

· 基础研究 ·

# 基于离心风机叶轮理论的密度式气体 纯度在线检测装置

The density-type gas purity on-line detection device  
based on the centrifugal fan impeller theory

曾衍锋<sup>1</sup>, 韩志成<sup>2</sup>

ZENG Yan-feng<sup>1</sup>, HAN Zhi-cheng<sup>2</sup>

(1. 福建漳州后石电厂, 福建 漳州 363000; 2. 内蒙古大唐国际托克托发电有限责任公司, 内蒙古 呼和浩特 010020)  
(1. Fujian Zhangzhou Houshi Power Plant, Zhangzhou 363000, China; 2. Inner Mongolia Datang International  
Tuoketuo Power Generation Corporation Limited, Huhhot 010020, China)

**摘要:**介绍了基于离心风机叶轮理论的密度式气体纯度在线检测装置的工作原理,分析了混合气体组分对该装置检测误差的影响。总结了因运行维护不当影响该装置检测准确性的因素,以及现场初步判定该气体纯度检测装置纯度指示准确性的方法。

**关键词:**气体纯度;检测原理;汽轮发电机;误差分析

**中图分类号:** TM 311      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1674 - 1951 (2008) 06 - 0027 - 03

**Abstract:** The working principle of density-type gas purity on-line detection device based on the centrifugal fan impeller theory was introduced, and the influence of mixed gas composition on its measuring error was analyzed. The factors, which influence on the measuring accuracy caused by improper operation and maintenance, were summarized, and the method for preliminary determination of the detector measuring accuracy was given also.

**Key words:** gas purity; principle of detection; steam turbo-generator; error analysis

## 0 引言

气体纯度在线检测装置是采用水-氢-氢冷或全氢冷汽轮发电机氢气控制系统的重要组成部分。福建漳州后石电厂600 MW汽轮发电机气体纯度测量采用的是基于离心风机叶轮理论的密度式气体纯度在线检测装置。该装置可以检测汽轮发电机组正常运行时氢气或者发电机气体置换过程中混合气体某种组分的纯度。因为该装置不必设置混合气体的组分,因此,可以完全避免因混合气体组分设置不正确而造成纯度检测结果错误,但同时也会因混合气体组分与纯度计算器默认的不一致而造成检测误差。

## 1 汽轮发电机气体纯度在线检测的意义

(1) 汽轮发电机正常运行时,氢气纯度降低将

增加发电机的通风损耗。

(2) 监视氢气纯度并将其控制在规定的范围内是机组长期安全运行的需要。氢气系统运行中,氢气纯度的降低也增加了氢气与其他气体混合成爆炸性气体的可能性。电安生[1994]227号《电业安全工作规程(热力和机械部分)》要求:“发电机氢冷系统中氢气纯度不低于96%,含氧量不超过2%...”。因此,氢气纯度检测的准确性直接影响汽轮发电机的安全性。

另外,当汽轮发电机氢气系统置换时,在线监视氢气或二氧化碳组分的比例,有利于对整个置换过程的掌控与最终置换结果的判断。

## 2 气体纯度在线检测装置的原理

### 2.1 气体纯度在线检测装置分类

常用的气体纯度在线检测装置根据其工作原理可分为:基于测量混合气体密度来计算气体纯度和

基于利用混合气体热导特性来计算气体纯度 2 大类。

其中,密度式气体纯度在线检测装置又可以分为利用离心式风机进出口差压随工作介质密度变化的特性测量混合气体的密度,利用薄膜圆柱容器的共振频率随环境气体密度变化的特性测量混合气体的密度 2 种型式。

## 2.2 基于离心式风机叶轮理论的密度式在线气体纯度检测装置的组成

某电厂 600 MW 汽轮发电机的氢气纯度检测装置由离心式定速纯度风机、压力变送器、差压变送器、温度变送器以及纯度计算器等主要部件组成。系统示意图如图 1 所示。

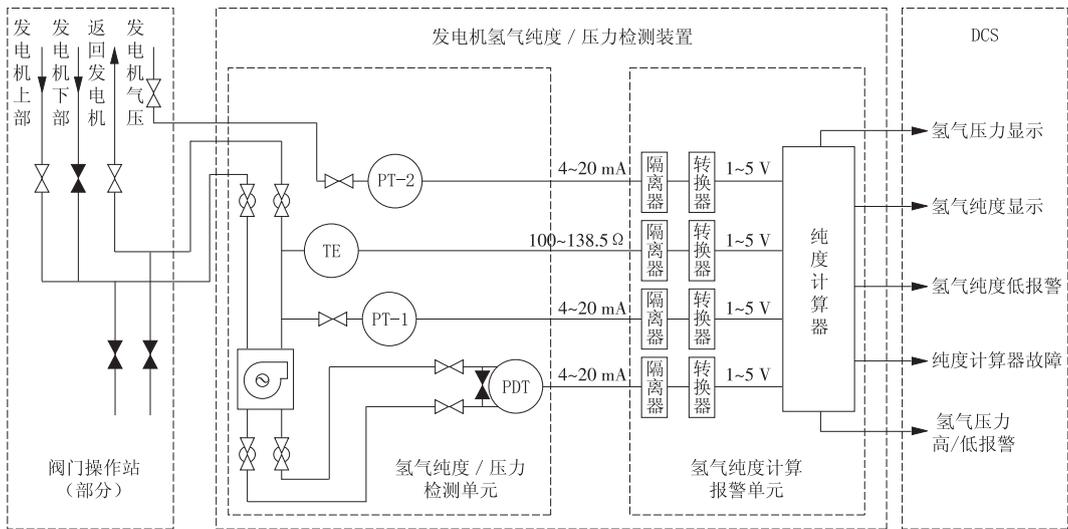


图 1 气体纯度检测装置组成  
PDT. 纯度风机进出口差压变送器, 输入 0~1600 Pa, 输出 4~20 mA; PT-1. 纯度风机进口压力变送器, 输入 0~10 kg/cm<sup>2</sup>, 输出 4~20 mA; TE. 纯度风机进口温度变送器, 输入 0~100℃, 输出 100~138.5 Ω; PT-2. 发电机气体压力变送器, 输入 0~10 kg/cm<sup>2</sup>, 输出 4~20 mA。

图 1 气体纯度检测装置组成

$u_2$  和  $u_1$  均为常数, 即  $K = (u_2^2 - u_1^2)/2$ 。因此, 通过测量纯度风机运行时进出口的差压, 可得到纯度风机取样气体的密度  $\rho = \Delta p/K$ 。

(2) 纯度风机取样气体密度  $\rho$  的换算。汽轮发电机正常运行或气体置换时其内部的气体均近似于理想气体, 密度  $\rho$  随气体压力与温度按理想气体状态方程式规律变化。因此, 必须测量纯度风机处取样气体的压力与温度, 将纯度风机取样气体的密度  $\rho$  折算成一标准状态下 ( $t_0 = 0^\circ\text{C}$ ,  $p_0 = 1.0332 \text{ kg/cm}^2$ ) 的密度  $\rho_0$ , 以便根据这一标准状态下混合气体的各气体组份的物理特性计算出某一气体组份的纯度。标准状态下混合气体的密度  $\rho_0$  换算如下式

$$\rho_0 = \rho \times [p_0 / (t_0 + 273.15)] \times [(t + 273.15) / p]$$

式中:  $\rho_0$  为折算到  $t_0 = 0^\circ\text{C}$ ,  $p_0 = 1.0332 \text{ kg/cm}^2$  状态的混合气体密度;  $t$  为纯度风机处取样气体的温度;  $p$

## 2.3 气体纯度检测装置对某一组分气体纯度的演算和结果显示

### 2.3.1 气体纯度的演算过程

(1) 根据纯度风机进出口差压, 测取混合气体的密度  $\rho$ 。由离心式风机的叶轮理论可知, 流体在封闭的叶轮内作旋转运行时, 叶轮进出口的差压与叶轮转动角速度的平方和流体密度成正比关系变化, 即纯度风机的进出口差压可以表示为

$$\Delta p = \rho \times (u_2^2 - u_1^2) / 2,$$

式中:  $\Delta p$  为纯度风机进出口差压;  $\rho$  为流经纯度风机的气体密度 (基于纯度风机进口压力  $p$  与温度  $t$ );  $u_2/u_1$  为纯度风机叶轮出/进口圆周速度。

对于一个确定的固定转速的离心式风机而言,

为纯度风机处取样气体的压力。

(3) 标准状态下混合气体的密度  $\rho_0$  与某一组分气体纯度的关系。

在经过上述运算得到了混合气体的密度  $\rho_0$  后, 假定发电机内只有氢气与空气 2 种组分, 则混合气体的密度  $\rho_0$  可以写成

$$\rho_0 = \rho_{\text{H}_2} \times \varphi(\text{H}_2) + \rho_{\text{A}_0} \times [100\% - \varphi(\text{H}_2)],$$

式中:  $\rho_{\text{H}_2}$ ,  $\rho_{\text{A}_0}$  分别为  $t_0 = 0^\circ\text{C}$ ,  $p_0 = 1.0332 \text{ kg/cm}^2$  状态下氢气和空气的密度;  $\varphi(\text{H}_2)$  为氢气的体积分数。

将  $\rho_{\text{H}_2} = 0.090 \text{ g/L}$ ,  $\rho_{\text{A}_0} = 1.293 \text{ g/L}$  代入上式可得

$$\varphi(\text{H}_2) = (1.293 - \rho_0) / 1.203.$$

由以上计算可知: 当汽轮发电机内只有氢气与空气 2 种组分时,  $\varphi(\text{H}_2)$  数值大小等于混合气体中氢气的纯度; 当混合气体由二氧化碳与空气或二氧化碳与氢气组成时,  $\varphi(\text{H}_2)$  数值大小只表示某种组

分气体的纯净程度。

### 2.3.2 气体纯度在操作站屏幕上的显示

气体纯度在操作站屏幕上的显示是以假设发电机内混合气体只有氢气与空气或二氧化碳与空气为前提的,所以,只有满足该假设条件时操作站屏幕上显示的气体纯度才准确。

(1) 气体纯度计的输出与纯度的演算结果  $\varphi(\text{H}_2)$  的关系。气体纯度计是以 4 ~ 20 mA 的电流信号作为其输出,与气体纯度演算值  $\varphi(\text{H}_2)$  的关系按以下原则标定:当混合气体为 100% 的二氧化碳 ( $\rho_0 = 1.964$ ) 时,可得  $\varphi(\text{H}_2) = -55.78\%$ , 对应纯度计算器的输出标定为 4 mA; 当混合气体为 100% 的空气 ( $\rho_0 = 1.293$ ) 时,可得  $\varphi(\text{H}_2) = 0.00\%$ , 对应纯度计算器的输出标定为 9.474 mA; 当纯度风机差压为零 (相当于  $\rho_0 = 0$ ) 时,可得  $\varphi(\text{H}_2) = 107.5\%$ , 对应纯度计算器的输出标定为 20 mA;

(2) 气体纯度在操作站屏幕上的最终显示。根据上述气体纯度计输出电流的标定方法与基于发电机内混合气体只有氢气与空气或二氧化碳与空气的假设,则气体纯度计输出电流在 4.000 ~ 9.474 mA 对应了二氧化碳纯度为 100% ~ 0%; 气体纯度计输出电流 9.474 ~ 20.000 mA 对应氢气纯度为 0% ~ 107.5%。

在 DCS 中可以通过函数将气体纯度计输出的 4 ~ 20 mA 转换为气体的纯度数值,如图 2 所示。当显示负值时指二氧化碳的纯度,显示正值时指氢气的纯度,显示为零时表示混合气体为 100% 空气。

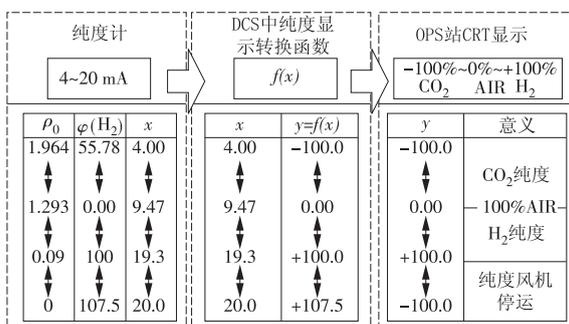


图2 气体纯度输出显示转换

根据以上纯度测量原理与输出显示的方法可知,当发电机内混合气体为氢气与二氧化碳时(即置换过程),所显示的氢气纯度或二氧化碳纯度存在较大误差,该误差随着氢气或二氧化碳的纯度的提高而减小。

## 3 气体纯度在线检测装置的测量误差

### 3.1 混合气体组分与默认值不一致引起检测误差

汽轮发电机正常运行中,以及在发电机气体置

换过程中用二氧化碳驱赶空气或用空气驱赶二氧化碳时的混合气体,与氢气纯度检测装置默认的混合气体组分一致;而在发电机气体置换过程中用二氧化碳驱赶氢气或氢气驱赶二氧化碳时发电机内混合气体的组分与氢气纯度检测装置默认的气体组分不一致,因此会产生检测误差。

图3表示了混合气体在不同的组分时,实际体积比例与 CRT 显示的纯度的关系。

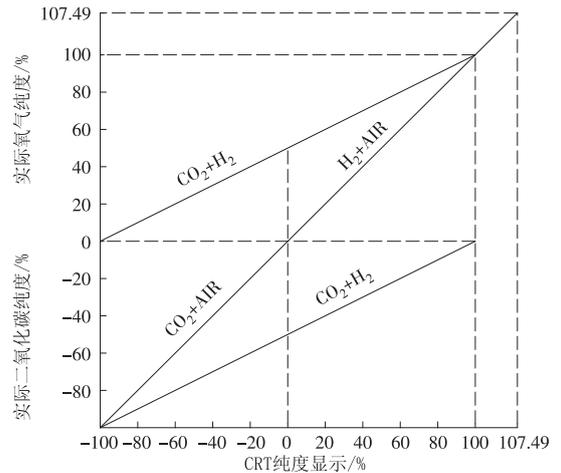


图3 CRT纯度显示与实际纯度

因此,只有在汽轮发电机内气体组分为(AIR + H<sub>2</sub>)或(AIR + CO<sub>2</sub>)时纯度计显示的 CRT 读数与对应的气体纯度一致;而在发电机内气体组分为(H<sub>2</sub> + CO<sub>2</sub>)时,只有当 H<sub>2</sub> 或 CO<sub>2</sub> 纯度接近 100%, 纯度计显示的 CRT 读数才与实际纯度趋于一致。

### 3.2 影响气体纯度在线检测结果的因素

(1) 液体在取样管线内有积存,导致了纯度风机差压不能正确反映取样气体的密度,因此,有必要在取样管线适当的位置设置疏放水阀,防止取样管线内积有油水。

(2) 取样管线的阀门状态不正确,影响到纯度风机差压、取样气体压力参数的正确测量,从而导致气体纯度检测结果不准确。因而,在气体纯度在线检测装置运行时,检测系统的阀门状态必须正确。

(3) 由于取样气体的密度的演算是基于纯度风机为恒速的假设,并且由于纯度风机密封与防爆的要求使得其在结构上不易观察、测量到实际运行转速。因此,当由于电源缺相或其他原因导致纯度风机转速变化较大时,将影响气体纯度检测结果的准确性。

(4) 测量一次元件(变送器)没有按要求校验误差较大、纯度计算器设定不当、纯度显示分度错误等直接影响到气体纯度测量的准确性。

### 3.3 测量准确性的初步判定

气体纯度在线检测装置运行时测量准确性,可以通过检查纯度计全量程中的 3 个特殊工况点的指示是否正确而作出初步判定。

(1) 停止纯度风机运行,确认发电机气体纯度 CRT 指示是否为 107.5%。

(2) 纯度风机通过临时软管填充纯气态纯二氧化碳运行,确认发电机气体纯度 CRT 指示是否为 -100%。

(3) 纯度风机通过临时软管充干燥的仪用气空气运行,确认发电机气体纯度 CRT 指示是否为 0%。

## 4 结束语

基于离心风机叶轮理论的密度式气体纯度在线

检测装置是常应用于水-氢-氢冷或全氢冷汽轮发电机的氢气纯度监视的仪表之一。掌握该气体纯度在线检测装置的工作原理,在该装置运行中避免因运行维护不当而产生测量误差,并通过平时检查纯度计全量程中的 3 个特殊工况点的指示是否正确来评估气体纯度检测装置的准确性,是电厂保证水-氢-氢冷或全氢冷汽轮发电机组长期安全、经济运行的有效措施之一。

(编辑:刘芳)

---

#### 作者简介:

曾衍锋(1977—),男,江西新余人,福建漳州后石电厂工程师,从事发电厂运行管理方面的工作。

韩志成(1975—),男,内蒙古凉城人,内蒙古大唐国际托克托发电厂有限责任公司工程师,从事发电厂运行管理方面的工作。