

智能工厂中的英特尔® FPGA — 简短案例研究

作者 简介

Muataz Hameed Al-Doori 博士

工业 4.0 与智能自动化主管
Flex, 檳城
Muataz.Aldoori@flex.com

Mark Jervis 博士

工业和汽车架构师
英特尔® 公司
可编程解决方案事业部
mark.jervis@intel.com

Takayuki Ikushima 先生

工业和汽车业务部门市场开发总监
英特尔公司
可编程解决方案事业部
takayuki.ikushima@intel.com

工业制造正在经历第四次革命，即所谓的工业 4.0 (I4.0)，数字化和连接功能将助力业界从智能制造迈向智能工厂，从而提升机器自动化水平和敏捷性。在新的形势下，数据将推动业务转型。工业物联网 (IoT) 正推动信息技术 (IT) 变革优势外溢至运营技术 (OT)，为制造设备、流程和管理注入智能特性。智能制造解决方案在网络边缘使用连接的传感器和设备实时改进设备性能和人员效率，同时将数据传递到内部或云端服务器，以提供深入分析和洞察。

变革优势包括：

- 更高的生产力和工厂吞吐量
- 更高的生产质量
- 更高的可靠性，更长的正常运行时间
- 改进的预测性维护和模型开发
- 更高水平的灵活性、敏捷性和自动化，从而改善系统管理

英特尔具有与工业制造商合作的丰富经验，携手行业伙伴推进了云计算、端点及产品组合等方面的发展，帮助促进工作负载整合、管理网络流量增长并加速工业 4.0 变革。

本白皮书阐述了 Flex 为推进工业 4.0 变革、开发基于英特尔® FPGA 的表面贴装技术 (SMT) 生产线所采用的创新方法。

改造生产线

基础设施改造的目标是提高 SMT 生产线的生产力和灵活性，简化机器的转换流程，减少机器的停机时间，提高产品质量并提高利用率。愿景是设计一种可移植、可扩展且安全的系统要素，从而为每台 SMT 机器提供强大、高效和准确的智能特性。通过将目前由许多不同硬件系统完成的新工作负载和现有工作负载整合到一个可配置和可自定义的平台上，降低系统的复杂性。这将需要一个能够通过精确的实时决策流程快速进行数据计算的平台。

SMT 生产线最初由具有传统控制器的传统机器组成，例如运行软件机器处理程序的 PLC 和工业 PC。这些平台无法满足动态高效决策和快速计算的前瞻性要求。此外，这些机器并未全面联网，因此不适合通过网络收集数据并从中深挖，帮助提高生产力和效率。

目录

简介.....	1
改造生产线.....	1
FPGA 如何打破障碍， 实现性能突破.....	4
结论.....	5

现有平台面临两个重大挑战：决策操作的综合性质和数据计算延迟。数据收集、过滤和处理的复合流程造成了决策的复杂性。而且，这些平台中的信号同步、计算引擎架构和有限的计算能力（运行频率和吞吐量）会导致数据处理明显延迟。Flex 专注于简化系统架构和数据处理，同时改善系统的实时功能。整合和集中 SMT 流程的计算资源被认为是关键因素。但是，这本身带来了额外挑战。第一个挑战是整合的实时处理将需要真正的并行性。第二个挑战是在连接过程中需要保障网络安全。

系统设计的一项重大挑战是管理多个实时计算任务之间的排序依赖性。依赖性可以在多种情况下以多种方式出现。例如，当一个进程等待另一个进程发来消息或信号时，这两个进程之间存在依赖性，例如在 Wi-Fi 连接握手信号之后将宽度调整控制字节发送到输送机。细粒度的读写操作（传统的“写后读”、“写后写”和“读后写”）也存在依赖性。

管理依赖性至关重要，因为依赖性不仅会限制并行性能，而且会影响正确性。例如，跨越网络安全层边界的数据依赖性会要求各层之间进行同步或通信。分析哪里存在数据依赖性可帮助了解并行性和正确性的结果，即便没有事先映射计算的哪个方面导致顺序关系。

工业架构师已尝试使用工业 PC、微处理器和微控制器或通用图形处理器等计算平台来克服此类问题。尽管这些平台能够准确、高效地完成某些任务，但无法在功耗预算范围内实现足够性能和满足确定性低延迟计算的要求。理想的平台应具备高效的并发和并行架构，能够进行实时的高性能计算，同时实现足够低的功耗、支持灵活的 I/O 连接以及集成强大的网络安全性以强化保护的能力。

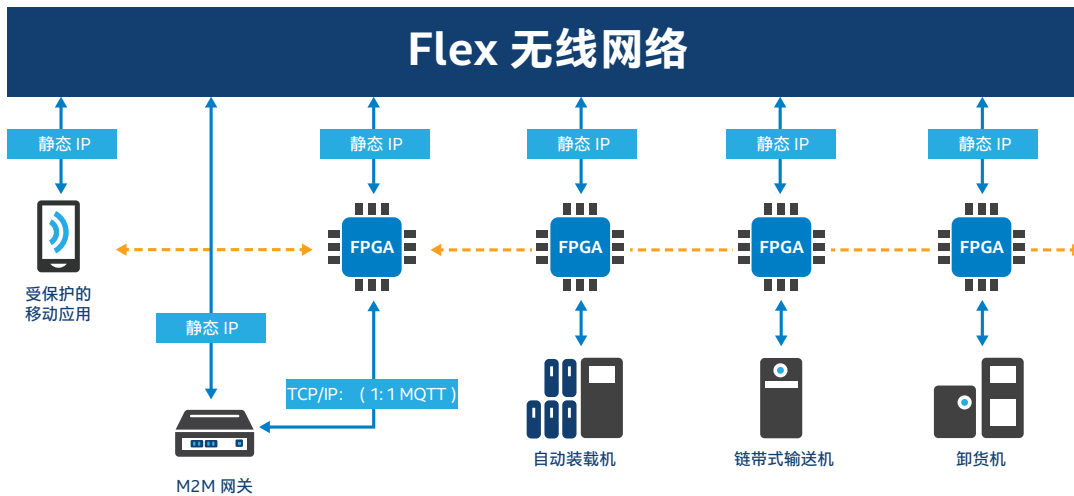


图 1. 两层 XANDER 连接

创新方法

Flex 的解决方案是与英特尔合作，在其 FPGA 平台上开发智能的“机器大脑”（“XANDER”）。在系统架构中，两层 XANDER 以分散的方式集成在 SMT 生产线中。每台端点机器（例如自动装载机、链带式输送机、卸货机等）都有一个对应的 XANDER，可根据需要自动与该层中的其他设备进行东西向通信，并与 SMT 生产线主设备进行北向通信。参见图 1。该组织非常灵活，基本实现了本地化决策。

这种架构减少了与主 FPGA 系统的通信带宽，从而释放了处理空间，有助于与生产中的其他主级别 SMT 生产线进行更高水平

的连接。Flex SMT 生产线中安装了数十个 XANDER，可安全、实时地处理和收集传感器数据。它们全部与连接到 Flex 内部网络的生产线网关进行了无线连接。图 2 和图 3 描绘了 XANDER 的顶层设计和架构层级。

并行性是确保嵌入式设计同时具备出色效率和性能的关键因素，XANDER 顶级架构清晰证明了这一点。它在单个 FPGA 芯片上结合了两个可重配置的嵌入式处理器（REP）计算引擎、四个过滤线、嵌入式内存、地址生成器、一个输入单元管理器、仿真器和时钟生成器以及一个 Wi-Fi 控制器和其他控制子系统。这些主要设计单元概述如下：

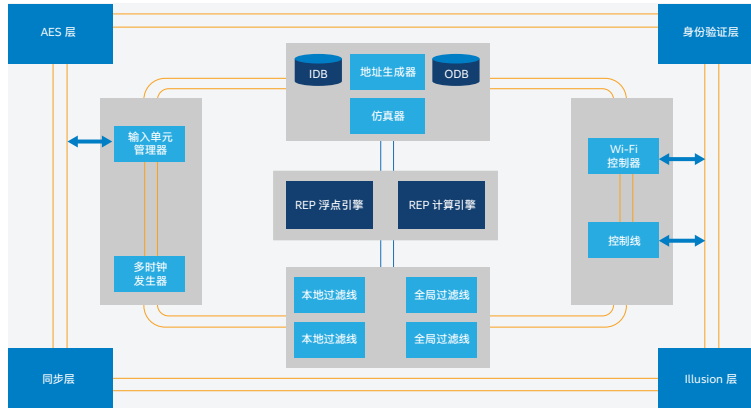


图 2. XANDER 的顶层设计

输入单元管理器： FPGA 具有足够的片上内存来缓冲传入的高带宽数据，从而实现高效的嵌入式处理。与使用片外内存相比，这可以加快计算速度。双端口内存被配置为支持并发的读/写操作，以预处理从 SMT 生产线上不同制造商构建的不同机器发来的各种传入数据格式。输入内容可以是 ASCII 数据、HEX 数据、十进制数据，且全部支持不同的数据包大小和格式。清理步骤也必不可少，以过滤生产操作不需要的数据，使用最少的内存，然后以标准化格式进行传输以便处理。

嵌入式并行脉动滤波器： FPGA 空间计算结构非常适合流水线滤波器子阶段的实现。控制器通过一系列流水线和计时步骤来协调这些功能单元的执行，以确保所有步骤在允许的抖动时间内都具有计划的时隙。在每个时间步上通过这些功能单元对并发计算实施流水线化，减少总体周期，同时使用最少的 FPGA 资源区域，进而实现高效率计算。每个同步管线都有几个计算阶段，每个阶段执行离散任务，并使用嵌入式寄存器存储部分结果。使用分配给每个阶段的标记位来指示其状态，可帮助克服潜在的数据和控制冲突，例如，空闲或仍在处理的数据。

信号仿真器： 这是 XANDER 中实现的独立单元，可以模拟来自各种工厂机器的信号和控制字。借助此功能，XANDER 可进行隔离的单元测试，以诊断任何系统问题，保障性能和效率。

控制子系统： 可向其他连接的机器发出命令。命令是发送给机器的复杂控制字，用于指示它们执行各种任务和处理操作，例如宽度调整、自动模式流程、启用和禁用。命令字通常由几个 ASCII 字节组成，具有与流程功能相关的不同字长。

主要核心由两个 REP 组成，它们分别负责浮点和定点任务处理。这些自定义任务处理计算引擎自动执行常见的必要任务，例如校准电路板宽度调整。

REP 引擎包括一个双指令 (dual-issue) 计算单元和一组流水线功能单元，这些功能单元可配置为多个嵌入式自定义进程。REP 包括两个阶段的双指令任务提取和解码及加载/存储行，任务和数据内存及计时器。任务单元每个周期可以提取、解码和发布两个任务，由流水线功能单元执行。这些单元针对小型任务集广泛使用线程和循环以执行本地子任务。通过这种架构，可以在相对较小的内存中实现较大的计算带宽。

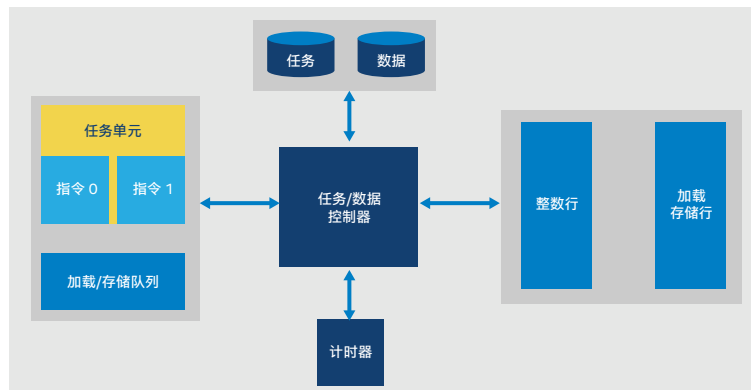


图 3. REP 架构

这些计算管线功能单元可被重新配置，以执行许多不同的任务，从而使其可扩展到任何 SMT 生产线，无论机器的品牌是什么。

除了即时控制功能外，FPGA 还支持加入分析功能以帮助评估和监控每台机器的状况，通过预测性维护可获得减少停机时间并提高生产力的额外优势。机器学习解决方案包括监督和非监督方法。极度随机树 (ERT) 和决策树 (DT) 等算法可结合使用，以 99.2%[†] 的高准确度提供机器健康状况的前向预测。为此，需捕捉包含超过一百万个数据点的大型数据集，并将其用于训练和测试，其中训练数据占 80%，测试数据占 20%。

分析结果可揭示生产线组件在一定时间范围内的状态。

在较短的时间范围内，机器对机器 (M2M) 英特尔网关通过机器大脑，使用边缘分析来了解即时的生产力、效率和缺陷率；并触发各种操作，例如在检测到连续缺陷时停止输送机，或者在取放 (PnP) 率降到 98% 以下时停止运行并致电工程师。

在较长的时间范围内，在软件中运行的分析功能会突出显示异常情况，提供趋势信息并预测单个机器数周后的性能和健康状况，从而为工厂经理提供所需信息，帮助其在问题恶化前进行机器维护。

该系统的架构还缩短了 SMT 生产线的更新时间。以前更新分析需要手动操作，耗时达 20 分钟之久，例如更新产品分类中使用的模型。现在，该流程简化成了按钮式操作，可在生产线上依序完成，耗时不过 2.5 分钟。此外，FPGA 可以同时存储多个模型并在它们之间轻松切换，这意味着在 SMT 生产线满负荷运行时相关操作可继续进行。

FPGA 如何打破障碍，实现性能突破

Flex 选择在 Cyclone® IV FPGA 上实现每个机器大脑。这种方法具备经过验证的可靠性、长生命周期和出色的成本效益，能够满足苛刻的计算和操作要求，包括低功耗。

FPGA 提供了真正的并行同步计算架构，可帮助满足 SMT 等高速生产线对低延迟和确定性控制功能的要求。选择 Cyclone IV FPGA 的关键性能指标是数据摄取、同步和处理能力。该平台必须应对输入单元管理器、过滤模块、可重新配置的嵌入式处理器、数据缓冲、控制子系统、Wi-Fi 控制器等组件的大量并行数据处理需求，在数微秒内可靠地进行各项计算任务，并保护设备和通信完整性。这些功能都可以在 Cyclone IV FPGA 上实现，同时在成本和功耗之间保持平衡。

如上所述，系统组件的粗粒度和细粒度都是管理依赖性限制的关键。FPGA 提供了一种确定性平台，可实现极低的抖动，并在逐周期执行中精确控制数据。在此基础上，Flex 可以实现所需的架构子模块，并将计算与经过仔细参数化的硬件资源绑定在一起，以满足设计的特定需求。

网络安全是互联智能制造中的另一个重要问题。安全攻击是真实可信的威胁，Stuxnet、Triton 和 Industroyer 等攻击已经证明了这点。FPGA 值得选择的另一个原因是，它能够有效防范远程攻击；FPGA 没有操作系统，没什么数据漏洞，已发布的相关攻击信息很少。没有系统是完全安全的，因此防御必须敏捷以应对新威胁并修补任何发现的弱点。FPGA 在硬件级别是可编程的，具备出色的敏捷性，包括硬件级定制。此外，加密、安全性和相邻算法通常需要繁重的前馈式数学计算，非常适合 FPGA 空间计算架构，其具有一系列数字信号处理 (DSP) 块逻辑和嵌入式内存。

在 Cyclone IV FPGA 上实现 XANDER 提供了全面的网络安全性，包括具有多层保护的纵深防御方法 (如图 2 角落的 4 层所示)；包括高级加密标准 (AES) 加密/解密层、身份验证层以及 “illusion” 层中的最后一行入侵检测、预防和缓解机制。

AES 层使用 256 位密钥进行加密，这种强度通常被认为适用于 2031 年及更远的未来。FPGA 的一个优点是，如果事实并非如此，可以在固件中进行更新。我们可以进一步利用 FPGA 底层硬件定制优势进一步阻止攻击，例如通过在多个嵌入式内存位置上对密钥进行切片和分配进行模糊处理。身份验证代码层负责为所有通信和数据传输生成握手代码。在 Flex 系统中，这些代码可由自定义单向数学函数使用嵌入式微分方程式生成，没有这些代码验证就无法进行传输。

握手功能进行授权验证，并确保数据已成功接收。防御的最后一层 (在 Flex 系统中称为 Illusion 层) 可观察异常情况，包括握手响应失败。在发生可疑活动时，它通过将所有数据归零 (在这种情况下使用新的伪数据覆盖)，并锁定所有 I/O (两个用于系统抢救和帮助设计师清理的引脚除外)，从而确保没有入侵者能够访问数据或进一步访问系统。

FPGA 架构非常适合解决所有这些设计挑战。它包含可编程逻辑元件以及可配置的静态随机存取内存 (SRAM)、高速输入/输出 (I/O) 引脚和路由互连。这些计算元件分布在芯片内部，以实施并行和同步计算任务。它为用户提供了设计自定义处理器的能力，自定义处理器专门用于管理所需的独特数据流。

Cyclone IV FPGA 具有均衡的低功耗逻辑结构和 I/O 性能，以及适合工业用例的长生命周期及高可靠性，因此非常适合 Flex 的 XANDER。

结论

与 Flex 共同实施的这个协作项目可提供有益远见，帮助我们了解英特尔 FPGA 可如何实现工业 4.0 变革的生产效率提升愿景。FPGA 真正的并行实时计算实现了 SMT 流程的整合，满足了高效决策和快速处理的要求。灵活的 I/O 和网络安全性可帮助它们在多层分散式架构中实现安全连接。

英特尔物联网引领革新机器、建筑、供应链、工厂和电网等领域的智能化水平，可帮助工业世界应对大数据、安全漏洞与 IT/OT 融合带来的新挑战。英特尔可帮助将整个工厂的数据转化为实时洞察以释放数据的潜力，从而延长正常运行时间、提高质量并增加收入。



[†] 基于 Flex 内部测试。

英特尔技术可能需要支持的硬件、特定软件或服务激活。

任何产品或组件都无法保证绝对安全。

成本和结果可能有所差异。

英特尔不对第三方资料进行控制或审计。请进行多方咨询，评估信息的准确性。

© 2020 英特尔公司版权所有。英特尔、英特尔标识和其他英特尔标志是英特尔公司在美国和/或其他国家的商标。* 其他的名称和品牌可能是其他所有者的资产。