

船舶轴系双通道轴功率与扭振应力测量分析软件研发

庞胜利¹, 李日财¹, 付世伟², 郭茹侠³

(1. 西安邮电大学 通信与信息工程学院, 西安 710121; 2. 西安邮电大学 电子工程学院, 西安 710121; 3. 长安大学 信息工程学院, 西安 710061)

摘要: 为了实现船舶双推进轴系轴功率及扭振应力的动态测量, 开发设计了轴功率与扭振应力测量分析软件, 描述了轴功率及扭振应力测量的基本原理及所需设备, 测量软件通过对船舶推进轴系的扭矩和转速的实时采集和计算转换, 实时计算出轴功率及扭振应力, 并且能够实时显示和存储扭矩, 转速, 轴功率即扭振应力; 同时根据测量圈数对扭振应力进行频域分析, 通过数据回放功能能够选择指定测量文件进行回放观察; 最后, 实船测试表明, 该系统测试精确度高, 轴功率与扭振应力分析结果显示直观, 满足了船舶双推进轴系轴功率与扭振应力分析的设计要求。

关键词: 船舶轴系; 轴功率; 扭振应力

Software Development on Ship Shafting Dual Channel Shaft Power and Stress Measurement of Torsional Vibration Analysis

Pang Shengli¹, Li Ricai¹, Fu Shiwei², Guo Ruxia³(1. Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, China;
2. School of Information Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: In order to achieve the ship double shaft power propulsion shafting and dynamic measurement of torsional vibration stress, the shaft power and torsional vibration stress software on measurement and analysis was developed and designed. The basic principle of shaft power, the torsional vibration stress measurement and the required equipment was described. Through ship propulsion shafting of torque and rotational speed of real-time acquisition and conversion, measuring software was able to calculate the shaft power and the torsional vibration stress and display and storage of torque, rotating speed and shaft power and the torsional vibration stress in real time. At the same time, according to the measurement turns, torsional vibration stress was analyzed in the frequency domain. The data playback can select specified measured file with playback observation. Prototype test shows that the system test precision is high. Shaft power and torsional vibration stress analysis results are showed intuitively, which satisfy the design requirements on ship's double propulsion shafting shaft power and torsional vibration stress analysis.

Keywords: ship shafting; shaft power; torsional vibration stress

0 引言

轴功率是船用柴油机及其动力装置最重要的性能参数之一, 可通过间接测量轴系的输出扭矩和转速得到^[1]。在新船出场交付或在船舶动力装置修理后, 都需要进行实船测试并测定其有效功率。此外, 在船舶运行过程检测机组工况及故障诊断时, 也要进行轴功率测量。

本文基于 Delphi, 利用其面向对象易于开发、第三方控件成熟众多可完成各类界面美化设计等特点, 进行轴系双通道轴功率与扭振应力测量分析软件系统的开发, 通过对船舶推进轴系的扭矩、转速的实时采集和分析处理, 实现了轴功率与扭振应力的实时测量分析。不仅能够实时显示和存储测量数据文件, 还能够通过数据回放功能选择指定测量文件进行显示分析。

1 测试计算原理

扭矩是船舶轴功率测试中的关键, 通过扭矩和转速可求得轴功率与扭振应力, 船舶上经常采用传递法来测量扭矩。传递

法是指根据弹性轴在收到转矩作用时产生的变形、应力或应变与扭矩的关系来测量扭矩的方法^[2]。传递法根据测量的参数不同, 可分为扭转角型, 应力型和应变型。目前, 扭转角型和应变型这两种扭矩测试方法被广泛应用于船舶轴功率测量中。扭转角法是通过直接或间接测得扭转角 θ , 即扭振幅度, 然后根据扭振计算出扭矩值。这种方法测量实现简单, 但由于测量和计算中都存在精度问题, 最后计算得到的轴功率与扭振应力结果误差较大。本文采用的是应变型测量方法, 通过沿给定轴 $\pm 45^\circ$ 方向上分别黏贴 4 片应变片^[3-5], 将其组成惠斯顿电桥, 通过 Torque Trak 10 K (TT10 K) 将应变量转换成电压值输出后计算扭矩。应变片黏贴方式如图 1 所示。

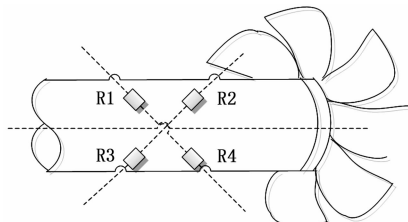


图 1 应变片黏贴方式

轴系双通道轴功率与扭振应力测量分析系统扭矩测量利用 TT10K 扭矩遥测和应变计实现, 转速测量采用磁阻传感器实现。系统结构如图 2 所示。

收稿日期:2015-08-22; 修回日期:2015-09-18。

基金项目:西安邮电大学青年教师科研基金资助项目(ZL2010-01)。

作者简介:庞胜利(1980-),男,河北邢台人,讲师,硕士,主要从事物联网技术方向的研究。

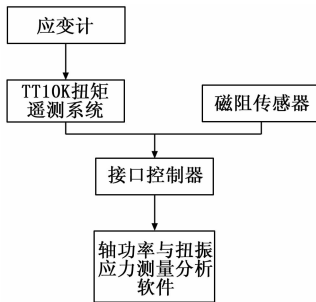


图 2 轴系双通道轴功率与扭振应力测量分析系统结构框图

1.1 扭矩测量原理

测量发动机轴的扭矩采用电阻应变片法, 把应变片贴到发动机轴上(如图 1 贴法), 原理是发动机轴系转动中, 贴在轴系上的电阻应变片会随着轴的变动发生形变, 这样电阻应变片阻值就会改变, 阻值的变化会带来电压值的变化, 利用放大器把微弱的电压变化值放大后, 通过 AD 转换之后, 通过 USB 或网口发送给轴系双通道轴功率与扭振应力测量分析软件进行扭矩计算。把就可以求得轴的扭矩^[6]。AD 采集频率将随着磁阻传感器送来的的转标信号产生不同的变化, 以确保采集的精确性。

电压值与被测轴的扭矩成正比, 满足如下计算公式^[7]:

$$M_e = \frac{V_{out}}{10} \times M_{FS} = \frac{V_{out}}{10} \times \frac{V_{FS} \pi E \times 4(d_0^4 - d_i^4)}{16000 V_{EXC} k_{GF} N(1 + \mu) G_{XMT} d_0} \quad (1)$$

式中, V_{out} 为扭矩遥测系统接收机调理后的输出电压 (V); M_{FS} 为满量程扭矩 ($N \cdot m$); V_{FS} 为满量程电压 (V); E 为轴材料的弹性模量 ($N \cdot mm^2$); d_i 为轴内径 (mm); d_0 为轴外径 (mm); V_{EXC} 为电桥励磁电压 (V); k_{GF} 为应变片灵敏系数; N 为电桥桥臂数; μ 为轴材料的泊松比; G_{XMT} 为扭矩遥测系统发射装置的放大倍数。

本系统采用的是 16 位 AD 进行电压采样, 则要某点的采集值为 N , 则该点的电压值为: $V_{out} = N/2^{16} \times 10$, 再将计算得到的电压带入 (2) 式中计算即可。

1.2 转速测量原理

转速测量采用频法, 即通过测量正对飞轮安装的磁阻传感器产生的脉冲信号个数来确定转速。磁阻传感器正对飞轮安装, 轴运行时, 飞轮没转过一个齿轮即产生一个脉冲, 输出到接口控制器通过计数器进行计数, 轴的转速可根据下式计算^[8]:

$$n = 60N/Mt \quad (2)$$

式中, n 为被测轴转速 (r/min); t 为接口控制器计数时间, 根据计数器工作频率计算, 本系统采用的计数器工作频率为 36M; N 位时间 t 内计数器测定的脉冲数; M 为飞轮齿数。

1.3 轴功率计算

对以轴为输出装置的柴油机来说, 轴功率 P_e 的计算公式如^[7]:

$$P_e = (M_e \times n)/9550 \quad (3)$$

式中, M_e 为轴的输出扭矩 ($N \cdot m$); n 为轴的转速 (r/min)。因此, 只要通过公式 (1)、(2) 计算出实时扭矩和实时转速即可带入 (3) 式中计算得到实时轴功率。

1.4 扭振应力计算

扭振应力即在在扭矩作用下, 轴表面微体中最大切应力。根据材料力学可知切应力大小 τ 计算公式为:

$$\tau = \frac{M_e}{W_p} \quad (4)$$

式中, W_p 为轴的抗扭截面系数, 仅与截面尺寸有关。 M_e 为被测轴输出扭矩。又根据材料力学有:

$$W_p = \frac{J_p}{R} \quad (5)$$

式中, J_p 为极惯性矩, R 为轴外半径, 将上两式代入 (5) 中即可求得轴的抗扭截面系数 W_p , 再代入 (4) 中最终得扭振应力公式为:

$$\tau = \frac{16M_e}{\pi d_0^3(1 - \partial^4)} N/mm^2; \partial = \frac{d_i}{d_0} \quad (6)$$

这样便可通过扭矩求得最终的扭振应力。

2 软件总体方案设计

2.1 软件功能设计

图 3 所示为软件总体功能架构图。

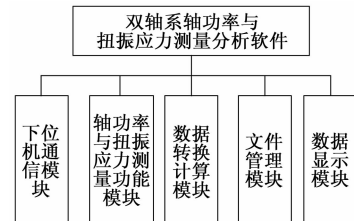


图 3 软件总体功能架构图

下位机通信模块主要功能是与下位机通过 USB 或网口进行通信, 如告诉下位机进行哪种测量, 测量的参数为多少, 并接收下位机回送过来的测量数据; 轴功率与扭振应力测量功能模块则是完成轴功率与扭振应力测量功能, 包括测量参数设置, 数据回送帧解析等功能; 数据转换模块主要功能为根据拉依达准则剔除接收到的测量数据中的异常值, 然后进行转换和计算, 得到实时扭矩、实时转速、实时轴功率以及实时扭振应力, 并根据转标信号对扭振应力进行频域分析得到频域的谱次振幅等数据; 文件管理模块的主要功能是将测量时的一些周边数据如测量时间、测量地点、几个通道以及重要的测量数据等存成测量文件以待后面的测量人员分析; 数据显示模块则是根据保存的测量文件, 将经过数据转换和处理的数据绘成时域波形图、频域图以及频谱表等。

2.2 软件功能模块详细设计

2.2.1 文件管理模块

软件的数据包括实时测量的数据和历史测量存储的数据。实时测量的数据主要为计算时需要的采集值以及一些参数设置, 软件将接口控制器发送来的数据经过解析计算后实时写入文件中。文件新建采用拷贝事先建立好的 temp.db 数据库文件的方式建立数据库文件, 并保存为 *.PWM 格式。数据库中包含有三张表: 测量任务信息 tb_Task; 测量工况数据 tb_Data; 测量工况参数设置 tb_Parameter。其中测量任务信息表中包含有本次任务的信息, 如任务测试船名, 测试人, 测试开始信息, 备注以及该任务包含工况总数等; 测量工况数据表中包含有单次工况号, 该工况点数、圈数, 每点的实时采集值, 转换计算后的实时扭矩、实时转速、实时轴功率、实时扭振应力值以及本工况中总的平均扭矩、平均轴功率和平均扭振应力值; 测量工况参数设置表中则包含用于与测量数据对应参与计算的单次工况号以及计算原理中计算所需的参数如轴内径、轴外径、弹性模量等^[8]。

2.2.2 轴功率与扭振应力测量模块

轴功率与扭振应力测量中, 需要扭矩值, 而扭矩值可由

TT10K 输出的电压值计算得到。计算扭矩值，需要很多参数，即需要预先设置好测量参数，同时测量参数中包含有本次工况预期需要的测量时间设置或测量圈数设置。测量时，软件将接收到的转速数据，智能调整接收数据的间隔，同时将测量数据经过转换计算后动态显示出来。

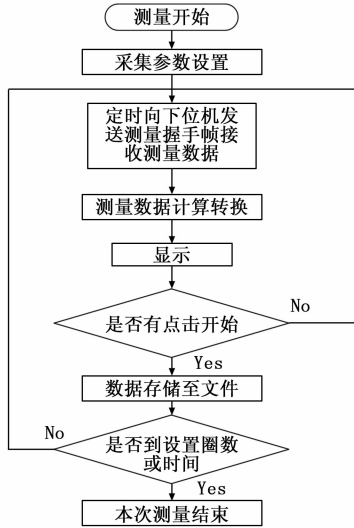


图 4 轴功率与扭振应力测量的流程图

2.2.3 通信模块设计

为完成与接口控制器高效稳定的数据交互通信，利用 USB 接口及网口开发通信模块。同时考虑到测量的实时性较高，故单独创建一通信线程用于与接口控制器通信，其中以以太网通信采用阻塞方式。在通信线程中加上 USB 及网口接口支持，完成比通用串口更加高速有效的信息交互。同时将整个通信线程封装有 USB 接口端口号和超时设置，网口 IP 地址及端口号等设置信息、数据暂存的接收数据数组、发送命令数组存储空间以及用于发送、接收以及解析数据帧的函数及过程。

2.2.4 数据显示模块

轴功率、扭振应力测量完毕后即进行计算，即可得到轴功率、扭振应力时域信号以及对扭振应力根据圈数做 FFT 变换后的频谱图形、数据表 (0.5~16 谱次)^[9]。

轴功率时域如图 5 所示，这是采集原始数据显示的轴功率图，还存在一些野值需要剔除，扭振应力时域如图 6 所示，扭振应力频域分析如图 7 所示。



图 5 轴功率时域图

2.2.5 数据转换计算模块

根据最前面所述的测量原理，根据奈尔准则进行剔除图 5 中的野值。

奈尔准则： $y_i = (\bar{x}_i | i - x_i)$, \bar{y} 为 y_i 的平均值。

构造统计量 $r = \frac{y_i - \bar{y}}{\sigma}$ ，式中 σ 为已知的观测误差总体标准差。

奈尔推导证明出统计量 r 的分布函数为：

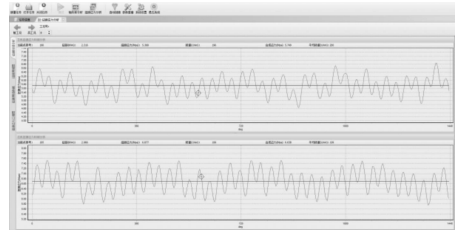


图 6 扭振应力

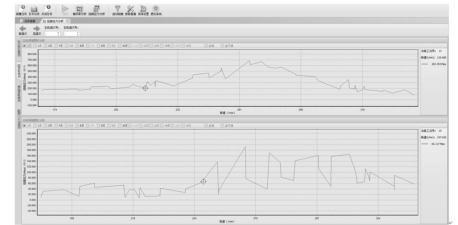


图 7 扭振应力频域图

$$F(u) = P(r \leq u) = P(y_n \sqrt{\frac{(n-1)}{n}} \leq u) = \frac{n!}{(2\pi)^{n-1}} \int_0^u \sqrt{\frac{n}{(n-1)}} \int_0^y \sqrt{\frac{n}{(n-2)}} \dots \int_0^{y_3} \sqrt{3} \exp(-\frac{1}{2} \sum_{i=2}^n y_i^2) dy_2 \dots dy_{n-1} dy_n = n \int_0^u \sqrt{\frac{n}{(n-1)}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp(-\frac{1}{2} y_n^2) F_{n-1}(y_n \sqrt{\frac{n}{(n-1)}}) dy_n = \frac{n\sqrt{n}}{\sqrt{n-1}} \int_0^u \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp[\frac{-nz^2}{2(n-1)}] F_{n-1}(\frac{n}{n-1}z) dz$$

奈尔检验的临界值见文献[10]。选定显著性水平 α ，由 n 查表确定临界值 $R(\alpha, n)$ ，可以得到 $P(r > R(\alpha, n)) = \alpha$

因此有如下的判别准则：若统计量

$$\frac{x_i - \bar{x}_i}{\sigma} > R(\alpha, n)$$

则认为对应的观测值 x_i 为野值，应予剔除；否则为正常，保留数据。

粗大误差的剔除是一个反复的过程，当剔除了一个异常值后，应重新计算标准差，再进行验证。图 5 与图 8 对比可以看出有明显的改善，没有比较大的野值存在了。



图 8 轴功率时域图处理之后

在软件得到接口控制器的测量采集值后，通过数据转换计算模块将采集值经过计算转换成每点的实时轴功率和实时扭振应力以及经过 DFT 变换后的各谱次扭振应力值，并通过文件管理模块保存成为对应工况的 *.PWM 文件，通过数据显示模块显示。

3 实验结果与分析

应用本文研制的双轴系轴功率与扭振应力测量分析软件，

在某船厂 32Wt 油轮上进行了轴功率测量, 测量参数中额定功率为 9 480 kW, 额定转速 127 r/min, 推进轴直径 420 mm。按照试航大纲要求, 测量主机负载在 50%, 75%, 90% 和 100% 4 种工况下额轴功率, 测量结果如表 1 所示。

表 1 码速率准确度和稳定度测

主机负载	扭矩 N/m	转速 r/min	轴功率/kW
50%	390 340.7	101.2	4 132.2
75%	533 278.7	115.6	6 450.1
90%	601 456.3	123.3	7 752.8
100%	641 352.9	126.9	8 631.1

4 结语

船舶轴功率与扭振应力测量是实船测试的一项重要环节, 而轴功率与扭振应力测量分析软件也是轴功率与扭振应力分析系统中的重要组成部分。

本文设计的轴功率与扭振应力测量分析软件针对轴功率与扭振应力测量分析的精度问题, 设计了测量参数设置环节, 尽量保证对扭矩信号完成整周期采样。在实时采集数据的同时, 根据测量数据换算出轴功率和扭振应力并根据整转数据完成扭振应力整周期 FFT 变换得到频谱图; 同时将原始数据及参数信息, 计算转换后的轴功率与扭振应力数据及扭振应力 FFT 变换数据保存写入文件中, 便于进一步的调用和分析。同时对数据进行统计分析, 剔除异常的测量数据。测量软件功能完

善, 界面友好, 用户操作体验方便简单, 通过实船测试, 也验证了测量软件的精确性、可靠性和实用性, 可在轴系测量及分析中得到广泛的应用。

参考文献:

[1] 俞 汲, 胡 琼, 徐 杰. 基于 LabVIEW 的轴功率测量系统软件的设计 [J]. 船舶工程, 2010 (S2): 61-64.
 [2] 甘少炜, 范世东, 周 刚. 船舶柴油机轴功率测量系统的设计与实现 [J]. 船海工程, 2006 (01): 25-27.
 [3] 段 然, 肖立峰. 材料拉伸试验中影响应变片测量精度的因素分析 [J]. 机械设计, 2013 (12): 76-80.
 [4] 张晚晴, 陈睿颖, 陈泽生, 等. 应变片贴片位置对轮轨横向水平力测试精度的影响 [J]. 城市轨道交通研究, 2012 (03): 58-60+68.
 [5] 吕凡任, 邵红才, 金耀华, 等. 正压力对电阻应变片应变测量影响的试验研究 [J]. 工业建筑, 2012 (06): 98-101.
 [6] 李 震, 桂长林, 孙 军. 内燃机曲轴轴系振动分析研究的现状、讨论与展望 [J]. 内燃机学报, 2002 (05): 469-474.
 [7] 王 磊. 船舶复杂推进轴系扭振机理及计算软件研究 [D]: 武汉理工大学, 2011.
 [8] 仇学敏. 分析软件开发中数据库设计理论的实践 [J]. 制造业自动化, 2012 (15): 91-93.
 [9] 蔡鹏飞, 徐 荣, 郭宜斌, 等. 含有皮带驱动附件的船舶柴油机轴系扭振分析 [J]. 舰船科学技术, 2015 (03): 77-80.
 [10] 王中宇, 刘智敏, 夏新涛, 等. 测量误差与不确定度评定 [M]. 北京: 科学出版社, 2008.

(上接第 289 页)

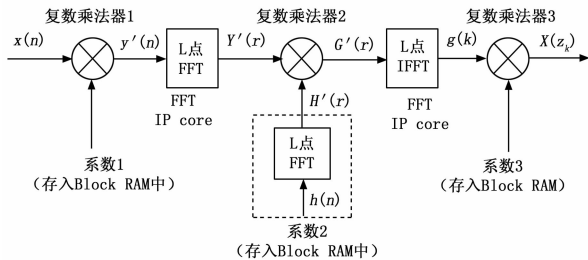


图 5 CZT 算法具体实现流程

运算的 IP 核对其进行 FFT 运算, 结果同系数 2 进行复数乘法, 对该结果 $G'(r)$ 进行 IFFT 运算, 其结果同系数 3 进行复数乘法, 截取该结果的前面 M 点。由于 FPGA 内部运算时, 信号位数会增加, 考虑资源的情况, 必须对结果进行截位。所以在设计中, 必须对每一步计算结果的信号进行截位以及时序的对齐。

对于图 2 中 ZFFT 的计算过程, 在 FPGA 中实现时, 具体的流程如图 6 所示。

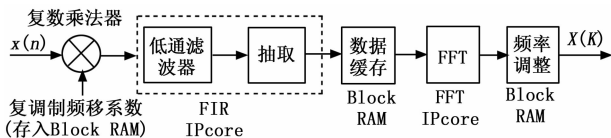


图 6 ZFFT 算法具体实现流程

对于 ZFFT 算法的实现过程, 主要也是将相应的系数存入 Block RAM 中, 实现过程中也调用的 FPGA IP 核中自带的运算算法, 在频率调整时, 由于在 MATLAB 中采用 fftshift 函数对频谱进行翻转, 而在 FPGA 中, 可以通过把 FFT 后的数据存入 Block RAM 中, 然后读取时, 先读取后半部分的数据, 再读取前半部分的数据来实现。对于这些设计方法, 在 FPGA

中实现起来都比较简单、方便。而且 FPGA 运算速度快, 也能很好地满足工程需求。

4 结束语

本文主要比较分析了 CZT 算法和 ZFFT 算法在频谱细化中的性能, 通过 MATLAB 仿真分析得到这两种算法在频谱细化性能中相比较传统的 FFT 算法有很大的提高, 并且 ZFFT 算法性能也稍优于 CZT 算法, 最后给出了在 FPGA 中实现这两种算法的具体步骤。这种实现方法已经在工程上得到一定应用^[9-10]。

参考文献:

[1] 李天响, 葛临东. 两种快速频域细化分析方法的研究 [J]. 系统工程与电子技术, 2004, 26 (9): 1192-1194.
 [2] 胡广书. 数字信号处理理论算法与实现 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
 [3] 丁 康, 潘成灏, 李巍华. ZFFT 与 Chirp-Z 变换细化选带的频谱分析对比 [J]. 振动与冲击, 2006, 25 (6): 9-12.
 [4] 谢 明, 丁 康. 基于复解析带通滤波器的复调制细化谱分析的算法研究 [J]. 振动工程学报, 2002, 15 (4): 479-483.
 [5] 王 力, 张 冰, 徐 伟. 基于 MATLAB 复调制 ZOOM-FFT 算法的分析与实现 [J]. 舰船电子工程, 2006, 26 (4): 119-121.
 [6] 赵宏强. 频谱细化算法分析 [J]. 四川兵工学报, 2013, 34 (5): 105-109.
 [7] 张军团, 程德福, 林 君. 储油罐液位监测雷达设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2004, 12 (11): 1040-1042.
 [8] 张 红, 王晓红, 郭 昕. 提高线性调频连续波雷达测距精度的 ZFFT 算法 [J]. 航天电子对抗, 2006, 22 (1): 48-51.
 [9] 王向辉, 高天德, 郭秀炎, 等. 基于 LabVIEW 的吸声系数测试系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2011, 19 (5): 1014-1016.
 [10] 马 可, 来晋峰, 李慧敏, 等. CZT 在双频连续波雷达信号处理中的应用分析 [J]. 火控雷达技术, 2014, 43 (3): 46-49.