

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.05.010

基于产学研合作的螺旋桨数控抛光机设计及工作参数优化

刘世豪,林茂,马庆芬

(海南大学 机电工程学院,海南 海口 570228)

摘 要:针对目前数控抛光机在船舶行业中结构庞大、不够灵活、零件生产成本高的问题,对螺旋桨数控抛光机的结构设计及工作参数优化展开研究。通过产学研合作,结合高校的科研实力与企业的实际需求,对螺旋桨数控抛光机进行结构设计。针对数控抛光机的工作参数进行优化,以提高其抛光精度和生产效率。该研究旨在为螺旋桨数控抛光机的设计 and 应用提供理论支持。

关键词:螺旋桨;数控抛光机;参数优化;遗传算法

中图分类号:TH122 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2025)05-0050-07

Design and Working Parameters Optimization of Propeller CNC Polishing Machine Based on Industry-Academia Cooperation

LIU Shihao, LIN Mao, MA Qingfen

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Hainan University, Haikou 570228, China)

Abstract: This paper studies the structural design and working parameters optimization of propeller CNC polishing machine to approach the problems of colossal structure, inflexibility and high production costs of parts in current CNC polishing machines in shipbuilding industry. Through industry-academia cooperation, the structural design of the propeller CNC polishing machine is carried out by combining the scientific research strength of universities with the actual needs of enterprises. The working parameters of the CNC polishing machine are optimized to improve its polishing accuracy and production efficiency. The study is aimed at providing theoretical support for the design and application of the propeller CNC polishing machine.

Keywords: propeller; CNC polishing machine; parameter optimization; genetic algorithm

0 引言

螺旋桨作为航空和船舶动力系统的关键部件,其表面质量直接影响到整体的性能和效率。随着制造技术的不断进步,传统的手工抛光方法已逐渐无法满足高精度和高效率的要求,螺旋桨数控加工技术得到了应用^[1]。数控抛光机因其自动化程度高、加工精度稳定等优点,逐渐成为现代制造业中不可或缺的重要设备^[2]。在产学研合作的背景下,结合学术研究与实际生产需求,设计螺旋桨数控抛光机具有重要意义^[3]。一方面,企业能够通过与高校和科研机构的合作,获取前沿的技术支持和创新思路,提升自身产品的市场竞争力;另一方面,高校和科研机构也能通过深入企业实际,了解更多的应用需求,从而推动科研成果的转化和应用。

近年来,随着研究者们不断地对工业机械臂技术的研究,使技术得到了快速地发展,并且在向

着标准化和通用化不断前进^[4]。目前,机械臂技术开始慢慢地成为一门独立学科,据此促进了工业机械臂产业的稳步前进^[5]。在国外,NAGATA等^[6]针对关节型工业机器人,提出了一种基于CAD/CAM的位置/力控制器,该控制器能同时实现稳定的力控制和精确的曲面拾取进给控制。DIESTE等^[7]提出并定义了一种精加工方法,适用于由球形机器人执行的自动过程,通过控制路径、刀具、磨料和定义数学模型,最终零件和产品的质量得到优化,同时也降低了其工艺时间和成本。国内的一些高校也针对机器人磨削加工进行了一系列研究。华中科技大学研制的机器人研抛机构,将砂带磨机构夹持于机器人末端,其主要用于抛光汽车模具^[8]。北京航空航天大学对机器人磨削抛光系统的接触刚度做了相关的理论研究,对整个机器人磨削系统进行接触刚度分析,补偿变形误差,以提高加工精度^[9]。上述研究为解决利用机械臂抛光螺旋桨叶提供了多种观点和方法。

基金项目:海南省高等学校教育教学改革研究资助项目(Hnjg2023ZD-3);海南大学教育教学改革研究项目(hdjy2304)

第一作者简介:刘世豪(1981—),男,湖北天门人,教授,博士,研究方向为机械优化设计,liushihao1102@126.com。

在海南省大力发展船海工程装备的背景下,海南大学机械优化设计科研团队深入省内某螺旋桨修造企业开展合作,主要针对螺旋桨的数控抛光机进行结构设计及工作参数优化。通过对执行机构、手臂摆动机构和底座转动机构进行系统的设计,确保抛光机能够稳定、高效地运行,并且能够适应不同规格和形状的螺旋桨。通过对机械臂关节转速的优化,进一步提升抛光质量和效率,满足高性能螺旋桨的制造要求,实现产学研合作的双赢局面。

1 螺旋桨简介

螺旋桨由桨叶和桨毂两部分构成^[10],重载轮船一般采用五叶或六叶螺旋桨,普通的运载货轮常采用三叶或四叶螺旋桨,如图1所示。桨叶与桨毂连接处为叶根,远离桨毂的一端为叶梢,转动时转向上前面的叶边为导边,后面的叶边为随边,从船背面向前方看的一面称为叶面,与其相对的一面称为叶背^[11]。

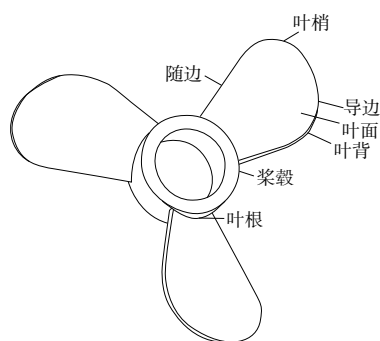


图1 螺旋桨结构

制造螺旋桨的材料主要有铸铁、铜合金、铸钢等^[12]。铸钢材料的螺旋桨加工成本高且容易被腐蚀;铸铁材料的螺旋桨使用寿命短、强度低;铜合金(锰青铜、铝青铜)螺旋桨强度高、刚性好,具有良好的抗冲击性能,不易腐蚀,加工容易,成本低^[13]。因此目前螺旋桨中应用较为广泛的材料为铜合金。

本文选用砂轮对螺旋桨进行磨削抛光,如图2所示。砂轮磨削应用十分广泛,普及于各行各业,对各种不同类型的材料都能进行加工,尤其是对复杂型面的加工^[14]。

砂轮加工螺旋桨的走刀方式有两种^[15]:横向行距法、纵向行距法,如图3所示。横向行距法的优点在于,抛光过程中接触面为线,因此加工精度高,但是加工效率低。纵向行距法的优点在于,在

加工过程中,砂轮与桨叶表面的接触面积较大,叶片的压强小,材料去除率高,加工效率高,但是加工设备的动载荷大,加工质量相对较差。本文选用纵向行距法对螺旋桨进行抛光。

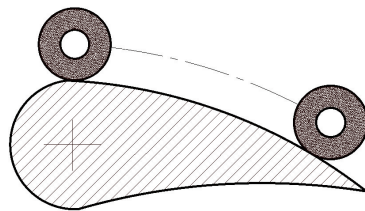


图2 螺旋桨磨削抛光示意图

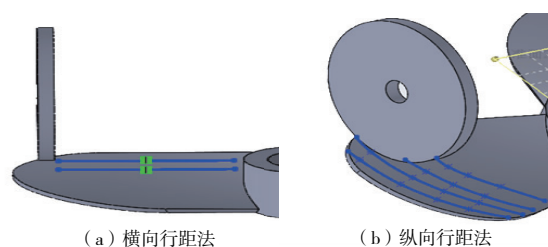
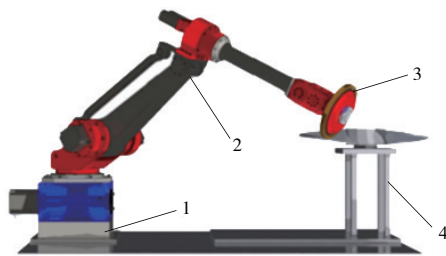


图3 螺旋桨叶两种不同的走刀路径

2 螺旋桨数控抛光机的结构设计及有限元分析

由于整体型螺旋桨桨叶的曲率复杂,要想保证表面精度和质量,抛光时需要转速和受力进行灵活的控制,故选用关节型机械臂作为抛光机的执行机构。该型螺旋桨数控抛光机主要由底座、机械臂、抛光头、工作台、数控系统等组成^[16],如图4所示。



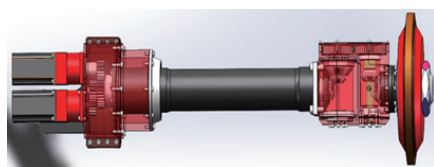
1—底座;2—机械臂;3—抛光头;4—工作台。

图4 多自由度螺旋桨数控抛光机

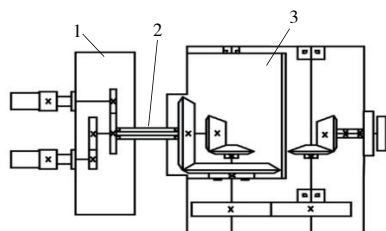
2.1 执行机构设计

要灵活完成抛光作业不仅要使砂轮获得抛光螺旋桨所需稳定的转速和力矩,还需要稳定的切削余量^[17]。机械臂因要求体积小、质量轻、精度高而采用齿轮传动,齿轮传动的效率最高,还具有

结构紧凑的特点,具体设计如图 5 所示。

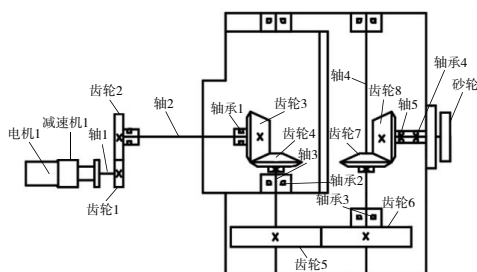


(a) 肘关节-小手臂-手腕结构图

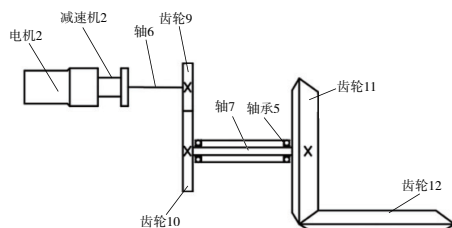


1—肘部电机齿轮箱; 2—小手臂; 3—手腕齿轮箱。

(b) 肘关节-小手臂-手腕整机简图



(c) 轮系1



(d) 轮系2

图 5 肘关节-小手臂-手腕内部结构简图

由图 5 可知,执行机构由肘关节、小手臂和手腕这 3 部分组成,轮系 1 和轮系 2 由肘关节-小手臂-手腕整机拆分得到。轮系 1 主要负责提供抛光螺旋桨所需稳定的转速和力矩。工作原理为:电机 1 驱动减速机 1 进而带动轴 1 使直齿轮 1 和直齿轮 2 进行工作,直齿轮 2 带动轴 2 进而使手腕齿轮箱中的三级齿轮进行工作,三级齿轮输出端由轴 5 带动砂轮从而使砂轮获得相应的转速和力矩。

轮系 2 主要负责使手腕齿轮箱 3 进行灵活的摆动从而获得稳定的切削余量。工作原理为:电机 2 驱动减速机 2 进而带动直齿轮 9 和直齿轮 10 进行工作,直齿轮 10 带动轴 7,轴 7 带动锥齿轮 11 和锥齿轮 12 进行工作,锥齿轮 12 采用键连接

的方式带动手腕齿轮箱 3 进行摆动。

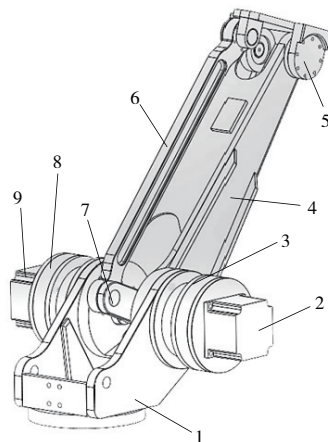
为保证齿轮磨损较为均匀,设计的齿轮齿数应该互质,详细如表 1 所示。

表 1 执行机构零件设计明细表

零件名称	材料	齿数	传动比 u
齿轮 1、齿轮 2	40Cr	16、17	1
齿轮 3、齿轮 4	40Cr	20、21	1
齿轮 5、齿轮 6	40Cr	45、46	1
齿轮 7、齿轮 8	40Cr	25、26	1
齿轮 9、齿轮 10	40Cr	16、33	2
齿轮 11、齿轮 12	40Cr	40、41	1
轴	20Cr	—	—
键	45	—	—
肘部电机齿轮箱箱体	Q235	—	—
小手臂外壳	铝合金 2A-12	—	—
手腕箱体	Q235	—	—
轴承	GCr15	—	—
螺钉	304	—	—
其他结构零件	6063-T5	—	—

2.2 手臂摆动机构设计

手臂的合理设计关系着整个机械臂结构的灵活性,手臂部位的质量应较轻,质量过大会造成较大的转动惯量从而使机械臂运行精度降低。手臂摆动的传动机构采用连杆传动,连杆传动的运动副以低副居多,低副的接触方式为面接触,可以减少各杆所承受的压强,提高其承载能力,实现较远距离的传动,如图 6 所示,零件明细如表 2 所示。



1—驱动臂座; 2—电机; 3—减速机; 4—大手臂;
5—小手臂座; 6—连杆; 7—曲柄; 8—减速机; 9—电机。

图 6 连杆机构结构图

表2 手臂摆动机构零件材料明细表

零件名称	材料
驱动臂座	Q235
大手臂	铝合金 2A-12
连杆	铝合金 2A-12
曲柄	铝合金 2A-12
小手臂座	铝合金 2A-12
轴承	GCr15
螺钉	304
键	45
其他结构	6063-T5

连杆机构的作用主要在于实现机械臂整体的灵活性,该机构设计工作原理如下:电机9驱动减速机8进而带动大手臂4完成摆动,以调整抛光的高度。将大手臂4视为机架时,电机2驱动减速机3进而带动曲柄7,连杆6在曲柄7的带动下运动从而带动小手臂座5转动。

2.3 手臂摆动机构参数设计

1) 杆长条件分析

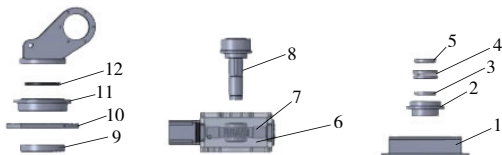
当机械臂在工作过程中,可在某一瞬时将AD杆视为机架。

杆长条件: $l_1 = L_{AB} = 200 \text{ mm}$, $l_2 = L_{BC} = 680 \text{ mm}$, $l_3 = L_{CD} = 230 \text{ mm}$, $l_4 = L_{AD} = 700 \text{ mm}$ 。

$$\begin{cases} \varepsilon_2 = \omega_1^2 \frac{l_1}{l_2} \left[\frac{l_1 \sin^2(\varphi_1 - \varphi_2)}{l_3 \sin^3(\varphi_2 - \varphi_3)} - \frac{\cos(\varphi_1 - \varphi_3)}{\sin(\varphi_2 - \varphi_3)} - \frac{l_1 \sin^2(\varphi_1 - \varphi_3)}{l_2 \sin^2(\varphi_2 - \varphi_3)} \cot(\varphi_2 - \varphi_3) - \frac{\varepsilon_1 \sin(\varphi_1 - \varphi_3)}{\omega_1^2 \sin(\varphi_2 - \varphi_3)} \right] \\ \varepsilon_3 = \omega_1^2 \frac{l_1}{l_3} \left[\frac{l_1 \sin^2(\varphi_1 - \varphi_3)}{l_2 \sin^3(\varphi_3 - \varphi_2)} + \frac{\cos(\varphi_1 - \varphi_2)}{\sin(\varphi_3 - \varphi_2)} - \frac{l_1 \sin^2(\varphi_1 - \varphi_3)}{l_3 \sin^2(\varphi_3 - \varphi_2)} \cot(\varphi_3 - \varphi_2) + \frac{\varepsilon_1 \sin(\varphi_1 - \varphi_2)}{\omega_1^2 \sin(\varphi_3 - \varphi_2)} \right] \end{cases} \quad (4)$$

2.4 底座转动机构设计

底座转动机构为机械臂抛光螺旋桨提供进给速度,抛光过程中需要保持传动平稳且承受一定的进给力,传动件需要具有自锁性能。蜗轮蜗杆传动具有传动平稳、噪声低、传动比大及在一定情况下实现自锁等优点,故本设计采用蜗轮蜗杆传动。底座转动机构各零件组成如图8所示。



1—箱体底座;2—底盘旋转蜗轮轴下法兰;
3—底盘旋转蜗轮轴下法兰下轴承;4—底盘旋转轴承 51315;
5—底盘旋转蜗轮轴下法兰上轴承;6—底盘旋转蜗轮箱;
7—蜗轮蜗杆;8—蜗轮轴;9—底盘旋转蜗轮轴上法兰轴承;
10—底盘法兰盖;11—底盘旋转蜗轮轴上法兰;12—蜗轮轴油封。

图8 底座转动机构爆炸图

$$l_1 + l_4 < l_2 + l_3 \quad (1)$$

故该四杆机构为曲柄摇杆机构,如图7所示。

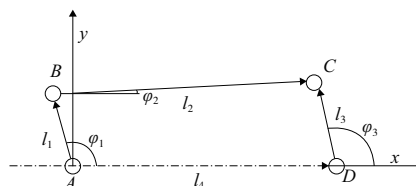


图7 四杆机构运动简图

2) 急回运动分析

连杆和曲柄两次共线时计算其摆角和极位夹角: $\theta = 4^\circ$, $\psi = 121^\circ$ 。由于机械臂在工作过程中需要防止因速度突变造成动载荷过大的情况,即:极位夹角尽可能小或者行程速比系数等于1,由此计算行程速比系数K。

$$K = (180^\circ + \theta) / (180^\circ - \theta) = 1.045 \approx 1 \quad (2)$$

满足设计要求。

3) 手臂摆动机构的动力学设计

采用速度瞬心法对机械臂进行分析。

AD杆为机架时,AB杆作为原动件由伺服电机驱动,由速度瞬心法可知:各杆角速度为

$$\begin{cases} \omega_2 = -\omega_1 l_1 \sin(\varphi_1 - \varphi_3) / l_2 \sin(\varphi_2 - \varphi_3) \\ \omega_3 = \omega_1 l_1 \sin(\varphi_1 - \varphi_3) / l_3 \sin(\varphi_3 - \varphi_2) \end{cases} \quad (3)$$

各杆角加速度为

底座转动机构零件材料如表3所示。按从上到下的方式对其进行安装,由于蜗轮蜗杆传动比较大,故不需要减速机进行减速增矩。

表3 底座转动机构零件材料明细表

零件名称	材料
箱体底座	Q235
法兰	Q235
底盘旋转蜗轮箱	Q235
蜗轮	ZCuSn10P1
蜗轮轴	20Cr
轴承	GCr15
螺钉	304
蜗杆	HT100
键	45

电机驱动蜗杆从而带动蜗轮转动,蜗轮蜗杆如图9所示。根据装配要求,设计蜗杆头数 $Z_1 =$

4, 蜗杆直径 $d_1 = 63 \text{ mm}$, 蜗轮齿数 $Z_2 = 60$ 。

$$i = \frac{Z_2}{Z_1} = 15 \quad (5)$$

2.5 大手臂和蜗轮轴静力学分析

大手臂主要起到承载执行机构的质量和力矩, 以及自身的质量。执行机构施加的力(重力, N)和力矩(Nm)大小为

$$F = m_2 g = 43.43 \times 10 = 434.3 \quad (6)$$

$$T = m_2 g l_2 = 43.43 \times 10 \times 213.26 \times 10^{-3} = 370.47 \quad (7)$$

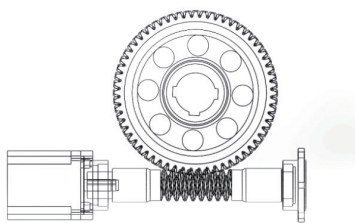


图9 蜗轮蜗杆

将材料参数和所受力、力矩以及自质量导入 ANSYS 数据库进行求解, 得到结果如图 10 所示。

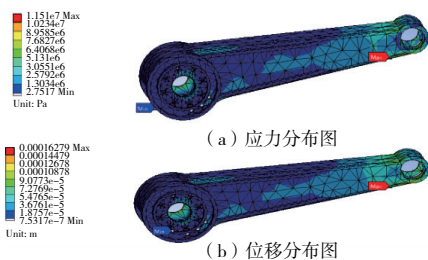
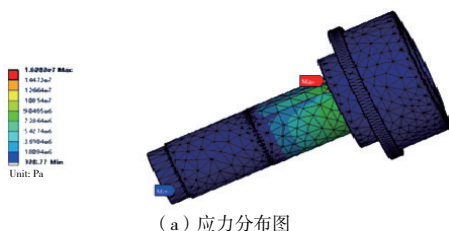


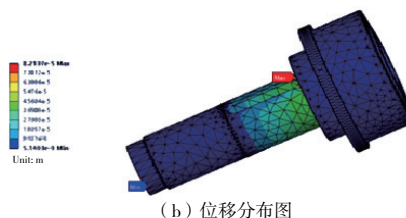
图10 大手臂有限元分析结果

铝合金选用型号为 2A-12, 取安全系数 1.5, 其屈服强度为 240 MPa, 修正后屈服强度为 160 MPa, 由图 10(a) 求解得到的手臂所受最大的应力为 11.51 MPa, 故符合设计要求。由图 10(b) 可知最大变形量为 0.16 mm 位于右下方, 在铝合金正常的变形范围内。

蜗轮轴材料为 20Cr, 调质处理。蜗轮轴承受蜗轮以及驱动臂座产生的力矩, 力矩大小由蜗轮蜗杆的设计校核时校核得出, 将其导入 ANSYS 中进行处理得到结果如图 11 所示。



(a) 应力分布图



(b) 位移分布图

图11 蜗轮轴有限元分析结果

由于所选的 20Cr 的屈服强度为 60 MPa, 取安全系数 1.5, 修正后屈服强度为 40 MPa, 由图 11(a) 可知最大的应力为 16.28 MPa, 故符合设计要求。由图 11(b) 可知最大变形量为 0.08 mm 位于右上方, 处于正常 20Cr 变形范围内。

3 抛光机械臂关节转速优化

3.1 变量的确定

螺旋桨表面加工质量的好坏主要与切削余量和表面粗糙度有关^[18]。背向力 F_p 是引起震动, 影响加工质量和加工精度的主要原因。理想平面磨削厚度 h_{Dav} 越大, 其磨削生产效率越高, 但是切削力也相应增大, 磨削质量相应变差。

由于在本设计中砂轮的切削速度、进给速度、背吃刀量主要由 5 个伺服电机所驱动关节提供, 所以各因变量为关节的转速^[19]。切削速度 v_s 由关节 1 提供, $v_s = \omega_1 l_1$ (ω_1 为关节 1 转速, l_1 为横向工作伸长范围)。进给速度 v_w 由关节 5 提供, $v_w = \omega_5 R$ (ω_5 为关节 5 转速, R 为砂轮半径)。切削深度 f_r 与关节 2、关节 3、关节 4 的关系为: $f_r = k_1 \omega_2 \times k_2 \omega_3 \times k_3 \omega_4$ (ω_2 、 ω_3 、 ω_4 分别为关节 2、关节 3、关节 4 的转速, k_1 、 k_2 、 k_3 为权值根据层次分析法专家评估分别得出 0.06、0.02、0.02)。

机械关节如图 12 所示, 关节 1 负责驱动砂轮的转动, 关节 2 驱动手腕摆动, 关节 3 驱动小手臂摆动, 关节 4 驱动大手臂摆动, 关节 5 驱动机械臂转动。

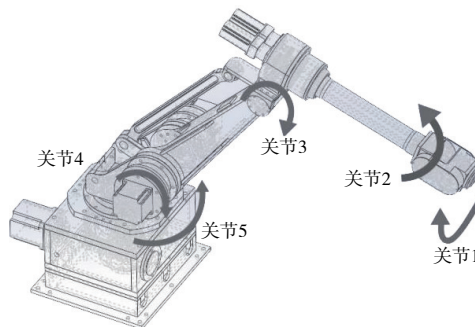


图12 机械臂关节图

背向力 F_p (kN) 与切削速度、进给速度、切削深度的关系为

$$F_p = \frac{3.6 U_c f_r^{0.71} v_w^{0.68} b}{1000 v_s^{1.15}} \quad (8)$$

式中: U_c 为比切削能, 取 $1\ 100\text{ kg/mm}$; b 为砂轮宽度, 取 20 mm 。

理想平面磨削厚度 h_{Dav} (mm) 与切削速度、进给速度、切削深度的关系为

$$J = \min \left[\frac{0.32 (0.06\omega_2 + 0.02\omega_3 + 0.02\omega_4)^{0.71} (\omega_5 l_1)^{0.68}}{\omega_1^{1.15} \sqrt{(0.06\omega_2 + 0.02\omega_3 + 0.02\omega_4) (1/250)}} \left(\frac{\omega_5 l_1}{1.87 \times 10^5 \omega_1} \right) \right] \quad (10)$$

取 $20\text{ m/s} \leq v_s \leq 50\text{ m/s}$, $10\text{ mm/min} \leq v_w \leq 50\text{ mm/min}$, $0.005\text{ mm} \leq f_r \leq 0.010\text{ mm}$, 各变量取值范围如表 4 所示。

表 4 变量约束条件

变量	类型	取值范围
关节 1 转速 ω_1 /(rad/s)	设计变量	16~40
关节 2 转速 ω_2 /(rad/s)	设计变量	0.041~0.063
关节 3 转速 ω_3 /(rad/s)	设计变量	0.003 4~0.006 2
关节 4 转速 ω_4 /(rad/s)	设计变量	0.002 6~0.005 8
关节 5 转速 ω_5 /(rad/min)	设计变量	0.016~0.041
横向工作伸长范围 l_1 /mm	设计变量	1 230~1 450

3.2 利用遗传算法进行优化

参考侯仰强等^[21]构造的遗传算法模型, 本文设置种群规模为 50、进化代数数为 50、交配概率为 0.9、变异概率为 0.1, 流程如图 13 所示。

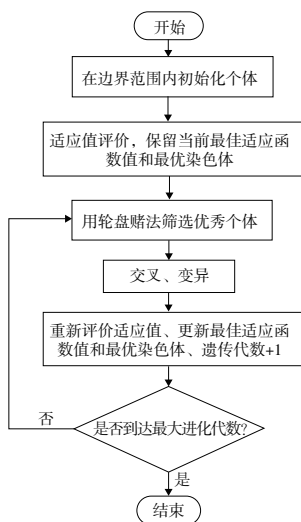


图 13 遗传算法寻优流程

$$h_{\text{Dav}} = \frac{v_w}{60 v_s m} \sqrt{f_r \left(\frac{1}{D} + \frac{1}{D_w} \right)} \quad (9)$$

由于螺旋桨的磨削属于曲面磨削^[20], 故趋于无穷大, $1/D_w = 0$; D 为砂轮直径, 取 250 mm ; m 为单位面积 (mm^2) 内有效磨粒数 $m = 1/(10d)$, d 为磨粒平均直径, 计算得 $m = 25$ 。

综上所述, 目标函数为

将工作距离以砂轮的宽度 $b = 20\text{ mm}$ 为间隔在 MATLAB 软件中进行寻优计算, 最优适应度值随遗传代数变化如图 14 所示, 最终得到不同横向工作距离下的优化结果, 如表 5 所示。

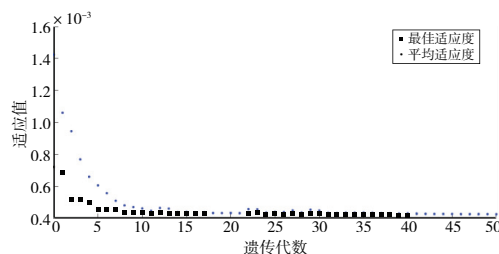


图 14 种群迭代收敛情况

关节 1 负责驱动砂轮的转动且切削速度由关节 1 提供, 因此优先考虑关节 1 的转速, 选择表 5 序号 7 作为优化结果。与优化前相比, 关节 1 的转速有了明显的增大, 从而提高了砂轮的切削速度。此外, 为了综合考虑背向力和理想平面磨削厚度的影响, 对其他关节的转速也进行了精准调整。这些改动不仅提升了螺旋桨的加工效率和加工质量, 还有效降低了由于振动引起的不良影响, 从而实现了更稳定的加工过程和更高的产品精度。

4 结语

本文对一种螺旋桨数控抛光机进行了结构设计及工作参数优化, 旨在提高螺旋桨加工的质量和精度, 进而提升船舶的工作效率。通过详细分析螺旋桨的磨削工艺及其结构特性, 确定螺旋桨数控抛光机执行机构为关节型机械臂, 并进行了结构设计及参数分析, 确保其稳定性和耐用性。利用 ANSYS 软件对大手臂和蜗轮轴进行有限元分析, 验证了其设计的合理性。通过 MATLAB 中的遗传算法优化了机械臂关节转速, 提高了抛光效率和精度。这项研究不仅为数控螺旋桨抛光技

术小型化和低成本化提供了重要的理论与实践指 技术支持。
导,还为船舶行业的发展和竞争力的提升提供了

表 5 优化结果

序号	工作转速/(r/min)					横向工作 伸长范围 l_1 /mm
	关节 1	关节 2	关节 3	关节 4	关节 5	
1	2.391×10^3	3.991×10^{-1}	3.532×10^{-2}	2.943×10^{-2}	6.528×10^{-3}	1 250
2	2.383×10^3	3.942×10^{-1}	3.343×10^{-2}	2.619×10^{-2}	6.528×10^{-3}	1 270
3	2.397×10^3	3.969×10^{-1}	3.363×10^{-2}	3.072×10^{-2}	6.528×10^{-3}	1 290
4	2.396×10^3	3.919×10^{-1}	3.584×10^{-2}	2.921×10^{-2}	6.528×10^{-3}	1 310
5	2.378×10^3	4.079×10^{-1}	3.312×10^{-2}	2.665×10^{-2}	6.528×10^{-3}	1 330
6	2.383×10^3	3.950×10^{-1}	3.452×10^{-2}	2.677×10^{-2}	6.528×10^{-3}	1 350
7	2.399×10^3	3.990×10^{-1}	3.436×10^{-2}	2.607×10^{-2}	6.528×10^{-3}	1 370
8	2.327×10^3	3.992×10^{-1}	3.271×10^{-2}	2.598×10^{-2}	6.528×10^{-3}	1 390
9	2.398×10^3	3.955×10^{-1}	3.532×10^{-2}	2.972×10^{-2}	6.520×10^{-3}	1 410
10	2.398×10^3	3.937×10^{-1}	3.384×10^{-2}	4.376×10^{-2}	6.528×10^{-3}	1 430
11	2.379×10^3	3.947×10^{-1}	3.701×10^{-2}	2.589×10^{-2}	6.511×10^{-3}	1 450

参考文献:

[1] 季洋阳,田桂中,周宏根. 船用螺旋桨先进制造技术研究进展[J]. 舰船科学技术,2015,37(5):9-15.

[2] 郭铭. 三工位五轴抛光机开发[D]. 长春:吉林大学,2018.

[3] 黄彬,姚宇华. 新工科现代产业学院:逻辑与路径[J]. 高等工程教育研究,2019(6):37-43.

[4] 江峰,苏麒. 多自由度柔性机械臂非线性连续时变反馈控制方法[J]. 机械制造与自动化,2024,53(2):193-197.

[5] 李雪婧. 智能制造中工业机械臂的精确控制技术研究[J]. 现代制造技术与装备,2024,60(2):185-188.

[6] NAGATA F,HASE T,HAGA Z,et al. CAD/CAM-based position/force control for a ball-end abrasive tool and its application to an industrial robot [J]. Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing,2008,2(4):742-752.

[7] DIESTE J A,FERNÁNDEZ A,ROBA D,et al. Automatic grinding and polishing using spherical robot [J]. Procedia Engineering,2013,63:938-946.

[8] 齐立哲,甘中学,负超,等. 机器人砂带磨削系统作业精度分析与误差补偿[J]. 机器人,2010,32(6):787-791,798.

[9] 王伟,负超. 砂带磨削机器人的灵活性分析与优化[J]. 机器人,2010,32(1):48-54.

[10] 杨琼方,黄修长,李晔. 船用螺旋桨水动力、空化和低噪声集成设计[J]. 清华大学学报(自然科学版),2024,64(1):75-89.

[11] 樊雅君. 基于 QFD 的船用螺旋桨设计及工艺参数优化[D]. 太原:太原理工大学,2020.

[12] 丛庆,林凤森,曾秋云,等. 大尺寸复合材料螺旋桨制造技术研究[J]. 化工新型材料,2022,50(增刊1):465-469.

[13] 王文杰. 高性能先进舰船用合金材料的应用现状及展望[J]. 材料导报,2013,27(7):98-105.

[14] 张明德,王加林,苏占领,等. 船用螺旋桨叶片五轴联动砂带磨削方法研究[J]. 现代制造工程,2016(3):43-48.

[15] 贺旭东. 大型航天薄壁结构件加工变形控制基础试验研究[D]. 上海:上海交通大学,2017.

[16] 刘世豪,黄鹏飞,王菲,等. 螺旋桨数控抛光机结构设计及功能分析[J]. 制造技术与机床,2022(4):38-42.

[17] 顾国刚,成贤锴,陈琦,等. 精密导轨研磨抛光机设计[J]. 组合机床与自动化加工技术,2018(9):111-113,117.

[18] 张明德,沈智军,谢乐. 船用螺旋桨铣削参数优化和刀轴矢量控制方法研究[J]. 机械科学与技术,2022,41(4):580-586.

[19] 李彦青. 蜗杆砂轮磨齿磨削力预测及磨削参数对磨削力的影响研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2023.

[20] 胡宁,陈海锋. 曲面磨削表面微观形貌建模方法研究[J]. 宇航材料工艺,2023,53(4):17-25.

[21] 侯仰强,王天琪,岳建锋,等. 基于多目标遗传算法的双机器人协调焊接路径规划[J]. 中国机械工程,2018,29(16):1984-1989.

收稿日期:2024-07-16