



工业互联网产业联盟  
Alliance of Industrial Internet

CAICT 中国信通院

# 流程行业边缘计算 解决方案白皮书

Alliance of Industrial Internet

中国信息通信研究院  
工业互联网产业联盟

2022年4月

## 编写说明

编制单位及编写组成员（排名不分先后）：

中国信息通信研究院：

胡钟颢、王哲、朱璿、曹蓟光、汤立波、黄颖

中国移动通信集团有限公司：

罗达

中国联合网络通信有限公司：

陈丹、肖羽、傅成龙

中国电信研究院：

段惠斌、丁鹏、薛裕颖

大庆油田信息技术公司：

纪德伟、孙宇

中国华能集团有限公司信息中心：

孟子涵

华为技术有限公司：

孔令波、黄还清

腾讯云计算（北京）有限责任公司：

彭超、刘海涛

杭州和利时自动化有限公司：

翟庆明、李昱、孙继超

浙江蓝卓工业互联网信息技术有限公司：

邵黎勋

天合云能源互联网技术（杭州）有限公司：

方斌

石化盈科信息技术有限责任公司：

程中林

恒力石化股份有限公司：

余斌

罗克韦尔自动化（中国）有限公司：

李铮、郑韬、林李智



工业互联网产业联盟  
Alliance of Industrial Internet

## 声 明

本报告所载的材料和信息，包括但不限于文本、图片、数据、观点、建议，不构成法律建议，也不应替代律师意见。本报告所有材料或内容的知识产权归工业互联网产业联盟所有（注明是引自其他方的内容除外），并受法律保护。如需转载，需联系本联盟并获得授权许可。未经授权许可，任何人不得将报告的全部或部分内容以发布、转载、汇编、转让、出售等方式使用，不得将报告的全部或部分内容通过网络方式传播，不得在任何公开场合使用报告内相关描述及相关数据图表。违反上述声明者，本联盟将追究其相关法律责任。

工业互联网产业联盟  
Alliance of Industrial Internet

# 前言

新一轮产业变革进程不断加速，以信息通信技术驱动的数字化转型成为企业发展的重要方向，工业互联网、5G 等垂直领域应用的蓬勃发展，带来了大量数据就近处理和分析需求，边缘计算通过就近提供边缘智能服务，成为产业数字化转型的关键支撑技术。

为推动边缘计算产业发展，工业互联网产业联盟在 2020 年发布《离散制造业边缘计算解决方案白皮书》。根据离散行业的特点，针对其制约因素，阐述了边缘计算的发展和应用是如何打破桎梏，推动了离散行业的数字化转型。

在《离散制造业边缘计算解决方案白皮书》基础上，工业互联网产业联盟进一步调研流程行业转型所面临的阻碍以及当前边缘计算在其应用的现状，继续探究边缘计算为流程行业工厂现场带来的价值，基于原有框架建立了适用于流程行业边缘计算参考实施架构和技术体系，最后提出流程行业边缘计算技术和产业化发展意见，发布《流程行业边缘计算解决方案白皮书》。

# 目 录

一、边缘计算在流程行业的应用价值 .....	1
(一) 流程行业高质量发展对边缘计算能力的需求分析 .....	1
1. 流程行业数字化转型面临的挑战 .....	1
2. 边缘计算为流程行业高质量发展带来的现场价值 .....	2
(二) 边缘计算在流程行业的应用现状 .....	4
1. 边缘计算在电力行业的应用现状 .....	4
2. 边缘计算在石化行业的应用现状 .....	5
3. 边缘计算在钢铁行业的应用现状 .....	7
4. 边缘计算在水泥行业的应用现状 .....	8
5. 边缘计算在有色金属行业的应用现状 .....	9
二、流程行业边缘计算体系功能架构 .....	10
(一) 功能架构 .....	10
(二) 部署架构 .....	13
1. 5G MEC 边缘计算部署模式 .....	14
2. 现场级边缘计算部署模式 .....	17
3. 云原生边缘计算部署模式 .....	19
三、流程行业边缘计算应用典型案例 .....	21
(一) 电力(火电)行业边缘计算应用典型案例 .....	21
1. 应用场景 .....	21
2. 技术方案 .....	21
3. 实施效果 .....	23
(二) 电力(风电)行业边缘计算应用典型案例 .....	23
1. 应用场景 .....	23

2. 技术方案 .....	24
3. 实施效果 .....	25
(三) 石化行业边缘计算应用典型案例 .....	26
1. 应用场景 .....	26
2. 技术方案 .....	26
3. 实施效果 .....	30
(四) 钢铁行业边缘计算应用典型案例 .....	31
1. 应用场景 .....	31
2. 技术方案 .....	32
3. 实施效果 .....	35
(五) 水泥行业边缘计算应用典型案例 .....	35
1. 应用场景 .....	35
2. 技术方案 .....	35
3. 实施效果 .....	37
(六) 有色金属行业边缘计算应用典型案例 .....	38
1. 应用场景 .....	38
2. 技术方案 .....	39
3. 实施效果 .....	41
四、 流程行业边缘计算发展趋势及建议 .....	41
(一) 强化政策制度保障 .....	41
(二) 加速关键技术攻关 .....	41
(三) 完善标准体系建设 .....	42
(四) 推进规模应用部署 .....	42

# 一、边缘计算在流程行业的应用价值

## （一）流程行业高质量发展对边缘计算能力的需求分析

### 1. 流程行业数字化转型面临的挑战

随着工业化和经济的快速发展，我国的流程行业正向着数字化、智能化的方向发展转型，但是制约流程行业转型的因素仍存在很多，主要体现如下：存在信息孤岛现象，信息传递不及时全面；数据价值挖掘不深入，存在行业 know-how 壁垒；传统设备维护资源耗费大，预测性维护应用不广泛；各系统层次架构不清晰，异构系统间数据协同程度低；智能控制技术应用不足，节能技术改造任重道远等均给流程行业的转型发展造成阻碍。

#### **存在信息孤岛现象，信息传递不及时全面。**

流程行业大量设备和传感器处于环境极端、地理偏远地区，不具备良好网络条件，设备运行状态数据无法被及时采集。同时，设备普遍转数较高且数据量大，也给采集造成了困难。另外，不同供应商不同时期上线的控制系统、监视系统、制造执行系统以及辅助业务系统间往往相互独立，数据不能有效地交换和共享。

#### **数据价值挖掘不深入，存在行业 know-how 壁垒。**

流程行业现场实时产生大量数据，包含着丰富信息，这些信息真实地反映着现场的运行状态，对其有效挖掘和利用对于企业的生产优化和正确决策有重要意义。一般情况下，现场数据分析主要由具有丰富行业经验的专业人员完成，存在技术壁垒，而且，靠专业人员完成

的数据分析有时也难以全面覆盖所有数据。另外，流程行业某些传统工艺会受环境、季节、催化剂和传感器老化等因素影响，具有时变性质，固定参数的静态模型因不能表示这样的时变过程而产生大量误报，造成工厂或设备单元停产，导致损失。

### **传统设备维护耗费大，预测性维护应用不广。**

流程行业产线固定、设备投资大，需要通过维护延长设备使用周期。目前，对设备的检修维护模式为计划性检修，根据设备生产商提供的经验或数据，制定周期性维护计划，当设备达到检修期限，无论设备状态如何，都统一进行更换、升级。预测性维护通过实时采集设备运行数据进行分析判断，按需检修，能够有效降低人员工作量、减少现场停机时间和提高设备使用寿命，但目前其应用在传统流程行业并未广泛铺开。

### **智能控制技术应用不足，节能技术改造任重道远。**

流程行业高耗能、高排放，普遍使用能源管理系统进行企业能耗的监视和管理调度，这种事后处理方式，难以满足现阶段“双碳”对于企业节能减排的相关要求。智能的信息模型和先进的控制算法的应用，可以完善现有的能源策略和优化工艺流程，实现对能源的统一调度、动态平衡和高效配置，从根本上减少能耗和排放，但相关解决方案在流程行业的应用仍不充分。

## **2. 边缘计算为流程行业高质量发展带来的现场价值**

边缘计算是在靠近物或数据源头的网络边缘侧，融合网络、计算、存储、应用核心能力的分布式开放架构，就近提供边缘智能服务，满足行业数字化在敏捷联接、实时业务、数据优化、应用智能、安全与

隐私保护等方面的关键需求。边缘计算主要在如下方面给流程行业带来现场价值：

### **增强数据处理的实时性，减轻云端计算压力。**

边缘计算在现场侧对设备、传感器和仪表等终端进行数据采集，有效避免了以往将数据长距离传输至中心机房或云端而面临的网络资源不足和信号干扰等问题的风险，可以最大限度地保证数据采集的实时性。同时，通过边缘侧提供的算力，可以对采集的数据进行实时的过滤、处理、分析和反馈，极大地减轻了全量数据在云端进行处理的算力压力。另外，通过边缘计算提供的开放性的平台，可以实现不同供应商不同时期上线系统的利旧和互通融合。

### **充分发挥数据价值，助力打破行业 know-how。**

边缘计算结合人工智能可以助力流程行业数据价值的深入挖掘，解决现有数据模型不能反应真实场景的问题，打破行业 know-how 壁垒。边缘计算对从传感器和执行器采集的数据进行过滤、预处理，然后训练人工智能模型，使模型不断更新，最大程度接近真实场景，从而提高工艺模型的精确性，减少误报，提升数据的价值。

### **结合预测性维护技术，提升设备生产效率。**

流程行业因其设备需保证长时间无故障运转，设备维护尤其重要。边缘计算可以通过设备数据的获取和特征提取分析，进行状态识别和设备健康度预测，最后通过判定预测可信度来确定维护策略并实施维护。边缘计算结合预测性维护可以优化维护成本、最大化提升生产效率、减少设备停机时间和提高设备的使用寿命。随着传感器和边缘计算技术的日趋成熟，预测性维护的准确性和成熟度会更快地发展和突破，在流程行业的应用也会越来越广泛。

## 优化生产工艺，助力节能降碳。

流程行业传统的控制方式是 PID（比例-积分-微分）控制，缺点是难以处理多变量和控制滞后。目前，有些工业控制企业集成了模型预测控制软件系统作为系统级边缘计算载体，通过利用预测模型、系统历史数据以及未来输入来预测系统未来的输出。这种边缘计算控制系统能够通过降低系统反应时的波动振幅来改造整体工艺的效果和量化价值，达到降低能耗、减少碳排放的核心目的。同时，利用动态数学模型可以快速进行工程投入，缩短模型学习时间，降低实施成本。

## （二）边缘计算在流程行业的应用现状

### 1. 边缘计算在电力行业的应用现状

电力产品在人们社会生活中的特殊地位，使其在发电、输电、配电、售电和用电过程中的实时性和可靠性具有极强的经济意义。电力企业生产过程中有信息流、物质流和连续的能源流产生，并伴随着复杂的物理化学反应和物质能源转化传递。提高电网企业和发电企业在设备数据收集、设备智慧运维和用电发电安全监控等方面的效能，成为亟待解决的难题。边缘计算技术的应用可以帮助电力行业解决上述难题。边缘计算在构建低时延、轻量级、高可靠和智能化的智慧电网方面具有明显优势，目前，边缘计算在电力领域的应用以实时数据采集和边缘智能为主。首先，边缘计算解决了从控制系统有序高效地采集实时数据，并按照统一的数据标准把数据汇集到区域数据中心的问题。在现场实时数据采集的过程中，标准的统一网关逐步形成，广泛的协议解析能力也得到强化，使现场数据采集更加标准化、自动化和

灵活化。其次，随着边缘端的数据处理能力不断强化，边缘智能将成为电力行业发展的重要趋势。

当前，头部能源行业企业均积极引入边缘计算来提升企业的数字化和智能化水平。华能集团自主开发了工业智能平台，其功能组成分别为边缘侧数据采集和汇聚，数据计算和挖掘结果展示。目前该系统已在小湾电厂完成搭建，在实时数据监视报警的基础上，实现了数据聚合监视、特征值报警、故障预测等功能，提升了设备运行、维护和检修精细化、精益化水平；国家能源集团下属的乌海能源，在边缘侧应用了电厂输煤皮带安全管控系统，该系统实现通过智能相机对结构进行图像采集、分析、计算，并利用图像算法针对结构光的特征变化进行识别，判断皮带是否有发生撕裂的状况，以提升企业安全管控水平；大唐电信的边缘物联终端已应用于雄安新区的开关站，该边缘物联终端集电参量采集、环境监测、全景可视化等智能化功能为一体，远程对设备运行状态进行监控，进而降低设备故障发生频率。对频率较高的故障，通过边缘计算分析其趋势性，分析故障发生原因，科学评估设备状态以减少运维工作量，为用户提供更好的运维服务。

## 2. 边缘计算在石化行业的应用现状

石化行业包括石油石化和化工两大部分，主要是对原油和天然气进行加工、销售。石化行业涉及的原料危险性大，许多物料易燃、易爆、剧毒和强腐蚀。另外生产过程需要经历多物理、化学过程和传质、传热单元操作，控制条件苛刻且易发生灾难性事故。同时，生产装置大型、技术资金密集，一旦发生事故无论影响还是财产损失，其规模均难以想象。边缘计算因其实时性和智能性的优势，可以在智能监控

和网络安全防护等方面助力石化行业的安全生产。目前边缘计算在石化行业主要有三方面应用。一是边缘计算赋能油气生产数据采集和协议整合。边缘计算将端侧产生的数据进行采集和处理，形成实时的示功图数据传输至 SCADA、DCS 等系统。在此过程中，生产单元繁杂的通信协议被统一转化为 OPC UA 等协议。二是边缘计算助力石化厂商智能化建设。利用视频摄像头采集的源数据，边缘计算可以智能化地应用，如进行井场内的电子围栏告警、安全作业监管、环境保护监管等。三是边缘计算支持石油石化生产网络的安全防护。安全防护是石油石化生产网络中的一项重要前提，目前一个很突出的矛盾是在边缘侧部署安全设备投入较大，且会降低通信效率和运维效率，一定程度上影响生产业务安全。因此可在通信设备上构建边缘计算能力，将一定的安全功能集中在交换机等网络设备当中，由边缘计算赋能端侧安全管控。

石化行业的龙头企业，为解决行业安全生产的痛点问题，目前都在企业内积极促进边缘计算应用的落地。中国石油构建以生产指挥系统和应急管理系统为主要模块的边缘计算平台，借助视频终端、工控采集终端 PLC 的边缘计算智能监控、智能分析功能，来实现油气生产建设实时监控，异常情况实时报警，信息指令实时推送等功能，提升了本质化安全管理水平和生产管理效率，助推生产调度工作方式变革；中国石化应用网络切片+MEC+UPF（用户面功能）技术，形成石油化工企业的整体边缘计算解决方案，在物料管理、生产调度、环境监测等多场景实现节电减排，节省燃料减排；恒力石化的边缘计算数字孪生项目建设，在设备域应用边缘计算对物理设备建立实时、系统的数字孪生模型，实时分析海量数据，预测设备状态，仿真设备运行，企业

因此可以随时掌握相关设备的健康状态，促进了设备监控模式的转变，提高设备管理效率并降低设备故障隐患。

### 3. 边缘计算在钢铁行业的应用现状

钢铁行业产业规模巨大、工序多且流程复杂。随着近十几年的发展建设，形成了巨大的产能，同时行业的整体自动化与信息化水平也有很大程度提高。钢铁行业生产过程中，产线控制系统产生大量的过程数据，包括设备数据、工艺数据、操控数据、质量数据、能源数据、班组数据等等，这些数据携带着生产过程的全方位信息，直接或间接的反映着生产过程细节。边缘计算可以实时地采集整理这些数据，并对此进行分析和挖掘，实现模型的优化控制和实时的在线分析等功能，促进钢铁行业的工艺、控制的优化和生产过程管理水平的提升。边缘计算目前典型应用是在钢铁行业轧钢系统的智能控制。在轧钢系统中，大功率电动机工作期间的温升会影响电动机的使用效率，一般通过通风等方式降低（稳定）电机工作温度。利用基于现场控制器 PLC 框架的边缘人工智能计算模块，可以找到工作主电机的温升与风机电机频率的关系，当工作主电机温度异常升高，自动停止主电机运转或改变通风系统的频率，以此来提高电机运行效率，减少能源浪费和降低电机损坏的可能性。

国内先进的钢铁企业，近年来都在构建实施自己的边缘设备或边缘平台。宝钢自主研发的 Pidas 系统，以边缘采集、处理和存储生产、工艺、设备和性能数据等为主要功能，在设备状态监控、远程设备运维、工艺评估设计和产品质量监测等多个工业环节已有应用，促进了边缘计算在钢铁行业的应用落地，提高企业管理决策的精度和效率；

鞍钢股份冷轧厂利用 5G MEC 和机器视觉技术，实时拍摄钢板表面图像无延时上传至 MEC，告别了肉眼检查和进口单机表检测仪时代，通过缺陷库分析比对，钢板的缺陷识别率、产出率大幅提升；首钢集团京唐公司，基于 5G 和边缘计算技术，应用于天车的钢材向酸洗车间运输功能。通过低时延的 5G 实时回传高清画面，远程调用边缘控制，实现天车的无人化，提高了运输效率且减少了人为事故的发生。

#### 4. 边缘计算在水泥行业的应用现状

水泥行业因其下游产业涉及房地产、水利、国防以及农村建设等使其在我国经济建设中具有重要地位。因其物料、生产要素以及工艺等制约，在生产过程中面临着种种安全风险，主要包括人为不安全行为、设备管理不当和设备故障、安全防护不到位、检修未落实等等。边缘计算在水泥行业的设备故障状态的工况识别和预警等方面的应用，可以确保连贯生产并达到安全管理优化的目的。边缘计算在水泥行业的主要应用是实现生产过程的视觉分析、设备参数采集、人员安全管理、危险区域巡检和 AR 远程维护等功能。同时，在皮带廊道的运输中，5G 和边缘侧机器视觉技术的结合，已实现了水泥工厂设备故障状态的工况识别和预警。另外，在安全生产监测方面，边缘计算在水泥行业的应用场景包括安全帽佩戴监测、进入去安全监测和驱动轮打滑监测等。

水泥行业领先企业，在矿山、工厂等主要生产场景中，正在深入边缘计算技术的应用。华润水泥通过 5G SA 独立组网方式，结合边缘计算方案，使主厂区、粉磨站厂区和矿山开采区的现场监测检测设备、移动终端设备和视频监控等配套系统，实现数据无线传输和集成和生

产工艺、质量检测等生产数据的实时在线分析；海螺水泥基于电信提供的 5G 边缘计算+切片技术方案，在智慧矿山和智能工厂等场景，实现 VR 工业辅助、AI 监测分析、智能安防、设备控制等应用的落地；华新水泥在边缘侧建立智能安全生产系统，结合海康威视具有边缘计算能力的 AI 摄像头，对主机设备和窑况进行巡视，并进行异常报警和自动调整处理或给出处理建议。

## 5. 边缘计算在有色金属行业的应用现状

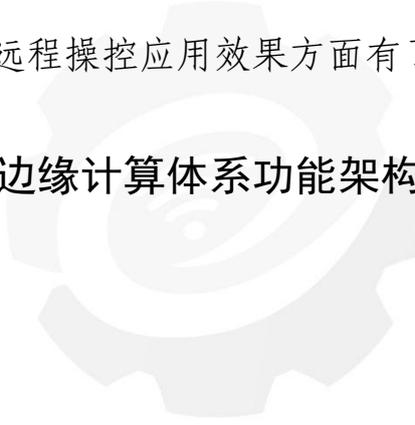
有色金属行业包括矿产勘探、矿产开采、选矿、冶炼、金属加工和终端消费品生产等领域。目前有色金属行业存在的普遍问题是处于同一链条的上下游企业的信息化建设以及企业内各部门间的信息化建设不平衡，无法形成业务流程的整合和协同。边缘计算通过其强大的连接性和协议整合能力，可以解决上述问题。目前边缘计算在有色金属行业的典型应用是实现在矿产开采生产中，各专业系统的联通。在井下矿产开采中一般建有井下环境监测系统、井下人员定位系统和井下通风系统。各系统间相互独立互不联通，无法充分合理地协调各系统功能，不利于通风管理及通风安全和能耗管控。边缘计算集成通风系统的动态仿真应用，建立了与井下环境监测系统、井下人员定位系统和井下通风系统的联通，通过获取各种传感器采集风量、毒害气体的实时参数，以及井下人员的分布状态，通过精确分析计算，实现按需调整风机风量，达到安全和节能最终目的。

国内有色金属行业的典型性企业，为企业内降本增效，近年来纷纷在边缘计算技术上有所布局。中铝智能通过建立边缘计算终端对生产设备、人工数据、仪器仪表、监控设备等进行数据采集，对接 ERP

系统、能管系统等以实现锻造厂挤模压生产线的工艺管理、设备监控质量管理等功能，从而提高产品质量、减少能耗、管控效率，经济效益显著；紫金矿业自主打造了紫金方舟平台，该平台在 IaaS 层实现边缘端的数据采集和边缘控制，其上搭载的软件应用覆盖生产、采购、销售等诸多环节，支撑对从单个矿山到集团层面的管理，实现了企业层面的数据的互联互通；江西铜业城门山采矿基地目前部署入驻式 MEC 设备，基于 5G 切片网络营造确定性网络环境，实现生产数据不出园区，同时也通过边缘计算节点的就近部署，显著降低业务传输时延，使得采矿设备在远程操控应用效果方面有了显著提升。

## 二、流程行业边缘计算体系功能架构

### （一）功能架构



工业互联网产业联盟  
Alliance of Industrial Internet



图 1 流程行业边缘计算功能架构图

基于流程行业特点，根据边缘计算在流程行业的应用现状，本文概括提出流程行业的边缘计算功能架构如图 1。在边缘层主要包括边缘控制、边缘网络、计算、存储、运维和边缘智能等类别的功能。

边缘控制能力主要体现在边缘端对现场层设备的控制能力，包括传统流程行业的逻辑控制、PID 控制、批量控制、复杂控制、联锁控制和运动控制等。

边缘网络能力包括了数据采集、协议转换、5G 网络、TSN 和专业系统联通等。数据采集和协议转换是边缘端的基本能力，边缘端通过

有线或无线方式与现场层设备、传感器、执行器建立物理连接后，通过边缘端支持的多种总线协议和工业以太网协议（例如 Profinet、Ethernet/IP、Modbus TCP、Modbus RTU、OPC UA、OPC DA、Profibus-DP、Deveice NET、Etherncat 等）进行大批量数据的实时采集。同时，通过边缘端的协议解析能力，将采集数据进行过滤、映射或转换等处理，再通过 OPC UA 或 MQTT 等协议北向传输处理过的数据。5G TSN 在边缘计算网络端应用具有确定性趋势，兼具 TSN 的确定性传输、低抖动特点和 5G 的低时延、高可靠特点，是未来工业互联网无线化发展的重要基础。专业系统联通是流程行业边缘计算应用能力的特有特点。流程行业普遍厂区跨度大、生产危险性高，所以应用很多专业系统协助管理，边缘计算通过其网络能力，将各系统连接成网，实现了专业系统间的数据共享和服务协同。

边缘层的计算能力在流程行业的应用主要包括数据分析、数据清洗和异构计算等。数据分析指的是通过规则引擎对采集的数据进行数据筛选、过滤或抽取等预处理。数据清洗是在边缘对数据进行审查和校验，从而删除重复信息和纠正错误以达到数据一致性的目的。因工业现场协议繁多且数据量巨大，所以在边缘端实现数据初步整合和清洗是必要的。另外，边缘层设备种类多样，在资源、架构、能耗等方面存在较大差异，存在不同的计算需求，所以在边缘层构建集成多芯片的异构计算功能，提供并行计算、人工智能、视频编解码等适用于不同工业场景的计算能力。

边缘层的存储能力主要包括数据存储和数据备份。边缘端可提供典型的数据存储能力：（1）时序数据。存储现场产生的实时数据如电网发电设备的集中监测数据和石油化工有限公司油井、运输管线运输车队

的实时监测数据等。(2) 业务数据。存储如现场操作人员的登录、登出系统等非实时变化的业务数据。(3) 非结构化数据。存储现场摄像头产生的视频数据等。同时，边缘端不仅可以将以上类型数据进行存储，也提供数据备份和数据恢复能力，防止系统崩溃后数据丢失的情况发生。

边缘层的运维能力是边缘层的基础能力，主要包括日志管理、监控中心和安全管理。日志管理是对边缘端的系统或应用的用户操作、环境和数据等状况进行记录，以文件或数据库等方式进行存储、删除和调取查阅等管理。监控中心是对边缘系统的软硬件状态进行的实时监控，并通过仪表盘等形式向管理者进行展示或交互。安全管理主要是对边缘系统的身份认证、网络安全和数据安全等进行限制和管控。

边缘层智能能力在流程行业应用包括边缘智能和智能控制。边缘智能是边缘计算与人工智能融合的新范式，提供了边缘侧的建模能力、数据汇聚和分析能力、控制能力。边缘智能从延迟、内存占用量和能效等方面，进行边缘计算节点上智能推理加速和多节点智能训练算法的联动，完成轻量级、低延时、高效的人工智能计算。

边缘层和云层的系统，会开放能力给各个应用，应用在其生命周期内，通过 API 的形式调用平台的能力，以完成执行逻辑。流程行业典型的应用包括视频监控、行为监管、排放监测、预测性维护等。

## (二) 部署架构

边缘计算已经进入全面产业化初期阶段，已初步形成了 5G MEC、现场级边缘计算、云原生边缘计算三种发展路径及其对应的部署模式。由电信运营商主导的 5G MEC 路径，依托运营商网络优势实现对网络

能力和计算能力的融合和调用，适用于对网络能力要求较高的应用；由设备厂商和工业企业主导的现场级边缘计算，依托行业专业优势，适用于对时延、安全、性能和自我管理要求严格的应用；由 IT 企业主导的云原生边缘计算，依托云计算优势，关注边缘协同，适用于对云服务延申有需求和数据管控有较高要求的应用。<sup>[2]</sup>上述三种边缘计算部署模式的发展各具优势，同时也会受到相应的限制。在实际的部署中，这三种并非是完全互斥、没有交集。相反，能够在合理的范围内相互融合，促进标准的统一，将进一步推进边缘计算产业化和规模化。

### 1. 5G MEC 边缘计算部署模式

流程行业工厂内网络连接的主要方式是采用现场总线和工业以太网等有线连接方式，但因其广泛具有生产区域跨度大和大量使用动设备等问题，往往很多生产重要环节的数据点采集困难，难以做到应采尽采，如果重新布网难度很大且成本较高，因此采用 5G MEC 的方式是比较好的解决方案。5G 实现了控制面和用户面的分离，其核心网控制面中心化，而用户面功能下沉到边缘层，数据可以在边缘就近处理，是保证稳定低时延的手段，从而实现数据的全面及时的采集和处理。

MEC 一般可分为边缘计算管理平台(MEMP)及边缘计算平台(MEP)。MEMP 负责资源管理及业务编排、运营管理，与边缘的业务实现没有直接关系，可不占用边缘稀缺服务器资源，一般集中部署于运营商省级中心，与 5GC 部署位置相同。MEP 可为用户提供网络、计算、存储等基础能力，并可承载业务应用，与 5G UPF 的下沉和分布式部署相互协同，可下沉到地市、区县，甚至是边缘接入局所及工厂机房。5G

MEC 边缘节点的建设，主要指 UPF+MEP 的建设部署。UPF 和 MEP 采用松耦合方式，可分别独立部署。

根据用户对于成本、性能、安全要求不同，主要有以下三种模式。

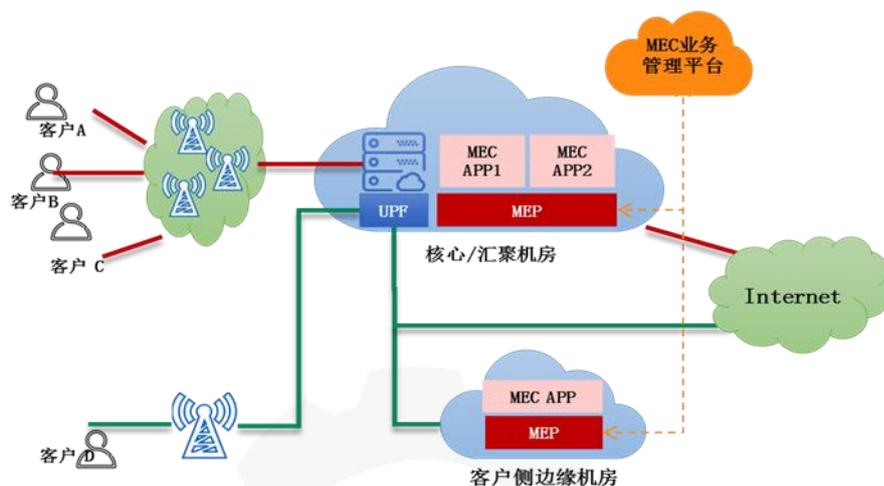


图 2 5G MEC 建设部署模式

### 1) 边缘网络和边缘节点共享 (UPF 共享+MEP 共享)

成本较低，适合要求提升业务实时体验的企业。UPF 网元及 MEC 平台均部署在运营商机房，客户共享 UPF 网元，运营商为不同客户配置不同的分流策略。MEP 采用多租户模式，为不同客户分配逻辑隔离的基础资源和业务资源。UPF 网元及 MEP 部署层级越高，部署和维护保障越方便，机房条件越好，客户业务得到更好运维保障且资费也会相对低廉。

### 2) 边缘网络共享、边缘节点专享 (UPF 共享+MEP 专享)

成本相对较高，适合可靠性要求高，网络时延 20ms 以内，业务量较大的企业。UPF 网元部署在运营商机房，MEP 部署在运营商边缘机房或客户侧机房。UPF 与 MEP 之间采用专线对接。客户共享 UPF，为不同客户配置不同的分流策略。MEP 资源专享，应用部署及数据存储可按需均在客户本地，满足企业本地化独享的安全需求。MEP 部署

在边缘机房或客户侧，对维护水平要求较高，需要更高的业务保障和响应。

### 3) 边缘网络和边缘节点均专享 (UPF 专享+MEP 专享)

成本较高，适合对数据隔离要求高，业务量大的企业。针对客户对数据安全、本地部署、处理时延有极高要求的，可提供定制化部署服务在网络安全的前提下，UPF 网元和 MEP 都部署在客户侧接入机房，客户专享 UPF 网元和 MEP。提供专用边缘分流服务，实现本地数据终结，满足数据不出厂的要求。

整体来讲，5G MEC 的组网、部署应视服务范围、用户特点，按需采用差异化的部署方式，一般是按时延要求来选择部署，对于时延不敏感的超大带宽业务也可酌情下沉一级部署。部署过程中还需考虑安全要求，比如边缘 UPF 和 MEC 平台、MEC 平台与云平台的组网安全以及 MEC 平台与工厂应用间的安全防护与隔离等。MEC 部署在更高层级的机房，可以为设备带来更高的容灾、维护和安全级别、从而为业务带来更高的安全性保障，且可以提高 DC 资源池共享率。因此，建议除了工厂侧明确要求部署在本地机房的情况，在业务指标需求可以满足的情况下，MEC 平台与 UPF 同机房部署，并尽可能的部署在更高层级的机房。

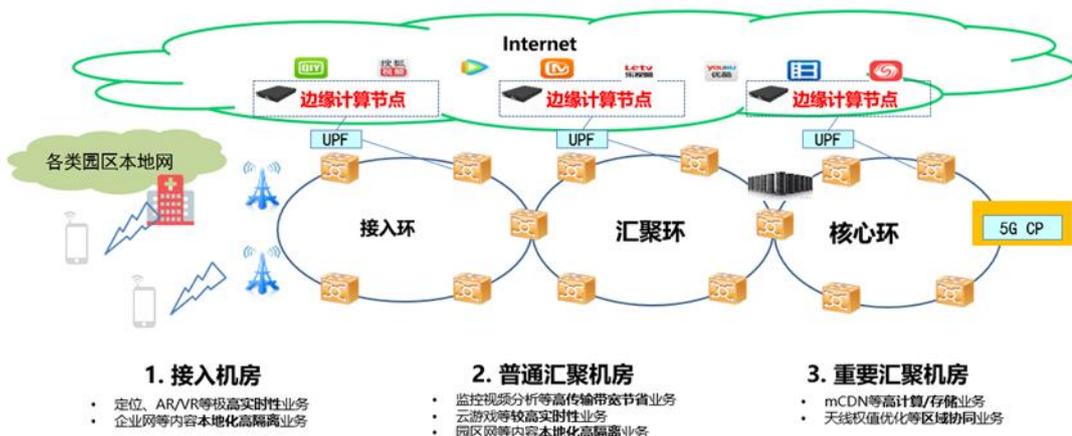


图 3 5G MEC 部署机房位置

## 2. 现场级边缘计算部署模式

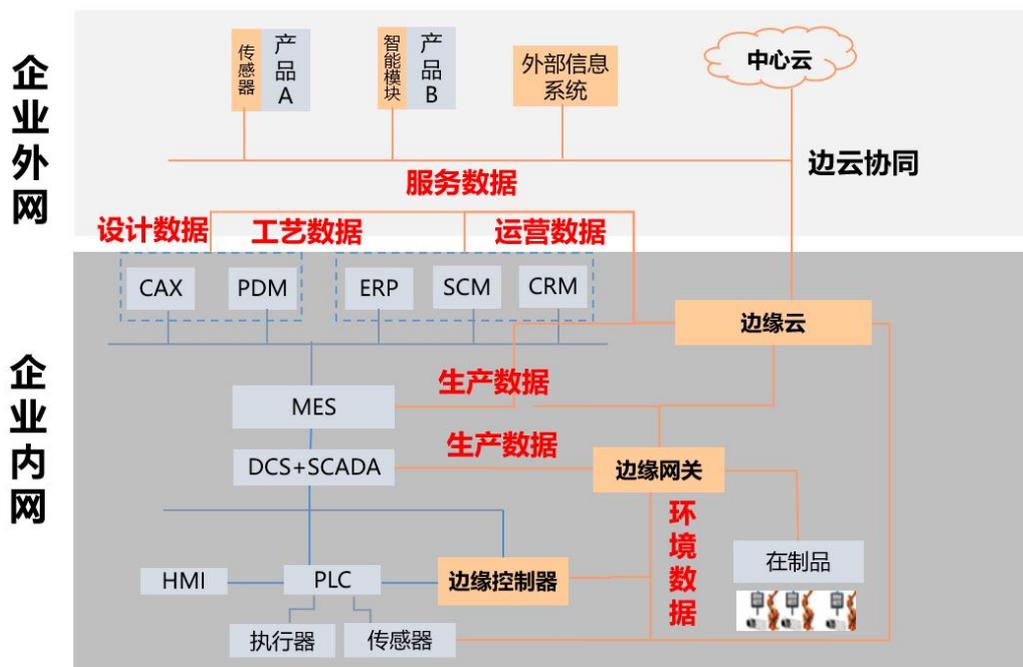


图 4 现场级边缘计算部署架构图

流程行业是闭环工艺流程，每个工艺的数据节点位置不同，边缘计算的部署和逻辑与离散制造业有区别。流程行业对于边缘计算的部署需求：（1）在设备单元层级，部署边缘计算功能，对工艺设备、风机、水泵等单体设备（不可生产交付物设备）进行维护、诊断、预测

分析保证工艺参数稳定。(2) 在 DCS 系统之上部署边缘计算系统, 对整个生产工艺的各个连续工序的计算优化, 给出最优解, 并且闭环执行指令。

参考流程行业边缘计算的部署需求, 并结合流程企业的实际情况, 本文提出如图 4 中所示的流程行业现场级边缘计算部署模式。在企业内部, 自动化和信息化系统主要分为三个层级即过程控制层(如 DCS、SCADA、PLC 等), 制造执行层(MES 等)和管理决策层(ERP 等)。因流程行业生产特点, 大部分流程企业自动化信息化程度比较高, 系统建设相对比较完善。边缘计算的实施架构不会取代原有系统, 而是与其进行紧密结合。边缘计算一方面可实时地采集海量现场数据, 然后或是利用其本身提供的算力进行动态的数据过滤、分析和处理, 或是协同中心云并结合边缘智能, 将数据过滤后提供给模型进行训练; 另一方面, 经过边缘计算处理的结果数据也可以作为源数据提供给其他系统, 作为参考和决策的依据。

流程行业的边缘计算实施架构包括边缘控制器、边缘网关、边缘云。

边缘控制器在边缘侧连接各种现场设备, 进行工业协议的转换和适配, 统一接入到边缘计算网络中, 并将设备能力以服务的形式进行封装, 实现物理上和逻辑上生产设备之间通信连接。

边缘网关是指具备边缘计算、过程控制、运动控制、机器视觉、现场数据采集、工业协议解析能力的边缘计算装置。边缘网关能适应工业现场复杂恶劣环境, 满足国内主流控制器、工业机器人、智能传感器等工业设备的接入和数据解析的需求, 支持边缘端数据运算及通过互联网推送数据到工业互联网平台。

边缘云是边缘侧单个或者多个分布式协同的服务器，通过本地部署的应用实现特定功能，提供弹性扩展的网络、计算、存储能力，满足可靠性、实时性、安全性等需求，是实现 IT 技术与 OT 技术深度融合的重要纽带。

边缘计算低时延、海量连接、就近计算等特性，可以有效满足工业应用的需求，受到了垂直行业企业和设备厂商的关注，其希望借助边缘计算进一步实现业务升级并拓展业务范围。设备厂商也从单纯的提供硬件产品向“设备+边缘平台”供给转变。边缘计算与行业融合创新日益广泛，一批工业企业已开始利用边缘计算模式改变传统的制造方式，企业、行业、区域综合集成应用实践不断涌现<sup>[3]</sup>。

### 3. 云原生边缘计算部署模式

云原生边缘计算部署模式相比于上述两种部署模式，部署位置更接近云端，更适用于有统筹需求和用以管控整个企业需求的流程行业应用。采用云原生边缘计算部署，可屏蔽底层资源的差异，从而完成对异构边缘节点的兼容。

云原生边缘计算部署模式是基于容器技术和 kubernetes 编排管理能力的一种部署模式。相比于传统的物理机和虚拟机部署，云原生边缘计算部署模式具有轻量级、易部署、多环境、启动快、易扩容和易迁移等特点。

通过应用的云边协同，使边缘集群和边缘节点皆可被云端纳管。云端的一键部署，便能够下发应用至海量的边缘节点，实现云-边-端应用分发的一体化。同时，通过单元化部署，可以实现多地域的服务部署，且应用无需进行适配和改造。单元化部署可以便捷地在共属

同一个集群的不同机房或区域中，各自部署一组服务，各服务间的请求在本机房或本地域内部即可完成响应，从而避免了服务的跨地域访问。

云原生边缘计算一般有两种部署模式。

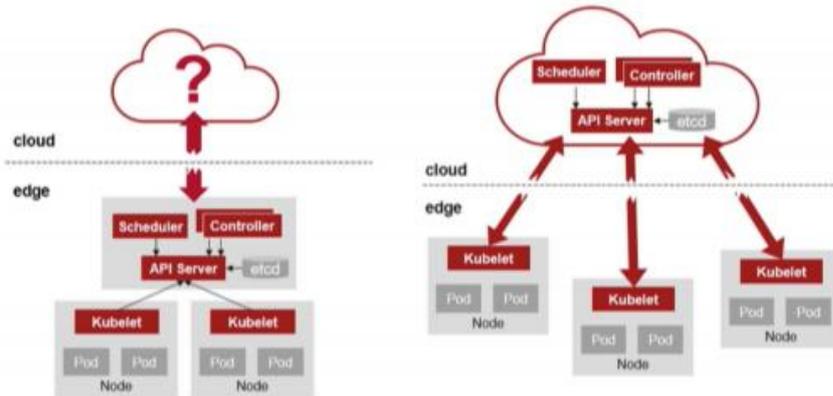


图 5 云原生边缘计算部署模式与架构

### 1) 边缘独立集群部署模式

边缘独立集群将 kubernetes 控制面下沉至边缘侧。云端主要是分布式云中心，是面向多云多集群场景的应用管理平台，支持用户将云原生化的应用扩展到分布式云，并以全局视角统一管理和运维分布式的云资源，从而对边缘端的多个边缘集群进行统一资源纳管和应用分发。这种部署模式对于边缘的资源要求比较高，一般需部署 IDC 机房级别的边缘站点。在云端和边缘端之间断网情况下，本地仍可以保持完整的 kubernetes 的管控和调度能力，使本部署模式适用于对本地业务完整性和可靠性要求较高的业务场景。

### 2) 边缘托管集群部署模式

边缘托管集群部署模式是 kubernetes 控制面部署在云端，对边缘多个节点进行统一资源纳管以及应用分发。边缘集群托管服务构建了云原生边缘计算基础设施，管理位于边缘端的计算资源。同时，可

从云端管理资源的分配和调度,并进行应用部署、升级和销毁等操作,以及云端完成系统的运维工作。边缘集群托管服务向上作为底座支撑边缘计算领域 PaaS 构建,向下支持边缘网关、服务器等边缘算力资源接入,并支持边缘自治、边缘安全容器、边缘智能等。这种部署模式对于边缘的资源要求比较低,可以部署在服务器或者是边缘网关等形态。在云端和边缘端断网的情况下可以保持单点自治,一般适用于边缘为独立节点且跨节点之间的业务关联性比较小的场景。

### 三、流程行业边缘计算应用典型案例

#### (一) 电力(火电)行业边缘计算应用典型案例

##### 1. 应用场景

大型火电行业基本完成了信息化建设,传统的 DCS 控制方案较为成熟,但相对封闭,对火电厂进一步控制优化需要定制化开发,不便于现场工程人员将现有经验转化和第三方算法供应商的集成。鉴于此种情况,边缘计算的应用满足了火电厂企业以下需求:

- 1) 最大化复用现有资产。
- 2) 灵活扩展,可方便扩展第三方及自定义算法。
- 3) 对工业人员界面优化,方便算法开发及运维操作。
- 4) 符合火电行业相关标准规范及信息安全要求。
- 5) 具有较高的可靠性、可用性及生产安全性。

##### 2. 技术方案



意服务或服务器如出现问题，则可实现服务的迁移，从而提高整个服务的可用性。边缘应用服务器采用微服务框架，提供微服务管理服务、边缘数据库服务、信息模型服务、边缘应用管理服务，边缘安全服务等。微服务框架遵循标准、安全、开放的原则，方便第三方应用程序的部署集成，同时提供了基于 Web 的可视化算法编排工具，对现场工程师优化界面，以便根据现场经验快速实现相关功能的开发。

### 3. 实施效果

- 1) 符合现有火电行业标准规范，最大程度兼容现有系统，包括行业标准规范对系统安全性、可靠性方面的要求。
- 2) 建立平台机制，支持第三方算法的扩展。
- 3) 可视化开发工具方便现场人员将现有知识经验转化为成果。

## (二) 电力（风电）行业边缘计算应用典型案例

### 1. 应用场景

风机都配有风机主控系统（SCADA），通过该系统可以远程操控风机，同时监测功率、风速、电流、电压以及温度等信号，监测更偏重于电气信号。由于风机大部件早期的机械损伤，对 SCADA 系统监测的众多电气信号基本没有影响，因此 SCADA 在监测风机大部件机械损伤方面处于失灵状态。同时，风机塔筒、叶片目前缺少有效的监测手段，导致齿轮箱磨损发现不及时、塔筒倾斜发现不及时，甚至倒塔等事故时有发生，为了弥补 SCADA 系统在风机大部件、叶片、塔筒监测方面的不足，本解决方案加装了风力发电机组边缘计算远程智能监测系统。

## 2. 技术方案

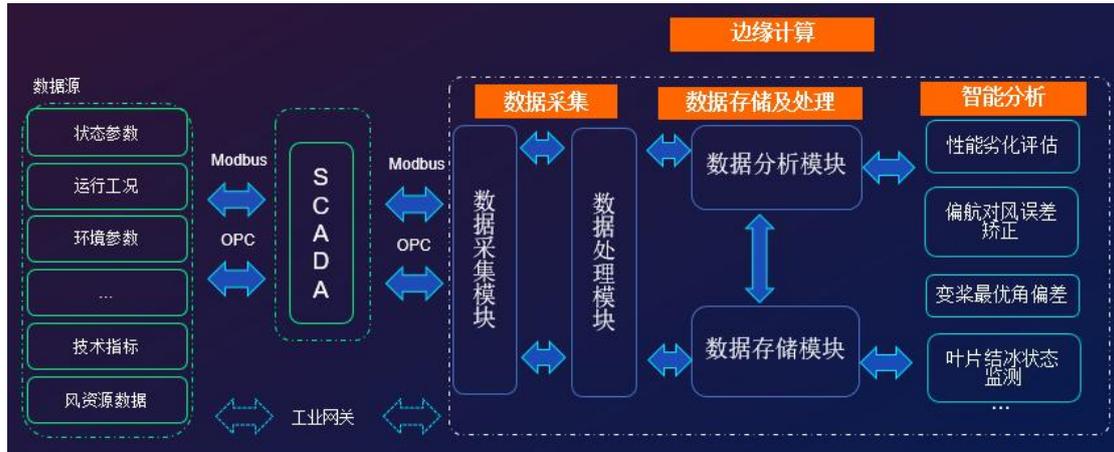


图 7 风电行业边缘计算实施架构

通过安装在机组上的各种传感器将主轴轴承、齿轮箱、发电机以及塔筒的信号、叶片振动信号、法兰间隙、螺栓通道信号采集并上传到系统服务器。通过边缘端辅助诊断功能触发自动报警，第一时间发现隐患，并及时通知现场和远程诊断中心，通过分析来诊断主轴轴承、齿轮箱、发电机缺陷、塔筒和叶片各项指标，为设备检维修提供科学的技术支撑，使设备管理人员实时、准确地掌握设备运行状态，提高企业设备管理水平，达到事前预防、预知检修的效果，保障生产的安全、可靠和稳定运行。同时，借助智能报警策略，可及时发现机组的运行异常状态，并实现异常状态的短信自动推送和移动 APP 报警推送。

### 1) 数据采集

高频数据清洗分析系统运行在工控机硬件设备上，需实现数据分析应用运行时所需的如下功能：实时高频数据采集、清洗和处理；数据存储引擎（包括但不限于时序数据库）；算法运行支撑环境；设备元数据管理；用户和权限管理；针对采集的高频数据进行预处理，有

效解决数据缺失，数据异常等问题，提高数据质量。

## 2) 智能分析

智能分析提供三种服务，包括：数据处理服务、数据存储服务和数据分析服务。

数据处理服务，包括如下功能：支持多种协议的数据接入，包括MQTT、HTTP/HTTPS、WebSocket、OPC/OPC UA；为海量设备提供毫秒级、高并发接入能力；支持设备元数据管理，定义设备关联及层级关系，保存设备相关元数据信息，如数据存储位置，数据点来源等，为其他应用和服务提供统一、完整、准确的源数据。

数据存储服务，能够实现高实时的吞吐和批量写入以及高性能的读取，还支持在查询结果上快速构建各种展示图表。能够管理至少 2 年以上的当前项目所涉及的风机数据。

数据分析服务，提供对多语言开发及运行环境的支持，包括：R、Python 和 Scala 等。支持生成实时的数据分析任务，以及对设备产生的实时数据流，进行实时分析。

## 3) 智能决策

智能决策实际上就是将每个功能模块，封装成具体的应用。根据不同的场景需求和用户体验需求，包装成可视化和交互式的完整应用功能。

## 3. 实施效果

通过实时获取风力发电机组在运行过程中的振动、转速、塔筒晃动、叶片振动、油液、螺栓应力等信号，按照既定的数据采集、报警策略，一旦状态异常，系统可实现自动触发设备异常报警机制，并通

过即时短信、邮件等方式通知风机管理人员和远程诊断专家，实现风力发电机组运行状态的判断。基于风力发电机组智能远程监测系统是解决风机大部件故障的最佳方案。

### （三）石化行业边缘计算应用典型案例

#### 1. 应用场景

旋转透平压缩机组、大型往复压缩机及遍及各流程中的机泵群是石化企业的核心，在生产中发挥着无可替代的作用。它们通常在复杂、严酷的环境下长期服役，一旦发生故障可能导致系统停机、生产中断，甚至会出现恶性生产事故，危及人们的生命财产安全。因此保证这些设备的安全、稳定、长周期、满负荷、连续优质运行，对于安全生产、提高企业的经济效益具有十分重要的意义。对动设备实施在线监测及数据驱动的故障诊断，实现动设备预知维修是达到以上目标最重要的手段之一。在动设备本体关键部位安装振动、位移、温度等传感器，对设备的状态进行实时的信号拾取，通过边缘计算设备对采集的信号进行调理、转换、计算、特征提取、状态分析，实时感知设备状态，然后将数据传输到平台，实现数据驱动对设备的健康计算、分析、趋势预测、故障诊断，确保设备的安全运行。边缘计算设备是感知层到平台层最为关键的节点。

#### 2. 技术方案

多台边缘计算设备构成一个分布式设备状态监测网络，实现全部设备的在线实时状态监测与故障自动预警和识别。状态预警除常规的

振动峰峰值、烈度外，还提供特征参数的异常预警和趋势预警，充分利用设备监测数据，全方位保障设备运行的安全性和可靠性。设备预警门限在一次大修周期内，可结合其运行数据进行统计学习，自适应设备运行环境和状态的变化。

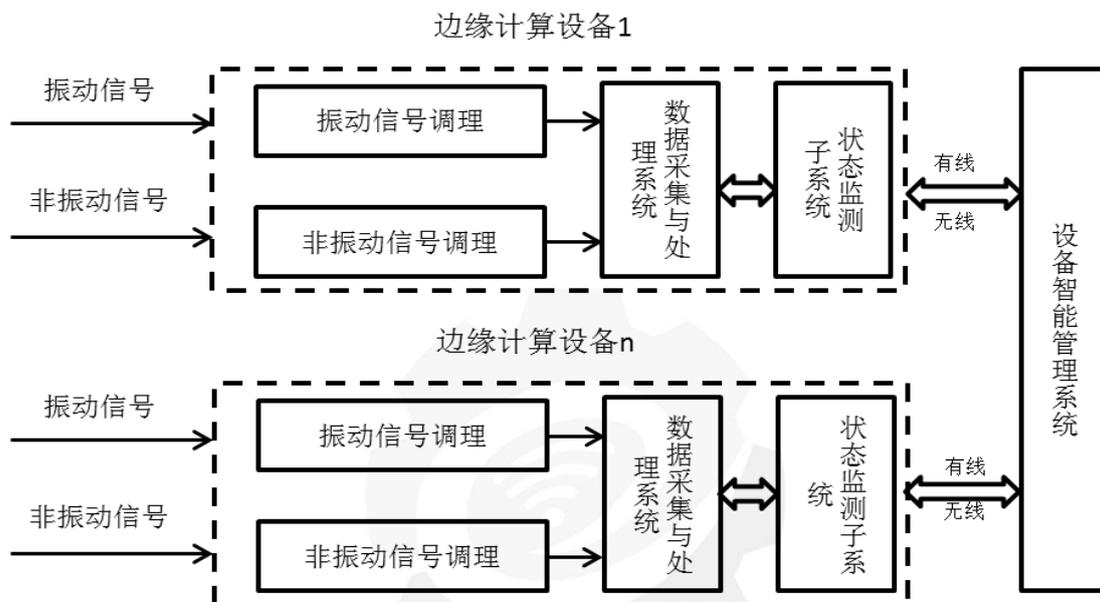


图 8 石化行业边缘计算设备功能架构

对普通机泵设备，对比关键设备监测实时性要求降低，采用边缘计算加传感器一体的无线边缘计算设备，实现信号采集、数据处理、状态判断、常见故障诊断等功能，同时设备自带电池及使用无线传输，适合快捷安装部署，提高动设备在线状态监测的覆盖率。

无线数采器用电池驱动工作，由于电池容量在现场有安全限制，因此常规的无线数采器对采集的数据至少 8 小时发送一次到服务器，导致连续运转设备的故障不能实时监测。无线边缘计算设备对采集的数据在边缘侧进行特征提取、状态判断，当设备状态正常时按较长的时间尺度发送数据；当设备有故障征兆时，实时发送数据，兼顾电池有效利用与设备状态连续监测两个维度的需要。

无线边缘计算设备，通过内部无线网与 4G 接入设备连接，将数

据传输到平台。

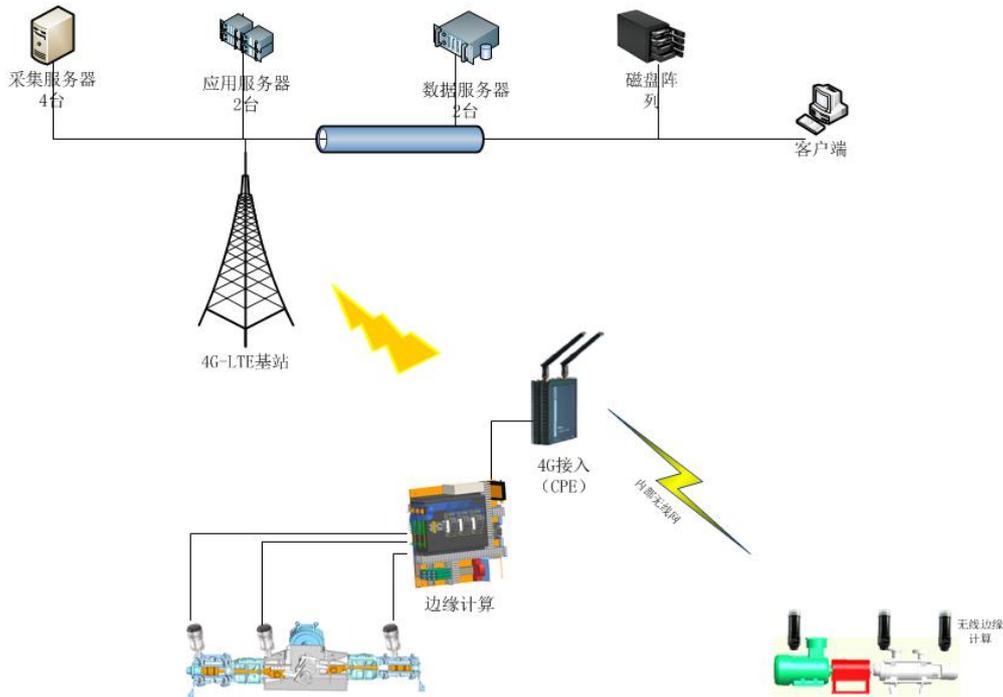


图 9 石化行业现场实施的络架构

边缘计算设备主要功能实现数据采集、特征提取、状态判断、数据智能传输。数据智能传输是基于对设备状态的智能识别，设备正常状态数据传输频率低于告警状态。设备状态识别依赖于特征提取和告警判断。边缘计算设备智能传输可以减少企业带宽压力，并能为诊断系统分担计算负荷压力。边缘计算在本方案应该功能如下：

### 1) 数据采集

边缘计算设备与安装于设备上的传感器相连，按照一定的采集策略采集传感器的信号，并通过信号调理，AD 转换等技术，将电信号转换为数字信号，即计算机可以处理的数据。采集得到的每个样本数据都是全集，包含快变量（速度、加速度、位移等）、慢变量（电压、电流、温度等）。振动数据连续同步采集，间隔不高于 20 秒，多轴独立键相整周期采样。加速度信号采样长度至少 16K，最大可达 32K，

速度信号采样长度为 2560;

## 2) 特征提取

传感器数据是物理设备对象状态的直观映射,设备每一个部件都有对应的数据特征表达。根据设备专业通用的工程理论,边缘计算设备支持对部件的专有特征进行提取,以此为基础实现对部件的故障的预警、故障诊断应用。

## 3) 数据存储

网络中断时,磁盘数据起到缓存作用,网络恢复后,可以重新传输到智能诊断系统。

## 4) 状态识别

边缘计算设备对提取的部件特征实时进行计算分析,对部件的早期故障征兆进行监测、报警,实现物理设备与数字孪生体的状态映射。

## 5) 快速诊断

边缘计算设备还能针对状态识别进一步地进行快速的真伪辨识,除了对状态识别的优化以外,还可以分担智能诊断系统的负荷,特别是随着智能设备的发展,硬件处理能力的不断提升,还可以进一步把后端更复杂的诊断能力分化到边缘侧,大大降低后端智能诊断系统的负荷,同时还能提高诊断的即时性。为方便进行能力扩展,该诊断能力也采用机器学习模型的人工智能模型,自学习进化,提高诊断精度。

## 6) 智能传输

为适应工业 4G 网络传输要求,需根据设备运行状态自主调整数据传输策略,设备正常运行时数据上传间隔较大,设备异常时缩短传输间隔被缩短。

## 7) 供电系统

采用交流转直流的方式给边缘计算设备供电。

### 8) 安全要求

边缘计算设备采用隔爆型防爆箱，满足防爆等级 ExdIICT4。防护等级不低于 IP65。多台边缘计算设备构成一个分布式设备状态监测网络，因此在工业互联场景下，边缘计算设备整机或防爆箱规格大小适当，长度与宽度不超过 550mm，厚度不超过 350mm，其具有以下特点：功耗低，连接传感器整体功率不超过 80 瓦；易维护，跳电后可自动恢复服务；系统稳定可靠，参数可远程配置。

## 3. 实施效果

本项目在设备域应用边缘计算技术对物理设备建立实时、系统的数字孪生模型，实现物理设备状态与数字孪生模型的实时映射，预测设备的状态、仿真设备的运行，然后驱动设备优化运行。本项目边缘计算应用范围：包括 52 台离心泵、3 台往复压缩机安装边缘计算设备，构成一个分布式设备状态监测网络，实现设备数字孪生的系统化的智能应用。

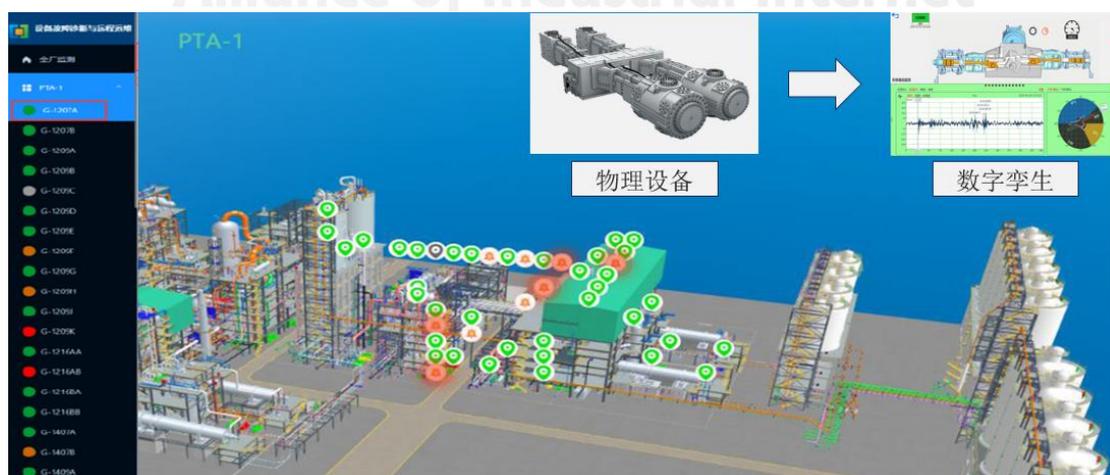


图 10 石化行业边缘计算应用实施效果图

实施效果如下：

1) 实现高速数据采集

机组振动频谱监测、分频报警、趋势报警及数据通信等功能可并行执行，满足状态监测与诊断的实时性要求。

2) 内嵌特征提取和设备状态分析与告警功能

对振动点的各个特征值（峰峰值、分频矢量、变化趋势等）和温度、流量、压力值报警提供了四个参数：报警下限、报警上限、危险下限、危险上限，实现设备常见故障初步诊断功能。

3) 采用模块化设计思想进行软件开发

降低系统软件的耦合度，使系统框架结构具有较好的开放性、扩展性和可维护性。

4) 设备运行状态自动识别

包括盘车、升降速、定速和正常运行等状态。

5) 具有黑匣子功能

装置能够保存设备最近若干天运行数据。当设备处于报警状态时，系统自动保留报警前后若干小时数据。

6) 智能数据传输功能

装置能根据设备运行状态自主调整数据传输策略，用户可以对设备正常运行时数据上传间隔进行设置，设备异常运行时则数据全部上传。

## （四）钢铁行业边缘计算应用典型案例

### 1. 应用场景

在钢铁行业的轧钢系统中的大功率电动机，其工作期间的温升会影响电动机的使用效率，通常通过水冷、通风等方式降低（稳定）电机工作温度，对于不同的风量，温升可能不同，因此通过改造通风机为变频控制，调节风量可以实现稳定的电机工作温度，同时在可能的工况下也可以实现节能的目的。利用基于现场控制器 PLC 框架的边缘人工智能计算模块，控制工程师可以找到工作主电机的温升与风机控制的电机频率的关系，如果温度异常升高，需要停止主电机或改变通风系统的频率，以此提高电机运行效率，减少能源浪费和电机损坏的可能性。

## 2. 技术方案

嵌入式边缘分析模块是 PLC 框架内插件嵌入式分析的部署平台模块，它基于 Windows 10 IoT，将边缘机器学习软件与 PLC 相结合实现智能化控制。区别于传统自动化，嵌入式边缘分析模块以一个新的、独特的方式工作，把数据算法公式变成了一个用户定义的 PLC 系统标签。

在控制器应用程序中，应用分析是实现流程改进的一种新的基本方法。在充分了解工艺过程后，应用分析可以减少对数据的需求来实现数据清理，同时也减少因数据采集而对自动化网络的负担。通过在 PLC 系统中维护关键数据降低了企业风险，并保持过程关键控制所需的高速计算和低时延。

### 1) 系统架构

## 基于控制器的边缘AI计算架构

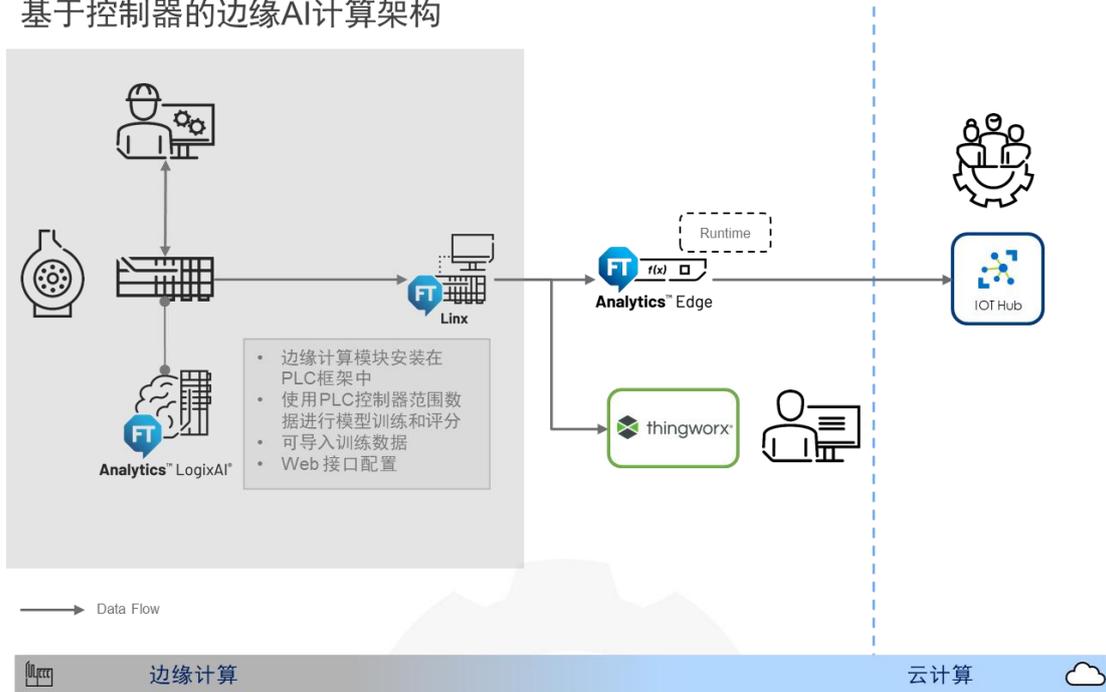


图 11 基于控制器的边缘 AI 计算架构

这种基于 PLC 架构的边缘计算分析模块，可以在设备、系统以描述性、诊断性、预测性和规范性的方式在 L0-L1 层面提供系统级的预测性分析，使用户能够在控制器应用程序内实现规定的功能。

基于 PLC 架构的边缘计算分析模块的动力来自它的模型引擎。这项获得专利的数据科学技术，将来自控制器的数据流传输到边缘计算模块的预测数据流。

虽然边缘计算分析模块简化了数据科学概念，但用户仍然需要自动化和应用专业知识才能应用。

### 2) 实施架构

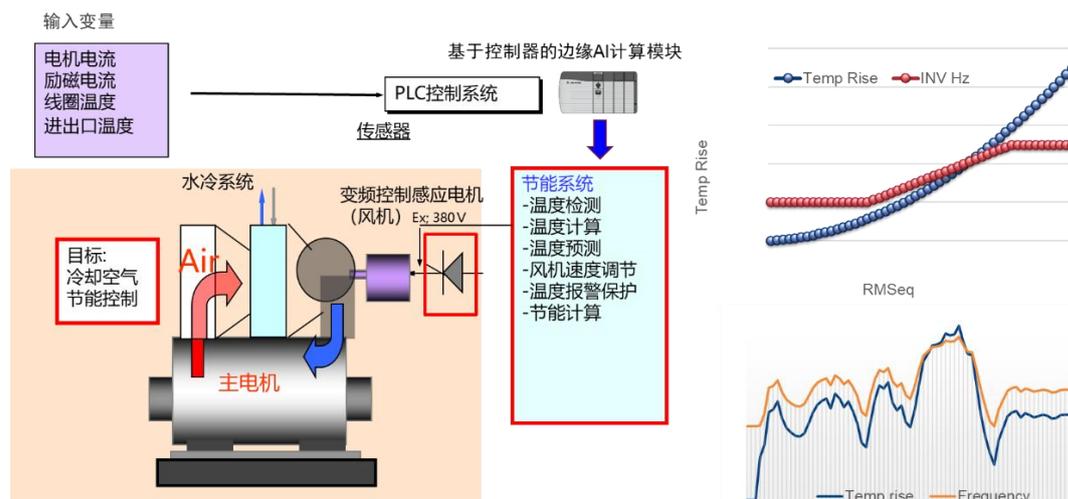


图 12 实施架构

主电机的温度变化受负载大小（电流），环境温度，水冷系统流量、温度，风机流量（频率）等多个条件影响，传统的 PID 方式无法实现稳定的控制。

当边缘计算 AI 分析模块插入背板时，我们调用“预测生成器”用于提供数据点和边界。然后建模引擎确定基于物理的静态函数或“ $f(x)$ ”方程最恰当地代表了评估中的物理应用。 $f(x)$  方程可以看作是模型，并自动生成一个用户自定义数据结构 UDT 导入 PLC 控制器。UDT 创建利用 PLC 作为高速实时流数据分析功能平台的能力。

一旦训练模型识别典型系统行为，将模型设置为计算模式。然后计算预测的控制变量值和预测的可信水平。模型可以监视系统性能以预测系统级问题，如控制变量偏离设定点，是指吞吐量的质量偏离设定点。从而实现在复杂的外部多变量条件下，根据主电机的温度变化自动调节风机的频率，达到稳定主电机温度和风机节能的目的。

### 3. 实施效果

通过嵌入式 AI 大数据分析模块，精确预测电机工作温度变化趋势，控制风机的频率。整个模型建立到自动化控制，不需要代码级的编程工作，在自动化工程师的范围内轻松实现 AI 边缘计算。与原来工频电机比较，节约电能 30%。主电机工作温度波动减少 10%。

## （五）水泥行业边缘计算应用典型案例

### 1. 应用场景

水泥行业因其行业的特点以及物料获取、生产要素、制造工艺等因素的制约，生产过程中面临种种风险，边缘计算结合智能机器视觉技术，可以解决水泥企业的安全管理问题。由工业相机，对企业内安全帽佩戴、禁入区闯入、下料口堵料等关键风险进行实时监控，通过 5G 提供的大带宽、低时延的特性，进行大数据量的视频传输到边缘系统。边缘系统对视频数据进行图像处理实时分析，对于非安全操作进行预警。

### 2. 技术方案

本项目采用 supOS 工业操作系统在集团和分厂两层构建大数据中台。单个厂区可借助 5G 实现各类终端高速接入，通过 MEC 承载 supOS 平台实现业务本地化和计算边缘化，确保业务数据的低时延和高可靠。云上 supOS 总部平台还可通过高速专网，对各个厂区的平台应用进行支撑和管理。本项目将工厂运维过程中的生产数据、视频监控数据、操作数据和管理数据进行有效融合，为工业大数据的分析和挖掘奠定

基础，构建水泥行业互联智能工厂，实现面向水泥行业的工业大数据平台和工业智能 APP 生态圈。

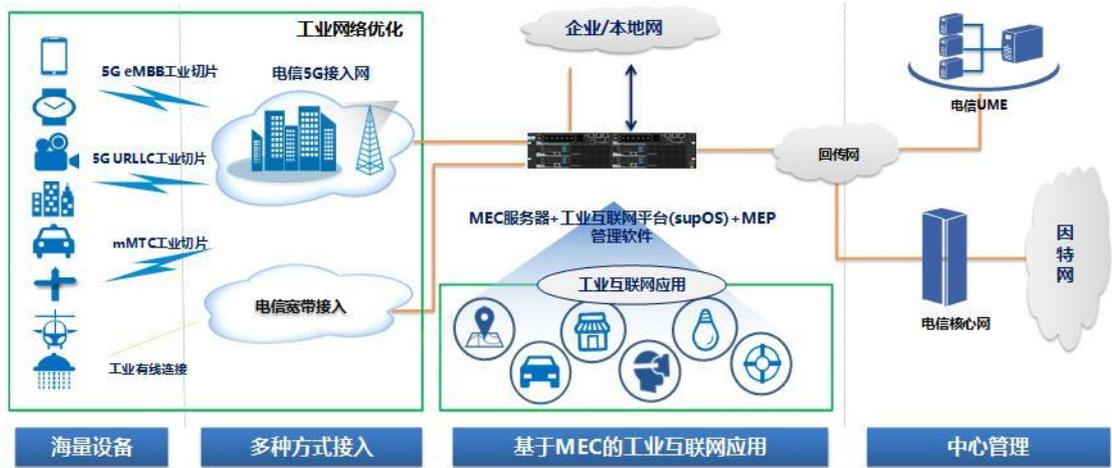


图 13 5G+工业互联网平台网络拓扑示意图

根据工业制造对无线通信的严格需求，基于 5G MEC 的行业服务化架构，以及 eMBB、uRLLC、mMTC 和网络切片等关键技术，实现制造企业内网无线接入网络和传输网络。同时，解耦 5G 网络功能为服务化组件，调用轻量级组件开放接口，满足工业企业实现按需、动态、弹缩和高可靠的网络分配、运维和管理的需求，全方位构建满足工业制造需求的 5G 通信系统。

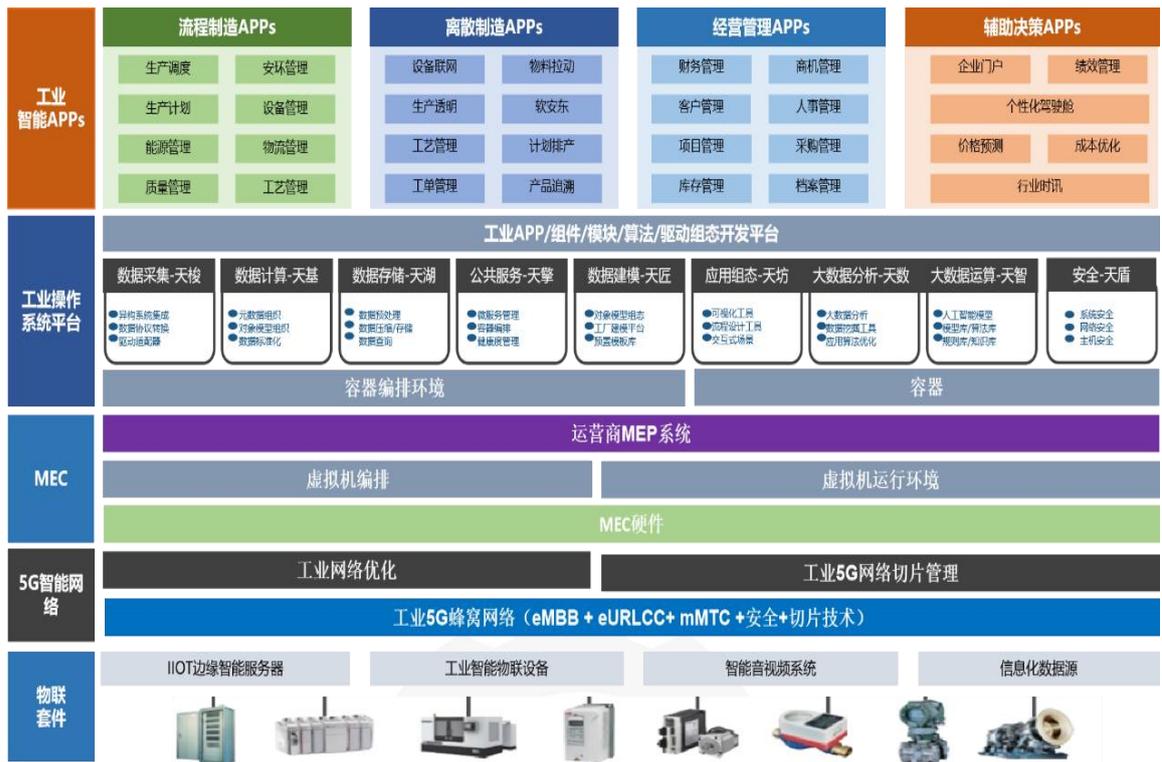


图 14 水泥行业 5G+MEC 总体技术架构图

利用 5G 低时延的特性去控制工业设备; 利用 5G 网络的高带宽特性, 结合边缘计算平台可以采集工业的实时运行数据和视频类数据; 利用 5G 的海量连接特性, 结合边缘计算平台可以连接众多的工业互联网设备, 实现设备“上网”。

### 3. 实施效果

通过 5G MEC 和 supOS 的实施, 满足企业生产管控的需要, 取得了以下效果:

- 1) 现场工业视频通过 5G 网络提供的大带宽(上行>100Mb/s)、低时延(<20ms)特性实现了快速上传。
- 2) supOS 基于实时回传的高清视频进行分析, 完成对现场工作人员安全帽佩戴、禁入区闯入、下料口堵料分析管理, 出现

异常情况会及时预警。

- 3) 厂区生产管控由原来的被动监控转为主动预警，提升了企业安全监控的效率。



图 15 水泥行业边缘计算应用效果图

## (六) 有色金属行业边缘计算应用典型案例

### 1. 应用场景

由于季节变化、催化剂失效以及传感器老化等原因，有色行业的工业过程经常具有时变的性质。此时，那些具有固定参数的静态模型已经不能表示这样的过程，从而产生大量的误报，从而导致工厂或者设备单元不得不停产来做过程安全相关得检查。以株冶关键设备鼓风机为例，其 X 相轴震动和 Y 相轴震动具有典型的时变特征，传统的监测方法均无法适应，必须不断更新现有模型。之前的模型大都部署于边缘端承担过程监测任务，而边缘计算正好适用于局部性、实时性、

短周期数据的处理和分析，如今模型需要不断更新，显然需要较大的计算资源，仅仅依靠边缘端的计算力已然无法实现。因此，一个基于边云协同的关键设备监测系统能够助力一个企业实现智能制造的重大转型。

## 2. 技术方案

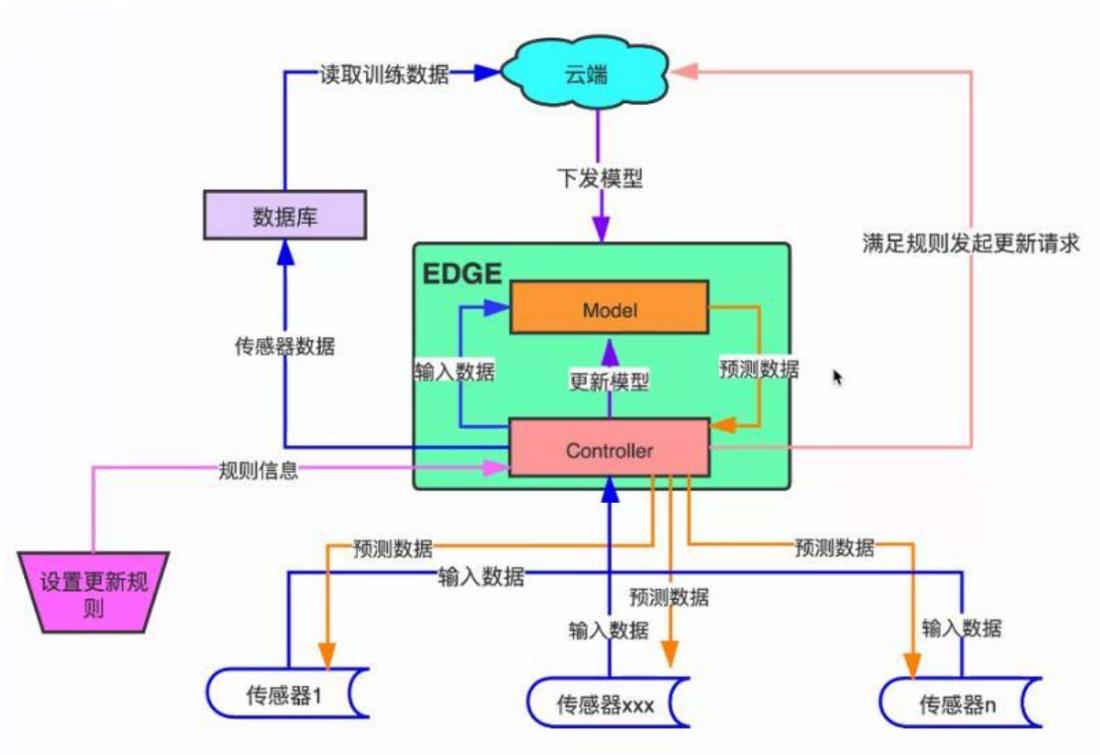


图 16 边云协同功能架构图

首先，在云端训练模型，输入训练数据，输出模型，模型包括一个字典(矩阵或二维数组)以及一个控制限(浮点数)；云端训练出模型后，将其发送至边缘端。训练过程结束，训练数据和训练的使用到此结束。

此时，云端和边缘端有相同的模型，测试过程开始。测试数据和训练数据类型相同，一条一条的发送到边缘端(使用循环进行模拟)，边缘端的检测代码进行故障的检测和诊断，不符合条件的直接判定该

数据为故障数据，进行相应的报警；如果该数据符合条件，那么将其发送至云端。

云端此时有模型更新的代码接收该数据，此段代码输入上次更新的模型和新接收到的符合条件的测试数据，输出新的模型。当云端更新固定步数后，云端会将最新版本放入模型发送到边缘端，替换边缘端的模型。

本方案的核心技术点如下：

#### 1) 字典学习和过程监测

字典学习是一种基于稀疏表示的机器学习方法，能够有效的提取数据的特征，表示能力很强。假设有训练数据  $X \in R^{M*N}$ ，其中 M 表示变量维度，N 表示样本数量。我们可以使用字典和稀疏矩阵共同来表示出训练数据。  $X \approx DW$  其中  $D \in R^{M*K}$  表示字典，  $W \in R^{K*N}$  表示稀疏矩阵。由于 X 为训练数据，其包含的 N 个样本数据均被视为正常数据，因此 D 能表示正常工况的数据，而不能表示训练数据中没有出现的故障工况的数据。

在过程检测方面，通过大量的历史数据训练出字典 D，并设定一个阈值，后续的铝电解运行数据都通过字典 D 计算出重构误差，如果较大的就认为此时处于异常，需要人工检查设备；如果较小就代表此时铝电解过程运行正常。至于界定大小就通过与训练阶段确定的阈值进行相比。

#### 2) 在线学习和边云协同

在基于传统字典学习的过程监测中只需要在云端训练之后，将模型（包括字典和阈值）部署在边缘端即可进行监测，不需要进行云边协同。然而这仅仅是在静态模型的情况下，在工业过程中，由于季节

的变动、设备的老化等因素，历史数据训练出的静态模型往往不能代表现在的数据，因此需要借助在线学习。即在监测过程的同时，将判断运行正常的数​​据发还给云端并更新模型，此时的模型是动态的，能够一直确保具有代表性。

### 3. 实施效果

通过边云协同的实施，建立动态变化的模型，减少了大量的误报。本项目所述工厂现状和需求、解决方案及案例场景，均具有代表性，在其他有色冶炼企业可以进行推广，可以产生很好的典型示范作用。

## 四、流程行业边缘计算发展趋势及建议

随着国家“双碳”战略实施不断深入以及流程行业向数字化和智能化转型的需求，边缘计算将在流程行业发挥越来越重要的作用。为促进流程行业边缘计算的发展，建议如下：

### （一）强化政策制度保障

一是全方位地制定边缘计算短期、中期和长期发展政策，充分调动流程行业相关企业参与边缘计算技术研究、应用实践以及产业生态化转型积极性；二是通过规划引导和资源整合，推动以边缘计算技术创新的政产学研融合发展；三是促进边缘计算技术示范项目的规划与建设，加快边缘计算技术的应用。

### （二）加速关键技术攻关

一是建立国内领先、国际一流的边缘计算创新实验室，加强边缘

计算政产学研协同创新，促进技术创新成果产业化；二是持续支持以轻量级操作系统、边缘智能以及边云协同为代表的边缘原生关键技术方向的基础理论研究攻关，为边缘计算技术的应用转化夯实基础；三是着力开发具有自主知识产权的边缘侧专用芯片、服务器等产品，提升边缘计算设备自主供给能力和供给质量。

### （三）完善标准体系建设

国际标准组织高度关注边缘计算标准化工作，不断细化互通接口核心技术标准，我国应当把握标准制定窗口期，出台统一开放的《边缘计算标准体系建设指南》，强化顶层设计，加强边缘计算的核心设备、关键技术、测试规范、应用指南、安全等关键标准研制，进一步促进边缘计算系统的应用程序接口、服务方式及数据格式采用统一的标准和兼容接口，同时积极完善边缘计算产品的认证机制，加速推动跨厂商边缘计算产品互联互通互操作。

### （四）推进规模应用部署

一是构建“边缘计算+N”应用体系，推动边缘计算在流程行业应用实践，并通过边缘计算开发者大赛等活动激发应用创新活力，繁荣应用生态。二是鼓励行业龙头企业按需灵活部署边缘计算基础设施，形成一批可复制、可推广的应用路径，推动边缘计算应用至企业生产、供应链资源有效组织的协同制造体系，带动中小企业开展网络化改造和边缘计算应用，提升整体发展水平。三是结合5G、工业互联网等新型基础设施建设规划及发展需求，统筹规划边缘计算基础设施规模化部署。

参考文献:

[1] 王哲. 边缘计算发展现状与趋势展望 [J]. 自动化博览, 2021, 38 (02): 22-29.

[2] 边缘计算与云计算协同白皮书 2.0 [R/OL]. 2018



**工业互联网产业联盟**  
Alliance of Industrial Internet

## 中国信息通信研究院

地址：北京市海淀区花园北路 52 号

邮政编码：100191

联系电话：010-62304839

传真：010-62304980

网址：[www.caict.ac.cn](http://www.caict.ac.cn)



## 工业互联网产业联盟

地址：北京市海淀区花园北路 52 号

邮政编码：100191

联系电话：010-62305887

传真：010-62304980

网址：[www.aii-alliance.org](http://www.aii-alliance.org)



工业互联网产业联盟  
Alliance of Industrial Internet