

doi: 10.7690/bgzdh.2024.01.002

数字化与可视化柔性机加单元管控系统

孙科星, 眭阳天, 梁海洋, 谢敏, 赵智聪, 徐曼菲

(中国兵器装备集团自动化研究所有限公司智能制造事业部, 四川 绵阳 621000)

摘要: 针对目前多数机加车间存在的信息交互能力不足、生产管理效率低下、可视化程度低等问题, 基于 OPC UA 数据交互技术与虚拟监控技术, 设计并实现以 4 台机床为加工核心的自动化和柔性化数控机加单元管控系统。使用 Unity3D 软件搭建单元实时监控模块, 借助通信技术与柔性调度技术, 以提升机加单元数字化与自动化能力。结果表明: 该系统能提高机加单元管理与调度能力, 解决信息展示与交互程度低的问题, 促进车间加工效率的提升。

关键词: 数据采集; 虚拟监控; 柔性机加单元; 数字化

中图分类号: TP311 **文献标志码:** A

Management and Control System of Digital and Visual Flexible Machining Unit

Sun Kexing, Sui Yangtian, Liang Haiyang, Xie Min, Zhao Zhicong, Xu Manfei

*(Department of Intelligent Manufacture, Automation Research Institute Co., Ltd. of
China South Industries Group Corporation, Mianyang 621000, China)*

Abstract: In order to solve the problems of insufficient information interaction ability, low efficiency of production management and low degree of visualization in most machining workshops, an automatic and flexible CNC machining unit management and control system with four machine tools as the processing core was designed and implemented based on OPC UA data interaction technology and virtual monitoring technology. Unity3D software is used to build a real-time monitoring module of the unit, and communication technology and flexible scheduling technology are used to enhance the digitalization and automation capabilities of the machining unit. The results show that the system improves the ability of machining unit management and scheduling, solves the problem of low information display and interaction, and promotes the improvement of workshop processing efficiency.

Keywords: data acquisition; virtual monitoring; flexible machining unit; digitization

0 引言

“工业 4.0”概念提出以来, 世界各国积极响应, 纷纷围绕智能化、数字化、柔性化等理念对制造业再升级提出了相应规划。总体来看, 我国制造业存在设备陈旧、信息闭塞、效率低下、人才匮乏等诸多问题, 急需技术转型升级, 向数字化、自动化、信息化发展。同时, 随着市场发展呈现多样化, 传统的大批量单一类型的制造不再占据主导地位, 为满足客户需求, 企业逐渐认识到提高车间单元化、自动化、柔性化以及信息化水平, 对企业生存发展的重要性; 因此, 越来越多新类型的传感器、智能制造系统、工业机器人、成套自动化生产线设备等大规模的布置在生产装配车间, 生产车间的设备出现了复杂化、多样化、柔性化、智能化发展趋势^[1]。李海澄等^[2]利用西门子 PLC、发那科机器人、2 台数控机床等主要零部件设计实现了单元级机械加工系统, 成功实现了物料在机床之间的流转以及成品

与毛坯的自动上下料, 降低了工人的劳动强度, 提升了加工效率与机床利用率。申宽^[3]以提升车间生产节拍, 节约人力成本为目标, 从六轴机械臂与机床的布局优化角度着手, 设计了自动化车削单元的分布式控制, 并借助于仿真, 验证了系统在提升效率与节省人力方面的可行性。目前, 大多数机加单元往往只考虑系统的自动化程度及流程设计与结构设计, 对系统的数字化与柔性化建设缺乏投入。笔者从满足多品种、小批量的生产需求出发, 基于 OPC UA、S7.Net、Http 等通信协议, 利用某 4 台西门子 810D 系列数控机床、KUKA 工业机器人、西门子 1200 系列 PLC 等搭建柔性化加工单元, 成功实现了数字化柔性机加单元, 提升了多品种、小批量生产模式的整体生产效率, 降低了操作人员的劳动负荷, 实现了产品加工过程的自动化, 提高了机床利用率; 并对机床刀具信息、刀具使用、状态信息、实时加工参数情况等内容进行监控与管理, 完

收稿日期: 2023-09-20; 修回日期: 2023-10-25

第一作者: 孙科星(1992—), 男, 河南人, 硕士。

成了加工单元数字化、智能化改造，促进了车间信息化水平的发展。

1 系统总体设计

机加单元的数字化与柔性化改造涉及数据交互、人工智能、数据处理、可视化、传感器等诸多现代化科技，是一个复杂而综合的智能化系统^[4]。笔者介绍的数字化柔性机加单元整体架构如图 1 所示，系统通过工业以太网，实现车间 MES(制造执行系统)、3 维可视化系统、机床、转运机械臂、线边库、柔性化单元调度系统、数据处理等模块的互联互通，使来自于 MES 的任务信息快速地下发给柔性化单元调度系统，进而将任务分解并根据机床

的状态信息准确地分配给相应机床。

过程中机床的异常信息、加工参数、状态信息和任务执行情况等可以及时准确地反馈给任务调度模块与车间 MES，从而形成信息的闭环流通，有效提升车间的数字化管控能力，降低因信息交互缓慢而造成的任务进度延后，一定程度上解放人力劳动，提高生产效率^[5]。

数字化柔性机加单元分为设备层、控制层和管理层。设备层包含加工中心、线边库、执行 PLC、机器人等设备，控制层包含生产线控制系统和加工自适应控制系统，管控层包含数据中心、生产管控、数据分析与监控 3 部分。集成技术架构如图 1 所示。

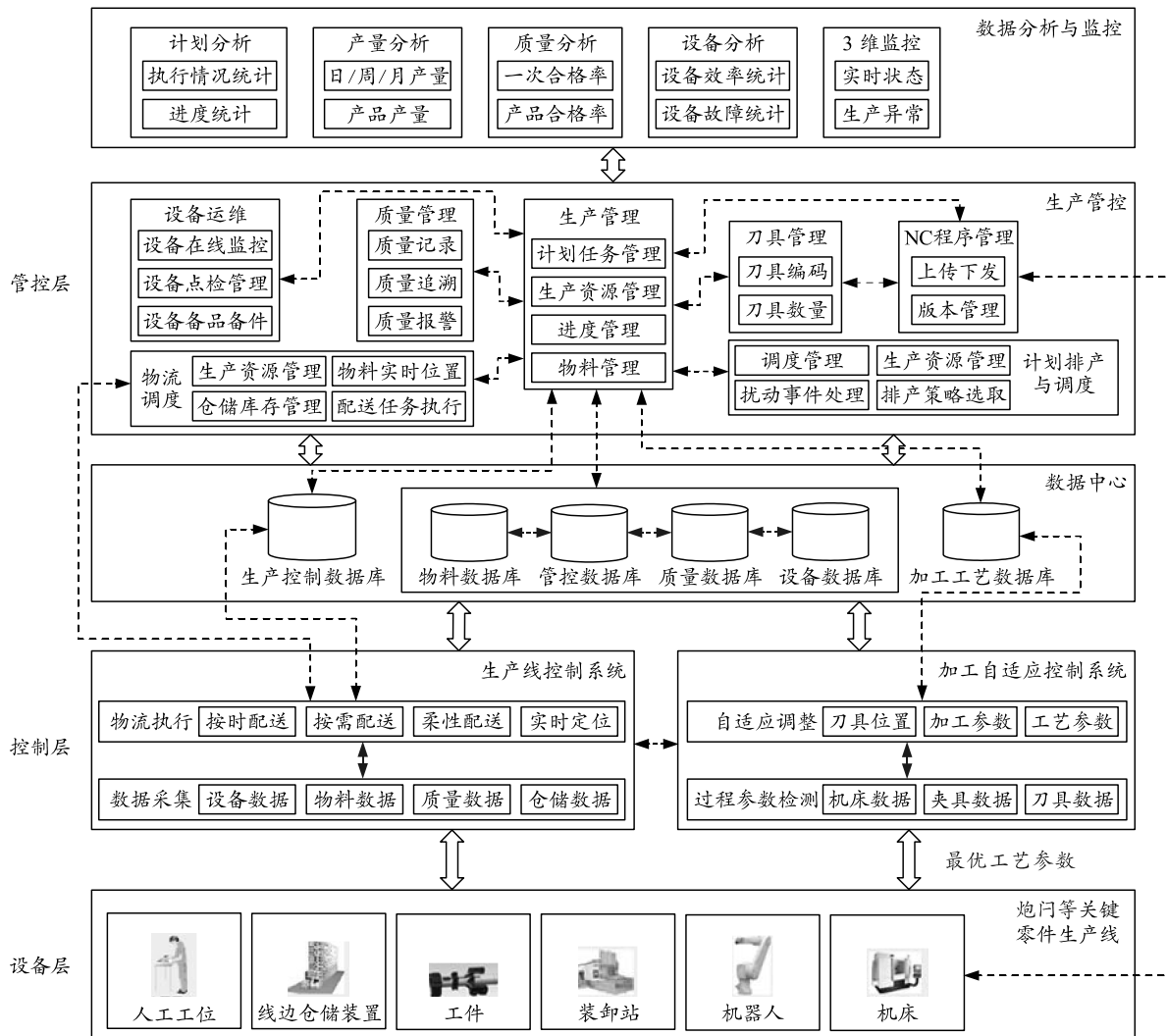


图 1 数字化柔性机加单元系统架构

数字化柔性机加单元将现场设备、生产线控制系统、加工自适应控制系统和生产管控系统进行整合，实现典型零件的加工全过程自适应调整、物料精准配送和基于在线数据感知的生产过程智能管

控。智能机加生产线实现设备状态、加工工艺参数的实时监控，生产任务的自动排产、加工零件的自适应动态调度，NC 程序的自动选择等功能，可将设备故障、生产任务异常等数据主动推送到现场电

子看板和声光报警装置，提醒操作人员进行干预和处置；同时，将机加生产线产量、质量、计划进度等与产线相关联数据在电子看板进行图表形式的可视化呈现，辅助操作人员进行生产管理和生产作业调整，有效提高加工过程中的加工精度、质量一次合格率和生产效率^[6-8]。

1) 设备层。

设备层主要涉及整个车间的组成元素，主要包含车间进行生产加工的各种设备，如 DNC 系统中的数控机床、物料转运机械臂及自动控制的 PLC 设备、RFID 等。设备是整个车间进行生产制造过程的基础，同时也是车间监控系统的重要数据来源，设备的运行状态直接影响整个车间的生产。通过车间数据采集技术将各个底层的数据进行采集，为数据层提供数据源。

2) 控制层。

控制层是单元智能管控系统运行的基础和动力，单元监控系统中模型的实时驱动、单元生产进度状况、搬运信息、设备运行状态等都需要生产现场大量的实时数据、历史数据以及控制指令信息的支撑。本系统的实时数据直接从生产现场的实时通信服务器中获取，历史数据从历史数据库中获取，生产指令信息从车间信息系统中获取。底层数据通过数据采集系统进行采集，利用车间现场总线传输到数据层中，通过函数调用方式以 JSON 的格式将数据传入可视化系统。

3) 管控层。

管控层主要根据生产现状对单元监控系统要展示的信息进行设计，主要包括进度管理、单元现场管理以及生产效能管理 3 方面。进度管理主要对生产线上的加工进度，包括单个产品的加工进度及整个生产计划的进度情况进行查询；单元现场管理主要对设备实时运行状态以及车间生产实时状况进行管控，包括单元设备的实时动作、运行状态信息，转运机械臂位置和运动信息并及时发布产线异常的警报信息；生产效能管理主要结合单元制造执行系统，对设备利用率、任务完成率进行统计与反馈。管控层是整个系统的关键，是用户与系统进行交互的桥梁，也是单元监控系统的最终展示层。用户层中的人机交互界面，其主要作用是将车间现场的所有信息完整地映射到虚拟场景中，实现虚拟场景的可视化，展示虚拟单元内的布局情况、模型信息以及各类工艺流程信息，利用数据的实时传输技术可

以实现虚拟车间与物理单元的实时同步，丰富了车间可视化的展现模式，增强了人与虚拟监控系统交互能力。

2 系统组成

如图 2 所示，数字化柔性机加单元主要由 4 台西门子 810D 数控机床、上下料工作台、转运机械臂、线边库、数据采集与交互系统、调度系统、可视化系统和电气系统等组成。借助工业以太网，各模块之间完成信息交互，从而快速地将毛坯件放置于线边库，调度系统获取机械臂与机床状态后，合理地将毛坯件送至空闲机床进行加工，加工完成后成品或半成品工件送至上下料站或者线边库进行下一步处理，形成了一套自动化、柔性化、数字化的机加系统。

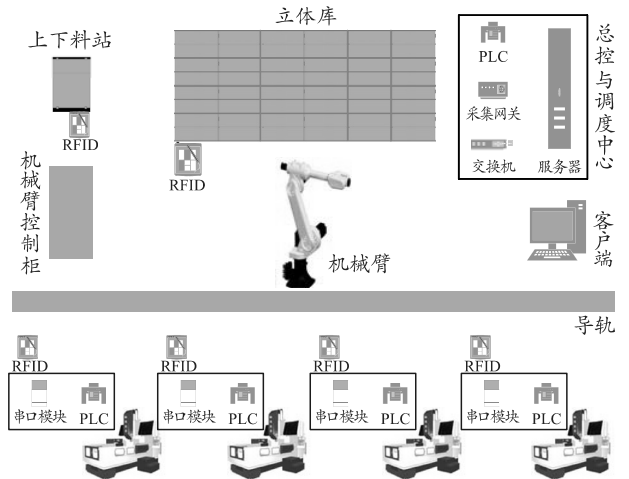


图 2 系统组成

3 系统实现

数字化柔性机加单元主要包含数字化升级改造、系统数据感知、柔性调度和 3 维可视化 4 个模块。数字化改造主要针对机床进行通信优化；数据感知是对机床、机械臂控制单元、柔性调度等模块的数据采集与管理；柔性调度模块主要内容是生成最优加工指令，从而提升系统加工效率；3 维可视化模块是基于 unity 可视化技术，实现系统加工信息与设备状态信息等的实时展示。

3.1 机加单元改造

机加单元主要由 4 台西门子 810D 数控机床组成，其功能是实现毛坯件自动化加工，因该型号的机床信息化、自动化与数字化程度低，故首先对其进行以下自动化与数字化升级改造：

- 1) 该类型机床的数据交互接口为 MPI 串口，

组网与通信能力差，故采用串口转网口方式对其进行通信能力升级，实现数据的以太网交互，具体实现如下。

安装串口转网口模块到机床的 MPI 通信接口，如图 3 所示。810D 数控系统 NCU 模块上都会标有 MPI 接口标志，将专用串口转网口的 S7 总线接口接到 MPI 接口上，用网线连接串口转网口模块，配置 IP、波特率等相关参数。

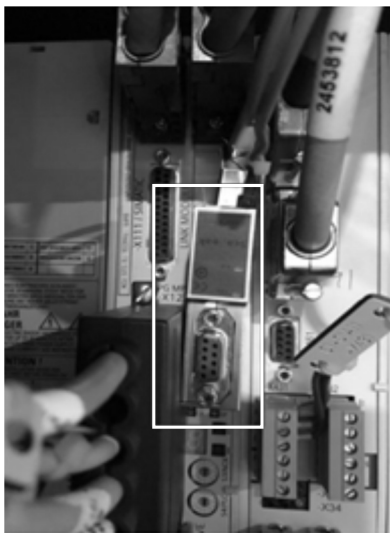


图 3 串口转网口安装

4 台机床按如上方式安装完毕后，基于串口转网口模块将 4 台机床联网，如图 4 所示，实现加工单元的网络化改造。

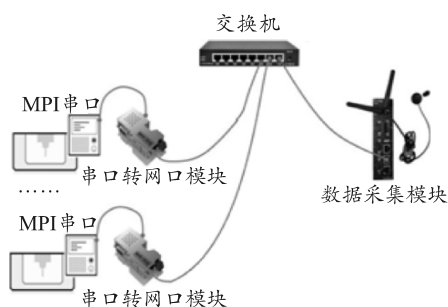


图 4 串口转网口安装

2) 初始情况下，810D 数控机床无法通过远程模式自动切换 NC 程序，为实现该功能，需对机床内部的 PLC 进行二次开发。借助于西门子 Step-7 功能块 FB4 的 PI_SERV 申请，定义好程序名、路径、切换启动触发等相关变量，当触发条件满足时，强制方式组转换到 AUTO 模式，同时启动功能 FB4，程序功能会自动搜索路径与程序名变量，完成程序切换，具体实现分 3 个步骤：

① 将机床模式切换为自动模式。借助 S7 协议与机床 PLC 建立通信，判断连接是否成功，若成功

则将 PLC 的输入寄存器“10.0”位置 1。具体流程如图 5 所示。

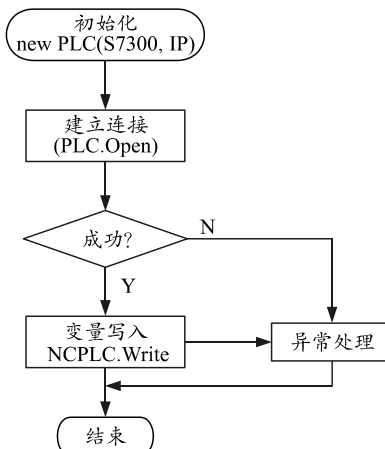


图 5 自动模式切换流程

② 自动切换机床 NC 程序。西门子 810D 数控不提供直接的程序选择接口，要实现远程程序切换需借助于西门子的 Step-7 功能块 FB4 的 PI_SERVER 服务功能来完成。FB4 的 PI_SERVER 被用于 NCK 内部零件加工程序与外部开关量即 PLC 的输入输出接口建立连接，从而达到内外部转换的过程。当内部某中间继电器为有效脉冲后，强制方式组转换到 AUTO 方式，同时启动功能 FB4，程序功能会自动寻找事先做好 DB 块的指定外部零件加工程序的地址路径，自动选择该零件程序，切换完毕后自动转回到方式组初始状态^[9]。

③ 启动程序，实现自动加工。机床启动流程与切换 Auto 模式类似，首先判断当前程序是否为目标程序，机床状态是否为待加工状态，若满足上述条件，则基于已建立的连接，将“11.7”位置 1。

3) 其他改造包含加装零点定位系统、安装自动升降侧门等。

3.2 数据感知模块

在感知制造环境下，网络(如车间以太网、RFID 等)连接整个生产单元的各个信息化模块，基于信息物理融合系统理念构建生产单元感知环境，如图 6 所示。生产单元由柔性调度中心、立体库、转运机械臂、数控机床、上下料站和控制柜等组成，各个主要流转单元安装 RFID 读写器，工件粘贴有抗金属陶瓷 RFID 标签，完成从原料出库经过机床加工以及产品入库整个加工过程的监测与追踪，在物料所经过的各个工位都配置有 RFID 感知节点，实时感知到达工件的托盘号、时间、位置等数据，通过数据分析，可以实时监测工件的异常事件。

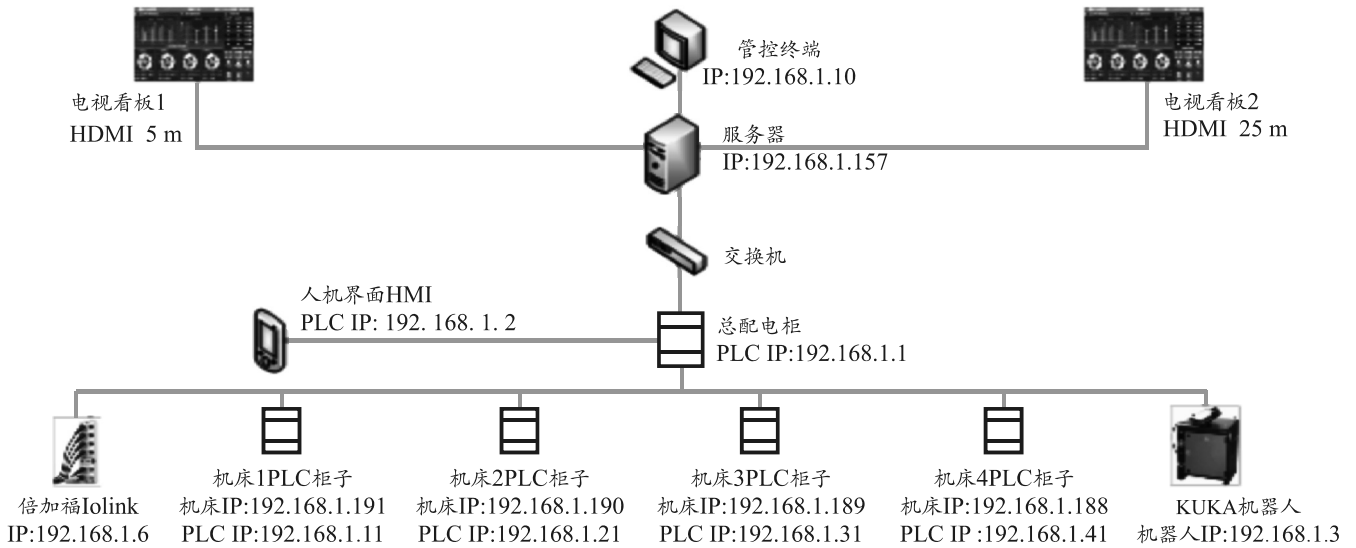


图 6 数据感知

制造数据实时物联采集包括对生产现场进行联网管理，综合采用各类数据采集方法，实现人、机、料、法、环等数据进行全面实时采集，并进行数据的融合处理、实时存储等。结合机加单元设备开放接口情况和改造后接口状态，编写定制化数据采集软件，通过调用对应设备开发协议的第三方数据驱动包，实现现场设备的设备数据、物料数据和工装数据等管控数据的实时采集。具体如下：

1) 生产现场物联。

生产线采用工业以太网作为现场总线，实现设备的互联互通，构建开放的体系结构，便于设备扩展。所有设备通过以太网接口接入网络。对于不是以太网接口的设备，需采用接口转换设备实现接口和协议的转换。

2) 制造数据采集。

为实现对数据在线智能感知，综合 OPC UA、S7 等采集协议，通过以太网的传输方式，实现各个工位人、机、料、法、环数据的全面采集。

3) 数据实时存储。

现场数据来源于不同的采集渠道，为实现生产过程的信息有效存储，需对这些数据进行筛选、处理、剔除，以降低数据存储和处理复杂度。建立基于时间队列的数据集，设定数据偏差变动阈值，实时甄别数据的偏差变动范围，而对于偏离范围较大且不连续或持续时间较短的数据点，可以作剔除处理。

系统主要基于 2 类通信协议实现数据采集，分别为 OPC UA 与西门子 S7 协议，2 类协议的具体采集方案如下。

3.2.1 基于 OPC UA 协议的机床数据通信方案

为提升数据交互效率与安全性，系统采用多线程机制对 4 台设备进行分线程数据实时通信。

在程序初始化时将标签信息转化为 OPC UA 客户端的节点信息，接着定义 OPC UA 客户端，添加相关事件，异步请求连接。连接成功后，读取节点数据值，判断读取结果是否良好，最后将读取结果进行解析。以 Mqtt 协议发送给前台页面进行展示，同时存入数据库，实现数据的实时采集、发布、存储。具体流程如图 7 所示。

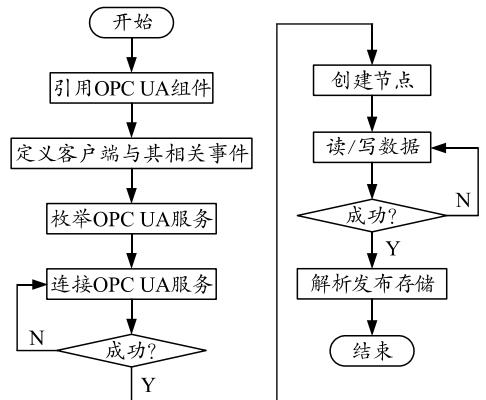


图 7 OPC UA 客户端数据采集流程

3.2.2 基于 S7 协议的 PLC 数据交互方案

S7 通信协议网络中设备可作为客户端 (Client)、服务端 (Server) 和伙伴设备 (Partner) 3 种角色。通信规则为：客户端只能发送查询，服务端只能回复，而伙伴设备可自主发起查询或回复。本系统中，各 PLC 作为服务端与上位机采集程序 (客户端) 进行数据交互。

在与机床 PLC 进行通信时，如图 8 所示，右侧

的设备，包括上位机、PG/PC 编程设备、HMI 都是客户端设备。它们通过以太网通信与 PLC 连接并通过 S7 协议发起请求，PLC 作为服务端回复相应格式的数据。在此通信架构下，服务端无需做任何配置，PLC 服务端的服务由其 CP 网卡自动处理，如图 9 所示。

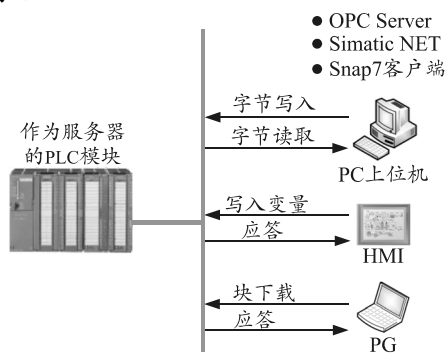


图 8 PLC 数据交互

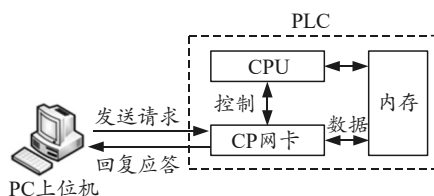


图 9 机床 PLC 数据交互

3.3 柔性调度模块

3.3.1 现场信息快照的保存与环境模型的抽象

产品和工件的运转全部靠机械臂的转运来实现，在设备、库位之间的自动流转；因此，现场信息的快照在精简过后至少包括设备的相关信息、上下料处相关信息、机械臂信息、库位信息以及所有托盘和托盘上的工件信息等。此外，必备的基础资源数据，如基础的产品信息、工艺信息、NC 信息等加工生产所要用到的非现场数据也需要整合到快照中。

快照的信息要严格保证保存的数据与现实中的数据相一致，采集类的数据通常利用实时数据接口进行获取与交互，不会出现不一致的情况。配置、设置类的数据，例如库位的状态、托盘状态、NC 程序信息等数据，通常不具备自动采集条件，需要人工配置，存在与现场实际情况不一致的风险，有可能生成不符合现实需求的指令序列；因此，快照的信息有效性与配置型的数据有效性紧密关联。

当开始保存快照时，系统首先截取采集的设备、机械臂等实时信息，并写入缓存，模拟持久化过程。然后查取现场所有库位、托盘、工件的信息，并以这些信息为入口，级联获取整个加工现场需要用到

的所有相关数据，并分类写入缓存。

通过对数据进行结构化处理，在管控系统后台的缓存区中把快照数据处理成数据模型，即把快照数字化为数据结构+数据，系统把这些数据结构和数据视为生产环境的抽象，在此基础上进行后续指令生成以及环境的演变，不断迭代直至任务完成或不可进行。

快照信息的处理与模型抽象如图 10 所示。

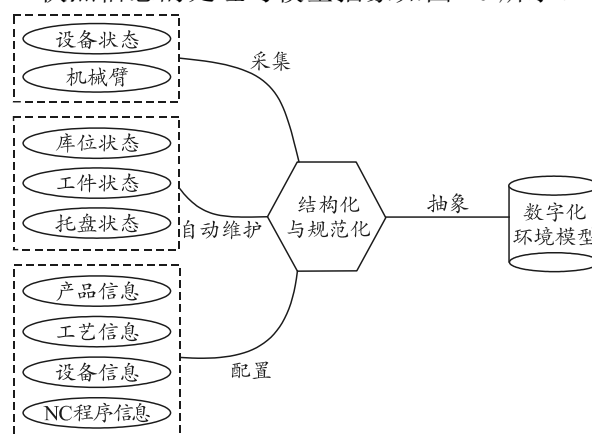


图 10 快照信息的处理与模型抽象

3.3.2 当前环境的最优指令生成与新环境的演化

把现场环境抽象出数据模型之后，根据当前待加工的零件信息，综合设备信息与状态，结合库位的存储情况，以最大限度地利用空闲设备为目的，生成对应的指令。

指令的合理性要综合各个情况，如待加工的工件需要的设备资源、各个设备当前是否具备可加工能力、暂存的工件优先级、调度指令的优先级等。

在现场，工件一般有待上线、加工中、(加工完)待转运、暂存中、已存储 5 个基本状态。

工件在上料区等待机械臂抓取至加工设备进行加工时为待上线状态；工件正在某个加工设备中进行加工时为加工中状态；工件在设备中加工完成后等待机械臂抓取进行下一步流转时为待转运状态；加工遇到冲突时，被移交到空库位暂存，等待下一次上线时为暂存中状态；所有工序完全加工完成后，由机械臂存放至空库位后为已存储状态。

每一次管控系统在生成指令时，所考虑的工件只有前 4 种。

从资源的利用角度，加工优先级一般为线上工件 > 暂存半成品 > 未上线工件，其中线上工件中，优先处理加工完待转运的工件(加工中的工件不允许处理)，以便腾出加工机械，处理方式有库位暂存和继续加工，优先考虑继续加工；暂存半成品中，

优先处理等待时长最长的半成品；未上线工件按顺序处理。

实际在很多场景中，未上线的工件处于所有信息都未知的状态，对系统而言是不可控资源；因此，通常为使该技术方案能适用于更普遍的车间情况，仅考虑用户在把工件安装到托盘之后，控制机械臂运转回库位暂存才能进行进一步的安排处理，如此一来，只要处于线上环境中，系统就可维护每一个现场资源的变化情况，并针对该情况做出相应处理。

根据环境模型生成最优指令后，为能继续模拟接下来的指令，需在缓存中预先生成执行该指令之后的新环境模型。正常情况下，一条指令正常执行只会会有一个确定的结果，对模拟环境所带来的变化是可以预见的。例如，一条指令是把 1 号库位的 X 托盘放入 A 设备加工，可以预见，如果成功执行该指令，则当前 1 号库位将变为空库位，X 托盘将会放入 A 设备，A 设备将会调用 X 托盘上的程序进行加工，在一段可预估的时间后加工完成；而对于现场的时间因素，如执行指令的时间、加工工件的时间、机械臂转运时间等，可以依靠经验数据来模拟得出。以这种方式，可以在系统中实现一个生成指令->模拟运行->更新环境->生成指令的循环，而缓存中的环境模型不断演化，最终演化到所有工件全部加工完成，或者剩下的工件全都不可加工的情况。

3.3.3 调度指令生成

调度指令的生成逻辑通过环境的抽象来实现，预先生成的环境指令序列只是理想情况下的计划，真正的执行需要结合每一步的实际环境信息，才能确保实际的动作是满足现实情况的。

在没有人为干预的情况下，现场出现的意外情况变化通常是机械状态变化、指令执行变化等可采集的信息变化，而对于库位存放信息、工件信息这些的变化不可能在无人刻意修改的情况下发生，并且人为干预所造成的不可采集信息的变化无法通过固定的程序策略来进行预知或者处理；因此，对于现场实时情况的作业调整仅考虑可采集信息变化的情况，对与不可采集信息的变化，则提供人工调整的操作逻辑。

为保证作业能及时进行调整，可在每执行一条指令前，利用当前的环境按照同样的逻辑进行一次指令生成，看生成的指令与计划的指令内容是否相同，若相同，则计划不需要调整；若不同，则计划

需要重新在此环境的基础上重新生成。

严格来说，如果业务场景中不需要用到指令安排与步骤计划，单独为了实现自动调度的话，可直接采用生成指令->执行->生成指令的循环，即不预先生成指令序列，直接进行每执行一步，生成一次指令再执行的步骤，但如此一来就会丧失对整个加工过程的全局掌控，失去对本次加工任务的预见性，不能提早发现潜在的问题；因此，一般情况下，都采用预先生成指令序列作为加工辅助，实际生成指令作为实际调度，在整个加工过程结束时，实际指令也将形成一个指令序列，通过与计划的指令序列进行对比，结合数据采集系统，能追溯到加工过程中在哪一步出现了什么问题，系统采用了什么应对方式继续加工等关键信息。

实时调整的指令间关系如图 11 所示。

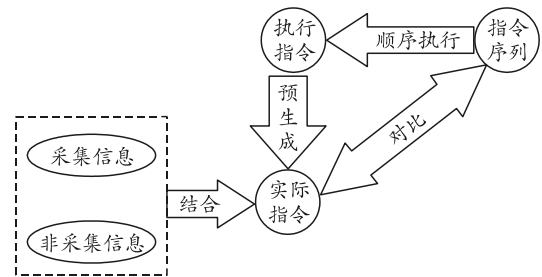


图 11 实时调整的指令间关系

该方案的关键在于保证在生成指令时所得到的采集信息能贴合当前实际环境，确保每次生成指令都是建立在实时环境的条件下，而可采集类的信息需要快速反映出现场实时的环境变化。

3.4 3 维可视化模块

3 维可视化监控是基于物理实体，通过数据感知与通信技术，实现对实际生产场景产生的各类信息进行实时可视化监控的技术手段。实现可视化监控首先要了解其系统组成，从而结合实际对象，构建监控模型。

3.4.1 模块组成

机加单元 3 维虚拟监控系统基于数字化双胞胎技术与数据存储平台整合，通过与单元设备数据以及车间 MES 系统、ERP 系统等信息系统进行数据交互，完成单元制造资源的 3 维可视化展示与分析并对单元现场的工艺参数信息、产品质量信息、物料信息、设备运行状态等信息进行呈现和管理，形成面向整体车间的虚拟监控平台，实现生产过程透明化^[10]。

单元可视化系统组成如图 12 所示。

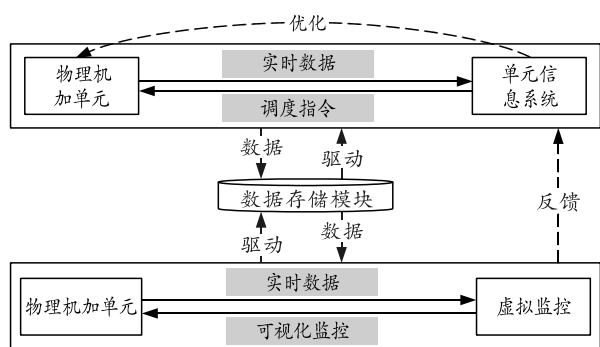


图 12 单元可视化系统组成

综合上图，笔者设计与实现的单元可视化系统由物理机加单元、单元信息系统、数据存储平台和虚拟监控 4 部分组成。物理机加单元即真实生产环境下制造加工实体集合，过程中产生的数据通过各种接口发送给 3 维可视化模块与数据存储平台；单元信息系统负责现场任务调度，该模块基于历史数据与物理模型的实时数据动态调整加工过程，从而实现柔性生产。4 个模块以数据驱动为核心，完成实体模型信息的监控、加工任务的调度优化，是一个耦合的多模块系统。

3.4.2 构建流程

基于数字孪生技术的机加单元 3 维可视化监控系统构建流程主要有以下步骤：

1) 模型构建与处理。

将 3dMax 机加单元模型经过轻量化、减少模型片面数、渲染等处理后，生成.fbx 文件，在 Unity3D 中选择导入，从而将 3dMax 模型导入到 Unity3D 工程中。

2) 基于 WebSocket 技术的数据发布。

在数据采集模块中搭建 WebSocket 服务器，定义状态改变、数据发送等事件与函数。将 OPC UA 客户端采集到的机床数据、S7 协议采集到的控制单元数据、来自 WebAPI 接口的任务调度数据打包转化为 JSON 格式的数据进行数据发送。

3) 数据获取。

Unity3D 中编写脚本函数并与全局物体进行绑定，在该脚本中定义 WebSocket 客户端并对其初始化，添加数据接收事件。WebSocket 客户端接收到来自数据采集模块的 JSON 格式数据后，将其解析，并将数据推送给 Unity3D 中的队形进行显示，或者驱动物体进行动作。

4) 基于实时数据的机械臂动作驱动。

虚拟单元中，机械臂的动作驱动借助于 Final IK 组件实现，首先将该组件导入虚拟单元工程中，接

着将机械臂从底部到夹爪在 Unity3D 中按照父子节点的形式进行组建，之后在第 2 级节点中引入 Final IK 组件，设置各节点权重，然后定义机械臂末端各目标点，最后在数据驱动脚本中，基于数据驱动机械臂进行动作。

5) 效果展示。

在模型中引入 UI 可视化元素，将数据与各 UI 对象进行绑定，显示诸如设备状态、主轴负载、当前加工程序号、刀具号、主轴速度、任务调度信息等，数字化柔性机加单元 3 维可视化效果如图 13。



图 13 机加单元 3 维可视化监控效果

4 结束语

笔者针对目前机加领域存在的信息孤岛、生产效率低、人员劳动强度高问题，基于目前成熟的数字化、自动化、柔性化、可视化技术，围绕 4 台西门子数控机床搭建自动化柔性机加单元，形成一套可行的数字化与可视化机加单元集成方案。系统自上线以来，稳定运行，有效减少了 20%人力成本；数据从机加单元到上层管理系统的流转时间从原来的 2~3 h，缩短为 3 min 以内，极大程度上缩小了数据流转上的时间延误。

该机加单元包含线边库、上下料站、转运机械臂、机床自动升降门等自动化机构，调度系统基于数据采集模块提供的机床状态、机械臂状态等实时信息与相关历史及人工输入数据，生成调度指令，控制单元接收命令，驱动机械臂从起点取料放置目的地。管控系统中的数据采集模块基于 OPC UA 与西门子 S7 协议将来自控制单元、机床、调度系统的相关数据，然后基于 WebSocket 协议发送至 3 维可视化模块，从而形成对现场设备状态及任务进度的实时可视化监控。笔者设计的管控系统在某制造企业机加车间成功实施并应用，有效解决了小批量多品种产品加工过程中存在的一系列问题，提高了车间的生产效率，降低了基础数据到管控层之间的延误。