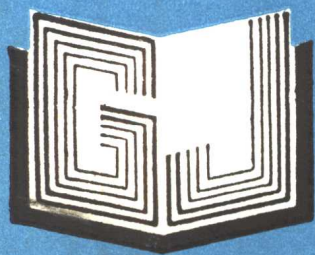


984566



高等学校教材

安全系统工程在汽轮机中的应用

山东工业大学 裘烈钧 孙奉仲 合编



高等学校教材

安全系统工程在汽轮机中的应用

山东工业大学 裘烈钧 孙奉仲 合编

水利电力出版社

内 容 提 要

本书以安全系统工程及可靠性理论为基础,全面阐述了汽轮机设备及其在运行中的安全性及危险性分析方法,如故障模式及影响法和故障树法等,给出了评价安全性的指标,还结合人机工程学理论,论述了人的特性及环境因素对汽轮机可靠性的影响。全书内容丰富,取材新颖,紧密联系电厂实际和当前科学技术发展,具有实用价值。本书可供高等学校热能动力专业及相近专业的师生使用,也可供电厂及从事动力工作的工程技术人员参考。

高等学校教材

安全系统工程在汽轮机中的应用

山东工业大学 裘烈钧 孙奉仲 合编

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

北京市地矿局印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 9.75印张 217千字

1995年11月第一版 1995年11月北京第一次印刷

印数 0001—1470册

ISBN 7-120-02392-6/TK·351

定价 7.70元

前 言

本书是根据原能源部电厂热能动力专业委员会汽轮机教学组制订的教材出版计划编写的，它是电厂热能动力专业的一门选修课教材。本书亦可以供其他有关人员参考。

本书共分五章，着重介绍了安全系统工程的基本理论及分析方法、可靠性的基本理论以及人机工程学的基础知识，结合汽轮机运行时出现的故障，阐述了安全性及危险性的分析评价方法，如工程上常用的故障模式及影响分析法、故障树分析法等。

本书由山东工业大学裘烈钧、孙奉仲同志合编，其中绪论及第一章由裘烈钧同志编写，第二章、第三章、第四章和第五章由孙奉仲同志编写。全书由孙奉仲同志负责统稿。承蒙华中理工大学翦天聪教授主审了全书，他对书稿提出许多宝贵意见，使本书质量得以提高。

限于我们的水平，以及掌握的资料有限，书中难免存在不妥之处，甚至错误，恳请读者指正。

编 者

1994. 6

目 录

前 言	
绪论	1
第一章 安全系统工程基础	3
第一节 概述	3
第二节 安全系统工程分析的原则与方法介绍	6
第三节 布尔代数基础	11
第二章 汽轮机的可靠性	17
第一节 可靠性基本理论	17
第二节 可靠性数据的统计及处理	37
第三节 汽轮机可靠性概念及指标	46
第四节 可维修性与马尔可夫过程	53
第三章 汽轮机设备的故障与安全性分析	58
第一节 汽轮机设备的故障分析基础	58
第二节 故障模式与影响分析	71
第三节 故障树分析	75
第四章 汽轮机的危险性分析	85
第一节 概述	85
第二节 危险性评价	93
第三节 危险性预防及预测	105
第五章 人机系统与汽轮机运行	113
第一节 人机工程学概述	113
第二节 汽轮机的人机系统及其可靠性	118
第三节 人的特性及对汽轮机运行的影响	138
第四节 汽轮机人机系统中的环境因素	143
参考文献	149

绪 论

我国电力事业发展迅速，初步形成现代化的电力工业体系和电力设备的制造体系。到1993年末，发电装机容量已达1.8亿kW，大型机组如600MW和300MW机组不仅在各电网中开始占主导地位，而且我国已能自己制造此类机组。同时，在多年的实践建设中培养锻炼了一支能承担大型机组设计、施工、调试、运行和管理等方面的技术骨干力量。

由于电力事业的发展迅速，特别是近20年来，大型机组投运数量增加速度较快，所以不论在设备制造质量上和运行管理手段上都存在一定缺陷，再加上辅机配套性能不完善，影响了机组的整体完善性。因此，如何搞好质量管理，显得十分重要。

电厂过去有一套完整的安全技术措施，保证了机组的安全运行。这些安全技术措施都是百余年来几代人在这方面的经验教训的积累，但很明显，新的大型机组投入运行时间不长，很多经验尚待总结。要预防新事故的发生，不能等待事故发生以后再去采取措施，那样会造成较大的经济损失，甚至危及生命。因此把安全系统工程的分析方法应用于电站设备安全运行分析中具有重大意义。这种安全系统工程的方法能够事先预测事故发生的可能性，掌握事故发生的规律，作出定性和定量的评价，并能对运行管理、施工和设计中发生的危险加以辨认，并通过对危险性评价的结果作出相应的安全措施达到控制事故的目的。

安全系统工程发展到现在仅仅半个世纪的时间，随着航空航天事业的发展，安全问题的影响越来越大，事故的损害越来越严重。这种方法应用于研究导弹系统的可靠性和安全性上，取得了成功，继而英国在原子能应用方面，建立了核电站故障分析概率评价方法，对安全性作出定量的评价，建立了可靠性的数据库，为有关单位提供了分析故障的数据。同时美国对核电站各部位历年发生的故障采用了事件树和故障树的分析方法，作出了核电站安全性评价。

目前世界各国对安全系统工程十分重视，相继在各个领域中应用，我国也已在石油、化工等10余个产业部门推广应用，在电力部门也已有了一些应用和一些可靠性分析的著作。

大型汽轮发电机组的投运数量不断增多，已成为我国电网的主力机组，因此保证大型机组安全运行也日臻重要。本书编写的目的在于，让热能动力类专业学生掌握一定的安全系统工程的知识，并介绍如何在大型机组管理中的应用，为今后对大型机组的安全管理提供一定的基础。

本书共分五章：第一、二章介绍安全系统工程的基础知识，以及与其有关的一些可靠性基础知识。安全系统工程有很多种分析方法，在本书中只作一般介绍，而着重阐述在汽轮机可靠性分析中要采用的方法。但鉴于资料收集比较困难，同时故障概率数据本身是一项很大的研究课题，非少数人所能解决的，所以有关汽轮机部件故障数据的介绍，是本书力所不能及的。

第三、四章着重讨论汽轮机各主要部位的可靠性分析。根据各主要部件存在的事故隐

患，利用故障树等分析方法分析其可靠性，作为学习安全分析方法的典型例子，通过事例了解大型机组主要部件可靠性情况。这些事故是已经发生的，只是作为分析评价的参考。至于对大型机组存在的隐患，整机安全性分析与评价等等，是今后各部门或实际工作中需要解决的课题，不在本书范围之内。

安全问题不仅发生在设备本身以及设备与设备连接面之间，更重要的是人机接触面（人机界面）之间。作为汽轮机运行，人机关系较为重要，因此人机系统作为独立一章来讨论。

大型汽轮机运行方面存在问题很多，无论在设计、制造、安装、施工、控制等方面都有不少问题，也存在着可能的危险性。通过本书学习，希望能有助于这项工作的开展，促进可靠性分析在电站热力设备中推行。

第一章 安全系统工程基础

第一节 概 述

一、什么是安全系统工程

采用系统工程的方法解决安全方面的问题称为安全系统工程。这种解决安全问题的方法，有别于传统的处理安全问题。因为传统的方法以及所采取的一系列安全措施，如常用的安全监督检查、制订安全管理规程、生产过程监察规则、使用防护用具等等都是建立在事故发生以后，总结经验教训的基础之上的，所以把这种建立在事故发生后的经验教训之上的安全方法称之为传统的方法，即“问题出发型”方法。因为生产有其本身的特点，事故未发生前不会引起人们的注意，所以这种方法不能解决某些潜在的未发生的隐患。另外生产是在不断发展的，新的生产过程的建立，新设备的安装投运，新工艺的使用等都没有一定的经验教训。如过去发电厂安装的中、小型机组，现在安装运行的是高参数 300MW 的大型机组，它有自身的一系列特点，小机组运行的经验、处理事故的经验，不足以帮助解决大机组运行中发生的问题，新机组的投运还有一系列特殊问题。同时人们对新事物的认识还跟不上当前技术进步和生产发展。所以仅仅用传统的安全方法处理安全问题已不能胜任。

随着系统工程的出现，以及它在解决生产过程中问题的应用，改变了事故不可知论的观点。它能帮助我们预测事故的发生，从而使我们及早采取预防措施就有了可能。因为系统工程的方法可以研究出事故发生的规律，了解安全对象，即所谓系统化的各个构成部分之间的安全关系的联系，可以检查出可能发生事故的危险性及其危害的程度和危险性发生的过程。这样就可以预先采取措施，或改变运行方式，加强防护措施，或增加设施，或重新设计新的方案，使事故发生降低到最小限度或不发生。这建立在早发现早预防基础上的安全方法，即安全系统工程方法，常称为“问题发现型”方法。

安全系统工程所以有这种可能，其原因得从“系统”的本质说起。系统就是指的所研究的对象，它可以是一个复杂的大系统，也可以是简单到一个单一元素的小系统。复杂的大系统如汽轮机组及其热力系统，它由许多部件，人们称之为子系统或元素所组成，各部件或元素，即子系统之间各有其特点，相互有区别，又相互联系、相互作用，组成一个具有特定功能的有机集合体。一旦子系统之间的相互制约、相互联系失调，这个系统就不能完成其目标，如汽轮机组及其热力系统，有蒸汽、给水、循环水等等系统，它们各有一定的设备，形成一个有一定功能的发电整体。一旦系统中有一环节失调，就不能完成发电这个大目标。因此系统必须具备一定特征才构成一个系统。它的特征有：

(1) 目的性。组成大系统就是为了完成某一个具有特定功能的目标。一个系统可以分割成许多子系统，子系统各具有自己的分目标，分目标的完成保证了总目标的实现。但子

系统之间的分目标可能是矛盾的，如为了实现生产的总目标，要求“投资费用最低”、“可靠性最大”，因为要实现最高可能的安全标准和可靠性，将使费用增加，所以采取某种折衷方案，即在矛盾的分目标中寻求平衡，达到生产的最佳状况，即优化状态。如汽轮机的启动过程，既要求缩短启动时间争取早发电，但又要保证汽轮机各金属部套的温度差保持在一定范围之内，因此在启动过程中寻求既能保证安全又能加快启动速度的最优化启动方式。

(2) 整体性。由子系统组成的系统是一个实现特定功能的整体，各个部件在总体中只能逻辑地互相配合、互相协调，共同完成一个总目标，不是各个子系统的简单的集合，而是在保证给定总目标下各部件之间的互相配合，使这个整体产生最大效果，由此可见虽然各个部件本身并不能都很完善，但它们可以综合成一个良好的总体。反之即使每个部件都良好，但作为整体却不具备某种良好的功能，也就成为不完善的系统。所以在处理有关安全问题时应明确，不是把每个都能安全的部件凑在一起就一定会产生整体的安全。如汽轮机前面几级因蒸汽的容积流量比较小，需要有部分进汽度，这就会产生对叶片的冲击力，易使叶片共振而断裂，因此为避免共振，要对叶片进行测频，舍弃那些会发生共振的叶片。它的部件常有不够完善的地方，但配合得好就能达到整机生产安全。

(3) 相关性。组成系统之间的各个要素必须相互依存、相互制约，如子系统之间无相互关系和约束就不成其系统。如汽轮机各个部件之间，都必须互相配合协调工作，否则就不能保证安全发电，不能完成总目标。

(4) 环境适应性。系统存在于一定物质环境之中，从环境中吸收输入，同样产生物质向环境输出，正如汽轮发电机组通过人的操作向锅炉吸取蒸汽的热能，向循环水 and 环境放出排汽热量，同时向电网输出电能，因此必须重视环境的作用，与环境相适应。

运用“系统”的观念和方法去解决工程问题，或以工程的方法来研究系统，即用工程方法来看待系统，设计新系统，这样两个方面结合起来，使传统的工程问题增加了新内容，这就是系统工程。而采用系统工程解决安全问题，就是以系统的思想作指导，以系统工程的方法和工程方法为工具去设计生产所需要的新系统或改造旧系统，使之更加安全合理，更加完善，这就是安全系统工程。就汽轮机运行中的安全问题来说，如汽轮机热力系统，把它分割成几个子系统，汽水系统、轴封系统、凝汽设备系统、疏水系统等等，它们之间各有联系、相互制约，达到发电的总目标，保证各系统以及系统之间都能安全运行。所以对每个子系统进行安全分析，进行安全性评价，然后对总体的安全性进行评价，通过评价如果发现问题，即可重新改变系统或加强防护措施或改变运行方案，这就是汽轮机的安全系统工程。要解决这个问题，首先要能识别存在于各部件本身和各元件之间的危险性。识别危险性的各种方法就是要进行安全分析，因为危险性存在于每一部件的自身特性中，存在于运行操作中。把汽轮机分割成子系统或子单元就能充分地、不遗漏地查找到各系统之间存在的危险性，经过安全分析就能发现其危险性或不完善的程度，再进行安全评价，视危害大小、严重程度加以改造或消除。

除了发现设备本身的缺陷以外，还要充分揭示设备各部件之间的连接面，人与机器操作过程的接触面即人机界面，也要对其安全性进行分析，因为前一段元件的输出参数或危

险，往往是后一段元件的输入，这种关系必须符合一定规律。汽轮机转子的胀差必然影响动静叶栅的间隙，人对机进行操作限制其温差过大，就会影响到设备的伸缩变化，因此应按设备结构特点进行控制调节。操作失误，调节失灵等就要危及安全。

二、安全系统工程的内容

根据上述的情况综合起来，安全系统工程的内容包括三个方面，它们之间的联系如图 1-1 所示。

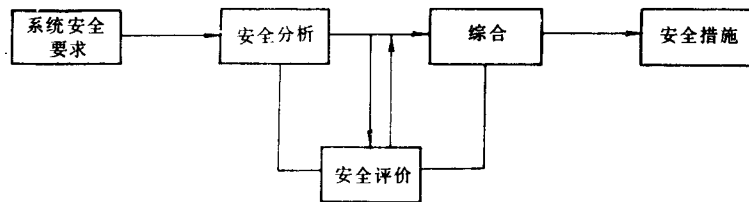


图 1-1 安全系统工程内容关系图

1. 系统安全分析

为充分认识系统存在的危险性，就必须对系统进行认真的分析，这是安全系统工程的基础。只有分析清楚而且正确，才能为下一步安全评价提供有用资料。安全分析根据系统安全的要求，有各种不同的分析方法，其中有定性的分析方法，也有定量的分析方法，这是安全系统工程中的重要的一环。

2. 安全评价

做系统的安全分析时，还要进行评价。从所做的分析中了解到系统中存在的危险和薄弱环节以及发生事故的概率和事故的严重程度，就可以采取措施，改变运行方式，然后再进行评价，根据逐个评价的方案，选出其中最佳即最安全的方案，这就是评价需要做的工作。

3. 安全措施

通过几种方案的评价比较综合出最佳方案，对评价所提出的某些存在的危险性，需要采取防范措施，或者调整方案，对薄弱环节进行修正，从而避免重大事故发生，或使危险减少到最低限度。

三、安全系统工程的优点

我国对汽轮机制造和运行方面都采取了许多安全措施，制订了一系列安全管理规则、运行规程、检修规程等，并采取了预防事故发生的一系列措施，取得了很大的效果。但大多数是以传统的安全方法为主，对预防事故的发生还有不足，事故发生的后果也较少见到定量分析，因此对事故的后果心中无数。现在如采用安全系统工程，它将对事故预防带来许多好处。归纳起来其优点有：

(1) 采用安全系统工程，通过安全分析，可以对安全的认识变被动为主动。因为安全分析能预防可能存在的危险性和薄弱环节以及可能存在的误操作，及早采取措施，不要等事故发生后去亡羊补牢。

(2) 通过安全评价,可以知道险情发生的严重程度,分清危险度等级,了解什么样安全措施既经济又安全,减少了投资,保证了可靠性。

(3) 对新投产试运行的机组,也可根据安全分析,搞出一定试运行规程。虽然没有旧的机组经验可参考,也可制订出比较完善的启动方案,为新技术、新工艺等试用提供方便。

(4) 为了做好安全评价,需要制订许多标准,收集许多数据,如历史上各类机组发生重大事故的次数和周期,计算出设备的故障概率,并通过大量数据统计,了解我国各类机组的安全指标值。这样做就能提高我们对设备安全的认识,促进我们重视安全生产,提高安全人员的水平。

第二节 安全系统工程分析的原则与方法介绍

安全系统工程分析,即系统安全分析,是处理各种安全问题中极其重要的一个步骤,是建立在系统对安全有什么要求的基础之上,即建立在系统所确立的安全目标和准则的基础之上。系统本身有复杂的有简单的,对安全要求也就有多种类型,因此采用的分析方法也因此而不同。另外复杂的系统用一种方法不能满足安全分析的要求,因此往往需要几种方法互相补充、互相完善。即使如此,有的复杂系统也不能做到尽善尽美。

在安全分析中着重调查研究、收集有关资料,然后对系统的安全性作出逻辑的推理,明确一定事故发生的种种因果关系,在此基础上建立产生系统事故发生的输入(即原因)、输出(即后果)之间的关系以及改变这种关系所做的种种转换过程的种种假设。在特定的条件下,利用定性定量的分析方法,探索若干可以互相替代的方案,并研究探讨可能产生的效果,综合技术经济等多方面因素,寻求系统的整体安全的最佳方案,作为安全计划制订与组织的依据,供决策者决策。下面以不同条件可能采用的分析方法作扼要介绍。

1. 单点故障分析法

为了全面查清可能造成的系统故障,需要对整个系统的每一设备元件或每一个组合的安全性进行分析。可采用“单点故障分析法”,对系统的每一元件进行分析,然后对严重问题进行重点分析,这一方法是重点故障分析法(如故障树分析法)。它是检查最基本危险性的基础,所以是一种基础性分析方法。通过这种基础性分析,可以全面了解危险性大小、危险程度,但对很复杂的系统,作全面单点故障分析就较困难。

2. 意外事故分析法

许多安全问题虽然已经采取一些预防措施,但也有一些偶发性事故,检查此类偶发性事故的安全分析法称意外事故分析法。偶发性事故常发生在系统的元件与元件之间的接触面上,或人与机的界面上,如操作失误等等。通过分析查明哪些地方应特别注意,需要配制备用装置,或采取应急措施和防护设备,以便能控制此类事故发生。这种分析方法,要针对性地采取一种或一组分析方法来辅助其完成。

3. 交接面分析法

一个系统设备部件联结之间,人机之间,可能存在着配合不当的隐患,必须将其查清,

以免在运行时发生事故，这就须用“交接面分析法”。

4. 致命度分析法

在分析过程中，往往可能发生好多个故障，在不能全部解决的情况下，首先应分清这些故障造成危害的严重程度，这种分析故障造成危害程度的方法，称致命度分析法。通过分析，按其危害程度进行分级，然后按其严重后果的等级进行编排顺序，首先解决危害大的，同时在运行中对这些危害严重的地方加强注意。

5. 危险性预先分析

设备在大修后，或者经技术改造后，在试机启动前，事先要对设备可能发生的危险性做到心中有数，事先要进行安全分析，这种分析法称为“危险性预先分析”。通过分析根据可能发生的故障，制订试运行操作规程。危险性预先分析是按照过去经验和同类型机组发生过事故，按系统的分割，逐步进行分析以防止漏查，查出危险性情况，找出控制这些危险性的可行性办法。这些分析方法常常需要依靠别的分析方法来帮助完成。

在有些情况下，需要对每一步操作程序，如汽轮机启动程序进行逐步检查，这种分析方法称程序分析法。这种分析法以原有规程作为依据，逐项检查防止漏查，类似这样的分析方法还有“作业安全分析法”、“流程分析法”和“能量分析法”，都需要每个单元逐步检查分析。

作业安全分析法：如对汽轮机运行规程规定的每一步逐步进行分析，辨识每一步可能带来的危险性，通过分析可以训练运行人员辨识危险性的能力，提高运行水平。

流程分析法：如汽轮机热力系统比较复杂，汽水流动经历许多设备才能完成发电任务，根据汽水流动经过的部件，检查其流动是否正常，检查出不该发生的流动，或流动偏大或偏小，都是事故发生的征兆。

能量分析法：这种方法和流程分析法相类似，但根据能量的特点，如热能、势能、电能、机械能等，检查其流动规律。能量在传递和储存过程中都有危险性，有压力、势能存在就有爆炸的危险性，有热能存在就有着火烧伤的危险性。运用能量流程分析各部件的安全性，在分析安全性的同时应注意能量利用率、周期和频率以及振动和疲劳负荷的综合影响，如容器壁、汽缸受到瞬时压力和温差的影响等，这类分析主要依靠规程、标准作为准则，通过分析采取防护措施。

以上介绍的分析方法，什么场合应作什么样的分析，大都是综合性的、整体性的、基础性的。另外有些特定要求的分析，如根据事故严重性、重要性要进行专题分析，类似这种分析本书将在以后章节中着重讨论。现先介绍其概念。

一、事件树分析（ETA）

事件树分析法是可靠性分析中重要方法之一，它是利用逻辑推理的方式分析事故的形成过程，即在一系统运行中，分析各个元件什么情况下是运行正常的，什么情况下运行是不正常的，并求出其正常运行的概率，即可靠度的方法，以此比较出各种运行方案，选择其中可靠运行方案。

这种方法的主要手段是基于逻辑推理，如汽轮机凝汽设备的低真空运行，其能否正常工作取决于汽轮机的低压级能否安全工作。这就可通过排汽压力或温度是否超过规程规定

来判断，不超过规定，可正常工作；超过规定，则视其金属热膨胀情况，如金属热膨胀正常则可照常运行，如金属热膨胀异常，发生动静摩擦，机组振动就会发生事故。如此把系统运行正常或不正常，及引发事故的原因依次以“是”与“非”的办法推理下去，直到某事件发生。这种把一个系统的事件发生过程的形成用一枝水平放置的事件树的形式表达出来的方式称为事件树分析，如图 1-2 所示。然后根据求概率的办法，求其可能发生某事件的概率和不可能发生的概率，由此得到整个系统的可靠性的认识。

由此可知，瞬间造成的事故后果常常是各个事件酿成的。通过这种方法可以看到事件发生发展的全部动态过程，从宏观角度分析系统可能发生哪种事件，从而全面掌握事件发生的规律，并且知道用规定指标严格限制超规程运行的重要性，监视各种指标使其不发生事故的意义。

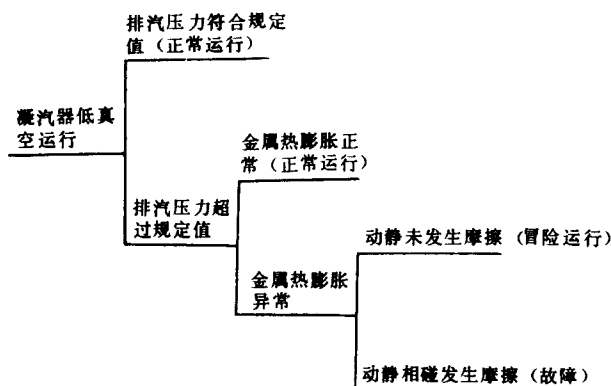


图 1-2 事件树分析

二、故障树分析 (FTA)

前面提到的事件树分析是根据一个系统运行中各个元件或操作的成功和失败的可靠性，经过逻辑推理形成一枝系统可靠性的水平的事件树，然后分析归纳保证整个系统可靠性的措施方法。这种方法只讨论失败、成功，至于怎样失败，哪些因素造成失败，都不能分析，所以产生了故障树分析方法，即事故原因的分析方法。这两种方法可以互相补充。

故障树分析首先应提出最不希望发生的事件，作为顶事件，然后根据发生此事件的原因，逐个分析，查找所有全部产生事故的基本原因，运用逻辑方式用“逻辑门”把那些事故连接起来，形成一枝由各种中间事件和基本原因事件形成的事故树形，找到了顶事件所以发生的基本原因。基本事件发生，顶事件就被引发，提供人们进一步分析其量的关系，也可以做成安全检查表供采取防护措施，这种方法补充了事件树的不足。基本事件中除了有设备故障外，还有其他各种原因，如缺少安全措施，人员误操作或失职，仪表故障等等。

故障树分析中顶事件要明确，如汽轮机运行中转子飞车事件是最不希望发生的事故，同时要能分析到真正的基本事件。如果要进行定量分析，还必须具备这些基本原因事故历年发生的故障概率，要有精确的统计性，才能获得正确的分析。另外，一个设备运行，往往有好几个顶事件，都应进行独立分析。具体的分析方法，将在以后章节中讨论。

三、故障模式 and 影响分析 (FMEA)

故障模式分析是要通过分析,把组成系统的各个组成部分如子系统或元件,在运行时不能达到规定要求,不能完成其工作任务或者发生严重后果的原因找出来。发生故障的原因可能不止一个。如汽轮机大轴弯曲主要原因是主轴局部受热的故障引起的,但产生局部受热的原因是多种的,可能是热启动不当、滑参数停机不当、汽轮机进水及径向间隙消失、动静摩擦等等,除这些原因外,还有制造安装方面原因。对这种故障,必须根据分析需要,把系统分割成几个子系统,查明其故障模式,即查明故障出现的状态,进一步分析故障类型对子系统以致整个系统产生的影响,最后采取措施加以解决。

故障模式及影响的分析方法不同于事件树分析方法,后者只从宏观上了解每一元件失败与成功的过程,找出其失败事件的影响,不追查原因。但也不同于故障树的分析方法,只针对顶事件,分析其产生的原因,以及可能产生的概率,而故障模式分析,既对需要研究的系统进行分割并逐个进行故障模式分析,又追查其原因及其影响,最后采取措施进行解决。这种方法既可用于定性分析也可用于定量分析,特别严重的事故还可结合致命度分析,比较周密完善。目前此法已在核电站、动力工业、仪器仪表工业中得到广泛应用。具体分析方法将在以后章节中介绍。

四、管理失误和风险树分析

有时为了防止事故的发生,便于运行时全面对照检查,人们往往希望把系统中各元件和设备在运行中可能产生的误操作和造成的风险,设计成一个系统化了的逻辑树,这样的逻辑关系的风险树,包括了能够考虑到的设备在运行中的各个方面的故障和造成事故的原因等。在运行中可以以此树与实际情况逐项对照,容易帮助发现问题。

有时也可将系统运行中的元件故障绘成逻辑网络图,并用布尔代数式把逻辑网络图表示成系统的功能,然后利用布尔代数运算,对网络进行分析,找出易于发生事故的部件。

五、安全检查表法

安全检查表法是早在 20 年代以来就采用的有效安全分析法,目前在极大部分安全管理中仍使用此法。其主要内容是把检查对象进行分析(可以用上面提到过的分析方法进行分析),把大系统分割成子系统,把分析出来的各种不安全因素或基本原因事件,列成安全检查表,并填上确定出的保障安全需要检查的项目,以提问的方式,在检查中逐项回答,是或否,或正常等等。这样编列的表就是安全检查表,它有许多优点:

(1) 安全检查表是根据系统工程的方法划分各子系统的,然后通过科学的分析,或集合了许多有经验人员的经验教训而制订的,考虑周密不致遗漏。

(2) 在使用安全检查表过程中,结合现有规程、标准进行对照检查执行规程情况,能得出准确评价。

(3) 安全检查表简单明了,有时用提问方式,指出什么是正确的,什么是错误的,什么人负责什么工作,职责明确,起到安全教育作用。

(4) 安全检查表虽属定性检查方法,但都是经验总结,也是各种先进科学方法的综合归纳,对没有定量分析或难以定量分析的复杂系统或设备是一个很好的安全总结。

现以热力系统中的加热器为例,将其基本原因事件列出安全表,作定性检查之用。需

要指出的是，这一检查表是从能够分辨出的因素如各种仪表是否正常等出发列出的，并不全面，仅供学习参考。具体分析见表 1-1。

表 1-1 加热器的安全检查表

顺序	检查项目	要求标准	顺序	检查项目	要求标准
1	汽压状况	不超压	15	汽压表、水位计冲洗情况	按时冲洗
2	汽压表状况	完好	16	设计状况	合格
3	汽压表试验	定期	17	制造状况	合格
4	汽压表照明	充足	18	安装状况	合格
5	汽压表表盘	合格	19	技术检修状况	定期检修
6	安全阀	完好	20	计划修理状况	计划修理
7	安全阀整定	整定准确	21	疏水设备	良好
8	安全阀动作	灵敏	22	疏水自动调节器	好用
9	安全阀试验	按时实验	23	疏水管路	正常
10	水位报警器	灵敏可靠	24	维护保养	良好
11	水位计完好状况	完好	25	操作规程	完善
12	水位计照明	良好	26	坚守岗位状况	坚守岗位
13	水位计高度	合适	27	工作状态	精力集中
14	汽压表、水位计连接管件	畅通	28	掌握操作规程	熟练

除了以上条件下采用的分析方法以外，当用一般分析方法难以得到明显效果时，可用模型或样机进行仿真研究，即把系统或子系统做成操作模型，然后对模型进行实验，找出在操作运行中出现的故障。

上面讨论了各种条件下可能采用的几种分析方法。当然目前可采用的分析方法不下 30 余种，但选用哪种方法，可根据具体情况采用，其选用原则有以下几点：

(1) 首先根据研究对象或系统进行初步的概括性的分析，此时可以作危险性预先分析，也可作安全检查表，了解研究对象的危险性情况。

(2) 根据不同对象的不同要求，选用相应分析方法。如果安全对象是汽轮机整机，包括热力系统的运行操作，就应选用各单元之间有联系的方法，如事件树分析法、交接面分析。如果需要避免研究对象的重大事故发生，则需选用故障树分析法以解决顶事件。如果分析对象是一个关键性设备，则可采用故障模式分析结合致命度分析法。

(3) 对新建或大修后、或技术改造的对象，则可选用危险性预先分析法一类的静态分析。如果正在运行的设备可采用程序分析和逻辑分析等方法。

(4) 在新设备运行时，需要对设备进行反复调整，以达到安全经济运行，为此可采用逻辑分析或采用替代法分析，即设想几种运行方案，通过其他辅助分析，改变几个运行环节，就可达到安全运行。

(5) 在分析过程中如果一种方法还不能充分完成安全分析的任务，则需要几种方法互相补充。如可以把故障树分析和事件树分析结合起来，这两种方法的结合也常称为“因果

分析法”，从整个系统的第一个危险性起做出事件树，把在事件树中找到的使系统发生危险的失败环节作为故障树的顶事件，分别做出各自的故障树。

(6) 选用的方法也要根据投入的人力和资金，尽可能采用简便的方法取得正确的评价，不一定复杂的方法对任何系统都是最好的方法。

第三节 布尔代数基础

布尔代数以“逻辑门”为运算手段的代数方程，所以又称开关代数或集合代数。在可靠性分析中，故障树的做图，各事故的因果关系要用逻辑门来联结，最后还需用布尔代数方程来表达故障树的结构函数。同时要用布尔代数的运算方法来简化故障树。本节内容主要是从可靠性应用的要求出发，简单地阐述布尔代数的基本内容。

一、逻辑门

逻辑门很多，本书取其在可靠性分析逻辑作图常用的“门”如下：

1. 与门

此门表示前一事故是后两种或几种原因事件所造成的，前一事故的“果”是后一事故的“因”，当后几种事件同时发生时才能造成前一种事故，前者称为输出 A ，后者称为输入 B_1 、 B_2 ，其表示符号见图 1-3。单个 B_1 或单个 B_2 不可能使 A 发生故障，只有 B_1 与 B_2 同时发生，才能使 A 事件发生。用公式表示为：

$$A = B_1 \cap B_2 \quad \text{或} \quad A = B_1 \cdot B_2 \quad (1-1)$$

即“与门”在逻辑运算中表示为逻辑乘。

名称	符号表示	名称	符号表示
与门		限制门	
或门		排斥或门	
条件与门		顺序与门	
条件或门		表决门	

图 1-3 逻辑门符号的表示

2. 或门

此门表示前一种事故是由于后二种事件之一所造成的，后者只要有一种事件发生，就

能使前者事件发生, 其符号表示见图 1-3。用公式表示其关系为:

$$A = B_1 \cup B_2 \quad \text{或} \quad A = B_1 + B_2 \quad (1-2)$$

即“或门”在逻辑门运算中, 表示为逻辑相加。

3. 条件与门

见图 1-3, 表示 B_1 与 B_2 两事件虽然在同时发生, 但还不能使 A 事件发生, 只有在同时满足 α 时, 才能使 A 事件发生, 用公式表示为:

$$A = B_1 \cap B_2 \cap \alpha \quad \text{或} \quad A = B_1 \cdot B_2 \cdot \alpha \quad (1-3)$$

4. 条件或门

见图 1-3, 当 B_1 和 B_2 两事件中有一个事件发生时, A 事件也不能发生, 只有满足条件 α 时, 才能使 A 事件发生, 用公式表示为:

$$A = (B_1 \cup B_2) \cap \alpha \quad \text{或} \quad A = (B_1 + B_2) \cdot \alpha \quad (1-4)$$

5. 限制门

见图 1-3, 输入事件 B 只有一个, 如果不满足条件 α , 则虽然 B 事件发生, A 事件也不会发生, 如汽轮机热态启动, 大轴发生弯曲, 那只有在轴封供汽不当时, 轴封套内壁温度和轴封汽温之间温差超过 60°C 后才能发生轴封片与大轴摩擦, 使大轴局部过热而弯曲。所以限制门的表示式为:

$$A = B \cap \alpha \quad \text{或} \quad A = B \cdot \alpha \quad (1-5)$$

6. 排斥或门

其符号见图 1-3, 它和或门相似, 下面的输入事件 B_1 或 B_2 只要有一个发生, 上面输出事件 A 就能发生, 但 B_1 与 B_2 二事件是彼此排斥的, B_1 发生 B_2 就不可能发生, 如转子静胀差超过一定程度能使动静摩擦, 负胀差也能使转子动静发生摩擦, 但发生正胀差时, 不可能发生负胀差, 这两者是相互排斥的。其表示式为:

$$A = B_1 \cup B_2 \quad \text{或} \quad A = B_1 + B_2 \quad (1-6)$$

与或门运算一样, 但在定量分析时两者是有区别的, 排斥或门可简化运算过程。

7. 顺序与门

见图 1-3, 它表示同时输入 B_1 与 B_2 能使输出 A 事件发生, 但必须 B_1 先于 B_2 发生, A 事件才会发生, 顺序相反 A 事件就不会发生。如除氧器满水, 若水不进入汽缸不会造成大轴弯曲。如水从除氧器满出从抽汽口和轴封汽管进入汽缸, 使上下缸温差增大超过一定极限, 才造成大轴弯曲, 所以这次事故应是除氧器满水在前, 汽缸进水在后才引起。所以事故发生, 必须两者同时存在而除氧器满水在先。其逻辑关系为:

$$A = B_1 \cap B_2/B_1 \quad \text{或} \quad A = B_1 \cdot B_2/B_1 \quad (1-7)$$

8. 表决门

见图 1-3, 它表示下面几个输入事件 $B_1, B_2, \dots, B_n$ 中至少要有几个同时发生时, 上面输出事件 A 才能发生。如为使凝汽器便于清洗, 四条循环水通路停运一半凝汽器仍能工作, 这就是说有二条通路发生故障, 凝汽器仍可正常运行, 表示为 $2/4$ (四取二), 其逻辑关系表示为:

$$A = B_1 \cap B_2 \cup B_1 \cap B_3 \cup B_1 \cap B_4 \cup B_2 \cap B_3 \cup B_2 \cap B_4 \cup B_3 \cap B_4$$