

析因试验在控制阀流道设计中的应用

刘晨 Lawrence L. Martin
(艾默生过程管理(天津)阀门有限公司 天津 301799)

摘要: 以提高控制阀门流道的流通能力为目标,提出了基于全因子试验设计(DOE)的设计方法,进行控制阀内部流道形状的研究。首先提出可能影响流通能力的参数(上流道角度、下流道角度和阀口尺寸),基于已有的流道模型,建立不同参数下的流道仿真模型。借助 CFD 仿真,针对不同的流道模型,分别进行流向向上和流向向下时,流通能力的数值模拟。对结果进行统计学分析,得到回归方程,并确定影响流通能力的主要因素。研究结果表明:当流向向下时,对流通能力影响最大的因素是上流道角度;当流向向上时,对流通能力影响最大的因素是下流道角度。在实际流动过程中,流动分离和流体流经阀门内部产生的旋涡对流通能力也具有一定影响。研究结果对于流道设计具有一定的指导意义。

关键词: 流道设计; 流通能力; 析因试验

0 引言

流道作为流体流通控制阀的通道,其形状结构对于阀门流通能力具有重要影响。高效的流道设计不仅可以提升控制阀的性能,还能有效降低成本。应用全因子析因试验的方法,对可能影响流通能力的流道参数进行 CFD 数值模拟。对于相同的阀笼和阀芯,流通能力越高,说明流道越高效。通过分析试验结果,得到影响流道流通效率的主要因素。

1 析因试验简介

析因试验是一种多因素的交叉分组试验设计,也是试验设计中的一个重要类别。析因试验可以同时多个因素进行分析,甄别出关键的影响因素,并建立各个变量间的交互关系。析因试验在各领域中,进行基础研究、产品设计和过程改善等方面都具有广泛的应用。析因试验可以根据试验的研究目标和影响因素分为全因子试验和部分因子试验。当可控因素数量较少时,可以选用全因子试验,当可控因素数量较多时,一般选用部分因子试验,或采用其他类别的试验方法,例如筛选试验和田口设计等。

由于试验设计是建立在统计学基础上的学科,对于试验结果的分析主要是针对统计学概念的分析。为了判断各个因素对试验结果的影响及其关系,就要使用方差分析和多元回归分析等统计分析方法。

2 流道参数设定及析因试验设计

一般而言,控制阀的进出口保持在同一水平线上。对于直通阀来说,在阀体内部,流体需要经过上流道、阀内腔及下流道,因此在本次试验中,定义三个参数,上流道与水平方向的角度 A,下流道与水平方向的角度 B,以及阀口大小 D。上下流道的角度决定了流体流经阀门的难易程度,而阀口尺寸决定了流体的流量。在试验过程中,其他参数均保持不变,并且参数设置需要在合理的范围,各因素水平见表 1。

表 1 各因素水平表

因素	下流道角度 (A/°)	上流道角度 (B/°)	阀口尺寸 (D/inch)
水平 1	A1	B1	D1
水平 2	A2	B2	D2

3 析因试验及结果讨论

利用三维作图软件可以得到不同因素水平下的流道模型。利用 CFD 对各个模型进行模拟并得到最大流通系数。由于所有试验结果均由 CFD 数值模拟提供,其试验误差水平一致,因此本文假设 CFD 的模拟结果即为每一组因素水平下的试验结果,因此不再对 CFD 结果进行噪声分析。

由于试验因素有三个,每个因素为二水平,一共需要 23 次试验可以对所有因素进行分析,因此选用全因子法对试验结果进行分析。考虑到单因素及多因素交互作用结果,对于最终试验结果的影响因素有 7 个,分别为单因素 A、B、D,二元交互作用 AB、AD、BD 和三元交互作用 ABD。本文采用两个步骤对实验结果进行分析,首先通过极差分析,确定影响流通能力的主要因素。然后通过方差分析及回归方程得到各因素与试验结果的关系及其显著性。

$$\mu_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (1)$$

$$\Delta_j = \mu_{j(+)} - \mu_{j(-)} \quad (2)$$

式中, μ -- 均值;

N-- 试验次数;

X-- 试验结果;

Δ -- 极差。

在试验结果表中,采用“+”表示高水平,“-”表示低水平。对于存在交互作用的因素,采用其单因素水平的符号乘积表示其水平。例如试验 1 中,A、B 均为高水平,则 AB 即为 (+) 1 × (+) 1= (+) 1,结果为高水平,试验 3 中,A 为高水平,B 为低水平,则 AB 为 (+) 1 × (-) 1= (-) 1,结果为低水平。

对于流经控制阀的流体,可能有两种流动方向,向下和向上,针对两种流向分别进行分析。

极差最大的几个影响因素为 A 因素、B 因素及 AB 交互作用;相比于 A、B 因素,D 因素及其他交互作用的极差结果很小。因此,B 因素对于结果的影响最大,AB 的交互作用次之,A 因素对于结果的影响较小,而 D 因素及其他交互作用的影响最小,可忽略不计。由此可知因素 A、B 及 AB 交互作用为影响流通能力的主要因素。

对以上三组因素主要影响因素进行回归分析,得到结

表 2 方差及回归分析结果（流向向下）

回归统计					
相关系数 R			0.9927		
相关系数 R ²			0.9854		
调整相关系数 R ²			0.9708		
标准差			1.0992		
观测值			7		
回归系数					
自变量	系数	系数标准误差	T- 分布	P-value	
常量	137.7	3.5904	38.3528	0.0000	
A	-0.5925	0.1135	-5.2186	0.0064	
B	-1.035	0.1135	-9.1160	0.0008	
AB	0.0159	0.0036	4.4216	0.0115	
方差分析					
来源	自由度	SS	MS	F	Significance F
回归	3	280.73	93.6	90.74	0.0004
残差误差	4	4.125	1.0313		
合计	7	284.86			

果见表 2。

表中，SS—平方和；
MS—均方；
F—检验统计量；
Significance F—F 显著性；
P 值—在相应 F 值下的概率值。
回归方程为： $C_v=137.7-0.5925A-1.035B+0.0159AB$
其中， C_v -- 阀门流通能力。

对于回归方程的分析，本文主要考量三个方面：回归方程的显著性、回归的总效果，以及回归方程中各项的显著性。

(1) 回归方程的显著性

回归方程的显著性由方差分析中的 Significance F 决定，值小于 0.05 即可判定模型有效。本例中，Significance F=0.0004<0.05，说明该回归方程总体效果是显著的。

(2) 回归效果

回归效果由相关系数 R^2 和 R^2 （调整）决定。 R^2 越接近 1，回归效果越好。但是只要自变量数量增加， R^2 就会相应增加一些，不论增加的自变量对结果的影响效果是否显著。因此引入 R^2 （调整）来减小因自变量个数增加导致的相关系数增大的影响。二者越接近，说明模型越好。在本例中， R^2 和 R^2 （调整）的数值非常接近，说明回归效果很好。

(3) 回归方程中各项的显著性

同回归方程的显著性检验一样，各项系数的显著性检验依靠 P-value 完成。在回归方程各系数中，P-value 都小于 0.05，说明回归方程中各项系数都有显著意义。该结论也与

极差分析的结果一致。

对于流向向上的情况，采用相同方法进行分析。通过极差分析可知，对于流向向上的情况，对流通能力有显著影响的因素是上流道角度和阀口大小。对其进行方差分析，可知，下流道角度和阀口确为流通能力的主要影响因素，并且下流道的影响更大。而各因素交互作用对于流向向上的情况，影响均不大。

回归方程为： $C_v=150.875-0.6075A-21.6D$

通过观察流向向上的流线图可以发现，流体在阀口处发生了流动分离，并产生旋涡，阀口尺寸越大，流动分离越严重，旋涡也越大，从而影响了流道的流通能力。

因此在流道设计时，除了以上提到的因素外，也需要考虑流动分布对流通能力造成的影响。

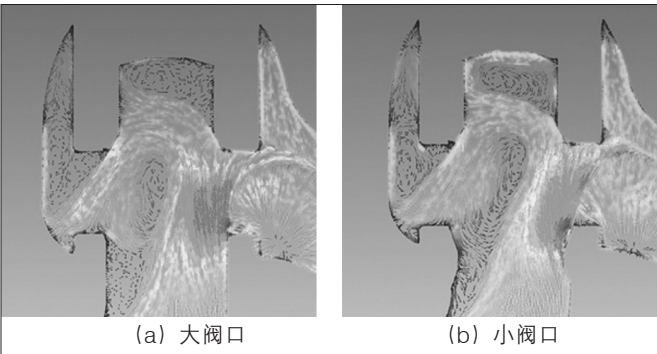


图 在流向向上时不同大小阀口的流动分布

4 结语

通过完全析因试验法，将影响流道流通能力的因素完全分解，对其中的主效应和交互作用进行分析，最终确定对流通能力的影响。在此基础上建立了流道流通能力的多元线性回归方程。方差分析表明该预测模型与各因素有确切的线性关系，并且各个因素均对流通能力有显著影响。因此，在对流道进行设计时，上下流道的角度都需要注意，阀口也需要根据工况选择合适的尺寸。

参考文献：

[1]Howard J. Seltman.Experimental Design and Analysis[Z].2018:9-11.
[2]张驰.六西格玛试验设计[M].广州：广东经济出版社,2003:7-9.
[3]马逢时,周晔,刘传冰.六西格玛管理统计指南[M].北京：中国人民大学出版社,2010:400.

作者简介：刘晨（1988-），女，汉族，辽宁沈阳人，硕士，工程师，研究方向：控制阀设计。