

轴流泵叶片多学科设计优化*

汤方平 石丽建 雷翠翠 杨 华 杨 帆

(扬州大学水利与能源动力工程学院, 扬州 225100)

摘要:在对水力性能和结构分别进行学科分析的基础上,通过2个学科的耦合关系,建立了轴流泵叶片多学科设计优化的数学模型。采用协同优化算法,实现了同时满足叶轮效率最高和叶片质量最轻的优化目标。优化结果表明,多学科设计优化提高了轴流泵叶片的综合性能,可有效兼顾高效、轻量化的要求。水泵叶片多学科设计优化模型的协同优化算法高效、可行。

关键词:轴流泵 叶片 协同算法 多学科设计优化

中图分类号: TH312 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)09-0096-05

引言

在工程项目和产品设计中,遇到的研究对象往往是复杂的系统,这些设计对象基本都具有规模大、结构复杂,而且涉及多个学科领域等特点。传统的单学科设计方法已无法完成这样的设计优化任务。

多学科设计优化(Multidisciplinary design optimization, MDO)^[1]作为一种基于系统科学的思想,以数学方法为手段,计算机技术为工具,面向工程设计和应用的方法论,在处理复杂耦合系统的多目标优化设计方面具有突出的优点。多学科设计优化自从20世纪90年代初被提出来以后,在飞行器等领域的应用技术已趋近成熟,本文所作的轴流泵叶片设计就涉及到水力性能和结构性能2个学科,因此借鉴MDO在航天器的应用^[2],将MDO应用到轴流泵叶片的优化设计上。

1 水泵叶片多学科设计优化问题

1.1 轴流泵叶片多学科设计优化的相关参数

在水泵叶片设计过程中,不同参数对轴流泵叶片的水力性能和结构强度有着不同的影响,本文主要考虑以下参数对轴流泵叶片设计的影响:

(1)叶栅稠密度 l/t ^[3]

减小叶栅稠密度可以提高轴流式叶片的效率,但对汽蚀性能、叶片强度和刚度有不利影响。因此需找到一个合适的叶栅稠密度使叶轮强度、刚度与效率达到最优水平。

(2)轮毂比 d/D

从水力性能上看,减小轮毂比可以增加过流面积,减小水力摩擦损失,有利于汽蚀性能的改善,但是过分减小轮毂比,会增加叶片的扭曲,降低结构强度,而且会过早造成非设计工况液体的流动分离。因此需要合理设计找出最佳的轮毂比。

(3)叶片翼型厚度比 h/l

从水力性能上讲,叶片越薄,水力性能越好;但是叶片过薄,结构强度要求无法满足。因此要将上述两方面综合考虑找出最佳的翼型厚度。

1.2 协同优化设计的设计思想

在传统工程设计框架中,优化计算是在一个优化器中进行的^[4-5]。针对设计对象的规模越来越大,复杂度越来越高,协同优化方法提出一种新的设计思想,即将复杂的工程设计问题分解为系统级设计和并行的几个子问题设计,系统级设计者向各子问题设计者给出设计向量的期望值,各子问题设计者在只考虑本子问题约束的情况下,使设计向量值与系统级传递下来的期望值差距最小。系统级设计者根据来自各个子问题设计者的返回信息,按照一定的规则协调子问题的不一致,同时使得原问题目标函数最优。协同优化中系统级与子问题之间的关系如图1所示。

协同优化的2个重要特点在于:子问题并行优化,系统级协调;各子问题优化保持独立。

协同优化的这2个特点在数学上表现为:原有的优化设计问题分为两级,一个系统级优化和并行

收稿日期: 2013-09-19 修回日期: 2013-10-26

* 国家自然科学基金资助项目(51376155)、“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2012BAD08B03-2)、江苏省高校自然科学研究重大项目(11KJA570001)和江苏省普通高校研究生科研资助项目(CXLX13_904)

作者简介: 汤方平,教授,博士生导师,主要从事流体机械设计、复杂工程系统科学优化设计、泵站自动化等研究,E-mail: yzdx_tfp@263.net

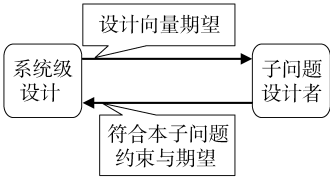


图1 系统级与子问题之间的关系

Fig. 1 Relationship between the system-level and sub-problems

的多个子问题级优化;状态向量当作设计向量处理。

1.3 轴流泵叶片设计优化中的协同优化数学建模

针对轴流泵水力模型叶轮进行优化,目标函数是使叶轮效率最高和叶片质量最轻,并且能够满足汽蚀性能、当量扩散系数以及叶片应力的要求。按照协同优化方法的计算框架,该轴流泵叶片设计优化问题分解为1个系统级优化和2个子问题优化,模型如下:

系统级优化模型

min f = 10(1 - η_R) + 10⁵W (1)

式中 η_R——叶轮效率 W——质量

设计变量为

X = (d/D, l/t, h/l, z_m)

约束条件

{ R₁ < 0.001 2
R₂ < 0.001

式中 z_m——叶根叶栅稠密度倍数

R₁、R₂——水力和结构学科优化后返回值

为了在程序中更方便的描述,上述设计变量简记为

X = (a, b, c, z_m)

系统级优化目标是叶轮效率最高和叶片质量最轻,为多目标优化,采用加权组合方法处理。

水力学科优化模型(子问题1):

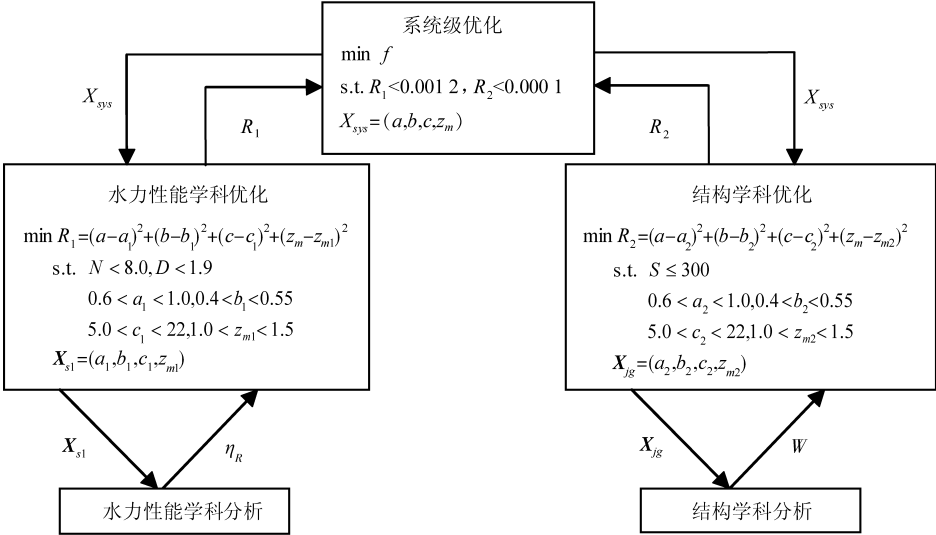


图2 轴流泵叶片协同优化框图

Fig. 2 Framework map of collaborative optimization algorithm for the blades of axial flow pump

设计变量 a₁, b₁, c₁, z_{m1}

目标函数

min R₁ = (a - a₁)² + (b - b₁)² + (c - c₁)² + (z_m - z_{m1})² (2)

约束条件 { N ≤ 8.0
D ≤ 1.9
0.6 ≤ a₁ ≤ 1.0
0.4 ≤ b₁ ≤ 0.55
5.0 ≤ c₁ ≤ 22.0
1.0 ≤ z_{m1} ≤ 1.5

其中 D 为叶栅当量扩散系数,该系数用于判断各断面叶栅的综合工作状态,系数值大于 1.9,叶栅内容易脱流。N 为轴流泵叶轮的汽蚀余量,影响汽蚀余量的主要因素是泵叶轮进口的几何参数。因此在叶片设计优化时要充分考虑汽蚀余量对水力性能的影响。

结构学科优化模型(子问题2):

设计变量 a₂, b₂, c₂, z_{m2}

目标函数

min R₂ = (a - a₂)² + (b - b₂)² + (c - c₂)² + (z_m - z_{m2})² (3)

约束条件 { S ≤ 300
0.6 ≤ a₂ ≤ 1.0
0.4 ≤ b₂ ≤ 0.55
5.0 ≤ c₂ ≤ 22.0
1.0 ≤ z_{m2} ≤ 1.5

其中 S 是叶片根部最大应力。应力要求叶片较厚,但会导致叶片水力性能变差。因而叶片设计优化过程要综合考虑叶片翼型厚度比。

根据系统级模型和水力与结构学科模型建立轴流泵叶片的协同优化模型如图 2 所示。X_{sys} 为系统

给定的期望,通过系统期望和返回值的不断调整确定最优的多学科优化结果。

2 轴流泵叶片的多学科分析

2.1 水力性能学科分析

水力性能^[6-7]优化的目标是在满足水泵汽蚀性能与当量扩散系数的约束条件下,使转轮的效率最高。因此水力性能优化目标可以表示为

$$\min(1 - \eta_R) = 1 - f\left(\frac{d}{D}, \frac{l}{t}, z_m\right) = 1 - (1 - h_{re} - h_{te})\eta_V \quad (4)$$

式中 h_{re} 、 h_{te} ——翼型损失和轮缘间隙损失

η_V ——容积效率

各种水力损失的计算参照文献[8]的方法。

2.2 轴流叶片结构学科分析

叶片强度^[9]优化的目标是在保证叶片最大应力小于许用应力的条件下,使叶片的质量最轻。水力设计过程中,指定叶根叶片剖面最大厚度以及翼型最大厚度从叶根到叶尖成线性变化,则叶栅稠密度从叶根到叶尖的变化规律也已经确定,因此,保证叶片根部断面面积与叶展乘积最小,即强度优化目标可以表示为

$$\min W = \int_b^{1.0} \left(0.963a \frac{h}{l} l^2\right) d\lambda \quad (5)$$

式中 λ ——无因次半径 a ——常系数

强度校核计算采用分析算法。在一般情况下,作用在剖面上的离心应力较小,故计算中仅参考轴向推力的作用和周向转矩所引起的应力。对于不可调节叶片,最大应力一般在叶根处出现^[10],叶根处的剖面如图3所示。

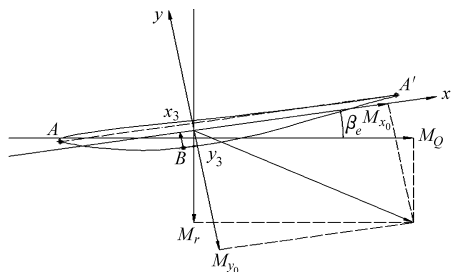


图3 叶根处的剖面图

Fig. 3 Cross sectional view at the blade root

叶根处由扬程产生轴向推力 M_r , 假定扬程 H 沿径向分布为常数,则

$$M_r = \frac{\rho g h}{\eta_h} \int_{\lambda_0}^1 \frac{2\pi \lambda_0 R}{Z} \frac{l}{t} (\lambda) \cos \beta_e R d\lambda = \frac{2\pi \rho g H R^2}{Z \eta_h} \int_{\lambda_0}^1 \lambda \frac{l}{t} (\lambda) \cos \beta_e d\lambda \quad (6)$$

式中 η_h ——水力效率 Z ——叶片数

λ_0 ——轮毂处的无因次半径

R ——叶片半径

周向转矩 M_Q 为

$$M_Q = \frac{\rho g Q h}{\omega \eta_v \eta_h Z} \quad (7)$$

式中 Q ——流量

设叶根翼型剖面安放角为 β_{eh} , xx 、 yy 为剖面的惯性主轴,它们通过剖面的中心,并近似取 xx 轴与剖面内弦(鼻尾线)平行,则对应于叶根剖面上 xx 、 yy 轴的弯曲力矩为

$$\begin{cases} M_{x_0} = M_T \cos \beta_{eh} + M_Q \sin \beta_{eh} \\ M_{y_0} = M_T \sin \beta_{eh} - M_Q \cos \beta_{eh} \end{cases} \quad (8)$$

以 I_{x_0} 、 I_{y_0} 表示剖面绕惯性主轴的惯性矩,则得到叶片剖面上的应力分别为:

在导边 A 点的应力

$$\sigma_A = -\frac{y_1 M_{x_0}}{I_{x_0}} - \frac{x_1 M_{y_0}}{I_{y_0}} \quad (9)$$

在随边 A' 点上的应力

$$\sigma_{A'} = -\frac{y_2 M_{x_0}}{I_{x_0}} - \frac{x_2 M_{y_0}}{I_{y_0}} \quad (10)$$

在叶背最大厚度处 B 点的应力

$$\sigma_B = -\frac{y_3 M_{x_0}}{I_{x_0}} - \frac{x_3 M_{y_0}}{I_{y_0}} \quad (11)$$

应力正值表示拉应力,负值表示压应力。本文选用 NACA66-mod 翼型,对于翼型导边、随边、叶背最大厚度点的坐标大小及正负可参阅相关的设计手册进行求解,最大应力在这3点出现,选取最大值进行控制。文献[11-12]中也作了相关介绍。

一般情况下,应力可表示为

$$\sigma = f\left(Q, H, n, Z, \frac{d}{D}, \left(\frac{h}{l}\right)_h, \frac{l}{t}, z_m\right) \quad (12)$$

式中 n ——转速

下标 h 表示叶根处的参数。 Q 、 H 、 n 为水泵设计参数, $\frac{d}{D}$ 、 $\left(\frac{h}{l}\right)_h$ 、 $\frac{l}{t}$ 、 z_m 为优化参数。

3 轴流泵模型多学科优化结果及分析

3.1 水泵设计参数

给定流量 $Q = 0.36 \text{ m}^3/\text{s}$, 扬程 $H = 6 \text{ m}$, 转速 $n = 1450 \text{ r/min}$, 比转数 $n_s = 831.8$, 叶片数 $Z = 4$ 。

3.2 轴流泵模型优化结果及分析

水力性能单学科优化以效率最优为目标,只考虑汽蚀性能和扩散当量系数的约束,不考虑强度要求对叶片进行优化;结构性能优化以叶片质量最轻为目标,只考虑强度要求,即满足应力约束,不考虑汽蚀性能和当量扩散的影响对叶片进行优化^[13]。而多学科优化则将这2个学科协调起来,综合考虑。

根据协同优化的结构框架,在 ISIGHT^[14-15] 优化平台下建立叶片的协同优化模型,分别集成水力性能、结构以及系统级的优化算法,实现 2 个学科的协同优化,系统级采用混合整形优化法 (MOST) 和序列

二次规划法 (NLPQL),子问题采用序列二次规划法 (NLPQL)。设计变量初始值分别取 $d/D = 0.5$, $l/t = 0.8$, $h/l = 10$, $z_m = 1.2$,得到设计优化结果如表 1 所示。

表 1 设计优化结果数据
Tab.1 Data of design optimization

优化方式	d/D	h/l	l/t	z_m	η_R	N	D	W	S/N
水力优化	0.484	6.00	0.835	1.000	0.887	8.003	1.897	3.224×10^{-5}	1 650
结构优化	0.550	11.12	0.600	1.500	0.896	10.916	1.701	6.432×10^{-5}	300
协同优化	0.510	14.97	0.859	1.358	0.882	8.030	1.767	1.124×10^{-4}	204.86

根据该优化结果导出的叶片造型如图 4~6 所示。

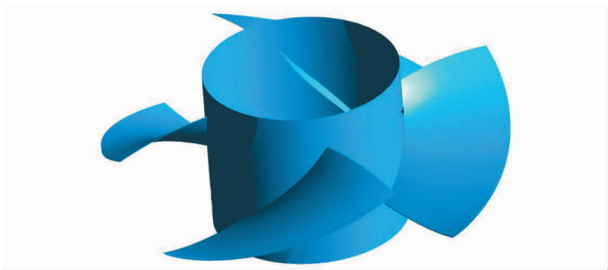


图 4 水力性能优化后的叶片造型
Fig.4 Blade shape optimized by the hydraulic performance

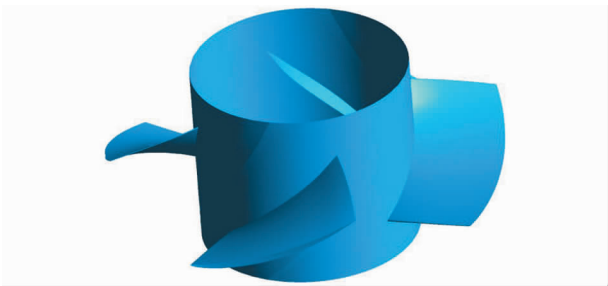


图 5 结构优化后的叶片造型
Fig.5 Blade shape optimized by structure

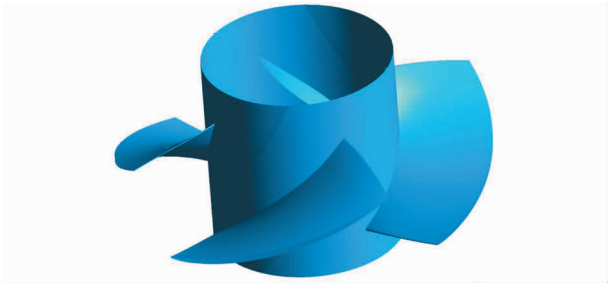


图 6 协同优化后的叶片造型
Fig.6 Blade shape optimized by MDO

将协同优化的叶轮配上导叶(叶片数 7 片)进行模型泵试验,1 450 r/min 时,最高效率点参数为:

流量 0.355 m³/s,扬程 6.822 m,效率 83.91%,汽蚀余量 8.4 m;设计流量附近参数为:流量 0.363 m³/s,扬程 6.438 m,效率 83.27%,汽蚀余量 8.3 m,综合性能良好。

通过对优化结果和试验数据分析比较可知:
(1)水力性能单学科优化结果表明,在保证汽蚀性能要求和当量扩散的要求下,效率达到最优,叶片根部厚度对效率影响很小,接近初值,但是叶片根部最大应力远大于许用应力,强度不能满足要求。

(2)结构性能单学科优化结果表明,保证应力约束的条件优化后的轮毂比较大,叶片较短,弯矩小。可以看出轮毂比对最大应力的影响很大,一般均达到给定的最大轮毂比;其次,叶片根部最大厚度较敏感。为减轻质量,叶片较短,汽蚀性能往往得不到保证。

(3)经过协同优化,在满足汽蚀性能、当量扩散系数和应力约束的条件下,效率最优,质量较轻。避免了单学科优化时需人工凭经验控制有关指标的过程。

4 结束语

本文采用协同优化方法,以效率最优、质量最轻为目标对水泵叶片进行多学科优化,其设计优化结果提高了水泵的总体性能。

优化目标为效率和质量的综合,属于多目标优化。而目标函数中权重分配不同,得到的优化结果也不同,因此合理分配权重对优化结果非常重要。

由于本文采用中等精度的预测模型进行水力性能和结构强度的学科分析,应用具有局限性。如果采用 CFD 和有限元等高精度模型进行学科分析,将提高优化方法的适应性,并进一步提高设计精度和可靠性。

参 考 文 献

- 1 聂勇军,魏世民. 多学科优化设计技术及其应用研究[J]. 机电产品开发与创新,2011,24(1):4-8.
- 2 王小青,王小军. 多学科优化技术及其算法[J]. 导弹与航天运载技术,2007(1):23-26.
- 3 王玲花. 叶栅稠密度对双向贯流泵性能影响的分析[J]. 水电能源科学,2003,21(4):69-71.
Wang Linghua. Analysis of influence of blading density degree to characteristics of bidirectional tubular pump[J]. Water Resources and Power,2003,21(4):69-71. (in Chinese)
- 4 韩明红,邓家祺. 协同优化算法的改进[J]. 机械工程学报,2006,42(11):34-38.
Han Minghong, Deng Jiati. Improvement of collaborative optimization[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering,2006,42(11):34-38. (in Chinese)
- 5 李海燕,马明旭,黄章俊,等. 自适应罚函数协同优化算法[J]. 系统仿真学报,2009,21(19):6178-6182.
Li Haiyan, Ma Mingxu, Huang Zhangjun, et al. New adaptive penalty scheme for collaborative optimization[J]. Journal of System Simulation,2009,21(19):6178-6182. (in Chinese)
- 6 汤方平,王国强,刘超,等. 高比转数轴流泵水力模型设计与紊流数值分析[J]. 机械工程学报,2005,41(1):119-123.
Tang Fangping, Wang Guoqiang, Liu Chao, et al. Design and numerical analysis on an axial-flow model pump with high specific speed[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering,2005,41(1):119-123. (in Chinese)
- 7 Yang Zhengjun, Wang Fujun, Zhou Peijian. Evaluation of subgrid-scale models in large-eddy simulations of turbulent flow in a centrifugal pump impeller[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering,2012,25(5):911-918.
- 8 汤方平,周济人,袁家博,等. 轴流泵水力模型 CAD/CAM[J]. 江苏农学院学报,1998,19(1):1-5.
- 9 李磊,张建润,陈琳. 柴油机运动机构多学科协同优化设计[J]. 农业机械学报,2013,44(3):33-37.
Li Lei, Zhang Jianrun, Chen Lin. Multidisciplinary collaborative design optimization of diesel engine motion mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2013,44(3):33-37. (in Chinese)
- 10 潘旭,李成,铁瑛,等. 轴流泵叶片流固耦合强度分析[J]. 水力发电学报,2012,31(4):221-226,237.
Pan Xu, Li Cheng, Tie Ying, et al. Strength analysis of fluid-solid coupling of axial-flow pump blades[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2012,31(4):221-226,237. (in Chinese)
- 11 Li Zengliang, Zhi Ruiping, Zhao Chuanwei, et al. The 3D modeling of blades of multiphase flow helico-axial pump's rotor based on Solidworks[J]. CADDM,2011,21(2):1-6.
- 12 Ye Liang, Liu Zhongmin. Design of implantable axial-flow blood pump and numerical studies on its performance[J]. Journal of Hydrodynamics,2009,21(4):445-452.
- 13 雷翠翠. 水泵叶片的多学科设计优化理论与方法研究[D]. 扬州:扬州大学,2009.
- 14 周达达,陈国金,龚友平. 基于 iSIGHT 的多学科优化方法研究[J]. 机电工程,2009,26(12):78-81.
- 15 樊江,曾维维,王荣桥,等. 基于 iSIGHT 的涡轮叶片叶冠优化设计[J]. 航空动力学报,2011,26(4):745-751.
Fan Jiang, Zeng Weiwei, Wang Rongqiao, et al. Optimization design of the turbine blade shroud based on iSIGHT software[J]. Journal of Aerospace Power,2011,26(4):745-751. (in Chinese)

Multidisciplinary Design Optimization of Axial-flow Pump Blades

Tang Fangping Shi Lijian Lei Cuicui Yang Hua Yang Fan

(School of Hydraulic Energy and Power Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225100, China)

Abstract: The design and optimization of axial-flow pump blades usually takes the hydraulic design as the principle, then takes strength check into consideration. That cannot achieve the goal of integrated optimization. The mathematical model of axial flow blades of multidisciplinary design optimization was established on the basis of the subject analysis and the coupling relation between hydraulic and structure subject. The mathematical model could achieve the targets of the highest efficiency of impeller and the lightest weight of blades by using collaborative optimization algorithm. The study shows that multidisciplinary design optimization could improve the overall performance of axial flow blades, which also meet the requirements that the axial is efficient and lightweight. The collaborative optimization algorithm for axial flow blades model of multidisciplinary design optimization is efficient and feasible.

Key words: Axial-flow pump Blades Collaborative algorithm Multidisciplinary design optimization