

美国燃气协会燃气互换性公式评述（第一部分）

□ 中国市政工程华北设计研究总院（300074）李猷嘉

摘要：美国燃气协会（A.G.A）的燃气互换性公式即美国燃气协会36号研究公报发表的公式，在我国的一些参考书中早已有所介绍，但至今未看到这些公式的理论基础、假设和形成的详细资料。根据计算结果，判定两种燃气能否互换时，公告原本分成两类，即最佳值（Preferable）和不良值（Objectionable），无中间挡。我国有的文献中^{〔9〕}分成合适、勉强和不合适3挡，但未说明“勉强”挡的出处和准确的内涵。范围的判定标准对这一方法的应用关系极大。从原文看，“中间挡”已突破了最初的理论假设条件，是在做燃具应用试验中出现的一些可允许情况，与原始的调定方法有关，是专对补充燃气而言，且并无“勉强”之意。本文引用了原文中的论述，可作进一步的研究。

在已知所有的燃气互换性方法中，只有美国燃气协会的36号公告和韦弗法采用了数学公式分析的方法，曾做了大量的试验，内容十分丰富，可看到的资料也比较完整。本文尽可能的对36号公告法的试验结果作介绍，以加深对其研究思路的理解。对认识当前新形势下燃气互换性的问题也会有所帮助。

1 概述

1.1 前提

在已知的燃气互换性方法中，均以民用大气式燃烧器为主。各国的研究都是以本国可能遇到的燃气组分变化状况为基础。从单一指数、发展到多指数法、图解法和其他方法等。采用的手段都是通过实验。由于燃气燃烧过程的复杂性，至今对一些燃烧机理或原理的分析还是以实验数据为依据。由于试验所采用的状态条件也不完全相同，所得数据也有差异。至今虽有国际标准作依据，但在燃气界至今仍未统一。最简单的如燃气的热值就是一例。同一燃气在各国采用不同的状态标准，比较时需要换算，我国也不例外。

预测燃气互换性的方法虽多，必须首先弄清每一种方法产生的国情状况，形成的过程，方法的特点、使用的条件和应用范围等；其次，应结合本国情况，继续开展实验研究，才能从根本上解决问题。

美国在天然气的发展中形成了3类基础负荷天然气。基础负荷气定义为满足民用、商业和工业使用，其日负荷变化不大的那部分燃气。基础负荷气不包括随室外温度变化而负荷变化很大的那部分燃气。调峰用的燃气则称为补充燃气。下面3类天然气常作为全国各类燃气的调定气（或调节气），即：

（1）高热值天然气（热值为41.54MJ/m³或1 115Btu/cf，相对密度为0.64，燃烧的理论空气量为10.575m³/m³，组分为CH₄—83%；C₂H₆—16.0%；CO₂—0.5%；N₂—0.5%。沃泊指数为51.93MJ/m³）。

（2）高甲烷天然气（热值为35.73MJ/m³或959Btu/cf，相对密度为0.558，燃烧的理论空气量为9.0m³/m³。组分为：CH₄—94.5%，惰性气体—5.5%，沃泊指数为47.83MJ/m³）。

（3）高惰性气体（含量）天然气（热值为37.26MJ/m³，或1 000Btu/cf，相对密度为0.693，燃烧的理论空气量为9.37m³/m³。组分为：CH₄—71.4%，

C_2H_6 —14.0%, C_3H_8 —1.0%, CO_2 —0.5%, N_2 —13.1%, 沃泊指数为 $44.76MJ/m^3$)。(状态参数为温度60F, 约为 $15.5^\circ C$; 压力30英寸汞柱, 约为 $1.013 \times 10^5 Pa$; 沃泊指数值为笔者所加)。

1.2 补充燃气

互换性研究的目的是在高峰负荷时作为补充燃气使用(置换)的可互换性。在当时条件下, 研究所及的补充燃气有:

(1) 两种热值的增碳水煤气, 以及它与不同比例基础负荷气掺混的混合燃气。

(2) 两种热值的焦炉气, 以及它与不同比例基础负荷气掺混的混合燃气。

(3) 不同比例的丁烷气和不同比例的发生炉气掺混的混合燃气。

(4) 不同比例的丁烷气与不同比例的丁烷改制气的混合气, 以及它与基本负荷气的混合气。

(5) 不同比例的丁烷气与不同比例水煤气的混合气, 以及它与基本负荷气的混合气。

(6) 上述3种不同的比例基本负荷气互混的混合气。

从上述可能混配的置换气方案看, 理论上有限多个, 但实际上受能否互换的条件所限, 数量可大大减少, 但试验规模仍然很大。

1.3 研究方法

采用一种或几种精密燃烧器, 可在一定的工况条件下(压力、入力(负荷)、一次空气量和效率等)用仪器迅速测出极端条件(Extreme condition)下的数据。所谓极端条件是指发生离焰、黄焰端(Yellow tips)和回火等时的一次空气量和选定的热入力值。离焰、黄焰端和回火是稳定火焰的3个基本条件, 但判定应遵循严格的规范标准^{[2], [3], [6]}, 例如将火焰从黄焰端到离焰分成11个等: +5级为离焰(极端), 有 $\geq 25\%$ 的火孔离焰。-5级为黄焰端, 火焰的外焰端明显有浅黄色, 火焰撞击时有积碳形成等, 文献6还有图示。甚至还有判别黄焰端和空气中尘埃引起黄焰端的方法或眼镜等, 并伴有照相记录。

由于影响火焰稳定性的因素很多, 除一次空气量、燃气的燃烧速度、火孔负荷(Port loading)外, 还有火孔大小和火孔深度等一些影响燃烧速度的因素等。在美国介绍大气式燃烧器的设计方法时深入的做了研

究, 有许多应遵循的图表数据^{[2], [4]}。这些数据都影响着美国互换性研究的方法。美国的互换性图以一次空气系数为纵坐标, 以火孔负荷(Port loading)为横坐标, 火孔负荷定义为^[6]:

$$\text{火力负荷} = \frac{\text{入力(输入热量)}}{\text{火力负荷}}$$

也即火孔负荷为单位火孔面积的热输出量, 或称作火孔热强度, 单位为 $MJ/h \cdot mm^2$ ($Btu/h \cdot in^2$)。

根据在精密燃烧器(Precision burner)上对各种燃气试验所得的数据, 按上述坐标体系可给出表达3种现象的曲线, 即离焰、黄焰端和回火的极限特性曲线(Characteristic Limit Curves)。这三条曲线就成为在一定工况下用来判断两种燃气能否互换的边界条件。研究工作的水平可用这些数据在试验中的复现性表示。美国燃气协会实验室根据试验所得数据整理成计算公式, 作为一个燃气互换性预测的必要条件, 而非充分条件。充分条件则用置换气与调定气互换指数允许的偏差量来表示。这是由于用户实际使用的燃具不同于精密燃烧器, 又由于用户燃具使用的所谓现场条件不同于实验室, 而且千差万别, 而真实用户的真实使用条件才是预测燃气能否互换的根本依据。如图1^[4]和图2所示^[2]。

图1中的中间范围即燃具的设计范围(Design Area), 也即满意的运行范围(Satisfactory operating Area)。图2中的⑤表示标准调定线。极限值相当于金属材料试验中的屈服极限, 满意的运行范围或标准

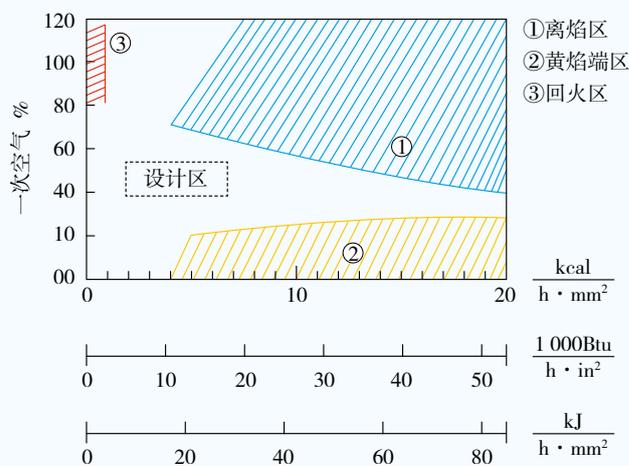


图1 天然气的离焰、黄焰端和回火的特性曲线(火孔直径2.7mm, 孔边距6.35mm, 单排火孔), 设计区即运行满意区。

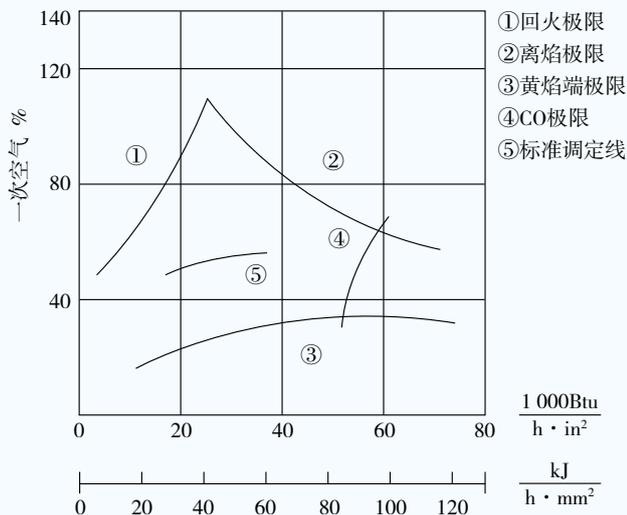


图2 一个本生燃烧器的火焰极限曲线

调定线相当于材料的许用应力，这一范围即燃具的互换范围。有的国家表示不完全燃烧的黄焰端的互换范围常取极限值的1/2。美国规定一个新型燃具出厂时必须附有类似图1中的满意运行范围区。文献4并指出这也是评价燃具适应性（Flexibility）的依据，其中入力和效率是最基本的质量要求，因为每种置换气一经确定后都有很长的使用时间。

2 互换性预测因素的选择原理

为研究和开发燃气互换性的求解公式，首先注意到的是燃气的化学组分对燃气燃烧特性的影响，特别是对着火速度或火焰传播速度的影响。各单一燃气的着火速度与一次空气百分数的关系，在各种书籍中均有介绍。速燃气体的组分，如 H_2 ，大大的加速了火焰的传播，易于发生回火的趋势和熄火时的噪声；缓燃气体的组分，如 CH_4 ，虽也有少量的回火趋势，但更易发生离焰现象。

图3所示为不同燃气的着火速度与一次空气百分数的关系曲线，如与单一气体的曲线相比可看出其火焰传播速度的最大值相当接近，但并不发生在相同的一次空气百分数值时。假设一个使用天然气的燃烧器按一次空气系数为65%调定（由图3可知，曲线所示的着火速度约为9cm/s），然后改烧热值为1400Btu/cf（52.16MJ/m³）的丁烷—空气混合气，则一次空气百分数很快上升到80%，火焰传播速度达到29cm/s^[5]，

后果是发生了回火。

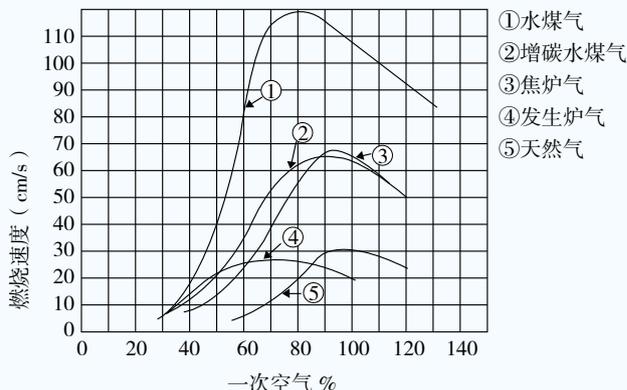


图3 不同燃气的燃烧速度曲线

由于上述现象，在美国燃气协会导出的燃气互换性公式都是以着火速度作为基础，在研究中也积累了大量的不同燃气火焰传播速度的数据。但不久就发现，如再按上述思路，已不能对开发新的公式提供可靠的基础^[5]。从美国大量的燃烧器设计经验来看，还有许多影响因素必须考虑到。如对5种不同火孔孔径的燃烧器用同一燃气进行试验，试验中保持一次空气百分数和燃气的流量为常值，就得到了5种不同的火焰速度。如火孔的孔径和一次空气百分数保持不变，又发现燃气的流量也有变化^[5]。这些在燃烧器设计中常遇到的问题使人们也意识到，要清晰的描述不同燃气燃烧速度的实际意义，必然会联系到燃具的运行特性所受离焰极限曲线特性的影响。因此，研究中直接应用这一类与火焰稳定性有关的特性曲线，与应用着火速度曲线相比，其优点是更易于测量和获得，且试验中的复现性更好。也说明用火焰特性的极限曲线作为互换性研究的基础，比单纯用着火速度更具有实践意义。

在采用含有液化石油气和饱和烃的高热值燃气作为天然气的置换气时，还须要引进一个极限值，即代表黄焰端出现的一个指标。黄焰端的极限曲线是比较燃气燃烧特性的又一个基础因素。于是，必须从离焰和黄焰端的极限特性研究中获得所需的大量数据：如一个燃烧器在已知的火孔负荷下运行，可将其一次空气的调节器（俗称风门）逐渐开启至发生离焰状态的一个点位；当逐渐关闭调节器，又可找出产生黄焰端的另一个点位。这是在同一火孔负荷下产生的两种现象。在火孔负荷相同时用空气调节器改变一次空气

的引入量,也可保证在每一条件下,燃烧器头部的温度为常值⁽⁵⁾。

同样,如用同一种燃气在一个已定的燃烧器上对不同火孔负荷和已知燃烧器头部温度条件下进行运行试验,就可得到该燃气完整的离焰和黄焰端的极限特性曲线。同时也指明了发生离焰和黄焰端时相应一次空气百分数的最大值和最小值。

这样所得的特性曲线只对应选定的试验燃烧器。如同一试验燃烧器继续采用不同燃烧特性的燃气作试验,就明显的可看出其中的差别,并可做出比较^[5]。用美国燃气协会(A.G.A)的精密燃烧器所得前述高热值天然气和高惰性天然气试验得到的典型曲线可见图4。

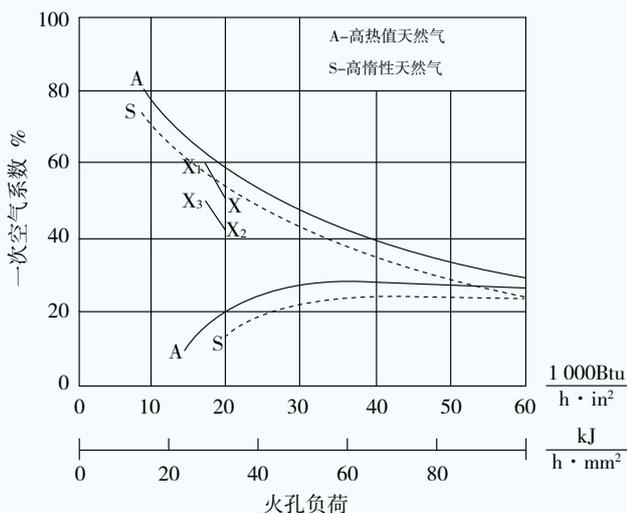


图4 在调定燃烧器上两种燃气运行中的互换效应

A.G.A.精密燃烧器上试验所得的曲线也适用于其它燃烧器和燃具,只要在替代时遵循采用与已知条件相同的比例(相同的一次空气引入量、火孔负荷、温度等参数),这样处理后,所得特性曲线的意义也就更大。其实质是,以前对一个已知燃烧器用统一燃气运行所得的特性曲线,将来对燃烧器的调定要参照这些极限曲线时,应预先作出所使用的燃烧器与获得曲线的燃烧器相同的假设。这是从互换性角度出发研究这些特性曲线的重要前提。众所周知,在已知温度下,任何燃烧器的运行性能都是根据火孔负荷、燃烧器头部的一次空气百分数和燃气的化学组分来控制的。燃气的热值和相对密度的变化用来表示燃烧器运

行点的变化,而化学组分的变化则表示极限曲线本身所发生的变化。燃烧器的调定应使其运行点处于离焰、回火和黄焰端极限特性曲线内的满意运行范围之内。作为互换性的要求,代表燃烧器的调定点,在由一种燃气置换另一种燃气后,必须保持在置换气的极限特性曲线范围之内。可以看出,即使在燃气的组分只有极少变化时也会发生不满意的结果。在此以高热值天然气和高惰性天然气的比较为例。在同一燃烧器上得到这两种燃气的离焰和黄焰端的极限特性曲线如图4所示。实线A代表高热值的天然气(调定气),虚线S代表高惰性天然气(置换气)。

如前所述,本文是介绍美国燃气互换性的求解公式,在此,先说明燃气互换前后,火孔负荷和一次空气系数发生变化的计算公式,以加深对这些公式应用的理解。公式导出的过程则随后有所论证。

$$PL_s = PL_a \left(\frac{h_s}{\sqrt{d_s}} \right) \left(\frac{\sqrt{d_a}}{h_a} \right) \quad (1)$$

$$PA_s = PA_a \left(\frac{\sqrt{d_s}}{A_s} \right) \left(\frac{A_a}{\sqrt{d_a}} \right) \quad (2)$$

式中 PL—火孔负荷MJ/h·mm²;

PA—一次空气系数%;

h—燃气的高热值MJ/m³;

d—燃气的相对密度;

A—每m³燃气燃烧所需的空气量m³;

角码a、s分别代表调定气和置换气。

根据运行条件的要求,假设本例中调定气a是在火孔负荷为32.7 kJ/h·mm²(20 000Btu/h·in²)和50%的一次空气百分数下调定,这一调定点用符号X表示。如改用置换气S气后,燃烧器又未曾调节变动,则火孔负荷会有所减小。减小量为:

$$\begin{aligned} PL_{X1} &= PL_X \left(\frac{h_s}{\sqrt{d_s}} \right) \left(\frac{\sqrt{d_a}}{h_a} \right) \\ &= 32.7 \left(\frac{37.26}{\sqrt{0.693}} \right) \left(\frac{\sqrt{0.64}}{41.54} \right) = 32.7 \times 0.86 = 28.1 \text{ kJ/h} \cdot \text{mm}^2 \end{aligned}$$

而一次空气百分数有所增加,增加量为:

$$PA_{X1} = PA_X \left(\frac{\sqrt{0.693}}{9.37} \right) \left(\frac{10.576}{\sqrt{0.64}} \right) = 0.50 \times 1.1744 = 0.5872 \text{ 即 } 58.72\%$$

这说明用高热值天然气调定后的燃烧器在改用高惰性天然气置换后,其运行工作点X₁已高于高惰性天然气的离焰极限曲线值(见图4中X₁的位置),会发

生离焰。显然，如调定点X置于调定气的极限曲线上（一次空气系数接近60%—见图4），则置换后的工作点X₁将远高于置换气的离焰曲线（图上未表示），这一运行工况是完全不能接受的。在这一特殊的假设条件下，如燃烧器的调定是在同样的火孔负荷下，但一次空气系数略低于50%（约为42%，其工作点在图4上用X₂表示，则在用高惰性天然气置换后，一次空气百分数增加到

$$PA_{X_3} = PA_{X_2} \times 1.1744 = 0.42 \times 1.1744 = 0.4932 \text{ 即 } 49.30\%$$

即图4中置换后的工作点X₃，就不会遇到离焰情况。从燃烧器的设计要求来看，对一次空气系数就有规定的要求。以上只是从离焰曲线论离焰，不能认为调整一次空气系数就可解决燃气的互换问题。

用高热值燃气与天然气互换时产生的特殊问题是易于产生黄焰端的趋势。如图5所示，以高热值天然气A作调定气，以30%的丁烷气和70%的丁烷改制气的混合物作置换气S的互换性为例。置换气的热值为44.64MJ/m³或1 198Btu/cf，相对密度为0.84，燃烧的空气需要量为10.616，化学组成为H₂—46.23%，CO—20.48%，CH₄—2.17%，C₃H₈—6.6%，C₄H₁₀—23.4%，CO₂—0.42，N₂—0.7%，沃泊指数为48.70MJ/m³。

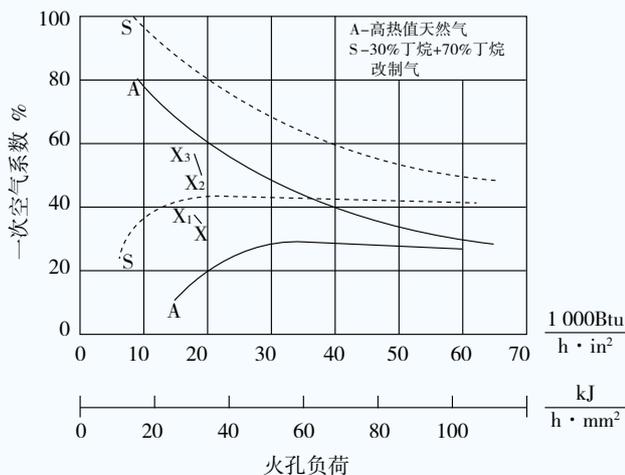


图5 在调定燃烧器上两种燃气运行中的互换效应

在以A气调定时取火孔负荷为32.7kJ/h·mm²或20 000Btu/h·in²，一次空气系数为35%，在图5中以点X表示。此点与A气的离焰和黄焰端极限曲线相比较，处于调定气的满意运行范围内。用丁烷—改制丁烷气的混合物作置换气时，火孔负荷将降低，一次空

气量将增加，其运行点在图5上用X₁表示。

$$PL_{X_1} = PL_X \left(\frac{h_s}{\sqrt{d_s}} \right) \left(\frac{\sqrt{d_a}}{h_a} \right)$$

$$= 32.7 \left(\frac{44.64}{\sqrt{0.84}} \right) \left(\frac{\sqrt{0.64}}{41.54} \right) = 32.7 \times 0.94 = 30.7 \text{ kJ/h} \cdot \text{mm}^2$$

$$PA_{X_1} = PA_X \left(\frac{\sqrt{0.84}}{10.616} \right) \left(\frac{10.576}{\sqrt{0.64}} \right) = 0.35 \times 1.14 = 0.399 \text{ 即 } 39.9\%$$

显然，X₁点落在丁烷—改制丁烷混合气的黄焰端极限曲线的下部，即必然有黄焰端的产生。但是，如果燃烧器用A气调定时，火孔负荷仍相同，但一次空气百分数为50%，即图中的工作点X₂，置换后的工作点为X₃，该点的火孔负荷同样减少为30.7kJ/h·mm²，一次空气系数增加至57%，表明无黄焰端产生。

$$PA_3 = PA_2 \times 1.14 = 0.5 \times 1.14 = 0.57 \text{ 即 } 57\%$$

值得注意的是，按上所述，家庭用户使用的燃具燃烧器就可能有无限多个调节方案，其中的一部分非常接近于离焰或黄焰端极限，多数燃烧器将有一定的适应性，允许所供燃气的组分有一些变化。其范围应采用可控燃烧器在现场使用置换气的调节范围，使之能代表实际的运行条件。这一范围即图1中所示的满意运行范围，也即设计范围，如设计时必须达到的火孔负荷和效率要求等铭牌所规定的的数据。文献4还指出，这也是燃具对所供燃气可能变化的适应性范围。

试验表明，如改用置换气后，在满足上述要求条件下，已不再有燃烧器出现离焰、回火和黄焰端，就可认为这一置换气已达到了满意运行条件的期望要求，但仍有一个情况例外^[5]，即当调定气的一次空气引入量，即空气/燃气比的因数 $\frac{\sqrt{d}}{h}$ 高于0.8时，需要减小风门的开度才能获得满意的运行条件，而改用置换气时，又因一次空气因数的减小可能发生不满意的燃烧。实际上，不论调定气的一次空气因数小于或等于0.8，置换气的一次因数等于或大于调定气（参看后续的表8），燃烧器在使用置换气时均应无黄焰端、离焰和回火来表达互换的程度。在后续的论述中将有深入的说明。

因此，用一种燃气置换另一种燃气时，用来预测燃具性能的公式应包括下列因素：

(1) 能说明由于燃气热值和相对密度的变化引起一次空气量也变化的因素。

doi:10.3969/j.issn.1671-5152.2012.07.002

北京市天然气用户数据采集传输方法的探讨

□ 北京市燃气集团有限责任公司规划发展部(100035) 贾林 刘燕

摘要: 近年来,随着北京市经济的高速发展,人民群众对环境质量要求的不断提高,北京市天然气发展呈现出用气量快速增长,供应范围不断扩大,用气领域多样化的特点。这也对我集团计量收费、数据采集传输及数据分析方面的工作提出了更高要求。本文针对上述特点,结合当前在计量收费、数据采集传输及数据分析等方面工作中遇到的实际问题,通过对目前国内常用远程抄表技术的介绍和“本地自动记录存储系统”、“区域楼宇无线远程抄表系统”、“GSM/GPRS公众无线网远程抄表监测系统”3种天然气用户数据采集传输系统实际应用情况的比较与分析,初步得出当前天然气用户数据采集传输系统的选取原则以及未来天然气用户数据采集传输系统的发展方向。

关键词: 天然气 数据采集 远程抄表

随着北京市天然气用量的快速增长,北京市燃气集团的供气范围也随之不断扩大(覆盖北京各城区及大部分郊区县),供应领域呈现多样化(从民用炊事发展到工业、采暖、制冷、发电、燃气汽车等诸多领域),与此同时也在计量收费、数据采集传输及数据分析研究等方面对企业提出了更高要求。

截止2009年底,北京市燃气集团已拥有各类天然气用户382万户,管理着各种类型的天然气计量仪表近390万块,其中普通表200万块,逻辑加密卡表166万块,CPU卡表24万块。普通表的大量存在给企业的日常管理带来诸多不便,例如:需要人工入户抄表,

统计和计算大量用户数据,无法及时掌握用户的用气数据并对数据进行统计分析,用户拖欠费用等等。这直接制约着企业向自动化、信息化、智能化管理的迈进。CPU卡表、逻辑加密卡表的出现和使用虽然在一定程度上解决了计量收费等问题,但对于现代化大型天然气供应企业来讲,需要建立更为先进的用户计量管理、数据采集分析系统,其不但要能解决对用户的日常计量与收费,还要能时刻掌握用户的用气状况,并对用户的用气情况进行数据采集、传输与技术分析,做到足不出户,只通过电脑网络就可实现上述功能,使计量更加精准、管理更加便捷、运行更加高

(2)能说明由于燃气热值和相对密度的变化引起燃烧器火孔负荷也变化的因素。

(3)能说明由于燃气组分的变化引起燃烧器燃烧特性极限曲线的位置也发生变化的因素。

基于上述考虑,所导出的公式应能预测民用燃烧器在根据一种天然气调定后,置换使用其他任何燃气

时的运行特性。

所得的公式包括一个互换结果产生离焰,一个产生回火和一个产生黄焰端可能性的3个公式。使用这些公式时,需要已知两种燃气的化学组分(热值和相对密度等)以及有关燃烧器设计和运行的知识。

(未完待续,见下期)