

DOI: 10.19666/j.rlfed.202404119

基于软件定义的新型协同控制平台设计

王禹诺, 高少华, 曹桦松, 薛建中, 胡波, 宋美艳
(西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054)

[摘要] 随着互联网技术向工业控制领域的不断渗透, 催生出了工业 4.0、工业互联网等概念体系, 电厂也不断向数字化、信息化方向发展, 现场被控对象的智能性与复杂程度日益增加, 传统分散控制系统 (DCS) 的控制功能逐渐显得力不从心。为提升我国智能制造的成熟度, DCS 应强化自身核心的运算控制功能。对此, 提出了一种基于软件定义的新型协同控制平台, 采用软件定义思想对传统 DCS 的软硬件进行解耦, 在上位机中重构了其控制与组态功能, 设计、开发了双冗余计算引擎和组态配置与调试工具, 并建立了保护机制来保障平台运行安全及第三方数据安全, 使得平台在功能方面既继承了传统 DCS 的常规组态及控制功能, 又能额外支持各种先进智能算法的实现; 在应用方面, 既能用来增强传统 DCS 的控制性能, 又能作为独立产品为其他控制系统提供高质量的计算服务。因此, 该控制平台可以广泛应用于多种过程控制场景, 为平台用户提供一种可靠、高效、灵活、廉价的生产控制方案, 也为未来 DCS 引入人工智能、大数据等计算机前沿技术提供了可选的平台基础。

[关键词] DCS; 软件定义; 冗余; 组态; 多方协同; 智能化

[引用本文格式] 王禹诺, 高少华, 曹桦松, 等. 基于软件定义的新型协同控制平台设计[J]. 热力发电, 2024, 53(12): 143-150.
WANG Yunuo, GAO Shaohua, CAO Huasong, et al. Design of a new collaborative control platform based on software definition[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(12): 143-150.

Design of a new collaborative control platform based on software definition

WANG Yunuo, GAO Shaohua, CAO Huasong, XUE Jianzhong, HU Bo, SONG Meiyan
(Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China)

Abstract: The continuous penetration of internet technology into industrial control field has given rise to conceptual systems such as Industry 4.0 and Industrial Internet. Consequently, power plants are evolving towards digitization and informatization, with the intelligence and complexity of field-controlled objects increasing steadily. Control functions of conventional distributed control systems (DCS) are gradually becoming inadequate to meet these new demands. To enhance the maturity level of intelligent manufacturing in China, it is essential to strengthen the core computational control functions of DCS. In response, a novel collaborative control platform is proposed based on software-defined principles. This platform decouples the software and hardware of conventional DCS using software-defined concepts, reconstructs the control and configuration functions on the host computer, and designs and develops a dual-redundant computing engine and configuration and debugging tools. Additionally, protection mechanisms are established to ensure the operational security of the platform and the security of third-party data. This platform inherits the conventional configuration and control functions of conventional DCS while additionally supporting the implementation of various advanced intelligent algorithms. In terms of application, it can both enhance the control performance of conventional DCS and serve as an independent product providing high-quality computing services for other control systems. Consequently, it can be widely applied to various process control scenarios, offering users a reliable, efficient, flexible and cost-effective production control solution. Moreover, it provides an optional platform foundation for the future integration of

收稿日期: 2024-04-23

基金项目: 西安热工研究院有限公司发展基金项目 (TV-24-TYK03)

Supported by: Development Fund Project of Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd. (TV-24-TYK03)

第一作者简介: 王禹诺 (2000), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为工控系统, wangyunuo@tpri.com.cn.

通信作者简介: 高少华 (1986), 男, 工程师, 主要研究方向为工控系统, gaoshao-hua@tpri.com.cn.

cutting-edge computer technologies such as artificial intelligence and big data into DCS.

Key words: DCS; software definition; redundancy; configuration; multi-party collaboration; intelligentized

分散控制系统(distributed control system, DCS)是实现大型工业生产过程自动化的核心设备,自 20 世纪 70 年代第一台 DCS 问世以来,它逐渐发展成为电力、化工、食品等大规模过程控制行业中的主心骨。DCS 以基于嵌入式操作系统的控制器为核心,采用分散控制、集中管理的思想,结合通信、显示、计算机等技术,集组态、监视、控制、管理功能为一体^[1],通过将关键模块和通信网络冗余,保证了系统运行的可靠性和容错性;通过图形化组态自定义控制逻辑,保证了控制决策制定的专业性和灵活性;通过上位机显示器监视管理系统状态,保证了生产过程监管的直观性和便捷性。

工业 4.0 和工业互联网等概念体系的兴起和计算机领域高新技术的快速发展,使工业领域逐渐衍生出了各类智能化的机器与设备、便于监控操作的人机交互技术和电厂级的管控信息系统,相比之下,DCS 的控制性能多年未得到飞跃性的提升,且囿于第三方知识产权和 DCS 系统兼容性的限制,难以支持现有的各类先进信息技术,大大减弱了 DCS 的灵活性和智能性。为提高工业领域智能制造能力的成熟度,厂家开始在 DCS 中增添专门用于系统优化的控制器,或是外接第三方系统和设备,以此融合人工智能技术或优化算法模块,提升原 DCS 的控制性能并扩展其控制功能。然而,该方法过于依赖硬件设备,导致引进费用高且部署规模大,且由于每个系统、设备的 DCS 控制都是独立的,即各设备、系统具有封闭性,无法形成统一的整体来统筹全局,同时给后期的维护带来困难。因此,该方法难以满足小型工程对低成本、小空间、易运维的需求。

“软件定义”思想^[2-3]的提出让中小型厂家看到了希望。所谓“软件定义”,就是通过降低软硬件间的耦合度,从而解放软件模块的生产力^[4],这一思想源于 20 世纪 90 年代中期提出的“软件定义网络(SDN)”概念,SDN 试图通过在简单的网络硬件上编程来推动网络创新,但由于当时的网络设备对硬件依赖性强,且缺乏统一、开放的编程接口,故难以将硬件的底层操作和上层的编程环境清晰地分开^[5],因此未能成功实施。后来,“虚拟化”技术^[6]的出现真正实现了硬件和软件的分离,它将硬件资源抽象为便于共享、管理的虚拟资源,从而为上层应用提供了一个更加灵活开放的编程环境,为

“软件定义”的发展铺平了道路^[7]。本文即采用软件定义的思想,通过解耦 DCS 中的逻辑控制、主备冗余、数据存储和 IO 通信模块,在上位机中重构了 DCS 控制器硬件的运算与控制功能,设计了一种新型协同控制平台,通过开发冗余计算引擎、组态配置与调试工具,并配合平台数据库,来取代机组额外的硬件设备,使得解耦后的各个模块可以独立开发、优化,不仅可以实现模块间的动态组合包装,还可以减小后期的维护开销,为 DCS 的性能升级和智能发展提供更具性价比的方案。

1 新型协同控制平台软件架构

本文旨在设计一种基于软件定义的新型协同控制平台,在不影响电厂正常过程控制的前提下,优化控制回路,实现节能减排,提高电厂工艺生产的自动化、管理决策的智能化。该平台在继承通用 DCS 的常规组态、控制功能之外,还具备载入第三方模块智能算法的功能和使用高级语言开发组态功能块的功能。该平台将解决传统 DCS 在智能化升级和降低投入成本间难以平衡的问题,满足电力生产企业对智能控制系统的需求。

新型协同控制平台基于华能睿渥 HNICS-T316 工业分布式控制系统^[8],采用软件定义概念,运用虚拟化技术,将原 DCS 的软硬件解耦重构,开发了双冗余计算引擎、组态配置与调试工具,通过程序实现了 DCS 控制器的逻辑计算功能,并支持复杂算法,通过图形化界面实现了对生产过程控制逻辑的灵活部署,通过数据库进行内部模块间的数据交互及对外的控制指令下发,实现了对各个测点的增删改灵活处理。该平台基于轻量化、强鲁棒、低成本、高灵活的设计原则,既能满足厂家对运行稳定性、数据可靠性、系统安全性方面的需求,还能在最大程度上兼容第三方系统和算法模块。

图 1 为该协同控制平台的总体架构。由图 1 可见,平台按功能可划分为 3 个单元。

1) 冗余同步单元 即冗余计算引擎,是对原 DCS 控制器模块解耦后的虚拟化实现,主要负责主备控制器间的冗余逻辑运算和冗余数据同步过程。该单元处理上位机组态工具与现场控制器及设备之间的通信、数据交互和任务请求过程,通过接收上位机的逻辑组态文件,并从历史数据库中提取冗

余所需的同步数据，实现主备控制器间的双机热备，保证了平台控制功能的可靠性与容错性。

2) 组态配置与调试单元 即组态配置调试工具，负责监视平台运行状态并提供组态配置与编译功能。该单元可以给操作员提供图形化组态配置工具、给工程师提供多种功能块开发手段，保证了平台控制逻辑的灵活实现与专业化定制。

3) 数据采集与通信单元 即平台数据库，是原 DCS 数据存储与 IO 通信模块解耦后的虚拟化实现，主要负责接收、存储和传递协议栈数据。该单元通过对内通信接口将历史数据库中冗余所需的运算结果传递给计算引擎，通过对外通信接口采集现场设备数据或传递控制指令。

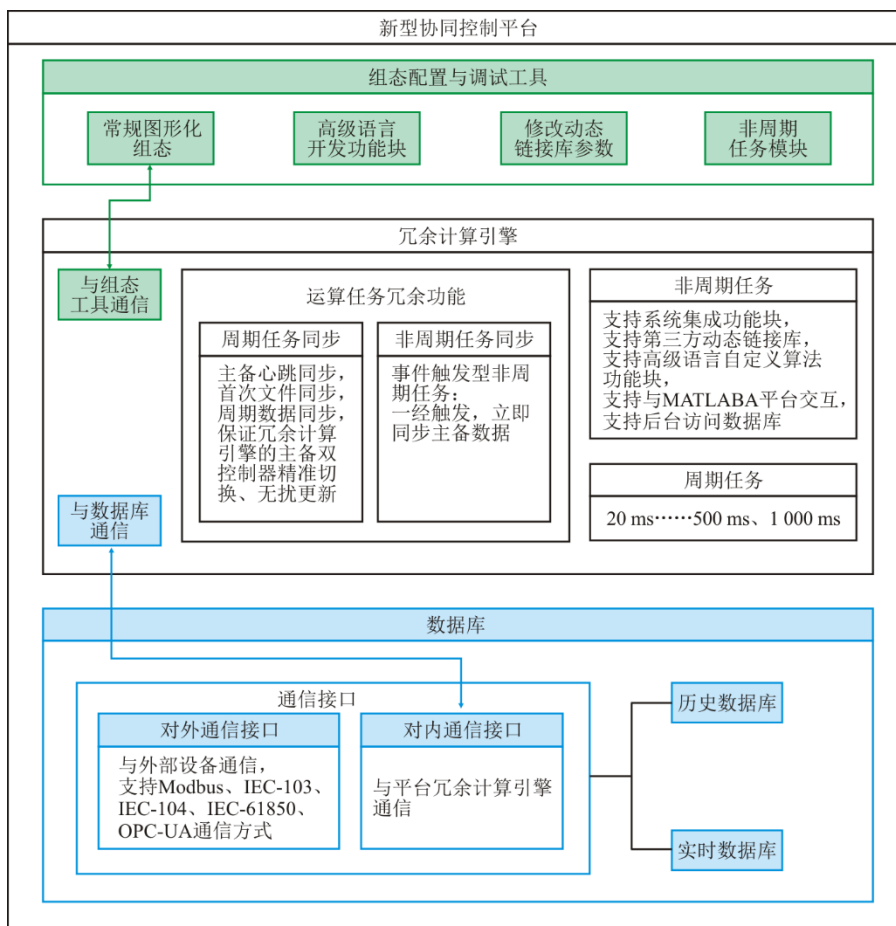


图 1 协同控制平台总体架构

Fig.1 Overall architecture of collaborative control platform

2 冗余计算引擎

2.1 冗余计算引擎功能设计

冗余计算引擎由虚拟控制器（运算部分）和通信接口（通信部分）构成。其中，虚拟控制器处于双机热备状态，主备机间的数据实时同步。发生故障时，系统控制权自动切换至备机，保证切换后备机能按照最新的离线页面数据和实时页面数据继续运算，实现对设备的无扰控制。图 2 为冗余计算引擎在本平台中的功能与作用。因此，冗余计算引擎具体应设计以下内容。

1) 周期及非周期任务模块 同时支持时间驱

动的常规工程文件和事件驱动的第三方算法模块。

2) 冗余运算任务间的同步功能 通过周期性同步主备间的心跳和数据保证控制器的按需切换、无扰更新，通过“触发即同步”的方式保证主备控制器中非周期任务数据的可靠性。

3) 与组态工具和数据库的通信接口 使得上位机中修改的组态数据可以下装到计算引擎中，计算引擎中的各类任务也可以向数据库中读写数据。

2.2 冗余计算引擎功能实现

计算引擎以双冗余虚拟控制器为核心，包含管理程序 Manager 与内核程序 VDPU。其中管理程序包含网络管理、内核进程管理、用户管理、数据转

发通信等功能；内核程序包含逻辑运算、运算速率调整、数据通信等功能。计算引擎通过通信接口连

接组态配置调试工具和数据库。

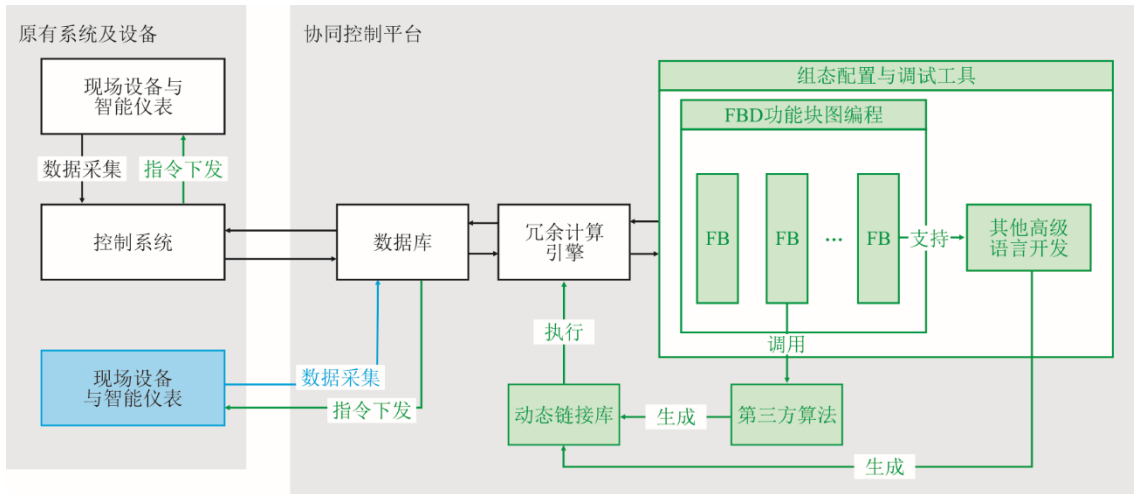


图 2 冗余计算引擎功能
Fig.2 Redundant computing engine function

管理程序 Manager 通过通信转发、心跳机制、数据同步这 3 个机制实现控制器的双冗余。

- 1) 通信转发 控制器间的通信是通过管理程序转发数据实现的，不仅要转发控制器中的离线页面数据和实时页面数据，还要转发控制器的状态。
- 2) 心跳机制 对控制器的状态进行监测，及时发现控制器的故障或失效情况，保障了平台的实时性与可靠性。
- 3) 数据同步 分为首次文件同步和后期数据同步两部分，用来保证控制器切换时运算数据真实可靠，从而实现对设备对象的无扰控制。

2.2.1 主备切换可靠性的实现

由于 Manager 之间传递 UDP 报文，当前主备机间的心跳数据和其他数据（同步数据和其他程序的通信数据）通过双网通信，若主备机间数据量过大会导致 UDP 心跳数据丢包，主备机间可能失去心跳，导致“双主”问题。

因此考虑将心跳数据、同步数据与系统其他程序数据分离，确保心跳数据稳定可靠，同时通过重发机制保证主备数据的一致性。图 3 为冗余计算引擎通信架构。本文将用 2 个专门的网卡管理心跳和同步数据，另外再用 2 块网卡传输其他程序数据。

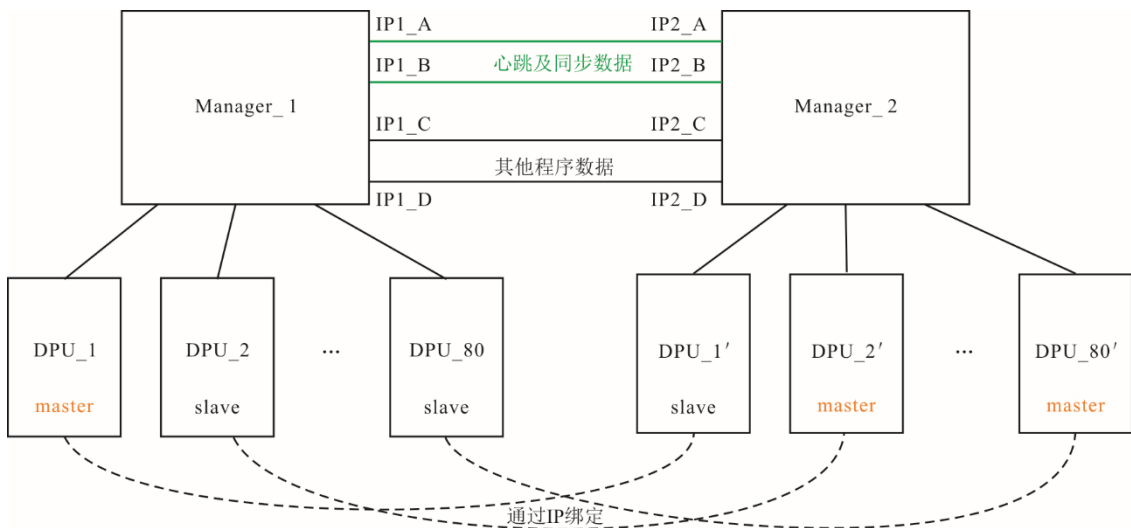


图 3 冗余计算引擎通信架构
Fig.3 Communication architecture of redundant computing engine

2.2.2 同步数据真实性的实现

主备机长时间运行后, 由于系统时钟误差, 可能导致数据同步也出现误差。因此考虑周期性比较主备间数据差异, 及时重发数据以保证同步。本文将自设定周期比较数据同步间的差异; 或让主控制器在每个运算周期向备控制器同步回环运算输出, 并对输出数据进行比较, 若主备控制器输出差异大, 则要设计报警机制。

2.2.3 周期任务实时性的实现

由于本文计算引擎在非实时性 linux 系统下运行, 周期任务执行会存在误差^[9]。因此考虑以 20 ms 任务周期为目标, 规定执行误差不应超过 1 ms, 且额外支持的非周期任务不会影响原来的周期任务。本文将对国产 linux 操作系统的实时性进行研究, 提高虚拟控制器进程在操作系统内的运行优先级, 并研究系统调度和程序自主分核的性能差异, 确定是否可以将具体任务绑定在指定内核中执行。

2.2.4 对第三方模块和智能算法的兼容

计算引擎按执行周期将常规工程任务分为 8 级, 而第三方模块中的算法可能非周期执行。因此考虑开发非周期任务模块, 并设计非周期任务的冗余同步功能。本文将开发一种事件触发型非周期任务区, 该非周期任务区具有以下功能:

- 1) 支持系统集成算法功能块。
- 2) 支持高级语言自定义算法功能块。
- 3) 支持以调用动态链接库的方式接入第三方算法^[10]。
- 4) 支持外部系统访问数据库。

对于向本平台开源的算法, 平台支持对该非周期任务进行触发式冗余同步; 对于不向本平台开放的算法, 仅保证接口数据不被窃取。

3 组态配置与调试工具

3.1 组态配置与调试工具功能设计

上位机中的组态配置与调试工具应支持 FBD 功能块图编程^[11], 提供用户程序编程和调试功能, 可实现工程创建、软硬件组态、设备在线监视和无扰更新等功能; 同时支持可配置动态库参数的功能, 加入可执行非任务周期的模块, 支持 Python 等高级语言对功能块的开发, 可接驳 MATLAB 平台。图 4 为控制算法的组态流程。

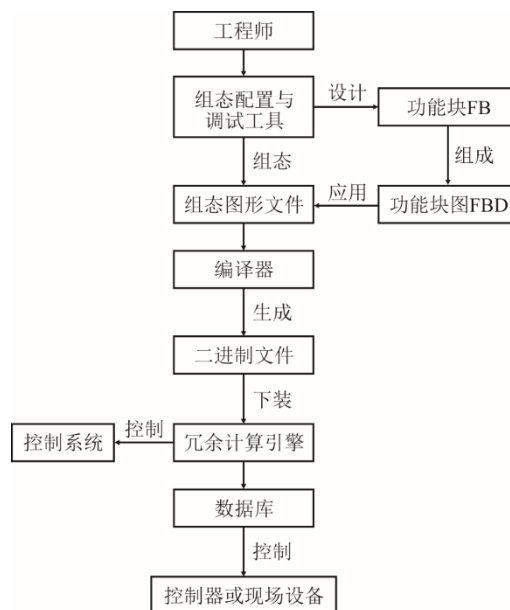


图 4 控制算法组态流程

Fig.4 Configuration process of control algorithm

3.2 组态配置与调试工具功能实现

3.2.1 配置第三方动态链接库参数

本协同控制平台可以从内部调用由第三方算法生成的动态链接库文件, 通过组态配置工具自定义输入、输出、参数变量的类型与数值, 之后下装到计算引擎中完成运算, 将最终输出数据存入内存数据库中供第三方取回。

3.2.2 添加非周期任务执行模块

操作人员可以自选建立的任务类型, 本平台支持周期性任务和事件触发型非周期任务, 且在非周期任务中也能调用周期运行的功能块。

3.2.3 支持部分高级语言开发功能块

平台支持常规图形化组态, 通过调用动态链接库支持 Python 等高级语言^[12], 同时可接驳 MATLAB 平台, 借此对一些控制逻辑更为复杂的功能块进行协同开发。

4 安全性保障

由于本平台与第三方模块交互时, 可能会有数据外泄^[13-14], 或是外接算法陷入死循环的情况, 导致第三方模块和本系统的安全受到威胁。因此, 考虑建立保护机制进行安全防护, 阻止外部算法错误影响本平台, 同时保护第三方知识产权安全。图 5 为系统安全防护策略。由图 5 可见, 系统安全防护策略如下。

- 1) 动态链接库 将第三方算法进行编译, 形成

动态链接库后引入平台。由于动态链接库可能需要访问敏感资源或是执行特权操作，有些恶意动态链接库会通过提升权限或执行未授权操作进行攻击。对此，操作系统和应用程序应对文件权限和隐私数据进行隔离管理，针对不同用户授权相对应的存取控制机制^[15]。

2) 参数结构体 定义动态链接库入口函数所需参数的结构体，采用指针调用方式传递数据。考虑到指针使用不当会导致安全漏洞（例如缓冲区溢出、指针的非法引用等），因此应及时初始化新指针、清空旧指针，避免出现空指针、野指针^[16]。

3) 看门狗机制^[17] 监视第三方算法，若连接超时，则终止(或重启)调度任务，由此保障系统运行的安全。

4) 容错机制 通过前期估计控制器算例，以及后期对系统资源占用情况的实时监控^[18]，阻止占用资源过大的第三方模块；同时，对符合要求的第三方模块应做冗余同步处理，需自定义同步时间及要同步的中间变量。

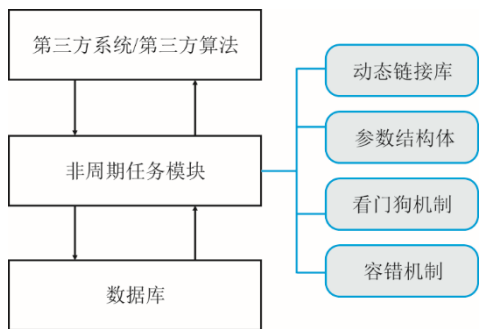


图5 系统安全防护策略
Fig.5 System security protection policy

5 应用场景

将传统 DCS 基于软件定义思想重构后，针对控制器模块的解耦，将提高软件功能开发的便捷性，进而增强控制器运算功能的智能性，使得本平台可应用于各类复杂场景下的过程控制；针对 IO 模块的解耦，将提升数据采集的灵活性与底层设备的可扩展性，使得本平台适用于多种支持标准通信协议的数字量 IO 采集环境。

图 6 为新型协同控制平台应用场景。由图 6 可见：平台可作为独立产品为其他控制系统提供安全可靠的运算服务；也可应用在已有的控制系统中，取代智能物理控制器实现第三方算法的接入；对于储能和综合能源管理等对系统实时性要求不高的

场景，平台还可以直接取代物理控制器，通过读取数据库实现与现场设备的交互。

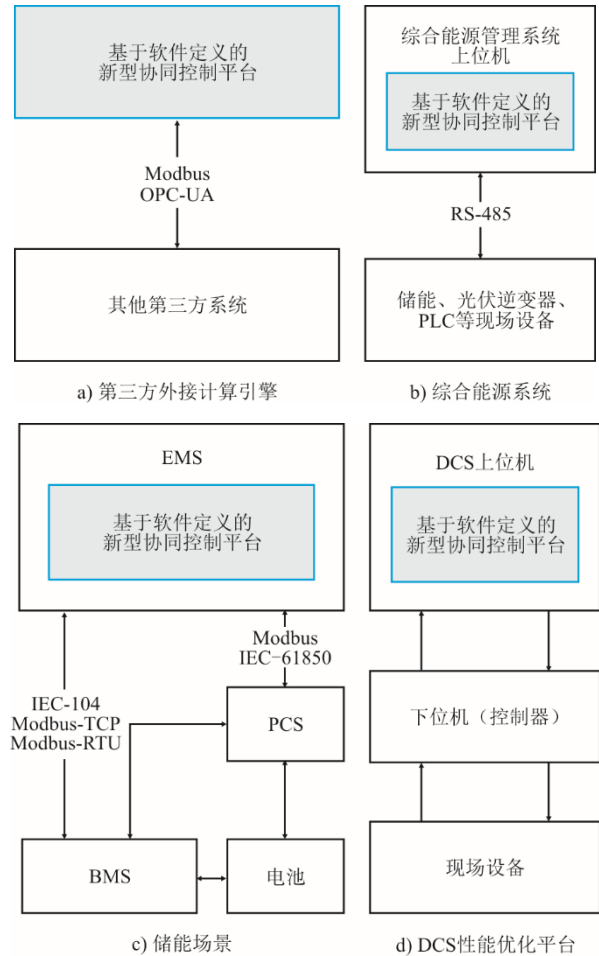


图 6 新型协同控制平台应用场景
Fig.6 Application scenarios of the new collaborative control platforms

6 结 语

DCS 在火力发电领域的普及，使火电厂的发电控制过程实现了高度自动化，倘若能根据当前生产需要，在现有的发电控制逻辑中引入先进控制算法或智能优化算法，就能进一步提高电厂机组的运行效率，从而提升发电过程的控制精度，对降低生产成本、节约能源、减少污染排放都有重大意义^[19]。为此，多数大型企业通常选择额外采购 PLC 来优化火力发电的自动化控制，但该方式需要增添现场控制柜、智能控制器、工业 IPC 等系统硬件，在实际应用时部署工程量大、占用空间大、价格昂贵且不具备拓展空间，对于小型工程而言引进性价比不高。同时，该方法多采用对外通信的形式连接外部设备，可能导致第三方数据的外泄，且自身系统的安全性也难以保证。

为此,本文受软件定义思想的启发,提出一种新型协同控制平台架构,将 DCS 软硬件解耦重构,通过软件来配置硬件资源,通过程序来实现控制逻辑,实现了硬件资源的虚拟化和功能管理的可编程化^[20]。相较之下,本平台各软件功能可以独立开发、优化、维护,为平台的计算性能提升与智能化支持提供了保障。同时,由于解耦后的各模块可灵活动态组合,因此本平台可以按客户需求进行拆解、组装,一方面可以作为独立产品无缝整合进其他控制系统设备;另一方面还可以对 DCS 本身的计算性能进行优化升级,取代智能控制器实现高级复杂算法,替代传统方法为电力生产企业提供灵活可靠的控制服务。还可以直接应用于储能、综合能源等新领域,发展前景十分广阔。

综上所述,本平台具有投入成本低、通信兼容好、软硬件维护便捷、支持第三方复杂算法、应用场景广泛等优势,不仅为我国电力生产企业的灵活高效生产和智能化升级提供了更具性价比的方案,还顺应了当前“软件定义世界”的潮流,将是控制系统技术未来革命性的新一代产品。

[参 考 文 献]

- [1] 冷杉. 论虚拟分散控制系统技术[J]. 中国电力, 2003(2): 57-60.
LENG Shan. Virtual distributed control system technology[J]. Electric Power, 2003(2): 57-60.
- [2] 廖鹏飞, 赵淑光, 刘湘中. 超融合技术在设计业务中的应用与研究[C]//中国电机工程学会电力信息化专业委员会. 2017 电力行业信息化年会论文集. 北京: 人民邮电出版社, 2017: 4.
LIAO Pengfei, ZHAO Shuguang, LIU Xiangzhong. Application and research of hyper-converged technology in design business[C]//Electric Power Informatization Committee of China Society of Electrical Engineering. Proceedings of the 2017 Annual Conference on Informatization of Electric Power Industry. Beijing: People's Posts and Telecommunications Press, 2017: 4.
- [3] 陈立水, 李宁, 王静, 等. 基于软件定义的军事通信网络技术探讨[C]//中国通信学会, 四川省经济和信息化厅, 四川省通信管理局, 四川省科学技术协会, 成都市政府. 2018 中国信息通信大会论文摘要集. 2018: 1.
CHEN Lishui, LI Ning, WANG Jing, et al. Discussion on software-defined military communication network technology[C]//China Institute of Communications, Sichuan Provincial Department of Economy and Information Technology, Sichuan Provincial Communications Administration, Sichuan Provincial Association for Science and Technology, Chengdu Municipal Government. Abstract Collection of Papers of 2018 China Information and Communication Conference. 2018: 1.
- [4] CHUA M Y K, YU F R, LIANG C, et al. Software-defined device-to-device (D2D) communications in virtual wireless networks with imperfect network state information (NSI)[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(9): 7349-7360.
- [5] FEAMSTER N, REXFORD J, ZEGURA E. The road to SDN: an intellectual history of programmable networks[J]. ACM Sigcomm Computer Communication Review, 2014, 44(2): 87-98.
- [6] 李忠民, 吴敬敬, 李建坤. 面向空天地一体化的传输虚拟化系统架构[C]//信息工程研究所, 美国 2012 年地球科学与遥感国际会议论文集(ESRS 2012). 2012: 6.
LI Zhongmin, WU Jingjing, LI Jiankun. Transmission virtualization system architecture for space-air-ground integration[C]//Information Engineering Research Institute, USA. Proceedings of 2012 International Conference on Earth Science and Remote Sensing (ESRS 2012). 2012: 6.
- [7] KREUTZ D, RAMOS F M V, VERISSIMO P E, et al. Software-defined networking: a comprehensive survey[J]. Proceedings of the IEEE, 2015, 103(1): 14-76.
- [8] 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 distributed control system[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(3): 159-165.
- [9] 流水灯. 什么是实时操作系统 (RTOS), linux 为什么无法保证实时性[EB/OL]. (2023-10-16)[2023-11-13]. <https://www.cnblogs.com/god-of-death/p/17768411.html>.
waterfall light. What is the real-time operating system (RTOS), and why linux cannot guarantee the real-time performance[EB/OL].(2023-10-16) [2023-11-13]. <https://www.cnblogs.com/god-of-death/p/17768411.html>.
- [10] 朱雍杰, 杨新志. 基于动态链接库与多媒体定时器技术的 SCADA 系统[C]//中国系统仿真学会 (Chinese Association for System Simulation(CASS)). 2004 年生命系统建模仿真国际会议暨第一届全国生命系统建模仿真学术会议论文集. 2004: 4.
ZHU Yongjie, YANG Xinzhi. SCADA system based on dynamic link library (DLL) and multimedia timer[C]//Chinese Association for System Simulation (CASS). Proceedings of the 2004 International Conference on Modeling and Simulation of Living Systems and the First National Conference on Modeling and Simulation of Living Systems. 2004: 4.
- [11] 谭良良, 陈宏君, 张磊, 等. 支持 IEC61131-3 标准的编程软件设计[J]. 工业控制计算机, 2019, 32(6): 3.
TAN Liangliang, CHEN Hongjun, ZHANG Lei, et al. Support the programming software design of the IEC61131-3 standard[J]. Industrial Control Computer, 2019, 32(6): 3.
- [12] Python Software Foundation. 使用 C 或 C++ 扩展 Python[EB/OL]. (2023-12-04)[2023-12-13]. <https://docs.python.org/zh-cn/3/extending/extending.html>.
Python Software Foundation. Extending Python with C or C++[EB/OL]. (2023-12-04) [2023-12-13]. <https://docs.python.org/release/3.12.1/extending/index.html>.
- [13] 廖淑珍, 覃冬华, 吴易轩, 等. 基于区块链的高校数据交换共享平台安全性研究[J]. 广西广播电视大学学报, 2023, 34(4): 26-31.
LIAO Shuzhen, QIN Donghua, WU Yixuan, et al. Research on the security of university data exchange and sharing platform based on blockchain[J]. Journal of Guangxi Radio and Television University, 2023, 34(4): 26-31.

- [14] 杨力强, 黄申, 卢冰, 等. 电力数据网传输模式研究[J]. 科技风, 2018(2): 87.
YANG Liqiang, HUANG Shen, LU Bing, et al. Research on transmission mode of power data network[J]. Science & Technology Wind, 2018(2): 87.
- [15] 李明时. 工业物联网安全通信关键技术研究[D]. 沈阳: 中国科学院大学, 2023: 1.
LI Mingshi. Research on key technologies of secure communication for industrial Internet of Things[D]. Shenyang: University of Chinese Academy of Sciences, 2023: 1.
- [16] 叶帮利. 用于工控监测系统的多进程软件看门狗[J]. 微计算机信息, 2008(7): 304-305.
YE Bangli. Multi-process software watchdog for industrial control monitoring system[J]. Microcomputer Information, 2008(7): 304-305.
- [17] 陈意云, 华保健, 葛琳, 等. 一种用于指针程序安全性证明的指针逻辑[J]. 计算机学报, 2008, 31(3): 372-380.
CHEN Yiyun, HUA Baojian, GE Lin, et al. A pointer logic for safety verification of pointer programs[J]. Chinese Journal of Computers, 2008, 31(3): 372-380.
- [18] 王海猷, 贺仁睦. 变电站自动化监控主站的系统资源平衡[J]. 电网技术, 1999, 23(1): 17-20.
WANG Haiyou, HE Renmu. Balance of system resources of host for monitoring and controlling in substation automation[J]. Power System Technology, 1999, 23(1): 17-20.
- [19] 丁宁. 优化控制平台系统组态站软件设计与开发[D]. 保定: 华北电力大学, 2013: 1.
DING Ning. Design and development of software for configuration station of optimized control platform[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2013: 1.
- [20] 刘宝. 软件定义环境下业务重构系统的研究与开发[D]. 南京: 南京邮电大学, 2018: 1.
LIU Bao. Research and development of a business reconstruction system in a software-defined environment[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2018: 1.

(责任编辑 杜亚勤)