

# 派弦传感器在船舶应力监测系统中的应用

**摘要:** 船舶在航行过程中受到多种力的作用,而目前船舶上几乎都没有结构安全监测系统,船员无法掌握其受力状态,不能及时了解各关键部位的应力情况。通过对派弦传感器特性及应用方法的研究,将派弦传感器应用于船舶结构安全监测系统,实现了船舶应力的长期、实时监测。

**关键词:** 派弦传感器; 船舶; 应力; 监测

中图分类号: TP212.1 文献标识: A 文章编号: 1006-883X(2009)03-0036-04

►► 袁广超 田旭东 陈恩 程镇 鲁飞

## 一、概述

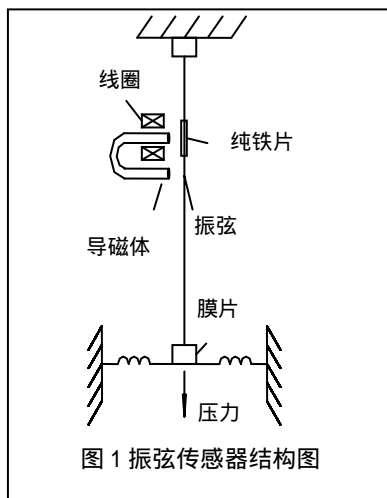
在应力、应变测量中通常的做法是使用电阻式应变片,把电阻应变片粘贴在被测试件上,当被测试件受力形变时,应变片也随之一起形变,从而引起应变片电阻的变化,测出其电阻的变化量,即可计算出被测试件的受力大小或应变。对于需要长期观测的被测试件,由于其不断受到拉伸或压缩,一方面使应变片疲劳、蠕变,另一方面会使应变片与被测试件之间的粘贴剂发生变化,造成虚假的视应变。因此,电阻应变片不适合需要长期监测的场合。而派弦式传感器可以埋入或焊接在被测试件上,基本不存在粘贴剂老化、脱落问题。此外,它还有结构简单、精度高、抗干扰能力强以及对电缆要求低等诸多优点,因而一直受到工程界的关注。但是,由于历史的原因,其长期稳定性一直备受争议,直到上世纪70年代,随着现代电子读数仪技术、材料及生产工艺的发展,派弦式仪器技术不断的得以完善,已成为新一代工程仪器的潮流,被广泛应用于大坝、桥梁、公路等土木工程监测中。在海上航行的船舶,船体处在复杂的受力状态,为分析船体的受力情况,在船舶下水试航时,船舱中往往到处贴满应变片,而在交付使用时则被拆除。因此,船舶在正常使用过程中,无法监测船体的受力,受中船集团某研究所的委托,我们对派弦传感器应用于船舶应力监测的可行性与方法展开了研究。

## 二、派弦传感器的工作原理<sup>[1]</sup>

派弦传感器由定位支座、线圈、派弦、温度补偿传感器以及封装外壳等组成,如图1所示。

派弦上装有一块小纯铁片,其旁放置电磁铁,当电磁铁线圈通入脉动电流  $i$  后,电磁铁就吸住小铁片(派弦);当线圈中无电流流过,电磁铁就释放派弦,如此循环激励,于是弦就产生振动。当停止激励时,由于惯性的作用,弦继续做阻尼振动,电磁铁线圈中产生感应电动势,感应电动势的频率与弦的阻尼振动频率相等。

当弦受到的压力为零时,弦以其固有频率  $f_0$  振动。当弦受到压力  $P$  时,派弦张紧力  $T$  改变,弦的谐振频



率  $f$  也随之变化, 这样就可根据线圈感应电动势的频率来测量振弦的振荡频率  $f$ 。

振弦的振动频率(谐振频率)与材料的应力、长度和质量有关, 它们之间的关系为:

$$f = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{F}{M}} \quad (1)$$

$$M = \frac{\rho A}{g} \quad (2)$$

$$F = \varepsilon E \quad (3)$$

式中,  $f$ —弦的谐振频率;

$L$ —弦的长度;

$M$ —单位长度弦的质量;

$F$ —弦的张力;

$\rho$ —弦的密度;

$A$ —弦的横截面积;

$g$ —重力加速度;

$\varepsilon$ —弦的应变;

$E$ —弦的杨氏模数。

将上面公式合并, 得出:  $f = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{\varepsilon E g}{\rho A}} \quad (4)$

### 三、振弦传感器的特性研究

测量弦的振动频率的变化, 首先要有激励信号, 使弦振动。那么, 给一个怎样的信号使弦既容易起振, 振动的幅度大, 而且持续的时间较长呢? 为此, 我们对振弦传感器的谐振特性做了研究:

用频率连续变化的正弦信号激励, 根据振弦传感器的工作原理, 当正弦信号的频率与弦的谐振频率相同时, 弦就可以起振。我们用一从低到高连续变化的正弦信号激励传感器, 弦谐振时的频率为  $f_L$ , 再用从高到低变化的信号去激励, 弦谐振时的频率为  $f_H$ , 两个谐振频率的差值  $\Delta f = f_H - f_L \leq 0.7 \text{ Hz}$ 。这说明振弦传感器的品质因数  $Q$  值很高, 谐振时输出信号的通频带很窄, 要使这种传感器谐振激励信号的频率与弦的谐振频率应非常接近。因此, 使这种传感器起振是比较困难的, 反过来, 也证明了这种传感器的抗干扰能力强。

用占空比为 0.5 的方波激励, 调节方波信号的频率, 在不同的频率点都能使弦谐振。

在弦谐振时, 调节方波信号的占空比, 对弦谐振基本

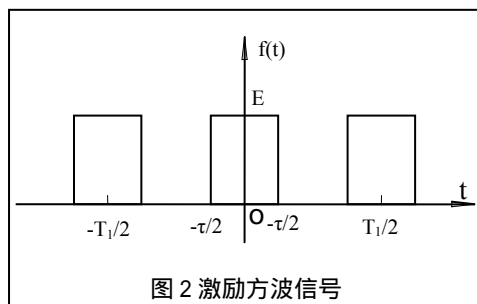


图 2 激励方波信号

无影响。

调节激励电流的大小, 当激励电流较大时, 传感器谐振波形较差, 其上含有较多的高频成份; 当激励电流过小时, 谐振波形的振幅很小, 持续时间较短; 当激励电流在十几毫安到几十毫安时, 谐振波形比较光滑、振幅较大, 且在一定范围改变

激励电流, 输出波形基本不变。

无论是正弦信号激励还是方波信号激励, 当弦谐振时, 撤去激励信号, 弦仍然振荡, 其谐振频率不变, 只是弦的振动幅度是逐渐变小的。

因此, 振弦传感器具有如下特性: 正弦信号或方波信号激励都能使弦谐振; 振弦传感器具有弱电流激励的特性; 谐振时, 撤去激励信号, 振弦作阻尼衰减振荡; 传感器受到的拉伸力或压缩力不同时, 弦的谐振频率也不同; 只要不断地间断激励, 振弦传感器就能可靠、有效、连续地谐振。

### 四、激振信号分析

由上面实验可知, 用方波信号激励振弦传感器较易使其谐振, 其原因分析如下:

激励信号如图 2 所示, 将它展开为付立叶级数有:

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega_1 t + b_n \sin n\omega_1 t) \quad (5)$$

式中:  $\omega_1 = 2\pi f_1 = \frac{2\pi}{T_1}$

$$a_0 = \frac{1}{T_1} \int_{-\frac{T_1}{2}}^{\frac{T_1}{2}} f(t) dt = \frac{1}{T_1} \int_{-\frac{\tau}{2}}^{\frac{\tau}{2}} E dt = \frac{E\tau}{T_1}$$

$$a_n = \frac{2}{T_1} \int_{-\frac{T_1}{2}}^{\frac{T_1}{2}} f(t) \cos n\omega_1 t dt = \frac{2}{T_1} \int_{-\frac{\tau}{2}}^{\frac{\tau}{2}} E \cos \frac{2n\pi}{T_1} t dt = \frac{2E}{n\pi} \sin \frac{n\pi\tau}{T_1}$$

$$b_n = \frac{2}{T_1} \int_{-\frac{T_1}{2}}^{\frac{T_1}{2}} f(t) \sin n\omega_1 t dt = \frac{2}{T_1} \int_{-\frac{\tau}{2}}^{\frac{\tau}{2}} E \sin n\omega_1 t dt = 0$$

式(5)可以表示为:

$$f(t) = \frac{E\tau}{T_1} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2E}{n\pi} \sin \frac{n\pi\tau}{T_1} \cos 2n\pi f_1 t \quad (6)$$

若传感器的谐振频率为  $f_0$ , 则只要激励信号的频率满足下式,

$$\text{传感器就可谐振: } f_1 = \frac{f_0}{n} \quad (7)$$

可见, 方波激励信号除含有基波成份外, 还包含丰富的谐波, 谐波频率是基波的整数倍。只要基波或其谐波频率与弦的谐振频率接近, 弦就能起振。因此, 方波激励信号更容

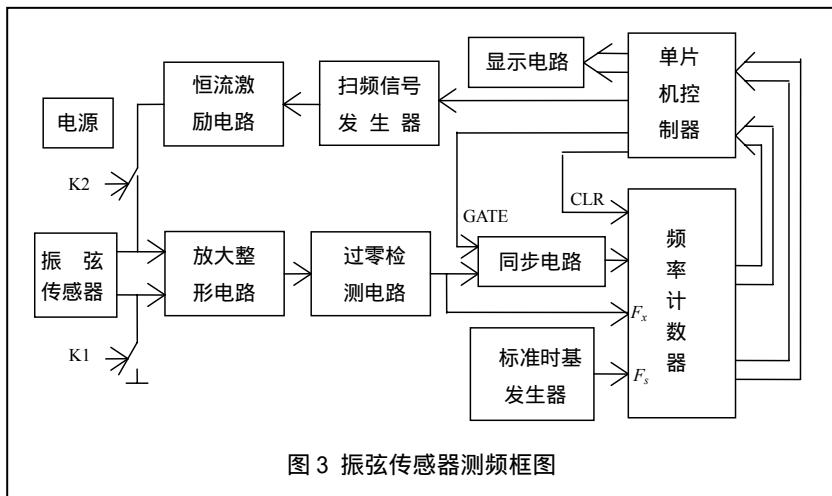


图3 振弦传感器测频框图

易使传感器振荡。

在实际应用中，根据传感器在整个测量范围内频率的变化，限定激励频率的上、下限，用频率变化的方波扫频信号不断间歇激励传感器。

### 五、激振信号的产生与谐振信号的检测

振弦传感器谐振频率的检测主要由扫频激振电路、计数电路和控制电路等部分组成，测频框图如图3所示。其工作过程如下：扫频激振时，单片机控制电路使开关K1、K2闭合，启动扫频信号发生器发出频率从低到高变化的脉冲电压，此脉冲电压经恒流电路变为电流脉冲流过传感器的激励线圈，当激励脉冲的频率和传感器弦的固有振荡频率相等或接近时，弦将被激励谐振。谐振后，控制电路使开关K1、K2断开，撤除激励信号，弦依其谐振频率作幅度衰减的阻尼振

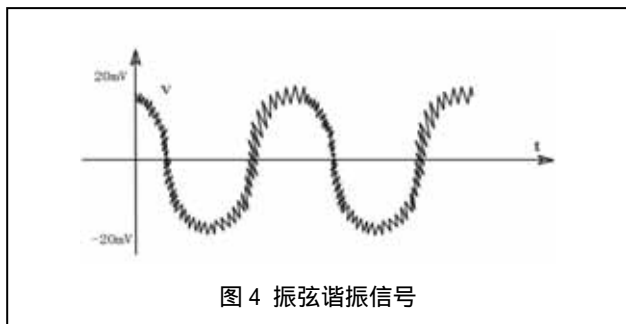


图4 振弦谐振信号

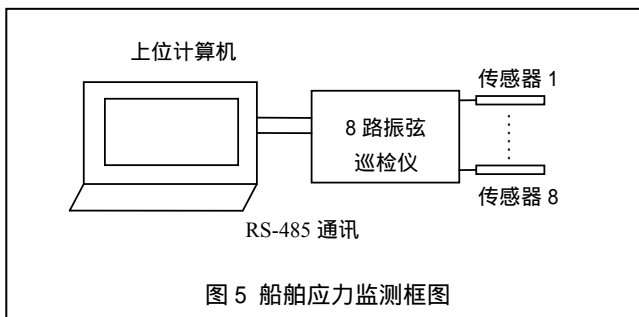


图5 船舶应力监测框图

动，在线圈中产生正弦感生电势，此感生电势的频率和弦的谐振频率一致，波形如图4所示。由图4可见，感生电势的幅度较小，其上叠加上有高频谐波分量，通过放大、低通滤波器、过零检测等电路整形，形成幅度、形状一致的计数脉冲。在K1、K2断开的同时，控制器发出清零信号CLR，频率计数器清零。同时，控制器使预置门控信号GATE由低电平变为高电平，利用预置门控信号的上升沿启动测量过程，但此时频率计数器并没有开始计数。只是在预置门控信号变为高电平后，被测信号 $f_x$ 的第一个上升沿使得

实际门控信号变为高电平有效信号，频率计数器才开始对被测信号和标准时基发生器产生的基准时钟脉冲计数。当计数时间到，预置门控信号变为低电平信号时，频率计数器并没有立即停止计数，而是要等到紧接在其后的被测信号的上升沿到来时，实际门控信号变为低电平时才停止计数。设频率计数器计得的被测脉冲的值为 $N_1$ ，基准时钟脉冲的计数值为 $N_2$ ，基准频率为 $f_s$ ，被测频率为 $f_x$ ，则有：

$$f_x = (f_s \times N_1) / N_2 \quad (8)$$

### 六、船舶应力监测系统

船舶应力监测系统的组成如图5所示。共有8路振弦传感器，分别安装在船体的不同部位，船体受力时，弦的张紧度改变，弦的固有谐振频率也随之改变。监测时，8路巡检仪分时向8路传感器发出激励信号，检测振弦的谐振频率。8路巡检仪将检测的频率信号通过RS-485接口上传到上位计算机，上位机把采集的数据转换为船体的受力或应变变量并显示，根据应变量的变化趋势绘出变化曲线，实时存储检测的数据供以后调用、分析。我们用美国基康公司的VK4100、VK4150型振弦传感器，在WE-30万能材料实验机上对监测系统进行了模拟加载试验，数据如表1所示。表中“计算应变”、“计算频率”是根据VK4100、VK4150数学模型的计算值。从表中看出，实际测得的频率值与理论值非常接近。

### 七、结束语

振弦传感器具有长效、稳定、高精度的特点，我们把它应用到船舶应力监测系统中，使长期实时监测船舶的受力情况成为现实。为船员提供实时、有效的支持，使船员对船舶的状态更加了解，全面掌握船舶的现状，为船舶的使用、维护和保养提供了充分的依据，也为船舶的设计、改进、制造

表 1 VK4100/ VK4150 型传感器模拟试验数据

序号	施加压力 (kN)	计算应变 ( $\mu\epsilon$ )	计算频率 (Hz)	实测频率 (Hz)
VK4100 型				
1	0	3680.9	3068.2	3069.4
2	50	3478.7	2982.8	2984.0
3	100	3252.9	2884.3	2885.5
VK4150 型				
1	0	3620.9	3043.1	3043.2
2	50	3583.9	3027.6	3029.0
3	100	3558.0	3016.6	3015.4

提供了真实可靠的数据，有较高的经济效益。振弦传感器应力监测系统也可推广到其它领域，如化工、石油、天然气以及国防等方面，具有广阔的应用前景。

#### 参考文献

- [1]. 王厚枢, 余瑞芬, 吴志鹤等. 传感器原理[M], 北京: 航空工业出版社, 1987.  
[2]. VK4100/4150 振弦式点焊型应变计操作使用手册[Z]

#### The application of vibrating wire strain gages in shipping

YUAN Guang-chao, TIAN Xun-dong, CHEN En, CHENG Zhen, LU Fei

(Hefei General Machinery Research Institute, Hefei Anhui 230088, China)

**Abstract:** The shipping is affected by multi-force on its sailing. At the present time, there are no structure-safe-inspecting system on shipping. The sailor can't know an applied force and key parts strain or deform on shipping's body in time. The vibrating wire strain gas characteristic and applications are studied so that it can be applied on shipping. Therefore it is possible to give shipping a realtime monitoring and control in long time.

**Keywords:** vibrating wire strain gages ; shipping; stress; inspect

#### 作者简介

袁广超：合肥通用机械研究院 制冷与环境研究所高级工程师，从事电机调速、单片机技术应用、特种制冷设备控制等方面的研究。

通讯地址：安徽省合肥市高新区天湖路 29 号 邮编：230088  
邮箱：fei20041@yahoo.com.cn 电话：0551-5335594

田旭东，合肥通用机械研究院制冷与环境所所长，研究员  
陈恩，合肥通用机械研究院制冷与环境所副所长，工程师  
程镇，合肥通用机械研究院 制冷与环境研究所工程师  
鲁飞，合肥通用机械研究院经营管理部工程师。

读者服务卡编号 009