

基于改进开普勒优化算法的区域停车分配模型

王 喆¹, 范文波¹, 刘 昕¹, 杨 欢², 宋现敏², 杨柏婷³

(1. 吉林大学 大数据和网络管理中心, 长春 130022; 2. 吉林大学 交通学院, 长春 130022; 3. 长春职业技术学院, 长春 130033)

摘 要: 为了提高现有停车资源利用效率, 减少出行者无效停车泊位搜索行为所带来的交通拥堵、尾气排放等问题, 提出了一种优化停车资源配置的多目标非线性整数规划模型。首先, 在综合考虑用户步行距离、停车费用、区域内各停车场利用率均衡性以及停车附加的路网交通压力基础上, 建立停车分配的个人成本和社会成本函数; 其次, 以系统综合成本最小为优化目标, 构建区域内多停车场的停车分配模型, 同时, 考虑到模型求解的复杂性, 设计了一种融合多策略的改进开普勒优化算法进行模型求解。最后, 为了检验本文模型的有效性, 设计了不同停车供需情况下的数值实验, 并将本文模型和算法与经典分配模型以及传统求解算法进行对比分析, 结果表明: 本文模型使个人成本平均降低了 4.4%, 各停车场利用率的均衡性得到了显著提高; 同时, 本文模型在减少停车群体附加的路网交通压力方面有着明显优势, 最高降低了 33.6% 的路段阻抗增长率; 与传统的遗传算法以及模拟退火算法对比, 本文提出的改进开普勒优化算法有着更快的收敛速度以及更好的寻优能力。

关键词: 智能交通; 停车位分配; 系统综合成本; 整数规划; 改进开普勒优化算法

中图分类号: U491.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2025)12-3907-11

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20240484

Regional parking allocation model based on improved Kepler optimization algorithm

WANG Zhe¹, FAN Wen-bo¹, LIU Xin¹, YANG Huan², SONG Xian-min², YANG Bai-ting³

(1. Center for Big Data and Network Management, Jilin University, Changchun 130022, China; 2. College of Transportation, Jilin University, Changchun 130022, China; 3. Changchun Polytechnic, Changchun 130033, China)

Abstract: In order to improve the utilization efficiency of existing parking resources and reduce the traffic congestion, exhaust emissions and other problems caused by travelers' invalid parking space search behavior, a multi-objective nonlinear integer programming model for optimizing the allocation of parking resources was proposed. Firstly, based on the comprehensive consideration of user walking distance, parking fees, the balance of utilization of various parking lots in the area, and the additional traffic pressure attached to parking behaviors, the personal cost and social cost functions of parking allocation were established. Then, with the optimization objective of minimizing the comprehensive cost of the system, a

收稿日期: 2024-05-06.

基金项目: 国家自然科学基金项目(52131202).

作者简介: 王喆(1979-), 男, 高级工程师, 硕士. 研究方向: 计算机网络与大数据分析. E-mail: wangzhe@jlu.edu.cn

通信作者: 范文波(1973-), 男, 工程师. 研究方向: 计算机网络与大数据分析. E-mail: fwb@jlu.edu.cn

multi-parking intelligent parking allocation model was constructed, and at the same time, considering the complexity of model solving, an improved Kepler optimization algorithm integrating multiple strategies was designed for model solving. Finally, in order to test the effectiveness of the model, numerical experiments under different parking supply and demand situations were designed, and the proposed model and algorithm were compared and analyzed with the classical allocation model and the traditional solution algorithms. The results show that the proposed model reduces the individual cost by 4.4% on average, and the balance of utilization of each parking lot is significantly improved. Meanwhile, the proposed model has obvious advantages in reducing the additional traffic pressure of the road network caused by parking groups, with a maximum reduction of 33.6% in the impedance growth rate of the road segment. Compared with traditional genetic algorithm and simulated annealing algorithm, the proposed improved Kepler optimization algorithm has faster convergence speed and a better ability to search for optimal solutions.

Key words: intelligent transportation; parking lots allocation; system comprehensive cost; integral programming; improved Kepler optimization algorithm

0 引言

随着机动车保有量的快速增加,停车供需之间的矛盾日益突出,“停车难”成为出行者经常面临的问题。在日常出行中,出行者需花费大量时间搜索停车位,这不仅增加了出行成本,同时也加剧了交通拥堵和环境污染等问题^[1]。然而由于土地资源的限制,停车供给的增长速度远比不上停车需求的增长速度,一味地通过新增停车位难以解决问题,故研究人员将重点聚焦于停车管理策略的研究上,以寻求新的解决方法。

目前的停车管理策略主要分为两类:第1类策略侧重于停车需求管理,试图从源头上减少停车需求,这类方法包括向车辆征收道路通行费用^[2],发放可交易的停车许可证^[3],以及目前已经在中国部分城市实施的限号出行等;第2类策略侧重于提高现有停车资源的利用效率,如开发智能停车系统、实施共享停车服务等。旧金山实施的SF park和洛杉矶的LA Express Park项目是两个最有名的智能停车系统案例,其主要是通过停车位布置传感器以实时获取车位信息,并将信息发送至展板或者用户终端,进而引导司机选择停车位^[4]。然而停车分配模型构建是智能停车系统实施的关键,未包含停车分配模型的智能停车系统可能会吸引过多的待泊车辆,进而导致停车冲突,产生局部交通拥堵等问题。

因此,国内外学者对停车分配模型进行了大量研究。现有模型大多从司机视角或停车平台经营者视角出发,对停车成本、平台利润、停车场利用率等目标进行优化,如Shao等^[5]以平台利润及

停车场利用率最大为目标,通过构建二元整数线性规划模型优化了共享车位的分配问题。Jiang等^[6]以停车平台的利益最大化为目标,构建了司机不同时段停车概率模型和0~1整数线性规划模型,并讨论了共享时间不确定的情形下的共享车位分配方案。考虑到停车场之间利用率不均衡带来的局部拥堵问题,Kim等^[7]将个人停车成本以及各停车场总利用率最小作为目标,构建了混合整数线性规划模型,并利用交替方向乘子法进行求解。考虑到司机的个人偏好对停车服务是否能够正常进行有着较大影响,Nakazato等^[8]在考虑司机个人偏好的情况下,提出了基于匹配理论的停车场分配方法。卢凯等^[9]考虑到用户心理意愿对停车选择的影响,定义了考虑心理意愿的停车诱导系统虚拟成本,并以虚拟成本最小为目标,构建了区域的停车诱导与分配模型。Wang等^[10]在分析了影响停车选择的因素的基础上,以停车搜索时间最短和停车成本最低为目标,构建了停车分配模型。张水潮等^[11]在考虑预约需求、预约时长和延时需求的情况下,建立了以平台收益和停车步行距离为优化目标的双目标规划模型。刘永红等^[12]针对临时停车需求和预约停车需求设定了不同的目标函数,并在此基础上构建了多居住区共享停车场泊位的分配方法。

综上所述,现有研究大都忽略了区域内多个停车场之间的合作关系,且较多模型在分配时仅考虑用户停车成本或平台收益,这将导致区域停车位利用率不均衡和效能低的现象;同时,现有停车分配模型大多都只针对车辆进行点对点的分

配,未考虑行驶过程中停车群体对路网交通的影响。为此,本文从系统角度出发,综合考虑了用户的步行距离、停车费用、各停车场利用率以及停车群体对路网造成的交通压力等因素,以系统综合成本最低为优化目标,构建了一种多目标非线性整数规划的停车分配(Optimal system comprehensive cost parking assignment, OS-PA)模型,并与经典分配模型进行了数值实验分析。

1 综合个人成本和社会成本的智能停车分配模型

1.1 问题描述

如图 1 所示,当用户 $O_i \{i=1, 2, \dots, n\}$ 行驶至目的地一定距离时,利用终端提交个人停车信息,以寻求合适的停车位。系统收到当前时段所有用户的停车请求后,即刻收集区域内停车场 $P_j \{j=1, 2, \dots, m\}$ 的供给信息 $p_j \{j=1, 2, \dots, m\}$ 以及道路交通状况信息。之后系统将综合考虑用户停车费用、步行成本、停车场利用率的均衡性和道路交通状况,统一将有限的停车资源与用户进行匹配,最终生成最优停车分配方案,并将分配结果发送至用户终端,从而引导用户合理停车。不难发现,本文解决的是已有资源的最优配置问题。

1.2 目标函数构建

为了从系统层面优化停车资源的分配方案,本文定义系统综合成本由个人成本和社会成本两部分构成,并以系统综合成本最低为目标构建停车分配模型。目标函数如下所示:

$$F = \min(\omega F_1 + \epsilon F_2) \quad (1)$$

式中: F_1 为个人成本, $F_1 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m C_{ij}$; F_2 为社会成本; ω, ϵ 均为参数。

(1) 个人成本

本文定义个人停车成本由停车费用和步行成本两部分组成。其中,停车费用主要考虑用户不同停车时长所带来的成本,步行成本受用户与停车场之间距离的影响。当区域内有 n 个停车用户、 m 个停车场时,用户 $O_i \{i=1, 2, \dots, n\}$ 停放至停车场 $P_j \{j=1, 2, \dots, m\}$ 的个人成本 C_{ij} 为:

$$C_{ij} = \lambda \|d_i - d_j\| + \varphi_j t_{ij} \quad (2)$$

式中: d_i 为用户 O_i 目的地的位置; d_j 为停车场 P_j 的位置; φ_j 为停车场 P_j 单位时间的停车价格; t_{ij} 为用户 O_i 在停车场 P_j 的停车时长; λ 为步行成本转换系数; 等式右边第 1 部分为用户的步行成本; 第 2 部分为用户的停车费用。

(2) 社会成本

为了衡量停车分配对各停车场以及路网交通造成的影响,本文引入停车场利用率方差 $D(z)$ 以及路网阻塞程度 $J(q)$ 两个指标,并定义社会成本为二者的加权和,即:

$$F_2 = \mu_1 D(z) + \mu_2 J(q) \quad (3)$$

式中: μ_1, μ_2 为参数。

当出行者只考虑个人的停车成本进行停车选择时,可能会出现大量车辆前往同一个停车场,而其他停车场闲置的情况,这不但会加剧局部交通拥堵问题,同时也会造成停车资源的浪费。故本文针对多个停车场进行停车分配时,通过优化停车场间的利用率方差 $D(z)$ 达到均衡停车场利用

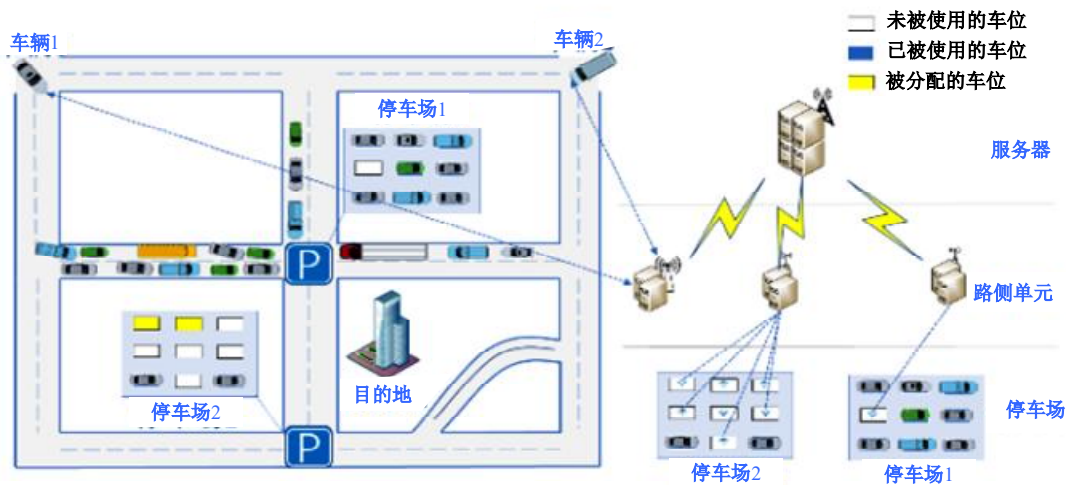


图 1 智能停车分配系统示意图

Fig. 1 Diagram of intelligent parking lots assignment system

率的目的。其计算公式如下:

$$D(z) = \frac{\sum_{j=1}^m \left(\frac{z_j}{p_j} - \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \frac{z_j}{p_j} \right)^2}{m} \quad (4)$$

式中: z_j 为停车场 P_j 的被占用的车位数; p_j 为停车场 P_j 的总可用车位数。

同时,为了减轻停车群体给路网带来的交通压力,引入BPR函数,构建路网阻塞程度 $J(q)$,其计算公式如下:

$$J(q) = \frac{\sum_{a=1}^k q_a t(q_a)}{\sum_{a=1}^k q_{a0} t_{a0}} \quad (5)$$

式中: $a = \{1, 2, 3, \dots, k\}$ 为路段编号; q_{a0} 为路段 a 初始流量; q_a 为路段 a 上的交通量; t_{a0} 为路段 a 的自由流行程时间; $t(q_a)$ 为路段 a 的时间阻抗, $t(q_a) = t_{a0} \left(1 + \alpha \frac{q_a}{c_a} \right)^\beta$; α, β 取值分别为 0.15、4; c_a 为路段 a 的通行能力。

本文假设所有的停车请求被分配至停车场后,停车用户会根据当前状况的最短路径前往停车场,则路网最终会达到用户均衡状态。故后续可以引入用户最优的交通分配模型更新各路段的阻抗,并计算、更新不同停车分配方案下路网的阻塞程度。

1.3 多目标非线性整数规划模型构建

本文以系统综合成本最小为优化目标,建立的多目标非线性整数规划模型如式(6)~(15)所示,其中式(6)为目标函数,式(7)~(15)为约束条件:

$$F = \min \left[\omega \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (\lambda \|d_i - d_j\| + \varphi_j t_{ij}) + \gamma \frac{\sum_{j=1}^m \left(\frac{z_j}{p_j} - \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \frac{z_j}{p_j} \right)^2}{m} + \theta \frac{\sum_{a=1}^k q_a t_{a0} (1 + \alpha (q_a/c_a)^\beta)}{\sum_{a=1}^k q_{a0} t_{a0}} \right] \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^m x_{ij} \leq 1, \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, n\} \quad (7)$$

$$z_j = \sum_{i=1}^n x_{ij}, \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, n\}, \quad \forall j \in \{1, 2, \dots, m\} \quad (8)$$

$$0 \leq z_j \leq p_j, \quad \forall j \in \{1, 2, \dots, m\} \quad (9)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, n\}, \quad \forall j \in \{1, 2, \dots, m\} \quad (10)$$

$$\omega + \gamma + \theta = 1 \quad (11)$$

$$\gamma = \epsilon \mu_1 \quad (12)$$

$$\theta = \epsilon \mu_2 \quad (13)$$

$$\sum_r \sum_s \sum_g f_g^{rs} = q_a, \quad a \in \{r, s\} \quad (14)$$

$$f_g^{rs} \geq 0 \quad (15)$$

式中:决策变量 x_{ij} 为用户 O_i 是否被分配至停车场 P_j ,若是, $x_{ij} = 1$;否则 $x_{ij} = 0$; γ, θ 为参数; f_g^{rs} 为出发地 r 至目的地 s 之间的第 g 条路径上的流量。

约束条件式(7)表示每位停车用户至多被分配至一个停车位;约束条件式(9)考虑到研究区域内各停车场的停车容量与实际可停放泊位数之间的关系,表示各停车场被使用的车位数不能超过停车位的定额;因为本文利用用户均衡的交通分配方法更新路段阻抗并计算停车附加的路网交通压力,所以交通分配时应当满足条件式(14)~(15)的约束;其中约束条件式(14)表示路段 a 的交通量等于出发地与目的地间所有经过路段 a 的路径的流量之和;约束条件式(15)表示路径流量非负。

2 算法设计

2.1 开普勒优化算法

当区域内有 n 个停车用户、 m 个停车场时,最多可能产生 m^n 种停车分配方案,故当停车用户以及停车场数量较多时,模型的计算量较大,难以使用精确算法在可接受的时间内求得最优解。故此次研究引入元启发式算法中的开普勒优化算法进行求解。

开普勒优化算法(Kepler optimization algorithm, KOA)是2023年Mohamed等^[13]提出的一种基于群体的优化算法。KOA参照行星环绕太阳的运动规律,用太阳(当前最优解)和围绕太阳旋转的行星(备选解)表示搜索空间。不同时刻,行星运动至不同位置,进而可以对空间进行有效的搜索。当出现更优解时,原有的太阳将被替换,同时围绕其运动的行星也相应发生变化,形成新的搜索空间,行星也将进行新的搜索。如此反复进行,直至搜索到最优解。

2.2 融合多策略的改进开普勒优化算法

KOA具有收敛快、寻优强等优点,但由于该

算法可随机生成行星的初始位置,进而容易产生局部最优解。故本文结合 Tent 混沌映射和反向学习策略,对 KOA 中行星位置初始化进行改进,从而实现局部开发和全局探索能力的提升。融合多策略的改进开普勒优化算法(Improved Kepler optimization algorithm, IKOA)技术思路如下所示。

(1)融合 Tent 混沌映射与反向学习策略的行星位置初始化

首先,将初始的行星种群设置为 $X = \{X_1, X_2, \dots, X_{N_p}\}$,行星 $X_i = \{X_i^1, X_i^2, \dots, X_i^d\}$ 表示一种停车分配方案,其中 d 表示待求解问题的维数(变量数), $X_i^1 = 1$ 表示第 1 个用户被分配至第 1 个停车场。行星的初始位置对于算法求解起着重要作用,而混沌映射有助于优化算法跳出局部最优解,进而获得较好的全局搜索能力。因此,引入 Tent 混沌映射优化行星位置的初始化。

基于 Tent 混沌映射生成混沌序列如下:

$$Z_{i+1}^j = \begin{cases} \frac{Z_i^j}{\eta}, & 0 \leq Z_i \leq \eta \\ \frac{1 - Z_i^j}{1 - \eta}, & \eta < Z_i \leq 1 \end{cases} \quad (16)$$

式中: Z_i^j 为针对变量 j 的混沌序列中第 i 个混沌值; η 为控制参数。

结合混沌序列,进一步生成搜索空间内行星初始位置如下所示:

$$X_i^j = l_{\text{bound}}^j + Z_i^j(u_{\text{bound}}^j - l_{\text{bound}}^j) \quad (17)$$

式中: X_i^j 为第 i 个行星中变量 j 的位置, $i \in \{1, 2, \dots, N_p\}$; u_{bound}^j 和 l_{bound}^j 分别为变量 j 取值的上、下界。

为提高行星初始位置的多样性,引入反向学习策略,按照式(18)计算 X_i^j 的反向位置 Y_i^j :

$$Y_i^j = \begin{cases} r(l_{\text{bound}}^j + u_{\text{bound}}^j) - X_i^j & 18(a) \\ \text{rand}(l_{\text{bound}}^j, u_{\text{bound}}^j) & 18(b) \end{cases}$$

式中: r 为 $[0, 1]$ 间的随机数; $\text{rand}(\cdot)$ 为随机函数。当式(18a)中的位置发生越界时,则利用式(18b)随机生成位置进行替代。

将基于 Tent 混沌映射的所有行星初始位置序列 X 与混合 Tent 混沌映射和反向学习策略产生的所有行星初始位置 Y 合并,形成新的行星初始位置序列 $X' = \{X \cup Y\}$ 。根据适应度大小,选取前 N_p 个位置作为最终的行星初始位置,同时选取适应度最优的行星作为太阳。

(2)行星所受引力及其速度的计算

在确定每个行星以及太阳的位置后,需要计算各个行星 X_i 与太阳 X_s 之间的位置、受到的引力大小以及各自的运行速度。根据万有引力定律,各行星所受引力 F_{gi} 为:

$$F_{gi}(t) = e_i \mu(t) \frac{\overline{M_s} \overline{m_i}}{\overline{R_i}^2 + v} + r_1 \quad (19)$$

式中: e_i 为行星轨道的偏心率; $\mu(t)$ 为万有引力常数; $\overline{M_s}$ 及 $\overline{m_i}$ 为太阳和行星质量归一化处理后的取值; $\overline{R_i}$ 为轨道 X_i 与 X_s 之间欧几里得距离 R_i 归一化处理后的取值; v 和 r_1 为参数。

上述所提及的太阳质量和行星质量由适应度函数取值决定(以最小化问题为例),计算公式分别为:

$$M_s = r_2 \frac{f_s(t) - f_{\text{ub}}(t)}{\sum_{k=1}^N (f_k(t) - f_{\text{ub}}(t))} \quad (20)$$

$$m_i = \frac{f_i(t) - f_{\text{ub}}(t)}{\sum_{k=1}^N (f_k(t) - f_{\text{ub}}(t))} \quad (21)$$

式中: r_2 为参数; $f(t)$ 为适应度函数; $f_s(t)$ 为适应度取值下界; $f_{\text{ub}}(t)$ 为适应度函数取值的上界。

行星的速度取决于行星相对于太阳的位置,与太阳距离越近,所受引力增大,行星速度越快,反之速度会下降。行星速度的计算公式由两部分组成,具体形式如下:

$$V_i(t) = \begin{cases} L(2r_4 X_i - X_b) + L'(X_a - X_b) + (1 - \overline{R_i}(t)) \rho U_1 r_5 (X_{i,\text{up}} - X_{i,\text{low}}), & \overline{R_i}(t) \leq 0.5 \\ r_4 l(X_a - X_i) + (1 - \overline{R_i}(t)) \cdot \rho U_2 r_5 (r_3 X_{i,\text{up}} - X_{i,\text{low}}), & \text{其他} \end{cases} \quad (22)$$

$$L = U \cdot M \cdot l \quad (23)$$

$$l = \left[\mu(t) (M_s + m_i) \left| \frac{2}{\overline{R_i}(t) + v} - \frac{1}{a_i(t) + v} \right| \right]^{\frac{1}{2}} \quad (24)$$

$$M = [r_3(1 - r_4) + r_4] \quad (25)$$

$$L' = (1 - U) M' l \quad (26)$$

$$M' = [r_3(1 - r_5) + r_5] \quad (27)$$

式中: $V_i(t)$ 为行星在 t 时刻的速度; X_a 和 X_b 为随机选取的两个行星位置; $X_{i,\text{up}}$ 、 $X_{i,\text{low}}$ 分别为当前行星位置的上、下界; r_3 、 r_4 、 r_5 、 ρ 、 U 和 U_1 为参数;

$a_i(t)$ 为行星旋转轨道的长半径。

(3) 行星位置更新和保留

如前面所述,各行星在椭圆轨道上绕太阳旋转过程中,会在一定的时间靠近太阳,然后远离太阳。IKOA 通过探索和开发两个阶段模拟这个行为,从而试图利用距离太阳较远的行星进行探索,以寻找新的解决方案,进而利用距离太阳较近的行星进行开发,以搜索最优解附近的新位置。

不难发现,探索和开发行星的选择以及位置的更新对 IKOA 性能影响较大,故引入一种选择机制更新不同阶段行星的位置,从而体现泊位选择时的动态变化特性:

$$X_i(t+1) = \begin{cases} X_i(t) + \rho V_i(t) + (F_{gi}(t) + |r|)U(X_s(t) - X_i(t)), & r_6 < \xi, \\ X_i(t)U_1 + (1 - U_1)\left(\frac{X_i(t) + X_s(t) + X_a(t)}{3} + h\left(\frac{X_i(t) + X_s(t) + X_a(t)}{3} - X_b(t)\right)\right), & r_6 \geq \xi, \end{cases} \quad (28(a))$$

$$h\left(\frac{X_i(t) + X_s(t) + X_a(t)}{3} - X_b(t)\right), r_6 \geq \xi, \quad (28(b))$$

式中: h 为控制 t 时刻太阳与行星之间距离的自适应因子; r_6 为 $[0, 1]$ 内的随机数; ξ 为调节参数。

根据式(28),如果 $r_6 < \xi$,那么认为行星处于探索阶段,并利用式(28a)更新其下一个位置;如果 $r_6 \geq \xi$,那么认为行星处于开发阶段,其下一个位置将用式(28b)进行更新。同时为确保太阳和行星的最佳位置,引入精英主义策略,对行星的新位置 $X_{i, \text{new}}$ 进行选择和保留,具体标准如式(29)所示。IKOA 流程如图 2 所示。

$$X_{i, \text{new}}(t+1) = \begin{cases} X_i(t+1), & f(X_i(t+1)) \leq f(X_i(t)) \\ X_i(t), & \text{其他} \end{cases} \quad (29)$$

3 数值实验

3.1 实验设置

(1) 路网数据设定

本文截取经典 Siouxfalls 网络中的部分结构,构建一个以 800 m 为半径的小型商业区路网,路网拓扑结构以及各路段信息如图 3 所示。该路网包含 15 个节点,44 条路段。其中,节点 1、3、13、15 为该路网的入口,司机只能从这 4 个节点驶入,并假定司机到达入口前就已经提交停车请求。为了方便计算,将所有司机的出行目的地都设置在节点 6 处。路网中包含 A、B、C 3 个停车场,分别位

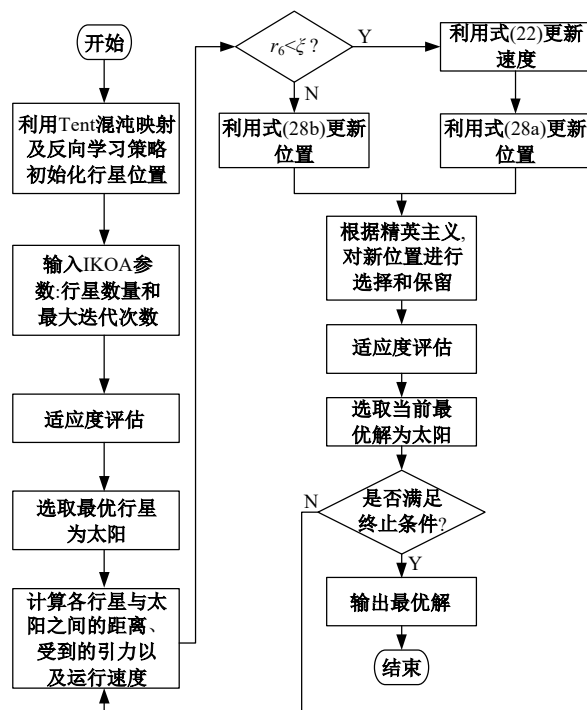


图 2 IKOA 流程

Fig. 2 IKOA flow

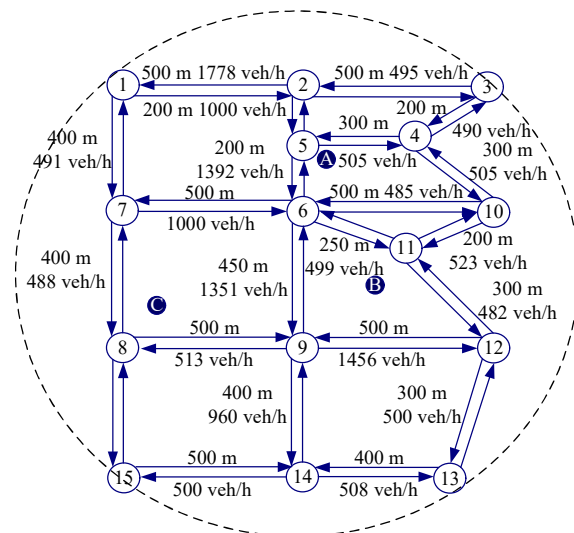


图 3 实验路网信息

Fig. 3 Experimental road network information

于节点 5、11、8 附近。为了模拟真实路网的道路交通情况,设定路段 6-5、6-7、6-9、6-10、6-11 饱和度为 0.9,路段 5-6、7-6、9-6、10-6、11-6 饱和度为 0.8,其余路段的饱和度为 0.7。

(2) 停车数据设定

考虑到停车需求的时变性,此次实验针对不同时间段,分别生成数量为 100~1 400 辆的停车需求,其停车时长皆服从期望为 70 min 的负指数分布。同时,假定停车需求均匀地分布在路网的 4 个入口处。

对应停车需求的不同情形,将区域总停车供给设定为 1 000、1 200、1 400、1 600、1 800、2 000 个 6 种情况。停车场 A、B、C 至目的地的步行距离分别设置为 200、300、350 m,各停车场收费标准皆为 2 元/(30 min)。假定所有用户的步行速度为 1 m/s,并依照文献[9],将用户的步行时间成本设定为 0.3 元/min,进而可得到步行成本转换系数 $\lambda=0.005$ 元/m。

(3)参数设定

本文模型的目标函数包含 ω 、 γ 、 θ 三个参数,参数不同取值对模型表现有较大影响,故需要对参数进行标定。标定过程中,考虑到条件式(11)

的约束,选择固定 $\theta=0.1$,变动 ω 的取值,部分结果如图 4 所示。由图 4 可以看出,在停车需求为 200、600、1 000、1 400 的情况下,停车用户的个人成本随着 ω 的增加而降低,路网阻塞程度随着 ω 的增加先降低后快速增加,而停车场利用率方差随着 ω 的增加而增加。这是因为,随着 ω 的增加,本文模型为追求更低的个人成本,而舍弃了部分停车场利用率的均衡性所致。当 ω 增大到一定值时,路网阻塞程度会急剧上升,同时停车场利用率方差也越来越不均衡,此时认定参数达到最优数值。依照该标准得到不同供需情况下 ω 的最优取值如表 1 所示。

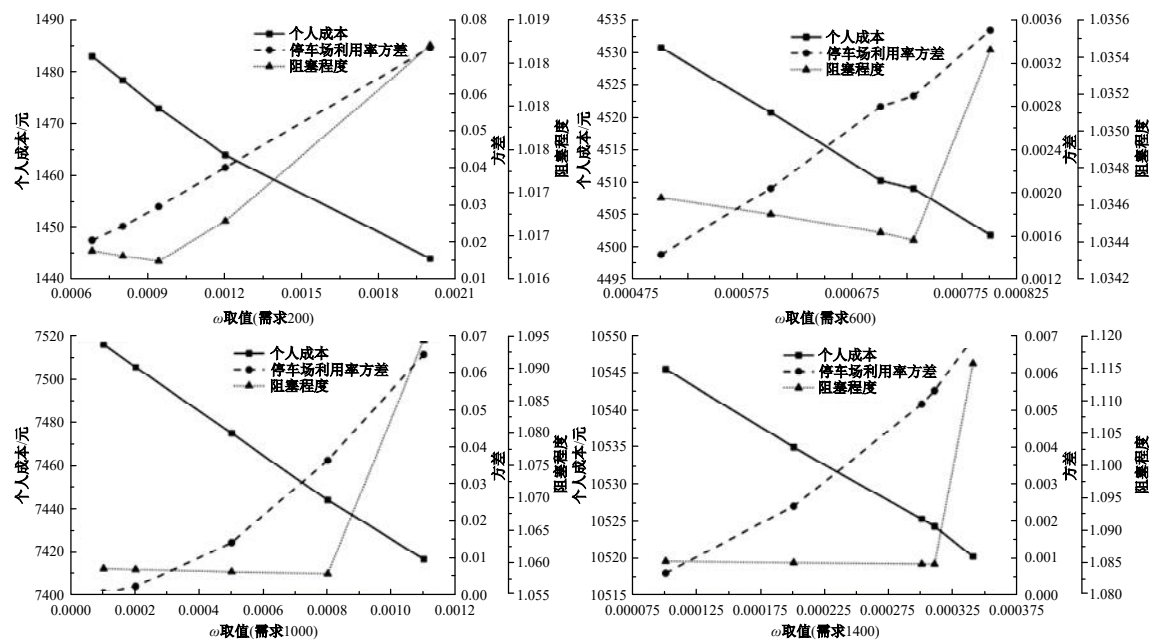


图 4 参数 ω 影响分析

Fig. 4 Parameter ω impact analysis

表 1 参数 ω 最优取值

停车需求数	总停车场供给数		
	1 000	1 600	2 000
600	0.001 20	0.000 73	0.000 33
800	0.000 93	0.000 65	0.000 84
1 000	0.006 20	0.000 50	0.000 56

对各种情况下的最优参数进行曲面拟合,得到的曲面以及最佳参数与停车供需之间的关系式如如图 5 所示,进而后续实验中可以通过该式计算不同供需下的最优参数值。

3.2 评价指标

为了衡量本文模型在分配车位方面的有效性,选取平均个人停车成本、阻塞程度、路段 V/C 比(指路段交通与通行能力之比)和路段阻抗变化

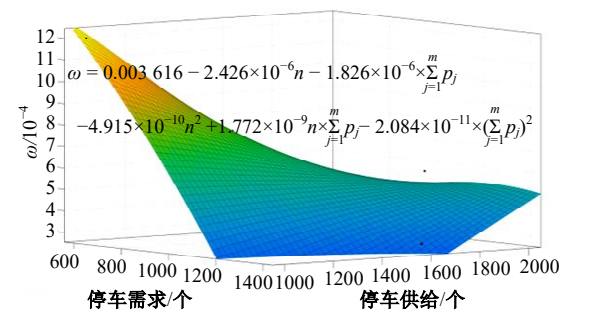


图 5 参数 ω 拟合曲面

Fig. 5 Parameter ω fitting of surface results

率对模型进行评价。其中,选择平均个人停车成本为评价指标是为了度量模型进行停车分配时,是否从用户的角度出发,为用户节省支出。平均个人停车成本 $\bar{C}$ 计算公式如下:

$$\bar{C} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m C_{ij}}{n} \quad (30)$$

阻塞程度如式(5)所示,路段 V/C 比即路段交通量与通行能力之比。引用路段阻抗变化率是为了衡量模型分配车位后,停车群体给道路交通带来的影响,其计算公式如下:

$$\tau = (t_a - t_{a0}) / t_a \quad (31)$$

3.3 实验结果

为验证本文模型的合理性,引用经典分配模型^[7]中仅考虑个人成本的停车分配(M-PA)模型及考虑个人成本和停车场利用效率均衡性的停车分配(O-PA)模型作为对比模型,进行对比实验。在固定停车供给为1 600个,停车需求从100个递增至1 400个的情况下,本文OS-PA模型与M-PA模型,O-PA模型分配的结果如图6~图8所示。

从图6(a)可以看出,本文OS-PA模型分配后的用户平均个人成本略高于M-PA模型,但随

着停车需求的增加,二者之间的差距逐渐降低,说明OS-PA模型在针对停车供给紧张的情况下,能够更好地降低个人停车成本;而与O-PA模型相比,OS-PA模型分配后的平均个人成本降低了4.4%。

图6(b)~6(d)展示了模型分配后,停车场A、B、C的利用率及各停车场利用率与平均利用率的偏离程度。不难看出,本文OS-PA模型在平衡停车场之间利用率方面的表现明显优于M-PA模型和O-PA模型。以停车需求为1 000个的情况为例,OS-PA模型分配后各停车场利用率为51.1%~80.3%,而M-PA模型、O-PA模型分配后各停车场利用率分别为37.7%~100%、0%~100%。产生上述结果是因为,M-PA模型分配时仅考虑用户停车成本,而没有对停车场利用率均衡性进行优化;虽然O-PA模型分配时考虑了停车场利用率的均衡性,但是以最小化停车利用率总和为分配目标,难以达到平衡停车场利用率的目的。

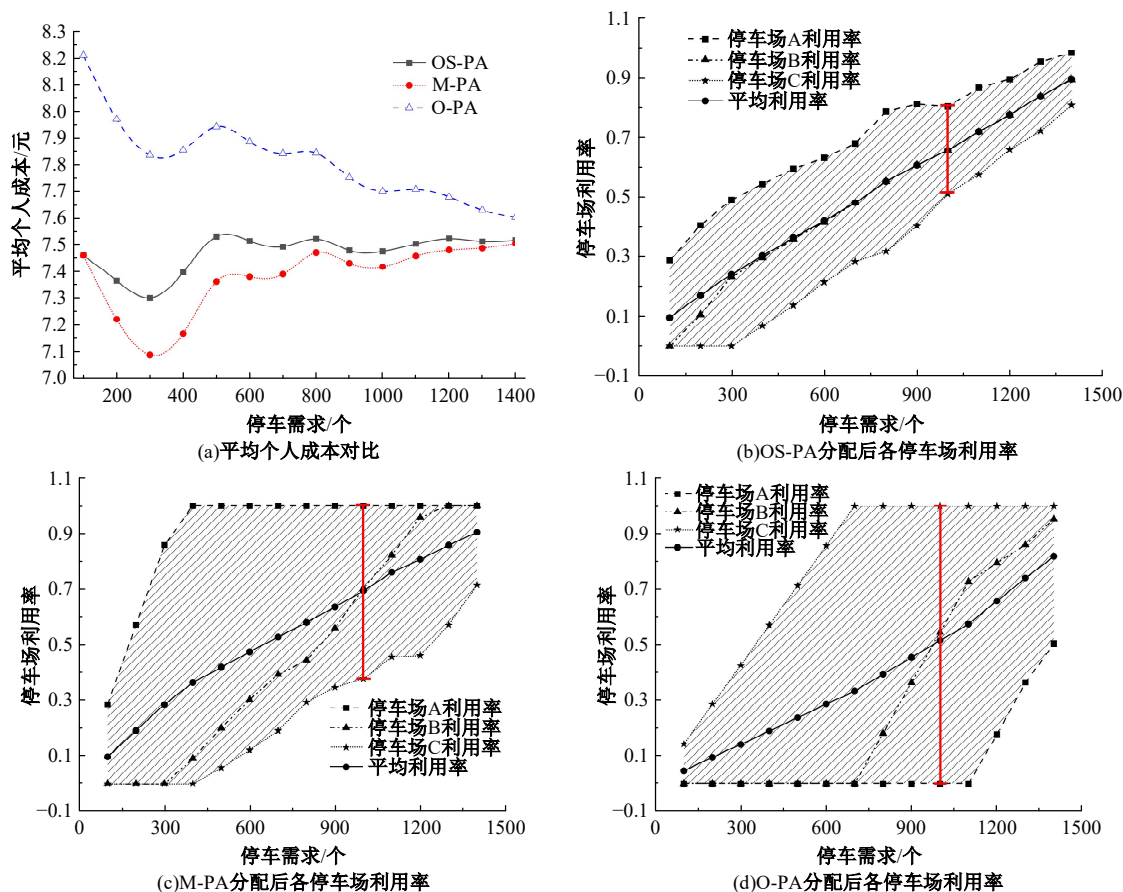


图6 不同需求情况分配后的评价指标对比

Fig. 6 Comparison of evaluation indicators after allocation for different demand scenarios

对停车需求进行分配并加载至路网后,路网道路状况不可避免地会发生变化。图 7 为 OS-PA 模型和对比模型在不同停车需求情况下,降低停车群体对道路交通造成的负面影响对比。可以看出,OS-PA 模型分配的结果始终优于 M-PA 模型和 O-PA 模型,且随着停车需求的增加,模型性能差距逐渐增大。图 8 为模型分配后区域路网内各路段 V/C 比,除个别路段以外,OS-PA 模型分配后路段 V/C 比远低于 M-PA 模型、O-PA 模型的分配结果,这说明 OS-PA 模型能够将交通量更加均匀地加载至路网路段上,避免路段出现严重过载的情况。

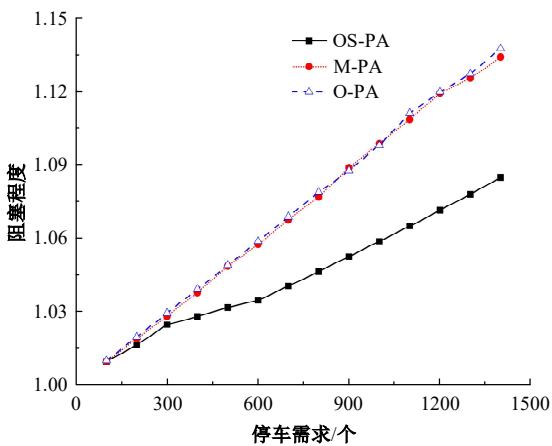


图 7 不同需求情况分配后阻塞程度对比

Fig. 7 Comparison of the degree of congestion after allocation of different demand scenarios

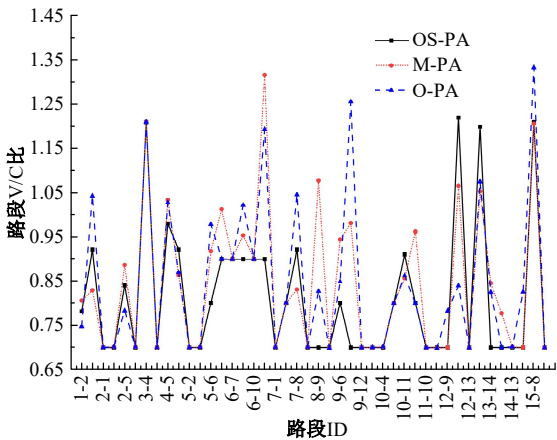


图 8 各路段 V/C 比对比图

Fig. 8 V/C Comparison chart by segment

为凸显本文模型解决停车场利用率不均衡导致局部拥堵问题的优势,以停车供给为 1 600 个、停车需求为 1 000 个的情况为例,利用各路段阻抗的变化率对 A、B、C 三个停车场及目的地(D)周边交通状况进行分析,结果如表 2 所示。

表 2 路段阻抗增长率
Table 2 Impedance change rate of different road sections

路段 id	位置	分配模型		
		OS-PA	M-PA	O-PA
2-5	A	7.5	9.3	5.6
4-5		13.8	17.1	16.7
5-2		3.6	3.6	3.6
5-4		3.6	3.6	3.6
5-6	A&D	6.1	10.6	13.7
6-5	A&D	9.8	15.8	9.9
6-11	B&D	9.8	45	30.4
11-6	B&D	6.1	12.8	6.1
10-11	B	10.3	8.1	8.3
11-10		3.6	3.6	3.6
11-12		3.6	3.6	3.6
12-11		33.2	19.3	7.5
7-8	C	10.7	7.1	17.9
8-7		3.6	3.6	3.6
8-9		3.6	20.1	7
8-15		3.6	3.6	3.6
9-8	D	3.6	13.9	37.2
15-8		32.2	31.7	47.4
6-7	D	9.8	9.8	9.8
6-9		9.8	12.3	16.4
7-6		6.1	6.1	6.1
9-6		6.1	11.9	7.8
10-6		6.1	6.1	6.1

注:路段所处位置中,A表示该路段为停车场 A 附近路段,A&D 表示该路段为 AD 之间的连接路段,以此类推。

由表 2 可以看出,利用 3 种模型进行停车分配,并将具有停车需求的交通量加载至路网后,停车场及目的地周围的路段阻抗都不可避免地有一定程度的增加,但 OS-PA 模型分配后,各路段阻抗的增长率大多低于 M-PA 模型和 O-PA 模型的分配结果。以停车场 C 附近路段为例,经计算,各模型对应的停车场 C 附近路段阻抗平均增长率分别为 9.5%、13.3%、19.5%。选择路段 9-8 作为参考路段,此路段在各模型下的阻抗增长率分别为 3.6%、13.9%、37.2%,与 M-PA 模型和 O-PA 模型相比较,本文 OS-PA 模型分别降低了 10.3%、33.6% 的路段阻抗增长率。说明本文模型能够较好地避免停车所带来的局部拥堵问题。

此外,为了对比本文所提的 IKOA 的性能,引入传统遗传算法(Genetic algorithm,GA)以及模拟退火算法(Simulated annealing algorithm,SA)与 IKOA 进行对比分析(以停车需求为 600 个,总

停车供给为 1 000 个的情况为例),结果如图 9 所示。从图 9 可以看出,在生成初始解的方面,IKOA 明显优于 GA 和 SA,所生成的初始解更加接近最优解;在收敛速度方面,IKOA、GA 和 SA 分别迭代了 350、1 463 和 309 次后收敛。在搜索模型最优解方面,IKOA 和 GA 能够搜索到相同的最优解,且最优解明显优于 SA 搜索到的最优解。

综上可得,针对本文提出的区域停车资源分配问题,与 GA 和 SA 相比,本文所提的 IKOA 有着较好的收敛性能和较强的寻优能力。

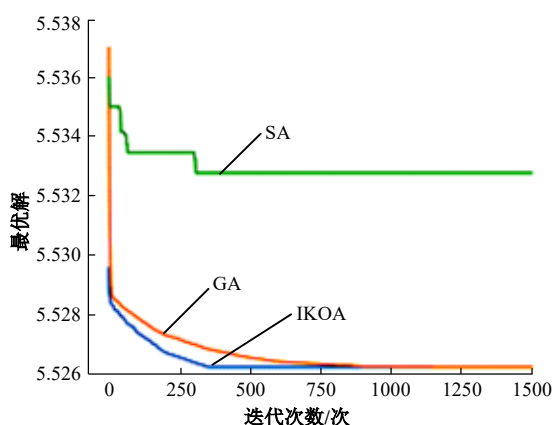


图 9 算法性能对比图

Fig. 9 Algorithm performance comparison chart

4 结 论

(1) 本文模型能够在有效降低用户个人成本的同时,显著提高区域停车场利用率的均衡性,避免停车资源利用不均衡所带来的问题。

(2) 相较于 M-PA 模型和 O-PA 模型,本文模型在减少停车行为对交通压力的影响方面具有明显优势,对停车场附近的重点路段,其路段阻抗增长率最高分别降低了 10.3%、33.6%。

(3) 针对本文所提出的停车分配问题,所改进的开普勒优化算法相较于遗传算法和模拟退火算法有着更快的收敛速度以及更优的搜索能力。

参考文献:

[1] Shoup D C. Cruising for parking[J]. Transport Policy, 2006, 13(6): 479-486.
[2] Chu C P, Wang C Y, Hu S R. Application of e-tag in pricing road tolls and parking fees for traffic congestion mitigation[J]. Transportation Research Procedia, 2017, 25: 2913-2922.
[3] Bao H X H, Ng J. Tradable parking permits as a

transportation demand management strategy: A behavioural investigation[J]. Cities, 2022, 120: 103463.

- [4] Lin T, Rivano H, Le M F. A survey of smart parking solutions[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2017, 18(12): 3229-3253.
[5] Shao C, Yang H, Zhang Y, et al. A simple reservation and allocation model of shared parking lots[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2016, 71: 303-312.
[6] Jiang B, Fan Z P. Optimal allocation of shared parking slots considering parking unpunctuality under a platform-based management approach[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2020, 142: 102062.
[7] Kim O T T, Tran N H, Pham C, et al. Parking assignment: Minimizing parking expenses and balancing parking demand among multiple parking lots[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2019, 17(3): 1320-1331.
[8] Nakazato T, Fujimaki Y, Namerikawa T. Parking lot allocation using rematching and dynamic parking fee design[J]. IEEE Transactions on Control of Network Systems, 2022, 9(4): 1692-1703.
[9] 卢凯, 林茂伟, 邓兴栋, 等. 停车总成本最小的停车位动态分配与诱导模型[J]. 华南理工大学学报:自然科学版, 2018, 46(9): 82-91, 98.
Lu Kai, Lin Maowei, Deng Xing-dong, et al. Dynamic allocation and inducement model of parking spaces with minimum total parking cost[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2018, 46(9): 82-91, 98.
[10] Wang Y, Chen Q. Dynamic parking allocation model in a multidestination multiple parking lot system[J]. IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, 2022, 14(5): 195-208.
[11] 张水潮, 蔡逸飞, 黄锐, 等. 基于预约需求的共享停车平台泊位分配方法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2020, 20(3): 137-143, 162.
Zhang Shui-chao, Cai Yi-fei, Huang Rui, et al. Shared parking space allocation method considering reservation demand[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2020, 20(3): 137-143, 162.
[12] 刘永红, 罗霞, 胡剑鹏. 考虑临时和预约需求的共享泊位动态分配方法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2022, 22(1): 171-181.
LIU Yonghong, LUO Xia, HU Jianpeng. Dynamic allocation method for shared berth considering imme-

- ciate and reservation demands[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2022, 22(1): 171-181.
- [13] Abdel-Basset M, Mohamed R, Azeem S A A, et al. Kepler optimization algorithm: A new metaheuristic algorithm inspired by Kepler's laws of planetary motion. Knowledge-Based Systems, 2023 (May 23): 268. DOI: 1016/j.knosys. 2023. 110454.

《吉林大学学报(工学版)》2026年征订通知

《吉林大学学报(工学版)》是由教育部主管、吉林大学主办的工学门类学术期刊(ISSN 1671-5497;CN 22-1341/T)。1957年创刊,原名为《吉林工业大学学报》。2000年吉林工业大学合并到新吉林大学,2002年经国家新闻出版总署批准,《吉林工业大学学报》更名为《吉林大学学报(工学版)》。本刊2022年起改为月刊,每月1日出版。

《吉林大学学报(工学版)》为中文综合性科学技术类核心期刊,中国科技期刊卓越行动计划二期项目入选期刊,中国科技核心期刊,教育部优秀科技期刊。主要刊登车辆工程、机械工程、材料科学与工程、动力工程及工程热物理、控制科学与工程、计算机科学与技术、电子科学与技术、信息与通信工程、交通运输工程、农业工程等方面的高水平学术论文和应用技术类论文。目前已被美国《工程索引》(EI Compendex)、美国《化学文摘》(CA)、俄罗斯《文摘杂志》(AJ)、美国《剑桥科学文摘》(CSA)等收录;被国内十几种文摘刊物和数据库转载和收录,影响因子在同类期刊中位居前列。

《吉林大学学报(工学版)》为16开本,国内定价为60元/期,720元/年,公开发行。邮发代号:12-46(国内),BM4549(国外)。国内读者请在邮局订购,国外读者请通过中国国际图书贸易总公司订购,补订者可直接与本刊编辑部联系。

地址:长春市人民大街5988号 吉林大学南岭校区逸夫教育大楼B823室

邮编:130022

电话:(0431)85095297

邮箱:xbgxb@jlu.edu.cn