

基于流场特性的液力缓速器叶栅角度优化设计*

李雪松¹ 刘春宝² 程秀生¹ 苗丽颖¹

(1. 吉林大学汽车仿真与控制国家重点实验室, 长春 130025; 2. 吉林大学机械科学与工程学院, 长春 130022)

摘要: 为了提高液力缓速器制动转矩系数,对液力缓速器内湍流流动进行了三维瞬态多相流数值模拟。通过对其内流场特性分析,发现液力缓速器工作流道的壁面脱离现象以及弦面内产生的涡旋区不利于恒定制动转矩的输出。针对这一问题,考虑到液力缓速器各结构参数之间的相关性,对多参数共同作用的内流场进行数值分析,优化叶栅参数。结果表明,通过分析多参数共同作用的流场来优化缓速器叶栅参数的方法比较合理;对液力缓速器叶片前倾角和叶片前缘倒角进行优化后,叶轮流道内存在的涡团和流动分离现象基本消失,制动转矩系数提高6%。

关键词: 液力缓速器 流场特性 相关性 叶栅优化

中图分类号: TH137.331 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)06-0020-05

引言

目前我国交通事故频繁发生,其中由于制动系统失效引起的事故比例逐渐增加,因此近年来车辆的制动性能受到人们越来越多的关注^[1-4]。液力缓速器以其高速制动力矩大、能长时间提供连续制动能力等优点,在车辆上得到日益广泛的应用,大大增强了行车安全性。随着人们对车辆传动系统功率密度的重视,提高液力缓速器的制动力矩系数,成为其结构参数优化设计的关键^[5-6]。影响液力缓速器制动力矩系数的关键因素是其结构参数,即循环圆形状和有效直径、叶片数目、叶片倾角以及叶片前缘倒角等。部分国内学者运用 CFD 技术分析了液力缓速器单个结构参数对其缓速制动性能的影响,仅对单参数进行内流场计算分析及优化而没有考虑各个结构参数之间的相关性^[7-10]。

本文基于计算流体动力学,借助 CFD 软件,对不同工况液力缓速器内流场进行数值模拟,并分析液力缓速器各结构参数之间的相关性,以制动转矩系数为优化目标,对其叶栅角度进行优化。

1 数值模拟可靠性验证

1.1 叶轮参数及模型

液力缓速器结构参数如表 1 所示,叶轮三维实体模型如图 1 所示,其中箭头所示为液体在叶轮内

的循环流动路径。图 2 为叶轮工作流道网格模型。

表 1 叶轮结构参数

Tab. 1 Structural parameters of impellers

参数	转子	定子
循环圆有效直径/mm	296	293
叶片数目	36	34
叶片前倾角/(°)	40	40
叶片前缘倒角/(°)	30	30

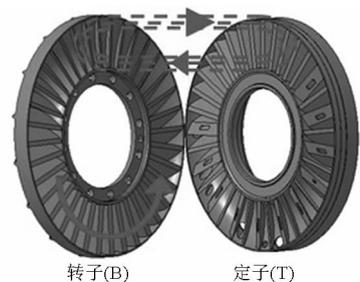


图 1 液力缓速器叶轮三维模型

Fig. 1 3D model of hydraulic retarder impellers

1.2 数值计算结果可靠性验证

为了对缓速器整个工作流道进行瞬态计算,并且保证定子、转子两区域之间参数传递的准确性,分别将其流道控制体网格放入静、动同轴旋转坐标计算域内,并采用滑动网格理论给定相应的数据交互性边界条件。流道内壁和叶片表面近壁处速度场采用速度无滑移边界条件。部分充液工况下,考虑到缓速器内气液两相的存在状态,采用混合模型对液

收稿日期: 2013-10-12 修回日期: 2014-01-10

* 国家自然科学基金青年科学基金资助项目(51305156)、中国博士后科学基金资助项目(2011M500602)和江苏省汽车工程重点实验室开放基金资助项目(QC201201)

作者简介: 李雪松,讲师,博士后,主要从事液力传动与自动变速理论研究,E-mail: lixuesong@jlu.edu.cn

通讯作者: 刘春宝,副教授,主要从事液力传动与自动变速研究,E-mail: liuanbc@126.com

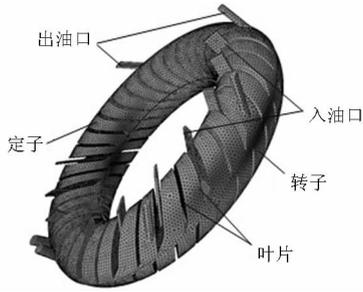


图2 工作流道网格模型

Fig. 2 Mesh models of work flow channel

力缓速器内流场进行多相流计算。本文采用的数值模拟计算方法较传统的稳态计算方法更加准确可靠,与试验吻合良好^[11]。

2 流场特性分析

文中的液力缓速器叶轮无内环且回转壁面弯曲严重,叶片压力面和吸力面的根部存在流动分离,且定子叶片吸力面附近尤其严重,靠近外环产生了严重脱流(图3a)。近壁面处的流动分离已经严重影响到叶片流道主流区的流动,不利于液流迅速冲击定子叶片,导致冲击损失降低^[12-14];叶片流道主流区的流线方向在个别叶片间比较分散,凸向冲击较大的压力面形成了马蹄涡(图3c)^[15];外环面产生的马蹄涡影响了液体循环流动,致使弦面内进出口区域流动不均匀,压力梯度的存在使得此处形成通道涡(图3e),通道涡是影响流动的主要因素之一,在弯曲流动中不可避免,只能适当缓解其现象^[16-17]。

分析原因,涡旋的产生主要由于叶片的进口冲角和叶片倾角不符合流动规律,因此导致流体在冲击叶片时,在进出口交接区域产生通道涡,干扰了入口流场,使得通道涡的分支在叶片两侧产生了漩涡和分离流动^[18-19]。针对上述流动问题,对叶轮提出优化叶片倾角及前缘倒角叶型修正方案,以期提高叶轮的冲击损失,消除或者减少不必要的流动损失。

3 叶栅优化设计

3.1 参数优化评价指标

对于流道几何相似的液力缓速器,在同一工况下转矩无因次系数 λ_k 相等, λ_k 直接体现了液力缓速器制动转矩性能,因此可以用转矩系数 λ_k 作为评价液力缓速器结构参数优化的指标^[20]。 λ_k 可表示为

$$\lambda_k = \frac{T}{\rho g n_b^2 D^5} \quad (1)$$

式中 T ——制动转矩, $N \cdot m$

ρ ——工作油液密度, kg/m^3

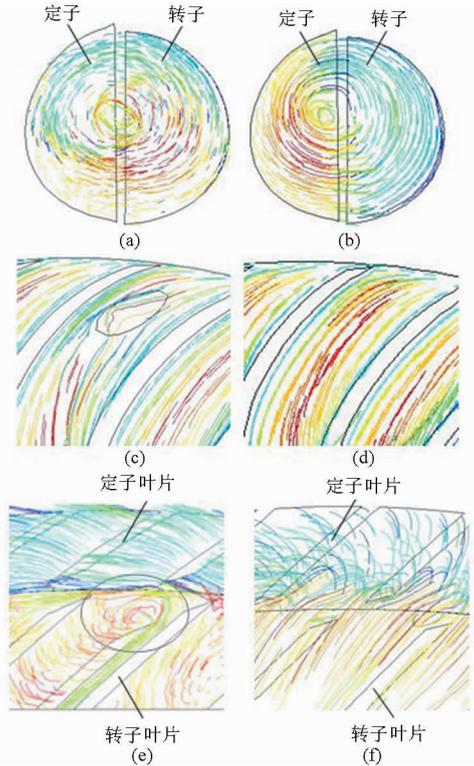


图3 液体流动迹线

Fig. 3 Liquid flow trace

(a) 原型叶轮节面 (b) 最优叶轮节面 (c) 原型叶轮翼面
(d) 最优叶轮翼面 (e) 原型叶轮弦面 (f) 最优叶轮弦面

g ——重力加速度

n_b ——转子转速, r/min

D ——循环圆有效直径, m

从式(1)可以看出,当循环圆有效直径不变时,一定转速下制动转矩和转矩系数呈正比,因此,在不改变有效直径的条件下,也可以将制动转矩作为参数优化评价指标。

3.2 叶栅角度优化方案选择

影响液力缓速器制动转矩的结构参数主要有:循环圆形状和有效直径、叶片数目、叶片倾角以及叶片前缘倒角。通过流场特性分析得知弦面出现涡旋主要是由叶片倾角和前缘倒角的设计不合理造成的,与循环圆形状及叶片数目关系甚微,所以文中在其他参数保持不变的前提下,只对叶片倾角和前缘倒角进行修正。

图4所示为液力缓速器前倾叶片示意图,其中 α 为叶片前倾角。液体从叶片间流道流出时,叶片倾角的变化会改变冲击角,影响冲击损失,从而导致制动转矩变化。表2所示为叶片倾角从 32° 变化到 48° 时,液力缓速器内流场的数值计算结果,结果显示当缓速器其他结构参数不变时,随着叶片倾角的增大,制动转矩先增大后减小,前倾 42° 时,由于叶片获得较大的冲击损失使其制动转矩最大。

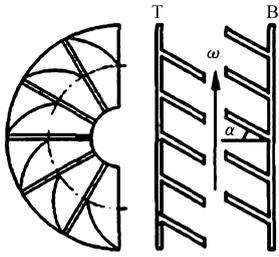


图4 叶片倾角示意图

Fig. 4 Schematic of blade tilt angle

表2 不同叶片倾角的制动转矩

Tab. 2 Braking torque of different blade tilt angle

叶片倾角/(°)	32	34	36	38	40	42	44	46	48
$T/(N \cdot m)$	3 290.5	3 354.3	3 498.4	3 712.1	3 874.3	4 005.8	3 801.3	3 463.4	3 247.5

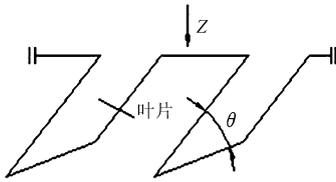


图5 叶片楔角示意图

Fig. 5 Schematic of blade wedge angle

表3 不同叶片楔角的制动转矩

Tab. 3 Braking torque of different blade wedge angle

叶片楔角/(°)	10	15	20	25	28	30	35	40	45
$T/(N \cdot m)$	5 176.5	5 124.3	5 062.4	4 711.1	4 003.6	3 872.2	3 458.3	2 949.4	2 433.5

表4 叶栅优化方案

Tab. 4 Cascade optimization scheme

参数	方案					
	1	2	3	4	5	6
叶片倾角/(°)	40	40	42	42	44	44
叶片楔角/(°)	28	30	30	28	28	30

取其内外特性进行对比分析。

3.3 优化结果

将几组优化方案的流场特性与原样机对比分析

速度/($m \cdot s^{-1}$)

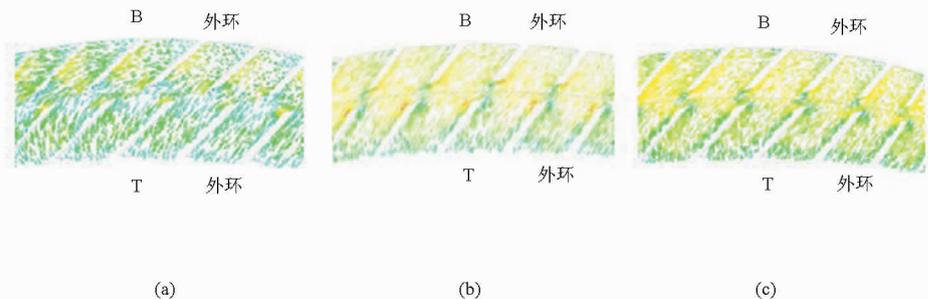
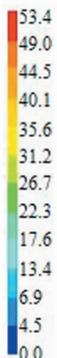


图6 弦面相对速度分布图

Fig. 6 Relative velocity distribution of chord surface

(a) 方案2 (b) 方案4 (c) 方案5

叶片楔角(前缘倒角)同叶片倾角一样对冲击损失有很大影响,从而影响液力缓速器的制动转矩,图5中 θ 为叶片楔角。为研究不同楔角与制动转矩的关系,在全充液工况,分别对 $10^\circ \sim 45^\circ$ 楔角的内流场进行数值计算,结果表明(表3):当其他结构参数不变时,随着叶片楔角逐渐减小,制动转矩将不断增大,但是过小的楔角会导致叶片前缘过薄从而引起强度不够。

对于叶片倾角和叶片楔角,两者在冲击损失方面互相影响,相关性较大。因此不能简单将叶片倾角或前缘倒角单一参数作用下得到的优化结果组合形成最优方案,而要以叶片倾角和前缘倒角的变化趋势对制动转矩的影响为依据,并考虑叶片强度等相关因素,在不改变其他结构参数的条件下,拟采用表4中的几组优化方案进行内流场数值计算,并获

可知,只有方案2、4、5流场中的流动分离和涡旋现象得到了明显改善。图6显示相对速度最大值出现在方案4的定转子交界区域,说明该方案中液流从转子吸收的能量最多,从而产生较大的冲击损失。图7显示在叶片吸力面与叶片楔角转折处产生了局部低压,使得压力面与吸力面之间产生横向压差,横向压差越大,工作腔内循环流动越显著,制动转矩越大。表5为制动转矩以及转矩系数的数值计算结果。方案4的制动转矩最大,其次是方案2,最小是

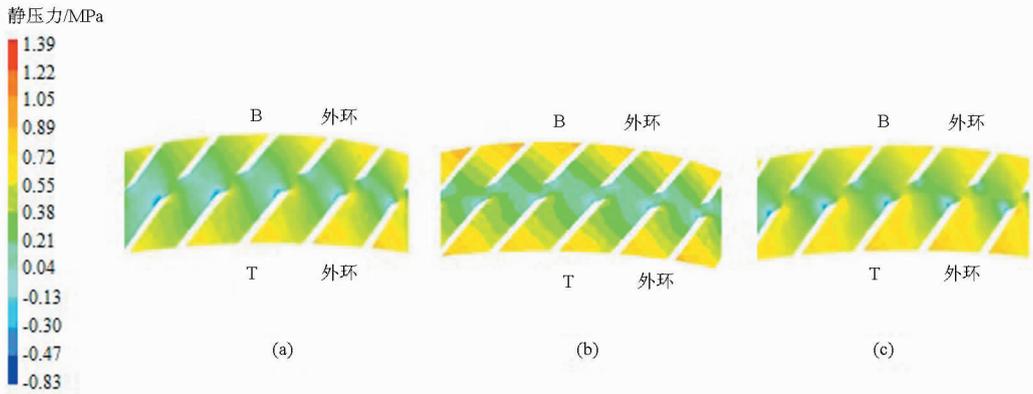


图 7 弦面静压分布图

Fig. 7 Static pressure distribution of chord surface

(a) 方案 2 (b) 方案 4 (c) 方案 5

方案 5,因此方案 4 为最佳优化方案。

表 5 各优化方案下的制动转矩及转矩系数

Tab. 5 Braking torque and torque coefficient of each optimization scheme

方案	制动转矩/(N·m)	转矩系数 λ_k
2	3 896. 49	$1. 387 \times 10^{-4}$
4	4 190. 21	$1. 492 \times 10^{-4}$
5	3 718. 79	$1. 324 \times 10^{-4}$

优化后的液力缓速器各结构参数分别为:循环圆形状为圆形、定子叶片数 34,转子叶片数 36,叶片倾角 42° ,叶片楔角 28° 。液体在原型叶轮和最优叶轮内叶片近壁面和工作流道内截面的流动迹线对比可以发现(图 3),叶型改进后,由于叶片的入口冲击角减小,使得原型叶片在吸力面根部的流动分离现象有所改善,循环流动比较顺畅,马蹄涡的影响范围减小;新的叶型抑制了通道涡的形成,有助于减少通道涡附近的高能量液体因相互混掺而产生的损失,从而降低了二次流损失。

3. 4 优化前后性能对比分析

图 8 为不同充液率 f 下,优化前、后液力缓速器的转速-制动转矩曲线。通过对比发现,低充液率下,制动转矩变化不太显著,但是在较高充液率下,

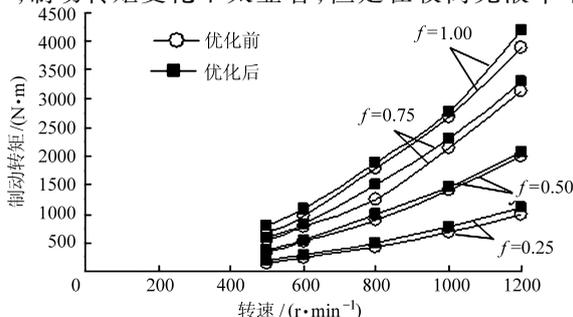


图 8 优化前后制动转矩曲线对比

Fig. 8 Comparison of braking torque curves before and after optimization

优化后的性能明显提高。

图 9 为不同工况下,缓速器优化前后制动转矩系数对比曲线。制动转矩系数随充液率的增加逐渐增大,全充液时达到最大,此时即使工作腔内的压力继续升高,转矩系数也不再变化,而是维持在最大值左右。从 2 条曲线的拟合结果对比来看,在高充液率下优化后缓速器的制动转矩系数提高明显,较原样机提高大约 6%,达到了提高制动转矩系数的目的。

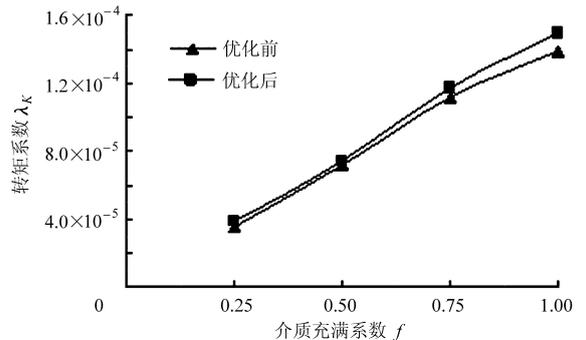


图 9 优化前后制动转矩系数曲线对比

Fig. 9 Comparison of braking torque coefficient curves before and after optimization

4 结论

(1)为了较准确地预测液力缓速器内流场中的涡旋、脱流和分离流动等场内流动问题,对缓速器内湍流流动进行三维瞬态流动分析,并发现了流动中存在的问题,即由于叶栅结构设计的不合理,外环近壁面区域出现脱流现象,并且流道内产生了马蹄涡和通道涡,不利于恒定制动转矩的输出。

(2)采用基于流场特性分析的优化方法对叶栅角度进行优化设计,优化效果显著,原型叶轮中存在的涡旋和壁面脱流现象基本消失,弦面内的涡团影响范围减弱,降低了二次流损失,使得循环流动更加顺畅,并且优化后的缓速器在不同转速下的制动转矩均有一定程度的提高,制动转矩系数提高了 6%。

参 考 文 献

- 1 闫清东,邹波,唐正华,等. 车用液力减速器叶片数三维集成优化[J]. 农业机械学报,2012,43(2):21-25.
Yan Qingdong, Zou Bo, Tang Zhenghua, et al. 3-D integrated optimization of blade numbers for vehicular hydraulic retarder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2012,43(2):21-25. (in Chinese)
- 2 闫清东,邹波,魏巍,等. 液力减速器充液过程瞬态特性三维数值模拟[J]. 农业机械学报,2012,43(1):12-17.
Yan Qingdong, Zou Bo, Wei Wei, et al. Numerical investigation on transient oil-filling process of hydraulic retarder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2012,43(1):12-17. (in Chinese)
- 3 何延东,刘刚,朱向哲. 大功率调速型液力偶合器数值计算与实验[J]. 农业机械学报,2012,43(8):37-41.
He Yandong, Liu Gang, Zhu Xiangzhe. Numerical calculation and experiment of high-power variable speed hydrodynamic coupling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2012,43(8):37-41. (in Chinese)
- 4 闫清东,邹波,魏巍. 液力变矩-减速装置制动特性流场分析[J]. 吉林大学学报:工学版,2012,42(1):91-97.
Yan Qingdong, Zou Bo, Wei Wei, et al. Numerical investigation of brake performance of hydrodynamic tractor-retarder assembly[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2012,42(1):91-97. (in Chinese)
- 5 严军,何仁,鲁明. 液力缓速器变叶片数的三维数值模拟[J]. 江苏大学学报:自然科学版,2009,30(1):27-31.
Yan Jun, He Ren, Lu Ming. Numerical simulation of hydraulic retarder with different blade number[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2009,30(1):27-31. (in Chinese)
- 6 Zhang Yanhong, Yang Chao, Mao Zaisha. Large eddy simulation of the gas-liquid flow in a stirred tank [J]. AIChE Journal, 2008,54(8):1963-1974.
- 7 何仁,严军,鲁明. 不同倾斜方式对液力缓速器缓速性能的影响分析[J]. 机械科学与技术,2009,28(8):1056-1059.
He Ren, Yan Jun, Lu Ming. Performance analysis of a hydraulic retarder with different vane inclinations[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2009,28(8):1056-1059. (in Chinese)
- 8 严军,何仁. 液力缓速器叶片变角度的缓速性能分析[J]. 农业机械学报,2009,40(4):206-209.
Yan Jun, He Ren. Performance analysis for hydrodynamic retarder with different vanes[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2009,40(4):206-209. (in Chinese)
- 9 邹波,陈日军,唐正华,等. 液力减速器内流道数值建模方法研究[J]. 机床与液压,2011,39(9):100-104.
Zou Bo, Chen Rijun, Tang Zhenghua, et al. Research on parametric modeling method of hydraulic retarder cascade[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2011, 39(9):100-104. (in Chinese)
- 10 魏巍,李慧渊,邹波,等. 液力减速器制动性能及两相流分析方法研究[J]. 北京理工大学学报,2010,30(11):1281-1284.
Wei Wei, Li Huiyuan, Zou Bo, et al. Study on braking performance and analysis of two-phase flow in vehicular hydraulic retarder [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2010,30(11):1281-1284. (in Chinese)
- 11 李雪松,程秀生,苗丽颖. 液力缓速器部分充液流场大涡模拟及特性预测[J]. 中南大学学报:自然科学版,2012,43(5):1717-1723.
Li Xuesong, Cheng Xiusheng, Miao Liying. Large eddy simulation on internal flow field of hydraulic retarder and characteristics prediction[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2012,43(5):1717-1723. (in Chinese)
- 12 Brandt T T. Usability of explicit filtering in large eddy simulation with a low-order numerical scheme and different subgrid-scale models[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2008,57(7):905-928.
- 13 He Yandong, Ma Wenxing, Liu Chunbao. Numerical simulation on CFD of flow field in hydrodynamic coupling and characteristics prediction[C]//Power and Energy Engineering Conference, APPEEC 2009, 2009:1-4.
- 14 Song Bin, Lü Jiangang, Zhao Guangjun, et al. Numerical simulation on gas-liquid two-phase flow in fluid coupling during braking[C]//Proceedings of the 2010 3rd IEEE International Conference on Computer Science and Information Technology, 2010: 709-713.
- 15 谢蓉,单玉姣,王晓放. 混流泵叶轮流动性性能数值模拟和叶型优化设计[J]. 排灌机械工程学报,2010,28(4):296-299.
Xie Rong, Shan Yujiao, Wang Xiaofang. Numerical simulation on flow performance and blade profile optimal design of mixed-flow pump impeller[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2010,28(4):296-299. (in Chinese)
- 16 Zhou Guoyi, Wang Weiqing, Yang Zhichun, et al. Numerical simulation on three-dimensional turbulent flow[C]//Power and Energy Engineering Conference, APPEEC 2010,2010:1-4.
- 17 冯宜彬,过学迅. 液力减速器内流场的 CFD 数值模拟研究[J]. 汽车工程,2009,31(4):353-356.
Feng Yibin, Guo Xuexun. A study on the CFD numerical simulation of internal flow field in hydraulic retarder[J]. Automotive Engineering,2009,31(4):353-356. (in Chinese)
- 18 Chang Xin, Qi Xiangyang, Cheng Xiangru, et al. Large eddy simulation of 2-dimensional incompressible flow around airfoil[C] //2011 International Conference on Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering,2011: 6088-6092.
- 19 Zhang Ling, Wen Guoliang. Large eddy simulation on compound angle film cooling of turbine blades [C] // 2011 10th International Conference on Electronic Measurement & Instruments, 2011,1:282-287.
- 20 黄俊刚,李长友,童军,等. 液力缓速器制动扭矩的关键影响因素分析[J]. 机床与液压,2010,38(15):77-80.
Huang Jungang, Li Changyou, Tong Jun, et al. Study on pivotal factor influencing breaking torque of hydrodynamic retarder [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2010, 38(15):77-80. (in Chinese)

- 12 Heimgärtner C, Leipertz A. Investigation of the primary spray breakup close to the nozzle of a common-rail high pressure diesel injection system [C]. SAE Paper 2000-01-1799, 2000.
- 13 Brusiani F, Bianchi G M, Tiberi A I. Primary breakup model for turbulent liquid jet based on ligament evolution [C]. SAE Paper 2012-01-0460, 2012.
- 14 Mayer W, Laurien E, Khalifa E, et al. On the surface deformation of a liquid jet ejected from semi-turbulent pipe flow [C] // ICLASS-Europe 2003, 9th International Conference on Liquid Atomization and Spray System Sorrento, 2003.
- 15 Bae C, Yu J, Kang J, et al. Effect of nozzle geometry on the common-rail diesel spray [C]. SAE Paper 2002-01-1625, 2002.

Characterization of Gasoline Jets from a Single-hole Direct Injection Injector by Means of Microscopic Magnification

He Bangquan Zhang Tankai

(State Key Laboratory of Engines, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The characteristics of the gasoline jets from a single-hole direct injection injector were investigated by means of a long-distance microscope and a high-speed digital camera at various injection pressures and backpressures. The results showed that the surface waves were formed along the surface of the gasoline jets, and developed randomly with time. Discontinued surface waves usually broke up at the places where the direction of jet changed and formed dense small droplets. With the increase of injection pressure, the wavelength of the surface wave shortened and their frequencies rose, which promoted the breakup of jets. The distance between two adjacent radial branches of a jet decreased with increasing fuel injection pressure and backpressure.

Key words: Gasoline Spray Microscopic magnification Surface wave

(上接第 24 页)

Cascade Angle Optimization of Hydraulic Retarder Based on Flow Field Characteristics

Li Xuesong¹ Liu Chunbao² Cheng Xiusheng¹ Miao Liying¹

(1. State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control, Jilin University, Changchun 130025, China

2. College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: In order to improve the braking torque coefficient, the numerical simulation of 3D transient multiphase flow was performed to the turbulent flow in Hydraulic Retarder. By the analysis of internal flow field characteristics, both the flow separation phenomenon in the work flow channel and the vortex generated in the chord surface went against the output of the braking torque. To solve this problem, considering correlation between the structural parameters of hydraulic retarder, numerical analysis based on multi-parameter flow field was performed, and the blade cascade parameters were optimized. The results showed that, the method through the analysis of the multi-parameter flow field to optimize blade cascade parameters was reasonable. When the blade angle and chamfer angle were optimized, the vortex and the flow separation phenomenon in the flow channel of impeller disappeared and the braking torque coefficient increased by 6%.

Key words: Hydraulic retarder Flow field characteristics Correlation Cascade optimization