

# 基于改进 AFAL 分析法的核电厂 仪表校验周期延长研究

陈云<sup>1</sup>, 赵立宏<sup>1</sup>, 于涛<sup>2\*</sup>, 何丽华<sup>2</sup>, 刘紫静<sup>2</sup>, 谢金森<sup>2</sup>

1. 南华大学电气工程学院, 湖南衡阳, 421001; 2. 南华大学核科学技术学院, 湖南衡阳, 421001

**摘要:**通过对仪表漂移特性 (AFAL) 分析法的改进, 特别是对数据统计算法的改进, 提出了一种改进 AFAL 分析法。实例结果表明, 本文所建议的改进方法是有效和完善的, 能直观描述仪表的漂移特性, 对分析仪表校验周期延长后仪表性能的可靠性有较大提高。

**关键词:**核电厂; AFAL 分析法; 校验周期; 延长

**中图分类号:** TL362 **文献标志码:** A

## Extension of Instrument Calibration Intervals Base on Improved AFAL Analysis

Chen Yun<sup>1</sup>, Zhao Lihong<sup>1</sup>, Yu Tao<sup>2\*</sup>, He Lihua<sup>2</sup>, Liu Zijing<sup>2</sup>, Xie Jinsen<sup>2</sup>

1. School of Electric Engineering, University of South China, Hengyang, Hunan, 421001, China;

2. School of Nuclear Science and Technology, University of South China, Hengyang, Hunan, 421001, China

**Abstract:** Base on the improvement of AFAL analysis, especially the improvement of the statistical analysis method, an improved model of AFAL analysis is proposed. The result of engineering example studies have shown that, the proposed method is effective and perfect, and it can visually describe the characteristics of instrument drift, and is much better to prove the stability of extended instrument calibration cycle.

**Key words:** Nuclear power plant, AFAL methodology, Calibration cycle, Extension

### 0 引言

在确保安全的条件下, 延长机组大修周期有利于提高核电厂运行的经济效益。为了将燃料循环周期延长, 核电厂必须评价燃料循环周期的延长对仪表漂移误差和仪表通道安全功能的影响, 以确保仪表的测量误差满足设计要求。仪表漂移特性 (AFAL) 分析法是基于历史校验数据, 用统计学规律对仪表的漂移特性进行描述, 通过评估仪表当前的运行状态进而预测将来的漂移趋势, 以此分析仪表校验周期延长后仪表性能的可靠性<sup>[1-3]</sup>。传统的 AFAL 分析法采用  $T$  试验判定异常点; 而  $T$  试验法局限于判断服从正态分布

的数据, 应用范围较小。另外, 通过建立直方图分析数据分布特性, 不能准确描述数据与正态分布的相识度, 容易导致主观误判。考虑到 AFAL 分析法存在的问题, 本文提出一种改进 AFAL 分析法, 改进后的仪表漂移分析过程由以下 5 个步骤组成: 计算仪表漂移率; 判断和处理异常点; 分析数据分布特性; 分析仪表漂移趋势; 评估周期延迟可行性。通过建立数学模型和分析图能直观描述仪表的漂移特性, 并增加了分析仪表漂移趋势的步骤, 计算出了仪表漂移随运行时间的相关性。应用于核电厂仪表校验周期延长论证中表明, 改进 AFAL 分析法能有效分析仪表

收稿日期: 2016-05-11; 修回日期: 2016-12-20

作者简介: 陈云 (1989—), 男, 硕士研究生, 现从事先进检测技术与智能仪器仪表研究

\*通讯作者: 于涛, E-mail: yutao29@sina.com

校验周期延长的可行性。

## 1 改进 AFAL 分析法的简介

### 1.1 计算仪表漂移率

按相关仪表允许误差的验收准则，核电厂需定期对仪表进行检查或监督，以确保仪表性能响应在所要求的精度范围内。对于选定的仪表样本，通过收集历史校验数据，计算仪表样本各量程校验点的仪表漂移率值，可得到仪表校验点观察到的运行周期始末仪表检验误差的变化量。计算公式为：

$$X_i = \frac{AF_i - AL_{i-1}}{R} \times 100\% \quad (1)$$

式中， $X_i$  为计算得到的仪表漂移率； $AF_i$  (As-Found) 为仪表运行第  $i$  周期后未校验前的测量值； $AL_{i-1}$  (As-Left) 为仪表运行第  $i-1$  个周期校验后的测量值； $R$  为仪表的量程范围。

### 1.2 判断和处理异常点

当校验点的漂移明显不同于其他校验点时，该漂移有可能是异常点。由于异常点可能导致样本的标准差被放大，需要在统计分析过程中对异常点进行判断、分析和去除。盒型图判定法能直观判断服从各类数据分布的异常点<sup>[4]</sup>。漂移率值按从小到大排列，通过观测排列在 3 个四分位点对应的数值 ( $Q_1, Q_2, Q_3$ )，建立排列在四分之一位点 ( $Q_1$ ) 与四分之三位点 ( $Q_3$ ) 的盒型区域，计算  $Q_3$  与  $Q_1$  之间的间隔差  $I$ ，若盒型外的数据点与盒子边框的距离大于  $I$  的 1.5 倍，则理论视为异常点。若经验证是由于人因失误或工艺状态等因素引发，则不影响仪表的实际性能，仪表校验周期延长可行。

### 1.3 分析数据分布特性

在处理异常点后，漂移率值重新按从小到大的顺序排列。由于仪表漂移特性分析法应用的前提是假定数据服从正态分布，有必要分析、验证样本数据的正态分布特性。卡方检验法是基于正态分布的数据比例分析法，计算公式为：

$$k^2 = \frac{\left[ \sum_{i=1}^n (Z_i - \bar{Z}) \cdot (p_i - \bar{p}) \right]^2}{\left[ \sum_{i=1}^n (Z_i - \bar{Z})^2 \right] \cdot \left[ \sum_{i=1}^n (p_i - \bar{p})^2 \right]} \quad (2)$$

$$p_i = \frac{i}{n+1}; \quad Z_i = \varphi \left( \frac{X_i - \bar{X}}{S} \right)$$

$$k_p = 1 - (\alpha_p + \beta_p \cdot n)^{-1}$$

式中， $\bar{x}$  为平均值； $s$  为标准偏差值； $p_i$  为排列在前  $i$  个数累积比值； $Z_i$  为转化为拟合正态分布下的累积比； $\bar{p}_i$  和  $\bar{Z}_i$  分别为  $p_i$  和  $Z_i$  的平均值； $k^2$  为样本数据的拟合度； $k_p$  为在重要水平  $p$  (1%、5% 和 10%) 下的拟合度临界值；通过查表可得对应限值参数  $k_p$  和  $p$  的值<sup>[5]</sup>。若  $k^2$  大于  $k_p$ ，则样本数据符合正态分布统计要求，在大多数情况下，数据完全服从正态分布是理想情况，若样本数据近似正态分布或者通过正态分布加以限定，则分析结果仍然有效。

### 1.4 分析仪表漂移趋势

仪表的漂移可分为随机漂移和偏差漂移，由于偏差漂移可能会导致仪表的误差不断增大，有必要计算、分析仪表漂移率与运行时间的相关性。协方差分析法可检验 2 个以上的样本数据相关性<sup>[6]</sup>。通过计算核电厂仪表的运行时间  $x$  与漂移率  $y$  的回归线方程，计算公式为：

$$y = b_{1x} + b_0 \quad (3)$$

$$b_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad b_0 = \bar{y} - b_{1x}$$

式中， $x_i$  为仪表运行至第  $i$  个周期的时间； $y_i$  为第  $i$  个周期内仪表的漂移率； $\bar{x}$  和  $\bar{y}$  分别为  $x$  和  $y$  的平均值； $b_1$  为回归线斜率； $b_0$  为回归线截距。计算估计值和真实值之间的误差均方值，可得到漂移率与时间的相关性，计算公式为：

$$F = \frac{M_{SR}}{M_{SE}} \quad (4)$$

$$M_{SR} = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{k}, \quad M_{SE} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - (k+1)}$$

式中， $n$  为样本的数量； $k$  为自由度； $\hat{y}_i$  为把  $x_i$  代入方程得到的估计值； $M_{SR}$  为组间偏差平方和； $M_{SE}$  为组内偏差平方和； $F$  为误差均方值；通过查询分布表<sup>[7]</sup>，可得对应临界值  $F_0$ 。若  $F$  少于  $F_0$ ，则仪表漂移率与时间相关性不明显，既仪表漂移率不随运行时间变化。

### 1.5 评估周期延迟可行性

在以上分析步骤均可行的情况下，可计算漂移率容许区间，评估仪表周期延迟的可行性。通

过计算仪表漂移数据在 95%/95%的置信水平下的误差参数,可建立原校验周期下漂移率的误差带<sup>[6-7]</sup>:

$$T_{I(\gamma/P\%)} = \bar{x} \pm ks \quad (5)$$

式中,  $T_I$  为漂移率的误差带;  $\gamma$  为期望的置信度;  $p$  为样本包含在误差带内的百分比;  $\bar{x}$  和  $s$  分别为平均值和标准偏差值;  $k$  为在 95%/95%的置信水平下的误差因子。

可在原校验周期(如 12 个月)漂移率误差带的基础上,选择更高置信水平的误差因子  $k$ ,如 95%/99%置信水平,作为延长校验周期(18 个月)下的误差带估计值。若经过对比,结果不超过核安全分析允许值,则认为周期延长是可行的。反之,仪表校验周期延长不可行,需采取相应的处理措施。

## 2 改进 AFAL 分析法的应用

基于以上描述的改进 AFAL 分析法的全过程,现举例说明该方法的应用,验证此方法的可行性。

图 1 为一组仪表漂移数据分布与正态分布的对比,采用卡方检验分析正态分布特性,可求得拟合度  $k^2$  的值为 0.9942,查询得到在重要水平 5% 下,参数  $p$  和  $p_c$  的值分别为 0.7194、0.7733,从而计算出拟合度临界值  $k_p$  的值为 0.9915,  $k^2$  大于  $k_p$ ,可得漂移数据分布接近于正态分布。通过采用协方差分析法计算得到 5 个校验(0%、25%、50%、75%、100%)的协方差  $F$  值分别为 0.85、0.76、0.86、0.73、0.89,查询得到对应  $F_0$  为

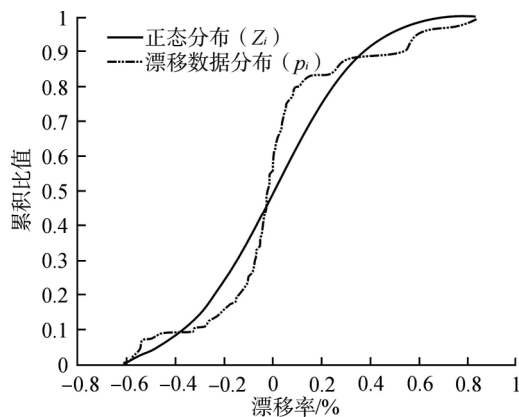


图 1 数据分布对比图(例 1)

Fig. 1 Comparison of Data Distribution (Example 1)

4.28,  $F$  值均少于  $F_0$ , 此组仪表的漂移率不随时间变化。通过计算得到在 95%/99%置信水平下的误差带的值为  $\pm 0.8221\%$ ,且漂移率数据分布在核安全分析容许区间的包络百分比为 100%,少于该仪表设计要求的漂移限值 1.4%,可见该组仪表性能比较稳定,确定适当延长该组仪表的校验周期可行。

图 2 为另一组仪表漂移数据分布对比。采用卡方检验分析法可计算得到对应  $k^2$  和  $k_p$  的值分别为 0.9127 和 0.9684,  $k^2$  小于  $k_p$ ,且从图中可明显看出漂移数据分布与正态分布相差较大,可判定漂移数据分布不服从正态分布。传统 AFAL 分析法通过建立直方图只能得到数据分布的大致概括,不能准确看出本组数据不服从正态分布。在这种情况下,若继续计算漂移率容许区间分析校验周期延长的可行性,则计算出的统计参数结果是不太保守的,需采用其他方法进行有效论证。

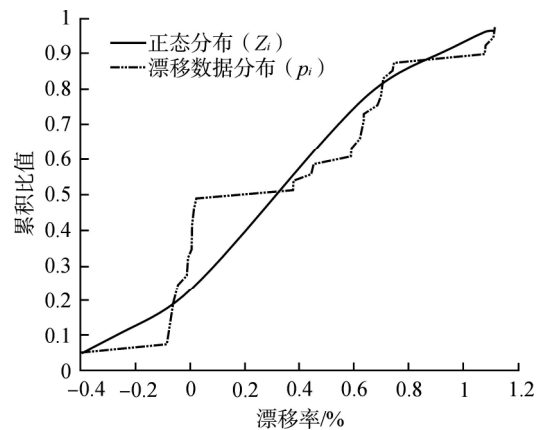


图 2 数据分布对比图(例 2)

Fig. 2 Comparison of Data Distribution (Example 2)

## 3 结束语

本文以传统 AFAL 分析法为基础,提出了一种改进 AFAL 分析法。与传统 AFAL 分析法相比,本文方法首先通过采用盒型图判定异常点,弥补了  $T$  试验法应用范围较小的不足;其次通过采用卡方检验法分析分布特性,有效验证了数据是否服从正态分布;再加上运用协方差法分析仪表漂移趋势,有效分析了仪表漂移率与运行时间的相关性。通过理论分析与应用实例可知,此方法能有效分析仪表校验周期延长的可行性,对核电厂延长机组换料大修周期具有指导性作用。

## 参考文献：

- [1] 徐贝贝, 邱城, 刘志军, 等. 核电厂专设安全系统仪表漂移特性统计分析[J]. 机电产品开发与创新, 2012, 25(1): 32-33.
- [2] 周平, 邱春辉, 初起宝. AFAL 分析方法在核电厂仪表标定周期延长论证中的应用[J]. 核动力工程, 2013, 34(5): 115-117.
- [3] 王玉贵, 董军成. 核电厂长燃料循环项目中仪表漂移计算方法的研究[J]. 仪器仪表用户, 2013, 3(3): 18-20.
- [4] Seung-Cheol Jang. Statistical management of an instrument setpoint drift based on plant specific as-found/as-left data[J]. Annals of Nuclear Energy. 2010(37): 277-284.
- [5] Gan F F, Koehler K J. Goodness-of-Fit Tests based on P-P probability plots[J]. Technometrics, 1990, 32(3): 289-303.
- [6] Plant Application of On-Line Monitoring for Calibration Interval Extension of Safety-Related Instruments Update Report [R]. EPRI. 2008.
- [7] 李宗扬. 数据处理与统计量技术基础[M]. 北京: 原子能出版社, 2002.

(责任编辑: 杨洁蕾)