

钢铁企业 APS 优化引擎的软件模型研究及应用*

施灿涛^{1,2}, 杨国俊^{1,2}, 李铁克^{1,2}

(1. 北京科技大学 经济管理学院, 北京 100083; 2. 钢铁生产制造执行系统技术教育部工程研究中心, 北京 100083)

摘要: 分析了钢铁企业 APS 理论 and 应用研究现状, 总结了钢铁生产计划体系中的优化问题和求解方法, 在此基础上, 提出了钢铁企业 APS 优化引擎的软件模型 ISMA。模型以通用性、独立性、可重用性和可扩展性为目标, 分为接口层、求解层、模型层和算法层, 阐述了各层的分工和协作方式。最后以钢轧一体化批量计划编制问题为例, 说明了模型的应用方法。

关键词: 钢铁生产; 高级计划与排程系统; 优化引擎; 软件模型

中图分类号: TP18 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2011)02-0606-03

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2011.02.056

Research and application of software model for steel enterprise APS optimization engine

SHI Can-tao^{1,2}, YANG Guo-jun^{1,2}, LI Tie-ke^{1,2}

(1. School of Economics & Management, University of Science & Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2 Engineering Research Center of MES Technology for Iron & Steel Production of Ministry of Education, Beijing 100083, China)

Abstract: By analyzing the research on APS theory and its application in iron and steel enterprises and summarizing the optimization problems and their solving solutions in steel production planning hierarchy, this paper proposed a software model for steel enterprise APS optimization engine, called ISMA. Aiming at having universality, independence, reusability, and extensibility, this model consisted of interface layer, solving layer, model layer, and algorithm layer, discussed the model's functions and cooperation mechanism. Finally by taking batch plan problem of integrated steel production as example, presented the application method of the ISMA model.

Key words: steel production; APS; optimization engine; software model

APS(高级计划与排程系统)以约束理论为基础,采用数学模型来描述生产计划与调度管理中的实际问题,用计算机程序实现模型算法求解或以人工智能仿真模拟方法寻求模型的优化可行解^[1]。APS 的出现被视为生产计划排程技术的飞跃,因此获得日益广泛的关注^[2,3]。

在钢铁生产领域,针对 APS 的研究成果正在不断丰富。庞新富等人^[4]研究了炼钢连铸动态智能调度系统的软件结构、功能结构和技术架构,提出了人机协调、多种方法组合、四维一体的综合集成方案;王秀英等人^[5]将智能优化设定控制策略应用于炼钢连铸生产调度过程中,研发了集调度计划编制、在线跟踪与调整、人机交互等功能为一体的调度软件;钟金宏等人^[6]结合钢铁制造企业的特点,提出了一种基于 STEP 标准的钢铁制造业信息化集成方案。可以看出,目前针对钢铁企业 APS 的研究集中在 APS 系统框架结构、APS 系统中某些具体优化问题及 APS 与其他系统的集成等方面,对于 APS 系统的核心内容——APS 优化引擎,现有的研究则显得非常薄弱。因此,本文从软件实现角度对钢铁企业 APS 优化引擎进行研究,提出一种面向钢铁企业 APS 优化引擎的通用软件模型 ISMA,该模型定位于 APS 系统底层并服务于 APS 业务模块,为

业务模块中的优化计算提供支持。

1 钢铁企业 APS 结构分析

在面向订单的钢铁企业生产排程中,需要综合考虑企业整体目标和约束条件来制定详细的生产进度计划,而 APS 最大的特点就是层次计划体系,它利用层次计划思想把计划任务分解成许多局部计划模块。从钢铁企业生产计划编制流程的角度出发,钢铁企业 APS 中的生产计划通常分为以下三个主要的业务模块:

a) 订单计划,即企业对接收到的客户订单进行处理,初步给出交货期承诺,并将客户订单转换为生产订单,为制定详细批量计划作准备。此阶段主要有以下三个问题:库存匹配,即对给定的客户订单集合如何与现有库存进行合理的匹配;能力匹配,即对没有库存与之匹配的订单集合,是否有足够的能力进行生产;板坯设计,即如何将需要生产的订单集合转换为板坯集合。对于这些问题可以归结为多目标 0-1 整数规划问题、带有颜色约束的多背包问题^[7]和装箱问题等。目前应用较多的解法有主要目标法、遗传算法、蚁群算法、模拟退火算法和启发式算法。

收稿日期: 2010-08-05; **修回日期:** 2010-09-15 **基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(70771008);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(FRF-AS-09-007B)

作者简介: 施灿涛(1979-),男,安徽临泉人,博士,主要研究方向为先进制造管理、生产计划与调度、电子商务、智能算法(shict@ustb.edu.cn);杨国俊(1986-),男,山东烟台人,硕士研究生,主要研究方向为钢铁生产计划与调度;李铁克(1958-),男,吉林长春人,教授,博导,主要研究方向为先进制造管理、生产计划与调度、电子商务、智能算法等。

b) 批量计划,指如何把待生产的多品种、小批量订单按照生产的工艺路线、技术条件、设备的作业要求组织成批量生产计划,是生产计划组织阶段的主要工作。炼钢、连铸、热轧每个工序分别有自己的加工单位和工艺约束。批量生产计划阶段的首要问题就是按照每个工序的工艺约束和目标制定炼钢、连铸和热轧批量计划。对于批量计划问题可以归结为车辆路径、多旅行商^[8]和收益旅行商^[9]等问题,可以分别采用蚁群算法、遗传算法和基于禁忌搜索的启发式方法等进行求解。

c) 生产调度,钢铁生产中的调度问题通常是多阶段、多机器、多种工艺约束限制的多目标组合优化问题,由于连铸调度和热轧调度有着完全不同的约束条件和优化目标,常将钢铁生产调度问题划分为热轧调度和炼钢—连铸调度两部分。热轧调度问题可以归结为多旅行商问题^[10],采用遗传算法、禁忌搜索算法、模拟退火算法等求解。炼钢—连铸调度问题多被描述为混合流水车间模型,常用启发式方法、线性规划方法等进行求解。

2 钢铁企业 APS 优化引擎的软件模型

从上述分析不难看出,钢铁企业 APS 中涉及众多的优化问题及相应的求解方法,而某些优化问题可归结为相同或相似的问题模型,同时某些求解算法在一定程度上也具有通用性,因此,可以考虑对优化引擎进行层次化分割,将问题、算法和求解分别独立出来。划分层次结构的主要思想是保持各层之间的独立性,使模型的结构更加清晰,在实际应用中更易于实现和维护。

基于这种思想,本文提出一种面向钢铁企业 APS 优化引擎的软件模型,该模型包含接口层(interface)、求解层(solving)、模型层(model)和算法层(algorithm)四个层次,称为 ISMA 模型。

2.1 模型结构

ISMA 模型内部不同层次之间的调用关系及其与外部领域需求和不同应用系统之间的应用联系如图 1 所示。

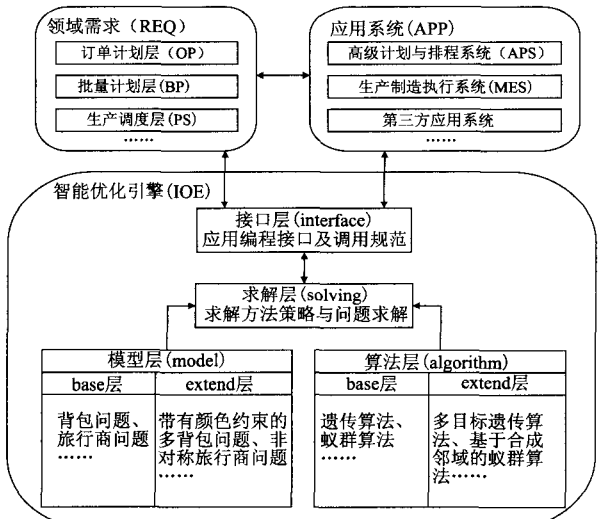


图1 ISMA模型结构

ISMA 模型面向钢铁企业 APS 的核心内容——APS 优化引擎,而优化引擎的任务就是要为不同应用系统中的各种领域需求提供优化计算功能。ISMA 模型将优化引擎定位为具有高度独立性的模块,可以为 APS、MES 或其他第三方应用系统所

调用,同时也可以支持订单计划、批量计划和生产调度等领域需求。

通过对钢铁生产管理中的优化问题及其求解算法的深入分析,ISMA 模型通过以下四个层次实现优化计算:

a) 模型层(model)。该层包括特定问题建模与模型表述,主要将生产中的实际问题进行模型转换,建立企业级的统一数据模型,供求解层调用。此层内部分为 base 层和 extend 层两个部分。其中,base 层由一些基本问题模型组成,如背包问题、旅行商问题等;extend 层则主要是对 base 层问题模型的扩展,如将背包问题扩展成带有颜色约束的多背包问题,将旅行商问题扩展为非对称旅行商问题等。

b) 算法层(algorithm)。该层主要包含各种优化算法和第三方优化包(如 iLog、MATLAB 等),供求解层调用。与模型层类似,算法层中同样包含 base 和 extend 层。Base 层中主要是一些基本算法,如遗传算法、蚁群算法等;extend 层则将 base 层的基本算法进行扩展或改进,衍生出一些新的算法,如多目标遗传算法、基于合成邻域的蚁群算法等。

c) 求解层(solving)。该层主要包括一些求解方法策略,利用这些方法和策略,可以对某些问题和模型进行匹配并求解,得到优化方案。求解层将模型层和算法层这两个核心内容关联起来,实现模型求解过程。

d) 接口层(interface)。该层主要包括应用编程接口及调用规范,是优化引擎与外界交互的接口,负责接收实时系统数据,调用求解层相应模块,并返回优化计算结果。

2.2 模型特点

通过对优化问题求解过程建立层次化结构,将常见优化问题模型和算法分别独立构建模型库和算法库,使得 ISMA 模型具有通用性、独立性、可重用性和可扩展性。

1) 通用性 ISMA 模型不针对具体优化问题或具体业务模块,而是对优化引擎进行高度抽象,将建模和求解过程分拆到不同层次,整体结构清晰,内部分工明确,无论 APS 优化引擎面向何种业务模块,都可以采用该模型,帮助优化引擎完成计算任务,具有较高的通用性。

2) 独立性 作为 APS 系统的核心模块,采用 ISMA 模型的 APS 优化引擎可以将钢铁企业生产管理中涉及的各种优化问题及其求解方法封装到独立的单元中,从而形成面向钢铁行业特征的问题库和算法库。这一特征也为优化引擎的可重用性和可扩展性提供了基础。

3) 可重用性 与 APS 的业务模块如订单计划模块、批量计划模块和生产调度模块相比,采用 ISMA 模型的 APS 优化引擎还具有可重用性。如前所述,ISMA 模型中的模型层将各种优化问题模型划分为 base 层和 extend 层,对于钢铁生产中的具体问题,如果可以归结为同样的基本模型,则可以在求解时调用同样的问题模型;同理,由于算法层将各种优化算法划分为 base 层和 extend 层,对于可采用相同算法求解的不同问题,也在求解时调用同一算法。因此,模型层和算法层的合理组织是实现可重用性的关键。

4) 可扩展性 随着钢铁企业生产流程的不断改进,生产组织方式的日益高效化,其生产管理中的优化问题也越来越多,并且越来越复杂。为适应动态变化的需求,要求 APS 优化引擎具有高度的可扩展性。作为 ISMA 模型的核心组成部分,模型库和算法层对问题模型和求解算法进行各自定义,而在求

解层才将两者联系起来,并最终在接口层实现面向外部系统的调用接口。因此,在需要对优化引擎进行扩展时,只需要根据新问题的特征在模型层进行模型匹配或添加新模型,同时在算法层进行算法匹配或添加新算法,然后在求解层和接口层添加相应的求解过程即可。

3 模型应用

本文以钢铁企业钢轧一体化批量计划编制问题为例,说明 ISMA 软件模型的应用。

3.1 问题分析^[1]

1) 问题背景 钢铁生产过程中,由于钢水经过连铸机后由液态变为固态、连铸机和热轧机的准备时间存在差异等,使得连铸和热轧工序之间存在固有的间歇性,而在制定钢轧一体化批量计划时,又必须将炼钢、连铸、热轧三大工序看做一个有机整体,系统地考虑炼钢、连铸和热轧阶段的所有工艺约束,所以如何编制在时间和排序上协调一致的批量计划便成了一个亟待解决的问题。

2) 建模思路 对于钢轧一体化批量计划编制问题,若将板坯看做被访问的客户,将一体化批量计划看做车辆,将轧制单元的轧制长度和主体材轧制长度看做一种广义的时间,则可将钢轧一体化批量计划归结为带有软时间窗口约束的车辆路径问题(vehicle routing problem with soft time window, VRPSTW)进行建模和求解。

3) 求解思路 对于 VRPSTW 模型,虽然近年来用遗传算法和蚁群算法等来求解,但本问题模型带有钢轧一体化批量计划的问题特征,且遗传算法和蚁群算法对参数值变化比较敏感,使其有一定的局限性,所以采用改进的离散粒子群算法进行求解。

3.2 模型实现

基于上述问题分析及 ISMA 模型介绍,钢铁企业钢轧一体化批量计划编制问题在 APS 优化引擎中的实现方法和步骤如下:

a) 建立模型。假定已经在模型层中的 base 层建立了车辆路径问题模型,即 Model. Base. VRP,需要在 extend 层中建立 VRPSTW 问题模型 Model. Extend. VRPSTW,该模型是 Model. Base. VRP 的扩展模型。Model. Extend. VRPSTW 模型继承 Model. Base. VRP 的全部特征,同时根据问题约束需要添加新的属性。VRPSTW 模型包括编码方式(code)、约束条件(constraint)等属性。

b) 构造算法。假定已经在算法层的 base 层中建立了基本二进制粒子群算法,即 Algorithm. Base. BPSO,在 extend 层进行扩展,建立改进的粒子群算法 Algorithm. Extend. IBPSO。IBPSO 算法包括初始化 initiate()、计算适应值 fitness()、更新粒子 update()等方法。

c) 求解问题。求解层中的计算过程可视为在获取接口数据的基础上将模型层和算法层中的属性和方法进行组合的过程。基于改进 PSO 求解钢轧一体化批量计划编制问题的主要计算过程可以用伪代码表示如下:

```
Solving. IBP. VRPSTW_BY_IBPSO(input)
```

```
//input 为接口数据,包括约束条件和界面参数等
```

```
{
```

```
//初始化算法参数、粒子群
```

```
Extend. IBPSO. Initiate( Model. Extend. VRPSTW. Code, input);
```

```
//计算粒子适应值
```

```
Extend. IBPSO. Fitness( Model. Extend. VRPSTW. Constraint, input);
```

```
//邻域搜索
```

```
NS( Model. Extend. VRPSTW. Code, input);
```

```
//更新粒子位置
```

```
Extend. IBPSO. Update( Model. Extend. VRPSTW. Code, input);
```

```
//修复不可行解
```

```
Fix( Model. Extend. VRPSTW. Code, input);
```

```
}
```

d) 创建接口。通过接口层接收钢轧一体化批量计划约束条件和界面参数,如中间包允许的最小(最大)重量、浇次内允许的最大模变次数、浇次内相邻元组钢级和交货期允许变化的最大值等,并将其传递至求解层进行求解。在求解完成后,通过接口层返回优化结果。接口层主要工作流程表示如下:

```
//接收约束条件和界面参数
```

```
input = Interface. IBP. Input();
```

```
//调用求解层求解
```

```
Solving. IBP. VRPSTW_BY_IBPSO(input);
```

```
//输出求解结果
```

```
Interface. IBP. Output();
```

```
}
```

4 结束语

本文提出了面向钢铁企业 APS 优化引擎的通用软件模型 ISMA,该模型将钢铁生产管理中常见的优化问题和求解算法分别划分到模型层和算法层,在求解层将模型和算法结合起来进行问题求解并通过接口层实现与外部系统的数据交互供其调用计算。通过钢轧一体化批量计划编制问题的 ISMA 模型应用说明了模型的可行性,同时也体现了模型具有通用性、独立性、可重用性和可扩展性。

参考文献:

- [1] 徐昊宁,杨东超,孙宗禹,等. MRP II 系统中 TOC 的研究及应用[J]. 工业工程,2000,3(1):43-46.
- [2] 谭辉,张洪伟,朱丽. APS 系统中基于改进的遗传算法的分布式排产研究[J]. 计算机应用研究,2005,22(6):76-79.
- [3] 齐二石,刘亮. 面向订单生产 APS 的关键流程分析及其应用方法研究[J]. 制造业自动化,2006,28(12):33-36.
- [4] 庞新富,俞胜平,刘炜,等. 炼钢连铸动态智能调度系统的研究与开发[J]. 控制工程,2005,12(6):553-556.
- [5] 王秀英,柴天佑,郑秉霖. 炼钢—连铸智能调度软件的开发及应用[J]. 计算机集成制造系统,2006,12(8):1220-1226.
- [6] 钟金宏,黄玲,李兴国,等. 钢铁制造业信息化集成方案与优化技术研究[J]. 计算机应用研究,2008,25(8):2305-2308.
- [7] FORREST J J H, KALAGNANAM J R, LADANYI L. A column-generation approach to the multiple knapsack problem with color constraints[J]. INFORMS Journal on Computing,2006,18(1):129-134.
- [8] TANG L X, LIU J Y, RONG A Y, et al. A multiple traveling salesman problem model for hot rolling scheduling in Shanghai Boshan iron and steel complex[J]. European Journal of Operational Research,2000,124(2):267-282.
- [9] LOPEZ L, CARTER M W M, GENDREAU M. Hot strip mill production scheduling problem: a tabu search approach[J]. European Journal of Operational Research,1998,106(2-3):317-335.
- [10] 唐立新. 热轧调度并行处理策略的多旅行商模型[J]. 东北大学学报,1999,20(2):148-150.
- [11] 张文学,李铁克. 基于粒子群和约束满足的钢轧一体化批量计划优化[J]. 计算机集成制造系统,2010,16(4):840-846.