

硕士学位论文

基于 CLIPS 的卫星电源故障诊断专家系统

**EXPERT SYSTEM OF SATELLITE POWER
SYSTEM FAULT DIAGNOSIS BASED ON CLIPS**

王明远

哈尔滨工业大学

2017 年 6 月

国内图书分类号：V19

国际图书分类号：531

学校代码：10213

密级：公开

工程硕士学位论文

基于 CLIPS 的卫星电源故障诊断专家系统

硕 士 研 究 生：王明远

导 师：王日新 副教授

申 请 学 位：工程硕士

学 科：航天工程

所 在 单 位：航天学院

答 辩 日 期：2017 年 6 月

授予学位单位：哈尔滨工业大学

Classified Index: V19

U.D.C: 531

Dissertation for the Master Degree in Engineering

**EXPERT SYSTEM OF SATELLITE POWER
SYSTEM FAULT DIAGNOSIS BASED ON CLIPS**

Candidate :	Wang Mingyuan
Supervisor :	Associate Prof. Wang Rixin
Academic Degree Applied for :	Master of Engineering
Speciality :	Astronautical Engineering
Affiliation :	School of Astronautics
Date of Defence :	June, 2017
Degree-Conferring-Institution :	Harbin Institute of Technology

摘 要

卫星电源系统的正常工作对于整个卫星的顺利运行举足轻重，在卫星众多的分系统中，卫星电源系统发生故障的概率最高，这就要求卫星电源系统具备更高的安全性，同时对卫星电源系统的故障诊断理论与技术提出了更高的要求。随着专家系统开发工具和计算机应用技术的发展，针对卫星电源系统开发一套满足诊断需要的卫星电源故障诊断专家系统具有很重要的意义。

本文首先分析了卫星电源系统的工作原理，在工作原理的基础上确定电源系统的结构，再根据电源系统的结构进行故障模式分析，最后从所有故障模式中选取最具代表性的几类故障模式，采用故障树分析法建立卫星电源故障树，并基于故障树研究总结出卫星电源系统的诊断规则。接着以此为基础研究并设计出卫星电源专家系统总体结构，再具体将故障诊断专家系统划分为知识库管理系统（KBMS）和诊断推理系统两个子模块，确定每个子模块的功能，进而实现子模块的设计。针对知识库管理子系统，实现用户对知识的增加、删除、修改、查询等操作，还对知识库内知识进行一致性检验、冗余检验以及完备性检验等，此外还以卫星电源系统为研究对象，设计出独具特色的“产生式-框架”知识表达方式，进而实现本系统的规则和事实表达方式的定义；针对诊断推理子系统，分析 CLIPS 推理机的推理流程和知识库的设计过程，运用将 CLIPS 嵌入 C++ 的方式进行混合编程，并设计出卫星电源专家系统与数据库的接口。最后验证系统的正确性和可行性，完成整个专家系统的开发。

关键词：卫星电源系统；故障诊断；专家系统；CLIPS

Abstract

The regular working of satellite power system plays an important role in the smooth operation of the whole satellite. Among the numerous satellite's subsystems, the probability of failure of satellite power systems is the highest, which requires the satellite power system to have higher security. It also puts forward higher demand for fault diagnosis theory and technology of satellite power system. With the development of expert system tools and computer science and technology, it is very important to develop a fault diagnosis expert system for satellite power system.

First of all, the working principle of satellite power supply system is analyzed. The structure of the power system is determined on the basis of the operating principle, along with the diagnosis rule of power system. According to the satellite power system monitoring and diagnosis of the requirements, the overall structure of the diagnosis expert system is divided into knowledge base management system and diagnostic reasoning system, and each module of the function and realization was elaborated. Determining the function of each sub module, and then realizing the design of sub modules. Then, the inference flow of the CLIPS inference engine is analyzed according to the diagnosis reasoning subsystem, along with hybrid programming by embedding CLIPS into C++. And the interface between satellite power expert system and database is designed. Finally, the correctness and feasibility of the system are verified, and the development of the whole expert system is completed.

Keywords: Satellite's Power System; Fault Diagnosis; Expert System; CLIPS

目 录

摘 要	I
Abstract	II
第 1 章 绪 论	1
1.1 课题研究背景及意义	1
1.2 卫星电源故障诊断方法的研究现状	2
1.2.1 基于解析模型的故障诊断方法	2
1.2.2 基于信号处理的故障诊断方法	3
1.2.3 基于知识的故障诊断方法	3
1.3 专家系统及其开发工具	4
1.4 论文主要内容安排	6
第 2 章 卫星电源系统故障分析	8
2.1 卫星电源系统的工作状态	8
2.1.1 光照期电源系统工作状态	8
2.1.2 地影期电源系统工作状态	8
2.1.3 入影期和出影期电源系统工作状态	9
2.2 卫星电源系统的结构划分	10
2.2.1 能量传输方式划分	10
2.2.2 母线控制方式划分	11
2.2.3 系统控制方式划分	13
2.3 卫星电源系统的故障模式分析	14
2.3.1 太阳电池阵故障模式分析	14
2.3.2 蓄电池组故障模式分析	15
2.3.3 分流调节器故障模式分析	15
2.3.4 充电调节器故障模式分析	16
2.3.5 放电调节器故障模式分析	16
2.4 卫星电源系统诊断规则提取	16
2.4.1 特征参数的选取	17
2.4.2 故障树分析法	17
2.4.3 基于故障树分析法的卫星电源系统故障树的构建	18

2.5 本章小结	19
第 3 章 知识库管理系统的设计与实现	20
3.1 知识库管理系统需求分析	20
3.1.1 系统性约束	20
3.1.2 功能性需求	20
3.1.3 需求调查表	22
3.2 知识库管理系统设计	23
3.2.1 数据流图	23
3.2.2 数据库设计	24
3.3 知识库管理系统的操作	26
3.3.1 登录模块	26
3.3.2 主界面模块	27
3.3.3 数据库操作模块	28
3.3.4 导入导出数据库模块	29
3.4 知识库管理系统的维护	31
3.5 本章小结	34
第 4 章 卫星电源故障诊断专家系统的诊断推理机制设计	35
4.1 卫星电源故障诊断专家系统的结构	35
4.2 卫星电源故障诊断专家系统的推理机制	36
4.2.1 CLIPS 的基本组成与推理机制	36
4.2.2 Rete 模式匹配算法	38
4.2.3 卫星电源故障诊断专家系统推理机的实现	39
4.2.4 调试运行 CLIPS 推理程序	44
4.3 卫星电源故障诊断专家系统的接口设计	45
4.3.1 CLIPS 嵌入技术	45
4.3.2 CLIPS 与 Visual C++ 的数据交互实现	46
4.3.3 人机界面的设计及验证	49
4.4 本章小结	52
结 论	53
参考文献	55
哈尔滨工业大学学位论文原创性声明和使用权限	59
致 谢	60

第 1 章 绪 论

1.1 课题研究背景及意义

20 世纪 50 年代，世界上第一颗人造地球卫星“卫星”-1 号在前苏联成功发射，虽然这颗卫星设计功能单一，而且在太空运行时间并不长，但它却推动了各国发展空间技术的步伐，开创了人类航天的新纪元。自 20 世纪 60 年代以来，美国、欧洲、和中国等国家也相继发射了大量的各类人造地球卫星，人造地球卫星的发展进入井喷阶段，占据人类发射航天器数目的头名。卫星技术的发展成为各国航天领域研究的焦点，对国民经济和国防科技的影响也日益明显，俨然成为一个国家综合实力的象征。人造地球卫星拥有十分广泛的用途，在科学探测研究、军事、通信、跟踪、导航等各个领域发挥着巨大的作用。

人造地球卫星的型号众多，有转播电视信号、提供手机通讯的通信卫星，也有预报天气气候变化、监测地质灾害的气象卫星，还有提供全球定位、执行军事用途的导航卫星等。不同种类的人造地球卫星，肩负着不同的任务和使命，这就导致人造地球卫星具有功能多样性和飞行任务复杂化的特点。由于人造地球卫星的运行轨道位于地球大气层外的外太空，辐射强度高、空间温差大、太空垃圾增多等因素都对人造地球卫星的安全造成了极大的威胁，同时对人造地球卫星自身而言，系统结构通常复杂多样，所以在人造地球卫星工作运行过程中，发生故障是不可避免的，一旦发生故障，代价往往很巨大，轻则不能完成既定的在轨任务，重则整个卫星完全报销。通过对近年来国内外人造地球卫星发生故障的统计，故障频率呈现逐年增长的态势。如果能够及时发现并诊断故障，对于卫星能更好完成指定任务的同时延长使用寿命具有重要的意义。

不同种类的人造地球卫星，所搭载的系统类型也往往不同。总体来说，这些系统可以分为两大类：有效载荷和保障平台^[1]。

(1) 有效载荷。有效载荷一般包括卫星的通信设备和卫星的科学仪器等，用以完成特定的飞行任务。

(2) 保障平台是指除有效载荷外设备组成的系统，该系统由电源系统、测控系统以及姿态控制系统等子系统组成^[2]，用以支持人造地球卫星所有分系统的正常运行。

电源系统是保障平台不可或缺的组成部分，它为人造地球卫星各分系统提供电能，一旦电源系统发生故障，整颗卫星都将陷入瘫痪。根据国外公开资料信息，对全部在轨航天器发生的在轨故障，按照故障所属系统分类整理，结果表明电源系统产生的故障数占到了航天器故障总数的 30.3%^[3]，所占比例最大，是最有可能发生故障的系统。所以，考虑到上述各个因素，卫星电源系统的异常检测和故障诊断具备非常重要的意义。为了检测卫星电源系统可能发生的故障，并减轻故障对卫星性能的影响，本文设计了一套基于 CLIPS 的卫星电源故障诊断专家系统。

1.2 卫星电源故障诊断方法的研究现状

针对卫星电源系统的故障诊断是指，在卫星运行过程中，检测电源系统产生的状态信息，当系统发生故障时，根据信息的异常情况做出判断，确定故障产生的部位和故障产生的起因，最后能对已发生的故障提出解决方案。卫星电源系统的组成结构复杂，大到整个系统，小到每一个电子器件，都有可能产生故障。面对如此大规模的故障可能，人工干预会受到极大限制，况且星上资源也有限^[4]，因此选择一套高效而又系统的故障诊断方法，是解决问题的关键。随着国内外故障诊断理论和技术的研究进步，故障诊断的方法也层出不穷。国内外关于故障诊断方法的分类还没有统一的定义，目前多数学者普遍支持将所有的故障诊断方法归为三类：基于解析模型的故障诊断方法、基于信号处理的故障诊断方法和基于知识的故障诊断方法^[5]。

1.2.1 基于解析模型的故障诊断方法

该方法以数学模型为基础，将系统划分为互相独立的多个元件，利用一阶逻辑语言描述元件之间的逻辑关系，使各元件连接起来，从而建立系统的逻辑模型。故障诊断时，将系统的输入代入逻辑模型，对比模型推导出的预期行为和观测到的实际行为得出残差，通过对残差的分析，诊断系统发生的故障类型，并确定产生故障的元件部位^[6]。该方法具体包括观测器方法、最小二乘法法和 Kalman 滤波法等。

Masterson^[7]等针对非线性系统，利用最小二乘法设计了故障推理递推算算法，实现了自适应观测器；王小丽^[8]等针对三轴稳定卫星执行机构，同样也通过设计自适应观测器的方式，利用 Lyapunov 直接方法计算出了故障参数的近似值；Pirmoradi^[9]等针对卫星姿态敏感器，利用 Kalman 滤波法检测该系统的故障^[10]。

1.2.2 基于信号处理的故障诊断方法

该方法以信号为基础^[11]，利用计算机等专业数据处理机器，对信号进行采集、转换、评估等操作，从而得出故障信息。该方法对比基于解析模型的方法，没有复杂的建模过程，只运用数值计算的方法，使用起来方便快捷。具体包括小波分析法、傅里叶分析法（FFT）等。

赵志宇^[12]等针对滚动轴承，利用小波从复杂的轴承振动信号中提取故障信号，从而确定了故障类型、故障原因和对策；吴丽娜^[13]等针对卫星姿态控制系统，利用小波分析多分辨分析的特点，区分噪声和发生的故障，实时地对姿态控制系统进行故障检测与诊断。

1.2.3 基于知识的故障诊断方法

该方法以人工智能及计算机技术为基础，将理论概念和处理方法知识化，通过对知识的处理，实现故障诊断的智能化。该方法对比上述两种方法，由于其智能性，显示出了强大优越性，逐渐成为对于非线性等复杂系统的主流诊断方法。具体包括：定性模型方法、模糊推理方法、专家系统方法等^[14]。

（1）定性模型方法近年来受到欧美学者的高度重视^[15]，国际空间站的故障诊断系统就运用了定型模型的推理方法。当输入输出信号已知，而建立的解析数学模型不具备可控性时，即可采用定型模型的方法，对比预期行为和实际行为的残差，确定引发故障的参数集合^[16]。崔子谦^[17]针对卫星电源系统，考虑到卫星光照条件变化的影响，根据定型模型方法建立了四个分系统，设计了一套准确可靠地故障诊断系统。

（2）模糊推理方法的主要思想是模拟人脑的推理方式，近年来随着模糊控制技术在家电方面的发展而开始受到广泛关注^[18]，但是模糊推理缺少严格可靠的逻辑推理基础。马丽娜^[19]等在为模糊推理提供逻辑基础上做出了有益的尝试；李世伦针对企业预警模型，运用模糊推理的方法，为解决高度复杂的非线性系统的建模问题提供了模糊推理的途径。

（3）专家系统方法是人工智能应用研究中最活跃和最广泛的一个分支，也是基于知识的故障诊断中的研究重点。国内外学者不断深入其基础理论的研究^[20]，极大地扩大了专家系统方法的应用领域。专家系统方法在航天领域的开发应用，外国学者起步较早，有 Ali^[21]等针对航天飞机的主发动机开发的 FDIR 专家系统、Ringer^[22]等针对空间站环控生保分系统 CO₂ 去除装置开发的 FIXER 系统等。近年来国内学者对于专家系统在航天领域应用的研究也逐渐增多，杜湘瑜^[23]等设计并实现空间碎片减缓设计专家系统，通过减少空

间碎片产生、规避空间碎片冲击的方式，保护了在轨航天器；钱宇^[24]等针对在轨航天器的预警问题，为了保证在轨航天器的安全，提出建立专家系统用在航天器预警技术等。

1.3 专家系统及其开发工具

专家系统（Expert System）是人工智能最主要的分支，近年来受到社会各领域的广泛关注。Dendral^[25]是世界上第一个专家系统，该系统最初是Feigenbaum、Lederberg 等人为了判定指定物质的分子结构而设计，系统以通用问题求解的理论经验为基础，结合化学学科的专家知识^[26]，是一款高度专业化的专家系统。半个世纪以来，随着专家系统理论研究的逐渐完善、专家系统研发技术的不断革新以及知识工程（Knowledge Engineering）理论的实践应用^[27]，专家系统的应用已经深度到社会的各行各业，针对航天、交通、船舶、化学^[28]、工程^[29]、卫生^[30]、计算机等众多领域开发的专家系统数量成千上万。专家系统的发展不仅仅体现在应用规模上，还体现在，部分专家系统的性能已经达到甚至超越了同一领域内人类专家的水平^[31]，实现了领域内故障诊断的高度自动化、智能化，降低了人力成本，极大地促进了社会经济的发展进步。

专家系统的发展大致可以划分为四个阶段。

（1）初创期。这一时期的专家系统以 dendral 为代表，其特点是只针对某一特定领域进行设计，系统高度专业化，在特定领域内的问题求解效率高。但缺点在于系统不具备完整的体系结构、已研发的系统无法移植到其他领域、系统结构封闭、无法求解自身领域以外的问题等^[32]。

（2）成熟期。casnet、hearsay、prospector 等是这一时期专家系统的代表^[33]，其应用范围依然是固定的单学科领域，相比于前一时期，进步之处在于完善了系统的体系结构、已研发系统具备一定的可移植性、系统的透明性增强，使用者的门槛降低^[34]。在这一时期，专家系统的技术革新迅速，包括正向推理与不确定推理技术、知识获取技术、人机接口设计技术等众多技术由启蒙走向成熟^[35]。

（3）发展期。在这一时期，人工智能领域的理论有了重大突破，人工智能的专家们提出，专家系统应该接收多个领域内大量高质量的专业知识^[36]。思路上的突破带来应用领域的不断扩大，专家系统不在只针对单一领域设计，而是跨学科的综合性的设计^[37]。系统开发过程中可采用高级人工智能语言编程，并提供多种知识表示方式，同时采用优化的推理机控制机制^[38]，产生了

高级程序设计语言、专家系统外壳和专家系统开发工具等三个主要的大型综合专家系统研发方式。

(4) 展望期。在总结前一代大型多学科综合型专家系统的研发基础上,专家系统加入了多专家协作开发模式、多学科协同推理、人工神经网络等最新的技术成果^[39],在未来更多新技术的加入后,最新的第四代专家系统已经呼之欲出。

专家系统通常由推理机、知识库、人机接口、综合数据库和解释机等五个部分构成^[40]。专家系统将领域内的知识转化成推理机可识别的知识表示形式,然后调用推理机根据规则和事实进行推理,进而给出问题的解决方案。目前开发专家系统主要有三种方式:高级程序设计语言、专家系统外壳和专家系统开发工具^[41]。

(1) 高级程序设计语言。将知识用特定的方式来表示,就能使计算机运用识别它,目前常用的知识表示方式有产生式规则、逻辑模式、基于过程、基于脚本等^[42]。由于专家系统基本上是为符号推理而设计的,所以基于产生式的规则表示方法是目前专家系统最常运用的知识表示方式^[43],而如 C、C++ 等高级程序设计语言所擅长的是面向对象的程序设计,更适合处理数据,因此通常不适合用来开发专家系统。

(2) 专家系统外壳(shell)。常用的专家系统外壳有 EMYCIN、EXPERT 等,EMYCIN 将专家系统的知识库和推理机明确分离,允许领域内的知识的自由替换,使得推理机和用户界面可重复使用。外壳允许在已开发完成的系统的基础上方便快速地生成新的专家系统,大大缩短了系统的开发周期,缺点是必须沿用先前系统的开发方法,局限性大。

(3) 专家系统开发工具。专家系统开发工具有通用的知识表示方式和推理机制,程序开发的规模一般较小,运行时响应速度快且结果准确,因此可以十分迅速高效地完成专家系统开发。其优点是系统开发周期短、系统可维护性高、开发出来的专家系统运行效率高等,其兼具高级程序设计语言的灵活性和专家系统外壳开发周期短的特性。目前常用的专家系统开发工具是 CLIPS (C Language Integrated Production System)。

CLIPS 是由美国航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration) 于 1985 年用 C 语言设计开发的通用专家系统工具^[44],相比于其他各类专家系统开发工具,CLIPS 具备更好的兼容性,同时 CLIPS 编写出来的程序运行效率也比其他开发工具编写的高^[45]。CLIPS 的知识表达方式灵活,采用独特的 Rete 模式匹配算法进行推理,减少了事实与规则匹配所需

要的时间，从而提高系统的推理效率，适合大型的专家系统开发。目前，国内外对 CLIPS 开发专家系统的应用和研究十分普遍^[46]，这使得 CLIPS 在航天航空领域得到了更加广泛的应用^[47]。

CLIPS 的缺点也很突出，由于专家系统基本上是为符号推理而设计的，CLIPS 在数据处理方面比较吃力；此外，CLIPS 的交互界面基于文本环境，不具备开发人机交互界面的能力，系统界面友好性极低，不利于用户对系统的操作。

为了弥补 CLIPS 的上述缺点，本文采用 Visual Studio S2010 开发专家系统的人机界面、设计同数据库的数据连接^[48]；而 CLIPS 只需负责开发专家系统的核心推理模块，以动态链接库（DLL）嵌入式的方式将 CLIPS 模块嵌入到 Visual Studio 2010 开发的应用系统中。同样使用 Visual Studio 2010 设计推理诊断系统的人机界面，用来实现用户和 CLIPS 的友好交互，从而实现功能强大、界面友好的故障诊断专家系统。

1.4 论文主要内容安排

本文的研究目标为针对卫星电源系统的特点，研究电源系统的智能故障诊断技术，开发一套界面友好、操作简单、具有实际指导作用的电源故障诊断专家系统软件，为卫星电源系统在轨长期可靠运行提供技术支持。具体研究内容分为以下几个部分：

（1）查阅相关资料，梳理和总结国内外卫星电源系统常见的故障模式，确定故障诊断专家系统的诊断范围；以地球静止轨道（GEO）卫星为研究对象，首先分析卫星电源系统的工作状态，确定卫星电源系统的结构组成，再对电源系统的各个组成部分进行故障模式分析，同时选取最具代表性的特征参数，综合分析故障模式和特征参数后，利用故障树分析法建造卫星电源系统故障树。

（2）设计开发卫星电源故障诊断专家系统的知识库管理子系统。按照软件开发的流程，首先明确知识库管理系统的需求，接着根据需求分析设计知识库管理系统的整体架构，然后列出系统大致的功能模块，以及每个功能模块的小功能模块，并且设计出相关的界面和界面功能，再根据系统整体的逻辑关系设计数据库的 E-R 模型图表，依照 E-R 模型图表设计数据库的表格结构，然后再根据系统的功能需要，编程实现对数据库表格的增、删、改、查操作，最后根据系统的特殊性要求，设计实现故障诊断推理机传输来的二进制文件内容和数据库表的互相转化。

(3) 设计开发卫星电源故障诊断专家系统。同样根据系统需求设计故障诊断专家系统的整体架构, 列出系统大致的功能模块, 其中知识库管理模块已经设计完成。首先确定知识在本专家系统中的表达方式, 然后根据电源系统故障树把每个节点的信息都设计成 **CLIPS** 可以识别的形式, 再确定推理机的推理方式和故障树的搜索方式, 接着在 **CLIPS** 上验证电源系统的故障推理; 接下来完成 **C++** 与 **CLIPS** 的接口设计, 将 **CLIPS** 嵌入 **C++** 后, 开启二者的混合编程, 完成诊断推理系统的设计, 最后将诊断推理系统的推理结果和 **CLIPS** 单独运行的推理结果进行验证, 证明接口设计正确, 完成了卫星电源故障诊断系统的开发。

第 2 章 卫星电源系统故障分析

卫星电源系统负责为所有卫星分系统供能。当光照条件充足时，电源系统将光能转化为电能，并按需提供给其他分系统，同时利用蓄电池存储多余的电能。

当光照条件不充足或无光照条件时，电源系统将存储起来的化学能转化为电能，对其他系统供电。所以卫星运行状态的变化，影响到电源系统的工作状态。

2.1 卫星电源系统的工作状态

卫星的用途或种类繁多，所搭载的电源系统的组成也负载多样。目前国内对于卫星电源系统的组成没有统一的划分，但是一般卫星电源系统正常运行所需的必要部分包括：电源、电源控制设备以及电源配电和电缆网等^[49]。

其中电源和电源控制设备称为卫星的一次电源系统，国内外的航天器中，90%的一次电源系统都采用太阳电池阵-蓄电池组结构^[50]。

由于卫星所处的太空环境复杂，因此在不同的飞行状态，卫星电源系统也有不同的工作状态，具体分析如下。

2.1.1 光照期电源系统工作状态

在光照期，卫星运行位置如图 2-1 所示，处在地球和太阳之间，太阳电池阵产生的电能满足卫星有效载荷的能量需求。根据蓄电池是否需要充电，工作状态又分为以下两种情况：

(1) 若蓄电池需要充电，分流调节器先将剩余电流对蓄电池充电，然后将剩余电流进行分流；

(2) 若蓄电池不需要充电，则将全部剩余电流分流出卫星。

2.1.2 地影期电源系统工作状态

在地影期，卫星运行到地球形成的阴影里，如图 2-2 所示，此时太阳电池阵接收不到太阳照射，不在工作，转由电源系统的蓄电池组为卫星有效载荷供电。

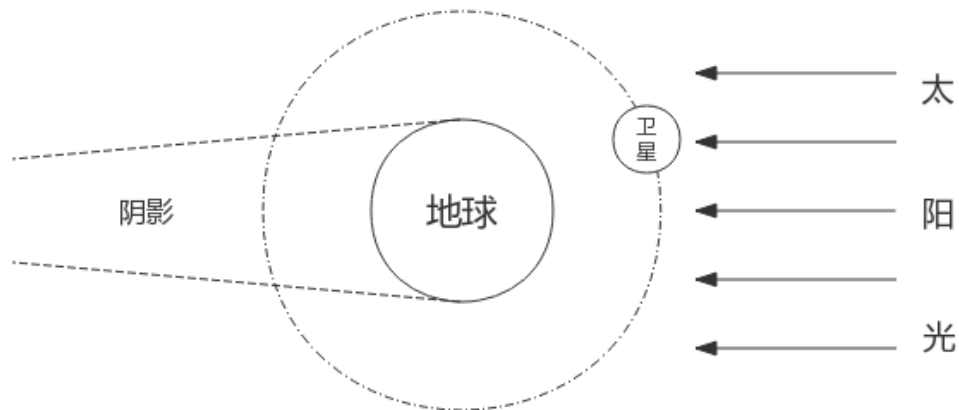


图 2-1 光照期卫星运行位置

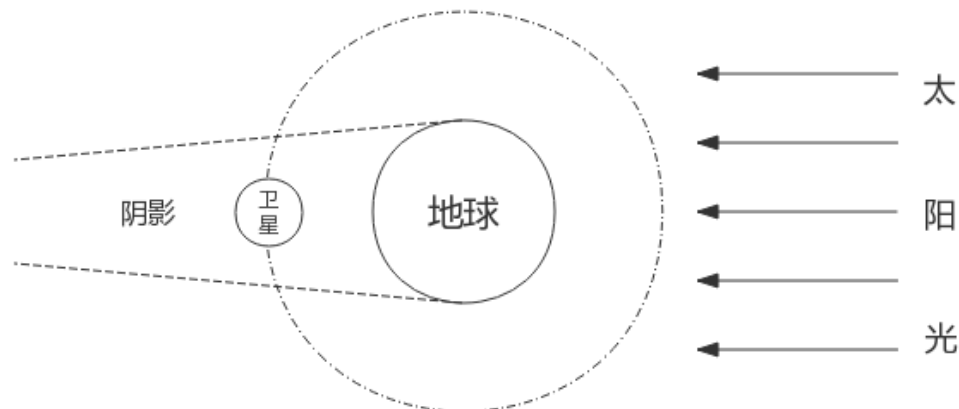


图 2-2 地影期卫星运行位置

2.1.3 入影期和出影期电源系统工作状态

在入影期和出影期，卫星运行到光照和阴影的交叉区，如图 2-3 所示，太阳电池阵产生的电能不足以满足卫星有效载荷的能量需求。在入影期，卫星从光照区进入阴影区的阶段，此时由于光照强度减少，太阳电池板产生的电能随之减少，这时太阳电池阵和蓄电池需要同时供电才能满足负载能量需求；在出影期，卫星从阴影区进入光照区的阶段，此时太阳电解板接受的光照强度逐渐增强，产生的电能也随之增加，但仍需要蓄电池配合，同时对负载供电。

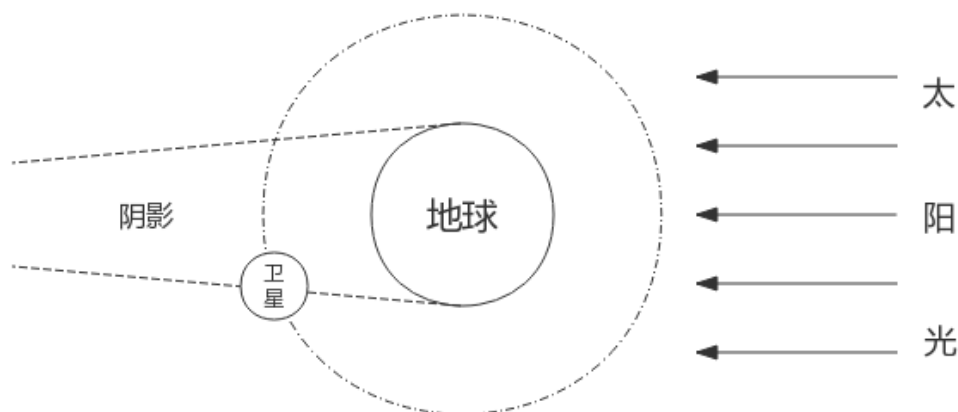


图 2-3 入影期和出影期卫星运行位置

分析电源控制设备在三个阶段的工作状态:卫星在光照期的工作模式下,分流调节器处于工作状态,充电调节器的工作状态取决于蓄电池组是否充满,放电调节器处于不工作状态;在阴影期放电调节器处于工作状态,充电调节器和分流调节器不工作;同样在入影期和出影期,放电调节器处于工作状态,充电调节器和分流调节器不工作。

2.2 卫星电源系统的结构划分

卫星电源系统结构的划分有三种方式:以能量传输方式划分、以母线控制方式划分和以系统控制方式划分^[51]。

2.2.1 能量传输方式划分

卫星电源系统的结构根据能量传输方式分为两种:直接能量传递方式(DET)和峰值功率跟踪方式(PPT)^[52]。

(1) 直接能量传递方式(DET)

直接能量传递方式的结构如图 2-4 所示。系统运行时,将蓄电池组、太阳电池阵与负载并联,同时再并联分流调节器,通过将太阳电池阵产生的多余电流分流,来限制并稳定母线电压。充电调节器与放电调节器并联,并串联在蓄电池组上。其中,充电调节器能避免蓄电池组过冲或欠充,为蓄电池组设定充电终止条件和倍率;在地影期,放电调节器期通控制蓄电池组的放电电流,用以稳定母线电压。

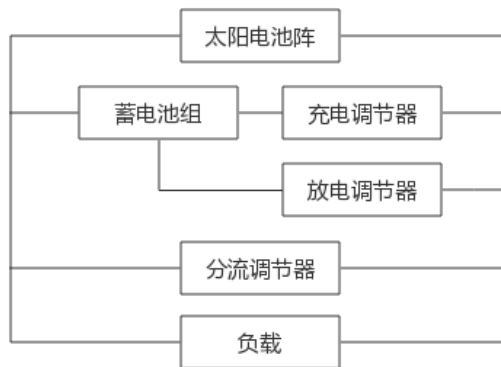


图 2-4 DET 的系统结构图

直接能量传递方式的特点在于，负载完全由太阳电池阵直接供能，在不考虑电路的能量损耗下，可以达到 100% 的传输效率；此外，太阳电池阵的输出功率还可满足蓄电池组的充电需求；而当充电池组处于充满状态时，还能通过分流调节器将过剩功率导出卫星，降低系统的热量产生。

（2）峰值功率跟踪方式（PPT）

峰值功率跟踪方式的结构如图 2-5 所示。PPT 系统结构在 DET 系统结构的基础上，将串联开关调节器串联在太阳电池阵和蓄电池组（或负载）之间。与 DET 系统结构相比，PPT 结构以损失电源系统能量传输效率为代价，实现了对太阳电池阵输出功率的最大程度利用。

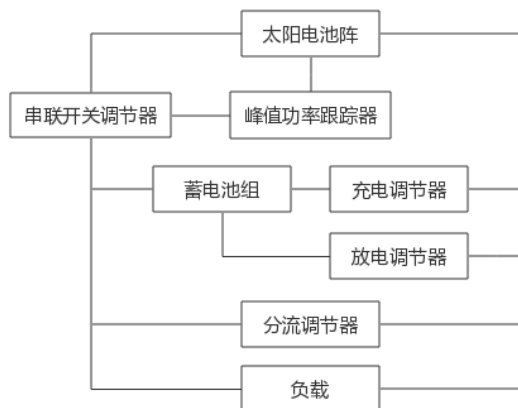


图 2-5 PPT 的系统结构图

2.2.2 母线控制方式划分

卫星电源系统的结构根据母线控制方式分为三种：不调节母线、半调节母线和全调节母线^[52]。

（1）不调节母线

不调节母线方式的结构如图 2-6 所示。在光照期，不对母线电压进行调节，受负载、光照强度、系统温度等因素的影响，母线电压随太阳电池阵的输出点也而变化；在地影期，同样不对母线电压进行调节，受蓄电池组容量、放电深度等因素影响，蓄电池组电压就是母线电压。

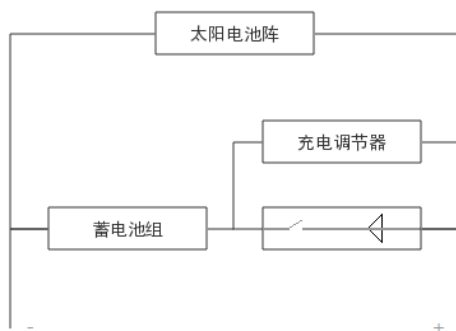


图 2-6 不调节母线的系统结构图

不调节母线方式的特点在于，功率控制结构的设计简单，但在系统运行时，母线电压的变化很大，不利于卫星的整体以及星上其他设备或系统的设计。

(2) 半调节母线

半调节母线方式的结构如图 2-7 所示。与不调节母线方式相比,半调节母线方式在地影期同样不对母线电压进行调节,但是在光照期,采用并联接入分流调节器的方式,对母线电压进行调节,使母线电压处于相对稳定。

半调节母线方式的特点在于，当卫星处于入影期或出影期时，母线的电压会由相对平稳出现明显的向下突变，虽然在地影期母线的电压会出现波动，但系统会获得很高的能量传递效率。

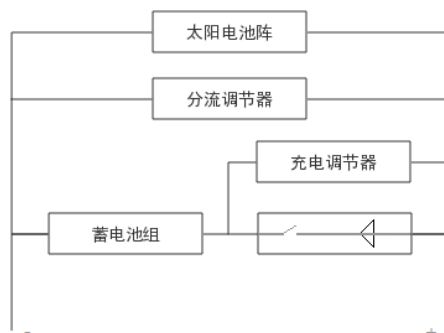


图 2-7 半调节母线的系统结构图

(3) 全调节母线

全调节母线的结构如图 2-8 所示。相比于前两种方式，全调节母线方式不仅在光照期而且在地影期都能实现对母线电压的调节。在光照期沿用半天街母线的调节方式；而在地影期，通过将放电调节器和蓄电池组串联，达到控制选电池组的放电电流的目的，从而实现实母线电压的稳定。

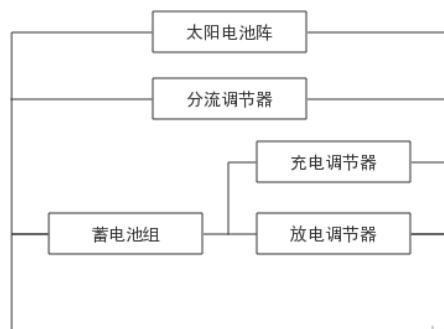


图 2-8 全调节母线的系统结构图

全调节母线方式的特点在于，无论卫星处于光照期还是地影期，都能维持电源系统的母线电压稳定，方便了卫星的整体以及其他系统的设计，有利于卫星的整体结构规划，是国内外航天器应用最多的调节方式。

2.2.3 系统控制方式划分

系统控制方式的原理是，通过电源系统电源控制部分消除由太阳电池阵、蓄电池组或负载的功率变化而引起的母线电压变化，主要包括顺序开关分流调节器型功率调节技术（S3R）、混合型功率调节技术以及串联型顺序开关分流调节器型功率调节技术（S4R）^[52]。

20 世纪 70 年代，欧洲航空局（ESA）提出 S3R 型功率调节技术，该技术将分流调节器电压、充电调节器电压和放电调节器电压通过误差放大器放大，通过分析放大器的输出值，来确定卫星电源控制部门的工作状态。其优点是，利用对电源控制部门输出值的监测，实现对母线电压调节，对电源系统负载的响应准确；然而该技术的控制电路过于复杂，对母线电压低的电源系统的蓄电池组充电电压要求高。

20 世纪 80 年代，鉴于 S3R 技术的缺陷，欧洲航空局提出了混合型功率调机技术。为了减小控制回路的复杂程度，将太阳电池阵划分为两个部分：充电阵和供电阵，两个部分互相独立，分别执行对负载的供电操作和对蓄电池组的充电操作。

20 世纪 90 年代, 欧洲航空局综合上述两者的优点, 开发出了 S4R 型功率调节技术, 该技术的特点在于, 在将控制回路划分成主误差放大调节器 (MEA) 和蓄电池误差当大调节器 (BEA) 两个控制域, 降低了电源系统控制回路的复杂程度的同时, 还能保持较高的电源系统太阳能电池阵能量传输效率。

2.3 卫星电源系统的故障模式分析

本文选取卫星电源系统中太阳能电池阵、电源控制器、蓄电池组等三个部分作为故障模式分析的对象, 其中电源控制器又可具体分为充电调节器、放电调节器和分流调节器。

2.3.1 太阳能电池阵故障模式分析

太阳能电池阵电路是太阳能电池阵发生故障频率较高的部分, 其次为展开机构和对日定向驱动机构等。

(1) 太阳能电池阵电路故障

太阳能电池阵的电路故障主要为电路短路、电路开路以及性能衰退等。其中较为严重的故障是电路短路故障和电路开路故障, 直接影响太阳电池的充电功能, 降低电池阵输出功率; 而性能衰退故障会则会减少卫星的工作寿命。

外太空环境是太阳能电池阵电路产生故障的主要原因, 太阳能电池阵的组成元件由于制作工艺的差异, 在长期受强辐射、高低温交替等因素的影响下, 会产生物理上的损坏, 进而导致元件所在电路的电路故障。针对以上故障产生原因, 可以通过采用高稳定性材料等措施来解决。

(2) 对日定向驱动机构故障

当卫星执行对日定向命令时, 如果阳光在太阳能电池阵的入射角在 0-90 度之间, 即可认定对日定向驱动机构发生故障。该故障会导致太阳能电池阵的输出功率降低, 导致卫星不能获得足够的电源来完成指定任务。太空环境的高、低温以及强辐射导致的驱动机构摩擦增加, 是对日定向驱动机构的主要故障原因。

(3) 展开机构故障

太阳能电池阵能否展开决定了卫星能否获得运行所必需的能源, 关系到卫星能否顺利执行任务。如果展开机构导致太阳能电池阵不能展开, 那这颗卫星就与太空垃圾无异; 如果太阳能电池阵未完全展开, 处于半展开状态时, 导致电池产生的总功率无法满足卫星载荷的需求, 降低卫星的工作寿命。

当力矩不满足展开机构的要求时，就会产生展开机构故障，低温或高温环境会导致展开机构的摩擦力增大，导致展开力矩不足。当故障发生时，可通过开启助推装置协助展开机构展开。

2.3.2 蓄电池组故障模式分析

与太阳电池阵类似，蓄电池组的故障模式主要是性能衰退、短路或开路等。

（1）蓄电池组性能衰退

蓄电池组性能衰退的原因很多，对于已工作较长时间的蓄电池组，其使用内阻往往会变大，其内部的活性物质也有泄漏或者脱落的可能。故障的表现主要是蓄电池电压突然减小、蓄电池容量降低等。可通过在卫星设计阶段选用高性能的蓄电池来改善。

（2）蓄电池单体短路或开路

蓄电池组是由多个蓄电池单体以串联的方式组成，当某个蓄电池单体出现故障时，就会导致蓄电池组整体电压和容量的下降，虽然产生的影响或许不严重，但也会增加蓄电池组的放电深度。一般可通过为每个蓄电池单体并联二极管的方式来降低故障产生的可能。

2.3.3 分流调节器故障模式分析

分流调节器主要的故障模式包括分流调节器不分流和分流调节器恒分流。

（1）分流调节器不分流

当电源系统需要分流器对某电路分流时，并无分流电流产生，即可认定出现分流调节器不分流故障。一般是由于误差放大器将采集生成的错误样本传送至分流开关，使得分流开关做出截止行为，也有可能是采集开关或分流电路出现故障。分流调节器不分流故障会导致负载电流增大，导致母线电压低于正常值。

（2）分流调节器恒分流

当电源系统需要某电路不分流时，该电路有分流电流产生，即可判断出现分流调节器恒分流故障。该故障的故障原因与故障表现和分流调节器不分流故障相反，因此不再多做叙述。

2.3.4 充电调节器故障模式分析

充电调节器的主要故障包括充满断开、充电回路短路或断路。

(1) 充满断开失效

当蓄电池组的控制测量装置（或传感器）故障时，就会产生充满断开失效故障，会导致系统接收不到蓄电池组已充满的消息，使蓄电池组处于过充电状态。该故障轻则导致蓄电池寿命降低，重则使蓄电池组急剧升温，引发爆炸。

(2) 充电回路短路或断路

当充电调节器不能控制蓄电池组充电时，就代表发生了充电回路短路或断路故障，充电调节器损坏或者控制信号错误都会导致产生该故障。这样蓄电池组只会放电，而无法充电，最终会导致卫星寿命的结束。

2.3.5 放电调节器故障模式分析

放电调节器的故障模式主要包括升压器不升压和升压器无输出等。

(1) 升压器无输出

升压器短路会导致升压器无输出故障。虽然卫星电源系统一般配有多个升压器，但是其中一个升压器无输出会导致其他升压器的工作负担增加，最终会减少其使用寿命，导致卫星报废。

(2) 升压器不升压

当升压调节器控制蓄电池组放电时，蓄电池组电压与母线电压相同，这就是升压器不升压故障，一般是由放电调节器短路导致的。故障表在为蓄电池组放电电流变小，母线电压与蓄电池组电压相同且一直波动，其余表现与半调节母线的缺陷相同。

2.4 卫星电源系统诊断规则提取

本节从 2.3 节归纳选取七个具有代表性的故障用于协助卫星电源系统的诊断规则提取，分别是

- (1) 太阳电池阵输出性能下降；
- (2) 分流调节器无法分流；
- (3) 供电阵的分流调节器恒分流；
- (4) 充电阵的分流调节器恒分流；
- (5) 放电调节器不升压；

- (6) 蓄电池短路;
- (7) 蓄电池组性能衰退;

2.4.1 特征参数的选取

文章^[53]利用 Simulink 建立了卫星电源系统的仿真模型。以故障发生后最后一个周期作为分析对象,对比发生故障时和正常状态时的所有变量,选取最具代表性的六个数据作为特征参数,分别是

- (1) 快速充电时间(t);
- (2) 母线电压(U)
- (3) 放电深度(DOD)
- (4) 蓄电池充电电压(Uchange);
- (5) 快速充电电流(Ichange)
- (6) 太阳电池阵输出电流(Isat)

2.4.2 故障树分析法

故障树是一种特殊的树状结构^[54],树的节点通常表示某一事件,相互连接的节点体现事件节点之间的因果逻辑。通常子节点是父节点的“因”,父节点是子节点的“果”。

故障树分析法(FTA)以故障树为分析对象,运用演绎法构建故障树的层次关系。其中,故障事件用树的节点表示,通过逻辑门符号与(\square)、或(\cup)、非(\triangle)等将故障节点连接起来,体现出故障节点的内在联系和因果关系,主要用于复杂系统的可靠性、安全性分析以及风险评估^[55]。运用故障树分析法建立的故障树,要满足内容上的完整性和逻辑上的可靠性,因此在建立过程中需要注意以下几个方面:

(1) 针对诊断对象进行故障模式分析,可参考权威学术文献、设备结构原理图、维修经验等。将分析所得的故障记录下来,寻找故障之间存在的逻辑对应关系。

(2) 选择合适的故障节点作为故障树的根,然后将直接引起根故障的故障节点作为根节点的子节点,同理再针对根节点的子节点,寻找引起子节点故障的故障节点,作为故障树的第三层节点,以此类推,最后完成故障树的建立。

(3) 故障树的规模应当适中,如果规模太大,将会极大加重分析负担,如果规模太小,则不能完全涵盖系统的故障信息,同样也不利于故障分析。

因此故障树故障节点和层次的划分必须做到严格而又高效。

2.4.3 基于故障树分析法的卫星电源系统故障树的构建

卫星电源系统故障树研究中，“电源系统故障”是最直观、最容易检测到的故障，以此作为故障树的顶事件。而电源系统又可划分为太阳电池阵、电源控制器和蓄电池组三部分，因此将三者作为故障树的中间事件。以此类推，分别找出每个父节点故障事件所有的直接原因，作为下一级中间事件，最终完成故障树的建立，如图 2-9 所示。

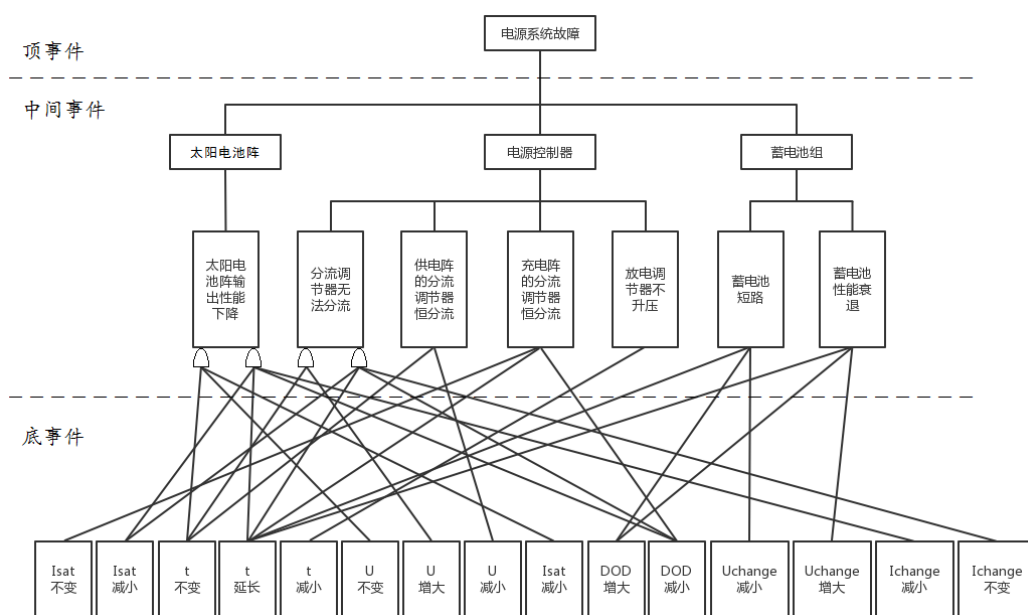


图 2-9 卫星电源系统故障树

根据上面的故障树，可以提炼出如下 9 条诊断规则：

- (1) If “快速充电时间 t 不变” and “母线电压增大” then “卫星电源系统分流调节器无法分流故障”；
- (2) If “快速充电时间 t 不变” and “母线电压减小” then “卫星电源系统供电阵的分流调节器恒分流故障”；
- (3) If “快速充电时间 t 不变” and “母线电压 U 不变” and “电池阵输出电流减小” then “卫星电源系统太阳电池阵性能下降故障”；
- (4) If “快速充电时间 t 延长” and “放电深度 DOD 增大” and “蓄电池充电电压 U_{charge} 增大” then “卫星电源系统的蓄电池组性能衰退故障”；
- (5) If “快速充电时间 t 延长” and “放电深度 DOD 增大” and “蓄电池充电电压 U_{charge} 减小” then “卫星电源系统的蓄电池短路故障”；

(6) If “快速充电时间 t 延长” and “放电深度 DOD 减小” and “太阳电池阵输出电流 I_{sat} 不变”， then “卫星电源系统充电阵的分流调节器恒分流故障”；

(7) If “快速充电时间 t 延长” and “放电深度 DOD 减小” and “太阳电池阵输出电流 I_{sat} 减小” and “快速充电电流大小减小” then “卫星电源系统太阳电池阵性能下降故障”；

(8) If “快速充电时间 t 延长” and “放电深度 DOD 减小” and “太阳电池阵输出电流 I_{sat} 减小” and “快速充电电流大小不变” then “卫星电源系统分流调节器不分流故障”；

(9) If “快速充电时间 t 减小” then “卫星电源系统放电调节器不升压故障”。

2.5 本章小结

本章从对卫星电源系统的工作状态分析入手，根据电源系统的结构组成进行故障模式分析，并从中总结提炼出七条最具代表性的故障模式，同时选取六条最具代表性的特征参数，再以此为基础运用故障树分析法建立卫星电源故障树，最后基于此故障树提炼出卫星电源系统的故障诊断规则。

第 3 章 知识库管理系统的设计与实现

卫星电源故障诊断专家系统主要由知识库管理系统（KBMS）、故障诊断推理机和人机交互界面这三个部分组成。其中知识库管理系统主要负责对故障诊断专家系统的知识进行分类、表示、获取、管理与组织。

故障诊断专家系统的推理、决策和得出最终结果的过程，实际上就是对知识进行匹配、演算和归纳的过程，这些知识都是由知识库提供的。知识是专家系统的核心，决定了专家系统解决问题的能力，因而从某种意义上来说，知识库管理系统性能的好坏决定了故障诊断专家系统诊断能力的高低，甚至影响到系统的成功与否。因此设计出一款管理高效、功能完善的知识库管理系统对于故障诊断专家系统性能的提升是十分重要的。

3.1 知识库管理系统需求分析

本文中，知识库管理系统的主要功能是用来管理故障诊断专家系统在诊断、推理和决策时用到的故障实例和诊断规则等。系统需具备以下功能：一、在知识的管理中，为用户提供方便快捷的增加、删除、修改、查询等基本操作；二、能实现从数据库格式到推理机可识别的二进制文件格式之间的转换；三、提供知识的一致性检验、完备性检验和冗余检验。

3.1.1 系统性约束

本文所设计的知识库管理系统的系统约束表如表 3-1 所示。

表 3-1 系统约束表

系统约束	说明
平台约束	Windows 系统、Visual Studio 2010 开发环境
语言约束	C++、Sql
数据约束	SQL Server 2010
行业约束	遵守 CMM5 开发流程

3.1.2 功能性需求

（1）用户注册。通过用户注册功能，为登录系统的用户提供注册渠道，注册用例图如图 3-1 所示。

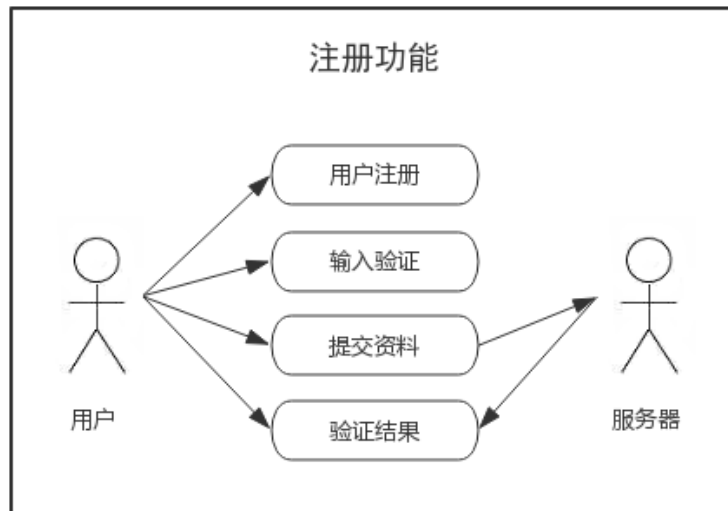


图 3-1 注册用例图

(2) 用户登录。已注册用户可进入系统管理界面，登录用例图如图 3-2 所示。

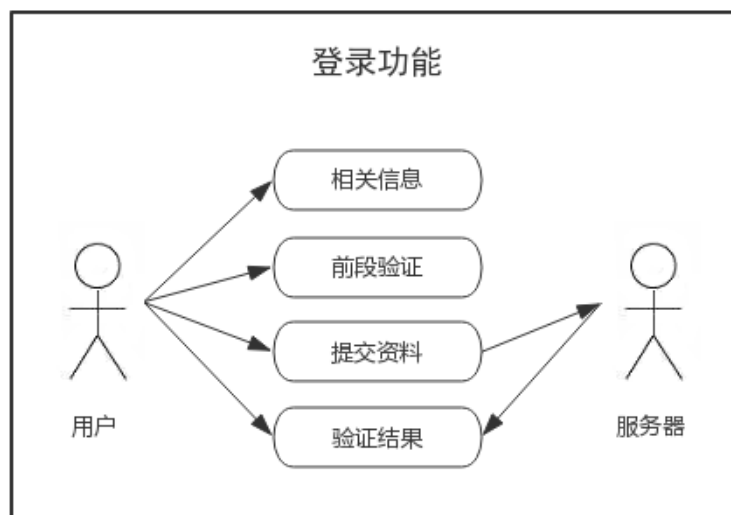


图 3-2 登录用例图

(3) 数据库操作。用户可对知识进行增加、删除、修改和查询等操作，数据库操作用例图如图 3-3 所示。

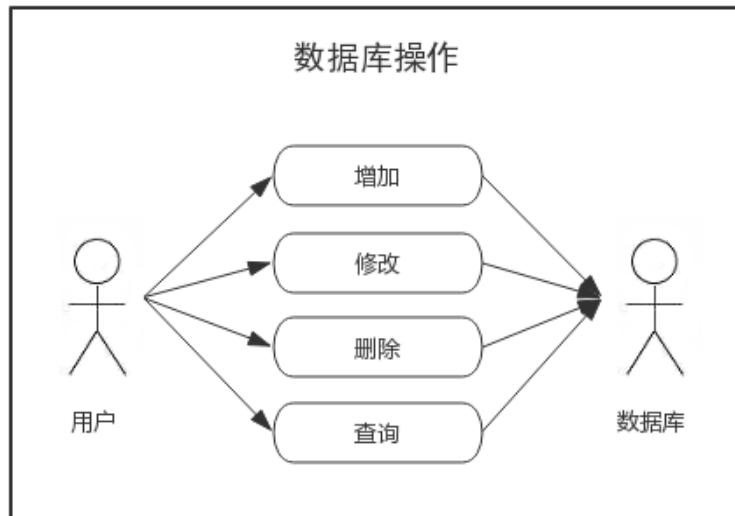


图 3-3 数据库操作用例图

(4) 知识的检查管理。用户可对知识进行检查管理，包括一致性检查、完备性检查和冗余检查。知识的检查管理用例图如图 3-4 所示。

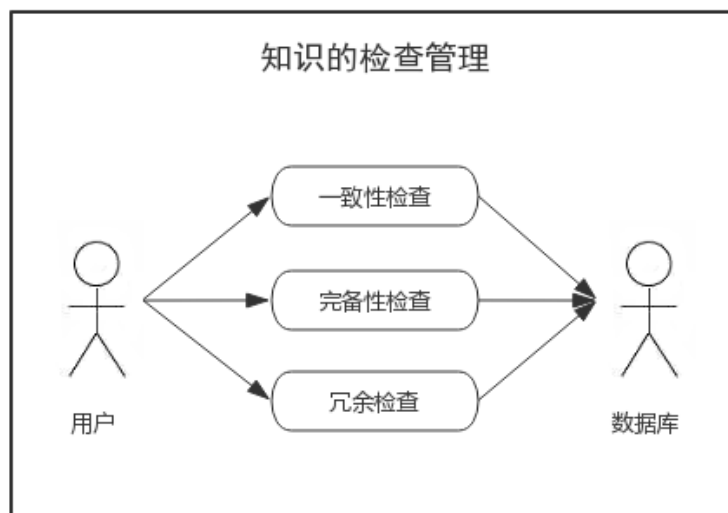


图 3-4 知识的检查管理用例图

3.1.3 需求调查表

综合上述功能性需求分析，本文知识库管理系统的功能需求调查表如表 3-2 所示。

表 3-2 需求调查表

需求标识	需求分类	用户需求描述	相关需求
用户登录 1	基本功能	用户输入用户名和密码，正确进入系统，错误进入提示界面	用户登录 2
用户登录 2	扩展功能	对空的用户名或密码，都会有相应的错误提示	无
数据库操作	基本功能	系统响应用户的增删改查操作，把操作结果反馈回用户	数据库操作 2
数据库操作 2	扩展功能	对用户的误操作或非法操作，都会有相应的错误提示	无
知识的检查管理	基本功能	对数据库内知识进行一致性检查、完备性检查和冗余检查，不符合规范的知识有提示反馈	无

3.2 知识库管理系统设计

如图 3-5 所示，本系统整体架构主要分为三大部分：用户端、中间层和数据存储端。

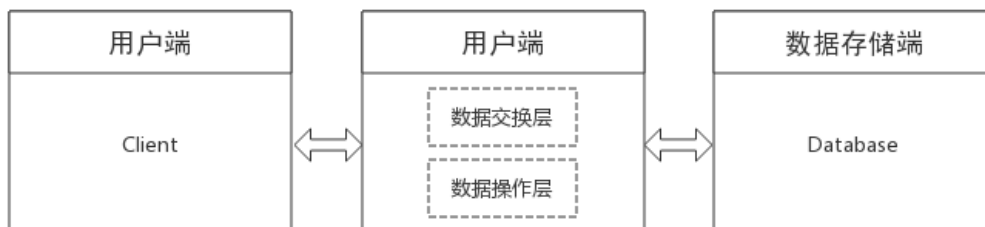


图 3-5 整体架构图

中间层又分为数据交换层和数据操作层：数据交换层在数据交换中起到上传下达的作用，它是数据操作层的调用者，同时也是用户端的被调用者；数据操作层是对数据进行操作，换言之，数据操作层的主要工作对象是数据库内的数据，而不是数据库，服务对象是数据交换层。

3.2.1 数据流图

数据的更新或加载是知识库管理系统运行的日常工作，数据流的流动和对数据处理的结构如图 3-6 所示。

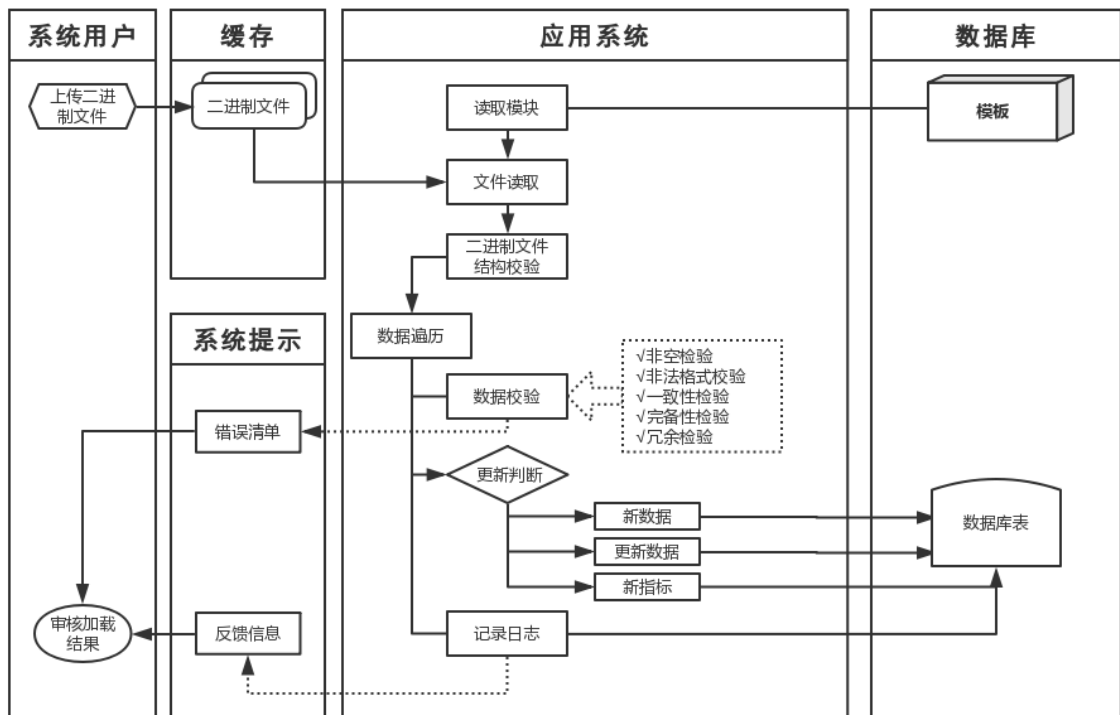


图 3-6 数据流结构图

3.2.2 数据库设计

根据系统整体的逻辑关系，设计出如图 3-7 所示的 E-R 模型图表结构。

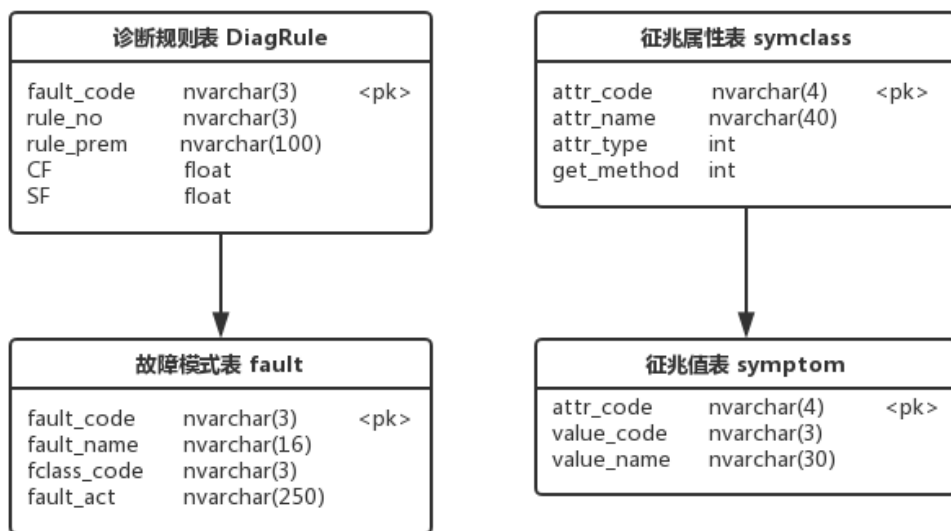


图 3-7 E-R 模型图

分析上述 E-R 模型图，E-R 图之间基本以单线连接，复杂程度不高。结

合系统整体的数据逻辑关系清晰简洁的特点，将知识库分为两个子库：诊断规则库和征兆属性库。

(1) 诊断规则库主要存储故障的诊断规则和故障的具体参数等信息。由诊断规则表 (DiagRule) 和故障模式表 (fault) 两个数据库表组成。

诊断规则表 (DiagRule) 和故障模式表 (fault) 的设计分别如表 3-3 和表 3-4 所示。

表 3-3 诊断规则表 (DiagRule)

序号	列名	数据类型	长度	标识	主键	外键	允许空	说明
1	fault_code	nvarchar	3	是	是		否	故障代码
2	rule_no	nvarchar	3				是	规则序号
3	rule_prem	nvarchar	100				是	规则前提
4	CF	float	[-1,1]				是	规则可信度
5	SF	float	[0,1]				是	故障严重度

表 3-4 故障模式表 (fault)

序号	列名	数据类型	长度	标识	主键	外键	允许空	说明
1	fault_code	nvarchar	3	是	是		否	故障代码
2	fault_name	nvarchar	6				是	故障名称
3	fclass_code	nvarchar	3				是	所属类别
4	fault_act	nvarchar	250				是	故障对策

诊断规则表 (DiagRule) 和故障模式表 (fault) 设有相同的字段“fault_code”，将两个表的主键均设置为该字段，用以方便未来的联表查询。

(2) 征兆属性库主要存储征兆的具体参数和征兆值的参数等信息，由征兆属性表 (symclass) 和征兆值表 (symptom) 两个数据库表组成。

征兆属性表 (symclass) 和征兆值表 (symptom) 的设计分别如表 3-5 和表 3-6 所示。

表 3-5 征兆属性表 (symclass)

序号	列名	数据类型	长度	标识	主键	外键	允许空	说明
1	attr_code	nvarchar	4	是	是		否	属性代码
2	attr_name	nvarchar	40				是	属性名称
3	attr_type	int	{0,1}				是	征兆类型 (0-主要征兆 1-辅助征兆)
4	get_method	int	{0,1}				是	征兆获取方式 (0-自动 1-对话)

表 3-6 征兆值表 (symptom)

序号	列名	数据类型	长度	标识	主键	外键	允许空	说明
1	attr_code	nvarchar	4	是	是		否	所属类别
2	value_code	nvarchar	3				是	征兆代码
3	value_name	nvarchar	30				是	征兆名称

由于一个征兆有可能对应多个征兆值，本文将征兆值表设计成三列，分别为“attr_code”、“value_code”和“value_name”，这样的设计既能将全部征兆值存入同一个表，又能保持征兆值原有的逻辑从属关系不变。

同样的，征兆属性表 (symclass) 和征兆值表 (symptom) 也设有相同的字段“attr_code”，将两个表的主键均设置为该字段，用以方便未来的联表查询。

3.3 知识库管理系统的操作

知识库管理系统采用 Visual Studio 2010 开发环境支持的 C++ 语言开发系统的用户端界面，用户在用户端界面即可方便快捷地实现检索、修改、添加和删除等操作。

3.3.1 登录模块

登录模块的基本功能，就是实现用户正确输入用户名和密码后，进入知

识库管理系统，此外还具备记住账号密码功能和找回密码功能。登录模块窗体运行界面如图 3-8 所示。



图 3-8 登录模块窗体运行界面

3.3.2 主界面模块

主界面模块由四个区域组成，分别是菜单栏、功能选择区、信息显示区和树状图显示区，如图 3-9 所示。

(1) 菜单栏。菜单栏的功能包括：用户中心、系统日志、数据库表和二进制文件相互转换等。

(2) 功能选择区。该区域包括查找、增加、修改和删除功能，以满足用户对数据库的操作需要。

(3) 树状图显示区。该区域将数据库表以树状图的形式展示给用户，知识库的结构组成一目了然。

(4) 信息显示区。用以显示用户对系统的操作和检索结果。



图 3-9 主界面模块

3.3.3 数据库操作模块

数据库操作模块有两个子模块：添加模块和查询模块。以对征兆属性表的操作为例，如图 3-10 所示，选择“征兆属性库”并点击添加按钮即可进入添加子模块。模块功能：搜索征兆属性表内所有信息并打印在主界面的信息显示区；进入添加子模块后，用户根据提示要求录入新的一条征兆属性信息。

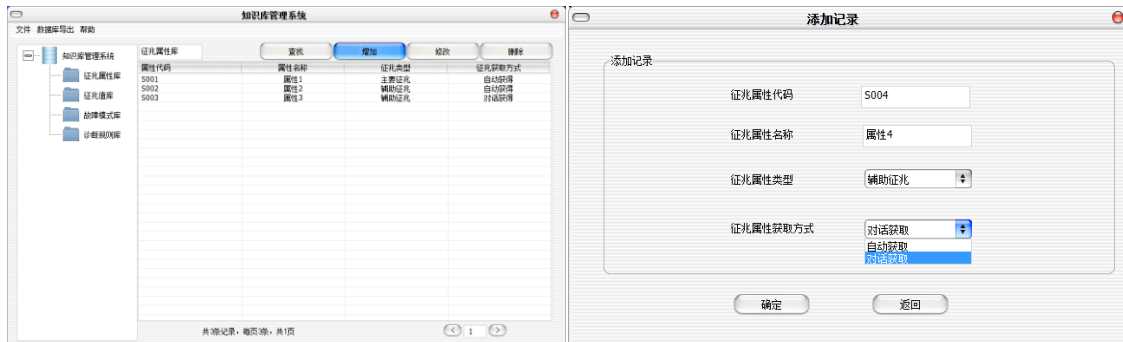


图 3-10 添加子模块

还是以对征兆属性表的操作为例，如图 3-11 所示，选择“征兆属性库”并点击查找按钮即可进入查询子模块。模块功能：支持用户在任意字段以精确查询或模糊查询的方式查找当前表内信息，并支持对查询结果进行删除、修改等操作。

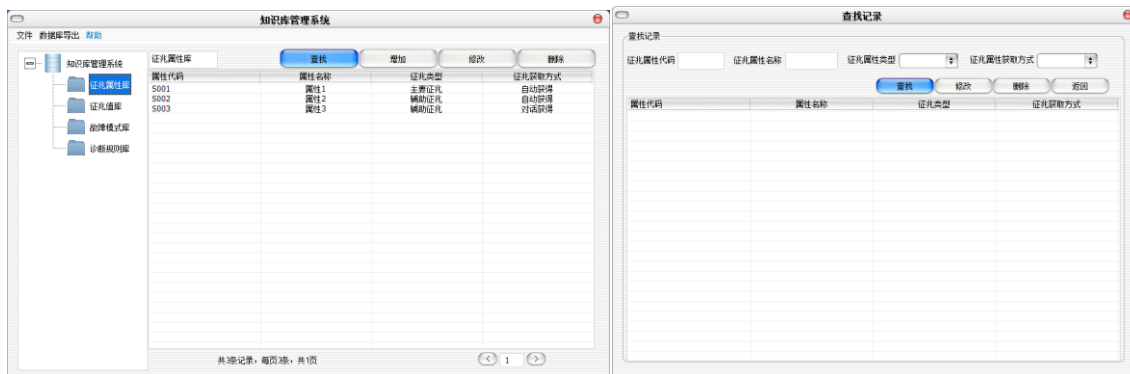


图 3-11 查询子模块

对表内信息的删除和修改除了上述操作方式外，还可在主界面的信息显示区选中目标信息直接进行删除和修改，如图 3-12 所示。

数据库表	征属属性表 symclass	Attr_code		二进制文件	征属字典 symp.dic	Unit_Num		数据库表	征属属性表 symclass	Attr_code		二进制文件	征属字典 symp.dic	Unit_Num	
		Attr_name				Attr_Name				Attr_Name					
	Attr_type		Attr_code			Attr_type			Attr_code		Attr_way				
	get_method		Attr_type			get_method			Value_Num						
	attr_code		Attr_way			Attr_code			Value_Num						
	value_code		Value_Name			Value_code			Value_Name						
	value_name		Value Code			Value_name			Value Code						
	fclass_code		Fault_Num			fclass_code			Fault_Num						
	fclass_name		Fault_code			fclass_name			Fault_code						
	故障类列表 fclass	fault_name			故障字典 fault.dic	Fault_Name			数据库表	故障模式表 fault	fault_name			二进制文件	故障字典 fault.dic
fault_code		Fault_Mess		fault_name			Fault_Mess								
fclass_code		Fault_Num		fclass_code			Fault_Num								
fault_act		Fault_code		fault_act			Fault_code								
故障模式表 fault	fault_code		故障知识库 act.kbf	Fault_idea		故障知识库 act.kbf	故障模式表 fault	fault_mean		故障知识库 act.kbf	故障模式表 fault	Fault_idea			
rule_no		Unit_Num			fault_code				Unit_Num						
rule_pren		Fault_code			rule_no				Fault_code						
CF		Father_code			rule_pren				Father_code						
诊断规则表 DiagRule	SF		诊断知识库 diag.kbf	child_code		诊断知识库 diag.kbf	诊断规则表 DiagRule	CF		诊断知识库 diag.kbf	诊断规则表 DiagRule	child_code			
				Rule_Num					Rule_Num						
				Rule_No					Rule_No						
				Rule_Prem					Rule_Prem						
				CF1				CF1				CF1			

[illegible]

由图 3-13(a)和 3-13(b)分析可知，征兆属性表(symclass)的全部字段对应征兆字典(sympt.dic)的一部分字段，征兆值表(symptom)的全部字段对应征兆字典(sympt.dic)的剩余部分字段。即征兆属性表(symclass)和征兆值表(symptom)的全部字段正好和征兆字典(sympt.dic)的全部字段完全对应。

再分析图 3-13(c)，故障字典(fault.dic)的全部字段对应故障模式表(fault)的一部分字段，对策知识库(act.kbf)的全部字段对应故障模式表(fault)的剩余部分字段。即故障字典(fault.dic)和对策知识库(act.kbf)的全部字段正好和故障模式表(fault)的全部字段完全对应。

最后分析图 3-13(d)，不难看出，诊断规则表(DiagRule)和诊断知识库(diag.kbf)的全部字段完全对应。即两者是一一对应的关系。

基于以上分析，不难得出二者互相转化的算法流程图。

二进制文件转为数据库表（以征兆字典 sympt.dic 转为数据库表为例）的流程图如图 3-14 所示；数据库表转为二进制文件的流程图如图 3-15 所示。

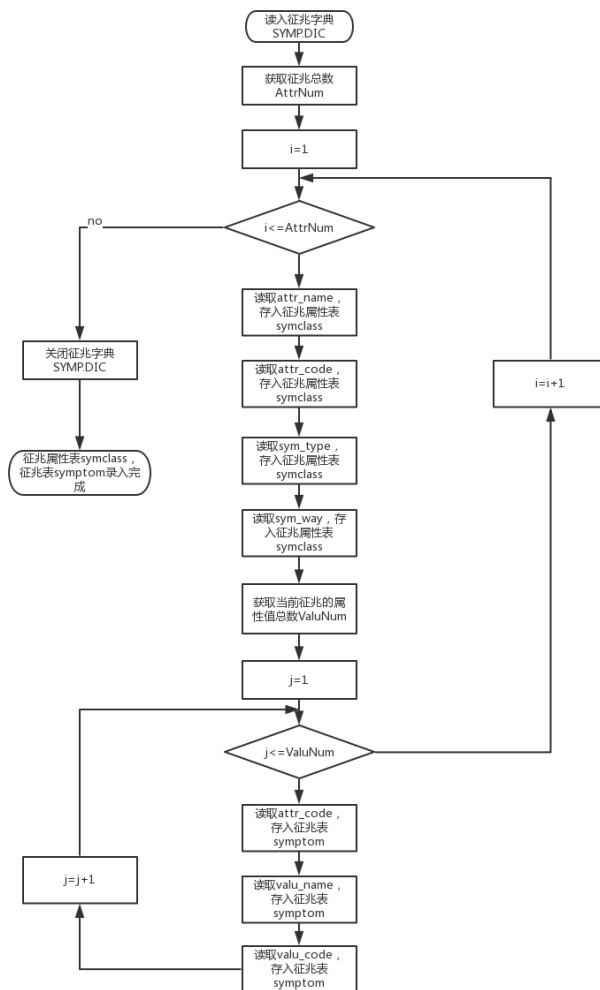


图 3-14 征兆字典 sympt.dic 转为数据库表

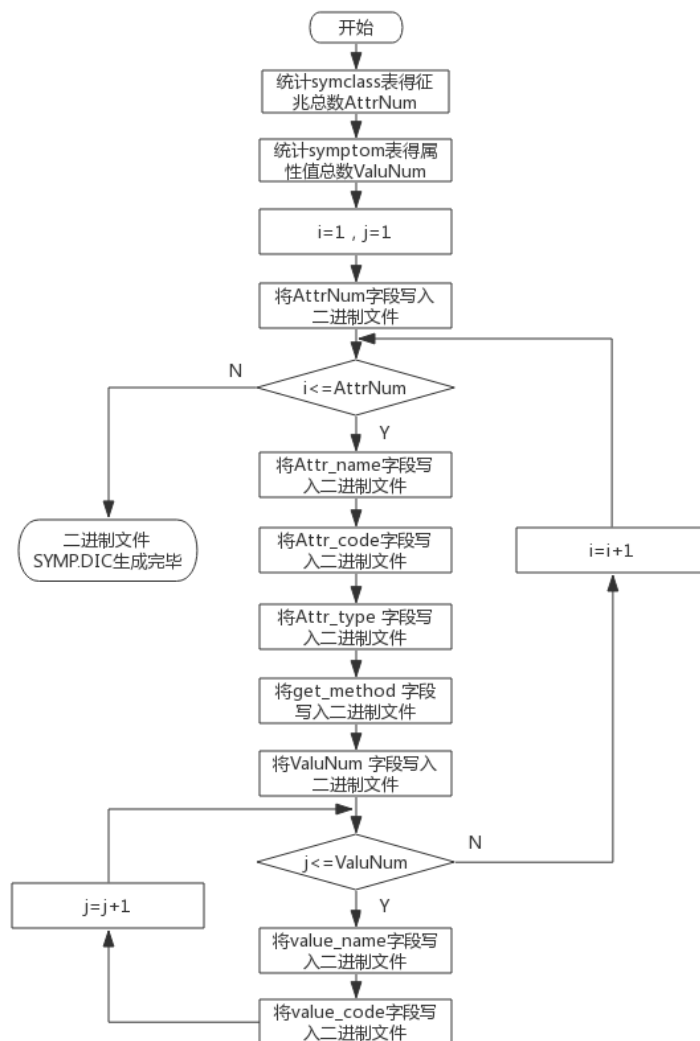


图 3-15 数据库表转为征兆字典 symp.dic

3.4 知识库管理系统的维护

专家系统知识库的规模在建立之初一般较小，随着专家系统使用频率的增加以及后续知识的添加，其规模才会逐渐扩大。对于知识库管理系统的维护，在规模很小的情况下，可以通过人工的方法进行检测维护，一般适用于程序发开人员对结构简单的知识进行知识库维护；而在系统交付用户使用后，大量的事实和规则都会陆续存储到知识库中，库内的知识不仅组成结构复杂，而且知识之间逻辑关联杂乱，这时仅仅靠人工手段逐条检查库内知识已不现实，这就需要针对知识库管理系统设计一套完备的维护算法，用以代替人工检查的方式。考虑周全的维护算法应当具备冗余检验、知识的一致性检验以及知识的完备性检验的能力。

(1) 冗余检验。冗余是一般指两条规则的前提条件相同，结论也相同的情况。假设已知两条规则：

Rule1: IF A THEN C₁;

Rule2: IF B THEN C₂;

对这两条规则进行冗余检验，其算法流程如图 3-16 所示。

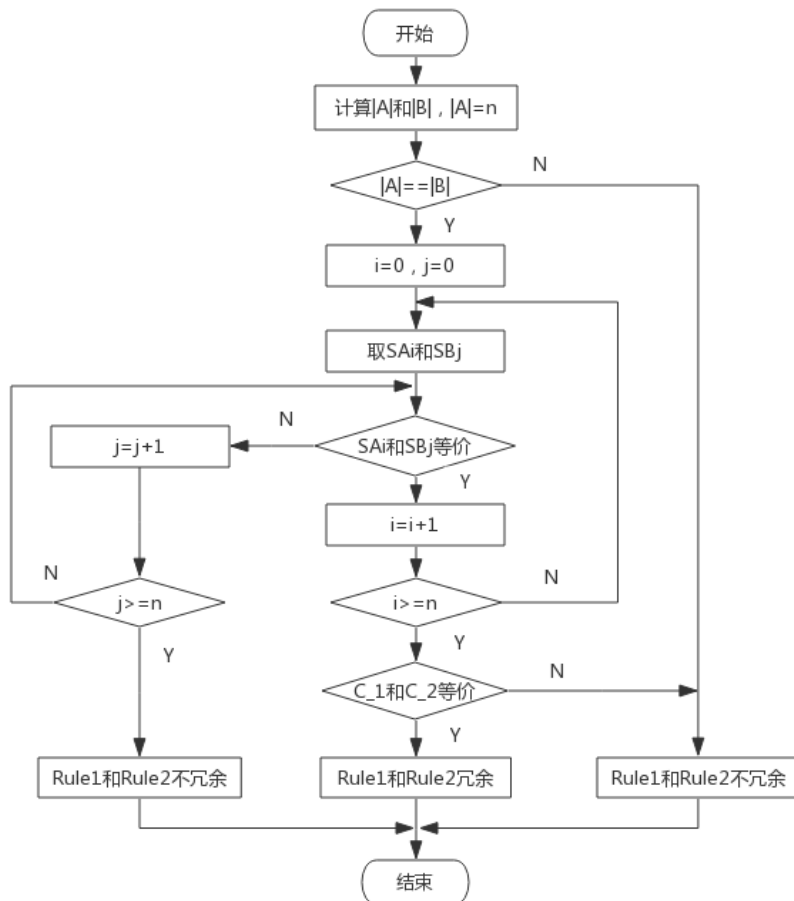


图 3-16 冗余检验流程图

其中 SA_i 为前提 A 的第 i 个子前提， SB_j 为前提 B 的第 j 个子前提，算法思想是先以前提 A 为基准，将前提 B 与前提 A 匹配，匹配成功则代表 Rule1 和 Rule2 的前提等价，进而再判断 C₁ 和 C₂ 是否等价，若两者也等价即可认定 Rule1 和 Rule2 存在冗余。

(2) 知识的一致性检验。知识库管理系统的一致性检验主要应用在对数据库执行添加命令时。当用户向知识库添加新规则时，如果新规则的前提与已有规则的前提相同，而两者的结论矛盾，程序的一致性检验算法就会触发警告。假设已有规则集 Set，和待添加规则“IF A THEN B”，执行添加命令后，一致性检验的流程如图 3-17 所示。

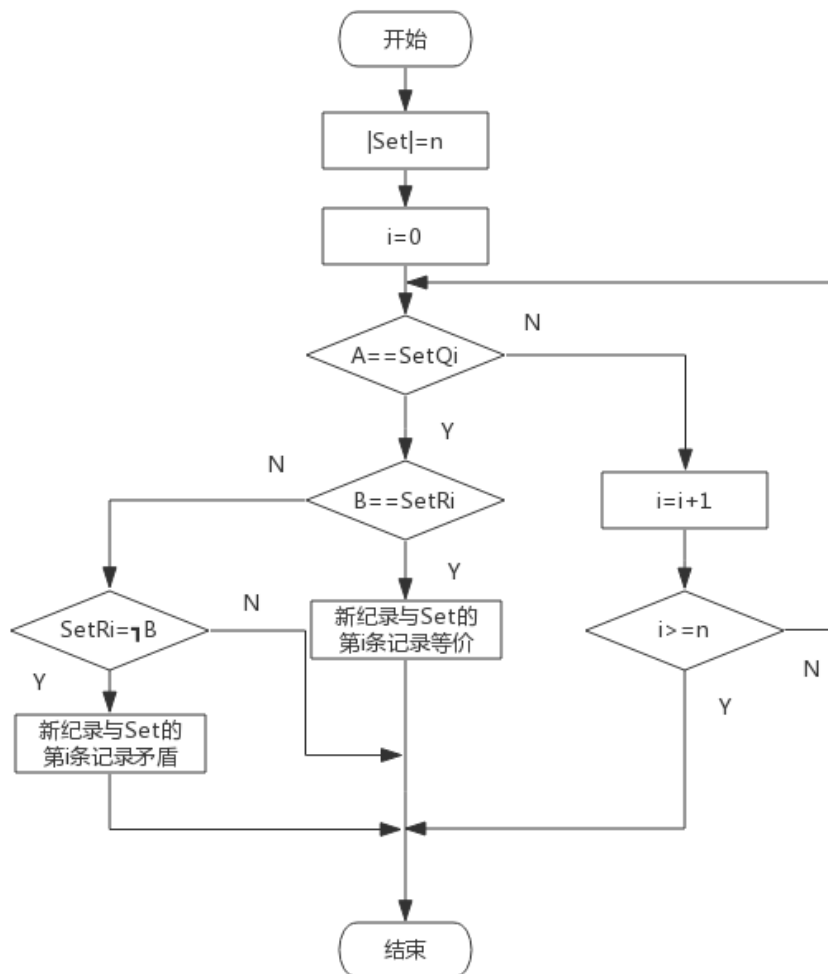


图 3-17 一致性检验流程图

其中 $\text{Set}Q_i$ 为规则集 Set 内第 i 个规则的前提， $\text{Set}R_i$ 为规则集 Set 内第 i 个规则的结论，算法思想是，将新规则的前提 A 依次与规则集 Set 内第 i 条规则的前提 Q_i 匹配，其中匹配算法调用冗余检验的前提匹配算法，若匹配成功则判断新规则的结论 B 与规则集 Set 内第 i 条规则的结论 R_i 是否矛盾，如果矛盾即可认定新规则无法通过一致性检验。

(3) 知识的完备性检验。知识库管理系统的完备性检验主要在用户使用系统时使用删除功能删除知识库内知识时生效。假如用户因为误操作而删除了某一条规则，导致的后果是知识库内规则之间的逻辑关系缺失，进而导致系统无法执行对该规则有需求的推理操作，对故障诊断专家系统的危害极大。因此在用户执行删除某一条规则的命令时，系统对用户提示警示信息，同时在警示界面打印该规则的部分重要信息以及它与其他规则的逻辑关系，进而避免知识库的完备性缺失。

3.5 本章小结

本章主要完成知识库管理系统的设计，从对系统的需求分析，到对系统的整体结构设计，再到对系统的具体功能设计，最后针对知识库的管理维护设计三种检验方式。

第4章 卫星电源故障诊断专家系统的诊断推理机制设计

本章主要完成对卫星电源故障诊断专家系统的子系统——诊断推理系统的设计开发。

4.1 卫星电源故障诊断专家系统的结构

专家系统发展至今，其结构组成已经十分完善，各部分或模块之间分工明确合理。针对不同的研发对象，专家系统的功能都可以概括为推理问题和诊断故障两方面，因此各类专家系统的结构也基本大同小异，所以知识库和推理机是专家系统最重要的模块。在此基础上，为了能高效便捷的对知识库进行操作，还应增加知识库管理模块；为了能让用户更好的理解推理机的推理结果、使推理机的推理过程更加透明直观，还应增加解释机模块；为了提高专家系统的人机友好度、建立系统与用户之间交流的“桥梁”，还应增加人机接口模块等。

本文专家系统的研发对象是卫星电源系统，因此其设计要求包括：能对知识库内已有的卫星电源系统的规则和事实进行增加、查询、修改和删除操作；能根据用户输入的卫星电源系统故障征兆信息，推理出准确无误的诊断结果，并根据诊断结果提供给用户正确的解决方案；还能提供对用户友好、功能完备的显示界面等。基于以上设计要求，卫星电源故障诊断专家系统的总体结构如图 4-1 所示。

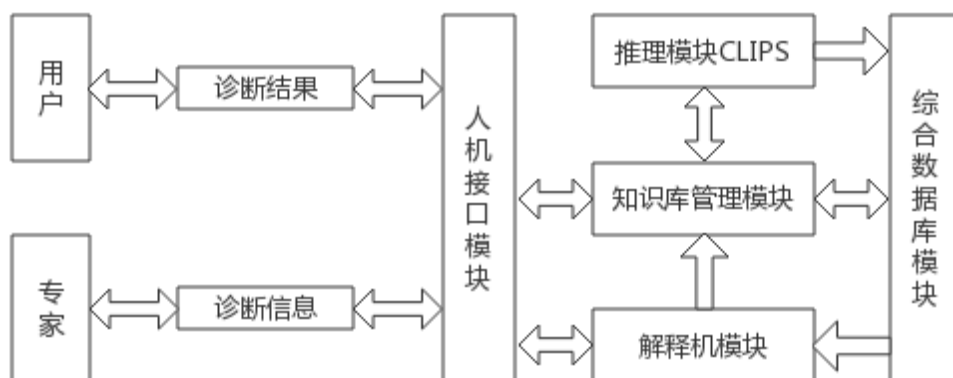


图 4-1 故障诊断专家系统组成

(1) 推理模块。推理模块的重点是 CLIPS 推理机，推理模块的主要功能是根据故障征兆决定需要选取哪些规则，接收从综合数据库模块调入推理机

的规则，再根据所选取的规则进行推理，得出中间诊断结果，进而最终得到推理结果。

(2) 知识库管理模块。通过知识库管理模块的功能包括：能够根据工程师或用户的需要，将综合数据库内的故障信息、诊断规则等直观的提供给用户，同时允许用户对综合数据库内的故障信息进行增添、修改和删除；当有对综合数据库内规则进行变动的操作时，能运用一致性检验、完备性检验等方式评估该操作的影响，并对危险操作提出警示。更多的功能设计在本文的第三章有详尽的叙述，这里不再赘述。

(3) 人机接口模块。鉴于 CLIPS 不擅长处理数据，且 CLIPS 的文本形式的交互界面不符合人机友好的要求，本文采用面向对象的 C++ 编程语言来设计人机接口模块，实现系统与用户之间的友好沟通。在用户端，用户能直观的查询系统的诊断规则和故障诊断结果，还能通过人机接口将故障征兆、新规则等输入到系统中；在系统端，系统通过人机接口获取用户输入的信息，并将推理机的推理结果和过程反馈给系统的用户。

(4) 综合数据库模块。综合数据库模块主要用来存放系统进行推理所需的规则和事实，本模块由知识库管理系统建立。

(5) 解释机模块。解释机模块的功能体现在：将用户通过自然语言描述的诊断规则翻译为推理机能识别的 CLIPS 语言，同时还能将推理机的诊断结果翻为自然语言显示在人机界面，使推理机的推理过程更加透明直观，增强推理结果的可信度，还能让用户获得良好的操作体验。

4.2 卫星电源故障诊断专家系统的推理机制

4.2.1 CLIPS 的基本组成与推理机制

CLIPS 的基本组成如图 4-2 所示。CLIPS 的结构紧凑且高度集成化，体现了模块化设计的理念。其中规则库用来存放故障诊断所需的规则，事实库则用来存放故障诊断所需的事实，待议事件表用来存放已经被激活的规则，而推理机利用规则库内的规则和事实库内的事实，通过 Rete 模式匹配算法，进行推理。

CLIPS 的推理机在推理时根据已有的规则对事实进行模式匹配。当某条规则条件部分 (LHS) 的所有模式都能在事实库内与事实实现匹配，那么称这条规则为已触发规则，通过冲突消解，选取一条已触发规则作为启动规则，该规则的执行动作 (RHS) 就会执行，以此类推。这就是实现正向推理的原

理，推理过程如图 4-3 所示。

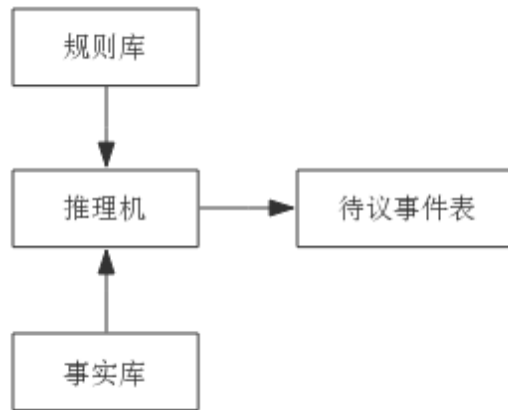


图 4-2 CLIPS 的基本结构

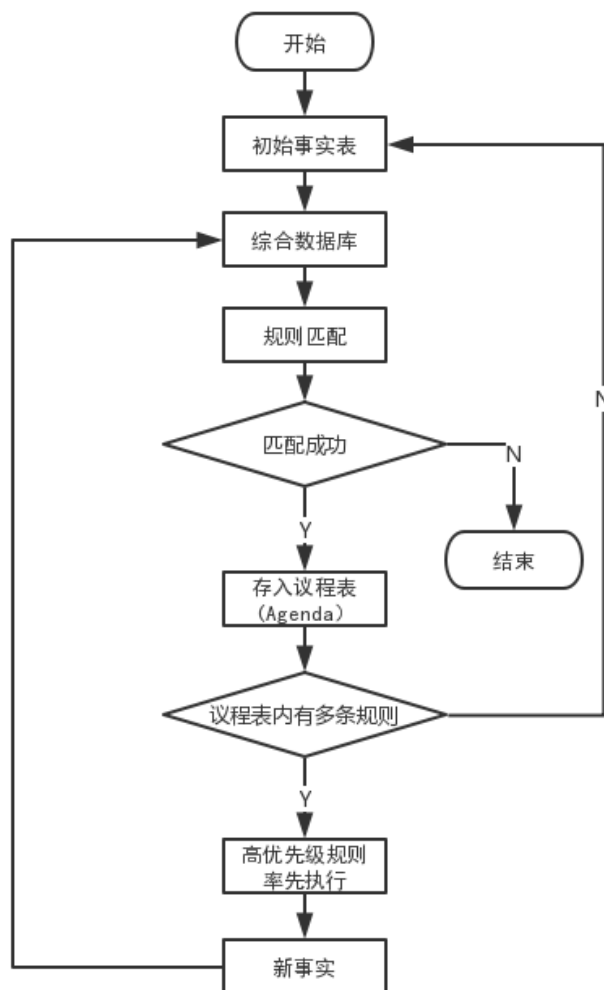


图 4-3 CLIPS 的推理流程

具体执行步骤过程如下：

- (1) 推理机开始对事实库内的事实和规则库内的规则进行模式匹配。
- (2) 某条规则如果匹配成功，则将该规则激活并存入 **Agenda** 表。
- (3) 如果议程表里有多条规则，**CLIPS** 通过冲突消解策略根据优先级的先后来确定规则的执行顺序，如果优先级相同，则由 **CLIPS** 自行调度。如果议程表里没有规则，程序结束。
- (4) 执行当前规则的执行动作 (**RHS**)，其执行结果有可能对事实表内的事实产生变动，例如事实的添加操作或删除操作，这时需要返回事实库进行事实库更新。

4.2.2 Rete 模式匹配算法

Rete 模式匹配算法示由 **Forgy** 在 20 世纪 80 年代提出，具备很高的匹配效率。基于规则的系统通常采用两种匹配算法：规则寻找事实算法和事实寻找规则算法。

(1) 规则寻找事实算法。规则寻找事实算法的推理思想是：系统在推理时将规则库内的全部规则依次与事实库内的事实进行匹配，如果匹配成功，则将该规则激活并存入 **Agenda** 表，规则执行动作 (**RHS**) 的执行会对事实库内的事实产生变动，同时这种变动也会反过来影响规则的匹配，所以推理机会再次遍历全部规则，当规则库内规则数量众多时，会严重降低匹配效率。规则对事实的寻找如图 4-4 所示，其中阴影部分代表推理过程中事实库中被修改的事实。

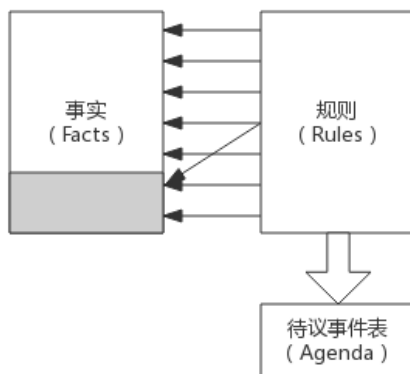


图 4-4 规则对事实的寻找

在规则寻找事实算法中，推理机每遍历一次规则表，就要检查一次事实表，如果某条规则和事实表内容满足匹配，则将该规则激活并存入待议事件表中，这意味着事实表在每一次遍历都会产生变化，同样也意味着推理机又要对规则表进行一次遍历。然而实践经验表明，事实表内容的变化只会对很

少一部分规则产生影响，这样推理机完全没必要对全部规则进行遍历，这就是时间冗余性。

(2) 事实寻找规则算法。事实寻找规则算法的推理思想是：系统在推理时，推理机对于已经匹配完成的规则，不再将其纳入下一次的推理，推理机制对事实表产生变化的部分进行计算，避免了大量的无效计算。算法在推理过程中，规则表的规则是不变的，只有事实表中的事实是变化的，算法流程如图 4-5 所示。

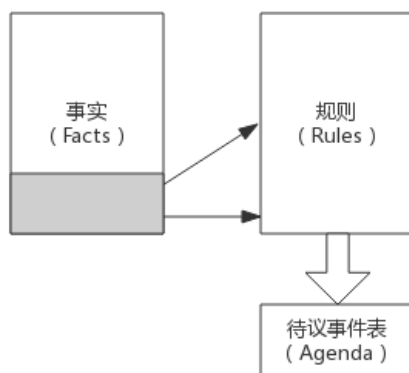


图 4-5 事实对规则的寻找

在 CLIPS 中，Rete 模式匹配算法对已匹配的事实的状态进行检查，仅在事实库内容产生变化时对变化的内容进行模式匹配。Rete 模式匹配算法大大改善了系统的时间冗余性，每一轮的模式匹配都会对上一轮的匹配上状态进行检查，只对事实表中发生过变化且对本次计算造成变化的内容进行计算。其中，规则不用全部参与循环匹配，而事实库也只在规则执行之后才产生变化。Rete 模式匹配算法的优越性在于：

(1) 通过共享节点机制，降低规则或事实的冗余度。

(2) 通过在连接操作时存储部分的匹配结果，避免事实库在内容发生变化时对整个事实库进行遍历，只需对存储的变化进行计算即可。

(3) 允许纪录单元在事实从内存撤销时从网络中移除。

当然，Rete 模式匹配算法也存在一定的缺陷，该算法以牺牲空间复杂度为代价，实现时间复杂度的降低，因此对内存的占用量较大。这在现今条件下已不成问题，只需增大机器内存即可。

4.2.3 卫星电源故障诊断专家系统推理机的实现

专家系统的知识的常见表达方式有：

(1) 产生式规则。

产生式规则的一般形式形为：IF “A” THEN “B”。

为了表示产生式规则的多个条件和多个结论的关系，可以用与（AND）、或（OR）、非（NOT）来进行连接。产生式规则能够以直观、符合人类思维的方式表示具有因果关系的简单知识，但是不适用于表示复杂知识。

（2）框架

框架(frame)数据结构能详尽描述是能事物的属性。框架内部的知识表示形式是一种相互嵌套的结构，一般形式为：

```
( <框架名>
  ( <槽名 1>
    ( <侧面名 1> ( <值 1> ... ) ... )
    ...
  )
  ( <槽名 2>
    ( <侧面名 2> ( <值 2> ... ) ... )
    ...
  )
  ...
)
```

框架一般包含若干个槽，每一个槽都代表对象的每一条属性，如对象“学生”的属性“学号”、“年级”、“成绩”等都属于槽，槽又一般包含若干个侧面，紧接侧面的括号里的内容就是侧面值。框架的结构由每个槽组成，可以将每个槽看作是框架的多个模块，每个模块都是嵌套格式，每个模块内部都包括若干侧面，从结构上看，槽的内部基本相同，因此框架结构可以表示层次复杂多样的知识，体现了模块化设计的思想。

本文在第二章的 2.4.2 节研究了卫星电源系统故障树的构建，尽管卫星电源系统故障种类多且故障节点之间的因果关系复杂，但是从整体上分析，各个故障节点之间具备很强的逻辑连接，由于故障树分析法建立的故障树是一种层次分明的单流程结构，因此可通过推理策略获得卫星电源系统故障的逻辑信息。基于卫星电源系统知识表达方法的上述特点，再者框架擅长表达层次关系，而产生式规则擅长描述因果关系，所以卫星电源故障诊断专家系统决定将故障信息以“框架-产生式规则”的知识表达形式来表示，用以构建卫星电源故障诊断专家系统的知识库，这样做既刻画了故障知识之间的层次关系，又展示了故障知识之间的因果逻辑，充分发挥了框架和产生式规则的优点。

基于前文用故障分析法建立的卫星电源系统故障树，来构建使用 CLIPS

开发的卫星电源故障诊断专家系统，首先要解决如何用 CLIPS 能识别的编程语法来表示卫星电源系统故障树的每个故障节点。

基于框架的表示形式为：关系名表示故障树故障节点的信息，槽表示故障树故障节点的属性，以及节点的子节点；产生式规则的表达形式为：故障树故障节点的槽内的所有子节点都是该故障节点产生。鉴于 CLIPS 中自定义事实框架可以通过 (deftemplate) 命令来定义，因次可以借助该命令实现“框架-产生式规则”的方式表示事实。卫星电源系统故障树的故障节点定义如下：

```
(deftemplate TNode
  (slot msg)//故障信息
  (slot Ttype)//故障类型
  (slot TNode_1)//故障原因1
  (slot TNode_2)//故障原因2
  (slot TNode_3)//故障原因3)
```

其中，TNode 为事实的关系名；msg 为故障树故障节点的信息；Ttype 为故障树故障节点的类型；TNode_1, TNode_2, TNode_3 等是本节点的所有子节点。

下面取图 2-1 的故障树中的中间事件节点“蓄电池短路”如图 4-6。



图 4-6 蓄电池短路节点

套用此自定义模板表示为如下事实：

```
(TNode (msg “蓄电池短路”)
  (Ttype q)
  (TNode_1 “t 延长”)
  (TNode_2 “Uchange 减小”)
  (TNode_3 “DOD 增大”)
)
```

该事实表示：“蓄电池短路”的原因是“快速充电时间 t 延长”、“蓄电池充电电压 Uchange 减小”和“放电深度 DOD 增大”。TNode_1、TNode_2、TNode_3 共同发生才会导致“蓄电池短路”，体现了产生式规则关系。

当事实到最底层时，取底事件节点“快充电时间延长”如图 4-7 所示。

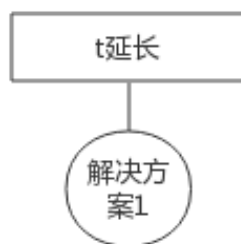


图 4-7 t 延长底事件

故障信息及解决方案可以表示为事实：

```
(TNode (msg "t 延长")
  (Ttype a)
  (TNode_1 "解决方案 1")
)
```

该事实表示：快速充电时间延长，那么对应的解决方法是解决方案 1。以此类推，将卫星电源故障诊断专家系统知识库中的全部知识都用“产生式-框架”的方式进行定义并保存起来，以供推理机推理时调用。

卫星电源故障诊断专家系统的推理机设计还需要确定推理方法和推理策略。

(1) 本专家系统采用正向推理的方法，正向推理流程如图 4-8 所示，其基本思想是：以已发生的故障征兆为条件，以事实为基础，根据已有的规则对事实进行模式匹配，当某条规则条件部分（LHS）的所有模式都能在事实库内与事实实现匹配，则根据该规则的执行动作（RHS）确定下一步的操作同时将中间结果存入数据库，以此类推，直到推理完成。

正向推理的特点在于：对于用户，只需将观测到的故障征兆提供给专家系统，即可等待专家系统的推理结果；对于专家系统，只需用户一次性提供全部故障征兆信息，即可实现故障推理。

(2) 专家系统的推理策略主要分为深度优先搜索和广度优先搜索两种。

深度优先搜索是从树的顶事件开始，选取顶事件的一个子节点，尽可能的往下层进行搜索，直到搜索到叶子节点，这代表已经抵达故障树的底事件，此时返回上一层节点，选择另一个子节点进行搜索。如图 4-9 是一个深度优先搜索实例，其搜索的顺序为：A→B→D→E→C→F→G。

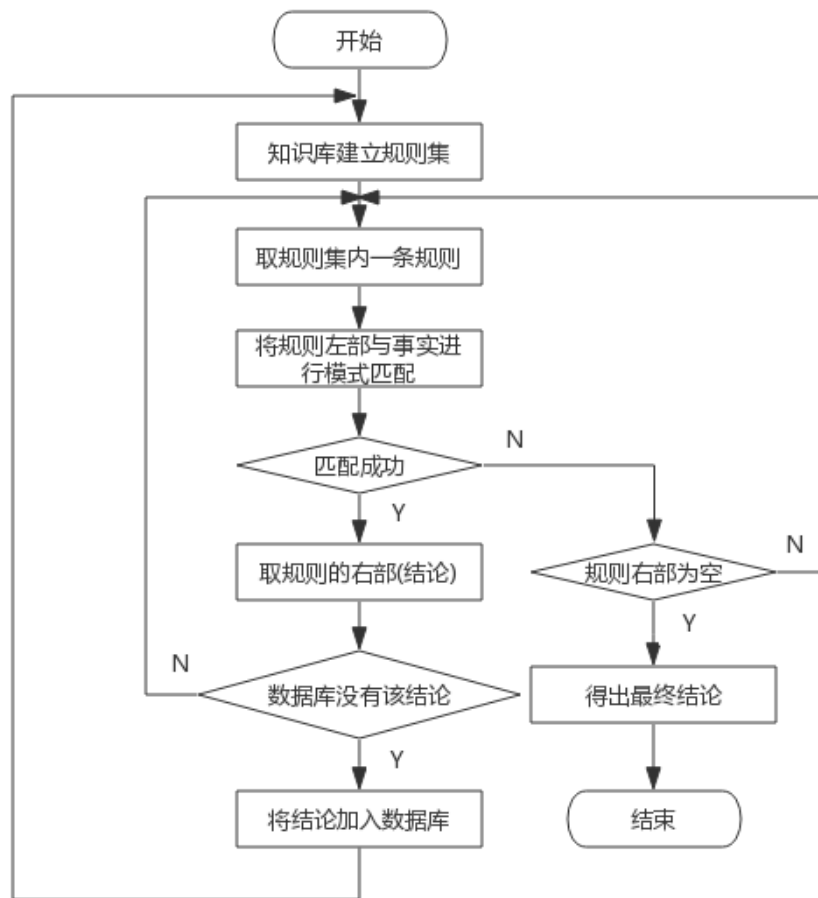


图 4-8 正向推理流程图

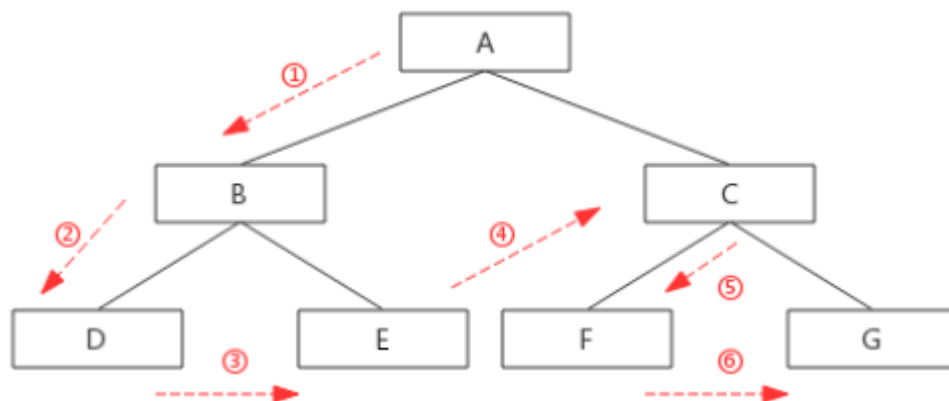


图 4-9 深度优先搜索

广度优先搜索是从树的顶事件开始，对当前节点的所有子节点都全部遍历，直到匹配到目标。图 4-10 是一个广度优先搜索的实例，其搜索的顺序为 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow F \rightarrow G$ 。

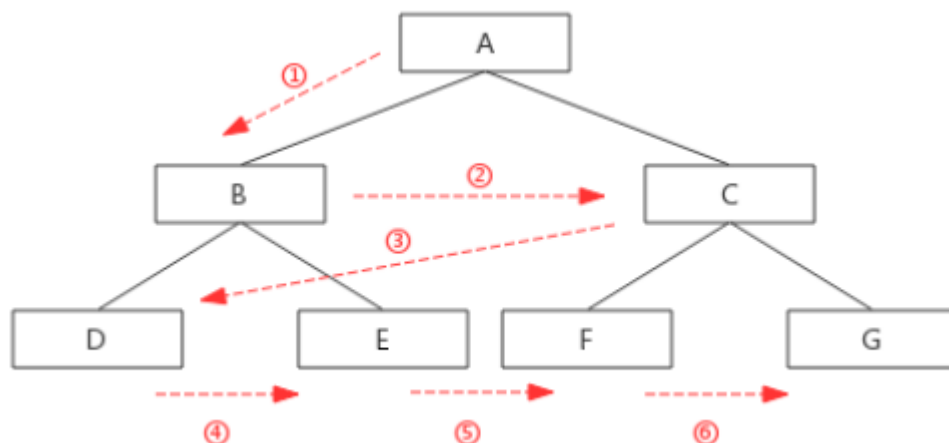


图 4-10 广度优先搜索

由于本文构建的卫星电源故障树只有三层，又由于故障树中父节点是子节点的“果”、子节点是父节点的“因”的因果逻辑，所以推理策略采用广度优先搜索。

4.2.4 调试运行 CLIPS 推理程序

为了验证上文的分析和设计，本文在 CLIPS6.3 平台上进行故障诊断编程。以本文第二章建立的卫星电源故障树为研究对象，用 engine.CLP 文件保存规则库、用 node.dat 保存知识库。针对卫星电源故障树在 CLIPS 平台上运行结果如图 4-11 所示。

通过推理机推理，故障的原因是电调节器不升压；解决的办法是解决方案 5。CLIPS 运行结果表明，前文的推理设计正确无误。

此外，不难发现 CLIPS 的交互界面基于文本环境，不具备开发人机交互界面的能力，系统界面友好性极低，不利于用户对系统的操作。因此需要面向对象的高级编程语言来开发友好的人机界面以及建立系统与数据库的连接。

比较高效可行的方案是：将 CLIPS 嵌入 Visual C++ 进行混合编程，即专家系统的人机接口界面由 Visual C++ 设计，专家系统的推理机和知识库则由 CLIPS 设计。

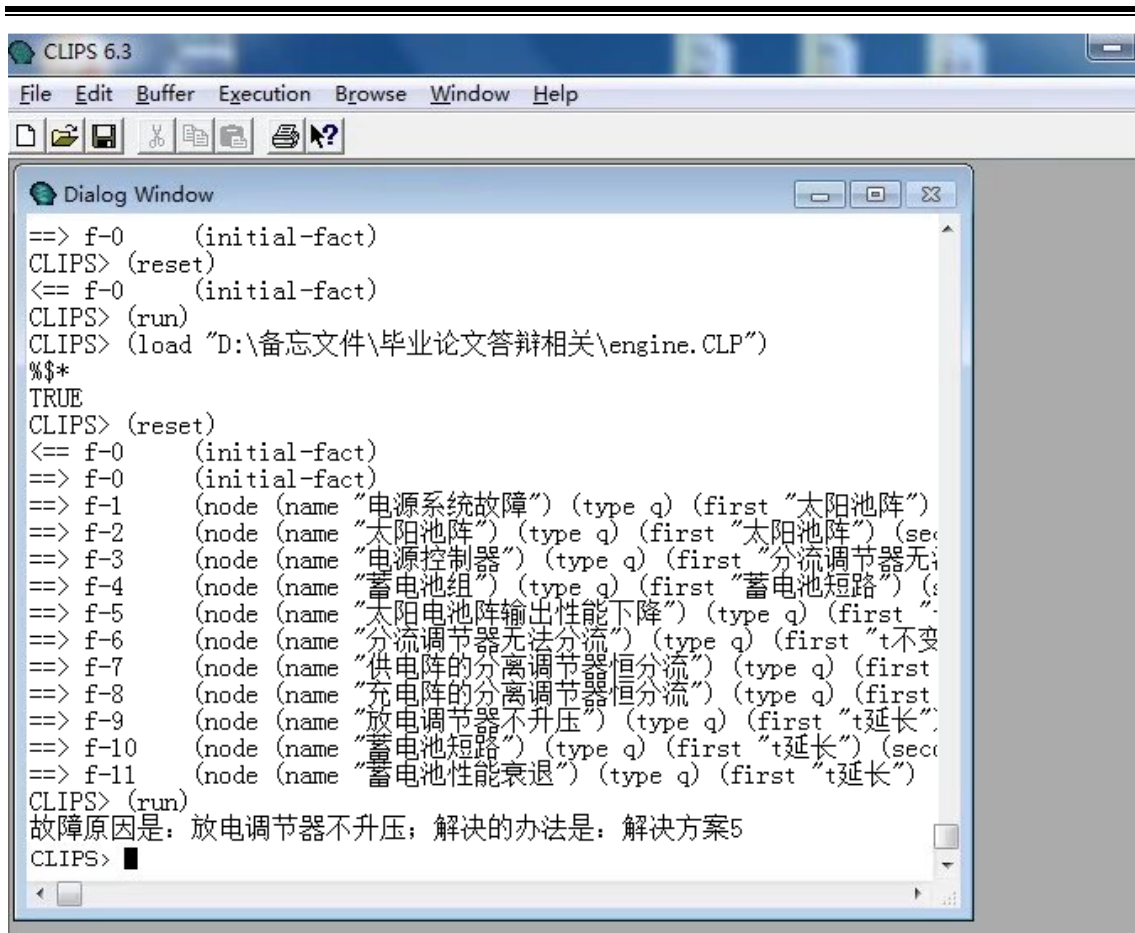


图 4-11 CLIPS 运行结果

4.3 卫星电源故障诊断专家系统的接口设计

本文采用目前比较主流的联合开发方法：在 Visual Studio 2010 环境下，使用 Visual Studio 2010 设计系统的人机界面。在开发过程中需要解决两个关键性问题：一、如何实现 CLIPS 的嵌入式开发；二、如何实现 CLIPS 与 Visual C++ 的数据交互。下文将一一阐述。

4.3.1 CLIPS 嵌入技术

常用的 CLIPS 嵌入技术具体还可以分为直接嵌入方式和动态链接库（DLL）嵌入方式。

4.3.1.1 直接嵌入方式

直接嵌入方式是直接将 CLIPS 的源代码直接嵌入到高级编程语言的工程中。具体的实现方式是重新编译 CLIPS 源代码，必须在 CLIPS 程序中向 CLIPS 声明用户定义的函数和结构，此外还要在高级编程语言的工程中对 CLIPS 的头文件（clips.h）进行声明。

虽然直接嵌入方式的实现方式简单方便，但是其缺点也十分明显：由于采用将源代码直接嵌入到高级编程语言的工程中，导致 CLIPS 源代码、高级编程语言代码、在 CLIPS 代码内声明的自定义函数等混合在一起，不利于程序的维护管理，工程的可扩展性极低；程序重新编译 CLIPS 源代码的时间太长，占用内存较大。

4.3.1.2 动态链接库（DLL）嵌入方式

动态链接库嵌入方式的原理是，将 CLIPS 的大部分推理指令封装到动态链接库中，分离 CLIPS 推理程序的开发和程序界面的编程，同时 DLL 支持高级编程语言如 C++ 等对它的直接调用，将动态链接库加载进程序后，就可以为程序提供封装好的 CLIPS 接口函数，降低程序开发人员的使用门槛。

对比直接嵌入方式，DLL 嵌入方式拥有无与伦比的优势。采用 DLL 方式开发专家系统，接口函数调用简单、编程方式灵活、程序编译效率高、系统开发周期短、系统维护方便，可扩展性强。综合上述分析，本文采用动态链接库嵌入方式，将 CLIPS 的 DLL 嵌入到 VS2010 工程中。

4.3.2 CLIPS 与 Visual C++ 的数据交互实现

CLIPS 与 Visual C++ 的数据交互需要解决的难题是：Visual C++ 如何将故障征兆转化成 CLIPS 能识别的格式，并传入 CLIPS 中；以及如何将 CLIPS 推理的结果读取到 Visual C++ 中。

在过去，文本文件是 CLIPS 和 Visual C++ 数据交互的媒介。Visual C++ 将故障征兆转化成二进制格式，写入到二进制文件中，故障征兆通过二进制文件进入 CLIPS 的推理机，CLIPS 根据故障征兆调用推理机进行推理；然后 CLIPS 推理机得出推理结果，将结果存入二进制文件，然后由 Visual C++ 从二进制文件中提取诊断结果，并显示给用户。交互过程需要调用两个函数：CLIPSLoadFacts(file) 和 CLIPSDribble(file, TRUE)，交互流程如图 4-12 所示。

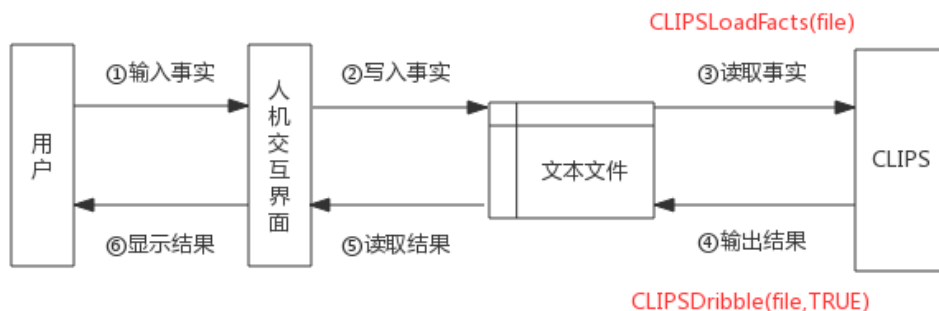


图 4-12 数据交互流程

以文本文件为交互媒介，弊端在于在推理过程中要频繁的调用文件读写函数，会花费大量时间，因此在数据量较大的情况下，系统的推理效率会很低。

现在，CLIPS 动态链接库的出现为系统推理效率的提高提供了可能。CLIPS 的动态链接库中封装有事实添加函数(CLIPSAAssert)和事实读取函数(CLIPSNextFactString)，当系统需要数据交互时，Visual C++只需调用这两个即可，省去了中间的文本交互过程，这样即简单又高效。

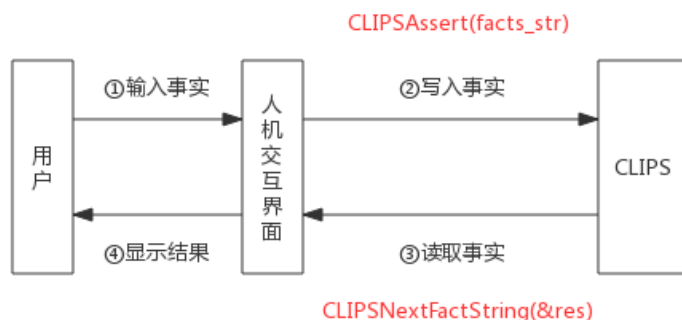


图 4-13 DLL 方式数据交互流程

由于 CLIPS 提供的动态链接库没有封装读取推理结果的函数，若想实现完整的数据交互，需要转换思路。将推理结果以事实的形式存储，通过调用读取事实的函数，即可将推理结果读进 Visual C++。

但这样就要对传统的规则定义做出一定的修改。传统方式定义的规则如下：

```

(defrule rule_name “事实描述”
  (fact_1 para)
  (fact_2 para)
=>
  (printout t”推理结果”))
    
```

定义中，printout t 函数的作用是命令 CLIPS 将推理结果显示在电脑屏幕上。而为了用事实来存储推理结果，需要用 assert 替换 printout t 函数，新的规则定义如下：

```

(defrule rule_name “事实描述”
  (fact_1 para)
  (fact_2 para)
=>
  (assert (result”推理结果”))
  )
    
```

基于新的规则定义，当 Visual C++ 向 CLIPS 传入故障征兆和 Visual C++ 从 CLIPS 读取推理结果时，具体的代码及注释如下：

```

clips=new CLIPSWrap();
/*初始化CLIPS*/
clips->CLIPSInit();
/*清空CLIPS工作区*/
clips->CLIPSClear();
/*加载规则库*/
clips->CLIPSLoad("engine.clp");
/*重置推理机*/
clips->CLIPSReset();
/*传入事实，多次调用*/
clips->CLIPSAssert(fact_str);
/*执行推理*/
clips->CLIPSRun();
/*获取推理结果*/
clips->CLIPSNextFactString(res);
/*退出CLIPS*/
clips->CLIPSExit();
    
```

程序运行后，CLIPS 的推理流程如图 4-14 所示。

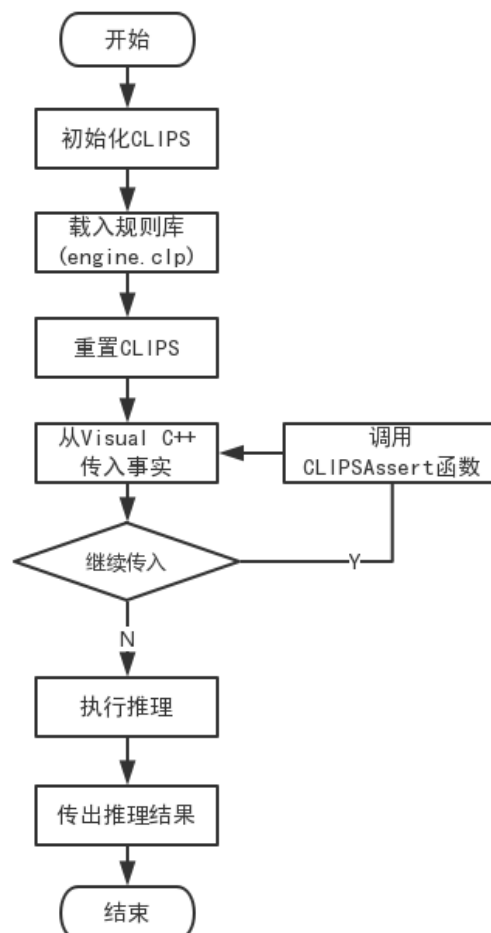


图 4-14 CLIPS 推理流程

4.3.3 人机界面的设计及验证

4.3.3.1 设计诊断推理人机界面

对于诊断推理系统的设计, 本文将各模块全部集成在一个大界面, 具体包括本专家系统的故障展示、故障征兆输入、推理诊断等不同功能模块。诊断推理系统的界面如图 4-15 所示。



图 4-15 诊断推理系统界面

诊断推理系统界分为三个部分:

(1) 故障信息区。故障信息区有“卫星电源系统”和两个拓展槽共三个选项卡, 拓展槽是为以后卫星上其他系统的故障诊断内容预留, 目前只有“卫星电源系统”选项卡可被激活。点击“卫星电源系统”后, 在右侧列表区域显示电源系统的全部故障信息, 在列表区左侧可以通过点击“太阳池阵”、“电源控制器”或“蓄电池组”三个按钮, 来具体查看这三个子系统的可能故障信息。

(2) 已发生故障的信息显示区。该区域下边的文本框可以显示已发生的故障的信息, 一方面可以通过选取故障信息列表区内的对应行的内容, 添加已发生的故障信息, 例如发生“放电调节器不升压”故障, 如图 4-16 所示。

另一方面，如图 4-17 所示，以“充电阵的分流调节器恒分流”故障为例，还可以通过点选文本框上方的单选框内容，将已发生的故障信息添加至系统。

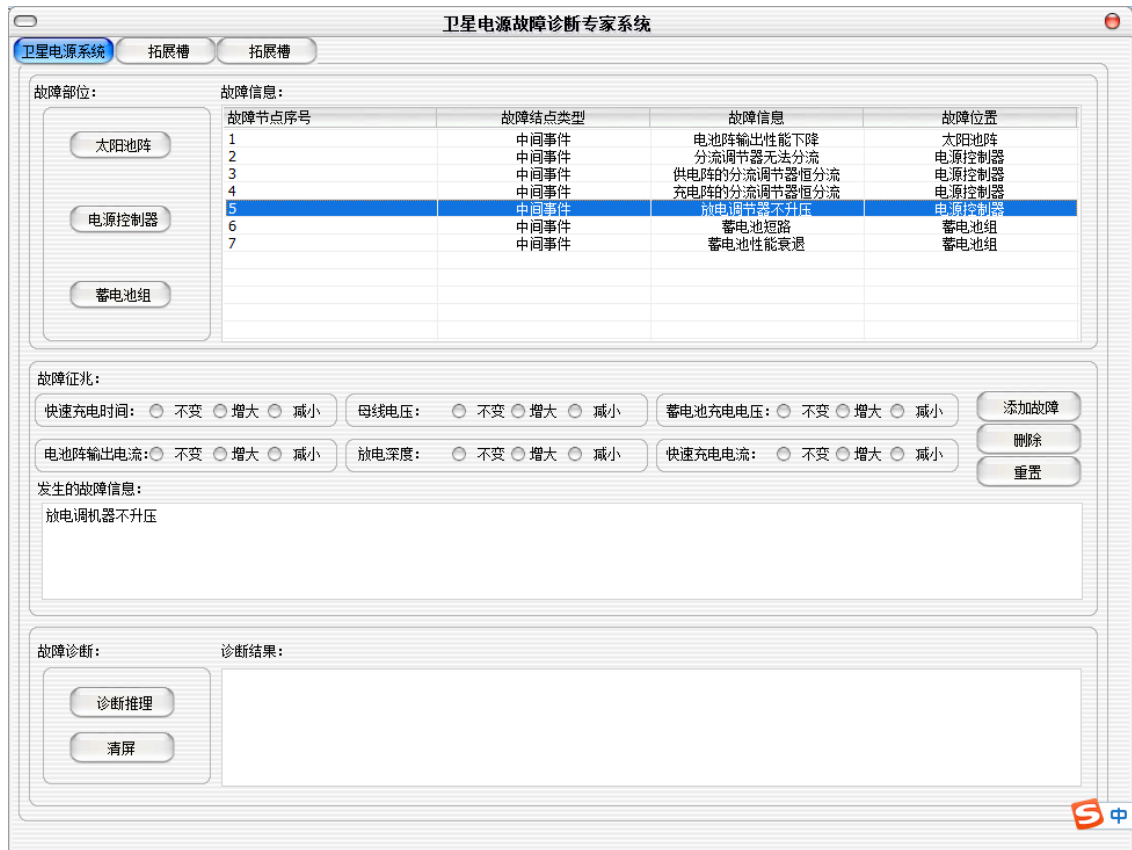


图 4-16 添加已发生故障的信息的方式之一



图 4-17 添加已发生故障的信息的方式之二

(3) 推理诊断区。系统根据用户输入的故障征兆进行诊断推理，将推理的结果和解决方案显示在该区域。

4.3.3.2 推理机设计的测试验证

在本文第三章，采用演绎法构建卫星电源系统的故障树，如图 4-18 所示。现在以该故障树作为模拟测试对象，假设卫星电源系统在卫星运行时发生故障，主要表现为快速充电时间延长、电池阵输出电流不变、放电深度减小，

根据故障征兆运行卫星电源故障诊断专家系统。

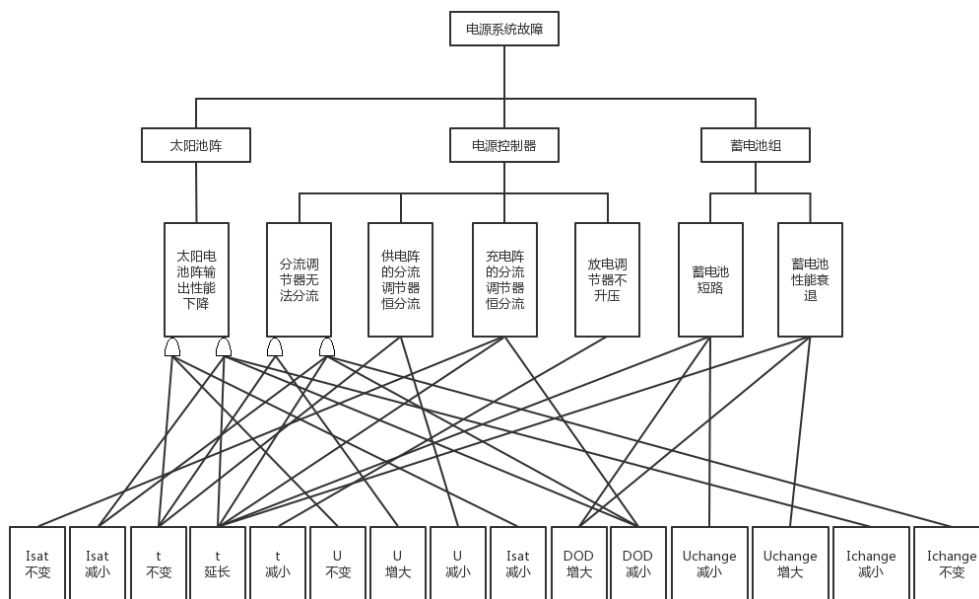


图 4-18 卫星电源系统故障树

第一步：获取故障征兆。主要故障征兆为：快速充电时间延长、电池阵输出电流不变、放电深度减小。

第二步：专家系统诊断。在诊断推理系统界面上的“故障征兆”模块，将“快速充电时间”勾选为“延长”、将“电池阵输出电流”勾选为“不变”、将“放电深度”候选为“减小”，然后通过点击“推理诊断”按钮使系统开始进行诊断。系统推理运行结果如图 4-19 所示。

第三步：对比验证。本文的 4.2.4 节在 CLIPS 编程环境下，基于卫星电源系统故障树，进行了一次实验性推理诊断。综合 CLIPS 环境下的推理结果和本次实验推理的结果，对比结果表明，由 Visual C++开发的人机接口的各项功能运行正常，诊断推理的结果符合测试要求，基本完成了本章设计要求。

图 4-19 系统推理运行结果

4.4 本章小结

本章首先完成对卫星电源故障诊断专家系统的设计，接着分析 CLIPS 推理机的推理机制，其中研究了 Rete 模式匹配算法的算法思想和匹配过程，然后以卫星的电源系统为研究对象，建立基于 CLIPS 的卫星电源专家系统推理机，最后通过分别在 CLIPS 6.3 平台和 Visual Studio 2010 开发平台进行编程设计的方式，验证本文的理论设计部分的正确性，从而完成卫星电源故障诊断专家系统的开发。

结 论

本论文利用 CLIPS 专家系统工具开发了一套针对卫星电源系统故障诊断的专家系统，并取得了以下结果：

(1) 在对卫星电源系统工作状态的分析研究中，总结出工作状态分为光照期、阴影期、入影期和出影期，并分别分析各时期电源系统电源控制器的工作状态；根据对卫星电源系统结构化分的三种方式进行分析，总结并对比每种方式下卫星电源系统结构的优缺点；根据卫星电源系统结构分析总结的结果，对太阳电池阵、电源控制器和蓄电池组这三个部分的故障模式进行了深入的分析总结，得出 7 条最具代表性的卫星电源系统故障；将卫星电源系统故障与卫星电源系统的特征参数结合，利用故障树分析法构建卫星电源系统故障树，根据故障树得出 9 条卫星电源系统的故障诊断规则。

(2) 以开发卫星电源故障诊断专家系统的分系统——知识库管理系统为目标。在软件开发过程中历经对系统的需求分析、对知识库管理系统的结构设计、对系统中数据的流动分析、数据库表的设计、数据库操作（增、删、改、查）的功能实现、系统的界面设计等步骤，完成了知识库管理系统的开发。其中还解决了 CLIPS 二进制文件格式和数据库表格式的相互转化的算法设计。此外还从冗余检验、一致性检验和完备性检验三个方面实现对该系统的管理维护。

(3) 在上述两部分研究成果的支持下，研究专家系统的推理机制，并最终完成卫星电源故障诊断专家系统的设计。首先分析总结专家系统的组成模块以及每个模块的功能，接着深入分析 CLIPS 推理机的推理机制和 Rete 模式匹配算法，进而实现针对卫星电源系统的故障诊断设计，其中还分析比较不同推理方法和不同推理策略的特点，然后实现在 CLIPS 环境下的卫星电源故障诊断专家系统；接着进一步完成 CLIPS 与 VS2010 的接口设计，将 CLIPS 内核嵌入 C++ 程序中，实现人机接口界面的开发，经过严格的推理结果验证后，完成基于 CLIPS 的卫星电源故障诊断专家系统的开发。

本论文设计的专家系统以人造地球卫星的众多分系统中的电源分系统为故障诊断对象，并取得了以上成果，但是人造地球卫星还包括诸如卫星姿态控制系统等分系统，这些分系统对于保证卫星的正常运行工作也至关重要。在此为卫星的故障诊断工作做一下展望：

(1) 将针对电源系统故障诊断的研究方法，推广到对其他卫星分系统的

故障诊断中；

(2) 将本文开发的卫星电源故障诊断系统作为一个子模块，以该模块为模板，开发其他所有分系统的故障诊断专家系统，最终将所有模块集成，组成卫星故障诊断专家系统。

(3) 在现有的基础上，开发更高效、更准确、更便捷的故障诊断技术。

参考文献

- [1] 汤泽东. 卫星电源系统多学科设计优化[D]. 湘潭大学, 2013.
- [2] 朱良宽. 挠性航天器姿态鲁棒非线性控制算法研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2008.
- [3] 闻新, 张兴旺, 秦钰琦,等. 国外航天器在轨故障模式统计与分析[J]. 质量与可靠性, 2014(6):13-18.
- [4] 宋其江. 基于有向图模型的故障诊断方法研究及其在航天中的应用[D]. 哈尔滨工业大学, 2010.
- [5] 邵继业. 基于模型的故障诊断方法研究及在航天中的应用[D]. 哈尔滨工业大学, 2009.
- [6] 陈填锐. 确定学习理论与智能振动故障诊断[D]. 华南理工大学, 2010.
- [7] Masterson R, Miller D, Grogan R. Development of empirical and analytical reaction wheel disturbance models[C]// Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference and Exhibit. 2015.
- [8] 王小丽, 倪茂林. 基于自适应观测器的非线性系统故障诊断[J]. 空间控制技术与应用, 2008, 34(4):33-37.
- [9] Pirmoradi F N, Sassani F, Silva C W D. Fault detection and diagnosis in a spacecraft attitude determination system[J]. Acta Astronautica, 2009, 65(5 - 6):710-729.
- [10] 许保健. 基于多变量统计的故障检测与诊断及应用研究[D]. 沈阳航空航天大学, 2012.
- [11] Williams B C, Nayak P P. A model-based approach to reactive self-configuring systems[C]// Thirteenth National Conference on Artificial Intelligence. AAAI Press, 1996:971-978.
- [12] 赵志宇. 基于小波变换的滚动轴承故障诊断系统的研究与开发[D]. 大连理工大学, 2005.
- [13] 吴丽娜, 张迎春. 离散小波变换在卫星姿控系统故障诊断中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2006(z1):407-409.
- [14] 姜连祥, 李华旺, 杨根庆,等. 航天器自主故障诊断技术研究进展[J]. 宇航学报, 2009, 30(4):1320-1326.
- [15] Frank P M. Fault diagnosis in dynamic systems using analytical and knowledge-based redundancy: A survey and some new results[J]. Automatica,

- 1990, 26(3):459-474.
- [16]郑威,吴建军. 液体火箭发动机基于定性键合图模型的故障诊断方法研究[J]. 宇航学报,2004,(06):604-608.
- [17]崔子谦. 基于定性模型的卫星电源系统故障诊断方法的研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2007.
- [18]裴道武. 模糊推理的基本理论[J]. 高校应用数学学报 A 辑,2012,(03):340-350.
- [19]马丽娜. 模糊推理方法及知识推理的计量化研究[D]. 陕西师范大学, 2011.
- [20]Yairi T, Kawahara Y, Fujimaki R, et al. Telemetry-mining: A Machine Learning Approach to Anomaly Detection and Fault Diagnosis for Space Systems[C]// IEEE International Conference on Space Mission Challenges for Information Technology. IEEE Computer Society, 2006:466-476.
- [21]Ali M, Gupta U. An expert system for fault diagnosis in a Space Shuttle main engine[J]. Aiaa Journal, 1990.
- [22]Ringer M J, Quinn T M, Merolla A. Autonomous power system: Intelligent diagnosis and control[J]. Telematics & Informatics, 1991, 8(4):365-383.
- [23]杜湘瑜, 朱炬波, 郭德强,等. 空间碎片减缓设计专家系统设计与实现[J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30(7):1355-1358.
- [24]钱宇, 向小军, 杨军利. 基于 CLIPS 的航天器预警专家系统的设计与实现[J]. 计算机仿真, 2012, 29(9):61-64.
- [25]岳夏. 基于 HMM 的复杂条件故障诊断技术研究[D].华南理工大学, 2012.
- [26]严悦,哈进兵. 利用 ART 神经网络优化相似案例匹配方法[J]. 信息系统工程, 2012, (03):70-74.
- [27]褚伟. 基于科学数据共享网的现场总线选择专家系统的设计[D].北京交通大学, 2009.
- [28]郑璇. 催化裂化反应故障诊断系统的研究与开发[D].北京化工大学, 2009.
- [29]吴志刚. 基于 Solid Works 的数控卧式车床模块化设计系统的研究与开发[D].兰州理工大学, 2012.
- [30]王玲玲. 远程临床诊断专家系统的设计与实现[D].山东大学, 2009.
- [31]陈明. 活性石灰生产工艺关键参数在线监测及专家系统故障诊断[D].武汉理工大学, 2010.
- [32]王安炜. 基于 Android 的手机农业专家系统的设计与实现[D].山东大学, 2011.

- [33]王珂. 西部优势农作物专家系统设计[D].西安电子科技大学, 2010.
- [34]拓勇. 碳纳米管数据库的建立与性能预测研究[D].西安电子科技大学, 2012.
- [35]张子云. 主体与协同:专家系统的发展方向[N]. 计算机世界, 2007-10-29(B11).
- [36]王亚南. 专家系统中推理机制的研究与应用[D].武汉理工大学, 2006.
- [37]张娟. 铁路信号设备故障检修决策支持系统研究与实现[D].北京交通大学, 2009.
- [38]于媛媛. 面向课程知识的教育知识学习平台研究与实现[D].大庆石油学院, 2010.
- [39]邢传鼎. 人工智能原理及应用[M]. 东华大学出版社, 2005.
- [40]Giarratano J C, Riley G. Expert Systems: Principles and Programming[M]. 机械工业出版社, 2002.
- [41]薛笑芳. 专家系统及专家系统开发工具发展现状及动向[J]. 重庆通信学院学报, 2000:34-39.
- [42]李保卿. 基于免疫神经网络专家系统的纺丝工艺优化[D].东华大学, 2011.
- [43]杜伟. CIPS 解体计划自动编制系统研究与应用[D].北京交通大学, 2011.
- [44]Giarratano J C. CLIPS User' s Guide[J]. Nasa Technical Report, 1994.
- [45]吴喆,刘波峰,张劲松,徐玉虎. CLIPS 嵌入 VC++.NET 编程的研究与应用[J]. 微计算机信息, 2009, (18):168-169+198.
- [46]Joseph C.Giarratano, Ph.D. CLIPS Advanced Programming Guide[Z]. NASA. 2007.
- [47]郑永煌, 李人厚, 徐克俊,等. 基于 CLIPS 的航天发射决策支持系统[J]. 宇航学报, 2006, 27(1):117-120.
- [48]黄霞, 姜震. 一种基于 CLIPS 的知识库系统的模块化设计方法[J]. 计算机时代, 2005(12):26-27.
- [49]马世俊. 卫星电源技术[M]. 宇航出版社, 2001.
- [50]孙亮. 基于定性模型的卫星姿轨控制系统故障诊断方法的研究[D].哈尔滨工业大学,2009.
- [51]刘丽霞. 卫星电源系统的故障仿真及诊断[D].哈尔滨工业大学,2015.
- [52]李国欣. 航天器电源系统技术概论[M]. 中国宇航出版社, 2008.
- [53]肖柳青. 卫星一次电源系统的故障仿真及诊断[D].哈尔滨工业大学,2016.
- [54]朱芳仪. 故障树分析法在工控故障诊断中的应用[J]. 现代电子技术,2012,(08):104-106.

[55]张东斌. 基于 VC 的大型故障树分析软件研究[D].河北工业大学,2005.

致 谢

时光匆匆，两年的硕士生涯即将结束，本学位论文的顺利完成离不开老师的谆谆教导，也离不开师兄弟、师妹们的关怀帮助。

感谢导师王日新老师的耐心指导与悉心栽培，王老师言传身教、春风化雨、润物无声，为选题迷茫的我指明方向、为遇到困难的我提供帮助、为松懈的我激励鞭策。王老师严谨理性的研究思维、坚定不移的科研精神、尽职尽责的职业操守、仁厚宽容的处世风格不仅值得我们的敬佩而且潜移默化地熏陶着周围的人。

感谢硕士生涯中的每一位老师，他们不仅传授给我专业知识，而且每个老师的个人魅力与学术精神也深深感染激励着我。

感谢致力于航天工程研究的前辈们，他们的科研成果是本论文得以顺利完成的基石。

感谢研究生阶段父母、亲人和朋友对我的关心和爱护，给我提供源源不断的动力奋力向前。

感谢所有参加论文评审、答辩工作的教授和专家们，你们辛苦啦。