

核电图纸现状及拓扑应用浅析

Analysis of the Current Situation and Topological Application of Nuclear Power Drawings

汤立宏¹ 何善红¹ 王强² 董晨辉¹ 杨雅慧¹

Lihong Tang¹ Shanhong He¹ Qiang Wang² Chenhui Dong¹ Yahui Yang¹

1. 苏州热工研究院有限公司 中国·江苏 苏州 215000

2. 阳江核电有限公司 中国·广东 阳江 529500

1. Suzhou Nuclear Power Research Institute Co., Ltd., Suzhou, Jiangsu, 215000, China

2. Yangjiang Nuclear Power Co., Ltd., Yangjiang, Guangdong, 529500, China

摘要: 随着中国工业领域智能化、数字化程度的逐步提升, 针对目前核电图纸应用领域还存在的智能化程度低、掌握时间长、人员效率低下等问题提出解决方案。首先, 根据图纸应用现状, 分析出图纸使用过程中存在的具体问题; 根据问题进行分析, 以数字图纸为基础, 引入拓扑概念, 利用图纸中的各个节点建立拓扑连接关系, 建立有向图; 利用对有向图的计算, 开发一系列应用, 推演出基于信号流的全链路信号图, 实现图纸应用效率的倍增。

Abstract: With the gradual improvement of intelligence and digitization in China's industrial field, solutions are proposed to address the pain points of low intelligence, long mastery time, and low personnel efficiency in the current application field of nuclear power drawings. Firstly, based on the current application status of drawings, analyze the specific problems that exist during the use of drawings; Analyze the problem based on digital drawings, introduce topological concepts, establish topological connections using various nodes in the drawings, and establish a directed graph; By utilizing the calculation of directed graphs, a series of applications are developed to derive a full link signal graph based on signal flow, achieving a doubling of the efficiency of drawing application.

关键词: 智能分析; 智能推演; 拓扑提取; 有向图

Keywords: intelligent analysis; intelligent deduction; topology extraction; directed graph

DOI: 10.12346/etr.v6i3.9187

1 引言

中国核能行业协会 2023 年 2 月 2 日消息, 截至 2022 年 12 月 31 日, 中国运行核电机组共 55 台 (不含台湾地区), 装机容量为 56985.74MWe (额定装机容量)。2022 年 1—12 月, 全国累计发电量为 83886.3 亿千瓦时, 运行核电机组累计发电量为 4177.86 亿千瓦时, 占全国累计发电量的 4.98%。全国运行核电机组累计发电量为 4177.86 亿千瓦时, 比 2021 年同期上升了 2.52%; 累计上网电量为 3917.90 亿千瓦时, 比 2021 年同期上升了 2.45%。在双碳目标下核电迎来新的发展, 但是核电的安全性也同样迎来了挑战。

单台核电机组包含数十万页图纸, 目前所有图纸均由人工识别使用, 无辅助工具, 且绝大部分图纸为扫描版, 存在

不清晰、无法编辑等缺点。现场故障发生后人员需要花费大量时间手动查阅大量图纸, 不仅效率低下还可能遗漏信号, 造成人为失误, 直接影响核安全。仪控信号的分析是核电厂故障分析中的重要一环。核电传统的图纸中仪控信号在不同图纸的反复跳转, 并进行复杂的逻辑计算, 梳理一个信号的影响可能需要查阅数十页图纸, 给人员分析故障带来巨大挑战。

以核电厂跳机跳堆分析为例, 分析过程需要对流程图、组态图、逻辑图、模拟图、接线图在内的各种计量对象连接关系进行识读、连线、重绘等大量手动工作, 故障节点查找甚至需要数日之久, 极大制约了核电厂数字化水平。在核安全要求愈加严格的形势下, 在面对运营机组实现“零”停机

【作者简介】汤立宏 (1994-), 男, 中国江西吉安人, 本科, 工程师, 从事核电工程改造及其数字化转型研究。

停堆、避免非计划强迫损失的目标下，急需一种可以协助人员进行故障分析、信号提取的图纸分析工具，实现快速提取、推演信号链路功能，提高日常使用效率。

核电多个领域，如图纸修改、故障分析、隔离、电气负荷及停电分析等链路分析工作完全依靠人工，对人员要求较高且准确度不高，存在多种缺陷：

①完全依靠人工搜索，要求人员对文档应用体系高度掌握；

②完全依靠人工识图，要求人员对各种图纸内容和识图技能高度掌握；

③完全依靠人工手动分析图纸，要求人员对不同种类图纸之间的关联关系高度掌握；

④依靠人工流程，导致效率低下。

在核安全要求愈加严格的形势下，在面对运营机组实现“零”停机停堆、避免非计划强迫损失的目标下，现急需一种可以协助人员进行故障分析、信号提取的图纸分析工具，实现快速提取、推演，提高日常使用效率的同时，为数字化、智能化打下基础。

为解决上述问题存在下述主要难点：①图纸结构复杂，无法直接用计算机技术处理；②不同集合的链路信号存在交叉，难以推演出作业所需的全链路信号图；③推演出的全链路信号图无法保证清晰、简洁、明了。

2 图纸结构

在电器、电子线路等图纸中，为了表现各连通部分的相互关系，通常将各连通部分集中在一张图纸上进行表示^[1]。对于复杂的电路，由于其包含的连通子图众多，每一个物理连接都在图纸上都对应一逻辑连接，导致图纸变得异常复杂^[1]。核电逻辑图同工业电子线路等图纸类似，复杂且包含了海量连通关系，分布在不同页图纸上，导致图纸更加复杂、难懂。

论文研究内容为逻辑图，属于核电站最重要的一类图纸之一，最常用于逻辑分析、故障分析，其基本样式如图1所示。

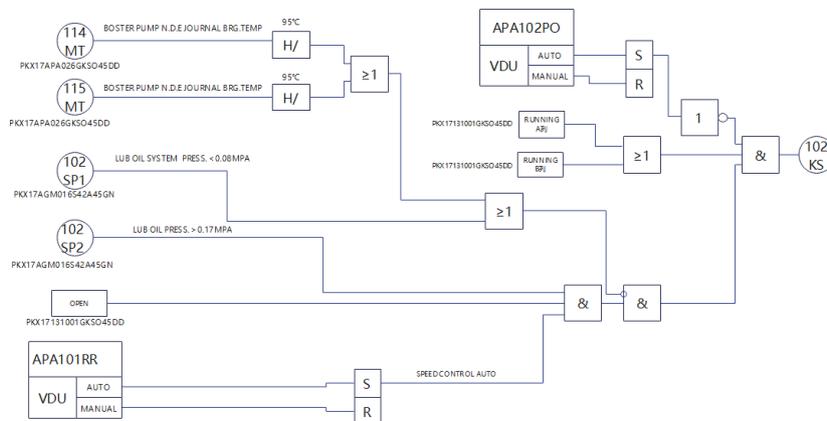


图1 逻辑图样式

逻辑图最左侧为信号来源，多为设备编码、其他页检索信号；中间为逻辑处理模块，多为与门、或门、非门，用于表示对逻辑信号的处理过程，是逻辑图中的核心内容，同时也是最复杂的功能，是信号分析的基础；最右侧为信号输出端，多为设备编码或至其他页的检索信号；利用最左侧和最右侧的检索信号，与其他页逻辑图相连，实现全系统逻辑图的拼接。

一份完整的逻辑图中存在多个集合的逻辑链路，不同集合的逻辑链路之间不存在相连关系；同一集合的逻辑链路中任意两点之间必然通过线路连接，图1是表示与102KS相关的完整逻辑信号链路集合，一份逻辑图中可能存在多个类似集合，同一集合又可能分割在不同的逻辑图中。由于逻辑链路极其复杂且绘图过程中被分割在不同页逻辑图中，在不同页逻辑图中通过检索信号连接，不同链路集合的连线相互缠绕，导致效率低下、错误率高。

3 图纸转化及处理

3.1 拓扑结构

拓扑结构常用于计算机网络领域，计算机网络拓扑结构是一个复杂的网络结构^[2]。网络拓扑结构是指把网络电缆等各种传输媒体的物理连接等物理布局特征，通过借用几何学中的点与线这两种最基本的图形元素描述，抽象地来讨论网络系统中各个端点相互连接的方法、形式与几何形状，可表示出网络服务器、工作站、网络设备的网络配置和相互之间的连接。

本课题引入拓扑结构概念，将核电图纸转换为具有拓扑结构的结构化数据，便于计算机处理。借用几何学中的点与线这两种最基本的图形元素描述将逻辑图中的所有图例相互连接，例如与门、或门、非门、检索信号，所有图例抽象成一个无物理含义的节点。将节点、连接线及其之间的连接关系加以转换和定义，可以将复杂的逻辑图转换成计算机可处理的有向图。利用计算机对有向图的计算和推演，可以替代人力进行逻辑图的逻辑分析等工作。

3.2 有向图

有向图是表征物件与物件之间的连接关系，一个有向图 D 是指一个有序三元组 $V(D), A(D), \psi(D)$ ，其中 $\psi(D)$ 为关联函数，它使 $A(D)$ 中的每一个元素（称为有向边或弧）对应于 $V(D)$ 中的一个有序元素（称为顶点或点）对^[3]。从图论学表示，可以表征多个节点之间的有向连接关系，如果它是连通的，那么它的任意两个顶点之间必存在一条路径，通过这一路径可从一个顶点到达另一个顶点；若从 v 可以到达 u，并不蕴涵也存在从 v 到 u 的路径，即 v 和 u 之间是非互相可达的，如图 2 所示。

从图论学角度，核电厂核心一类图纸中的逻辑图、模拟图、流程图、接线图、组态图等均是典型的有向图，它内部各种节点之间的连接关系都是有向的信号流，仅需要将物理图纸通过处理转换为有向图，即可实现图纸的推演应用研究。

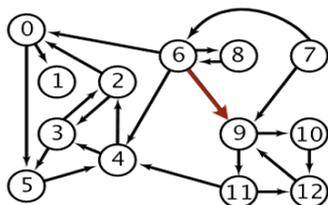


图 2 有向图

3.3 有向图的存储

邻接表是图的一种链式存储结构。邻接表存储图是将图中的所有顶点存储到顺序表或链表中，同时为各个顶点配备一个单链表，用来存储和当顶点有直接关联的边或者弧（弧的弧尾是该顶点），如图 3 所示。

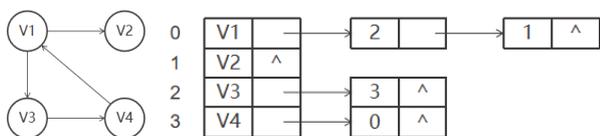


图 3 邻接表

邻接表中存储边或弧的方法，就是存储边或弧另一端顶点在顺序表中的位置下标。以顶点 V1 为例，它对应的单链表中有两个结点，存储的值分别是 2 和 1。2 是 V3 顶点在顺序表中的位置下标，存储 2 的结点就表示 $\langle V1, V3 \rangle$ 这条弧；同理，1 是 V2 顶点在顺序表中的位置下标，存储 1 的结点就表示 $\langle V1, V2 \rangle$ 这条弧。

V2: 由于图中不存在以 V2 为弧尾的弧，所以不需要为 V2 构建链表；

V3: 以 V3 为弧尾的弧只有 $\langle V3, V4 \rangle$ ，V4 在顺序表对应的下标为 3，因此单链表中只有 1 个结点，结点中存

储 3 来表示 $\langle V3, V4 \rangle$ ；

V4: 以 V4 为弧尾的弧只有 $\langle V4, V1 \rangle$ ，V1 在顺序表对应的下标为 0，因此单链表中只有 1 个结点，结点中存储 0 来表示 $\langle V4, V1 \rangle$ 。

4 智能推演

智能推演是将分布在图纸中相同集合的逻辑链路从图中单独提取出来的技术，选中目标节点自动提取出其所在的完整逻辑链路集合。推演技术的关键在于计算出图中有哪些点，哪些点之间是连通的。在图中，用顶点表示活动，用有向边表示活动间的先后关系，这种有向图称为 AOV 网（Activity On Vertex Network）^[4]。将 AOV 网中的各个顶点排成一个线性序列，使各顶点在序列中保持其在图中体现出来的先后关系，这个过程称为拓扑排序。推演计算的核心就是拓扑排序^[4]。

深度优先遍历算法（Depth First Traversal）和广度优先遍历算法（Breadth First Traversal）均属于排序算法，广度优先遍历在遍历的时候不需要全部遍历，搜索到符合条件的就立即终止，而深度优先遍历则会遍历所有的结点，深度优先遍历用来解那种需要得到全部解的题，而广度优先遍历则是用来求最短路径的，到达的每一个结点都是最短路径。

以深度优先遍历（Depth First Traversal）的方法为基础算法，在遍历的过程中对每个点加入相应的标志，找出回路^[5]。利用堆栈进行深度优先遍历的算法复杂度为线性的 $O(n+e)$ ，其中 n 为顶点数，e 为边数^[5]。

全拓扑排序采用了邻接表作为图的存储结构，通过深度优先搜索获得序列，利用栈结构存储无前驱的顶点，利用队列结构存储所有可能的待检测的序列，利用穷举法来判断是否符合拓扑排序的要求，最终求出所有符合要求的解。

①统计所有入度为 0 的顶点，穷举出由这些顶点开始所能构造的所有可能的顶点序列；

②判断当前序列是否是合法的拓扑排序，如果是，则输出该序列，转①；

③否则转②，直到所有可能序列都完成检测为止。

以图 4 为例，从节点 0 出发，0 有 3 个可以去点分别是 2、5、1，随便选一个节点 2；

2 无路可去，把 2 加进栈后，返回上一个分支 0；

0 还有两个可以去点，随便选一个节点 5；

5 可以去 2，但 2 已标记，不管；

把 5 加进栈 A，返回上一个分支 0；

如此往复则可以排列出如图右侧序列的所有节点排序图。

全拓扑排序函数代码如下：

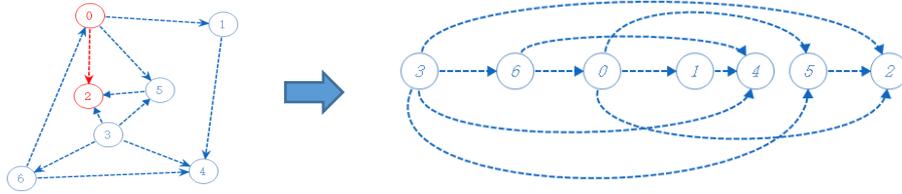


图4 拓扑排序法

Static void topSort2 (Graph g, myQueue &pre) //g 为有向图, pre 为用来存储拓扑序列的队列

```
{
    if ( g.vertexNum == 1 ) // 如果只剩一条边, 则不需要判断直接输出。
```

```
{
    pre.print ( ) ;
    cout << g.dat[0].vertex +1 << endl;
}
```

```
else
```

```
{
```

```
for ( int i =0; i < g.vertexNum; i++)
```

```
{
```

```
if ( g.dat[i].in==0 ) // 寻找入度为 0 的即无前驱的结点。
```

```
{
```

```
Graph m ( g ) ;// 生成临时图结构来存储中间判断结果
```

```
myQueue queue ( pre ) ;// 将其前驱结点放入队列
```

```
queue.push ( g.dat[i].vertex +1 ) ;// 同时将当前结点入队
```

```
m.remove ( g.dat[i].vertex ) ;// 从 m 临时结构中移除其前
```

驱结点

```
topSort2 ( m, queue ) ;// 递归调用 top-Sort2 函数。
```

```
}
```

```
}
```

```
}
```

```
}
```

5 结语

目前核电领域缺少可以辅助作业人员利用图纸的智能化工具, 导致作业效率较低, 错误率较高, 影响了核电长期发展和安全性。利用有向图结构处理传统图纸数据, 结合拓扑排序算法, 可以智能推演出基于信号流的全链路信号图, 有利于图纸应用领域的效能提升, 可以利用此技术在新员工培

训、运行学习、故障推演、维修演练等场景中, 并逐步可推广至非核领域。

通过调研核电站、变电站、石油化工企业, 目前针对组态图 / 逻辑图 / 模拟图 / 接线图 / 单线图 / 流程图 / IOlist 等多种工业图纸的潜在应用需求巨大:

①自动批量提取多张图纸中的重要信息, 如图名、页码、图纸号、版本、属性、点名、坐标等, 并将其整理后汇总形成 Excel/xml 等便于其他软件读取的形式, 根据用户需求对以上信息进行二次分类和解析。

②根据已有的上级、下级连接关系或数据, 从某个设备 / 某个点出发搜索相邻的上、下级设备 / 点名。分析拓扑图的规模以及各类设备 / 点的位置, 根据给定的缩放因子确定图形大小, 自动绘制相应的拓扑图。

③从关联的角度对图纸数据的关联与检索的方法进行研究, 通过关联查询搜索满足要求的图纸数据节点, 实现对图纸数据的检索。利用节点间的关联性和基于数据库间数据表间的关联性, 实现精确检索节点所在图纸的功能, 同时实现图纸间的自动跳转。

④将设备 / 节点的属性、值、文件等信息与图纸关联, 在图纸中 / 重构的拓扑图中可以快速选择并跳转到设备 / 节点所对应的属性及文件信息, 便于用户查看。

参考文献

- [1] 刘晓平.多连通图的参数化表示与分解算法[N].工程图学学报,2009(2).
- [2] 程倩.计算机网络拓扑结构的分析及选择[J].电子技术与软件工程,2013(16):60.
- [3] 卜月华,王维凡,吕新忠.图论及其应用[M].南京:东南大学出版社,2015.
- [4] 薛春艳.基于邻接表结构的拓扑排序的全序列算法研究[J].现代计算机,2016(7):74-76.
- [5] 倪轺鑫,金乃咏.基于有向图深度优先遍历的组合反馈环路检测算法[J].计算机应用与软件,2008,25(6):76.