

基于叶片角变化规律的液力变矩器改型设计法

王立军¹, 吴光强^{1,2}, 王欢¹

(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)

摘要: 研究了三维设计环境下液力变矩器叶栅系统改型设计方法, 提出以叶片角变化规律为基础对原型叶片进行改型设计。首先, 通过初始化图形交换规范(IGES)与三维软件交换叶栅系统的三维信息; 然后, 利用De Boor算法的开花计算叶片上各点处的叶片角, 将反映叶片角沿叶片内外环设计基线变化的曲线拟合为非均匀有理B样条(NURBS), 通过调整NURBS曲线的控制点以及各控制点权重值, 实现叶片角变化规律的调整; 确定了新的叶片角变化规律后, 叶片的空间形状即可确定, 从而可以生成新的叶栅系统模型; 最后, 对新生成的叶栅系统进行性能预测, 得到满意的结果后即可进入后续详细设计阶段。利用该方法构建了液力变矩器改型平台, 使用该平台分别以提高变矩性能和提高效率为目标对某款液力变矩器进行改型研究, 结果表明所提出的方法行之有效, 有助于提高改型设计的效率。

关键词: 改型设计; 叶片角变化规律; 非均匀有理B样条; 开花算法; 液力变矩器

中图分类号: U 463.22

文献标识码: A

Design Strategy for Modification of Torque Converters Based on Variation Law of Blade Angle

WANG Lijun¹, WU Guangqiang^{1,2}, WANG Huan¹

(1. College of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Institute of Industrial Science, the University of Tokyo, Tokyo 153-8505, Japan)

Abstract: A design strategy is presented for modification of torque converters based on variation law of blade angle along design path. First, the initial graphics exchange specification (IGES) format is utilized as an interface to exchange cascade system data with computer aid design (CAD) software. Then, blade angle is calculated by using the blossoming of De Boor algorithm. The design paths which indicate variation law of blade angle are fitted to strings of non-uniform rational B-

spline (NURBS). After that, it is possible to modify the design paths of blade angle by re-localizing control points or modifying weight values of them. Once the modified design paths of blade angle are obtained, blade shape is re-defined. Afterwards, the modified torque converter model is transmitted to computational fluid dynamics (CFD) package for hydraulic performance prediction. The modification iterations might be carried on for several times before a desired performance is achieved. Finally, the modified torque converter model can be transmitted to CAD software for further detailed design. A modification design which's to improve torque converting performance and economic performance respectively for one certain torque converter product is carried out based on the presented design strategy. The result shows that the proposed framework provides reasonable results and proves to be time efficiency.

Key words: modification design; variation law of blade angle; non-uniform rational B-spline; blossoming algorithm; torque converter

液力变矩器是一种由机械与液力元件构成的复杂的液固耦合系统。液力变矩器的核心——叶栅系统, 是由复杂的空间曲线曲面组成的功能性元件。因此设计叶栅系统时不仅要考虑几何曲面的光顺, 还要考虑性能方面的要求, 这大大增加了叶栅系统的设计难度。

液力变矩器设计方法可以概括为两类: (1) 正向设计: 以一维束流理论作为理论依据, 并结合现有液力变矩器的统计数据初步设计, 运用计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)对变矩器内流场进行数值计算得到液力性能的预测结果, 并根据各设计参数对性能的影响规律及具体流场分布情况对叶栅参数进行反复调整直至达到设计要

收稿日期: 2010-08-05

基金项目: 国家“863”高技术研究计划资助项目(2007AA04Z132)

第一作者: 王立军(1986—), 男, 博士生, 主要研究方向为汽车液力变矩器设计理论及改型、优化方法。E-mail: wljlu@163.com

通讯作者: 吴光强(1965—), 男, 教授, 工学博士, 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

求;(2)改型设计:液力传动车辆的牵引性能和燃油经济性,在很大程度上,取决于液力变矩器与发动机和机械变速器之间匹配是否良好.因此,以匹配为目的的液力变矩器改型设计在实际工程应用中占据了液力变矩器产品开发的主体.为了使同系列液力变矩器(循环圆设计参数相同)能够匹配不同性能的发动机,需要以某款性能与设计要求的液力变矩器作为设计原型进行改型设计.由于液力变矩器的轴向及径向尺寸均受到限制,因此一般不轻易改动循环圆的设计参数,而是通过修改叶形来满足在短时间内开发出具有不同液力特性产品的需求.

近十几年来,随着 CFD 技术在叶轮机械流场分析中运用的日趋成熟,以及在三维设计环境下叶轮机械设计方法研究的不断深入,设计与分析集成已成为该领域的发展趋势. Lin 等^[1]从液力变矩器全生命周期角度论述了在三维开发环境下液力变矩器的开发流程,并指出该方法有利于实现设计与液力性能预测的集成,有效缩短液力产品的开发设计周期. Yang 等^[2]通过提取、修改液力变矩器设计基线,并集成 CFD 分析实现液力变矩器的改型及优化设计. Koini 等^[3]提出叶轮机械参数化设计方法,该方法运用 2 次非均匀有理 B 样条(non-uniform rational B-spline, NURBS)曲线来表述叶片设计基线,使用该方法进行叶形设计可以有效减少叶栅系统设计变量的数目,有利于后续优化与改型设计,但使用该方法修改叶形时,叶片角的变化趋势得不到有效约束,所生成的叶片的液力性能并不理想.国内对液力变矩器改型设计所做的研究十分有限,吴光强等^[4]主要从液力变矩器流场分析的角度指导叶栅设计.然而,已有文献仅专注于改型前后液力性能的对比,对于改型设计方法本身并未做进一步的研究.

对于液力变矩器改型设计,需要通过逆向工程建立原型机的几何模型,然而仅通过三坐标扫描仪无法获得循环圆及叶栅系统的参数化模型,因此后续改型设计也就很难实施.如何识别原型叶片的设计特征、对叶形进行参数化,并对其进行修改来满足当前设计要求的改型设计的难点. Gräening 等^[5]指出如何充分提取设计特征有助于指导优化及改型设计,帮助设计者更好地理解设计变量与性能之间的关系.因此,着重研究液力变矩器改型设计方法,提出以叶片角变化规律为基础对原型叶片进行修改,该方法可以在改型设计过程中向设计者提供有关叶栅系统原型的设计特征,且便于设计者融入自己的设计经验.进而,利用该方法构建了改型设计平台,

实现设计和分析的综合,并对某款液力变矩器进行改型研究,且得到较满意的效果.

1 几何造型的数学基础

NURBS 具有灵活地表述自由型曲线曲面,同时又能精确地表述二次曲线曲面等优点,因此采用 NURBS 作为改型设计平台的数学基础,平台内能够采用统一的数学模型来实现对各种曲线曲面的表示,方便改型平台的开发,同时又可通过调整控制点及其权重因子实现几何形体的修改,为各种形状设计提供必要的灵活性,提高叶轮机械三维设计系统的交互设计能力,便于在基于理论进行设计的同时融入设计人员的经验^[6].此外,在构建改型平台过程中,采用标准图形接口实现叶片几何信息的传递.这里采用 IGES 格式来实现 NURBS 曲线信息的传递.

p 次 NURBS 曲线的有理分式形式如下:

$$C_N(u) = \frac{\sum_{i=0}^n \omega_i N_{i,p}(u) P_{i,N}}{\sum_{i=0}^n \omega_i N_{i,p}(u)}, \quad u_0 \leq u \leq u_{n+p+1} \quad (1)$$

式中: $C_N(u)$ 为 NURBS 曲线上与参数 u 相对应的 N 维空间坐标; ω_i ($0 \leq i \leq n$) 为控制点权重因子, NURBS 曲线权重值具有直观的几何意义,如图 1 所示,即改变某一控制点的权重值所得的一系列形值点的连线为一条穿过该控制点的直线; $P_{i,N}$ ($0 \leq i \leq n$) 对应于控制顶点 P_i ($0 \leq i \leq n$) 的 N 维空间坐标; $N_{i,p}(u)$ 是由节点矢量 $U = [u_0, u_1, \dots, u_{n+p+1}]$ 决定的 p 次 NURBS 样条基函数,特别地,当节点矢量为 $[\underbrace{a, \dots, a}_{p \times 1}, u_{p+1}, \dots, u_{m-p-1}, \underbrace{b, \dots, b}_{p \times 1}]$ 时, NURBS 将插值首尾两控制点,如图 1 所示.图中, B 为对应控制点的形值点.

p 次 NURBS 样条基函数还必须满足如下递推关系:

$$N_{i,0}(u) = \begin{cases} 1 & u_i \leq u < u_{i+1} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

$$N_{i,p}(u) = \frac{u - u_i}{u_{i+p} - u_i} N_{i,p-1}(u) + \frac{u_{i+p+1} - u}{u_{i+p+1} - u_{i+1}} N_{i+1,p-1}(u) \quad (3)$$

并规定 $0/0 = 0$.

其 k 阶导矢计算方法为
设

$$A(u) = \sum_{i=0}^n \omega_i N_{i,p}(u) P_i \quad (4)$$

$$w(u) = \sum_{i=0}^n \omega_i N_{i,p}(u) \quad (5)$$

从而

$$A(u) = C_N(u) w(u) \quad (6)$$

$$A^k(u) = (C_N(u) w(u))^k =$$

$$w(u) C_N^k(u) +$$

$$\sum_{i=1}^k \binom{k}{i} w^i(u) C_N^{(k-1)}(u) \quad (7)$$

$$C_N^k(u) =$$

$$\frac{A^k(u) - \sum_{i=1}^k \binom{k}{i} w^i(u) C_N^{(k-1)}(u)}{w(u)} \quad (8)$$

其中, $w^i(u)$, $1 \leq i \leq k$, $A^k(u)$, $1 \leq k \leq p$, 可以根据 B 样条曲线德波尔算法的开花求得^[7].

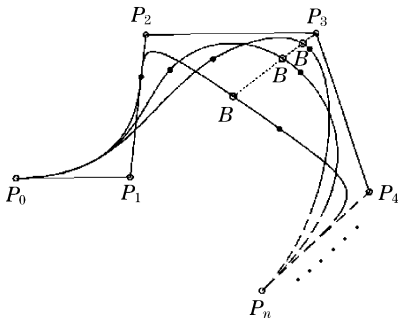


图 1 NURBS 样条权重因子的几何意义
Fig.1 Geometric interpretation of weight value for NURBS

开花算法主要思想是将单变量复杂函数 $C_N(u)$ 用多变量的简单函数 $C_N(U_1, U_2, \dots, U_n)$ 表示, 图 2 为一段三次 B 样条曲线的德波尔算法的开花. 开花算法可以用来分析曲线曲面性质、基变换算法的推导、升阶、节点插入、节点消除等^[8].

2 液力变矩器改型设计方法

2.1 叶片曲面的特征曲线

为便于制造时制模及生产, 目前液力变矩器叶片多由直纹面构成, 即通过任意两条设计基线可完全确定叶片曲面的空间形状(图 3). 因此修改叶片曲面的问题可以简化为修改曲面上两条设计基线的问题. 在初步设计阶段, 由于一维束流理论假设将流体质量集中于中间设计基线上, 故在初步设计阶段通常选择中间设计基线及外环设计基线确定叶片形

状. 然而, 在改型过程中, 由于只对叶片局部特征进行修改, 并不关心中间设计基线上叶片角的具体值, 另一方面, 通过内外环设计基线确定叶片曲面既直观, 又无需再次计算叶片曲面与内环的交线, 故选择内外环设计基线作为描述叶形的特征曲线.

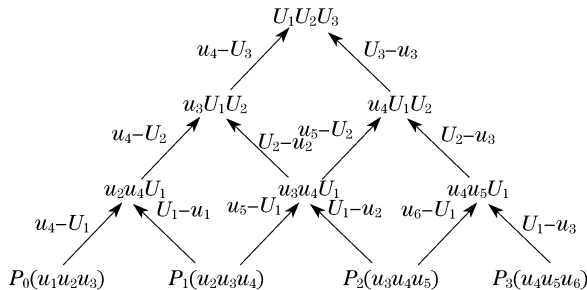


图 2 德波尔算法的开花
Fig.2 Blossoming of De Boor

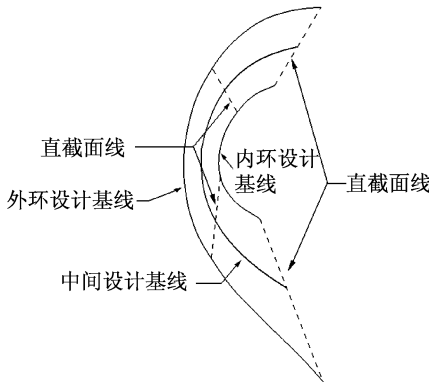


图 3 直纹面叶片
Fig.3 Ruled surface blade

2.2 沿设计基线的叶片角设计线

在设计叶轮机械叶形时, 广泛采用等角射影图的形式将叶片空间几何形状映射至平面视图, 如图 4 所示, 其优点在于能够较直观地展现叶形. 但是, 等角射影图无法反映叶片角的变化规律. 尤其对于改型设计, 由于无法获知原型叶片的设计特征, 因此几乎不可能对叶片的等角射影图进行参数化, 也就很难在原型基础上进行修改及优化.

图 4 中, β_i ($0 \leq i \leq m$) 为各点叶片角, Δl_i ($0 \leq i \leq m$) 为叶片子午面弦长增量, Δn_i ($0 \leq i \leq m$) 为叶片周向弦长增量.

为了解决改型设计时遇到的上述难题, 提出以叶片角变化规律为基础对原型叶片进行修改. 叶片角沿叶片内外环设计基线的变化(下文简称叶片角设计线)可以提供很多关于原型叶片设计特征的信息, 以某款液力变矩器泵轮原型叶片为例, 其叶片角设计线如图 5 所示. 图中, 横坐标 l 代表叶片进口至

该点弧长占总弧长的百分比,其中 0 代表叶片入口位置,1 代表叶片出口位置.通过观察该泵轮叶片的叶片角设计线可以发现其设计方法十分特别,不同于经典的环量分配法或等角射影法,而是由三段直线及两段二次曲线构成.

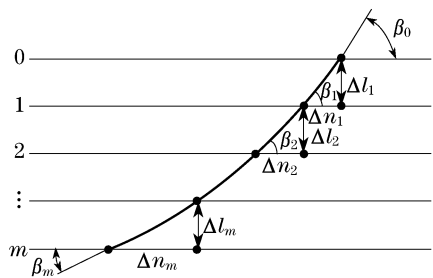


图 4 等角射影图

Fig.4 Conformal projection of design path

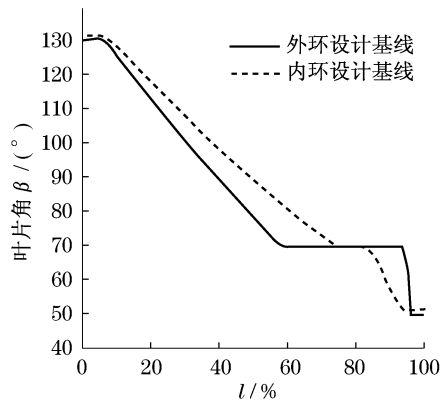


图 5 叶片角沿叶片内外环设计基线的变化

Fig.5 Variation of blade angle along design path

在实际性能较好的液力变矩器中,液流圆周分速度一般按反势流情况分布,但并不完全满足式(9)^[9]:

$$\left(\frac{V_u}{r}\right)_c = \left(\frac{V_u}{r}\right)_s \quad (9)$$

式中: V_u 为液流周向分速度; r 为液流至旋转轴心的距离; C 代表内环面; S 代表外环面.

因此在改型设计中分别独立地对内外环上叶片设计基线进行调整以满足设计要求.

2.3 计算叶片角设计线

利用计算 NURBS 切矢量的方法计算得到沿内外环设计基线各点的切矢量后,据叶片角的定义能计算得叶片角设计线.再通过反求控制点,求得叶片角设计线的 NURBS 表示法,这样便能通过调整 NURBS 曲线的各控制点及修改各控制点权重值来实现对叶片角变化规律的调整.但是,要直接构造一个 NURBS 曲线插值这些已知点,目前还没有一种有

效的数学方法.处理的方法如下,由于 B 样条曲线是 NURBS 曲线各控制点权重均为 1 的特例,故可先适当选取形值点,采用非有理 B 样条曲线反求顶点的方法求取 B 样条插值曲线的控制点,然后,再用 NURBS 方法表示该曲线.实践证明只要合理选取形值点及各控制点的权重因子,就可达到满意的拟合效果.

2.4 修改叶片角设计线

将对叶片角设计线的修改分为两类:

2.4.1 进出口角调整

调整进出口角,用以调整各速比下冲击损失的大小,从而达到调整液力变矩器失速变矩比、最高效率及最高效率区间等目的.

如图 6 所示,首先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,以下简称固定区域.大多数液力变矩器叶片进出口角曲率较小,即叶片角设计线变化较平坦,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将该区域压缩至位于进出口处的点.此外,固定区域与进、出口区域由两段过渡区域相连.

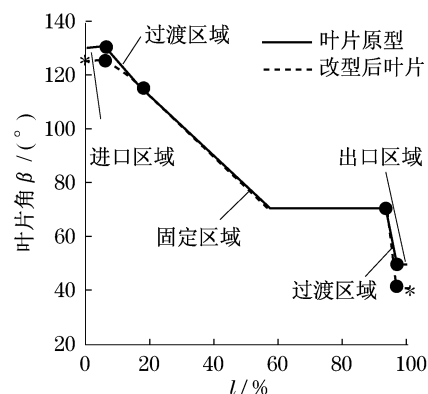


图 6 叶片角设计线的区域划分

Fig.6 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叶片角设计线进行区域划分;

(2) 运用 NURBS 节点插入算法分别在区域分割点处插入节点;

(3) 根据 NURBS 曲线插值首尾控制点的特性,平移进、出口区域控制点,并使 NURBS 曲线插值改型目标进、出口角;

(4) 过渡区域作为连接进出口区域与固定区域

的区域,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,具有较好的液力特性.提出利用三角函数实现过渡区域内曲线控制点的调整,过渡区域内新控制点坐标为

$$P'_{i,N} = P_{i,N} + (P'_{n,N} - P_{n,N}) \cdot \frac{1 + \sin\left[\frac{\pi}{2}(2s \cdot \frac{a_i}{a_n} - 1)\right]}{1 + \sin\left[\frac{\pi}{2}(2s - 1)\right]},$$

$$i = 0, \dots, n \quad (10)$$

式中: $[P_{0,N}, \dots, P_{n,N}]$ 为改型前过渡区域内控制点的 N 维空间坐标,其中, $P_{0,N}$ 为与固定区域相接的控制点的 N 维空间坐标, $P_{n,N}$ 为与进出口区域相接的控制点的 N 维空间坐标; $[P'_{0,N}, \dots, P'_{n,N}]$ 为改型后过渡区域内的控制点的 N 维空间坐标; a_i 为与固定区域相接点至某点弧长占过渡区域总弧长的比重; S 为形状控制变量, $0 < S \leq 1$, 用来根据具体情况调节改型后曲线过渡区域与进出口区域连接处叶片角设计线的变化规律.图 7 为形状控制变量 s 取不同值时对改型后叶片角设计线线形的影响.

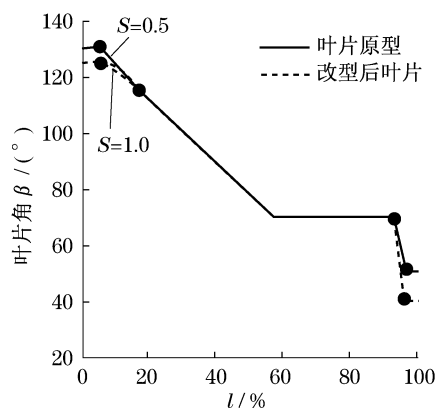


图 7 形状控制变量 s 对叶片角设计线线形的影响

Fig.7 Effect of shape control variable (s) on design path of blade angle

2.4.2 局部调整

对叶片曲线中段某局部进行修改,以调整流道截面积的变化,减小沿叶片局部负压梯度,降低脱流对液力性能的影响等,提高液力变矩器总体效率^[10].

在研究中发现通过调整叶片角设计线控制点对其中段进行调整常常造成叶片角设计线变化不合理,而采用改变控制点权重的方法更为有效.调整叶片角设计线中段的具体步骤如下:①在叶片角设计线上确定修改区域,为了便于后续节点消除,要求修改区域不益过长,否则可能无法将该区域内的节点

数降低到可接受范围,也就不可能通过修改少量控制点的权重值实现对该区域内叶片角设计线形状的修改;②对修改区域运用节点消除算法减少节点数;③修改控制点权重值直至达到满意效果.

在改变了叶片角变化规律后,叶片在翼面上的形状就被确定下来,但在改动较大的情况下,叶片在翼线方向上的倾角可能出现不合理的情况,可以通过整体旋转某一设计基线进来调整.

2.5 改型前后叶形对比

图 8,9 为泵轮叶片外环设计基线修改前后的对比.通过分析液力变矩器内流场数值预测结果发现在叶片中段的转折处存在明显的液力损失,为了消除原型叶片叶片角中间段的转折,对其局部进行修改使其过渡平滑.由于原型叶片角的整体变化趋势在改型变化后得到保留,因此基于液力性能良好的液力变矩器原型进行改型可以大幅减少改型设计周期,并保证其在改型后同样具有良好的液力性能表现.而叶片角改型区域的划分以及控制点权重因子的引入为设计者的设计提供了一定的自由度,便于融入其设计经验,使改型设计过程更为高效.

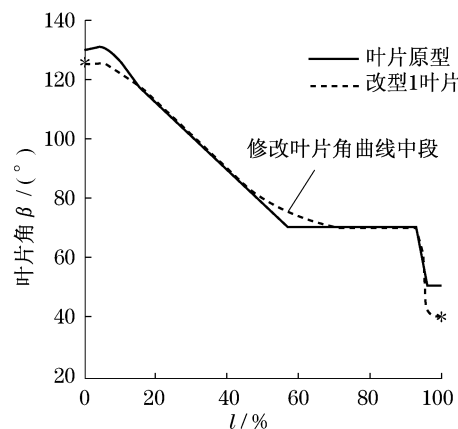


图 8 改型前后沿设计基线的叶片角设计线对比

Fig.8 Comparison of blade angle curve between prototype and modification

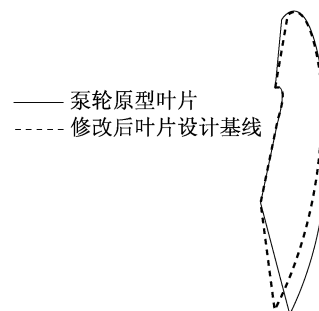


图 9 改型前后叶形对比

Fig.9 Comparison of blade shape between prototype and modifications

3 改型平台开发及验证

运用上述改形方法,并结合计算流体力学技术构建了液力变矩器改型设计平台,如图 10 所示,并对某款液力变矩器产品进行改型设计研究.

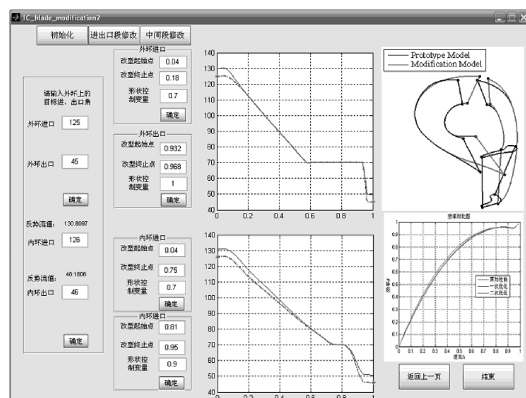


图 10 液力变矩器改型设计平台

Fig.10 Design platform for modification of torque converter

图 11 为运用 CFD 技术计算得到的液力变矩器液力性能与试验结果的对比.数值计算与试验结果基本保持一致,数值计算在低速比时得到的 K 因子略高. K 因子表示泵轮在一定转速下传递转矩的能力.造成数值计算在低速比时得到的 K 因子偏高的原因是,在低速比时液流冲击角急剧增加,液流流态复杂,导致计算得到的流量和力矩减小,从而使 K 因子增高^[11].在改型设计过程中使用的数值预测方法具有较高的精度,从而能够有效地减少改型设计时试制环节及改型设计成本.

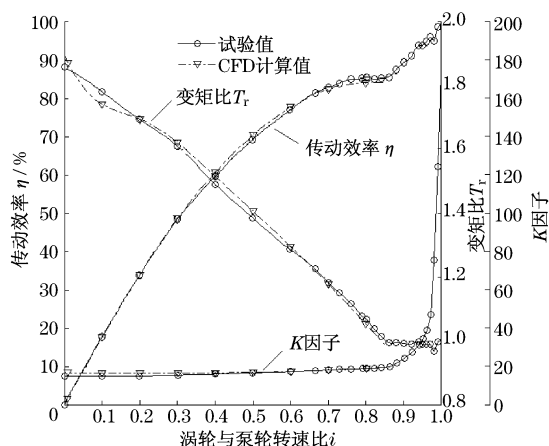


图 11 数值预测与试验性能参数对比

Fig.11 Comparison of performance parameters between test and numerical simulation

图 12 为改型前后液力性能对比,1 号改型机较原型机在变矩性能方面,尤其是失速变矩比有较大提高,可用于匹配对动力性能要求较高的车型,而 2 号改型机较原型机在最高效率及高效率区间方面有所提高.因此,通过所提出的方法,即使在对原型机叶栅系统设计思路缺乏了解的条件下也可以实现液力变矩器的改型设计,并有效地缩短设计周期.

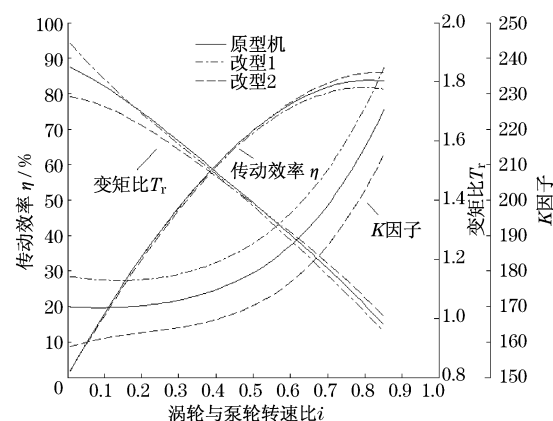


图 12 原型性能与改型性能对比

Fig.12 Comparison of hydraulic performance between prototype and modifications

4 结论

(1) 采用曲线曲面的 NURBS 表达方式作为液力变矩器改型设计的数学基础,便于实现改型平台与 CAD 及 CFD 软件在设计过程中的集成.

(2) 提出通过修改叶片角变化规律实现叶形修改,并将叶形修改分为对进出口区域的修改和对叶形中间区域的修改.通过调整叶片角设计线控制点实现权值实现对叶形中间区域的修改.采用上述方法实现液力变矩器改型的优点在于:① 对于在有限技术资源条件下的液力变矩器改型设计,可向设计人员提供原型叶片的设计特征,为后续叶形调整提供依据,避免盲目修改,提高改型设计效率;② 在改型过程中可清晰预见叶片角变化趋势,而叶片角变化趋势对液力变矩器的液力性能有直接的影响;③ 通过运用 NURBS 形式表述叶片角设计线,修改叶片角设计线由调整控制点及修改控制点权重值来实现,该方法为设计人员提供了一定自由度,以便在改型设计中融入个人的设计经验.

(3) 通过利用所提出的液力变矩器改型设计方法构建的改型平台对某款液力变矩器进行改型研

究.分别从注重变矩性能和注重经济性两个角度对原型机进行改型,最终结果较为满意,从而进一步验证了文中提出的改型设计方法行之有效.

参考文献:

- [1] Lin Y J, Colello M. Exploring the transitional impacts of a 2D to 3D design environment for the development of torque converters [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2004, 23: 389.
- [2] Yang Seunghan, Shin Sehyun, Bae Incheal, et al. A computer-integrated design strategy for torque converters using virtual modeling and computational flow analysis [C] // 2009 Transmission and Driveline System Symposium. [S. l.]: SAE, 1999 - 01 - 1046.
- [3] Koini G N, Sarakinos S S, Nikolos I K. A software tool for parametric design of turbomachinery blades [J]. Advances in Engineering Software, 2009, 40: 41.
- [4] WU Guangqiang, YAN Peng. System for torque converter design and analysis based on CAD/CFD integrated platform [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 21(4): 35.
- [5] Lars Gräening, Stefan Menzel, Martina Hasenjäger, et al. Knowledge extraction from aerodynamic design data and its application to 3D turbine blade geometries [J]. Journal of Mathematical Modelling and Algorithms, 2008, 7(4): 329.
- [6] 陈次昌,宋文武,杨昌明,等.离心泵三维设计的研究[J].农业机械学报,2002,33(3):34.
CHEN Cichang, SONG Wenwu, YANG Changming, et al. 3-D design of a centrifugal pump [J]. Transactions of The Chinese Society of Agricultural Machinery, 2002, 33(3): 34.
- [7] Piegl L, Tiller W. The nurbs book [M]. 2nd ed. Berlin: Springer-Verlag, 1997. 125 - 126.
- [8] Goldman R. Pyramid algorithms: a dynamic programming approach to curves and surfaces for geometric modeling [M]. San Fransisco: Morgan Kaufmann, 2002. 263 - 264.
- [9] 马文星.液力传动理论与设计 [M]. 中国:化学工业出版社,2005.
MA Wenxing. Theory and design of hydraulic transmission [M]. China: Chemical Industry Press, 2005.
- [10] Hiroya Abe, Masaaki Tsuruoka, Akio Muto, et al. Development of super ultra flat torque converter with multi plate lock-up clutch [J]. SAE International Journal of Engines, 2009, 2(1): 48.
- [11] 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.
HAN Kefei, WU Guangqiang, WANG Huan. Prediction of the effects of key parameters of pump impeller cascade on the performance of torque converter based on CFD [J]. Automotive Engineering, 2010, 32(6): 497.

(上接第 1672 页)

效吸收发动机扭矩波动造成的冲击;滑差控制中整车冲击度与纯液力传动相差不大,但传递效率远高于后者,ECE工况下节油率为4.8%;可在不影响乘坐舒适性的同时,提高车辆燃油经济性.

(2)与PID控制器相比,滑模变结构控制器响应速度更快,而且可以更有效地消除发动机扭矩波动.

(3)采用零相位数字滤波的方式可以抑制滑模控制系统抖振,进而增强控制系统的鲁棒性.

参考文献:

- [1] Kazutaka Adachi, Yoshimasa Ochi, Satoshi Segawa. Slip control for a lock up clutch with a robust control method [C] // SICE conference. Sapporo: SICE, 2004: 744 - 748.
- [2] 葛安林.液力变矩器闭锁与滑差控制[J].汽车技术,2001(7):1.
GE Anlin. The lock-up and slip control of torque converter [J]. Automobile Technology, 2001(7): 1.
- [3] 胡建军,秦大同.液力变矩器锁止离合器性能及滑差控制[J].重庆大学学报,2004,27(2):2.
HU Jianjun, QIN Datong. Performance and slip control of torque converter lock-up clutch [J]. Journal of Chongqing University, 2004, 27(2): 2.
- [4] 张德明,吴光强.模糊滑模变结构控制在DCT电控离合器上应用[J].汽车技术,2007(10):1.
ZHANG Deming, WU Guangqiang. Application of fuzzy-slide mode control in electronic control clutch of DCT [J]. Automobile Technology, 2007(10): 1.
- [5] 蒋小华,秦大同.液力变矩器闭锁离合器滑摩控制研究[D].重庆:重庆大学机械学院,2004.
JIANG Xiaohua, QIN Datong. The slip control of torque converter lock-up clutch [D]. Chongqing: Chongqing University. School of Mechanical Engineering, 2004.
- [6] 刘金琨.滑模变结构控制 Matlab 仿真 [M]. 北京:清华大学出版社,2005.
LIU Jinkun. Matlab simulation for sliding mode control [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.
- [7] Kang B P, Ju J L. Sliding mode controller with filtered signal for robot manipulators using virtual plant/controller [J]. Mechatronics, 1997, 7(3): 277.
- [8] 阴小峰,谭晶星,雷雨龙,等.基于神经网络发动机模型的动态三参数换挡规律[J].机械工程学报,2005,41(11):174.
YIN Xiaofeng, TAN Jingxing, LEI Yulong, et al. Dynamic shift schedule 3-parameter based on neural network model of engine [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(11): 174.