

基于模糊逻辑的铁路机车无线通信接入拥塞控制系统设计

白宏权^{1,2}

- 国能朔黄铁路发展有限责任公司, 山西 原平 034100;
- 石家庄铁道大学 电气与工程学院, 石家庄 050043)

摘要: 铁路机车无线通信主要用于列车与控制中心之间的数据传输, 如果通信网络出现拥塞, 会导致信息传输延迟或失败, 进而影响到列车的运行安全; 为了提高铁路机车无线通信接入的流畅性, 设计了基于模糊逻辑的铁路机车无线通信接入拥塞控制系统; 通过数据解析分类模块对数据包进行解析, 经过 WRED 模块完成丢包处理, 传输给队列模块, 通过队列的整理将数据传输给模糊逻辑控制器模块, 在模糊逻辑控制器模块中, 利用模糊逻辑理论, 设计了模糊控制规则, 依据逐跳拥塞控制, 完成系统的硬件设计; 在系统的软件设计中, 根据无线通信接入数据在队列模块的缓存情况, 感知无线通信接入节点的状态, 通过获取无线通信接入节点的剩余队列, 预测无线通信接入路径的拥塞情况, 在无线通信接入的最佳路径下, 设计了拥塞控制算法, 实现对铁路机车无线通信接入的拥塞控制; 测试结果表明, 设计系统的吞吐量可达到 4 000 kbps, 丢包率和节点死亡率均低于 1%, 能够有效控制无线通信接入的拥塞情况。

关键词: 模糊逻辑; 无线通信; 状态感知; 铁路机车; 拥塞控制

Design of Locomotive Wireless Communication Access Congestion Control System Based on Fuzzy Logic

BAI Hongquan^{1,2}

- Shuohuang Railway Development Limited Liability Company, Yuanping 034100, China;
- School of Electrical and Electronic Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: Locomotive wireless communication is mainly used for data transmission between trains and control centers. If there is a congestion in communication network, it will cause information transmission delay or failure, which will affect the operation safety of train. In order to improve the smoothness of locomotive wireless communication access, a fuzzy logic based congestion control system for locomotive wireless communication access is designed. The data packet is analyzed through the data analysis and classification module, and the WRED module completes the packet loss processing, which is then transmitted to the queue module. The data is organized and transmitted to the fuzzy logic controller module. In the fuzzy logic controller module, fuzzy control rules are designed by using fuzzy logic theory, and the hardware design of the system is completed based on hop by hop congestion control. In the software design of the system, according to the cache of the wireless communication access data in the queue module, the state of the wireless communication access node is sensed, and the congestion of the wireless communication access path is predicted by obtaining the remaining queue of the wireless communication access node. Under the optimal path of wireless communication access, a congestion control algorithm is designed to achieve the congestion control of the locomotive wireless communication access. The test results show that the designed system can achieve a throughput of 4 000 kbps, the packet loss rate and node mortality rate are both below 1%, and it can effectively control congestion in wireless communication access.

Keywords: fuzzy logic; wireless communication; state perception; locomotive; congestion control

0 引言

铁路机车中的无线通信系统是铁路运营的一项关键技术, 它是保证铁路机车运输安全和提高运输效率的主要手段^[1]。其中, 无线通信网络作为铁路机车通信接入的一个关键部分, 在铁路机车各项业务中, 可以实现数据的交换与传输。随着中国铁路和客运专线的建设不断深入, 铁路机车、信号、网络通信等相关领域的技术创新也在不断地发生着变

化。无线通信网络是一种基于通信协议、对铁路机车通信服务的具体要求进行完善和改进后, 而产生的一种铁路机车特有的无线电通信服务网络, 它承担着铁路机车的调度通信、C3 列车控制、客运站车、车地监控等多种交通通信服务^[2]。高速、高密度的铁路轨道交通对无线通信系统的安全提出了更高的要求。无线通信网络的不断发展, 对铁路机车接入无线通信网进行更深层次的安全性研究已经成为必然^[3]。若铁路机车无线通信网络出现拥塞现象, 极有可能引发信息传输

收稿日期: 2023-09-04; 修回日期: 2023-10-16。

作者简介: 白宏权(1982-), 男, 大学本科, 工程师。

引用格式: 白宏权. 基于模糊逻辑的铁路机车无线通信接入拥塞控制系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(10): 104-110.

失败的问题，降低列车行驶的安全性，因此，亟须研究一种铁路机车无线通信接入拥塞控制系统。

在国内的研究中，李国钦等人^[4]考虑到交叉路口路段高密度交通流导致的车联网拥堵问题，在 K-means 聚类法的基础上，设计一种车联网拥塞控制系统。基于 IEEE802.11P 的协议模型，将具有较高并发量的拥塞控制模块引入到系统设计中，将车与车之间距离作为 K-means 聚类算法的相似性判别指标，并结合 VANET 中的标准参数，构建一种适用于多个不同类型车联网的拥挤控制策略，以解决不同类型车联网中存在的节点交互不同步、节点密集时导致的高拥挤问题。实验证明，该算法在平均延迟、平均吞吐量、丢包率、冲突率等方面优于 CSMA/CA 算法。赖涵光等人^[5]考虑到传统算法在一些特定场景中的性能下降问题，在变化的场景下，设计一种通信网络传输协议的拥塞控制系统。通过仿真通信网络传输协议的实时环境，结合实际的环境参数，对场景进行识别。将现有的拥塞控制算法切换成对应场景下的拥塞控制算法。实验证明，相对于传统的基于节点间连接速率的控制算法、基于性能的控制算法等单一拥塞控制策略，该拥塞控制机制能够在多个应用场景中，实现对系统的整体吞吐量提高 5%、整体时延降低 10% 的效果。姜雨菲等人^[6]针对 V2G 环境下，由于 PLC 链路带宽有限和误码率高，已有 TCP 响应的拥塞控制系统缺少对数据丢失的准确判定，往往把噪音引起的链路随机误差数据丢失和网络数据丢失作为一种拥塞事件来对待，产生了不必要的拥挤规避，引发了系统的吞吐问题。针对这一问题，给出了一种新的网络流量管理方法。通过对网络的拥塞等级进行聚类预测，获取到网络的当前状态，以此为依据，估计出网络的可用带宽，判断存在的丢包类型，实现对网络拥塞窗口的调节。通过对已有的几种系统进行比较，实验证明，设计系统具有更高的阻塞窗口增长率、吞吐量、公平性、收敛速度和友好度，从而显著地提高了 V2G 网络的吞吐性能。在国外的研究中，Kiran 等人^[7]设计了一种网络状态感知的拥塞控制系统。该系统的主要目标是正确预测网络拥塞的严重程度，并根据拥塞程度调整数据的发送速率。采用模糊控制器，通过运行时间、动态参数（如缓冲区占用率、数据包发送速率和节点优先级）来推断拥塞的严重程度。基于这个决定性的信息，可以通过最小化冲突和拥塞，调节传输速率。仿真结果揭示了设计的 NSACC 系统在吞吐量、重传次数和丢包率方面的性能明显提升。

基于以上研究背景，本文将模糊逻辑应用到了铁路机车无线通信接入拥塞控制系统设计中，从而提高铁路机车无线通信网络的吞吐量。

1 铁路机车无线通信接入拥塞控制系统硬件设计

在铁路机车无线通信接入网络中，拥塞控制系统硬件由数据解析分类模块、WRED 模块、队列模块以及模糊逻辑控制器模块组成，整体框架如图 1 所示。

无线通信接入网络数据先进入到数据解析分类模块中，

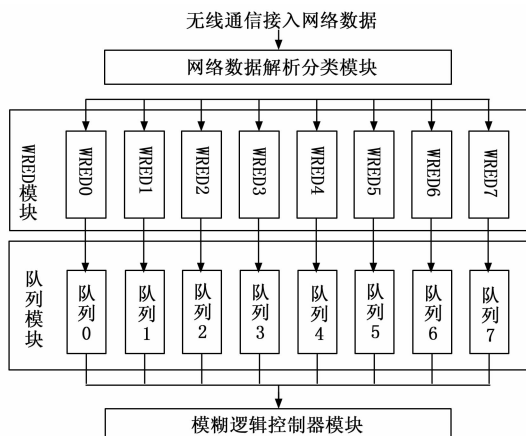


图 1 拥塞控制系统硬件框架图

通过数据包的解析，根据包头中的 IP 优先级字段，将解析分类模块中的数据包划分为 8 个类别，并传输给对应的 WRED 模块。

在 WRED 模块中，随机对接入铁路机车的无线通信数据进行丢包处理，将 WRED 模块划分为 8 个 WRED 子模块，并为其配置不同的模块参数，并传输给队列模块。

在队列模块中，缓存经过 WRED 模块处理的数据，通过队列的整理，为 WRED 模块实时提供数据的队列长度信息，队列模块是与 WRED 模块对应的，每一个 WRED 子模块对应一个子队列模块，经过队列模块的处理之后，将数据传输给模糊逻辑控制器模块。

模糊逻辑控制器模块是以模糊逻辑为基础，经过逻辑推理，得到网络数据的模糊集合，利用解模糊器将推理机的输出结果转换成清晰输出，通过调整控制器的增益，实现对铁路机车无线通信接入的拥塞控制。

1.1 数据解析分类模块设计

数据解析分类模块是对输入的无线通信接入数据进行解析与分类，根据包头中的 IP 优先级字段，对无线通信接入数据进行分类。解析分类模块的接口信号如图 2 所示。

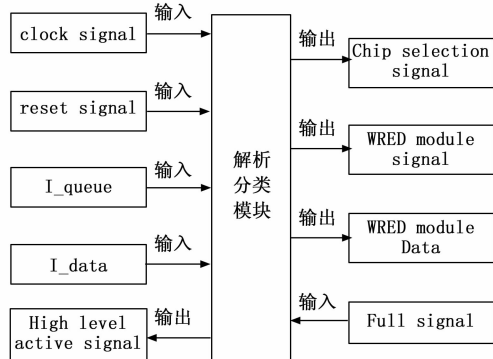


图 2 解析分类模块的接口信号图

解析分类模块包括 9 套接口信号，除去低电平复位信号和时钟信号之外，在这个模块的入口方向上还有 3 套信号，分别是 1 位写入的高电平有效信号、16 位输入数据信号和 1 位满信号。在出口方向中，包含了 8 位片选信号，它

被用在片选 WRED 子模块中，并且最多可以有 1 位高电平，1 位可以写出有效信号，32 位可以写出数据信号，1 位可以从 WRED 模块中得到反馈的将满信号。

1.2 WRED 模块设计

WRED 模块可以对经过解析分类处理的无线通信接入数据进行丢包处理^[8]，其结构如图 3 所示。

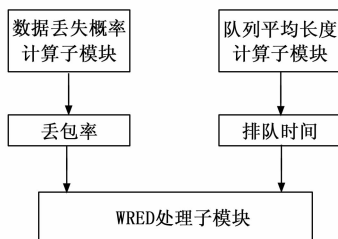


图 3 WRED 模块的结构框图

WRED 模块包括数据丢失概率计算子模块、队列平均长度计算子模块和 WRED 处理子模块。

1) 数据丢失概率计算子模块主要根据 WRED 处理子模块输入的数据丢失策略^[9]，对数据丢失的概率进行计算，并将数据传输到 WRED 处理子模块进行分析。

2) 队列平均长度计算子模块可以根据队列模型中所得到的队列长度，对队列数据进行统计，并计算出平均队列长度，最后将计算结果传输到 WRED 处理子模块中。

3) WRED 处理子模块通过计算数据丢失概率、最大队列长度、最小队列长度以及平均队列长度，来确定是否要丢弃进入的无线通信接入数据。如果排队的平均时间比最大队列长度的排队时间长，就会放弃进来的无线通信接入数据；如果排队的平均时间比最小队列长度的排队时间短，那么被准许进来的无线通信接入数据就会被送到排队中去；当队列的平均长度介于最大队列长度排队时间和最小队列长度排队时间之间时，根据数据丢失率的大小，将输入的无线通信接入数据舍弃。

为了降低 WRED 算法在无线通信接入铁路机车拥塞控制系统硬件实现中的难度，减少处理器芯片中的数据量，给出了 WRED 模块的接口信号，如表 1 所示。

表 1 WRED 模块的接口信号列表

信号名称	位宽	输入/输出	含义
clock signal	1	输入	时钟信号
reset signal	1	输入	低电平复位信号
I_Chip selection signal	1	输入	WRED 模块的高电平有效片选信号
I_WRED module signal	1	输入	读取 WRED 模块的高电平有效信号
I_Almost full signal	16	输入	读取无线通信接入数据
O_Request signal	1	输出	输出高电平将满信号
O_WRED module signal	1	输出	输出高电平有效信号
O_data	16	输出	输出队列模块的数据
I_Queue data length	12	输入	队列模块提供给 WRED 模块的队列长度

WRED 模块中一共包括 9 组接口信号，除去低电平复位信号和时钟信号之外，在这个模块的入口方向上还包括 4 组信号，分别为 1 位的 WRED 模块高电平有效片选信号、1 位的 WRED 模块高电平有效信号、16 位的无线通信接入数据和 12 位的 WRED 模块队列长度。在出口方向上，包括 1 位的高电平将满信号、16 位的队列模块数据和 1 位的高电平有效信号。

1.3 队列模块设计

无线通信接入拥塞控制中的队列模块不仅可以对 WRED 模块输出的无线通信接入数据进行缓存^[10]，并产生数据报文的请求信号，当某一个队列的子模块被调度时，发送无线通信接入数据，还可以将队列长度信息提供给 WRED 模块。队列模块的接口信号如表 2 所示。

表 2 队列模块的接口信号列表

信号名称	位宽	输入/输出	含义
clock signal	1	输入	时钟信号
reset signal	1	输入	低电平复位信号
I_queue	1	输入	读取队列模块的高电平有效信号
I_date	16	输入	读取数据
O_queue_length	12	输入	读取 WRED 模块的队列长度
O_Request signal	1	输出	输出高电平请求信号
I_answering signal	1	输出	输出高电平应答信号
O_data	16	输出	输出信号
O_Effective signal	1	输出	输出高电平有效信号

队列模块一共包括 9 组接口信号，除去低电平复位信号和时钟信号之外，在这个模块的入口方向上还有 3 套信号，分别是 1 位的读取队列模块高电平有效信号、16 位读取数据信号和 12 位的读取 WRED 模块队列长度信号。此模块在输出方向上具有一系列的信号，其中包括 1 位的输出高电平请求信号、1 位的输出高电平有效信号、16 位的输出信号和 1 位的输出高电平应答信号。

所谓的队列模块包括排队长度的计算子模块、仲裁信号的处理子模块和 FIFO 子模块^[11]。对于排队长度的计算子模块而言，首先获取 FIFO 写入和 FIFO 读取两个有用信号，如果 FIFO 写入和 FIFO 读取两个有用信号都是高电平，就意味着在这个时候，队列模块中的 FIFO 子模块进行同步的读取和写入，而 FIFO 的排队长度并没有变化，所以这个时候，排队长度计数器的值仍然是相同的。如果 FIFO 写入有效信号为高电平，而 FIFO 读取有效信号为低电平，这意味着在这个时候，在排队模块中的 FIFO 只是进行了写操作，而没有进行读写操作。如果 FIFO 的队列长度增大，那么这时队列长度计数器的值就会增大 1。如果 FIFO 写有效信号为低电平，而 FIFO 读有效信号为高电平，那么这个时候，排队模块中的 FIFO 进行读操作，而没有进行写操作，FIFO 的排队长度被减少，那么这个时候，排队长度计数器的数值就被减 1。如果 FIFO 写有效信号和 FIFO 读有效信号都为低电平，那么就意味着在这个时候，在排队模

块中的 FIFO 读写操作都没有进行，FIFO 的队列长度也没有变化，那么此时排队长度计数器的值就会维持不变。

仲裁信号的处理子模块可以针对无线通信接入数据产生仲裁请求信号^[12]，并对仲裁应答信号进行相应处理。

1.4 基于模糊逻辑设计拥塞控制器模块

将模糊逻辑理论引入到拥塞控制器设计中^[13]，无线通信接入铁路机车时需要使用信息中继，原因是下游网络节点通过执行模糊逻辑算法，向上游节点传输拥塞反馈信号。在传输反馈信号的过程中，需要信息中继按照一定方式为无线通信接入数据分配无线信道。

模糊规则是无线通信接入铁路机车拥塞控制器的核心，具体设计步骤如下：

1) 划分输入变量与输出变量的模糊集合：首先，针对拥塞控制器的输入和输出，划分模糊集合，一般情况下，被划分的各个模糊集合会用词集的方式来表达，将输入和输出变量划分为 7 个模糊集合。

划分的模糊集合越多，对无线通信接入铁路机车的拥塞控制效果越好。

2) 建立模糊子集：通过确定模糊子集隶属函数的曲线形状，建立模糊子集，隶属函数曲线如图 4 所示。

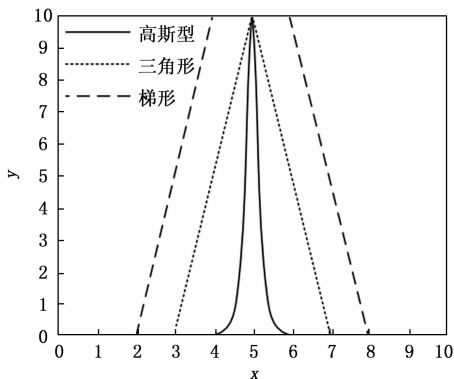


图 4 隶属函数曲线

图 4 中，高斯型隶属函数和三角形隶属函数的曲线形状比较尖锐，说明采用这种隶属函数对拥塞控制的灵敏度较高。

3) 建立模糊规则：模糊规则就是模拟手动控制的一种策略，通过一些条件词语将模糊集合中的对应词集编写成模糊规则。

在无线通信接入铁路接车时，因为各个节点的作用基本一致，不存在底层节点和中间节点，因此需要各个节点之间的相互协作，形成一个完整的网络。要使众多的节点之间进行通信，就必须使每一个节点都具备多跳的中继能力。利用信道干预优先级的方式^[14]，对无线通信接入进行拥塞控制，按照跳频传送的方式转发无线通信接入数据。每一个接入节点都需要执行模糊逻辑拥塞控制算法，经过 3 个步骤的处理，实现铁路机车无线通信接入的拥塞控制。逐跳拥塞控制原理如图 5 所示。

从图 5 可以清楚地看到，节点 A、节点 B 和节点 C 之

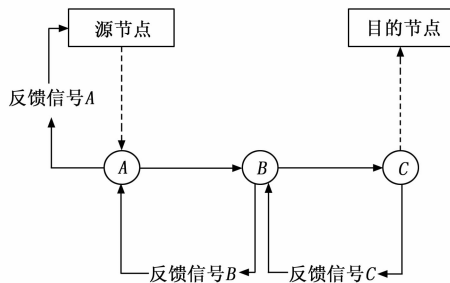


图 5 逐跳拥塞控制原理

间具有一定的联系，节点 C 是在进行一次模糊逻辑的拥塞检测之后，一次又一次地向源节点传递自己的拥塞反馈信息，而这个中间节点又穿过节点 B 和节点 A，在节点 B 接收到节点 C 的消息后，节点 B 根据来自节点 C 的消息和来自节点 B 的消息，再将处理后的结果传递到节点 A，如此类推，一次又一次地进行拥堵控制，从而减轻了整个网络的拥堵。

在 MAC 协议的 RTS/CTS 控制框架中写入无线通信接入拥塞信息，通过 MAC 层的传输机制^[15]，向上行节点隐蔽地传输数据，既可以减少节点的能耗，又可以减少由于“逐跳”消息传输造成的系统寿命损失。当由节点 B 计算出局部拥塞没有出现时，拥挤反馈信号在节点 B 停止。所以，只有当无线通信接入拥塞处于十分严峻的情况下，全条传输路径中的多个节点都会出现拥挤，只有这样，所有节点才会一跳一跳地将拥塞信息反馈给上端节点。

综上所述，通过数据解析分类模块、WRED 模块、队列模块和拥塞控制器模块的设计，完成系统的硬件设计。基于设计的硬件系统，为铁路机车无线通信接入拥塞控制系统提供高速的数据处理能力，提升拥塞控制系统的整体性能。

2 铁路机车无线通信接入拥塞控制系统软件设计

2.1 无线通信接入节点状态感知

队列模块对 WRED 模块输出的无线通信接入数据进行缓存时，根据缓存的占用情况，将无线通信接入节点划分为饱和节点和非饱和节点。在比较理想的条件下，指定时间段内的相遇节点中，将非饱和节点转换成饱和节点的极限值，也就是在 $[t, t + \Delta t]$ 区间内发生碰撞的非饱和节点数量，如式 (1) 所示：

$$A_{\max}(t) = A_v(t) - A_l(t) - A_s(t) \quad (1)$$

式中， $A_v(t)$ 为碰撞节点数量在 t 时段内与非饱和节点相等的数量， $A_l(t)$ 为相遇节点的数量， $A_s(t)$ 为饱和节点的数量。

如果饱和节点的数量为 0，就说明该节点并没有与任何节点发生碰撞，那么节点接收数据的上限为：

$$B_{\max} = \frac{V \times \Delta t}{B_{\text{size}}} - A_{\max}(t) \quad (2)$$

式中， Δt 为节点碰撞的最大延时， V 为数据传输的速率， B_{size} 为数据的大小。

依据铁路机车无线通信接入数据的转发机制, 当节点 a_k 和节点 a_q 相遇, 并且节点 a_q 内存在 B_{\max} 个节点 a_k 没有保存数据时, 无线通信接入节点的状态就会发生改变, 因此, 节点的状态变化概率可以通过公式 (3) 计算得到:

$$a(k, q) = \frac{a_k}{a_q} \times M_{\max} \quad (3)$$

式中, a_k 、 a_q 分别为第 k 、 q 个数据节点, M_{\max} 为最大节点数量。

当节点的状态发生变化时, 可以计算出非饱和节点转换为饱和节点或其他节点的数量, 公式为:

$$A_a(t) = a(k, q) \times B_{\max}(t) \quad (4)$$

通过对理想条件下的无线通信接入节点状态分析可知, 饱和节点处于饱和状态时, 几乎无法容忍其余的数据, 所以饱和节点的状态不会变化。在指定的时间段 Δt 内, 无线通信接入节点会主动放弃本地缓存中的过期数据, 可以将部分饱和节点转换成非饱和节点^[16], 那么在下一个时间段内, 与无线通信接入节点碰撞的饱和节点数量为:

$$A_s(t + \Delta t) = A_s(t) + [A_s(t) - A_s(t) \times P(t_{\min} < \Delta t)] \quad (5)$$

式中, $P(t_{\min} < \Delta t)$ 为饱和节点在指定时间段内放弃生命周期已截止数据的概率, t_{\min} 为饱和节点可以容纳的数据个数。

在比较短的时间段内, 与特定节点发生碰撞的节点数量都服从无线通信网络的结构分布^[17], 可以根据历史记录预测碰撞节点的数量。

在碰撞节点数量的预测阶段, 将 β 作为权重, 预测出下一个时间段发生碰撞的节点数量, 即:

$$M_{t+1} = \beta \times A_s(t) + (1 - \beta) \times M_{t-1} \quad (6)$$

式中, M_{t-1} 为上一个时间段预测的碰撞节点数量。

在指定的时间段 Δt 内, 无线通信接入节点的活动会受到一定限制, 可以将其看作是接入节点所处的范围内网络的结构相对稳定。那么可以得到下一个时间段内无线通信接入节点的状态感知, 表示为:

$$A_v(t + \Delta t) = M_{t+1} - A_s(t + \Delta t) \quad (7)$$

根据拥塞预测机制中获取的队列模块无线通信接入数据缓存状态, 感知无线通信接入节点的状态, 可提前发现拥塞现象, 提高预测的准确性。

2.2 预测无线通信接入路径的拥塞情况

为实现对无线通信接入路径拥塞情况的有效控制, 在分析无线通信接入节点状态与剩余队列的基础上, 获取相邻节点的剩余队列数据。该数据是无线通信接入路径选取的核心标准, 能够有效均衡访问通道的吞吐负荷。

在无线通信接入路径拥塞情况的预测机制中, 可以利用马尔科夫链对节点进行分析, 不同工作方式下的节点具有不同的马尔科夫链。如果一个节点有 n 种工作方式, 则可以利用 N 种马尔科夫链进行分析^[18]。无线通信接入节点在一条路径上的随机数为 X_0, X_1, X_2, \dots , 可以描述出无线通信接入节点上数据吞吐处理时间步长的状态。如果 $X_0 = u$, 说明第 m 个时间步长处于 u 状态下。除此之外, 如果

无线通信接入节点中某一个数据吞吐处理时间步长的状态为 u , 那么后续的时间步长就会在固定概率 p_{ij} 的限制下, 将自身的工作状态转变成 v , 将上述感知信号输入公式 (8) 中, 可以计算出无线通信接入节点的状态转移概率, 即:

$$p_{ij} = A_v(t + \Delta t) (X_{n+1} = v \mid X_n = u) \quad (8)$$

式中, X_n 为无线通信接入铁路机车时第 n 种工作方式的随机数。

根据无线通信接入节点的状态转移概率, 可以预测出节点吞吐量下降的具体情况, 并估计出状态信息。如果接入节点处于 u 状态下, 那么在 m 个时间步长内接入节点在 u 状态下的时间步长数为 m_u 。

假设 C_u 表示无线通信接入节点处于状态 u 的时间步长耗费队列, 对后续 m 个时间步长中节点消耗的队列总值进行预测, 得到:

$$C^m = \sum_{u=1}^m m_u \times C_u \quad (9)$$

通过计算 C^m 值, 可以准确获取无线通信接入路径的拥塞情况, 便于将资源优先分配给拥塞情况较严重的接入路径, 以提高整体的通信效率。

2.3 无线通信接入拥塞控制路径设计

根据无线通信接入路径的拥塞情况预测结果, 判断拥塞程度, 通过设计拥塞控制算法, 提高无线通信接入的吞吐量。在无线通信接入路径 L 中, 对数据的传输延时进行归一化处理^[19], 即:

$$f_{\tau}(L) = \begin{cases} C^m \frac{\tau_{\max} - \tau(L)}{\tau_{\max}} & \tau(L) < \tau_{\max} \\ 0 & \tau(L) \geq \tau_{\max} \end{cases} \quad (10)$$

式中, τ_{\max} 为无线通信接入铁路机车的最大传输延时, $\tau(L)$ 为路径 L 中数据的传输延时, 可以通过下式计算, 即:

$$\tau(L) = \sum \tau(g) + \tau(h) \quad (11)$$

其中: $\tau(g)$ 为无线通信接入路径 L 中节点 g 的拥塞程度, $\tau(h)$ 为路径 L 中链路 h 的拥塞情况。

假设 $K(L)$ 为无线通信接入路径的可用带宽, 利用公式 (12) 对无线通信接入路径 L 中的可用带宽进行归一化^[20]处理, 得到:

$$f_K(L) = \frac{K(L) - K_{\min}}{K_{\max} - f_{\tau}(L)} \quad (12)$$

式中, K_{\max} 和 K_{\min} 分别为路径 L 中的最大带宽和最小带宽。设置约束条件, 将满足约束条件的无线通信接入路径作为拥塞控制的最佳路径, 表示为:

$$s. t. \begin{cases} f_K(L) \leq \tau_{\max} \\ f_K(L) > \tau_{\max} \end{cases} \quad (13)$$

其中: 当 $f_K(L) \leq \tau_{\max}$ 时, 说明无线通信接入铁路机车的传输路径是可靠的, 而当 $f_K(L) \geq \tau_{\max}$ 时, 说明无线通信接入的所用带宽小于可用带宽范围。

综上所述, 通过感知无线通信接入节点状态, 预测无线通信接入路径的拥塞情况, 在无线通信接入的最佳路径下, 实现对铁路机车无线通信接入的拥塞控制。

3 实验分析

3.1 设置仿真场景

为了验证设计系统在无线通信接入拥塞控制中的性能，以 Matlab 作为仿真工具，设置了拥塞控制的仿真场景，具体如图 6 所示。

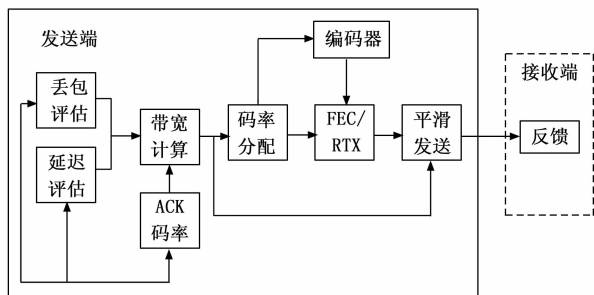


图 6 仿真场景

在图 6 的仿真场景中，数据通过发送端的一系列处理之后，可以传输到接收端，传输的过程中，先对数据的传输过程进行延迟评估和丢包评估，经过 ACK 误码率计算之后，计算出数据传输过程中的带宽，通过传输码率的分配，在 FEC/RTX 协议下，将数据传输到接收端。

3.2 设置实验参数

将无线通信接入铁路机车的过程部署在图 6 的场景中，在 Windows8 操作系统下，设置仿真参数如表 3 所示。

表 3 仿真参数

参数名称	参数大小	参数名称	参数大小
无线通信接入时延	5 ms	铁路机车网络带宽	36 Mbps
无线通信接入节点的数量	200 个	无线通信接入的最大缓存空间	120 kB
无线通信接入的队列长度	100 packets	网络空间大小	500 m * 500 m
无线通信接入的时隙	12 μs	仿真时间	100 s
无线通信接入节点的数据产生率	30 kbit/s	频率	10 GHz

表 3 中的仿真参数可以为无线通信接入拥塞控制实验提供稳定的实验环境，保证实验结果的真实性。

3.3 控制结果测试

将设计系统导入图 6 的仿真场景中，在表 3 仿真参数的支撑下，测试了拥塞控制前后无线通信接入铁路机车的吞吐量，结果如图 7 所示。

根据图 7 的结果可知，当无线通信接入铁路机车时，利用设计系统进行拥塞控制前后的吞吐量存在很大差别，在控制之前，吞吐量在 2 000 kbps 以下，经过设计系统的拥塞控制之后，吞吐量提升到 4 000 kbps 以上，有效提升了无线通信接入的流畅性。

3.4 对比分析

3.4.1 丢包率测试

为了突出设计系统在无线通信接入铁路机车拥塞控制

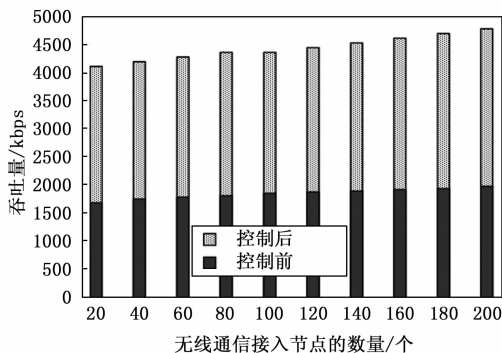


图 7 拥塞控制前后无线通信接入铁路机车的吞吐量

中的优越性，引入基于 K 均值聚类的控制系统和基于场景变化的控制系统进行对比实验，测试了无线通信接入的丢包率和节点死亡率，结果如图 8 所示。

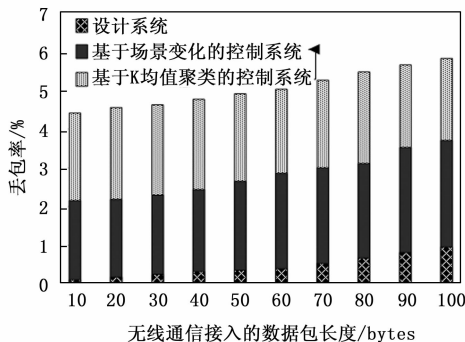


图 8 无线通信接入的丢包率

从图 8 的结果可以看出，采用基于 K 均值聚类的控制系统时，无线通信接入铁路机车的丢包率在 4%~6% 之间；采用基于场景变化的控制系统时，无线通信接入铁路机车的不同场景下，丢包率虽然有所下降，但是仍然超过了 2%。而采用设计系统时，由于模糊逻辑能够对无线通信接入节点进行逐跳处理，将丢包率控制在 1% 以内。

3.4.2 节点死亡率测试

基于上述结果，对 200 个无线通信接入节点进行 10 次测试，测试 3 种系统的节点死亡率，结果如图 9 所示。

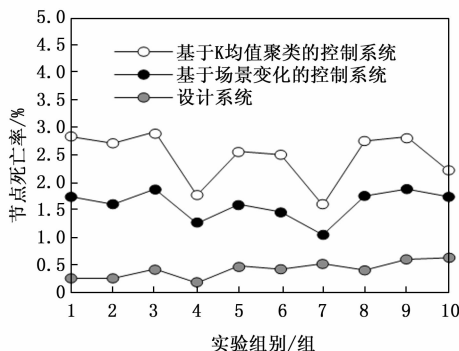


图 9 无线通信接入的节点死亡率

图 9 的结果显示，采用基于 K 均值聚类的控制系统时，无线通信接入的节点死亡率在 1.5%~3% 之间，说明 K 均值聚类对拥塞控制的效果还有待于提升。采用基于场景变

化的控制系统时，无线通信接入的节点死亡率在 1%~2% 之间，控制效果较好，但还有上升的空间。而采用设计系统时，无线通信接入的节点死亡率低于 1%，说明利用模糊逻辑设计的拥塞控制器可以避免无线通信接入节点出现大量死亡现象，提高控制效果。

4 结束语

本文设计了基于模糊逻辑的铁路机车无线通信接入拥塞控制系统，通过硬件设计和软件设计相结合的方式，保证无线通信接入铁路机车的流畅性，结果显示，该系统可以有效降低无线通信接入的丢包率和节点死亡率，具有良好的无线通信接入拥塞控制能力。

参考文献:

[1] 帅 斌, 秦梦瑶, 许旻昊. 基于元胞自动机的高速铁路列车运行仿真研究 [J]. 计算机仿真, 2022, 39 (8): 153-159.

[2] 冯 维, 徐永鑫, 王 凤, 等. 无线多跳网络联合拥塞控制和功率分配的快速二阶算法 [J]. 控制与决策, 2020, 35 (1): 99-106.

[3] 程 前, 王福平. 基于往返时延梯度的多路径拥塞控制算法 [J]. 计算机工程与设计, 2023, 44 (4): 1027-1034.

[4] 李国钦, 孙友伟, 柴永平. 车联网中基于 K 均值聚类的拥塞控制方法 [J]. 计算机工程与设计, 2020, 41 (2): 334-338.

[5] 赖涵光, 李 清, 江 勇. 基于场景变化的传输控制协议拥塞控制切换方案 [J]. 计算机应用, 2022, 42 (4): 1225-1234.

[6] 姜雨菲, 梁向阳, 唐俊勇. V2G 网络中基于带宽自适应的拥塞控制协议优化 [J]. 计算机应用研究, 2021, 38 (12): 3719-3724.

[7] KIRAN M V, NITHYA B. Network status aware congestion control (NSACC) algorithm for wireless body area network [J]. Procedia Computer Science, 2020, 171: 42-51.

[8] 秦久人, 许长桥, 杨树杰, 等. 基于深度增强学习与子流耦合

(上接第 103 页)

[12] HU P D. A Self-calibration method for the installation errors of rotation axes based on the asynchronous rotation of rotational inertial navigation systems [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65 (4): 3550-3558.

[13] 徐 庚, 何永旭. 惯导系统传递对准模型的研究进展综述 [J]. 无人系统技术, 2024 (1): 36-49.

[14] YANG J, WANG X, JI X, et al. A new high-accuracy transfer alignment method for distributed INS on moving base [J]. Measurement, 2024, 227: 114302-114310.

[15] ZHAO Y M, YAN G M, QIN Y Y. A novel alignment method for SINS with large misalignment angles based on EKF2 and AFIS [J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2020, 20 (21): 5975-5975.

[16] 崔 潇, 秦永元, 杨小康, 等. 战术级捷联惯导方位装订的半自主对准 [J]. 弹箭与制导学报, 2019 (2): 40-43.

[17] 王艳永, 杨功流, 王永苗, 等. 捷联惯性导航系统动态传递对准性能综合评估 [J]. 中国惯性技术学报, 2013 (4): 425-429.

[18] 宋亚风. 机载捷联惯导系统快速传递对准技术研究 [D]. 南

感知的多路传输控制机制 [J]. 电子学报, 2022, 50 (2): 346-357.

[9] 王龙翔, 董 凯, 李小轩, 等. 面向虚拟数据空间的智能 TCP 拥塞控制算法 [J]. 西安交通大学学报, 2021, 55 (5): 83-91.

[10] 周小玲, 付银莲. WSN 中的最大冗余丢弃和覆盖传输拥塞控制 [J]. 计算机工程与设计, 2021, 42 (7): 1844-1850.

[11] 侯 睿, 刘俊康, 张成俊, 等. 基于 ZigBee 的医疗监测系统自适应拥塞控制方法 [J]. 中南民族大学学报: 自然科学版, 2020, 39 (6): 632-636.

[12] 邢光林, 胡 青, 侯 睿. 命名数据网络中一种显式拥塞控制方法研究 [J]. 中南民族大学学报 (自然科学版), 2022, 41 (2): 228-234.

[13] 陈梦婷, 田 茂, 陈小莉, 等. 基于卫星延迟容忍网络的拥塞控制机制研究 [J]. 小型微型计算机系统, 2020, 41 (5): 1059-1064.

[14] 贾 璐. 基于聚合等级的 5G 通信下行信道传输控制系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2022, 30 (8): 90-95.

[15] 潘成胜, 张 松, 赵 晨, 等. 一种基于 TCP-ARED 的网络动态拥塞控制策略 [J]. 火力与指挥控制, 2023, 48 (1): 1-7.

[16] 崔建群, 黄东升, 常亚楠, 等. DTN 中基于消息质量度和节点可信度的拥塞控制 [J]. 计算机科学, 2021, 48 (4): 268-273.

[17] 赵静静, 袁璐洁. 基于排队时延主动探测的多路传输拥塞控制 [J]. 计算机工程与设计, 2021, 42 (3): 628-635.

[18] 杨美艳. 基于数据驱动的无线传感器网络拥塞控制 [J]. 沈阳工业大学学报, 2022, 44 (5): 570-574.

[19] 曲大鹏, 张建坤, 吕国鑫, 等. 命名数据网络中带宽时延感知的拥塞控制机制 [J]. 计算机科学与探索, 2022, 16 (5): 1076-1086.

[20] 杨 戈, 朱永豪. 基于负载预测的车联网信道拥塞控制策略 [J]. 电子技术应用, 2022, 48 (3): 64-67.

京: 东南大学, 2020.

[19] 蔡远文, 程 龙, 辛朝军, 等. 航天装备测试技术现状与发展 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (9): 1-4.

[20] 高 山, 杨玖文, 李彦峰. 航天快速发射测控支持模式研究 [J]. 导弹与航天运载技术 (中英文), 2023, (5): 75-79.

[21] 熊童满, 王 维. 水下无人装备声呐发射机自动测试系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2023 (12): 76-83.

[22] 梁 旗, 吴 伟, 张凯强, 等. 一种点火控制系统自动测试设备设计与应用 [J]. 计算机测量与控制, 2023, 32 (12): 64-68.

[23] 廖 欣, 朱建华, 卞付国, 等. 利用“三再”方法提升导弹武器装备可靠性的研究与实践 [J]. 空天防御, 2023, 6 (1): 11-16.

[24] 冯晓彬, 王 永, 王 磊. 基于数据模拟的惯性卫星组合导航系统测试 [J]. 电子测试, 2022 (11): 76-78.

[25] 吴超越. 捷联惯导模拟器及测试系统设计 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.

[26] 王召利, 范文晶, 张明利, 等. 一种用于简弹测试条件下的软件升级方法 [J]. 空天防御, 2023, 6 (1): 45-48.