



传统集装箱码头向自动化码头改造仿真分析

张清波, 匡家喜, 张雨婷

(上海振华重工(集团)股份有限公司, 上海 200125)

摘要: 以国内某传统集装箱码头为例, 提出2种向自动化码头改造升级的码头布局及装卸工艺, 并通过仿真软件 WITNESS 进行仿真建模, 输出仿真数据。根据仿真数据, 对码头水平运输设备的数量配比进行仿真分析, 并从堆场年通过能力、堆场作业能力、码头管理以及能耗成本4个方面对提出的两种工艺进行评估, 选出一种较优工艺。

关键词: 自动化码头; 布局; 装卸工艺; 仿真

中图分类号: U 656.1⁺35

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2017)05-0138-05

Simulation analysis of renovation project for turning traditional container terminal into automated one

ZHANG Qingbo, KUANG Jiayi, ZHANG Yuting

(Shanghai Zhenhua Heavy Industries Co., Ltd., Shanghai 200125, China)

Abstract: Two kinds of reconstructing layout and handling technology plans for automated container terminals are put forward by taking a traditional container terminal for instance. Establishing a simulation model by the simulation software WITNESS, we get the simulation data, according to which, we analyze the quantity proportion of horizontal transport equipments, and evaluate two kinds of layout plans from the yard's annual throughput capacity and operation capacity, harbor management and energy consumption cost for the two technologies put forward, and choose the better one.

Keywords: automated container terminal; layout; handling technology; simulation

随着科技的进步和集装箱运输业的快速发展, 加之环境及劳动力成本压力等因素, 自动化码头在全球各地不断兴起, 目前全球实现全自动化的码头有12个, 主要集中在荷兰、德国、日本、澳大利亚和美国5个发达国家。近年来, 我国也开始建设自动化码头, 比如厦门远海自动化码头、青岛自动化码头、上海洋山自动化码头等。

针对于自动化码头布局及装卸工艺的研究主要有: 谢云等介绍了外高桥自动化堆场的自动化作业装卸系统以及实现自动化所采用的射频技术、

图像识别技术以及传感器技术等^[1]; Lau等针对自动化码头的3种装卸搬运设备, 提出桥吊、自动导引车以及龙门吊联合调度模型, 但该模型所针对的装卸搬运设备以及装卸工艺都还不够成熟^[2]; 徐健针对ZPMC之前提出的立体轨道式自动化码头系统, 提出一种基于多智能体协作的设备调度方法, 并对其作业效率和设备利用率等性能参数进行了仿真分析^[3]; 林浩等将自动化码头的装卸及运输系统分为码头装卸船作业、集装箱水平运输以及垂直布局的集装箱堆场3个部分, 并对装

收稿日期: 2016-10-30

作者简介: 张清波 (1990—), 女, 硕士, 助理工程师, 从事码头系统仿真工作。

卸工艺及作业流程进行仿真模拟^[4];王施恩等提出了洋山四期全自动化集装箱码头堆场布局新模式^[5];罗勋杰围绕技术参数、效率、能力、能耗、成本及技术先进性等要素,对自动导引车和自动跨运车这两种自动化码头主要的水平运输方式进行了定性及定量对比分析^[6]。

本文以国内某个传统集装箱码头为例,对其提出2种向自动化码头改造升级的装卸工艺,并通过仿真软件 WITNESS 建立模型,进行仿真分析,选出一种较优工艺。

1 码头布局及装卸工艺

目前该码头前沿采用传统单小车岸桥(12台单箱岸桥+4台双箱岸桥)进行作业。前沿岸线有2条:第1条岸线长900 m,共有3个泊位,分布12台岸桥进行作业;第2条岸线长度340 m,共有1个泊位,分布4台岸桥进行作业。目前大船平均作业效率为27~28 moves/h,陆侧作业峰值为每小时100辆集卡。水平堆场包含60(12行×5列)个箱区,场桥采用RTG,水平运输采用集卡。

自动化码头的装卸工艺多种多样:码头布局可以采用垂直布局,也可以采用水平布局;自动化设备包括自动化岸桥、自动化轨道吊、单双悬臂(自动化)轨道吊、自动化龙门吊、AGV以及自动化跨运车等。目前我国对于新建的自动化码头,往往将自动化实现到底,比如在建的青岛和洋山的全自动化码头,堆场布局为垂直布局,码头设备主要采用自动化双小车岸桥、自动化轨道吊以及AGV。但是“由传统码头向自动化码头改造”与“直接新建自动化码头”是有区别的,因为需要考虑当前码头的装卸工艺,以减少改造成本。根据该码头的现状,现提供2种改造的码头布局及装卸工艺:堆场依然采用水平布局,水平运输依然采用集卡,以双箱双小车自动化岸桥替换传统岸桥,以悬臂轨道吊替换RTG。2种工艺的区别在于一种工艺采用双悬臂轨道吊,箱区宽度可容纳13排集装箱,内外集卡装卸道分布在箱区的两侧,为“双悬臂轨道吊+集卡”工艺(简称

“双悬臂工艺”),改造后的码头布局如图1所示;另一种工艺采用单悬臂轨道吊,箱区宽度可容纳14排集装箱,内外集卡装卸道均分布在箱区的海侧,为“单悬臂轨道吊+集卡”工艺,(简称“单悬臂工艺”),改造后的码头布局如图2所示。2种工艺的堆场都有18个箱区,每个箱区有2台悬臂轨道吊,而集卡数量配比需通过仿真分析决定。

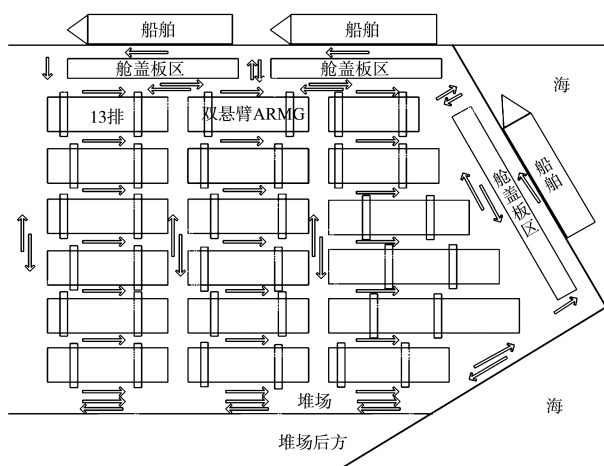


图1 双悬臂工艺布局

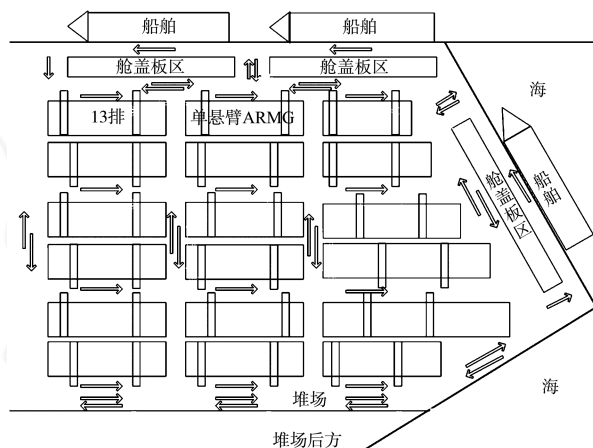


图2 单悬臂工艺布局

集卡并非自动化设备,因而改造后的自动化码头也并非全自动化码头。但是传统码头向自动化码头的改造并不一定要一蹴而就,待自动化技术更加成熟、改造后的自动化码头管理更加完善之后,可以考虑将集卡替换为AGV。

2 仿真模型

自动化集装箱码头系统是由岸桥、堆场、场

桥、内外集卡、道路以及设备调度策略(即设备控制系统)、码头运营规则(即码头操作系统)等组成的一个离散事件动态系统,其特点为随机因素多、多级排队、紧密耦合。这些特点导致其难以用数学模型来分析系统效率、设备配置以及调度管理等诸多问题,因此,选择仿真软件 WITNESS 来建立自动化集装箱码头系统的仿真模型。图 3 为双悬臂工艺的仿真模型。

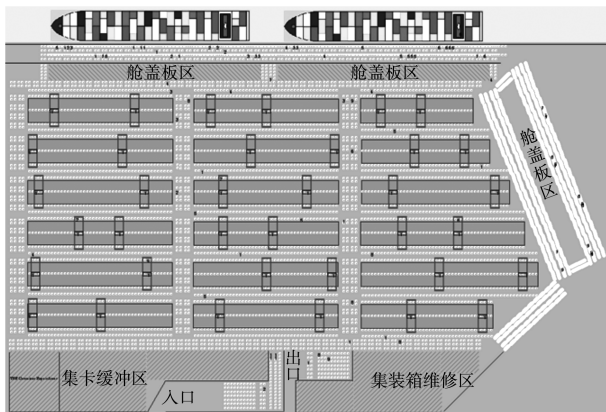


图 3 双悬臂工艺的仿真模型

根据自动化集装箱码头系统的功能特点,可以将仿真模型划分为以下 9 大模块:参数模块、作业计划模块、岸桥作业模块、堆场模块、内集卡模块、外集卡模块、道路模块、外集卡模块。各模块的主要功能如下:

1) 参数模块:包含多个变量和 2 个函数,变量表示参数,2 个函数中一个用于作业计划相关参数的初始化,另一个用于单双悬臂轨道吊相关参数的初始化。2 个函数均在模型初始化的地方被调用。

2) 作业计划模块:由 2 个子模块构成,分别是船计划模块、集疏运计划模块。2 个子模块下包含多个跟作业计划相关的变量,如集装箱箱号、箱型、船上箱位、场位等。除此之外,2 个子模块下均有 1 个函数,分别用于读取做船计划和集疏运计划,也是都在模型初始化的地方被调用。

3) 岸桥作业模块:包含表示岸桥大车、岸桥小车、岸桥起升、岸桥下的装卸道和穿行道的所

有元素以及跟岸桥作业相关的多个变量和函数,如表示岸桥作业集装箱数量的变量、表示岸桥作业循环时间的函数、表示岸桥与集卡对箱时间的函数等。

4) 堆场模块:由 18 个子模块和多个变量、函数构成。18 个子模块代表 18 个箱区,变量和函数是 18 个子模块的公共变量和函数,每个子模块内又包含表示 2 台轨道吊的大车、小车、起升、内外集卡的装卸道、穿行道的元素以及多个变量和函数,如表示箱区编号的变量、表示轨道吊每作业完一个集装箱的能耗计算函数、表示轨道吊每抓起一个集装箱所触发事件的函数、表示轨道吊每放下一个集装箱所触发事件的函数等。

5) 内集卡模块:包含表示内集卡、内集卡属性、内集卡缓冲区的各个元素以及多个变量。如表示内集卡拥堵时间的变量、表示内集卡等待岸桥的时间变量、表示内集卡等待场桥的时间变量等。

6) 外集卡模块:包含表示外集卡、外集卡属性、外集卡缓冲区、闸口的各个元素以及多个变量。如表示外集卡累计进场数量的变量、表示外集卡拥堵时间的变量、表示外集卡等待场桥的时间变量等。

7) 道路模块:由表示码头内主要穿行道的元素构成。主要包括进出岸桥下的穿行道、连接堆场箱区间的穿行道等。

8) 数据分析模块:包含多个变量和 1 个函数。该模块下的变量主要是用来表示统计指标的,如各设备的效率、利用率、轨道吊大车和内集卡每完成 1 个 move 的行驶距离、轨道吊和内集卡每完成 1 个 move 的能耗、关键交叉路口的堵塞时间等。

9) 图标模块:由多个变量构成,这些变量均跟图标移动有关。

9 大模块之间相互关联便构成了整个自动化码头系统仿真模型,关联的主要依据是码头操作流程(图 4)。

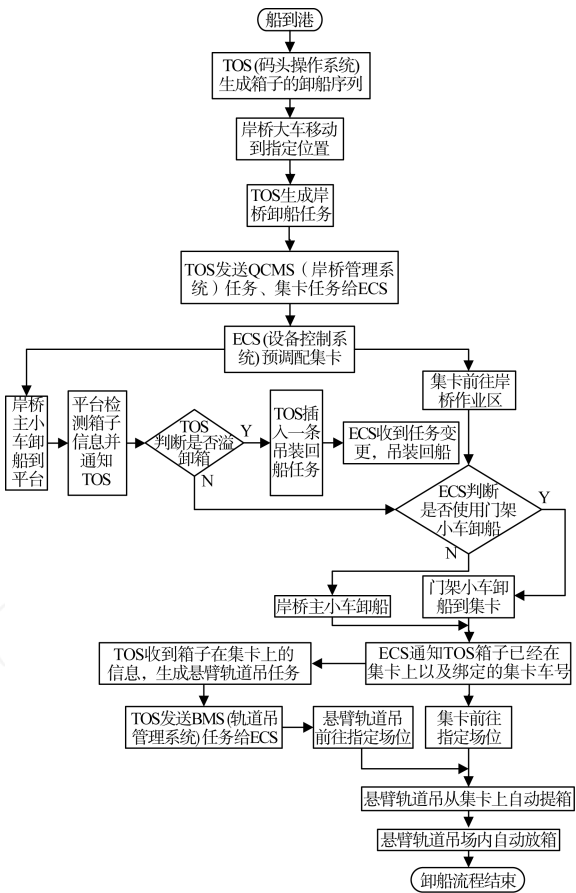


图 4 卸船流程

3 仿真结果分析

3.1 2 种装卸工艺下的集卡数量配比

图 5 和图 6 展示了 2 种工艺不同集卡配比下的系统效率和集卡利用率。从中可以看到：对于双悬臂工艺，集卡配比为 1:5 时，虽然可以满足系统效率要求，但是一方面考虑到集卡配比数由 5 提高到 6 后系统效率提高明显，另一方面考虑到集卡平均 5% 的故障率后，集卡有效利用率为 84.06%，可被再利用空间有限，可能会导致集卡成为限制效率提升的瓶颈，故不推荐该配比；集卡配比 1:7 时，一方面考虑到集卡配比数由 6 提高到

7 后系统效率提高不明显，另一方面考虑到 1:7 时集卡利用率不高，故不推荐该配比；集卡配比 1:6 时，一方面考虑到集卡配比数由 5 提高到 6 后系统效率提高明显，另一方面考虑到 1:6 时集卡利用率适中，故推荐集卡配比为 1:6。同理，单悬臂工艺的集卡最佳配比也是 1:6。

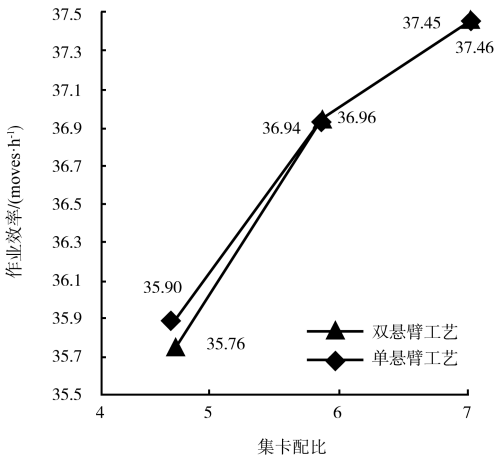


图 5 2 种工艺不同集卡配比下的系统效率

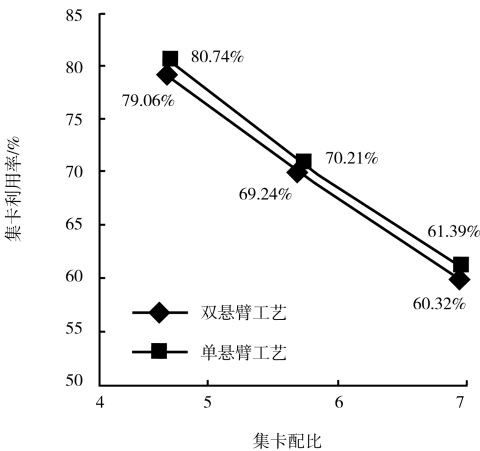


图 6 2 种工艺不同集卡配比下的集卡利用率

3.2 最优装卸工艺评估

在集卡配比 1:6 的基础上，两种装卸工艺的主要统计指标如表 1 所示。

表 1 2 种装卸工艺的主要统计指标

工艺名称	岸桥平均效率/ (moves·h ⁻¹)	集卡平均效率/ (jobs·h ⁻¹)	集卡平均 利用率/%	轨道吊平均 效率/(moves·h ⁻¹)	轨道吊平均 利用率/%	集卡能耗/ (L·move ⁻¹)	轨道吊能耗/ (kW·h·move ⁻¹)
双悬臂工艺	36.96	6.18	69.20	18.93	75.70	1.10	2.49
单悬臂工艺	36.94	6.18	70.21	18.90	76.99	1.14	2.47

在对 2 种装卸工艺进行评估时，主要考虑以下 4 个方面：堆场年通过能力、堆场作业能力、码头管理以及能耗成本。

3.2.1 堆场年通过能力

根据码头经验公式(堆场年通过能力=堆场容量堆场利用系数×365 d/堆存期×中转率/通过能力

峰值系数×空重箱调整比率)计算不同工艺的堆场年通过能力(表2)。其中,堆场利用系数为0.7,堆存期4.51 d,中转率1.64,通过能力峰值系数为1.14,空重箱调整比率为85.5%。

表2 堆场年通过能力计算

工艺名称	地面箱位数/个	堆场年通过能力/(万 TEU·a ⁻¹)
RTG+集卡	9 654	322
双悬臂+集卡	10 338	382
单悬臂+集卡	11 123	415

从表2可以看到:两种装卸工艺的堆场通过能力均大于原有RTG堆场通过能力,均能满足码

头需求,并且单悬臂工艺堆场通过能力比双悬臂工艺高。

3.2.2 堆场作业能力

16台岸桥的目标效率为35 moves/h,因而岸边作业能力为560 moves/h。一方面,考虑设备故障、维护保养、堆场间任务分配不均以及设备是否解耦等因素,结合码头经验,假设堆场设备利用率最高为80%时不会对岸边作业效率产生影响;另一方面,考虑码头陆侧进提箱作业(约100 moves/h),对堆场作业能力进行折算。折算后的堆场作业能力与岸边作业能力对比如表3所示。

表3 堆场装卸船作业能力与岸边作业能力对比

工艺名称	岸边能力/(moves·h ⁻¹)	堆场作业能力/(moves·h ⁻¹)	折算后的堆场作业能力/(moves·h ⁻¹)	堆场作业能力富余程度/%
双悬臂+集卡	560	900.24	620.20	11.0
单悬臂+集卡	560	883.75	607.00	8.4

注:堆场作业能力=场桥效率/场桥利用率×场桥数量。

从表3可以看到:单双悬臂工艺均能满足岸边作业能力需求,并且双悬臂工艺的堆场作业能力比单悬臂工艺强。

3.2.3 码头管理

双悬臂工艺中可规定码头内集卡和外集卡分别位于双悬臂轨道吊的两侧悬臂下作业,便于码头任务及设备管理。

单悬臂工艺中内外集卡需在同一侧悬臂下仅通过不同车道区分,不利于码头管理;同时,与双悬臂工艺相比,由于码头箱区比较宽,堆场内道路较少,交通相对比较拥堵。

3.2.4 能耗成本分析

2种工艺的能耗成本如表4所示,与单悬臂工艺相比,双悬臂工艺的能耗成本较低。

表4 2种工艺的能耗成本

工艺名称	集卡能耗/(L·move ⁻¹)	燃油单位成本/(元·L ⁻¹)	轨道吊能耗/(kW·h·move ⁻¹)	工业耗电单位成本/[元·(kW·h) ⁻¹]	能耗成本/(元·move ⁻¹)
双悬臂工艺	1.10	9	2.49	1.4	13.39
单悬臂工艺	1.14	9	2.47	1.4	13.72

3.2.5 优选工艺

从堆场通过能力看,单悬臂工艺更优;从堆场作业能力、码头管理和能耗成本来看,双悬臂工艺更优。表5通过给2种工艺的4项评估指标设置权重并打分来确定2种工艺的优劣。4项评估

指标的权重分别为:0.3, 0.3, 0.2, 0.2。打分依据为:对于任意一项评估指标,较优的工艺在该项指标上得满分10分,另一工艺则以满分工艺为基准,每差距1%则降0.1分,码头管理越容易,得分越高。

表5 4项评估指标的打分及权重

工艺名称	堆场通过能力打分	堆场通过能力权重	堆场作业能力打分	堆场作业能力权重	码头管理打分	码头管理权重	能耗成本打分	能耗成本权重
双悬臂工艺	9.2	0.3	10.0	0.3	10	0.2	10.00	0.2
单悬臂工艺	10.0	0.3	9.8	0.3	8	0.2	9.75	0.2

(下转第156页)

- [7] 徐伟, 刘斯宏, 王柳江, 等. 真空预压联合电渗法加固软基的固结方程[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2011, 39(2): 169-175.
- [8] 王柳江, 刘斯宏, 汪俊波, 等. 电场-渗流场-应力场耦合的电渗固结数值分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(6): 1904-1911.
- [9] 吴辉, 胡黎明. 真空预压与电渗固结联合加固技术的理论模型[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2012, 52(2): 182-185.
- [10] 李剑, 张仪萍, 严露. 真空电渗联合作用下的软基固结计算研究[J]. 水运工程, 2012(3): 133-138.
- [11] LIU H L, CUI Y H, SHEN Y, et al. A new method of combination of electroosmosis, vacuum and surcharge preloading for soft ground improvement[J]. China ocean eng, 2014, 28(4): 511-528.
- [12] 赵建国, 朱文凯. 电渗-强夯综合法加固软土地基的实践[J]. 地质与勘探, 1994, 30(2): 76-80.
- [13] 刘凤松, 刘耘东. 真空-电渗降水-低能量强夯联合软弱地基加固技术在软土地基加固中的应用[J]. 中国港湾建设, 2008(5): 43-47.
- [14] 高有斌, 曾国海, 徐步兴, 等. 双控动力固结法加固软黏土地基的应用研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2009, 29(6): 632-637.
- [15] 汪俊波, 刘斯宏, 徐伟, 等. 电渗法处理大连大窑湾超软土室内试验[J]. 水运工程, 2010(1): 15-19.

(本文编辑 武亚庆)

(上接第 142 页)

表 6 展示了 2 种工艺 4 项评估指标得分情况。从中可以看到, 双悬臂工艺的累计得分要高于单悬臂工艺, 因此对该传统码头进行改造升级时, 优先考虑双悬臂工艺。

表 6 2 种工艺 4 项评估指标

工艺名称	堆场通过能力得分	堆场作业能力得分	码头管理得分	能耗成本得分	累计得分
双悬臂工艺	2.76	3.00	2.00	2.00	9.76
单悬臂工艺	3.00	2.94	1.60	1.95	9.49

4 结语

1) 通过仿真分析发现: 本文提出的 2 种由传统码头向自动化码头改造升级的装卸工艺的最佳集卡配比均为 1:6。

2) 通过对 2 种工艺的堆场年通过能力、堆场作业能力、码头管理以及能耗成本的仿真数据进行分析得到: 针对本文作为案例的码头, 在堆场年通过能力(即年吞吐能力)上, 单悬臂工艺优于双悬臂工艺; 在堆场作业能力、码头管理以及能耗成本方面, 双悬臂工艺略优于单悬臂工艺。

3) 通过对 2 种工艺的 4 项评估指标进行加权分析得到: 针对本文作为案例的码头, 综合年吞

吐能力、堆场作业能力、码头管理以及能耗成本 4 个方面可知, 双悬臂工艺优于单悬臂工艺。

4) 目前中国的集装箱码头基本上都是这种类型的传统码头(即传统岸桥+集卡+RTG), 因此本文提出的案例具有一定的代表性。

参考文献:

- [1] 谢云, 包起帆, 姚振强, 等. 外高桥自动化堆场的自动作业装卸系统研究[J]. 机械设计与研究, 2007, 23(4): 106-108.
- [2] LAU H Y K, ZHAO Y. Integrated scheduling of handling equipment at automated container terminals[J]. International journal of production economics, 2008, 112(2): 665-682.
- [3] 徐健, 陈启军. 基于 MAS 的集装箱自动化码头调度算法[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(15): 4888-4891.
- [4] 林浩, 唐勤华. 新型集装箱自动化码头装卸工艺工艺探讨[J]. 水运工程, 2011(1): 158-163.
- [5] 王施恩, 何继红, 林浩, 等. 自动化集装箱码头堆场布置新模式[J]. 水运工程, 2016(9): 23-26.
- [6] 罗勋杰. 全自动化集装箱码头水平运输方式对比[J]. 水运工程, 2016(9): 76-82.

(本文编辑 郭雪珍)