



# Chap6 机载网络与总线



上海交通大學

SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY



# Civil Avionics Systems

## Chap 6 Network and Data Bus

**Prof. Xiao Gang**



Email: [Xiaogang@sjtu.edu.cn](mailto:Xiaogang@sjtu.edu.cn)

Office: Aerospace Room.A432

Tel/Fax:021-34206192

*Advanced Avionics and Intelligent Information Laboratory*

<http://www.avionics.icoc.in/>



- 1 机载总线网络系统发展
- 2 几种主要航电总线简介
- 3 ARINC 429总线原理及应用
- 4 AFDX数据交换网络原理及应用
- 5 总线网络测试技术





# 1 机载总线网络系统发展





- 机载总线发展过程
- 机载总线作用





## ➤ 机载总线发展过程

◆机载电子系统经历了分立式、联合式、综合式和先进综合式四个阶段。

◆贯穿于整个航电系统发展过程的是对信息传输能力和实时通信性能的不断提高的要求。

◆航电系统对信息交换的要求：带宽、实时性、容错和可靠性。

◆航电系统总线网络及应用现状。





## ➤ 机载总线作用

- ◆ 解决航电系统中各子系统设备的信息传输和共享
- ◆ 提高航电系统可靠性、灵活性和可扩展性
- ◆ 降低航电设备寿命周期费用
- ◆ 飞机航电系统的中枢，航电系统发展的技术基础





2

## 几种主要航电总线简介





- ARINC429总线
- MIL-STD-1553B总线
- ARINC629总线
- AFDX交换网络
- 光纤通道FC





### ➤ ARINC429总线

#### ◆ MARK 33 Digital Information Transfer System (DITS)

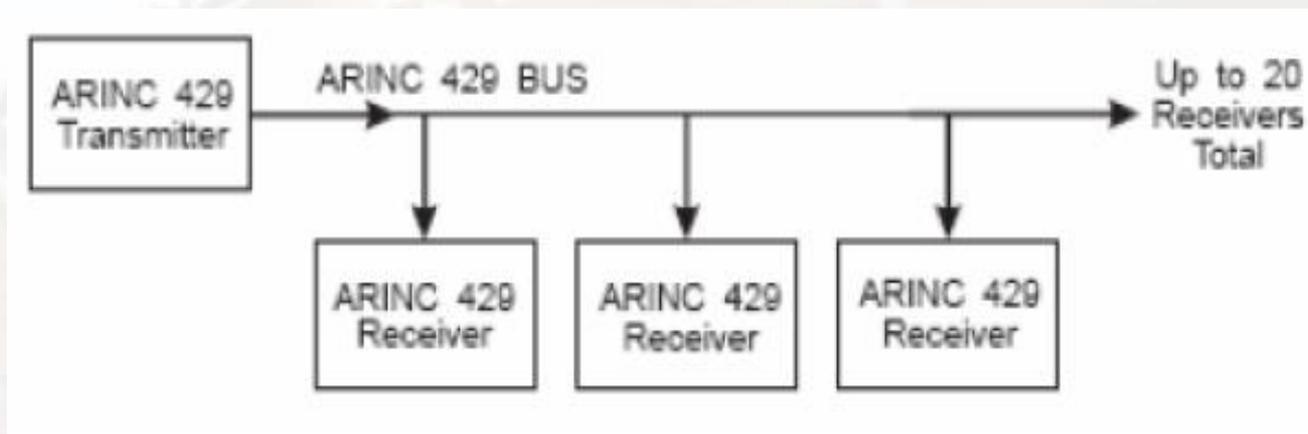
HB6096 – 86 SZ\_01数字信息传输系统

#### ◆ 规范分成三个部分（2001年）

- 429P1-17:功能描述，电气接口，标号分配，字格式
- 429P2-16:离散字格式
- 429P3-18:文件数据传输



### ◆ 拓扑结构



### ◆ 点对点数据传输

### ◆ 传输方式：半双工，差分传输

### ◆ 一个发送端最多连接20个接收端

### ◆ 传输速率：12.5Kbps和100Kbps



### ➤ MIL-STD-1553B总线

#### ◆ 总线发展

- MIL-STD-1553 1973 F-16
- MIL-STD-1553A 1975 F-16 AH-64A
- MIL-STD-1553B 1978
- EBR-1553
- Hyper 1553 2005年F-15E验证试飞，标准未推出
- 国军标GJB289A – 2001时分制指令/响应式多路传输数据总线





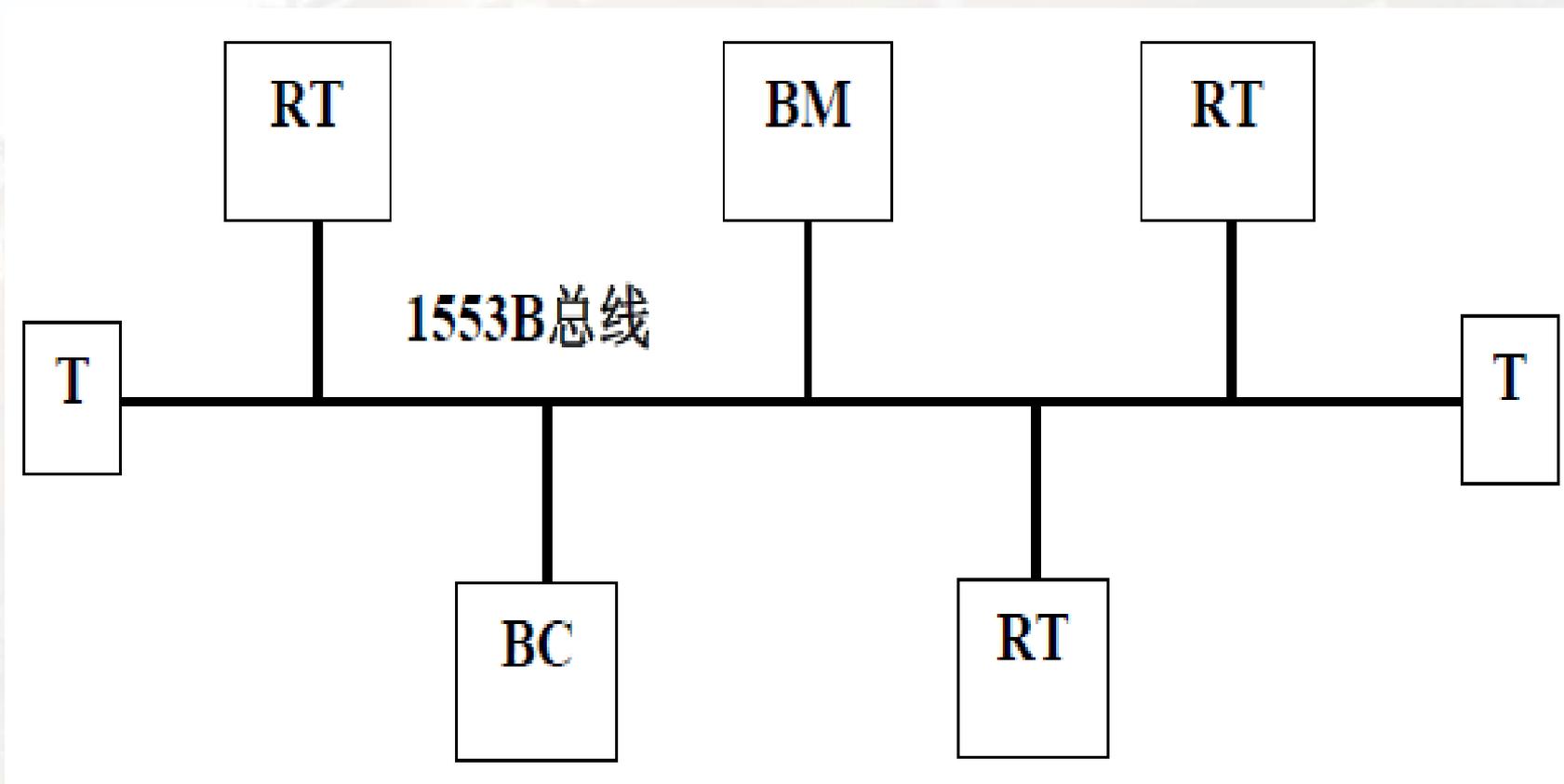
### ◆ 总线特点

- 拓扑结构：串行时分命令/响应式总线
- 组成部分：总线控制器BC、远程终端RT、总线监视器BM(MT)、传输介质
- 传输方式：半双工
- 传输速率：1Mbps
- 编码方式：曼切斯特II性双相电平码
- 消息长度：1 ~ 32个16位字
- 传输介质：屏蔽双绞线
- 耦合方式：直接耦合和变压器耦合





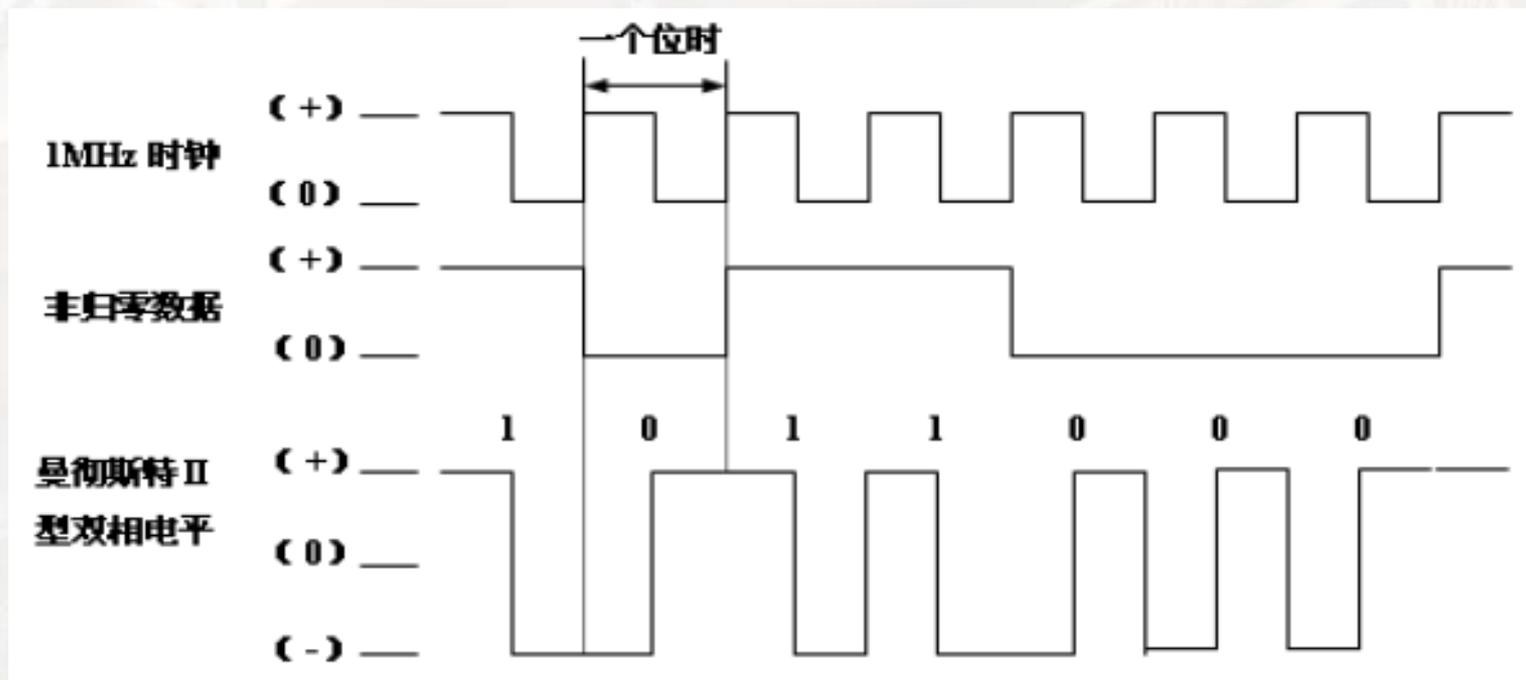
### ◆ 拓扑结构





### ◆ 传输协议

- 数据编码格式：曼彻斯特II型(Manchester II)，双相非归零制



## 2 几种主要航电总线简介



- 三种基本的字类型：命令字、数据字和状态字

| 位时  | 1   | 2 | 3      | 4 | 5 | 6 | 7 | 8    | 9    | 10     | 11 | 12 | 13 | 14     | 15         | 16    | 17   | 18 | 19 | 20 |
|-----|-----|---|--------|---|---|---|---|------|------|--------|----|----|----|--------|------------|-------|------|----|----|----|
| 指令字 |     |   | 5      |   |   |   |   | 1    | 5    |        |    |    |    | 5      |            |       |      |    | 1  |    |
|     | 同步头 |   | 远程终端地址 |   |   |   |   | T/R  |      | 子地址/方式 |    |    |    |        | 数据字计数/方式代码 |       |      |    |    | P  |
| 数据字 |     |   | 16     |   |   |   |   |      |      |        |    |    |    |        |            |       |      |    |    | 1  |
|     | 同步头 |   | 数据     |   |   |   |   |      |      |        |    |    |    |        |            |       |      |    |    | P  |
| 状态字 |     |   | 5      |   |   |   |   | 1    | 1    | 1      | 3  |    |    | 1      | 1          | 1     | 1    | 1  | 1  | 1  |
|     | 同步头 |   | 远程终端地址 |   |   |   |   | 消息差错 | 测试手段 | 服务请求   | 备用 |    |    | 广播指令接收 | 忙          | 子系统标志 | 终端标志 | 奇偶 |    |    |



## 2 几种主要航电总线简介

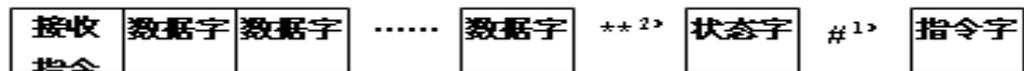
- 字长：20位比特，包括三部分：同步域（3位）、消息块（16位）和奇偶位（1位）
- 帧传输方式：非广播方式和广播方式。
- 非广播方式有六种帧传输格式：BC到RT、RT到BC、RT到RT和命令模式三种（即不带数据的命令模式、带数据发送的命令模式和带数据接受的命令模式）；
- 广播传输方式有四种广播帧传输格式：BC到RT、RT到RT和广播命令模式二种（不带数据的广播命令模式和带数据的广播命令模式）





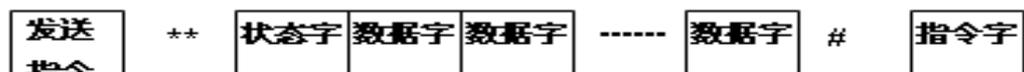
### ◆ 信息传送格式

控制器向  
远程终端  
的传输

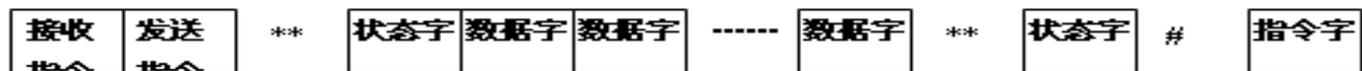


下一消息

远程终端  
向控制器的  
传输

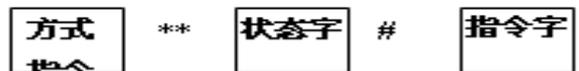


远程终端  
向远程终端  
的传输



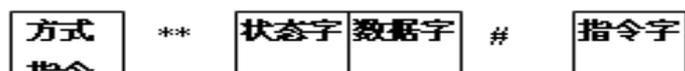
下一消息

不带数据  
字的方式  
指令



下一消息

带数据字  
的方式指令  
(发送)



下一消息

带数据字  
的方式指令  
(接收)



注: 1) “#” 表示消息间隔。  
2) “\*\*” 表示响应时间。



### ➤ ARINC629总线

- 作为ARINC429的替代型总线提出
- 起源于1977年波音研究的总线DATAC(数字式自主终端存取通信)
- 1989年成为ARINC 标准
- 仅用于波音777





### ◆ 主要特点

- 拓扑：串行数据总线，多发送机，最多120个终端
- 介质存取采用CSMA/CA
- 位速率：2Mbps
- 编码方式：曼切斯特II性双相电平码
- 消息字长度：最多31个字串，每个字串包含1个16位标号字和最多256个16位数据字
- 服务类型：周期性和非周期性
- 介质：电流或电压方式驱动的双绞线





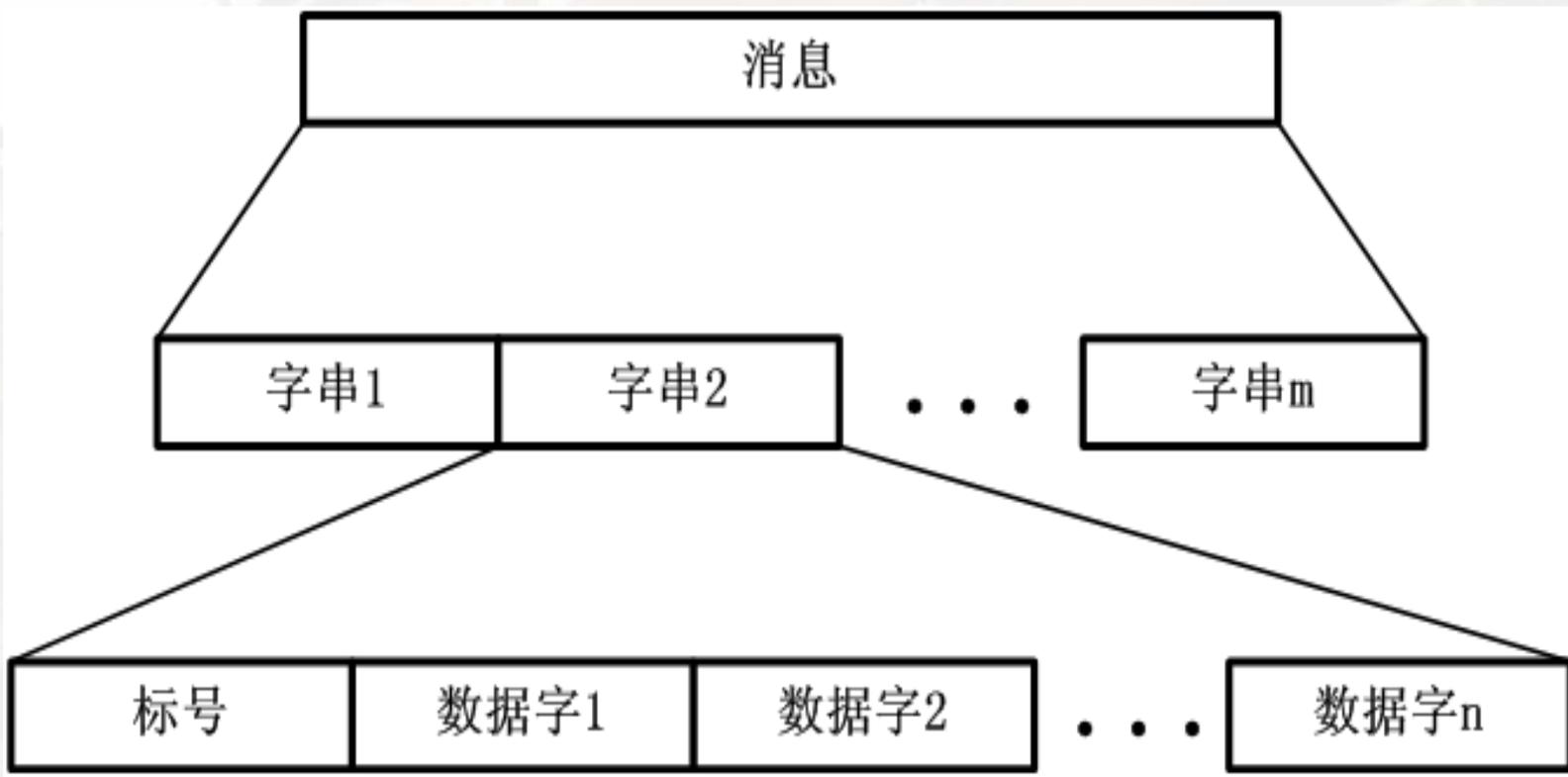
### ◆ 协议层次

|     |
|-----|
| 上层  |
| 网络层 |
| 链路层 |
| 物理层 |





### ◆ 消息格式





### ◆ 链路层协议

- 基础协议BP

- ✓ BP协议可以工作在周期性模式和非周期性模式

周期性模式每个小周期中每个终端传输时间确定

非周期性模式某个终端传输时间在不同的小周期中可能不同

- ✓ 时间控制参数

BP协议定义三个参数:传输间隔TI、同步间隙SG、终端间隙TG

TI、SG对总线上所有终端均相同

每个终端的TG相对于其它终端是唯一的

$TI > SG > TG$

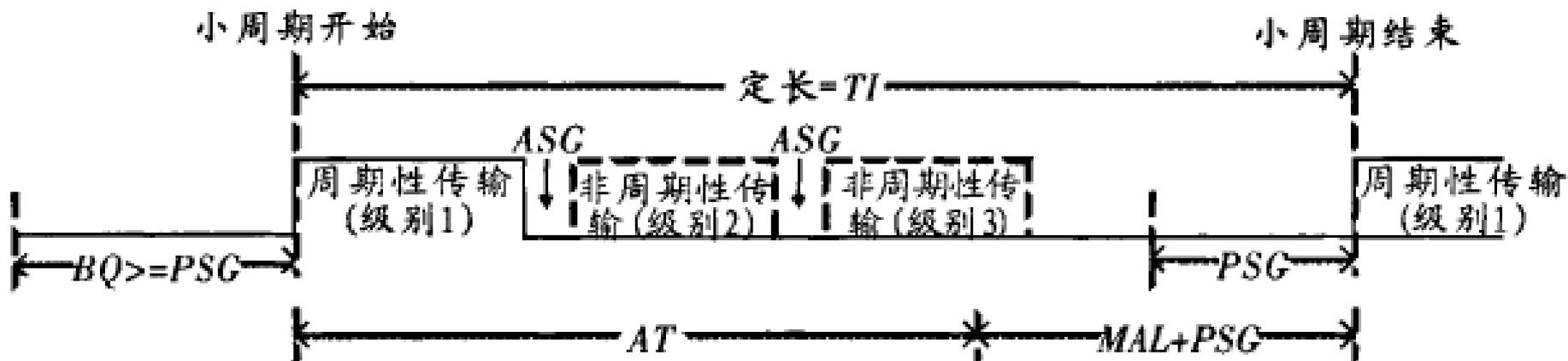


## 2 几种主要航电总线简介

- 混合协议CP

British Aerospace和Smiths Industries提出

关键特征：在混合模式下可以在同一总线上混合周期性和非周期性消息，并且可以为非周期性消息设置不同的优先级



CP 协议示意图





### ➤ AFDX交换网络

#### ◆ AFDX是什么？

- 航空全双工交换式以太网Avionics Full Duplex Switched (X) Ethernet
- 串行数据传输方式，基于广泛应用的工业标准（Ethernet）
- 采用交换式技术
- 支持铜缆和光纤传输介质
- 支持10Mbps和100Mbps传输速率
- 采用确定性传输机制
- 支持通道冗余功能，提供两个完全独立的网络（A、B网），每个网有独立的交换机和链路
- 冗余管理对发送应用透明，对接收应用部分透明



## 2 几种主要航电总线简介

- 不同于局域网LAN技术
- 不是纯的总线型网络
- 不是基于物理共享的介质
- 确定性机制不是基于物理介质
- 不使用CSMA/CD，仅使用全双工方式
- 不使用RJ45连接器，使用四同轴连接器





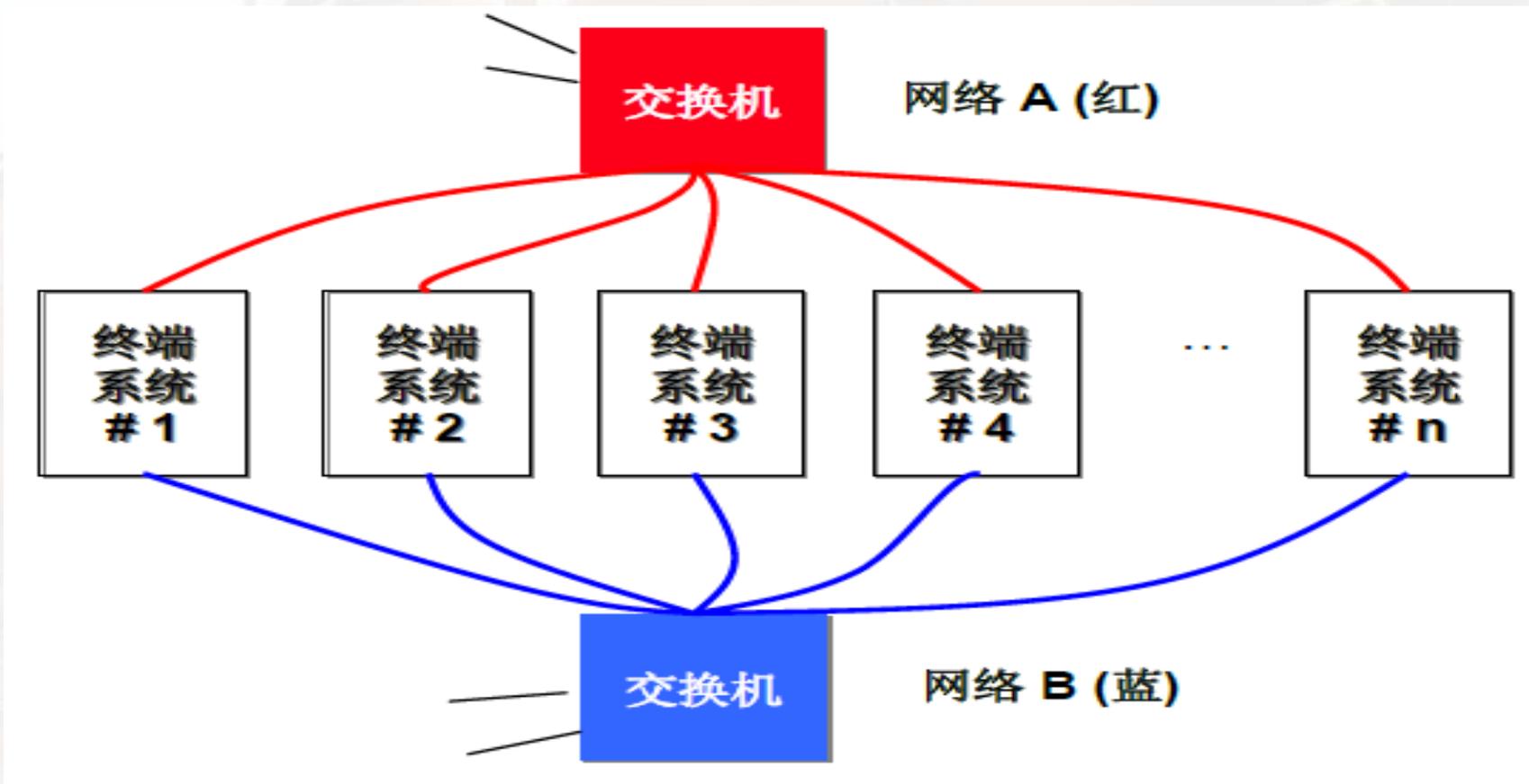
### ◆ AFDX 发展的原因

- 克服以往民机航电网络(ARINC 429等)的局限
- 解决带宽和距离问题
- 减轻重量, 利于省油
- 基于工业标准, 减少开发成本





### ◆ 拓扑结构





### ➤ 光纤通道FC

- FC统一网络由ANSI X3T11小组于1988年制定的高速
- 串行传输协议
- 共享介质时采用基于仲裁或交换的信道共享冲突解决
- 机制和基于信用（Credit）的流量控制策略
- 信息传输速率包括1Gb/s(FC-PH)、2Gb/s和
- 4Gb/s(FC-PH-2)
- 支持IP、SCSI等上层协议
- 支持单工、半双工和全双工通信方式
- 支持光纤和普通铜缆



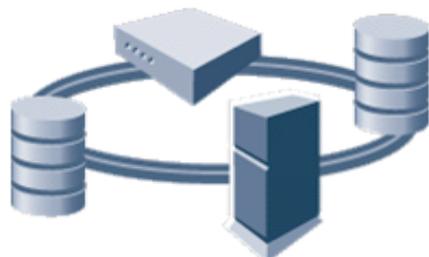
### ◆ FC拓扑结构

点对点



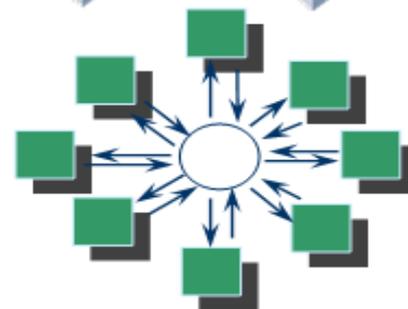
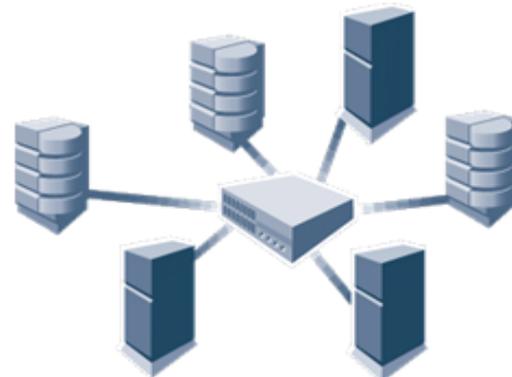
只能连接 **2** 个设备  
(直接连接)

Arbitrated Loop (仲裁环)



最多支持 **127** 个设备  
(光纤集线器)

交换式 Fabric



最多支持 **1千6百万** 个设备  
(光纤通道交换机)

## 2 几种主要航电总线简介

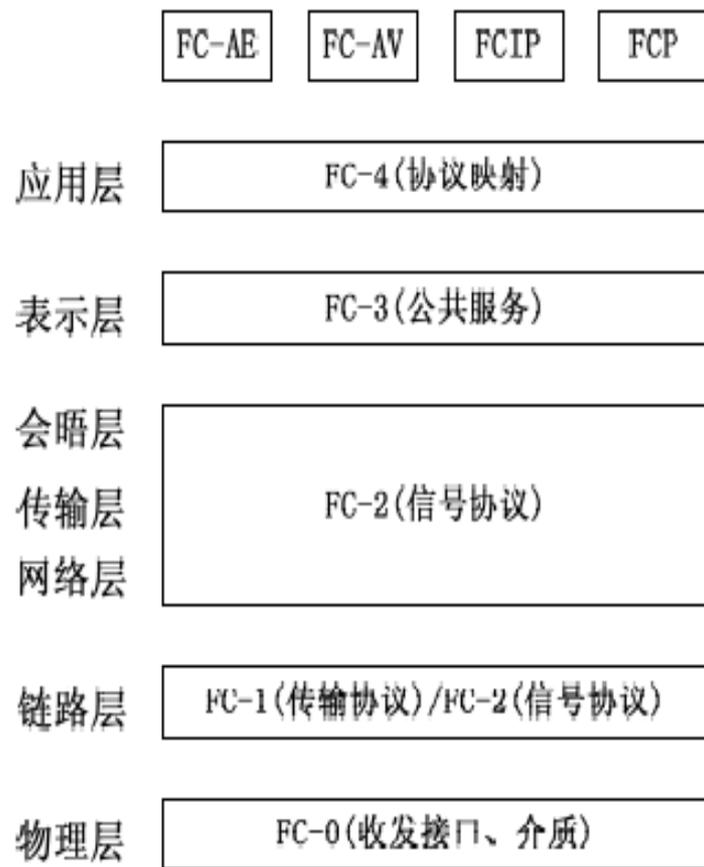
- 点对点  
通过双向链路直接连接两个设备的端口  
提供最大带宽的专用连接，并实现全双工通讯
- 仲裁环  
串行数据通道，允许环上全部端口构成一个逻辑环  
同一时刻只有两个端口可以在环路上通讯  
单个链路出问题可能会导致整个环路停止工作  
实际应用采用双环结构或通过HUB进行物理上的星形连接构成冗余环
- 交换机  
同一时刻有多个通讯路径有效，  
带宽不共享，有利于实时消息传输  
系统配置改变时，不需要执行额外的协议，保证了系统的确定性  
消息传输有多条路径可选，可靠性较高





### ◆ FC统一网络5层模型

- FC - 0层：定义物理接口，包括光和电气接口，电缆，连接器等
- FC - 1层：定义传输协议，包括8B/10B的编解码，有序集和链路控制协议
- FC - 2层：定义信号协议，主要包括交换和序列管理，帧类型结构，服务类型以及流控机制等，定义了六类服务
- FC - 3层：通用服务层，该层主要对一个开放式的网络互连进行链路的建立、撤销等规定了一系列需要实现的通讯过程
- FC - 4层：协议映射，该层主要针对上层的应用需求规定了一些协议映射的实现，从而增加了光纤通道的服务





### ◆ FC分类服务

- 1类服务 – 专用连接：1类服务用于建立两个节点端口之间的专用连接。
- 2类服务 – 多路复用：2类服务是有帧交付应答的无连接服务，用于多路传输。
- 3类服务 – 数据报：3类服务和2类服务非常类似，不同之处是3类服务只支持无确认帧的交付。3类服务的所有确认都是由ULP决定和实现的。
- 4类服务 – 虚电路：4类服务用于交换网的连接服务，允许在一对通信节点之间建立4类电路的一种可选择的服务，4类服务在两个N端口之间提供资源的分配。
- 5类服务：5类服务用于同步、即时服务。
- 6类服务 – 单向专用连接：6类服务支持通过交换式网络进行多点传送，除了多播连接外，6类服务和1类服务非常相似



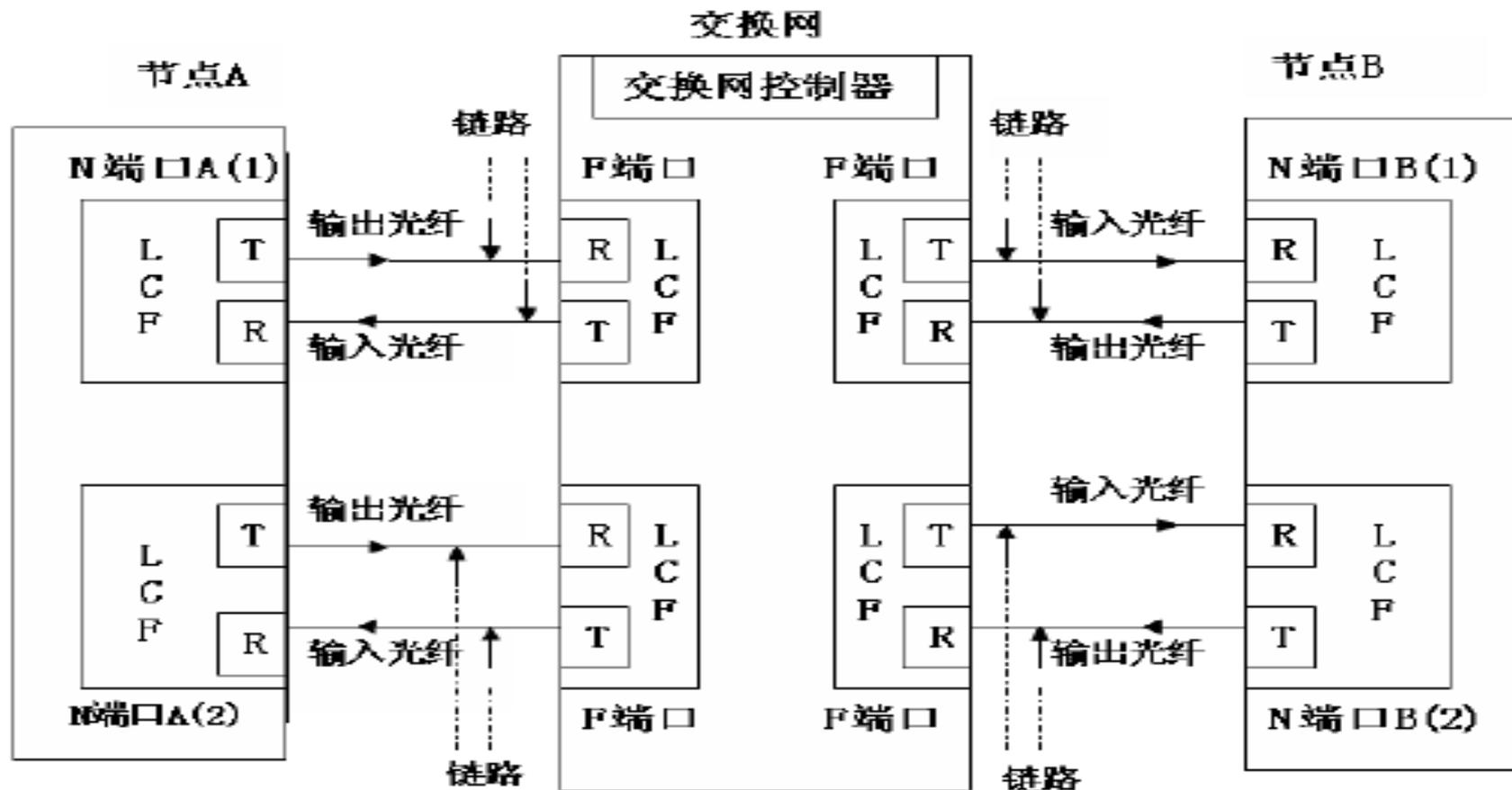


### ◆ 需重点关注的FC相关标准

- ANSI X3.272: 1996 光纤通道仲裁环 (FC-AL)
- INCITS TR-31-2002 光纤通道航空电子环境 (FC-AE)
- ANSI/INCITS 356:2001 光纤通道音频-视频(FC-AV)
- ANSI X3.289: 1996 光纤通道交换式网络通用要求 (FC-FG)
- Project 1331-D 光纤通道帧和信号接口 (FC-FS)
- INCITS 352 光纤通道物理接口 (FC-PI)
- ANSI X3.288: 1996 光纤通道通用服务 (FC-GS)
- ANSI X3.230: 1994 光纤通道物理和信号接口 (FC-PH)
- ANSI X3.297: 1997 光纤通道物理和信号接口-2 (FC-PH-2)
- ANSI X3.303: 1998 光纤通道物理和信号接口-3 (FC-PH-3)
- NCITS 321: 1998 光纤通道交换式网络光纤和交换式网络控制要求 (FC-SW)



### ◆ 典型的FC交换网络组成





3

## ARINC 429总线原理及应用





- ARINC 429总线概述
- ARINC 429总线规范
- ARINC 429总线应用实例





## ➤ ARINC 429总线概述

### ◆ ARINC 429是一份规范

- 定义航电设备和系统之间的互相通讯的规约，包括电气和数据特性和协议
- 设备间采用双绞线互连
- 数据传输速率12.5Kbps或100Kbps
- 数据传输方式为单向广播式，发送和接收均有单独的接口。系统庞大时，连线较多





#### ◆ ARINC429总线特征

- 结构简单：点对点
- 性能稳定：单向传输
- 抗干扰性强：差分传输
- 可靠性高：非集中控制





### ➤ ARINC 429总线规范

#### ◆ ARINC 429标准概况

- MARK 33 Digital Information Transfer System
- 标准包括三部分：

第1部分：ARINC 技术标准429P1-17 提供功能、电气接口、标记和地址分配,及字格式描述；

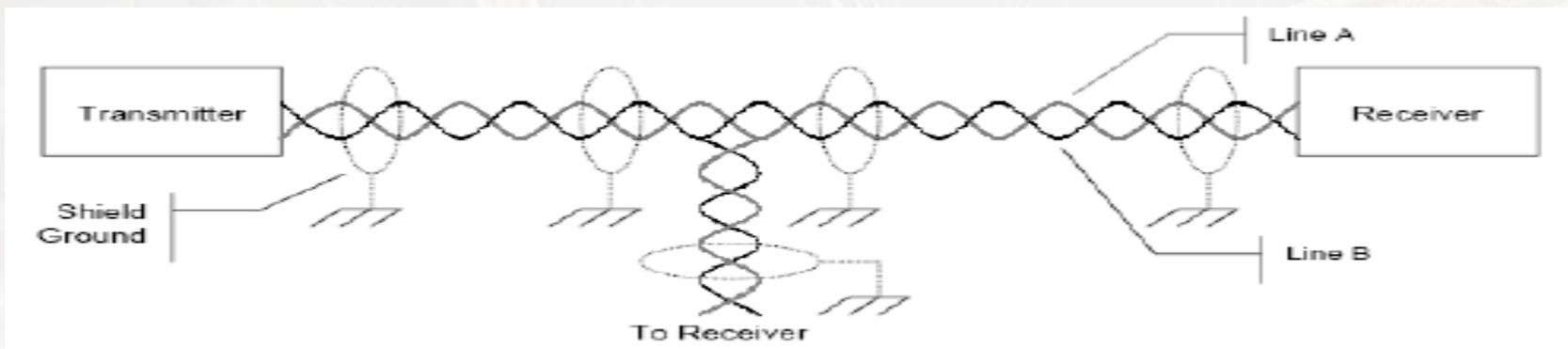
第2部分：ARINC 技术标准429P2-16 提供一个标记排序的离散字位列表；

第3部分：ARINC 技术标准429P3-18 为数据块和文件传送技术描述协议和信息定义。



#### ◆ 电气特性

- 发送设备和接收设备采用双绞屏蔽线(称为A、B线)传输信息。双绞屏蔽线要求在屏蔽线两端及所有中断处接地。
- 每个接收器应采用隔离措施,防止本接收器故障时影响连在同一总线上的其它接收设备
- 调制方式:采用双极归零制三态调制方式,即调制信号由高(+5V)、零(0V)、低(-5V)三种状态组成组成





- 输出信号

发送设备开路时输出信号电平符合下表

| 端口状态         | 高电平/V          | 零电平/V         | 低电平/V          |
|--------------|----------------|---------------|----------------|
| <b>A端对B端</b> | <b>+10±1.0</b> | <b>0±0.5</b>  | <b>-10±1.0</b> |
| <b>A端对地</b>  | <b>+5±0.5</b>  | <b>0±0.25</b> | <b>-5±0.5</b>  |
| <b>B端对地</b>  | <b>-5±0.5</b>  | <b>0±0.25</b> | <b>+5±0.5</b>  |





- 输入信号

受传输线长度、接收负载个数等影响，信号电平范围比发送端输出范围宽发送设备开路时输出信号电平符合下表

|       | 名义值              | 实际值              |
|-------|------------------|------------------|
| 高电平/V | <b>+6~+10</b>    | <b>+6.5~+13</b>  |
| 零电平/V | <b>-0.5~+0.5</b> | <b>-2.5~+2.5</b> |
| 低电平/V | <b>-10~-6</b>    | <b>-13~-6.5</b>  |

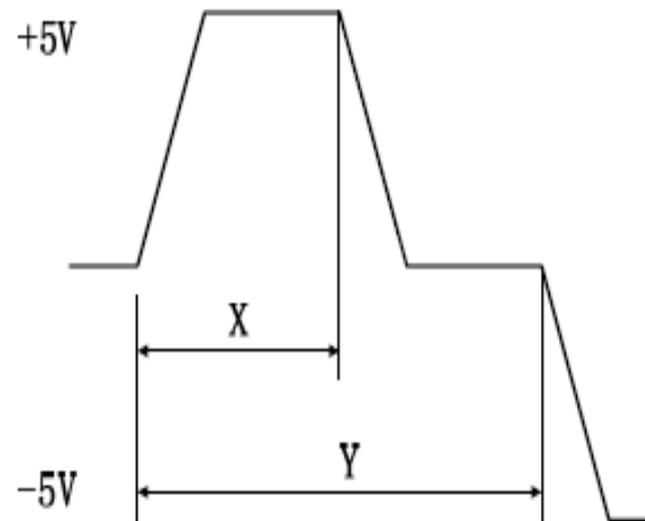




- 位斜率

位斜率指信号的上升和下降时间，在信号上升沿或下降沿的10%到90%处测量

| 参数      | 高速                   | 低速                              |
|---------|----------------------|---------------------------------|
| 位速率     | 100Kbps              | 12.5K~14.5Kbps                  |
| 时间Y(1位) | $10\mu s \pm 2.5\%$  | $1/(\text{位速率})\mu s \pm 2.5\%$ |
| 时间X     | $5\mu s \pm 5\%$     | $Y/2\mu s \pm 5\%$              |
| 上升时间    | $1.5\mu s \pm 0.5\%$ | $10 \pm 5\mu s$                 |
| 下降时间    | $1.5\mu s \pm 0.5\%$ | $10 \pm 5\mu s$                 |





- 负载特性

发送器输出阻抗： $75 \pm 5 \Omega$ ，在A、B线间均分

接收器输入阻抗：

差动输入阻抗： $R_I = 12000 \Omega$ （最小）

差动输入电容： $C_I = 50 \text{ pf}$

对地电阻 $R_H$ 和 $R_G > 12000 \Omega$

对地电容 $C_H$ 和 $C_I < 50 \text{ pf}$

接收器总输入电阻包括 $R_I$ 、 $R_H$ 和 $R_G$ 的影响，最小 $8000 \Omega$

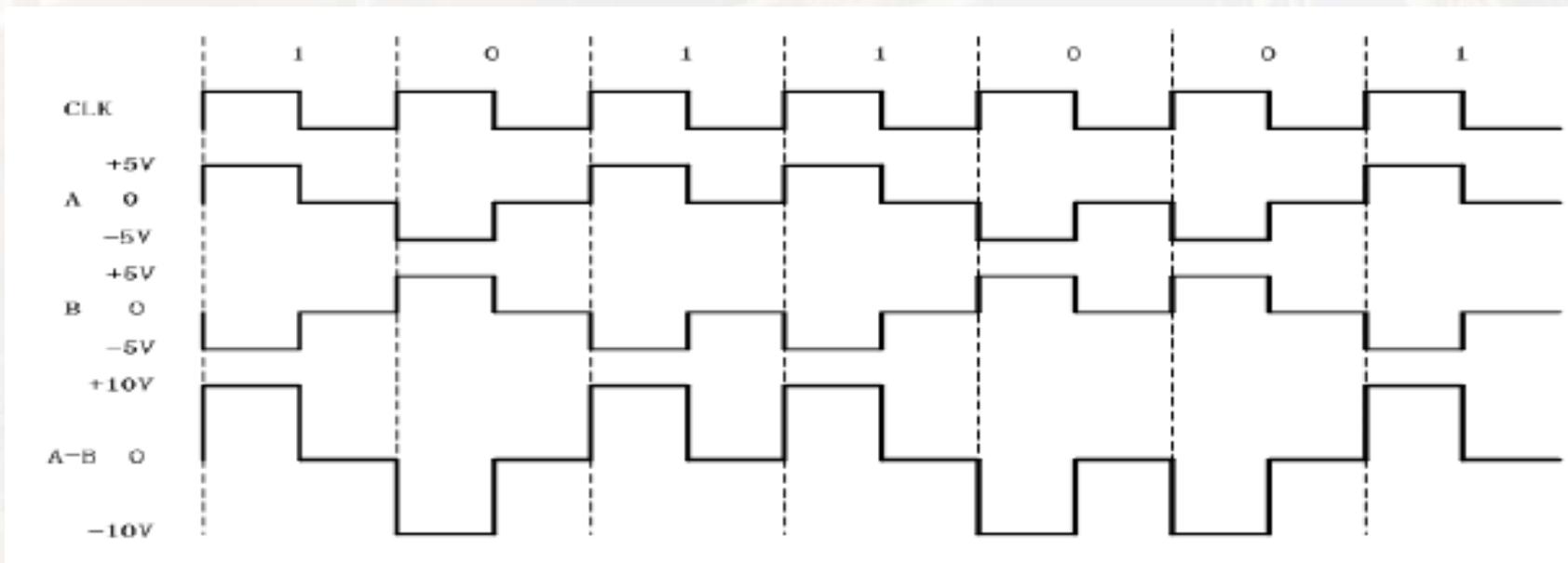
20个接收器负载最小电阻 $400 \Omega$





## ◆ 总线协议

- 数据格式
- 1) 数据编码采用双极型归零制三态码，每一位前半周期高电平表示逻辑“1”，低电平表示逻辑“0”，后半周期电压回零





- 2) 数据字格式

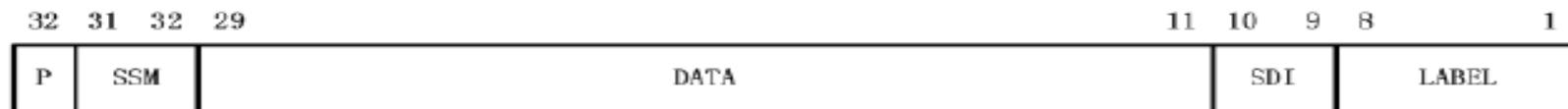
标识符 (LABEL) : 第1 ~ 8位, 八进制表示, 标识BNR和BCD数字内包含的信息或识别作离散、维护和AIM数据用的字

源、目标标识符 (SDI) : 用于多接收设备的系统中将特定字发送给特定接收设备, 或多系统设备中表示发送源设备

数据段 (DATA) : 第11 ~ 29位为数据位, 可以有多种不同的格式。

符号、状态矩阵 (SSM) : 标识设备硬件状态、操作模式、数据内容有效性等

校验位 (P) : 奇偶校验方式, 常用奇校验



| 30 | 31 | BCD  | BNR  | AIM | FILE |
|----|----|------|------|-----|------|
| 00 |    | 正    | 故障告警 | 中间字 | 中间字  |
| 01 |    | X    | X    | 初始字 | 初始字  |
| 10 |    | 功能测试 | 功能测试 | 结束字 | 结束字  |
| 11 |    | 负    | 正常操作 | 控制字 | 中间字  |

| SDI | 设备号   |
|-----|-------|
| 00  | 4/all |
| 01  | 1     |
| 10  | 2     |
| 11  | 3     |





- 3) 数据类型

二进制补码BNR

十进制BCD

离散数据

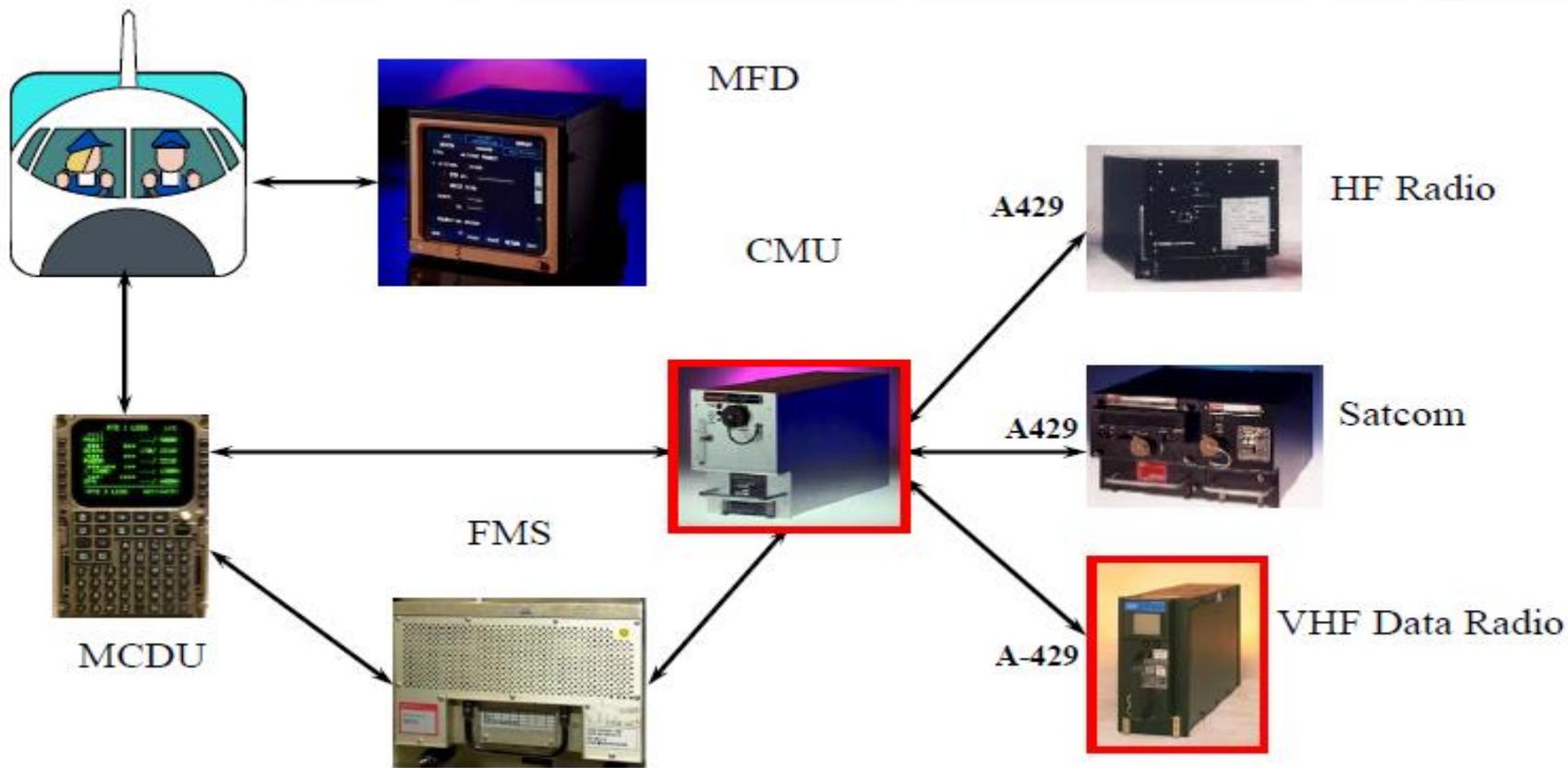
维护数据

AIM数据(应答、ISO 5号字母表)





## ➤ ARINC 429总线应用实例





4

## AFDX数据交换网络原理及应用





- AFDX网络概述
- AFDX/ARINC664规范
- AFDX网络相关技术
- AFDX网络关联的几种网络协议
- AFDX网络系统应用实例





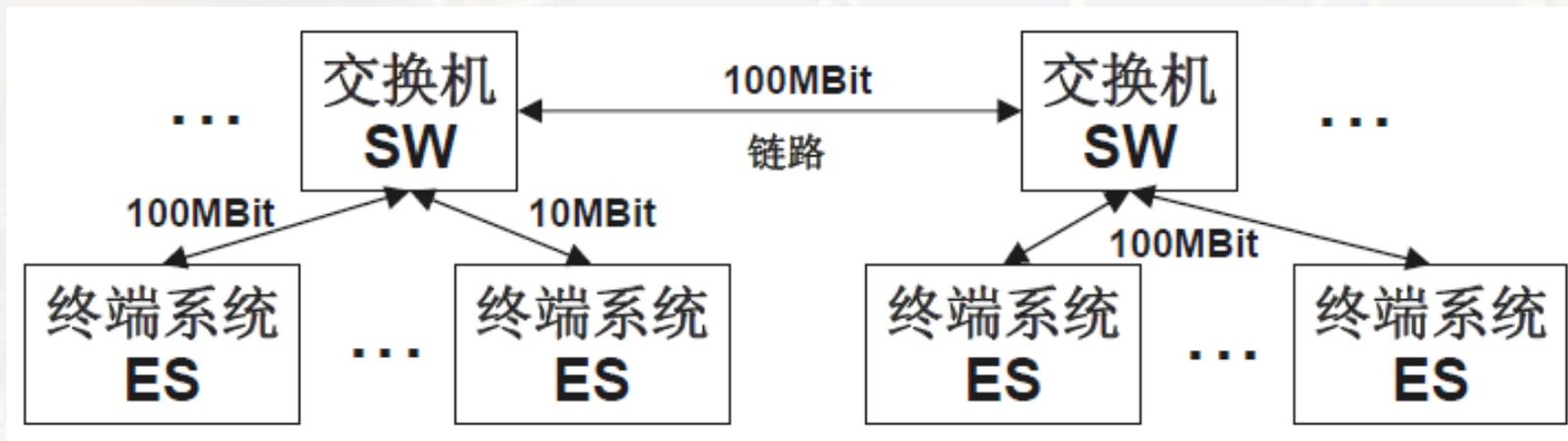
### ➤ AFDX网络概述

- 航空全双工交换式以太网（Avionic Full-Duplex Switched Ethernet, AFDX/ARINC 664）是适用于航电系统信息传输的确定性飞机数据网路总线系统
- 基于标准的IEEE802.3技术，在以太网基础上增加了确定性定时机制和可靠的信息传输机制以适应航电应用
- 确定性定时机制通过具有有限带宽和帧传输间隔的虚拟链路技术实现，可靠的信息传输通过帧管理机制实现，包括信息的冗余传输和完整性检查。
- 传输速率支持10MBit/s和100MBit/s



### ◆ AFDX网络三个基本要素

- 终端系统 (ES)
- 交换机 (SW)
- 链路





### ◆全双工Ethernet优势

- 全双工通讯可以避免冲突
- 有限的时间延迟
- 物理隔离
- 可以实现与其它总线（如429、1553）的映射
- 可以增加完整性和确定性机制以适应航电应用





### ◆ AFDX网络主要技术特点

- 特殊的寻址方式：基于MAC地址的寻址方式
- 有限的传输时间，AFDX交换机的技术延时小于100us
- 自适应的双余度工作，高可靠性
- 串行总线，固定的最大端到端延迟、低延迟
- 采用包交换的交换机，并且以交换机为中心进行星形连接
- 可变长度帧结构，帧的大小L介于64字节和1518字节之间
- AFDX交换机可以处理4096个虚拟链路（VL），每个VL对应一个发送MAC地址和多个接收MAC地址
- 32位CRC校验
- 传输速率为100Mbps
- 传输介质：光纤、非屏蔽双绞线及同轴电缆
- 结构灵活，终端数目扩充方便，系统可进行级联扩展
- 系统具备监控功能



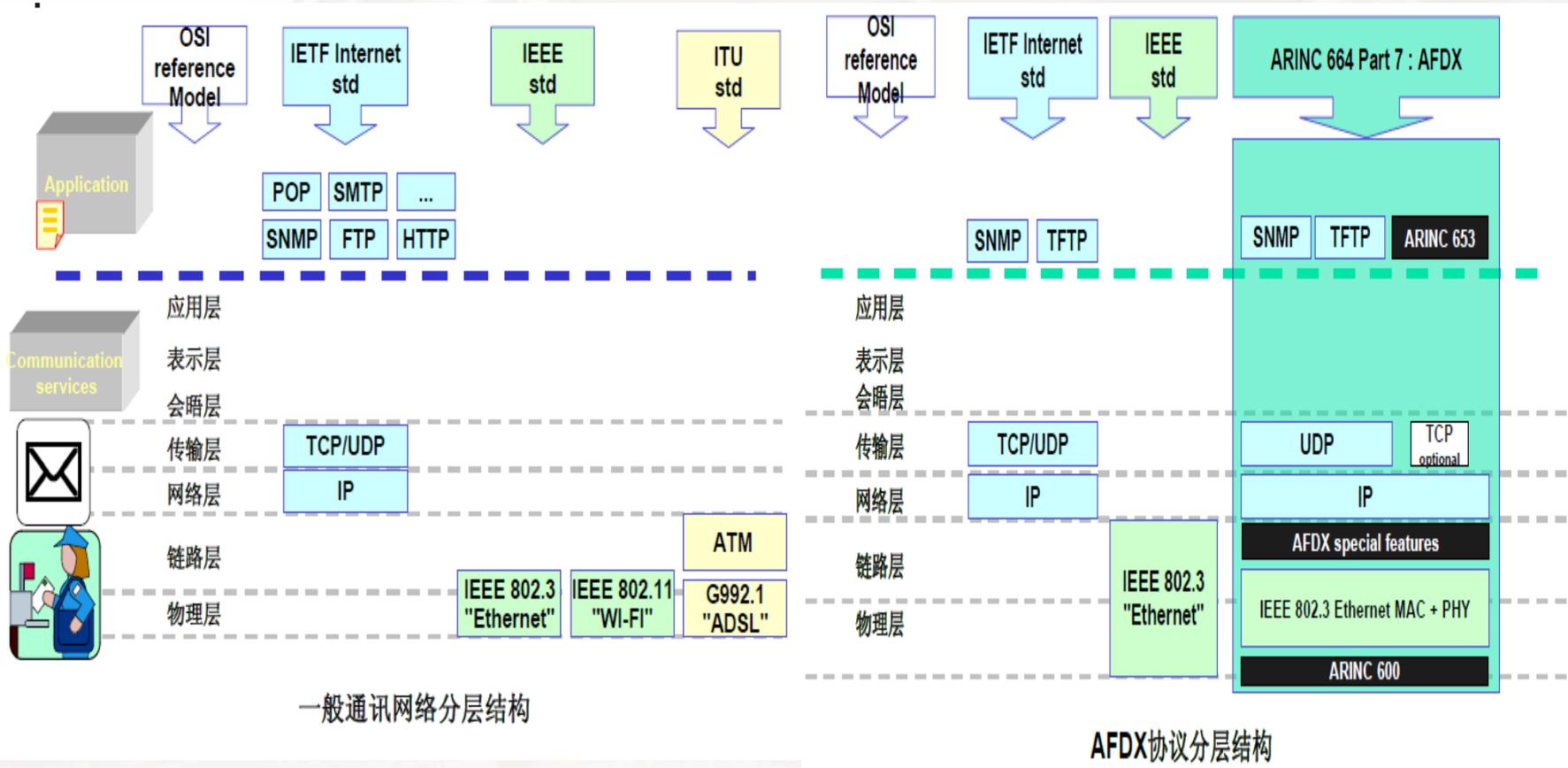


### ◆与AFDX相关的ARINC标准

- ARINC 615A Data Loading
- ARINC 664, Aircraft Data Network
  - Part 2 -Ethernet
  - Part 3 -Airlines Internet-Based Protocols
  - Part 4 -Addressing Structures and Assignments Services
  - Part 7 Avionics Full Duplex Switched Ethernet (AFDX) Network
- ARINC 653, Avionics Application Software Standard Interface:  
Application/EXecutive(APEX)



## ➤ AFDX/ARINC664规范





### ◆终端系统

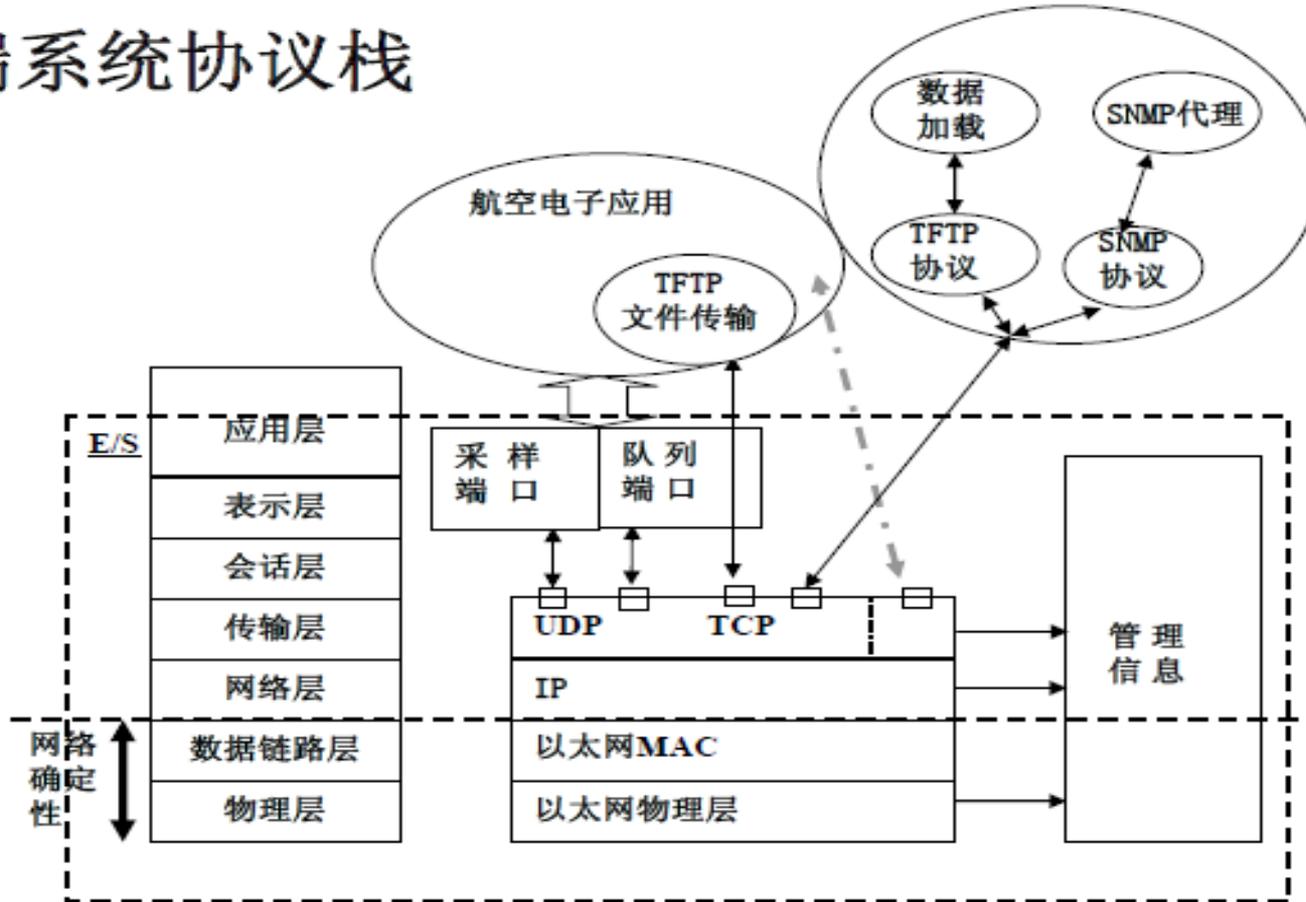
- AFDX终端分布在航空电子系统的各个分节点上，其主要功能是给航空电子分系统之间提供安全、可靠的数据交换
- AFDX终端主要保障以下两个方面：
  - 保证每条虚链路的带宽和延迟边界
  - 保障数据在传输中的安全性和可靠性





## 终端系统协议栈

### 终端系统协议栈





### □ AFDX终端主要功能

- 系统管理：负责对各个终端的各条虚链路进行参数配置
- 信息封装：对应用层信息进行UDP、IP和MAC的封装
- 虚链路的调节：保证每个VL的带宽分配间隙
- 多路调度：当发送ES具有多路VL时，多路复用不同的消息流
- 冗余管理：AFDX网络采用了两个独立的冗余网络进行传输
- 完整性检查：接收终端进行完整性检查保证每条虚链路上信息传送的可靠性





### □ 系统综合器

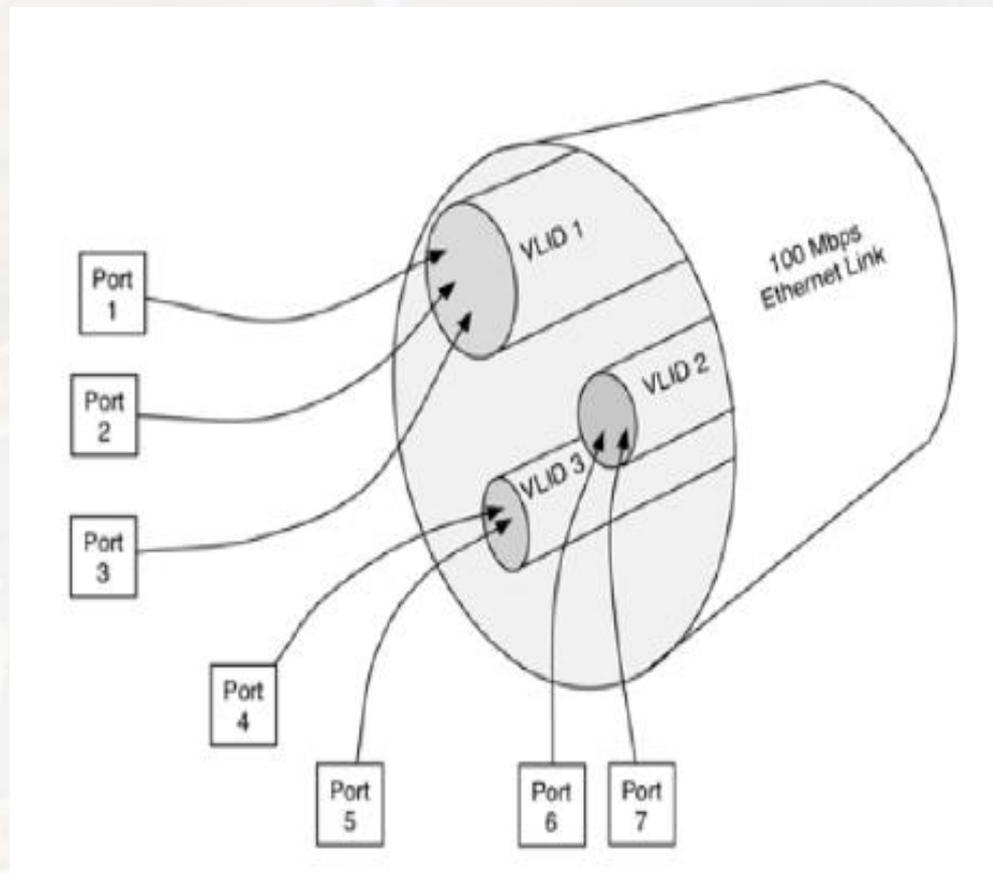
- 每个AFDX终端都需要有一个系统综合器，主要功能是对终端系统进行虚链路配置，从而能够以一种（通信时间）可确定性的方法使用AFDX终端(ES)
- 终端配置表典型参数
  - VirtualLinkID, 虚拟链路号
  - BAG, 帧间隔
  - Jitter, 发送抖动间隔
  - Lmax, 最大最小帧长
  - IntegrityCheck, 该虚拟链路是否经过完整性 检查
  - RedundancyManagement(ACTIVE | NOT\_ACTIVE), 是否经过冗余管理
  - SkewMax, 两个冗余帧之间的最大时间间隔





### □ 虚拟链路 (VL)

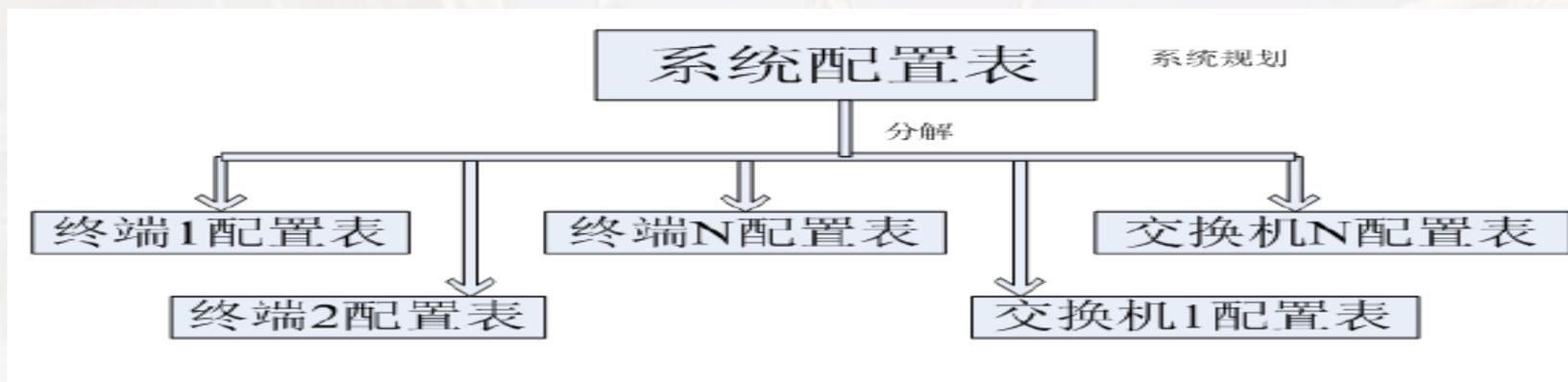
- ES通过VL交换以太网帧，在网络的任何一个VL中，只有一个ES能作为它的源。即对于任何一个VL，一个ES不能同时设计成它的发送方和它的接收方
- VL是一个概念上的通信载体，具有如下属性：VL定义了一个逻辑的单向连接，这个连接从一个源ES到一个或多个目的ES；每个VL都有一个指定的最大带宽，这个带宽是由系统综合器分配的



## 4 AFDX数据交换网络原理及应用



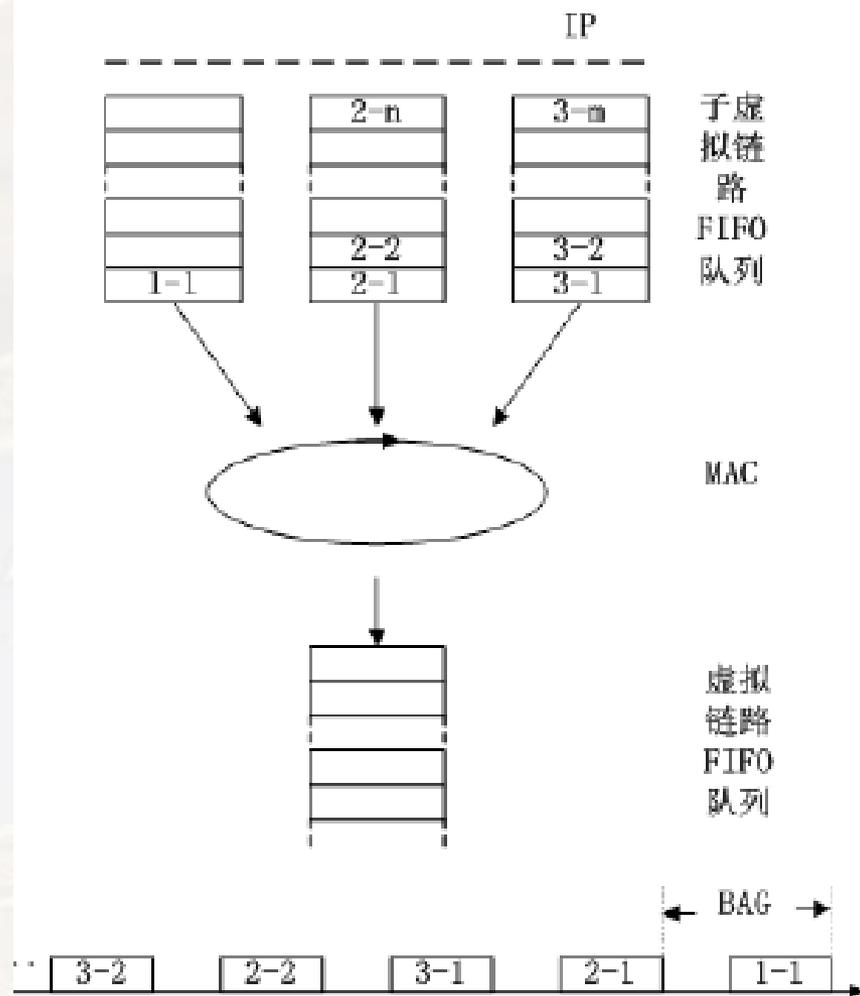
- ES应能在它所支持的所有VL中针对可用带宽提供逻辑上的隔离，无论哪一个分系统想利用一个VL，其他任何VL的可用带宽都不受影响
- 对于每一个VL，ES应保持由分系统传递数据的顺序，包括发送和接收，即顺序的完整性。无论其它VL是否想要使用带宽，ES通信协议栈应保证每个VL在传输中分配的带宽。为了在分系统之间的网络层保持隔离，一个VL不能被两个或更多地源分系统共享
- VL处理是通过一个流量控制机理来实现的，即调整一个ES的不同源VL产生的数据流量。这个机理对VL在网络层提供隔离
- 虚拟链路在物理上体现在系统的配置表中，分布在终端和交换机各自的配置表中。





### □ 子虚拟链路 (Sub-VL)

- 一个VL可以包括不多于4个的子VL
- 每个子VL都有一个专用的先进先出 (FIFO) 队列
- 主VL的FIFO队列基于循环环读取子VL的FIFO队列
- 子VL位于MAC层





### □ 流量控制

- 在ES的输出端，有两个参数确定与指定VL相关帧的流量的特性

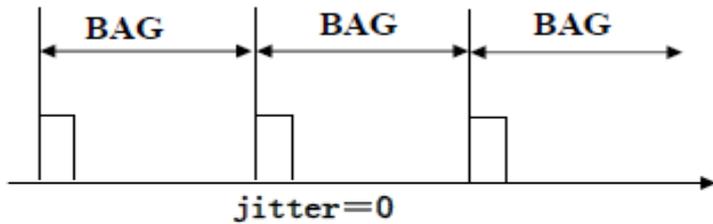
带宽分配间隙（BAG）：同一VL连续帧间最小时间间隔

抖动（Jitter）：给定VL，帧可以出现的有限时间

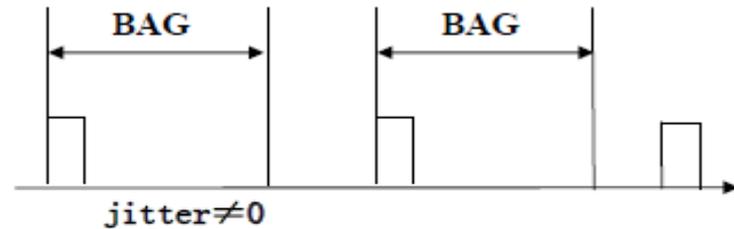
- 如果一个帧从调度器出来后没有抖动，那么BAG表示同一个VL上两个连续帧首位之间的最小的时间间隔。为了保证每个VL的BAG，调整器对消息帧流在发送前进行了调整。



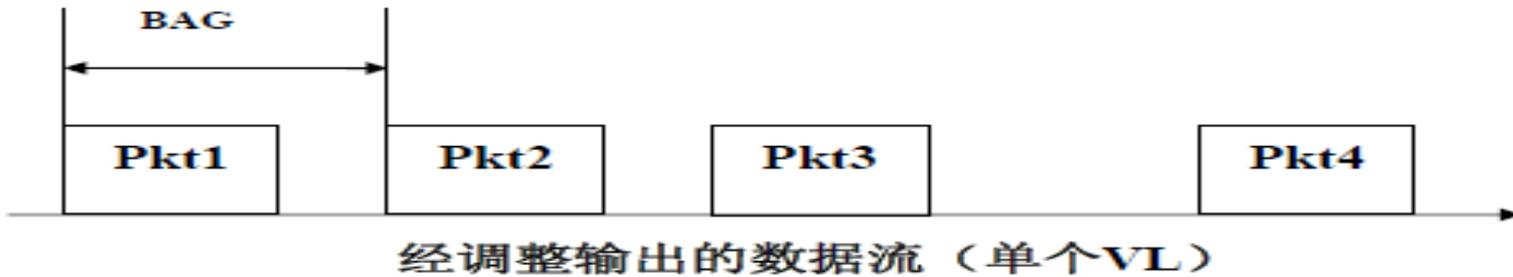
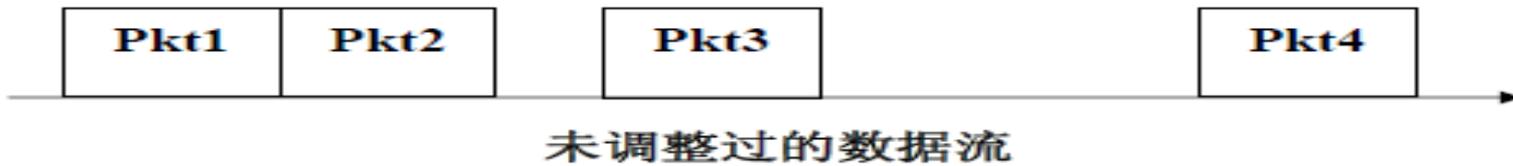
# 4 AFDX数据交换网络原理及应用



最大带宽数据流中的带宽分配间隙



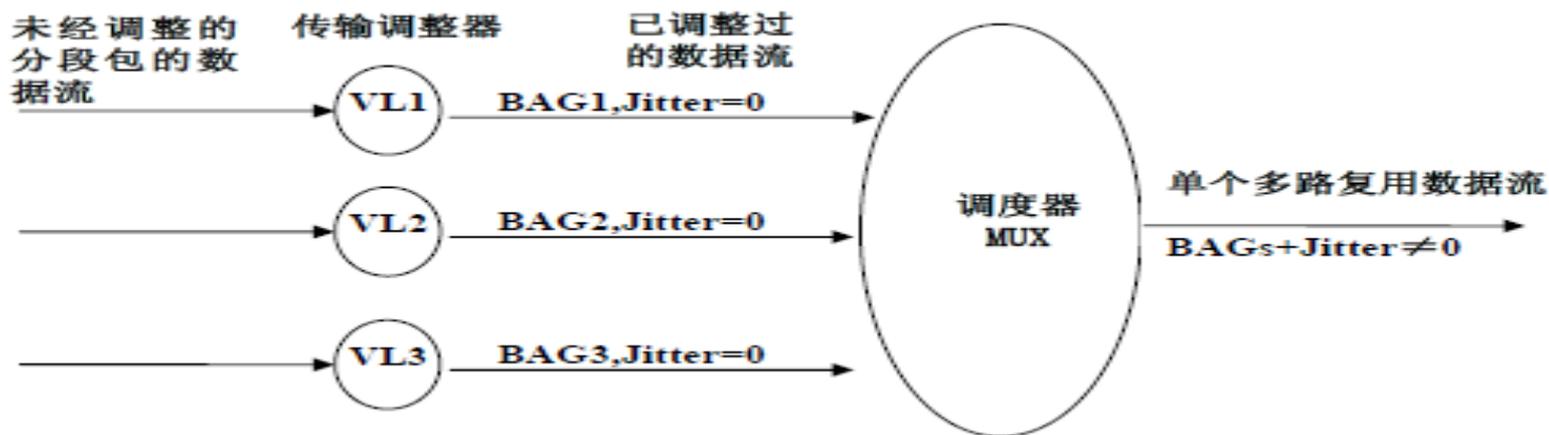
非最大带宽数据流中的带宽分配间隙





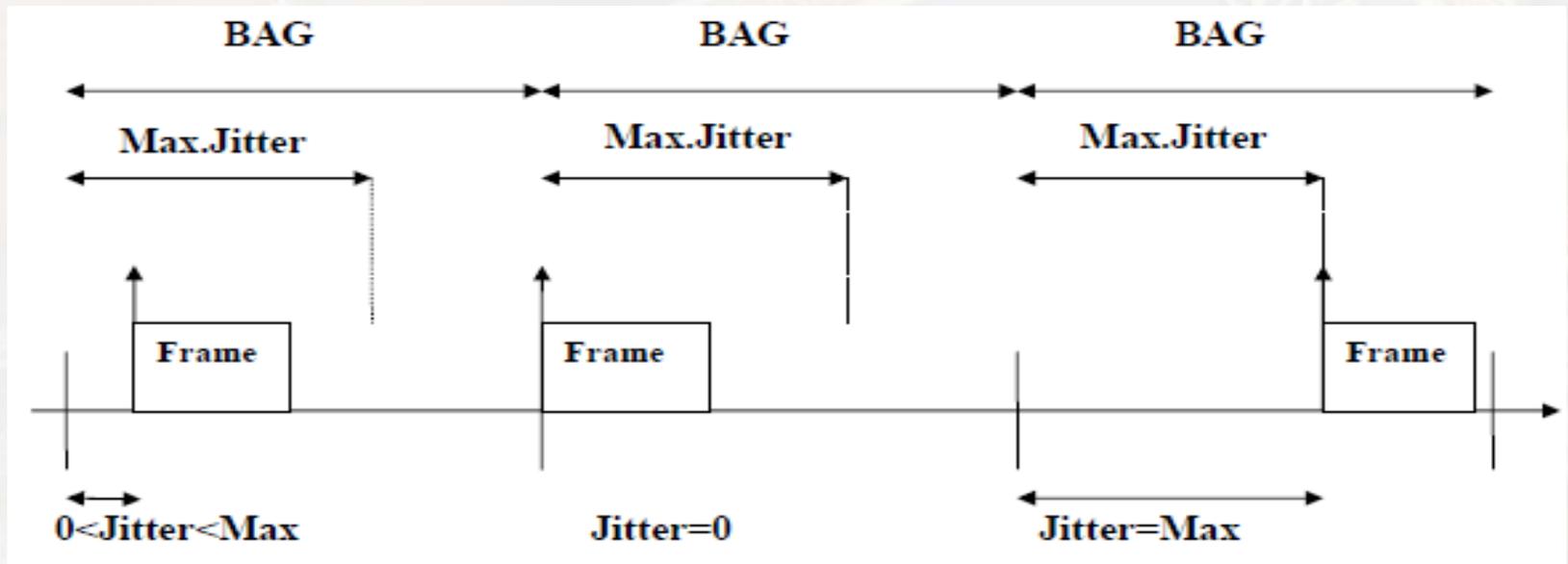
### □ 调度

- 当发送ES具有多路VL时，调度器多路复用来自调整器的不同的消息流。对数据的调整功能是确定性分析方法的基础，ES应在每个VL基准上调整要发送的数据
- 对于每条VL，调整器在每个BAG(ms)间隙内调整发送的消息不超过一个帧





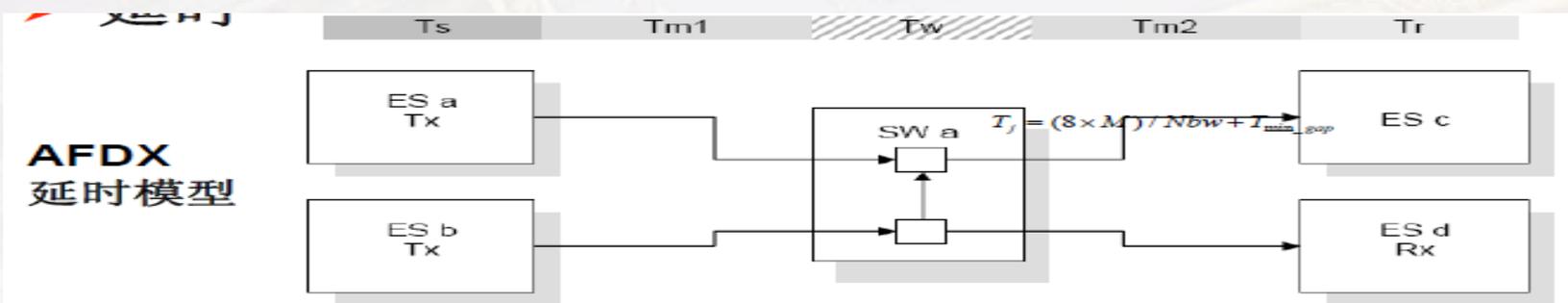
- 对于一个给定的VL，在调度器的输出端，帧可以出现在有限定的时间间隔内，这个间隔定义为最大的可接受的抖动。这个抖动是调度器引起的而不是消息流自己造成的





### □ 延时

- $T_s$ 为终端的发送延时,  $T_r$ 为终端的接收延时。
- $T_m$ 为消息自身延时, 长度/带宽
- $T_j = (8 \times M) / Nbw + T_{min\_gap}$
- $T_j$ 为抖动时间;  $M$ 为帧长;  $Nbw$ 为传输带宽;  $T_{min\_gap}$ 为最小帧间隔;
- 第一帧的延时:  $L_a = T_s + T_{m1} + T_{sw} + (8 \times M) / Nbw + T_{m2} + T_r$
- 第二帧的延时:  $L_b = L_a + T_j$





### □ MAC约束

- 为了避免在数据突发时丢失输入的帧，并且在发送时中具有固定的IFG，ES的MAC层应具有以下功能：以介质的全帧速率处理接收帧，并以介质的全帧速率选择适当的帧到主机；连续发送帧。
- 对于最短的帧对应有最大的帧速率：
- 以100Mbps的速率发送（64字节（帧）+12字节（IFG）+7字节（前导符）+1字节（SFD）=）84字节，相当于6.72us发送一帧（大约每秒148800帧）





### □ 抖动

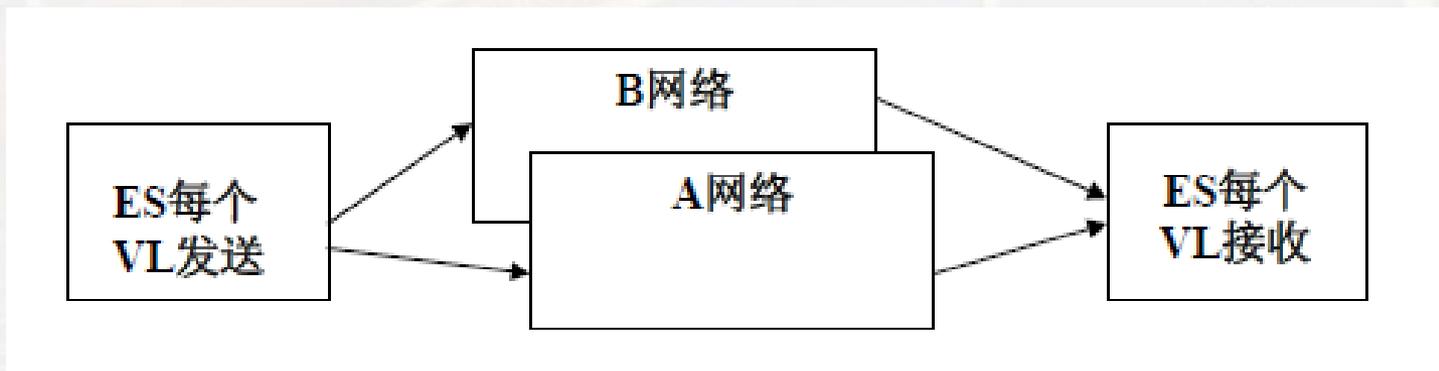
- ES的每个VL的输出端口允许的最大抖动必须符合下列公式

$$\begin{cases} \max\_jitter \leq 40us + \frac{\sum_{i \in \{VLset\}} (20 + L^{\max}) \times 8}{100} \\ \max\_jitter \leq 500us \end{cases}$$



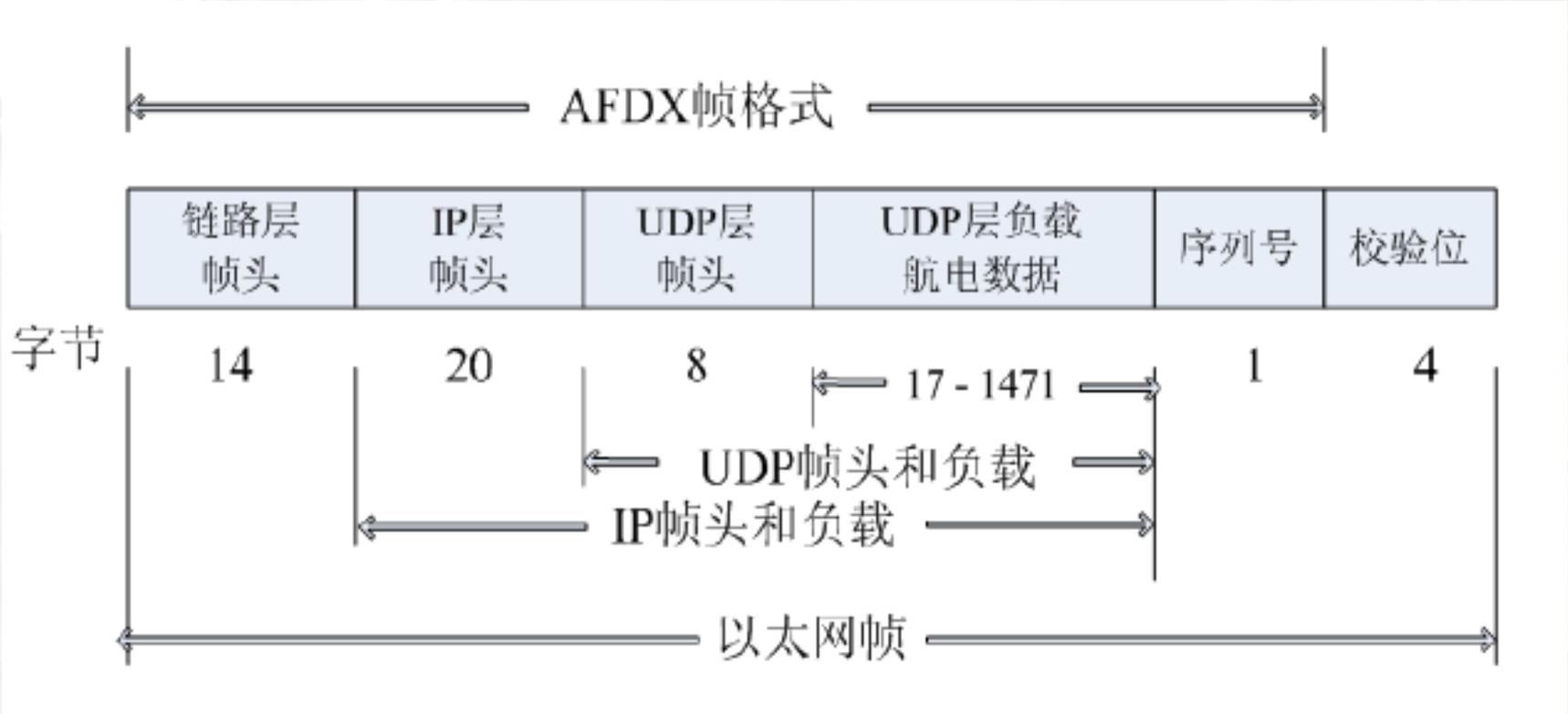
### □ 冗余管理

- 冗余的方案是每个VL上都工作，发送终端和接收终端以下面方式通过特定的虚拟链路通信





## □ AFDX帧格式





## □ MAC首部格式

|     |     |         |        |    |           |     |
|-----|-----|---------|--------|----|-----------|-----|
| 前导码 | 分隔码 | MAC目的地址 | MAC源地址 | 类型 | 帧负载       | 校验位 |
| 7   | 1   | 6       | 6      | 2  | 46 - 1500 | 4   |

字节

### MAC目的地址

|  |       |
|--|-------|
| 固定域<br>0000 0011 0000 0000 0000 0000 0000 0000 | 虚拟链路号 |
|--|-------|

32bits

16bits

### MAC源地址

|   |      |     |      |      |      |       |
|---|------|-----|------|------|------|-------|
| 固定域<br>0000 0010 0000<br>0000 0000 0000 | 网络ID |     | 设备ID |      | 接口ID | 00000 |
|   | 0000 | 域ID | 边ID  | 位置ID |      |       |

24bits

4

4

3

5

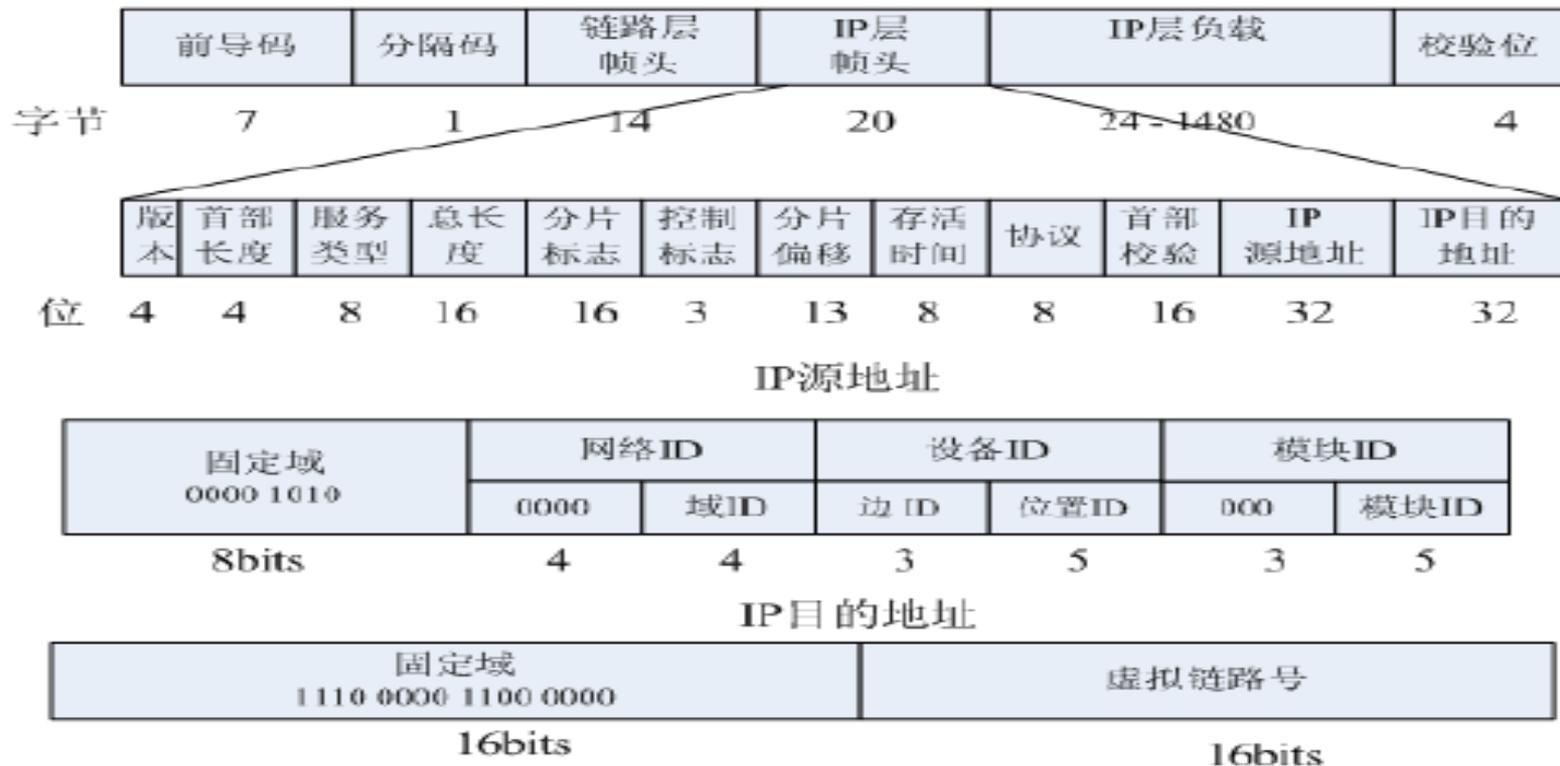
3

5





## □ IP首部格式





### □ AFDX应用程序接口

- 终端支持两种方式的访问接口
- 通讯端口：采样和队列方式；
- SAP端口：TFTP传输和与兼容网络的通讯





### ◆ 交换机

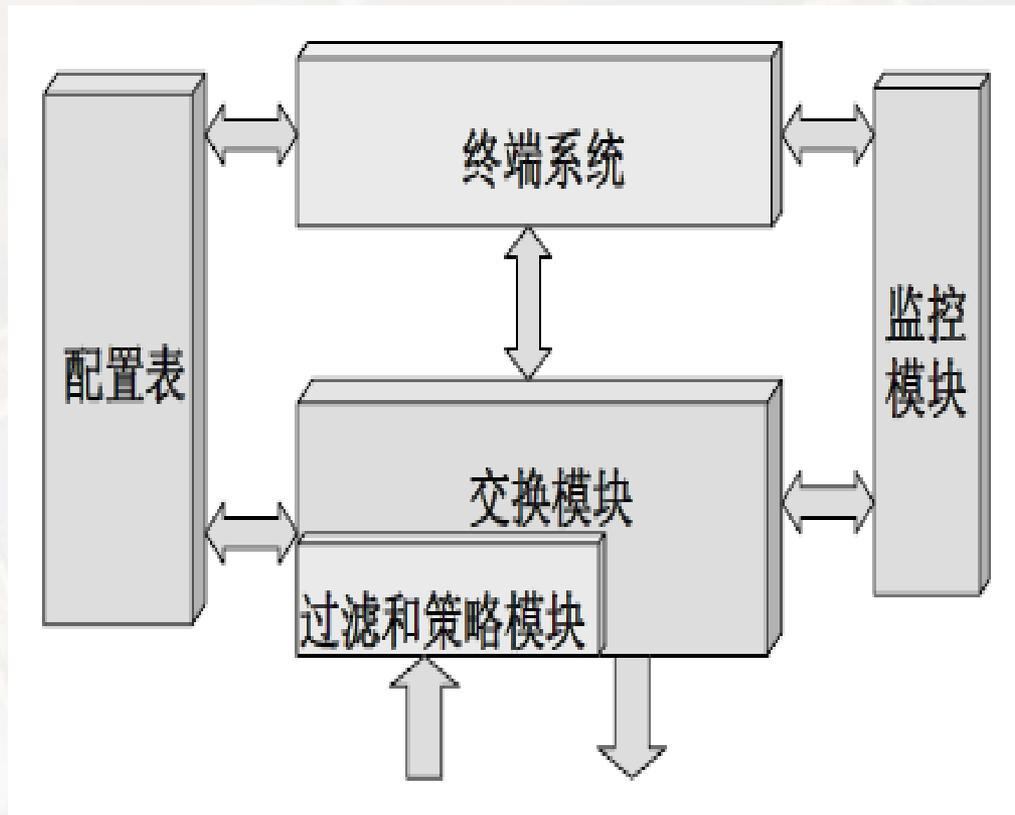
□ AFDX交换机与商用交换机有以下几点不同:

- 对虚拟链路的支持
- 流量控制
- 每个输出端口足够大（512帧）的缓冲空间
- 交换机的交换过程中具有确定的可预计的延迟时间
- 拥有一个符合AFDX规范的终端



### □ AFDX交换机由五个功能部分组成

- 过滤和策略模块
- 交换模块
- 配置表
- 终端系统
- 监控模块





### □ 交换模块

- 任何VL相关的输入帧和输出帧的顺序在交换机中应该保持，AFDX的用户按照帧被发送的顺序对帧进行接收。交换机不得修改接收到的帧的帧校验序号FCS。交换机作为网络组件之一，不得重新生成CRC校验，包括在重新传输时也不得重新生成
- 对于每个帧，交换机根据配置表中找出目标地址域的内容对应的端口号，将帧转发到该端口。如果输出端口由于缓冲区堵塞而无法接收，则丢弃该帧
- 如果一个端口出现链路故障，那么转发到该端口的帧和该端口缓冲区的帧都将被丢弃





### □ 配置表

- 在AFDX中，必须采用固定的虚拟链路配置表的方式进行目的端口的寻址，以控制寻址时间。同时配置表还包括了各条虚拟链路的过滤和流量等信息
- 配置表为每条虚拟链路分别定义了各种参数，交换机根据这些参数决定改虚拟链路帧的交换和过滤
- 整个AFDX交换系统具有一张完整系统的配置表，系统的各个子模块包括终端和交换机根据系统的预先规划裁减得到各自所需的配置表





### □ 终端系统

- 交换机中的终端系统应该满足ARINC664规范中对终端系统的所有要求，除了网络余度相关的内容
- 当交换机的终端系统发送数据帧时，使用自己的MAC单播地址作为MAC源地址





### □ 监控模块

- AFDX的监控功能是在以下基础上实现的：
  - a) 每个AFDX组件（包括设备、用户和交换机等等）中都实现了MIB（管理信息库）用来存储该组件相关的信息；
  - b) 每个AFDX组件都实现SNMP代理，通过SNMP同网络管理功能部分进行通讯
  - c) 实现网络管理功能，用于实现从所有组件中搜集信息的相关性，从而检测或者定位故障，并分析网络性能





### ◆ 链路

- AFDX网络中，ES物理层遵循IEEE802.3标准的以太网规范相关规定，传输介质可以是铜缆或光纤
- 铜缆 屏蔽双绞线：可以是5类1线屏蔽双绞线、2线屏蔽双绞线、4线屏蔽双绞线，阻抗均为 $100\Omega$
- 连接器/触点 ARINC 664规范推荐使用ARINC 600标准的连接器及相关的定义圆形连接器的军用和工业用标准，连接器触点类型推荐以下三种：
  - a) 标准触点 (20或22号)
  - b) 四芯触点 (QuadraxContacts)
  - c) 双芯触点 (TwinaxContacts)







### ◆ 协议映射

#### □ ARINC429 到AFDX格式转换导则

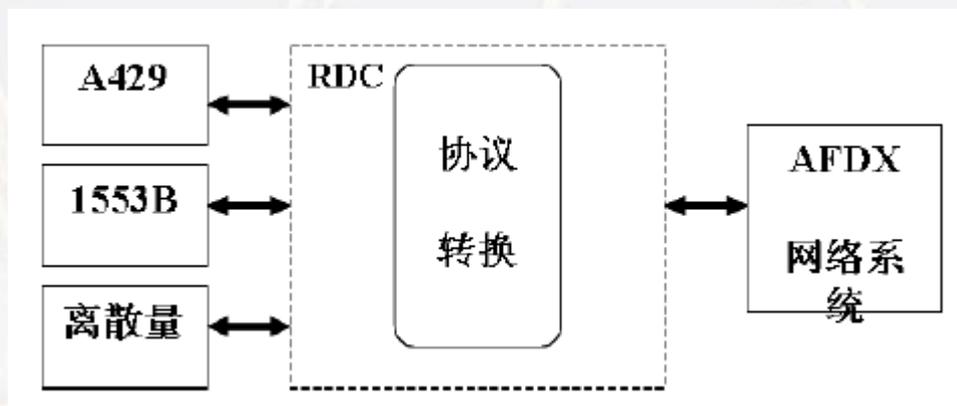
- ARINC 664规范附录B给出了ARINC 429协议到AFDX协议的格式转换导则
- 导则推荐在AFDX网络和ARINC 429设备间设计一个桥（集中器）实现协议的转换
- 有两种通用的方法
- 将每个标号放置在32位固定长度的不透明数据原语中
- 放置可变数量的标号在可变长度的不透明结构中



### ➤ AFDX网络相关技术

#### ◆ RDC (Remote Data Concentrators)

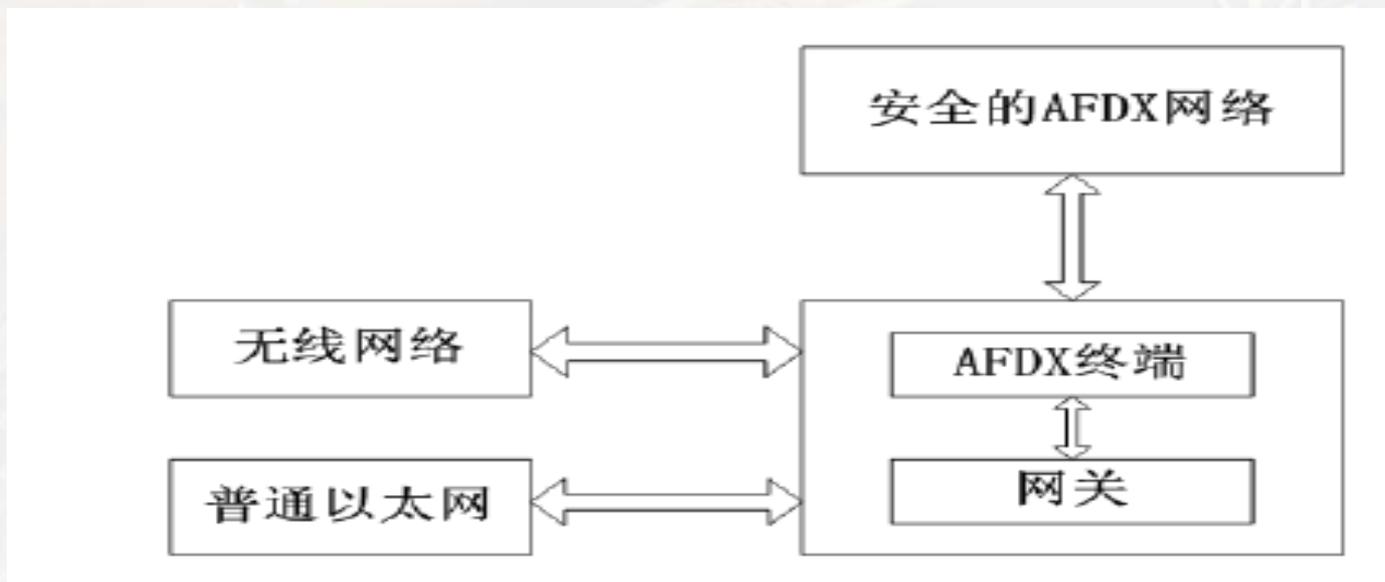
- RDC是AFDX网络与现有总线ARINC429、RS422、GJB289A、离散量和模拟量的桥接器。RDC可以方便采用现有成熟的总线设备，在波音B787中大量使用。





### ◆ SCI (Secure Communication Interface )

- SCI作为AFDX网络与外部网络的隔离设备，起到了协议转换和防火墙的作用，增强了AFDX网络系统中关键设备的安全通讯功能和保密性





### ◆ ADFX网络系统记录和监控

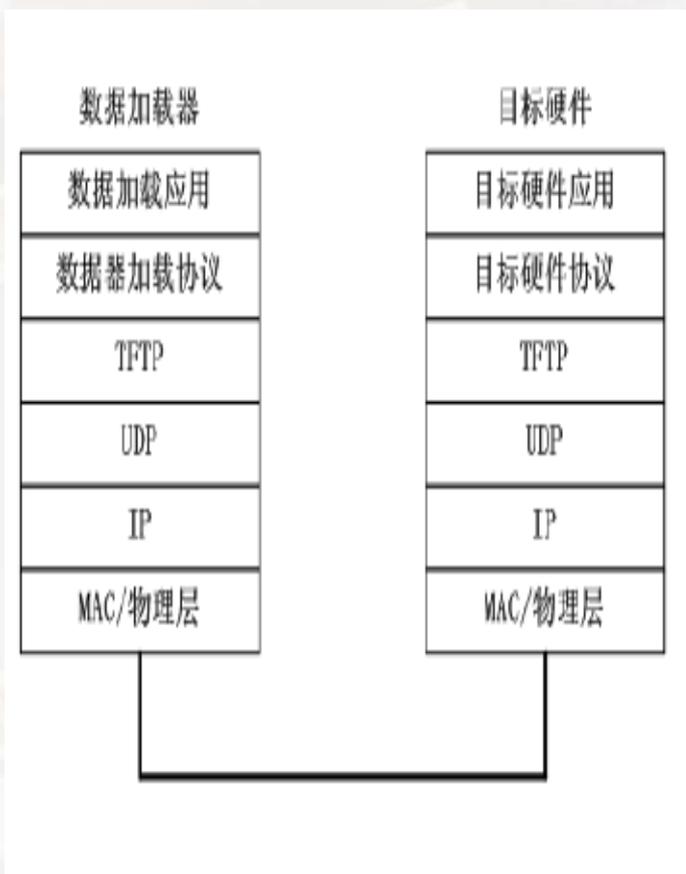
- 交换机监控通道监控
- TAP监控
- 插入式监控



### ➤ AFDX网络关联的几种网络协议

#### ◆ ARINC 615A

- 定义加载、卸载、信息、中断服务
- 描述数据加载器协议和应用层之间交换的信息
- 定义数据加载器和目标硬件的文件交换协议
- 定义FIND协议，以确定目标硬件是否在线





### ◆ Internet控制报文协议 (ICMP)

- 报告差错情况和有关异常情况
- 只报告差错，不纠正差错。差错纠正由高层协议处理
- ICMP报文类型：
  - 差错报告报文 – 报告路由器或主机在处理IP分组时遇到的问题
  - 查询报文 – 帮助主机或网络管理员查询在路由器或另一个主机中的特定信息



### ◆简单网络管理协议 (SNMP)

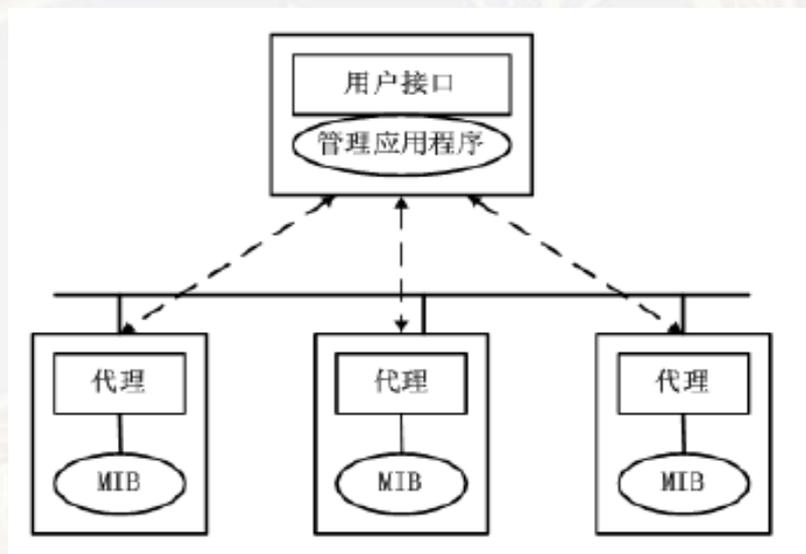
- SNMP作为一种网络管理协议，使网络设备彼此可以交换管理信息，使网络管理员了解网络性能、定位和解决网络故障，进行网络规划

- SNMP网络管理模型

- 被管理设备

- 代理 (Agent)

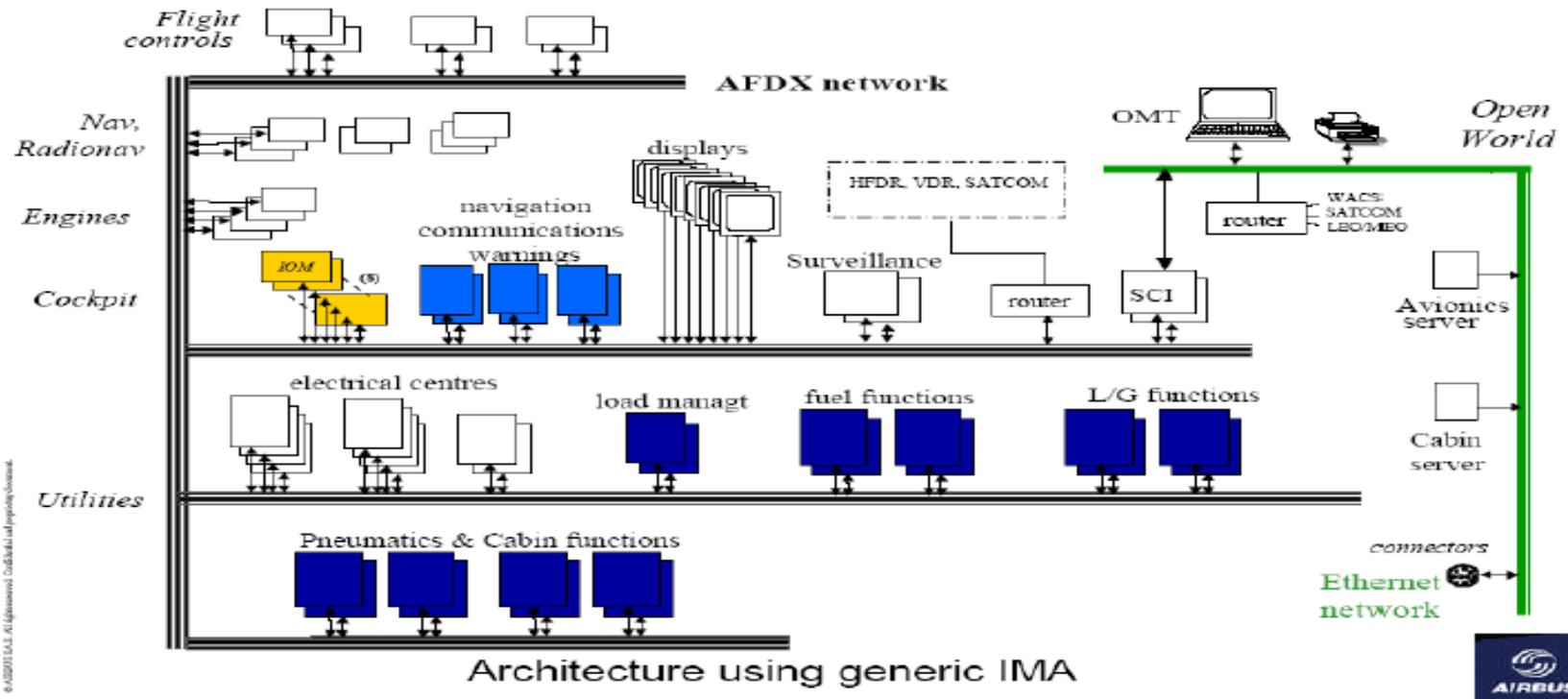
- 网络管理系统 (NMS)





## ➤ AFDX网络系统应用实例

### ◆ A380





## ◆ B787





5

# 总线网络测试技术





- 总线网络测试一般要求
- ARINC 429总线测试
- AFDX网络测试





### ➤ 总线网络测试一般要求

#### ◆ 测试分类

##### □ 功能性能测试

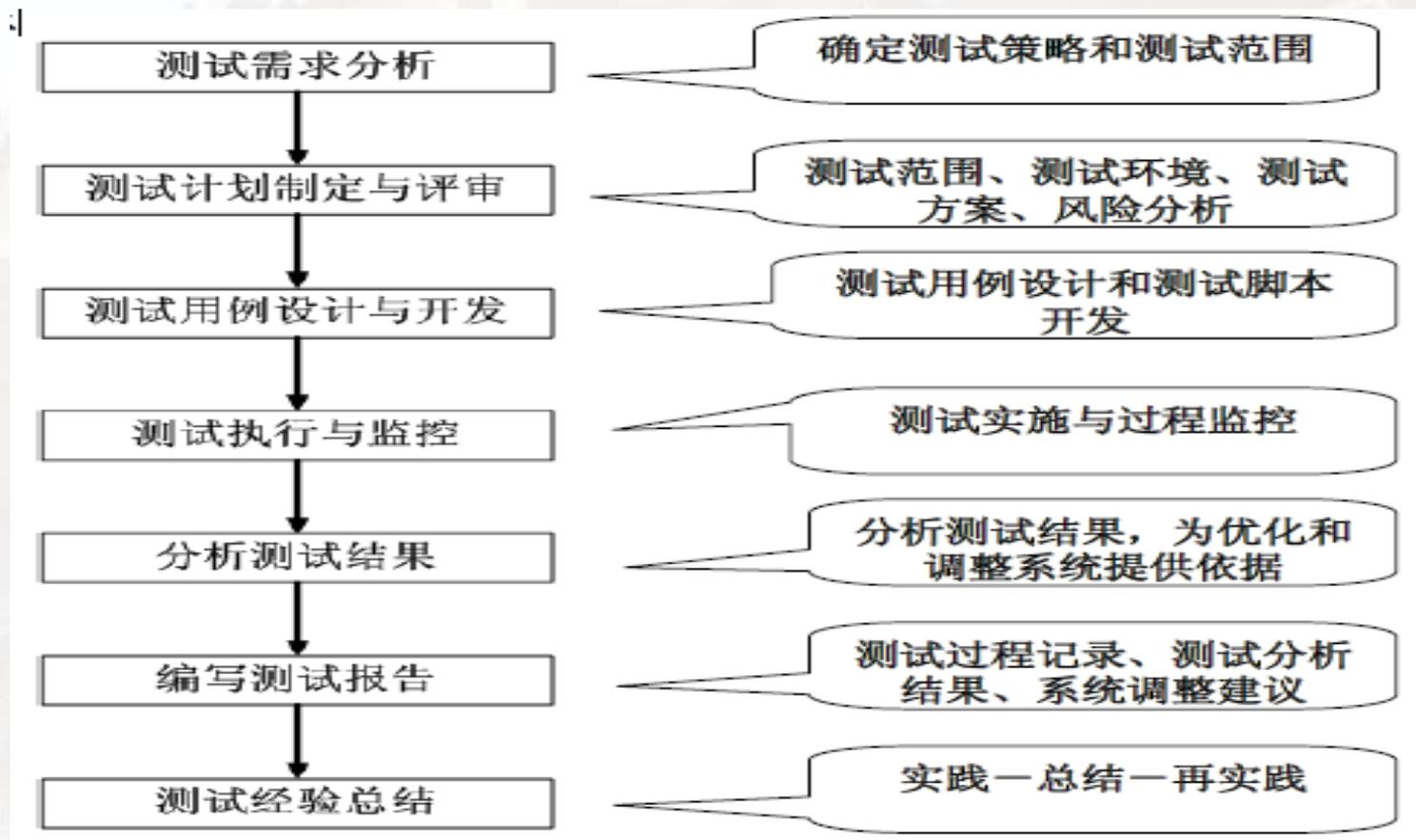
- 功能测试：规范规定的总线/网络功能
- 性能测试：吞吐量/带宽、延迟、误码率、丢包率、压力测试等

##### □ 协议一致性测试

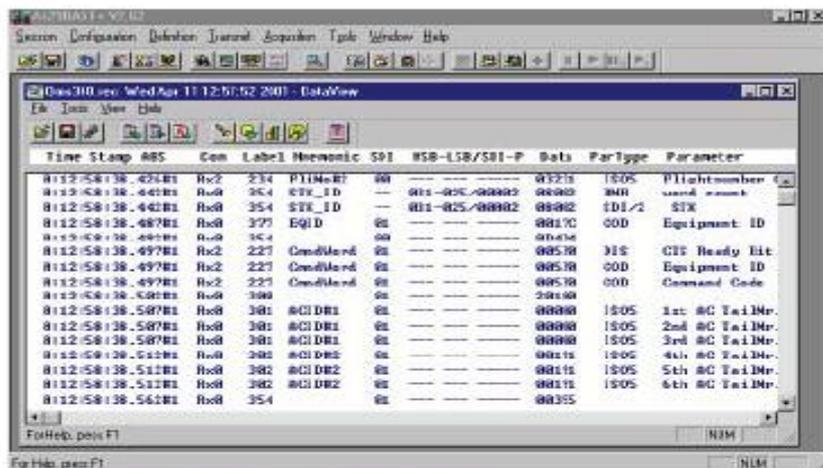
- 物理层
- 链路层
- .....
- 应用层



### ◆ 测试流程



## ➤ ARINC 429总线测试



| Time Stamp         | ABS | Con | Label   | Mnemonic | SP1           | WSB-LSB/SP1-P | Bits  | ParType | Parameter      |
|--------------------|-----|-----|---------|----------|---------------|---------------|-------|---------|----------------|
| 0112:58:138.421001 | Rs2 | 234 | P11MsR1 | 00       | ---           | ---           | 01213 | 1505    | Flightnumber   |
| 0112:58:138.441001 | Rs0 | 354 | STR_ID  | --       | 001-025/00002 | 00000         | 00000 | 000     | used amount    |
| 0112:58:138.441001 | Rs0 | 354 | STR_ID  | --       | 001-025/00002 | 00002         | 00002 | 1D1/2   | SIX            |
| 0112:58:138.487001 | Rs0 | 377 | EqID    | 00       | ---           | ---           | 00170 | 000     | Equipment ID   |
| 0112:58:138.497001 | Rs0 | 344 |         | 00       | ---           | ---           | 01014 |         |                |
| 0112:58:138.497001 | Rs2 | 221 | CmdMend | 00       | ---           | ---           | 00510 | 315     | CTL Ready Bit  |
| 0112:58:138.497001 | Rs2 | 221 | CmdMend | 00       | ---           | ---           | 00510 | 000     | Equipment ID   |
| 0112:58:138.497001 | Rs2 | 221 | CmdMend | 00       | ---           | ---           | 00510 | 000     | Command Code   |
| 0112:58:138.507001 | Rs0 | 300 |         | 00       | ---           | ---           | 00100 |         |                |
| 0112:58:138.507001 | Rs0 | 301 | ACIDR1  | 00       | ---           | ---           | 00000 | 1505    | 1st AC TailNr. |
| 0112:58:138.507001 | Rs0 | 301 | ACIDR1  | 00       | ---           | ---           | 00000 | 1505    | 2nd AC TailNr. |
| 0112:58:138.507001 | Rs0 | 301 | ACIDR1  | 00       | ---           | ---           | 00000 | 1505    | 3rd AC TailNr. |
| 0112:58:138.511001 | Rs0 | 302 | ACIDR2  | 00       | ---           | ---           | 00111 | 1505    | 4th AC TailNr. |
| 0112:58:138.511001 | Rs0 | 302 | ACIDR2  | 00       | ---           | ---           | 00111 | 1505    | 5th AC TailNr. |
| 0112:58:138.511001 | Rs0 | 302 | ACIDR2  | 00       | ---           | ---           | 00111 | 1505    | 6th AC TailNr. |

带数据显示工具的BAST主要窗口



各种GraphMon对象以显示A429参数值



- 多通道数据采集和传输功能
- 用户可设置传输速度，奇偶校验及发送模式
- 接收数据时间戳
- 动态更新发送数据（Tx功能如正弦曲线、台阶线等）
- 数据重放及数据操作
- 发送器可以自定义多个429标号，并具有各自的更新速率
- 采集数据过滤及触发数据采集
- 脱机DataView工具：功能强大的单机数据浏览器，提供数据选择，排列和搜寻功能，ASCII数据格式的导出及导入，可在参数层面上设置数据显示形式







- ◆ 在线和脱机状态下进行数据分析
- ◆ 三种模式的帧显示，
  - 历史模式：罗列所有收到的帧
  - VL模式：罗列最近通过各个已定义虚拟链路所接收的帧
  - Port模式：罗列最近通过各个已定义端口所接收的帧
- ◆ 带协议详细信息(MAC, IP, UDP) 的原始数据显示，其中有效加载数据以十六位码显示
- ◆ 解码数据显示
- ◆ 数据格式可为十六进制，十进制或二进制





- ◆强大的搜寻和过滤功能，可涉及
  - MAC地址：源地址/目标地址，
  - IP地址：源地址/目标地址，
  - UDP：源地址/目标地址，
  - 协议类型，物理接口/网络，数据完整性错误及重复错误，偏差，带宽分配间隙（BAG）等
- ◆用户自定义的过滤和搜寻选项可存入文件并重新装载
- ◆二进制数据可根据输入控制参数进行过滤，输入的参数可以是MSB，LSB，数据遮罩，比较值或逻辑符（等于，不等于，小于/大于）等





- ◆可对整个网络或单个虚拟链路进行在线统计数据，如丢失或遗弃的帧，错误帧，帧延迟和数据传输速率（兆比特/秒，帧数/秒，信息数/秒）
- ◆重组AFDX信息片断
- ◆绝对，相对或增量帧时间戳
- ◆带可选择触发控制的数据纪录
- ◆针对单个发送虚拟链路及信息的可控数据传输（激活/终止，有效加载数据更改和错误注入）
- ◆纪录数据重放
- ◆与cADS配套使用，可用图形方式显示数据，并对数据加载外部作用力



# 本章小结

系统  
发展

典型  
总线

429  
总线

AFDX

总线  
测试

1. 阅读5~10篇论文，关于以下方向：

- 网络演算
- AFDX

并选择其中一个方向做个5mins PPT介绍与交流。



Thanks!  
Questions?



上海交通大學  
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY

交通大學

