

AKOMA2000 煤粉取样装置技术改进与工程应用

国网山东省电力公司电力科学研究院

成果主要创造人：侯凡军 段传俊

成果参与创造人：郝卫东 胡志宏 郭玉泉 刘福国 杨兴森 周新刚

1、创新背景

随着国家对火力发电机组环保和节能要求的逐渐提高，采用直吹式制粉系统的大型机组得到了广泛应用。在直吹式制粉系统中，影响锅炉安全经济运行的两个主要问题是一次风粉分配的均匀性和煤粉细度大小。

在直吹式制粉系统中，往往一台磨煤机同时有多根出口煤粉管，各煤粉管道的煤粉浓度是不同的。若这种浓度不平衡过大，会影响各燃烧器的风煤比，造成燃烧效率下降、燃烧不稳定、结渣、增大 NO_x 的产生等，一般浓度偏差最好控制在 10% 以内。但由于没有合适的在线测量技术，电厂在运行中一直无法对直吹式制粉系统中的煤粉浓度状况进行检测，无法了解煤粉的实际状况。目前国内外的电厂均是在机组停机时，通过测量纯空气的流速来调整各煤粉管道的流动阻力。实际上，有煤粉和没有煤粉时煤粉管道内的流动状况是不同的，在单相流动（空气）时得到的结果并不能如实反映煤粉两相流的流动状况。

同时煤粉颗粒的大小对燃烧和磨煤机效率也有较大影响。煤粉过细和过粗都会降低锅炉机组效率。若煤粉过粗，会导致飞灰含碳量增加，锅炉燃烧效率下降；若煤粉过细，将使煤粉着火提前，造成燃烧器喷口结焦，同时由于制粉系统出力下降，制粉电耗也会升高。正确的做法是根据入炉煤的变化情况及时调整煤粉细度，使整个锅炉机组效率保持最佳状态。若来煤煤质较差，在保证磨煤机出力和整个发电机组出力的前提下，可以适当降低煤粉细度，降低飞灰含碳量；若来煤煤质较好，可以适当提高煤粉细度，在飞灰含碳量基本不变的情况下，提高制粉细度出力，降低制粉系统制粉单耗。同样由于没有准确的在线测量煤粉细度，电厂就无法根据煤质变化对煤粉细度及时进行调整。

为解决这个问题，近年来，国内外都在开展煤粉在线测量技术研究，如微波法、电容法、电荷法、超声法等。但这些方法不易准确，通用性不强，至今常用于锅炉试验定量分析地还是在两相气流中对固体颗粒直接取样的方法进行浓度和细度的测量。为了确定煤粉浓度和细度，只有从一次风固两相流中取出煤粉进行测定，如何从一次风固两相流中获得具有代表性的煤粉样成为关键。

AKOMA2000 煤粉等速取样装置是由德国的 e.on 工程公司开发的具有世界领先水平的燃煤电厂煤粉等速取样装置，该装置在 2000 年左右根据中德合作项目“电力环保测试车培训”首次引入中国。该装置能满足火力发电厂制粉系统常规性能试验和优化调整试验的要求，能检测煤粉细度、一次风速、煤粉浓度和均匀性，以指导制粉系统调整和锅炉燃烧优化调整工作，从而达到优化燃烧、提高锅炉效率、降低锅炉污染物排放的目的。适用于锅炉热效率试验、制粉系统性能试验、锅炉性能试验等场合。在国内各省电科院、各大电力公司等科研单位均有很好的应用，现在全国还在使用的大约有 60 多套，价值 4000 多万元。

山东电力研究院也引进了 2 台 AKOMA2000 煤粉等速取样装置，在省内火力发电厂制粉系统调整试验中发挥了很大作用。在长期使用 AKOMA 煤粉取样装置过程中，主要发现存在以下不足：

(1) 只能用于静压平衡式单点煤粉取样，而且只能进行静压差为 0 的静压平衡等速取样，这样就无法对不同取样条件下的取样误差进行研究，实际上很多煤粉取样装置都是在不等速条件下进行的。

(2) 由于一次风管内为气固两相流，流动状况复杂，需要煤粉取样装置调节灵敏，才能跟踪上一次风管内压力的波动。在流场多变的取样环境下，AKOMA 的调门有时会全开或全关，调节品质变差，影响了煤粉取样的准确性。

(3) 仪器维修费用高，更换零件需要进口，价格昂贵，维修周期长。

(4) 应用 AKOMA 煤粉取样装置完整地取一次样至少需要 20 分钟，劳动强度大，仪器粗重，至少需要 3 个人才能进行取样，极大限制了其在现场的推广应用，只有在进行比较重要的考核试验时才用。

其中最关键的问题是控制差压定值的选择和调节。AKOMA2000 采用静压平衡法等速取样原理，即认为如果将煤粉管道内静压和探头内的静压的差值控制在零附近，就可以实现等速取样。而在实际使用过程中发现，由于气固两相阻力的影响，零压控制并不能真正实现等速，煤粉取样存在较大误差。

综合上述，对 AKOMA2000 煤粉取样装置进行改进、提出新的煤粉取样方法、研制新的煤粉取样装置是非常必要的，可以提高煤粉取样的准确性和代表性，使锅炉的燃烧调整达到真正有根有据，避免盲目调整，对于防止锅炉受热面因燃烧负荷分配不均而导致局部过热及沾污结渣，提高燃烧效率，降低飞灰含碳量等均有重要意义。

2、解决方案

2.1 AKOMA2000 煤粉等速取样系统介绍

图 1 为 AKOMA2000 煤粉等速取样装置示意图，其主要具有以下特点：

(1) 实时等速和全面取样，取样枪内分布由两根压力传输管，分别测量煤粉管内和取样管内的静压，自动控制装置内部安装差压传感器、快速电磁阀和执行机构等部件。

(2) 取样过程中能实施测量煤粉管和取样管内的流速，使它与煤粉管道内的流速相等，从而实现准确的等速取样。

(3) 装置结构设计紧凑合理、内部部件安装方便牢固可靠，设备操作灵活方便，能在现场长时间准确测量。

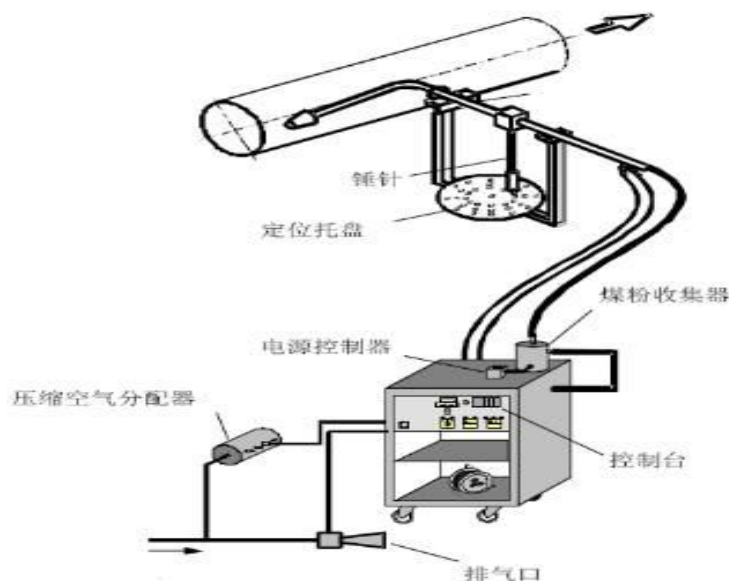


图 1 AKOMA2000 煤粉等速取样装置

2.2 粉等速取样原理

电厂锅炉煤粉取样就是利用取样探头从一次风管道中取出少量含尘气体，用分离设备将这部分气体中煤粉分离出来进行称重或筛分。

对气固两相流进行取样时，会出现以下四种情况：吸入速度等于、小于或大于来流速度；或吸入速度虽与来流速度相等，但取样探头没有正对气流方向。后三种情况都会使探头进口附近的气流流线改变方向。由于固体颗粒的密度比气体颗粒的密度大得多，所以当取样使吸入速度和来流速度不相等时，固体颗粒会因惯性力的作用而脱离弯曲的气流流线，造成取样误差。

煤粉取样的第一个原则是必须实现等速取样。所谓等速取样，即让进入取样探头进口的吸气速度与探头前的来流速度相等。若取样速度低于来流速度（取样速度为 W ，来流速度为 W_0 ），则进入探头的流量将小于管道中原来的流量，部分气流绕向探头外侧，气流流线向外扩张。探头边缘气流中的微小颗粒就会随气体向外绕流，而相同位置的较大颗粒却由于惯性冲入取样探头内，造成取样浓度偏高和样品中的粗颗粒组分增加，平均粒径变大；若取样速度大于来流

速度，探头入口附近的气流流线收缩，结果与上面相反，导致取样浓度比实际浓度低，且所取样品偏细；当取样探头不正对来流方向时，气流进入探头时要改变流向，探头边缘部分气流中较大颗粒因惯性会无法进入取样探头内，造成取样浓度偏低，样品偏细；当只有当取样速度与来流速度相等时，所取样品的数量和大小才与实际一致。各种取样工况导致测量偏差的结果如图 2 所示。

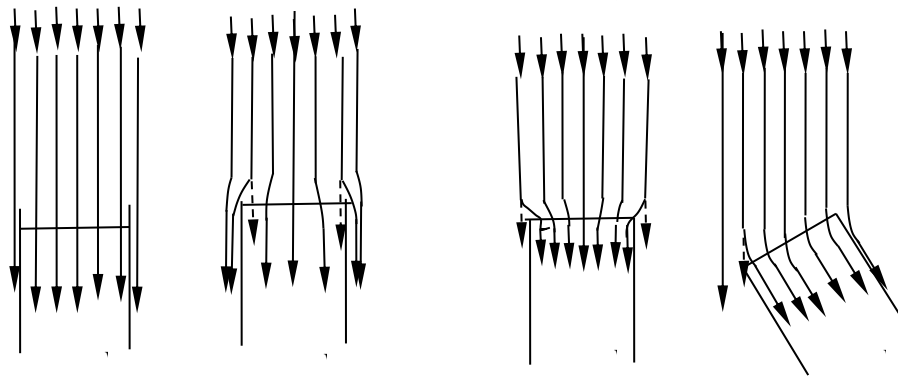


图 2 煤粉取样工况

煤粉取样的第二个原则是保证所取的样在测量管道的整个截面上具有代表性。在大多数情况下，需要在横截面的几个不同位置进行取样。ISO9931 规定的取样代表点见图 3。

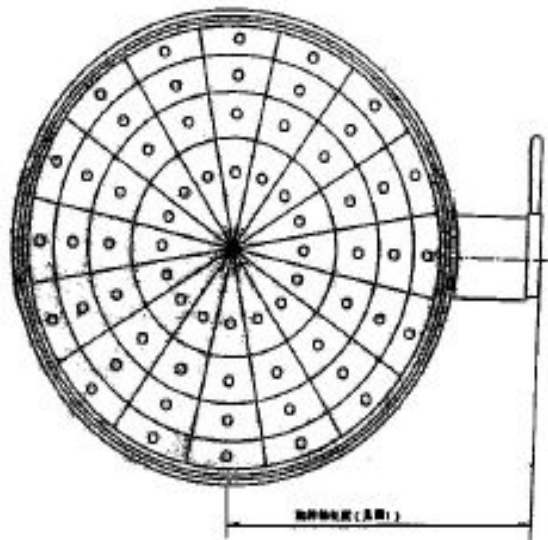


图 3 ISO9931 规定的取样代表点

2.3 AKOMA2000 煤粉等速取样原理

AKOMA2000 煤粉等速取样装置采用弯头式煤粉取样枪，煤粉取样采用静压平衡式等速取样原理。弯头式取样探头的结构如图 4 所示。探头外侧开有测压孔用于测量来流静压，探头内侧开有测压孔用于测量探头内气流静压。若认为被取样气体为理想流体，不考虑阻力的影响，根据伯努里方程：

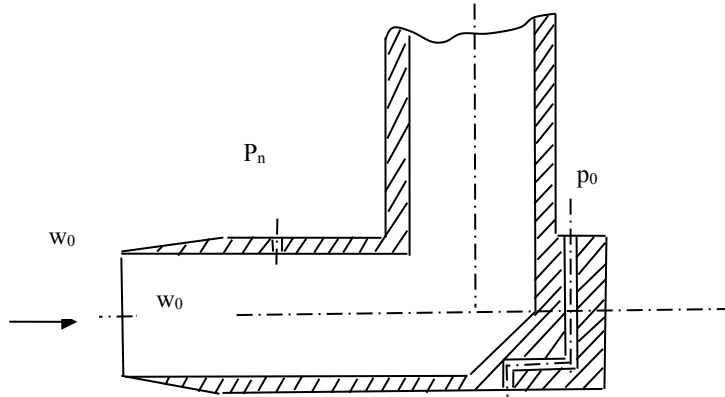


图4 静压平衡式取样探头

$$\frac{\rho_0 w_0^2}{2} + p_0 = \frac{\rho w^2}{2} + p_n \quad (1)$$

式中 p_0, p_n —来流和探头内的静压, Pa;

w_0, w —来流速度和吸入速度, m/s;

ρ_0, ρ —来流和探头内气体密度, kg/m³。

气体被吸入前后温度相同, 探头内外的气体密度相等, $\rho_0 = \rho$, 当取样探头内的静压和探头外的静压相等, 即

$p_0 = p_n$ 时, 由上式可得 $w_0 = w$, 即吸入速度与来流速度相等, 可以实现等速取样, 但实际上只保持内外静压相等往往达不到等速取样的目的, 原因是实际气流都具有粘性, 在从取样进口至内静压孔一段距离内存在各项阻力损失, 阻力损失的绝对值虽然很小, 但是足以影响等速取样的准确性。考虑阻力影响后, 伯努里方程变为:

$$\frac{\rho_0 w_0^2}{2} + p_0 = \frac{\rho w^2}{2} + p_n + \sum \Delta p \quad (2)$$

式中 $\sum \Delta p$ —各项阻力损失之和, Pa;

总阻力损失 $\sum \Delta p$ 为探头进口阻力损失、沿程摩擦阻力损失及速度再分布损失之和。总阻力损失可以采取适当措施适当减小, 但却不可避免。

由于阻力损失的存在, 当 $p_0 = p_n$ 时, 由上式可得 $w_0 < w$, 即吸入速度小于来流速度, 其相对不等速程度高达 -25.1~ -29.5%, 远远地偏离了等速取样工况, 造成取样不准。只有在 $p_0 > p_n$ 时才能达到等速的要求。

为了减小因阻力损失造成的取样误差, 可以通过增大探头入口流通面积的方法, 降低流速, 增加静压, 自动补偿探头进口段的总阻力损失。图5为补偿式静压平衡式等速取样的结构图, 在进口段后紧接着是一扩压段, 在扩压段内的静压 p_2 大于无扩压段时的静压 p_n , 当增加的静压等于进口至静压测孔间的阻力损失时, 就可以实现静压零位等速取样, 即 $p_2 - p_n = 0$ 时, $w_1 = w_0$ 。以上分析都是在气体单相流的条件下进行的, 当时气固两相流时, 还要考虑

气固两相流的阻力损失，而这个问题变得非常复杂。在气固两相流状态下，即使采用补偿式静压零位探头，也不能保证实现等速取样。

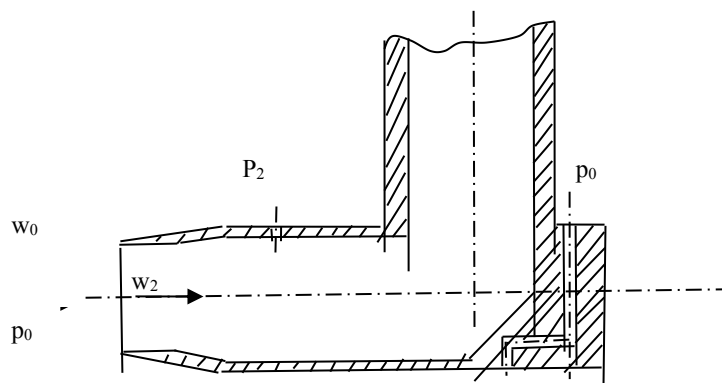


图 5 补偿式静压平衡探头

2.4 静压不平衡煤粉等速取样原理

在如何实现等速取样的问题上，先前的研究者一直拘泥于如何实现静压平衡，即 $p_0 - p_n = 0$ 。一种方法是忽略阻力损失的影响，认为 $p_0 - p_n = 0$ 时， $w = w_0$ ，但实际上 $w < w_0$ ，取样误差是客观存在的，虽然通过全截面取样可以适当减小取样误差；另一种方法是通过取样探头结构的改变，通过扩大容积提高静压来补偿阻力损失，使 $p_2 - p_n = 0$ 。如前面所述，由于气固两相流的影响，也无法实现真正等速。实际上，根据公式（2），只要保证 $p_0 - p_n = \sum \Delta p$ ，就可以使 $w = w_0$ ，实现等速取样，但其中有两个关键问题要解决：

一是 $\sum \Delta p$ 的准确数值。在纯空气流过时，可以根据阻力计算公式计算出总阻力损失的大小，试验结果表明，在正常一次风速范围内，在不同流速条件下，总阻力损失值变化不大。当实际气固两相流流经取样探头时，总阻力损失 $\sum \Delta p$ 与纯空气时不同，要想在气固两相流状态下计算出总阻力损失在理论上是非常困难的。可以采用试验标定的办法解决此问题：让已知细度的煤粉颗粒流经一次风管路，在不同差压下进行煤粉取样并分析样品细度，样品细度与原样品细度最接近的工况下的差压即为在气固两相流状态下总阻力损失 $\sum \Delta p$ 。

二是如何保证差压始终维持与总阻力损失相同。事实证明，靠人工调节是无法满足要求的，只有采用先进的控制技术和方法才能满足要求。后面会介绍通过新设计开发的双调节差压控制技术可以满足静压不平衡等速取样方法对差压控制的要求。在现场进行煤粉取样时，通过双调节静压不平衡取样装置，保证控制差压为标定得出的总阻力损失，即可实现等速取样。

3、具体过程

3.1 AKOMA2000 煤粉等速取样装置控制过程

图 6 展示了利用控制阀进行人工控制建立零压的取样装置结构图。根据采集到的差压信号来调节控制阀的开度，将取样头差压维持在零压附近，实现煤粉气流的等速取样。采用零压钟锤取样针的最大好处就是只需要安装一个测点就可以扫描整个端面。在煤粉管线上按等面积原理进行取样点划分。

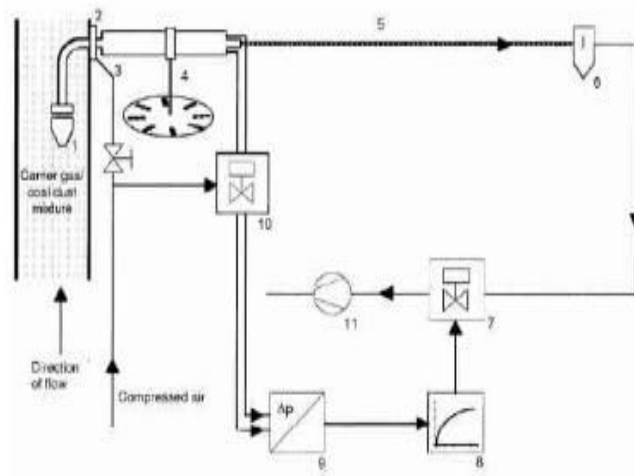


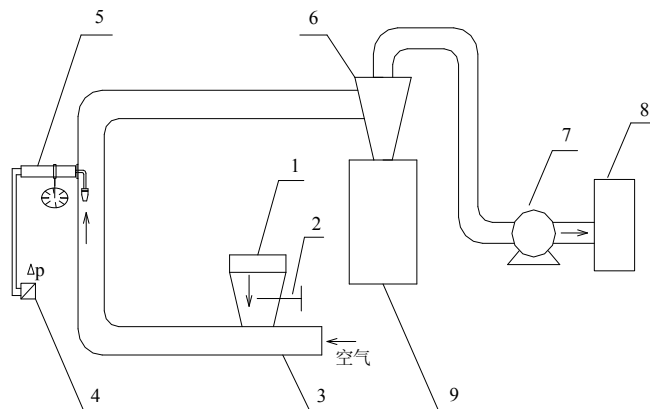
图 6 煤粉取样头零压的自动控制系统图

3.2 AKOMA2000 煤粉等速取样装置控制过程的改进

根据静压不平衡煤粉等速取样原理，只要将煤粉等速取样装置控制系统的差压定值控制为 $\sum \Delta p$ ，即可实现煤粉取样时的真正等速。

可通过试验标定的方法获得 $\sum \Delta p$ 的准确数值。让已知细度的煤粉颗粒流经一次风管路，在不同差压下进行煤粉取样并分析样品细度，样品细度与原样品细度最接近的工况下的差压即为在气固两相流状态下总阻力损失 $\sum \Delta p$ 。

根据以上思路，设计并安装了煤粉取样装置差压定值标定试验台，图 7 是试验台示意图。试验台由煤粉仓、给粉机、送粉管道、旋风分离器、排粉风机、布袋除尘器等组成。试验前先将某一细度的煤粉样品放入煤粉仓内，并将煤粉取样枪伸入送粉管道内。开启排粉风机，系统通风，送粉管道风速控制在 25m/s 左右。开启排粉风机，煤粉仓中的煤粉落入送粉管道，与空气混合形成气固两相流，调节排粉风机转速，将煤粉浓度控制在 0.3~0.5kg 煤粉/kg 空气范围内，使用 AKOMA2000 煤粉等速取样装置进行全截面煤粉取样，控制差压定值分别取 0Pa、20Pa、40Pa、60Pa、80Pa、100Pa、120Pa，将取样得到的煤粉样品进行细度化验，找到与煤粉仓中已知煤粉细度最接近的工况，在相应控制差压定值附近再取几个差压定值，直至找到最佳控制差压定值。



1—煤粉仓 2—给粉机 3—送粉管道 4—差压变送器 5—煤粉取样枪 6—旋风分离器 7—排粉风机 8—布袋除尘器

图 7 煤粉取样装置差压定值标定试验台

取不同细度的煤粉样分别进行控制差压定值标定试验，部分试验结果见表 1。

表 1 煤粉取样装置差压定置标定结果

	样品 1	样品 2	样品 3
实际细度 R90/%	8.6	18.5	28.7
取样细度 R90/%	8.3	18.2	28.4
差压定值/Pa	82	85	86
差压定值的平均值 /Pa	84.3		

可见在现有试验台条件下，将差压定值控制在 84.3Pa 左右，即可实现煤粉的等速取样。当然这个差压定值并不适用于所有现场条件，在进行现场试验前，应根据现场的实际试验条件，如煤粉细度、一次风管道内径、一次风管道布置等，在试验台上进行标定试验，得到差压标定结果后，然后再到现场进行实际取样。

3.3 双调节静压不平衡煤粉等速取样装置的研制

为了改变国内没有全自动煤粉等速取样装置的现状，决定研制国产煤粉自动取样装置。通过长期研究和试验，克服了关键技术难点，研制了双调节静压不平衡煤粉等速取样装置。图 8 为双调节静压不平衡煤粉等速取样装置控制系统图，图 9 和图 10 为实物图。

双调节静压不平衡煤粉等速取样装置的主要特点是：

(1) 调节品质好。采用两级协调控制，即同时调节抽气量和压缩空气压力，当调门开度过大或过小时，通过调节压缩空气压力，使调门开度回到线性度较好的开度范围内，克服各种干扰的影响，极大地提高了调节品质。

(2) 控制功能全面，应用范围广。适用于静压平衡式单点煤粉取样、预测式单点、多点煤粉取样；适用于采用布袋除尘和旋风分离除尘等不同分离方式的煤粉取样装置，图 6 为预测流速式煤粉自动煤粉取样装置控制系统图。

(3) 控制方式灵活，调节参数可以人为调节。通过人为改变调节参数，可以对控制方式进行优化，如在单点静压平衡取样方式中，通过改变差压定值，可以研究在不同条件下的各种煤粉取样装置特性。

(4) 自动控制部分和取样部分分离布置，大大减轻了煤粉取样仪器的体积和重量。

双调节静压不平衡煤粉等速取样装置主要由煤粉取样枪、电加热取样管、取样阀、电加热分离设备、射气抽气器、传压管、差压变送器、控制器、调节阀 A、调节阀 B、电磁阀 A、电磁阀 B、电磁阀 C、电磁阀 D、电磁阀 E 组成。

煤粉取样枪的作用一方面是将煤粉颗粒从气固两相流中抽取出来，另一方面是通过取样探头的两个静压孔测量差压信号。电加热取样管的作用是将煤粉取样枪与电加热分离设备连接起来。取样阀的作用是打开或关闭取样管路。电加热分离设备的作用是将煤粉颗粒从气固两相流中分离出来。射气抽气器的作用是当压缩空气流过时会产生足够大的负压，将送粉管道中的风粉气流抽吸出来与压缩空气混合后排入大气。传压管的作用是将煤粉取样枪所测静压信号输入差压变送器。差压变送器的作用是将煤粉取样枪所测差压信号转换为标准电信号后输入控制器。控制器的作用是实现煤粉取样装置的差压自动控制和电磁阀组的顺序控制。调节阀 A 的作用是接受控制器输出信号调节抽气量的大小。调节阀 B 的作用是接受控制器输出信号调节射气抽气器前压缩空气压力大小。电磁阀 A 和电磁阀 B 的作用是对传压管和静压孔进行吹扫，防止管路积粉。电磁阀 C 和电磁阀 D 的作用是在管路吹扫时关闭以保护差压变送器超量程损坏，在吹扫结束后打开，接通测量管路使差压变送器正常测量。电磁 E 的作用是在差压变送器每次测量前打开使两边静压平衡。

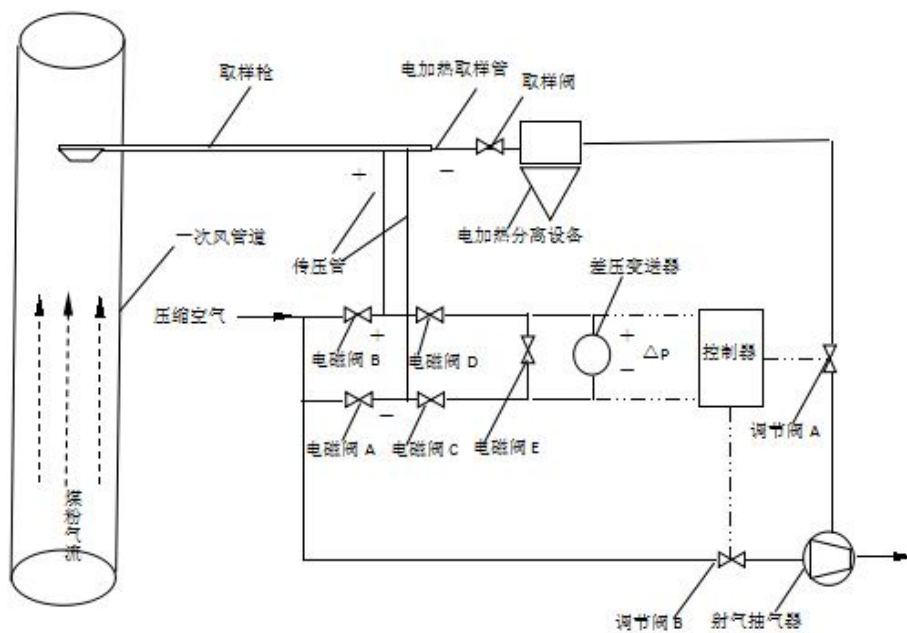


图 8 双调节静压不平衡等速取样系统示意图

工作过程和原理如下所述：煤粉取样前，对煤粉分离设备和取样管路进行电加热，加热到设定温度后保持温度恒定。将取样装置通入压缩空气，压缩空气通过射气抽气器后会产生负压，关闭取样阀，检查电加热煤粉分离设备的真空，防止空气泄漏。真空检查完毕后，将煤粉取样枪放入一次风管道中，准备取样。控制器接通电源，通过控制器画面输入等速取样所需要的差压定值，然后打开取样阀，按控制器开始取样按钮开始正式取样。控制器工作主要包括顺序控制和自动控制。顺序控制过程如下：首先关闭电磁阀 C 和电磁阀 D，打开电磁阀 A 和电磁阀 B 对传压管和取样探头上的静压孔进行吹扫，数秒后关闭电磁阀 A 和电磁阀 B，然后打开电磁阀 E，使差压变送器输入差压为零，然后关闭电磁阀 E。打开电磁阀 C 和电磁阀 D，将所测静压输入差压变送器进行测量，几十秒后，关闭电磁阀 C 和电磁阀 D，停止测量。然后打开电磁阀 A 和电磁阀 B 重新进行吹扫，重复进行上述过程直至取样结束。自动控制过程如下：在正常测量阶段，控制器将变送器差压信号值与输入差压定值相比较。若实测差压值大于差压定值，表明取样枪探头抽吸速度小于管道流速，控制器发出信号，同时开大调节阀 A 和调节阀 B，使抽吸速度增大，实测差压值会逐渐变小直至恢复到差压定值；若实测差压值小于差压定值，表明取样枪探头抽吸速度大于管道流速，控制器发出信号，同时关小调节阀 A 和调节阀 B，使抽吸速度减小，实测差压值会逐渐变大直至恢复到差压定值。差压定值一般很小，精确控制难度很大，因此采用了双调节差压控制方式，即同时控制调节阀 A 和调节阀 B。当调节阀 A 的开度超出其线性范围后，可通过改变调节阀 B 的开度，改变压缩空气压力，使调节阀 A 重新回到线性范围，这样就极大提高了差压控制精度。到打设定的取样时间后，取样会自动停止，所有电动阀将不再动作。将煤粉取样枪从管道中取出，打开电加热分离设备，将煤粉取出进行称重和筛分，就完成了—次完整的煤粉取样工作。



图 9 双调节静压不平衡煤粉等速取样装置控制部分



图 10 双调节静压不平衡煤粉等速取样装置取样部分

4、实施效果

在某火力发电厂一台配备中储式制粉系统的煤粉锅炉上进行煤粉取样试验。分别采用三种方式进行取样：采用静压平衡取样原理的 AKOMA 煤粉等速取样装置、采用经过技术改进的 AKOMA 煤粉等速取样装置和静压不平衡煤粉等速取样装置。试验时分别在制粉系统小筛子处和一次风管道上同时进行取样，试验结果如表 2 所示。

表 2 不同型式煤粉取样装置取样试验结果

	静压平衡取样原理的 AKOMA 煤粉等速取样装置	经过技术改进的 AKOMA 煤粉等速取样装置	静压不平衡煤粉等速取样装置
差压定值/Pa	0	85	85
取样细度 R90/%	15.5	15.5	15.5
实际细度 R90/%	13.6	14.3	14.6
取样误差/%	-12.3	-7.7	-5.8

取样结果表明，采用静压平衡取样原理的 AKOMA 煤粉等速取样装置的煤粉取样误差为-12.3%，采用经过技术改进的 AKOMA 煤粉等速取样装置的煤粉取样误差为-7.7%，静压不平衡煤粉等速取样装置煤粉取样的误差为-5.8%。采用经过技术改进的 AKOMA 煤粉等速取样装置和静压不平衡煤粉等速取样装置进行煤粉取样的误差明显减小。

改进后的 AKOMA2000 煤粉等速取样装置取样更加准确，在山东省内各火力发电厂制粉系统调整试验和锅炉燃烧优化调整试验中得到了更广泛的应用，取得了较好的经济效益。

5、持续改进措施

AKOMA2000 煤粉等速取样装置经过技术改进后，煤粉取样更加准确，应用范围更加广泛，收到火力发电厂客户的普遍欢迎。在使用过程中，发现还有以下问题需要改进和完善：

(1) 煤粉取样枪的自动移动。为了实现全截面取样，操作时需要两个人配合，操作人员劳动强度大，取样时间长，工作效率低。如果能实现煤粉取样枪的自动移动，在执行机构的带动下取样口自动移动到指定位置，实现全截面取样，可以大大节省人力，提高工作效率。

(2) 通过大量的工程应用，证明经过技术改进后的 AKOMA2000 煤粉等速取样装置和新研制的双调节静压不平衡煤粉等速取样装置，取样技术先进，取样准确性大大提高。如果将双调节静压不平衡煤粉等速取样技术与激光粒度在线技术相结合，就可以实现火力发电厂煤粉细度的在线测量，实现煤粉细度测量的质的飞跃。