

基于设备状态评价的故障率计算

段小峰

(国网泰州供电公司, 江苏 泰州 225300)

摘 要: 本文以电力设备实际综合状态评分为依据, 提出了故障率与状态评分之间的指数关系; 根据设备历史状态评分和故障次数统计数据, 建立了故障率最小二乘数学模型; 介绍了非线性最小二乘问题的 Gauss-Newton 和 Marquardt 拟求解法, 用来估计关系式中的参数; 从而确立了设备故障率与状态评分之间的定量关系, 为状态检修和系统风险分析提供数据基础。

关键词: 状态评分; 故障率; 最小二乘模型

0 引言

在电力设备状态检修决策中, 设备状态不同, 检修策略就会不同。特别是当从系统角度来制定状态检修策略时, 设备的故障率参数是进行系统风险评估的基础, 是将设备层面和系统层面联系在一起的纽带。因此, 设备在不同状态下的故障率计算对最终状态检修策略的制定至关重要。

电力设备的故障率等可靠性数据往往是根据历史数据得到的, 它是一种统计意义上的平均值, 是对设备一段时间内运行可靠性的宏观评价, 在数据量较少的情况下, 用这种方法得到的故障率可信度很低。状态检修决策中的设备故障率不同于统计得到的平均故障率, 它要求设备的各个状态都要有相应的值, 是一种瞬时故障率。

1 研究现状

要实现对电力设备的状态检修, 电力设备故障率的计算是其重要内容之一。目前大多研究是基于历史数据, 得到的结果是统计性的平均值。文献[1]借助于从 1995 到 2000 年间全国 100MW 火电机组的多项可靠性统计指标, 对其中蕴藏的信息进行了提取, 建立了可靠性指标与原始数据的函数关系, 通过拟合方法得到了火电机组故障率; 文献[2]对加拿大、美国和中国的电力设备可靠性指标值分别进行了统计比较; 文献[3]提出了在老化退役元件的数量有限的情况下, 估计元件寿命概率密度函数期望值和方差的方法, 不同于传统的样本平均法只用到了退役元件的寿命, 这种方法用到了包括退役和运行在内的所有元件信息。

在影响故障率的因素方面, 大多数文献研究的是外部因素的影响。文献[4]研究了天气因素对配电网架空线路故障率的影响, 建立了线路故障率的泊松回归模型和贝叶斯网络模型; 文献[5]统计了瑞典和芬兰地区六氟化硫和少油断路器的故障信息, 计算了它们的故障率, 指出电压等级和操作次数对断路器的影响很大, 提出了这类断路器部件以及整件的可靠性模型; 文献[6]借助于 Hydro 地区某电网的空气断路器停运情况统计数据, 研究了断路器故障率与设备运行年限、电压等级、制造水平、维修次数的关系, 并考虑了设备检修而造成的计划停运率影响。

以上对电力设备故障率的计算方法都是停留在统计意义上的平均值, 无法提供设备不同健康状态下的瞬时故障率。文献[7]提出利用设备状态检测数据计算故障率的方法, 首先将设备检测数据转换为标准化状态评分, 接着根据实际经验假设状态评分和故障率之间存在指数函数关系^[8,9], 最后根据完好状态、一般状态、严重状态下的故障率反演求出指数函数中的参数, 但完好状态、一般状态、严重状态下的故障率数据是文中假定的, 并不全是实际数据, 所以缺乏一定的可信度。

2 设备状态评价

设备状态的评价是基于巡检、带电检测、在线监测、停电试验、诊断性试验、家族缺陷、不良工况等状态信息, 包括现象强度、量值大小和发展趋势, 并与同类设备比较, 做出的综合评估。由于目前待评价的状态量较多, 同时成熟的带电检测技术

较少,难以真正做到实时监测设备的状态,所以获取状态量的周期不相同,同一个评价周期内不是每个状态量都能得以更新,对于进行状态评价时尚未更新的状态量,则沿用该状态量的上一次结果[10]。

设备状态评价主要依据《国家电网公司输变电设备状态检修试验规程》、《国家电网公司输变电设备状态评价导则》等技术标准,依据收集到的各类设备信息,确定设备状态和发展趋势。

3 设备故障率计算模型

3.1 故障率与状态评分数学关系

以设备当前的状态量指标为依据,以相关的评分导则为标准,对设备各部件进行打分(扣分值),可以求得设备的综合状态评分。因为设备的状态评分越高(即扣分越多),其健康状况越差,所以在总体趋势上,设备状态评分和故障率之间应该存在这样的定性关系:设备状态评分上升,故障率也随之上升。假定它们之间具有如式所示的指数关系[7-9]。

$$\lambda = A \times e^{B \times ISE} + C \quad (1)$$

式中:

λ ——设备故障率(次/年);

ISE ——设备状态评分(Index of State Evaluation);

A ——比例系数;

B ——曲率系数;

C ——位移系数。

若一年里有 n 台设备参与统计,每台设备分别进行 m 次状态评分,每次时间间隔相等,则有:

$$\lambda_i = \sum_{j=1}^m \frac{1}{m} \times (A \times e^{B \times ISE_{ij}} + C) \quad (2)$$

式中:

λ_i ——第 i 台设备的年故障率;

ISE_{ij} ——第 i 台设备第 j 次状态评分值,

$i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, m$

这 n 台设备一年里理论上的总故障次数为

$\sum_{i=1}^n \lambda_i$,若实际中由于设备缺陷总共发生了 N_f 次

故障,则近似有如下关系:

$$\begin{aligned} N_f &\approx \sum_{i=1}^n \lambda_i \\ &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \frac{1}{m} \times (A \times e^{B \times ISE_{ij}} + C) \end{aligned} \quad (3)$$

只要具备三年以上的设备状态评分和故障次数统计数据,将每年的数据分别代入上式,通过最小二乘法即可求得适合于区域电网的 A 、 B 、 C 值,从而用于电力系统风险评估。

3.2 故障率的求解模型

若对此类设备进行了为期 d 年的状态评价数据统计,则求解此问题的最小二乘数学模型如下:

$$\min_{x \in E^n} F(A, B, C) = \sum_{t=1}^d f_t^2(A, B, C) \quad (4)$$

其中,

$$f_t(A, B, C) = \sum_{i=1}^{n^t} \sum_{j=1}^m \frac{1}{m} \times (A \times e^{B \times ISE_{ij}^t} + C) - N_f^t \quad (5)$$

式中:

n^t ——第 t 年参与统计的设备台数;

ISE_{ij}^t ——第 t 年,第 i 个设备的第 j 次状态评

分值, $i = 1, \dots, n^t, j = 1, \dots, m, t = 1, \dots, d$;

N_f^t ——第 t 年实际故障的设备台数。

式(5)中 $f_t(A, B, C)$ 对参数 A 、 B 、 C 的偏导

数如下:

$$\frac{\partial f_t}{\partial A} = \sum_{i=1}^{n^t} \sum_{j=1}^m \frac{1}{m} \times e^{B \times ISE_{ij}^t}$$

$$\frac{\partial f_t}{\partial B} = \sum_{i=1}^{n^t} \sum_{j=1}^m \frac{1}{m} \times A \times ISE_{ij}^t \times e^{B \times ISE_{ij}^t}$$

$$\frac{\partial f_i}{\partial C} = n^i \quad (9)$$

4 故障率求解方法

上述式(4)所示的非线性二乘问题求解方法通常有Gauss-Newton法和Marquardt法^[11]。

4.1 Gauss-Newton 法

针对如下非线性最小二乘问题：

$$\min_{\mathbf{x} \in E^n} F(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^m f_i^2(\mathbf{x}) \quad (6)$$

令 $f(\mathbf{x}) = (f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), \dots, f_m(\mathbf{x}))^T$ ，由向量函数的一阶泰勒展开式得：

$$f(\mathbf{x}) \approx f(\mathbf{x}^k) + f'(\mathbf{x}^k)(\mathbf{x} - \mathbf{x}^k) \quad (7)$$

式中：

$$f'(\mathbf{x}^k) = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial f_i}{\partial x_1} & \frac{\partial f_i}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_i}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial f_m}{\partial x_1} & \frac{\partial f_m}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_m}{\partial x_n} \end{pmatrix} \quad (8)$$

因此，

$$\begin{aligned} F(\mathbf{x}) &= (f(\mathbf{x}), f(\mathbf{x})) \\ &\approx (f(\mathbf{x}^k) + f'(\mathbf{x}^k)(\mathbf{x} - \mathbf{x}^k), f(\mathbf{x}^k) + f'(\mathbf{x}^k)(\mathbf{x} - \mathbf{x}^k)) \\ &= \|f(\mathbf{x}^k)\|^2 + 2(\mathbf{x} - \mathbf{x}^k)^T f'(\mathbf{x}^k)^T f(\mathbf{x}^k) \\ &\quad + (f'(\mathbf{x}^k)^T f'(\mathbf{x}^k)(\mathbf{x} - \mathbf{x}^k), \mathbf{x} - \mathbf{x}^k) \end{aligned}$$

故，

$$F'(\mathbf{x}) = 2f'(\mathbf{x}^k)^T f(\mathbf{x}^k)$$

$$F''(\mathbf{x}) \approx 2f'(\mathbf{x}^k)^T f'(\mathbf{x}^k)$$

根据求解无约束规划问题的下降类算法得到如下迭代式：

$$\begin{aligned} \mathbf{x}^{k+1} &= \mathbf{x}^k + \alpha_k \mathbf{p}^k \\ &= \mathbf{x}^k - \alpha_k [F''(\mathbf{x})]^{-1} F'(\mathbf{x}) \\ &= \mathbf{x}^k - \alpha_k [f'(\mathbf{x}^k)^T f'(\mathbf{x}^k)]^{-1} f'(\mathbf{x}^k)^T f(\mathbf{x}^k) \end{aligned}$$

此公式称为 Gauss-Newton 法，其中搜索方向

$\mathbf{p}^k = -[f'(\mathbf{x}^k)^T f'(\mathbf{x}^k)]^{-1} f'(\mathbf{x}^k)^T f(\mathbf{x}^k)$ ，搜索步长 α_k 按最佳步长方法获得。

Gauss-Newton 法存在的问题是：有时矩阵

$f'(\mathbf{x}^k)^T f'(\mathbf{x}^k)$ 不可逆，方法失效；有时搜索方向

\mathbf{p}^k 与梯度 $F'(\mathbf{x})$ 接近于正交，因而迭代进展很慢，或出现假收敛。

4.2 Marquardt 法

为了克服 Gauss-Newton 法的不足之处，

Marquardt 提出了一种修正的方法，使得 \mathbf{p}^k 与负梯度方向偏斜，即令

$$\mathbf{p}^k = -[f'(\mathbf{x}^k)^T f'(\mathbf{x}^k) + \beta_k \mathbf{I}]^{-1} f'(\mathbf{x}^k)^T f(\mathbf{x}^k) \quad (10)$$

其中， \mathbf{I} 为单位矩阵。

当 $\beta_k = 0$ 时， \mathbf{p}^k 就是 Gauss-Newton 法的搜

索方向；

当 $\beta_k \neq 0$ 时，

$$\begin{aligned} \mathbf{p}^k &= -[\frac{f'(\mathbf{x}^k)^T f'(\mathbf{x}^k)}{\beta_k} + \mathbf{I}]^{-1} \times \frac{f'(\mathbf{x}^k)^T f(\mathbf{x}^k)}{\beta_k} \\ &= [\frac{f'(\mathbf{x}^k)^T f'(\mathbf{x}^k)}{\beta_k} + \mathbf{I}]^{-1} \times \frac{-1}{\beta_k} F'(\mathbf{x}^k); \end{aligned}$$

当 β_k 足够大时， \mathbf{p}^k 接近于 $F(\mathbf{x})$ 的负梯度方向。

因此 Marquardt 方法可以看作是 Gauss-Newton 法与最速下降法的结合，本文采用 Marquardt 方法对设备故障率求解。

Marquardt 算法的计算步骤（取搜索步长

$\alpha_k = 1$ ）为：

① 给定初始值 $x^0, \beta_0, \gamma, \varepsilon$ ，置 $\beta = \beta_0$ ，

$k = 0$ 。

② $\beta = \beta / \gamma$ 。

③ 计算:

$$f(\mathbf{x}^k) = (f_1(\mathbf{x}^k), f_2(\mathbf{x}^k), \dots, f_m(\mathbf{x}^k))^T,$$

$$F(\mathbf{x}^k) = \sum_{i=1}^m f_i^2(\mathbf{x}^k),$$

$$f'(\mathbf{x}^k) = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial f_i}{\partial x_1} & \frac{\partial f_i}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_i}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial f_m}{\partial x_1} & \frac{\partial f_m}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_m}{\partial x_n} \end{pmatrix}.$$

矩阵中的元素表示在 x^k 处的偏导数。

④

$$\mathbf{p}^k = -[f'(\mathbf{x}^k)^T f'(\mathbf{x}^k) + \beta_k \mathbf{I}]^{-1} f'(\mathbf{x}^k)^T f(\mathbf{x}^k);$$

$$\mathbf{x}^{k+1} = \mathbf{x}^k + \mathbf{p}^k;$$

$$F(\mathbf{x}^{k+1}) = \sum_{i=1}^m f_i^2(\mathbf{x}^{k+1})$$

⑤ 若 $F(\mathbf{x}^{k+1}) < F(\mathbf{x}^k)$, 则置 $\mathbf{x}^k = \mathbf{x}^{k+1}$ 转步骤⑦; 否则置 $\beta = \beta \cdot \gamma$ 转步骤⑥。

⑥ 若 $\|f'(\mathbf{x}^k)^T f(\mathbf{x}^k)\| \leq \varepsilon$, 则求出最优解 $\mathbf{x}^* = \mathbf{x}^k$; 否则转步骤④。

⑦ 若 $\|f'(\mathbf{x}^k)^T f(\mathbf{x}^k)\| \leq \varepsilon$, 则求出最优解 $\mathbf{x}^* = \mathbf{x}^k$; 否则置 $k = k + 1$ 转步骤②。

5 结论

本文研究了状态检修决策中的设备故障率计算问题, 假定设备故障率与状态评分之间存在指数关系, 并介绍了非线性最小二乘问题的Gauss-Newton和Marquardt解法, 用来估计关系式中的A、B、C三个参数。在状态检修决策中计算设备故障率时, 假定设备故障率与状态评分之间服从指数关系^[15-17], 这只是一种趋势上的把握, 但二者之间究竟服

从何种关系还有待进一步研究; 另外, 状态评分体制存在着相当大的人为主观成分, 掩盖了许多设备内部状态量的变化特点, 所以直接建立设备故障率与设备内部状态量的关系更客观, 这方面可以进一步探索研究。

参考文献:

- [1] 任震, 张静伟, 张晋昕. 基于偏最小二乘法的设备故障率计算[J]. 电网技术, 2005, 29 (5): 12-16.
- [2] Li W, Zhou J, Hu X. Comparison of Transmission Equipment Outage Performance in Canada, USA and China[C], 2008.
- [3] Li W. Evaluating Mean Life of Power System Equipment With Limited End-of-Life Failure Data[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19 (1): 236-242.
- [4] Zhou Y, Pahwa A, Yang S-S. Modeling Weather-Related Failures of Overhead Distribution Lines[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21 (4): 1683-1690.
- [5] Lindquist TM, Bertling L, Eriksson R. Circuit breaker failure data and reliability modelling[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2008, 2 (6): 813-820.
- [6] Anders GJ, Maciejewski H, Jesus B, et al. A Comprehensive Study of Outage Rates of Air Blast Breakers[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21 (1): 202-210.
- [7] Brown RE, Frimpong G, Willis HL. Failure Rate Modeling Using Equipment Inspection Data[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19 (2): 782-787.
- [8] Hughes D. CONDITION BASED RISK MANAGEMENT ENABLING ASSET CONDITION INFORMATION TO BE CENTRAL TO CORPORATE DECISION MAKING[C]. Turin, 2005.
- [9] 国家电网公司. 输变电设备风险评估导则(试行)[S]. 国家电网公司部门文件生变电(2008)32号, 2008.
- [10] 国家电网公司. 《输变电设备状态检修试验规程》等七项国家电网公司技术标准[S]. Q/GDW 168-2008 — Q/GDW 174-2008, 2008.
- [11] 张可村, 李换琴. 工程优化方法及其应用[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2007.

作者简介:

段小峰(1986-), 男, 江苏泰州人, 工程师, 从事电网规划设计工作。