DOI: 10.3901/JME.2015.11.064

基于包容球理论的大型桨叶去重平衡的优化研究*

何福本¹ 梁延德¹ 孙捷夫¹ 王治雄² 郭超¹

(1. 大连理工大学机械工程学院 大连 116024;

2. 大连船用推进器有限公司 大连 116021)

摘要: 由于桨叶在成型加工过程中受制造精度、材料缺陷及装配误差等非设计因素的影响,导致组合式船用螺旋桨的实际重心位置与理论设计重心位置不一致,无法满足实际需要和工程应用,因而需要对重心不合格的桨叶进行去重处理以修正重心误差。针对去重最优化要求,提出基于最小包容球理论的重心误差最小包容球概念,建立多桨叶间的重心位置关系,用以描述组合式桨的重心误差范围,还提出相应的去重工艺球算法,来判断桨叶是否需要去重处理。为了验证误差包容球和去重球理论,建立相关桨叶的参数化模型,应用 sobol 算法和 TSearch 算法进行优化,并确定去重区域,可得到满足条件的去重参数。结果表明,将包容球理论应用于组合式船用桨的去重优化,可实现船桨的重心误差修正且满足其动平衡性能要求。

关键词: 组合式船用桨; 最小包容球; 去重工艺球; 参数优化; 动平衡仿真

中图分类号: TH161

The Optimization of Weight Removing and Balancing for Large Blade Based on Minimum Enclosing Ball Theory

HE Fuben¹ LIANG Yande¹ SUN Jiefu¹ WANG Zhixiong² GUO Chao¹

(1. School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024;

2. Dalian Marine Propeller Co., Ltd., Dalian 116021)

Abstract: In the process of blade manufacturing, there exist the influences of manufacturing precision, material defects, assembling errors and other non-design factors, which cause the actual barycenter of modular marine propeller is inconsistent with the theoretical barycenter. Hence, it is necessary to correct the errors of barycenter position of blade by weight removing so as to satisfy the actual requirements and engineering applications. For the optimization of weight removing, it proposes the concept of minimum error containing ball based on the theory of minimum enclosing ball, and establishes the barycenter relationships in multi-blades to describe the error range of the barycenter for modular marine propeller. It also proposes the algorithm of removal processing ball for weight removing in order to judge whether the blade needs to handle or not. To verify the theories of minimum containing ball and removal processing ball about the barycenter, the parametric model of relevant blade is established. After applying sobol algorithm and TSearch algorithm to optimize the model, the weight removing area can be determined and the removing parameters which meet the conditions can be also obtained. The results indicate that to apply the enclosing ball theory to the optimization of weight removing can correct the barycenter errors and satisfy the requirements of dynamic balancing performance.

Key words: modular marine propeller; minimum containing ball; removal processing ball; parameter optimization; dynamic balancing simulation

0 前言

目前,大型船舶普遍采用组合式船用螺旋桨作为主要的船用推进器。因为组合式船用桨是由同种规格的多个桨叶通过焊接或铆接的方式组装而成的螺旋桨整体,相对于普通整体式船用螺旋桨,其具有分体加工、安装方便、易于维修和节约成本等特

点,尤其适用于可调螺距螺旋桨、自重构变形桨叶螺旋桨等特种新型螺旋桨的加工和制造^[1]。通常情况下,桨叶的加工制造过程是首先将铸造好的桨叶毛坯件在普通机床上进行粗加工,然后通过数控机床进行精加工以及后期人工修整^[2],但是在实际制造过程中,存在加工材料不均匀、加工精度不足以及加工装配不到位等非设计的加工问题,使实际桨叶的重心位置与理论设计重心位置不重合,不但无法满足桨叶的设计指标,同时也会影响到组合式船用螺旋桨的动力学性能。

* 国家自然科学基金资助项目(51175064)。20140917 收到初稿,20150228 收到修改稿

从动量变化的观点上, 船用螺旋桨工作原理可以解释为桨叶通过加速水流运动使水的动量增加, 从而产生反作用力来推动船舶前进^[1], 而组合式船用螺旋桨的动平衡性能很大程度上取决于各桨叶的重心位置以及相互之间的位置关系。而重心位置精度误差会造成船用螺旋桨的动不平衡, 在工作中容易产生剧烈的振动和噪声, 导致船体结构疲劳、焊缝损伤, 同时会影响机电设备、精密仪器使用寿命和工作精度^[3-4]。因此, 在桨叶制造完成后, 需要对其重心位置进行精确测量和相应的重心修正处理, 以有效降低螺旋桨辐射噪声和提高敞水效率, 并满足设计指标和工作要求。

实际工程中, 对于桨叶重心位置修正的方法主要是依靠加工量估算和人工测量的方式进行手工反复打磨作业。虽然该方法操作简单、实施灵活, 但是重心修正度和表面修整度很大程度上取决于工人的技术熟练程度, 而且工作量大, 加工质量难以保证。另外, 受到人为因素的影响, 去重效果无法保证最优, 而如果估算错误或者加工参数的选择不当, 则会造成桨叶的直接损坏甚至报废, 所以传统去重方式不能够满足高效优质生产的需要^[5]。为了改善桨叶的重心加工质量, 相关学者提出一些改进方法和措施, 如于颖等^[6]根据螺旋桨桨叶曲面加工精度和公差的要求, 应用计算机辅助工艺方法, 求取加工过程中最小打磨量, 其结果比人工计算更为合理且通用性强, 也降低了工艺人员熟练程度和技术水平, 但是其算法的计算效率较低, 且不能准确得到桨叶的最优去重位置; 此外, 李芳^[7]也设计了一套桨叶重心测量与调整系统, 通过图像处理方法将桨叶理想重心位置与实际重心位置进行比较得出重心偏差值, 然后移动桨叶到待加工位置进行去重打磨加工, 直至实际重心与期望重心位置重合, 该方法可快速准确找到桨叶重心位置并实现自动测量, 但是不能确定合适的去重加工参数, 需要多次检测安装才能完成整个加工过程, 因此可靠性不高, 去重效率较低。

为了实现对重心误差快速准确的评价, 本文引入数学上最小包容球理论作为基本方法, 由于最小包容球理论普遍适用于大规模数据的处理而得到广泛应用如支持向量机^[8]、机器智能学习^[9]和任意维度数据的聚类问题^[10]等领域。本文在大型桨叶的重心大量测量数据的基础上, 应用最小包容球理论, 提出重心误差的最小包容球和去重工艺球的概念, 通过比较二者空间关系, 判定是否需要对桨叶重心误差进行修正, 并结合桨叶的参数化模型, 应用 sobol 算法和 TSearch 算法确定最优去重参数, 最后

对多桨叶的组合式船用桨进行动平衡仿真试验, 以验证该去重优化方法的可行性和实用性。

1 重心误差最小包容球

1.1 最小包容球概念

定义 n 维空间 $\mathbf{R}^n$ 是一个以 c 点为中心, 以 r ($r>0$) 为半径的球 B_{cr} , 可以表示为

$$B_{cr} = \{x \in \mathbf{R}^n : \|x - c\| \leq r\} \quad (1)$$

式中, x 表示空间 $\mathbf{R}^n$ 中任意一点, 则 $\|x - c\|$ 表示空间任意点距中心的 Euclidean 范数即距离范数。

在 $\mathbf{R}^n$ 空间中, 设定其中 m 个点的集合为 $S = \{P_1, P_2, \dots, P_m\}$, 那么最小包容球(Minimum enclosing ball, MEB)定义为能够包含 S 中所有 m 个点且具有最小半径的空间球^[11]。重心误差球是指对于一个工件多次测量所得不同重心位置的包容球域, 或者对于组合工件中不同零件的重心测量位置的包容球域。在组合式船用螺旋桨中, 每个桨叶的重心位置可以当作船桨空间中的数据点, 参考 MEB 的概念可知, 有且仅存在一个球域, 半径为最小并能够包含空间所有的重心数据点(包括球内及球表面), 则该空间球域可定义为重心的最小包容球。

如果设组合式船用螺旋桨由 n 个单桨叶片组成, 定义 n 个桨叶的重心坐标分别为 $C_1(x_1, y_1, z_1)$, $C_2(x_2, y_2, z_2)$, $\dots$, $C_n(x_n, y_n, z_n)$, 根据最小包容球的定义, 重心误差最小包容球则表示为各个桨叶重心坐标的集合 $C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$ 。如果令 $C_i(x_i, y_i, z_i)$ 表示第 i 个桨叶的重心坐标值, 运用最小二乘法对重心包容球进行测算^[12], 可以得到最小包容球初始球心坐标 $C_0(x_0, y_0, z_0)$ 的表达式

$$\begin{cases} x_0 = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n x_i \\ y_0 = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n y_i \\ z_0 = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n z_i \end{cases} \quad (2)$$

1.2 确定最小包容球

在提出重心误差最小包容球概念后, 如何计算螺旋桨的实际最小包容球仍需要详细说明, 为此给出以下具体算法步骤来描述确定最小包容球的过程。

(1) 用 d_i 表示第 i 个桨叶重心位置到包容球初始球心 C_0 的距离, 根据空间坐标关系可知

$$d_i = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2} \quad (3)$$

令其中 d_i 的最大值 $\max\{d_i\} = r_0$, 那么以 C_0 为球

心和 r_0 为半径所做的空间球可包容各个桨叶的重心坐标点 C_i , 将其中距离 C_0 为 r_0 即 $\max\{d_i\}$ 的重心坐标点表示为 C_f , 此时 C_f 一定位于球面上。

(2) 让球心 C_0 沿矢量 C_0C_f 动, 每次移动的距离步长为 ε , 移动后球心位置 $C_0(\varepsilon)$ 和球半径 $r_f(\varepsilon)$ 为

$$\begin{cases} C_0(\varepsilon) = C_0 + \varepsilon \\ r_f(\varepsilon) = r_0 - \varepsilon \end{cases} \quad (4)$$

另外, 球心每移动一步, 需要应用式(5)进行一次判定

$$d_{ie} = \|C_0(\varepsilon)C_i\| \leq r_f(\varepsilon) \quad i=1, 2, \dots, n \quad (5)$$

式中 d_{ie} ——各个桨叶的重心;

C_i ——到移动后球心 $C_0(\varepsilon)$ 的距离。

根据式(5), 当 d_{ie} 满足式(5)所示条件时, 可重复进行步骤; 当 $d_{ie} > r_f(\varepsilon)$ 时, 则适当减小移动步长 ε , 重新进行运算和判定; 当且仅当有第二个重心点同时位于包容球表面时即 $d_{ie} = r_f(\varepsilon)$, 停止运算与判定。

定义此时位于包容球面上的另一重心坐标为 C_n , 那么如图 1 所示, $C_0(\varepsilon)$ 、 C_f 、 C_n 三点构成以 $C_0(\varepsilon)$ 为顶点的等腰三角形, 由等腰三角形性质可知, $C_0(\varepsilon)$ 位于底边 C_fC_n 的垂直平分线上。

(3) 取底边 C_fC_n 中点坐标为 $M(x_m, y_m, z_m)$, 让球心 $C_0(\varepsilon)$ 沿着矢量 $C_0(\varepsilon)M$ 移动, 每次移动的距离步长为 δ , 移动后新的球心位置 $C_0(\varepsilon\delta)$ 和半径 $r_f(\varepsilon\delta)$ 为

$$\begin{cases} C_0(\varepsilon\delta) = C_0 + \delta \\ r_f(\varepsilon\delta) = r_f(\varepsilon) - \delta \end{cases} \quad (6)$$

与步骤(2)相似, 球心每移动一次, 需要应用式(7)进行一次判定

$$d_{ie\delta} = \|C_0(\varepsilon\delta)C_i\| \leq r_f(\varepsilon\delta) \quad i=1, 2, \dots, n \quad (7)$$

当 $d_{ie\delta}$ 满足式(7)所示条件时, 可重复进行步骤(3); 当存在 $d_{ie\delta} > r_f(\varepsilon\delta)$ 时, 应适当减小步长 δ , 重新进行运算和判定; 当且仅当有第三个点 C_t 使得 $d_{ie\delta} = r_f(\varepsilon\delta)$, 即存在三个重心点同时位于包容球表面时, 停止运算与判定。如图 1 所示, 此时球心位置 $C_0(\varepsilon\delta)$ 是三角形 $\triangle C_fC_nC_t$ 的外心, 即为所求重心误差最小包容球的球心, 其最小包容球的半径为 $r_f(\varepsilon\delta)$ 。

为了验证该算法的有效性, 本文引入一组试验模型的桨叶重心数据来求取其重心误差最小包容球, 如表 1 所示, 根据上述算法, 经计算可以得到近似球心位置为 $C_0(-47.154 \text{ mm}, 50.31 \text{ mm}, 685.27 \text{ mm})$, 半径 $R=1.206 \text{ mm}$ 。

2 桨叶去重工艺球

2.1 去重工艺球概念

由上文可知, 组合式船用螺旋桨的重心精度,

是由各个桨叶的重心位置决定的, 若桨叶的实际重心位置与理论重心位置相符, 那么螺旋桨的状态是理想的。但是在实际加工过程中, 桨叶的重心位置是存在偏差的, 因此螺旋桨的实际重心存在于以空间某点为球心的最小包容球内。为了调整和优化螺旋桨的重心位置, 需要对重心不合格的桨叶进行去重处理, 然而如何判定去重条件, 合理有效地进行去重操作仍需要进一步研究, 因此本文提出桨叶去重工艺球的概念。去重工艺球是指在重心误差最小包容球基础上, 在去重加工中能够满足设计公差要求且与各个桨叶重心相关联的空间球域。

图 1 最小包容球确定过程示意图

表 1 4 桨叶重心坐标值

桨叶编号	x 坐标/mm	y 坐标/mm	z 坐标/mm
C ₁	-46.91	51.01	685.40
C ₂	-46.70	50.83	685.31
C ₃	-46.82	50.39	685.93
C ₄	-46.75	49.88	685.93

因此判定桨叶是否需要去重的准则可以描述为: 当去重工艺球半径小于最小包容球半径时, 需要对螺旋桨桨叶进行去重修正; 当去重工艺球半径大于或等于最小包容球半径时, 不需要对桨叶进行去重处理。如果综合考虑加工效率、成本以及去重参数等因素, 则最佳去重工艺球应满足以下条件。

(1) 重心矩最小: 考虑到桨叶材料强度、水动力性能等因素, 桨叶的去重修正位置选择为靠近叶梢的上半部分, 所以去重工艺球应包含重心位置最低的桨叶。

(2) 去重桨叶数量最少: 由于每次对桨叶进行去重都需要将桨叶安装在加工平台上进行重新定位和调整, 会产生额外的安装误差, 浪费时间和大量的人力, 操作繁琐, 为此要减少需要去重桨叶的数量。

(3) 去重质量最省: 如果单个桨叶的去重质量过大, 会对桨叶表面形状产生较大的改变, 不利于桨叶的水动力性能, 所以尽可能使去重质量最省。

2.2 最佳去重工艺球的确定

最佳去重工艺球的半径为设计半径即满足公差要求的半径, 因此确定最佳去重工艺球的过程主要是确定其球心位置。根据桨叶去重判定准则和最佳去重工艺球条件, 其具体操作步骤如下。

(1) 确定基准桨叶: 为了满足重心矩最小准则, 首先以重心位置最低的桨叶作为去重基准桨叶, 即不对此桨叶进行去重处理, 将其桨叶重心位置标记为 $C_b(x_b, y_b, z_b)$ 。因此, 最佳去重工艺球一定会包含该桨叶重心点。

(2) 确定去重工艺球球心: 以 $C_b(x_b, y_b, z_b)$ 为球心, 以半径 r 做空间球 A , 则球 A 的描述方程为

$$(x - x_b)^2 + (y - y_b)^2 + (z - z_b)^2 = r^2 \quad (8)$$

如图 2 所示, 过球心 C_b 沿着 z 轴正方向与球 A 外表面的交点作为去重工艺球的初始球心, 记为 $C_q(x_q, y_q, z_q)$ 。

图2 去重工艺球球心示意图

可计算 C_q 到最小包容球内其他点的距离为

$$d_q = \sqrt{(x_i - x_q)^2 + (y_i - y_q)^2 + (z_i - z_q)^2} \quad (9)$$

那么可以判定, 如果 $d_q > r$, 则以该点 C_q 为重心的桨叶需要进行去重修正, 若 $d_q \leq r$, 则球心 C_q 在去重工艺球内, 此桨叶不需要去重。

(3) 确定最佳去重工艺球: 考虑到工程实际情况, 去重的桨叶越少, 越节省资源, 因此首先以需要去重桨叶数量最少的球为最佳去重工艺球。若存在多个去重工艺球表明需要去重的桨叶的数量相同, 则再以需要去重质量之和最小的球为最佳去重工艺球。

为了方便计算, 可将去重工艺球改写为关于设计变量的参数方程的形式

$$\begin{cases} x_q = r \cos \alpha \cos \beta \\ y_q = r \cos \alpha \sin \beta \\ z_q = r \sin \alpha \end{cases} \quad (10)$$

式中, α 与 β 为设计变量, $\alpha \in [-\pi/2, \pi/2]$, $\beta \in [0, 2\pi]$, 定义其初始值为 $\alpha = \pi/2$ 和 $\beta = 0$, 设定 $-\pi/20$ 为 α 的增量步长, $\pi/20$ 为 β 的增量步长(其步长越小, 计算结果越准确), 令去重工艺球半径 $r = 1$ mm 为设计半径。根据确定最佳去重工艺球算法, 参考表 1 的数据, 那么可以求得去重工艺球的球心为 $C_q(-46.63$ mm, 50.56 mm, 685.1 mm)。

计算结果的最小包容球和去重工艺球如图 3 所示, C_0 为最小包容球球心, C_q 为去重工艺球球心, 4 个桨叶的重心坐标分别为 C_1, C_2, C_3 和 C_4 。由于去重工艺球半径小于最小包容球半径, 且 2 号桨叶重心不在去重工艺球内, 因此需要对螺旋桨的 2 号桨叶进行去重操作处理。

图3 最小包容球和去重工艺球

3 桨叶去重参数优化

通过重心误差最小包容球和去重工艺球理论可以快速准确地判定组合式船用螺旋桨是否需要去重和去重桨叶, 但是对于具体的去重区域形状和去重质量仍需要进一步优化处理以利于实际的去重加工。由于 Friendship-Framework 软件是船舶领域的专业性全参数化建模软件, 具有集参数化建模、动态仿真、优化算法于一体的优点^[13], 因此本文应用该软件对桨叶进行参数化建模和去重仿真。

3.1 桨叶参数化建模

Friendship-Framework 软件的建模思想是基于 Feature 建模和仿真驱动设计来建立形状特征曲线和形状特征参数, 利用内部的曲线生成器和曲面生成器快速生成设计曲面, 并创建形状特征曲线和特征参数, 从而实现参数化建模, 其设计流程图如图 4 所示。

本文根据实际参数对桨叶进行参数化建模, 桨叶模型主要形状参数如表 2 所示, 桨叶三维模型如图 5 所示。

图 4 桨叶参数化建模流程图

表 2 桨叶模型主要形状参数

叶片高度/mm	盘面比	螺距比	最大厚度/mm	最大宽度/mm
1 140	0.484	0.669	152.3	852.8

图 5 桨叶三维模型

3.2 确定去重设计变量

建立桨叶的参数化模型后, 在 Friendship-Framework 中利用 surface delta shift 命令对桨叶进行去重仿真分析, 其工作原理是对桨叶上的一个平面位置和形状进行改变(即对桨叶的指定区域进行去重加工), 从而影响单个桨叶叶片的重心变化。

定义桨叶的去重区域为一个长为 a 、宽为 b 的矩形, 位置如图 5 所示。引入去重区域形状控制参数, 则 f_y 和 f_z 分别表示矩形的长和宽在 y 轴和 z 轴的缩放因子。设矩形在 y 轴正方向的移动距离为 dy , 在 z 轴正方向的移动距离为 dz , 那么定义桨叶的去重深度为该矩形中心在 x 轴负方向的移动距离 dx 。那么可知 f_x, f_y, dx, dy, dz 均为去重设计变量, 参考最佳去重工艺球的中重心矩最小和去重质量最省准则, 可得去重设计变量的取值如表 3 所示。

表 3 去重设计变量取值

设计变量	初值	最小值	最大值
f_y/mm	1.0	0.1	2.0
f_z/mm	1.0	0.1	2.0
d_x/mm	-10	-40	0
d_y/mm	0	-300	300
d_z/mm	500	50	1 100

3.3 优化设计变量

由于设计变量的取值范围太广, 因此需要精简

不必要的取值, 减少计算量, 提高去重参数的设计效率。本文采用 Friendship-Framework 软件中 sobol 算法来优化设计变量, 它是一种基于 sobol 序列具有良好覆盖率的全局性搜索算法^[14]。在搜索运算过程中, 每个设计变量将由确定性计算生成伪随机数序列, 以一种标准形式在整个变量域空间内传播, 从而得到均匀的变量取值方案。因而通过使用 sobol 算法对设计变量的目标函数进行全局搜索, 可以将设计变量取值范围精确化。

在应用搜索算法时, 需要做以下设置。

(1) 设允许误差为 $0.1 \times 10^{-3} \text{ mm}$, 最大迭代次数为 200。

(2) 输入如表 2 所示的设计变量取值。

(3) 将最小去重质量为目标参数, 观察重心坐标 (x, y, z) 和去重质量 ΔW 。

(4) 设置约束条件, 即将需要去重桨叶的重心点移到去重工艺球内, 可表示为

$$\sqrt{(x + 46.63)^2 + (y - 50.56)^2 + (z - 685.10)^2} \leq 1$$

经过 sobol 全局搜索算法后, 观察并分析搜索的结果, 优化后设计变量取值如表 4 所示。

表 4 优化后设计变量取值

设计变量	初值	最小值	最大值
f_x/mm	1.0	0.8	1.2
f_y/mm	1.0	0.7	1.3
dx/mm	-10	-20	-5
dy/mm	0	-30	80
dz/mm	500	400	800

3.4 优化去重参数

在对设计变量取值进行优化后, 仍需要更深层次的优化算法确定各个设计变量的准确取值, 以得到最终的优化去重参数。通过应用 Friendship-Framework 软件中 TSearch 算法, 以 sobol 算法的搜索结果作为初值进行深度的局部优化。由于该算法是一种小范围、满足不等式约束的单目标优化算法, 常与 sobol 算法配合使用, 由此可缩小设计变量在整个设计空间的取值范围。

在应用优化算法时, 需要做以下设置。

(1) 设允许误差为 $0.1 \times 10^{-4} \text{ mm}$, 最大迭代次数为 200。

(2) 输入如表 3 所示的设计变量取值。

(3) 目标函数和约束条件等与应用 sobol 算法的运算条件相同。

经过 TSearch 优化算法可得到满足约束条件的 4 组去重参数如表 5 所示。其中, 第 1 组去重深度最浅, 第 2 组的去重区域面积最大, 第 3 组的去重

量最小, 这 4 组去重参数均符合去重指标要求。

表 5 4 组优化去重参数

去重参数	第 1 组	第 2 组	第 3 组	第 4 组
f_y/mm	1.03	1.02	1.05	1.00
f_z/mm	0.83	0.99	1.03	0.93
dx/mm	-8.60	-8.30	-8.20	-8.50
dy/mm	27.30	24.70	29.10	23.60
dz/mm	579.30	586.20	581.40	580.50
x/mm	-46.73	-46.94	-47.32	-47.51
y/mm	50.01	50.48	50.62	51.06
z/mm	685.72	685.12	685.47	685.13
$\Delta W/\text{g}$	109.66	105.30	101.79	108.32

4 动平衡仿真试验分析

不平衡问题是大型旋转机构组合中常见的工频故障之一^[15], 尤其对于大型组合式船用螺旋桨, 若不满足动平衡要求, 螺旋桨在工作时就会产生剧烈的振动和噪声, 会对船舶的正常行驶造成影响。因此, 针对表 4 中所示的 4 组优化去重参数, 分别对去重后的螺旋桨进行动平衡仿真分析, 以评定在不同去重参数下的动平衡性能, 从而确定桨叶的最优化去重参数。

在动力学分析软件 ADAMS 的仿真环境中, 对螺旋桨进行参数化建模, 参考表 5 的各项参数对桨叶的重心位置作相应调整, 螺旋桨的动力学仿真模型如图 6 所示。为了模拟实际工作情况, 仿真中采用额定转速为 200 r/min, 在软件中设置动力学的仿真时间为 4 s, 步长为 800, 分别针对 4 组去重参数进行螺旋桨的动平衡仿真试验, 通过测量可得去重前的螺旋桨和去重后各组螺旋桨主轴的径向振幅曲线变化情况, 如图 7 所示。表 6 为经计算后各组螺旋桨主轴径向振动幅值和相对于去重前桨轴振幅减小的百分比。由图 7 和表 6 可知, 经过去重处理后, 螺旋桨主轴在运动过程中出现的径向跳动状况都得到不同程度的改善, 尤其是第 4 组去重螺旋桨主轴的径向振幅减小程度最为明显, 振幅由 3.8 mm 减少到 0.9 mm, 减小百分比为 76.32%, 且去重质量和其他 3 组去重参数相差不多。综合考虑以上因素, 最终选取第 4 组去重参数为最优去重参数。

表 6 螺旋桨主轴径向振幅对比

组号	径向振幅/mm	振幅减小百分比(%)
1	2.40	36.84
2	1.75	53.95
3	1.12	70.53
4	0.90	76.32

图 6 螺旋桨动力学仿真模型

图 7 螺旋桨主轴径向振动曲线

5 结论

针对组合式船用桨加工后实际桨叶重心位置不满足使用要求的问题, 本文创新地引用最小包容球的理论, 提出重心误差的最小包容球和去重工艺球的概念来解决以上问题, 包括以下几个方面。

(1) 通过比较组合桨的最小包容球与去重工艺球之间的空间关系, 判定是否需要去重以及具体需要去重修正的桨叶。

(2) 应用 Friendship-Framework 软件对去重桨叶进行参数化建模和去重仿真, 定义去重设计变量和目标函数, 通过使用 sobol 算法进行全局搜索和 TSearch 算法进行局部优化, 得到 4 组符合条件的去重参数。

(3) 运用动力学仿真软件 ADAMS 中对螺旋桨进行动平衡仿真, 以螺旋桨工作时主轴径向振幅大小为依据, 选出最优去重参数。

具有多桨叶的组合式船用桨的去重问题有其独特复杂性且难于处理, 本文所提出的这套新颖的重心分析方法, 将各个桨叶重心位置和去重工艺公差结合起来考虑, 可以快速准确地计算出去重工艺参数。动平衡仿真试验结果也表明了应用优化去重参数后, 螺旋桨主轴径向振动情况较去重前有了较大地改善, 有效地解决了重心问题对螺旋桨工作的影响, 消除了船舶行驶过程中的安全隐患。同时, 本文所提出的去重优化方法也为类似的多桨叶组合

式桨的重心误差修正问题提供可靠的参考依据并起到相应的指导性作用。

参 考 文 献

- [1] 吴光林, 严谨. 船用螺旋桨的应用与发展趋势[J]. 广东造船, 2008(4): 49-51.
WU Guanglin, YAN Jin. Application and trend in development of marine propeller[J]. Guangdong Shipbuilding, 2008(4): 49-51.
- [2] 曹利新, 杨延峰, 刘健. 圆柱形刀具侧铣船用螺旋桨原理与方法[J]. 大连理工大学学报, 2006(1): 45-49.
CAO Lixin, YANG Yanfeng, LIU Jian. Principle and method of frank milling a marine propeller with cylindrical cutter[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2006(1): 45-49.
- [3] 韩向东. 机械工程力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
HAN Xiangdong. Mechanical engineering mechanics[M]. Beijing: China Machine Press, 2002.
- [4] 张平, 杨辉. 常规螺旋桨设计要点分析[J]. 江苏船舶, 2006(6): 1-3.
ZHANG Ping, YANG Hui. Analysis of design elements for conventional propeller[J]. Jiangsu Ship, 2006(6): 1-3.
- [5] 曾艳, 李斌, 彭芳瑜, 等. 面向数控加工的大型螺旋桨桨叶的余量估算问题研究[J]. 中国机械工程, 2006, 17(6): 566-569.
ZENG Yan, LI Bin, PENG Fangyu, et al. Research on the estimation of the propeller allowance in NC machining[J]. China Mechanical Engineering, 2006, 17(6): 566-569.
- [6] 于颖, 於孝春, 关琦. 螺旋桨桨叶叶面加工过程中加工量的计算[J]. 机械设计与制造, 2003(5): 100-101.
YU Ying, YU Xiaochun, GUAN Qi. Calculation of processing quantity for the surface of blades of the propeller[J]. Machinery Design and Manufacture, 2003(5): 100-101.
- [7] 李芳. 桨叶重心检测系统设计[C]//中国智能交通年会, 2009年5月, 北京: 中国智能交通协会, 2009: 90-92.
LI Fang. Design of measurement system of the center of gravity[C]// Annual Meeting of Chinese Intelligent Transportation, May, 2009, Beijing: Intelligent Transportation Society of China, 2009: 90-92.
- [8] TSANG I W, KWOK J Y, ZURADA J M. Generalized core vector machines[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2006(5): 1126-1140.
- [9] 顾鑫, 王士同. 基于最小包含球的领域迁移学习新方法[J]. 计算机科学, 2013(7): 187-191.
GU Xin, WANG Shitong. Novel domain transfer learning approach using minimum enclosing ball[J]. Computer Science, 2013(7): 187-191.
- [10] THOMAS L, LINUS K. Fast and robust approximation of smallest enclosing balls in arbitrary dimensions[J]. Computer Graphics Forum, 2013(32): 93-101.
- [11] 丛伟杰, 刘红卫. 求解 MEB 问题的一种 SMO-型方法[J]. 西北大学学报, 2010(6): 965-969.
ChONG Weijing, LIU Hongwei. An SMO-type method for solving the MEB problem[J]. Journal of Northwest University, 2010(6): 965-969.
- [12] 施吉林, 刘淑珍, 陈桂芝. 计算机数值方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2005.
SHI Jilin, LIU Shuzhen, CHEN Guizhi. Computer Numerical methods[M]. Beijing: Higher Education Press, 2005.
- [13] ABTC J, HARRIES L. Friendship framework integrating ship design modeling simulation and optimization[J]. The Naval Architect, 2007(1): 33-35.
- [14] 聂祚兴, 于德介, 李蓉, 等. 基于 sobol 法的车身噪声传递函数全局灵敏度分析[J]. 中国机械工程, 2012, 23(14): 1753-1757.
NIE Zuoxing, YU Dejie, LI Rong, et al. Global sensitivity analysis of autobodies' noise transfer functions based on sobol method[J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(14): 1753-1757.
- [15] 廖与禾, 郎根峰, 屈梁生. 多故障转子进动趋势分析与平衡策略[J]. 机械工程学报, 2009, 45(8): 45-51.
LIAO Yuhe, LANG Genfeng, QU Liangsheng. Precession trend analysis and balancing strategy for rotors with multi-fault[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(8): 45-51.

作者简介: 何福本, 男, 1984 年出生, 博士研究生。主要研究方向为精密制造及特种加工、机器人动力学等。

E-mail: hefuben@mail.dlut.edu.cn

梁延德(通信作者), 男, 1953 年出生, 教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为机械精度检测、精密制造及特种加工等。

E-mail: lydjx@dlut.edu.cn