

乘用车液力变矩器研究现状与趋势

吴光强^{1,2}, 陈 祥^{1,3}, 王立军^{1,3}

(1. 同济大学 汽车学院, 上海 201804; 2. 东京大学 生产技术研究所, 东京 153-8505 日本;

3. 上海萨克斯动力总成部件系统有限公司, 上海 201708)

摘要: 首先, 概述了液力变矩器研发与应用中出现的新趋势. 阐述了液力变矩器内流场测量与仿真计算、性能优化与关键结构参数分析以及液力性能预测计算等研究领域的研究概况. 展示了液力变矩器相关研究领域的最新研究成果, 主要包括: 基于非均匀有理 B 样条的液力变矩器叶栅系统参数化建模方法, 运用计算流体力学数值计算结果改进一元束流性能预测模型, 基于格子 Boltzmann 方法的叶轮内流场仿真技术. 最后, 结合上述研究成果, 讨论并展望了液力变矩器叶栅系统设计与分析自动化集成技术的实现方向.

关键词: 液力变矩器; 叶栅系统设计; 流场仿真; 一元束流理论; 非均匀有理 B 样条

中图分类号: U463.22

文献标志码: A

Research Status and Development of Torque Converters in Passenger Vehicles

WU Guangqiang^{1,2}, CHEN Xiang^{1,3}, WANG Lijun^{1,3}

(1. Automotive School, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Institute of Industrial Science, the University of Tokyo, Tokyo 153-8505, Japan; 3. Shanghai Sachs Powertrain Components Systems Co., Ltd., Shanghai 201708, China)

Abstract: Firstly, new trends in research and applications of torque converters are overviewed in this paper. Then, technology for measurement and numerical simulation of internal flow field, optimization and prediction of hydraulic performance as well as analysis of key design parameters are discussed. Furthermore, the current research achievements are brought forth, such as parametric modeling of blade cascade based on the non-uniform rational B-spline, modification of hydraulic prediction model based on one-dimension flow theory according to the results obtained from computational fluid dynamic analysis, and internal flow simulation based on the lattice-Boltzmann method. Finally, based on the current research achievements, the way to

realize automated integration of design and analysis of blade cascade is presented.

Key words: torque converter; design of cascade system; flow field simulation; one-dimension flow theory; non-uniform rational B-spline

液力变矩器是液力机械式自动变速器 (automatic transmission, AT) 以及部分无级变速器 (continuously variable transmission, CVT) 中用于发动机与变速器之间传递动力的装置. 装备有液力变矩器的车辆具有如下诸多优势: ① 对外载荷变化具有良好的自适应性; ② 提高低速行驶通过性与稳定性; ③ 吸收传动系统扭振, 提高乘坐舒适性以及车辆使用寿命等.

虽然液力变矩器在汽车上的应用已有近百年的历史, 由于液力变矩器的性能优劣直接影响到液力传动车辆的动力性、经济性与舒适性, 人们一直没有放弃过对其结构与性能的改进. 如今其应用范围不仅局限于传统车辆, 在新能源汽车传动系统中也有其一席之地.

对于液力变矩器的研发涉及到诸多领域, 经历了几个突破性的阶段. 首先, 随着微型 5 孔探针、激光多普勒测速以及粒子成像测速等技术的成熟, 对液力变矩器内流场测量已成为可能, 从而加强了人们对其内部复杂流动状态以及关键设计参数的理解. 其次, 随着商用计算流体力学 (computational fluid dynamics, CFD) 软件的普及, 液力变矩器内流场数值仿真计算已成为产品开发重要环节. 此外, 计算几何学的研究成果也在液力变矩器叶栅系统的参数化设计方法中得到应用. 如今, 如何实现叶栅系统设计与分析自动化集成, 已成为液力变矩器研究领

收稿日期: 2014-07-29

基金项目: 国家自然科学基金 (51175379)

第一作者: 吴光强 (1965—), 男, 工学博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为车辆现代化设计理论及方法以及车辆动力学及其控制.

E-mail: wuguangqiang@tongji.edu.cn

域新的探索方向。

1 乘用车液力变矩器产品发展新趋势

1.1 混合动力传动系统

液力变矩器不仅在传统车辆中得到了广泛应用,而且在混合动力车辆(hybrid electric vehicle, HEV)中同样具有不可替代的地位. 对于某些注重车辆动力性能的高级别车辆,比如大众新途锐混合动力版配备了液力变矩器以满足拖车牵引以及越野等功能要求. 此外,如一汽丰田普锐斯 1.5 AT、别克君越 2.4T、宝马 7 系 4.4T 等混合动力车型也都配备了液力变矩器。

1.2 内置离心摆减振器

为了进一步改善液力传动车辆油耗高以及动力输出滞后等不足,液力变矩器的锁止工况需要尽可能向发动机低转速扩大,然而这将削弱液力传动对发动机扭转振动的衰减作用. 为了解决由于提前锁止引发的振动、噪声问题,舍弗勒创新性地地将双质量飞轮与离心摆减振器集成于液力变矩器涡轮侧,并且在涡轮与锁止离合器间布置大弧形弹簧,将涡轮作为双质量飞轮的第二级转动惯量,如图 1 所示。

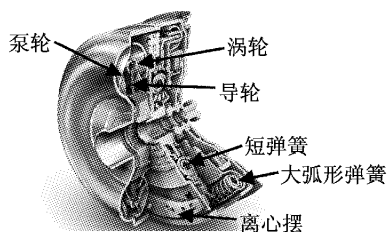


图 1 带离心摆减振器的液力变矩器

Fig.1 Torque converter with centrifugal pendulum vibration absorber

1.3 扁平化趋势

随着 AT 档位数的不断增加,以及各类型内置减振器的引入,传动系统轴向尺寸将变得更为紧张,进一步减小液力变矩器循环圆的轴向尺寸已成为解决该问题的趋势. 以采埃孚最新的 W238 系列为例(图 2),该产品循环圆的轴向尺寸已由前代的 70 mm 减小为现在的 50 mm,与此同时产品重量由 17 kg 减小为 14 kg。

1.4 多功能液力变矩器

多功能液力变矩器(multi-function torque converter, MFTC)是舍弗勒公司的专利产品,用以适应增压发动机的特殊需求,如图 3 所示. 该液力变矩器能够在怠速时将液力传动与发动机分离,以避

免在失速工况时产生液力损失. 此外,该产品还集成了启停控制模块用以改善增压发动机扭矩输出滞后的弊端。

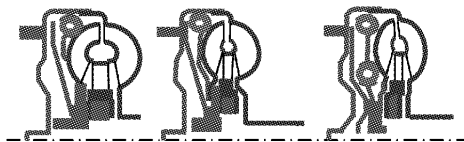


图 2 循环圆尺寸变化趋势

Fig.2 Variation trend of torus size

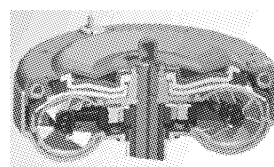


图 3 MFTC 示意图

Fig.3 Illustration of MFTC

2 相关领域研究现状

2.1 液力变矩器内流场研究

(1) 试验研究

试验研究是研究流体运动一种十分重要的手段. 然而,由于液力变矩器属于内部流动,其本身结构十分紧凑,且叶轮流道封闭在壳体内部,叶片又为空间曲面,因此必须设计专门的试验设备对其内部流动进行测量. 其中主要测量手段包括:微型 5 孔探针(miniature five-hole probe),激光多普勒测速(laser Doppler velocimetry, LDV),粒子成像测速(particle image velocimetry, PIV). 由于设计、制造特殊的试验设备难度大、投入高,因此公开发表的液力变矩器内流场试验测量结果比较有限. 然而,其对帮助理解液力变矩器内部流动特性、液力损失机理以及修正计算流体力学仿真结果等方面都有着十分重要的作用。

美国宾夕法尼亚州立大学的 Lakshminarayana 教授^[1-2]所带领的研究团队在该领域做过大量的工作,其主要测量手段为高频响应 5 孔探针. 另一位长期从事液力变矩器内流场试验研究的是美国福杰尼亚大学的 Flack 教授,其主要测量手段为激光测速仪^[3-4]. Numazawa 等^[5]运用树脂技术建立了液力变矩器试验模型,最早实现了液力变矩器内部流场的可视化. Hisashi Watanabe 等^[6]通过在导轮支撑轴上开设观测窗口实现导轮内部流场的可视化测量. 在文献^[7]中,Toshio Kobayashi 等利用 PIV 技术实

现了导轮流场的可视化测量.此外,国内马文星^[8]与闫清东^[9]等也曾深入开展过液力变矩器内流场的试验研究.

(2) 数值模拟

Lakshminarayana 等^[10]在美国国家航空航天管理局(NASA)提供的求解三维不可压缩 Navier-Stock(N-S)方程组的开源代码 INS3D 的基础上补充了低雷诺数 $q\omega$ 两方程湍流模型,并将其应用于液力变矩器单个泵轮内流场的数值求解,研究结果表明改变泵轮入口面速度分布对泵轮内部流动损失将产生巨大影响.因此,在仿真计算时,泵轮入口处的边界条件应严格参照试验数据才能得到有意义的结果. Schulz 等^[11]开发了基于有限体积法的液力变矩器内流场专用计算程序,该研究采用了 $k-\epsilon$ 湍流模型以及非正交贴体网格,各叶轮流体计算区域之间采用混合面技术交互传递流场参数,首次实现了液力变矩器循环流道内三维不可压缩粘性运动方程的求解.

(3) 流场分析

文献[12]深入分析了透平机械中液力损失的来源与机理.该报告将液力损失机理分为:边界层流动的粘性效应、流动混掺过程中的粘性效应、液流冲击以及不同温度区域的热传导,将液力损失来源分为叶片边界层及叶片尾缘损失、顶尖泄漏损失、端壁损失以及传热损失.

液力变矩器是一种结构布置相对简单,然而内部液流流动却十分复杂的透平机械.由于导轮与泵轮、涡轮之间构成定子-转子相对运动,使内部流动具有强非定常特征;泵轮与涡轮流道中存在明显的二次流动;由于轴向流动与径向流动的交替转变,内环面附近存在壁面层流动分离,并在叶轮出口处形成大面积回流;根据试验与 CFD 仿真结果,泵轮出口处液流流动具有明显射流-尾流特征;低速比时,导轮吸力面出现明显的壁面层流动分离.以液力变矩器泵轮流道内二次流动的研究成果为例,图4所示为中速比时,泵轮流道内二次流动的发展过程.

根据流体力学中动量方程可以推导得到主流方向涡分量沿弦线发展存在如下关系:

$$\frac{\partial \xi_s}{\partial S} = 2 \frac{\xi_n}{r_b} - 2 \frac{\omega \xi_b \sin \kappa}{V_s} - 2 \frac{\omega \sin \kappa}{r_b} \quad (1)$$

式中: ξ_s 、 ξ_n 、 ξ_b 分别为流道弦、展向和节向涡分量; s 代表流道弦向; r_b 为流道在轴面内的曲率半径; ω 为叶轮转速; κ 为流道弦向与旋转轴线的夹角; V_s 为液流流速沿弦向分量.

式(1)说明,对于旋转透平机械,主流方向(弦

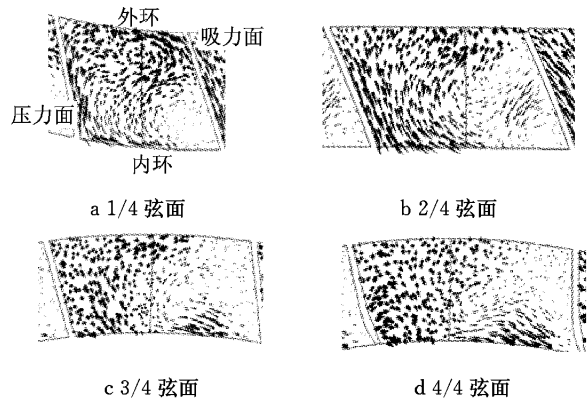


图4 泵轮流道各弦面二次流动

Fig.4 Secondary flow at chord plane of impeller flow passage

向)涡量来源于三方面.式(1)右边第1项说明,当具有展向方向涡量的液流流经弯曲流道时,由于惯性,涡矢将改变方向,从而在弦向出现涡分量;式(1)右边第2项说明,在旋转透平机械中,当具有节向方向涡量的液流沿径向流动时,在科氏力的作用下,涡矢将改变方向,从而在弦向出现涡分量;式(1)右边第3项为透平机械旋转运动与液流在轴面弯曲流道中流动的联合作用.对于液力变矩器泵轮内流场,在泵轮入口处,流动状态在压力面与吸力面之间以及内环与外环之间分布不均匀.泵轮入口处分别具有节向涡分量以及展向涡分量,从而为主流方向涡分量的产生提供了初始条件.

图5为运用式(1)预测得到的流道弦向涡分量沿程变化情况与 CFD 计算结果的对比.预测值与 CFD 结果都显示,在前半流道,弦向涡分量先逐渐增强,在后半流道,弦向涡分量又逐渐减弱,在临近出口时弦向涡分量已经改变方向,该现象与图4中所示临近出口面时弦面内局部二次流动方向发生改变一致.

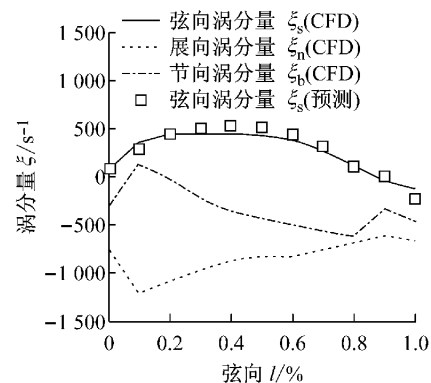


图5 涡分量沿流道弦向的变化

Fig.5 Variation of chordwise vortex

上述对液力变矩器的试验与数值的研究在一定程度上加深了人们对于液力变矩器内部流场的认识,然而正如文献[12]着重强调的,现有对于透平机械流场分析的研究依旧局限于根据试验结果对理论预测进行经验性修正,还未能对损失的产生机理达到清晰与完整的认识。

2.2 液力变矩器性能优化与关键结构参数分析

在以整车传动系统匹配为目的的改型设计中,相比于修改发动机与变速箱设计,修改液力变矩器设计是最为经济、有效的手段。大量研究以此为出发点,详细研究了液力变矩器不同设计参数对液力性能的影响^[13-16]。

随着液力机械式自动变速器的档位不断增多,其轴向尺寸也随之增加,为了保持传动系统的紧凑,液力变矩器的轴向尺寸却在不断地被压缩。研究发现减小液力变矩器轴向尺寸将对导轮流场造成不利影响^[17]。如何弥补甚至进一步提高液力变矩器液力传动性能是近十年来液力变矩器的研究重点。文献[18]中,Dong 等研究发现通过控制液流在内环处的

泄漏以及空化现象的产生能够提高变矩比与传动效率。文献[19]提出利用开孔导轮叶片来抑制边界层流动的分流,并且研究了不同开孔位置以及开孔角度的效果,研究显示使用开孔导轮可以大幅提高泵轮转矩。在文献[20]中,本田汽车展示了其最新研发的超扁平循环圆液力变矩器,为了避免由于循环圆扁平化造成的导轮入口处内环面附近的流场分离,在导轮叶片压力面与内环面交接处延展出凸包状设计来引导液流流向。文献[19-20]的研究充分显示了通过结构上的改造对液流流动进行优化可以大幅提高液力变矩器的液力性能。由于循环圆扁平化将对导轮内部液流流动产生不利影响,因此对于导轮设计的不断改进与优化将成为现今液力变矩器研究的重点。

图 6 为采用双元件叶片作为液力变矩器导轮叶型从而提高液力变矩器在低速工况下性能的研究成果。由图 7 可以看出,装有双叶片导轮叶栅系统的液力变矩器,其出口面上流动情况分布更为一致。双叶片导轮液力变矩器在泵轮转矩不变的前提下可以获得更高的变矩比和传动效率。

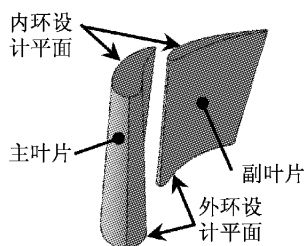
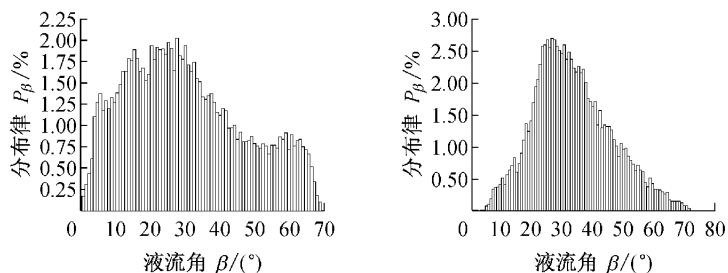


图 6 双叶片导轮

Fig.6 Dual-blade stator



a 单叶片导轮

b 双叶片导轮

图 7 导轮出口面液流角分布

Fig.7 Flow angle distribution at stator exit plane

2.3 液力变矩器液力性能计算

液力变矩器设计中两个重要环节为液力特性计算与叶栅系统设计,其中液力特性计算对后续试验、试制具有重要的指导意义。尽管一元束流理论对于液力变矩器内部复杂的三维流动作了诸多简化与假设,但是由于其参数调节简单、计算量小、便于应用于优化设计等优点,一直以来,基于束流理论的性能预测方法在液力变矩器设计中占有重要地位。为了克服性能预测结果与实际性能偏差较大的缺陷,不同研究者提出了许多修正方法^[21-23]。文献[24]最早提出运用试验或者 CFD 计算得到的内流场信息来修正束流理论中损失系数的设想,然而其研究未基于严格的理论推导。使用 CFD 计算得到的流场信息对束流理论进行修正能够达到较高的预测精度,其

对 CFD 计算的使用量将大幅减少。将改进后的束流模型与优化算法相结合,可以进一步提高液力变矩器的设计质量与效率。

2.4 液力变矩器内流场仿真计算新方法

传统计算流体力学通过数值方法求解基于欧拉描述法的流体宏观控制方程,其基本特点为运用空间离散与时间离散方法将原本非线性的偏微分控制方程转变为线性代数方程组,然后迭代求解线性方程组直至得到收敛解。随着电子计算机计算能力的大幅提升,传统计算流体力学已经得到了广泛运用,并成为工程设计与科学研究不可或缺的手段。然而在某些领域,传统计算流体力学却遇到了难以逾越的障碍,比如微纳米尺度流动、多孔介质流动、多相流等。

建立流体运动的数学模型时不仅可以从宏观的角度将其视为连续介质,还可以分别从微观与介观层面进行建模。在微观层面,流体不再是连续分布的介质,而是由大量分子热运动组成,分子运动规律由各分子间相互作用力以及外界作用力决定。由于基于分子动力学的流体运动仿真对计算资源要求极大,因此该方法常用于研究基本流动现象,并成为辅助理论研究的重要工具。在介观层面,假设流体由一系列粒子系统组成。在宏观上,流体粒子足够小,在微观上,流体粒子在统计意义上反映了分子的热运动。对于上述流体粒子系统,只要建立合理的演化机制,便能得到符合实际物理规律的流体运动特征。格子 Boltzmann 方法(lattice boltzmann method, LBM)与光滑粒子流体动力学(smoothed particle hydrodynamics, SPH)是最近 20 多年来逐步发展起来的基于介观层面的流体动力学数值计算方法。

光滑粒子流体动力学最早由 Lucy^[25]、Gingold^[26]在 1977 年先后提出,其基本思想是通过跟踪计算大量流体质点的运动来获得流场中变量的分布。SPH 是一种基于 Lagrange 表述的无网格方法,因此特别适合于处理不同介质之间的交接面以及高速碰撞等动态大变形问题^[27]。格子 Boltzmann 方法最早由 Menamara^[28]在 1988 年提出。与 SPH 方法不同的是,LBM 通过 Euler 方法表述流场信息。其基本思想是对流体粒子在离散网格间沿特定路径进行推演。格子 Boltzmann 是由格子气自动机(Lattice Gas Cellular Automata, LGCA)发展而来,由于 LGCA 在粒子迁移计算时采用布尔运算,即通过 1 或 0 来表示有无粒子运动,因而存在局部数值噪声。Menamara 和 Aznetti^[28]提出采用实数运算替代布尔运算,计算网格节点上的粒子数不再用 1 或 0 来表征,转而使用具有统计意义的粒子分布函数来代替,从而消除了数值噪声。LBM 中描述粒子状态基本参数的物理量为粒子分布函数 f ,其物理意义为在 t 时刻,位于空间矢量 $\mathbf{R}(x, y, z)$ 处,粒子运动状态为 $\boldsymbol{\zeta}(\xi_x, \xi_y, \xi_z)$ 的概率密度。其基本控制方程为

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\partial f}{\partial \mathbf{R}} \cdot \boldsymbol{\zeta} + \frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{\zeta}} \cdot \mathbf{a} = -\frac{1}{\tau_0}(f - f^{\text{eq}}) \quad (2)$$

式中: f^{eq} 为 Maxwell 平衡态分布,该规律规定了粒子在静止平衡态时的最可几率速度分布; τ_0 为粒子两次碰撞间的平均时间间隔,称为弛豫时间; \mathbf{a} 为粒子运动的加速度矢量。

格子 Boltzmann 方法与传统数值计算方法相比具有如下主要优势:

(1) 在宏观层面建立的流体控制方程中,对流

项为非线性项,而在介观层面中,粒子分布函数相对于空间的对流项为线性项;

(2) 传统 CFD 方法需要迭代求解非线性偏微分方程组,而 LBM 的粒子推演过程只涉及相邻节点,因此可以方便地采用区域分割法进行并行计算;

(3) LBM 是高效的数值计算方法,简单形式的 LBM 的数值精度可以与 Navier-Stoke 方程组的高阶框架相当。

(4) 对于液力变矩器研究来说,格子 Boltzmann 方法不依赖于贴体网格,可以更为灵活地处理多个叶轮间转速不同的透平机械流场仿真问题,有助于深入研究上游叶片形成的流动尾迹对下游叶轮内部流动的影响。

3 液力变矩器叶栅系统设计、分析集成

通过液力变矩器叶栅系统设计与分析技术的集成可以有效提高液力变矩器的研发效率。

构建液力变矩器叶栅系统设计、分析集成平台首先需要建立叶片参数化建模方法。由于非均匀有理 B 样条(non-uniform rational B-spline, NURBS)能够灵活地表示自由型曲线曲面、精确地表示二次曲线曲面、易于调整叶片局部形态等优点,使用 NURBS 做为液力变矩器叶栅系统的数学表达形式,可以提高叶片设计质量。

此外,构建叶栅系统设计、分析集成平台还需要建立高效的液力性能预测方法。采用 CFD 计算固然能够达到较高的预测精度,但是在设计阶段,每次对设计变量进行微小的改动都运用 CFD 进行性能计算很难有实际应用价值,因此结合 CFD 计算与束流理论性能预测模型可以有效地提高叶栅系统的设计效率。

对于传统 CFD 计算方法,为了实现叶栅系统设计分析过程中的自动化,必须首先实现流道计算模型网格的自动划分。然而,对于像液力变矩器这类旋转透平机械,由于叶片存在空间扭曲,且沿圆周方向周期性分布,网格划分质量很难得到有效控制,常常需要根据经验手动调整参数才能获得比较满意的网格质量,因此很难实现自动网格划分。由于 LBM 不运用贴体网格,因此不存在上述困难,从而为进一步实现设计与分析集成与自动化带来便利。

3.1 液力变矩器叶栅系统设计

(1) 正向设计方法

构建液力变矩器叶栅系统设计、分析集成平台的基础在于叶片参数化建模方法. 图 8 为基于 NURBS 的液力变矩器叶片设计流程. 叶片中弧线由一条 2 次 NURBS 曲线构成. 该 NURBS 曲线共由 3 个控制顶点(P_0, P_1, P_2)确定, 其中首尾两控制顶点(P_0, P_2)分别与叶片前、后缘相重合. 在 NURBS 曲线首尾处分别采用三重节点, 即节点向量为 $[0, 0, 0, 1, 1, 1]$, 从而使所生成的 NURBS 曲线分别插值首尾两控制顶点. 非等厚流线型叶片轮廓线由一条封闭的 3 次 NURBS 曲线构成. 叶片轮廓 NURBS 曲线的控制顶点沿中弧线两侧排列. 该 NURBS 曲线首尾控制顶点(P_0, P_N)设置在叶片后缘处, 并且在节点向量的首尾都采用四重节点, 从而使其构成一条封闭且后缘插值指定点的叶片轮廓曲线. 另外, 为了使 NURBS 曲线插值叶片前缘, 在叶片前缘处也布置一个控制顶点 $P_{N/2}$, 并且在对应节点向量处设立四重节点.

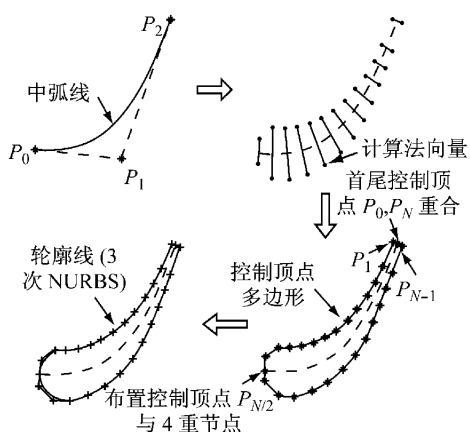


图 8 叶片轮廓线构造示意图

Fig. 8 Illustration of blade profile

运用上述叶片设计方法(正向设计方法), 基于 Matlab/GUI 工具箱编制了液力变矩器叶栅系统设计软件, 利用它可以通过人机界面交互的方式设计泵轮、涡轮与导轮叶片. 该软件通过 IGES 接口读入循环圆内、外环曲线. 在参数输入对话框中输入各叶片参数值, 并可以在图形窗口中实时显示当前参数下的叶片曲线, 便于快速修改设计. 最后, 通过 IGES 接口将所设计的叶片曲面数据输出, 如图 9 所示.

(2) 改型设计方法

在实际设计过程中, 会根据不同情况对已有叶片某些局部进行修改, 或者基于未知设计规律的逆向模型开发新产品. 此时, 仅有上述的正向设计方法无法完全适应液力变矩器叶栅系统的设计任务. 由于叶片设计方案多种多样, 无法根据固定的设计方

法复现原有叶片的设计, 因此传统的液力变矩器叶片改型方法通常只测得各叶轮叶片的进出口角, 然后采用现有设计方法重新设计叶片. 然而在某些情况下, 只需要对叶片局部进行修改, 而不希望改变叶片整体的设计思路. 为解决改型设计时遇到的上述困难, 文献[29]研究了以叶片角变化规律为基础对原型叶片进行修改的方法, 其流程如图 10 所示.

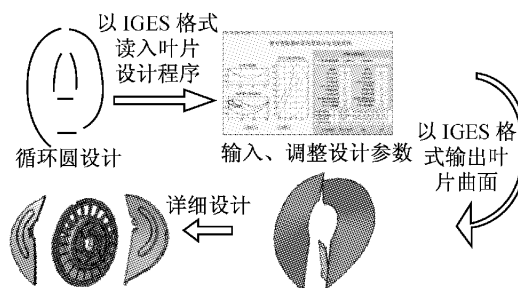


图 9 叶栅系统正向设计流程图

Fig. 9 Forward design scheme for blade cascade

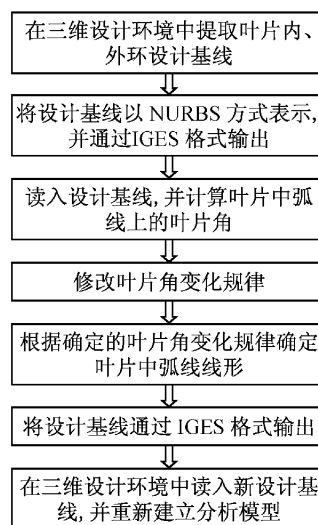


图 10 叶栅系统改型设计流程图

Fig. 10 Design flowchart for modification of blade cascade

首先反求 NURBS 曲线控制顶点的方法, 求得叶片角设计线的 NURBS 表示, 这样便能够通过调整 NURBS 曲线的各控制顶点以及修改各控制顶点权重值来实现对叶片角变化规律的调整. 如图 11 所示, 将叶片角设计线划分为 5 个区域. 其中, 中间区域在叶片角修改过程中将保持固定, 以下简称为固定区域. 大多数液力变矩器叶片进出口角曲率变化较小, 有时甚至出现一段定叶片角区域. 因此, 进出口处各定义一个区域, 分别称为进、出口区域, 可以对该区域叶片角进行整体平移, 也可以视叶片角具体变化规律取消该区域. 此外, 固定区域与进、出口

区域由两段过渡区域相连。

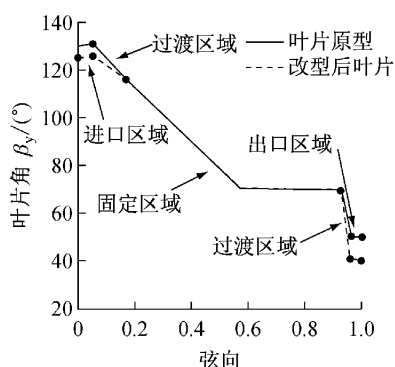


图 11 叶片角设计线的区域划分

Fig. 11 Section dividing of blade angle

调整进出口角的具体步骤如下所述:①视叶片角具体变化规律对其设计线进行区域划分;②根据 NURBS 曲线插值首尾控制顶点的特性,平移进、出口区域控制顶点,并使 NURBS 曲线插值改型目标进、出口角;③过渡区域作为连接进出口区域与固定区域的部分,要求该区域内叶片角设计线变化平坦,保证其连续性,从而使生成的叶片形状合理,且具有较好的液力特性。

运用上述改型设计方法对泵轮叶片的出口角进行修改,其中过渡段为原叶片弯折处。所得到的叶片仍然保留原设计的特征,叶片整体为斜插直叶片,出口处发生弯折,以得到不同的出口角,如图 12 中改型 I 所示。此外,可以改变过度段位置,如改型 II 所示,改型后的泵轮叶片已不再是斜插直叶片形式。

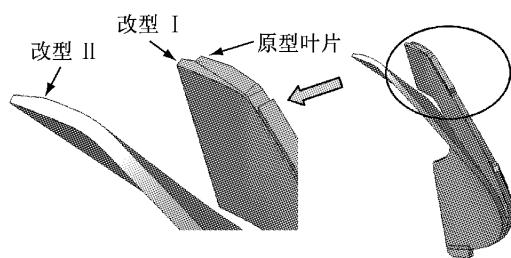


图 12 泵轮叶片改型前后叶片对比

Fig. 12 Comparison between modified and original impeller blade

3.2 改进一元束流性能预测模型

文献[30-31]研究了运用 CFD 技术计算得到的内流场信息对一维束流性能预测模型进行修正的方法。从保证冲击损失计算精度的角度出发,推导了一维束流理论性能预测模型中各参数基于 CFD 分析具有如下等效表达式:

$$\bar{Q} = \iint_A V_m dA \quad (3a)$$

$$\bar{r} = \sqrt{\frac{\iint_A r^2 (V_m dA)}{\bar{Q}}} \quad (3b)$$

$$\bar{V}_u = \frac{\iint_A V_u r (V_m dA)}{\bar{Q} \bar{r}} \quad (3c)$$

$$\bar{V}_m = \sqrt{\frac{\iint_A V_m^3 dA}{\bar{Q}}} \quad (3d)$$

$$\bar{A}_m = \frac{\bar{Q}}{\bar{V}_m} \quad (3e)$$

式中: \bar{Q} 为循环流量; r 为等效液流半径; V_m 为等效液流流速轴面分量; V_u 为等效液流流速周向分量; A_m 为等效流道轴面截面积; 上标“—”表示对应变量的液流等效参数。

建立了如下适用于一元束流理论的出口流动偏离修正方程用以提高导轮出口面液流周向分速度的预测精度。

$$V_{uS2} r_{S2} = V_{mS2} \cot \beta_{yS2} r_{S2} + C_S (V_{mS2} \cot \beta_{yS2} r_{S2} - V_{uT2} r_{T2}) + \Delta M_S \quad (4a)$$

$$V_{uI2} r_{I2} = (1 + C_I) V_{mI2} \cot \beta_{yI2} r_{I2} - C_I V_{uS2} r_{S2} + \Delta M_I \quad (4b)$$

$$V_{uT2} r_{T2} = (1 + C_T) V_{mT2} \cot \beta_{yT2} r_{T2} - C_T V_{uI2} r_{I2} + \Delta M_T \quad (4c)$$

式中: C 为修正系数; ΔM 为零攻角修正量; 下标 I, T, S 分别代表泵轮、涡轮和导轮; 下标 1, 2 分别代表进口面与出口面。

从 CFD 分析结果中提取各叶轮的损失功率, 运用最小二乘法确定各叶轮的冲击损失系数 ξ_{ci} 与粘性损失系数 ξ_{mc} , 进而得到各项液力损失的构成情况, 即

$$\min \sum_i (P_{loss-J} - \rho g \bar{Q} H_{ci-J} - \rho g \bar{Q} H_{mc-J})^2 \quad (5)$$

$$H_{ci-J} = \xi_{ci-J} \frac{\Delta V_u^2}{2g} \quad (6)$$

$$H_{mc-J} = \xi_{mc-J} \left(\frac{1 + \cot^2 \beta_{yJ1}}{A_{mJ1}^2} + \frac{1 + \cot^2 \beta_{yJ2}}{A_{mJ2}^2} \right) \frac{Q^2}{2g} \quad (7)$$

式中: H_{ci} 为各叶轮的冲击损失, H_{mc-J} 为粘性损失, J 可取 I, T, S; P_{loss} 为从 CFD 计算结果中提取出各叶轮的损失功率; i 为速比; ρ 为液流密度; g 为重力加速度; ΔV_u 为冲击速度周向分量。

如图 13 所示, 改进的性能预测模型具有较高的预测精度。并且, 如图 14 所示, 该方法可以获得液力变矩器内部各项液力损失分布, 为进一步改进设计提供依据。

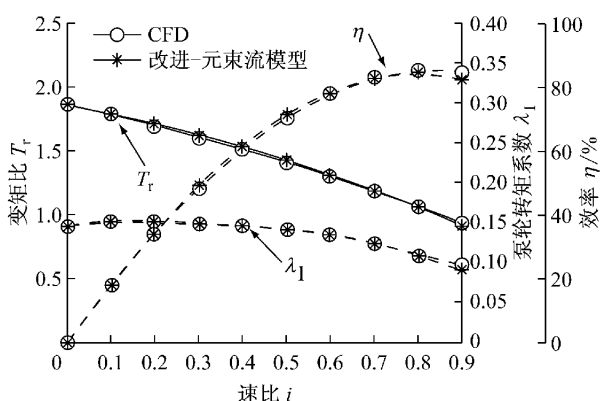


图 13 等效参数模型性能预测结果

Fig. 13 Performance predictive result of equivalent parameter model

3.3 基于 LBM 的叶轮内流场仿真

LBM 作为一种探索高精度方法的数值框架,其优点不仅局限于此.简单形式的 LBM 的数值精度可以与 N-S 方程组的高阶框架相提并论,比如二阶精度的 LBM 比基于二阶空间三阶 Runge-Kutta 方法的 N-S 方程组具有更小的弥散误差.此外,LBM 还具备固有的并行计算特征,使大规模分布式集群计算具有极高的效率.因此,LBM 在实际工程应用中同样具备独特的优势.

对于液力变矩器导轮内流场仿真计算,其计算步骤如图 15 所示.

图 16a 为使用 LBM 计算得到的导轮流场,图中显示了导轮吸力面处边界层分离在其后部造成明显的非定常尾迹区域.图 17 显示,使用 LBM 计算得到的尾迹区域内流动情况十分复杂,存在若干较小结构的涡旋互相影响.

4 结论与展望

本文液力变矩器最新研究成果展现了叶栅系统设计与分析自动化集成的雏形.要最终实现叶栅系统高效自动化设计,还需基于上述设计与分析手段建立智能化的专家系统.首先,需建立包含大量设计样本的数据库作为初始设计的来源.然后,运用所提出的液力变矩器叶栅系统设计方法建立液力变矩器三维模型.接着进行流场仿真计算,根据流场计算结果自动建立性能预测模型.基于所得到的改进性能预测模型搜索改型方向,并且在必要时再次自动进行流场仿真计算更新性能预测模型中的参数,直至达到最优设计.

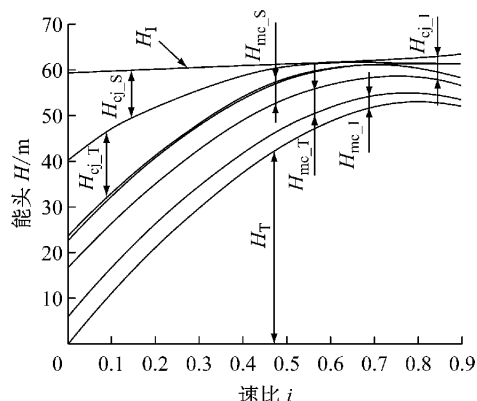


图 14 内流场能头构成情况

Fig. 14 Construction of energy head of internal flow

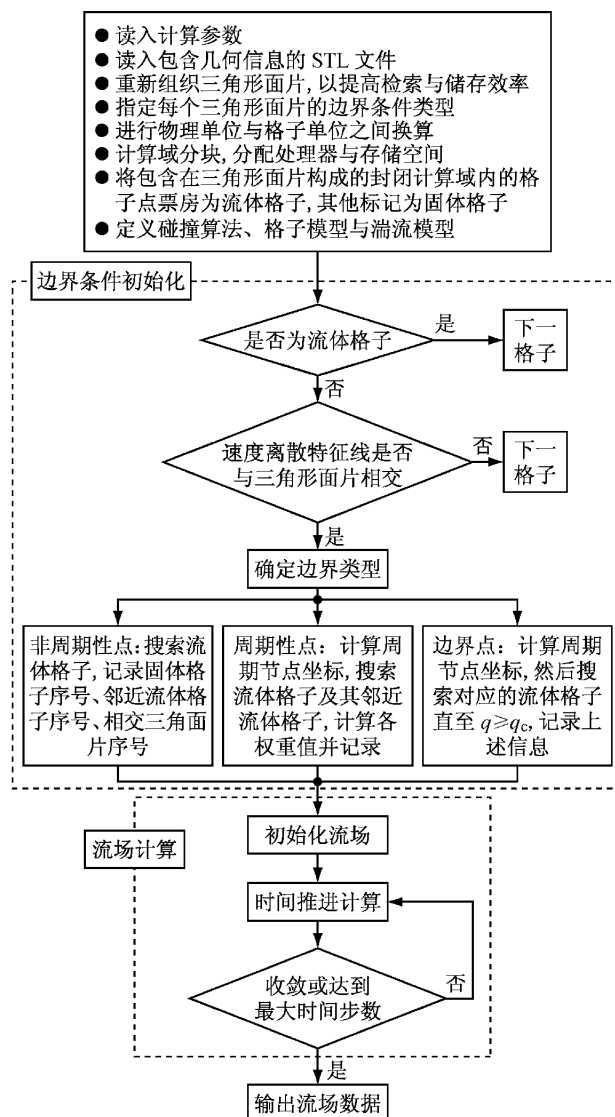


图 15 计算程序流程图

Fig. 15 Flowchart of simulation program

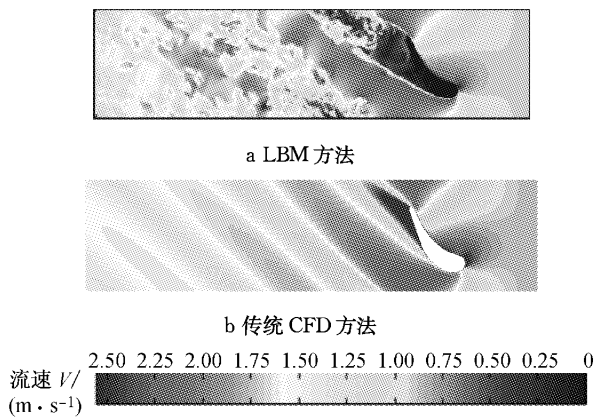


图 16 导轮中展面流场流速等高图

Fig.16 Contour of flow velocity on the mid-span plane

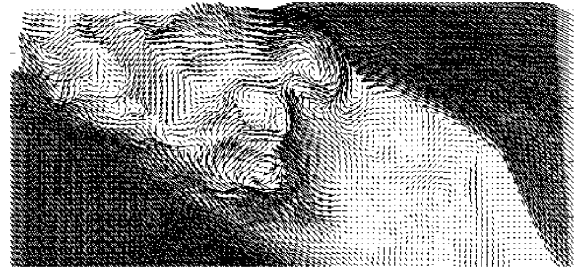


图 17 导轮流场速度矢量

Fig.17 Velocity vector in the mid-span plane of stator

参考文献:

- [1] Dong Y, Lakshminarayana B. Rotating probe measurements of the pump passage flow field in an automotive torque converter [J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2001, 123:81.
- [2] Liu Y F, Lakshminarayana B, Burningham J. Flow field in the turbine rotor passage in an automotive torque converter based on the high frequency response rotating five-hole probe measurement. part I: flow field at the design condition (speed ratio 0.6) [J]. *International Journal of Rotating Machinery*, 2001, 7(4):253.
- [3] Habsiege A, Flack R D. Flow characteristics at the pump-turbine interface of a torque converter at extreme speed ratios [J]. *International Journal of Rotating Machinery*, 2003, 9(6): 419.
- [4] Kraus S O, Flack R D, 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*, 2004, 127(2):308.
- [5] Akio Numazawa, Fumihiro Ushijima, Kagenori Fukumura, *et al.* An experimental analysis of fluid flow in a torque converter [C]//1983 SAE International Congress and Exposition. [S. l.]: SAE, 19830571.
- [6] Hisashi Watanabe, Tetsuo Kurahashi, Masahiro Kojima. Flow visualization and measurement of torque converter stator blades using a laser sheet lighting method and a laser doppler velocimeter [C] // 1997 Transmission and Driveline Systems Symposium; Transmission Systems, Components, Gears and Friction and Fluid Materials. [S. l.]: SAE, 19970680.
- [7] Toshio Kobayashi, Nobuyuki Taniguchi, Tetsuo Saga, *et al.* Piv measurement on the flow field around a stator cascade of automotive torque Converter [C] // 2001 Transmission and Driveline Systems Symposium. [S. l.]: SAE, 2001-01-0868.
- [8] 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.
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.
- [9] 祝自来, 李宏才, 闫清东, 等. 液力变矩器内流场 LDV 测试散射粒子的选取[J]. *实验技术与管理*, 2013, 30(12):54.
ZHU Zilai, LI Hongcai, YAN Qingdong, *et al.* Selection of scattering particles in flow field measurement of hydraulic torque converter using LDV[J]. *Experimental Technology and Management*, 2013, 30(12):54.
- [10] By R R, Kunz R, Lakshminarayana B. Navier-Stokes Analysis of the pump flow field of an automotive torque converter [J]. *Journal of Fluids Engineering*, 1995, 117(1):116.
- [11] Schulz H, Greim R. Calculation of three-dimensional viscous flow in hydrodynamic torque converters [J]. *Journal of Turbomachinery*, 1996, 118(6):578.
- [12] Denton J D. Loss mechanisms in turbomachines [J]. *Journal of Turbomachinery*, 1993, 115(4):621.
- [13] Masaaki Kubo, Ejiri E. A loss analysis design approach to improving torque converter performance [C] // 1998 Transmission and Driveline Systems Symposium; New Developments and Advanced Concepts in Systems and Components. [S. l.]: SAE, 19981100.
- [14] Joo I S, Kim D J, Kim K J, *et al.* The effect of reactor blade geometry on the performance of an automotive torque converter [C] // 2002 Transmission and Driveline Systems Symposium. [S. l.]: SAE, 2002-01-0885.
- [15] SUN Hao, LI Jun, FENG Zhenping. Investigations on aerodynamic performance of turbine cascade at difference flow conditions [J]. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 2012, 6(2):214.
- [16] Sehyun Shin, Hyukjae Chang, In-Sik Joo. Effect of scroll angle on performance of automotive torque converter [C] // 2000 Transmission and Driveline Symposium. [S. l.]: SAE, 2000-01-1158.
- [17] Ejiri E, Kubo M. Influence of the flatness ratio of an automotive torque converter on hydrodynamic performance [J]. *Journal of Fluids Engineering*, 1999, 121(3):614.
- [18] Dong Y, Korivi V, Attibele P, *et al.* Torque converter CFD engineering part II: performance improvement through coreleakage flow and cavitation control [C] // 2002 Transmission and Driveline Systems Symposium. [S. l.]: SAE, 2002-01-0883.
- [19] Sehyun Shin, Byung-Cheol Lee, Jong-Hae Hong, *et al.* Performance improvement using a slotted stator of an

- automotive torque converter [C] // 2003 Transmission & Driveline Systems Symposium. [S. l.]: SAE, 2003-01-0247.
- [20] Hiroya Abe, Masaaki Tsuruoka, Akio Muto, *et al.* Development of super ultra flat torque converter with multi plate lock-up clutch [C] // 2009 Transmission and Driveline. [S. l.]: SAE, 2009-01-0141.
- [21] 田华, 葛安林, 马文星, 等. 修正能头损失的变矩器性能预测方法[J]. 农业机械学报, 2005, 36(3):19.
TIAN Hua, GE Anlin, MA Wenxing, *et al.* Performance estimation method of torque converter by energy loss modification [J]. Transactions of the CSAM, 2005, 36(3):19.
- [22] Whitfield A, Wallace F J, Patel A. Performance prediction of multi- element torque converters [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1983, 25(2):77.
- [23] Spence S W T, Artt D W. An experimental assessment of incidence losses in a radial inflow turbine rotor [J]. Journal of Power and Energy, 1998, 212(1):43.
- [24] Kim B S, Ha S B, Lim W S, *et al.* Performance estimation model of a torque converter part I: correlation between the internal flow field and energy loss coefficient [J]. International Journal of Automotive Technology, 2008, 9(2): 141.
- [25] Lucy L B. A Numerical approach to the testing of the fission hypothesis [J]. The Astronomical Journal, 1977, 82(12): 1013.
- [26] Gingold R A, Monaghan J J. Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 1977, 181(11): 375.
- [27] Colagrossi A, Landrini M. Numerical simulation of interfacial flows by smoothed particle hydrodynamics [J]. Journal of Computational Physics, 2003, 191(2):448.
- [28] Menamara G R, Aznetti G. Use of the Boltzmann equation to simulate lattice automata [J]. Physical Review Letters, 1988, 61(20): 2332.
- [29] 王立军, 吴光强, 王欢. 基于叶片角变化规律的液力变矩器改型设计方法[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2011, 39(11):1673.
WANG Lijun, WU Guangqiang, WANG huan. Design strategy for modification of torque converters based on variationlaw of blade angle [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2011, 39(11):1673.
- [30] WU Guangqiang, WANG Lijun. Performance optimization of torque converters based on modified 1D flow model [J]. Journal of Donghua University: English Edition, 2012, 29(5): 380.
- [31] 吴光强, 王立军. 基于 CFD 的液力变矩器等效参数性能预测模型[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2013, 41(1):121.
WU Guangqiang, WANG Lijun. CFD Analysis-based torque converter performance prediction model with equivalent parameters [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2013, 41(1):121.

~~~~~  
(上接第 1294 页)

- [7] Daito Y, Matsumoto M, Araki K. Torsional flutter mechanism of two-edge girders for long-span cable-stayed bridge [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2002, 90: 2127.
- [8] 高广中, 朱乐东, 吴昊. 弹簧悬挂节段模型机械频率和阻尼的非线性特性识别[C]//第十六届全国结构风工程学术会议暨第二届全国风工程研究生论坛. 成都:[s. n.], 2013: 315-316.  
GAO Guangzhong, ZHU Ledong, WU Hao. Identification of nonlinear structural damping and frequency for spring-suspended sectional model test [C]//The 16th National Conference on Structural Wind Engineering & The 2nd Forum on Wind Engineering for Graduate Students. Chengdu:[s. n.], 2013: 315-316.
- [9] 高广中, 朱乐东, 吴昊. 典型桥梁断面软颤振现象的影响因素及产生机理研究[C]//第九届全国风工程和工业空气动力学学术会议. 长春:[s. n.], 2014: 62-70.  
GAO Guangzhong, ZHU Ledong, WU Hao. Influential factors and generating mechanism of soft flutter phenomenon for typical bridge deck sections [C]//The 9th National Conference on Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. Changchun:[s. n.], 2014: 62-70.