基于代数模型的飞控计算机可靠性分析方法

张竞凯 章卫国 刘小雄 王晓光

(西北工业大学 自动化学院, 西安 710072)

摘 要: 针对现有大型客机飞行控制计算机的体系结构,运用动态故障树分析方法对系统进行可靠性分析. 通过引入时间算子,为系统所包含的温贮备门事件建立了可靠性代数模型,并且在借助逻辑符号系统得到的结构函数基础上,推演出非相似余度温贮备可靠性分析的量化表达形式. 这种代数模型方法可以适用于包含任何寿命分布类型部件的系统. 通过对一个典型的电传飞控计算机系统进行研究,将其和经典 Markov 方法比较,体现出该种方法在工程中的有效性和便捷性.

关 键 词: 飞行控制计算机; 动态故障树分析; 代数模型; 温贮备门; Markov 方法

中图分类号: V 24

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2014)02-0262-06

Reliability analysis based on algebraic model for flight control computers

Zhang Jingkai Zhang Weiguo Liu Xiaoxiong Wang Xiaoguang

(College of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: According to the architecture of modern airliners' flight control computers, a method dynamic fault tree analysis was used to assess the system reliability. Algebraic models with temporal operators which can handle dynamic logics were built for warm spare gates included in the system. Based on the expressions of logical symbols such as structure functions, the quantitative formulation was deduced to analyze a warm spare gate with dissimilar redundancy. The algebraic models proposed are applicable in any distribution type of lifetime. Compared to the classical Markov method, the application using algebraic models for a case of a typical flight control computer system shows the efficiency and convenience in practice.

Key words: flight control computer; dynamic fault tree analysis; algebraic models; warm spare; Markov method

当今电传飞控的发展使系统对飞行控制计算机(FCC,Flight Control Computer)的可靠性要求进一步提高,而由余度技术进步产生的多种管理机制为可靠性建模、分析和设计带来了挑战,故相关工具和方法需要完善. 学者们对飞控系统尤其 FCC 的可靠性分析方法进行了深入研究: 文献[1]通过动态故障树(DFT,Dynamic Fault Tree)对非相似容错飞控系统进行了可靠性分析; 文献[2]通过 Markov 方法分析了高性能四余度容错计算机的可靠性,考虑了瞬态故障恢复和状态转移概率的分配等因素; 文献[3-4]提出了基于广义随机 Petri 网的 FCC 可靠性建模方法,该方法描述细致,但符号和求解较复杂; 文献[5]通过分级组合建模方法对 Boeing 777 的 FCC 进行可靠性建模与分析,运用独立子系统模块化和分层优势,结合可靠性框图和广义随机 Petri 网方法简化了复杂系统定量分析.

从上述脉络中发现,研究者针对飞控系统或 FCC 特点,较多采用了以 DFT 分析、Petri 网和 Markov 为工具的动态方法,尤其是后两者(如将 DFT 转

收稿日期: 2013-04-16; **网络出版时间**: 2013-11-27 15:52

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20131127.1552.007.html

基金项目: 航空科学基金资助项目(20125853035)

作者简介: 张竞凯 (1981-),男,河北泊头人,博士生,legionii@163.com.

化为 Markov 过程). 但由于经典时间齐次 Markov 方法(后文中提到的"Markov 方法"均特指此方法)存在寿命分布局限,Petri 网方法在图形表现和计算求解方面较复杂,故有待做方法上的改进.

1　客机 FCC 架构及其故障树

大型客机 FCC 发展趋势有以下 2 个类型:

1) 波音类型. 以 Boeing 777 为例,3 ×3 配置,3 个数字式主飞行控制(PFC,Primary Flight Control)计算机运算通道(channel),每通道含指令、监控和备份 3 个支路(lane),每支路含电源、处理器和总线接口,同通道不同支路中处理器为非相似. 每个通道的各支路通过专用总线传输数据,但只能通过非专用总线监听其他通道. 如图 1 所示,重置策略为,若指令支路失效,由备份支路取代,若其他 2 个支路有 1 个失效,则该通道失效[4].

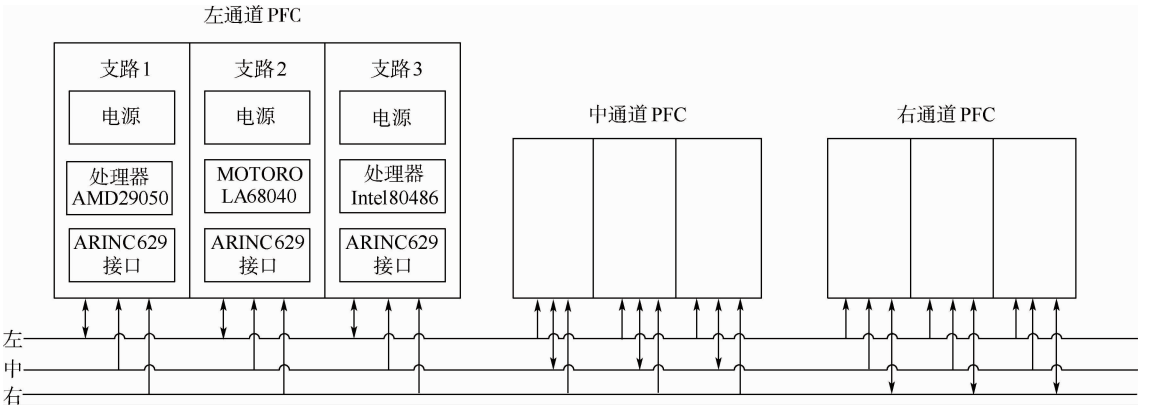
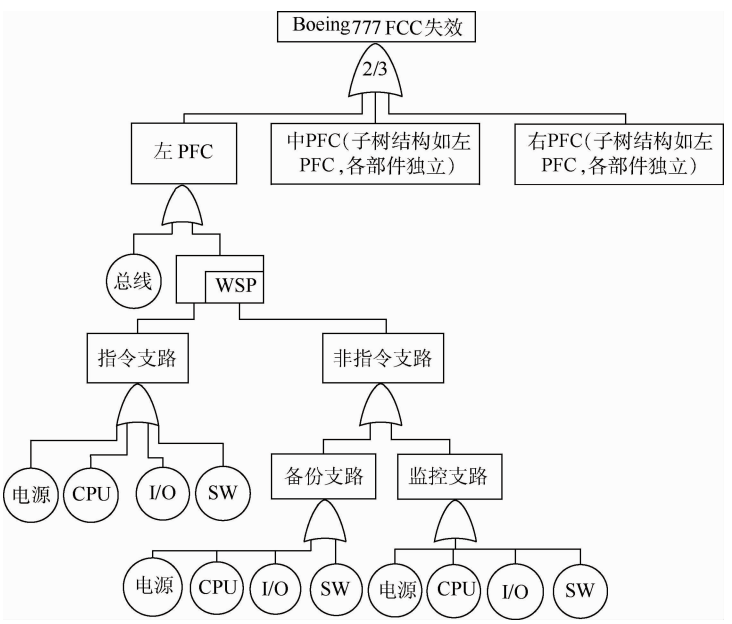


图 1　Boeing 777 飞行控制计算机体系结构

2) 空客类型. 以 A320 为例,FCC 分控制功能配置,包括 2 个升降舵副翼计算机(ELAC,Elevator Aileron Computer),3 个扰流片升降舵计算机(SEC,Spoiler Elevator Computer),两者组成主操纵系统,2 个飞行增稳计算机. 不同控制功能中,系统通过非相似余度提高可靠性,其重置策略若以俯仰控制为例,当 ELAC2 或者相关液压系统或传动装置失效时,系统自动切换至 ELAC1,相关液压或传动装置也被切换;如果 ELAC1 失效,再依次切换至 SEC1 和 SEC2[4,6].

可见,2 种类型都有较为复杂的余度管理机制,然而 A320 的 FCC 对控制功能有一定的权限限制,在此,本文采用较为通用的 Boeing 777 的 FCC 体系结构作为研究对象.

根据图 1 的 FCC 结构,建立其相应故障树[5]模型(图 2).



2/3—2/3 表决逻辑[7];□—顶事件或中间事件;△—"或"逻辑;□—贮备门;WSP—温贮备;○—底事件,表示"基本部件故障".

图 2　Boeing 777 控制体系结构故障树

2 基于代数模型的 DFT 分析方法

本节对基于代数模型的 DFT 分析方法进行研究.

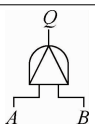
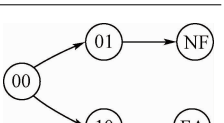
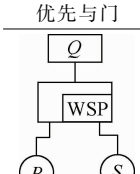
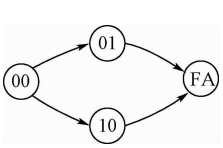
2.1 方法概述

DFT 分析主要建立在对各动态逻辑建模基础上. 对备份逻辑尤其是温备份(WSP, Warm Spare)建模是该类分析的关键问题,很多文献也对此作了充分的研究:文献[8]提出了针对失效率恒定、维修率不定 WSP 的基于 Markov 过程补充变量法;文献[9]在统计数据不完全情况下,通过一致渐近正态估计,实现对失效率和维修率的统计推断;文献[10]对具有 1-out-of-N、相似余度、失效率定常、不可修特性的 WSP 系统,利用概率论得到可靠性模型;文献[11]运用 Markov 模型分析一个 k-out of-$M+N$:G 可修系统(失效率和维修率恒定)的可靠性;文献[12]通过计数过程法对具有非相似部件、混合余度、备件共享以及开关失效特征的复杂系统进行可靠性建模;从优先与门开始,在文献[13 – 15]中,G. Merle 等进行了适用于所有故障-时间分布类型的 DFT 代数模型(AM, Algebraic Model)研究,如优先与门、功能依赖门、诸贮备逻辑门、动态子树和重复事件等.

综上,针对含较多独立子系统的 FCC 系统,相对 Markov 和计数过程法,AM 方法更为精练,且和静态逻辑建模的衔接更紧密,并可将静态分析中的重要度分析移植到 DFT 分析中. 故本文采用基于 AM 的 DFT 分析,通过分析失效概率得到定量的 WSP 可靠性分析工具,实现对 FCC 的可靠性分析. 将 AM 和 Markov 方法进行比较,前者在解析表达形式和可靠性指标求解方面更为简练.

AM 在 DFT 分析中的有效应用主要归功于 G. Merle 将时间算子(TO, Temporal Operators)引入 AM 中[15]. 该类算子可将 DFT 中典型的逻辑门描述成精练的代数逻辑形式,见表 1.

表 1 典型 DFT 门代数逻辑形式

逻辑标记	代数表达式	状态转移表达形式
 优先与门	$Q = B \cdot (A \lhd B)$	
 温贮备门	$Q = P \cdot (S_d \lhd P) + S_a \cdot (P \lhd S_a)$	

文献[16]已经通过该方法对冷贮备门(CSP, Cold Spare)和热贮备门(HSP, Hot Spare)的可靠性分析进行了详细的阐述,2.2 节将对 WSP 作相应的定性和定量分析.

2.2 针对温贮备门的代数演绎

2.2.1 定性分析和概率模型的建立

WSP 的结构函数为

$$E_T = B_a \cdot (A \lhd B_a) + A \cdot (B_d \lhd A) \tag{1}$$

其中,E_T 为顶事件发生的逻辑变量;A 为主件失效;B_a 为配件在激活/工作(active)状态下的失效;B_d 为配件处于休眠(dormant)状态下的失效. 将式(1)进行定量处理,得

$$P_{E_T}(t) = F_S(t) = P_{B_a \cdot (A \lhd B_a)}(t) + P_{A \cdot (B_d \lhd A)}(t) \tag{2}$$

其中,P 为以下标为名称的事件的发生概率;F_S 为系统失效分布. 且式(1)无需不交化,因为 $B_a \cdot (A \lhd B_a)$ 和 $A \cdot (B_d \lhd A)$ 的交集为∅.

2.2.2 定量分析

本文采用文献[10]的方法获得双输入 WSP 失效分布函数,该方法建立在主、备件失效的相对顺序(图 3)基础上,但其对象是相似余度系统,现结合文献[14]将该法运用到非相似余度情况中.

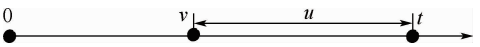


图 3 故障发生时刻图

图 3 中,在 0 ~ t 时刻内,第 1 个故障(主件工作失效或备件休眠状态失效)出现在时刻 v;第 2 个故障为系统故障(备件工作失效或主件工作失效),它出现在时刻 u,该时刻在[v, t]范围内随机分布. 根据表 1 和式(2),可得在时间区间[0, t]的系统失效分布函数为

$$F_S(t) = \int_0^t f_A(v) R_{B_d}(v) \left[\int_v^t f_{B_a}(u - v)\,\mathrm{d}u \right] \mathrm{d}v + \int_0^t f_A(u) \left[\int_0^u f_{B_d}(v)\,\mathrm{d}v \right] \mathrm{d}u \tag{3}$$

为描述非相似余度,式(3)将文献[10]中式(4)的工作状态失效概率密度 f_0 进行了细化:f_{B_a} 为备件工作状态失效概率密度;f_A 为主件工作状态失效概率密度;f_{B_d}, R_{B_d}, R_A 分别为备件休眠状态失效概率密度、备件休眠状态可靠度以及主件工作状态可靠度. 式(3)可进一步写为

$$F_S(t) = \int_0^t f_A(v) R_{B_d}(v) F_{B_a}(t - v)\,\mathrm{d}v + \int_0^t f_A(u) F_{B_d}(u)\,\mathrm{d}u \tag{4}$$

式(4)的 2 个积分项中:第 1 项为由于事件 $B_a \cdot (A \lhd B_a)$ 而导致的系统失效分布函数

$P_{B_a\cdot(A\lhd B_a)}$;第 2 项为由于事件 $A\cdot(B_d\lhd A)$ 而导致的系统失效分布函数 $P_{A\cdot(B_d\lhd A)}$. 假设主、备件可靠度符合:

$R_A(t)=e^{-\lambda_A t}\quad R_{B_d}(t)=e^{-\lambda_{B_d} t}\quad R_{B_a}(t)=e^{-\lambda_{B_a} t}$

其中 λ 表示以相应下标为名称的事件的失效率[7]. 代入式(4),得

$$F_S(t)=1-e^{-\lambda_A t}-\frac{\lambda_A}{\lambda_A+\lambda_{B_d}-\lambda_{B_a}}\left[e^{-\lambda_{B_a} t}-e^{-(\lambda_A+\lambda_{B_d})t}\right] \tag{5}$$

3　基于 AM 的 FCC 可靠性分析

FCC 系统分为 4 个部分:电源,CPU,I/O 和软件.

3.1　代数模型法定量分析

假设图 2 中各底事件相关部件寿命服从指数分布,其失效率见表 2.

表 2　底事件相关部件失效率

部件名称	失效率
电源	λ_P
中央处理器	λ_{CPU}
输入/输出模块	$\lambda_{I/O}$
软件	λ_{SW}

由于 3 条支路中电源和 I/O 为同分布独立部件,CPU 和软件为不同分布独立部件. 因此指令支路、备份支路和监控支路的失效分布函数分别为

$$\left.\begin{aligned}F_C(t)&=1-e^{-(\lambda_P+\lambda_{CPU1}+\lambda_{I/O}+\lambda_{SW1})\cdot t}=1-e^{-\lambda_C\cdot t}\\F_{BK}(t)&=1-e^{-(\lambda_P+\lambda_{CPU2}+\lambda_{I/O}+\lambda_{SW2})\cdot t}=1-e^{-\lambda_{BK}\cdot t}\\F_M(t)&=1-e^{-(\lambda_P+\lambda_{CPU2}+\lambda_{I/O}+\lambda_{SW2})\cdot t}=1-e^{-\lambda_M\cdot t}\end{aligned}\right\} \tag{6}$$

指令支路单独构成主支路,备份支路和监控支路通过与逻辑构成备用支路,其失效分布为

$$F_{SPARE}(t)=F_{BK}(t)+F_M(t)-F_{BK}(t)\cdot F_M(t) \tag{7}$$

将式(6)代入式(7),得

$$F_{SPARE}(t)=1-e^{-(\lambda_{BK}+\lambda_M)\cdot t}=1-e^{-\lambda_{SPARE} t} \tag{8}$$

根据式(5),得到 WSP 组件的失效分布函数:

$$F_{WSP}(t)=1-e^{-\lambda_C t}-\frac{\lambda_C\left[e^{-\lambda_{SPARE} t}-e^{-(\lambda_C+\mu)t}\right]}{\lambda_C+\mu-\lambda_{SPARE}} \tag{9}$$

因图 2 中“总线”指左、中、右 PFC 的同型(同分布)独立指令支路,故总线失效分布函数为

$$F_{BUS}(t)=1-e^{-\lambda_{BUS} t}$$

将式(9)代入得到单个通道 FCC 的失效分布函数:

$$F_{L\text{-}PFC}(t)=F_{C\text{-}PFC}(t)=F_{R\text{-}PFC}(t)=F_{PFC}(t)=F_{WSP}(t)+F_{BUS}(t)+F_{WSP}(t)\cdot F_{BUS}(t)$$

其中,$F_{L\text{-}PFC}$,$F_{C\text{-}PFC}$ 和 $F_{R\text{-}PFC}$ 分别指左、中和右 3 个通道的主飞行控制计算机的失效分布,由于相同,则采用 $F_{PFC}(t)$ 表示任意通道计算机失效分布. 通过表决逻辑,整个的 FCC 系统失效分布为

$$F_{FCC}(t)=3F_{PFC}^3-2F_{PFC}^2 \tag{10}$$

3.2　Markov 方法定量分析

Markov 方法是一个经典的动态系统(包括 DFT)可靠性分析工具. 图 2 中故障树的动态系统主要表现为以备份支路和监控支路组成的 WSP 为代表的独立子树,故可借 Markov 法对其进行定量分析. 由图 2 得 WSP 逻辑对应的 Markov 链如图 4 所示.

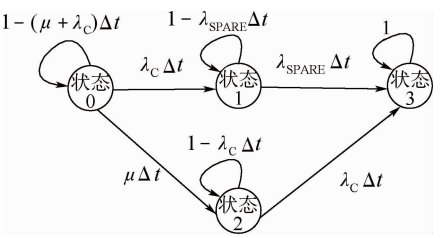


图 4　WSP 对应的 Markov 链

由图 4 可知,WSP 包含 4 个状态:{0,1,2,3}. 其中状态 0,1,2 为系统正常,分别表示主备件正常、主件失效且备件正常、备件休眠期间失效且主件正常,状态 3 为系统失效. 根据文献[5,7]可得,WSP 定量分析的求解目标为顶事件(系统)的概率分布函数,即状态概率向量

$$\boldsymbol{P}(t)=(P_0(t),P_1(t),P_2(t),P_3(t))$$

中的 $P_3(t)$(状态 3 对应分布函数),该值可以通过求解如下线性微分方程组[7]获得.

$$\left.\begin{aligned}\boldsymbol{P}'(t)&=\boldsymbol{P}(t)\boldsymbol{A}\\\boldsymbol{P}(0)&=(1,0,0,0)\end{aligned}\right\} \tag{11}$$

其中,矩阵 $\boldsymbol{A}$ 为系统的转移率(transition rate)矩阵.

将图 4 中条件转移概率转化为 $\boldsymbol{A}$ 得

$$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix}-(\lambda_C+\mu) & \lambda_C & \mu & 0\\0 & -\lambda_{SPARE} & 0 & \lambda_{SPARE}\\0 & 0 & -\lambda_C & \lambda_C\\0 & 0 & 0 & 0\end{bmatrix}$$

由此,方程组转化为

$$P_0'(t) = -(\lambda_C + \mu)P_0(t)$$
$$P_1'(t) = \lambda_C P_0(t) - \lambda_{SPARE} P_1(t)$$
$$P_2'(t) = \mu P_0(t) - \lambda_C P_2(t)$$
$$P_3'(t) = \lambda_{SPARE} P_1(t) + \lambda_C P_2(t)$$

求解前 3 个状态的状态概率得

$$P_0(t) = e^{-(\lambda_C+\mu)t}$$
$$P_1(t) = \frac{\lambda_C(e^{-\lambda_{SPARE}t} - e^{-(\lambda_C+\mu)t})}{\lambda_C - \lambda_{SPARE} + \mu}$$
$$P_2(t) = e^{-\lambda_C t} - e^{-(\lambda_C+\mu)t}$$

状态 3 概率对时间变量 t 求导数得

$$\frac{dP_3(t)}{dt} = \lambda_{SPARE}\frac{\lambda_C(e^{-\lambda_{SPARE}t} - e^{-(\lambda_C+\mu)t})}{\lambda_C - \lambda_{SPARE} + \mu} + \lambda_C(e^{-\lambda_C t} - e^{-(\lambda_C+\mu)t})$$

根据初始条件 $P_3(0)=0$,得

$$P_3(t) = 1 - e^{-\lambda_C t} - \frac{\lambda_C}{\lambda_C - \lambda_{SPARE} + \mu}e^{-\lambda_{SPARE}t} + \frac{\lambda_{SPARE}\lambda_C}{(\lambda_C - \lambda_{SPARE} + \mu)(\lambda_C + \mu)}e^{-(\lambda_C+\mu)t} + \frac{\lambda_C(\lambda_C - \lambda_{SPARE} + \mu)}{(\lambda_C - \lambda_{SPARE} + \mu)(\lambda_C + \mu)}e^{-(\lambda_C+\mu)t}$$

进一步化简得

$$P_3(t) = 1 - e^{-\lambda_C t} - \frac{\lambda_C}{\lambda_C + \mu - \lambda_{SPARE}}[e^{-\lambda_{SPARE}t} - e^{-(\lambda_C+\mu)t}] \quad (12)$$

式(9)和式(12)结果相同.

3.3 方法比较

3.1 节和 3.2 节分别采用了 AM 法和时间齐次的 Markov 方法对一个典型 FCC 系统进行了可靠性建模和分析,现就 2 个方法和传统方法的特点作出比较(如表 3),可以得到如下结论:

1) AM 法较之时间齐次 Markov 方法,适合于各种寿命分布类型;

2) AM 方法的定性分析建立在对系统故障相关最小割集正则结构函数的基础上,而 Markov 方法需枚举系统全状态转换过程,前者在定性分析系统故障原因方面更为简练;

3) 在获取系统的失效分布函数方面,AM 方法更为直接,且更易于进行底事件重要度分析,Markov 方法需要通过计算系统状态概率向量提取出系统失效分布,较难进行重要度分析;

4) 由于 AM 法的相关自动化分析工具相对于 Markov 方法的相关工具仍不完善,需要将包括最小割序列求取以及结构函数不交化方法在处理动态逻辑方面进行改进,开发基于 AM 的动态故障树自动化工具,提升 AM 法效能.

表 3 AM 方法和 Markov 方法的比较

待比较特性	系统可靠性分析方法		
	传统 AM	引入 TO 的 AM	时间齐次 Markov
适用故障树种类	只能对静态故障树进行分析[11]	对静、动态故障树均可进行分析	对动、静态故障树均可进行分析
不同分布适应性	适应所有寿命分布类型	适应所有寿命分布类型	仅适应指数分布类型寿命分布
定性分析	由最小割正则式组成结构函数	由最小割集正则表达式[13]组成结构函数	须通过求 2^n 次系统状态值,并结合状态转移方向组成 Markov 状态转移图
定量分析	可获得系统失效分布以及底事件的各重要度	可获得系统失效分布,以及底事件各重要度	可获得系统状态分布和失效分布,不易获得事件重要度
自动化工具适应性	基于二值决策图方法进行自动化分析[17-18]	自动化工具待开发	自动化工具较成熟[18]

4 结束语

本文通过代数模型方法,对典型的 WSP 双输入系统进行了可靠性的建模与分析,并将其应用于典型 FCC 系统的可靠性评估中.将该方法和较为经典的 Markov 方法进行比较,可以看出该方法最大的优势在于不局限于系统所含部件的寿命分布类型,且容易通过其结构函数进行诸如重要度分析等一系列的定量处理.然而,由于该方法的相应自动化分析工具尚未开发,因此在处理大规模动态故障模型方面的能力有待提高.

参考文献(References)

[1] Yao Yiping, Cheng Minghua. The application on dynamic fault tree analysis for dissimilar fault-tolerant flight control system [C]//Proceedings of AIAA/IEEE Digital Avionics Systems Conference. Piscataway, NJ: IEEE, 1999, 1: 3. B. 1-1 - 3. B. 1-6

[2] 韩炜,臧红伟,谢克嘉,等.四余度容错计算机系统结构及其可靠性分析[J].计算机工程与科学,2003,25(1):98 - 100
Han Wei, Zang Hongwei, Xie Kejia, et al. Quad-redundant fault tolerant computer architecture and reliability analysis[J]. Computer Engineering and Science, 2003, 25(1): 98 - 100(in Chinese)

[3] 秦旭东,陈宗基.基于 Petri 网的非相似余度飞控计算机可靠性分析[J].控制与决策,2005,20(10):1173 - 1176
Qin Xudong, Chen Zongji. Reliability analysis of dissimilar redundant flight control computers based on Petri nets[J]. Control and Decision, 2005, 20(10): 1173 - 1176(in Chinese)

[4] 陈宗基,秦旭东,高金源.非相似余度飞控计算机[J].航空学报,2005,26(3):320 - 327
Chen Zongji, Qin Xudong, Gao Jinyuan. Dissimilar redundant flight control computer system[J]. Acta Aeronautica et Astronau-

tica Sinica,2005,26(3):320 – 327(in Chinese)

[5] 安金霞,朱纪洪,王国庆,等. 多余度飞控计算机系统分级组合可靠性建模方法[J]. 航空学报,2010,31(2):301 – 309
An Jinxia,Zhu Jihong,Wang Guoqing,et al. Hierarchical combination reliability modeling method for multiple redundancy flight control computer system[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica,2010,31(2):301 – 309(in Chinese)

[6] 孙岩,苏媛,洪冠新,等. 世界大型商用飞机飞控技术演变与发展分析[J]. 民用飞机设计与研究,2009(S1):92 – 96
Sun Yan,Su Yuan,Hong Guanxin,et al. An analysis to the development and evolution of airliners' flight control technology in the world[J]. Civil Aircraft Design and Research,2009(S1):92 – 96(in Chinese)

[7] 曹晋华,程侃. 可靠性数学引论[M]. 修订版. 北京:高等教育出版社,2006:43 – 243
Cao Jinhua,Cheng Kan. Introduction to the mathematics of reliability[M]. Revised ed. Bejing:Higher Education Press,2006:43 – 243(in Chinese)

[8] Kodama M,Nakamichi H,Takamatsu S. Analysis of 7 models for the 2-dissimilar-unit,warm standby,redundant system[J]. IEEE Transactions on Reliability,1976,R-25(4):273 – 279

[9] Dharmadhikari A,Gupta Y. Analysis of 1-out-of-2:G warm-standby repairable system[J]. IEEE Transactions on Reliability,1985,R-34(5):550 – 553

[10] She J,Pecht M G. Reliability of a *k*-out-of-*n* warm-standby system[J]. IEEE Transactions on Reliability,1992,41(1):72 – 75

[11] Zhang Tieling,Xie Min,Horigome M. Availability and reliability of *k*-out-of-($M+N$):G warm standby systems[J]. Reliability Engineering & System Safety,2006,91(4):381 – 387

[12] Amari S V,Dill G. A new method for reliability analysis of standby systems[C]//Annual Reliability and Maintainability Symposium. Piscataway,NJ:IEEE,2009:417 – 422

[13] Merle G,Roussel J M,Lesage J J. Algebraic determination of the structure function of dynamic fault trees[J]. Reliability Engineering & System Safety,2011,96(2):267 – 277

[14] Merle G,Roussel J M,Lesage J J,et al. Probabilistic algebraic analysis of fault trees with priority dynamic gates and repeated events[J]. IEEE Transactions on Reliability,2010,59(1):250 – 261

[15] Merle G,Roussel J M,Lesage J J,et al. Algebraic expression of the structure function of a subclass of dynamic fault trees[C]//Proceedings of the 2nd IFAC Workshop on Dependable Control of Discrete Systems. Laxenburg:International Federation of Automatic Control,2009,2(1):117 – 122

[16] 张竞凯,章卫国,刘小雄,等. 基于贮备门 DFT 的飞控系统可靠性分析方[J]. 计算机测量与控制,2013,21(1):142 – 145
Zhang Jingkai,Zhang Weiguo,Liu Xiaoxiong,et al. A method of reliability analysis based on DFTs for FCS with spare gates[J]. Computer Measurement and Control,2013,21(1):142 – 145(in Chinese)

[17] Dugan B,Sullivan K J,Coppit D. Developing a low-cost high-quality software tool for dynamic fault-tree analysis[J]. IEEE Transactions on Reliability,2000,49(1):49 – 59

[18] Ibáñez-Llano C,Rauzy A,Melénadez E,et al. A reduction approach to improve the quantification of linked fault trees through binary decision diagrams[J]. Reliability Engineering & System Safety,2010,95(12):1314 – 1323