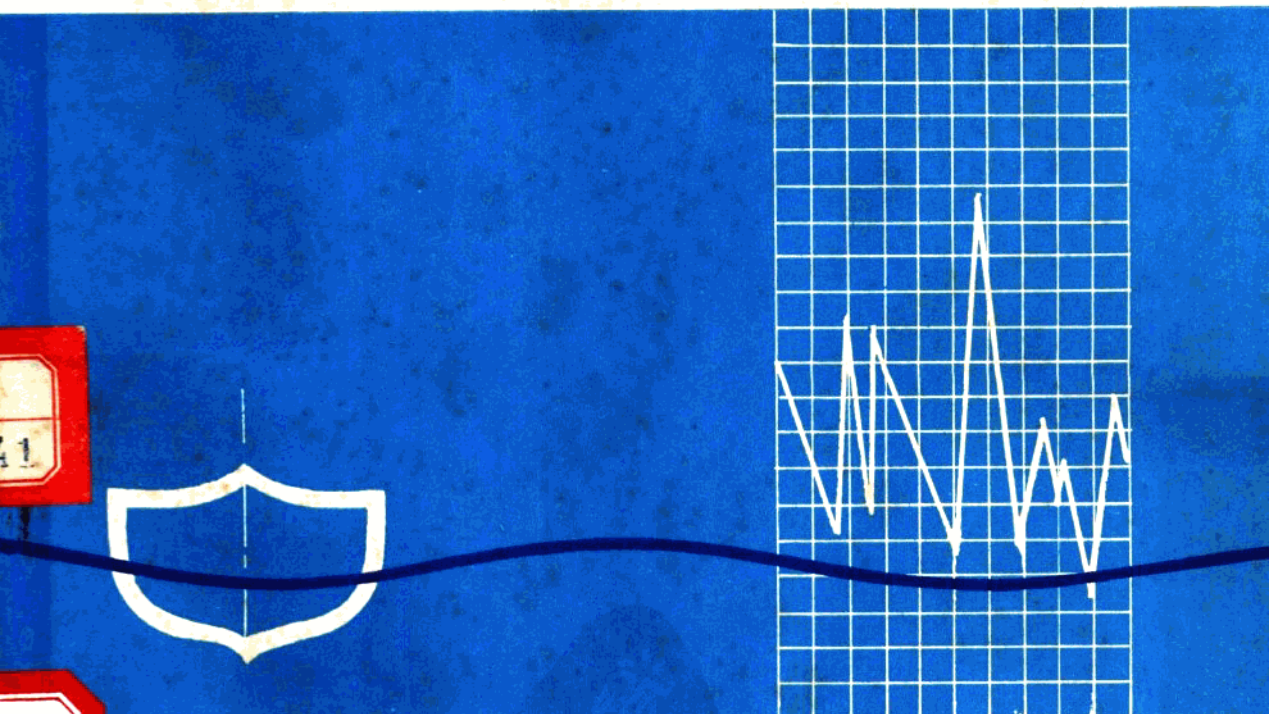
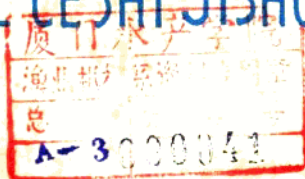


船舶力学测试技术文集

CHUANBO LIXUE CESHU JISHU WENJI



中国船舶科学研究中心
中国造船工程学会 船舶力学学术委员会

1982年2月

前 言

我们所盼望的“船舶力学测试技术文集”和大家见面了！

多年来广大船舶力学测试设备和仪表研制人员都希望有一个自己的学术交流园地。去年五月在江苏无锡召开的“船舶力学测试技术学组”成立会上，来自全国各地的同行们，在庆贺自己学组诞生的同时，建议出版一本文集。学组向船舶力学学术委员会反映了这种愿望，并得到了学会和中国船舶科学研究中心的积极支持，于是在各方面共同的努力下，编辑、出版了这样一本文集。

本文集主要选登在学组全会上发表的有价值的论文、报告，其目的是开展学术交流、推广科研成果，促使船舶力学测试技术的发展。

我们希望本文集在船舶力学的学术交流中作出它应有的贡献。

中国造船工程学会船舶力学学术委员会测试技术学组

1982 年 1 月

目 录

自动跟踪式六自由度适航仪·····	(1)
船池拖车数字精密调速系统研讨·····	(20)
719 机实船与船模试验数据处理系统介绍·····	(28)
机械式水池适航仪·····	(36)
稳向仪·····	(45)
自航船模航迹自动记录仪研制报告·····	(56)
关于空泡水筒水速与压力的自动调节·····	(63)
可控硅供电船模自航装置·····	(75)
375 吨交通船实船试验测试·····	(81)
二自由度载人运动模拟器控制系统设计·····	(92)
热线流速仪·····	(101)
弹性支杆圆弧部分的近似计算·····	(118)

自动跟踪式六自由度适航仪

中国船舶科学研究中心 周柏根

前 言

在船模的斜浪试验中,过去须用二种陀螺仪来分别测量船模的纵摇、横摇和首摇,而用平台和加速度计来测量垂荡、纵荡和横荡。因此,对于船模运动上述六个参数的测量所用仪器较多,引起船模惯量调整困难,给测试结果带来一定的误差。曾经用三自由度适航仪来测所需运动参数,但使用场合有一定的局限性。随着舰载直升飞机起飞和降落的研究,特别是近年来海洋石油钻探平台研究的发展,迫切需要一台高精度的六自由度适航仪来满足试验要求,本仪器就是为了适应这种要求而研制成功的。

本仪器设计过程中参考了美国戴维逊实验室六自由度适航仪的基本原理,并作了必要的修改,仪器制成后又作了多次试验,试验结果与国外资料比较非常一致。因此,本仪器完全满足了任务的要求。

一、功 能 及 用 途

六自由度适航仪可用来连续测量舰船、海洋工程和锚系设施等模型在人造的风、浪、流作用下,航行或停泊时的每个瞬时的六个运动分量,这六个分量是纵荡、横荡、垂荡、纵摇、横摇和首摇等,以分析各运动参数的幅值及它们之间的相位关系。由于本仪器安装于模型上的构件重量轻、体积小,所以对于较小尺度的模型也可适用。

在模型重心处,六自由度适航仪可起平台的作用,可在仪器上面安装加速度传感器,来测量船模重心处的垂向和水平运动加速度,并能保证测量精度。

另外,六自由度适航仪可为适航性水池的曳行车自动跟踪船模提供必要的位差讯号,又可为船模自动操舵仪(即稳向仪)提供船模航向偏移讯号。

二、原 理 及 构 造

六自由度适航仪由机械结构、纵横二向伺服随动系统和测量器三部分组成。分述如下:

1. 机械结构

机械结构是六自由度适航仪的主体,它由升沉杆、平行移动架、纵向跟踪子车、纵向跟踪轨道、横向子车、横向跟踪轨道、横向水平轨道和同步机构所组成。

原理:利用平行四边形原理构成一只平行移动架,它的功能是保证升沉杆始终铅垂。

机械结构的升沉杆和船模相连,用铰链安装于船模重心处。横向跟踪轨道和水平轨道安装于

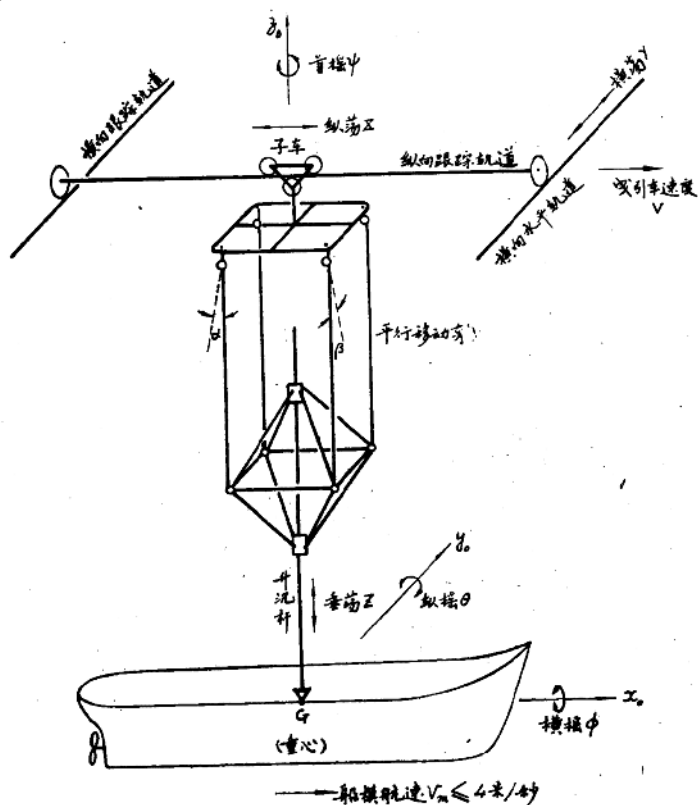


图 1. 机械结构原理图

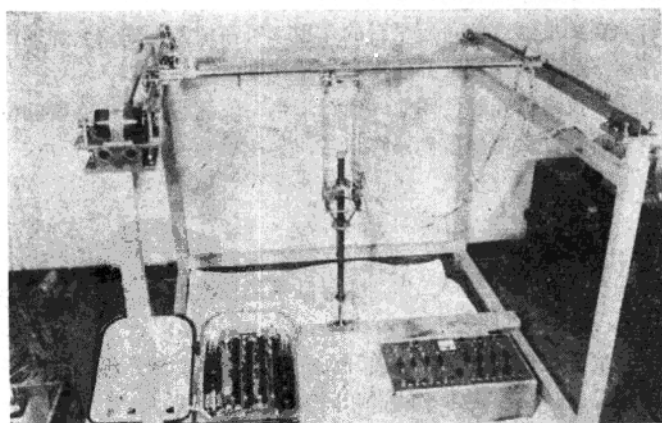


图 2 自动跟踪式六自由度适航仪实物照片。左下角是纵、横二向伺服随动系统放大器，右下角是测量器桥路箱

水池曳引车上,是刚性固定的。升沉杆、平行移动架、纵向跟踪轨道、横向跟踪轨道和横向水平轨道均为可拆部件,拆装方便。

(1) 升沉杆

升沉杆仅能在空间反映船模直线位移的平行移动,其前后、左右、上下的平移量即是船模的纵荡、横荡和垂荡三个线位移运动分量。升沉杆没有任何微小的转动,因为它将作为船模纵摇、横摇和首摇三个角位移的测量基准。

测量要求升沉杆对船模运动的约束尽可能小。为此,应在保证刚度足够的条件下尽量减轻。对本仪器来说,如果采用无缝钢管,升沉杆系统的总重量 ≤ 1.9 公斤,如果采用硬铝合金管,则可减到 ≤ 1.0 公斤,甚至还可以更轻。

升沉杆的垂直安装偏差 ≤ 0.1 度。

由于升沉杆始终保持铅垂,垂直精确度又很高,无疑可以起一个平台的作用。

以上诸优点,显然是陀螺仪无法比拟的。

(2) 平行移动架

平行移动架使升沉杆始终铅垂,保证升沉杆仅能在空间平行移动,且限制升沉杆旋转。它又是测量船模垂荡运动分量的测量基准,并使升沉杆始终在铅垂状态下跟随船模灵活滑动。

平行移动架由四根吊杆和八只万向接头组成。其安装的方法是每根吊杆两端各装一只万向接头,而四根吊杆两端万向接头的中心距均相等,再把四根吊杆上端的四只万向接头中心安装在同一水平面上并成矩形分布,下端同样如此,这就组成了一只平行六面体。当四根吊杆同时作任意偏转时,平行六面体的下底面始终平行于上底面。升沉杆垂直安装于平行移动架的下底面时,当然也就垂直于上底面,上底面在空间运动时只要始终水平,就保证了升沉杆始终铅垂。

平行移动架四根吊杆不允许有较大的偏转角,偏转角越大,试验时对船模纵荡及横荡运动的附加影响也就越大。偏转角不能超过纵向 $\alpha \leq \pm 1$ 度,横向 $\beta \leq \pm 1$ 度。

平行移动架的下底面是船模垂荡运动的测量基准。当 α 角和 β 角都等于1度时,垂荡运动的测量基准偏差为0.09毫米,从而可以忽略不计。

平行移动架重了,虽可以提高随动系统的跟踪性能,但却会大大增加对船模运动的附加影响,这是决不允许的,为此,在保证刚度的前提下,平行移动架越轻越好。采用 $\phi 10 \times 1$ 的硬铝合金管是适宜的。

(3) 纵向跟踪轨道

纵向跟踪轨道沿着横向轨道在同一水平面内作左右平行移动,它承受纵向子车和平行移动架的重量,并保证纵向子车灵活地前后滑动。纵向跟踪轨道又是测量船模纵荡运动分量的测量基准。所以它不允许有任何微小的前后移动,这由横向跟踪轨道来限制,也不允许在水平面内有任何的转动,这由同步机构来限制。

纵向跟踪轨道与横向子车固定连接,由横向伺服随动系统驱动,且使它跟随船模横漂。横向平移量与平行移动架的横向偏转角 β 代数和即为船模的横荡运动分量。

(4) 纵向子车

纵向子车用来悬挂平行移动架,并与它固定连接,它由纵向伺服随动系统驱动。在试验测量时,它跟随船模沿着纵向跟踪轨道滑动,其相对纵向跟踪轨道的平移量与平行移动架的纵向偏转角 α 的代数和,即为船模的纵荡运动分量。

此外,纵向子车还能提供水池曳行车自动跟踪船模所需的位移偏差讯号。

(5) 横向跟踪轨道和水平轨道

横向跟踪轨道和横向水平轨道是六自由度适航仪与水池曳引车的连接部件,是刚性连接的。它们在曳行车上安装时的水平精度直接影响升沉杆的垂直精度。为此,在连接处装有调节螺栓,以便调准水平。

(6) 横向子车

横向子车固定连接在纵向跟踪轨道,以保证其只能沿着横向轨道左右平行移动。安装时必须保证纵向跟踪轨道垂直于横向轨道。

(7) 同步机构

为了提高伺服随动系统的跟踪性能,在机械结构上采取软钢索绞盘形式,把执行电机和变速齿轮箱相对固定,以减少随动部分的重量。

同步机构是在一根长轴上,两端各装一只齿轮,而齿轮各在自己的齿条上啮合滚动,这样就保证纵向跟踪轨道只能作平移,而不转动。

2. 纵、横二向伺服随动系统

在试验测量时,因波浪扰动产生船模纵荡和横荡运动,引起平行移动架四根吊杆偏转。纵、横二向伺服随动系统能随时消除偏转,保证仪器的测试精度。

伺服随动系统是由角度传感器、晶体管放大器、两相伺服电动机及子车组成的闭环控制系统。图3示出系统的电路方框图。图4示出纵向伺服随动系统电气图。

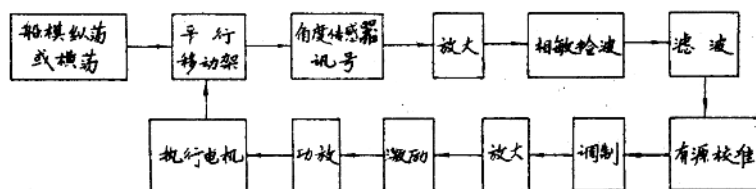


图3 伺服随动系统电路方框图

(1) 角度传感器

角度传感器测量平行移动架产生的偏角,型号为四五二厂生产的JG-1。特点是非接触式、体积小、重量轻。使用500周中频电源激磁,激磁电压为110伏。当动片半径等于57毫米时,灵敏度为1.5伏/度,此时测量范围为 ± 3 度。

(2) 放大器输入级

为了使角度传感器能有较大的输出,放大器的输入级 T_1 采用射极输出的电路。射极电阻采用电位计 W_1 ,使之兼作放大器增益调节之用。负载是耦合变压器 B_2 及其后面的相敏检波级。 C_1 是隔直电容, C_2 对来自角度传感器输出中的高频干扰造成对地通路。耦合变压器 B_2 副端有中心抽头供相敏检波用。

(3) 相敏检波级

角度传感器的输出信号是500周的调幅波,它的包络线反映平行移动架所产生的角差变化。包络线的变化相对于500周的交流来讲是极其缓慢的。为使具有高增益的随动系统能稳定地工作,必须加以校正,即对角差信号进行必要的变换。在本系统中,采用仅对慢变的角差信号进行变换的校正形式,因此有必要将反映角差变化的包络线由调幅波中检出。相敏检波就是为此目的而设置的。

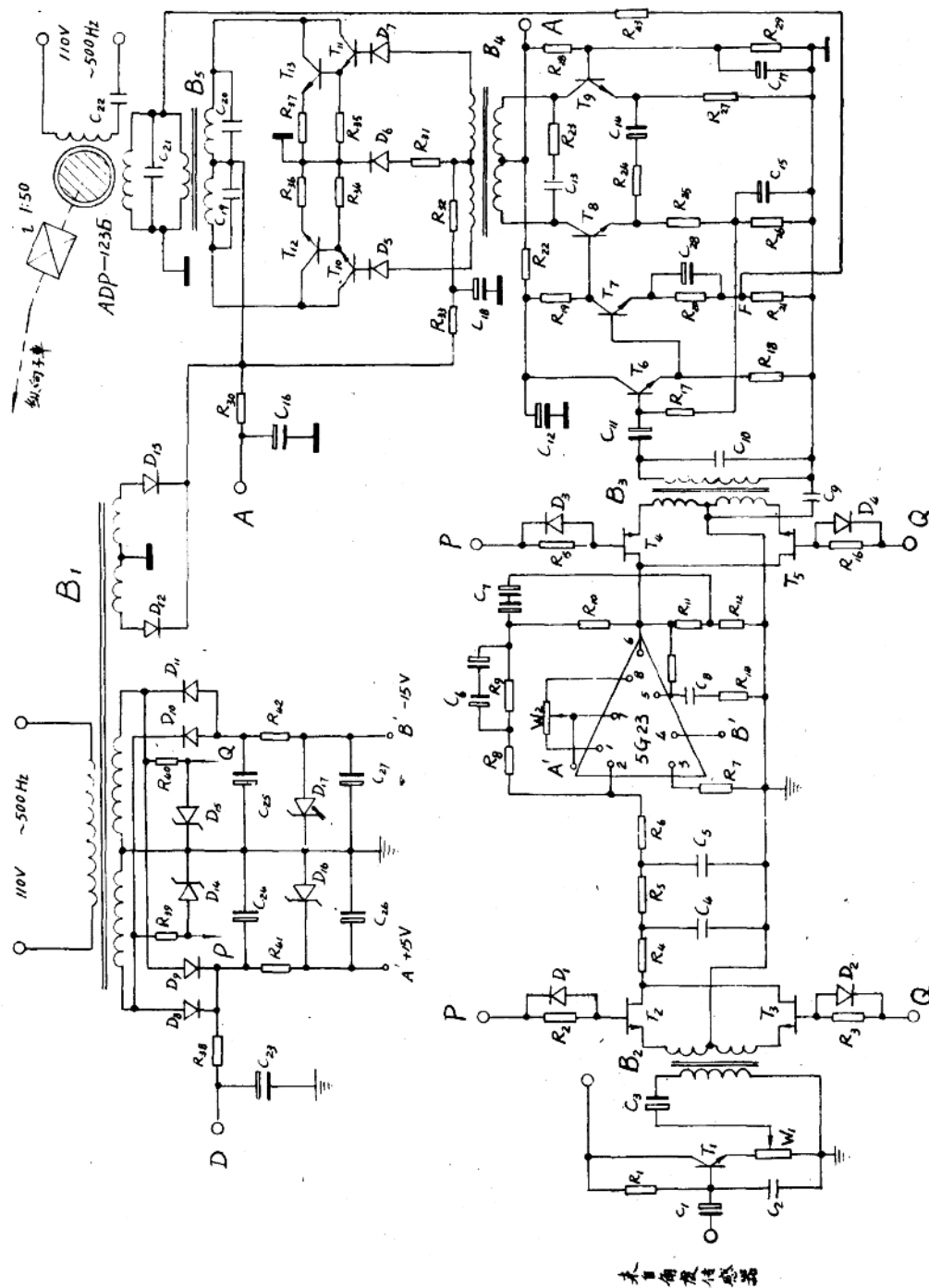


图 4 纵向同步系统电气图

(4) 滤波级

为了从检波级的输出信号(双半波信号)中取得反应平行移动架角差变化的慢变信号(即调幅波经检波后所得双半波的平均值),还必须将输出双半波信号中的 500 周交流分量滤掉。为此设置滤波级。

这是一个双节的 Γ 型阻容滤波电路。

时间常数 $R \times C = 47 \text{ K}\Omega \times 0.033 \mu\text{f} = 1.55 \text{ 毫秒}$ 。

$$\text{传递函数 } W_r(S) = \left(\frac{R_{fz}}{2R + R_{fz}} \right) \cdot \frac{1}{\left(\frac{R_{fz}}{2R + R_{fz}} \right) R^2 C^2 S^2 + \left(\frac{R + 3R_{fz}}{2R + R_{fz}} \right) RCS + 1}$$

其中 $R = R_4 = R_6$, $C = C_4 = C_6$, $R_{fz} \approx R_6 = R$

(5) 有源校正级

有源校正级是由具有高增益的线性固体组件 5G23 及一系列反馈电路所组成的反馈放大器实现的。在此电路中,反馈放大器的输出信号除成比例地反应其输入信号(即经滤波后的反应平行移动架角差变化的慢变信号)外,还将在一定频段内反应输入信号的导数(即变化趋势)和积分,组成了比例加微分加积分校正。

$$\text{传递函数 } W_f(S) = K_f \frac{(T_2 S + 1) \cdot (T_4 S + 1)}{(T_1 S + 1) \cdot (T_5 S + 1)}$$

其中 T_1 、 T_2 是积分校正的时间常数;

T_4 、 T_5 是微分校正的时间常数。

对纵向系统来说 $T_1 = 18 \text{ 秒}$, $T_2 = 3.8 \text{ 秒}$,

$T_4 = 0.062 \text{ 秒}$, $T_5 = 0.0062 \text{ 秒}$ 。

对横向系统来说 $T_1 = 28 \text{ 秒}$, $T_2 = 2.3 \text{ 秒}$,

$T_4 = 0.0362 \text{ 秒}$, $T_5 = 0.00363 \text{ 秒}$ 。

电阻 R_{13} 是 5G23 输出级集电极电阻(外接电阻), R_7 是输入级的平衡电阻, R_{11} 及 C_8 构成消振回路,用以消除 5G23 自激振荡,电位器 W_2 为调零用。

(6) 调制级

调制级的输出信号是反应输入慢变信号极性的 500 周交流信号。由变压器 B_3 的副端输出而送至前置放大级进一步放大。

(7) 前置放大级

前置放大级是为放大调制后的 500 周调幅波而设置的,属于电压放大类型的放大器。最后二只晶体管构成单端输入及双端输出的差动放大级,这种电路具有较高的共模抑制能力。通过耦合变压器 B_4 馈送到推动(即激励)级。差动放大级的电压增益约为单级电压增益的两倍。

(8) 激励级

激励推动级由二只功率管 T_{10} 和 T_{11} 组成。由电阻 R_{31} 、 R_{32} 及二极管 D_6 构成偏置电路。 D_6 起温度补偿作用。来自前置放大级的幅度相等相位相反的输入信号经耦合变压器 B_4 的副端分别馈送到 T_{10} 、 T_{11} 的基极。利用二极管 D_6 、 D_7 的整流作用而使 T_{10} 、 T_{11} 交替工作。

推动级的输出信号取自射极,可使输出阻抗小些,便于和功率放大级匹配。

推动级基本上工作在乙类状态。

(9) 功率放大级

功率放大级采用了推挽线路,工作在乙类状态,通过输出变压器 B_0 馈送给两相伺服电动机的控制绕组。

(10) 局部反馈

局部反馈是将功率放大器的输出反馈到前置放大级的射极的电阻负反馈。可以降低整个放大器的输出阻抗,同时还可以减弱参数变化对整个放大器特性的影响。

纵向系统中,电压负反馈由输出变压器 B_0 副端的信号实现。反馈系数 $F = \frac{R_{21}}{R_{21} + R_{43}}$ 。

横向系统中,电压负反馈由输出变压器 B_0 原端信号再经反馈变压器实现。反馈系数为 $F = \frac{1}{7} \times \frac{R_{21}}{R_{21} + R_{43}}$ 。

若无电压负反馈时,前置放大级、推动级与功率放大级的总电压增益为 K_0 ,则有反馈时的增益为 K_F , $K_F = \frac{K_0}{1 + K_0 F}$ 。

其中 $\frac{1}{1 + K_0 F}$ 为反馈深度。

(11) 电源

伺服随动系统采用单相 500 周(或 400 周),115 伏中频电源供电。

放大器的全部电源均由电源变压器 B_1 供给。

(12) 伺服电动机与子车

放大器的输出,经输出变压器 B_0 馈送至伺服电动机的控制绕组,根据放大器输出信号的大小控制两相伺服电动机转速的高低。伺服电动机的输出轴经齿轮减速器(速比 $i = 50$)及钢索带动子车移动,子车的移动将消除平行移动架所产生的偏角,从而使偏离中心位置的角度传感器的动片复位,至此具有主负反馈的控制系统便闭合起来。

纵、横二向随动系统都使用具有空心杯转子的 ADP 系列两相伺服电动机。

伺服电动机	纵 向	横 向
型 号	A D P-123 B	A D P-263 A
有效功率	8.9~9瓦	27.7瓦
额定转矩	145~125克厘米	450 克厘米
起动力矩	170~150克厘米	600 克厘米
额定转速	6000~7000 转/分	6000 转/分
空载转速		8600 转/分
激 磁	110伏,0.27~0.24安,500周	36伏,1.6安,500周
最大控制电压	110 伏	275 伏
最大控制电流	0.23~0.18安	0.55 安
静态摩擦转矩	3 克厘米	6 克厘米

3. 测量器

测量系统是把船模的机械运动量转变为电量(电流或电压),送入电磁式光点示波器或磁带机

- | | |
|-------------|--------------|
| 纵荡 X | ± 500 毫米 |
| 横荡 Y | ± 500 毫米 |
| 垂荡 Z | ± 150 毫米 |
| 纵摇 θ | ± 15 度 |
| 横摇 ϕ | ± 35 度 |
| 首摇 ψ | ± 10 度 |

(2) 电桥原理及结构

测量系统均以线绕电位计作为敏感元件,配置直流不平衡电桥进行测量。

电桥中的电阻 R_0 用来调节电桥输入端的电源电压, 限流电阻 R_0 根据振子的最大量程来选择。阻尼电阻 R_0 按规定选取。调节可变电阻 R_0 , 可使电桥动触点处于“机械零位”时电桥没有输出。

当 $R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3$ 时电桥平衡。当 $R_1 = R_2$, $R_3 = R_4$ 的对称情况下, 非线性误差显著降低。

计算公式

从图 5 可得到流过负载中的电流, 其公式为:

$$I_r = u \cdot \frac{\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4}}{R_r + \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} + \frac{R_3 \cdot R_4}{R_3 + R_4}}$$

其中 u ——电桥两端的电源电压

$$R_r = R_0 + \frac{R_0 \cdot R_i}{R_0 + R_i}$$

R_i ——振子内阻

当 $R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3$ 时电桥平衡。

当 $R_1 = R_2$, $R_3 = R_4$ 时, 又 $\varepsilon = \frac{\Delta R_1}{R_1}$, $\Delta R_1 = -\Delta R_2$

则

$$I_r = \frac{u}{2} \cdot \frac{\varepsilon}{R_r + \frac{R_1}{2}(1 - \varepsilon^2) + \frac{R_3}{2}} = f(\varepsilon)$$

函数 $I_r = f(\varepsilon)$ 的非线性误差将依 ε 的数值和 R_1 、 R_3 与 R_r 之间的关系而定, 当 R_1 、 R_3 、 R_r 一定时, 只取决于 ε 的数值。这 ε 值是由船模各运动分量偏离“机械零位”的位移量所决定。

非线性最大误差

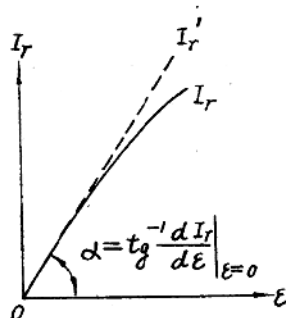
$$\sigma_{\max} = \frac{I_{r\max} - I'_r}{I'_{r\max}}$$

其中

$$I'_r = \varepsilon \cdot \left. \frac{dI_r}{d\varepsilon} \right|_{\varepsilon=0} = \frac{u}{2} \cdot \frac{1}{R_r + \frac{R_1}{2} + \frac{R_3}{2}}$$

从而得到

$$\sigma = \frac{\frac{R_1}{2} + \frac{R_3}{2} + R_r}{\frac{R_1}{2}(1 - \varepsilon^2)} - 1$$



误差分析图

这就是分析桥路非线性误差的计算公式。

(3) 纵荡和横荡测量电桥

纵荡和横荡二运动分量的测量电桥, 在原理上和其他运动分量的测量电桥是一样的, 但是在实际测量时电桥电路的结构形式有所不同。由于船模的纵荡是由纵向子车前后位移与 α 角偏移两分量的代数和, 横荡是由横向子车横移与 β 角偏移两分量的代数和。为了使两电桥的输出电流代数相加, 纵荡测量电桥和 α 角测量电桥的电源必须没有公共点, 横荡测量电桥和 β 角测量电桥的电源也没有公共点, 因而各采用两个独立电源分别供电。从而可以做到: 升沉杆不动, 平行移动架偏转时, 纵荡电桥没有输出, 升沉杆位移, 纵荡电桥动触头不动, 纵荡电桥的输出量即为升沉杆的位移量, 而升沉杆的位移量即是船模的纵荡运动量。 α 电桥对 X 电桥起补偿校准作用。横荡电桥和 β 角电桥亦是一样。见图 5。

α 和 β 角测量电桥的作用有二, 其一, 在船模试验前, 测量平行移动架吊杆的偏转角, 也就是检验跟踪系统的工作是否正常; 其二, 在船模试验时, 对因平行移动架偏转而使纵荡及横荡运动量产生的误差进行校正。

(4) 电桥电源

电桥的电源可采用三号甲电、蓄电池或稳压电源供电。

在要求电流输出即用电磁光点示波器记录时, 纵荡、垂荡、首摇及横摇四只电桥的电源可用

同一组电源供给, 纵荡和横荡二只电桥的电源用另一组电源供给, 而 α 及 β 二只电桥的电源必须分别独立供给。

在要求电压输出即用磁带机记录时, 八只电桥的电源必须用八组电源分别独立供给, 为便于获得公共接地点, 可以和磁带机相匹配。此时仍可有电流输出可供记录。

(5) 电桥电路的主要参数及计算结果

表 1 电桥电路的主要参数

电桥	电位计	桥路电压(伏)	非线性误差 σ
纵摇	$l=120$ 毫米, 66°	3.0; 1.5; 1.0	$\pm 5^\circ$ 时 0.16%; $\pm 10^\circ$ 时 0.65%; $\pm 15^\circ$ 时 1.45%
垂荡	$l=330$ 毫米, 185°	3.0; 1.5; 1.0	$\pm 50^{MM}$ 时 0.16%; $\pm 100^{MM}$ 时 0.66%; $\pm 150^{MM}$ 时 1.49%
横摇	$l=150$ 毫米, 86°	3.0; 1.5; 1.0	$\pm 10^\circ$ 时 0.055%; $\pm 20^\circ$ 时 0.22%; $\pm 35^\circ$ 时 1.0%
首摇	$l=90$ 毫米, 52°	3.0	$\pm 10^\circ$ 时 0.05%
纵荡	$l=1060$ 毫米, 610°	6.0	$\pm 500^{MM}$ 时 0.65%
α 角	$l=80$ 毫米, 48°	2.0	$\pm 6^\circ$ 时 0.10%

横荡电桥和纵荡电桥相同, β 角电桥和 α 角电桥相同, 表中未予列出。桥路电压各数值是供分档测量之用, 所有元件都采用电阻及电位器等线性元件组成。

三、技术指标

1. 测量系统

(1) 线位移和角位移的测量误差不大于 1.5%。

最小反应位移 0.1 度; 0.25 毫米。

纵荡和横荡的最大绝对误差 ≤ 1.5 毫米。

非线性误差 $\leq \pm 1.5\%$ 。

(2) 校验结果

采用日本 EMO-121 型电磁光点示波仪进行记录, 振子为 G-170C 和 G-100A。校验结果见表 2~6。

表 2 纵摇测量电桥校验结果

桥压 \ 纵摇		-15°	-10°	-6°	-5°	-4°	-2°	0	+2°	+4°	+5°	+6°	+10°	+15°
光点移动 (毫米)	3.0 伏			89.5		59.4	29.7	0	29.7	59.4		89.1		
	1.5 伏		72		36			0			36		72	
	1.0 伏	63	42		21			0			21		42	63.1

表 3 垂荡测量电桥校验结果

桥压 \ 垂荡 (MM)		-150	-120	-100	-80	-60	-40	-20	0	+20	+40	+60	+80	+100	+120	+150
光点移动 (毫米)	3.0 伏					50.9	33.8	16.9	0	17	34	51				
	1.5 伏			40	32	24	16	8	0	8	16	24	32	40		
	1.0 伏	39.2	31.5		21		10.5		0		10.5		21		31.5	39.4

表 4 横摇测量电桥校验结果

桥压 \ 横摇		-30°	-25°	-20°	-15°	-10°	-5°	0	+5°	+10°	+15°	+20°	+25°	+30°
光点移动 (毫米)	3.0 伏		10.24	82	61.5	41	20.5	0	20.5	41	61.5	82	10.26	
	1.5 伏	61.2	51	40.8	30.6	20.4	10.2	0	10.2	20.4	30.6	40.8	51	61.2
	1.0 伏	40.3	33.6	26.8	20.1	13.4	6.7	0	6.7	13.4	20.1	26.8	33.6	

表 5 首摇测量电桥校验结果

桥压 \ 船摇		-16°	-12°	-8°	-4°	0	+4°	+8°	+12°	+16°
3.0 伏, 光点移动 (毫米)		64.8	48.6	32.4	16.2	0	16.3	32.5	48.8	65

表 6 纵荡测量电桥校验结果

桥压 \ 纵荡 (MM)		-500	-400	-300	-200	-100	0	+100	+200	+300	+400	+500
6.0 伏, 光点移动 (毫米)		89.4	72	54	36	18.2	0	17.7	35.7	53.7	72	90

横荡测量电桥校验结果与纵荡测量电桥基本相同, 这里不再重复。

2. 纵、横二向伺服随动系统

(1) 最大跟踪速度 200 毫米/秒。

最大跟踪加速度 1260 毫米/秒²。

最大跟踪频率 纵向 3.5 赫/秒, 横向 3.0 赫/秒。

当船模受到波浪冲击而突然偏移时, 子车跟踪的振荡过程应在两个半波内消失, 调节时间不大于 0.5 秒。

保证平行移动架在整个测试过程中其偏转角 $\alpha, \beta \leq \pm 1$ 度。

(2) 系统特性

系统特性见表 7~9, 过渡过程见图 6~7。

表 7 角度传感器特性

输入位移 (毫米)		0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
输出 (毫伏)	正	20	282	553	840	1100	1360	1610	1840	2080	2300	2480	2650
	反	20	287	575	840	1100	1420	1700	1900	2150	2350	2580	2800

位移 7.85 毫米对应于平行移动架偏转 1 度。

表 8 横向放大器特性

输入电压 (毫伏)		25	40	50	60	70	80	90	100	125	150	200	350	500
正向特性	输出(伏)	20	39	57	72	83	89.5	97.5	108	120	130	148	188	218
	K	800	975	1140	1200	1186	1120	1082	1080	960	867	740	537	436
反向特性	输出(伏)	23.5	38	49	61	77	86.5	95	110	118	130	146	188	220
	K	940	950	980	1015	1100	1082	1054	1100	943	867	730	537	440

K 是放大倍数。

表 9 纵向放大器特性

输入电压 (毫伏)		25	40	50	60	70	80	90	100	125	150	200	350	500
正向特性	输出(伏)	10.4	19	25	33	40	46	51	54	57.5	61	67.5	74	80
	K	416	475	500	550	571	575	567	540	460	407	338	211	160
反向特性	输出(伏)	9.3	19.8	26	34	41	47	52	55	58.5	62	68	75	80
	K	361	495	520	560	585	588	577	550	468	413	340	214	160

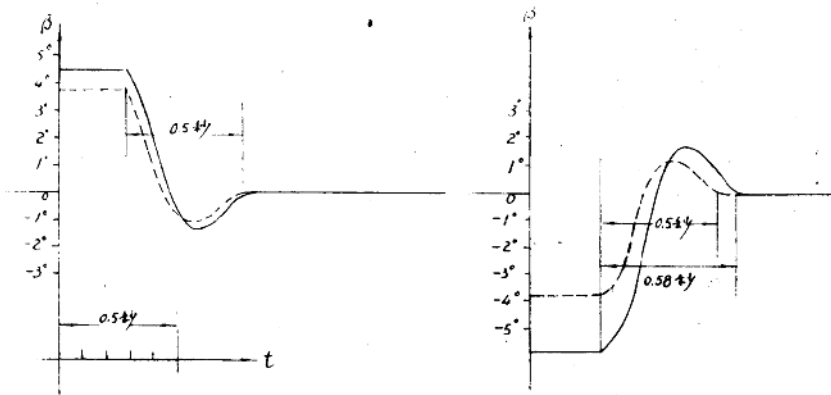


图 6 横向伺服随动系统过渡过程曲线图

3. 结 果

(1) 从表 2~6 可见, 测量系统的非线性误差都小于 1.5%, 说明本仪器的跟踪系统和测量系统是较理想的。这里着重指出二点: 一是记录器的振子灵敏度越高, 测试误差就越小; 二是测量电桥必须在“机械零位”的平衡状态下使用。

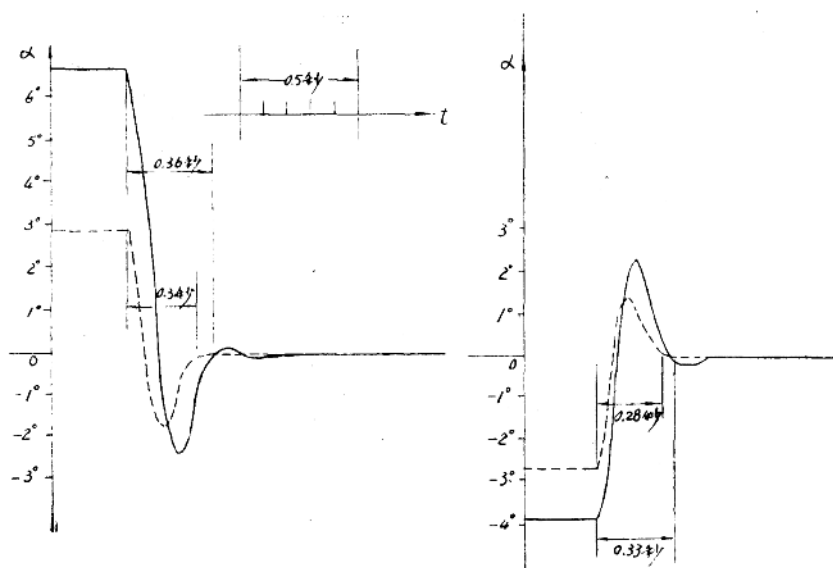


图 7 纵向伺服随动系统过渡过程曲线图

(2) 纵、横二向伺服随动系统的过渡过程基本上只有一个半波。纵向过渡过程在较大的阶跃讯号作用下只有 0.25 秒，横向过渡过程在较大的阶跃讯号作用下则为 0.5~0.6 秒。如果在 ± 1 度的阶跃讯号作用下，过渡过程时间可以大大缩短 (< 0.5 秒)，即在 0.5 秒的时间内即可消除振荡。

四、水池中校核和使用情况

1. 水池校核

1976 年和 1980 年在中国船舶科学研究中心适航性水池中，对本仪器作了校核试验，目的是考察仪器的伺服随动系统工作情况是否能达到预定的设计技术指标。以各种航速、航向，不同波高和各种波频组合下，在水池进行了校核试验。考虑到船模水平位移量一般在零速状态下较大，所以以零速规则波试验来校验适航仪的跟踪性能。

校核试验采用国际拖曳水池会议推荐的 S175 标准船模。此模型既有各国的理论计算数据，又有各国水池试验的结果，便于分析比较。

船模：排水量 $D_m = 0.145 \text{ 米}^3$ ，船长 $L_m = 3.16 \text{ 米}$ ，吃水 $T_m = 0.173 \text{ 米}$ ，船宽 $B_m = 0.462 \text{ 米}$ 。

图 8 示出零速迎浪中的试验结果。图 9 示出零航速横浪中的试验结果。

试验结果表明：不论在规则波、不规则波中或是过渡波的冲击作用下，而且不管浪向如何，航行或者停泊状态都能满足上述的技术指标。即使在过渡波的特大波高 $2h = 190 \text{ 毫米}$ 的作用下，平行移动架的偏转角分别为 $\alpha < \pm 0.5^\circ$ 度及 $\beta < \pm 1^\circ$ 度，也是满足要求的。

2. 使用情况

该仪器投产后，至今运行性能良好，曾用于各种模型的试验，包括各类船模、海上浮标、海

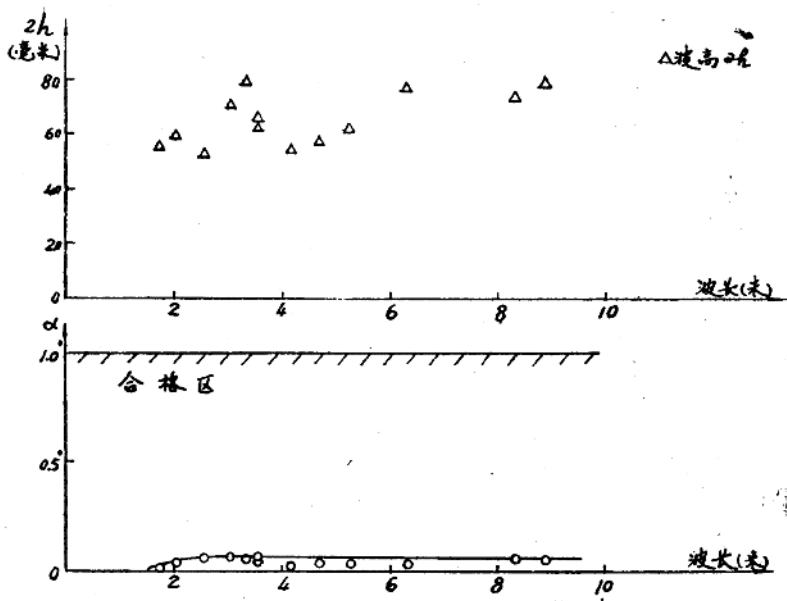


图 8 S175 船模规则波试验。航向 180° ，航速为零， α 角合格

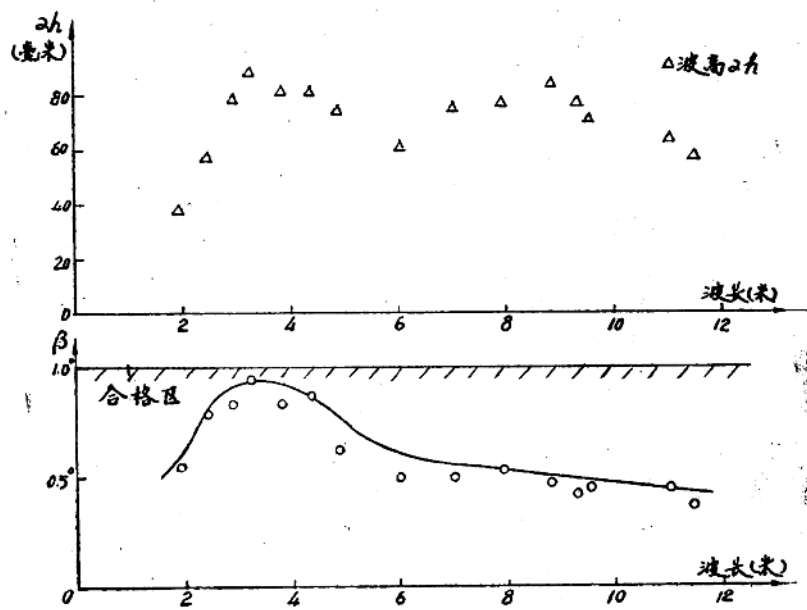


图 9 S175 船模规则波试验。航向 90° ，航速为零， β 角合格