

基于非线性最小二乘法的热电厂状态估计

金 杰¹, 章坚民^{1,2*}, 张承来³, 张云雷³

(1. 杭州电子科技大学 电子信息学院, 浙江 杭州 310018; 2. 浙江创维自动化工程有限公司, 浙江 杭州 310012;
3. 浙江省电力公司, 浙江 杭州 310012)

摘要: 目前, 状态估计技术广泛运用于以数学、控制工程和自动化为基础理论的各个行业中。为了解决热电系统运行参数采集过程中出现的数据不全、精度不高、数据不和谐和出现坏点的问题, 对状态估计技术在热电系统中的应用进行了研究, 提出了一套以非线性最小二乘法为基础的状态估计算法, 并进行了实例分析。研究表明, 通过运用状态估计技术可以补平采集数据的缺失点, 提高数据采集精度, 节省采集终端投资和项目工程实施量, 保障后续高级软件对热电系统分析评估的可靠性。

关键词: 状态估计; 非线性最小二乘法; 热电系统

中图分类号: TP311

文献标识码: A

文章编号: 1001-4551(2010)07-0065-05

State estimation of thermal power plant based on non-linear least-square method

JIN Jie¹, ZHANG Jian-min^{1,2}, ZHANG Cheng-lai³, ZHANG Yun-lei³

(1. School of Electronics Information, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China;
2. Creaway Automation Engineering Co., Ltd., Hangzhou 310012, China;
3. Zhejiang Electric Power Corporation, Hangzhou 310012, China)

Abstract: Nowadays, the state estimation in accordance with the theory of mathematics, controlling engineering and automation are widely used in every industry. In order to solve the problems with regard to the incompleteness, inaccuracy and inharmony of data acquired in the collecting process of the operating parameters of power system, the application of state estimation was studied and a set of algorithms based on nonlinear weighted least squared method were presented. An example in the experiments of the application of the state estimation was set up. The results prove that the missing points in collecting process can be recovered, the accuracy of data collection can be enhanced, the investment and workload for the collection terminals and project engineering can be saved, and the reliability of the evaluation of late advanced software for the thermal power system can be guaranteed.

Key words: state estimation; nonlinear weighted least squared method; thermal power system

0 引 言

浙江省地方电厂管理信息系统^[14] (Local Plant Management Information System, 简称 LPMIS, 俗称为热电系统) 已投运二十几个月, 通过热电终端采集的热电厂生产过程数据均有可能存在着偏差。而偏差的存在则会弱化未来热电厂执行国家政策的支持力, 导致

公信力难以建立。因此在基于大量历史数据分析的基础上, 需要运用“状态估计”技术, 对测量数据进行校核, 从而提高地方电厂管理信息系统的采集数据准确性和可靠性。目前, 根据国内外文献记载, 状态估计技术在航空航天、水库预报、电力系统等行业应用比较广泛^[5], 但在热电系统方面的应用报道却并不多, 因而状态估计技术在热电系统中的应用是一个新的研究方向。

本研究主要研究状态估计技术在热电系统中的应用,首先结合系统的实际情况,根据热电厂热电运行模型和能量守恒定律建立其状态估计数学模型,同时顾及该模型的非线性程度,运用加权最小二乘估计准则(WLS)对其进行求解。

1 状态估计理论分析

在系统网络结构不变的情况下,系统状态估计的量测方程可表示为:

$$z = h(x) + v_z \quad (1)$$

式中 z — m 维量测矢量; x — n 维状态矢量; $h(x)$ —用状态量表示出来的 m 维量测函数矢量矩阵; v_z — m 维量测误差矢量矩阵。

一般情况下有: $m > n$,且量测系统的冗余度 $K = m - n$ 。

由参考文献[6]可知,随机变量 z 的概率密度函数为:

$$P_z(Z) = \frac{1}{(2\pi)^{n/2} |R|^{1/2}} e^{-\frac{1}{2}[Z-h(x)]^T R^{-1}[Z-h(x)]} \quad (2)$$

式中 $z, x, h(x)$ — n 维矢量; $R = E[v_z v_z^T]$ — m 阶对角阵,对角元素为各个量测误差的方差 σ_i^2 ; R^{-1} —量测量的加权对角阵。

由于量测值 Z 中存在误差,无法得到状态量 X 的准确值,只能得到“使式(2)为最大,即指数 $[Z-h(x)]^T R^{-1}[Z-h(x)]$ 为最小”的状态估计值 \hat{X} 。为此,可以取:

$$J(x) = [Z-h(x)]^T R^{-1}[Z-h(x)] \quad (3)$$

式(3)也被称为误差最小二乘值函数。

为了提高整个状态估计值的精度,按照量测量的量测精度赋予它相应的权值,此时式(3)就可以表示为:

$$J(x) = \sum_{i=1}^n \frac{v_i^2}{\sigma_i^2} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i^2} [z_i - h_i(x)]^2 \quad (4)$$

最后达到使式(4)在状态估计值 \hat{X} 处为最小值。

状态估计值 \hat{X} 由极值条件 $\partial J / \partial x = 0$ 求得,它满足误差二乘值最小这一要求。如果量测方程是线性的,通过解联立方程组就可以求得状态估计值;如果测量方程是非线性的,通常将 $h(x)$ 对 x 近似泰勒展开,使方程组线性化,逐步迭代解出状态估计值。

为此可以取:

$$H(x) = \frac{\partial h(x)}{\partial x}, \quad g(X) = \frac{\partial J(X)}{\partial X} \quad (5)$$

对式(3)进行矩阵微分运算求解,有:

$$g(X) = -2 \left[\frac{\partial h(X)}{\partial X} \right]^T R^{-1} [Z-h(X)] \quad (6)$$

令非线性方程组 $g(X)$ 为 0,则有:

$$H(X)^T R^{-1} [Z-h(X)] = 0 \quad (7)$$

根据文献[6],方程组(7)的解即为最优化问题式(4)的解。

2 热电厂运行模型

热电厂的运行状态是建立热电系统状态估计模型的首要条件,它的任务是提供热电系统的“真实”状态,由此取得的各个物理量应准确满足能量守恒定律。目前对于各个电厂的热电系统运行模型都可以按照图1所示的结构来建立。

图1中, $B_1 \sim B_n$ 表示为锅炉, $S_1 \sim S_m$ 表示为汽轮机, $G_1 \sim G_m$ 表示为发电机,根据不同电厂安装的锅炉和汽轮机组的数目来确定下标 n 和 m 的值。发电机通过汽轮机传输过来的蒸汽推动自身的转轮来发电,其数目与汽轮机组数目一致。焓值 H 是表征蒸汽温度 T 和压力 P 的参数: $H = H(P, T)$,相应地有蒸汽能量: $Q = S \times H^{[7]}$ 。

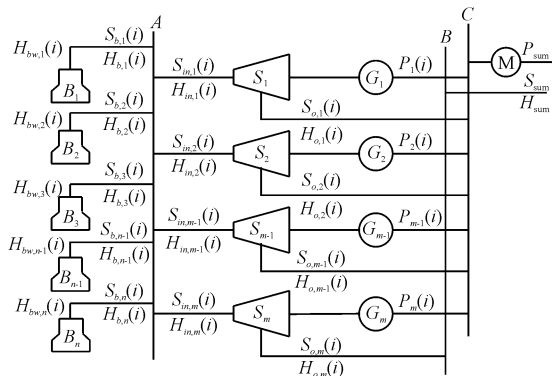


图1 热电厂锅炉汽轮机组结构示意图

$S_{b,n}(i)$ —第 $n(n=1,2,\dots,N)$ 台锅炉的出汽量, t/h ; $H_{b,n}$

(i) —第 $n(n=1,2,\dots,N)$ 台锅炉的出汽焓值, kJ/kg ; $H_{bw,n}$

(i) —第 $n(n=1,2,\dots,N)$ 台锅炉的进水焓值, kJ/kg ; $S_{in,m}$

(i) —第 $m(m=1,2,\dots,M)$ 台汽轮机组的进汽量, t/h ; $H_{in,m}$

(i) —第 $m(m=1,2,\dots,M)$ 台汽轮机组的进汽焓值, kJ/kg ;

$S_{o,m}(i)$ —第 $m(m=1,2,\dots,M)$ 台汽轮机组的出汽量, t/h ;

$H_{o,m}(i)$ —第 $m(m=1,2,\dots,M)$ 台汽轮机组的出汽焓值, kJ/kg ;

$P_m(i)$ —第 $m(m=1,2,\dots,M)$ 台发电机的发电量, MW ;

P_{sum} —热电厂的总供电量, MW ; S_{sum} —热电厂的总供热量, t/h ;

H_{sum} —热电厂的总供热流量焓值, kJ/kg

3 热电系统状态估计量测方程

根据图1所示的热电系统,按照锅炉蒸汽供出母

管关系、对外供出母管关系和汽轮机组特性曲线可以得到各个参数之间的数学等式。母管 A 的能量守恒关系为:

$$\sum_{n=1}^N S_{b,n}(i)H_{b,n}(i) - \sum_{n=1}^N S_{b,n}(i)H_{bw,n}(i) = \sum_{m=1}^M S_{in,m}(i)H_{sin,m}(i) \quad (8)$$

母管 A 侧的流量关系为:

$$(1 - \beta_1) \sum_{n=1}^N S_{b,n}(i) = \sum_{m=1}^M S_{in,m}(i) \quad (9)$$

式中 β_1 —母管 A 的损耗率,通过对历史数据分析计算得出。

母管 B 侧的流量关系为:

$$(1 - \beta_2) \sum_{m=1}^M S_{o,m}(i) = S_{sum}(i) \quad (10)$$

式中 β_2 —母管 B 的损耗率,获取途径同 β_1 。

母管 B 侧的能量守恒关系为:

$$\sum_{m=1}^M S_{o,m}(i)H_{o,m}(i) = S_{sum}(i)H_{sum}(i) \quad (11)$$

汽轮机组的特性曲线关系为:

$$P_m(i) = aS_{in,m}(i)^2 + bS_{in,m}(i) + cS_{o,m}(i)^2 + dS_{o,m}(i) + e \quad (12)$$

汽轮机的进汽量、出汽量和发电功率三者之间的

关系,通过挖掘系统长时间运行而得的历史数据并采用多项式拟合的方法来得到^[8-9]。其中 a, b, c, d, e 是拟合而得的常数,不同型号的汽轮机具有不同的值。

汽轮机组的能量守恒关系为:

$$3600P_m(i) + S_{o,m}(i)H_{o,m}(i) = S_{in,m}(i)H_{in,m}(i) \quad (13)$$

其中,第一项为机组的发电量。

根据特定电厂的锅炉和汽轮机组数目,可以建立该电厂的网络方程数学方程组。按照状态量选取量测精度比较高的原则,可以选择机组发电功率或者蒸汽焓值为状态估计量,其余的参数则为量测量。通过对网络方程组的化简和变换,可以把各个量测量 Z 用相应的状态量 X 来表示出来,同时考虑到量测误差 V_z ,因此正常的热电系统状态估计的量测方程组即为:

$$Z = h(X) + V_z \quad (14)$$

式(14)与式(1)一致,接下来便可以采用第1节所描述的方法来进行求解。

4 算例分析

现以平湖热电厂为例进行分析。平湖热电厂为一个六炉四机的热电系统,具有6台锅炉,4台汽轮机组,从而有 $N = 6, M = 4$,且其汽轮机组的具体信息如表1所示。

表1 平湖热电汽轮机组参数一览表

机组 id	汽轮机组型号	a	b	c	d	e
1#	C6-3.43/0.981	1.78×10^{-3}	0.219 3	2.25×10^{-4}	-0.192	-0.428 8
2#	C6-3.43/0.981	1.78×10^{-3}	0.219 3	2.25×10^{-4}	-0.192	-0.428 8
3#	B6-3.43/0.981	0	0.083 9	0	0	-0.949 2
4#	C7.5-3.43/0.981	8.744×10^{-5}	0.206 2	8.1×10^{-4}	-0.729	0.601 4

经过对其历史数据的分析计算,得到锅炉母管 A 侧的损耗率 $\beta_1 = 0.08$,母管 B 侧的损耗率 $\beta_2 = 0.1$ 。同时平湖热电的运行参数总计为40个,按照状态量选取精度高的原则和量测冗余度的要求,选择状态量 X 如下:

状态量 = $[H_{b,1}(i), H_{b,2}(i), H_{b,3}(i), H_{b,4}(i), H_{b,5}(i), H_{b,6}(i), P_1, P_2, P_3, P_4, H_{o,1}(i), H_{o,2}(i), H_{o,3}(i), H_{o,4}(i)]$

总计14个,因此剩余26个参数为量测量 Z ,如下:

$[S_{b,1}(i), S_{b,2}(i), S_{b,3}(i), S_{b,4}(i), S_{b,5}(i), S_{b,6}(i), H_{bw,1}(i), H_{bw,2}(i), H_{bw,3}(i), H_{bw,4}(i), H_{bw,5}(i), H_{bw,6}(i), S_{in,1}(i), S_{in,2}(i), S_{in,3}(i), S_{in,4}(i), H_{in,1}(i), H_{in,2}(i), H_{in,3}(i), H_{in,4}(i), S_{o,1}(i), S_{o,2}(i), S_{o,3}(i), S_{o,4}(i), S_{sum}(i), H_{sum}(i)]$

此时,系统的冗余度 = 系统独立测量数/系统状态变量数 = $26/14 = 1.86$,满足状态估计冗余度的要求(一般冗余度要求在1.5~3.0之间)。按照第2节的描述,可以计算得到相应的量测方程,并根据第1节所描述的计算方法,进行迭代计算直至收敛,得到相应的状态量值 \hat{x} 。

本研究选择平湖热电2008年5月1日00:05时刻的量测参数来进行状态估计的仿真计算。其状态量和量测量的值变换如表2所示。

如表3所示,利用加权最小二乘法进行状态估计时,状态估计误差的绝对值明显小于量测误差的绝对值。对于一个状态估计程序,表征其性能的主要指标是目标函数的均值 $J(\hat{x})$ 、量测误差统计值 \bar{S}_M 和估计误差统计值 \bar{S}_E ,根据所得的估计值,计算结果如下:

$$\begin{aligned} \bar{J}(\hat{x}) &= \sum_{i=1}^{26} [z_i - h(\hat{x}_i)]^2 = 12.063 \approx m - n \\ &= 26 - 14 = 12 \end{aligned} \quad (15)$$

$$\bar{S}_M = \left[\frac{1}{26} \sum_{i=1}^{26} \left(\frac{Z_{i,t} - S_{ii,j}}{\sigma_i} \right)^2 \right]^2 = \sqrt{\frac{22.16}{26}} = 0.923 \approx 1 \quad (16)$$

$$\bar{S}_E = \left[\frac{1}{26} \sum_{i=1}^{26} \left(\frac{h_{i,t}(\hat{x}) - S_{ii,i}}{\sigma_i} \right)^2 \right]^2 = \sqrt{\frac{15.47}{26}} = 0.771 < 1 \quad (17)$$

其中, $S_{ii,t}$ 表示量测量的真值。上述结果按文献 [6] 所述, 可以说明状态估计程序的性能良好, 状态估计具有良好的滤波作用。从而可以证明在热电系统中运用状态估计技术是可行的, 状态估计技术模块可以作为一个校正模型存在于热电系统中。

表 2 状态量初始值、估计值(2008-05-01 00:05 时刻)

状态量	初始值	估计值
$H_{b,1}$	3 275.35	3 265.64
$H_{b,2}$	3 328.68	3 317.53
$H_{b,3}$	3 313.95	3 321.76
$H_{b,4}$	3 304.22	3 303.21
$H_{b,5}$	3 317.28	3 320.4
$H_{b,6}$	3 327.01	3 325.62
P_1	3.82	4.18
P_2	3.61	3.88
P_3	5.841	5.97
P_4	4.518	4.448
$H_{o,1}$	0.905	1.12
$H_{o,2}$	0.905	0.879
$H_{o,3}$	3 180.53	3 178.63
$H_{o,4}$	3 134.86	3 129.17

注: 焓值单位为 (kJ/kg), 发电功率为 MW。

表 3 量测量参数变化(2008-05-01 00:05 时刻)

测点 i	测量参数	真值	量测值	量测误差	标准差 σ	权重 R^{-1}	估计值	估计误差
1	$S_{b,1}$	31.45	33.68	2.23	5.34	0.035	32.75	1.3
2	$S_{b,2}$	29.75	33.66	3.91	6.89	0.021	31.54	1.79
3	$S_{b,3}$	27.74	30.49	2.75	5.37	0.035	29.87	2.13
4	$S_{b,4}$	70.18	67.76	-2.42	4.84	0.043	68.35	-1.83
5	$S_{b,5}$	67.27	67.37	0.1	5.23	0.037	67.32	0.05
6	$S_{b,6}$	62.82	56.11	-6.71	4.33	0.053	58.23	-4.59
7	$H_{bw,1}$	637.752	639.669	1.917	1.23	0.66	638.529	0.777
8	$H_{bw,2}$	636.886	639.669	2.783	1.31	0.58	637.867	0.981
9	$H_{bw,3}$	638.754	639.71	0.956	1.43	0.49	638.981	0.227
10	$H_{bw,4}$	639.563	639.601	0.038	1.12	0.80	639.701	0.138
11	$H_{bw,5}$	638.997	639.658	0.661	1.19	0.71	639.257	0.26
12	$H_{bw,6}$	637.465	639.594	2.129	1.39	0.52	638.798	1.333
13	$S_{in,1}$	37.86	33.95	-3.91	6.2	0.03	35.69	-2.17
14	$S_{in,2}$	32.57	33.11	0.54	6.18	0.026	32.97	0.4
15	$S_{in,3}$	85.38	85.71	0.33	1.14	0.77	85.98	0.6
16	$S_{in,4}$	49.14	47.96	-1.18	8.06	0.02	48.12	-1.02
17	$H_{in,1}$	776.086	779.667	3.581	1.43	0.49	778.371	2.285
18	$H_{in,2}$	3 247.65	3 251.256	3.606	1.29	0.60	3 249.387	1.737
19	$H_{in,3}$	3 306.993	3 317.182	10.189	1.19	0.71	3 316.176	9.183
20	$H_{in,4}$	3 286.356	3 292.832	6.476	1.51	0.44	3 290.298	3.942
21	$S_{o,1}$	15.37	16.86	1.49	5.99	0.028	15.68	0.31
22	$S_{o,2}$	16.02	17.61	1.59	5.96	0.028	17.01	0.99
23	$S_{o,3}$	85.38	84.68	-0.7	1.41	0.51	85.02	-0.36
24	$S_{o,4}$	24.34	30.21	5.87	5.75	0.03	28.76	4.42
25	S_{sum}	138.38	146.56	8.18	5.47	0.033	144.34	5.96
26	H_{sum}	2 754.898	2 764.902	10.004	1.81	0.31	2 762.851	7.953

注: 流量单位为 (t/h), 焓值单位为 (kJ/kg)。

5 结束语

通过对平湖热电公司的采集数据应用状态估计技术, 可知采集数据的估计误差明显低于量测误差, 所得到的估计值的离散度更小, 表征状态估计技术的 3 个

性能指标值也在理想范围之内, 估计结果反映了热电系统的真实运行工况; 同时, 降低了热电系统对采集终端过多的依赖, 充分发挥了硬件和软件的效用。但是目前只是针对特定的热电模型, 没有考虑到模型的多

(下转第 103 页)

将调谐电压从0 V增加到80 V,发现谐振器的谐振频率 f_r 从原来的自然谐振频率 $f_0 = 18.9$ kHz减小到13 kHz,减小了将近31%,所以,通过改变调谐电压,用曲线调谐梳齿可以调节谐振器的谐振频率。但是对于这种形状的曲线梳齿,只能调节谐振频率使其值减小。

3 结束语

本研究提出了一种可用于微谐振器频率调节的曲线梳齿结构。在微谐振器上加上这种曲线调谐梳齿,可以通过改变梳齿上的调谐电压,来改变谐振器的有效弹性系数,进而改变谐振频率。结果表明,有效弹性系数与调谐电压的平方成比例,产生一个线性的动态位移响应。对于一个有着186个梳齿的微梳齿谐振器,当调谐电压从0 V变化到80 V左右时,器件的有效弹性系数从2.64 N/m减小到1.23 N/m,且谐振频率从初始自然谐振频率18.9 kHz减小到13 kHz,降幅分别为53%和31%。因此,将这种曲线梳齿用作为调谐梳齿,能有效调节微谐振器的谐振频率。

这种曲线梳齿的作用是“软化”谐振器的弹性,即通过改变调谐电压,减小谐振器的谐振频率,但不能增大。在曲线结构尺寸设计时,梳齿间距过小,梳齿边缘效应、梳齿吸合等问题对器件有着较大影响,在以后的工作中需要进一步深入。

参考文献(References):

[1] TANG W C, NGUYEN T H, HOWE R T. Laterally Driven Polysilicon Resonant Microstructures [C]//IEEE Microelec-

tro Mech. Syst. Workshop. Salt Lake City: [s. n.], 1989: 53-59.

- [2] KIANG M H, SOLGAARD O, LAU K Y, et al. Polysilicon optical microscanners for laser scanning displays [J]. *Sensors Actuators*, 1998, A(70): 195-199.
- [3] BANNON F D, CLARK J R, NGUYEN C T. High-HF microelectromechanical filters [J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2000, 35(4): 512-526.
- [4] RICHARD R A S. Electrothermal frequency tuning of folded and coupled vibrating micromechanical resonators [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 1998, 7(2): 164-171.
- [5] CHIAO M, LIN L. Post-Packaging Tuning of Microresonators by Pulsed Laser Deposition [C]//12th Int. Conference on Solid State Sensors, Actuators and Microsystems. Boston: [s. n.], 2003: 1820-1823.
- [6] LEE K B. A closed-form approach for frequency tunable comb resonators with curved finger contour [J]. *Sensors and Actuators A*, 2008, 141(1): 523-529.
- [7] YE W J, MUKHERJEE S. Optimal shape design of an electrostatic comb drive in microelectromechanical systems [J]. *Journal of Microelectromechanical System*, 1998, 7(1): 16-26.
- [8] 谢处方, 饶克谨. 电磁场与电磁波 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1999: 67-73.
- [9] JENSEN B D. Shaped comb fingers for tailored electromechanical restoring force [J]. *Journal of Microelectromechanical System*, 2003, 12(3): 373-382.

[编辑: 李辉]

(上接第68页)

样性,因此需要建立一个公共接口来对每个热电厂进行自动建模,这是状态估计技术在热电系统中进行应用的前提,也是下一步主要的研究内容。

参考文献(References):

[1] 王柳, 章坚民. 省级地方电厂管理信息系统通信子系统设计与实现 [J]. 杭州电子科技大学学报, 2008, 28(4): 25-28.

[2] 李志华, 孙盼, 章坚民. 多数据集成方式在热电信息采集方面的应用 [J]. 中国水运, 2008, 6(1): 184-185.

[3] 纪风, 章坚民. 基于热电管理系统的热电厂优化运行的研究 [J]. 机电工程, 2009, 26(2): 63-66.

[4] 戴碧豪, 章坚民. OPC在地方电厂管理信息系统中的应用

[J]. 计算机系统应用, 2008, 17(12): 128-131.

- [5] 李文魁. 电力系统状态估计及不良数据检测与识别研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学信息科学与技术学院, 2004: 5-23.
- [6] 于尔铿. 电力系统状态估计 [M]. 1版. 北京: 水利电力出版社, 1985.
- [7] FRED C S, MICHAEL C C, RICHARD D T, et al. Spot Pricing of Electricity [M]. 5th ed. Massachusetts: Kluwer Academic Publishers, 2002: 55-93.
- [8] 刘喜超, 唐胜利. 基于偏最小二乘法的压气机特性曲线的拟合 [J]. 汽轮机技术, 2006, 48(5): 327-329.
- [9] 杨海生, 郭江龙. 汽轮机背压修正曲线计算的简化方法 [J]. 汽轮机技术, 2007, 49(1): 32-34. [编辑: 李辉]