

引用格式: 乔若真. 基于 SolidWorks Flow Simulation 的不同管路布置形式下蝶阀流场仿真[J]. 有色设备, 2025, 39(6): 47-54.  
QIAO Ruozhen. Numerical simulation of flow field in butterfly valves under different pipeline layouts based on SolidWorks Flow Simulation[J]. Nonferrous Metallurgical Equipment, 2025, 39(6): 47-54.

# 基于 SolidWorks Flow Simulation 的不同管路布置形式下蝶阀流场仿真

乔若真

(中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038)

**[摘要]** 本文针对倒 U 形管路系统中蝶阀安装位置对流动特性的影响, 基于 SolidWorks Flow Simulation 开展数值模拟研究。通过构建弯头下游、弯头上游及直管 3 种蝶阀布置模型, 结合流场可视化与流阻系数定量分析, 系统对比了不同配置的水力性能。研究表明: 蝶阀开启角度与流阻系数呈显著负相关, 且角度变化对阻力的调节呈非线性特征, 其中低开度区间( $0^{\circ} \sim 30^{\circ}$ )的阻力调节梯度尤为剧烈; 当蝶阀布置于弯头上游时, 系统在全工况范围内表现出更优的流动稳定性, 流阻系数、压力损失显著降低; 此外, 该布置形式可有效抑制阀门振动及流动分离现象。基于仿真结果, 建议工程实践中优先采用弯头上游安装蝶阀的配置, 尤其适用于需要频繁调节的管路系统, 并结合优化弯头间距或引入导流片进一步提升性能。

**[关键词]** CFD; 蝶阀; 流场仿真; 管路布置; 流阻系数; 数值模拟

**[中图分类号]** TH134      **[文献标志码]** A      **[文章编号]** 1003-8884(2025)06-0047-08

**DOI:** 10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2025.06.006

## 0 引言

计算流体力学(CFD)方法是通过数值方法求解流体力学控制方程, 得到流场的离散定量描述, 并以此预测流体运动规律。Flow Simulation 是一套直观的计算流体力学(CFD)解决方案, 嵌入 SolidWorks, 适用于模拟液体和气体流动, 可有效地分析影响浸入或周围组件上的流体流动、传热和相关力的变化。

目前, 应用 Flow Simulation 进行阀门流场分析研究有很多, 孙健<sup>[1]</sup>利用 CFD 软件进行 SolidWorks Flow Simulation, 对所建立的球阀装配体数学模型内部流场数值模拟, 最终得到壁面参数值, 提升了工程技术人员的设计效率和准确性。赵伟<sup>[2]</sup>通过 SolidWorks Flow Simulation 研究了阀门流量特性, 通过设置不同的阀芯位置, 得到了流体流动轨迹、速度、静压等物理量, 并绘制出截止阀模型流量特性曲线。刘晓凯等<sup>[3]</sup>利用 SolidWorks Flow Simulation 对不同

结构碟式止回阀阀板流场进行仿真分析, 结果表明: 斜跨桁架式阀板的流通性优于垂直筋板式阀板。李晓波<sup>[4]</sup>利用 Flow Simulation 仿真模拟, 分析阀门分别处于  $75^{\circ}$ 、 $40^{\circ}$ 、 $10^{\circ}$  工况时的压力云图, 对阀门流阻进行理论计算, 优化了止回阀的设计。梁潇<sup>[5]</sup>通过试验与 CFD 仿真, 对直管路上安装球阀的管路系统内部流场及其流阻压降特性展开研究, 得出管道构型会对小开度下球阀管路系统流速和流阻压降产生较大影响, 随着开度的不断增加, 管道构型对球阀管路系统流场的影响逐渐减小, 当开度大于  $70^{\circ}$  时, 管道构型对球阀管路系统不再产生影响。张健平等<sup>[6]</sup>通过数值模拟分析了压比、开度、口径和阀前静压对蝶阀流量系数的影响, 得出其影响由大到小依次为开度、压比、口径。以上研究针对阀门内部流场, 以优化阀门的设计, 但对于阀门相对于管路系统安装位置的研究仍较为匮乏。

蝶阀作为一种结构简单、调节性能优异的阀门,

[收稿日期] 2025-06-26

[第一作者] 乔若真(1993—), 男, 山东德州人, 工程师, 主要从事矿山机械相关的咨询、设计及研究工作。

广泛应用于大口径管路的流量控制。其安装位置(如弯头上游或下游)可能显著影响管路系统的流动稳定性与能量损失。本文以  $DN100$ 、公称压力  $2.0\text{ MPa}$  的蝶阀为研究对象,通过 SolidWorks Flow Simulation 模拟 2 种典型安装形式(弯头上游/下游)及直管安装下的流场特性,对比分析不同布置方案对流动阻力和流场分布的影响,为工程实践提供优化依据。

## 1 管路及蝶阀结构

### 1.1 安装规范及安装形式

蝶阀的安装位置规范如下。①应优先安装在水平管道上,阀杆垂直向上,便于操作和维护。若安装在垂直管道上,需确保阀杆方向合理(如水平或向上倾斜),避免介质长期冲击密封面。②留出足够的操作空间,方便手动或电动装置的启闭操作以及后期检修。③远离高温、振动或腐蚀性环境,如需在特殊环境下(如高温、低温、防爆场合)安装,应选用对应材质或功能的阀门,并采取防护措施。

本文依托某矿山排水泵站中的两段管路实际安装情况,水泵出口管路分为 2 根支管,分别连接至 2 根主排水管路。受限于场地要求,其中 1 个蝶阀需要安装在倒 U 形管路,安装方式如图 1 所示。沿水流方向看,方式 1 为蝶阀安装于弯头下游,即垂直管段入口处;方式 2 为蝶阀安装于弯头上游,即水平管段出口处。为全面分析流场特性,另增设直管安

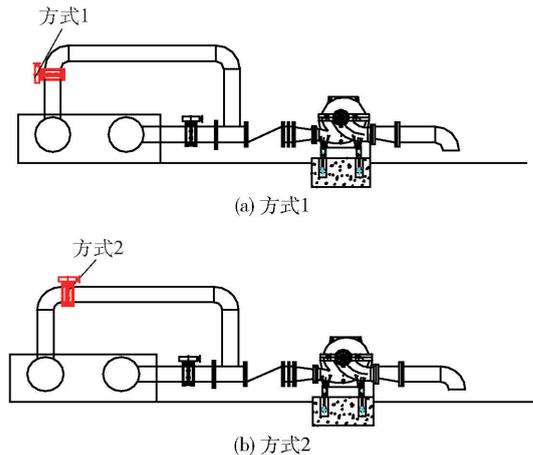


图 1 蝶阀安装位置示意

Fig. 1 Schematic diagram of butterfly valve installation location

装蝶阀的对照模型(方式 3)。以上 3 种方式均满足安装规范要求。

### 1.2 蝶阀的结构

蝶阀的结构主要包括阀体、阀板、阀杆和密封圈 4 部分。一般阀体呈圆筒形,阀板置于阀体内,通过阀杆与阀体连接并绕阀杆旋转。当旋转角度为  $0^\circ$  时,阀板和密封圈共同阻挡液体流进阀门,阀门完全关闭;当旋转角度为  $90^\circ$  时,阀门则完全开启,该旋转角度又称为阀门的开度,可控制介质的流量。蝶阀的开启和关闭方向如图 2 所示。

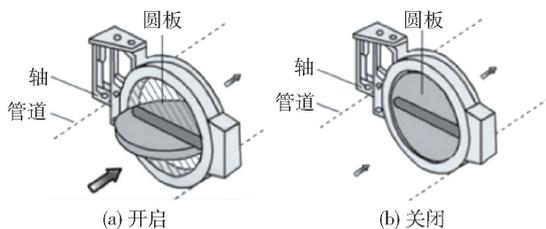


图 2 蝶阀开启和关闭示意

Fig. 2 Schematic of butterfly valve opening and closing

## 2 蝶阀模型建立

基于 SolidWorks Flow Simulation 构建三维管路模型,保留关键几何特征(如管径、弯头曲率),简化非必要细节(法兰螺栓孔等)。采用端盖工具封闭流体域,确保模型符合内部流动仿真要求<sup>[7]</sup>。最终得到模型如图 3 所示。

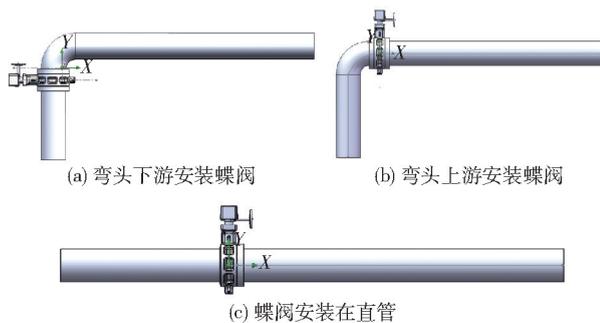


图 3 管路模型示意

Fig. 3 Piping model schematic

### 2.1 参数设置

#### 2.1.1 雷诺数、湍流强度、湍流长度的计算

SolidWorks Flow Simulation 内置了流体力学的连续性方程、动量方程、能量方程。因此,无需设置求解器,只需输入参数并完成设置即可。

雷诺数 ( $Re$ ) 是表征流体流动情况的无量纲数, 是流动中惯性力和黏性力的比值度量。利用雷诺数可区分流体的流动是层流或湍流, 也可以确定物体在流动中受到的阻力。雷诺数计算公式见式(1)。

$$Re = \frac{\rho v l}{\mu} \quad (1)$$

在压强为 101.325 kPa、温度为 20 °C 的条件下, 水的动力黏度为  $1.01 \times 10^{-3}$  Pa/s, 密度为  $1.0 \times 10^3$  kg/m<sup>3</sup>, 特征长度取管路内径 100 mm, 特征速度 2.0 m/s, 计算出雷诺数为 13 861, 判定为湍流。

湍流强度是脉动速度与平均(自由流)速度的比值再乘 100, 也等于 0.16 与按水力直径计算得到的雷诺数的负八分之一次方的乘积。公式见式(2)。

$$I = 0.16 \times Re^{-\frac{1}{8}} = 3.48\% \quad (2)$$

湍流长度见式(3)。

$$l = 0.07L = 0.007 \text{ m} \quad (3)$$

式中:  $L$  为特征长度, 即水力直径, 取 100 mm。

### 2.1.2 基本设置

单位系统为 SI(kg-m-s), 分析类型选择为内部, 并考虑重力。默认流体选择水, 流动类型为层流和湍流, 绝热壁面且忽略粗糙度。初始条件中, 湍流强度设置为 3.48%, 湍流长度设置为 0.007 m。初始条件设置准确性, 与计算速度及质量相关(表 1)。

表 1 初始条件设置

Table 1 Initial condition setting

|       | 参数                            | 数值      |
|-------|-------------------------------|---------|
| 热动力参数 | 压力/Pa                         | 101 325 |
|       | 温度/K                          | 293.2   |
| 速度    | $x$ 方向速度/(m·s <sup>-1</sup> ) | 0       |
|       | $y$ 方向速度/(m·s <sup>-1</sup> ) | 0       |
|       | $z$ 方向速度/(m·s <sup>-1</sup> ) | 0       |
| 湍流参数  | 湍流强度/%                        | 3.48    |
|       | 湍流长度/m                        | 0.007   |

### 2.2 边界条件

仿真选择设置一个压力开口边界条件和流速边界条件。这种设置方法能防止边界条件设置出现错误, 在压力开口处软件会自动计算出满足质量守恒定律的质量流量。

在本模型中, 水流入和流出位置是确定的, 压力开口条件设置为静压; 结合泵站工作实际情况, 管路入口处平均流速为 2 m/s, 管路系统入口压力 1.6 MPa。

边界条件如下: ①入口, 速度边界条件,  $V = 2.0$  m/s; ②出口, 静压边界条件,  $P = 1.6$  MPa; ③壁面, 绝热无滑移条件, 忽略粗糙度。边界条件设置和网络划分结果如图 4 所示。

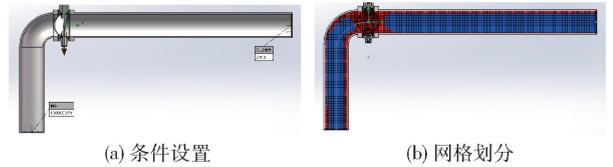


图 4 边界条件设置和网格划分结果

Fig.4 Boundary condition settings and grid division results

### 2.3 网格划分

针对 0 ~ 90° 阀门开度, 以 10° 为梯度分别建立模型, 并使用自动网格划分功能, 控制 5 级基础网格精度进行网格划分。该网格划分功能基于笛卡尔网格的自动加密, 结合边界层棱柱网格, 适用于本文所述快速流体分析目的。使用高级通道细化功能, 调整蝶阀内部网格, 通过用于指定最小缝隙尺寸值的方式, 以识别未被 Flow Simulation 自动识别的细小模型。检查模型获得最小通道尺寸, 设置蝶阀区域最小缝隙尺寸为 0.104 mm。网格划分结果如图 4 所示。蝶阀阀板附近及管路两侧狭小通道区域细化网格; 其余部分没有采用细化。

### 2.4 目标设置

在工程实践中, 任何管路的压力水头损失可以划分为 2 个部分: 沿程阻力损失和局部阻力损失, 如弯头、T 形管、变径、阀门、风门等。以上水利损失的累加为管路总的水利损失。

通常情况下, 管路中的沿程阻力损失可以根据经验公式计算, 局部阻力损失(也称为局部压降)通常只能通过试验得出, 特别是分析的管路和装置形状剧烈变化和流动状态复杂时, 局部阻力损失的确定更困难。本文在 Flow simulation 的 EFD. lab 中, 计算测量管路系统内局部阻力。

流阻系数表征管路的流通能力, 是衡量管路性能优劣的重要指标, 流阻系数越小, 对流体的阻力越小, 表明管路系统更稳定、更顺畅。流体流经阀门的

流阻系数  $\xi$  可用式(4)表示<sup>[8]</sup>。

$$\xi = \frac{\Delta P}{\rho V^2 / 2} \quad (4)$$

式中： $\rho$  为水的密度； $V$  为水的流速。

将蝶阀与前后连接的管路视为一组管路部件，压力差取值为管路出入口压力差的绝对值。因不同布置和阀门开度下最大流速区域面积不同，因此将水流速度简化为管路中水流平均速度，通过计算整体流阻系数，反映不同布置方式下的蝶阀对管路系统流通性的影响。添加平均速度全局目标，进出口封盖设置静压表面目标。添加 1 个方程目标压力差  $\Delta P$ ，压力差  $\Delta P$  等于入口压力与出口压力之间差的绝对值。代入流阻系数公式，添加第二个方程目标表达式，见式(5)。

$$\xi = \frac{\Delta P}{1000 \times [\text{平均值速度}]^2 / 2} \quad (5)$$

### 3 管路流场的仿真结果分析

#### 3.1 流场分析

##### 3.1.1 弯头下游安装蝶阀的流场

入口速度  $V = 2.0 \text{ m/s}$ ，出口静压  $P = 1.6 \text{ MPa}$  时，方式 1 不同开度下流场如图 5 所示。图 5 展示了弯头下游安装蝶阀(方式 1)不同开度下的速度场与压力场分布。数值模拟结果表明：当阀门开度从  $10^\circ$  增至  $90^\circ$ ，最大流速区域面积逐渐减小。在初始开启阶段( $10^\circ$ )，阀板两侧形成显著速度梯度(最大流速达  $2.757 \text{ m/s}$ ，最小仅  $0.031 \text{ m/s}$ )，这是由于流通道很小，阀前压力大，阀后压力小，流通截面急剧收缩引发的压差效应导致的。

上述仿真结果流线可视化后如图 6 所示，弯头下游出现大尺度涡旋结构，涡旋结构空间占比随开度增加逐渐减小。

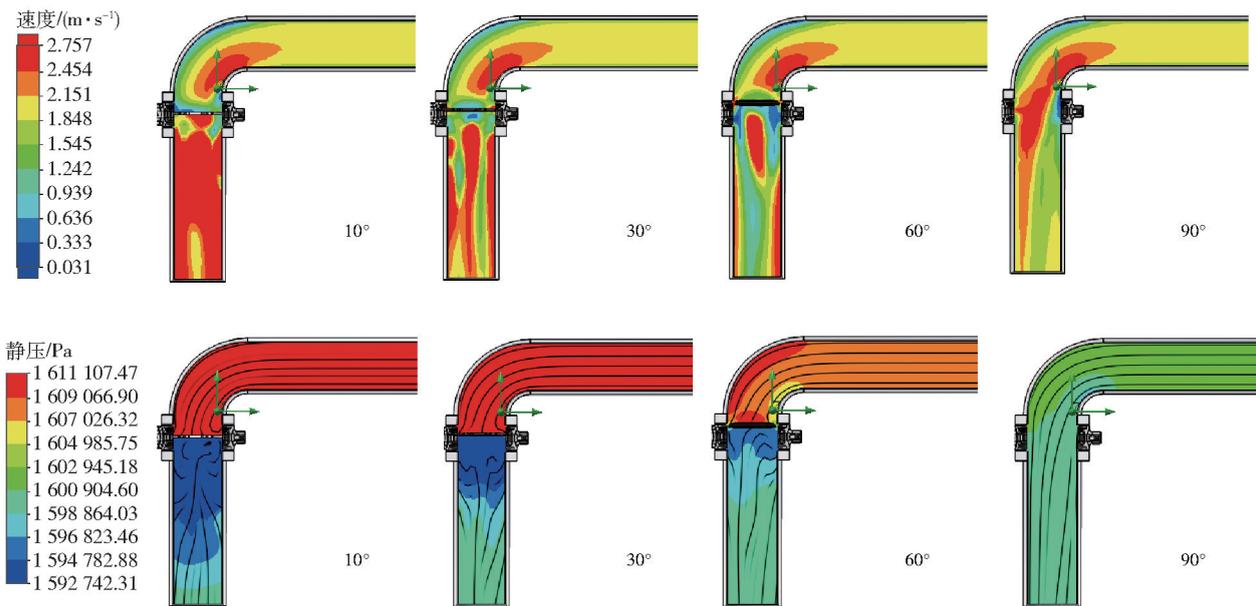


图 5 方式 1 的流场仿真结果

Fig. 5 Flow field simulation results of Method 1

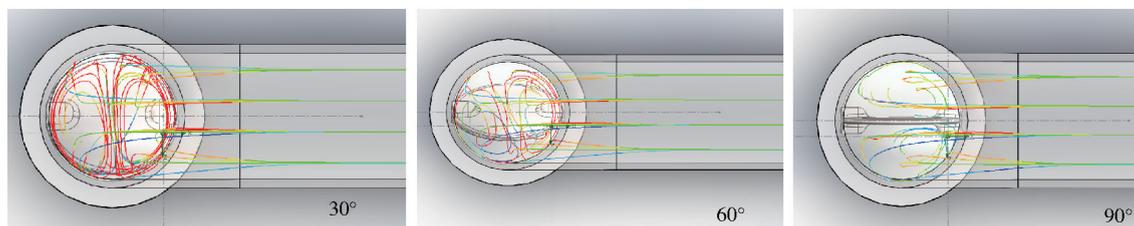


图 6 方式 1 流动迹线

Fig. 6 Flow trajectory of Method 1

### 3.1.2 弯头上游安装蝶阀流场

当入口速度  $V=2.0\text{ m/s}$ 、出口静压  $P=1.6\text{ MPa}$  时,弯头上游安装蝶阀(方式2)不同开度下流场如图7所示。图7展示(方式2)流场呈现出独特的动力学特征,最大流速衰减规律与方式1相似,但速度场空间分布存在显著差异:当开度  $\geq 30^\circ$  时,弯头内侧出现流速抑制区。压力场分析表明,  $30^\circ$  和  $60^\circ$  开度下蝶阀后方分别形成占管径约  $1/3$  和  $1/5$  区域的

逆流区。在完全开启状态( $90^\circ$ ),方式2表现出更优的流动均匀性,速度分布较方式1更均匀。

将上述仿真结果流线可视化,结果如图8所示。在阀门开启过程中,经过弯管后流线呈螺旋状,越靠近管壁流速越大;流动迹线,结果无杂乱现象,表现出很强规律性,表明管路系统更稳定;当阀门全开时,可以看到蝶阀对弯头处流动影响基本消失。

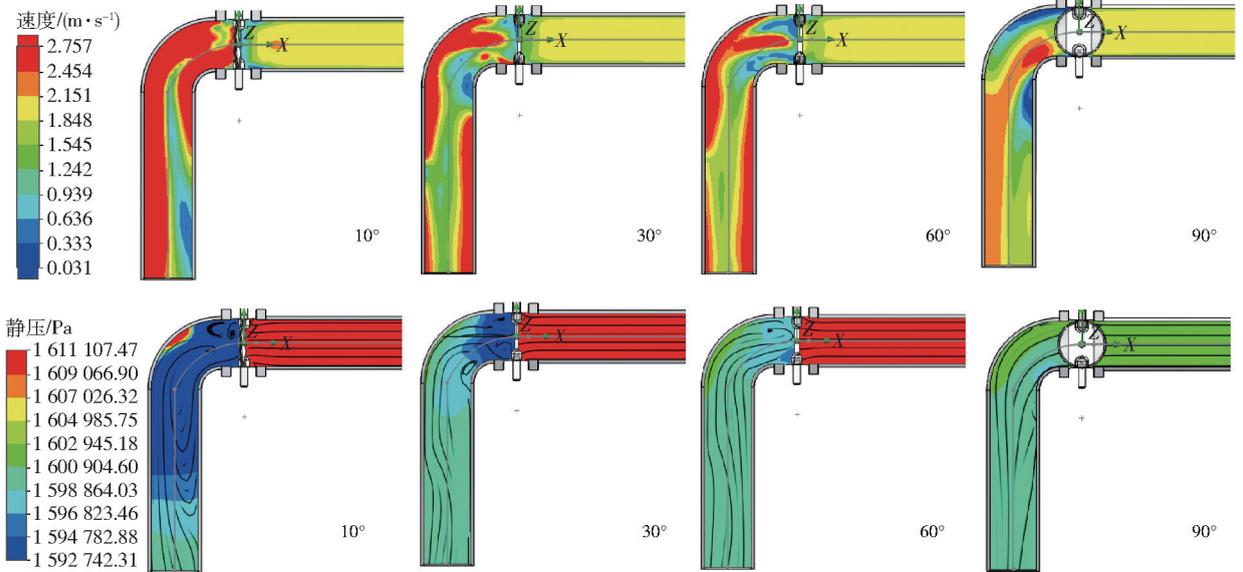


图7 方式2流场仿真结果

Fig.7 Flow field simulation results of Method 2

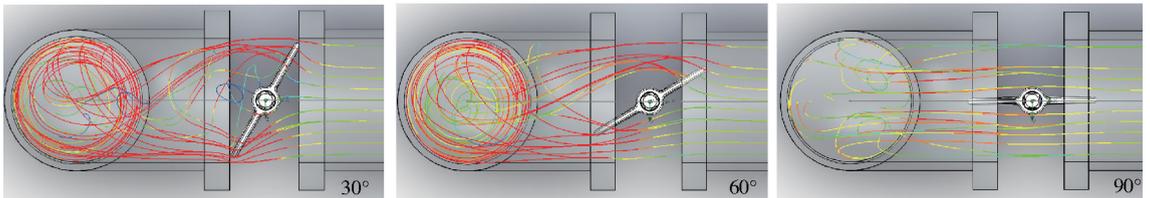


图8 方式2流动迹线

Fig.8 Flow trajectory of Method 2

### 3.1.3 直管上的蝶阀流场

当入口速度  $V=2.0\text{ m/s}$ 、出口静压  $P=1.6\text{ MPa}$  时,直管上的蝶阀不同开度下流场如图9所示。直管安装蝶阀开度为  $10^\circ$  时,流通通道小,流速过大,即产生占流通截面一半以上的分离涡,但随着开度增加流动稳定性显著改善。全开状态下速度场更均匀(速度基本分布在  $2.151\sim 2.454\text{ m/s}$ ),仅阀板尾迹区存在局部加速现象(最大流速  $2.45\text{ m/s}$ )。

### 3.2 流阻系数分析

流阻系数代表局部管路的流通能力,流阻系数越小表明流通能力越强,即管路系统压力损失更小、运行情况更稳定<sup>[9]</sup>。不同形式压力损失及其流阻系数在不同阀板开度下的统计见表2。表中计算了2种弯头与蝶阀组合形式的压力损失、流阻系数减小百分比(方式2流阻系数相比方式1流阻系数)。

当阀板开度小于  $40^\circ$  时,方式2的压力损失、流

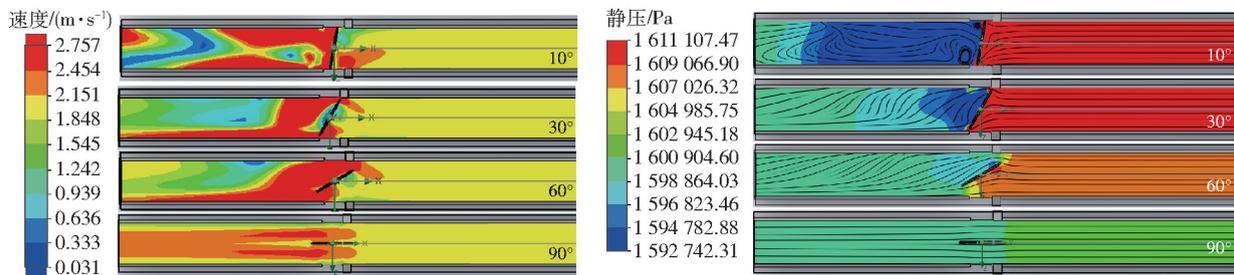


图 9 直管上的蝶阀流场仿真结果

Fig. 9 Flow field simulation results of butterfly valve on straight pipe

表 2 在不同阀板开度下压力损失及其流阻系数统计表

Table 2 Statistical table of pressure loss and flow resistance coefficient under different valve plate opening degrees

| 阀板开度 | 压力损失       |                |                |        | 流阻系数       |                |                |        |
|------|------------|----------------|----------------|--------|------------|----------------|----------------|--------|
|      | 直管上的蝶阀(对照) | 弯头上游安装蝶阀(方式 2) | 弯头下游安装蝶阀(方式 1) | 减小比例/% | 直管上的蝶阀(对照) | 弯头上游安装蝶阀(方式 2) | 弯头下游安装蝶阀(方式 1) | 减小比例/% |
| 90°  | 1 387      | 1 728          | 1 730          | 0.1    | 0.691      | 0.859          | 0.863          | 4.7    |
| 80°  | 1 800      | 2 171          | 2 073          | -4.5   | 0.892      | 1.056          | 1.031          | -2.4   |
| 70°  | 3 551      | 4 044          | 3 886          | -4.0   | 1.741      | 1.891          | 1.918          | 1.5    |
| 60°  | 8 268      | 9 405          | 8 806          | -6.4   | 3.993      | 4.166          | 4.265          | 2.4    |
| 50°  | 23 178     | 24 556         | 22 587         | -8.0   | 10.843     | 10.312         | 10.630         | 3.1    |
| 40°  | 65 057     | 72 049         | 72 208         | 0.2    | 30.084     | 28.069         | 32.482         | 15.7   |
| 30°  | 147 178    | 237 719        | 251 968        | 6.0    | 65.202     | 97.705         | 108.266        | 10.8   |
| 20°  | 1 157 605  | 1 023 046      | 1 381 270      | 35.0   | 411.034    | 355.241        | 562.530        | 58.3   |
| 10°  | 5 042 942  | 5 301 840      | 7 911 326      | 49.2   | 1429.590   | 1427.763       | 2673.187       | 87.2   |

阻系数均显著小于方式 1,压力损失最大减小比例是 10°时的 49.2%,流阻系数最大减小比例是 10°时的 87.2%。这表明在阀门开启初期,方式 2 流通能力优于方式 1。当阀板开度大于 40°时,方式 2 的压力损失略大于方式 1,当开度为 50°时两者压力损失差达到最大值,即 -8.0%;流阻系数方式 2 仍小于方式 1。

### 3.2.1 整体趋势分析

为了更直观体现 3 种方式流阻系数的差异,以上述表格数据绘制曲线。如图 10(a)所示,3 种布置形式的流阻系数均与阀门开启角度呈显著负相关。当开启角度由 0°增至 45°时,流阻系数降幅达 90%以上,这主要归因于流道截面积的增大有效降低了局部阻力损失。因此,角度变化对阻力的非线性调节作用在工程实践中具有重要应用价值。

### 3.2.2 阶段特征分析

1)初始开启阶段(0°~30°):如图 10(b)所示,弯头下游安装蝶阀的流阻系数较其他形式高,最大时为其他两种形式 2 倍,这主要因为阀板初始开启时形成的 S 形流道加剧流动分离。该阶段的流阻系数变化梯度大,验证了阀门动态特性对系统瞬态过程的关键影响。

2)中间调节阶段(30°~60°):图 10(c)显示 3 种布置的流阻系数差异缩小至 8%以内,其中弯头上游安装蝶阀形式表现出最优水力特性,ζ 值为 3 种形式中最小的。该现象可解释为阀板位置的优化布置有效改善弯头处的速度场分布,降低了二次流强度。

3)全开阶段(60°~90°):如图 10(d)所示,此时流阻系数主要受弯头几何参数主导,3 种形式的 ζ 值差异不足 10%。但弯管组合形式的残余阻力仍

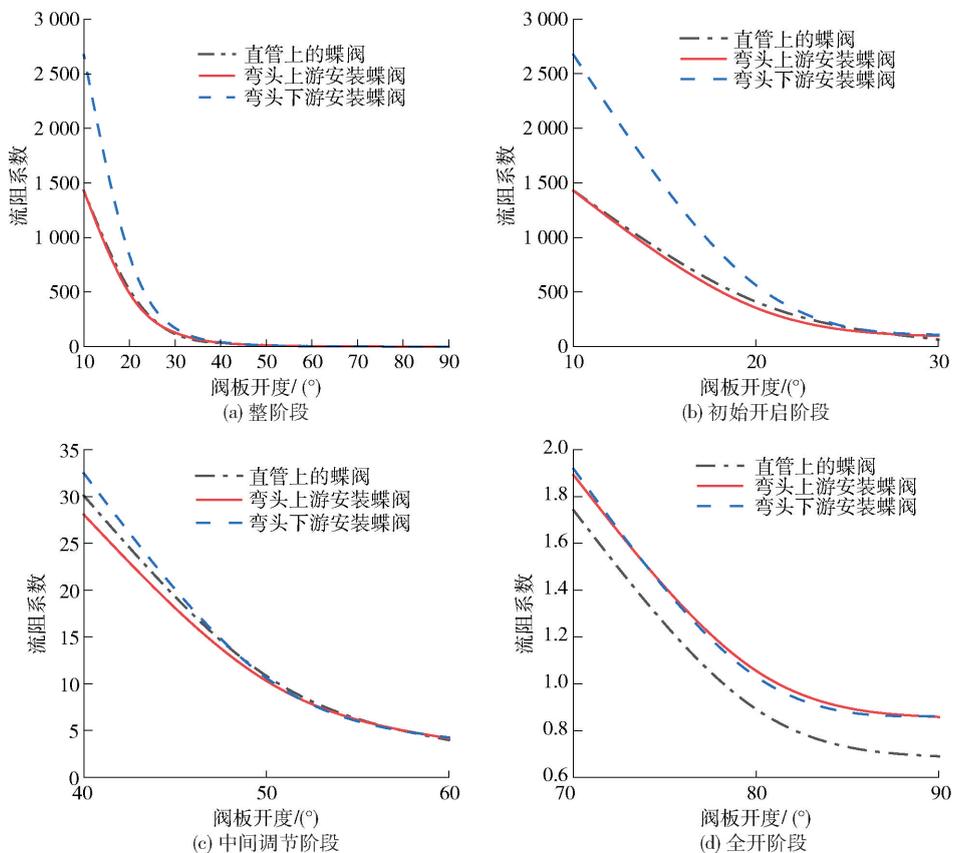


图 10 不同安装方式不同开度下流阻系数曲线

Fig. 10 Curve of flow resistance coefficient under different installation methods and different opening degrees

比直管布置高,这与弯头处持续存在的离心力效应密切相关。

### 3.2.3 工程优化建议

对比分析结果表明,当蝶阀布置于弯头上游时(方式2),系统在全工况范围内表现出更优的水力特性:在关键调节区间( $0^\circ \sim 30^\circ$ ),流阻系数较方式1降低 87.2% ~ 10.8%;在中高开度区间,流阻系数也有 2.4% ~ 15.7% 的改善。因此,建议在实际工程中优先采用弯头上游装蝶阀的布置方案,该配置不仅可提升系统流通能力,还能有效抑制阀门振动,具有显著的工程应用价值。

## 4 结论

1) 在布置方案选择时,推荐采用弯头上游安装蝶阀(方式2),其在全开度范围内综合性能最优,尤其在关键调节区间( $30^\circ \sim 90^\circ$ ),压力损失较弯头下游安装蝶阀更低,流阻系数降低。

2) 当采用方式1的布置形式时,避免在低开度( $< 30^\circ$ )频繁启闭,以减少系统振动,需避免用于精

密调节场景。

3) 在工程实践中,应根据工况需求选择布置方案,并针对低开度工况采取结构优化措施。管路系统设计改进方向,对于需频繁调节的管路系统,应尽量增加蝶阀与弯头的间距,以削弱组合安装的叠加效应。

### [参考文献]

- [1] 孙健. 基于 SolidWorks Flow Simulation 的球阀流场分析[J]. 机械研究与应用, 2019, 32(4): 175 - 177.
- [2] 赵伟. 基于 SolidWorks 的阀门流量特性仿真研究[J]. 机械工程与自动化, 2025, 54(2): 88 - 90.
- [3] 刘晓凯, 袁林枫. 基于 SolidWorks Flow Simulation 大口径蝶阀流场分析及结构对比[J]. 智能制造, 2016(8): 46 - 49.
- [4] 李晓波. 基于 Solidworks Flow Simulation 的微流阻微开启压力止回阀设计[J]. 科技通报, 2017(5): 98 - 101.
- [5] 梁潇. 球阀管路系统流场特性分析[D]. 西安: 长安大学, 2022.
- [6] 张健平, 张松, 但志宏, 等. 大口径蝶阀流量系数的影响因素分析[J]. 航空动力学报, 2025, 40(1): 403 - 415.

- [7] 高红亮. 利用 SolidWorks Flow Simulation 分析调节蝶阀的流量系数[J]. 通用机械, 2015(10):57-58,63.
- [8] 李娜, 王杰. 大型泵站装置系统的 CFD 并行计算及分析[J]. 中国农村水利水电, 2016(10):179-181,185.
- [9] 江鑫, 韩欣霖, 韩昱. 三偏心蝶阀流场数值模拟与流量特性分析[J]. 科学与信息化, 2022(4):157-161,165.

## Numerical simulation of flow field in butterfly valves under different pipeline layouts based on SolidWorks Flow Simulation

QIAO Ruozhen

(China ENFI Engineering Corporation, Beijing 100038, China)

**Abstract:** This study investigates the influence of butterfly valve installation positions on flow characteristics in an inverted U-shaped pipeline system through numerical simulations based on SolidWorks Flow Simulation. By constructing three butterfly valve configurations (downstream of the elbow, upstream of the elbow, and in a straight pipe) combined with flow field visualization and quantitative analysis of flow resistance coefficients, the hydraulic performance of different layouts was systematically compared. The results reveal a significant negative correlation between the valve opening angle and the flow resistance coefficient, with nonlinear resistance modulation by angle variation. The resistance adjustment gradient is particularly pronounced in the low-opening range ( $0^{\circ} \sim 30^{\circ}$ ). When the butterfly valve is installed upstream of the elbow, the system exhibits superior flow stability across the full operating range, with significantly reduced flow resistance coefficients and pressure losses. Additionally, this configuration effectively suppresses valve vibration and flow separation phenomena. Based on the simulation results, it is recommended to prioritize the upstream elbow installation of butterfly valves in engineering practice, especially for pipeline systems requiring frequent adjustments. Further performance improvements can be achieved by optimizing elbow spacing or introducing flow guides.

**Keywords:** CFD; butterfly valve; flow field simulation; pipeline layout; flow resistance coefficient; numerical simulation

