

# 定向凝固铸造过程质量控制自学习专家系统

张宏伟<sup>1</sup>, 章 华<sup>2</sup>

(1. 北京航空材料研究院先进高温结构材料国防科技重点实验室, 北京 100095; 2. 北京航空航天大学, 北京 100083)

**摘要:**为了提高某航空材料定向凝固铸造过程工艺参数给定准确度和缺陷诊断能力,提出了一种根据生产数据、产品缺陷诊断结果和有限元数值模拟数据进行自学习的铸造过程质量控制专家系统,使得系统在铸造过程中能不断对过去的经验进行学习,并且解决了在规则库规则不完整和信息不完全的情况下进行推理的问题。试验结果表明,该系统能很好的应对生产过程的动态变化,提高了缺陷诊断能力,减少了产品次品率。

**关键词:**专家系统;学习系统;定向凝固;质量控制

**中图分类号:** TP18; TG247 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8365(2007)09-1243-04

## Adaptive-learning Expert System for Quality Control in the Process of Directional Solidification

ZHANG Hong-wei<sup>1</sup>, ZHANG Hua<sup>2</sup>

(1. National Key Laboratory of Advanced High Temperature Structural Materials, Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China; 2. Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

**Abstract:** To improve accuracy of technological parameters and defect diagnosis ability for an aeronautical material during the process of directional solidification, an adaptive-learning expert system for the quality control is proposed utilizing the production data, diagnostic results of defects and numerical simulation data using finite element technology. The system can not only constantly learn from experience but also skillfully reason when the knowledge and rule information are incomplete. Experimental results show that this system can successfully meet the dynamic condition in production, improve the defect analyzing ability and decrease rejection ratio.

**Key words:** Expert system; Learning system; Directional solidification; Quality control

定向凝固铸造是航空复杂构件精确成形的关键工艺,它是一个复杂的物理化学变化过程。以前从工艺设计到生产操作完全依靠人的经验进行,由于人的知识及操作熟练程度差异,导致废品率居高不下。对于生产过程中的许多问题必须很大程度地依赖行业专家的专业知识、经验和技能,所以专家系统在铸造领域中的广泛应用<sup>[1~4]</sup>,在一定程度上解决了以上问题。

目前,铸造领域专家系统功能比较单一,只针对某一个具体环节的独立应用,不具有自学习能力或自学习能力较弱<sup>[5]</sup>。例如,缺陷分析专家系统仅针对缺陷进行分析,工艺参数专家系统只具有工艺设计功能,合金铸件的化学成分选择只负责材料选择等。然而,整个铸造过程的各个工序之间是相互影响的,例如铸造工艺参数的准确与否直接影响铸件的性能及缺陷。

本文依据工艺参数与铸件缺陷的关系,建立具有一定自学习功能的铸件质量控制专家系统,集成工艺参数给定模块与铸件缺陷分析模块,铸件缺陷分析的结果反馈给工艺参数给定模块进行再学习,进一步对工艺参数优化,以控制铸件质量及降低铸件次品率。

### 1 自学习专家系统总体结构

本文提出的自学习专家系统只针对定向凝固过程的工艺参数给定与缺陷诊断2个重要工序进行联合设计。自学习专家系统总体结构如图1所示。知识库由工艺参数规则库和缺陷分析规则库组成;数据库用来存放推理全过程的输入事实、中间结果以及结论,生产过程的重要数据也存放在数据库中,例如实际工艺参数值;推理机是专家系统的核心。

系统功能及执行过程如下所述。

(1) 工艺参数专家系统根据原材料及所期望的铸件与其性能给出工艺参数。

(2) 若知识库中含有该相关知识,由推理机自动

收稿日期:2006-12-03; 修订日期:2007-07-02

作者简介:张宏伟(1971-),湖南株洲人,工程师,硕士生,研究方向:铸造高温合金。

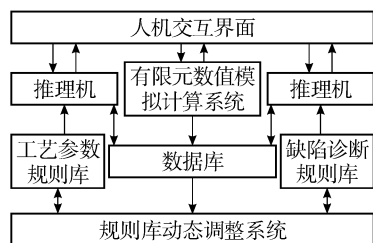


图1 自学习专家系统总体结构图

Fig. 1 General construction chart of an daptive-learning expert system

给出工艺参数。

(3) 若知识库中没有相关知识,即输入的是一种新材料或者需要得到一种新的铸件,则由有限元系统给出参考工艺参数。

(4) 在生产结束以后,由产品检验人员运用缺陷诊断系统对铸件进行缺陷分析,并把诊断结果存入数据库。

(5) 规则库动态调整系统根据事实、生产数据、有限元数据和产品诊断结果,来调整规则库中的内容。

## 2 知识库设计

知识库是专家系统中存放的以一定形式表示的专家的知识 and 经验的集合。基于知识的系统能否正常运行、结果是否正确有效,很大程度上取决于知识库是否正确有效。

### 2.1 工艺参数知识库设计

热工艺参数模块的主要功能是,用户输入原材料类型和期望铸件的性能,由专家系统推理出适合该工艺的关键参数。所以,工艺参数知识库由铸件信息树、原材料信息树组成,如图2、3所示。

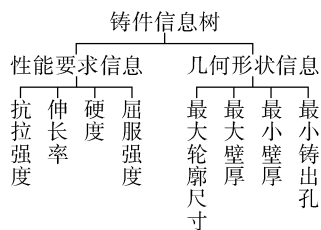


图2 铸件信息树

Fig. 2 Information tree of casting

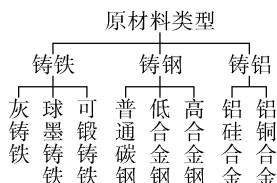


图3 原材料信息树

Fig. 3 Information tree of raw materials

### 2.2 缺陷诊断知识库设计

缺陷诊断模块的主要功能是,根据铸件产品的质量来确定缺陷类型,分析缺陷产生的原因,给出防止缺

陷产生的方法。所以缺陷诊断专家系统主要由铸件缺陷树组成,如图4所示。

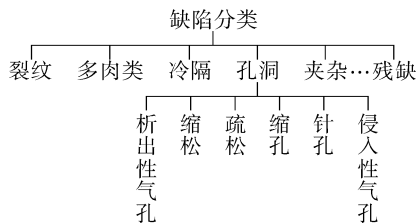


图4 铸件缺陷树

Fig. 4 Tree of Casting's defects

### 2.3 知识表达方法

知识表达的方式有很多种,如框架表示法、过程表示法、规则表示法、面向对象表示法等。由于系统中的知识类型大多属于和描述问题状态有关的各种叙述性知识,包括了各种状态描述和约束条件,所以采用了基于规则的产生式知识和表达方法,即:

$$R: IF P THEN C WITH CF(C, P) \quad (1)$$

式中 R ——规则号;

P ——规则的前提条件;

C ——为条件引出的结论;

CF ——为规则的置信度因子。

置信度因子表示证据 P 对 C 的支持程度,取值范围为[-1, 1]。当取值为1时,表示证据 P 对 C 完全肯定,当取值为-1时,表示证据 P 对 C 完全否定,当取值为0时,则表示前提条件与结论无关。采用这种确定性理论,可以解决数据不确定、不精确、不完备及规则不精确等不确定性问题,从而使专家系统具有实用性<sup>[6]</sup>。

例如,工艺参数推理规则可表示为:

IF 铸件的抗拉强度要求在 150 ~ 200 MPa 之间

AND 铸件要求的硬度不低于 150 HB

AND 对伸长率、屈服强度无要求

AND 原材料是 高合金钢

THEN 工艺参数为 浇注温度 1 340

AND 抽拉速度 15 mm/s

置信度 0.95。

缺陷诊断规则可以表示为:

IF 缺陷为孔洞类型 AND

形状为不规则的封闭或敞露的孔洞 AND

孔壁粗糙并带有枝状晶 AND

产生在热节和最后凝固的部位 AND

是大且集中的孔洞

THEN 该缺陷是缩孔

置信度 0.98。

IF 缺陷为缩孔

THEN 缺陷是由于抽拉速度过慢造成的,应适当提高抽拉速度  
置信度 0.8。

#### 2.4 知识不确定性处理

知识的不确定性的处理是任何一个专家系统所不可缺少的,目前主要有两类处理方法:一类是数值计算法,另一类是非数值法。在系统中采用数值计算法,用确定性理论来解决知识的不确定性问题。

通常每个专家对同一规则都有一个置信度值 CF,如果有 N 个专家对同一条规则存在 n 个置信度,则将这 n 个 CF 进行排序,有:  $CF_1 < CF_2 < \dots < CF_n$ 。在这里,  $CF_1$  受  $CF_2$  的正影响,又同时受  $CF_3$  的正影响,以此类推,其影响值可按下式计算:

$$S = \begin{cases} d/2 & (d \geq 0.5) \\ (1-d)/2 & (d < 0.5) \end{cases} \quad (2)$$

其中 d 是相邻近相互影响的 CF 的差的绝对值,一个 CF 所受的总的影响值  $S_{\text{总}}$ ,由它所受到的正影响  $S_+$  减去负影响  $S_-$ ,即:  $S_{\text{总}} = S_+ - S_-$ 。这样修正后的 CF 为原来的 CF 与  $S_{\text{总}}$  的和,即:

$$CF' = CF + S_{\text{总}} \quad (3)$$

综合考虑各置信度  $CF'$ ,可得到一组协调后的置信度值  $CF'$ 。最后利用这组协调后的置信度值,则可求出规则的最终的置信度 CF,即:

$$CF = \left( \sum_{i=1}^n CF_i \right) / N \quad (4)$$

这样得到的置信度值就综合考虑了各专家的意见,使推理结论更能接近实际,更具有接近人类思维的特点。

#### 3 推理机

推理机的任务是通过选择和使用知识库的知识,运用适当的推理控制策略进行推理,实现对实际问题的求解。推理控制策略是推理机设计的关键部分。常用的推理策略有:正向推理、反向推理、正向与反向推理相结合的混合推理<sup>[6]</sup>。

##### 3.1 工艺参数推理机

工艺参数推理机采用的是正向推理机构,即先将一批事实(期望铸件信息树和原材料信息树)存放到数据库中,推理机把这些事实与规则的前提匹配,运用匹配成功的规则得到结论,把得到的结论作为新的事实存放到数据库中,用更新过的数据库所有事实再与规则的前提匹配,直到得出所需要的结论。

##### 3.2 缺陷诊断推理机

缺陷诊断推理机采用的推理控制策略是正向和反向推理相结合的混合推理方式,这种推理方法结合了正向推理与反向推理的各自优点,其基本思想是先通

过正向推理选择初始目标,然后通过反向推理求解该目标。它既可避免目标驱动中初始目标选择的盲目性,又可克服数据驱动中初始推理的盲目性。这种推理控制策略非常适合于铸件缺陷分析系统那样的求解空间较大的专家系统。

由于系统中各规则的结论部分都附有设定的置信度域值,因此当推理得出的结论的置信度不小于系统设置的域值时,则结论成立,结束推理;否则,系统将另设缺陷属性为推理目标,重复上述过程,直到获得最终的判断结果。在缺陷属性推理出来后,即可根据用户的要求对该缺陷进行分析,得出该缺陷的产生原因和防止措施<sup>[7]</sup>。

#### 3.3 有限元数值模拟计算系统

有限元数值模拟计算模块的输入是铸件信息和原材料信息,输出是铸造工艺参数数值。在工艺参数模块进行推理时,若推理机无法找到与事实相匹配的规则时,系统自动把推理交给有限元数值模拟计算系统,通过有限元数值模拟计算得到一个理论上的工艺参数和参数的变化可能会导致的缺陷。然后,把输入事实和得到的结论等信息传递给规则动态调整系统。

#### 4 规则动态调整系统

传统专家系统的知识库是静态的,或者需要人去不断地编辑知识库,导致专家系统自学习能力很差或者不具备自学习能力。

##### 4.1 知识添加

知识添加主要是在规则库不完善的情况下,首先由辅助模块进行推理,然后再把辅助模块的推理结果反馈给主模块用于添加新的规则。

##### 4.2 知识修正

知识修正主要是对诊断知识的可信度因子 CF 进行调整。CF 是一个统计量,所以调整比较复杂。但是可以利用一种近似的简化方法进行调整。

知识修正的方法如下:设某项知识的 CF 的初始值为 1,经过 n-1 次起用后可信度为  $CF(n-1)$ ,那么第 n 次起用后的可信度为:

$$CF(n) = [CF(n-1) + (n)]/2 \quad (5)$$

其中, (n) 为描述知识通用情况的参数。当第 n 次起用成功,则 (n) = 1;反之失败时, (n) = 0。由此可以对 CF 进行调整。

规则库动态调整系统工作流程如图 5 所示,其功能如下所述。

(1) 有限元数值模拟计算结束以后,该系统自动从数据库获取输入事实和计算结果,由添加操作模块生成相应的工艺参数规则和缺陷诊断规则。

(2) 在产品诊断结束以后,系统自动从数据库获

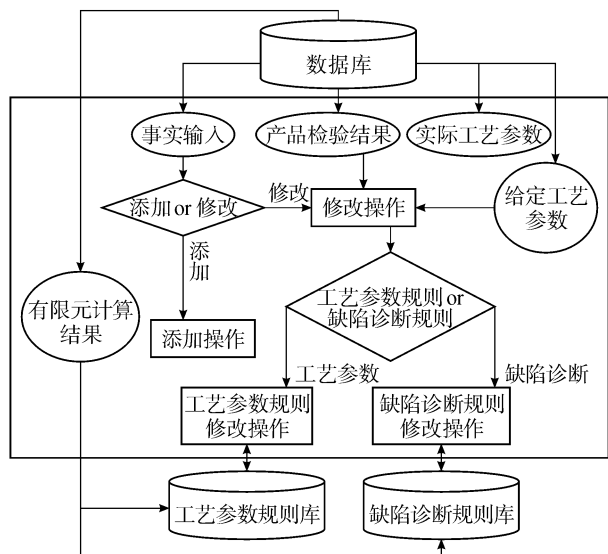


图5 规则库动态调整系统工作流程图

Fig. 5 Flow chart of dynamic regulating system of rules lib  
取产品诊断信息,以及工艺参数推理所获得的工艺参数,由这两类数据共同确定具体需要修改的规则。

(3) 若实际工艺参数偏离给定工艺参数,且没有出现预测的缺陷,则相应修改缺陷规则库。

(4) 若实际工艺参数与给定工艺参数符合要求,但铸件产品存在缺陷,则按照缺陷诊断结果相应修改工艺参数规则。

(5) 经过系统的自动调整,系统知识表达越来越准确,知识越来越丰富,实现了专家系统的自学习功能。

## 5 试验结果

本文采用 Clips 作为专家系统开发工具、Visual C++ 作为界面开发工具、SQL Server 作为数据库进行系统联合开发工具。作者成功地实现了具有一定自学习

功能的铸造过程专家系统。

试验表明其提高了工艺参数给定准确率,缺陷诊断准确率,尤其解决了知识库不完整的情况下的推理,运行情况良好。

## 6 结论

本文给出了一种应用于铸造领域的自学习专家系统的框架及实现方法,介绍了工艺参数专家系统、缺陷分析专家系统与有限元数值模拟计算系统的集成方法、推理方法,以及系统的自学习方法。说明了这种自学习专家系统,不仅能够从过去的经验中进行学习,并且在解决规则库规则不完整和信息不完全的情况下的系统的推理问题中具有突出优势,提高了专家系统的性能。

## 参考文献

- [1] 柳百成,荆涛,童本行. 铸造工程的模拟仿真与质量控制[M]. 北京:机械工业出版社,2001.
- [2] 刘强,蒋玉明,阳屹. 铸造工程专家系统技术的研究现状及进展[J]. 铸造技术,2002,23(2):77-80.
- [3] 南海,修吉平. 神经网络与专家系统在铸造中的应用[J]. 现代铸铁,1998,(4):42-43.
- [4] Roshan H Md., Sudesh K. Expert System for Analysis of Casting Defects: Cause Module[J], AFS Transactions, 1989,(97):601-606.
- [5] 李金厚,张绍德. 一类分段自学习工艺曲线专家系统的分析与设计[J]. 自动化与仪表,2001,16(1):30-33.
- [6] 程伟良. 广义专家系统[M]. 北京:北京理工大学出版社,2005.
- [7] 金传伟. 航空铝镁铸件缺陷分析专家系统的设计与实现[J]. 铸造,2000,149(18):488.

# 铸造新教材邮购

由中国铸造协会组织、中国水利机电出版社出版,铸造专业系列教材:

铸造工艺学(李魁盛、侯福生主编,2006年版)邮购价:73元

特种铸造(姜不居主编,2005年12月版)邮购价:48元

造型材料(黄天佑主编,2006年版)邮购价:46元

灰铸铁球墨铸铁及其熔炼(吴德海、胡家骢、钱立主编,2006年版)邮购价:69元

铸钢及其熔炼(李传斌主编,2006年版)邮购价:48元

铸造非铁合金及其熔炼(曾大本主编,2006年版)邮购价:48元

铸造设备(吴俊郊主编,2007年版)邮购价:(约)48元

地址:710048 西安理工大学 608 信箱 铸造技术杂志社

电话/传真:029-82312421,029-82312292