

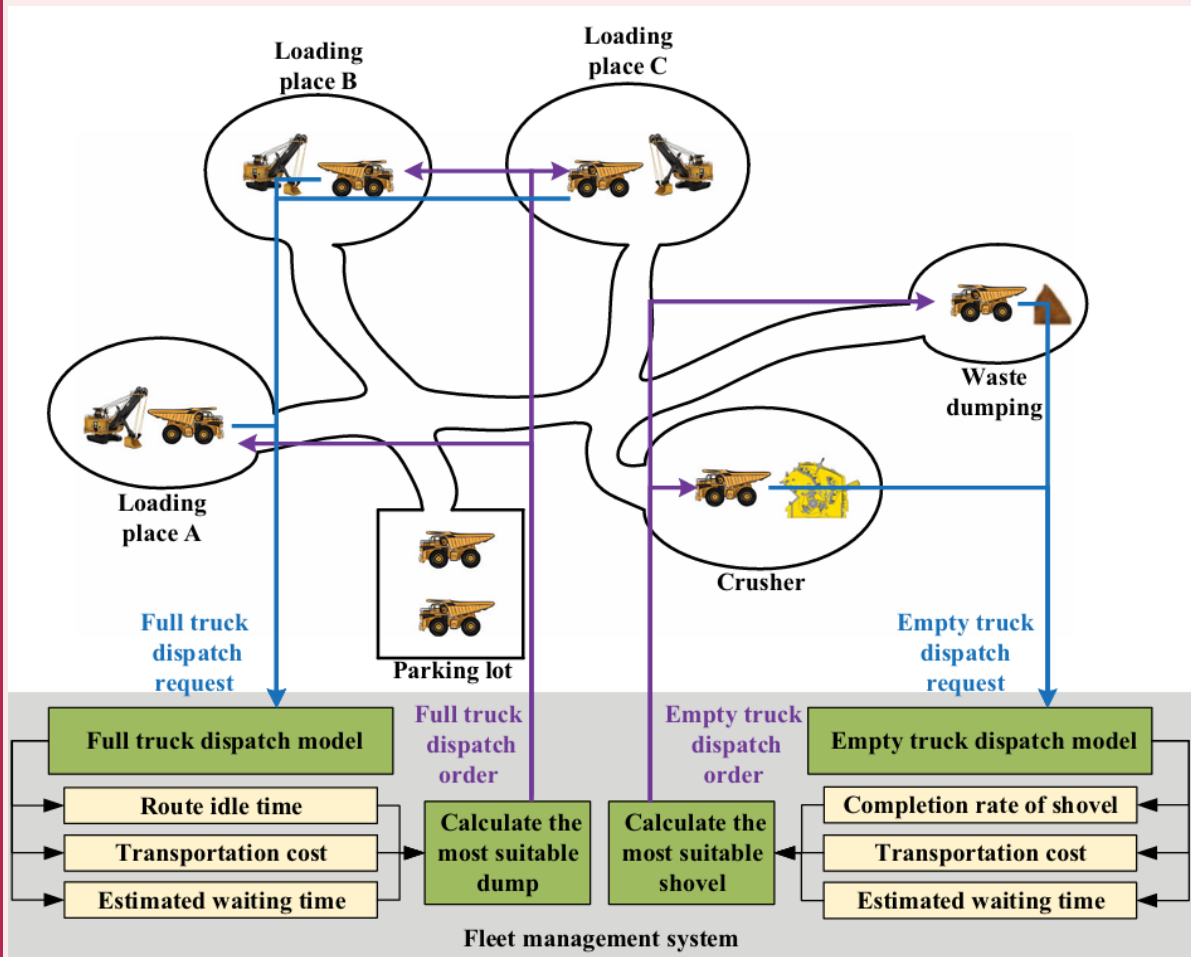
Задача диспетчеризации грузовых автомобилей на открытых карьерах в режиме реального времени

Курсовая работа

Выполнила Агаева Эмилия, 431 группа

Введение

Процесс добычи полезных ископаемых на открытых карьерах включает в себя множество этапов, и одним из основных является транспортировка материала. Затраты на транспортировку, особенно на крупных карьерах, достигают до 50% от общих затрат, именно поэтому оптимизация транспорта является настолько актуальной задачей. Диспетчеризация в режиме реального времени — это система автоматизированного управления транспортными потоками, которая мгновенно анализирует данные и корректирует работу техники для максимизации эффективности добычи. На данный момент большинство методов рассматривают цикл между разгрузками как единый процесс и недостаточно учитывают маршрутизацию гружёной техники. Это приводит к отклонениям в производстве из-за отсутствия корректировок во время цикла. Кроме того, алгоритмы часто используют единый критерий (например, минимизацию времени ожидания), что ограничивает гибкость системы. Для решения этих проблем, в данной работе будет рассмотрен метод, который, во-первых, разделяет полные и пустые грузовики, а во-вторых, оптимизирует такие параметры как: время ожидания грузовиков, отклонение от плановой интенсивности грузопотока и транспортные расходы.



В настоящее время широко используется многоуровневая FMS, основанная на многоэтапных алгоритмах планирования и включающая три стадии:

1. Поиск кратчайшего пути от каждого пункта погрузки до пункта разгрузки
2. Разработка модели распределения потоков самосвалов
3. Диспетчеризация самосвалов в реальном времени

Из этих трех этапов первый уже хорошо изучен. Маршруты в карьерах обычно просты, и базовые алгоритмы успешно решают задачу оптимизации пути. В настоящее время большинство исследований сосредоточено на оптимизации второго этапа, тогда как третий этап изучен недостаточно.

Используемые предположения

Предположения, используемые в модели:

- Полная загрузка:
груз в кузове соответствует номинальной грузоподъёмности самосвала
- Тип груза за смену:
за одну смену самосвал перевозит либо руду, либо отходы (но не смешанный груз одновременно)
- Стационарность экскаватора:
положение экскаватора фиксировано в течение всей смены (не перемещается между уступами)
- Расчёт времени цикла:
среднее время рейса (от погрузки до разгрузки и обратно) может быть достаточно точно прогнозируемо
- Топливное обеспечение:
дозаправка не требуется в течение смены (учтён запас топлива на весь рабочий цикл)

Используемые параметры

k	Индекс самосвалов (общий парк техники)	$k = 1..K$
i	Индекс пунктов разгрузки (дробилки/отвалы)	$i = 1..I$
j	Индекс экскаваторов (погрузочные единицы)	$j = 1..J$
k_m	Индекс неисправных самосвалов	$k_m = 1..K_m$
i_m	Индекс неисправных пунктов разгрузки	$i_m = 1..I_m$
j_m	Индекс неисправных экскаваторов	$j_m = 1..J_m$
T_{now}	Текущее время	
TA_{kji}	Время прибытия груженого самосвала k от экскаватора j к пункту i	
TL_{kji}	Остаток времени погрузки самосвала k на j до i	
TF_{kji}	Среднее время движение груженого самосвала k от j к i	
TFD_{kji}	Фактическое время отправки груженого самосвала k от j к i	
D_{ji}	Расстояние между экскаватором j и пунктом i	
TD_n	Время погрузки самосвала n	
w_{kji}	Время ожидания в очереди на разгрузку для k от j до i	
O_{ji}	Время простоя маршрута от j до i	
L_{ji}	Время последнего назначения самосвала от j до i	
C_{jil}	Грузоподъемность последнего самосвала, отправленного от j до i	
P_{ji}	Плановый показатель грузопотока для маршрута от j до i	

m_{kji}	Стоимость рейса самосвала k при назначении на маршрут от j до i
M_k	Расход топлива самосвала k
X_{kji}	Бинарная переменная решения о назначении (полный рейс)
TA_{kij}	Время прибытия пустого самосвала k от пункта разгрузки i к экскаватору j
TE_{kij}	Среднее время движения пустого самосвала k от пункта i к экскаватору j
TED_{kij}	Фактическое время отправки порожнего самосвала k от пункта i к экскаватору j
TD_{kij}	Остаток времени на разгрузку самосвала k в пункте i перед отправкой к экскаватору j
SA_j	Ближайшее время доступности экскаватора j
N_{queue}	Количество самосвалов в очереди
TS_n	Время позиционирования самосвала n (период необходимый для подготовки к загрузке)
TL_n	Время погрузки самосвала n
w_{kij}	Время ожидания самосвала k при назначении от i к j
m_{kij}	Стоимость рейса самосвала k по маршруту от i до j
X_{kij}	Бинарная переменная решения о назначении (пустой рейс)
y_{min}	Минимум целевой функции
n	Номер экскаватора, к которому направляется самосвал
SR_i	Время готовности экскаватора к погрузке
TT_i	Среднее время движения от пункта разгрузки к назначенному экскаватору
S_{kji}	Время простоя экскаватора j при назначении на маршрут от j до i
T_{kji}	Время ожидания самосвала k на маршруте от j до i
$C_{ji}-$	Недовывоз (негативное отклонение от планового грузопотока от j к i)
$C_{ji}+$	Перевыполнение (позитивное отклонение от планового грузопотока от j к i)

Модель диспетчеризации гружёных самосвалов (FTD):

В качестве потенциальных направлений рассматриваются все доступные пункты разгрузки, до которых может добраться гружёный самосвал.

Критерии оптимизации:

- Расчетное время ожидания в очереди на разгрузку
- Отклонение от плановой интенсивности грузопотока
- Транспортные затраты до каждого пункта назначения

На основе этих подцелей формируется целевой функционал оптимизации с соответствующими ограничениями.

Расчеты

Рассчитываем время прибытия самосвала к пункту разгрузки на основе его текущего положения:

- Самосвал k находится в процессе погрузки:

$$T_{A_{kji}} = T_{\text{now}} + T_{L_{kji}} + T_{F_{kji}}$$

- Самосвал k' следует к пункту разгрузки:

$$T_{A_{k'ji}} = T_{FD_{kji}} + T_{F_{kji}}$$

Времена прибытия двух указанных типов образуют множество $\{T_{A_{kji}}, T_{A_{k'ji}}\}$. Его элементы сортируются в хронологическом порядке, формируя множество $\{T_1, T_2, \dots, T_k, \dots\}$, в котором расчетное время прибытия самосвала k , направляемого от j к i , составляет T_k . Согласно этой последовательности и правилам разгрузки, можно рассчитать время ожидания для каждого самосвала в последовательности.

- Из-за очереди на разгрузку, для самосвала в последовательности, если он и предыдущий самосвал являются либо крупнотоннажными, либо разнотипными самосвалами, время ожидания связано с временем завершения разгрузки предыдущего самосвала и рассчитывается по формуле:

$$W_n = \begin{cases} 0, n = 1 \\ \max(T_{n-1} + w_{n-1} + TD_{n-1} - T_n, 0), n > 1 \end{cases}$$

- Для самосвала в последовательности, если он и предыдущий являются малотоннажными, время ожидания зависит от времени завершения разгрузки второго самосвала перед ним:

$$W_n = \begin{cases} 0, n = 1, 2 \\ \max(T_{n-2} + w_{n-2} + TD_{n-2} - T_n, 0), n > 2 \end{cases}$$

- Если самосвал предназначен для перевозки отходов, его пунктом назначения является отвал. Согласно очереди на разгрузку, его время ожидания связано с временем завершения разгрузки предыдущего самосвала в последовательности и рассчитывается по формуле:

$$W_n = \begin{cases} 0, n = 1 \\ \max(T_{n-1} + w_{n-1} + TD_{n-1} - T_n, 0), n > 1 \end{cases}$$

Таким образом, мы получаем расчетное время ожидания w_{kji} для назначения самосвала k от экскаватора j к каждому пункту разгрузки i . Сформулируем три подцели:

- Минимизация расчетного времени ожидания. Первый коэффициент целевой функции равен w_{kji} .
- Минимизация отклонения от плановой интенсивности грузопотока, что может быть выражено через время простоя каждого маршрута. Второй коэффициент целевой функции o_{ji} рассчитывается следующим образом:

$$o_{ji} = T_{\text{now}} - (L_{ji} + C_{jil} / P_{ji})$$

- Минимизация транспортных затрат самосвала до каждого пункта назначения, и ее коэффициент целевой функции m_{kji} рассчитывается по следующей формуле:

$$m_{kji} = D_{ji} * M_k$$

Получили три цели модели:

$$f_1 = \sum_{k=1}^K \cdot \sum_{i=1}^I \cdot \sum_{j=1}^J \cdot w_{kji} * x_{kji}$$

$$f_2 = \sum_{k=1}^K \cdot \sum_{i=1}^I \cdot \sum_{j=1}^J \cdot o_{ji} * x_{kji}$$

$$f_3 = \sum_{k=1}^K \cdot \sum_{i=1}^I \cdot \sum_{j=1}^J \cdot m_{kji} * x_{kji}$$

Поскольку три целевые функции имеют различную размерность, для устранения влияния различий в единицах измерения показателей требуется нормализация данных. В данном случае применяется метод min-max нормализации для стандартизации трех целевых функций:

$$f_1 = (f_1 - f_1^{min}) / (f_1^{max} - f_1^{min})$$

$$f_2 = (f_2 - f_2^{min}) / (f_2^{max} - f_2^{min})$$

$$f_3 = (f_3 - f_3^{min}) / (f_3^{max} - f_3^{min})$$

После нормализации получаем целевую функцию:

$$y_{min} = P_1 f_1 + P_2 f_2 + P_3 f_3$$

где $P_1 + P_2 + P_3 = 1$ и весовые коэффициенты могут быть заданы и скорректированы в соответствии с фактическими условиями работы (техническое состояние оборудования, текущая загрузка) и желаемыми целями (если важно время ожидания – увеличим P_1 , если важнее соблюдение планового грузопотока – то повысим P_2 , а если же важна экономия топлива, то увеличим P_3)

Ограничения

- $\sum_{i=1}^I \cdot \sum_{j=1}^J \cdot x_{kji} = 1, k = 1..K$ (1) один самосвал одновременно может следовать по одному маршруту
- $\sum_{i=1}^I \cdot \sum_{k=1}^K \cdot x_{kji} \leq 1, j = 1..J$ (2) один пункт разгрузки обрабатывает \leq одного самосвала одновременно
- $\sum_{k=1}^K \cdot \sum_{i=1}^I \cdot \sum_{j=1}^J \cdot x_{kji} \leq K$ (3) число самосвалов в модели \leq общего числа самосвалов
- $\sum_{k=1}^K \cdot \sum_{j=1}^J \cdot x_{kji} = 0, i = 1..I_m$ (4)
- $\sum_{i=1}^I \cdot \sum_{j=1}^J \cdot x_{kji} = 0, k = 1..K_m$ (5)
- $\sum_{i=1}^I \cdot \sum_{k=1}^K \cdot x_{kji} = 0, j = 1..J_m$ (6)
- $x_{kji} = \{0, 1\}$ (7) 1 – самосвал k на маршруте от i до j, 0 иначе
- исклечение неисправного оборудования из планирования

Модель диспетчеризации пустых самосвалов (ETD):

В качестве потенциальных направлений рассматриваются все достижимые пустым самосвалом экскаваторы.

Критерии оптимизации:

- Время ожидания самосвала у экскаватора
- Отклонение от плановой интенсивности грузопотока
- Транспортные затраты до каждого пункта назначения

На основе этих подцелей формируется целевая функция оптимизации с соответствующими ограничениями.

Расчеты

Рассчитываем время прибытия самосвала к экскаватору на основе его текущего положения:

- Самосвал k , направляемый к экскаватору после разгрузки:

$$T_{A_{kij}} = T_{\text{now}} + T_{D_{kij}} + T_{E_{kij}}$$

- Самосвал уже следующий к экскаватору:

$$T_{A_{k'ij}} = T_{E_{D_{kij}}} + T_{E_{kij}}$$

Времена прибытия двух указанных типов образуют множество $\{T_{A_{kji}}, T_{A_{k'ji}}\}$. Его элементы сортируются в хронологическом порядке, формируя множество $\{T_1, T_2, \dots, T_k, \dots\}$, в котором расчетное время прибытия самосвала k , составляет T_k . Согласно этой последовательности можно рассчитать время ожидания для каждого самосвала в последовательности.

Время SA_j , когда экскаватор j сможет принять самосвал:

$$SA_j = T_{\text{now}} + TL_{kij} + \sum_{n=1}^{n=N_{\text{queue}}} (TS_n + TL_n)$$

Рассчитаем время ожидания:

- Для первого самосвала в очереди:

$$w_n = \max(SA_j - T_1, 0)$$

- Для последующих самосвалов время ожидания связано с временем завершения погрузки предыдущего транспортного средства в последовательности и рассчитывается как:

$$w_n = \max(T_{n-1} + w_{n-1} + TS_{n-1} + TL_{n-1} - T_n, 0), n > 1$$

Таким образом, мы получаем расчетное время ожидания w_{kji} для назначения самосвала k от экскаватора j к каждому пункту разгрузки i .

Сформулируем три подцели:

- Минимизация расчетного времени ожидания. Первый коэффициент целевой функции равен w_{kij} .
- Минимизация отклонения от плановой интенсивности грузопотока, что может быть выражено через процент выполнения планового показателя добычи для каждого экскаватора.

Коэффициент s_j целевой функции рассчитывается следующим образом:

$$s_j = p'_j / p_j, \quad p_j = \sum_{i=1}^I p_{ji} * T$$

где p'_j - фактическая выработка экскаватора j с начала смены (получается из FMS), p_j – плановая выработка экскаватора j за смену, p_{ji} - плановый грузопоток на маршруте от экскаватора j до пункта разгрузки i , T – время смены.

- Минимизация транспортных затрат самосвала до каждого пункта назначения, и ее коэффициент целевой функции m_{kij} рассчитывается по следующей формуле:

$$m_{kij} = D_{ji} * M_k$$

Получили три цели модели:

$$f_4 = \sum_{k=1}^K \cdot \sum_{i=1}^I \cdot \sum_{j=1}^J \cdot w_{kij} * x_{kij}$$

$$f_5 = \sum_{k=1}^K \cdot \sum_{i=1}^I \cdot \sum_{j=1}^J \cdot s_j * x_{kij}$$

$$f_6 = \sum_{k=1}^K \cdot \sum_{i=1}^I \cdot \sum_{j=1}^J \cdot m_{kij} * x_{kij}$$

Поскольку три целевые функции имеют различную размерность, для устранения влияния различий в единицах измерения показателей требуется нормализация данных. В данном случае применяется метод min-max нормализации для стандартизации трех целевых функций:

$$f_4 = (f_4 - f_4^{\min}) / (f_4^{\max} - f_4^{\min})$$

$$f_5 = (f_5 - f_5^{\min}) / (f_5^{\max} - f_5^{\min})$$

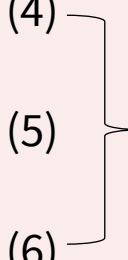
$$f_6 = (f_6 - f_6^{\min}) / (f_6^{\max} - f_6^{\min})$$

После нормализации получаем целевую функцию:

$$y_{\min} = P_4 f_4 + P_5 f_5 + P_6 f_6$$

где $P_4 + P_5 + P_6 = 1$ и весовые коэффициенты могут быть заданы и скорректированы в соответствии с фактическими условиями работы (техническое состояние оборудования, текущая загрузка) и желаемыми целями (если важно время ожидания – увеличим P_4 , если важнее соблюдение планового грузопотока – то повысим P_5 , а если же важна экономия топлива, то увеличим P_6)

Ограничения

- $\sum_{i=1}^I \cdot \sum_{j=1}^J \cdot x_{kij} = 1, k = 1..K$ (1) один самосвал одновременно может следовать по одному маршруту
- $\sum_{j=1}^J \cdot \sum_{k=1}^K \cdot x_{kij} \leq 1, i = 1..J$ (2) один экскаватор обрабатывает \leq одного самосвала одновременно
- $\sum_{k=1}^K \cdot \sum_{i=1}^I \cdot \sum_{j=1}^J \cdot x_{kij} \leq K$ (3) число самосвалов в модели \leq общего числа самосвалов
- $\sum_{k=1}^K \cdot \sum_{j=1}^J \cdot x_{kij} = 0, i = 1..I_m$ (4) 
- $\sum_{i=1}^I \cdot \sum_{j=1}^J \cdot x_{kij} = 0, k = 1..K_m$ (5) исключение неисправного оборудования из планирования
- $\sum_{i=1}^I \cdot \sum_{k=1}^K \cdot x_{kij} = 0, j = 1..J_m$ (6)
- $x_{kij} = \{0, 1\}$ (7) 1 – самосвал k на маршруте от j до i, 0 иначе
- $S_{kij} < C_k$ (8) масса груза не должна превышать грузоподъемность самосвала

Реализация метода

Рассмотрим реализацию данного метода (FTD) на языке Python. Для простоты была выбрана простая модель карьера: 4 самосвала, 3 пункта погрузки и 2 пункта разгрузки. Функции, вычисляющие массив времени прибытия каждого самосвала и 3 основных подцели оптимизации:

```
def get_T():
    T = {}
    for j in range(J):
        for i in range(I):
            key = (j, i)
            TA_kji = []
            for k in range(K):
                TA = TD + (D[j][i] * 1000) / (S[k] * 1000 / 60)
                TA_kji.append((k, TA))
            TA_kji.sort(key=lambda x: x[1])
            T[key] = TA_kji
    return T
```

$O(J * I * K \log K)$

```
def get_w(T):
    w_kji = np.zeros((K, J, I))
    for key in T:
        j, i = key
        TA = T[key]
        w = []
        for n in range(len(TA)):
            if n == 0:
                w.append(0)
            else:
                W_n = max(TA[n-1][1] + w[n-1] + TL - TA[n][1], 0)
                w.append(W_n)
        for idx, (k, _) in enumerate(TA):
            w_kji[k, j, i] = w[idx]
    return w_kji
```

$O(J * I * K)$

```
def get_m():
    m_kji = np.zeros((K, J, I))
    for k in range(K):
        for j in range(J):
            for i in range(I):
                m_kji[k, j, i] = D[j, i] * M[k] / 100
    return m_kji
```

$O(J * I * K)$

```
def get_o(T, T_now):
    o_ji = np.zeros((J, I))
    for j in range(J):
        for i in range(I):
            key = (j, i)
            TA = T[key]
            if not TA:
                L_ji = 0
            else:
                L_ji = TA[-1][1]
            C_jil = sum(C[k] for k, _ in TA)
            P_ji = P[j][i]
            o_ji[j][i] = T_now - (L_ji + C_jil / P_ji)
    return o_ji
```

$O(J * I * K)$

Параметры

Информация о самосвалах (обозначения согласованы с ранее представленными):

```
S = np.array([60, 50, 70, 65])  
C = np.array([20, 25, 15, 30])  
M = np.array([30, 25, 35, 28])
```

где S – скорость движения (км/ч), C – вместимость (т), M – расход топлива (т/км)

Информация о пунктах загрузки и разгрузки (строки – пункты загрузки, столбцы – разгрузки):

расстояние между i и j (км)

```
D = np.array([  
    [15, 20],  
    [25, 10],  
    [18, 30]  
)
```

```
P = np.array([  
    [100, 150],  
    [200, 50],  
    [75, 125]  
)
```

плановый грузопоток
между i и j (т / ч)

Оптимизация

Оптимизация построенного целевого функционала производится при помощи библиотеки SciPy, для решения задач MILP в ее подмодуле optimize имеется функция linprog. При оптимизации учитывается и то, что переменные x_{ijk} принимают значения $\{0, 1\}$, и все ограничения на задачу.

```
y_min = P1 * f1_opt + P2 * f2_opt + P3 * f3_opt
```

```
opt = linprog(y_min,  
              A_eq=np.array(A1),  
              b_eq=np.array(b1),  
              A_ub=np.array(A2),  
              b_ub=np.array(b2),  
              bounds=bounds,  
              integrality=integrality,  
              method='highs')
```

Полученные результаты

Используемые веса: $P1, P2, P3 = 0.5, 0.1, 0.4$

Результат:

$y_{\min}: 1.65$

x_opt:			
k	j	i	x_ijk
1	1	1	1
1	1	2	0
1	2	1	0
1	2	2	0
1	3	1	0
1	3	2	0
2	1	1	0
2	1	2	1
2	2	1	0
2	2	2	0
2	3	1	0
2	3	2	0

x_opt:			
k	j	i	x_ijk
3	1	1	0
3	1	2	0
3	2	1	0
3	2	2	1
3	3	1	0
3	3	2	0
4	1	1	0
4	1	2	0
4	2	1	0
4	2	2	0
4	3	1	1
4	3	2	0

Используемые веса:

$P_1, P_2, P_3 = 0.3, 0.3, 0.4$

Результат:

$y_{\min}: 1.78$

$x_{\text{opt}}:$

k	j	i	x_{ijk}
1	1	1	0
1	1	2	0
1	2	1	0
1	2	2	0
1	3	1	1
1	3	2	0
2	1	1	0
2	1	2	0
2	2	1	0
2	2	2	0
2	3	1	0
2	3	2	1

$x_{\text{opt}}:$

k	j	i	x_{ijk}
3	1	1	0
3	1	2	0
3	2	1	0
3	2	2	1
3	3	1	0
3	3	2	0
4	1	1	0
4	1	2	0
4	2	1	1
4	2	2	0
4	3	1	0
4	3	2	0

Выводы

При реализации метода, были сделаны следующие выводы о рассматриваемом алгоритме:

1)

Метод работает корректно

2)

- Общая сложность алгоритма без учета оптимизации не превосходит $O(J * I * K \log K)$
- Оптимизация в SciPy дает сложность $O((K * I * J)^3)$

В реальности значения этих параметров обычно такие, что данный алгоритм сработает за приемлемое количество времени.

Оценка метода

Для оценки эффективности предложенной модели в исследовании используется реальный карьерный полигон, на котором проводятся имитационные испытания. В среде MATLAB разработаны три модели:

- Предлагаемая модель
- MSC-модель
- Многоцелевая модель

Ключевые показатели эффективности (KPI):

- Общий объем перевозок
- Коэффициент использования оборудования
- Среднее время ожидания самосвалов
- Общие затраты
- Время принятия решений

MSC-модель

Пустые самосвалы на точке разгрузки направляются к экскаватору с наименьшим показателем насыщения, который определяется как отношение числа уже назначенных самосвалов к плановому числу самосвалов для данного экскаватора

Ключевая цель - равномерное распределение самосвалов через равные временные интервалы и обеспечение непрерывной работы экскаваторов без простоев

Целевая функция системы выражается следующим образом:

$$n: \operatorname{argmin}_i \{ (SR_i - T_{\text{now}}) / TT_i \}$$

Многоцелевая модель

Целевые функции модели:

- Первый критерий оптимизации:
минимизация суммарного времени простоя работающих экскаваторов

$$f_1 = \sum_{k=1}^K \cdot \sum_{i=1}^I \cdot \sum_{j=1}^J \cdot S_{kij} * x_{kij}$$

- Второй критерий оптимизации:
минимизация общего времени ожидания самосвалов

$$f_2 = \sum_{k=1}^K \cdot \sum_{i=1}^I \cdot \sum_{j=1}^J \cdot T_{kij} * x_{kij}$$

- Третий критерий оптимизации:
минимизация отклонений от плановой интенсивности потоков на маршрутах

$$f_3 = \sum_{i=1}^I \cdot \sum_{j=1}^J \cdot (C_{ji-} + C_{ji+})$$

Параметры карьера

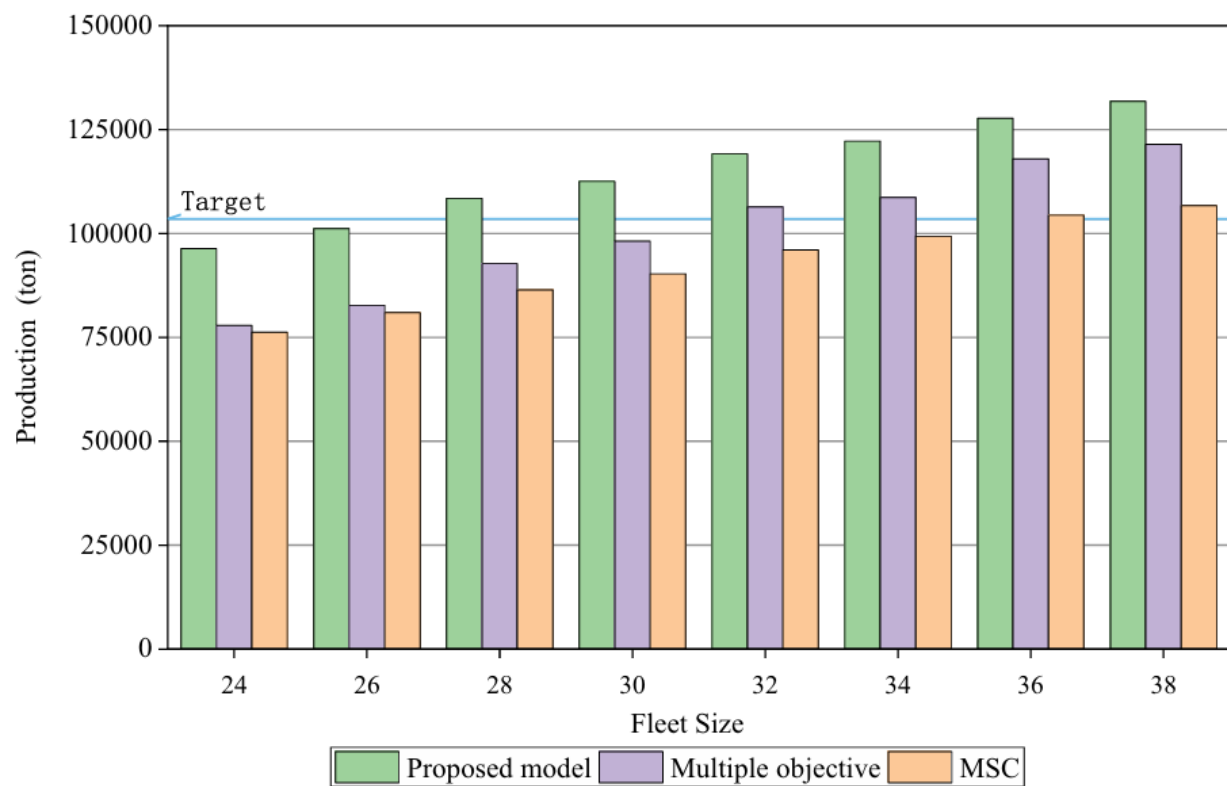
Dump place	Parameters	Loading place						
		j_1	j_2	j_3	j_4	j_5	j_6	j_7
i_1	Distance/km	5.26	5.19	4.21	2.46	1.9	0.64	1.27
	Flow rate/($t \cdot h^{-1}$)	680	770	650	750	0	0	0
i_2	Distance/km	1.9	0.99	1.9	1.48	2.04	3.09	3.51
	Flow rate/($t \cdot h^{-1}$)	716	734	762	670	0	0	0
i_3	Distance/km	5.89	5.61	5.61	2.46	2.46	1.06	0.57
	Flow rate/($t \cdot h^{-1}$)	700	684	744	760	0	0	0
i_4	Distance/km	0.64	1.76	1.27	4.21	3.72	5.05	6.1
	Flow rate/($t \cdot h^{-1}$)	0	0	0	0	686	714	750
i_5	Distance/km	4.42	3.86	3.72	0.78	1.62	1.27	0.5
	Flow rate/($t \cdot h^{-1}$)	0	0	0	0	780	646	740

Model	Truck		Shovel
	XCMG XDE120	XCMG XDE240	WK-20
Capacity(t)	110	220	-
Full Load Fuel Consumption(kg/h)	116	241	-
No-load Fuel Consumption(kg/h)	68	141	-
Idle Fuel Consumption(kg/h)	13	28	-
Full Load Speed(km/h)	21	18	-
No-load Speed(km/h)	30	28	-
Loading Time(min)	3	5	-
Dumping time(min)	2.5	3	-
Rated Power(KW)	-	-	1120
Idle Power(KW)	-	-	124.32

Плановый грузопоток и расстояния транспортировки приведены в таблице.

Суммарный плановый объем перевозок за смену составляет 103,488 тонн.

7 погрузочных пунктов: 4 для руды, 3 для отходов;
5 пунктов разгрузки: 3 дробилки, 2 отвала



На графике показан общий объем перевозимых материалов для трех моделей при различных размерах автопарка.

При одинаковом количестве техники предложенная модель перевозит как минимум на 14% больше материала

Минимальный размер автопарка (ед. техники) для выполнения производственных норм:

- предложенная модель: 28 единиц
- многоцелевая модель: 32 единицы
- MSC-модель: 36 единиц

Разработанная модель позволяет:

- достигать плановых показателей с меньшим парком техники
- обеспечивать более высокую производительность на единицу оборудования

На следующем слайде будет представлен график коэффициента использования оборудования, включающий:

- a. использование экскаваторов
- b. использование самосвалов

Эффективность использования экскаваторов:

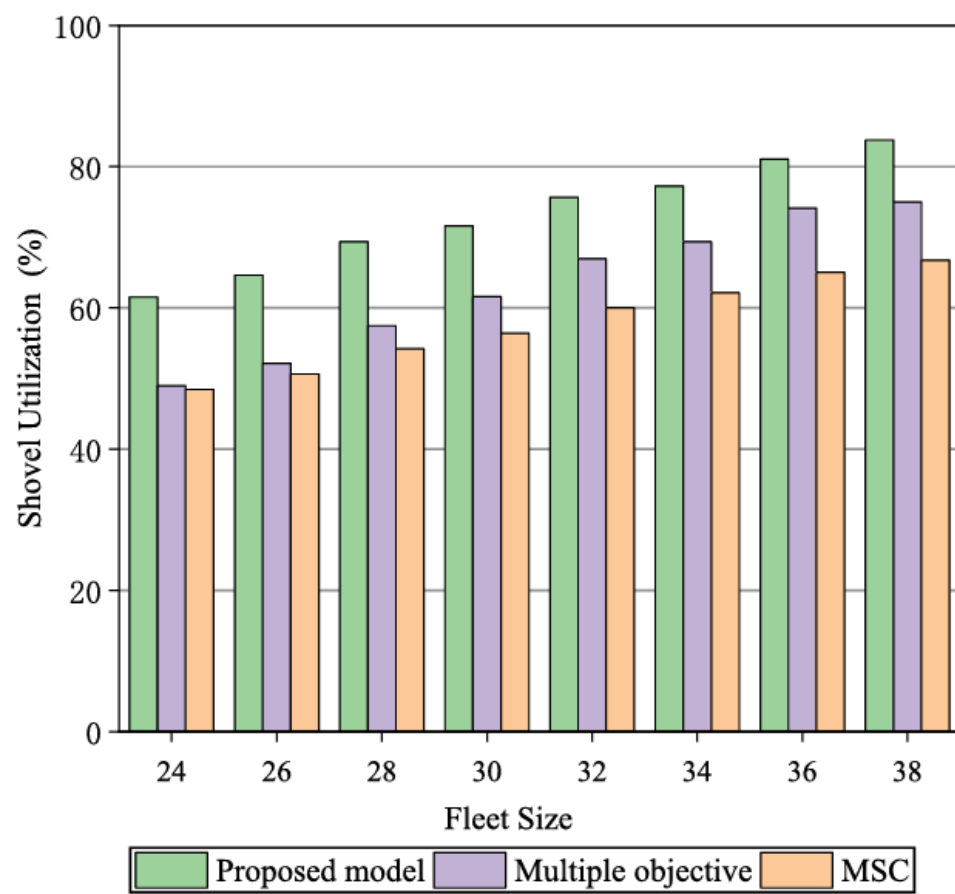
- наивысший коэффициент использования экскаваторов
- превосходство не менее чем на 15% по сравнению с другими моделями
- стабильность показателей при различных размерах автопарка

Эффективность использования самосвалов (показатель пробега пустых самосвалов)

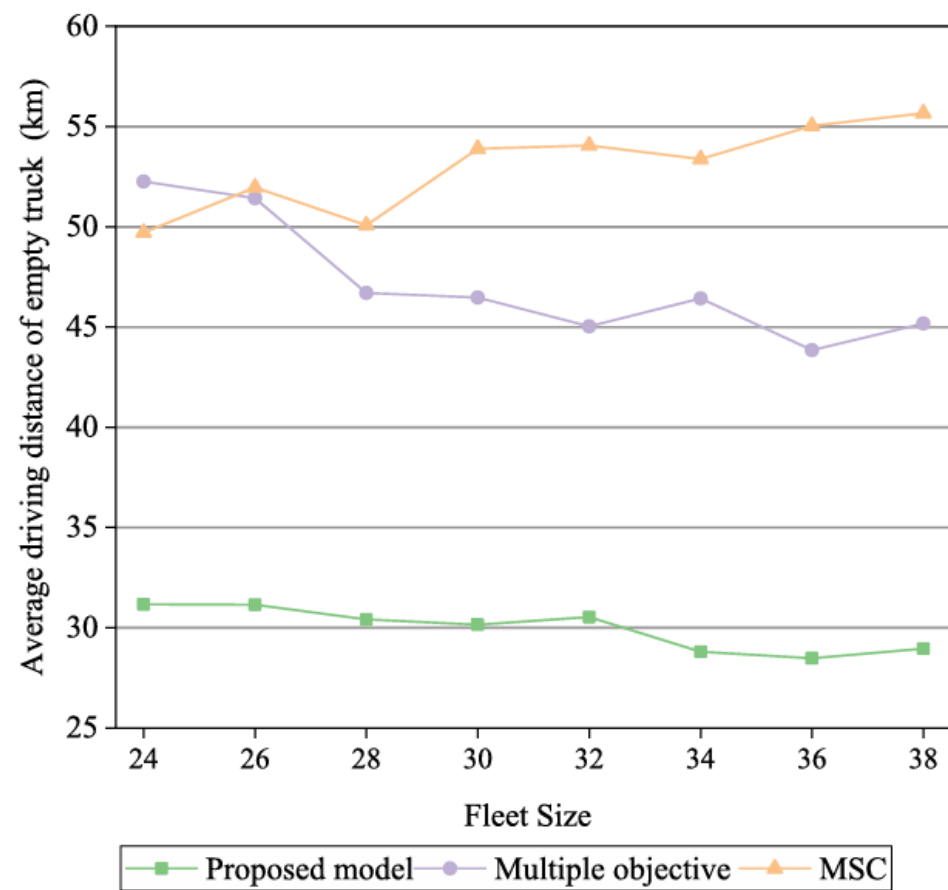
- средний пробег пустых самосвалов в других моделях на 36% выше
- оптимизация маршрутов в предложенной модели минимизирует непроизводительный пробег

Применение предложенной модели позволяет:

- повысить общий коэффициент использования оборудования
- обеспечить более рациональное использование техники:
 - максимальная загрузка экскаваторов
 - минимизация непроизводительных пробегов самосвалов



(a)



(b)

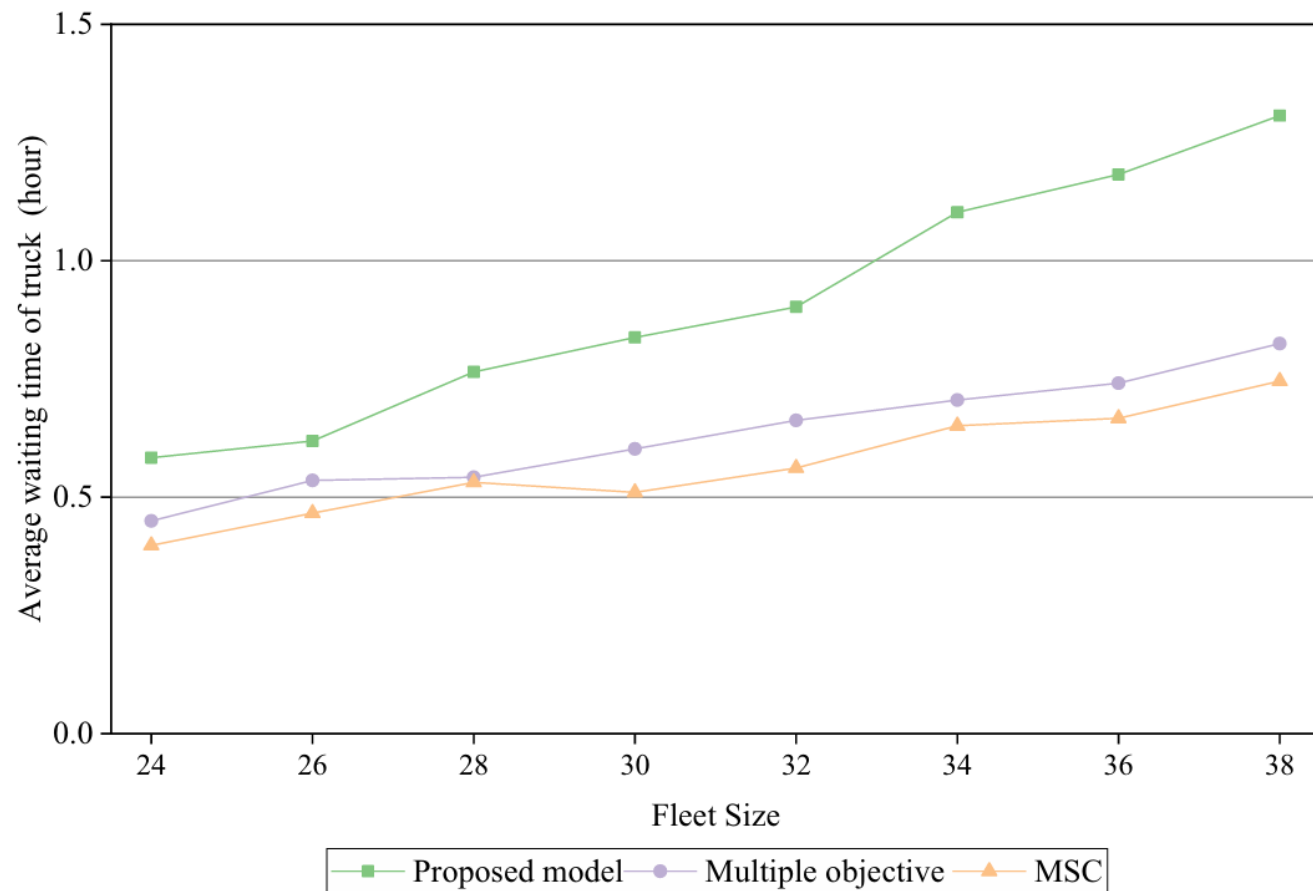


график времени ожидания самосвала

График показывает, что время ожидания самосвала у предложенной модели больше, чем у двух других моделей.

Причина заключается в том, что предложенная модель склонна выбирать пункт назначения с длительным временем ожидания, а не более удаленный пункт назначения.

Таким образом, предложенная модель может снизить транспортные расходы, потому что расход топлива в режиме ожидания ниже, чем при движении.

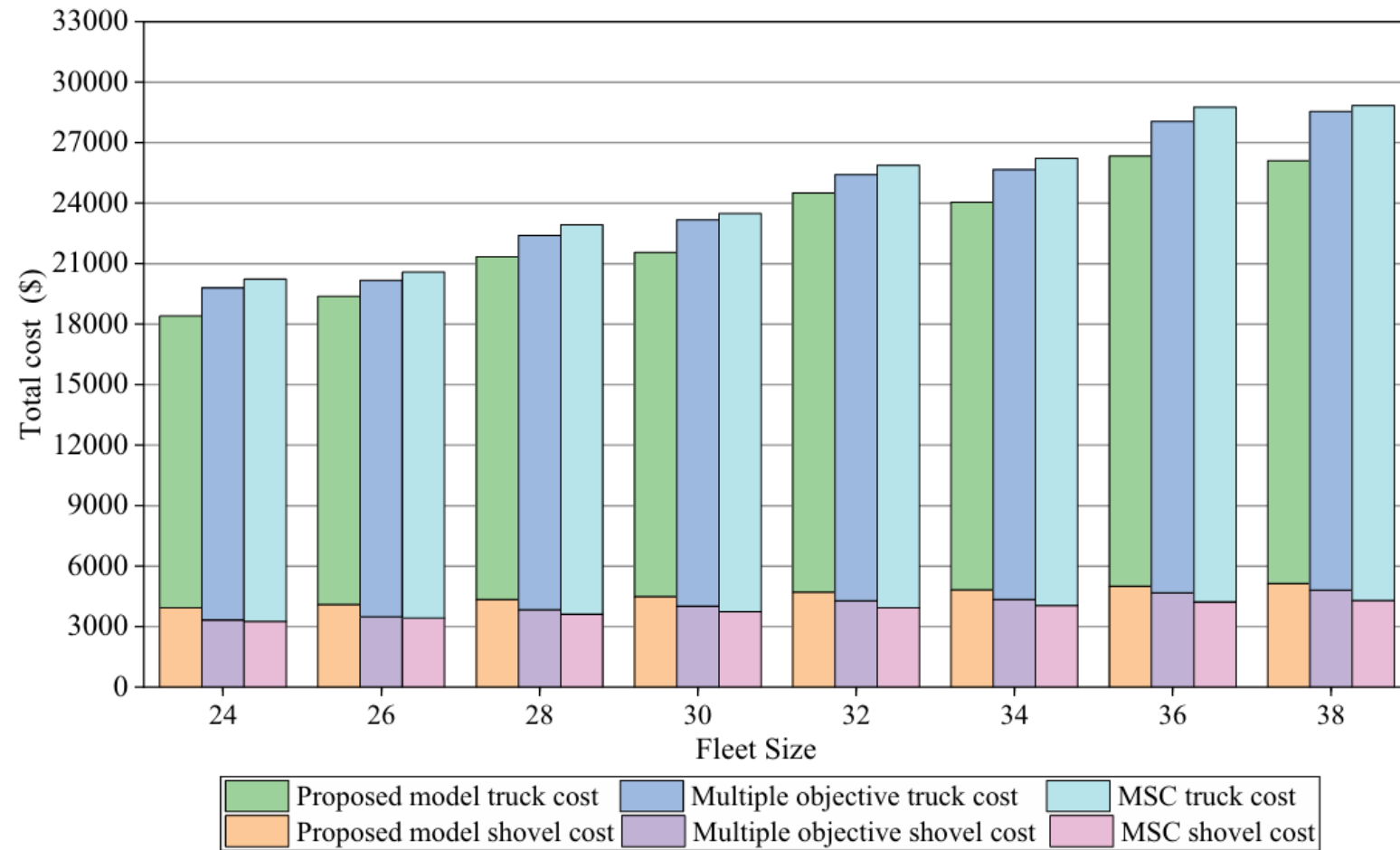


график общих затрат для разных размеров автопарка

Стоимость системы диспетчеризации самосвалов в карьере включает в основном энергопотребление экскаваторов и расход топлива самосвала.

Затраты на работу самосвалов и общие эксплуатационные расходы предложенной модели являются наименьшими среди трех моделей, и преимущество увеличивается с ростом размера автопарка.

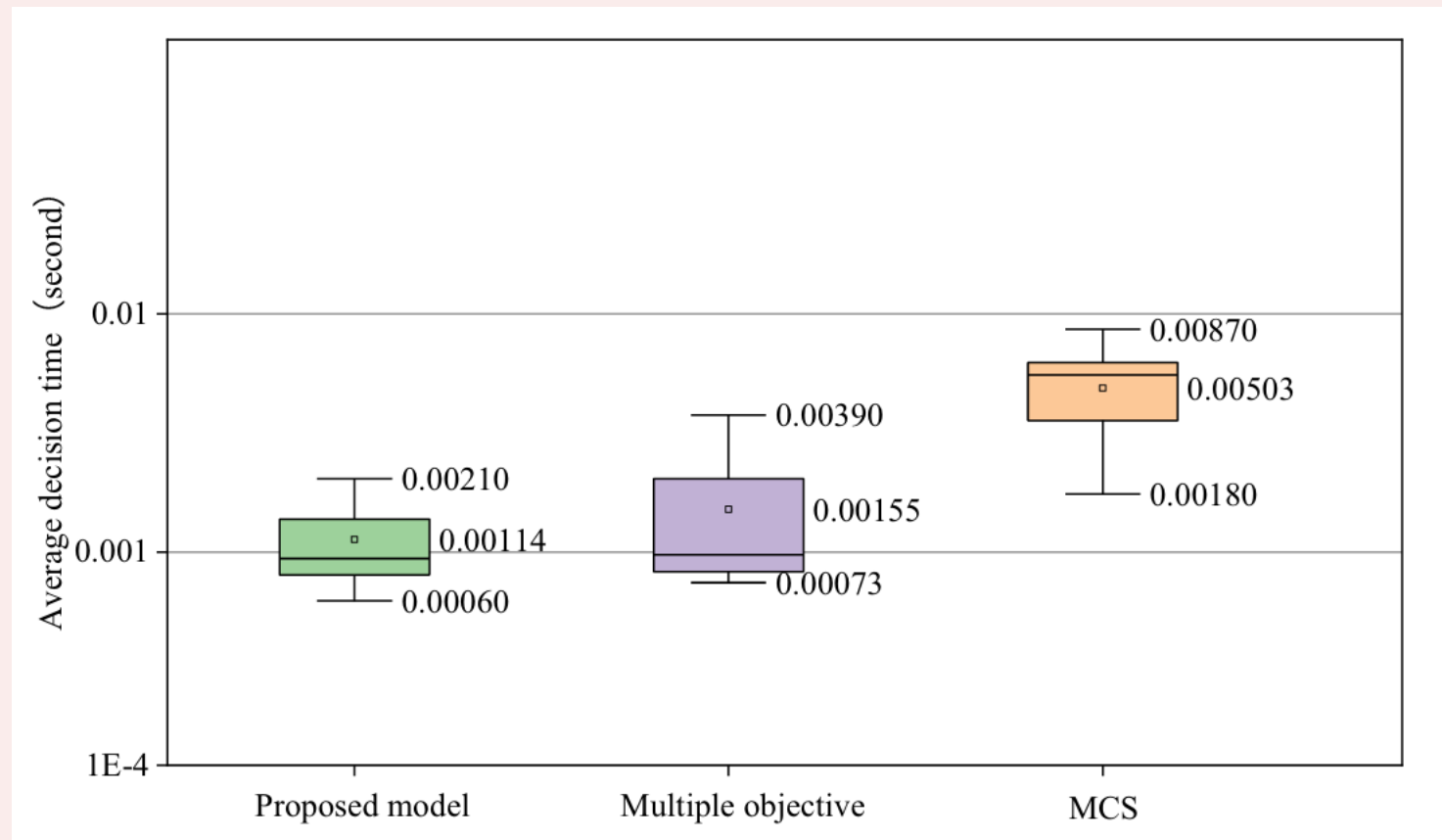


график скорости принятия решений

Среди трех моделей предложенная модель имеет наименьшие среднее время и разницу экстремальных значений.

Это показывает, что предложенная модель является наилучшей с точки зрения скорости диспетчеризации, а также наиболее стабильной из-за минимальных колебаний времени обработки.

Результаты сравнения

В сравнении с эталонными моделями разработанное решение демонстрирует следующие ключевые преимущества:

Повышение производственной эффективности:

- обеспечение более высоких объемы добычи
- улучшение коэффициента использования экскаваторов
- сокращение средней дистанции пробега пустых самосвалов

Экономия эксплуатационных затрат:

- снижение общего потребления топлива
- уменьшение энергозатрат производственного оборудования
- сокращение среднего времени принятия решений

Заключение

Данное исследование предлагает адаптивный метод диспетчеризации, предназначенный для определения оптимальных пунктов загрузки и разгрузки в соответствии с производственными требованиями. Модель принимает решения о назначении маршрутов, анализируя результаты планирования путей на втором этапе системы управления автопарком в сочетании с актуальными условиями.

Для оценки эффективности предложенной модели были выбраны эталонные модели. Результаты демонстрируют, что:

- производительность предложенной модели как минимум на 14% выше, чем у двух сравниваемых моделей
- эксплуатационные затраты системы ниже как минимум на 6%
- модель демонстрирует высокую эффективность и оптимально балансирует между минимизацией расстояний перевозок и максимизацией загрузки техники