

10-14-2020

Optimization of Shore Bridge Driver Scheduling Strategy Considering Influence of Illumination

Tiexin Wang

1. *Maritime College, Ningbo University, Ningbo 315211, China; ;*

Haihong Yu

1. *Maritime College, Ningbo University, Ningbo 315211, China; ;*

Danlan Xie

2. *Dalian Neusoft University of Information, Dalian 116023, China;*

Yibin Wang

1. *Maritime College, Ningbo University, Ningbo 315211, China; ;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Optimization of Shore Bridge Driver Scheduling Strategy Considering Influence of Illumination

Abstract

Abstract: The luminous environment has an important effect on the efficiency of quay crane drivers' work. Aiming at the quay crane drivers' shift arrangement under the changing illumination intensity, *the theoretical model of illumination influencing efficiency and the 3D simulation model of port operation are established*. The influence of different lighting conditions on quay crane drivers' work is analyzed to find the optimal scheduling strategy. By comparing four different scheduling strategies, the optimal 6h interval scheduling is obtained, which increases the working efficiency by about 14% compared with the existing scheduling methods. It shows that when the total working time is unchanged, adjusting the scheduling strategy according to the influence of illumination can improve the operation efficiency of the quay crane.

Keywords

illumination effect, computer simulation, scheduling strategy, human factors

Recommended Citation

Wang Tiexin, Yu Haihong, Xie Danlan, Wang Yibin. Optimization of Shore Bridge Driver Scheduling Strategy Considering Influence of Illumination[J]. Journal of System Simulation, 2020, 32(10): 2059-2065.

考虑光照影响的岸桥司机排班策略优化研究

王铁欣¹, 俞海宏¹, 谢旦岚², 王亦彬¹

(宁波大学, 海运学院, 浙江 宁波 315211; 2. 大连东软信息学院, 辽宁 大连 116023)

摘要: 光环境对岸桥司机的工作效率具有重要影响。针对在光照强度不断变化下的岸桥司机排班问题, 建立光照影响效率理论模型和港口作业三维仿真模型, 分析不同光照条件下对码头岸桥司机工作的影响, 并研究得出岸桥司机的最优排班策略。通过比较不同的 4 种排班策略, 分析得到 6h 间隔排班最优, 比现有的排班方式的工作效率提高 14% 左右, 因而说明在工作时间总量不变的情况下, 根据光照影响调整排班策略, 可以提高岸桥的作业效率。

关键词: 光照影响; 计算机仿真; 排班策略; 人因

中图分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2020) 10-2059-07

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.20-FZ0281

Optimization of Shore Bridge Driver Scheduling Strategy Considering Influence of Illumination

Wang Tiexin¹, Yu Haihong¹, Xie Danlan², Wang Yibin¹

(Maritime College, Ningbo University, Ningbo 315211, China; 2. Dalian Neusoft University of Information, Dalian 116023, China)

Abstract: The luminous environment has an important effect on the efficiency of quay crane drivers' work. Aiming at the quay crane drivers' shift arrangement under the changing illumination intensity, the theoretical model of illumination influencing efficiency and the 3D simulation model of port operation are established. The influence of different lighting conditions on quay crane drivers' work is analyzed to find the optimal scheduling strategy. By comparing four different scheduling strategies, the optimal 6h interval scheduling is obtained, which increases the working efficiency by about 14% compared with the existing scheduling methods. It shows that when the total working time is unchanged, adjusting the scheduling strategy according to the influence of illumination can improve the operation efficiency of the quay crane.

Keywords: illumination effect; computer simulation; scheduling strategy; human factors

引言

港口是水陆交通的集结点, 进出口物资的集散地。通过减少岸桥装卸时间是提高港口绩效的重要手段之一。所以研究如何提高岸桥司机的工作效

率, 有着重要意义。

光环境是影响岸桥司机工作的重要因素, 而在描述光环境的众多物理特征时普遍认为, 光照强度是影响工作效率的最主要的因素。一天白天中室外自然光光照强度最高能达到几万勒克斯, 最低只有几十勒克斯。岸桥司机最主要的信息来源是视觉。据相关研究, 操作员视觉工效必定会受到光环境不断变化的影响, 光环境的光照强度过高, 过低, 都会影响到专注度的下降^[1], 从而影响到岸桥司机的反应时间和着箱命中率。由于光照强度受时间影



收稿日期: 2020-04-27 修回日期: 2020-05-30;
作者简介: 王铁欣(1996-), 男, 浙江宁波, 硕士生, 研究方向为港航技术与工程; 俞海宏(通讯作者 1973-), 男, 浙江宁波, 博士, 教授, 研究方向为供应链管理、系统仿真优化; 谢旦岚(1992-), 女, 浙江绍兴, 硕士生, 助教, 研究方向为系统仿真。

<http://www.china-simulation.com>

• 2059 •

响较大,安排合理的排班时间是提高岸桥装卸效率的有效方案。

目前排班问题的研究方法很多,基本可分为三类:一是最优化算法,即一定的限制条件下,对于求解的目标式的可行解空间内,寻找最优的解的方法。如 Domínguez-Martín 等^[2]提出了一种混合整数规划公式,并设计一种分支界定法和割平面法解决人员排班问题。但此类方法计算时间长,且在限制条件较多的复杂情况,计算并不精确;二是启发式算法,如翟东伟基于禁忌搜索和遗传算法和的混合启发式算法用以优化人工编制的调度计划^[3],相较于最优化算法,规模较大实例启发式算法有着独特的优势,但由于算法本身缺陷,容易陷入局部最优。而由于排班问题约束较多,规模较大,理论上属于 NP-难问题,算法复杂度高,研究岸桥司机作业效率,随时间的变化波动程度的分布概率也并不规律;三是仿真模拟方法,若运用仿真软件对其进行模糊处理,操作简单,能较快的得出较好的可行解,是一种行之有效的策略。FlexSim 是离散型系统仿真的有效工具,不仅建模过程快捷,而且还提供了实体和模型导入功能,可以形象的还原港口工作流程,为系统规划设计提供了良好的可视化有段。

本文通过不同光照强度下岸桥司机的作业效率与时间的变化关系,利用计算机仿真软件 FlexSim 建立模型,得到最优的排班策略,为港口排班问题提供科学的指导意见。

1 排班策略研究

轮班制度是港口工作的主要劳动组织形式,以昼夜交替的形式不断进行。根据我国国家《劳动法》规定,劳动者每日工作时间不得超过 8 h。传统的 3 班倒制度减少了交接班次,但也存在作业强度大,疲劳累积程度严重的特点,必须给与工作人员一定的休息时间,平均每 2 h 休息 15 min^[4]。

由于岸桥内部工作环境密闭,外部工作环境复杂,工作过程单调重复等特性会导致疲劳累积程度

更快。大部分港口舍弃 8 h 三班倒制度,将 8 h 进行分割,工作时间被分成两段,每段 4 h,两段之间相隔 8 h。这样可以保证工作人员充分的休息时间,但于此同时也增加了交替班的次数。所以传统的轮班制依旧存在着优化空间。为了能更好的解决最优的排班策略,提出了以下 4 种方案,与现有的排班制度进行对比,如表 1 所示。

表 1 排班方案介绍

排班方案	工作时间/h
A	5
B	6
C	7
D	8

岸桥工作要求每次交接换班的岸桥司机都要穿戴安全鞋和安全服、检查作业环境、空载试车、填写班簿等一系列程序,大约需要花费 20 min 左右的时间,所以实际的有效时间是工作时间减去休息时间和交接损失的时间。具体实际有效工作时间如表 2 所示^[5]。

表 2 实际有效工作时间

每个班次工作时间/h	每天实际有效工作时间/h
4	19.000
5	19.400
6	19.667
7	19.857
8	20.000

实际有效工作时间随着班次轮换次数的增多而减少,以三班制改编:(1)传统轮班安排,以 4 h 为间隔,能保持工作时间固定,每天实际有效时间为 19 h,人均有效时间为 6.33 h,此种排班方式实际有效工作时间最少;(2)A 轮班安排,以 5 h 为间隔,中间休息 10 h,每天实际有效时间为 19.4 h,人均有效时间为 6.47 h;(3)B 轮班安排,以 6 h 为间隔,每天实际有效时间为 19.67 h,人均有效时间为 6.56 h;(4)C 轮班安排,以 7 h 为轮班间隔,

每天实际有效时间为 19.86 h, 人均有效时间为 6.62 h; (5) D 方案为三班制排班方案, 每天实际有效时间为 20 h, 人均有效时间为 6.67 h。

2 不同光环境下的影响模型

岸桥驾驶室由于多采用 3 面加底面透明封闭的设计。相较于室内, 一天中有更多的阳光照进驾驶室, 驾驶室的白天平均光照强度在 1 100 lx 左右, 正午光照强度能达到 3 000 lx, 夜间会开启大功率照明设备, 光照强度能达到 1 500 lx 左右。

岸桥司机在不同的光照强度下工作时, 视觉获得的信息, 反应时间、专注度、疲劳下降程度也不尽相同, 因此, 将一段时间内的装箱数量, 作为衡量岸桥司机工作效率的指标, 与不同的光照强度建立数学关系。建立最优的排班策略。

2.1 建立模型

2.1.1 建立逻辑关系

在不同的光照强度下, 会产生不同的工作效率, 效率随时间的变化也会不同^[6]。在恶劣的环境下, 岸桥司机操作效率降低的会更快, 相对舒适的环境, 也会保持更长久的工作状态和工作效率, 即不同的光照强度区间对应着不同的工作效率区间。在相对较小的区间内, 假定它们之间是线性关系, 因此光照强度影响效率参数为:

$$E_i = (-N_i t + 1) \pm m_i \quad (1)$$

式中: E_i 为在第 i 种光照强度下的影响效率参数; N_i 为第 i 种光照强度下的时间影响参数; t 为已工作的时长; m_i 是波动百分数。

2.1.2 岸桥装卸用时与数量

光照强度对工作效率的影响难以量化, 所以对岸桥司机的作业时间作为参考手段。一次装卸的过程中, 完成时间会维持在一个时间范围内(一般 100~120 s), 恶劣的环境会导致装卸时间更接近时长范围的上限, 并且装卸都会随时间变化产生波动, 因此岸桥司机单次装卸用时为:

$$T_i = \frac{w}{E_i} \quad (2)$$

式中: T_i 为第 i 种光照强度下每次装卸的实际用时; w 是单次装卸理论用时; E_i 为第 i 种光照强度下的影响效率参数。

将每次装卸时间与选择班次的工作时间联系起来, 就能得到单个班次内的装卸集装箱的总量。所以不同光照强度条件下, 不同班次的装卸数量为:

$$P_{ij} = \frac{S_j}{T_i} = \frac{S_j}{w / [(-N_i t + 1) \pm m_i]} \quad (3)$$

式中: P_{ij} 为第 i 种光照强度下, 第 j 种排班策略的装卸数量; S_j 为第 j 种排班策略的实际有效工作时长。

2.2 设定参数

2.2.1 船舶到达参数

根据学者对集装箱船舶到港记录的统计分析^[7], 提出集装箱班轮到港规律服从泊松分布, 船舶相继到港时间服从负指数分布, 其概率为:

$$P(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (4)$$

式中: t 为两艘船到达时间间隔; λ 为单位时间内船舶的平均到达率。运用反变换法, 令 $u = P(t) = 1 - e^{-\lambda t}$, 可得到其反函数

$$t = P^{-1}(t) = -\lambda \ln(1 - u) \quad (5)$$

由于随机变量 u 与 $1-u$ 的分布是相同的, 都服从在 $[0,1]$ 上的均匀分布, 所以式(5)可改写为:

$$t = -\lambda \ln u \quad (6)$$

2.2.2 光照强度相关参数

不同的光照强度区间与工作效率区间存在着模糊对应的关系。驾驶室里, 操作环境相对稳定, 温度和风力变化不大, 可近似相当于阳光照射充足的室内环境。岸桥司机在操作过程中, 运用操作手柄, 观察仪表, 信号指示灯工作, 工作时长偏久, 且需要保持高度的精神集中状态。从某种程度上与飞机座舱工作性质类似。因此, 借鉴室内光环境对工作效率的影响^[8]和光环境对飞机座舱视觉工效

影响的相关数据完善相关参数^[9]。根据资料表明,在岸桥驾驶室工作环境中,1 500 lx 左右的光照强度能达到最是工作环境,以最开始 2 h 内 1 500 lx 的工作效率为 100%^[10],随着光照强度的升高和减低,效率都会随之递减,具体效率值如表 3 所示。

表 3 4 种光照强度在不同时间的效率值
Tab. 3 Efficiency values of four illumination at different time %

时间/min	光照强度/lx			
	100	750	1 500	3 000
120	83.1	92.1	100	84.0
240	74.3	89.4	99.1	71.8

由于受到年龄、性别、个体差异等因素的限制,每个人对光的敏感性有所不同,但都维持在一个相对标准内。根据资料表明,视觉的改善,有收效递减的规律,越接近视觉舒适区,波动程度越小。在 100 lx 时,波动程度最大,达到 5.9%; 1 500 lx 波动程度最小,达到 0.45%。波动程度的分布概率并不规律,因此,采用了运用仿真软件中的随机数流进行模糊对应,进行仿真分析,如表 4 所示。

表 4 4 种光照强度下效率随时间的对应关系
Tab. 4 Relation of efficiency with time at four illumination

编号	光照度/lx	对应关系
1	100	$E_1 = (-1.86 \times 10^{-5}t + 1) \pm 5.9\%$
2	750	$E_2 = (-9.17 \times 10^{-6}t + 1) \pm 1.4\%$
3	1 500	$E_3 = (-6.25 \times 10^{-7}t + 1) \pm 0.45\%$
4	3 000	$E_4 = (-2.09 \times 10^{-5}t + 1) \pm 6.1\%$

根据实际情况,单个岸桥对应单个船舶运输线,单次装卸用时在 100~120 s 之间。根据实际情况,将实验环境分为晴天和阴天。06:00-08:00,太阳光还不强,假定晴天为 750 lx,阴天为 100 lx; 08:00-11:00,太阳光逐渐增强,晴天能达到 1 500 lx,阴天能达到 750 lx 以上;正午是一天中光照强度最强的时候,晴天 11:00-14:00 能达到 3 000 lx,阴天能达到 1 500 lx;下午光照强度逐渐减弱,14:00-17:00 晴天平均光照强度为 1 500 lx,阴天平均 750 lx 左右;黄昏是一天中光线最暗的时候,17:00-19:00 晴天为 750 lx,阴天为 100 lx;为保证操作安全,

晚间驾驶室内要开启大功率照明灯,工作环境光照强度能达到 1 500 lx。

3 仿真模型建立与结果分析

3.1 建立仿真模型

根据以上数据分析,在 FlexSim 2017 update2.0 中建立仿真模型,具体流程如下。

(1) 设置模型运行时间设定为 720 h;

(2) 以某港集装箱码头的实际作业环境设置船舶装卸模块、集卡运输模块和堆场装卸模块 3 部分,其中船舶装卸模块以 3 台岸桥为一组,对到达船舶进行装卸。集卡运输模块设置 8 辆集卡为一组。堆场装卸模块,设置 4 台场桥为一组。根据模型情况,在实体库选项卡栏,拖出实体模型。在发生器到达时间间隔中输入船舶到达服从泊松分布,端口选择为可用的排队最短的端口。在处理器加工时间代码编辑器中输入代码,带入光照强度相关参数;

(3) 连接实体关系连接线,使用 3DSMax 软件将模型导为.3ds 格式文件,并将模型导入到实体模型当中;

(4) 在统计选项栏的实验器中运行 100 次,输出仿真结果。仿真布局如图 1 所示。

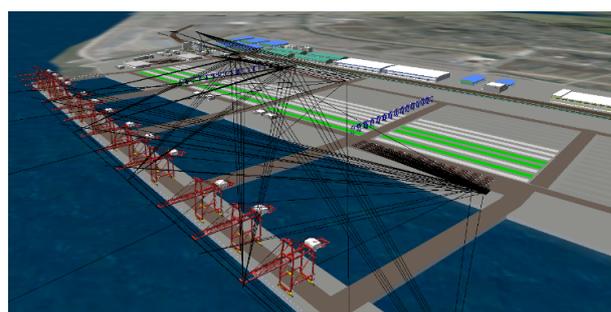


图 1 FlexSim 仿真布局图
Fig. 1 FlexSim simulation layout

3.2 传统排班方案仿真结果分析

3.2.1 晴天岸桥吞吐量

图 2 是晴天作业环境下传统 4 h 间隔排班制度

集装箱吞吐量的散点图。横坐标是 30 天的吞吐量, 纵坐标是 100 次的实验模拟。港口岸桥月平均集装箱吞吐量为 17 872 TEU, 由图 2 可以看出, 大部分数据都集中在 17 850 TEU, 围绕其附近上下波动。最低吞吐量 17 693 TEU, 最高吞吐量为 18 003 TEU。两者实际数值与正常结果相差在正常范围之内, 极端结果数量不多, 因此保证了仿真结果的准确性与实验的科学性。

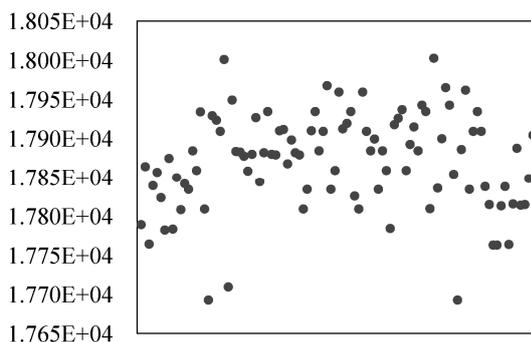


图 2 晴天传统排班集装箱吞吐量

Fig. 2 Traditional scheduled container throughput in sunny days

3.2.2 阴天岸桥吞吐量

图 3 是阴天作业环境下传统 3 班倒制度集装箱吞吐量散点图。岸桥月平均吞吐量为 17 798 TEU。阴天在最适宜的光照强度与晴天照射的时长相同, 相对适宜条件下更久, 但恶劣光环境持续时间要更久一些, 仿真总体结果接近, 可以看出天气并不是决定排班策略的决定因素。晴天与阴天集装箱吞吐量相差较小, 后面将不再展示阴天集装箱吞吐量散点图。

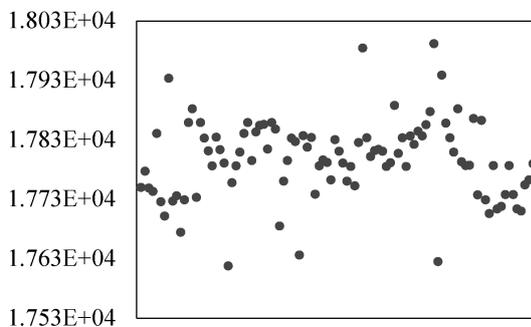


图 3 阴天传统排班集装箱吞吐量

Fig. 3 Traditional scheduled container throughput in cloudy days

3.3 改进排班方案仿真结果分析

3.3.1 A 排班方案结果分析

图 4 是 A 方案, 即 5 h 换班工作制, 岸桥月集装箱吞吐量散点图。月晴天平均集装箱吞吐量能达到 19 738 TEU, 阴天能达到 19 660 TEU, 相较于 8 h 排班工作制, 多出了 1 866 TEU, 岸桥装卸工作效率增加了 10.4%左右。这种排班策略的优势在于, 既能减小光照疲劳对岸桥司机的累加影响, 又相较于 4 h 换班制度减少了交接班的次数, 节约了换班时间。缺点是排班时间不固定, 不能实现每天固定的上下班时间, 在一定程度上可能会增加岸桥司机的疲劳程度。

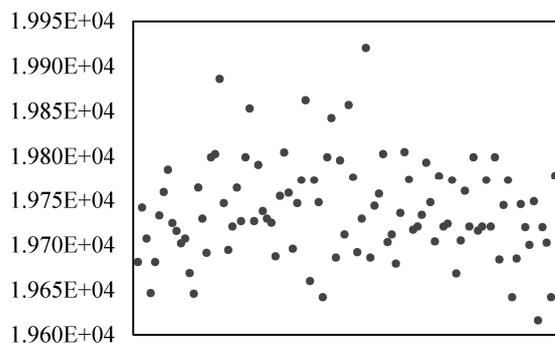


图 4 晴天 A 方案排班集装箱吞吐量

Fig. 4 Container throughput of plan A in sunny days

3.3.2 B 排班方案结果分析

图 5 是 B 方案, 即 6 h 换班工作制, 岸桥月集装箱吞吐量散点图。月晴天平均集装箱吞吐量为 20 489 TEU, 阴天为 20 491 TEU。比传统排班制度多出 2 617 TEU, 总体效率多出 14.6%。这种排班方式比前 2 种排班方式减少了交换班次数, 也比 8 h 排班制度减少视觉疲劳影响, 排班操作得当, 也能实现工作时间固定。缺点是操作不当可能导致一天工作时间超过 8 h 以上。

3.3.3 C 排班方案结果分析

图 6 是 C 方案, 即 7 h 换班工作制, 岸桥月集装箱吞吐量散点图。晴天月平均集装箱吞吐量为 18 063 TEU, 阴天为 17 910 TEU, 比 6 h 排班制度

少了 2 426 TEU, 比 5 h 排班工作制少了 1 675 TEU, 优化提升相对明显, 比传统排班制度多 191 TEU, 相差不大。也可得知持续越久, 对岸桥装卸效率影响越大。此种排班方式的排班时间难以固定, 也会对工作人员产生一定消极影响, 缺少改进的必要。

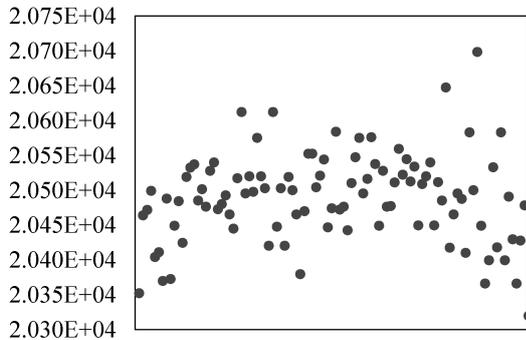


图 5 晴天 B 方案排班集装箱吞吐量
Fig. 5 Container throughput of plan B in sunny days

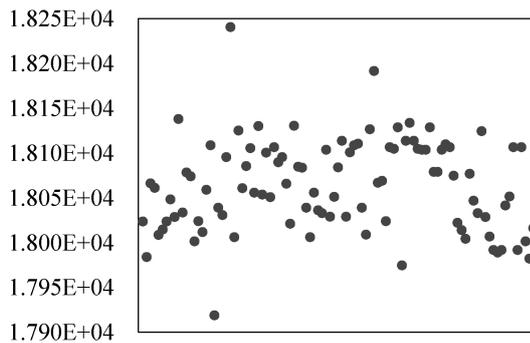


图 6 晴天 C 方案排班集装箱吞吐量
Fig. 6 Container throughput of plan C in sunny days

3.3.4 D 排班方案结果分析

图 7 是 D 方案, 即 8 h 工作制, 也是目前大部分港口选择的轮班制度。岸桥月装卸集装箱吞吐量散点图。月平均晴天集装箱吞吐量为 17 744 TEU, 阴天为 17 716 TEU。最高能达到 17 983 TEU, 最少为 17 485 TEU。这种排班策略的优势在于可以给岸桥司机充足的休息时间, 使岸桥司机受光照度疲劳影响降到最低, 排班时间相对固定, 但也因此增加了换班所需要的次数, 而减少了实际工作的时间。相较于传统 4 h 间隔排班仿真结果少了 128 TEU, 二者相差不多, 缺少改进必要, 说明疲劳累计也会产生更多的成本。

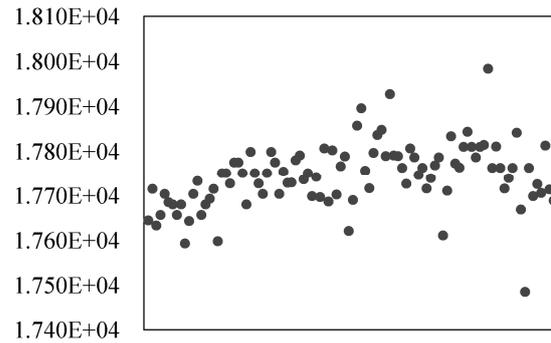


图 7 晴天 D 方案排班集装箱吞吐量
Fig. 7 Container throughput of plan D in sunny days

4 结论

通过考虑光照因素对岸桥司机的影响, 借助 FlexSim 计算机软件进行仿真模拟, 优化传统 8 h 三班倒排班制度, 增加港口运行效率。根据仿真结果得出: 传统排班方案与该码头实际作业情况基本相符, 印证了仿真建模方法在集装箱码头系统中应用的可行性。

整体排班策略 B>A>C>D, 传统排班方案介于方案 C 与方案 D 之间。即最优的排班策略是 6 h 换班制度, 以装卸 TEU 总数来看, 能提高 14% 左右的工作效率。其次是 5 h 和 7 h, 能提高 10% 左右。由于 4 h 排班换班次数过多, 导致了实际有效时间产生了不必要的浪费。7 h 由于整体效率不高, 排班时间不固定, 缺少改进的必要。

文章参考数据是在室内环境的人造光环境下, 通过动眼仪, 生理检测等设备进行的, 与实际港口岸桥的工作环境仍有些差别。通过仿真软件进行模糊处理, 所得数为足够好的近似解。对于这些问题的研究将是后续研究的重点。

参考文献:

- [1] 卫旭骏, 梁承姬, 潘洋, 等. 基于眼动分析的不同光环境下岸桥司机的专注度[J]. 大连海事大学学报, 2015, 41(3): 93-99.
Wei Xujun, Liang Chengji, Pan Yang, et al. Quayside crane driver's concentration research under different luminance environment based on eye movement analysis[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2015, 41(3): 93-99.

- [2] Domínguez-Martín B, Rodríguez-Martín I, Salazar-González J J. An exact algorithm for a Vehicle-and-Driver Scheduling Problem[M]. Amsterdam: Elsevier Science Ltd., 2017.
- [3] 翟东伟. 基于 GATS 的公交驾驶员调度算法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2008.
Zhai Dongwei. Research on public traffic driver scheduling problem based on GATS[D]. Beijing: Beijing Jiao Tong University, 2008.
- [4] 李思, 方卫宁, 吴捷, 等. 2 种地铁司机轮班疲劳评价方法的比较[J]. 中国安全科学学报, 2019, 29(2): 7-12.
Li Si, Fang Weining, Wu Jie, et al. A comparison between two methods of evaluating shift subway drivers fatigue[J]. Chinese Journal of Safety Science, 2019, 29(2): 7-12.
- [5] 郭晓毅. 轮班工时制度与降低职工疲劳程度有关问题的探究[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(增 2): 40-44.
Guo Xiaoyi. Research on problem of shift working hour system and reducing fatigue of workers[J]. Chinese Journal of Safety Science, 2018, 28(S2): 40-44.
- [6] Parsons K C. Environmental ergonomics: A review of principles, methods and models[J]. Applied Ergonomics (S0003-6870), 2001, 31(6): 581-594.
- [7] 张怀慧, 蒋大煌. 船舶到港分布律的研究及合理泊位数的计算[J]. 水运工程, 2014(9): 51-56.
Zhang Huaihui, Jiang Dahuang. Distribution law of ships to port and calculation of reasonable number of berths[J]. Port & Waterway Engineering, 2014(9): 51-56.
- [8] 兰丽. 室内环境对人员工作效率影响机理与评价研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2010.
Lan Li. Mechanism and evaluation of the effects of indoor environmental quality on human productivity[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2010.
- [9] 潘玲玲. 飞机座舱光环境对视觉工效的影响研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.
Pan Lingling. Research on the effect of light environment on visual ergonomics in aircraft cabin[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017.
- [10] Carlucci S, Causone F, De Rosa F, et al. A review of indices for assessing visual comfort with a view to their use in optimization processes to support building integrated design[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews (S1364-0321), 2015, 47: 1016-1033.