

FPGA-TAS信号发生器与边缘控制器的协同设计及其在智能制造系统中的应用

李正国

杭州米坦智能技术有限公司 浙江 杭州 310000

摘要: 智能制造系统发展中, 信号精准生成与高效控制极为关键。分析智能制造系统对信号和控制的需求, 明确FPGA-TAS信号发生器需具备高精度信号输出能力, 边缘控制器要有快速决策与实时响应功能。通过搭建整体协同设计框架, 完成二者硬件架构设计, 并实现信号生成、控制算法以及通信协同等关键技术。将其应用于智能制造系统特定场景, 以系统稳定性提升、生产效率提高等为评估指标预期良好应用效果。该协同设计有效促进智能制造系统优化, 推动工业生产智能化、高效化发展。

关键词: FPGA-TAS信号发生器; 边缘控制器; 协同设计; 智能制造系统

1 引言

随着制造业向智能化迈进, 智能制造系统成为产业升级的关键驱动力。在这一背景下, 对信号处理和实时控制提出了前所未有的高要求。FPGA-TAS信号发生器凭借其灵活、高速的特性, 能够产生各类复杂且精准的信号, 为智能制造提供基础的信号支持。而边缘控制器则能在靠近数据源的位置快速处理数据, 实现对生产流程的高效调控。将两者协同设计并应用于智能制造系统, 可有效提升系统响应速度、增强控制精度, 满足智能制造对生产效率与质量的严格标准。因此, 深入研究二者协同设计及其在智能制造系统中的应用, 对推动制造业智能化转型, 提升工业生产水平具有重要的现实意义。

2 协同设计需求分析

2.1 智能制造系统对信号与控制的需求

智能制造系统涵盖生产设备自动化运行、生产流程精准调度等复杂环节。在设备运行方面, 需稳定、高精度的信号驱动, 如电机控制信号, 要求频率、相位精确, 以保障设备稳定运行、避免卡顿与误差。生产流程调度时, 不同设备协同作业依赖信号的实时传递与反馈, 实现工序紧密衔接。控制层面, 系统需快速响应外部指令与内部状态变化, 依据生产进度、产品质量反馈等动态调整控制策略, 保证生产高效、产品质量达标, 满足智能制造柔性生产、快速迭代的需求。

2.2 FPGA-TAS信号发生器功能需求

为契合智能制造系统, FPGA-TAS信号发生器需具备多方面功能。一是高灵活性, 能依据不同生产场景与设备需求, 灵活生成正弦波、方波、锯齿波等多种类型信号, 满足多样化设备驱动^[1]。二是高精度, 输出信号的

频率、幅度、相位等参数误差极小, 像在精密加工设备中, 精确的信号可保障加工精度。三是快速切换能力, 智能制造常涉及多工序切换, 信号发生器需在短时间内完成不同信号模式、参数切换, 确保生产流程无缝衔接, 不延误生产进度。

2.3 边缘控制器功能需求

边缘控制器在智能制造中承担关键任务。首先要有强大的实时数据处理能力, 快速分析传感器采集的海量生产数据, 及时提取关键信息, 如设备运行状态、产品质量数据等。其次, 具备高效的决策能力, 依据数据处理结果, 迅速做出控制决策, 如调整设备运行参数、启停设备等。再者, 支持可靠的通信功能, 一方面与上位系统通信, 接收生产任务、上传生产数据; 另一方面与底层设备通信, 下达控制指令, 实现智能制造系统上下层间的信息流通与协同工作^[2]。如图1所示。



图1 边缘控制器硬件实物图

3 协同设计架构搭建

3.1 整体协同设计思路与框架

智能制造依赖精准信号与实时控制, 二者协同是关

键。整体思路是以数据交互为纽带，让FPGA-TAS信号发生器精准生成信号，边缘控制器依据信号快速处理并下达控制指令^[3]。框架搭建从系统层面出发，构建双向通信链路。信号发生器接收来自边缘控制器的参数配置信息，据此生成适配智能制造需求的各类信号，如复杂波形、脉冲序列等。边缘控制器则接收信号发生器的反馈信号，以及智能制造系统中传感器采集的数据，经分析处理后，调控信号发生器工作状态，形成闭环控制体系，保障协同作业高效、稳定，满足智能制造动态生产需求。

3.2 FPGA-TAS信号发生器硬件架构设计

基于FPGA可重构特性搭建硬件架构。选用高性能FPGA芯片作为核心，其丰富逻辑资源和高速处理能力是基础。配置时钟管理模块，确保生成信号频率精准、稳定，满足智能制造高精度时序要求。设计数据存储与缓存模块，用于存储信号生成所需的各类参数和波形数据，方便快速调用。外部接口方面，设置高速串行接口，实现与边缘控制器及其他设备高速通信，能及时传输生成信号和接收控制指令；配备数模转换模块，将FPGA生成的数字信号转换为模拟信号，以适配智能制造中各类模拟量输入设备。如图2所示。

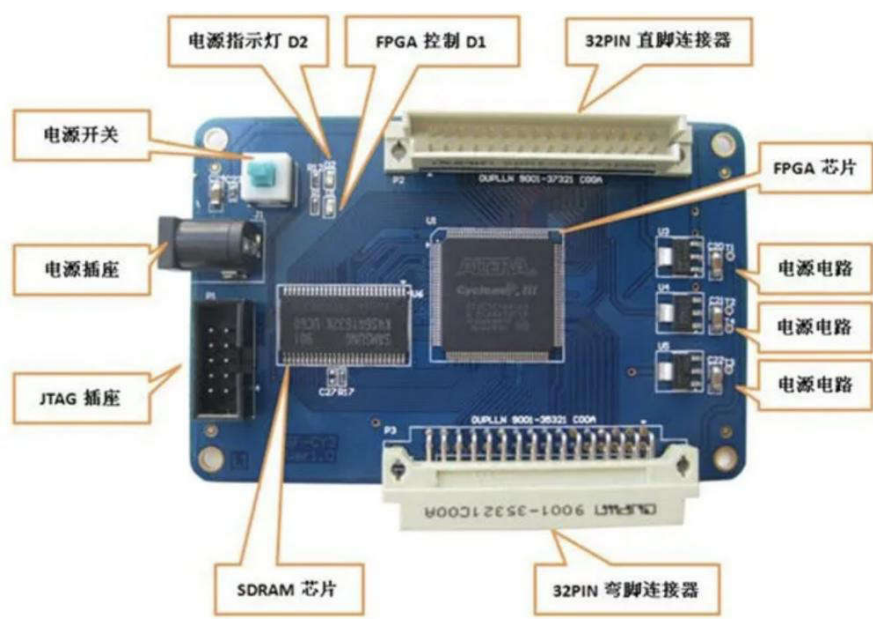


图2

3.3 边缘控制器硬件架构设计

边缘控制器硬件架构以嵌入式处理器为核心，结合丰富外围电路实现功能。选用运算速度快、低功耗的处理器，确保实时处理大量数据。配备存储模块，包括高速缓存和大容量存储器，前者加速数据读写，后者存储历史数据与控制程序。通信接口设计是重点，设置以太网接口用于与上位机及其他网络设备通信，实现远程监控与数据交互；集成多种现场总线接口，如CAN、RS485等，方便连接智能制造系统中的传感器、执行器等底层设备，快速采集数据和发送控制信号。还添加电源管理模块，保障设备稳定供电，满足工业现场复杂环境下的可靠运行需求。

4 协同设计关键技术实现

4.1 FPGA-TAS信号发生器信号生成技术

在协同设计里，FPGA-TAS信号发生器信号生成技

术是核心。采用直接数字频率合成（DDS）技术，基于相位累加原理，通过控制相位增量精准调节输出信号频率，达成频率快速切换与高分辨率特性，满足智能制造系统多变的信号需求。利用查找表（LUT）存储波形数据，依据不同需求输出正弦波、方波、锯齿波等各类标准波形，还能灵活合成复杂调制波形。此外，借助FPGA的并行处理能力，多通道同时工作，保证信号输出的同步性与稳定性，为智能制造系统的测试、监测与控制环节提供高质量、多样化的信号源。下面的表格展示了在不同应用场景下，基于DDS技术的FPGA-TAS信号发生器输出信号的频率、相位精度以及波形稳定性等关键参数数据。如表1所示。

4.2 边缘控制器控制算法实现

在智能制造系统中，边缘控制器的控制算法是实现高效生产的核心技术。模型预测控制（MPC）算法，

基于对系统的精确建模，预测系统未来的运行状态。例如在自动化生产线中，通过分析设备当前运行参数和生产任务要求，预测下一时刻设备状态，提前优化控制策略，让设备精准执行生产动作，提升生产效率和产品质量。模糊控制算法则针对生产过程中难以精确建模的复杂情况。在智能仓储物流中，面对仓库环境的不确定性，依据专家经验设定模糊规则，将AGV小车的位置偏

差、速度等模糊信息转化为清晰的控制指令，灵活调整小车运行路径和速度，实现高效货物搬运^[4]。自适应控制算法实时监测系统运行状态。在质量检测环节，随着检测设备长时间运行可能出现的性能变化，它能自动调整控制参数，保证检测精度稳定。这三种算法相互配合，让边缘控制器在不同智能制造场景下都能精准决策，确保系统稳定高效运行。

表1

应用场景	信号频率 (Hz)	频率分辨率 (Hz)	相位精度 (度)	波形稳定度 (ppm)
精密加工设备控制	10000	0.001	±0.1	50
自动化生产线测试	5000	0.01	±0.5	80
智能仓储物流 AGV 小车导航	800	0.1	±1	100

4.3 两者间通信与协同技术实现

实现FPGA-TAS信号发生器与边缘控制器的高效通信与协同，是智能制造系统顺畅运行的关键。采用高速串行通信接口，如SPI、LVDS，保障数据快速、稳定传输，满足实时性要求。设计专用通信协议，规范数据格式与交互流程，确保双方准确无误地接收和解析信息。在协同机制上，建立任务分配与调度策略，根据智能制造系统需求，合理安排信号发生器的信号输出任务与边缘控制器的控制任务，使二者紧密配合。通过中断机制实现事件驱动，当有紧急任务或异常情况时，及时通知对方做出响应，共同保障智能制造系统各环节协同工作，提升整体运行效率。

5 在智能制造系统中的应用部署

5.1 智能制造系统应用场景分析

智能制造系统涵盖多个关键环节，存在丰富应用场景。在自动化生产线场景中，设备运行需精准的时序控制信号，且要依据生产状况实时调整参数。例如电子元件贴片生产，每一步贴装动作都依赖精确的信号指令，确保元件准确放置。在智能仓储物流场景下，AGV小车的行驶路径规划与调度、货物搬运操作等，需要信号发生器提供稳定的导航信号，边缘控制器根据仓库实时库存和订单需求灵活调配资源。此外，质量检测环节也不可或缺，通过信号驱动检测设备，边缘控制器快速分析检测数据，判断产品质量是否合格，这些场景对协同设计的性能提出了多元且严格的要求。

5.2 协同设计在场景中的集成方式

在自动化生产线集成时，将FPGA-TAS信号发生器与

设备的执行机构相连，按照生产工艺预设信号参数，为设备运转提供基础动力信号。边缘控制器则接入生产线的传感器网络，实时采集设备运行状态、产品加工进度等数据，依据预设算法调整信号发生器的输出，实现动态控制^[5]。在智能仓储物流集成中，信号发生器为AGV小车提供定位与运行信号，边缘控制器通过无线网络与仓库管理系统对接，获取任务指令，根据仓库布局和小车位置，优化调度策略并反馈给信号发生器，协同完成物流任务。在质量检测集成中，信号发生器激发检测设备的检测动作，边缘控制器快速处理检测数据，并与质量标准对比，指导生产流程的调整。

5.3 应用效果预期与评估指标

应用协同设计后，预期在自动化生产线能大幅提升生产效率，降低次品率。通过精准信号控制与实时动态调整，设备运行稳定性增强，生产节拍更精准。评估指标包括生产效率提升百分比，如单位时间产量增加幅度；次品率降低比例，直观反映产品质量改善情况。在智能仓储物流场景，预期实现仓储空间利用率提高，物流配送时间缩短。评估指标有仓库存储容量利用率、AGV小车平均配送时间等。质量检测场景中，期望检测精度与速度显著提升，以检测准确率、单位时间检测数量作为评估指标，通过这些指标量化评估，判断协同设计对智能制造系统优化的实际成效。

6 结语

FPGA-TAS信号发生器与边缘控制器的协同设计，成功打造出契合智能制造系统需求的关键架构，实现了信号生成、控制及通信协同等核心技术突破，有效提升了

智能制造系统在生产、物流、质检等环节的运行效能。不过,当前协同设计在应对复杂多变的生产环境时,灵活性与适应性仍有提升空间,与部分异构系统的兼容性也有待加强。未来,需深入探索前沿技术,如引入人工智能优化控制算法,提升系统自适应性;研究新型通信协议,增强与各类系统的交互能力。持续优化协同设计,推动智能制造系统朝着更智能、更高效、更柔性的方向发展,助力制造业实现全方位转型升级。

参考文献

[1]南京理工大学.一种基于边缘计算的制造装备智能送料系统及方法:CN118513464A[P/OL].2024-08-20[2025-

04-14].

[2]杭州米坦智能技术有限公司.一种基于FPGA的TAS信号发生器:CN115932347A[P/OL].2023-04-07[2025-04-14].

[3]方宁.一种高性能小型中子发生器智能控制系统的设计与实现[D].安徽省:安徽大学,2024.

[4]李建瑞,胡松林,岳东,等.DoS攻击下随机系统的攻击参数依赖型观测器与控制器协同设计[J].控制理论与应用,2023,40(06):986-994.

[5]张文铎,王闯,孙宏玥.基于FPGA的可变带宽调相信号发生器设计[J].舰船电子工程,2023,43(11):70-77.