

封面

面向 OT/IT 融合的新一代工业控制软件研发与应用

主题方向： 大国智造

专业领域/方向： 电子信息

适用课程： 工业互联网、网络系统控制、网络优化

作者姓名： 关新平、戴文斌、白洋

工作单位： 上海交通大学电子与电气工程学院

中国专业学位案例中心

2024 年 3 月 10 日

案例正文

面向 OT/IT 融合的新一代工业控制软件研发与应用*

关新平 戴文斌 白洋

摘要: 本案例描述了上海交通大学基于 IEC 61499 标准研发新一代面向 OT/IT 融合的工业控制软件全套软件工具，为实现融合式新工业控制体系铺垫了不可缺少的软件基础。该案例主要覆盖以下三方面内容：一是面对工业互联网边-云协同的扁平化新架构对工业软件的构架需求，介绍了开放自动化系统 IEC 61499 标准内容及其对新架构的适配特性；二是上海交通大学以 IEC 61499 标准作为支撑点，研究跨平台多语言混合建模与编译、边-云协同工业边缘应用任务快速部署、分布式节点自组织动态迁移与动态重构等关键技术，最终成功研发新一代面向 OT/IT 融合的工业控制软件全套软件工具；三是对新一代工业软件的成果应用进行介绍，上海交通大学与华为合作构建新一代虚拟化工业控制系统概念原型机，完成全球首个虚拟控制器 vPLC 实验，实现了 vPLC 远程部署和资源自动弹性扩展。本案例旨在通过对新一代工业控制软件设计、研发与应用的过程介绍，揭示工控软件对融合式工业控制新体系的作用和机制。

Abstract: This case study showcases how Shanghai Jiao Tong University created a new generation of industrial control software tools that form the software foundation of the new industrial control system. The study focuses on three main aspects: Firstly, the study introduces the features of the IEC 61499-based automation system and how these features meet the demands of the flattened architecture for industrial software in the context of the industrial internet of things and edge-cloud collaboration. Secondly, Shanghai Jiao Tong University explores key technologies such as cross-platform multi-language mixed modeling and compilation, rapid deployment of edge-cloud collaborative industrial applications, and distributed nodes self-organizing dynamic porting and reconfiguration, based on the IEC 61499 standard. The university successfully developed a new generation of industrial control software tools for OT/IT convergence based on these technologies. Thirdly, the study provides field implementation of the developed industrial software. Shanghai Jiao Tong University and Huawei collaborated to build a new generation of virtualized industrial control system, which achieved the world's first virtual controller vPLC experiment. This achievement enabled remote deployment of vPLC and automatic elastic resource

* (1)本案例系教育部学位与研究生教育发展中心 2022 年主题案例项目成果(项目名称: 面向高端装备智能制造的现场级工业物联网; 项目编号: ZT-221024817; 首席专家: 关新平)。

(2)本案例复制权、发表权、信息网络传播权等相关权益由教育部学位与研究生教育发展中心依法享有, 如有相关需要, 请取得教育部学位与研究生教育发展中心授权。

(3)本案例只供课堂讨论之用, 并无意暗示或说明某种行为是否有效。

expansion. The study aims to reveal the role of industrial control software in the new OT/IT convergence based industrial control system by introducing the design, development, and application process of the new generation of industrial control software.

关键词：工业软件、IEC 61499、融合式新工业控制体系、新一代虚拟化工工业控制系统

Keywords: Industrial software, IEC 61499, fusion-based industrial control system, New generation virtualized industrial control system.

作者信息：关新平，上海交通大学电子与电气工程学院教授，院长；戴文斌，上海交通大学电子与电气工程学院教授；白洋，上海交通大学电子与电气工程学院助理教授。

引言

工业互联网平台近年来蓬勃发展，已形成了大体量应用规模。工业互联网平台主要由工业传感器、控制器、执行器及工业边缘设备构成，这些设备能够实现数据采集、数据传输、数据存储与数据智能分析，最终赋能工业生产过程优化。在工业互联网的背景下，工业生产的各项功能主要由工业边缘计算软件（工业边缘 App）实现。工业边缘计算软件种类繁多，涵盖现场总线通讯、运动控制、实时控制、人机界面等传统功能外，同时还集成了数据采集、数据分析处理、运营维护、生产管理等新型应用。鉴于云-边协同的工业互联网扁平化系统架构，传统工业软件开发方法已无法解决工业边缘 App 大规模交互、多语言共存、跨平台协同等新挑战。

欧盟于 2017 年针对上述问题展开研究工作，欧盟提出的 DAEDALUS 项目架构利用信息物理系统实现了设备间协作，其采用 IEC 61499 标准以完成设备封装，并通过开发工业自动化领域的应用商店。另外，开放过程自动化联盟（OPAF）对 PLC、DCS、MES、HMI 等功能进行整合，并基于模块化设计达成过程控制系统开放性。

1. 背景

1.1 工业软件现状制约融合式工业控制新体系发展

工业互联网平台为工业系统提供强大的算力基础与储存能力，为推动工业信息化与智能化提供了保障。在工业互联网“端-边-云”协同的新架构下，如何有效地利用计算、储存与通信能力，实现信息技术（IT）、通信技术（CT）和运营技术（OT）的高度融合一直是学术界与工业界共同探索的方向与目标。目前绝大多数工业互联网平台、边缘计算网关等设备由于缺乏对工业控制设备的掌控能力，始终游离于工业控制系统之外，导致信息化与数字化无法涉足工业生产环节，无法发挥其应有的作用。要使工业互联网与边缘计算能够真正实现其自身价值，必须从底层的工业控制系统开始变革，实现融合式工业控制新体系。

如图 1 所示，现有的工业控制系统大多遵从 ISA95[1] 标准。ISA95 是一个五层架构，而工业互联网打破了五层架构，形成了边-云协同的扁平化新型系统[2]。在云端，海量计算与储存资源能够支撑起设计、仿真、产品全生命周期管理、企业资源管产学研融合、生产执行管理等数据量较大、实时性要求较低的工业应用。在边缘侧，具备较强算力的工业现场设备能够在保证实时生产、监控等任务确定性的同时，通过边-云协同、边-边协同等新方式满足数字化、信息化与智能化工业应用的需求，工业从“专机专用”时代进入了可以对设备赋能的“功能机”时代。然而，工业互联网的终极目标是实现所有节点间的无障碍信息交互，工业应用可以自由部署在任意设备上，从而真正进入工业的“智能机”时代。

因此，面向全新的“智能机”时代，我们需要一个工业编程语言高效地完成分布式工业控制系统的设计、开发、部署与测试，使企业可以在不受限制的情况下将各种不同语言开发的工业应用程序部署在任意设备上（包括但不限于云服务器、网关路由、PLC、DCS 等等具有不同计算资源的设备）。传统工业自动化系统虽然对实时控制进行了高度优化，可以满足离散制造业和流程工业的不同控制应用需求，但是这些工业自动化系统是相对封闭的，整个系统以硬件为中心且局限于专用的生态环境，编程软件与控制器等硬件设备是深度“绑定”的，不同供应商的工业控制软件互不兼容。目前，工业生产中的设备所安装的软件具有“专机专用”的特性，其硬件与软件之间存在紧密耦合。一旦设备硬件或工业网络发生变化，工业软件无法直接移植和应用。

工业软硬件的深度耦合与工业软件的封闭性阻碍了工业自动化系统变革。首先，工业控制软件并没有设计成与 IT 技术方便连接，也缺乏相应工具。用户（包括系统集成商）每次都不得不依照具体应用要求进行大工作量的专门开发，且难以复用推广，极大地阻碍了工业自动化系统的升级和创新应用。其次，工业设备厂商采用各自的技术标准，致使各工业控制平台之间的协作缺乏兼容性。此外，刚性的软件结构已无法满足工业互联网大规模定制生产。基于新型工业互联网平台，客户可根据原料、功能、工艺等多重因素自定义产品需求。因此，边缘设备需同时根据生产订单需求变化动态地配置可用资源。然而，现阶段工业软件需在需求动态变化的条件下停机调试，导致生产效率下降。上述问题对工业互联网边缘计算软件开发提出了新要求。

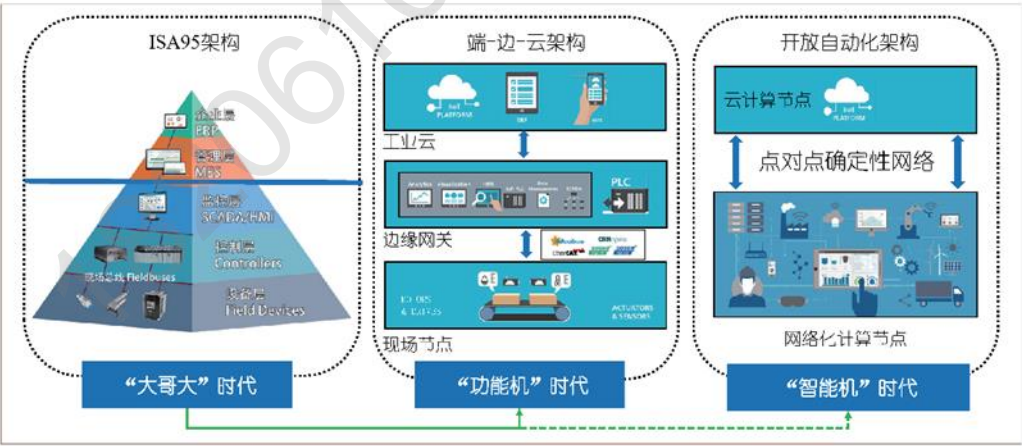


图 1 工业控制系统体系架构演进

1.2 工业互联网下的工业软件构架需求

工业企业的正朝向软件企业和数据企业概念推进发展，并以软件定义技术为核心推动力。基于软件定义的边缘计算为工业互联网带来了无限的发展可能性，为现有工业转型注入了新的活力。

灵活的体系对边缘计算软件提出了多项新要求，具体可见于图 2。首先，在

边缘计算环境下，工业软件必须具备动态重构的能力。动态重构能够使系统能够根据需求变更实时自我调整生产过程。动态重构可分为多个级别：

- 1) 低级动态重构：低级动态重构能够根据需求变更调整工艺参数，但其仅能实现简单的定制要求，比如调整过程控制参数。
- 2) 中级动态重构：中级动态重构应能够从预设的功能集合中动态更新生产过程以满足生产定制需求，但仍然缺乏学习新生产工艺的能力。
- 3) 高级动态重构：高级动态重构能够根据客户需求对软件进行动态组态，且能够创造新功能并定义新的工艺流程。

工业软件的可移植性一直是业界的难题。可移植性问题一方面是厂家为了保护自身的知识产权和客户资源而设置壁垒，另一方面由于对标准的理解不同，使得语言的解析也各不相同。边缘计算环境下，工业软件的互联互通和相互操作能力至关重要。传统的工业系统通常使用各自工业现场总线进行通信，这导致了设备之间无法有效地交换信息。为了解决此问题，OPC UA 提供了通用的信息模型，并定义了访问方式，从而为设备之间的互操作性提供了基础。然而，工业边缘环境仍然需要根据实时情况结合知识和经验进行决策，以实现智能制造。



图 2 工业互联网下的工业软件构架需求

工业软件的可移植性一直是业界的难题。可移植性问题一方面是厂家为了保护自身的知识产权和客户资源而设置壁垒，另一方面由于对标准的理解不同，使得语言的解析也各不相同。边缘计算环境下，工业软件的互联互通和相互操作能力至关重要。传统的工业系统通常使用各自工业现场总线进行通信，这导致了设

备之间无法有效地交换信息。为了解决此问题, OPC UA 提供了通用的信息模型, 并定义了访问方式, 从而为设备之间的互操作性提供了基础。然而, 工业边缘环境仍然需要根据实时情况结合知识和经验进行决策, 以实现智能制造。

2. IEC 61499 技术内容及其特点

IEC 61499 标准是一种适用于分布式工业控制软件系统的建模语言, 其主要技术内容涵盖以下几个方面:

2.1 IEC 61499 分布式自动化系统参考模型

1. 系统构架: 分布式自动化系统被构建成设备集合, 这些设备能够相互连接和通信, 它们通过链接连接到网络中。利用 IEC 61499 提供的系统构架, 应用开发者不再受限于单一控制器。

2. 设备和资源模型: IEC 61499 中, 设备模型包括一个过程或通信接口, 并包含多个资源。资源模型为独立功能单元, 包含在设备中且具有独立控制功能, 保证各资源之间互不影响。资源主要通过设备的过程或通信接口交换事件和数据。IEC 61499 标准通过设备与资源模型, 将控制器与硬件作为设备类型实例, 物理过程则是利用过程接口与资源实现映射。基于该模型, 设计和开发应用程序时无需关注硬件类型, 实现了软、硬件解耦。

3. 应用和分布式模型: 在 IEC 61499 中, 应用由多个功能块网络构成。这些应用可以部署在同一台设备或不同台设备的多个资源上。分布式模型允许应用或子应用程序将功能块实例分配至一个或多个设备中的不同资源之上进行部署。功能块可看作是分布式控制系统的基本单元。通过应用和分布式模型, IEC 61499 标准可实现分布式控制系统的有效部署。

4. 管理模型: 涵盖设备和资源之间的管理, 以及资源之间的管理, 旨在实现服务接口和通信功能的标准化。

2.2 功能块模型

在 IEC 61499[4]标准中, 功能块是核心内容之一, 它们被表示为图形符号, 并且在概念上与 IEC 61131-3[3]中的编程语言相似, 但 IEC 61499 标准更强调对象的概念。功能块类型定义了该类型所有实例特征, 包括类型名称、事件输入和输出的编号、类型和顺序, 以及数据输入、输出和内部变量编号、名称、数据类型和顺序。与 IT 行业中的软件组件类似, 功能块是可重复使用的软件单元, 具有规范的模型和接口定义。尽管 IEC 61499 标准主要应用于分布式自动化系统, 但从应用开发角度来看, 它已经与 IT 软件开发思路相通。此外, 功能块仅规定了类型名称、接口标准和算法规范, 并未定义采用具体实现语言。IEC 61499 使用 XML 语言描述功能块, 从而增强了功能块的可移植性。

IEC 61499 标准囊括基本功能块、复合功能块、子应用和服务接口功能块。其可通过复合功能块，可以创建更复杂的模型，提高编程效率。

2.3 服务接口功能块

IEC 61499 的服务接口功能块建立在服务原语与功能块的事件输入\输出、数据输入\输出之间的映射基础上。服务接口功能块的外部接口与基本功能块相似，不同的是其输入和输出具有特殊语义。功能块可用于应用程序和资源间信息交换，并在应用程序端定义接口标准规范。通信服务功能块和管理功能块等属于服务接口功能块的范畴。借助这些功能块，可以实现应用程序的分布式部署，使不同设备和资源之间的数据和事件自动交互。根据 IEC 61499 标准中服务接口功能块的规范，可开发各种不同的服务，例如与 Web 服务连接或与数据库连接等。这些服务接口功能块的应用丰富了 IEC 61499 标准的应用范围，包括云端微服务到边缘控制、HMI 及现场设备。

2.4 适配器接口规范

适配器接口类型的定义包括接口类型名称以及其中包含的事件和数据接口，这对于制定 IEC 61499 应用程序至关重要。通过适配器接口类型，可以实现对象的高度封装，并同时实现多线程工程。这样一来，应用程序就能清晰地了解实际控制对象的关联和分布情况。

2.5 IEC 61499 标准的规范性要求

IEC 61499 标准规定了事件功能块、文本语法以及文档类型的具体要求。软件工具必须能够准确地分析和解析符合这些规范性要求的语法和语义，以确保设备符合 IEC 61499 标准，实现不同软件之间的互操作性、可移植性和可配置性。总体而言，IEC 61499 标准定义了系统模型、资源模型、设备模型、应用模型、功能块模型、管理模型和部署模型，从而实现了自动化系统的以下特性：

- 1) 互操作性：即实现不同设备之间的通信和交互；
- 2) 可配置性：即可采用不同厂商的软件进行设备的调整和配置，包括运行时的实时重构；
- 3) 可移植性：即应用程序和功能块库能被多种软件工具接受和正确解释。

IEC 61499 具有面向对象、对象嵌套和黑盒软件组件等特性，可实现工业 IT 系统和 OT 系统之间的融合。IEC 61499 同时定义了分布式信息和控制系统的高级设计语言，可实现功能封装、基于图形化组件的设计、事件驱动执行、自动化应用程序分发及部署。基于 IEC 61499 标准的自动化系统可改变工艺流程和机器设备的设计方式，提升厂商平台之间的可移植性。施耐德电气推出的 EcoStruxure™ 开放自动化平台，正是基于 IEC 61499 标准的开放产品，拉开了可互操作的工业自动化的序幕。

3. 基于 IEC61499 标准的新一代 OT/IT 融合工业控制软件

3.1 跨平台多语言的混合建模与编译

当前工业系统内的嵌入式软件呈现多样化趋势，包括 Sequential Function Chart 等图形化编程语、Structure Text 等文本型编程语言、.Net/ JavaScript 等人机界面编程语言等。工业边缘 App 由多个功能组合而成，例如，PCB 质量检测生产线可能涉及运动控制、数据采集、机器视觉等功能，且各功能可能由不同编程语言开发。此外，设备间通讯也存在诸多差异，单用于控制器与传感器的信息传输总线就有近二十种。最后，可视化建模语言对于工业边缘 App 至关重要。可视化建模语言能够直观地展示系统设计，有助于提高系统设计效率

基于实际的边缘计算编程环境，模块化设计成为实现跨平台多语言混合建模与编译的最佳途径。在模块化设计中，功能块本身与通用软件接口成为基本构件。利用 IEC 61499 功能块标准可以将各类编程语言封装为功能块，并将功能块的输入输出接口映射为软件服务参数。同时，人机界面也可采用模块化描述，更好地满足工业边缘网络异构场景需求。基于 IEC 61499 的模块化设计为实现跨平台多语言混合建模与编译提供了有力解决方案。

同时，IEC 61499 提供标准功能块接口定义、分级功能块网络、部署模型、管理协议，支持模块化抽象系统设计。功能块间采用事件触发方式进行流程编排，功能块接口通过调用 API 实现。工业边缘软件服务可将每个逻辑作为一个服务入口列入服务合约。当服务被调用时，服务需求方更新输入变量，而服务提供方执行相应的逻辑代码并返回结果。IEC 61499 使得功能块网络可以直接进行部署和执行，降低了建模语言转换为可执行代码的过程，从而显著提高了设计效率。

3.2 边-云协同工业边缘应用任务快速部署

为了打造融合式工业控制新体系，工业界正在从云端和边缘两个方向展开创新探索。为满足数字化、信息化和智能化工业应用的需求，引入边-云协同和边-边协同等新型方式，助力工业步入智能机时代。在边缘方面，全新的一体化边缘节点将取代传统的 ISA-95 架构中的设备层、控制层和监控层，构建起集传感/执行、控制和监控为一体的分布式边缘计算节点网络。在云端，各种工业应用的设计、研发、测试和管理也得到了实现。实现实时数据交换和工业应用的部署，实现全计算、全连接、全解耦的闭环工业互联网体系。

随着工业自动化系统规模的扩大和复杂程度的提升，工业软件开发人员在设计过程时需要投入大量精力，将各种功能分配到不同控制器上进行编程，并通过手动方式创建控制器之间的信息接口。IEC 61499 则采用软硬件松散耦合的设计方式，要求所有的代码都必须封装在功能块中，从而确保不同平台硬件间的代码复用。

系统设计完成后需将代码部署到异构硬件平台。根据 IEC 61131-3 标准，工程师须手动将代码逐个下载至各控制器。由于部署方案在开发过程中动态变化，工程师需浪费大量精力重新编辑逻辑和配置系统。利用 IEC 61499 实现系统配置时，功能块的部署主要利用软件定义的方式实现。如图 3 所示，工业应用部署首先创建部署模型。部署模型可将各功能块部署至既定的目标资源上，且该过程不需要重新编写功能模块的接口，大幅提升了工业应用在异构硬件平台之间的互操作性[5]。采用 IEC 61499 标准的设备资源相互独立，该前提确保了边缘设备执行各项任务时的资源相互隔离，互不干扰。同时，IEC 61499 标准可在系统内同时配置多个并行的应用，并且可将各应用的功能块部署至不同设备。另外，部署模型将部署工作抽象化，通过管理协议完成动态部署，大幅提升了系统效率，同时避免了人工配置可能带来的错误。

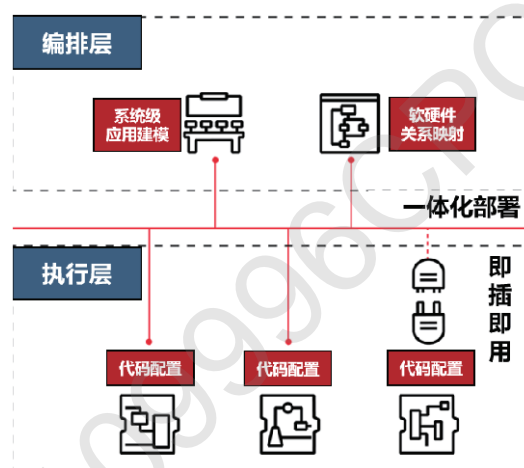


图 3 基于 IEC 61499 的代码部署

3.3 分布式节点自组织动态迁移与动态重构

下一代工业控制软件需要具备可移植性、可重构性和可复用性的特点，能够轻松实现从一个平台迁移到另一个平台。由于工业软件与硬件紧密耦合，不同厂家的产品之间存在兼容性问题。工控系统的封闭性和专用性大大限制了工业自动化系统的迁移和复用，同时也给用户增加了大量成本。

利用 IEC 61499 标准可实现新一代工业软件的软硬件解耦。它采用了统一的软件模型来描述生产流程之间的交互，使得工业软件能够轻松迁移到其他计算资源设备节点。借助实时状态监测和 IEC 61499 管理模型的动态调整功能，一旦检测到单个边缘计算节点的算力或存储资源不足，系统将会自动将某些逻辑迁移至全新的目标资源，以保证负载均衡和业务的稳定运行，从而保障工业控制可靠性。

在实际的制造环境中，工业软件需具备实时动态自我调整的能力，以满足不断变化的需求，而无需重新编写代码。一旦系统开始运行，在线代码修改通常是非常困难的。尽管现有的 PLC 支持在线编辑功能，可以更新部分代码，但重新

配置类型定义和硬件仍需离线下载。IEC 61499 标准制定了一项代码动态重构机制，只需向目标控制器发送管理命令，便可在不干扰正常运行的情况下重新配置代码[6]。

在面对硬件故障或软件崩溃时，必须确保存在热冗余备份系统以提供支持。这样的备份系统设计旨在通过 IEC 61499 标准中的动态重构功能，实现低成本高可靠性。与此同时，系统还会自动修复故障的虚拟设备，以保障后续的运行稳定性。

4. 应用：携手华为搭建虚拟化控制系统原型机

随着新一代信息技术（如人工智能、物联网、大数据、云计算等）的不断发展，数字化控制系统（以 DCS、PLC、SCADA 为代表）也在逐步向智能控制系统转变。为了推动工业应用的智能化发展，我们提出了一种虚拟化工业控制系统的架构，旨在实现更加开放、灵活和智能的工业控制系统。在上海交通大学与华为的合作下，成功完成了新一代智能工控系统概念原型的创新演示和验证。这一系统实现了虚拟控制器 vPLC 的远程部署和资源自动弹性扩展，确保了 vPLC 控制的实时性。同时，通过确定性网络提供了 RTT 小于 1ms 的通信服务质量保障。

4.1 面向虚拟化工业控制系统架构的工业数字底座设计要求

为了支持新一代虚拟化工业控制系统，我们需要对边缘设备、操作系统、编程语言、通信网络等四个方面进行设计，形成所谓的“工业数字底座设计”。首先，在软件方面，我们需要一套全新的软硬件解耦编程语言，以支持柔性边缘 App 的设计开发语言和部署。进一步地，通过自动分配适当的资源，将软件模型与硬件设备相结合，并采用轻量级容器等虚拟化技术来确保代码的可移植性和便利性。在现场设备方面，通用算力设备将搭载协作式工业实时操作系统，取代大量的专用设备。同时，通过确定性点对点通信来确保信息交互与协作的实时性，从而形成完整的新一代虚拟化工业控制系统架构。前文已经详细介绍了基于 IEC 61499 标准的新一代工业软件的设计思路，接下来将详细描述其他部分的设计要求。

1. 通用化工业控制设备

在硬件方面，工业现场涵盖了大量的专用设备，包括可编程逻辑控制、分布式控制系统、运动控制器、变频器以及各种传感器等。每个厂商都根据市场需求将这些设备细分为不同等级，例如 PLC 可能分为大型、中型和小型等类型[7]。不同厂家生产的同类设备之间无法直接互换。为了确保系统的可靠性，现场设备种类繁多，通常需要备件存放，以便在设备故障时能够及时替换，快速恢复生产。此外，物流延迟或供应链问题可能导致供货延迟，严重影响项目建设进度和生产安全。因此，使用通用算力设备替代专用设备已成为生产制造企业的迫切需求。

在另一层面上，随着芯片工艺的不断进步，曾经由于计算能力的限制而形成的“专机专用”格局已经被颠覆。随着多核多线程的工业微控制单元进入边缘领域，新型设备的算力和存储能力已经足以同时满足多种边缘应用的需求。此外，这些设备还能够在本地对大量实时数据进行过滤、缓存、预处理等操作，甚至在算力充足的情况下直接进行数据分析。

最终，生产系统的可靠性要求通常比 IT 系统高出几个数量级。通用算力设备可以改变现有的冗余备份方式，以较低的成本实现更高的可靠性要求。现行的工业控制系统通常采用热备份方法来确保系统的可靠性，即同时运行两套完全相同的软硬件系统，当一台设备发生故障时，自动切换到备用设备。尽管这种方法是安全可靠的，但通常需要付出相当大的代价。然而，利用通用算力设备，当硬件故障时，用户可以使用任何具有相同或更强算力的设备替代故障硬件；当软件故障时，用户甚至可以直接利用同一硬件设备上的额外资源来实现冗余。相对于传统的热备份方法，基于通用算力设备的新型冗余机制能够在不增加硬件成本的情况下满足工业级热备份需求，这对于生产型企业具有相当大的吸引力。

2. 协作式工业操作系统

虚拟化工业控制系统除了需要强大算力的硬件外，还需以新型操作系统作为支持。目前，大多数工业现场设备采用实时操作系统以确保控制任务的高实时性。然而，为了保障系统的可靠性，每个设备通常只能部署单一实时控制任务[8]。当单一设备需要同时运行多各高实时性控制任务时，不可避免地会发生资源竞争，从而严重影响生产系统的实时性和可靠性。因此，有必要设计一款全新的工业操作系统，以满足这些需求。

为确保在同一设备上能够有效地调度多个应用并充分利用资源，嵌入式虚拟化技术已成为新型工业操作系统的关键特征之一。通常，虚拟化可以通过虚拟机或容器实现。基于虚拟机的虚拟化技术通常对现有操作系统支持良好，因此工业应用可以直接迁移到虚拟机中而无需进行任何更改。但是，虚拟机往往会导致一定程度的性能损失，因此，目前的技术往往会通过将处理器内核与虚拟机绑定的方式来提高性能。虚拟机技术已经被广泛应用于工业现场设备中，西门子、艾默生等工业巨头已在 DCS、PLC 等设备中部署了虚拟化技术[9]。然而，虚拟机技术也存在一些缺陷，首先是配置和重新启动虚拟机的时间较长，无法满足工业边缘应用对实时性的要求。其次，虚拟机对存储资源的需求较高，备份虚拟机需要消耗大量时间。另一种方案是使用轻量级容器技术，将每个边缘应用视为独立的容器，由操作系统管理和调用[10]。容器化技术通常部署在边缘网关设备中，适用于各种使用不同语言编写的应用。目前的容器化技术仍然存在一些问题，如容器镜像较大、启动时间较长等。因此，面向工业的轻量级虚拟化操作系统应具备毫秒级启动和备份能力，并能根据应用需求自动动态分配资源，以避免由于资源

绑定而导致的应用移植限制。

3. 确定性工业通信网络

工业控制系统和信息系统之间使用的通信协议存在显著的差异。在边缘领域，控制器与设备之间通常使用工业现场总线以确保通信的确定性。近年来，基于以太网的工业现场总线协议如西门子的 ProfiNET[11]、罗克韦尔自动化的 Ethernet/IP[12]、倍福自动化的 EtherCAT[13]等逐渐流行起来，它们能够同时保证超高可靠性并满足实时性要求，时延通常小于 1 毫秒。然而，各自动化厂商推出的工业现场总线协议并不相互兼容，导致了如今几十种工业现场总线并存的局面。同时，边缘设备与监控系统之间通常使用 OPC DA/UA 协议进行数据交互，而 IT 系统则使用 MQTT、WebSocket、HTTP Restful 等网络协议进行通信，这些通信任务的周期通常大于 1 秒。实现工业互联网的点对点信息交互，必须打破当前“七国八制”的格局。近年来，工业领域成为了新型通信网络的竞争场所，时间敏感网络（TSN）、确定性 IP 网络（DIP）、工业光总线、5G、Wi-Fi 6 等通信网络都将重点放在了工业应用上。无论是边-边还是边-云协同，工业通信网络的首要任务都是保持确定性，即在规定时间内完成数据传输。以往的工业现场总线只需保证控制器与现场设备之间的通信确定性，而工业互联网还需额外保证控制系统与信息系统之间的通信确定性。由于设备种类繁多和工业现场环境的复杂性，单一网络很难满足通信需求。对现场用户来说，只要能保证工业网络传输的确定性，即使网络由多种异构网络组成，对工业控制系统也不会产生影响。同时，为了满足虚拟化需求，设备内部（例如服务器内部的多个虚拟机之间）也需要保证确定性传输以满足实时性需求。采用统一的确定性工业通信网络能够满足多个虚拟化控制器之间的点对点确定性传输，进一步保证系统的实时性和可靠性。

利用最新的 OICT（Operational-Information-Communication Technology）技术，包括通用计算设备、嵌入式操作系统、确定性网络和分布式工业编程语言，上海交通大学和华为技术有限公司合作设计了虚拟化控制系统原型机。该系统原型机基于华为 FusionCube 超融合虚拟化服务器、openEuler Embedded 操作系统和确定性网络构建，采用 IEC 61499 标准的分布式功能块网络封装控制工艺。该系统采用了低代码构造[14]，大幅降低开发、部署和调试的时间成本。

5. 总结与启示

工业领域一直以来都在追求 OT、IT、CT 技术的深度融合，这是行业发展的关键目标之一。在这种融合过程中，如何在保障实时性和可靠性的同时提升系统的灵活性和适应性，成为了 OICT 深度融合所面临的核心挑战。本文总结如下：

1. 利用 IEC 61499、轻量级虚拟化工业操作系统、确定性 IP 网络等新技术的深度整合，能够真正打破 OT 和 IT 之间的壁垒，为工业控制系统带来实实在在

的改进，对整个行业产生颠覆性的影响。

2. 对于能源、钢铁、冶金、汽车等大型制造系统而言，虚拟化的工业控制系统取代了许多专用设备，不仅保证了可靠性，还大幅度降低了硬件设备和现场维护的成本。同时，采用了新型编程语言和操作系统，不仅减少了人为错误，还降低了人力成本。

3. 对于包装、注塑、医药、食品等以单台设备为主的加工行业，单个虚拟化边缘设备可以同时执行控制、监控、数据交互等功能，从而在降低成本的同时实现了工业云平台的闭环。

未来展望，随着工业互联网的不断发展，OT、IT、CT 技术的融合将继续深化。下一代工业控制系统将借助智能硬件、灵活的确定性网络以及虚拟化 IEC 61499 软件环境，实现开放式自动化系统。在各个工业领域，这些技术都有着广阔的应用前景，将工业带入一个真正智能化的时代，展现工业互联网的潜力。

参考文献

- [1].B. Scholten. The road to integration: A guide to applying the ISA - 95 standard in manufacturing[S]. ISA, 2007.
- [2].W. Dai, H. Nishi, V. Vyatkin, V. Huang, Y. Shi and X. Guan. Industrial Edge Computing: Enabling Embedded Intelligence[J]. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2019, 13 (4).
- [3].IEC 61131-3, Programmable controllers - Part 3: Programming languages, International Standard, Third Edition[S].2013
- [4].IEC 61499. Function Blocks (Second Edition) [S]. 2012.
- [5].Vyatkin V. The IEC 61499 standard and its semantics[J]. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2009,3(4):40-48
- [6].Prenzel L, Zoitl A, Provost. IEC 61499 runtime environments: A state of the art comparison[C]// In International Conference on Computer Aided Systems Theory, 2019: 453-460.
- [7].Tiegelkamp M, John K H. IEC 61131-3: Programming Industrial Automation Systems[M]. Berlin/Heidelberg, Germany: Springer, 2010.
- [8].Heiser G. The role of virtualization in embedded systems[C]// Proceedings of the 1st workshop on Isolation and integration in embedded systems. 2008: 11-16.
- [9].Martins A, Costelha H, Neves C. Shop floor virtualization and industry 4.0[C]// 2019 IEEE International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions (ICARSC).2019: 1-6.
- [10].Leon D V, Miori.L, Sanin J, et al. A lightweight container middleware for edge cloud architectures[M]. Fog and Edge Computing: Principles and Paradigms.

2019:145-170.

- [11].Pigan R, Metter, “Automating with PROFINET: Industrial communication based on Industrial Ethernet”, John Wiley & Sons, 2008.
- [12].Brooks P. Ethernet/IP-industrial protocol[C]// 8th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, 2001(2): 505-514.
- [13]. Jansen D, Buttner H. Real-time Ethernet: the EtherCAT solution[J]. Computing and Control Engineering, 2004, 15(1):16-21.
- [14]. 戴文斌, 张瀛月, 康嘉乐, 等. 工业边缘计算软件低代码设计方法[J]. 自动化博览, 2023, 40(02):40-44.