

燃气轮机天然气热值测量值滞后时间的分析与改进

吴志方

(东方电气自动控制工程有限公司, 四川 德阳 618000)

摘要:在燃气轮机控制系统中,需要实时测量天然气的热值,根据天然气的热值进行燃烧调整,以保证燃气轮机的运行和出力的稳定。当热值测量值的时间滞后于天然气进入燃气轮机的时间,控制系统就不能及时根据热值进行燃烧控制,从而使燃气轮机的燃烧调整滞后,使燃气轮机运行不稳定。结合某工程实例,对天然气热值测量值的滞后时间进行分析,给出滞后时间的改进方法。通过对热值测量值滞后时间的改进,使控制系统能及时进行燃烧调整,从而保证燃气轮机运行稳定。

关键词:天然气热值;滞后;改进

中图分类号:TK472

文献标志码:B

文章编号:1009-2889(2021)01-0069-04

1 概述

天然气作为燃气轮机的燃烧原料,热值的高低直接影响燃气轮机的运行。燃气热值是燃气轮机控制系统中重要的测量参数,控制系统通过天然气的热值来优化燃烧效率,进而提高燃气轮机的性能。当天然气供气管道内的天然气成分发生变化时,如果热值分析系统测量热值的时间滞后于天然气进入燃气轮机的时间,不能及时将热值信号送入控制系统,将导致燃气轮机燃烧调整滞后,造成燃气轮机熄火或火焰脉动燃烧不稳定现象^[1]。热值分析系统热值信号能否实现前馈控制,对燃气轮机的运行十分重要。

2 燃气轮机热值分析系统设计

2.1 热值分析系统配置

热值分析系统由一个分析机柜、两台冗余配置的热值分析仪、一套预处理、一套前级减压系统组成,配备有供电、接线、通风、照明电路等基本设施,用于对燃气轮机天然气热值进行连续自动的现场测量、分析。系统设备布置于可燃性气体的危险厂所。样气从工艺管道出来后即进入前级减压系统,先经过针阀、过滤器,然后经过减压阀减压后就完成了前

级减压。其中前级减压系统还包括了泄压阀,样气经过前级减压后通过一体化采样伴热管路进入热值分析系统的预处理系统,经过球阀、过滤器后进入热值分析仪分析^[2]。热值分析系统图如图1所示。

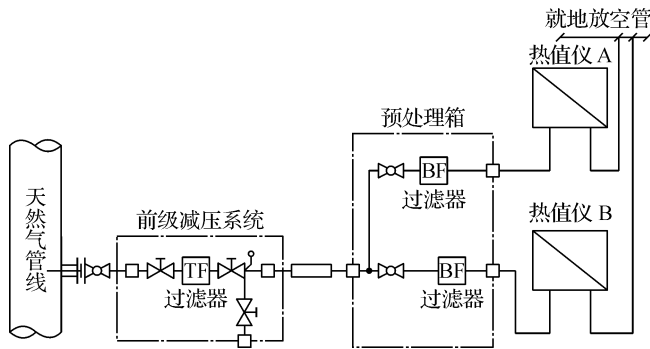


图1 热值分析系统图

2.2 热值分析系统布置与时间关系

热值分析系统对取样口的压力有一定的要求,一般要求压力稳定。热值分析系统布置在天然气调压站出口。天然气经过调压站后,压力比较稳定。设定 T_a 表示燃气从取样口A到燃气轮机燃烧室入口所需时间, T_b 表示燃气从取样口A到热值分析系统热值分析模块入口所需时间, T_{90} 表示热值分析模块自身响应时间^[3]。热值分析系统布置与时间示意如图2所示。

收稿日期:2020-10-08 改稿日期:2020-11-02

作者简介:吴志方(1982—),男,湖北随州人,高级工程师,工学学士,主要从事燃气轮机热控方面的工作,E-mail:wuzf@dongfang.com。

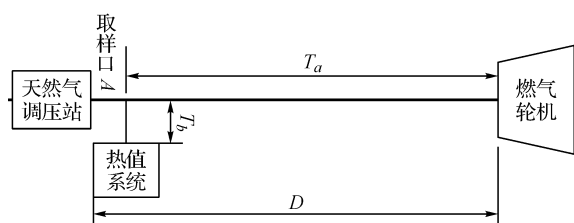


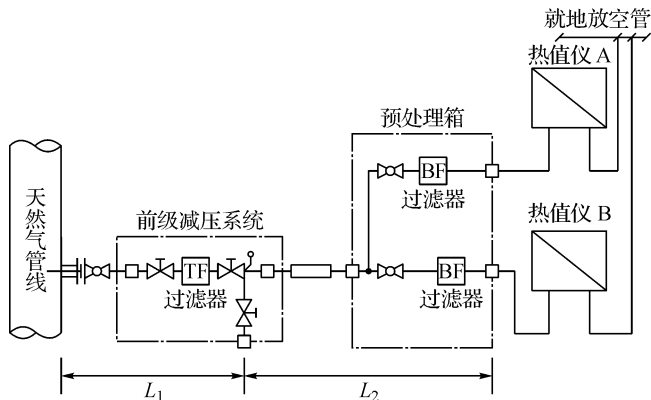
图2 热值分析系统布置与时间示意图

从图2我们得知,要热值信号实现前馈控制,必须满足 $T_b + T_{90} < T_a$ 。其中 T_{90} 是仪表选型决定,为热值仪表产品固有特性。在选型方面,尽可能选择 T_{90} 小于 5 s 的产品,在选型确定后, T_{90} 不可更改。

3 热值测量值滞后时间分析

3.1 T_b 时间计算

在不同的天然气发电厂,因厂房建筑布置设计不同导致热值分析系统的布置位置、燃气轮机的布置位置各不相同。在设计之初,需要通过计算确认时间关系是否满足 $T_b + T_{90} < T_a$ 。若不满足,将采取缩短 T_b 或延长 T_a 的方式,以实现天然气热值的前馈控制。以某工程为例,进行 T_b 、 T_a 的计算。 T_b 的计算分为两段 L_1 和 L_2 ,示意图如图3所示。

图3 T_b 的计算分 L_1 和 L_2 两段示意

3.1.1 计算 L_1 段的时间 t_1

取样口 A 到前级减压箱距离 L_1 为 20 dm,其中管道内天然气压力 P 为 4 MPa,管道气体热力学温度 T_1 为 288 K,管道尺寸为 $\Phi 6 \times 1$ mm,热值分析仪样气流速 $F = 15$ L/min。

L_1 采样管道横截面积 S_1 为:

$$S_1 = \frac{1}{4} \times \pi \times d^2 = \frac{1}{4} \times \pi \times (0.06 - 0.01 \times 2)^2 = 0.001\ 256 \text{ (dm}^2\text{)} \quad (1)$$

式中: d 为取样管道直径, dm。

L_1 采样管道体积 V_1 为:

$$V_1 = S_1 \times L_1 = 0.001\ 256 \times 20 = 0.025\ 12 \text{ (L)} \quad (2)$$

式中: S_1 为取样管道横截面积, dm^2 ; L_1 为管道长度, dm。

这段采样管道的天然气体积经减压后的体积 V_2 为:

$$\begin{aligned} V_2 &= 1.2 \times \frac{T_2 \times P_1}{T_1 \times P_2} \times V_1 \\ &= 1.2 \times \frac{4 + 0.1}{0.1 + 0.1} \times 0.025\ 12 \\ &= 0.617\ 952 \text{ (L)} \end{aligned} \quad (3)$$

式中: T_1 为减压前取样天然气热力学温度, K; P_1 为减压前取样天然气绝对压力, MPa; T_2 为减压后取样天然气热力学温度, K; P_2 为减压后取样天然气绝对压力, MPa; 1.2 为气体经验系数。减压前后 $T_1 = T_2$, 大气压力取 0.1 MPa, 减压前 $P_1 = 4 + 0.1 = 4.1$ MPa, 减压后 $P_2 = 0.1 + 0.1 = 0.2$ MPa。

样气经过 L_1 段管道所需时间 t_1 为:

$$t_1 = \frac{V_2}{F} \times 60 = \frac{0.617\ 952}{15} \times 60 = 2.471\ 808 \text{ (s)} \quad (4)$$

式中: V_2 为减压后样气天然气体积, L; F 为分析仪样气流速, L/min。

3.1.2 计算 L_2 段的时间 t_2

前级减压箱到预处理距离 L_2 为 70 dm, 其中管道内天然气压力 P_2 为 0.2 MPa(绝压), 管道气体热力学温度 T_2 为 288 K, 管道尺寸 $\Phi 6 \times 1$ mm, 流速 $F = 15$ L/min。

L_2 采样管道横截面积 S_2 :

$$\begin{aligned} S_2 &= \frac{1}{4} \times \pi \times d^2 \\ &= \frac{1}{4} \times \pi \times (0.06 - 0.01 \times 2)^2 \\ &= 0.001\ 256 \text{ (dm}^2\text{)} \end{aligned} \quad (5)$$

式中: d 为取样管道直径, dm。

L_2 采样管道体积 V_3 为:

$$\begin{aligned} V_3 &= 1.2 \times S_2 \times L_2 \\ &= 1.2 \times 0.001\ 256 \times 70 \\ &= 0.105\ 504 \text{ (L)} \end{aligned} \quad (6)$$

式中: S_2 为取样管道截面积, dm^2 ; L_2 为管道长度, dm; 1.2 为经验系数。

L_2 段管道所需时间 t_2 为:

$$t_2 = \frac{V_3}{F} \times 60 = \frac{0.105\ 504}{15} \times 60 = 0.422\ 016 \text{ (s)} \quad (7)$$

式中: V_3 为减压后样气天然气体积, L; F 为分析仪样气流速, L/min。

$$T_b = t_1 + t_2 = 2.471\ 808 + 0.422\ 016 \approx 2.893\ 8\ (\text{s})$$
(8)

3.2 T_a 时间计算

计算 T_a 的时间,取样口 A 到燃气轮机的管道长度 D (图 2 所示)为 110 m,其中管道内天然气压力 P 为 4 MPa,管道气体热力学温度 T_3 为 288 K,管道尺寸 $\Phi\ 273 \times 16\ \text{mm}$,燃气轮机在额定工况运行时消耗天然气质量流量 M_f 为 64 730 kg/h(压力为大气压,温度为 20 ℃)。

计算管道横截面积 S_3 :

$$S_3 = \frac{1}{4} \times \pi \times d_1^2 = \frac{1}{4} \times \pi \times (0.273 - 0.032)^2$$
$$= 0.045\ 616\ 71\ (\text{m}^2)$$
(9)

式中: d_1 为取样管道直径,m。

管道体积 V_4 为:

$$V_4 = D \times S_3 = 110 \times 0.045\ 616\ 71 = 5.018\ (\text{m}^3)$$
(10)

式中: D 为管道长度,m; S_3 为管道截面积, m^2 ;

取天然气质量流量 M_f 为 64 730 kg/h,天然气密度 $\rho = 0.6\ \text{kg/m}^3$ (压力为大气压,温度为 20 ℃),可得天然气体积流量 V_f 为:

$$V_f = \frac{M_f}{\rho} = \frac{64\ 730}{0.6} = 107\ 883.333\ \text{m}^3/\text{h}$$
(11)

根据理想气体状态方程得出在工况条件下(天然气压力为 4 MPa,管道天然气温度为 15 ℃)的体积流量 V_F 为:

$$V_F = \frac{V_f \times P_4 \times T_3}{P_3 \times T_4}$$
$$= 107\ 883.333 \times \frac{0.1 \times (273 + 15)}{(4 + 0.1)(273 + 20)}$$
$$= 2\ 586.398\ 1\ (\text{m}^3/\text{h})$$
(12)

式中: T_3 为燃气轮机天然气供气热力学温度,K; P_3 为燃气轮机天然气供气压力(绝压),MPa; T_4 为燃气轮机额定工况天然气参考热力学温度,K; P_4 为燃气轮机额定工况天然气参考大气压力(绝压),MPa。

天然气在管道中的时间 T_a :

$$T_a = \frac{V_4}{V_F} \times 3\ 600 = \frac{5.018 \times 3\ 600}{2\ 586.398\ 1} = 6.984\ 5\ (\text{s})$$
(13)

3.3 计算结果

综上: $T_b + T_{90} = 2.893\ 8 + 5 = 7.893\ 8\ (\text{s})$, $T_a = 6.984\ 5\ (\text{s})$, $7.893\ 8 > 6.984\ 5$,不满足 $T_b + T_{90} < T_a$ 的关系。当热值分析系统测量出天然气的热值时,该天然气已经进入燃气轮机燃烧,控制系统无法前

馈控制,需要对热值分析系统进行改进才能满足控制需求。

4 热值测量值滞后时间改进

4.1 改进方案

为了保证 $T_b + T_{90} < T_a$,有两个措施:(1) 延长 T_a 的时间;(2) 缩短 T_b 的时间。

延长 T_a 的三个措施:减小天然气质量流量,延长管道传输距离,增大传输管径。燃气轮机额定工况运行时所消耗的天然气质量流量为定值,减小天然气质量流量无法实现;燃气轮机布置位置离取样口 A 的管道长度 D (图 2 所示)受电厂布置位置制约,延长管道传输距离难以实现;采用加大天然气供气管径是一种比较容易实现的方法,但天然气输送管道造价昂贵,不利于成本控制。缩短 T_b 的三个措施:增大取样天然气流量,缩短管道传输距离,减小传输管径。其中缩短管道传输距离,减小管径的措施在实际执行过程中已经实施,在实施这两种措施的情况下,仍然不能满足 $T_b + T_{90} < T_a$,增大取样天然气的流量成为重点考虑的措施。由于热值仪核心部件的分析流量为仪表固有特性,一般无法更改,考虑在天然气进入热值分析仪表之前,增加快速旁路管线,快速旁路管线设置手动调节阀门,通过该手动阀门实现旁路流量的调节。快速旁路流量接入用户天然气回收管网,通过增加的快速旁路管线,提高取样天然气流量,以实现 $T_b + T_{90} < T_a$ 。增加快速旁路的系统图如图 4 所示。

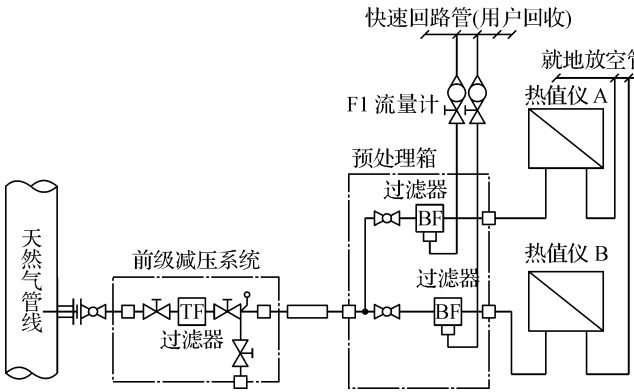


图 4 增加快速旁路的热值分析系统图

4.2 改进后 T_b 计算

通过图 4 快速旁路的设置,可以使样气流量由 $F = 15\ \text{L/min}$ 提升至 $30\ \text{L/min}$ 。通过 3.1 中 T_b 的计算:

$$t_1 = \frac{V_2}{F} \times 60 = \frac{0.617\ 952}{30} \times 60 = 1.235\ 9\ (\text{s})\ (14)$$

$$t_2 = \frac{V_3}{F} \times 60 = \frac{0.105\ 504}{30} \times 60 = 0.211\ (\text{s})\ (15)$$

$$\begin{aligned} T_b + T_{90} &= t_1 + t_2 + 5 = 1.235\ 9 + 0.211 + 5 \\ &= 6.446\ 9\ (\text{s}) \end{aligned}\ (16)$$

$T_a = 6.984\ 5\ (\text{s})$, 满足 $T_b + T_{90} < T_a$, 实现了燃气轮机热值前馈控制的要求。

5 结语

对于燃气轮机燃烧控制, 输入的热值测量信号的时间关系必须满足 $T_b + T_{90} < T_a$, 才能实现对燃气轮机燃烧的精准控制。通常在设计燃气轮机热值分析系统时, 系统滞后时间的分析是容易忽略的环节,

滞后时间不满足, 热值分析系统无法发挥重要作用。通过改进热值分析系统配置, 在取样回路设置快速旁路。快速旁路流量可调, 根据不同工程, 实现 $T_b + T_{90} < T_a$, 精准控制燃气轮机燃烧, 提高燃气轮机效率, 为燃气轮机电厂带来更高的经济效益。

参考文献:

[1] 杨顺虎. 燃气-蒸汽联合循环发电设备及运行[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003 年: 76-77.
[2] 东方电气. M701F4 燃气-蒸汽联合循环机组运行维护手册[M]. 德阳: 东方汽轮机有限公司, 2019.
[3] Mitsubishi Heavy Industries. Ltd-purchase specification of calorimeter [M]. Takasago: Power System Plant Engineering, 2010: 10-15.

Analysis and Improvement of Lag Time of Natural Gas Calorific Value Measurement of Gas Turbine

Wu Zhifang

(Dongfang Electric Autocontrol Engineering Co., Ltd., Sichuan Deyang 618000, China)

Abstract: In the control system of gas turbine, it is necessary to measure the calorific value of natural gas in real time and adjust the combustion according to the calorific value of natural gas to ensure the stable operation and output of gas turbine. When the time of calorific value measurement lags behind the time when natural gas enters the gas turbine, the control system can not control the combustion according to the calorific value in time, so that the combustion adjustment of the gas turbine lags behind and the operation of the gas turbine is unstable. Combined with an engineering example, the lag time of calorific value measurement of natural gas is analyzed, and the improvement method of lag time is given. By improving the lag time of calorific value measurement value, the control system can adjust combustion in time, so as to ensure the stable operation of gas turbine.

Key words: natural gas calorific value; lag; improvement