

DOI:10.19431/j.cnki.1673-0062.2019.01.013

一种基于扩展多维尺度分析的协作定位算法

曹阿龙, 章 平, 刘 涛*

(安徽工程大学 计算机与信息学院, 安徽 芜湖 241000)

摘 要:针对经典 MDS(multi-dimensional scaling)算法中心化矩阵的局限性,提出了一种扩展 MDS 算法。具体地,首先推导出了 MDS 算法中生成相对地图所需的中心化矩阵的满足条件,然后根据条件寻找可以获得更高定位精度的中心化矩阵。理论分析与仿真实验表明,节点的定位精度得到了提升。

关键词:无线传感网络;节点定位;中心化矩阵;MDS 算法

中图分类号:TP393 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-0062(2019)01-0067-06

A Cooperative Location Algorithm Based on Extended Multidimensional Scaling Analysis

CAO Along, ZHANG Ping, LIU Tao*

(School of Computer Science, Anhui Polytechnic University, Wuhu, Anhui 241000, China)

Abstract: Aiming at the limitation of the classical MDS(multi-dimensional scaling) algorithm centralization matrix, an extended MDS algorithm is proposed. Specifically, the satisfaction condition of the centralization matrix required to generate the relative map in the MDS algorithm is first derived, and then the centralization matrix which can obtain higher positioning accuracy is found according to the condition. Theoretical analysis and simulation experimental results show that, node localization accuracy has been improved.

key words: wireless sensor networks; node location; centralization matrix; MDS algorithm

0 引 言

无线传感器网络(wireless sensor networks,

WSN)是由大量分布式传感器节点组成的网络,最初是为军事应用而开发的。现今无线传感网络已经广泛用于工业和民用应用领域,如工业过程

收稿日期:2018-08-07

基金项目:国家自然科学基金项目(61501005);安徽省高等教育提升计划自然科学研究一般项目(TSKJ2015B10);安徽工程大学科研启动基金项目(2015YQQ010)

作者简介:曹阿龙(1995-),男,硕士研究生,主要从事无线定位、无线传感网络、物联网等方面的研究. E-mail: 154351635@qq.com. *通信作者:刘 涛(1973-),女,教授,主要从事计算机网络与信息安全、无线传感网络等方面的研究. E-mail: liutao@ahpu.edu.cn

监测与控制,机器健康监测,环境与栖息地监测,医疗保健应用和交通控制等^[1-2]。在传感器节点从环境中取样(光照度、气温和湿度等)之后,会通过网络将数据传递到汇聚节点,由汇聚节点进行数据处理。但是由于部署在广大地区的传感器节点的无线电通信范围较小,因此测量信息不能直接发送到汇聚节点。所以每个传感器会将数据发送到其最近的负责重新传输数据包的邻居节点,通过节点之间的相互协作实现数据传输。在无线传感网络的路由方面,有许多跳协议可以提供最佳的通信成本^[3]。

节点的定位是无线传感网络中的一个重要应用,寻找确切的物理位置对于持续的网络运行和无线传感器网络管理至关重要^[4]。如将无线传感网络用于监测森林中的温度,使用飞机抛洒方式进行节点部署,大多数传感器节点的精确位置是未知的,需要对这些未知位置的传感器节点进行定位。其中一个解决方案是为所有节点都配备一个全球定位系统(global positioning system, GPS)对节点进行定位,但这需要很高的成本。目前,尽管许多学者已经提出了大量的、不同的技术来解决节点定位问题,但目前它仍然是一个具有挑战性的问题^[5-6]。

多维尺度(multi-dimensional scaling, MDS)是一套分析技术,已经在数学心理学,经济学和市场研究等学科中使用了多年。它是一种适用于降低数据维数的方法。这种技术也可以用于只有节点间距离已知的无线传感网络。每个节点之间的距离测量可以被用作输入数据。由于MDS是一种集中式技术,因此所有测量均在进一步处理的汇聚节点处收集。使用MDS的主要优点是即使在没有锚节点时也能够重建网络的相对映射。如果给定足够数量的锚节点,MDS可以得到非常准确的位置估计,从而可以将相对地图转换为绝对地图。

在MDS算法中,用于生成相对地图的中心化矩是一个满足某些条件的矩阵集合,即有许多可以满足条件的矩阵,MDS算法中的中心化矩阵是一个特例。本文通过节点间的距离关系来推导出MDS算法相对地图生成时所用的中心化矩阵的满足条件,并通过随机搜索的方式来找出大量性能更好的矩阵。根据中心化矩阵的条件研究不同的中心化矩阵对定位精度的影响,并寻找可以获得更高定位精度的中心化矩阵,从而提高MDS算

法的定位效果,但是如何事先构造矩阵仍需进一步的研究。

1 相关工作

许多研究小组已经研究了不同的无线传感网络节点定位技术。在过去几年中提出的大多数技术基本上可以分为两类:测距定位和非测距定位^[7]。非测距定位也被称“基于跳数”的定位方法,使用跳数或连接信息来确定节点的位置^[5,8]。测距定位使用不同的信号测量技术来估计相邻节点之间的距离或角度等信息^[9-10]。接收信号强度指示(received signal strength of indicator, RSSI)^[11]是测量接收到的无线电信号功率的最常用的信号测量技术。其他流行的技术还有到达角度(arrival of angle, AOA)^[12]、到达时间(time of arrival, TOA)^[13]、到达时间差(time difference of arrival, TDOA)^[14-15]。TDOA方法非常准确,但是在非视距(non-line of sight, NLOS)环境下,其性能显著下降。AOA定位技术比基于RSSI的定位技术定位效果更好,但是需要配备额外硬件的传感器,相比于RSSI更加昂贵。所以RSSI是最常用的距离测量解决方案。

基于多维尺度(MDS)的算法是基于测距的定位算法。学者们提出了多种不同版本的MDS用于节点的位置估计^[16-17]。最受欢迎的是由Y. Shang和W. Ruml在文献[16]中提出的MDS-MAP。他们表明,MDS-MAP性能优于其他技术,特别是在节点密集网络上的应用。MDS-MAP基于经典的MDS,由以下三个步骤组成:

1) 计算每对节点之间的最短距离(使用Dijkstra's或Floyd算法得到的所有节点之间的最短路径)。

假设无线传感网络中的 N 个节点部署在一个二维平面上,由所有节点坐标组成的向量为:

$$\mathbf{X} = [X_1, \dots, X_N]^T \quad i = 1, \dots, N \quad (1)$$

其中 X_i 代表节点 i 的坐标

$$X_i = [x_i, y_i] \quad (2)$$

节点 i 和节点 j 之间的欧几里得距离为

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (3)$$

d_{ij} 表示节点 i 和节点 j 之间的估计距离。当节点 i 和节点 j 相邻时,即在彼此的通信范围内, d_{ij} 是节点之间的测量距离。否则, d_{ij} 是由Dijkstra's或Floyd算法计算出来的最短路径。

D 是对称的 N 维距离矩阵,其元素是所有节点之间的估计距离。

$$D = \begin{bmatrix} 0 & d_{12}^2 & d_{13}^2 & \cdots & d_{1N}^2 \\ d_{21}^2 & 0 & d_{23}^2 & \cdots & d_{2N}^2 \\ d_{31}^2 & d_{32}^2 & 0 & \cdots & d_{3N}^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{N1}^2 & d_{N2}^2 & d_{N3}^2 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

2) MDS 利用距离矩阵生成相对地图
矩阵 B 表示为矩阵 D 的双中心形式

$$B = -JD^2J/2 \quad (5)$$

其中 $J = I - N^{-1}ee^T$, I 是 N 阶的单位矩阵, e 是全 1 向量,其中所有元素都是 1。另外,矩阵 B 也可以表示如下形成:

$$B = XX^T \quad (6)$$

如果已知矩阵 D 和中心矩阵 J ,则可以通过奇异值分解(singular value decomposition, SVD)方法求解节点的相对坐标^[18]。

令 A 为由 SVD 得到的特征值组成的矩阵, V 为由相应的特征向量组成的矩阵,则

$$\begin{aligned} B &= VAV^T + V(A^{1/2} \times A^{1/2})V^T \\ &= (VA^{1/2}) \times (VA^{1/2}) \end{aligned} \quad (7)$$

由方程(6)和(7)可得

$$X = VA^{1/2} \quad (8)$$

得到相对地图,即所有节点的相对坐标。

3) 相对地图通过坐标转换为绝对地图

对于某些无线传感网络应用,只有了解节点的绝对坐标才能满足实际需要。在需要使用节点

的绝对坐标的情况下,可以通过坐标转换将相对坐标转换成绝对坐标,也称为坐标系转换^[19]。在坐标转换过程中,相对坐标 x 通过平移 t ,比例 s 和旋转 R 被转换成绝对坐标 x' 。

$$x' = sRx + t \quad (9)$$

存在其他基于 MDS 的方法,但是它们更复杂,因此更依赖于计算。如 MDS-MAP(P)^[20],它是基于分布方法的 MDS-MAP 的改进。对于不规则网络拓扑结构,它的定位效果比 MDS-MAP 更好,但是算法复杂度更大,需要节点有着更多的计算资源。在 MDS-MAP(P)中,网络中的每个节点使用 MDS-MAP 在其两跳邻居内计算局部定位图。然后所有的局部定位图都合并成一张全局定位图。在文献[21]中提出了一种对文献[20]的改进方案,其中定位基于有序的 MDS 算法。MDS 的这种变化假设存在一个线性方程,它将每对节点之间的最短路径距离和欧几里得距离相关联,定位效果更好。

2 基于扩展多维尺度分析的协作定位算法

假设 N 个节点部署在一个二维平面上,它们所对应的节点坐标为 $X_i = (x_i, y_i)$, $i = 1, 2, 3, \dots, N$ 。若节点间的两两距离已知,则距离矩阵 D 是一个 $N \times N$ 的方阵,表示任意 X_i 与 X_j 之间的估算距离。则可知距离矩阵的平方 D^2 可由式(10)表示

$$\begin{aligned} D^2 &= \begin{bmatrix} \|X_1 - X_1\|^2 & \|X_1 - X_2\|^2 & \|X_1 - X_3\|^2 & \cdots & \|X_1 - X_N\|^2 \\ \|X_2 - X_1\|^2 & \|X_2 - X_2\|^2 & \|X_2 - X_3\|^2 & \cdots & \|X_2 - X_N\|^2 \\ \|X_3 - X_1\|^2 & \|X_3 - X_2\|^2 & \|X_3 - X_3\|^2 & \cdots & \|X_3 - X_N\|^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \|X_N - X_1\|^2 & \|X_N - X_2\|^2 & \|X_N - X_3\|^2 & \cdots & \|X_N - X_N\|^2 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \|X_1^2\| \\ \|X_2^2\| \\ \|X_3^2\| \\ \vdots \\ \|X_N^2\| \end{bmatrix} 1_N^T - 2 \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ \vdots \\ X_N \end{bmatrix} [X_1^T \ X_2^T \ X_3^T \ \cdots \ X_N^T] + 1_N \begin{bmatrix} \|X_1^2\| \\ \|X_2^2\| \\ \|X_3^2\| \\ \vdots \\ \|X_N^2\| \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (10)$$

其中 1_N 为 $n \times 1$ 阶全 1 矩阵,若想由距离的平方 D^2 的求出节点的相对坐标,则需要将上式中第一项与第三项消掉,在经典 MDS 算法中,中心化矩阵 J 满足 $J = I - N^{-1}ee^T$,实际上 J 是满足一定条

件的矩阵集合, J 需要满足

$$\begin{cases} 1_N^T J^T = 0 \\ J 1_N = 0 \end{cases} \quad (11)$$

若 J 满足上述条件,令

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ \vdots \\ X_N \end{bmatrix} [X_1^T \ X_2^T \ X_3^T \ \cdots \ X_N^T] \quad (12)$$

即可得到

$$\mathbf{J}\mathbf{B}\mathbf{J}^T = -0.5 \times \mathbf{J} \times \mathbf{D}^2 \times \mathbf{J}^T \quad (13)$$

令 $\mathbf{A}$ 为由 SVD 得到的特征值组成的矩阵, $\mathbf{V}$ 为由相应的特征向量组成的矩阵, 则可以通过奇异值分解(SVD)方法求解节点的相对坐标。

$$\mathbf{J}\mathbf{B}\mathbf{J}^T = \mathbf{V}\mathbf{A}\mathbf{V}^T = \mathbf{V}(\mathbf{A}^{1/2} \times \mathbf{A}^{1/2})\mathbf{V}^T$$

$$= (\mathbf{V}\mathbf{A}^{1/2}) \times (\mathbf{V}\mathbf{A}^{1/2})^T \quad (14)$$

$$\mathbf{X} = \mathbf{J}^{-1}\mathbf{V}\mathbf{A}^{1/2} \quad (15)$$

需要寻找满足式(11)的 $\mathbf{J}$ 矩阵。

$$\text{令 } \mathbf{J} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (16)$$

则由式(11)可得:

$$\begin{cases} a_{11} + a_{12} + \cdots + a_{1n} = 0 \\ a_{21} + a_{22} + \cdots + a_{2n} = 0 \\ \vdots \\ a_{n1} + a_{n2} + \cdots + a_{nn} = 0 \\ a_{11} + a_{21} + \cdots + a_{n1} = 0 \\ a_{12} + a_{22} + \cdots + a_{n2} = 0 \\ \vdots \\ a_{1n} + a_{2n} + \cdots + a_{nn} = 0 \end{cases} \quad (17)$$

$$\begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} & & & \\ & a_{21} & \cdots & a_{2n} & & \\ & & \ddots & & \ddots & \\ & & & a_{n1} & \cdots & a_{nn} \\ a_{11} & & & & & \\ & a_{21} & & & & \\ & & \ddots & & & \\ & & & a_{n1} & & \\ a_{1n} & & & & a_{2n} & \\ & & & & & a_{nn} \end{bmatrix} \mathbf{x} = 0 \quad (18)$$

式(18)的通解 $k_1\xi_1 + k_2\xi_2 + k_3\xi_3 + \cdots + k_{(n-1)}\xi_{(n-1)} + k_{(n-2)}\xi_{(n-2)}$ 即为满足条件的所有 $\mathbf{J}$ 矩阵, 其中 k 为任意常数。

3 仿真实验

实验平台: WIN7+MATLAB 2014a。实验环境与场景: 矩形随机网络、C 型随机网络; 2-D 平面 50 m×50 m 的区域内随机分布 50 个节点。在实验场景的两种网络拓扑下, 随机部署 50 个节点,

在不同连通度的情况下, 通过求解方程式(18)的基础解系可以得到所有满足的中心化矩阵的通解。在仿真实验中, 方程通解的未知量 k 的范围设置在 $[-1, 1]$ 之间, 仿真 10 000 次, 利用 Procrustes 坐标作为相对构型的坐标表示^[22], 将 Procrustes 坐标与原始坐标的均方误差 t_{Error} 作为评价标准。

$$t_{\text{Error}} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (X_k - Y_k)^2 \quad (19)$$

其中 X_k 为节点的真实坐标, Y_k 为 Procrustes 坐标。

该实验的矩形随机网络、C 型随机网络的原始节点分布与定位误差分别如图 1~图 4 所示。

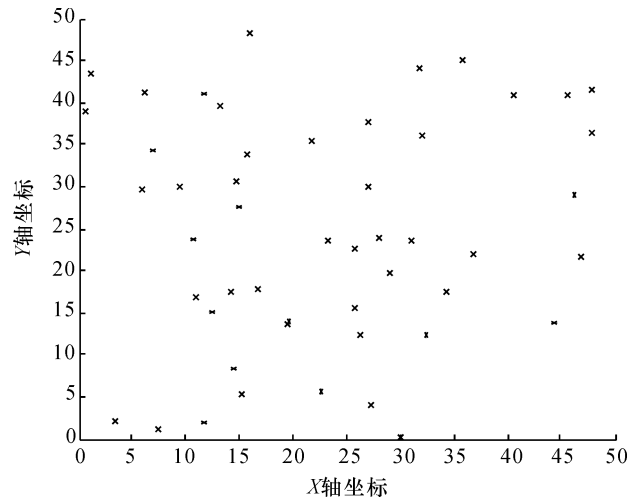


图1 矩形网络节点分布图

Fig.1 Rectangular network node distribution map

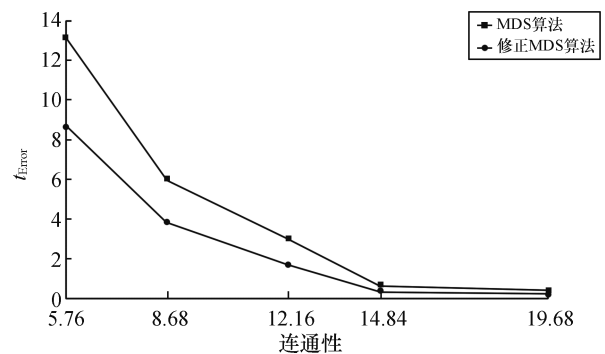


图2 矩形网络连通性的影响

Fig.2 Impact of rectangular network connectivity

从上面的仿真结果可以看出, 随着连通性的变大, MDS 算法与本文的算法定位误差都在减小, 但是本文算法所使用的中心化矩阵的定位误差要小于 MDS 算法。可见, 中心化矩阵的生成对

于相对地图的生成有一定的影响,选取合适的中心化矩阵可以提高定位的精度。

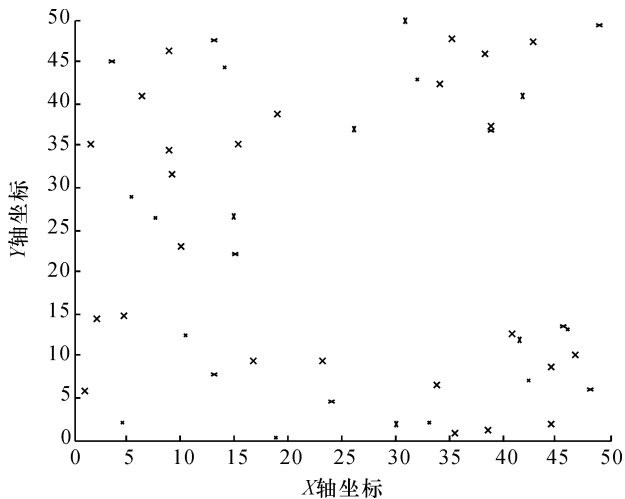


图3 C型网络节点分布图

Fig. 3 Distribution map of C-type network nodes

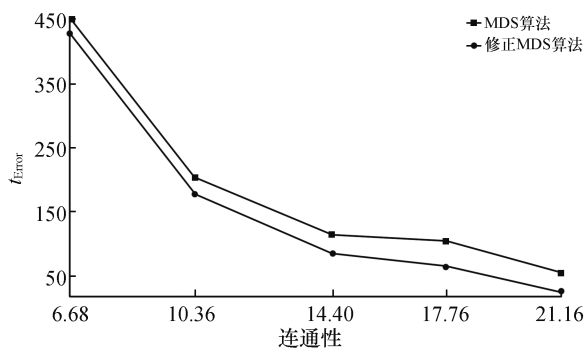


图4 C型网络连通性的影响

Fig. 4 Impact of Type C network connectivity

4 结 论

本文在仿真实验的基础上,通过设计合适的双中心化矩阵 J ,使得相对坐标所生成的相对地图与初始地图的拟合度更高,从而可以在不改变算法复杂度的情况下使得坐标的估计更加精确,提供了一种对MDS算法改进的新思路。但是在实验中,只有在固定的坐标下可以找到更好的中心化矩阵,具有一定的限制性,后期将矩阵放在其它条件下进行实验,寻找一个具有普遍适用性的矩阵。

参考文献:

- [1] 李聃. 无线传感器网络节点定位技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2017.
- [2] 汪炀. 无线传感器网络定位技术研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2007.
- [3] 代泽兰. 无线传感器网络路由协议的研究与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2010.
- [4] 赵雁航, 钱志鸿, 尚小航, 等. 基于跳距修正粒子群优化的WSN定位算法[J]. 通信学报, 2013, 34(9): 105-114.
- [5] WANG J, GHOSH R K, DAS S K. A survey on sensor localization[J]. Control theory and technology, 2010, 8(1): 2-11.
- [6] 钱志鸿, 孙大洋, VICTOR L. 无线网络定位综述[J]. 计算机学报, 2016, 39(6): 1237-1256.
- [7] 万国峰, 钟俊, 杨成慧. 改进的RSSI测距和定位算法[J]. 计算机应用研究, 2012, 29(11): 4156-4158.
- [8] 高晓君. 无线传感器网络非测距定位算法研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2017.
- [9] HAN G, JIANG J, ZHANG C, et al. A survey on mobile anchor node assisted localization in wireless sensor networks[J]. IEEE Communications surveys & tutorials, 2016, 18(3): 2220-2243.
- [10] QUAN Y U, SUN S, BAOGUO X U, et al. Node localization in wireless sensor networks based on improved particle swarm optimization[J]. Journal of computer applications, 2015, 35(6): 1519-1522.
- [11] 郗剑文, 贾方秀, 李兴隆, 等. 基于组合测距的无线传感器网络自定位算法[J]. 传感技术学报, 2016, 29(5): 739-744.
- [12] 张文华, 于洁潇, 刘开华, 等. 联合TDOA-AOA无线传感器网络半定规划定位算法研究[J]. 传感技术学报, 2017, 30(9): 1375-1380.
- [13] 许佩佩. 基于TOA方案的超宽带室内定位技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.
- [14] 张会新, 陈德沅, 彭晴晴, 等. 一种改进的TDOA无线传感器网络节点定位算法[J]. 传感技术学报, 2015, 28(3): 412-415.
- [15] ZHANG P, LU J, WANG Q. Performance bounds for relative configuration and global transformation in cooperative localization[J]. ICT Express, 2016, 2(1): 14-18.
- [16] SHANG Y, RUMI W, ZHANG Y, et al. Localization from mere connectivity[C]//ACM international symposium on mobile ad hoc NETWORKING & Computing. Maryland, USA: ACM, 2003: 201-212.
- [17] WANG J, MA Y, ZHAO Y, et al. A multipath mitigation localization algorithm based on MDS for passive UHF RFID[J]. IEEE communications letters, 2015, 19(9): 1652-1655.
- [18] WEI C, WU C, WEI M, et al. Dynamic multidimensional scaling algorithm for 3-D mobile localization[J]. IEEE

- transactions on instrumentation & measurement, 2016, 65(12):2853-2865.
- [19] WEI M, ARAGUES R, SAGUES C, et al. Noisy range network localization based on distributed multidimensional scaling[J]. IEEE sensors journal, 2015, 15(3): 1872-1883.
- [20] SHANG Y, RUMMLER W. Improved MDS-based localization [C]//Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Hong Kong, China: IEEE, 2004: 2640-2651.
- [21] VIVEKANANDAN V, Wong V W S. Ordinal MDS-Based localization for wireless sensor networks[C]//Vehicular technology conference. Melbourne, Australia: IEEE, 2006: 1-5.
- [22] 章平. 无线传感器网络协作定位的性能分析[D]. 南京: 东南大学, 2014.

(责任编辑:周泉)

(上接第51页)

参考文献:

- [1] SERGIENKO I V, DEINEKA V S. Optimal control of a conventionally correct system with conjugation conditions [J]. Journal cybernetics and systems Analysis, 2002, 38(4):509-526.
- [2] SERGIENKO I V, DEINEKA V S. Optimal control of an elliptic-parabolic system with conjugation conditions[J]. Journal cybernetics and systems analysis, 2003, 39(3): 402-418.
- [3] SERGIENKO I V, DEINEKA V S. Optimal control of distributed systems with conjugation conditions[M]. Nuoweier; Kluwer Academic publishers, 20015.
- [4] 王丽丽. 一维半线性抛物方程自由边界问题的局部零能控性和时间最优控制的存在性[D]. 长春: 东北师范大学, 2018.
- [5] 张灿. 一类抛物型发展方程的时间最优控制问题[D]. 武汉: 武汉大学, 2014.
- [6] 郑国杰, 马宝林, 李钧涛. 分数阶抛物方程控制系统最优控制的稳定性(英文)[J]. 数学杂志, 2015, 35(4): 800-808.
- [7] 钱坤. 基于最优控制理论的退化抛物型方程的源项反演问题[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2014.
- [8] 张博. 抛物型偏微分方程最优控制问题区域分解算法及其先验误差估计[D]. 上海: 华东师范大学, 2011.
- [9] 汤国生. 两类抛物型方程的最优控制[D]. 镇江: 江苏大学, 2006.

(责任编辑:扶文静)