

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2020.03.012

# 三通道特斯拉阀门结构与优化

刘海洋<sup>1</sup>, 张钰浩<sup>1</sup>, 李广超<sup>1\*</sup>, 王森<sup>1</sup>, 马佳<sup>2</sup>

(1. 沈阳航空航天大学辽宁省航空推进系统先进测试技术重点实验室, 辽宁 沈阳 110136;  
2. 沈阳航空航天大学理学院, 辽宁 沈阳 110136)

**摘要:**针对现有特斯拉阀门仅有2个端口,无法将因逆压超过临界值而回流的流体排出,进而影响前级机械部件正常工作的问题,课题组提出了一种三通道特斯拉阀门,并对其进行了结构优化。首先结合流场仿真分析此结构的设计原理,提出了影响工作效率的变量;然后使用Kriging代理模型构建设计变量与目标变量之间关系的响应面,运用粒子群算法(PSO)实现对总目标函数的寻优,完成了三通道阀门多目标优化设计;最后利用CFD软件完成对优化结果进行验证。结果表明:半径参数是影响效率的重要因素,响应面拟合效果良好,优化后入口静压降低6.85%,流量比降低10.56%,阀门工作效率有所提高。优化后的结构可改善倒吸回流状况,且无可动部件,便于加工和使用。

**关键词:**特斯拉阀门;三通道结构;Kriging代理模型;粒子群算法;计算流体力学

中图分类号:TH138.52 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2020)03-0059-06

## Structural Design and Optimization of Three-Channel Tesla Valve

LIU Haiyang<sup>1</sup>, ZHANG Zhenghao<sup>1</sup>, LI Guangchao<sup>1\*</sup>, WANG Sen<sup>1</sup>, MA Jia<sup>2</sup>

(1. Liaoning Key Lab of Advanced Measurement and Test Technology for Aviation Propulsion System, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China; 2. College of Science, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

**Abstract:** The existing Tesla valve has only two ports, which can not discharge the fluid flowing back due to the reverse pressure exceeding the critical value, thus impacting the normal operation of the front mechanical parts. A three-channel Tesla valve was proposed and its structure was optimized. The design theory was claimed in combination with the flow field simulation firstly, and the variables affecting the working efficiency of the structure were proposed, then the response surface of the relationship between the design and target variables was constructed using the Kriging surrogate model, and the optimization of the total objective function used by particle swarm optimization (PSO) was achieved, so the multi-objective optimization design of the three-channel valve was completed, in the end, CFD software was used to verify the optimization results. The results show that the radius parameter is an important factor affecting the efficiency, and the response surface fitting effect is good. After optimization, the inlet static pressure is reduced by 6.85%, and the flow ratio is reduced by 10.56%, the working efficiency of the valve is improved. The optimized structure can improve the condition of backdraft and backflow, and has no movable parts, so it is convenient to process and use.

**Keywords:** Tesla valve; three-channel structure; Kriging surrogate model; particle swarm optimization; CFD (computational fluid dynamics)

1920年尼古拉·特斯拉提出一种无可动部件阀门,并将其命名为“特斯拉阀门”。通过构建特殊几何回路,特斯拉阀门可对内部流体起到控制流向作用<sup>[1][2]</sup>。研究表明,特斯拉阀门可以在一个方向提供较

另一个方向更高的压降,使流体沿其中一方向流动会较为顺利,沿另一方向会较为困难<sup>[2][1]</sup>。目前有诸多工作者对特斯拉阀门结构及布局方式进行了大量分析:如Reed<sup>[3]</sup>在此基础上提出MSTV型特斯拉阀门;

收稿日期:2019-08-26;修回日期:2020-01-14

基金项目:国家自然科学基金(51306126);辽宁省大学生创新创业训练计划项目(201810143265)。

第一作者简介:刘海洋(1999),男,山东潍坊人,本科,主要研究方向为计算流体力学和优化设计。通信作者:李广超(1979),男,辽宁铁岭人,博士,教授,主要研究方向为燃气轮机气动热力学、计算流体力学等。E-mail:ligc706@163.com

Gamboa 等<sup>[4]342</sup>通过结构优化得到了具有最高控制流向效果的特斯拉阀门; Mohammadzadeh 等<sup>[5]</sup>对特斯拉阀门结构尺寸效应作出了探讨。目前特斯拉阀相关理论基础已经较为成熟。特斯拉提出此结构的目的是抑制机械产品倒吸<sup>[1]3</sup>, 此结构能够保证在逆压未超过临界值之前, 内部无流体流经<sup>[4]339</sup>。特斯拉阀门具有结构简单, 方便加工, 使用寿命长等优点, 仅凭借其自身几何形状便可产生流向控制效果。

但对于多数机械产品, 工作过程中可能发生较大气流冲击<sup>[6]</sup>, 伴随较大压力, 若应用一般特斯拉阀门, 气流压力值将超过其逆流临界值, 无法避免回流所产生的危害。因此在抑制倒吸的同时, 需要有合适的通道将反向流动气体及时排出, 避免将热量和压力带回前级机械部件, 否则会出现喘振等一系列不利于正常工作的现象<sup>[7]</sup>。

针对上述问题, 课题组提出了一种三通道特斯拉阀门, 当发生倒吸时, 阀门能将因逆压超过临界值而回流的气体排到外界, 一定程度上能抑制倒吸和回流的发生; 并通过结构优化确定最优尺寸参数, 缩短了开发周期。

### 1 特斯拉阀门

前人研究中, 具有最高流向控制性质的结构为 GMF 特斯拉阀门<sup>[4]346</sup>, 结构如图 1 所示。GMF 特斯拉阀门单元由 3 个通道组成, 分别为直通道、圆弧通道和斜通道。其中直通道与斜通道之间的夹角为 48°, 圆弧通道外圆弧半径为 23.58 mm, 其一端与斜通道末端相切, 另一端是与水平线夹角为 18°的通道, 并与水平通道过渡连接。斜通道、直通道中未与其他通道交汇部分长为 120 mm, 所有管道宽度均为 10 mm。

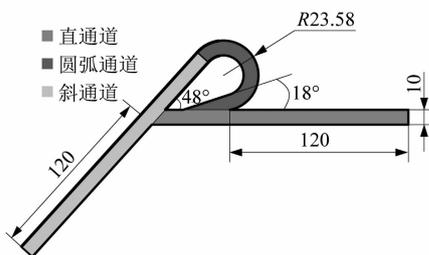


图 1 特斯拉阀门单元结构

Figure 1 Structure of Tesla valve unit

分别以直通道端口和斜通道端口为流体入口, 另一端为出口, 在入口流速为 15 m/s, 出口环境为标准大气压, 空气为流动介质的条件下, 使用 CFD 软件进行流场分析。2 种流动方式速度云图和沿程压降图分别如图 2 和图 3 所示。流体从直通道端口流入, 斜通

道端口流出过程中, 几乎没有流体沿圆弧通道流动。并且在流动方向急剧变化处会产生一部分损失, 从沿程压降图中可以看出此部分压力损失约为 40 Pa。这种流动方式为流体在特斯拉阀门中的正向流动<sup>[2]3</sup>。当流体从斜通道端口流入, 一部分流体经过圆弧通道到达直通道, 另一部在汇交处直接进入直通道。通过沿程压降图可以看出, 流经圆弧通道的流体因几何突变和流体交汇而产生的压力损失高达 150 Pa。这种流动方式为流体在特斯拉阀门中的逆向流动<sup>[2]3</sup>。由于逆向流动压力损失比正向流动大一个数量级, 即逆向流动会产生更大的能量耗散, 进而导致逆向流动会比正向流动困难, 这便是此结构可以实现流向控制的原因。

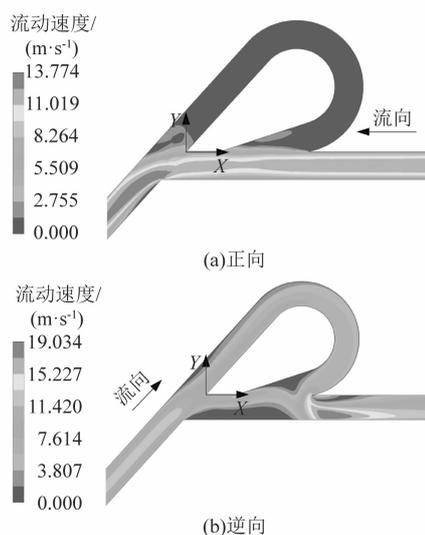


图 2 正逆向流动速度云图

Figure 2 Velocity nephogram of forward and reverse flow

### 2 三通道特斯拉阀门

由于原始特斯拉阀门仅包含 2 个端口, 无法将因逆压超过临界值而倒吸的流体排出, 故现提出一种三通道特斯拉阀门, 结构如图 4 所示, 总长和总宽分别为 500 和 200 mm, 使用时可根据实际情况按比例缩放, 图示中 A, B, C 分别代表此结构的 3 个可以与外界相通的管口。

三通道特斯拉阀门由 9 个单元组成, 具体参数与图 1 保持一致, 各单元布局考虑如下 3 种流动方式:

1) 管口 A 作为流动入口, 管口 B 和 C 作为出口。管口 A 与 B 之间流体将进行正向流动, 几乎无流体从管口 C 流出, 仿真结果如图 5 所示。

2) 管口 B 作为流动入口, 管口 A 与 C 作为流动出口。管口 B 与 C 之间流体会进行正向流动; 管口 B 与 A 之间流体则进行逆向流动。流体从管口 C 较从

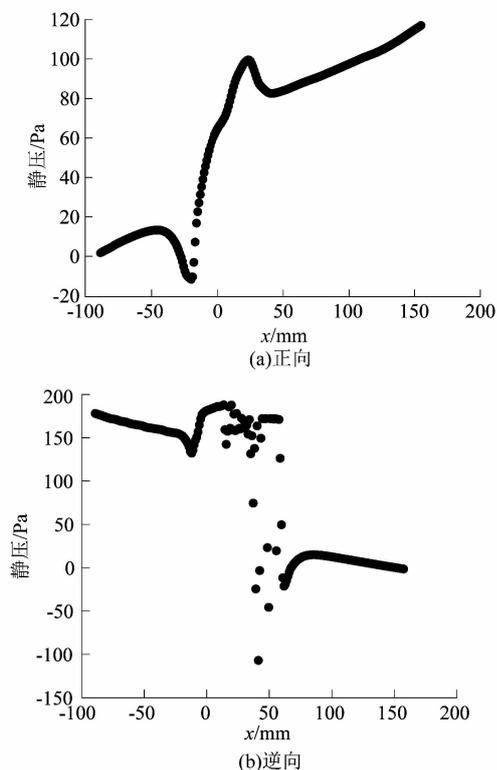


图3 正逆向流动沿程压降

Figure 3 Pressure drop of forward and reverse flow

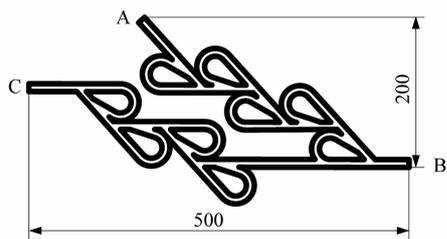


图4 三通道特斯拉阀门结构

Figure 4 Structural of three-channel Tesla valve

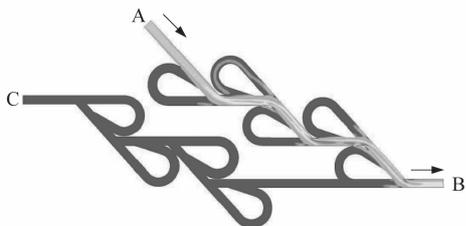


图5 流动方式 I

Figure 5 Flow condition I

管口 A 流出更为顺利,因此管口 C 处质量流量大于管口 A,仿真结果如图 6 所示。

3) 管口 C 作为流动入口,管口 B 作为流动出口。此时管口 C 与 B 之间流体进行逆向流动,而管口 A 与 B 之间无流体流动。仿真结果如图 7 所示。

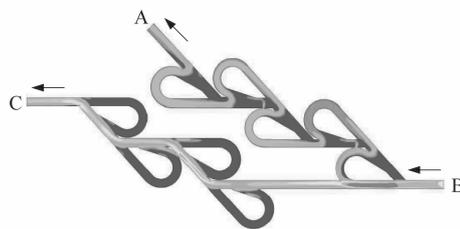


图6 流动方式 II

Figure 6 Flow condition II

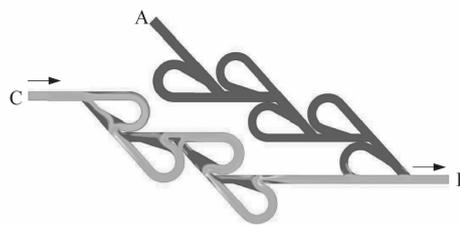


图7 流动方式 III

Figure 7 Flow condition III

此结构用做机械防倒吸装置时,考虑如下布局方式:管口 A 作为流动入口,管口 B 作为流动出口,管口 C 与外界相通。流动方式 I 可以作为机械产品内部流体的正常流动方式,发生倒吸时,回流的流体将按照流动方式 II 流动,因回流至管口 A 流量小于流至外界流量,回流部分流体可控性大幅度提高。流动方式 III 用于抑制外界大气涌入。

### 3 优化设计

上述 3 种流动方式中,流动方式 I 和 II 最为常见,因内部压力小于外界压力的情况很少出现,故流动方式 III 发生概率很小。接下来着重考察流动方式 I 和 II,使用优化设计方法改进结构中某些参数,使得三通道阀门具有更高工作效率。

#### 3.1 目标函数

分别定义流动方式 I 和 II 的目标函数,方便进行多目标优化。

对于流动方式 I,工作效率可用管口 A 处压力表示,即入口静压  $p_A$ ,较小入口静压可以方便流体流入,因此定义方式 I 的目标函数为:

$$\min p_A \quad (1)$$

对于流动方式 II,管口 A 质量流量越少,表明回流至入口的流体越少,因此将管口 A 与管口 C 质量流量的比值作为此方式的目标函数:

$$\min \frac{Q_{mA}}{Q_{mC}} \quad (2)$$

#### 3.2 优化对象

借助 CFD 仿真,靠近管口 B 的前两级圆弧通道半

径大小将对阀门工作效率产生较大影响,此2级通道半径对应图8中 $R_1$ 与 $R_2$ 。因此将这2个参数作为优化对象进行优化设计。 $R_1$ 与 $R_2$ 的初始尺寸均为23.58 mm,由于结构约束,半径大于初始尺寸会产生干涉,尺寸过小则无法围成圆弧通道,故 $R_1$ 和 $R_2$ 的取值范围为[17.58,23.58] mm。

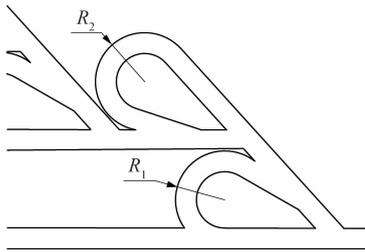


图8 优化对象

Figure 8 Optimization objectives

### 3.3 Kriging 代理模型

进行优化设计需要明确输入参数与输出参数之间关系,以获得全局最优解。而多数工程问题中输入与输出之间并不存在明确显式关系,因此常使用代理模型替代真实模型进行求解<sup>[8]2</sup>。在目前常用的代理模型中,Kriging 代理模型具有计算效率高、计算周期短以及对复杂非线性问题处理效果好等一系列优点,能够兼顾全局和局部因素的影响,具有良好的优越性<sup>[9-11]</sup>,故本次优化设计使用 Kriging 代理模型构建表征输入与输出关系的响应面。

Kriging 模型由全局模型和局部偏差2部分组成,其输出参数为全局设计空间与局部偏差之和<sup>[9]546</sup>,其数学表达式为:

$$y(x) = F(\boldsymbol{\beta}, x) + Z(x) = \mathbf{f}^T(x)\boldsymbol{\beta} + Z(x) \quad (3)$$

式中: $\boldsymbol{\beta} = [\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p]$ ,是基函数回归系数向量; $\mathbf{f} = [f_1, f_2, \dots, f_p]$ ,是回归多项式基函数向量,代表设计空间全局模型; $p$ 为回归多项式数量; $Z(x)$ 是均值为0,方差为 $\sigma^2$ 的 Gaussian 随机函数,其数学期望和协方差矩阵为:

$$E(Z(x)) = 0; \quad (4)$$

$$\text{Cov}[Z(x), Z(u)] = \sigma^2 \mathbf{R}(x, u, \theta) \quad (5)$$

式中: $\theta$ 为相关函数参数,用于衡量样本点之间相关性随两点间距离增加的衰减程度; $\mathbf{R}(x, u, \theta)$ 为样本点间的变异函数,其一般形式为:

$$\mathbf{R}(x, u, \theta) = \prod_{j=1}^n R_j(d_j) \quad (6)$$

式中: $R_j(d_j)$ 为变异函数的核函数,函数形式通常采用 Gaussian 函数<sup>[10]3200</sup>,其表达式为:

$$\mathbf{R}(x, u, \theta) = \exp\left(-\sum_{k=1}^n \theta_k |x_k^i - x_k^j|^2\right) \quad (7)$$

式中: $n$ 为设计变量个数; $\theta_k$ 是未知参数矢量; $|x_k^i - x_k^j|$ 为第 $i$ 个数据点与第 $j$ 个数据点之间距离。

确定完成相关函数,便可以建立 $y(x)$ 的近似响应 $\hat{y}(x)$ 关于观测点 $x$ 的表达式:

$$\hat{y}(x) = \hat{\boldsymbol{\beta}}^T \mathbf{f}(x) + \mathbf{r}^T(x) \mathbf{R}^{-1}(\mathbf{y} - \mathbf{F}\hat{\boldsymbol{\beta}}) \quad (8)$$

式中: $\mathbf{y}$ 是 $n$ 维列向量,由每个设计点的目标函数值组成; $\mathbf{r}^T(x)$ 为相关性向量,表示观测点 $x$ 与样本点之间的相关性,且有

$$\mathbf{r}^T(x) = [R(x, x_1), R(x, x_2), \dots, R(x, x_n)]^T \quad (9)$$

其中 $\boldsymbol{\beta}$ 可按式进行估计:

$$\hat{\boldsymbol{\beta}} = (\mathbf{x}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{x})^{-1} \mathbf{x}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{Y} \quad (10)$$

式中: $\mathbf{x}$ 为由试验样本点组成的系数矩阵; $\mathbf{Y}$ 为试验样本点对应的响应值。

$$\text{方差 } \sigma^2 = (\mathbf{Y} - \mathbf{x}\boldsymbol{\beta})^T \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{Y} - \mathbf{x}\boldsymbol{\beta}) \quad (11)$$

式(7)中相关参数 $\theta$ 可通过最大似然估计得到,即有

$$\min [n \ln(\hat{\sigma}^2) + \ln |\mathbf{R}|] / 2 \quad (12)$$

求解式(12)的无约束非线性最优问题便可得到最优 Kriging 模型。

### 3.4 试验样本点

试验样本点布置会对响应面精度产生较大影响<sup>[12]</sup>,因此课题组采用最优空间填充设计方法布置试验点。此方法布置的试验点空间填充能力强,在设计空间分布均匀,能较好反映全局特性<sup>[13]</sup>,适用于后续 Kriging 代理模型构建的响应面。经 CFD 计算得到试验设计点的目标函数值如表1所示。

表1 最优空间填充设计点及计算结果

Table 1 Optimal space-filling design and calculation results

序号	$R_1/\text{mm}$	$R_2/\text{mm}$	流量比	静压/Pa
1	21.33	18.00	0.385	621.93
2	22.67	19.33	0.368	630.36
3	18.67	21.33	0.372	451.89
4	20.67	20.67	0.372	458.51
5	18.00	17.33	0.463	751.30
6	19.33	18.67	0.403	526.67
7	20.00	22.67	0.356	464.08
8	22.00	22.00	0.356	487.55
9	17.33	20.00	0.439	486.19

### 3.5 响应面建立

根据求解得到的设计点数据,利用 Kriging 代理模型构建响应面,图9所示为式(1)中静压关于半径参

数的响应面,图 10 所示为流量比关于半径参数的响应面,图中散点表示所布置的初始试验点。其中静压响应面均方误差小于 0.03,流量比响应面均方误差小于 1%,说明利用 Kriging 代理模型所构建的响应面能够很好反映设计变量与目标变量之间的函数关系。

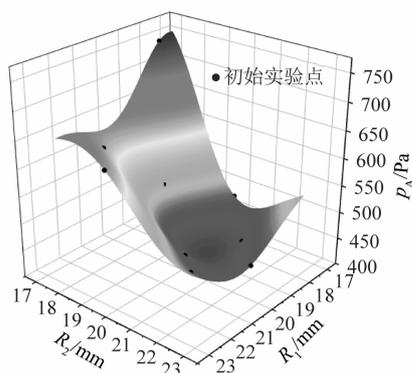


图 9 静压关于  $R_1$  和  $R_2$  的响应

Figure 9 Static pressure response for effects of  $R_1$  and  $R_2$

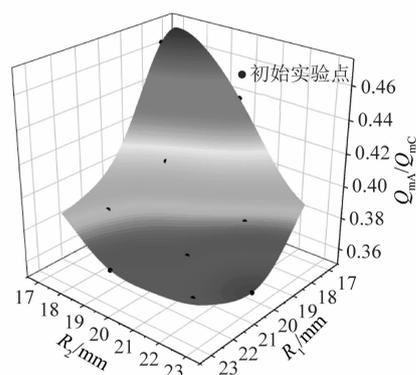


图 10 流量比关于  $R_1$  和  $R_2$  的响应

Figure 10 Flow ratio response for effects of  $R_1$  and  $R_2$

### 3.6 多目标优化

针对课题组提出的结构,同时将流量比和入口静压作为目标变量进行多目标优化设计,为避免目标变量数据量级对优化结果产生影响,需要将单个目标函数进行归一化处理<sup>[8]</sup>,总目标函数  $G$  为单个目标函数的加权和。如式(13)所示,其中  $w$  为权重系数,  $p_A^*$  和  $(Q_{mA}/Q_{mC})^*$  分别为出口静压和流量比的均值,则有

$$G = w \frac{p_A}{p_A^*} + (1 - w) \frac{Q_{mA}/Q_{mC}}{(Q_{mA}/Q_{mC})^*} \quad (13)$$

出口静压和流量比能够分别反映流动方式 I 和 II 的工作效率,就机械产品而言,这 2 个变量能够分别表征正常工作和发生倒吸时阀门导通和阻碍流体的效

果,应具有同等重要地位,综合考虑,文中取  $w$  为 0.5。

### 3.7 寻优过程

对于多目标优化设计中的寻优过程,常用方法有遗传算法、模拟退火算法和粒子群算法等。其中粒子群算法是受鸟群捕食规律启发而提出的算法,其通过追随当前搜索到的最优值来寻找全局最优,具有便于实现、收敛速度快等优点<sup>[14-15]</sup>,而且从已经构建完成的响应面可以看出,响应面并不存在复杂的极值点,因此使用粒子群算法便可以完成目标函数的寻优<sup>[14]1947</sup>。

图 11 所示为目标函数  $F$  在整个寻优过程中的变化情况,收敛效果很好,优化后的尺寸如表 2 所示。优化后  $R_1$  尺寸变化较为明显,  $R_2$  尺寸变化较小。  $R_1$  减小时,会由于管径减小导致第一级圆弧通道压力增大,进而导致管口 A 的质量流量减少,但同时也会导致式(1)中入口静压的增大。因此较小的  $R_1$  值有利于降低流量比,适当减小  $R_2$  值可以抵消由  $R_1$  值减小而导致的出口静压增大的影响。

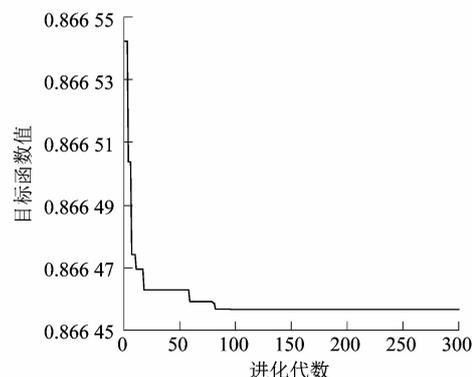


图 11 粒子群算法寻优过程

Figure 11 Optimization process of PSO

表 2 原始模型与优化后模型参数对比

Table 2 Verification of parameters of initial model and optimized model

项目	$R_1$ /mm	$R_2$ /mm
原始模型	23.58	23.58
优化后模型	19.86	22.83

### 4 结果验证

使用优化后尺寸重建模型并进行流场仿真,其流动介质、边界条件以及收敛准则等设置与原始结构设置一致,优化前后管口 A 处压力云图和整体速度云图如图 12 和 13 所示。通过式(1)和式(2)计算得到的具体数值如表 3 所示。优化后入口静压降低了 6.85%,流量比降低了 10.56%,保证了阀门工作在流动方式 I 时,流体流入管道时所需入口压力尽可能低,也保证了

工作在流动方式 II 时管口 C 质量流量尽可能多。CFD 计算验证了本次优化结果的合理性和有效性。

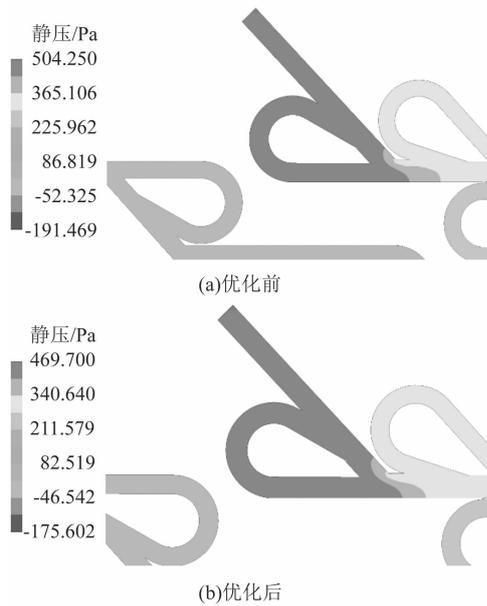


图 12 优化前后入口静压

Figure 12 Static pressure of inlet before and after optimization

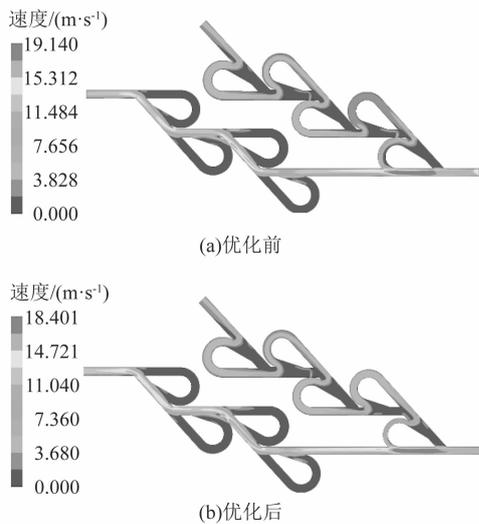


图 13 优化前后速度云图

Figure 13 Velocity nephogram before and after optimization

表 3 优化结果对比

Table 3 Verification of optimal calculation results

项目	静压/Pa	流量比
初始模型	504.25	0.373
优化后模型	469.70	0.334

## 5 结语

1) 课题组利用特斯拉阀门单元的流动导向性,提出了一种应用在机械防倒吸的三通道特斯拉阀门,此阀门无能动结构,具有 3 种流动方式,能够实现对流体流动方向的控制,其具有加工方便,使用寿命长等特性。

2) 课题组的研究表明入口静压和流量比可以分别表征三通道阀门关键流动方式的工作效率,圆弧通道半径  $R_1$  与  $R_2$  的大小对工作效率有较大影响。优化结果和 CFD 验证结果表明,当  $R_1$  取 19.86 mm,  $R_2$  取 22.83 mm 时,入口静压可降低 6.85%,流量比可降低 10.56%,阀门工作效率得到提高。

3) 课题组提出的结构可作为一般机械的防倒吸装置,也可用于发动机防喘振控制。本课题设计思想也可为相关领域研究提供参考。

### 参考文献:

- [1] TESLA N. Valular conduit; US1329559 [P]. 1920-02-03.
- [2] THOMPSON S M, PAUDEL B J, JAMAL T, et al. Numerical investigation of multi-staged Tesla valves [J]. Journal of Fluids Engineering, 2014, 136(8): 1-7.
- [3] REED J L. Fluidic rectifier; US 5265636 [P]. 1993-11-30.
- [4] GAMBOA A R, MORRIS C J, FORSTER F K. Improvements in fixed-valve micropump performance through shape optimization of valves [J]. Journal of Fluids Engineering, 2005, 127(2): 339-346.
- [5] MOHAMMADZADEH K, KOLAHDOUZ E M, SHIRANI E, et al. Numerical investigation on the effect of the size and number of stages on the tesla microvalve efficiency [J]. Journal of Mechanics, 2013, 29(3): 527-534.
- [6] 廉筱纯, 吴虎. 航空发动机原理 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2005: 54.
- [7] 罗泽明, 郑丽, 张玉宪. 航空发动机喘振的研究与发展 [J]. 机械设计与制造工程, 2015(6): 1-4.
- [8] 艾延廷, 刘海月, 田晶, 等. 薄壁机匣螺栓连接结构多目标优化设计 [J]. 推进技术, 2018, 40(4): 2.
- [9] 王晓锋, 席光. 基于 Kriging 模型的翼型气动性能优化设计 [J]. 航空学报, 2005, 26(5): 545-549.
- [10] 韩忠华. Kriging 模型及代理优化算法研究进展 [J]. 航空学报, 2016, 37(11): 3197-3225.
- [11] 王银, 孙泽刚, 李开世, 等. 基于 Kriging 代理模型液压锥阀抗空化结构优化研究 [J]. 液压与气动, 2019(1): 78.
- [12] 徐兴伟, 胡晓兵, 武韶敏, 等. 实验设计及 Kriging 响应面在优化设计中的应用 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2017(1): 62-65.
- [13] 方开秦. 均匀设计与均匀设计表 [M]. 北京: 科学出版社, 1994: 55-57.
- [14] KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimization [C] // Proceedings of ICNN' 95-International Conference on Neural Networks. Perth, Australia: IEEE Service Center, 1995: 1942-1948.
- [15] 余胜威. MATLAB 优化算法案例分析与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2015: 476-493.