone™ 中文技术论坛

ANALOG DEVICES 超越一切可能™

analog.com/cn

如需了解区域总部、销售和分销商，或联系客户服务和技术支持，请访问analog.com/cn/contact。

©2026 Analog Devices, Inc. 保留所有权利。商标和注册商标属各自所有人所有。