

文章编号: 1671-6612 (2020) 01-053-04

数据中心高压冷水机组定性故障诊断模型构建

李勇伟¹ 郑庆华¹ 孙艳军¹ 杨蕊²

(1.中国移动通信集团山西有限公司数据中心 太原 030000 ;

2.山西省农业科学院农业科技信息研究所 太原 030031)

【摘要】 为提高数据中心空调系统的可靠性和安全性, 全面掌握系统各部件的内在复杂的因果关系, 采用定性的图论方法构建系统分层有向图模型, 利用符号有向图和论域有向图描述系统部件的结构和影响关系。以高压离心式冷水机组为例, 构建模型并进行故障推理验证。结果表明, 该模型层次明确、准确有效, 实现了系统潜在故障实时预测和诊断, 能够为系统运行提供指导。

【关键词】 符号有向图; 分层有向图; 数据中心; 离心式冷水机组; 故障诊断
中图分类号 TB657.2 文献标识码 A

Construction of Qualitative Fault Diagnosis Model for Data Center High Voltage Chiller

Li Yongwei¹ Zheng Qinghua¹ Sun Yanjun¹ Yang Rui²

(1.Data Center, Shanxi Branch, China Mobile Communications Group, Taiyuan, 030000;

2.Institute of Agricultural Information, Shanxi Academy of Agricultural Sciences, Taiyuan, 030031)

【Abstract】 In order to improve the reliability and safety of the data center air conditioning system, and comprehensively grasp the inherent complex causal relationship of the various components of the system, the qualitative graph theory method was proposed to construct hierarchical directed graph model of the system. The structure and influence relationship of system components were described by the signed directed graph and domain directed graph. Taking the high voltage centrifugal chiller as an example, the model was constructed and fault reasoning is verified. The results show that the model was clear, accurate and effective, which can realize the real-time prediction and diagnosis of potential faults of the system, and can provide guidance for system operation.

【Keywords】 signed directed graph; hierarchical directed graph; data center; centrifugal chiller; fault diagnosis

作者(通讯作者)简介: 李勇伟(1985.10-), 男, 硕士研究生, 工程师, E-mail: 2011@139.com

收稿日期: 2019-03-27

0 引言

互联网应用日益激增, 网络的稳定性和持续性影响用户的体验效果。数据中心作为互联网支撑的基础载体, 机房设备的正常与否制约着网络的运行状态。机房负载及外部天气环境实时变化; 高压冷水机组作为空调系统的核心制冷系统, 对持续控制机房温度参数在合理区间起到了至关重要的作用。

空调系统对高压冷水机组的稳定性要求极高, 当高压冷水机组的某个部件失效或发生故障时, 轻则使系统局部处于异常运行状态, 重则使整个系统停运, 造成不可挽回的重大经济损失。因此, 为保障数据中心安全可靠地运行, 同时实现经济效益最大化, 迫切需要建立一套高压冷水机组故障诊断模型, 对数据中心空调系统实际生产过程中可能发生的故

障准确高效实时地诊断和预测,以提高数据中心的安全性和经济效益^[1]。

本文采用一种定性的图论方法分层有向图模型进行建模,符号有向图(Signed Directed Graph, SDG)能够利用定性的知识描述变量和设备部件间复杂的影响关系和大量潜在因果关系,该模型具有较强的完整性、适应性和鲁棒性^[2-5]。针对高压冷水机组特定的系统结构和运行工况进行分析,首先建立描述其工作原理的符号有向图,在其基础上,利用基于可达性的分层方法构建分层有向图模型。该模型能够根据图的传播关系分层次描述,故障诊断推理方向为单向传播,能够减少故障源搜索的空间。

1 图论模型

1.1 分层有向图模型

本文采用文献^[3-5]提出的改进分层有向图模型的定义。

定义 1 系统 S 的分层有向图模型 G 的数学表述为: $G=(G_S, G_T)$ 。

其中, 分层有向图模型 G 由二元组符号有向图 G_S 和论域有向图 G_T 构成。

符号有向图 G_S 的三元组表述为 $G_S=(V_S, E_S, \varphi)$, V_S 表示节点集合, $V_S=\{v_i|v_i$ 为测量节点, $1 \leq i \leq n\}$, n 表示节点总数; E_S 表示支路集合, $E_S=\{e_{ij}|e_{ij}$ 代表节点 i, j 之间的有向边 $i \neq j\}$,

支路 e_{ij} 为故障从节点 i 到 j 的传播路径, 函数 φ 为支路 e_{ij} 的符号, 节点间的正影响和负影响关系分别用 “+” 和 “-” 表示。

论域有向图 G_T 的三元组表述为 $G_T=(V_T, E_T, \psi)$, V_T 表示节点集合, $V_T=\{v_h|v_h$ 为第 h 层的节点集合, h 为层数, $0 < h \leq n$; E_T 表示支路集合, $E_T=\{e_h|e_h$ 表示第 h 层和 $h+1$ 层全部节点之间的所有有向边的集合}; ψ 表示支路符号集合, $\psi=\{\varphi_h|\varphi_h$ 表示 v_h 和 v_{h+1} 节点间的所有支路 e_h 的符号集合}, 节点间的正影响用 “+” 表示, 负影响关系用 “-” 表示^[3-5]。

分层有向图模型由符号有向图模型演变而来, 建立系统 S 的符号有向图 G_S 是构建模型的关键。

模型中, G_S 具有完备性, 能够反映测量节点间的因果定性关系, G_T 反映了分层后节点间的论域关系, 描述了任一节点分层后所在的层次。

定义 2 符号有向图 G_S 的所有节点的当前状态集合组成一个样本, 则用 $\psi(v_i)$ 表示节点状态函数, $\psi(v_i): v_i \in \{+, -, 0\}$, 其中, 超过正常阈值符号 “+” 表示, 低于正常阈值用符 “-” 表示, 正常阈值范围内用 “0” 表示。

定义 3 具有样本的符号有向图 G_S 中, 假如 $\psi(v_i) \neq 0$, 则节点 v_i 称为有效节点; 如果 $\psi(v_i)\varphi(e_{i,j})\psi(v_j) = +$, 则称此支路 $e_{i,j}$ 为相容支路, 相容支路的首和尾相连组成的路径称为相容通路^[2-5]。

根据符号有向图的性质可得, 故障信息只能通过相容通路传播。

定义 4 用符号 G_n 表示一个有向图, 那么它的邻接矩阵为 A , $A=(A_{ij})_{n \times n}$, n 代表节点个数, 其中元素 A_{ij} 的数学表述为:

$$A_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{两节点间存在直接有向边} \\ 0, & \text{两节点间不存在直接有向边} \end{cases}$$

定义 5 用 G_n 表示一个有向图, 那么它的可达矩阵为 P , $P=(P_{ij})_{n \times n}$, n 代表节点个数, 其中元素 P_{ij} 的数学表述为:

$$P_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{节点 } v_i \text{ 到 } v_j \text{ 至少存在一条有向路径} \\ 0, & \text{节点 } v_i \text{ 到 } v_j \text{ 不存在有向路径} \end{cases}$$

可达矩阵 P 可通过邻接矩阵 A 得到利用经典 Warshall 算法^[6]计算得出。

定理 1 矩阵 A 为系统 S 的邻接矩阵, 若存在置换矩阵 E , 使得 $E^T A E$ 运算后为分块三角阵, 则称该系统可分层; 反之, 该系统不可分层^[5,7]。

1.2 分层方法

将符号有向图 G_S 分层后得到分层有向图模型, 该模型利用分层结构划分故障源的层次, 即每一层节点的故障偏差只能对本层和比之更低的节点传播或产生影响, 而不会影响到比之更高层的节点。模型层次分明, 故障传播方向自上而下, 故障诊断时减少了故障源搜索回溯的路径, 其特性直接影响潜在的故障源候选节点数量下降。

采用文献^[8]中基于可达性的分层方法, 具体步骤如下:

第一步 根据符号有向图 G_S 得到系统 S 的邻接矩阵 A_{ij} 。

第二步 利用定理 1 判断系统 S 能否分层, 若可分层, 则进行第三步; 若不可分层, 则退出。

第三步 将得到的邻接矩阵 A_{ij} 利用 Warshall 算法转化为可达矩阵 P_{ij} 。

第四步 可达矩阵 P_{ij} 的第 i 行中所有值为 1 的元素对应的行节点组成可达集 R_i , 可达矩阵 P_{ij} 列第 i 列中所有值为 1 的元素对应的列节点组成先行集 A_i , 两集合的交集为 $R_i \cap A_i$; 对于节点 v_i , 若 $R_i \cap A_i = A_i$, 那么 v_i 就是系统第 1 层中的节点。

第五步 将第四步中所有上层节点的行和列在可达矩阵 P_{ij} 删除, 便得到除去上层节点后的可达矩阵。

第六步 重复第四步, 计算得到第 2 层的节点集, 重复以上步骤直到处理完所有的节点, 便可以建立分层有向图模型 G 。

2 构建模型

2.1 高压冷水机组

数据中心冷水系统主要由高压冷水机组(主要包含蒸发器、冷凝器、压缩机、截流元件)、冷却塔、循环水泵、集水器、分水器和末端设备等部分组成^[8], 工作原理图如图 1 所示。

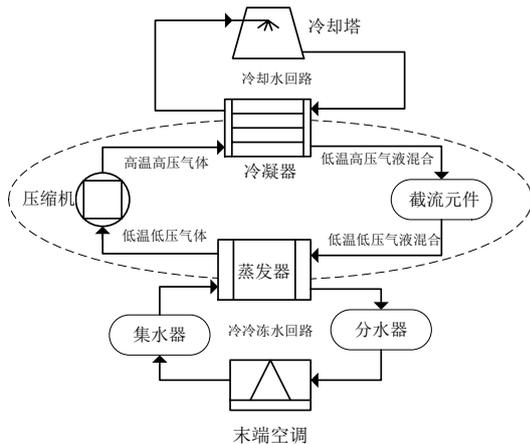


图 1 数据中心冷水系统工作原理图

Fig.1 Data center cold water system working principle diagram

本文研究对象为离心式高压冷水机组, 机组采用频率为 50Hz 的 3 相 10kV 电压, 制冷剂为 R134a, 制冷量为 7032kW; 各部件的参数符号如表 1 所示。

表 1 高压冷水机组各部件参数符号

Table 1 Parameters of various components of high voltage chiller

参数	符号	参数	符号
蒸发器制冷量	N_C	冷凝器流量	F_{L1}
蒸发器流量	F_L	冷凝器进水温度	T_{E1}
蒸发器进水温度	T_E	冷凝器出水温度	T_{L1}
蒸发器出水温度	T_L	冷凝器进出水温差	T_{R1}
蒸发器进出水温差	T_R	冷凝器污垢系数	F_1

续表 1 高压冷水机组各部件参数符号

参数	符号	参数	符号
蒸发器水压降	P_D	冷凝器水压降	P_{D1}
蒸发器污垢系数	F	冷凝器水流量开关	W_{L1}
蒸发器介质类型	L_T	冷凝器介质类型	L_{T1}
水流量开关	W_L	性能参数	C_P
压缩机电流	C	制冷剂类型	R_E
压缩机功率	P_0	制冷剂充注量	R_C
压缩机频率	F_R	压缩机导叶开度	D_K
压缩机电机转速	M_S		

2.2 符号有向图模型

符号有向图的建模方法常用的有 4 种, 分别是基于数学模型的方法、基于经验知识的方法、基于流程图的方法和结合仿真技术的符号有向图方法^[8], 本文采用基于流程图的方法和基于经验知识的方法, 得到离心式高压水冷机组的符号有向图模型 G_S , 如图 2 所示。

符号有向图 G_S 定性地表示了离心式高压冷水机组各部件的内部结构和因果关系, 节点和支路包含了大量潜在信息, 故障诊断时可以通过故障偏差的传播路径及其演变加以描述^[5]。高压水冷机组的各参数被抽象为节点, 各节点均为可测节点, 节点的测量值有超过阈值“+”、正常“0”和低于阈值“-”三种状态, 节点间相互影响关系由箭头表示, 实箭头代表正影响, 虚箭头代表负影响。

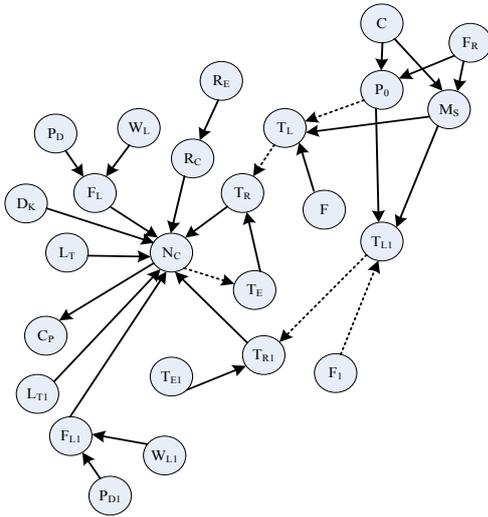


图 2 高压冷水机组的符号有向图模型 G_S

Fig.2 Symbolic directed graph model G_S for high voltage chiller

2.3 分层有向图模型

为进一步挖掘符号有向图 G_S 中节点间的内在关系,采用基于可达性的分层方法建立离心式高压冷水机组的分层有向图模型 G ,如图 3 所示。由图 3 可知,该模型共有 5 层,第一层节点称之为根节点,该层节点只有子节点无父节点,各层节点的支路箭头均指向下一层的节点,由此可以看出节点的偏差值只能自上而下传播,不会反向传播,每层节点抽象为节点集合,作为论域有向图 G_T 的节点,层间的支路抽象为论域有向图 G_T 的支路集合,其论域有向图 G_T 如图 4 所示。

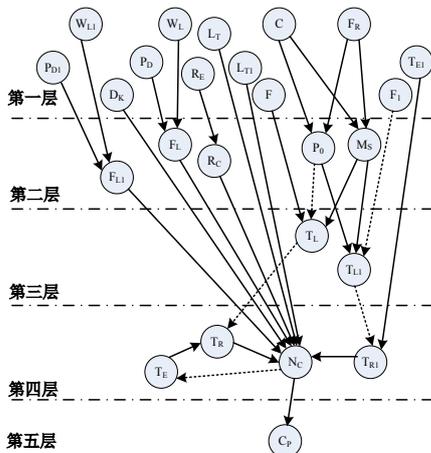


图 3 高压冷水机组的分层有向图模型 G

Fig.3 Layered directed graph model G of high voltage chiller

分层有向图模型 G 中,层数 $h=5$,各层节点集合为 $v_h, v_1=\{F, W_{L1}, P_{D1}, D_K, P_D, W_L, R_E, C, L_T, L_{T1}, F_R, F_1\}, v_2=\{F_{L1}, F_L, R_C, P_0, M_S, T_{E1}\}, v_3=\{T_L, T_{L1}\}, v_4=\{T_E, T_R, N_C, T_{R1}\}, v_5=\{C_P\}$ 。

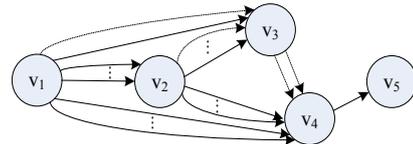


图 4 高压冷水机组的论域有向图模型 G_T

Fig.4 The domain directed graph model G_T of the high voltage chiller

论域有向图 G_T 中,各层节点抽象为单个节点,各层间连接关系用多个箭头表示,且关系简明,传播方向固定,为进一步的故障诊断提供了模型依据。

3 故障推理

3.1 故障推理方法

故障推理方法常用的有正向推理和反向推理两种。若模型的节点状态是未知的,采用正向推理方法,即从原因节点向后果节点回溯,搜索并标记独立完备的相容通路,最后判断互相隶属且独立通路的合理性,正向推理可称为评价模式。若模型已获得全部节点的状态样本,则采用反向推理方法,从样本的后果节点向原因节点搜索,记录并判断各通路的相容性和独立性,反向推理又可称为诊断模式。在实际中,可以联合使用两种推理方法,称为混合推理^[5,9]。

3.2 应用实例

分层有向图模型中,故障由上往下传播,上层节点的故障将导致下层节点测量值产生偏差,当给出节点状态样本时,可从节点中首先找出最高层偏差的节点,最高层的节点是导致系统节点发生偏差的主要因素。由 3.2 可知,各节点均可测,表 2 给出了 8 个节点的状态样本,由此可以分解出案例 1-3 的 SDG 通路,如图 5 所示。根据定义 2.3 判断各支路均为相容通路。

案例 1 中,最高层发生偏差节点的集合为 $\{F\}$,因此蒸发器污垢系数 F 是故障源节点。案例 2 和 3 中,最高层发生偏差的节点集合为 $\{C\}$,因此压缩机电流 C 是故障源节点,压缩机电流 C 偏小时说明机组工作在低负荷工况下,热负荷较低的话易引

起冷水机组喘震, 机组热负荷较小而压缩机电流 C 偏大时, 压缩机能耗增加, 机组能效比降低机。

表 2 节点状态样本

Table 2 Node Status Samples

案例	C	F	P_0	T_R	T_L	N_C	T_E	C_P
1	0	+	0	-	+	-	+	-
2	+	0	+	+	-	+	-	+

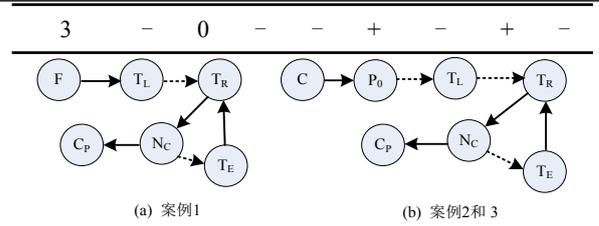


图 5 各案例的 SDG 通路

Fig.5 SDG path for each case

(下转第 61 页)