

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2208801

基于遗传禁忌搜索的时隙分配算法*

王 瑞¹ 孙晓伟¹ 毛忠阳¹ 张钊源²

(1. 海军航空大学 烟台 264001; 2. 中国人民解放军 92697 部队 陵水 572400)

摘要:合理的时隙分配可保证数据链战术消息的时效性,提升数据链网络运行效率。现有单一优化的时隙分配算法全局寻优能力低、运算量大、运行效率低。本文基于最小均匀时隙方差模型,提出了一种遗传禁忌搜索的时隙分配算法。该算法充分利用遗传和禁忌搜索两种典型智能优化算法的优势,采用遗传变异操作构造多样性的邻域,使获得全局最优时隙解的概率增强;使用禁忌搜索算法在局部进行搜索,加快收敛速度。采用精度提升率、稳定性和时间开销等指标对算法的精度、稳定性和运行效率进行了验证,结果表明:算法相比单一的遗传和禁忌算法,在保持较高稳定性和运行效率的同时,时隙分配精度有明显提升。当空闲时隙数量为500和1000时,相对遗传时隙分配算法,精度分别提升了6%和9%。

关键词:时隙分配;战术数据链;禁忌搜索;时隙方差

中图分类号: TP924 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.5015

Slot allocation algorithm based on genetic and tabu search

Wang Rui¹ Sun Xiaowei¹ Mao Zhongyang¹ Zhang Zhaoyuan²

(1. Naval Aeronautical University, Yantai 264001, China;

2. Unit 92697 of the Chinese People's Liberation Army, Lingshui 572400, China)

Abstract: Slot allocation is a key technology in TDMA data link network planning. Reasonable time slot allocation can ensure the timeliness of tactical messages and improve the operation efficiency of data link network. Because the traditional slot allocation algorithm can not realize the allocation of any slot. The single intelligent optimization slot allocation algorithm has the problems of low global optimization ability, large amount of computation and low operation efficiency. Based on the minimum uniform slot variance model, a slot allocation algorithm based on genetic tabu search is proposed in this paper. The algorithm makes full use of the advantages of two typical intelligent optimization algorithms: Genetic and tabu search, and uses genetic mutation operation to construct diverse neighborhoods, so as to enhance the probability of obtaining the global optimal slot solution. Tabu search algorithm is used to search locally to speed up the convergence speed. The accuracy, stability and efficiency of the proposed algorithm are evaluated by experiments. The results show that compared with the single genetic algorithm and tabu algorithm, the algorithm not only maintains high stability and operation efficiency, but also significantly improves the time slot allocation accuracy. When the number of free slots is 500 and 1000, the accuracy is improved by 6% and 9% respectively compared with the genetic slot allocation algorithm.

Keywords: slot allocation; tactical data link; tabu search; slot variance

0 引 言

战术数据链是将传感器系统、指控系统、武器系统无缝交联的一种无线通信系统,是现代信息化条件下战斗力的“倍增器”。时分多址是现役战术数据链采用最为广泛的网络协议,如美军的Link-16,Link22数据链等^[1-2]。采用该协

议的数据链信道以时隙来表征,网内作战平台只能在其所分配的时隙内发送战术消息。在时隙分配时,为了匹配战术消息的周期性发送,减小信息传输过程中的时延,进而保证数据链网络的稳定性和可靠性,要求分配给网内作战平台的时隙在一个时帧内尽可能保持均匀^[3]。

在一个时帧的众多时隙内选取均匀的时隙分配方案,

收稿日期:2022-01-08

* 基金项目:国家自然科学基金(41606117,41476089,61671016)项目资助

本质上是 NP-hard 问题 (non-deterministic hard problem)^[4]。随着时隙长度和时隙需求数量的增加,若采用枚举方式直接搜索,计算量巨大,实际中无法应用。目前,最为典型且应用最为广泛的时隙分配方法为固定时隙分配算法,该算法是以二叉树的时隙结构实现时隙分配,只能保证对 2 的整数幂时隙数量需求实现均匀分配。这会产生两个问题:1) 如果将作战平台的时隙数量需求都近似为 2 的整数幂,在进行多次分配后,会出现小的时隙碎块,这些碎块无法再次分配,造成较大的时隙资源浪费^[5];2) 实际作战任务中,作战平台的时隙数量需求大多数是非 2 的整数幂的,基于二叉树的时隙分配方法无法与实际需求匹配^[6]。

为此,Dong 等^[7]提出的时隙分配算法对相邻时隙间隔进行了约束,但是实际运用中无法给出约束参量,导致其军事推广价值受到一定限制。文献[8]提出了基于最小时延抖动的时隙分配算法,该算法将时隙分配等价于图论路径环问题,并利用动态规划理论求解。由于动态规划是一种遍历搜索方法,如求得全局最优解,计算复杂度高,时间开销大。陈嘉远等人采用遗传算法 (genetic algorithm, GA),通过选择、交叉和变异运算步骤的不断进化,选取最优或接近最优的分配方案^[9]。遗传算法作为一种智能优化算法,具有较强的全局寻优能力,但进化后期收敛速度缓慢,造成时隙分配时运行效率低。事实上,目前已有的智能优化算法还包括模拟退火、禁忌搜索、蚁群等算法,模拟退火具有线性收敛性,以一定几率收敛至全局最优解,但算法性能严重依赖于初始参数设置^[10];禁忌搜索算法 (tabu search algorithm, TS) 具有较强的局部寻优能力,但对领域结构和初始解的依赖性较强;蚁群算法虽然不依赖于初始参数的选择,但在迭代初期,信息素的缺乏会影响算法的收敛效率^[11-14]。

综上所述,智能优化算法是解决战术数据链的时隙分配问题一个重要方向。由于每种智能算法运行机理不同,各有优势,需要结合具体军事需求,寻求多种优化机制的混合式时隙分配算法。核心目标是在满足不同平台时隙需求的前提下,提高全局寻优能力和较高的运行效率。鉴于此,在构建最小均匀时隙方差模型基础上,提出了一种遗传禁忌搜索的时隙分配算法。该算法结合遗传算法良好的全局寻优能力和禁忌搜索独具的记忆功能,采用遗传变异操作构造多样性的邻域,使获得全局最优时隙解的概率增强;使用禁忌搜索算法在局部进行搜索,加快收敛速度。试验结果表明,所提算法在保持稳定性和运行效率的同时,时隙分配精度有明显提升,适用于对实时性较高的时分多址数据链网络规划中。

1 问题描述

考虑时帧作为时隙分配的基本单元,一个时帧包含 N 个时隙,分别为 S_1, \dots, S_N ,其中包含 L 个空闲时隙分别为 $I_1, \dots, I_L (L \leq N)$ 。现要从 L 个空闲时隙中选取 M 个时隙

分配给网内成员,最理想的分配结果是从 L 个时隙中等间隔地选取 M 个时隙,此时时隙间隔为 $D=L/M$ 。由于空闲时隙的分布是随机的,很难进行等间隔地选取,此时就需要一定的指标来衡量分配时隙的均匀性。

假设实际分配的时隙序列为 A_1, \dots, A_M ,其相邻时隙的间隔分别为 V_1, \dots, V_M ,则有:

$$V_i = \begin{cases} A_{i-1} - A_i, & i = 1, 2, \dots, M-1 \\ A_1 + L - A_M, & i = M \end{cases} \quad (1)$$

当 $i = M$ 时, V_i 为一个时帧所分配的最后一个时隙 A_M 与下一个时帧的第一个时隙 A_1 之间间隔。时隙分配示意图如图 1 所示。

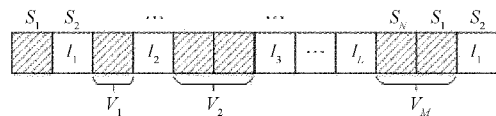


图 1 时隙分配示意图

采用均匀时隙方差 Var 来衡量时隙分配的均匀性, Var 的计算公式定义为:

$$\text{Var} = \sum_{i=1}^M \frac{(V_i - D)^2}{D} \quad i = 1, 2, 3, \dots, M \quad (2)$$

式中: D 为理想情况下的时隙间隔。可以看出,均匀时隙方差越小,其时隙分配的均匀性越好。因此时隙分配问题可转换为求解基于最小时隙方差的最优化问题,可描述为:

$$\begin{aligned} \min_{A_1, A_2, \dots, A_M} & \sum_{i=1}^M \frac{(V_i - D)^2}{D} \\ \text{s. t. } & D = \frac{L}{M} \\ & M \leq N \leq L \\ & A_i \leq L \\ & i = 1, 2, 3, \dots, M \end{aligned} \quad (3)$$

2 算法设计与实现

禁忌搜索是模仿人类短期记忆功能的一种高效搜索算法,它通过接受差解,避免单个区域的局部搜索,确保对大区域多条路径的探测,具有较强的局部搜索能力。遗传算法是模拟遗传学机理的生物进化过程的搜索方法,以群体内所有个体为搜索对象,随机化指导对一个被编码的解空间进行高效搜索。它可对解空间的多点进行并行搜索,具有较强的全局搜索能力。单一的禁忌搜索过程中,邻域的构造仅利用单纯的替换操作,由邻域产生的候选解之间存在高度相关性,这种相关性降低了算法突破局部最优的能力;而遗传搜索过程中的变异、交叉等操作能产生差异性较大的候选解,能够增加候选解的多样性,从而提升算法的全局寻优能力。因此,可将禁忌和遗传两种算法进行有机融合,设计一种混合型时隙分配算法。

本文设计的基于最小时隙方差的遗传禁忌搜索 (minimum variance based genetic and tabu search, MV-GTS) 时

隙分配算法,首先使用变异操作作为分散策略构造邻域,使时隙分配方案散落在时隙解空间的大部分区域,保证算法的全局寻优能力;然后再使用禁忌搜索作为集中策略进行局部优化,使个体不断突破局部最优解,防止局部收敛。这个过程中,分散策略体现了集体智慧,有利于提高候选解的多样性;集中策略保证了局部搜索的精度,两种策略的有效组合能够增加获得全局最优解的概率。MV-GTS 的具体步骤如下:

1)初始化参数和产生初始解

初始化禁忌长度 TabuL、候选解个数 Ca_Num 和最大迭代次数 G,置禁忌表为空;根据所求时隙数 M,将空闲时隙集平均分成 M 个区间,在每个区间内随机产生 Ca_Num 个数,形成 Ca_Num 个由 M 个空闲时隙组成的初始解。

2)产生邻域

交叉是遗传算法中模拟产生新个体的主要方法,它按照一定的概率交换两个解之间的部分时隙。该过程包括随机配对、确定交叉点和交换配对基因 3 个步骤。如初始解或邻域解中随机选取两个时隙解,随机确定一个交叉点,该点前后的两个时隙解结构互相交换,最终生成两个新解。如初始解 3-4-7-10 和 5-6-9-12 个体,随机选取第 2 个交叉点,可形成 3-4-9-12 和 5-6-7-19 两个新解。变异操作是以较小的概率在时隙解中的某位或某些位进行变动,从而产生新个体。

3)选择候选解

为了加快禁忌搜索的速度,通过筛选较小时隙方差的时隙解形成候选解,引导算法向解空间中大概率可能的最优区域进行探测。对邻域中的每个时隙解计算时隙方差,将时隙解按时隙方差从小到大进行排序,选择排名前 10 的时隙解构成候选解集参与禁忌搜索。

4)更新禁忌表

从候选集中选取时隙方差最小的解 S 作为优选解,并与禁忌表中的最优解 S* 进行比较,如果 S 优于 S*,则将 S 加入禁忌表。被选入禁忌表中的时隙解不能再成为产生邻域的新解,以防止无效搜索和避免陷入局部搜索陷阱。若 S 不优于 S*,则要判断 S 是否属于禁忌表中的解,如果属于,则删除 S;否则将 S 加入禁忌表,并将 S 赋予初始解。

5)藐视准则的判断

对于候选解出现历史最优解时,即便该时隙解被禁忌,仍可代替历史最优时隙解,并作为下一次迭代的初始时隙解,即特赦该被禁忌的时隙解。若候选解时隙集中的所有解都被禁忌,则特赦候选解中的最优解。

6)判断是否终止

算法有两个终止条件:1)迭代次数达到预设的最大次数;2)连续若干次迭代所求解的最优解保持不变。两个条件满足其中之一即可终止计算过程。根据经验,连续迭代次数为算法已发生迭代次数的 0.5 倍。

综上所述,MV-GTS 算法的流程如图 2 所示。

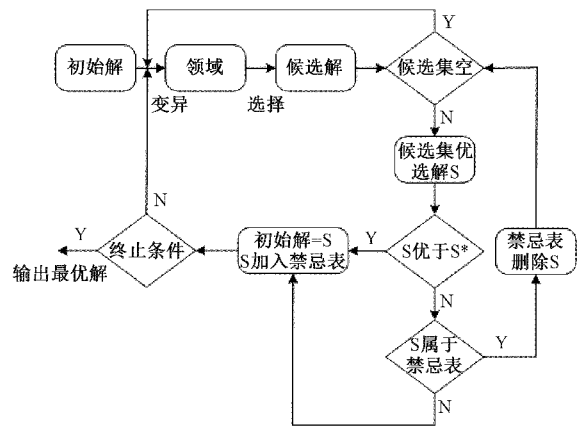


图 2 MV-GTS 时隙分配算法流程

3 试验与讨论

3.1 试验环境

算法选择 Link16 数据链时隙帧结构,即一个时隙包含 1 536 个时隙长度。从这 1 536 个随机选取 50、100、500、1 000 个空闲时隙作为样本进行算法计算。为了方便后续指标的验证,保证真值的确知性,在随机选取样本时,确保空闲时隙中存在等间隔的 M 个时隙,即对这 M 个时隙来说,其最小时隙方差为 0。测试环境如表 1 所示。

表 1 测试环境

软件		硬件	
操作系统	开发环境	处理器	内存
Windows 1 专业版	Visual Studio 2015	Intel i7-10700F	16 GB

3.2 算法评价指标及参数设置

本文采用解的精度提升率 (precision increase rate, PIR)、稳定性 Stability 和时间开销 TimeCost 来衡量算法的性能。精度提升率是以遗传算法计算的结果为基准,用以衡量禁忌搜索和遗传禁忌算法结果的精度提升程度。稳定性是利用算法得到最优解的次数与总计算次数的比值,衡量算法的鲁棒性。时间开销是算法的处理器耗时,单位为秒。PIR 和 Stability 的计算公式为:

$$PIR = \frac{V - G}{G} \times 100\% \tag{4}$$

$$Stability = \frac{I(B)}{C} \times 100\% \tag{5}$$

其中,G 为禁忌算法计算的时隙方差,V 代表遗传算法或遗传禁忌算法计算的时隙方差。由于最优时隙解的方差为 0,即 PIR 最大值为 100%。稳定性计算式子中,C 为同一组数据计算的总次数;B 代表计算结果中的最优解,I 代表计算得到 B 的次数统计。算法参数设置与空闲时隙数 N 与时隙解时隙个数 M 关系密切,如表 2 所示。

表 2 算法的参数设置

迭代次数	邻域大小/M	候选解大小	禁忌表大小/M	交叉概率	变异概率
50	20	10	2	0.8	0.01

3.3 试验结果

1) 算法精度

利用式(4)以 TS 时隙分配算法为基准,衡量 MV-GTS 算法、GA 算法的精度提升率,如表 3 所示。从表中看出,当空闲时隙数量较小时,两种算法的 PIR 较小,随着空闲时隙数量增大,两种算法精度提升能力增强。而相对于 GA 算法,MV-GTS 的提升程度更大。如当 $N=100$ 时,MV-GTS 相比 GA,PIR 提升了 3%;当 $N=1\ 000$ 时,MV-GTS 相比 GA,PIR 提升了 7%。

表 3 MV-GTS 和 GA 时隙分配算法精度增长率比较

算法	空闲时隙数量 $N(M=4)$			
	50	100	500	1 000
TS	0	0	0	0
GA	0	65%	76%	89%
MV-GTS	0	68%	82%	98%

将算法精度和时间开销综合考虑,算法的精度提升率和时间开销之间的关系曲线如图 3 所示。试验结果表明:当精度提升率控制在 $[0, 100\%]$ 时,相比 GA 时隙分配算法,MV-GTS 的平均耗时明显降低;且随着精度的不断提升,MV-GTS 的效率优势不断增加。当空闲时隙为 50 时,MV-GTS 算法与 GA 算法的最大耗时仅差 0.5 s,然后随着空闲时隙数量的增加,如 N 为 1 000 时,二者最大耗时相差 80 s 以上。

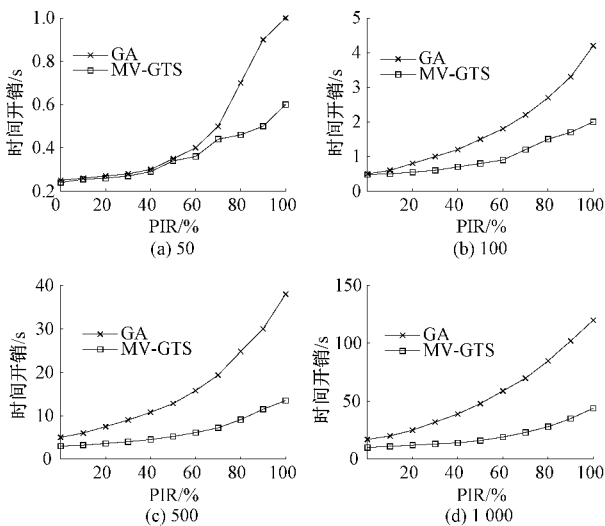


图 3 GA 和 MV-GTS 算法的 PIR 与时间开销的关系

2) 算法稳定性

算法稳定性用以衡量算法在指定 PIR 情况下,算法求得

最优解次数与计算总次数的比值。稳定性利用式(5)进行计算,Stability 值越大,表明算法越稳定。在统计算法稳定性时,对 GA 和 MV-GTS 算法的 PIR 进行人工干预。考虑两种 PIR 情况,一种 PIR 范围为 $[0\%, 100\%]$,即要求精度较低,只要比 TS 精度高即可;另一种 PIR 范围为 $[80\%, 100\%]$,此时要求 GA 和 MV-GTS 具有较高的精度。针对这两种情况,统计算法所求得最优解的频次。稳定性结果如图 4 所示。

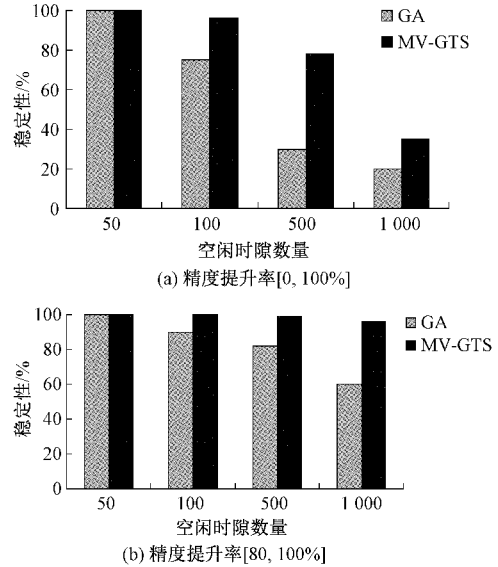


图 4 GA 与 MV-GTS 算法精度控制对稳定性的影响

PIR 范围为 $[0\%, 100\%]$ 时,当空闲时隙数量较少时,GA 和 MV-GTS 算法保持有较高的稳定性;当空闲时隙数量较大时,由于精度要求较低,GA 和 MV-GTS 只需要很短的时间开销就可满足要求,但此时算法稳定性较低。PIR 范围为 $[80\%, 100\%]$ 时,对算法的精度要求较高,需要较长的时间开销才能满足要求,当空闲时隙数量较少时,两种算法同样保持了较高的稳定性;当空闲时隙数量较大时,与 PIR 范围为 $[0\%, 100\%]$ 时不同,两种算法的稳定性显著提升,且 MV-GTS 与 GA 相比,具有较高的稳定性。这一方面表明 MV-GTS,相比 GA 算法具有较高的稳定性;另一方面要求在实际应用中,应根据具体的战术需求,提出具体的稳定性要求,进而确定相应的 PIR 范围。

3) 算法效率

算法效率利用时间开销与空闲时隙数量之间的关系进行衡量。将 GA 和 MV-GTS 算法的 PIR 限定在 $[80\%, 100\%]$,统计 TS、GA 和 MV-GTS 3 种方法的时间开销,统计结果如图 5 所示。可以看出,随着空闲时隙数量的增加,时间开销均呈现指数级增长,其中 GA 增长最快。当空闲时隙数量较低时,时间开销成本相差不大,但当空闲时隙数量增大后,时间开销的差异性增大。如当 N 等于 50 时,三种算法的时间开销比为 $1 : 1.29 : 0.86$;而当 N 等于 1 000 时,时间开销比为 $1 : 1.1 : 0.3$ 。综合来看,MV-GTS 的运行效率要优于 TS 和 GA。

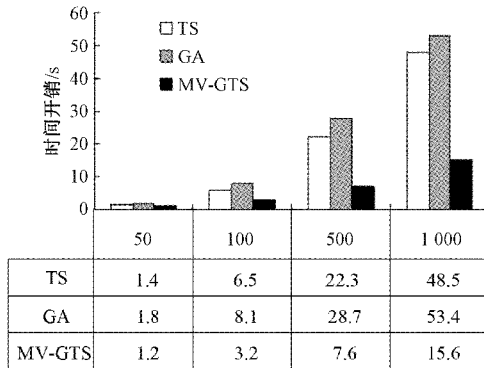


图 5 3 种算法的时间开销对比

综上所述,所提 MV-GTS 算法相比 TS、GA 算法,在保持了较高稳定性和较高运行效率的同时,时隙分配精度有明显提升,尤其是当空闲时隙数量较多时,提升幅度较大。比如当空闲时隙数量为 500 和 1 000 时,相对遗传时隙分配算法,精度分别提升了 6% 和 9%。

4 结 论

本文设计了一种基于最小均匀时隙方差及遗传禁忌搜索的时隙分配算法。算法充分发挥了遗传和禁忌搜索算法的优势,采用遗传变异操作构造多样性的邻域,使获得全局最优时隙解的概率增强;使用禁忌搜索算法在局部进行搜索,加快收敛速度。相比单一的遗传或禁忌搜索时隙分配算法,本文算法的精度提升率大,稳定性好,运行效率高。值得一提的是,所提算法不同的变异操作具有弱相关的特点,符合任务并行处理机制。因此在实际工程实现时,可考虑将本文算法计算并行化,以发挥多核处理器的并行计算优势,进一步提升运行效率。但变异操作存在盲目性,不能完全保证算法收敛于最优解,需要分析评估变异操作对算法精度、稳定性等性能的影响,这也是后续工作的重点。

参考文献

- [1] 赵志勇. 数据链系统与技术[M]. 北京:电子工业出版社,2014.
- [2] 李娜,邓雪云,毛建华,等. 基于 IMA 架构的 ATC 数据

链 RCP 性能分析研究[J],电子测量技术,2021,44(11):131-135.

- [3] 刘昌锦,张颀,童利标,等. 数据链时隙动态分配算法建模分析[J]. 仪器仪表学报,2007,28(4):366-368.
- [4] 王文政. 战术数据链时隙分配协议及其仿真研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2010.
- [5] 梁爽,毛玉泉. 地空数据链中的时隙分配算法[J]. 空军工程大学学报(自然科学版),2005(3):12-15.
- [6] 李建勋,樊晓光,张喆,等. 基于优先级的 TDMA 动态时隙分配算法[J]. 计算机工程,2011,37(14):288-290.
- [7] DONG L, RAMI M, DANIEL M. Scheduling algorithms for dynamic message streams with distance constraints in TDMA protocol[J]. CiteSeer, 2000:239-246.
- [8] 刘星,何肇雄,周经伦. TDMA 战术数据链中最小时延抖动的固定时隙分配算法[J]. 系统工程,2012(6):94-98.
- [9] 陈嘉远. 战术数据链时分多址时隙分配算法研究[D]. 北京:北京交通大学,2015.
- [10] 杨立炜,付丽霞,等. 多层优化蚁群算法的移动机器人路径规划研究[J]. 电子测量与仪器学报,2021,35(9):10-18.
- [11] 陆锋. 最短路径算法:分类体系与研究进展[J]. 测绘学报,2001(3):269-275.
- [12] 苏欣欣,秦虎,王恺. 禁忌搜索算法求解带时间窗和多配送人员的车辆路径问题[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版),2020,37(1):22-30.
- [13] 郝群茹,潘师. 基于禁忌搜索算法的物流系统车辆路径优化[J]. 科学技术与工程,2019,19(34):401-407.
- [14] 朱毅,杨航,吕泽华,等. 一种基于禁忌搜索的全局最优模糊聚类算法[J]. 电子学报,2019,47(2):289-295.

作者简介

王瑞,工学博士,讲师,主要研究方向为数据链系统与技

术、无线通信技术、无线通信设备检测等。
E-mail:gaozz099@163.com