DOI: 10.19666/j.rlfd.202606081

睿渥分散控制系统基金会现场总线主站国产化研发与应用

宋美艳[1]，贾朋伟[2]，李 卓[1]，刘 伟[2]，李晓博[1]，王 刚[2]
（1.西安热工研究院有限公司，陕西 西安 710054;
2.华能荆门热电有限责任公司，湖北 荆门 448000）

［摘 要］【目的】针对基金会现场总线（foundation fieldbus, FF）主站供应链安全隐患突出，相关芯片、协议栈与组态工具高度依赖进口问题，依托睿渥技术体系开展 FF-H1（foundation fieldbus- H1）总线主站全链条国产化研发，实现主站软硬件完全自主可控，为电力工控系统的供应链安全与能源安全保障提供技术支撑。【方法】硬件方面，采用国产分立器件搭建介质连接单元（medium attachment unit, MAU）物理层电路，通过基准电压选择与恒流闭环控制电路实现总线信号精确调制，并采用选频放大与迟滞比较电路完成总线信号接收整形；软件方面，在嵌入式处理器中编写 FF 通信协议栈，实现系统管理服务、链路调度以及周期数据与非周期数据通信等功能；配套组态工具基于银河麒麟操作系统完成开发，覆盖设备文件解析、功能块组态、在线监控与工程维护等应用需求。【结果】系统测试表明，双网段各挂载 16 台从站时，设备组态与数据通信均可稳定运行，模拟量输入（analog input, AI）、模拟量输出（analog output, AO）、开关量输入（digital input, DI）、开关量输出（digital output, DO）四类数据读写状态正常，长时间连续运行工况下报文侦听未检测到错误帧，充分验证了主站通信功能与数据交互的正确性。【结论】所研发的 FF-H1 主站实现了从芯片、协议栈到组态工具的全链条自主可控，通信性能满足工程要求，可支撑睿渥分散控制系统（distributed control system, DCS）规模化配套应用，对提升电力工控系统供应链安全、保障能源安全具有现实意义。

［关 键 词］睿渥 DCS；FF-H1 现场总线；主站模件；国产化；组态工具

［引用本文格式］宋美艳，贾朋伟，李卓，等. 睿渥分散控制系统基金会现场总线主站国产化研发与应用[J]. 热力发电，2026，55(1)：起始页码-终止页码. Song M Y, Jia P W, Li Z, et al. Domestic research and application of Ruiwo distributed control system Foundation Fieldbus master module[J]. Thermal Power Generation, 2026, 55(1): 起始页码-终止页码.

Domestic research and application of Ruiwo distributed control system Foundation Fieldbus master module

Song Meiyan[1], Jia Pengwei[2], Li Zhuo[1], Liu Wei[2], Li Xiaobo[1], Wang Gang[2]

(1. Xi'an Thermal Power Research Institude Co., Ltd, Xi'an 710054, China;
2. Huaneng Jingmen Thermal Power Co., Ltd., Jingmen 448000, China)

Abstract: [Objective] In view of the prominent supply chain security risks associated with the FF(Foundation Fieldbus) master station in power industrial control systems, where the relevant chips, protocol stacks, and configuration tools have long been heavily reliant on imports, a full-chain localization research and development of the FF H1 fieldbus master station was carried out based on the Ruiwo DCS technical platform. The aim of this work is to break the foreign monopoly on key components and basic software, achieve completely independent and controllable master station hardware and software, and provide solid technical support for the supply chain security of power industrial control systems and for national energy security.[Methods] In terms of hardware,

收 稿 日 期：2026-06-25 修回日期 2026-10-19 接收日期 2026-10-21
基 金 项 目：中国华能集团有限公司总部科技项目（HNKJ25EZ111）
Supported by：Huaneng Group Science and Technology Project No.HNKJ25EZ111
第一作者简介：宋美艳（1979），女，高级工程师，主要研究方向为工业控制系统研发与应用，songmeiyan@tpri.com.cn。

domestic discrete components are adopted to construct the MAU(Medium Attachment Unit) physical layer circuit. In the transmitting path, precise modulation of bus signal was realized through reference voltage selection combined with a constant-current closed-loop control circuit, which ensures that the transmission current accurately tracks the command value and thereby improves the accuracy of signal modulation. In the receiving path, frequency-selective amplification was adopted to extract the modulated bus signal from background noise, and hysteresis comparison circuits are used for receiving and shaping bus signals to guarantee the integrity of signal transmission. For the software side, the FF communication protocol stack was programmed on an embedded processor, realizing such core functions as system management services, link scheduling, and cyclic and acyclic data communication based on virtual communication relationships, which fully meet the requirements of real-time performance and reliability for field-level control. In addition, the supporting configuration tool was developed based on the Kylin operating system, covering the complete engineering application workflow , including device description file parsing, function block configuration, network configuration, online monitoring and maintenance. [Results] Systematic tests showed that, with 16 slave devices mounted on each of the two network segments, device configuration and data communication could operate stably and reliably. The read and write status of the four typical types of process data, namely AI(analog input), AO(analog output), DI(digital input), DO(digital output), remained normal throughout the tests; and no error frames were detected by continuous message monitoring under long-term operating conditions, which fully verifies the correctness of master station's communication functions and data interaction as well as the reliability of the independently developed hardware and software. [Conclusion] The developed FF-H1 master station achieves full-chain independent control ranging from chips and protocol stacks to configuration tools, and its communication performance satisfies engineering application requirements. The results indicate that the master station can support large-scale supporting application of the Ruiwo DCS, and the work is therefore of great practical significance for improving the supply chain security of power industrial control systems and for safeguarding energy security.

Key words: Ruiwo DCS; FF-H1 fieldbus; main station module; domestication; configuration tool

现场总线作为工业控制“神经末梢”，承担着过程工业底层数据采集、设备诊断与控制执行的核心任务，基金会现场总线（foundation fieldbus, FF）凭借稳定的传输特性，在火电、化工等连续过程控制场景中得到广泛应用[1]。目前，国内工业控制系统的国产化呈现明显的“上层快、底层慢”格局：主流分散控制系统（distributed control system, DCS）的软硬件已实现国产化，但处于系统最底层、直接决定现场设备能否接入的 FF 主站核心组件仍依赖海外产品[2]。已有研究对 DCS 国产化路径、现场总线应用现状讨论较多[3-4]，国家层面亦从能源安全角度对核心技术自主可控提出了明确要求[5]，但针对 FF 主站这一具体环节，如何实现芯片、协议栈与组态工具的同步国产化并开展工程验证，公开文献中仍少有系统报道。换言之，产业链的“最后一环”尚未闭合。睿渥 DCS 已应用于国内数百台火电机组，产品体系内缺少自主研发的 FF 主站产品，这一短板在全行业具有代表性。针对上述空白，本文完成 FF 主站硬件、嵌入式软件、组态工具三大板块的全链条国产化研发，并通过双网段挂载测试与长时间连续运行测试验证其通信性能。在复杂国际环境下，实现 FF 主站完全自主可控，是填补 DCS 国产化链条底层空白、提升电力基础设施安全水平与保障能源安全的直接举措[6-7]。

1 系统总体架构与技术路线

1.1 系统总体架构

整套系统面向电厂过程控制场景设计，系统边界涵盖上位机组态工具、控制器、主站模件与现场仪表四大部分，架构设计将配置管理、协议调度、数据品质校验、异常诊断整合为一套闭环运行体系。上位机组态工具负责 DD 设备描述（device description, DD）文件[8]导入、网段搭建、功能块筛选、通信点映射以及组态文件下载；控制器接收工程参数，实时刷新周期数据，并执行现场控制逻辑；主站模件一方面完成输入输出总线（input output bus, IOBUS）报文解析与数据缓存管理；另一方面运行链路活动调度器（link active scheduler, LAS）调度程序，维护维护虚拟通信关系（virtual communication relationship, VCR）连接，访问设备对象字典，同时全程监控从站的运行状态；现场仪表通过两路相互独立的网段接入 FF 主站端口，两个端口设置电气隔离结构。睿渥 DCS 接入 FF 主站通信路径如下图 1 所示。

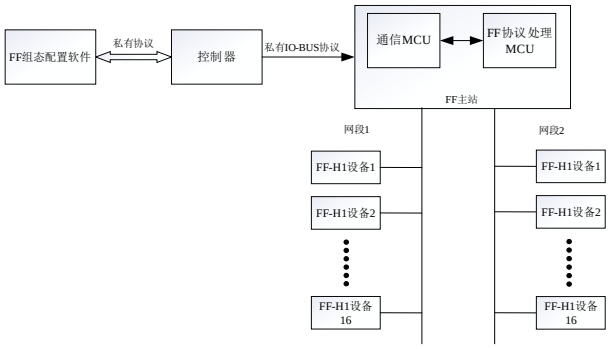


图 1 睿渥 DCS 接入 FF 主站通信路径示意

Fig.1 Schematic diagram of Ruiwo DCS access to FF master station communication path

1.2 通信流程与技术路线

系统通信流程分为周期通信、非周期通信、组态下装、异常上报四大类别，不同流程分工明确，运行逻辑相互独立。周期通信服务于过程控制业务，模拟量输入（analog input, AI）、开关量输入（digital input, DI）采集的数据会按照调度表传输并写入控制器输入区域，模拟量输出（analog output, AO）、开关量输出（digital output, DO）控制数据则从控制器输出区域下发至从站功能块；非周期通信用于参数读写、设备识别、故障诊断与组态更新，相关指令由组态工具发起，经过控制器透传至主站，主站会利用总线令牌窗口访问目标设备；组态下装会先完成 DD 解析与功能块编排，再生成网段配置表、VCR 表、调度表、通信点映射表，依次下发至控制器与主站；异常上报由主站持续监测设备列表、链路状态、模件插拔动作与从站重连状态，接口处理单元将异常状态转换为控制器可识别的标记信号。整套系统采用“周期优先、非周期插空、异常独立上报”的调度策略，有效规避不同通信任务之间的相互干扰，技术路线如图 2 所示。

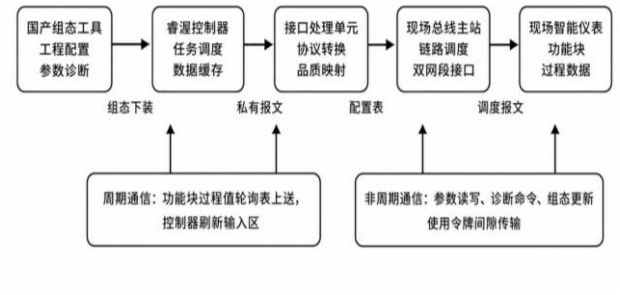


图 2 组态及通信技术路线

Fig.2 Configuration and communication technical route

由图 2 可知，完整的数据链路形成闭环，基于银河麒麟上位机组态工具生成工程配置，数据经过睿渥控制器、到达 FF 主站，FF 主站再与现场智能仪表完成双向数据交互。周期通信依托固定时隙完成过程值上送，保障控制数据持续稳定刷新，非周期通信借助令牌间隙传输各类运维指令，两类通信模式共享物理总线，划分出独立的调度入口。

2 硬件设计与实现

2.1 硬件整体结构

FF 主站采用通信母板加 FF 核心板双层分体式架构。通信母板与睿渥 DCS 控制器通信，负责接收控制器的配置参数、封装输入输出（input output, IO）报文、缓存运行数据以及映射设备状态。FF 核心板对接 FF-H1 网段，承担协议栈运行、物理层收发驱动、双端口电器隔离、端口防护等工作。两块模板依靠高速内部总线交换配置数据与运行数据，即通信母板仅处理 DCS 系统相关业务，FF 核心板仅解析 FF 总线相关业务。FF 主站模件硬件原理实现如图 3 所示。

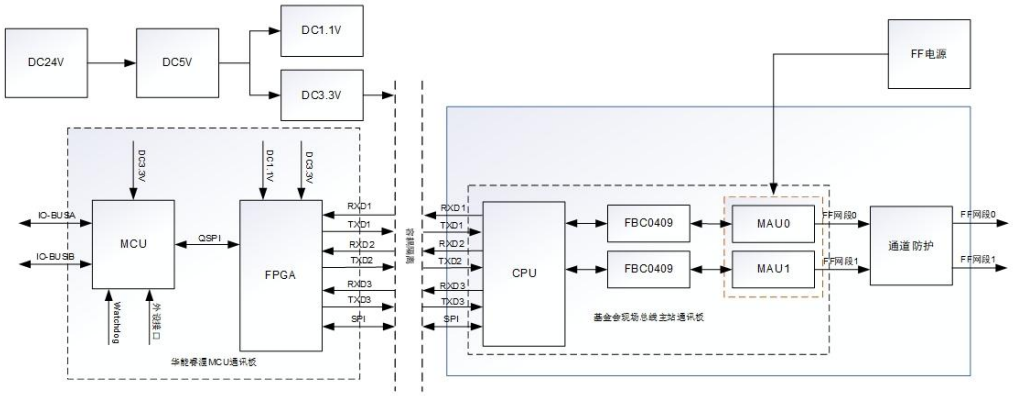


图 3 FF 主站模件硬件原理示意图

Fig.3 Schematic diagram of FF master station module hardware principle

FF 主站硬件划分为 MCU 侧、FPGA 侧、物理层接口多个功能区域，本次基于睿渥技术体系 FF 主站不再搭载国外专用协议芯片，而是使用国产分立器件搭建介质连接单元（medium attachment unit, MAU）接口电路，依靠分立器件完成信号耦合、滤波、收发驱动与电气隔离；接口通信板通过 IOBUS 总线和控制器交换过程数据，核心板会根据下发的配置文件自动生成总线调度表。

2.2 硬件核心技术指标

硬件技术指标结合 FF-H1 现场总线标准、睿渥机架安装约束、火电现场抗干扰要求三大依据制定，物理层通信速率固定为 31.25 kbps[9]，总线工作电压区间设置为 9~32 V，能够适配工业现场复杂多变的供电环境；硬件对外提供两路独立的 FF-H1 物理端口，两个通信端口电气隔离处理，单端口设计带载上限为 16 台从站设备，双端口合计最大带载数量为 32 台从站设备。硬件支持 AI、AO、DI、DO 四类常规工业数据传输，同时配置标准化的异常处理逻辑，设备掉线后对应数据品质位置 0，设备重连后对应数据品质位置 1，所有异常状态都可完整回传至控制器。硬件核心技术指标汇总内容如表 1 所示。

表 1 硬件核心技术指标
Tab.1 Core Hardware Technical Specifications

指标项	设计值或验证值	说明
通信速率	31.25 kbps	符合 FF-H1 物理层速率要求
总线电压范围	9~32 V	适配现场总线供电条件
物理端口数量	2 路	2 个网段电气隔离
单端口带载	16 台从站	最大带载测试数据正常
双网段带载	16 台+16 台	2 个网段均可下装及通信
数据类型	AI、AO、DI、DO	读写测试均正常

2.3 MAU 分立电路详细设计

FF 主站物理层接口电路承担 31.25Kbit/s 曼彻斯特信号的编码、解码等核心功能，整体划分为发送电路、接收电路与供电电路 3 个功能单元，如下图 4 所示。

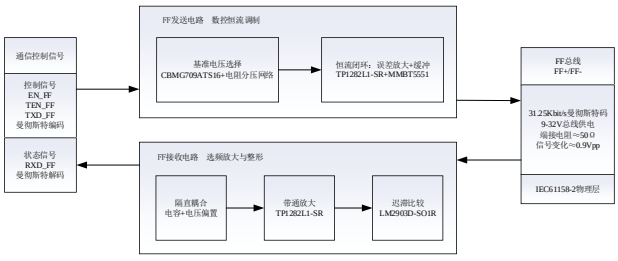


图 4 MAU 物理层实现原理示意图
Fig. 4 MAU physical layer implementation schematic Diagram

2.3.1 发送电路设计

发送电路采用“基准电压选择＋恒流闭环”的调制方案。精密电阻分压网络产生多路基准电压，经四通道模拟开关（芯佰微 CBMG709ATS16）在控制信号 EN_FF、TEN_FF、TXD_FF 作用下选择其中一路，作为恒流环路的给定；误差放大与缓冲级（思瑞浦 TP1282L1-SR）驱动电流调整管，以采样电阻上的压降作为反馈，构成闭环。环路工作时，总线电流等于基准电压与采样电阻之比。

三路控制信号定义了调制器的 3 种工作状态：1）EN_FF 为逻辑低电平时环路无给定，电路不吸收总线电流，实现节点的“电子脱网”；2）TEN_FF 置逻辑低电平（发送不使能）时环路稳定于 10 mA 静态工作点；3）数据发送期间 TXD_FF 在 1 mA 与 19 mA 两档间切换，即在 10 mA 基准上叠加 ±9 mA 的曼彻斯特调制电流。调制电流经约 50Ω 总线端接电阻转换为电压波形，峰峰值约 0.9 V，处于 IEC 61158-2 规定的 0.75~1.25 Vpp 范围之内。发送输出经肖特基二极管与滤波电容实现总线侧反向保护与高频去耦。

2.3.2 接收电路设计

FF 接收电路采用“隔直耦合—带通放大—迟滞比较”三级结构。总线电压波形经耦合电容隔直并建立直流偏置后，送入中心频率为 31.25 kHz 的有源带通滤波放大器（TP1282L1-SR 构成的两级运放级联），放大倍数与品质因数由 RC 网络整定，对工频及高频干扰形成带外抑制；滤波后的信号经双比较器（思瑞浦 LM2903D-SO1R）进行门限判决，比较器引入的正反馈构成迟滞特性，可有效抑制总线噪声引起的输出抖动。整形后的数字波形送至处理器进行曼彻斯特解码。模拟域选频与数字域解码相分离的设计，在长总线、多节点、强干扰工况下保证了接收灵敏度与误码裕量。

2.3.3 供电电路设计

供电控制电路由电子开关、防反接保护与多级 π 型电磁干扰（electromagnetic interference, EMI）滤波器构成。供电控制电子开关由 P 沟道 MOSFET（无锡新洁能 NCE60P25K）为核心器件组成，受 EN_PWR 控制，实现总线电源的可控接入与上电时序管理，避免启动浪涌对网段现场设备的冲击；串联肖特基二极管提供电源极性反接保护，保证总线

电源满足 FF 规范对电源质量的要求。总线端接网络（100 Ω 电阻与 1 μF 电容并联）经开关管投切，便于工程调试与分段测试。

2.3.4 信号质量测试

图 5 为 FF 主站向从站发送请求报文信号波形图，图 6 为 FF 主站内部解调从站信号后的波形图。

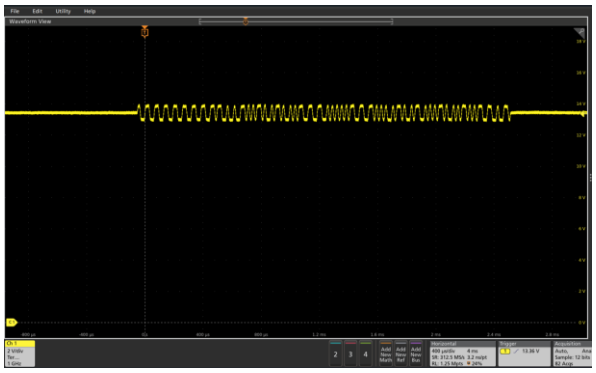


图 5 FF 主站发送信号波形实测图
Fig.5 Measured Waveform of FF Master Station Transmitted Signal

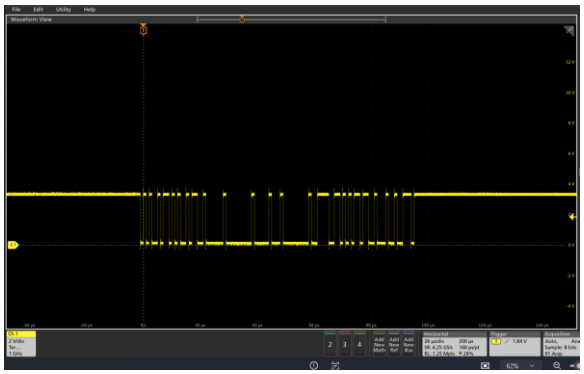


图 6 FF 主站 MCU 解调信号后通信波形图
Fig.6 Communication Waveform of FF Master Station after Signal Demodulation by MCU

3 嵌入式 FF 协议栈软件设计

3.1 协议栈分层架构

嵌入式 FF 协议栈运行在 FF 核心板，整体采用分层化设计，从上至下依次划分为组态接口层、应用服务层、系统管理层、数据链路层、物理适配层五个层级，层级之间设置标准化交互接口，限制数据跨层级直接跳转访问，有效降低模块之间的耦合性。组态接口层负责接收上位机下发的配置表，校验配置版本并生成系统运行表；应用服务层完成功能块参数读写、VCR 通信链路维护与设备对象字典访问工作；系统管理层实现设备地址分配、在线设备识别、全网时间同步，同时汇总诊断信息并向上上报；数据链路层运行 LAS 调度程序，管理总线令牌，执行周期发布任务，完成循环冗余校验（cyclic redundancy check, CRC）与报文重传；物理层掌控报文收发动作，实现曼彻斯特编解码，同时适配隔离接口与总线供电电路。分层架构如图 7 所示。

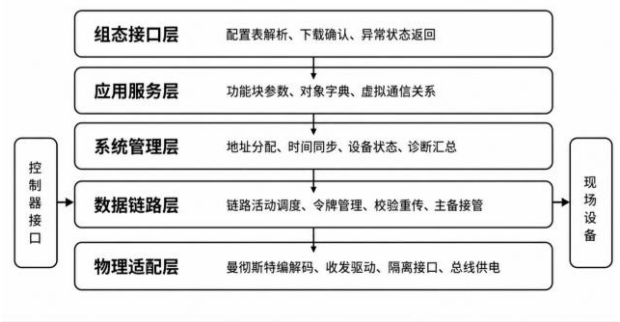


图 7 嵌入式现场总线协议栈分层架构
Fig.7 Architecture of Embedded Fieldbus Protocol Stack

协议栈划分出对接控制器的左侧接口与对接现场设备的右侧接口，中间的分层结构完成语义转换与调度约束，控制器不会直接操作 FF 设备对象字典，现场设备也无法解析睿渥 DCS 系统的 IOBUS 报文，分层模式不仅简化了故障排查流程，也提升了代码复用效率，降低了后期代码维护的难度。

3.2 核心功能实现

LAS 调度是协议栈的核心功能，主站读取组态工具生成的调度表后，会将总线划分为多个通信时隙，同一时隙内仅允许一台设备占用总线资源，非周期访问动作会在令牌窗口内执行，参数读取、组态下装、诊断查询等操作均不会占用周期通信时隙，时序划分从根本上保障了控制数据的传输优先级。设备上线识别拥有标准化的运行流程，系统启动在线扫描后，会分步获取设备基础信息，依次完成 VCR 初始化、管理信息库（management information base, MIB）连接初始化、现场总线报文规范（fieldbus message specification, FMS）初始化与对象字典（object dictionary, OD）信息读取，流程结束后自动生成可映射的设备列表，为后续的组态绑定工作提供完整的数据支撑。点表拆分与品质映射是系统适配 DCS 平台的关键环节，FF 总线的输入品质占用八位数据位，协议栈对品质数据执行映射操作；FF 输出数据附带完整的品质信息，IOBUS 报文将品质信息按位进行打包，FF 主站结合控制器运行状态、通道运行状态对 FF 总线品质

进行解析质，避免从站执行错误指令。针对火电现场设备长期连续运行的工况特点，主站采用影子表机制处理组态更新任务。所谓影子表，即 FF 主站在运行期间同时维护两张配置表：一张是当前正在执行的活跃配置表（主表），另一张是用于接收和验证新配置文件的备用配置表（影子表）。组态更新时，新配置文件首先写入影子表，影子表独立完成格式校验及从站设备信息的匹配验证。待校验通过、接口卡配置下载完毕、调度表激活全部完成后，系统运行指针才从主表一次性切换至影子表，原主表退为备用。如果下载或校验过程中出现中断故障，系统继续运行原有主表配置，并同步向控制器上报组态更新异常，待故障排除后重新触发更新流程，彻底防止数据错位问题。

3.3 通信模式设计

系统并行运行周期通信、非周期通信两类模式，两类模式分时复用总线资源，系统明确划分优先级，周期通信的优先级高于非周期通信。周期通信面向工业实时控制场景，传输内容包含模拟量输入数据、模拟量输出数据、开关量输入数据、开关量输出数据；周期通信数据采用固定封装格式，完全匹配睿渥 IOBUS 协议，能够被 DCS 控制器直接解析，其中模拟量输入数据的浮点数值占用两个双字节寄存器，状态信息单独占用一个寄存器，开关量输入数据依靠状态位完成读取，模拟量输出、开关量输出数据由控制器下发后，主站转换数据格式再传输至 FF 从站。非周期通信利用周期通信的空闲时隙运行，主要承担设备参数读写、组态下载、故障诊断指令传输等工作，这类通信没有固定刷新周期，外部指令触发后立即执行，指令执行完毕便自动释放总线资源。系统内置总线流量管控机制，当总线实时负载率超过 70%时，系统会主动限制非周期通信的发起频次，优先保障周期通信稳定运行。在双网段同时运行的场景中，协议栈对两个网段执行独立调度，不同网段的通信任务互不干涉，彻底解决跨网段调度冲突问题；从站数量增加会线性延长组态下装耗时，但不会影响周期通信的运行状态，设计将低速运维指令放置在可控时隙窗口内，避免运维指令打乱控制数据的刷新节奏，即便进行多网段拓展，通信模式的运行规则也不会改变，系统运行状态始终保持稳定，整套通信模式兼顾了实时性、完整性与稳定性三大核心要求。

FF 虽然实现了互操作性，但设备并不能直接互换，即更换不同软件版本的设备后，网段必须重新分析，这导致，用户必须维护 DD 文件的版本库，设备文件版本管理视为刚性需求。另外 FF-H1 通信速率固定为 31.25Kbps，面向多变量、高频诊断和连续状态监测等密集型数据请求应用场景力不从心。

在流程工业本安、总线供电、两线制布线的场景约束下，Ethernet-APL（Advanced Physical Layer）被视为 FF-H1 的接班路线，未来 FF 的功能块模型和用户层语义有望向 FDI（Field Device Integration）信息模型的形式演进。

4 国产 FF 组态工具开发

国产 FF 组态工具主要服务于工业 FF 总线仪表的国产化适配、组态配置与现场运维。该工具采用低耦合模块化架构，按照业务逻辑划分为 DD 文件解析、FF 通信协议交互、可视化组态界面、控制系统集成及跨系统通信五个功能模块。为实现 FF 总线设备与睿渥全国产 DCS 控制系统的无缝接入，整套组态功能以模块化嵌入方式集成至现有控制体系：底层依托 DD 解析与通信协议模块完成仪表数据采集与指令下发；中层通过可视化组态界面实现工程配置与逻辑编辑；顶层借助专用通信接口完成组态数据、设备状态与 DCS 上位机及控制器的数据同步，从而完善睿渥 DCS 系统对 FF 总线仪表的组态管控能力。以下围绕各功能模块，逐层阐述各模块的开发原理及系统集成实现方式[10-11]。

4.1 DD 文件解析功能开发

DD 文件解析是实现多品牌 FF 总线仪表兼容接入与跨厂商设备互操作的底层基础，亦是组态工具的核心功能。不同厂商生产的 FF 仪表，其功能块参数、设备对象字典、报警阈值、测量量程及工程单位等语义化配置信息均封装于专属 DD 描述文件中。若缺乏对应的解析能力，组态工具仅能识别设备总线地址等基础编码，无法读取仪表深层运行参数，难以开展精细化组态配置与设备运维。

为此，本项目开发了专用 DD 文件解析模块，兼容福克斯波罗、ABB、Yokogawa、Rosemount、Microcyber、VORTEK、KROHNE 等行业主流厂商[12]的设备描述文件，支持 DD 文件导入、解析、存储及迭代管理等全套功能。操作人员可通过专用交互界面上传 DD 文件，后台解析单元自动完成数据读取与解析，并按设备厂商分类归档；同时将差异

化的异构设备数据统一转换为设备库标准数据对象，便于工程人员按需调用与组态配置，DD 文件导入及设备库展示界面如图 8 所示。



图 8 DD 文件导入及设备库界面
Fig.8 DD file import and device library interface

DD 解析环节采用分层处理机制，逐级拆解 DD 文件中的设备基础属性、功能块集合、通信测点、报警条目及量程参数五类核心数据，并完成数据标准化格式化处理。模块内置文件完整性与数据合法性校验机制，可自动识别格式错误、版本不匹配及文件损坏等无效资源，并在日志区域输出详细报错信息，从源头规避异常文件引发的设备接入故障。该解析机制能够屏蔽不同厂商 FF 设备的数据格式差异，为后续设备绑定、功能块配置及通信点组态提供标准化数据支撑，从而实现多品牌 FF 仪表的一体化兼容接入。

4.2 FF 通信协议功能开发

为满足组态客户端与 FF 主站模件、现场总线仪表之间稳定的数据交互需求，本项目基于 FF-H1 现场总线协议搭建专用通信模块，并匹配睿渥国产 DCS 上位机通信规约，构建双向互通的协议传输通道。该模块主要负责通信接口初始化、长连接维持、数据收发解析及异常重连容错，是保障整套组态软件正常运行的通信核心。

软件启动后，通信模块优先完成外部通信接口初始化，主动与现场 FF 主站模件建立永久性 TCP 长连接，链路实时运行状态同步展示于软件界面顶部，便于运维人员实时监控通信工况。针对工业现场电磁干扰、网络波动等复杂工况导致的握手失败、链路断连等问题，模块设计了多重容错保障机制，制定了标准化通信握手流程；当单次握手请求失败时，系统自动触发重连机制，设置最大重试次数为 5 次，重试间隔固定为 2 s，以提升复杂工业环境下链路建立的成功率。

4.3 可视化组态界面功能开发

组态工具按照现场设备投运的标准流程依次排布，操作逻辑连贯且贴合现场使用习惯。操作人员首先新建工程文件并创建独立网段，随后清除系统缓存、刷新网段内的物理设备，启动在线设备扫描流程，分步获取设备基础信息；扫描完成后，操作人员创建虚拟设备，系统自动完成虚拟设备与物理设备的绑定映射；接着在编辑窗口拖拽 AI、AO、比例-积分-微分（proportional-integral-derivative, PID）、变送块（transducer block, TTB）、资源块（resource block, RB）、控制变送块（control transducer block, CTB）等功能块，并配置模块内部参数；之后进入通信点配置界面，勾选参与周期通信的测点，系统自动完成测点与寄存器的绑定工作；最后执行组态下载并激活调度表，整套设备部署流程正式结束。在线扫描结果如图 9 所示。

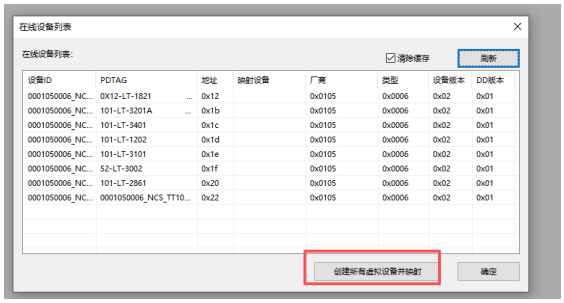


图 9 在线设备扫描结果界面
Fig.9 Online device scan result interface

在线设备扫描完成后，列表会清晰展示设备 ID、总线地址、PDTAG、厂商、设备版本、DD 版本等参数，这些参数为后续设备映射工作提供了精准依据，操作人员可一键创建虚拟设备并完成物理绑定，在线扫描功能有效提升了现场设备的识别与部署效率。通信点选择界面如图 10 所示。

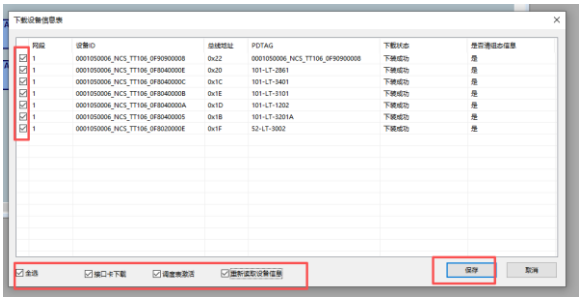


图 10 通信点表选择及寄存器绑定界面
Fig.10 Communication point table selection and register binding interface

界面汇总展示网段、设备 ID、总线地址、物理设备位号（physical device tag, PDTAG）、下载状态等信息，操作人员可批量勾选通信测点，系统自动

完成寄存器绑定，同时支持清空原有组态信息等操作，自动化的配置流程减少了人工操作带来的误差。组态下载界面如图 11 所示。

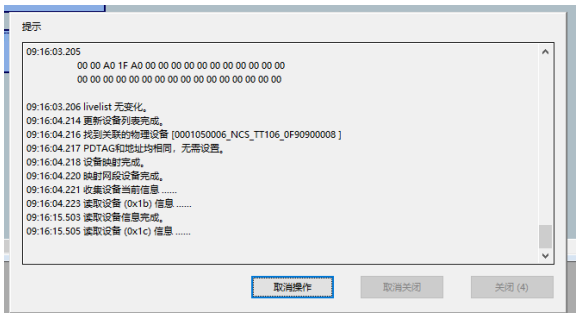


图 11 组态下装日志界面
Fig.11 Configuration download log interface

组态下载过程会生成完整的运行日志，日志详细记录设备信息读取、设备映射、配置下发、状态反馈等全流程内容。工程现场容易因下载中途状态模糊出现新旧配置混用的问题，而工具细化了下载阶段划分，完整记录下载对象、失败原因、激活结果，主站也会依据日志状态判断是否切换运行配置表，日志文件实现了操作全流程追溯，能够帮助运维人员快速开展故障排查工作。整体来看，DD 文件导入、在线扫描、设备映射、APP（application）应用、通信点配置、组态下装等功能相互配合，搭建出一套覆盖设备入库、设备识别、逻辑配置、点表生成、运行部署的完整工程化平台，完全满足工业现场的组态运维需求。

4.4 与现有系统通信功能开发

跨系统通信功能主要用于实现组态客户端与睿渥 DCS 上位机、现场控制器之间的数据双向交互。系统以标准化统一点表与设备状态字为信息载体，同步下发组态配置、回传设备运行参数及故障报警信息，适配改造项目与新建项目的差异化兼容需求。

面向在役机组国产化改造场景，本工具配套的上位机操作界面可完全兼容原有控制系统的布局风格与操作逻辑，无需调整机组原有控制架构，即可完成老旧 FF 仪表的国产化替换与组态适配，降低改造工作量；面向新建机组场景，该工具可直接嵌入全新 DCS 工程，无历史版本兼容限制，适配范围更广。

通信层面的集成方案以标准化统一点表为依托，统一封装 AI、AO、DI、DO 4 类过程变量数据，并按固定寄存器映射规则上传至控制器。控制器无需解析仪表底层原始报文，直接读取寄存器数据即可完成闭环控制，有效降低平台整体耦合度。运维层面依托运行日志与状态字完成数据联动，DCS 上位机可实时采集通道品质、设备工况及报警信息；组态客户端亦可接收上位机调度与参数修改指令，实现远程组态管控。

此外，该组态工具具备多操作系统适配能力，除主力适配银河麒麟 V10 国产操作系统外，还可兼容 Windows 运行环境，能够适配不同厂区、不同运维终端的部署条件，有效提升工具的工程适配性与应用覆盖面。

5 系统测试与验证

5.1 测试环境与测试方案

测试环境温度 28 ℃，湿度 60%，无电磁干扰环境搭建完整的测试平台，平台硬件包含睿渥 DCS 控制器、FFB102 FF 主站模件、FF 从站仪表、NI USB-8486 报文侦听设备、工业工控机与 FF 电源；工控机预装银河麒麟 V10 操作系统，搭载 Smart IC 组态工具。测试过程中，网段一、网段二分别挂载 16 台 FF 从站仪表，本次测试分为基础功能组态、通信测试、多从站与双网段带载测试、异常工况可靠性测试四大类别。测试采用分步执行模式，单项测试判定合格后，方可进入下一项测试，所有测试项目重复执行 3 轮，以此规避偶然误差，全部测试数据统一录入专用测试记录表。本次测试所有项目的执行方法和判定标准如表 2 所示。

表 2 测试项目及判据
Tab.2 Test items and criteria

测试项目	执行方法	通过判据
DD 导入	导入目标设备 DD 并查看设备库	厂商及设备项正常显示
在线扫描	清缓存后刷新物理设备列表	16 台从站可被识别
设备映射	创建全部虚拟设备并绑定物理设备	工程区显示映射设备
组态下装	按设备下载并激活调度表	日志提示接口卡下载完成
周期通信	读取 AI、DI，写入 AO、DO	监控值同配置工具值一致
带载测试	双网段 16 台+16 台，单网 16 台	周期数据正常显示
异常可靠性	断开、重连、插拔主站	状态及品质按预期变化

5.2 基础功能组态与通信测试

测试人员依次完成 DD 文件导入、在线设备扫描、设备映射、APP 应用创建、通信点配置、组态下装等全套基础组态流程，整套流程运行顺畅，系

统日志未出现任何报错信息。组态完成后，针对 AI 模拟量输入、DI 开关量输入、AO 模拟量输出、DO 开关量输出四类数据开展通信测试，测试选用 16 台从站设备，每台设备启用对应类型测点，同步读取 Smart IC 组态工具监视数值与 FF 配置工具数值，两组数值保持完全一致。测试资料中 Smart IC 组态工具数据监视界面如图 12 所示。

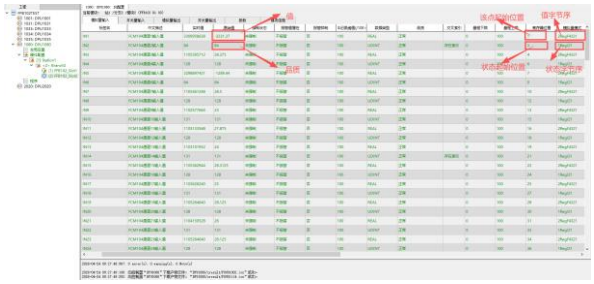


图 12 周期通信数据监视界面
Fig.12 Periodic communication data monitoring interface

界面展示多组 AI 测点的实时数值、数据品质、寄存器位置等信息，模拟量测点分配三个寄存器，两个寄存器存储工程量浮点值，一个寄存器存储状态信息，控制器可同步获取过程值与设备质量信息；主站处理输出数据时，会主动补充完整的输出品质，保证现场执行器获取完整的运行语义。

AI 模拟量输入、DI 开关量输入、AO 模拟量输出、DO 开关量输出四类通信数据全程未产生数值偏差，数据传输精度完全满足工业控制的严苛要求，整套组态功能也全部达到预设设计标准。额外开展的组态更新专项测试结果显示，修改测点配置并重新下发后，系统未出现数据错位问题，组态更新异常上报功能也可正常触发。

5.3 多从站与双网段带载测试

测试人员划分两个独立网段，网段 01 与网段 02 分别接入 16 台从站设备，此配置为按照设计指标允许接入最大数量从站进行功能性验证。按照先完成网段 01 组态下载、再执行网段 02 组态下载的顺序操作，有效规避网段调度冲突，两个网段分别执行非周期数据下装操作，网段之间无信号干扰、无数据异常。随后开展单网段最大带载极限测试，单网段接入 16 台 FF 从站设备，长时间监测周期数据，数据刷新状态始终正常。测试截图如图 13 所示。

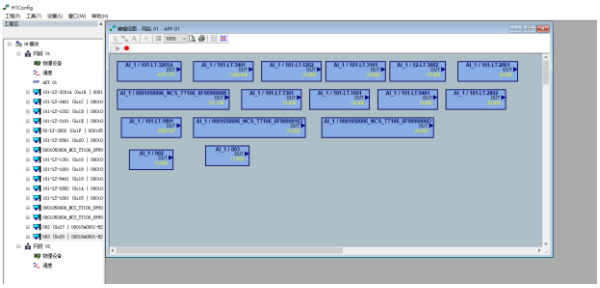


图 13 双网段多从站配置界面
Fig.13 Dual segment multi-slave configuration interface

界面清晰区分两个网段内的多台从站设备，APP 组态功能可正常完成功能块配置，双网段独立调度功能运行稳定。

5.4 异常工况测试

测试人员模拟工业现场两类典型异常场景，第一类为现场从站设备断开与重连，切断从站通信线路后，对应测点状态自动置 0；重新接通线路，测点状态恢复为 1，测点数据同步完成刷新。第二类为 FF 主站模件插拔测试，拔出主站卡件后，所有通道数据进入冻结状态，通道品质统一标注为通信异常；重新插入卡件，卡件自动执行初始化流程，通道品质恢复正常，数据恢复实时刷新。各类异常工况下的系统响应时间统计结果如表 3 所示。

表 3 异常工况系统响应时间表
Tab.3 System response timetable under abnormal operating conditions

异常类型	测试次数	平均响应时间/ms	功能状态
从站设备断开	30	18	状态正常置位
从站设备重连	30	21	数据恢复正常
主站模件拔出	30	15	数据冻结，品质异常
主站模件插入重启	30	126	初始化完成，恢复通信

数据分析可知，各类异常工况下系统的响应时间较短，能够快速识别现场故障并完成运行恢复，设备状态上报功能运行正常，DCS 控制器可精准获取设备异常信息，整套异常防护机制运行稳定，符合过程控制故障安全的设计要求。针对组态更新中断的场景再次验证，下载中断时系统会持续运行旧配置，并同步上报故障信息，影子表运行机制可靠，全程未出现数据错位、指令误下发等问题。

5.5 长时间运行稳定性测试

测试人员启动长时间（72 h）连续运行测试，试验组态按照工程实际应用，每个网段最多允许挂载 8-10 台从站。在测试期间，每个网段从站按照 9

台，两个网段合计 18 台从站配置进行长时间运行稳定性测试。从站设备全程保持在线状态，NIUSB-8486 报文侦听设备全程抓取总线报文，统计报文总量与各类解码错误数量。72 小时测试周期内，整套系统未出现宕机故障，所有测点数据持续正常刷新；报文统计结果显示，现场总线访问子层（fieldbus access sublayer, FAS）、现场总线报文规范（fieldbus messaging specification, FMS）、系统管理（system management, SM）解码错误均为 0，总线整体功能性错误计数为 0。测试报文帧统计结果如下图 14 所示。

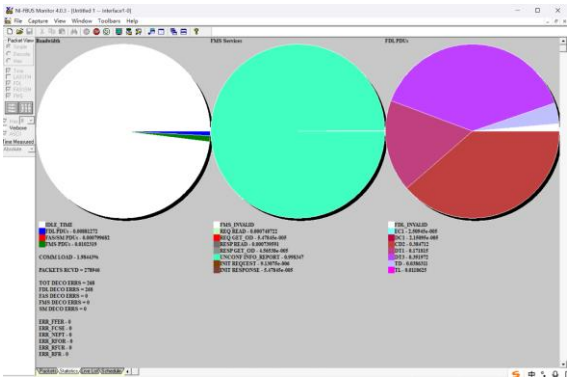


图 14 长时间稳定性测试侦听报文统计
Fig.14 statistics of captured messages in long-term stability test

除总线错误计数外，对 FF 主站 CPU 运行资源进行同步监测分别在 0h、24h、48h 和 72h 记录关键指标，结果表面在试验期间，CPU 运行稳定，如表 4 所示。

表 4 CPU 负荷及内存占用统计表
Tab.4 Statistical Table of CPU Load and Memory Usage

监测时间点	CPU 负荷/%	内存占用率/%
0h	34.45	17.43
24h	34.52	17.54
48h	35.01	17.61
72h	34.73	17.60

睿渥 FF 主站内置纳芯微 NST175H-QSPR 温度采集芯片读取硬件表面稳态温度稳定保持在 41 ℃左右，未触发过热保护动作，软件进程也不存在内存泄漏问题。本次长稳测试证明，在实验室标准环境下，主站调度、物理层收发、从站响应、控制器交互均保持正常，链路未出现重传异常、帧校验异常或调度失序问题，系统能够满足工业现场不间断运行的基本要求，适配火电机组常年连续运行的工况特点。

6 结　语

FF 主站国产化此前推进缓慢，症结在于物理层 MAU 依赖进口专用芯片（如德州仪器公司的 DAC8742H）、协议栈依赖国外商用软件授权（如 SOFTING FF 授权软件）、组态工具运行于国外操作系统平台，三个环节同时受制于人、任一环节受限都会中断整机交付，本文采取三个环节同步替代，实现了硬件电路、嵌入式协议栈、组态工具三大核心部分的全链条国产化落地，彻底摆脱了对国外技术与产品的依赖。

测试结果表明，整套系统符合 IEC61158-2 标准，单网段可稳定承载 16 台从站设备，双网段合计最大带载 32 台，基础通信实现数据传输零偏差，异常工况下故障识别与运行恢复的响应速度满足现场使用要求，72 小时连续运行测试实现总线功能性错误归零。作者认为，实践证明以国产分立器件替代进口专用 ASIC 构建 MAU，通信性能可对标进口同类设备，规避了专用芯片断供风险，这一“通用器件+闭环设计”的技术路线更适合当前阶段的主站国产化，对同类工业通信设备的自主化开发具有直接借鉴意义；后续将围绕更大网段带载下的长期老化数据积累与第三方一致性认证开展研究，进一步支撑规模化工程应用。该设备可无缝对接现有睿渥 DCS 平台，既能服务火电、化工等流程工业的存量改造项目，也可应用于同领域新建项目。

[参 考 文 献]

[1] 刘松, 李世彦, 唐慧瑛. 现场总线技术在 1000MW 火电机组中的应用[J]. 沈阳工程学报学院（自然科学版）,2026, 22(2):33-39.
Liu Song, Li Shiyan, Tang Huiying. Application of Fieldbus Technology in 1000MW Thermal Power Units[J]. Journal of Shenyang Institute of Engineering (Natural Science),2026,22(2):33-39.

[2] 俞冠中, 田青旺, 田钢, 等. 基于 FF-H1 协议的核电站现场总线控制器设计与实现[J]. 自动化仪表, 2023,44(1):55-60.
YU Guanzhong, TIAN Qingwang, TIAN Gang, et al. Design and Implementation of Fieldbus Controller for Nuclear Power Plants Based on FF-H1 Protocol[J]. Process Automation Instrumentation, 2023, 44(1):55.

[3] 胡波,陈俊,杨柳,等. 全国产分散控制系统开发与应用[J].热力发电, 2022, 51(3): 159-165.
HU Bo, CHEN Jun, YANG Liu, et al . Development and application of fully domestic control system[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(3):159-165.

[4] 要丰伟. 火力发电机组分散控制系统自主可控改造技术分析[J]. 科技资讯, 2026(14):97-99.
YAO Fengwei. Analysis of Autonomous and Controllable Transformation Technology of Decentralized Control System in Thermal Power Generation Unit[J]. Science & Technology Information,

2026(14):97-99.
[5] 王宾,蔡丹,邱起瑞, 等. 分散控制系统自主可控技术的发展[J]. 热力发电, 2022, 51(3):182-186.
WANG Bin, CAI Dan, QIU Qirui, et al . Development of autonomous control technology for distributed control system[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(3):182-186.
[6] 冯潇, 邹洪伶, 张博, 等. 基金会现场总线（FFH1）关键方案研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2024(6):305-308.
FENG Xiao, ZOU, Hongling, ZHANG Bo, et al. Research on the key scheme of Foundation Fieldbus (FFH1)[J]. Automation & Instrumentation, 2024(6):305-308.
[7] 王选鹏, 合蕊, 杨梅, 等. FF 总线在现场应用中远距离传输信号衰减研究[J]. 化工自动化及仪表, 2023, (1):212-214.
Wang XuanPeng, He Rui, Yang Mei, et al. Study on Signal Attenuation of Foundation Fieldbus in Long-distance Field Transmission[J]. China Plant Engineering, 2023 (1):212-214.
[8] 吴越, 沈利斌, 姚杰. 领域驱动设计在基于 FF 的 FCS 中的应用[J]. 工业控制计算机, 2023(36):1-3.
WU Yue, SHEN Libin, YAO Jie. Application of Domain-Driven Design in FCS Based on FF[J]. Industrial Control Computer, 2023(36):1-3.
[9] 黄仍杰, 沈楼燕, 唐国标, 等. 基金会现场总线技术在工程设计中的应用[J]. 铜业工程, 2023(6):166-174.
HUANG Rengjie, SHEN Louyan, TANG Guobiao, et al. Application of Foundation Fieldbus Technology in Engineering Design[J]. COPPER ENGINEERING, 2023(6):166-174.
[10] 薛建中, 宋美艳, 张军, 等. 分散控制系统逻辑组态监控方法、系统、设备及介质：CN117006476A[P], 2023-11-07[2025-04-12]
XUE Jianzhong, SONG Meiyan, ZHANG Jun, et al. Monitoring method, system, device and medium for logical configuration of distributed control system: CN117006476A[P]. 2023-11-07[2025-04-12].
[11] 宋美艳, 高少华, 薛建中, 等. DCS 控制组态数据一致性与同步技术研究[J]. 热力发电, 2026, 55(1):160-168.
SONG Meiyan, GAO Shaohua, XUE Jianzhong, et al. Research on data consistency and synchronization technology of DCS control configuration[J]. THERMAL POWER GENERATION, 2026, 55(1):160-168.
[12] 王航. 火电厂现场总线技术的应用[J]. 化学工程与装备, 2022(3):206-207+202.
WANG Hang. Application of Fieldbus Technology in Thermal Power Plants[J]. Chemical Engineering & Equipment, 2022(3): 206-207+202.

（责任编辑 XXX）