

# 模糊故障树分析方法在 HACCP 中的应用研究

王开义<sup>1,2</sup>, 赵春江<sup>2\*</sup>, 张方田<sup>2</sup>

(1. 北京工业大学计算机学院, 北京 100022; 2. 国家农业信息化工程技术研究中心, 北京 100097)

**摘要:** 危害分析与关键控制点(HACCP)是一个复杂的系统工程,对于农产品加工企业或食品企业而言,制定一个产品的 HACCP 计划有很大的难度,特别是对于关键控制点的正确选取更需要领域专家的帮助。该文介绍了故障树分析方法在 HACCP 体系第一原则和第二原则上的应用,并引入模糊数学理论中的模糊算法和非模糊化方法与故障树分析方法相结合,分别适用于计划的制定和计划的变更,并可根据该方法开发出制定计划的软件工具,使得计划的制定趋于简单化和自动化。

**关键词:** 危害分析与关键控制点(HACCP); 故障树分析; 模糊算法; 非模糊化

**中图分类号:** TP273+.4; TS201.6

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-6819(2007)5-0164-04

王开义, 赵春江, 张方田. 模糊故障树分析方法在 HACCP 中的应用研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(5): 164-167.

Wang Kaiyi, Zhao Chunjiang, Zhang Fangtian. Application of the fuzzy fault tree analysis approach to HACCP system[J].

Transactions of the CSAE, 2007, 23(5): 164-167. (in Chinese with English abstract)

## 0 引言

HACCP (Hazard Analysis and Critical Control Point) 称为“危害分析与关键控制点”。其强调的是在生产过程中通过预防使可能发生的食品安全危害降低到最低限度,而不是靠事后检验产品的安全性。采用 HACCP 原理预防农产食品的不安全危害,已成为农产品生产加工企业全过程质量安全控制技术发展的新趋势<sup>[1]</sup>。目前的农产品生产加工企业绝大多数是中小型企业,而这些农产品加工企业在实施 HACCP 过程中无一例外地面临着技术、人才、资金等方面的困难<sup>[2]</sup>,因为 HACCP 管理体系涉及到食品工艺学、微生物学、化学和物理学、质量控制和危险性评估等多方面的专业知识<sup>[3]</sup>。

国内外很多研究人员一直致力于研究简单化、自动化、智能化的 HACCP 实施方法与工具<sup>[4-6]</sup>。这些研究成果多数针对某一个特定的产品(如:鱼罐头等),通过对多个企业实施 HACCP 的大量实践数据进行危害分析,挖掘危害分析及关键控制点的规律,进而为新实施该产品 HACCP 体系的企业提供技术支持。但是,目前应用效果还不能满足实际需求,现实中人们还是采用传

统的方法,借鉴专家的经验并结合企业的实际情况来实施 HACCP。

本研究结合近些年来开发农业企业 HACCP 管理软件的工程实践,探索利用故障树理论、模糊数学理论来降低 HACCP 实施难度的方法。分别针对初次实施 HACCP 和基于原有 HACCP 基础上的变更这两种实际需求,介绍了两种方法:(1)初次实施 HACCP 的企业没有原始数据积累和相关工作经验,采用模糊故障树分析方法实施 HACCP;(2)而 HACCP 的变更可以充分利用原有 HACCP 系统运行中积累的大量数据,采用非模糊化(也称去模糊化)故障树分析方法。

## 1 模糊故障树分析方法

### 1.1 故障树分析方法

故障树分析(Fault Tree Analysis, FTA)是在复杂系统设计过程中通过对可能造成系统失效的各种因素(包括硬件、软件、环境、人为因素)进行分析,画出逻辑框图(失效树),从而确定系统失效原因的各种可能组合方式或其发生概率,以计算系统失效概率,并采取相应的纠正措施,来提高系统可靠性的一种设计分析方法。故障树分析把系统最不希望发生的故障状态作为逻辑分析的目标,在故障树中称为顶事件,继而找出导致这一故障状态发生的所有可能直接原因,在故障树中称为中间事件。再跟踪找出导致这些中间故障事件发生的所有可能直接原因。一直追寻到引起中间事件发生的全部部件状态,在故障树中称为底事件。用相应的代表符号及逻辑符号把顶事件、中间事件、底事件连接成树形逻辑图,则称此树型逻辑图为故障树。故障树分析方法

收稿日期: 2006-12-31 修订日期: 2007-04-17

基金项目: 科技部科技支撑计划项目(2006BAD10A04)

作者简介: 王开义(1974—),男,博士生,主要从事农业信息化技术研究。北京 北京 2449 信箱 26 分箱,100097。

Email: wangky@nercita.org.cn

\*通讯作者: 赵春江,男,研究员,博士,博士生导师,主任,主要从事农业信息化研究。北京 北京 2449 信箱 26 分箱,100097。

Email: zhaocj@nercita.org.cn

在机械、航天、核能等领域被广泛应用。

## 1.2 模糊故障树分析方法

传统的故障树分析是以布尔代数为基础的, 把事件发生的概率处理成一精确值。事实上, 由于环境的模糊性以及数据的不精确, 都会影响事件发生的概率, 因此难以用一精确值来表示事件发生的概率。而且概率值的获取需要大量的统计数据, 但是在一些故障发生频率很低的场合, 特别是一个从未实施过 HACCP 的企业, 要想获得大量的统计数据是不可能的, 这就为确定事件发生的概率值带来了极大的困难。传统的故障树分析, 在事件发生的概率值不精确时, 是无能为力的。将模糊集合理论引入到故障树分析中, 以模糊数(模糊数是由实正规凸隶属函数所描述的<sup>[7]</sup>)表示事件发生的概率, 故障树则成为模糊故障树, 可以较好地解决这一问题。20 世纪 80 年代中期开始, 国外开始进行模糊故障树分析方法的研究, 建立了模糊故障树分析的基本概念和方法<sup>[8]</sup>。本项研究从实际应用与软件开发的角度出发, 详细地研究了 HACCP 体系中的故障树模糊分析问题, 提出了两种适用范围广、工程性强的故障树分析方法, 即模糊故障树分析方法和非模糊化故障树分析方法。

### 1.2.1 故障树分析的模糊算子

在实数域上定义一个正规的凸模糊集作为模糊数, 记为  $\tilde{I}$ 。现设  $\tilde{I}$  和  $\tilde{J}$  分别为  $R$  实论域  $X$  和  $Y$  实轴上的两个模糊数, 符号  $*$  表示模糊数的二元运算, 即  $*$  =  $\{+, -, \times, \div\}$ , 两个模糊数的二元运算记做  $\tilde{I} * \tilde{J}$ , 定义在  $R$  域上, 根据扩张原理, 知其隶属函数为<sup>[4]</sup>

$$\mu_{\tilde{I} * \tilde{J}}(z) = \bigvee_{x \circ y = z} (\mu_{\tilde{I}}(x) \wedge \mu_{\tilde{J}}(y)) \quad (1)$$

式中  $\mu_{\tilde{I}}$  —— 模糊集  $\tilde{I}$  的隶属函数;  $\mu_{\tilde{J}}$  —— 模糊集  $\tilde{J}$  的隶属函数。

由于两个模糊数二元运算的结果仍然是模糊数, 故由该公式可得出另一个模糊数。

模糊故障树分析的常用方法是以式(1)为基础, 推导出相应的模糊算子<sup>[9]</sup>(与门模糊算子、或门模糊算子等), 然后用传统故障树定量分析的方法得到顶事件发生的模糊数。当给定阈值  $\lambda$  时, 就可获得顶事件发生的一可信区间。

与门模糊算子可记为

$$\tilde{P}_{AND} = \bigcap_{i=1}^n p_i = (P_{AND}^{\alpha}, P_{AND}, P_{AND}^{\beta}) \quad (2)$$

式中  $p_i$  —— 事件  $i$  发生的概率, 为一精确值;  $\bigcap$  —— 模糊乘法运算。

为计算方便模糊数  $\tilde{p}_i$  可记为  $\tilde{p}_i = (m_i - \alpha_i, m_i, m_i + \beta_i)$

其中,  $m_i$  为模糊属  $\tilde{p}_i$  的均值, 为实数。 $\alpha_i$ 、 $\beta_i$  为均值  $m_i$  的左、右扩展。

$P_{AND}^{\alpha}, P_{AND}, P_{AND}^{\beta}$  可表示为

$$P_{AND}^{\alpha} = \prod_{i=1}^n (m_i - \alpha_i) \quad (3)$$

$$P_{AND} = \prod_{i=1}^n m_i \quad (4)$$

$$P_{AND}^{\beta} = \prod_{i=1}^n (m_i + \beta_i) \quad (5)$$

同理或门模糊算子记为

$$P_{OR}^{\alpha} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - (m_i - \alpha_i)) \quad (6)$$

$$P_{OR} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - m_i) \quad (7)$$

$$P_{OR}^{\beta} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - (m_i + \beta_i)) \quad (8)$$

### 1.2.2 一个 HACCP 故障树的模糊分析方法举例

本文以某全脂巴氏杀菌乳产品生产企业实施 HACCP 过程中一个故障子树为例, 来验证模糊故障树分析方法在 HACCP 中的应用, 该子树为全脂巴氏杀菌乳生产过程中 CIP (Cleaning in Place) 系统的故障子树, 如图 1 所示。CIP 是利用大流量泵, 泵以冷热水及酸碱进行强烈循环, 或由特殊的喷淋冲刷装置使洗液高速均匀地喷淋或冲刷被清洗物表面, 使之达到物理、化学和微生物学的清洗。CIP 系统的故障子树的底事件名称、事件发生概率的均值  $m_i$  及计算的  $\alpha_i$  及  $\beta_i$  值列于表 1 中。

假定各基本事件相互独立, 由图 1 知顶事件可表示为:  $T1 = A + B + C$ , 式中  $A = 1 + D + 4$ ,  $D = 2 \times 3$ ,  $B = 5 + 6 + 7$ ,  $C = 8 + 9 + 10$ 。当各事件的概率值用模糊数表示时, 有

$$\tilde{p}_A = \tilde{p}_1 \oplus \tilde{p}_D \oplus \tilde{p}_4; \tilde{p}_B = \tilde{p}_5 \oplus \tilde{p}_6 \oplus \tilde{p}_7;$$

$$\tilde{p}_C = \tilde{p}_8 \oplus \tilde{p}_9 \oplus \tilde{p}_{10}; \tilde{p}_D = \tilde{p}_2 \oplus \tilde{p}_3;$$

$$\tilde{p}_{T1} = \tilde{p}_A \oplus \tilde{p}_B \oplus \tilde{p}_C。$$

根据本文介绍的与门模糊算子计算方法, 可求得  $\tilde{p}_D = (0.001427, 0.0016, 0.001783)$ ; 根据本文介绍的或门模糊算子计算方法, 可求得  $\tilde{p}_A = (0.970458, 0.968648, 0.966826)$ ,  $\tilde{p}_B = (0.005847, 0.006190, 0.006534)$ ,  $\tilde{p}_C = (0.037334, 0.039502, 0.041667)$ 。故顶事件发生的模糊概率为:  $\tilde{p}_{T1} = (0.07123, 0.07537, 0.07951)$ 。

当各事件的概率值用精确值表示时可认为取  $\alpha_i = \beta_i = 0$ , 得顶事件发生的概率为  $P_{T1} = 0.07537$ 。按本文介绍的故障树模糊算子计算方法, 所得顶事件发生的概

率为一模糊数。取不同的置信水平  $\lambda$ , 可得不同的置信区间, 若取  $\lambda = 1$ , 则顶事件发生的概率为 0.07537。由此看出, 传统的故障树分析可视为模糊故障树分析的特例。而模糊故障树分析方法可解决传统故障树分析无法解决的基本事件难以精确赋值问题, 因此模糊故障树分析具有更广的适用范围。在可靠性工程上, 有时需估计系统发生故障的概率, 而并非一定要用精确值表示故障发生的概率, 这时用模糊故障树对系统进行分析就显得极为重要。

模糊故障树分析方法中的与门和或门逻辑运算如果采用 C、Java 等语言实现起来有些难度, 建议采用 Matlab 作为编程工具, Matlab 尤其擅长工程计算和数值分析, 然后将 Matlab 开发的功能组件作为数据引擎被 C、Java 等语言所调用, 实现起来比较方便。

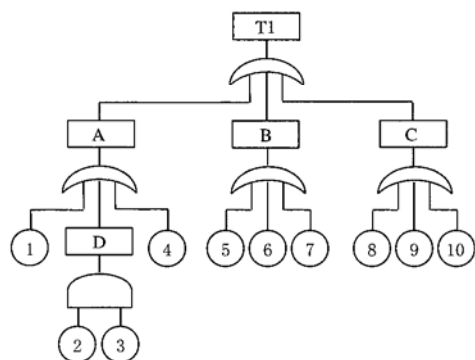


图 1 巴氏杀菌乳危害分析故障子树

Fig. 1 Hazard analysis fault subtree of Pasteurism milk

表 1 CIP 系统的故障树的底事件发生概率

Table 1 Bottom event probability of fault tree of CIP system

代号	基本事件	均值 $m_i$	$\alpha$ 及 $\beta_i$
1	碱液浓度: 1.5% ~ 2.0%	0.02	$1.112 \times 10^{-3}$
2	碱液温度: 70 ~ 80℃	0.08	$4.448 \times 10^{-3}$
3	碱液时间: > 15 h	0.02	$1.112 \times 10^{-3}$
4	酸液浓度: 0.5% ~ 1.0%	0.01	$5.56 \times 10^{-4}$
5	酸液温度: 60 ~ 70℃	0.001	$5.56 \times 10^{-5}$
6	酸液时间: > 15 h	0.0042	$2.335 \times 10^{-4}$
7	热水温度: > 85℃	0.001	$5.56 \times 10^{-5}$
8	热水时间: > 5 h	0.02	$1.112 \times 10^{-3}$
9	温水温度: > 40 ~ 50℃	0.01	$5.56 \times 10^{-4}$
10	温水时间: > 3 ~ 5 h	0.01	$5.56 \times 10^{-4}$

## 2 去模糊化故障树分析方法

HACCP 计划不是静态的, 而是动态的<sup>[10]</sup>。其动态性主要体现在 HACCP 中的关键控制点是可以改变的。关键控制点的改变是随企业的位置、产品配方、加工过程、仪器设备、原料供应、卫生控制和其他支持性计划发生变化而改变。在实际工作中, 一个产品 HACCP 计划

的改变, 即危害分析和关键控制点的改变是农业企业质量控制的一项重要工作, 特别是在目前出口农产品技术壁垒不断增强的现实情况下尤为重要。在改变一个产品 HACCP 计划的工作中, 分析人员已经掌握了大量的 HACCP 系统运行数据, 多数事件的概率能够精确表示出来。而需要改变的事件, 由于缺乏数据而无法精确表示, 这一部分恰恰是工作的重点。如果整个故障树全部用模糊化分析方法将浪费原有的数据资源, 原有的数据也是最具实际应用价值的资源, 应该有效加以利用来增强 HACCP 计划制定的可靠性。

针对以上情况, 本研究将能够精确表示的原有事件以精确的概率表示, 需要改变的事件以模糊化的概率表示。这样的故障树既有精确数表示的事件概率, 又有模糊数表示的事件概率, 所以问题的关键是如何进行事件的并逻辑运算和交逻辑运算。这里采用的方法是将模糊数转化为一个精确数(暂时称为“非模糊化方法”, 这样的故障树分析方法暂时称为“非模糊化故障树分析方法”), 然后用传统的故障树分析方法进行分析, 计算起来比较简单、易于工程化。

非模糊化方法主要以模糊集的数字特征(平均隶属度、模糊数均值等)为基础<sup>[11]</sup>, Timoyhy 等<sup>[12]</sup>从工程应用的角度介绍了 7 种将模糊输出函数(隶属函数)非模糊化的方法, 它们有各自的适用对象和特点。模糊推理和模糊控制输出的模糊集比较复杂, 有时是非凸模糊集, 无法用模糊数表示, 因而可能用到的非模糊化方法较多。与此不同的是, 在故障树模糊分析中, 基本事件的隶属函数一般都是所谓的 L—R 模糊数(分为三元组和四元组), 都是“标准”的凸模糊集, 三角形和梯形隶属函数分别是 L—R 模糊数中的线性三元组和线性四元组。这里, 仅就可用于本项研究的基本非模糊化方法作一分析。

### 2.1 最大隶属值法

最大隶属值方法也称为高度法, 它是由隶属函数的最大峰值所决定的, 其数学表达式为

$$\mu_{\tilde{I}}(X_0) \geq \mu_i(X), X_0 \in X$$

式中  $\mu_{\tilde{I}}$  —— 模糊集  $\tilde{I}$  的隶属函数;  $X_0$  —— 非模糊化得到的确定量。

对于三角形隶属函数而言,  $X_0$  反映了事件失效率的平均值; 对于梯形隶属函数来说, 如果取梯形上边的中点为  $X_0$ , 则也可作为事件失效率的平均值。此方法能够突出主要信息, 而且最为简单, 但因其它次要信息全部被舍弃, 故又较粗糙。

### 2.2 质心法

质心法亦称之为面积中心法或重心法, 其数学表达

式为

$$Z^* = \int \mu_{\tilde{I}}(X) \cdot X dX / \int \mu_{\tilde{I}}(X) dX$$

如果把  $\mu_{\tilde{I}}$  视为在  $X$  处的“概率密度”,则  $Z_0$  可理解为  $\tilde{I}$  的数学期望(或  $\tilde{I}$  的均值),它表示了模糊集的较大的隶属度在论域内集中的地方,包含了较多的信息,所以此方法在所有非模糊化方法中应用较为广泛。如果三角形和梯形隶属函数均为对称形,则质心法与最大隶属值法得到的是相同的;如果是非对称形,则采用质心法较好。

### 3 结论与讨论

本文介绍的模糊故障树分析方法对 HACCP 体系的智能危害分析与关键控制点自动发现工作起到探索作用,该方法可直接应用于相关软件产品的开发。智能危害分析与关键控制点自动发现一直是 HACCP 研究领域的一个难点问题,借鉴本文的研究工作经验,可以引进一些数据挖掘技术来攻克该项难题。特别是在大量获得某一行业(如畜肉加工行业)危害与关键控制点数据后,进而采用适当的数据挖掘技术进行智能危害分析与关键控制点自动发现将会获得较大突破,必将获得实际应用价值很高的研究成果。

#### [参 考 文 献]

- [1] 唐晓芬. HACCP 食品安全管理体系的建立与实施[M]. 北京:中国计量出版社,2003.
- [2] Li Bai, Ma Chenglin, Yang Yinsheng, et al. Implementa-

tion of HACCP system in China: A survey of food enterprises involved [J]. Food Control (2006),, doi: 10.1016/j.foodcont. 2006.07.006.

- [3] 赵同刚,徐科. 食品企业危害分析关键控制点(HACCP)质量控制体系[M]. 北京:经济管理出版社,2003.
- [4] Massimo Bertolini, Antonio Rizzi, Maurizio Bevilacqua. An alternative approach to HACCP system implementation [J]. Food Engineering (2006), doi: 10.1016/j.jfoodeng. 2006.04.038.
- [5] Tuominen P, Hielm S, Aarnisalo K, et al. Trapping the food safety performance of a small or medium-sized food company using a risk-based model[J]. The HYGRAM system. Food Control, 2003, 14(8): 573- 578.
- [6] Bowles J B, Pela'ez C E. Fuzzy logic prioritization of failures in a system failure mode, effects and criticality analysis[J]. Reliability Engineering and System Safety, 1995, 50: 203- 213.
- [7] 张俊福,等. 应用模糊数学[M]. 北京:地质出版社,1988.
- [8] 董玉革. 机械模糊可靠性设计[M]. 北京:机械工业出版社,2000.
- [9] Singer D. Fuzzy set approach to fault tree and reliability analysis[J]. Fuzzy set and system, 1990, 34: 145- 155.
- [10] 赵德孜,温卫东,段成美. 故障树模糊分析方法的研究[J]. 机械设计与制造,2003,4: 35- 37.
- [11] 何新贵. 模糊知识处理的理论与技术(第2版)[M]. 北京:国防工业出版社,1998.
- [12] Timoyhy J/Ross(美). 模糊逻辑及其工程应用[M]. 北京:电子工业出版社,2001.
- [13] 刘浩,卓黎阳. 统计过程控制与 HACCP[J]. 中国酿造, 2005, 12: 62- 64.

## Application of the fuzzy fault tree analysis approach to HACCP system

Wang Kaiyi<sup>1,2</sup>, Zhao Chunjiang<sup>2</sup>, Zhang Fangtian<sup>2</sup>

(1. College of Computer Science, BeiJing University of Technology, Beijing 100022, China;

2. China National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China)

**Abstract:** The practical implementation of Hazard Analysis and Critical Control Point(HACCP) in particular the definition of the Critical Control Points(CCPs) in the food industry is usually a complex system engineering. The application of Fault Tree Analysis(FTA) approach to the first and second principles of HACCP was recommended. Combined the fuzzy arithmetic and defuzzification with FTA, HACCP plans were created and updated. A software tool will be developed based on the approach introduced, aimed at simplification and automation of the hazard analysis.

**Key words:** hazard analysis and critical control point (HACCP); fault tree analysis; fuzzy arithmetic; defuzzification