

1038883

分类号: TP277 密级: 公开
UDC: 621 学号: 036004



东南大学

硕士学位论文

电喷发动机故障诊断专家系统的研制

研究生姓名: 蒋红枫

导师姓名: 贾民平 教授

申请学位级别 硕士 学科专业名称 机械电子工程

论文提交日期 2006年03月 论文答辩日期 2006年03月29日

学位授予单位 东南大学 学位授予日期 2006年 月 日

答辩委员会主席 张辉 教授 评阅人 张辉 教授
许飞云 副教授

2006年03月

电喷发动机故障诊断专家系统的研制

研究生姓名：蒋红枫

导师姓名：贾民平 教授

学校名称：东南大学

电子控制燃油喷射发动机被广泛应用于现代汽车上,它的使用大大提高了发动机的综合性能,同时,发动机故障诊断技术的科技含量变得越来越高。因此,研制电喷发动机故障诊断专家系统就显得尤为必要。

本文针对目前国内电喷发动机维修过程中存在的问题,结合专家系统的特点,对电喷发动机故障诊断系统的总体结构及其实现的关键技术进行了研究。

阐述了故障树分析法和基于规则的专家系统的基本理论,设计了基于故障树分析法和基于规则的集成诊断专家系统,着重研究了将故障树形式转化为规则,构建知识库,并在此基础上建立了正向推理机。以 Windows XP 为操作系统, Visual Basic、Access 等为编程语言,应用人工智能诊断方法和面向对象的编程方法,开发了电喷发动机故障诊断专家系统,它具有友好的人机界面,实现了故障诊断、知识库管理、数据库管理和在线培训四个模块功能。利用 ADO 技术,研究了数据库管理方法,改善了诊断专家系统的性能和诊断功能。探讨了多媒体技术在诊断专家系统中的应用,增强了系统的实用性。

应用电喷发动机故障诊断专家系统,在发动机实验台架上分析测试,证明了该系统的有效性。

关键词：电喷发动机 专家系统 故障诊断

Development of Expert System for Fault Diagnosis of Electrical Fuel Injection Engine

By JIANG Hongfeng

Supervised by Prof. JIA Minping

Southeast University

Electrical fuel injection engine is widely used in modern automobile. It greatly increases integration capability of engine, at the same time, the technology of fault diagnosis of engine demands more and more high technology. So, to develop expert system for fault diagnosis of engine looks especially necessary.

Arming at the problems existing in maintenance of electrical injection engine, combining with the characteristics of expert system, the architecture of expert system for fault diagnosis of electrical injection engine and the key technology for its realization are studied in this paper.

The basic theory of fault tree analysis and rule-based expert system are introduced, and the integration expert system based on fault tree analysis and rule-based is designed. To obtain the rule according to the fault tree is mainly studied, knowledge base is established, forward direction reasoning mechanism based on the knowledge base is built. By using Visual Basic and Access etc under Windows XP and applying the diagnosis method of artificial intelligence and the object-oriented programming technology, to develop the fault diagnosis expert system of engine, which has a friendly interface, four functional parts of the fault diagnosis, the knowledge base management, the database management and online training are realized. Using ADO technology, the way of data base management is studied, the performance and the diagnosis function of the expert system of fault diagnosis are improved. The application of multimedia technology in diagnosis expert system is discussed, which improves practicability of the system.

By analyzed and tested on the practical desk of engine, the effective of the system is proved.

Key Words: Electrical Fuel Injection Engine Expert System Fault Diagnosis

东南大学学位论文独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得东南大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

研究生签名： 蒋红林 日期： 2006.03

东南大学学位论文使用授权声明

东南大学、中国科学技术信息研究所、国家图书馆有权保留本人所送交学位论文的复印件和电子文档，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。本人电子文档的内容和纸质论文的内容相一致。除在保密期内的保密论文外，允许论文被查阅和借阅，可以公布（包括刊登）论文的全部或部分内容。论文的公布（包括刊登）授权东南大学研究生院办理。

研究生签名： 蒋红林 导师签名： 贾明 日期： 2006.03

第一章 绪论

1886 年世界上第一辆汽车的诞生,标志着人类文明史上交通工具的科技进步。随着电子技术,计算机技术的飞速发展,汽车已不再是简单的机械产品,而是集机械、电子、液压和自动控制技术于一体的高科技产品。汽车工业的发展带动了机械制造业、电子业、化工业的发展,促进了公路和汽车服务业的发展。汽车工业已成为各个国家的支柱产业,汽车给人类社会的进步与发展带来了许多益处。

但是,由于某一种或某几种原因的影响,汽车在使用过程中,会出现动力性和安全性下降,排放污染和噪声严重等一系列破坏汽车正常运行和绿色环保的问题,为了诊断并排除故障,延长汽车的使用寿命,汽车故障诊断技术便应运而生,并随着汽车技术的日新月异而不断完善。

1.1 汽车故障诊断技术

1.1.1 汽车故障诊断方法

汽车故障诊断是指汽车有了故障之后,在不解体或仅拆下个别小件的情况下,判断故障部位和查明故障原因,最后指出排除故障的对策。其基本方法主要有四种。

1. 人工经验诊断法

诊断人员依据实践经验和专业知识,借助简单工具,凭耳听、眼看、手摸等直觉,进行检查、试验、分析,以确定故障原因和故障部位。这种早期的诊断方法虽然准确性差、速度慢,但是由于不需要专门设备仪器,因而投资小。所以现代汽车上某些故障的诊断仍然采用该方法。

2. 简单仪器诊断法

由于汽车结构日趋复杂,电器设备的采用逐步增多,因此汽车诊断开始使用真空表、万用表和示波器等,对汽车零部件和总成进行检测,为分析判断汽车技术状况提供数据和波形。

3. 精密监测诊断法

随着汽车电子化程度越来越高,动态的随机故障以及控制系统功能性故障日益增多,以计算机技术为核心的各种精密监测手段被广泛使用,大大提高了汽车故障诊断的准确率。

4. 人工智能诊断法

随着电子控制技术、计算机技术的广泛应用,汽车故障诊断迫切需要减少人工干预,提高自动化及自适应能力的多层次的智能化诊断系统^[1-3]。

1.1.2 国内外汽车故障诊断的发展概况

1. 国外汽车故障诊断技术的发展

20 世纪 40 年代,国外就开发了以故障诊断和性能调试为主的单项检测技术。60 年代后诊断检测技术得到较大发展,发达国家相继研制并开发了各种车外诊断设备仪器。车外诊断(Off Board Diagnostics)指利用独立于车辆的诊断设备进行诊断。1972 年,第一届国际汽车安全会议上,德国大众汽车公司首次推出了使用计算机的车外诊断仪器,1975 年,美国哈米顿标准公司推出了 Autosense 设备;1986 年,美国通用汽车公司推出了 CAMS 系统,福特公司推出了 SBDS 系统;1987 年,日本丰田汽车公司的 Diagnostics 诊断仪器。

随着电子控制技术的广泛应用,故障诊断主要体现为随车诊断。随车诊断(On Board Diagnostics)指利用汽车上安装的诊断装置进行诊断。1977 年,通用汽车公司首先研发了发动机点火控制系统 MISAR。80 年代后,为了诊断具有众多输入输出信号和复杂控制功能的电子系统都设有随车诊断装置。

80 年代后期,随着人工智能技术的发展,汽车故障诊断专家系统开始被应用,如法国雷诺公司推出的 Rulemaster 专家系统,福特公司推出了 TEST 专家系统等。专家系统和车外诊断系统、随车诊断装置并驾齐驱,在汽车故障诊断领域得到了不断发展^[4-6]。

2. 国内汽车诊断技术的发展

我国汽车诊断与检测技术的研究起步较晚。80年代,随着我国汽车工业和交通运输业的迅猛发展,汽车保有量的快速增长,对汽车安全性和环保问题的高度重视,这些都促进了汽车诊断技术的发展^[2]。80年代中期,我国开始研发汽车安全性能计算机测控系统,经过十几年的努力,汽车性能检测线在智能化上有了很大的进展。

“六五”期间,国家重点课题之一是汽车诊断与检测技术。2000年实施的国家标准《汽车综合性能检测站通用技术条件》和2002年实施的国家标准《营运车辆综合性能要求和检验方法》等一系列政策和法规,为更好地发展我国现代汽车诊断技术提供强有力的法律保证^[4]。

3. 汽车诊断技术的发展方向

汽车随车诊断装置、车外诊断设备只是解决了状态监测或与硬件直接有关的单一物理故障,而对功能性、综合性故障的诊断还存在着一些问题。汽车上电控系统的日益增多,传感器的广泛应用^[3],使得汽车故障诊断技术的要求越来越高。为适应汽车高新技术的发展,汽车故障诊断技术必将向智能化、网络化方向发展。

(1) 汽车故障诊断专家系统能够适用于电控系统和机械系统的故障诊断;能够灵活地运用专家的知识来高效且准确地查明故障原因和部位;具有自学习功能和信息融合功能,不断拓宽专家系统的诊断范围和维护系统的性能。

(2) 现代信息社会,汽车维修业的网络化已不再是新鲜事物。汽车故障诊断网络化可以突破传统汽车诊断技术信息在时空、速度和容量方面的局限性,集成各种软件和设备,实现诊断信息的资源共享;应用多媒体技术,实现在线帮助和培训,提高汽车维修人员的专业水平,从而提高系统的诊断准确度^[3-8]。

1.2 专家系统概述

专家系统(Expert System, ES)是人工智能(AI)应用研究最为重要和最为广泛的课题之一。1965年,美国斯坦福大学费根鲍姆(E.A. Feigenbaum)教授开始研制世界上第一个结合启发式程序和大量专门知识的专家系统DENDRAL系统,该系统能模拟化学家的思维过程,根据有机化合物的分子式及其质谱数据,推断其分子结构。1972年,斯坦福大学开始研制世界上第一个功能较为全面的基于规则的产生式系统MYCIN系统,该系统第一次应用了知识库(Knowledge Base, KB);应用可信度因子进行不精确推理的求解;具有解释功能、人机界面和自学习等技术。专家系统经过20多年的研究,已遍及各类应用领域,如化学、医学、地质、教育、交通、机械等。随着专家系统商品化,巨大的经济效益和社会效益日益增多,目前,专家系统正在被广泛地研制和应用^{[9][10]}。

专家系统实质上是利用储存在计算机内的某一领域内人类专家的知识,模拟人类专家解决该领域问题的计算机程序系统。

1.2.1 专家系统的特点和功能

1. 专家系统的特点^[10-13]

(1) 启发性。专家系统使用的知识是领域专家长期积累的专门经验,属于专门知识,专门知识具有启发性。专家系统采用启发性知识和回溯策略,从给定条件出发,进行启发式搜索、推理,实现问题求解。

(2) 透明性。系统能够在求解问题时,给出正确的解释,使用户能够了解推理过程,提高对专家系统的可信度。

(3) 灵活性。专门知识相对逻辑知识是不稳定的,专家随时可能要修改和补充已有的知识,所以专家系统中知识库和推理机是分离的,使系统能不断更新和扩充新知识。

2. 专家系统的功能

(1) 咨询功能:系统能回答用户提出的某个领域的问题,解释系统本身的决策过程。

(2) 学习功能:在专家的训练下,系统能不断地补充和修改知识库的知识。有的专家系统具有自学习、自适应功能,可以完善知识库的知识。

(3) 教育功能：系统通过回答有关问题，向用户提供专门知识，达到教育新手的目的。其它还有报警功能、控制功能和信号显示功能等。

1.2.2 专家系统的分类

按照专家系统处理问题的类型，海叶斯-罗斯 (F.Heyes--Roth) 等人将专家系统分为以下几种类型。

1. 解释型 (expert system for interpretation)

通过对已知数据和信息进行分析与解释，确定它们的含义。这类系统能够识别不确定或不完整的信息，并能够对数据作透明性说明。如最早的分析化合物分子结构的 DENDRAL 专家系统。

2. 预测型 (expert system for prediction)

通过分析相关对象的过去和现在情况，推测未来的可能情况。这类系统处理的数据随时间变化，需要对应的动态模型支持，时间推理是其常用的技术。如天气预报、交通预测、军事预测和经济预测等。

3. 诊断型 (expert system for diagnosis)

根据输入信息来推断相应对象存在的故障，找出存在的故障原因并给出解决方案的系统。这类系统要求了解处理对象内部各部件的功能及其相互关系。由于现象与故障之间存在不一定严格的对应关系，所以这类系统需要较全面地掌握有关对象的知识，并能处理多种故障同时并存的情况。诊断型专家系统是应用最多的一类系统，如著名的医疗 MYCIN、CASNET 系统、计算机诊断 DART 系统等。

4. 设计型 (expert system for design)

根据给定要求，求出满足设计约束的目标配置。这类系统要求在给定的限制条件下给出最佳设计方案，空间推理是其常用的技术。这类系统广泛应用于工程设计、服装设计、计算机硬件配置等领域。

5. 规划型 (expert system for programming)

按照某个给定目标拟定总体规划和行动计划的一类系统。一般要求在一定条件下以较小的代价达到给定的目标。例如制定最佳行车路线 CARG 系统，安排宇航员空间活动的 KNEECAP 系统。

6. 教育型 (expert system for instruction)

按照学生的特点和基础，以最适当的教学方法和教学内容对学生教学和辅导。以深层知识为基础的解释功能是其关键技术。如美国麻省理工学院开发的符号积分与定理证明系统 MACSYMA 等。

7. 监视型 (expert system for stakeout)

把实时观察到的行为与其应该具有的行为比较，以发现异常情况，并发出警报信号。这类系统要求反应速度快，实时性强。如航空母舰飞机管理系统 AIRPLAN 等。

8. 维修型 (expert system for repair)

制定并实施排除故障的方案。要求能够根据故障的特点，制定故障对策，并实施排除故障的方案。如内燃机故障维修系统 DELTA 等。

9. 控制型 (expert system for control)

结合监视型和维修型，对各种大型设备完成实时控制。这类系统具有解释、预报、诊断、规划等多种功能。如维修钻机最佳探流特征的系统 MUD 等。

10. 调试型 (expert system for debugging)

对失常的对象给出处理意见和处理方法。这类系统兼有规划、设计、预报和诊断等功能。如石油钻探机械故障诊断系统 DRILLING 等。

1.2.3 专家系统的基本结构

专家系统的基本结构一般包括人机接口 (Man-machine Interface)、知识库 (Knowledge Base)、数据库 (Data Base)、推理机 (Inference Engine)、解释器 (Explanation) 和知识获取 (Knowledge Acquisition) 六个部分，如图 1.1 所示。

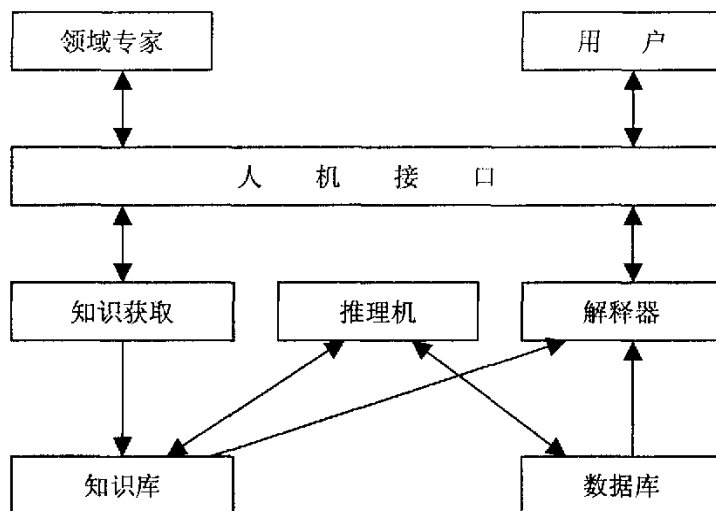


图 1.1 专家系统的基本结构

1. 人机接口

人机接口是专家系统与用户、领域专家之间进行数据、信息交流的界面。接口可使领域专家输入知识，并完善知识库，提高系统求解问题的能力；用户可根据已知事实向系统咨询，系统则显示推理过程和推理结果，并对结果作出必要的解释。

2. 知识库

知识库用来存储领域专家的经验性知识和事实。知识库内的知识通过知识获取得到，又为推理提供问题求解所需的知识。

3. 数据库

数据库又称“黑板”，是专家系统在推理过程中存储初始事实、中间结果、最终结论等信息的工作存储器。数据库的内容在系统运行过程中是变化的，而知识库在一次推理中是相对不变的，两者动静结合，构成专家系统完整的知识库。

4. 推理机

推理机能够模拟领域专家的思维过程，根据知识库中的知识，按一定的推理方法和控制策略进行推理，最终求得问题的解。

5. 解释器

解释器能够向用户解释自己的行为，解答用户提出的各种问题^[9-16, 7]。

6. 知识获取

知识获取将领域内的事实和经验性知识转化为推理机可利用的形式，建立良好性能的知识库。

1.3 汽车故障诊断专家系统

1.3.1 汽车故障诊断专家系统研究现状

意大利米兰汽车工业大学于 1982 年首先成功地研制了汽车电子系统故障诊断专家系统；1985 年美国通用汽车公司研制了发动机冷却系统噪声识别与诊断专家系统 Engine cooling advisor；日本丰田中央研究所开发了汽车故障诊断专家系统 ATREX；1986 年日本 Nissan 汽车公司研制了发动机电控系统的诊断专家系统；同年美国福特公司开发了专家系统 TEST；1987 年加拿大太平洋公司开发了发动机油液分析故障诊断专家系统 EDMS (Engine Diagnosis Maintenance System)；同年日本日产汽车公司研制了随车和离车汽车发动机故障诊断系统。20 世纪 90 年代，汽车故障诊断专家系统已被应用到汽车系统总成，如运用状态监控和模糊逻辑推理的悬架单元故障诊断系统；运用振动信号的特征提取和神经网络模式识别的变速箱故障诊断系统；基于规则和神经网络的制动系统故障诊断系统等^{[5][17]}。

国内在汽车发动机故障诊断系统方面的研究起步较晚。20 世纪 90 年代中后期, 国内对汽车故障诊断专家系统的研究进入了快速发展阶段。如北京理工大学开发了油液分析的专家系统 OAFDS; 南京大学开发了汽车故障维修专家系统 ABDES 等。然而这些系统与国外系统相比存在明显的差距, 普遍实用性差, 知识库不完善, 推理效率低^[39]。

1.3.2 汽车故障诊断专家系统发展趋势

1. 建立有效的知识表示模式

知识的表示方法对领域专家的知识表达能力有极大的影响, 有效的知识表示方法有利于知识库的组织、管理和维护, 也有利系统推理、解释。

2. 建立集成化的诊断系统

基于规则、故障树、案例和模糊神经网络模型的集成专家系统包括知识构建的集成、推理机制的集成, 是故障诊断专家系统化研究的方向。

3. 建立自适应的学习机制

解决知识获取困难的有效途径就是系统具有完善的自适应学习机制。这样, 专家系统能象人类专家那样去获取所需的知识, 增加系统的容错性, 提高系统的智能化水平。正在开发的有基于案例的学习、基于神经网络的学习系统等。神经网络 (Neural Network, NN) 具有强大的学习能力和自适应能力等, 某种程度上克服了传统专家系统知识获取的“瓶颈”问题, 但还存在一些困难。所以, 探索多种学习方法协同工作的诊断专家系统, 是发展的方向。

4. 应用多媒体技术

多媒体技术能够使人机界面友好, 交互性能良好, 增加系统的可操作性, 提高专家系统的实用性。

5. 建立分布式网络诊断

利用局域网、因特网的信息传递, 可以实现异地诊断和远程诊断, 实现诊断信息资源的共享, 多个专家协同工作, 提高诊断的实时性和准确率^[5, 17-29]。

1.4 课题研究的目的和意义

1. 电喷发动机故障诊断专家系统, 将电喷发动机故障诊断领域专家们的大量维修经验进行汇总和提炼, 计算机根据用户提供的故障线索及存储在计算机内的经验规则数据, 通过人机接口, 引导用户逐步深入诊断, 准确判定发动机故障部位, 提出解决问题的决策和合理的诊断程序, 实现汽车故障诊断专家级的诊断, 具有实用意义。

2. 汽车故障的复杂性和多元性使得诊断方法也是多元化。因此, 本课题研究的专家系统是基于规则的故障诊断专家系统和基于故障树分析方法的集成故障诊断专家系统。这两种诊断方法, 技术简单又成熟, 能够显式表示诊断系统的求解策略, 把故障树知识结构作为知识表示, 可以降低知识获取的难度, 汽修从业人员也能掌握这种方法, 具有一定的社会效益。

3. 我国汽修行业维修人员普遍文化层次低, 技术水平差。因此, 本课题针对领域专家不足的现状, 面向普通维修工人, 应用多媒体技术, 进行在线技术培训。这有助于更新维修观念和知识, 提高员工的整体素质, 充分利用专家知识来解决发动机故障诊断问题, 提高汽车售后服务质量, 具有广阔的应用前景^[3, 5, 6, 33-35]。

1.5 课题研究的背景

汽车发动机是汽车的心脏部分, 其各子系统之间的关系复杂, 要求各系统和机构之间配合协调, 因此发动机出现故障的几率较高, 一般占整车故障的 40% 左右。另外, 在排除故障时, 确定故障原因和部位的时间约占总时间的 70%-90%, 而排除故障的维修工作约 10%-30%。如何迅速而准确地诊断出故障部位并加以排除, 已成为汽车诊断与维修行业中所面临的迫切任务。在现代绿色汽车上, 电控燃油喷射发动机得到了广泛的应用。由于采用了大量的电子元件和传感器, 电喷发动机基本上都有故障自诊断功能, 但仅局限于电控系统中的一般性故障诊断, 而对于一些复杂故障则无能为力。所以有必

要研究电喷发动机故障诊断专家系统。

汽车故障诊断是在不解体（或仅卸下个别小件）的条件下，确定故障部位及原因的检查和析，这就需要有一定专业知识和专业技能的汽修人员。但是，一方面随着汽车保有量的急剧增加，使得汽修行业高素质从业人员严重不足；另一方面，电控系统在汽车上的应用，特别是电控技术在发动机性能提高上的作用，使电喷发动机成为当今汽车发动机的主流。电喷发动机故障诊断，单靠传统的诊断方法进行故障诊断明显存在局限性；而且种类繁多，技术更新快，对从业人员的要求越来越高。所以，研究汽车故障诊断专家系统是满足汽修行业发展的需要，也符合汽车故障诊断技术的发展趋势。本课题以汽车电喷发动机为研究对象，研究电喷发动机故障诊断专家系统^[30-32]。

1.6 课题的主要研究内容

本课题的主要研究内容是面向汽车电喷发动机，构建一个故障诊断专家系统。为了在一定程度上解决专家系统研究中知识获取困难的问题，本课题采用基于规则的故障诊断专家系统和故障树分析法；为了体现现代汽车维修的特征，真正实现专家级诊断，本课题应用多媒体技术获得在线培训和帮助。具体的研究内容如下：

1. 系统的总体设计

系统的结构关系到系统的可操作性和可靠性，设计一个合理的系统结构，乃是课题研究的关键。

本文在第二章，对电喷发动机故障诊断的思路进行了阐述，分析了电喷发动机电子控制喷射系统的构造与功能；诊断参数的确定；介绍了发动机故障概念及分类；主要讨论了电喷发动机故障诊断的基本程序；研究了故障树分析法理论，以及它和基于规则的专家系统之间的联系，以便建立知识库。着重探讨了专家系统的开发设计内容，包括系统体系结构，用户界面设计，系统诊断功能和辅助功能。同时介绍了本课题所采用的开发工具。

2. 发动机故障诊断专家系统知识库

知识库是专家系统的核心，知识因不同领域内问题的性质而有多种表示方法，知识的表示方法又与系统的推理控制策略有关。

本文在第三章，分析了知识库中知识的表达方式，提出了基于故障树分析的产生式规则和框架集成知识表示方法，对发动机旋转部分与非旋转部件的产生式规则表示方法进行了研究，并给出了本系统知识库的实现方式。

3. 发动机故障诊断专家系统推理机

推理机是专家系统的思维机构，推理的正确与否与专家系统故障诊断的正确性有密切关系。

本文在第四章，着重研究了推理机推理过程控制方式，对故障树模型进行了探讨，实现了诊断推理方式。

4. 数据库技术

数据库是推理机不可缺少的存储单位。本文在第五章，对数据库技术在专家系统中的应用进行了讨论，设计出本系统的数据库结构。

5. 多媒体技术

为了使诊断界面友好，易操作，又能实现在线培训，本课题采用了多媒体技术。

在第六章，介绍了发动机机构和工作原理的仿真，在线培训的实现。

6. 系统的总体实现

在第七章，本文描述系统的总体模块，介绍了各功能模块的实现。

第二章 电喷发动机故障诊断专家系统的总体设计

2.1 电喷发动机故障诊断的思路

汽油机燃油供给系统的主要任务是根据发动机对不同工况的要求，配制合适的空燃比的可燃混和气进入气缸。为了获得最佳空燃比，以提高发动机经济性、动力性，减少排放污染，在现代汽车上，电子控制燃油喷射系统（Electronic Fuel Injection, EFI）因其能实现最佳空燃比的控制而被广泛应用。电喷发动机是机电液一体化的集成控制系统，在故障诊断时，首先要对整个系统的构造、功能有个全面的了解，这样分析故障就变得容易。本节主要介绍电喷系统故障诊断的基本思路。

2.1.1 电喷系统 EFI 的构成与功能^[36]

电喷系统一般由空气供给系统、燃油供给系统和电子控制系统等组成。

1. 空气供给系统

空气供给系统的功能是测量和控制汽油燃烧所需要的空气量，为发动机提供所需的空气。其类型有 D 型和 L 型。

(1) D 型（速度密度控制）

通过检测进气歧管压力来测量供入发动机的空气量。如图 2.1 所示。

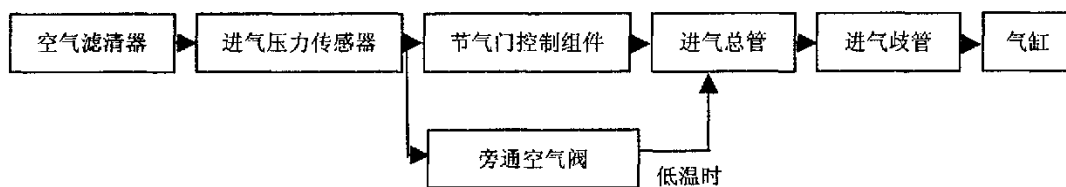


图 2.1 D 型空气供给系统

(2) L 型（质量流量控制）

用空气流量计测量供入发动机的空气量，其测量准确度比 D 型高。如图 2.2 所示。

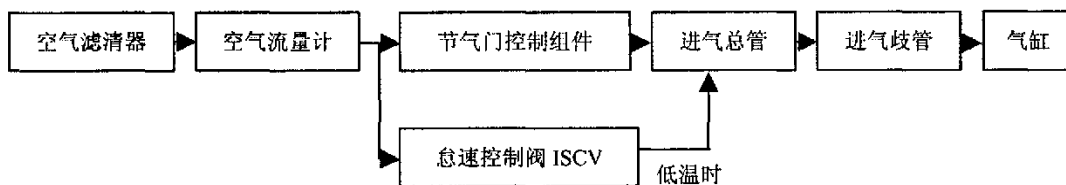


图 2.2 L 型空气供给系统

2. 燃油供给系统

燃油供给系统的功能是，向各气缸供给混和气燃烧所需要的汽油量。如图 2.3 所示。

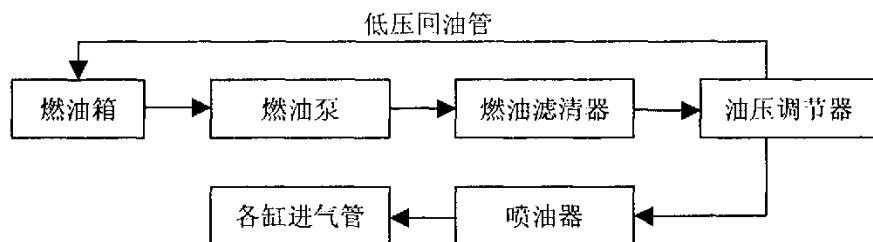


图 2.3 燃油供给系统

3. 控制系统

控制系统的功能是根据发动机工况确定汽油的最佳喷射量。如图 2.4 所示。

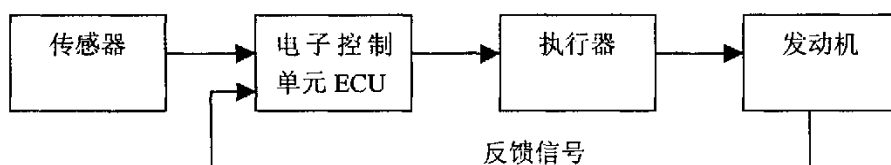


图 2.4 电子控制系统

2.1.2 电喷发动机故障分类

发动机故障是发动机各零件、部件本身或它们之间配合状态、系统性能发生了异常变化。对故障分类是进行故障诊断的必要条件。

1. 电喷发动机的结构

汽车发动机系统由多个子系统组成。发动机的功能就是由这些子系统按照一定的规律，互相配合而实现的。为了给发动机的故障分类，有必要先对发动机结构分级。如图 2.5 所示。

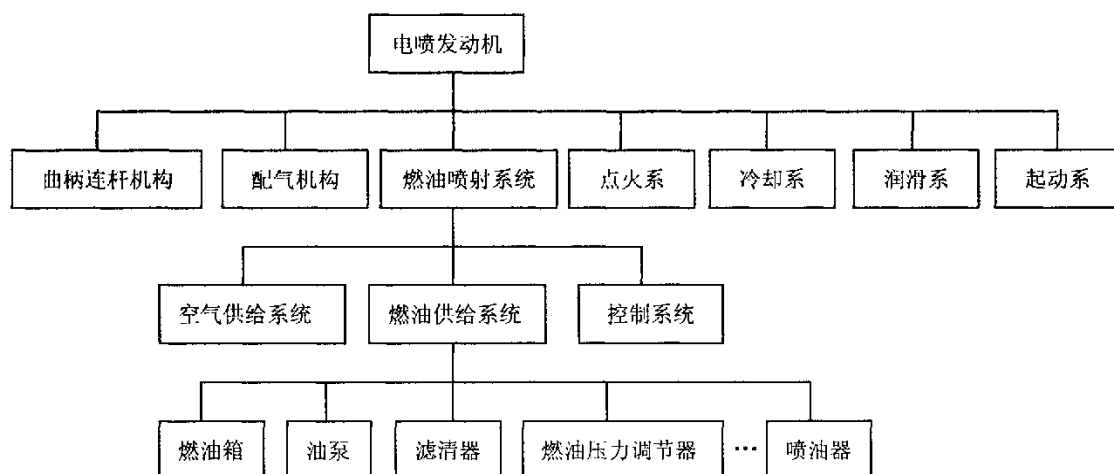


图 2.5 电喷发动机结构

- (1) 发动机自身。
- (2) 各子系统，包括曲柄连杆机构、配气机构、电控燃油喷射系统、点火系统、冷却系统、润滑系统、起动系统。
- (3) 组成各子系统的各个部件。例如，燃油供给系统由燃油箱、油泵、滤清器、燃油压力调节器、喷油器等组成。

电喷发动机的结构分级知识将直接用于专家系统的知识库中。

2. 电喷发动机故障分类

- (1) 电喷发动机故障：发动机不能发动、怠速不良、发动机无力、发动机温度或油耗异常、发动机异响等。
- (2) 各子系统故障。例如：燃油供给系统故障有混和气过稀、过浓、来油不畅等。
- (3) 子系统故障中故障原因。例如：燃油供给系统的混和气过浓可能喷油器滴漏、燃油压力偏高、温度时间开关不正常工作等。

如图 2.6 所示，发动机排气管放炮的故障源是燃油供给系统，其原因是喷油器滴漏。

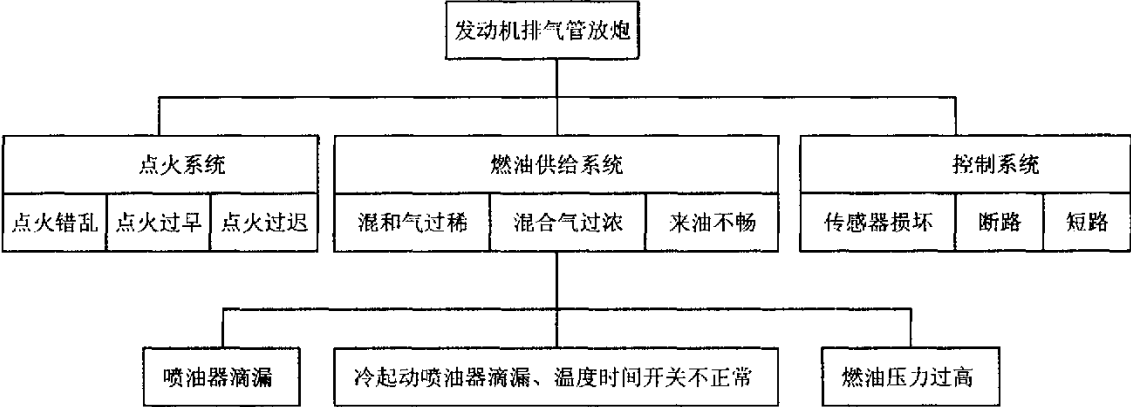


图 2.6 发动机排气管放炮故障

2.1.3 电喷发动机诊断参数的确定^[2]

发动机诊断参数指在诊断时，表明发动机技术状况的参数。它是故障诊断的重要依据，因此在系统设计时必须确定诊断参数。

根据电喷发动机的构造，其诊断参数见表 2.1。

表 2.1 电喷发动机常用诊断参数

诊断对象	诊断参数
曲柄连杆机构	气缸压力 (MPa)
	曲轴箱窜气量 (L/min)
	气缸漏气量 (KPa)
	进气管压力 (真空度) (KPa)
配气机构	气门间隙 (mm)
	配气相位 (°)

燃油供给系	怠速转速 (r/min)
	喷油器 30s 喷油量 (mL) 和雾化形状
	怠速时燃油压力 (KPa)
	喷油器漏油量 (滴)
点火系	蓄电池电压 (V)
	点火提前角 (°)
	各缸点火线圈电压值 (KV)
	各缸点火电压短路值 (KV)
	点火系最高电压值 (KV)
润滑系	火花塞电极间隙 (mm)
	机油压力 (KPa)
	油底壳液面高度 (mm)
	机油温度 (°C)
冷却系	机油消耗量 (Kg)
	冷却液温度 (°C)
	冷却液液面高度 (mm)
	散热器冷却液入口与出口温差 (°C)
控制系	各种传感器电阻 (K Ω), 电压 (V)
	ECU 各端子间电阻 (Ω), 电压 (V)
	喷油器电阻 (Ω)、怠速控制阀电阻 (Ω)、点火线圈电阻 (K Ω)

2.1.4 电喷发动机故障诊断的程序^[37]

对于电喷发动机的故障诊断, 是通过友好的人机交互诊断界面实现的, 可按图 2.7 所示的故障诊断流程图进行诊断和检修。

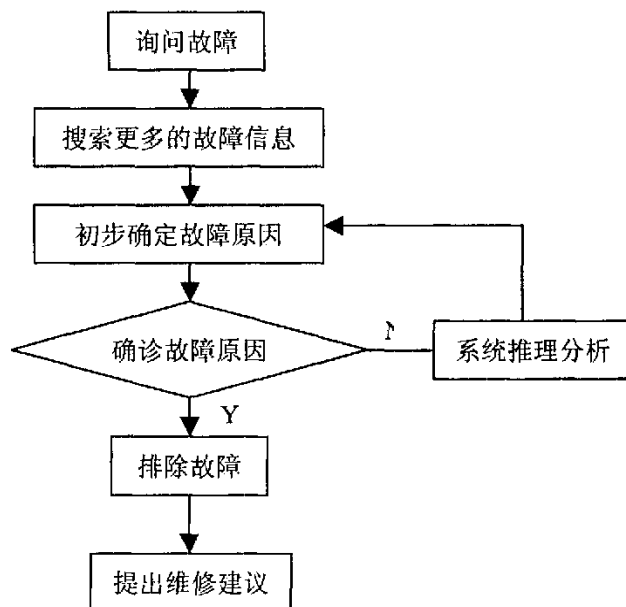


图 2.7 系统诊断流程图

2.2 故障树分析法和基于规则的专家系统^{[1] [6] [9] [14] [38]}

2.2.1 故障树分析法概述

故障树分析法 (Fault Tree Analysis, FTA) 是对动态系统或对现场设备工况状态进行可靠性和安全性分析的一种图形演绎方法。它通过对可能造成系统故障的各种原因作由总体至部分按树状逐级细化分析, 画出逻辑框图。该法把被分析系统中最不希望发生的事件作为顶事件, 然后找出直接导致顶事件发生的全部可能因素或各种因素的组合, 再找出导致上述因素发生的全部直接因素, 如此循环逐级向下演绎, 直至查到引出该系统发生故障的全部因素, 这些不必再探究的因素称为底事件。然后, 用相应的符号表示各级事件, 用适当的逻辑门把这些事件联接成一棵以顶事件为根, 中间事件为节, 底事件为叶的具有若干级的倒置树状逻辑因果关系图, 即故障树。

2.2.2 故障树定性分析

1. 结构函数

故障树是由构成它的全部底事件经过“与”和“或”的逻辑关系联接而成, 为了便于对故障树作定性分析, 需要先给出故障树的结构函数。

为了简化, 假设系统和零部件均只考虑正常和故障两种状态, 以由几个相互独立的底事件构建的故障树为研究对象。设 x_i 为底事件的状态变量, 取值为 0 或 1, $\phi(x)$ 为顶事件的状态变量, 其值也为 0 或 1, 则底事件和顶事件可定义如下:

$$x_i = \begin{cases} 1, & \text{当第 } i \text{ 个底事件发生时 (即零部件有故障)} \\ 0, & \text{当第 } i \text{ 个底事件不发生时 (即零部件正常)} \end{cases}$$

$$\phi(x) = \begin{cases} 1, & \text{当第 } i \text{ 个底事件发生时 (即系统有故障)} \\ 0, & \text{当第 } i \text{ 个底事件不发生时 (即系统正常)} \end{cases}$$

显然, 顶事件状态变量 $\phi(x)$ 必然是底事件状态变量 x_i ($i=1, 2, \dots, n$) 的函数。

$$\phi(x) = \phi(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (2.1)$$

$\phi(x)$ 被称为故障树的结构函数。

(1) “与” 门的结构函数

$$\phi(x) = \bigcap_{i=1}^n x_i \quad (\text{或用 } \prod_{i=1}^n x_i) \quad (2.2)$$

(2) “或” 门的结构函数

$$\phi(x) = \bigcup_{i=1}^n x_i \quad (\text{或用 } \sum_{i=1}^n x_i) \quad (2.3)$$

2. 故障树定性分析

故障树定性分析的主要目的是找出所有导致顶事件发生的最小割集。

导致系统故障发生的某几个底事件的集合, 就是割集。当割集中任意一个底事件不发生, 顶事件就不发生, 这样的割集被称为最小割集。

在故障树定性分析中, 引入最小割集的概念, 可以简化既有“与”门又有“或”门的故障树的复

杂结构函数。

设故障树有 K 个最小割集，只要有一个最小割集 k_j ($j=1, 2, \dots, k$) 中的全部底事件 x_i 均发生，系统必定发生故障， k_j 可以表示为

$$k_j(x) = \bigcap_{i=1}^m x_i \quad (2.4)$$

K 个最小割集中，只要有一个发生，顶事件就发生，即故障树的结构函数为

$$\phi(x) = \bigcup_{j=1}^k k_j(x) = \bigcup_{j=1}^k \bigcap_{i=1}^m x_i \quad (2.5)$$

最小割集是非常重要的，它描述了系统处于故障状态时，必须修理的故障，即系统中最薄弱的环节。这样可以帮助维修人员有目的、快速的进行故障诊断。

故障树分析法用于发动机故障诊断，是根据发动机的工作特性与技术状况之间的逻辑关系建成故障树，对故障发生的原因进行定性分析，它可以对发动机故障进行预测和诊断，从中找出系统的最薄弱环节，即维修的重点，以使发动机的技术状况处于良好状态。

2.2.3 基于规则的专家系统

基于规则的专家系统是将专家经验知识归纳成规则，通过计算机程序，调用知识库内的规则，对动态数据库内的具体问题（事实）进行处理，通过推理机推断出新的事实。基于规则的专家系统以 IF-THEN 的形式表示有关诊断对象的故障和故障现象之间的对应关系。

基于规则的专家系统的工作模型如图 2.8 所示。

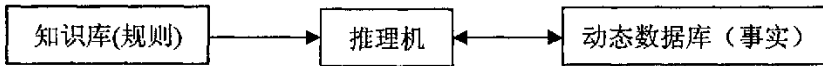


图 2.8 基于规则的专家系统的工作模型

(1) 知识库。存储以产生式规则表示法“IF 前件 THEN 后件”表示的专家知识，属于长期存储器模型。

(2) 动态数据库。存放问题事实和由推理机根据规则进行推理并导出的新的事实，属于短期存储器模型。

(3) 推理机。结合知识库内的规则和动态数据库内的事实，推断出新的事实的一种推理模型。它把动态数据库内的事实与知识库内的规则的前件进行比较，若事实与前件一致，则匹配成功，这条规则被激活。通过激活的规则，推理机把结论存放在动态数据库，并进行处理，直到再没有其他规则的前件能与事实相匹配为止。

基于规则的专家系统诊断知识库与推理机相互独立，便于知识库的维护，它具有形式统一、表达直观、高度模块化、较强可扩充性和推理方便等优点，因此被广泛应用于故障诊断领域。但基于规则的专家系统过分依赖专家的经验知识，存在知识获取困难以及控制策略不灵活等缺点。

2.2.4 故障树分析法与基于规则的专家系统的联系

故障树是用于系统可靠性分析和故障诊断的一种图形化故障模型，而基于规则的诊断专家系统的目标是当系统发生故障时综合利用各种诊断信息，根据知识库中的规则，通过推理确定系统的故障模式，推断出故障部位和故障原因，最后提出排除故障的方法和维修建议。

从知识获取的角度分析，故障树具有标准化的知识结构，如果利用故障树的知识生成专家系统知

从知识获取的角度分析,故障树具有标准化的知识结构,如果利用故障树的知识生成专家系统知识库的知识,那么系统可以显式地表达诊断专家的问题求解策略,从而可以很大程度地降低系统知识获取的难度,解决基于规则的专家系统知识获取的瓶颈问题。

事实上,故障树的顶事件对应于专家系统要分析解决的故障现象,其底事件对应于专家系统的推理结论,即故障原因,而故障树由顶向底的层次和逻辑关系则对应于专家系统的推理过程。因此,研究者可以把故障树同专家系统的知识库通过最小割集联系起来,具体做法是:故障树的一个最小割集是系统的一种故障模式,对应于知识库中的一条规则,最小割集内的基本事件是该故障模式的最基本原因,对应于知识库中规则的后件,即故障源或故障原因;从顶事件到割集的搜索路径,是该割集不同于其他割集的中间过程,对应于知识库中规则的前件。但是,在故障诊断中,简单的故障诊断表述是不够的,因此,要在知识库中增加其他内容,如故障现象的描述、故障的检测提示、诊断建议和故障对策等。其中,描述故障现象可以图文并茂,它们分别反映故障树的一个故障模式和对应的故障现象,它们组成专家系统进行推理的依据,同时构成知识库内规则的前件;故障的检测提示属于故障的中间辅助表示部分,它提示了检测故障的方法;诊断建议和故障对策属于专家系统推理的结论部分,它说明了故障树顶事件对应的系统故障的故障原因以及排除故障的方法和维修建议。

应用故障树分析法建立专家系统的知识库,主要原因是:

(1) 描述系统故障的故障树,可以将描述系统的故障模式和专家系统的知识库联系起来,保证知识获取的完整性。

(2) 故障树是描述系统各事件之间的一种特殊逻辑因果关系图,在故障树中表示出系统最不希望发生的事件或最薄弱的环节,与它的各个子系统之间的逻辑结构关系,诊断结果较为准确。

(3) 故障树的建立可以是手工方法,也可以借助计算机程序,它可以把故障模式、故障原因、描述性文字图形、检测提示和故障对策知识添加在故障树相应节点处,而这些内容正是知识库的必不可少的组成部分,所以故障树的自动建立对专家系统知识库的知识获取特别适用。

通过故障树定性分析,再将简化的故障树用于基于规则的专家系统的知识库的构造,既能解决知识获取的困难,又能简化知识库,降低知识的冗余,便于快速诊断。

2.3 专家系统开发设计

2.3.1 专家系统设计的原则

1. 设计专家系统时,一般应遵循的原则有:

- (1) 知识库和推理机相互独立;
- (2) 推理机应尽量简单,便于推理和解释;
- (3) 知识表示方法尽量统一,便于管理;
- (4) 实现系统功能的模块化;
- (5) 用户与系统的交互功能良好。

2. 专家系统设计时,应兼顾的特点:

- (1) 方便性。为用户提供系统的提示、操作方法、解释机构等。
- (2) 可靠性。为用户提供诊断结论的可靠程度和系统的稳定性。
- (3) 有效性。知识表示方法、类型、数量以及应用知识的方法均影响系统的有效性。
- (4) 维护性。系统能够便于增删、修改和完善。

2.3.2 系统设计步骤

专家系统是一种人工智能计算机程序,它的设计同其他计算机软件的设计一样,一般步骤如下:

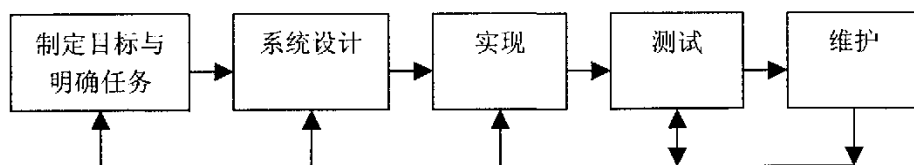


图 2.9 设计与建立专家系统的一般步骤

1. 制定目标与明确任务

本研究课题，由于研究时间的限制，重点对电子控制燃油喷射发动机不同工况下最常见的故障进行研究，由于本系统的模块化拓展性较强，因此能方便地对其内容作进一步的维护和完善。

- (1) 确定电喷系统的结构与功能；
- (2) 确定电喷发动机故障模式，对电喷发动机结构分级，故障分类；
- (3) 明确电喷发动机的诊断参数；
- (4) 初步拟定诊断流程；
- (5) 对系统设计的可行性进行必要的论证，确定基于故障树分析法和基于规则的诊断专家系统的集成系统；
- (6) 建立发动机故障树，求出最小割集，获得简化的故障树，生成对应的规则知识库；

2. 系统设计

系统设计包括知识的概念化、形式化和系统结构设计。

- (1) 知识概念化主要概括知识表示所需要的关键概念及其关系特征，描述领域中的问题求解过程，详细说明与问题求解有关的子任务和控制策略，明确问题求解所采用的方法。
- (2) 知识形式化就是把与概念化过程有关的关键概念及其关系特征等转变为比较正式的表达形式，包括过程模型和数据特征等。
- (3) 系统结构设计采用面向知识的结构设计，以知识库为中心，设计整个系统。这种系统模块化程度较高，系统的扩充性功能较强。在设计实际系统时，知识库、推理机和人机接口是必不可少的三个组成部分。

3. 实现

领域专家必须收集并重新组织已形式化的知识，使之与问题的关系特征相吻合。以建立的故障树生成规则知识库，用设计的推理机来实现具有执行和测试功能的系统最初版本。

4. 测试

测试包括对已形成的系统最初版本的性能进行评价，并作适当地修改，使之符合领域专家对系统定义的标准。

5. 维护

系统的维护是使系统在使用和运行最初版本时，处于稳定状态，并解决运行过程中可能出现的问题。由于专家系统具有不断提高问题求解的能力，因此，要反复地对知识库及推理规则进行改进试验，归纳出更完善的结果。经过一段时间的测试和改进，使系统处于稳定良好的运行状态，并可在实践中应用。

2.3.3 系统结构

本研究课题设计的电喷发动机故障诊断专家系统（Electrical Fuel Injection Engine Fault Diagnosis Expert System，简称 EFIE-FDES）主要由知识库、推理机、故障树、动态数据库、解释系统和人机接口组成，如图 2.10 所示。

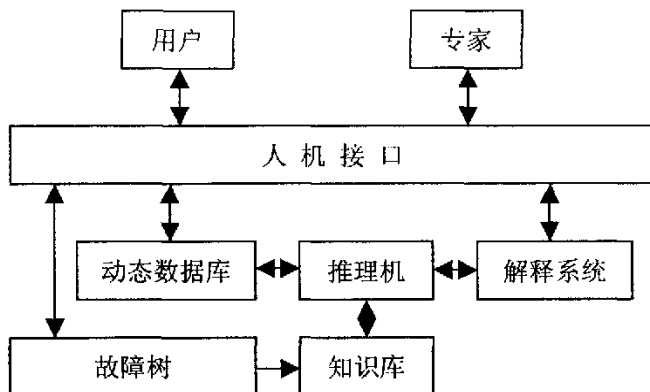


图 2.10 专家系统体系结构

EFIE-FDES 专家系统是基于故障树分析法和基于规则的专家系统，其结构中，故障树模块存放故障树知识，从而可以获取规则，存入知识库中；知识库用于存放诊断规则、故障原因、检测提示和故障对策，这些知识都来自于领域专家和有经验的维修人员，知识库集中了多个专家的知识，并可以在运行中不断修正，排除了个人解决问题时的主观意识，使诊断结果更加趋近实际；推理机实施对整个问题的求解过程的控制，它根据动态数据库中的当前事实，将规则库中的规则进行匹配，然后应用适当的控制策略推断出结论；动态数据库主要存放原始事实、过程特征信息、测点信息等诊断过程的信息；解释系统是对故障诊断的全过程作出合理的解释；人机接口是诊断专家系统和用户之间通过窗口、菜单进行信息交互的媒介，它把用户输入的信息转换成系统的内部表达形式，然后通过程序去处理，把系统的内部信息反馈给用户。

2.3.4 系统主界面

本系统模拟专家的思维方式，以菜单形式进行人机对话，搜索故障信息，采用相应的推理机进行诊断，并给出解决问题的方案；同时，本系统还能够对知识库中的知识进行查找、增删和修改；另外，本系统还有详尽的解释功能和友好的人机界面。

EFIE-FDES 系统主界面如图 2.11 所示。菜单主要模块有：故障诊断模块、知识库管理模块、数据管理模块、在线学习模块等。分别完成系统诊断功能，增删、修改、浏览知识库功能，推理数据的更新和测点参数属性设置功能，利用网页辅助教学功能和系统使用维护功能。



图 2.11 系统主界面

2.3.5 系统人机界面设计

由于开发的电喷发动机故障诊断专家系统面向的用户层次不同、技术水平不同，主要面向汽车维修服务市场，因此，本系统的人机交互界面要求简单易操作，具有较强的容错功能、解释功能、浏览功能、保存功能和帮助功能；另外，针对电喷发动机的常见故障建立的故障树，作为搜索的主线，始终显示在故障诊断模块和知识库管理模块的界面上，这样既保持知识库和推理机的分离，又直观清晰。

本系统采用 Visual Basic 6.0 软件编程，通过面向对象的程序设计方法和事件驱动机制进行用户界面设计，使系统可视化强，人机交互友好。

用户界面主要有以下几种窗体：

1. 显示故障诊断推理和解释过程的窗体。系统在这类窗体中利用文本框控件 Text，将推理路径和结论作实时解释，并显示出来，从而增加推理机制和数据处理的透明性，使系统具有实用性。

2. 显示知识库的窗体。显示故障树，系统推理所需的数据以及对知识库的增删和维护，保证知识的更新和完善。

3. 显示数据库与编辑参数属性的窗体。显示数据库的数据和测点的参数和所用传感器的参数值，也可以更改数据和不同测点及参数的上限值和下限值。

4. 查询专家系统和发动机有关知识的窗体。可以利用 Web Browser 控件，在窗体中显示 Web 文档，即有关系统的说明和诊断内容，帮助用户了解发动机工作原理和检测方法，以便更快的进行故障诊断。

2.3.6 系统功能

基于故障树和基于规则的 EFIE-FDES 系统主要包括故障诊断功能、知识库管理功能、数据管理功能和在线学习功能。

1. 故障诊断功能

故障诊断功能包括故障树推理和规则推理。基于故障树推理侧重于在诊断过程中用户通过查询来获取更为详细的故障信息，故障树在定性分析的基础上得到最小割集，从而演变为简化的故障树，为规则推理做好准备。如发动机不能发动作为顶事件，把无着车征兆、有着车征兆和起动困难划分为中间事件，再对其细分分别找出各自的底事件，采用逻辑“或”的关系把它们联结在故障树节点。把故障树上所有节点间形成的规则库中的广义规则封装在一个独立的框架内，当故障树上有节点异常时，则启动与该故障树对应的框架，规则推理将该框架中的规则调入内存，在推理机的作用下，根据被激活的规则与故障征兆相匹配，对数据库中的相关数据作内部处理后，以列表的形式显示在用户界面上，减少了知识的冗余，较好地保证了知识的一致性，提高了诊断速度。系统在推理过程中，产生的中间数据，存储在动态数据库内，系统根据推理路径，可以对诊断结论作出解释，并显示给用户。

2. 知识库管理功能

知识库管理功能通过对领域专家的知识 and 经验不断总结和完善，能够对知识库内的故障树节点和规则库内的规则增删、修改，并能浏览知识库。可以调整优化故障树和规则库；通过更新的知识库，可以使系统更准确、更快速地获取知识，并使系统不断适应新的故障模式，从而提高系统诊断能力。

3. 数据管理功能

系统管理员可以对数据库内的数据表进行管理。管理员使用可视化数据管理器可以负责数据库和工程之间的数据交换，进行数据表结构的设计，数据类型的转换，以及添加、删除记录和查询等操作。利用数据控件绑定文本框，可以浏览数据。

4. 在线学习功能

应用多媒体技术制作的网页，以形象生动的图形、图像和文字等方式显示电喷发动机的构造、工作原理、工作波形和检测设备。用户通过单击按钮，进入不同的框架内容，帮助用户在线系统地学习发动机构造原理和故障诊断技术或查询本系统的相关知识和使用说明。^[39-41]

2.4 系统开发软件的选择^[42-47]

系统开发的软件对一个系统的设计是相当重要的，开发软件决定了系统设计的可操作性及其难易程度。系统开发的应用软件，如 Visual Basic、Visual C++ 和 Delphi 等。

EFIE-FDES 系统是应用 Visual Basic 6.0 开发的。Visual Basic 是在 Basic 语言的基础上发展起来的程序设计语言，是一种可视化、面向对象、事件驱动的编程。面向对象编程（Object Oriented Programming, OOP）是一种全新的程序设计方式，面向对象的设计体现在对象、属性、方法、事件和类等概念上，其中对象是将数据和代码封装起来的实体；属性指描述对象的数据；方法是对象的行为动作；事件是对象在一定条件下会被触发的过程，也是对象所提供的用户编程接口；类指一组相似的对象。

面向对象的方法有以下特征：

（1）抽象性。用户可以关注程序的每个对象，真正参与解决实际问题的过程。

（2）封装性。通过声明模块级的变量和在某个模块中建立内部过程，可以将用户所需要的共同对象封装在各个模块，并将私有部分打包，在内部自由修改一个对象的数据，无需改变程序中的其它部分。使知识具有隐藏性。

（3）继承性。类与类之间的属性和方法可以继承，利用继承性可以实现代码的重复使用。避免了知识的冗余。

（4）多态性。相同的操作可以作用于不同类型的对象并取得不同的结果，可以使用一个单独变量管理一组对象，增加知识应用的柔性。

面向对象的 VB 6.0 具有简单易学、设计规范、功能强大和操作便捷的特点。它先进的数据访问特点让用户能够创建多种类型的数据库，创建前端应用系统。其 Active X 技术允许用户使用别的应用系统提供的函数和功能，如 Microsoft Word 处理功能，可以方便地打印出诊断报告。它的 DHTML 工程类型的应用程序，具有在 Web 浏览器上运行交互应用程序的功能，可以实现故障诊断的在线培训。

本系统应用程序使用 Access 作为后台数据库。Microsoft Access 是一种流行的关系型数据库管理系统（DataBase Management System, DBMS），主要应用于中小型信息管理系统。关系数据库系统的所有数据分别保存在若干个独立存储表中，表与表之间通过公共属性实现联系，当部分表的存储位置、数据内容发生变化时，表间的关系不会被改变，可以避免数据的冗余。使用 SQL 语句查询，可以检索符合条件的数据，增删多条记录。VB 6.0 开发的窗体中使用 ADO Data 控件提供 Access 后台数据库内的数据源，使用 DataGrid 控件可以显示浏览数据表内的信息。

Access 数据库的特点是面向对象、采用事件驱动的开放式关系型数据库管理系统，通过开放式数据库互连（ODBC），可以与其它应用程序相连，具有 Web 管理功能实现数据的访问、交换与共享。支持多媒体技术，通过对象链接与嵌入（OLE），可以编辑显示多媒体数据，使应用程序有丰富多彩的界面。

本系统在线学习模块所采用的软件有 FrontPage 和 Solid Edge。FrontPage 是 Microsoft Office 中的一种所见即所得的 Web 网站编辑器，它拥有用户需要的创建和导航 WWW 站点的所有内容。它有集成的 Internet Explorer 浏览器功能，可以方便编辑网页，然后保存在服务器内，方便网页的链接。Solid Edge 是美国 EDS 公司专门为装配设计和工程制图的主流 CAD 软件，适用于任何产品设计行业进行实体建模和装配，具有很好的可扩展性，能与 Unigraphics NX 无缝集成，支持 Windows OLE 技术，与数据库、电子邮件等软件能极好地协同工作。本系统采用该 CAD 软件对发动机的主要零部件进行建模和装配，实现工作行程原理的虚拟动画演示。

2. 5 本章小结

本章对电喷发动机的核心部分电子控制燃油喷射系统的结构和功能作了简单叙述,在此基础上初步研究了电喷发动机的故障分类方法和进行故障诊断所涉及的诊断参数的确定,以及电喷发动机故障诊断流程。

本章主要阐述了故障树诊断方法和基于规则的故障诊断专家系统的有关理论,研究了电喷发动机故障诊断系统的总体结构。

(1) 从结构函数方面,分析了最小割集,应用最小割集的概念对故障树作定性分析,以便找出系统的最薄弱环节。

(2) 通过分析归纳故障树和基于规则的诊断专家系统相结合的途径,明确了本系统采用基于故障树和基于规则的故障诊断专家系统。

(3) 根据专家系统设计原则和设计步骤,设计了本专家系统的体系结构,介绍了本系统所实现的系统功能和用户界面。

(4) 系统选择 VB 6.0 软件作为开发平台的工具,使整个系统的诊断过程简单易操作,具有较好的开放性和通用性。

(5) 本系统不但具有诊断功能,而且具有数据管理功能。根据系统的性能要求,选择了合适的数据库和数据库接口,保证了后台数据库调用的正常运行。

第三章 电喷发动机故障诊断专家系统知识库设计

知识库是专家系统的核心部分，知识库又是推理机的基础。在基于故障树的专家系统中，知识经过故障树分析存储在知识库中，推理机依据知识库中的知识按照一定的推理控制策略来完成专家系统的故障诊断过程。在构建诊断专家系统时，知识表达方法的选择是极其重要的，它不仅影响知识获取的能力，也影响处理知识的效率。

电喷发动机系统的故障比较复杂，主要形式有一果多因、一因多果、多因多果。因而建立高效、完善的知识库将对电喷发动机故障诊断专家系统性能的提高起到至关重要的作用。

3.1 知识表示

所谓知识就是人类通过学习、实验等实践活动认识到客观世界的规律性的信息，经过加工、处理、解释和改进而形成的。知识是智能的基础，为了使专家系统具有智能，使它能够模仿人类专家的诊断能力，该系统必须具有知识。

任何需要交流和处理的对象都必须用适当的形式表示，从而才能被应用。对于知识也是如此，即知识表示。所谓知识表示就是对知识的一种描述，一种约定，一种计算机可以采用的知识符号。这种知识表示的过程是把知识编译成某种数据结构的过程，只有这样，才能把知识存储到计算机中，以供解决问题时使用。

专家系统的工作过程实质是知识获取并运用的过程，合理的知识表示方法可以便于知识在计算机中的调用、检索、增删和修改，提高专家系统的推理效率。

目前应用较广泛的知识表示方法有：产生式表示法、框架表示法、一阶谓词逻辑表示法、语义网络表示法、Petri 网络表示法、时序逻辑表示法、神经网络知识表示法、可视知识模型表示法等。本课程主要研究产生式表示法和框架表示法。

3.1.1 产生式表示法

产生式一词是由美国数学家波斯特（Post）于 1943 年提出的。波斯特根据替换规则提出了计算模型，模型中的每一条规则当时被称为一个产生式。产生式又称为规则或产生式规则。产生式一般用于表示因果关系的知识，其基本形式是：

IF 条件 THEN 结论

其中，条件也称为前提或前件，用于指出该产生式规则是否可用的条件；结论也称为后件或动作，用于如果当前提条件被满足时，则可以推出的结论或执行的操作。前件和后件可以由逻辑运算符 AND、OR 或 NOT 组成表达式。例如：

IF 燃油压力过高 OR 喷油器泄露严重 THEN 发动机急速过高

其中，燃油压力过高、喷油器泄露严重是条件；发动机急速过高是结论；条件和结论都可称为事实。而两个条件之间采用逻辑或的关系联系在一起。

把一组产生式规则放在一起，通过逻辑关系使它们互相配合，协同工作，一个产生式规则的结论还可以供给另一个产生式规则作为前件使用，以这种方式求得问题的解决，这种系统被称为产生式系统（Production System）。由于这种系统的知识库主要用于存储规则，因此又把这种系统称为基于规则的系统（Rule-Based System）。

产生式表示法具有以下优点：

- （1）自然性。它的表示形式与人类的判断性知识基本一致，所以直观、自然和便于推理。
- （2）模块性。规则是知识库中最基本单元，各规则之间不能相互调节，因此增加了规则的模块性，可以与推理机相互独立，有利于对某一规则的增删和修改。
- （3）清晰性。知识库中的规则具有相同的表示形式，为此编程时可以统一处理规则，方便简单。

(4) 有效性。它既可以表示确定性知识,又可以表示不确定性知识;还可以表示启发式知识和过程性知识。

产生式表示法也存在以下缺点:

(1) 效率不高

产生式系统的求解过程是一个反复进行“匹配—冲突消解—执行”的过程。由于规则库比较庞大,而且匹配是费时的,因此其效率不高,也容易引起组合爆炸。

(2) 不能表达结构性知识

产生式表示的过程性知识具有因果关系,但对于具有结构关系的知识却无从着手,因此它不能表示具有结构关系的事物间的联系与区别。

3.1.2 框架表示法

框架表示法是一种基于框架理论的结构化表示方法。认识都是以框架的结构存储在记忆中的。框架理论是 1975 年,由美国人工智能学者 Minsky 提出的,该理论认为人们对事物的认识都是以框架的结构存储在记忆中。一个框架(Frame)由若干个描述相关事物各方面及其概念的槽(Slot)组成,每个槽下面的层次为侧面,每个侧面又有各自的若干个值。槽用于描述研究对象某一方面的属性。

框架表示法的结构一般形式为:

框架名		
槽名 1:	侧面名 1	值 1, 值 2, ..., 值 k
	侧面名 2	值 1, 值 2, ..., 值 k
	⋮	
	侧面名 n	值 1, 值 2, ..., 值 k
槽名 2:	侧面名 1	值 1, 值 2, ..., 值 k
	⋮	
	侧面名 n	值 1, 值 2, ..., 值 k
槽名 n:	侧面名 1	值 1, 值 2, ..., 值 k
	⋮	
	侧面名 n	值 1, 值 2, ..., 值 k
规则:	规则 1	
	规则 2	
	⋮	
	规则 m	

框架的槽值可以是另一个框架,为此框架可以对知识进行三维结构描述。

框架表示法的特点:

(1) 结构性

框架表示法的基本单位是框架,因此它便于表达结构性知识,且通过槽、侧面把知识的内部结构关系和知识间的关系显式地表示出来。

(2) 继承性

一个框架的槽值是另一个框架名,构成了复杂知识的框架网络,这种承上启下的关系有利于知识的修改和补充,有利于减少知识的冗余,并且保证了知识的一致性。

(3) 便于推理

框架的槽还可以有附加过程,包括子程序和某种推理过程,被称为过程附件(Procedural Attachment)。这种过程附件可以进行矛盾检测,用于知识的一致性维护,并应用其继承性可以实现高效率的推理。

框架表示法也存在缺点,主要是不善于表达过程性知识。所以,它常常与产生式表达式表示法联合使用,取长补短,发挥系统的最佳效率。

根据电喷发动机故障诊断的复杂性, 本研究系统采用产生式规则表示法和框架表示法的集成表示法。

3.2 知识库管理

知识库管理 (Knowledge Base Management, KBM) 是对知识库中的知识进行管理和控制, 完成对知识库的各项操作, 并向用户提供查询、检索。它包括知识的获取和知识的校验等。

3.2.1 知识获取

知识获取 (Knowledge Acquisition, KA) 指从知识源获取知识, 经过识别、分类、筛选和归纳等阶段, 将其转换成知识库的过程。知识源包括专家、书本、数据库及人类的经验等。知识获取的一般过程如图 3.1 所示。

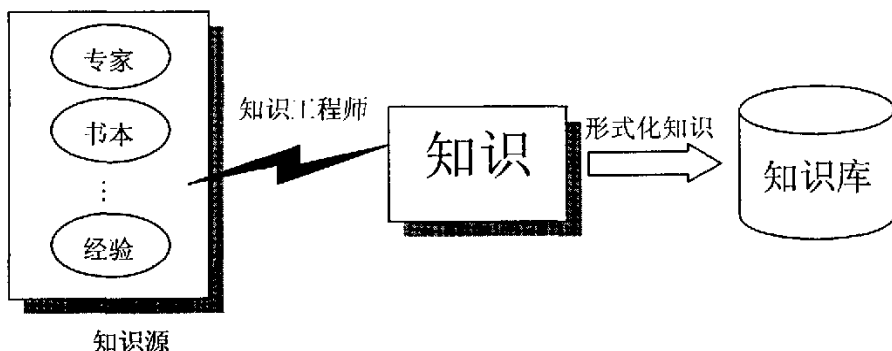


图 3.1 知识获取过程

知识获取是建立专家系统的关键步骤, 也是制约专家系统的瓶颈。知识获取一般有三种方式:

1. 非自动知识获取

知识工程师与领域专家配合, 收集专家知识, 并分析、整理、归纳, 通过知识编辑程序输入到知识库中。

2. 半自动知识获取

利用智能化编译技术, 采取提示、指导或解答的方法, 把知识转换为计算机可以存储的内部形式, 并自动存入知识库。

3. 自动获取知识

系统直接从知识源中获取全部信息, 并填入知识库, 是一种机器学习系统。另外, 系统在运行过程中能不断总结经验, 归纳新知识, 并修改和完善知识库。机器学习是一项研究计算机不断获取新知识和新技能, 并能识别原有知识的课题。

本课题的知识获取过程包括故障树和规则库两部分知识的增删、修改和维护。由于发动机工况的复杂性, 发动机故障征兆的数据不充分, 因此获取发动机故障诊断知识是一项困难的工作, 制约了专家系统的性能。为了解决这个难题, 本系统的知识获取主要是通过查阅大量国内外汽车发动机故障诊断与检测技术等方面的文献资料, 走访领域专家来搜集、整理和归纳的。为了使知识库是一个动态系统, 能够随着实际应用的展开, 在不断积累、更新故障诊断知识的环境中, 进一步扩充和完善知识库, 以提高诊断专家系统的实效性, 因此, 本系统专门建立了知识库管理模块, 便于领域专家和知识工程师直接和发动机故障诊断系统友好交互, 输入和编辑知识。

3.2.2 知识校验

知识获取经过知识工程师的抽取和形式化后, 便获得了知识库。但在获取的过程中, 难免有一些矛盾和冗余的规则存在, 因此, 初步建成知识库后, 要对知识库中的规则进行一致性、完整性和冗余性等检验。

1. 一致性检验

所谓一致性，就是知识库中的知识必须是相容的，没有矛盾存在，主要有：

(1) 规则本身

若规则中的前件包括至少一项矛盾的条件，则为规则本身条件冲突。

(2) 规则之间

若规则中结论相同但前件矛盾，则为规则前件矛盾冲突；若规则前件相同而结论矛盾，则为规则结论矛盾冲突。

2. 完整性校验

所谓完整性校验，就是知识中的约束条件。约束条件不正确，将导致有些推理无法正常进行。

(1) 若规则中的结论未被其它任何前件所引用，而且也不可能达到求解目标，则这条规则将不能被激活并不能应用。

(2) 若规则中的推理出现死循环现象，则该规则不完整。

3. 冗余性校验

冗余性指重复、多余、包含的规则。

(1) 若一条规则的前件中出现包含两个或两个以上的相同条件，则为规则自身冗余。

(2) 若两条规则的前件和结论均相同，则为规则间冗余。此类现象不影响推理的正确性，但大大

降低了系统的推理效率。^{[12] [13]}

3.3 电喷发动机诊断系统知识库的设计

电喷发动机故障诊断中的知识一般具有因果关系和实际经验性的特点，因此，本专家系统构建的知识库是基于故障树分析（FTA）。由于电喷发动机故障征兆和原因的复杂性和多样性，所以知识库中的结论之间具有故障树所独有的层次关系。即知识的一个结论可能是另一个知识的前提；或也是另一个结论，因此，结论性知识之间既有相同的属性又有不同的属性，在选择知识表示时，应该考虑这个特性。所以本系统采用产生式规则和框架相结合的集成知识表示法。

3.3.1 系统的知识表示

基于故障树的框架和规则的集成知识表示是通过故障树定性分析法，把故障树转换为最简单故障树，再将每个最简单故障树转换为知识库中的一条或多条产生式规则。其中故障树中逻辑“与门”相当于一规则；逻辑“或门”相当于多条规则。有关故障树中所有诊断信息和转换的产生式规则都封装在一个个框架中，这种框架具有良好的扩展性，便于知识库和推理机分离。

这种知识表示中的框架包括：

- (1) 框架名：该框架的说明及标志符，表示故障树的节点。
- (2) 父槽：其槽值即为父节点的框架名，用框架名的标志符表示，没有父槽的用 0 表示。
- (3) 子槽：其槽值即为各子节点的框架名，也用框架名的标志符表示，各子节点之间用逗号分开。
- (4) 类型槽：槽值为该事件与节点间逻辑关系与门、或门。若该事件为底事件，则槽值为叶节点。
- (5) 规则槽：槽值为转换的该事件的规则，没有规则的用 0 表示。

图 3.2 表示基于故障树的框架和产生式规则集合的专家系统知识表示方法。

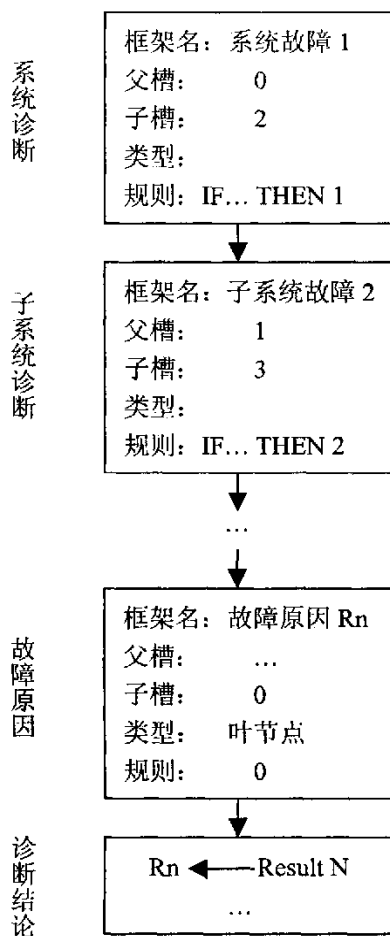


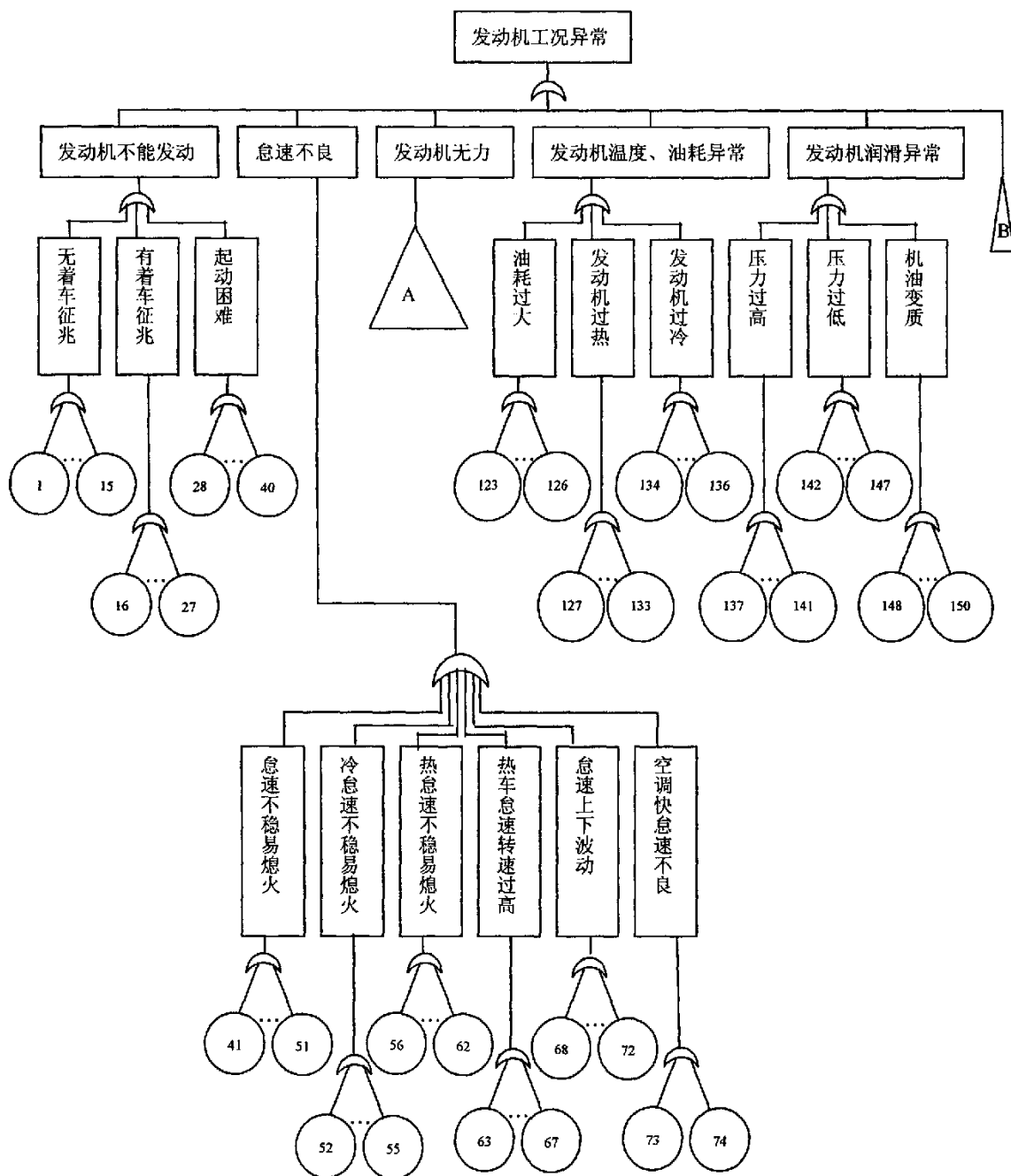
图 3.2 专家系统知识表示

3.3.2 系统知识库的建立^{[6][16][34][40][48]}

1. 电喷发动机故障树的建立

电喷发动机的结构、功能和故障类型已经在第二章的电喷发动机故障诊断思路中进行了分析研究。本节根据以上故障模式分析和诊断知识表示法的讨论，构建电喷发动机故障树。将发动机工况异常作为顶事件；各种具体故障征兆作为中间事件；发生各种故障现象的原因作为底事件，建立了如图 3.3 所示的故障树。

其中，底事件分别为①EFI 熔断丝熔断，②点火线圈连接不对，③点火器的连接不正常，④点火线圈损坏，⑤曲轴位置传感器损坏，⑥ECU 有故障，⑦火花塞有故障，⑧点火正时不正确，⑨油路堵塞，⑩燃油泵有故障，⑪油压调节器故障，⑫喷油器控制电路故障，⑬喷油嘴堵塞，⑭气门组件故障，⑮气缸活塞组故障，……，⑮61 正时齿轮啮合间隙不对，⑮62 曲轴或凸轮轴轴向窜动，⑮63 正时齿轮轮齿损坏，⑮64 齿轮润滑不良。



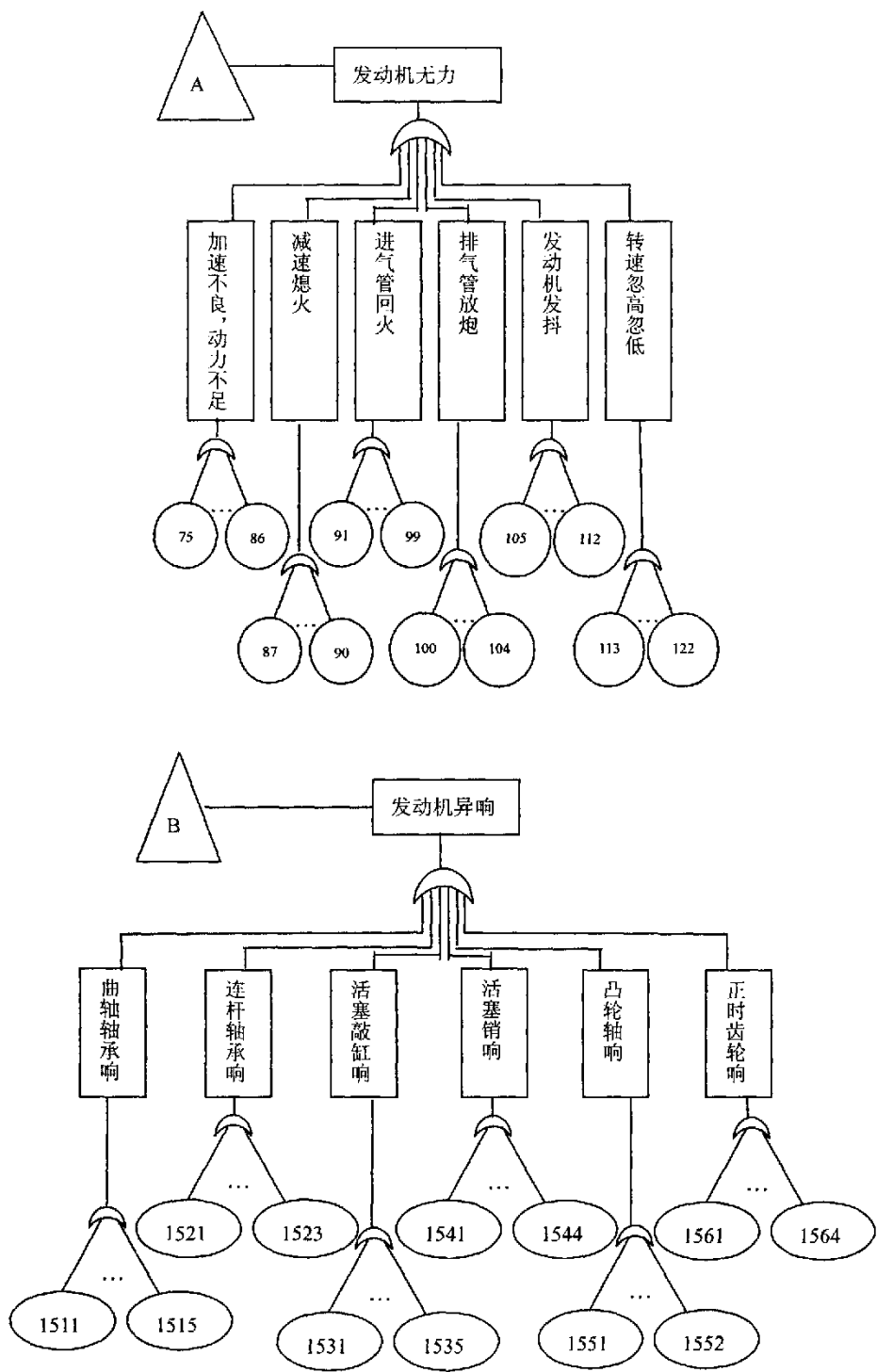


图 3.3 发动机工况异常故障树

2. 故障树的简化

对上述电喷发动机故障树作定性分析, 求出最小割集, 由此可得到简单故障树, 如图 3.4 所示; 以及等效可靠性框图, 如图 3.5 所示。由图可知, 发动机工况异常的故障原因对应一阶割集, 明确地

表示了故障征兆与故障原因的逻辑关系。

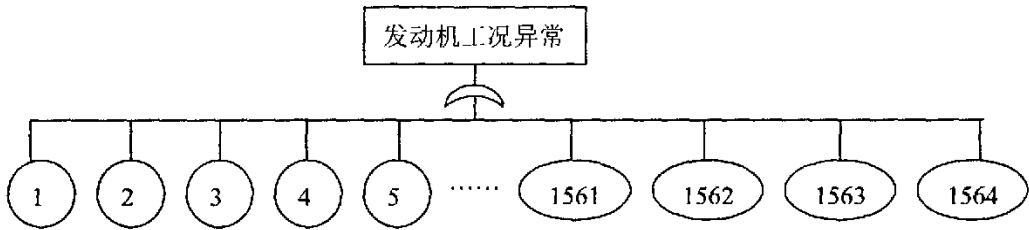


图 3.4 发动机工况异常简单故障树

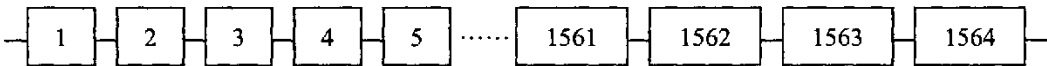


图 3.5 等效可靠性框图

3. 电喷发动机工况异常的知识表示

本系统是采用基于故障树的框架和产生式规则集成知识表示法。根据图 3.3 所示的发动机故障树，经过求最小割集后得到图 3.4 所示的简化故障树，对简化故障树分析后形成的规则封装在框架内。用户首先进入发动机工况异常系统诊断框架，然后由故障数据库中提供的检测提示、对应规则等描述性知识，通过与被诊断对象的故障模式相比较，启动有关的子系统诊断框架；对子系统框架进行推理，在故障原因框架内找到故障原因，最后进入诊断结论框架得到故障对策和维修等建议。本诊断系统知识表示如图 3.6 所示。

本系统知识表示中规则的书写格式参照 Windows 系统中.ini 文件的格式进行书写。由于工程机械由旋转部件和非旋转部件组成，因此，在故障诊断过程中，对于不同的部件进行诊断所采用的产生式知识表示方法是不同的。同样，在发动机总成内包括如曲轴、连杆机构、凸轮轴、摇臂气门传动组等旋转部件，也包括点火系统、燃油供给系统等非旋转部件。所以，本系统知识库中的规则也采用两种不同的表示格式。

(1) 旋转部件产生式知识表示中规则文件

[规则号]

前件=...

后件=...

条件信息=条件个数 规则强度

条件 1=.....#概率 测点

检测提示 1=.....

条件 2=.....#概率 测点

检测提示 2=.....

故障对策=.....

其中，规则号：“规则”+规则序号，规则序号为故障树中各子节点对应的故障序号；

前件：规则对应的故障节点的父节点内容；

后件：规则对应的故障节点的内容；

条件信息：包括二个内容，规则中的条件个数和规则强度，条件个数与规则强度之间用空格分开；

规则强度：又称为静态强度或置信度，它表示前提条件对结论的支持程度，在 0~1 内取值，一般由领域专家根据故障发生信息确定；

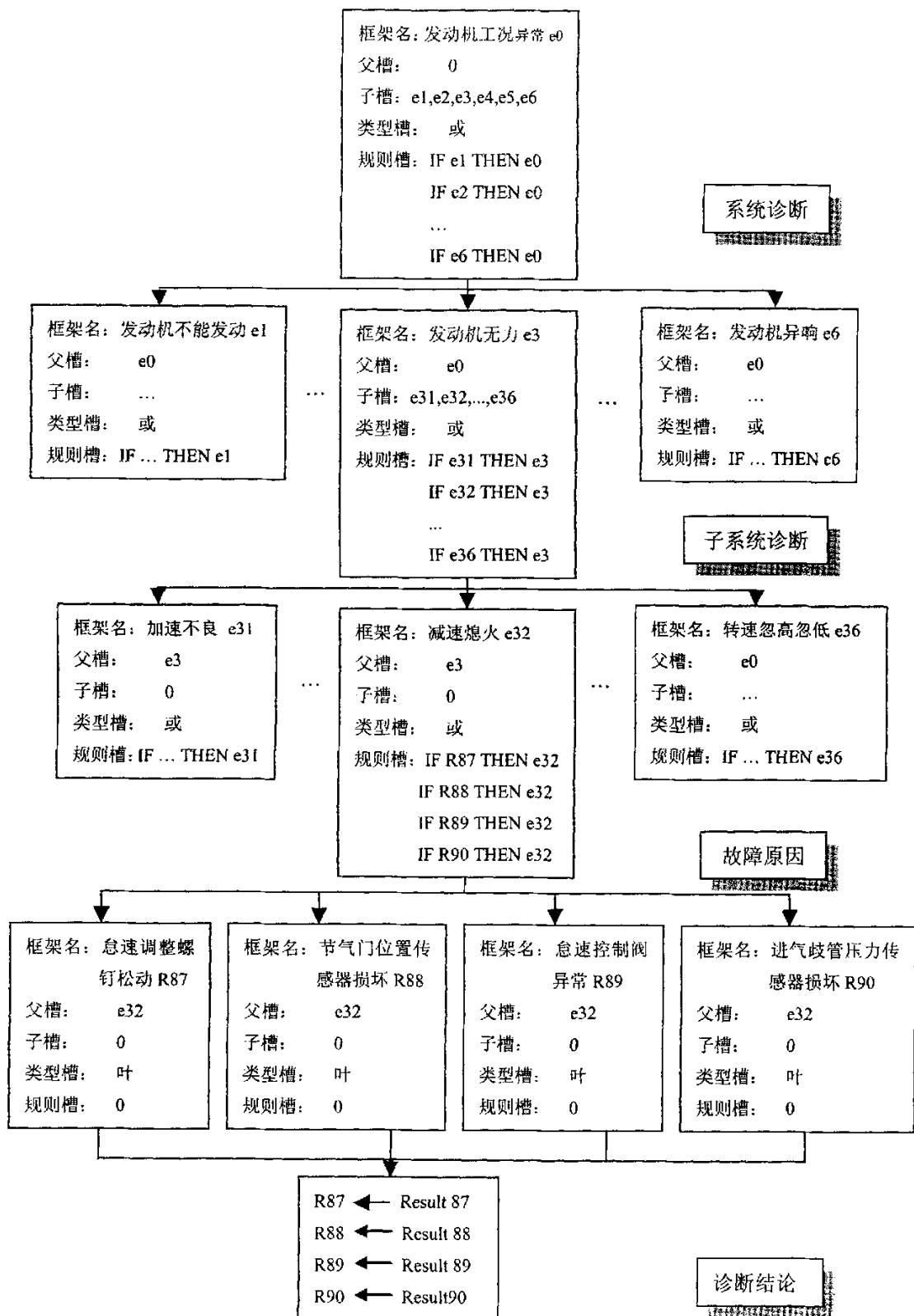


图 3.6 发动机工况异常知识表示

条件：包括条件项的具体内容、条件概率以及该项条件中所需数据对应的测点，没有对应的测点时，该项为 0。条件概率由专家根据故障发生的几率确定；

检测提示：对对应条件进行判别所需进行的一系列检测方法；

故障对策：针对该条规则的故障排除方法。

(2) 非旋转部件产生式知识表示中规则文件

[规则号]

前件=“父节点 规则号”

后件=.....#测点

故障对策=.....

子节点数=条件个数

子节点 1=规则号#前提条件

子节点 2=规则号#前提条件

.....

其中，规则号：“规则”+规则序号，规则序号为故障树中各子节点对应规则号；

前件：该规则对应的前一条规则的序号；

后件：包含该规则的提问内容与对应测点，提问内容与测点之间用“#”隔开；

测点：用一字符串描述，该字符串中必须是事先定义好的。如果该规则问题的回答无需检测数据，则测点用字符“0”表示。

检测提示：为用户确定问题时提供指导性方法；

故障对策：针对该条规则的故障排除方法。

子节点数：当前规则对应的后续规则的个数。

子节点内容：包括规则号与前提条件。其中前提条件为一般字符标志，分为两种情况：‘Y’——当前规则成立，‘N’——当前规则不成立。

这两种规则文本文件通过 Access 数据库管理工具导入到对应的数据表格中，形成专家系统知识库。

在图 3.6 所示发动机工况异常知识表示中，对发动机无力子系统诊断时，找出其下一级故障征兆减速熄火的故障原因的诊断流程图如图 3.7 所示。

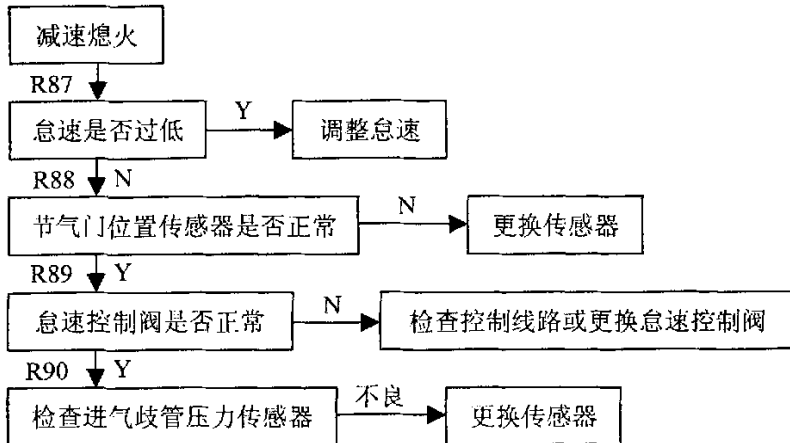


图 3.7 发动机减速熄火诊断流程

以该例说明规则的提取和表达。当检查到怠速正常时，然后要检查节气门位置传感器。即在节气门全闭时，节气门位置传感器的怠速开关触点应闭合，否则应进行修理或更换传感器。由此得到对应的规则 R88。

[规则 88]

前件=怠速是否过低

后件=节气门位置传感器是否正常#0

检测提示=节气门全闭时，节气门位置传感器的怠速开关触点应闭合。否则修理或更换。

故障对策=修理或更换节气门位置传感器

子节点数=1

子节点 1=89# 'Y'

4. 知识库中数据表

基于故障树的专家系统知识库的建立，实际是将故障树形式转换为数据库形式，并从数据表中获得规则。电喷发动机故障模式和原因复杂，在建立知识库时，一张数据表是不够的，因此，本系统设计了三张相关联的数据表，即故障树表、规则参数表、诊断结论表，三张表之间以故障树为联系的入口，以故障现象为关键字进行知识的查询，最后以规则确定相应的故障排除方法。

(1) 故障树表

故障树中，最不希望发生的现象（发动机工况异常）作为顶事件，而将子系统故障作为中间事件，最后将故障原因或部位作为底事件。从顶事件到每个底事件形成故障诊断支路，在程序编写时，这些支路与数据表结构对应起来，其数据结构如表 3.1 所示。

表 3.1 发动机故障树表

节点 ID	父节点	子节点	逻辑关系	规则 NO
e11	发动机不能发动	无着车	或	R1#R12#...#R15
e12	发动机不能发动	有着车	或	R16#R17#...#R27
e21	怠速不良	怠速不稳，易熄火	或	R41#R42#...#51

其中

节点 ID：节点标识码，文本字段数据类型，作为节点的标记，由字母和数字组成。“e”表示发动机，左起第 1 位数字表示父节点序号，第 2 位数字表示子节点序号。它是系统进入数据库的入口条件。

父节点：故障事实的父节点，文本型，表示对事实的自然描述。

子节点：故障事实的子节点，文本型，表示子系统故障模式。

规则 NO：故障事实的规则入口。

(2) 规则表

本系统的诊断规则是以故障树为基础转换得到的，同时考虑到诊断推理机和解释器的需要，设计了如表 3.2 所示的规则数据表。

表 3.2 发动机规则表

规则 NO	前件	后件	置信度	测点	状态
R1	无着车征兆	检查熔断丝盒	0.9	0	R2#Y
R3	检查高压火花	检查点火正时	0.9	上止点	R9#Y
R55	检查怠速控制阀是否正常	水温传感器是否正常	0.85	电阻	R57#Y
R150	机油滤清器是否良好	PCV 阀是否失效	0.85	0	0

其中，

规则 NO：针对具体规则的编号，文本型。它由规则 Rule 的字母 R 和对应规则编号的数字表示。

前件：产生式规则中前提条件，文本型。

后件：产生式规则中提问内容的具体描述，文本型。

置信度：规则的可靠程度，数字型，数值在 0~1 之间，由专家确定。

测点：对规则问题回答的具体测试内容，文本型。

状态：在诊断流程中，系统询问用户，并向用户提示操作步骤，要求操作程序与故障树统一存储，并且结构保持一致。属于文本型。用当前规则编号和回答“Y”或“N”表示，不需要回答的用 0 表示。

(3) 诊断结论表

根据推理机推断出故障原因或故障部位，并向用户显示维修建议的诊断结果和规则的对应关系表如表 3.3 所示。

表 3.3 发动机诊断结论表

规则 NO	检测提示	故障对策
R25	检测水温传感器不同温度时的电阻值	更换水温传感器
R101	用喷油器校验器检验喷油器在 3 分钟内是否滴漏一滴或更少	更换喷油器
R118	拆除空气滤清器滤芯后起动发动机，如能正常起动，则滤芯故障	更换滤芯
R150	检查曲轴通风 PCV 阀是否粘结而不能移动	更换 PCV 阀

其中，

规则 NO：具体规则的编号，文本型。

检测提示：针对故障诊断流程，向用户提示检测方法，文本型。

故障对策：在确定故障原因或故障部位的基础上，向用户提供维修建议，文本型。

(4) 各数据表之间的联系

首先，系统从节点 ID 字段入口进入数据库，由故障树表节点获得节点事实后，同时获得对应的规则 NO 字段，然后以规则 NO 字段为主键，建立起数据库中规则表和诊断结论表之间的关联。通过规则 NO 可以在两表之间获得节点事实对应的规则，再通过推理机推断出故障原因或故障部位，最后向用户提供专家级的维修建议。

这三张数据表作为知识库管理的后台数据库资源，当将具体的数据填入数据表后，就可以完成知识库的建立。这样建立的知识库，便于对知识库中的知识管理，通过框架可以避免知识的交叉，保证了知识的完整性。而通过对数据表的属性设置，可以保证知识的一致性。

3.4 本章小结

本章首先探讨了知识的表示方法以及知识库的管理，针对电喷发动机故障的复杂性，提出了基于故障树的产生式规则和框架集成知识表示方法。

基于故障树的规则在知识获取上克服了专家系统知识获取的困难，而且通过框架的封装，诊断时启动故障树对应的规则，可以最大限度提高系统的诊断效率。

本章其次研究了电喷发动机工况异常的故障树，设计了本系统的知识表示以及知识库的后台数据表格，从而实现了知识库的建立。

第四章 电喷发动机故障诊断专家系统推理机

专家系统一般具有一个存放知识的知识库，一个用于推理的推理机和一个存放初始已知事实和中间事实的数据库。推理机是专家系统的思维机构，它根据当前的已知事实，运用知识库中的知识，按照一定的推理方法和一定的控制策略进行推理，以求得问题的解或证明某个假设成立。因此，推理机和知识库构成了专家系统的核心部分，在推理机的作用下，用户能够象领域专家那样解决疑难问题。

推理机的性能与结构一般与知识的表示方法以及组织形式有关，而与知识的内容无关，这样有利于保证知识库和推理机的相互分离。当知识库中的知识有变化时，不会影响推理机。所以，推理机的设计和知识库的设计是分别进行的，在设计时要根据知识表示方法和组织形式选择合适的推理方法；同时还要考虑推理的方便性，有利于提高推理效率的前提下设计恰当的知识表示方法和组织形式。

推理过程是一个问题求解的过程，因此问题求解的质量和效率主要取决于推理方法和推理控制策略。控制策略又包括推理方向、搜索策略和冲突消解策略等方面的内容。

4.1 推理方法和控制策略的研究^{[11] [13]}

在设计推理机时，一般按照高效率推理的原则，先选择推理方法，再选择控制策略。

4.1.1 推理方法

1. 推理方法按知识的确定性可分为：确定性推理和不确定性推理。

确定性推理假设所求解问题的条件和结论之间存在确定的因果关系，即推理的前提和推理的结论或者是真，或者是假，没有第三种可能性。这样推理时，当一条规则的前提全部都是真时，该条规则才能被激活。

不确定性推理是充分考虑到事实的特征，并不总是只有真或假，而是还可能存在其它一些因素，如概念的模糊性，知识的置信度等。因此，推理时所用的知识和推理的结论是不精确的。所谓不确定性推理指依据不确定的初始条件，运用不确定性知识，最终推断出具有不确定性但却近似合理或基本合理的结论的一种思维过程。常用的不确定性推理有基于主观贝叶斯理论的概率推理、基于信任测度函数的证据理论和基于模糊集理论的模糊推理。

确定性推理不考虑证据规则和推理的不确定，因而推理的结论不可能完全符合实际情况。由于其没有考虑知识的定量关系，因此易于实现知识的获取。而不确定性推理所引用的概率信息和模糊信息都是与知识的量化有密切关系，这样虽然推断比较精确而且更趋于实际，但推理比较复杂，反而降低了推理效率，推理也不容易实现。

2. 按推理方式可分为：演绎推理、归纳推理和模型推理等。

演绎推理指由一般性知识推断出适合某一特殊情况的结论，即从一般推出个别的推理。其常用推理方式是三段论式，包括一般性已知知识的大前提、具体事实判断的前提和由此推出的结论。

归纳推理指由个别到一般的推理。

模型推理实质上是基于知识的推理，即依据已知事实，运用知识进行推理。模型主要指知识模型，包括知识的结构层次和组织形式。

3. 按知识的层次可分为：领域级推理和非领域级推理。

领域级推理的知识层属于领域层知识，主要有经验推理、因果推理和功能推理等。

非领域级推理的知识层属于策略层次知识和规则层次知识。

4.1.2 推理方向

推理方向用于确定推理的驱动方式有正向推理、反向推理、正反向混合推理和双向推理四种方式。

1. 正向推理

正向推理或前向推理（Forward Chaining），又称为数据驱动控制，是从已知的事实出发，向结论

方向推导,直到推出正确的结论。其基本思想是:从用户提供的初始事实出发,在知识库(Knowledge Base, KB)中找出当前可调用的规则,构成可适用的知识集(Knowledge Set, KS),然后根据某种冲突消解策略从KS中选则一条规则和原始信息进行匹配,若匹配成功,则将推出的新事实作为中间数据,加入到动态数据库(Data Base, DB)中作为下一步推理的已知事实,继续在KB中找合适的规则与之相匹配,如此循环,直到得出最终结论或不再有新事实被加入动态数据库为止。其推理原理图如图4.1所示

2. 反向推理

反向推理或后向推理(Backward Chaining),又称为目标驱动控制,它先选择一个目标作为假设,然后在知识库中寻找支持该假设的证据或事实。若找到所需要的证据或事实,则证明原假设是成立的,推理成功;若找不到所需要的证据或事实,则说明假设不成立,推理不成功,需重新作新的假设。

3. 正反向混合推理

正反向混合推理(Forward and Backward Chaining)是为了综合利用正向推理和反向推理各自的优点,克服各自的缺点而提出的。根据已知的原始数据向前推理,得到可能成立的结论,作为假设目标,进行反向推理,寻找支持这些假设的事实或证据,这是先进行正向推理后进行反向推理。另外还有,先假设一个目标进行反向推理,然后利用在反向推理中取得的数据进行正向推理,最后推出更多的结论。这种推理类似于人类日常进行决策时思维方式,求解问题的过程也更被人类所能理解,但控制策略较其单独推理更为复杂。

4. 双向推理

双向推理指正向推理与反向推理同时进行,且在推理过程的某一步上相遇的推理方法。其基本思想是,其一根据已知事实进行正向推理,但不推断出最终目标;其二从假设目标出发进行反向推理,但不推出原始事实,而使它们在某一步骤相遇即正向推理所推出的中间结论正好是反向推理所需要的证据,至此推理结束。反向推理所作假设就是推理的最后结论。

4. 1. 3 搜索策略

搜索是人工智能的一个基本问题。它直接影响推理机运行效率,因而在研究推理机时不能忽视搜索策略。搜索问题实际上就是研究状态以及状态的转移。表示问题的方法常用状态和算符来表示。

状态是描述问题求解过程中不同时间的求解状态;而算符是对状态的动作。由问题的全部状态和一切可能用到的算符所构成的集合就是问题的状态空间。状态空间的图形则称为状态空间图,其中,节点指状态,有向弧指算符。状态空间图的形式象树形。搜索问题中有一个开始状态和若干个目标状态,搜索就是一条从开始状态到某一个目标状态的路径。

状态空间的搜索策略有两大类,启发性搜索和盲目性搜索。

启发性搜索用问题自身的某些特征信息,指导搜索向最有希望的方向前进。由于其针对性强,因而一般只需要搜索问题的部分状态空间,因而效率较高。但假如它不能缩小状态空间时,也将变成盲目性搜索。

盲目性搜索主要有深度优先搜索和宽度优先搜索等。

1. 深度优先搜索

深度优先搜索(Depth-First Search)就是从初始节点开始搜索,在其子节点中选择一个节点进行考察,若不是目标节点,则在该子节点的下一级子节点中再选择一个节点进行考察,如此循环,直至到达目标节点。当在某个子节点时,该子节点既不是目标节点又不能够继续向下搜索,此时,才选择同一层的相邻节点如此循环类推,直至最终目标节点。搜索过程如图4.2所示,目标节点G将按ABEBFBACADG顺序搜索得到。

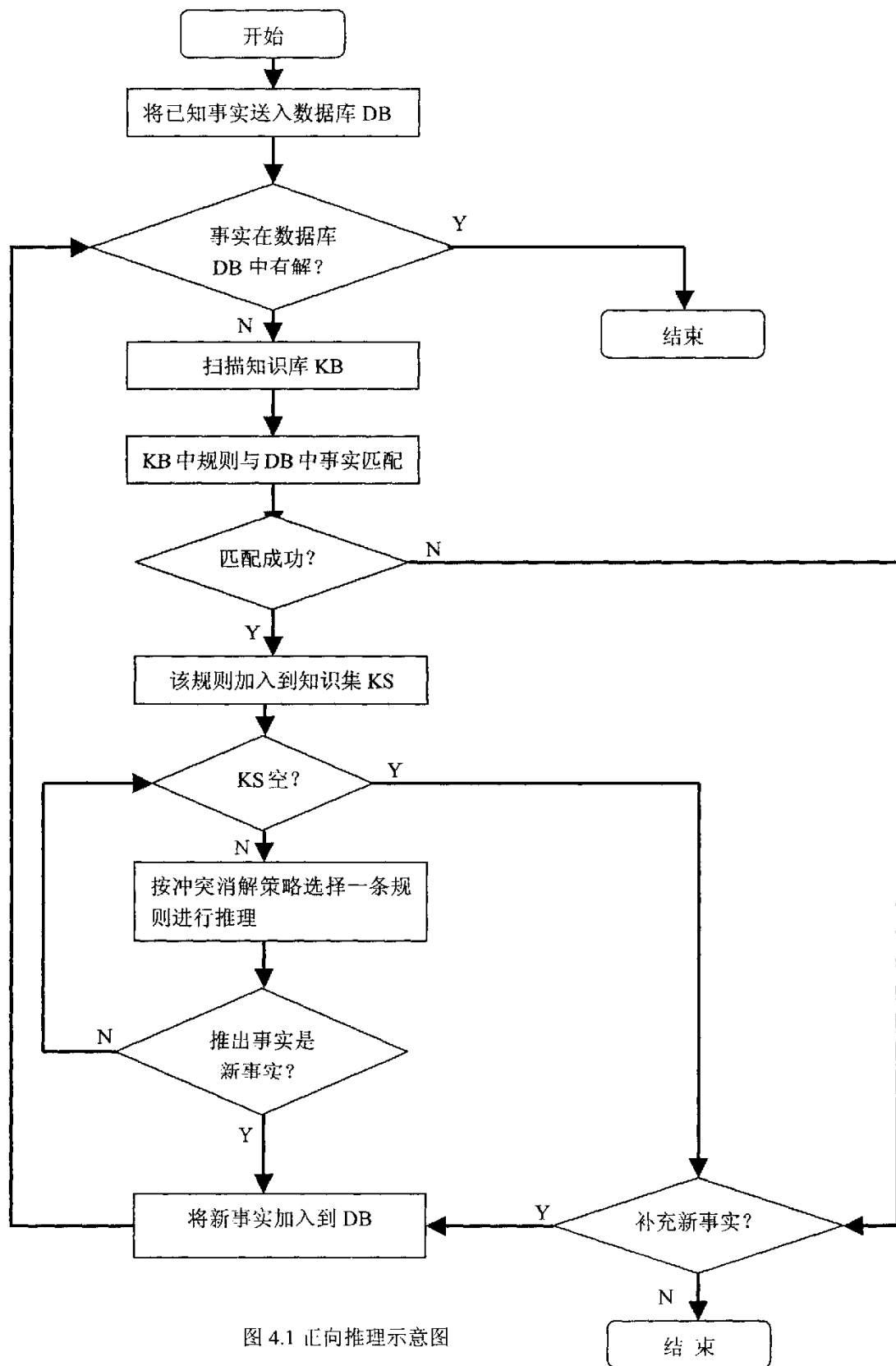


图 4.1 正向推理示意图

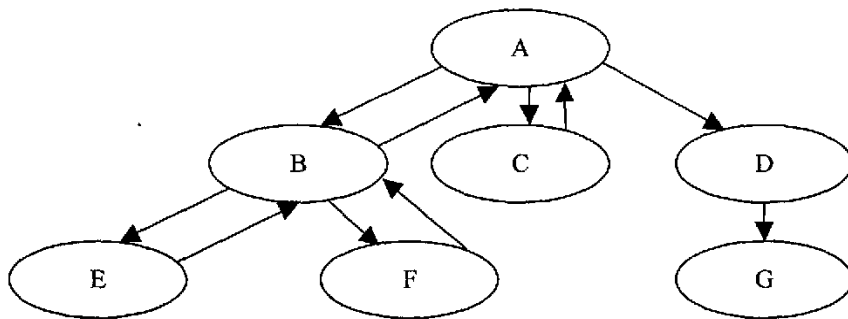


图 4.2 深度优先搜索图

深度优先搜索适用于搜索图是树状或格子的一类问题，能很快深入到深层搜索空间。但对其他搜索图，有可能出现无限循环，从而搜索不到需要的解，而搜索路径也不可能是最短的路径。

2. 宽度优先搜索

宽度优先搜索 (Breadth-First Search) 又称广度优先搜索，指从初始节点开始，逐层地对节点进行扩展并考察其是否为目标节点，对本层的节点没有全部考察结束之前，不会对下一层的节点考察如图 4.3 所示，目标 G 将按 ABCDEFHG 的顺序搜索得到。

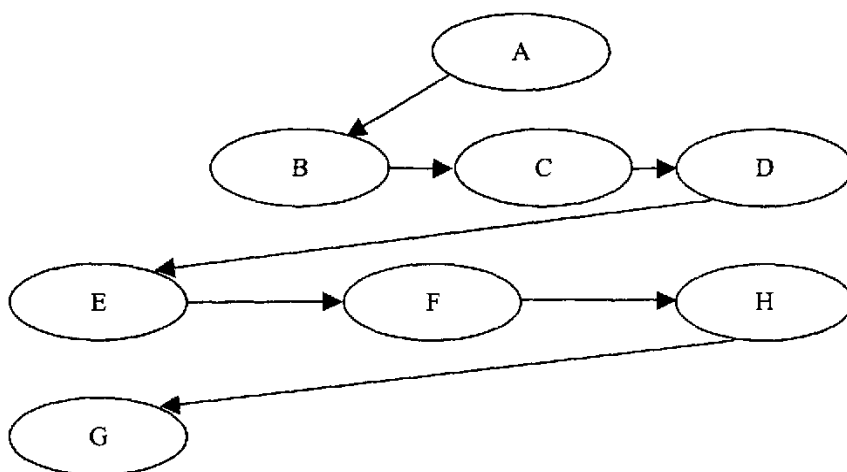


图 4.3 宽度优先搜索图

宽度优先搜索的盲目性较大，且随着搜索深度的增加，耗费时间较多，但它总能求得最短路径的解。

4. 1. 4 冲突消解策略

在推理过程中，系统根据当前已知的事实，搜索知识库中的规则进行匹配时，可能出现以下三种情况：

- (1) 只有一条规则匹配成功，这是最理想的情况，其余的事实只需要验证这条规则的条件是否成立，若成立，则激活该条规则。
- (2) 没有一条规则匹配成功，可能是在求解问题过程中选择的路径不对，或者可能是知识库中的规则不全面等，此时可根据当时的实际情况做相应处理。
- (3) 有多条规则匹配成功冲突现象，此时需要一种原则，对这些规则排序，以便从中选取一条规

则用于当前的推理,这一解决冲突的问题求解过程称为冲突消解过程,所用的原则称为冲突消解策略。

冲突消解策略,就是对规则按优先级排序,常用的排序策略有以下几种:

(1) 知识库组织次序排序。以规则在知识库组织中的顺序决定其优先权。

(2) 分块组织。知识库的组织按问题求解状态进行分组,使用时,从对应的知识框架中去选择可用规则。

(3) 就近排序。通过动态修改知识的优先级的算法,将最近使用的规则作为最优先权。

(4) 专一性排序。根据规则条件的强弱程度,弱化规则比强化规则更具有优先权。

(5) 数据冗余限制。当某一知识操作时有余事实时,则降低其优先权。

4. 2 系统推理机的设计

推理机是专家系统的核心。针对电喷发动机故障的复杂性,本系统设计了基于故障树的模型推理机制,采用确定性推理和不确定性推理相结合的推理方法,采用正向推理的推理方向深度优先搜索和冲突消解策略的搜索策略。

4. 2. 1 诊断模型

在进行模型推理时,主要要建立一个合适的诊断模型。常用的诊断模型有:表示系统各部件与总成关系的结构模型,表示各部件功能的模型,表示各部件间的因果关系的因果模型,表示几何关系的几何模型等。

故障树既可以作为知识模型,又可以作为诊断模型。考虑到本系统的使用对象包括一些技术水平不高的工人,同时,系统也主要用于提高企业维修效率和质量,降低成本。因此,本系统以故障树为知识模型和诊断模型。

4. 2. 2 确定性和不确定性推理

发动机故障有功能性故障和发动机异响两类。功能性故障是当某一故障出现时,经常伴有某些功能上的失效或不完善,如发动机无力、怠速不良等。这种故障的特点经常由两个或两个以上故障现象决定一个故障部位,而且这类故障的现象容易被汽车维修人员发现。而发动机异响时没有严重功能性故障,则异响故障,当异响时伴有严重功能性故障,异响为功能故障的一种异常现象。这样,发动机故障就有确定性知识和不确定性知识,即功能性故障用确定性理论描述,而异响等用不确定性理论表述。

1. 确定性推理。诊断发动机确定性故障时,从故障树的根节点出发,根据确定的树叉及知识库中的对应规则匹配,并从根节点到叶节点的控制策略来提示用户进行操作。此时,用户可以简单回答“Yes”或“No”,系统将用户回答的结果存放在动态数据库中。

如果某一条规则匹配成功时,系统就不再回溯,直接显示结果。这样的推理方法在知识库中存在规则数目较多时,可以有效控制,为知识库的维护作好准备,同时也避免了一些不必要的搜索。以优先检查为诊断原则,即:

(1) 先系统,后子系统、零部件。

(2) 先检查故障率高的子系统、零部件。

2. 不确定性推理

在使用诊断参数诊断发动机工况时,存在的不确定性现象,可以用“是”、“否”或者“不确定”来表示,通过领域专家的经验,考虑置信度和概念,进行不确定性推理。从故障树分析法可以得到,以故障树为诊断模型,用户属于非完全介入,用户无权对系统有最终决策权,因此,本系统推理主要以确定性推理为主,兼顾不确定性推理。

4. 2. 3 正向推理

根据电喷发动机的故障模式,故障现象常常是显式地呈现给用户,由此通过故障诊断推理出故障原因和故障部位,在确证故障原因的同时,给用户提出故障排除的对策。因此符合这种诊断过程思维方式的推理方法采用正向推理方法。

另外, 由于本系统采用故障树分析法, 故障树中因果逻辑关系简单了, 因此, 本系统采用正向推理, 使系统可以较快地回答用户的问题, 再利用友好的人机接口, 为用户提供了操作简单, 易于理解的信息交互界, 提高了系统的实用价值^[40]。

4. 2. 4 深度优先搜索策略

由以上分析得知, 发动机出现故障的因果逻辑关系的深度不很深, 而其广度却很广。为了提高搜索效率, 因此, 本系统采用了深度优先搜索策略。其基本思想是从根节点出发, 逐步往下搜索。

但是其量化指标有不精确性, 如传感器的电压、电阻、燃油压力等都不是一个确定的数值, 大部分知识给出一个大约范围, 根据经验设定的。另外, 不同车型不同工况的诊断参数也是不同的。在排除故障时, 操作者也无法设置一个合适的值, 也是凭经验不断校正的。所以在采用深度优先的搜索策略时, 当第一次不成功而需要第二次搜索时, 仍然是经历上一次相同的路径, 也就是调整该参数。因此, 采用置信度的比较方法, 在出现有多条规则与事实匹配时, 若一条规则的置信度小于预设的阈值时, 该条规则被禁用。规则每使用一次后, 其置信度减少一个设定值。如果两条规则的置信度相等, 则将最近用过的那条规则再减小, 如此反复, 直到找到故障原因并排除故障。此处的置信度、阈值和减小值由专家设置^[16]。

推理时, 从知识库中选择的规则与数据库中的事实进行匹配时, 可能会出现冲突。由于本系统采用框架表示法, 因此冲突消解策略采用分块组织排序, 在每个框架内, 启用置信度排序, 置信度高的排在前面, 使用时先从排在最前面的规则开始搜索, 进行匹配, 依次类推, 直至推断出结果。

4. 3 诊断实例

发动机是汽车的心脏, 对各机构和各系统的要求很高, 而且它们之间的关系也十分复杂。电控燃油喷射系统, 由于采用了大量传感器和电子控制单元。使得电喷发动机的故障变得更为复杂, 从而故障诊断也越来越困难。开发电喷发动机故障诊断专家系统, 建立完善的智能诊断系统, 对电喷发动机运行的动力性、经济性和安全性有着极其重要的意义。电喷发动机故障诊断专家系统的研究是一项艰巨而繁重的工作, 为了说明这项工作, 本节以发动机不能发动且无着车征兆这一故障实例来详细解释诊断推理过程。

如图 4.4 是故障诊断流程图, 将故障诊断所用的知识分散添置到故障诊断树的各个节点, 发动机不能启动且无着车征兆作为根节点, 点火系故障、供油系故障、控制系统故障和机械部分故障的故障原因, 检测提示和故障对策作为叶节点。树上所有节点都包含一个故障模式的识别问题, 以及对此问题的回答“正常”或“异常”, 由此将诊断过程引导至各个节点不同层和不同分支, 这些分支有可能是诊断的最终结果, 或者下一层故障模式识别问题, 随着用户对一系列识别问题的回答, 最终推出诊断结论。每个问题是用来区分同一节点下的两个分支, 将从根节点到诊断结论叶节点的整个过程中所搜索过的所有节点的内容综合, 就是某一故障的整合。

每一层节点构成了知识库中规则的前件和后件, 而诊断过程的同一层的叶, 则为相应规则库中的检测提示和故障对策, 这些就是第三章中所讨论的数据表中的内容。因此, 本系统在正向推理过程中, 以节点 ID 为诊断入口, 调用故障树表, 进行故障模式识别, 通过规则 NO 把规则表和故障表和诊断结论表联系起来, 进行规则匹配, 由检测提示引导, 考虑上述提及的搜索策略, 推出故障原因和故障对策。

本系统设计的正向推理流程图如图 4.5 所示。

采用图 4.5 所示的推理机设计方案, 最优化模仿了人类领域专家在诊断发动机故障时所用的诊断流程, 利用框架知识的分块组织, 最大限度地避免了多余规则之间的匹配冲突, 从而提高了故障诊断的可靠性, 发挥了专家系统的智能。

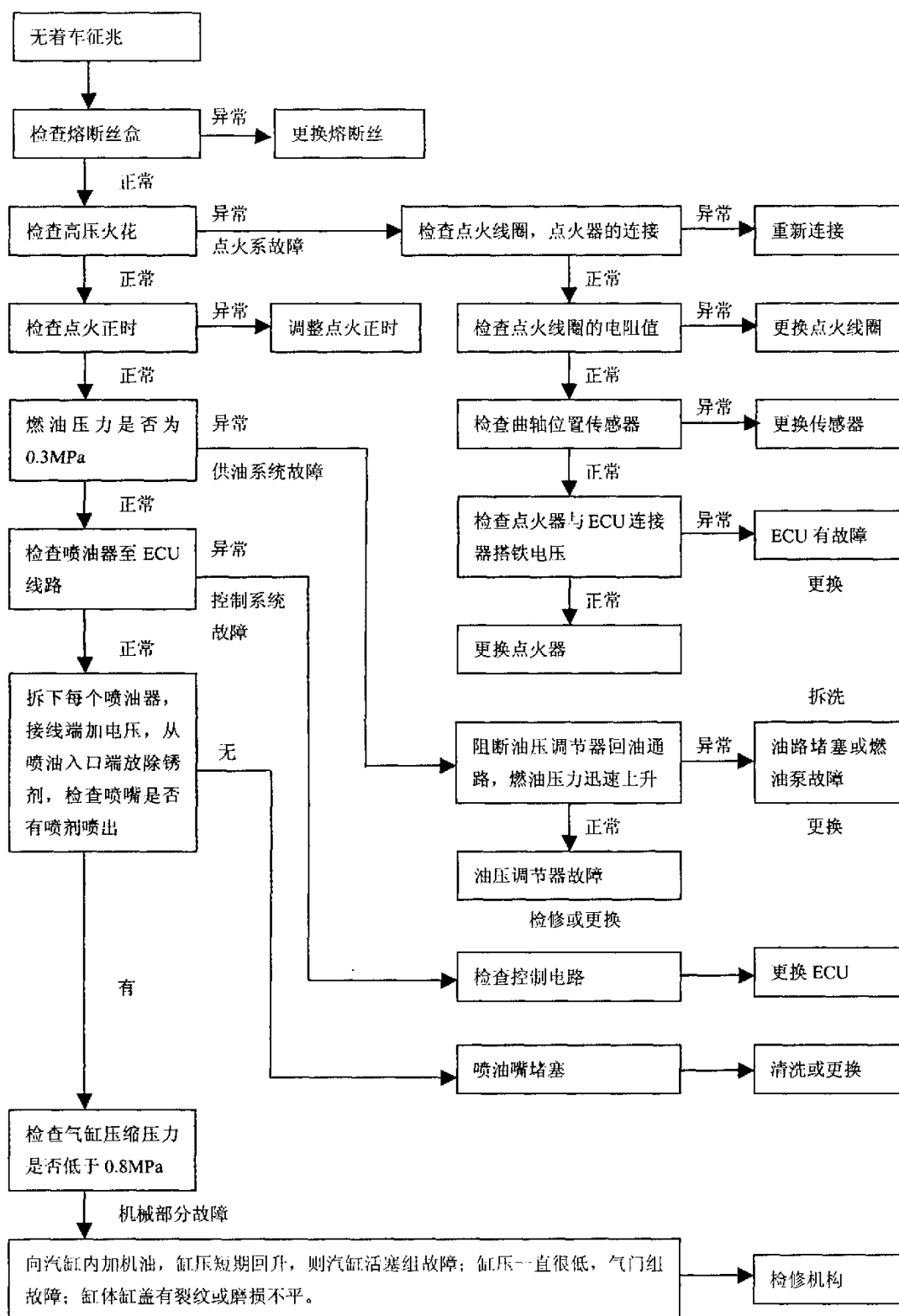


图 4.4 发动机不能启动且无着车征兆故障诊断流程图

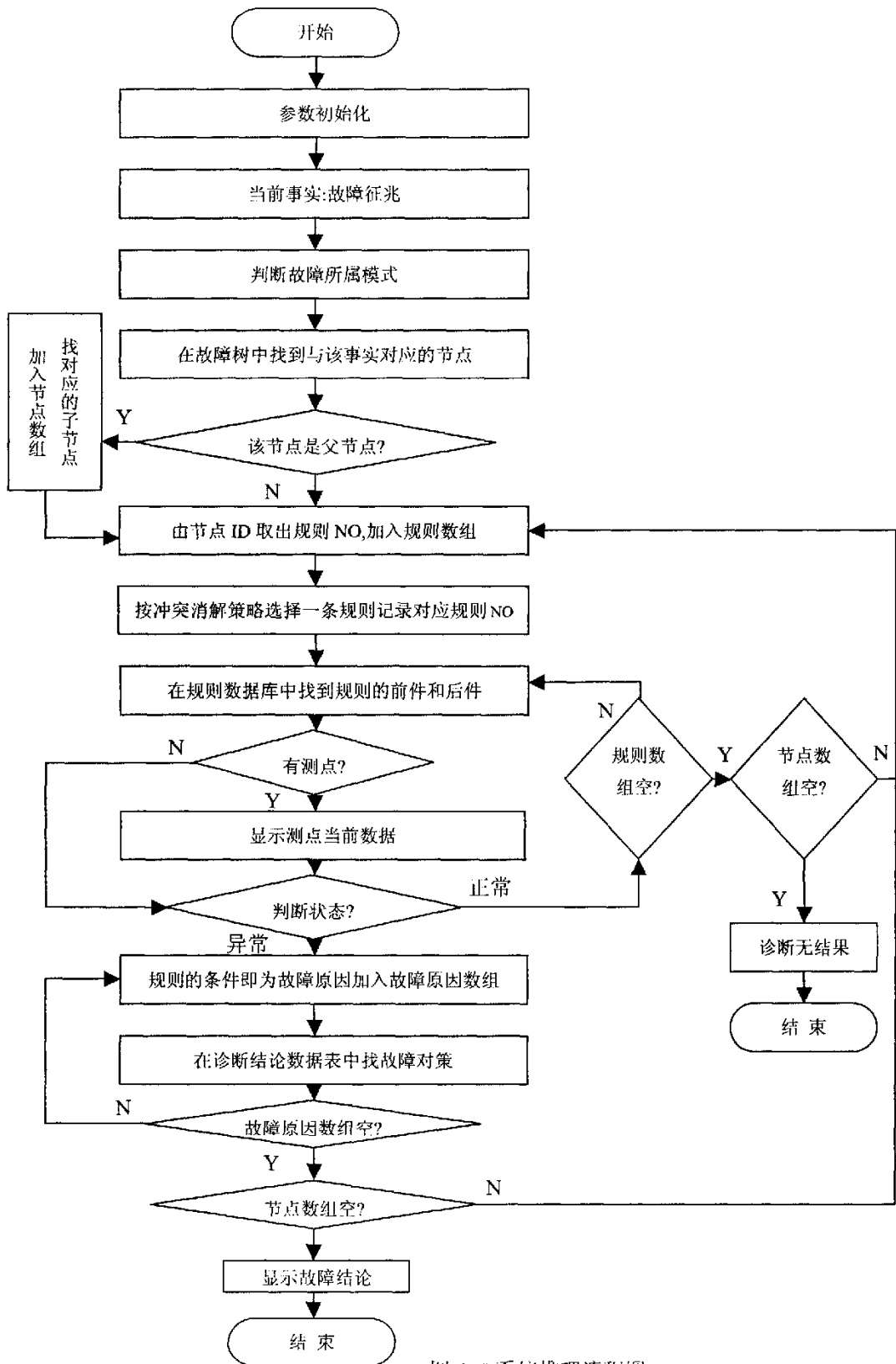


图 4.5 系统推理流程图

4. 4 本章小结

本章详细研究了推理机的相关理论，讨论了电喷发动机故障诊断专家系统的核心部分之一推理机的设计。设计了基于模型推理的故障树诊断模型，采用以确定性推理为主，兼顾不确定性推理，将两者有机结合的推理方法，采用正向推理方向、深度优先搜索和分块组织的冲突消解策略。通过实例介绍了发动机故障诊断流程。这种推理机的设计较好地模仿了领域专家的故障诊断过程，为专家系统的实现打好了坚实的基础。

第五章 综合数据库的设计

综合数据库是专家系统用于存储数据问题的初始信息和推理过程中产生的各种当前信息的存储器。它与知识库一起为推理机提供求解问题所用的规则和当前事实和中间数据。当知识库中一条产生式规则的条件可与综合数据库的某些已知事实相匹配时,则该条规则被激活,并将推出的结论存入综合数据库中,作为后续推理的已知事实。因此,综合数据库的内容是动态的,它又称为动态数据库。它的管理模块必须具有添加、删除、查询和修改等功能,使推理机能够方便地存取或修改数据库的内容。同时,在设计综合数据库时,应考虑它的知识表示方式与知识库的知识表示方式相一致。

5.1 选择合适的数据库系统建立数据库

本系统是在 Windows XP 操作系统下采用 Visual Basic 6.0 编程语言开发的。VB 是一个非常出色的数据库应用前端开发工具,它能方便地通过 ADO (Microsoft Active Data Object) 控件、ODBC Driver 开放数据库的驱动程序等中间连接,获得对数据库的前端连接,同时也能对数据的用户界面进行操作。数据库根据其组织形式不同,分为层次型数据库、网络型数据库和关系型数据库。其中关系型数据库是目前最流行的数据库,有 Access、SQL Server、Oracle 和 FoxPro 等。Access 是 Microsoft Office 软件中的数据库管理系统 (DataBase Management System, DBMS),它具有功能灵活、界面友好、易于操作和便于管理等特点。它不属于 VB,但在 VB 开发平台中,Access 数据库是默认的数据库,它所采用的 Jet 数据库引擎,被嵌入在 VB 中,因此,Access 作为后台数据库与 Visual Basic 开发工具有着很好的接口。通过综合分析数据库应用前端开发工具和数据库管理系统,电喷发动机故障诊断专家系统 EFIE-FDES 的数据库程序设计采用 Access 2003 数据库管理系统。

在 EFIE-FDES 中建立的数据库为诊断数据库 Diagnosis.mdb,包括参数表、故障树表、规则表和诊断表等。

1. 创建数据库

数据库把数据组织成一张或几张关系表格,关系表格间存在着相互的联系,在建立关系表之前,必须先创建数据库。

通过 Access 2003 中菜单命令“新建”,打开新建对话框,选择“空数据库”项后,在“文件新建数据库”对话框中输入数据库文件名 Diagnosis,在相对路径中,保存了该数据库 Diagnosis.mdb。

2. 创建数据表

数据表是数据库的基本数据结构,它由记录和字段组成,字段包括字段名称、数据类型和说明等。通过数据库窗口中的设计按钮,打开数据表设计窗口,在此窗口设置数据字段名称、字段大小、主键、数据类型等。例如字段表的字段设置如表 5.1 所示。

表 5.1 fault 表设置

字段名称	数据类型	字段大小	允许空字符串	索引	说明
faultid	数字	长整型	否	有	故障 ID
faultxx	文本	50	否	有	故障现象
reason	文本	50	否	有	原因
reasonno	数字	整型	否	无	原因序号
check	文本	255	否	无	检测提示
sjsx	文本	50	是	无	数据采集上限
sjxx	文本	50	是	无	数据采集下限
status	数字	字节	是	无	原因状态, 1-是, 2-否, 3-不确定, 默认否

表中,故障 ID 为主键,它是数据表记录中唯一的标识,用以区分每条记录。当完成数据表格的设置后,以“fault”为表名称存在 Diagnosis.mdb 数据库中,并向数据表中添加各条记录,最后完成数据表如图 5.1 所示。

faultid	faultname	reason	reason	check
11	无蓄电池	熔断丝熔断	111 检查熔断丝盒,重点检查 10A 熔断丝是否熔断	0
11	无蓄电池	点火线圈、点火器的连接不正常	112 点火线圈 (+) 端短路,点火器接地应为 12V,否则检查点火线	0
11	无蓄电池	点火线圈有故障	113 检查初级线圈和次级线圈的电阻	11
11	无蓄电池	初级线圈传感器损坏	114 用万用表测量传感器的电阻	271
11	无蓄电池	点火线圈有故障	115 点火线圈电阻电压正常,则更换点火器	0
11	无蓄电池	点火定时不对	116 用正时灯检查点火定时,一般为上止点前 10°,正时灯应在 10°	115
11	无蓄电池	燃油泵或燃油泵有故障	117 用脚踏油泵手动泵油,燃油上升应连续且声音正常,否则检查	0
11	无蓄电池	燃油调节器故障	118 如燃油泵正常,燃油压力,说明燃油调节器故障	0
11	无蓄电池	燃油泵和燃油泵有故障	119 拆下燃油泵滤网并清洗,燃油泵滤网堵塞,说明燃油泵故障,拆下	0
11	无蓄电池	燃油泵故障	1110 拆下燃油泵,按燃油泵上 12V 电压,从燃油泵入口端加入燃油并	0
11	无蓄电池	汽缸组件故障	1111 压力低于 0.08MPa,说明汽缸密封故障,检查汽缸盖、汽缸内加 0.5	0
12	有蓄电池	空气滤清器堵塞	121 拆掉滤芯后启动发动机,如能正常启动,说明滤芯堵塞	0
12	有蓄电池	高压线圈故障	122 检查蓄电池电压是否正常,若正常,则高压线圈故障	0
12	有蓄电池	分电器、分火头漏电	123 启动发动机,如分电器中心高压线头与分火头的绝缘脱落,说明	0
12	有蓄电池	进气系统漏气	124 检查进气软管是否漏气,各连接处是否漏气,如漏气则更换	0
12	有蓄电池	燃油滤清器堵塞	125 检查燃油滤清器是否堵塞,燃油调节器和燃油泵是否故障	0
12	有蓄电池	点火定时不正确	126 点火定时不正确,应调整正时	15
12	有蓄电池	点火线圈故障	127 拆下点火线圈,检查点火线圈,如点火线圈故障,则更换	0
12	有蓄电池	空气滤清器堵塞	128 关闭点火开关,拆下空气滤清器的罩壳,检查各滤清器,如不平	0
12	有蓄电池	水温传感器不正常	129 检查水温传感器的电阻是否在规定范围,如不符合,则更换	0
12	有蓄电池	燃油泵故障	1310 燃油泵故障检查电压是否为蓄电池电压,电压 12V,则燃油泵	12
12	有蓄电池	汽缸组件故障	1311 压力低于 0.08MPa,说明汽缸密封故障,检查汽缸盖、汽缸内加 0.5	0
13	启动困难	燃油泵和燃油泵连接不对	134 拆下燃油泵和燃油泵的连接管,检查燃油泵和燃油泵是否故障	0
13	启动困难	燃油滤清器堵塞	135 检查燃油滤清器是否堵塞,燃油调节器和燃油泵是否故障	0
13	启动困难	燃油泵故障	136 拆下燃油泵滤网并清洗,燃油泵滤网堵塞,说明燃油泵故障,拆下	0
13	启动困难	空气滤清器堵塞	137 关闭点火开关,拆下空气滤清器的罩壳,检查各滤清器,如不平	0
13	启动困难	燃油泵故障	138 燃油泵故障检查电压是否为蓄电池电压,电压 12V,则燃油泵	12

图 5.1 故障数据表

5.2 采用 ADO 控件访问数据库

在 VB 中,有四种数据访问接口,即 Active X 数据对象 (Active X Data Objects, ADO)、数据访问对象 (Data Access Objects, DAO) 和远程数据对象 (Remote Data Objects, RDO),其中 ADO 最新、最简单,因此,本系统在使用 VB 数据控件访问 Access 数据库中数据时,采用 ADO 数据访问接口。

ADO Data 控件 (Adodc) 是 Active X 数据对象 ADO 访问数据库的具体实现,ADO Data 控件使用 Recordset 对象支持对数据库中的数据访问,并允许将指针从一条记录移到另一条记录,显示和操纵数据记录,但它本身不能显示数据库中数据。它经常要与数据感知控件绑定使用,如 Data Grid 控件、Data Combo 控件等。这样,当 ADO Data 控件中的当前记录变化时,与之绑定的数据感知控件则自动显示变动后的当前记录,而不需要另外编制代码,因此便于数据库的更新、浏览和查询。

1. 数据连接

ADO Data 控件不是 VB 的内部控件,使用前必须打开“部件”对话框选择“Microsoft ADO Data Control 6.0 (OLEDB)”复选框,把 ADO Data 控件添加到控件箱中。在属性窗体中单击“Connection String”右边的按钮,在弹出的对话框中选择“使用连接字符串”选项,单击“生成”按钮,在数据链接属性选项卡的“提供者”中选择“Microsoft Jet 4.0 OLEDB Provider”,在“连接”选项卡中选择数据库文件 Diagnosis.mdb,单击“测试连接”按钮,最后单击“确定”按钮,完成 ADO Data 控件的连接。



图 5.2 Adodc 属性窗口

2. 记录源

在 Adodc (adodiagnostics) 属性窗口中单击 RecordSource 右边的按钮，在记录源选项的“命令类型”中设置表格的记录源为“2-adCmdTable”，在“表”的下拉列表中选择“knowledge”表，然后单击“确定”按钮，则 Adodc1 记录源连接到“Diagnosis.mdb”数据库中的“knowledge”表。如图 5.2 所示。

3. DataGrid 控件

使用数据感知控件 DataGrid 控件，浏览、查询和编辑数据库表。和 Adodc 相似，使用之前，先在部件选项卡中选择“Microsoft DataGrid Control 6.0 (OLEDB)”复选框，把 DataGrid 控件添加到控件箱。创建 DataGrid 控件后，在“属性页”选项卡中设置所要显示的列内容，在属性窗口中设置 DataSource 属性为 adodiagnostics，如图 5.3 所示，通过网格控件显示数据库。

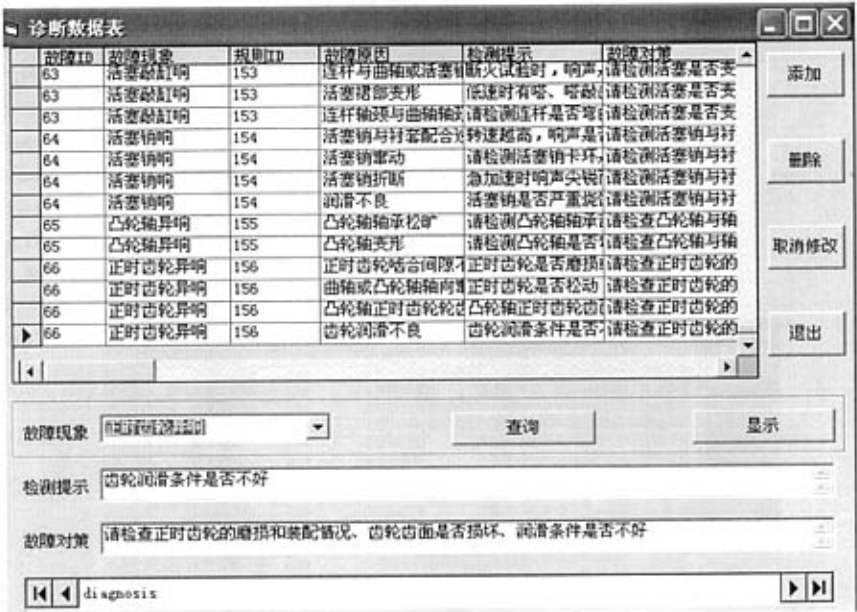


图 5.3 Diagnosis 数据库

5.3 数据库管理

综合数据库是动态的，随着故障诊断专家系统的测试和完善，数据库应该满足添加和删除等要求。

1. 添加

“添加”按钮发生单击事件时，通过“添加”消息框的提示，如果“确定”，则在数据表记录的最后可以添加新的记录，其代码如下：

```
Private Sub Command1_Click()  
Dim Response As Integer  
Response=MsgBox(“是否添加新的记录？”,vbYesNo,“添加记录”)  
If Response=vbYes Then  
Rsfault.MoveLast  
Rsfault.AddNew  
End If  
End Sub
```



图 5.4 添加对话框

2. 删除

删除代码如下：

```
Private Sub Command2_Click()  
Dim Response As Integer  
Response=MsgBox(“是否删除当前记录？”,vbYesNo,“删除记录”)  
If Response=vbYes Then  
Rsfault.Delete  
Rsfault.MoveLast  
End If  
End Sub
```



图 5.5 删除对话框

3. 查询

利用 DataCombo 控件把数据绑定在组合框内, 当单击 DataCombo 时, 通过 DataCombo.BoundText 的值刷新 Adode (adodiagnosis), 从而更新 DataGrid 控件中显示的数据, 再触发查询按钮事件, 文本框显示查询的内容, 如检测提示和故障对策。触发 Commandcx_Click 事件的程序代码如下:

```
Private Sub Commandcx_Click()  
    Dim s As String  
    If DataCombo1.Text="" Then  
        Exit Sub  
    End If  
    s="Select * From Knowledgebase Where Knowledgebase.ChildID=""&DataCombo1.BoundText& ""  
    Adodiagnosis.RecordSource=s  
    Adodiagnosis.Refresh  
End Sub
```

4. 修改

在 Access 2003 中打开数据库, 右击要修改的数据表, 选择“设计视图”命令, 在打开的表设计器中对数据表进行各种修改。

5.4 本章小结

本章应用关系型数据库 Access 作为 EFIE-FDES 的后台数据库管理系统, 能方便有效地实现数据库的管理。在建立数据库时, 充分利用 Access 数据库工作环境, 保证了数据库的知识和知识库的知识的一致性。采用 ADO Data 控件访问数据库, 当数据库中的当前记录变化时, 与之绑定的数据感知控件则自动显示变化后的当前记录, 实现数据库的更新、浏览和查询功能, 便于对动态数据库的维护。

第六章 多媒体技术

电子燃油喷射发动机由于采用了电子技术、计算机技术和控制技术等高科技,因此使得电喷发动机故障诊断和检测维修更趋于复杂。目前,我国汽车维修行业中维修人员的专业水平、外语水平、计算机水平都很低,很难适应现代汽车的高科技发展,不能快速、正确地判断故障原因并排除故障。所以,必须尽快地提高汽车维修人员的技术水平,这就使得维修人员的培训尤为重要。Internet 互联网打破了信息、资讯传递在时间、空间、形式上的局限,能随时随地最快捷、全方位地实现信息资源共享,维修人员通过在线培训,能不断更新维修理念、诊断知识和技术,从而提高诊断效率和维修质量。

为了使诊断和维修系统形象生动、便于培训和使用,本课题开发的 EFIE-FDES 系统中有一个在线培训多媒体模块。

多媒体技术 (Multimedia Technology) 指能够同时获取、处理、编辑、存储和显示多种不同类型信息媒体的技术。这些信息媒体包括文字 (Text)、声音 (Sound)、图形 (Graph)、图像 (Photo)、动画 (Animation) 以及视频 (Video) 等。多媒体技术通过超链接,可以将相关的信息集合在一起,使它具有较强的交互性、丰富的表现力,并能够在网上发布运行,实现远程服务。

本系统多媒体技术的应用是以 VB 为开发平台,通过 Solid Edge 软件进行虚拟造型和运动仿真,采用 FrontPage 制作在线培训网页。

6.1 电喷发动机机构

电喷发动机除了电子燃油喷射系统外,两大机构即曲柄连杆机构和配气机构起着重要的作用,本系统在对机构建模的基础上实现了发动机工作原理的仿真。

6.1.1 三维建模

Solid Edge 是基于特征的参数化设计造型,具有丰富的造型特征,也是最早的实用实体造型系统,它能应用强大的设计指引工具在全三维变量几何造型环境中进行机械零件的建模和装配。其建模思路是在二维草图环境中建立草图,对草图添加几何约束关系和驱动尺寸以完成草图的定位,然后通过拉伸、旋转和除料等操作形成三维模型。如图 6.1 为曲轴三维实体。

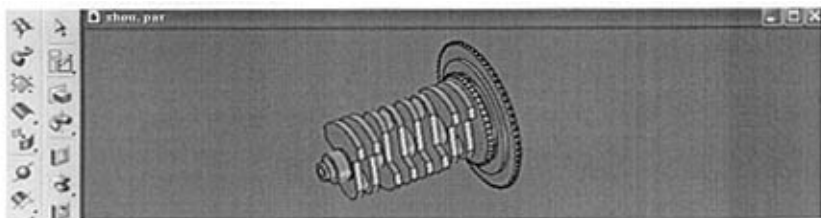


图 6.1 曲轴三维实体

6.1.2 工作原理的仿真

Solid Edge 全面支持“自顶向下 (Top-Down)”和“自底向上 (Bottom-Up)”的设计,即既可以应用传统技术完成装配,又可以在装配环境中设计新的零件,设计很灵活。本系统是采用“自底向上”的设计方法。如曲杆连柄机构,先逐一建立曲柄、连杆、活塞等单个零件,然后按一定的装配关系,把这些零件装配在一起,并进行编辑、保存。这里的装配关系主要有固定关系、面匹配关系、轴对齐关系和连接关系等。

在创建装配过程中,必须进行干涉检查。干涉检查 (Check Interference) 是指检测装配件中所

选择的零件之间有没有重叠部分。

在装配环境中的运动仿真 (Motion)，可以设置各零件的运动模式，分析运动轨迹，干涉检查以及能够对模拟的运动输出动画 (.avi)。这对发动机工作原理的仿真起到了虚拟作用。

例如曲柄连杆机构，先对曲柄、连杆、活塞、飞轮等进行三维建模，然后以曲轴为基准，进行“由底向上”的装配，最后进行运动仿真，并渲染保存为动画“发动机原理.avi”。如图 6.2 所示为曲柄连杆机构装配模型。

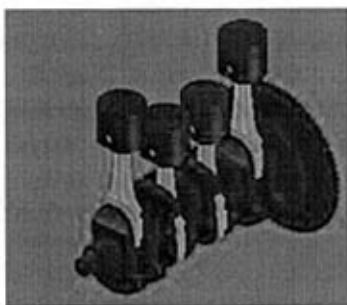


图 6.2 曲柄连杆机构

6.2 在线培训

本系统开发的在线培训包括发动机构造、工作原理、常见波形和检测设备四个功能模块。采用 FrontPage 2003 网站编辑器制作了“培训.htm”、“构造.htm”、“工作原理.htm”等。

FrontPage 是一种面向对象的可视化 Web 网站编辑器，应用它很容易创建和发布主页，具有动态的网页效果，而且可以在 Internet Explorer 浏览器内完成网页编辑，便于网页的更新和维护，适用于诊断专家系统的辅助功能实现。图 6.3 是首页 (培训.htm)，图 6.4 是发动机结构框架，图 6.5 是工作原理框架。

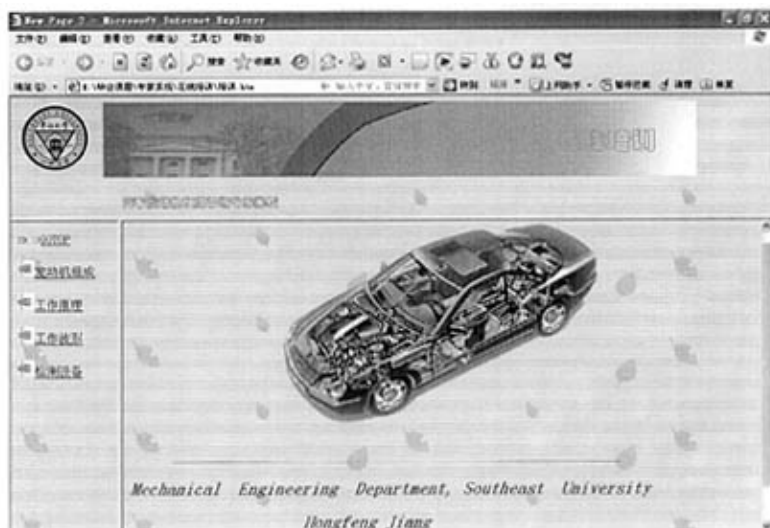


图 6.3 培训.htm

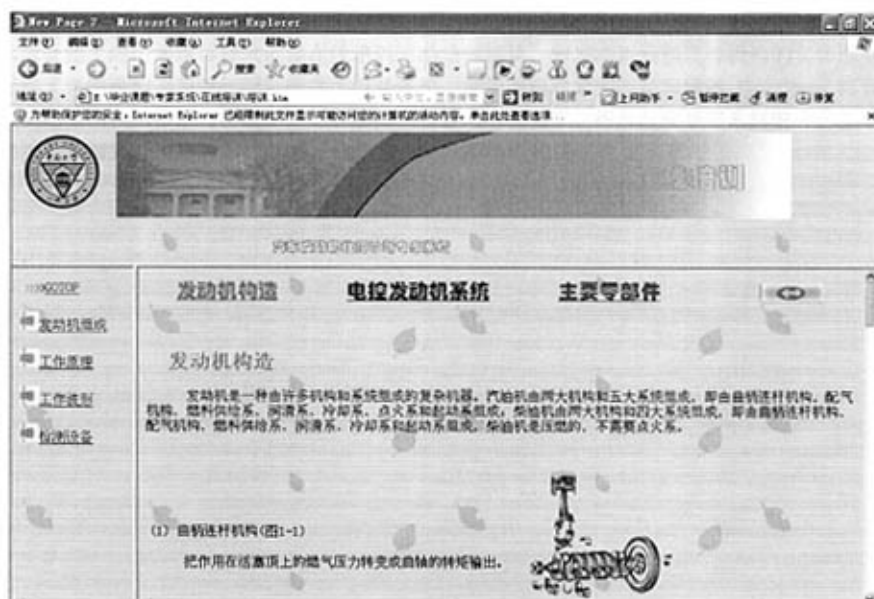


图 6.4 发动机结构.htm

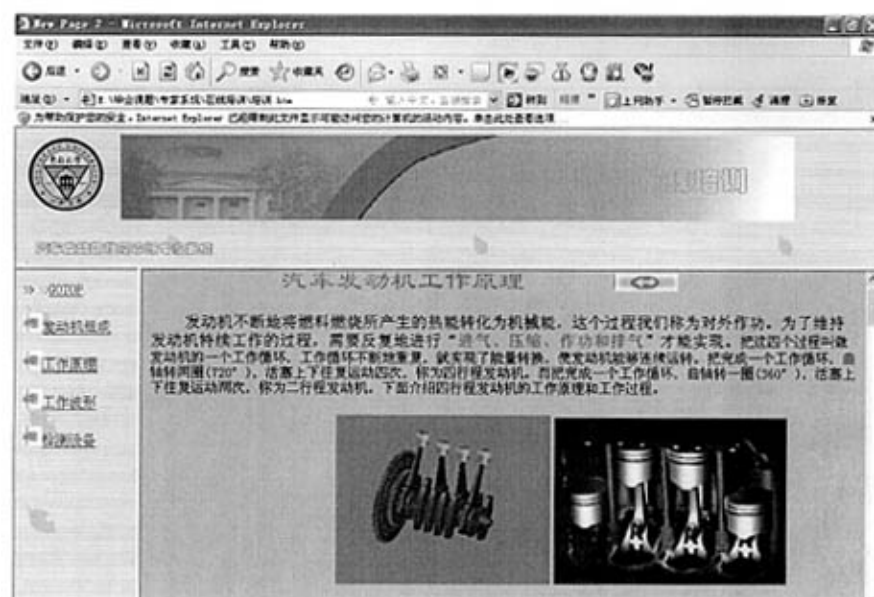


图 6.5 工作原理.htm

6.3 本章小结

本章介绍了应用多媒体技术创建在线培训辅助功能模块。对发动机曲柄连杆机构的实体造型和虚拟装配作了详细说明，为制作网页提供了信息资料。利用面向对象的网站编辑器 FrontPage 将有关电喷发动机的结构、工作原理、常见波形和检测设备等内容文字、图片和视频等素材编译在各个网页中，通过浏览网页，用户可以简单直观地学习，为故障诊断提供了理论基础。

第七章 专家系统的实现

电喷发动机故障诊断专家系统 EFIE-FDES 是基于故障树分析法框架和产生式规则的集成表示法专家系统。该系统将故障诊断和在线培训融合于一体,既能模仿领域专家对电喷发动机常见故障进行准确有效地诊断并排除故障,又能对汽车维修企业的维修人员进行在线多媒体培训,从本质上提高汽车诊断和维修的质量和效率。

7.1 系统模块结构

EFIE-FDES 的系统模块结构如图 7.1 所示,主要功能模块是故障诊断、数据管理、知识库管理和在线培训四个模块。

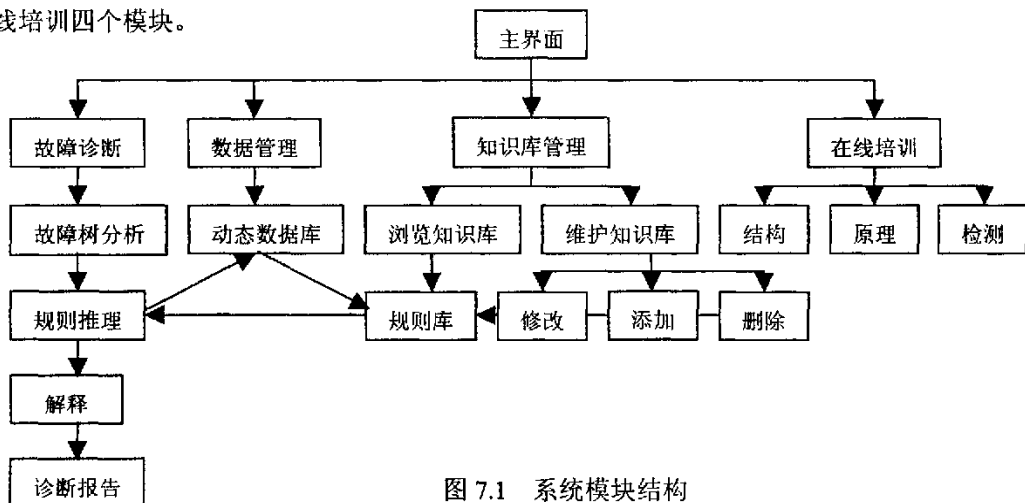


图 7.1 系统模块结构

系统是在 Windows XP 环境下采用 VB6.0 语言和 Access 数据库开发的,诊断界面友好、易操作,通过 ADO (ActiveX Data Objects) 技术访问数据库中各张数据表,采用面向对象的事件触发,发挥功能模块的作用,完成专家系统与用户的交互以实现故障诊断。

7.2 功能模块的实现

1. 系统登录

图 7.2 是系统启动界面,图 7.3 是登录密码验证对话框。用户通过身份验证可以进入系统主界面,当单击菜单中各项子菜单,就可以进行各种功能模块的操作。系统主界面在第二章系统总体设计中已经提过,如图 2.11 所示。



图 7.2 EFIE-FDES 启动界面

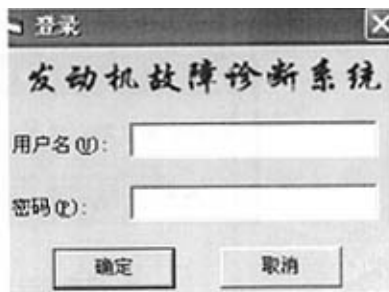


图 7.3 登录对话框

2. 故障诊断

诊断模块的界面如图 7.4 所示，主要由三部分组成，即故障树显示、诊断提问内容显示和推理过程显示。

用户根据故障现象选择故障树中某个节点后，系统开始诊断推理。在推理过程中，用户回答诊断提问，系统则不断激活规则，并把推理过程中产生的中间结论不断地加入动态数据库中，直到推理结束，按钮显示为“诊断结束”，当用户单击该按钮时，则以 Word 文档格式显示诊断报告。如图 7.5 所示为显示诊断报告的消息框，图 7.6 所示为 Word 格式诊断报告。

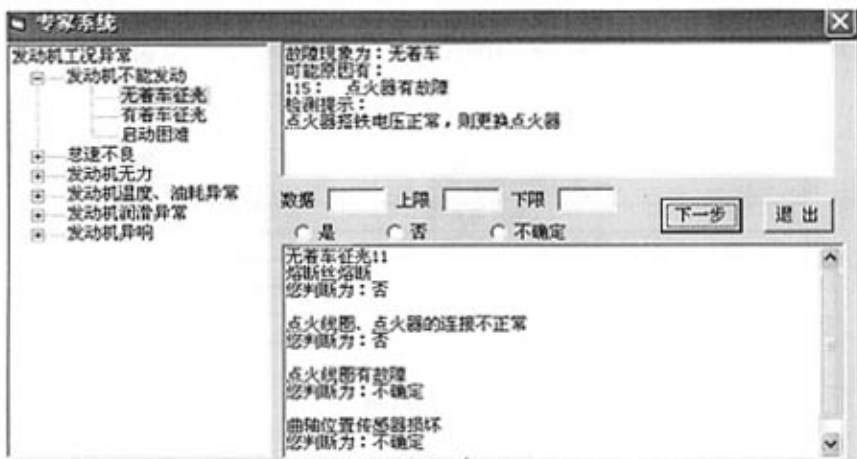


图 7.4 诊断模块

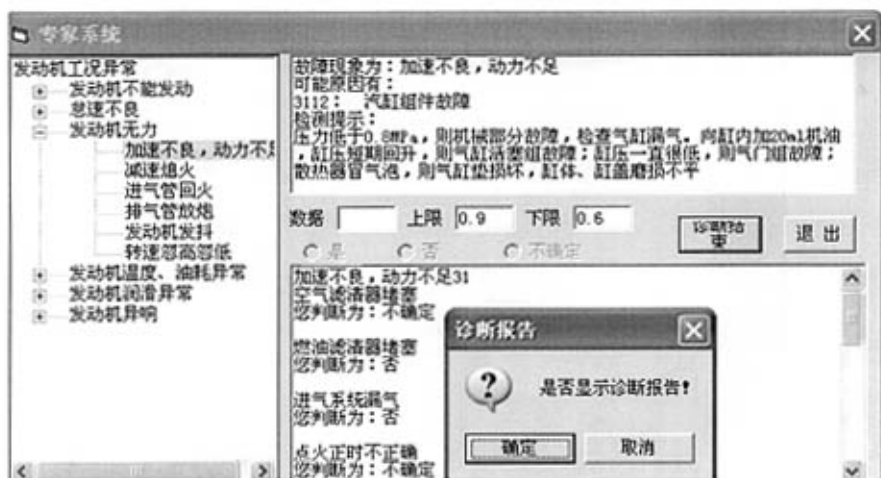


图 7.5 诊断报告消息框

专家系统诊断报告

诊断时间:2006 年 3 月 16 日 星期四下午 8 时 55 分

测点数据:
系统未测量数据:

确定故障:

故 障	减速熄火
原 因 1	怠速控制阀不正常
排除方法 1	检修控制线路或更换怠速控制阀

可能故障:

故 障	减速熄火
原 因 1	怠速调整螺钉松动
排除方法 1	调高怠速
原 因 2	节气门位置传感器不正常
排除方法 2	修理或更换节气门位置传感器
原 因 3	进气歧管压力传感器不正常
排除方法 3	更换传感器

图 7.6 诊断报告

3. 知识库管理

知识库里的故障现象、故障原因、故障对策和规则等是以分层次形式存储在数据库里，该功能模块包括故障树管理、规则库管理和知识库浏览三部分，同时可以进行添加、修改、删除等功能的操作。操作时，用户在简洁明了的界面上，只要单击各种提示按钮，即可方便地完成各种功能管理。如图 7.7 是故障树管理界面，图 7.8 是规则库管理界面，图 7.9 是规则库浏览界面。

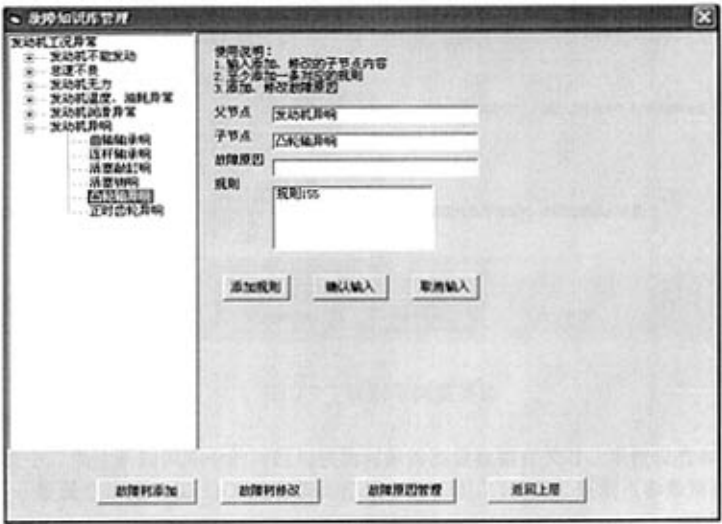


图 7.7 故障树管理界面

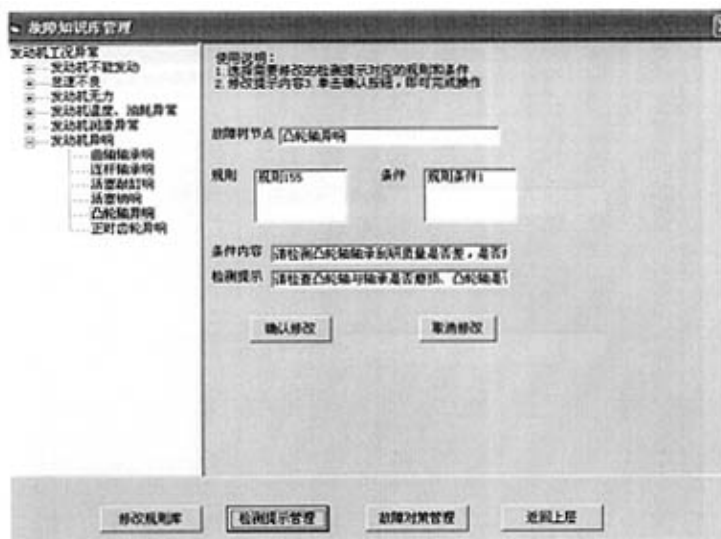


图 7.8 规则库管理界面



图 7.9 规则库浏览界面

4. 数据管理

在诊断过程中，当诊断知识库中的问题与被测对象的测量数据有关时，系统设有参数属性页，如图 7.10 (a) 是一般属性，图 7.10 (b) 是各类传感器参数，图 7.10 (c) 是测点参数属性。

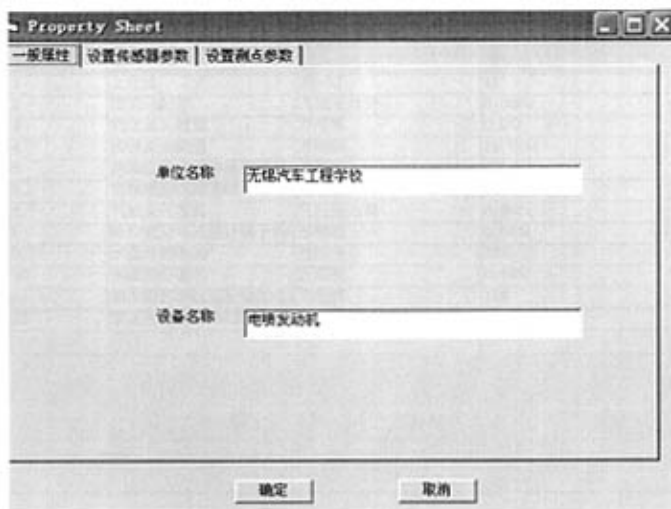


图 7.10 (a) 一般属性

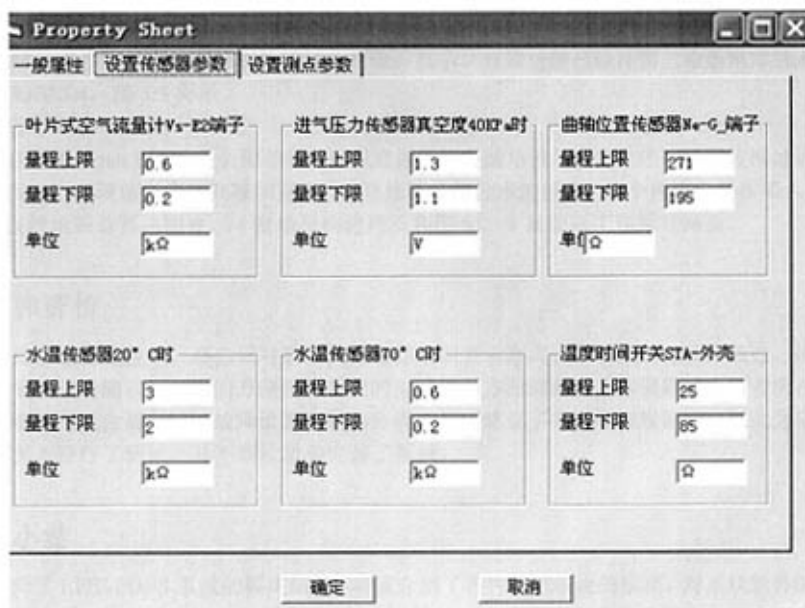


图 7.10 (b) 传感器参数



7.10 (c) 测点参数属性

在推理时，综合数据库中数据表的添加、删除、显示、查询功能已经在第三章数据库技术中作了详细说明，如图 5.4，图 5.5 所示。

5. 在线培训

通过 VB 的 Internet Explorer 引用功能，可以直接访问在线培训的内容，还可以通过网址访问各个汽车维修网站，以实现信息资源共享和更新，增强诊断维修技术的能力。这个内容已经在第六章论述，见图 6. 3 在线培训首页，图 6. 4 发动机构造网页和图 6. 5 发动机工作原理网页。

7.3 测试和评价

专家系统在建立过程中，都必须对系统软件进行知识表示方式、知识正确性和一致性、推理方法和策略、各模块的功能以及使用的方便性和系统的实用性等方面的测评。本课题结合作者所在工作单位的电喷发动机实验台架，经过故障诊断资料的分析汇总，建立了数据库和规则库，以此为依据对系统在不同工况下进行了测试，并不断改进和完善了系统。

7.4 本章小结

本章分析了 EFIE-FDES 系统的模块结构，着重介绍了各种功能模块的实现，对系统软件进行了说明。本系统应用 Visual Basic6.0、Access、ADO Date 控件、SQL 查询语句等编程方法和多媒体技术有机结合，设计的人机界面友好，易操作，而且系统能不断维护和管理。应用研制的诊断专家系统在电喷发动机实验台架上测试，证明了系统的有效性。

第八章 总结与展望

8.1 总结

本研究课题将专家系统、故障诊断技术、计算机技术相结合并应用于电喷发动机故障诊断中。本课题从发动机故障模式出发,根据现代汽车故障诊断研究发展方向,以 Visual Basic、Access 等软件为编程工具,开发了基于故障树的框架和规则集成知识表示方法的 EFIE-FDES 系统软件。本系统的主要工作如下:

1. 针对汽车发动机故障诊断技术的现状,研究了故障诊断理论,分析了电喷发动机故障机理,为建立专家系统知识库和推理机提供了理论依据和经验知识。

2. 本系统集成电喷发动机故障诊断系统和在线培训于一体。系统实现了故障诊断、知识库管理、数据库管理和在线培训四个主要功能,这些功能模块既相对独立又相互联系,一方面保证了故障诊断的正确性和实用性,另一方面为汽车维修人员提供了发动机原理和检测等知识,便于更好地进行故障诊断。

3. 系统采用了故障树分析法、框架和产生式规则相混合的知识表示方法。通过编程,实现领域专家可以直接使用发动机故障诊断系统的知识库,并在实际应用时,不断维护和扩展知识库,以最大限度地提高知识的表达能力和系统的实效性,同时在一定程度上解决了专家系统中知识获取的瓶颈问题。

4. 系统采用 Visual Basic 作为前台程序开发工具,开发的用户界面友好、易操作以及可以快速地访问各个功能模块接口。采用 Access 数据库开发了动态数据库,利用 ADO 技术实现了后台数据的调用和维护,使知识库和推理机相对独立。系统通过分析结构和各功能模块,采用正向推理方向和深度优先搜索和冲突消解策略,以确定性推理方法为主的推理机制,具有较高的可靠性。

5. 系统采用多媒体技术,利用 Solid Edge 软件对电喷发动机的结构进行了三维建模,并实现其工作原理的仿真运动,为在线培训提供了形象生动的素材。用 FrontPage 编辑器设计的网页,实现了网络环境下的在线培训,使故障诊断专家系统在汽车维修行业更易于推广。

8.2 展望

发动机故障诊断是综合性、智能化很高的一门技术,建立一个合适、完善和高效的发动机故障诊断专家系统又是一项高难度、复杂的工作。由于本人的时间和精力有限,本系统的功能还有待于进一步完善和提高。主要有以下几点:

1. 灵活的知识表示可以满足多种推理方法的需要,因此在故障诊断知识获取方面可以考虑神经网络、模糊理论与专家系统相结合。

2. 在网络化技术高速发展的背景下,应充分考虑分布式诊断和远程诊断。

致 谢

弹指一挥间，三年的硕士研究生之路即将到达终点。回顾不长的求学历程，没有硕果，唯有感谢。

我由衷地感谢我的导师贾民平教授，是您的渊博知识、独特见解、宽广胸怀和严谨务实的工作作风在不断地激励着我，让我战胜了一个又一个困难，学到了书本上没有的知识；是您不辞辛劳、耐心细致地指导我、帮助我，让我顺利完成了课题研究。在此，我要说一声：导师，您辛苦了！谢谢！

同时，我要感谢黄仁教授、许飞云老师、胡建中老师、彭英老师！

感谢同一实验室的硕士生李丛颖、钱媛媛、许四湖、刘静、詹宏宏、陈建业以及师兄（弟）师姐（妹）对我的帮助，能够和你们一起学习，高兴之至。

感谢我的领导、同事和朋友们给予我的照顾和关心。

最后深深地感谢我的父母、爱人和女儿，是你们的理解和支持让我圆了研究生之梦。

祝愿你们：好人一生平安！

学海无涯。我将一如既往地继续学习，以报答老师、朋友和家人的恩情。

作者

2006年03月于南高院

参考文献

1. 钟秉林, 黄仁. 机械故障诊断学 (第2版) [M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
2. 王秀贞. 汽车故障诊断与检测技术 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2003
3. 储江伟. 汽车电控系统故障模式识别的研究 [D]. 东北林业大学博士学位论文, 2000
4. 曹家吉. 现代汽车检测诊断技术 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2003
5. 曹建国. JL368Q 汽油发动机故障诊断专家系统研究 [D]. 西安: 西安交通大学机械工程系, 2002
6. 董因平. 基于故障树知识的汽车故障诊断专家系统框架设计研究 [D]. 吉林: 吉林大学硕士研究生学位论文, 2001
7. 肖永清. 国内外汽车检测技术发展状况 [J]. 中国机电工业, 2003, 18: 37-38
8. 江冰. 现代汽车故障诊断技术的探讨 [J]. 山西交通科技, 2002, 2: 60-61
9. 蔡自兴, 徐光佑. 人工智能及其应用 (第三版) [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004
10. 武波, 马玉祥. 专家系统 (第二版) [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2001
11. 李道亮, 傅泽田, 田东. 智能系统: 基础、方法及其在农业中的应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004
12. 邢传鼎, 杨家明, 任庆生等. 人工智能原理及应用 [M]. 上海: 东华大学出版社, 2005
13. 易继锴, 侯媛彬. 智能控制技术 [M]. 北京: 北京工业大学出版社, 2004
14. 肖云魁. 汽车故障诊断学 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2001
15. Joseph c. Giarratano, Gary D. Riley. Expert System: Principles and Programming, Fourth Edition [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005
16. 王文林. 注塑机故障诊断专家系统 [D]. 浙江: 浙江大学硕士学位论文, 2001
17. 陈朝阳, 张代胜, 任佩仁. 汽车故障诊断专家系统的现状与发展趋势 [M]. 机械工程学报, 2003, 39(11): 1-4
18. 刘洪刚, 吴建军, 陈启智. 基于混合知识模型和混合推理策略的液体火箭发动机智能故障诊断 [J]. 推进技术, 2003, 24(3): 193-197
19. 孙培峰. 基于虚拟技术的汽车发动机故障远程诊断系统 [J]. 机械与电子, 2004, 1: 71-73
20. 刘国光, 华文林. 基于 BP 算法的发动机故障诊断系统 [J]. 机电一体化, 2002, 4: 77-79
21. 曹建国, 罗辑. 基于神经网络的发动机异响故障诊断方法 [J]. 机械制造, 2004, 42(474): 19-20
22. 谭德荣, 韩加逢. 基于 BP 的车辆系统故障诊断模式识别 [J]. 山东理工大学学报, 2003, 17(3): 8-12
23. 卫绍元, 张蕾, 董恩国. 电控发动机工作波形智能识别系统设计 [J]. 车用发动机, 2002, 2: 51-53
24. 武和雷, 朱善安. 基于 FNN 与规则推理的轿车故障诊断方法研究 [J]. 汽车工程, 2003, 25(6): 642-644
25. 胡奕涛, 武和雷. 车用发动机故障综合智能诊断方法研究 [J]. 车用发动机, 2003, 148(6): 32-34
26. 朱三文, 席泽敏, 薛林. 基于神经网络的雷达故障诊断专家系统 [J]. 机械与电子, 2004-7: 75-77
27. 孙莲芳. 集成神经网络信息融合技术在旋转机械故障诊断中的应用 [J]. 机械与电子, 2004, 1: 12-15
28. 邓军. BP 神经网络在高强度螺栓疲劳试验设计中的应用 [J]. 机械设计与制造, 2004, 1: 4-5
29. 陈朝阳, 张代胜. 神经网络技术在汽车故障诊断专家系统中的应用 [J]. 合肥工业大学学报, 2000, 23(1): 28-31
30. 王赞松, 褚福磊. 神经网络信息融合方法在电控发动机故障诊断中的应用研究 [J]. 汽车技术, 2003, 5: 38-41
31. 郑文钟, 陈开考, 何勇. 电喷发动机故障诊断专家系统的研究 [J]. 浙江大学学报, 2002, 28(2): 213-216
32. 赵树朋, 张世芳, 祁朴生等. 汽车电喷发动机故障诊断专家系统的开发研究 [J]. 河北农业大学学报, 2002, 25(2): 79-81
33. 蒋亚南, 楼应侯. 多媒体技术在汽油发动机故障诊断专家系统中的应用 [J]. 科技通报, 2002, 18

(4): 299-303

34. 许化东. 基于故障树分析法的汽车故障诊断专家系统的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学车辆工程专业, 2002
35. 金朝勇. 现代汽车维修特征与进展[J]. 合肥工业大学学报, 2003, 26 (2): 250-253
36. 邹长庚, 赵琳. 现代汽车电子控制系统构造原理与故障诊断 (上) (第五版) [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2004
37. Tom Denton, Advanced Automotive Fault Diagnosis[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 2005
38. 赵松年, 佟杰新, 卢秀春. 现代设计方法[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001
39. 赵树朋. 汽油电喷发动机故障诊断专家系统的开发研究[D]. 河北农业大学硕士研究生论文, 2003
40. 姜华. 基于 WEB 的工程机械液压故障诊断专家系统的研究[D]. 南京: 东南大学机械工程系, 2004
41. 陈义军. 机械传动系统方案设计 CAD 专家系统的研究[D]. 南京: 东南大学机械工程系, 2005
42. 李鸿吉. Visual Basic 6.0 中文版编程方法详解[M]. 北京: 科学出版社, 2003
43. 伍俊良. Visual Basic 应用与开发教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004
44. 刘钢, 程克明. Access 数据库程序设计教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004
45. 周国民, 李国军. Visual Basic + Access 数据库应用系统开发与实例[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2004
46. 姜晓铭, 杜吉祥. FrontPage 2000 入门与提高[M]. 北京: 国际文化出版公司, 1999
47. 张剑澄, 黄胜. Solide Edge 基础教程 (第 2 版) [M]. 北京: 机械工业出版社, 2003
48. 李军. 一种基于神经网络的专家系统的设计与实现[D]. 北京: 北京工业大学工学硕士学位论文, 2003
49. 纪常伟. 于故障树的汽车故障诊断系统开发[J]. 车辆与动力技术, 2003, 1: 52-57
50. 陈朝阳, 王永宽, 张代胜. 汽车故障诊断知识库管理系统的研究[J]. 汽车维修与保养, 2004, 1: 82-85
51. 张建, 金伟. 基于 Delphi 5 数据库的故障诊断专家系统[J]. 大连轻工业学院学报, 2002, 21 (1): 44-49
52. Shubhalaxmi, P.K., P.C. Automobile Engine Fault Diagnosis Using Neural Network [J]. 2001 IEEE Intelligent Transportation System Conference Proceedings-Oakland(CA), USA-August 25-29, 2001, 492-495
53. Mattias Nyberg. Model-Based Diagnosis of an Automotive Engine Using Sereral Types of Fault Models[J]. IEEE Transactions on Control System Technology, Vol. 10. No. 5. Sep. 2002, 679-689
54. Wang Weijie, Kang Yuanfu, Zhao Xuezheng, etc. Study of Automotive Engine Fault Diagnosis Based on Wavelet Neural Networks [J]. Proceedings of the 5th World Congress on Intelligent Control and Automation, June 15-19, 2004, P.R.C. 1766-1770
55. K.L.Butle, J.A.Momoh. A Neural Net Based Approach For Fault Diagnosis in Distribution Networks [J]. IEEE, 2000, 1275-1278
56. Dong Xu, Mei Wu, Jinwen An. Design of An Expert System Based on Neural Network Ensembles for Missile Fault Diagnosis [J]. Proceedings of the 2003 IEEE, 903-908
57. Laurian Dinca, Tunc Aldemir, Giorgio Rizzoni. A Model-Based Probabilistic Approach for Fault Detection and Identification with Application to the Diagnosis of Automotive Engines. IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 44, Nov. 1999, 2200-2205
58. 孔繁森, 董因平. 基于故障树知识的汽车故障诊断推理[J]. 汽车工程, 2001, 23 (3): 209-213
59. 鲍卫宁, 门清毅. 基于知识的汽车维修及诊断专家系统开发研究[J]. 汽车科技, 2002, 6: 31-33
60. 王教东. 汽车故障诊断专家系统[J]. 宁波职业技术学院学报, 2003, 7 (6): 86-88
61. 钱作勤, 周祥军. 内燃机拉缸故障诊断型专家系统[J]. 武汉理工大学学报, 2004, 28 (5): 634-636

62. 张代胜, 陈朝阳, 张树强等. 基于案例推理的汽车维修专家系统[J]. 汽车工程, 2003, 25(5): 506-509
63. 李增芳, 孙培峰, 严爱芳. 基于 E-R 图分析的汽车故障诊断专家系统[J]. 农机化研究, 2003, 3: 212-213
64. 刘文霞, 孙凤英, 纪峻岭. 专家系统故障诊断及在汽车故障诊断中应用[J]. 交通科技与经济, 2001, 3(2): 40-42
65. Dawei W Dong, John J. Hopfield, K.P. Unnikrishnan. Neural Network for Engine Fault Diagnostics[J]. IEEE, 1997: 636-644
66. Dinghui Zhang, Shuguang Dai, Youqin Zheng, etc. Researches and Application of a Hybrid Fault Diagnosis Expert System[J]. Proceedings of the 3rd World Congress on Intelligent Control and Automation, June 28-July 2 2000: 215-219
67. R.J. Howlett. Condition Monitoring and Fault Diagnosis in A Domestic Car Engine Using A Neural Network[J]. The Institution of Electrical Engineers, 1996: 5/1-5/4
68. K. Mohammadi, A.R. Mohseni Monfared, A. Molaei Nejed. Fault Diagnosis of Analog Circuits with Tolerances By Using RBF and BP Neural Networks[J]. Student Conference on Research and Development Proceeding, 2002: 317-321
69. Yi Lu, Toe Qi Chen, Brennan Hamilon. A Fuzzy System for Automotive Fault Diagnosis: Fast Rule Generation and Self-Tuning[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol 49, NO. 2, 2000: 651-660
70. Yi Lu Murphey, Jacob A. Crossman, Zhihang Chen, etc. Automotive Fault Diagnosis——Part II: A Distributed Agent Diagnosis System[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol 52, NO. 4, 2003: 1076-1097
71. Koji Morikawa, Hideo Watanabe, Aktira Furuye. Comparison of fuel injection systems and a new combustion method for a direct injection two-stroke-cycle automobile engine[J]. JSAE Review 17, 1996: 401-404
72. Shin-Yaug Liu, Jen-Gwo Chen. Development of a Machine Troubleshooting Expert System via Fuzzy Multiattributes Decision-Making Approach[J]. Expert System With Application vol. 8, NO. 1, 1995: 187-201
73. Luis J. de Miguel, Margarita Mediavilla, Jose R. Peran. Fault Diagnosis System Base on Sensitivity Analysis and Fuzzy Logic[J]. IEEE, 1996: 50-55
74. Kyusung Kim, Alexander G. Parlos, Raj Mohan Bharadwaj. Sensorless Fault Diagnosis of Induction Motors[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 50, NO. 5, 2003: 1038-1046
75. Hayashi, Asakural, Sheng Zhang. Study of Machine Fault Diagnosis System Using Neural Networks[J]. IEEE, 2002: 956-961
76. 杨建文, 贾民平. 基于 Web 的多代理故障诊断系统研究[J]. 工业仪表与自动化装置, 2004, 5: 40-43
77. 孙培峰, 潘爱华. 汽车发动机故障诊断信息网站的开发研究[J]. 内燃机, 2003, 3: 40-41
78. 倪晓宇, 易红, 倪中华等. 机床组件有限元分析前处理专家系统研究[J]. 东南大学学报, 2005, 35(2): 211-215
79. 鲍卫宁. 汽车故障智能虚拟网络监控系统研究[J]. 中国制造业信息化, 2004, 7: 108-111
80. 孙培峰. 基于虚拟技术的汽车发动机故障远程诊断研究[J]. 机械与电子, 2004, 1: 71-73
81. 曲建民. 多媒体技术与应用教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005
82. 曾强聪. Visual Basic 程序设计与应用开发案例教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004

硕士期间发表的论文

1. 蒋红枫, 贾民平. 汽车发动机故障诊断专家系统的研究[J]. 公路与汽运, 2005, 5: 15-18
2. 蒋红枫, 陆晓东. 基于神经网络的电喷发动机故障诊断专家系统[J]. 机械设计, 2004, 21: 270-271
3. 蒋红枫, 陆晓东. 虚拟技术在汽车车身设计中的应用[J]. 江苏省博士研究生学术论坛, 2004, 12: 237-241