

DEH 转速测量系统的故障树分析

马芳梅 张家琛 何映霞 乐景 向春梅

(华中理工大学)

[摘要] 本文利用故障树理论对 300 MW 汽轮机 DEH 转速测量系统的可靠性进行仿真, 研究系统的可靠性, 并对系统进行失效分析, 提出我们的看法。

关键词 故障树 可靠性仿真 DEH 测量系统

分类号 TK267

1 300 MW 汽轮机 DEH 的转速测量系统

在汽轮发电机组的控制系统中, 转速不仅是被测量, 也是被调量。在机组并网调频运行中, 机械功率与电功率不平衡导致转速的变化, 反映了供电的质量; 当机组甩负荷时, 必须保证动态升速在允许范围之内, 其中转速测量的准确和可靠具有重要的意义, 为此, 在 300 MW 机组的数字电液控制系统(DEH)中, 转速信号采用了“三选二”的逻辑处理。

DEH 系统设有三个独立的转速测量传感器及其通道, 分别采用磁阻发讯器将其输入的转速信号转换成脉冲信号, 然后通过 f/V 变送器输出正比于转速的电信号, 三路信号两两进行比较, 在确认信号可靠时, 才被 DEH 所采用。当三个转速信号中, 有一个不可靠时, DEH 系统仍可照常工作; 当有两个不可靠时, 则改由模拟手动系统工作。为了保证 DEH 系统转速测量通道可靠, 除控制系统设计时采取的措施外, 本文从运行观点出发,

利用故障树理论, 对转速测量通道及其各个部件, 进行失效分析, 并提出我们的看法。

2 故障树法分析系统可靠性

故障树法是一种安全性可靠性分析技术, 广泛应用于各种领域, 当故障树规模较大时, 用可靠性仿真求解系统的可靠性将十分有效。对故障树进行定性定量分析的方法很多, 我们采用的是蒙特卡罗仿真法求解系统的可靠性指标。蒙特卡罗方法是用数学方法来模拟随机试验, 然后确定欲求的概率和分布数字特征等的一类方法。

2.1 可靠性仿真模型的建立

设系统由几个基本部件组成, 用 S 表示系统, 则有

$$S = \{Z_1, Z_2, \dots, Z_i, \dots, Z_n\} \quad (1)$$

其中 $Z_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 表示系统有 n 个基本部件组成, 并已知每一个基本部件的失效分布函数为 $F_i(t) (i = 1, 2, \dots, n)$ 。

故障树就是系统中各事件之间的逻辑

收稿日期 1995-10-16 修改稿 1996-01-30

关系图,图此可以用系统的故障树表示仿真的逻辑关系,故障树的顶事件即为系统 S 的失效事件,其底事件即基本部件 Z_i 的失效事件,故系统中有 n 个底事件。

在引入时间参量情况下,故障树的结构函数用 $\Phi[\bar{X}(t)]$ 表示。其中 $\bar{X}(t)$ 为 $X_i(t)$ 构成的向量;即

$$\bar{X}(t) = [X_1(t), X_2(t), \dots, X_i(t), \dots, X_n(t)] \quad (2)$$

式中 $X_i(t)$ 表示有第 i 个底事件的状态变量,取

$$X_i(t) = \begin{cases} 1, & \text{在 } t \text{ 时刻第 } i \text{ 个底事件发生} \\ 0, & \text{在 } t \text{ 时刻第 } i \text{ 个底事件不发生} \end{cases} \quad (3)$$

用 $\Phi(t)$ 表示顶事件在 t 时刻的状态变量,则有

$$\Phi(t) = \begin{cases} 1, & \text{在 } t \text{ 时刻顶事件发生} \\ 0, & \text{在 } t \text{ 时刻顶事件不发生} \end{cases} \quad (4)$$

且 $\Phi(t)$ 的取值为

$$\Phi(t) = \Phi[\bar{X}(t)] \quad (5)$$

2.2 随机抽样及通扫故障树

用蒙特卡罗方法对 n 个基本部件寿命进行随机抽样,以得到每一个基本部件故障时间的简单样本,对第 i 个基本部件失效时间抽样值为:

$$t_i = F_i^{-1}(\eta_i) \quad (6)$$

在第 j 次仿真中,第 i 个基本部件失效时间抽样值为 t_{ij} ,则

$$t_{ij} = F_i^{-1}(\eta_{ij}) \quad (7)$$

其中 η_{ij} 是第 i 个基本部件第 j 次仿真中随机数,对于第 i 个基本部件,在 t_{ij} 时刻失效由式(7)决定,对第 i 个基本部件在 t 时刻的状态变量可表示为

$$X_{ij}(t) = \begin{cases} 1, & t \geq t_{ij} \\ 0, & t < t_{ij} \end{cases} \quad (8)$$

所以,可得到第 j 次抽样的 $\bar{X}_j(t)$,即

$$\bar{X}_j(t) = [X_{1j}(t), X_{2j}(t), \dots, X_{ij}(t),$$

$$\dots, X_{nj}(t)] \quad (9)$$

若进行 N 次仿真运行,则 $j = 1, 2, \dots, N$,那么第 j 次抽样时,顶事件的状态变量

$$\Phi_j(t) = \Phi[\bar{X}_j(t)] \quad (10)$$

为了统计计算第 j 次抽样时,系统发生失效时刻 t_{ij} ,下式成立:

$$\Phi_j(t) = \begin{cases} 1, & \text{当 } t \geq t_{ij} \text{ 时;} \\ 0, & \text{当 } t < t_{ij} \text{ 时;} \end{cases} \quad (11)$$

系统仿真模型建立后,对被仿真的过程规定一个最大工作时间 $T_{\max}$,将 $T_{\max}$ 等分成 W 个间隔,如图 1 所示。

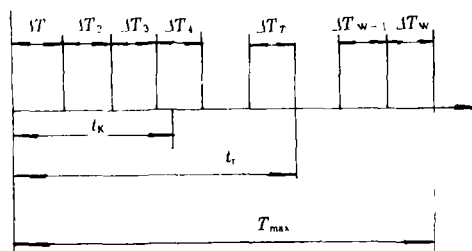


图 1 等分系统最大工作时间图

图 1 中是 $T_{\max}$ 分成的等分,则每个时间间隔为

$$\Delta T_r = \frac{T_{\max}}{W}$$

$$r = 1, 2, W \quad (12)$$

式中 r —序列号

t_r —第 r 个区间终点的时间

t_k —某一次仿真运行中系统发生故障的时间

设仿真运行总次数为 N ,在第 j 次运行中,第 i 个部件的故障时间 t_{ij} 为

$$t_{ij} = F_i^{-1}(\eta_{ij}) \quad (13)$$

式中 η_{ij} —第 j 次抽样的随机数,即随机数列 $(\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_i, \dots, \eta_n)$ 中的第 j 个随机数。

在每一次仿真运行中,都将 t_{ij} 按时间由小至大顺序排列,并记为 TTF_i ,即

$$TTF_1 < TTF_2 < \dots < TTF_K < \dots <$$

TTF ,与之相应的基本部件顺序表示如下:

$$Z_1, Z_2, \dots, Z_K, \dots, Z_n$$

再按故障树的逻辑关系找出顶事件发生时间 $t_{kj} = TTF_K$ 。这种做法为“通扫故障树”。随后判断 t_{kj} 落在图 1 哪个区间,用区间统计的办法进行系统失效数的分布统计,然后用概率统计方法,计算系统的可靠性特征值,画出分布的直方图。

3 300 WM 机组转速测量通道的故障树

该系统由 18 个基本部件组成,其故障树见图 2。

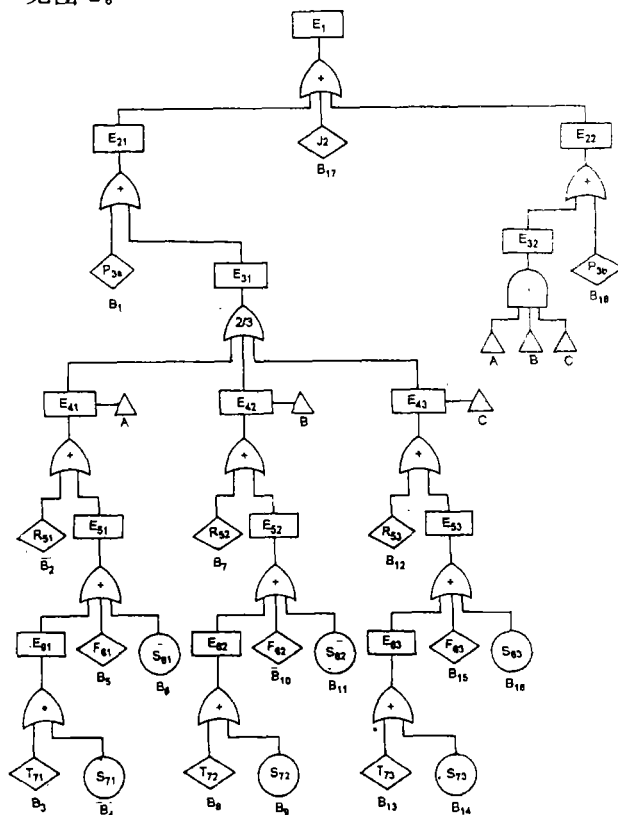


图 2 转速测量系统故障树

图中 B_i 表示第 i 个底事件, B_i 是第 i 个基本部件 Z_i 失效的事件,已知每个基本部件的失效分布函数 $F_i(t)$,其分布类型及特征参数见表 1,表中 λ_i 为失效率, m_i 为正态分布的数学期望; σ_i 为正态分布的标准差。故障树中各组成部分的含义见表 2。

表 1 各基本部件失效分布类型及参数

基本部件	失效密度函数类别 $f_i(t)$	$f_i(t)$ 的特征参数
Z_1, Z_{17}, Z_{18}	正态分布	$m = 1000, \sigma = 130$
Z_2, Z_7, Z_{12}	指数分布	$1/\lambda = 2000$
Z_3, Z_8, Z_{13}	正态分布	$m = 1200, \sigma = 150$
Z_4, Z_9, Z_{14}	指数分布	$1/\lambda = 1800$
Z_5, Z_{10}, Z_{15}	正态分布	$m = 1200, \sigma = 150$
Z_6, Z_{11}, Z_{16}	指数分布	$1/\lambda = 2500$

表 2 转速测量系统故障树中各符号含义

符 号	内 容
E_1	转速测量系统失效
J_2	逻辑选择出错
E_{21}, E_{22}	无转速信号输出
P_{3a}, P_{3b}	逻辑选择未展开事件失效
E_{31}, E_{32}	转速通道失效
E_{41}, E_{42}, E_{43}	变送器失效
R_{51}, R_{52}, R_{53}	整个电路故障
E_{51}, E_{52}, E_{53}	l/v 转换器失效
E_{61}, E_{62}, E_{63}	磁阻发讯器失效
F_{61}, F_{62}, F_{63}	l/v 转换器未展开事件失效
S_{61}, S_{62}, S_{63}	l/v 转换器电源失效
T_{71}, T_{72}, T_{73}	磁阻发讯器未展开事件失效
S_{71}, S_{72}, S_{73}	磁阻发讯器电源失效

图 2 故障树中有 14 个逻辑门,其中或门 12 个,与门 1 个,表决门 1 个。由可靠

性理论得知,系统中或门,与门和表决门的结构函数分别是:

$$\begin{aligned} & \text{或门的结构函数 } \Phi_{or}[\bar{X}(t)]: \\ \Phi_{or}[\bar{X}(t)] &= \Phi_{or}(t) = 1 - \prod_{i=1}^r [1 - X_i(t)] \end{aligned} \quad (14)$$

它表示在此或门下共有 r 个输入事件, $x_i(t)$ 为 i 个输入事件的状态变量,其取值

$$x_i(t) = \begin{cases} 1, & t \geq t_i \\ 0, & t < t_i \end{cases} \quad (15)$$

与门的结构函数 $\Phi_{and}[\bar{X}(t)]:$

$$\Phi_{and}[\bar{X}(t)] = \Phi_{and}(t) = \prod_{i=1}^r X_i(t) \quad (16)$$

它表示在此与门下共有 r 个输入事件, $x_i(t)$ 为 i 个输入事件的状态变量,其取值同式(15)。

2/3 表决门的结构函数 $\Phi_{va} = [\bar{X}(t)]:$

$$\Phi_{va}[\bar{X}(t)] = \Phi_{va}(t) = 1 - \prod_{i \neq j} (1 - X_i X_j) \quad (17)$$

2/3 表决门也可以用一个或门串联三个与门代替。通过各门的结构函数,由底事件状态变量经过逐门的逻辑关系得出顶事件的状态变量 $\Phi_i(t)$,即转速通道失效。

4 DEH 转速测量通道的蒙特卡罗法仿真

4.1 可靠性仿真计算

根据故障树理论,利用结构函数,在已知基本部件的失效分布函数情况下,编制了利用蒙特卡罗方法进行系统可靠性仿真运行的计算机程序,最后对可靠性各种估计值进行统计。

4.2 仿真程序及仿真结果

根据仿真模型,用 Quick Basic 语言编制

的仿真程序由主程序;求均匀随机数子程序;随机变量抽样子程序;求逻辑门状态变量子程序;数值排序子程序等组成。仿真结果统计出系统的可靠度 $R_s(t)$;系统的失效率分布 $P_s(t)$;系统的平均寿命 $MTBF$,基本部件的重要度和模式重要度等。仿真结果能反映出转速测量系统中各部件在系统中的重要程序及基本部件失效如何造成系统失效的。

设系统寿命 ζ 为随机变量,其各种估计值的统计计算如下:

4.2.1 系统的可靠性指标

系统的累计失效概率

$$F_s(t_r) \approx \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \Phi_j(t) \quad t \leq t_r \quad (18)$$

统计 $t \leq t_r$ 的系统失效数

$$m(t_r) = \sum_{j=1}^N \Phi_j(t_k) \quad t_k \leq t_r \quad (19)$$

$$\text{则有 } F_s(t_r) \approx \frac{m(t_r)}{N} \quad (20)$$

$$\text{系统的可靠度 } R_s(t_r) = 1 - F_s(t_r) \quad (21)$$

系统的失效概率分布 $P_s(t_r) \approx$

$$\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \Phi_j(t) \quad (22)$$

$$\text{系统平均寿命 } MTBF \approx \sum_{t_i=0}^{\infty} [t_i, P_s(t_i)] \quad (23)$$

4.2.2 重要度计算

基本部件重要度 $W(Z_i) =$

$$\frac{\text{基本部件 } Z_i \text{ 失效引起系统失效次数}}{\text{基本部件 } Z_i \text{ 失效的总次数}} \quad (24)$$

基本部件重要度可表示部件 Z_i 在系统中的重要程序,若 $W(Z_i) = 1$,说明只要 Z_i 发生一次失效,则系统必定因其失效而发生一次失效。

基本部件模式重要度 $W_s(W_i) =$

$$\frac{\text{基本部件 } Z_i \text{ 失效引起系统失效次数}}{\text{系统总的失效次数}} \quad (25)$$

模式重要度表示了 Z_i

失效而引起系统失效的次数在系统总失效次数中的百分比。

上述两个重要度从不同角度反映了部件在系统可靠性分析中的重要程度。

5 仿真结果分析

在系统仿真中,分别作了 $N = 200, 1000, 2000, 3000, 5000, 10000$ 等的运行,随着运行次数的增加,发现运行次数达 3000 次以上后,运行结果十分接近,表明此时运行已达到稳定状态。

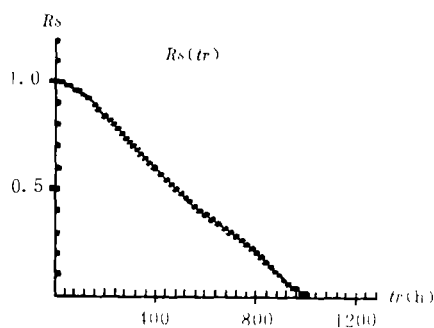


图3 系统可靠度曲线

图3表示系统的可靠度 $R_s(t)$ 曲线,它是 $N = 3000$ 的运行结果。

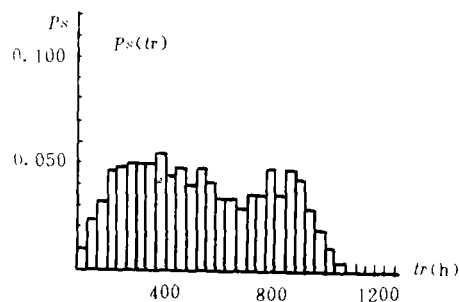


图4 系统失效概率分布曲线

图4为系统失效概率分布 $P_s(t)$,它是用直方图表示的仿真结果。

基本部件重要度和模式重要度见表3。

分析以上结果可看出:

5.1 基本部件 Z_1, Z_{17}, Z_{18} 是或门下的部件,共重要度为 1.000,与理论分析一致,即底事件一旦发生,就引起顶事件发生。其它部件均处于 2/3 表决门下,只有当两路速度通道故障才会导致顶事件发生,故其重要度均小于 1.0000,即它们引起系统失效次数要小于自身失效次数。

表3 $W(Z_i), W_s(Z_i)$ 仿真结果

部件序号	$W(Z_i)$	$W_s(Z_i)$	部件序号	$W(Z_i)$	$W_s(Z_i)$
1	1.0000	0.0610	10	0.6667	0.0040
2	0.7920	0.1790	11	0.7751	0.1585
3	0.6667	0.0030	12	0.8057	0.1825
4	0.8243	0.1970	13	0.6667	0.0050
5	0.5000	0.0020	14	0.8274	0.2205
6	0.8011	0.1470	15	0.6667	0.0020
7	0.7789	0.1850	16	0.7845	0.1420
8	0.6250	0.0050	17	1.0000	0.0630
9	0.8150	0.2115	18	1.0000	0.0580

5.2 Z_1, Z_{17}, Z_{18} 同属正态分布, 具有相同的均值和标准差, 因此在足够多的仿真次数下, 失效次数应相近。由表 3 可见, 三者确实具有相近的 $W_N(Z_i)$ 值, 如果 $N \rightarrow \infty$, 其数据趋于一致。同样可看出, 具有相同指数分布的 $Z_2, Z_7, Z_{12}, Z_4, Z_9, Z_{14}, Z_6, Z_{11}, Z_{16}$ 及具有相同正态分布的 $Z_3, Z_8, Z_{13}, Z_5, Z_{10}, Z_{15}$ 等均具有相近的 $W(Z_i)$ 和 $W_N(Z_i)$, 随着 N 无限增大, 也将趋于一致。

5.3 由定义可见, $W(Z_i)$ 表示部件 Z_i 在系统中的重要程度, 为了提高转速测量系统的可靠性, 首先应着眼于那些 $W(Z_i)$ 大的部件。又由定义知, $W_N(Z_i)$ 可判断系统可靠性的薄弱环节, 因此 $W_N(Z_i)$ 越大, 说明 Z_i 越是系统可靠性的薄弱环节, 从表 3 所列数据可看出 Z_4, Z_9, Z_{14} (均为磁阻发讯器); Z_{11}, Z_{16}, Z_{21} (f/v) 及 Z_2, Z_7, Z_{12} (电路部分), 它们的 $W(Z_i)$ 和

$W_N(Z_i)$ 均较大, 它们是提高转速测量系统可靠性的关键部件。

5.4 结果表明, 失效率小的指数分布的部件及均值大的正态分布的部件, 失效次数都比那些效率大的指数分布和均值大的正态分布的部件少。所以要想提高转速通道的使用寿命, 减少失效次数, 必须选用失效率小或均值大的传感器, 变送器, 电源等及其相应的元部件。

参 考 文 献

- 1 梅启智. 系统可靠性工程基础. 科学出版社, 1987
- 2 杨为民, 盛一兴. 系统可靠性数字仿真. 北京航空航天大学出版社, 1990
- 3 疏松桂. 控制系统可靠性分析与综合. 科学出版社, 1992
- 4 周青龙. 故障诊断与监控. 兵器工业出版社, 1992

(渠源 编辑)

作者简介 马芳梅 女 1943 年生, 1962 年毕业于武汉华中工学院热动专业, 现任华中理工大学动力系热动教研室副教授。从事电厂热能动力及其自动化方面的教学和科研。主要研究方向为电厂, 热能动力工程的自动化及计算机控制、动力机械及动力工程的测试。主要代表作有: 动力机械及动力工程测试技术; DEH 的动态特性研究; 200 MW 汽轮机中压缸启动; 气温计算模型的构造与优选等。在研的课题有国家自然科学基金项目两项, 华中电管局项目两项。八五攻关课题 300 MW 汽轮机 DEH 的故障诊断研究。(通讯处: 430074 武汉华中理工大学动力系热动教研室)

更 正

由于校对错误, 本刊 1996 年第 5 期 331 页作者金淑敏应为金洁敏, 请作者谅解, 特此更正。

——编辑部

载热气化燃煤联合循环性能研究 = A Study on the Performance of Heat-Carrying Gasification Coal-Fired Combined Cycle [刊, 中]/Xu Xiangdong, Zhao Li, Zhu Weimin (Tsinghua University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. 1996, 11(6): 337~342

A relatively comprehensive analysis is given of the performance of a new-type coal-fired combined cycle version, i. e. a heat-carrying partial gasification coal-fired combined cycle version. To select a rational system configuration, the authors used the mathematical model of existing components and calculated the system parameters under various configurations. From some useful conclusions thus obtained a relatively optimized version has been selected, which can eventually provide a reliable theoretical basis for the development and realization of the above-cited system. Key words: heat-carrying gasification, combined cycle, differential speed circulating fluidized bed

用于循环流化床的鳍片管束惯性分离器流动特性的研究 = A Study on the Hydrodynamic Characteristics of a Finned Tube Bank Inertial Separator Used for a Circulating Fluidized Bed [刊, 中]/ Li Xiaodong, Shen Yueliang, Yan Jianhua, Li Yangxin, et al. (Thermal Power Engineering Institute of Zhejiang University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, -1996, 11(6): 343~347

By employing laser Doppler velocity measurement and numerical simulation method the authors have conducted a study on the hydrodynamic characteristics of a finned tube bank inertial separator used for a circulating fluidized bed, thereby obtaining the distribution of such parameters as the gas velocity flowing around the finned tubes, and the turbulent flow intensity, etc. In addition, the test and calculation results were analysed and discussed, which will provide a solid basis for the further optimization study of the finned tube bank impact separator. Key words: measurement, hydrodynamic characteristics, separator

DEH 转速测量系统的故障树分析 = Fault Tree Analysis for a DEH Rotating-Speed Measurement System [刊, 中]/Ma Fangmei, Zhang Jiace, Hei Yingxia, et al. (Huazhong University of Science & Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1996, 11(6): 348~353

Through the use of a Monte Carlo method-based fault tree theory the reliability simulation of a digital electro-hydraulic (DEH) speed measurement system of a 300 MW steam turbine was performed and the system reliability studied along with a fault analysis of the system. On the basis of the above some observations were given. Key words: fault tree, reliability simulation, DEH measurement system

能量系统的炯经济学分析通用模型及其在电厂中的应用 = A General Model for the Exergy Economics Analysis of an Energy System and its Use for an Electric Power Plant [刊, 中]/ Yang Yongping, Wang Jiaxuan (Beijing Postgraduate Department of North China Electrical Power Engineering Institute) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, -1996, 11(6): 354~359

During the operation of an electric power plant it often happens that some main parameters deviate from their design values. The study of the effect of such deviations on the economic operation of a