

文章编号:1000-582X(2011)09-017-04

高精度可调距螺旋桨强力数控砂带磨床的设计及应用

黄智^{1,2}, 黄云², 张磊², 张伟文²

(1. 电子科技大学机电工程学院, 四川成都 611731; 2. 重庆大学机械传动国家重点实验室, 重庆 400044)

摘要:针对目前国内船用可调距螺旋桨(简称调距桨)制造中落后的手工打磨工艺现状,提出了一种利用数控砂带磨削技术实现调距桨复杂型面的高效加工方法,并设计了四坐标联动的强力磨床,重点介绍了该磨床的关键技术如强力砂带磨头的设计、调桨砂带磨削数控编程软件的开发等,最后利用该样机对桨叶表面进行了强力砂带磨削应用试验,为确定合理的船用螺旋桨强力高效砂带磨削工艺参数与应用提供了参考依据。

关键词:可调距桨;强力砂带磨削;四轴联动;型面加工

中图分类号:TH11

文献标志码:A

The design and application of heavy-duty CNC abrasive belt grinding machine with high precision controllable pitch propeller

HUANG Zhi^{1,2}, HUANG Yun², ZHANG Lei², ZHANG Wei-wen²

(1. School of Mechatronics Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 611731, P. R. China;

2. The State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: Aiming at the backward hand-grinding ways of controllable pitch propeller in China shipbuilding industry, a highly efficient precision grinding method is brought forward, and a four axes simultaneous grinding machine is designed which can machining complex profile with abrasive belt grinding technology by CNC. The key techniques to develop this new grinding machine is presented in detail such as heavy-duty belt grinding head, NC grinding computer aided software, etc. The application experiments of grinding and polishing propeller blade are carried out on the basis of different parameters, and the trial results provide foundation for the confirmation and application of reasonable belt grinding and polishing parameters.

Key words: controllable pitch propeller; heavy-duty abrasive belt grinding; four axes simultaneous; profile machining

收稿日期:2011-04-07

基金项目:重庆市重点科技攻关项目(CSTC 2008AB3014);机械传动国家重点实验室访问学者基金资助项目

作者简介:黄智(1977-),男,博士,重庆市材料表面精密加工及成套装备工程技术研究中心客座研究员,主要从事高效精密加工技术与先进数控装备研究。

黄云(联系人),男,重庆大学研究员,(E-mail)yunhuang@sambida.com。

可调螺距螺旋桨(简称调距桨),就是通过设置于桨毂中的操纵机构,使桨叶能够转动而调节螺距的螺旋桨,调距桨借助于螺旋桨叶片角度的改变,从而实现船舶行驶的正车、倒车、停车以及速度变化,不需要可反转的主发动或换向装置。由于调距桨与普通的定距离螺旋桨相比,具有降低油耗,延长主机使用寿命的特点,因此作为新型的船舶操纵装置,已成为船用推进动力部件的重要核心零件,不仅用于侧推,还在主推中发挥出越来越重要的作用^[1]。其制造精度和效率的高低将直接影响各类船舶的水动力推进特性^[2]。然而该零件具有薄壁、型面复杂、弱刚性结构的特征,加之其构成材质在磨削时容易堵塞磨具并烧伤表面,对其进行高效率磨抛到目前仍然还是一个技术难题。虽然欧美日等国家已采用先进数控加工技术实现了船用螺旋桨的自动化加工^[3-4],这些先进的机械加工方法使得螺旋桨的型面几何精度、加工效率均得到了较大水平的提升,然而国外对涉及军工背景的相关先进加工技术装备特别是复杂型面高效自动化磨抛技术的封锁,中国船用螺旋桨生产企业尽管大多拥有了各类数控铣削机床,但铣削出来的螺旋桨型面精度和表面质量仍然还不能满足最终技术要求,普遍还是采用落后的手工打磨方式进行桨叶型面的光精加工,甚至有些桨叶产品完全就依靠手工打磨成型,该落后现状不仅严重影响了中国相关国防载运工具装备技术水平的提高,同时,这种低效率、低精度、高强度及多粉尘污染的落后工艺已远不能满足船舶行业市场发展对上述高附加值的核产品日益增长的需求。能否研制出解决上述瓶颈的新工艺、新技术装备成为一个重要的攻关课题。鉴于砂带磨削在复杂曲面零件加工优势,笔者创新性地提出利用砂带磨削技术来解决调距桨加工难题的思路,并通过工艺基础研究论证和样机关键技术开发及工艺优化改进,最终成功研制了针对可调距桨并能实现“以磨代铣”的数控砂带磨床。

1 方法的提出

根据对可调距螺旋桨主要构成材料青铜合金的材料性能分析,结合砂带磨削效率高、磨削力小、发热少及工艺灵活性好的特点,开展了该材料的初步砂带磨削基础试验研究。通过上述可行性研究,笔者提出了采用如图 1 所示的四轴联动砂带磨削可调距桨叶的原理,为实现叶片表面粗精加工采用更换粗细粒度砂带的方法实现磨削。

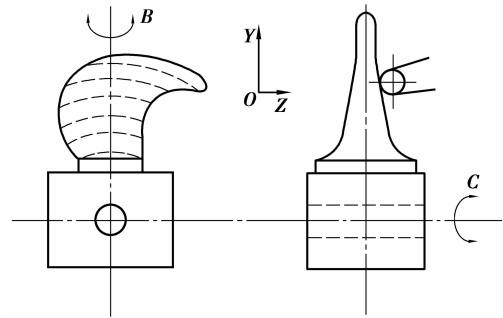
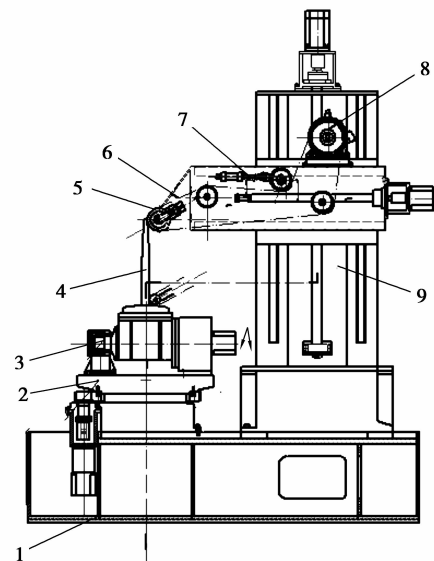


图 1 可调距桨叶四轴联动砂带磨削原理

基于笔者所在研究团队在复杂曲面砂带磨削方面的研究积累^[5-7],结合螺旋桨铜合金材料高效强力砂带磨削工艺试验研究结果,研制了如图 2 所示的四轴联动砂带磨床。该磨床机床能够实现 2 个直线轴和 2 个旋转的数控四轴联动,这些运动轴包括:磨头垂直上下方向的运动轴(Y 轴);磨头左右进给运动轴(Z 轴),桨叶工件回转轴(B 轴),工件摆动转轴(C 轴)。该砂带磨床主要由床身部分、砂带磨头、工件夹具、回摆转台、磨削冷却及抽雾系统、钣金防护等部分构成,调距桨工件置于回摆工作转台的专用夹具上,桨叶随着转台的旋转并通过与高速旋转砂带的切触即可实现吸、压力型面的连续一体化磨削加工,可灵活选择横向、纵向、干式及湿式等进行磨削,通过手工砂带更换即可完成叶片粗磨和精磨两道工序,机床主体结构如图 2 所示。



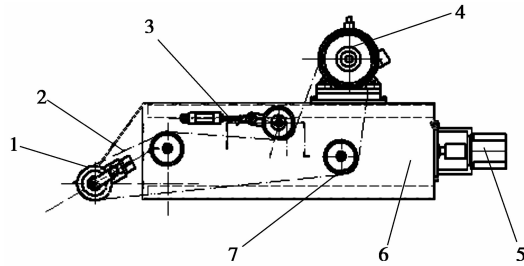
1. 床身; 2. B 轴转台; 3. C 轴转台;
4. 工件; 5. 接触轮; 6. 砂带;
7. 磨头机构; 8. 磨头电机; 9. 立柱

图 2 磨床主体结构

2 调距桨强力数控砂带磨床的关键技术

2.1 强力高效砂带磨头的设计

强力高效砂带磨头是整个磨床的核心部件^[8-9],通过磨头及其相关关键功能部件的基本参数设计计算和选择,最终设计了主要由支撑横梁、磨头电机、磨头张紧及加压机构、砂带驱动轮、过渡轮等组成的高效强力砂带磨头,如图3所示。



1. 接触轮;2. 砂带;3. 磨头张紧机构;4. 磨头电机;
5. Z轴伺服电机;6. 磨头支撑横梁;7. 过渡轮

图3 强力高效磨头结构

2.2 调距螺旋桨磨削CAM软件的开发

通过ACIS组件平台并采用C++工具开发了本调距桨砂带磨削数控加工的自动编程软件系统,根据桨叶三维几何模型及其砂带磨削工艺要求,该软件系统在功能上不仅能计算得出砂带磨削的刀位点^[10-12],还能实现砂带磨削加工过程的动态仿真,从而以确保不正常干涉在磨削过程中的出现,最后,该软件还能够针对不同数控系统,如深利昌、西门子、发那科、三菱等控制器,后置生成四轴联动数控代码^[13-15]。调距桨数控砂带磨削自动编程软件使用流程如图4所示。该磨削加工软件主要分为以下几个模块:零件模型数据的导入及磨削工艺参数设置模块、砂带磨削数控刀位生成模块、砂带磨削加工仿真模块、数控代码生成模块。

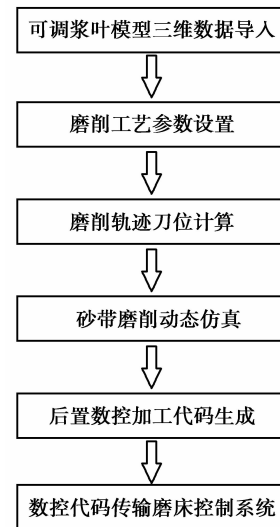


图4 可调桨数控砂带磨削编程软件流程

3 磨削应用及相关测试结果

笔者通过研制的四轴联动数控强力砂带磨床对某船用螺旋桨厂为某型船舶的 $\phi 1\ 000\text{ mm}$ 侧推桨叶开展了强力砂带磨削工艺的相关应用试验,如图5所示是进行的调距桨砂带磨削试验。通过对砂带磨削工艺参数经优化调整^[16-17],制定了如下的磨削工序流程:铸造毛坯来料—桨叶整体铲刨—桨叶吸力面型面粗磨—桨叶压力面型面粗磨—换带—桨叶吸力面型面精磨—桨叶压力面型面精磨—桨叶边缘修边磨削—成品检验—入库。具体砂带磨削工艺参数见表1所示。



图5 四轴联动砂带磨削桨叶试验

表1 某厂调距桨实际磨削参数

工序	磨料粒度	砂带规格 (W×L)/mm ²	磨削余量 分配/mm	磨削功率 /kW	磨削 方式	磨削速度 /(m·s ⁻¹)	接触轮(直径× 宽度)/mm ²	接触轮 硬度	接触轮 表面形状
粗磨	VSM ZK713T 铅钢玉 80#	30×3 280	0.30~0.50	7.5	湿	24	200×30	Hs80	锯齿型
精磨	VSM KK711X 氧化铝 240#	30×3 280	0.02~0.05	7.5	湿	32	100×30	Hs40	平面型

将磨削后的调距桨任意抽出 2 只(编号为 CPP1 和 CPP2)经该厂质量检验部门检验,其结果如下:

1)型值表误差。在叶片吸力面和压力面不同半径方向各检验 3 处的实际 Z 值,则与理论型值 Z' 的误差为 ΔZ ,其检验结果如表 2 所列,远优于相关 ± 0.30 mm 技术要求。

表 2 型线漏光检测结果 mm

桨叶 编号	测量 半径	吸力面 ΔZ			压力面 ΔZ		
		X_5	X_{10}	X_{15}	X_5	X_{10}	X_{15}
CPP1	0.40R	0.04	0.08	0.09	0.10	0.12	0.09
	0.50R	0.06	0.05	0.12	0.08	0.13	0.09
	0.60R	0.08	0.07	0.11	0.09	0.17	0.07
	0.70R	0.11	0.09	0.12	0.09	0.15	0.11
	0.80R	0.08	0.06	0.13	0.10	0.08	0.08
	0.90R	0.05	0.07	0.14	0.09	0.15	0.05
CPP2	0.95R	0.08	0.06	0.15	0.05	0.17	0.04
	0.40R	0.02	0.07	0.05	0.04	0.07	0.06
	0.50R	0.04	0.02	0.08	0.08	0.09	0.08
	0.60R	0.05	0.10	0.13	0.17	0.09	0.07
	0.70R	0.07	0.07	0.09	0.08	0.11	0.07
	0.80R	0.15	0.08	0.07	0.14	0.08	0.12
	0.90R	0.12	0.07	0.08	0.11	0.07	0.14
	0.95R	0.14	0.09	0.07	0.13	0.12	0.11

2)表面粗糙度。检验结果如表 3 所示,远优于特高精度 T 级调距桨表面粗糙度 $Ra1.2 \sim 1.6 \mu\text{m}$ 的要求,这将对提高桨叶推进效率和寿命,降低推进噪音将有着非常关键特殊的意义。

表 3 表面粗糙度检测结果

桨叶编号	吸力面 $Ra/\mu\text{m}$	压力面 $Ra/\mu\text{m}$
CPP1	0.13~0.25	0.15~0.25
CPP1	0.17~0.29	0.11~0.27

3)称重。2 只桨称重的结果分别为 56.37 和 55.27 kg,其实际重量偏差分别为理论重量 55.85 kg 的 $+0.93\%$ 和 -1.04% ,完全符合重量偏差小于理论重量的 $\pm 4\%$ 技术标准要求。

4)静不平衡量。将磨削后的 6 只桨叶每 3 只一组,与桨毂组合成的 2 个桨进行静不平衡量检测,分别为 0.15 和 0.17 kg,合乎相关技术要求。

4 结 论

笔者针对船用调距螺旋桨加工难点,将砂带磨削技术与数控技术相结合,开发设计了四轴联动的强力砂带磨床,实现了单次 $0.3 \sim 0.5$ mm 余量的调距桨强力高效磨削,并经过精磨工序后能达到 $0.13 \sim 0.29 \mu\text{m}$ 的表面粗糙度。通过开展调距桨数控砂带磨削工艺应用测试实验表明:采用该四轴联动砂带磨床加工可调距桨桨叶型面的方法,成功实现了调距桨叶型面的强力高效磨削,完全到达了预期研发目的,其加工后的工件经抽检,更是远优于目前手工修磨工艺,为中国船用螺旋桨制造企业加工可调距桨提供了新的加工方法及手段。同时,该项研究还打破了国外对该领域技术封锁,并对促进其他复杂曲面零件的加工技术发展具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] ALARCIN F, EKINCI S, GULEZ K. Controllable pitch propeller control with fast backpropagation algorithm [J]. Marine Technology, 2007, 44(3): 180-184.
- [2] DOI M, NAGAMOTO K, TAKEHIRA T, et al. Delay time of propelling force with ship's Controllable Pitch Propeller[C]// The 2009 International Joint Conference on Instrumentation, Control and Information Technology, August 18-21, 2009, Fukuoka, Japan. [S. l.]: IEEE, [2009-11-13]: 551-554.
- [3] YOUNG J W, JUN Y, PARK S. Interference-free tool path generation in five-axis machining of a marine propeller [J]. International Journal of Production Research, 2003, 41(18): 4383-4402.
- [4] BRIENT A, MARTINEAU J P, HASCOET J Y. Influence of machining paths on hydro propeller performance[J]. Journal of Engineering Manufacture, 2003, 217(12): 1757-1762.
- [5] YI L, HUANG Y, LIU G H. Experimental research on the electrochemical abrasive belt grinding 0Cr17Ni4Cu4Nb stainless steel [J]. Materials Science Forum, 2009, 626/627: 617-622.
- [6] HUANG Z, HUANG Y, ZHANG M D, et al. Development of the 6-axes CNC abrasive belt grinding machine[J]. Key Engineering Materials, 2008, 359/360: 574-578.

(下转第 32 页)

- [10] MARKLUND P, LARSSON R. Wet clutch friction characteristics obtained from simplified pin on disc test[J]. Tribology International, 2008, 41(9): 824-830.
- [11] BEZZAZI M, KHAMLICHI A, JABBOURI A, et al. Experimental characterization of frictional behaviour of clutch facings using Pin-on-disk machine[J]. Materials and Design, 2007, 28(7): 2148-2153.
- [12] MAJCHERCZAK D, DUFRENOY P, BERTHIER Y. Experimental thermal study of contact with third body[J]. Wear, 2006, 261(5/6): 467-476.
- [13] 孙冬野, 胡丰宾, 邓涛, 等. 湿式多片离合器翘曲特性模拟与试验[J]. 重庆大学学报, 2010, 33(5): 1-6.
- SUN DONG-YE, HU FENG-BIN, DENG TAO, et al. Simulation and experiment for warp characteristic of wet multiple disc clutches[J]. Journal of Chongqing University, 2010, 33(5): 1-6.
- [14] MARKLUND P, ROLAND L. Wet clutch friction characteristics obtained from simplified pin on disc test [J]. Tribology International, 2008, 41 (9): 824-830.
- [15] 曲在纲, 黄月初. 粉末冶金摩擦材料[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2004.

(编辑 张 苹)

~~~~~

(上接第 20 页)

- [7] HUANG Y, HUANG Z. Research on the heavy abrasive belt grinding machine to reduce thickness of engine connecting rod head [J]. Key Engineering Materials, 2005, 304/305: 436-440.
- [8] 黄云, 黄智. 现代砂带磨削技术及工程应用[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2009.
- [9] SUN Y Q, GIBLIN D J, KAZEROUNIAN K. Accurate robotic belt grinding of workpieces with complex geometries using relative calibration techniques [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2009, 25(1): 204-210.
- [10] TSUTSUMI M, SAITO A. Identification and compensation of systematic deviations particular to 5-axis machining centers [J]. International Journal of Machine and Manufacture, 2003, 43(8): 771-780.
- [11] 苏高峰, 张秋菊. 叶片型面误差的数控砂带磨削技术研究[J]. 汽轮机技术, 2005, 47(2): 158-160.
- SU GAO-FENG, ZHANG QIU-JU. Research on the NC belt grinding for the tolerance of blade surface [J]. Turbine Technology, 2005, 47(2): 158-160.
- [12] 张伟文, 郭钢, 张岳, 等. 多轴联动砂带磨削刀触点路径规划及几何仿真[J]. 重庆大学学报, 2010, 33(9): 8-13.
- ZHANG WEI-WEN, GUO GANG, ZHANG YUE, et al. Tool path planning and geometry simulation for multi-axis CNC belt grinding[J]. Journal of Chongqing University, 2010, 33(9): 8-13.
- [13] ZHANG X, KUHLENKOTTER B, KNEUPNER K. An efficient method for solving the Signorini problem in the simulation of free-form surfaces produced by belt grinding[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2005, 45(6): 641-648.
- [14] REN X Y, KUHLENKOTTER B. Real-time simulation and visualization of robotic belt grinding processes[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008, 35(11/12): 1090-1099.
- [15] HUANG H, ZHOU L, CHEN X Q, et al. SMART robotic system for 3D profile turbine vane airfoil repair[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2003, 21(4): 275-283.
- [16] JOURANI A, DURSAPT A, HAMDI H. Effect of the belt grinding on the surface texture: modeling of the contact and abrasive wear[J]. Wear, 2005, 259(7/12): 1137-1143.
- [17] NEMLI G, AKBULUT T, ZEKOVIC E. Effects of some sanding factors on the surface roughness of particleboard[J]. Silva Fennica, 2007, 41(2): 373-378.

(编辑 张 苹)