

水利工程泵站机电设备故障诊断方法分析

李婷 李双林 马泽

(山东省调水工程运行维护中心蓬莱管理站 山东 烟台 265600)

摘要: 水利工程泵站对我国防洪排涝、灌溉、调水、居民用水、工业用水、航运、自然环境等有着重要意义。水利水电厂的机电设备出现问题,或由于意外原因导致的停电、供水中断,将造成巨大的经济损失和不良后果。本文根据对水利工程泵站机电设备故障的实际调查,收集了一些典型的泵站机电设备的故障数据,运用故障树原理,建立了一个典型的泵站故障树,并对其进行逻辑分析,进而得出了相应的结论,以便对水利工程泵站的故障进行及时的判断,进而提高智能化管理水平。

关键词: 水利工程; 泵站; 机电设备; 故障诊断

0 引言

在泵站投入和使用后,如何确保泵站稳定、安全、经济运行成为各运行部门的一项重大课题。泵站种类繁多,结构错综复杂,如果其中一个系统出现问题,又无法对其进行快速识别,那么,不但会造成自身的损害,而且会造成连锁效应,影响到整个泵站的运行^[1]。我国专家学者对泵类机电设备的故障检测也进行了探讨,并有一定的成效。有的学者对水利工程泵站内常见的机电设备进行了温度诊断、铁谱检测、振动检测等,并对设备进行了故障诊断和维修;还有的学者则对泵站机电设备方面的问题进行了深入的分析和探讨,并对其进行了总结^[2]。目前,对水利工程泵站的电气机械装置进行故障检测还很少见。水利工程泵站的机电设备故障检测主要依赖于有经验的人,这给有关工作者带来了很大的工作量,而且计算出来的数据往往不够精确,给水泵的运行带来很大的不便。故障树是一种具有逻辑关系的因果关系图,一棵成熟的故障树,就像一棵倒挂的大树,它的根部在上面,它的枝干一直延伸到地面。本文对水利工程泵站的机电设备群进行了故障树的构建,将其层层拆分,通过对其结构的剖析,找到导致水利工程泵站机电设备各个子系统故障的根源。建立故障树具有非常现实的意义,可以方便地了解水利工程泵站在实际操作中易发生的故障,正确地构建一棵故障树,对于故障的诊断和预报具有很好的参考作用。

1 水利工程泵站机电设备常见故障分析

水利工程泵站的机电设备是水泵机组的核心,它具有调水、排涝、灌溉等多种功能,保证水泵机组正常工作是保证水泵机组安全的关键。在对前期的数据进行了统计的基础上,得出了水利工程泵站机电设备故障的原因。

1.1 水泵导流轴承故障

泵的导流支座和轴套损坏后,导流轴承间的间隙会增大,从而导致泵轴和叶轮的振动加剧,导致密封圈渗漏,甚至导致叶片碰撞,整个装置不能工作。根据其润滑形式,分为油液润滑导流轴承和水润滑导流轴承。前者由于故障而导致其可靠性差。后者由于故障而导致其可靠性受到制约。

1.2 叶轮故障

造成叶轮故障的主要原因是水动力。长期的磨损和保养不善,或者长时间的超负荷运转,造成空蚀、汽蚀,从而引起压力脉动。设备超载也会造成叶片破损等。

1.3 叶调机构故障

叶轮调整装置可分为两类:机械型和水力型。机械叶片调节装置常见的故障原因有4种。一是机构在旋转时的同心度不够,造成了拉杆和主轴之间的旋转。二是连接强度低,连接方式不够合理。法兰和上部操纵棒的安装位置不正确,会出现较大的相对滑移,造成了轴承的轴向空隙。三是轴瓦的径向偏移现象比较严重。四是隔板密封磨损。水力叶片调节装置的调节能力强、损坏小、稳定性好,但对

气密性的要求更大。其主要故障及原因是：吸油阀门放气周期太久，密封机构老化，导致不能维持压强，不能调整桨叶。

1.4 推力瓦烧毁

推力瓦烧毁的主要原因有2种。一是受力太大。在选用电动机的过程中，没有合理地估算出最大的工作范围，所选用的推力轴承所受的载荷很大，很可能造成轴承过载和推力瓦烧毁。二是推力瓦的压力分布不均匀。由于生产、安装、运行等实际原因，大型水泵厂经常会在电动机中使用少量的推力瓦，若局部瓦面处的受力过高，就会造成温度上升，乃至推力瓦烧毁。

1.5 定子故障

定子故障主要包括：定子绕组断开、定子线圈匝间短路、定子绝缘和定子铁心故障。定子绕组的断开：定子绕组端面和引线紧固机构出现脱焊、焊接不彻底、装置损坏等原因，使绕组头和引线产生较大的振荡，容易出现疲劳裂纹。断裂的电线一直延伸到主要的绝缘层，使得其主要的绝缘层越来越薄，最后被打穿。定子线圈匝间短路的原因有：自身的匝间隔离能力差；在维修过程中，部分线路的绝缘受到损坏；电动机长期运转会使线圈升温，造成绝缘老化加快。定子绝缘：内部出现明显分层、脱壳，引起局部放电，导致绝缘击穿。定子铁心故障：电动机的定子铁心是电动机的重要部件，在正常运转期间具有设备、磁和电三种特性。三相的短路容易造成铁心损伤。

1.6 电机绝缘老化

负载变化、环境和设备损坏都会导致绝缘的老化。其常见原因有4种。一是高温陈化。在长期的高温下，材料会发生各种物理化学改变，比如裂解、起层等，导致原材料品质下降，从而导致产品老化。二是电气设备陈旧。局部放电、漏电和电侵蚀导致绝缘老化。三是机器陈旧。其表现形式为疲劳裂纹、松弛、磨损等。四是环境老化。环境老化主要体现在灰尘、油污、盐类及其他腐蚀材料等方面，此外还包括隔热吸收，其使绝缘电阻降低，介质损失增加。电动机在不断的老化过程中，对外部环境较为敏感，目前的环境条件将会对电动机的绝缘寿命产生直接的影响。

2 水利工程泵站机电设备故障树的构建

2.1 故障树在泵站机电设备中应用的优势

在工程实际建设阶段，主要采用故障树对系统问

题进行分析，以提高工程的可靠性。

(1) 采用一种简便而又可伸缩的方法，通过这种方法，可以对整个体系中的有关要素进行深入的分析。首先从最上层开始，进行全面的分析，再将整个体系问题分解成相互关联的各个部分。另外，它还可以组合和分解，不仅可以研究单一的部件对整个系统的影响，还可以研究组合单元和系统的功能。

(2) 故障树图反映了内部的逻辑和因果关系，并以图表形式进行完整的显示。通过图表，可以直接、清楚地看到各种活动之间的联系。同时，利用故障树可以更好地理解各种事件之间的联系，并对其进行分析，从而达到对其进行优化改造的目的，不断增强其稳定性。

(3) 这种方法需要在各种基本要素间建立逻辑关系，然后进行相关的调查和计算，以决定顶部事件是否会出现，从而为系统的可靠判定打下了坚实的基础。

2.2 机电设备组故障树构建

造成机组故障的实际原因有很多，除装置自身的原因外，还包含了大量主观原因。由于存在着很多的主观和行政方面的原因，无法制定统一的评价指标，无法进行定量分析。所以，在进行故障树的设计时，没有考虑人工因素和管理性因素，仅从设备本身的状况出发。根据上述的主要故障原因，建立了水泵站的主要设备的故障树，如图1所示。

2.3 基于故障树理论的定性定量分析

2.3.1 定性分析

确定最小割集是故障树定性分析的中心任务。割集是引起系统故障发生的几个故障基础事件的集合，即一个割集代表了系统发生故障的一种可能性或一种故障模式。如果最小割集只覆盖了一个特定的事件，那么这个事件的发生就代表了一个顶部事件的发生；如果一个最小割集包括了多个集合，那么这个最小割集就是一个顶部事件。

本文采用下行法确定最小割集。根据故障树中逻辑“或门”会增大割集容量的性质，参照故障树的内部构造，由上而下进行，即由顶部开始，逐步完善，再由二级事故替代一级，如此等等。遇到“与门”就将其基础事件排在同一行，遇到“或门”就将其基础事件各自排成一行，直至所有的顶部事件都变

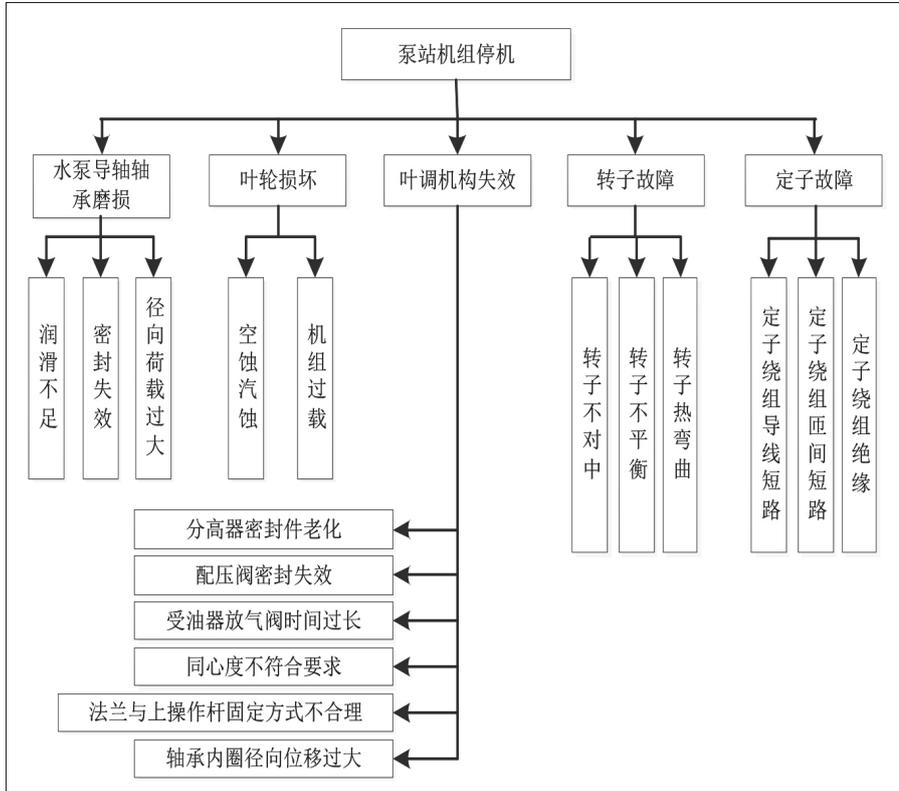


图1 泵站机电设备组故障树模型图

为基础事件，再通过比较消元，通过最小割集来判断其他割集，最终得到最小的分割。在实际工程中，大多数问题的解决都采用了下行法。

应用下行法对水泵机组的故障进行了求解，得到了水泵机组的最小割集。从图2泵车主机设备的故障树模型中可以看出，不同的基础事件之间仅有“或门”的关联，因此，建立一个布尔代数，得出最大的事件方程是：

$$M_1 = M_1 + M_2 + M_3 + M_4 + M_5 + M_6 \quad (1)$$

式中： M_1 —泵的导流支座；

M_2 —叶轮；

M_3 —叶片调节装置；

M_4 —推进器；

M_5 —定子；

M_6 —马达。

2.3.2 定量分析

在前期的定量研究中，最重要的是建立一个准确、科学的数学模型，然后根据数据来分析各种可能发生的事件，再通过不断的改进来保证各个零件的稳定运行。一般而言，量化分析的内容主要是顶部事件发生的概率计算和基础事件的构造与重要度计算。

2.3.2.1 顶部事件故障概率

在故障模型中，各种基础事件的故障率一般通过大量的资料和维护人员的实际工作经历得到。以模型的内在逻辑为基础，从最小割集的故障概率开始向上分析，以求出顶部事件发生的概率。

(1) 故障树与门结构的顶部事件出现的概率计算如下：

$$Q(A) = \cup Q(B_i) = Q(B_1) \times Q(B_2) \times \dots$$

$$Q(B_n) = \prod Q(B_i) \quad (2)$$

式中： A —顶部事件；

B_i —基础事件 ($i=1,2,\dots,n$)；

$Q(B_i)$ —基础事件出现的概率。

上式即为并联系统故障概率的计算公式。

(2) 故障树或门结构的顶部事件出现的概率计算如下：

$$Q(A) = \cup_{i=1}^n Q(B_i) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - Q(B_i)] \quad (3)$$

上式就是串联系统故障概率的计算公式。

2.3.2.2 重要度分析

在分析问题的过程中，环境、部件、工作环节及工作人员的不同，导致各个因素对结果的影响程度都不相同。重要度是指在一个整体模型中，一个部分或最小割集对顶部事件发生的贡献大小。高的重要度，意味着一个完整的事件或者一个完整的集合，会对一个体系产生更大的影响，在系统的开发和运行过程中，都需要重点考虑。

(1) 构造重要度：从内部构造的观点来分析各种构件对结构的影响。其计算如下：

$$I_\phi(i) = \frac{1}{2^{n-1}} \sum [\phi(X_1, \dots, X_{i-1}, 1, X_{n+1}, \dots, X_n) - \phi(X_1, \dots, X_{i-1}, 0, X_{n+1}, \dots, X_n)] \quad (4)$$

式中： $\phi(x)$ —结构函数 ($i=1,2,\dots,n$)。

(2) 概率重要度：由基础事件发生概率的改变引起顶部事件发生概率的改变程度，记作 $I_q(X)$ 。由于顶部事件的概率函数 $Q(X)$ 是一个多元线性函数，因此，通过对自变量 q_i 的一次偏导值，可以获得其概率意义因子：

$$I_q(X) = \frac{\partial Q(X)}{\partial q_i} \quad (5)$$

3 故障应用实例

3.1 项目概况

该泵站是南水北调东引工程中的第9个梯级泵站。泵站的水利建设项目主要包括：进水渠、清污机桥、进水池、主泵房、副厂房安装间、出水闸、出水渠和管理区域。泵站主要采用堤后结构。主泵房中装有4个后置灯泡式贯流泵，其叶片的直径为2.85mm，单机组设计流速25m³/s，设计扬程2.40m。泵站内设有直管型进、出水流动道，并能迅速切断水流。

3.2 历史故障

利用前期搜集的调查数据，总结和梳理了水利建设中出现的问题，为后续建设中问题树的构建和定性、定量分析等提供数据支撑。所搜集的水利项目站点的历史失效情况如表1所示。

表1 历史故障汇总表

系统	部位	历史故障描述
主机组	主水泵	Z ₁ : 推力轴承密封失效
		Z ₂ : 水泵空气围带机械密封失效，漏水
		Z ₃ : 叶轮外壳的不锈钢两侧均有轻微汽蚀
	主电动机	Z ₄ : 湿度大，电动机绝缘受潮
		Z ₅ : 电动机轴承内圈磨损

3.3 故障树的构建

在水利建设中，最大的问题是水泵站出现了故障。水泵站出现了故障，将会对水泵的正常调水造成一定的不利影响。所以，在故障树分析中，顶点是指抽水站发生中断，将直接导致顶部事件的发生，剔除不能定量的客观事实，并将其确定为特定的中间过程。表2显示了顶部事件和中间事件。

通过对某水利建设项目站泵站失效的顶部事件、

表2 顶部事件和中间事件

事件名称	具体事件
顶部事件	T ₀ : 泵站故障停机
中间事件	Y ₁ : 主水泵故障
	Y ₂ : 主电动机故障
	Y ₃ : 快速阀门故障

中间事件和基础事件的相关性进行研究，构造一棵故障树（图2）。

3.4 定性定量分析

3.4.1 定性分析

运用下行法对某水电站项目站间的故障树进行了最小割集确定。从图2的故障树形图中可以看出，基础事件之间仅存在“或”的关联，因此，建立故障树的布尔代数表达式：

$$\begin{aligned} Y_1 &= Z_1 + Z_2 + Z_3 \\ Y_2 &= Z_4 + Z_5 \\ Y_3 &= F_1 + F_2 + F_3 \end{aligned} \quad (6)$$

所以顶部事件表示为：

$$T_0 = Y_1 + Y_2 + Y_3 \quad (7)$$

即

$$T_0 = Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_5 + F_1 + F_2 + F_3 \quad (8)$$

通过以上布尔操作，可以得出以下结论：水利工程泵站的故障树中，有8个基础事件，每一个都具有各自的特征，每一次发生都会引起一个顶点，即{Z₁}、{Z₂}、{Z₃}、{Z₄}、{Z₅}、{F₁}、{F₂}和{F₃}。

3.4.2 定量分析

为了提高和改进水利水电工程站故障树的研究成果，需要在前期调研的基础上进行量化研究，并询问有关专家和现场工作人员。依据有关人员的工作数据对基础事件进行模糊可靠度计算，得出各个基

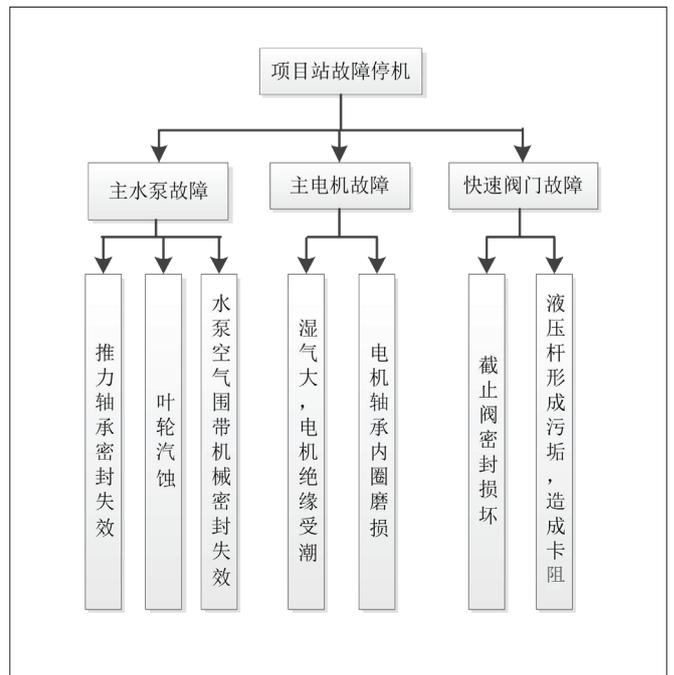


图2 水利工程项目站故障树

础事件的发生概率，见表3。

3.4.2.1 顶部事件发生概率计算

因为水利工程项目站泵站故障树不存在“与门”关系，因此其结构函数是：

$$Q(A) = \bigcup_{i=1}^n Q(B_i) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - Q(B_i)] \tag{9}$$

另外针对第*i*个基础事件，布尔变量是 $B_i(t) = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$ ，也就是等于1时，在*t*时刻*B_i*事件出现；等于0时，*t*时刻*B_i*事件不出现。参考上文定性研究，水利工程项目站故障*T₀*最小割集就是基础事件。则可得泵站故障概率为： $Q(A) = 0.1284$ ，即顶部事件——水利工程项目站故障停机发生的概率为12.84%。

3.4.2.2 概率重要度计算

根据公式(5)确定不同基础事件的概率重要度值，如表4所示。

4 结语

本文对水利电站泵站的故障进行了定量研究，得出了各个最小割集的重要度，为以后的水利建设工程站点的检修工作奠定了基础。按照事故发生的可能性次序排列，在水电工程中，电动机的绝缘受潮是最大的问题。

参考文献：

[1] 许鑫. 基于粗集理论的舰船机电设备故障诊断研究[J]. 舰船科学技术, 2022(16): 114-117.

[2] 张旭辉, 张雨萌, 王岩, 等. 融合数字孪生与混合现

表3 水利工程项目站故障基础事件的故障概率

事件编号	事件概率	事件编号	事件概率
Z ₁	0.0182	Z ₅	0.0044
Z ₂	0.0243	F ₁	0.0139
Z ₃	0.0354	F ₂	0.0035
Z ₄	0.0383	F ₃	0.0019

表4 水利工程项目站故障各基础事件概率重要度计算

事件编号	事件描述	概率重要度
Z ₄	湿气大，电动机绝缘受潮	0.1265
Z ₃	叶轮外壳的不锈钢两侧均有轻微汽蚀	0.1254
Z ₂	水泵空气围带机械密封失效，漏水	0.1233
Z ₁	推力轴承密封失效	0.1198
F ₁	截止阀密封破损	0.1157
F ₂	液压杆易形成污垢，造成卡阻	0.1045
F ₃	链条腐蚀断裂	0.0947

实技术的机电设备辅助维修方法[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(8): 2187-2195.

作者简介: 李婷(1988.09-), 女, 汉族, 山东菏泽人, 本科, 工程师, 研究方向: 水利工程管理; 李双林(1972.03-), 男, 汉族, 山东济南人, 本科, 高级工程师, 研究方向: 水利工程管理; 马泽(1994.11-), 男, 汉族, 山东枣庄人, 本科, 助理工程师, 研究方向: 水利工程管理。