

光纤通道区分服务优先级流量的路径分配方法

刘述艺, 李峭, 王彤, 徐鼎

(北京航空航天大学电子信息工程学院, 北京 100191)

摘要: 针对航空电子光纤通道网络通信任务服务要求的不同, 对于硬实时偶发、硬实时周期以及软实时任务区分优先级, 发展了一种优先考虑高优先级任务的端到端延迟保证路径分配方法。采用共轭网络演算分析得到流量经过级联后的端到端最坏情况延迟上限, 并结合优先级得到流量的路径。共轭网络演算使级联服务曲线的 min-plus 卷积转化成变换域中的加法, 简化了端到端服务曲线的计算。最后通过一个实例进行分析验证, 说明采用上述方法得到路径分配方案可以使高优先级任务的延迟上界小于不进行区分服务的延迟上界。

关键词: 航空电子; 光纤通道; 共轭网络演算

中图分类号: V271.4; TP323 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2013)05-0058-05

A Route Allocation Method for Differential Service Priority Flows in Fibre Channel Networks

LIU Shuyi, LI Qiao, WANG Tong, XU Ding

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: A novel routing strategy is proposed to satisfy the various service demands on hard real-time sporadic occurrence, hard real-time periodicity and soft real-time in Fiber Channel. This routing strategy gives prior guarantee to the end-to-end delay of tasks with higher priority. The conjugate network calculus, transforming the Min-plus convolution of cascade service curve into addition in transform domain, is applied to analyze the delay upper-bound in those worst cases. Thus a simplified method is given to calculate the service curve of multiple nodes. In the end, an example adopting the above approach is given to achieve the path routing scheme. The simulation results indicate that the delay upper-bound of high priority tasks using proposed approach is much lower than that of tasks using no priority classification.

Key words: avionics; fibre channel; conjugate network calculus

0 引言

光纤通道(Fibre Channel, FC)是先进综合式航空电子系统统一网络互联的技术解决方案^[1]。FC网络实时性能保证需要结合通信任务流量以及交换服务资源,在最坏情况下进行分析,并通过优先级、路径分配等设计方法加以保障。

本文针对航空电子领域光纤通道网络提出一种区分服务优先级的路径分配方法。按照时间确定性程度,将不同类型的流量分为高低优先级,优先对高优先级任务分配路径,通过计算最坏情况下的端到端延迟

上界,对性能进行确证。

对于最坏情况下的端到端延迟上界的分析与计算, Cruz 等学者^[2-3]开创的 Network Calculus 是一种有效的方法,采用 min-plus 异构代数,即用“min”和“+”算子替代常规运算的加法和减法,并已被用于 AFDX 等航空电子网络的适航论证中。对于级联的多路交换节点排队可以抽象为各服务组件的 min-plus 卷积。另一方面, Fidler M, Recker S 等学者^[4-5]发展的共轭网络演算采用 Legendre 变换,将 min-plus 卷积、解卷积运算转化为变换域中的加法、减法运算。本文采用共轭网络演算分析端到端流量的最坏情况延迟上限,使得级联多路交换节点服务曲线的计算简单快捷,对于区分服务优先级流量通信任务进行路径分配,取得合理的路径分配方案,并通过对一个交换式 FC 网络进行路径分配和性能分析,结果表明,采用本文方法得到的路

径分配方案可以保证高优先级任务的延迟上界小于不进行区分服务的延迟上界。

1 光纤通道流量类型及其特征描述

参考任务关键性要求,可以将航空电子网络传输的数据分为4类^[6]:1)硬实时偶发(Sporadic),即非周期但具有极高延迟要求的紧急数据,如警报;2)周期性的,有硬性延迟要求的数据,如传感器数据;3)非周期性,有一定延迟要求但不紧急的数据;4)非周期性,也没有时延要求的数据,如对时间不敏感的文件传输。把所有的任务分成两个优先级,其中,1)、2)类为高优先级,3)、4)类为低优先级。

网络演算中,通常需要对网络中的数据流进行特征化描述,使用累积函数 $R(t)$ 来描述在时间 $[0, t]$ 内数据流的比特数^[7]。

到达曲线 $a(t)$ 对数据在某一时间间隔内到达的比特流数进行限制^[3]。如果 $R(t)$ 满足式(1),则可以说数据流受到到达曲线 $a(t)$ 限制, $a(t)$ 是非负不递减的时间函数。

$$\alpha(t-s) \geq R(t) - R(s), \quad 0 \leq s \leq t \quad (1)$$

漏桶到达曲线是一种典型的到达曲线,表示为 $\alpha_{r,b}(t) = \begin{cases} 0, & t=0 \\ b+r \cdot t, & t>0 \end{cases}$,其中,参数 r 和 b 分别制定了数据流的持续到达速率和最大突发长度。对于周期为 P 的数据流 $a(t) = \begin{cases} 0, & t=0 \\ b+r \cdot t/P, & t>0 \end{cases}$ 。对于偶发或非周期性任务,一般限定它们的最小可能发生时间间隔,以该间隔作为它们的“周期”,而以最大可能的数据包长度作为 b 的取值。

服务曲线定义了数据流在某个网络节点对数据流可能提供的最小服务^[3]。 $R'(t)$ 是时间间隔 $[0, t]$ 内已接受服务的比特流数, $\beta(t)$ 是非负不递减的时间函数,且

$$R'(t) - R(s) \geq \beta(t-s), \quad 0 < s < t \quad (2)$$

则 $\beta(t)$ 为节点为数据流提供的服务曲线。

典型的服务曲线为速率延迟服务曲线,用参数 R 和 T 来描述,分别代表数据流接受服务的速率和服务前必须等待的时间。

$$\beta_{R,T}(t) = R[t-T]^+ = \begin{cases} R(t-T), & t > T \\ 0, & t \leq T \end{cases} \quad (3)$$

如果能够确定一条数据流经过节点的到达曲线和服务曲线,则可以利用网络演算或共轭网络演算计算出数据流的最大服务延迟 D 和最大数据积压 Q 。

2 共轭网络演算

离散事件凸分析与异构代数的研究表明,Legendre

变换将异构代数的卷积转化为共轭变换域中的“乘法”(相当于常规的加法),相当于线性系统中Laplace变换的地位。

对于很大一类到达曲线 $a(t)$,或者是它们的次可加闭包,经过补充定义在 $t < 0$ 时, $a(t) = -\infty$,则在时域中它们是凹函数;而对于典型的服务曲线经过补充定义在 $t < 0$ 时, $\beta(t) = -\infty$,则在时域中它们是凸函数。

Legendre变换对于凸函数和凹函数具有不同的定义,分别为 $\bar{\zeta}$ 和 $\underline{\zeta}$;通过Legendre变换,分别求得凸函数和凹函数的Fenchel共轭。

凸函数的Fenchel共轭为

$$F(s) = \bar{\zeta}(f(t))(s) = \sup_t [s \cdot t - f(t)] \quad (4)$$

凹函数的Fenchel共轭为

$$G(s) = \underline{\zeta}(g(t))(s) = \inf_t [s \cdot t - g(t)] \quad (5)$$

通过Legendre变换,将“时间-累积量”空间中的到达曲线 $a(t)$ 、服务曲线 $\beta(t)$ 变换为“速率-累积量”空间内的共轭曲线 $A(s)$ 与 $B(s)$ 。漏桶到达曲线 $\alpha_{r,b}(t)$ 的共轭曲线如图1中 $A(s)$ 所示。

$$A(s) = \inf_t [s \cdot t - \alpha(t)] = \begin{cases} -\infty, & s < r \\ -b, & s \geq r \end{cases} \quad (6)$$

速度延迟服务曲线 $\beta_{R,T}(t)$ 的共轭曲线 $B(s)$ 为

$$B(s) = \sup_t [s \cdot t - \beta(t)] = \begin{cases} +\infty, & s < 0 \\ s \cdot T, & s \geq 0, s \leq R \\ +\infty, & s > R \end{cases} \quad (7)$$

根据Legendre变化以及凸函数Fenchel共轭的特性,存在如下的运算规律。

定理1^[5] 若 $f(t)$ 和 $g(t)$ 是两个凸函数, $f(t)$ 和 $g(t)$ 的min-plus卷积 $(f \otimes g)(t)$ 是凸函数,则

$$\bar{\zeta}((f \otimes g)(t))(s) = \bar{\zeta}(f(t))(s) + \bar{\zeta}(g(t))(s); \quad (8)$$

若 $f(t)$ 是凹函数, $g(t)$ 是凹函数,则

$$\underline{\zeta}((f \otimes g)(t))(s) = \underline{\zeta}(f(t))(s) - \underline{\zeta}(g(t))(s)。 \quad (9)$$

通过到达曲线 $A(s)$ 与服务曲线 $B(s)$ 计算最坏情况下的延迟,既可以用Legendre变化将它反变换到时域,由到达曲线和服务曲线的最大水平距离得到;也可以在变换域中由定理2求得。

定理2^[5] 如果一个数据流被到达曲线 $a(t)$ 所约束,服务节点的服务曲线为 $\beta(t)$, $A(s)$ 与 $B(s)$ 分别是 $\alpha(t)$ 和 $\beta(t)$ 的Fenchel共轭。设 $A(s)$ 与 $B(s)$ 在点 s^* 的切线在纵坐标轴相交于一点,最大服务延迟 D 可以表示为两条切线斜率的最大差值,对于式(6)、式(7)给出的 $A(s)$ 与 $B(s)$ 的例子,其最大服务延迟如图1中 D 所示,bit为二进制位。

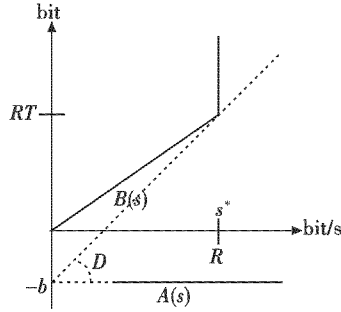


图1 Legendre 域中的最大服务延迟

Fig.1 Maximum delay in the Legendre domain

3 路径分配

设FC网络在运行时采用静态路由配置,即路径在设计阶段离线确定。区分服务流量优先级,将硬实时偶发、硬实时周期流量作为高优先级流量,并先分配高优先级流量的路径。要求网络容量大于各流量可持续速率之和,即对于每个多路复用节点,设服务速率为 R ,流量可持续速率为 r ,必须满足 $\sum_i r_i < R$ 。

由定理3给出服务节点提供给高优先级任务与低优先级任务服务曲线的定义。

定理3^[3] 考虑一个服务节点对两个数据流 F_H 、 F_L 进行服务。给予数据流 F_H 非抢占式的高优先级服务。假设服务节点提供给 F_H 和 F_L 的总服务曲线为 $\beta(t)$,高优先级数据流曲线 F_H 受到到达曲线 $\alpha_H(t)$ 的限制,且 $\alpha_H(t)$ 是单调递增的, l_{\max}^L 是低优先级数据流中 F_L 的最大帧长,则高优先级的数据流 F_H 和低优先级的数据流 F_L 的服务曲线分别为

$$\beta_H(t) = [\beta(t) - l_{\max}^L]^+ \quad (10)$$

$$\beta_L(t) = [\beta(t) - \alpha_H(t)]^+ \quad (11)$$

在路径分配中首先找到每个高优先级任务的片面最优路径。所谓“片面最优路径”是指不考虑其他流量干扰时最坏情况下服务延迟最小的路径。采用共轭网络演算方法计算流量最坏情况下的服务延迟,由式(10)得到服务节点提供给高优先级任务的服务曲线 $\beta_{Hi}(t)$, n 个服务节点级联服务曲线为

$$\beta_{etc}(t) = \otimes_{i=1}^n \beta_{Hi}(t) \quad (12)$$

式(12)等号两边同时进行Legendre变换由定理1得

$$\bar{\zeta}(\beta_{etc})(s) = \sum_{i=1}^n \bar{\zeta}(\beta_{Hi})(s) \quad (13)$$

则

$$B(s) = \sum_{i=1}^n B_{Hi}(s) \quad (14)$$

式中, $B_{Hi}(s) = \bar{\zeta}(\beta_{Hi}(t))(s)$ 。

作为一种典型的情况,如果 $\beta_{Hi}(t)$ 为速率时延服务曲线,而流量到达曲线为漏桶到达曲线 $\alpha_{r,b}(t)$,到达曲线和服务曲线的Legendre变换 $A(s)$ 和 $B(s)$ 如图2所示,则

$$\beta_{Hi}(t) = R_i \left[t - \frac{l_{\max}^L}{R_i} \right]^+ = \begin{cases} R_i \left(t - \frac{l_{\max}^L}{R_i} \right), & t > \frac{l_{\max}^L}{R_i} \\ 0, & t \leq \frac{l_{\max}^L}{R_i} \end{cases} \quad (15)$$

$$B(s) = \sum_{i=1}^n B_{Hi}(s) = \begin{cases} +\infty, & s < 0 \\ s \cdot \sum_{i=1}^n \frac{l_{\max}^L}{R_i}, & s \geq 0, s \leq \min R_i \\ +\infty, & s > \min R_i \end{cases} \quad (16)$$

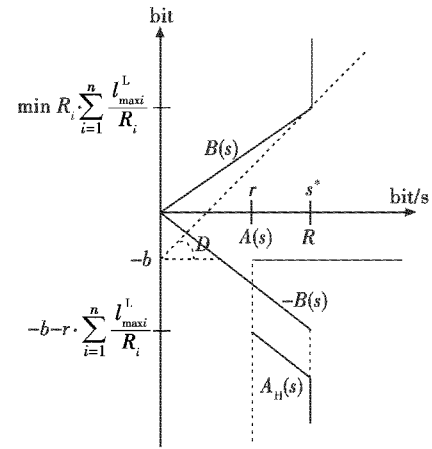


图2 漏桶到达曲线、速率时延服务曲线 Legendre 变换

Fig.2 Leaky-bucket arrival curve and Rate-latency service curve in the Legendre domain

根据定理2、图2和式(16),得到最大服务延迟 D 为

$$D = \frac{\min R_i \sum_{i=1}^n \frac{l_{\max}^L}{R_i} + b}{\min R_i} = \sum_{i=1}^n \frac{l_{\max}^L}{R_i} + \frac{b}{\min R_i} \quad (17)$$

将源节点到目的节点最坏情况下的最大服务延迟作为路径的“长度”,采用最短路径算法(如Dijkstra算法^[8-9])进行路径优化,可以得到各条流量的片面最优路径。将所有高优先级任务按照各自的片面最优路径通信,计算出各条流量并发传输时每个任务的最大服务延迟。如果有任务不满足延迟要求,对其进行禁忌搜索^[10-11],寻找到次优路径。所谓“次优路径”是指不考虑其他到达流量干扰时最坏情况下服务延迟第二小的路径。由式(17)可知,流量最大突发长度 b 越大,最大服务延迟 D 越大。当同时有多个流量不满足延迟要求,优先为最大突发长度大的流量进行次优路径分配。

如果出现下面2种情况则报错,路径分配失败:1)找不到次优路径;2)次优路径在无其他流量干扰时最坏情况下服务延迟不满足要求。具体流程见图3。

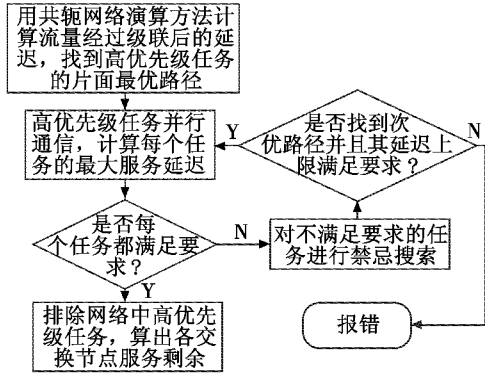


图3 高优先级任务路径分配流程图

Fig.3 Path allocation flow chart of the high-priority task

为高优先任务分配完路径后,排除网络中高优先任务,用式(11)计算出各节点对低优先级任务的服务曲线,其中, $\alpha_H(t)$ 的计算也可以用共轭网络演算得到。例如:仍设定漏桶到达曲线和速率时延服务曲线,则 $\alpha_H(t)$ 在变换域中的 Fenchel 共轭函数 $A_H(s)$ 如图2所示,将其反变换得到 $\alpha_H(t)$;然后再对低优先级任务进行路径分配,所用方法与高优先级同理。

4 实例的性能评价

实例场景为 FC 交换结构互连网络,网络物理拓扑如图4所示。

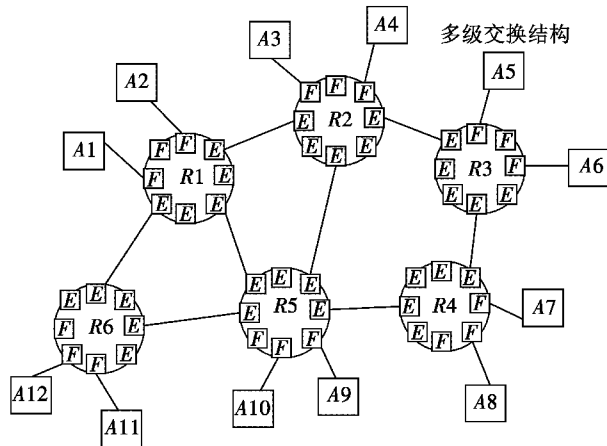


图4 网络物理拓扑

Fig.4 Physical network topology

网络由 FC 交换机、FC 终端、内部交换链路 (Internal-Switch Link, ISK) 和普通链路组成。R_i 表示 FC 交换机, A_i 表示 FC 终端。ISK 通过 E 端口将 FC 交换机互连,普通链路连接 FC 交换机的 F 端口和 FC 终端。这里设定每个 FC 交换机的规格相同,具有相同的转发性能,可提供的物理带宽为 1 GB/s,交换机模型提供两级优先级排队服务策略。

在某应用中,要求优先级 1 任务的最大服务延迟上限为 10 μ s,优先级 2 任务的最大服务延迟上限为 50 μ s,优先级 1 高于优先级 2。网络数据流特征见表 1。

表 1 数据流特征表

Table 1 Data stream characteristics table

数据编号	源终端	目的终端	数据长度/byte	发送周期/ μ s	优先级
MSG0	A1	A4	100	100	1
MSG1	A2	A5	100	100	1
MSG2	A3	A6	200	100	1
MSG3	A4	A7	200	100	1
MSG4	A5	A8	1000	200	2
MSG5	A6	A9	1000	200	2
MSG6	A7	A10	1000	200	2
MSG7	A8	A11	2000	400	2
MSG8	A9	A12	2000	400	2
MSG9	A10	A1	2000	400	2
MSG10	A11	A2	4000	500	2
MSG11	A12	A3	4000	500	2

根据第3小节所述的路径分配方法及式(17),各任务数据流路径及最大服务延迟如表2所示。

表 2 各任务数据流路径及最大服务延迟

Table 2 Path of the data flow and the maximum service delay

数据编号	路径	最大服务延迟/ μ s
MSG0	A1 - R1 - R2 - A3	8.202
MSG1	A2 - R1 - R2 - R3 - A5	9.619
MSG2	A3 - R2 - R3 - A6	5.708
MSG3	A4 - R2 - R3 - R4 - A7	7.766
MSG4	A5 - R3 - R4 - A8	10.036
MSG5	A6 - R3 - R4 - R5 - A9	23.159
MSG6	A7 - R4 - R5 - A10	19.864
MSG7	A8 - R4 - R5 - R6 - A11	34.813
MSG8	A9 - R5 - R6 - A12	28.072
MSG9	A10 - R5 - R1 - A1	22.677
MSG10	A11 - R6 - R1 - A2	24.503
MSG11	A12 - R6 - R5 - R2 - A3	36.193

将表2的结果与不进行优先级分类的各任务数据流最大服务延迟进行比较,结果如图5所示。

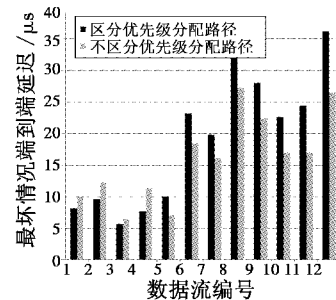


图5 两种路径分配方法流量最坏情况下延迟

Fig.5 The worst case delay of the two path allocated method

由图5可知,前4个优先级为1的数据流的服务延迟上界小于不进行优先级分类时的延迟上界,并且其最坏情况下的时延全部在设计允许的最大延迟界限之内。在航空电子互连的应用说明该方法有利于保证关键命令和紧急周期消息传输的实时性。

5 结论

本文针对航空电子光纤通道网络,给出了硬实时偶发、硬实时周期通信任务的端到端延迟保证路径分配方法。该方法采用共轭网络演算方法分析各数据流最坏情况下端到端的延迟上限,解级联服务曲线问题仅需要在共轭变换域中进行“乘法”(相当于常规的加法),方便了寻找最优路径算法中路径“长度”的计算。通过实例仿真表明,采用上述方法得到的路径分配方案有利于保证高优先级任务的时延上限。此方法可用于航空电子光纤通道的网络设计。

参考文献

- [1] 熊华钢,王中华. 现代航空电子综合技术[M]. 北京:国防工业出版社,2009.
- [2] CRUZ R L. A calculus for network delay, Part I: Network elements in isolation[C]//IEEE Transactions on Information Theory, 1991, 37(1):114-131.
- [3] LE BOUDEC J Y, THIRAN P. Network calculus: A theory of deterministic queuing systems for the Internet [M]. Berlin: Springer-Verlag, 2001.
- [4] HISAKADO T, OKUMURA K, VUKADINVIC V, et al. Characterization of a simple communication network using Legendre transform[C]//IEEE Int. Symp. Circuit and Systems, Bangkok, Thailand, 2003:25-28.
- [5] FIDLER M, Recker S. Conjugate network calculus: A dual approach applying the Legendre transform [J]. Computer Networks, 2006, 50(8):1026-1039.
- [6] 林强,熊华钢,张其善. 强实时约束下光纤通道交换网络消息集优化[J]. 电子学报,2006,34(2):344-347.
- [7] 赵长啸,屠晓杰,丁凡,等. 光线通道网络实时性能分析[J]. 北京航空航天大学学报,2011,31(10):1202-1206.
- [8] 王景存,张晓彤,陈彬,等. 一种基于 Dijkstra 算法的启发式最优路径搜索算法[J]. 北京科技大学学报,2007,29(3):346-350.
- [9] 蔡凯,管明露,张天明,等. 使用 Dijkstra 算法的攻击机初始航迹研究[J]. 电光与控制,2008,15(11):22-25.
- [10] GLOVER F. Tabu search: Part I [J]. ORSA Journal on Computing, 1989, 1(3):190-206.
- [11] GLOVER F. Tabu search: Part II [J]. ORSA Journal on Computing, 1990, 2(1):4-32.
- (上接第 14 页)
- [6] 黄仁全,靳聪,贺筱军,等. 自适应局部增强微分进化改进算法[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2011,12(3):84-89.
- [7] WESTMARK V R. A definition for information system survivability [C]//Proceeding of the 37th Annual Hawaii International Conference on System Science, Hawaii, USA, 2004:428-437.
- [8] 孙敏. 网络安全宏观态势评估与预测技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2009.
- [9] ZHANG Qinghua, BENVENISTE A. Wavelet networks [J]. IEEE Transaction on Neural Networks, 1992, 3(6):889-898.
- [10] 孙延奎. 小波分析及其应用[M]. 北京:机械工业出版社,2005.
- [11] 潘泉,张磊,孟晋丽,等. 小波滤波方法及应用[M]. 北京:清华大学出版社,2005.
- [12] 阳明盛,罗长童. 最优化原理、方法及求解软件[M]. 北京:科学出版社,2006.
- [13] 冯登超. 蚁群算法与小波网络在复杂性科学中的应用研究[D]. 天津:天津大学,2008.
- [14] PROJEC H. Know your enemy: Statistics [EB/OL]. <http://www.Honeynet.org/papers/stars/>, 2002.
- (上接第 57 页)
- [16] CHANDOLA V, MITHAL V, KUMAR V. Comparative evaluation of anomaly detection techniques for sequence data [C]//The 8th IEEE International Conference on Data Mining, Pisa, Italy, 2008:743-748.
- [17] 张德利. 基于贝叶斯网络的故障智能诊断方法研究[D]. 北京:华北电力大学,2008.
- [18] 王巍,崔海英,黄文虎. 基于故障树最小割集和最小路集的诊断方法研究[J]. 数据采集与处理,1999,14(1):26-29.
- [19] 谭天乐,宋执环,李平. 基于粗糙集和故障诊断方法[J]. 浙江大学学报:工学版,2003,37(1):47-50.
- [20] 吴希军. 基于主元分析方法的空调系统传感器故障诊断研究[D]. 杭州:浙江大学,2005.
- [21] ORSAGH R, BROWN D, ROEMER M, et al. Prognostic health management for avionics system power supplies [C]//IEEE of Aerospace Conference, 2005:3585-3591.
- [22] CHENG Shunfeng, PECHT M. A fusion prognostics method for remaining useful life prediction of electronic products [C]//IEEE International Conference on Automation Science and Engineering, San Francisco, 2009:102-107.
- [23] 张凤鸣,褚文奎,樊晓光,等. 综合模块化航空电子体系结构研究[J]. 电光与控制,2009,16(9):47-51.
- [24] 周福娜,文成林,冷元宝,等. 一种数据驱动的故障传播分析方法[J]. 化工学报,2010,61(8):1993-2001.
- [25] ARP4754-1996. Certification considerations for highly-integrated or complex aircraft systems[S]. Society of Automotive Engineers Inc, 1996:45-53.