基于故障树分析法的矿山工程机械故障预警与设备管理研究

王泽琪
中稀（凉山）稀土有限公司，四川 凉山 615600

[摘要]四川露天非煤矿山，工程设备经常出故障，文章选用了故障树分析法（FTA），搭建起了一套露天采选设备的故障预警和管理体系。以皮带输送机作为例子，建立起了对应的故障树模型，算出了最小割集，再开展了结构重要度的分析，找到了造成设备停机的故障传导路径，定位好了容易出问题的薄弱零部件。把故障树最底层的失效事件，转换成了温度、振动、油压、皮带跑偏量这类可以实时在线监测的数据，以此设置好了不同等级的故障预警规则。同时，结合零部件的重要程度调整好了维修方案，优化好了备件储备，并且引入了预测性维护的思路，搭建起了全生命周期的管理体系。研究的结果证明，FTA能够理清露天采选设备各类故障之间的逻辑关系，还能快速反向查找出故障的根本原因，可以帮助四川露天非煤矿山加强设备安全的管理，降低设备停机故障，为现场的生产提供了技术支持。

[关键词]故障树分析；矿山工程机械；故障预警；设备管理；露天非煤矿山
DOI：10.33142/ec.v9i11.20730　　中图分类号：TD63　　文献标识码：A

Research on Fault Tree Analysis based Fault Warning and Equipment Management of Mining Engineering Machinery

WANG Zeqi
Zhongxi (Liangshan) Rare Earth Co., Ltd., Liangshan, Sichuan, 615600, China

Abstract: In Sichuan's open-pit non coal mines, engineering equipment often malfunctions. This article uses Fault Tree Analysis (FTA) to establish a fault warning and management system for open-pit mining and selection equipment. Taking the belt conveyor as an example, a corresponding fault tree model was established, the minimum cut set was calculated, and the structural importance analysis was carried out to identify the fault transmission path that caused equipment shutdown and locate weak components that are prone to problems. By converting the failure events at the bottom of the fault tree into real-time online monitoring data such as temperature, vibration, oil pressure, and belt deviation, different levels of fault warning rules have been set up. At the same time, the maintenance plan has been adjusted based on the importance of the components, the spare parts reserve has been optimized, and the concept of predictive maintenance has been introduced to establish a full lifecycle management system. The research results prove that FTA can clarify the logical relationship between various faults of open-pit mining and selection equipment, and quickly reverse find the root cause of the faults, which can help Sichuan open-pit non coal mines strengthen equipment safety management, reduce equipment shutdown faults, and provide technical support for on-site production.

Keywords: fault tree analysis; mining engineering machinery; fault warning; equipment management; open pit non coal mine

引言

露天矿山的采选设备，是保障矿山连续生产最关键的硬件。设备能否稳定运转，直接影响矿山生产安全和采选作业效率。如今露天矿山开采规模持续变大，机械化水平也在不断提高，皮带输送机、排土机、破碎机、球磨机这类大型设备，还有重选、浮选、磁选等选矿装备，数量越来越多。但这类大型设备一旦出现突发故障，不仅造成整条生产线停工，经济损失，严重时还会损坏设备本体，甚至引发人员受伤等安全事故。故障树分析法（FTA）采用逆向推演的思路，它从最顶层的事故结果入手，一层一层反向查找故障产生的根源。可以借助事件之间的逻辑关联，再结合最小割集、结构重要度分析，找到故障主要的传播路径。选取四川某露天非煤矿山作为研究案例，先梳理露天采选工程机械的故障特点，同时剖析当下设备管理工作里存在的各类短板。以故障树分析作为核心，搭建一套对应的技术方案，建立设备故障预警机制，并且配套完善设

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

备管理制度。

1 露天矿山工程机械故障特征与设备管理现状

1.1 四川露天矿山工程机械作业特点

四川攀西地区的露天非煤矿山，现场作业环境差，设备长时间高负荷连续运转，而且采选一体化生产线的设备之间联动紧密。皮带输送、排土排弃、破碎磨矿、矿物分选装置持续工作。川西南山地矿区地势落差大，露天场地没有遮挡。这里雨水多、空气湿度大设备金属结构很容易生锈，电气元件的绝缘效果变差，设备润滑系统容易进水，造成润滑油乳化。同时矿石本身磨蚀性强，破碎、磨矿、输送设备上的耐磨件磨损速度快，零部件需要频繁更换。另外，矿区里设备种类繁多，对应的故障类型差别也很大。露天采选设备主要分成穿孔、铲装、排土输送、破碎磨矿、矿物分选五大类。排土机和皮带输送机，常常出现皮带撕裂、跑偏、托辊损坏以及传动机构失效的问题。破碎磨矿设备，大多是衬板磨损、齿轮和轴承损坏。重选、浮选、磁选这类分选设备，故障大多集中在搅拌组件、泵体、磁系还有阀门管路等位置。

1.2 设备管理存在的主要问题

在当下，国内大部分露天矿山，至今还停留在事后抢修的被动维保模式中，无法提前预判设备存在的各类运行风险。与此同时，现场运维人员只能单纯依靠个人过往经验来确定点检项目，并没有结合关键零部件真实的失效规律，梳理形成标准化的点检清单，这就直接造成了设备漏检频发、点检台账弄虚作假等管理乱象。而且，矿山设备的运行参数、故障记录、维修档案都没有做到数字化存档，大量纸质资料很容易丢失损毁。长期下来，故障台账、零部件使用寿命这类基础运维数据的积累出现了严重不足的问题，管理人员很难依托真实的数据，做出量化、精细化的运维管理决策。除此之外，很多矿山在备件库存的管理上也存在着明显短板，没有建立起分级管控的方案，并未按照零部件的重要程度、故障发生的概率来统筹规划备货工作。所以，高价值的关键备件经常断货，耽误抢修进度，普通通用备件又大量长期积压，占用了大量流动资金。

2 故障树分析法的基本原理与建模流程

2.1 故障树分析原理

故障树分析属于逆向推导故障的分析手段，它先锁定最上层的顶事件，再一层一层往下查找会造成故障的各类原因，还会用规范符号来描述各个故障事件，以及事件之间的逻辑关系。故障树一般包含顶事件、中间事件、底事件和逻辑门部分，平时最常用的是或门和与门。其中或门的逻辑是，只要下属任意一个事件出现，上层事件就会触发；但与门不一样，它要求下属所有事件必须同时发生，上层事件才会出现。故障树模型搭建好后，进行定性分析和定量分析这两类分析工作。定性分析主要用来求解最小割集和最小径集，从中梳理出所有可能导致顶事件发生的故障组合。而定量分析，需要录入各个底事件的失效概率，算出顶事件的发生概率，还能求出每个底事件对应的概率重要度、关键重要度。这里要注意，结构重要度比较特殊，它只由故障树本身的结构决定，不受底事件失效概率的影响，我们可以依靠最小割集，来对各个部件做风险等级排序。

2.2 建模与定性定量分析流程

开展故障树的建模，先要厘清设备的结构与工作的原理。先锁定好研究的对象，划定好系统的边界，选定好顶事件。再自上而下地逐层分解故障的诱因，搭建起故障树并完成了校验。运用下行法或是上行法求解出最小割集，开展对应的定性分析。若已有底事件的失效统计数据，就可以继续开展定量的计算，算出顶事件的失效概率，得到各个底事件的重要度。结合分析得到的结果，针对性地制定设备的管控方案，落实好优化改进的举措。

3 故障树模型构建：以露天矿皮带输送机为例

3.1 故障树建立

皮带输送机是露天矿山采选生产线里连续输送的核心装备，承担了矿石转运的任务，属于生产线单点的关键设备。选取皮带输送机停机故障作为顶事件 T，从输送带本体、驱动传动系统、托辊机架、张紧制动系统、电气控制系统、人为管理因素这 6 个子系统，构建了故障树模型。

故障树逻辑表达式如下：

$T=M1\cup M2\cup M3\cup M4\cup M5\cup M6$ $M1=x1\cup x2\cup x3$（输送带本体故障：输送带撕裂 x1、输送带严重跑偏 x2、输送带老化脱层 x3）

$M2=x4\cup x5\cup x6$（驱动传动系统故障：驱动电机损坏 x4、减速器齿轮轴承失效 x5、联轴器断裂 x6）

$M3=x7\cup x8$（托辊与机架故障：托辊卡死损坏 x7、机架变形开裂 x8）$M4=x9\cap x10$（张紧制动系统故障：张紧力不足 x9 与制动闸失效 x10 同时发生，引发停机事故）

$M5=x11\cup x12$（电气控制系统故障：电控元件损坏 x11、保护回路失效 x12）$M6=x13\cap x14$（人为管理因素：物料大块卡堵 x13 与日常点检维护缺失 x14 同时发生）

3.2 最小割集、最小径集与结构重要度分析

采用下行法对故障树顶事件求解最小割集，一共得到 10 个一阶割集，分别为{x1}、{x2}、{x3}、{x4}、{x5}、{x6}、{x7}、{x8}、{x11}、{x12}；还有 2 个二阶割集：{x9,x10}、{x13,x14}。最小割集的阶数越低，触发顶事件

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

故障需要满足的失效条件就越少，对应的设备风险也就越高。一阶割集对应的底事件属于单点失效，它的结构重要度，要高于{x9,x10}、{x13,x14}这类耦合失效底事件。最小径集，可以用来找到阻止顶事件发生的最简防控组合。对于二阶割集对应的耦合故障路径，不用单独防止其中某一个事件失效。只要不让 x9 和 x10、x13 和 x14 同时失效，就能切断故障传递。一阶割集对应的部件，是单点风险的部件。这类部件一旦失效了，皮带输送机就会直接停机，是管控的重点。按结构重要度，划分管控的优先级：输送带、驱动电机、减速器齿轮轴承、托辊、电控保护元件，作为首要的监测对象。张紧制动系统、物料卡堵与人机管理，属于耦合的故障，要同时管控好两个关联的条件，才能防止故障的出现。这套分析的结果，可以为预警指标的筛选、运维人员和备件资源的优化调配，提供理论的依据。

4 基于故障树的故障预警与设备管理体系

4.1 故障预警机制构建

把故障树里的底事件，转换成了能够实时监测的参数，以此建立了皮带输送机的分级预警机制（见表 1）。单个参数超标，就启动黄色的预警，派人到现场巡检确认。多个参数同时超标，或是满足了二阶割集的条件，就直接触发红色的预警，情况危急的时候联锁停机。监测的指标，都是从故障树模型里筛选出来的，减少了靠经验点检容易漏掉隐患的情况。部分部件暂时没法实现在线的监测，就先用人工巡检搭配便携设备来检测，后续再逐步改造，上线在线的预警功能。

4.2 基于重要度的维修决策与备件优化

结合结构重要度与概率重要度，重新给零部件排定了优先级，精准做好维保安排与资源调配的工作。输送带、减速器轴承齿轮、驱动电机、托辊、电控保护元件，这几类部件的结构重要度最高。只要其中任意一件失效了，整条生产线都会直接停机。因此要提高巡检的频次，给关键点位加装好了在线监测设备，同时把它们划入到强制定期维保清单里，做到提前防控。张紧制动系统和前面这些部件不一样，它属于多部件联动失效的类型。单一零件损坏了不一定会停机，但多件同时出问题就会触发故障。针对这种情况，实行联动点检、双人交叉复核，同步排查多项诱发故障的因素，按照部件重要度和故障概率，对备件实施了分级管控。对于高重要度、高故障率的备件，设置好了动态安全库存，提前备货，最大限度压缩抢修停工的时间。而对于普通低值零配件，只按需少量备货，避免大量资金压在了库存里，既减少了积压，又能保障现场应急抢修够用。

4.3 设备全生命周期管理体系

以故障树预警体系为基础，把设备运行参数、日常点检记录、维修工单、备件使用寿命等全部信息统一归集。把底层的零部件失效事件，整理成统一规范的点检清单。同时按照零部件重要程度，把维保分成三级，日常点检、月度保养、计划性大修。每次故障处理完毕后，及时更新故障树模型，重新修正零部件失效概率和预警门槛，不断迭代优化模型，逐步建成设备全生命周期管理机制，把事后抢修慢慢转变成提前预判的预测性维护。

5 四川露天非煤矿山的应用与实施要点

结合四川露天矿山的现场工况来看，故障树预警和设备管理体系落地，主要抓好四项重点工作：把故障树模型对接进在线监测平台，同步采集振动、温度、视频图像等多方面数据。系统能够自动识别设备隐患，按风险等级发出预警，直接下发维修工单，这样设备管理就能从过去出事之后紧急抢修，转变成提前防控风险。规范维修记录台账，建立故障数据库，持续组织人员培训，提高大家搭建故障模型、追溯故障根源的能力。同时，川西南矿区雨水多、环境潮湿，矿石磨蚀性强，设备很容易受损。所以，要针对性做好防腐、耐磨防护，优化备件管控，降低环境因素带来的设备故障。

表 1　皮带输送机故障预警指标与分级示例表格

对应底事件	监测参数	主要监测手段	预警等级
输送带撕裂 x1、跑偏 x2、老化脱层 x3	输送带图像、跑偏量、表面温度	机器视觉、跑偏传感器、红外测温	黄色
驱动电机损坏 x4、减速器齿轮轴承失效 x5、联轴器断裂 x6	振动烈度、轴承温度、油液金属颗粒、电流	振动传感器、温度变送器、油液在线监测	黄色
托辊卡死损坏 x7、机架变形开裂 x8	托辊温度、机架应变	红外测温、应变片、定期无损检测	黄色
张紧力不足 x9、制动闸失效 x10	皮带张紧应力、制动闸间隙、制动压力	张力传感器、行程开关、压力变送器	红色（耦合）
电控元件损坏 x11、保护回路失效 x12	电压电流、保护回路状态	电气参数采集、保护自检	红色
物料大块卡堵 x13、点检维护缺失 x14	料流厚度、大块识别、点检工单台账	料流监测、视频识别、运维信息化系统	红色（耦合）

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

6 结论

可以用故障树分析法，搭建起一套故障预警和设备管理的体系。拿皮带输送机作为例子，先搭建好故障树的模型，理清了各类失效模式之间的关联关系。能够计算出最小割集、分析好结构重要度，找出了单点故障，还有由多因素叠加而形成的关键故障链条。这样就能为预警指标的挑选、维修方案的制定，提供了量化的依据。接着把底层的故障事件，转换成了不同等级的在线监测指标。同时结合部件的重要程度，优化好维修方案和备件的库存，对设备开展了全生命周期的精细管控，持续提升了采矿选矿设备的可靠性。

[参考文献]

[1]王成军,孔维存.矿山机电设备中的电气断路故障检测[J].应用能源技术,2025(12):115-117.
[2]刘津君.故障树分析法在阶段矿房嗣后充填法矿房稳定性风险分级管控中的应用[J].现代矿业,2025,41(10):28-34.
[3]陆卫东,孙胤洲,杨婷,等.改进 FTA-DBN 在矿山典型重大风险预测中的应用[J].安全与环境学报,2025,25(4):1286-1297.
[4]袁斌华,薛彪.矿山电气自动化控制中智能化技术的应用[J].世界有色金属,2023(21):1-3.
[5]王凯.基于故障树方法的智能采矿系统可靠性分析[D].长沙:中南大学,2023.
[6]周建军.矿用供电系统故障模型及诊断方法研究[J].机械管理开发,2021,36(8):153-155.

作者简介：王泽琪（1990—），男，现就职于中稀（凉山）稀土有限公司，助理机械工程师，长期从事生产管理、设备管理工作。

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.