

电站辅机可靠性考核验证方案

(中国华电电站装备工程总公司)

许洪全

(上海发电设备成套设计研究所)

史进渊

(上海交通大学) 蒋安众 刘玉成

黄东升

摘要 为核验电站辅机的可靠性,本文介绍了以平均无故障运行时间和可用系数为指标,利用电站现场运行数据对电站辅机进行可靠性指标验证的方案和相应的实例,可供电站辅机制造行业和电力运行部门制定可靠性考核方法时参考。

关键词 电站辅机 平均无故障运行时间 可用系数
可靠性验证试验

中图分类号 TM621.7 TB11.3

1 电站辅机可靠性验证的意义

可靠性是衡量发电设备质量的重要指标,前苏联国家标准中把可靠性指标作为制造厂的保证值列为发电设备的质量指标;美国发电设备的购买规范中将可靠性指标作为技术要求列入合同,投运后进行验证,如果产品的可靠性达不到规定值则要求索赔。而发电设备产品大、数量少、可修复、系统复杂、昼夜连续运行,可靠性试验在实验室无法进行,其可靠性验证是现场验证。从文献 [1] 可得知目前我国 200 MW 及以上大容量火电机组的主要辅机的可靠性不容乐观,因此有必要根据辅机以往运行数据来考核各种辅机的可靠性,向电站辅机制造厂家和电力运行和决策部门提出建议,进一步提高电站辅机可靠性水平,减少由于辅机运行可靠性水平低下所带来的巨大经济损失。

2 电站辅机平均无故障运行时间的验证方案

平均无故障运行时间 (MTBF) 是电站辅机的狭义可靠性主要评价指标,其计算公式为 $MTBF = \text{运行小时} / \text{非计划停运次数}$ 。验证 MTBF 要用到以下参数: a. 不可接收的平均无故障运行时间 (记为 θ_1), 是指当 $MTBF < \theta_1$ 时, 辅机是不符合要求的;

b. 可接收的平均无故障运行时间 (记为 θ_0), 是指当 $MTBF \geq \theta_0$ 时, 辅机是符合要求的; c. 生产方风险 T , 即把 MTBF 本来是合格的辅机误判为不合格的概率; d. 使用方风险 U , 即把 MTBF 本来是不合格的辅机误判为合格的概率; e. 鉴别比 $D_m = \theta_0 / \theta_1$; f. 合格判定数 c 。电站辅机无故障运行时间服从指数分布时, 可用下述考核验证方案

2.1 定时截尾有替换验证试验方案

从一批产品中任取 n 个样品进行有替换的寿命试验, 到规定时间 t^* 截尾, 这时发生故障产品数为 r , 则判断规则为: $r \leq c$ 时, 认为产品合格, 接受这批产品; $r > c$, 认为产品不合格, 拒收这批产品。

在给定 T, U, θ_0, θ_1 时, 所制定的试验方案应同时满足:

$$2T / \theta_0 = x_{1-\alpha}^2 (2C + 2) \quad (1)$$

$$2T / \theta_1 = x_{\beta}^2 (2C + 2) \quad (2)$$

其中 T 为总试验时间: $T = nt^*$, 利用 x^2 分布表, 可从上述两式解出 T 和 C , 根据 $T = nt^*$ 及生产、设备具体情况来确定抽验量 n 及试验截止时间 t^* , 此即为产品的 (n , 有, t^*) 试验方案。对于常用的两类风险 T, U 值及鉴别比 D_m 的值, 国际标准 IEC605 - 7 美国军标 MIL-STD-781C 和国标 GB5080-85 均有现成的验证试验抽样表, 只要在确定了 T, U, θ_0 及 θ_1 值后, 从表中可查得相应的方案号, 便可得到 T 及合格的允许故障数 C 。对产量少、价格高的产品, 原则上用一台辅机进行试验, 即用 (1, 有, T) 试验代替 (n , 有, t^*) 试验。其思路为: 辅机在偶然故障期, 其无故障运行时间服从指数分布, 发生故障后, 经过检修又能恢复其原有功能, 使修复后的辅机和原来的辅机一样, 从投入运行到下次发生故障这段时间就是它的工作寿命 (即无故障运行时间)。因此, 一台可修复的辅机的连续运行可看成是多个“不可修复辅机”在原辅机发生故障后进行替换继续工作, 其第 i 次工作寿命对应着第 i 台“不可修复辅机”。在连续运行总试验时间 T 内, 发生故障次数为 r , 当 $r \leq c$

时,辅机是合格的; $r > c$ 时,辅机是不合格的

实例:某发电厂 15号机组 1号给水泵,1991年投入运行,不妨设 θ_0 为 1200小时/次, θ_1 为 800小时/次,则鉴别比 D_m 为 1.5 而生产方和使用方希望的验证时间为两年之内,双方可根据国家标准 GB5080-85和所希望验证的时间范围来确定总试验时间为 $T = 14. \theta_0$,即 16 920小时,相应的合格判定数为 $C = 17$,生产方和使用方初步风险为: $T_0 = 20\%$, $U_0 = 20\%$ 从方程 (1) 和 (2) 可求出生产方和使用方实际风险 $T_0 = 21.73\%$, $U = 18.00\%$ 。该给水泵在 16 920小时内实际故障次数为 $r = 9$ 次, $r < C$,故该辅机可靠性验证合格

2.2 序贯验证试验方案

定时验证方案是一次作出接受或拒收的决定,没有充分利用每次故障所提供的信息,一般需要考虑的故障数多,试验时间较长,序贯寿命试验方案则可避免这个缺点。其检验规则为:从一批产品中任取 n 个样品进行试验,观察第 r 个故障发生的时间, $r =$

表 1

r	T_r 小时	$T(A)$ (小时)	$T(B)$ (小时)	比较结果	结论
1	1209.833	4300.223	-2353.990	$T(B) < T_r < T(A)$	继续验证试验
2	4372.333	5273.379	-1380.874	$T(B) < T_r < T(A)$	继续验证试验
3	5012.666	6246.455	-407.758	$T(B) < T_r < T(A)$	继续验证试验
4	8070.166	7219.572	565.359	$T_r \geq T(A)$	接受该辅机产品,验证终止

2.3 截尾序贯验证试验方案

序贯验证试验方案对于可靠性水平不是太好也不是太坏的产品,要作出判决的试验时间会很长,截尾序贯验证试验方案可解决这个问题。其基本方法为:取适当的截止时间 T_0 和截尾数 r_0 ,在 $T-r$ 坐标平面上作直线 $r = r_0, T = T_0$,与直线 $T(A) = sr + h_0, T(B) = sr - h_1$ 围成一个封闭的继续试验区域,以防止试验时间拖得太长,其使用方法为:从试验开始起,若发生 r 次故障的试验总时间为 T_r ,将点 (T_r, r) 点在坐标平面上或在相应的判决标准表中对照,若落入接收区或拒收区就可作出判决,试验就可终止,如落入继续试验区,继续验证,直到验证终止为止。国家标准 GB5080-85中已有现成的标准,对于上例可采用 GB5080-85中方案 A: 5 此处: $r = 3$ 时: $0.1\theta_0 = 192$ 小时 $\langle T_r = 5012.666$ 小时 $\langle 5.2\theta_0 = 6264$ 小时,继续验证: $r = 4$ 时: $T_r = 8070.166$ 小时 $\rangle 6.0\theta_0 = 7236$ 小时,接受该辅机产品,验证终止。从方案 A: 5 中可看出不论辅机可靠性水平如何,总试验时间 T 最大为 $14. \theta_0 = 17 520$ 小时,就可作出判决,

1, 2, ..., n , 并计算第 r 次故障时, n 个样品的总试验时间 T_r ,判断规则为: $T_r \geq T(A)$, 认为产品合格,接受这批产品: $T_r \leq T(B)$, 认为产品不合格,拒收这批产品; $T(B) < T_r < T(A)$, 不能作出决定,须继续试验。对单台辅机 T_r 为发生第 r 次故障时辅机的总试验时间,即连续运行的总时间。对于一个序贯验证试验方案,关键在于要确定两个界限 $T(A), T(B)$

$$\text{接受界限值: } T(A) = sr + h_0, \quad (3)$$

$$\text{拒收界限值: } T(B) = sr - h_1 \quad (4)$$

$$\text{式中: } h_0 = \frac{\ln(1 - T) / U}{1/\theta_1 - 1/\theta_0}, h_1 = \frac{\ln(1 - U) / T}{1/\theta_1 - 1/\theta_0},$$

$$s = \frac{1/\theta_0 \theta_1}{1/\theta_1 - 1/\theta_0}$$

实例:这里仍以某发电厂 15号机组 1号给水泵为例, θ_0 为 1200小时/次, θ_1 为 800小时/次, $T = 20\%$, $U = 20\%$, 计算可得: $h_0 = 2.772 59\theta_0, h_1 = 2.772 59\theta_0, s = 0.810 93\theta_0$, 则 $T(A) = (0.810 93r + 2.772 59)\theta_0, T(B) = (0.810 93r - 2.772 59)\theta_0$ 对应的序贯验证试验方案与结论见表 1

即当连续运行到 17 520小时时停止试验,若此时的故障次数 ≤ 19 ,则认为产品合格;若此时的故障次数 > 19 ,则认为产品不合格

3 可用系数的验证方案

可用系数 (AF) 是电站辅机的广义可靠性主要评价指标,其计算公式为: $AF = \text{可用小时} / \text{统计期间小时}$ 。验证 AF 要用到以下参数: a. 不可接收的可用系数 AF_1 ,是指当 $AF < AF_1$ 时,辅机是不符合要求的; b. 可接收的可用系数 AF_0 ,是指当 $AF \geq AF_0$ 时,辅机是符合要求的; c. 生产方风险 T ; d. 使用方风险 U ; e. 统计时间 PH (小时)。当辅机的可用时间和不可用时间均服从指数分布时,可用下述考核验证方案

3.1 定时验证试验方案

3.1.1 参数计算

判决临界值:

$$AF_c =$$

$$AF_0 \times \frac{\lambda_T AF_0}{1 - AF_0 + \lambda_U AF_1} \times \frac{\lambda_U AF_1}{1 - AF_1} \times 100\% \quad (5)$$

$$\text{验证总时间: } T_a = MDT \times f_t \quad (6)$$

其中: $MDT = \frac{UH}{NU}$

$$f_t = 2 \times \left[\frac{\lambda_T AF_0}{AF_0 - AF_1} \frac{1 - AF_0 + \lambda_U AF_1}{1 - AF_1} \right]^2$$

λ_T, λ_U ——正态分布的上侧分位数,
 NU ——不可用次数,
 UH ——不可用总时间(小时),
 MDT ——平均不可用时间(小时/次).

3.1.2 判决规则: 在 $[0, T_a]$ 内, 计算 $AF(T_a)$, 当 $AF(T_a) \geq AF_c$ 时, 接受该辅机产品; 当 $AF(T_a) < AF_c$ 时, 拒收该辅机产品.

实例: 仍以某发电厂 15 号机组 1 号给水泵为例, 给定 $AF_0 = 90\%$, $AF_1 = 85\%$, $T = U = 20\%$, 计算可得: $AF_c = 87.682\%$, $T_a = f_t \cdot MDT = 213.496 MDT = 19380$ 小时, 从 1991 年 1 月 1 日 0 时 0 分 到 1993 年 3 月 18 日 12 时 0 分, $PH = 19380$ 小时, $UH = 1993.451$ 小时, 在 $[0, T_a]$ 内, $AF(T_a) = 89.713\% > AF_c = 87.682\%$, 故接受该辅机产品.

3.2 定时截尾序贯验证方案

3.2.1 参数计算

$$\text{鉴别比: } D_a = d_0 / d_1 \quad (7)$$

$$\text{时间比: } Z = \sum_{i=1}^r UH_i \sum_{i=1}^r AH_i \quad (8)$$

$$\text{拒收界限值: } RE(r) = (D_r - G_r) / (G_r - 1) \quad (9)$$

$$\text{接受界限值: } AC(r) = (D_a - H_r) / (H_r - 1) \quad (10)$$

上述式中: $d_0 = AF_0 / (1 - AF_0)$;
 $d_1 = AF_1 / (1 - AF_1)$; r — 不可用次数;

$$H_r = \frac{D_a [(1 - T) U]^{1/2r}}{D_a} ;$$

$$G_r = \frac{D_a [T / (1 - U)]^{1/2r}}{D_a}$$

3.2.2 其判决规则为: 在 $PH < T_{max} = 1.25T_a$ 时: 若 $d_0 Z_r \geq RE(r)$, 拒收该辅机产品; 若 $d_0 Z_r \leq AC(r)$, 接受该辅机产品; 若 $AC(r) < d_0 Z_r < PE(r)$, 继续验证. 在 $PH \geq T_{max}$ 时: 若 $d_0 Z_r \leq C_\infty$, 接受该辅机产品; 若 $d_0 Z_r > C_\infty$, 拒收该辅机产品. (其中 $C_\infty = D_a$)

实例: 以上例继续说明, 鉴别比为: $D_a = 1.588$, $T_{max} = 1.25 \times T_a = 1.25 \times 19380 = 24225$ 小时. 对应的验证试验方案与结论见表 - 2

表 2

r	Z _r	G _r	H _r	PH	RE(r)	AC(r)	比较结果	结论
1	0.003	0.630	2.521	1213.5	-2.190	-0.613	RE(r) < 0 AC(r) < 0	继续验证试验
2	0.003	0.890	1.782	4385.5	-6.403	-0.248	RE(r) < 0 AC(r) < 0	继续验证试验
3	0.015	1.00	1.588	5088.0	2237.873	0.001	AC(r) < d ₀ Z _r = 0.135 < RE(r)	继续验证试验
4	0.013	1.06	1.499	8175.3	8.846	0.180	d ₀ Z _r = 0.117 < AC(r)	接受该辅机产品, 验证终止

4 结束语

本文介绍的电站辅机可靠性考核验证方法同目前国际通用的产品可靠性验证方法基本一致, 在工程上是实用的. 但生产方和使用方的风险以及可靠性考核指标的取值还需要双方协商确定.

参考文献

- 李玉生, 蒋锦峰. 1993 年度大型火电机组主要辅机可靠性分析. 华北电力技术, 1995, (2).
- 许洪全. 上海交通大学硕士学位论文, 1997. 1.
- 茆诗松, 王玲玲编著. 可靠性统计. 华东师范大学出版社, 1984 年.
- 姚一平, 李沛玉等编著. 可靠性及余度. 航空工业出版社, 1991 年.
- 孟庆玉主编. 舰艇武器装备可靠性工程基础. 兵器工业出版社, 1993. 4.

- 周源泉, 翁朝曦著. 可靠性评定. 科学出版社, 1993. 3.
- 史进渊. 发电设备可靠性的评定. 预测和考核. 发电设备, 1987, (8).
- 史进渊, 林振坤. 大型机械成套设备广义可靠性的分析. 机械强度, 1994, 16(3).
- 史进渊. 发电设备可靠性现场考核验证方案. 电站系统工程, 1992(2).
- 史进渊, 何新士等. 发电设备可靠性的统计评价和验证方案. 应用概率统计, 1991, (3).
- 史进渊. 发电设备可靠性分析的新技术. 电站系统工程, 1993, (2).

作者简介 许洪全, 男, 1970 年生, 硕士, 工程师, 1997 年 3 月于上海交通大学能源工程系电厂热能动力工程专业毕业; 1997 年 4 月至 1998 年 6 月, 在中国航空综合技术研究所质量室工作; 目前在中国华电电站装备工程总公司环境保护部(北京市西三环南路甲 17 号, 邮编: 100073) 工作.

(李乡复 编辑)

压气机的湿压缩特性及计算模型初步研究 = **A Preliminary Study of Compressor Wet Compression Characteristics and its Calculation Model** [刊, 中] / Lin Feng, Wen Xueyou (Harbin No. 703 Research Institute) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power). - 1998, 13(6). - 402~ 405

After analyzing a huge amount of information and data published abroad concerning water spray into a compressor flow path and on the basis of the preliminary test results already obtained the authors sum up the main features of the compressor performance after a water spray and key factors which can exercise an influence on the compressor performance. A theoretical analysis and argumentation/justification of these features have been conducted. Finally, a calculation model is proposed based on the features of "wet compression". Key words compressor, wet compression, model

锅炉过热器汇流集箱流动机理研究 = **A Study of the Flow Mechanism in the Collector of a Boiler Superheater** [刊, 中] / Wang Junye, Wu Guojiang, Wang Deping, et al (Shanghai Jiaotong University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power). - 1998, 13(6). - 406~ 408

The uniform distribution of flow in a boiler header constitutes one of the key technological factors ensuring the safe design of boiler superheaters and reheaters. On the basis of momentum conservation this paper focuses on the study of flow mechanism of the header and its flow static pressure distribution. Furthermore, an analysis is also conducted of the basic governing rules and design parameters of the flow in the boiler header. Key words boiler, header, superheater, branch flow, reheater

电站辅机可靠性考核验证方案 = **A Reliability Verification Scheme for Power Station Auxiliaries** [刊, 中] / Xu Hongquan, et al (China National Aviation Comprehensive Technology Research Institute) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power). - 1998, 13(6). - 409~ 411

MTBF(mean time between failure) and AF(availability factor) indexes are employed to verify the reliability of power station auxiliaries. Presented is a scheme for reliability index verification of power station auxiliaries by the use of power station on-site operation data along with some pertinent practical examples. This can serve as a guide for power station auxiliaries manufacturers and electric power operation departments in formulating reliability verification methods. Key words power station auxiliaries, mean time between failure, availability factor, reliability verification test

自然循环锅炉启动过程中过热器超温机理的研究 = **A Study of the Overheating Mechanism of Superheaters During Start-up of Natural Circulation Boilers** [刊, 中] / Yan Weiping (North China University of Electric Power Engineering) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power). - 1998, 13(6). - 412~ 414

On the basis of a heat balance principle presented in this paper is a simple and intuitive analytical method of calculation for analysing and substantiating the underlying cause of superheater overheating during a boiler start-up. The results obtained agree well with those of actual measurements. The essence of superheater overheating during the boiler start-up is hereby clarified, which can have a certain reference value for the study of the superheater overheating mechanism and the determination of measures for solving the superheater overheating issues. Key words boiler, boiler start-up, superheater overheating

氢能燃气轮机循环低温能有效利用及热力学分析 = **The Effective Utilization of Hydrogen Energy-based Gas Turbine Cycle Low-temperature Energy and Its Thermodynamic Analysis** [刊, 中] / Cao Huiling, Yu