

技术交底书

联系人： 陈相许齐敏 电话： 1569602221015026611879 邮箱

cx13996363616qiminxu@163.comsjtu.edu.cn

技术问题联系人： 陈相许齐敏 电话： 1569602221015026611879 邮箱

cx13996363616@163.comqiminxu@sjtu.edu.cn

一、发明名称

一种基于时间敏感网络门控机制的流量整形与路由规划的联合调度方法 一种针对 5G+TSN 时钟同步的载波参数优化方法

二、所属技术领域

本发明涉及有线通信网络技术领域，特别是涉及一种基于时间敏感网络门控机制的流量整形和路由规划的联合调度方法。

本发明涉及异构通信网络技术领域，特别是涉及 OFDM 的无线网络与基于时间敏感门控机制的确定性网络之间时钟同步方法。

三、技术背景，并描述已有的与本发明/实用新型最相近似的实现方案。

近年来，在航空航天、汽车和工业自动化等领域中，对时间关键数据流（Time Critical，TC）的确定性实时通信需求越来越高，传统以太网技术由于“尽力而为”特性难以满足需求。目前市场中以 EtherCAT、Profinet 等为核心的实时通信技术得到了全面推广，但是这些实时以太网技术都具备各自的专用机制，使得在工作状态下彼此不兼容，限制了实时以太网的进一步发展。为此，IEEE 802.1 工作组希望提出一种能够连接来自不同供应商的工业设备的通用通信协议，以实现 QoS（Quality of Service）异构数据的确定性实时传输。TSN（Time Sensitive Networking）技术进入了产业视野，它提供了与当前工业以太网协议匹配或超过该协议性能的实时连接功能，并且还增加了 IEEE 标准的灵活性。TSN 由一系列子标准构成。其中，IEEE 802.1Qbv 和 IEEE 802.1AS-Rev 是保证 TC 流确定性实时通信的核心子标准，IEEE 802.1Qbv 定义了一种可编程的门控机制，使用时间传输门和门控列表来确定交换机端口哪些队列用于传输，又称为时间感知整形器（Time-aware Shaper，TAS）。值得注意的是，为了保证 TAS 部署成功，所有设备需要基于 IEEE 802.1 AS-Rev 实现时钟同步。然而，虽然 IEEE 802.1Qbv 规定了门控机制的行为，但是如何调度配置以实现 TC 流的确定性延迟和有界抖动是极具挑战性的。

针对 TSN 网络中 TC 流的确定性实时传输调度问题，目前最常用的建模方法主要是整数线性规划（Integer linear programming，ILP）方法和可满足性模块理论（Satisfiability Modulo Theories，SMT）方法。ILP 方法和 SMT 方法都是通过构造一系列约束以实现 TC 流的确定性实时通信传输，两者之间最

大的不同就是 SMT 方法构造的约束表达式是具有相应理论背景的一阶逻辑公式。值得注意的是，在复杂网络拓扑中，传输调度的前提是需要明确各个 TC 流的传输路径，但是现有的研究大多提前给定各个 TC 流的传输路径，这不仅会减小可调度解空间，使得不能获取全局最优解，还可能导致一个可调度系统得到不可调度的解。

此外，在 TSN 网络中除了传输 TC 数据，还需要传输 BE（Best Effort）和 RC（Rate Constrain）数据，TC 数据一般都是周期性数据，具有高优先级，数据量小以及高实时、确定性通信需求，而 BE 和 RC 数据大多都是非周期型数据，优先级较低，没有严格的实时通信要求。TSN 网络的核心诉求就是周期性关键数据和非周期性数据在同一个网络中传输，但是如何结合 TSN 技术在保证周期性 TC 流的确定性实时通信前提下，尽可能提高非周期数据通信性能，是一个极具挑战性的问题。

经对现有文献检索发现，最相近似的实现方案为中国专利申请号为：201910740838.7，名称为：一种用于混合流量融合的时分复用方法，其具体做法为：在时间敏感网络中设定周期性数据和非周期性数据发送时间片，并在每个发送时间片设定每个 TDMA 周期内的多孔调度方案，基于此调度方案，实现周期性数据和非周期性数据混合传输的时分复用。但是其多孔调度模型没有考虑交换机端口的队列分配和门控列表（Gate Control List，GCL）设计，无法保证复杂网络拓扑以及高负载场景下系统的可靠性以及可调度性。专利申请号为：201380047085.2，名称为：用于根据 IEEE 802.1Qbv 传输分组的方法和装置，其具体做法为：每个网络设备的端口都被配置为存储多优先级数据帧的多个队列，并基于整形器，在每一个传输间隔，先传输最高优先级队列中的数据帧，再确定剩余多个队列中下一数据帧的大小以及传输所需的时间量，进而有选择地传输下一数据帧，以此类推，完成所有数据帧的传输，且每一个队列在传输过程中，其他队列中的数据不能进行传输。但是该方法只是简单建立了数据帧和队列的映射关系，并没有涉及每个端口详细的 GCL 设计，无法保证具有不同实时需求的多周期 TC 流的确定性和实时性传输，难以应用在工业场景下。

四、现有技术的缺点是什么？

1. 现有的调度方法大多基于 TTE（Time Trigger Ethernet）技术从时间上和空间上将 TC 数据流分配在对应的时间槽里以保证 TC 流的实时性和可靠性，但是这种方法需要全局静态调度配置，不能灵活地添加新的终端系统或者新的 TC 数据流。
2. 现有的基于时间敏感网络门控机制的调度方法大多只关注于 TC 数据流的传输调度，不考虑 RC 数据和 BE 数据的通信传输性能，同时也忽略了 RC 数据和 BE 数据的通信传输对于 TC 流确定性传输的影响，对于存在多种数据类型的工业现场不适用。
3. 现有的基于时间敏感网络门控机制的调度方法在设计各个交换机端口的 GCL 时，都假定 GCL 循环的开启时刻是一致的，但是在最开始传输期间，离终端较远的一些交换机端口并没有数据到达，如果基于

全局设定，同时开启 GCL 循环势必会导致通信资源的浪费以及可调度解空间的下降。

4. 现有的调度方法大多提前给定每个 TC 数据流的通信传输路径，没有考虑路径规划和传输调度之间的耦合关系，这可能导致网络系统的可调度解空间下降或者出现不可调度情况。

五、针对以上（四）所述缺点，本发明/实用新型要解决的技术问题

1. 如何避免各交换机端口 GCL 循环同时开启所带来的通信资源浪费以及可调度解空间下降问题，提出一种适用于 TSN 网络传输调度的 GCL 循环开启策略。
2. 如何基于时间敏感网络的门控机制实现 TC 数据流、RC 数据流以及 BE 数据流在同一网络混合传输，并在保证 TC 数据流的确定性实时传输前提下，尽可能提高 RC 流和 BE 流的通信性能。
3. 如何解析网络层的路径规划和数据链路层的传输调度之间的耦合关系，构建一个完备的传输和路由联合调度模型以实现 TC 流的确定性实时传输和非 TC 流通信传输性能的改善。

六、为解决以上（五）技术问题而采用的技术方案的具体阐述

本发明的目的在于完善现有确定性传输调度方法的不足，提供一种基于时间敏感网络门控机制的流量整形和路由规划的联合调度方法，在保证具有不同实时需求的多周期 TC 流确定性实时传输前提下，尽可能提高非 TC 流的通信传输性能。

本发明是通过以下技术方案实现的，包含以下步骤：

第一步：根据实时需求和优先级的高低先对周期性的 TC 流进行路由和传输联合调度，在不影响 TC 流确定性实时传输的前提下再进行非 TC 流（RC 和 BE 数据流）的通信传输调度。

第二步：基于 IEEE 802.1Qbv 协议标准和缓存队列类型，将每个交换机端口的队列分为 TC 队列和非 TC 队列，假设 TC 队列数量为 k ，队列编号为 $\{1, 2, \dots, k\}$ ，则非 TC 队列编号为 $\{k+1, k+2, \dots, 8\}$ ，并定义交换机端口的 GCL 循环周期为所有 TC 流发送周期的最小公倍数，确定第一个循环周期内每个 TC 流需要传输调度的数据帧以及数量。

第三步：将多个终端设备和 TSN 交换机组成的网络系统结构图抽象为由网络节点和节点链接组成的有向图，基于各个 TC 数据流属性确定其通信传输的起始节点和终止节点，构造路由约束，生成第一个循环周期内所有 TC 数据帧的多个可选通信传输路径集（数量为 m ），按照其通信重叠链路和路由跳数的总数目从小到大进行排序，依次编号为 $\{1, 2, \dots, m\}$ 。

所述终端设备之间功能不同，每个终端设备在运行过程中只能发送同种类型的数据流，数据流和终端系统是一一对应关系。

所述的路由约束包括通信传输路径不形成闭环约束和网络拓扑约束（传输链路属于网络拓扑有向图）。

第四步：根据第三步得到的通信传输路径集，构造一系列周期性 TC 数据帧及其传输链路的确定性实时约束，通过相关的求解器生成第一个循环周期内所有 TC 数据帧的确定性实时调度方案，筛选出调度成功的通信传输路径集，并记录其编号和 TC 队列使用数量 n ，选取 TC 队列使用数量最小的通信传输路径集和确定性实时调度方案为 TC 流的最优联合调度方案，若多个调度成功的通信传输路径集具有相同的 TC 队列使用数量，选取编号最小的路径集。

所述的一系列确定性实时约束具体为：

4.1 队列映射约束：将所有 TC 数据帧映射在交换机端口编号为 $\{1,2,\dots,n\}$ 的缓存队列中。

4.2 实时性约束：限制每个 TC 数据帧的端到端延迟小于等于其相应的截止时间

4.3 GCL 循环周期时域约束：每个 TC 数据帧在通信链路上的传输时刻需要在相应交换机端口的第一个 GCL 循环开启时刻和结束时刻之间，以避免对下一个循环周期调度方案的干扰。

4.4 冲突避免约束：对于传输路径存在重叠的 TC 数据帧，限制通信链路上传输时域不重叠，并在同一个交换机输出端口的同一队列缓存时，限制缓存时域不重叠，或者将缓存时域重叠的 TC 数据帧分配至不同的 TC 队列中，如图 5 所示。

4.5 TC 流顺序约束：属于同一个 TC 流的数据帧必须按照其路由通信路径的时间顺序进行传输，且需要补偿相邻两个节点之间的时钟误差。

所述的 GCL 循环开启时刻是根据 TC 数据帧的到达时间而确定，即每个交换机端口的 GCL 循环开启的基准时刻不一定相同。

第五步：根据第四步得到的最优联合调度方案以及数据和队列之间映射关系，设计各个交换机端口 TC 队列的 GCL，进一步得到每个交换机端口的每一个 GCL 循环空闲时段。

所述的 GCL 循环空闲时段是指相应交换机端口所有的 TC 队列处于关闭状态，不进行 TC 数据帧传输。

第六步：基于第三步得到的网络拓扑有向图以及非 TC 数据流属性确定其通信传输的起始和终止节点，生成非 TC 流的可选择通信路径集，选取非 TC 流的最优通信路径集。

所述的最优通信路径集的选取基于两个规则：非 TC 流之间通信传输链路重叠数目最小以及通信传输链路上各个交换机端口一个 GCL 循环的总空闲时段最长。

第七步：规划交换机端口 GCL 循环的每一个空闲时段，将其划分为两部分，第一部分为允许传输时段，开启所有的非 TC 队列，按照非 TC 流的优先级依次从高到底进行数据帧传输；第二部分为保护带时段，对于允许传输时段还没有传输完成的非 TC 数据帧可以继续传输，但是不允许传输新的非 TC 数据帧，如图 6 所示。

所述的保护带大小为所有非 TC 数据帧的最大传输时间，由非 TC 数据帧大小和链路传输速度确定。

第八步：根据各个交换机端口 TC 队列的 GCL 以及每一个 GCL 循环空闲时段的规划方案，生成各个交换机端口输出队列的 GCL，并基于第四步和第六步分别得到的 TC 流和非 TC 流最优通信传输路径集，生成混合流量传输的最优联合调度方案；最终将其配置到各个交换机以及终端设备上。

七、与最接近的现有技术相比，本发明/实用新型的优点

本发明的优点是：

1. 针对具有不同实时需求的多周期 TC 流，本发明构造了一系列路径规划和传输调度的联合约束，既保证了 TC 流的实时性需求（端到端延迟），又保证了存在传输链路重叠的 TC 流完成端到端的确定性传输。
2. 通过采用交换机输出端口 GCL 设计的方式提高其传输调度的灵活性，并在设计各个交换机端口相应队列的 GCL 时，其循环开启时刻是基于 TC 数据帧的到达时间而确定，有效解决了交换机输出端口 GCL 循环同时开启带来的通信资源浪费的问题，极大地提高了网络系统的可调度解空间。
3. 在对多周期 TC 数据流进行路由和传输的联合调度时，不仅考虑到 TC 流的确定性实时需求，还考虑了非 TC 流的通信性能；在保证 TC 流的联合调度方案成功的前提下，选取 TC 队列使用数量最小的调度方案，剩余的输出队列用于传输非 TC 流以减少数据缓存和传输冲突率，进而提高其通信传输性能。

八、针对（六）中的技术方案，是否还有别的替代方案？

原方案：

替代方案：

九、本发明/实用新型的关键点和欲保护点

1. 基于时间敏感网络门控机制的流量整形和路由规划的联合调度方法，其特征在于包括以下步骤：

第一步：根据实时需求和优先级的高低先对周期性的 TC 流进行路由和传输联合调度，在不影响 TC 流确定性实时传输的前提下再进行非 TC 流的通信传输调度。

第二步：将交换机端口的输出队列分为 k 个 TC 队列和 $(8-k)$ 个非 TC 队列，基于各个 TC 流周期以及 GCL 循环周期，确定第一个循环周期内需要传输调度的 TC 数据帧及其数量。

第三步：根据终端设备和交换机抽象的网络拓扑有向图，确定 TC 数据帧的起始节点和终止节点，并利用路由选择算法生成多个可选择通信传输路径集。

第四步：按照其通信重叠链路和路由跳数的总数目从小到大进行排序，依次编号为 $\{1, 2, \dots, m\}$

第五步：根据通信传输路径集构造一系列保证 TC 数据帧确定性实时传输的联合调度约束，生成一个循环周期内的 TC 数据帧确定性实时调度方案。

第六步：筛选出调度成功的通信传输路径集，选取 TC 队列使用数量最小的通信传输路径集和相应确定性实时调度方案为 TC 流的最优联合调度方案。若多个调度成功的通信传输路径集具有相同的 TC 队列使用数量，选取编号最小的路径集。

第七步：基于最优联合调度方案以及数据和队列之间映射关系，设计各个交换机端口 TC 队列的 GCL，进一步得到每个交换机端口的每一个 GCL 循环空闲时段。

第八步：根据网络拓扑有向图，确定非 TC 流的起始节点和终止节点，生成非 TC 流的最优通信路径集。

第九步：规划交换机端口 GCL 循环的每一个空闲时段，将其划分为允许传输时段和保护带时段两个部分，第一部分用于传输非 TC 流，第二部分用于保护 TC 流传输免受非 TC 流的干扰。

第十步：根据 TC 队列 GCL 设计以及 GCL 循环空闲时段规划方案，生成各个交换机端口输出队列 GCL，并基于 TC 流和非 TC 流的最优通信传输路径集，生成混合流量传输的最优联合调度方案，通过相关的配置软件生成交换机端口和终端设备的配置文件，将其配置到各个交换机以及终端设备上。

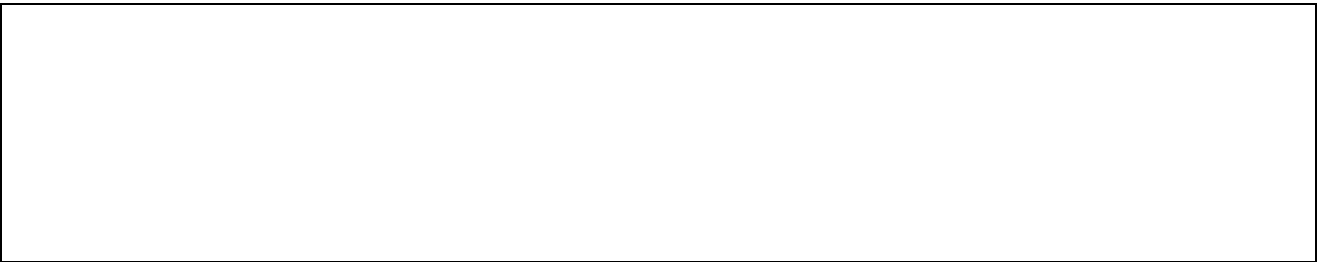
2. 根据权利要求 1 所述的一种基于时间敏感网络门控机制的流量整形和路由规划的联合调度方法，其特征在于：第二步中，由于各交换机输出端口 GCL 是循环执行的，因此，此处致力于第一个 GCL 循环周期内所有 TC 数据帧的确定性实时调度。

3. 根据权利要求 1 所述的一种基于时间敏感网络门控机制的流量整形和路由规划的联合调度方法，其特征在于：第三步中，通信传输路径集的选择要满足通信路由选择约束，即通信传输路径不闭环约束和网络拓扑有向图满足约束。

4. 根据权利要求 1 所述的一种基于时间敏感网络门控机制的流量整形和路由规划的联合调度方法，其特征在于：第五步中，保证 TC 数据帧确定性传输的一个关键是构造冲突避免约束。针对传输链路且缓存队列存在重叠的 TC 数据帧，通过限制其传输时域和缓存时域不重叠来避免冲突，对于传输链路存在重叠但缓存队列不一致的 TC 数据帧，只需限制其传输时域不重叠。

5. 根据权利要求 1 所述的一种基于时间敏感网络门控机制的流量整形和路由规划的联合调度方法，其特征在于：第五步中，保证 TC 数据帧确定性传输的另一个关键是构造 GCL 循环周期时域约束，每个 TC 数据帧在通信链路上传输时刻需要在相应交换机端口的第一个 GCL 循环开启时刻和结束时刻之间，以避免对下一个循环周期调度方案的干扰。
6. 根据权利要求 1 所述的一种基于时间敏感网络门控机制的流量整形和路由规划的联合调度方法，其特征在于：第五步中，保证 TC 数据帧实时性传输的关键是构造实时性约束，通过限制每个 TC 数据帧的端到端延迟小于其截止时间来保证实时性需求。
7. 根据权利要求 1 所述的一种基于时间敏感网络门控机制的流量整形和路由规划的联合调度方法，其特征在于：第五步中，第一个 GCL 循环开启时刻是基于 TC 数据帧的到达时间而确定，可避免通信调度资源的浪费，提升网络系统可调度性。
8. 根据权利要求 1 所述的一种基于时间敏感网络门控机制的流量整形和路由规划的联合调度方法，其特征在于：第八步中，所述的非 TC 流的最优通信路径集选取基于两个规则：非 TC 流之间通信传输链路重叠数目最小以及通信传输链路上各个交换机端口一个 GCL 循环的总空闲时段最长。
9. 根据权利要求 1 所述的一种基于时间敏感网络门控机制的流量整形和路由规划的联合调度方法，其特征在于：第九步中，每一个 GCL 循环的每一个空闲时段一开始关闭所有 TC 队列，开启所有非 TC 队列，按照优先级大小以及数据到达输出队列的时间进行非 TC 流的传输，当进入保护带时段时，关闭没有正在进行数据传输的非 TC 队列，对于正在进行数据传输的非 TC 队列，等完成当前 TC 数据帧的传输再关闭队列。因此，每个非 TC 队列的 GCL 在每一个 GCL 循环的空闲时段可能会有所差异。

十、附图及附图说明



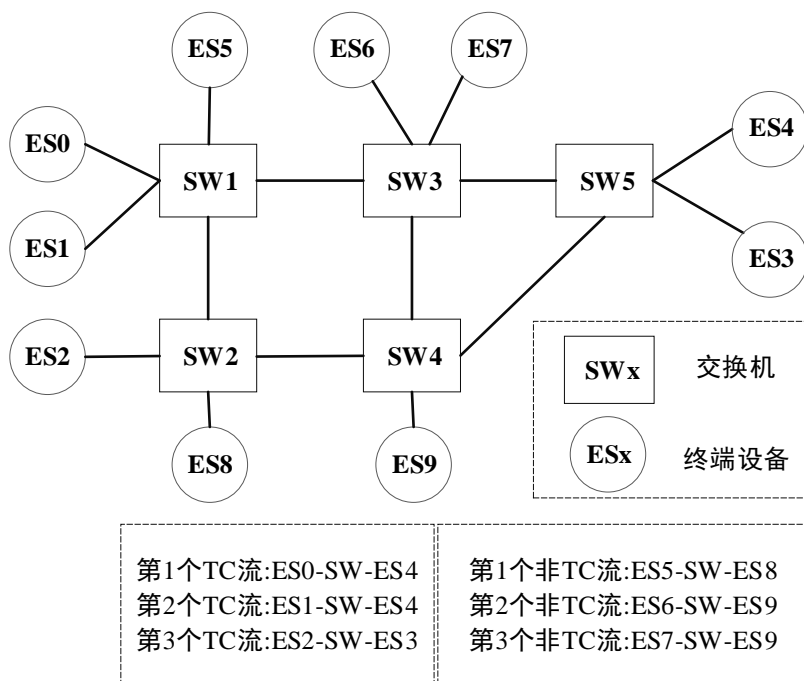


图 1

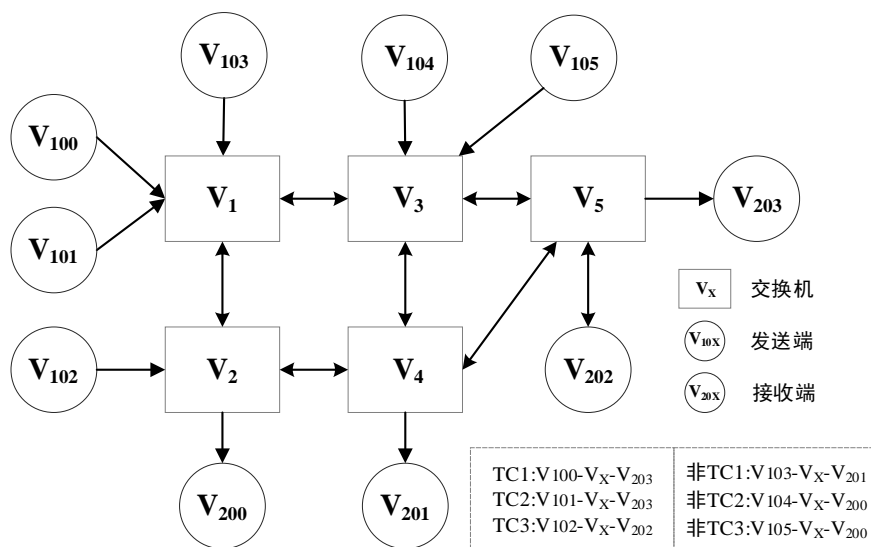


图 2

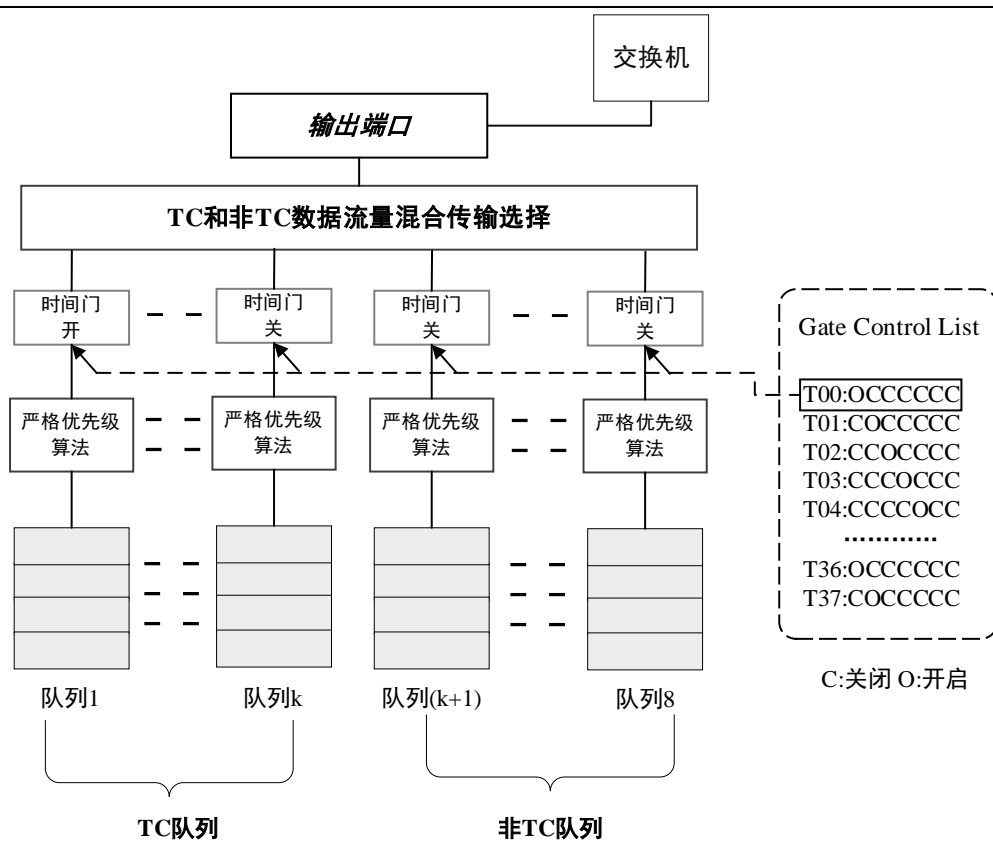


图 3

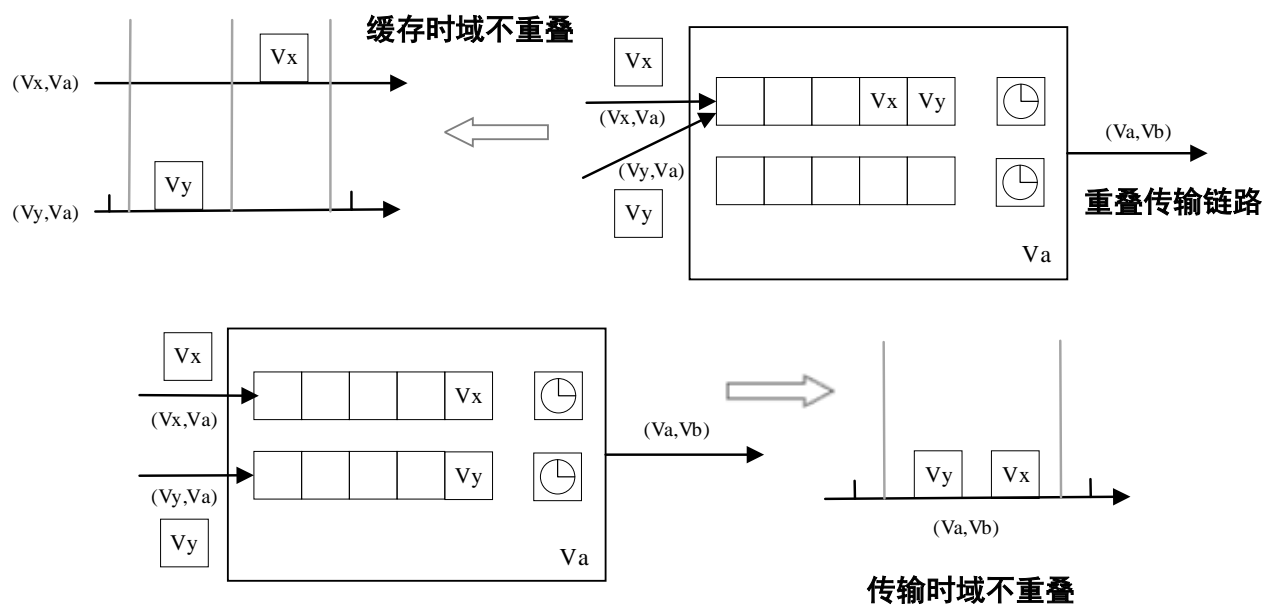


图 4

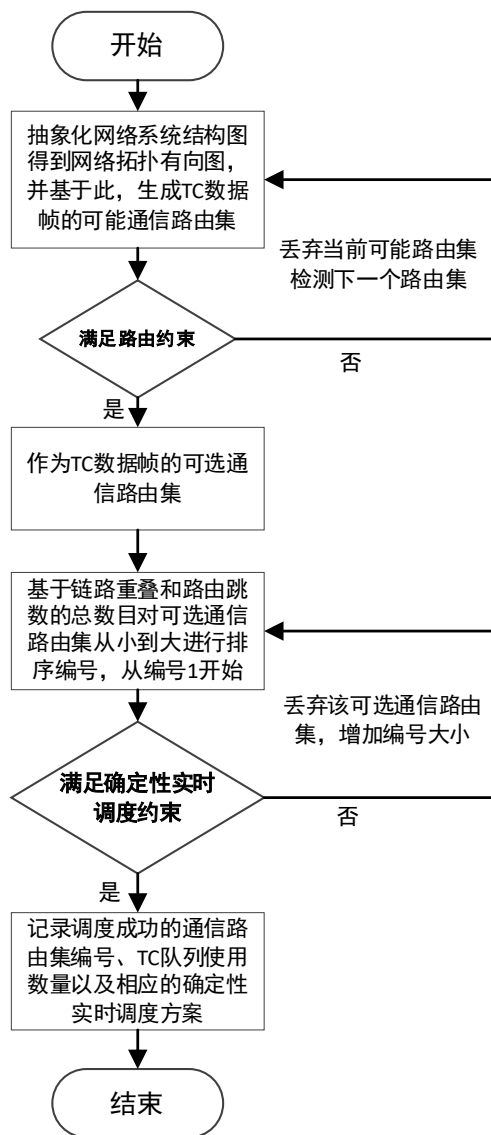


图 5

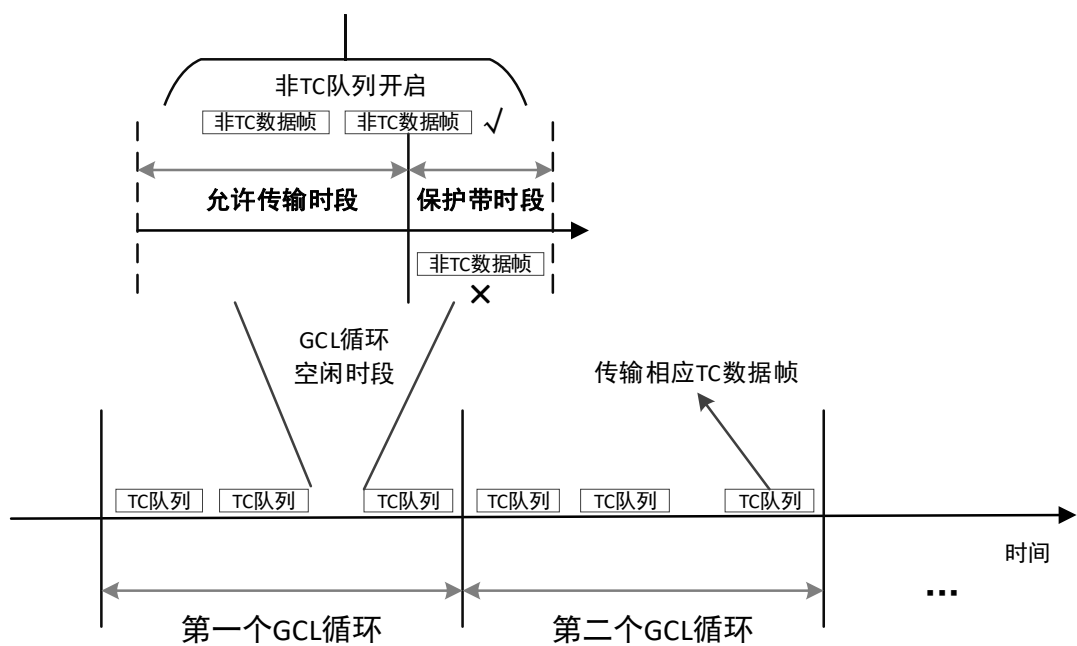


图 6

附图说明：

图 1 时间敏感网络系统结构图

图 2 抽象化网络拓扑有向图

图 3 交换机端口输出队列传输控制及其 GCL 示意图

图 4 冲突避免约束示意图

图 5 TC 流路由和传输联合调度流程图

图 6 TC 流和非 TC 流混合传输示意图

十一、具体实施方式

具体实施方式

以下结合附图对本发明作进一步描述。本实施例在以本发明技术方案为前提下进行实施，给出了详细的实施方式和具体的操作过程，但本发明的保护范围不限于下述的实施例。

实施例

本实施例中如图 1 所示，网络系统由 10 个终端设备和 5 个交换机组成，5 个终端用于 TC 流的发送和接收，5 个终端用于非 TC 流的发送和接收，其相应网络拓扑有向图如图 2 所示，其中交换机端口输出队列传输控制及其 GCL 如图 3 所示，TC 流路由和传输联合调度流程如图 4 所示，冲突避免约束示意图如图 5 所示，一个 GCL 循环周期内 TC 流和非 TC 流的混合传输如图 6 所示。

第一步：根据各个 TC 流的发送周期 T_i (i 表示 TC 流的编号) 确定 GCL 循环周期，本实例中，三个 TC 流的发送周期分别为 $\{T_1=600\mu s, T_2=300\mu s, T_3=200\mu s\}$ ，令所有 TC 流发送周期的最小公倍数为 GCL 循环周期 $T=600\mu s$ ；第 i 个 TC 流在第一个循环周期会重复发送 $\{1, \dots, j, \dots, T/T_i\}$ 次，其中， j 代表第 j 次发送序号，用 $f_{i,j}$ 表示第 i 个 TC 流的第 j 个数据帧，在本实例中，第一个 TC 流在第一个循环周期内发送 1 个 TC 数据帧，第二个 TC 流发送 2 个 TC 数据帧，其相应发送时间差异为 $300\mu s$ ，第三个 TC 流发送 3 个数据帧，相邻二个数据帧发送时间差异为 $200\mu s$ 。

第二步：如图 2 所示，根据 6 个 TC 数据帧的起始节点和终止节点，选择每个 TC 数据帧的通信传输路径，在选取时需要满足每个交换机节点只能被一个 TC 数据帧选择一次，防止出现闭环路径，此外，一个循环周期内属于同一个 TC 流的 TC 数据帧可以选择不同的通信传输路径，在本实例中，三个 TC 流可选通信路径集的数量分别为 $\{3, 3, 2\}$ ，根据第一步得到的每个 TC 流在第一个循环周期发送的数据帧数量 $\{1, 2, 3\}$ ，得到所有 TC 数据帧可选通信传输路径集的数量 $m=216$ ，按照其通信重叠链路和路由跳数的总数目将可选路径集从小到大进行排序，依次编号为 $\{1, 2, \dots, 216\}$ 。

第三步：根据 TC 数据帧的通信传输路径集（每个 TC 数据帧的传输链路），构造一系列相应传输链路及其终端设备的确定性实时约束，其关键约束具体为：

3.1 实时性约束：根据各个 TC 流的实时性需求确定其截止时间 D_i ，在本实例中，三个 TC 流的截止时间分别为 $\{D_1=400\mu s, D_2=300\mu s, D_3=200\mu s\}$ ，每个 TC 数据帧的端到端延迟应满足下式：

$$O_{i,j}^{(v_{n-1}, v_n)} + L_i - O_{i,j}^{(v_1, v_2)} \leq D_i$$

式中， L_i 表示第 i 个 TC 流的数据帧在链路上传输时间， $O_{i,j}^{(v_1, v_2)}$ 和 $O_{i,j}^{(v_{n-1}, v_n)}$ 分别表示 $f_{i,j}$ 的第一个和最后一个传输链路的时间偏移量；

3.2 GCL 循环周期时域约束：为避免对下一循环周期调度方案的干扰，每个 TC 数据帧在传输链路 (v_a, v_b) 上的时间偏移量需要满足下式：

$$(O_{i,j}^{(v_a, v_b)} \geq T_a^w) \wedge (O_{i,j}^{(v_a, v_b)} + L_i \leq T + T_a^w)$$

式中， T_a^w 表示交换机节点 v_a 输出端口 GCL 循环开启时刻；

3.3 冲突避免约束：通信传输路径存在重叠的 TC 数据帧需要满足下式以消除 TC 数据帧冲突导致的不确定性传输：

$$(Q_{i,j}^{(v_a, v_b)} \neq Q_{\beta,\gamma}^{(v_a, v_b)}) \vee (O_{i,j}^{(v_x, v_a)} + L_i \leq O_{\beta,\gamma}^{(v_y, v_a)}) \vee (O_{\beta,\gamma}^{(v_y, v_a)} + L_\beta \leq O_{i,j}^{(v_x, v_a)}) \\ (O_{i,j}^{(v_a, v_b)} + L_i \leq O_{\beta,\gamma}^{(v_a, v_b)}) \vee (O_{\beta,\gamma}^{(v_a, v_b)} + L_\beta \leq O_{i,j}^{(v_a, v_b)})$$

式中，第一行表示存在传输链路的数据帧缓存时域不重叠或分配在不同的缓存队列中，第二行表示传输链路重叠的数据帧传输时域不重叠， (v_x, v_a) 和 (v_y, v_a) 分别表示数据帧 $f_{i,j}$ 和 $f_{\alpha,\beta}$ 的传输链路 (v_a, v_b) 的上一个传输链路。

3.4 流顺序约束：TC 数据帧 $f_{i,j}$ 在按照其路由通信路径的时间顺序进行传输：

$$O_{i,j}^{(v_x, v_a)} + L_i \leq O_{i,j}^{(v_a, v_b)} + \delta$$

式中， δ 表示相邻两节点之间的时钟同步误差，在本实例中，取 $\delta = 1\mu s$ 。

第四步：针对 216 个可选通信传输路径集，通过相关的求解工具生成相应的满足上述确定性实时约束的调度方案（传输链路上时间偏移量、交换机端口缓存队列及其 GCL 循环开启时刻），表 1 为一个循环周期内所有 TC 数据帧的一个可选通信传输路径集和相应数据帧大小，下面以表 1 为例给出其相应的确定性实时调度方案和交换机 GCL 循环开启时刻：

表 1 TC 数据帧属性示例

TC 数据帧序号	通信传输路径	数据帧大小换算 (链路上的传输时间)	截止时间
$f_{1,1}$	(V_1, V_3, V_4, V_5)	60us	400us

$f_{2,1}$	$(V_1, V_2, V_4, V_3, V_5)$	40us	300us
$f_{2,2}$	(V_1, V_3, V_5)	40us	300us
$f_{3,1}$	(V_2, V_4, V_3, V_5)	40us	200us
$f_{3,2}$	(V_2, V_4, V_5)	40us	200us
$f_{3,3}$	(V_2, V_4, V_3, V_5)	40us	200us

如表 1 所示，TC 数据帧之间存在实时性需求和数据帧大小差异，且通信路径存在重叠传输链路，利用相关的求解工具得到相关的成功调度方案如表 2 和表 3 所示：

表 2 TC 数据帧成功调度方案表

TC 数据帧 序号	在交换机 V_1 的缓存队列 编号、转发时 间偏移量	在交换机 V_2 的缓存队列 编号、转发时 间偏移量	在交换机 V_3 的缓存队列 编号、转发时 间偏移量	在交换机 V_4 的缓存队列 编号、转发时 间偏移量	在交换机 V_5 的缓存队列 编号、转发时 间偏移量
$f_{1,1}$	(1, 60us)	——	(1, 160us)	(1, 230us)	(1, 300us)
$f_{2,1}$	(1, 50us)	(1, 100us)	(1, 190us)	(1, 150us)	(1, 230us)
$f_{2,2}$	(1, 340us)	——	(1, 380us)	——	(1, 420us)
$f_{3,1}$	——	(1, 50us)	(1, 130us)	(1, 90us)	(1, 170us)
$f_{3,2}$	——	(1, 250us)	——	(1, 290us)	(1, 350us)
$f_{3,3}$	——	(1, 450us)	(1, 530us)	(1, 490us)	(1, 570us)

表中，“——”表示相应数据帧的通信传输路径不包括该交换机节点，交换机节点的转发时间偏移量是相比于基准 0 时刻（TC 流最早发送的第一个数据帧对应时刻），另外，如表 2 所示，TC 队列的使用量 $k=1$ 。

表 3 交换机节点 GCL 循环开启时刻

	交换机 V_1	交换机 V_2	交换机 V_3	交换机 V_4	交换机 V_5
GCL 循环开启 时刻偏移量	10us	10us	0us	10us	160us

第五步：针对所有调度成功的通信传输路径集，选取 TC 队列使用数量 k 最小的通信传输路径集和相应确定性实时调度方案为 TC 流的最优联合调度方案。若多个调度成功的通信传输路径集具有相同的 TC

队列使用数量，选取编号最小的通信路径集。

第五步：基于最优联合调度方案以及数据和队列之间映射关系，设计各个交换机输出端口 TC 队列的 GCL，进一步得到每个交换机端口的每一个 GCL 循环空闲时段。

第六步：如图 2 所示，根据三个非 TC 流的起始节点和终止节点选择其通信传输路径，在选取时需要满足每个交换机节点只能被一个非 TC 流选择一次，防止出现闭环路径，在本实例中，3 个非 TC 流的可选通信路径集分别为{2,2,2}，以非 TC 流之间通信传输链路重叠数目最小以及通信传输链路上各个交换机端口一个 GCL 循环的总空闲时段最长为最优选择原则，选出所有非 TC 流的最优通信传输路径集。

第八步：根据非 TC 流的最优通信传输路径集以及非 TC 流发送时间的不确定性，规划通信传输路径集上交换机端口 GCL 循环的每一个空闲时段，将其划分为允许传输时段和保护带时段两个部分，第一部分开启每一个空闲时段所对应输出端口的非 TC 队列，按照优先级大小以及数据的到达时间传输非 TC 流，第二部分设置保护带用于保护 TC 流传输免受非 TC 流的干扰。

第九步：根据 TC 队列 GCL 设计方案以及 GCL 循环空闲时段规划方案，生成各个交换机端口输出队列 GCL，并基于 TC 流和非 TC 流的最优通信传输路径集，生成混合流量传输的最优联合调度方案，通过一些配置软件生成各个交换机端口和终端设备的配置文件，将其配置到各个交换机以及终端设备上。

十二、其他有助于专利代理人理解本技术的资料

【给代理人提供更多的信息，可以有助于代理人更好更快的完成申请文件】

- 1、代理人并不是技术专家，交底书要使代理人能看懂，尤其是背景技术和详尽的技术方案，一定要写得全面、清楚。
- 2、全文对同一事物的叫法应统一，避免出现一种东西多种叫法。（这点最重要，否则可能使理解的方案有偏差）
- 3、和代理人沟通时，对于代理人的疑问应认真理解，要求补充的材料应及时补充。
- 4、专利法规定：

①专利必须是一个技术方案，应该阐述发明/实用新型目的是通过什么技术方案来实现的，不能只有原理，也不能只做功能介绍；

交底书不能按功能写，应按步骤/层次写，即从步骤/层次角度扩展（以阶梯方式描述），使之逻辑清楚。若从功能角度写，则具有较多的介绍成分，使本发明/实用新型的方法/系统分散，不易提炼本发明/实用新型的核心。

②专利必须充分公开，以本领域技术人员不需付出创造性劳动即可实现为准。