

# 路径规划算法及其应用综述\*

张广林 胡小梅 柴剑飞 赵磊 俞涛

(上海市机械自动化与机器人重点实验室 上海大学 上海 200072)

**摘要:** 路径规划技术是目前很多技术领域研究的热点,具有广阔的应用前景和科研价值,而路径规划算法的研究是其中的核心内容。文章系统地总结了现今国内外路径规划智能算法的主要研究成果,并对其优缺点进行了分析比较。而后对目前研究热门的路径规划问题进行了分类总结,分析了他们各自的应用算法。最后,提出了路径规划算法的进一步研究方向。

**关键词:** 路径规划 遗传算法 蚁群算法 A\* 算法 粒子群算法 Dijkstra 算法 人工势场法

**中图分类号:** TP39 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-6886(2011)05-0085-06

## Summary of Path Planning Algorithm and its Application

ZHANG Guanglin HU Xiaomei CHAI Jianfei ZHAO Lei YU Tao

**Abstract:** Path planning technology is a hot spot of many area at present. It has broad application prospects and scientific value. And the research of the path planning algorithm is the core of it. In this paper, the domestic and foreign research of nowadays path planning algorithm were summarized. And their advantages and disadvantages were analyzed and compared. Then, the hot problems that applied these path planning algorithm were classified and summarized, and the algorithms that applied to these problems were analyzed. At last, the further research direction of path planning was proposed.

**Key words:** path planning; genetic algorithm; ant colony algorithm; A\* algorithm; particle swarm optimization; dijkstra algorithm Artificial potential field

## 0 引言

路径规划技术<sup>[1-2]</sup>在很多领域都具有广泛的应用。在高科技领域的应用有:机器人的自主无碰行动;无人机的避障突防飞行;巡航导弹躲避雷达搜索、防反弹袭击、完成突防爆破任务等。在日常生活领域的应用有:GPS导航;基于GIS系统的道路规划;城市道路网规划导航等。在决策管理领域的应用有:物流管理中的车辆问题(VRP)及类似的资源管理资源配置问题。通信技术领域的路由问题等。凡是可拓扑为点线网络的规划问题基本上都可以采用路径规划的方法解决。

路径规划的核心就是算法的设计,路径规划算法<sup>[3]</sup>目前已经得到了广泛的关注,从传统算法到后来的结合仿生学发展起来的算法,智能算法已经取得了巨大的进展。不同的智能算法特点不同,适用范围和领域也就不同,因而从算法本身特点及其应用来研究路径规划智能算法,对路径规划技术的发展具有重要意义。

## 1 路径规划及其智能算法综述

### 1.1 路径规划问题的分类

根据对环境信息的把握程度可把路径规划划分为基

于先验完全信息的全局路径规划和基于传感器信息的局部路径规划<sup>[4-6]</sup>。其中,从获取障碍物信息是静态或是动态的角度看,全局路径规划属于静态规划(又称离线规划),局部路径规划属于动态规划(又称在线规划)。全局路径规划需要掌握所有的环境信息,根据环境地图的所有信息进行路径规划;局部路径规划只需要由传感器实时采集环境信息,了解环境地图信息,然后确定出所在地图的位置及其局部的障碍物分布情况,从而可以选出从当前结点到某一子目标结点的最优路径。

根据所研究环境的信息特点,路径规划还可分为离散域范围内的路径规划问题和连续域范围内的路径规划问题。离散域范围内的路径规划问题属于一维静态优化问题,相当于环境信息简化后的路线优化问题;而连续域范围内的路径规划问题则是连续性多维动态环境下的问题。

### 1.2 路径规划的一般步骤

一般的连续域范围内路径规划问题,如机器人、飞行器等的动态路径规划问题,其一般步骤主要包括环境建模、路径搜索、路径平滑三个环节<sup>[7-8]</sup>。

1) 环境建模。环境建模是路径规划的重要环节,目的是建立一个便于计算机进行路径规划所使用的环境模

型 即将实际的物理空间抽象成算法能够处理的抽象空间 实现相互间的映射。

2) 路径搜索。路径搜索阶段是在环境模型的基础上应用相应算法寻找一条行走路径 使预定的性能函数获得最优值。

3) 路径平滑。通过相应算法搜索出的路径并不一定是一条运动体可以行走的可行路径 需要作进一步处理与平滑才能使其成为一条实际可行的路径。

对于离散域范围内的路径规划问题 或者在环境建模或路径搜索前已经做好路径可行性分析的问题 路径平滑环节可以省去。

### 1.3 常用路径规划算法

路径规划的方法有很多 根据其自身优缺点 其适用范围也各不相同。根据对各领域常用路径规划算法的研究 按照各种算法发现先后时序及算法基本原理 将算法大致分为四类: 传统算法、图形学的方法、智能仿生学算法和其他算法<sup>[9-10]</sup>。

#### (1) 传统算法

传统的路径规划算法有: 模拟退火算法、人工势场法、模糊逻辑算法、禁忌搜索算法等。

1) 模拟退火算法<sup>[11-13]</sup> (Simulated Annealing, 简称 SA) 是一种适用于大规模组合优化问题的有效近似算法。它模仿固体物质的退火过程 通过设定初温、初态和降温率控制温度的不断下降 结合概率突跳特性 利用解空间的邻域结构进行随机搜索。具有描述简单、使用灵活、运行效率高、初始条件限制少等优点 但存在着收敛速度慢、随机性等缺陷 参数设定是应用过程中的关键环节。

2) 人工势场法<sup>[14-16]</sup> 是一种虚拟力法。它模仿引力斥力下的物体运动 目标点和运动体间为引力 运动体和障碍物间为斥力 通过建立引力场斥力场函数进行路径寻优。优点是规划出来的路径平滑安全、描述简单等 但是存在局部最优的问题 引力场的设计是算法能否成功应用的关键。

3) 模糊逻辑算法<sup>[17]</sup> 模拟驾驶员的驾驶经验 将生理上的感知和动作结合起来 根据系统实时的传感器信息, 通过查表得到规划信息 从而实现路径规划。算法符合人类思维习惯 免去数学建模, 也便于将专家知识转换为控制信号 具有很好的一致性、稳定性和连续性。但总结模糊规则比较困难 而且一旦确定模糊规则在线调整困难, 应变性差。最优的隶属度函数、控制规则及在线调整方法是最大难题。

4) 禁忌搜索算法<sup>[18]</sup> (TS) 是一种全局逐步寻优算法, 是对人类智力过程的一种模拟。通过引入一个灵活的存储结构和相应的晋级规则来避免与会搜索 并通过藐视准

则来赦免一些被紧急的优良状态 以实现全局优化。

#### (2) 图形学的方法

传统算法在解决实际问题时往往存在着建模难的问题 图形学的方法则提供了建模的基本方法 但是图形学的方法普遍存在着搜索能力的不足 往往需要结合专门的搜索算法。图形学的方法有: C 空间法、栅格法、自由空间法、voronoi 图法等。

1) C 空间法又称可视图空间法<sup>[19]</sup> 即在运动空间中扩展障碍物为多边形 以起始点、终点和所有多边形顶点间的可行直线连线(不穿过障碍物的连线) 为路径范围来搜索最短路径。C 空间法的优点是直观 容易求得最短路径; 缺点是一旦起始点和目标点发生改变 就要重新构造可视图 缺乏灵活性。即其局部路径规划能力差 适用于全局路径规划和连续域范围内的路径规划。尤其适用于全局路径规划中的环境建模。

2) 自由空间法<sup>[20]</sup> 针对可视图法应变性差的缺陷 采用预先定义的基本形状(如广义锥形、凸多边形等) 构造自由空间 并将自由空间表示为连通图 然后通过对图的搜索来进行路径规划。由于起始点和终点改变时 只相当于它们在已构造的自由空间中位置变化 只需重新定位, 而不需要整个图的重绘。缺点是障碍物多时将加大算法的复杂度 算法实现困难。

3) 栅格(grid)法<sup>[21-22]</sup> 即用编码的栅格来表示地图, 把包含障碍物的栅格标记为障碍栅格, 反之则为自由栅格 以此为基础作路径搜索。栅格法一般作为路径规划的环境建模技术来用 作为路径规划的方法它很难解决复杂环境信息的问题, 一般需要与其他智能算法相结合。

4) voronoi 图<sup>[23-24]</sup> 是关于空间邻近关系的一种基础数据结构。它是用一些被称为元素的基本图形来划分空间, 以每两点间的中垂线来确定元素的边 最终把整个空间划分成结构紧凑的 voronoi 图 而后运用算法对多边形的边所构成的路径网进行最优搜索。优点是把障碍物包围在元素中 能实现有效避障 缺点图的重绘比较费时 因而不适用于大型动态环境。

#### (3) 智能仿生学算法

处理复杂动态环境信息情况下的路径规划问题时, 来自于自然界的启示往往能起到很好的作用。智能仿生学算法就是人们通过仿生学研究 发现的算法 常用到的有: 蚁群算法、神经网络算法、粒子群算法、遗传算法等。

1) 蚁群算法<sup>[25-26]</sup> (Ant Colony Algorithm, 简称 ACA) 的思想来自于对蚁群觅食行为的探索 每个蚂蚁觅食时都会在走过的道路上留下一定浓度的信息素 相同时间内最短的路径上由于蚂蚁遍历的次数多而信息素浓度高 加上后来的蚂蚁在选择路径时会以信息素浓度为依据 起到正

反馈作用,因此信息素浓度高的最短路径很快就会被发现。算法通过迭代来模拟蚁群觅食的行为达到目的。具有良好的全局优化能力、本质上的并行性、易于用计算机实现等优点,但计算量大、易陷入局部最优解,不过可通过加入精英蚁等方法改进。

2) 神经网络算法<sup>[27]</sup>是人工智能领域中的一种非常优秀的算法,它主要模拟动物神经网络行为,进行分布式并行信息处理。但它在路径规划中的应用却并不成功,因为路径规划中复杂多变的环境很难用数学公式进行描述,如果用神经网络去预测学习样本分布空间以外的点,其效果必然是非常差。尽管神经网络具有优秀的学习能力,但是泛化能力差是其致命缺点。但因其学习能力强鲁棒性好,它与其他算法的结合应用已经成为路径规划领域研究的热点。

3) 遗传算法<sup>[28,29]</sup>(Genetic Algorithms,简称GA)是当代人工智能科学的一个重要研究分支,是一种模拟达尔文遗传选择和自然淘汰的生物进化过程中的计算模型。它的思想源于生物遗传学和适者生存的自然规律,是按照基因遗传学原理而实现的一种迭代过程的搜索算法。最大的优点是易于与其他算法相结合,并充分发挥自身迭代的优势,缺点是运算效率不高,不如蚁群算法有先天优势,但其改进算法也是目前研究的热点。

4) 粒子群算法<sup>[27,30]</sup>(POS)也是一种迭代算法,它模拟鸟群飞行捕食行为,和遗传算法相似,它也是从随机解出发,通过迭代寻找最优解,也是通过适应度来评价解的品质,但它比遗传算法规则更为简单,它没有遗传算法的“交叉”和“变异”操作,有记忆功能,它通过追随当前搜索到的最优值来寻找全局最优。具有算法简洁、易于实现、鲁棒性好、算法对种群大小不十分敏感、收敛速度快等优点,但易陷入局部最优解。

#### (4) 其他算法

也有一些人为发明的算法因为其优秀特点得到广泛应用,这些算法一般都具有很强的路径搜索能力,可以很好地在离散的路径拓扑网络中发挥作用。这些算法包括:A\*算法、Dijkstra算法、fallback算法、Floyd算法等。

1) A\*算法<sup>[31,32]</sup>是一种启发式搜索算法,通过设定合适的启发函数,全面评估各扩展搜索节点的代价值,通过比较各扩展节点代价值的大小,选择最有希望的点加以扩展,直到找到目标节点为止。优点是扩展节点少,鲁棒性好,对环境信息反应快;缺点是在实际应用中忽略了运动体自身的体积带来的节点限制,不过通过增加节点即可改进。

2) Dijkstra算法<sup>[33,34]</sup>是一种典型的最短路径算法,它是以起始点为中心向外层层扩展,直到扩展到终点为止,

即通过所有节点的正向遍历比较得到最短路径。因为它是遍历完所有节点才得到最短路径,所以得到的最短路径成功率很高,鲁棒性也好;但是遍历节点多,效率低是其运用于大型复杂路径拓扑网络时的致命缺点,此外,Dijkstra算法也不能处理有负边的问题。

3) Fallback算法<sup>[35]</sup>其实是Dijkstra算法的一种改进算法,主要应用于多QoS要求的路由选择,以不同的QoS要求作为目标函数,运用Dijkstra算法进行路径搜索,根据多QoS要求的满足情况决定重复Dijkstra算法或者终止。由于算法完全借鉴了Dijkstra算法,其优缺点也与之相同。

4) Floyd算法<sup>[36]</sup>又称弗洛伊德算法,是一种用于寻找给定加权路径拓扑网络中顶点间最短路径的算法。它先把路径网络转换为权值矩阵,而后在权值矩阵中求任意两点的最短路径。它相较于Dijkstra算法有了很大改进,稠密图效果最佳,边权可正可负,起始点和终点的变化对算法影响不大,简单有效,效率高于Dijkstra算法;但也存在时间复杂度高,不适合计算大量数据的缺点。

## 2 路径规划算法的应用综述

路径规划的应用领域非常广泛,如:机器人机械臂的路径规划、飞行器航迹规划、巡航导弹路径规划、旅行商问题(TSP)以及其衍生的各种车辆(VRP)路径规划、虚拟装配路径规划、基于道路网的路径规划、电子地图GPS导航路径搜索与规划、路由问题等。根据我们对路径规划问题的分类,结合相应的路径规划算法,我们总结出路径规划算法的应用如下。

### 2.1 离散域范围内的路径规划问题

离散域范围内的路径规划问题大致可以分为全局规划、局部规划和遍历式规划。由于离散域范围内的局部路径规划对环境信息变化的适应能力要求不高,可视为静态规划,因此并入全局规划。在此相对于遍历式规划,我们称之为离散域范围内的最短路径规划。

#### (1) 离散域范围内的最短路径规划问题

属于离散域范围内最短路径规划的问题有:基于道路网的路径规划问题、电子地图GPS导航路径搜索规划问题、路由问题等。

1) 基于道路网<sup>[37]</sup>和基于电子地图GPS导航<sup>[38]</sup>的路径规划都可视为基于GIS(Geographical Information System)的路径规划问题。这些问题的解决都是从复杂的数据信息中提取出所需道路信息,以路口为节点,道路信息为路径信息,构造出复杂的路径信息拓扑网络,将起始点和目标点定位为这个拓扑网络上两个节点,而后运用路径搜索算法进行最短路径寻优规划。

2) 路由问题<sup>[35]</sup>属于通信技术领域研究的重点。路



法应用于无人机航迹规划时的弊端,李季等提出了改进  $A^*$  算法,解决了  $A^*$  算法难以满足直飞限制并且有飞机最小转弯半径等约束的局限性这一问题<sup>[31]</sup>。

2) 路径规划算法的有效结合(即混合算法)。任何的单一路径规划算法都不可能解决所有实际应用中的路径规划问题,特别是在面对交叉学科的新问题时,研究新算法的难度大,路径规划算法间的优势互补为解决这一问题提供了可能。对于多空间站路径规划问题,金飞虎等把蚁群算法和神经网络方法相结合解决了这一问题,并避免了单纯运用神经网络算法时出现的局部最小问题<sup>[51]</sup>。

3) 环境建模技术和路径规划算法的结合。面对复杂的二维甚至三维连续动态环境信息时,算法所能做的是有限的,好的建模技术和优秀路径规划算法相结合将成为解决这一问题的一种方法。如栅格法和蚁群算法的结合<sup>[52]</sup>、C 空间法和 Dijkstra 算法的结合<sup>[33]</sup>等。

4) 多智能体并联路径规划算法设计。随着科学技术的应用发展,多智能体并行协作已经得到应用。其中,多机器人协作和双机械臂协作中的路径冲突问题日渐为人们所关注,如何实现其无碰路径规划将成为日后研究的热点之一<sup>[53, 54]</sup>。

#### 4 结束语

本文研究了目前常用的路径规划算法的特点,分析比较了它们的应用范围;而后根据路径规划的分类,对现今路径规划的应用领域及其常用方法进行了分类总结,并结合其应用算法进行了综述;最后展望并指出了路径规划算法的研究方向。随着科技的发展,路径规划技术将在越来越多的领域得到应用,路径规划技术也将使人工智能离我们越来越远。

#### 参考文献

- [1] 丛岩峰. 基于滚动优化原理的路径规划方法研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2007
- [2] Peter Stiles, Ira Glickstein. Route Planning [C]. IEEE, 1991: 420 - 425
- [3] 张永芳, 张安, 张志禹等. 战术飞行路径规划算法[J]. 交通运输工程学报, 2006(12): 84 - 87
- [4] 鲍庆勇, 李舜酩, 沈恒等. 自主移动机器人局部路径规划综述[J]. 传感器与微系统, 2009, 28(9): 1 - 4
- [5] 徐进. 基于蚁群算法的移动机器人路径规划算法研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2009
- [6] 马仁利, 关正西. 路径规划技术的现状与发展综述[J]. 现代机械, 2008(3): 22 - 24
- [7] 徐培培. 复杂动态环境下移动机器人的全局路径规划算法研究[D]. 北京: 北京邮电大学自动化学院, 2009
- [8] 王涛. 基于蚁群算法的机器人路径规划及其仿真系统研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2009
- [9] 杜萍, 杨春. 飞行器航迹规划算法综述[J]. 飞行力学, 2005, 23(2): 10 - 13
- [10] 张颖, 吴成东, 原宝龙. 机器人路径规划方法综述[J]. 控制工程, 2003(5): 152 - 155
- [11] 杜宗宗, 刘国栋. 基于遗传模拟退火算法的移动机器人路径规划[J]. 计算机仿真, 2009, 26(2): 118 - 121
- [12] Romeijn H E, Smith R L. Simulated Annealing for Constrained Global Optimization [J]. J of Global Optimization, 1994, 5(2): 101 - 124
- [13] Chen L N, Aihara K. Chaotic Simulated Annealing by a Neural Network Model with Transient Chaos [J]. Neural Networks, 1995, 8(6): 915 - 930
- [14] Oussama Khatib. Real-time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots [J]. International Journal of Robotics Research, 1986(5): 90 - 98
- [15] B Siciliano, L Sciavicco. A Solution Algorithm to the Inverse Kinematic Problem for Redundant Manipulators [J]. IEEE Journal of Robotics and Automation, 1998(4): 403 - 410
- [16] 覃柯, 孙茂相, 孙昌志. 动态环境下的基于改进人工势场的机器人运动规划[J]. 沈阳工业大学学报, 2003(5): 568 - 570
- [17] 杜宇上. 一种基于模糊逻辑的滚动窗口路径规划方法[J]. 数控技术, 2010(2): 146 - 148
- [18] Huang Lin, Lai Junfeng, Hou Jian et al. Multicast Routing Algorithm Based on Tabu Search [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2010(9): 801 - 805
- [19] 刘作军. 基于电路地图的移动机器人路径规划方法研究[D]. 天津: 南开大学, 2005
- [20] R A Brooks. Solving the Find-path Problem by Good Representation of Free Space [J]. IEEE Trans on Sys Man and Cybern, 1983, 13(3): 190 - 197
- [21] 于红斌, 李孝安. 基于栅格法的机器人快速路径规划[J]. 微电子学与计算机, 2005, 22(6): 98 - 100
- [22] M. A. Mansor, A. S. Morris. Path Planning in Unknown Environment with Obstacle Using Virtual Window [J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 1995, 24: 235 - 251
- [23] 李友国. Voronoi 图在机械加工路径规划中的应用[D]. 上海: 同济大学软件学院, 2008
- [24] 尹宝才, 徐振华, 孔德慧. 基于 Voronoi 图的实时人群路径规划[J]. 北京工业大学学报, 2009(8): 1115 - 1121
- [25] 于艳艳. 蚁群算法研究综述[J]. 科技广场, 2009(1): 238 - 239
- [26] 董金明. 基于蚁群算法的路径规划研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2009
- [27] 姜明洋, 胡玉兰. 基于神经网络和粒子群算法的移动机器人路径规划[J]. 沈阳理工大学学报, 2007(12): 11 - 14
- [28] J Tu, S Yang. Genetic Algorithm Based Path Planning for a Mobile Robot [C]. Taiwan: Proceedings of IEEE Intelligent Conference on Robotics and Automation, 2003: 1221 - 1226

- [29]常洪江. 遗传算法综述[J]. 电脑学习 2010(6): 115-116
- [30]王坤. 基于量子粒子群算法的移动机器人的路径规划的研究[D]. 江南大学 2009
- [31]李季 孙秀霞. 基于改进 A-Star 算法的无人机航迹规划算法研究[J]. 兵工学报 2008(7): 787-792
- [32]Dieter Fox. A Probabilistic Approach To Collaborative Robot Localization[J]. Autonomous Robots 2008 8: 325-344
- [33]杨兵 刘伟杰. 一种基于可视图的机器人避障路径规划[J]. 电脑知识与技术 2009(1): 434-435
- [34]衣云龙 关颖. 基于 Dijkstra 算法的足球机器人的一种路径规划方法[J]. 沈阳工程学院学报 2009(1): 67-69
- [35]杨云 徐永红 曹立鑫等. 基于 Dijkstra 策略的多 QoS 路由算法 Fallback + [J]. 计算机工程 2003(10): 20-22
- [36]张德全 吴果林. 最短路径问题的 Floyd 算法优化[J]. 许昌学院学报 2009(3): 10-13
- [37]贺鹏 殷亚君. 最短路径算法浅析[J]. 甘肃科技 2010(1): 42-43
- [38]王宗原. 基于电子地图的路径规划的设计与实现[D]. 哈尔滨工程大学 2005
- [39]刘北林 高爽. 配送车辆路径优化问题算法研究[J]. 商业经济, 2008 9: 31-33
- [40]魏宁. 虚拟人全局路径规划技术研究[D]. 江苏大学 2007
- [41]WANG Hong-jian XIONG Wei. Research on Global Path Planning Based on Ant Colony Optimization for AUV[J]. J. Marine. Sci. 2009 (4): 90-98
- [42]李擎 徐银梅 张德政等. 基于粒子群算法的移动机器人全局路径规划策略[J]. 北京科技大学学报 2010(3): 397-401
- [43]梁毓明 徐立鸿. 基于改进模拟退火混合算法的移动机器人全局路径规划[J]. 控制与决策 2010(2): 237-240
- [44]Khatib O. Real-time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots[J]. The International Journal of Robotics Research, 1986, 5(1): 90-98
- [45]Liu Jinhu, i Paul Gader. Neural Networks with Enhanced Outlier Rejection Ability for Off-line Handwritten Word Recognition[J]. Pattern Recognition, 2002, 35(10): 2061-2071
- [46]纪晴 段培永 李连防 王海鹏. 移动机器人全覆盖路径规划算法综述[J]. 山东建筑大学学报 2008(11): 355-359
- [47]Neumann de Carvalho R Vidal H Vieira P et al. Complete Coverage Planning and Guidance for Cleaning Robots[C]. Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Guimarães, Portugal, 1997(2): 677-682
- [48]蒋玉杰 曾岑. 清洁机器人基于遗传算法的全区域路径规划[J]. 机械制造 2009(5): 18-20
- [49]杨惠 李峰. 粒子群和蚁群融合算法的自主清洁机器人路径[J]. 计算机工程与应用 2008(11): 355-359
- [50]刘海 郭小勤 余得贵. 清洁机器人全覆盖路径规划算法综述[J]. 机电产品开发与创新 2007(8): 36-38
- [51]金飞虎 郭琦. 基于蚁群算法的 Hopfield 神经网络在多空间站路径规划的应用研究[J]. 计算机应用研究 2010(1): 51-53
- [52]何娟 涂中英 牛玉刚. 一种遗传蚁群算法的机器人路径规划方法[J]. 计算机仿真 2010(3): 170-174
- [53]王坤. 多机器人控制及其虚拟仿真[D]. 陕西: 西安电子科技大学 2010
- [54]李江抒. 多移动机器人路径规划算法与导航系统研究[D]. 吉林: 吉林大学 2004
- 基金项目: 国家自然科学基金项目(50805089), 上海市科委科技攻关计划(10DZ1126100, 10DZ1140900) 上海高校选拔培养优秀青年教师科研专项基金, 上海大学创新基金和上海市重点学科建设(编号: Y0102) 资助。
- 作者简介: 张广林(1988-) 男, 河南许昌人, 硕士研究生, 研究领域: 计算机集成制造。
- 收稿日期: 2011-3-15

(上接第 71 页)

### 3 结论

1) 在电渣重熔前, 钢中夹杂物主要以  $\text{Al}_2\text{O}_3$  类夹杂物为主, 以及少量的  $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂物, 形状以尖角状和不规则形状为主, 尺寸大部分小于  $20\mu\text{m}$ 。

2) 钢锭经过电渣重熔后,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  类夹杂物尺寸和数量均有所减少。但电渣重熔后产生了新的  $\text{TiN}$  类夹杂物, 该类夹杂物形状为三角形或四边形形状。

#### 参考文献

- [1]李正邦, 周文辉, 李宜大. 电渣重熔去除夹杂的机理[J]. 钢铁, 1980, 15(1): 20-26
- [2]傅杰, 朱剑, 迪林等. 微合金钢中  $\text{TiN}$  的析出规律研究[J]. 金

属学报, 2000, 36(8): 801-804

- [3]巴顿, 密多瓦尔. 电渣炉[M]. 北京: 国防工业出版社, 1983
- [4]耿鑫, 姜周华, 刘福斌等. 电渣重熔过程中夹杂物的控制[J]. 钢铁, 2009, 44(12): 42-46
- [5]袁方明, 王新华. 钙元素对钢水相线温度的影响[J]. 特殊钢, 2006, 27(3): 32-35
- [6]黄希祐. 钢铁冶金原理[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2005
- [7]陈家祥. 炼钢常用图表数据手册[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1984

基金项目: 贵阳市科技局工业攻关项目(2009-1059)。

作者简介: 李长荣(1963-) 男, 贵州桐梓人, 博士, 教授, 主要从事纯净钢理论与工艺研究。

收稿日期: 2011-6-15