



Статья

Рассмотрение проекта оптимизации городского автобуса Сетевое планирование

Си Юй¹, Хуан Цао², Кэ Цао², Лян Цао² и Линсян Чжу^{3,*}¹ Ханчжоу Chuangtou Film and Television Co., Ltd., Ханчжоу 310000, Китай; 13806523777@139.com Колледж² Гражданского и транспортного машиностроения, Шэньчжэньский университет, Шэньчжэнь 518060, Китай; 1910473029@email.szu.edu.cn (HC); 2110474187@email.szu.edu.cn (KC); zouliang@szu.edu.cn (LZ)³ Колледж математики и информатики Южно-Китайского сельскохозяйственного университета, Гуанчжоу 510642, Китай

* Переписка: hcitsy@163.com.

Аннотация: В настоящее время оптимизация сетевых общественного транспорта и планирование движения транспорта в проводящихся самостоятельно поэтапно. Однако в результате анализа было обнаружено, что информация о расписании, такая как расписание маршрутов, является важным фактором выбора маршрута. Поэтому для дальнейшего улучшения эффекта оптимизации в данной статье предлагается инновационная идея одновременной оптимизации сетевых и линейных планирования. На основе построения реально-виртуальной сетевой общественной транспортной вэтой статье строится модель синхронной оптимизации линейной сетевой планирования с учетом ожидания пассажиров, так и времени ожидания на борту. Чтобы избежать учета пассажиров при выборе различных маршрутов, был предложен алгоритм быстрого поиска кратчайшего пути на основе иерархической декомпозиции количества и веса кратчайших путей между двумя смежными OD, а для решения модели использовался генетический алгоритм. Наконец, эффективность модели была проверена на численных примерах, и результаты показали, что синхронная оптимизация превосходит поэтапную оптимизацию: затраты на пассажирское время сократились на 21,5%, затраты на эксплуатацию автобусов сократились на 13,7%, а общий объем автобусных перевозок снизился на 21,5%. Стоимость системы снизилась на 18,0%.

Ключевые слова: выбор маршрута; интервал управления; планирование; актуальность; синхронная оптимизация



Цитирование: Юй, С.; Цао, Х.; Цао, К.; Цао, Л.; Чжу, Л. Рассмотрение проекта оптимизации планирования городского автобусной сети. Прикладн. 2024, 14, 6337. <https://doi.org/10.3390/app14146337>.

Поступила: 22 июня 2024 г.

Пересмотрено: 15 июля 2024 г.

Принято: 18 июля 2024 г.

Опубликовано: 20 июля 2024 г.



Копирайт: © 2024 авторов.

Лицензия: MDPI, Базель, Швейцария.

Эта статья находится в открытом доступе. Она распространяется на условиях и условиях Creative Commons

Лицензия с указанием авторства (CC BY) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Введение

С ускорением развития экономики и быстрого роста городского населения количество автомобилей и потребность в общественном транспорте также быстро растут. Затраты на дорогах стали обременительными в последние годы, все более серьезные.

Чтобы решить эту проблему, необходимо рассмотреть общественный транспорт, особенно в крупных городах, где общественный транспорт развивается быстрыми темпами. Например, в Шэньчжэне протяженность действующих железных дорог в 2020 году превысила 400 км достигнув 422,6 км, что на 33,9% больше, чем в прошлом году. Протяженность автобусных маршрутов достигла 21 310,53 км, снизившись по сравнению с прошлым годом на 1,4%. В настоящее время в крупных городах страны активно развивается общественный транспорт, такси и трамваи, вместе образуют сетевую общественную транспортную систему, при этом общественный пассажирский транспорт увеличивается. В 2019 году среднесуточный пассажиропоток общественного транспорта в Шэньчжэне составил 11,06 миллиона пассажиров в день, что на 2,65 миллиона пассажиров в день больше, чем в 2011 году. Ежедневный пассажиропоток за весь год составил 8,226 млн пассажиров, снизившись по сравнению с аналогичным периодом прошлого года на 25,6%. По мере улучшения ситуации с пандемией и открытия новых линий метро пассажиропоток общественного транспорта в декабре вырос до самого высокого уровня за год: среднесуточный пассажиропоток составил 10,603 миллиона пассажиров, возросший до 94,1% к аналогичному периоду 2019 года.

Чтобы повысить эффективность автобусных перевозок и сбалансировать спрос и предложение автобусной системы необходимо перепланировать и перепроектировать автобусную сеть. Это поможет избежать значительного перекрытия железных дорог, предотвратить дублирование маршрутов и ресурсов.

на прасно т рат ить . В то же время крайне важно обеспечить бесперебойное сообщение и пересадку между автобусами и железнодорожным транспортом емс а мму до влет воря я пот ребно ст и пасса жиров в поездках и снижая транспорт ные расх оды

После проведения отчетст венных и между на родных исследований и анализа автобусных сет ей было обнаружено, что существующие исследования не учитывают влияние планирования на оптимизацию автобусных сет ей. Они также не учитывают затраты пассажиров на ожидание при расчете общих транспортных расходов пассажиров. Анализ данных считывания пассажирских карт выявил меренну ю корреляцию между выбором маршрута пассажирами и частотой автобусных рейсов. Поэтому в эту статью включены изображения планирования при оптимизации автобусных сет ей.

Ученые как внутри страны так и за рубежом провели исследование по зрелье исследования по оптимизации городских автобусных сет ей. Большинство исследований по оптимизации сет ей сосредоточено на трех аспектах: теории, построении моделей и разработке алгоритмов.

Теоретические методы Пу Хань и др. предложил метод оптимизации шинной сет и на основе многоуровневых сложных сет ей [1]. Митра Субро и др. представил метод многокритериальной оптимизации автобусной сет и [2]. Пет и Ангуани др. представил метод проектирования шинных сет ей, основанный на агрегатных сет ях и моделях непрерывной аппроксимации [3].

Сзето и др. предложил метод сетевой оптимизации городских транспортных сет ей и дорожных сет ей [4]. Чжан Л. разработал вспомогательный метод оптимизации сет и маршрутов общественного транспорта (PTRN), основанный на прогнозировании линий связи [5]. Клиер МДж. представил новый

метод оптимизации проектирования сет ей общественного транспорта, максимизирующий ожидаемое общее количество пассажиров общественного транспорта в условиях бюджетных ограничений [6]. Инь Дж. изучил оптимизацию скоординированного расписания поездов в городских железнодорожных транспортных сет ях и предложил математическую формулу для синхронного создания на более скоординированного расписания поездов [7]. Лян М создал многокритериальную модель, основанную на двух противоречивых целях, и разработал две процедуры для одновременной оптимизации сет и и частоты [8]. Ван С. представил метод проектирования многоуровневой многорежимной сет и [9].

Хуан А. изучил влияние общественного транспорта, реагирующего на спрос (DRT), кот орая пост оя нно корректирует маршрут в зависимости от динамических потребностей пассажиров, максимизируя эффективность системы одновременно учитывая предпочтительные временные окна пассажиров [10].

Гонг М предложил разработать модульную сет ь СВ на базе автопарка на основе пересадок, одновременно оптимизируя распределение пассажирских маршрутов [11]. Ян Дж. предложил новый алгоритм генерации начальной боры маршрутов и эвристический алгоритм изменения размера боры маршрутов, встроены в структуру решения, основанную на недоминируемом генетическом алгоритме сортировки-II (NSGA-II), для генерации приближенных границ Парето [12]. Яо Э представил новый метод (MVT-E-VSP) для планирования электромобилей нескольких типов [13]. Го Р оптимизировал

эксплуатационные характеристики двухсторонней системы BRT с эластичным спросом минимизируя общие временные затраты одного пассажира [14]. Ли Вэнь юн и др. предложил метод планирования сет и микроциркуляторы шин на основе иерархической кластеризации [15]. Ши Сюэ и др. предложил метод оптимизации фидерной автобусной сет и железнодорожного транспорта, основанный на модели маркировки кратчайшего маршрута [16]. Хуан Мин и др. предложил метод построения автобусных маршрутов разноразрядной и их оптимизации отдельно по разному уровню функции м [17]. Яй Ф и др. представил гибридный подход для оптимизации теоретического метода для задачи планирования конвейера, зависящих от

Построение модели: Рен Хуа линг и др. предложил новую модель распределения шин, основанную на стратегиях линий и узлов [19]. Ши Циншуй и др. предложил модель оценки оптимизации маршрута общественного транспорта, основанную на данных об автобусах из нескольких источников [20]. Fan W представил эвристический метод, основанный на поиске т абу (TS), и применил его для проектирования сет и общественного транспорта с переменным спросом [21]. Хуан Д. разработал новую модель оптимизации для проектирования специализированной сет и шин (СВ), реагирующей на спрос, включая динамические и статические фазы [22]. Ли Х предложил совместную модель оптимизации для планирования сет и обычных зарядных электростанций автобусов и развертывания фиксированных зарядных станций с учетом политически значимой зарядки и цен на электроэнергию по времени использования [23]. Шайнер К. разработал модель оптимизации стратегического планирования сет и для автобусных маршрутов [24]. Чай С. разработал многоцелевую модель проектирования автобусной сет и, кот орая не только учитывает влияние пересадок, но также учитывает задержки во времени поездки пассажиров из-за задержек [25]. Вэ

модель проектирования фидерных автобусных перевозок для повышения качества обслуживания и доступности и транспорта [26].

Разработчик алгоритма: З. Танидр. предложил объединить локальный детерминированный поиск и глобальные эволюционные алгоритмы для оптимизации автобусной сети [27]. Куанидр. провели исследование по оптимизации автобусной сети с использованием комбинации генетических алгоритмов и алгоритмов муравьиных колоний [28]. Нганмай и др. представил метод, который сочетает в себе различные механизмы генетических операций для оптимизации проектирования шинной сети [29]. Bourbonnais PL использовал различные данные о местной дорожной сети и репрезентативные данные о спросе на общественный транспорт для оптимизации генетического алгоритма и генерации разумных решений [30]. ДинЦянью и др. предложил использовать лучевой алгоритм мк-кратчайшего пути для исследования оптимизации автобусной сети [31]. ЛоСяолин и др. предложил использовать алгоритм кластеризации K-средних для выполнения кластерного анализа на автобусной станции в целях исследования оптимизации сети [32]. Гао Миньяо и др. предложил использовать лучевой алгоритм оптимизации роя частиц (PSO) для решения модели оптимизации шинной сети [33]. Синь И и др. предложил использовать алгоритм mNSGA-II для решения многокритериальной модели оптимизации шинной сети [34]. Ван Нини и др. предложил использовать клеточный генетический алгоритм для решения модели фидерной автобусной сети [35]. Юлицзюнь и др. разработали лучевой алгоритм моделирования отжига для оптимизации и решения модели оптимизации сети [36]. У Кэсинь и др. использовали лучевой алгоритм муравьиной колонии для сетевой оптимизации автобусной сети [37].

В целом исследования по оптимизации шинной сети позволили достичь многочисленных отличных результатов в области теоретических методов, так и в построении моделей, а также в разработке алгоритмов, что обеспечивает теоретическую исследовательскую основу для оптимизации проектирования сети, рассматриваемой в этой статье. Однако эти достижения по-прежнему имеют некоторые недостатки в практическом применении:

(1) Игнорирование выбора пассажирского маршрута: как отечественные, так и международные пользователи часто предполагают, что пассажиры выбирают кратчайшее время или наименьшее количество пересадок при оптимизации автобусной сети. Однако, когда несколько маршрутов между одними и теми же станциями отправления и назначения (OD) соревнуются друг с другом критериями пассажиров, пассажиры могут выборочно выбирать разные маршруты для путешествия.

(2) Не учитывалось влияние планирования на оптимизацию автобусной сети. Предыдущие исследования часто упускали из виду влияние планирования маршрутов на выбор пассажирских маршрутов на этапе проектирования сети. При расчете общей стоимости проезда пассажиров не учитывались затраты на ожидание на остановках. Это неполный учет при расчете общих затрат времени для пассажиров на прямую связь с планированием движения транспорта средств, поскольку затраты на ожидание пассажиров на прямую связь с планированием

Чтобы помочь читателям лучше понять структуру и содержание данной статьи, техническая схема содержания глав проиллюстрирована на рисунке 1. Краткий обзор каждой главы представлен

ниже: В разделе 2 представлено построение и решение интегрированной модели оптимизации для автобуса. сеть и планирование. В этой статье естественным образом определяется объем исследования проблемы автобусной сети, представлено предположение для построения модели, а затем описываются целевая функция и ограничения модели интегрированной оптимизации. На основе построения актуальной виртуальной автобусной сети, обеспечивающей базисные интегрированные как пассажиров, так и операторов, в главе создается интегрированная модель оптимизации.

В разделе 3 алгоритм Мейна применяется для анализа доступных путей между одними и теми же парами источник-назначение (OD). Пути сортируются по их весам, а параметр Кгибко задается для сортировки различным OD. Поскольку так же задачи обычно являются NP-сложными и требуют высокой вычислительной сложности, обычно используются интеллектually вычислительные алгоритмы оптимизации. Учитывая вычислительную сложность построения крупномасштабной автобусной сети, мы выбрали эффективный генетический алгоритм для решения интегрированной модели оптимизации.

опт имизации авт обусной сет и планирования на основе генет ического алгорит ма. Пут ему ст ановки весов между ст аниями м была проверена эффективность алгорит ма в процессе оптимизации. Кейсы оптимизировались поэтапно и синхронно, со сравнением результатов между ними. На конец был проведена анализ чувствительности с акцент ом на различные заинтересованные стороны что под вердило вывод о том что эффект снижения затрат более значит елен

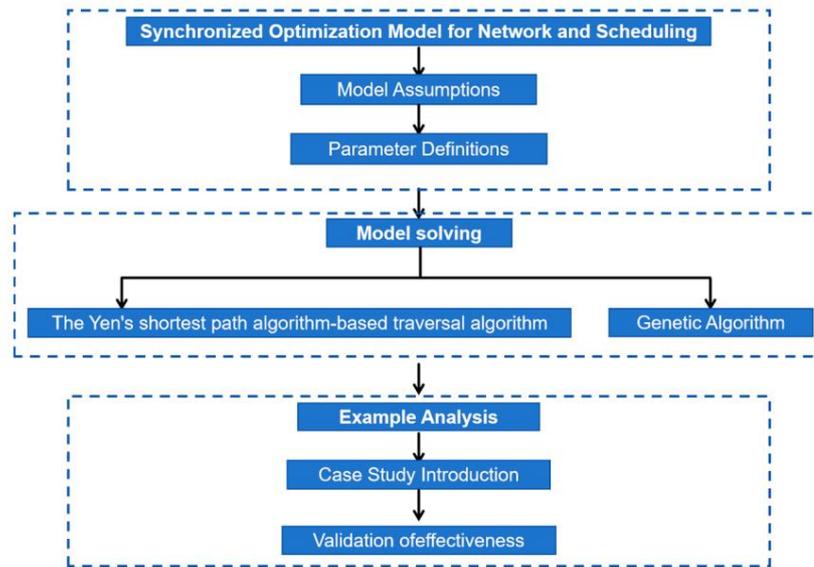


Рисунок 1. Техническая карта содержания раздела.

2. Модель синхронизированной оптимизации маршрутизации поездов в метрополитенской сети

Сет и планирования на основе генет ического алгорит ма на основе конкрет ных тематических исследований.

веса между ст аниями, можно повысить эффективность алгорит ма при оптимизации.

Ввиду многогранности факторов, влияющих на шинную систему, был проведен следующий процесс. Кейсы оптимизировались поэтапно и синхронно, с результатами сделаны предположения, что объектно определит задачу оптимизации шинной сет и по сравнению между ними. На конец, была проведена анализ чувствительности с учетом порогна различные

В этом исследовании представлены результаты, подтверждающие вывод о том, что эффект снижения затрат более значит елен.

(1) Пассажиры выбирают кратчайший маршрут поездки; когда несколько маршрутов могут обеспечить кратчайшее время в пути, пассажиры выбирают на основе доли от общего числа.

2. Модель синхронизированной оптимизации для сет и планирования.

(2) Статистика ожидания для пассажиров принимается равной половине среднего времени ожидания. В связи с многогранностью факторов, влияющих на автобусную систему, для выбранного маршрута, равного половине интервала отправления автобуса, расчет транспортных средств производится для точного определения решаемой проблемы оптимизации автобусной сет и.

выбранный маршрут.

этом исследовании:

(3) Транспортные средства на каждом маршруте считаются идентичными, за исключением количества. Пассажиры выбирают для поездки маршрут с наименьшим временем в пути; когда можно использовать несколько маршрутов поездки. Различия в таких факторах, как дорожное движение, пассажирская загрузка и скорость движения, которые удовлетворяют кратчайшему времени поездки, пассажиры выбирают исходя из доли от общего числа.

могут повлиять на выбор пассажирского маршрута, игнорируются.

количество поездов, совершенных транспортными средствами по данному маршруту ОД (самое короткое время)

(4) Общее время в пути для пассажиров включает время ожидания, время, проведенное в транспортном средстве - (2) Статистика ожидания для пассажиров предполагает равную половину среднего времени ожидания.

свое время, ходят места отправления до остановок и время, ходят места отправления до выбранного маршрута, равное половине интервала отправления транспортного средства на маршрут.

названия маршрута.

(5) Пассажирские перевозки ограничиваются одной и той же автобусной остановкой. Если прямого маршрута нет (3)

Транспортные средства на каждом маршруте считаются идентичными, за исключением количества. Между пунктом отправления и пунктом назначения пассажиры необходимо выйти на остановке на первом рейсе. Различия в таких факторах, как дорожное движение, пассажирская загрузка и скорость движения, которые могут влиять на выбор пассажирского маршрута, на который влияет выбор.

делают пассажиры на одной и той же остановке.

(4) В общем времени поездки пассажиров включается время ожидания, время, потраченное на средство, время, ходят места отправления до автобусной остановки и время, ходят автобусной остановки.

для маршрута в качестве прибытия на остановку, без ограничений вместимости транспортных средств.

(5) Пассажирские перевозки ограничиваются одной и той же автобусной остановкой. Если нет прямого пути между пунктом отправления и пунктом назначения пассажиры необходимо выйти на остановке первоначального маршрута. Исходя из другой автобус, проходящий через эту остановку, чтобы вернуться до места назначения, только принимая во внимание пересадка на той же остановке.

(6) Предполагается, что пассажиры могут сесть в следующую доступную транспортное средство в желаемом направлении маршрута после прибытия на остановку, без ограничений вместимости транспортных средств.

2.2. Определения параметров

$T_{ij}(X)$: В рамках автобусной сет и X минимальное время в пути, необходимо пассажирам для проезда от Станции i до Станции $j(s)$;

T_{wij} : Время ожидания для пассажиров, следующих из пункта i в пункт j по выбранному им кратчайшему пути (α);

T_{Sij} : Время остановки автобуса во время пути от пункта i до пункта j (α);

T_{dij} : время нахождения пассажира на борту от пункта i до пункта j (α);

T_{Sij} : Время остановки автобуса во время пути от станции i до станции j (α);

T_s : Среднее время простоя автобуса на остановке (α);

T_r : Время работы маршрута (α);

F : Эксплуатационные расходы (α);

M : Стоимость приобретения автобуса (α);

N : Эксплуатационные расходы каждого автобусного маршрута (α);

N : Стоимость единицы расстояния для автобуса (α);

M : Стоимость ежедневной покупки автобуса (α);

X : Автобусная сеть;

Q_{ij} : потребность в трафике от станции i до станции j ; p :

количество остановок между станциями i и j на выбранном маршруте;

l^p : Длина участка между станциями i и j на маршруте g (км); α и β :

S : количество представленных автомобилей; Количество

P^c станций между станциями i и j на маршруте g ; l_{min} : минимальная длина автобусного

маршрута (км); l_{max} : максимальная длина автобусного маршрута

(км); f_{min} : минимальный интервал движения автобусов на

автобусном маршруте; f_r : интервал движения автобусов по маршруту g ; f_{max} :

максимальный интервал движения автобусов

на автобусном маршруте; L_g : Длина маршрута g (км); d_g : расстояние по прямой между

начальной и конечной точками маршрута g

(км); λ : весовой коэффициент между затратами времени и эксплуатационными расходами; ω : коэффициент преобразования

между затратами времени и эксплуатационными расходами; δw : Коэффициент ожидания

пассажиров обусловленным тем, что пассажиры прибывают равномерно, а прибытие транспорта

средств подчиняется распределению Пуассона, $\delta w = 0,5$;

α^p : Значение равно 1, если кратчайший путь от сайта i к сайту j проходит через маршрут g , и 0 и β : если это не так;

V : Средняя скорость автобуса (м/с); γ

γ : Сегмент l_{ij} между соседними станциями i и j на маршруте g имеет значение 1, когда ij : он находится на маршруте g , и значение 0, когда это не так; Или: Станция i на маршруте g .

2.3. Модельное строение

Рассмотрение оптимизации конструкции городских автобусных сетей с планированием направлено на минимизацию затрат времени пассажиров и затрат на эксплуатацию автобусов. Ограничения включают длину маршрута, интервал движения, неповторяющиеся станции маршрута и коэффициент нелинейности маршрута. Модель синхронной оптимизации разрабатывается как для сетей, так и для планирования.

2.3.1. Целевая функция

Цель оптимизации автобусной сети должна всесторонне учитывать интересы пассажиров, так и автобусных операторов. Пассажиры стремятся сократить время поездки, а операторы стремятся к эффективному использованию ресурсов и минимизации инвестиционных затрат. Таким образом при проектировании оптимизации автобусной сети и модели планирования в это время одновременно учитываются интересы пассажиров, так и автобусных операторов. Цель состоит в том, чтобы сократить время в пути пассажиров и снизить затраты на эксплуатацию автобусов, стремясь минимизировать затраты как для пассажиров, так и для операторов автобусов в автобусной сети.

Стоимость поездки пассажира

Стоимость пассажирских перевозок в основном носит характер общего времени в пути и пассажиров в пределах сети, включая время ожидания и время нахождения в автомобиле.

(1) Время

ожида ния В предположения х модели, у помя ну т ьк ранее, предполаг ает ся , чт о пасса жирypo прибу т ии на ст а нцию могу т сест ь в первый авт обу с целевого маршрута для поездки, т о ест ь все пасса жирyмогу т сест ь на следу ющий регу лярный авт обу с целевого маршрута . Т аким образом время ожида ния пасса жиров в основномзависит от инт ервала ожида емого ими маршрута , при эт омвремя ожида ния пасса жиров сост авля ет половину инт ервала выбранного маршрута . Время ожида ния пасса жира выража ет ся как:

$$T_{wij} = \delta w \sum_{p=1}^p \frac{1}{\text{фр.}} \frac{p \cdot x_{ij}}{p \cdot x_{r=1} \cdot r} \cdot \frac{1}{\text{инт.}} \cdot \text{фр.} = \delta w \sum_{p=1}^p \frac{p \cdot x_{ij}}{p \cdot x_{r=1} \cdot r} \cdot \frac{1}{\text{инт.}} \quad (1)$$

(2) Время в транспортном

средстве. Время в транспортном средстве в основном состоит из двух частей: время в пути и время пребывания на остановках. Если не учитывать влияние дороги и других внешних факторов, время в пути зависит от расстояния и скорости движения, а время ожидания связано с количеством промежуточных остановок. Таким образом, время в пути и время пребывания предст авляются следующим образом:

$$T_{\text{движ}} = \frac{1}{v} \sum_{p=1}^p \frac{p \cdot x_{ij}}{p \cdot x_{r=1} \cdot r} \cdot \frac{1}{\text{фр.}} \cdot L_{ij}^p \quad (2)$$

$$T_{Sij} = T_s \sum_{p=1}^p \frac{1}{\text{фр.}} \frac{p \cdot x_{ij}}{p \cdot x_{r=1} \cdot r} \cdot \frac{1}{\text{инт.}} \cdot p \cdot c_{ij} \quad (3)$$

Исходя из вышеизложенного, общие затраты времени для пассажиров можно выразить следующим образом:

$$T = \sum_{j=1}^c \sum_{i=1}^c Q_{ij} \lambda (\delta w \sum_{p=1}^p \frac{p \cdot x_{ij}}{p \cdot x_{r=1} \cdot r} \cdot \frac{1}{\text{фр.}} + \frac{1}{v} \sum_{p=1}^p \frac{p \cdot x_{ij}}{p \cdot x_{r=1} \cdot r} \cdot \frac{1}{\text{фр.}} \cdot L_{ij}^p + c_{ij} \sum_{p=1}^p \frac{p \cdot x_{ij}}{p \cdot x_{r=1} \cdot r} \cdot \frac{1}{\text{фр.}} \cdot p \cdot c_{ij}) \quad (4)$$

Затраты на эксплуатацию

автобусов. Расходы на эксплуатацию операторов в основном включают закупку автобусов, стоимость обслуживания, заработную плату персонала, управленческие сборы, содержание транспортных средств, затраты на топливо, расходы на амортизацию транспортных средств и налоги, среди прочего. В данной работе при рассмотрении затрат учитываются только эксплуатационные расходы на автобусы, которые в основном относятся к экономическим издержкам. В частности, это относится к затратам на закупку транспортных средств и эксплуатацию маршрута на каждом маршруте автобусной сети.

(1) Затраты на приобретение

транспортных средств. Чтобы минимизировать затраты на приобретение транспортных средств и максимизировать их использование, необходимо максимально сократить количество транспортных средств. Однако так же важно убедиться, что на станции отправления есть автобус, который встретит следующий запланированный рейс по каждому маршруту. Для этого необходимо обеспечить, чтобы интервал движения превышал продолжительность каждого маршрута, а это означает, что минимальное количество транспортных средств, необходимое для каждого маршрута, должно удовлетворять следующему условию:

$$2 \cdot \text{инт.} \geq \frac{L_{r,r}}{v} \cdot \frac{1}{\text{фр.}} \quad (5)$$

Таким образом, минимальная стоимость закупки транспортного средства составляет:

$$M = \sum_{p=1}^p \frac{1}{\text{фр.}} \cdot \text{мин.} \quad (6)$$

(2) Стоимость эксплуатации маршрута

Эксплуатационные затраты автобусного маршрута в основном включают в себя эксплуатационные расходы транспортного средства, которые в первую очередь зависят от его поездок и стоимости одной поездки. Таким образом, минимальные эксплуатационные затраты маршрута предст

$$H = \sum_{p=1}^p \frac{c_p}{\mu_p} \quad (7)$$

Таким образом стоимость эксплуатации автобуса предст

$$F = 2 \left(\sum_{p=1}^p \frac{L_p}{B} \cdot \frac{1}{\mu_p} M + \mu_p \tau_p H \right) \quad (8)$$

2.3.2. Ограничительные условия

Чтобы обеспечить детальное определение условий, заданных в модели, вводятся следующие ограничения для дальнейшего ограничения модели: (1) Длина маршрута. При оптимизации

автобусной сети, если маршрут слишком короткий, эксплуатационные расходы велики, а чрезмерно длинные маршруты сокращают комфорт пассажиров. Поэтому для лучшего удовлетворения потребностей пассажиров маршруты не должны быть слишком короткими или длинными. Длина каждого маршрута должна удовлетворять следующему ограничению:

$$l_{min} \leq L_r \leq l_{max} \quad (9)$$

(2) Интервал.

Правильная установка интервала имеет решающее значение. Слишком длинный интервал увеличивает время ожидания пассажиров, что приводит к увеличению затрат времени пассажиров. С другой стороны, слишком короткий интервал приводит к увеличению количества необходимых транспортных средств, что приводит к увеличению эксплуатационных расходов для автобусных операторов. Таким образом, продвижение должно удовлетворять следующему ограничению:

$$f_{min} \leq f_r \leq f_{max} \quad (10)$$

(3) Неповторяющиеся остановки маршрутов. В

проекте иерархической автобусной сети, чтобы избежать образования петель на автобусных маршрутах, которые увеличивают расходы на пассажирские перевозки и приводят к непроизводительному расходованию ресурсов, установлено ограничение, согласно которому каждый автобусный маршрут должен содержать неповторяющиеся остановки. Это означает, что каждая остановка должна появляться только один раз на каждом автобусном маршруте.

$$O_a^p / = O_j^p ; j = 1, \dots, S; a / = j; g = 1, \dots, p \quad (11)$$

(4) Коэффициент нелинейности.

Во избежание чрезмерных объездов на установленных маршрутах, сокращения затрат времени в пути пассажиров и повышения качества автобусных перевозок коэффициент нелинейности маршрута ограничивается на основании «Правил планирования и проектирования городского дорожного движения». в модели синхронной оптимизации этой статьи.

$$\frac{L}{d-p} = 1,4 \quad (12)$$

2.3.3. Модель синхронной оптимизации как для сет и, так и для планирования

На основании вышеизложенного модель синхронной оптимизации как для сет и, так и для планирования в этой статье представлена следующим образом

$$Z = \min(T + \lambda F)$$

у л:

$$f_{\min} \leq f_r \leq f_{\max} \quad l_{\min} \leq l_k \leq l_{\max}$$

$$l_{kj} = \sum_{i \in I_{kj}} c_{ij} x_{ij} \quad j = 1, \dots, R \quad p = 1, \dots, \bar{p}$$

Или $x_{ij} = 0$ или $x_{ij} = 1$, $j = 1, \dots, R$ $p = 1, \dots, \bar{p}$

Целевая функция в модели синхронной оптимизации, построенной в данной работе

статья разделена на две части: стоимость пассажира-времени и стоимость эксплуатации автобуса.

Стоимость времени пассажира включает в себя: время ожидания (уравнение (1)), время между остановками (уравнение (2)), время ожидания (уравнение (3)); Стоимость эксплуатации автобуса включает в себя: стоимость приобретения транспортных средств (уравнение (6)), стоимость эксплуатации маршрута (уравнение (7)).

Ограничения включают в себя: длину маршрута (уравнение (9)), интервал движения (уравнение (10)), отступ от станции повторного посещения маршрута (уравнение (11)), коэффициент нелинейности (уравнение (12)).

3. Решение модели.

Модель синхронной оптимизации, предложенная в данной статье, предполагает, что пассажиры выбирают кратчайший путь при расчете затрат времени в пути на транспортном средстве в целевой функции. Однако между одними и теми же станциями отправления и назначения (OD) может существовать несколько кратчайших путей. В таких случаях важно учитывать выбор пассажиров среди различных маршрутов. Поэтому необходимо статистически проанализировать количество кратчайших путей между каждой парой OD. Алгоритм Иена может анализировать достижимые пути между одной и той же парой OD, подсчитывать эти пути на основе их весов и обеспечивать отсортированное ранжирование весов. В этой статье алгоритм Иена используется для статистического анализа кратчайших путей между различными парами OD. Во время применения используется гибкий подход для установки значения K (количество рассматриваемых кратчайших путей) путем сравнения весов соседних кратчайших путей. Это позволяет гибко выбирать значение K для разных станций OD.

В данной статье предлагается модель синхронной оптимизации, которая решает задачу комбинаторной оптимизации. Такие задачи имеют конечное число возможных комбинаций, и оптимальное решение можно найти с помощью метода перебора. Однако, когда имеется много переменных решений, вычислительная сложность задачи может стать чрезвычайно большой, часто демонстрируя экспоненциальный рост. Например, при рассмотрении оптимизированной автобусной сети с N узлами сети, размерности m , маршрутами и интервалами движения R , перебор потребует $N! \cdot R^m$ операций, что приведет к огромной вычислительной нагрузке. Это попадает в категорию типичных NP-сложных задач. Из-за высокой вычислительной сложности и сложности таких задач для их решения обычно используются интеллектуальные алгоритмы оптимизации. Учитывая характеристики построения крупномасштабных шинных сетей в этом исследовании, которые включают в себя большое количество размеров узлов и вычислительную сложность, генетические алгоритмы являются хорошим выбором, поскольку они обеспечивают высокую эксплуатационную эффективность и широко применимы для решения крупномасштабной комбинаторной оптимизации и нестандартных задач. Задачи линейной оптимизации. Поэтому в этой статье используется генетический алгоритм для решения модели синхронной оптимизации.

Для задачи синхронной оптимизации автобусной сети и планирования, обсуждаемой в этой статье, были разработаны соответствующие алгоритмы модели синхронной оптимизации, которые конкретно описываются следующим образом

3.1. Алгоритм поиска на основе алгоритма кратчайшего пути Иены В

данной статье рассматривается ситуация, когда пассажиры выбирают маршрут во время путешествия. При расчете общей стоимости поездки пассажиров между различными пунктами отправления -

стационарные значения (OD), предполагается, что пассажиры всегда выбирают кратчайший путь. Однако в случаях, когда существует несколько кратчайших путей между парами OD, становится необходимым учитывать выбор пассажиров среди этих путей. Поэтому важно проанализировать и вычислить кратчайшие пути между каждой парой OD. Чтобы удовлетворить эту аналитическую потребность, выбирается алгоритм кратчайшего пути иенддя аналитическая сценариев кратчайшего пути между различными парами OD. Алгоритм Иена, предложенный Джином Иеном в 1971 году для решения проблемы KSP (K-кратчайших путей), основан на алгоритме поиска кратчайшего пути и вычисляет первые K-кратчайшие пути между станциями OD. Он подходит для вычисления K-кратчайших путей с односторонними ориентированными циклическими графами с неотрицательными взвешенными ребрами [38]. В этой статье основной процесс обхода кратчайшего пути на основе алгоритма Иена выглядит следующим

(1) Учитывая исходную станцию o и станцию назначения d , для начального обхода устанавливается значение K равным 1. Это позволит найти первый кратчайший путь P_1 для пары OD и соответствующий вес Y_1 (2) При

поиске i -го кратчайшего пути P_i , когда K установлено на 2, процесс выглядит следующим образом: 1 Обновить кратчайшие пути для каждого сегмента: первоначально устанавливается вес всех сегментов на пути P_1 равным бесконечности. Вычислить новый кратчайший путь для каждого сегмента, последовательно устанавливая вес сегментов на пути P_1 равным бесконечности. Объединить полученные новые кратчайшие пути с исходным путем P_1 . Количество вычислений равно количеству сегментов пути.

2 Инициализировать набор маршрутов-кандидатов X . Если вновь полученные пути на предыдущем шаге не являются удовлетворяющими условиями непустоты существующих станций и отличаются от ранее выбранного пути P_1 , добавят их в набор маршрутов-кандидатов X . Удалить любые дубликаты из набора маршрутов-кандидатов X . 3 Выберите кратчайший маршрут и обновите набор маршрутов-кандидатов X . Из непустого набора маршрутов-кандидатов X выберите путь с минимальным весом как веса второго кратчайшего пути P_2 с весом Y_2 . Удалите этот путь из набора маршрутов-кандидатов X . Этот процесс гарантирует, что будет найден второй кратчайший путь, учитывая непустоты существующих станций и избегая дублирования с первым выбранным путем P_1 .

(3) При поиске i -го кратчайшего пути P_i с K , установленным на i , процесс выглядит следующим образом: 1 Обновить кратчайшие пути для каждого сегмента: начните с установки весов всех сегментов на пути P_{i-1} равным бесконечности. Вычислите новый кратчайший путь для каждого сегмента, последовательно устанавливая вес сегментов на пути P_{i-1} равным бесконечности. Объедините полученные новые кратчайшие пути с исходным путем P_{i-1} . Количество вычислений равно количеству сегментов пути. 2 Инициализируйте набор маршрутов-кандидатов X . Если вновь полученные пути на предыдущем шаге не являются соответствующими условиями непустоты существующих станций и отличаются от ранее выбранных путей от P_1 до P_{i-1} , добавьте их в маршрут-кандидаты X . Удалите все дубликаты из набора маршрутов-кандидатов X . 3 Выберите кратчайший маршрут и обновите набор маршрутов-кандидатов X . Из непустого набора маршрутов-кандидатов X выберите путь с минимальным весом как веса i -го кратчайшего пути P_i с весом Y_i . Удалите этот путь из набора маршрутов-кандидатов X . Если существует несколько путей с одинаковым весом Y_i , повторите описанный выше процесс для каждого пути i -го кратчайшего пути, полученного с весом Y_i .

(4) Сравните вес Y_i с Y_{i-1} от 1 до $i-1$

первый кратчайший путь. Если Y_i равно Y_{i-1} больше, установите K на $i+1$ и повторите шаг (3), пока Y_i не будет Y_{i-1} . Этот процесс продолжается до тех пор, пока цикл не завершится, что приводит к количеству кратчайших путей и их соответствующим весам между заданными станциями отправления и назначения.

3.2. Генетический

Алгоритм генетический алгоритм (ГА) был предложен Джоном Холландом в 1970-х годах и представляет собой интеллектуальный алгоритм оптимизации, который применяет эволюционный принцип «выживания наиболеепригодней» в природе для решения задач оптимизации. Это итерационный алгоритм, который ищет оптимальное решение и известен своей широкой применимостью, эффективностью и хорошей глобальной производимостью [39].

Сочетая вышеописанную модель оптимизации сетей и синхронизации планирования, а также дальнейшую разработку генетического алгоритма для исследовательской задачи, конкретный процесс проектирования

выглядит следующим образом 1. Кодирование решений: модель оптимизации сетей и синхронизации, установленная в этой главе, в основном предназначена для определения станций, порядка и интервалов отправления каждого автономного маршрута в автономной сети. Поэтому необходимо закодировать станции, порядок и интервалы отправления каждого маршрута как переменные решения. При кодировании решений используется метод кодирования с плавающей запятой, который подходит для кодирования генетических алгоритмов в больших диапазонах, высокими требованиями к точности и большими пространствами генетического поиска. Это особенно эффективно для многомерной задачи крупномасштабных сетей станций в этом исследовании. Метод

построения исходного решения в этой статье заключается в следующем (1) Определение размеров переменных решения: при выполнении операций кодирования решений необходимо сначала определить размеры. В случае данного исследования, когда станции сетей и интервалы отправления автономных маршрутов задаются в качестве переменных решения, размеры переменных решения определяются количеством станций и количеством маршрутов K (соответствующим соответствующим интервалам отправления для каждого маршрута). Определение количества станций на каждом маршруте основано на таких факторах, как длина маршрута и среднее расстояние между станциями.

Обычно количество станций на автономном маршруте устанавливается от 15 до 30. Конкретное количество станций должно устанавливаться на основе фактической длины маршрута и среднего расстояния станций, где обозначает количество станций. Определение количества маршрутов обычно основано на произведении количества станций на каждом маршруте и обычно находится в пределах 1-2-кратной разницы между общим количеством станций автономной сети и количеством станций на каждом маршруте. В этом смысле количество маршрутов обозначается как K . Помимо станций сетей, переменные решения также включают настройку интервалов отправления для каждого маршрута с размерами, соответствующими количеству маршрутов K . Таким образом, размерность переменных решения в этом исследовании определяется как: $K \times n + K$. В ходе фактического процесса оптимизации сетей окончательное количество станций и маршрутов должно быть дополнительно определено проектировщиком транспортной сети на основе фактических требований.

(2) Выбор маршрутных станций После определения количества станций и маршрутов в сети также задается диапазон количества автономных маршрутов и соответствующих станций. Для дальнейшего повышения эффективности и упрощения последующих операций станции для каждого маршрута выбираются так, чтобы обеспечить возможные начальные решения с хорошей пригодностью. Конкретный процесс заключается в следующем (а) Установка первой и последней станций: метод выбора колеса рулетки используется для выбора первой и последней станций маршрутов. Пассажирский спрос для каждой станции OD преобразуется в долю от общего пассажирского спроса, и эта пропорция используется как вероятность установки OD в качестве первой и последней станции маршрута. На основе этих вероятностей выбираются пары OD , которые будут служить первой и последней станциями каждого маршрута. (б) Установка промежуточных станций: после определения первой и последней станций маршрутов рассчитываются расстояния между всеми остальными станциями сети, а также первая и последняя станции. В качестве промежуточной станции устанавливается станция с минимальной суммой расстояний до первой и последней станций. Затем рассчитываются расстояния между оставшимися станциями, выбранной промежуточной станцией и последней станцией и следующей промежуточной станцией устанавливается станция с минимальной суммой расстояний.

Этот процесс продолжается до тех пор, пока для каждого маршрута не будут выбраны 2 промежуточные станции.

(3) Представление сетей и общественного транспорта. После определения размеров переменных решения и выбора маршрутных станций это исследование представляет собой решение, состоящее из двух частей, для представления сетей и общественного транспорта. Первая часть состоит из определения и заказа станций для каждого автономного маршрута, а вторая часть соответствует интервалам отправления каждого маршрута. Например, решение «12345678959678432518» представляет собой сетевую схему, состоящую из двух автономных маршрутов по девять станций в каждом. В этом представлении первая часть «123456789» и «967843251» соответственно представляют два маршрута как «1-2-3-4-5-6-7-8-9» и «9-6-7-8». -4-3-2-5-1»; вторая часть

интервалы для двух маршрутов составляют 5 и 8 минут соответственно. Определение станций для каждого маршрута в соответствии с процессом выбора, описанному на этапе (2). Кроме того, интервалы отправления для каждого маршрута генерируются случайным образом в диапазоне от 5 до 15 минут.

(4) Этот метод кодирования сначала определяет размеры сетки, количество автобусных маршрутов и количество станций для каждого маршрута. Выбирая станции для каждого маршрута и случайным образом генерируя соответствующие интервалы отправления, он определяет станции и интервалы отправления для каждого маршрута в исходной сети. В результате этап построения начальных решений является допустимыми решениями с относительно хорошей пригодностью, что значительно снижает сложность вычислений. Кроме того, этот метод кодирования обеспечивает реализацию решений на протяжении всех последующих операций генерации алгоритма, исключая генерацию неосуществимых решений.

2. Инициализация популяции. Следуя формату построения начальных решений на этапе I, особи для популяции генерируются случайным образом при этом случайная генерация повторяется в соответствии с установленным размером популяции. Население представлено как $P = \{x^1, x^2, \dots, x^{\mu}\}$, где μ — размер популяции, а каждый индивид x^i представлен как $x^i = [x_1^i, x_2^i, \dots, x_n^i]$, где n — размерность переменных решения, частоты, суммарное количество станций для каждого маршрута и количество маршрутов в сети.

$$x^i = [x_1^i, x_2^i, \dots, x_n^i]$$

3. Оценка пригодности: возьмите переменные решения, определите во время инициализации, и введите их в синхронизированную модель оптимизации для сети и планирования.

Рассчитайте стоимость пассажирского времени и эксплуатационные расходы общественного транспорта в рамках этой исходной сети, получив значение целевой функции. Модель, построенная в этой статье, направлена на минимизацию затрат времени пассажиров и эксплуатационных расходов общественного транспорта. Приспособленность каждого человека оценивается на основе минимального значения целевой функции.

4. Отбор. В данном исследовании для отбора индивидов в популяции используется метод выбора колеса рулетки. Принцип этого метода отбора заключается в расчете вероятности появления особи в следующем поколении на основе ее значения приспособленности. Затем особи отбираются для формирования потенциальной популяции в соответствии с этой вероятностью.

Преимущество этого метода заключается в том, что люди с более высокими показателями приспособленности имеют более высокую вероятность быть выбранными.

5. Кроссовер. После выполнения операции выбора на достаточном уровне выполняется одноточечный кроссовер с использованием случайной сгенерированной точки кроссовера.

6. Мутация. Особи в популяции подвергаются мутационной операцией основанной на вероятности мутации P_m . Для особей, подвергающихся мутации, выбирается случайное положение мутации, и мутация осуществляется с использованием метода двухточечной обменной мутации.

4. Пример анализа 4.1.

Введение в тематическое исследование

4.1.1. Введение данных

(1) Данные о местоположении OD. В

данном документе тематическое исследование сосредоточено на пяти автобусных маршрутах, проходящих через две станции (от станции 98 до станции 101) с самым высоким уровнем комфорта в определенном районе города Гуанжоу. Выбранный случай включает в себя сложность и 134 станции в сети, из них 102 станции в дорожной сети. Среди них 38 станций в районе Хайчжу, 7 в районе Байюнь, 13 в районе Ливань, 7 в районе Юсю, 13 в районе Тяньхэ и 24 в районе Паньюй. В сети несколько раз появляются 18 станций, в основном расположенных в районах Хайчжу и Ливань. Все пять выбранных маршрутов проходят через участок дороги между Станцией 98 и Станцией 101.

Пассажирский спрос между каждой станцией основан на данных считывания пассажирских карт в утренние часы пик (7:00-9:00) 25 апреля 2018 года в городе Гуанжоу. Всего среди выбранных станций на считывание 10 302 пары OD с общим количеством пассажиров 19 938 человек.

герс. Среди пар ОДс пассажиропоток превышает 100 человек, вылет станции в основном сосредоточены в районах Хайчжу и Юсю, а станции назначения в основном сосредоточены в районах Тяньхэ, Паньюй и Хайчжу.

Округ. Среди них самый высокий пассажиропоток наблюдается со станцией 101 по станции 35, при этом 371 пассажир.

(2) Пересмотренные сетевые данные

После уточнения исходных данных следующим шагом детальнойнейшее определение размеров выбранного решения шинной сети. Проанализированы основные данные пути и выбранных маршрутов в случае оптимальной сети и было обнаружено, что среднее расстояние между станциями на каждом маршруте составляет 668 м при среднем количестве станций 26,8 и средней длине маршрута.

17,32 км. Обычно длина городских маршрутов составляет от 10 км до

Протяженность 30 км количество станций от 15 до 30. Для удовлетворения потребности пассажиров.

и операторов, проектировщики сети стремятся сохранить количество маршрутов неизменными старайтесь поддерживать согласованность длинных маршрутов и количества станций с исходными маршрутами. в процессе оптимизации. Таким образом размеры решения шинной сети составят и определяются следующим образом 5 маршрутов по 25 станций в каждом

Основываясь на приведенных выше введениях, размер решений в этой сети и

для модели оптимизации планирования установлено значение 130; 5 линий по 25 остановок каждая, всего 125 остановок.

в сети; и 5-минутные интервалы для каждой станции. Размерность матрицы смежности и в фактическая - виртуальная сеть общественного транспорта представляет собой суммарное количество дорожной сети и сети остановок, всего 227.

4.1.2. Настройка параметров

Следующим шагом детального построения синхронизированной модели оптимизации шинной сети и планирование на основе генетических алгоритмов с учетом определения параметров модели и алгоритма.

(1) Параметры модели

В этом исследовании коэффициент преобразования λ установлен равным 0,5, так как стоимость пассажирского времени общественного транспорта является затратной операцией считаются одинаково важными при оптимизации процесс. Исходя из средней заработной платы в Гуанчжоу в 2021 году в размере 10 843 юаней, значение ω установлено на уровне 36,1 юаня/час. Унифицировать стоимость пассажирского времени и стоимость эксплуатации общественного транспорта в целевой функции (уравнение (13)) и избежать значительного разрыва между временными затратами и эксплуатационными расходами оба преобразуются в ежедневный цикл исследований целей. В соответствии с Годовой отчетом о развитии общественного транспорта в Гуанчжоу в 2021 году, средняя скорость городских дорог в центральном городском районе Гуанчжоу в будние дни составляет 30,57 км/ч, а средняя скорость автобусов установлена на уровне 30,57 км/ч. Из расчета стоимости одного автобуса в 3 млн юаней и среднем сроке службы автобуса 15 лет, установлена ежедневная стоимость закупки транспортных средств в М. до 548,1 юаня/автобус. Проанализированы данные эксплуатации транспортных средств по выбранному маршрутам среднее время остановки автобуса T_s для выбранного маршрута установлено равным 36 с. Следовательно, значения параметров в модели синхронной оптимизации, предложенной в этом исследовании, таковы показаны в Таблице 1 ниже:

Таблица 1. Параметры модели синхронной оптимизации.

Параметры	Значение
Коэффициент акцентации λ	0,5
Коэффициент преобразования времени и стоимости ω	45,1 юаней/час
Средняя скорость V	30,57 км/ч
Расход на единицу пробега N	2,8/км
Среднее время пребывания T_s	36 с
Стоимость приобретения автобуса за один день M	548,1/автобус
Минимальная длина маршрута l_{min}	10 км
Максимальная длина маршрута l_{max}	30 км
Минимальный интервал вылета f_{min}	5 мин
Максимальный интервал вылета f_{max}	15 мин

(2) Параметр алгоритма.

Основываясь на фактической ситуации выбора линейной сети и в этом смысле и определении размерности решаемой переменной в этом смысле как 130 на основе приведенного выше анализа, соответствующие параметры генетического алгоритма определяются в соответствии с характеристиками модели синхронной оптимизации решения линейной сети и в этом смысле. Установка размера популяции. Установка слишком маленького количества популяций может привести к большим ошибкам в результате того, что результаты не сойдутся; установка слишком большого значения усложнит решение проблемы. Обычно размер совокупности установившейся популяции составляет 20-100 раз больше размера переменной решения. В этом смысле размер совокупности для измерения переменной решения линейной сети и в этом смысле установка равна 5000. Установка количества итераций: посредством нескольких пробных расчетов было обнаружено, что целевые значения сходятся примерно на 150 000 итераций. Для обеспечения сходимости результатов в данной статье количество итераций увеличено до 200 000. Установка вероятности кроссовера: Чтобы достичь метода одного очечного кроссовера с обменом только одного генетического сегмента, как описано в предыдущей главе, поскольку количество генетических сегментов для этой сети и линий равно 5, вероятность кроссовера установлена равной 0,2. Установка вероятности мутации: Обычно вероятность мутации устанавливается в диапазоне от 0,0001 до 0,1. В этой статье вероятность мутации установлена равной 0,01.

Оптимизация параметров: Что касается параметров, как размер популяции, количество итераций, мутаций и вероятность скрещивания в разработанном генетическом алгоритме, из-за большой размерности и большой вычислительной нагрузки на оптимизацию сети и линий решение одной задачи заняло почти день, и после 10 вычислений результаты оптимизации показали хорошую производительность. Однако из-за ограниченных вычислительных возможностей в данной статье не проводилась глобальная оптимизация значений параметров алгоритма. Конкретные значения параметров генетического алгоритма, предназначенного для решения модели синхронной оптимизации в данной статье, показаны в таблице 2 следующим образом.

Таблица 2. Параметры значения генетического алгоритма

Параметры	Ценности
размер популяции	5000
количество итераций	200 000
вероятность	0,2
кроссовера вероятность мутации	0,01

Используя данные о дорожной сети и спросе, параметры модели и параметры алгоритма, упомянутые выше в качестве основных данных, с параметрами каждой станции и интервалами отправления каждого маршрута в сети и в качестве входных данных, синхронная оптимизационная модель, построенная в этой статье, будет решена с использованием соответствующего алгоритма, разработанного в разделе 4.

4.2. Проверка эффективности

На основе данных о дорожной сети и спросе, а также заданных параметров модели и алгоритма, упомянутых выше, решается модель синхронной оптимизации сети и планирования. Выполняется поэтапная оптимизация сети и данного корпуса. Сравните и проанализируйте результаты синхронной оптимизации с результатами поэтапной оптимизации, чтобы определить эффективность модели синхронной оптимизации и разработанного алгоритма.

4.2.1. Анализ эффективности алгоритма

В данной статье установлена оптимальная схема расположения автобусной сети и между выбранными станциями на основе установки весов между станциями. Впоследствии синхронная оптимизация проводится в сети и пробной шины. Следующий разработанный алгоритм, задача оптимизации решается непрерывно в течение 10 итераций, последовательно давая оптимальное решение для пробного случая. Сходимость разработанного генетического алгоритма происходит примерно за 150 000 итераций, при этом последующие результаты остаются неизменными. В результате итераций, хотя и лучшие значения целевой функции и средняя целевая функция

Таблица 3. Таблица данных результатов синхронной оптимизации.

Номер маршрута	Маршрут ные станции	Отправление Инт ервал (мин)	Размер флота Конфигу рация	Длина маршрута (км)	Нелинейный Коэ ффициент
1	7-99-71-27-100-11-92-45-97-49-53-95-43-69-70-78-88-21-89-51-41-54-77-14-8	12	8	18,4	1,39
2	77-50-14-8-44-18-101-98-62-17-60-37-24-6-23-25-12-38-61-19-56-57-65-102-73	8	10	16,8	1.13
3	63-79-62-59-74-75-29-30-52-32-13-81-82-94-93-36-34-64-40-28-96-39-2-85-87	7	14	21,8	1,29
4	87-86-84-85-83-35-3-15-40-22-72-31-55-1-26-80-46-91-20-90-44-62-76-58-63	12	8	21,4	1,36
5	4-12-66-25-67-9-59-62-10-48-33-5-98-101-18-16-44-50-77-47-54-42-78-7-49	10	8	19,5	1.23

На приведенной выше диаграмме мы видим результаты оптимизации автобусной сети и планирование. Длина каждого маршрута в сети ограничена диапазоном от 10 км до 30 км интервалы отправления транспортных средств на каждом маршруте соответствуют ограничениям от 5 минут до 15 минут; станции на каждом маршруте сети соответствуют неповторяющимся ограничениям станций; а коэффициент нелинейности для каждого маршрута ниже 1,4. Поэтому, делаем вывод, что результаты оптимизации автобусной сети и планирования являются достижимыми. Сравнение тепловой карты повторяющихся частей станций перед и после оптимизации, а также сравнительную таблицу количества маршрутов и соответствующих повторяющихся номеров станций до и после оптимизации показаны на рис. Рисунок 3 и 4 соответственно.

Прил. нау к. 2024, 14, х НА ЭСПЕРТ ИЗУ

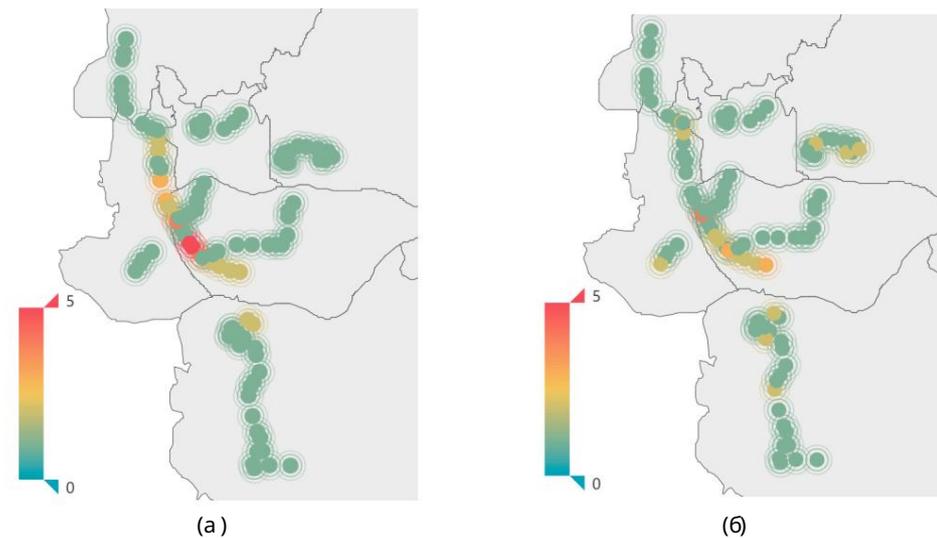


Рисунок 3. (а) Тепловая карта повторяющихся частей станций до оптимизации. (б) Тепловая карта повторяющихся частей станций после оптимизации.



выбор маршрута во время путешествия и установка вливает синхронную модель оптимизации автотранспортной сети и планирования. При разделном проведении синхронной оптимизации и поэтапной оптимизации в конкретной сети результаты указывают, что синхронная оптимизация более эффективна, чем поэтапная оптимизация, в сокращении затрат времени пассажиров и затрат на эксплуатацию автотранспорта. Затраты на пассажирское время снизились на 21,5%, затраты на эксплуатацию автотранспорта снизились на 13,7%, а общие затраты на автотранспортную систему снизились на 18,0%. Однако вычислительная сложность предлагаемой модели быстро возрастает с увеличением количества станций. Поэтому в настоящее время он подходит только для оптимизации автотранспортных маршрутов в местных городских районах. Будущие исследования будут сосредоточены на том, как применить его к действительной крупномасштабной сети.

7. Патенты

Результаты этого исследования были использованы для подачи заявки на китайский патент на изобретение.

Вклада авторов: концептуализация, LZ (Лян Цюю) и HC; методология, HC и XY; программное обеспечение, XY; проверка, XY; формульный анализ, LZ (Линсян Чжу); исследование, XK; ресурсы LZ (Лян Цюю); кураторские данные, XY; письмо — подготовка оригинального черновика, XY и LZ (Линсян Чжу); написание — просмотр и редактирование, KC и XY; визуализация, LZ (Линсян Чжу) и HC; надзор, LZ (Лян Цюю); приобретение финансирования, LZ (Лян Цюю) Все авторы прочитали и согласились с опубликованной версией рукописи.

Финансирование: Данная работа поддерживается Цзяньчжэньским проектом научно-технического плана (No. KJZD20230923115223047) и проект плана стабильной поддержки высшего образования в Цзяньчжэне (№ 20231123103157001).

Заявление о доступности данных: данные, используемые для подтверждения результатов этого исследования, можно получить у соответствующего автора по запросу.

Конфликт интересов: Авторы Си Юй работают в компании Hangzhou Chuangtou Film and Television Co., Ltd. Остальные авторы заявляют, что исследование проводилось при отсутствии каких-либо коммерческих или финансовых отношений, которые могли бы быть истолкованы как потенциальный конфликт интересов.

Рекомендации

- Пу, Х.; Ли, Ю. М.; К. Анализ топологии сети и общественного транспорта Ланчжоу на основе теории двухуровневых сложных сетей. *Физ. Стат. Мех. Эго приложение*. 2022, 592, 126694. [\[CrossRef\]](#)
- Рао, КР; Митра, С.; Шерековский, Дж. Выбор структуры автотранспортной сети с множеством ветвей. *Межд. Дж. Опер. Рез. Инф. Сист.* 2021, 12, 13. [\[CrossRef\]](#)
- Петти, А.; Йильдримоглу, М.; Геролимис, Н.; Оуян, Ю. Проектирование сети и выделенных автотранспортных полос в условиях отклонения спроса и динамических затрат на дорогах: подход к модели агрегированной сети и непрерывной аппроксимации. *Трансп. Рез. Часть С* 2021, 128, 103187. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
- Фарахани, РЗ; Миандоуби, Э.; Сзет, О.; Вайоминг; Рашиди, Х. Обзор проблемы проектирования городской транспортной сети. *Евро. Дж. Опер. Рез.* 2013, 229, 281-302. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
- Чжан, Л.; Лу, Дж.; Ю, Х.; Чжоу, Дж.; Ли, Ю. Ван, К. Вспомогательный метод оптимизации сложной маршрутной сети общественного транспорта на основе прогнозирования ссылок. *Мд. Физ. Летт.* 2018, 32, 1850066. [\[CrossRef\]](#)
- Клиер, МФ. Хаазе, К. Оптимизация городской сети и общественного транспорта при гибком спросе. *Или Спектр*. 2015, 37, 195-215. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
- Инь, Дж.; Дариано, А.; Ван, Ю. Ян, Л.; Тан, Т. Координация расписания в железнодорожной транспортной сети с зависящим от времени спросом пассажиров. *Евро. Дж. Опер. Рез.* 2021, 295, 183-202. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
- Лян, М.; Ван, В.; Донг, К.; Чжао, Д. Совместный координируемый проект оптимизации городской транспортной сети и рабочие части экспертной системы. *Прил.* 2020, 160, 113736. [\[CrossRef\]](#)
- Ван, К.; Йе, З.; Ван, В. Многоцелевая оптимизация гибридного эвристического подхода к проектированию сети и городских автотранспортных маршрутов. *IEEE Access* 2020, 8, 2154-2167. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
- Хуанг, А.; Доу, З.; Ци, Л.; Ван, Л. Гибкая оптимизация маршрутов для удовлетворения спроса на услуги общественного транспорта. *Дж. Трансп. Англ. Часть А. Сист. емв.* 2020, 146, 04020132. [\[CrossRef\]](#)
- Гонг, М.; Ху, Ю. Чен, З.; Ли, Х. Проектирование индивидуальной маршрутной автотранспортной системы на основе транзфера с оптимизацией распределения пассажировских маршрутов. *Трансп. Рез. Часть Е Логист. Трансп. Ред.* 2021, 153, 102422. [\[CrossRef\]](#)
- Ян, Дж.; Цзянь, Ю. Применение модифицированного NSGA-II к проблеме проектирования транспортной сети. *Дж. Адв. Трансп.* 2020, 2020, 3753601. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
- Яо, Э.; Лю, Т.; Лу, Т.; Ян, Ю. Оптимизация планирования электромобилей с использованием нескольких критериев в общественном транспорте. *Поддерживать. Города Соц.* 2020, 52, 101862. [\[CrossRef\]](#)

14. Го, Р.; Антунес, Ф.; Чжан, Дж.; Юдж.; Ли, В. Совместная оптимизация инверсала движения и количества остановок для двустороннего скоростного автобусного сообщения. *PLoS ONE* 2024, 19, e0300286. [\[Перекрестная ссылка\]](#) [\[PubMed\]](#)
15. Ли, Вайоминг; Гао, БК; Лиан, Г. Метод планирования сети и микроциркуляторы шин на основе иерархической кластеризации. *Хэйлуцзянская транспортная технология*. 2021, 44, 166-168.
16. Ши, ХВ; Су, ПТ; Цзоу, Ю; Шао, LX Исследование по оптимизации традиционной автобусной сети для железнодорожного транспорта на основе модели разметки кратчайшего пути. *Вычислитель. Прил. Рез.* 2020, 37, 1-8.
17. Хуанг Мюгоу ровневый анализ топологической структуры рывишной сети. *Хэйлуцзянская транспортная технология*. 2010, 27, 93-99.
18. Игит Ф.; Базилио, член парламента; Перейра, В. Гибридный подход многокритериальной оптимизации последовательности зависимостей. *Планирование цеха на основе потоков. Математика* 2024, 12, 2007. [\[CrossRef\]](#)
19. Рең, Х.; Сонг, Ю Лонг, Дж.; Си, В. Новая модель назначения транзита, основанная на стратегиях линий и узлов. *Трансп. Рез. Часть Б* 2021, 150, 121-142. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
20. Ши, К.; Чжан, К.; Венг, Дж.; Донг, Ю Мв, С.; Чжан М Модель оценки схем оптимизации автобусных маршрутов на основе данных об автобусах из нескольких источников. *Трансп. Рез. Междисциплинар. Перспектива*. 2021, 10, 100342. [\[CrossRef\]](#)
21. Фан, В.; Мачель, Р.Б. Стратегия поиска Тэбу для оптимизации сети общественного транспорта с переменным спросом транзита. *Вычислитель. Помощь гражданскому. Инфраструктура*. 2008, 23, 502-520. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
22. Хуанг, Д.; Парень.; Ван, С.; Лю, Э.; Чжан, В. Двухэтапная модель оптимизации для адаптивной к спросу шины сетевой дизайн. *Трансп. Рез. Часть Б*. *Систем. Технол.* 2020, 111, 1-21. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
23. Ли, Х.; Ван, Т.; Ли, Л.; Фэн, Ф.; Ван, В.; Ченг, К. Совместная оптимизация расписания транзитной сети и электрических автобусов с регулируемой зарядкой и развертыванием стационарных зарядных устройств с учетом оптимизации частоты зарядки и цены электроэнергии по времени исполнения. *Дж. Адв. Трансп.* 2020, 2020, 8863905. [\[CrossRef\]](#)
24. Шайнер, К.; Ирнич, С. Стратегическое планирование интегрированных сетей мобильности и потребности в городском общественном транспорте. *Трансп. нау к.* 2020, 54, 1616-1639. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
25. Чан, С.; Лиан, К. Улучшенный алгоритм NSGA-II для проектирования транзитной сети и задачи остановки частоты. *Дж. Адв. Трансп.* 2020, 2020, 2895320. [\[CrossRef\]](#)
26. Вэй, М.; Лю, Т.; Сан, Б.; Цин, Б. Оптимизация интегрированной модели для проектирования транзитного маршрута и задачи остановки частоты выбором остановки. *Дж. Адв. Трансп.* 2020, 2020, 6517248. [\[CrossRef\]](#)
27. Тан, З.; Ху, Х.; Перю, Дж. Многоуровневый гибридный метод оптимизации, сочетающий детерминированный локальный поиск и глобальный поиск. *Поиск эволюционных алгоритмов. Арх. Вычислитель. Методы*. 2019, 27, 939-975. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
28. Куан, С.Н.; Онг, Х.Л.; Нг, К.М. Решение задачи проектирования фидерной автобусной сети с помощью генетических алгоритмов и колонии муравьев оптимизации. *Программное обеспечение* 2006, 37, 351-359. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
29. Намай, С.; Ловелл, DJ Оптимизация передачи времени при проектировании сети и автобусных маршрутов с использованием генетического алгоритма. *Дж. Трансп. англ. Ассе* 2003, 129, 510-521. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
30. Бурионне, Польша; Меренки, К.; Репане, Е; Мерель-Поликич Э Проектирование транзитной сети с использованием генетического алгоритма интегрированной дорожной сетью и деагрегированными данными о спросе O-D. *Транспорт* 2021, 48, 95-130. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
31. Дин, Ю; Чжу, ЮВ.; Ли, Б.; Чжан, С. Исследование по оптимизации шинной сети на основе улучшенного алгоритма К-кратчайшего пути. *Дж. Хэйлуцзянский университет. Технол.* 2019, 42, 1388-1393+1423.
32. Ло, ХЛ; Цзя, С. Ю Проектирование сети и пригородных автобусов на основе кластеризации К-средних. *Хэйлуцзянская транспортная технология*. 2018, 35, 115-120+134.
33. Гао, МЮШи, Х.Г. Оптимизация маршрутов железнодорожных транзитных автобусов на основе усовершенствованного алгоритма PSO. *Дж. Транспортная прозрачность. англ. Инф.* 2019, 17, 49-54.
34. Синь, Ю Хо, ЮМ Модель многоцелевой оптимизации автобусной сети на основе алгоритма NSGA-II для транзита, реагирующего на спрос. *Интегр. Трансп.* 2022, 44, 68-72.
35. Ван, Н; Цзоу, WZ; Чу, Х.Л. Оптимизация маршрутов подвездных автобусов железнодорожного транспорта с использованием клеточно-генетического алгоритма. *Трансп. Технол. Экон.* 2018, 20, 13-18.
36. ЮЖЖ; Лиан, МП. Оптимизация проектирования городской обычной автобусной сети на основе целочисленного нелинейного программирования. *Дж. Китайское шоссе*. 2016, 29, 108-115+135.
37. Ву, Оптимизация пути в сети шинных на основе улучшенного алгоритма муравьиной колонии. *Микрокомпьютер. Прил.* 2021, 37, 134-136.
38. Йен, Дж. Я. Поиск кратчайших путей без петель в сети. *Менеджер. нау к.* 1971, 17, 712-716. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
39. Холланд, Дж. Х. Генетические алгоритмы нау к. Явления. 1992, 267, 44-50. [\[Перекрестная ссылка\]](#)

Отказ от ответственности/Примечание издателя: Заявления, мнения и данные, содержащиеся во всех публикациях, принадлежат исключительно издателю отдельному автору (ам) и соавтору (ам), а не MDPI и/или редактору (ам). MDPI и/или редактор(ы) не несут ответственности за любой вред, причиненный или имущий, возникший в результате публикации идей, методов, инструкций или продуктов, упомянутых в контенте.