

# 某船用低压叶片泵顺序阀流场及动态特性仿真优化

吴建磊, 朱江森, 赵天梁, 袁艳艳

武汉船用机械有限责任公司, 湖北 武汉  
Email: wjlboy101@163.com

收稿日期: 2021年1月18日; 录用日期: 2021年2月8日; 发布日期: 2021年2月24日

---

## 摘要

顺序阀是叶片泵的关键阀件之一, 主要作用是安全保护。为了保证顺序阀的泄压功能, 采用CFD流场仿真和AMESim动态响应仿真方法, 分析顺序阀压力特性, 并进行结构优化。仿真优化结果表明, 顺序阀满足压力指标要求。

## 关键词

顺序阀, CFD仿真, 动态响应, 仿真优化

---

# CFD and Dynamic Simulating Optimization of Sequence Valve in Marine Low Pressure Vane Pump

Jianlei Wu, Jiansen Zhu, Tianliang Zhao, Yanyan Yuan

Wuhan Marine Machinery Plant Co., Ltd, Wuhan Hubei  
Email: wjlboy101@163.com

Received: Jan. 18<sup>th</sup>, 2021; accepted: Feb. 8<sup>th</sup>, 2021; published: Feb. 24<sup>th</sup>, 2021

---

## Abstract

Sequence valve is one of the important valves in vane pump, and its main function is to protect security. In order to guarantee the sequence valve pressure relief function, CFD simulation and dynamic simulation in AMESim are used to analyze the pressure characteristics of sequence valve,

**文章引用:** 吴建磊, 朱江森, 赵天梁, 袁艳艳. 某船用低压叶片泵顺序阀流场及动态特性仿真优化[J]. 机械工程与技术, 2021, 10(1): 74-82. DOI: 10.12677/met.2021.101009

and then optimize structure. Optimization results show that the sequence valve satisfies the requirement of pressure index.

## Keywords

Sequence Valve, CFD Simulation, Dynamic Response, Simulating Optimization

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

本顺序阀是船用叶片泵的关键液压元件之一。相对于传统的液压系统溢流阀而言，除了具备安全保护作用外，还额外具备卸荷功能，可以使系统压力达到安全保护压力后，迅速卸荷至较低压力，进而使叶片泵受到更好的超载保护。目前市场类似产品为 IHI 低压叶片泵顺序阀，最大流量为 1000 L/min，采用两个额定流量 500 L/min 的顺序阀并联的方式进行安全保护。本顺序阀应用的船用低压叶片泵额定流量达 4100 L/min，目前市场上没有类似的成熟产品，流量指标要求远超过主流产品。

## 2. 技术路线

本文主要分析顺序阀卸荷功能，其设计指标为：额定流量 4100 L/min，卸荷行程小于 10 mm，卸荷前压力不超过 12 MPa，卸荷后压力不超过 1.5 MPa。

针对该设计指标，制定技术路线如图 1 所示，采用 CFD 流动特性仿真和 AMESim 动态特性仿真计算顺序阀的性能，并进行不断优化设计[1] [2] [3]。在本技术路线中，CFD 流动特性仿真的结果将会用于标定 AMESim 动态特性仿真时的参数设置，以提高顺序阀卸荷特性的预报精度。

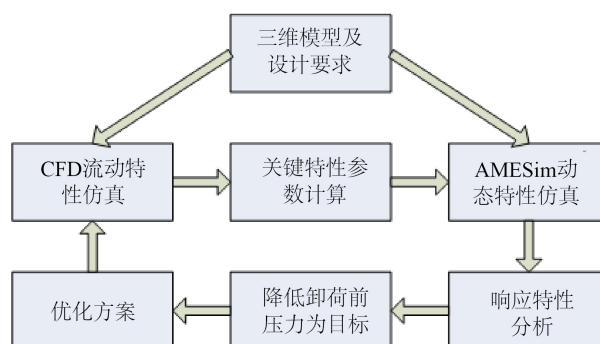


Figure 1. Technical route

图 1. 技术路线

## 3. 顺序阀流动特性仿真

### 3.1. 计算流体域

顺序阀的计算流体域提取至三维模型，并进行合理简化处理，如图 2 所示。

图 3 所示为顺序阀计算流体域网格模型，采用六面体网格进行划分，并进行网格无关性检查，在保

证计算精度的前提下，减少非关键区域网格数量，提高计算效率[4] [5]。

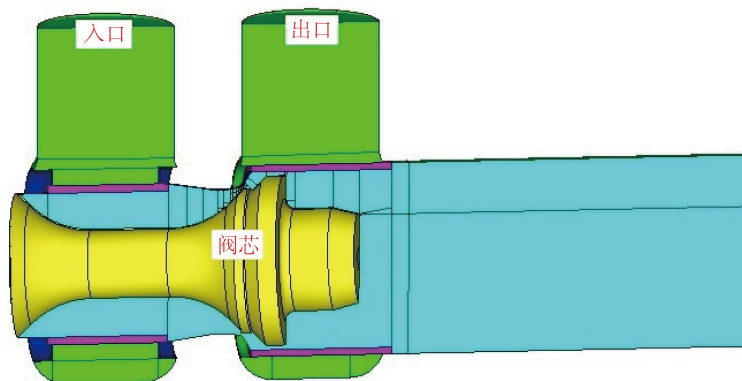


Figure 2. Geometric model of computational fluid domain  
图 2. 计算流体域几何模型

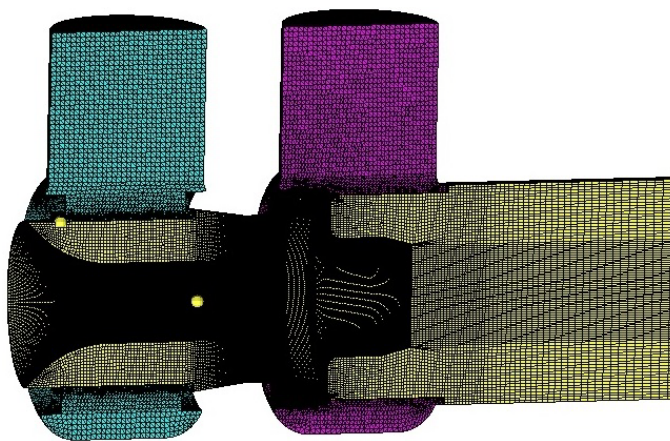


Figure 3. Computational fluid domain grid model  
图 3. 计算流体域网格模型

### 3.2. 边界条件

依据顺序阀的使用特性，边界条件按照如下设置：

- ① 顺序阀流量未达到 4100 L/min 时，压力入口 pressure-inlet，压力出口 pressure-outlet；
- ② 顺序阀流量达到 4100 L/min 后，速度入口 velocity-inlet，压力出口 pressure-outlet。

### 3.3. 仿真结果

表 1 和表 2 所示为不同阀芯行程时的流动特性仿真结果，计算得到流量、压差、等效  $C_d \cdot A$  及阀芯液动力。当压差 9 MPa，流量 4100 L/min 时，阀芯行程为 10.5 mm。

图 4 所示为阀芯液动力特性曲线，蓝线与红线交叉点，即为液动力最大点。当行程为 10.5 mm 时，最大液动力为 2500 N。阀芯液动力会导致顺序阀泄压前的压力升高，液动力为 2500 N 时，顺序阀泄压前压力会升高 3.86 MPa，达到 12.86 MPa。

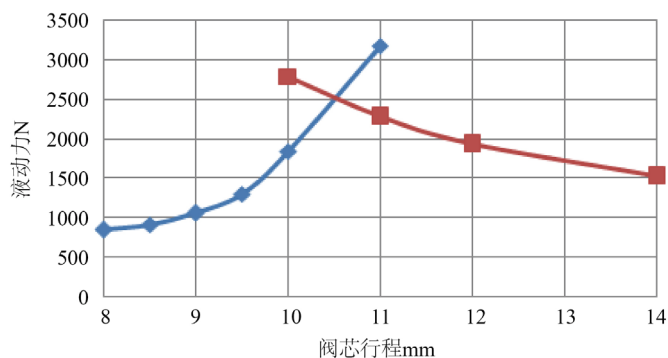
本方案的卸荷前压力、卸荷行程超过了设计要求，需进行合理优化。同时，流场计算得到的  $C_d \cdot A$ 、阀芯液动力将作为 AMESim 动态特性建模的标定参数。

**Table 1.** Simulation results of spool stroke 8~11 mm**表 1.** 阀芯行程 8~11 mm 仿真结果

行程/mm	压差/MPa	流量/L·min <sup>-1</sup>	等效 Cd·A	阀芯液动力/N
8	9	1756	0.000203	847
8.5	9	1894	0.000219	912
9	9	2150	0.000249	1063
9.5	9	2579	0.000299	1305
10	9	3292	0.000381	1838
11	9	4870	0.000564	3169

**Table 2.** Simulation results of spool stroke 10~16 mm**表 2.** 阀芯行程 10~16 mm 仿真结果

行程/mm	流量/L·min <sup>-1</sup>	压差/MPa	等效 Cd·A	阀芯液动力/N
10	4100	14.01	0.000381	2790
11	4100	6.27	0.000569	2274
12	4100	3.41	0.000772	1929
14	4100	1.51	0.001159	1525
16	4100	0.95	0.001459	1256

**Figure 4.** Hydrodynamic characteristic curve of valve core**图 4.** 阀芯液动力特性曲线

## 4. 顺序阀动态特性仿真

顺序阀的动态特性仿真主要计算顺序阀在不同工况时的卸荷响应特性。

### 4.1. 动态特性仿真建模

顺序阀的动态仿真 AMESim 模型如图 5 所示, 模型中的元件参数来源于顺序阀的三维模型、流场仿真结果等。模型中, 泵提供流量, 开关阀和溢流阀配合进行加载。

### 4.2. 动态特性仿真工况

开关阀打开, 溢流阀压力在 30 s 内从 0 MPa 上升至 20 MPa。

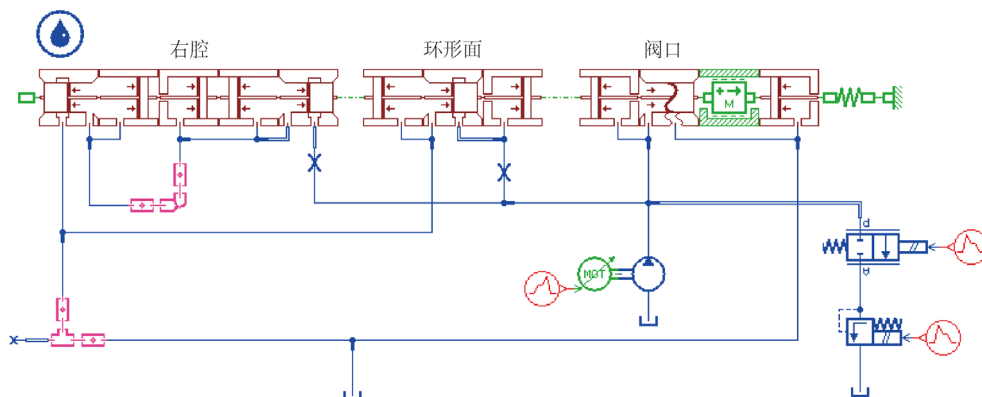


Figure 5. AMESim model for dynamic simulation of sequence valve  
图 5. 顺序阀动态仿真 AMESim 模型

### 4.3. 动态特性仿真结果

图 6~图 8 所示为顺序阀卸荷性能动态响应特性曲线，顺序阀卸荷时压力为 12.68 MPa，行程为 8.42 mm，流量 2285 L/min，卸荷后压力为 1.63 MPa。

上述卸荷性能指标中，卸荷压力超过 12 MPa，不满足设计指标要求。分析原因可知，顺序阀卸荷时，流量未达到额定流量，阀口通流能力不足，需提高。

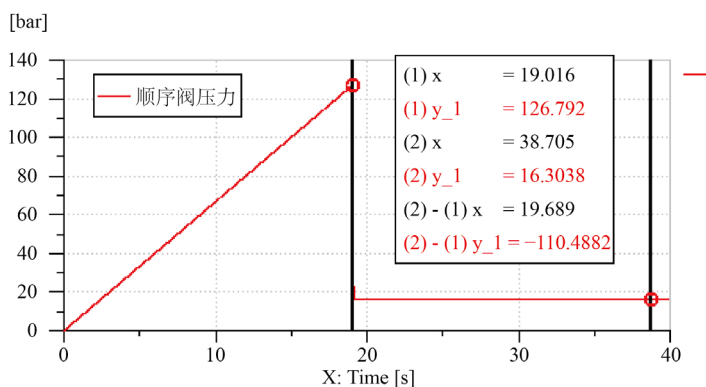


Figure 6. Pressure response characteristic curve of sequence valve  
图 6. 顺序阀压力响应特性曲线

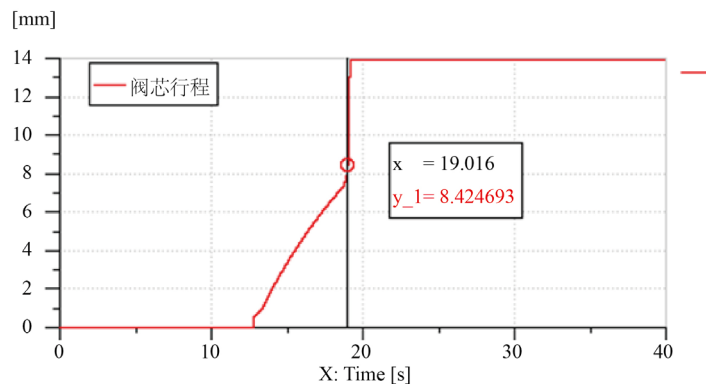


Figure 7. Stroke characteristic curve of sequence valve spool  
图 7. 顺序阀阀芯行程特性曲线

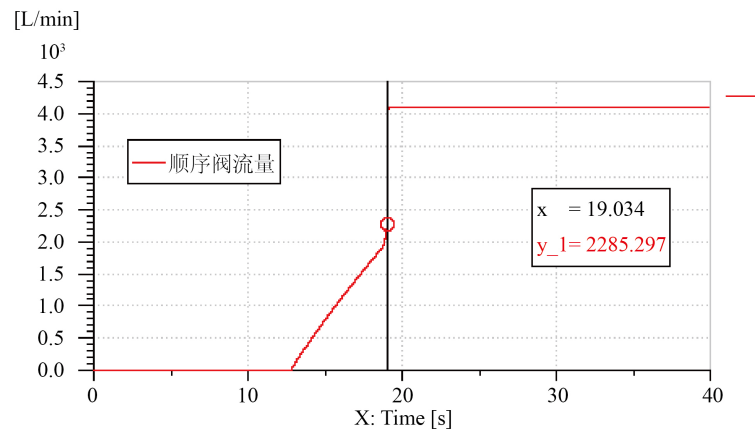


Figure 8. Flow characteristic curve of sequence valve  
图 8. 顺序阀流量特性曲线

## 5. 优化分析

### 5.1. 优化方案

为了提高阀口通流能力，阀套上的锥面锥度由原先的  $8^\circ$  更改为  $15^\circ$  (如图 9 所示)。

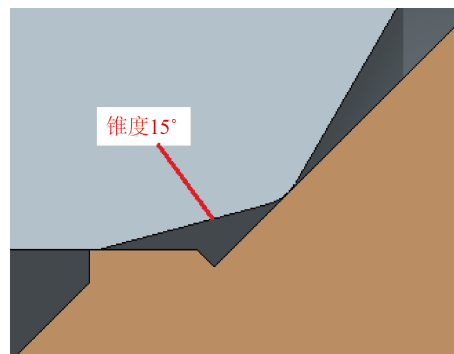


Figure 9. Taper of valve sleeve  
图 9. 阀套锥度

### 5.2. 流动特性仿真结果

表 3、表 4 和图 10 所示为优化方案流动特性仿真结果，当压差 9 MPa，流量 4100 L/min 时，阀芯行程 8.75 mm，液动力 2150 N。

相比原方案，阀芯行程从 10.5 mm 减小至 8.75 mm，液动力从 2500 N 减小至 2150 N，优化效果好。

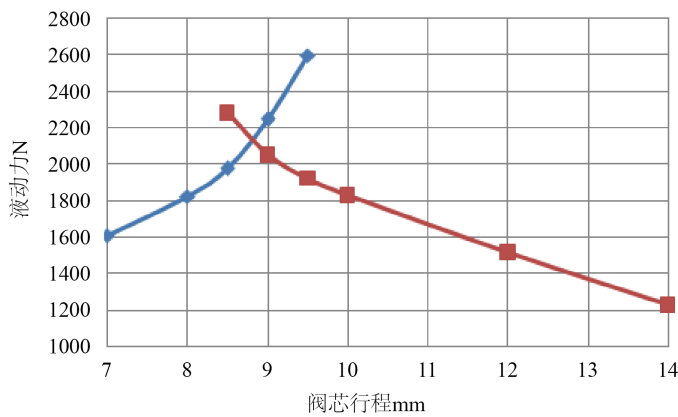
Table 3. Simulation results of spool stroke 7~9.5 mm—Optimization scheme

表 3. 阀芯行程 7~9.5 mm 仿真结果——优化方案

行程/mm	压差/MPa	流量/L·min <sup>-1</sup>	等效 Cd·A	阀芯液动力/N
7	9	3161	0.000366	1609
8	9	3592	0.000416	1825
8.5	9	3880	0.000450	1975
9	9	4327	0.000501	2347
9.5	9	4823	0.000559	2597

**Table 4.** Simulation results of spool stroke 8.5~14 mm—Optimization scheme  
**表 4.** 阀芯行程 8.5~14 mm 仿真结果——优化方案

行程/mm	压差/MPa	流量/L·min <sup>-1</sup>	等效 Cd·A	阀芯液动力/N
8.5	4100	10.18	0.000447	2280
9	4100	8.14	0.000500	2050
9.5	4100	6.23	0.000571	1920
10	4101	4.67	0.000660	1829
12	4100	1.84	0.001050	1514
14	4100	0.91	0.001491	1227



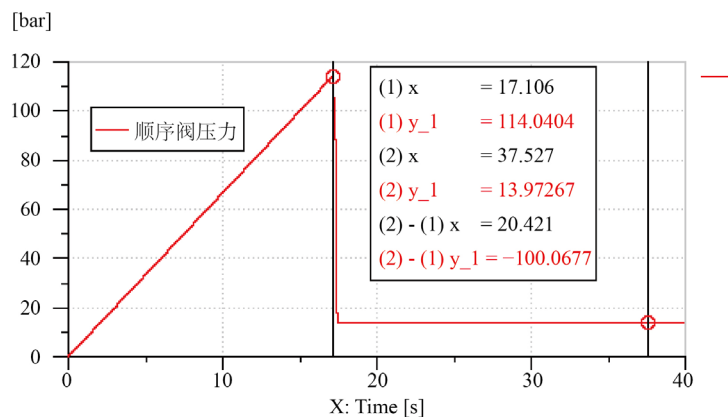
**Figure 10.** Hydrodynamic characteristic curve of optimized valve core  
**图 10.** 优化后的阀芯液动力特性曲线

### 5.3. 动态特性仿真结果

依据优化后的三维模型和流动特性仿真结果，更新 AMESim 模型中的参数并计算。

图 11~图 13 所示为优化后的顺序阀卸荷性能响应特性曲线，顺序阀卸荷前压力为 11.4 MPa，阀芯行程为 7.77 mm，流量 4060 L/min，卸荷后压力 1.4 MPa。

上述顺序阀的卸荷性能指标均满足设计指标要求，优化方案是可行的。



**Figure 11.** Pressure curve of optimized sequence valve  
**图 11.** 优化后的顺序阀压力曲线

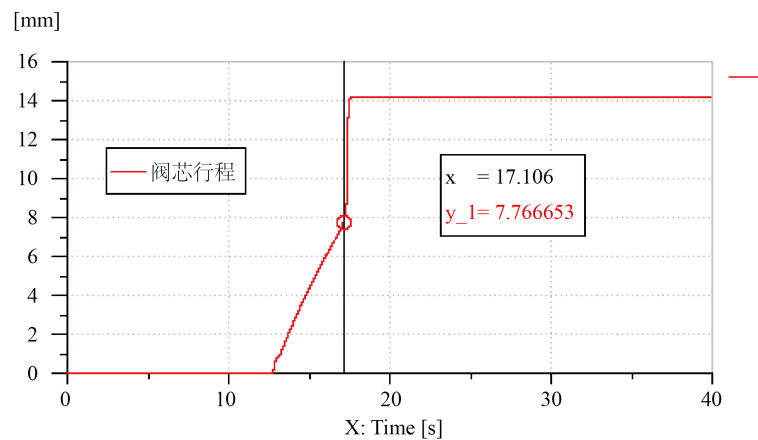


Figure 12. Stroke curve of optimized sequence valve spool  
图 12. 优化后的顺序阀阀芯行程曲线

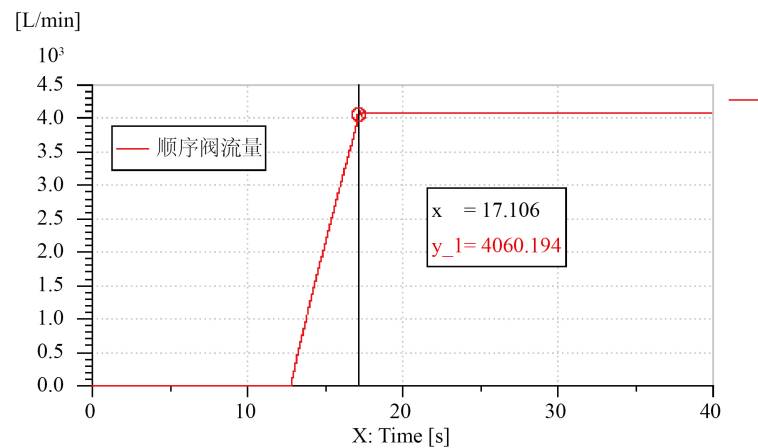


Figure 13. Flow curve of optimized sequence valve  
图 13. 优化后的顺序阀流量曲线

## 6. 结论

本文按照规定的技术路线，仿真分析顺序阀的卸荷性能，并进行合理优化，形成如表 5 所示的性能指标对比，可得如下结论：

Table 5. Comparison of performance indexes  
表 5. 性能指标对比

关键特性	设计指标	原方案	优化方案
卸荷时压力	<12 MPa	12.68 MPa	11.4 MPa
卸荷时阀芯行程	<10 mm	8.42 mm	7.77 mm
卸荷时流量	4100 L/min	2285 L/min	4060 L/min
卸荷后压力	<1.5 MPa	1.63 MPa	1.4 MPa

- (1) 由于阀口通流能力不足，造成原方案的多项关键特性指标超过了设计指标要求，必须进行优化。
- (2) 增大阀套锥面锥度，提高阀口通流能力，使得优化方案的关键特性指标均满足设计指标要求，验



证了优化方案的可行性。

(3) CFD 流动特性仿真和 AMESim 动态响应特性仿真的联合,可以得到准确的顺序阀关键特性,提高设计效率。

### 参考文献

- [1] 杨树人,等. 工程流体力学[M]. 北京:石油工业出版社,2014.
- [2] 张恒,等. 基于 Fluent 的负载敏感平衡阀流场分析[J]. 液压气动与密封,2010(4): 32-35.
- [3] 张杰,等. 基于 FLUENT 的滑阀液动力补偿的研究[J]. 机电工程技术,2014, 43(1): 41-44.
- [4] 付永领,等. LMS Imagine. Lab AMESim 系统建模和仿真[M]. 北京:北京航天航空出版社,2011.
- [5] 朱江森,等. 基于 AMESim 的某先导式调速阀动态特性仿真及结构参数优化[J]. 船舶设计师,2013, 3(12): 54-58.