

AFDX 网络传输性能分析

陈 涛

(克莱菲尔德大学 工程学院, 西安 710089)

摘要: AFDX (avionics full duplex switched ethernet) 作为一种基于 Ethernet 技术的全双工数据交换航空电子数据总线, 它不仅避免了 Ethernet 数据传输冲突和碰撞的问题, 而且在减轻重量的基础上提高了数据传输率; 在设计的过程中, 为了保证数据传输的实时性和可靠性, 确保数据传输的确定性和无丢失服务, 网络传输性能测试分析是设计人员必须考虑的问题; 由此一种简单快捷的基于网络演算 NC (network calculus) 理论进行总线性能传输和测试的方法被推导出来, 目的是通过数学评估和仿真的手段分析不同航空电子 AFDX 数据总线和网络拓扑结构的传输性能, 分析的主要目的针对 3 个重要的网络延迟参数指标 (延迟、预留缓冲区和输出数据流); 开展这方面的研究有利于在航电总线设计初期帮助设计人员发现问题, 尤其是应用于保证航电数据总线无丢失确定性服务方面; 除此之外, 还比较了目前存在的延迟计算的几种常用方法, 并通过仿真举例说明了这种方法的应用。

关键词: 网络演算; 延迟; 服务曲线; 到达曲线; 终端系统

AFDX Network Transmission Performance Analysis

Chen Tao

(Cranfield University, School of Engineer, Xi'an 710089, China)

Abstract: AFDX (Avionics Full Duplex Switched Ethernet) is the high-speed full duplex switched avionics databus, on the basis of the Ethernet technology. AFDX can not only avoid Ethernet conflicts and collisions, but also increase transmission rate with a lower weight of the databus. The avionics data must be delivered punctually and reliably, so it is very essential to validate the real-time performance of AFDX during the design process. Aims to guarantee the lossless service in avionics databus, based on NC (Network Calculus), a smart method has been deduced to assess the transmission performance of different network topologies in different avionics architectures through the simulation and the mathematical assessment, mainly considering three important parameters (delay, backlog and output flow). The technologies used in this thesis benefit to find problems and faults in the beginning stage of the avionics architecture design in the industrial project, especially, in terms of guarantee the lossless service in avionics databus. Several current methods for calculating delay have been listed here, and using some simulation examples illustrates the way to apply it in concrete scenario.

Keywords: network calculus; delay; service curve; arrival curve; end system

0 引言

随着计算机和微电子技术的迅速发展, 现代综合航空电子系统发展迅速。传统的航电数据总线技术已经不能满足高性能低延迟的数据总线传输需求。AFDX 作为一种基于 Ethernet 技术的全双工数据交换航空电子数据总线技术, 提供了很好的解决方案, 因此得到了广泛的应用。

即使如此, 网络数据传输延迟的问题从理论上讲是不可避免的。但是如果航电数据总线系统设计和配置合理, 数据溢出和冲突是能被成功避免的, 延迟也可以控制在一个可以接受的范围之内。开展这些研究的目的是为了更有效地有依据地指导航电总线的设计过程。虽然目前国内外研究人员已经在这些方面越来越重视, 并展开了很多相关研究, 但是到目前为止, 由于推演延迟的性能是个很复杂的问题, 很难找到一个比较理想的解决方案。

因此, 一种将计算机网络的演算法 (NC) 和航空领域 AFDX 总线技术相结合, 来解决 AFDX 网络延迟性能分析的方法被提了出来, 并比较了它与其他传统方法的优劣性。该方法简便快捷, 实用性强, 它运用数学模型和仿真结果相结合推

演出网络延迟的上限, 成为航电总线系统设计过程的重要依据之一。

1 AFDX 网络延迟性能分析

1.1 网络延迟计算公式

已有的航空标准中定义了 AFDX 网络数据帧点对点的传输数据流的最大延迟的概念。根据定义, 可以得出以下的计算公式。假设一条虚拟链路 VL 的路径 p_x , 对于数据帧 F_{p_x} 在数据链路 p_x 上传输的点对点数据延迟 DF_{p_x} 可以被定义为:

$$DF_{p_x} = LD_{F_{p_x}} + SD_{F_{p_x}} + WD_{F_{p_x}} \quad (1)$$

$LD_{F_{p_x}}$ 是数据在链路 (不包含节点和终端) 上传输时导致的延迟。

$SD_{F_{p_x}}$ 是数据流经交换节点时从输入到输出端口的延迟。假设在一个交换节点里从输入到输出端口的延迟可以被定义为一个常数 SD, 被保证的服务上限是 $16 \mu\text{s}$ 。

$WD_{F_{p_x}}$ 是在交换节点和终端输出缓冲区内的延迟: 这个延迟很大程度上取决于数据流到达这个输出端口的时间和先后顺序等因素。计算公式是:

$$WD_{F_{p_x}} = WD_{F_{p_x}}(ES_{p_x}) + \sum_{Sk \in \Psi_{p_x}} WD_{F_{p_x}}(Sk) \quad (2)$$

其中: ES_{p_x} 是 F_{p_x} 数据源终端系统, Ψ_{p_x} 是一系列 p_x 链路路上的交换节点, $WD_{F_{p_x}}(ES_{p_x})$ 是在 ES_{p_x} 数据源在 ES 上的数据延迟, $WD_{F_{p_x}}(Sk)$ 是输出缓冲区上的数据

收稿日期: 2014-10-07; 修回日期: 2015-03-19。

作者简介: 陈涛 (1975-), 女, 河北人, 硕士, 高级工程师, 主要从事飞行模拟器航电仿真技术和工程应用方向的研究。

延迟。

总之，DFPx 可以被分为两部分：一个固定的部分 LDFPx + SDFPx 和一个变化的部分 WDFPx。固定的部分可以依据传输的路径、FPx 的长度和数据链路的带宽等静态地计算出来上限。变化的部分依赖于不同的场景和航电数据总线结构设计思路。

1.2 网络延迟计算常用方法介绍

目前网络延迟计算方法包括两种：轨迹分析法和仿真分析法，下面将这两种方法和 NC 分析法进行比较。

轨迹分析法：是根据具体的网络拓扑结构图和时序关系进行分析的方法，这种方法的精确度高，但是存在的问题是分析的过程比较复杂，尤其是面对复杂的网络拓扑结构时。图 1 举例说明了这种分析的方法。

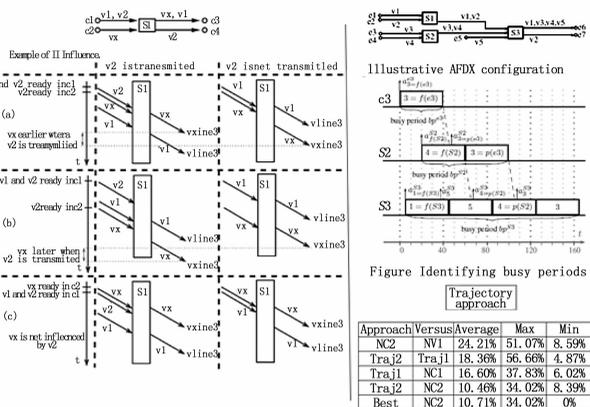


图 1 AFDX 网络延迟分析方法和结果比较

图 1 的右上角是航电拓扑结构图的一个案例，包括 7 个 ES、5 条 VL 和 3 个 Switches。从 e3 终端系统发送的数据帧 f (e3) 在 a3 时刻发送到 s2 的 switch 上，这时候已经有来自 e4 的 v4 提前到达了 s2，因此它是在 s2 繁忙的时间到达的，也就导致了数据传输延迟，这种一段段按照路径和时序分析的方法，就是 Trajectory 分析法的基本思路。

网络演算法：该方法产生于最小代数理论，运用最小代数理论来研究队列和网络性能。常用的网络演算方法来分析 AFDX 的延迟可以基于成组和不成组 (grouping and without grouping) 的两种技术进行研究，根据基本理论推导和实际评估结果，使用成组技术进行估算更准确快捷。图 1-1 中右下角显示的表格，比较了 NC 法和轨迹分析法的优劣，同时也比较了成组和不成组技术的优劣，结论是采用 NC 的成组技术是相对比较好的一种选择。

仿真法 (Simulation)：通过建立 AFDX 的仿真平台来估算网络性能的方法，这种方法对仿真平台的逼真度有很高的要求，评估的结果很大程度上依赖于仿真平台的准确性和仿真级别。

2 基于网络演算的 AFDX 传输性能分析

2.1 网络演算理论介绍

2.1.1 Basic Min-plus Calculus

在传统代数中基于两个常用区域 Z 和 R 上最通常的两种操作就是加和乘。减加理论的基本概念是“加”被“最小化”代替，而且“乘”被“加”代替的一种理论。这就是极小加代数 (Min-plus calculus)。

极小加代数包含许多的定义和理论，例如卷积、反卷积和

星形函数、极小加卷积、子加函数、子加卷积和极小加反卷积等。将反卷积的算法应用于网络研究，构成了网络演算的基础。

2.1.2 网络演算理论

网络演算是一种新兴的 Internet 的队列理论。它的发展目的是深层的研究网络数据流的问题。数学理论基础是基于 dioids 的极小加算法。运用 NC 理论可以很好的理解综合服务网络的基本属性，例如网络延迟，缓冲区界限等。NC 理论是一种保持网络系统的行为确定性的 internet 理论，它也被用在通信队列管理中。

在网络演算的算法中定义了输入输出函数 R(t) R*(t)，分为离散和连续两种。提出了两个非常重要的到达曲线和服务曲线的概念。

到达曲线 (ARRIVAL CURVE)：α(t-s) 被用来定义从数据源发送来的数据流的最低界限。

服务曲线 (SERVICE CURVE)：β(t-s)，它代表输出流的限制，输出的数据流受到 R⊗β的限制。

同时定义了预留缓冲区 (backlog)：R(t) - R*(t) 和网络延迟 (delay)：D(t) = inf {r ≥ 0; R(t) ≤ R*(t+r)}，以及输出流 (out flow)，它受到到达曲线 α* = α⊗β的限制。

根据定义，可以通过绘制到达和服务曲线图形的方法求解最大最小偏差，从而估计延迟界限和预留缓冲区大小。

例如，在一个 VBR 流中，一个输入流的到达曲线模型是 α(t) = min(M+pt, rt+b)。假设这个流被服务曲线 β=βR.T 限制。假设当 R ≥ r 时，垂直偏差 v = sup_{s ≥ 0} [α(s) - β(S)]，或者：

$$v = \max[\alpha(T), \alpha(\theta) - \beta(\theta)] \tag{3}$$

其中：θ = (b-M)/(p-r)，相同的，延迟界限也是通过计算最小垂直距离得出的：

$$d = \max\left(\frac{\alpha(\theta)}{R} + T - \theta, \frac{M}{R} + T\right) \tag{4}$$

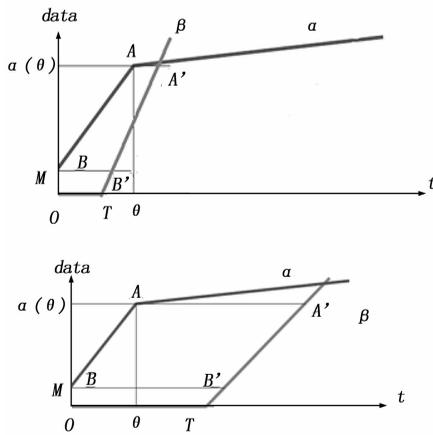


图 2 VBR 数据流三个参数示意图

聚合节点理论和多数据流理论是应用 NC 成组技术研究 AFDX delay 和 backlog 的基础。

理论 1 (聚合节点理论)^[17]：假设一个数据流按照先后顺序串行流经 S1 and S2 系统。假设每个系统提供的服务曲线是 βi, i=1, 2。那么这两个系统的组合系统提供的服务曲线是

$\beta_1 \otimes \beta_2$ 。那么：

$$\beta_{R_1, T_1} \otimes \beta_{R_2, T_2} = \beta_{\min(R_1, R_2), T_1 + T_2} \quad (5)$$

理论 2 (多数据流理论)^[17]：假设一个 switch 服务于两个数据流 flows 1 and 2 时，假设这个节点的服务曲线是 β ，flow2 是 α_2 -smooth 的。定义 $\beta_1(t) = [\beta(t) - \alpha_2(t)]^+$ ，如果 β_1 是广义增函数，那么它是 flow 1 的服务曲线。

2.2 三个界限参数计算方法

实际上，采用 AFDX 航空电子总线系统的飞机设计网络结构是非常复杂的，可以拥有多达 100 个终端系统 (ES)、近十个交换节点 switches 和超过 1 000 个虚拟连接。根据 NC 的聚合节点理论，推导综合模型，许多 VLs 将被划归为一个单一的数据流模型，而许多的交换机网络系统也被当作一个交换机网络系统来处理，也就是所谓的成组处理技术 (grouping) 的基本思想。

2.2.1 AFDX 的 NC 数学模型分析

1) 交换节点服务模型：

作为 ARINC 664 标准，传输和接收都是根据 FIFO 理论进行管理的。每一个交换机以一个固定的最大传输率 $R = 100\text{Mbps}$ 服务于 AFDX 的虚拟链路 VL。因此，根据 rate-latency 函数定义，switch 可以用 rate-latency curve 曲线模块化。

$$\beta_{R, T}(t) = R[t - T]^+ \quad (6)$$

其中： R 是针对聚合输入流的最大服务能力； T 是从输入到输出缓冲区的最大时间延迟。

2) VL 模型：

根据航空标准 ARINC 664，每个 VL 都有两个参数。

(1) Bandwidth Allocation Gap (BAG)，代表着每一个网络的数据帧首位之间的最大时间间隔。它的范围是从 1 到 128 毫秒。 $BAG = 2^K$ [in ms] (整数 K 的范围从 0 到 7)

(2) L_{\max} 是最大帧的大小。他的取值范围是从 64 到 1518 个字节，那么根据定义 VL 的到达曲线可以被定义为

$$\alpha(t) = \left[L_{\max} + \frac{L_{\max}}{BAG} t \right]^T \quad (7)$$

2.2.2 多数据流多节点的综合系统数学模型分析

1) 多个数据流流入一个 switch 的服务曲线：

为了计算多个 switches 的结构，我们先来分析一个 switch 的结构。假设每一个 switch 的结构，提供服务给多输入流 $R_i(t)$ ($i=1, 2, \dots, n$)，图 3 所示。

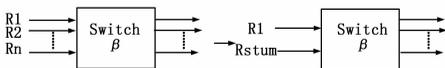


图 3 多数据流流过单交换节点的示意图

输入流可以被分为两个部分：一个是 $R_i(t)$ 它是我们需要分析的数据流，另一个是 $R_{sum}(t)$ 。 $R_{sum}(t)$ 代表了除了 i^{th} 输入流以外的其他输入流的总和，它的到达曲线是：

$$\alpha_{sum}(t) = [\sigma_{n-1} + \rho_{n-1}t]^+ \quad (8)$$

其中： $\sigma_{n-1} = \sum_{j=1}^n \sigma_j - \sigma_i$ ， $\rho_{n-1} = \sum_{j=1}^n \rho_j - \rho_i$ 。

基于上面的讨论，多输入流可以被分为两个部分，我们需要的就是计算提供给 $R_i(t)$ 输入流的服务曲线。

根据聚合理论和严格服务曲线的定义，有下面的结果

$$\beta_i(t) = [\beta_{R, T}(t) - \alpha_{n-1}(t)]^+ = [R(t - T) - (\rho_{n-1}t + \sigma_{n-1})]^+ =$$

$$(R - \rho_{n-1} \left[t - \left(T + \frac{\rho_{n-1}T + \sigma_{n-1}}{R - \rho_{n-1}} \right) \right]^+ \quad (9)$$

公式 (9) 就是数据流 $R_i(t)$ 的服务曲线。其中 $i=1, 2, \dots, n$ ； $\sigma_{n-1} = \sum_{j=1}^n \sigma_j - \sigma_i$ ， $\rho_{n-1} = \sum_{j=1}^n \rho_j - \rho_i$ 。

2) 多 switches 网络结构系统：

根据串联节点理论 (concatenation of nodes theorem)，串联理论提出“Pay Bursts Only Once”理论。两个 switches 系统可以被转换成一个服务曲线为 $\beta_1 \otimes \beta_2$ 的系统。我们可以推导出 m 个 switches 能被转换成一个 switch 系统，它的服务曲线是

$$\beta = \beta_1 \otimes \beta_2 \otimes \dots \otimes \beta_m \quad (10)$$

结果显示在图 4 中。

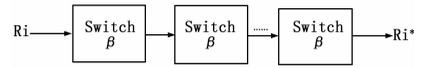


图 4 一个数据流流经多个数据节点的示意图

假设第 m 个 switch 的服务曲线 β_{R_i, T_i} ($i=1, 2, \dots, m$)，那么总的服务曲线是：

$$\beta_{R, T} = \beta_{R_1, T_1} \otimes \beta_{R_2, T_2} \otimes \dots \otimes \beta_{R_m, T_m} \quad (11)$$

根据凸函数的定义 (convex function definition)，

$$R = \min\{R_1, R_2, \dots, R_m\},$$

$$T = T_1 + T_2 + \dots + T_m$$

作为结论，对于 i^{th} 输入流在多个交换机的服务曲线是：

$$\beta_i(t) = (R - \rho_{n-1} [t - (T + \frac{\rho_{n-1}T + \sigma_{n-1}}{R - \rho_{n-1}})]^+ \quad (12)$$

3) AFDX 三个界限参数计算：

根据三个界限参数定义，假设在一个交换机网络中，一个输入流的到达曲线是 $\alpha = \gamma_{r, b}$ ，受到服务曲线 $\beta_{R, T}$ 的服务，这 3 个界限和结果如下：

(1) 缓冲区大小界限是 $b + rT$ ；

(2) 延迟界限是 $T + \frac{b}{R}$ ；

(3) 输出流受到到达曲线 $\gamma_{r, b} \otimes \beta_{R, T} = \gamma_{r, b+rT}$ 的限制。当 $0 < r < R$ 并且 $t \geq 0$ ， $\gamma_{r, b} \otimes \beta_{R, T} = \gamma_{r, b+rT}$ 。

——终端到终端的延迟：根据上一节的延迟计算公式：

$$DF_{px} = YDF_{px} + LDF_{px} + SDF_{px}$$

其中：

(1) YDF_{px} 是数据帧在 ES 里预处理的时间，取值假设等于 0。

(2) LDF_{px} 是数据物理链路上的传输延迟。全双工的 AFDX 在物理链路上没有数据碰撞。因此，在一条链路上的延迟是 $c \times S_{F_{px}}$ ，其中 c 是带宽和 $S_{F_{px}}$ 是 F_{px} 的长度。因此 $LDF_{px} = nbl_{px} \times c \times S_{F_{px}}$ ，其中 nbl_{px} 是实际链路的总数。这里认为在最差的情况下是 $0.5 \mu\text{s}$ 。

(3) SDF_{px} 假设终端端口上的延迟近似为零时，这个值是在交换节点的输出端口中的数据传输延迟界限，根据公式 (8) 和公式 (12)：

$$SDF_{px} \leq T + \frac{\rho_{n-1}T + \sigma_{n-1}}{R - \rho_{n-1}} + \frac{\sigma_i}{R - \rho_{n-1}} \quad (13)$$

——缓冲区界限：根据公式 (8) 和 (12)，缓冲区界限是

$$H_{\max} = \sigma_i + \rho_i \times (T + \frac{\rho_{n-1}T + \sigma_{n-1}}{R - \rho_{n-1}}) \quad (14)$$

架。为改善传统 AODV 协议单纯以跳数惩罚度 metric 作为路选依据造成多跳衰减严重的情况，提出了改进型 RSSI—AODV 协议，采用 RSSI 和跳数作为路径选择的依据。通过对改进型 RSSI—AODV 路由协议的实际测试表明：七跳链路总丢包率可达到 0.3%，远远优于传统路由算法。本文作为无线传感器网络在矿山无线通信中的应用基础研究，具有重要的意义。

参考文献：

[1] Yang W, Huang Y. Wireless Sensor Network Based Coal Mine Wireless and Integrated Security Monitoring Information System [A]. IEEE Proceedings of the Sixth International Conference on Networking (ICN07) [C]. 2007.

[2] Hao L, Wang Q P, Su Y, et. A CUT—based Routing Protocol for Wireless Sensor Networks in Coal Mine [J]. Proceeding of the IEEE, 2008: 978-1-424.

[3] Enjie D, Wang M Y, Wen J C. Performance Evaluation of 2.4GHz Wireless Sensor Nodes Transmission in Coal Mine [J]. IEEE, DOI 10.1109/CSIE.2009.257.

[4] Li M, Liu Y H. Underground Structure Monitoring with Wireless Sensor Networks [J]. IEEE 2007, IPSN07.

[5] 朱明辉, 张会清. 基于 RSSI 的室内测距模型的研究 [J]. 传感器与微系统, 2010, 29 (8): 19-22.

[6] Raychaudhuri D, Mandayam N B. Frontiers of Wireless and Mobile Communications [J]. Proceedings of the IEEE, 2012, 100 (4).

(上接第 1742 页)

——输出数据率：根据等式 (8) 和 (12)，输出流曲线是

$$\alpha^* = [\rho_i t + (\sigma_i + \rho_i \times (T + \frac{\rho_{n-1} T + \sigma_{n-1}}{R - \rho_{n-1}}))]^T \quad (15)$$

其中：

- (1) $i=1, 2, \dots, n$;
- (2) $R = \min \{R_1, R_2, \dots, R_m\}$, 在 AFDX 里, 这里的 R 是 12.5×10^6 B/S;
- (3) $T = T_1 + T_2 + \dots + T_m$, 根据 ARINC 664, Part 7, 在交换机里的延迟被限制在 $16 \mu s$, 因此 $T = m \times 16 \mu s$;

(4) $\sigma_i = L_{max}$, $\rho_i = \frac{L_{max}}{BAG}$;

(5) $\sigma_{n-1} = \sum_{j=1}^n \sigma_j - \sigma_i$;

(6) $\rho_{n-1} = \sum_{j=1}^n \rho_j - \rho_i$.

3 案例分析

这一节通过两个具体的案例来分析 AFDX 网络性能的数学算法。这个案例假设有 8 个 switches 在物理链路上, 每个 switch 有 8 个输入流 VL, 研究的对象是虚拟链路 VL_i。

1) 假设除了 VL_i, 所有的虚拟链路 = 1 (ms), $L_{max} = 1518$ (byte)。VL_i 的 $L_{max} = 1518$ (byte)。当 VL_i 的 BAG 在从 1 到 128 (ms) ($2^k = 1 \sim 7$) 的范围内变化时, 它的延迟计算参数 SDF 和预留缓冲区大小 h_{max} 的计算结果被显示在图 5。

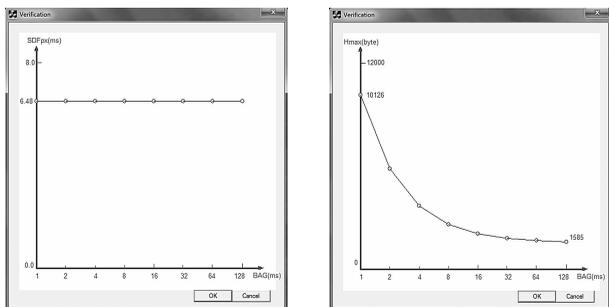


图 5 case1 的计算结果示意图

2) 假设, 对于所有的虚拟链路, $BAG = 1$ (ms), $L_{max} = 1518$ (byte), 包括 VL_i。但是对于 VL_m (其他的 7 虚拟链路中的一条) 的 L_{maxm} 的变化范围是从 64 到 1518 (byte)。VL_i 的延迟和缓冲区大小计算结果被显示在图 6 中。在图 6, x 轴代表 L_{maxm} 的变化, y 轴代表 SDF_{pxi} and H_{maxxi} 的计算结果。

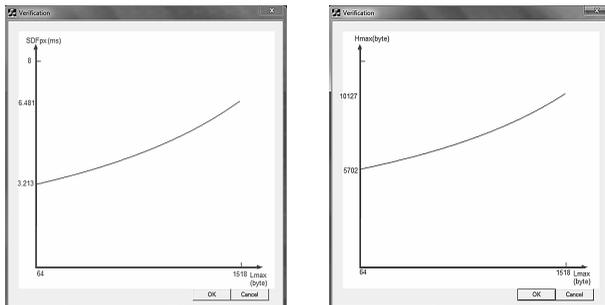


图 6 SDF_{pxi} 和 H_{maxxi} 在例子 3 中的计算结果

4 结论

航电总线设计工程师需要在 AFDX 总线系统结构和性能方面针对不同的逻辑和物理配置提供详细的设计, 其中包括网络延迟、预留缓冲区大小、对输出流的最大范围等性能分析。为了有效地依据地指导航电总线的设计过程, 需要寻找更为简洁准确的方法来确保网络拓扑结构的无丢失确定性服务, 也就因此向航电总线系统设计工程师们提出了挑战。上述简单介绍了网络设计和配置时估计网络性能参数的几种方法, 并详细介绍了 NC 在这一领域的应用。未来还需在方法验证对比和延迟计算精度方面开展更深入的研究。

参考文献：

[1] Boudec J L, Thiran P. Network Calculus—A Theory of Deterministic Queuing Systems for the Internet [M]. Online Version of the Book Springer Verlag—LNCS 2050; Version May 10, 2004.

[2] ARINC 664. Aircraft Data Network Part 2: Ethernet Physical and Data Link Layer Specification [S]. 2003.

[3] ARINC 664. Aircraft Data Network Part 7: Avionics Full Duplex Switched Ethernet (AFDX) Network [S]. 2005.

[4] 赵永库, 唐来胜, 李 贞. AFDX 网络测试技术研究 [J]. 计算机测量与控制, 2012 (4): 945-947.

[5] 周天然, 张勇涛, 何 锋, 等. 基于 AFDX 的航空电子系统可调度性分析 [J]. 北京航空航天大学学报, 2012 (1): 75-79.

[6] Ritu Chadha. Applications of policy—based network management [A]. IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium [C]. 2004: 907-908.

[7] IETF RFC 2753, A framework for policy—based admission control [S]. Yavatkar R, Pendarakis D, Guerin R, 2000.