

doi: 10.7690/bgzdh.2016.12.005

# 故障树分析法在防止柴油发电机事故中的应用

刘海洋, 唐金国, 曲东森

(海军航空工程学院科研部, 山东 烟台 264000)

**摘要:** 为快速找出柴油发电机火灾事故的主要原因, 防止柴油发电机事故, 运用故障树分析法构建一种柴油发电机火灾事故的故障树。阐述柴油发电机的结构和工作原理, 分析柴油发电机的常见故障, 编制柴油发电机火灾事故的故障树, 并分析故障树的最小割集、最小径集及基本事件结构重要度。分析结果表明: 该方法能够找出柴油发电机在安全管理方面的侧重点, 对防止柴油发电机事故的发生起到很好的预防作用。

**关键词:** 故障树分析; 柴油发电机; 故障分析; 安全管理

**中图分类号:** TP271<sup>+</sup>.2 **文献标志码:** A

## Application of the Fault Tree Analysis in Preventing Diesel Generator Accidents

Liu Haiyang, Tang Jinguo, Qu Dongsan

(Department of Research &amp; Development, Naval Aeronautical Engineering Institute, Yantai 264000, China)

**Abstract:** In order to quickly find out the main causes of diesel generator fire accidents and to prevent these accidents, fault tree analysis is used to establish fault tree for diesel generator fire accidents. Firstly, the structure and the principles of diesel generator are introduced. Secondly, the common faults of diesel generator are analyzed. Thirdly, fault tree analysis for diesel generator accidents is build, and minimum cut sets, minimum path sets, and structure importance are analyzed. The analysis revealed that in this analysis method the emphasis of the safety management for diesel generators could be found out, which will be beneficial to prevention of diesel generator fire accidents.

**Keywords:** fault tree analysis; diesel generator; fault analysis; safety management

### 0 引言

柴油发电机作为一种常用的发电设备, 在各行业中应用广泛, 但是一旦发生事故, 特别是火灾爆炸事故, 将会造成严重的人员伤亡及财产损失。运用故障树对其事故原因进行分析, 能够很容易找出柴油发电机火灾事故的主要原因, 为其安全管理工作指明重点和方向。基于此, 笔者构建了柴油发电机火灾事故的故障树, 分析了故障树的最小割集、最小径集和基本事件结构重要度, 对柴油发电机火灾事故原因进行定性和定量的分析, 为预防事故发生提供了理论依据。

### 1 柴油发电机的工作原理

#### 1.1 柴油发电机的结构

柴油机、发电机和控制系统是一台柴油发电机必不可少的构成部件。柴油机提供动力源, 通过活塞的往复运动, 将柴油燃烧产生的化学能转化为曲轴运动的机械能。发电机通过电磁感应原理, 将发动机曲轴运动产生的机械能转化为电能向负载输出。控制系统主要是接收、反馈与柴油机和发电机相连的各类传感器信息, 并在控制屏上显示这些数

据, 从而保证柴油发电机的正常工作<sup>[1]</sup>。

#### 1.2 柴油发电机的工作原理

柴油机的工作原理主要分为进气、压缩、燃烧膨胀和排气这 4 个步骤。进气是进入新鲜空气和雾化柴油的混合气体; 压缩是将混合气体压缩使柴油达到燃点; 燃烧膨胀的过程其实就是做功的过程; 排气是把膨胀后的废气排出去。循环进行这 4 个步骤, 不断做功<sup>[2]</sup>。

发电机工作是利用电磁感应原理, 柴油机活塞在气缸内进行往复运动, 通过曲轴运动带动发电机转子, 产生电能。

### 2 柴油发电机常见故障分析

#### 2.1 柴油发电机温度过高

引起柴油发电机温度过高的原因主要有以下几点: 一是冷却液稀少, 柴油机工作时持续发热, 冷却液过少导致热量集聚, 无法及时排出; 二是冷却水温度过高, 主要原因是水泵供水效率低, 导致冷却系统内循环水量减少, 热量无法及时排出, 从而水温升高; 三是循环系统管路结垢堵塞。水垢的传热能力较差, 当管路中集聚水垢后, 不仅导致冷却

收稿日期: 2016-08-25; 修回日期: 2016-09-18

作者简介: 刘海洋(1987—), 男, 山东人, 学士, 助理工程师, 从事装备安全管理研究。

水量减少，而且传热能力下降；四是风扇故障，长时间的运行会造成风扇皮带打滑、开裂或风扇扇叶损坏，从而影响散热；五是节温器故障。节温器故障时，会使燃烧室温度过高时，冷却系统无法及时进行散热；六是机油供给不足造成各摩擦表面异常磨损或烧伤，从而发生危险<sup>[3]</sup>。

### 2.2 与燃烧过程相关的故障

影响燃烧过程的因素很多，与燃烧过程相关的故障主要集中在柴油机上，包括以下几个方面：供油管路破损，阀门连接不良导致柴油泄露，输油管路堵塞，燃油供给不足，燃油牌号不对，燃油中混有杂质，输油泵损坏，活塞环与汽缸套磨损严重，机油粘稠度过大，润滑效果不良，磨损加剧，气缸过热，产生裂纹，喷油器故障等<sup>[4]</sup>。

### 2.3 与发电机相关的故障

与发电机相关的故障主要是与电相关，集中表现为电压输出不稳定，无电压输出，甚至发生短路危险，从而造成事故<sup>[5-6]</sup>。产生这一类故障的主要原因如下：一是发电机中有元件损坏；二是发电机内部或外部开路或短路；三是连接节点处存在接触不良的现象；四是没有按照要求进行接地；五是绝缘层被击穿或绕组被烧毁<sup>[7]</sup>。

## 3 柴油发电机火灾故障树分析

### 3.1 确定顶上事件及编制柴油发电机火灾故障树

在系统安全工程中，故障树分析法 (fault tree analysis, FTA) 因其简单、直观等优点而得到广泛应用，它以顶上事件为基础，逐层展开，分析导致各个事件发生的原因，直至分析到基本事件，因而通过故障树，能够直观地看出事故发生的整个过程和危险性所在，并且可以做定性和定量分析<sup>[8]</sup>。

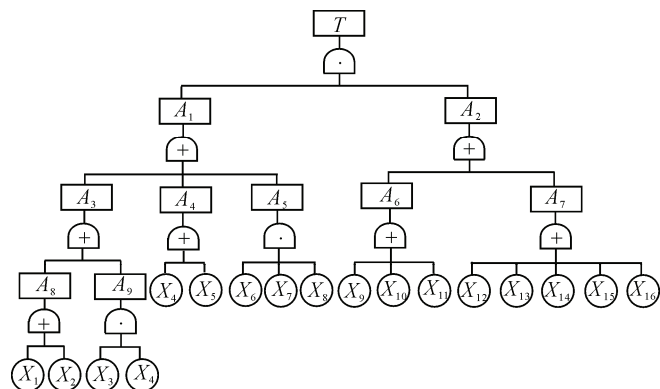


图 1 柴油发电机火灾故障树

确定顶上事件为柴油发电机火灾，火灾形成的三要素为可燃物、助燃物及达到着火点，助燃物为空气，在故障树列表中不予列出。以柴油发电机火灾作为顶上事件，按照故障树的建立方法<sup>[9]</sup>，逐层寻找事件发生的原因，由此编制柴油发电机火灾故障树如图 1。

图 1 柴油发电机火灾故障树中各故障代号及故障说明如表 1 所示。

表 1 故障树故障代号及故障说明

代号	故障说明	代号	故障说明
T	柴油发电机火灾	X <sub>4</sub>	人员操作不当
A <sub>1</sub>	可燃物积聚	X <sub>5</sub>	密封圈老化
A <sub>2</sub>	达到着火点	X <sub>6</sub>	散热效果不良
A <sub>3</sub>	燃油管路破损	X <sub>7</sub>	超负荷运行
A <sub>4</sub>	管路阀门连接不良	X <sub>8</sub>	润滑不足
A <sub>5</sub>	柴油机爆缸	X <sub>9</sub>	发电机短路
A <sub>6</sub>	点火源	X <sub>10</sub>	违规动火
A <sub>7</sub>	冷却系统失灵	X <sub>11</sub>	接地不良漏电
A <sub>8</sub>	管路有破口	X <sub>12</sub>	冷却液稀少
A <sub>9</sub>	温度过高爆裂	X <sub>13</sub>	水泵供水效率低
X <sub>1</sub>	人为破坏	X <sub>14</sub>	循环系统结垢堵塞
X <sub>2</sub>	管路老化破损	X <sub>15</sub>	风扇故障
X <sub>3</sub>	设备运行故障	X <sub>16</sub>	节温器故障

### 3.2 柴油发电机火灾故障树最小割集分析

在柴油发电机火灾故障树中，最小割集是能引起柴油发电机火灾事故发生的各种基本事件组合<sup>[10]</sup>。每个最小割集都是柴油发电机火灾事故发生的—种可能途径，—种失效模式就是—个危险源<sup>[11]</sup>。最小割集数目越大，组成最小割集的基本事件数量越少，危险性就越大。由图 1 可得下式：

$$\begin{aligned}
 T &= A_1 \cdot A_2 = (A_3 + A_4 + A_5) \cdot (A_6 + A_7) = \\
 &= (A_8 + A_9 + A_4 + A_5) \cdot (A_6 + A_7) = \\
 &= (X_1 + X_2 + X_3 \cdot X_4 + X_4 + X_5 + X_6 \cdot X_7 \cdot X_8) \cdot \\
 &= (X_9 + X_{10} + X_{11} + X_{12} + X_{13} + X_{14} + X_{15} + X_{16}) = \\
 &= (X_1 + X_2 + X_4 + X_5 + X_6 \cdot X_7 \cdot X_8) \cdot \\
 &= (X_9 + X_{10} + X_{11} + X_{12} + X_{13} + X_{14} + X_{15} + X_{16})。
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

利用布尔代数求得该事故树的最小割集有 40 个，其中二阶割集有 32 个，占总数的 80%；四阶割集有 8 个，占总数的 20%。因为每个割集就是柴油发电机火灾事故发生的—种可能性，所以本故障树柴油发电机火灾发生的可能性共有 40 种。而且最小割集中基本事件的数量越少，就越容易导致事故的发生；因此，32 个二阶割集为本故障树的薄弱环节，最容易引起事故的发生，管理人员应高度重视。

### 3.3 柴油发电机火灾故障树最小径集分析

径集反映了与割集相反的意义，它能够反映系

统的安全可靠<sup>[12]</sup>。通过计算故障树的最小径集，能够找出防止事故发生的方法，从而为选择消除事故的措施提供了依据。

求故障树最小径集的方法是利用它与最小割集的对偶性，将故障树换成安全树，求出安全树的最小割集，就是原故障树的最小径集，如下式：

$$\begin{aligned} \bar{T} &= \bar{A}_1 + \bar{A}_2 = \bar{A}_3 \cdot \bar{A}_4 \cdot \bar{A}_5 + \bar{A}_6 \cdot \bar{A}_7 = \\ & \bar{A}_8 \cdot \bar{A}_9 \cdot \bar{A}_4 \cdot \bar{A}_5 + \bar{A}_6 \cdot \bar{A}_7 = \\ & \overline{X_1 \cdot X_2 \cdot (X_3 + X_4) \cdot X_4 \cdot X_5 \cdot (X_6 + X_7 + X_8)} + \\ & \overline{X_9 \cdot X_{10} \cdot X_{11} \cdot X_{12} \cdot X_{13} \cdot X_{14} \cdot X_{15} \cdot X_{16}} = \\ & \overline{X_1 \cdot X_2 \cdot X_4 \cdot X_5 \cdot X_6} + \\ & \overline{X_1 \cdot X_2 \cdot X_4 \cdot X_5 \cdot X_7} + \overline{X_1 \cdot X_2 \cdot X_4 \cdot X_5 \cdot X_8} + \\ & \overline{X_9 \cdot X_{10} \cdot X_{11} \cdot X_{12} \cdot X_{13} \cdot X_{14} \cdot X_{15} \cdot X_{16}} \end{aligned} \quad (2)$$

得出柴油发电机火灾事故最小径集为 {X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub>, X<sub>4</sub>, X<sub>5</sub>, X<sub>6</sub>}，{X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub>, X<sub>4</sub>, X<sub>5</sub>, X<sub>7</sub>}，{X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub>, X<sub>4</sub>, X<sub>5</sub>, X<sub>8</sub>}，{X<sub>9</sub>, X<sub>10</sub>, X<sub>11</sub>, X<sub>12</sub>, X<sub>13</sub>, X<sub>14</sub>, X<sub>15</sub>, X<sub>16</sub>}<sup>[13]</sup>。分析柴油发电机火灾事故最小径集可看出：要想防止柴油发电机火灾事故的发生，必须要控制火灾形成的三要素，不能使可燃物、助燃物及着火温度同时得到满足。

### 3.4 基本事件结构重要度分析

柴油发电机火灾故障树中共有 16 个基本事件，这 16 个基本事件对柴油发电机火灾事故影响各不相同。通过计算基本事件结构重要度能够找出哪些基本事件是导致柴油发电机火灾事故发生的主要因素，进而有针对性地预防这些基本事件的发生。结构重要度的计算方法是将每个最小割集赋值 1，然后平均分配给该最小割集里的每个基本事件，最后累加起来得到每个基本事件的结构重要度<sup>[14]</sup>。以此方法计算，本故障树基本事件结构重要度如表 2。

表 2 基本事件结构重要度

代号	结构重要度	代号	结构重要度	代号	结构重要度	代号	结构重要度
X <sub>1</sub>	4.00	X <sub>5</sub>	4.00	X <sub>9</sub>	2.25	X <sub>13</sub>	2.25
X <sub>2</sub>	4.00	X <sub>6</sub>	2.00	X <sub>10</sub>	2.25	X <sub>14</sub>	2.25
X <sub>3</sub>	0.00	X <sub>7</sub>	2.00	X <sub>11</sub>	2.25	X <sub>15</sub>	2.25
X <sub>4</sub>	4.00	X <sub>8</sub>	2.00	X <sub>12</sub>	2.25	X <sub>16</sub>	2.25

由表 2 可以看出：柴油发电机火灾事故中各个基本事件的结构重要度，X<sub>1</sub>、X<sub>2</sub>、X<sub>4</sub>、X<sub>5</sub>这 4 个基本事件的结构重要度值最高，是导致柴油发电机火

灾事故发生的主要原因，对事故的影响最大。所以，在采取预防措施时，首先要考虑结构重要度数值高的基本事件。

### 4 结束语

故障树分析法是进行事故分析的有效工具，能找到引起事故发生因素及其相互之间的关系，可以发现危险源，从而有针对性地预防事故发生。笔者构建了柴油发电机火灾事故的故障树，分析了最小割集、最小径集及基本事件结构重要度，找出了导致事故发生的主要因素，以预防此类事故的发生。对于大型的故障树系统，可以借助于故障树分析软件来求解并分析其结果。

### 参考文献：

- [1] 魏爱华, 吴修强. 浅谈柴油发电机的工作原理[J]. 河南化工, 2010, 27(3): 41-43.
- [2] 张岳, 周文华, 杨腾飞, 等. 电控柴油机 OBD 系统监控需求及管理研究[J]. 机电工程, 2015, 32(2): 265-269.
- [3] 赵鑫. 柴油发电机组冷却系统故障分析[J]. 山东工业技术, 2015(11): 174.
- [4] 罗刚. 柴油发电机组的启动与故障分析[J]. 林业机械与木工设备, 2012, 40(11): 47-53.
- [5] 朴昌浩. 柴油发电机组常见故障及日常维护[J]. 黑龙江水利科技, 2012, 40(9): 131-132.
- [6] 邓冠前, 邱静, 李智, 等. 间歇故障诊断技术研究综述[J]. 兵工自动化, 2015, 34(1): 15-20.
- [7] 朱平良, 吴书有, 孔凡让. 舰用柴油发电机组故障诊断分析[J]. 机械与电子, 2008(11): 12-14.
- [8] 景国勋, 施式亮. 系统安全评价与预测[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2009: 135-151.
- [9] 中国国家标准化管理委员会. GB7829 故障树分析程序[S]. 北京: 中国国家标准出版社, 1987.
- [10] 王玉珏, 漆德宁. 基于否定选择算法的模拟电路故障诊断[J]. 兵工自动化, 2015, 34(4): 30-32.
- [11] 邓琼. 安全系统工程[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2009: 69-85.
- [12] 陈少荣. 安全生产风险管理与控制[M]. 北京: 化学工业出版社, 2013: 130-134.
- [13] 陈秀芳, 许利亚, 刘晓春, 等. 决策树算法在装备故障检测中的应用[J]. 兵工自动化, 2015, 34(10): 81-84.
- [14] 舒安庆, 张鹏, 丁克勤, 等. 事故树分析法在港机故障检测中的应用[J]. 武汉工程大学学报, 2013, 35(6): 62-66.