

分布式控制系统 动态重构技术研究与实践

郑松^{1,2}, 倪维斗¹

(1. 清华大学 热能工程系, 北京 100084; 2. 绿色煤电有限公司, 北京 100098)

摘要: 动态重构是一种在控制系统运行时进行控制组态无扰更新的技术, 它与控制系统的体系结构、控制组态方法以及管理机制等技术问题密切相关。本工作研究动态重构技术的基本特征, 探讨控制组态技术标准与动态重构之间的内在联系。基于图形化的控制组态方法, 提出一种独立于控制站计算平台的数据引擎模型和相应的工程实现技术, 将动态重构过程转化为控制站实时数据库的数据更新过程。采用多代理软件工程的方法实现数据引擎机制。提出在可编程控制器(PLC)中实现动态重构技术的方法, 并将该技术应用到发电机组的分布式控制系统中。对动态重构技术在核电站 I&C 系统中应用的有关问题也进行了探讨。

关键词: 分布式控制系统; 动态重构; 控制组态; 数据引擎

中图分类号: TP273

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2009)08-0724-06

Research and Implementation of Dynamic Reconfiguration Technology in Distributed Control System

ZHENG Song^{1,2}, NI Wei-dou¹

(1. *Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;*

2. GreenGen Co., Ltd., Beijing 100098, China)

Abstract: Dynamic reconfiguration is a technology by which control configuration can be updated without disturbance when the control system is in operation and is closely related to the architecture, control configuration and management mechanism of the control system. The characteristics of dynamic reconfiguration were studied and the intrinsic relationship between dynamic reconfiguration and control configuration standard was analyzed. Based on graphic configuration, the data engine model and its implementation independent of any control platform were presented, implying that the dynamic reconfiguration was converted to data-updating in the real data base of control station. Data engine was programmed by the multiagent system software. The method of dynamic reconfiguration in the programmable logic controller (PLC) and its application to the distributed control system in power generating units were described.

The application of dynamic reconfiguration in NPP I&C system was also discussed.

Key words: distributed control system; dynamic reconfiguration; control configuration; data engine

在大型复杂工业系统(如核能发电机组)中,分布式控制系统已得到广泛应用。许多研究表明^[1-8],在此类系统的控制组态软件中引入动态重构技术,是保证在线组态时控制系统安全可靠性能的最好办法。目前,动态重构技术已成为分布式计算领域中非常活跃的研究课题,建立了多种形式的技术架构。近年来,一些国家和地区的大学研究机构纷纷开展动态重构技术的研究,提出了诸如实时Java^[2]、面向对象和基于代理的软件方法^[3]、开放性的动态重构OpenRec^[4]、采用互联网传送控制组态数据^[5]、Java RMI^[6]、Java 功能元件^[7]以及 CORBA 中间件软件技术^[8]等方法的应用课题。这些研究的基本特点是采用基于图形元件的组态软件架构,并应用中间件技术解决元件模型的处理问题。相关研究基本上均停留在实验室验证阶段,其工程实现问题尚未得到很好解决。近年来,核电站的 I&C 系统已从单纯的数字化系统逐步过渡到了 DCS 模式^[9-13]。动态重构是确保核电站控制软件可靠性、稳定性和多样性的一项关键技术。考虑到目前控制组态主要采用图形化控制元件的模式,因此可将专门处理图形元件模型的数据引擎^[14]作为开发动态重构技术的基础。本工作将研究在数据引擎环境中动态重构技术的形成机制。

1 控制组态的重构问题

对于正在运行中的控制组态,动态重构包含了控制元件的添加、删除和替换,相关拓扑关系调整,以及新旧控制组态的交换这 5 种类型的操作过程。在这里,动态重构包括了控制逻辑(算法)和控制参数的在线调整过程。这方面的变化过程足以对控制系统的技术性能产生重大影响。动态重构的技术要求是:在新旧控制组态交换时,控制组态的执行必须是连续的和一致的。

定义 1:设在 i 时刻对控制组态进行重构,若任何控制元件的计算输出为 y_i ,且满足 $|y_i - y_{i-1}| \leq \delta$,则当 $|y_{i+1} - y_i| \leq \delta$ 时,该重构过程为

连续的。

定义 2:设 E 为动态重构后新增的控制元件,则当 E 的初始状态(包括计算属性和计算输出)能够满足与其相连接的控制元件的连续性时,该重构过程为一致的。

根据上述定义,控制组态的文件格式必须同时满足 3 项要求,即:1) 反映控制元件功能及算法的模型结构是统一的;2) 在控制站中读写控制组态文件不中断相关执行软件(Run-time)的工作;3) 控制组态中体现控制元件动、静状态的数据是相互独立的,才能具备建立动态重构机制的条件。显而易见,这些要求和控制组态标准化的技术要求完全一致。因而,可采用控制组态标准化的方法来研发动态重构技术。

IEC61499 是控制组态标准化技术实现的一种选择,但到目前为止,尚无一种商业化的控制组态软件和计算引擎能够适用于这项标准。主要原因是在大型分布式控制系统中,功能块的元件数量非常庞大,一般控制站的处理能力不足以应对功能块之间的交叉链接处理,控制组态人机界面实时监控的可读性也很差。为此,需对 IEC61499 的功能块进行简化,如图 1 所示。简化后,功能块的所有技术特性并无根本改变,但在组态的拓扑结构上更易进行量化处理,且有利于控制组态的实时监控。

为支持控制组态的动态重构,采用一组具有固定结构和格式的数据单元体作为控制元件功能及算法的模型。不同的控制元件,其数据单元体长度相等,结构相同,只是其中的数据有别。于是,控制组态的动态重构过程便转化为特定数据的组合、通讯、读写的过程,而不涉及计算平台中执行软件运行状态的变化,满足了动态重构对控制组态文件格式的 3 项技术要求。

为实现标准化目标,开发了控制组态软件。为支持动态重构,该软件对任何组态的变化均提供语法诊断功能,以避免动态重构的语法错误。另外,该软件还提供了离线仿真功能,以验

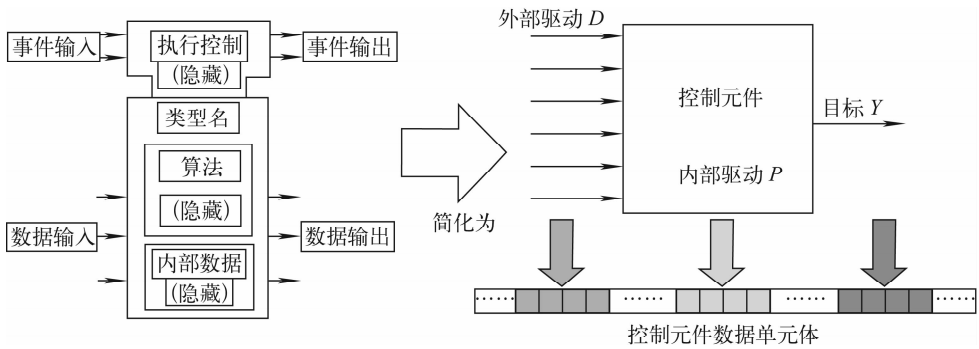


图1 DCS控制站中控制元件数据引擎技术架构示意图

Fig. 1 Framework of data engine for control element in control station

证控制组态变更的动态特性。通过语法诊断和离线仿真过程,可极大减少动态重构过程的风险。

2 数据引擎方法

针对控制组态的文件格式为数据单元体的特点,在控制站的研制中采用了数据引擎技术^[14-15]。数据引擎是由基于内存的实时数据库和基于多代理系统(multiagent system, MAS)的若干实时数据处理进程构成的一种软件组织。其中,实时数据库是控制组态数据单元体的一种动态映像,单纯的数据内容完全独立于控制站计算指令与计算资源。MAS软件进程被用来执行实时数据库事务处理的任务,具体解读、分析、计算、更新实时数据库中的相关事项。这些进程相对独立,它们是纯粹的计算代理或设备驱动代理,具体的处理流程和结果仅取决于所涉及的数据单元体的内容。因此,这种进程具有理想的复用性能。应用这项技术的目的是使得控制组态和控制站计算平台的技术相关性降到最低程度,以便实现控制组态跨平台运行的目标,满足控制组态标准化的基本要求。在这样的计算环境中,控制过程实质上已被转化为实时数据库的数据更新过程,数据引擎也就成为一种控制组态算法执行的操作系统(FBOS)^[2]。

数据引擎的工作是以控制组态数据单元体为对象,在计算时序的引导下,对实时数据库不间断地进行实时、循环更新的过程。图2为MAS软件中最重要的控制元件算法的执行进程结构示意图。当控制组态的一个数据单元体

被推送到该进程的通信模块上时,首先根据数据结构及内容将数据单元体所携带的数据传送到各功能处理子模块中。这些数据包含了控制元件算法的信息、控制元件计算属性参数以及上个计算周期的计算结果等内容,也包含了控制元件的超控状态。该进程针对相关数据所代表的服务请求信息,从算法执行库中检索出相关算子,来完成特定数据的更新任务。为保证控制过程的实时性,所有控制元件的遍历处理过程必须在特定的运行周期内完成。MAS的每一项进程均包含1个环境感知模块,用于监测控制站计算平台的非常状态(动态重构就是其中的一种),以便暂停正常的代理服务或者临时改变代理服务的内容,满足控制系统安全、稳定、经济运行的所有要求。

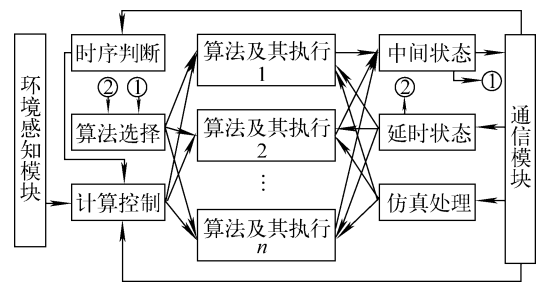


图2 数据引擎中控制元件算法执行软件结构示意图

Fig. 2 Algorithm of control block in data engine

在动态重构时,只有那些发生变化的数据单元体被传送到控制站,并存放在1个临时数据缓冲区中。当数据引擎敏感到动态重构的请求时,将冻结所有的控制元件的控制算法计算服务,接着进行实时数据库相关数据单元体静

态数据的置换过程,这就是所谓的动态重构的“沉默过程”,它被控制在1个计算周期内结束。在这个过程中,由于只有数据单元体的静态数据被变更,控制算法中涉及到的计算变量在数据单元体中的位置与数值均未发生任何变化,所以这种动态重构的过程是无扰的。紧接的1个计算周期为动态重构的“同步过程”,即根据相关数据单元体中初始状态,在所有外部输入输出冻结条件下执行控制算法。在数据引擎中,动态重构只需经历“沉默”和“同步”这两个过程(占用两个计算周期),即可完成控制组态的在线无扰更新。

3 动态重构技术的工程实现

3.1 基于 PLC 的动态重构技术的工程实现

为了验证动态重构技术的可行性,选择了OMRON CS1和 AB ControlLogix 这两种由不同厂家生产的可编程控制器(PLC)作为控制站的计算平台进行应用研究,它们相应的软硬件环境互不兼容。由于 PLC 长期以来都只是作为开关量逻辑或简单回路的控制装置,因此这项研究将有助于 PLC 应用范围和产品定位的拓展。研究的目的是:针对不同 PLC 的技术特性,分别开发相应的数据引擎,使他们成为同时具有控制组态标准化与动态重构技术特性的新

型分布式控制系统的控制站计算平台。

内存技术特性是开发基于 PLC 的数据引擎技术的关键因素。相对来说,PLC 的内存空间非常有限,通常仅为 1~10 MB,且其中一部分还要用于指令序列的存储。根据数据引擎技术规范,将 PLC 内存中的数据区每 90 Byte 定义为 1 组,对应于控制元件的数据单元体,组成实时数据库的存储空间。通常情况下,控制站的控制组态元件数为 3 000~4 000,其中一部分是为动态重构而预留的。以最多容纳 4 000 个控制元件为例,实时数据库的内存空间仅约为 350 kB。这说明,数据引擎及其相关动态重构技术对控制站计算平台的资源要求很低,大部分 PLC 均能满足此要求。因此,在 PLC 中实现数据引擎技术的关键因素是指令的执行时间。事实上,数据引擎所涉及到的 PLC 指令基本上是采用内存地址为间接操作数的结构,执行时间通常为 0.02~10 μ s,既能满足实时数据库中有关数据传送、计算处理和数据更新的事务处理要求,又能满足实时控制的要求。

采用多任务管理机制实现 PLC 中的数据引擎,所有任务代表 1 个 MAS 进程,均由 1 个调度任务来统筹管理。表 1 列出了在 PLC 数据引擎中的所有任务^[14]。

表 1 基于 PLC 的分布式控制系统数据引擎 MAS 进程任务清单

Table 1 Task list of MAS software in distributed control system based PLC

序号	任务	功能说明
1	任务调度	协调启动数据引擎中的各种 MAS 进程
2	动态重构管理	进入动态重构保护状态,更新实时数据库
3	运行操作处理	处理人机界面上的操作信号
4	从人机界面到控制站数据通讯管理	接受人机界面系统的下载数据
5	输入数据预处理	对数模转换后输入数据进行标么化处理
6	输入数据仿真	切断物理输入通道,设置仿真数据
7	输入缓存数据传送到实时数据库的管理	实时数据库中输入控制元件的数据更新
8	控制元件算法执行	实现图 2 所示的控制元件算法执行过程
9	转速信号处理	用计数模块测量转速时需进行的数据处理
10	网络通讯故障检测	分析各控制站及人机界面之间数据通讯状态
11	网络切换管理	主、备用控制网络之间的切换管理
12	从控制站到人机界面数据通讯管理	控制站中人机界面数据的上传管理
13	控制组态特征数据统计	统计有效和强制控制元件的数量
14	实时数据库数据传送到输出缓存的管理	实现控制指令的输出
15	控制站上电初始化管理	控制站通电后进行基础数据的恢复工作
16	控制站故障监测	监视控制站 CPU 中看门狗信号的状态
17	控制站故障状态自诊断	收集控制站自诊断故障状态,形成报警报告

3.2 动态重构技术在常规发电机组中的应用

由表1可见,以PLC为计算平台的数据引擎不针对具体的控制对象,所有控制策略全部反映在实时数据库数据单元体中,因此配置有这种数据引擎的PLC就成为一类通用的控制站平台,可在工业生产环境中得到应用。目前,采用上述两种不同类型的PLC所研发的控制站已在华能福州、岳阳、大庆新华、白杨河以及北京热电厂的发电机组和脱硫、脱硝等控制系统中得到应用。特别需要指出的是,在调试和试运阶段,每个控制系统都经历了数百次控制组态的动态重构过程,使相关机组的控制品质能够在安全、稳定的前提下不断得到改善。

3.3 动态重构技术在核电站 I&C 系统中的应用

动态重构机制对于提高核电站 I&C 系统的可靠性、稳定性和容错性也非常有效。采用数据引擎的动态重构技术具有跨平台运行控制组态的特性,因而可用不同硬件平台的控制站来构建核电站控制系统的多样化体系,进一步降低冗余控制站发生共模故障的几率。例如,可用不同厂家生产的 PLC 来构成核电站安全保护系统的冗余控制站,它们同时出现软硬故障的几率将低于采用相同 PLC 构成的冗余控制站。控制站硬件虽不同,但由于安装了数据引擎,它们的控制组态是相同的,因而这种多样化技术方案并未造成软件管理方面成本和安全风险的增加。为满足动态重构的技术要求,控制组态必须采用标准结构的数据格式来建立模型,这使得 I&C 系统控制站计算过程任何变量的内存地址保持恒定。这种控制算法的执行机制为确保控制站的稳定性提供了非常有效的技术基础。此外,随着过程工艺要求的提升,近年来先进控制理论(包括模糊控制、神经网络控制等)在核电站 I&C 系统中的应用研究也十分活跃,如何实现并优化这些控制策略,提高 I&C 系统的容错性,已成为今后研究的热点课题。采用动态重构技术,能够在确保机组安全运行的前提下,实时优化控制策略的结构和参数。

4 结论

工业系统的复杂性和工艺要求的多样性,使得动态重构技术在工程应用中的作用越来越重要。动态重构技术的研究包含了控制组态软

件开发,数据引擎技术规范的建立,基于 PLC 的控制站研究,以及发电机组分布式控制系统的工程应用等多项具体工作。研究显示,动态重构技术与控制组态技术有着极其密切的关系,实际上已成为控制组态软件工具中的一项基本功能。解决动态重构问题的关键是控制组态标准机制的建立,而这种机制可采用数据引擎来实现。数据引擎将控制组态文件和控制组态的执行机制两者完全隔离开来,并采用数据单元体方法建立控制组态的基本模型。动态重构实际上等价于数据引擎实时数据库的局部数据更新过程。经工程上的反复验证表明,基于数据引擎的动态重构技术是成熟的,已具备在工业自动化领域中推广应用的条件。动态重构技术对于提高核电站 I&C 系统的可靠性、稳定性和容错性也有积极的作用。

动态重构技术虽已在某些工程项目中得到应用,但对它的深度研究还在继续。在新追加的控制元件中,采用智能模式自动给出相应的初始状态,这是一个很值得研究的课题。此外,根据动态重构的技术特性,可将控制组态作为网络通讯的一部分,进而对分布式控制系统的计算资源进行动态再分配,这也是今后研究的一个方向。

参考文献:

- [1] CAO J, CHAN E, LEE C H, et al. A dynamic reconfiguration manager for graph-oriented distributed programs[C]// International Conference on Parallel and Distributed Systems (ICPADS'97). Seoul: IEEE Computer Society, 1997: 216-221.
- [2] BRENNAN R W, FLETCHER M, NORRIE D H. An agent-based approach to reconfiguration of real-time distributed control systems[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2002, 18(4): 444-451.
- [3] XU Y, BRENNAN R W, ZHANG X, et al. A reconfigurable concurrent function block model and its implementation in real-time Java[J]. Journal of Integrated Computer-Aided Engineering, 2002, 9: 263-279.
- [4] HILLMAN J, WARREN I. An open framework for dynamic reconfiguration[C]// Proceedings of the 26th International Conference on Software

- Engineering (ICSE'04). Edinburgh; ACM-IEEE, 2004; 594-603.
- [5] RASCHE A, POLZE A. Dynamic reconfiguration of component-based real-time software[C]// Proceedings of the 10th IEEE International Workshop on Object-Oriented Real-Time Dependable Systems (WORDS'05). Arizona; IEEE Computer Society Press, 2005; 347-354.
- [6] CHEN X. Extending RMI to support dynamic reconfiguration of distributed systems[C]// Proceedings of the 22nd International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS'02). Vienna; IEEE Computer Society, 2002; 401-408.
- [7] LEE Y F, CHANG R C. Java-based component framework for dynamic reconfiguration[J]. IEEE Proc Software, 2005, 152(3): 110-118.
- [8] ALMEIDA J P A, WEGDAM M, van SINDEREN M, et al. Transparent dynamic reconfiguration for CORBA[C]// Proceedings of the Third International Symposium on Distributed Objects and Applications. Rome; IEEE Computer Society, 2001; 197-207.
- [9] 李文睢, 张玉峰. 田湾核电站仪表和控制系统安全分级和设备鉴定[J]. 核工程研究与设计, 2005(9): 17-21.
- LI Wenju, ZHANG Yufeng. Safety classification and equipments qualification of I&C in TNPP [J]. Research & Design of Nuclear Engineering, 2005(9): 17-21(in Chinese).
- [10] 许乐山. 核电站仪表与控制系统数字化的途径[J]. 世界仪表与自动化, 2003, 7(12): 18-24.
- XU Leshan. A digitization way for the I&C systems in the nuclear power plant[J]. International Instrumentation & Automation, 2003, 7(12): 18-24(in Chinese).
- [11] HEINZ J P. Advanced I&C systems for nuclear power plant feedback of experience[C]// Proceeding of the International Conference on Nuclear Energy in Central Europe. Portoroz, Slovenia; Nuclear Society of Slovenia, 2001; 504.1-504.6.
- [12] BASTL W, BOCK H W. German qualification and assessment of digital I&C systems important to safety[J]. Reliability Engineering and System Safety, 1998, 59: 163-170.
- [13] LEE J S, KIM M C, SEONG P H, et al. Evaluation of error detection coverage and fault-tolerance of digital plant protection system in nuclear power plants [J]. Annals of Nuclear Energy, 2006, 33: 544-554.
- [14] 郑松. 数据引擎技术研究及其在电站 DCS 中的应用[D]. 北京:清华大学热能工程系, 2006.
- [15] ZHENG Song, NI Weidou. The design and application of PLC-based distributed control system [C]// Proceedings of the 3rd International Conference on Control Theory and Applications. Pretoria; IEEE Press, 2001; 584-588.