

基于规则和故障树的故障案例库构建方法研究

陈瑞勋, 李 青, 解海涛

(北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 北京 100191)

[摘要] 基于案例推理的故障诊断方法适用于经验丰富的决策环境,在飞机维修保障领域应用广泛,但由于缺乏解析模型和诊断规则的支持,难以满足复杂故障诊断要求。而故障树分析法建立在设计原理的基础上,可信度高。为了提高故障诊断效率和准确性,以实现基于规则和故障树模型与基于案例推理相融合的诊断方法为目的,研究案例的组织 and 案例库的构建。根据飞机维修保障实际需求,采用基于故障树分析的方法,结合故障诊断推理规则,建立飞机故障诊断模型;将模型和经验知识相结合,提出一种基于规则和故障树的案例库构建方法,进一步完善基于案例的推理机制,提高故障诊断的精确性和有效性。该案例库已应用于飞机故障诊断系统,实现了交互式故障诊断和排故引导,验证了研究方法的可行性。

关键词: 故障树;推理规则;案例库;故障诊断

Fault Case Library Construction Method Research Based on Rules and Fault Tree

CHEN Ruixun, LI Qing, XIE Haitao

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China)

[ABSTRACT] Based the integration of empirical knowledge and rules, structure of fault tree, on the lack of physical and fault diagnosis rules supporting, the authors researched cases of aircraft malfunction and developed a method of constructing a case library; Currently, there are no standardized descriptions of these aircraft fault cases. As a result of the necessity of accurate fault diagnosis and its particularities, the authors built a model for aircraft malfunction diagnosis using fault tree analysis and its rules of inference. In addition, the classification method of case libraries derived from the model could potentially be beneficial in the process of updating existing case libraries. These case libraries may be applied to existing fault diagnosis systems, provide troubleshooting guidance, and enable effective fault diagnosis utilizing case-based reasoning, thereby improving their efficiency and proving the feasibility of the research methodology.

Keywords: Fault tree; Rule of inference; Case library; Fault diagnosis

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2017.03.086

故障案例库是进行故障诊断的基础,案例库的质量和规模决定了故障诊断的效率。虽然目前企业在长期的服务保障过程中积累了大量的故障案例知识,但通常是蕴藏在故障信息、排故记录、技术报告等数据或文档中,案例库的构建过程缺少解析模型和推理规则的支持,不利于排故。而基于故障树分析的故障诊断方法则利用了飞机的正向设计知识对故障进行定位和诊断,两者结合相互补充,共同实现案例库的构建。因此,需要利用排故经验和知识将基于故障树分析的方法和推理规则充分融入到案例的构建过程中,建立具有一定规模和质量的故障案例知识库,案例的组织方法有利于排故过程中对案例的重用,满足案例检索和排故引导等要

求。

目前,国内外学者在案例表示与案例库组织方面进行了大量研究。文献[1]提出了基于XML的案例表示和案例库构建方法;文献[2]通过数据挖掘技术,提出一种由原始故障诊断信息构建故障案例库的方法,以提高案例获取的效率;文献[3]着重描述了框架表示法,并且结合 Snort 规则的案例进一步作了实例分析。但是它们并没有利用故障树模型,案例之间的层次结构关系也没有体现出来,案例的重用和基于案例推理的故障诊断效率还有待进一步提高。因此,有必要研究能够提高案例重用和故障诊断效率的案例库构建方法。

本文从提高案例重用和故障诊断效率的角度,通过

对飞机故障树进行数学描述和定性定量分析,结合故障诊断推理规则,从模型中提取案例,提出一种案例库的构建方法。在此基础上将案例库应用于故障诊断系统,提供一种向导式的排故指南,实现基于案例推理的故障诊断功能,为维修保障人员不断积累案例知识,充分、有效地利用已有的故障案例和设计知识进行推理和故障诊断提供有效的技术支持。

1 案例表示方法

案例表示就是对案例中的信息进行结构化的描述,是一种按照某种固定格式组织案例信息的方法^[4],案例主要信息如表1所示。常用的案例表示方法有以下几种:

(1)面向对象表示法:借助面向对象的程序设计语言来实现,也具有类和实例、继承(多重继承)、多态、封装等特点,这种层次结构及继承机制直接支持了案例表示的模块化和分层表示。

(2)框架表示法:在框架理论基础之上发展起来的一种结构化的知识表示方法。

(3)通用案例表示语言: CASUAL 是一个灵活的、面向对象的、类似框架的案例表示语言,它将案例的描述模型存储在 ASCII 文件中,专门为案例表示而设计,综合了前面两种方法的优点,而且也能将规则融于案例的表示中,是最完善的案例表示方法。

本文所采用的是第2种方法,即框架表示法,将案例进行结构化的表示,存储到数据库中。

表1 案例主要信息

名称	含义
案例编号	唯一标识案例的代码
机型	故障案例所属的机型
专业	故障案例所属的专业
设备	故障案例所属的设备
故障现象	故障案例最基本的特征
诊断结论	故障诊断后得到的结论
诊断方法	排除故障的方法

2 构建飞机故障案例库

故障案例是某个特定故障的相关信息的集合,包括故障类型、故障现象、故障原因、修复方法以及故障件、所属机型等。故障案例库是将故障案例信息按照一定的规则组织为有利于存储、管理和重用的数据库。为了保证故障案例库的质量和规模,对故障树进行定性和定量分析,应用正向设计知识通过故障树分析建立顶事件(故障现象)到叶节点(故障原因)的逻辑关系,并将外

场故障诊断和排故经验经过规范化和结构化处理后形成的推理规则融入其中,建立故障诊断模型,从中提取案例并实现案例库的构建。

2.1 故障树的定性与定量分析

定性分析和定量分析是故障树主要的分析方法。定性分析是找出可以导致故障事件发生的所有事件的组合;定量分析是得出这些组合对于故障发生所起的作用^[5]。本文以某型飞机液压系统液压油箱不能加油的故障树为例来说明故障树定性与定量分析过程。首先通过对液压系统液压油箱不能加油的故障机理、模式及故障后果的分析,得到其故障树,如图1所示。

2.1.1 故障树的定性分析

故障树模型可由故障树的结构函数来描述。上述模型的故障树结构函数为:

$$\phi(\vec{X}) = \sum_{i=1}^k \left(\prod_{j=1}^m x_{ij} \right) \quad (1)$$

式中: k 、 m 均为自然数。

故障树的最小割集是指包含了最少数量,而又最必须的底事件的割集。最小割集发生,顶事件必然发生,其意义就在于它指出了系统中最薄弱的环节。因此,故障树定性分析的主要任务就在于找出其最小割集^[6]。

对于简单的故障树,只需将故障树的结构函数展开,然后运用布尔代数运算规则加以化简;而复杂的故障树则可以运用下行法和早期不交化算法来求解其最小割集。经过分析,图1中的故障树的最小割集为 $\{X_1, X_2\}$ 、 $\{X_3, X_4\}$ 、 $\{X_1, X_4, X_3\}$ 、 $\{X_2, X_4, X_3\}$ 。

2.1.2 故障树的定量分析

故障树的定量分析包括两个部分:计算故障树顶事件出现的概率和最小割集重要度。本文介绍最小割集重要度的分析过程,最小割集重要度主要有结构重要度、关键重要度和概率重要度3种。它们从不同的角度反映了部件对系统影响的重要程度,使用的时机不同。

(1)结构重要度:表示部件在系统结构上的重要性,它完全取决于部件在系统中的位置。

(2)概率重要度:表示基本事件发生概率对顶事件发生的影响程度。

(3)关键重要度:表示基本事件在故障树结构中所占地位造成的影响程度,是顶事件发生概率变化率对基本事件发生概率变化率的比值,是故障诊断最重要的参考指标,其计算公式为:

$$II_i = \frac{\Delta Q/Q}{\Delta q_i/q_i} = \frac{q_i}{Q} I_i \quad (2)$$

图1中故障树的定量分析结果见表2。由计算结果可以看出,关键性重要度的大小排序为 $X_4 > X_1 = X_2 > X_3 > X_5$ 。

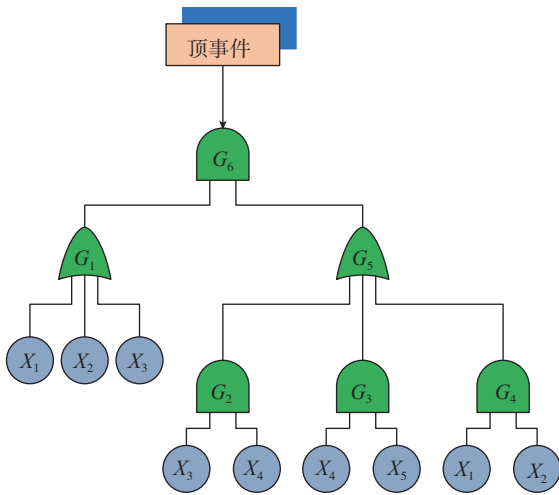


图1 故障树
Fig.1 Fault tree

表2 故障树定量分析计算结果

基本事件	结构重要度	概率重要度	关键重要度
X ₁	0.625	0.1062	0.493494
X ₂	0.625	0.1062	0.493494
X ₃	0.5	0.0972	0.451673
X ₄	0.71875	0.1152	0.535316
X ₅	0.4375	0.0162	0.075279

注：基本事件发生的概率均为 0.1（可根据实际情况作调整）。

因此,进行故障诊断时应首先将 X₄, X₁, X₂, X₃ 4 个底事件作为检查对象。依据关键性重要度进行故障诊断,能快速、准确找到故障点,并有效缩短诊断时间,减少必要的检修与拆卸,提高故障诊断效率^[7]。

2.2 建立故障诊断模型

故障树的分析结果包括系统中导致故障发生的各基本事件的组合以及顶事件发生的概率、各基本事件的概率重要度或关键重要度。基于此分析结果,为了寻找到控制顶事件发生的有效途径以及故障诊断建议,使后续构建的故障案例库便于交互式排故引导,本文对传统的故障树进行扩充,将故障树分析结果与产生式推理规则(故障的现象描述、故障的检查程序、故障的排故建议和维修决策等)相融合,最终建立故障树所对应的故障诊断模型^[8]。

2.2.1 建立故障诊断(推理)规则

故障诊断的推理规则来源于专家排故经验知识,本文对规则的表达涉及到了 Prolog 中的两个谓词 rule 和 cond,其中,谓词 rule 的语法为:

Rule(<规则号>,<类别>,<范畴名>,<子范畴名>,<特性表>)

其中,规则号为规则库中的规则编号;类别为规则

库中的故障树的干或叶;范畴名为故障所属系统或故障类型;子范畴名为故障细数或诊断结论;特性以 1 个或 1 组整数代表,表示某种故障所对应的特性。

谓词 cond 的语法为:

Cond(<特性号>,<特性描述>)

其中,特性号为特性表中的编号;特性描述定义特性的一个因子,指故障症状或测试过程等。规则与特性示例见表 3^[9]。

2.2.2 构建规则表达的二值范畴树

规则和特性的结构采取树状形式,液压系统不能加油相关规则表达的二值范畴树示例如图 2 所示。树中

表3 规则与特性示例

规则与特性	示例
规则	Rule(1, Category, 液压油箱, 油箱)
	Rule(2, Category, 液压油箱, 加油设备)
	Rule(3, Category, 液压油箱, 液压系统未完全卸压)
	Rule(4, Category, 液压油箱, 液压设备故障)
	Rule(5, Category, 加油设备, 加油设备损坏)
	Rule(6, Category, 液压设备, 回油油滤损坏)
	Rule(7, Category, 液压设备, 油箱损坏)
	Rule(8, Category, 液压设备, 加油活门损坏)
特性	Cond(1, [油箱故障导致液压油箱不能加油])
	Cond(2, [加油设备损坏导致液压油箱不能加油])
	Cond(3, [检查液压系统是否未完全卸压])
	Cond(4, [液压设备故障导致油箱故障])
	Cond(5, [检查加油设备是否损坏])
	Cond(6, [检查回油油滤是否损坏,更换后,正常])
	Cond(7, [检查油箱是否损坏,更换后,正常])
	Cond(8, [检查加油活门是否损坏,更换后,正常])

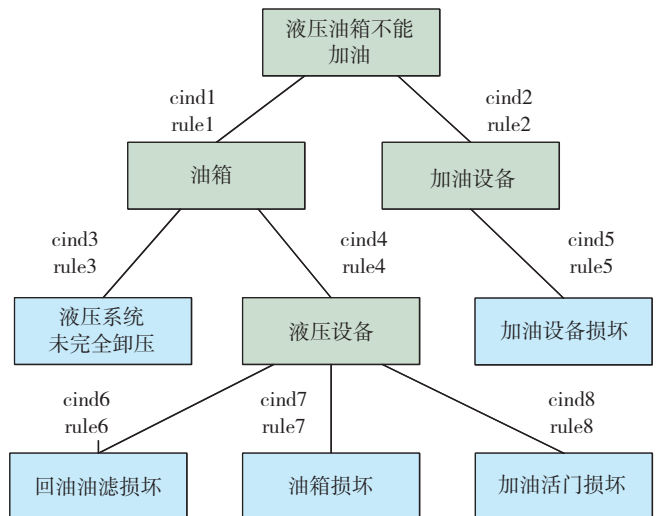


图2 规则表达的二值范畴树示例
Fig.2 Rule expression of a two-value tree

每个矩形框表示 1 个决策点,当给出了相应于该决策点的规则是否成立的结果后,就可以得到下一步前进的路径,直到得出诊断结论^[10]。

2.2.3 结合故障树分析结果建立故障诊断模型

为了将图 2 二值范畴树中的规则应用于故障诊断过程,本文将二值范畴树进行重新组织,基于故障树分析结果,确定属于不同故障模式的规则应用的先后顺序,并将规则中的内容分解为可以指导排故的测试环节,最终得到具有二叉树数据结构的故障诊断模型。其具体过程包括以下几个步骤:

(1)按照故障树定性分析结果中最小割集的不同故障模式对规则进行分组,并由二值范畴树中规则的逻辑层次关系对每组中的规则进行排序。

(2)将规则中的内容分解为可以指导排故的测试环节,按照故障树定量分析结果中关键性重要度大小顺序,将每个故障模式的测试环节嵌入到故障树的逻辑结构中。

(3)借助二叉树的数据结构,构建出利于交互式故障引导的故障诊断模型,如图 3 所示。

2.3 案例提取与案例库组织

从故障诊断模型中总结出案例的核心概念,充分考虑案例在故障诊断中的应用,包括案例检索以及案例重用等环节,构建案例信息模型,完成案例提取,并提出通过分类组织案例库来实现案例调整的方法。

2.3.1 案例核心概念

结合故障诊断要求,本文将案例知识内容归纳为组成案例的 3 个核心概念,即案例描述、案例锁定和案例诊断。将案例描述与模型中故障树顶事件所表现出来的故障现象对应,案例锁定与推理规则相对应,案例诊断则与诊断模型中对具体故障的修复措施相对应。

2.3.2 构建案例信息模型

通过对故障诊断模型的进一步分析,发现通过这 3 个概念组织而成的案例中存在许多重叠的内容。如在具有相同顶事件的故障树中,不同的故障模式表现出相同的故障现象,不同的故障模式中也可能存在相同的推理规则与特性。因此,进一步对案例描述、案例锁定和案例诊断进行分析和总结,归纳出更简洁的案例信息模型,如图 4 所示。

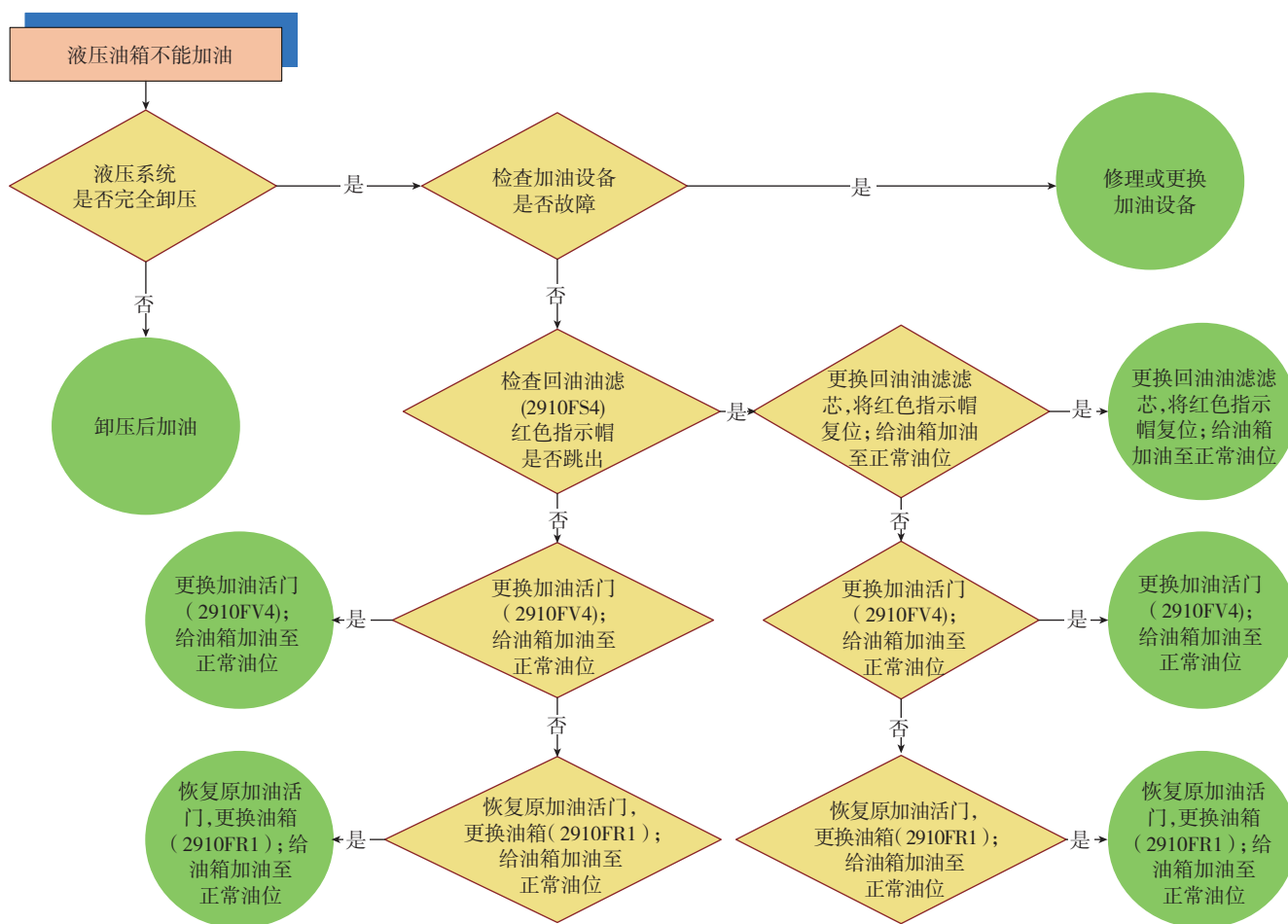


图3 故障诊断模型
Fig.3 Fault diagnosis model

该案例知识信息模型中,将案例分成 3 个部分: 案例现象、案例测试和案例修复。分别对应到故障诊断的 3 个步骤。故障案例所表现出来的现象和特征定义为现象集; 确定故障案例的推理规则定义为测试集; 所提供的故障修复方法, 定义为故障修复集。

现象集是可以直接观察或者测试得到的故障特征的集合, 为了在故障诊断时缩小现象的检索范围, 把它按照类别划分为警告类、飞行参数类、目视类等。每 1 个案例可以包含多个故障现象, 而每 1 个故障现象也可

以出现在不同的案例当中。

测试集是为了快速排除和锁定案例而定义的一组有序故障测试集合, 为了方便测试的查找和使用, 把它按照飞机系统来划分, 如液压系统、环控系统等等。为了准确定位故障, 每一条案例都包含一系列有序的测试项, 通过合理的设置测试内容来将每一条测试项的结果都简化为是与否的选择。

修复集是验证及确认故障是否排除的方法和故障件的相关信息集合, 它是按照系统来划分。每个案例都有唯一对应的 1 个修复项。

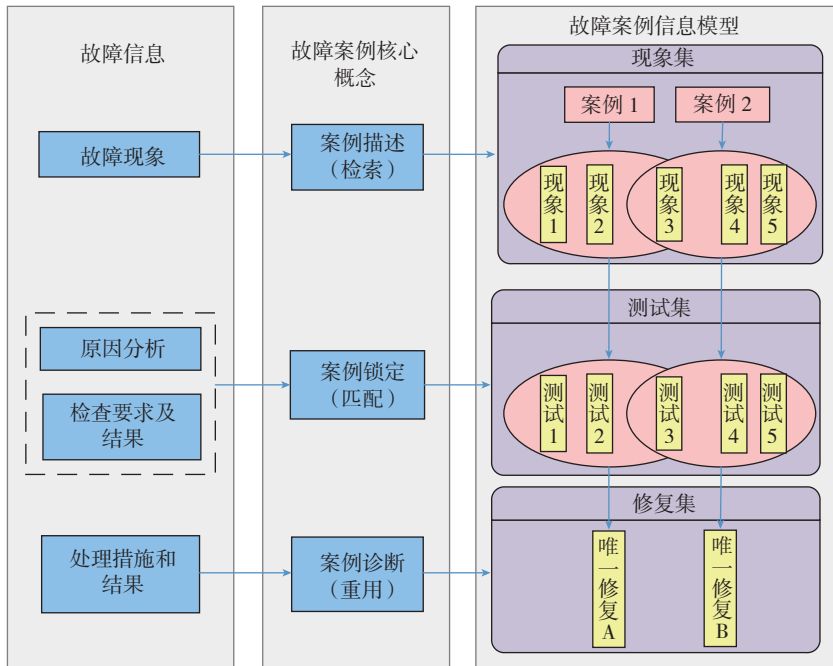


图4 案例信息模型
Fig.4 Case information model

3 案例库在故障诊断系统中的应用

在基于案例推理的故障诊断系统中, 采用本文提出的方法构建了案例库, 故障诊断过程如图 5 所示。

故障诊断的流程分为 4 个步骤, 分别是案例检索、反向建立相似案例集、基于该模型的交互式排故引导、完成故障诊断与案例调整。具体内容如下:

(1) 利用相关检索工具对案例现象进行检索, 得出包含该故障现象的相似案例集。

(2) 对相似案例进行可视化处理, 建立对应排故流程, 并将不同案例排故流程中相同的测试项进行合并, 反向建立故障诊断模型。

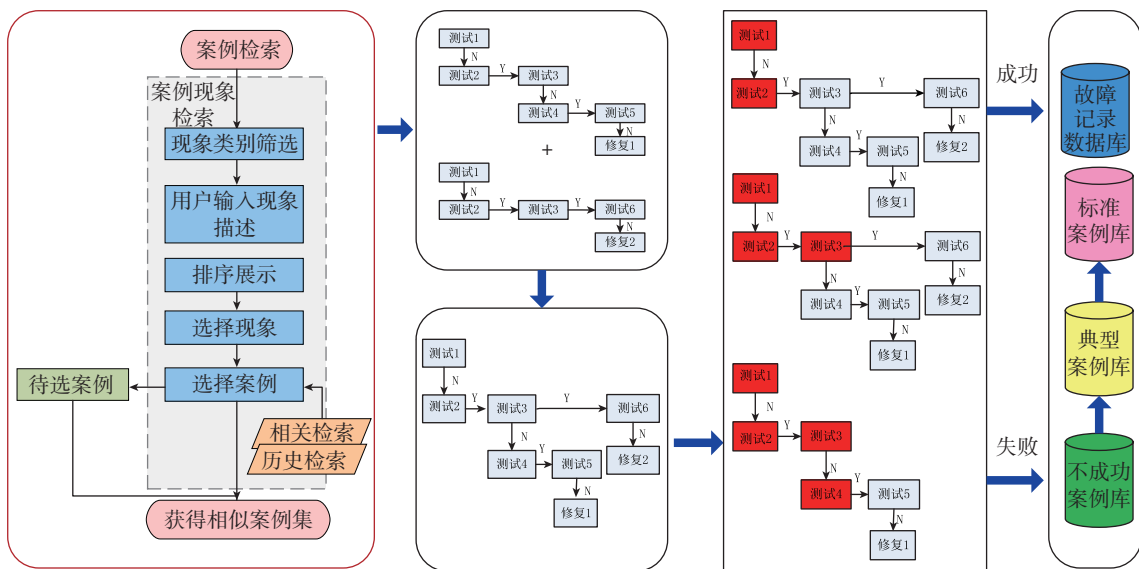


图5 基于案例推理的故障诊断流程
Fig.5 Fault diagnosis process based on case based reasoning

(下转第 100 页)