

引用格式:孙俊焘,刘海,申婷婷,朱建明.基于故障树法的广播电视信号传输安全风险评价[J].中国传媒大学学报(自然科学版),2024,31(01): 33-41.

文章编号:1673-4793(2024)01-0033-09

基于故障树法的广播电视信号传输安全风险评价

孙俊焘^{1*},刘海¹,申婷婷²,朱建明³

(1. 青岛市广播电视台,青岛266071;2. 江苏省广电有线信息网络股份有限公司,南京210018;
3. 中国科学院大学,北京100049)

摘要:利用故障树法对广播电视信号传输安全进行了风险分析评价。在系统技术分解的基础上建立了故障树模型,并对风险因素进行了风险识别;通过计算故障树的最小割集和结构重要度,对风险因素进行了定性和定量分析,最终得到了相应的风险评价结果。研究成果可作为广播电视信号传输安全风险管理的决策支撑,为广播电视台的安全播出工作提供坚实保障。

关键词:安全播出;风险评价;故障树分析法;最小割集;结构重要度

中图分类号:TN941.3 **文献标识码:**A

Risk assessment of radio and television signal transmission safety based on FTA

SUN Juntao^{1*}, LIU Hai¹, SHEN Tingting², ZHU Jianming³

(1. Qingdao Media Group, Qingdao 266071, China; 2. Jiangsu Broadcasting Cable Information Network Corp. Ltd, Nanjing 210018, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In this paper FTA (Fault Tree Analysis) was used to conduct risk analysis and evaluation on the safety of radio and television signal transmission. A fault tree model was established based on the technical decomposition of the system, and the risk factors were identified; by calculating the minimum cut set and structural importance of the fault tree, the risk factors were qualitatively and quantitatively analyzed, and the corresponding risk assessment results were obtained. The research results can be used as decision-making support for safety risk management of radio and television signal transmission, and provide a solid guarantee for the safe broadcasting work of radio and television stations.

Keywords: safety broadcast; risk assessment; FTA; minimum cut-set; structural importance

1 引言

安全播出是广播电视工作的一项长期性、基础性和根本性的任务^[1]。国家广播电视总局颁布的《广播电视安全播出管理规定》(第62号令)指出,安全播出是指在广播电视节目播出、集成、传输、分发过程中的内容完整、信号安全、网络安全和技术安全。其中,信

号安全是指承载广播电视内容的电、光信号不间断、高质量^[2]。因此,广播电视信号传输安全是广播电视台安全播出工作的重要保障。

如何在多元信号背景下对信号传输安全进行有效的风险识别和风险评价,是行业内亟需解决的问题。本文将广播电视信号传输系统为研究对象,以故障树分析法为主要研究方法,在风险识别的基础上

基金项目:国家自然科学基金面上项目(72074203)

作者简介(*为通讯作者):孙俊焘(1984-),男,双硕士,高级工程师,主要从事信号传输与覆盖、安全播出风险管理等方面的工作。Email: 78514328@qq.com;刘海(1972-),男,正高级工程师,主要从事广播电视播出、广播电视技术管理等方面的工作。Email:18661736173@163.com

对影响信号传输安全的风险因素进行定性和定量分析,以获得相应的风险评价结果,保障广播电视信号传输安全。研究技术路线如图1所示。

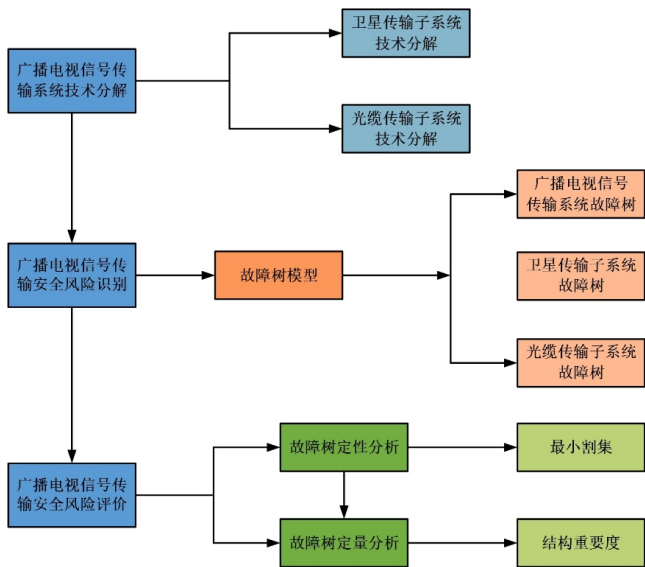


图1 研究技术路线

2 广播电视信号传输系统技术分解

2.1 广播电视信号传输系统概述

在广播电视直播、转播的信号传输工作中,广播电视台通常会将卫星和光缆两种传输模式结合使用并互为备份。如图2所示,广播电视信号传输系统由卫星传输子系统和光缆传输子系统组成。在卫星传输子系统中,卫星转播车将节目信号以卫星传输的方式发送,播控中心的卫星接收系统接收到信号后,将其传输至播总控系统;而在光缆传输子系统中,卫星

转播车利用通信光缆将节目信号传输至播控中心的播总控系统。根据相关规定和技术要求,只有两个子系统的信号均达到不间断、高质量的技术标准,才能切实保障节目信号传输安全。

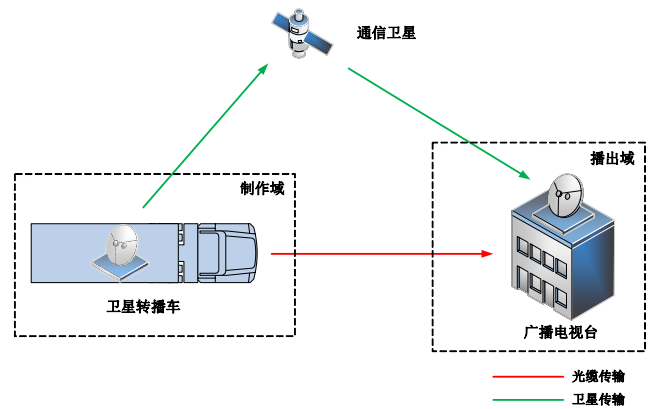


图2 广播电视信号传输系统组成

2.2 卫星传输子系统技术分解

卫星传输子系统由传输主系统和应急备系统两部分构成,如图3所示。在正常状态下,卫星转播车利用车载卫星天线发送节目信号,经过通信卫星转发后,传输主系统的卫星天线接收到节目信号,通过光端机和光纤将信号传输至卫星接收机,卫星接收机对信号进行解码,最后通过电缆将节目信号传输至总控矩阵;而在异常状态下,即传输主系统的光端机或卫星接收机出现失效时,技术人员可通过光纤配线架以跳接的方式,迅速将应急备系统的光端机和卫星接收机接入传输链路,从而确保节目信号可以安全、完整地传输至总控矩阵。因此只有当传输主系统和应急备系统同时失效时,才会导致卫星传输子系统失效。

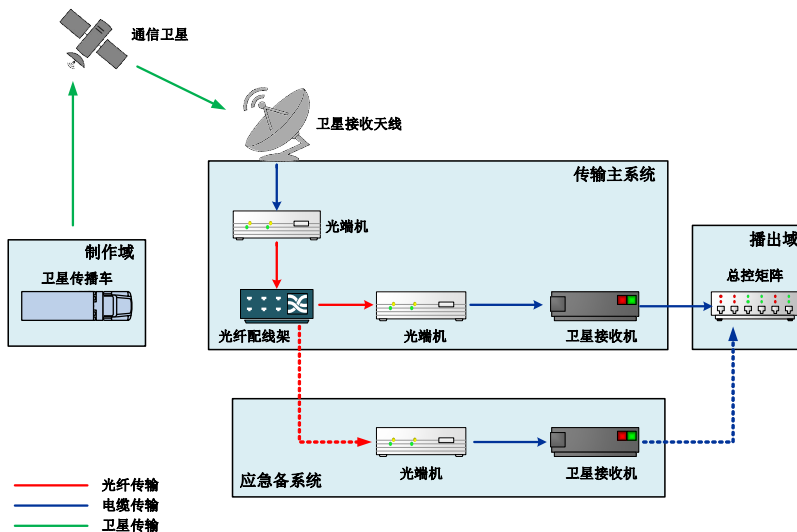


图3 卫星传输子系统技术分解

2.3 光缆传输子系统技术分解

光缆传输子系统同样由传输主系统和应急备系统两部分构成,如图4所示。在正常状态下,卫星转播车通过通信光缆发送节目信号,传输主系统的光中继器接收信号并进行增益,随后光端机对信号进行光-电转换,最

后通过电缆将节目信号传输至总控矩阵;而在异常状态下,即传输主系统的光端机出现失效时,技术人员同样可通过光纤配线架以跳接的方式,将应急备系统的光端机即时接入传输链路,以保障节目信号至总控矩阵的传输安全。因此只有当传输主系统和应急备系统同时失效时,才会导致光缆传输子系统失效。

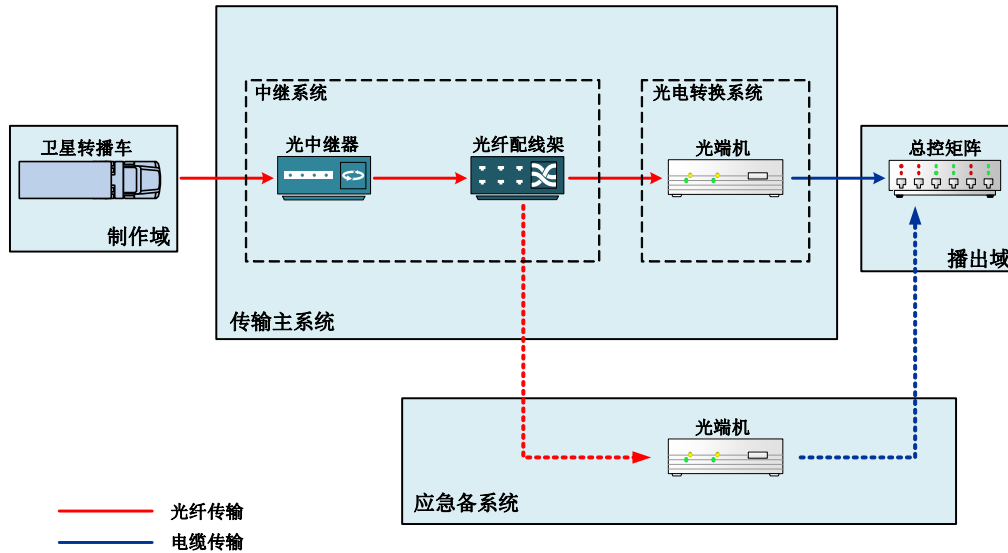


图4 光缆传输子系统技术分解

3 广播电视信号传输安全风险识别

3.1 故障树分析法

故障树分析法(Fault Tree Analysis, FTA)是用于大型复杂系统可靠性、安全性分析和风险评价的一种方法。本文用到的故障树事件有用圆形符号表示的底事件、用矩形符号表示的顶事件和中间事件^[3],符号表示及其含义如表1所示。

表1 故障树事件符号表示及其含义

事件	符号	含义
底事件		位于故障树底端、无须探明其发生原因的事件。
顶事件		位于故障树顶端的结果事件。在所有事件联合作用下发生,是输入事件而非输出事件。
中间事件		位于顶事件之下和底事件之上的结果事件。可作为输入或输出事件。

在故障树中,逻辑门用于描述不同事件间的逻辑和因果关系。本文用到的逻辑门主要是与门和或门,符号表示及其含义如表2所示。

表2 故障树逻辑门符号表示及其含义

门	符号	含义
与门		只有所有输入事件发生,门的输出事件才会发生。
或门		只要有一个输入事件发生,门的输出事件就会发生。

3.2 广播电视信号传输系统故障树

根据系统技术特征,以“广播电视信号传输系统失效”为顶事件,以“卫星传输子系统失效”、“光缆传输子系统失效”为中间事件,各事件的符号表示及其描述如表3所示。建立广播电视信号传输系统的故障树模型,如图5所示。

表3 广播电视信号传输系统故障树事件符号表示及其描述

事件	描述
T	广播电视信号传输系统失效
T_1	卫星传输子系统失效
T_2	光缆传输子系统失效

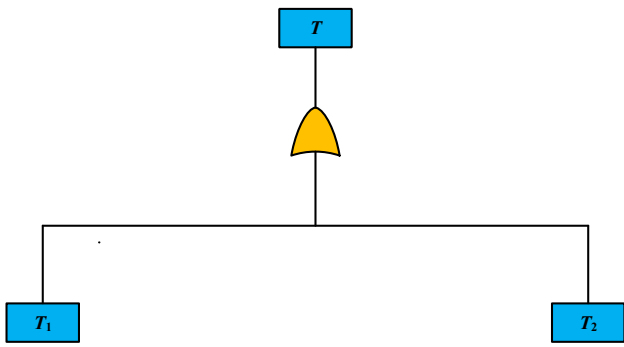


图5 广播电视信号传输系统故障树

3.3 卫星传输子系统故障树

根据卫星传输子系统的技术分解结果和相关文献资料^[4],以“卫星传输子系统失效”为顶事件,识别出9项中间事件和18项底事件,各事件的符号表示及其描述如表4所示。分析这些风险因素及风险因素之间的逻辑关系,建立卫星传输子系统的故障树模型,如

图6所示。

表4 卫星传输子系统故障树事件符号表示及其描述

事件	描述	事件	描述
T_1	卫星传输子系统失效	x_5	插播信号
G_1	传输主系统失效	x_6	线缆断裂
G_2	应急备系统失效	x_7	操作失误
G_3	信号中断	x_8	电力故障
G_4	信号劣化	x_9	火灾
G_5	应急操作失效	x_{10}	雷电
G_6	信号强度低	x_{11}	暴雨
G_7	信号受干扰	x_{12}	大雪
G_8	人员失效	x_{13}	台风
G_9	管理失效	x_{14}	微波干扰
x_1	设备故障	x_{15}	业务水平低
x_2	人为破坏	x_{16}	规章制度缺陷
x_3	野蛮施工	x_{17}	管理不到位
x_4	偷盗设施	x_{18}	应急预案缺失

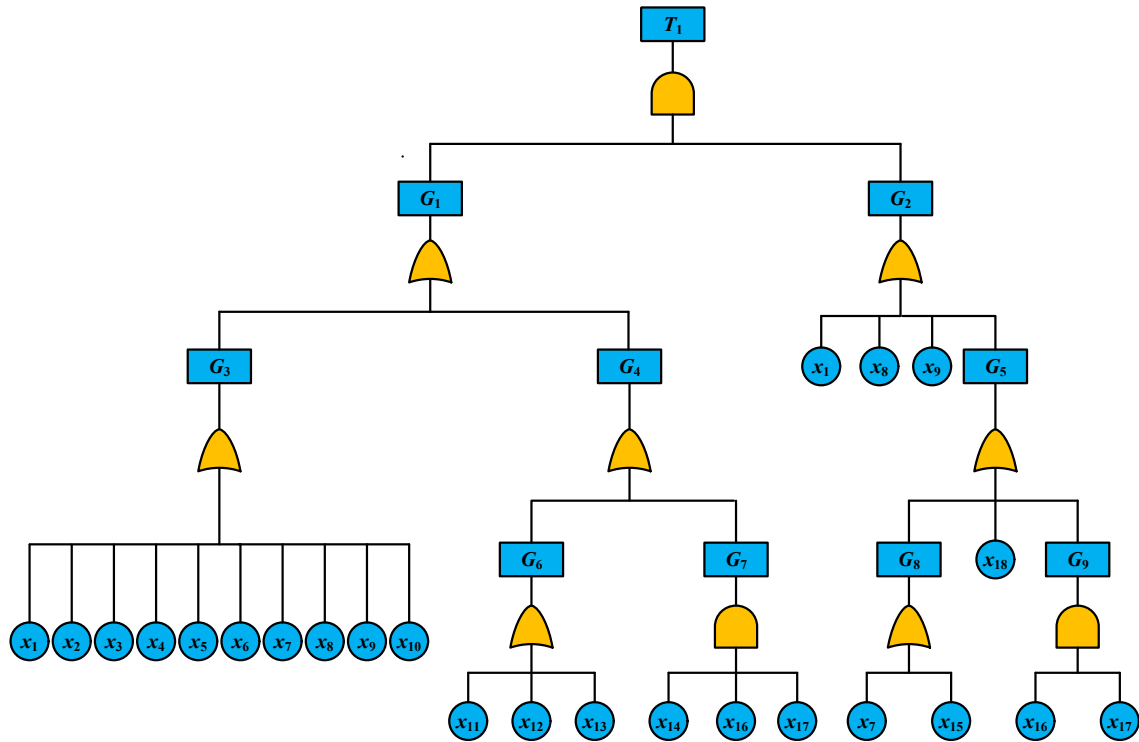


图6 卫星传输子系统故障树

在卫星传输子系统的故障树中,在顶事件“卫星传输子系统失效(T_1)”之下,组成各中间事件的风险因素共有9项:

- (1)传输主系统失效(G_1),是指卫星传输模式下,传输主系统因各种内在、外在的因素而导致的系统失效;
- (2)应急备系统失效(G_2),是指卫星传输模式下,应急备系统因各种内在、外在的因素而导致的系统失效;

- (3)信号中断(G_3),是指卫星信号完全中断;
- (4)信号劣化(G_4),是指卫星信号质量下降,不符合相关技术标准;
- (5)应急操作失效(G_5),是指各种原因造成技术人员不能进行应急操作,导致卫星信号无法及时恢复;
- (6)信号强度低(G_6),是指卫星信号信噪比较低,无法正常使用;

(7)信号受干扰(G_7),是指卫星信号受到异常干扰,无法正常使用;

(8)人员失效(G_8),是指技术人员由于自身原因不能进行应急操作,导致卫星信号无法及时恢复;

(9)管理失效(G_9),是指技术人员由于管理原因不能进行应急操作,导致卫星信号无法及时恢复。

在卫星传输子系统的故障树中,在9项中间事件之下,组成各底事件的风险因素共有18项:

(1)设备故障(x_1),是指技术设备因自身损耗造成的设备失效,包含卫星天线接收不到卫星信号或信号强度低、光端机无法进行光-电转换、卫星接收机不能正常解码等,导致卫星信号中断或无法及时恢复;

(2)人为破坏(x_2),是指因台内外人员蓄意对系统进行破坏,造成设备及线缆失效,导致卫星信号中断;

(3)野蛮施工(x_3),是指因施工作业不遵守施工规程和管理规范,造成设备及线缆失效,导致卫星信号中断;

(4)偷盗设施(x_4),是指因人为窃取、盗割而造成设备及线缆失效,导致卫星信号中断;

(5)插播信号(x_5),是指因组织或个人对系统进行恶意攻击,造成节目内容遭到非法篡改,导致卫星信号中断;

(6)线缆断裂(x_6),是指电缆、光纤等传输介质因过度弯曲和材料老化而造成的线缆断裂,导致卫星信号中断;

(7)操作失误(x_7),是指技术人员因疏忽造成参数设置或线路连接错误,致使设备失效,导致卫星信号中断或无法及时恢复;

(8)电力故障(x_8),是指因外电或UPS供电中断造成设备失效,导致卫星信号中断或无法及时恢复;

(9)火灾(x_9),是指因卫星机房或总控机房发生火灾,造成设备及线缆失效,导致卫星信号中断或无法及时恢复;

(10)雷电(x_{10}),是指在极端气象条件下,雷击造成卫星天线等设备设施失效,导致卫星信号中断;

(11)暴雨(x_{11}),是指在在极端气象条件下,暴雨造成电磁波雨衰现象,导致卫星信号强度下降;

(12)大雪(x_{12}),是指在极端气象条件下,积雪造成卫星天线无法正常聚焦电磁波信号,导致卫星信号强度下降;

(13)台风(x_{13}),是指在极端气象条件下,台风造成卫星天线俯仰角、方位角出现偏移,导致卫星信号强度下降;

(14)微波干扰(x_{14}),是指相关单位使用相同、相近频段的电磁波对卫星信号造成同频或邻频干扰,导致卫星信号异常;

(15)业务水平低(x_{15}),是指技术人员由于业务能力不足,在应急状态下不能准确排除故障,造成设备及线缆失效,导致卫星信号无法及时恢复;

(16)规章制度缺陷(x_{16}),是指在突发或应急状态下,因规章制度缺陷而造成技术人员不能进行业务协调或应急操作,导致卫星信号异常或无法及时恢复;

(17)管理不到位(x_{17}),是指因管理松懈迟缓,造成技术人员不能进行业务协调或应急操作,导致卫星信号异常或无法恢复;

(18)应急预案缺失(x_{18}),是指因应急预案存在缺失,造成技术人员不能按照预案采取应急措施,导致卫星信号无法及时恢复。

3.4 光缆传输子系统故障树

根据光缆传输子系统的技术分解结果和相关文献资料^[5-6],以“光缆传输子系统失效”为顶事件,识别出7项中间事件和10项底事件,事件符号表示及其描述如表5所示。分析这些风险因素及风险因素之间的逻辑关系,建立光缆传输子系统的故障树模型,如图7所示。

表5 光缆传输子系统故障树事件符号表示及其描述

事件	描述	事件	描述
T_2	光缆传输子系统失效	x_3	野蛮施工
F_1	传输主系统失效	x_6	线缆断裂
F_2	应急备系统失效	x_7	操作失误
F_3	光电转换系统失效	x_8	电力故障
F_4	中继系统失效	x_9	火灾
F_5	应急操作失效	x_{15}	业务水平低
F_6	人员失效	x_{16}	规章制度缺陷
F_7	管理失效	x_{17}	管理不到位
x_1	设备故障	x_{18}	应急预案缺失

在光缆传输子系统的故障树中,在顶事件“光缆传输子系统失效(T_2)”之下,组成各中间事件的风险因素有7项:

(1)传输主系统失效(F_1),是指光缆传输模式下,传输主系统因各种内在、外在的因素而导致的系统失效;

(2)应急备系统失效(F_2),是指光缆传输模式下,应急备系统因各种内在、外在的因素而导致的系统失效;

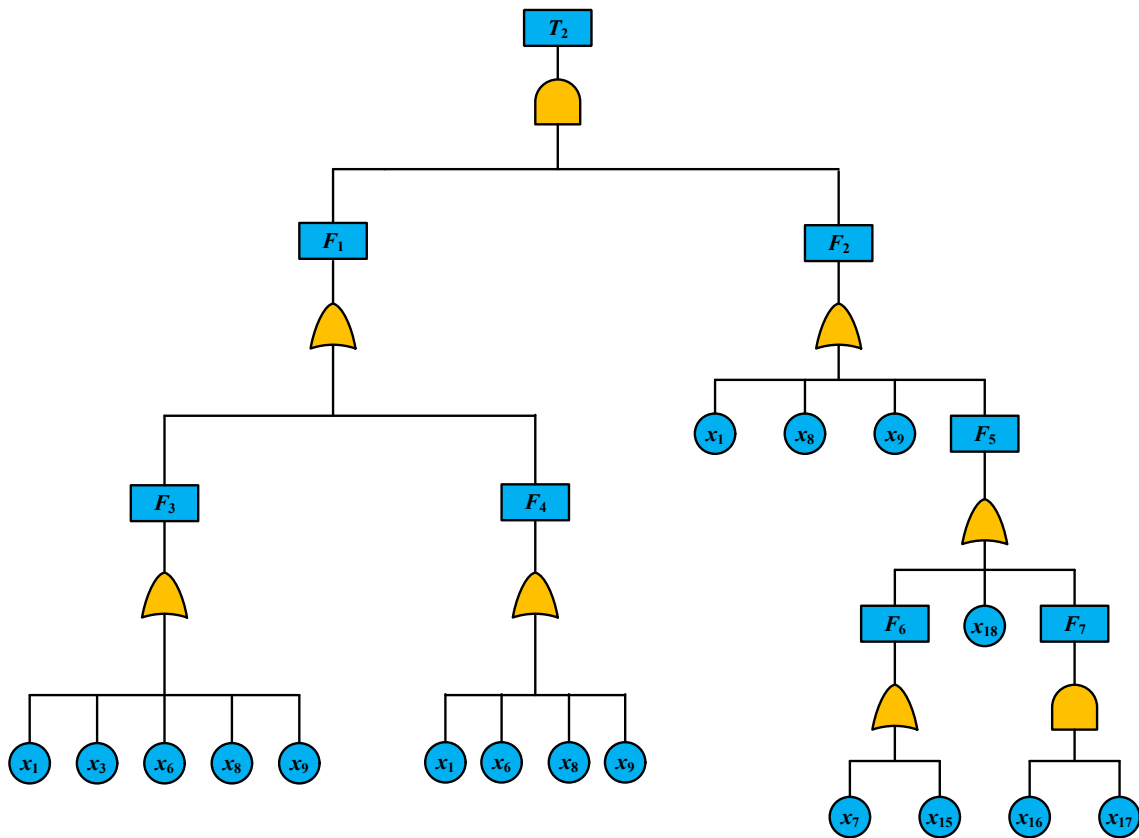


图7 光缆传输子系统故障树

(3)光电转换系统失效(F_3),是指光端机和连接光端机的电缆或光纤出现失效,导致光缆信号中断;

(4)中继系统失效(F_4),是指光中继器及其连接的光纤出现失效,导致光缆信号中断;

(5)应急操作失效(F_5),是指各种原因造成技术人员不能进行应急操作,导致光缆信号无法及时恢复;

(6)人员失效(F_6),是指技术人员由于自身原因不能进行应急操作,导致光缆信号无法及时恢复;

(7)管理失效(F_7),是指技术人员由于管理原因不能进行应急操作,导致光缆信号无法及时恢复。

在光缆传输子系统的故障树中,在7项中间事件之下,组成各底事件的风险因素共有10项:

(1)设备故障(x_1),是指技术设备因自身损耗造成的设备失效,包含光中继器不能实现对光信号的增益、光端机无法进行光-电转换等,导致光缆信号中断或无法及时恢复;

(2)野蛮施工(x_3),是指因施工作业不遵守施工规程和管理规范,造成设备及线缆失效,导致光缆信号中断;

(3)线缆断裂(x_6),是指电缆、光纤等传输介质因过度弯曲和材料老化而造成的线缆断裂,导致光缆信

号中断;

(4)操作失误(x_7),是指技术人员因疏忽造成参数设置或线路连接错误,致使设备失效,导致光缆信号中断或无法及时恢复;

(5)电力故障(x_8),是指因外电或UPS供电中断造成设备失效,导致光缆信号中断或无法及时恢复;

(6)火灾(x_9),是指因配线机房或总控机房发生火灾,造成设备及线缆失效,导致光缆信号中断或无法及时恢复;

(7)业务水平低(x_{15}),是指技术人员由于业务能力不足,在应急状态下不能准确排除故障,导致光缆信号无法及时恢复;

(8)规章制度缺陷(x_{16}),是指在应急状态下,因规章制度缺陷而造成技术人员不能进行应急操作,导致光缆信号无法及时恢复;

(9)管理不到位(x_{17}),是指因管理松懈迟缓,造成技术人员不能进行应急操作,导致光缆信号无法及时恢复;

(10)应急预案缺失(x_{18}),是指因应急预案存在缺失,造成技术人员不能按照预案采取应急措施,导致光缆信号无法及时恢复。

4 广播电视信号传输安全风险评价

4.1 故障树定性分析

故障树法主要以计算最小割集的方式进行定性分析。假设系统事件的发生状态只有两种且互为独立,故障树由 n 个底事件构成,设 $x_i(i=1,2,\dots,n)$ 取值为 1 或 0,表示底事件发生或不发生。

割集 C 是底事件集合 $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 的子集,若底事件都发生则顶事件必发生。如果将割集中任一底事件去掉后 C 不再是割集,则该割集 C 称为最小割集^[7]。

设故障树由 n 个底事件组成, x_i 为描述第 i 个底事件状态的布尔变量, x_i 的描述如式(1)所示:

$$x_i = \begin{cases} 1, & \text{若第 } i \text{ 个底事件发生} \\ 0, & \text{若第 } i \text{ 个底事件不发生} \end{cases}, i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

其集合为 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 。故障树顶事件状态变量与底事件状态变量的关系可用结构函数 $\varphi(X)$ = $\varphi(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 来表示。令 C_1, C_2, \dots, C_n 为故障树的 k 个最小割集, $\varphi(X)$ 如式(2)所示:

$$\varphi(X) = \bigcup_{j=1}^k \bigcap_{x_i \in C_j} x_i \quad (2)$$

其中, k 为最小割集数目; C_j 为第 j 个最小割集 ($j=1, 2, \dots, k$)。

上行法是计算故障树最小割集的一种重要方法。该计算方法沿故障树自下而上进行,利用运算规则进行简化吸收,从而得到底事件积之和的表达式,其中每项即为一个最小割集^[8]。

利用上行法对卫星传输子系统故障树的最小割集进行计算,故障树最下一级为:

$$G_6 = x_{11} + x_{12} + x_{13}$$

$$G_7 = x_{14}x_{16}x_{17}$$

$$G_8 = x_7 + x_{15}$$

$$G_9 = x_{16}x_{17}$$

往上一级为:

$$G_3 = x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 + x_7 + x_8 + x_9 + x_{10}$$

$$G_4 = G_6 + G_7 = x_{11} + x_{12} + x_{13} + x_{14}x_{16}x_{17}$$

$$G_5 = G_8 + G_9 + x_{18} = x_7 + x_{15} + x_{16}x_{17} + x_{18}$$

再往上一级为:

$$G_1 = G_3 + G_4$$

$$= x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 + x_7 + x_8 + x_9 + x_{10} + x_{11} + x_{12} + x_{13} + x_{14}x_{16}x_{17}$$

$$G_2 = x_1 + x_8 + x_9 + G_5$$

$$= x_1 + x_7 + x_8 + x_9 + x_{15} + x_{16}x_{17} + x_{18}$$

通过集合运算简化吸收后,最后一级为:

$$T_1 = G_1 \cdot G_2$$

$$= x_1 + x_7 + x_8 + x_9 + x_2x_{15} + x_2x_{18} + x_3x_{15} + x_3x_{18} + x_4x_{15} + x_4x_{18} + x_5x_{15} + x_5x_{18} + x_6x_{15} + x_6x_{18} + x_{10}x_{15} + x_{10}x_{18} + x_{11}x_{15} + x_{11}x_{18} + x_{12}x_{15} + x_{12}x_{18} + x_{13}x_{15} + x_{13}x_{18} + x_2x_{16}x_{17} + x_3x_{16}x_{17} + x_4x_{16}x_{17} + x_5x_{16}x_{17} + x_6x_{16}x_{17} + x_{10}x_{16}x_{17} + x_{11}x_{16}x_{17} + x_{12}x_{16}x_{17} + x_{13}x_{16}x_{17} + x_{14}x_{16}x_{17}$$

得到卫星传输子系统故障树的 32 项最小割集为:

$$\{x_1\}, \{x_7\}, \{x_8\}, \{x_9\}, \{x_2, x_{15}\}, \{x_2, x_{18}\}, \{x_3, x_{15}\}, \{x_3, x_{18}\}, \{x_4, x_{15}\}, \{x_4, x_{18}\}, \{x_5, x_{15}\}, \{x_5, x_{18}\}, \{x_6, x_{15}\}, \{x_6, x_{18}\}, \{x_{10}, x_{15}\}, \{x_{10}, x_{18}\}, \{x_{11}, x_{15}\}, \{x_{11}, x_{18}\}, \{x_{12}, x_{15}\}, \{x_{12}, x_{18}\}, \{x_{13}, x_{15}\}, \{x_{13}, x_{18}\}, \{x_2, x_{16}, x_{17}\}, \{x_3, x_{16}, x_{17}\}, \{x_4, x_{16}, x_{17}\}, \{x_5, x_{16}, x_{17}\}, \{x_6, x_{16}, x_{17}\}, \{x_{10}, x_{16}, x_{17}\}, \{x_{11}, x_{16}, x_{17}\}, \{x_{12}, x_{16}, x_{17}\}, \{x_{13}, x_{16}, x_{17}\}, \{x_{14}, x_{16}, x_{17}\} \circ$$

同样利用上行法对光缆传输子系统故障树的最小割集进行计算,故障树最下一级为:

$$F_6 = x_7 + x_{15}$$

$$F_7 = x_{16}x_{17}$$

往上一级为:

$$F_3 = x_1 + x_3 + x_6 + x_8 + x_9$$

$$F_4 = x_1 + x_6 + x_8 + x_9$$

$$F_5 = F_6 + F_7 + x_{18} = x_7 + x_{15} + x_{16}x_{17} + x_{18}$$

再往上一级为:

$$F_1 = F_3 + F_4 = x_1 + x_3 + x_6 + x_8 + x_9$$

$$F_2 = x_1 + x_8 + x_9 + F_5$$

$$= x_1 + x_7 + x_8 + x_9 + x_{15} + x_{16}x_{17} + x_{18}$$

通过集合运算简化吸收后,最后一级为:

$$T_2 = F_1 \cdot F_2$$

$$= x_1 + x_8 + x_9 + x_3x_7 + x_3x_{15} + x_3x_{18} + x_6x_7$$

$$+ x_6x_{15} + x_6x_{18} + x_3x_{16}x_{17} + x_6x_{16}x_{17}$$

得到光缆传输子系统故障树的 11 项最小割集为:

$$\{x_1\}, \{x_8\}, \{x_9\}, \{x_3, x_7\}, \{x_3, x_{15}\}, \{x_3, x_{18}\}, \{x_6, x_7\}, \{x_6, x_{15}\}, \{x_6, x_{18}\}, \{x_3, x_{16}, x_{17}\}, \{x_6, x_{16}, x_{17}\} \circ$$

由于卫星传输子系统和光缆传输子系统的故障树是或门关系, $T = T_1 + T_2$, 通过集合运算简化吸收后,得到广播电视信号传输系统故障树的 32 项最小割集为:

$$\{x_1\}, \{x_7\}, \{x_8\}, \{x_9\}, \{x_2, x_{15}\}, \{x_2, x_{18}\}, \{x_3, x_{15}\}, \{x_3, x_{18}\}, \{x_4, x_{15}\}, \{x_4, x_{18}\}, \{x_5, x_{15}\}, \{x_5, x_{18}\}, \{x_6, x_{15}\}, \{x_6, x_{18}\}, \{x_{10}, x_{15}\}, \{x_{10}, x_{18}\}, \{x_{11}, x_{15}\}, \{x_{11}, x_{18}\}, \{x_{12}, x_{15}\}, \{x_{12}, x_{18}\}, \{x_{13}, x_{15}\}, \{x_{13}, x_{18}\}, \{x_2, x_{16}, x_{17}\}, \{x_3, x_{16}, x_{17}\}, \{x_4, x_{16}, x_{17}\}, \{x_5, x_{16}, x_{17}\}, \{x_6, x_{16}, x_{17}\}, \{x_{10}, x_{16}, x_{17}\}, \{x_{11}, x_{16}, x_{17}\}, \{x_{12}, x_{16}, x_{17}\}, \{x_{13}, x_{16}, x_{17}\}, \{x_{14}, x_{16}, x_{17}\} \circ$$

4.2 故障树定量分析

因为不能确定影响广播电视信号传输安全的发生概率,所以本文采用结构重要度分析的方式对系统故障树进行定量分析。结构重要度是指在底事件发生概率未知的情况下,设定底事件的概率值均为1/2,即底事件的重要度仅由故障树的结构确定,此时的重要度 $I_Y(x_i)$ 称为底事件 x_i 的结构重要度^[9]。结构重要度系数的计算如式(3)所示:

$$I_Y(x_i) = 1 - \prod_{x_i \in K_j} \left(1 - \frac{1}{2^{N_j-1}}\right) \quad (3)$$

其中, K_j 为第 j 个最小割集; N_j 为底事件所在最小割集中的底事件个数。

x_1 (设备故障)、 x_7 (操作失误)、 x_8 (电力故障)和 x_9 (火灾)在所有最小割集中各出现1次,其中1个底事件的最小割集为1个,因此根据式(3)计算得到:

$$I_Y(x_1) = I_Y(x_7) = I_Y(x_8) = I_Y(x_9) = 1 - \prod_{x_i \in 1} \left(1 - \frac{1}{2^{1-1}}\right) = 1$$

x_2 (人为破坏)、 x_3 (野蛮施工)、 x_4 (偷盗设施)、 x_5 (插播信号)、 x_6 (线缆断裂)、 x_{10} (雷电)、 x_{11} (暴雨)、 x_{12} (大雪)和 x_{13} (台风)在所有最小割集中各出现3次,其中2个底事件的最小割集为2个,3个底事件的最小割集为1个,因此根据式(3)计算得到:

$$\begin{aligned} I_Y(x_2) &= I_Y(x_3) = I_Y(x_4) = I_Y(x_5) = I_Y(x_6) \\ &= I_Y(x_{10}) = I_Y(x_{11}) = I_Y(x_{12}) = I_Y(x_{13}) \\ &= 1 - \prod_{x_i \in 2} \left(1 - \frac{1}{2^{2-1}}\right) \prod_{x_i \in 1} \left(1 - \frac{1}{2^{3-1}}\right) = 0.8125 \end{aligned}$$

x_{15} (业务水平低)和 x_{18} (应急预案缺失)在所有最小割集中各出现9次,其中2个底事件的最小割集为9个,因此根据式(3)计算得到:

$$I_Y(x_{15}) = I_Y(x_{18}) = 1 - \prod_{x_i \in 9} \left(1 - \frac{1}{2^{2-1}}\right) = 0.9980$$

x_{16} (规章制度缺陷)和 x_{17} (管理不到位)在所有最小割集中各出现10次,其中3个底事件的最小割集为10个,因此根据式(3)计算得到:

$$I_Y(x_{16}) = I_Y(x_{17}) = 1 - \prod_{x_i \in 10} \left(1 - \frac{1}{2^{3-1}}\right) = 0.9437$$

x_{14} (微波干扰)在所有最小割集中出现1次,其中3个底事件的最小割集为1个,因此根据式(3)计算得到:

$$I_Y(x_{14}) = 1 - \prod_{x_i \in 1} \left(1 - \frac{1}{2^{3-1}}\right) = 0.2500$$

以结构重要度为依据,对故障树底事件进行排序,建立故障树底事件与风险因素的映射对应关系,

使用相关标度法确定影响广播电视信号传输安全的风险因素的风险等级,如表6所示。

表6 广播电视信号传输安全风险评价结果

排序	底事件	结构重要度系数	风险因素	风险等级
1	x_1, x_7, x_8, x_9	1	设备故障 操作失误 电力故障 火灾	重大
2	x_{15}, x_{18}	0.9980	业务水平低 应急预案缺失	重大
3	x_{16}, x_{17}	0.9437	规章制度缺陷 管理不到位	重大
4	$x_2, x_3, x_4, x_5, x_6,$ $x_{10}, x_{11}, x_{12}, x_{13}$	0.8125	人为破坏 野蛮施工 偷盗设施 插播信号 线缆断裂 雷电 暴雨 大雪 台风	较大
5	x_{14}	0.2500	微波干扰	一般

研究得到的广播电视信号传输安全风险评价结果,为后续风险应对策略的选择、风险应对措施制定等工作提供了重要决策依据。可以看出:

(1)因为“设备故障”、“操作失误”、“电力故障”、“火灾”、“业务水平低”、“应急预案缺失”、“规章制度缺陷”和“管理不到位”为重大风险因素,所以在设备运行保障、操作规程应用、电力保障、火灾防范、人员培训、应急预案完善、规章制度修订和管理水平提升等方面采取相应的风险应对措施,是确保广播电视信号传输安全的先决条件;

(2)因为“人为破坏”、“野蛮施工”、“偷盗设施”、“插播信号”、“线缆断裂”、“雷电”、“暴雨”、“大雪”和“台风”为较大风险因素,所以在安保能力提升、施工管理保障、信号冗余备份、线缆维护保养、恶劣天气防范等方面采取相应的风险应对措施,是广播电视信号传输安全保障工作中需要重点关注的关键问题;

(3)因为“微波干扰”为一般风险因素,所以在干扰协调机制建设等方面采取相应的风险应对措施,也是保障广播电视信号传输安全不可忽视的因素。

5 结束语

本文在技术分解基础上,利用故障树分析法对影响广播电视信号传输安全的风险因素进行了风险识别和风险分析,得到了广播电视信号传输安全风险评

价结果。该研究成果在实际应用中展现出了良好的适用性和有效性,为广播电视信号传输安全的管理工作提供了有力的决策支撑,有效保障了多元信号背景下的信号传输安全,推动了广播电视台的安全播出保障工作更上新台阶。

参考文献(References):

- [1] 刘旭东.广播电视及安全播出保障能力评估研究与实践[M].北京:中国言实出版社,2017.
- [2] 国家广播电视总局.广播电视安全播出管理规定(第二次修订版)[S/OL]. [2021-03-23]. https://www.nrta.gov.cn/art/2021/4/9/art_1588_55722.html.
- [3] 姚成玉,陈东宁.T-S故障树理论及其应用[M].北京:国防工业出版社,2020.
- [4] 张瑞芝,杨波,王昌明.广播电视卫星地球站播出安全风险评估方法研究[J].广播与电视技术,2012(4): 121-124.
- [5] 覃道光,朱建明.有线电视安全播出风险识别与评价研究[J].广播与电视技术,2018(3): 114-119.
- [6] 张瑞芝,张利军.广播电视光缆干线传输网传输安全风险评估方法研究[J].广播与电视技术,2014(4): 117-120.
- [7] 崔铁军,马云东.空间故障树的径集域与割集域的定义与认识[J].中国安全科学学报,2014(4): 27-32.
- [8] 郭波,龚时雨,谭云涛.项目风险管理[M].北京:电子工业出版社,2008.
- [9] 胡晓.城市轨道交通信号系统安全风险评价[D].四川:西南交通大学,2012.

编辑:赵志军