

基于梯度迭代的阻抗控制曲面跟踪方法仿真

卢承华^{1,2}, 朱明超^{1*}, 王 栋^{1,3}, 吴清文¹

(1.中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2.中国科学院大学, 北京 100049;

3.长光卫星技术有限公司, 吉林 长春 130033)

摘要:针对机器人末端执行器和未知曲面接触时对未知曲面跟踪难的问题,提出一种基于梯度迭代的机器人阻抗控制算法。建立机器人末端执行器与未知曲面接触的阻抗控制模型,并将模型简化为阻尼系数变化的新型阻抗模型;设置与位置、力误差相关的损耗函数作为曲面跟踪与预测效果的度量;通过基于梯度上升迭代的方法优化阻尼系数,在力误差与位置误差允许范围内,找到最优阻尼系数。利用 Matlab 进行的仿真证明,经过 10 次迭代后,曲面跟踪与预测过程的损耗逐渐减小,跟踪位置误差逐渐减小,跟踪力逐渐趋近于理想力,力误差、位置误差表现出收敛趋势且达到设定的误差精度要求,证明了算法针对曲面跟踪与预测应用的有效性,达到了理想目标。

关键词:阻抗控制;曲面跟踪;梯度迭代

中图分类号:TP242 **文献标识码:**B

Simulation of Impedance Control Surface Tracking Method Based on Gradient Iteration

LU Cheng-hua^{1,2}, ZHU Ming-chao^{1*}, WANG Dong^{1,3}, WU Qing-wen¹

(1.Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,

Changchun Jilin 130033, China;

2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3.Changguang Satellite Technology Co.LTD, Changchun Jilin 130033, China)

ABSTRACT: Aiming at the application of tracking the unknown surface when the robot's end-effector contact the unknown surface, a robot impedance control algorithm based on gradient iteration is proposed. Firstly, the impedance control model of the robot end effector in contact with the unknown surface was established, and the model was simplified to a new impedance model with varying damping coefficients. Secondly, we set the loss function related to position and force error as a measure of the surface tracking and prediction effect. Finally, the damping coefficient was optimized by the iterative method based on gradient ascent, and the optimal damping coefficient was found within the allowable range of force error and position error. The simulation experiment conducted by Matlab proves that after 10 iterations, the loss of the surface tracking and prediction process gradually decreases, the tracking position error gradually decreases, the tracking force gradually approaches the ideal force, and the force error and position error show a trend of convergence. The set error range requirements are met, which proves the effectiveness of the algorithm for surface tracking and prediction applications, and achieves the ideal goal.

KEYWORDS: Impedance control; Surface tracking; Gradient iteration

基金项目: 国家自然科学基金(51605465); 吉林省科技发展计划
(20180201020GX)

收稿日期: 2020-12-22 修回日期: 2020-12-27

1 引言

如今,机械臂被广泛应用到去毛刺、焊接、打磨等工业自动化加工等领域,这些工作要求机械臂末端与环境接触并对接触面进行跟踪与预测,且需要同时控制机械臂末端的位置与力信息^[1-2]。针对机械臂末端力与位置的智能控制问题,国内外学者已经开展了很多研究。

力/位混合控制^[3]、阻抗控制^[4]是两种主要的柔顺控制方式。其中,力/位混合控制在控制过程中需要预先对力矩阵或位置矩阵进行选择,即控制过程中需要对力、位置控制模式来回切换,不能同时对二者进行控制,这一缺点大大影响了机器人控制的柔顺性^[4-5]。而阻抗控制避开这一缺点,成为一种性能优良的控制算法。自1985年Hogan提出阻抗控制概念以来,该算法便受到了极大的关注并应用到了机器人控制的各个领域^[6]。Lasky与Hsia首次将阻抗控制应用到力跟踪问题,他们将机械臂与环境接触的模型等效为虚拟的质量-弹簧-阻尼系统,巧妙地简化了控制过程^[7]。

阻抗控制与自适应控制以及学习算法的结合也成为了国内外学者研究的热点。Seul使用自适应控制对阻尼系数进行优化^[8],Liu、段晋军等人对刚度系数进行优化^[8-11],但自适应过程并未显示优化后的阻抗系数。Abdelhamid提出了四种可用于机器人的迭代学习控制方法^[12],李琳、Liang等人将迭代学习应用到了曲面跟踪^[13-15],并对末端轨迹偏差量进行迭代学习,但该算法需要经历较多的迭代次数才能达到理想效果。Li、Ge用基于线性二次调节的强化学习阻抗控制算法权衡并减小力与位置误差^[16-17],Loris利用强化学习与迭代学习步长摩擦力并进行了阻抗力控制^[15],张铁利用强化学习优化了力误差系数^[18],但强化学习具有较高的计算复杂度。

为提升学习效率并简化学习过程,本文提出了一种基于梯度迭代的阻抗控制算法,适用于未知曲面的跟踪过程,可以处理环境参数和机器人动力学的不确定性。通过优化机械臂阻抗模型的等效阻尼系数,减小了跟踪过程中力误差与位置误差,能够在误差允许范围内寻找到最优的阻尼系数且使系统趋于稳定。仿真结果证明,该算法具有较高的效率和较高的精度,具有可行性和正确性。

2 机器人末端与曲面接触模型

机器人与环境接触的过程可分为接触前时刻、接触临界、接触后的交互阶段,如图1(a)-(c)。该模型可以等效为一个二阶质量-弹簧-阻尼系统,其中 x_e 是环境位置, x_c 为机器人末端轨迹, x_r 为机器人参考轨迹。令 $E=x_c-x_r$,其模型可表示如下

$$M \frac{dE(t)^2}{dt^2} + B \frac{dE(t)}{dt} + KE(t) = \Delta F(t) \quad (1)$$

式中 M 是质量矩阵, B 是阻尼矩阵, K 是刚度矩阵, $\Delta F(t)$ 为实际接触力 F 与期望接触力 F_d 之差。该模型的传递函数为

$$K(s) = \frac{1}{Ms^2 + Bs + K} \quad (2)$$

不失一般性,以一维空间举例,只考虑一维空间的机器人末端与曲面接触模型为

$$m\ddot{e} + b\dot{e} + ke = \Delta f \quad (3)$$

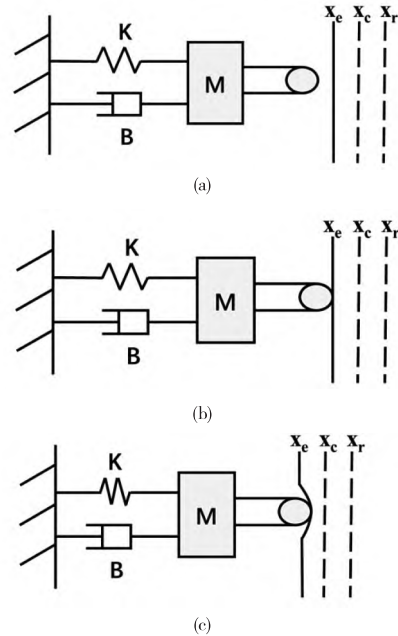


图1 机器人末端与环境接触模型

其中 $e=x_c-x_r$ 。 Δf 可分解为

$$\begin{aligned} \Delta f &= f - f_d \\ &= k_e(x_e - x_c) - f_d \\ &= k_e x_e - k_e x_c - f_d \\ &= k_e x_e - k_e(x_r + k(s)\Delta f) - f_d \end{aligned} \quad (4)$$

将一维空间的传递函数代入得

$$\begin{aligned} \Delta f(ms^2 + bs + k + k_e) \\ = (ms^2 + bs + k)[k_e(x_e - x_r) - f_d] \end{aligned} \quad (5)$$

由此可得稳态力跟踪误差

$$\Delta f_{ss} = \frac{k}{k + k_e}[k_e(x_e - x_r) - f_d] \quad (6)$$

为使(5)式收敛于0,需对 f_d 进行讨论:

若 $f_d=0$,存在 $x_r=x_e$,必然使 $\Delta f_{ss}=0$,因此稳态力跟踪误差收敛于0。

若 $f_d \neq 0, k_e(x_e - x_r) - f_d \neq 0$,因此想要使稳态误差收敛于0,须置 $k=0$,由此机器人末端与曲面接触模型可简化为

$$m\ddot{e} + b\dot{e} = \Delta f \quad (7)$$

其中 $e=x_c-x_r$ 。由于环境参数未知,很难获得精确的参考轨迹,因此以环境位置 x_e 取代参考轨迹 x_r ,则阻抗控制模型为

$$m(\ddot{x}_c - \ddot{x}_e) + b(\dot{x}_c - \dot{x}_e) \Delta f \quad (8)$$

其中

$$\Delta f = f - f_d = m\ddot{e} + b\dot{e}$$

$$\begin{aligned} &= k_e(x_c - x_e) - f_d \\ &= -k_e e - f_d \end{aligned} \quad (9)$$

即

$$m\ddot{e} + b\dot{e} + k_e e = -f_d \quad (10)$$

3 基于梯度迭代的阻抗控制算法

未知曲面跟踪与预测任务要求机器人及环境接触的力尽量小,同时尽量贴合环境位置,因此曲面跟踪与预测效果的好坏与力误差和位置误差有关。定义 e_f 为实际接触力 f 与期望力 f_d 的差, e_x 为机器人末端实际位置 x_e 与环境位置 x_e 的差,即

$$\begin{cases} e_f = f - f_d \\ e_x = x_e - x_e \end{cases} \quad (11)$$

在此,定义损耗函数 Γ 作为曲面跟踪与预测效果的度量,即

$$\Gamma = \gamma_1 e_f^2 + \gamma_2 e_x^2 \quad (12)$$

其中, γ_1 和 γ_2 是力误差与位置误差的权重系数。若机器人任务为纯力跟踪,可设 $\gamma_2 = 0$ 或 $\gamma_1 \gg \gamma_2$,反之同理。

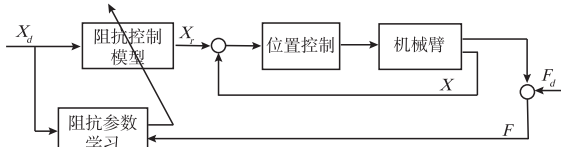


图2 控制结构

在前一节式(7)已经推导出简化后的阻抗控制模型。由于质量矩阵 m 的改变会导致系统不稳定,因此一般将 m 设为定值^[19],如下式

$$m\ddot{e}(t) + b(t)\dot{e}(t) = \Delta f(t) \quad (13)$$

通过优化阻尼系数 b ,可以达到曲面跟踪与预测的良好效果。

本文使用基于梯度迭代的学习方法优化阻尼系数。其优化策略如下

$$b^k = b^{k-1} + \alpha \nabla \Gamma b^{k-1} \quad (14)$$

式中 k 是迭代次数,损耗函数 Γ 是跟踪效果的性能度量, $\nabla \Gamma b^{k-1}$ 是 Γ 对阻尼 b 的梯度, α 是学习速度因子,通过设置 α 的正负控制使用梯度上升与下降。为使系统收敛, α 的赋值需满足 $\|I - \alpha \cdot e_x^k(t)\|_\infty < 1$ 。因此,通过对阻尼 b 的学习可以使损耗函数 Γ 沿着减小的方向发展。由于式(13)中 Γ 与 b 并不具备直接的梯度关系,因此引入实际接触力 f 过渡如下

$$\begin{aligned} b^k(t) &= b^{k-1}(t) + \alpha \left(\frac{\partial \Gamma^{k-1}(t)}{\partial b^{k-1}(t)} \right)^T \\ &= b^{k-1}(t) + \alpha \left(\frac{\partial f^{k-1}(t)}{\partial b^{k-1}(t)} \right)^T \left(\frac{\partial \Gamma^{k-1}(t)}{\partial f^{k-1}(t)} \right)^T \end{aligned} \quad (15)$$

由式(8)、(9)和式(12)知

$$\begin{cases} \frac{\partial \Gamma^{k-1}(t)}{\partial b^{k-1}(t)} = e_x^{k-1}(t) \\ \frac{\partial \Gamma^{k-1}(t)}{\partial f^{k-1}(t)} = e_f^{k-1}(t) \end{cases} \quad (16)$$

因此式(14)可以转化为与误差相关的函数

$$\begin{aligned} b^k(t) &= b^{k-1}(t) + \alpha \cdot (e_x^{k-1}(t))^T \cdot 2\gamma_1 (e_f^{k-1}(t))^T \\ &= b^{k-1}(t) + \gamma (e_x^{k-1}(t))^T (e_f^{k-1}(t))^T \end{aligned} \quad (17)$$

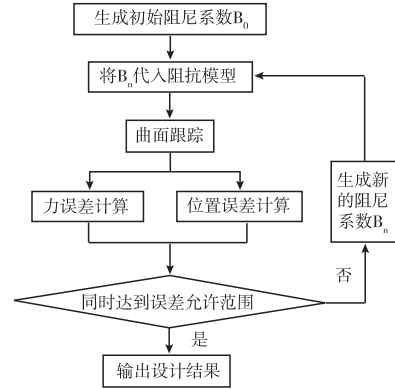


图3 阻抗系数优化流程

4 仿真及结果

4.1 仿真

为验证所提方法的有效性,使用 Matlab Simulink 模块以二自由度机械臂跟踪未知曲面进行仿真。曲面跟踪任务为:在保证机器人末端与曲面有接触的情况下,对曲面轮廓进行检测。

曲面跟踪轮廓为圆心在(1m,1m)处、半径0.2m的圆形二维曲面,曲面刚度系数为,但机器人对曲面信息未知,机器人末端运动的初始位置位于(0.8m,1.0m)处,采样时间0.001s。

为防止机器人的质量矩阵变化给系统带来的不稳定性,将质量矩阵设为定值。阻尼系数的学习采用梯度上升策略,初始值为0,学习速度因子设为10,损耗函数中力误差与位置误差的权重系数、分别设置为2.5、7.5,这表明在此次仿真中,更看重轨迹跟踪的效果,但学习速度因子和权重系数可以依据操作任务需求调整。理想情况下,对于曲面检测,应将理想跟踪力设为0,但为保证机器人与曲面接触,将理想跟踪力设为 N 。将目标理想跟踪力误差定为0.01N,目标理想跟踪位置误差为3mm,当实际跟踪力和跟踪位置误差同时达到跟踪误差精度时,迭代停止。

4.2 仿真结果

经过10次迭代后,曲面跟踪的效果较理想。机器人在与曲面接触前期,接触力波动较大,后期波动较小;随着迭代次数的增加,接触前期波动幅度减小,后期逐渐接近理想跟踪力设定值,其中第10次迭代得到的实际接触力为0.0497N,与理想跟踪力的误差小于0.01N,如图4。迭代前

期,跟踪轨迹与理想轨迹存在一定差距,经过 10 次迭代后,机器人末端已经可以较完美地跟踪曲面轨迹,其中 x 方向的跟踪效果逼近过程如图 5,首次与末次的二维跟踪效果如图 6。

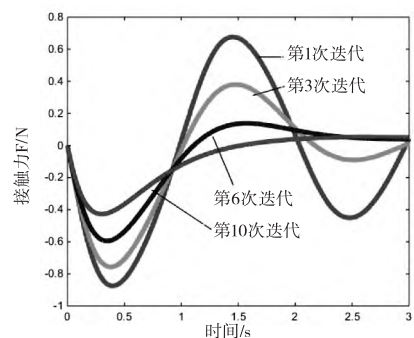


图 4 机器人与曲面力跟踪迭代效果

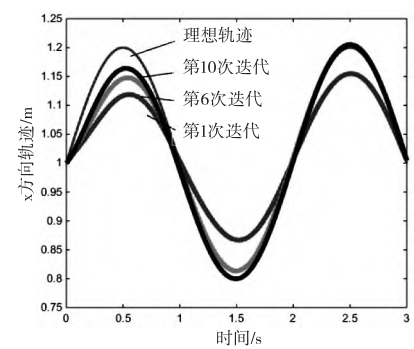


图 5 机器人与曲面跟踪 X 方向位置迭代过程

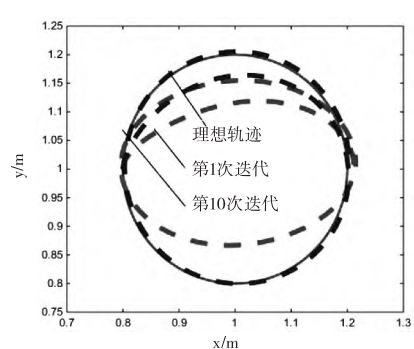


图 6 机器人与曲面轨迹跟踪迭代效果

作为曲面跟踪效果的度量,损耗函数显示了迭代后的曲面跟踪的结果,如图 7。由于损耗函数是与力跟踪误差、位置跟踪误差相关的函数,因此其呈现的变化趋势与图 4 和图 5 相似,但由于误差只可减小并不可消除,因此损耗函数始终为正,但跟踪效果显示,经过 10 次迭代,损耗函数呈现收敛趋势,在第 10 次迭代过程中已经趋近于 0。每次迭代过程中的最大位置跟踪误差是跟踪效果稳定性的评价标准,图 5 显示了 10 次迭代过程中的最大位置误差与描述最大位置误差

变化趋势的最大误差导数,由图可见,二者都呈现收敛趋势,可见该算法稳定性良好。

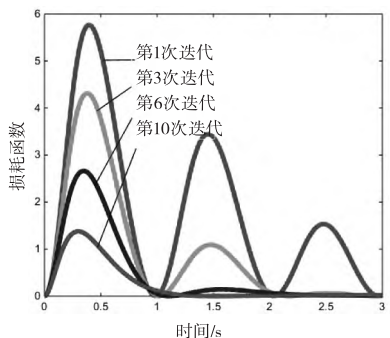


图 7 损耗函数变化

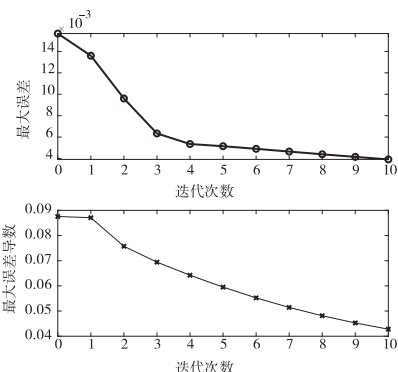


图 8 最大位置误差

在迭代过程中,阻尼系数由初始值 0 开始寻优,经过 10 次迭代后,满足了力跟踪误差和位置跟踪误差,且能够在 0.5s 时间内迅速响应接近最优阻抗系数,如图 7。此时最优的阻尼系数约为 $[24, 0; 0, 24]$ 。

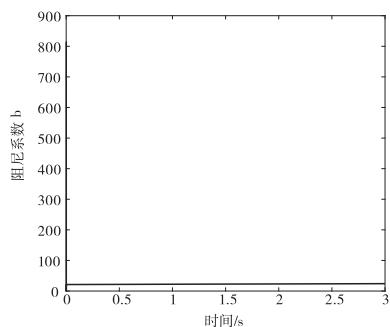


图 9 第 10 次迭代过程中的阻尼系数

5 结束语

本文提出一种基于梯度迭代的阻抗控制算法,适用于机器人对未知环境的曲面跟踪。对机器人末端执行器与曲面接触建立阻尼系数可变的新型阻抗控制模型,使用梯度上升迭代算法对阻尼系数进行优化,能够在短时间内迅速响应至

最优阻尼系数。设置与力误差、位置误差相关的损耗函数作为跟踪效果的度量。仿真结果证明,该算法能够在 10 次迭代后达到理想的控制精度,具有较高的迭代稳定性,能够达到良好的曲面跟踪效果,具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 王雨,孙龙,王玉伟,宁军.风电叶片打磨机器人柔性末端磨削力抗扰控制[J].计算机仿真, 2020,37(7):384-390,413.
- [2] 顾寄南,姜晓丹,高国伟.一种打磨机器人末端执行器的设计与分析[J].机电工程,2017,34(10):1085-1089.
- [3] 余波,李嘉龙,彭楷烽.基于力/位混合控制的机器人打磨[J].机械工程与自动化, 2019,(4):181-183.
- [4] 陈峰,费燕琼,赵锡芳.机器人的阻抗控制[J].组合机床与自动化加工技术, 2005,(12):46-47.
- [5] 殷跃红,朱剑英,魏忠信.机器人力控制研究综述[J].南京航空航天大学学报, 1997,(2):100-110.
- [6] Hogan N.Impedance control: An approach to manipulation: Part II—Implementation[J].Journal of dynamic systems, measurement, and control, 1985,107:8-16.
- [7] Lasky T A, Hsia T.On force-tracking impedance control of robot manipulators [C]. Proceeding of 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation, USA, 1991:274-280.
- [8] Seul J, Hsia T, Bonitz R G.Force tracking impedance control of robot manipulators under unknown environment [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2004,(12):474-483.
- [9] Weifang L, Houde L, Xiaojun Z, et al.Variable stiffness force tracking impedance control using differential-less method[C].Proceeding of the 2017 29th Chinese Control And Decision Conference, Chongqing, 2017:4906-4911.
- [10] Houde L, Weifang L, Xiaojun Z, et al.Force tracking impedance control with moving target[C].Proceeding of the 2017 14th IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, Macau, 2017:1369-1374.
- [11] 甘亚辉,段晋军,戴先中.非结构环境下的机器人自适应变阻抗力跟踪控制方法[J].控制与决策, 2019,34(10):2134-2142.
- [12] Tayebi A.Adaptive iterative learning control for robot manipulators [J].Automatica, 2004,(40):1195-1203.
- [13] 李琳,肖佳栋,张铁,等.基于自适应迭代的机器人曲面恒力跟踪[J].北京航空航天大学学报, 2019,45(4):641-649.
- [14] Xiuquan L, Huan Z, Xiangfei L, et al.Force tracking impedance control with unknown environment via an iterative learning algorithm[C].Proceeding of the 2018 3rd International Conference on Advanced Robotics and Mechatronics, Singapore, 2018:158-164.
- [15] Loris R, Giacomo P, et al.Iterative Learning Procedure with Reinforcement for High-Accuracy Force Tracking in Robotized Tasks [J].IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018,(14):1753-1763.
- [16] Zhijun L, Junqiang L, Zhicong H, et al.Adaptive Impedance Control of Human-Robot Cooperation Using Reinforcement Learning[J].IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017,64:8013-8022.
- [17] Chen W, Yanan L, Shuzhi Sam G.Reference Adaptation for Robots in Physical Interactions with Unknown Environments [J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2017:3504-3515.
- [18] 张铁,肖蒙,邹焱飏,肖佳栋.基于强化学习的机器人曲面恒力跟踪研究[J].浙江大学学报(工学版), 2019,53(10):1865-1873.
- [19] Jinjun D, Yahui G, Ming C.Adaptive variable impedance control for dynamic contact force tracking in uncertain environment [J]. Robotics and Automation Systems,2018,102:54-65.

[作者简介]



卢承华(1995-),女(汉族),山东省青岛市人,硕士研究生,主要研究领域为机器人柔顺控制方法研究。

朱明超(1980-),男(汉族),吉林省长春市人,博士,研究员,硕士生导师,主要研究领域为机器人运

动力学、动力学与控制、惯性稳定平台动力学控制。

王 栋(1982-),男(汉族),山东聊城人,博士,副研究员,研究生导师,主要研究领域为航天器热控制、小卫星总体结构设计。

吴清文(1968-),男(汉族),四川省简阳市人,博士,研究员,博士生导师,主要研究领域为光学精密工程的 CAD/CAE/ CAM 技术。

(上接第 198 页)

- [15] Fan P, Sainbayar B, Ren S.Operation Analysis of Fast Charging Stations With Energy Demand Control of Electric Vehicles [J]. IEEE Transactions on Smart Grid.2015,6(4):1819-1826.
- [16] Mak W, Morton D P, Wood R K.Monte Carlo bounding techniques for determining solution quality in stochastic programs [J].Operations research letters.1999,24(1-2):47-56.
- [17] 陈文龙,安聪荣,王结臣,等.基于网络 Voronoi 图和多目标微粒群的空间选址优化 [J].地理与地理信息科学, 2014,30(03):1-6.

[作者简介]



冯 春(1970-),男(汉族),四川巴中人,教授,博士生导师,主要研究领域为物流与供应链管理、人道救援物流、复杂网络。

陈木泉(1994-),男(汉族),福建漳州人,硕士研究生,主要研究领域为充电站选址与优化。

蒋 雪(1996-),女(汉族),四川简阳人,硕士研究生,主要研究领域为物流设施选址与优化。