

doi: 10.7690/bgzd.2019.09.021

救生机器人推进器的 3 维反问题设计与性能校验

周 浩

(海军工程大学兵器工程学院, 武汉 430033)

摘要: 针对水上救生机器人难以实现快速稳定航行的问题, 采用 3 维反问题设计理论对机器人推进器进行几何设计并对相关参数进行匹配, 在合理假设条件下, 将喷水推进泵内的有旋流方程进行有效分解获得周向平均流动方程和周期性脉动流动方程。使用速度矩沿流线的分布来控制叶片的载荷, 运用计算流体力学对所设计的喷水推进泵进行水力性能校验, 结果表明: 在毂径比较大等特定条件约束下, 喷水推进泵的水力效率达到 80.38%, 并且在较宽的流量范围内保持高效, 叶轮表面压力沿轴向分配合理, 没有局部低压区, 叶轮推力满足预期性能, 验证了设计思路和参数配置的正确性。

关键词: 救生机器人; 喷水推进泵; 3 维反问题设计; 性能校验

中图分类号: TP242 **文献标志码:** A

3D Inverse Design and Performance Analysis of Water Jet Pump on Lifesaving Robot

Zhou Hao

(College of Weaponry Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: In order to solve the problem of the lifesaving robot to achieve fast and stable navigation, the 3D inverse design theory is used to obtain the geometry of the robot pump. Under reasonable assumptions, the swirl equation in the water jet pump is effectively decomposed to obtain the circumferential mean flow equation and periodic fluctuating flow equation. The distribution of speed moment along the streamline is used to control the loading on the blade, and the hydraulic performance of the designed water jet pump is calculated by computational fluid dynamics. The results show that the hydraulic efficiency of the water jet pump reaches 80.38% under the constraints of large hub diameter ratio and other specific conditions. At the same time, it maintains high efficiency in a wide flow range. The pressure distribution along the axis of the impeller surface is reasonable, and low pressure zone is not found, the impeller thrust meets the expected value, which proves the design and parameter configuration are correct and feasible.

Keywords: lifesaving robot; water jet pump; 3D inverse design; performance verification

0 引言

为应对可能出现的水上救生险情, 单纯配备救生圈远远不够, 譬如救生圈投掷有偏差, 或是遇险地的水流、风速过大都可能导致落水者无法获得救生设备而陷入危险之中; 因此, 为提高落水者的生存机会, 开发一款能够自行寻找落水者的救生机器人, 成为当前合理且迫切的需求, 而实现救生机器人快速稳定航行的前提是设计出安全高效的推进器。

目前, 按照安装位置的不同, 推进器分内置式和外置式 2 种。内置推进器主要优点是可以简化应用设备的外部形状, 使推进器免受非流体的损伤; 外置推进器主要优点是便于加工和安装。内置式结构类似于喷水推进泵的工作方式, 外置推进器类似于导管桨。考虑到救生机器人的实际工作环境和水上救生需要, 笔者拟采用内置喷水推进泵的结

构形式。

目前, 喷水推进泵的设计方法一般根据假设的不同分为一元理论、二元理论和三元理论。其中三元理论对水流假设最少, 设计过程简单高效^[1], 应用越来越受到国内外业界的广泛关注。Zangeneh 运用泵的三元设计理论完成了对某喷水推进泵的设计, 成功地消除了导叶中的二次流, 提出了叶片设计过程中消除二次流的准则^[2]。Duccio 综合了三元设计理论和遗传优化, 对离心泵的叶片进行了优化, 研究了相应参数对叶片性能的影响^[3]。靳栓宝采用三元设计理论, 对某混流泵进行改进设计, 成功地提高了泵的效率, 证明了三元设计理论的优越性^[4]。

为克服救生机器人推进器尺寸小、毂径比大的设计难点, 提高喷水推进泵的效率, 降低因假设条件较多带来的设计偏差, 笔者采用三元设计理论对

收稿日期: 2019-06-14; 修回日期: 2019-06-24

基金项目: 国防“973”基础研究项目(613188030103)

作者简介: 周 浩(1971—), 男, 山西人, 博士, 副教授, 从事兵器发射与控制技术研究。E-mail: zhouhao507@163.com。

救生机器人内置喷水推进泵进行几何设计,运用数值仿真对所设计的喷水推进泵的水力性能进行效验。

1 救生机器人的功能和主要技术指标

目前,救生机器人主要应用于各类危险水域的人员救生。当发生人员意外落水等紧急情况时,水上救生机器人可以代替救援人员快速安全地到达,能克服水情不明、水下暗流等给救援人员可能带来的次生伤害。其救援速度快、持续时间长,对于风浪等险情的抗干扰能力强。

笔者设计的水上救生机器人,质量为 21 kg,长为 1 m,宽为 0.8 m,高为 0.3 m,目标设计航速为 5 m/s,采用双推进器作为动力源,电机最大功率 1 kW,转速 3 000 r/min。

2 推进器设计理论

根据泵的三元设计理论,对喷水推进器的来流进行下列假设:1) 水的流动是无粘性、不可压缩的;2) 推进器转子前的进流是没有旋度的;3) 根据 S_2 流面理论,将叶片视作无厚度的涡片,叶片对水的作用通过速度矩 $r\bar{v}_\theta$ 来控制^[5-6]:

$$r\bar{v}_\theta = \frac{B}{2\pi} \int_0^{2\pi} rv_\theta d\theta \quad (1)$$

式中: B 为叶片数; r 为半径; v_θ 为周向速度。转子内流场的旋度为:

$$\bar{\Omega} = \nabla \times v = [\nabla \lambda \times \nabla S] \delta_p(S) \quad (2)$$

式中: $S(r, \theta, z) = \theta - f(r, z)$, $f(r, z)$ 为叶片的包角; 当 $S = m \frac{2\pi}{B}$ 时,表示 S 的坐标值正好是叶片所在位置, m 取 1,2,3,⋯; $\delta_p(s)$ 是一个周期函数,其平均值正好为 1,当 $S = 2m\pi/B$ 时(即在叶片上) $\delta_p(s) \neq 0$,当 S 为其他值时 $\delta_p(s) = 0$ 。这样就可以将 $\delta_p(s)$ 用傅里叶级数展开为:

$$\delta_p(S) = 1 + \sum_{K=1}^{\infty} 2\cos(KBS) \quad (3)$$

从而周向平均旋度就变为

$$\bar{\Omega} = \nabla \times \bar{v} = \nabla r\bar{v}_\theta \times \nabla S \quad (4)$$

迭代初始阶段,首先依据二元理论获得轴面速度分布 W_b ,因为相对流速 W_b 和叶片表面相切,所以,其和叶片法向矢量 ∇S 相垂直,即

$$W_b \cdot \nabla S = 0 \quad (5)$$

式中: $W_b = \frac{W_b^+ + W_b^-}{2}$, W_b^+ 和 W_b^- 分别表示叶片压和吸力面上的速度。式(5)是一个偏微分方程,叶片的几何通过将方程的特征线沿轴面流线积分获得^[5-6]。

在完成初始几何和速度场的求解后,通过式(2)可以获得内流场的旋度,即叶片表面涡的分布,根据涡的分布,即可求得 3 维速度分布。

为了获得喷水推进泵中 3 维有旋流动的解,可以将该流动拆解为周向平均流动和周期性脉动流动。前者采用 3 维欧拉方程处理,将其转化为 2 维的泊松偏微分方程;后者则采用 Clebsch 变换,转化为 3 维泊松偏微分方程。将其用傅里叶级数沿周向展开,从而获得无穷多个 2 维方程,在工程应用中,可以根据精度要求选取有限个方程求解即可。最后,通过有限差分法和贴体坐标系,将 2 个方程的解整合,即可获得整个流场的速度分布。

将新的速度分布代入式(5),重新求得叶片几何,通过对比前后 2 次叶片的包角,确定几何误差是否已满足要求。叶片的设计流程如图 1 所示。

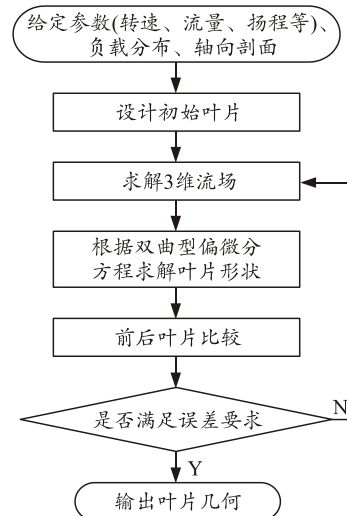


图 1 叶片设计流程

根据泵的设计理论,叶片的随边处应当满足 Kutta 条件,即压力面和吸力面在随边处速度相等。根据文献[7-8]可知,叶片前后面之间的相对速度关系为:

$$W_b^+ - W_b^- = \frac{2\pi}{B} \frac{(\nabla r\bar{v}_\theta \times \nabla S) \times \nabla S}{\nabla S \cdot \nabla S} \quad (6)$$

将上式用伯努力方程简化,即可获得压力面与吸力面的压差:

$$p^+ - p^- = \frac{2\pi}{B} \rho \bar{W} \cdot \nabla r\bar{v}_\theta \quad (7)$$

式中 $\bar{W} = \frac{W_b^+ + W_b^-}{2}$ 。

整个迭代程序需要明确的参数有: 轴面的几何形状, 出口流量, 叶片数, 叶片的速度矩分布, 发动机转速。

3 几何设计

通过救生机器人的航行阻力和推进器的预估效率, 求得所需的电机功率 P_d , kW。目前对应千瓦功率的电机直径最小为 50 mm, 电机所在机器人脚部位置的直径为 190 mm, 考虑到泵体外壳的厚度不小于 3 mm, 将泵的直径选取为 88 mm。叶轮转速由电机的转速确定, 出口直径、流量、扬程, 根据最优喷速比原则确定, 叶片数根据泵的比转速确定。最终的设计参数为: 叶轮转速为 3 000 r/min、流量为 28 kg/s、扬程为 2.5 m、进口直径为 88 mm、出口直径为 32 mm、轮毂半径为 50 mm、叶轮叶片数为 3、导叶叶片数为 4。机器人结构如图 2 所示。

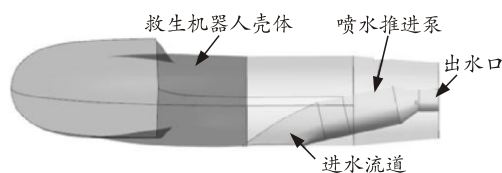


图2 机器人结构

3.1 轴面形状

轴面形状对推进器的效率有明显的影响, 通常根据应用条件和比转速确定。文中的喷水推进泵, 其叶轮由电机的外壳来带动运转, 而 2 个脚部的空间有限; 因此, 毂径比较大, 根据以往的设计经验可知, 将导致喷水推进泵的效率降低较多。根据喷水推进泵的比转速大小, 最终选择轴流式泵作为喷水推进器的参考形式, 其轴面示意图绘制效果如图 3 所示。

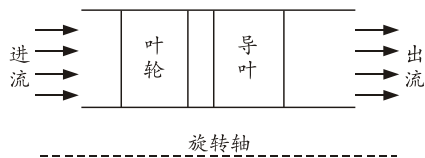


图3 喷水推进泵轴面

3.2 叶片速度矩分布

叶片速度矩在轴向和径向的分布情况对叶片的效率和空化性能影响明显, 因此, 选择合理的载荷分布对喷水推进泵叶轮的设计来说至关重要。

由式(7)可知: 叶片的载荷(即前后面的压力差)跟速度矩 $r\bar{v}_\theta$ 的偏导数有关, 为了精确控制叶片在轴

向和径向的载荷, 通常将 $r\bar{v}_\theta$ 沿流线的导数, 即 $\partial r\bar{v}_\theta / \partial m$, 作为载荷的给出形式^[9-10]。同时, 叶片的速度矩还需要满足 2 个条件^[11]:

1) 出口处的 $\frac{\partial r\bar{v}_\theta}{\partial m} = 0$ 。由 Kutta 条件可知, 在叶片随边处有 $p^+ = p^-$, 所以 $\bar{W} \cdot \nabla r\bar{v}_\theta = 0$ 。通常 $\bar{W} \neq 0$, 因此, 可以得到 $\frac{\partial r\bar{v}_\theta}{\partial m} = 0$ 。

2) 叶片沿流线的速度矩积分以后应当等于相应半径处的速度矩, 即

$$\int_0^1 \frac{\partial r\bar{v}_\theta}{\partial m} dm = v_{\theta_2} r_2 \quad (8)$$

其中: $m=0$, 代表导边; $m=1$, 代表随边; 下标 2 表示相应参数出口处的值。

根据文献[6]可知: 喷水推进泵叶轮效率最高的载荷分配方式是将叶片的最高载荷处放在叶片轴向的前半部分, 通常是在叶片 20% 弦长处, 然后以抛物线的形式逐渐降低, 在叶片随边处减小为 0。这样的分布有利于避免随边出现流动分离, 因此, 同样负载条件下, 前重载的效率较高。另一方面, 这样的负载分布形式会使叶片上的压力快速降低, 容易降低叶片的抗空化性能。将最高载荷放在 80% 弦长处, 其性能特点与前置重载则刚好相反。笔者考虑到救生机器人可能工作在恶劣的海况条件下, 决定兼顾效率和抗空化性能, 将负载缓慢增大后, 在 20% 弦长处开始均匀分布, 在 60% 弦长处开始减小, 直至在 100% 弦长处减为 0, 如图 4 所示。叶轮其他半径处依据叶根和叶梢处的载荷值进行线型插值获得。

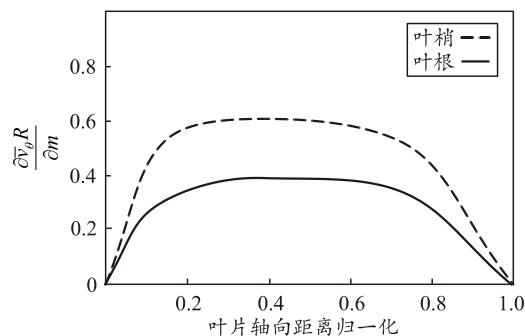


图4 转子叶片负载分布

定子的作用一方面用来支撑导管, 一方面用来将叶轮出流的部分周向动能转换为轴向动能, 从而进一步提高推进器效率。其负载分布形式参考文献[4]中的结论, 具体分布情况如图 5 所示, 其他半径处的负载依据叶根和叶梢处的载荷值进行线型插值

获得。

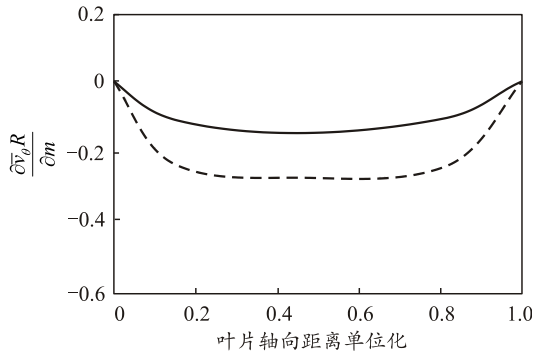


图 5 定子叶片负载分布

3.3 叶片的加厚处理

根据所求叶片几何的弦长,参考NACA系列翼型,求得不同弦长处叶片的厚度分布情况,叶片中心面加厚以后,即可得到叶片的几何。最终的推进器几何如图 6 所示。

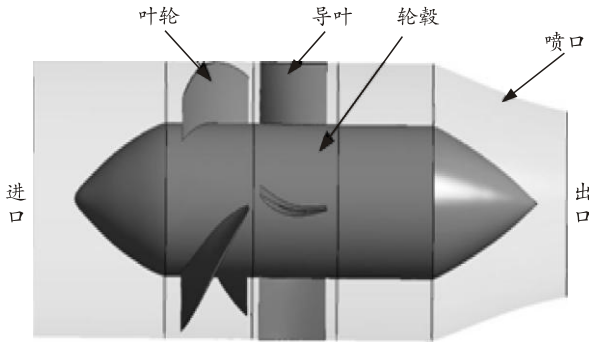


图 6 泵喷推进器几何

4 喷水推进泵的性能校验

在得到整个泵的几何条件以后,通过 CFD 对其水力性能进行数值计算和结果分析。

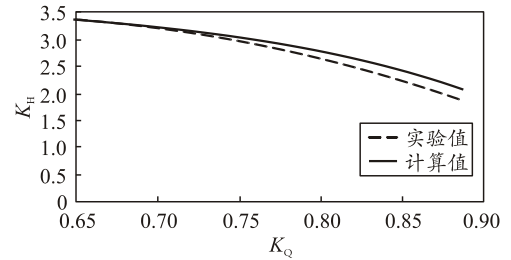
4.1 数值模型与验证

采用基于中心节点控制和有限体积法来求解 N-S 方程,湍流模型选用 SST 模型,该模型是 $k-\epsilon$ 和 $k-\omega$ 模型的函数,综合了 2 种模型的优点,既可以在湍流剧烈区域采用 $k-\epsilon$ 模型,又可以在近壁面附近使用 $k-\omega$ 模型,从而可以更准确地模拟整个区域内的流动情况。以某喷水推进器为例进行验证。

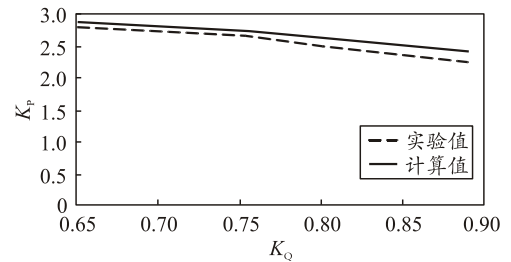
该喷水推进器图纸为国内某厂家提供,其性能数据通过台架试验所得。推进器直径为 D ,转速为 n_0 。

选取扬程系数 $K_H = \frac{gH}{n_0^2 D^2}$; 功率系数

$K_P = \frac{P}{\rho n_0^3 D^5}$ 作为对比参数。采用和文中同样的网格划分方法和湍流模型,对比结果如图 7 所示。



(a) 扬程曲线



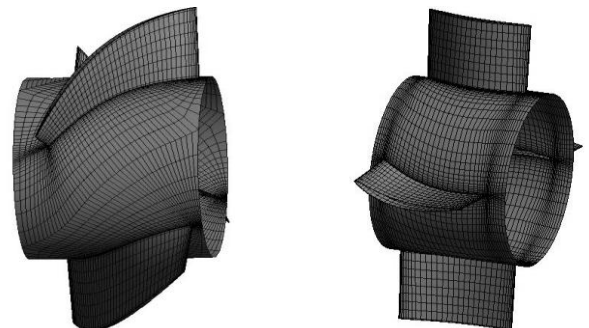
(b) 功率曲线

图 7 台架实验值与计算值对比

从对比结果可以看到:扬程系数和功率系数在 10 个工况点情况下,误差在 5% 的工程误差允许范围内,证明所用的 SST 湍流模型、网格划分方法以及边界条件设置合理可信。

4.2 网格划分与边界条件设置

喷水推进泵的叶轮和导叶采用六面体结构化网格划分,叶轮的扭曲程度较大,以 J 型拓扑结构来构建区域网格,叶顶间隙设置为 0.3 mm,单通道网格结点数量设置为 2.5 万,导叶采用 H 型拓扑结构,单通道网格结点数量设置为 2 万。叶轮和导叶表面网格如图 8 所示。喷口网格选用结构化网格,其最终的网格数量为 7.3 万。进口边界条件选择流量进口,出口边界条件选择一个大气压的压力出口。叶轮和轮毂设置为相对静止壁面边界条件,叶轮导管设置为绝对静止壁面边界条件^[14]。



(a) 叶轮表面网格

(b) 导叶表面网格

图 8 不同部件的网格

4.3 计算结果与分析

对该喷水推进泵进行性能计算,计算结果如图

9 所示。由图可见：在流量为 26 kg/s 时，泵的效率达到最大 80.38%，在较宽的流量范围内，喷水推进泵均保持了较高的效率，表现出了很好的流量适应性。此时泵的推力为 131.5 N。

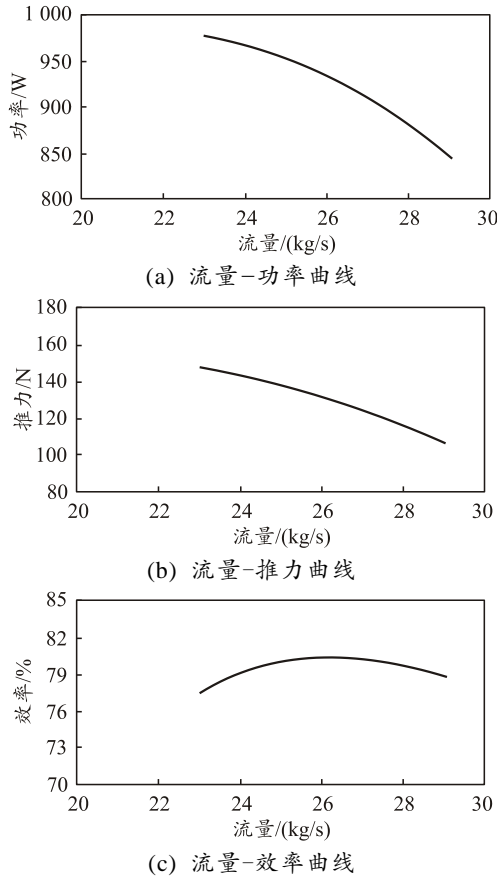


图 9 喷水推进泵性能

设计流量下叶片表面的压强分布如图 10 所示。由图可见：导边和随边处压强变化较为剧烈，这是因为叶片在导边和随边处与水的作用较为剧烈所致，叶片中间区域压强沿弦长方向平滑光滑，未出现激变的区域，这表明叶片的负载分布合理，没有引起压力梯度突变，从而避免了低压区的出现，保证了叶片的抗空化性能。观察叶轮和导叶的压力云图，如图 11 所示，从图中看到表示低压区的白色区域几乎没有，这和图 10 的结论一致。

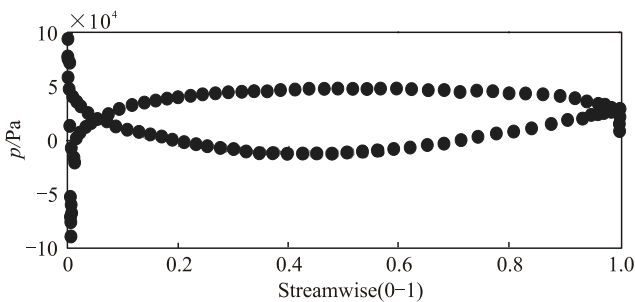


图 10 叶轮叶片压力分布

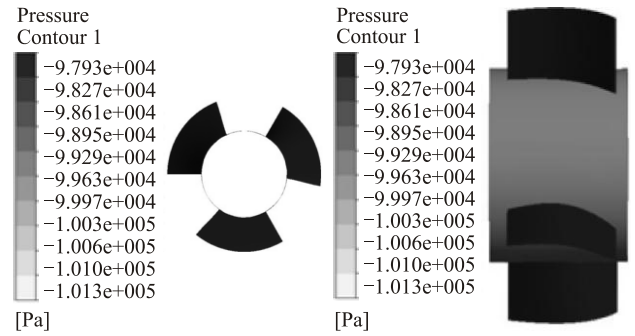


图 11 叶轮和导叶压力云图

如图 12 所示，观察表示喷水推进泵内部流动状况的流线分布情况。从图中可知：叶轮叶片间的流动未见有涡流等紊乱情况，导叶和喷口处 3 维流线光滑平直，表明叶片几何设计满足设计需求。

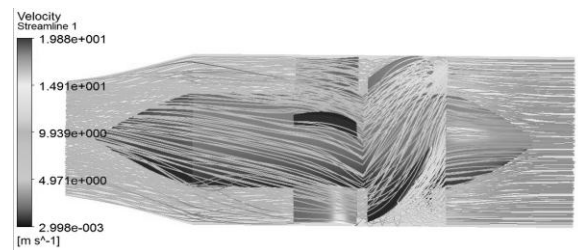


图 12 喷水推进器 3 维流线

5 结束语

笔者以旋转机械的 3 维反问题设计理论和计算流体力学为基础，对某救生机器人的喷水推进泵进行了 3 维几何设计和水动力性能校验。设计过程中，克服了毂径比较大、推进器整体几何尺寸小等问题，通过对流体流动的合理假设，有效地构建关于流动和叶片之间关系的设计程序。叶片的载荷通过参数化控制，很好地提高了叶片在轴向和径向上负载分布的灵活性，避免了叶片局部因载荷过大而产生空化区。

计算结果表明：在特定毂径比等条件约束下，喷水推进泵的最高水力效率达到 80.38%，并且在较宽的流量范围内保持高效流动，叶片表面压力分布曲线平滑光滑，没有局部压力增大的跳跃点，产生的推力满足实际需求。实现了预期性能，验证了设计过程中假设的合理性和参数配置的正确性。

参考文献：

[1] 关醒凡. 现代泵理论与设计[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2011: 9-12.

[2] ZANGENEH M, GOTO A. On the Design Criteria for Suppression of Secondary Flows in Centrifugal and Mixed Flow Impellers[J]. Journal of Turbomachinery, 1998, 10(3): 23-34.

[3] DUCCIO B, ZANGENEH M. On the Coupling of Inverse Design and Optimization Techniques for the Multiobjective, Multipoint Design of Turbomachinery Blades[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2009, 131(2): 1014-1030.

[4] 靳栓宝, 王永生, 刘承江. 高性能紧凑型水泵的三元设计方法[J]. 农业机械学报, 2013, 44(11): 82-86.

[5] ZANGENEH M. A compressible three dimensional blade design method for radial and mixed flow turbomachinery blades[J]. Journal of Numerical Methods in Fluids, 1991, 13(5): 599-624.

[6] BONAIUTI D, ZANGENEH M. Parametric design of a waterjet pump by means of inverse design, CFD calculations and experimental analyses[J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2010, 132(1): 1-15.

[7] 罗兴琦. 混流式水轮机转轮的全三维反问题计算与优

化[D]. 北京: 清华大学, 1996: 23-35.

[8] 彭国义. 轴流式水轮机转轮三维反问题计算与优化[D]. 北京: 清华大学, 1996: 31-42.

[9] ZANGENEH M, GOTO A, TAKEMURA T. Suppression of secondary flows in a mixed-flow pump impeller by application of three-dimensional inverse design method: part1: design and numerical validation[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1996, 118(2): 536-543.

[10] TAN C S, HAWTHORNE W R, MCCUNE J E, et al. Theory of blade design for large deflections: part 2 annular cascades[J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1984, 106(2): 354-365.

[11] 靳栓宝, 王永生, 丁江明. 混流式喷水推进泵三元设计及数值试验[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2012, 33(10): 1223-1227.

(上接第 81 页)

5 结束语

笔者设计一款带有云台升降功能的变电站巡检机器人, 进行了运动学、动力学、稳定性分析, 以及相关实验, 验证了模型的正确性和样机的稳定性。根据变电站巡检的发展需求可知, 该机器人具有广阔的应用前景。

参考文献:

[1] 胡启明, 胡润滋, 周平. 变电站巡检机器人应用技术[J]. 华中电力, 2011, 24(5): 36-39, 43.

[2] 鲁守银, 张营, 李建祥. 移动机器人在高压变电站中的应用[J]. 高电压技术, 2017, 43(1): 276-284.

[3] WANG B, GUO R, LI B. An autonomous robotic system for inspecting substation equipment[J]. Journal of Field

Robotics, 2011, 29(1): 123-137.

[4] 蔡焕青, 邵瑰玮, 胡霖, 等. 变电站巡检机器人应用现状和主要性能指标分析[J]. 电测与仪表, 2017, 54(14): 117-123.

[5] 李祥, 崔昊杨, 曾俊冬, 等. 变电站智能机器人及其研究展望[J]. 上海电力学院学报, 2017, 33(1): 15-19.

[6] 张成巍, 岳湘. 智能巡检机器人研究现状与发展趋势[J]. 电工文摘, 2015(1): 9-12.

[7] 戚烈, 吕新民, 王立星. 全时四轮驱动车动力分配比的分析及仿真[J]. 机械设计与制造, 2011(8): 181-183.

[8] 付贵永, 周利坤. 机器人稳定性研究综述和展望[J]. 机械工程与自动化, 2013(2): 215-217.

[9] 陆震, 颜飙. 轮式移动机器人运动学逆问题及机体稳定性[J]. 北京航空航天大学学报, 1998(3): 339-341.

[10] 赵铁军, 孙健. 轮式移动机器人运动稳定性分析[J]. 机械工程与自动化, 2009(6): 17-19.