

## 基于定性约束的故障诊断设计

邵晨曦,张俊涛,白方周,张 毅

(中国科学技术大学 计算机科学技术系,安徽 合肥 230027)

(cxshao@ustc.edu.cn)

**摘 要:**在 B. J. Kuipers 的 QSIM 算法基础上,提出了比较约束概念用于消减推理空间。给出了各定性约束的传递规则,用于对系统的推理仿真。以系统故障的观测结果为初始状态,依据约束流的传播,诊断变量异变的位置和原因,并把诊断结果进行正向推理,消除部分冗余。在压缩制冷系统实例中,根据制冷系统的定性微分方程建立约束关系。针对制冷效果不佳的症状,仿真诊断出故障源为系统中有空气或氟利昂充液量过大的故障,与实际系统相一致。

**关键词:**定性仿真;约束传递;故障诊断;制冷系统

**中图分类号:** TP391.9 **文献标识码:** A

## Fault diagnosis design based on qualitative constraint

SHAO Chen-xi, ZHANG Jun-tao, BAI Fang-zhou, ZHANG Yi

(Department of Computer Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei Anhui 230027, China)

**Abstract:** Based on the QSIM algorithm of B. J. Kuipers, comparative constraint was presented to reduce the diagnosis space. The transfer regulation of qualitative constrain was used in the simulation and reasoning of system diagnosis. This algorithm took observed faulty state as the beginning, to diagnosis the location and cause of variable discrepancy according to the transfer regulation of qualitative constraint, reasoned from diagnosed faulty to examine the result and deleted the redundancy of diagnosis result. In the example of condensation refrigeration system, the constraint relation was built according to qualitative difference equation. Aim at the bad efficiency of refrigeration, the mixture of air or Freon superfluously was diagnosed as the result faulty source, consistent with the actual system.

**Key words:** qualitative simulation; constraint transfer; faulty diagnosis; refrigeration system

## 0 引言

近年来,随着设备自动化程度的提高,使得在线故障诊断受到广泛地关注。当前的实际系统过于复杂而且结构知识不完备,有些系统无法构造出精确的数学模型,定性仿真<sup>[1]</sup>提供了处理这类问题的有效途径。

传统的故障诊断技术都是基于专家系统的方法。在这种基于规则的方法中,经验知识只是对现象和结论之间的相互关系的一种不完全的描述,它不能充分体现两者之间必然的因果关系,称为“浅”层知识<sup>[2]</sup>。而应用基本的规律和法则,描述现象与结果之间必然的关系的方法,例如在数学上表示为方程或函数关系,这些知识称之为“深”层知识。复杂系统的输入输出之间,存在着由构造所决定的一般并非严格的定量的或逻辑的因果关系<sup>[3]</sup>,因而其故障和症状之间不存在一一对应的简单关系。实时在线处理具有因果环路、可观测信号为离散变量和连续变量相混合的复杂系统<sup>[4]</sup>的故障诊断,是一个难点问题,难以得到快速而有价值的结果。

定性约束是系统结构的深层知识表示,其描述不同于专家系统的浅层知识表示。代数约束和比较约束及其传递规则的引入,扩大了定性仿真在故障诊断中的应用范围。

## 1 定性约束的概念

定性约束是由美国德州大学的 B. J. Kuipers 提出,从一个约束集和一个初始状态出发,对系统的定性行为进行预测。在 Kuipers 的 QSM<sup>[1,5]</sup>算法中约束概念的基础上,提出了描述变量作用关系大小的比较约束关系,并给出了约束关系的传递规则。约束主要体现系统中各变量间的代数关系和定性关系。

### 1.1 代数约束

代数约束是一些基本的代数和微分关系,定义如下:

1) ADD( $f, g, h$ ) 为真的充分必要条件是 $f, g, h$ 三个可推理函数(变量)满足 $f(t) + g(t) = h(t)$ 。

2) MULT( $f, g, h$ ) 为真的充分必要条件是 $f, g, h$ 三个可推理函数(变量)满足 $f(t) * g(t) = h(t)$ 。

3) MINUS( $f, g$ ) 为真的充分条件是 $f, g$ 两个可推理函数(变量)满足 $f(t) = -g(t)$ 。

4) DERIV( $f, g$ ) 为真的充分条件是 $f, g$ 两个可推理函数(变量)满足 $f'(t) = g(t)$ 。

5)  $M^+(f, g)$  为真的充分条件是存在函数 $h(t)$ ,其中 $g$ 是 $h$ 的定义域, $f$ 是 $h$ 的值域, $h'(t) > 0$ ,即函数 $f$ 与 $g$ 的单调性一致。

6)  $M^-(f, g)$  为真的充分条件是存在函数 $h(t)$ ,其中 $g$ 是

收稿日期:2005-01-14;修订日期:2005-03-06 基金项目:国家自然科学基金重点项目(60434010)

作者简介:邵晨曦(1954-),男,山东海阳人,副教授,主要研究方向:定性仿真、脑与复杂性、生物医学系统行为、CAD 和 CIMS; 张俊涛(1975-),男,河南许昌人,主要研究方向:计算机系统定性仿真、故障诊断; 白方周(1933-),男,河南开封人,教授,主要研究方向:计算机控制与仿真; 张毅(1976-),男,江苏连云港人,主要研究方向:系统定性仿真。

$h$  的定义域,  $f$  是  $h$  的值域,  $h'(t) < 0$ , 即函数  $f$  与  $g$  的单调性相反。

### 1.2 比较约束

为了扩大定性仿真在故障诊断中的应用范围, 在代数约束的基础上, 新定义了比较约束定性关系  $IMP(f, g, h)$ 。大型复杂系统变量多, 因果关系复杂, 一个部件常与多个部件相连, 系统参数的变化也受多个因素的影响。比较约束定性关系  $IMP(f, g, h)$  表示不同变量对同一变量影响大小的比较。

$IMP(f, g, h)$  为真的充分条件为, 变量  $f$  与  $g$  相比较,  $f$  对变量  $h$  的影响更大。变量  $f$  为支配变量, 变量  $g$  则称为从属变量。

比较约束关系  $IMP(f, g, h)$  的引入, 可以在变量的定性推理中突出主要因果关系, 减少故障的诊断空间, 提高诊断的效率和分辨率。

### 1.3 约束的传递规则

以上几个代数约束的定义, 体现了系统变量间的关系, 是系统结构和深层知识的描述。根据约束的定义, 建立变量间的定性影响关系, 反映系统参数间的相互作用。定义定性值“+”表示变量值增加; 定性值“-”表示变量值减少; 定性值“0”表示变量值在正常范围内。各约束传递规则见表1~表3。

表1 ADD 和 MULTI 定性约束影响

	+	0	-
+	+	+	0
0	+	0	-
-	0	-	-(+)

表2 M<sup>+</sup> 定性约束影响

$f$	+	0	-
$g$	+	0	-

表3 M<sup>-</sup> 及 MINUS 定性约束影响

$f$	+	0	-
$g$	-	0	+

比较约束关系  $IMP(f, g, h)$  的传递规则为, 当  $f$  与  $g$  变量同时作用于变量  $h$ , 并且两个变量的作用方向相反时, 应用约束关系  $IMP(f, g, h)$ , 对系统定性仿真和推理的过程裁剪, 按变量  $f$  的分支方向进行约束传递。放弃了诊断中的细小分支, 可以减少诊断结果受次要因素的影响。

## 2 定性模型的建立

定性模型的建立按照第一原则 (First Principles)<sup>[6,7]</sup> 来建立。所谓的第一原则是指使用深层 (基础) 知识而不是浅层 (启发式) 知识来建模和推理。对于每一个约束, 有 2~3 个变量。

模型的建立, 可以先按部件来建立, 定性的系统模型通过连接离散的定性部件行为模型来生成。这种方法使系统行为定义成离散部件模型的相互作用而不是一个单一整体的系统模型。模型结构平行于系统的物理结构。在以上定义的基础上, 针对诊断对象的系统结构, 可以建立起系统的定性模型。各复杂系统的定性模型的建立, 主要是建立系统各变量间的定性微分方程 (QDE)。

真实系统微分方程的建立方法如下:

1) 可以从常微分方程 (ODE) 直接转化而来, 复杂的方程通过增加变量实现<sup>[9]</sup>。

$$g(s) \longrightarrow \boxed{k/(\tau s + 1)} \longrightarrow h(s)$$

图1 SISO 系统结构框图

考虑一个单输入单输出系统 (SISO), 其时间域内的微分方程是:

$$\tau \frac{dh}{dt} = kg - h$$

常微分方程约束方程对应如下:

$$f_1 = \frac{dh}{dt} \rightarrow \text{DERIV}(f_1, h)$$

$$f_2 = \tau * f_1 \rightarrow \text{MULT}(\tau, f_1, f_2)$$

$$f_3 = k * g \rightarrow \text{MULT}(k, g, f_3)$$

$$f_4 = f_3 - h \rightarrow \text{ADD}(h, f_4, f_3)$$

2) 从系统结构出发, 将各种守恒定律, 变量间的代数关系, 因果关系等直接表达而成。例如, 电路系统中可以应用欧姆定律、基尔霍夫定理来建立系统定性微分方程 QDE; 热力系统中可以根据热平衡、能量守恒定律来建立 QDE。

系统模型建立, 还要建立系统各异常变量对应的故障集合, 即将异常变量的组合与故障的部件及原因对应起来, 使诊断的结果更易为系统接受。

### 3 诊断仿真算法

在实际的诊断过程中, 系统中将有两种类型的数据, 一种数据是传感器实测数据, 可以将其称作观测值; 另一种是经过推理得到的数据, 可以称作推理值。那么, 数据还有一项属性, 就是它和路标值比较, 符号化后的值, 或者称为非观测值。实测数据要经过平滑处理, 去除传感器噪声然后再和路标值进行比较。如果是仿真数据, 就不必进行这一步。

根据建立的定性模型, 以故障状态为输入的初始状态, 以各约束关系和定性微分方程 (QDE) 为故障向上回溯的路径, 查找变量发生突变的可能位置, 即诊断故障发生的位置。在算法的初始, 表示观察的系统故障症状, 定义集合  $SD$  为系统描述, 即系统定性微分方程 QDE 的全体; 定义系统约束集  $C$ ; 定义集合  $S$  为定性状态转换规则集合。

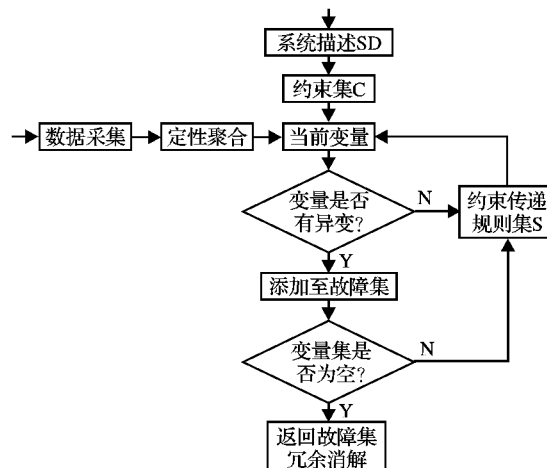


图2 算法流程图

基于约束的故障诊断算法可以描述为:

1) 根据系统描述  $SD$ , 建立系统的定性微分方程  $QDE$ , 形

成系统的约束集  $C$ ;

- 2) 根据约束集合  $C$ ,产生各变量的转换规则集合  $S$ ;
- 3) 在系统运行过程中,用数据采集设备,分时段采集系统数据;
- 4) 根据正常运转的系统参数值,将采集的数据样本进行数据拟合,确定变量的定性值及其定性影响;
- 5) 根据定性影响,确定系统故障的症状,将当前的症状变量作为当前变量判断是否为故障源;
- 6) 当前变量若是故障源,将故障变量加入故障集合;若不是故障源,则跳转到步骤7);
- 7) 判断变量集合是否为空,若为空,则返回故障源集合,结束诊断;
- 8) 若非空,则从约束集合中选择与症状变量相关的约束,依据约束的转换规则进行约束传递,若为空,则选择当前变量返回步骤6);
- 9) 应用系统约束对故障集中的变量进行冗余消解。

#### 4 仿真实验

以工业和生活中常用的压缩制冷设备为实例进行实验。

##### 4.1 系统描述

常用的压缩式制冷系统由压缩机、冷凝器、膨胀阀和蒸发器四个部件组成(如图3所示)。

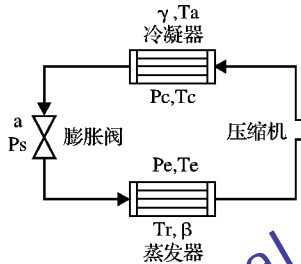


图3 压缩制冷系统的变量分布图

压缩机从蒸发器吸入低温低压的制冷剂,压缩后压力和温度上升,成为高温高压的蒸汽;经冷凝器与外部空气冷却换热后,成为低温高压的液态制冷剂;经膨胀阀膨胀降压后成为低压低温的制冷剂进入蒸发器;从环境吸收热量蒸发为低温低压的气态制冷剂进入下一循环。

压缩制冷系统准确数学模型的建立,涉及的变量多、关系复杂、计算难度大,而且不满足故障诊断快速、实时的根本要求。制冷系统为一个封闭的循环系统,相互间的影响具有传播性和延时性,故采用定性的方法,建立定性模型用于故障诊断。

##### 4.2 变量定义

表4 变量的定性表示及意义

序号	名称	意义	序号	名称	意义
1	$P_z$	压缩机压力增加	10	$T_w$	蒸发器出口温度
2	$T_z$	压缩机温度增加	11	$P_j$	蒸发器进口压力
3	$P_c$	冷凝压力	12	$T_j$	压缩机进口温度
4	$T_c$	冷凝温度	13	$T_a$	室外空气温度
5	$P_s$	膨胀阀压力减少	14	$T_r$	室内空气温度
6	$P_e$	蒸发压力	15	$\alpha$	膨胀阀开度
7	$T_e$	蒸发温度	16	$\beta$	送风机状态
8	$T_g$	过热度	17	$\sigma$	冷凝风机状态
9	$P_w$	蒸发器出口压力	18	$\gamma$	室外风机状态

##### 4.3 约束关系

根据热力学定律,可以得出变量的约束为:

- 1) 冷凝温度与冷凝压力成正比关系  $M^+(P_c, T_c)$ ;
  - 2) 蒸发温度与蒸发压力成正比关系  $M^+(P_e, T_e)$ ;
  - 3) 过热度  $T_g$  与阀门的开度  $\alpha$  成正比关系  $M^+(\alpha, T_g)$ ;
  - 4) 压缩机的温度增加与压力增加约束关系  $M^+(P_z, T_z)$ ;
- 根据系统结构和部件的功能建立约束关系如下:
- 1) 压缩机压力增加约束  $ADD(P_j, P_z, P_w)$ ;
  - 2) 压缩机温度增加约束关系  $ADD(T_j, T_z, T_w)$ ;
  - 3) 膨胀阀压力减少约束关系  $ADD(P_e, P_s, P_c)$ ;
  - 4) 过热度反映蒸发器吸气温度与蒸发温度的差  $ADD(T_e, T_g, T_j)$ ;
  - 5) 室外空气温度  $T_a$  与冷凝温度  $T_c$  的关系  $MULT(\sigma, T_c, T_a)$  其中  $\sigma$  反映冷凝器工作状态;
  - 6) 室温  $T_r$  与蒸发器的  $T_e$  的比  $\beta$  反映送风机的工作状态  $MULT(\beta, T_e, T_r)$ ;
  - 7) 室外温度  $T_a$  与冷凝温度  $T_c$  的比  $\varepsilon$  反映室外风机的工作状态  $MULT(\gamma, T_a, T_c)$ ;
  - 8) 阀门的开度与膨胀阀的压降成正比例关系  $M^+(\alpha, P_s)$ ;
  - 9) 压缩机出口压力与冷凝器内压力成正比例关系  $M^+(P_c, P_w)$ ;
  - 10) 过热度  $T_g$  与室内负荷  $T_r$  成正比例关系  $M^+(T_g, T_r)$ ;
  - 11)  $IMP(\gamma, T_a, T_c)$  表示室外风机工作状态  $\gamma$  对冷凝温度  $T_c$  的影响比  $T_a$  的影响重要。
  - 12)  $IMP(\alpha, T_r, T_g)$ 。

根据系统的约束关系,可以按照表1~表3的约束传递规则,建立系统各变量间的定性状态转换集合  $S$ ,用于系统的诊断推理。由各变量的意义,列出各变量对应的部件,用于对推理诊断结果的分析。

##### 4.4 诊断推理

对于R22系统制冷时,一般认为蒸发压力在  $5 \sim 7 \text{ kgf/cm}^2$  绝对压力,蒸发温度在  $3 \sim 10^\circ\text{C}$ ,过热  $3 \sim 5^\circ\text{C}$ ;冷凝压力在  $15 \sim 19 \text{ kgf/cm}^2$  绝对压力,冷凝温度在  $40 \sim 50^\circ\text{C}$ ,过冷  $5 \sim 15^\circ\text{C}$ 。室内温度正常值,制冷系统在这样的工况下工作,能够获得正常的制冷性能。某分体空调器运行过程中,选择持续时间5min以上的诊断数据并根据系统正常值范围,对参数进行定性拟合。其测量值和定性值如表5所示。

表5 系统测量值

参数	数值	定性值	参数	数值	定性值
$T_r$	$31.0^\circ\text{C}$	+	$T_a$	$41^\circ\text{C}$	0
$P_c$	$27.8 \text{ kgf/cm}^2$	+	$\gamma$	正常	0
$P_e$	$12.6 \text{ kgf/cm}^2$	+	$\beta$	正常	0

按照前述的诊断算法,结合系统的约束关系和各约束关系的转换规则,诊断推理的过程如下:

系统中症状变量为  $T_r$ 。

- 1) 选择当前变量为  $T_r = +$ ,应用定性约束  $MULT(\beta, T_e, T_r)$ ,结果  $T_e = +$ ,添加  $T_e$  至故障集;变量集非空;
- 2) 应用约束  $M^+(T_e, P_e)$  的转换规则,则  $P_e$  为+,与集合相一致,添加至故障集;
- 3) 若  $P_e = +$  则  $P_c = +$ ,则根据  $ADD(P_e, P_s, P_c)$  推导出  $P_s = 0$ ,在故障集中添加故障变量;
- 4) 应用约束  $M^+(P_c, T_c)$ ,  $M^+(P_c, P_w)$  则  $T_c = +, P_w$

= +。添加  $T_e$  至故障集合;

5) 应用约束  $IMP(\alpha, T_r, T_g)$ , 可以得出  $T_g = 0$  添加到故障集合;

6) 根据约束  $ADD(T_e, T_g, T_j) T_g = 0, T_e = +$ , 则推导出  $T_j = +$ ;

7) 若  $P_z = 0$  则  $P_j = +$ , 若  $P_z = -$ , 则  $P_j = 0$ ; 根据约束关系  $M^+(T_g, P_s)$  可消除故障组合  $F_2$ , 故障组合为  $F_1$  (如表 6 所示)。

由计算结果可以看出, 比较约束  $IMP(\gamma, T_a, T_c)$  的引入, 极大地消解了推理过程中不必要的分支, 减少了冗余的诊断结果, 提高了诊断的精度。

#### 4.5 故障分析与评估

故障组合  $F_1$  中,  $P_z$  为 0 表示压缩机的工作状态正常, 不存在故障;  $T_g$  为 0 且  $\alpha = 0$ , 表示毛细管道的压力降低正常; 且压缩机进口压力  $P_j$  和出口压力  $P_w$  都为 +, 系统中的高低压均高于正常值。根据各变量对应设备部件, 可以确定对应的故障点为: 系统中制冷剂混合有空气或系统的制冷剂充液量过大。

表 6 仿真结果表

fault	$P_z$	$T_z$	$P_c$	$T_c$	$P_s$	$P_e$	$T_e$	$T_g$
$F_1$	0	0	+	+	0	+	+	0
$F_2$	-	-	+	+	0	+	+	0

fault	$P_w$	$T_w$	$P_j$	$T_j$	$T_a$	$T_r$	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$
$F_1$	+	+	+	+	0	+	0	0	0
$F_2$	+	+	+	+	0	+	0	0	0

此算法的诊断结果与有经验的修理师从管道高压侧和低压测的压力值、系统循环管路的的声音、管道各处感知的温度等方面诊断的结果基本相一致, 也验证了算法的正确性。但是因为系统描述定性信息与定量的准确性, 使得诊断结果中还存在不确定性, 这也与定性故障诊断的初衷相一致。

(上接第 1640 页)

表 2 测试数据

商品价格		保修期限		供货日期	
原值/元	归一	原值/月	归一	原值/天	归一
400	0.0	18	0.4	6	0.86
410	0.2	36	1.0	7	1.00
415	0.3	12	0.2	1	0.14
420	0.4	6	0.0	0	0.00
425	0.5	36	1.0	3	0.42
430	0.6	12	0.2	2	0.29
440	0.8	6	0.0	0	0.00
450	1.0	18	0.4	1	0.14

表 3 输出数据

网络输出的满意度			
价格	保修	供货	整体
0.959	0.792	0.670	0.944
0.881	0.998	0.650	0.928
0.873	0.592	0.967	0.764
0.800	0.350	0.992	0.687
0.737	0.999	0.901	0.741
0.616	0.554	0.935	0.567
0.400	0.350	0.998	0.299
0.102	0.710	0.994	0.084

## 5 结语

目前, 定性仿真技术应用于故障诊断在国内的研究和应用还很少, 在复杂系统的故障诊断中, 有着独特的无可替代的效能。但定性仿真技术应用于故障诊断, 是一种发展中的新技术, 还有待于在大量的应用中进一步完善和系统化, 其主要问题是精确性和分辨率不够高。为了提高系统的诊断能力, 要增加测量点, 即增加系统的信息, 提高诊断过程中的抗干扰能力。目前, 基于约束的故障诊断技术, 需要解决的问题是建立各组件的约束集合库, 并形成规模, 提高系统约束的自动生成能力。

#### 参考文献:

- [1] KUIPERS BJ. Qualitative simulation [J]. Artificial Intelligence, 1986, 29(3): 289-338.
- [2] DRUZOVEC M. Diagnostics and a qualitative model[J]. International Journal of Medical Informatics, 2001, 63(1): 51-60.
- [3] MIYASAKA F, YAMASAKI T, YUMOTO M, et al. Real-time simulation for fault detection and diagnosis using stochastic qualitative reason[A]. Proceeding of 8th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation[C], 2001. 391-398.
- [4] 邵晨曦, 白方周. 定性仿真技术及应用[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(2): 202-209.
- [5] 白方周, 张雷. 定性仿真导论[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1998.
- [6] REITER R. A theory of diagnosis from first principles [J]. Artificial Intelligence, 1987, 32(1): 57-95.
- [7] GREINER R, SMITH BA, WILKERSON RW. A correction to the algorithm in Reiter's theory of diagnosis [J]. Artificial Intelligence, 1989, 41(1): 79-88.

## 3 结语

以上测试结果的分析表明, 神经网络能用于拟合用户的偏好, 说明了我们构建的 Agent 协商模型具有可行性。为了使模型能发挥出更好的效果, 在对 Agent 训练时的样本数据是关键, 数据的采样点应尽可能多, 尽可能反映出用户的偏好特征。

#### 参考文献:

- [1] WOOLDRIDGE M, JENNINGS NR. Agent Theories, Architectures and Languages: A survey[A]. Intelligent Agents[C]. Berlin: Springer Verlag, 1995. 1-22.
- [2] JENNINGS NR, SYCARA K, WOOLDRIDGE M. A roadmap of agent research and development[J]. Autonomous Agents and Multi-Agent Systems, 1998, (1): 7-38.
- [3] OLIVER JR. ON Artificial for Negotiation in Electronic Commerce [D]. University of pennsylvania, 1996. 10-62.
- [4] 史忠植. 知识发现[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002. 234-241.
- [5] 王三明, 蒋军成, 姜慧. 基于神经网络理论的系统安全评价模型[J]. 工业安全与防尘, 2001, 27(2): 27-30.