

# 基于DOE的液力变矩器进出口角对性能的影响分析

曾星, 张涛

同济大学汽车学院, 上海  
Email: 19921313924@163.com

收稿日期: 2020年12月31日; 录用日期: 2021年2月8日; 发布日期: 2021年2月25日

---

## 摘要

基于某款液力变矩器参数化模型, 研究叶栅系统内外环进出口角共12个设计参数对液力变矩器性能影响, 并构建近似模型代替原始模型进行性能分析和多目标优化, 利用优化拉丁超立方试验设计方法生成150组数据组, 进行CFD仿真计算每组性能, 对这150组样本点进行敏感性分析, 结果表明: 涡轮外环出口角对最高效率和失速泵轮扭矩系数的影响最大, 泵轮外环进口角对失速变矩比影响最大; 同时, 涡轮外环进口角和出口角之间有明显的交互效应, 在参数调整时应重点考虑; 优化后各项性能均有提升。

## 关键词

试验设计, 多目标优化, 响应面模型, 进出口角

---

# Analysis of the Influence of the Inlet and Outlet Angles of the Torque Converter on Performance Based on DOE

Xing Zeng, Tao Zhang

School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai  
Email: 19921313924@163.com

Received: Dec. 31<sup>st</sup>, 2020; accepted: Feb. 8<sup>th</sup>, 2021; published: Feb. 25<sup>th</sup>, 2021

---

## Abstract

Based on the parametric model of a hydraulic torque converter, the influence of 12 design para-

meters on the performance of the hydraulic torque converter was studied, and an approximate model was constructed to replace the original model for performance analysis and multi-objective optimization. 150 groups of data were generated by using the optimized Latin hypercube experimental design method, and the performance of each group was calculated by CFD simulation. Sensitivity analysis shows that the outlet angle of turbine outer ring has the greatest influence on the maximum efficiency and stall torque coefficient, and the inlet angle of impeller outer ring has the greatest influence on stall torque ratio; meanwhile, there is obvious interaction between the inlet angle and outlet angle of turbine outer ring, which should be considered in parameter adjustment; after optimization, all performances are improved.

## Keywords

Experimental Design, Multi Objective Optimization, Response Surface Model, Inlet and Outlet Angle

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

影响液力变矩器性能的结构参数有进出口角、偏转角、周向偏移等,对这些参数的研究表明,液力变矩器性能和设计参数之间关系较为复杂,在众多叶栅系统设计参数里面,进出口角对液力性能的影响是最为显著的[1]。因此,研究液力变矩器进出口角参数对变矩器优化设计具有重大意义。国内在这方面也展开了一系列研究,文献[2]采用数值模拟液力变矩器稳态内流场,研究了泵轮叶片进出口角对性能的影响,但并没有区分内外环,且未对涡轮和导轮进出口角度进行研究。文献[3]提出了一种优化策略和算法对各轮进出口角进行优化;文献[4]研究了叶栅系统进出口角对失速变矩比和最高效率的影响并进行了优化,但并未考虑到失速泵轮扭矩系数。综上文献可知,虽然对液力变矩器进出口角已有部分研究,但是大都局限在各叶轮中间流线上的进出口角,且在研究中是通过改变单一设计变量来记录对性能的影响,忽略了各参数之间的交互效应和非线性影响。这样虽然研究相对方便,但降低了实际设计过程中的参考价值。

本文为解决液力变矩器进出口角对性能的影响关系及优化问题,采用 CFD 和优化拉丁超立方试验方法相结合,研究了液力变矩器内外环进出口角对性能的影响,利用响应面方法构建近似模型,并在此基础上对液力变矩器进出口角设计参数值进行了改进。

## 2. 实验设计方法

实验设计方法可以有效的研究和管理多维设计空间、有效地选取采样点来评估效应,因此被广泛应用,它包含全因子法、中心组合法、正交数组法和拉丁方等,其中应用的较多的为优化拉丁超立方设计,它在拉丁方设计的基础上通过优化的方法使得采样点尽可能的分布均匀,避免缺口区域出现[5] [6] [7],如图 1 和图 2,根据已知某款液力变矩器叶片角参数值,结合参数化设计模型,为了保证更改设计参数后叶型不发生过度扭曲,选定叶片角范围如表 1,利用优化拉丁方得到试验设计组合,更改三维参数化模型,通过 star-creo 联合仿真接口导入到 STARCCM 进行 CFD 计算,得到各样本点所对应的性能数据,进行下一步分析。

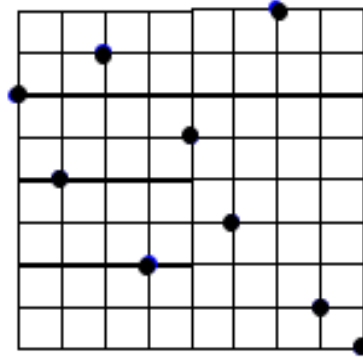


Figure 1. Latin hypercube sampling  
图 1. 拉丁方

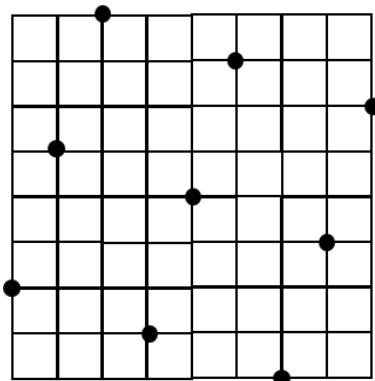


Figure 2. Optimized latin hypercube sampling  
图 2. 优化拉丁方

Table 1. Research range of blade angle  
表 1. 叶片角研究范围

	内环进口角	内环出口角	外环进口角	外环出口角
泵轮	[148, 162]	[30, 40]	[148, 162]	[30, 40]
涡轮	[20, 30]	[145, 160]	[20, 30]	[145, 160]
导轮	[78, 92]	[15, 25]	[78, 92]	[15, 25]

### 3. 设计参数敏感性分析

根据表 2 得到的样本点和表 3 计算出的各样本点对应性能,以液力变矩器内外环进出口角作为因子,各性能指标为响应进行回归分析,获得因子对响应影响的 Pareto 图,主效应和交互效应图,Pareto 图反映了样本拟合后所有因子对每个响应的贡献程度,经正则化处理后转化为百分比,主效应是指因子在某一水平时所有实验中响应的平均值,交互效应反映影响同一响应时两个因子间的交互关系和程度[8] [9]。以两个输入变量为例,其多项式如下:

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_1^2 + a_4x_2^2 + a_5x_1x_2 \quad (1)$$

则  $x_1, x_2$  线性主效应为:

$$M_{x_1} = a_1dx_1, M_{x_2} = a_2dx_2 \quad (2)$$

**Table 2.** Sample points based on optimized Latin square hypercube sampling  
**表 2.** 基于优化拉丁方设计得到的样本点

样本点	泵轮内环进口角	泵轮内环出口角	涡轮外环进口角	...
1	151	36	29	...
2	154	39	27	...
3	148	35	22	...
		...		

**Table 3.** The performance of each sample point  
**表 3.** 各样本点所对应性能

样本点	$\eta_{\max}$	$K_o$	$\lambda_{Bo}/(10^{-6} \text{ min}^2 \cdot \text{r}^{-2} \cdot \text{m}^{-1})$
1	0.809022139138877	1.64419827609108	6.03888955839502
2	0.802625572125361	1.62696129115086	6.28763705019934
3	0.811224744770400	1.62372421674585	6.69704437589982
		...	

$x_1, x_2$  二阶主效应为:

$$M_{x_1^2} = 2a_3x_1dx_1, M_{x_2^2} = 2a_4x_2dx_2 \quad (3)$$

$x_1 - x_2$  交互效应为:  $M_{x_1x_2} = a_5dx_1x_2$ , 其中

$$d(x_1x_2) = [Max(x_1)Min(x_2) + Min(x_1)Max(x_2)] - [Max(x_1)Max(x_2) + Min(x_1)Min(x_2)] \quad (4)$$

将输入变量归一化后用最小二乘法拟合模型系数  $S_i$ , 将其转化为贡献率百分比, 计算公式为:

$$N_{x_i} = 100 * S_{x_i} / \sum_j |S_{x_j}| \quad (5)$$

根据表 2 得到的样本点设计参数和表 3 计算出的样本点所对应的性能以及公式(1)~(5), 对液力变矩器进出口角设计参数进行敏感性分析。

### 3.1. 最高效率

图 3 为最高效率 Pareto 图, 由图可知, 涡轮外环出口角对最高效率影响最大, 且泵轮外环进口角和最高效率之间呈现明显的非线性关系, 这由图 4 主效应图也可以得出。

### 3.2. 失速变矩比

由图 5 和图 6 可知, 泵轮外环进口角对失速变矩比影响最大, 其次是涡轮外环出口角, 且泵轮外环进口角和失速变矩比之间存在较明显的二次非线性相关关系, 同时, 泵轮外环出口角和泵轮外环进口角之间存在较为明显的交互作用, 这由图 7 和图 8 的交互效应图可以看出来, 所以在参数优化时, 应当综合考虑它们的相关性。

### 3.3. 失速泵轮扭矩系数

图 9 为失速泵轮扭矩系数 Pareto 图, 由图可以看出, 在选定的参数研究范围内, 涡轮外环进出口角之间存在交互效应, 涡轮外环出口角对失速泵轮扭矩系数影响最大, 且存在明显的非线性二次相关关系,

在优化失速泵轮扭矩系数时应该重点考虑。

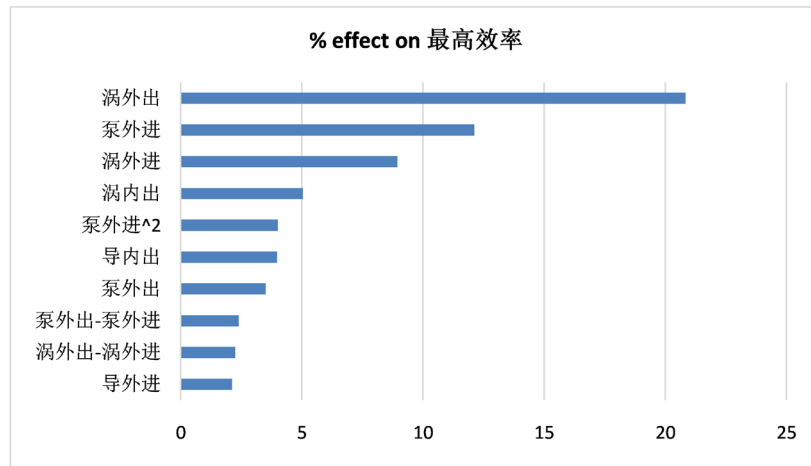


Figure 3. The pareto chart of  $\eta_{\max}$

图 3. 最高效率 Pareto 图

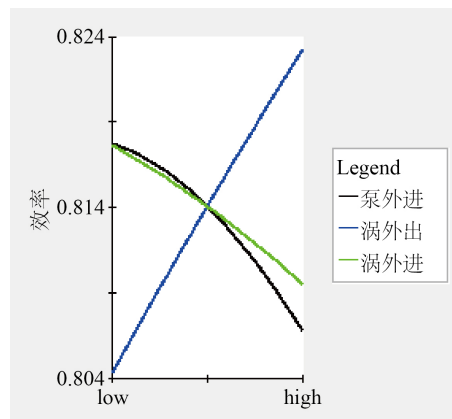


Figure 4. The main effect of  $\eta_{\max}$

图 4. 最高效率主效应图

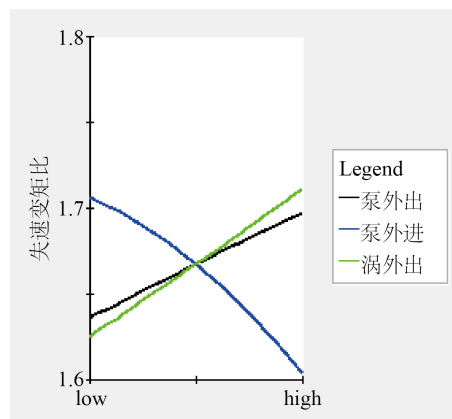


Figure 5. The main effect of  $K_o$

图 5. 失速变矩比主效应图

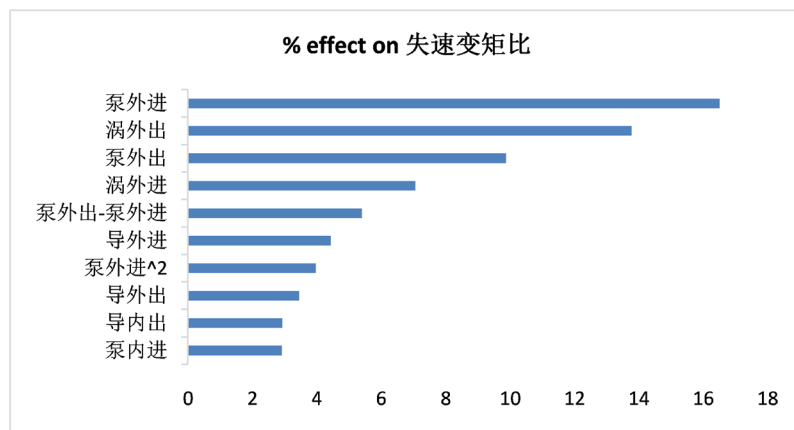


Figure 6. The pareto chart of  $K_o$   
图 6. 失速变矩比 Pareto 图

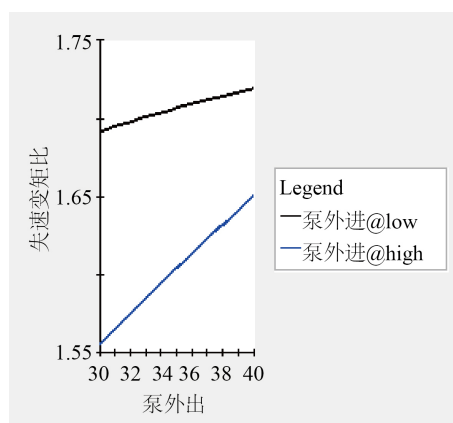


Figure 7. Interaction effect between  $\beta_{PO\_O}$  and  $\beta_{PO\_I}$

图 7.  $\beta_{PO\_O}$  与  $\beta_{PO\_I}$  交互效应图

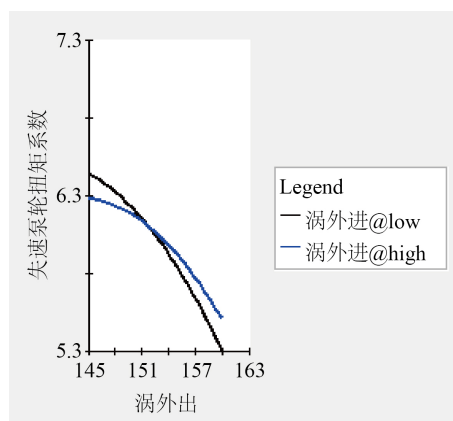


Figure 8. Interaction effect between  $\beta_{TO\_O}$  and  $\beta_{TO\_I}$

图 8.  $\beta_{TO\_O}$  与  $\beta_{TO\_I}$  交互效应图

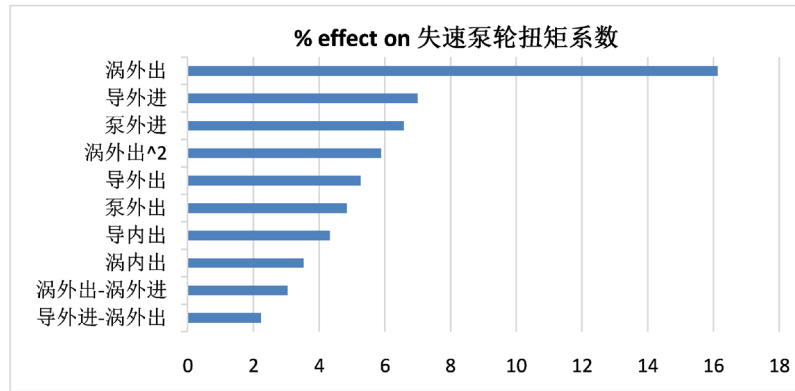


Figure 9. The pare to chart of  $\lambda_{Bo}$

图 9. 失速泵轮扭矩系数 Pareto 图

#### 4. 基于 RSM 方法的近似模型的搭建及优化设计

近似模型是用数学模型来逼近输入变量和输出变量之间关系的方法。液力变矩器设计参数众多, 若一个个代入模型更改参数去仿真计算寻优的话, 由于仿真计算迭代时间过长、计算繁琐, 将耗费大量时间和资源, 通过构建近似模型, 再在近似模型的基础上进行寻找优化解, 将大大缩短时间优化资源, 使用近似模型来代替原始的计算仿真运用越来越广, 它能避免高强度的仿真计算, 平滑设计空间的数值噪声, 可使数值优化算法也可找到全局解, 通常由下式来表述:

$$y(x) = \bar{y}(x) + \delta \tag{6}$$

其中,  $y(x)$  为实际值,  $\bar{y}(x)$  为拟合的多项式近似值,  $\delta$  为随机误差, 通常服从标准正态分布。响应面方法 (RSM) 利用多项式函数拟合设计空间, 具有良好的鲁棒性。对于三阶响应面模型, 其拟合公式为:

$$\bar{y} = a_0 + \sum_{i=1}^m b_i x_i + \sum_{i=1}^m b_i^2 x_i^2 + \sum_{i=1}^m b_i^3 x_i^3 + \sum_{i \neq j} x_i x_j \tag{7}$$

液力变矩器设计参数众多, 若一个个代入模型更改参数去仿真计算寻优的话, 将耗费大量时间和资源, 通过构建近似模型, 再在近似模型的基础上进行寻找优化解, 将大大缩短时间优化资源, 利用响应面方法构建近似模型, 然后计算预测值与 CFD 计算值之间的误差, 获得误差分析如表 4。

Table 4. Fitting error analysis

表 4. 拟合误差分析

性能	平均误差	最大误差	均方根误差	判定系数
$\lambda_{Bo}$	0.04775	0.09586	0.05828	0.96235
$K_o$	0.0288	0.05945	0.03356	0.98514
$\eta_{max}$	0.02469	0.05763	0.03112	0.9879
许用范围	$\leq 0.2$	$\leq 0.3$	$\leq 0.2$	$\geq 0.9$

由表中数据可知, 构建的近似模型各项检验误差均小于许用值, 拟合精度符合要求, 可用于代替原始模型并进行下一步研究。

液力变矩器包含多个性能指标, 本文研究了最高效率、失速变矩比、失速泵轮扭矩系数三个主要性能参数, 所以液力变矩器的优化属于多目标优化, 本文选用 NSGA-II 算法, 该算法是目前运用较为广泛

的多目标遗传算法, 运行速度快、收敛性好, 在设计范围内, 取三个性能等权重, 优化后的模型参数结果如表 5, 优化后的性能如表 6。

**Table 5.** Optimized parameter value

**表 5.** 优化参数

	内环进口角	内环出口角	外环进口角	外环出口角
B	149	33	148	37
T	20	159	21	153
D	79	22	83	16

**Table 6.** The result of performance optimization

**表 6.** 性能优化结果

	$\lambda_{BO}/(10^{-6} \text{ min}^2 \cdot \text{r}^{-2} \cdot \text{m}^{-1})$	$K_o$	$\eta_{\max}$
原始模型	4.622	1.708	0.816
优化模型	5.952	1.756	0.824

由表 6 可知, 模型优化后, 各项性能指标均略有增加, 其中失速泵轮扭矩系数增大了约 28%, 失速变矩比增大了约 2.8%, 最大效率增加约 1%。

## 5. 结论

(1) 在三维流场设计仿真的基础上, 运用优化拉丁超立方试验设计方法, 对液力变矩器样本点进行选取, 研究了液力变矩器内外环进出口角对性能的影响, 运用 RSM 方法构建近似模型并通过 NSGA-II 多目标遗传算法对设计参数进行了寻优, 得到一组样本点使各项性能指标均有提升。

(2) 由性能影响分析结果可知, 涡轮叶片外环出口角、泵轮叶片外环进口角对液力变矩器各项性能指标均有较大影响, 在分析优化失速变矩比时, 应考虑到涡轮外环进口角和出口角之间的交互效应。

(3) 优化后失速泵轮扭矩系数增大了约 28%, 失速变矩比增大了约 2.8%, 最大效率增加约 1%, 结果表明, 该方法优化效果良好, 精度符合要求, 为液力变矩器设计优化提供理论指导。

## 参考文献

- [1] 朱文杰. 轿车液力变矩器的扁平化设计及其性能优化[D]: [硕士学位论文]. 上海: 同济大学, 2015.
- [2] 韩克非, 吴光强, 王欢. 基于 CFD 的泵轮叶栅关键参数对液力变矩器的性能影响预测[J]. 汽车工程, 2010, 32(6): 497-500+465.
- [3] 吴光强, 陈曙光, 王欢. 液力变矩器叶栅角度参数优化及算法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2009, 37(6): 810-813.
- [4] Wu, G.-Q., Chen, J. and Zhu, W.J. (2018) Performance Analysis and Improvement of Flat Torque Converters Using DOE Method. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, **31**, Article No. 60. <https://doi.org/10.1186/s10033-018-0262-1>
- [5] 陈魁. 试验设计与分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [6] Kuhnt, S. and Steinberg, D.M. (2010) Design and Analysis of Computer Experiments. *AStA Advances in Statistical Analysis*, **94**, 307-309. <https://doi.org/10.1007/s10182-010-0143-0>
- [7] Viana, F.A.C., Venter, G. and Balabanov, V. (2010) An Algorithm for Fast Optimal Latin Hypercube Design of Experiments. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, **82**, 135-156. <https://doi.org/10.1002/nme.2750>



- [8] 刘城, 潘鑫, 闫清东. 基于 DOE 及 RSM 的液力变矩器叶片数对性能的影响及优化[J]. 北京理工大学学报, 2012, 32(7): 689-693.
- [9] 赖宇阳. Isight 参数优化理论与实例详解[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2012.