

Artículo

Considerando el diseño de optimización del autobús urbano Programación de red

Xi Yu ¹, Huan Cao ², Ke Cao ², Liang Zou ²  y Lingxiang Zhu ^{3,*}

¹ Hangzhou Chuangtou Film and Television Co., Ltd., Hangzhou 310000, China; 13806523777@139.com

² Facultad de Ingeniería Civil y de Transporte, Universidad de Shenzhen, Shenzhen 518060, China; 1910473029@email.szu.edu.cn (HC); 2110474187@email.szu.edu.cn (KC); zouliang@szu.edu.cn (LZ)

³ Facultad de Matemáticas e Informática, Universidad Agrícola del Sur de China, Guangzhou 510642, China

* Correspondencia: hcitsy@163.com

Resumen: En la actualidad, la optimización de las redes de transporte público y la programación de vehículos se realizan de forma independiente y por etapas. Sin embargo, a través del análisis, se ha descubierto que la información de programación, como los horarios de ruta, es un factor importante relacionado con la selección de ruta de los pasajeros. Por lo tanto, para mejorar aún más el efecto de optimización, este artículo propone una idea innovadora de optimizar simultáneamente la red de líneas y la programación. Basado en la construcción de una red de transporte público real-virtual, este artículo construye un modelo de optimización sincrónica para la red de líneas y la programación considerando tanto la espera de los pasajeros como el tiempo a bordo. Para lograr la consideración de pasajeros para diferentes opciones de ruta, se propuso un algoritmo de recorrido del camino más corto basado en Yen para analizar el número y el peso de los caminos más cortos entre el mismo OD, y se utilizó un algoritmo genético para resolver el modelo. Finalmente, se verificó la efectividad del modelo a través de ejemplos numéricos, y los resultados mostraron que la optimización sincrónica fue superior a la optimización por fases: el costo del tiempo de los pasajeros se redujo en un 21,5%, el costo de operación del autobús se redujo en un 13,7% y el costo total del autobús. El coste del sistema se redujo en un 18,0%.

Palabras clave: selección de ruta; intervalo de salida; Planificación; Relevancia; optimización sincrónica



Cita: Yu, X.; Cao, H.; Cao, K.; Zou, L.; Zhu, L. Consideración del diseño de optimización de la programación de la red de autobuses urbanos. *Aplica. Ciencia*. 2024, 14, 6337. <https://doi.org/10.3390/app14146337>

Recibido: 22 de junio de 2024

Revisado: 15 de julio de 2024

Aceptado: 18 de julio de 2024

Publicado: 20 de julio de 2024



Copyright: © 2024 por los autores. Licenciatario MDPI, Basilea, Suiza.

Este artículo es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos y condiciones de los Creative Commons

Licencia de atribución (CC BY)

(<https://creativecommons.org/licenses/by/autobuses>, es necesario replanificar y rediseñar la red de autobuses. Esto ayudará a evitar una superposición significativa con las líneas de transporte ferroviario, evitando rutas y recursos redundantes.

1. Introducción

Con la aceleración de la urbanización y el rápido desarrollo económico de nuestro país, el número de vehículos de motor y las demandas de viaje de los residentes también están aumentando rápidamente. La congestión del tráfico se ha vuelto común y es cada vez más grave.

Para aliviar la presión actual sobre el transporte, nuestro país está promoviendo vigorosamente el desarrollo del transporte público, especialmente en las grandes ciudades donde el transporte público se está desarrollando rápidamente. Por ejemplo, en Shenzhen, la longitud de las líneas operativas de tránsito ferroviario superó los 400 km en 2020, alcanzando los 422,6 km, un aumento interanual del 33,9%. La longitud de las rutas operativas de autobuses alcanzó los 21.310,53 kilómetros, un descenso interanual del 1,4%. Actualmente, en las principales ciudades del país, los modos de transporte como autobuses, metro, taxis y tranvías forman juntos una red de transporte público, con un flujo general de pasajeros en continuo aumento. En 2019, el flujo promedio diario de pasajeros del transporte público en Shenzhen fue de 11,06 millones de pasajeros por día, un aumento de 2,65 millones de pasajeros por día en comparación con 2011. En 2020, debido al impacto de la pandemia de COVID-19, el flujo promedio de pasajeros por día en el transporte público en Shenzhen fue de 11,06 millones de pasajeros por día, un aumento de 2,65 millones de pasajeros por día en comparación con 2011. El volumen diario de pasajeros durante todo el año fue de 8.226 millones de pasajeros, un descenso interanual del 25,6%. A medida que la situación de la pandemia mejoró y se abrieron nuevas líneas de metro, el flujo de pasajeros del transporte público en diciembre aumentó al nivel más alto del año, con un volumen promedio diario de pasajeros de 10.603 millones de pasajeros, recuperándose al 94,1% del mismo período en 2019.

Para mejorar la eficiencia del transporte de los autobuses y equilibrar la oferta y la demanda del sistema de

desperdiciar. Al mismo tiempo, es crucial garantizar conexiones y transbordos fluidos entre los autobuses y el transporte ferroviario, satisfaciendo así las necesidades de viaje de los pasajeros y reduciendo los costos de viaje.

Después de realizar investigaciones y análisis nacionales e internacionales sobre las redes de autobuses, se descubrió que los estudios existentes pasan por alto el impacto de la programación en la optimización de las redes de autobuses. Tampoco tienen en cuenta los costes de espera de los pasajeros al calcular los costes totales de viaje de los pasajeros. El análisis de los datos sobre el uso de tarjetas de los pasajeros reveló una correlación moderada entre las opciones de ruta de los pasajeros y la frecuencia de los servicios de autobuses. Por lo tanto, este artículo incluye consideraciones de programación en la optimización de redes de autobuses.

Académicos tanto a nivel nacional como internacional han realizado investigaciones relativamente maduras sobre la optimización de las redes de autobuses urbanos. La mayoría de las investigaciones sobre optimización de redes se centran en tres aspectos: teoría, construcción de modelos y desarrollo de algoritmos.

Métodos teóricos: Pu Han et al. propuso un método de optimización de la red de autobuses basado en redes complejas multicapa [1]. Mitra Subhro et al. presentó un método de optimización de la red de autobuses con múltiples objetivos [2]. Petit Antoine et al. introdujo un método de diseño de redes de autobuses basado en redes agregadas y modelos de aproximación continua [3]. Szeto et al. propuso un método de optimización de redes para redes de transporte urbano y redes de carreteras [4]. Zhang L desarrolló un método de optimización auxiliar de la red de rutas de transporte público (PTRN) basado en la predicción de enlaces [5]. Klier MJ introdujo un novedoso método de optimización para diseñar redes de transporte público, maximizando el número total esperado de pasajeros del transporte público bajo restricciones presupuestarias [6]. Yin J estudió la optimización coordinada de los horarios de trenes de las redes de transporte ferroviario urbano y propuso una fórmula matemática para generar el horario de trenes mejor coordinado de forma sincrónica [7]. Liang M estableció un modelo multiobjetivo basado en dos objetivos en conflicto y desarrolló dos poblaciones para optimizar simultáneamente la red y la frecuencia [8]. Wang C introdujo un método de diseño de red multimodo multinivel [9]. Huang A estudió un servicio de transporte público (DRT) que responde a la demanda y que ajusta las rutas continuamente en función de las demandas dinámicas de los pasajeros, maximizando la eficiencia del sistema y considerando los intervalos de tiempo preferidos de los pasajeros [10]. Gong M propuso diseñar una red CB basada en flotas modulares basada en transferencias, optimizando simultáneamente las asignaciones de rutas de pasajeros [11]. Yang J propuso un novedoso algoritmo de generación de conjuntos de rutas iniciales y un algoritmo heurístico alternativo de tamaños de conjuntos de rutas integrados en un marco de solución basado en el algoritmo genético de clasificación no dominado II (NSGA-II) para generar fronteras de Pareto aproximadas [12]. Yao E presentó un nuevo método (MVT-E-VSP) para programar vehículos eléctricos de múltiples tipos [13]. Guo R optimizó el desempeño operativo de un BRT bilateral con demanda elástica, minimizando los costos de tiempo generalizados por pasajero [14]. Li Wenying et al. propuso un método de planificación de redes de autobuses de microcirculación basado en agrupaciones jerárquicas [15]. Shi Xiaowei et al. propuso un método de optimización de la red de autobuses alimentadores de tránsito ferroviario basado en el modelo de etiquetado de ruta más corta [16]. Huang Min et al. propuso un método para construir diferentes niveles de rutas de autobuses y optimizarlas por separado según diferentes niveles y funciones [17]. Yight F et al. proporcionó un enfoque híbrido para optimizar el método teórico para problemas de programación de tuberías dependientes de la secuencia [18].

Construcción de modelos: Ren Hualing et al. propuso un nuevo modelo de asignación de autobuses basado en estrategias de líneas y nodos [19]. Shi Qingshuai et al. propuso un modelo de evaluación de optimización de rutas de transporte público basado en datos de autobuses de múltiples fuentes [20]. Fan W introdujo un método heurístico basado en Tabu Search (TS) y lo aplicó al diseño de redes de transporte público con demanda variable [21]. Huang D desarrolló un nuevo modelo de optimización para el diseño de redes de bus (CB) personalizadas que responden a la demanda, incluidas fases dinámicas y estáticas [22]. Li X propuso un modelo de optimización conjunta para la programación de la red de autobuses eléctricos de carga convencional y el despliegue de cargadores fijos considerando políticas de carga parcial y precios de electricidad por tiempo de uso [23]. Steiner K desarrolló un modelo de optimización de la planificación estratégica de redes para rutas de autobuses [24]. Chai S estableció un modelo de diseño de red de autobuses con múltiples objetivos que no solo considera los impactos de las transferencias sino que también tiene en cuenta los retrasos en el tiempo de viaje de los pasajeros debido a la congestión [25]. Wei M presentó una m

modelo para diseñar servicios de autobuses alimentadores para mejorar la calidad del servicio y la accesibilidad de los centros de transporte [26].

Desarrollo de algoritmos: Z. Tang et al. propuso acoplar búsqueda determinista local y algoritmos evolutivos globales para la optimización de la red de autobuses [27]. Kuan et al. llevó a cabo una investigación sobre la optimización de la red de autobuses utilizando una combinación de algoritmos genéticos y algoritmos de colonias de hormigas [28]. Ngamchai et al. introdujo un método que combina varios mecanismos de operación genética para el diseño de optimización de redes de autobuses [29]. Bourbonnais PL utilizó datos precisos de la red de carreteras locales y datos representativos de la demanda de transporte público para optimizar el algoritmo genético y generar soluciones razonables [30]. Ding Jianxun et al. propuso utilizar un algoritmo mejorado de ruta más corta K para la investigación de optimización de redes de autobuses [31]. Luo Xiaoling et al. propuso utilizar el algoritmo de agrupamiento K-means para realizar análisis de conglomerados en estaciones de autobuses para la investigación de optimización de la red [32]. Gao Mingyao et al. propuso utilizar un algoritmo mejorado de optimización de enjambre de partículas (PSO) para resolver el modelo de optimización de la red de autobuses [33]. Xin Yi et al. propuso utilizar el algoritmo NSGA-II para resolver el modelo de optimización de red de autobuses multiobjetivo [34]. Wang Ning et al. propuso utilizar un algoritmo genético celular para resolver el modelo de red de autobuses alimentadores [35]. Yu Lijun et al. diseñó un algoritmo de recocido simulado mejorado para optimizar y resolver el modelo de optimización de la red [36]. Wu Kexin et al. utilizó un algoritmo mejorado de colonias de hormigas para la optimización de la red de redes de autobuses [37].

En general, la investigación de optimización de redes de autobuses ha logrado numerosos resultados de investigación excelentes tanto en métodos teóricos como en la construcción de modelos, así como en el desarrollo de algoritmos, proporcionando una base de investigación teórica para el trabajo de diseño de optimización de la red de este artículo. Sin embargo, estos logros todavía tienen algunas deficiencias en su aplicación práctica: (1) Selección de ruta de

pasajeros ignorada: tanto los académicos nacionales como los internacionales a menudo suponen que los pasajeros eligen el tiempo más corto o la menor cantidad de transbordos al optimizar las redes de autobuses. Sin embargo, cuando múltiples rutas entre las mismas estaciones de origen-destino (OD) cumplen con los criterios de los pasajeros, los pasajeros pueden elegir selectivamente diferentes rutas para viajar.

(2) No consideró el impacto de la programación en la optimización de la red de autobuses: Investigaciones anteriores a menudo han pasado por alto la influencia de la programación de rutas en la selección de rutas de los pasajeros durante la fase de diseño de la red. Al calcular el coste total del viaje de los pasajeros, no se tuvieron en cuenta los costes de espera en las paradas de autobús. Esta consideración incompleta al calcular el costo total del tiempo para los pasajeros está directamente relacionada con la programación del vehículo porque los costos de espera de los pasajeros están directamente relacionados con la programación.

Para ayudar a los lectores a comprender mejor la estructura y el contenido de este documento, la hoja de ruta técnica del contenido del capítulo se ilustra en la Figura 1. A continuación se proporciona una breve descripción general

de cada capítulo: La Sección 2 presenta la construcción y solución del modelo de optimización integrada para el autobús. Red y programación. Primero define el alcance de la investigación del problema de la red de autobuses en este artículo, presenta los supuestos para la construcción del modelo y luego describe la función objetivo y las restricciones del modelo de optimización integrado.

A partir de la construcción de una red de autobuses real-virtual, que equilibre los intereses tanto de los pasajeros como de los operadores, el capítulo establece el modelo de optimización integrada.

La sección 3 aplica el algoritmo de Yen para analizar rutas alcanzables entre los mismos pares origen-destino (OD). Las rutas se clasifican según sus pesos y el parámetro K se configura de manera flexible para adaptarse a diferentes OD. Dado que estos problemas suelen ser NP-Difíciles e implican una alta dificultad y complejidad computacional, generalmente se emplean algoritmos de optimización inteligentes. Dada la complejidad computacional de la construcción de redes de autobuses a gran escala, elegimos el algoritmo genético eficiente para resolver el modelo de optimización integrado.

La Sección 4 valida la efectividad del modelo integrado de optimización para una red de autobuses y programación basado en el algoritmo genético a través de estudios de casos específicos. Al establecer pesos entre estaciones se verificó la efectividad del algoritmo en el proceso de optimización. Los casos se optimizaron por etapas y de forma sincrónica, comparándose los resultados entre ellos. Finalmente, se realizó un análisis de sensibilidad centrándose en diferentes partes interesadas, confirmando la conclusión de que los efectos de reducción de costos son más significativos.

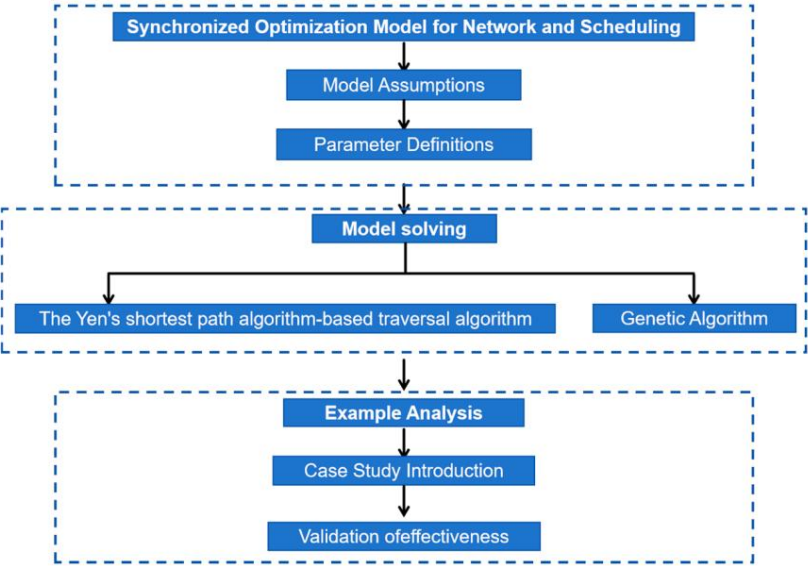


Figura 1. Hoja de ruta técnica de contenidos de la Sección.

2. Modelo de optimización de la red de autobuses y programación para la sección 4.

Red y programación basada en el algoritmo genético a través de casos de estudio específicos.

Debido a la naturaleza multifacética de los factores que influyen en el sistema de autobuses, se verificó el siguiente proceso. Los casos se optimizaron por etapas y de forma sincrónica, con resultados entre ellos. Finalmente, se realizó un análisis de sensibilidad centrándose en diferentes partes interesadas, lo que confirma la conclusión de que los efectos de reducción de costos son más significativos.

(1) Los pasajeros eligen la ruta de viaje más corta para viajar; cuando múltiples rutas pueden satisfacer el tiempo de viaje más corto, los pasajeros eligen en función de la proporción del total 2. Modelo de optimización número de viajes realizados por los vehículos en esa ruta OD. (Tiempo más corto)

(2) Se supone que el costo de espera para los pasajeros es la mitad del tiempo promedio de espera. Debido a la naturaleza multifacética de los factores que influyen en el sistema de autobuses, lo siguiente para la ruta seleccionada, que es igual a la mitad del intervalo de salida de los vehículos en la ruta elegida. Se realizan suposiciones sobre los vehículos para definir con precisión el problema de optimización de la red de autobuses abordado.

(3) Se supone que los vehículos en cada ruta son idénticos excepto por el número de (1) Los pasajeros eligen la ruta de menor tiempo de viaje para viajar; cuando múltiples rutas pueden excursions. Las diferencias en factores como el tráfico rodado, la carga de pasajeros y la velocidad de conducción que satisfacen el tiempo de viaje más corto, los pasajeros eligen en función de la proporción del total.

(4) El tiempo total de viaje para los pasajeros incluye el tiempo de espera, el tiempo invertido en el vehículo (2) Se supone que el costo de espera para los pasajeros es la mitad del tiempo promedio de espera. Se supone que el tiempo de caminata desde el origen hasta la parada de autobús y tiempo de caminata desde la parada de autobús hasta la ruta seleccionada, que es igual a la mitad del intervalo de salida de los vehículos en la ruta elegida.

(5) Los traslados de pasajeros se limitan a la misma parada de autobús. Si no hay una ruta directa (3) Se supone que los vehículos en cada ruta son idénticos excepto por el número de entre el origen y el destino, los pasajeros deben bajarse en una parada en los viajes de la ruta inicial. Diferencias en factores como el tráfico rodado, la carga de pasajeros y la velocidad de conducción que pueden y abordar otro autobús que pasa por esa parada para llegar al destino, solo se ignora la selección de ruta que afecta al pasajero.

(6) El tiempo total de viaje de los pasajeros incluye el tiempo de espera, el tiempo invertido en el tiempo de caminata desde el origen hasta la parada de autobús y el tiempo de caminata desde la parada de autobús. recorrido tras llegar a la parada, sin restricciones de aforo en los vehículos. al destino.

(5) Los traslados de pasajeros se limitan a la misma parada de autobús. Si no hay ruta directa entre el origen y el destino, los pasajeros deben bajarse en una parada en la ruta inicial y abordar otro autobús que pase por esa parada para llegar al destino, considerando únicamente Traslados en la misma parada.

(6) Se supone que los pasajeros pueden abordar el siguiente vehículo disponible en el horario deseado. recorrido tras llegar a la parada, sin restricciones de aforo en los vehículos.

2.2. Definiciones de parámetros

$T_{ij}(X)$: En la red de autobuses X , el tiempo de viaje más corto necesario para que los pasajeros lleguen viajar desde la Estación i a la Estación j (s);

T_{wij} : El tiempo de espera para los pasajeros que viajan del sitio i al sitio j a lo largo de los caminos más cortos elegidos ;

TS_{ij} : Tiempo de parada del autobús durante su recorrido desde el sitio i al sitio j (s);

T_{dij} : Tiempo a bordo del pasajero desde el sitio i al sitio j (s);

TS_{ij} : El tiempo de parada de un autobús durante su viaje desde la estación i a la estación j (s);

T_s : El tiempo medio de permanencia de un autobús en una(s) parada(s);

T_r : El tiempo operativo de la ruta r (s);

F : Costos operativos;

M : El costo de comprar un autobús(es);

N : Los costos operativos de cada(s) ruta(s) de autobús;

N : Costo por unidad de distancia para un(os) autobús(es);

M : El costo de compra diario por autobús(es);

X : Red de autobuses;

Q_{ij} : Demanda de tráfico desde la estación i hasta la estación j ; n : El número de paradas entre las estaciones i y j en la ruta seleccionada;

l_r La longitud del segmento entre las estaciones i y j en la ruta r (km); y_o :

S : El número de estaciones totales representadas;

r_s El número de estaciones entre las estaciones i y j en la ruta r ; ij :

l_{min} : La longitud mínima de una ruta de autobús (km);

l_{max} : La longitud máxima de una ruta de autobús (km);

f_{min} : El intervalo mínimo de salida para autobuses en una ruta de autobús;

f_r : intervalo de salida del autobús de la

ruta r ; f_{max} : el intervalo máximo de salida de autobuses en una ruta de autobús; L_r : La longitud de la ruta

r (km); d_r : La distancia en línea recta entre los puntos inicial y final de la ruta r (km); λ : El coeficiente de ponderación entre el costo de tiempo y el costo de operación; ω : El

coeficiente de conversión entre costo de tiempo y costo de operación; $\delta\omega$: El

coeficiente de espera de pasajeros se debe a que los pasajeros llegan uniformemente y las llegadas de vehículos siguen una distribución de Poisson, $\delta\omega = 0,5$;

X_r El valor es 1 si el camino más corto desde el sitio i al sitio j pasa por la ruta r , y 0 ij : si no lo hace;

V_r : La velocidad media de un autobús (m/s); y

r El segmento ij entre las estaciones adyacentes i y j en la ruta r tiene un valor de 1 cuando ij : está en la ruta r , y un valor de 0 cuando no lo está; O : La estación i en la ruta r . i

2.3. Construcción de modelos

La consideración de optimizar el diseño de las redes de autobuses urbanos con programación tiene como objetivo minimizar el costo del tiempo de los pasajeros y el costo de operación del autobús. Las restricciones incluyen la longitud de la ruta, el avance, las estaciones de ruta no repetidas y los coeficientes de ruta no lineales. Se desarrolla un modelo de optimización síncrona tanto para la red como para la programación.

2.3.1. La función objetivo

El objetivo de optimización de la red de autobuses debe considerar de forma integral los intereses tanto de los pasajeros como de los operadores de autobuses. Los pasajeros buscan tiempos de viaje cortos, mientras que los operadores buscan una utilización eficiente de los recursos y costos de inversión minimizados. Por lo tanto, en el diseño de optimización de la red de autobuses y el modelo de programación de este artículo, se consideran simultáneamente los intereses tanto de los pasajeros como de los operadores de autobuses. El objetivo es reducir el tiempo de viaje de los pasajeros y disminuir los costos de operación de los autobuses, con el objetivo de minimizar los costos tanto para los pasajeros como para los operadores de autobuses en la red de autobuses.

Costo de viaje del pasajero

El costo de viaje de los pasajeros se refiere principalmente al tiempo total de viaje de los pasajeros dentro del red, que incluye el tiempo de espera y el tiempo en el vehículo.

(1) Tiempo de

espera En los supuestos del modelo mencionados anteriormente, se supone que los pasajeros, al llegar a la estación, pueden abordar el primer autobús de la ruta objetivo para viajar, lo que significa que todos los pasajeros pueden tomar el siguiente autobús programado de la ruta objetivo. Por lo tanto, el tiempo de espera de los pasajeros depende principalmente del avance de la ruta que están esperando, siendo el tiempo de espera de los pasajeros la mitad del avance de la ruta seleccionada. El tiempo de espera de los pasajeros se expresa como:

$$T_{wij} = \delta w \sum_{r=1}^R r_{x_{ij}} \frac{1}{\sum_{r=1}^R \frac{1}{r_{x_{ij}}}} \frac{1}{f_r} = \delta w \sum_{r=1}^R \frac{r_{x_{ij}}}{\sum_{r=1}^R \frac{1}{r_{x_{ij}}}} \frac{1}{f_r} \quad (1)$$

(2) Tiempo en el vehículo

El tiempo en el vehículo consta principalmente de dos partes: tiempo de viaje entre paradas y tiempo de permanencia en las paradas. Ignorando la influencia de la carretera y otros factores externos, el tiempo de viaje está relacionado con la distancia y la velocidad de viaje, mientras que el tiempo de permanencia está relacionado con el número de paradas intermedias. Por tanto, el tiempo de viaje y el tiempo de permanencia se representan de la siguiente manera:

$$t_{dij} = \frac{1}{V_r} \sum_{r=1}^R r_{x_{ij}} \frac{1}{\sum_{r=1}^R \frac{1}{r_{x_{ij}}}} \frac{1}{f_r} \quad (2)$$

$$T_{Sij} = T_s \sum_{r=1}^R r_{x_{ij}} \frac{1}{\sum_{r=1}^R \frac{1}{r_{x_{ij}}}} \frac{1}{f_r} \quad (3)$$

Con base en lo anterior, el costo total del tiempo para los pasajeros se puede expresar de la siguiente manera:

$$t = \sum_{y=1}^S \sum_{j=1}^S \sum_{i=1}^S \lambda_{ij} (\delta w \sum_{r=1}^R \frac{r_{x_{ij}}}{\sum_{r=1}^R \frac{1}{r_{x_{ij}}}} \frac{1}{f_r} + \frac{1}{V_r} \sum_{r=1}^R r_{x_{ij}} \frac{1}{\sum_{r=1}^R \frac{1}{r_{x_{ij}}}} \frac{1}{f_r} + T_s \sum_{r=1}^R r_{x_{ij}} \frac{1}{\sum_{r=1}^R \frac{1}{r_{x_{ij}}}} \frac{1}{f_r} s_{rj}) \quad (4)$$

Costo de Operación de

Buses Los gastos de los operadores de buses incluyen principalmente la adquisición de buses, construcción de estaciones, sueldos y salarios del personal, honorarios de administración, seguros de vehículos, costos de combustible, gastos de depreciación de vehículos e impuestos, entre otros. En este trabajo, al considerar los costos, solo se tienen en cuenta los costos operativos de los autobuses, los cuales se reflejan principalmente en costos económicos. Se refiere específicamente a los costos de adquisición de vehículos y costos operativos de cada ruta dentro de la red de autobuses.

(1) Costo de adquisición de vehículos

Para minimizar los costos de adquisición de vehículos y maximizar su utilización, es necesario reducir la cantidad de vehículos tanto como sea posible. Sin embargo, también es importante asegurarse de que haya un autobús disponible en la estación de salida para atender la siguiente salida programada para cada ruta. Esto requiere garantizar que el avance acumulado sea mayor que la duración de cada ruta, lo que significa que el número mínimo de vehículos requeridos para cada ruta debe cumplir la siguiente condición:

$$\geq 2 \text{ n min. } \frac{L_r}{V} \cdot \frac{1}{f_r} \quad (5)$$

Por tanto, el coste mínimo de adquisición del vehículo es:

$$m = \sum_{r=1}^R m_{\min M} \quad (6)$$

(2) Costo de operación de ruta

El costo operativo de una ruta de autobús incluye principalmente el costo operativo del vehículo, el cual está relacionado principalmente con la frecuencia de los viajes y el costo por viaje. Por lo tanto, el costo operativo mínimo de una ruta se representa de la siguiente manera:

$$C_{\text{norte}} = \sum_{r=1}^R \frac{2Tr}{\text{ingl}} \quad (7)$$

Por tanto, el costo de operación del autobús se representa de la siguiente manera:

$$F = 2 \left(\sum_{r=1}^R \frac{Lr}{V} \cdot \frac{1}{fr} M + \frac{tr}{\text{NORTE}} \right) \quad (8)$$

2.3.2. Condiciones de restricción

Para proporcionar una definición detallada de las condiciones establecidas en el modelo, se imponen las siguientes restricciones para restringir aún más el modelo: (1)

Longitud de la ruta

En la optimización de la red de autobuses, si las rutas de autobús son demasiado cortas, los costos operativos aumentan, mientras que las rutas excesivamente largas reducen comodidad de los pasajeros. Por lo tanto, para satisfacer mejor las necesidades de los pasajeros, las rutas no deben ser excesivamente cortas ni demasiado largas. La longitud de cada ruta debe satisfacer la siguiente restricción:

$$L_{\text{mín}} \leq L_r < L_{\text{máx}} \quad (9)$$

(2) Avance Ajustar

el avance correctamente es crucial. Un intervalo demasiado largo aumenta el tiempo de espera de los pasajeros, lo que genera mayores costos de tiempo para los pasajeros. Por otro lado, un avance demasiado corto da como resultado un mayor número de vehículos necesarios, lo que genera mayores costos operativos para los operadores de autobuses. Por lo tanto, el avance debe satisfacer la siguiente restricción:

$$f_{\text{mín}} \leq fr < f_{\text{máx}} \quad (10)$$

(3) Estaciones de rutas no repetidas En la

red de autobuses diseñada, para evitar que las rutas de autobuses formen bucles que aumenten los costos de viaje de los pasajeros y conduzcan al desperdicio de recursos, se establece la restricción de que cada ruta de autobús debe contener estaciones de autobuses que no sean repetidas. Esto significa que cada estación de autobuses sólo debe aparecer una vez a lo largo de cada ruta de autobús.

$$O_i^r = O_j^r ; y_o, j = 1, \dots, S; y_o = j; r = 1, \dots, R \quad (11)$$

(4) Coeficiente no lineal Para evitar

desvíos excesivos en las rutas establecidas, reducir los costos del tiempo de viaje de los pasajeros y mejorar la calidad de los servicios de autobús, el coeficiente no lineal de las rutas está restringido con base en el "Código de Planificación y Diseño del Tráfico Vial Urbano" en el modelo de optimización sincrónica de este artículo.

$$\frac{D_r}{L_r} \leq 1,4 \quad (12)$$

artículo considera la situación en la que los pasajeros eligen qué ruta tomar durante su viaje. Al calcular el costo total de viaje para pasajeros entre varios orígenes:

estaciones de destino (OD), se supone que los pasajeros siempre eligen el camino más corto. Sin embargo, en los casos en los que existen múltiples caminos más cortos entre pares OD, es necesario considerar las elecciones de los pasajeros entre estos caminos. Por tanto, es fundamental analizar y calcular los caminos más cortos entre cada par de OD. Para abordar esta necesidad analítica, se selecciona el algoritmo de ruta más corta del yen para analizar los escenarios de ruta más corta entre diferentes pares de OD. El algoritmo Yen, propuesto por Jin Y. Yen en 1971 para resolver el problema KSP (K-Shortest Paths), se basa en el algoritmo del camino más corto y calcula los primeros K-caminos más cortos entre estaciones OD. Es adecuado para calcular las rutas K-más cortas de una sola fuente en gráficos acíclicos dirigidos con aristas ponderadas no negativas [38]. En este artículo, el proceso básico del recorrido del camino más corto basado en el algoritmo del Yen es el siguiente:

(1) Dada la estación de origen o y la estación de destino d , para el recorrido inicial, establezca el valor de K en 1. Esto encontrará el primer camino más corto P_1 para el par OD y el peso correspondiente Y_1 (2) Al buscar el segundo ruta más corta P_2

con K establecido en 2, el proceso es el siguiente: 1 Actualice las rutas más cortas para cada segmento: Inicialmente, establezca los pesos de todos los segmentos en la ruta P_1 al infinito. Calcule la nueva ruta más corta para cada segmento estableciendo los pesos de los segmentos en la ruta P_1 al infinito en secuencia. Concatene las nuevas rutas más cortas resultantes con la ruta P_1 original. El número de cálculos es igual al número de segmentos de la ruta. 2 Inicialice el conjunto de rutas candidatas X . Si las rutas recién obtenidas del paso anterior no están vacías y cumplen con las condiciones de estaciones no repetidas y son diferentes de la ruta P_1 previamente seleccionada, agréguelas al conjunto de rutas candidatas X . Eliminar cualquier duplicado del conjunto de rutas candidatas X . 3 Seleccione la ruta más corta y actualice el conjunto de rutas candidatas X . Del conjunto de rutas candidatas X no vacío, seleccione la ruta con el peso mínimo como la segunda ruta más corta P_2 , con un peso de Y Elimine esta ruta del conjunto de rutas candidatas X . Este proceso garantiza que se encuentre la segunda ruta más corta considerando estaciones que no se repiten y evitando la duplicación con la primera ruta seleccionada P_1 .

(3) Al encontrar la i -ésima ruta más corta P_i con K establecido en i , el proceso es el siguiente: 1 Actualice las rutas más cortas para cada segmento: comience estableciendo los pesos de todos los segmentos en la ruta P_{i-1} al infinito. Calcule la nueva ruta más corta para cada segmento estableciendo los pesos de los segmentos en la ruta P_{i-1} al infinito en secuencia. Concatene los nuevos caminos más cortos resultantes con el camino P_{i-1} original. El número de cálculos es igual al número de segmentos de la ruta. 2 Inicialice el conjunto de rutas candidatas X . Si las rutas recién obtenidas del paso anterior no están vacías y cumplen con las condiciones de estaciones no repetidas y son diferentes de las rutas previamente seleccionadas P_1 a P_{i-1} , agréguelas a la ruta candidata. establezca X . Elimine cualquier duplicado del conjunto de rutas candidatas X . 3 Seleccione la ruta más corta y actualice el conjunto de rutas candidatas X . Del conjunto de rutas candidatas no vacío X , seleccione la ruta con el peso mínimo como la i -ésima ruta más corta P_i , con un peso de Y Elimina esta ruta del conjunto de rutas candidatas X . Si hay varias rutas con el mismo peso Y_i od, repite el proceso anterior para cada ruta. del i -ésimo camino más corto obtenido con el peso Y

(4) Compare el peso Y_i del primer camino más corto. Si Y_i es igual a Y_{i-1} establezca K en $i + 1$ y repita el paso (3) hasta Y_i mayor que Y_{i-1} Este proceso continúa hasta que finaliza el bucle, lo que da como resultado el número de caminos más cortos y sus pesos correspondientes entre las estaciones de origen y destino dadas.

3.2. Algoritmo

genético El algoritmo genético (GA) fue propuesto por John Holland en la década de 1970 y es un algoritmo de optimización inteligente que aplica el principio evolutivo de "supervivencia del más apto" de la naturaleza para resolver problemas de optimización. Es un algoritmo iterativo que busca la solución óptima y es conocido por su amplia aplicabilidad, eficiencia y buen rendimiento global [39].

Combinando el modelo de optimización de sincronización de programación y red mencionado anteriormente y diseñando además un algoritmo genético para el problema de investigación, el proceso de diseño específico es el

siguiente: 1. Codificación de soluciones: el modelo de optimización de sincronización y red establecido en este capítulo. Sirve principalmente para determinar las estaciones, el orden y los intervalos de salida de cada ruta de autobús en la red de autobuses. Por tanto, es necesario codificar las estaciones, orden e intervalos de salida de cada ruta como variables de decisión. La codificación de soluciones utiliza el método de codificación de punto flotante, que es adecuado para la codificación de algoritmos genéticos con grandes rangos, requisitos de alta precisión y grandes espacios de búsqueda genética. Es particularmente efectivo para el problema de alta dimensión de las estaciones de red a gran escala en este estudio. El método de construcción de la solución inicial en este artículo es

el siguiente: (1) Determinación de las dimensiones de las variables de decisión: al realizar operaciones de codificación para soluciones, primero es necesario determinar las dimensiones de las variables. En el caso de este estudio donde las estaciones de la red y los intervalos de salida de las rutas de autobús se establecen como variables de decisión, las dimensiones de las variables de decisión están determinadas por el número de estaciones n y el número de rutas K (correspondientes a los respectivos intervalos de salida para cada ruta). La determinación del número de estaciones en cada ruta se basa en factores como la longitud de la ruta y la distancia promedio entre estaciones. Normalmente, el número de estaciones en una ruta de autobús se establece entre 15 y 30. El número específico de estaciones debe establecerse en función del diseño real de la longitud de la ruta y la distancia promedio de la estación, donde n indica el número de estaciones. La determinación del número de rutas generalmente se basa en el producto del número de estaciones en cada ruta y generalmente está dentro de 1 a 2 veces la diferencia entre el número total de estaciones de la red de autobuses y el número de estaciones en cada ruta. En este caso, el número de rutas se denota como K . Además de las estaciones de la red, las variables de decisión también incluyen el establecimiento de intervalos de salida para cada ruta, con dimensiones consistentes con el número de rutas K . Por lo tanto, la dimensión de las variables de decisión en este estudio se establece como: $K \times n + K$. Durante el proceso de optimización real de la red, el diseñador de la red de tránsito debe determinar con más detalle el número final de estaciones y rutas en función de los requisitos reales.

(2) Selección de estaciones de ruta Después de determinar el número de estaciones y rutas en la red, también se establece el rango del número de rutas de autobús y estaciones correspondientes. Para mejorar aún más la eficiencia computacional y facilitar las operaciones posteriores, las estaciones para cada ruta se seleccionan para construir soluciones iniciales factibles con buena aptitud.

El proceso específico es el siguiente: (a) Configuración de la primera y última estación: El método de selección de la ruleta se utiliza para seleccionar la primera y la última estación de las rutas. La demanda de pasajeros para cada estación OD se convierte en una proporción de la demanda total de pasajeros, y esta proporción se utiliza como la probabilidad de establecer el OD como la primera y última estación de una ruta. Se seleccionan K pares de OD en función de estas probabilidades para que sirvan como la primera y la última estación de cada ruta. (b) Configuración de Estaciones Intermedias: Después de determinar la primera y la última estación de las rutas, se calculan las distancias entre todas las demás estaciones de la red y la primera y la última estación. La estación con la suma mínima de distancias a la primera y a la última estación se establece como estación intermedia. Luego, se calculan las distancias entre las estaciones restantes y la estación intermedia seleccionada y la última estación, y la estación con la suma mínima de distancias se establece como la siguiente estación intermedia. Este proceso continúa hasta que se seleccionan $n-2$ estaciones intermedias para cada ruta.

(3) Representación de la Red de Transporte Público: Luego de determinar las dimensiones de las variables de decisión y seleccionar las estaciones de ruta, este estudio representa la solución en dos partes para representar la red de transporte público. La primera parte consiste en determinar y ordenar las estaciones de cada ruta de autobús, y la segunda parte corresponde a los intervalos de salida de cada ruta. Por ejemplo, la solución "12345678959678432518" representa un esquema de red compuesto por dos rutas de autobús con nueve estaciones cada una. En esta representación, la primera parte "123456789" y "967843251", respectivamente, representan las dos rutas como "1-2-3-4-5-6-7-8-9" y "9-6-7-8-4-3-2-5-1"; la segunda parte "5" y "8" represen

Los intervalos para las dos rutas son de 5 min y 8 min, respectivamente. La determinación de estaciones para cada ruta de la red sigue el proceso de selección descrito en el paso (2). Además, los intervalos de salida para cada ruta se generan aleatoriamente dentro del rango de 5 min a 15 min.

(4) Este método de codificación determina primero las dimensiones de la red, el número de rutas de autobús y el número de estaciones para cada ruta. Seleccionando las estaciones para cada ruta y generando aleatoriamente los intervalos de salida correspondientes, determina las estaciones e intervalos de salida para cada ruta en la red inicial. Como resultado, las soluciones iniciales construidas son soluciones factibles con una aptitud relativamente buena, lo que reduce en gran medida la complejidad del cálculo. Además, este método de codificación asegura la viabilidad de las soluciones a lo largo de las operaciones posteriores del algoritmo genético, eliminando la generación de soluciones inviables.

2. Inicialización de la población: siguiendo el formato de construcción de las soluciones iniciales en el paso 1, los individuos se generan aleatoriamente para la población, y la generación aleatoria se repite según el tamaño de población establecido. La población se representa como $P = x_i = 1, 2, \dots, \mu$, donde μ es el tamaño de la población, y cada individuo se representa como x donde n es la dimensión de las variables de decisión, específicamente, la suma del número de estaciones para cada ruta y el número de rutas en la red.

$$x_i = x_1, x_2, \dots, x_{n_{\text{route}}}$$

3. Evaluación de aptitud: tome las variables de decisión determinadas durante la inicialización e introdúzcalas en el modelo de optimización sincronizado para la red y la programación.

Calcule el costo del tiempo de los pasajeros y el costo de operación del transporte público bajo esta red inicial, obteniendo el valor de la función objetivo. El modelo construido en este artículo tiene como objetivo minimizar el costo del tiempo de los pasajeros y el costo operativo del transporte público. La aptitud de cada individuo se evalúa en función del valor mínimo de la función objetivo.

4. Selección: En este estudio, se utiliza el método de selección de la ruleta para seleccionar individuos de la población. El principio de este método de selección es calcular la probabilidad de que un individuo aparezca en la próxima generación en función de su valor de aptitud. Luego se seleccionan los individuos para formar la población de descendientes de acuerdo con esta probabilidad. La ventaja de este método es que los individuos con mejores valores de aptitud tienen una mayor probabilidad de ser seleccionados.

5. Cruce: después de realizar la operación de selección en la población, se realiza un cruce de un solo punto utilizando puntos de cruce generados aleatoriamente.

6. Mutación: Los individuos de la población se someten a operaciones de mutación basadas en la probabilidad de mutación P_m . Para los individuos que sufren mutación, se selecciona una posición de mutación aleatoria y la mutación se realiza utilizando el método de mutación de intercambio de dos puntos.

4. Análisis de ejemplo 4.1.

Introducción al estudio de caso

4.1.1. Introducción de datos

(1) Datos del sitio y OD El

estudio de caso en este documento se centra en cinco rutas de autobús que pasan por las dos estaciones (de la estación 98 a la estación 101) con el mayor tráfico repetido en un área determinada de la ciudad de Guangzhou. El caso seleccionado incluye un total de 134 estaciones en la red, siendo 102 estaciones en la red viaria. Entre ellas, hay 38 estaciones en el distrito de Haizhu, 7 en el distrito de Baiyun, 13 en el distrito de Liwan, 7 en el distrito de Yuexiu, 13 en el distrito de Tianhe y 24 en el distrito de Panyu. Hay 18 estaciones que aparecen varias veces en la red, principalmente ubicadas en el distrito de Haizhu y el distrito de Liwan. Las cinco rutas seleccionadas pasan por el segmento de carretera entre la Estación 98 y la Estación 101.

La demanda de pasajeros entre cada estación se basa en los datos de deslizamiento de la tarjeta de los pasajeros durante las horas pico de la mañana (7:00 a 9:00) del 25 de abril de 2018, en la ciudad de Guangzhou. Hay un total de 10.302 pares OD entre las estaciones seleccionadas, con un total de 19.938 pasajeros.

gers. Entre los pares OD con demanda de pasajeros superior a 100 personas, la salida Las estaciones se concentran principalmente en el distrito de Haizhu y el distrito de Yuexiu, mientras que las estaciones de destino se concentran principalmente en el distrito de Tianhe, el distrito de Panyu y Haizhu. Distrito. Entre ellas, la mayor demanda de pasajeros es desde la Estación 101 hasta la Estación 35, con

371 pasajeros.

(2) Datos de red revisados

Después de refinar los datos básicos, el siguiente paso es determinar aún más las dimensiones de la solución de red de autobuses seleccionada. Al analizar los datos básicos de los cinco seleccionados rutas de autobús en el caso de la red optimizada, se encontró que la distancia promedio entre estaciones en cada recorrido es de 668 m, con una media de 26,8 estaciones y una longitud media de recorrido de 17,32 kilómetros. Normalmente, las longitudes de las rutas de autobuses urbanos están diseñadas para estar entre 10 km y 30 km, con un número de estaciones fijado entre 15 y 30. Para satisfacer las necesidades de los pasajeros y operadores, los diseñadores de la red pretenden mantener el número de rutas sin cambios y Intente mantener la coherencia en la longitud de la ruta y el número de estaciones con las rutas originales. durante el proceso de optimización. Por lo tanto, las dimensiones de la solución de red de autobuses son determinado de la siguiente manera: 5 rutas con 25 estaciones cada una.

Con base en la introducción anterior, la dimensión de las soluciones en esta red y el modelo de optimización de programación se establece en 130; 5 líneas con 25 paradas cada una, con un total de 125 paradas en la red; e intervalos de 5 minutos para cada línea. La dimensión de la matriz de adyacencia en el La red de transporte público real-virtual es la suma de las paradas de la red vial y de la red. paradas, totalizando 227.

4.1.2. Configuración de parámetros

El siguiente paso será construir un modelo de optimización sincronizado para el autobús. red y programación basada en algoritmos genéticos, con enfoque en determinar la Parámetros del modelo y algoritmo.

(1) Parámetros del modelo

En este estudio, el coeficiente de conversión λ se establece en 0,5, ya que el costo del tiempo de los pasajeros y el servicio público El costo de operación del transporte se considera igualmente importante durante la optimización. proceso. Según el salario medio en Guangzhou en 2021 de 10.843 yuanes, el valor de ω se fija en 36,1 yuanes/h. Unificar el costo del tiempo del pasajero y el costo de operación del transporte público. en la función objetivo (Ecuación (13)) y evitar una brecha significativa entre el costo de tiempo y costo de operación, ambos se convierten a un ciclo diario para fines de investigación. De acuerdo a En el Informe anual sobre el desarrollo del transporte público de Guangzhou en 2021, la velocidad media La velocidad de las vías urbanas en el área urbana central de Guangzhou durante los días laborables es de 30,57 km/h, y la velocidad media de los autobuses V se fija en 30,57 km/h. Basado en un coste de un solo autobús de 3 millones yuanes y una vida útil promedio del autobús de 15 años, el costo diario de adquisición del vehículo M se establece a 548,1 yuanes/vehículo. Después de analizar los datos de operación del vehículo para las rutas seleccionadas, el tiempo medio de parada de autobús T_s para las rutas seleccionadas se establece en 36 s. Por lo tanto, los valores de los parámetros en el modelo de optimización sincronizada propuesto en este estudio son como se muestra en la Tabla 1 a continuación:

Tabla 1. Parámetros del modelo de optimización sincronizado.

Parámetros	Valor
Coefficiente de énfasis λ	0,5
Factor de conversión de tiempo y costo ω	45,1 yuanes/h
Velocidad media V	30,57 kilómetros por hora
Coste de consumo por kilometraje unitario N	2,8/kilómetro
Tiempo medio de permanencia T_s	36 segundos
Costo de adquisición de vehículos en un solo día M	548,1/vehículo
Longitud mínima de ruta l_{min}	10 kilómetros
Longitud máxima de ruta l_{max}	30 kilómetros
Intervalo mínimo de salida f_{min}	5 minutos
Intervalo máximo de salida f_{max}	15 minutos

(2) Parámetros del algoritmo

Con base en la situación real de selección de la red de línea en este caso, y determinando la dimensión de la variable de decisión de este caso como 130 con base en el análisis anterior, los parámetros relevantes del algoritmo genético se determinan de acuerdo con el Características del modelo de optimización síncrona para resolver la red de líneas de este caso. La configuración del tamaño de la población: establecer un número de poblaciones demasiado pequeño puede dar lugar a grandes errores, lo que hace que los resultados no puedan converger; establecerlo demasiado grande aumentará la dificultad de resolver el problema. Generalmente, el tamaño de la población se establece entre 20 y 100 veces la dimensión de la variable de decisión. En este caso, el tamaño de la población para la dimensión de la variable de decisión de la red de líneas de este caso se establece en 5000. Establecimiento del número de iteraciones: mediante múltiples cálculos de prueba, se encontró que los valores objetivos convergían en alrededor de 150 000 iteraciones. Para garantizar la convergencia de los resultados, este artículo aumenta el número de iteraciones a 200.000. Establecer la probabilidad de cruce: Para lograr el método de cruce de punto único de intercambiar solo un segmento de gen como se describe en el capítulo anterior, dado que el número de segmentos de genes para esta red de líneas es 5, la probabilidad de cruce P_c se establece en 0.2. Configuración de la probabilidad de mutación: Generalmente, la probabilidad de mutación se establece entre 0,0001 y 0,1. En este artículo, la probabilidad de mutación se establece en 0,01. Mitigamos el impacto de las soluciones no válidas mediante la construcción de una función de penalización.

Optimización de parámetros: con respecto a la configuración de parámetros como el tamaño de la población, el número de iteraciones, la mutación y la probabilidad de cruce en el algoritmo genético diseñado, debido a la alta dimensión y la gran carga computacional de optimizar la red de líneas, resolverlo una vez tomó casi un día. Y después de 10 cálculos, los resultados de la optimización mostraron un buen rendimiento. Sin embargo, debido a las capacidades informáticas limitadas, este artículo no optimizó profundamente los valores de los parámetros en el algoritmo. Los valores específicos de los parámetros del algoritmo genético diseñados para resolver el modelo de optimización síncrona en este artículo se muestran en la Tabla 2 a continuación:

Tabla 2. Parámetros relacionados con el algoritmo genético.

Parámetros	Valores
tamaño de la población	5000
número de iteraciones	200.000
probabilidad de cruce	0,2
probabilidad de mutación	0,01

Utilizando la red de carreteras y los datos de demanda, los parámetros del modelo y los parámetros del algoritmo mencionados anteriormente como datos básicos, con la configuración de cada estación y los intervalos de salida de cada ruta en la red como entradas, se construyó el modelo de optimización síncrona construido en este artículo. se resolverá utilizando el algoritmo correspondiente diseñado en la Sección 4.

4.2. Validación de la eficacia

Con base en la red de carreteras y los datos de demanda, así como el modelo establecido y los parámetros del algoritmo mencionados anteriormente, resuelva el modelo de optimización síncrona de la red y la programación. Realice una optimización gradual en la red de este caso. Compare y analice los resultados de la optimización síncrona con los resultados de la optimización por fases para validar la efectividad del modelo de optimización síncrona y el algoritmo diseñado.

4.2.1. Análisis de efectividad del algoritmo

Este artículo establece el esquema de diseño óptimo de la red de autobuses entre estaciones seleccionadas en función de la configuración de pesos entre estaciones. Posteriormente, se lleva a cabo una optimización síncrona en la red de autobuses de prueba. Siguiendo el algoritmo diseñado, el problema de optimización se resuelve continuamente durante 10 iteraciones, generando consistentemente la solución óptima para el caso de prueba. La convergencia del algoritmo genético diseñado se produce alrededor de 150.000 iteraciones y los resultados posteriores permanecen sin cambios. En los resultados de la iteración, aunque los mejores valores de la función objetivo y la función objetivo promedio

Este artículo establece el esquema de diseño óptimo de la red de autobuses entre estaciones seleccionadas en función de la configuración de pesos entre estaciones. A continuación se lleva a cabo una optimización síncrona en la red de autobuses de prueba. Siguiendo el algoritmo diseñado, el problema de optimización se resuelve continuamente durante 10 iteraciones, obteniendo consistentemente el solución óptima para el caso de juicio. La convergencia del algoritmo genético diseñado se produce alrededor de

150.000 iteraciones, y los resultados posteriores permanecen sin cambios. En los resultados de la iteración, aunque los mejores valores de la función objetivo y los valores promedio de la función objetivo en cada iteración no son exactamente iguales, sus valores son bastante cercanos. Además, el Los valores en cada iteración no son exactamente iguales, sus valores son bastante cercanos. Además, los grandes valores del eje y en el gráfico hacen que aparezcan las diferencias entre los dos valores cercanos. Los valores grandes del eje y en el gráfico hacen que las diferencias entre los dos valores cercanos parezcan insignificantes, lo que genera los mejores valores de la función objetivo y la función objetivo promedio. insignificante, lo que hace que los mejores valores de la función objetivo y los valores promedio de la función objetivo parezcan casi idénticos en el gráfico. El proceso de optimización del algoritmo es los valores se vean casi idénticos en el gráfico. El proceso de optimización del algoritmo se ilustra en la Figura 2. ilustrado en la Figura 2.

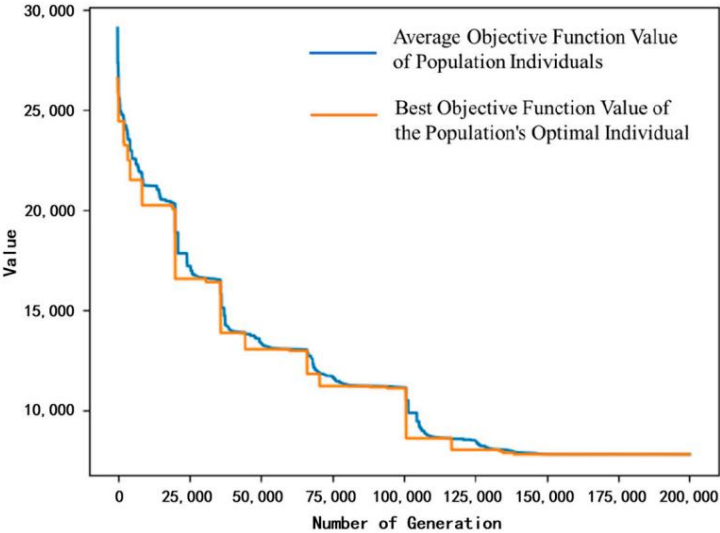


Figura 2. Proceso de optimización de valores objetivos.

4.2.2. Análisis de efectividad del modelo

4.2.2. Análisis de efectividad del modelo Para validar aún más la efectividad de la optimización síncrona de la red y la programación, este documento también lleva a cabo una optimización por fases en la red de autobuses seleccionada. Los resultados de la optimización síncrona se comparan y analizan con los resultados óptimos por fases para estudiar los resultados de la optimización gradual de la efectividad del modelo de optimización síncrona para la programación. Los pasos Red de programación. Los pasos específicos para la optimización gradual de la programación de la red de autobuses son y programación de vehículos son los siguientes:

- (1) De acuerdo con los datos de la red de autobuses y los datos de demanda de pasajeros utilizados en la optimización síncrona, la base de datos de tiempo de viaje y costo de tiempo del pasajero como objetivo, el costo como objetivo, considerando la longitud de la ruta, las estaciones de ruta no repetidas y el coeficiente no lineal.
- (2) Mantener la red optimizada sin cambios y luego optimizar la programación de los

vehículos de autobús como el menor costo operativo como objetivo y el intervalo de salida como restricción. como el menor costo operativo más bajo como objetivo y el intervalo de salida como control. Ambas fases de optimización de la tensión de configuración de programación utilizan un algoritmo genético.

de modo que la solución obtenida por las estaciones en un algoritmo genético de la red de autobuses, que la dimensión de la solución configurada para que coincida con el número de redes para la resolución de modelos. En la fase de optimización de la red, la solución obtenida son las estaciones de estaciones, que la red de autobuses, de optimización de la programación es la dimensión de la solución con el número de redes

estaciones es el número de rutas de autobuses configurada para que coincida con el número de rutas, que es cinco. Utilizando el parámetro de esta manera, con los parámetros del modelo y el algoritmo para cada fase, dando como resultado diseños optimizados para la red de autobuses, y sus centros ponderados. Con parámetros consistentes con la optimización síncrona, el modelo se resolvió cinco veces los intervalos de salida para cada ruta después de la optimización por fases. Para garantizar la precisión de los resultados, el El promedio del costo del tiempo del pasajero y el costo operativo de los cinco resultados de optimización es tomado como resultado de la optimización por fases.

Al utilizar algoritmos genéticos para resolver el modelo de optimización síncrona, el resultado final El resultado optimizado produce un valor de función objetivo óptimo de 250.835,3 yuanes. Los datos Los resultados para las cinco rutas de autobús correspondientes después de la optimización síncrona se muestran en Tabla 3.

Tabla 3. Tabla de datos de resultados de optimización síncrona.

Número de ruta	Estaciones de ruta	Partida Intervalo (min)	Tamaño de la flota Configuración	Longitud de la ruta (kilómetros)	No lineal Coeficiente
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

En el gráfico anterior podemos ver los resultados de la optimización de la red de autobuses y Planificación. La longitud de cada ruta en la red está restringida a estar dentro del rango de 10 kilómetros a 30 kilómetros; los intervalos de salida de los vehículos en cada ruta cumplen la restricción de 5 min a 15 min; las estaciones de cada ruta de la red cumplen con los requisitos no repetitivos restricción de estación; y el coeficiente no lineal para cada ruta es inferior a 1,4. Por lo tanto, Concluimos que los resultados de la optimización de la red de autobuses y su programación son factible. La comparación entre el mapa de calor de frecuencias de estaciones repetidas antes y después de la optimización, así como el cuadro comparativo del número de rutas diferentes y los números de estación repetidos correspondientes antes y después de la optimización, se muestran en Figuras 3 y 4, respectivamente.

Aplica. Ciencia. 2024, 14, x PARA REVISIÓN POR PARES

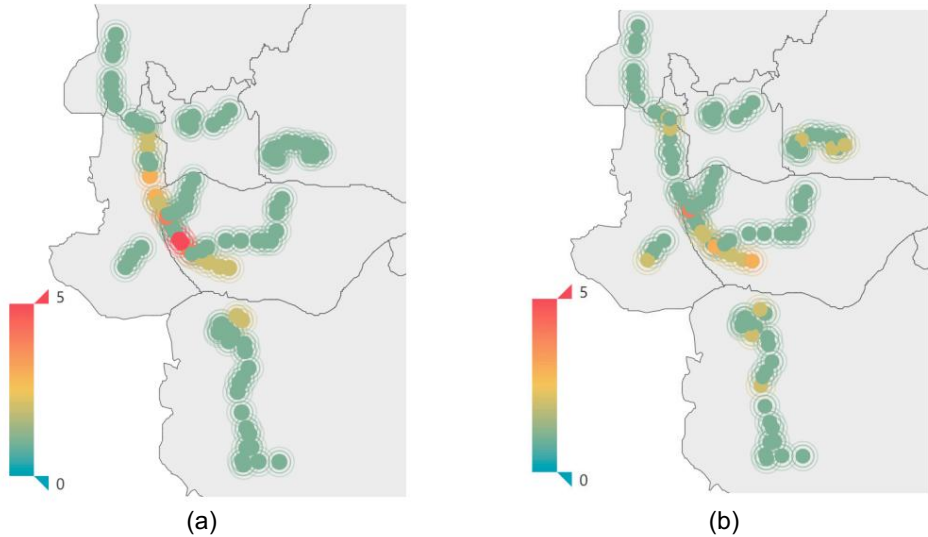
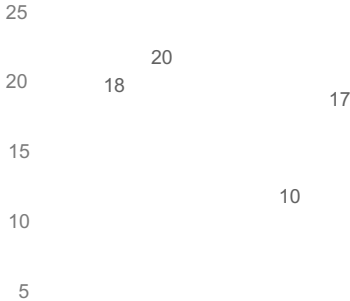


Figura 3. (a) Mapa de calor optimizado de frecuencias de estaciones repetidas antes de la optimización. (b) Mapa de calor optimizado de frecuencias de estaciones repetidas después de la optimización.



(a)

(b)

Aplica. Ciencia. 2024, 14, 6337

Figura 3. (a) Mapa de calor optimizado de frecuencias de estaciones repetidas antes de la optimización. (b) Mapa de calor optimizado de frecuencias de estaciones repetidas después de la optimización.

16 de 18

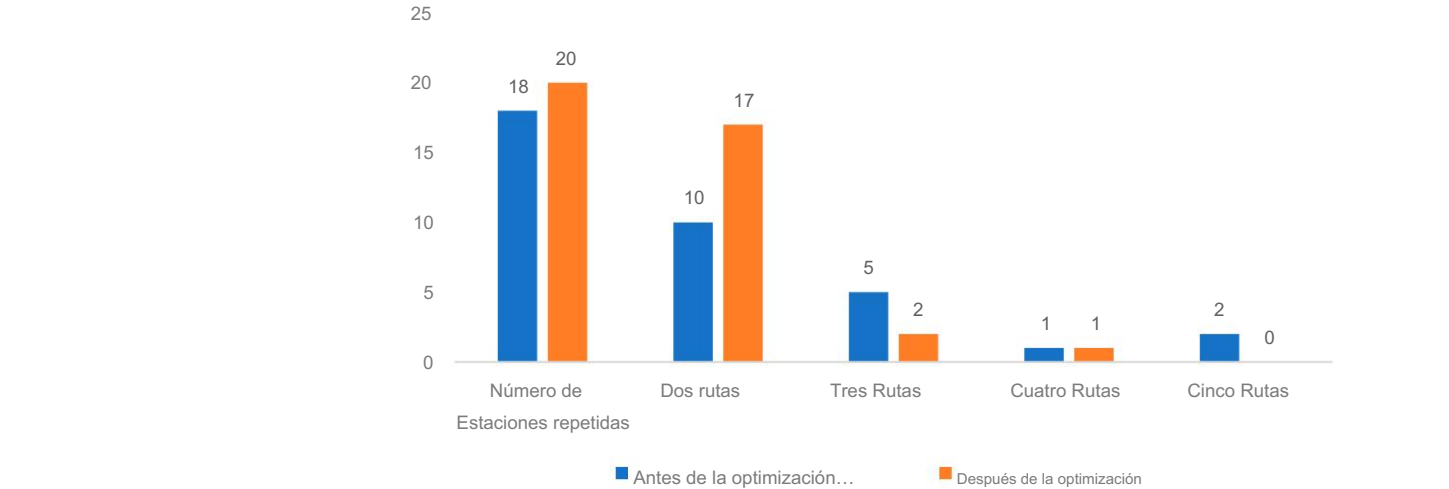


Figura 4. Cuadro comparativo del número de rutas diferentes y estación repetida correspondiente antes y después de la optimización.

En la figura anterior, podemos ver que en las estaciones de la red de autobuses después de la optimización el número de estaciones existentes en las cinco rutas ha disminuido desde dos estaciones optimizadas antes de la optimización a estaciones cero. El número de estaciones existentes en tres ha disminuido de cinco estaciones antes de la optimización a dos estaciones. El número de estaciones existentes en dos rutas ha aumentado de 10 estaciones a 17 estaciones. Las estaciones repetidas en la red optimizada han disminuido significativamente y las repetidas de la red se concentran principalmente en dos rutas, evitando una duplicación excesiva de rutas. Las estaciones de la red se concentran principalmente en dos rutas, evitando una duplicación excesiva de rutas. Las estaciones de la red se concentran principalmente en dos rutas, evitando una duplicación excesiva de rutas. Las estaciones de la red se concentran principalmente en dos rutas, evitando una duplicación excesiva de rutas.

5. **Discusión**

El artículo propone un modelo de optimización síncrona para la red de autobuses y la programación, teniendo en cuenta la elección de los pasajeros de diferentes rutas durante el viaje. Este artículo propone un modelo de optimización síncrona para la red de autobuses y, en comparación con estudios anteriores, este modelo refina aún más los costos del tiempo de espera de los pasajeros y programación, teniendo en cuenta la elección de los pasajeros de diferentes rutas durante el viaje. considera de manera integral el costo de tiempo total para los pasajeros. También analiza estadísticamente En comparación con estudios anteriores, este modelo refina aún más los costos de tiempo de espera de los pasajeros en sus elecciones de diferentes rutas para reflejar mejor los escenarios del mundo real. Síncrono y considera de manera integral el costo de tiempo total para los pasajeros. También estadísticamente la optimización es más efectiva que la optimización por etapas, pero aún existen deficiencias. Analiza las elecciones de los pasajeros de diferentes rutas para reflejar mejor los escenarios del mundo real. Síncrono- que necesitan mejoras adicionales en futuras investigaciones. Las mejoras en futuras investigaciones.

se puede realizar en varios aspectos:

(1) Consideración de las tasas de ocupación de vehículos: El artículo supone que los pasajeros Todos pueden abordar los vehículos de la ruta objetivo mientras esperan y no impone capacidad. Límites en los autobuses. Investigaciones posteriores pueden introducir restricciones en la capacidad de los autobuses, de modo que cuando los autobuses alcanzan su capacidad máxima, los pasajeros deben esperar el siguiente autobús. Esta consideración se puede incorporar al proceso de optimización para tener en cuenta el bus. tasas de ocupación.

(2) Integración entre autobuses y transporte ferroviario: el artículo solo se centra en la ruta de autobús. despliegue y no optimiza la relación entre las rutas de autobús y las redes ferroviarias. El rápido desarrollo del transporte ferroviario tiene un impacto significativo en los flujos de pasajeros de autobuses, sin embargo, el estudio de la influencia mutua entre el transporte ferroviario y los autobuses es limitado en este artículo. Las investigaciones futuras pueden analizar más a fondo los datos de viajes entre autobuses y el transporte ferroviario, utilizar datos de operación de autobuses y datos de viajes en metro para estudiar los cambios en el flujo de pasajeros, optimizar el conexión entre los autobuses y el transporte ferroviario, y realizar ajustes oportunos en las redes de autobuses maximizar el uso de los recursos del transporte público.

6. **Resumen**

Basado en la construcción real-virtual de la red de autobuses y considerando el transporte de pasajeros. tiempo de espera y a bordo, este documento tiene en cuenta además el impacto de los pasajeros

selección de rutas durante el viaje y establece un modelo de optimización sincrónica para la red y la programación de autobuses. Al realizar la optimización sincrónica y la optimización por etapas en la red del caso por separado, los resultados indican que la optimización sincrónica es más efectiva que la optimización por etapas para reducir los costos de tiempo de los pasajeros y los costos de operación del autobús. Los costos de tiempo de los pasajeros disminuyeron un 21,5%, los costos de operación de autobuses disminuyeron un 13,7% y los costos generales del sistema de autobuses disminuyeron un 18,0%. Sin embargo, la complejidad computacional del modelo propuesto aumenta rápidamente con el número de estaciones. Por lo tanto, actualmente sólo es adecuado para optimizar las rutas de autobús en áreas urbanas locales. Las investigaciones futuras se centrarán en cómo aplicarlo a redes verdaderamente a gran escala.

7. Patentes

Los resultados de la investigación de este estudio se han utilizado para solicitar una patente de invención china.

Contribuciones de los autores: Conceptualización, LZ (Liang Zou) y HC; metodología, HC y XY; software, XY; validación, XY; análisis formal, LZ (Lingxiang Zhu); investigación, HC; recursos, LZ (Liang Zou); curación de datos, XY; Escritura: preparación del borrador original, XY y LZ. (Lingxiang Zhu); redacción: revisión y edición, KC y XY; visualización, LZ (Lingxiang Zhu) y HC; supervisión, LZ (Liang Zou); adquisición de financiación, LZ (Liang Zou) Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Financiamiento: Este trabajo cuenta con el apoyo del Proyecto del Plan de Ciencia y Tecnología de Shenzhen (No. KJZD20230923115223047) y Proyecto del Plan de Apoyo Estable a la Educación Superior de Shenzhen (Nº 20231123103157001).

Declaración de disponibilidad de datos: Los datos utilizados para respaldar los hallazgos de este estudio están disponibles a pedido del autor correspondiente.

Conflictos de intereses: El autor Xi Yu fue empleado de la empresa Hangzhou Chuangtou Film and Television Co., Ltd. Los autores restantes declaran que la investigación se realizó en ausencia de relaciones comerciales o financieras que pudieran interpretarse como un posible conflicto de intereses. .

Referencias

1. Pu, H.; Li, Y.; Ma, C. Análisis de topología de la red de transporte público de Lanzhou basado en la teoría de redes complejas de doble capa. Física. Una estadística. Mec. Su aplicación. 2022, 592, 126694. [\[Referencia cruzada\]](#)
2. Rao, KR; Mitra, S.; Szmerkovsky, J. Selección de la estructura de la red de tránsito de autobuses con múltiples objetivos. En t. J. Ópera. Res. inf. Sistema. 2021, 12, 13. [\[Referencia cruzada\]](#)
3. Pequeño, A.; Yildirimoglu, M.; Geroliminis, N.; Ouyang, Y. Diseño de red de carriles exclusivos para autobuses bajo desvío de la demanda y congestión de tráfico dinámica: una red agregada y un enfoque de modelo de aproximación continua. Transp. Res. Parte C 2021, 128, 103187. [\[Referencia cruzada\]](#)
4. Farahani, RZ; Miandoabchi, E.; Szeto, WY; Rashidi, H. Una revisión del problema de diseño de la red de transporte urbano. EUR. J. Ópera. Res. 2013, 229, 281–302. [\[Referencia cruzada\]](#)
5. Zhang, L.; Lu, J.; Yue, X.; Zhou, J.; Li, Y.; Wan, Q. Un método de optimización auxiliar para una red compleja de rutas de transporte público basado en la predicción de enlaces. Modificación. Física. Letón. B 2018, 32, 1850066. [\[Referencia cruzada\]](#)
6. Klier, MJ; Haase, K. Optimización de la red de transporte público urbano con demanda flexible. O espectro. 2015, 37, 195–215. [\[Referencia cruzada\]](#)
7. Yin, J.; D'Ariano, A.; Wang, Y.; Yang, L.; Tang, T. Coordinación de horarios en una red de tránsito ferroviario con demanda de pasajeros que depende del tiempo . EUR. J. Ópera. Res. 2021, 295, 183–202. [\[Referencia cruzada\]](#)
8. Liang, M.; Wang, W.; Dong, C.; Zhao, D. Un diseño cooperativo de optimización coevolutiva de la red de transporte urbano y frecuencias de funcionamiento. Sistema experto. Aplica. 2020, 160, 113736. [\[Referencia cruzada\]](#)
9. Wang, C.; Vosotros, Z.; Wang, W. Una optimización multiobjetivo y un enfoque heurístico híbrido para el diseño de redes de rutas de autobuses urbanos. Acceso IEEE 2020, 8, 2154–2167. [\[Referencia cruzada\]](#)
10. Huang, A.; Dou, Z.; Qi, L.; Wang, L. Optimización de rutas flexibles para un servicio de transporte público que responda a la demanda. J. Transp. Ing. Parte A Sistema. 2020, 146, 04020132. [\[Referencia cruzada\]](#)
11. Gong, M.; Hu, Y.; Chen, Z.; Li, X. Diseño de un sistema de autobús modular personalizado basado en transferencias con optimización de la asignación de rutas de pasajeros . Transp. Res. Logístico de la Parte E. Transp. Rev.2021 , 153, 102422. [\[CrossRef\]](#)
12. Yang, J.; Jiang, Y. Aplicación de NSGA-II modificado al problema de diseño de la red de tránsito. J. Adv. Transp. 2020, 2020, 3753601. [\[Referencia cruzada\]](#)
13. Yao, E.; Liu, T.; Lu, T.; Yang, Y. Optimización de la programación de vehículos eléctricos con múltiples tipos de vehículos en el transporte público. Sosten. Ciudades Soc. 2020, 52, 101862. [\[Referencia cruzada\]](#)

-
14. Guo, R.; Antunes, F.; Zhang, J.; Yu, J.; Li, W. Optimización conjunta del avance y el número de paradas para el tránsito rápido de autobuses bilaterales. *MÁS UNO* 2024, 19, e0300286. [\[Referencia cruzada\]](#) [\[PubMed\]](#)
15. Li, WY; Gao, BQ; Lian, G. Método de planificación de redes de autobuses de microcirculación basado en agrupaciones jerárquicas. *Transp. de Heilongjiang . Ciencia. Tecnología.* 2021, 44, 166–168.
16. Shi, XW; Su, PT; Zou, YJ; Shao, LX Investigación sobre la optimización de la red de autobuses convencionales para conexiones de transporte ferroviario sobre el modelo de etiquetado de ruta más corta. *Computadora. Aplica. Res.* 2020, 37, 1–8.
17. Huang, M. Análisis multinivel de la estructura topológica de la red de autobuses. *Alto. Transp. Tecnología.* 2010, 27, 93–99.
18. Yigit, F.; Basilio, diputado; Pereira, V. Un enfoque híbrido para la optimización basada en múltiples criterios de la configuración dependiente de la secuencia. *Programación basada en Flow Shop. Matemáticas* 2024, 12, 2007. [\[CrossRef\]](#)
19. Ren, H.; Canción, Y.; Largo, J.; Si, B. Un nuevo modelo de asignación de tránsito basado en estrategias de líneas y nodos. *Transp. Res. Parte B* 2021, 150, 121–142. [\[Referencia cruzada\]](#)
20. Shi, Q.; Zhang, K.; Weng, J.; Dong y.; Mamá, S.; Zhang, M. Modelo de evaluación del esquema de optimización de rutas de autobuses basado en datos de autobuses de múltiples fuentes. *Transp. Res. Interdisciplina. Perspectiva.* 2021, 10, 100342. [\[Referencia cruzada\]](#)
21. Fan, W.; Machemehl, RB Tabu busca estrategias para optimizar la red de transporte público con demanda de transporte variable. *Computadora. Civilización asistida. Infraestructura. Ing.* 2008, 23, 502–520. [\[Referencia cruzada\]](#)
22. Huang, D.; Chico.; Wang, S.; Liu, Z.; Zhang, W. Un modelo de optimización de dos fases para el autobús personalizado que responde a la demanda. *diseño de red. Transp. Res. Parte C Emergente. Tecnología.* 2020, 111, 1–21. [\[Referencia cruzada\]](#)
23. Li, X.; Wang, T.; Pequeño.; Feng, F.; Wang, W.; Cheng, C. Optimización conjunta del cronograma de la red de tránsito de autobuses eléctricos de carga regular y la implementación de cargadores estacionarios considerando la política de carga parcial y los precios de la electricidad por tiempo de uso. *J. Adv. Transp.* 2020, 2020, 8863905. [\[Referencia cruzada\]](#)
24. Steiner, K.; Imrich, S. Planificación estratégica de la movilidad integrada bajo demanda y de las redes de autobuses públicos urbanos. *Transp. Ciencia.* 2020, 54, 1616–1639. [\[Referencia cruzada\]](#)
25. Chai, S.; Liang, Q. Un algoritmo NSGA-II mejorado para el problema de configuración de frecuencia y diseño de redes de tránsito. *J. Adv. Transp.* 2020, 2020, 2895320. [\[Referencia cruzada\]](#)
26. Wei, M.; Liu, T.; Sol, B.; Jing, B. Modelo integrado óptimo para el diseño de rutas de tránsito alimentadoras y problema de establecimiento de frecuencia con selección de paradas. *J. Adv. Transp.* 2020, 2020, 6517248. [\[Referencia cruzada\]](#)
27. Tang, Z.; Hu, X.; Périaux, J. Métodos de optimización hibridados multinivel que combinan la búsqueda local determinista y global. *Buscar algoritmos evolutivos. Arco. Computadora. Métodos Ing.* 2019, 27, 939–975. [\[Referencia cruzada\]](#)
28. Kuan, SN; Ong, HL; Ng, KM Resolución del problema de diseño de la red de autobuses alimentadores mediante algoritmos genéticos y optimización de colonias de hormigas. *tiorL. Adv. Ing. Software.* 2006, 37, 351–359. [\[Referencia cruzada\]](#)
29. Ngamchai, S.; Lovell, DJ Transferencia de tiempo óptima en el diseño de redes de rutas de tránsito de autobuses utilizando un algoritmo genético. *J. Transp. Ing. Asce* 2003, 129, 510–521. [\[Referencia cruzada\]](#)
30. Bourbonnais, PL; Morency, C.; Trepanier, M.; Martel-Poliquin, É. Diseño de red de tránsito utilizando un algoritmo genético con red vial integrada y datos de demanda O–D desagregados. *Transporte* 2021, 48, 95–130. [\[Referencia cruzada\]](#)
31. Ding, JX; Zhong, YW; Li, B.; Zhang, S. Investigación sobre optimización de redes de autobuses basada en el algoritmo K-Shortest Path mejorado. *Universidad J. Hefei. Tecnología.* 2019, 42, 1388–1393+1423.
32. Luo, XL; Jiang, SY Diseño de una red de autobuses suburbanos basado en agrupaciones de K-means. *Alto. Transp. Tecnología.* 2018, 35, 115–120+134.
33. Gao, MI; Shi, HG Optimización de las rutas de autobuses alimentadores de transporte ferroviario basada en un algoritmo PSO mejorado. *J. Transporte de tráfico. Ing. inf.* 2019, 17, 49–54.
34. Xin, Y.; Huo, modelo de optimización de red de autobuses multiobjetivo de YM basado en el algoritmo NSGA-II para tránsito sensible a la demanda. *Integral Transp.* 2022, 44, 68–72.
35. Wang, N.; Cao, WZ; Chu, XL Optimización de las rutas de autobuses alimentadores de transporte ferroviario mediante un algoritmo genético celular. *Transp. Tecnología. Economía.* 2018, 20, 13–18.
36. Yu, LJ; Liang, MP Diseño de optimización de una red de autobuses urbanos convencionales basado en programación entera no lineal. *J. China Highw.* 2016, 29, 108–115+135.
37. Wu, optimización de la ruta de la red de autobuses KX basada en un algoritmo mejorado de colonias de hormigas. *Microcomputadora. Aplica.* 2021, 37, 134–136.
38. Yen, JY Encontrar los k caminos sin bucles más cortos en una red. *Gestionar. Ciencia.* 1971, 17, 712–716. [\[Referencia cruzada\]](#)
39. Holland, JH Algoritmos genéticos. *Ciencia. Soy.* 1992, 267, 44–50. [\[Referencia cruzada\]](#)

Descargo de responsabilidad/Nota del editor: Las declaraciones, opiniones y datos contenidos en todas las publicaciones son únicamente de los autores y contribuyentes individuales y no de MDPI ni de los editores. MDPI y/o los editores renuncian a toda responsabilidad por cualquier daño a personas o propiedad que resulte de cualquier idea, método, instrucción o producto mencionado en el contenido.