

# 时间触发以太网 在列车通信网络中的应用

赵曦滨

zxb@tsinghua.edu.cn

清华大学·软件学院

2019年8月



# 大纲

- 1. 列车通信网络概述**
- 2. 时间触发以太网应用适配**



# 大纲

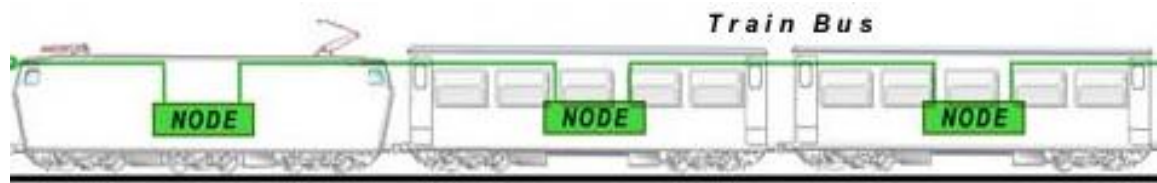
## 1. 列车通信网络概述

## 2. 时间触发以太网应用适配



# 概述

- 列车控制系统已从单台机车的**集中控制**向整列车的**分布式网络控制**方向发展，网络控制已成为高速列车和高速动车组的必备技术之一
  - 总线贯穿列车，简化连线，减轻质量，降低费用
  - 列车同步、协调、可靠的牵引与制动控制
  - 全列车的自动门控制和空调控制
  - 远程设备监控、诊断和维护
  - 旅客信息与旅客服务



# 常用列车网络技术

- 列车网络中，常用的现场总线有：
  - **TCN**
    - **列车通信网络 (Train Communication Network)**
  - WorldFIP
    - 欧洲现场总线标准 EN50170-3 和国际标准 IEC61158-7
    - 法国 Alstom 公司将其应用于 TGV 高速列车的 AGATE 控制系统中
  - LonWorks
    - 列车通信协议标准 IEEE1473-1999 的一部分，即 IEEE1473-L
    - 在铁路工业有着广泛的应用，如美国新泽西轻轨“彗星”号列车等
  - ArcNet
    - 北京地铁 5 号线和我国引进的日本动车组 E2-1000 采用了 ARCNET 局域网作为列车网络控制技术
  - CAN
    - 国际标准 ISO11898 和 ISO11519
    - 在列车上常用于较为底层的数据交换网络



# 列车通信网络 (TCN)

- TCN在国内动车组中的应用

- **CRH1 型动车组**

- 主要采用瑞士 Adtranz 公司的 MITRAC 模块化产品，控制网络采用 TCN 标准，包括 WTB 和 MVB

- **CRH5 型动车组**

- 基于 TCN 标准，列车级网络采用绞线式列车总线 (Wired Train Bus, WTB)，车辆级网络采用多功能车辆总线 (Multifunction Vehicle Bus, MVB)
    - 网关作为列车总线和车辆总线之间的协议转换器

- **CRH3 型动车组**

- 采用 TCN 列车控制网络

- **CRH380**

- **中国标准动车组 (复兴号)**



# TCN标准

- IEC TC9 (第9技术委员会-电力牵引设备) 与UIC (国际铁路联盟) 合作于1988年成立WG22 (第22工作组) 来制定列车通信网络标准。
  - IEC 61375-1(1999): TCN Specification
  - IEC 61375-2(1999): TCN Conformance Testing

## railways operators:

Chinese Railways  
DB (Germany)  
FS (Italy)  
JRRI (Japan)  
NS (Netherlands)  
RATP (France)  
SNCF (France)  
PKP (Poland)

grouped in the UIC  
(Union Internationale  
des Chemins de Fer)

## manufacturers:

Adtranz (CH, DE, SE)  
ANSALDO (IT)  
CAF (E)  
Ercole Marelli Trazione/Firema  
GEC-Alsthom (F, GB, B)  
Mitsubishi (JP)  
Siemens (GB, DE)  
Toshiba (JP)  
Westinghouse Signals (GB)



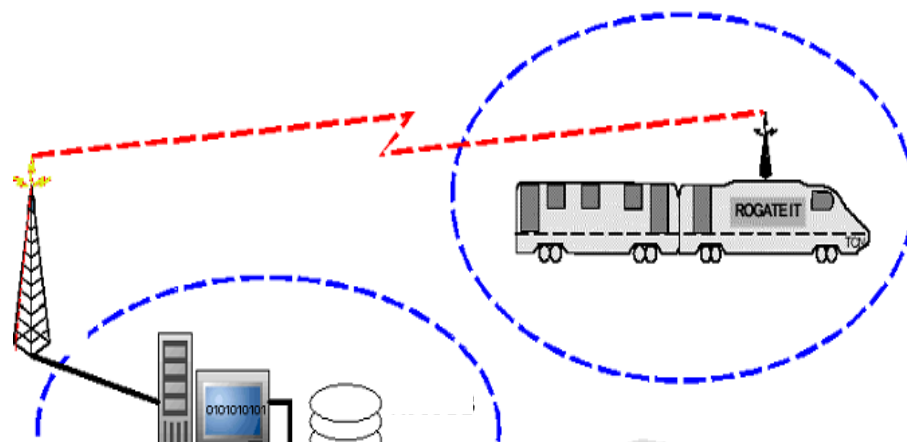
# TCN标准的演进

- TCN 标准的演进

IEC TC9 WG43: Train Communication Networks

- 工作内容

- 维护和升级 IEC 61375-1 和 61375-2
- 升级和完善 TCN 框架, 添加:
  - 新的车辆总线 (vehicle bus)
  - 宽带列车网络
  - 车地间的无线通讯系统
  - Communication Profile



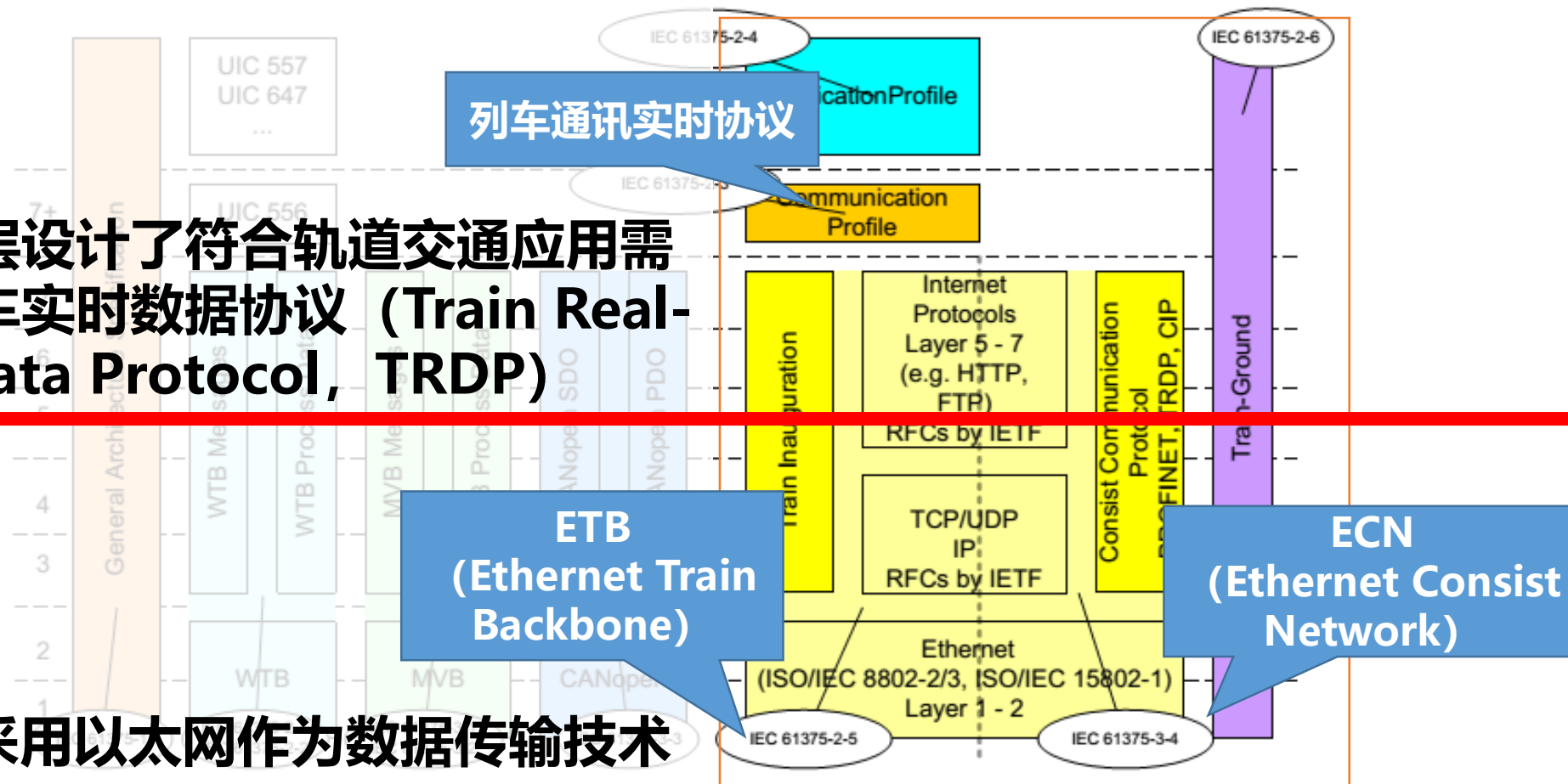
解决原有总线带宽不够的矛盾，使用统一网络传输多种数据



# IEC 61375标准系列

在应用层设计了符合轨道交通应用需求的列车实时数据协议 (Train Real-time Data Protocol, TRDP)

在底层采用以太网作为数据传输技术

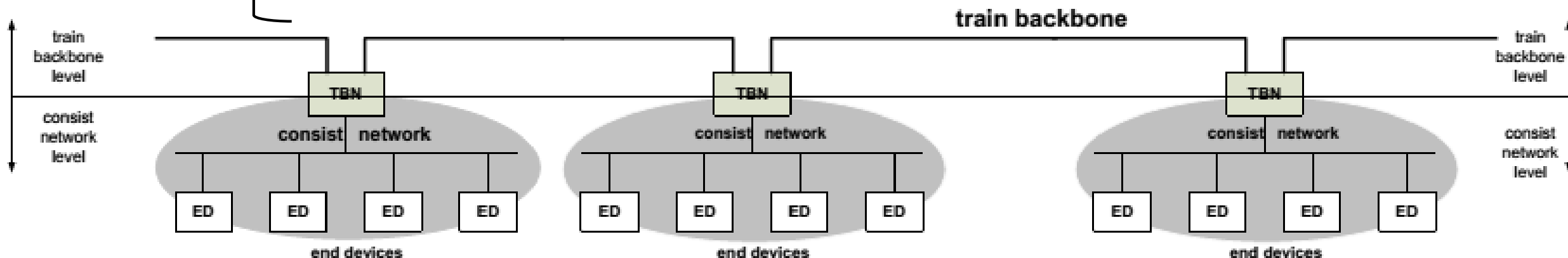


# 列车通信网络拓扑和技术选择

列车总线

WTB  
ETB

- 基于总线技术的 TCN: WTB + MVB + ...
- 基于交换技术的 TCN: ETB + ECN + ...



车辆总线

如何适配?

# 大纲

1. 列车通信网络概述

**2. 时间触发以太网应用适配**



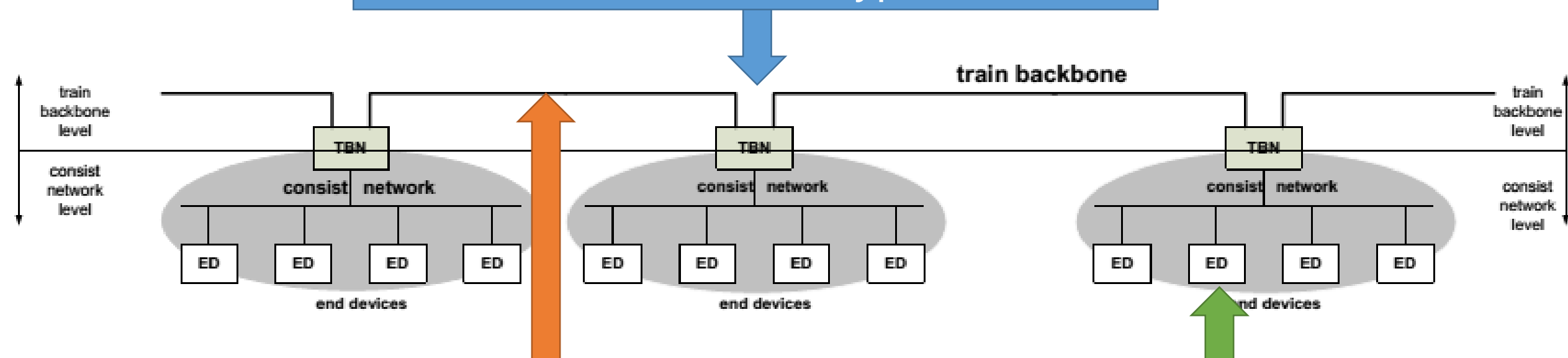
# 时间触发以太网关键技术

- 时间触发以太网可兼容传统以太网，因此，可以被作为列车通信网络的底层技术。
- 基础性关键技术
  - 高精度时间同步技术
  - 基于全局时间的确定性调度技术
  - 基于冗余链路的数据可靠性传输技术
  - 基于线性规划的数据流规划技术
  - .....



# 列车网络领域特定需求

列车网络是一个典型的线性/环形拓扑。当出现车厢无电时，交换机掉电，为保证数据传输，会触发交换机的bypass功能



传统的WTB总线发生重新编组时，会发生初运行，重新生成调度。在时间触发以太网场景下，当发生重新编组时，如何快速生成调度并平稳切换？

接入时间触发以太网需要定制网卡，如何适配普通以太网终端？

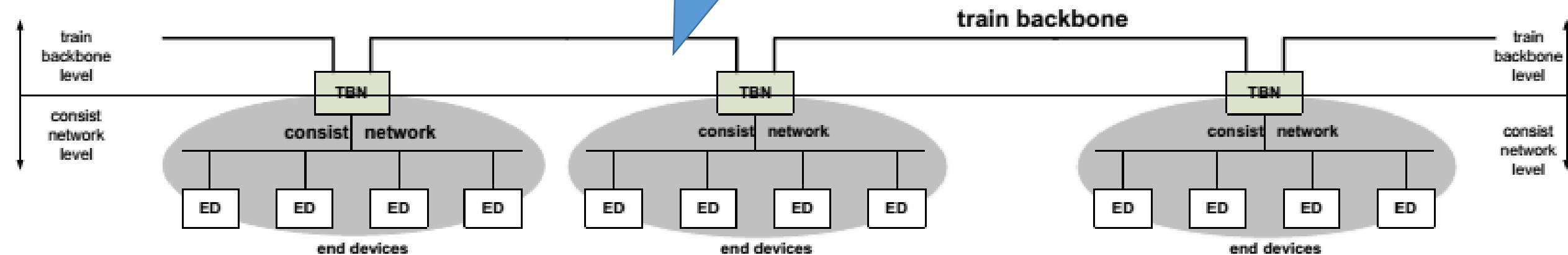
# 领域特定需求小结

1. 如何快速生成调度？
2. 如何快速的、无缝的完成调度切换？
3. 如何适应bypass场景？
4. 如何适应普通以太网设备的接入？



# 调度快速生成

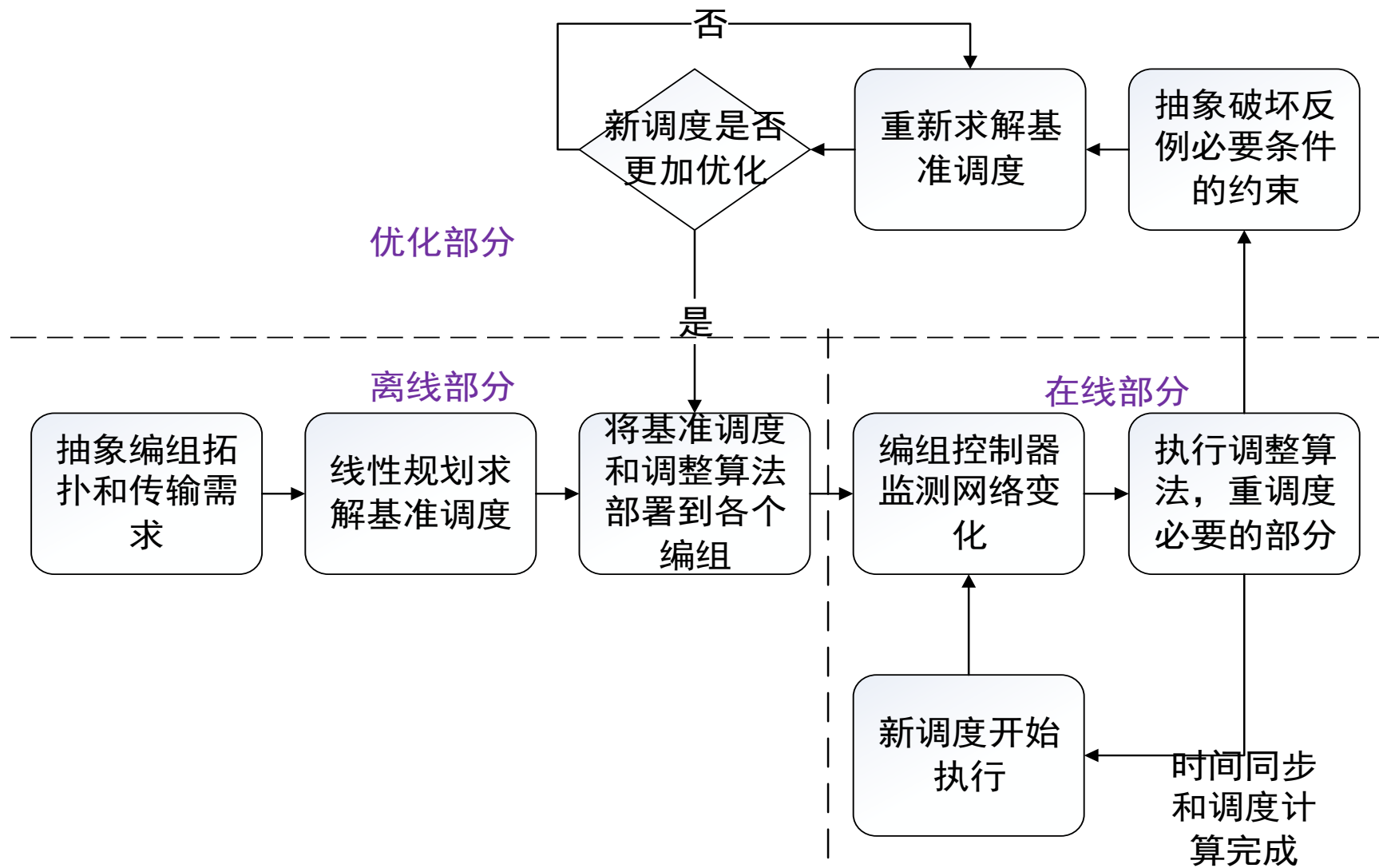
数据流通常是将报文发往所有同类设备（以组播方式）



各个编组间的网络拓扑接近同构

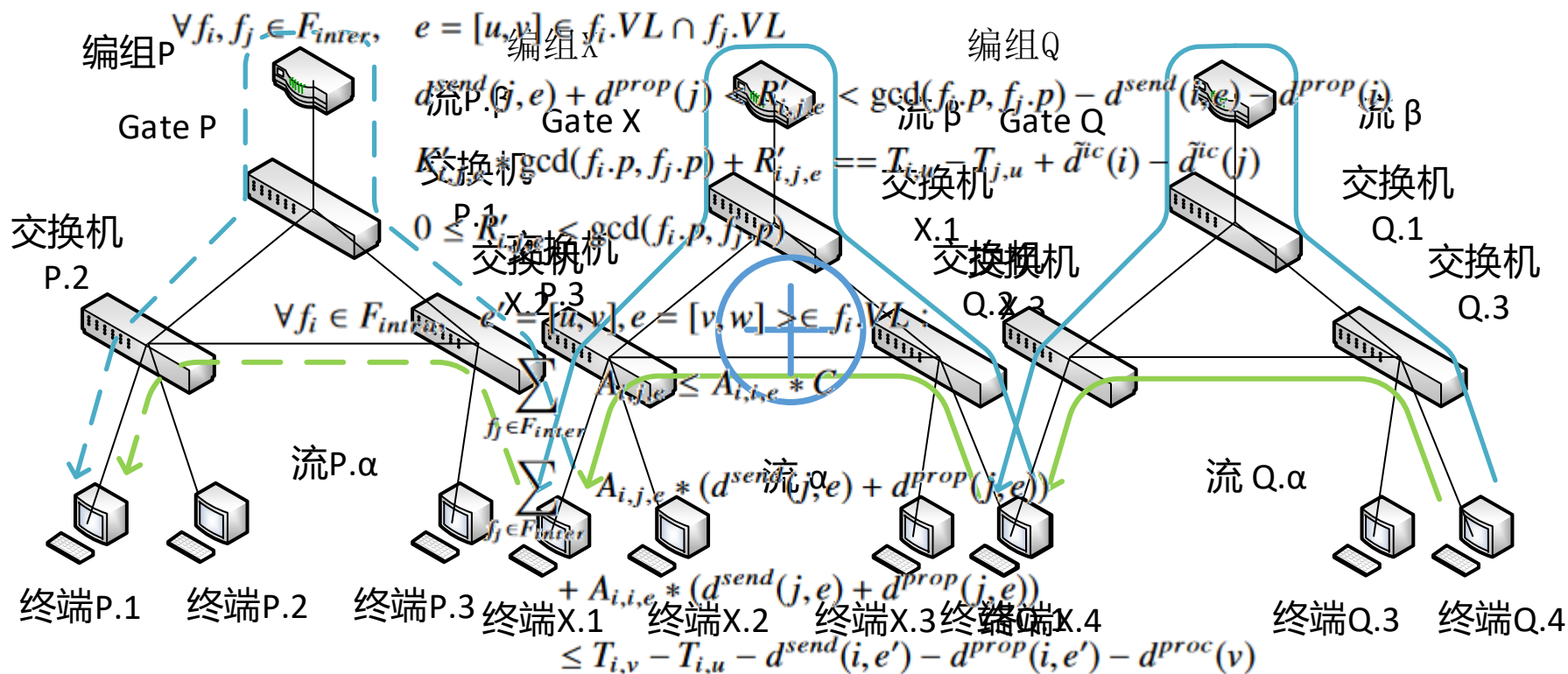
编组变化过程中，编组内数据流保持不变，编组间数据流接收者增多/减少

# 算法框架



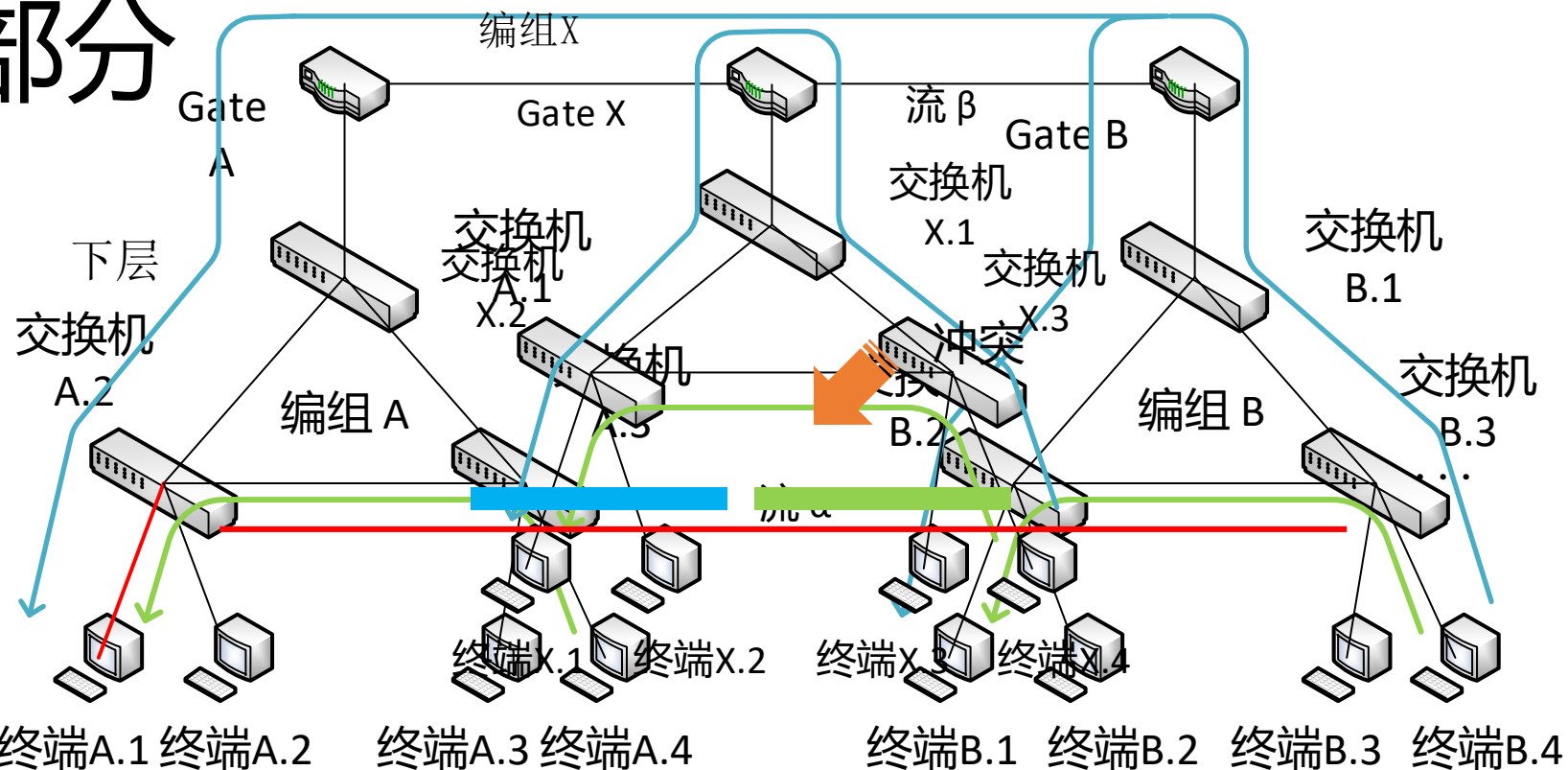


# 离线部分



- 抽象近似同构的编组拓扑，对抽象出的拓扑进行整数线性规划表述并求解，解作为**基准调度表**
- 使用附加的约束：潜在的编组间数据流冲突、潜在的编组间和编组内数据流冲突约束
- 附加约束为相应的数据流预留资源：编组间数据流允许推迟、编组内数据流允许提前

# 在线部分

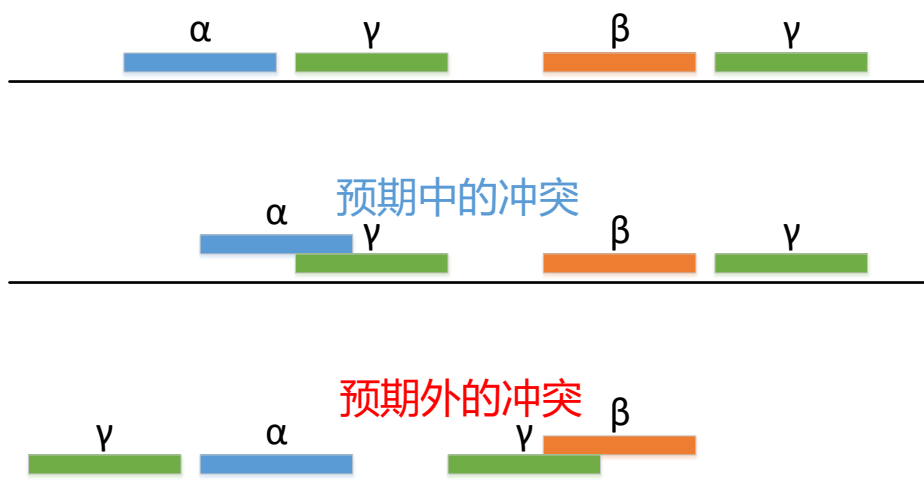


- 从基准调度表出发，获得当前网络状态下可用的实际完整调度表
- 加入编组间传输的延迟，冲突出现
- 根据预留资源：编组间数据流冒泡推迟、编组内数据流冒泡提前

18. 无法解决的冲突：保持现有的其他数据流不变，构造一个小的线性规划问题求解

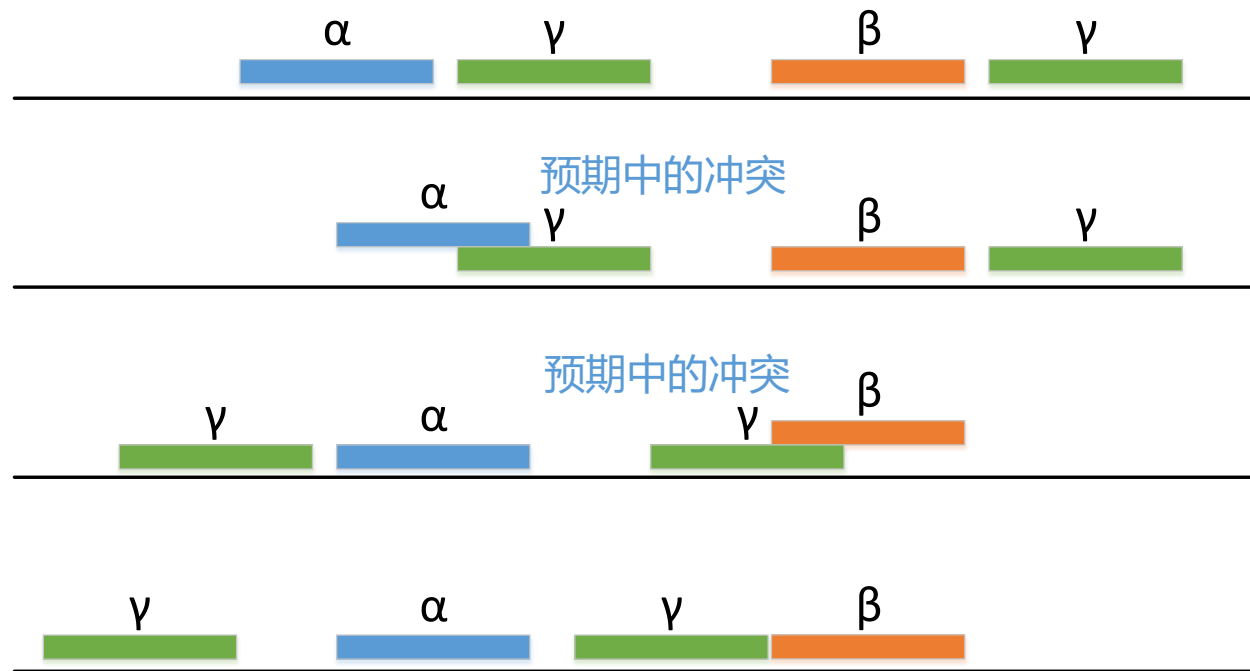


# 优化部分



强制增加 $\beta, \gamma$ 之间的  
潜在冲突

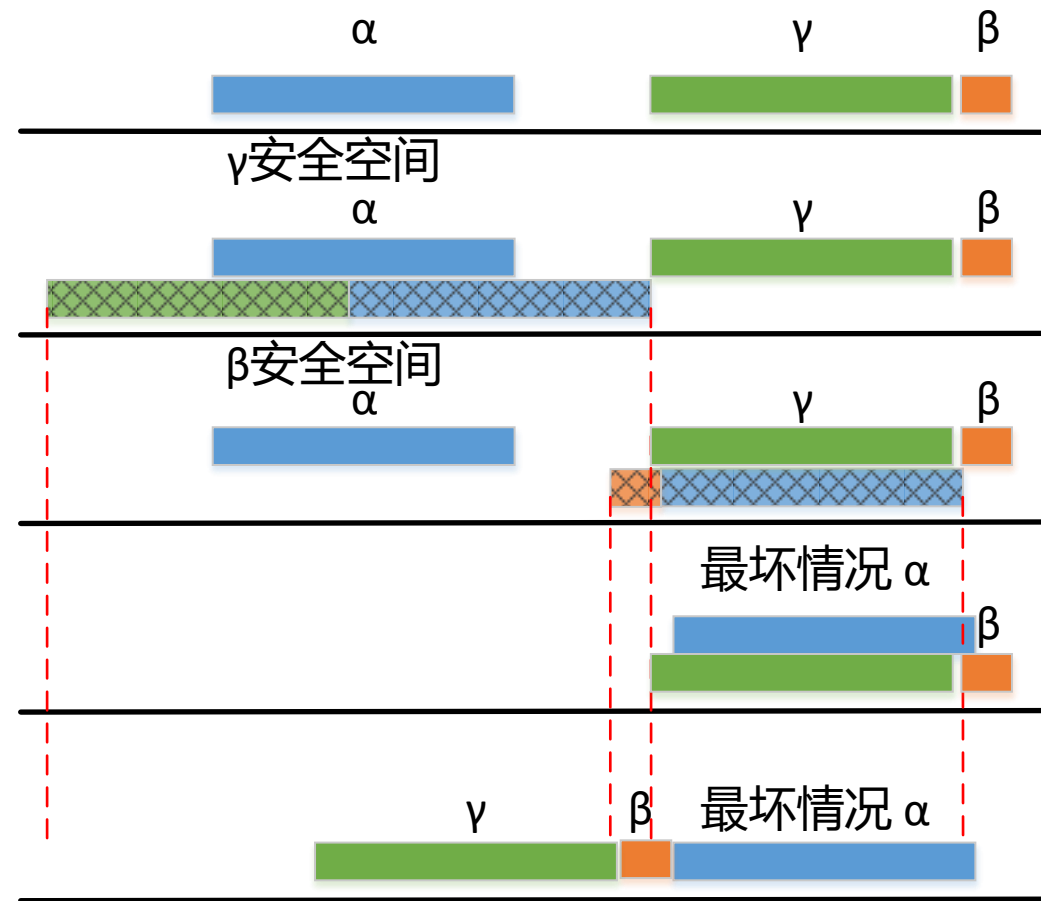
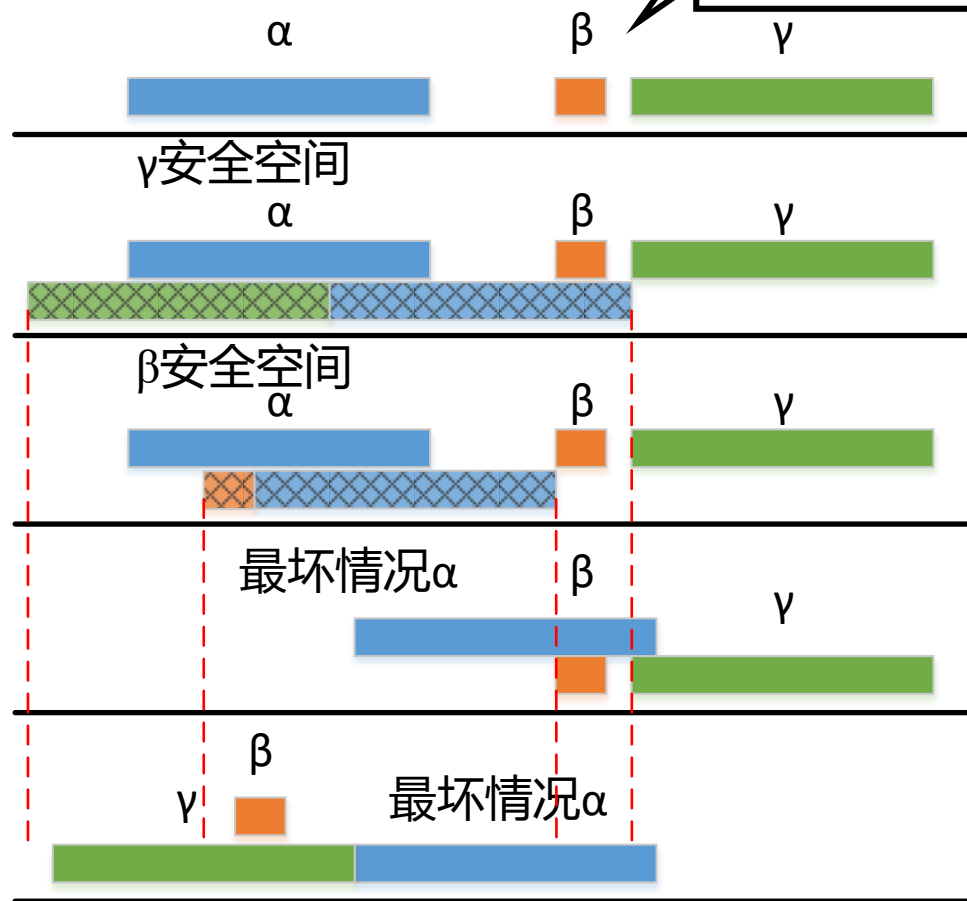
$$A_{x,b,e} + |F_P| - 1 \geq \sum_{f_i \in F_P} A_{i,b,e}$$



$\gamma$ 会预留更长的可  
提前时间

# 优化部分

强制修改 $\beta, \gamma$ 的发送顺序



$\forall f_y \in F_P :$

$$T_{\alpha, v} \bmod \gcd(f_x \cdot p, f_y \cdot p) - T_{y, v} \bmod \gcd(f_x \cdot p, f_y \cdot p) > 0$$

长报文先发送，预留的提前发送时间不会占据后发送的短报文发送时间



# 效果评估

表 5.1 在线部分的平均调度时间

$\mu$	$s$					
	0%	20%	40%	60%	80%	100%
15%	0.0073	0.0791	0.1116	0.1306	<b>0.1583</b>	0.1547
30%	0.0159	0.2382	0.2905	0.7122	<b>0.9029</b>	0.7800
45%	0.0240	2.8795	4.3046	<b>4.9511</b>	2.5686	2.3061
60%	0.0325	13.807	<b>28.787</b>	14.794	6.9606	6.0483

表 5.2 一般模型的平均调度时间

$\mu$	$s$					
	0%	20%	40%	60%	80%	100%
15%	0.0098	15.895	12.808	14.613	24.074	28.198
30%	0.0124	39.847	41.872	60.059	80.812	80.705
45%	0.0263	57.977	115.21	187.94	190.93	202.70
60%	0.0301	119.38	236.12	287.54	319.57	334.22

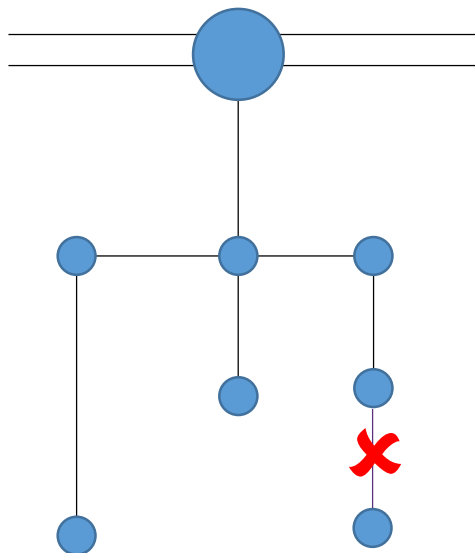
在 $\mu < 30\%$ 的**真实场景**  
下，在线部分可以在**秒级**  
时间内完成新调度表的生  
成



# 调度切换方法

序号	服务质量(QoS)	服务质量要求
1	实时响应	实时响应网络拓扑或网络需求改变
2	错误率	不丢包、不拥堵、无环
3	利用率	有效地利用网络资源
4	复杂性	计算复杂度可接受，更新时间可控
5	灵活性	操作和配置灵活

网络拓扑改变



交换机A

交换机X

交换机B

订阅

发布

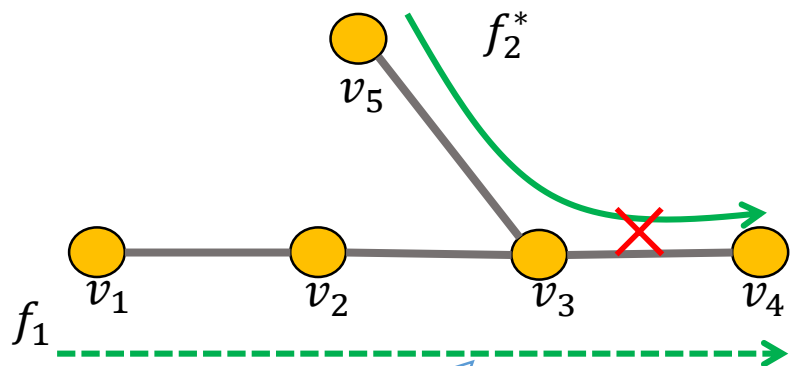
订阅

通知

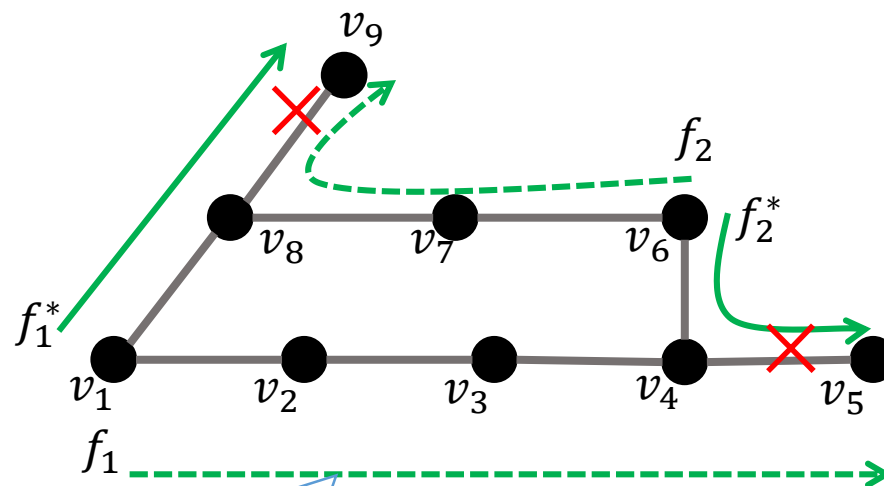
网络需求改变



# 调度切换的冲突



旧流 $f_1$ 和新流 $f_2$ 有冲突。那么，让 $f_1$ 先更新，然后再让 $f_2$ 更新。



$f_1$ 需要先于 $f_2$ 更新，且， $f_2$ 需要生于 $f_1$ 更新。

设计一种配置切换机制，最小化配置切换过程中的丢包数，同时尽可能缩短配置切换的时间

# 切换方法

- 发生冲突的充要条件

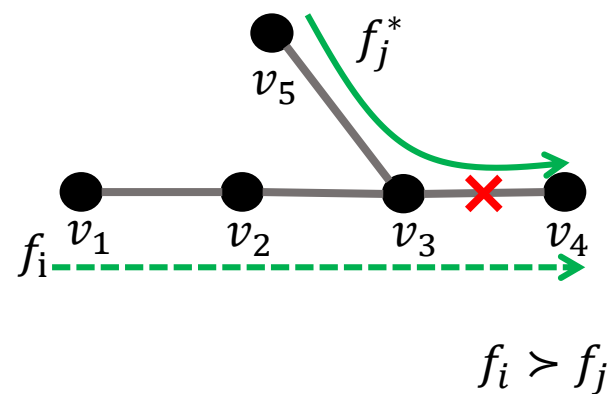
$$f_i^{first(f_i)}.offset + m * f_i.period < uptime < f_j^{*first(f_j^*)}.offset + n * f_j^*.period$$

并且,

$$f_i^{[v_k, v_l]}.offset + m * f_i.period = f_j^{*[v_k, v_l]}.offset + n * f_j^*.period$$

成立,  $uptime$  是  $f_i$  和  $f_j$  相同的更新时间点。

- 通过充要条件得到更新的先后顺序
- 当出现循环依赖时, 如何在**最小代价**下破坏?





# 算法框架

冲突的充分必要条件  
更新时间间隔  $C(f_i, f_j^*)$

构建依赖图

存在环?

是

丢包权重

依赖图破环

否

生成计划更新时间

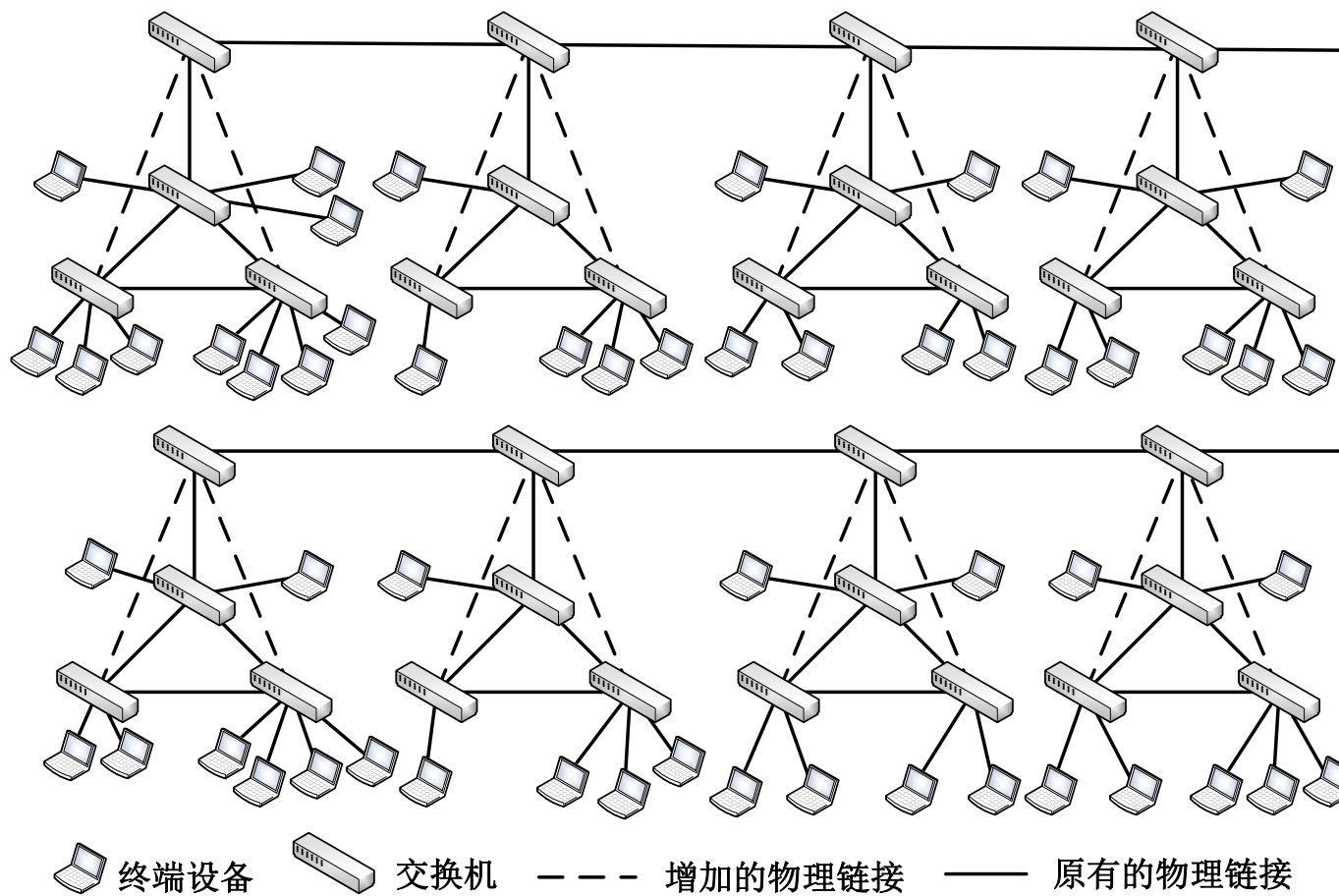
AoE网络, 计算最早更新时间和最晚更新时间

$$L(f_i, f_j) = \max\{L_{r_i}(f_i, f_j) | (r_i \in R) \wedge ([f_i, f_j] \in r_i)\}$$

带权重的反馈边集合  
(Weighted Feedback  
Arc Set, 简称WFAS)

NP问题, 存在多项式时间复杂度的启发式算法

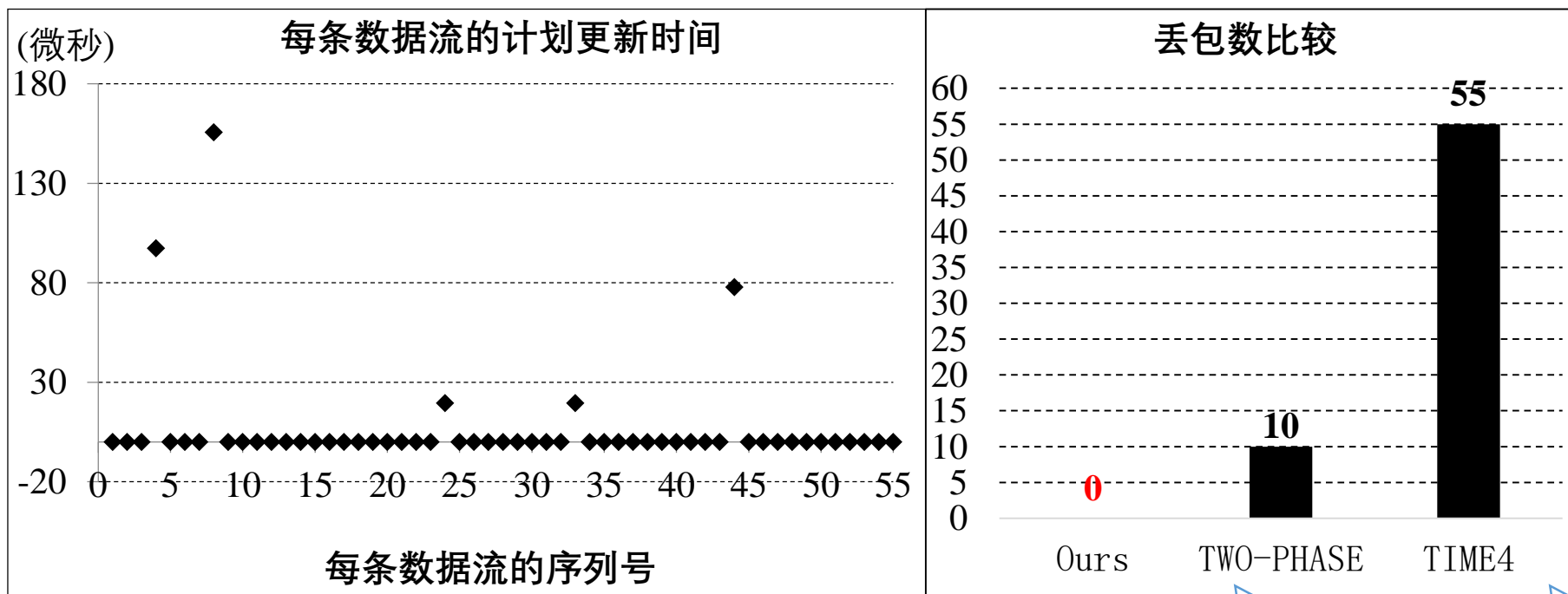
# 效果评估



54个终端设备  
32台交换机

# 效果评估

- 拓扑结构发生变化，共调度了55条数据流



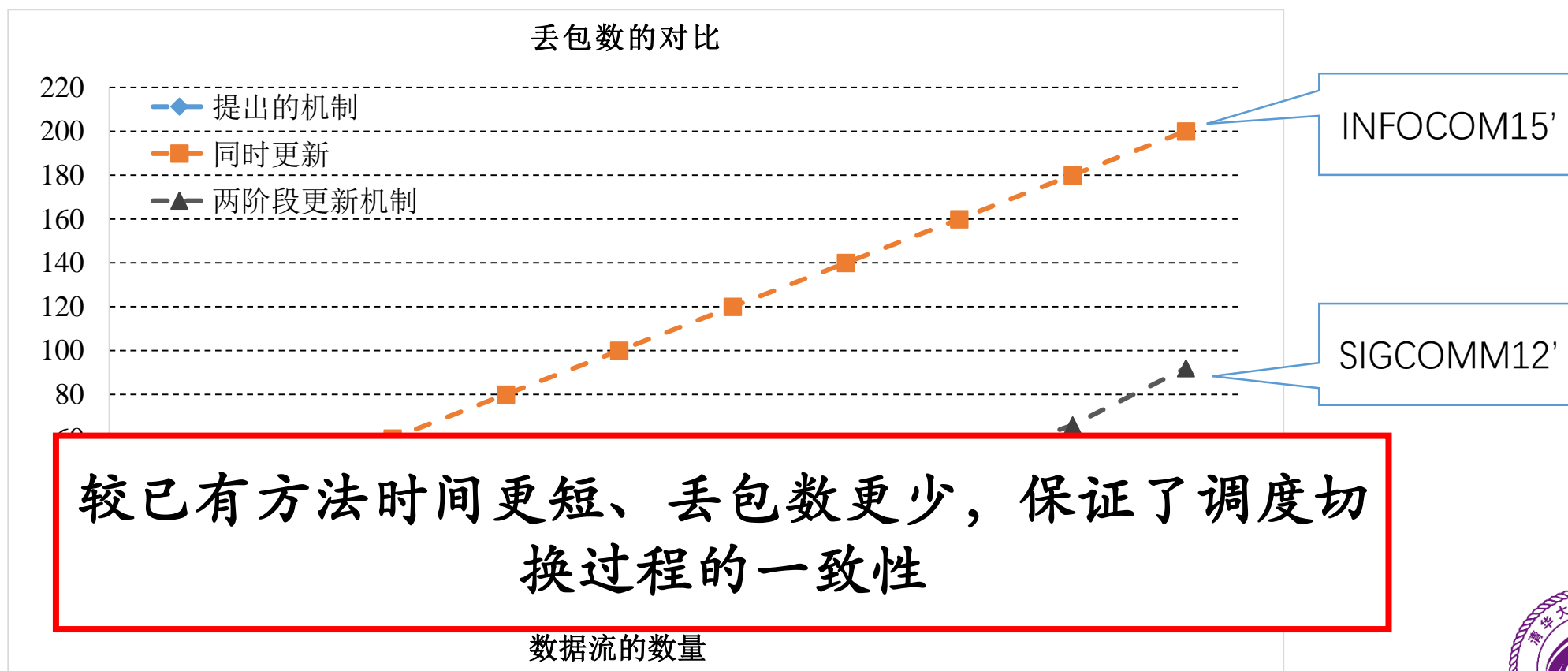
SIGCOMM12'

INFOCOM15'

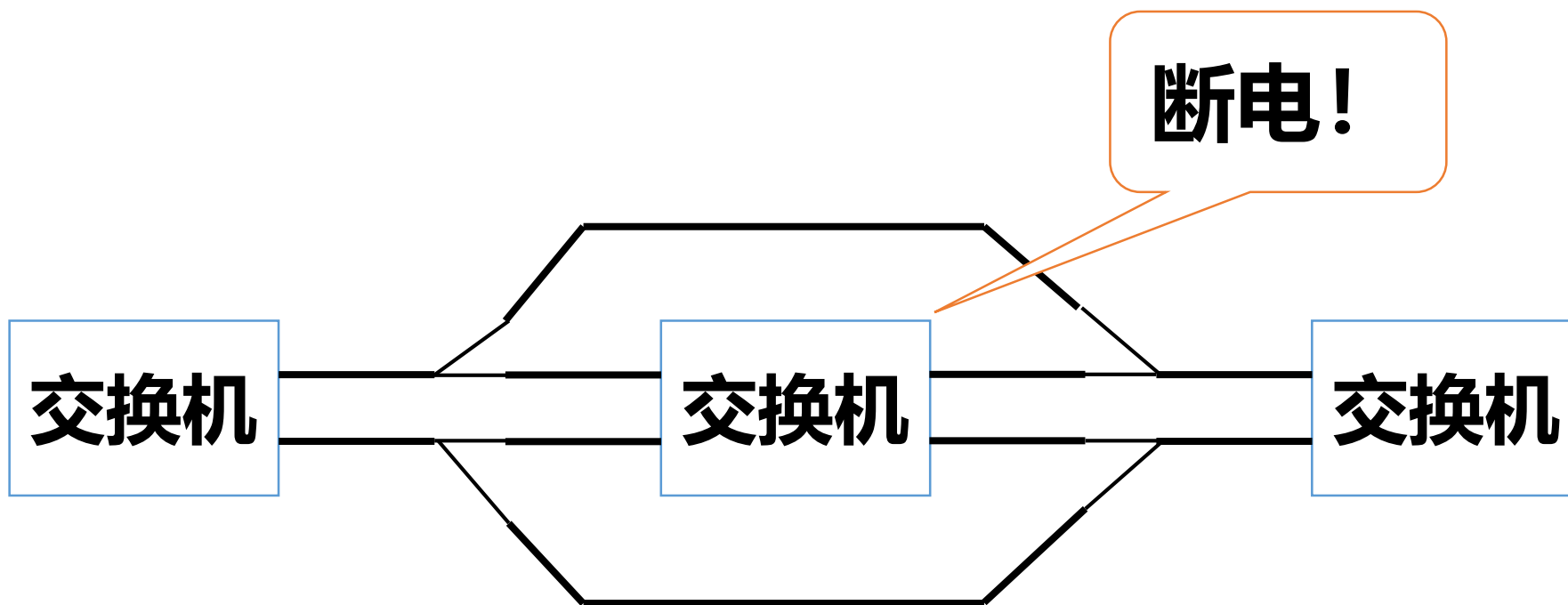


# 效果评估

- 数据流发生变化



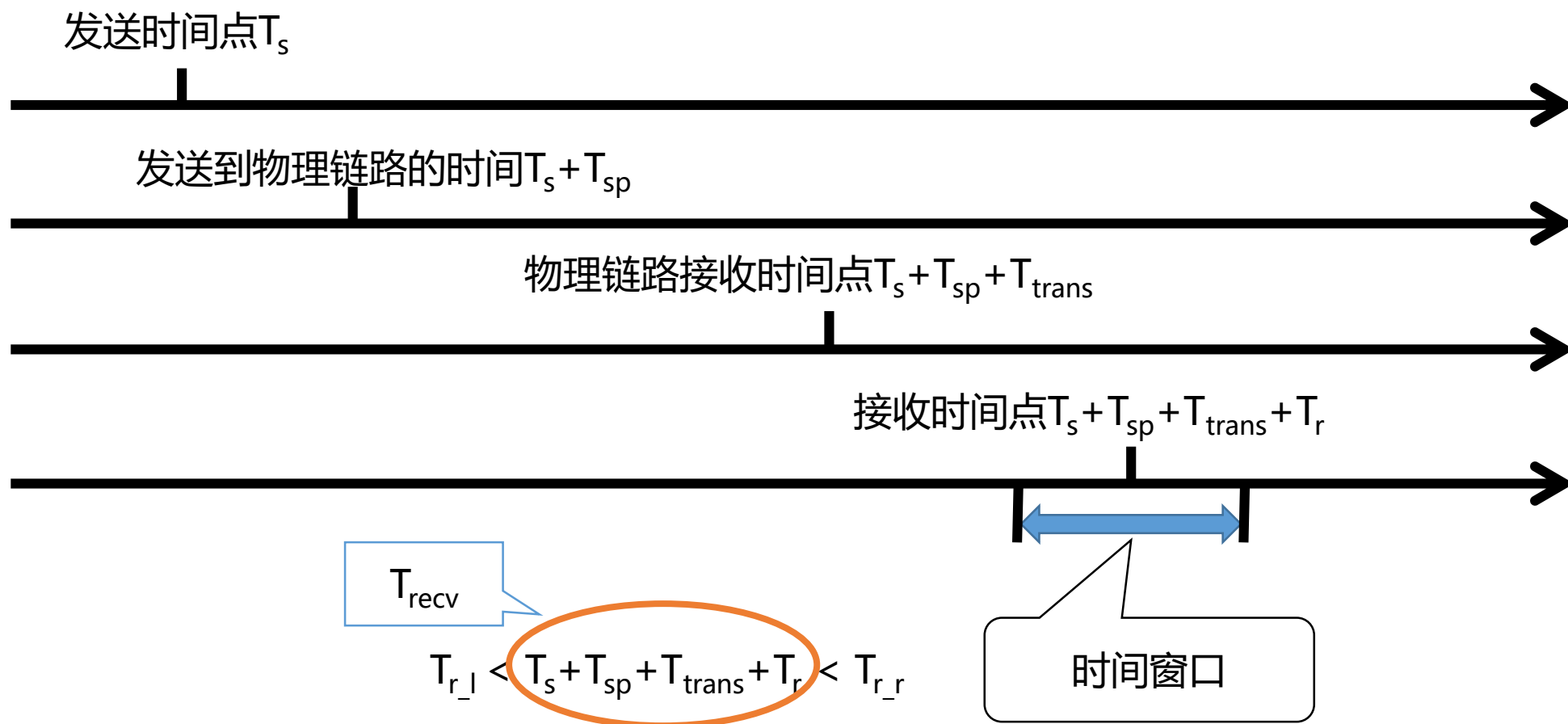
# Bypass场景适配



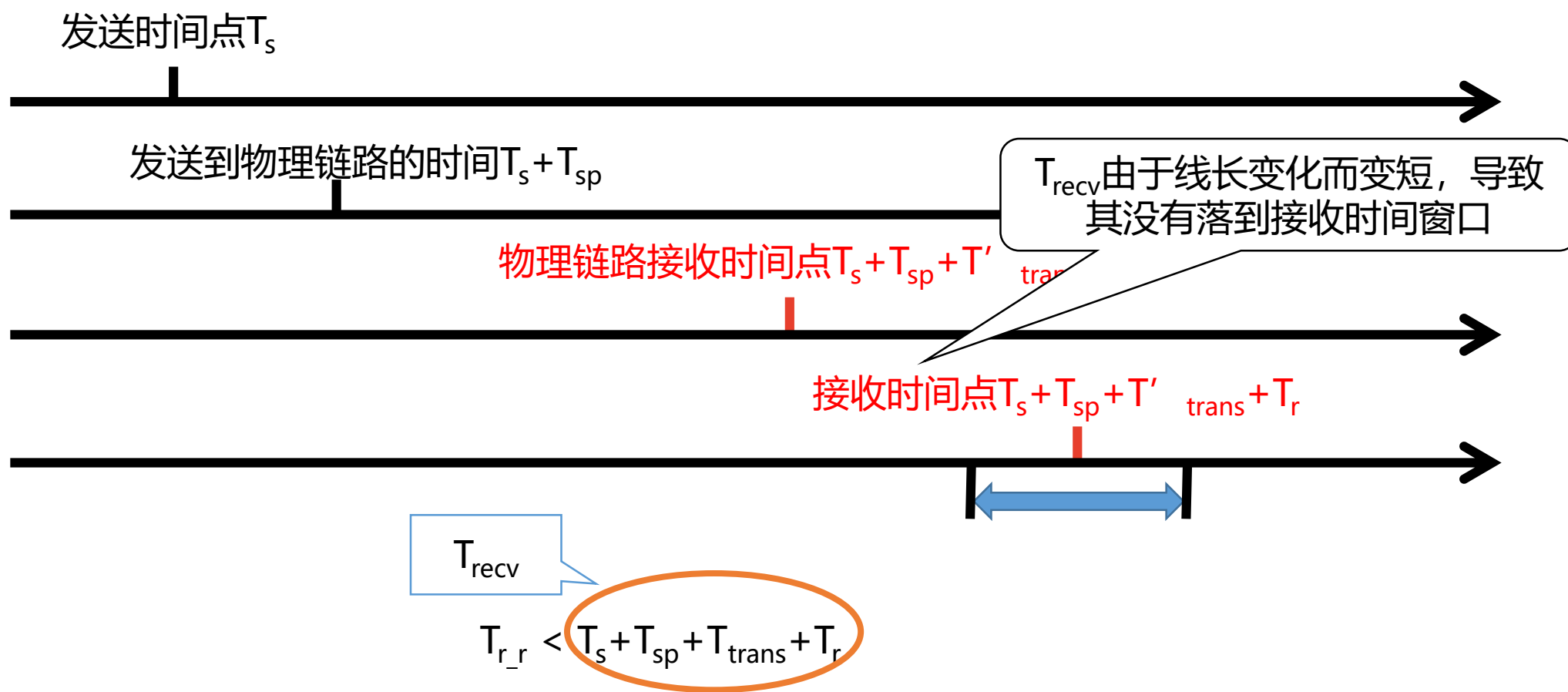
当发生Bypass时，相当于线长发生变化。时间触发调

如何使时间触发调度机制对线长变化不敏感？

# Bypass前



# Bypass后



# Bypass场景适配

1. 增加线路延时测量模块，可以动态测量线路延时 $T_{line}$ 。

2. 修改接收窗口判断条件为：

$$T_{r_l} < T_{recv} - T_{line} < T_{r_r}$$

通过这个消除线长的影响

3. 相应修改调度生成工具。

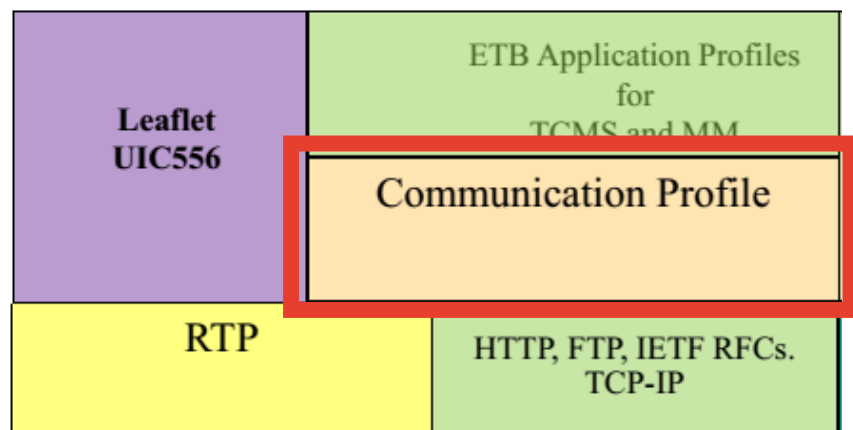
消除线长对时间触发调度的影响





# 普通终端场景适配

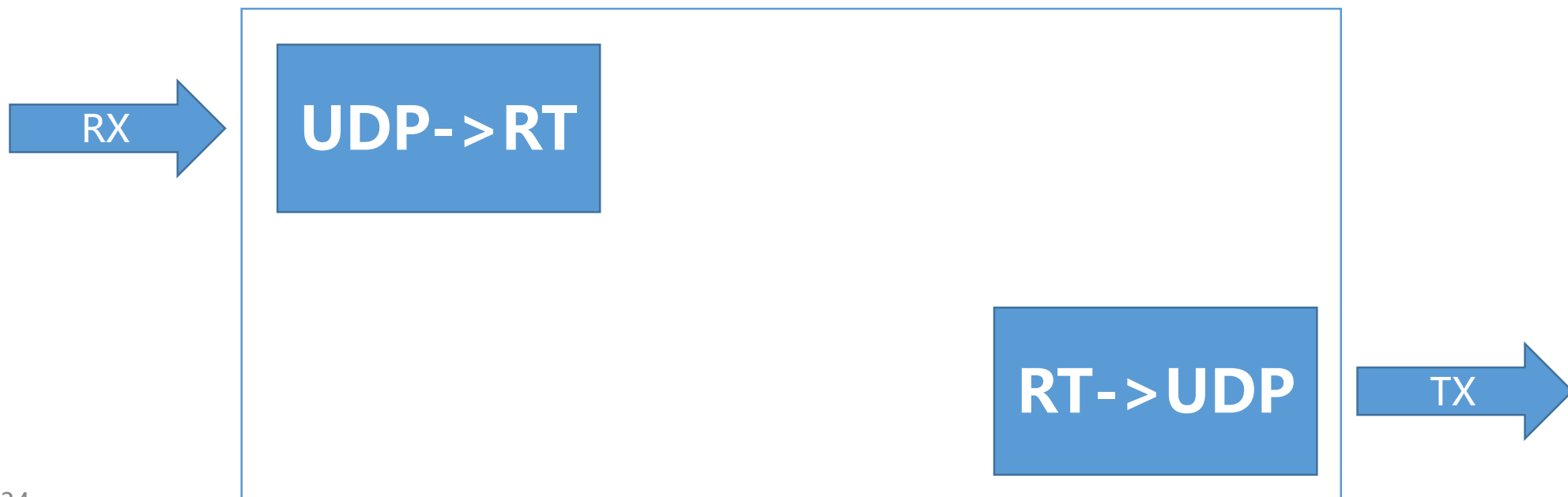
- TRDP为IEC 61375规定的通信规范，运行在TCP/IP之上。通过TRDP发送的报文是标准的UDP和TCP报文——普通终端无法发送特定格式的实时数据报文。



如何在不影响终端设备的情况下，  
进行数据格式适配？

# 普通终端场景适配

- 因为交换模块是使用FPGA实现的，所以，我们可以在交换机入/出端口处，增加适配器模块，使得其可以根据UDP报文的特定数据进行数据转换和逆转换，从而在交换机内部实现对普通以太网设备接入的支持。



# 时间触发论文发表情况

- Online Scheduling for Dynamic VM Migration in Multicast Time-Sensitive Networks, IEEE Transactions on Industrial Informatics (TII), 2019
- Model-Based Adaptation of Mixed-Criticality Multi-Service Systems for Extreme Physical Environments, IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems (TCAD), 2019
- An Enhanced Reconfiguration for Deterministic Transmission in Time-Triggered Networks, IEEE/ACM Transactions on Networking (TON), 2019
- Time-triggered Switch-Memory-Switch Architecture for Time-Sensitive Networking Switches, IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems (TCAD), 2019
- Adaptive Scheduling for Multi-cluster Time-Triggered Train Communication Networks, IEEE Transactions on Industrial Informatics (TII), 2018
- Synthesizing Fault-Tolerant Schedule for Time-Triggered Network Without Hot Backup, IEEE Transactions on Industrial Electronics (TIE), 2018
- Work in Progress: A Flexible and Efficient Framework for Mixed-Criticality Real-Time Systems, IEEE Transactions on Industrial Informatics (TII), 2018
- Modeling and Scheduling of Mixed-Criticality Multi-Service Systems for Extreme Physical Environments, IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems (TCAD), 2018
- Hard Real-Time Scheduling for Mixed-Criticality Multi-Service Systems, IEEE/ACM 25th International Symposium on Quality of Service (IWQoS), 2017

系统性地构建了时间触发以太网  
高性能、高可靠、灵活性核心技术



**谢谢!**  
**Q&A**

