



# 基于仿真分析的煤炭装船码头筒仓群 装卸工艺系统优化

刘成鑫, 吴立新, 唐 颖

(中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

**摘要:** 大型煤炭装船码头采用筒仓群储运系统, 具有自动化程度高、环保效果好以及集约化发展等多方面优势, 但相关储运系统装卸工艺设计无成熟的可供参考的规范。而基于经验公式的计算, 无法准确反映出不同工艺平面布置方案对通过能力的影响。本文基于已建黄骅港三、四期煤炭码头工程, 根据筒仓群工艺平面布置不同, 提出 4 个典型的装卸工艺方案; 然后基于 Simio 系统仿真软件, 建立了 4 个方案的仿真模型, 计算各个方案合理的通过能力; 最后对各个方案进行综合经济技术指标比选, 并给出类似工程筒仓群平面布置的优化建议。

**关键词:** 筒仓群; 装卸工艺; 卸料小车; 仿真

**中图分类号:** U 656.1+33; V 448.15+3

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1002-4972(2022)S1-0063-06

## Handling process optimization of grouping silos in export coal terminal by simulation

LIU Cheng-xin, WU Li-xin, TANG Ying

(CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

**Abstract:** There are many advantages applying grouping silos in large export coal terminal, such as high level of automation, environmentally friendly and smaller footprint etc. But there is no mature standard for reference about the grouping silo handling process layout. However, the calculation based on the empirical formula cannot accurately reflect the influence of different handling process layout schemes on the passing capacity. This paper is based on the Phase 3 and Phase 4 projects of coal harbor at Huanghua Port. According to the different layout of the grouping silos, four typical handling process options were put forward. Then the reasonable terminal throughput capacity of every option was got by the simulation study with Simio. At last, detailed comparisons were taken among the four options about the main technical and economic indicators, and a few suggestions were given about the grouping silos layout for similar projects.

**Keywords:** grouping silos; handling process; coal unloading trolley; simulation

筒仓作为存储散状物料的设施, 在煤炭矿山、钢铁冶炼、火力发电系统已有多年的建设应用实例, 但在港口工程中应用较少。黄骅港三期、四期煤炭码头工程开创了在专业化煤炭下水港口建设筒仓封闭储煤系统的先河, 目前已稳定运行多年, 年装船量维持在 1 亿 t 左右。

港口筒仓群堆存系统具有建设规模大, 进、出仓能力大和可靠性高等特点<sup>[1]</sup>, 目前国内外还没有成熟的可供参考的设计规范。《港口工程煤炭筒仓储运系统设计导则》针对大型煤炭装船码头筒仓群建设规模(总容量)、单仓容量、进出仓机械设备选型以及应急堆场的布置等方面均有详细的

**收稿日期:** 2021-12-23

**作者简介:** 刘成鑫(1987—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为装卸工艺设计。

介绍<sup>[2]</sup>，但针对筒仓群在采用不同矩阵平面形式下，对应进、出仓作业线的布置原则，以及不同筒仓群平面布置对码头通过能力影响和对应的经济指标等方面的系统研究还相对较少。

本文以现有黄骅港三、四期煤炭码头工程为基础，综合应用计算机仿真技术，针对不同的筒仓群装卸工艺平面布置方案，从系统通过能力、工艺流程、投资和运营成本等几个方面进行深入研究和分析。

1 平面布置方案

大型煤炭装船码头采用筒仓群煤炭储运系统具有以下优势：1) 节约土地资源，占地约为常规露天堆场的 1/4；2) 出仓效率高、运行稳定，综合效率约为常规堆场项目的 1.5 倍；3) 自动化程度高，劳动定员约为常规堆场项目的 1/5；4) 环保效果好，基本实现零排放。本文以黄骅港煤炭港区三、四期工程为基础，工程共建设 4 个 10 万吨级专业化煤炭装船泊位，占用岸线总长度 1 230 m，设计年吞吐量 5 000 万 t/a。

火车卸车系统采用“O”形转子串联四翻式翻车机，实际作业效率可达 25 次/h，翻堆线的额定输送能力为 8 000 t/h。铁路站场采用贯通式布置形式，每条翻车机作业线布置 2 条重车线、1 条空车线和 2 条清车线。码头装船作业远期配备 4 台移动式装船机，额定装船能力为 8 000 t/h<sup>[3-4]</sup>。

堆场采用筒仓群储运系统，共布置 24 座直径 40 m、高 43.4 m 的储煤筒仓，单仓容量 3 万 t，堆场总容量 72 万 t。筒仓采用锥底布置形式，每排筒仓仓顶煤炭进仓采用带式输送机+移动式卸料小车方式。卸料小车能力与仓顶进仓线能力一致，均为 8 000 t/h。堆场出料考虑混配煤作业需求，仓底出料设备采用活化给料机。单个筒仓布置 6 个仓下漏斗，为 2 排 3 列布置，分别向 2 条皮带机供煤。筒仓群旁边布置露天堆场，作为倒仓

应急堆场。

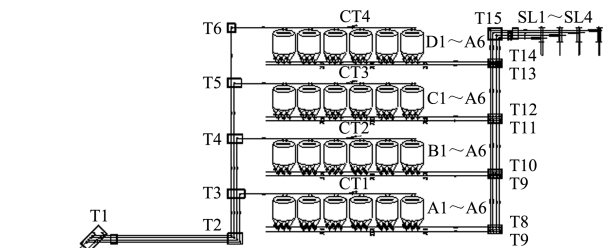
堆场筒仓群采用矩阵布置形式，根据单条作业线对应筒仓数量的不同以及筒仓群进仓场端线布置位置和出仓皮带机能力不同，共提出 4 个装卸工艺平面布置方案，见图 1。其中方案 1 与已建三、四期工程布置类似，方案 2~4 在方案 1 基础上进行了优化。

1) 方案 1：按照 4 排 6 列布置，单条出仓皮带机的额定能力为 4 000 t/h，形成 4 条进仓作业线和 4 条出仓作业线。

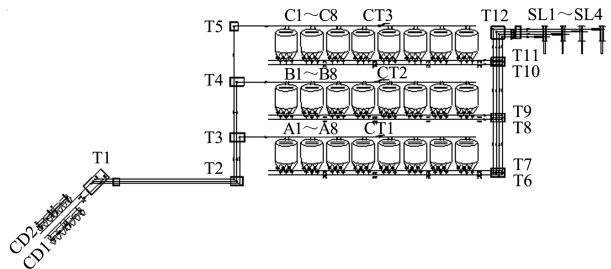
2) 方案 2：按照 3 排 8 列布置，单条出仓皮带机的额定能力为 8 000 t/h，形成 3 条进仓作业线和 6 条出仓作业线。

3) 方案 3：按照 2 排 12 列布置，单条出仓皮带机的额定能力为 8 000 t/h，形成 2 条进仓作业线和 4 条出仓作业线。

4) 方案 4：按照 2 排 12 列布置，在方案 3 的基础上将进仓场端线布置在筒仓群的中央，物料通过转运站内的三通溜槽分别转接至两侧筒仓的进仓线。作业线数量同方案 3。



a) 方案1



b) 方案2

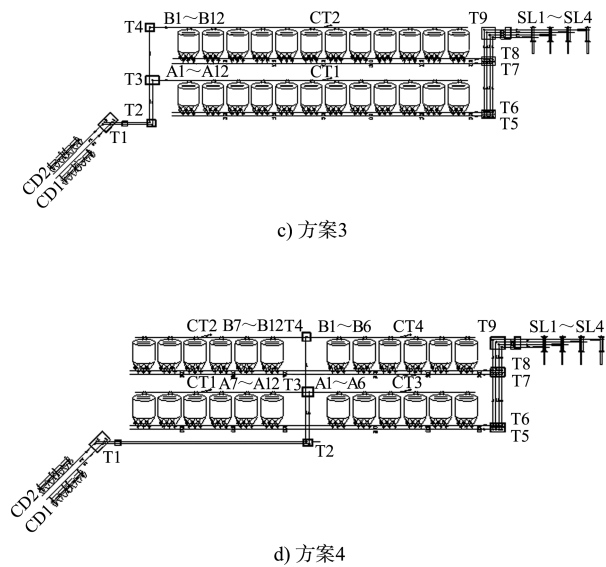


图 1 装卸工艺流程

## 2 装卸工艺系统仿真

### 2.1 仿真研究原则

筒仓群装卸工艺平面布置在现有三、四期工程的基础上进行了优化,但是现有的装卸工艺经验计算公式无法准确反映出不同工艺平面形式下、不同的进出仓线设置原则对码头通过能力的影响。因此,搭建了工程装卸工艺系统仿真模型,对比

分析各优化方案的合理通过能力、堆场容量、设备利用率和泊位利用率等技术指标。

为合理简化模型,不单独考虑设备故障、气象、潮汐以及航道等对码头通过能力的影响,直接引用三、四期工程的实际运营数据作为仿真输出验证目标。模型输入的数据包括:列车自港前站至翻车机前重车场时间 59 min,列车自翻车机后空车场至港前站时间 208 min,船舶航道和港池航行时间 100 min,卸料小车平均行驶速度 15 m/min。输出验证的数据包括:码头装船能力 5 000 万 t/a,泊位利用率 82%,翻车机卸车能力(CD10~CD13) 5 000 万 t/a,翻车机综合作业率(CD10~CD13) 49.84%,筒仓群平均堆存量 50.4 万 t(三期)/50.04 万 t(四期),平均每列车卸车时间 0.96 h,火车平均在港停时 6.35 h。

仿真模型参照的工程到港船型及生产运营数据见表 1。其中:作为模型输入的参数为平均载质量、船舶艘次比、平均待装时间、平均待离时间和平均停机时间;作为输出验证的参数为平均在港停时和平均泊位停时。

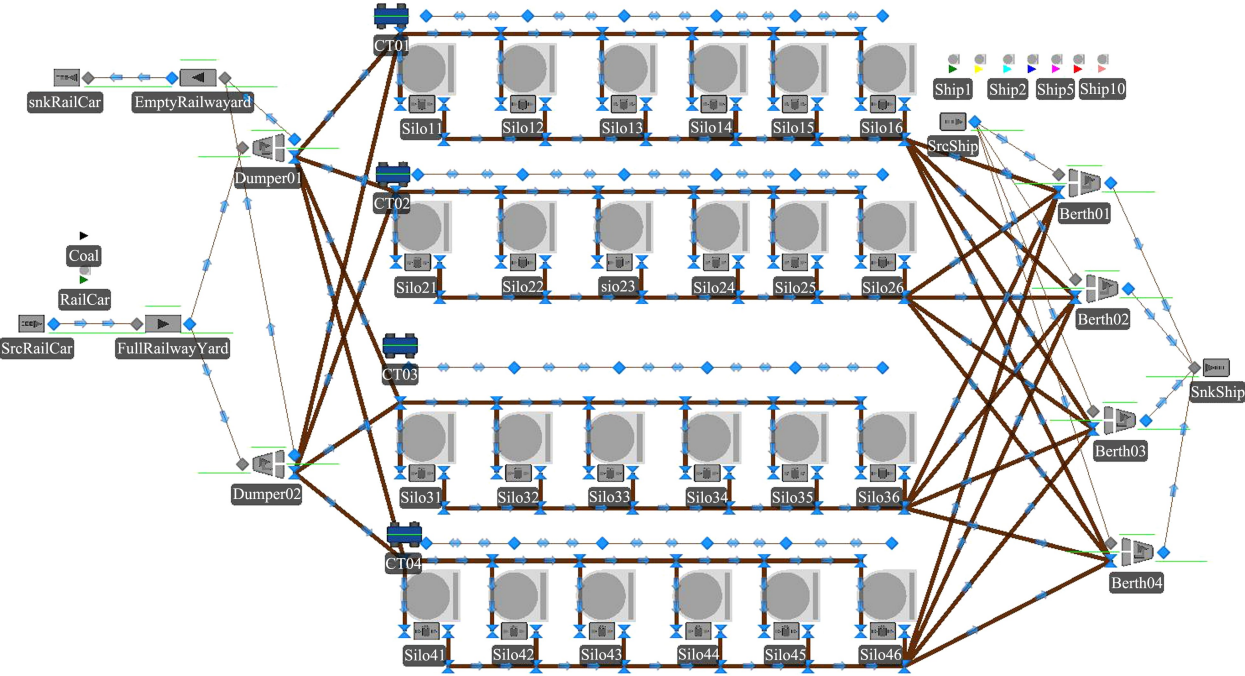
表 1 黄骅港三、四期煤炭码头工程到港船型及生产运营数据

船舶吨级/万 DWT	平均载质量/万 t	船舶艘次百分比/%	平均在港停时/h	平均泊位停时/h	平均待装时间/h	平均待离时间/h	平均停机时间/h
1.0	1.151 0	2.1	88.09	27.81	1.83	4.34	4.10
1.5	1.597 5	3.2	117.84	27.10	3.27	3.56	6.10
2.0	2.043 6	6.4	101.66	19.50	3.19	3.91	4.88
3.5	3.614 7	21.2	107.65	24.71	3.01	3.87	7.08
5.0	5.172 0	48.4	113.73	28.31	2.67	3.64	8.95
7.0	7.407 6	18.2	125.82	32.85	2.42	4.37	10.53
10.0	10.033 4	0.6	143.95	40.80	1.73	9.52	11.50
平均值	4.878 4	—	113.65	27.83	2.73	3.89	8.40

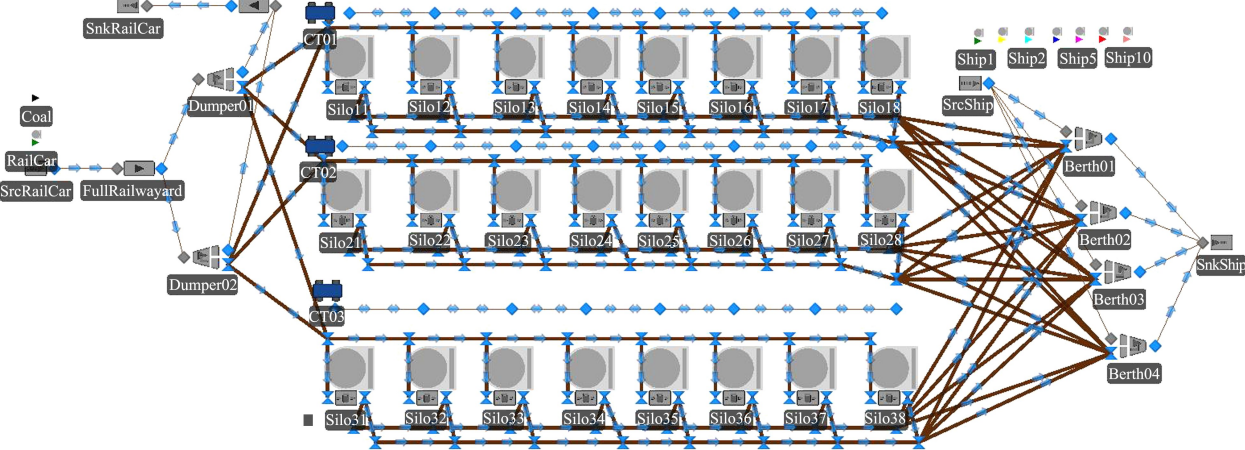
### 2.2 仿真模型建立

仿真模型采用通用系统仿真软件 Simio v9 建立,Simio 是美国 Simio LLC 公司研发的新一代基于智能对象技术的仿真模拟软件,模型中的逻辑

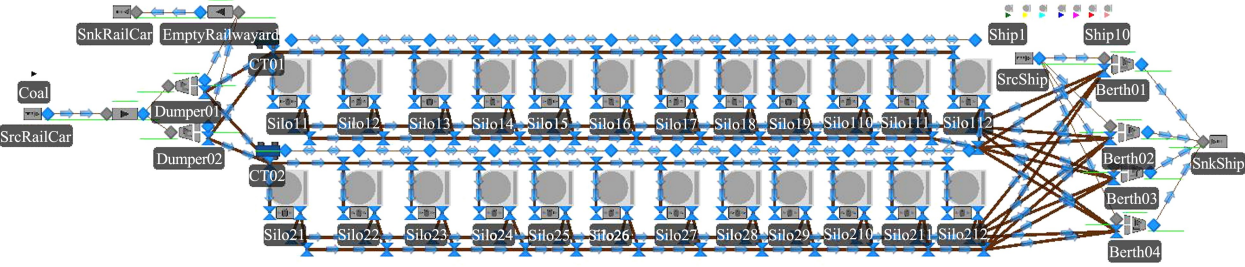
过程由图形化编程实现<sup>[5]</sup>。仿真模型的陆侧边界为黄骅港港口站,海侧边界为船舶锚地,4 个方案的仿真模型见图 2。



a) 方案1



b) 方案2



c) 方案3



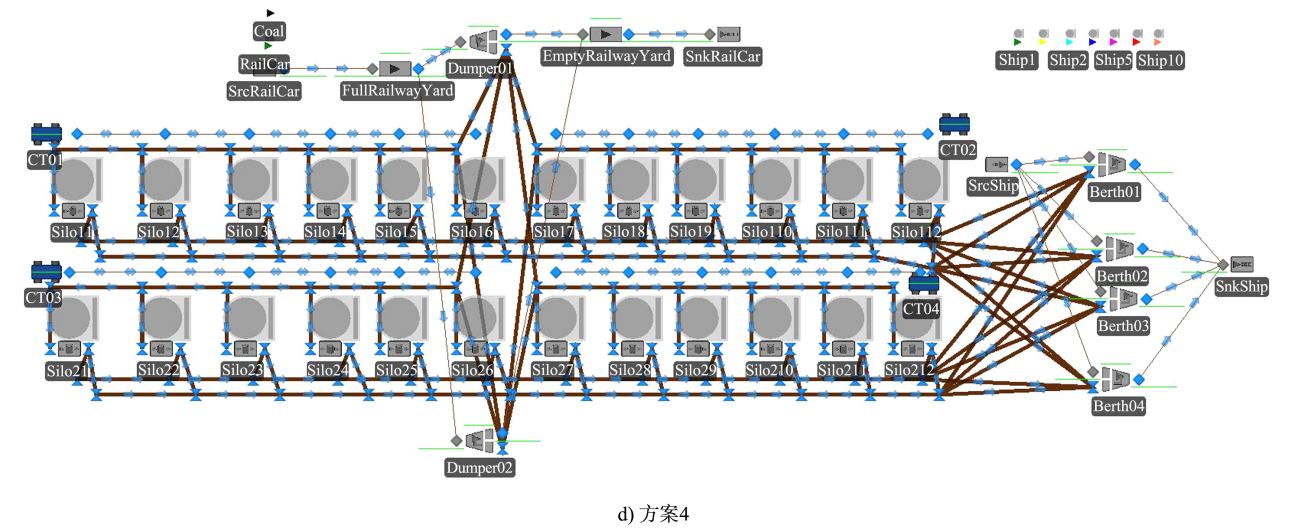


图 2 基于 Simio 筒仓群装卸工艺平面布置方案

2.3 系统仿真计算

2.3.1 主要输入假定

- 1) 火车到港规律总体上服从泊松分布, 但当港口铁路站场内火车数量接近最大能力时, 将对火车到达施加限制措施; 火车铁路作业时间服从均匀分布; 每列火车到达载质量为 2 万 t 时, 相关作业参数均以 5 000 t 编组为基本单元进行统计。
- 2) 船舶到港规律服从泊松分布, 船舶吨级、艘次比和相关作业参数见表 1。船舶航道内航行时间服从均匀分布。
- 3) 卸车流程、装船流程综合作业效率服从三角分布。
- 4) 分煤种管理, 一个筒仓只能堆存一个煤种。采用装船配煤, 选择同一排筒仓中的不同筒仓同时出料进行配煤。
- 5) 煤炭进仓堆存原则: 优先选择当前煤种总堆存量最小的排, 在该排中选择当前堆存量最大但剩余容量大于火车装载量的筒仓。

- 6) 煤炭出仓装船原则: 优先选择当前总堆存量最大的排, 在该排中选择当前煤种堆存量最大的筒仓。
- 7) 对于同一座筒仓, 进仓作业和出仓作业不能同时进行。
- 8) 筒仓铺底煤容量为 650 t。仓顶卸料小车行驶速度服从三角分布。
- 9) 码头装船和堆场、铁路的年运营天数相同。

3.3.2 仿真试验

仿真试验按照等差递增的方式从吞吐量 4 000 万 t/a 对应的火车流和船舶流的到港密度开始试验, 以 100 万 t 为步长逐步加大火车流和船舶流的到港密度。

仿真试验终止原则为: 火车在港停时和船舶在港停时与现有三、四期工程比较, 相差幅度均小于 5% 以内时停止试验。三、四期工程火车平均在港停时 6.35 h, 船舶平均在港停时 113.65 h, 其允许的平均时间区间分别为 [6.03 h, 6.67 h] 和 [107.97 h, 119.33 h]。相关仿真计算结果见表 2。

表 2 筒仓群装卸工艺系统仿真计算结果

方案	码头装船能力/ (万 t·a <sup>-1</sup> )	泊位利用率/ %	作业线数量/ (进仓线×出仓线)	堆场平均堆 存量/万 t	船舶平均在港 停时/h	船舶平均泊位 停时/h	火车平均在港 停时/h
1	5 160	81.32	4×4	49.26	112.34	27.80	6.15
2	5 107	81.09	3×6	52.89	113.94	28.05	6.32
3	5 012	79.78	2×4	49.79	109.17	28.04	6.51
4	5 262	81.35	2×4	47.95	108.78	27.58	6.24

3 平面布置优化

3.1 装卸工艺流程

本工程共配置 2 台四翻式翻车机和 4 台移动式装船机，为满足卸车系统和装船系统作业线数量的匹配要求，筒仓群进仓线数量不应小于 2 条，出仓线数量不应小于 4 条<sup>[6]</sup>。

方案 1 布置 4 排筒仓，形成 4 条进仓作业线和 4 条出仓作业线。仓顶配置 4 台卸料小车，仓底单条出仓皮带机的额定能力为 4 000 t/h。方案 2~4 将筒仓排数分别优化至 3、2、2 排，对应进仓线数量也分别减少至 3、2、2 条。为满足出仓作业线数量，将仓底出仓皮带机的能力由 4 000 t/h 提高至 8 000 t/h，则出仓线数量分别为 6、4、4 条。

按照分煤种管理，一个筒仓只能堆存一个煤种。通过装船流程实现配煤作业，同一排不同的筒仓分别出料完成配煤。方案 1 单排筒仓数量最少为 6 座，方案 3、4 单排筒仓数量最多为 12 座，方案 2 为 8 座。

综上，为保证与卸车系统、装船系统的工艺流程相匹配，满足作业要求，优化方案增加了筒仓群单排筒仓的数量，提高了堆存和配煤工艺系统的灵活性。

3.2 主要技术指标

基于 Simio 的计算机仿真来计算码头装船能力、泊位利用率、火车和船舶在港停时等技术指标，见表 3。经分析可知，码头装船能力相差最大幅度约为 5%，泊位利用率相差最大幅度约为 2%，火车和船舶在港停时相差最大幅度分别约为 4% 和 5%。

方案 1、4 分别配置 4 台卸料小车，每台卸料小车的工作行程约为 230 m。方案 2、3 分别配置 3 台和 2 台卸料小车，对应的作业行程分别为 322 m 和 506 m。方案 3 卸料小车利用率最高，为 50.65%；方案 2 次之，为 33.9%；方案 1 和方案 4 最小，约为 25%。

表 3 卸料小车作业参数对比

方案	卸料小车数量/台	卸料小车工作行程/m	卸料小车作业筒仓数量/座	卸料小车设备利用率/%
1	4	230	6	25.45
2	3	322	8	33.90
3	2	506	12	50.65
4	4	230	6	24.79

综上，优化后的工艺方案 2~4 均能满足年运量的要求。主要装卸设备和泊位利用率、火车和船舶在港停时等技术指标均与方案 1 基本相当，且由于优化了筒仓群进仓作业线和仓顶卸料小车的数量，大幅提高了卸料小车的利用率。

3.3 工程投资和生产运营成本

4 个装卸工艺方案的技术经济指标见表 4，每个方案的筒仓数量、堆场容量、堆场面积、出仓设备、翻车机和装船机数量基本相同。由于筒仓群装卸工艺平面布置不同，方案 1 带式输送机总长度、转运站数量、装机容量和设备投资均最高。方案 2、3 优化减少了卸料小车和进、出仓带式输送机数量，装机容量和设备投资均逐步减少。与方案 1 相比，方案 2、3 的装机容量分别降低 9.5% 和 19.4%；设备投资分别降低 5.2% 和 11.3%。方案 4 将进仓场端线布置在筒仓群中部，卸料小车数量增加为 4 台，装机功率和设备投资也相应提高。

表 4 装卸工艺方案对比

方案	堆场面积/ 万 m <sup>2</sup>	堆场堆存 容量/万 t	四翻翻 车机/台	装船机/ 台	移动卸料 小车/台	活化给 料机/台	带式输 送机/m	转运站/ 座	总装机 容量/kW	设备总 投资/万元
1	10.95	72	2	4	4	144	16 664	15	55 010	163 874
2	10.11	72	2	4	3	144	14 431	12	49 765	157 048
3	9.47	72	2	4	2	144	12 251	9	44 340	145 284
4	9.97	72	2	4	4	144	13 335	9	47 040	151 978