

# 煤矿综采设备系统预防性维护决策研究

高继云

中煤西北能源化工集团有限公司 内蒙古 鄂尔多斯 017200

**摘要:** 煤矿综采设备是煤矿开采的重要部分,维护是保障设备系统正常运行、提高可靠性的有效手段,随着煤矿智能化开采和智慧煤矿建设的快速发展,维护对于煤矿综采工作面中综采设备系统的保障作用愈加突出,维护工作也变得越来越困难。因此,本研究针对煤矿综采多设备串联系统存在维护成本高、可靠性要求高的特点,对煤矿综采设备系统预防性维护决策进行研究,从综采单设备层研究出发,基于可靠性理论,研究可靠性对预防性维护和维修成本的影响,获得预防性维护优化周期,再考虑设备维护对系统运行的影响,探索机会维护规则,进而对煤矿综采多设备系统层维护策略进行研究。

**关键词:** 机会维护; 维护成本节约; 预防性维护; 综采设备系统

煤矿综合机械化采煤设备系统是现代高产高效矿井的主要生产装备,该系统的运行好坏直接影响矿井的生产能力、安全水平和经济效益。而目前煤矿企业综采设备的维修模式,即事后维修和计划性定期维修,都存在明显的缺点,致使非计划停机时间长、维修资源浪费、突发性停机等问题频发,给煤矿生产造成巨大的损失。因此,预防性维护决策的研究就显得十分重要,它的目的就是科学合理的决策来达到设备可靠性、可用性、维修成本三者之间最优平衡,为煤矿综采设备高效稳定地运行提供有力保障。

## 1 综采设备维护概述

煤矿综合机械化采煤设备系统是现代高产高效矿井的主体生产装备,其运行状况的好坏直接关系到矿井的生产能力、安全水平和经济效益。典型的综采工作面设备系统主要有大功率电牵引采煤机、大工作阻力液压支架、大运量刮板输送机、大转载能力转载机、可伸缩带式输送机和配套的供电、供液及控制系统。这些设备在空间上是紧密耦合的,在工艺上是顺序联动的,构成一个复杂的、连续运行的“采、支、运”一体化生产系统。事后维修是在设备发生故障之后才采取修复措施,这种方式造成非计划停机时间长、生产损失大,以MG750/1915WD型采煤机为例,其牵引部行星机构故障的平均事后维修时间为48到72小时,直接导致产量减少3万到5万吨。计划性定期维修是按设备运行时间或者日历周期来进行的。但是该模式也存在明显的缺点,一方面会造成状态良好的设备被过度维修,浪费维修资源,甚至会引入新的早期故障;另一方面又不能在潜在故障发生之前及时干预,造成突发性停机。

## 2 有限时间内单设备预防性维护决策

### 2.1 单设备退化建模与故障率函数构建

科学决策的基础是对设备性能退化过程的准确描述。综采设备中机械部件,例如采煤机的截割滚子轴承、摇臂减速箱齿轮、刮板输送机的链轮轴组等,磨损、疲劳等退化过程一般都存在时间累积效应。本文采用威布尔分布的故障率函数来建模。威布尔分布由于形状参数灵活,可以描述故障率递增、恒定或者递减的多种情况,在机械可靠性分析中应用较多。一个两参数的威布尔分布故障率函数可以写成:

$$\lambda(t) = \left(\frac{\beta}{\eta}\right) X\left(\frac{t}{\eta}\right)^{(\beta-1)}$$

其中 $t$ 为运行时间, $\beta$ 为形状参数, $\eta$ 为尺度参数。对于处在损耗故障期的设备, $\beta > 1$ ,故障率随时间增大。对某矿区50台同型号刮板输送机减速器首次大修前故障间隔时间数据进行拟合,得到其故障率函数的形状参数 $\beta$ 约为2.3,尺度参数 $\eta$ 约为8500小时。这意味着该减速器运行到8500小时的时候,瞬时故障概率会明显增大。对于带有电气和控制元件的部件,如变频器、PLC控制器等,则需要采用指数分布和分段模型来描述其偶然故障和性能衰减。

### 2.2 有限时间约束下的维护成本模型建立

在设备的一个大修周期或者一个计划生产周期内,决策目标就是使该有限时间内总期望的维护成本最小化。总成本一般由预防性维护成本、小修成本、故障后更换成本、停机损失成本组成。预防性维护成本包括计划性的人工、备件、管理成本,一般为固定值。小修成本是轻微缺陷修复的成本,小于预防性维护成本。故障后更换成本最高,包含修复成本以及因突发故障造成的连锁损失成本。停机损失成本和设备停歇时间成正比,综采

工作面主设备每小时停机损失可达数万至数十万元。

通过建立成本模型要设定维护策略。一种典型的策略是周期性预防性维护与故障后小修相结合。在一个规划周期 $T$ 内进行 $N$ 次等间隔的预防性维护,每次预防性维护可以使设备的故障率函数回到一个较低的初始水平,但不能恢复到新的状态,称为最小维修模型。每次故障发生就进行小修,小修只修复故障而不改变设备的整体故障率趋势。周期 $T$ 内总期望成本 $C(T, N)$ 可以表示为

$$C(T, N) = N \times C_p + E[Nf] \times C_f + C_d \times E[Td]$$

$C_p$ 是单次预防性维护的成本, $C_f$ 是单次故障小修的成本, $C_d$ 是单位时间停机损失费率, $E[Nf]$ 是期望的故障次数, $E[Td]$ 是期望的总停机时间。 $E[Nf]$ 用故障率函数在各个维护周期内积分求和得到。决策变量为预防性维护次数 $N$ 或者其间隔期。

### 2.3 基于成本优化的维护间隔决策算法

优化目标是找到最优的维护次数 $N^*$ 或者最优维护间隔 $t^* = T/N^*$ ,使得总期望成本 $C(T, N)$ 最小。因为 $N$ 为整数,所以该问题属于整数规划。求解算法一般分为解析法和数值搜索法。对于故障率函数形式简单的,可以通过对成本函数求导并令其为零,得到理论最优间隔的解析解条件。对复杂的模型一般用数值迭代法。基本步骤为,给定一个 $N$ 值,计算每个子区间故障率重置过程,用数值积分计算该区间内期望故障次数;累加所有区间的故障次数,代入成本模型计算总成本 $C(N)$ ;遍历 $N$ 从一个合理的上限值,分别计算 $C(N)$ ;最后比较得到使 $C(N)$ 最小的 $N^*$ 。

### 2.4 考虑状态监测信息的视情维护决策阈值优化

周期性维护决策没有充分利用设备实时状态信息。视情维护根据在线或者离线监测到的设备状态参数来决定维护时机。关键步骤就是确定状态参数的预警阈值。常用的状态参数有振动加速度、油液磨粒浓度、温度趋势等。决策问题转化为,当监测参数 $X(t)$ 超过某个阈值 $L$ 时就执行预防性维护,如果故障发生时间在达到 $L$ 之前就立即进行故障后维修。阈值 $L$ 的确定最为关键,需要建立监测参数退化轨迹的随机过程模型,如伽马过程或者逆高斯过程,来描述 $X(t)$ 由初始值到故障阈值 $D$ 的随机性。然后求出设备在预警阈值 $L$ 之前发生故障的概率,以及从发出预警到执行维护的延迟期间的故障风险。成本模型要将监测成本、预警预防性维护成本、故障维修成本和相应的停机成本综合起来。利用仿真或者解析的方法,找到使长期运行单位时间平均成本最低的最优预警阈值 $L^*$ 。以刮板输送机减速器为例,利用油液光谱分析中的铁元素浓度趋势建立伽马过程模型,优化后得到的铁元素浓度

最佳预警阈值为120ppm,比经验阈值150ppm低20%,在保证可靠性的前提下平均延长了20%的有效润滑油更换周期,减少了维护频率。

## 3 综采设备系统机会维护建模及决策

### 3.1 系统设备关联性与机会维护概念界定

综采设备系统中各个设备不是孤立的,它们之间存在着功能关联、结构关联、经济关联。功能关联即生产工艺的流水线特性,一台核心设备停机就会造成全线停产。结构关联指的是设备在物理位置上邻近或者集成,采煤机与刮板输送机用滑靴、齿轮啮合连接,维护一台设备时,需要另一台设备处于某种状态。经济关联即维护活动共用固定的停机成本、共同的维修班组、吊装工具等资源。机会维护就是利用这些关联性而产生的维护策略。其基本思想是:当系统中的某个设备因为故障或者计划维护而停机的时候,该次停机给系统中的其他设备提供了一个低附加的维护窗口。决策者可以判断是否利用这个窗口,对那些状态尚可但已经接近维护需求的设备进行提前维护,从而避免它们单独停机所造成的高昂成本。机会维护决策的核心就是权衡,提前维护所造成的额外预防性维护成本和备件消耗,同未来可能避免的更高故障停机成本之间的经济性。

### 3.2 多设备系统机会维护协同决策模型构建

建立系统机会维持模型首先要确定系统的状态。系统状态可以用所有设备的状态组合来表示。设备状态可以是离散的,即正常、轻微退化、严重退化、故障;也可以是连续的,用性能指标或者剩余寿命来表示。第二,要定义维护行动集:故障设备的纠正性维修、退化设备的机会维护和正常设备的置之不理。模型的目标函数一般是在一个长时段内,使系统的总期望折扣成本或者平均成本率最小。系统成本有每台设备的预防性维护成本、故障维修成本、更换备件成本、系统停机损失成本。系统停机损失成本与系统内任一设备停机有关,且一般远大于单台设备维护自身的工时成本,这就是机会维护价值的来源。约束条件包括维修资源的约束,即同时可用的维修班组数量、备件库存水平;维护活动的逻辑约束,即某些维护任务必须按顺序进行;生产计划的约束,即必须在计划检修班次内完成维护活动。该模型一般被表述为随机动态规划问题或者半马尔可夫决策过程问题,但是其状态空间随着设备数量的增加呈指数增长,造成“维数灾难”。

### 3.3 基于启发式规则与智能算法的维护计划优化

为了求解上述复杂的模型,在实践中一般会采用启发式规则或者元启发式算法。常用的启发式规则有:年

龄阈值法,即当机会窗口出现的时候,对剩余寿命小于某个阈值的设备进行维护;经济性比较法,即计算每台潜在设备进行机会维护可以带来的净收益,优先选择净收益最大的设备。更精细地优化要用智能算法。遗传算法属于常用的工具之一。求解过程为编码,把一个包含多个机会窗口期的维护计划编码成染色体,基因位表示在某个窗口期对某台设备的维护决策。初始化,随机生成一组维护计划作为初始种群。适应度函数即为该维护计划下系统总成本的估计值,用蒙特卡洛仿真来评价。选择,根据适应度来选择较好的个体进入下一代。交叉和变异模拟生物进化过程来产生新的维护计划。重复选择、交叉、变异的过程,直到收敛到近似最优解为止。

### 3.4 模型应用与维护决策支持系统集成

理论研究需落地于实际应用。将上述单设备与多设备机会维护决策模型集成到煤矿的设备管理信息系统或未来的矿山物联网平台中,可构建智能预防性维护决策支持系统。该系统需要的数据有设备实时运行状态数据,通过振动传感器、油液在线监测仪、红外热像仪等获得;设备历史维护与故障档案数据库;维修资源与成本数据库;生产计划数据。系统的工作流程是根据实时以及历史的数据,用退化模型在线更新每台关键设备的剩余寿命分布或者健康指数。其次,按照生产调度计划,找到未来未知的计划停机窗口。当系统检测到随机故障发生或者计划窗口到来的时候,触发机会维护决策引擎。引擎调用优化算法,按照目前的设备状况、备件库存、维修班组状况,迅速产生一份或者几份推荐的机会维护行动清单。最后维修调度人员参考系统推荐,结合现场实际情况做出最终决策并下达工单。系统依靠对决策结果同实

际效益的不断学习,持续改进模型参数,达成决策能力的自我进化。从数据到决策的闭环,是提高煤矿综采设备系统可靠性的必由之路,也是实现精益化维护管理的重要途径。

### 4 结束语

煤矿综采设备系统预防性维护决策研究,从单设备、多设备系统维护需求入手,建立了一套科学合理的决策模型和优化算法。从有限时间内的单设备退化建模、成本模型建立、维护间隔、视情维护决策阈值的优化、综采设备系统机会维护的协同决策模型构建与维护计划优化,研究内容全面深入。将研究成果集成到设备管理信息系统当中,创建起智能预防性维护决策支持系统,从而达到从数据采集到决策形成的闭环管理,有效地改善了煤矿综采设备系统可靠性以及维护管理的精益化程度,给煤矿行业的可持续发展赋予了强有力的技术支撑。

### 参考文献

- [1]杨鑫,曹现刚,段雍,张鑫媛,赵福媛,张鑫,韩珂,王浩博,马晓阳.基于改进神经关系推理的综采设备系统动力学建模方法[J].煤炭学报,2025,(12):113-116.
- [2]李彪.煤矿综采设备电控系统的智能监测与优化[J].能源与节能,2025,(12):113-116.
- [3]徐晓瑞,王建新,姚西龙,杨育,刘健.基于成本节约模型的煤矿综采多设备维护优化策略[J].工业工程与管理,2024,29(03):49-56.
- [4]徐晓瑞.煤矿综采设备系统预防性维护决策研究[D].导师:姚西龙;王建新.太原理工大学,2023.
- [5]李鹏飞.煤矿综采设备群生产与维护联合决策方法研究[D].导师:曹现刚.西安科技大学,2022.