

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.
G01F 1/34 (2006.01)



[12] 发明专利申请公布说明书

[21] 申请号 200910067527.5

[43] 公开日 2010 年 2 月 24 日

[11] 公开号 CN 101655381A

[22] 申请日 2009.9.9

[21] 申请号 200910067527.5

[71] 申请人 东北电力大学

地址 132012 吉林省吉林市船营区长春路 169 号

[72] 发明人 李 勇 张 毅 曹丽华 姜铁镭
张炳文 张爱萍 潘忠志 矫庆兴

[74] 专利代理机构 吉林市达利专利事务所
代理人 陈传林

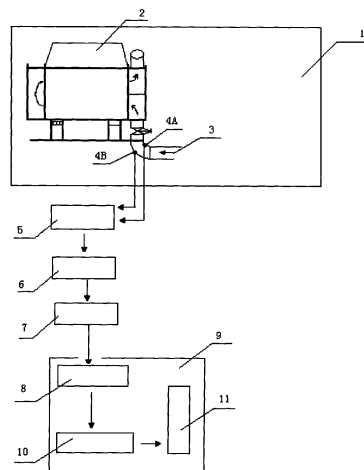
权利要求书 2 页 说明书 8 页 附图 3 页

[54] 发明名称

汽轮机凝汽器循环冷却水流量测量方法及其在线测量装置

[57] 摘要

一种汽轮机凝汽器循环冷却水流量测量方法，其特点是：包括测点安装与数据采集，循环冷却水流量计算，装置标定，装置投运、实际测量与数据显示步骤；其在线测量装置包括汽轮机的循环冷却水管通过垂直弯管与凝汽器连接，在垂直弯管 45° 截面的内、外侧分别安装内侧取压管、外侧取压管，内、外侧取压管均通过橡胶管与差压变送器连接，差压变送器与测压电阻电连接，测压电阻与数据采集器电连接，数据采集器与计算机电连接。其测量方法科学，便于掌握，适用性强；在线测量装置结构简单、成本较低、能够自动准确测量汽轮机循环冷却水流量。



1. 一种汽轮机凝汽器循环冷却水流量测量方法，其特征是，它包括以下步骤：

1) 测点安装与数据采集：汽轮机的循环冷却水管通过垂直弯管与凝汽器连接，在垂直弯管 45° 截面的内、外侧分别安装内侧取压管、外侧取压管，内、外侧取压管均通过橡胶管与差压变送器连接；差压变送器与测压电阻电连接，测压电阻与数据采集器电连接，数据采集器与计算机电连接，将每秒采集一次的差压数据存入计算机数据文件中；

2) 循环冷却水流量计算：

(1) 根据自由涡流理论，由伯努利方程得到垂直弯管内流体的速度分布为

$$v = \frac{C_1}{R} \quad (1)$$

式中， C_1 为积分常数， m^2/s ； R 为曲率中心到管内某点的距离， m ，

对于垂直弯管，理想流量与垂直弯管内外压力差之间的关系式为

$$Q_v = C_{el} \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}} \quad (2)$$

$$C_{el} = \sqrt{2\pi r_0^2} \frac{(x^2 - 1)(x - \sqrt{x^2 - 1})}{\sqrt{x}} \quad (3)$$

$$x = \frac{R_0}{r_0}$$

其中， Q_v 为通过垂直弯管的理想流量， m^3/s ； C_{el} 为只与垂直弯管几何尺寸有关的系数； Δp 为垂直弯管 45° 角方向截面内外侧压力差， Pa ； ρ 为流体的密度， kg/m^3 ； r_0 为垂直弯管的内半径， m ； R_0 为垂直弯管中心的曲率半径， m ；

对于凝汽器入口的垂直弯管，经过推导，得

$$Q_v = C_{el} \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho} - gz} \quad (4)$$

其中 Δp 为垂直弯管 45° 角方向截面内外侧压力差， ρ 为流体的密度， kg/m^3 ；

g 为重力加速度； z 为垂直弯管 45° 角方向截面内外侧高度差； $z = \Phi \times \cos 45^\circ$ ， Φ 为管路直径；

(2) 通过垂直弯管的实际流量，由于流量损失的存在，使得在同一内外压差条件下，流体实际流量并不等于流体的理想流量，其之间的关系表示为

$$Q_v = \alpha Q_{\text{理}} \quad (5)$$

其中， Q_v 为实际测量流量， m^3/s ； $Q_{\text{理}}$ 为通过弯管的理想流量， m^3/s ； α 称为流量系数，其通过实验标定确定其值；

3) 装置标定：用水银差压计测量垂直弯管内外侧压差，流体流量的测量是在冷却水管路上选择某一具有足够长直管段的位置安装阿牛巴流量计测量流经管道的流体流量，改变流量大小，从而对系数进行确定，标定后将水银压差计和阿牛巴流量计取下；

4) 装置投运、实际测量与数据显示：根据软件程序计算得到循环冷却水流量，且通过计算机显示器进行显示。

2. 一种汽轮机凝汽器循环冷却水流量在线测量装置，它包括汽轮机的循环冷却水管通过垂直弯管与凝汽器连接，其特征是：在垂直弯管 45° 截面的内、外侧分别安装内侧取压管、外侧取压管，内、外侧取压管均通过橡胶管与差压变送器连接，差压变送器与测压电阻电连接，测压电阻与数据采集器电连接，数据采集器与计算机电连接。

汽轮机凝汽器循环冷却水流量测量方法及其在线测量装置

技术领域

本发明涉及热力设备状态监测领域，是一种汽轮机凝汽器循环冷却水流量测量方法及其在线测量装置。

背景技术

循环冷却水流量是决定汽轮机凝汽器真空的重要因素之一，循环冷却水流量不仅影响到汽轮机运行的经济性，而且对循环冷却水泵耗电量也产生很大的影响。同时，分析凝汽器真空降低原因、研究循环冷却水泵的和冷却塔的性能，都需要对循环冷却水流量进行测量。

现有对循环冷却水流量的测量一种是采用凝汽器热平衡方法，其基本原理是利用凝汽器中蒸汽的放热量等于循环冷却水的吸热量，从而通过求解得到循环冷却水的流量，但实际运行过程中，进入凝汽器的蒸汽量及疏水量的测量精度不高，从而影响到循环冷却水流量的准确测量。还有一种是利用循环冷却水泵进出口水的焓升来测量循环冷却水流量，但实际上，由于循环冷却水泵属于大流量、小扬程的离心式水泵，循环冷却水在循环冷却水泵内的焓升很小，从而也影响到循环冷却水流量的测量精度。

目前，火力发电厂中循环冷却水流量普遍采用超声波流量计进行测量。但超声波流量计不仅价格昂贵，而且受电磁波影响较大。同时，由于管道内部经常会出现腐蚀现象，从而也影响到超声波流量计的测量精度。

随着火电机组单机容量的逐渐增大，火电厂的耗水量也逐渐增大，使得循环冷却水泵的容量以及输送管路的直径也相应增加。例如，对于 300MW 汽轮机，额定工况下循环冷却水流量为 37512t/h，循环冷却水管直径通常在 1.2~2.2m 范围内。如此大的循环冷却水流量以及循环冷却水管直径为安装孔板等流量测量装置带来了很大的困难，人们一直在努力创造一种切实可行的汽轮机凝汽器循环冷却水流量的测量方法，渴望实际解决循环冷却水流量在

线测量的难题，但迄今尚未得到解决。

发明内容

本发明的目的是，提供一种方法科学，便于掌握，适用性强的汽轮机凝汽器循环冷却水流量测量方法，并提供一种结构简单、成本较低、能够自动准确测量汽轮机凝汽器循环冷却水流量在线测量装置。

实现本发明的目的所采取的技术方案是：

一种汽轮机凝汽器循环冷却水流量测量方法，其特征是，它包括以下步骤：

1) 测点安装与数据采集，汽轮机的循环冷却水管通过垂直弯管与凝汽器连接，在垂直弯管 45° 截面的内、外侧分别安装内侧取压管、外侧取压管，内、外侧取压管均通过橡胶管与差压变送器连接；差压变送器与测压电阻电连接，测压电阻与数据采集器电连接，数据采集器与计算机电连接，将每秒采集一次的差压数据存入计算机数据文件中；

2) 循环冷却水流量计算，

(1) 根据自由涡流理论，由伯努利方程得到垂直弯管内流体的速度分布为

$$v = \frac{C_1}{R} \quad (1)$$

式中， C_1 为积分常数， m^2/s ； R 为曲率中心到管内某点的距离， m ，

对于垂直弯管，理想流量与垂直弯管内外压力差之间的关系式为

$$Q_v = C_{el} \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}} \quad (2)$$

$$C_{el} = \sqrt{2\pi r_0^2} \frac{(x^2 - 1)(x - \sqrt{x^2 - 1})}{\sqrt{x}} \quad (3)$$

$$x = \frac{R_0}{r_0}$$

其中， Q_v 为通过垂直弯管的理想流量， m^3/s ； C_{el} 为只与垂直弯管几何尺

寸有关的系数； Δp 为垂直弯管 45° 角方向截面内外侧压力差，Pa； ρ 为流体的密度， kg/m^3 ； r_0 为垂直弯管的内半径，m； R_0 为垂直弯管中心的曲率半径，m；对于凝汽器入口的垂直弯管，经过推导，得

$$Q_v = C_{el} \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho} - gz} \quad (4)$$

其中 Δp 为垂直弯管 45° 角方向截面内外侧压力差， ρ 为流体的密度， kg/m^3 ； g 为重力加速度； z 为垂直弯管 45° 角方向截面内外侧高度差； $z = \Phi \times \cos 45^\circ$ ， Φ 为管路直径；

(2) 通过垂直弯管的实际流量，由于流量损失的存在，使得在同一内外压差条件下，流体实际流量并不等于流体的理想流量，其之间的关系表示为

$$Q_v = \alpha Q_v \quad (5)$$

其中， Q_v 为实际测量流量， m^3/s ； Q_v 为通过弯管的理想流量， m^3/s ； α 称为流量系数，其通过实验标定确定其值；

3) 装置标定，用水银差压计测量垂直弯管内外侧压差，流体流量的测量是在冷却水管路上选择某一具有足够长直管段的位置安装阿牛巴流量计测量流经管道的流体流量，改变流量大小，从而对系数进行确定，标定后将水银压差计和阿牛巴流量计取下；

4) 装置投运、实际测量与数据显示，根据软件程序计算得到循环冷却水流量，且通过计算机显示器进行显示。

一种汽轮机凝汽器循环冷却水流量在线测量装置，它包括汽轮机的循环冷却水管通过垂直弯管与凝汽器连接，其特殊之处在于：在垂直弯管 45° 截面的内、外侧分别安装内侧取压管、外侧取压管，内、外侧取压管均通过橡胶管与差压变送器连接，差压变送器与测压电阻电连接，测压电阻与数据采集器电连接，数据采集器与计算机电连接。

本发明的汽轮机凝汽器循环冷却水流量测量方法科学，便于掌握，适用

性强。

本发明的汽轮机凝汽器循环冷却水流量在线测量装置结构简单、成本较低、能够自动准确测量汽轮机循环冷却水流量。

附图说明

图 1 为汽轮机凝汽器循环冷却水流量测量方法方框图。

图 2 为汽轮机的循环冷却水管通过垂直弯管与凝汽器连接结构示意图。

图 3 为垂直弯管内的速度分布示意图。

图 4 为实施例的垂直弯管结构示意图。

图 5 为汽轮机凝汽器循环冷却水流量在线测量装置结构示意图。

图中：1 汽轮机，2 凝汽器，3 循环冷却水管，4A 内侧取压管，4B 外侧取压管，5 差压变送器，6 测压电阻，7 数据采集器，8USB 接口，9 计算机，10 数据处理软件，11 显示器。

具体实施方式

参照图 1、2 和 5：汽轮机凝汽器循环冷却水流量测量方法包括以下步骤：

1) 测点安装与数据采集：火力发电厂汽轮机 1 的排汽进入凝汽器 2 中，利用汽轮机 1 的循环冷却水将汽轮机 1 排汽凝结成水。循环冷却水通过循环冷却水泵打入凝汽器 2。通常循环冷却水管 3 布置于地下，布置于地下的循环冷却水管 3 通过垂直弯管与凝汽器 1 连接，在垂直弯管 45° 截面的内、外侧分别安装内侧取压管 4A、外侧取压管 4B，内、外侧取压管 4A、4B 均通过橡胶管与差压变送器 5 连接，差压变送器 5 与测压电阻 6 电连接，测压电阻 6 与数据采集器 7 电连接，数据采集器 7 与计算机 9 电连接，将每秒采集一次的差压数据存入计算机 9 数据文件中。

2) 循环冷却水流量计算：

(1) 垂直弯管中理想流量与内外压差的关系，根据自由涡流理论，该理

论方法假设：①流体作稳定定常流动，流体充满管道，不含气泡；②流体具有不可压缩性和流动连续性；③垂直弯管保持同一曲率半径，弯管本身的椭圆度可忽略不计，管内壁光滑。这种理论认为弯管中的流体是绕弯管的曲率中心作自由旋转运动，由伯努利方程，并忽略流体流动过程中流体内部之间的摩擦力，得到弯管内流体的速度分布为

$$v = \frac{C_1}{R} \quad (1)$$

式中， C_1 为积分常数， m^2/s ； R 为曲率中心到管内某点的距离， m 。

由式(1)可见，流体沿垂直弯管流动时，随曲率半径的增大，流体流速逐渐降低，而流体压力则逐渐增大。其流体流动的速度分布如图3所示。

对于垂直弯管，理想流量与垂直弯管内外压力差之间的关系式为

$$Q_v = C_{el} \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}} \quad (2)$$

$$C_{el} = \sqrt{2\pi r_0^2} \frac{(x^2 - 1)(x - \sqrt{x^2 - 1})}{\sqrt{x}} \quad (3)$$

$$x = \frac{R_0}{r_0}$$

其中， Q_v 为通过垂直弯管的理想流量， m^3/s ； C_{el} 为只与垂直弯管几何尺寸有关的系数； Δp 为垂直弯管 45° 角方向截面内外侧压力差， Pa ； ρ 为流体的密度， kg/m^3 ； r_0 为垂直弯管的内半径， m ； R_0 为垂直弯管中心的曲率半径， m 。

对于凝汽器入口的垂直弯管，经过推导，得

$$Q_v = C_{el} \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho} - gz} \quad (4)$$

其中 Q_v 为通过垂直弯管的理想流量， m^3/s ； Δp 为垂直弯管 45° 角方向截面内外侧压力差， ρ 为流体的密度， kg/m^3 ； g 为重力加速度； z 为垂直弯管

45° 角方向截面内外侧高度差； $z = \Phi \times \cos 45^\circ$ ， Φ 为管路直径。

(2) 通过垂直弯管的实际流量，上述建立的垂直弯管内流体理想流量与内外压差之间的关系，是将流体作为理想流体处理的，没有考虑到流体流动过程中的损失。实际上，流体在垂直弯管内流动过程中，不可避免地存在着一定的损失。这些损失包括流体与管壁之间摩擦、流体内部摩擦、旋涡以及流体二次流动产生的损失。由于这些损失的存在，使得在同一内外压差条件下，流体实际流量可能并不等于流体的理想流量，其之间的关系可以表示为

$$Q_v = \alpha Q_v \quad (5)$$

其中， Q_v 为实际测量流量， m^3/s ； Q_v 为通过垂直弯管的理想流量， m^3/s ； α 称为流量系数，其通过实验标定确定其值。

3) 装置标定：标定目的在于确定流量系数 α 。具体方法分别用水银压差计测量差压，用阿牛巴流量计测量循环冷却水流量，从而对上述装置进行标定。具体标定方法是用水银压差计测量垂直弯管内、外侧压差。流体流量的测量在厂房外部的循环冷却水管路 3 上测量。选择某一具有足够长直管段的位置安装阿牛巴流量计测量流经管道的流体流量。改变流量大小，从而对系数进行确定。标定后，将水银压差计和阿牛巴流量计取下。

4) 装置投运、实际测量与数据显示：根据数据处理软件 10 计算得到循环冷却水流量，且通过计算机 9 的显示器 11 进行显示。

一种汽轮机凝汽器循环冷却水流量在线测量装置，它包括汽轮机1的循环冷却水管3通过垂直弯管与凝汽器2连接，在垂直弯管45°截面的内、外侧分别安装内侧取压管4A、外侧取压管4B，内、外侧取压管4A、4B均通过橡胶管与差压变送器5连接；差压变送器5与测压电阻6电连接，测压电阻6与数据采集器7电连接，数据采集器7与计算机9的USB接口8电连接，计算机的9的接口USB将采集的数据提交给安装在计算机9的数据处理软件10；安装在计算机的数据处理软件10使计算机得到循环冷却水流量后在计算机显示器11上显示。

参照图4和5，本发明的汽轮机凝汽器循环冷却水流量测量方法的具体应用实例，对某300MW汽轮机单台凝汽器冷却水流量进行了测量试验。

1) 测点安装与数据采集:

布置于地下的循环冷却水管 3 通过垂直弯管与凝汽器 1 连接，垂直弯管的内直径为 1.220m，曲率半径为 1.250m。压差测点选择在垂直弯管 45° 截面，在垂直弯管 45° 截面的内、外侧分别安装内侧取压管 4A、外侧取压管 4B，内、外侧取压管 4A、4B 均通过橡胶管与差压变送器 5 连接，差压变送器 5 与测压电阻 6 电连接，测压电阻 6 与数据采集器 7 电连接，数据采集器 7 与计算机 9 电连接，将每秒采集一次的差压数据存入计算机 9 数据文件中。

2) 循环冷却水流量计算:

垂直弯管的内直径为 1220mm，即 1.212m，所以 $r_0=0.606\text{ m}$ ，曲率半径为

$R=1.250\text{ m}$ ， $x=\frac{R_0}{r_0}$ ，所以 $x=2.06$ ，带入(3)式 $C_{el}=\sqrt{2\pi r_0^2 \frac{(x^2-1)(x-\sqrt{x^2-1})}{\sqrt{x}}}$ 得到 $C_{el}=0.945801$ 值；

利用(4)式 $Q_w=C_{el}\sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}-gz}$ 求理想流体流量 Q_w ；其中 Δp 为垂直弯管 45° 角方向截面内外侧压力差，为采集系统采集数据； ρ 为流体的密度， kg/m^3 ，即水密度； g 为重力加速度，值为 9.8； z 为垂直弯管 45° 角方向截面内外侧高度差； $z=\Phi \times \cos 45^\circ$ ， Φ 为管路直径 1.212m，求得 $z=\Phi \times \cos 45^\circ =0.86\text{ m}$ ，将上述之带入(4)式，并取表一的第一行 $\Delta p=25649.37\text{ Pa}$ ，式得：
 $Q_w=3.937299\text{ m}^3/\text{s}$ 。

3) 装置标定:

对上述装置进行标定，标定目的在于确定流量系数 α 。具体方法分别用水银压差计测量差压，用阿牛巴流量计测量循环冷却水流量，从而对上述装置进行标定。具体标定方法如下：用水银压差计测量垂直弯管内外侧压差。流

体流量的测量在厂房外部的循环冷却水管 3 上测量。选择某一具有足够长直管段的位置安装阿牛巴流量计测量流经管道的流体流量。改变流量大小，从而对系数进行确定。

调节循环冷却水泵出口调节阀，流量从大到小，试验数据及计算结果如表 1 所示流量系数 α =实测流量/（4）式计算结果 Q_v （即通过垂直弯管的理想流量）=3.835717/3.937299=0.9742

表1 试验数据及计算结果

压差(Pa)	实测流量(m³/s)	自由涡模型		
		(4) 计算结果 (m³/s)	流量系数	平均流量系数
25649.37	3.835716572	3.937298883	0.9742	0.9716
24299.64	3.678025009	3.780864524	0.9728	
20988.64	3.306209908	3.366469715	0.9821	
16282.57	2.578750658	2.668961558	0.9662	
14028.57	2.175814076	2.259881675	0.9628	

从表 1 看出在流量较大的变化范围内，流量系数随流量变化很小，证明循环冷却水流量只是垂直弯管内外压力差的函数。然后求流量系数 α 的平均数即可。流量系数 α =0.9716，标定后将水银压差计和阿牛巴流量计取下。

经过上面标定可知，流体的流量值为公式（5）
 $Q_v = \alpha Q_v = 3.937298883 \times 0.9716 = 3.835716572 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

4) 装置投运、实际测量与数据显示:

根据数据处理软件 10 计算得到循环冷却水流量，且通过计算机 9 的显示器 11 进行显示。数据处理软件 10 的编制依据自动控制与计算机处理技术为本领域熟知的技术。

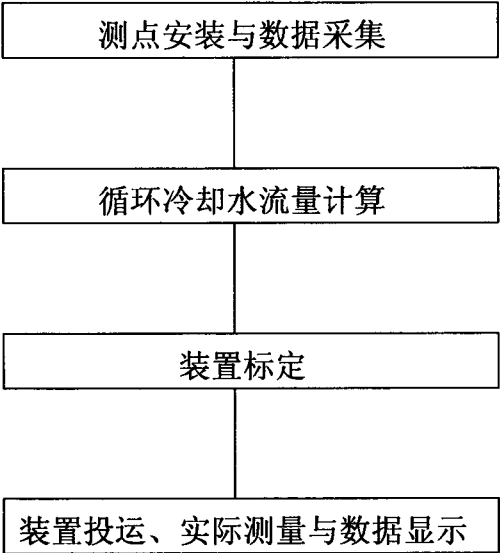


图 1

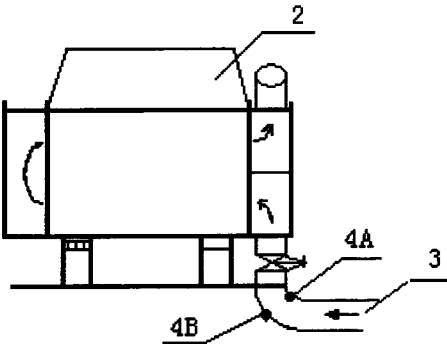


图2

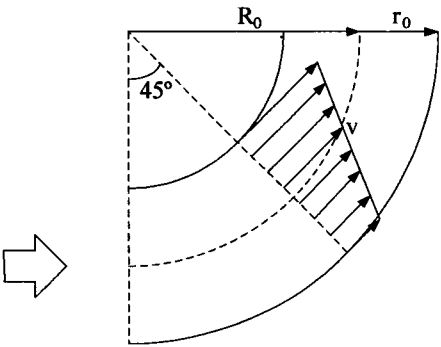


图 3

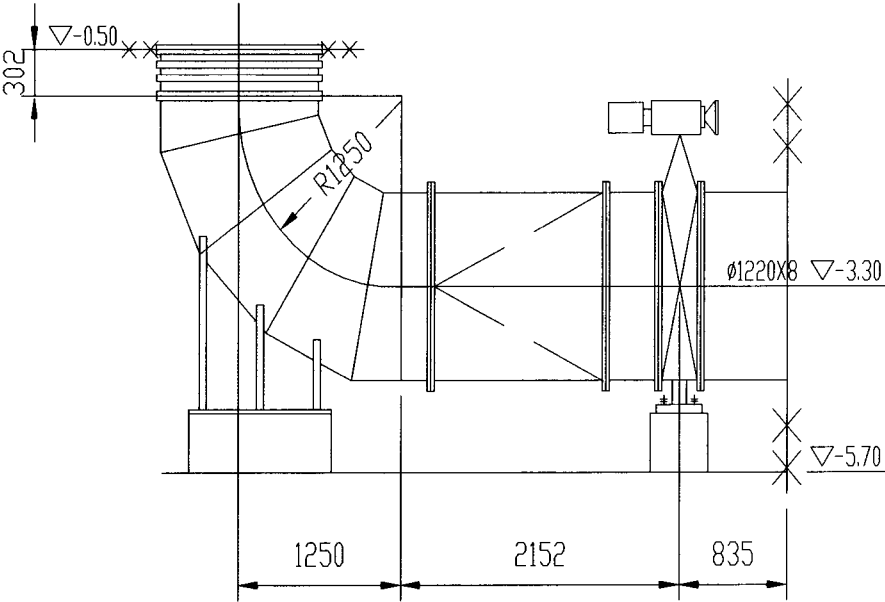


图 4

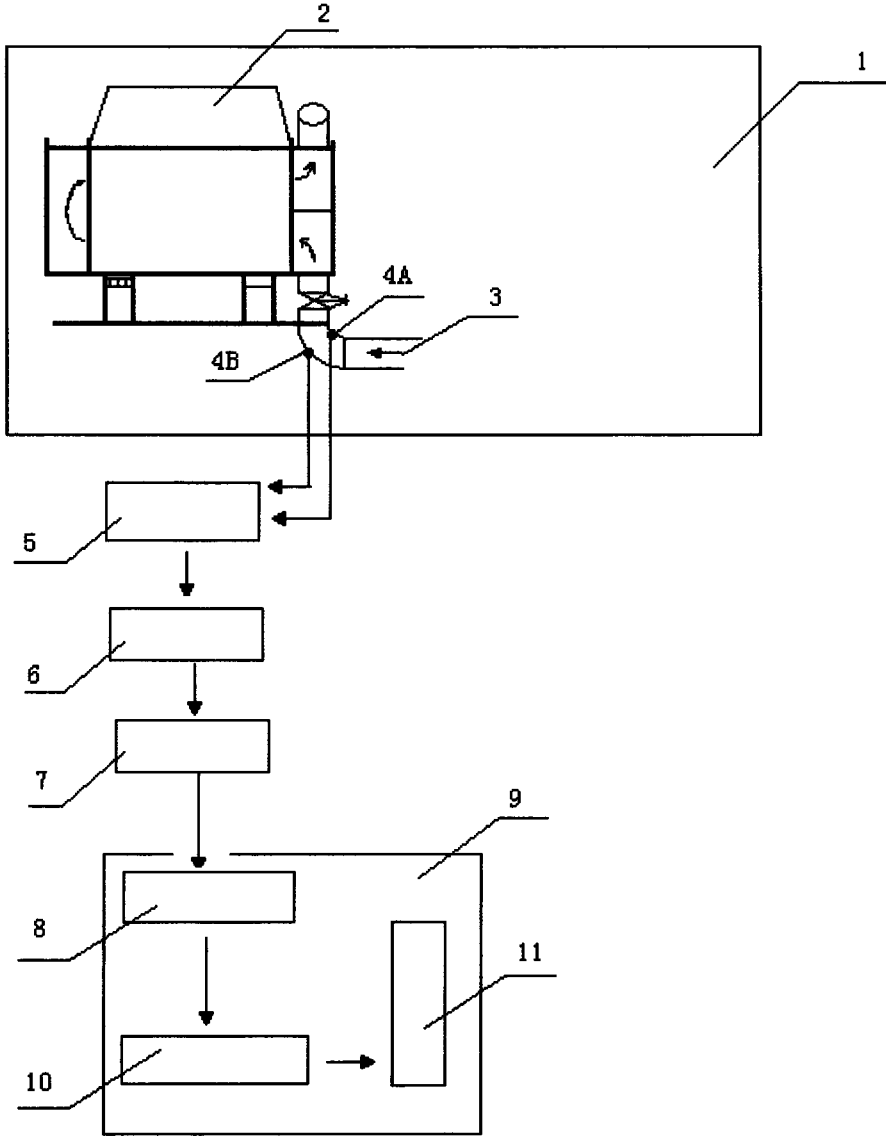


图 5