Low Latency Real-Time Traffic Scheduling Method for Traffic Monitoring Sensor Network*

ZHANG Biao, ZHANG Yi*
(School of City and Architecture Engineering, Zaozhuang University, Zaozhuang Shandong 277000, China)

Abstract: In order to reduce the complexity of traffic monitoring sensor network flow scheduling and optimize real-time scheduling, a low latency real-time flow scheduling method for traffic monitoring sensor networks is proposed. The elements of the traffic monitoring sensor network are clarified, the binary of network topology and nodes is solved. A traffic monitoring sensor network model is established and the transmission data flow is solved. Traffic scheduling constraints are set and data streams are transmitted in connectivity order to meet the low latency requirements of traffic monitoring sensor networks. By combining taboo search algorithm and genetic algorithm, taking into account fitness, average population fitness, and iteration number, the adaptive crossover probability is calculated to obtain the optimal mutation scheme fitness and complete real-time traffic scheduling. The simulation results show that the proposed method has an average throughput of over 5.2 GB·s, a packet loss rate of less than 0.017%, a minimum average resource overhead of 1.3 bps, and an average end-to-end latency of less than 100 μs. It is confirmed that the proposed method effectively improves the real-time performance and efficiency of data transmission after application.

Key words: traffic monitoring sensor network; real time traffic scheduling; low latency; link constraints; adaptive crossover probability
EEACC: 7230 **doi**: 10.3969/j.issn.1004-1699.2025.10.020

交通监测传感网络低时延实时流量调度方法*

张 彪, 张 轶*
(枣庄学院城市与建筑工程学院, 山东 枣庄 277000)

摘 要: 为了降低交通监测传感网络流量调度的复杂性, 优化调度实时性, 提出交通监测传感网络低时延实时流量调度方法。明确交通监测传感网络元素, 求解网络拓扑与节点的二元组, 建立交通监测传感网络模型, 求解传输数据流; 设定流量调度约束条件, 并以连通性顺序传送数据流, 满足交通监测传感网络低时延需求; 结合禁忌搜索算法与遗传算法, 综合考虑适应度、平均种群适应度和迭代数, 算出自适应交叉概率, 获得最佳变异方案适应度, 完成实时流量调度。仿真结果表明, 所提方法平均吞吐量高于 5.2 GB·s, 丢包率低于 0.017%, 平均资源开销最小值达到 1.3 bps, 平均端到端时延小于 100 μs。证实了所提方法应用后有效提高了数据传输的实时性和效率。

关键词: 交通监测传感网络; 实时流量调度; 低时延; 链路约束; 自适应交叉概率
中图分类号: TP393 **文献标识码**: A **文章编号**: 1004-1699(2025)10-1878-08

交通监测传感网络广泛覆盖了城市的各个角落, 通过部署大量的传感器节点, 实现了对交通状况[1-2]的全方位、全天候监测。然而, 随着传感器节点数量的激增和监测需求的不断提高, 网络流量[3]也随之呈现出增长的趋势, 且表现出高度的动态性和不可预测性。每个传感器节点都需要实时采集并传输交通数据, 包括车辆流量、车速、道路占用率等关键信息。这些数据直接关系到交通管理部门能否及时、准确地掌握交通状况[4], 不仅体量大, 而且实时性要求高。然而, 在实际运行中, 由于网络带宽有限、传输协议复杂以及数据处理能力不足等因素, 往往会导致数据传输出现延迟, 甚至部分数据因网络拥堵而丢失。更为严重的是, 大量传感器节点采集的数据中往往包含大量的冗余信息。这些冗余数据不仅占用了网络资源, 增加了数据处理的难度和成本, 在交通事故、道路拥堵等紧急情况下, 如果无法迅速获取准确的交通信息, 将会严重影响交通管理部门的应急响应速度和决策效果, 进而加剧交通拥堵和安全隐患。

基于此, 相关的网络流量调度方法引起了学者

项目来源: 博士科研启动基金项目(11/1020704)
收稿日期: 2024-09-23 **修改日期**: 2024-10-18

的广泛关注。高新成等[5]提出了利用粒子群优化算法的网络流量调度方法。基于软件定义网络的集中式控制和全局视图特征,初始转发流量,选择粒子群优化算法重新定义粒子群内部寻优,过滤网络流量,建立全局节点概率矩阵,设计概率调度算法,获得最佳转发路径,完成网络流量调度。粒子群算法会因为粒子间的相互影响而逐渐趋同,导致解的多样性减少,故容易陷入局部最优解,令流量调度效果不佳。王家兴等[6]提出了利用在线混合流量分析粒子群的网络流量调度方法。通过网络状态混合流量求解路径,降低冗余搜索与约束粒子速度,防止陷入局部最优,考虑到流量类型不统一,设定适应值函数,实现网络流量自适应调度。适应值函数设计不当,会导致算法在搜索过程中偏离全局最优解,无法快速适应网络状态的变化,影响流量调度。Wei 等[7]提出了利用循环神经网络的网络流量调度方法。采用深度学习方法分类交通并预测流量大小,依据分类结果,通过多级优先级队列优先分配时延敏感数据,结合网络缓存提升数据中心网络容量,抵抗流量突发,提高吞吐量,完成流量调度。循环神经网络模型需要适应时间、网络环境和用户行为的变化,然而,在实际应用中,模型无法及时捕捉到所有变化,影响流量调度性能。杜林峰等[8]提出了利用反向传播神经网络的网络流量调度方法。首先通过启发式算法获得网络流量调度方案,结合反向传播神经网络建立流量调度模型,然后依照网络实时状态和流量调度方案之间的映射关系,离线训练流量调度模型,最后在网络运行阶段,利用网络智能流量调度模型完成流量调度。启发式算法在处理大规模网络流量调度问题时,存在计算过程较为复杂问题,影响调度的实时性。

为此,提出了交通监测传感网络低时延实时流量调度方法。通过建立交通监测传感网络模型,根据连通性传输数据流,同时设置流量调度约束,保证网络低延迟,将禁忌搜索和遗传算法相结合,调节交叉概率和变异策略,得到最优方案,从而完成流量调度。

1　基于交通监测传感网络模型求解传输数据流

交通监测传感网络由大量的传感器节点组成,这些节点通过复杂的通信链路相互连接。基于交通监测传感网络模型,可以清晰地了解网络的拓扑结构、节点分布以及它们之间的连接关系。为了识别出网络流量[9]的主要来源、流向以及变化规律,通过模型求解传输数据流,为后续的流量调度提供基础。

根据式(1)将网络拓扑 α 与节点数目 m 简化为二元组 A_N:

$$A_N=\{\alpha,m\} \tag{1}$$

由于交通监测传感网络具有一定的拓扑结构,可用有向图进一步简化表示:

$$\boldsymbol{G}=A_N\{\boldsymbol{U},\boldsymbol{E}\} \tag{2}$$

式中:$u_o\in\boldsymbol{U}$ 表示由终端、交换机组成的节点;$(u_a,u_b),(u_b,u_a)\in\boldsymbol{E}$ 表示双向链路节点集合。

从源节点出发,可按特定条件传送到目的节点的顺序数组称作流。每个流都有传输路径 C,传输周期 T,负载值[10] D,端到端时间限制 F。可以用四元组表达传输数据流 h_o:

$$h_o=(C_o,T_o,D_o,F_o)\in\boldsymbol{G} \tag{3}$$

2　交通监测传感网络流量调度约束

考虑到交通监测传感网络中密布着众多传感器节点,这些节点持续、实时地采集并传输海量数据,且数据流量动态波动显著。一旦网络中的数据流 h_o 传输量超越了其承载能力,将导致网络拥塞,增加数据传输延迟。这种延迟不仅削弱了数据反映实时交通状况的能力,还严重损害了基于这些数据所做决策的有效性和时效性。因此,为了精准匹配交通监测传感网络对低延迟性能的高要求,设计系数约束条件指导流量调度策略的设计与实施。

①帧约束 R_1,保证传输数据流 h_o 的每个帧 $h_{or}^{[n_x,n_y]}$ 在其相应周期 $Q_{or}^{[n_x,n_y]}$ 内完成传送。

②链路约束 R_2,即任何两个帧 $h_{\mathrm{do}}^{[n_x,n_y]}$、$h_{\mathrm{er}}^{[n_x,n_y]}$ 都必须经过同一传输数据流 h_o,且在超周期 H_l 时间域上无重叠。

③流传输约束 R_3,是指在流量调度时[11],同一帧在其路径上具有不同链路时,必须以链路的物理连通性顺序传送数据流。

④端到端约束 R_4,代表了每个传输数据流 h_o 的最大端到端时延比所能承受最大端到端时延 $T_{\max}(h_o)$ 要小。

⑤帧隔离约束 R_5,即在流量调度[12-13]过程中,相同时间内同一队列中仅能保存一条传输数据流 h_o 的帧,当有一条数据帧从队列中退出时,则另一条数据帧才能加入队列中,而当两帧处于不同的队列中时,则不存在这种约束。

⑥抖动约束 R_6,在实际和理想情况下,传输数据流 h_o 的传送和处理总时延差值不得超过最大延时。

综上,确定交通监测传感网络传输数据流 h_o 上的流量调度约束 R 为:

$$R=\sum_{i=1}^{6} R_i, R_i \in h_o \tag{4}$$

将满足式(4)6 个约束条件的数据流,以连通性顺序传送,确保后续流量调度满足交通监测传感网络低时延需求。

3 低时延实时流量调度

根据式(4)可知,交通监测传感网络的流量调度面临多重约束条件,这些条件使得低时延实时流量调度最优解搜索空间极大且复杂。在此情境下,传统遗传算法往往因易陷入局部最优解的困境,而难以制定出合理且高效的低时延实时流量调度方案。同时,网络流量是动态变化的,需要低时延实时流量调度算法能够快速适应这些变化。为此,在传统遗传算法变异过程中引入禁忌搜索[14]、多种群体联合优化方法,提升算法的局部探索与全局搜索能力,确保在面对复杂多变的网络流量环境时,能够迅速找到并锁定最优的流量调度方案,从而最大化调度效果,满足交通监测传感网络对低时延、高实时性的要求。

传统遗传算法[15]存在着各方案间具有相同交叉概率的主导方案易被打破的问题。因此,在满足流量调度约束 R 的前提下,结合禁忌搜索算法改进遗传算法,设计流量调度流程如图 1 所示。

步骤 1 流量调度约束 R。在实时流量调度中,包括帧约束、链路约束、流传输约束、端到端约束、帧隔离约束、抖动约束。

步骤 2 种群初始化。初始化一个包含多个潜在解的种群。

步骤 3 求出适应度:对种群中的每个个体进行适应度评估。适应度是评价个体优劣的指标,在实时流量调度中,适应度反映了调度方案的精准性。

步骤 4 符合终止准则:检查是否满足算法的终止条件。本文设定的条件为达到最大迭代次数和适应度值收敛到最小值等。如果不满足终止条件,则继续执行后续步骤。

步骤 5 选择操作:根据适应度选择一部分个体作为父代,用于生成新的子代。选择操作遵循“优胜劣汰”的原则,即适应度高的个体更容易被选中。

步骤 6 求出自适应交叉概率:计算交叉操作的概率。交叉是遗传算法中产生新个体的主要方式之一,通过交换两个父代个体的部分基因来生成子

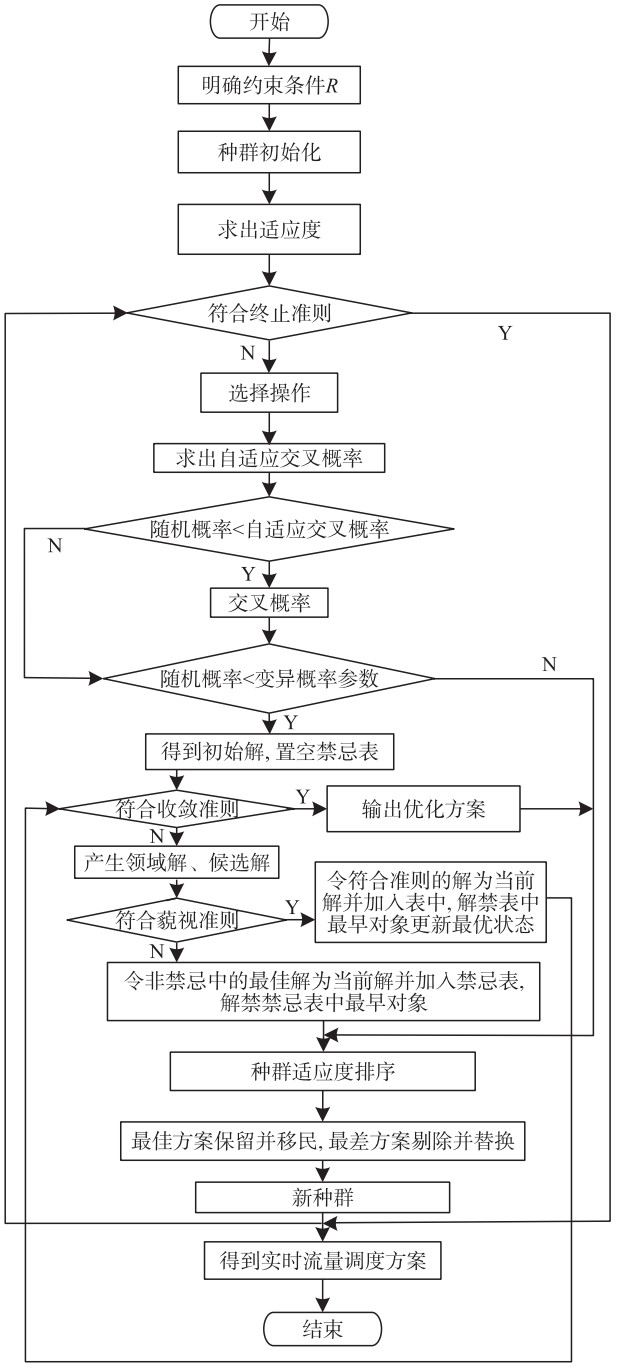

图 1 交通监测传感网络低时延实时流量调度流程

代个体。自适应交叉概率意味着这个概率可以根据种群的适应度分布情况动态调整。

综合考虑适应度、平均种群适应度和迭代数,获得自适应交叉概率表达式:

$$A_c=\begin{cases} e^{-\frac{X}{Y}}\times\dfrac{g-g_{\min}}{g_{\mathrm{mid}}-g_{\min}} & g<g_{\min} \\ e^{-\frac{X}{Y}} & g\geqslant g_{\mathrm{mid}} \end{cases} \tag{5}$$

式中:A_c 表示交叉概率,X 表示迭代次数;Y 表示指数系数;g 表示适应度;$g_{\min}$ 表示目前种群最佳适应度;g_{mid} 表示目前种群适应度中间值。其中,适应度

反映了当前个体适应度与种群平均适应度的相对差异。当个体适应度高于平均适应度时,该值为正,增加交叉概率以促进优秀基因的扩散;反之,则降低交叉概率以保护较差但可能具有潜在价值的基因。其计算公式为:

$$\Phi=\sum_{l=1}^{L} g[r_k(l)] \tag{6}$$

式中:Φ 表示适应度,l 表示个体编号,L 表示遗传种群内个体数量,$r_k(l)$ 表示第 k 个种群编号的个体。

步骤 7　随机概率与交叉/变异概率比较:根据随机生成的概率与交叉概率、变异概率进行比较,决定是否执行交叉或变异操作。交叉操作生成新的基因组合,而变异操作则对个体基因进行随机扰动,以增加种群的多样性。

自适应变异概率表达式为:

$$P=P_{m1}+\frac{P_{\max}-g'}{P_{\max}-P_{\min}}(P_{m2}-P_{m1})\left(1-\frac{X}{X_{\max}}\right)^{\mu} \tag{7}$$

式中:P 表示自适应变异概率,P_{m1} 和 P_{m2} 表示变异概率的下限和上限;g' 表示目前种群最差适应度;μ 表示指数系数,用于控制迭代次数对变异概率的影响。

步骤 8　得到初始解并置空禁忌表:根据步骤 6 和 7,通过动态调整交叉和变异概率,算法能够在搜索初期快速探索解空间,找到潜在的优秀解;在搜索后期则逐渐收敛于最优解,提高搜索效率。此时,在执行完上述步骤后,得到一个新的解,并初始化禁忌表。禁忌表用于记录最近被搜索过的解,以避免算法陷入局部最优解。

步骤 9　符合收敛准则:在迭代过程中,不断检查是否满足收敛准则。如果满足,则认为已经找到了满意的解,可以提前结束算法。

步骤 10　输出优化方案:当算法终止时,输出最终得到的优化方案。在实时流量调度中,这个方案将指导网络流量的合理分配。

步骤 11　禁忌搜索过程:结合禁忌搜索策略,用于在遗传算法的基础上进一步搜索优质解。禁忌搜索通过禁忌表来避免重复搜索,并通过“藐视准则”来允许一些被禁忌的优质解被重新考虑。

步骤 12　种群适应度排序与替换:在每一代中,对种群进行适应度排序,并根据精英保留策略保留最佳方案,剔除最差方案,并用新生成的个体替换之。

步骤 13　得到实时流量调度方案:经过多次迭代后,算法最终将输出一个实时流量调度方案,该方案在满足所有约束条件的前提下,优化了交通监测传感网络低时延实时流量调度效果。

至此,通过明确网络元素、构建网络模型并求解传输数据流,设定流量调度约束条件确保低时延。最终,所提方法结合禁忌搜索与遗传算法,动态调整交叉概率以优化变异方案,实现了高效、实时的流量调度。

4　流量调度仿真

为了验证所提方法的流量调度性能,在图 2 所示的交通监测传感网络中进行仿真。

具体的仿真参数如表 1 所示。表 1 中,在遗传算法中,初始交叉概率设为 0.7,以确保种群中足够多的个体能够发生基因交换,增加遗传多样性,同时避免过高的交叉概率导致优秀基因过快丢失;初始变异概率设为 0.01,以保持种群的多样性,防止早熟收敛,同时避免过高的变异概率导致算法性能不稳定。此外,设定仿真环境的具体配置如下:硬件配置包括一台高性能服务器作为中心节点,该服务器配置有 Intel Xeon E5 系列处理器、16 GB 内存及充足存储空间,负责数据的收集、处理和分发;多个嵌入式设备作为传感器节点,配备低功耗处理器、4 GB 内存、存储空间及 Wi-Fi 等无线通信模块,分布于监测区域内实时采集和传输数据;传感器节点与中心节点间通过有线连接或无线连接实现数据传输,确保通信的稳定性和可靠性。软件平台采用 OMNeT++进行网络仿真,MATLAB 实现遗传算法和禁忌搜索算法,以评估和优化传感器网络中的流量调度性能。

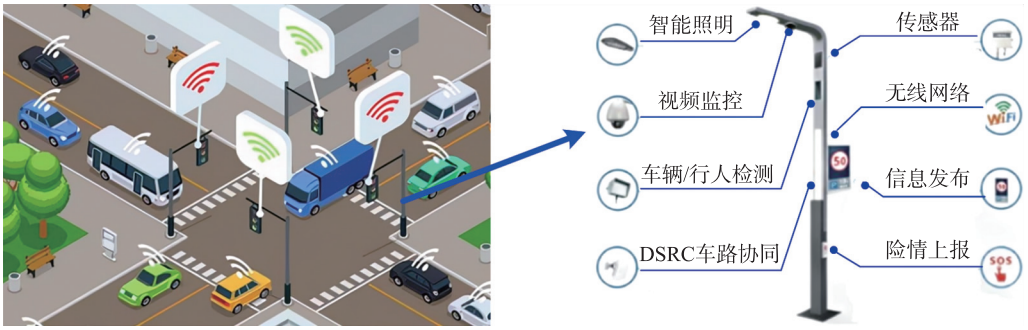

图 2　交通监测传感网络监测现场

表 1 仿真参数

类别	参数/设置	描述/数值	设定依据
网络参数	传感器节点数量	100	根据监测区域的大小、监测需求及成本预算确定
	网络拓扑	星型与树型混合	
	节点类型	地磁传感器(50) 摄像头(30) 环境传感器(20)	-
	分簇节点数量	10	网络负载和通信效率平衡需求
	传感器到分簇节点带宽	1 Mbps	数据传输需求和带宽资源分配策略
	分簇到中心节点带宽	10 Mbps	
	数据包大小	500 KB	实际应用场景中的数据传输需求
	数据包生成频率	1 包/秒/节点	
遗传算法	种群大小	50	平衡搜索效率和搜索深度，确保算法能够在有限的计算资源内找到高质量的解
	迭代次数	100	
	初始交叉概率	0.7	
	初始变异概率	0.01	
禁忌搜索算法	禁忌表长度	10	
	候选解数量	5	
	藐视准则	候选最优解适应度 > 当前最优解适应度×1.1	
性能指标	端到端延迟	≤ 100 ms	—
	数据包丢失率	≤ 0.5%	—
	资源利用率	≤ 80%	—
	带宽利用率	≤ 90%	—

以表 2 所示的不同流量模式作为前提，其中，流量模式 A 为低负载或基准流量；B 为中等负载流量；C 为高负载或峰值流量；D 为突发流量；E 为周期性流量；F 为背景流量；G 为特定应用流量；H 为异常流量；I 为混合流量；J 为极端或特定条件流量，证明所提方法的调度性能。

表 2 流量模式设定情况

流量模式	流量分布	峰值时段	数据包大小/kB	实时性需求/ms
A	均匀分布	无	10~50	100~200
B	波动分布	14:00—16:00	50~150	50~100
C	极不均匀分布	08:00—09:00,18:00—19:00	150~500	150~500
D	突发分布	任意时段	200~800	10~20
E	周期性分布	07:00—09:00,17:00—19:00	80~120	30~60
F	均匀分布	无	45 432	200~300
G	应用特定分布	根据应用而定	50~300 视频,10~50 文本	视频<50 ms,文本<100 ms
H	异常分布	不可预测	100~1000 攻击,5~50 扫描	攻击<10 ms
I	混合分布	根据各模式而定	10~800	根据各模式而定
J	极端分布	根据条件而定	>500 大型数据包,<10 小数据包	<10 ms

仿真过程中，为了确保所提方法的有效性，设定第 3 节部分的帧约束、链路约束等 6 大约束范围。具体为：帧约束的周期时间严格限制在 50 ms~100 ms 的范围内；链路约束的超周期设定为 200 ms；流传输约束要求同一帧在其路径上具有不同链路时，必须按照链路的物理连通性顺序传送数据流；端到端约束规定每个传输数据流的最大端到端时延必须小于 200 ms 的时延阈值；帧隔离约束在流量调度过程中，要求同一时间内同一队列中仅能保存一条传输数据流的帧；抖动约束则限制了传送和处理总时延与理想情况下的差值不得超过 10 ms 的最大延时阈值。同时，选用文献[5]粒子群优化方法、文献[7]循环神经网络方法进行对比，以平均吞吐量、网络丢包率、平均资源开销、平均端到端时延作为评价指标，仿真结果如下所示。

平均吞吐量是指网络在单位时间内成功传送的数据量，是衡量系统性能和网络通信效率的关键指标之一。在表 1 参数下，每个传感器节点以 100 个数据包/s 的速率发送数据，持续测量 1 min，得到不同流量模式的平均吞吐量结果，如图 3 所示。

通过图 3 能够看出，所提方法在所有流量模式下，平均吞吐量高于 5.2 GB·s，均高于循环神经网络

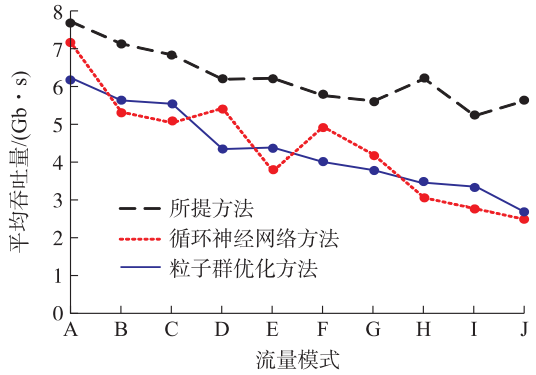

图 3　不同流量模式的平均吞吐量

方法、粒子群优化方法,证明所提方法首先明确交通监测传感网络的元素,进而求解网络拓扑与节点的二元组关系,建立了精确的交通监测传感网络模型。这一步骤确保了数据流动的准确性和效率,因此,可以有效地进行流量调度,减少时延,提高网络性能。循环神经网络方法整体平均吞吐量低于所提方法,特别是在高流量模式下,差距更为明显,说明循环神经网络在处理复杂多变的交通流量数据时,其调度效果受到一定限制。粒子群优化方法的平均吞吐量最低,趋势相对平缓,表明该方法在应对不同流量模式时的调度效果相对较差,无法适应交通流量的动态变化。综上所述,所提方法的交通监测传感网络实时流量调度性能较好,能够提高网络性能,令交通资源分配更加合理。

网络丢包率是指数据包丢失部分与所传数据包总数的比值,反映了网络传输的可靠性和稳定性。同样在表 1 的设定下,每个传感器节点以 200 个数据包/s 的速率发送数据,以模拟网络拥塞情况,持续测量 10 min,得到不同流量模式的网络丢包率结果,如图 4 所示。

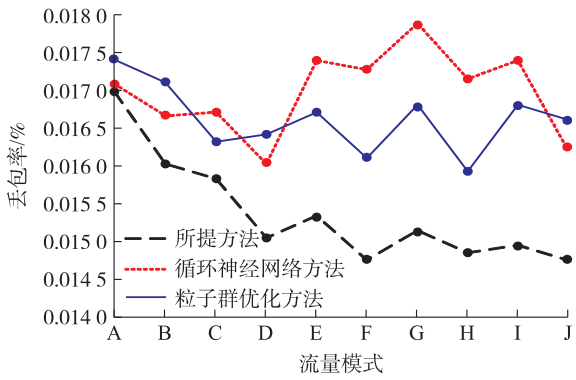

图 4　不同流量模式的网络丢包率

从图 4 能够得知,所提方法的丢包率低于 0.017 0%,明显低于循环神经网络方法、粒子群优化方法。表明所提方法在处理不同流量模式时具有更高的稳定性和更低的丢包率。总而言之,所提方法考虑了交通监测传感网络实时性要求高、数据量大且动态变化快的特点,设定了严格的流量调度约束条件。这些条件确保了数据流以连通性顺序传送,有效避免了因数据冗余和传输冲突导致的延误,从而优化了交通监测传感网络低时延实时流量调度,在不同流量模式下均展现出了优于循环神经网络方法和粒子群优化方法的网络调度性能,既保证数据传输的完整性和实时性,又提高交通监测传感网络的运行效率和可靠性。

平均资源开销是指在网络传输过程中,每个数据包所消耗的网络资源的平均值,反映了网络传输的效率和成本。从 10 个到 100 个不等,模拟不同数量的流量请求,并根据每个传感器节点的传输需求动态分配资源。在每个流量请求数量下,持续测量 3 min,得到不同流量请求数量的平均资源开销结果,如图 5 所示。

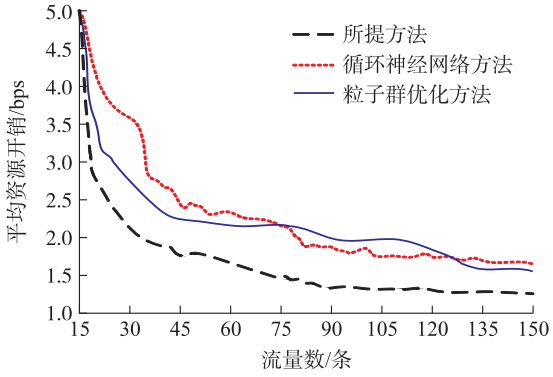

图 5　不同流量请求数量的平均资源开销

从图 5 可以得知,循环神经网络方法的平均资源开销最小值达到 1.7 bps,粒子群优化方法的平均资源开销最小值达到 1.6 bps,而所提方法的平均资源开销最小值达到 1.3 bps。当流量请求数量很少时,平均资源开销很高,当流量请求数量增多时,平均资源开销就会减少,并且在以后的时间里,平均资源开销不会有进一步的下降。这主要是因为在初始阶段,不存在资源竞争,平均资源开销对流量请求接收率的影响不大;然而,当流量请求很大时,为了接收尽量多的流量请求,就必须以最小的资源开销满足流量请求。综上所述,所提方法结合了禁忌搜索算法与遗传算法,通过综合考虑适应度、平均种群适应度和迭代数等因素,求解出自适应交叉概率,并获得了最佳变异方案适应度。通过充分利用遗传算法的全局搜索能力和禁忌搜索算法的局部搜索能力,有效避免了传统算法易陷入局部最优解的问题,从而在交通监测传感网络低时延实时流量调度方面表

现出色,能够更有效地利用系统资源,降低开销,提高交通监测传感网络的实时性和效率。

平均端到端时延是指从用户发出服务请求到可以收到服务响应的平均时间,反映了网络传输的实时性和用户体验。从 1 跳到 5 跳不等,模拟不同长度的数据传输路径,使用 ping 命令网络性能测试工具测量端到端时延。在每个流量请求数量和数据传输路径下,持续测量 5 min,得到不同流量请求数量的平均端到端时延结果,如图 6 所示。

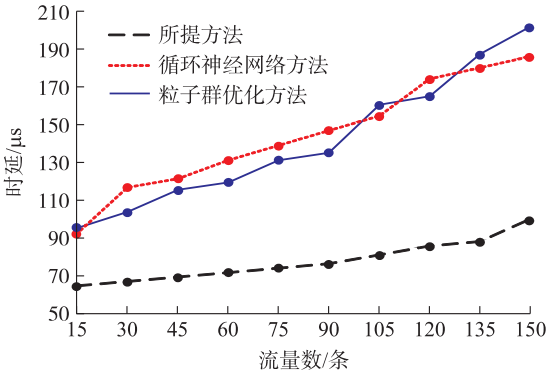

图 6 不同流量请求数量的平均端到端时延

通过图 6 可以明显看出,所提方法的平均端到端时延小于 100 μs,低于循环神经网络方法和粒子群优化方法。说明所提方法在处理不同流量请求数量时,注重资源的优化配置和负载均衡。通过动态调整网络资源的分配策略,确保了网络资源的有效利用,避免了因资源不足或分配不均导致的性能瓶颈,具有更高的效率,能够更有效地减少数据传输和处理的时间,特别是在流量增多时,所提方法的性能更加显著,时延增长相对缓慢,表现出良好的可扩展性和稳定性。

为了验证所提方法在交通监测传感网络中的实际应用性能,选择了三个不同的真实交通监测场景进行实验。其中,场景 1 为城市高峰时段交通监测,传感器节点密集,交通流量大且变化快。场景 2 为郊区非高峰时段交通监测,传感器节点较为稀疏,交通流量相对较小且稳定。场景 3 为高速公路交通监测,传感器节点沿道路分布,交通流量大且持续变化。在上述三种场景下,比较所提方法、粒子群优化方法和循环神经网络的性能,结果如表 3 所示。

由表 3 可知,粒子群优化方法通过粒子间的协作和竞争,能够快速找到较好的解,因此其在较简单的场景中(场景 2),计算时间较短。然而,在高交通密度和动态变化的场景中,网络延迟和数据传输成功率相对较低。这可能是因为粒子群优化方法在搜索过程中容易陷入局部最优。循环神经网络能够处理时间序列数据,对于交通流量的预测和调度具有一定的优势。然而,在本实验中,循环神经网络的网络延迟较高,数据传输成功率较低,资源利用率也相对较低。这可能是因为循环神经网络在处理高维和动态变化的交通数据时,模型的训练和优化变得复杂且耗时。所提方法在网络延迟、数据传输成功率和资源利用率方面表现优异,特别是在高交通密度和动态变化的场景中(场景 1 和场景 3),表现明显优于两种对比方法。这得益于其自适应的流量调度策略和高效的搜索算法。

表 3 不同方法在真实场景中的性能比较

场景	方法	网络延迟/ms	数据传输成功率/%	资源利用率/%	计算时间/s
1	所提方法	23	98	85	4.5
	粒子群优化方法	31	95	80	3.8
	循环神经网络	42	90	75	7.2
2	所提方法	18	99	78	3.2
	粒子群优化方法	25	97	75	2.9
	循环神经网络	35	92	70	6.5
3	所提方法	29	97	90	5.1
	粒子群优化方法	38	94	85	4.3
	循环神经网络	50	88	80	8.8

采用与表 1 相同的参数,设定单一禁忌搜索算法参数:禁忌表长度=10,候选解数量=5,藐视准则=候选最优解适应度>当前最优解适应度×1.1。单一遗传算法参数为:种群大小=50,迭代次数=100,初始交叉概率和初始变异概率根据原文方法动态调整。以端到端延迟为指标进行消融实验,结果如表 4 所示。

表 4 消融实验结果

对比方法	低负载端到端延迟/ms	中负载端到端延迟/ms	高负载端到端延迟/ms
禁忌搜索算法	110	125	140
遗传算法	105	115	130
禁忌+遗传算法	90	98	105

由表 4 可知,在所有负载情况下,结合禁忌搜索算法与遗传算法的所提方法的端到端延迟分别为 90 ms、98 ms 和 105 ms,均表现最优。因此,结合禁忌搜索算法与遗传算法在降低交通监测传感网络端到端延迟方面表现出色,且在不同负载情况下均能保持较低的延迟。因此,在实际应用中,所提方法能够更有效地实现低时延实时流量调度,满足交通监测系统的实时性要求。

5 结论

针对交通监测传感网络在实时数据采集和传输

过程中面临的流量大、动态变化快以及冗余数据导致的调度复杂性和决策准确性下降等问题,本文提出了交通监测传感网络低时延实时流量调度方法。仿真结果证实所提方法提升了交通监测传感网络的实时数据传输能力,减少了因数据冗余和传输延迟对交通决策准确性的影响,还优化了网络资源的利用效率,降低了系统整体能耗。虽然所提方法取得了较好的流量调度效果,为进一步优化其性能扩展其应用范围,未来将探索更先进的智能算法融合策略,通过深度学习算法与启发式算法的结合,以进一步提升流量调度的精确度和效率。同时,研究所提方法在智慧城市、物联网等其他类型网络中的适用性,探索更广泛应用场景的定制化调度策略。

参考文献:

[1] 洪莹,丁飞,崔峻,等. 城市交通流聚类仿真与特征识别研究[J]. 计算机仿真,2024,41(5):133-139,146.

[2] 吕悦晶,吴耀,张萌萌,等. 异质交通流环境下无信号 T 形交叉口控制策略[J]. 江苏大学学报(自然科学版),2024,45(4):387-395.

[3] 陈亚鹏,周振宇,韩东升,等. 电力+5G 前传网中融合时延敏感网络技术的流量调度方法[J]. 电子学报,2023,51(5):1141-1147.

[4] Sahoo A, Gao W, Ropitault T, et al. Admission Control and Scheduling of Isochronous Traffic with Guard Time in IEEE 802.11ad MAC[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing,2023,22(12):7218-7233.

[5] 高新成,刘威,王启龙,等. 基于 SDN 的混合分段路由概率流调度机制[J]. 计算机应用研究,2023,40(11):3382-3387.

[6] 王家兴,杨思锦,庄雷,等. 时间敏感网络中多目标在线混合流量调度算法[J]. 计算机科学,2023,50(7):286-292.

[7] Wei Z, Li Q, Zhu K, et al. DiffTREAT: Differentiated Traffic Scheduling Based on RNN in Data Centers[J]. IEEE Transactions on Cloud Computing, 2023, 11(3): 2407-2419.

[8] 杜林峰,崔金鹏,章小宁. 面向海量业务场景的网络智能流量调度算法研究[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版),2023,35(6):1062-1071.

[9] Sharma K G, Singh Y. Predicting Intrusion in a Network Traffic Using Variance of Neighboring Object's Distance [J]. International Journal of Computer Network and Information Security,2023,15(2):73-84.

[10] 唐婧壹,唐杰. 基于最小流量的宽带电子设备通信容量分配算法设计[J]. 电子器件,2023,46(6):1615-1620.

[11] 袁亚洲,郑雷雷,张健民,等. 面向现场级工业无线网络混合流量分级调度的时隙分配策略[J]. 控制理论与应用,2022,39(10):1915-1924.

[12] 肖漫漫,刘骥琛,李艳丽,等. 软件定义广域网中基于 IPv6 分段路由的双栈流量调度算法[J]. 重庆大学学报,2022,45(9):115-125.

[13] Wan J L, Lin S, Zhang Z F, et al. Scheduling Real-Time Wireless Traffic: A Network-Aided Offline Reinforcement Learning Approach[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2023,10(24):22331-22340.

[14] 王鸿鹏,王前,张晓阳,等. 基于 3D-Tabu 禁忌搜索的广域环境 MESH 网络节点部署优化算法研究[J]. 传感技术学报,2021,34(2):261-267.

[15] 潘虹,陈江萍,王玉芳. 基于混合遗传算法的皮革产业固废运输路径优化研究[J]. 中国皮革,2024,53(4):55-58.

张　彪(1985—),男,汉族,山东枣庄人,博士研究生学历,枣庄学院城市与建筑工程学院讲师。毕业于吉林大学交通学院交通信息工程及控制专业,主要研究方向为道路工程、智慧交通等。先后发表论文 9 篇,参与国家 863 重大课题、省部级科研项目 8 项。先后荣获山东省普通高等学校教师教学创新赛 3 等奖、山东省大学生测量技能大赛"优秀指导教师"等荣誉称号。指导学生荣获全国大学生测绘学科创新创业智能大赛 2 等奖、华东区大学生 CAD 应用技能竞赛 3 等奖等奖项,zhangbiao655@163.com;

张　轶(1985—),男,汉族,山东枣庄人,硕士研究生,国家注册一级造价工程师,毕业于安徽建筑大学结构工程专业,现任枣庄学院高级实验师,主要从事混凝土结构理论研究和工程造价研究,近五年发表科研论文十余篇,SCI 四区收录 3 篇,撰写专业教材一部,横向课题到账经费 100 余万元,zhy180212@163.com。