

DOI:10.19423/j.cnki.31-1561/u.2022.06.073

螺旋桨随边削边振动特性预报软件开发

姚月兵¹ 金鑫¹ 李解¹ 李家盛^{1,2,3} 张正艺^{1,2,3} 汪伟斌¹ 付田¹

(1. 华中科技大学 船舶与海洋工程学院 武汉 430074 ; 2. 船舶数据技术与支撑软件湖北省工程研究中心 武汉 430074 ; 3. 船舶和海洋水动力湖北省重点实验室 武汉 430074)

[摘 要] 由于螺旋桨几何曲面复杂, 为实现随边削边几何建模与振动分析功能, 该文开发了一款通用的螺旋桨随边削边振动特性快速预报软件。采用有限元法、基于 QT 平台, 结合 MATLAB 程序语言与 ANSYS 模块功能完成了螺旋桨随边削边振动分析软件的开发。基于该软件, 对 4383 桨前五阶固有频率数值进行了求解与分析, 结合参考文献数据发现相对误差均在 5% 以内, 证明该软件程序和计算结果的正确性。该软件使用方便、运算快速, 具有良好的工程应用价值, 为实现螺旋桨随边削边后船-机-桨合适匹配提供了新的分析途径。

[关键词] 螺旋桨; 随边切割; 振动; QT 平台; MATLAB 程序; ANSYS 软件

[中图分类号] U662.9 [文献标志码] A [文章编号] 1001-9855 (2022) 06-0073-08

Development of Software for Vibration Analysis of Propeller With Trailing Edge Cutting

YAO Yuebing¹ JIN Xin¹ LI Xie¹ LI Jiasheng^{1,2,3}
ZHANG Zhengyi^{1,2,3} WANG Weibin¹ FU Tian¹

(1. School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. Hubei Provincial Engineering Research Center of Data Techniques and Supporting Software for Ships (DTSSS), Wuhan 430074, China; 3. Hubei Key Laboratory of Naval Architecture & Ocean Engineering Hydrodynamics (HUST), Wuhan 430074, China)

Abstract: Owing to the complex geometric curved surface of the propeller, general software for the rapid prediction of the vibration characteristics of the propeller with trailing edge cutting is developed for the geometric modelling and vibration analysis of the trailing edge cutting. The development of the software for the vibration analysis of the propeller with trailing edge cutting is completed by using the finite element method together with the MATLAB programming language and the ANSYS module based on the QT platform. This software is used to calculate and analyze the first five-order natural frequency values of the 4384 propeller. It is found that the relative errors are within 5% combined with the published data in order to prove the accuracy of the software program and the calculation results. The software is characterized of easy usage, fast calculation and great engineering

收稿日期: 2022-04-21; 修回日期: 2022-05-16

基金项目: 国家自然科学基金 (52001130, 11922208, 51839005); 华中科技大学自主创新研究基金 (2019kfyXJJS005); 湖北省技术创新专项重大项目 (2019AAA041)

作者简介: 姚月兵 (1997-), 女, 硕士。研究方向: 结构振动与噪声控制、船舶推进性能。

金鑫 (1999-), 男, 硕士。研究方向: 结构振动与噪声控制、船舶推进性能。

李解 (1999-), 男, 硕士研究生。研究方向: 结构振动与噪声控制、船舶推进性能。

李家盛 (1987-), 男, 博士, 讲师。研究方向: 结构振动与噪声控制、船舶水弹性力学 / 流固耦合力学、船舶推进性能。

张正艺 (1987-), 男, 博士, 副教授。研究方向: 结构振动与噪声控制、船舶推进性能。

汪伟斌 (1996-), 男, 硕士。研究方向: 结构振动与噪声控制、船舶推进性能。

付田 (1994-), 男, 硕士。研究方向: 结构振动与噪声控制、船舶推进性能。





application value. It provides a new analysis method for the matching of ship-machine-propeller after the trailing edge cutting.

Keywords: propeller; trailing edge cutting; vibration; QT platform; MATLAB programming; ANSYS software

0 引言

船舶在航行过程中,常因各种原因导致螺旋桨负荷“过重”,使螺旋桨无法实现船-机-桨合适匹配^[1]。为解决这一问题,研究人员常常采用随边削边技术^[2],对桨叶进行切边修改,以减小螺旋桨的直径或螺距,使螺旋桨的扭矩减小,进而使船-机-桨重新匹配,达到船舶最佳工况点。

当前螺旋桨随边削边技术研究多关注其对于螺旋桨水动力性能方面影响。卢恒荣等^[3]通过研究确定,采用螺旋桨随边切割技术,可以改善船舶的机桨匹配。陈朝辉等^[4]研究分析了切割量对KMM型号螺旋桨敞水性能的影响,并得到了随边切割量的应用计算图谱。曹梅亮^[5]研究得到随边切割对螺距及拱度的变化规律,并建立了一个根据实船试航结果来切割随边以适应船机桨匹配的简易方法。吴飞等^[6]采用翼形法对螺旋桨进行修边切割,解决了5万载重吨级散货船的主机超负荷问题。

但上述研究忽略了螺旋桨随边削边振动特性的研究。欧礼坚等^[7]通过对亚龙X案例的分析,发现螺旋桨削边技术不但可以优化船机桨的匹配,而且可以减少因螺旋桨脉动压力偏大引起的船体局部振动。李亮等^[8]以实尺度螺旋桨梢部的局部模型($0.9R \sim 1.0R$)为研究对象,采用不同的加工工艺后,获得了各梢部模型的梢涡空泡形态和空泡起始性能,可为实尺度螺旋桨档部抗唱音提供参考。螺旋桨作为船舶重要的推进器,其振动特性对民船舒适性及军船隐蔽性具有很重要的意义。由于螺旋桨几何曲面复杂,随边削边后桨叶几何形貌改变,研究其随边削边振动特性需进行多次相似几何建模与振动分析,开发通用的螺旋桨随边削边振动分析软件是高效且有必要的。

本文基于QT平台,同时结合MATLAB软件与ANSYS软件进行混合编程,利用ANSYS软件中参数化程序设计语言(APDL)技术对结构进行建模及振动特性分析;采用MATLAB程序生成APDL代码,

并藉由QT程序将整个分析过程打包的方式,开发了具有通用性的螺旋桨直径削边振动分析软件,同时与文献计算结果进行对比,验证了软件的正确性。

1 软件概述

螺旋桨随边削边振动分析软件包括几何要素输入平台及随边削边振动分析平台,主要具有绘制螺旋桨削边前几何线图、削边前后对比线图、有限元网格图及计算螺旋桨随边削边振动模态等功能,图1为软件的界面。



图1 软件界面

该软件基于 QT 平台, 集成各种具有独立功能的软件程序, 实现螺旋桨随边削边振动分析。软件调用 MATLAB 程序及 ANSYS 软件实现如下功能:

(1) 绘制螺旋桨削边前几何线图以及削边前后对比线图;

(2) 基于有限元理论建立螺旋桨随边削边后

的有限元模型;

(3) 计算螺旋桨在不同随边切割量下的模态, 即振型与固有频率;

(4) 将以上结果以图片或数据方式显示到人工交互界面,以便作螺旋桨随边削边振动特性分析。

2 软件功能设计

软件功能设计如图 2 和图 3 所示。

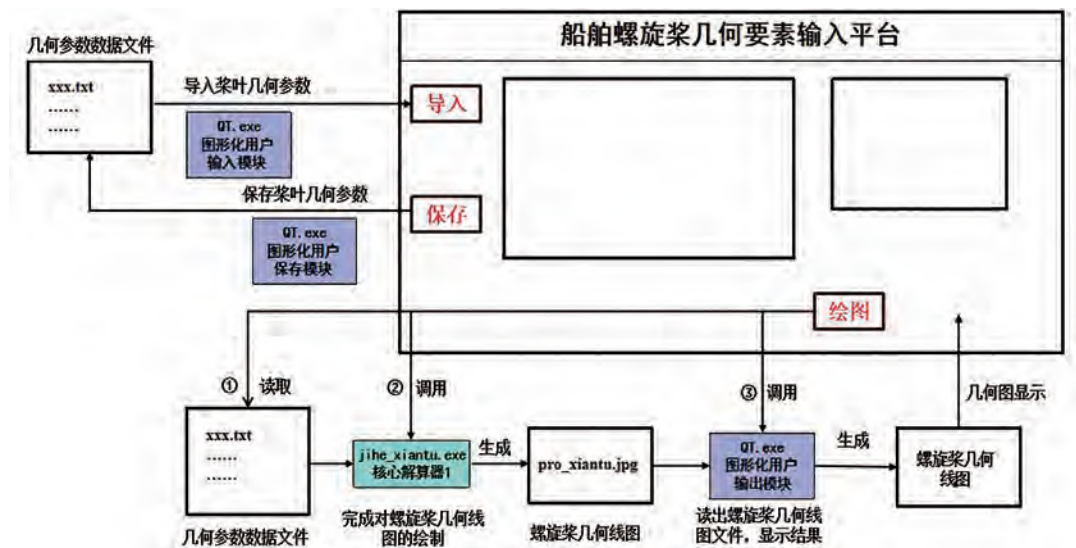


图2 螺旋桨几何要素输入平台

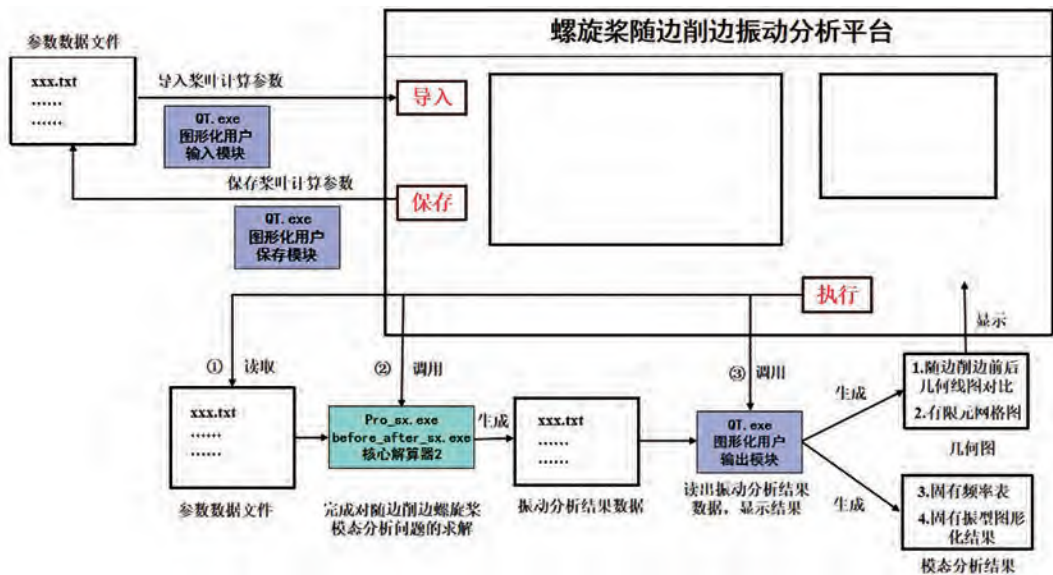


图3 螺旋桨削边振动分析平台



在上页图 2 所示螺旋桨几何要素输入平台, 几何参数数据有 2 种定义方式: 一种是将数据文件存入后台文件夹中, 绘图模块直接调取, 导入模块也可将其导入显示到界面; 另一种是由界面输入, 保存模块将其保存到后台文件夹, 供绘图模块调取。绘图模块的功能为: 读取数据库内几何参数, 调用 MATLAB 可执行程序及 ANSYS 软件, 完成桨叶几何线图的绘制并生成桨叶几何线图, 进而通过图形化用户输出模块, 将桨叶几何线图显示导入到界面。

对于如上页图 3 所示螺旋桨几何要素输入平台, 点击“导入”按钮, 即将后台几何数据导入显示到人机交互界面; 若需要, 用户可对界面数据进行修改, 点击“保存”按钮, 即可将现有 / 更改后的螺旋桨几何参数存储到后台几何数据文件中; 点击“绘图”按钮, 即可绘制现有 / 更改后的螺旋桨几何线图并将其显示到人机交互界面。其中, 叶切面基本输入参数模块下的“输入”按钮可以通过输入螺旋桨剖面数目和弦向坐标点数目, 来定义界面叶切面定位及形状参数表格大小, 方便用户导入及保存螺旋桨几何参数。

在螺旋桨削边振动分析平台, 同样有 2 种方式定义螺旋桨材料、计算阶次及削边量等参数: 一种是将数据文件存入后台文件夹中, 由执行模块直接读取, 导入模块可将其导入显示到界面; 另一种是由界面输入, 保存模块将其保存到后台文件夹中, 供执行模块调取。执行模块的功能为: 调用 MATLAB 可执行程序及 ANSYS 软件完成螺旋桨振动分析, 生成螺旋桨几何图形及振动分析结果文件, 最后通过图形化用户输出模块, 将几何图形及模态分析结果显示导入到界面。

对于螺旋桨随边削边振动分析平台, 点击“导入”按钮, 即可将数据库中螺旋桨材料参数、随边削边量参数与模态计算阶次参数导入显示到人机交互界面中; 点击“保存”按钮, 即可将现有 / 更改后的各项参数存储到后台数据文件中; 点击“执行”按钮, 即可计算现有 / 更改后的各项参数下的螺旋桨振动模态。

点击界面中以下按钮可以显示螺旋桨几何图形

及振动特性计算结果:

- 点击“显示几何”按钮可以显示螺旋桨削边前后的几何对比线图, 黑色线图为削边前的几何线图, 红色线图为削边后的几何线图;

- 点击“显示网格”按钮可以显示削边螺旋桨有限元网格模型;

- 点击“显示振型”按钮, 输入模态阶数, 即可显示相应模态阶数下的螺旋桨振型图;

- 点击“显示固有频率”按钮, 即可显示螺旋桨各阶固有频率值。

该软件界面的功能设计核心在于: 可实现不同随边切割量下螺旋桨模态计算自动化, 并将计算结果 (即固有频率及振型图) 显示到界面, 使削边螺旋桨振动特性直观地显示在用户面前, 方便用户进行后续研究分析。另外, 显示螺旋桨削边前后几何对比线图, 可使用户观察到螺旋桨削边前后桨叶的几何改变; 显示削边螺旋桨网格图, 使用户可以看到相应模态分析结果的网格质量如何。由此, 分析结果便相当完整地展现在用户面前。

3 随边削边螺旋桨振动分析软件的程序实现

基于随边削边螺旋桨数学模型与理论求解知识, 利用 QT 开发平台编写程序, 调用 MATLAB 可执行程序与 ANSYS 软件开发出一个软件, 将随边削边螺旋桨几何建模过程及振动分析过程集合起来。

3.1 几何程序实现

螺旋桨的几何参数分为叶切面形状参数与叶切面相对位置参数。叶切面相对位置参数包括剖面半径 (比)、螺距比、导边至参考线距离以及初始纵倾, 叶切面形状参数包括内弦弦长、拱度分布和厚度分布。文献 [9] 根据以上参数的几何关系推导出螺旋桨桨叶表面的数学表达, 如下页式 (1) 所示:

$$\begin{cases} Z_c(r) = Z_m(r) + s \sin \phi(r) - (f \pm t) \cos \phi(r) \\ \theta_c(r) = \theta_m(r) + s \frac{\cos \phi(r)}{r} - (f \pm t) \frac{\sin \phi(r)}{r} + \delta_k \\ Y_c(r) = r \cos \theta_c(r) \\ X_c(r) = r \sin \theta_c(r) \end{cases} \quad (1)$$

式中: 下标 m 、 c 分别表示为鼻尾线中点和桨叶表面点; $s=C(r)(S-1/2)$ 为弦向坐标点, 其中 $C(r)$ 为各叶剖面弦长; S 取值为 $0 \sim 1$; $\phi(r)$ 为各叶剖面螺距角; f 与 t 分别为桨叶各剖面拱度与相应剖面桨叶表面点厚度; $\delta_k=2\pi(k-1)/K$, $k=1, 2, 3, \dots, K$, K 为桨叶数。

选择对各个剖面随边部分桨叶均匀切割的切割方式, 即从叶根处开始切割, 具体切割量分配方式如下:

设各个半径处的切割量占螺旋桨最大弦长的比值为一个三次曲线, 记为 $\delta C(r)$, 且在叶根及叶梢处剖面切割量为 0, 同时叶根半径 R_s 处斜率为 0, 如图 4 所示。

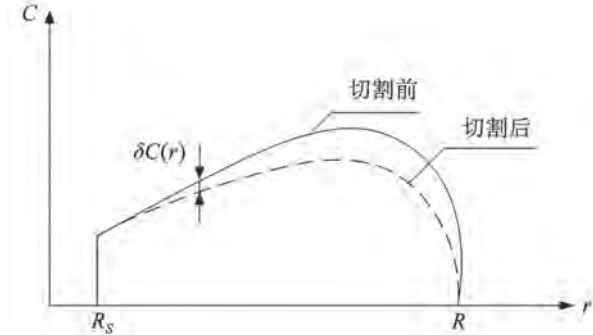


图 4 弦长切割量示意图

根据以上条件, 切割量占最大弦长的比值沿半径方向分布的三次曲线可假设为:

$$\delta C(r) = (r - R_s)(r - 1)(a \times r + b) \quad (2)$$

式中: R_s 为叶根处半径。此时切割量 $\delta C(r)$ 为无量纲值。

假设总切割量占叶片面积的比值为 $x\%$, 则:

$$\int_{R_s}^1 \delta C(r) dr = x\% A \quad (3)$$

式中: A 为无量纲的桨叶面积, 由叶根处至叶梢处的弦长占最大弦长的比值 C_p 积分求得:

$$A = \int_{R_s}^1 \frac{C(r)}{C(r)_{\max}} dr \quad (4)$$

式中: $C(r)_{\max}$ 为切割前所有剖面中的最大弦长。

开始切割的半径 R_s 处切割量分布曲线斜率为 0, 即:

$$\delta' C(r)|_{r=R_s} = 0 \quad (5)$$

研究人员定义切割量大小 $x\%$, 即可得到各半径的无量纲切割量 $\delta C(r)$ 。

各半径剖面处的有量纲随边切割量为:

$$\Delta C = \delta C(r) \cdot C(r)_{\max} \quad (6)$$

确定切割量之后, 将桨叶切割处剖面 ΔC 部分进行切割, 并且在其前 $2\Delta C$ 范围内将压力面修削光滑, 如图 5 所示。

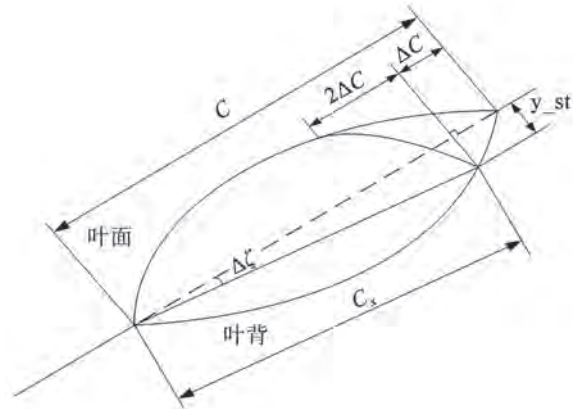


图 5 叶剖面切割示意图

切割后, 叶切面形状参数与相对位置参数值均发生了改变, 螺距角减小量 $\Delta \zeta$:

$$\tan \Delta \zeta = \frac{y_{st}}{(1 - y\%)C(r)} \quad (7)$$

式中: y_{st} 为原弦长下随边切割处的叶背二维坐标, 可由原弦长下其余叶背点的坐标插值得到。

螺距变为:

$$P_x = 2\pi r \tan \left[\zeta_0 - \arctan \frac{y_{st}}{(1 - y\%)C(r)} \right] \quad (8)$$

式中: ζ_0 为切割前螺距角。

各剖面新的侧斜角 $\theta_x(r)$ 与新的纵倾 $x_x(r)$ 为:

$$\theta_x(r) = \theta_{m0} - \frac{1}{2} y\% C(r) \cos \zeta_0 / r + \frac{1}{2} y_{st} \sin \zeta_0 / r \quad (9)$$

$$x_x(r) = x_{m0} - \frac{1}{2} y\% C(r) \sin \zeta_0 - \frac{1}{2} y_{st} \cos \zeta_0 \quad (10)$$





切割后新的弦长 C_x 为:

$$C_x(r) = \frac{(1-y\%)C(r)}{\cos \Delta \zeta} \quad (11)$$

新的叶面坐标与其弦向坐标表达式为:

$$S'_1 = S_1 \cos \Delta \zeta + Y_1 \sin \Delta \zeta \quad (12)$$

$$Y'_1 = Y_1 \cos \Delta \zeta - S_1 \sin \Delta \zeta \quad (13)$$

新的叶背坐标与其弦向坐标表达式为:

$$S'_2 = S_2 \cos \Delta \zeta + Y_2 \sin \Delta \zeta \quad (14)$$

$$Y'_2 = Y_2 \cos \Delta \zeta - S_2 \sin \Delta \zeta \quad (15)$$

由 MATLAB 程序求解以上方程, 可得到直径削边螺旋桨三维坐标, 并生成实现随边削边螺旋桨几何建模的 APDL 命令流文件, 程序流程见图 6。

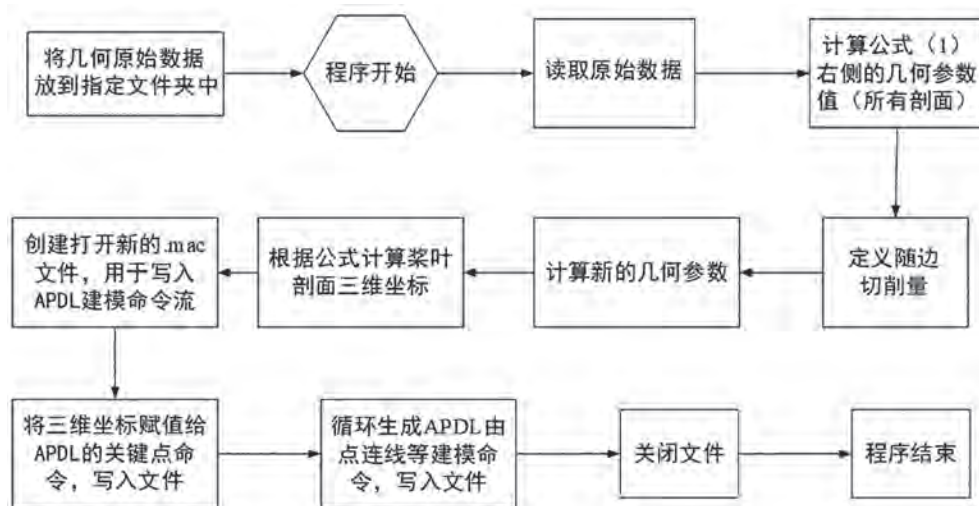


图 6 MATLAB 程序流程图

将 APDL 命令流文件导入 ANSYS 软件中即可完成随边削边螺旋桨自动化几何建模。

3.2 振动分析仿真程序实现

ANSYS 软件对螺旋桨进行振动分析步骤为: 赋材料属性、选取单元类型、网格划分、设置边界条件以及选择模态求解方法进行螺旋桨模态求解, 材料属性包括弹性模量、泊松比和密度。大型三维实体结构需要选择实体单元进行有限元计算, 本文选择四面体单元对螺旋桨进行网格划分, 并且选择四面体单元中目前性能最好的 solid187 单元。网格划分时, 选择由面分割尺寸定义网格大小。边界条件为固定桨毂。模态求解方法选择分块兰索斯法。以上部分的 APDL 代码如图 7 所示。

图 7 中, APDL 命令流也如上一节由 MATLAB 写入到 APDL 命令流文件, 接着导入 ANSYS 软件完成削边螺旋桨振动分析。

```

ET,1,SOLID187
MP,EX,1,72 000 000 000
MP,PRXY,1,0.300 000
MP,DENS,1,2 800
allsel,all
VATT,1,,1,0
AESIZE,all,0.002 5,
MSHAPE,1,3D
MSHKEY,0
VMESH,all
/SOL
CSYS,4
ASEL,s,LOC,x,-0.06-0.001,-0.06+0.001
CSYS,1
ASEL,r,LOC,x,3.048 000e-02-0.001,0
DA,all,all,
ANTYPE,2
MODOPT,LANB,15
EQSLV,SPAR
MXPAND,15,,0
LUMPM,0
PSTRES,0
MODOPT,LANB,15,0,0,OFF
/STATUS,SOLU
SOLVE
FINISH
  
```

图 7 ANSYS 模态计算命令流

3.3 基于 QT 的软件界面程序

螺旋桨随边削边振动分析界面的设计目的在于提供 1 个界面供用户计算得到螺旋桨在任意直径切割量下的振动模态。几何参数值可以由用户输入,也可以由数据库文件导入。具体来讲就是由 QT 程序生成 1 个界面,用户可在界面导入螺旋桨几何、削边、材料及模态计算参数值,由 QT 后台程序调用 MATLAB 可执行文件与 ANSYS 软件生成相应参数下的削边螺旋桨模态分析结果。用户可点击相应按钮读取模态分析结果到界面。其中,调用过程具体为:将用户在界面定义保存的几何参数文件由 MATLAB 读入,生成相应几何参数下的螺旋桨三维坐标、APDL 建模与振动分析命令流文件;接着调用 ANSYS 软件读入 MATLAB 生成的 APDL 命令流,生成螺旋桨的削边前后几何对比线图、网格图、固有频率及振型图;再由 QT 程序读入显示到界面中即可,程序编写逻辑如图 8 所示。

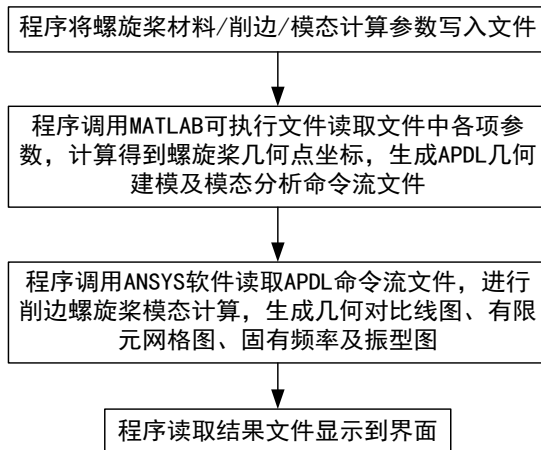


图 8 程序编写逻辑

其中, MATLAB 可执行文件为打包好的 MATLAB 主程序文件, 代替 MATLAB 软件实现相应操作, 用户电脑不需要再安装 MATLAB 软件。QT 程序调用 MATLAB 可执行文件的代码如图 9 所示, 调用 ANSYS 软件实现螺旋桨几何线图绘制的程序如图 10 所示。

```

QProcess p(0);
p.execute("../jihe_xiantu.exe");
  
```

图 9 调用 MATLAB 可执行程序的 QT 程序 (几何线图部分)

```

string path= "C:\\Program Files\\ANSYS Inc\\v193\\ansys\\bin\\winx64\\MAPDL.exe"
" -p ansys -np 2 -lch -dir C:\\Qt\\qt_job\\ANSYS_DATA -j pro_xiantu -s "
" read -l en-us -b -1 C:\\Qt\\qt_job\\ANSYS_DATA\\jihe_xiantu.dat"
" -o C:\\Qt\\qt_job\\ANSYS_DATA\\pro_xiantu.out" ;

WinExec(path.c_str(),SW_HIDE);
  
```

图 10 调用 ANSYS 软件的 QT 程序 (几何线图部分)

QT 程序编写完成后, 需将 QT 程序 release, 使之脱机运行。这样, 电脑便不需要安装 QT 软件, 只需安装 ANSYS 软件即可使用该软件进行削边螺旋桨的模态计算。

4 算例验证

选择 4383 桨对软件进行验证, 桨的主要几何参数和材料属性见表 1。

在几何要素输入平台输入或导入 4383 桨原始几何参数值, 在直径削边振动分析平台输入或导入材料及模态计算参数值, 将直径削边量定义为 0,

表 1 螺旋桨主要参数

主要参数	数 值
叶 数	5
直径 /m	0.304 8
杨氏模量 /GPa	72
泊松比	0.3
密度 /(kg · m ⁻³)	2 800
毂径比	0.2

点击执行按钮, 计算 4383 桨模态。得到其前五阶固有频率, 与文献 [10] 的计算结果进行对比, 结果



及相对误差见表 2。

表 2 固有频率比较

阶 数	固有频率		
	本文结果 /Hz	Young 结果 /Hz	相对误差 /%
第一阶	488.34	476.682	2.4
第二阶	956.97	997.431	4.1
第三阶	1 276.7	1 269.42	0.5
第四阶	1 733.7	1 779.78	2.6
第五阶	2 364.6	2 424.88	2.5
注：相对误差 = Young 结果 - 本文结果 /Young 结果 × 100%			

表 2 第 3 列为文献 [10] 中的计算结果。对比可以看出，两者前五阶固有频率的计算结果接近。由此证明本文的螺旋桨有限元模型以及模态分析结果是正确的，也证明了软件界面程序是正确的。

5 结 语

由于螺旋桨几何曲面复杂，随边削边前后几何形貌改变，且需进行多次相似几何建模与振动分析，基于 QT 平台开发螺旋桨随边削边振动分析软件，实现随边削边螺旋桨几何建模及振动分析自动化是很有必要的。该软件可一键预估随边削边螺旋桨的

振动模态，实现对随边削边螺旋桨的振动模态的理论分析，有效提高工作效率。

参考文献

[1] 杨磊. 船舶水动力学性能多学科设计优化研究 [D]. 北京：中国舰船研究院, 2017.

[2] 姚月兵. 螺旋桨削边改造振动分析方法研究与软件系统开发 [D]. 武汉：华中科技大学, 2021.

[3] 卢恒荣, 卢冠钟, 蒋更红. 旧船舶主机降速运行的情况下对螺旋桨的改进设计 [J]. 机电设备, 2009 (3): 5-7.

[4] 陈朝辉, 刘艳, 周力. 随边切割后的螺旋桨性能的试验研究 [C] // 全国船舶与海洋工程学术会议. 2009.

[5] 曹梅亮. 切割桨叶随边以适应船 - 机 - 桨的匹配 [J]. 上海交通大学学报, 2000 (1): 148-151.

[6] 吴飞, 吴国妹. 翼形法在船舶机桨不匹配处理中的应用 [J]. 江苏船舶, 2014 (1): 42-43.

[7] 欧礼坚, 李德玉, 欧家铭, 等. 螺旋桨削边技术减振的分析及应用 [J]. 广东造船, 2016 (3): 31-32, 45.

[8] 李亮, 辛公正, 白银平, 等. 实尺度螺旋桨抗唱音削边对梢涡空泡起始影响试验研究 [J]. 中国造船, 2021(3): 231-239.

[9] 王国强, 董世汤. 船舶螺旋桨理论与应用 [M]. 哈尔滨：哈尔滨工程大学出版社, 2007.

[10] YOUNG Y L. Time-dependent hydroelastic analysis of cavitating propulsors [J]. Journal of Fluids & Structures, 2007 (2): 269-295.