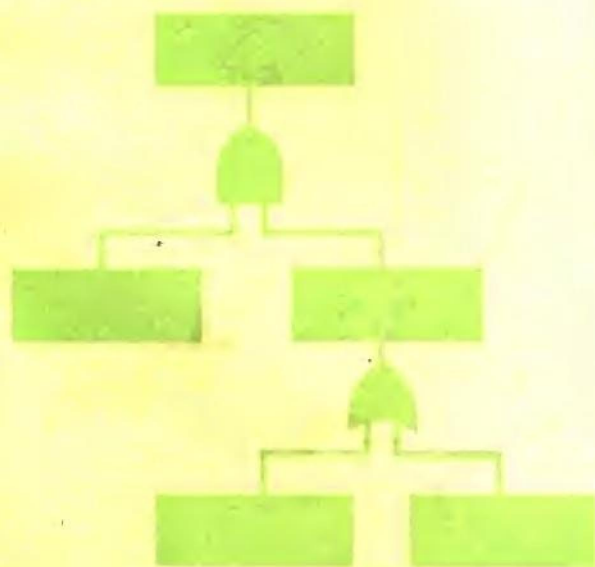




机械故障诊断丛书

故障树 原理和应用

朱继洲 编著



西安交通大学出版社

内 容 提 要

故障树分析是分析系统可靠性和安全性的重要方法。本书全面介绍故障树原理及其在电力、能源工程、化工、核能、机械等部门的应用。全书分七章,第一、二章阐述故障树分析法的基本概念、建树原则和过程,第三章介绍故障树的数学表述方法及运算规则,第四、五章分别讨论故障树定性分析法和定量分析法,第六、七章介绍故障树在各个部门成功应用实例和在专家系统中的应用。附录对故障树所应用的布尔代数作简要介绍,列出故障树定性分析、定量分析典型计算程序简介和一个计算程序示例。本书可作为各部门科研设计人员,维护保养人员进行系统可靠性与安全性分析、设备管理和开展机械故障诊断工作中的参考用书,亦可作为高等学校各工程类专业(如宇航、核能、电子、电力、化工、机械等)本科生和研究生的教学参考书。

本书出版得到江苏宝应振动仪器厂的赞助,特此表示感谢。

故 障 树 原 理 和 应 用

编 著 朱 继 洲

责任编辑 叶 超

*

西安交通大学出版社出版

(西安市咸宁路26号)

西安交通大学出版社印刷厂印装

陕西省新华书店发行 各地新华书店经售

开本787×1092 1/32 印张 5.125 字数: 108 千字

1989年1月第1版 1989年1月第1次印刷

印数: 1——5000

ISBN7-5605-0182-6/TB·15 定价:1.90 元

《机械故障诊断丛书》总前言

机械故障诊断技术是有关设备运行、维护的一项新兴技术。它的推广和应用，不但根本改变了原有设备维修制度，而且在保证设备安全运行、消除设备事故方面起着巨大的作用。当前，机械设备的运行维护，已经从单凭直觉的耳听、眼看、手摸发展到采用先进的传感技术、计算机和信息处理技术。新的监测手段，诸如超声、声发射、红外等，层出不穷。人工智能、专家系统、模糊数学一类新兴学科也在机械故障诊断技术中找到了用武之地。

近年来，在国家经委、中国设备管理协会和有关学会的大力支持下，机械故障诊断技术在我国各行业中的推广和应用正在方兴未艾。它已经并将继续在实践中获得巨大的经济效益和社会效益。本丛书的出版就是为适应广大工程技术人员的迫切需要而编写的。同时，也希望这套丛书能引起高等学校机械类专业广大师生和有关研究人员的兴趣。

我们在编写这套丛书时，既注意了它的科学性，又注意它的实用性。丛书保持了一定的理论深度，力求阐明机械故障诊断技术的理论基础，但又使之能为广大实际工作者所接受。对高等学校的师生和研究人员也有参考价值。为了尽量节约读者的精力和时间。丛书中每本就一个专题编写，字数限制在8万字左右。

由于各类产业机械在运行中既有各自的特点，又有某些共同点，同时机械故障诊断技术本身又正处于迅速发展的阶段，因此，本丛书在编写中既注意它的广泛性，即着重讨论多个行业中机械设备的共同技术问题，诸如轴承、齿轮、转子、润滑油等的监测与诊断，又注意在内容上具有开拓性，尽量向读者介绍和展示一些诊断方面的新技术、新动向。丛书中有相当的比重是编写者多年来自己从事实际工作的总结，加以汇编成册。希望能在我国的生产中进一步得到应用和推广。

丛书本身是作者、编者和读者间的桥梁。当它和广大读者见面之后，作为编者和作者，能得到来自广大读者的反馈信息，使之不断得到改进和提高，是我们衷心的希望。

《机械故障诊断丛书》编辑委员会

1988年6月

前 言

故障树分析是分析系统可靠性和安全性的重要方法，60年代初期，最早应用于航天、军工部门，随后，在核能、航空、航海、机械、电子、冶金、石油、化工、电力、轻工等领域得到了广泛的应用。

故障树分析法是以系统最不希望发生的事件作为分析的目标（顶事件），找出系统内可能发生的部件失效、环境变化、人为失误等因素（各种底事件）与系统失效之间的逻辑联系，用倒立树状图形表示出来。它可用于系统故障分析，分析某项故障产生的原因；可用于系统故障模式识别，进行故障预测和诊断，找出系统中的薄弱环节，以便在设计中采取相应的改进措施，实现系统设计优化；也可对复杂工程系统的风险进行评价，做出定量判断。由于有数理统计理论为基础，加上近代电子计算机的发展，故障树分析法已日臻完善，成为有效的设计工具和管理工具。

现代科学技术的发展，各种装置、系统日益向大型化、复杂化发展，系统越复杂，系统失效后果会越严重。为了确保和提高系统可靠性、安全性，就越需要使用故障树分析法。

近年来，系统可靠性工作在我国已有迅速发展，故障树分析法作为机械故障诊断中重要分支，也引起了人们的注意，取得了一些初步成果。为了全面介绍故障树原理和应

用，编者在为本校机械类专业、核反应堆工程专业学生和研究生开设“故障树分析法”和“可靠性与概率风险评价”课程基础上，编写了本书。书中一些应用实例，取材自国内各部门研究成果报告和编者的教学科研工作。

限于学识水平，书中会有不准确和错误之处，恳请读者批评指正。

编 者

1988 年 6 月

目 录

总前言

本书前言

第一章 故障树分析法基本概念	(1)
§ 1 概 述.....	(1)
§ 2 故障树分析的顺序.....	(5)
§ 3 故障树分析法的应用符号.....	(6)
第二章 故障树的建造	(11)
§ 1 故障树的建造过程.....	(11)
§ 2 顶事件的选择.....	(15)
§ 3 故障树建造过程中应注意事项.....	(17)
§ 4 故障树与可靠性框图.....	(21)
第三章 故障树的数学表述及运算规则	(28)
§ 1 故障树与结构函数.....	(28)
§ 2 结构函数的运算规则.....	(30)
§ 3 故障树的化简.....	(32)
§ 4 相干结构函数.....	(35)
第四章 故障树的定性分析	(39)
§ 1 概 述.....	(39)
§ 2 割集和最小割集.....	(40)
§ 3 路集和最小路集.....	(41)
§ 4 最小割集算法.....	(41)

§ 5	最小路集算法·····	(50)
§ 6	由最小割集或最小路集表示的结构 函数·····	(53)
第五章	故障树的定量分析·····	(56)
§ 1	事件和与事件积的概率计算公式·····	(56)
§ 2	用最小割集或最小路集表示的结构函数 来求顶事件发生概率·····	(58)
§ 3	用不交和展开法求顶事件发生概率的精 确解·····	(63)
§ 4	求顶事件发生概率的近似解·····	(69)
§ 5	事件重要度计算·····	(71)
第六章	故障树分析法的应用·····	(80)
§ 1	输电系统结构设计的评定· ·····	(80)
§ 2	锅炉压力容器事故分析·····	(86)
§ 3	高温高压换热器故障分析·····	(88)
§ 4	扭转扳手失效分析·····	(94)
§ 5	核电站低压安全注射系统可靠度预测···	(97)
§ 6	废气冷却及净化设备失效概率计算·····	(100)
第七章	故障树分析法与专家系统·····	(103)
§ 1	专家系统原理·····	(103)
§ 2	故障树分析法在专家系统中的应用·····	(107)
§ 3	基于最小割集技术的专家诊断系统和预 测系统·····	(111)
附录一	布尔代数简介·····	(117)
§ 1	集合的概念·····	(117)
§ 2	集合基本运算规则·····	(119)

§ 3	布尔代数运算规则·····	(124)
§ 4	不交型布尔代数运算规则·····	(127)
附录二	故障树计算程序简介·····	(129)
附录三	故障树分析法计算程序的一个示例·····	(133)
§ 1	压水堆核电站高压安全注射系统可靠度 预测·····	(133)
§ 2	故障树分析法计算程序示例·····	(136)
§ 3	结果分析·····	(151)
参考文献	·····	(152)

第一章 故障树分析法基本概念

§ 1 概 述

故障树分析法(Fault Tree Analysis)简称 FTA 法,是一种将系统故障形成的原因由总体至部分按树枝状逐级细化的分析方法,因而是对复杂动态系统的设计、工厂试验或现场发现失效形式进行可靠性分析的工具,其目的是判明基本故障,确定故障的原因、影响和发生概率。

1961-1962 年,美国贝尔电话研究所的沃森 (Watson) 和默恩斯(Mearns)在民兵式导弹发射控制系统的设计中,首先使用故障树分析法对导弹的随机失效问题成功地作出了预测。其后,波音公司的哈斯尔(Hassl)、舒劳特(Schroder)杰克逊 (Jackson) 等人研制出故障树分析法计算机程序,使飞机的设计有了重要的改进,故障树分析法进入了以波音公司为中心的宇航领域。1974 年,美国原子能委员会发表了麻省理工学院(MIT)拉斯穆森(Rasmussen)教授为首的安全小组所写的“商用轻水堆核电站事故危险性评价”报告,该报告所采用的就是美国国家航空和空间管理部与美国国防部在60年代发展起来的事件树分析法(Event Tree Analysis)和故障树分析法,分析了核电站可能发生的各种事故的概率,并由此肯定了核电站的安全性,得出了核能是一种非常安全的能源

的结论。这一报告的发表在各方面引起了很大的反响,并使故障树分析法从宇航、核能推广到了电子、化工和机械等工业部门。由于应用的日益广泛和逐渐形成为完整的理论,故障树分析法的应用已普及到社会问题、国民经济管理、军事行动决策等方面。目前,故障树分析法已被公认为是可靠性、安全性分析的一种简单、有效、很有发展前途的方法。

故障树分析法就是把所研究系统的最不希望发生的故障状态作为故障分析的目标,然后寻找直接导致这一故障发生的全部因素,再找出造成下一级事件发生的全部直接因素,一直追查到那些原始的、其故障机理或概率分布都是已知的,因而毋需再深究的因素为止。通常,把最不希望发生的事件称为顶事件,毋需再深究的事件称为底事件,介于顶事件与底事件之间的一切事件为中间事件,用相应的符号代表这些事件,再用适当的逻辑门把顶事件、中间事件和底事件联结成树形图。这样的树形图称为故障树,用以表示系统或设备的特定事件(不希望发生的事件)与它的各个子系统或各个部件故障事件之间的逻辑结构关系。以故障树为工具,分析系统发生故障的各种途径,计算各个可靠性特征量,对系统的安全性或可靠性进行评价的方法称为故障树分析法。

图 1-1 所示为一个故障树的例子。它首先选定系统的某一故障事件画在故障树的顶端,作为顶事件,即故障树的第一阶,再将导致该系统故障发生的直接原因(各部件故障)并列地作为第二阶,用适当的事件符号表示,并用适当的逻辑门把它们与系统故障事件连结起来,图上用或门表示系统的故障是由部件 A 故障或者部件 B 故障所引起的。其次,将导致第二阶各故障事件发生的原因分别并列在第二阶故障事件

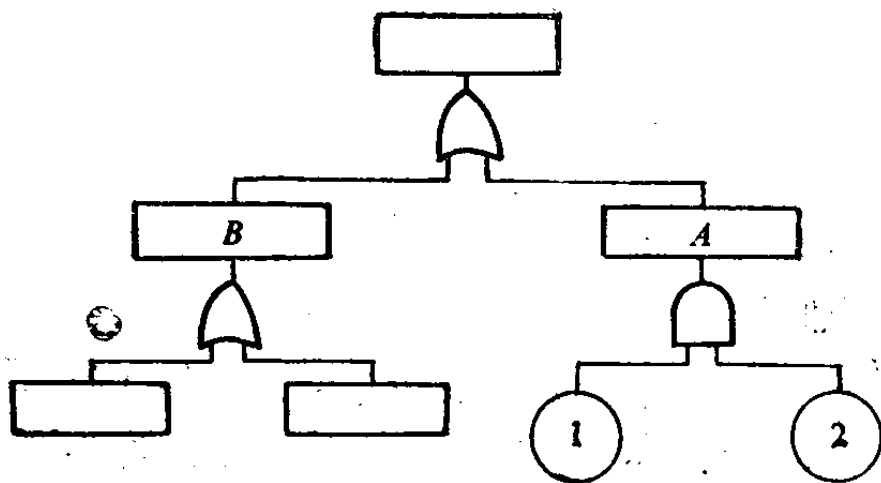


图 1-1 故障树示例

的下面作为第三阶，用适当的事件符号表示之，并用适当的逻辑门与第二阶相应的事件连结起来，连结部件A故障与元件1故障、元件2故障的是一与门，表明部件A故障是在元件1、元件2同时失效时发生的。如此逐阶展开，直到把形成系统故障的最基本事件都分析出来为止。

故障树分析法有下列一些特点：

1. **直观、形象** 与一般可靠性分析方法不同，故障树分析法是一种从系统到部件再到零件这样的“下降形”分析方法，通过逻辑符号绘制出的一个倒树形图，这样，它就把系统的故障与导致该故障的各种因素直观而又形象地呈现出来。如果我们从故障树的顶端向下分析，就可以找出系统的故障与哪些部件、零件的状态有关，从而全面查清引起系统故障的原因；如果我们由故障树的下端即各个底事件往上追溯，则可以分辨各个零件、部件故障对系统故障的影响途径与程度，从而可评价各种零件、部件故障原因及其对保证系统可靠性、安全性的重要程度。

2. 灵活、多用

(1) 可用于对产品、装置、部件、系统的可靠性、安全性进行定性分析和定量分析。

(2) 可以分析由单一构件故障所诱发的系统故障，还可以分析两个以上构件同时故障时所导致的系统故障。

(3) 可以用于分析系统组成中硬件（零、部件）故障的影响，也可以考虑维修、环境因素、人为操作或决策失误的影响；即不仅可反映系统内部单元与系统的故障关系，也能反映出系统外部因素所可能造成的后果。

3. 多目标、可计算

(1) 在设计中，应用故障树分析可以帮助设计者弄清系统的故障模式，在对系统或设备的故障进行预测和诊断中，找出系统或设备的薄弱环节，以便在设计中采取相应的改进措施，进而实现系统设计的最优化。

(2) 在管理和维修中，根据对系统故障原因的分析，充实部件备品，完善使用方法，采取有效的维修措施，切实防止故障的发生。

(3) 由于故障树是由特定的逻辑门和一定的事件构成的逻辑图，因此，可以应用电子计算机来辅助建树，定性分析和定量计算。

由于以上特点，故障树分析法特别适合于复杂的动态系统的可靠性分析中。它的缺点是：理论性较强、逻辑性较严密，它要求分析人员对所研究的对象（系统或设备）必须有透彻的了解，还应具有比较丰富的设计和运行经验；否则，在故障树建树过程中往往容易遗漏一些重要事件而导致错误的结果，同时，由于各个分析人员所取的范围不同，或认识

上的不一致，其所得结论的置信度也可能有所不同。此外，建造一复杂系统的故障树还是一件相当费时的工作，

§ 2 故障树分析的顺序

故障树分析法的顺序，如图 1-2 所示。

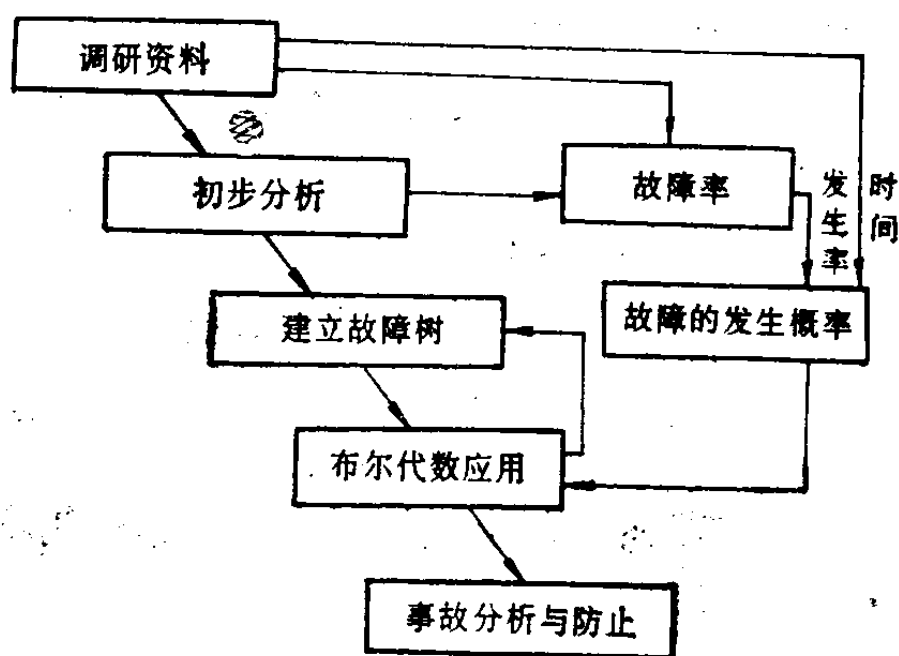


图 1-2 故障树分析法的顺序

具体步骤：

1. 对所选定的系统（或设备）作必要的分析，确切了解系统的组成及各项操作的内容，熟悉其正常运行时的作业图。
2. 对系统的故障进行定义，对预计可能发生的故障、过去发生过的故障事例及故障统计，作广泛的调查。
3. 仔细分析各种故障的形成原因，如设计、制造、装配、运行、环境条件、人为因素等等。对环境条件的外部因素，操作失误的人为因素应作充分的考虑。
4. 收集各故障发生概率数据。

5. 选定系统可能发生的最不希望发生的故障状态为顶事件，作出故障树逻辑图。

6. 对故障树结构作定性分析。

(1) 应用布尔代数的有关定律和运算法则对故障树作等价化简；

(2) 寻找故障树的最小割集和最小路集，以判断系统的故障模式和成功模式；

(3) 分析各事件的结构重要度，以判断各事件所代表的部件（或零件）在系统可靠性中的重要程度。

7. 对故障树结构作定量分析，如故障树各底事件（即各元件、部件）的故障概率数据为已知，就可以根据故障树逻辑，对系统的故障作定量分析；若底事件概率值系未知数，可假设某个合理值，以便对系统进行可靠性方案的比较。

8. 考虑价格及技术等条件，对如何有效地防止事故的发生提出并采取有效的措施。

§ 3 故障树分析法的应用符号

1. 定义

事件：描述系统状态、部件状态的改变过程叫事件。如果系统或元件按规定要求（规定的条件和时间）完成其功能称为正常事件；如果系统或元件不能按规定要求完成其功能，或其功能完成不准确，则称作故障事件。引起故障事件的原因有：硬件失效、软件差错、环境条件因素和人为因素等。

部件：凡是能产生故障事件的元件、子系统、设备、人和环境条件，在故障树中都定义为部件。部件的故障按其产

生的原因分为三类：

- (1) 一次故障，由于系统元件的内在原因而产生的故障。
- (2) 二次故障，由于外部原因、环境恶化等造成的系统元件的故障。
- (3) 其它原因故障，或称受控失效，对于这类部件不能工作的原因尚需作进一步分析。

2. 故障事件的符号

故障树分析法中所应用的代表故障事件的符号，如图 1-3 所示。

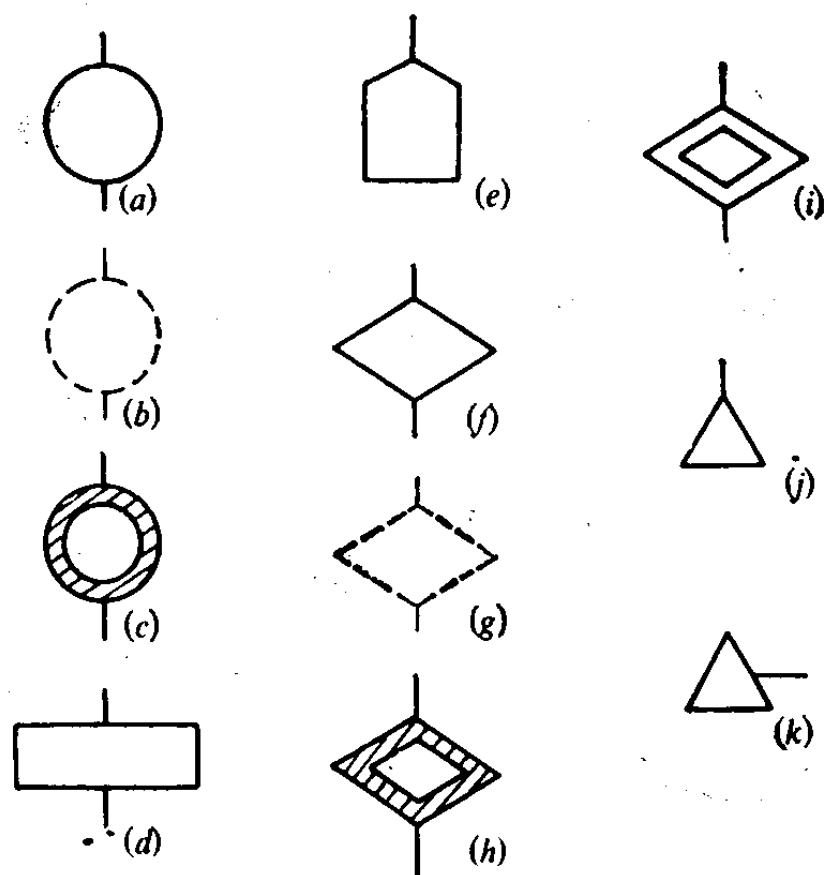


图 1-3 代表故障事件的符号

(1) **圆形符号** 表示底事件（图 1-3 中 *a, b, c*）。指由系统内部件失效，或人为失误引起的事件，通常应有足够的原始数据。又称基本事件，即它应该是不可能再行分解，是

在设计、运行条件下发生的固有随机事件。其中，

实线圆（图 1-3 *a*）表示硬件失效引起的故障。

虚线圆（图 1-3 *b*）表示人的差错引起的底事件。

同心圆（图 1-3 *c*）表示由于操作者的疏忽，未发现故障，而引起的底事件。

(2) **矩形符号** 表示故障树的顶事件或中间事件（图 1-3 *d*）。在矩形内可注明故障定义，其下与逻辑门连接。所谓中间事件，是指还可划分成底事件的事件。

(3) **房形符号** 表示条件事件（图 1-3 *e*）。系可能出现也可能不出现的失效事件，当所给定条件满足时，这一事件就成立，否则除去。房形符号内的事件可以是正常事件，也可以是故障事件，通常用于满足特殊条件下建树的需要。

(4) **菱形符号** 表示省略事件（图 1-3 *f, g, h, i*）。又可称作不完整事件，指那些可能发生的故障，但其概率极小，或由于缺乏资料、时间或数值，不需要或无法再作进一步分析的事件。其中，

实线菱形（图 1-3 *f*）表示硬件故障事件。

虚线菱形（图 1-3 *g*）表示人为失误引起的故障事件。

双菱形（图 1-3 *h*）表示由于操作者疏忽，未发现故障而引起的故障事件。（图 1-3 *i*）则表示对整个故障树有影响，有待进一步研究的、原因尚不清楚的失效事件。

(5) **三角形符号** 系联接及转移符号（图 1-3 *j, k*）。当一颗故障树包容的事件较多，为了减轻建树工作量，使故障树简化，可使用转移符号。上方有直线的三角形符号表示转入（图 1-3 *j*），侧面有横线的三角形符号则表示转出（图 1-3 *k*）。一个转出符号和一个转入符号为一对，在一对三