

基于 DEA 方法的船舶建造项目多指标评价研究

李 楷^{*1}, 刘 曼 婷¹, 张 楠², 赵 智 超¹

(1. 大连理工大学 船舶工程学院, 辽宁 大连 116024;

2. 上海惠生海洋工程有限公司, 上海 201210)

摘要: 船舶建造项目评价是新造船质量控制的必要手段,具有多指标的特点,其准确性取决于数据源是否可靠和评价模型是否合理.由于缺乏有效的数据采集手段,在船舶建造过程中产生的大量生产和检验数据并没有得到有效利用.针对这一问题,开发了船舶检验管理系统的原型程序,便于用户填报检验记录.在此基础上提出使用 DEA 方法进行船舶建造项目的多指标评价,为生产管理活动提供决策依据.最后通过某 VLCC 建造项目的生产和检验数据验证了所提多指标评价模型的可行性和有效性.

关键词: 多指标评价;船舶建造;数据包络分析;质量管理

中图分类号: U673.2

文献标识码: A

doi: 10.7511/dllgxb201806006

0 引 言

船舶是复杂的水上工程建筑物,船舶建造流程也非常复杂并且周期较长.现代造船模式是一个完整的生产体系,执行以中间产品为导向的建造策略,主要由 11 项关键技术组成:质量控制循环,船舶建造标准化,建造合同技术约定,产品导向工程分解,船体分道建造技术,区域舾装技术,区域涂装技术,管件制造技术,壳舾涂一体化,造船管理系统,造船编码技术.这些技术必须制度化、规范化地融入船舶建造的生产设计、组织与管理中,才能在最大程度上发挥各自的效益.船体分道建造技术是现代造船模式的重要组成部分,以成组技术(group technology)为理论基础,根据相似性,以中间产品为导向,按照系统部件、模块、分段和总段的建造过程,配置场地、设施和人员,组成多个生产单元,形成逐步推进的设计、生产和管理一体化的工艺流程.

中间产品是船体分道建造技术中的重要概念,通常包括 4 类:部件、模块、分段和总段.分段是由 1 个以上的模块和多个部件组成的,在分段划分时一般先将船舶按照区域划分为艏、艉、中部及上层建筑等,进而将各区域划分为总段,再将总

段划分为分段,并逐步划分为部件和模块等.

为了保证新造船达到船东、船检的要求,船东、船检、船厂需要对船舶建造过程中各专业项目和工艺指标进行检验来控制船舶建造项目质量.随着壳舾涂一体化的推进,船舶建造过程中的单个流程一般都涉及多个专业,影响船舶建造质量的因素越来越多,船舶质量检验的复杂程度也日益加剧.如目前在分段建造过程中分段的预舾装率有了很大的提高,分段检验不再是单纯的船体结构检验,还要包括机、电专业的检验项目.

影响船舶建造质量的因素还包括工期、成本、工艺质量等,为了保证质量,需要建立准确的评价模型辅助检验人员及时掌握、调控船舶建造过程,优化工艺流程,提高船舶建造质量,使船舶建造项目进入良性循环.船舶建造质量评价的复杂性在于:一是指标类型多样,既包含数值型参数也包含非数值型参数;二是船舶建造体系复杂、庞大、周期长,船舶建造过程中产生的数据量巨大.数据包络分析(data envelopment analysis, DEA)方法使用综合指标评价决策单元的技术效率,适合描述全要素生产效率状况,并且权重不受主观因素影响,不会因权重估计不准确而影响评价结果.本文采用 DEA 方法建立船舶建造项目的多指标评价模型.

1 船舶建造过程的多指标评价方法

1.1 DEA 方法简介

DEA 方法起源于 1957 年 Farrell 提出的包络思想^[1]. 1978 年, Charnes 等在相对效率评价概念基础上提出了 DEA 方法, 建立了第 1 个 DEA 模型——C²R 模型^[2]. DEA 方法模拟生产过程中从投入到产出的一系列决策活动, 这些衡量绩效的元素被称作决策单元 (decision making unit, DMU). DEA 方法以凸分析和线性规划为工具, 通过数学规划模型计算各 DMU 的相对有效性, 从而做出评价.

DEA 方法的特点包括:

(1) 适用于多输出-多输入的有效性综合评价问题.

(2) 不直接对数据进行综合. 各 DMU 的相对有效性与输入、输出指标的量纲选取无关, 因此应用 DEA 方法建立模型前无须对数据进行量纲一化处理.

(3) 无须任何权重假设, 而以 DMU 输入、输出的实际数据求得最优权重, 因此排除了主观因素, 具有很强的客观性.

DEA 方法应用的一般步骤如下:

(1) 确定评价目的. 分析问题的特点, 梳理、归纳、提取各类特征参数.

(2) 选择 DMU. 通过物理背景或时间间隔来构造 DMU, 使 DMU 具有相同的环境、输入和任务.

(3) 建立输入、输出指标体系. 要考虑能够实现评价目的, 还要避免指标之间有较强的线性关系. 也可以通过若干次试算来逐步确定指标集.

(4) 选择 DEA 模型. 要符合 DMU 的实际经济背景和问题的评价目的, 还要考虑某些特定要求.

(5) 进行相对有效性评价. 确定各 DMU 的相对有效性, 了解各 DMU 的相对规模收益情况.

假设在一项生产活动中, 共有 n 个 DMU, 第 i 个 DMU 对应的输入、输出向量分别为

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_i &= (x_{1i} \quad x_{2i} \quad \cdots \quad x_{mi})^T; \quad i=1, 2, \cdots, n \\ \mathbf{y}_i &= (y_{1i} \quad y_{2i} \quad \cdots \quad y_{ri})^T; \quad i=1, 2, \cdots, n \end{aligned}$$

在评价 DMU 的实际应用中, 一般采用具有非阿基米德无穷小的 C²R 模型. 如检验第 j 个 DMU 的相对有效性, 其规划问题为

$$\begin{aligned} \min \quad & \left[\theta - \epsilon \left(\sum_{i=1}^m s^- + \sum_{i=1}^r s^+ \right) \right] = v_d(\epsilon) \\ \sum_{i=1}^n \lambda_i \mathbf{x}_i + \mathbf{s}^- &= \theta \mathbf{x}_j \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n \lambda_i \mathbf{y}_i - \mathbf{s}^+ &= \mathbf{y}_j \\ \lambda_i &\geq 0; \quad i=1, 2, \cdots, n \\ \mathbf{s}^+ &\geq 0 \\ \mathbf{s}^- &\geq 0 \end{aligned}$$

其中 m 为输入的个数, r 为输出的个数, n 为 DMU 的个数, $\theta, \lambda_i, \mathbf{s}^+, \mathbf{s}^-$ 为待求解变量, θ 代表第 j 个 DMU 的相对有效性.

1.2 多指标评价方法在造船业中的现状

Park 等使用 DEA 方法分析比对船舶建造过程中生产计划与实际生产流程中的效率工艺区别, 在此基础上提出了船舶建造过程优化措施^[3]. Jr. Pires 等提出了基于 DEA 方法确定造船合同评价指标的决策支持方法^[4]. Ölçer 等使用模糊多属性决策方法对船舶早期设计阶段进行可生产性评估, 其中包括对成本、风险等的评估, 以达到在船舶实际建造过程中规避风险和减少浪费的目的^[5].

田严波等针对船型技术经济综合评判问题, 引入理想决策单元, 利用灰色关联度分析方法建立评价指标体系, 提出了改进的 DEA 方法, 并在三峡库区货船船型方案优选中进行了应用^[6]. 张浩等使用 DEA 方法, 结合造船企业的投入和产出特点, 建立了综合考虑造船企业经营效率的投入产出指标体系和评价模型, 基于造船企业的年投入和产出经营数据, 评估了企业的综合效率, 给出了低效率企业的产出不足量和投入冗余量^[7]. 吴帅等采用模糊评判方法对船舶生产设计托盘的质量从多个指标进行综合评价^[8]. 张浩等使用多目标粒子群算法对船舶分段建造的工期、成本、质量 3 个目标进行优化^[9]. 郭文杰等利用模糊评判和层次分析方法确定各影响因素对船舶建造质量风险的权重系数和风险估值, 构建了船舶建造质量风险评估的数学模型^[10].

在船舶建造质量控制技术方面, 由于质量检验必须进行现场进行, 各类专业检验人员的检验方法、技术手段、记录方式、采集数据格式也不完全一致, 目前还没有成熟的应用软件支持检验人员进行检验数据的记录、存储和分析, 大部分船厂的质量检验记录甚至还停留在纸笔的方式, 导致在船舶建造过程中产生的海量数据难以准确、及时地保存下来. 因此有必要开发相应的计算机应用程序, 辅助检验人员方便地填报检验记录, 在掌握准确数据的基础上展开数据分析, 实施船舶建造质量评价.

2 基于 DEA 方法的船舶建造项目多指标评价模型

2.1 总体流程

针对船舶建造的特点,基于质量控制技术的发展现状,本文提出基于 DEA 方法的船舶建造项目多指标评价模型,如图 1 所示.该模型利用船舶建造过程中产生的检验记录数据,使用 DEA 方法得到船舶建造质量的评价结果,从而为改善建造工艺流程提供决策依据.主要步骤如下:

- (1)组织船舶检验专家进行评估,针对各类船舶建造工艺流程制定检验项目,设置检验指标集.
- (2)根据检验项目和检验指标集,现场检验人员记录检验结果,存入数据库,形成船舶建造质量检验记录集.
- (3)使用 DEA 方法,评价各类工艺活动的技术效率.

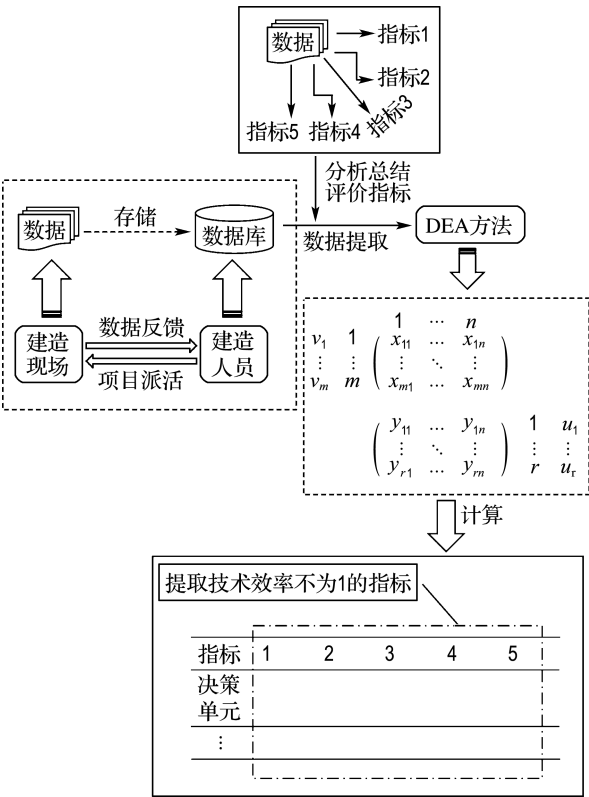


图 1 船舶建造项目多指标评价流程

Fig. 1 Process of multi-index evaluation for ship construction project

2.2 船舶建造项目典型评价指标

本文以如下 4 类典型工艺活动说明检验指标的设置.

(1)分段制作

分段制作是整个船舶建造过程中至关重要的一个步骤.分段制作的主要检验指标是从成本、计划、建造质量 3 方面来考虑的,包含焊接质量(CM 点)、分段密性、分段涂装、分段完整性、到期完工率、物料利用率、报验合格率. CM (construction monitoring)点即建造监控点,一般为高应力区,焊接形式为深熔焊或者全熔焊,焊后要做无损探伤检验.分段密性指船舶在分段制作完成后进行的密性试验. CM 点和分段密性是船舶检验过程中需要重点关注的.分段涂装指分段制作阶段的涂装质量.在船舶建造质量管理中,是否拖期及报验合格率是衡量船舶建造效率和质量的重要指标.到期完工率反映了船厂是否能根据建造计划节点完成生产任务,即生产执行能力.物料利用率体现了船厂在原材料使用方面的成本控制能力.报验合格率反映了船厂生产部门的工艺水平,其数值为报验次数的倒数.

(2)合拢检验

合拢是船体建造的关键环节.从分段组合到总段,再从总段组合成一艘完整的船舶,这些工艺活动都属于合拢.合拢检验的核心在于合拢焊缝,因此对于合拢检验,应该以焊缝为单元进行管理.在进行合拢检验管理时,首先应整理出所有的分段缝和总段缝,以便对应填报检验记录.合拢检验的主要评价指标包括焊前检查、焊后试验、密性试验、CM 点、到期完工率、物料利用率、报验合格率.

(3)舱室检验

船舶的舱室种类繁多,具备不同的功能.一般船舶中都设有机舱、货舱、油舱、压载水舱、生活舱室等.检验船舶舱室的目的是为了检验船舶结构的强度及承载力,保证舱室的承载力与完整性,从而实现各个舱室的功能.舱室密性试验的目的是保证船舶的稳性和结构完整性,同时为了防止腐蚀给船体结构带来的危害,因此舱室密性和涂层质量也是重要的评价指标.舱室检验的主要评价指标包括舱室完整性、舱室密性、涂层质量、舱室完工质量、到期完工率、报验合格率.

(4)管系检验

管系制作是船舶建造过程中的重要步骤,具有多品种、多规格、多批次、多数量的特点,制作与管理的工作量大,烦琐且复杂.管系检验的主要评价指标包括管系制作用时、焊前检验、焊后检验、无损探伤、压力试验、酸洗、涂装、到期完工率、物

料利用率、报验合格率。

3 船舶检验管理系统开发

3.1 系统架构

根据船舶建造项目评价模型的需求分析,基于 VS. net 平台,采用面向对象编程思想,以 Microsoft SQL Server 为数据库平台,开发了船

舶检验管理系统 (ship inspection management system,SIMS)的原型程序. 系统架构设计如图 2 所示,包括展示层、功能层、软件层和硬件层. 展示层为不同角色的用户提供统一的用户界面填报检验记录和访问数据库,功能层包括船舶检验、工作报表、查询统计、系统管理和辅助功能,软件层和硬件层为支撑层。

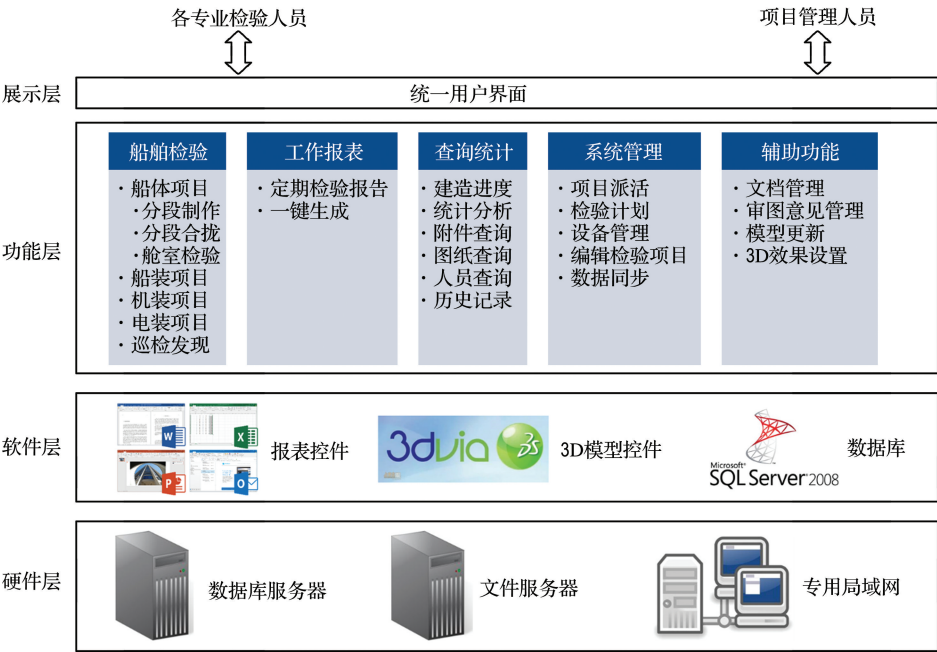


图 2 SIMS 系统架构
Fig. 2 System framework of SIMS

该系统提供基于 3D 模型的浏览方式以支持用户进行检验管理. 如图 3 所示,根据检验项目的特点,开发了两种三维模型:分段模型和舱室模型. 分段模型对分段、总段、分段合拢缝和总段合拢缝进行表达,舱室模型对全船各类舱室进行表达。

使用数据库存储方式,可以帮助用户有效地同时管理多个船舶建造项目. 一个用户同一时间只能访问一个项目的数据. 用户在登录后,需要选择某一建造项目才能进入主界面. 全船检验项目通常可以分为 5 部分:船体、舾装、轮机、管系和电气. 目前只针对分段和舱室相关的检验管理功能提供 3D 模型浏览支持. 将其他检验项目合并为一个统一的模块进行开发. 系统的检验管理功能包括分段制作、分段合拢、舱室检验、一般检验、设备检验、管系检验. 为支持更多类型的船厂具体生产设计情况,系统还提供预组段检验、分段定义和合拢定义 3 个功能。

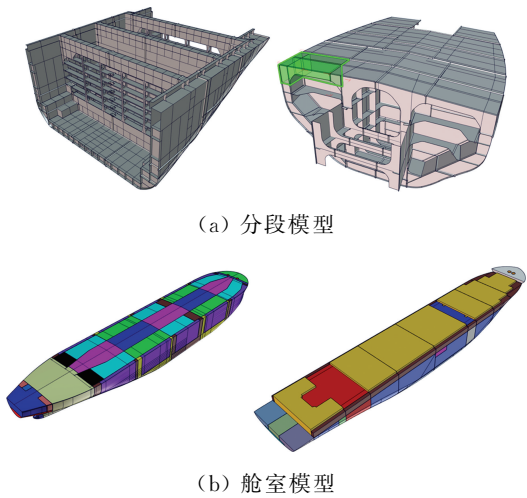


图 3 3D 模型
Fig. 3 3D models

为保证系统数据安全,具有一定权限的用户(如项目经理)才能查看多专业的检验记录和导出数据. 在系统中记录检查结果、输入检查记录、添

加检查照片后,根据用户指定的时间周期,自动输出工作报表.该系统可以在船舶建造期内收集详细的船舶检验信息,实现对大数据的存储与分析.

3.2 功能实现

以分段制作为例说明具有 3D 模型浏览支持功能的船舶检验记录填报、编辑与查询等管理功能.如图 4 所示,用户界面由 4 部分构成,分别为船舶分段结构树、分段检验记录列表、3D 模型展示和分段检验明细.在左侧分段结构树可根据区域对分段进行选择.在分段检验记录列表中显示各分段的综合检验记录,包括所属区域、总段号、分段号、检验状态、文字备注、检验日期、填报人.

考虑到并非每个分段都能一次通过检验,存在复检的情况,因此在这个列表中显示的是每个分段各指标的最终检验状态.如要查看历次检验记录,需要选中该分段号后,在下方分段检验明细区域点击历史记录按钮进行查看.左下部分是全船分段的 3D 模型,在分段检验记录列表中点击任一分段号,会在模型中高亮显示.右下部分为分段检验明细区域,在这里可以对各项检验项目进行填报、查看和修改.选择某一检验项,可以查看该检验项对应的 3D 模型云图,辅助用户直观地查看船舶建造进度以及建造质量的总体水平.

如图 5 所示,与分段制作相似,舱室检验由 4

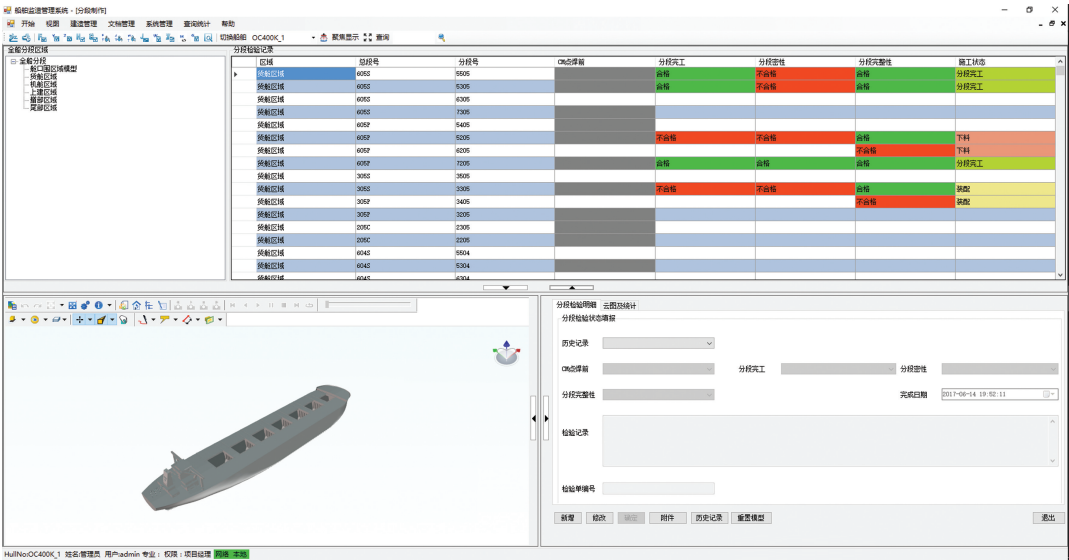


图 4 分段制作检验记录管理
Fig. 4 Block inspection record management

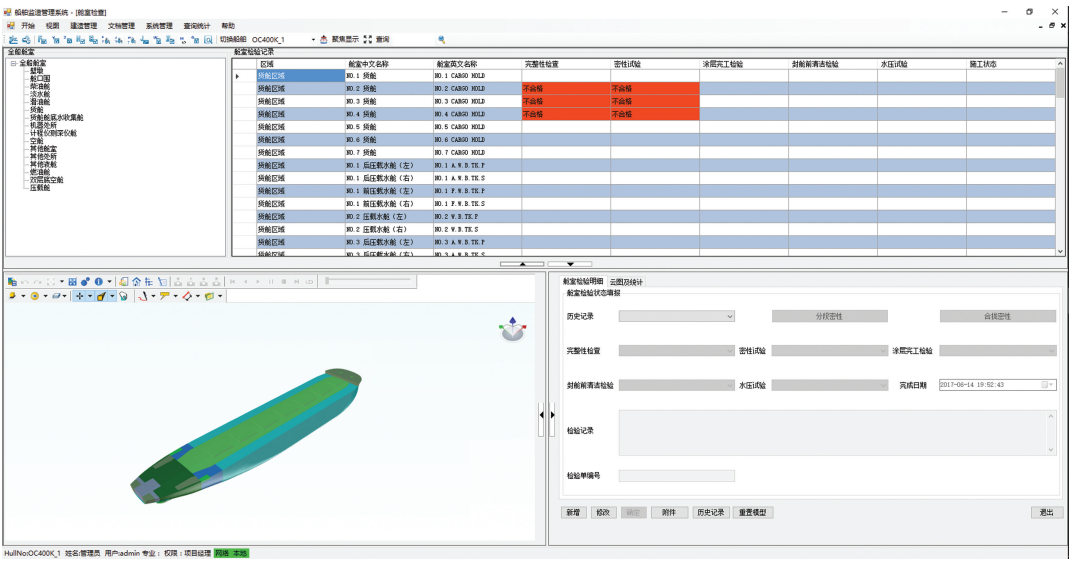


图 5 舱室检验记录管理
Fig. 5 Compartment inspection record management

个部分构成,分别是全船舱室结构树、舱室检验记录列表、3D 模型展示和舱室检验明细. 主要的填报检验指标包括完整性检查、密性试验、涂层完工检验、封舱前清洁检验和水压试验等.

在船舶建造期内的若干节点,根据需要,用户可选择需要输出的检验项目,系统以各检验人员填报的数据为基础,自动生成检验工作报告:总体进度图和分项进度图、包含附件照片的分专业各项检验记录、各检验项对应的 3D 模型云图.

4 实例验证

现以分段制作检验评价说明本文提出的船舶建造项目多指标评价模型. 输入指标包括生产工人数量(N_w)、专业复杂程度(N_s)、工时(W_h). 输出指标包括综合检验指标(CSI)、到期完工率(DCR)、物料利用率(MUR)和报验合格率(QR). 从船厂 CIMS 系统和船舶检验管理系统中分段制作检验记录中提取 14 个分段的生产和检验数据,不失一般性,将前 12 个分段的数据建立评价模型进行评价,最后两个分段的数据作为对照样本. 利用对照样本进行对比分析,能够直观地说明 DEA 分析结果的意义. 采用具有非阿基米德无穷小的 C^2R 模型进行评价,其输入、输出指标的数据以及相对有效性见表 1.

从表 1 可见,分段 7 和 9 的相对有效性较低,它们的各项输出指标尤其是物料利用率、报验合格率也处于较低的水平. 用对照样本分段 13 和 14 替换分段 7 和 9,重新进行评价,结果见表 2.

表 1 分段制作活动评价

Tab. 1 Evaluation of block production activity

分段	输入			输出				相对有效性
	N_w /人	N_s	W_h /h	CSI	DCR	MUR	QR	
1	11	3	120	0.90	1.00	0.96	1.00	0.909
2	10	2	110	0.94	1.00	0.92	1.00	1.000
3	12	4	140	0.90	0.97	0.83	0.50	0.852
4	11	2	125	0.95	1.00	0.90	1.00	1.000
5	11	2	117	0.85	0.80	0.87	0.50	0.824
6	10	1	110	0.88	0.90	0.96	0.50	1.000
7	12	3	150	0.84	0.70	0.85	0.33	0.730
8	10	2	106	0.98	1.00	0.97	1.00	1.000
9	11	3	130	0.79	0.67	0.78	0.33	0.733
10	10	2	102	0.95	1.00	0.86	1.00	1.000
11	10	2	98	0.87	0.86	0.92	0.50	1.000
12	15	2	150	0.91	1.00	0.86	1.00	1.000
13	9	2	140	0.92	1.00	0.95	1.00	—
14	11	2	105	0.85	1.00	0.88	0.50	—

表 2 使用对照样本进行分段制作活动评价

Tab. 2 Evaluation of block production activity using comparable samples

分段	输入			输出				相对有效性
	N_w /人	N_s	W_h /h	CSI	DCR	MUR	QR	
1	11	3	120	0.90	1.00	0.96	1.00	0.902
2	10	2	110	0.94	1.00	0.92	1.00	1.000
3	12	4	140	0.90	0.97	0.83	0.50	0.837
4	11	2	125	0.95	1.00	0.90	1.00	1.000
5	11	2	117	0.85	0.80	0.87	0.50	0.824
6	10	1	110	0.88	0.90	0.96	0.50	1.000
13	9	2	140	0.92	1.00	0.95	1.00	1.000
8	10	2	106	0.98	1.00	0.97	1.00	1.000
14	11	2	105	0.85	1.00	0.88	0.50	0.946
10	10	2	102	0.95	1.00	0.86	1.00	1.000
11	10	2	98	0.87	0.86	0.92	0.50	1.000
12	15	2	150	0.91	1.00	0.86	1.00	1.000

可见,分段 13 的相对有效性为 1.000,分段 14 的相对有效性为 0.946. 将分段 7 和 9 与分段 13 和 14 的数据进行对比,可以发现,适当的 N_w 和 W_h 是使 DMU 成为 DEA 有效的关键. 即要提高分段制作质量,应根据分段的建造复杂程度适当配置生产工人数量,制订合适的生产计划,合理安排工时. 如原生产计划制订的工期太紧张,导致工人一味赶工,有可能出现报验不合格,反而引起返工、复检等一系列流程,从而拖延工期.

5 结 语

船舶建造项目多指标评价是船舶建造过程中保证质量的重要环节,其实现需要两个关键要素,一是使用船舶检验管理系统软件记录建造过程中的各类工艺数据,二是选用合适的评价数学模型. 本文通过船舶检验管理系统软件的开发和使用将原有的检验流程信息化、电子化,使得船舶建造过程中产生的海量数据得以收集与存储,在此基础上使用 DEA 方法对各类建造项目进行分析,将数据转化为直观的评价结果展示出来,从而有效地利用大数据,为船舶建造过程的改进提供支持.

参考文献:

[1] FARRELL M J. The measurement of productive efficiency [J]. **Journal of the Royal Statistical Society. Series A (General)**, 1957, **120** (3): 253-290.

[2] CHARNES A, COOPER W W, RHODES E. Measuring the efficiency of decision making units [J]. **European Journal of Operational**

Research, 1978, **2**(6):429-444.

[3] PARK J, LEE D, ZHU J. An integrated approach for ship block manufacturing process performance evaluation: Case from a Korean shipbuilding company [J]. **International Journal of Production Economics**, 2014, **156**:214-222.

[4] Jr. PIRES F C M, LAMB T. Establishing performance targets for shipbuilding policies [J]. **Maritime Policy & Management**, 2008, **35**(5):491-502.

[5] ÖLÇER A I, ALKANER S, TURAN O. Integrated multiple attributive decision support system for producibility evaluation in ship design [J]. **Journal of Ship Production**, 2004, **20**(3):147-163.

[6] 田严波,叶 敏,胡方珍,等. 改进 DEA 方法在船型多方案优选中的应用研究[J]. 船舶工程, 2016, **38**(S1):23-27.

TIAN Yanbo, YE Min, HU Fangzhen, *et al.* Research on the application of improved DEA method for the optimal choice of ship forms [J]. **Ship Engineering**, 2016, **38** (S1): 23-27. (in Chinese)

[7] 张 浩,徐宣国. 基于 DEA 的造船企业经营效率分析评价[J]. 系统管理学报, 2010, **19**(1):49-55.

ZHANG Hao, XU Xuanguo. Analysis and evaluation on management efficiency of shipbuilding enterprises based on the DEA [J]. **Journal of Systems & Management**, 2010, **19**(1):49-55. (in Chinese)

[8] 吴 帅,林 焰. 基于模糊判断的船舶托盘设计质量评价[J]. 造船技术, 2015(5):43-45, 63.

WU Shuai, LIN Yan. Quality evaluation of ship's tray design based on fuzzy judgment [J]. **Marine Technology**, 2015(5):43-45, 63. (in Chinese)

[9] 张 浩,张步华. 船舶分段建造工程工期、成本、质量综合均衡优化研究[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2013, **27**(6):591-595.

ZHANG Hao, ZHANG Buhua. Comprehensive balanced optimization of time, cost and quality of ship section construction [J]. **Journal of Jiangsu University of Science and Technology(Natural Science Edition)**, 2013, **27**(6):591-595. (in Chinese)

[10] 郭文杰,张新龙. 基于模糊层次分析法的船舶建造质量风险评估[J]. 中国造船, 2011, **52**(1):216-224.

GUO Wenjie, ZHANG Xinlong. Shipbuilding quality risk assessment based on fuzzy-AHP model [J]. **Shipbuilding of China**, 2011, **52**(1):216-224. (in Chinese)

Research on multi-index evaluation
of ship construction project based on DEA method

LI Kai^{*1}, LIU Manting¹, ZHANG Nan², ZHAO Zhichao¹

(1. School of Naval Architecture & Ocean Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. Shanghai Wison Offshore & Marine Co. Ltd., Shanghai 201210, China)

Abstract: Ship construction project evaluation is a necessary means of quality control for new building ship, which has a feature of multiple indices. The accuracy depends on whether the data source is reliable and the evaluation model is reasonable. Due to the lack of valid data collection approach, mass of production and inspection data are not used effectively. In view of such situation, a prototype program of ship inspection management system is developed to assist user in filling in inspection records conveniently. Based on this, data envelopment analysis (DEA) method is proposed for multi-index evaluation of ship construction project, which can provide evidence for production management. By using the real production and inspection data of a VLCC construction project, the feasibility and validity of the proposed multi-index evaluation model is verified.

Key words: multi-index evaluation; ship construction; data envelopment analysis; quality management