

文章编号:1671-1637(2015)01-0074-08

## 钣金型液力变矩器外特性计算方法

惠记庄,张广辉,聂春鹏,刘 琼

(长安大学 道路施工技术与装备教育部重点实验室,陕西 西安 710064)

**摘要:**对原有试验台架的信号处理和液压系统进行改进,进行了YJH315钣金型液力变矩器的牵引试验。应用三维流场数值计算方法,提出了YJH315钣金型液力变矩器外特性的动量矩方程、力矩方程与性能参数计算方法。分别通过MATLAB仿真软件和实测试验得到了不同转速比下的效率、变矩系数和公称力矩,并将仿真结果与试验结果进行对比分析。分析结果表明:当转速比在0~0.9时,试验工况下的最大效率为0.82,仿真工况下的最大效率为0.79,效率的最大误差约为2%;试验工况下的最大变矩系数为2.41,仿真工况下的最大变矩系数为2.29,变矩系数的最大误差约为3%;试验工况下的最大公称力矩为28.7 N·m,仿真工况下的最大公称力矩为27.3 N·m,公称力矩的最大误差约为3%。3个指标的误差均在可接受范围之内,说明提出的钣金型液力变矩器外特性计算方法可行。

**关键词:**车辆工程;液力变矩器;外特性;三维流场;变矩系数;公称力矩;平均误差

**中图分类号:**U463.22

**文献标志码:**A

## Calculation method of external characteristic for sheet-metal hydraulic torque converter

HUI Ji-zhuang, ZHANG Guang-hui, NIE Chun-peng, LIU Qiong

(Key Laboratory for Highway Construction Technology and Equipment of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

**Abstract:** The signal processing and hydraulic system of original test bench was improved, and the traction test of YJH315 sheet-metal hydraulic torque converter was carried out. Based on the numerical calculation method of three dimensional flow field, the angular momentum equation, torque equation and the calculation method of performance parameter of external characteristic for YJH315 sheet-metal hydraulic torque converter were put out. The efficiencies, torque coefficients and nominal torques under different rotating speed ratios were gotten by using MATLAB simulation software and measured test respectively, and simulation result and test result were compared. Analysis result shows that when rotating speed ratio is from 0 to 0.9, the maximum efficiency is 0.82 under test condition, the value is 0.79 under simulation condition, and the maximum error of efficiency is about 2%. The maximum torque coefficient is 2.41 under test condition, the value is 2.29 under simulation condition, and the maximum error of torque coefficient is about 3%. The maximum nominal torque is 28.7 N·m under test condition, the value is 27.3 N·m under simulation condition, and the maximum error of nominal torque is about 3%. All the errors of three indexes are within the acceptable range, so the proposed

收稿日期:2014-09-13

基金项目:国家自然科学基金项目(11202036);陕西省自然科学基金项目(SJ08E206);中央高校基本科研业务费专项资金项目(2014G1251032)

作者简介:惠记庄(1963-),男,陕西富平人,长安大学教授,工学博士,从事车辆与机械工程研究。

calculation method of external characteristic for sheet-metal hydraulic torque converter is feasible. 1 tab, 22 figs, 21 refs.

**Key words:** vehicle engineering; hydraulic torque converter; external characteristic; three-dimensional flow field; torque coefficient; nominal torque; average error

**Author resume:** HUI Ji-zhuang (1963-), male, professor, PhD, +86-29-82334260, huijz6363@chd.edu.cn.

## 0 引言

液力变矩器是汽车和工程机械传动系统的关键部件之一,主要作用是高效、平稳地传递发动机的动力<sup>[1]</sup>。相对于铸造型液力变矩器而言,钣金型液力变矩器具有结构紧凑、密封性好、可靠性高且适合大批量生产等优点,已经广泛应用于车辆传动系统中。近年来,国内外相关学者已经逐渐开始对钣金型液力变矩器的研究。Flack 等分析了钣金型液力变矩器泵轮流道从内环到外环的射流-尾流状态和二次流成因<sup>[2]</sup>;Dong 等利用五孔探针测试了钣金型液力变矩器泵轮流场的速度和压力分布,分析了泵轮流场的稳态和非稳态现象<sup>[3]</sup>;Kraus 等采用激光多普勒技术研究了钣金型液力变矩器内流场,对比了不同转速比下内流场的速度分布<sup>[4]</sup>;王欢等利用计算流体力学(CFD)技术分析了液力变矩器内流场复杂的湍流运动<sup>[5]</sup>;魏良武等基于热弹性有限元分析对钣金型液力变矩器上下盖板总成焊接变形进行了预测,模拟了疲劳试验下的应力分布状态,并提出了合理的焊接方法和工艺参数<sup>[6]</sup>。

钣金型液力变矩器各工作轮上的叶片均由钣金冲压而成,叶片均为等厚度的三维空间结构,内流道与铸造结构有所差异<sup>[7]</sup>。早前,对钣金型液力变矩器的分析是基于一维和二维流场理论,但这些方法准确性不高。随着计算机技术和流体力学的发展,能够更好地反映内部因素对液力变矩器外特性影响的三维流场数值分析方法已经在铸造型液力变矩器外特性计算上得到应用<sup>[8-9]</sup>,国内外学者已经应用三维流场数值分析方法对铸造型液力变矩器进行了外特性分析。刘春宝等基于液力变矩器流场瞬态方法计算得到液力变矩器的外特性,并利用试验验证了计算精度<sup>[10]</sup>;Dong 等利用去除瞬态特性后的稳态方法,得到了液力变矩器外特性的分析结果<sup>[11]</sup>,但计算结果存在一定的误差;严鹏等采用稳态计算方法对液力变矩器外特性进行了分析<sup>[12]</sup>;刘悦等运用三维流场的数值计算方法对综合式液力变矩器轴向载荷进行了计算,并且验证了计算精确度<sup>[13]</sup>;袁

生杰等利用非结构化网络对变矩器三维流场计算域进行了网格划分,并进行了数值模拟<sup>[14]</sup>。

在上述研究中,对钣金型液力变矩器的研究只是通过试验测量的方法,没有提出相应的研究理论,应用三维流场对液力变矩器的分析方法只是针对铸造型液力变矩器,对内流道结构不同的钣金型液力变矩器还没有相关研究。本文基于三维流场的数值计算方法推导了钣金型液力变矩器外特性计算方法,并进行了试验验证。

## 1 基于三维流场的液力变矩器外特性计算方法

钣金型液力变矩器外特性的计算方法有 2 种:第 1 种是损失模型法,此种方法的参数容易调整,方法容易优化,故此方法应用比较广泛,但由于对液力变矩器内部流场假设过多而存在计算误差;第 2 种是三维流场数值计算方法,该方法利用 CFD 仿真软件分别计算钣金型液力变矩器各部分构件内部流场的速度与压力场,充分考虑了液力变矩器内部流场中涡流、回流、二次流等因素对液力变矩器外特性的影响,相比而言有较高的实用性和准确性。本文采用三维流场的数值计算方法对钣金型液力变矩器外特性进行研究。

### 1.1 动量矩方程

计算各工作轮的转矩是求取钣金型液力变矩器外特性的关键。通过 CFD 仿真软件计算可求得内流场的压力和速度,计算各工作轮流道进出口动量矩之差可得到各工作轮的转矩。在定常总流中,流体流向见图 1,  $v_1$ 、 $v_2$  分别为截面 1、2 上的液流平均速度。首先引入动量方程为

$$\begin{cases} F_x = \frac{\rho Q}{g}(v_{2x} - v_{1x}) \\ F_y = \frac{\rho Q}{g}(v_{2y} - v_{1y}) \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $F_x$ 、 $F_y$  分别为液流在  $x$ 、 $y$  方向所受合力;  $v_{2x}$ 、 $v_{2y}$  分别为液流平均速度  $v_2$  在  $x$ 、 $y$  方向的分量;  $v_{1x}$ 、 $v_{1y}$  分别为液流平均速度  $v_1$  在  $x$ 、 $y$  方向的分量;  $Q$

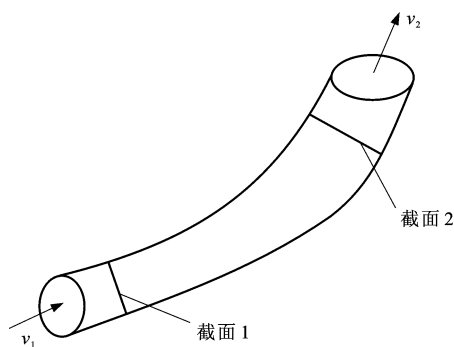


图 1 液体流向

Fig. 1 Fluid flow

为流体流量;  $\gamma$  为液流重度;  $g$  为重力加速度。

式(1)描述了液流状态与其边界条件之间的数量关系。当液流射向平面后,受平面作用而改变了方向,其作用力为

$$F_{x1} = -F_x \quad (2)$$

式中:  $F_{x1}$  为液流对叶片的作用力。

当液流以速度  $v_1$  进入叶片,以速度  $v_2$  流出叶片,且不计液体的压力影响时,由式(1)可以求出液流所受合力的大小和方向,但求不出合力的作用点。为此,本文引入动量矩方程,设质量为  $m$  的物体,在瞬时点  $A_1$ ,以速度  $v$  运动(图 2),对定点  $o_1$  的动量矩  $L_1$  为

$$L_1 = mvR \cos(\alpha) \quad (3)$$

式中:  $R$  为定点  $o_1$  到动量线的距离;  $\alpha$  为动量与动量线的夹角。

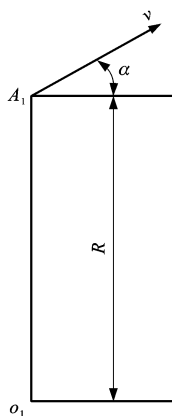


图 2 动量矩

Fig. 2 Angular momentum

由于单位时间内动量矩的变化(增量)等于作用在物体上的合外力矩,即

$$M = \frac{dL_1}{dt} \quad (4)$$

式中:  $M$  为力矩;  $t$  为时间。

本文利用动量矩定律研究合外力作用点的问题,液流对固定弯曲叶片的作用见图 3。取定点  $o_2$ ,

并做进出口速度  $v_1$  和  $v_2$  的垂线  $r_1$  和  $r_2$ 。由于是稳定流动,所以液流动量矩  $L$  的变化也可写为

$$dL = \frac{\gamma Q v_2 r_2 dt}{g} - \frac{\gamma Q v_1 r_1 dt}{g} \quad (5)$$

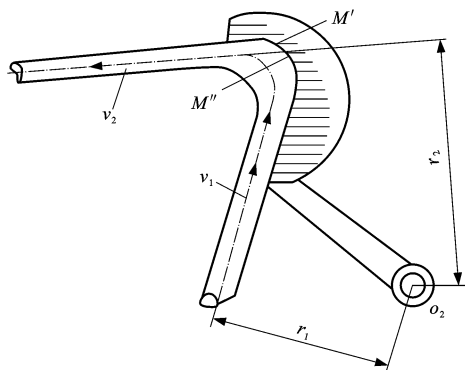


图 3 液流对固定弯曲叶片的作用

Fig. 3 Role of fluid flow on fixed curved blade

如果取出口处液体对  $o_2$  点的动量矩为正,则进口处液体对  $o_2$  点的动量矩为负,有

$$dL = \frac{\gamma Q v_2 r_2 dt}{g} + \frac{\gamma Q v_1 r_1 dt}{g} \quad (6)$$

$$M' = \frac{\gamma Q}{g} (v_2 r_2 + v_1 r_1) \quad (7)$$

令  $M''$  为液流对叶片的力矩,叶片对液流的力矩  $M'$  与  $M''$  是作用力矩和反作用力矩的关系。

由式(1)可求出作用在弯曲叶片上力的大小和方向,由式(7)可求出合外力对  $o_2$  点的力矩,可求出合外力的作用点。图 3 相当于变矩器导轮的工作情况,如果叶片不是固定的,则叶片在液流的作用下就以  $o_2$  点为轴心,以  $M''$  的大小和方向旋转而输出能量,这就相当于变矩器涡轮的工作情况。

## 1.2 力矩方程

为了进一步理解液流与叶片相互作用力矩,本文利用动量矩定律来研究叶片的工作状况。设工作轮控制面中  $ABCD$  这一段液体经过时间  $dt$  后流到新的位置  $A'B'C'D'$ ,见图 4。在此时间内动量矩的增量为

$$dL = L_{A'B'C'D'} - L_{ABCD} \quad (8)$$

式中:  $L_{ABCD}$  为液流初始位置动量矩;  $L_{A'B'C'D'}$  为液流经过时间  $dt$  后的动量矩。

由于液流作稳定流动,体积  $ABC'D'$  液流的动量矩不改变,因而  $dL$  还可写为

$$dL = L_{A'B'BA} - L_{C'D'DC} \quad (9)$$

图 4 中,  $A'B'BA$  为经过  $dt$  时间后,旋转面  $AB$  流过的体积为  $Qdt$ 。由于液流的不可压缩性,所以  $AB$  面的液体等于流过  $CD$  面的体积  $C'D'DC$ 。液

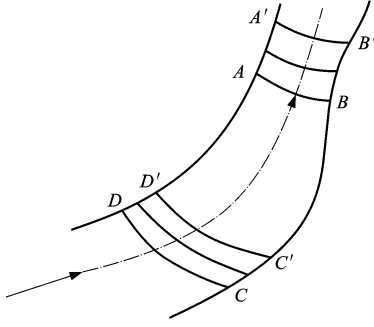


图 4 控制面动量矩

Fig. 4 Angular momentum of control surface

流控制面剖面见图 5,  $\alpha_1$  与  $\alpha_2$  分别为  $v_1$  与  $v_2$  对应的夹角。

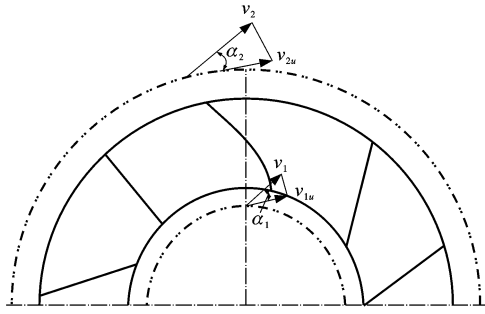


图 5 控制面剖面

Fig. 5 Sectional view of control surface

式(9)也可写为

$$dL = \frac{\mathcal{R}Q}{g} [v_2 r_2 \cos(\alpha_2)] - \frac{\mathcal{R}Q}{g} [v_1 r_1 \cos(\alpha_1)] \quad (10)$$

将式(10)代入式(4)得

$$\frac{dL}{dt} = \frac{\mathcal{R}Q}{g} [v_2 r_2 \cos(\alpha_2) - v_1 r_1 \cos(\alpha_1)] \quad (11)$$

$$\begin{cases} v_2 \cos(\alpha_2) = v_{2u} \\ v_1 \cos(\alpha_1) = v_{1u} \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $v_{1u}$ 、 $v_{2u}$  分别为进出口处液流的切向( $u$  向)速度。

式(11)还可写为

$$\frac{dL}{dt} = \frac{\mathcal{R}Q}{g} (v_{2u} r_2 - v_{1u} r_1) \quad (13)$$

因为作用在液流上的压力是轴对称的,故压力总和并不产生力矩,即对动量矩的变化不起作用。只有叶片对液流的作用力矩  $M'$  才会使液流的动量矩发生变化,由此可得

$$M' = \frac{dL}{dt} = \frac{\mathcal{R}Q}{g} (v_{2u} r_2 - v_{1u} r_1) \quad (14)$$

式(14)确定了外力矩与液流的流量以及速度之间的关系,表示为叶片作用给液流的力矩。

将式(14)右边分子、分母同乘  $2\pi$ ,可得

$$M' = \frac{\mathcal{R}Q}{2\pi g} (2\pi r_2 v_{2u} - 2\pi r_1 v_{1u}) \quad (15)$$

定义速度环量为  $\Gamma$ ,故式(15)用环量表示为

$$M' = \frac{\mathcal{R}Q}{2\pi g} (\Gamma_2 - \Gamma_1) \quad (16)$$

$$\begin{cases} \Gamma_1 = 2\pi v_{1u} r_1 \\ \Gamma_2 = 2\pi v_{2u} r_2 \end{cases} \quad (17)$$

式中:  $\Gamma_1$  为进口处速度环量;  $\Gamma_2$  为出口处速度环量。

根据式(16),泵轮、涡轮和导轮作用给液流的力矩分别为

$$\begin{cases} M_B = \frac{\mathcal{R}Q}{2\pi g} (\Gamma_{2B} - \Gamma_{1B}) \\ M_T = \frac{\mathcal{R}Q}{2\pi g} (\Gamma_{2T} - \Gamma_{1T}) \\ M_D = \frac{\mathcal{R}Q}{2\pi g} (\Gamma_{2D} - \Gamma_{1D}) \end{cases} \quad (18)$$

式中:  $M_B$ 、 $\Gamma_{1B}$ 、 $\Gamma_{2B}$  分别为泵轮对应的力矩、进口处速度环量和出口处速度环量;  $M_T$ 、 $\Gamma_{1T}$ 、 $\Gamma_{2T}$  分别为涡轮对应的力矩、进口处速度环量和出口处速度环量;  $M_D$ 、 $\Gamma_{1D}$ 、 $\Gamma_{2D}$  分别为导轮对应的力矩、进口处速度环量和出口处速度环量。

### 1.3 性能参数

液力变矩器原始特性计算式为

$$\begin{cases} \eta_V = Ki \\ K = \frac{M_T}{M_B} \\ \omega = 31.6228 \frac{M_B}{\sqrt{n_B}} \end{cases} \quad (19)$$

式中:  $\eta_V$  为液力效率;  $K$  为液力变矩器变矩系数;  $i$  为涡轮与泵轮的转速比;  $\omega$  为液力变矩器公称力矩;  $n_B$  为泵轮转速。

当计算出各工作轮转矩后,可根据式(19)计算出钣金型液力变矩器的液力效率  $\eta_V$ 。考虑到传动过程中受液力损失、机械损失和容积损失的影响,传动总效率  $\eta$  的表达式为

$$\eta = \eta_V \eta_\eta \eta_V \quad (20)$$

式中:  $\eta_\eta$ 、 $\eta_V$  分别为机械效率与容积效率。

## 2 试验验证

### 2.1 液力变矩器几何参数

本文试验采用的 YJH315 钣金型液力变矩器叶片的几何参数见表 1, YJH315 钣金型液力变矩器外观见图 6。

表 1 几何参数

Tab. 1 Geometrical parameters

叶片参数	泵轮	涡轮	导轮
进口厚度/mm	0.8	0.8	0.2
出口厚度/mm	0.8	0.8	1.0
数量	21	28	17



图 6 钣金型液力变矩器

Fig. 6 Sheet-metal hydraulic torque converter

## 2.2 试验设备

由于早期的试验台架在试验精度和试验效率上相对比较落后,因此,本文采用最新计算机技术和传感器技术对信号处理和液压系统进行了一些改进,使得液力变矩器性能试验的精度大幅度提高。改进后的试验台架见图 7。



图 7 试验台架

Fig. 7 Test bench

## 2.3 试验原理

在钣金型液力变矩器性能试验台架上,完成对液力变矩器动态、静态性能的测试,在提供测试数据的同时,还可提供系列化特性标定。一般的试验台架主要由驱动装置、变矩器、变矩器油路供给系统、加载装置、传感器、信号传输系统和信号处理系统等组成<sup>[15-16]</sup>。通过信号传输系统与信号处理系统进行分析和处理检测,试验原理见图 8。

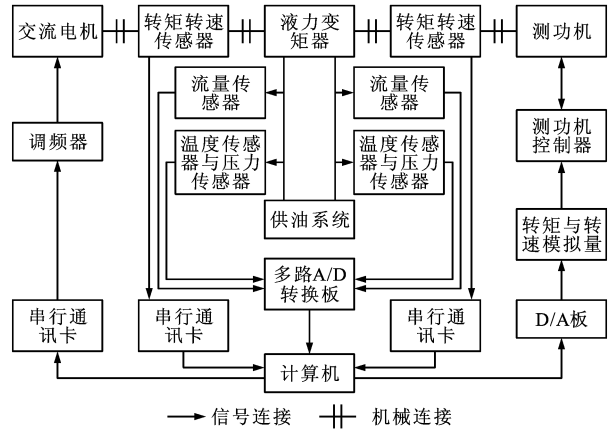


图 8 试验原理

Fig. 8 Test principle

## 2.4 特性试验

根据《液力变矩器性能试验方法》(GB/T 7680—2005)的规定<sup>[17]</sup>,对钣金型液力变矩器进行牵引试验<sup>[18-21]</sup>。在牵引试验中,保持输入转速稳定在  $1\,700\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ ,进口油温控制在  $80\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,出口油温要低于  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,进口压力稳定在  $1.5\text{ MPa}$ 。当输入转速为  $1\,700\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ (波动值不大于  $5\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ )时,采集各采集点的输出转速、输入力矩、输出力矩、进口油压、出口油压、进口油温、出口油温。

## 3 试验结果与仿真结果对比

将采集到的试验数据进行处理,牵引试验下的数据见图 9~18。根据仿真假设和液力变矩器外特性数值计算方法,计算了钣金型液力变矩器输出转速、效率、变矩系数、公称力矩,仿真计算结果见图 19~22。将仿真工况下的参数曲线与试验工况下的参数曲线进行对应比较,从中可以看出,2 种工况下的结果基本吻合,平均误差很小。液力变矩器效率最大误差约为 2%,变矩系数的最大误差约为 3%,公称力矩的最大误差约为 3%,误差在可接受

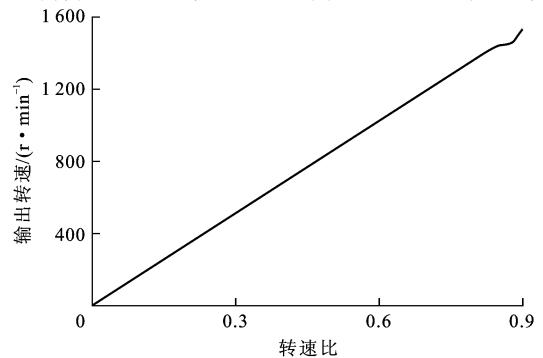


图 9 试验工况下的输出转速

Fig. 9 Output speed under test condition

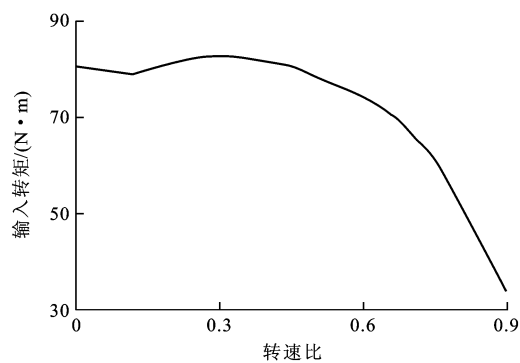


图 10 试验工况下的输入转矩

Fig. 10 Input torque under test condition

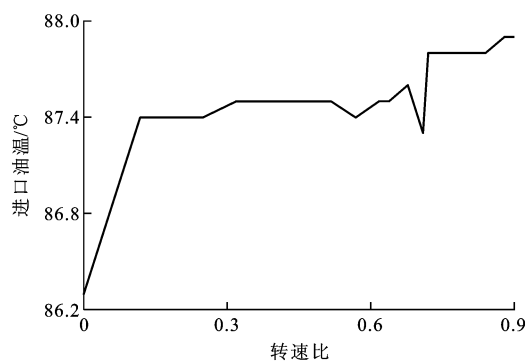


图 14 试验工况下的进口油温

Fig. 14 Imported oil temperature under test condition

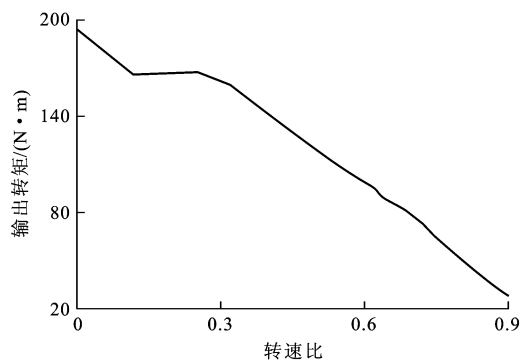


图 11 试验工况下的输出转矩

Fig. 11 Output torque under test condition

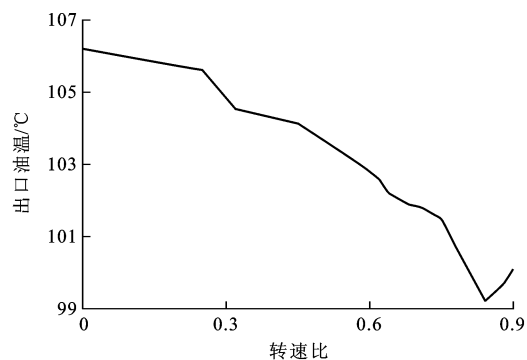


图 15 试验工况下的出口油温

Fig. 15 Exported oil temperature under test condition

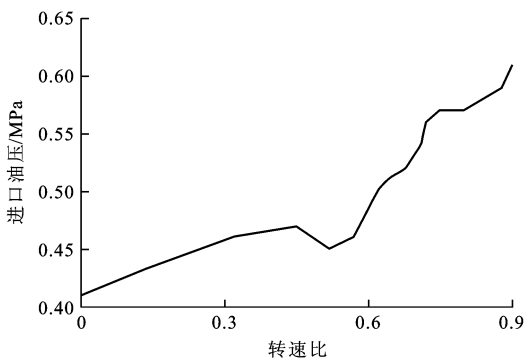


图 12 试验工况下的进口油压

Fig. 12 Imported oil pressure under test condition

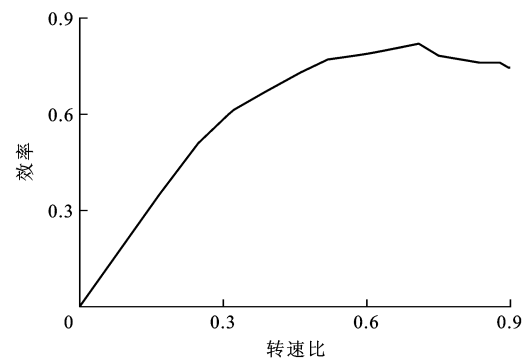


图 16 试验工况下的效率

Fig. 16 Efficiency under test condition

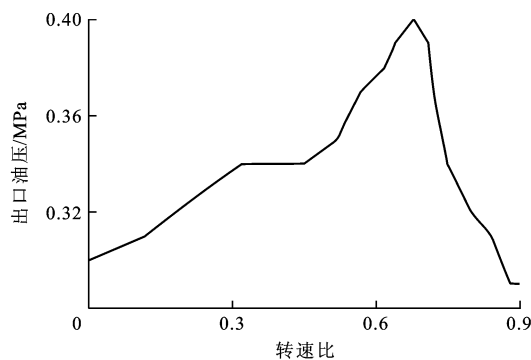


图 13 试验工况下的出口油压

Fig. 13 Exported oil pressure under test condition

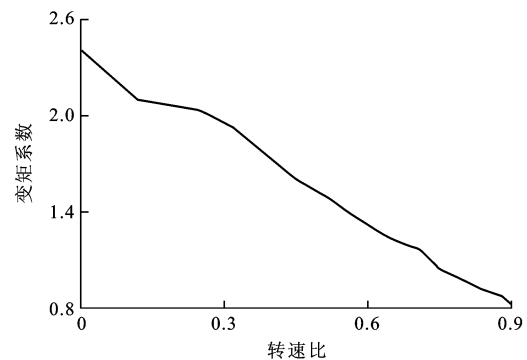


图 17 试验工况下的变矩系数

Fig. 17 Torque coefficient under test condition

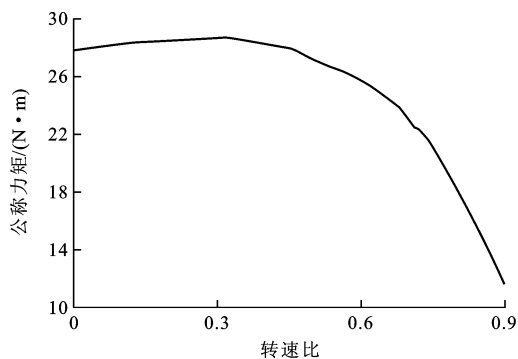


图 18 试验工况下的公称力矩

Fig. 18 Nominal torque under test condition

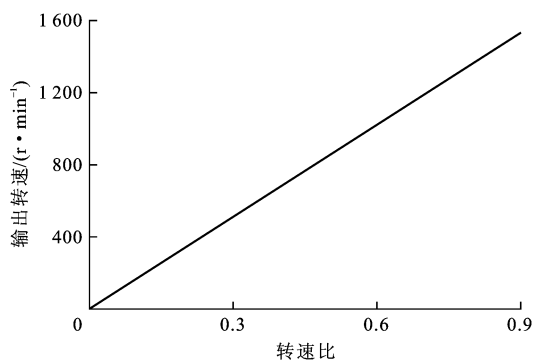


图 19 仿真工况下的输出转速

Fig. 19 Output speed under simulation condition

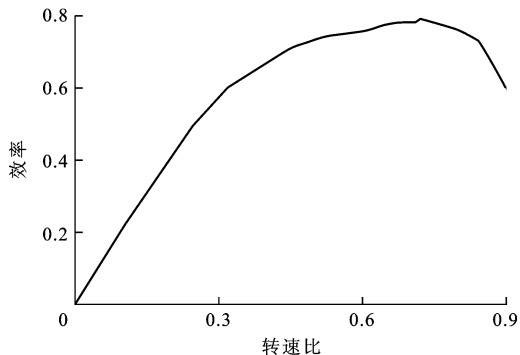


图 20 仿真工况下的效率

Fig. 20 Efficiency under simulation condition

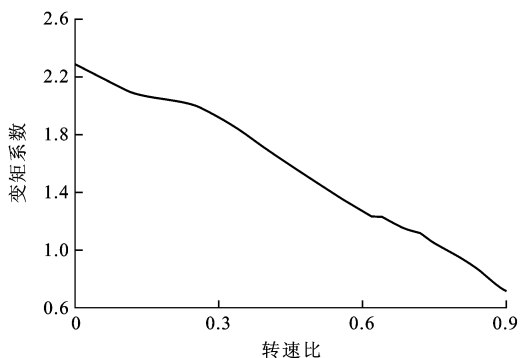


图 21 仿真工况下的变矩系数

Fig. 21 Torque coefficient under simulation condition

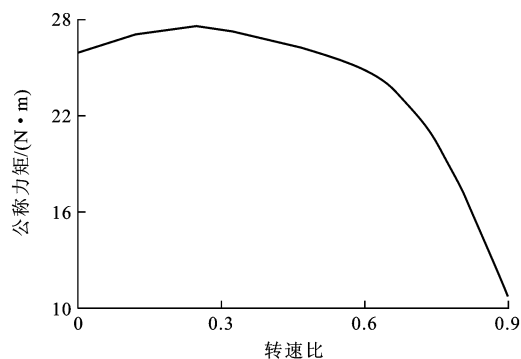


图 22 仿真工况下的公称力矩

Fig. 22 Nominal torque under simulation condition

范围之内,说明三维流场外特性数值计算方法的正确性。结果中存在一定的误差,这主要是因为对流动进行了一定的简化。

## 4 结 语

本文应用三维流场数值计算方法对钣金型液力变矩器外特性进行了研究,提出了钣金型液力变矩器外特性数值计算方法,充分考虑了钣金型液力变矩器内部因素对外特性的影响,将试验结果与仿真结果进行比较,验证了数值计算方法的有效性,为钣金型液力变矩器的设计提供了理论依据。

## 参考文献:

### References:

- [1] 惠记庄,焦生杰,邹亚科,等. 钣金型液力变矩器内部流场的分析[J]. 长安大学学报:自然科学版,2009,29(2):107-110.  
HUI Ji-zhuang, JIAO Sheng-jie, ZOU Ya-ke, et al. Analysis on flow field of fabrication hydraulic torque converter[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2009, 29(2): 107-110. (in Chinese)
- [2] FLACK R, BRUN K. Fundamental analysis of the secondary flows and jet-wake in a torque converter pump, Part II: flow in curved stationary passage and combined flows[J]. Journal of Fluids Engineering, 2005, 127(1): 75-82.
- [3] DONG Ying-fei, LAKSHMINARAYANA B. Rotating probe measurements of the pump passage flow field in an automotive torque converter[J]. Journal of Fluids Engineering, 2001, 123(1): 81-91.
- [4] KRAUS O, FLACK R, HABSIEGER A, et al. Periodic velocity measurements in a wide and large radius ratio automotive torque converter at the pump/turbine interface[J]. Journal of Fluids Engineering, 2005, 127(2): 308-316.
- [5] 王 欢,吴光强,冀海燕. 超扁平化液力变矩器泵轮流场主流特征分析[J]. 江苏大学学报:自然科学版,2009,30(5):463-466.  
WANG Huan, WU Guang-qiang, JI Hai-yan. Main flow features analysis on impeller of super flat automotive torque converter[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science

- Edition, 2009, 30(5): 463-466. (in Chinese)
- [6] 魏良武,魏杰,汪建华. 液力变矩器总成点固焊接变形有限元分析[J]. 电焊机, 2004, 34(9): 42-44.  
WEI Liang-wu, WEI Jie, WANG Jian-hua. Finite element analysis of welding distortion in tack welding of hydraulic torque convertor assembly[J]. Electric Welding Machine, 2004, 34(9): 42-44. (in Chinese)
- [7] 王宏卫. 钣金冲焊型双涡轮液力变矩器的研制[J]. 工程机械, 2002, 33(5): 45-47.  
WANG Hong-wei. Development of fabricated twin turbine hydraulic torque converters[J]. Construction Machinery and Equipment, 2002, 33(5): 45-47. (in Chinese)
- [8] 赵罡,马文星,周平. 反求工程技术在液力传动中的应用研究[J]. 液压气动与密封, 2006, 30(1): 26-28.  
ZHAO Gang, MA Wen-xing, ZHOU Ping. The application research on converse engineering technique in hydrodynamic transmission[J]. Hydraulics Pneumatics and Seals, 2006, 30(1): 26-28. (in Chinese)
- [9] EJIRI E, KUBO M. Performance analysis of automotive torque converter elements[J]. Journal of Fluids Engineering, 1999, 121(2): 266-275.
- [10] 刘春宝,马文星,朱喜林. 液力变矩器三维瞬态流场计算[J]. 机械工程学报, 2010, 46(14): 161-166.  
LIU Chun-bao, MA Wen-xing, ZHU Xi-lin. 3D-transient calculation of internal flow field for hydrodynamic torque converter[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(14): 161-166. (in Chinese)
- [11] DONG Yu, VAMSHI K, PRADEEP A, et al. Torque converter CFD engineering, Part I: torque ratio and k factor improvement through stator modifications[J]. Society of Automotive Engineer, 2002, 123(1): 83-90.
- [12] 严鹏,吴光强. 液力变矩器性能分析[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2004, 32(11): 1504-1507.  
YAN Peng, WU Guang-qiang. Performance investigation of torque converter[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2004, 32(11): 1504-1507. (in Chinese)
- [13] 刘悦,刘春宝,何大志,等. 液力变矩器轴向载荷三维流场的数值计算[J]. 机械设计与研究, 2011, 27(1): 42-44.  
LIU Yue, LIU Chun-bao, HE Da-zhi, et al. Three-dimensional flow filed numerical calculation of axial load in a torque converter[J]. Machine Design and Research, 2011, 27(1): 42-44. (in Chinese)
- [14] 袁生杰,刘艳芳,石传龙,等. 液力变矩器内部流场的三维数值模拟[J]. 工程机械, 2011, 42(7): 35-42.  
YUAN Sheng-jie, LIU Yan-fang, SHI Chuan-long, et al. 3-D numerical simulation of inner flow field for hydraulic torque convertor[J]. Construction Machinery and Equipment, 2011, 42(7): 35-42. (in Chinese)
- [15] 惠记庄,邹亚科. 液力变矩器性能实验台的研究[J]. 起重运输机械, 2007(12): 53-55.  
HUI Ji-zhuang, ZOU Ya-ke. Research of test bench for hydraulic torque converter performance[J]. Hoisting and Conveying Machinery, 2007(12): 53-55. (in Chinese)
- [16] 鲁统利,葛安林,张宏坤,等. 液力变矩器性能试验台油温自动控制系统研制[J]. 农业机械学报, 2000, 31(4): 95-102.  
LU Tong-li, GE An-lin, ZHANG Hong-kun, et al. Research on a temperature auto control system of motorcar torque converter test-bed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2000, 31(4): 95-102. (in Chinese)
- [17] GB/T 7680—2005, 液力变矩器性能试验方法[S].  
GB/T 7680—2005, torque converters-methods of performance tests[S]. (in Chinese)
- [18] 刘振军,秦大同,胡建军,等. 轿车用液力变矩器性能试验分析[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2002, 25(2): 103-105, 119.  
LIU Zhen-jun, QIN Da-tong, HU Jian-jun, et al. Testing study on hydraulic torque converter for car[J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2002, 25(2): 103-105, 119. (in Chinese)
- [19] 刘悦,马文星,刘春宝,等. 综合式液力变矩器内特性的计算与分析[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2008, 38(1): 70-74.  
LIU Yue, MA Wen-xing, LIU Chun-bao, et al. Calculation and analysis of internal characteristics of torque converter-coupling[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2008, 38(1): 70-74. (in Chinese)
- [20] 刘宗其,李志远,夏光. 基于反求技术的液力变矩器涡轮叶片设计[J]. 交通运输工程学报, 2014, 14(3): 65-72.  
LIU Zong-qi, LI Zhi-yuan, XIA Guang. Design of turbine blades of torque converter based on reverse technology[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2014, 14(3): 65-72. (in Chinese)
- [21] 徐信芯,焦生杰,顾海荣,等. 旋挖钻机钻杆耦合振动与减振研究[J]. 中国公路学报, 2014, 27(9): 119-126.  
XU Xin-xin, JIAO Sheng-jie, GU Hai-rong, et al. Research on coupled vibration and reducing vibration of drillstring for rotary drilling rig[J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(9): 119-126. (in Chinese)