

# 基于 OPC UA 和 ETL 的伺服阀综合应用系统设计

何军红,黎长鑫,董方辰

(西北工业大学 航海学院,陕西 西安 710072)

**摘要:**针对伺服阀生产过程中存在的设备种类繁多、不同供应商设备之间无法交换数据、数据集成工作复杂困难的问题,提出基于 OPC UA (Object Linking and Embedding for Process Control Unified Architecture) 和 ETL (Extract - Transform - Load) 的综合解决方案。该方案使用 OPC UA 作为通信协议完成设备之间的高效通信,利用 ETL 技术设计并实现了伺服阀综合应用系统。样机试验验证了方案的有效性。该方案实现了产线信息化过程中的设备互操作能力,是确保伺服阀质量可靠性和性能一致性的关键基础技术。

**关键词:**OPC UA;ETL 技术;伺服阀;多源数据融合

**中图分类号:**TP274+.2

**文章编号:**1000-0682(2025)01-0029-07

**文献标识码:**A

**DOI:**10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2025.01.006

## Design of servo valve integrated application system based on OPC UA and ETL

HE Junhong, LI Changxin, DONG Fangchen

(School of Marine Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Shaanxi Xi'an 710072, China)

**Abstract:** To address the problems of diverse types of equipment, inability to exchange data between different vendors' equipment, and complexity in data integration during the production process of servo valves, a comprehensive solution based on OPC UA (Object Linking and Embedding for Process Control Unified Architecture) and ETL (Extract - Transform - Load) is proposed. This solution uses OPC UA as the communication protocol for efficient communication between devices and utilizes ETL technology to design and implement a servo valve comprehensive application system. Prototype experiments have validated the effectiveness of the solution. The solution achieves interoperability of equipment in the process of informationization of production lines and serves as a critical foundational technology for ensuring the reliability and consistent performance of servo valves.

**Keywords:** OPC UA; ETL technology; servo - valve; multi - source data fusion

## 0 引言

伺服阀作为一种精确控制系统中的执行器,能够实现位置、速度或力的高度精准控制。其高精度、高响应速度和可编程性等特点使其广泛应用于工业自动化、机器人技术、飞行器和航空航天等领域。伺服阀技术的发展为提高生产效率、精确控制

运动系统以及推动制造业现代化提供了强有力的支持。然而,在伺服阀生产车间中,常常需要将不同厂家和种类的机器设备整合在一起。这些设备之间的通信方式各不相同,私有协议众多,而且设备语义信息也不一致,导致了生产过程中多源异构数据无法有效利用,制约了工业设备数据统一管控的发展,阻碍了生产车间的信息化智能化建设<sup>[1]</sup>。为解决问题,信息集成和设备互联是消除不同设备间的信息孤岛、实现车间数字化的关键<sup>[2]</sup>。在建立综合一体化模型方面,学者们提出并发展了多种建模方法,主要有 CIM - OSA (computer integrated manufac-

收稿日期:2024-05-29

第一作者:何军红(1971—),男,浙江义乌人,博士,副教授,研究方向为工业互联网,智能制造,嵌入式系统开发。

turing open system architecture) 方法<sup>[3]</sup>、ARIS (architecture of integrated information system) 方法<sup>[4]</sup>、IDEF (integrated definition) 技术<sup>[5]</sup>、UML (unified modeling language) 方法<sup>[6]</sup>以及 OPC UA (Object Linking and Embedding for Process Control Unified Architecture) 信息模型等。然而,在面向对象的建模方面,ARIS、IDEF、CIM-OSA 和 UML 方法存在一些限制,包括不满足完整性要求、扩展性欠佳、缺乏有效的指导和建模工具,以及动态性支持不足等问题。相比之下,OPC UA 技术具有明显的优势。它不仅解决了建模问题,还作为一种统一的数据传输通信协议,为设备的互联互通提供了完善的解决方案<sup>[7]</sup>。因此,OPC UA 技术在综合建模和通信协议方面成为了更具前瞻性和全面性的选择。

OPC UA 提供的通信协议能够对工业现场的多源异构数据进行采集、汇聚,但规模庞大的工业数据在分析处理时仍存在着巨大的挑战。ETL (Extract, Transform, Load) 作为一种广泛应用的数据处理技术,能够从源系统中提取数据并进行转换清洗,然后将处理后的数据加载到目标系统中。ETL 技术允许开发者定义不同的数据处理规则和逻辑来适应数据源和目标系统的需求,具有很强的灵活性和可扩展性,能够进一步提高数据处理和分析的效率和质量。

为了实现对伺服阀生产过程中关键数据的准确采集、融合,系统利用 OPC UA 技术的架构优势,对伺服阀生产线设备(如油源 PLC、油压传感器、温湿度传感器和油源工控机等)进行信息建模,通过自适应协议转换平台将不同协议的数据转化成符合 OPC UA 信息模型的数据,实现各设备间的互联互通操作和信息的有效集成。为了对采集到的多源异构数据进行处理分析,引入 ETL 技术根据建立的信息模型抽取不同的主题数据(如油源主题,包括油源温度、压力、流量等属性数据)写入到主题数据库中并进行分析处理,通过可视化看板实时反映设备的状态信息,实现了对伺服阀生产过程中数据的全面管理与控制。

## 1 关键技术

### 1.1 OPC UA 技术

OPC UA 技术是一种用于工业自动化和控制系统的开放标准通信协议,已成为下一代工业互联互通的重要协议标准<sup>[8]</sup>。它提供可靠、安全、跨平台的数据传输和通信机制,实现了不同设备、系统和厂商间的通信和数据交换。主要特点如下:

#### (1) 开放性

OPC UA 是 OPC 技术的升级版,具有跨平台支持能力,适用于多种软件平台如 Windows、Linux 和安卓,以及多种硬件平台如 PLC 和微控制器。它支持 TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol)、HTTPS (Hypertext Transfer Protocol Secure)、AMQP (Advanced Message Queuing Protocol) 等多种传输机制,适应不同网络环境,并具备灵活配置选项。

#### (2) 可靠性

为了确保数据传输中数据的安全性和可靠性,OPC UA 提供了包括数据加密、身份验证和访问控制等在内的多重安全机制。这些机制能够有效防范可能出现的网络攻击以及数据泄露,能够为系统提供更加有效的保护。

#### (3) 信息模型的灵活性

为了满足用户复杂的实际需要,OPC UA 配备了十分灵活的信息建模能力。OPC UA 可以基于集成的用户空间和信息模型,通过显示过程数据、报警数据、历史数据,并完成程序调用,来满足不同应用场景的需求<sup>[9]</sup>。

上述特点使得 OPC UA 为伺服阀生产过程实时精确数据采集和融合提供了可靠的技术基础,在实现设备间数据统一通信的同时,还可以提高数据传输的安全性,防止生产过程中的数据被非法获取或篡改。OPC UA 系统使用了客户端/服务器 (C/S) 架构进行通信,这种架构使得系统具备了极大的灵活性,允许用户轻松地添加或删除失效的组件<sup>[10]</sup>。OPC UA 的系统架构如图 1 所示。

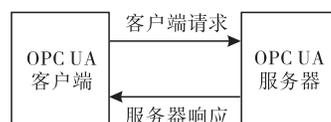


图 1 OPC UA 系统架构图

在基于客户端/服务器 (C/S) 架构的通信中,客户端首先发送连接请求,然后协议栈处理请求信号,建立连接并开始数据传输。在伺服阀生产车间的数据采集过程中,这个流程确保了有效的通信机制。OPC UA 客户端和服务器均由三层软件构成,包括通信栈、接口和应用程序<sup>[11]</sup>。OPC UA 客户端应用程序实现核心功能,而服务接口位于中间层,提供更灵活的开发和定制选择。OPC UA 服务器实时采集底层设备数据,并提供数据读写、订阅和历史数据查询等全面服务,确保系统在数据交互方面的高效性和可靠性。

### 1.2 ETL 技术

ETL 是一种被广泛应用于数据仓库和数据分析领域的数据集成为处理方法。ETL 将数据从源系统提取并转换为目标格式,然后加载到目标系统中<sup>[12]</sup>。ETL 技术有助于确保数据质量、一致性和可用性,它包含三个主要部分:

#### (1) 提取(Extract)

提取是指从一个或多个数据源中收集数据的过程。数据源可以是各种地方,如关系型数据库、日志文件、Web 服务、API、Excel 表格等。

#### (2) 转换(Transform)

数据抽取后再进行转换来满足目标系统的需求。整个过程包括数据清洗、合并、计算、重塑等。转换的目的是为了将原始数据转化成目标系统需要的格式和结构。

#### (3) 加载(Load)

加载指的是将转换后的数据加载到目标系统之中。这一过程通常包括将数据插入到数据仓库以及数据库中,或者导入到分析工具中。为了确保数据能够在目标系统中正确地存储和访问,加载过程通常需要考虑目标系统的性能和存储需求。通过 ETL 技术,能够对伺服阀生产全流程中产生的数据进行汇集、转换,对无效、异常或不完整的生产过程数据进行识别和处理,并将数据根据规则进行映射来确保数据的一致性,消除数据差异,为后续的数据分析、算法计算和可视化提供基础。

## 2 系统设计方案

### 2.1 系统数据架构

数据从底层设备提取,经过协议转换后,写入时

序数据库,作为元数据进行存储。系统通过 ETL 技术对这些元数据进行数据处理。根据系统配置的模型,处理好的数据将用于形成模型的主题数据并保存在主题数据库中。在此基础上采用大数据分析算法(如卡尔曼滤波算法等),对主题数据进行处理,形成视图数据保存在视图数据库中。各类应用 APP 在绑定视图数据库数据的基础上,通过 2D 或 3D 图形化方式展示关键数据信息和融合分析结果。系统数据流向图如图 2 所示。

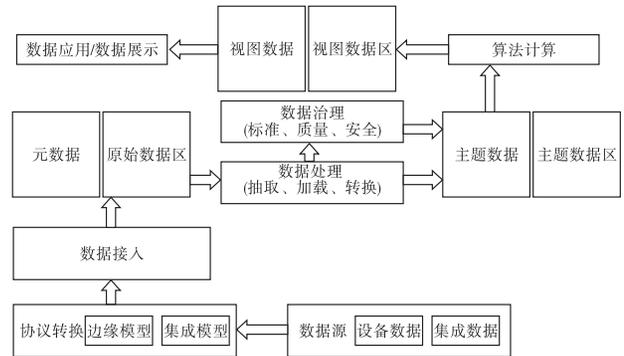


图 2 伺服阀综合应用系统数据流向图

### 2.2 系统技术架构

利用 OPC UA 技术,可以建立伺服阀产线的统一数据模型,并利用多种感知技术实现底层设备数据的采集。通过映射不同数据源的数据为统一的数据结构和语义,实现数据的一致性。利用 ETL 工具配置数据抽取方法,从数据库中提取关键数据,并对提取的数据进行转换和清洗,确保数据的一致性和可用性,同时处理可能存在的异常值和缺失值。经过 ETL 技术处理后的数据会被加载到目标数据库中,为后续的数据分析和质量控制提供基础。项目系统技术架如图 3 所示。

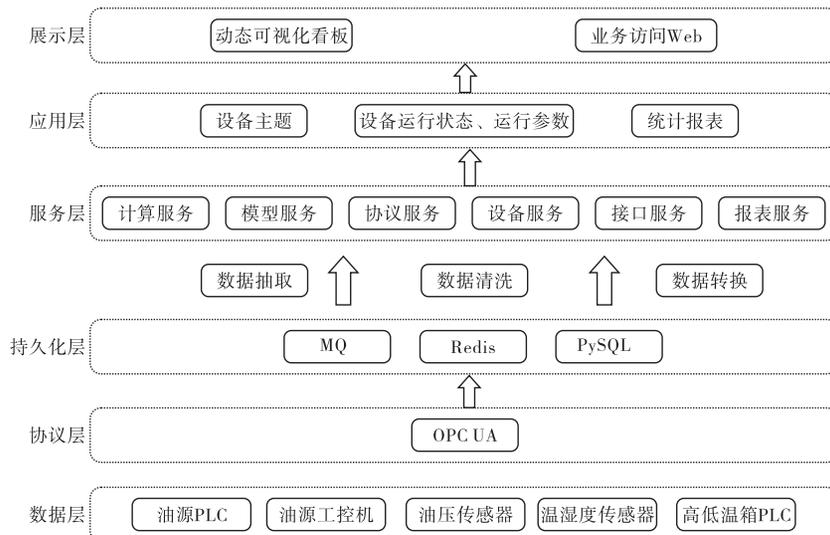


图 3 伺服阀综合应用系统技术架构图

(1)数据层:通过感知终端,采集现场设施的数据并上传到系统。这些数据包括来自油源 PLC、油压传感器、温湿度传感器、油源工控机等设备的实时数据、定时数据以及实践记录。

(2)协议层:设备以及各类传感器产生的实时数据,通过自适应数据协议转换平台进行协议解析,对接系统的协议库,实现数据解析通讯,转换成符合 OPC UA 信息模型的数据<sup>[13]</sup>。

(3)持久化层:实时消息队列、缓存和时序数据库实时接收来自协议层的数据,并将其记录在实时数据库中,实现数据的持久化。

(4)服务层:系统利用 ETL 工具从实时数据库中抽取、清洗和转换数据,然后通过服务层将重新整合的数据推送给应用层。

(5)应用层:应用层主要根据伺服阀信息模型对服务层推送的数据进行拆分,以形成最终需要展示的主题数据。

(6)展示层:通过可视化看板,将数据实时展示在大屏上,同时支持自定义展示内容。结合业务访问 Web,实现系统的业务功能应用。

### 3 功能实现

将系统的功能实现分为两个层级,第一层是以 OPC UA 技术为基础的数据采集层级,第二层是数据管理层级,基于 ETL 技术抽取主题数据并与采集对象模型结合,通过开发看板实现对数据的分析及可视化。

#### 3.1 数据采集层级

系统的数据采集层级基本框架如图 4 所示。在伺服阀生产线系统上,使用 MODBUS (Modular Digital Communication System) 协议连接油压传感器和温湿度传感器等,以及阀门与其它控制设备。PROFIBUS (Process Field Bus) 用于连接不同部件和附件,包括传感器、油源 PLC 和高低温箱 PLC 等。针对不同的通信协议,使用自主开发的多源数据自适应协议转换平台<sup>[14]</sup>作为协议适配层来实时监测并适应不同设备之间的通信协议变化,参照系统的元模型使用 OPC UA 技术建立生产设备的信息模型,通过协议适配层将不同协议的数据转化为符合 OPC UA 信息模型的数据,根据数据映射规则映射到信息模型中的相应节点中并通过 OPC UA 服务器将数据上传到持久化层的数据库。

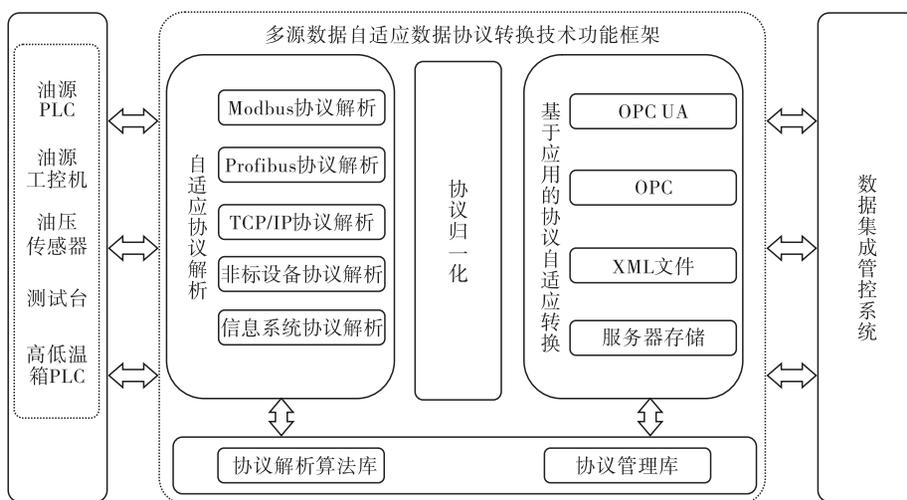


图 4 系统数据采集层级基本框架

#### 3.1.1 系统元模型的建立

针对目前建设的伺服阀生产线系统,生产的产品需要油源、测试台、高低温箱等进行模拟测试,包含油源 PLC、高低温箱 PLC、油源工控机、油源压力传感器、高低温箱传感器、温湿度传感器等设备。为

为了更好的模拟和测试产品的性能,采用了面向对象的建模方法,并基于该方法构建元模型<sup>[15]</sup>,该模型能够较好的继承和扩展标准信息模型,系统元模型如图 5 所示。

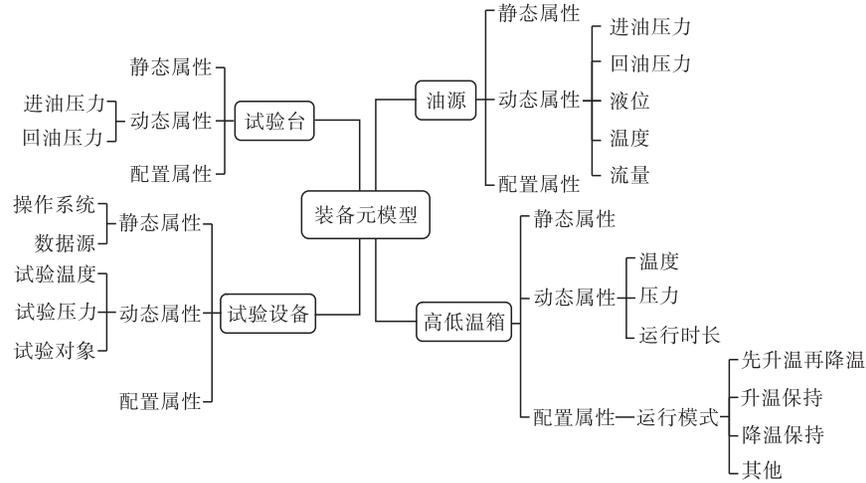


图 5 高低温箱以及润滑油测试系统元模型

### 3.1.2 OPC UA 信息模型建立

为实现不同厂商设备之间的数据互联互通,系统采用了多协议自适应转换和设备统一建模技术的数据集成管控系统,对包含设备在内的产线生产信息进行采集、建模、汇聚。通过 OPC UA 信息模型,对设备数据结构、属性和行为进行定义,并标准化命名空间,以有效区分不同设备的信息。该模型首先基于系统元模型,利用 OPC UA 技术对产线设备进行信息建模,确保数据传输的可靠性和安全性,然后在服务器对象文件夹下创建设备实例,定义数据类别,提升信息建模能力。将所需采集的生产调试变量依次添加到对应数据类别下的节点,定义通用属性并添加必要节点引用,建立产品生产调试信息模型。此外,还需要将所有相关设备类型映射为 OPC UA 中的对象类型节点。这个过程包括根据需求分析设备的属性和操作,并将它们映射为 OPC UA 中的对象、变量和方法节点。这增强了设备的互操作性和可维护性,使得不同厂商的设备能够更容易地集成在一起,设备的故障排查和维修也变得更加简单。部分关键节点如表 1~3 所示。

表 1 油源节点

节点类别	显示名称	可浏览名称	描述
	编号	Number	油源实例对象的编号
	进油液压力值	InPressuere	进油压值读数
	回油液压力值	OutPressuere	回油压值读数
变量	油压工程单位	Unit	测得值的工程单位/Pa
	进油温度	Temperature	进油温度值读数
	油温工程单位	Unit	油温的工程单位/°C

表 2 传感器节点

节点类别	显示名称	可浏览名称	描述
	编号	Number	传感器实例对象的编号
	型号	Product Type	描述传感器型号
变量	采样间隔	Sampling Interval	传感器的采样间隔
	读数	Data	当前读数
	工程单位	Unit	测得值的工程单位

表 3 温控箱节点

节点类别	显示名称	可浏览名称	描述
	编号	Number	温控箱实例对象的编号
	型号	Product Type	描述温控箱型号
变量	箱体温度	Temperature	进油温度值读数
	工程单位	Unit	油温的工程单位/°C
方法	启动	Start	测试启动
	停止	Stop	测试停止

### 3.2 数据管理层级

数据管理层级主要通过 ETL 技术对数据采集层级上传到实时数据库中的数据进行抽取、转化和加载,并结合大数据算法及可视化技术实现数据分析及可视化。进而使得工作人员能够通过看板了解生产过程中设备的实时运行状态,对生产环节进行实时把控。

系统方案对数据清洗和转换的能力有较高要

求,需要支持自定义规则,并确保海量数据的快速加载。为了满足这些需求,需要选择适合的工具、优化流程并合理配置资源。目前,广泛应用的 ETL 工具主要有 DataPipeline、Kettle、Talend、Information 以及 DataX 等,这些工具中,Kettle 在国内有大量成熟应用案例,且有免费开源的支撑、并支持在 ETL 过程中插入程序脚本进行对应需求的开发,无需时刻依赖软件本身<sup>[16]</sup>。因此首选 Kettle 作为 ETL 工具进行开发。

Kettle 提供直观的图形用户界面,用户可以通过拖放和连接的方式直接创建和配置数据转换流程。相应流程如图 6 所示。

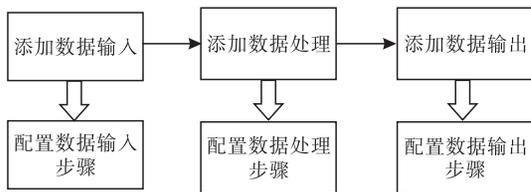


图 6 数据处理工作流程图

根据图 2 所示的系统数据流向,从元数据库中的数据到最终在看板上呈现的视图数据,整个数据处理过程可分为三个阶段:主题数据处理、视图数据处理、看板可视化。

### 3.2.1 主题数据处理

当实时数据进入到数据库中,可能存在一些不合格或无效的数据。此时需要对数据进行清洗,并且还需要根据数据类型进行分组计算。完成上述操作后,系统会根据配置的设备模型进行参数提取,并将其写入相应的主题数据库中,生成主题数据,如油源主题数据、高低温箱主题数据等。主题数据的处理流程以及 Kettle 环境下进行数据抽取、清洗、转换的处理流程如下图 7、8 所示。

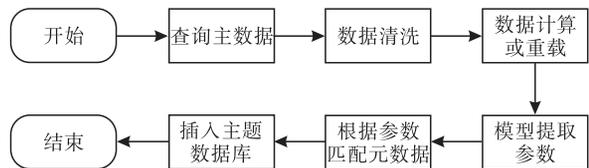


图 7 主题数据处理流程图

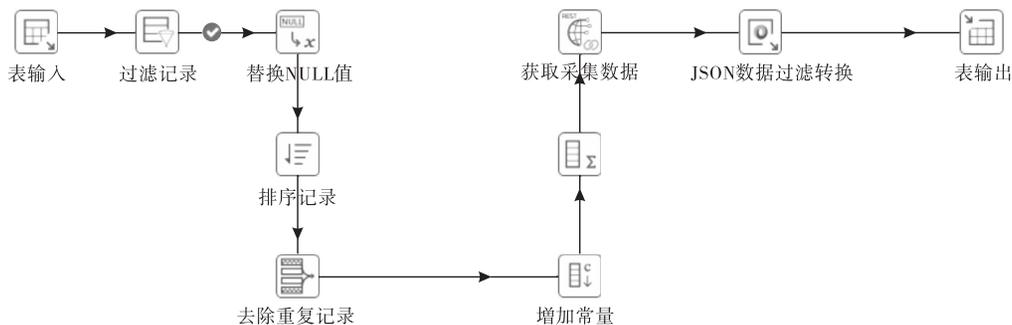


图 8 Kettle 环境下的数据抽取、清洗、转换流程图

### 3.2.2 视图数据处理

主题数据处理完成后,系统将根据展示效果,抽取主题数据,并结合各类大数据算法进行数据计算和分析统计。然后,将分析结果写入视图数据中。应用程序会直接与视图数据库绑定,并通过 2D 或 3D 图标的方式展示数据。视图数据处理流程及部

分数据表结构如下图 9、10 所示:

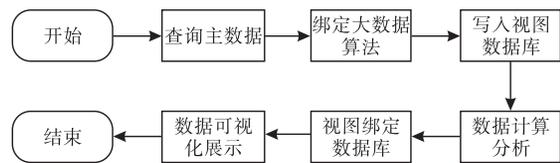


图 9 视图数据处理流程图

字段	索引	外键	唯一键	检查	排除	规则	触发器	选项	注释	SQL 预览
id										1
accessmanageid										
typemaneid										
tag										
name										
datatype										
upperlimit										
lowerlimit										
databaseid										
seq										
connectionconfigid										
unit										
isenabled										
iscollect										
equipmentid										

图 10 OPC UA 点位信息表结构图

### 3.2.3 看板可视化

通过开发可视化看板,可以对不同设备在一定时期内的运行数据进行分类汇总和主题展示。如图11、12所示。可视化看板将测试工站状态、设备状态、设备有效运转效率、设备健康统计信息以及油源的温度、压力、流量、污染情况以及高低温箱的温度、湿度、状态等级等信息进行有机整合。这样,生产产线就能够及时有效地对生产信息进行管控。

综上所述,数据管理层级利用 ETL 技术对实时数据库中的数据进行处理,同时结合大数据算法和可视化技术,提供决策支持和实时控制生产环节的

功能。数据管理层级能够挖掘数据价值、呈现关键信息、实时监控设备状态,促进工业自动化和智能化发展。

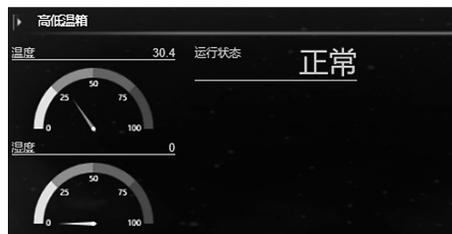


图11 高低温箱采集展示图



图12 可视化看板

## 4 结论

针对伺服阀生产全流程中的多源异构数据采集问题,该文提出了结合 OPC UA 技术和 ETL 技术的综合解决方案。首先在伺服阀生产线建立 OPC UA 通信网络,实现设备间的数据统一通信;其次利用 ETL 技术将生产过程中的数据进行清理、转换和聚合,通过大数据算法对数据进行分析 and 工序质量控制,并开发可视化看板反映生产设备状态。通过样机试验验证了该方案的有效性,结果表明所提出的数据集成管控系统增强了生产过程中的数据关联性,实现了全流程的数据协同和质量监控,为液压产品全流程智能制造提供了有力支撑,这些关键技术为进一步推进制造系统的数字化升级奠定了基础。

### 参考文献:

- [1] 薛栋栋,张宪民,詹镇辉,等.基于 OPC UA 的多机系统互联互通技术研究[J].高技术通讯,2022,32(03):283-293.
- [2] 孙勇,黄达力,王麟琨,等.基于 OPC UA 的典型塑性成

形机床设备模型的研究与应用[J].锻压技术,2020,45(06):122-129.

- [3] BEECKMAN D. CIM - OSA: Computer integrated manufacturing - open system architecture [J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 1989, 2(2):94-105.
- [4] SCHEER A W. ARIS - Business Process Modeling[M]. 3 Ed. Berlin:Springer - Verlag,2000.
- [5] MENZEL C, MAYER R J. The IDEF family of languages [M]// Handbook on Architectures of Information Systems. Heidelberg:Springer,1998:209-241.
- [6] NUNES N J, SELIC B, SILVA A R D, et al. UML Modeling Languages and Applications [M]. Berlin:Springer,2005.
- [7] 张兆坤,邵珠峰,王立平,等.数字化车间信息模型及其建模与标准化[J].清华大学学报(自然科学版),2017,57(02):128-133+140.
- [8] 张辰,毛冬,黄海潮.面向异构电力设备状态监测的低功耗 OPC UA 协议转换最小系统[J].机械科学与技术,2022,41(12):1936-1942.

(下转第87页)

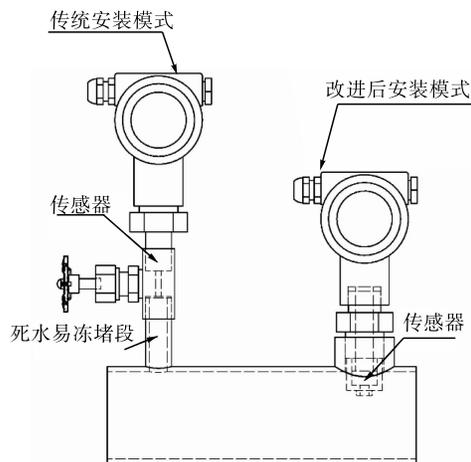


图 5 仪表安装示意图

## 5 结论

该本次研发的注水井油套压一体式 Wi-Fi 仪表基本实现设计功能,现场安装 21 套,数据传输稳定,野外环境下平稳度过 2023 年整个冬季,运行良好。防冻设计,为冬季油套压采集提供了坚实的保障;其适用的 MQTT 模式,较传统 SCADA 工控模式缩减了层级,降低了设备使用数量,为油田数据采集及仪表设计提供了借鉴意义;边缘计算的加入,使得设备初步探及“智能仪表”的大门。随着各项技术的逐渐成熟,仪表会变得越来越智能化,通过深度学习和人工智能的应用,智能仪表会具备强大的数据分析

和数据预测功能,为数据研究者提供更大的便利。

### 参考文献:

- [1] 王志坤. 基于物联网的石油管道压力仪表数据自动采集方法[J]. 石油和化工设备, 2024(02): 119 - 121 + 138.
- [2] 于洋. 石油化工自动化仪表控制技术设计应用[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2023(22): 181 - 183.
- [3] 赵晓娟, 祁超. 自动化控制在石油化工仪表中的运用[J]. 化工设计通讯, 2022(10): 82 - 84.
- [4] 柴修通. 自动化控制在石油化工仪表中的运用[J]. 化工设计通讯, 2022(07): 4 - 6 + 24.
- [5] 曹石婧. 石油化工仪表自动化控制系统的相关讨论[J]. 中国设备工程, 2022(14): 129 - 131.
- [6] 刘俊伟. 石油化工自控仪表安装调试与质量控制[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2022(11): 19 - 21.
- [7] 纪红霞, 张永辉. 石油化工仪表控制系统的应用分析[J]. 仪器仪表用户, 2017(04): 63 - 65.
- [8] 孙天择. 石油化工电气仪表安全供电系统探讨[J]. 硅谷, 2014(17): 164 + 168.
- [9] 许文军. 石油化工仪表中的自动化控制技术研究[J]. 科技创新导报, 2019(26): 65 + 68.
- [10] 胡晓若, 樊知轩, 彭世富, 等. 基于物联网的流量仪表智能标定系统设计[J]. 自动化仪表, 2024, 45(02): 51 - 54.
- [11] 张钰哲, 张伟东, 高伟, 等. 基于边缘计算的智能油田物联网油井监控系统[J]. 物联网技术, 2023, 13(10): 133 - 137.
- [12] 董政. 面向工业互联网的 OPC UA 架构研究与设计[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2022.
- [13] 尹作重, 刘继红, 王佃鹏, 等. 基于微服务的多机器人资源智能云服务平台架构[J]. 计算机集成制造系统, 2022, 28(07): 2102 - 2111.
- [14] 付鹏, 陈慧林, 梁凝. 基于 OPC UA 的工业设备数据互联互通统一管理平台[J]. 电动工具, 2023(05): 25 - 30.
- [15] 郑倩倩. 基于 Kettle 的工业数据集成与应用[D]. 重庆: 西南大学, 2023.
- [16] 王剑, 王好臣, 李学伟, 等. 基于 OPC UA 的数字孪生车间信息物理融合系统[J]. 现代制造工程, 2023(04): 43 - 50.
- [17] 何军红, 张迪, 张力, 等. 基于 TCP/IP 协议的异构网络的数据采集[J]. 工业仪表与自动化装置, 2019(03): 77 - 80 + 110.
- [18] 李锋, 张坤, 原丽娜. 基于 OPC UA 的纺织智能染整车间信息模型研究与实现[J]. 纺织学报, 2020, 41(02): 149 - 154.
- [19] 包甘盛, 罗晓飞. 浅析数据 ETL 自动化部署方法及实现[J]. 广播电视网络, 2022, 29(04): 70 - 72.

(上接第 35 页)