

基于西门子T2000系统的DCS组态转换技术

童辉¹, 万舒², 曹培根², 吴锋¹, 华志刚¹

¹核动力运行研究所, 湖北 武汉

²福建福清核电有限公司, 福建 福清

收稿日期: 2025年5月29日; 录用日期: 2025年6月16日; 发布日期: 2025年7月30日

摘要

本文探讨了基于西门子T2000系统的DCS组态转换技术, 旨在仿真平台上构建一套1:1的虚拟DCS系统, 用于培训、调试验证和故障诊断。通过TEC4软件导出逻辑图文件, 解析XML和Visio文件, 结合中核武汉rinsim2.0平台规则生成虚拟DCS组态文件, 实现组态转换, 提高建模效率和准确性。

关键词

西门子T2000, 虚拟DCS, 组态转换, TEC4

DCS Configuration Transformation Technology for the Siemens T2000 System

Hui Tong¹, Shu Wan², Peigen Cao², Feng Wu¹, Zhigang Hua¹

¹Research Institute of Nuclear Power Operation, Wuhan Hubei

²Fujian Fuqing Nuclear Power Co., Ltd., Fuqing Fujian

Received: May 29th, 2025; accepted: Jun. 16th, 2025; published: Jul. 30th, 2025

Abstract

This paper explores a DCS configuration transformation technology for the Siemens T2000 system. It aims to create a virtual DCS system on a simulation platform for training, debugging, validation, and fault diagnosis. By exporting logic diagrams from TEC4 software and parsing XML and Visio files, integrating the RINSIM 2.0 platform rules from CNPO to generate virtual DCS configuration files, configuration conversion can be achieved to improve modeling efficiency and accuracy.

Keywords

Siemens T2000, Virtual DCS, Configuration Transformation, TEC4



1. 引言

在当今的工业控制领域，分布式控制系统(DCS)的应用越来越广泛，尤其是在核电站这样的复杂工业环境中，DCS 系统的可靠性和高效性对于保证整个工艺过程的安全稳定运行起着至关重要的作用。西门子 T2000 系统作为一款专为核电站设计的 DCS 系统，以其卓越的性能和强大的功能在核电领域得到了广泛应用。

然而，随着核电站规模的不断扩大和系统复杂性的日益增加，传统的手动建模方式已经难以满足实际需求。手动建模不仅耗时耗力，而且容易出现人为错误，导致模型的准确性和可靠性无法得到有效保障，这对于核电站这样对安全性和精确性要求极高的设施来说是不可接受的。因此，研究并实现基于西门子 T2000 系统的 DCS 组态转换技术成为了推动核电站智能化发展的关键课题之一。

2. 西门子 T2000 系统与 TEC4 组态软件

2.1. 西门子 T2000 系统概述

西门子 SPPA-T2000 系统是一款用于电力行业的分散式控制系统(DCS)，主要用于核电站非安全级控制系统、汽轮机控制、保护和监控等领域。其设计充分考虑了核电站对控制系统在安全性、可靠性和实时性方面的严格要求[1]。

T2000 系统由以下子系统组成：AS620 自动控制系统、OM690 过程操作系统、TEC4/ES680 工程设计系统以及 SINEC 总线系统[2]。其系统结构如图 1 所示。

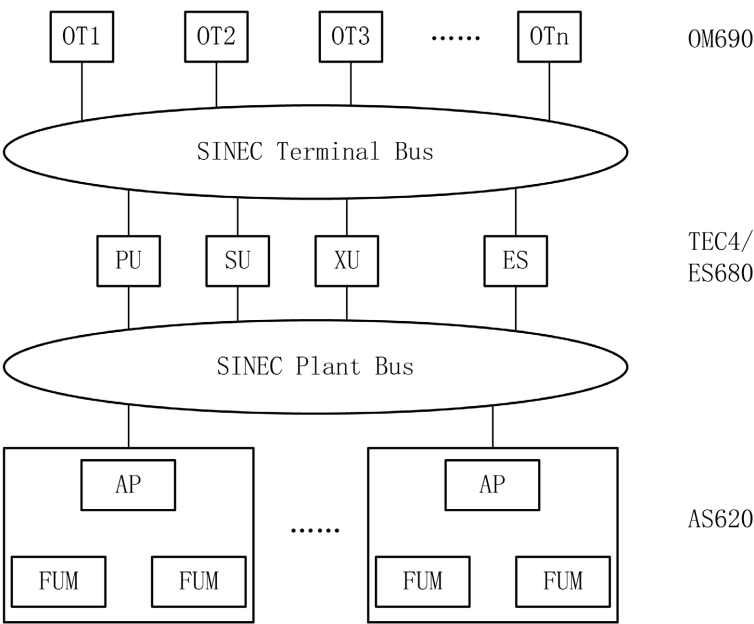


Figure 1. The structure of the T2000 system
图 1. T2000 系统结构

组态转换技术旨在通过程序化的方法，从 TEC4/ES680 工程设计系统的 TEC4 组态信息中自动提取数据并生成相应的仿真模型，从而大大节省人力和时间成本，同时提高模型的准确性和一致性。这对于核电站的运行人员培训、系统调试、故障诊断以及优化升级等方面都具有极为重要的意义，能够为核电站的安全、高效运行提供有力的技术支持[3]。

2.2. TEC4 组态软件介绍

TEC4 Function 软件简称 TEC4，作为西门子 T2000 系统的专用组态软件，是实现整个控制系统功能配置和逻辑设计的核心工具，如图 2 所示。其基于 Microsoft Visio 开发，巧妙地融合了 Visio 在图形化设计方面的优势与 sql server 数据库的强大数据管理能力，为用户准确、高效地进行控制系统组态提供了一个直观、便捷的平台。

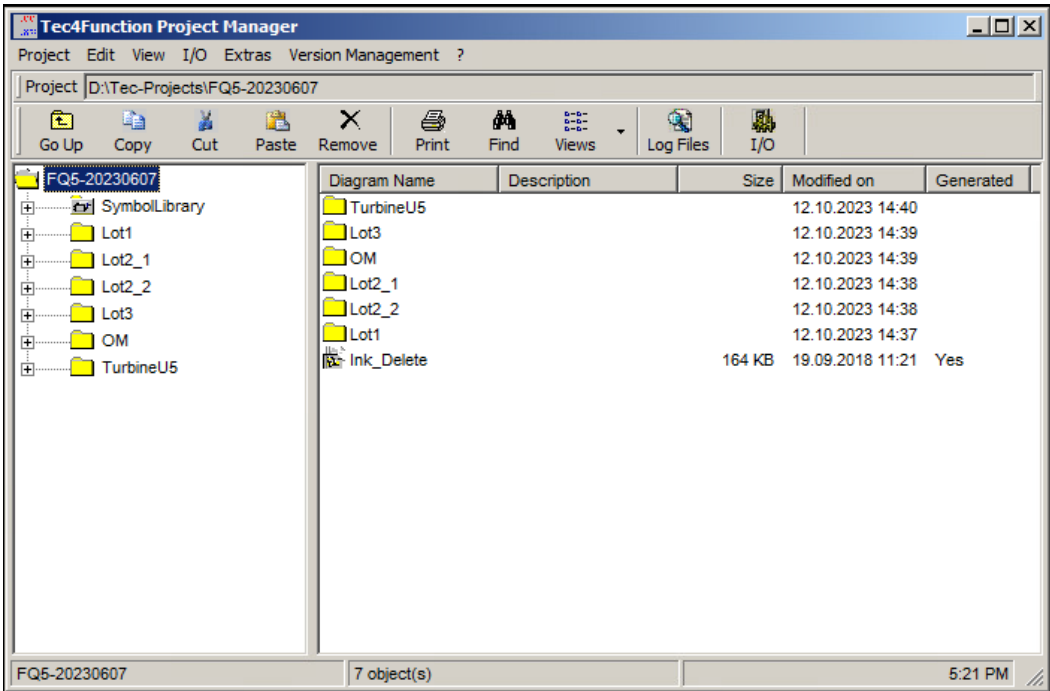


Figure 2. The TEC4 Function software interface
图 2. TEC4 Function 软件界面

在核电站 DCS 系统的建设过程中，TEC4 组态软件是不可或缺的重要工具。在工程设计阶段，工程师们使用 TEC4 根据核电站的工艺流程图和控制要求，进行详细的控制系统设计，包括功能块的选型与配置、逻辑图的绘制与连接、控制参数的整定等。在系统调试阶段，通过 TEC4 对控制系统进行在线调试和优化，实时监测功能块的运行状态和信号数值，及时发现并解决存在的问题。在核电站的运行维护阶段，TEC4 又作为控制系统维护的重要工具，帮助维护人员对控制系统进行故障诊断、功能升级、参数调整等工作，确保控制系统始终处于良好的运行状态，为核电站的安全稳定运行保驾护航。

3. 组态转换方法

组态转换方法涵盖以下四个关键步骤：首先进行逻辑图及其关联文件的导出操作；接着开展 XML 文件的解析工作，从中提取组态信息；然后对 Visio 文件进行解析，以还原逻辑图的图形化呈现；最后依据解析所得的数据，生成适用于虚拟 DCS [4]系统的组态文件。组态转换步骤如图 3 所示。

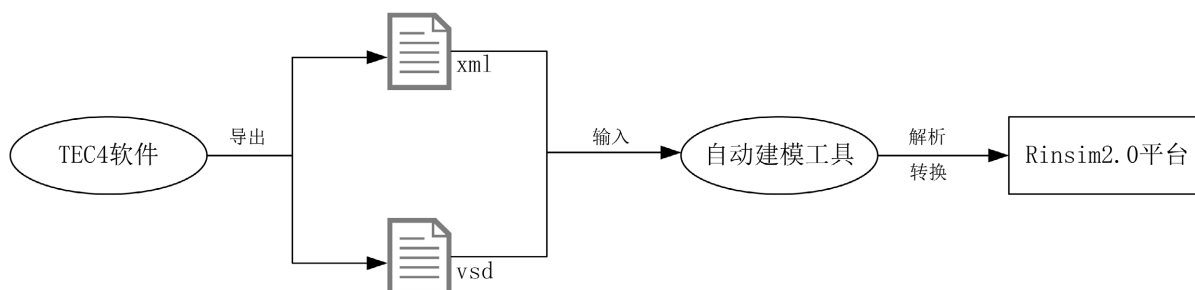


Figure 3. Key steps of configuration transformation

图 3. 组态转换关键步骤

3.1. 导出逻辑图相关文件

TEC4 软件具备将逻辑图导出为文件的功能，这是实现组态转换的数据基础。每张逻辑图对应两个文件：xml 文件和 vsd 文件。xml 文件存储了 sql server 数据库中的组态信息，这些组态信息是控制系统逻辑的核心数据，涵盖了数据类型定义、功能块定义、逻辑图功能块连接关系等多个方面，它们详细描述了控制系统的行为和功能实现方式；vsd 文件则包含了逻辑图的图形信息，如形状、坐标等，这些图形信息对于准确还原逻辑图的可视化布局至关重要，使得在组态转换过程中不仅能够获取功能块和连接关系的逻辑数据，还能够重现逻辑图在 TEC4 中的直观展示效果。

具体来说，在导出过程中，TEC4 会将逻辑图中的各个功能块及其属性、功能块之间的连接关系等信息按照一定的结构和格式存储到 xml 文件中。例如，对于一个模拟量输入功能块，xml 文件中会记录其数据类型为模拟量输入、采样周期、量程范围、报警限值等参数；对于功能块之间的连接关系，会记录输入端口和输出端口的关联信息，包括端口名称、信号类型、连接顺序等。这些详细的组态信息为后续的组态转换提供了丰富的数据素材，使得程序能够准确地理解控制系统的逻辑架构。

与此同时，vsd 文件则以 Visio 的专有格式保存了逻辑图的图形元素和布局信息。其中，每个功能块对应一个或多个图形形状，形状的位置坐标、大小、颜色、线条样式等属性都被精确地记录下来；连接线则以特定的图形对象形式存在，记录了连接线的起点和终点坐标、线型、颜色等信息。通过解析 vsd 文件，可以获取逻辑图在图形界面中的完整呈现方式，这对于在仿真系统中以直观的方式展示控制逻辑具有重要意义，使得操作人员和工程师在使用仿真模型时能够迅速建立起与实际控制系统相同的视觉感知，提高对仿真模型的接受度和使用效果。

3.2. 解析 xml 文件

xml 文件是组态转换过程中获取组态信息的关键来源，深入解析 xml 文件能够提取出构建仿真模型所需的核心数据。其主要包含四个重要节点：diagram、symbols、connections、segments，每个节点都承载着独特的信息内容。

diagram 节点：diagram 节点是逻辑图的基本属性集合，它包含了图的名称、任务号、描述、工程路径、所在控制站、最后修改时间等信息。这些信息在组态转换过程中具有重要的参考价值。例如，图的名称和任务号可以帮助识别该逻辑图在整体控制系统中的位置和功能定位，便于在生成仿真模型时进行相应的模块划分和命名；工程路径则指示了该逻辑图所属的工程项目目录结构，有助于在复杂的核电站控制系统中建立起清晰的层级关系和组织架构；所在控制站信息明确了该逻辑图所部署的硬件控制站，这对于在仿真模型中模拟实际的控制信号传输和处理过程至关重要；最后修改时间可以用于版本控制和数据更新管理，确保所使用的组态信息是最新的，避免因使用过时数据而导致仿真模型与实际控制系统不一致的问题。

symbols 节点：symbols 节点是逻辑图中所有功能块的信息宝库，主要分为 I/O 块和算法块两类。I/O 块负责与外部设备进行信号交互，如模拟量输入输出块、数字量输入输出块等，它们是控制系统与现场设备之间的桥梁，将现场设备的信号引入控制系统并输出控制指令到现场设备；算法块则主要用于实现各种控制算法和逻辑运算，如 PID 控制块、逻辑与或非运算块、数学函数运算块等，是实现控制系统核心控制功能的关键组成部分。在 symbols 节点下，每个功能块节点 symbol 又包含了若干 Port 节点，port 节点对应着算法块的端子，端子的属性设置丰富多样，如可见性属性决定了该端子在图形界面中是否显示，这对于逻辑图的可视化编辑和展示具有重要意义；初值属性为功能块的初始运行状态提供了基准值，在控制系统启动或复位时起到关键作用；信号取反属性可以改变信号的逻辑状态或物理量方向，为实现灵活多样的控制逻辑提供了便利。通过对 symbols 节点的全面解析，可以准确获取逻辑图中所有功能块的类型、参数配置和端子信息，为在仿真模型中精确重现这些功能块奠定了坚实基础。

connections 节点：connections 节点详细记录了图内各功能块之间的连接关系以及本图与其他逻辑图之间的信号传递关系。其中，connection 节点描述了逻辑图内部功能块之间的信号连接，包括输入端口和输出端口的关联信息，如连接的起始功能块和终止功能块、起始端口和终止端口的名称、信号类型和数据流向等，这些连接关系构成了控制系统内部的信号传输网络，决定了控制信号在各个功能块之间的流动路径和交互方式；global Connection 则涉及本图与其他逻辑图之间的信号传递，它定义了跨逻辑图的信号接口，使得不同逻辑图能够相互协作，共同完成复杂的控制任务。在组态转换过程中，解析 connections 节点可以清晰地还原逻辑图的内部连接结构和外部信号接口，确保仿真模型中的信号流向与实际控制系统保持一致，从而实现对整个控制系统逻辑的准确模拟。

segments 节点：segments 节点包含了与本图有信号传递关系的所有其他图的任务号。这一信息有助于在组态转换时构建整个控制系统中不同逻辑图之间的关联关系，实现对整个核电站控制系统完整模型的拼接和整合。通过 segments 节点，可以确定哪些逻辑图与当前逻辑图存在信号交互，进而追溯到相应的逻辑图文件，将其纳入到整体的建模范围中，确保生成的仿真模型能够涵盖整个控制系统的全部功能和逻辑交互，避免出现模型的遗漏和不完整情况。

3.3. 解析 visio 文件

在获取了 xml 文件中的组态信息后，为了完整地还原逻辑图中的功能块和连接线的分布与连接情况，需要使用 python 的 win32com 库解析 visio 文件。win32com 库提供了一种与 Visio 应用程序进行交互的接口，使得 Python 脚本能够操作 Visio 文件中的各种对象，如形状(shape)、线条(line)等。

在 visio 文件中，xml 文件中的每一个 symbol 和 connection 都对应一个 shape 对象。这些 shape 对象具有丰富的属性和方法，可以获取其形状类型(如矩形、圆形、线条等)、位置坐标(x、y 坐标值)、尺寸大小(宽度和高度)、旋转角度、填充颜色、线条颜色和样式等详细的图形信息。通过 symbol 和 connection 的 64 位 UID 码，可以将其与对应的 shape 对象进行精准关联，从而实现从组态信息到图形信息的映射。

在解析 visio 文件的过程中，首先利用 win32com 库启动 Visio 应用程序，并打开待解析的 vsd 文件。然后，通过遍历 visio 文件中的所有形状对象，根据 UID 码匹配 xml 文件中的 symbol 和 connection 信息，将获取到的形状对象的图形属性与组态信息进行整合。例如，对于一个功能块 symbol 对应的 shape 对象，可以将其位置坐标和尺寸大小信息与功能块的类型、参数等组态信息关联起来，生成带有完整图形位置和功能属性的模型元素；对于 connection 对应的 shape 对象(通常是线条形状)，可以提取其起点和终点坐标、线条样式等信息，并结合 xml 文件中记录的连接关系，准确地确定连接线所连接的功能块端口以及信号流向，在仿真模型中重现逻辑图中清晰、准确的连接线路布局。

通过这一过程，不仅可以获取逻辑图中功能块和连接线的逻辑关系，还能够完整地还原其在图形界

面中的分布和连接形态，为在仿真系统中以直观、准确的方式展示控制系统逻辑提供了有力支持，使得仿真模型不仅在功能上与实际控制系统一致，而且在视觉效果上也高度相似，方便操作人员和工程师进行观察、分析和操作。

3.4. 生成仿真系统组态文件

在成功解析 xml 文件和 visio 文件，获取了完整的原始组态数据之后，接下来的关键步骤是基于中核武汉 rinsim2.0 平台的组态规则生成仿真系统组态文件。这一步骤是整个组态转换技术与实际应用紧密结合的核心环节，其目的是将从 T2000 系统中提取的组态信息按照 rinsim2.0 平台的格式和要求进行转换和组织，生成能够被该仿真平台识别、解析并运行的组态文件，从而实现 T2000 系统逻辑在 rinsim2.0 仿真环境中的准确重现。

中核武汉 rinsim2.0 平台作为一种专业的核电站仿真平台，具有其独特的组态规则和模型结构要求。它通常采用分层、模块化的模型架构，将整个核电站的控制系统划分为多个功能模块和子系统，每个模块和子系统都有对应的组态文件来定义其内部的功能块、连接关系以及与其他模块的接口。为了生成符合 rinsim2.0 平台要求的组态文件，需要对 T2000 系统的组态数据进行一系列的转换和映射操作。

首先，需要对从 T2000 系统获取的功能块数据进行类型匹配和参数转换。由于 T2000 系统和 rinsim2.0 平台在功能块的类型定义和参数设置上可能存在差异，因此需要建立一个映射关系表，将 T2000 系统中的功能块类型映射到 rinsim2.0 平台对应的功能块类型，并对功能块的参数进行相应的单位转换、量程调整、数据格式转换等操作，以确保功能块在仿真模型中的行为与实际控制系统中保持一致。

其次，对于功能块之间的连接关系，需要根据 rinsim2.0 平台的连接规则进行重新组织和定义。这可能涉及到对连接信号的命名规范调整、信号类型匹配检查、连接顺序优化等方面的工作。在 rinsim2.0 平台中，连接关系的定义通常需要遵循特定的语法和格式，如采用特定的连接指令或标签来标识信号的源和目标端口，因此需要将 T2000 系统中提取的连接关系数据转换为符合这些要求的格式。

此外，还需要根据 rinsim2.0 平台的模块划分原则，对整个控制系统的逻辑图进行模块化拆分和整合。将功能相关、物理位置相近或属于同一子系统的逻辑图划分为一个模块，并为每个模块生成独立的组态文件，同时定义模块之间的接口和信号交互关系，以实现整个仿真模型的层次化管理和高效运行。

在整个组态文件生成过程中，还需要充分考虑 rinsim2.0 平台的仿真特性，如仿真步长、数值精度、实时性要求等，对组态数据进行适当的调整和优化。例如，根据 rinsim2.0 平台的仿真步长设置，对功能块的采样周期进行调整，以保证仿真结果的准确性和稳定性；对某些高精度模拟量信号进行数据精度转换，以适应 rinsim2.0 平台的数值计算要求。

最终生成的仿真系统组态文件包含了 rinsim2.0 平台所需的全部模型信息，包括功能模块定义、功能块配置、连接关系矩阵、模块接口描述等内容。这些组态文件可以直接加载到 rinsim2.0 仿真平台上，经过平台的解析和编译后，生成可执行的仿真模型，实现对西门子 T2000 系统控制逻辑的精确模拟，为核电站的运行培训、故障演练、控制策略优化等工作提供真实可靠的仿真环境。

4. 组态转换技术通用性研究

4.1. 不同 DCS 系统组态解析

在国内各核电站 DCS 系统中，功能块图(FBD-Function Block Diagram)凭借其清晰的图形化表示和强大的功能，广泛应用于模拟量控制和复杂控制逻辑的实现。它在核岛和常规岛的连续控制过程中发挥着关键作用，例如对温度、压力、流量等关键参数进行精确的 PID 控制。FBD 通过将各种功能块(如运算块、逻辑块、控制块等)以图形化的方式连接，直观地展示了数据流和控制流的走向。这种特性不仅便于

工程师理解和维护复杂的控制逻辑,还支持模块化设计和功能复用,提高了系统的可扩展性和可维护性。例如,西屋 Ovation 系统、和利时 MACS 系统、国能智深 EDPF-NU 系统以及西门子 T2000 系统均采用了 FBD 类型的组态。

FBD 图的组成结构可以分为以下四个关键组件:

1) 功能块:作为 FBD 的核心,功能块是预定义的软件模块,用于实现特定的控制逻辑和操作。它们是构建复杂控制策略的基本单元。

2) 连线:连线连接各个功能块,定义了信号的流向和数据的传输路径。它们确保功能块之间的输入输出信号能够正确地交互,是实现数据流和控制流的关键。

3) 输入和输出连接点:这些连接点充当功能块与其他组件或外部设备进行信号交换的接口,确保系统的各个部分能够协同工作。

4) 注释和标签:这些元素用于在 FBD 图中添加说明性文字,提高图的可读性和可维护性。注释和标签可以帮助工程师快速理解和维护复杂的控制逻辑。

在进行 FBD 图的转换时,首先需要在结构化的组态文件中识别并分析出上述各组件对应的标签节点。然后,针对不同类型的组件提取相应的信息,如表 1 所示。

Table 1. Component information table of FBD
表 1. FBD 各组件信息表

组件分类	子类	图形信息	组态信息
功能块	逻辑运算 算术运算 PID 运算 信号转换	横、纵坐标	功能块类型、图内编号、参数配置(包括各参数名称、类型、初值等)
连线	连线	路径坐标	输入功能块编号、输出功能块编号、输入功能块连接端子、输出功能块连接端子
输入输出节点	图间连接点 图内连接点 外部系统连接点	横、纵坐标	连接点类型、图内编号、连接点名称
注释和标签	文本	横、纵坐标	文本内容

为了实现不同 DCS 系统之间的通用转换,可以针对功能块、连线、输入输出点和注释标签这四种组件,分别开发 Block、Connection、InputOutput 和 Text 四个类。这些类能够从节点信息中提取图形信息和组态信息。尽管不同 DCS 系统的原始组态信息组织方式存在差异,但通常都包含上述关键信息。因此,针对不同的 DCS 系统,只需调整这四个类的实现细节,即可实现高效的组态解析。这种通用组态解析技术不仅提高了转换的准确性和效率,还降低了因系统差异带来的转换复杂性。

4.2. 通用仿真平台转换方法

PLCopen XML 是一种标准化的格式,用于在不同的 PLC 编程工具之间交换和存储程序。将功能块图(FBD)转换为 PLCopen XML 格式是一个涉及编程和数据转换的过程。以下是将 FBD 图转换为 PLCopen XML 格式的基本步骤:

1) 层次结构映射

FBD 通常具有层次结构,包含多个功能块和子系统。在 PLCopen XML 中,利用<Pou>元素构建层次。创建一个<Pou>元素表示一个程序或功能块,Name 属性为程序或功能块名称,Type 属性定义其类型。

在<Pou>内, 通过<Instances>和<Connections>子元素分别包含功能块实例和连接。

2) 功能块映射

在 FBD 中, 功能块是基本的逻辑单元, 每个功能块都有其特定的功能和属性。在映射到 PLCopenXML 模型时, 需将 FBD 中的功能块映射为 XML 中的<FB>元素。具体来说, 为每个 FBD 功能块创建一个<FB>元素, 并设置其 Name 属性为功能块的名称, Type 属性为功能块的类型。

3) 连接映射

功能块之间的连接定义了数据的流向和逻辑关系。在 PLCopen XML 中, 用<Connection>元素表示连接。为每条连接创建一个<Connection>元素, Source 属性为连接的起始端点(格式为“功能块名称.输出变量名”), Target 属性为结束端点(格式为“功能块名称.输入变量名”)。

4) 变量映射

功能块的输入输出变量是其与外部进行数据交互的关键。对于输入变量, 在<FB>元素内创建<Variables>子元素, 再在其中添加<Variable>元素, 将 Name 属性设为输入变量名, Type 属性设为变量类型, Direction 属性设为“IN”。输出变量的映射类似, 只是将 Direction 属性设为“OUT”。

从 DCS 系统解析的组态信息, 按照以上映射关系, 通过编码生成符合 IEC61131-3 标准的 PLCopen XML 文件, 可实现 FBD 格式 DCS 组态到 PLCopen XML 模型的转换, 为通用仿真平台提供标准化的数据格式, 促进系统间的集成与协同工作。

5. 组态转换技术的优势与应用价值

5.1. 提高建模效率

组态转换技术通过程序化手段, 自动完成从 TEC4 软件导出文件到 rinsim2.0 仿真模型的转换, 大大缩短了建模周期, 提高了工作效率。以中等规模核电站控制系统为例, 手动建模可能需要数周甚至数月, 而组态转换技术可在数小时内完成模型初步生成。

5.2. 提升建模准确性

组态转换技术基于对 TEC4 组态文件的精确解析, 直接提取原始组态数据, 避免了人为解读的中间环节, 从而提高了建模的准确性。程序严格按照预定义规则进行数据处理, 确保提取数据与原始组态信息一致, 减少了模型调试和修正的工作量。

5.3. 促进信息共享与集成

组态转换技术实现了西门子 T2000 系统与中核武汉 rinsim2.0 平台之间的信息共享与集成。T2000 系统的组态信息可快速准确地转化为 rinsim2.0 平台可识别的仿真模型, 无需繁琐的数据重新录入和格式转换, 使得控制系统设计数据在不同部门和平台之间高效流通。

5.4. 支持核电站数字孪生的发展

组态转换技术为核电站的智能化发展提供了支持。基于准确的仿真模型, 可开发孪生核电站, 为核电数字孪生信息处理技术、可视化运维技术、设备性能检测与健康管理、核电运行保障[5]等研究课题提供了基础。

6. 结论

在基于西门子 T2000 系统的 DCS 组态转换技术的研究中, 通过实际案例验证了该技术的有效性和可靠性。对比分析了化容系统低压下泄控制阀在 T2000 系统原始组态图(如图 4 所示)与经转换后的虚拟 DCS 组态图(如图 5 所示)。

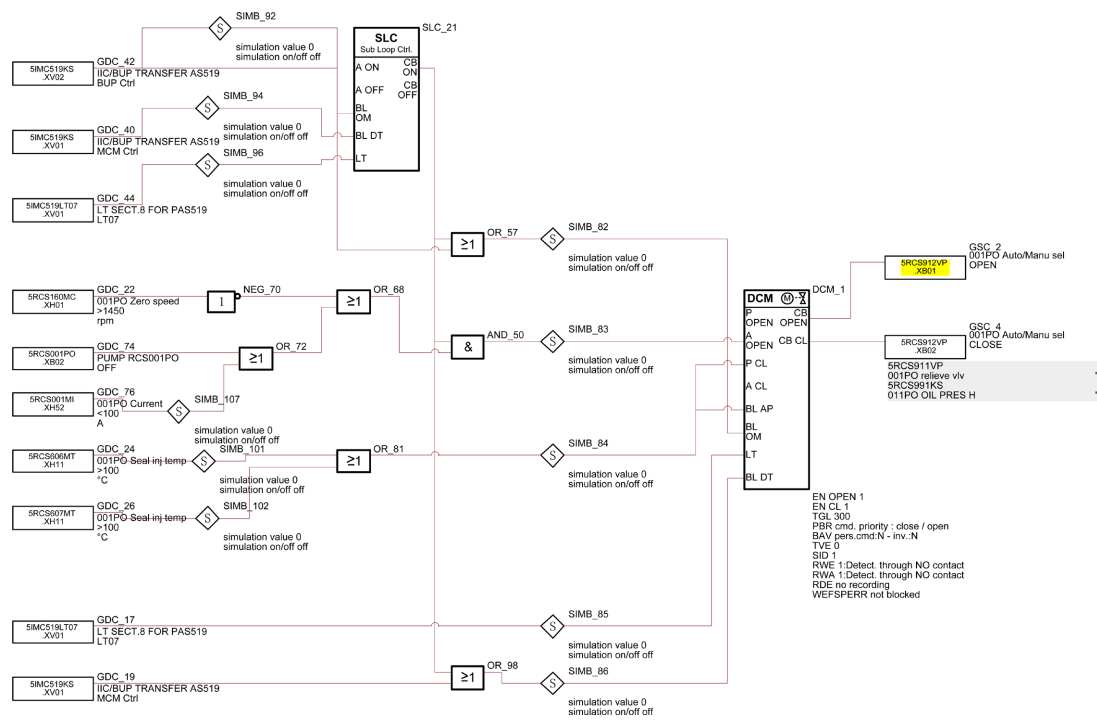


Figure 4. Original configuration diagram of the T2000 system
图 4. T2000 系统原始组态图

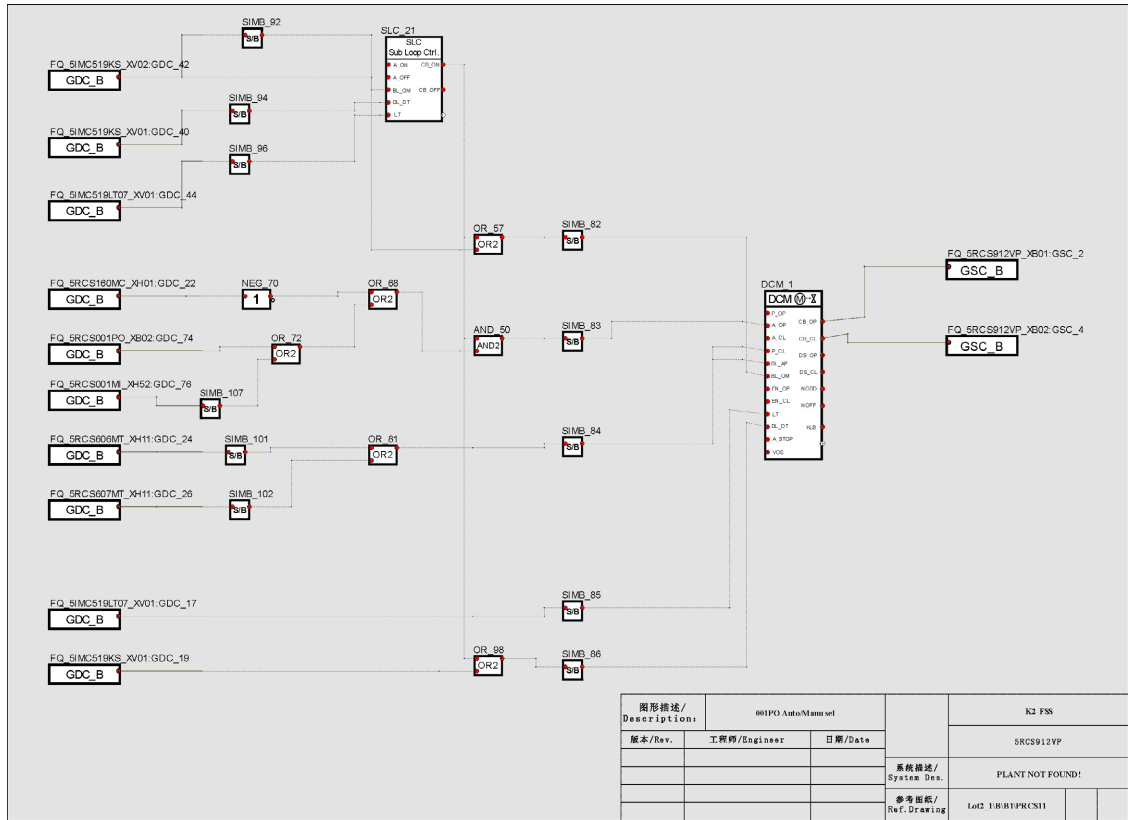


Figure 5. Virtual DCS configuration diagram
图 5. 虚拟 DCS 组态图

结果表明,自动建模技术能够精准地将原始逻辑图中的功能块及其连接关系完整复现于仿真图中,两者在拓扑结构、参数配置以及信号流向等关键方面保持高度一致。这一对比充分彰显了自动转换技术在还原原始控制系统逻辑方面的卓越能力,凸显了其显著的优势和重要的应用价值。它不仅有效提高了建模效率和准确性,还促进了信息共享与集成,有力支持了核电站的智能化发展。通过在仿真平台上构建 1:1 的仿真系统,该技术为核电站的培训、调试验证和故障诊断等工作提供了坚实的技术支撑。随着相关技术的不断发展和完善,该自动建模技术有望在未来的核电站建设与运营中发挥更为关键的作用,推动核电站向更智能、更安全、更高效的未来发展模式迈进。

参考文献

- [1] 王建淮. 西门子电厂控制系统 SPPA-T2000 介绍[J]. 中国建材科技, 2015(z1): 140-141.
- [2] 王云伟, 冷杉, 刘志声, 等. 虚拟 TXP 控制系统软件设计与开发[J]. 核动力工程, 2008, 29(6): 128-131.
- [3] 刘晓强, 石兆元. 1000 MW 核电汽轮机控制系统与 DCS 通讯解决方案[J]. 热力透平, 2020, 49(2): 158-161.
- [4] 冷杉. 论虚拟分散控制系统技术[J]. 中国电力, 2003, 36(2): 53-56.
- [5] 潘保林, 邹金强, 毛志新, 吴航. 数字孪生技术在核电站的应用分析[J]. 中国核电, 2020, 13(5): 587-591.