

直接作用式调压器的膜片及弹簧设计

□ 北京市公用事业科学研究所 (100011) 乔 斌

燃气调压器是燃气输配系统中非常重要的组成部分,燃气调压器的调压性能直接影响到燃气输配系统中管路设备的安全稳定和用户的用气安全。燃气调压器按其结构型式分为直接作用式调压器和间接作用式调压器,直接作用式调压器因其反应迅速、成本低,在燃气输配系统中的居民用户和锅炉用户中得到了广泛的应用。

根据直接作用式调压器的工作原理,直接作用式调压器有4个关键结构元件:调节元件——阀座、阀瓣;传感元件——膜片;加载元件——弹簧;平衡元件——平衡膜片。在直接作用式调压器的设计中,经常碰到这些关键元件的设计问题,比如尺寸、力的大小和压力范围如何确定等问题,所以,这些关键元件的设计效果直接影响到直接作用式调压器的调压性能是否满足各项指标要求。

1 直接作用式调压器中的几个问题

1.1 结构

《城镇燃气调压器》GB 27790-2011标准中对直接作用式调压器的定义是:利用出口压力变化,直接控制驱动器带动调节元件运动的调压器。

结构图见图1,上述定义中的驱动器是指托盘、膜片、阀杆等零件组成的功能性部件,它的功能是将燃气压力转换为直线位移运动。定义中的调节元件是指阀座和阀瓣这一对元件,它们之间的相对运动构成了压力调节的过程。

图1所示是一种具有平衡阀芯设计的直接作用式调压器,平衡阀芯组件中平衡膜片是关键部件。平衡

膜片的有效面积应与阀座的流通面积在理论上应是相等的。采用这种设计后,出口压力 P_2 不受进口压力 P_1 变化的影响,使静特性线族各条曲线离散性减小,提高了稳压精度。阀芯的下方还有一个复位弹簧,它的作用是用弹簧力抵消各个活动零件自身的重力,当调压弹簧调到最松弛状态时阀瓣能够彻底关闭并且能降低关闭压力。

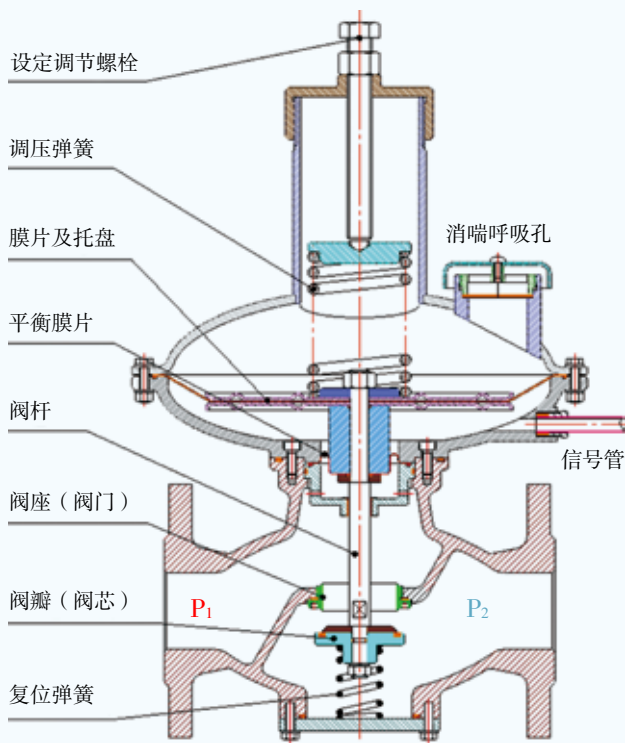


图1

1.2 调压方程

根据直接作用式调压器的调压方程:

$$P_2 = \frac{F}{A} \quad (1)$$

其中： P_2 —出口压力；
 F —设定的弹簧力；
 A —膜片有效面积。

由调压方程(1)看出，出口压力 P_2 与弹簧力成正比，与膜片面积成反比，当膜片面积一定，弹簧力越大出口压力 P_2 也就越高。说明一台调压器要想升高或降低出口压力只要调节调压弹簧力 F 即可实现。

1.3 弹簧效应

首先介绍弹簧的力学特性，可以用公式： $F=K \times H$ (2)表示，

式中： F —弹簧力(N)；
 K —弹簧刚度(N/mm)；
 H —弹簧的压缩量(mm)。

弹簧刚度 K 就是俗话说的“软”、“硬”，弹簧越“硬”则刚度越大。

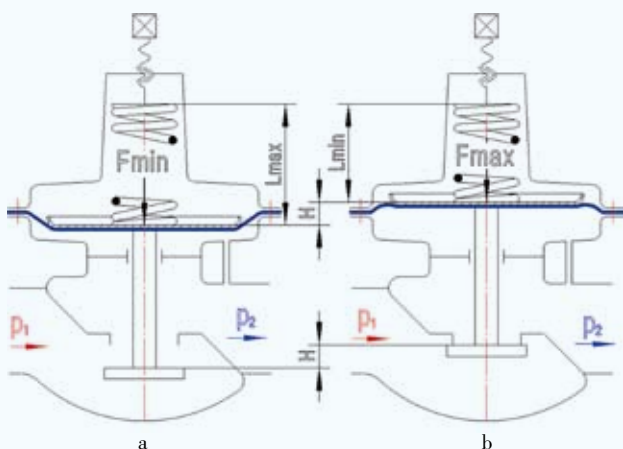


图2

图2是一台调压器两种不同的状态，调压弹簧在设定好以后，弹簧的上端被调节螺栓抵住固定不动，图2a说明流量较大时阀瓣与阀座之间开度加大，阀杆、托盘、膜片的位置较低，弹簧就相对松弛了，弹簧高度为 L_{max} ，其调压方程可用式 $P_{2min} = \frac{F_{min}}{A}$ (3)表示。图2b说明流量较小时阀瓣与阀座之间开度变小，从而阀杆、托盘、膜片的位置较高。压缩了弹簧高度为 L_{min} ，其调压方程可用式 $P_{2max} = \frac{F_{max}}{A}$ (4)表示。因

此一个设定值下，弹簧力 F 是随调节元件的行程变化的，图2中可看出弹簧的最大压缩量与调节元件最大行程为同一个数值即 H 。

如果用式(4)减去式(3)并令 $P_{2max} - P_{2min} = \Delta P_2$ ，将弹簧力学公式代入可得出下式：

$$\Delta P_2 = \frac{F_{max} - F_{min}}{A} = \frac{K \times (L_{max} - L_{min})}{A} = K \frac{H}{A} \quad (5)$$

$$\text{或 } k = \Delta p_2 \times \frac{A}{H} \quad (6)$$

式中： ΔP_2 —调压器出口压力的偏差量(MPa)

k —弹簧刚度(N/mm)

A —膜片有效面积(mm²)

H —阀瓣的行程或弹簧的压缩量(mm)

式(5)或(6)被称为弹簧效应公式，体现了调压器出口压力与弹簧刚度之间的关系。式中，阀瓣行程 H 和膜片有效面积 A 是常数，只有 K 值可以改变，从图3静特性线可以看出；理想的静特性线在工作段比较平直，有了弹簧效应后的静特性线就会有一定的倾斜，而 K 既是弹簧刚度也是直线方程的斜率， K 值越大则静特性线的斜率也就越大。

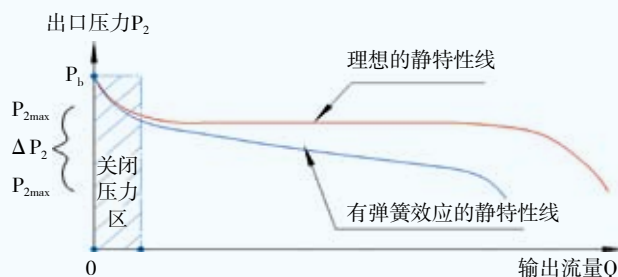


图3

1.4 弹簧效应带来的不良影响

弹簧效应对调压器造成的不利影响是：出口压力 P_2 会随着流量增大而下跌，使稳压精度降低，在稳压范围内的流量减少。

为了提高调压器的品质，提高稳压精度，有很多方法，减小弹簧刚度是经常采用的方法之一。根据以上分析，调压器的调压弹簧刚度越小稳压精度就越高，但是相应的调节范围就小了。我们可以采用不同出口压力范围使用不同刚度弹簧的方法，一个调压器多配用几个调压弹簧，区间调节范围相应变小，总体调节范围可相应变大，从而获得较高的稳压精度。

一些调压器生产厂家没有采用这种方法，而是使用一根刚度很大的弹簧，虽然调节范围很大，但是弹簧效应也很大，尤其是随着流量增加出口压力迅速下降，使调压器的调压性能变得很差。

2 碟形膜片受力及有效面积的计算

2.1 计算方法

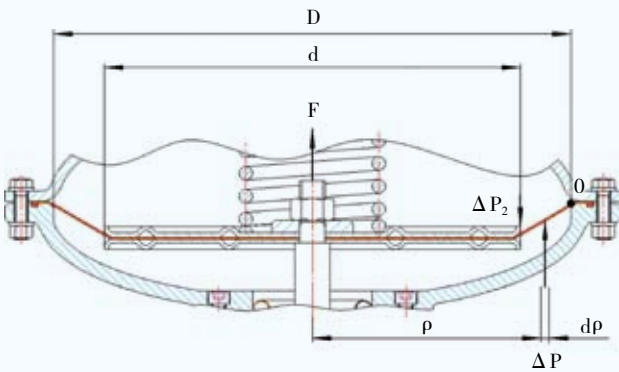


图4

直接作用式调压器中常使用碟形膜片，见图4，作用于阀杆的力*F*来源于两个方面：其一是直径*d*的托盘，托盘是刚性体可以按活塞计算方法，作用力 $F_1 = \frac{\pi}{4} d^2 \times p$ ，其二是膜片不受支托部分的环形面积，对于膜片环形面积上的力可由积分计算求得。如膜片挠度变形所需之力、阀杆截面积忽略不计，设在圆环面上取一微面积 $2\pi\rho \cdot d\rho$ ，其上所受的微压力为 $\Delta p = p \times 2\pi\rho \times d\rho$ 此力传到托盘边缘为 Δp_2 ，以膜片为受力体，对O点取力矩，则由力矩平衡原理得：

$$\rho \cdot 2\pi\rho \cdot d\rho \left(\frac{D}{2} - \rho \right) = \Delta p_2 \left(\frac{D}{2} - \frac{d}{2} \right)$$

$$\text{故得：} \Delta p_2 = 2\pi\rho \frac{D/2 - \rho}{D/2 - d/2} p \cdot d\rho$$

气压通过圆环面传到阀杆上的拉（推）力*F*₂通过积分求得：

$$\begin{aligned} F_2 &= \frac{2\pi \cdot p}{D/2 - d/2} \int_{d/2}^{D/2} (D/2 - \rho) \rho \cdot d\rho \\ &= \frac{\pi \cdot p}{12} (D^2 + D \cdot d - 2d^2) \end{aligned}$$

则膜片总输出力*F*为：

$$\begin{aligned} F &= F_1 + F_2 \\ &= \left[\frac{\pi d^2}{4} + \frac{\pi}{12} (D^2 + Dd - 2d^2) \right] \cdot p \\ &= \frac{\pi}{12} (D^2 + Dd - d^2) \cdot p \end{aligned} \quad (7)$$

从上式中去掉压力*P*这个因子，则式

$$\frac{\pi}{12} (D^2 + D \cdot d - d^2) \quad (8)$$

式中：D—膜片有效外径（mm）；

d—托盘直径（mm）；

p—调压器出口压力或驱动力（MPa）。

式（7）是膜片受力计算公式，式（8）是膜片有效面积公式，可根据设计需要选用，据有关资料介绍，一般托盘直径是膜片直径的0.8倍左右比较适宜。

2.2 碟形膜片的直径

碟形膜片的直径指的是图4中的尺寸*D*，从公式（7）可以看出，压力*P*与膜片直径的平方反比，若作用于阀杆上拉力*F*不变，出口压力越高膜片直径就可以越小。总之要保证关闭压力与运行压力之差作用于阀杆上的力能满足调节元件密封力的要求。膜片可以看成是位移传感器，膜片面积越大微量的压力变化就会产生位移，而灵敏度会越高，但制造工艺比较繁琐，膜片过大也会使调压器外观不协调，成本会有所增加，因此要综合考量。另外，有平衡阀芯结构的调压器相对没有平衡阀芯结构的调压器，其膜片尺寸也可以缩小。所以，设计调压器时膜片直径可以采用类比法和试验来确定。

3 弹簧设计

3.1 弹簧主要参数及其关系

调压器用的弹簧是圆柱螺旋压缩弹簧，主要参数有：钢丝直径*d*、弹簧中径*D*、有效圈数*n*、总圈数*n*₁、自由高度*H*、压并高度*H*_b、弹簧刚度*k*等，这些参数中它们之间有着非常密切的关系，可以用一个公式表示：

$$k = \frac{Gd^4}{8D^3n} \quad (9)$$

公式中的*G*是材料的切变模量，单位是MPa，其数值可以在《金属材料手册》、《机械设计手册》等

书中根据使用的材料查询。

由公式(9)看出;弹簧刚度的大小与钢丝直径的4次方成正比,对刚度的影响最大,与弹簧中径的3次方成反比,对刚度的影响其次,有效圈数与刚度成反比对刚度的影响最小。为了减小弹簧效应,根据经验;设计弹簧时先根据弹簧效应公式计算出弹簧刚度,然后确定弹簧中径及自由高度,最后确定钢丝直径和有效圈数。

3.2 弹簧中径及自由高度

弹簧中径是弹簧参数的一部分,要考虑调压器整体轮廓造型,根据设计经验见图5。

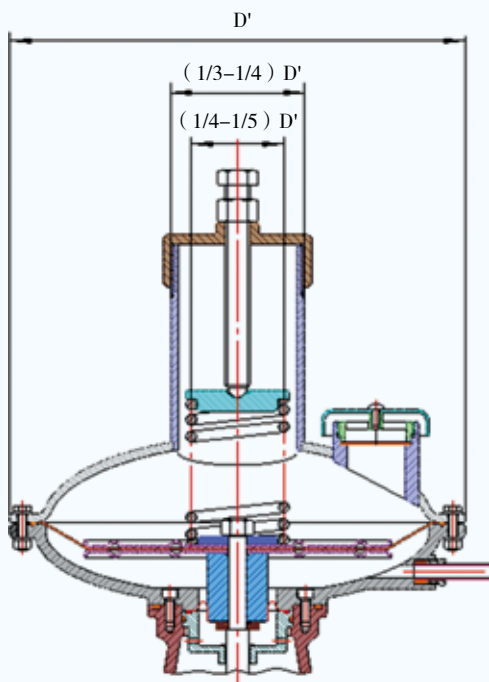


图5

为了设计美观,各部尺寸比例的协调,根据实践经验,若膜片外壳体的外径为 D' ,弹簧套筒的直径大约为 $(1/3 \sim 1/4) D'$,弹簧中径大约为 $(1/4 \sim 1/5) D'$,这种方法比较实用,仅供读者参考。

根据实践,弹簧的自由高度大约是弹簧中径的3~4倍,倍数过高会造成弹簧稳定性变差,压缩量比较大时弹簧会产生弯曲。

3.3 弹簧刚度计算

根据弹簧效应公式(6),我们可以人为规定出口压力的误差范围 Δp_2 ,用公式(5)反推出弹簧刚度值,有了弹簧刚度值以后,其他的弹簧参数就比较好确

定了,比如:钢丝直径、弹簧中径、有效圈数等等。

4 弹簧计算实例

例题:已知DN50带平衡膜片直接作用式调压器,阀座直径 $D_1=48\text{mm}$,采用碟形膜片,膜片(膜壳)最大外径 $D'=300\text{mm}$,膜片有效直径 250mm ,托盘直径 200mm ,调压器出口压力 $P_2=0.01\text{MPa}$,求稳压精度 $\pm 10\%$ 时所用弹簧的主要参数。

(1) 求解膜片有效面积 A

根据公式(8)和已知条件有:

$$A = \frac{\pi}{12} (D^2 + Dd + d^2)$$

$$= \frac{\pi}{12} (250^2 + 250 \times 200 + 200^2)$$

$$= 39\,904.17 \text{ (mm}^2\text{)}$$

(2) 求解阀瓣的行程(弹簧压缩量) H

当阀瓣的行程为阀座直径的 $1/4$ 时,阀瓣开启的流通面积与阀座流通面积相同,

因此, $H=1/4D_1=48 \div 4=12 \text{ (mm)}$

(3) 求解弹簧的刚度

根据弹簧效应公式(6)首先给弹簧效应限定一个范围,已知出口压力和稳压精度是 $0.01 \pm 10\%$ (MPa) 其偏差的上限是 0.011MPa ,下限是 0.009MPa ,他们之间的偏差是; $\Delta p_2=0.011-0.009=0.002 \text{ (MPa)}$,再将膜片有效面积 A 、阀瓣行程 H 带入公式(6)则有:

$$k = \Delta p_2 \times \frac{A}{H}$$

$$= 0.002 \times \frac{39\,904.17}{12}$$

$$= 6.65 \text{ (N/mm)} \quad (10)$$

式(10)求出的弹簧刚度是个参考数值,实际设计的弹簧刚度应小于这个值或近似这个值。

(4) 弹簧中径的确定

根据图5及说明,弹簧中径可取 D' 的 $1/4 \sim 1/5$,初步确定弹簧中径 62mm 。

(5) 自由高度的确定

自由高度按弹簧中径尺寸的3倍~4倍选取,故取自由高度为 200mm 。

(6) 弹簧其他主要参数

弹簧的其他主要参数根据公式(9)确定,但是

该公式的有效圈数、钢丝直径两个都是未知数，这种情况多用凑数法去计算，这种计算很麻烦。因此，我们借助计算机里面的Excel软件进行计算就变得方便了，见图6。

直接作用式调压器调压弹簧设计			
输入钢丝直径 d (mm)	6.5	求出弹簧刚度 (N/mm)	6.68136723
输入有效圈数 n	11	求出压并高度 (mm)	81.25
输入弹簧中径 D (mm)	62	求出最大负荷 (并圈+12) (N)	713.2359518
输入自由高度 H (mm)	200		
节距	17	求出最高调压压力 (kPa)	0.017873721
碟形膜片有效面积计算			
膜片内径直径 (mm)	250	求出有效面积	39904.16667
托盘直径 (mm)	200	求出最大负荷力 (N)	39.90416667
调压器出口压力 (kPa)	0.001		

图6

这是Excel的界面截图，界面上、下分成两部分，上面计算弹簧，下面计算膜片面积，B列是蓝色的数字是可以手工输入的，F列是红色的数字，输入后一回车就会自动显示，直到凑出的数字能满足刚度即可。现在图6显示的刚度是6.68136723N/mm近似计

算结果6.65N/mm，看E6、F6说明此弹簧可以由出口为0调至约0.017873721MPa，当然，设计与实际应用会有一些的差别，再经过一轮的调整就会设计出满意的弹簧。实践证明这种计算方法是可行的，直接作用式调压器不必内置信号管用取负压的方法，一样可以得到较高的稳压精度。

5 结论

国内生产调压器厂家很多，但能自主设计的占少部分，很多厂家产品互相抄袭仿制，本文计算经过设计实践，有很强的实用价值。希望能提供给有关设计人员一种设计思路和方法，使国内调压器的设计水平进一步提高。

参考文献

裴蕾, 齐旭, 薛岩铭. 动压和弹簧效应对调压器的影响及补偿技术. 城市燃气, 2006; 10

其它消息

安庆市首次铸铁管改造同步升压圆满完成

2016年8月12日晚9时，安庆市燃气铸铁管改造首次实现同步升压作业。

本次铸铁管改造同步升压作业是安庆港华铸铁管改造以来，接驳规模最大、施工难度最高、地下管挖掘最深的施工作业，也是安庆市引入天然气以来首次实施同步升压作业。安庆港华公司上下对此高度重视，不仅集全司之力排兵布阵，选择最佳作业方案，于港华南路、新世纪花园、红旗小区附近12处燃气管道接驳点投入百余名施工人员，同时公司董事长何族兴、总经理王政文还深夜亲临现场各关键施工点，督察指导施工作业进度及相关安全保障措施。

经过高温下数个小时的彻夜奋战，于8月13日凌晨顺利实现了对该区域从中压B到中压A的供气



压力升级，同时也宣告新世纪花园、红旗小区及华中东路段的铸铁管改造升级如期完成，周边城区生产、生活用气保障能力进一步提升。

(胡凯)