

高海拔矿山运输方式研究和运输方案比选

樊志刚

中冶沈勘工程技术有限公司，辽宁 沈阳

收稿日期：2025年11月10日；录用日期：2025年12月28日；发布日期：2026年1月7日

摘要

针对新疆某高海拔、地形陡峻、气候恶劣的露天铁矿，论文对其矿石运输系统改扩建开展方案比选研究。在分析现有汽车 - 溜槽 - 汽车运输方式存在高差大、易堵塞、安全隐患突出等问题基础上，提出汽车公路、汽车 + 溜井、汽车 + 皮带机、汽车 + 斜坡箕斗四种可行运输方案。采用定性分析、比选矩阵与费用比较相结合的方法，从投资、运营费、安全性及适应性等多维度进行综合评估。结果表明，斜坡箕斗方案虽初始投资略高(3861万元)，但年运营费最低(451万元)，投资回收期仅2.4~3.8年；设定年产能和运输单价作为关键变量变化 $\pm 10\%$ 、 $\pm 20\%$ 情况下，斜坡箕斗方案节省的年运营费1.7~4.8年即可补偿回多出的建设投资，从经济上仍是最合理的方案，推荐该方案作为矿山改扩建首选运输方式。采用定性分析法、比选矩阵法和费用比较法相结合的方案比较方法可以将复杂的技术方案比选结果转化为直观的表格或柱状图，便于决策者比较和选择，克服了其他比选方法的局限性，比选结果更具说服力，更具科学合理性。

关键词

运输方式，运输方案比选，皮带机运输，汽车公路运输，溜井运输，斜坡箕斗运输，溜槽运输

Research on Transportation Methods and Comparison of Transportation Schemes for High-Altitude Mines

Zhigang Fan

Shenkan Engineering & Technology Co., Ltd., MCC Group, Shenyang Liaoning

Received: November 10, 2025; accepted: December 28, 2025; published: January 7, 2026

Abstract

Focusing on an open-pit iron mine in Xinjiang characterized by high altitude, steep terrain, and harsh

climate, this paper carries out a comparative study on the expansion and reconstruction of its ore transportation system. After analyzing the problems of the existing truck-chute-truck transportation method, such as large elevation difference, easy clogging, and prominent safety hazards, four feasible transportation schemes are proposed: all-truck road, truck + ore pass, truck + belt conveyor, and truck + slope skip hoist. A comprehensive evaluation is conducted from multiple dimensions including investment, operating cost, safety, and adaptability by combining qualitative analysis, comparison matrix, and cost comparison methods. The results show that although the slope skip hoist scheme has a slightly higher initial investment (38.61 million yuan), it has the lowest annual operating cost (4.51 million yuan) and a payback period of only 2.4 to 3.8 years. When key variables such as annual production capacity and transportation unit price are varied by $\pm 10\%$ and $\pm 20\%$, the additional construction investment of the slope skip hoist scheme can be recovered through the saved annual operating cost within 1.7 to 4.8 years. Economically, it remains the most reasonable scheme and is recommended as the preferred transportation method for the mine expansion and reconstruction. The scheme comparison method combining qualitative analysis, comparison matrix, and cost comparison can transform complex technical scheme comparison results into intuitive tables or bar charts, facilitating decision-makers' comparison and selection, overcoming the limitations of other comparison methods, and making the comparison results more persuasive and scientifically reasonable.

Keywords

Transportation Method, Comparison and Selection of Transportation Schemes, Belt Conveyor Transportation, Truck Highway Transportation, Chute Shaft Transportation, Slope Skip Transportation, Chute Transportation

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

新疆某铁矿是一座在产露天矿山，位于帕米尔高原，地形陡峻，坡度在 $20^\circ\sim40^\circ$ 之间，海拔高度 4000~4800 m，比高 500~800 m，属中深切割区。根据矿区地质详查资料，矿区地层划分属西昆仑地层分区之公格尔地层小区。区内出露的主要地层有元古界布伦阔勒岩群(Pt1B)、下志留统温泉沟群(S1W)、中上志留统达坂沟群(S2-3D)、未分志留统(S)、中泥盆统克孜勒陶组(D2kz)和第四系(Q)。矿区气候为较典型的高寒大陆性气候，季节及昼夜温度变化大，气候干燥寒冷，即便在夏季早晚也需穿棉衣。年降雨量很少，且多集中在冬季。每年 9 月中下旬开始降雪，直到第二年 4 月中下旬冰雪才消融。春、夏季多风，每年的 5 月中下旬~9 月中上旬为最佳野外工作时间，但常有雨雪和冰雹，影响野外工作。矿山建设条件和生产条件极端恶劣，矿体处于 4200~4800 m 处的山坡和山顶上。矿山实际年工作时间仅 280 天，矿区不具备建设选厂的条件，采场采出的原矿需先运到山下 4070 m 的矿石转载站，再由外运汽车运至 100 km 外的选厂。矿山原有的运输方式是汽车 - 溜槽 - 汽车方式：采场矿石由汽车运至 4490 m 溜槽卸矿平台，经溜槽溜放至 4300 m 矿仓，在 4300 m 平硐内装入外部运输汽车运至选厂。现状溜槽运输矿石溜放高度 190 m，存在安全隐患；而且矿石含水率高，高原地区容易结冰，造成溜槽底部矿仓放矿口经常堵塞，每年因溜井堵塞事故停车时间达 200 h 以上。现状溜槽运输方式已不适应矿山的生产，要在进行矿山改扩建设计时寻求更合理的运输方式。矿山改扩建设设计达产期年产矿石量 300 万 t/a，矿山生产平均剥采比为 3:1，每年剥离 900 万 t/a 岩石。排土场距离采场较近，岩石汽车运距仅 1.5 km，岩石运输仍保留原来的

汽车公路运输方式，只需对露天矿的矿石运输进行方案优化研究和比选。

根据矿区现状地形条件，经过系统分析研究，找到矿石运输可行的运输方案有如下四种：汽车公路运输、汽车 + 平硐溜井运输、汽车 + 皮带机运输和汽车 + 斜坡箕斗运输[1]-[3]。图 1 绘出各种运输方案平面路由图。

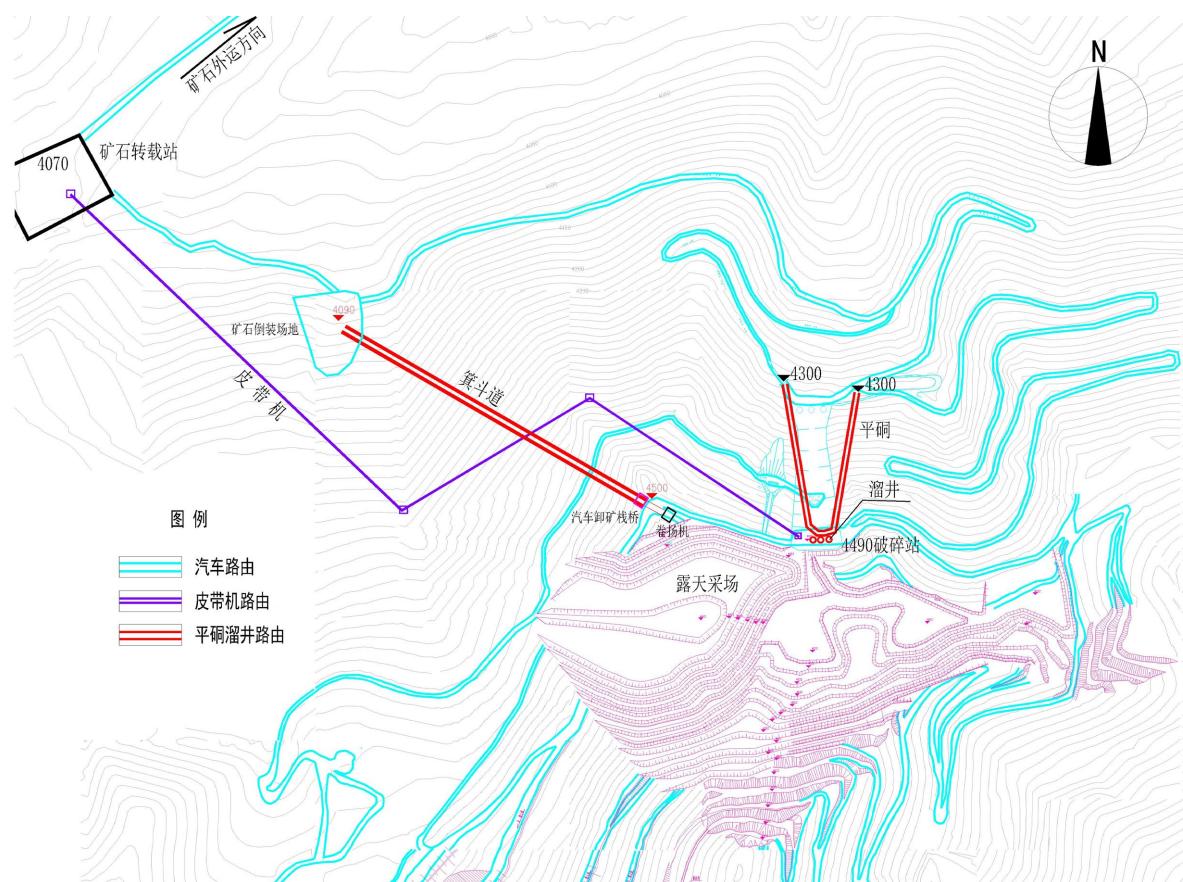


Figure 1. Plan view of various transportation routes

图 1. 各种运输方案平面路由图

2. 运输方案比选方法的确定

运输方案比选常用的方法有多种[4]-[25]，详见表 1。运输方案的比选方法种类较多，不同方法适用于不同场景，以下是常见的几类方法及其特点：

1) 定性分析法[6]-[9]

特点：通过专家经验、直观判断对方案进行优劣比较，常用于初步筛选或数据不足时。**优点：**简单、快速、无需大量数据。**缺点：**主观性强，缺乏量化依据，精度较低。**适用场景：**前期方案粗选、数据缺乏或时间紧迫时。

2) 定量分析法[19]-[25]

a) 费用比较法

特点：通过计算各方案的投资和运营成本，比较总费用。**优点：**直观、易于理解。**缺点：**通常只考虑静态费用，忽略资金时间价值。**适用场景：**投资规模相近、运营期短的简单运输系统。

b) 贴现总成本法(动态经济评价)[5]

特点：将未来各年运营费用贴现到现值，比较总成本。优点：考虑资金时间价值，结果更科学。缺点：计算复杂，需预测长期数据。适用场景：大型、长期项目，如露天矿运输方案比选。

3) 多指标综合评价法[10]-[25]

a) TOPSIS 法(逼近理想解排序法)

特点：构建评价指标体系，计算各方案与理想解的接近程度。优点：可处理多指标、多方案问题，结果客观。缺点：指标权重确定较复杂。适用场景：超限货物、铁路等特殊运输方案评价。

b) AHP-灰色关联度法[9]-[12]

特点：结合层次分析法(AHP)确定权重，再用灰色关联度排序。优点：兼顾主观判断与客观数据，适用于多因素系统。缺点：计算步骤多，对数据质量要求高。适用场景：公路大件运输等复杂系统。

4) 比选矩阵法/对比表法[18]

特点：将各方案的关键指标(如成本、时效、安全性、灵活性等)列出，进行横向对比。优点：结构清晰，便于决策。缺点：难以处理指标间权重差异。适用场景：国际贸易、物流运输方案初步筛选。

5) 净现值(NPV)法[5]

特点：计算各方案在整个生命周期内的净现值，选择净现值最优者。优点：动态反映经济效益。缺点：需完整现金流数据。适用场景：投资大、周期长的运输系统，如矿山、港口等。

Table 1. Comparison table of scheme selection methods

表 1. 方案比选方法对比表

方法名称	是否定量	是否考虑时间价值	是否多指标	适用场景简述
定性分析法	否	否	否	初步筛选、数据不足
费用比较法	是	否	否	简单系统、短期项目
贴现总成本法	是	是	否	长期、大型项目
TOPSIS 法	是	可扩展	是	多指标、复杂运输方案
AHP-灰色关联度法	是	可扩展	是	多因素、多方案系统
比选矩阵法	半定量	否	是	运输方案初步选择
净现值法	是	是	否	投资型项目全生命周期经济评价

表 1 中所列各种比选方法中，费用比较法通过计算各方案的投资和运营成本，简单易行，方便直观、易于理解。虽然只考虑方案的静态费用而忽略资金时间价值，但如果方案之间差异大，也可以比较出方案的优劣。参比方案的投资规模相近、矿山运营期短、运输系统简单，费用比较法适用项目的方案比选。如果只简单采用一种比选方法很难把项目所推荐的几种运输方式的差异化充分体现出来，难以区别每种方案的技术经济指标的优劣，让决策者仍然无从做出合理选择。采用定性分析法、比选矩阵法和费用比较法相结合的方式能够发挥三种比选方法的优点，能把所列方案的优劣充分显现出来让决策者更方便做出选择。

3. 运输方案定性比较

定性比较是通过对各种运输方案的优缺点比较，把缺点比较明显的方法摒弃，把优点比较明显的方案推荐出来。对于优缺点分辩明显的方案，通过定性比较可以鉴别出来，但相对于定量比较还是过于粗浅，尤其对于优缺点区别不是特别明显的方案比选，通过此方法就难以鉴别开来。案例所列举的几种运

输方案定性比较详见表 2。从表 2 中可以定性列出每种运输方案的优劣，但要确定哪个方案最优，还不好下结论，或者结论说服力不强。

Table 2. Qualitative comparison of transportation modes
表 2. 运输方案定性比较表

优缺点	方案一 (汽车公路)	方案二 (汽车 + 长溜井)	方案三 (汽车 + 皮带机)	方案四 (汽车 + 斜坡箕斗)
优点	机动灵活，能够适应复杂的地形和运输路线，对运输起点和终点的基础设施要求低，可随时调整运输路线以应对突发情况。无需建设额外的固定运输设施，如溜井、皮带机等，前期建设投资相对较低。	进一步延长了溜井的长度，更大程度地减少了汽车的运输工作量，降低了运输过程中的粉尘污染，有利于环境保护。长溜井的设置使得物料运输更加集中和高效，提高了整体运输效率。	皮带机运输的效率高且连续性强，能够实现大规模、高效率的物料运输，适合长距离、大运量的运输需求。运输过程中物料不易撒落，对环境的影响较小，且皮带机的运行相对稳定，故障率低。	投资省；运营低；下行重斗发电抵消上行耗电，维修量远小于汽车；爬坡能力强：大倾角自溜，斜坡即可克服 410 m 高差，占地少，沟道适应性好。环保安全：封闭溜槽 + 干雾抑尘，粉尘可控；汽车不再长距离下坡制动，运输事故率显著降低。绿色增效：势能发电年收益 1200 万元以上，符合绿色矿山政策。
缺点	汽车运输的能耗和运营成本相对较高，尤其是溜井建设成本高，当运输距离较长或运输量较大时，燃油费用和车辆维护成本会显著增加。运输过程中会产生较多的尾气排放和粉尘污染，对环境造成一定影响。在复杂的路况下，汽车的行驶速度受限，运输效率可能降低。	且长度增加后，对地质条件的要求更加严格，施工难度进一步加大。长溜井的维护和管理相对复杂，一旦出现故障，可能会影响整个运输系统的正常运行。	皮带机的建设需要较大的前期投资，且对运输路线的地形适应性较差，需要进行大量的土建工程。一旦皮带机发生故障，维修难度较大，且维修期间可能会导致运输中断。皮带机的运输能力相对固定，难以根据实际需求进行灵活调整。	灵活性差：统固定，移设困难；需提前规划最终边坡；对块度敏感：无缓冲仓，特大块易卡溜槽或冲击箕斗。环节刚性：汽车 - 溜槽 - 箕斗 - 前装机必须同步，任一节点故障即全线停机，需备用前装机和应急溜槽口。冬季风险：坡面一旦结冰，跑车风险高；轨道、溜槽、斗轮均需伴热，管理强度大。一次性定制高：超大箕斗、四象限卷扬机属非标设备，交货期长，价格谈判空间小。

4. 各方案投资和运营费量化计算

4.1. 方案一(汽车公路运输方案)

4.1.1. 方案简介

汽车公路运输方案可以直接利用现有公路，没有土建方面投资，方案的投资主要为新增运输设备投资。

矿石年运量按 300 万 t/a，年工作天数 300 天，每日 2 班，每班 8 小时。根据运输能力计算，选择运输车辆为 45 吨级矿用运输汽车。

汽车公路运输线路可以利用矿山已经修建好的道路，但原来是采用溜槽放矿，需要新增道路 3 km。矿石平均运距为 8.0 km。

4.1.2. 投资估算

自卸汽车台班生产能力可按下面的公式 1 计算：

$$A = \frac{60qT}{t} K_1 \eta \quad (1)$$

式(1)中：A——自卸汽车台班生产能力，t/台·班；

q ——自卸汽车载重量, t;
 T ——班工作时间, h;
 K_1 ——自卸汽车工作时间利用系数;
 t ——自卸汽车运输周期, min;
 η ——自卸汽车时间利用系数。

综合考虑运距及设备性能等因素, 自卸汽车数量可按下公式 2 计算。

自卸汽车数量计算公式:

$$N = \frac{K_2 \cdot Q_8}{A \cdot K_3} \quad (2)$$

式(2)中: N ——自卸汽车数量, 台;

K_2 ——运输不均衡系数;
 K_3 ——出车率;
 Q_8 ——露天矿班产量, t;
 A ——自卸汽车台班生产能力, t/台·班。

汽车公路运输方案自卸汽车数量计算过程和计算结果详见表 3, 经计算: 运矿汽车为 31 台。设计推荐 45 吨级纯电动矿用自卸运输汽车, 估算单价 66 万元, 则新增运输设备投资为 2046 万元。

Table 3. Vehicle quantity calculation table for option 1
表 3. 方案一汽车数量计算表

序号	指标	单位	运矿汽车
			配 4 m ³ 电铲
1	载重	t	45
2	容重	t/m ³	3.2
3	电铲铲斗容积	m ³	4
4	铲斗装满系数		0.9
5	松散系数		1.6
6	汽车平装容积	m ³	23
7	铲斗实装容积	m ³ /铲 ^立	3.6
8	铲斗实装重量	t/铲 ^立	7.20
9	装车铲数(按车载)	铲 ^立 /车	6.3
10	装车铲数(按车容)	铲 ^立 /车	6.4
11	装车铲数	铲 ^立 /车	6
12	汽车实装容积	m ³	21.6
13	汽车实装重量	t	43.20
14	载重利用系数		0.96
15	容积利用系数		0.94
17	平均运距	km	8
18	平均运行速度	km/h	16
19	装车时间	min	4.83
20	运行时间	min	60.00
21	卸车时间	min	1

续表

22	调停时间	min	4
23	时间利用系数		0.8
24	周转时间	min	69.8
25	每日工作班数	班	2
26	年工作日	天	300
27	台班效率	t/台班	238
28	在籍台年效率	万 t/a	10
29	运输不均衡系数		1.1
30	计算出车率		0.75
31	年运量	万 t/a	300
32	在籍汽车数量	台	30.87
33	在籍汽车数量	台	31

4.1.3. 年运营费估算

露天矿山采用电动汽车运输，矿石运输自采场运至 4070 m 矿石转载站，平均运距 8 km。因矿石运输全部是重车下坡，电动汽车下坡不用消耗动力。电动汽车还可以利用下坡的动能转化为电能进行发电，下坡的发电量足以维持空车上坡消耗的电量。重车下坡发挥了电动汽车的能量转化利用的优势，矿石吨公里运输单价按 0.5 元/t·km，300 万 t 矿石运输 8 km 每年运费估算为 1200 万元。

4.2. 方案二(溜井运输方案)

4.2.1. 方案简介

汽车溜井运输方案：在露天采场边部 4490 m 开凿溜井至 4300 m，并在 4300 m 修长 750 m 平硐至 4300 m 平硐出口(图 1)，放矿闸门设置在溜井井底(图 2)。为防止溜井堵塞影响生产，方案考虑建设双溜井，互为备用。露天采场矿石自采场经汽车运输到 4490 m 溜井井口卸矿，自溜到 4300 m 溜井底经放矿闸门再装入汽车，通过山坡运输道路运至 4070 m 矿石转载站。

4.2.2. 投资估算

双溜井总长度 360 m，平硐长度 750 m，建设投资中包含放矿闸门及控制硐室；溜井运输方案自卸汽车数量计算过程和计算结果参照表 3。经计算：溜井方案运矿汽车为 21 台，单价 66 万元，新增运输设备投资为 1386 万元；本方案土建投资和设备投资合计为 2568 万元。

4.2.3. 年运营费估算

配合溜井方案的采场内运输设备采用电动汽车运输，矿石运输自采场运至 4490 m 溜井口，平均运距 1.2 km。4300 m 溜井底至矿石转载站汽车运距 3.8 km，两段汽车运输总运距 5 km。矿石吨公里运输单价按 0.55 元/t·km，溜井转载费 0.4 元/t，本方案每年运营费估算为 945 万元。

4.3. 方案三(皮带机运输方案)

4.3.1. 方案简介

皮带机运输要求矿石粒度在 300 mm 以下，露天采场采出的原矿不能满足粒度要求，需在采场设置一座固定破碎站。固定破碎站位置越靠近矿体重心位置运费越省。经过计算各台阶的矿石加权平均运距，找到最靠近矿体重心的位置为 4490 m，即原溜槽汽车卸矿平台所在水平。把原溜槽汽车卸矿平台改造成

矿石破碎站，有足够的矿石卸车回车场地，而且填挖工程量最省。

皮带机起点标高 4490 m，终点标高 4070 m，高差 440 m，皮带机下行运输。

如果皮带机路由取直线，皮带机最大倾角要达到 30°。皮带机下行运输角度过大，可能产生物料失控下滑、胶带打滑、跑偏、折带、制动失效埋压机尾、飞石伤人、设备损坏等后果。所以，下行皮带运原矿一般把倾角控制在 12°以下。为了满足皮带机倾角，皮带机路由需要沿山坡地形折返，延长皮带机长度，增设 2 座转运站(图 3)。延长后皮带机总长度 1.8 km。采场采出矿石由汽车运至破碎站，破碎后经胶带机运至 4070 m 矿石转载平台。

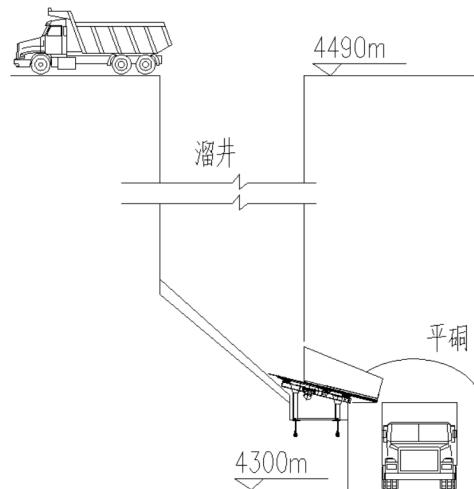


Figure 2. Ore pass and adit system diagram
图 2. 溜井平硐系统图

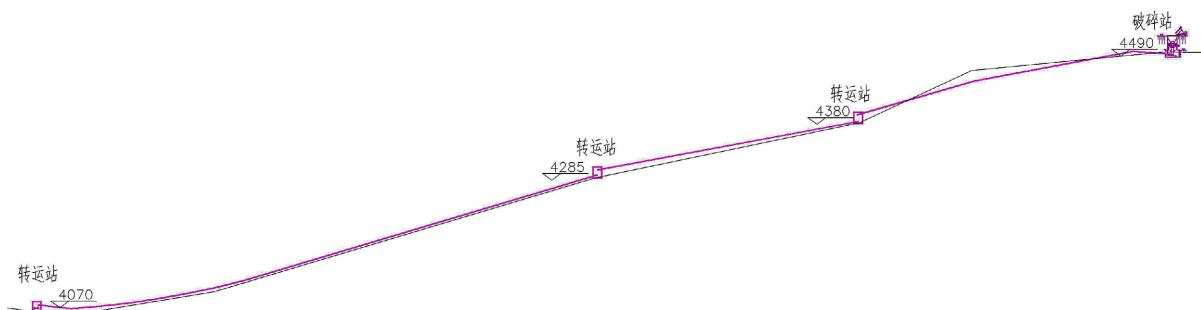


Figure 3. Profile view of belt conveyor transportation scheme
图 3. 皮带机运输方案剖面图

4.3.2. 投资估算

皮带机方案中皮带机总长度 1.8 km，含 1 座破碎站和 2 座转运站，破碎系统加皮带机系统投资 2625 万元。皮带机运输方案自卸汽车数量计算过程和计算结果参照表 3，经计算：皮带机方案中运矿汽车为 9 台，单价 66 万元，新增汽车投资为 594 万元；本方案总投资估算为 3219 万元。

4.3.3. 年运营费估算

配合皮带机方案的采场内运输设备同样采用电动汽车运输，矿石运输自采场运至 4490 m 破碎站，平均运距 1.2 km，矿石吨公里运输单价按 0.65 元/t·km，皮带机吨公里运输单价按 0.6 元/t·km，转载费 0.2 元/t，本方案年运营费估算为 618 万元。

4.4. 方案四(斜坡箕斗运输方案)

4.4.1. 方案简介

在露天采场 4500 m 设置汽车卸矿栈桥，自采场 4500 m 经斜坡箕斗溜放到 4090 m 矿石转载站，由外运汽车运至选厂(图 4)。采用双箕斗方式，双斗对开、一上一下，箕斗容积 25 m³，一车装一斗。斜坡箕斗方案的优势：不破碎、大高差大倾角直降、无仓直装直卸、双斗互为配重，重载下行带动空载上行，势能发电回馈。

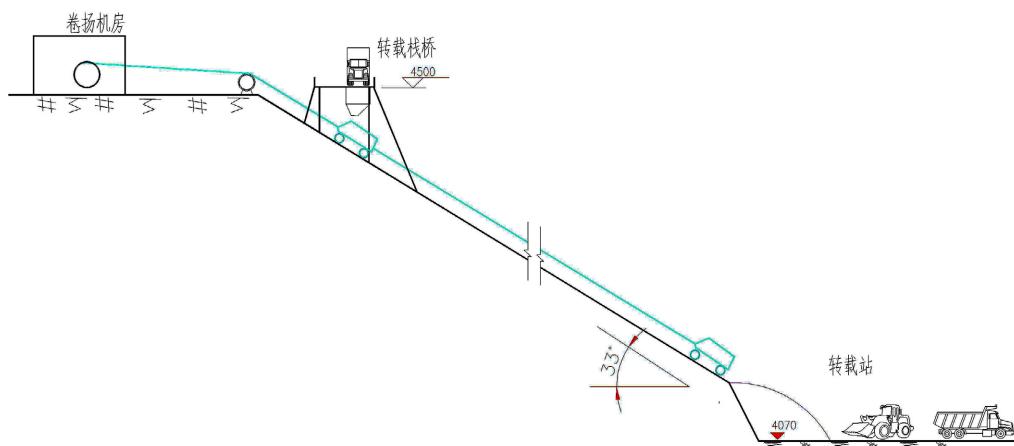


Figure 4. Profile of the slope skip hoisting system

图 4. 斜坡箕斗运输方案剖面图

4.4.2. 投资估算

双箕斗道总长度 1.64 km，包括箕斗设备和转载栈桥，总投资 3135 万元。斜坡箕斗运输方案自卸汽车数量计算过程和计算结果参照表 3，经计算：斜坡箕斗方案运矿汽车为 11 台，估算单价 66 万元，新增运输设备投资为 726 万元；本方案投资估算为 3861 万元。

4.4.3. 年运营费估算

配合斜坡箕斗方案的采场内运输设备同样采用电动汽车运输，矿石运输自采场运至 4500 m 转载栈桥，平均运距 1.2 km，与其他方案相比，本方案的矿石转载站不是设在 4070 m，而是设在 4090m。因收斜坡箕斗对斜坡角度的限制，斜坡箕斗的终点只能设置在 4090 m，比较其他方案的 4070 m 转载站增加 0.7 km 的汽车运距，汽车总运距为 1.9 km。矿石吨公里运输单价按 0.6 元/t·km，斜坡箕斗吨公里运输单价按 0.2 元/t·km，转载费 0.2 元/t，本方案每年运营费估算为 451 万元。

5. 投资和运营费量化分析比较

从表 4 和图 5 中可见，从方案一到方案四，建设投资依次从低到高而年运营费依次降低。汽车公路方案建设投资最低而年运营费最高，斜坡箕斗方案投资最高而年运营费最低；溜井方案和皮带机运输方案在建设投资和年运营费都居中。量化比较把每种方案的建设投资和运营费都明确列出，但不好判定出最优方案。可以把投资最高的斜坡箕斗方案跟前三方案的建设投资差价列出，分别为 1815 万元、1293 万元、642 万元；再把年运营费的差值列出，分别为 749 万元、494 万元、167 万元；再把投资差价除以年运营费差价，分别得到 2.4、2.6、3.8。即方案四节省的年运营费最快 2.4 年、最慢 3.8 年即可补偿回多出的建设投资。所以，方案四(斜坡箕斗方案)从经济上是最合理的方案。

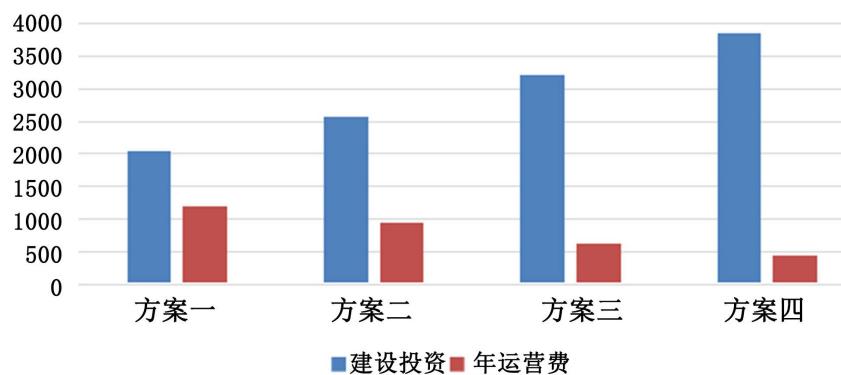


Figure 5. Comparison chart of investment and operating costs
图 5. 投资运营费对比图

Table 4. Quantitative comparison table of investment and operating costs for transportation alternatives
表 4. 运输方案投资与运营费比较表

序号	项目	单位	方案一(汽车公路)			方案二(溜井)			方案三(皮带机)			方案四(斜坡箕斗)			
			数量	单价	合价	数量	单价	合价	数量	单价	合价	数量	单价	合价	
可比建设投资	1 破碎站	座							1	625	625				
	2 胶带机系统	项							1	2000	2000				
	3 溜井	m				360	1.2	432							
	4 平硐	m				750	1	750							
	5 斜坡箕斗系统	项										1	3135	3135	
	7 新增电卡	辆	31	66	2046	21	66	1386	9	66	594	11	66	726	
	可比建设投资小计			2046			2568			3219			3861		
可比年运营费	序号	项目	运量(万t)	运距(km)	单价(元/t·km)	合价	运距(km)	单价(元/t·km)	合价	运距(km)	单价(元/t·km)	合价	运距(km)	单价(元/t·km)	合价
	1	转载费	300					0.48	144		0.24	72		0.24	72
	2	汽车运费	300	8	0.6	1440	5	0.66	990	1.2	0.78	281	1.9	0.72	410
	3	胶带机运费	300							1.8	0.72	389			
	4	箕斗运费	300									0.82	0.24	59	
可比年运营费小计			1440			1134			742			541			

注：表中汽车和溜井运营成本参数基于本矿山 2024 年的统计数据，皮带机和斜坡箕斗运营成本参照近 3 年内同类矿山的统计数据。

6. 关键变量波动条件下投资和运营费量化分析比较

设定年产能和运输单价作为关键变量，关键变量变化±10%、±20%情况下，各方案投资和运营费量排序的变化情况。从表 5 和图 6、图 7 中可见，从方案一到方案四，建设投资依次从低到高而年运营费依次降低。汽车公路方案建设投资最低而年运营费最高，斜坡箕斗方案投资最高而年运营费最低；溜井方案和皮带机运输方案在建设投资和年运营费都居中。年产能和运输单价波动后量化比较把每种方案的建设投资和运营费都明确列出，但不好判定出最优方案。

表 6 把投资最高的斜坡箕斗方案跟前三方案的建设投资差价、年运营费的差值和投资差回收期分别列出。表 6 可见，设定年产能和运输单价作为关键变量变化±10%、±20%情况下，方案四节省的年运营费

最快 1.7 年、最慢 4.8 年即可补偿回多出的建设投资。所以,关键变量变化 $\pm 10\%$ 、 $\pm 20\%$ 情况下,方案四(斜坡箕斗方案)从经济上仍是最合理的方案。

Table 5. Analysis of investment and operating cost variations under capacity and freight rate fluctuations
表 5. 产能和运价波动条件下投资和运营费变化情况分析表

关键变量	比较项	方案一	方案二	方案三	方案四
年产能 300 万吨	建设投资	2046	2568	3219	3861
	年运营费	1200	945	618	451
年产能 + 10%	建设投资	2244	2700	3219	3927
	年运营费	1320	1040	680	496
年产能 + 20%	建设投资	2442	2832	3285	3993
	年运营费	1440	1134	742	541
年产能 - 10%	建设投资	1848	2436	3153	3795
	年运营费	1080	851	556	406
年产能 - 20%	建设投资	1650	2304	3087	3729
	年运营费	960	756	494	361
基本方案运价	建设投资	2046	2568	3219	3861
	年运营费	1200	945	618	451
运价 + 10%	建设投资	2244	2700	3219	3927
	年运营费	1320	1040	680	496
运价 + 20%	建设投资	2442	2832	3285	3993
	年运营费	1440	1134	742	541
运价 - 10%	建设投资	1848	2436	3153	3795
	年运营费	1080	851	556	406
运价 - 20%	建设投资	1650	2304	3087	3729
	年运营费	960	756	494	361

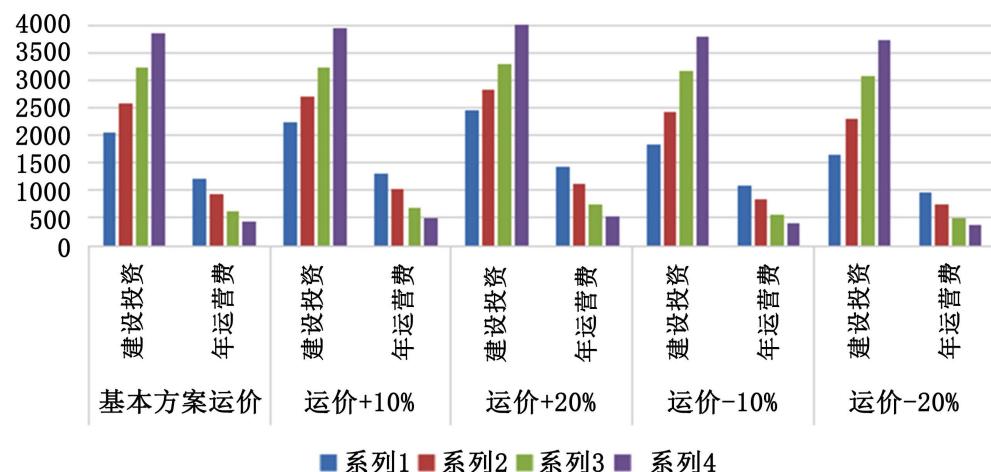
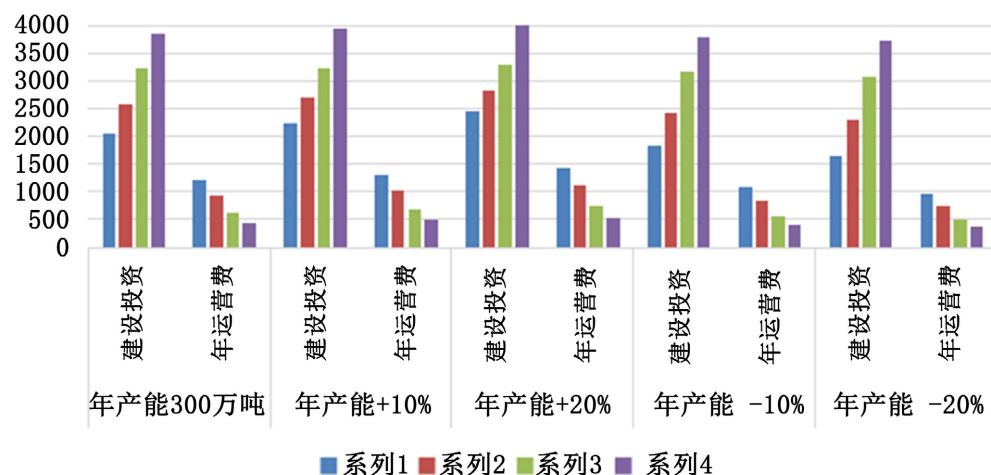


Figure 6. Analysis of investment and operating cost variations under annual production capacity fluctuations
图 6. 年产能波动条件下投资和运营费变化情况分析图

**Figure 7.** Analysis of investment and operating cost variations under freight rate fluctuations**图 7.** 运价波动条件下投资和运营费变化情况分析图**Table 6.** Comparison of payback period differences between option 4 and the first three options**表 6.** 方案四跟前三方案投资回收期差值比较表

关键变量	可比项	(4-1)	(4-2)	(4-3)
产能 300 万 t/a	建设投资差	1815	1293	642
	年运营费差	749	494	167
	投资差回收期	2.4	2.6	3.8
年产能 + 10%	建设投资差	1683	1227	708
	年运营费差	824	544	184
	投资差回收期	2.0	2.3	3.8
年产能 + 20%	建设投资差	1551	1161	708
	年运营费差	899	593	201
	投资差回收期	1.7	2.0	3.5
年产能 - 10%	建设投资差	1947	1359	642
	年运营费差	674	445	150
	投资差回收期	2.9	3.1	4.3
年产能 - 20%	建设投资差	2079	1425	642
	年运营费差	599	395	133
	投资差回收期	3.5	3.6	4.8
基本运价	建设投资差	1815	1293	642
	年运营费差	749	494	167
	投资差回收期	2.4	2.6	3.8
运价 + 10%	建设投资差	1683	1227	708
	年运营费差	824	544	184
	投资差回收期	2.0	2.3	3.8

续表

	建设投资差	1551	1161	708
运价 + 20%	年运营费差	899	593	201
	投资差回收期	1.7	2.0	3.5
	建设投资差	1947	1359	642
运价 - 10%	年运营费差	674	445	150
	投资差回收期	2.9	3.1	4.3
	建设投资差	2079	1425	642
运价 - 20%	年运营费差	599	395	133
	投资差回收期	3.5	3.6	4.8

7. 结论

采用定性分析法、比选矩阵法和费用比较法相结合的方案比较方法对新疆某高海拔露天铁矿的汽车公路、溜井、皮带机和斜坡箕斗四种矿石运输方案进行定性分析与量化比较，得出斜坡箕斗运输方案虽初始投资略高，但年运营费用最低，投资回收期短(2.4~3.8 年)；设定年产能和运输单价作为关键变量变化±10%、±20%情况下，斜坡箕斗运输方案节省的年运营费最快 1.7 年、最慢 4.8 年即可补偿多出的建设投资。方案四(斜坡箕斗方案)从经济上仍是最合理的方案。同时斜坡箕斗方案在经济性、安全性和适应性方面综合最优，推荐为改扩建首选运输方案。

表 1 中所列各种比选方法中，费用比较法只考虑方案的静态费用而忽略资金时间价值，但如果方案之间差异大，也可以比较出方案的优劣。该方法适用于投资规模相近、矿山运营期短、运输系统简单的方案比选。

采用定性分析法、比选矩阵法和费用比较法相结合的方案比较方法可以将复杂的技术方案比选问题转化为直观的表格或柱状图，便于决策者比较和选择，克服了表 1 所列的其他比选方法的局限性，比选结果更具说服力，更具科学合理性。

参考文献

- [1] 母传伟, 张国胜, 范志国, 王坤举, 刘聰. 宏大铁矿露天采场开拓运输优化设计与研究[J]. 金属矿山, 2014(12): 26-29.
- [2] 母传伟, 王先锋, 杨维菁, 等. 矿山汽车运输经济合理运距研究[J]. 金属矿山, 2015(7): 49-51.
- [3] 张永进, 孙立. 露天矿汽车运输成本管理的研究[J]. 内燃机与配件, 2019(6): 173-174.
- [4] 母传伟, 亢建民. 影响因子量化加权法优选选矿厂址和运输方案[J]. 金属矿山, 2014, 43(10): 82-85.
- [5] 母传伟, 张实斌, 宛井旭, 王斌, 冯禹凡, 赵虎. 贴现总成本法比选露天矿运输方案[J]. 矿山工程, 2025, 13(1): 137-147.
- [6] 龙丹, 宋瑞麒. 定性比较分析法在创业研究中的运用与展望[J]. 创新与创业教育, 2022, 13(1): 12-21.
- [7] 张明, 杜运周. 组织与管理研究中 QCA 方法的应用: 定位、策略和方向[J]. 管理学报, 2019(9): 1312-1323.
- [8] 张驰, 郑晓杰, 王凤彬. 定性比较分析法在管理学构型研究中的应用: 述评与展望[J]. 外国经济与管理, 2017(4): 68-83.
- [9] 杜运周, 贾良定. 组态视角与定性比较分析(QCA): 管理学研究的一条新道路[J]. 管理世界, 2017(6): 155-167.
- [10] 杜运周, 李佳馨, 刘秋辰, 等. 复杂动态视角下的组态理论与 QCA 方法: 研究进展与未来方向[J]. 管理世界, 2021(3): 180-197.

-
- [11] Aldrich, H.E. and Yang, T. (2014) How Do Entrepreneurs Know What to Do? Learning and Organizing in New Ventures. *Journal of Evolutionary Economics*, **24**, 59-82. <https://doi.org/10.1007/s00191-013-0320-x>
 - [12] Suddaby, R., Bruton, G.D. and Si, S.X. (2015) Entrepreneurship through a Qualitative Lens: Insights on the Construction and/or Discovery of Entrepreneurial Opportunity. *Journal of Business Venturing*, **30**, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.jbusvent.2014.09.003>
 - [13] 陈大鹏. DEA 方法在工业厂址选择中的应用研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2012, 44(3): 364-367.
 - [14] 孙乃聪. 专家评分法在方案技术分析中的应用[J]. 西安文理学院学报(自然科学版), 2013, 16(1): 125-128.
 - [15] 丁明江, 吴长春. 专家评分法在油气管道风险分析中的应用[J]. 油气田地面工程, 2004(1): 10-15.
 - [16] 张博文, 姬喜云. 专家评分法在国际工程投标决策中的应用[J]. 河北建筑科技学院学报(社科版), 2004(2): 122-123.
 - [17] 李雅晴, 马鑫豪. 工业企业的厂址选择[J]. 大氮肥, 2024, 47(4): 224-227+240.
 - [18] 和世明. 基于比较矩阵法的沥青混合料路用性能权重研究[J]. 路基工程, 2012(1): 18-20.
 - [19] 马丽丽, 田淑芳, 王娜. 基于层次分析与模糊数学综合评判法的矿区生态环境评价[J]. 国土资源遥感, 2013(3): 165-170.
 - [20] 王春燕, 邓曦东, 危宁. 风险评价方法综述[J]. 科技创业月刊, 2006, 19(8): 43-44.
 - [21] 王丽丽. 模糊数学法结合层次分析法用于清洁生产潜力评估研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2010.
 - [22] 魏永义, 王琼波, 张莉, 等. 模糊数学法在食醋感官评定中的应用[J]. 中国调味品, 2011(2): 87-88+120.
 - [23] 刘金山, 胡承孝, 孙学成, 等. 基于最小数据集和模糊数学法的水旱轮作区土壤肥力质量评价[J]. 土壤通报, 2012(5): 1145-1150.
 - [24] 司马锡生. 经济评价厂址选择的模糊评价法与分等加权法的比较[J]. 化工技术经济, 1998, 16(2): 20-22.
 - [25] 吴振华. 定量分析在水泥厂厂址选择中的应用[J]. 水泥技术, 2002, 35(5): 13-16.