

文章编号: 1001-0920(2004)10-1109-04

基于两级 CBR 的钢铁企业动态调度系统研究

常春光^{1,2}, 汪定伟¹, 胡琨元¹, 郑秉霖¹, 李慧莹¹

(1. 东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110004; 2 沈阳工业大学 管理学院, 辽宁 沈阳 110023)

摘要: 提出了具有较高稳定性的两级案例推理方法, 研究如何采用框架结构表达钢铁生产动态调度的案例 引入决策树的思想实现案例聚类, 运用最邻近法实现案例检索 借鉴面向对象的思想调整案例, 采用模糊集理论实现案例评价, 并探讨了案例维护的基本方式 开发了原型系统, 运行结果在速度、有效性和稳定性方面均符合现场基本要求

关键词: 案例推理; 动态调度; 检索; 决策树; 模糊集理论

中图分类号: TP13 **文献标识码:** A

Research on two stage case-based reasoning for the dynamic scheduling system of iron and steel works

CHANG Chun-guang^{1,2}, WANG Ding-wei¹, HU Kun-yuan¹, ZHENG Bing-lin¹, LI Hui-ying¹

(1. School of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China; 2 School of Management, Shenyang University of Technology, Shenyang 110023, China Correspondent: CHANG Chun-guang, E-mail: ccg777@sohu.com)

Abstract: The two-stage case-based reasoning (CBR) is proposed to realize stability of the dynamic real-time scheduling system of iron and steelworks. The frame structure presentation is used to describe complex scheduling problems in iron and steel production. By introducing decision tree idea to cluster cases, the nearest neighbor (NN) algorithm is used to retrieve case. The techniques such as adopting OO idea to adapt case, evaluating cases by the fuzzy theory, and the primary method of case maintaining are discussed. The computation experiment shows that the developed prototype system can satisfy the requirement of practical production on velocity, validity and stability.

Key words: case-based reasoning (CBR); dynamic scheduling; retrieving; decision tree; fuzzy theory

1 引言

基于案例推理 (CBR) 由 Roger 最早提出, 并由 Kolodner 首先实现^[1]. 人工智能中推理方法较多, 最实用的是规则推理和案例推理. 规则推理仅是对人类抽象思维的简单模拟, 而专家在决策中需要使用大量的形象思维. 问题的解决不是单纯依靠规则就能实现的, 还需要专家的经验^[2]. 与传统的基于模型的方法相比, CBR 不需要显式表达的领域模型, 适合解决不良结构问题^[3], 也能克服基于规则推理

的知识获取瓶颈问题. CBR 反映了专家思维的过程, 弥补了传统推理方式的不足. 该方法通过调整相关问题成功的解来解决新问题, 大大加速了推理速度, 理论上更适合动态调度的实时性要求.

目前, 国内外学者关于 CBR 的研究已有大量文献报道, 但针对 CBR 在钢铁生产动态调度领域的研究却非常少见. 本文结合某钢厂的实际应用背景, 研究两级 CBR 技术的实现.

收稿日期: 2003-09-11; 修回日期: 2003-12-05

基金项目: 国家自然科学基金项目 (70171056, 60084003); 国家 863/CMS 项目 (2002AA 412010, 2002AA 414610).

作者简介: 常春光 (1973—), 男, 辽宁辽阳人, 博士生, 从事生产计划与调度、智能优化算法等研究; 汪定伟 (1948—), 男, 江西彭泽人, 教授, 博士生导师, 从事生产计划与调度、建模与决策等研究.

2 基于两级 CBR 技术的动态调度系统框架

考虑钢铁生产动态调度系统实时性和稳定性要求,与传统的一级 CBR 不同,本文提出的两级 CBR 技术系统框架如图 1 所示

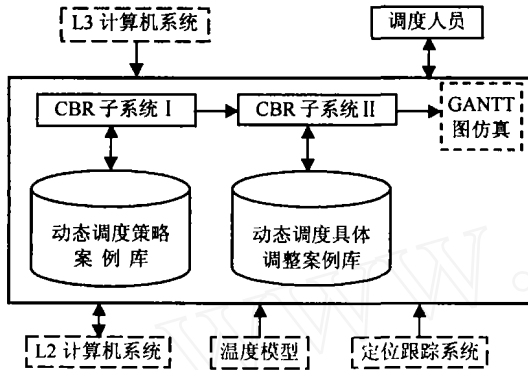


图 1 两级 CBR 技术的动态调度系统框架

在图 1 中, L3 为区域管理计算机,负责管理层信息处理,并最终将制订的生产计划输入系统。系统根据生产现场数据排出生产时刻表,并针对扰动事件和现场实绩数据制订动态调整方案。具体分为两个阶段:第 1 阶段的案例推理通过人机交互方式制订动态调整策略;第 2 阶段是在调度人员确定调整策略的基础上,制订出可行的具体调整方案,产生具体调整指令,并生成调整后的新时刻表。L2 为过程控制级的优化计算机,接收系统的具体调整指令,对生产现场进行控制。温度模型和定位跟踪系统是配合整个系统而分别开发的钢水温度测量和钢包定位跟踪的模型。Gantt 图仿真模块既可对动态调整后的结果实时仿真验证方案的可行性,又可通过对图形的直接调整得出新的可行方案。

3 案例推理实现的关键技术

3.1 案例表示

案例的描述具有很强的领域特征,但目前尚无一个好的标准^[4]。调度案例表示技术通常由问题特征、系统状态和问题解决方案三方面组成^[5]。在实践中,构造覆盖整个问题域的案例库是不现实的,但应尽可能多地覆盖问题空间。

框架系统表示法是语义网络一般化的结构,体现了面向对象的思想。本文采用基于框架系统表示法,将案例存入 SQL server 数据库,并划分为两级

——策略级和具体处理级

限于篇幅,这里仅以第 1 阶段的温度类动态调整策略案例库和第 2 级案例库中改向到另 CC 改钢策略类案例库为例加以说明。案例的框架表达和存储方式见表 1。有的案例槽比较简单,如表 1 中以 TO IC 开头的字段只有 3 个,TO IC 为槽名,TO ICT 和 TO ICM 均为槽值。有的槽比较复杂,如以 OCC 开头的字段共有 11 个(表略),不仅涉及槽侧面,还包括槽深和槽宽。可见框架是一种面向对象的灵活的知识表示方法,适合于解决复杂问题。

3.2 案例推理

CBR 包括案例匹配、调整、评价、维护等环节^[6],分别介绍如下。

3.2.1 案例匹配

案例的匹配策略主要有最近相邻策略、归纳推理策略、知识引导策略、模板检索策略等^[7]。考虑系统实现的实时性要求,本文综合使用归纳检索法和加权检索法两种匹配方法。

(1) 案例聚类

聚类可以加大案例匹配速度,比较成功的做法是借助于决策树将混在一起的案例加以分类^[8]。既然已经知道一些案例的归属,便可分成信息相关的若干类,而没有必要对所有的案例都采用决策树进行聚类。对于第 1 阶段中的案例,首先人为地划分出温度类、成分不符类、时间不符类、设备故障类以及其他类。如果案例不属于前 4 类,系统则将其归为其他类。当其他类案例逐渐增加时,系统将采用决策树方法将某些新类别从其他类中分离出去,这样可提高系统的案例匹配效率。

第 2 阶段的案例推理相对复杂一些,因此在方案实现上,对这一阶段的案例划分更为细致。最终归结为不改向、改向到另精炼 CC/IC 不改向、改向到另 CC、改向到 IC、轻装入/重装入、回炉、浇异常模子/异常包子/报废、增加路径几大类。对于不属于这几类的案例,归结为第 2 阶段案例的其他类。随着系统的不断使用和完善,其他类的案例有些会形成新的类别而分离出来。

(2) 案例相似度计算

设案例的对象集合 $C = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$, 各对象

表 1 第 1 阶段温度类案例字段注释对照

字段	CINO	TLK	TLC	TLH	ROCC	CS	CSP	CSF	CSR	CSRV	TO IC	TO ICT	TO ICM	HME
注释	案例号	Kp 前温低	Cas 前温低	回转台温低	可返送另 CC	可改钢	计划钢种	可改钢种	精炼满足	改用精炼设备	可返送 IC	IC 温满足	有 IC 模子	有异常模子

的属性集合 $a_i = \{f_{i1}, f_{i2}, \dots, f_{im}\}$, 则案例的相似度定义为

$$SM(n, o_k) = 1 - \frac{\sum w_i DIF(a_i^n, a_i^k)}{\sum w_i} \quad (1)$$

其中: a_i^n 为新案例中的第 i 个描述对象; a_i^k 为第 k 个旧案例中第 i 个描述对象; w_i 为权重, 代表描述对象 i 对决策问题的重要程度; $DIF(\bullet)$ 是一个函数或规则, 用于计算描述符的对应差异度, 其一般形式为

$$DIF(a_i^n, a_i^k) = d_{ij} DIF(f_{ij}^n, f_{ij}^k) / d_{ij} \quad (2)$$

式中 d_{ij} 为属性 f_{ij} 的权重因子. 对于 $DIF(f_{ij}^n, f_{ij}^k)$ 的计算, 考虑到研究对象的复杂性, 根据不同数据类型分别采用不同的计算方法. 对于 Boolean 型、real/int 型和 char 型数据, 分别有

$$DIF(f_{ij}^n, f_{ij}^k) = |f_{ij}^n - f_{ij}^k|, \quad (3)$$

$$DIF(f_{ij}^n, f_{ij}^k) = |f_{ij}^n - f_{ij}^k| / (|f_{ij}^n| + |f_{ij}^k|), \quad (4)$$

$$DIF(f_{ij}^n, f_{ij}^k) = (4 - \text{diff}(f_{ij}^n, f_{ij}^k)) / 4 \quad (5)$$

其中 $\text{diff}(\bullet)$ 应用 SQL server 2000 提供的函数来实现. 权重 w_i 和 d_{ij} 的确定, 邀请现场的调度专家和工作人员采用德尔菲法 (经过 5 轮, 评定值稳定后停止) 加以确定, 并通过运行历史数据不断修正与拟合而最终确定.

3.2.2 案例调整

匹配出的案例与实际问题的通常不完全相符^[9], 需要进一步调整和修正. 本系统采用基于人机交互的改写规则集策略, 实现了对案例的改写和调整. 较容易的问题通过系统自学习便可解决. 这得益于上述基于面向对象的知识表达方式, 因为通常这种调整方式是基于被定义的实体类. 具体实现是对涉及到的相关字段进行操作. 改写规则主要包括有关精炼炉升温设备使用、连铸机使用、判定另 CC 是否调整、连铸机连浇判断准则等规则 (表略). 本文借助于 SQL server 2000 数据库, 对字段数值及字段间的 constraint check 加入调度调整规则. 从匹配出调整方案中字符串包含的调整指令关键字 (如 ob, change, wait, ic, speed 等), 判断采用何种调整措施, 确定涉及到的字段, 对调整方案加以整理.

在特殊情况下, 案例还需要修补. 案例修补借助于状态与解涉及的子集包含状态的细加工, 采用人机交互的方式完成. 具体操作是对案例库中状态描述部分涉及到的字段值增加覆盖面, 必要时增删改案例库中的字段. 调整和修补使得案例推理系统随着时间的推移变得越来越完善. 当解决一个问题

失败时, 需要进一步引入新概念, 产生描述更具体的需求, 从而将其精炼为颗粒度更细的案例.

3.2.3 案例评价

本系统的评价主要以断浇次数增长比率 x_1 , 冗余等待时间满意度 x_2 , 质量不兼容增长比率 x_3 为主要变量进行案例评价, 得到的评价函数为

$$F(x_1, x_2, x_3) = \exp[(1 - x_1)^\alpha (1 - x_2)^\beta (1 - x_3)^\gamma - 1] \quad (6)$$

其中: x_1 为断浇增加数与相关浇次中包含的炉次总数之商; x_3 为质量不兼容增加量与相关浇次中包含的炉次总数之商. 其权重可由调度人员确定 (取 $\alpha = 2, \beta = 1, \gamma = 1$).

对于 x_2 的计算采用模糊评价. 现场对时间命中率度量允许一定的偏差范围. 借助于模糊数学理论^[10], 将不确定的作业时间作为模糊数进行处理, 这样更贴近现实, 符合人们的主观判断. 冗余等待时间模糊满意度定义为

$$\mu_{x_2}(x_{2i}) = \begin{cases} 1, & 0 \leq x_{2i} \leq a_i; \\ \frac{b_i - x_{2i}}{b_i - a_i}, & a_i < x_{2i} < b_i; \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (7)$$

其图解如图 2 所示. 本文希望在设备 i 上的等待时间尽量小于 a_i , 但在实际中允许超过其范围, 只是满意度随之降低.

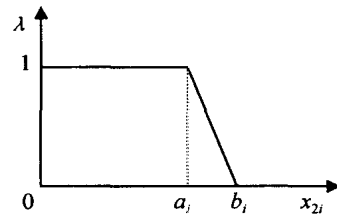


图 2 冗余等待时间隶属函数 μ_{x_2} 的图解

3.2.4 案例维护技术

案例的维护可分为事前维护和事后维护. 事前维护主要是采用冗余性消除技术, 防止相同的案例以及缺乏代表性和参考性的案例存入案例库. 当计算出当前问题状态与各案例的相似度时, 如果结果达到一定的阈值 (本文采用 0.95), 那么即使当前问题得到很好的解决, 评价价值很高, 也不能将新案例与原有案例同时存入案例库. 此时需要由系统使用者择一保存, 或自动将案例评价值高的案例加以保存.

事后维护是针对案例推理事后形成的问题, 分类加以处理. 事后维护是建立在一些基本案例推理运行状况趋势统计指标的基础上而实现的, 如案例

表 2 第 2 阶段改向到另 CC 改钢类问题运行结果

问题	ADJUST	C2NO	SM	ES	EC
1	speed cc1 next 10; change cc1 to cc3, wait 9; change steel to ck1	27	0.962 0	0.835 8	0.860 7
2	speed cc1 next 3; change cc3 to cc2; change steel to gg8	43	0.965 4	0.764 4	0.754 2
3	break on cc2; change cc2 to cc1; change steel to gr4	19	0.921 7	0.763 6	0.766 9
4	break on cc3; change cc3 to cc2; change steel to ju5	21	0.949 8	0.766 9	0.736 7
5	ob to cas2, wait 2; change cc2 to cc1, wait 14; change steel to ck1; ic to cc2	9	0.948 9	0.895 5	0.858 9
6	ob to lf, wait 17; change cc2 to cc1; change steel to ap1	14	0.941 6	0.896 1	0.956 5
7	ob to rh1; change cc3 to cc2; change steel to ju5	36	0.953 3	0.837 6	0.827 6
8	ob to rh1; change cc3 to cc2; change steel to gg8	29	0.953 7	0.942 4	0.992 6
9	ob to cas1; speed cc2 next 5; change cc2 to cc1; change steel to ck1	31	0.960 9	0.798 0	0.851 3
10	ob to cas2, wait 8; change cc1 to cc3; change steel to ck1; ic to cc1	46	0.943 2	0.901 4	0.914 9

采用率、案例一致性、案例评价值、案例调整的成功率等

1) 系统发现某些案例长时间内采用率极低甚至为 0, 将提示调度人员将其删除。经调度人员判断, 该案例状态在现场中已不存在(如工艺改变), 或该状态下有比它更典型的案例可以代替, 经审核后将其删去

2) 系统发现案例不一致, 即两个案例的状态相近而得出的调整结论相差甚远, 则将两个案例连同它们建立时所参照的案例一起提示给调度人员, 调度人员将审视产生不一致的原因并加以修正

3) 系统发现调整后案例评价值呈明显的降低趋势时, 将相关案例提示给调度人员加以修正, 以保持案例的典型性, 提高日后案例的评价值

4) 系统发现案例调整的成功率降低, 将该类问题提示给调度人员, 案例库中缺乏该类问题的典型案例可及时补充

4 系统运行结果

本系统采用 VC++ 语言编写, 应用 ODBC 技术, 以 SQL server 2000 为后台数据库, 在 Pentium 750/128 M 的兼容机上实现。在此仅对第 2 级改向到另 CC 改钢类案例推理加以介绍。其前提是第 1 级案例推理已确定问题归属改向到另 CC 改钢类问题, 这样可很快将问题的空间缩小到一个分支中。

为检验系统的有效性, 本着随机原则产生 10 个问题的状态值进行验证, 检测案例的评价结果。上述 10 个问题的运行结果列于表 2。其中 ADJUST, C2NO, SM, ES, EC 分别表示问题的状态、具体调整方案、匹配到的最相似案例、相似度、新解的评价

值、原有案例的评价值

为验证系统的有效性, 本文采用 ES 的均值来验证系统的有效性, 采用 ES 与 EC 之间的标准差系数来衡量系统的稳定性。则有

$$\sigma = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (ES_i - EC_i)^2 / n}{n} \right)^{1/2} = 0.035, \quad (8)$$

$$\overline{ES} = 0.84, \quad (9)$$

$$V_{\sigma} = (\sigma / \overline{ES}) \times 100\% = 4.17\%. \quad (10)$$

从 ES 均值可以看出, 系统的有效性较高, 评价值的标准差系数较小, 说明系统具有一定的稳定性, 案例库中对子问题的论域覆盖度基本达到了要求; 测试结果表明系统推理速度较快。可以认为, 两级 CBR 方法比较适合解决钢铁生产动态调度问题。

该方法在化工生产、铁路交通、电力、自来水、水库等其他行业的动态调度问题中具有广泛的应用前景。特别是待解决问题具有结构不良、实时性要求强、传统的优化模型难以解决等特性时, CBR 不失为一种较好的解决方法。

参考文献(References):

[1] Kolodner J L. Improving human decision making through case-based reasoning techniques[J]. *Artificial Intelligence Magazine*, 1991, 12(3): 52-59

[2] 赵卫东, 李旗号, 盛昭瀚. 基于案例推理的决策问题求解研究[J]. *管理科学学报*, 2000, 3(4): 29-36

(Zhao W D, Li Q H, Sheng Z H. Decision problem solution based on case-based reasoning[J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2000, 3(4): 29-36

(下转第 1116 页)

$$\frac{1}{Q \ 01} (e_1 - e_1) + e_3 + e_2).$$

所得系统输出跟踪误差仿真曲线如图1所示

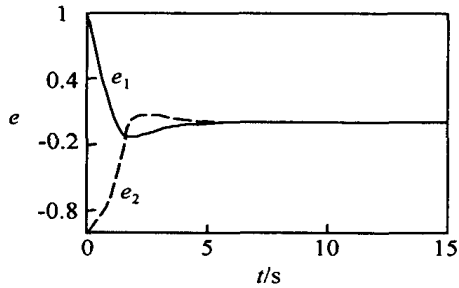


图1 系统输出跟踪误差仿真曲线

6 结 语

本文针对一类非线性不确定系统,设计出一种基于扩张观测器的输出跟踪控制器。由分析及仿真结果可以看出,该控制器的控制速度和精度都比较高。下一步工作是利用状态扩张及中心流形定理,对非线性非最小相位系统设计观测器,并进行输出跟踪控制。

参考文献(References):

- [1] Kokotovic P, A rca k M. Constructive nonlinear control: A historical perspective [J]. *A utom atica*, 2001, 37(5): 637-662
- [2] Slotine J E, Li W. *Applied N onlinear Control* [M].

Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1991.

- [3] Seungrohk O H, Hassan K K. Nonlinear output feedback tracking using high-gain observer and variable structure control [J]. *A utom atica*, 1997, 33(10): 1845-1856
- [4] Ahmad N A, Hassan K K. A separation principle for the stabilization of a class of nonlinear systems [J]. *IEEE Trans on A utom atic Control*, 1999, 44(9): 1672-1687.
- [5] Rabah W, Ldhaheer A, Hassan K K. Effect of unmodeled actuator dynamics on output feedback stabilization of nonlinear systems [J]. *A utom atica*, 2001, 37(9): 1323-1327.
- [6] 韩京清. 一类不确定对象的扩张状态观测器 [J]. *控制与决策*, 1995, 10(1): 85-88
(Han Jingqing. The "extend state observer" of a class of uncertain systems [J]. *Control and Decision*, 1995, 10(1): 85-88.)
- [7] 韩京清. 非线性系统的状态观测器 [J]. *控制与决策*, 1990, 6(1): 57-60
(Han Jingqing. State observer of nonlinear systems [J]. *Control and Decision*, 1990, 6(1): 57-60.)
- [8] Slotine J J E, Hedrick J K, Misawa E A. On sliding observers for nonlinear systems [J]. *J of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 1987, 109: 245-252

(上接第1112页)

- [3] Deng P S. Using case-based reasoning approach to the support of ill-structured decisions [J]. *European J of Operational Research*, 1996, 93: 511-521.
- [4] Smyth B, Keane M T, Cunningham P D. Hierarchical case-based reasoning integrating case-based and decompositional problem-solving techniques for plant-control software design [J]. *IEEE Trans on Knowledge and Data Engineering*, 2001, 13(5): 793-812
- [5] 徐晓臻, 高国安. 案例推理在多准则评价智能决策支持系统中的应用研究 [J]. *计算机集成制造系统*, 2001, 7(1): 16-18, 28
(Xu X Z, Gao G A. Research and implement of case-based reasoning in a multi-criteria evaluation DSS [J]. *CIMS*, 2001, 7(1): 16-18, 28)
- [6] Szelke E, Markus G. A learning reactive scheduler

using CBR [J]. *Computers in Industry*, 1997, 33: 31-46

- [7] Grupe F H, Urwiler R, Ramarapu N K, et al. The application of case based reasoning to the software development process [J]. *Information and Software Technology*, 1998, 40(9): 493-499
- [8] McKenzie D P, Forsyth R S. Classification by similarity: An overview of statistical methods of case-based reasoning [J]. *Computers in Human Behavior*, 1995, 11(2): 273-288
- [9] Angi V. How to solve complex problems with cases [J]. *Engineering Application Artificial Intelligence*, 1996, 9(4): 377-384
- [10] 方述诚, 汪定伟. *模糊数学与模糊优化* [M]. 北京: 科学出版社, 1997. 12-27.