文章编号: 1001-2486 (2000) 05-0098-05

基于立方体理论的 MFTA 软件设计与实现*

谢红卫, 夏家海, 张 明

(国防科技大学机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 本文报道的 MFTA(Multi- state Fault Tree Analysis)软件为可靠性工程师分析多状态系统提供一种计算机辅助分析工具。我们设计了友好的 Windows95 用户交互界面, 采用树视图组件实现逻辑树结构框架的输入, 采用字符串表格组件实现判定表的直接输入(立方体形式的 0- 1 序列), 还实现了多态单调关联典型结构函数到立方体形式判定表的转化。以标准模板库(Standard Template Library) 为基础, 采用面向对象程序设计方法构建了立方体类库; 然后, 实现了以立方体理论为核心的 MFTA 定性定量分析算法, 完成了软件的研制。

关键词: 多状态系统; 故障树分析; 立方体; 标准模板库
中图分类号: TB114.3 文献标识码: B

The Design and Implementation of Cube Theory-based MFTA Software

XIE Hong-wei, XIA Jia-hai, ZHANG Ming
(College of Mechatronics Engineering and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The MFTA software provides a computer- aided tool for the reliability engineers to analyze multi- state system. Designed on the platform of Windows 95, it has friendly interface. The software used TreeView component to input the logic tree, used StringGrid component to input the judgment table directly. What is more, it can fulfil the conversion of logic models from typical structure function to judgment table automatically. Based on Standard Template Library of C++ Builder, the library of cube class, upon which the Cube Theory- based MFTA algorithms and analysis methods are implemented, has been developed. The software can be used successfully in the multi- state system reliability analysis.

Key words: multi- state system; fault tree analysis; cube; standard template library

20 世纪 60 年代初期, 美国贝尔电话实验室的沃森(H. A. Watson) 博士等人在研制“民兵” 导弹发射控制系统时, 首先提出了故障树分析技术(Fault Tree Analysis, 简记为 FTA)。经过近 40 年的发展, 传统的二态系统 FTA 技术已经有成熟的理论基础和相应的计算机辅助分析软件, 在国防、工业等许多部门得到广泛应用, 并取得了显著效果。然而, 不能否认, 在工程实践中, 系统和元件的状态不只是单单表现为成功、失败二种状态, 往往表现为多种失效模式和多种故障程度, 在成功和失效之间往往还存在多个连续的或者离散的状态模式, 也就是说系统和元件存在固有的多态性, 这时用传统的二态系统 FTA 技术对多状态复杂系统进行可靠性分析难以令人满意。日趋复杂的工程技术系统的发展, 使多态故障树分析方法(Multi- state Fault Tree Analysis, 简记为 MFTA) 的研究及其配套软件研制成为一项紧迫的任务。

针对多状态系统故障树分析的特点, 我们已经系统研究了立方体表示方法和运算规则, 立方体表示方法实际上是把多值集合运算问题巧妙地用二值逻辑方法来解决, 并以此为核心提出了便于计算机实现的 MFTA 定性和定量算法; 同时, 针对多态系统建模的 NP 问题, 我们定义了在工程实践中有广泛应用面的三类典型多态关联系统结构函数用于逻辑建模。

对于大型复杂多状态系统, 研究系统可靠性依靠手算已不能胜任, 必须编制相应软件, 由计算机辅助进行分析。鉴于此, 我们经一年多时间研制出名为 MFTA 的软件。首先, 该软件在 Wondows95 环境下, 基于 Borland C++ Builder3. 0, 灵活运用树视图组件 TreeView 和字符串表格组件 StringGrid, 实现了多

* 收稿日期: 1999-12-11
基金项目: 国家部委基金项目资助(19. 6 2 4)
作者简介: 谢红卫(1965-), 男, 副教授。

状态系统模型——逻辑树及其逻辑算子的输入,同时实现了典型结构函数到立方体判定表的自动转化;然后编程实现了立方体运算规则的基本算法;最后编程实现了基于立方体表示方法和运算规则的 MFTA 定性和定量分析算法,研制了以立方体理论为核心的 MFTA 计算机辅助分析软件。本文介绍了 MFTA 软件,重点是立方体类库的设计与实现。

1 软件概述

我们知道,二态系统故障树是一种特殊的树状因果关系图,它用规定的事件、逻辑门和其它符号描述系统中各种事件之间的因果关系。多状态系统逻辑树与此类似,但是常用逻辑门已不能完整地描述系统中各种元件状态之间的因果关系,必须引入复杂逻辑算子(用判定表、结构函数等表示)。本软件在计算机内部统一采用立方体形式的判定表来描述因果关系,生成系统顶事件的蕴涵集时,则递归查询立方体形式的判定表,而不能像二态故障树那样简单地展开与或门。

与二态 FTA 类似,MFTA 工作步骤大体如下:

(1)定义系统;

(2)分析系统、子系统和部件之间的关系;

(3)建立逻辑树;

(4)依据所关心的系统顶事件生成派生故障树或直接由逻辑树生成蕴涵集;

(5)定性分析和定量分析。

定性分析工作包括生成多状态系统预定顶事件的派生故障树及其蕴涵集:由逻辑树及其逻辑算子,采用下行法递归生成派生故障树;实现基于立方体理论的双取补法、合取法,求取多状态系统质蕴涵集;实现基于立方体表示方法的无冗余基求取算法。定量分析(应首先输入各元件所有状态的发生概率)主要是计算多状态系统顶事件发生概率。为有效缓解 NP 问题,应实现基于早期不交化原理的立方体精确计算方法。软件流程图如图 1 所示。

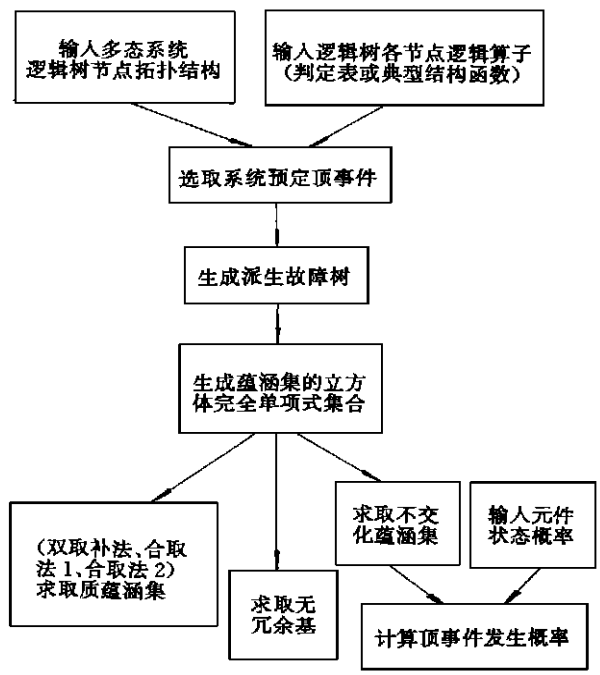

图 1 软件流程图

Fig. 1 Flow block diagram of MFTA

MFTA 软件的用户界面(如图 2 所示)是运行于 Wondows95 环境下的 C++ Builder3.0 应用程序。C++ Builder 提供了丰富的 VCL(Visual Components Library)组件,诸如菜单、按钮、文本区和对话框等,每个组件的位置和外观都能灵活地设置。属性、事件和方法构成了 VCL 中组件的公共界面(用户能看到的组件部分)。

MFTA 软件用户界面主要由三部分组成:一是菜单条,提供了文件操作、模型输入、定性分析、定量分析、结果输出和帮助信息等菜单;二是树视图组件 TreeView,用来显示、编辑逻辑树及显示故障树;三是字符串表格组件 StringGrid,用来显示、编辑逻辑算子。MFTA 软件用户界面充分利用了 C++ Builder3.0 的 VCL 及其设计风格,界面美观实用,操作方便。

2 立方体类库设计

由于逻辑算子的复杂性,MFTA 必须用多值判定表或结构函数来表示系统内的逻辑关系,后续的分析工作,如系统预定顶事件的故障树生成、蕴涵集求取等,都比较困难,所用的数据结构也非常复杂。归

纳起来,MFTA 软件的关键与难点在于:

(1) 模型输入。包括判定表的设计与输入,难点在于如何实现由 01 字符串到立方体的计算机内部表示的转化,以及由典型结构函数模型到立方体形式判定表的转化,为此需要首先生成所有最小项并计算其对应的上级系统状态,需要对所生成的立方体形式判定表作合取运算进行化简。在计算机内,模型的逻辑算子是统一用立方体形式判定表表示的。

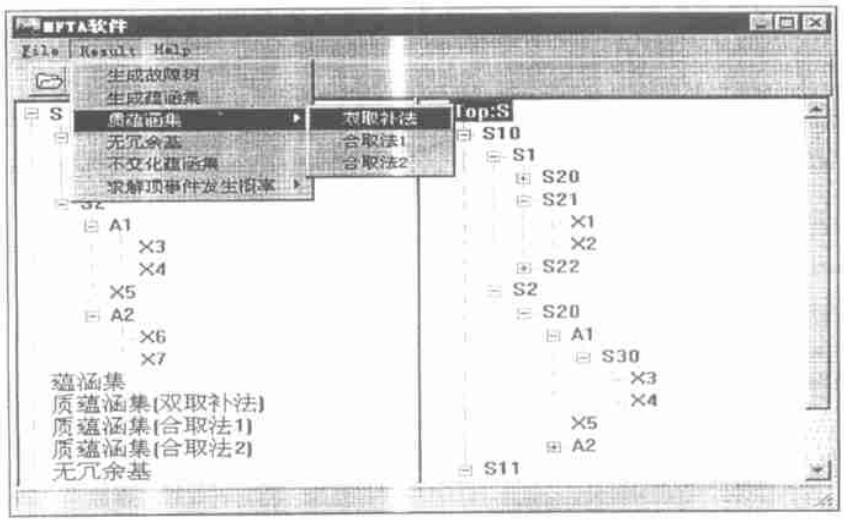

图 2 用户界面示例

Fig. 2 The interface example

(2) 派生故障树的生成。派生故障树由逻辑树用下行法递归生成,需要充分利用 TreeView 控件的属性、方法和事件,周游逻辑树并生成满足条件的派生故障树。多状态系统的逻辑算子的复杂性使得派生故障树(蕴涵集)的生成算法非常复杂。

(3) 蕴涵集的生成。蕴涵集由派生故障树递归生成,需要结合逻辑树的特点,采用广义表数据结构逐层递归展开,以便得到蕴涵集的立方体完全单项式表示。

(4) 求取质蕴涵集。质蕴涵集由蕴涵集用合取法求取,难点在于连接表的设计与实现,多重循环查询,立方体的增减等。运算量很大。

解决 MFTA 软件设计的上述难点,核心工作是立方体的计算机表示及其运算规则的计算机实现,如双取补法求质蕴涵集、合取法求质蕴涵集和化简判定表等,都必须以基本的立方体集合运算为基础。因此,立方体类库设计是 MFTA 的最关键最基础的工作。

2.1 集合的立方体表示

$C_1^0C_1^1\cdots C_1^{m_1-1}-C_2^0C_2^1\cdots C_2^{m_2-1}-\cdots-C_n^0C_n^1\cdots C_n^{m_n-1}$ 称为一个单项式的立方体表示,而 $C_i^0C_i^1\cdots C_i^{m_i-1}$ 称为立方体的坐标(即子系统 i 或元件 i 的状态子集 Si 的位域。其中,当状态 j 包含于状态子集 Si 时,$C_i^j=1$;否则,$C_i^j=0$)。每个布尔函数的完全单项式,都有唯一的立方体表示,而每个立方体表示都对应于唯一的布尔函数的完全单项式,这样就能运用立方体空间上的运算规则来解释相应的集合运算。立方体形式判定表如图 3 所示,立方体理论的详细介绍见文献[1]。

2.2 立方体表示及运算规则的计算机实现

立方体类库设计的主要内容是立方体表示及其运算规则的计算机实现。为此,我们针对立方体的特征,采用面向对象程序设计方法,利用 Borland C++ Builder 的标准模板库(STL),在包容器类 list 的基础上简单而可靠地设计实现了单项式类、立方体集合类以及辅助连接表等的表示,实现了立方体的运算规则。立方体类库中实现的立方体运算规则主要包括:

(1) 坐标运算包括坐标与、坐标或、坐标非,用位运算来实现;

例 1: 设两个立方体为 P= 011- 111- 100, Q= 110- 110- 110, 则 P 与 Q 的第一个坐标分别为 011 和 110, 它们的坐标与、坐标或分别为 010、111; 011 的坐标非为 100。

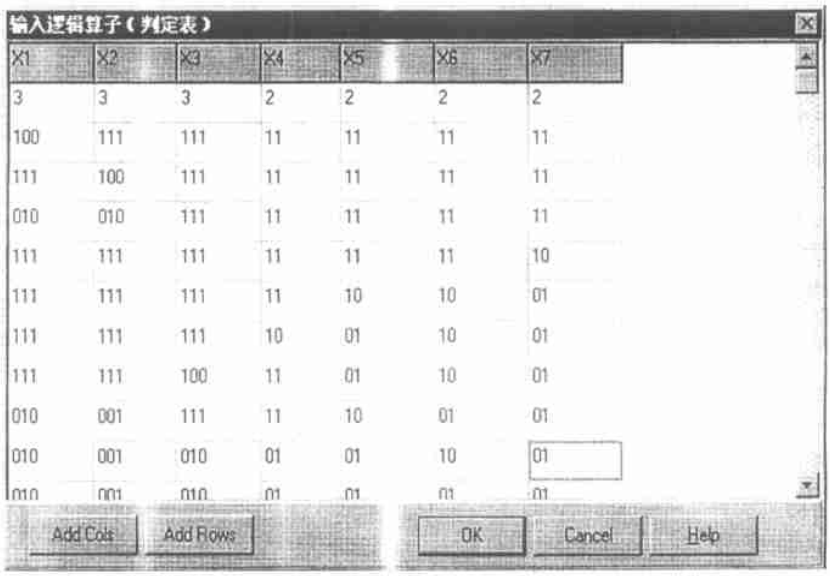

图 3 立方体形式判定表

Fig. 3 Judgment table in cube from

(2) 立方体单项式运算包括非、交、并三种基本运算以及用于 FTA 技术的距离、包含、吸收、不交化锐积、合取、锐积补(非运算的一种实现) 等运算。为此, 以 list 模板类为基础, 定义了立方体单项式类(typedef list< unsinged char> monomial), 通过计算机内的二元位运算实现了上述各类运算;

例 2: 设两个立方体为 P= 011- 111- 100, Q= 110- 110- 110, 则 P 与 Q 的立方体与运算结果为 AND (P, Q) = 010- 110- 100。

(3) 立方体单项式集合运算包括求积、求和。通过定义立方体单项式集合类(typedef list< monomial, allocator< monomial> > monoms), 并实现相应的集合运算;

(4) 辅助连接表是算法需要的辅助运算, 主要用于合取法求取质蕴涵集。它为每个立方体加上序号并建立其连接表, 对比较过的立方体用连接标记加以标注, 从而避免了可能出现的重复比较和死循环。增加、删除和查询立方体单项式的连接标记, 是合取法求取质蕴涵集的重要步骤。

立方体类库设计是 MFTA 的最关键最基础的工作。立方体类库设计在计算机内实现了立方体表示及其各类运算规则, 而立方体表示与布尔函数的完全单项式一一对应, 这样就通过立方体表示及其各类运算规则的计算机实现, 实现了相应的集合运算, 为软件各功能模块的开发奠定了基础。

3 软件主要模块功能

MFTA 软件的主要模块的功能简介如下(参见图 1)。

(1) 系统建模, 包括系统的逻辑树结构及其相应的逻辑算子。

用 C+ + Builder3.0 的树视图组件 TreeView 显示、编辑和存取逻辑树结构信息, 用字符串表格组件 StringGrid 显示、编辑逻辑算子(用判定表形式表示立方体), 为了使逻辑树与逻辑算子相关联, 将逻辑树节点(TreeNode) 的 Data 属性指向判定表指针。用 TreeView 组件 SaveToFile( )、LoadFromFile( ) 方法直接存取系统逻辑树结构文件, 为了存取各节点相关的逻辑算子, 定义了一个节点数据类(NodeData)。

实现了从典型逻辑结构函数模型到立方体形式判定表的自动转化, 这样可以使模型逻辑算子输入简单可靠, 并且大大降低了逻辑算子存储空间。

(2) 派生故障树和蕴涵集生成。

灵活运用了 TreeView 组件所封装的 Parent 属性、getFirstChild( ) 和 GetNextChild( ) 方法, 递归生成系统顶事件的蕴涵集。

(3) 求取质蕴涵集

实现了 3 种质蕴涵集求取方法, 它们是基于立方体锐积补运算的双取补法、基于立方体合取运算的合取法 1 和合取法 2。

(4) 求取无冗余基

结合求取质蕴涵集的合取算法 2, 实现了基于立方体不交化锐积运算的无冗余基求取算法。

(5) 求取不交化蕴涵集

应该指出的是, 按照一般的集合运算规则(即直接对蕴涵集求补集) 来实现多值逻辑函数蕴涵集的不交化运算是很困难的。这里, 结合不交化算法的基本思想, 我们实现了一种基于立方体不交化锐积运算求取不交化蕴涵集的算法。

(6) 计算系统顶事件发生概率

由于多状态系统元件和系统状态的多样性和复杂性, 求取顶事件发生概率的精确解时, 往往需要对蕴涵集进行不交化运算。在运用立方体不交化锐积运算求取不交化蕴涵集后, 实现了顶事件发生概率的精确计算。

4 结束语

MFTA 软件构建了立方体类库, 在此基础上, 利用 Windows95 平台编程实现了基于立方体的 MFTA 技术。MFTA 软件为可靠性工程师分析大型复杂多状态系统提供了一种有效的计算机辅助分析工具。

参考文献:

[1] 曾亮. 多状态系统可靠性建模与故障树分析方法研究[D]. 博士学位论文, 国防科技大学研究生院, 1997.

[2] 梅启智, 廖炯生, 孙惠中. 系统可靠性工程基础[M]. 北京: 科学出版社, 1987.

[3] Matt Tells. Borland C++ Builder 高级编程指南[M]. 北京: 中国水利电力出版社, 1998.