



SHANGHAI

and

Marintec offshore

China

国际海事技术学术会议

第二卷

造船学

船舶结构与
设计

VOLUME 2

Naval architecture

Ship structure and
Ship design

学术会议论文 中文部分

CONFERENCE PAPERS

Chinese Language Edition

中国 上海 10月22日至26日

联合主办单位
上海市造船工程学会
及
国际海事技术出版集团

SHANGHAI, PEOPLE'S REPUBLIC OF CHINA, OCTOBER 22-26

Jointly organised by
The Shanghai Society of Naval Architecture and Marine Engineering
and the
International MarIntec Press Group

U66-53
S29

U66-53
S29
2

1983年

国际海事技术学术会议

海事技术部分

卷 2 (i)

10月24日(星期一)下午

B.2 船体强度监测系统

A. Nitta, A. Kumano, K. Suzuki, Y. Tatara, 日本海事协会[日本]

B.3 快艇在海浪中的运动、弯矩及压力

宋竞正, 戴仰山, 李维扬, 哈尔滨船舶工程学院

B.1 近代船舶结构分析的趋向

H.G. Payer, 西德劳氏船级社[西德]

A.2 使用 SEFACO 系统对船梁应力监测四年的经验

M. Huther, 舰船设计师(SNAME 和 ISSC 委员), 法国船级社研究发展部主任 巴黎[法国]

J. Osouf, INSA 工程师, 法国船级社训练中心经理 南特[法国]

B.4 导管螺旋桨充气消蚀的试验研究

袁泽文, 顾其昌, 王根禄, 上海交通大学

8/10/152

1983年
国际海事技术学术会议
上海
10月22-26日

船体强度监测系统

A. Nitta A. Kumano K. Suzuki Y. Tatara
日本海事协会
日本

中国国内版权：上海市造船工程学会

中国之外世界版权：MarIntec Press (Far East) Ltd.

1983年10月

船体强度监测系统

A. Nitta, A. Kumano

K. Suzuki, Y. Tatara

日本海事协会〔日本〕

提要

本文叙述日本海事协会正在研制的船体监测系统的一般情况,该系统用于给船舶操纵人员提供防止船体在装货或卸货以及调整压载过程中由于处置失误造成破损的辅助信息,并协助操纵人员在气候和海况发生变化时作出相应的判断。

根据日本海事协会从1973年以来对几类船舶所进行的一系列无人实测所获得的技术资料和经验,已设计和制造了一套船体强度监测系统样机,对该系统在船上的性能和可靠性进行初步研究。

在这套监测系统中,用计算机分析安装在船体结构各个部位的传感器所接收到的数据,以求出与船体结构中诱导应力有关的累积能量密度、平均值、最小和最大值以及频率、船舶运动的加速度、螺旋桨旋转和调速器档位(governor notch)等。

当任何一个被算出的值超过预先规定的水平时,这一情况会在阴极射线管示波器(CRT)上示出,并同时发出警报。另外,在CRT和打印机上可输出数据幅值的相似波形和频率分布。

简要地讨论了在研制该系统可靠的测量设备中所涉及的问题,提出了克服在对该系统进行实航试验中所碰到的意外事故和困难的可能防范措施。

一 引言

面对近年来船舶愈来愈专用化和愈来愈自动化的趋势,人们设想用精简的编制来经营船舶。在这样的情况下,作者们从事了研制船体强度监测系统的研究课题,该系统可作为船舶安全和节俭经营的航海辅助手段。本系统的目的是给导航员提供关于船体对恶劣天气中的风浪(作用在船体的外载荷)的响应补充信息,从而船长能够对船的运行和运动情况作出适当判断(通过减速或改变航向),并对变化的海况和天气条件适当响应。本系统的另一个意图是在船舶装货、压载或卸载操作时对其受载情况作必要的调整,从而防止船体由于操作失误可能发生的破损。

由于认识到研制该系统的必要性,现在世界上许多

国家正进行各种各样的研究,一些船级社也正在试制和发展这套系统[1, 2, 3,]。

船体强度监测系统通常由各种采集有关船舶强度数据的传感器采集数据,然后在示波管上分析和说明这些数据,作为该船领航员的有益指南。因此,可靠性和简单性是这种系统的两个主要特点。

1973年以来,日本海事协会已通过在各种船舶上安装这种系统,对这些船的结构性能进行长期的实船测量[4, 5]。根据迄今从这些试验所积累的实验结果和通过经验所掌握的测量技术,作者们研制了几种不同的试验性监测系统,它们现在安装在几艘船上采集必要的信息,从而证实这些系统在使用中的充分可靠性。

二 监测系统概貌

日本海事协会研制的船体强度监测系统按照它们的功能和用途可分成三类,现说明如下:

(1) 简化型监测系统

这类监测系统显示直接从安装在船体上某个位置的传感器测得的数据。例如,当把上甲板的纵向应力作为评定船体响应的主要对象时,这类监测系统在防止船舶在装卸货物及压载或卸载过程中由可能的操作失误产生的船体破损方面是非常有用的。另外,当该船在航行中,将船体的纵向弯曲应力作为船体强度的代表值加以显示这可用作在恶劣天气下操作船舶的参考。

(2) 实用型监测系统

这类监测系统分析各种从安装在该船几个位置处的不同传感器测得的数据,并显示变动应力的均值、最大和最小值以及 $\sqrt{E}$ (E 为累积能量密度)、平均周期等。这类系统适于检测和分析具有较低变化速率的一些现象,诸如船体每个构件中的那些常规波浪应力、船舶运动加速度、螺旋桨转速、调速器档位等。

(3) 专用监测系统

这类监测系统使用数量较多的传感器,通过用最小数据采样间隔来监测作用在船体上的冲击载荷。这类监

测系统的特点是能处理从船上多个位置处在恶劣天气下不分昼夜收集到的数据,并且每当很大的冲击载荷作用在船上时指示必要的数据,以迅速地提醒领航员注意。

至此,简述了监测系统的一般情况。然而,该监测系统仅提供船舶安全和节俭运行的补充信息,而操纵船舶的实际及全面的判断则还全靠领航员按运行的具体情况得出。可能还必须通过对船舶在不规则海况下的船体响应,特别是对以现有船舶的实际运行情况、船舶运动以及在非常规波浪中船体强度等因素为依据的波浪冲击载荷作进一步的研究和探索,以提供关于在恶劣天气下如何操作船舶的完整信息。

三 实用型监测系统

按照不同的应用目的,这类监测系统能够实施如下两种功能,在图1中示出该系统的框图。

3.1 方式1 (在港内装卸货操作期间)

方式1的功能是在装卸货操作期间持续监测船体的强度。在此方式中,该监测系统用应变片接受船体的每一变化,用于监测船体每个剖面的纵向应力,并在示波管上显示这些应力。为了防止由于噪声和其它原因引起误报警,在示波管上显示五个测量结果的平均输出值。如果被显示的值超过指定的量级,则示波管上的背景色彩开始闪亮并同时奏乐。这时,将显示在示波管上的结果输出给打印机,如表1所给出的那样(表1在文末)。

3.2 方式2 (在海上航行期间)

方式2的功能是监测船舶在海上航行期间的状态。在这一方式中积累某段时间内来自每个传感器的数据。然后,计算并在示波管上显示频率分布、 $\sqrt{E}$ 等。也给监测系统这一方式提供与方式1同样的报警功能。

3.2.1 测点和采样方法。

为了评定在构件中产生的应力(纵向和横向应力)及船舶运动的加速度,在多个点处进行测量。日本海事协会正在研制的船体强度监测系统配备有8个通道的测点,并且每隔四小时对这些随波浪变化的数据进行采样。在一次采样中,模数转换器工作近3分钟。然后,将采样得到的数据作为一个数据块积累到存贮器(容量为10000比特)中。数据累积的方法照每次一至九个数据按块保存进磁盘中去。

3.2.2 数据的处理和显示

1) 数据处理

在计算机系统中,对如下项目进行数据处理:

- (a) 幅值的频率分布
- (b) 最大和最小值
- (c) $\sqrt{E}$

(d) 周期

(e) 最大幅值

2) 在示波管上显示和后处理

(a) 在示波管上显示有关船舶状况的信息,并通过比较上述结果与预先规定的参考数据作一般的解释。另外,将图2显示的模拟数据及表2给出的综合结果输出给示波管和打印机。

(b) 如果数据处理所得的结果超过预先规定的量级,则将上述(b)至(d)的结果以及测量的日期和时间送入塑料磁盘中去保存。然后,继续进行测量,即使在这时正发出警报也照常进行。

(c) 如果上述结果并未超过预先规定的量级,则清除塑料磁盘中原有的数据,并将这些数据保存备用,直至下个测量。在图3中示出方式2的数据处理过程流程图。

四 船上的试验

4.1 监测系统

曾试制了监测系统的1号样机A-1,并从1980年/月起将它安装在一艘集装箱船内进行该系统的船上试验,其基本目的是测量该船的纵向强度。

接着,改进了A型监测系统,增加了测点的数目,并修改了输出的格式。另外,试制了B型监测系统(实用型监测系统),并从1982年8月起将它安装在一艘轿车运输船上进行试验,主要确定该系统的可靠性。在表3中列出了目前安装在正处于营运中的几艘船内实施船上试验的诸监测系统(包括专用型系统)的要点和概况。

4.2 测量的项目和测点

当将监测系统装入船内时,首先必须通过考虑所选船舶的类型以及该船结构上的特点来确定其测量项目和测点。例如在表3所给出的轿车运输船的情形中,装货量较小且均匀分布在货舱内,因此,该船在静水中上甲板内的纵向应力通常并不会发生明显的变化。至于由波浪载荷引起的纵向应力,监测船舫上甲板处的应力作为有代表性的值一般是合理的和充分的,于是,为了监测这种轿车运输船的纵向强度只要选取一个测点。

然而,船体纵向弯矩会由于货物或压载分布而发生很大变化的油船和其它船舶,就必须在其船体的若干位置安装监测传感器。

另一方面,对于轿车运输船来说,为了监测其船体的横向强度,就要测量其宽板肋骨底部两板中的应力。轿车运输船的结构特点将会使其横剖面容易受到由于宽

板肋骨底部可能发生相当高的应力而产生的横向扭曲变形。考虑到过去在一些轿车运输船上的类似区域中曾发现许多疲劳裂纹破损,也选取了这种专门的测点。

与通常进行的实船测量情形不同,应当牢记,监测系统的基本目的是要以简明的形式向船舶操纵人员提供有关该船结构强度现状的基本信息,而不需要大量细节性数据。鉴于这一事实,应将测量项目和测点数减至最少。作为安装在上述轿车运输船上的监测系统的例子,在图4中示出船体垂向加速度和上甲板中纵向应力之间的关系。由这一图形了解到,运动的加速度与上甲板内的纵向应力看来有关系。从对另一艘轿车运输船的系列测量所获得的结束可以断定,在宽板肋骨下端的应力与船舱由于横摇运动产生的水平加速度之间存在着明显的关系。这些事实表明,简单地由测量船舶的运动加速度而不直接依靠测量船体构件中产生的应力有可能预估应力的大小。

4.3 报警量级

在设定报警量级方面,将监测构件的那些设计准则所采用的标准值作为直接参考似乎是不切实际的,这些值是以物件的屈曲强度和疲劳强度为依据的。看来根据每艘船本身在运行海况天气条件下操纵过程实际遇到和积累的数据和资料确定它们的报警量级更为现实和合理。在那些目前运行着的船上工作的监测系统中,报警量级是根据过去对类似船舶进行的实船测量所获得的应力频率分布结果设定的。

因此,必须通过尽量蒐集对各种各样的船舶测量作用在船体上的外力和诸物件中的应力所得的数据来建立一套设定报警量级的合理方法,也应该在发展对诸如波浪砰击和冲击载荷等课题的理论研究中做出相应的努力,并探索船舶在实际运行操作过程中操纵程式与波浪载荷之间的关系。

五 监测系统的可靠性

鉴于应用的目的,船体强度监测系统不应发生故障或事故,而必须具有高度的可靠性。

在研制该监测系统过程中,日本海事协会根据几年来在长期实船测量中所获得的经验,注意到如下几项与环境条件、操作的方便性以及测量仪器和设备的可维护性有关的内容。

5.1 测量仪器和设备的选择

(1) 应用的环境条件

船上的环境条件与实验室试验的情形相差很大。在船上会遇到高温、高湿度、海水腐蚀以及高粉尘的问

题。为了对付温升问题,最好选择用于操作温度范围为0至50°的那一类测量仪器。此外,如果该监测系统安装在机架内,必须用冷却风扇进行适当冷却。为了处理高湿度和腐蚀问题,让无电动机的装置总是处于通电状态。这将有助于该装置内减少雾气。对开关(SW)、垫整电容(PC)板及插口触点采用防腐蚀材料,并定期清洗它们。而且,空气中的尘埃量无疑很高,这会引起打印机机械部分、磁带、磁盘等的破损。因此,有必要在安装了冷却风扇的位置和进风口旁边设置一些过滤器。

(2) 船上的电源

当使用频率为50赫兹或60赫兹的电源时,只要更换某些部件就能容易地按需选择频率,那末,频率的不同将不会引起任何问题。然而,建议选择不用更换任何部件就能很容易地变更其频率的装置。另外,由于会发生电压的波动或电源故障,因此应强调中心处理装置和其它计算机系统必须配备这样的硬件或软件,使之能够经受住船上电源的不正常情况、电源故障和突然断电。

(3) 传感器

建议采用膜盒式(capsule type)应变片进行应变测量,这种应变片的工作效率和可靠性都较高。它是由0.2毫米厚的SUS材料罩住,并能用点焊法将护罩与片基材料结合在一起。该应变片用电缆连接,保证在水深20米内使用。为持续几年都能使用这种应变片,必须在它上面用两至三个额外的罩壳。

(4) 电缆

主电缆是采用四芯的、浓缩丙烷(EP)橡胶绝缘的,用全包装并有钢丝编织层的具有普通外罩的船用电缆,它可有几百米长。采用全天候型聚乙烯作为绝缘材料,而用电镀线作为导线。此外,鉴于保护目的,建议采用具有抗噪声特点和良好工作性能的铝质密拉(Mylar)型取代用编织的常规型电缆。进而,为了避免在油船和液化天然气运输船等危险区内火灾和爆炸的可能性,还考虑采用光纤电缆,以满足包括象CRT这样的高压仪器时的监测系统的要求。

(5) 抗噪声措施

应使用各种输入型直流放大器来对付来自输入的噪声,而由载流小型放大器来测量微应变时,可用低通滤波器来防止通道噪声和常态噪声等的相互干扰。另外,打算用隔离变压器隔来自电源线的任何噪声。在这种情况下,也应考虑接地的方法。

六 结论

近年来航运上的总趋势是,日益将商船用于专门行业并对船员进行精简。在这样的情况下,向船舶的领航员提供有关船体响应的精确信息对于领航员来说,除了在船舶操纵方面的渊博知识和经验外,对于导航和提出建议都至关重要。日本海事协会研制的船体强度监测系统期望通过进一步的试验和验证得以改善,使得这套系统对船舶的安全和节俭营运做出较大的贡献。

七 致谢

作者们向在实施本研究课题中提供宝贵协助和合作的船主和船厂表示由衷的谢意。

参考文献:

- (1) Lindeman, K.: "S03-PROJECT FINAL REPORT" Det Norske Veritas Report No. 81-0776, 1981
- (2) Hoffman, D. and Zubaly, R. B.: "Design of a Ship Response Monitoring and Guidance System for U.S.N.S. Furman" Report No. NMRC-198, National Maritime Research Center, 1980
- (3) Taylor, K. V.: "Onboard Guidance for Heavy Weather Operation" Trans. I. Mar. E. (C.), Vol. 92, 1980
- (4) Akira Nitta and Michifumi Yuasa: "Measurements and Long-term Predictions of the Longitudinal Strength of Container Ship" Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 141, 1977
- (5) Akira Nitta and Michifumi Yuasa: "Full scale Measurements on the Transverse Strength of Carriers" Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 147, 1980



照片 在船上的船体强度监测系统

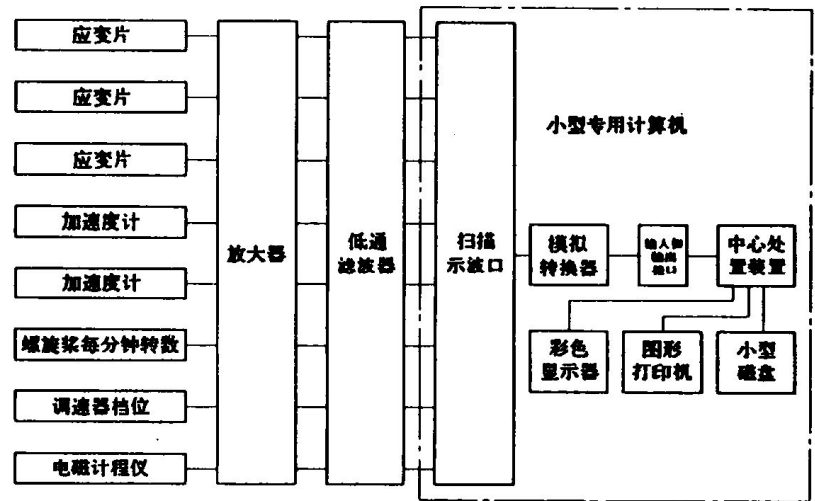


图1. 船体强度监测系统

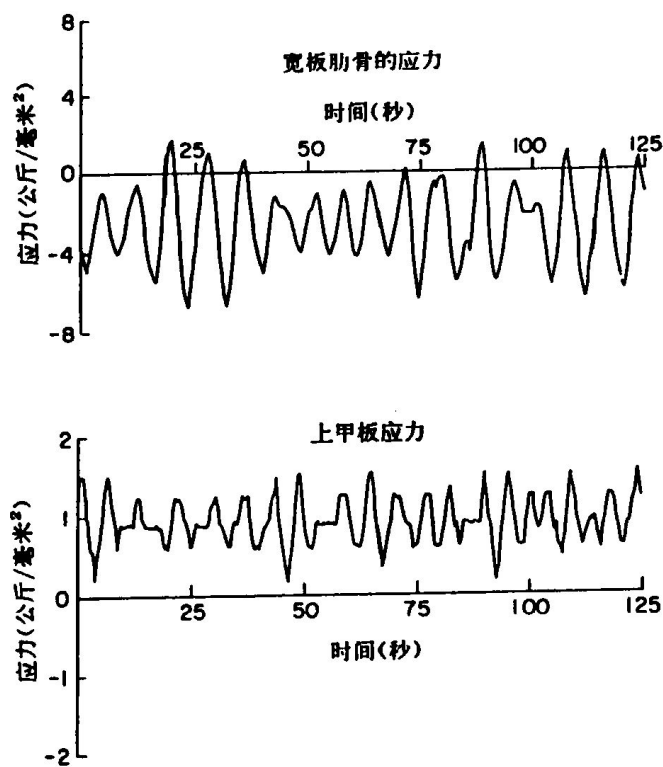


图2. 模拟数据的实例

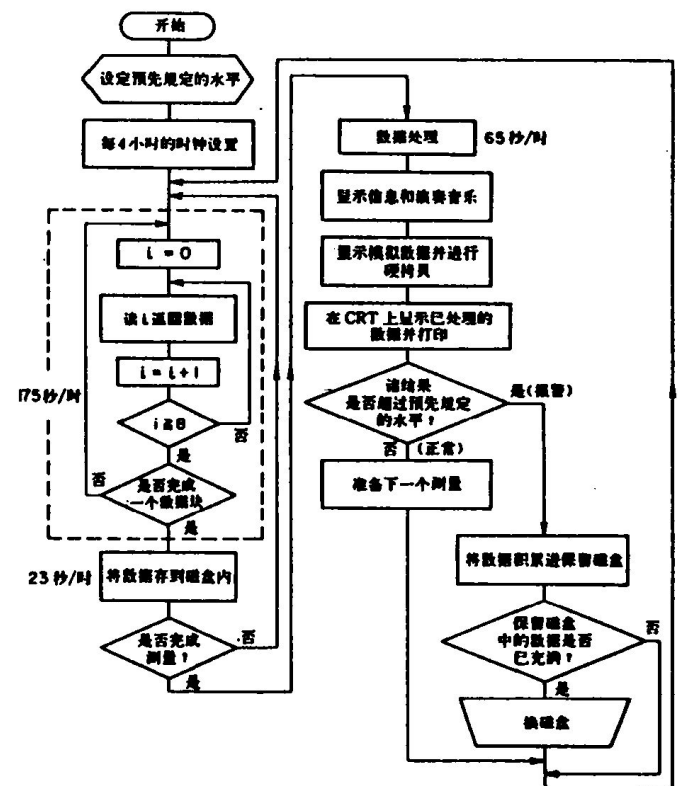


图3. 方式2的数据处理流程图

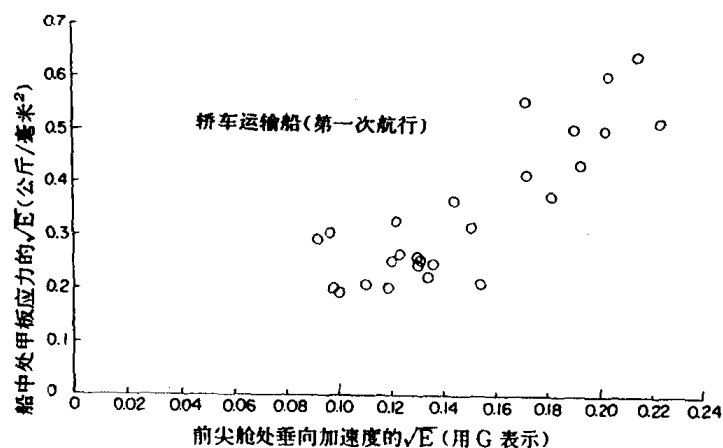


图4. 甲板应力与船的纵向加速度之间的关系

表1. 打印输出(方式1)

MODE 1		
LIMIT (Kg/mm**2)		
MAX= 10		
MIN= -10		
DATE: 83/03/28 (MON) TIME: 09:40:44		
CH No	MEASURE. POINT	PEAK
0	UPP. DECK STRESS	1.73

表2. 打印输出(方式2)

* RESULT *						
DATE: 82/12/27 (MON) START TIME: 08:00:00 NEXT TIME: 12:00:00						
WARNING LEVEL						
UPP. DECK STRESS SQRT. E = 0.50 WEBFRAME STRESS SQRT. E = 7.00						
CH. No	MEASURE. POINT	MAX	MIN	MEAN	SQRT. E	PERIOD
0	UPP. DECK STRESS *	1.88	-0.13	0.94	4.14E-01	17.17
1	WEBFRAME STRESS *	2.61	-7.29	-2.58	2.34E+00	9.45
2	VERT. ACC. (FORE), G	0.43	-0.43	-0.01	2.00E-01	8.08
3	LONG. ACC. (FORE), G	0.14	-0.09	-0.00	5.37E-02	8.02
4	PROP. SHAFT REV, RPM	146.18	120.80	129.94	3.82E+00	--
5	PUMP MARK, mm	5.12	3.53	5.11	7.92E-02	--
6	SEA SPEED, knot	13.03	8.99	11.23	1.20E+00	--

* [Kg/mm**2]

表3. 各种类型的监测系统试验一览表

监测定位		所安装的船舶	航线	监测内容	测量的项目和测点	持续时间
1	实用型 A-1	集装箱船	日本 - 美国	总纵强度	上甲板纵向应力 1	1980. 1 ~
2	实用型 A-2	集装箱船	日本 - 欧洲	同上	上甲板纵向应力 1	1981. 5 ~
3	实用型 B-1	单纯桥车运输船	日本 - 波斯湾 日本 - 澳大利亚	总纵强度和 横向强度	上甲板纵向应力 1 宽板肋骨应力 1 加速度 2 螺旋桨每分钟转数 1 调速器档位 1 船速 1	1982. 8 ~
4	实用型 B-2	散装货船		总纵强度	甲板应力 2 船底应力 1 加速度 2 螺旋桨每分钟转数 1 调整器档位 1 船速 1	1983. 6 ~
5	专用型 C-1	集装箱船	日本 - 美国	船首冲击	加速度 1 水冲击压力 4	1982. 1 ~

1983 年
国际海事技术学术会议
上海
10 月 22 - 26 日

快艇在海浪中的运动、弯矩及压力

宋竟正 戴仰山 李维扬
哈尔滨船舶工程学院

中国国内版权：上海市造船工程学会

中国之外世界版权：MarIntec Press (Far East) Ltd.

1983 年 10 月

快艇在海浪中的运动、弯矩及压力

宋竞正 戴仰山 李维扬
哈尔滨船舶工程学院

提 要

本文首先按切片法建立具有任意横剖面形状的快艇在不规则波迎浪航行时的运动方程。其中考虑了砰击效应对运动的反馈等非线性因素。将各剖面内的载荷沿艇长积分,可确定作用于艇梁的剪力和弯矩。最后根据艇在海浪上的姿态及运动参数,计算艇体下落时的峰值压力。与模型试验和实艇试验的结果相比,其符合程度尚属满意。

一、前 言

Martin^{[1][2]}、Zarnick^[3]对具有常斜升角的快艇,分别提出了规则波中运动计算的线性及非线性理论。

在文献^[4]中,作者对非线性运动计算方法^[3]作了某些改进,并使之扩展到可适用于快艇有着任意横剖面形状以及不规则波顶浪中的情况。之后,作者进一步讨论了快艇运动时艇梁剪力和弯矩的计算^[5]。

众所周知,对快艇结构的设计研究而言,承受砰击时底部结构的局部强度,与艇梁整体弯曲时的总强度同等重要。因此,如何确定作用于底部的压力,有着十分现实的意义。

本文是作者在快艇研究工作方面的一个阶段性总结。它将全面阐述如何在时间领域内,预报快艇在海浪中的运动、弯矩和压力。为检验该方法的可用性,文中与尽可能多的试验装料作了比较。

二、运 动

取了Oxz为空间固定坐标系,x轴置于未扰动的自由水面。Gxbzb是固定在艇上的坐标系,G系艇之重心(图1)。

试验表明^[6],相比于艇的升沉和纵摇,进退运动是个极小的量。将其略去后,得关于空间固定坐标系,重心的垂向坐标z_G与纵摇角θ的简化运动方程为

$$\begin{aligned} \frac{D}{g} \ddot{z}_G &= F_z - D \\ I \ddot{\theta} &= F_\theta \end{aligned} \quad (1)$$

其中D是艇重,I是艇的纵摇惯性矩;F_z及F_θ分别是z方向的水动力及水动力对重心的矩。

记剖面的浮力,阻尼力,惯性力分别为F'₁、F'₂、F'₃,注意到前者沿铅垂方向,后两者垂直于基线,则

$$\left. \begin{aligned} F_z &= \int_0^L F'_1 dx_b + \int_0^L (F'_2 + F'_3) \cos \theta dx_b \\ F_\theta &= \int_0^L F'_1 x_b \cos \theta dx_b \\ &\quad - \int_0^L (F'_2 + F'_3) x_b dx_b \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

其中ℓ是艇的浸湿长度。

不规则海面的数学模型取为

$$\xi_i = \frac{\sum_k \xi_{ak} \cos[k_K (Vt + x_b \cos \theta + z_b \sin \theta) + \omega_K t + \epsilon_K]}{K} \quad (3)$$

式中V—航速;

ξ_{ak}、ω_k、K_k—子波的波幅、波频和波数;

Σ_k—在[0, 2π]之间均匀分布的随机相位。子波波幅依能量关系按给定波谱密度决定。

下面分述各个水动力成分的确定。

快艇高速运动时,水流自尾部及舭部分离,各剖面浮力F₁的数值难以在理论上加以确定。故设

$$\left. \begin{aligned} F_{z1} &= \int_0^L F'_1 dx_b = a_z \int_0^L \varphi g A(T) dx_b \\ F_{\theta 1} &= - \int_0^L F'_1 x_b \cos \theta dx_b = \\ &\quad - a_\theta \int_0^L \varphi g A(T) x_b \cos \theta dx_b \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

其中A(T)是计及排挤波修正后吃水为T(垂直于基线量取)时的横剖面积;修正因子a_z、a_θ的确定见后文。

不计排挤波升高时的吃水

$$\bar{T} = \left[\frac{\xi_i - z_G + x_b \sin \theta - z_b \cos \theta}{\cos \theta - \alpha \sin \theta} \right] z_b = \xi \quad (5)$$

式中α—波倾角;

ξ—龙骨在垂直于基线方向的坐标。

于是T可由下式算出

$$T = s \bar{T} \quad (6)$$

因子s依文献^[7]中第五篇的方法确定。

由于快艇的航速高、摆幅大,阻尼力宜取下述非线性形式:

$$F'_2 = -\frac{1}{2} C_{DC} \int b v |v| \quad (7)$$

式中v—在垂直于基线方向艇体与波浪关于空间固定坐标系的相对速度;

b—计及排挤波后艇之瞬时宽度;

C_{DC}—阻尼系数。

当略去波浪轨线速度的水平分量（因其与航速相比甚小），可得

$$v = V \sin \theta - x_b \dot{\theta} + (\dot{z}_G - \frac{d\zeta_1}{dt}) \cos \theta \quad (8)$$

其中 $\frac{d\zeta_1}{dt}$ 是波浪坐标关于空间固定坐标系的时间导数。

对任意形状的剖面，可将其化为一个具有底升角 β_{cp} 的相当楔形剖面（ β_{cp} 是计算排挤波效应时，按文献 [7] 决定的平均底升角），则依楔形剖面的阻尼系统公式 [3]，有

$$C_{DC} = 1.0 \cos \beta_{cp} \quad (9)$$

惯性力按下式确定：

$$\begin{aligned} F'_3 &= - \frac{d}{dt} (mv) \\ &= - m\dot{v} - v\dot{m} + u \frac{a}{ax_b} (mv) \end{aligned} \quad (10)$$

其中 m 是 x_b 剖面吃水为 T 时之附加质量。对于任意剖面，采用多系数的保角变换，取其高频极限。计算中，计及空气吸入的影响，当相对速度 $v > 0$ 时，取 $\dot{m} = 0$ ，而

$$u = - \frac{dx}{dt} = V \cos \theta + z_b \dot{\theta} - \dot{z}_G \sin \theta \quad (11)$$

把 (2) ~ (11) 式代入 (1) 式，可得非线性运动方程的最终表达式：

$$\left. \begin{aligned} \left(\frac{Q}{g} + M_a \cos^2 \theta \right) \ddot{\theta}_G - (Q_a \cos \theta) \ddot{\theta} &= F'_z - D \\ (I + I_a) \ddot{\theta} - (Q_a \cos \theta) \ddot{z}_G &= F'_\theta \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式中

$$\left. \begin{aligned} M_a &= \int_L m dx_b \\ Q_a &= \int_L m x_b dx_b \\ I_a &= \int_L m x_b^2 dx_b \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

$$F'_z = \left\{ \begin{aligned} &- M_a \dot{\theta} (V \cos \theta - \dot{z}_G \sin \theta) + \int_L m \frac{d\zeta_1}{dt} \cos \theta dx_b \\ &- \int_L m \frac{d\zeta_1}{dt} \dot{\theta} \sin \theta dx_b - m u v |_{\text{stern}} - \int_L v \dot{m} dx_b \\ &- \int_L i C_{DC} \rho b v |v| dx_b \end{aligned} \right\} \cos \theta + a_z \int_L \rho g A dx_b \quad (14)$$

$$\begin{aligned} F'_\theta &= Q_a \dot{\theta} (V \cos \theta - \dot{z}_G \sin \theta) - \int_L m \frac{d\zeta_1}{dt} x_b \cos \theta dx_b \\ &+ \int_L m \frac{d\zeta_1}{dt} \dot{\theta} x_b \sin \theta dx_b + m u v x_b |_{\text{stern}} + \int_L m v u dx_b \\ &+ \int_L v m x_b dx_b + \int_L i C_{DC} \rho b v |v| x_b dx_b - a_\theta \int_L \rho g A x_b \cos \theta dx_b \end{aligned} \quad (15)$$

当已知修正因子 a_z 、 a_θ 时，即可对方程 (12) 施行数值积分。计算中， $\frac{d\zeta_1}{dt}$ 及 v 取剖面上特征点处之值。

现在来说明如何确定 a_z 和 a_θ 。在 (12) 式中若不考虑波浪扰动，并置

$$\dot{z}_G = \dot{z}_G = \dot{\theta} = \ddot{\theta} = 0$$

则它即快艇在静水航行时的定常运动方程。利用实船或模型在静水试验时得到的重心升高及纵倾角值，便可由该方程定出 a_z 和 a_θ 。

若无试验资料，可取 [3] $a_z = a_\theta = 0.5$ 。

三、弯矩

沿艇长方向任取一单元体。记 z_s 、 C_s 为垂直于基线

振动位移及其阻尼系数， N 、 Q 和 M 为作用于横剖面上的轴力、剪刀力和弯矩（图 2），则在铅垂方向应用 Newton 第二定律，并略去轴力在该方向的分量，有

$$\left[\frac{W}{g} \ddot{z}_s + C_s \dot{z}_s + \frac{d}{dt} (m \dot{z}_s) - \frac{\partial Q}{\partial x_b} \right] \cos \theta = F'_1 + (F'_2 + F'_3) \cos \theta - W - \frac{W}{g} (\ddot{z}_G - x_b \ddot{\theta} \cos \theta) \quad (16)$$

把上式与计及剖面转动惯量和剪切效应的内力-变形关系联立在一起 [5]，利用边界条件和初始条件，便可解出剪力和矩。

由于快艇短而小，艇体的弹性对剪力和弯矩的影响往往不大。实际计算中，可略去颤振效应，近似按下式决定

$$\left. \begin{aligned} Q(x', t) &= \int_{\text{stern}}^{x'} \left[\frac{W}{\cos \theta} - F'_2 - F'_3 + \frac{W}{g} \left(\frac{\ddot{z}_G}{\cos \theta} - x_b \ddot{\theta} \right) \right] dx_b \\ M(x', t) &= \int_{\text{stern}}^{x'} \left[\frac{W}{\cos \theta} - F'_2 - F'_3 + \frac{W}{g} \left(\frac{\ddot{z}_G}{\cos \theta} - x_b \ddot{\theta} \right) \right] (x' - x_b) dx_b \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

四、压力

根据快艇在海浪中的瞬时姿态及瞬时运动参数，可确定艇体下落时作用于底部的压力 [8]。

设艇具有水平速度 V_h 和垂直速度 V_v ，与波面在 A 点发生碰击（图 3）。若把参考点固定于波面上的 A 点，此时波浪相当于静止，而艇则以艇速加波速（ V_w ）的合成速度在移动。如果 A 点的波倾角为 α ，可把 V_h 、 V_v 及 V_w 在 A 点分解为垂直于波面的法向速度 V_n 和与波面相切的切线速度 V_t ：

$$\left. \begin{aligned} V_n &= V_v \cos \alpha + (V_h + V_w) \sin \alpha \\ V_t &= V_v \sin \alpha + (V_h + V_w) \cos \alpha \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

V_n 用来确定冲击压力 P_i ， V_t 用来确定滑行压力 P_p ：

$$\left. \begin{aligned} P_i &= k \rho V_n^2 \\ P_p &= \frac{1}{2} \rho V_t^2 \cos \beta_{eh} \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

系数 k 与横剖面上冲击点处的底升角 β ，该点纵剖面与基线的夹角 ϵ 以及纵摇角 θ 有关。Chuang 利用大量试验结果得出的 k 值示于表 1 [8]。表中 η 是在与波面和艇底冲击面相垂直的平面上，从波面至艇底冲击面量得的有效冲击角

$$\text{tg } \eta = \cos \beta_{eh} \text{tg}(\epsilon - \theta - \alpha) + \sin \beta_{eh} \text{tg } \beta_{ev} \quad (20)$$

式中

$$\left. \begin{aligned} \text{tg } \beta_{eh} &= \frac{\text{tg } \beta}{\text{tg } \epsilon \cos(\theta + \alpha) - \sin(\theta + \alpha)} \\ \text{tg } \beta_{ev} &= \frac{\text{tg } \beta}{\text{tg } \epsilon \sin(\theta + \alpha) + \cos(\theta + \alpha)} \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

β_{eh} 、 β_{ev} 的取值范围是： $0^\circ \leq \beta_{eh} \leq 180^\circ$ ， $0^\circ \leq \beta_{ev} \leq 90^\circ$

表 1 k 的数值

η	0°	1°	3°	6°	10°	15°	$\geq 20^\circ$
离开龙骨处	63.8	74.3	127.6	55.4	26.8	14.8	$\frac{1}{2} (1 + \frac{\pi}{4} \cot^2 \eta)$
龙骨处	63.8	74.3					$\frac{1}{2} \pi \cot \eta$

因为假定是理想流体, 故冲击压力和滑行压力都与艇底垂直。则作用于底部的总压力峰值可以两者之和求得:

$$P = P_i + P_p \quad (22)$$

在计算不规则波中的压力时, V_w 可取为波谱中特征频率对应的规则子波的波速。而艇在计算点处的速度, 由运动计算知

$$\left. \begin{aligned} V_h &= V - x_b \theta \sin \theta \\ V_v &= x_b \dot{\theta} \cos \theta - \dot{z}_G \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

五、与试验的比较

在文献〔4〕中, 计算了规则波中的升沉、纵摇和加速响应, 并与 Fridsma 在文献〔6〕中给出的包含有相当广泛的航速、波高和波长范围内的模型试验资料进行了比较。由于作者在计算方法上作了一些改进, 不仅在速长比 $V/\sqrt{L} = 4$ 和 6 (单位是: 节/英尺 $^{1/2}$ 下同), 就是在 $V/\sqrt{L} = 2$ 时计算与试验的吻合程度也是比较满意的。

表 2~4 是在不规则波中计算与模型试验〔9〕的比较。表 2、表 3 中三一波高与艇宽之比 $H_{1/3}/b$ 有三种情况。 $\bar{\eta}$ 、 $\bar{\theta}$ 、 $\sqrt{E_h}$ 、 $\sqrt{E_\theta}$ 分别表示关于平均线的升沉和纵摇运动极值的平均值及其均方根。表 4 中 $\bar{\eta}_b$ 、 $\bar{\eta}_G$ 是首部及重心处刚体运动垂向峰值加速度的平均值。文献〔9〕在总结大量试验结果的基础上指出, 峰值加速度的概率密度遵循指数分布。图 4 是计算所得的首部加速度直方图与指数分布曲线的比较。

表 2 不规则波中升沉响应的比较

量		$\bar{\eta}/b$			$\sqrt{E_h}/b$		
$H_{1/3}/b$		0.222	0.444	0.667	0.222	0.444	0.667
K 艇 ($V/\sqrt{L}=2$)	试验	0.042	0.109	0.159	0.049	0.129	0.203
	计算	0.036	0.128	0.213	0.043	0.151	0.243
I 艇 ($V/\sqrt{L}=4$)	试验	0.034	0.108	0.167	0.42	0.139	0.210
	计算	0.030	0.101	0.199	0.035	0.129	0.233
M 艇 ($V/\sqrt{L}=6$)	试验	0.036	0.147	—	0.045	0.209	—
	计算	0.025	0.108	—	0.037	0.142	—

表 3 不规则波中纵摇响应的比较

量		$\bar{\theta}$ (度)			$\sqrt{E_\theta}$ (度)		
$H_{1/3}/b$		0.222	0.444	0.667	0.222	0.444	0.667
K 艇 ($V/\sqrt{L}=2$)	试验	1.54	2.90	3.72	1.93	3.43	4.56
	计算	1.44	3.21	4.00	1.47	3.68	4.75
I 艇 ($V/\sqrt{L}=4$)	试验	1.19	2.46	3.07	1.41	2.54	3.77
	计算	0.86	1.86	2.81	1.07	2.53	3.62
M 艇 ($V/\sqrt{L}=6$)	试验	0.91	2.28	—	1.22	3.09	—
	计算	0.70	1.94	—	1.01	2.50	—

表 4 不规则波中加速度响应的比较

	K 艇 ($V/\sqrt{L}=2$)	I 艇 ($V/\sqrt{L}=4$)	M 艇 ($V/\sqrt{L}=6$)
	$\bar{\eta}_b(g)$	$\bar{\eta}_G(g)$	$\bar{\eta}_G(g)$
试验	1.17	0.26	2.35
计算	1.35	0.22	2.31

表 5~7 是与某实艇海上试验结果的比较。该艇先后在不同海区以不同航速作五次顶浪测量。在比较时, 不论是垂向加速度, 还是弯矩或压力, 皆对每次砰击时从零线量起的峰值进行取样。计算中采用的 ITTC 单参数谱。三一波高系在假定海浪为窄带随机过程的前提下, 从给出的百分之三保证度波高 $H_{3\%}$ 推算而来。表中 $\bar{\eta}$ 、 $\bar{M}$ 、 $\bar{p}$ 、 $\sqrt{E_n}$ 、 $\sqrt{E_m}$ 、 $\sqrt{E_p}$ 分别表示垂向峰值加速度、剖面弯矩以及龙骨附近处峰值压力的平均值和均方根。

需要说明的是, 表中加速度和弯矩的试验值是包含颤振效应的, 而其计算值皆未计及这一效应的影响。

六、结 语

1. 升沉、纵摇和加速度的预报与模型试验符合较好。
2. 从与实艇试验的比较中看出, 船中弯矩及底部峰值压力的计算尚属满意。
3. 今后应进一步改进水动力参数的确定, 并探讨颤振效应对加速及弯矩的影响。

文中引用的实艇试验资料, 系取自汪广海高级工程师、卢镇光工程师和夏剑晖副教授的有关报告, 在此特向他们表示感谢。

表5 与实艇试验加速度的比较

$H_{1/3}/b$	$V/\sqrt{L}$	理论站号	$\bar{\eta}$ (g)			$\sqrt{E_{\eta}}$ (g)		
			试验	计算	差值 %	试验	计算	差值 %
0.164	2.813	0	0.64	0.390	39	0.77	0.428	44
		13	0.17	0.128	25	0.20	0.138	31
0.270	2.254	0	0.93	0.513	45	1.12	0.570	49
		13	0.27	0.120	56	0.32	0.121	62
0.174	2.957	2	0.90	0.501	44	1.00	0.544	46
		9	0.29	0.292	1	0.34	0.332	2
0.229	2.858	2	0.62	0.456	44	0.96	0.508	41
		9	0.35	0.295	16	0.59	0.378	3
0.138	2.353	0	0.71	0.204	71	0.74	0.214	71
		7	0.44	0.134	70	0.46	0.136	70

表6 与实艇试验弯矩的比较 *

$H_{1/3}/b$	$V/\sqrt{L}$	理论站号	状态	$(\bar{M}/\rho g L^3 b) \times 10^3$			$(\sqrt{E_{\bar{M}}}/\rho g L^3 b) \times 10^3$		
				试验	计算	差值 %	试验	计算	差值 %
0.164	2.813	10	中拱	—	0.180		—	0.187	
			中垂	p-0.397	-0.457	15	0.433	0.487	12
		12	中拱	—	0.180		—	0.187	
			中垂	p-0.465 s-0.280	-0.470	1 68	0.509 0.314	0.501	2 60
0.270	2.254	10	中拱	—	0.292		—	0.313	
			中垂	p-0.404	-0.566	40	0.453	0.611	35
		12	中拱	—	0.269		—	0.290	
			中垂	p-0.401 s-0.529	-0.522	30 1	0.453 0.615	0.579	28 6
0.174	2.957	10	中拱	0.348	0.238	32	0.391	0.241	38
			中垂	-0.392	-0.478	22	0.420	0.509	21
		12	中拱	0.204	0.201	1	0.261	0.210	20
			中垂	-0.370	-0.510	38	0.395	0.543	37
0.229	2.858	10	中拱	0.345	0.249	28	0.407	0.266	35
			中垂	-0.456	-0.580	27	0.510	0.618	21
		12	中拱	0.219	0.250	14	0.284	0.266	6
			中垂	-0.414	-0.609	47	0.463	0.558	42
0.138	2.353	10	中拱	—	0.150		—	0.156	
			中垂	-0.399	-0.345	14	0.420	0.361	14
		12	中拱	—	0.142		—	0.146	
			中垂	-0.364	-0.336	8	0.382	0.343	10

*表中“左”、“右”系指上甲板的左舷、右舷。