离线水洗在线判断程序开发及最佳水洗周期研究

马文德,刘 骥

(东莞深能源樟洋电力有限公司,广东 东莞 523637)

摘 要:燃气轮机的压气机离线水洗 GE 没有给出固定的参考值,本文根据 GE 提供的功率修正曲线,综合压气机效率和多变指数,最佳水洗周期等计算公式,利用 MATLAB 软件,开发出一种可以在线综合判断压气机离线水洗的程序,能更好的对压气机脏污的状态进行判断,从多个方面给出压气机进行离线水洗的参考值。

关 键 词:离线水洗;压气机效率;多变指数;最佳水洗周期;程序开发

中图分类号:TK478 **文献标志码**:B **文章编号**:1009-2889(2019)03-0067-06

天然气发电机组一般只进行压气机的离线水洗,然而 GE 公司没有对离线水洗的周期提出明确的参考值,现在有将出力降低 5% ~10% 之间进行水洗作为标准,也有将燃气轮机水洗后运行时间(例如 500 h)作为标准,前者要进行燃气轮机功率的修正[1],本文根据 GE 公司提供的修正曲线,综合压气机效率和压气机多变指数,最佳水洗周期等计算公式,利用 MATLAB 软件,开发出一种综合判断压气机离线水洗的程序,并利用大量运行数据,根据某厂实际情况计算出机组的平均性能恶化速率,计算出理论的最佳水洗周期,以创造更大的经济效益。

1 压气机效率计算开发

压气机压缩过程 *T-s* 变化见图 1,进出口总压力分别为 P_1、P_2,等熵过程为状态 1 到状态 2s,实际压缩过程是熵增过程,即状态 1 到状态 2 的过程。

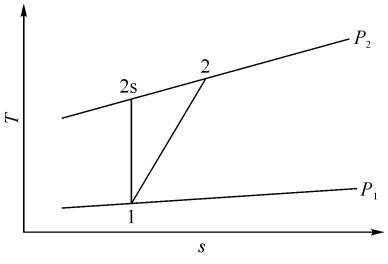


图 1 压气机压缩过程 *T-s* 变化情况

等熵效率的定义为:

$$\eta = (h_{2s} - h_1)/(h_2 - h_1) \tag{1}$$

压气机进口的空气比焓 h_1:

$$h_1 = f(t_1) \tag{2}$$

压气机进口的空气熵函数值 s_1:

$$s_1 = s(t_1) \tag{3}$$

压气机出口的空气比焓 h_2:

$$h_2 = f(t_2) \tag{4}$$

空气在压气机的绝热压缩后熵函数值 s_{2s}:

$$s_{2s} = s_1 + R \tag{5}$$

压气机绝热压缩后的排气比焓:

$$h_{2s} = f(t_{2s}) \tag{6}$$

理想气体状态方程 $PV = RT$,等熵过程方程为 $PV^m = Const$,当 m 为定比热常数 1.4 时可以得出 $t_{2s} = t_1 \times \tau^{\frac{1.4-1}{1.4}}$,当 m 为变比热指数时按张世铮公式拟合如下:

$$f(t) = (A + Bt + Ct^2 + Dt^3 + Et^4 + Ft^5) \times 4.186\ 8/28.97 \tag{7}$$

$$s(t) = (B\ln t + 2Ct + 1.5Dt^2 + 4/3Et^3 + 1.25Ft^4 + G) \times 4.186\ 8/28.97 \tag{8}$$

$(A, B, C, D, E, F, G) = (-0.330\ 150\ 38 \times 10^{-2}, 0.728\ 067\ 3 \times 10, -0.143\ 414\ 81 \times 10^{-2}, 0.234\ 829\ 26 \times 10^{-5}, -0.104\ 841\ 29 \times 10^{-8}, 0.124\ 290\ 4 \times 10^{-12}, -0.402\ 921\ 50 \times 10^{2})$

根据 MATLAB 软件开发出定比热时的压气机效率及变比热时的压气机效率 2 种,压气机变比热效率更能反映压气机的实际效率,因此压气机变比

收稿日期:2018-08-06 **改稿日期**:2018-09-26

作者简介:马文德(1987—),男,吉林长春人,项目技术部生产准备主管工程师,E-mail:mawenze87@126.com。

热效率下降到一定程度时,可以作为压气机进行离线水洗判断的依据,但压气机效率随着进气流量、温度、压力等工况的变化而变化,不同工况的效率没有可比性,大量的性能计算及运行数据统计发现,燃气轮机满负荷运行时影响压气机效率的主要因素有进口导叶 IGV 开度及进口温度[2],故压气机效率对比时应参考 IGV 开度及进口温度工况相近时的参数。

2 压气机多变指数计算开发

实际气体多变压缩过程中状态参数变化的指数称为多变指数 m,对于离心式和轴流式压缩机来说,多变指数 m 大于绝热指数 k,多变指数 m 越大,压缩所需的能量头越大[3]。

$$m = \frac{1}{1 - \log \tau^{\frac{t_2}{t_1}}} \tag{9}$$

式中:m 为压气机多变指数;τ 为相对压比;t_2 为压气机排气温度;t_1 为压气机进气温度。

压气机的运行效果越差,则多变指数会越大,对于燃气轮机稳定工况运行时,多变指数只与相对压比、压气机进气和压气机排气温度有关,其他因素基本不会影响其值的变化,故可以通过多变指数 m 的变化作为压气机离线水洗参考的一个标准。

3 燃气轮机功率修正计算开发

燃气轮机的功率要进行大气温度、大气压力、相对湿度、燃料成分、燃气轮机频率、进气压损、排气压损、发电机功率因数、海拔高度、机组老化等因素系数的修正[4]。正常机组运行时燃料成分、燃气轮机频率、发电机功率因数、大气压力等基本保持不变,故以上因素系数的修正本文不考虑。

3.1 大气温度影响

随着大气温度的升高,空气密度变小,进入压气机的空气质量流量随之减少,机组所发出的功率将减小,热耗率上升,效率下降;压气机的耗功与大气温度成正比,大气温度升高时,压气机耗功增加,压缩比下降,燃气轮机的净出力减小。如图 2 压气机入口温度—出力估计性能曲线所示,大气温度对功率的修正关系为 $X_1 = 1.093\ 96 - 0.006\ 246 t_1$。

3.2 海拔高度影响

燃气轮机的功率与吸入的空气质量流量成正比,而空气的质量流量又与海拔高度成反比,故燃气轮机的功率与海拔高度成反比。图 3 是海拔—出力修正因子估计性能曲线,海拔高度对功率的修正关系为 $X_2 = 1 - 0.000\ 1093\ 6 A_T$。

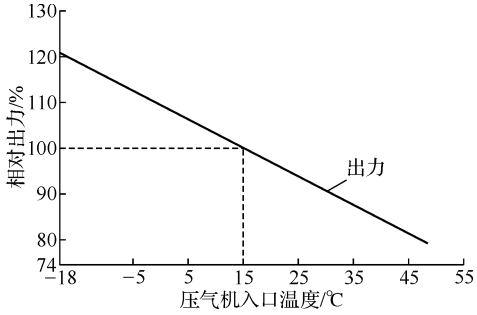


图 2 压气机入口温度-出力估计性能曲线

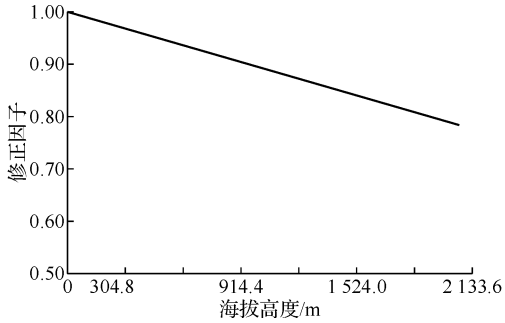


图 3 海拔-出力修正因子估计性能曲线

3.3 大气湿度影响

在较低的大气温度下,相对湿度对热效率和单位质量的净功的影响可以忽略,当大气温度和燃气轮机进口温度较高时,相对湿度的增加使热效率增加,净功降低。从图 4 可以看出,随着大气相对湿度的增加,机组的出力略有下降,热效率略有增加,大气湿度对功率的修正关系 $X_3 = 1.000\ 903\ 955 - 0.141\ 242\ 923 H$。

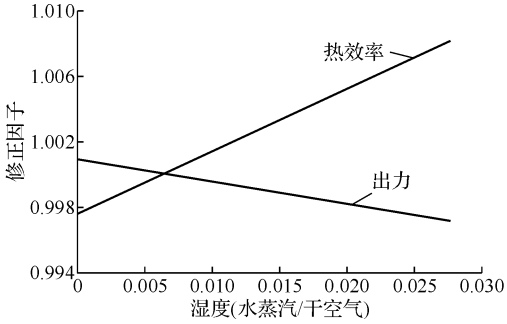


图 4 湿度-出力修正因子估计性能曲线

3.4 进、排气压力损失变化影响

在保持最大出力不变时,进气压力损失会使空气比容增加,流量减少,压气机耗功增大,从而导致机组出力和效率下降。排气压力损失(即排气压力升高)则减小了燃气轮机的膨胀比,燃气轮机出力下降。如图 5 压力损失-出力修正因子估计性能曲线所示,进气压损对功率的修正 $X_4 = 1.011\ 55 -$

0.015 4ΔP_{int}，排气压损对功率的修正 $X_5 = 1.016\ 8 - 0.005\ 6\Delta P_{ext}$。

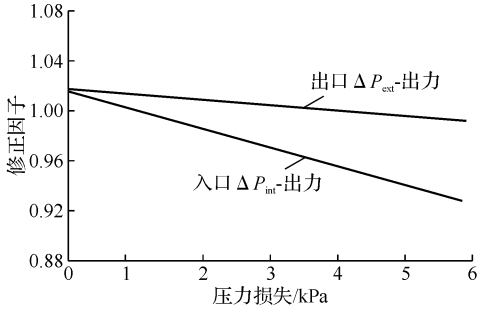


图 5　压力损失-出力修正因子估计性能曲线

3.5　机组老化的影响

随着运行时间的增加，压气机的磨损及积垢会导致机组的出力下降，热耗上升。燃气轮机运行一段时间后，进行检修及离线水洗等维护工作，会一定程度地提高燃气轮机性能。如图 6 运行时间—性能损失估计性能曲线所示，在 10 000 h 以内燃气轮机的性能损失大致成线性关系，即在水洗周期内线性关系为 $X_6 = 1 - 0.000\ 004T$。

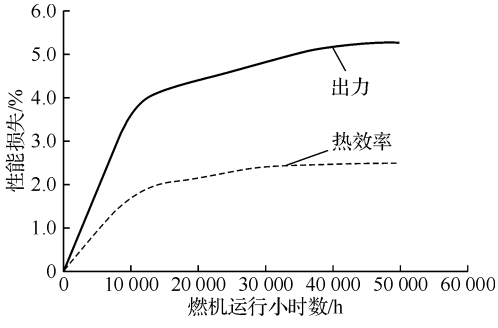


图 6　运行时间-性能损失估计性能曲线

根据现场取回的运行数据，将其修正到标准工况下的功率输出值 P_{iso}^{c}，$P_{iso}^{c} = P_{iso} \times X_1X_2X_3X_4X_5X_6$，其中 P_{iso}是燃气轮机出力实际实验测得值，本文中燃气轮机的功率设计值 120 000 kW · h。

4　离线水洗周期计算开发

4.1　平均性能恶化速率 k 的计算开发

相关研究表明，燃气轮机结垢后出力大致呈指数下降，开始下降较快，然后变缓，当机组运行约 1 000 ~ 2 000 h 后稳定下来[5]，把现场实测的数据做一定修正后，求出机组清洁状态下出力 P_{gt}与机组实测出力 P_{el}的差值，则

$$k = \frac{1}{T} \times \frac{P_{gt} - P_{el}}{P_{gt}} \tag{10}$$

式中：k 为机组的平均性能恶化速率，%/h；P_{gt}为机组清洁状态时的额定功率，kW；P_{el}为现场实发功率，kW；T 为水洗后运行小时数，h。

对于水洗后运行时间 T 的取值，T 在 1 000 ~ 2 000 h 内则 k 的计算更精确，本文用 MATLAB 软件开发出以 T > 500 h 为标准的计算平均性能恶化速率的方法，对于有条件的机组应在机组运行 1 000 ~ 2 000 h 范围内求出更精确的 k 来计算最佳水洗周期，对于已经能确定的机组平均性能恶化速率则在程序中直接输入即可。

由于每次离线水洗并不能将损失的功率完全恢复，所以 P_{gt}是变化的值，相关学者[6]研究指出，每次离线水洗后，燃气轮机性能可恢复到上一次水洗的 99.8%，即恢复系数 φ 取 0.998，对于水洗过 n 次后，则

$$P_{gt} = P_{iso}^{c}\varphi^{n} \tag{11}$$

4.2　经济离线水洗周期的计算开发

燃气轮机联合循环发电机组的广义离线水洗成本主要包括[7]：一个水洗周期内总的运行附加成本和停机成本。运行附加成本又包括两部分：(1) 由于结垢造成通流面积变小，工质流量减小而引起的燃气轮机出力下降；(2) 由于结垢导致叶片型线发生改变，燃气轮机效率下降而引起燃气轮机热耗率的增加。理论上燃气轮机部分结垢、功率下降后，燃气轮机少发的电量将会以热能的形式排入尾部余热锅炉，下游的汽轮机功率会有多增加，但是增加幅度很小，所以本计算中忽略了运行期间汽轮机功率的变化。水洗期间的停机成本主要是由于停机造成全厂少发的电量引起的损失。由于没有发电，即没有燃料的消耗，这部分的燃料成本应扣除。离线水洗的水洗剂为除盐水和清洁剂的混合物，而且为了强化水洗效果，需要将除盐水加热到 82 ℃以上，每次水洗经过停机冷却、浸泡、漂洗、甩干和烘干等过程，包括耗用的厂用电以及燃料费用。随着水洗周期的延长，总的停机成本基本不变，但是运行附加成本会大幅增加，较短的水洗周期虽然会使运行附加成本减少，但是整个水洗周期内的平均停机成本较大。因此离线水洗周期应使平均广义离线水洗成本最小，其函数如下所示：

$$M_{mean} = (M_{run} + M_{stop})/\mathrm{T} \tag{12}$$

$$M_{run} = \Delta W_1 C_e + \Delta F_1 C_f \tag{13}$$

$$\Delta W_1 = \int_0^T P_{gt} kt\,dt \tag{14}$$

$$\Delta F_1 = \int_0^T P_{gt}(1 - kt) \times 0.25kG_0 t\,dt \tag{15}$$

$$M_{stop} = \Delta W_2 C_e + M_w - \Delta F_2 C_f \tag{16}$$

$$\Delta W_2 = (P_{gt}(1-kt) + P_{st})T_{stop} \quad (17)$$

$$\Delta F_2 = G_0(1+0.25kt)P_{gt}(1-kt)T_{stop} \quad (18)$$

式中：M_{mean}为平均广义离线水洗成本；M_{run}为运行附加成本；M_{stop}为停机成本；T 为离线水洗周期；ΔW_1 为燃气轮机组跟清洁状态下相比一个水洗周期内少发的电量；C_e 为上网电价；ΔF_1 为燃气轮机组跟清洁状态下相比发同样的电量多消耗的燃料量；C_f 为燃料的价格；P_{gt}为机组清洁状态时的额定功率；k 为机组的性能恶化速率；t 为水洗后机组运行时间；G_0 为机组清洁状态下燃料消耗率；ΔW_2 为停机期间联合循环机组少发的电量；M_w 为一次水洗的成本；ΔF_2 为停机期间节省的燃料量；P_{st}为联合循环机组汽轮机的满发功率；T_{stop}为停机冷却和水洗总共耗费的时间。

查询 9E 机组厂家提供的曲线得出，出力下降与热耗率增加基本上是 4∶1 的关系，将 M_{mean}对 T 求导，当偏导数为零，且默认其他值及因素为定值时，得出最佳离线水洗周期 T_{opt}的近似值为：

$$T_{opt} = \sqrt{\frac{M_w + (P_{gt}+P_{st})T_{stop}C_e - G_0C_fP_{gt}T_{stop}}{(0.5C_e + 0.125G_0C_f)kP_{gt}}} \quad (19)$$

5 程序开发及实例计算

将以上数学公式用 MATLAB 软件进行编程，其他参数值作为程序输入值，得到压气机效率、多变指数、功率修正、离线水洗周期等计算结果的程序，程序运行界面如图 7。

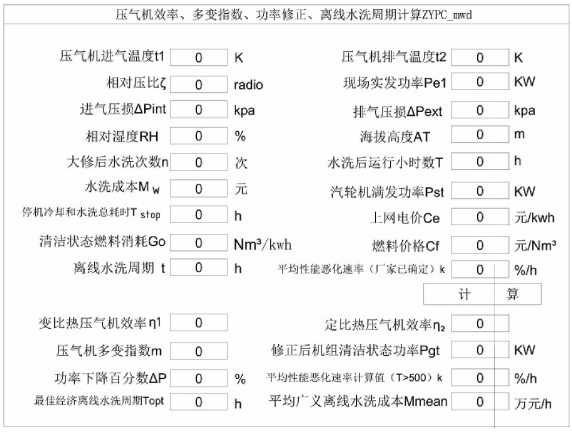


图 7 压气机效率、多变指数、功率修正、离线水洗周期等计算程序运行界面

以某 PG9171E 型燃气轮机为例，该燃气轮机 2018 年 3 月 27 日执行水洗，2018 年 6 月 24 日执行下一次水洗，该水洗周期内燃气轮机运行约 800 h，因该水洗周期内燃气轮机大部分时间为部分负荷运行，选取 2018 年 04 月 02 日及 2018 年 06 月 20、21 日 3 天的满负荷运行时数据（大修后水洗次数 8 次，海拔高度 0 m，相对湿度 60%）计算结果如表 1。

表 1 满负荷运行数据计算结果

时间	t_1/K	t_2/K	τ	p_{el}/(kW·h)	ΔP_{int}/kPa	ΔP_{ext}/ kPa	T/h	η_1	m	ΔP/%
04.02 16:00	305.25	640.85	11.5	104 800	1.046	2.874	46	0.895 71	1.436 1	0.676 51
04.02 20:00	300.95	636.35	11.7	107 800	1.097	2.975	50	0.893 12	1.437 7	0.678 77
06.20 20:00	305.25	641.95	11.3	100 400	1.034	2.800	764	0.883 86	1.442 1	4.629 7
06.20 22:00	305.8	641.75	11.3	100 900	1.045	2.798	766	0.887 66	1.440 2	3.734 9
06.21 10:00	306.95	643.25	11.3	99 900	1.046	2.792	768	0.889 54	1.439 1	3.948 2
06.21 12:00	309.05	644.75	11.3	97 900	1.02	2.751	770	0.896 85	1.435 3	4.511 1

选取此次水洗周期内压气机进气温度为 30 ℃，进口可转导叶 IGV 约 72°时的运行参数进行程序计算，将变比热压气机效率 η_1 及压气机多变指数 m 的计算结果绘制对应图如图 8。

从运行的数据可以看出，多变指数、压气机效率随运行时间大致呈线性关系，随着运行时间的增长，压气机效率从最初的 0.901 8 下降到 0.887 61，多变指数则相应的从 1.434 3 上升至 1.441 7，压气机效率降低约 1.57%，多变指数增加约 0.51%。选取 04 月 02 日 16 时和 06 月 20 日 20 时满负荷运行时同为温度为 32.1 ℃，IGV 开度为 86°时的计算结果，压气机效率从最初的 0.895 71 下降到 0.883 86，多变指数则从 1.436 1 上升至 1.442 1，满负荷运行时的压气机效率下降 1.32%，多变指数上升 0.41%，此时机组水洗后运行时间为 770 h，功率下降了约 4.51%，机组的平均性能恶化速率计算值约为 0.005 8%/h。

对于大修后燃气轮机基本能恢复到额定功率

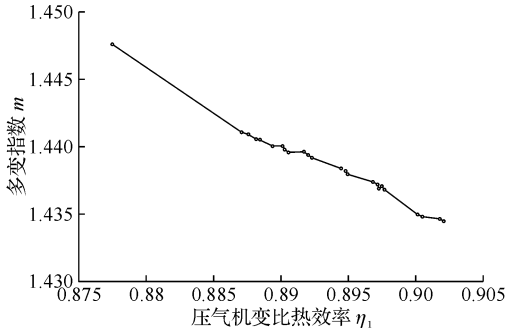


图8　压气机变比热效率 η_1 -多变指数 m 对应图

120 000 kW · h,汽轮机也基本达到额定功率 60 000 kW · h,一次水洗成本约 1 万元,每次停机冷却和水洗总耗时为 8 h,该厂上网电价 0.765 元/(kW · h),天然气价格 3.2 元/m^3,清洁状态燃料消耗率 0.201 m^3/(kW · h),根据以上已计算的平均性能恶化速率为 0.005 8%/h,计算得最佳水洗周期为 406.96 h,实际生产中无法停机水洗时,可以适当延长水洗周期,但不要提前,从程序可以计算出水洗周期缩短后的水洗成本比水洗周期延长的成本要高。因此,水洗周期宜迟不宜早。

最佳水洗周期的影响因素有上网电价、燃料价格、水洗停机时间、平均性能恶化速率、水洗次数等,根据程序的计算可知上网电价越低、燃料价格越高、水洗停机时间越短、平均性能恶化速率越高、水洗次数越少,相应的最佳水洗周期越短。

传统的压气机离线水洗,普遍把出力降低 5% ~10% 之间进行水洗作为判断依据,根据 MATLAB 计算的机组平均性能恶化速率 0.005 8%/h 计算,机组功率下降 5% 的水洗周期为 5%/0.005 8% = 862.07 h,正常情况厂家进行的水洗周期为 500 h,计算的最佳水洗周期为 406.96 h,将上述水洗周期带入程序中得到的平均广义离线水洗成本分别为 0.293 88 万元/h、0.232 09 万元/h、0.227 37 万元/h,按全厂机组年总运行小时 3 600 h 算,采用本优化模型进行离线水洗,则与传统水洗标准相比每年可节约水洗成本 239.44 万元,与电厂实际执行的水洗周期相比每年可节约水洗成本 16.99 万元。

综上所述,根据某次水洗后燃气轮机运行时间为 406.96 h 时的程序计算的数据,即当燃气轮机功率下降约 2.36%,压气机变比热效率下降约 0.70%,多变指数增加约 0.22% 时,可以进行压气机离线水洗,此时离线水洗最经济。

6　结束语

本文以 9E 型燃气轮机为模型根据 MATLAB 软件,对压气机效率、多变指数、功率修正、平均性能恶化速率和经济水洗周期等计算公式进行编程,生成的程序能更好地对压气机脏污的状态进行在线判断,并从多个方面给出了压气机进行离线水洗的参考值。

(1) 该程序中功率修正、经济水洗周期的计算只适用于 9E 型燃气轮机,对于 F 级燃气轮机应根据供应商提供的修正曲线进行相对应的修正。本程序水洗恢复系数取固定值 0.998,但如果因水洗侵泡、甩干、烘干等过程人为执行的不彻底,实际的恢复系数将会变小,本程序除效率和多变指数外的计算结果将会有偏差,即计算的 k 值比实际的大,T_{opt} 比实际值小。

(2) 本程序提出以 $T > 500$ h 为标准计算平均性能恶化速率的方法,对于有条件的机组应在机组运行 1 000 ~2 000 h 范围内求出更精确要求的 k 来计算最佳水洗周期,对于已经能确定的机组平均性能恶化速率则直接在程序中输入即可。

(3) 运行计算结果表明,本次优化的最佳水洗周期为 406.96 h,功率下降 2.36%,压气机效率下降 0.70%,多变指数增加 0.22% 时,可以进行压气机离线水洗,此时水洗最经济。采用本优化模型进行离线水洗,与传统水洗标准(功率下降 5%)相比,每年可节约水洗成本 239.44 万元,与电厂实际执行的水洗周期(500 h)相比,每年可节约水洗成本 16.99 万元。

最佳离线水洗的周期不是一成不变的,上网电价越低、燃料价格越高、水洗停机时间越短、平均性能恶化速率越高、水洗次数越少,相应的最佳水洗周期越短。对于固定的机组上述影响因素也是固定的,最佳水洗周期也就变化不大,可以根据电厂实际情况适当调整,但宜迟不宜早。

参考文献:

[1] 颜学翔,王炜. 洁净燃料机组水洗分析探讨[J]. 燃气轮机技术,2003,16(4):53-56.

[2] 仲如浩,董奎,梁珊珊,等. 燃气轮机压气机水洗在线判断算法研究[J]. 应用技术,2016,268(3):77-82.

[3] 袁清. 对燃气轮机压气机水洗的研究[J]. 中国化工贸易,2012,28(5):168.

[4] 陈永刚,李宏莲. PG9171E 型燃气轮机变工况特性研究[J]. 华

东电力,2009,37(8):1422-1425.
[5] MEHER-HOMJI C B, BROMLEY A. Gas turbine axial compressor fouling and washing [C]. Proceedings of the Thirty-Third Turbomachinery Symposium. Texas, America: Texas A&M University, College Station, 2004:1 63-192.
[6] GULEN S C, GRIFFIN P, RPAOLUCCI S. Real-time on-line performance diagnostics of heavy—duty industrial gas turbines[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2002, 124(4): 910-921.
[7] 程元,陈坚红,盛德仁,等.联合循环发电机组燃气轮机水洗策略优化模型研究[J].中国电机工程学报,2013,33(26):95-100.

Development of On-line Judgment Program for Offline Washing and Research on the Optimal Washing Cycle

Ma Wende, Liu Ji
(Dongguan Shenzhen Energy Zhangyang Power Co., Ltd, Guangdong Dongguan 523637, China)

Abstract: GE did not give a fixed reference on gas turbine compressor offline water washing, according to the correction curve provided by GE, combined with the compressor efficiency and the compressor polytropic index, optimal washing cycle calculation formula and so on, using the MATLAB software, has developed a comprehensive online judge compressor offline washing application, which can better judge the dirty state of the compressor, and gives the reference value of off-line water washing of compressor from many aspects.
Key words: offline washing; compressor efficiency; polytropic index; optimal washing cycle; application development

(上接第66页)

Structural Design and Performance Optimization of the Auxiliary Lubrication Pump Used for PG9171E Gas Turbine

Lu Guoping[1], Li Qingpu[2], Zhuang Jian[2], Zheng Zhiqiang[2], Chen Gang[2], Zhang Leishen[2]
(1. Nanjing Turbine & Electric Machinery (Group) Co., Ltd., Nanjing 210037, China;
2. Shanghai Zhabei Power Plant, Shanghai 200438, China)

Abstract: An auxiliary lubrication pump designed and fabricated locally is needed due to its current shortcomings of high cost and high failure rate, which can largely induce the operation cost. In this work, a specialized auxiliary lubrication pump (LYT230-90) used for the gas turbine of Shanghai Zhabei Power Plant has been designed and its quantity of flow has been enhance by 15 percent and the concentricity has been decreased to 0.05mm, which results in a high operating stability.
Key words: gas turbine; auxiliary lubrication pump; structural design; performance optimization