

文章编号: 1001 - 2486(2003)04- 0102 - 05

复杂系统可靠度的 CLTM 建模与递归综合算法*

贺勇军¹, 谢红卫²

(1. 国防科技大学航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073;

2. 国防科技大学机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 针对大型复杂系统可靠度模型及其综合计算的特点, 提出了一种一体化建模方法——“复合逻辑树模型”(Composite Logic Tree Model, 简称 CLTM), 阐述了其基本思想和原则, 给出了相应的可靠度递归调度算法, 并设计实现了基于 CLTM 的可视化建模与综合计算软件。该方法与软件已成功应用于某大型航天系统分析任务。

关键词: 系统可靠性; 复合逻辑树; 递归算法; 可视化建模

中图分类号: TB114 文献标识码: A

An Integrated Modeling Method CLTM and Recursion Algorithm
for Reliability of Complex SystemsHE Yong-jun¹, XIE Hong-wei²

(1. College of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. College of Mechatronics Engineering and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: After analyzing the characteristics of the model and integrated computing for reliability of the large scale complex systems, a new model named Composite Logic Tree Model (CLTM), its concept and modeling principles are put forth. And then a recursive algorithm based on CLTM for integrated reliability computing is designed. We have developed a software that can be used to establish graphic CLTM and implement comprehensive reliability analysis through interactive visualized interface, which has been successfully applied to the mission of an aerospace system analysis.

Key words: system reliability; composite logic tree model; recursion algorithm; visualization modeling

系统可靠性直接影响着系统能否充分发挥其性能, 因此, 可靠性分析在系统的研制工作中占据重要的地位。而对复杂大系统而言, 可靠性分析任务则面临着诸多困难。在人们所关心的固有可靠性模型和任务可靠性模型中, 都需要处理由寿命分布类型的多样性和逻辑结构的复杂性所带来的问题。特别是在任务可靠性模型中, 还存在单元共用相关性和时段延续相关性等问题。因此, 复杂大系统可靠度综合计算的难度和工作量相当大, 有必要设计高效的模型和算法以及相应的计算机辅助建模与计算软件来解决这些问题。

1 复杂大系统可靠度模型及其综合计算特点分析

1.1 模型复杂性

大型复杂系统可靠性综合计算模型的复杂性, 主要体现在以下几个方面:

(1) 系统规模庞大, 设备寿命分布类型多

复杂大系统通常由多级子系统构成, 各级子系统又涉及众多的基本设备单元。此外, 各基本单元的寿命分布类型呈现出多样性的特点, 如指数分布、二项式型、威布尔分布、正态分布等等。

(2) 系统逻辑结构复杂

复杂大系统的可靠性框图模型, 由基本设备单元按照多种逻辑关系构成, 如串联、并联、串并混联、

* 收稿日期: 2003 - 03 - 10

作者简介: 贺勇军(1969—), 男, 博士生。

N 中取 R 型、多数表决系统以及网络结构(包括无向网和有向网)等。其中,网络结构是最一般的结构形式,各种典型逻辑结构都可以视为网络结构的特殊形式。

(3) 相关性的存在

复杂大系统通常需要完成多功能、多阶段的任务,不同阶段的任务一般由不同的子系统、功能单元来组合完成,因此其可靠性逻辑结构(框图)也会随着任务时间段的改变而变化。进行可靠度综合计算时,子系统或模块间不再满足通常采用的独立性条件,而是涉及功能模块间的相关性问题。这种统计相关性问题有两个方面的表现,一是单元共用相关性,即同一任务时段内,部分单元在不同功能模块中共用,表现为相应方框在可靠性框图中重复出现,造成有关模块间逻辑上的不独立,不能直接采用常规的计算公式计算;另一种是时段延续相关性,即对于多阶段任务,各单元(或模块)由于开始参与工作的时刻不同、工作时间长短不同以及连续或断续出现在各任务阶段中,造成相应的可靠性框图中部分方框重复出现在不同时间段的模块中,呈现出不同时段间的相关性。

1.2 综合计算复杂性

在独立条件下,针对单一的寿命分布和典型逻辑结构,目前已有许多成熟的可靠度计算方法^[1,2]。关于单元共用相关性和时段延续相关性问题的解决方法,可参见文献[3,4]。但如何合理调度所需算法,形成一体化的可靠度综合计算模式,仍是一个需要深入研究的问题。

复杂大系统总的可靠性(框图)模型,由大量基本设备组成并以多种典型逻辑结构重重联结而构成,因此,其可靠性综合计算具有相当的复杂性,主要几点为:

(1) 针对各种基本设备,计算可靠度和 MTBCF 等性能参数时,应忠实于原设备的真实寿命分布,不可随意进行简化,否则不能满足精度要求。

(2) 对于非常复杂的网络图,由于计算环节众多,难以直接建立可靠性计算的解析表达式。

(3) 各种典型结构都有各自的化简和计算方法,并且其效率存在差异。不同的方法也只针对某些结构有效。当系统逻辑结构复杂时,虽然可以将它统一视为网络结构,用一般的网络算法来解,但对于复杂大系统而言,将会面临以下一些问题:其一,采用通常的网络描述方法(如邻接矩阵法等等)来建立大型复杂系统可靠度求解模型,所需参数众多,浪费空间,描述过程也会非常烦琐,工作量很大;其二,算法耗时。实际上,在系统可靠性模型中,大部分模块仅由一定数量的设备以简单的串联或并联关系构成,算法原本很简捷,但若按网络计算,反而把简单的问题复杂化,极大地增加了求解的时间复杂度和空间复杂度。

(4) 由于涉及不同的寿命分布和不同的逻辑结构,用现有的方法无法统一构建复杂大系统的综合计算模型。

2 复合逻辑树建模与递归算法

根据以上分析可知,可靠度综合建模和算法必须体现“量体裁衣,分而治之”的思想,针对不同类型的问题,相应地采用最有效的解法,然后再进行综合,以达到最高的效率和精确度。由此,我们提出了这样一种模型,即基于系统可靠性框图自身逻辑关系特点,从整体到局部,按照层次化、模块化的思想,自顶向下将整个框图逐级进行模块划分,直至所有的最底层模块为服从某种寿命分布的基本设备为止,由此构成系统可靠性模型的树状表达形式,我们称此结构为复合逻辑树模型(CLTM)。基于 CLTM,能够自然地采用递归求解策略,实现整个系统可靠度的一体化综合计算。

2.1 系统可靠度的 CLTM 建模

2.1.1 基本定义

• 基本元件 —— 指系统可靠性模型框图中最基本的组成成分。这种元件服从于某一确知的寿命分布,在可靠性框图中表现为一个单独的底层方框。常见的有指数分布型设备、正态分布型设备、威布尔分布型设备等。

• 基本单元 —— 复合逻辑树中的初级组成成分,它们是由多个基本元件构成、具备典型初级逻辑结

构的设备,如 n 个相同指数设备串联(或并联)型单元、 $N+L$ 冷储备型单元等。基本单元和基本元件的可靠度均可以用一个明确的解析式给出,也可以将它们统称为基本单元。它们在复合逻辑树模型中用叶节点表示。

• 非基本单元(模块)——复合逻辑树中由多个基本单元按照各种逻辑关系(如串联、并联、网络联结、含相关性的模块等)以一层或多层方式构成的模块或系统。它们在复合逻辑树模型中用非叶节点表示。

2.1.2 建模原则

根据大量分析和实践经验,我们归纳出了 CLTM 的建模策略。主要思路是自顶而下,对于每一层次,先解耦(即解除相关性),再按常规逻辑结构进行分解。具体措施为:

(1) 初期独立化分解,先将整个模型划分为相互独立的各个部分,然后再分别对各部分进行进一步的分解。当同时含有单元共用相关性、时段延续相关性时,应先按照时段延续相关模式分解。而且,在进一步分解含相关单元的模块时,能够合并在一起的独立单元应尽可能早地合并成单一模块,以减少含相关单元模块中单元的数量,由此缓解结构分解的复杂程度。

(2) 分解遵循“关系最简原则”。对可靠性框图模型可采用灵活自然的多种逻辑分解方法,分解后的结构形式并不唯一,其复杂程度和递归求解的效率也不同。一般来说,基本的串联和并联关系最为简单;串并混联关系可以分解为多级串联和并联关系的组合;广义网络结构,可以采用通用的全概率公式的分解模式,当然,对于规模较小的单元独立的网络结构,也可以采用其他建模方式(如邻接矩阵法);对于含相关性的模块,可以依照典型的相关结构模式进行简化^[3],或者使用全概率分解模式^[4]。

当系统模型的任一分支分解到基本单元时,该分支的分解结束。当所有分支的分解过程均结束时,就形成了整个系统的可靠性复合逻辑树模型。

2.1.3 CLTM 模型特点

CLTM 建模提供了系统可靠度模型的一体化描述方法,具备多种优点。其一,层次化结构是一切系统及其模型内在的形成模式,复杂系统的可靠性模型,大都可利用复合逻辑树模型予以表达。其二,通过系统可靠性模型的分解与重构,将复杂系统问题的求解化解为多种典型结构或设备的简单问题求解,并可分别采用相应的最高效的算法。其三,树状结构适合于设计实现统一的可靠度综合算法。其四,树状结构是计算机中所用的典型数据结构,因此,CLTM 模型及其算法易于计算机的实现。

2.2 基于 CLTM 模型的递归调度综合算法

基于 CLTM,我们设计实现了可靠度综合调度的递归算法,如下所示。

```
REL_rec(Unit)
{
  if(Unit ∈ Type_BU)
    {Rel = REL_bas(Type_BU_Sp(Unit), Para(Unit)); }
  else if (Unit ∈ Type_NBU)
    {
      for(i = 1; i ≤ N; i++)
        {Rel (Unit_Ch_i) = REL_rec(Unit_Ch_i); }
      Rel = REL_bas(Type_NBU_Sp(Unit), Para(Unit), Rel(Unit_Ch_1),
                    Rel(Unit_Ch_2), ..., Rel(Unit_Ch_N));
    }
  return(Rel);
}
```

其中:

∈ 类型归属关系符

Unit	待计算单元
Rel	单元可靠度计算值
REL_rec()	单元可靠度递归算法
REL_bas()	基本单元或非基本单元可靠度计算函数
Unit_Ch_i	Unit 的第 i 个子单元
Rel(Unit)	Unit 单元的可靠度
N	Unit 的子单元数
Type_BU	基本单元类型
Type_BU_Sp	基本单元具体类型
Type_NBU	非基本单元类型
Type_NBU_Sp	非基本单元具体类型
Para(Unit)	Unit 单元分布参数或结构描述参数集合

算法的基本思想为, 任一单元(整个系统也被视为单元)的可靠度取决于其数个直接子单元的可靠度和子单元间的逻辑关系。计算其可靠度时, 则按照单元的 CLTM 模型自顶而下逐层递推并回溯予以求解。

此算法对层次的数量和各层次中单元的类型及数量没有任何限制, 而且系统中任一层次的任一单元的可靠度均可采用此通用算法进行计算。实现递归算法的前提是建立可靠性算法模型库, 其中包含两类模型: 一是基本单元的可靠度计算模型, 它根据单元的寿命分布参数以及基本结构参数直接进行计算; 二是非基本单元的可靠度计算模型, 如串(并)联、邻接矩阵模式的网络、全概率分解、时段延续等逻辑结构的可靠度综合算法, 并可根据需要不断丰富基本算法库。

3 基于 CLTM 的复杂系统可靠度求解实例

CLTM 建模及其递归算法虽然在方法上解决了复杂系统可靠度的综合求解问题, 但对于复杂大系统, 没有计算机支持的建模与求解任务, 其繁琐程度是可想而知的。为此, 我们采用面向对象的思想和方法, 以及可视化建模技术、对象动态生成技术和组件集成技术等, 设计实现了复杂系统的 CLTM 可视化建模与综合计算软件, 使系统可靠性分析人员能够便捷可靠地完成相应任务。下面通过一个小规模复杂系统的典型实例来对系统可靠度建模与求解过程加以阐述。

3.1 实例描述

实例 system 为时变结构系统, 其可靠性框图见图 1。其中, 基本单元 D 在 $(t_0 \sim t_1)$ 和 $(t_1 \sim t_2)$ 两个时段内工作, 使得系统内含时段延续相关性; 而 B 则为共用相关性单元; F、G、H、I、J 五个单元构成网络结构。由此可见, 该系统已具备了复杂系统可靠性模型的典型特征。

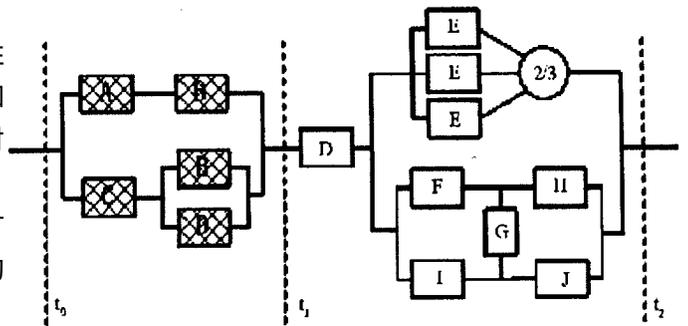


图 1 复杂系统可靠性框图典型实例

Fig. 1 A example of reliability model of complex systems

3.2 系统的 CLTM 分解

系统的可靠性模型可采用多种灵活的分解方法, 分解结果并不惟一。根据前文所述原则, 可采用以下分解过程(最终分解形

成的 CLTM 如图 2 所示): 首先是解决时段延续相关成分, 方法是, 提取 $D(t_1 \sim t_2)$, 将系统按照全概率公式求解模式进行分解。系统模型在 $D(t_1 \sim t_2)$ 成功的条件下为 M1, 失败条件下为 M2, 由图 1 可知, M2 实际上已失效。继续将 M1 分解为 M3 和 M4 这两个串联模块, 此时, M3 即为 $t_0 \sim t_1$ 时段的系统结构, M4 为 $t_1 \sim t_2$ 时段剔除 $D(t_1 \sim t_2)$ 后的系统结构。对于 M3, 首先提取 B, 按照全概率求解模式分解, 以消除单元

共用相关性。余下的部分，各单元均相互独立，分解过程已很清晰，不再赘述。其中，M8 为简单网络结构系统，可以直接调用相应的算法求解，不必再分解。若 M8 仍为含相关性的模块，可以继续采用全概率分解等去相关性的方法进行分解。

3.3 CLTM 的可视交互图形对象建模与综合计算软件提供了丰富的可视化控件及功能组件，使用户能够以可视化的动态交互方式直观、灵活地进行各种复杂系统的 CLTM 建模。系统分析人员所需完成的工作，仅是通过软件建立待求解系统(system)的 CLTM 视图(模型外部表达)，并设置其中各单元的结构或寿命分布参数，而软件自动生成与其相一致的底层动态数据结构(模型内部表示)。其中，视图有多种表达方式，譬如层次化目录型结构或图 2 所示的树形结构，可根据习惯加以选择。

建立该系统的 CLTM 模型之后，其他的计算分析以及结果报告任务就可交由软件自动完成。可以选择视图中任一单元，如整个系统 system，或其中间单元(如 M3)，或是最底层的基本单元(如 H)，求解其可靠性。计算分析内容则取决于所建模型，若为固有可靠度模型，则能够计算任意时刻或任意时段中的瞬时 $R(t)$ 和该单元的 MTBCF；若为任务可靠度模型，则计算其任务可靠度 R 。由此，能够对系统可靠性进行多层次的综合分析，确定薄弱环节，为系统可靠性优化设计提供翔实的依据。

4 结论

CLTM 模型及递归综合算法提供了系统可靠度的一体化建模与求解方法，体现了“量体裁衣，分而治之”的思想，模型描述精确，算法运行高效。它所蕴含的机理不仅适用于系统可靠度综合建模与计算，而且对于诸如 FTA、FMEA 和 FMECA 等任务，均可建立相应的 CLTM 模型及其算法。软件的设计实现及其在某大型航天系统可靠性综合分析任务中的成功应用，验证了其有效性。

参考文献:

- [1] 曹晋华,程侃. 可靠性数学引论[M]. 北京: 科学出版社, 1986.
- [2] 梅启智,等. 系统可靠性工程基础[M]. 北京: 科学出版社, 1987.
- [3] 谢红卫, 宫二玲, 贺勇军. 时变结构多阶段任务系统的可靠度研究[J]. 国防科技大学学报, 1999, 21(5).
- [4] 贺勇军. 载人航天测控网系统可靠性综合计算[D]. 国防科技大学, 1999.
- [5] Burdick G R, et al. Phased Mission Analysis: A Review of New Developments and an Application[J]. IEEE Transaction on Reliability, 1977, 26(1):43- 49.
- [6] Esary J, Ziehms H. Reliability Analysis of Phased Missions[A]. Barlow, et al. Reliability and Fault Tree Analysis. SIAM, 1975: 213- 216.
- [7] Bavoso S J, Rothman E, et al. HiRel: Hybrid Automated Reliability Predictor(HARP)Integrated Reliability Tool System(Ver 7. 0) [R]. NTIS NO. N95- 22603/ 1/HDM, 1995.

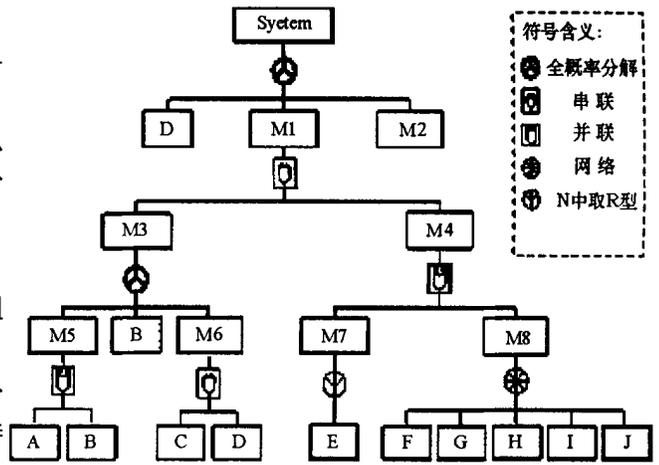


图 2 系统可靠性的复合逻辑树图形建模
Fig. 2 Modeling graphic CLTM for system reliability