

文章编号:1000-6893(2004)03-0275-04

# 实时网络系统可靠性建模研究

姜震<sup>1</sup>, 邵定蓉<sup>1</sup>, 熊华钢<sup>1</sup>, 汪健甄<sup>2</sup>

(1. 北京航空航天大学 电子工程系, 北京 100083)

(2. 中航第一集团 第六一三研究所, 河南 洛阳 471009)

## Research on the Reliability Model of Real-time Network Systems

JIANG Zhen<sup>1</sup>, SHAO Ding-rong<sup>1</sup>, XIONG Hua-gang<sup>1</sup>, WANG Jian-zhen<sup>2</sup>

(1. Electronic Engineering Department, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

(2. No. 613 Institute, China Aviation Industry Group I, Luoyang 471009, China)

**摘要:** 针对实时网络系统对任务完成时间有严格约束的特点, 首先建立了实时网络系统中的任务模型, 然后通过在网络系统可靠性模型中引入时间权函数建立了基于任务的实时网络系统可靠性模型, 建立了系统的可靠度矩阵, 最后针对 JAST 计划中的航空电子蝶型网络给出了建模实例。

**关键词:** 实时系统; 网络; 可靠性模型; 任务

**中图分类号:** TP302.7 **文献标识码:** A

**Abstract:** The real-time network system is a kind of system in which the completion time of a task is strictly bounded. In the paper a task-based model of this kind of systems considering timing issue is proposed. The model of the task is introduced and the emphasis is laid on how to include the timing factor in the model. An illustration of modeling avionics butterfly network in JAST program is also presented.

**Key words:** real-time system; network; reliability model; task

与集中式系统相比, 分布式实时网络系统具有可靠性高、抗打击能力强、系统可降级使用、易于扩充等特点, 尤其适合于作战系统在部分失效的情况下仍能够完成特定任务的需要。这类系统除了对实时性有严格的要求外, 系统的可靠性在保证系统能否完成正常功能及系统性能方面至关重要。

现有不少研究网络系统可靠性建模的文献, 但考虑具有时间约束条件的实时网络系统可靠性建模的文献不多见。文献[1]假设网络系统中节点绝对可靠, 网络部件之间统计独立, 考虑通信链路的失效, 从通信网络任意两节点端到端的可靠性角度考察系统的可靠性, 文献[2]将文献[1]的结论推广到节点和通信链路均不可靠的情况, 这是从连通性这一最基本的要求出发建立网络系统的可靠性模型<sup>[3,4]</sup>; 文献[5]提出并定义了基于任务的可靠度, 将网络系统可靠性与系统的功能联系起来, 不过该可靠度仅考虑任务计算过程中涉及到的处理机对系统可靠性的影响, 没有考虑通信链路失效的情况, 因而难以全面反映系统的可

靠性; 文献[6]综合考虑系统的拓扑结构、任务集、通信链路集和处理单元(节点)集对系统可靠性的影响, 提出了分布式系统的可靠性模型, 定义任务的可靠性为在给定分布式网络系统的拓扑结构、任务集、通信链路集和处理单元(节点)集的情况下, 在规定的任务时间内, 系统完成处理该任务的能力, 但在实际分析过程中并没有考虑任务的时间因素; 文献[6]在文献[7]的基础上对航空电子实时网络系统进行了可靠性建模研究, 定义任务是在源节点和目的节点之间的通信过程, 但在分析中仍然没有引入任务的时间约束条件。

## 1 实时网络系统中的任务模型

实时网络系统中节点间信息的交换过程依赖互连网络: 某一计算任务的完成, 不但依赖本地节点的资源, 且要求与其他节点进行通信, 获取资源。在航空电子系统的实时网络系统中, 这种信息传输过程(或通信过程)必须在系统设计时给定时间期限内完成, 否则即使任务的逻辑结果计算正确也认为该计算任务失败。参与信息交互的节点可以有 2 个、多个或者包括系统中所有的节点, 本文考虑 2 个节点之间进行信息交互的情况。

收稿日期: 2003-04-25; 修订日期: 2003-10-21  
基金项目: 航空基础科学基金(00F51014)资助项目

## 1.1 任务模型

定义任务为实时网络系统中任意2个节点之间的单向信息传输过程。这种信息传输必须在一定时间限制内,通过消息在通信网络中的传递完成。任务  $t$  用四元组  $[S, T, P, D]$  表示,其中

$S$ :代表任务的源节点;

$T$ :代表任务的目的节点;

$P$ :代表任务的周期;

$D$ :代表任务的最大允许执行时间,通常有  $D = P$ 。

以下讨论以  $t_{S-T-D}$  表示源节点为  $S$ ,目的节点为  $T$ ,最大允许执行时间为  $D$ (周期与最大允许执行时间相等)的任务。

## 1.2 任务的路径集

任务执行过程对应的系统节点和链路的集合称为任务的路径,用  $r_{S-T}$  表示。链路定义为相邻两节点之间的通信线路。在复杂系统中,任务的路径可能有多个,其数目设为  $k_{S-T}$ 。任务的完成依赖路径的连通性,也依赖路径的延迟特性,即并不是所有的连通路径都能保证任务的完成,能够满足任务完成的连通路集构成任务的路径集。设任务在路径  $r_{S-T,i}$  上的执行时间为  $d_i$ ,定义权函数

$$F(d_i) = \begin{cases} 1 & d_i \leq D \\ 0 & d_i > D \end{cases} \quad (1)$$

则任务  $t_{S-T-D}$  的路径集  $R_{S-T-D}$  为

$$R_{S-T-D} = \bigcup_{i=1}^{k_{S-T}} r_{S-T-D,i} = \bigcup_{i=1}^{k_{S-T}} F(d_i) r_{S-T,i} \quad (2)$$

其中:任务  $t_{S-T-D}$  的第  $i$  条路径  $r_{S-T-D,i}$  由节点单元集和链路单元集组成,分别以  $N_{r_{S-T-D,i}}$  和  $L_{r_{S-T-D,i}}$  表示

$$N_{r_{S-T-D,i}} = \left\{ n_{r_{S-T-D,i}} / n_{r_{S-T-D,i}} \quad r_{S-T-D,i} \right\} \quad (3)$$

$$L_{r_{S-T-D,i}} = \left\{ l_{r_{S-T-D,i}} / l_{r_{S-T-D,i}} \quad r_{S-T-D,i} \right\} \quad (4)$$

则任务  $t_{S-T-D}$  的节点单元集表示为

$$N_{T_{S-T-D}} = \bigcup_{i=1}^{k_{S-T}} N_{r_{S-T-D,i}} \quad (5)$$

任务  $t_{S-T-D}$  的链路单元集表示为

$$L_{T_{S-T-D}} = \bigcup_{i=1}^{k_{S-T}} L_{r_{S-T-D,i}} \quad (6)$$

## 2 实时网络系统的可靠性模型

### 2.1 前提和假设

对于由  $M$  个节点组成的实时网络系统,假

设:

(1)实时网络系统中的节点单元和链路单元都不可靠,但只有正常工作和失效两种状态,节点单元和链路单元的失效相互统计独立,失效概率可以不同;

(2)各个链路单元具有各自的通信延迟,各个节点单元具有各自的处理延迟;

(3)系统中的任务数为  $m$ ,从而构成系统的任务集  $= \{ t_{S-T-D,j} | j = 1, 2, \dots, m \}$ 。

### 2.2 单一任务的可靠度

任务  $t_{S-T-D}$  的完成可以具有多条冗余路径,任务  $t_{S-T-D}$  的第  $i$  条路径  $r_{S-T-D,i}$  的可靠度  $R_{r_{S-T-D,i}}$  定义为路径  $r_{S-T-D,i}$  的节点单元集  $N_{r_{S-T-D,i}}$  和链路单元集  $L_{r_{S-T-D,i}}$  正常工作的概率,即

$$R_{r_{S-T-D,i}} = P\{r_{S-T-D,i}\} = P\{N_{r_{S-T-D,i}}\} P\{L_{r_{S-T-D,i}}\} \quad (7)$$

任务  $t_{S-T-D}$  的可靠度  $R_{T_{S-T-D}}$  定义为任务的路径集  $R_{S-T-D}$  中至少有一条路径正常工作的概率,即

$$R_{T_{S-T-D}} = P\left\{ \bigcup_{i=1}^{k_{S-T}} r_{S-T-D,i} \right\} \quad (8)$$

根据相容事件的概率公式<sup>[8]</sup>,上式可表示为

$$\begin{aligned} R_{T_{S-T-D}} = P\left\{ \bigcup_{i=1}^{k_{S-T}} r_{S-T-D,i} \right\} = & P\left\{ r_{S-T-D,1} \right\} - P\left\{ r_{S-T-D,1} \cap r_{S-T-D,2} \right\} + \\ & P\left\{ r_{S-T-D,1} \cap r_{S-T-D,2} \cap r_{S-T-D,3} \right\} + \\ & \dots + (-1)^{m-1} \cdot P\left\{ \bigcap_{i=1}^{k_{S-T}} r_{S-T-D,i} \right\} \end{aligned} \quad (9)$$

当任务的路径数  $k_{S-T}$  较大时,上式的直接计算将十分繁琐,其简化方法可以采用布尔代数中的不交化方法并结合计算机进行计算求解<sup>[9]</sup>。

### 2.3 实时网络系统的可靠度与可靠度矩阵

实时网络系统的可靠度  $R_{\text{system}}$  定义为在给定系统网络拓扑、任务集的情况下,系统在任务的最大允许时间内完成任务集中所有任务的概率,其表达式为

$$R_{\text{system}} = \prod_{j=1}^m R_{T_{S-T-D,j}} \quad (10)$$

式中: $m$  为系统任务集的任务数量; $R_{T_{S-T-D}}$  为实时任务  $T_{S-T-D}$  的可靠度。

采用实时网络系统可靠度指标可以简洁地反映系统的可靠程度,但是不能够反映任务集中各个任务的可靠度与系统互连拓扑的关系,因此可

以采用可靠度矩阵的方法从任务的角度评价实时网络系统的可靠度。系统可靠度矩阵  $R_D$  中行为  $S$ , 列为  $T$  的元素代表任务  $t_{S-T-D}$  的可靠度, 即

$$R_D = [R_{T_{S-T-D}}] \quad S = 1, 2, \dots, M; T = 1, 2, \dots, M \quad (11)$$

从而以矩阵的形式给出实时网络系统任务可靠度与网络拓扑之间的关系。

### 3 实例分析

航空电子系统是典型的分布式实时控制系统, 系统可靠性在航空电子系统总体设计中占有至关重要的地位。考虑图 1 所示的美军下一代航空电子体系结构研究计划——JAST 航空电子系统结构中提出的蝶型互连网络<sup>[10]</sup>, 利用提出的方法对其进行可靠性建模。

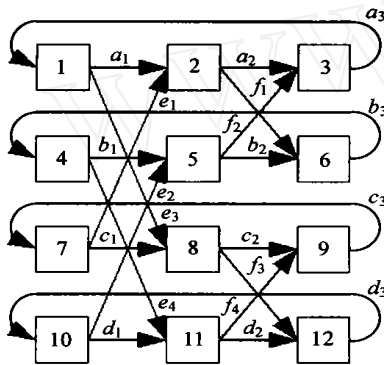


图 1 JAST 计划中的蝶型网络

Fig. 1 Butterfly topology in JAST program

实际的航空电子系统总体设计中, 实时任务的最大允许延迟参数受系统实时性要求约束, 应该由系统设计人员给定。航空电子实时网络系统中节点单元集和链路单元集都会对系统任务的执行带来延迟, 本例中不失一般性地假定所有节点引入的延迟相同, 取值为 1 个单位, 所有的链路延迟也相同, 取值为 0.5 个单位, 节点和链路的失效概率相同, 分别考察在节点和链路的失效概率为 0.10, 0.05 和 0.01 的情况下, 航空电子实时网络系统采用自适应路由算法时, 任务集  $= \{T_{1-3-4.5}, T_{1-6-7.5}, T_{1-9-8}, T_{1-12-9.5}\}$  的可靠性。

采用联络矩阵法找出任务的源节点到目的节点的所有链路单元集和节点单元集, 系统的联络矩阵  $C$  如式(12)所示。

根据联络矩阵, 可以得到各个任务源节点和目的节点之间的链路单元集和节点单元集, 如表 1 至表 4 所示。

$$C = \begin{bmatrix} 0 & a_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e_3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_2 & 0 & 0 & f_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & b_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e_4 & 0 \\ 0 & 0 & f_2 & 0 & 0 & b_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & b_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & e_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_2 & 0 & 0 & f_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & e_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & f_4 & 0 & 0 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_3 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

表 1 任务  $T_{1-3-4.5}$  的链路单元集和节点单元集

Table 1 Link set and node set of task  $T_{1-3-4.5}$

序号	链路单元集	节点单元集	延迟
1	$a_1, a_2$	1, 2, 3	4
2	$a_1, f_1, b_3, b_1, f_2$	1, 2, 6, 4, 5, 3	8.5
3	$e_3, c_2, c_3, e_1, a_2$	1, 8, 9, 7, 2, 3	8.5
4	$e_3, f_3, d_3, e_2, f_2$	1, 8, 12, 10, 5, 3	8.5

表 2 任务  $T_{1-6-7.5}$  的链路单元集和节点单元集

Table 2 Link set and node set of task  $T_{1-6-7.5}$

序号	链路单元集	节点单元集	延迟
1	$a_1, f_1$	1, 2, 6	4
2	$e_3, c_2, c_3, e_1, f_1$	1, 8, 9, 7, 2, 6	8.5
3	$e_3, f_3, d_3, e_2, b_2$	1, 8, 12, 10, 5, 6	8.5
4	$e_3, f_3, d_3, d_1, f_4, c_3, e_1, f_1$	1, 8, 12, 10, 11, 9, 7, 2, 6	13

表 3 任务集  $T_{1-9-8}$  的链路单元集和节点单元集

Table 3 Link set and node set of task set  $T_{1-9-8}$

序号	链路单元集	节点单元集	延迟
1	$e_3, c_2$	1, 8, 9	4
2	$a_1, f_1, b_3, e_4, f_4$	1, 2, 6, 4, 11, 9	8.5
3	$e_3, f_3, d_3, d_1, f_4$	1, 8, 12, 10, 11, 9	8.5
4	$e_3, f_3, d_3, e_2, b_2, b_3, e_4, f_4$	1, 8, 12, 10, 5, 6, 4, 11, 9	13

表 4 任务集  $T_{1-12-9.5}$  的链路单元集和节点单元集

Table 4 Link set and node set of task set  $T_{1-12-9.5}$

序号	链路单元集	节点单元集	延迟
1	$e_3, f_3$	1, 8, 12	4
2	$a_1, f_1, b_3, e_4, d_2$	1, 2, 6, 4, 11, 12	8.5
3	$a_1, f_1, b_3, e_4, f_4, c_3, c_1, f_3$	1, 2, 6, 4, 11, 9, 7, 8, 12	13
4	$e_3, c_2, c_3, e_1, f_1, b_3, e_4, d_2$	1, 8, 9, 7, 2, 6, 4, 11, 12	13

从表4中可以看出,在任务 $T_{1-12-9.5}$ 的所有连通路程中,只有路径1和路径2的延迟特性满足实时任务 $T_{1-12-9.5}$ 的设计要求,路径3和路径4虽然能够保证节点1和节点12之间的连通性,但是路径延迟大于实时任务所允许的最大延迟,因此在计算系统基于任务的可靠度时应予以排除。同理,表1至表3中,只有第一种连通路程是任务的可用路径。根据式(7)~式(9),可计算得到各任务的可靠度结果,如任务 $T_{1-12-9.5}$ 的可靠度计算公式为

$$R_{T_{1-12-9.5}} = P\left\{ \bigcap_{i=1}^2 r_{1-12-9.5,i} \right\} = P(r_{1-12-9.5,1}) + P(r_{1-12-9.5,2}) - P(r_{1-12-9.5,1} \cap r_{1-12-9.5,2}) = P(L_{T_{1-12-9.5,1}}) P(N_{T_{1-12-9.5,1}}) + P(L_{T_{1-12-9.5,2}}) P(N_{T_{1-12-9.5,2}}) - P(L_{T_{1-12-9.5,1}} \cap L_{T_{1-12-9.5,2}}) \cdot P(N_{T_{1-12-9.5}}^1 \cap N_{T_{1-12-9.5}}^2) \quad (13)$$

从而可得任务 $T_{1-12-9.5}$ 的可靠度计算结果。任务集中各任务的可靠度如表5所示

表5 任务集的可靠度  
Table 5 Reliability of task set

单元失效概率	0.10	0.05	0.01
任务 $T_{1-3-4.5}$	0.5905	0.7738	0.9510
任务 $T_{1-6-7.5}$	0.5905	0.7738	0.9510
任务 $T_{1-9-8}$	0.5905	0.7738	0.9510
任务 $T_{1-12-9.5}$	0.6369	0.8409	0.9768

### 3 结论

系统可靠性建模的目的是为了指导可靠性指标的正确分配。以往针对实时网络系统的可靠性建模研究中没有充分考虑时间约束条件,以致模型不能区分实时和非实时网络系统的特点,本文在网络系统可靠性建模研究的基础上,充分考虑系统的时间约束条件,建立了基于任务的实时网络系统可靠性模型。从实例分析可以看出,并不是系统内所有的连通路程都是实时任务的实际可用路径。通过引入时间的可靠性模型的建立,使得在分配航空电子系统等具有严格时间约束条件的网络控制系统的可靠性时可以充分结合系统的实时性要求,更全面地反映系统特性。

### 参考文献

- [1] Wing O, Demetriou P. Analysis of probabilistic networks [J]. IEEE Trans on Communication Technology, 1964, 12(3): 38 - 40.
- [2] Lin P M. A new algorithm for symbolic system analysis [J]. IEEE Trans on Reliability, 1976, 25(1): 1 - 15.
- [3] 熊庆旭. 通信网可靠性分析与设计 [D]. 北京: 北京大学, 1993.  
(Xiong Q X. Analysis and design of communication network reliability [D]. Beijing: Beijing University, 1993.)
- [4] 熊蔚明. 关于通信网可靠性的研究 [D]. 北京: 北京大学, 1990.  
(Xiong W M. On the research of reliability of communication network [D]. Beijing: Beijing University, 1990.)
- [5] Tripath C R. Reliability analysis of hypercube multi-computers [J]. Microelectron Reliability, 1997, 37(6): 885 - 891.
- [6] 胡华平, 金士尧. 分布式系统可靠性模型 [J]. 计算机工程与应用, 1999(8): 1 - 3.  
(Hu H P, Jin S Y. Reliability of distributed systems [J]. Computer Engineering and Applications, 1999(8): 1 - 3.)
- [7] 周强, 罗志强, 等. 航电系统 SCI 互连的可靠性建模研究 [J]. 北京航空航天大学学报, 2001, 27(5): 536 - 539.  
(Zhou Q, Luo Z Q, et al. On reliability model of SCI interconnections in avionics system [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2001, 27(5): 536 - 539.)
- [8] 章国栋, 陆廷孝, 等. 系统可靠性与维修性的设计与分析 [M]. 北京: 国防工业出版社, 北京, 1997. 72 - 77.  
(Zhang G D, Lu X T, et al. Design and analysis of system reliability and maintenance [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1997. 72 - 77.)
- [9] 沙基昌, 武小悦. 网络系统可靠度的 BDD 算法 [J]. 系统工程与电子技术, 1999, 21(7): 72 - 73.  
(Sha J C, Wu X Y. A BDD algorithm for network reliability [J]. System Engineering and Electronics, 1999, 21(7): 72 - 73.)
- [10] Joint advanced strike technology program. Avionics architecture definition [Z]. <http://www.jast.mil>, 1994.

作者简介:



姜震(1975-) 男, 辽宁沈阳人, 北京航空航天大学电子信息工程学院博士研究生, 主要从事航空电子综合化互连技术研究。

熊华钢(1961-) 男, 湖北武汉人, 北京航空航天大学电子信息工程学院教授, 主要从事航空电子综合化研究。

(责任编辑: 俞敏)