

文章编号:1671-6833(2015)03-0092-04

基于回归的深冷空分增压膨胀机组运行参量软测量建模

刘超锋¹, 赵伟², 尹永怀¹, 靳佳霖¹, 吴学红¹, 刘亚莉¹, 龚毅¹

(1. 郑州轻工业学院 能源与动力工程学院, 河南 郑州 450002; 2. 河南煤化集团中原大化公司, 河南 濮阳 457000)

摘要:研究了正在调试的某深冷空分增压膨胀 1[#] 机组、2[#] 机组的膨胀端进口压力、膨胀端进口温度、膨胀空气流量、膨胀端出口温度、增压端出口压力和膨胀机转速的软测量建模问题. 基于最小二乘法, 利用回归的方法, 根据运行现场对膨胀量、膨胀机转速的估算需求, 研究了软测量建模时提高估算精度的方法. 结果表明, 采用量纲分析和非线性回归后, 相对于实际的运行数据, 回归得到的经验关联式精度至少在 98% 以上, 达到了软测量建模的目的, 得到 9 个经验关联式, 满足了机组完好但是测量出现问题时生产现场对关联参量估算的需求.

关键词: 深冷空分设备; 增压膨胀机组; 运行特性参量; 软测量建模

中图分类号: TB653

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1671-6833.2015.03.020

0 引言

启动时, 膨胀机作为深冷空分设备中关键的核心机组之一, 用来使低温设备达到能低温精馏的状态, 以调节产品产量; 正常运转中, 它用来补偿隔热措施不完善以及换热不足所引起的冷量损失. 尤其是大型深冷空分设备中, 膨胀机普遍采用增压机作为制动器, 其中, 工质进入增压机获得能量, 接着冷却, 最后膨胀, 通过增压机回收膨胀机产生的轴功. 由于深冷空分设备的规模和性能要求的提高, 增压膨胀机组运行参量的准确计量对于机组的节能降耗及可靠性极为重要. 然而, 生产中有些参数测量滞后较大甚至不能准确测量或者测量成本较高, 例如: 膨胀空气流量测量滞后或流量测量不准确时被迫进行修正等. 流量测量值低于真正的流量值, 可能是由于增压机出口流量孔板的温压补偿错误地安装在冷却器前^[1], 故造成出增压机的高压空气流量测量值不足, 而实际膨胀空气量是足够的, 然而, 这些情况均可能引起膨胀机防喘振控制阀误动作.

转速是膨胀机的最主要的一个参数, 测量不准确时只好增设电流隔离器^[2], 把信号变成标准信号才能使现场的转速表与集控室的监控画面一

致. 有时受安装条件的限制, 没有设置屏蔽层的转速测量信号电缆直接与分子筛电加热器动力供电电缆同时安置在一个电缆桥架里, 其中电加热器电源电压为交流 380 V, 而转速测量信号是直流 24 V、毫安级电流信号. 在强磁场环境中, 测量回路的干扰使转速测量数据大幅波动, 时间长了, 安装在齿轮箱上的转速测量探头(不锈钢)与铸铁机壳之间的间隙过大, 产生转速测量值波动的现象. 转速传感器的测速探头可能受到轴上粘的凹槽和金属嘎巴的干扰而降低其测量的准确性. 有时, 磁电传感器接头破损后转速数据显示不正常^[3]也会使膨胀机工艺连锁停车. 但是, 膨胀机连锁停车, 不仅存在安全隐患, 还会加大工人的劳动强度, 若控制不及时, 滞后时间过长, 还将影响液体产量和生产稳定. 膨胀机转速测量不准确时, 严重时造成飞车^[4]使转子损坏, 甚至整台膨胀机不得不报废. 生产中需要根据膨胀机工作频率间接计算^[5]得到膨胀机的实际转速, 以核对转速表测量值是否存在测量误差.

对于深冷空分增压膨胀机组这样的多变量系统, 测量方面出问题后, 仅凭经验来做定性判断和处理很可能产生误操作, 从而导致经济损失甚至出现事故. 为此, 针对深冷空分增压膨胀机运行参

收稿日期:2015-01-08; **修订日期:**2015-03-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51476148); 教育部 2013 年国家级大学生创新创业训练计划项目(201310462103); 郑州轻工业学院科研基金项目(2014XJ018)

作者简介: 刘超锋(1969-), 男, 河南郑州人, 郑州轻工业学院副教授, 主要从事过程装备研究, E-mail: chfngliu@qq.com

量的软测量中存在的问题,研究软测量回归模型精度提高的方法.

1 运行特性参量的量纲分析

增压膨胀机运行特性相关的运行参量分别是:①由喷嘴阀开度来调节的膨胀气流量 q_v , 又称膨胀机进气量、进膨胀机气量、膨胀机处理气量、膨胀机工作流量或膨胀量、膨胀气流量;②膨胀端进口压力 p_1 , 又称膨胀机入口压力、膨胀机机前压力;③膨胀端进口温度 T_1 , 又称膨胀端进口温度、膨胀机机前温度;④膨胀端出口温度 T_2 , 又称膨胀机机后温度、膨胀后温度;⑤增压端出口压力 p_2 , 又称增压后压力、经膨胀机的增压端增压后的压力;⑥膨胀机转速 n , 俗称膨胀机的运转速度. 增压膨胀机运行特性相关的运行参量的量纲, 见表 1. 其中 $[L]$ 、 $[T]$ 、 $[M]$ 、 $[\Theta]$ 分别表示长度的量纲、时间的量纲、质量的量纲、温度的量纲^[6].

2 建模方案的设计

软测量技术, 又名“软仪表技术”^[7], 其基本思想是依据现有条件下能够测得准确值的量(容易测量的变量, 即辅助量)与难测量(主导量, 或者叫关键变量)间的数学关系, 采用一定的算法进行有机融合, 实现待测参量的精确推断和估计, 解决“难测量”或者“测量成本较高”的参量准确推断中存在的问题, 还可以确保产品质量并提高企业的经济效益. 软测量技术的核心是获得软测

量的数学模型. 软测量建模方法可以选择机理建模和辨识建模. 由于实际过程存在着非线性和不确定性, 难以单独采用物料衡算、能量衡算、动量守恒和相平衡等所谓的机理方法就能奏效. 因此, 本研究采用统计方法将实际数据中隐含的信息进行浓缩和提取, 以判别变量间的数量变化所具有的规律.

深冷空分成套设备正式投产前记录的调试数据极具研究价值. 为此, 针对某制氧机公司正调试的机组 DCS 系统每间隔 1 h 采集到的运行数据进行软测量建模. 具体数据见表 2. 表 2 中, 前 6 行数据属于 1[#]增压膨胀机, 后 6 行数据属于与 1[#]增压膨胀机型号相同的 2[#]机.

回归分析法是软测量模型构建的常用方法之一. 在回归分析时, 根据被研究对象的性能关联参量间的因果关系, 对于解释变量个数多、样本容量少(即观测值个数)的实际情况, 在量纲分析的基础上设法减少关联变量的个数, 使得到的经验公式计算简单, 应用条件更广泛, 便于实际应用.

假设出模型式后, 对于表 2 的数据, 采用最小二乘法回归的方法进行数学建模, 选择 Matlab、Mathematica 等软件. 结合本研究对象的特点, 选择的方案是: 当解释变量的个数 < 3 时, 非线性回归使用基于麦夸特法 + 通用全局优化法的软件 1stOpt. 当解释变量的个数 > 2 时, 回归使用软件 SPSS.

表 1 增压膨胀机运行特性相关的运行参量的量纲

| Tab. 1 Dimensional about operation parameters related to operation characteristics of booster expansion turbine | | | | | | |
|---|----------------------|---------------------------------|------------|------------|---------------------------------|------------|
| 参量 | q_v | p_1 | T_1 | T_2 | p_2 | n |
| 量纲 | $[L^3 \cdot T^{-1}]$ | $[M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}]$ | $[\Theta]$ | $[\Theta]$ | $[M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}]$ | $[T^{-1}]$ |

表 2 正在调试的增压膨胀机组运行数据

| Tab. 2 Operation datas from debugging booster expansion turbine | | | | | | |
|---|------------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|----------------------|--------------------------------|
| 机组号 - 序号 | 膨胀空气流量 $q_v/(m^3 \cdot s^{-1})$ | 膨胀端进口压力 p_1/Pa | 膨胀端进口 温度 T_1/K | 膨胀端出口 温度 T_2/K | 增压端出口 压力 p_2/Pa | 膨胀机转 速 $n/(r \cdot s^{-1})$ |
| 1 [#] - 1 | 3.431 | 619 000 | 251.95 | 175.85 | 637 000 | 440.532 |
| 1 [#] - 2 | 2.589 | 558 000 | 240.45 | 169.75 | 572 000 | 426.12 |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| 1 [#] - 5 | 3.086 | 687 000 | 231.35 | 156.45 | 704 000 | 450.203 |
| 1 [#] - 6 | 3.118 | 697 000 | 229.55 | 155.35 | 714 000 | 447.667 |
| 2 [#] - 1 | 3.499 | 617 000 | 261.15 | 182.75 | 638 000 | 440.977 |
| 2 [#] - 2 | 2.668 | 556 000 | 256.85 | 181.95 | 572 000 | 429.005 |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| 2 [#] - 5 | 3.163 | 687 000 | 242.35 | 164.35 | 704 000 | 452.848 |
| 2 [#] - 6 | 3.179 | 696 000 | 240.65 | 163.15 | 714 000 | 451.74 |

根据表 2 的数据来估算误差率的最大值,并判断回归关联式的精度. 误差率的计算方法是:估算值减去运行值后,除以运行值,再乘以 100%,最后取绝对值. 此外,还通过复相关系数(调整的 R 平方)考察数学模型的优劣. 复相关系数越接近于 1,则回归模型对样本观测值的拟合优度越高,模型的精确度越高.

3 运行特性参量间的关联

3.1 膨胀端出口温度和膨胀量

生产中,需要控制膨胀机机前压力、机前温度、膨胀量,以免膨胀机出口温度过低而出现小液滴. 根据膨胀机前的压力、机前温度、膨胀量估算膨胀机出口温度,对表 2 数据进行回归得到式(1). 式(1)的估算最高误差率为 0.418%. 式(1)的复相关系数为 0.998 3. 式(1)中, T_1 、 q_v 与 T_2 正相关; p_1 与 T_2 为负相关.

$$T_2 = e^{(0.0042T_1 + 0.00956q_v - 0.0000003562p_1 + 4.297)} \quad (1)$$

$$q_v = -0.127T_1 + 0.199T_2 + 1.542p_1 - 9.384 \quad (2)$$

将压差信号进行转换后间接测量孔板处气体流量时^[8],测量的压差信号易受安装位置和安装质量等因素的干扰. 空分设备基于流量控制自动调节负荷时^[9],一旦流量测量值不准确,则会严重影响自动调节负荷的进程,甚至破坏正常工况. 当膨胀空气流量的测量存在问题时,需要根据膨胀端进出口温度、膨胀机前的压力估算膨胀量. 因此,对表 2 的数据进行回归,结果见式(2). 式(2)的估算最高误差率为 7.285%,复相关系数为 0.722 4. 式(2)的精度不高,说明 q_v 和 T_1 、 T_2 和 p_1 之间存在非线性关系. 值得注意的是:膨胀机出口温度 T_2 和机前温度 T_1 的量纲是相同的. 因此,可以分别构造两种温度因数——无因次量 T_1/T_2 、 T_2/T_1 ,从而建立 q_v 分别和“ T_1/T_2 , p_1 ”,“ T_2/T_1 , p_1 ”之间的两种数学关系. 回归后,相对简单又具有较高精度的关联式分别见式(3)、式(4). 式(3)、式(4)的估算最高误差率分别为 2.00%、1.99%. 式(3)、式(4)的复相关系数分别为 0.977、0.977 6. 因此,式(4)的精度较高.

$$q_v = 0.396 + 3.992p_1 + 31.626/\{1 + [(T_1/T_2 - 1.431)/0.000261]^2\} \quad (3)$$

$$q_v = 0.433 + 3.939p_1 + 0.749e^{[-0.5[\ln(T_2/T_1/0.699) - 0.00196]^2]} \quad (4)$$

3.2 膨胀机转速和膨胀空气流量

在空分设备中,根据测速探头、传感器和转速

表构成的回路测量膨胀机转速. 在膨胀机转速测量存在问题时,也即被测量的膨胀机真实转速与转速表测量值存在较大偏差时,需要根据膨胀空气流量、膨胀端进口压力和膨胀端进口温度估算膨胀机转速,对表 2 的数据回归后得到式(5). 式(5)对膨胀机转速的估算误差率的最高值为 1.93%,复相关系数为 0.974 3.

$$n = -20.84q_v + 3.61 \times 10^{-4}p_1 + 1.12T_1 \quad (5)$$

根据膨胀机转速、膨胀端进口压力和膨胀端进口温度估算膨胀空气流量时,对表 2 数据经线性回归后得到式(6). 式(6)的估算误差率的最高值为 9.92%,复相关系数为 0.555. 改用非线性回归后得到式(7). 式(7)的估算误差率的最高值为 1.76%,复相关系数为 0.983. 因此,式(6)的精度较高.

$$q_v = -0.02n + 8.6 \times 10^{-6}p_1 + 0.026T_1 \quad (6)$$

$$q_v = -4.27n + 2.07 \times 10^{-3}p_1 + 2.15T_1 + 1.6 \times 10^{-2}n^2 + 1.34 \times 10^{-9}p_1^2 + 2.44 \times 10^{-3}T_1^2 - 1.05 \times 10^{-5}np_1 - 1.25nT_1 + 3.41 \times 10^{-6}p_1T_1 \quad (7)$$

3.3 增压端出口压力和膨胀机转速

表 2 数据回归后得到式(8)、式(9),分别用以估算增压端出口压力 p_2 、膨胀机转速 n . 式(8)、式(9)的估算误差率分别为 1.585%、0.622%. 式(8)、式(9)的复相关系数分别为 0.989 2、0.963 9.

$$p_2 = -1274.035.306n / (-828.25 + n) + 43673.307 / (-446.46 + n) - 1830.826n \quad (8)$$

$$n = -1085740.685 - 0.0397p_2 + 75661.37 \cdot \ln p_2 + 80069699.975/p_2^{0.5} \quad (9)$$

3.4 膨胀端进口压力和增压端出口压力

增压机排气压力升高,膨胀机入口压力随之升高. 有时,也需要根据膨胀机入口压力预计增压机排气压力. 为此,表 2 数据回归后,得相应的关联式(10)~(11),其估算最高误差率分别为 0.223%、0.240%. 式(10)、式(11)的复相关系数分别为 0.999 8、0.999 8.

$$p_1 = 5718636.824 - 4.937p_2 \ln p_2 + 0.11p_2^{1.5} - 4.712p_2^2 \quad (10)$$

$$p_2 = -9634179.087 - 344.354p_1 + 1.72p_1^2 + 4671.595p_1/\ln p_1 \quad (11)$$

4 结论

(1)在分析深冷空分增压膨胀机组运行特性参量之间因果关系的基础上,建立了软测量模型,

得到了精度较高的一组式子,分别是式(1)~(5)、式(7)~(11),预测精度达到工程需要的要求。

(2)有了软测量模型,可以节约测试时间和测试费用;软测量模型提供的估算值能够使运行人员定量地了解机组的运行状况,从而及时调整操作。

(3)本研究中,在采集到的样本点数量一定的情况下,被研究的运行参量关联时,根据需要进行量纲分析,构造了温度因数,减少了参与回归的解释变量的个数,即“参与回归的样本点数”和“参与回归的解释变量的个数”的比值增加,被解释变量的估算精度提高,说明基于量纲分析的运行参数关联回归对于高精度的软测量建模很有必要,可以在工程实际中推广应用。

参考文献:

[1] 李伟,张国华,崔洪伟.空分装置氧气产量偏低原因

分析与措施[J].大氮肥,2010,33(5):333-334.

[2] 赵洁.膨胀机调速系统的故障分析与处理[J].冶金动力,2012,150(2):30-31.

[3] 穆继伟.三起增压透平膨胀机故障的分析及处理[J].深冷技术,2013(6):64-66.

[4] 秦洪涛,杨箐.透平膨胀机转速测量及错误处理[J].化工自动化及仪表,2006,33(3):80-82.

[5] 崔旭.SZMB型磁电转速传感器测量失真分析[J].设备管理与维修,2007(12):13-14.

[6] 全国量和单位标准化技术委员会.有关量单位和符号的一般原则:GB3101—1993[S].1994-07-01.

[7] 刘艳芳,周晓微,梁萌.人工神经网络在生物过程中的应用[J].郑州大学学报:工学版,2007,36(2):121-124.

[8] 崔新亭,赵小莹.空分液化系统能耗的热力学分析[J].通用机械,2013(4):72-73,96.

[9] 薛平安.自动变负荷技术在6万m³/h空分装置中的应用[J].宝钢技术,2013(1):71-75.

Soft Measurement Modeling about Operation Characteristic Parameters of Booster Expansion Turbine for Cryogenic Air Separation Unit Based on the Regression Method

LIU Chao-feng¹, ZHAO Wei², YIN Yong-huai¹, JIN Jia-lin¹, WU Xue-hong¹, LIU Ya-li¹, GONG Yi¹
(1. School of Energy and Power Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002; 2. Zhongyuan Dahua Corporation, Henan Coal & Chemical Industry Group Co., Ltd., Puyang 457000)

Abstract: According to expansion air flow, expansion-side inlet pressure, inlet temperature of expansion side, expansion side outlet temperature, boost pressure and expander outlet end speed associated with operating characteristics of booster expansion turbine for cryogenic air separation unit, research about soft sensor modeling methods is conducted. Regression mathematical models from the operating data of unit 1[#] and 2[#] being debugged for an oxygen company are estimated and predicted for operation characteristic parameters relationship. The results indicate that the accuracy of the mathematical model is better, precision mathematical model consisting of nine equations resulting in at least more than 98%. The proposed method can be used to: predict the expansion end-side outlet temperature by expansion of the air flow, the expansion end of inlet pressure and the expansion inlet temperature; estimate expansion side flow by expander end inlet temperature, the expansion outlet temperature, and expansion side inlet pressure; predict speed by expansion side flow, expansion side inlet pressure and expander end inlet temperature; predict booster end outlet pressure by speed; predict expansion side inlet pressure by booster end outlet pressure.

Key words: cryogenic air separation unit; booster expansion turbine; operating parameters; soft measurement modeling