

基于NC-Link协议的数控装备数据采集架构设计与实现

黄静远¹, 冯冰艳¹, 杜鹏¹, 王萧², 黄天龙², 代超仁¹

1. 华中科技大学 湖北武汉 430074

2. 华中数控股份有限公司 湖北武汉 430223

摘要：提出NC-Link协议下多源异构数控装备边缘数据采集架构，用以实现异构设备及不同工业互联网平台间的数据互通。关键技术有协议体系架构、边缘数据交互、设备接口兼容与数据采样的设计。该架构能显著提高设备的运维效率，优化生产方案，为大数据分析提供有力支撑。

关键词：数控装备；互联互通；NC-Link协议；数据采集



黄静远

1 序言

众所周知，工业现场中各种自动化设备（包括数控机床、机器人、PLC模块和物料小车AGV等）的互联互通是数字化转型的基础。而设备协议种类繁多，目前主要通过实现单一协议转换或利用实时性较弱的OPC等技术实现交互；另一方面，由于物联网设备的爆炸增长，云计算实时性差、带宽不足和能耗高等弱点随之暴露^[1]，边缘计算开始在物联网设备的数据采集与处理中进行广泛应用。

针对上述工业互联、边缘计算的数据采集等需求，本项目通过网络连接、协议转换等方式链接物

理和数字世界。本项目充分调研使用广泛的数控设备互联协议，如OPC UA、MTConnect和NC-Link协议，选择了最合适的NC-Link协议^[2]。

OPC UA由OPC基金会于2006年8月首次发布，为工厂车间和企业之间的数据信息传递提供了与平台无关的互操作性标准，通过对人员授权及应用授权，可使数据信息随时随地获得授权访问，且该特性不会依赖于底层操作系统及用户所使用的技术栈，也不会被厂商绑定，具有较大的自主性。但其在通信实时性上具有局限性，不适用于工业现场级的数据互通^[3]。

MTConnect协议是2006年由美国机械制造技术协会（AMT）提出，用于解决异构数控设备数据采集问题。该协议允许不同来源的数据进行交互，支持不同数控系统、设备和应用软件之间更广泛的互操作，创造了“即插即用”的应用环境。但MTConnect是只读协议，目前尚不支持工业设备的反向控制。

NC-Link协议是专门针对控制设备的互联互通互操作协议，由数控机床互联互通协议标准联盟研发和制定，牵头单位武汉华中数控股份有限公司以及联合单位华中科技大学是NC-Link协议开发与标准起草的主导及参与单位，对该协议的实现及应用方面具有自主知识产权。NC-Link协议主要目的在

于减少数据清洗相关的繁重工作，“用户友好性”是NC-Link的核心需求，毫秒级大数据采集能力使其可运用于数控机床数字孪生建设。同时，NC-Link协议设计上充分考虑设备接入、应用接入等问题，设备接入门槛低，应用开发快、易于扩展和迁移。

因此，本项目选择NC-Link协议，在设备端基于NC-Link协议进行多源异构设备适配，实现数据采集、协议解析和数据格式转换，以标准化API形

式对外提供服务，具备了打通不同工业互联网平台间数据交互的能力。

2 关键技术及其方案设计

本项目搭建了基于NC-Link协议的边缘数据采集架构，协议栈设计方案如图1所示，支持整个车间的各类加工设备以及应用的数据接入，实现实时、高效的数据交互，为制造过程中工艺参数、设备状态以及制造过程信息流的汇集提供基础^[4]。



图1 基于NC-Link协议的边缘数据协议栈设计方案

2.1 NC-Link协议体系架构实现技术

NC-Link协议体系架构由代理器和适配器组成。适配器负责适配设备原生协议接口，对上层提供NC-Link协议访问接口。代理器负责把应用层的数据访问转发给适配器，并将适配器消息转发给应用层，提供数据安全、接入管理和权限管理等功能。

2.2 基于NC-Link协议的数据采样技术

数控机床数据属于工业控制系统的指令域数据场景，指令域数据经常需要结合多来源数据进行处理分析，实现对设备和加工过程的精确控制；部分数据要求高频采样，用来展示实时状态反馈，便于决策；且在使用频次上也有区别，部分数据需要频繁被访问处理及传输，以支持实时控制与监测，而低频数据通常为较稳定的配置参数，不需要频繁处理。针对以上数据特征，本项目基于发布订阅设计，结合了被动传输与主动传输两种工作模式。基

于主动传输机制，本项目通过采样通道设计和采样数据接口，实现了数控设备指令域数据的采集，并利用时序数据库对指令域数据进行了存储^[5]。

3 具体研究内容和试验验证结果

3.1 基于NC-Link协议搭建数据交互架构

NC-Link协议标准体系如图2所示，分为设备层、NC-Link层和应用层。数据可正、反向双向流动。设备层可基于数控装备（机床、机器人等）组成原始数据源；NC-Link层作为该架构的核心层，负责中间转发^[5]。

NC-Link层使用适配器加代理模式实现，其中适配器设计如图3所示，适配器可拆分为3个模块实现，分别是与设备层通信的驱动模块、模型解析模块和通信模块。驱动模块主要实现与设备层的通信，建立数据传输通道；解析模块主要负责将采集上报的数据转换为NC-Link格式数据，以此达到多

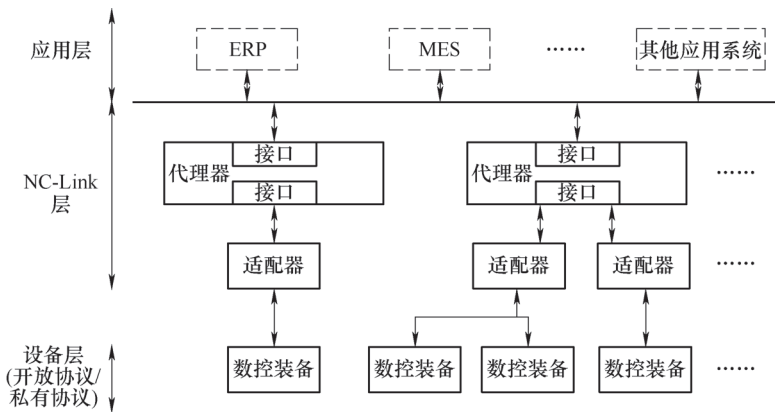


图2 NC-Link协议标准体系

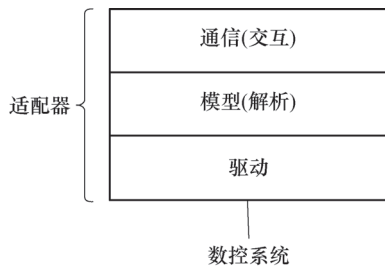


图3 NC-Link适配器

源异构设备兼容；通信模块则用于建立适配器与代理器的通信链路。

NC-Link代理器主要通过3层分层设计实现，包括应用层、管理层和适配层，如图4所示。适配层与适配器建立通信，管理层提供如身份认证、访问控制和传输安全校验等安全控制能力，应用层即客户端接口，与上层应用之间进行数据通信。

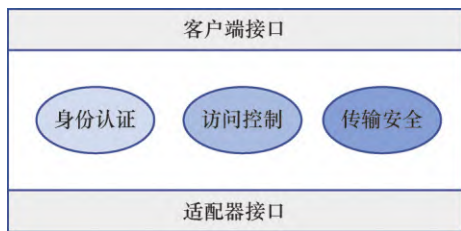


图4 NC-Link代理器

在实现该架构通信链路时，本项目选取了物联网场景广泛使用的MQTT（Message Queuing Telemetry Transport）协议，其具有长连接、实时性和传输可靠性等特性。消息交互模式采用订阅/发布模式，如图5所示。设备数据上报侧作为发布者，应用侧作为订阅者接收订阅消息，反之亦然。

3.2 基于NC-Link协议实现数据采样技术

边缘数据协议栈采用基于MQTT协议订阅/发布机制的数据交互模式。从数据交互频率来看，采

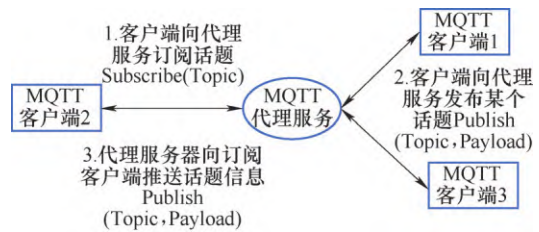


图5 基于MQTT的消息交互流程

样数据（如轴电流、轴电压、主轴振动和主轴功率等）具备高热度、高频和容量大等特点，其他非采样数据（如G代码、信息模型文件和刀具信息等）则热度较低，不需要频繁交互。因此，边缘数据协议栈基于订阅/发布模式实现主动传输和被动传输融合的数据交互方法。

（1）基于订阅/发布模式的数据主动传输 数据采集的采样周期越短，采样频率越高，数据密度越大，高密度数据可以更准确地描述数控机床的状态；不同的数据应用场景对数据精度和实时性需求不同，如相比于需要毫秒级采样的工艺优化应用，MES系统采用分钟级采样周期即可达到要求。而尽管高频采样能提供精确数据，但数控系统的硬件能力（如计算能力、存储能力和网络IO能力）限制了数据传输，若针对数控系统进行毫秒级采样且频繁发生IO，则系统极可能出现数据延迟或数据丢失。高频采样得到的数据主要应用于机器学习场景，而算法训练并不依赖实时的传输，保证数据点位的完整性即可用于训练，因此本项目采用了一种折中方案，即在数控系统端多次进行数据采集，将数据缓存到本地，然后一次性打包传输到边缘端，既实现了高频采样的需求，又保证了数据传输的完整性和可靠性。图6所示为一个指令域大数据的采样参考模型，主要设计理念为：毫秒级指令域数据的“多次

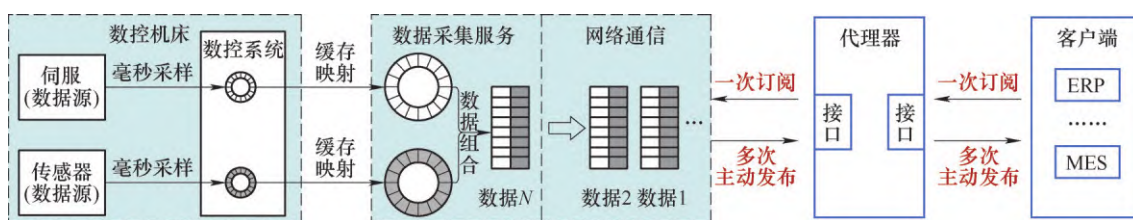


图6 指令域大数据采样参考模型

采集”在数控系统端完成，多组指令域数据以“数据组合”的形式向边缘网关传输一次，应用程序从边缘网关订阅采样数据^[5]。

“多次采集”阶段：①环形缓存。环形缓存具有固定容量，缓存满后新数据会覆盖旧数据，防止随着数据无限增长导致缓存占用大量系统资源；该设计采用先进先出结构，可高效读取写入数据，适合实时数据处理场景，且环形缓存结构简单，只需一对读写指针就能实现数据的循环存取；数控系统计算存储资源有限，通过环形缓存设计可显著减少对系统加工性能的影响。②缓存映射。数控系统主要任务为执行加工指令，如果数据采集模块直接操作数控系统内存，会占用系统资源，可能影响数控系统正常运行，而数据采集模块具有更大的缓存区及计算能力，可以更高效地处理大量数据，提高整个系统的数据处理效率。③数据组合。在数据采集模块中可实现复杂的数据组合、处理和转换算法，形成按时间序列构造的多行完整指令域数据^[5]。

“一次传输”阶段：在以太网的性能约束下，通过一次传输减少传输频次，优化传输效率，保证数据完整性；通过数据采集阶段预处理完成的时间序列指令域数据，节省了在边缘端数据排序的计算量，提高整个系统的数据处理效率。

为满足指令域大数据采集周期和传输周期的设置，数控机床模型文件提供了便捷配置项。模型文件如图7所示，采样通道“sample_channel1”中的“sampleInterval”参数设定采样周期，“uploadInterval”参数设定上传周期。图7所示的采样通道表示：采样数据的采样周期为1ms，上传周期为200ms，即每次传输200行指令域数据。

指令域数据的处理场景具有数据量大、传输频率高等特点，如果基于请求响应模式，每次传输数据时系统会产生2次网络耗时，当传输频率不断升高时会加大带宽压力，当达到系统网络IO能力瓶颈

```
{
  "id": "01"
  "type": "NC_LINK_ROOT",
  "name": "机床模型文件",
  "devices": [
    {
      "type": "MACHINE",
      "id": "0103",
      "name": "数控机床",
      "guid": "ID HNC",
      "description": "数控机床",
      "version": "1.0",
      "configs": [
        {
          "id": "sample_channel1",
          "type": "SAMPLE_CHANNEL",
          "name": "采样通道",
          "sampleInterval": 1,
          "uploadInterval": 200,
          "ids": [
            { "id": "0103502001" },
            { "id": "0103502001" },
            .....
          ]
        }
      ]
    }
  ]
}
```

唯一标识数控机床
模型文件版本信息
采样通道
采样周期
指令域数据组合
数据机床X轴驱动器的指令位置数据
数据机床X轴驱动器的指令速度数据

图7 数控机床模型文件示例

后，会产生数据延时、数据丢包等问题。而指令域数据项会预先在数控系统模型文件中定义，不会随着每次传输改变数据组合方式，基于此可通过“一次订阅，多次推送方式”进行传输，主要步骤为：

①边缘端/云端向消息转发网关订阅采样数据项。②消息网关服务将订阅消息向数控机床转发。③数控机床监测到符合订阅数据项的数据变化，将对应数据主动推送到消息网关。④消息网关即时将采样

数据推送到边缘端/云端。

(2) 基于订阅/发布模式的数据被动传输 相比于电流这种对时序完整性、采样频率要求较高的数据场景，对于数控G代码程序文件、PLC点位和

状态等数据，可通过同步调用方式（仿照请求/响应模式）处理，本项目仍采用订阅/发布模式实现了数据的被动传输^[5]，如图8所示。

通过订阅/发布模式实现模拟请求响应被动传输

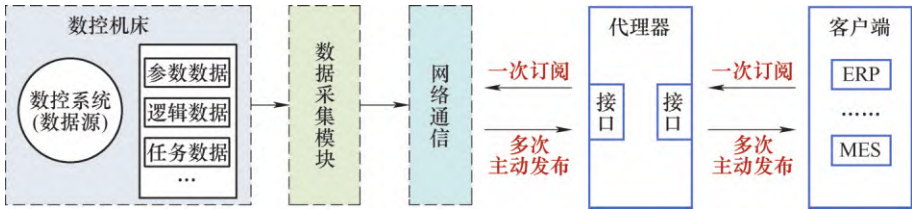


图8 基于订阅/发布模式的数据被动传输示意

流程为：①消息网关向数控机床订阅响应主题。②消息网关向边缘端/云端订阅请求主题。③边缘端/云端向消息网关发布请求，消息网关转发到数控机床。④数控机床被动地向消息网关响应主题消息，消息网关将数据转发回边缘端/云端。

被动传输方式基于“请求/响应”指令对。边缘端/云端根据业务需求，向数控系统发送特定的数据请求指令。请求指令由指令字和指令参数两部分构成，结构如图9所示。



图9 请求指令结构

例如：向数控系统查询X轴的指令速度（数据标识为0103502003），指令字为“Query/Request/ID_HNC”，指令参数为{“id”：“0103502003”}，数控系统每当收到查询指令时，会根据指令的要求查询数据，并生成响应指令返回给数字孪生。响应指令与查询指令类似，结构稍有差别，响应指令结构如图10所示。

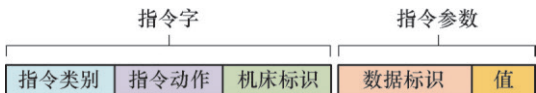


图10 响应指令结构

3.3 测试与应用验证

(1) 试验测试 异构边缘数据采集技术的测试环境见表1，使用配置华中数控系统的钻攻中心为测试对象，即终端设备，使用MQTTBox（即应用系统端）通过接口与终端设备交互，对数据的被动传输

模式和主动传输模式分别进行实际验证。

表1 异构边缘数据采集技术测试环境

项目	内容
G代码文件	O2D4R2
消息中间件	EMQ3.3
消息中间件客户端	MQTTBox
通信协议	NC-Link
网络	网线直连（百兆）
运行硬件	DELL inspiron5488
试验机床	玉溪钻攻中心Z450B
数控系统型号	HNC-818Ai
数控系统版本号	2.40.02_E11_B2
数控系统SN码	26AF1B9E3FF398E

终端发现指令应由应用系统发往代理器，用于请求当前所有已注册在该代理器上的所有适配器的设备终端的dev_uuid（本项目为SN码）列表信息。代理器收到终端发现指令的请求报文后，应通过响应报文向应用系统返回当前所有注册在其上的适配器的设备终端dev_uuid列表。

侦测指令可从应用系统发往代理器，也可从代理器发往适配器，用于获得指定设备终端的模型文件。其中的设备终端应由指令中的dev_uuid指定。

数据查询指令应由应用系统发往适配器，用于查询指定设备终端的指定数据项的当前值。设备终端应由指令中的标识部分给出。

数据采集指令的交互采用“主动传输”模式，适配器应调用数控装备接口获取采样数据，每间隔一段时间应向代理器发布含有采样数据的“数据采集指令”；而应用系统应从代理器订阅“数据采集

指令”，即可获得采样数据。图11是使用MQTTBox获取采样通道sample_channel1数据的示意，采样频率为1ms，数据每200ms上传一次。

当数据通过NC-Link接口被采集后，会存入数据库进行持久化。为了提供数据的长期存储能力，

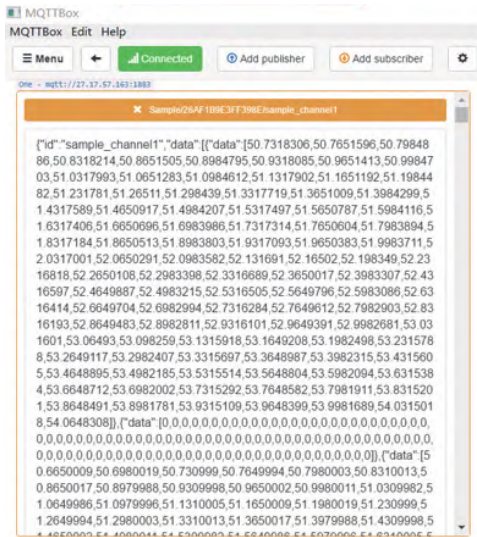


图11 使用MQTTBox订阅采样通道数据

可定期将时序库InfluxDB中的历史数据自动同步到分布式文件系统HDFS中进行备份保存。在HDFS中，数据按照机床/采样通道的索引结构存储，某数控机床的数据在分布式文件系统HDFS存储界面如图12所示^[6]。

(2) 应用验证 本项目基于上述已经实现的技术开发了边缘计算微服务操作系统应用中心，如图13所示，实现了云机床、质量分析、远程运维、系统管理、边缘数据管理和智能产线等一系列微应用。

1) 数控装备状态实时监测。实时、自动监测工业设备的生产状态，包括：运行、空闲、进给保持、报警和离线等，打破传统的人工巡视、定期预防性检修，帮助用户企业提高设备运维和使用效率，如图14所示。

2) 数控设备加工过程远程监测。对工业设备的运行状态数据进行实时采集和分析，提供图形化的实时数据可视化，以及加工过程的实时三维仿真和加工现场的实时视频监控，实现加工过程的可视

-rw-r--r--	ecm	supergroup	4.53 GB	Thu Oct 22 00:12:42 +0800 2020	3	128 MB	20201021
-rw-r--r--	ecm	supergroup	2.22 GB	Tue Oct 27 14:30:42 +0800 2020	3	128 MB	20201026
-rw-r--r--	ecm	supergroup	2.08 GB	Wed Oct 28 00:06:19 +0800 2020	3	128 MB	20201027
-rw-r--r--	ecm	supergroup	2.38 GB	Fri Oct 30 00:08:01 +0800 2020	3	128 MB	20201029
-rw-r--r--	ecm	supergroup	4.24 GB	Sat Oct 31 00:12:13 +0800 2020	3	128 MB	20201030

图12 数控机床的数据在分布式文件系统HDFS的存储界面



图13 边缘数据采集体系应用层具体实现展示

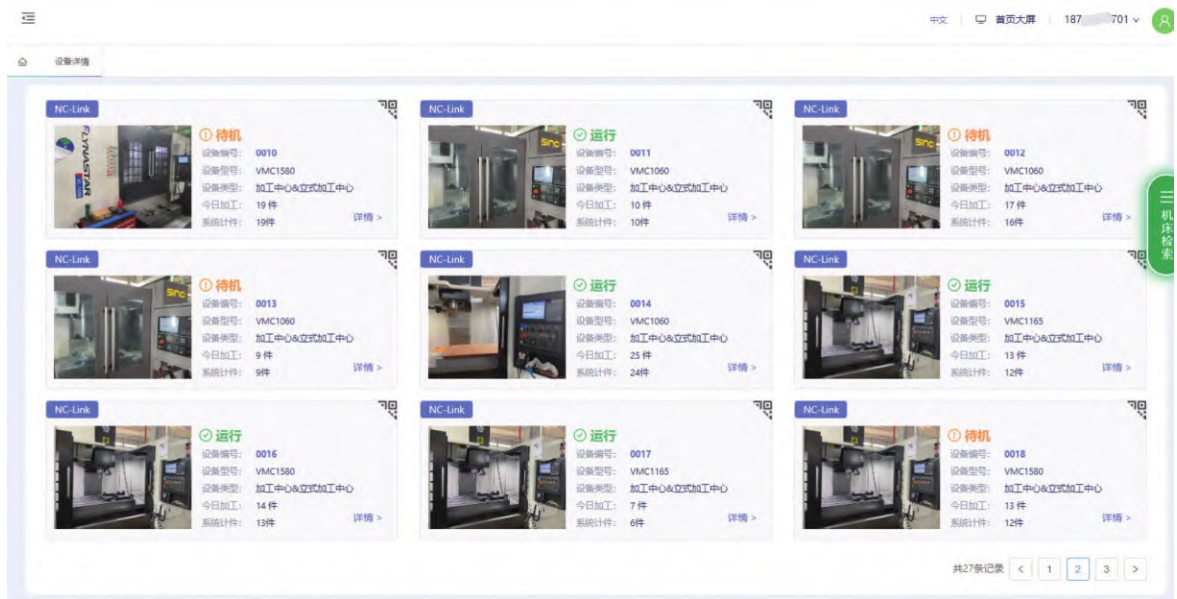


图14 数控设备状态实时监测展示

化、透明化管理。显示接入本系统全部设备基本信息，包括设备的运行状态数据、设备属性数据和健康状态数据等，如图15所示。

3) 数控设备远程采集配置。模型文件是对数控设备进行具体实例化的结果，即采用树状的聚合结构，通过具体数字化描述文件对数控设备的构成、功能及数据等进行描述和标识。通过对模型文件操作，即可远程实现采集数据需求的变更，简化了数据采集方式。模型文件远程操作界面如图16所示，左侧是以树形文件夹结构的方式列出模型文件，右

侧是以JSON数据展开的形式来显示模型文件的具体内容，可以通过此页面实现对适配器中模型文件的修改。

4) 数控设备预测预警及健康保障。汇聚机床从装配、联调、补偿到健康保障等过程的数据，建立机床健康指数变化模型，实现对机床综合性能的监测与管理，对设备亚健康状态发出预警，如图17所示。

5) 数控设备生产统计与效率分析。提供数字化、图表化等多维度的统计分析功能，清晰反映每

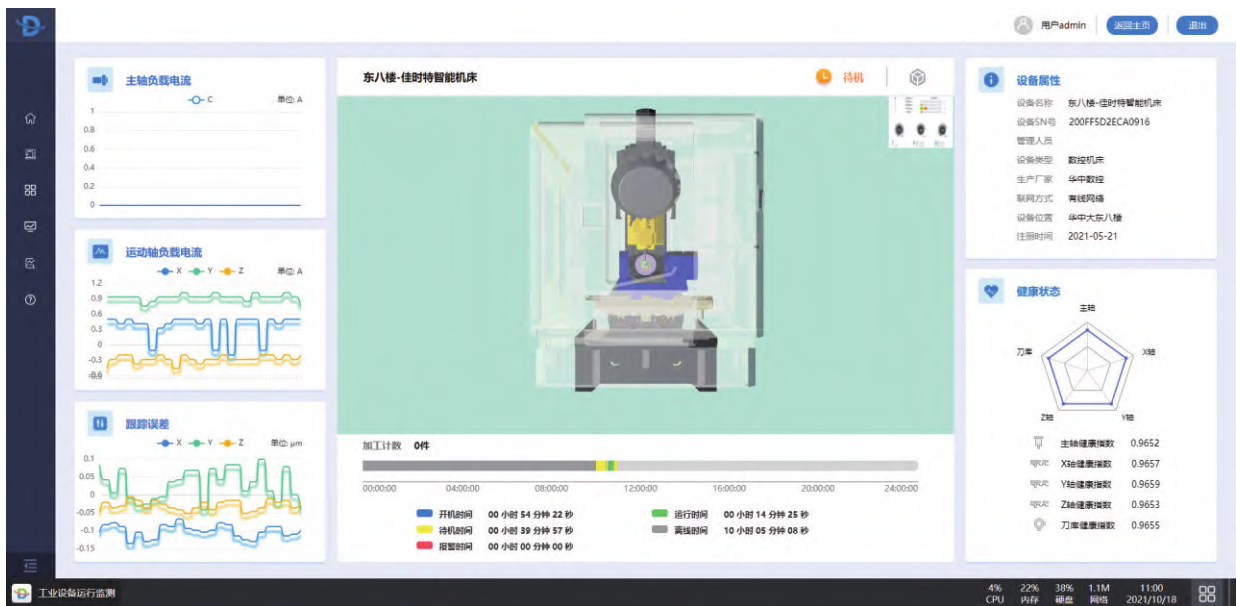


图15 数控设备加工过程远程监测展示

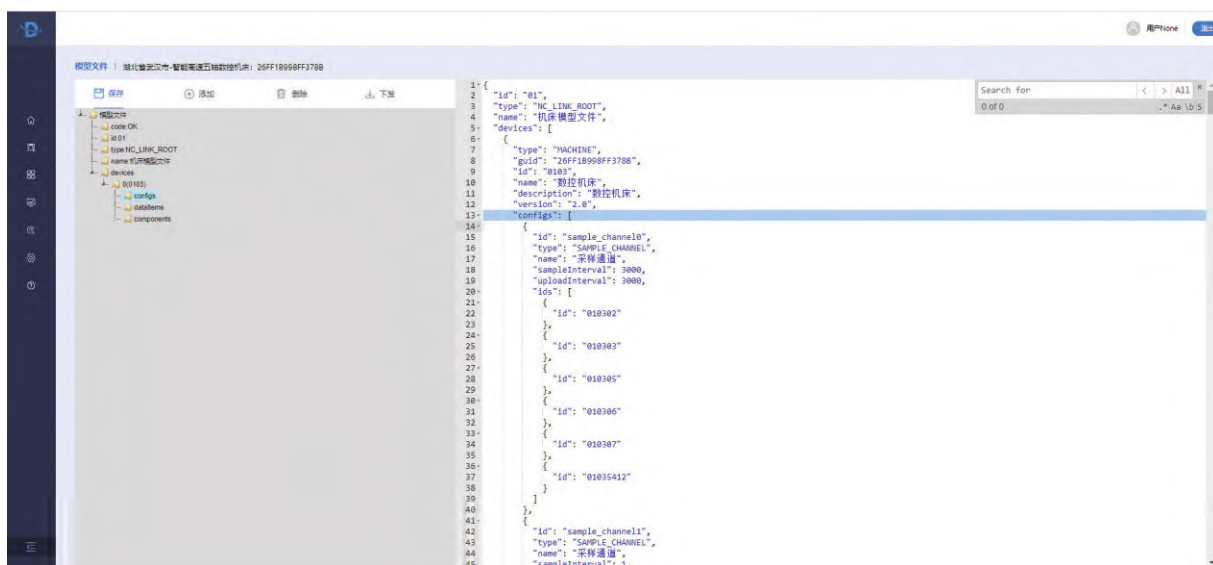


图16 模型文件远程操作界面

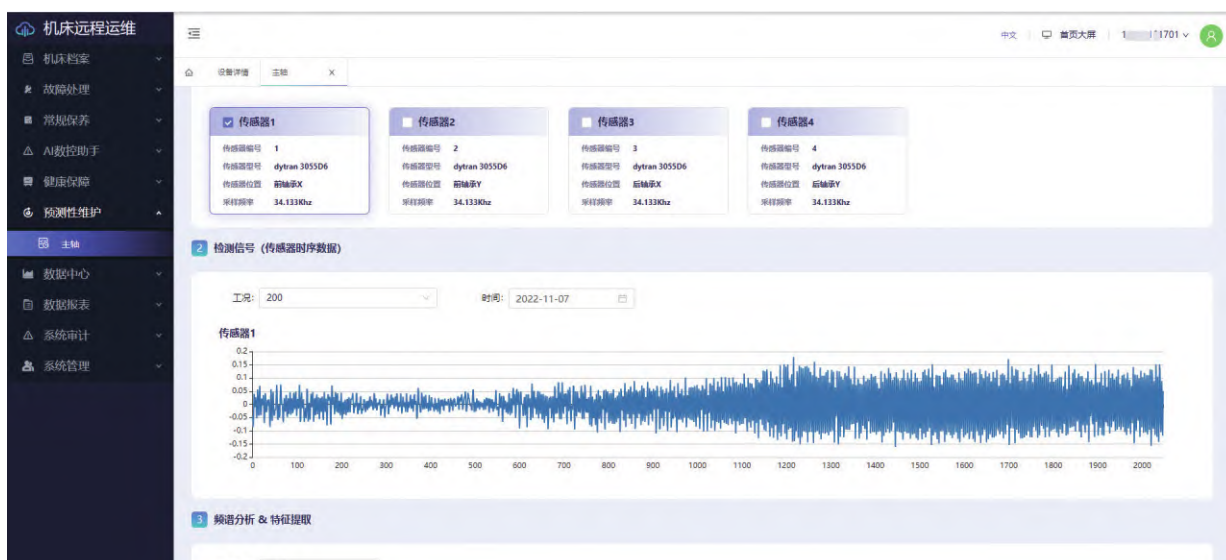


图17 设备预测预警及健康保障界面

台设备的运行率和生产效率，帮助管理人员掌握设备当前实际使用及加工效率，优化生产方案，如图18所示。

6) 智能总控与优化排产。实现从订单下达、物流送货到产品完成的整个生产过程的优化管理。对生产现场的流程进行智能控制，防错、防呆、防漏，自动化集成各种制造信息，使管理者准确掌控工厂实时状况，帮助制造企业提升营运效率、缩短交期，降低成本并提高质量。智能生产线看板如图19所示。

7) 数控设备刀具管理。针对刀具管理场景，可通过采集数控系统的各类指令域数据，如电流、电压等，结合系统内部管理的历史知识库数据进行对

比分析，历史数据也可结合数据挖掘、机器学习相关算法训练后，对实时数据进行预测。数控机床刀具管理如图20所示，如果推断出刀具状态异常，则可及时反馈给数控系统报警或停机。

8) 数控设备历史数据分析。按照数据交互信息定义的接口，输入查询信息比如数据根目录、机床SN码、起始时间或终止时间，点击检索，得到加工数据列表，双击其中一项，右侧显示其数据心电图。查询功能提供包括目录、机床、日期和程序名在内的多种筛选条件；心电图查看提供缩放功能，程序名、行号和采样值显示功能，各组件、类型可选择显示，默认全部显示。在历史数据心电图界面



图18 生产统计与效率分析界面



图19 智能生产线看板

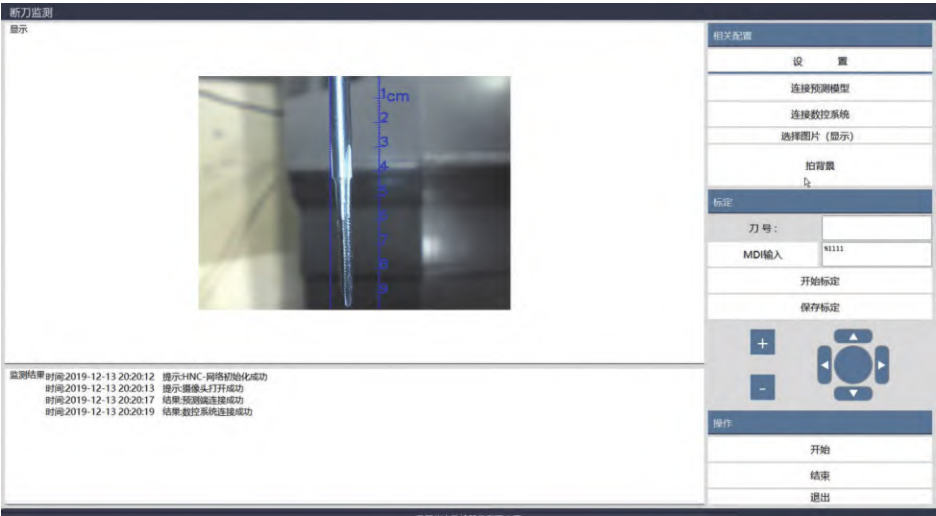


图20 数控机床刀具管理展示

(见图21) 可以进行数据标记、一次差分、联合差分、指令域直方图和频谱计算等操作。此功能提供了方便的查询操作，通过根目录、机床SN码、起始

时间和终止时间等5种条件对数据进行筛选展示，并通过缩放双击等功能可以使用户更加清晰地观测对应的工业大数据。

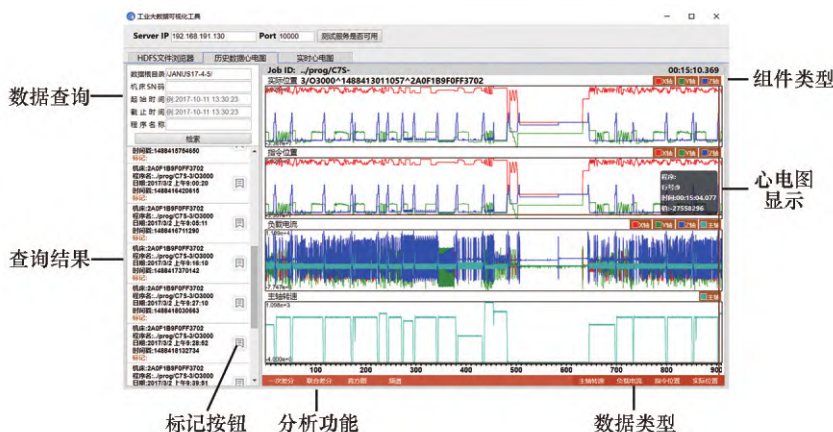


图21 历史数据心电图界面

4 结束语

本文基于自主研发NC-Link协议，介绍如何搭建数控装备异构边缘数据采集架构，以边缘数据信息交互、异构数控装备接口兼容和数据采样技术为研究内容，开发了实现设备远程监控、数据采集存储和大数据分析的软件，能够更加方便且直观地访问当前数据以及历史数据，并对大数据标记等常规功能进行了集成，为大数据分析、生产方案优化提供有效支撑。

参考文献：

- [1] 于海飞，张爱军. 基于MQTT的多协议物联网网关设计与实现[J]. 国外电子测量技术，2019，38(11)：45-51.

- [2] 黄倩，唐雄燕，黄蓉，等. 面向工业互联网云网端协同技术研究[J]. 邮电设计技术，2022(3)：25-28.
- [3] 冯冰艳，代超仁，王萧，等. 面向智能制造的数控机床互联互通互操作[J]. 金属加工(冷加工)，2022(2)：11-14.
- [4] 张凯. 支持概念设计的多源文本数据领域知识挖掘及方案决策方法研究[D]. 武汉：华中科技大学，2021.
- [5] 惠思明. 数控机床数字孪生自主感知技术研究[D]. 武汉：华中科技大学，2020.
- [6] 陈震. 基于NC-Link的数控机床大数据汇聚技术研究[D]. 武汉：华中科技大学，2021.

MW 20240708

欢迎关注“机工刀具世界”和“机工机床世界”微信公众号

“机工刀具世界”定位于指导制造企业一线技术员工如何合理选择和使用数控刀具，介绍数控刀具使用技巧。关注刀具行业最新技术进展，为广大制造企业推荐先进、实用数控刀具产品。

扫描二维码即可关注！



“机工机床世界”主要为广大制造企业和相关技术及操作人员介绍机床产品、机床技术、机床应用、机床使用技巧和数控机床等内容。

扫描二维码即可关注！

