

工程结构的知识工程与专家系统

上海交通大学 林少培 黄金枝

摘 要

本文介绍计算机人工智能的一个重要应用分支——专家系统在工程结构设计及检验中的应用及其主要基础知识工程的情况。除了对这门新兴学科的基本概念作一简述以外,文中对知识工程的内容、组成和方法进行了讨论;并结合航空飞行器的设计与检验问题,具体讨论了对其建立专家系统的概念与模型。

一、引 言

工程结构物的设计、制造、运行和检验工作往往包括很多专门知识,这些知识是专家们在多年实践中所积累的,然而,它只是部分地反映在个别的现行规范中。因此,对某些需要进行综合处理的问题,则经常处于无章可循的状态,处理过程则产生很大的主观随意性,很难确保处理的质量。我们知道,很大部分工程问题的知识是经验性的,它并非均可用数学显式表达,而且知识的传授需要很长时间,这就使在实践中更多利用前人知识带来了困难。而知识工程则为上述困难问题的解决提供了可能,它可以通过计算机处理专家知识,由理论上对专家知识的表达、解释与处理提供了框架系统。因此,以知识工程为基础的专家系统的出现,必将对工程结构处理的概念、方法产生深远的影响。

工程结构分析与设计中计算机的应用在近30年来已有迅速的发展,近年来,人工智能技术已开始在各领域中得到应用。人工智能是计算机科学的一个分支,它涉及用计算机来进行符号推理的概念与方法。在推理过程中使用知识的符号表示方法,可以使计算机用人的智能行为方式进行工作。应当指出的是专家系统在工程中的应用是人工智能的重要应用方面,目前已用于化学、医学、地质、气象、工程、教育以及军事等领域,并成功地作出了令人信服的诊断、解释、决策和处理。

工程问题是一个综合、复杂的交互过程。以工程设计为例,由方案概念的产生、初步设计、分析模型的建立及系统的分析与优化等,每一个环节均需要设计人员有很多门学科知识和综合能力,而这些知识和能力,又必须经过长年工作积累而获得的。

人工智能的问世,展示了计算机模拟人的智能的能力,专家系统作为一种智能型的计算机程序系统,它可储存和分享专家的知识与经验,运用知识信息的推理过程,求解人们一般能力尚难于处理的问题。因此,工程中的专家系统将是今后人们进行工程问题处理的有力工具与手段,它的服务方式为:

1986年4月2日收到。

- (1) 以权威的知识与用户对话与咨询;
- (2) 以雄厚可共享知识的数据库、知识库为用户提供科学的、周全的决策咨询与支撑环境;
- (3) 以推理机制 (Inference Mechanism), 用已有知识推断新的知识, 为用户关心的问题提供咨询服务;
- (4) 对各类工程问题作出解释、评价、预测等, 以便人们对资源的合理分配与处理。

专家系统的性能主要取决于它所储存知识的质量, 它对知识的收集提取, 知识的表达, 知识的存储和演释等问题也密切相关。随人工智能技术的发展, 如何处理知识则成为一个关键问题, 由此就产生了知识工程 (Knowledge Engineering) 这门崭新的学科。既然专家系统的力量在于所储存的知识, 而知识又分散在各个专家的头头脑里, 因此, 如何提取知识则成为知识工程师面临的大难题。各种知识表达、知识提取和知识演释的方法已成为当前人工智能学科最活跃的领域, 可以预见, 各类知识表示的成果将大大地推动人工智能和专家系统在各类工程中的应用。

二、专家系统的组成

工程中专家系统的组成示于图 1。由知识工程的观点, 知识分为两类: 广泛共有的知识, 指的是事实或已公开写在书籍、文献、规范等资料中的、为众人所周知并公认反映实际的知识; 另一种则为试探或测想 (Heuristic) 的知识, 它是一种由个人凭经历和实践而得到的某种经验性、判断性的知识, 具有很大主观性, 是难于准确表达, 有时甚至是一种直觉的、感观性的知识。图 1 表示知识工程师要面对知识的处理, 他首先要由专业文档和专业专家那里提取上述两类知识, 并解决知识模型和知识表达问题。为此, 他本身也应相当熟悉专业业务, 才能顺利完成知识的提取过程。专家系统包括知识库和推理机制两个核心, 以及知识提取和输入/输出两个系统。

为了说明当代知识工程和知识系统的关系, 图 2 引用了把知识系统描绘为具有不同开发环境与运行环境的计算机应用系统^[4], 参与知识系统开发时可在开发环境的软件工具支持下建立系统的三个关键部分: 知识库、推理机制和用户接口。

作为知识系统的重要组成部分的知识库与过去人们熟悉的数据库对比见表 1。

为了使专家系统能很好操作和使用所储存的知识, 知识库必须和数据库一样具有内部合理的知识物理组织和外部明确的逻辑组织。

推理机制是用以操作知识库、使用知识库中的知识进行工作的。通过推理方法, 用

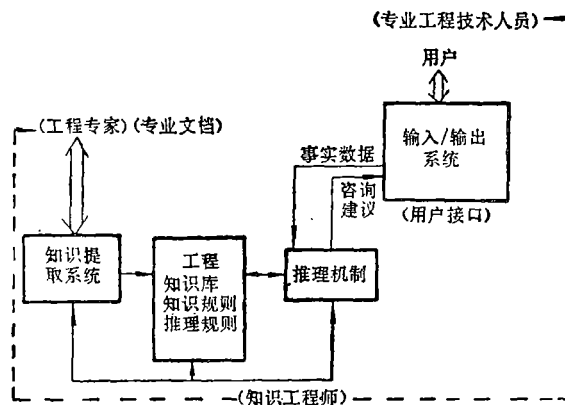


图 1 知识系统的构成

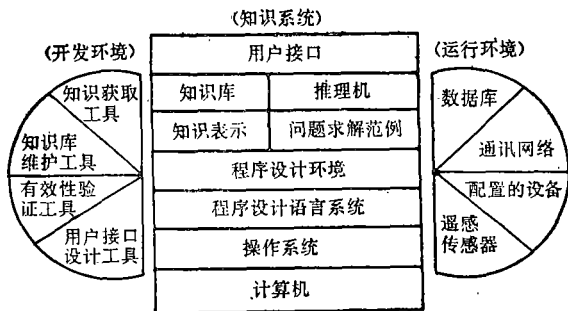


图 2 专家系统的构成

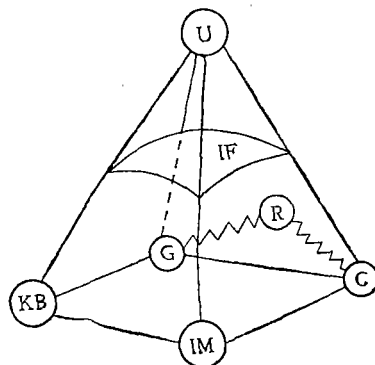


图 3 Wilson-Fang专家系统模型

表 1 数据库与知识库的对比

	数 据 库 (DB)	知 识 库 (KB)
定 义	涉及数据及数据的集合以及数据间关系的储存和处理的系统	涉及知识数据及知识数据集合及知识间关系的储存和处理的系统
内 容	反映各种指标、信息的数字	反映各种事实、规则的符号
运算处理	数字计算	字符运算
操 作	由专门的数据库管理系统支持下进行操作	由专门的知识库管理系统支持下管理操作知识库，对知识进行组织、控制、传送和更新等作业

以了解、探索已有有关知识，对其进行处理，并由此推理得到新的知识或概念。由于现实生活中作为专家系统工作前提和依据的知识数据往往带有不确定性、模糊性或不完备性，同理，专业专家的知识，尤其是经验知识也是不精确和不完备的。因此在推理方法中引入不精确性的模型，将是今后方向之一^[2]，如证据理论，可能性理论、确定性理论和各种经验模型等。

至于系统输入/输出的用户接口，则要努力使系统便于建立与增删维护，同时要使系统的输出使用户易于接受，并对所作的解释和推断令人信服。

作为专家系统的组成框架，不同的系统曾采用了不同的模型。Wilson和Fang^[11]于1985年提出了一个典型的模型，比较完整地反映了近代的发展趋势（图3）。

图3中 KB——知识库，存放事实、规则和推理准则；

IM——推理机制，包括选择、解释规则，推出新事实等；

IF——用户接口，具有控制过程，解释推理结果、显示等功能；

C——动态数据（知识）库，储存用户输入系统的数据，逐级推论的事实及知识库更新记录等；

U——用户，向系统提出咨询问题、要求系统作出推理、解释与诊断决策；

R——作为一种集取知识的手段，可以是遥感型的工具。如由机器人或遥感元件提取知识信息，包括对知识数据的处理与传送等；

G——计算机图象接口。

Wilson-Fang模型目前已由美国 Lehigh 大学成功地应用于一个地下处理有害废料的专家系统 GEOTOX中。

三、产生式系统及推理网络

许多专家系统中所使用的问题求解系统的基础是将简单的规则与给定的问题进行匹配。这些系统通常称作 IF-THEN系统, 或产生式系统。由于它在程序设计中事先考虑了已知的事实和规则, 故有时也称为以规则为基础的系统 (Rule-Based System)。

产生式系统把很多专家知识用一组规则来表示, 它具有以下形式:

IF (事实 1 为真)

(事实 2 为真)

.....

(事实 n 为真)

THEN (结论事实 $n + 1$ 为真)

(结论事实 $n + 2$ 为真)

.....

(结论事实 $n + m$ 为真)

整个知识就表示为规则表

RULES=(RULE 1 RULE 2 RULE 3 ...RULE n)

以结构的识别为例, 用LISP语言写出产生式系统的规则表如下:

```
(SETQ RULES (建规则表)
(IDENTIFY 1 (识别 1)
(IF (STRUCTURE IS RIVETED) (若结构为铆接)
(STRUCTURE SUBJECTS TO AERODYNAMIC
LOADS)) (并结构受气动荷载)
(THEN (STRUCTURE IS AERONAUTICAL
OR ASTRONAUTICAL))) (则为航空或宇航结构)
(IDENTIFY 2 (识别 2)
(IF (CONSTRUCTION NEEDS FIBER
LAYING) (若建造须铺敷纤维)
(STRUCTURE IS NON-METALLIC)) (若结构为非金属的)
(THEN (STRUCTURE IS COMPOSITE))) (则为复合材料结构)
(IDENTIFY 3 (识别 3)
(IF (STRUCTURE IS METALLIC) (若为金属结构)
(MATERIAL DENSITY IS GREATER
THAN 2.7)) (材料比重大于2.7)
(THEN (STRUCTURE IS ALUMINIUM
STRUCTURE))) (则为铝合金结构)
.....
```

专家系统的推理机制是利用知识库的知识规则逐个展开, 并尽可能扩大确认的事实

表。推理过程是按正向链 (Forward Chaining) 以及反向链 (Backward Chaining) 两种方式沿推理网络展开的。上述结构识别问题的推理网络如图 4 所示。

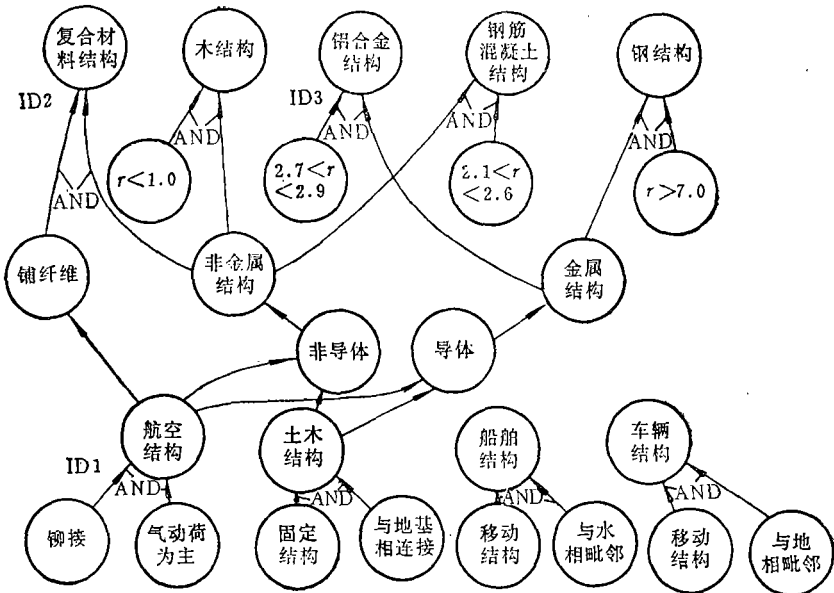


图 4 结构鉴别推理网络

在图 4 推理网络中，每个结点表示一个事实或某种断言。结点之间用弧线连接，由一个结点“发出”并“射向”和“射入”另一个结点。图 4 网络中可显见确定航空结构的 ID 1，确定复合材料结构的 ID 2 及确定为铝合金结构的 ID 3。底层结点一般为原始事实，高层结构是假设的结论，中间层结点既是发出弧规则的前提，又是射入弧规则的结论。

推理方法中常用的反向链法实质上是一个求解的程序。它从未被证实的假设出发，并试图对其证明。这种策略包括寻找能说明该假设的一些规则，然后再检验那些使规则能以运用的事实。与此相反，正向链的推理是从一组事实出发，一遍又一遍地尝试可利用的规则，并在此过程中不断加入新事实，直到没有规则可利用为止。问题求解中断定的某些事实也是可以利用的，并可用来帮助触发其他规则等。

四、航空结构检验专家系统模型

本节以航空结构为对象，建立一个结构维护、检修与报废的专家系统模型。文献 [6] 提出了结构耐久性检测的两类指标：反映结构使用整体功能的整体水平 IL (Integrated Level) 及反映结构破坏水平的 DL (Damage Level)。

对于一个新的结构 $IL = 1.0, DL = 0$

对于破坏的结构 $IL = 0, DL = 1.0$

通过系统的处理或经验积累，可以得到结构破坏特性曲线 (图 5)。图 5 中曲线④为破坏迟钝型曲线，相应的结构在受到一定损伤后对可使用性影响不显著，而曲线⑤则为破坏敏感型曲线，相应的结构受到一定损伤后对结构的可使用性影响很显著。图 5 的界限 A 表示必须进行维修的破损限度，而界限 B 则表示结构必须报废的破损限度。对不

同的结构情况, 界限 A 及 B 是变动的。

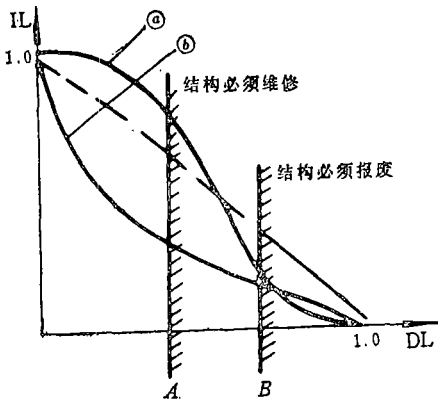


图 5 结构检验曲线

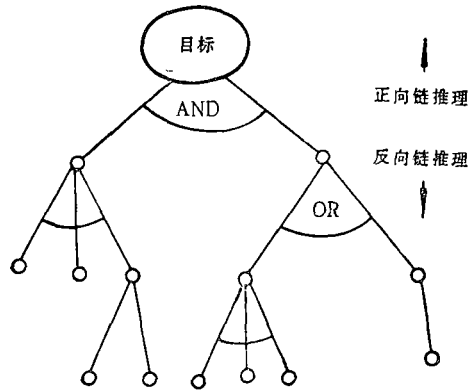


图 6 正向链和反向链推理网络

结构耐久性的评定必须由影响残余强度的主要因素, 诸如永久变形、屈曲、裂纹、损伤、腐蚀、疲劳寿命等。用以评定耐久性的规则, 规则下尚有子规则, 形成“规则树”。以规则为结点的推理网络, 然后用弧线和 AND/OR 把各结点联系起来。通过各层子目标的满足达到总判断目标的满足, 如图 6 所示。其中 i 结点的规则可表示为

RULE i

(IF (结构构件有明显伤痕) AND
(结构结合处有可见裂纹))
(THEN (结构处于严重破损状态))

显然, 为了建立结构检验专家系统的知识库, 必须收集:

- (1) 结构现有的文字技术档案;
- (2) 结构现场检测所处的状态及环境资料;
- (3) 结构设计与分析的数值资料;
- (4) 结构试验及现场检测的数据、资料。

将上述资料进行分类处理:

(1) 结构情况: 包括航空结构的形式、特点、支撑条件、连接型式与连接构造, 设计载荷特点、分布与强度以及结构的构造与尺寸等。

(2) 环境情况: 包括飞行航区的气候、气象条件, 空况的参数如气流要素及环境对结构性态影响的要素等。

(3) 检测情况: 包括可见裂纹尺寸及分布特征, 可见的损伤及尺寸、分布情况, 可见的局部失效情况等。

(4) 其它情况: 包括航空结构使用(飞行)的历史、疲劳历史估计及残余疲劳寿命估计、结构的现场及实测记录以及结构历史上的检修及维护记录等。

因为结构破坏大多是由于构件及材料的碰撞、超载、累计损伤、疲劳或裂纹丛生而引起的不同程度损伤导致局部结构失效而造成结构的整体破坏, 因此专家系统的产生式系统可以在观察材料损伤、锈蚀、裂纹及累计疲劳情况建立规则, 其推理网络模型可见图 7。

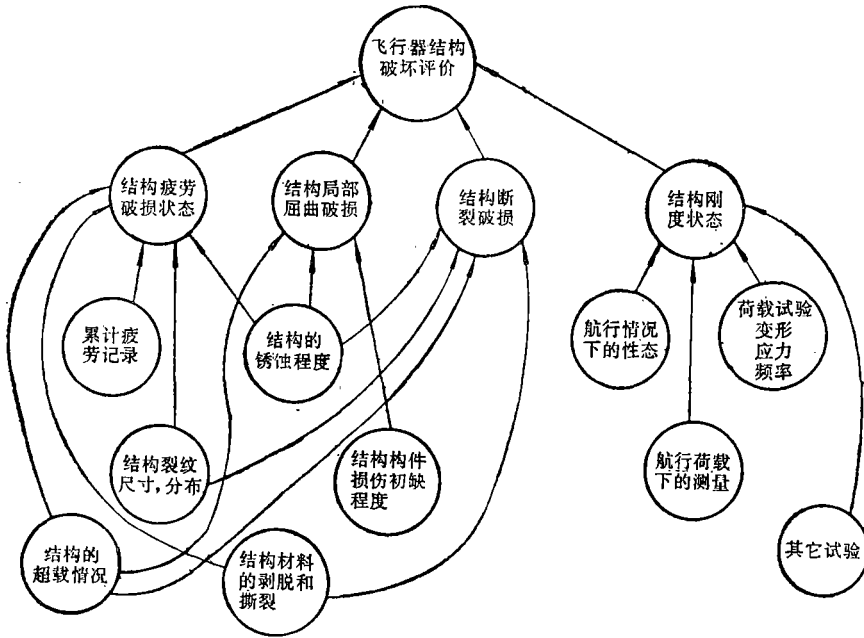


图 7 结构破坏评价推理网络

五、航空结构设计专家系统模型

众所周知，专家系统是人工智能技术的一个重要分支，在航空结构设计的 CAD 系统中，专家系统必然在今后要成为重要的组成部分。回顾当前航空与宇航工程中飞行器设计的 CAD 系统，如美国 NASA 的 Langley 研究中心所开发的 ODIN (Optimal Design Integration), AVID (Aerospace Vehicle Interactive Design) 系统，对于飞行器的整个设计过程均有综合、反馈信息和优化的功能。它由典型过程建立的飞行器几何外形的数学模型开始，进而进行气动力计算、推进系统的选择计算、飞行性能或弹道计算等，最后在优化上述过程的基础上通过重量特性估计飞行器的重量与重心等。上述过程是由系统本身的交互功能和数据库管理功能反复进行的。专家系统无疑将在上述各过程中引入专家经验，它是通过各子系统的知识栈、数据栈和推理机构实现的。

人工智能专家系统技术在 CAD 中应用的潜力很大，尤其对于飞行器的初步设计，专家系统使用的前景更好。因为：

- (1) 在初步设计中，概念设计是特别重要的一步，它特别需要专家知识和经验，这是用一般计算机程序难以表达的；
- (2) 对一般结构分析中，用户很难进入过程，也很难使计算机变更作业，故其正确性也很难由用户直接验证；
- (3) 专家系统方法发展很快，它已有可能成为解题过程中设计者的重要手段；
- (4) 初步设计主要立足于概念性知识，相对较少数学推演和算法方面的复杂因素，同时初步设计中每一步经常需要判断与决策，适合于专家系统的特点。

一个飞行器初步设计专家系统的模型示于图 8，飞行器初步设计专家系统 VEHES 的子系统可分为：

(1) 规划布置与几何图形子系统 (VEHPLN); 主要确定飞行器的总体轮廓尺寸与布置, 然后利用所带几何分析程序对各主要部件 (如机身、机翼和尾翼) 进行分析, 确定相应的几何参数, 如容积、面积、转动惯量与质心, 并进行气动计算等。此子系统主要按飞行器的使用要求, 重量和尺寸的约束限制, 按规范和经验知识所确定的规则进行判断和选优, 选出可行的选优方案。

(2) 推进系统初步设计子系统 (VEHPRO); 按原设计任务要求确定发动机类型、喷管面积比、推进剂型号及起飞推力与初始重量比, 并由此确定初选方案的推力、比冲、发动机重量等参数, 此子系统并有自动验算方案飞行性能的能力。

(3) 结构初步设计子系统 (VEHSTR); 按总体几何布置和推进的智能选优方案, 结合不同结构形式的安全、经济效果、决策结构方案的最优选择, 并确定飞行器尺寸及各部件的重量、重心与转动惯量等。

(4) 设备初步设计子系统 (VEHEQP); 按上述各过程的选优方案及设计任务要求, 由设备的造价、成本及其系统的功能效果分别对飞行器的机械、电气、通讯等设备决策其最佳选择。

(5) 制造与成本分析子系统 (VEHMF); 按要求的制造工期、质量与成本核算决策最优的制造方案, 并估算出其研制及生产的成本费用。

具体数据流与知识信息流以及相应的推理关系可见系统框架图 8, 它是一个支持多用户的大型系统模型, 应具备较高的软件支撑环境。

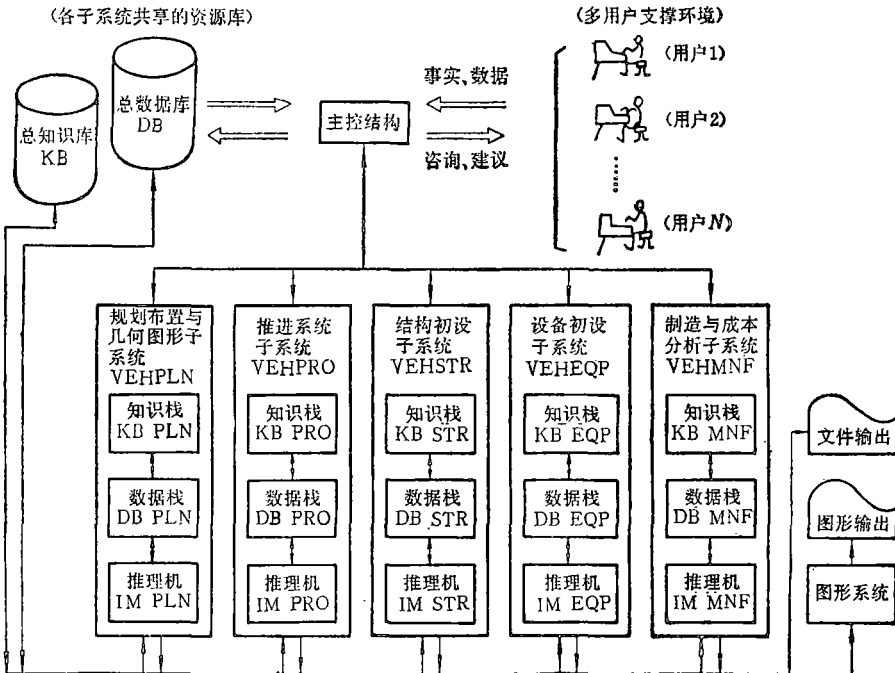
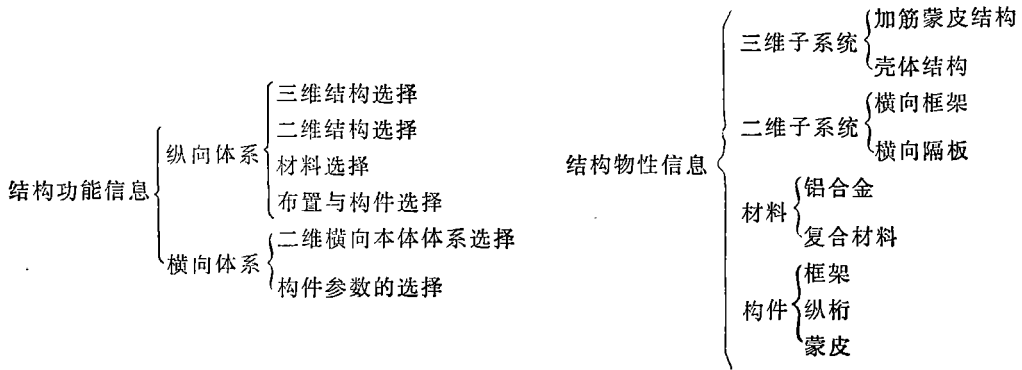


图 8 航空航天结构初步设计专家系统框架

当用产生式规则来选择方案时, 可行性方案可用试探消除规则 (Heuristic Elimination Rules) 为准则, 通过周游设计信息树所组成的方案集合而得。凡是逐层通过树结点, 并逐点满足试探消除规则者, 则为可行方案。

如飞行器的承载结构体系由结构功能信息和物性信息产生, 具体如下:



由结构的物性信息存储形成分层信息树，如图 9 所示。显然它表示了一组方案的集合。为了确定这个集合的可行方案子集只要周游图 9 信息树，并遵循以下预先由专家知识设定的试探消除规则分别校检每个方案的各层节点情况，必须全部通过的方案才属于可行方案子集，然后逐个子系统进行评价，淘汰并选优，具体步骤示意如下：

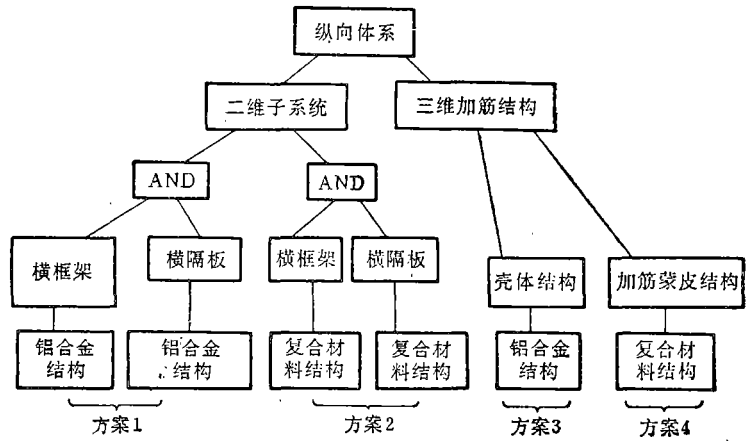


图 9 结构设计的分层信息树

```

IF (DIAMETER OF VEHICLE IS GREATER THAN 1000MM)
  AND (3D SYSTEM IS UNSTIFFENED SHELL STRUCTURE)
  THEN (ALTERNATIVE IS NOT FEASIBLE)
IF (3D SYSTEM IS STIFFENED SKIN STRUCTURE)
  AND (2D SYSTEM IS DIAPHRAGM)
  THEN (ALTERNATIVE IS NOT FEASIBLE)
.....

```

六、结 语

工程结构设计涉及多种综合知识，内容广泛。人类长期的设计与实践经验亦绝非少数人所能全面掌握者。随计算机科学与人工智能技术的发展，这个问题当今就可望通过专家系统得以部分解决，以便为高质量的设计提供科学依据。

过去，我国在结构有限元分析与应用问题上起步晚了约 15 年，在结构 CAD 的起步时间上，我国又晚了近 10 年。因此，我们必须在 CAD 的重要组成部分专家系统方面抓紧时机，及早起步，以期在不久的将来，赶上目前尚不太大的差距（约 5 年）。我们的工作仅仅是起步，对专业更知之甚少，但由于问题的重要性，故提出一些模型设想供大家讨论，只希望能由此引起工程界同行更多的兴趣与研究。

参 考 文 献

- [1] 林少培、黄金枝, 工程结构设计的专家系统, 第二届全国计算力学会议, 1986年8月, 上海。
- [2] 管纪文、张成奇, 专家系统中的不精确推理概述, 计算机科学, 1986年第3期37~43页。
- [3] 林少培, 工程设计分析集成系统的研制, 第一次全国结构计算应用软件学术会议, 1984年, 杭州。
- [4] Hayes-Roth, F., The Knowledge-Based Expert Systems, Computer, Vol.17 No.9, (1984) pp 11~28.
- [5] Sunder, S. S., Knowledge-Based Expert Systems for Offshore Engineering, Proc. of 4-th International Symposium on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Feb. (1985), Dallas, Texas, U. S. A. pp.593~600.
- [6] Yao, J. T. P. et al, An Expert System for Evaluation of Structural Durability, Proc. of the 5-th International Symposium on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, April (1986), Tokyo. Vol.1, pp.11~16.
- [7] Hayes-Roth, F. et al, Building Expert System, Addison-Wesley, (1983).
- [8] Fenves S. J., Expert Systems, CE Potential, Civil Engineering, ASCE, Oct. (1984), pp.44~47.
- [9] Davis, R., Buchanan, B. and Shortliffe, E., Production Rules as a Representation for a Knowledge-Based Consultation Program, Artificial Intelligence, 8, North Holland Pub. Co., (1977).
- [10] F. Naeim, R. M. et al, Potential Applications of Artificial Intelligence in Structural Engineering, Proc. of 2-nd International Conference on Computing in Civil Engineering, June (1985), Hangzhou, China, pp 146~156.
- [11] Wilson, J. L. Fang, H. Y. and Mikroudis, G. K., A Knowledge-Based Expert System Approach for Corrosion Problems in Offshore Structures, Proceedings of 2-nd Shanghai Symposium on Marine Geotechnology and Nearshore/Offshore Structures, Oct. (1985), Shanghai, China.
- [12] Sriram, D., Maher, M. L., and Fenves, S. J., Knowledge-Based Expert System in Structural Design, Computer and Structures, Vol. 20, No.1-3, (1985) pp 1~9.
- [13] Maher, M. L. and Fenves, S. J., HI-RISE, An Expert System for the Preliminary Design of High Rise Buildings, Knowledge Engineering in Computer Aided Design, North-Holland, (1985) pp.125~140.
- [14] 马裕, CAD在美国宇航及航空工程中的发展与应用. 中国力学学会计算力学委员会CAD技术交流会, 1985年, 长沙。

**KNOWLEDGE ENGINEERING AND EXPERT SYSTEMS IN
STRUCTURAL ENGINEERING**

Lin Shaopei Huang Jinzi
(Shanghai Jiao Tong University)

ABSTRACT

This paper presents the general principles of knowledge engineering that have led the current emphasis on rule-based expert systems and the corresponding fields of knowledge base and inference machine. Software systems that embody knowledge and apply it skillfully seem capable of equaling or surpassing the performance of individual human expert. It provides a prospective influences in the concepts and methodologies for engineering structure and promises to make knowledge a valuable industrial commodity.

Sample-models of inspection, classification and design for aeronautic structures are given for illustrating the technology.