

集装箱码头连续泊位-岸桥分配的仿真优化

郝杨杨,金永贺,杨斌

(上海海事大学物流研究中心,上海 201306)

摘要:泊位和岸桥是集装箱港口非常重要的资源,合理的分派与调度可以有效提高作业效率。集装箱码头连续泊位-岸桥分配的仿真优化研究中,大多以总在港时间最短或总成本最小为优化目标,往往忽略个体船舶的等待时间,没有兼顾服务公平性。在考虑偏好泊位的基础上,加入容忍度约束,以船舶在港总时间成本为目标,建立连续泊位-岸桥分配的非线性数学规划模型。设计求解模型的一种基于嵌套循环进化算法,内循环采用贪心算法生成相应的泊位调度计划;外循环采用遗传算法进一步生成岸桥调度计划。最后,以VC++开发仿真程序进行求解。实验结果表明,该算法能够在可接受的计算时间内获得稳定的满意解,新的泊位岸桥分配策略及算法可以较好的解决容忍度约束下的连续泊位-岸桥分配问题。

关键词:泊位-岸桥;偏好泊位;容忍度;贪心算法;遗传算法

中图分类号:TP391.9 **文献标识码:**B

Simulation and Optimization of Continuous Berth and Quay Crane Allocation in Container Terminal

HAO Yang-yang, JIN Yong-he, YANG Bin

(Logistics Research Center, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

ABSTRACT: A nonlinear mathematical programming model of the continuous berth-quay crane allocation is established, which considers the preference of the berth, adds the tolerance constraint and evaluating with the goal of the ships' total time costs in the port. A nested loop evolutionary algorithm is designed to solve the model, the inner loop is used to generate the corresponding berth scheduling scheme based on the greedy algorithm, and the outer loop is used to generate further quay scheduling by using genetic algorithms. Finally, a simulation program is developed to solve the problem of VC++. The results show that the algorithm can obtain a stable satisfactory solution within an acceptable computation time, the new berth-quay crane allocation strategy and algorithm can well solve the allocation problem under the restraint of tolerance.

KEYWORDS: Berth-quay crane; Preferences berth; Tolerance; Greedy algorithm; Genetic algorithm

1 引言

远洋运输是“21世纪海上丝绸之路”的重要组成部分,集装箱港口作为陆地与海洋的关键节点,必将会发挥更大的作用。泊位分配问题是提高港口运营效率的一个重要因素,与之衔接的岸桥分配问题则是快速装卸作业的双刃剑。泊位和岸桥是集装箱码头资源中难以扩充的关键资源,如何处理好有限的泊位、岸桥资源与船舶的需求矛盾,是码头作业

计划中的一个重要问题^[1]。实际作业中出于岸桥数量和岸桥成本限制,港口需要在最大限度的岸桥数量和有限泊位岸线下,进行集成资源优化配置来提高运行效率^[2,3]。

在泊位和岸桥的集成分配问题中,目标函数一般是船舶总在港时间最小或者是总成本最小。如Imai考虑到服务的优先级,建立了以最小化船舶在港时间为目标的优化模型,提出泊位分配问题的遗传算法求解过程^[4,5]。Frank Meisel等提出采用岸桥的装卸效率表示船舶的处理时间^[6]。梁承姬等提出船舶处理时间采用岸桥装卸的速度表示^[7]。乐美龙等研究了基于泊位偏好与服务优先级的泊位和岸桥分配问题^[8],将离散的泊位连续化可以最大限度地提高泊位利用率,增加港口吞吐量^[9,10]。Kim等构建MIP模型研究连续泊位分配问题,并用模拟退火算法和LINDO进行求解^[11]。韩

基金项目:国家自然科学基金资助项目(71301101);交通运输部建设科技项目(2015328810160);上海自然科学基金(15ZR1420200);教育部人文社科项目(15YJC630059)

收稿日期:2016-04-12 修回日期:2016-06-10

晓龙等研究了连续泊位和岸桥的协同分配问题,通过建立泊位分配混合整数规划模型和桥吊调度的混合整数规划模型^[12]。Monaca 等考虑船舶在港总时间建立了连续泊位的动态分配模型^[13]。Lee 等提出一种贪婪随机适应搜索方法求解连续泊位-岸桥分配问题^[14]。

以上研究主要从船舶的等待时间,成本最低等方面来研究泊位-岸桥分配问题,缺乏从公平性的角度考虑个体船舶等待装卸时间的容忍度。本文设计到港船舶等待装卸时间的容忍度约束,以船舶在港总时间成本为目标,建立连续泊位-岸桥分配的非线性数学规划模型。针对模型求解过程中的 NP-HARD 问题,设计了一种基于嵌套循环的进化算法。

2 连续泊位-岸桥分配系统概述

通常,船舶抵港后,码头调度员将根据相关信息和调度策略将泊位和岸桥分配给船舶。连续泊位-岸桥的优化分配是指通过分配适当的泊位、选择合适的靠泊顺序并配备合理的岸桥数量,使船舶在港时间较短,以提高船舶的利用率和客户的满意度,并降低码头的运营成本。

在集装箱码头的连续泊位-岸桥分配中,泊位分配是对各船舶在泊位的占用位置、占用时间和占用时长的安排;岸桥分配是对分配船舶岸桥数量、确定具体作业岸桥编号的管理。该问分配问题是一个相当复杂的 NP-HARD 问题,。在研究过程中,影响连续泊位-岸桥协分配的主要因素有以下四类:

1) 船舶相关信息

船舶长度、吃水深度、吨位和船期计划等影响泊位分配;船舶长度、集装箱装卸量等影响岸桥分配。

2) 岸边资源

连续泊位资源直接影响泊位的分配;岸桥的数量直接影响岸桥的分配。

3) 船舶的服务规则

船舶的服务规则就是指船舶抵达后进行靠泊作业的顺序,常见的服务规则有:先到先服务、有优先权的服务和公平性服务。

4) 其它因素

连续泊位-岸桥分配问题除了受以上所描述因素的影响,还将受到一些其它突发事件的影响,如船舶航期变化、天气、岸桥机械故障等不确定因素。

目前,连续泊位-岸桥分配问题的研究中,主要优化目标包括:船舶总在港时间最少、码头服务总成本最小以及泊位-岸桥的利用率最大等。

3 模型建立

3.1 相关概念和符号

1) N - 到港船舶集合, $N = [1, 2, \dots, n]$

2) L - 连续港口岸线的总长度

3) Q - 集装箱码头岸桥总数

4) M - 船舶的服务顺序

5) a_i - 船舶 i 的实际到港时间

6) W_i - 船舶 i 的等待靠泊时间

7) W_{c_i} - 船舶 i 等待岸桥的时间

8) l_i - 船舶 i 的长度

9) B_i - 船舶 i 的实际开始处理时间

10) d_i - 船舶 i 的期望离港时间

11) dp_{it} - 在时间段 t 船舶 i 的实际停泊位置

12) op_{it} - 在时间段 t 船舶 i 的最优偏好泊位

13) σ_i - 泊位偏离单位系数, $\sigma_i = \frac{\sqrt{s_{i2}^2 + s_{i1}^2}}{s_{i2}}$, s_{i1} 为偏好位置, s_{i2} 为实际位置;

14) S_i - 船舶 i 的实际靠泊位置与最优靠泊位置; $\forall i \in N$

15) T - 时间段集合, $T = \{1, 2, \dots, t\}$;

16) C - 可用岸桥集合, $C = \{1, 2, \dots, c\}$

17) H_{c_i} - 船舶 i 要处理的集装箱数, $\forall i \in N$

18) v_0 - 一台岸桥的工作效率, 以每个时段标准箱数量进行计算

19) Ds_i^{\min} - 能够同时分配给船舶 i 的最小岸桥数;

20) Ds_i^{\max} - 能够同时分配给船舶 i 的最大岸桥数;

21) ML_i - 船舶 i 等待的最大容忍度。

22) Mo_{ijk} : 在时间段 j , 如果岸桥 k 从其它泊位移动船舶 i 为其服务, 则取 $Mo_{ijk} = 1$, 否则取 0;

23) λ_{ijk} : 在时间段 j , 如果岸桥 k 为船舶 i 服务, 则取 $\lambda_{ijk} = 1$, 否则 $\lambda_{ijk} = 0$;

24) n_{it} : 在 t 时刻服务船舶 i 的岸桥数量;

25) ξ_{ij} : 如果船舶 i 完全位于船舶 j 的左侧, 则 $\xi_{ij} = 1$, 否则为 0;

26) ζ_{ij} : 如果船舶 i 完全位于船舶 j 的下方, 则 $\zeta_{ij} = 1$, 否则为 0;

3.2 泊位-岸桥集成分配模型

$$\text{Min } f_1 = \sum_{i \in N} Ds_i W_i + \sum_{i \in N} \sum_{t \in T} \sigma_i (dp_{it} - op_{it}) \quad (1)$$

$$\text{Min } f_2 = \frac{1}{N} \sum_{i \in N} \sum_{j \in T} \sum_{k \in C} Mo_{ijk} \quad (2)$$

s. t.

$$dp_i + l_i \leq L, \quad \forall i \in N \quad (3)$$

$$d_i - B_i \geq H_{c_i} / (v_0 * \sum_{i \in N} \sum_{t \in T} n_{it}) \quad (4)$$

$$S_i \geq dp_{it} - op_{it}, \quad \forall i, k \in N, \forall t \in T \quad (5)$$

$$S_i \geq op_{it} - dp_{it}, \quad \forall i, k \in N, \forall t \in T \quad (6)$$

$$\xi_{ij} + \xi_{ji} + \zeta_{ij} + \zeta_{ji} \geq 1, \quad \forall i, j \in N, i \neq j \quad (7)$$

$$\xi_{ij} + \xi_{ji} \leq 1, \quad \forall i, j \in N, i \neq j \quad (8)$$

$$\zeta_{ij} + \zeta_{ji} \leq 1, \quad \forall i, j \in N, i \neq j \quad (9)$$

$$Ds_i^{\min} \leq n_{it} \leq Ds_i^{\max}, \quad \forall i \in N \quad (10)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in T} \lambda_{ijk} \leq 1, \quad \forall k \in C \quad (11)$$

$$\sum_{k \in C} \sum_{i \in N} \lambda_{ijk} \leq c, \forall j \in T \quad (12)$$

$$W_i + Wc_i \leq Ml_i, \forall i \in N \quad (13)$$

$$Mo_{ijk}, \lambda_{ijk} \in \{0, 1\}, \forall i \in N, j \in T, k \in C \quad (14)$$

其中,式(1)(2)为目标函数,式(1)表示最小化船舶的在港总时间,式(2)表示最小化岸桥平均移动次数。约束(3)表示船舶到港后才能开始被服务。约束(4)表示船舶的装卸时间,它与岸桥的数量和岸桥的作业速度有关。约束(5)和(6)是对集装箱连续泊位偏好位置的定义。约束(7)~(9)确保船舶*i*和*j*在时空图中的位置不重叠,即船舶*i*和*j*在集装箱码头连续岸线上不能停泊在同一位置上。约束(10)给出了为每首船舶分配的岸桥数的范围。约束(11)确保每个时间段一台岸桥最多只为一首船舶服务。约束(12)确保每个时间分配给船舶*i*的岸桥数不能超过总的岸桥数。约束(13)限制每个船舶的等待时间小于其最大可接受的等待时间。约束(14)给出了因变量 Mo_{ijk}, λ_{ijk} 的取值。

4 算法

容忍度约束下连续泊位-岸桥集成分配问题主要由两个子问题组成,即泊位分配问题与岸桥分配问题。本文设计了一种基于嵌套循环的进化算法^[15],内循环为贪心算法,生成相应的泊位调度计划。外循环为遗传算法,在内循环结果的基础上生成相应的岸桥调度计划。

4.1 内循环:贪心算法

对于陆续抵港的船舶建立两个集合,分别命名为 Set A, Set B。Set A 代表陆续抵港的船舶集合,Set B 代表抵港后已分配泊位的船舶集合。每艘到港的船舶都有一个实际到港时间 a_i 和一个期望离港时间 d_i (其中 $0 \leq B_i < f_i < \infty$)以及数组集 $M[i]$ 用来存放船舶*i*的容忍度。

首先,把陆续到港的船舶加入到 Set A 集合中,然后根据贪心策略选择 Set A 中的船舶把它加入到 Set B 中去,本文的贪心策略就是指它在每一步都做出当时看起来最佳的选择,它总是做出局部最优的选择,寄希望这样的选择能导致全局最优解。

贪心算法步骤:

Step1:初始化各集合:Set A,存放到港待处理的船舶集合,其初始化大小就是到港船舶的总条数;Set B,初始化为空;转向 Step2。

Step2:判断 Set A 集合是否为空,若为空,程序结束;否则转向 Step3。

Step3:获取当前泊位的占用现状,以及 Set A 中船舶的偏好泊位、容忍度等参数,转向 Step4。

Step4:利用贪心策略从 Set A 中选择一条船舶,使得该船舶停靠后的目标函数值最小,转向 Step5。

Step 5:将停靠的船舶从 Set A 中删除,加入到 Set B 中,转向 Step2。

4.2 外循环:遗传算法

在外循环的算法中,首先通过遗传算法产生决策变量,然后运用岸桥启发式算法在每一代中产生从属变量。

1) 染色体编码

如图 1 所示,每个基因的位置表示船舶的 ID,相应的值表示在满足约束条件 10 的条件下随机产生的决策变量 n 。

Ship ID	1	2	3	4	5
n	2	5	3	3	4

图 1 染色体编码

2) 适应度函数

岸桥分配问题仍是一个最小化问题,因此它的目标函数值 $f_2(x)$ 转换为适应度函数 $F(x) = 1/(1 + \exp(f_2(x)/10, 000))$ 。

3) 选择策略

采用轮盘赌的选择策略。

4) 交叉操作

采用两点交叉法,其交叉后得到的子代满足约束条件(11)、(12)。

5) 换位变异

采用取代变异的方法,即随机的选择一个取代位置,并用当前个体中满足约束条件(11)、(12)的基因信息取代当前位置上的基因信息。

6) 终止条件判断

当达到设定值的最大迭代次数,算法终止并输出结果。

7) 岸桥迁移策略

首先,在获得船舶*i*的泊位位置 $(x_i, x_i + l_i)$ 和当前泊位调度计划中的时间窗 (y_i, c_i) 后,根据遗传算法获取分配给船舶*i*的岸桥数 n 。然后,检查相应泊位空间 $(x_i, x_i + l_i)$ 上空闲的岸桥数量,记为 C ,如果 $C > n$,选择合适的岸桥从左往右依次分配给船舶*i*;如果 $C < n$,则在满足没有交叉的前提下,从邻近位置移动岸桥到所需位置,直到满足所需的岸桥数量。

5 算例仿真与分析

本文考虑的连续泊位-岸桥分配问题为动态的、连续的,只要船舶条件满足靠泊的岸线长度,船舶便可沿连续岸线靠泊,多只船可以同时靠泊接受服务。本文仿真分析将基于如下合理假设:

1) 每条船必须被服务且被服务一次(不考虑移泊);

2) 处理时间取决于所在泊位、码头的岸桥数量,与船只的距离、集装箱运输以及其它因素等无关;

3) 泊位资源视为连续线性的,被划分为尽可能多且相等的微小停泊单元,多只船舶可以同时停靠;

4) 每条船舶设有同时作业的最大岸桥数和最小岸桥数,

当可用岸桥数量不小于最小岸桥数时才能开始作业,并且不能大于最大岸桥数;

5)分散的闲置岸桥不能横跨工作,岸桥只能在岸线固定的位置为靠泊的船进行装卸;

6)每条船都有一个最优停靠偏好位置,偏离偏好泊位会增加在港时长;

7)假定泊位计划在零时刻开始,船舶只有到港后才能进行靠泊作业。

8)船舶靠港作业过程中的靠泊时间和离泊时间对于不同船型差异不大,且相对整个在港时间很小,在此忽略不计。

仿真过程中,在不考虑水深影响的基础上,选取了岸线为1200米的连续泊位,吊桥总数为10,有20艘船舶陆续抵港,并以第一艘抵港船舶的抵港时间为基准0。采用VC++6.0编写仿真程序,实验采用的计算机环境为Intel(R)Core(TM)2 Duo CPU 2.13GHz,内存为4G。

本文仿真分析将从以下三个方面验证算法的有效性,对比分析如下图2所示。

1)综合考虑船舶偏好泊位、等待容忍度以及岸桥迁移策略对靠泊计划的影响。根据算例数据,经求解可得偏所有船舶总的等待时间 $t = 63$, 所有船舶总在港的时间成本 $f = 110.703$ 。

2)不考虑船舶偏好泊位、等待容忍度对靠泊计划的影响,只考虑岸桥迁移策略对船舶靠泊计划影响。根据算例数据,经求解可得所有船舶总的等待时间 $t = 92.25$, 所有船舶总在港的时间成本 $f = 116.456$ 。

3)不考虑船舶偏好泊位、等待容忍度对靠泊计划的影响,也不考虑岸桥迁移策略对船舶靠泊计划影响。根据算例数据,经求解可得所有船舶总的等待时间 $t = 92.25$, 所有船舶总在港的时间成本 $f = 160.055$ 。

如图2所示,在分析时若考虑船舶偏好泊位、等待容忍度和岸桥移动策略对靠泊计划的影响,船舶的等待时间、目标函数值都是最小的;反之,船舶的等待时间、目标函数值最大。由此反映了船舶的偏好泊位、等待容忍度以及岸桥迁移策略对靠泊过程中船舶的等待时间与在港总时间成本有较大的影响,验证了模型与算法的有效性。

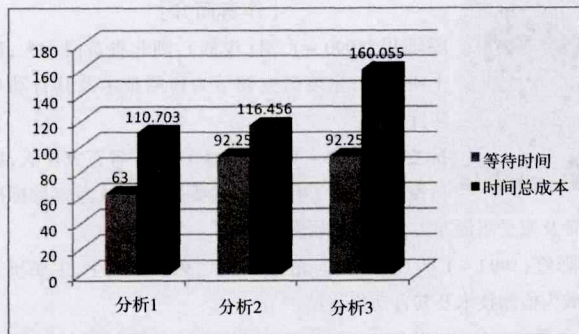


图2 对比分析图

综合考虑船舶偏好泊位、等待容忍度以及岸桥迁移策略对靠泊计划的影响,依据提出的模型与算法,以岸桥长度为 x 轴(单位:米),以时间为 y 轴(单位:小时),运用VC++编程,得出如图3所示的泊位-岸桥分配计划。

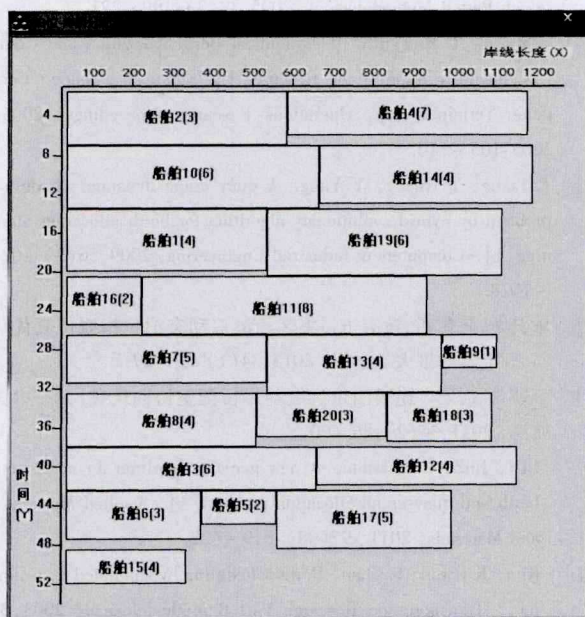


图3 泊位-岸桥分配计划

6 结论

在前人连续泊位、偏好泊位等研究的基础上,本文引入抵港船舶等待装卸时间的容忍度,以船舶在港总时间最小为目标,建立连续泊位-岸桥分配的非线性数学规划模型,并设计了一种基于嵌套循环的进化算法。与国内外同类研究相比,本文的创新之处主要体现考虑了船舶个体等待装卸时间的容忍度,并设计了两阶段嵌套循环算法求解泊位-岸桥分配的NP-HARD问题。最后,以VC++为仿真环境进行求解,实验结果显示,综合考虑船舶偏好泊位、等待容忍度和岸桥移动策略对靠泊计划的影响,可以获得更好的船舶靠泊计划。

此外,本文还存在一些不足,难以满足码头运营生产的实际需求,比如模型中目标函数的评价指标单一,缺乏随机性因素等。考虑码头作业过程的随机性,与后方堆场进行集成优化分配是下一步的研究方向。

参考文献:

- [1] 郑子龙,杨斌,胡志华. 偏好泊位约束下的集装箱港口离散泊位分配问题[J]. 水运工程, 2013, (12): 64-68.
- [2] V H Barros, T S Costa, A C M Oliveira. Model and heuristic for berth allocation in tidal bulk ports with stock level constraints[J]. Computers & Industrial Engineering, 2011, 60(4): 606-613.
- [3] 杜卫华,等. 岸桥移动约束的连续泊位和岸桥集成调度[J]. 上海海事大学学报, 2013, 34(4): 43-48.

- [4] A Imai, E Nishimura, Papadimitriou S. Berth allocation with service priority[J]. Transportation Research Part B Methodological, 2003,37(5):437-457.
- [5] A Imai, X Sun, E Nishimura. Berth allocation in a container port using a continuous location space approach[J]. Transportation Research Part B Methodological, 2005,39(3):199-221.
- [6] F Meisel, C Bierwirth. Integration of Berth Allocation and Crane Assignment to Improve the Resource Utilization at a Seaport Container Terminal[J]. Operations Research Proceedings, 2005, 2005:105-110.
- [7] C Liang, Y Huang, Y Yang. A quay crane dynamic scheduling problem by hybrid evolutionary algorithm for berth allocation planning[J]. Computers & Industrial Engineering, 2009,56(3):1021-1028.
- [8] 乐美龙,陈雷雷,黄有方. 集装箱港口动态泊位指派仿真优化[J]. 上海海事大学学报, 2013,34(1):23-27.
- [9] 李娜,靳志宏. 连续泊位调度与岸桥配置协同优化[J]. 中国航海, 2011,34(2):86-90.
- [10] LIN, JinZ, E Massami. A new genetic algorithm for continuous berth and quay crane allocation problem[J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 97(98):619-622.
- [11] Kim, K Hwan, K Chan. Berth scheduling by simulated annealing[J]. Transportation Research Part B Methodological, 2003,37(02):541-560.
- [12] 赵坤强,韩晓龙,梁承姬. 连续泊位下集装箱港口泊位与桥吊协同调度优化研究[J]. 武汉理工大学学报, 2011,(11):60-65.
- [13] M F Monaco, M Sammarra. The Berth Allocation Problem: A Strong Formulation Solved by a Lagrangean Approach[J]. Transportation Science, 2007,41(2):265-280.
- [14] D H Lee, J H Chen, J X Cao. The continuous Berth Allocation Problem A Greedy Randomized Adaptive Search Solution[J]. Transportation Research Part E Logistics & Transportation Review, 2010,46(6):1017-1029.
- [15] C Yang, X Wang, Z Li. An optimization approach for coupling problem of berth allocation and quay crane assignment in container terminal[J]. Computers & Industrial Engineering, 2012,63(1):243-253.

[作者简介]



杨杨(1984-),男(汉族),山西省忻州市人,讲师,主要研究领域为港口仿真优化。

金永贺(1989-),男(汉族),江苏省盐城市人,硕士研究生,主要研究领域为港口仿真优化。

杨斌(1975-),男(汉族),山东省青岛市人,教授,博士研究生导师,主要研究领域为港口仿真优化。

(上接第199页)

为铸球体进行均匀热处理和加强散热设计提供了参考信息。

2)与数理计算的结果相比较,数值仿真结果最大偏差仅为0.1124%,验证了本研究采用的仿真方案的正确性和可靠性。数值仿真通过直接求解质量、动量、能量等控制方程,对于求解一般模型和边界条件下的温度场问题,可以得到问题的数值解,克服理论计算不能得到解析解的限制和实验不可直接测量的问题,具有明显优势,数值仿真为解决传热等问题提供了新的思路。

参考文献:

- [1] 蔡跃波,等. 基于温度-应力试验机的大坝混凝土抗裂性综合评价[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2010,40(1):171-175.
- [2] 李启明,阎明印,汤赫男. 大型往复式压缩机气缸内温度场与热应力分析[J]. 机械工程师, 2016,(1):41-43.
- [3] 孙中仁,李长林,丁雪. 大型铸锻钢件的间歇水冷淬火[J]. 金属热处理, 2004,(6):62-64.
- [4] 郭可敬,张云鹏,梁冰利. 球铁磨球凝固过程温度场的数值模拟[J]. 计算机应用技术, 2014,34(4):375-377.
- [5] 李东辉,韩志凡,王芳. 基于ANSYS的耐磨铸球凝固过程温度场数值模拟[J]. 热加工工艺, 2010,39(21):45-47.
- [6] Zhao Wei Tao, Wu Jiu Hui, Chen Zhe. Analysis of non-Fourier heat conduction in a solid sphere under arbitrary surface tempera-

ture change[J]. Archive of Applied Mechanics, 2014,84(4):505-518.

- [7] A A Bhawe, K C Deshmukh, V S Kulkarni. An Inverse Mathematical Approach for Thermal Stresses in a Solid Sphere[J]. International Journal of Thermodynamics (IJOT), 2015, 18(3):206-211.
- [8] 胡峰,孙国基,卫军胡. 动态系统计算机仿真技术综述(1)—仿真模型[J]. 计算机仿真, 2000,17(1):1-3.
- [9] 杨世铭,陶文铨. 传热学(第四版)[M]. 北京:高等教育出版社, 2006.
- [10] 曾绍标,熊洪允,毛云英. 应用数学基础[M]. 天津:天津大学出版社, 2004.

[作者简介]



冯细见(1990-),男(汉族),湖北省黄冈市人,硕士研究生,主要研究领域为检测技术及其自动化装置。

孙立军(1974-),男(汉族),河北省石家庄人,副教授,硕士研究生导师,主要研究领域为流量标准装置及流量测量方法和技术的研究。

王彩虹(1992-),女(汉族),河北省保定人,硕士研究生,主要研究领域为检测技术及其自动化装置。

綦磊(1985-),男(汉族),山东省潍坊人,工程师,硕士,主要从事航天器结构健康监测及泄露测试方面预先研究。