

基于 CANopen 的列车通信网络状态反馈控制系统设计

贾寒霜¹, 张卡², 杨碎明¹

(1. 西安交通工程学院, 西安 710300; 2. 中国化学工程第十四建设有限公司, 南京 210044)

摘要: 列车通信网络负载过大, 会导致数据传输延迟或丢失, 进而影响系统的反馈控制效率和准确性; 为了保证列车通信网络的安全性, 设计基于 CANopen 的列车通信网络状态反馈控制系统; 增设 CANopen 网关设备, 改装列车通信网络数据采集器和网络状态反馈控制器, 调整反馈控制器驱动电路的连接方式, 完成系统硬件的优化; 设置 CANopen 作为列车通信网络的通信协议, 采用报文捕获的方式采集列车通信网络实时状态数据, 通过网络状态特征的提取与匹配, 确定当前列车通信网络状态; 从缓存长度、负载、时延等方面, 计算列车通信网络的控制量, 通过公平分配列车通信网络信道、列车通信网络拥塞调度控制两个步骤, 实现系统的列车通信网络状态反馈控制功能; 实验结果表明, 在铁路列车和公路列车通信网络环境下, 负载控制误差平均值分别为 0.6 Mbps 和 0.8 Mbps, 在所提方法控制下, 通信网络的缓存队列长度平均为 10 Mbps, 由此证明优化设计方法在控制功能和控制效果方面具有明显优势。

关键词: CANopen 协议; 列车通信网络; 状态反馈; 网络状态控制

Design of Train Communication Network State Feedback Control System Based on CANopen Protocol

JIA Hanshuang¹, ZHANG Ka², YANG Suiming¹

(1. Xi'an Traffic Engineering Institute, Xi'an 710300, China;

2. China National Chemical Engineering No. 14 Construction Co., Ltd., NanJing 210044, China)

Abstract: Excessive load on train communication network results in data transmission delay or loss, thereby affecting the efficiency and accuracy of system feedback control. To ensure the safety of the train communication network, a train communication network status feedback control system based on CANopen protocol is designed. Add the CANopen protocol gateway device, modify the train communication network data collector and network status feedback controller, and adjust the connection mode of the feedback controller driving circuit to optimize the hardware of the system. The CANopen is taken as the communication protocol for the train communication network, the real-time status data of the train communication network is collected using the message capturing. By extracting and matching the network status features, the current state of the train communication network is determined. The control variables of the train communication network are calculated through the factors of buffer length, load, and delay. The status feedback control of the train communication network is achieved through two steps of the fair allocation of train communication network channels and train communication network congestion scheduling control. Experimental results show that under the railway train and highway train communication network environments, the load control average errors reaches by 0.6 Mbps and 0.8 Mbps, respectively. By using the proposed method, the buffer queue average length of the train communication network reaches by 10Mbps, the results show that the optimal method has significant advantages in control functionality and effectiveness.

Keywords: CANopen protocol; train communication network; status feedback; network state control

0 引言

随着现代列车通信技术的发展, 比较成熟的列车系统都配备了完整的通信网络, 通信网络已经成为了列车的一个重要组成部分^[1-3]。列车通信网络是一种以计算机网络为核心的分布式网络控制系统, 列车通信网络的总体结构包

括了两级总线层次架构^[4-6]。由于列车处于行驶状态, 其通信网络环境也随之发生变化, 从而形成一种复杂的通信网络环境, 导致其在运行过程中极易出现异常、故障状态, 影响网络的通信效率^[7]。为解决上述问题, 需设计列车通信网络状态反馈控制系统。

列车通信网络状态反馈控制系统可以实时监控流量走

收稿日期: 2023-05-31; 修回日期: 2023-07-12。

作者简介: 贾寒霜(1988-), 女, 大学本科, 讲师。

杨碎明(1971-), 男, 硕士, 副教授。

引用格式: 贾寒霜, 张卡, 杨碎明. 基于 CANopen 的列车通信网络状态反馈控制系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(5): 115-121.

向、网络速度,实时获取准确的网络状态,而网络状态反馈则是将各状态变量与其对应的反馈系数相乘,反馈到输入端与参考输入相加,其和作为被控网络的控制信号。目前针对网络状态控制系统的研究成果较多,文献[8]提出基于有色 Petri 网的列车通信控制系统切换方法,构建基于有色 Petri 网的模式转换模型,并在此基础上,对不同的对点式通讯列车控制系统在不同的工作时间区间内的切换实时性进行研究。文献[9]提出高速列车总线式与交换式网络控制系统重联方法。在高速动车组网络控制系统中,主要有两种通信方式,一种是总线式,另一种是交换式。因为这两种网络控制系统的技术特征和工作原理都不相同,为实现互联互通,提出了一种高速列车总线式与交换式网络控制系统的重联方案,通过设计列车网络拓扑方案、自适应重联策略,实现高速列车总线式与交换式网络互联互通。文献[10]提出基于 Backstepping 非线性控制器的偏微分方程物理系统欠驱动网络状态反馈控制方法。偏微分方程的欠驱动网络由两个子系统通过边界互连。两个子系统中只有一个子系统被启动,基于 backstepping 方法及反步变换构建第一个反馈,以解决驱动子系统中存在的域内耦合,然后引入预测跟踪控制器来控制第二个 PDE 子系统。最后,将所提出的控制方法与低通滤波器相结合,实现网络状态反馈控制。上述控制系统应用到列车通信网络环境中,由于无法适应网络状态的更新速度,导致出现控制效果不佳的问题,具体体现在拥塞风险大、误码率和丢包率高等方面。

基于上述问题,设计基于 CANopen 的列车通信网络状态反馈控制系统。CANopen 是一种架构在控制局域网络上高层通信协议,具有高效、可靠、灵活等优点。本文将详细介绍 CANopen 协议的特点和应用,通过采集列车各个节点的实时状态信息,实现对列车运行状态的监测和控制,提高列车运行的安全性和可靠性。将 CANopen 协议应用到列车通信网络状态反馈控制系统的优化设计工作中,以期能够提高对列车通信网络状态的控制效果,间接提升列车的通信效率。

1 列车通信网络状态反馈控制系统硬件设计

优化设计的列车通信网络状态反馈控制系统分为网络状态检测和网络状态控制两个部分,其中,通过网络状态检测确定当前列车通信网络是否存在运行异常,并根据网络状态的检测结果判断是否需要执行系统的控制程序。而网络状态控制主要就是针对存在异常的网络,通过对网络流量、传输队列的控制,使网络状态重新恢复到正常状态。为实现上述功能,需要在软件程序开发之前,设计相关的硬件设备,为软件功能的实现提供硬件支持。本文通过 CANopen 网关设备和列车通信网络数据采集器实现网络状态检测,通过网络状态反馈控制器和反馈控制器驱动电路设计,来实现网络状态控制。

1.1 CANopen 网关设备

利用 CANopen 网关设备,通过监测 CAN 总线上的通

信活动来实现网络状态检测。CANopen 网关设备会监听 CAN 总线上的数据帧,并根据 CANopen 协议解析和处理这些数据帧。在网络状态检测方面,CANopen 网关设备会检测 CAN 总线上的节点是否正常运行,并获取节点的状态信息。CANopen 网关设备能够实时检测和监控 CAN 总线上节点的状态,包括节点的存在、运行状态和错误情况。这样的网络状态检测可以帮助确保 CANopen 通信网络的稳定性和可靠性,并及时发现和及时处理可能出现的问题。

CANopen 网关装置的主要作用就是把 CAN 总线以及 RS485 总线连接起来,并实现 CANopen 和 RS485 之间协议的转换,使显示器接收到 CANopen 传输的网络数据。所述网关还可以对 CAN 总线和 485 总线中的数据进行封装和处理,并将其转换为 CANOPEN 总线协议格式的数据发送给 CANOPEN 总线;同时,网关板接收来自 CANOPEN 总线的信号并将其传输到对应的 CAN 总线和 485 总线上。优化设计列车通信网络状态反馈控制系统中,安装的 CANopen 网关设备结构如图 1 所示。

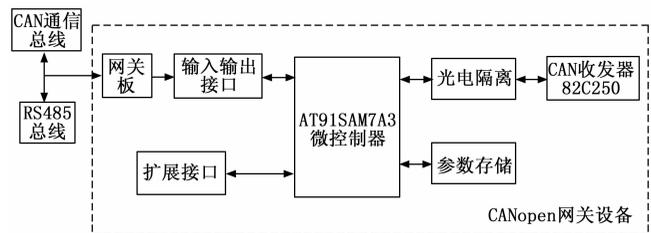


图 1 系统 CANopen 网关设备内部结构图

从图 1 中可以看出,CANopen 网关设备采用模块化结构,由微控制器、CAN 收发器等模块组成。CANopen 网关设备以 AT91 SAM7A3 型号的微处理器作为核心部件,微处理器中的芯片闪存可以在 JTAG-ICE 接口中进行程序设计,内置的锁定位能够保护固件不被错误地覆盖。在 Flash 没有被激活的时候,它会自动进入备用状态。

1.2 列车通信网络数据采集器

优化设计列车通信网络数据采集器的目的是提升网络数据的采集质量,进而保证列车通信网络状态的检测精度。列车通信网络数据采集器通过监听网络数据流量,捕获经过网络的数据包,对捕获到的数据包进行解析,提取其中的关键信息。列车通信网络数据采集器可以判断网络的状态。它可以帮助识别网络中的问题并提供相关信息,以支持网络维护和故障排除工作。这样可以确保列车通信网络的稳定性和可靠性,从而提高列车运行的安全性和效率。采用自顶向下的方式进行数据采集器的设计,数据采集器主要针对列车通信网络流量数据进行采集,优化设计的采集器由抽样模块、计时模块和映射模块两部分组成,依据列车通信网的传输协议,从前端采集到的数据包中抽取数据包,实现对统计流量的约减。在实际的数据收集中,利用周期性采样方法,按照一定的时间间隔进行采样,每隔 N 个数据报文抽取下一个数据报文。被抽样的报文内容具体包括:抽取源 IP 地址、目的 IP 地址、源端口、目的端

口等特征信息。计时模块使用 32-bit 定时器做为统计的时间标记, 记录采样数据报文到达系统的时间, 为以后的数据流信息管理提供了一个时间基准。

1.3 网络状态反馈控制器

采用 CAN 控制器与反馈控制器相结合的方式, 优化系统使用的网络状态反馈控制器。图 2 为网络状态反馈控制器的内部结构。

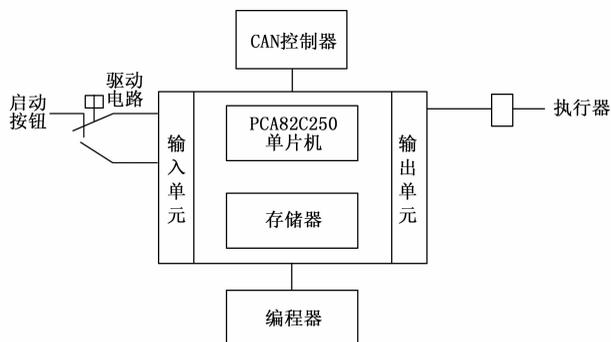


图 2 网络状态反馈控制器设计结构图

网络状态反馈控制器能够实时监测列车通信网络的状态, 并根据实际情况进行反馈控制。这样可以及时调整网络资源分配和数据传输策略, 以保持网络的稳定性、高效性和安全性。控制器中 CAN 控制元件采用了 PCA82C250 单片机, 实现了对微分信号的快速、稳定地收发。通过 PCA82C250 单片机不断地监测列车通信网络的实时状态, 包括检测网络的负载情况、缓存队列长度、时延等指标。通过实时监测, 控制器可以获取关于网络性能和健康状态的信息。基于实时监测到的网络状态信息, 网络状态反馈控制器会计算出相应的控制量, 网络状态反馈控制器会制定相应的控制策略。为增强其抗干扰能力, 在控制器中使用了双路电源模块进行供电, 最终将 CAN 控制元件加设到传统的反馈控制器中, 完成网络状态反馈控制器的优化。

1.4 反馈控制器驱动电路设计

以列车通信网络状态的检测结果为驱动信号, 驱动优化设计反馈控制器的运行, 图 3 为反馈控制器驱动电路的设计结果。

驱动电路的基本作用就是生成控制设备开启或关断的信号。将图 3 表示的反馈控制器驱动电路嵌入到优化设计的反馈控制器前端, 使得控制器能够根据软件指令完成启停切换。

2 列车通信网络状态反馈控制系统软件功能设计

在系统硬件设备的支持下, 对列车通信网络的实时运行状态进行检测, 并将检测结果反馈给控制终端, 控制器根据反馈的状态检测结果, 计算通信网络控制量, 并生成相应的控制指令, 从而实现列车通信网络状态反馈控制系统的软件功能。选择 C++ 编程语言、MATLAB 开发框架来开发列车通信网络状态反馈控制系统的软件部分, 在软件开发流程中, 首先设置 CANopen 列车通信网络协议, 开

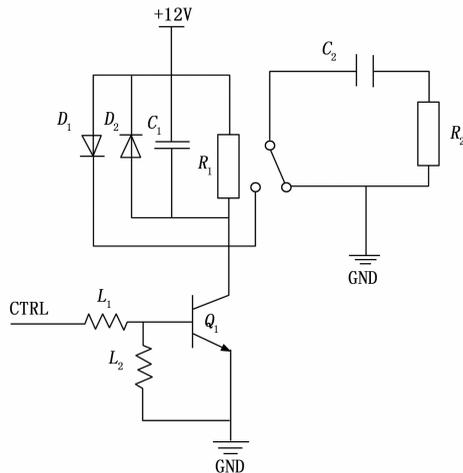


图 3 反馈控制器驱动电路图

发数据采集模块, 用于从列车通信网络中获取实时数据; 开发状态检测模块, 实现列车通信网络状态检测与反馈; 计算列车通信网络控制量, 实现列车通信网络状态反馈控制功能。将开发完成的软件部署到目标系统中, 并进行运行环境的配置和优化。确保软件在实际列车通信网络中稳定。

2.1 设置 CANopen 列车通信网络协议

CANopen 用来实现列车通信网络中网络层以上的协议。CANopen 支持网络管理、设备监控以及各节点之间的通信。在优化设计的列车通信网络状态反馈控制系统中, 设置 CANopen 协议作为控制指令的约束条件, 为网络状态提供控制目标。CANopen 协议的软件执行过程如图 4 所示。

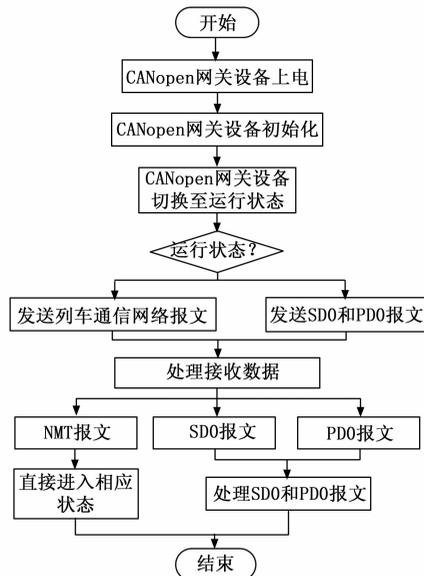


图 4 CANopen 通信协议执行流程图

列车通信网络 CANopen 协议定义了 2 种通信对象, 其中 SDO 对象用于在列车通信网络中进行组态信息的传输, PDO 对象用于实时进行通信数据的传输。列车通信网络的

状态切换是通过对 NMT 消息指令字的判断, 读取和写入消息标记字节码, 采用程序的散化方法来实现的。在列车通信网络状态控制切换过程下, CANopen 协议中的 CAN 波特率可以表示为:

$$\eta_{\text{CAN}} = \frac{f_{\text{clock}}}{T_{\text{SEG1}} + T_{\text{SEG2}} + 3} \quad (1)$$

式中, f_{clock} 为列车通信网络状态反馈控制器的时钟频率, T_{SEG1} 和 T_{SEG2} 分别对应的是控制器中时序寄存器和状态寄存器中的位。对于 PDO 和 SDO 通信对象按照列车通信网络报文标记字节码指示的当前状态来单独处理。

2.2 采集列车通信网络实时状态数据

采集列车通信网络实时状态数据的目的是为网络状态的检测提供数据支持, 具体的采集内容包括通信流量、任意节点的发送数据量与接收数据量等, 采用数据捕获的方式, 获取列车通信网络中的实时运行数据^[11]。如果有一个网络节点发送数据, 那么网络中的其他节点总是会被监听, 数据帧可以被任何站点接收, 否则就会被抛弃, 将系统硬件中的采集器调整至混合模式, 此时采集器就能接收到经过列车通信网络的所有数据帧, 并将其传递到更高层次的网络层。最终得出的网络流量数据采集结果可以表示为:

$$x_{\text{flow}} = \eta_{\text{CAN}} \times B \times \sigma \times \Delta t_{\text{communication}} \quad (2)$$

式中, B 表示列车通信网络信道容量, σ 为信道占空比, $\Delta t_{\text{communication}}$ 为网络的连续通信时间^[12]。同理可以得出其他反映网络运行状态的数据采集结果, 利用公式 (3) 实现实时状态采集数据的融合处理。

$$X = \sum \omega_1 x_{\text{flow}} + \omega_2 x_{\text{sending}} + \omega_3 x_{\text{receive}} \quad (3)$$

式中, x_{sending} 和 x_{receive} 分别为通信网络的发送数据量和接收数据量, ω_1 、 ω_2 和 ω_3 表示的是不同状态数据的权重系数, 通过公式 (3) 的处理, 将列车通信网络状态实时采集数据以集合的形式表示。

2.3 列车通信网络状态检测与反馈

列车通信网络的运行状态可以分为正常通信、异常通信以及静止 3 种状态, 其中异常通信状态主要就是指通信拥塞状态, 而静止状态则表示当前通信网络中不存在通信行为^[13]。以采集的列车通信网络实时状态数据为研究对象, 从负载、时延等方面, 提取当前通信网络的运行特征。定义列车通信网络节点 i 的缓存长度为:

$$L_i = \begin{cases} XL_{i-1}, & T_1 + T_{\text{min}} < T_2 \\ X(T_2 - T_1) \times \Delta L + L_{i-1}, & T_1 + T_{\text{min}} \geq T_2 \end{cases} \quad (4)$$

式中, L_i 和 L_{i-1} 分别为当前节点和邻居节点的缓存长度, ΔL 为缓存长度变化量, T_1 、 T_2 和 T_{min} 分别对应的是当前时刻、下一时刻以及最小通信时间^[14]。那么在当前时刻, 列车通信网络中第 i 个节点的负载总量可以表示为:

$$\tau_w(i) = L_i + \sum N_{\text{CN}} \quad (5)$$

式中, 变量 N_{CN} 表示 i 节点通信范围内的节点集合。若公式 5 的计算结果高于通信信道容量阈值 L_{max} 时, 当前通信网络可能处于拥塞状态, 若要得出精准的检测结果还需要进一

步对网络的其他特征进行提取与匹配^[15]。设置网络通信时延特征为 τ_{RTT} , 该特征的提取结果为:

$$\tau_{\text{RTT}} = \tau_w(i) \sqrt{\frac{U_{\text{max}}}{d^2 X}} \sqrt{\frac{dt^2}{dt^2}} \quad (6)$$

式中, U_{max} 表示最大传输单元, 最终提取的时延特征用来反映发送端传输一个包到收到相应确认的时间。另外, 通信速率特征的提取结果为:

$$\tau_v = \frac{\tau_{\text{RTT}} \times \gamma_{\text{code}} \times \gamma_{\text{modulate}} \times n_x}{\Delta t_{\text{communication}}} \quad (7)$$

式中, γ_{code} 和 γ_{modulate} 分别表示列车通信网络数据传输过程中的调制与编码系数, n_x 为采集的网络状态数据量^[16]。最终利用公式 (8) 对提取的实时网络状态特征进行融合处理。

$$\tau = \frac{\delta(\tau_{\text{RTT}} + \tau_v)}{X} \quad (8)$$

式中, δ 为加权系数。在此基础上, 以当前列车通信网络状态特征与拥塞状态网络标准特征之间的匹配度作为网络状态的判定标准, 特征匹配度的计算公式如下:

$$s = \frac{\tau \cdot \tau_{\text{standard}}(y)}{\|\tau\| \cdot \|\tau_{\text{standard}}(y)\|} \quad (9)$$

式中, 变量 $\tau_{\text{standard}}(y)$ 为拥塞状态下通信网络的运行标准特征, 通过公式 (8) 与公式 (9) 的联立, 即可得出匹配度的具体计算结果。若计算得出特征匹配度高于阈值 s_0 , 说明当前网络处于拥塞状态, 否则认为当前网络处于正常运行状态^[17]。在静止状态下的通信网络由于没有数据的通信与传输, 因此采集到的网络数据量为 0, 因此当无法采集到有效的网络状态数据时, 则认为当前网络处于静止状态, 由此即可得出当前列车通信网络状态的检测结果。由于列车通信任务随时都可能发生或结束, 因此需要对网络状态的检测结果进行动态反馈。

2.4 计算列车通信网络控制量

在 CANopen 列车通信网络协议约束下, 根据列车通信网络状态的检测结果, 从缓存长度、负载、时延等方面, 计算列车通信网络的控制量。其中缓存长度控制量的计算结果为:

$$c_L = \frac{L_{\text{target}} - L_i}{s} \quad (10)$$

式中, L_{target} 为缓存长度的控制目标, 该变量的计算公式为:

$$L_{\text{target}} = \eta_{\text{CAN}} \cdot N_{\text{communication}} \quad (11)$$

式中, $N_{\text{communication}}$ 为列车通信网络的传输数据量^[18]。另外通信网络负载和时延控制量的计算结果如下:

$$\begin{cases} c_w = c_L \tau_{w\text{-target}}(i) - \tau_w(i) \\ c_{\text{RTT}} = c_L \tau_{\text{RTT}\text{-target}} - \tau_{\text{RTT}} \end{cases} \quad (12)$$

式中, 变量 $\tau_{w\text{-target}}(i)$ 和 $\tau_{\text{RTT}\text{-target}}$ 分别为节点 i 的负载控制目标和时延控制目标, 上述变量可通过 CANopen 协议计算得出。按照上述方式可以得出异常状态下, 列车通信网络的状态运行控制量。

2.5 实现列车通信网络状态反馈控制功能

以列车通信网络状态的检测与反馈结果作为控制器的

驱动信号, 将列车通信网络控制量的计算结果输入到优化设计的反馈控制器中, 通过信道分配以及拥塞调度两个步骤, 实现系统的列车通信网络状态反馈控制功能。

2.5.1 公平分配列车通信网络信道

在列车通信网络控制过程中, 分别对网络通信信道资源和通信任务进行整合, 在考虑通信任务优先级的情况下, 对通信网络信道进行公平分配。列车通信网络信道与通信任务的优先级可以表示为:

$$\begin{cases} \zeta_{\text{channel}} = c_w \cdot B \cdot l \cdot \eta_{\text{communication}} \\ \zeta_{\text{task}} = c_{\text{RTT}} \frac{M}{B} \end{cases} \quad (13)$$

式中, l 和 $\eta_{\text{communication}}$ 分别为信道长度和通信效率, M 为待通信的数据量。在实际列车通信网络状态控制过程中, 分配给通信任务的信道资源为:

$$z(i) = \frac{\zeta_{\text{task}}}{n_{\text{channel}}} \times \zeta_{\text{channel}} \quad (14)$$

式中, 变量 n_{channel} 为列车通信网络中包含的信道数量。在通信任务的优先级不一样的情况下, 将信道分配给具有较高优先权的通信任务^[19]。轮询次数为满足列车通信网络中信道优先权值降低到平均值以下的最小值, 因为每个节点缓冲存储器中的数据帧是按照从高到低的顺序进行排序的, 所以优先级较高的数据包会先被发送出去, 满足高优先级数据包优先发送的公平性分配。

2.5.2 列车通信网络拥塞调度控制

列车通信网络拥塞调度控制是针对处于拥塞状态的列车通信网络信道, 通过动态调度的方式实现拥塞缓解的目的。设置列车通信网络的拥塞可调度条件为:

$$|c_L| + |c_w| + |c_{\text{RTT}}| > 0 \quad (15)$$

若公式 (15) 表示条件成立, 则需要执行相应的拥塞调度指令, 调度量为:

$$G = z(i) \times c_L \times B \quad (16)$$

针对处于拥塞状态的通信网络信道, 提取缓存队列中的通信数据, 提取量为 G 。根据列车通信网络状态的检测结果, 计算各个信道缓存空间的剩余量, 若信道空间剩余量高于公式 (16) 计算得出的调度量, 则可以选择该信道作为调度目标信道, 将提取的通信数据加入到目标信道对应的缓存队列中, 若计算得出 G 的值高于信道空间剩余量, 则认为当前信道无法满足调度任务, 需重复上述操作, 直至得到满足缓存空间条件的信道为止^[20]。最终得出的列车通信网络拥塞调度过程可以量化表示为:

$$\begin{cases} Y_{\text{target}} = \eta_{\text{CAN}}(M_{0-\text{target}} + G) \\ Y_{\text{original}} = M_{0-\text{original}} - G \times \eta_{\text{CAN}} \end{cases} \quad (17)$$

式中, $M_{0-\text{target}}$ 和 $M_{0-\text{original}}$ 分别为调度目标信道原信道中的通信数据量, Y_{target} 和 Y_{original} 对应的是拥塞调度完成后, 目标信道与原信道的函数表达式。按照上述流程, 在 CANopen 通信协议和反馈控制器的协同运行下, 完成列车通信网络状态的控制, 并将实时控制状态反馈给控制终端, 当反馈结果显示当前网络状态为正常状态时, 退出控制程序。

3 系统测试

为了验证优化设计的基于 CANopen 的列车通信网络状态反馈控制系统的网络状态控制效果, 在系统应用之前设计系统测试实验。此次系统测试采用白盒测试与黑盒测试相结合的方式, 白盒测试主要用来测试系统反馈的列车通信网络状态是否与实际设计的网络状态一致, 而黑盒测试则是验证在所提方法的控制下, 列车通信网络性能是否能够达到预期水平。

3.1 布设列车通信网络环境

此次系统测试分别在铁路列车通信网络和公路列车通信网络两个环境下执行, 上述两个列车通信网络中使用的服务器端型号均为 PowerEdge R740, 服务器端软件为 Unreal IRC 3.2.7。铁路列车通信网络以线路相似的两列火车及其包含的所有车厢作为网络通信节点, 通信节点数量共 17 个, 其中 1 号通信节点为列车通信网络的中心节点。公路列车通信网络主要由组列式汽车构成, 为避免通信网络中因节点间距离变化而导致的通信网络结构变化, 在组列式汽车中输入相同行驶路线, 且行驶速度基本相同, 构建的公路列车通信网络中包含的节点数量共 18 个。布设的列车通信网络中, 任意两个通信节点之间均存在一条通信信道, 铁路和公路列车通信网络中的信道数量分别为 136 条和 153 条, 根据信道两端节点编号对通信信道进行编号处理。

3.2 调试系统硬件设备

在系统测试实验开始之前, 首先需要根据系统硬件的设计结果, 将相应的硬件设备安装到实验环境中, 并与主测计算机相连, 系统部分硬件设备的连接原理图如图 5 所示。

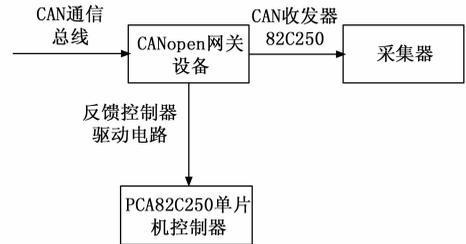


图 5 控制系统硬件设备连接原理

接通电源后, 对各个硬件设备进行调试。首先观察通电状态的硬件设备是否能够成功启动, 保证硬件设备能够正常使用。对于 CANopen 网关设备而言, 在调试过程中将 CANopen 适配器的监视主机与 CAN 总线网络相连, 形成了一个主从形式的网络结构。在此基础上, 分别验证 CANopen 网关设备的总线数据传输列表、特定报文的数据内容是否能够成功显示, 发送报文是否能够同步记录。同理, 分别对采集器、控制器以及驱动电路进行单独调试, 在保证上述硬件设备均能正常运行的前提下, 执行联合调试, 判断硬件设备之间是否存在不兼容的情况, 若存在则替换硬件设备或重新连接, 若显示系统硬件调试成功, 则执行实验的下一步操作。

3.3 设定列车通信网络初始状态

为了保证系统测试实验的测试意义，将布设的列车通信网络均设定为拥塞状态，列车通信网络的初始状态参数如表 1 所示。

表 1 列车通信网络初始状态参数表

通信节点编号	铁路列车通信网络				公路列车通信网络			
	缓存长度/Mbps	负载/Mbps	时延/s	通信速率/(Mbps/s)	缓存长度/Mbps	负载/Mbps	时延/s	通信速率/(Mbps/s)
1	39	659	63	212	38	677	52	189
2	35	661	60	209	36	679	55	185
3	42	658	59	213	32	673	53	187
4	36	652	61	214	35	675	50	186
5	36	660	65	206	39	678	47	183
6	39	655	62	213	42	676	49	194
7	41	657	64	208	40	679	51	191
8	40	661	60	211	37	674	52	193

按照上述方式可以得出列车通信网络中所有节点和信道的初始状态设定结果，以此作为反馈控制系统的输入值。

3.4 描述系统测试过程

基于 CANopen 的列车通信网络状态反馈控制系统硬件设备连接并调试完成后，还需软件程序对整个系统进行组态，具体内容有：配置每个 CANopen 子设备的对象字典、设置 CAN 相关通信参数、设置 CANopen 协议的相关参数等，其中 CANopen 协议参数包含通信报文、启动方式等。列车通信网络中的节点都会在组态界面上显示，能够对网络及节点的输入/输出状态进行实时监测，并能够强制设位和复位输出点。在主测计算机环境下，利用编程工具实现对系统反馈控制程序的开发，将布设列车通信网络环境及其实时运行数据输入到控制系统中，得出列车通信网络状态的反馈控制结果。图 6 表示的是任意时刻列车通信网络状态反馈控制系统的运行情况。

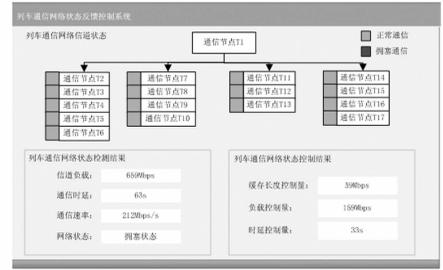
图 6 中 T 和 G 节点分别表示铁路列车通信网络节点和公路列车通信网络节点。按照上述方式可以得出实验周期内的所有反馈与控制结果。为了体现出所提方法的运行优势，设置文献 [8] 提出的基于有色 Petri 网的列车通信控制系统切换方法、文献 [9] 提出的高速列车总线式与交换式网络控制系统重联方法作为实验的对比方法，分别标记为对比方法 1 和对比方法 2，并输出相应的反馈与控制结果。

3.5 设置系统测试指标

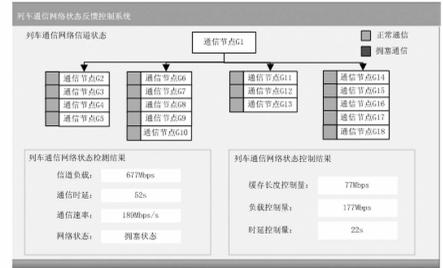
此次系统测试实验分别从控制功能和控制效果两个方面进行测试，其中控制功能的测试指标为负载控制误差，上述指标的数值结果如下：

$$\epsilon_w = W_{\text{reality}}(i) - W_{\text{target}}(i) \quad (18)$$

式中，变量 $W_{\text{reality}}(i)$ 和 $W_{\text{target}}(i)$ 分别表示第 i 个通信节点的实际负载与期望负载。在实际测试过程中，通过对各列车通信节点负载情况的统计，即可得出 $W_{\text{reality}}(i)$ 的具体取值。另外，控制效果测试指标为平均队列长度，该指



(a) 铁路列车通信网络



(b) 公路列车通信网络

图 6 列车通信网络状态反馈控制系统运行界面

标的测试结果为：

$$l_{\text{avg}} = \frac{\sum_{t=1}^{\Delta t_{\text{test}}} l_t}{\Delta t_{\text{test}}} \quad (19)$$

式中，变量 l_t 表示 t 时刻的缓存队列长度， Δt_{test} 为测试时间，计算得出平均队列长度越大，说明对应通信网络的拥塞风险越高。最终计算得出负载控制误差和时延控制误差越小，证明对应系统的控制功能越优，平均队列长度越小，说明系统的控制效果越好。

3.6 系统测试结果分析

3.6.1 系统控制功能测试结果

通过相关数据的统计，得出反映系统通信网络控制功能的测试结果，如表 2 所示。

表 2 系统通信网络控制功能测试数据表

通信节点编号	负载控制目标 /Mbps	铁路列车通信网络的负载/Mbps			公路列车通信网络的负载/Mbps		
		对比方法 1	对比方法 2	所提方法	对比方法 1	对比方法 2	所提方法
1	500	511	508	500	510	506	500
2	500	512	509	501	511	505	500
3	500	510	507	500	509	510	500
4	500	515	510	501	512	507	502
5	500	507	511	500	508	507	502
6	500	509	512	500	508	505	502
7	500	511	509	501	511	509	500
8	500	513	509	502	510	508	500

将表 2 中的数据代入到公式 19 中，计算得出铁路列车通信网络下，3 种方法的平均负载控制误差分别为 11 Mbps、9.4 Mbps 和 0.6 Mbps，公路列车通信网络下 3 种方法的平

均负载控制误差分别为 9.9、7.1 和 0.8 Mbps。

3.6.2 系统控制效果测试结果

综合铁路和公路列车通信网络两个实验环境, 通过公式 (19) 的计算, 得出 3 种列车通信网络状态反馈控制系统控制下, 各节点缓存平均队列长度的测试对比结果, 如图 7 所示。

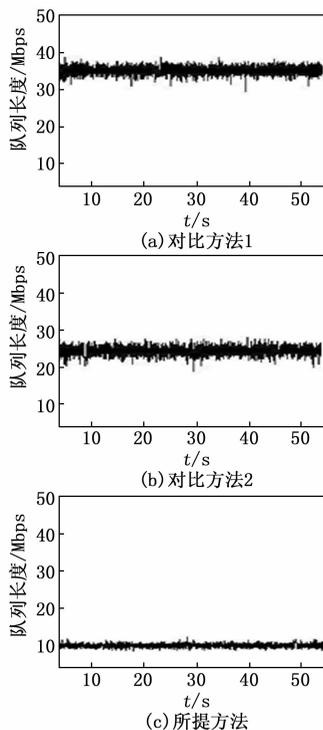


图 7 网络状态反馈控制系统下的队列长度对比结果

从图 7 中可以直观地看出, 与两种传统控制系统相比, 在所提方法的控制下, 列车通信网络的缓存队列长度更小, 平均为 10 Mbps, 即所提方法的拥塞风险更低, 由此证明优化设计方法的控制效果更优。

4 结束语

列车通信网络是列车自动行驶工作中的重要组成部分, 网络状态的运行情况直接影响列车的行驶速度和安全性。通过 CANopen 协议的应用, 实现对列车通信网络状态反馈控制系统的优化设计, 保证列车通信网络信息传递的可靠性、准确性和实时性。从系统测试实验结果中可以看出, 优化设计的基于 CANopen 的列车通信网络状态反馈控制系统能够很好地满足列车通信网络状态控制系统要求, 其技术方案和实现方法可以在列车通信网络状态控制系统中推广应用。然而在此次实验中, 设置的实验场景与测试指标较少, 因此得出的实验结果存在一定的局限性, 还需要在今后的研究工作中进一步补充。

参考文献:

[1] 于人生, 石勇, 白龙. 新能源悬挂式单轨列车网络控制系统设计要点及优化方向 [J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25

(9): 45-48.

- [2] 班玉友, 贺德强, 陈彦君, 等. 基于旗鱼优化器的列车通信网络拓扑优化研究 [J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18 (12): 3146-3154.
- [3] 贺德强, 柳国强, 陈彦君, 等. 基于正态云模型和模糊层次分析法的列车通信网络性能评估方法 [J]. 交通运输工程学报, 2022, 22 (2): 310-320.
- [4] 汪知宇, 张彤. 基于改进 LS-SVM 算法的列车通信网络时延预测方法 [J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24 (1): 101-106.
- [5] 向敏, 饶华阳, 张进进, 等. 基于图卷积神经网络的软件定义电力通信网络路由控制策略 [J]. 电子与信息学报, 2021, 43 (2): 388-395.
- [6] 李萍, 王昕. 控制网络节点可重构无线通讯协议性能仿真 [J]. 计算机仿真, 2021, 38 (4): 129-133.
- [7] 史建超, 谢志远, 胡正伟, 等. 多跳中继宽带电力线通信网络中的 OFDM 跨层资源分配 [J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49 (5): 58-66.
- [8] 汪小勇, 董德存, 欧冬秀, 等. 基于有色 Petri 网的点式-基于通信的列车控制系统切换实时性分析 [J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2021, 49 (3): 382-390.
- [9] 石艳红, 陈谦. 高速列车总线式与交换式网络控制系统重联设计 [J]. 机车电传动, 2021 (3): 108-112.
- [10] AURIOL J, PIETRI D B. Robust state-feedback stabilization of an underactuated network of interconnected $n+m$ hyperbolic PDE systems [J]. Automatica, 2022, 136: 110040.
- [11] 胡青长. 有轨电车 MVB (多功能车辆总线) 网络控制系统配置及通信控制策略 [J]. 城市轨道交通研究, 2022 (s1): 22-26.
- [12] 李伟, 陈则, 秦元庆, 等. 一种基于移动目标防御的列车通信网络闭环动态安全防护方法 [J]. 小型微型计算机系统, 2022, 43 (11): 2394-2398.
- [13] 陈丽琴, 顾静军. 基于无线传感器网络的地铁通信传输延迟优化方法 [J]. 传感技术学报, 2022, 35 (5): 698-702.
- [14] 孙凤琪. 连续综合控制系统的状态反馈广义 H_2 控制 [J]. 应用数学和力学, 2022, 43 (8): 901-910.
- [15] 赵千钧, 付兴建. 切换网络控制系统鲁棒 H_∞ 容错控制 [J]. 机床与液压, 2022, 50 (1): 144-149.
- [16] 郭伟, 范文奕, 杨书强, 等. 面向分布式一致性算法的通信网络优化设计 [J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50 (23): 151-160.
- [17] 冯浩楠, 范楷, 滕达, 等. 车车通信的列控系统动静结合安全策略 [J]. 科学技术与工程, 2021, 21 (4): 1555-1562.
- [18] 钟剑峰, 王红军. 适用于无人机集群应急通信系统分簇路由协议 [J]. 火力与指挥控制, 2022, 47 (2): 56-66.
- [19] 田辉, 贺硕, 林尚静, 等. 工业互联网感知通信控制协同融合技术研究综述 [J]. 通信学报, 2021, 42 (10): 211-221.
- [20] 倪启南, 杨明, 李云嵩, 等. 全闭环伺服驱动系统位置控制通信延时补偿技术 [J]. 电工技术学报, 2022, 37 (10): 2513-2522.