

液力传动研究现状分析与展望^{*}

马文星 何延东 刘春宝

【摘要】 综述了国内外近年来液力传动的研究进展和现状,包括基于 CFD 的液力传动元件内部三维流动的数值模拟,基于三维流场数值解的特性预测,以及采用粒子图像测速(PIV)等先进测试技术对液力元件内部复杂流动的实验研究等。提出未来应进行基于三维流动理论的叶片设计、流场的瞬态特性研究等。

关键词: 液力传动 综述 发展

中图分类号: TH137.332

文献标识码: A

Situation and Prospects of Research on Hydrodynamic Transmission

Ma Wenxing He Yandong Liu Chunbao

(Jilin University, Changchun 130025, China)

Abstract

The situation and progress of the domestic and foreign research on hydrodynamic transmission in recent years were summarized. It includes the CFD numerical simulation of the inner 3-D flow in hydrodynamic transmission elements, the characteristic prediction based on the numerical solution of the 3-D flow field, and the experimental study on the inner complex flow in hydrodynamic elements by means of the advanced flow measurement technique, such as particle image velocimetry (PIV). Finally, the further research directions were put forward as follow: blade design based on 3-D flow theory and transient characteristic study of the flow field.

Key words Hydrodynamic transmission, Review, Development

引言

对液力传动的研究过去曾采用的一维束流理论具有物理概念明确、参数调节简单的优点,在液力传动元件的设计研发中得到广泛应用。但实际上工作液体在液力元件工作叶轮中的流动呈粘性、三维、不可压缩、非稳定的复杂流动,显然基于一维束流理论并包含有很多经验系数的设计计算方法无法计算其内部流动,并且在叶片和流道设计以及对外特性预测中存在很大误差。20世纪80年代末至90年代初提出了液力传动二维流动理论和基于S1、S2流面的准三维流动理论,但因条件限制并未发展成为指导液力元件设计的成熟理论和方法。近年来,随着计算机技术、计算流体动力学(CFD)及其商业软

件和流动测量技术的飞速发展,对液力传动的研究又有了新的突破,同时也带动了液力传动理论与实际应用的长足发展。

1 国外液力传动研究现状

1.1 理论与方法研究

美国、德国、日本、韩国等近年来利用 CFD 技术对液力传动进行了大量研究,主要包括液力元件三维流场数值模拟分析以及从 CFD 的角度进行液力元件设计。

在流场数值模拟与分析方面,Shin Sehyun 等人采用 CFD 方法对导轮进行数值模拟,发现其二次流动的某些规律,其结果为变矩器叶片的优化设计提供了基础^[1]。Huitenga H 对液力耦合器启动工况

收稿日期:2008-01-10

^{*} 国家“863”高技术研究发展计划资助项目(项目编号:2007AA05Z256)

马文星 吉林大学机械科学与工程学院 教授 博士生导师,130025 长春市

何延东 吉林大学机械科学与工程学院 博士生

刘春宝 吉林大学机械科学与工程学院 博士生

内部流场进行了模拟与分析,并采取几个方案改变泵轮、涡轮的几何结构,通过对改进后的流场分析发现,几种情况下的内部流场更加符合实际的工作要求,从而成本降低^[2~3]。Dong Yu 采用流体分析软件 STAR-CD 进行变矩器的内部流场数值模拟与分析,利用混合平面理论,通过周向平均的方法将时变性去除以进行稳态计算,揭示其流场的流动规律和特性^[4~5]。Flack R 基于二维 N-S 方程数值解,发现泵轮压力面到吸力面、内环到外环的流动规律,得出泵轮曲率是影响其流动的重要因素,采用向后倾斜叶片可以消除流动中二次流等现象^[6~7]。Lee Chinwon 介绍了多重相关网格(multiple reference frame)的流场数值模拟方法^[8]。在 FLUENT 平台下,将计算区域划分成若干子域并分别以各自的速度旋转,在它们的分界面上相互联系。每个子域都存在该子域内的控制方程。在每两个子域的边界面上,设定速度的连续性。边界条件设置为周期性边界条件,将计算区域内的叶片表面及外环设置为壁面边界条件,每一元件都以一定的角速度旋转。初始条件除湍流脉动动能设置为 1 外,其余参数为 0,流场的计算是通过不断迭代求解整个流场空间离散单元的方程组,最终收敛准则为能量方程的参差低于 10^{-6} ,其余方程低于 10^{-3} 。由计算结果可以看出泵轮和涡轮叶片的压力面和吸力面呈现出不同的分布,高压区出现在叶片的外环边缘;导轮内部存在压力不连续的现象,这将会引起能量丢失,降低变矩器的性能。

基于 CFD 的计算结果能够有效地进行变矩器的改进设计和性能预测。Kowalski Darin 利用 CFD 的计算结果,通过改变工作油压,预测变矩器中的气蚀现象^[9];Norihiko Watanabe 将 CFD 计算结果与 SC/Tetra 技术相结合进行变矩器的设计,结果证明此方法较以往设计方法缩短了设计周期,优化了产品的性能^[10]。Yang Seunghan 将液力变矩器的模型建立和流场分析进行一体化设计,采用 CAD 与 CFD 相结合的方法,大大降低变矩器的设计成本,并缩短了其设计周期^[11];Shieh T 等人的 TCAP 设计系统是将二维设计、三维设计、优化设计与 CFD 软件相结合进行的变矩器一体化设计,具有设计快速方便、性能预测准确等优点^[12]。

综上所述,国外的理论和方法都已达到先进水平,利用 CFD 进行的性能预测精度较高,可以应用于液力变矩器的设计过程中,能够改变传统设计方法需多次试制方可定型的弊端,在计算机上实现设计过程,达到准确、省时和省力的目的,对于缩短开发周期、提高开发效率具有重要的意义。但是由于

问题的复杂性,目前根据性能指标要求,直接求解叶型和流道的反问题在国外研究较少,且未取得突破性进展。

1.2 实验研究

随着流动测试技术和计算机技术的发展,1996 年以来,各国在液力变矩器内流场的测量方面取得了很多成果,主要体现在对各叶轮流道内及叶片上速度和压力的测量,测量速度的较多。

Yasunori Kunisaki 等应用粒子图像测速(PIV)技术测量了液力变矩器导轮流场,发现导轮中弦面有顺时针二次环流现象,低速比时外环与吸力面交界处有逆向液流,内环与吸力面交界处有涡旋现象^[13];美国弗吉尼亚大学的研究小组采用激光多普勒测速(LDA)技术对变矩器的内流场进行了细致的实验研究,不仅分析了单个变矩器的各叶轮流场的稳态和非稳态特性,还对不同叶轮组合对内流场的影响作了对比,得出了很多具有指导意义的结论;日本的久保贤明、江尻英治等利用 LDA 对变矩器的内流场进行了测量与分析,对不同断面、不同速比下的结果进行对比,并且针对不同叶型和循环圆形状对变矩器性能的影响进行了实验研究^[14]。

Kraus S O 等人利用激光速度计测试涡轮与泵轮在 4 种速比下的速度分布,将各瞬时位置的速度值记录下来,发现泵轮出口与涡轮入口流体的运动规律^[15];Lakshminarayana B 等学者利用五孔探针台架测试变矩器的泵轮、涡轮、导轮流场的速度分布和压力分布,还采用静止探针测量了各元件出口流场分布,为了研究泵轮和涡轮旋转流道内的流场,该小组还提出了一种旋转探针测量技术,并测量了旋转流道的分布情况;福特汽车的 Dong Y 等应用五孔旋转探针测试变矩器泵轮处的稳态和非稳态流动现象^[16~17]。

Yasunori Kunisaki 等人将 PIV 与 CT 技术相结合从两个垂直方向分析导轮的内流场^[18],通过实验验证 CFD 数值模拟结果的准确性。实验中采用的液力变矩器由树脂制成,为了降低激光束散射对实验的影响,采用的工作油折射率和变矩器材料折射率基本相同,工作油温度控制在 $(20.4 \pm 0.5)^\circ\text{C}$,流场中撒布合适的示踪粒子,实验时间间隔为 50 ns,采用双脉冲 Nd-YAG 激光器,通过 CCD 记录下粒子的运动,数据送到工作站进行处理后得到 2 个连续时间内粒子的位移。将记录下的照片分成 32×32 像素区间,为了获取大量的流场数据,实验采用两套装置分别得到互相垂直的 X-Z 平面、Y-Z 平面的流场情况,最后将这 2 个平面的数据利用 CT 技术进行重构,得到导轮内部的三维流动情况。

可见,国外实验手段先进,尤其是近年来随着激光技术、数字信号处理技术,图形、图像处理技术以及计算机技术的日益成熟和完善,由接触式测量发展到非接触式测量,由定性测量发展到定量测量,由单一方式测量发展到多种流动显示与测量方法并用的综合测量,流场测试技术有了飞速发展。在当前液力变矩器内部流场数值模拟技术还不完全成熟时,流场测试与数值模拟相辅相成,实验测试仍是了解流场特性和验证数值计算正确性的重要手段。

2 国内液力传动研究现状

2.1 理论与方法研究

吉林大学从20世纪80年代末开始液力传动现代设计理论与方法的研究,研究经历了二维流动理论与方法到基于S1、S2流面的准三维理论与方法,再到三维流动理论与方法的过程。

才委、刘春宝等利用流体分析软件采用有限体积法对液力变矩器内流场进行数值计算,根据得到的内流场速度和压力信息,计算其叶轮转矩并预测其性能,计算结果与实验数据的对比表明数值模拟是准确可靠的^[19]。褚亚旭采用CFD方法进行液力变矩器的流场数值模拟计算和流场分析,将数值计算结果与实验结果进行分析对比,从而验证理论计算的正确性^[20];在流场计算的基础上,应用叶轮转矩方程,求解变矩器工作轮转矩,并预测其原始特性。与原始特性实验结果进行对比,证明采用CFD预测性能方法的准确性。

同济大学吴光强、吴晓栋等在分析了液力变矩器内部流场数值模拟存在困难的基础上,对液力变矩器的内部流场给出几个比较合理的假设,利用CFD技术分别对液力变矩器各叶轮内部流场进行数值模拟计算,通过分析流场分布情况,发现变矩器的几何形状存在问题^[21~22]。北京理工大学项昌乐、阎清东等利用CFD技术对液力变矩器内部三维流场进行数值分析,并以牵引-制动型液力变矩器为例,采用CFX软件计算变矩器内部流场,得出牵引和制动工况流场的分布特点,使一维束流理论的设计方法得到完善和改进,为进一步提高液力变矩器性能打下基础^[23]。

同国外的情况一样,国内对液力耦合器流场数值模拟与分析的工作较少。吉林大学李雪松利用三维流动数值模拟技术对液力耦合器制动工况的内部流场进行了数值计算与分析,并计算预测了制动转矩。结果表明,基于三维流场计算的制动转矩计算精度较高,与实验结果吻合很好^[24]。

国内在基于CFD的液力变矩器现代设计方法

研究方面也做了一些工作。刘春宝、褚亚旭提出了基于CFD的液力变矩器改进设计流程与方法。田华等人在CAD/CFD/CAM开发流程的基础上,以W305型与H245型液力变矩器为例,通过一体化设计与传统设计的比较,表明一体化设计方法具有准确的预测能力,可以提高变矩器一次设计成功率^[25]。

总体来讲,我国的理论与方法研究已经有很大进展,在这方面基本上接近或达到了国外水平。但同国外一样,基于三维流动理论的叶片设计方法的研究尚在起步探讨中。

2.2 实验研究

目前国内对液力变矩器内流场的测量研究还较少,主要集中在北京理工大学和吉林大学等高校。

北京理工大学较早利用LDV系统对YB-355型液力变矩器的泵轮和涡轮的内部流场速度分布进行了测量和分析。

吉林大学方杰依据三维流动基本理论对YJ380型液力变矩器内部流场进行了理论仿真计算,利用LSFM150型PIV测量系统对液力变矩器泵轮内部流场进行了初步研究;王清松用PIV技术对YJ380型液力变矩器泵轮的部分工况和切面流场进行了实验研究,并以实验得到的图像为基础,结合图像处理与模式识别技术研制出一套适合其实验特点的流动图像判读系统^[26]。

褚亚旭、才委等应用LDA技术对W305的导轮进行了内流场的测量与分析,将实验数据和数值模拟计算的数据进行了对比分析。在液力传动试验台上进行了原始特性实验,将测得的实验结果与CFD预测结果进行对比分析,验证了采用CFD预测性能的方法是实用和有效的^[27]。

与国外相比,液力传动元件流动测试研究的水平和深度还有一定的差距。

3 展望

对液力传动的研究已发展到三维流动模拟阶段,通过理论和实验结果对比,CFD对变矩器流场的数值模拟有较高的精度;液力传动内部流场采用现代流动测试技术和方法已实现可视化,流场的分析结果对进一步改进液力变矩器叶型,提高效率有重要的指导作用。

通过对国内外液力传动研究现状的分析,今后在液力传动领域进一步的研究主要包括以下几个方面:

(1)液力变矩器循环圆的优化设计。近年来随着轿车传动系布置空间越来越紧凑以及自动变速器

多档化的趋势,出现了扁平化的循环圆形状,可以节约一些空间,故循环圆形状以及扁平率对内部流场和性能的影响成为液力变矩器的研究方向之一。

(2)目前所进行的流场分析是在一些简化条件下进行的,尽管其计算精度在工程应用中已经足够,但随着 CFD 技术和计算机技术水平的提高,势必要求更加准确的数值模拟模型。

(3)加快对液力变矩器内部流场瞬态特性的研

究。目前进行的液力变矩器内流场分析都是基于稳态的假定,而液力变矩器内部流场本质是非稳态的,因此为了更准确地描述液力变矩器内部流场的特征,以达到提高设计水平的目的,应加快对液力变矩器内部流场瞬态特性的研究。

(4)基于三维流动理论的叶片及流道设计方法研究。依据性能指标要求,基于三维流动理论,直接进行叶片及流道的三维设计。

参 考 文 献

- 1 Shin Sehyun, Chang Hyukjae, Athavale Mahesh. Numerical investigation of the pump flow in an automotive torque converter[C]. SAE Paper 1999-01-1056, 1999.
- 2 Huitenga H, Mitra N K. Improving start-up behavior of fluid couplings through modification of runner geometry: part I—fluid flow analysis and proposed improvement[J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2000, 122(4): 683~688.
- 3 Huitenga H, Mitra N K. Improving start-up behavior of fluid couplings through modification of runner geometry: part II—modification of runner geometry and its effects on the operation characteristics [J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2000, 122(4): 689~693.
- 4 Dong Yu, Korivi Vamshi, Attibele Pradeep. Torque converter CFD engineering part I: torque ratio and K factor improvement through stator modifications[C]. SAE Paper 2002-01-0883, 2002.
- 5 Dong Yu, Korivi Vamshi, Attibele Pradeep. Torque converter CFD engineering part II: performance improvement through core leakage flow and cavitation control[C]. SAE Paper 2002-01-0884, 2002.
- 6 Flack R, Brun K. Fundamental analysis of the secondary flows and jet-wake in a torque converter pump—part I: model and flow in a rotating passage[J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2005, 127(1): 66~74.
- 7 Flack R, Brun K. Fundamental analysis of the secondary flows and jet-wake in a torque converter pump—part II: flow in a curved stationary passage and combined flows[J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2005, 127(1): 75~82.
- 8 Lee Chinwon, Jang Wookjin, Lee Jang Moo, et al. Three dimensional flow field simulation to estimate performance of a torque converter[C]. SAE Paper 2000-01-1146, 2000.
- 9 Kowalski Darin, Anderson Carl, Blough Jason. Cavitation prediction in automotive torque converters[C]. SAE Paper 2005-01-2557, 2005.
- 10 Norihiko Watanabe, Shinya Miyamoto, Masayuki Kuba, et al. The CFD application for efficient designing in the automotive engineering[C]. SAE Paper 2003-01-1335, 2003.
- 11 Yang Seunghan, Shin Sehyun, Bae Incheol, et al. A computer-integrated design strategy for torque converters using virtual modeling and computational flow analysis[C]. SAE Paper 1999-01-1046, 1999.
- 12 Shieh T, Perng C, Chu D, et al. Torque converter analytical program for blade design process[C]. SAE Paper 2000-01-1145, 2000.
- 13 Yasunori Kunisaki, Toshio Kobayashi, Tetsuo Saga, et al. PIV measurement on the flow field around a stator cascade of automotive torque converter[C]. SAE Paper 2001-01-0868, 2001.
- 14 久保贤明, 江尻英治. LDVトルクコンバータの内部流れ計測[C]. 日本机械学会论文集(B编), 1998, 64(626): 3198~3204.
- 15 Kraus S 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]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2005, 127(2): 308~316.
- 16 Dong Y, Lakshminarayana B. Experimental investigation of the flow field in an automotive torque converter stator[J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 1999, 121(4): 788~797.
- 17 Dong Y, Lakshminarayana B. Rotating probe measurements of the pump passage flow field in an automotive torque converter[J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2001, 123(1): 81~91.
- 18 Yasunori Kunisaki, Toshio Kobayashi, Tetsuo Saga, et al. A study on internal flow field of automotive torque converter three-dimensional flow analysis around a stator cascade of automotive torque converter by using PIV and CT techniques[J]. JSAE Review, 2001, 22(4): 559~564.
- 19 才委, 马文星, 刘春宝, 等. 基于三维流场计算的液力变矩器特性预测方法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2007, 28(3):

316~319.

- 20 褚亚旭,马文星,方杰,等. 液力变矩器三维流动的计算[J]. 农业机械学报,2005,36(8):107~110.
Chu Yaxu, Ma Wenxing, Fang Jie, et al. Three-dimensional flow calculation of hydrodynamic torque converter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(8): 107~110. (in Chinese)
- 21 吴晓栋,谢硕. 轿车液力变矩器的改进设计方法研究[J]. 汽车研究与开发,2002(6):19~23.
- 22 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):1 504~1 507.
- 23 项昌乐,肖荣,阎清东,等. 牵引-制动型液力变矩器流场分析[J]. 工程机械,2005(5):43~46.
- 24 李雪松,马文星,吴允柱. 液力耦合器制动工况三维流场数值模拟及制动转矩计算[C]. 第四届中国流体传动与控制学术会议论文集,大连,2006:659~664.
- 25 田华,雷雨龙,王健. 液力变矩器一体化设计[J]. 汽车技术,2007(5):3~5.
- 26 褚亚旭,马文星,王清松. 液力传动元件流动图像判读系统研究[J]. 机床与液压,2006(3):211~213.
- 27 才委,马文星,褚亚旭,等. 液力变矩器导轮流场数值模拟与试验[J]. 农业机械学报,2007,38(8):11~14.
Cai Wei, Ma Wenxing, Chu Yaxu, et al. Numerical simulation and experimental research on flow field in the stator of a torque converter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(8):11~14. (in Chinese)
- 28 Pohl Brad. Transient torque converter performance, testing, simulation and reverse engineering[C]. SAE Paper 2003-01-0249, 2003.
- 29 Tetsuya Kubota, Toshio Kobayashi, Tetsuo Saga, et al. Application study of PIV measurement of flow field around lock-up clutch of automotive torque converter[J]. JSAE Review, 2003,24(4):425~430.
- 30 Shin Sehyun, Chang Hyukjae, Joo In-Sik. Effect of scroll angle on performance of automotive torque converter[C]. SAE Paper 2000-01-1158, 2000.
- 31 Shin Sehyun, Lee Byung-Cheol, Hong Jong-Hae, et al. Performance improvement using a slotted stator of an automotive torque converter[C]. SAE Paper 2003-01-0247, 2003.

(上接第 46 页)

参 考 文 献

- 1 Kleinknecht H. CCP CAN calibration protocol ASAP standard (Version 2.1)[M]. Germany: Vector Informatik GmbH, 1998.
- 2 Ceraolo M, Capozzella P, Baronti F. CAN-LabVIEW based development platform for fine-tuning hybrid vehicle management systems[C]. Vehicle Power and Propulsion, 2005 IEEE Conference, 2005: 433~438.
- 3 Cho Hyoung Yeon, Gao Wenzhong, Herbert L G. A new power control strategy for hybrid fuel cell vehicles[C]. Proceedings of IEEE Conference, Alamitons, CA, USA, 2004: 159~166.
- 4 Wang Qingguo, Cheng Erwei. Optimization of calibration procedure for reverberation chamber based on NI LabVIEW platform[C]. Electromagnetic Compatibility 2007, EMC 2007 International Symposium, 2007: 154~157.
- 5 SAE Standard. J1939: Recommended practice for a serial control and communication vehicle network[S]. J1939, 2008-04.
- 6 钱立军,赵韩,鲁付俊. 基于 CAN 总线的混合动力汽车控制系统[J]. 农业机械学报,2004,35(6):9~11.
Qian Lijun, Zhao Han, Lu Fujun. Development of a CAN bus based control system for hybrid electric vehicle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(6): 9~11. (in Chinese)