

用于海上载体的 惯性导航系统

Инерциальные Навигационные
Системы Морских Объектов

【俄】 Д.П.Лукьянов А.В.Мочалов А.А.Одинцов И.Б.Вайсгант 著
陶 冶 贾福利 译 袁书明 王兴岭 审校



國防工業出版社
National Defense Industry Press

用于海上载体的惯性导航系统

Инерциальные Навигационные Системы Морских Объектов

[俄] Д. П. Лукьянов А. В. Мочалов 著
А. А. Одинцов И. Б. Вайсгант

陶冶 贾福利 译
袁书明 王兴岭 审校

国防工业出版社

· 北京 ·

著作权合同登记 图字:军—2013—065 号

图书在版编目(CIP)数据

用于海上载体的惯性导航系统 / (俄罗斯)鲁克亚诺夫等著;陶冶,贾福利译. —北京:国防工业出版社,2014.1
ISBN 978-7-118-09029-1

I. ①用... II. ①鲁... ②陶... ③贾... III. ①航海导航-惯性导航系统 IV. ①U666.12

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第279209号

Инерциальные Навигационные Системы Морских Объектов

© 1989 Д. П. Лукьянов А. В. Мочалов

А. А. Одинцов Н. Б. Вайсгант

本书中文简体版由 Д. П. 鲁克亚诺夫等授予国防工业出版社独家出版发行。
版权所有,侵权必究。

◆

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司印刷

新华书店经售

*

开本 880×1230 1/32 印张 6 $\frac{7}{8}$ 字数 210 千字

2014年1月第1版第1次印刷 印数 1—2000册 定价 45.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

译者序

导航系统是运动载体上的重要设备,可以提供载体的位置、速度和姿态信息。对于海上运动载体(特别是水下运动载体)而言,惯性导航系统能自主、准确地提供上述信息,以保证航行的安全性、行动的隐蔽性和攻击的准确性。

原著几位作者为苏联及当前俄罗斯导航领域的杰出专家,其中,Д. П. 鲁克亚诺夫(Д. П. Лукьянов)为自主激光导航系统领域专家,曾任圣彼得堡国立电子技术大学自主导航、控制与力学教研室主任,现为该校激光测量与导航系统教研室名誉教授,其主要研究方向为激光陀螺仪、惯性导航系统及光电信息测量设备等。А. А. 阿晋佐夫(А. А. Одинцов)为俄罗斯船用惯性导航系统领域专家,任职于俄罗斯中央科学电器研究所(ЦНИИ Электроприбор),其主要研究方向为高精度平台式惯性导航系统。上述作者所在单位均为俄罗斯高精度导航设备、陀螺敏感元件的主力研究单位,这两家单位在俄罗斯导航系统研制等领域存在广泛合作。另外,俄罗斯中央科学电器研究所每年还举办圣彼得堡组合导航系统国际会议,该会议在组合导航、敏感元件研制和运动控制等领域有着广泛的学术影响。每年还举办“导航与运动控制”青年学者会议。该研究所还出版《陀螺与导航》学术期刊,该期刊在国际上具有一定影响力。

本书叙述了用于海上运动载体的几类惯性导航系统(半解析式、几何式、解析式及捷联式)的设计原理。介绍了惯性导航系统的仪表组成。首次关注激光陀螺仪及其在捷联式惯性导航系统中的应用特点。分析了不同惯性元件的误差特性,结合各元件的实际误差模型重点分析了各类惯性导航系统的误差。书中还介绍了用于高纬度地区(如:极区)的惯性导航系统设计时导航坐标系的选择问题。特别给出

了具有非接触支承转子的不可控陀螺仪(如:静电陀螺仪)的漂移特点,分析了基于这种陀螺仪设计的惯性导航系统的误差原理,为从事这方面研究的科研人员提供了较好的参考。

译者特别感谢北京理工大学汪顺亭院士和清华大学张嵘教授在本书翻译过程中提出的宝贵建议。感谢国防工业出版社的支持,这将极大促进惯性技术领域的国际学术交流,共同分享科学技术的研究成果。

本书由贾福利、陶冶共同翻译,贾福利统稿,由袁书明、王兴岭审校。

由于译者水平有限,书中不妥之处,敬请各位读者批评指正。

译 者

2013年6月

目 录

引言	1
第 1 章 惯性导航系统的基本设计原理和敏感元件	3
1.1 惯性导航系统的组成和运行原理	3
1.2 惯性导航系统中利用的加速度计	7
1.3 陀螺敏感元件	20
1.4 陀螺稳定平台	33
1.5 海用惯性导航系统的应用特点和基本理论问题	47
1.6 导航坐标系及其变换	49
第 2 章 海用惯性导航系统的分类、配置和性能	64
2.1 惯性导航系统的分类及不同类型惯性导航系统对比分析	64
2.2 半解析式惯性导航系统	69
2.3 几何式惯性导航系统	82
2.4 解析式惯性导航系统	92
2.5 捷联式惯性导航系统	98
第 3 章 惯性导航系统各元件的仪表误差	108
3.1 基本误差特性	108
3.2 不可控陀螺仪的漂移	111
3.3 可控陀螺仪的漂移特性	124
3.4 浮子积分陀螺仪的误差	126
3.5 激光陀螺仪的误差	128
3.6 陀螺漂移分量时域内分布特性	135

3.7 陀螺仪精度提高方法	138
第4章 海用自主惯性导航系统的误差原理	145
4.1 问题提出	145
4.2 惯性导航系统模拟惯性坐标系及垂线建立误差	146
4.3 惯性坐标系及垂线模拟误差与惯性导航系统误差之间的关系	147
4.4 半解析式惯性导航系统误差方程的建立及变换	152
4.5 半解析式惯性导航系统中当地垂线的模拟误差	164
4.6 几何式惯性导航系统中当地垂线的模拟误差	169
4.7 解析式惯性导航系统中当地垂线的模拟误差	170
4.8 长时间内垂线建立误差的特点	173
4.9 半解析式惯性导航系统中惯性坐标系的模拟误差	175
4.10 在基于不可控陀螺仪的惯性导航系统中惯性坐标系的模拟误差	183
4.11 惯性导航系统陀螺定位装置的几何误差和动态误差	198
4.12 基于激光陀螺仪的捷联式惯性导航系统的误差	206
参考文献	211

引 言

海上航线的扩展及数量的增多、运动密度的增加,以及对不可达极区的探索开发都要求进一步完善海上载体导航与运动控制的方法和设备。惯性导航系统(ИНС)在最近一段时期在不同的导航系统中得到广泛应用,满足许多重要的要求,如在保证运动载体较高定位精度时的自主性、通用性、抗干扰性和行动隐蔽性等。这种系统的作用原理是对安装在载体上的加速度计测量的加速度进行积分,加速度计的空间定向由陀螺仪决定。在海上运动载体上惯性导航系统的成功实际应用很大程度上取决于在所需元件方面(精密加速度计、陀螺仪、高速计算机等)取得的成就。

利用附加信息源(无线电导航设备、天文导航设备、多普勒速度测量装置等)不定期地进行校准的惯性导航系统成功地解决了导航问题。惯性导航系统与非自主导航设备的组合是未来在太平洋上任意位置利用的导航组合体的设计基础。

起源于 20 世纪初的惯性导航思想以苏联学者 Б. В. Булгаковым 在 1932 年发展起来的惯性导航数学理论为依据。苏联学者 Л. М. Кофманом 和 Е. Б. Левенталем 提出的惯性导航系统独特的结构解决了沿地球表面运动载体地理位置的估计问题。由舒勒(М. Шулер)提出的物理摆和陀螺摆对水平加速度的无扰条件在惯性导航中起到重要作用。苏联学者 А. Ю. Ишлинский、Л. И. Ткачев、В. Д. Андреев、Е. А. Девянин、Д. М. Климов、Ю. К. Жбанов 等在惯性导航系统理论及原理设计方面进行了基础研究。

本书注重惯性导航系统的理论叙述、设计原理、误差分析及主要元件,特别关注了海上载体惯性导航系统的特点。由于本书篇幅所限,没

有叙述惯性导航系统的振荡阻尼、工作准备及校准等问题,这些问题同样具有更大的实际意义,可以作为独立课题进行研究。

引言、第1章和2.5节、3.5节、4.12节由 Д. П. 鲁克亚诺夫和 А. В. 马洽洛夫编写;第2~4章、1.5节、1.6节由 А. А. 阿晋佐夫和 Н. Б. 瓦伊斯坎特编写;3.7节由全体作者共同编写。

在此,对功绩卓越的科学家、技术科学博士 С. С. Ривкин 教授在本书提纲规划方面提出的宝贵意见表示真诚感谢,同时要感谢技术科学博士、А. А. 阿晋佐夫教授在手稿审校过程中给出的一系列宝贵建议。

欢迎读者批评及指正,联系地址:191065,列宁格勒,Гоголя 大街8号,Судостроение 出版社。

第1章 惯性导航系统的基本设计 原理和敏感元件

1.1 惯性导航系统的组成和运行原理

惯性导航系统解决的基本问题是确定运动载体的当前坐标、解算载体的运动参数和角位置参数。此时,只需利用载体的初始坐标、角位置信息以及惯性导航系统中敏感元件信息的处理结果。

作为惯性导航系统工作基础的物理原理与基本动力学问题的解决是密不可分的,即根据刚体的初始位置、速度和作用在其上的作用力确定刚体的运动。

我们首先分析沿不旋转的地球理想球形表面导航的一种假定情况。载体沿子午圈平面向北运动,此时有三种获得惯性信息的方法:

第一种情况,自由陀螺仪或陀螺稳定器的陀螺角度传感器(ДУГ)给出陀螺仪相对基座的角位置变化,也就是当地地理纬度的增量(如图1.1(a))。

第二种情况,将速率陀螺仪(如:激光陀螺仪)的敏感轴沿着运动平面法线定向安装在载体上,这样速率陀螺就会给出运动载体纬度变化速度,对速率陀螺仪示数进行积分后即可得到纬度增量(如图1.1(b))。

最后一种情况是利用敏感轴方向与载体运动方向一致的加速度计测量载体的线加速度(如图1.1(c))。载体处于水平状态消除了重力对加速度计示数的影响,对加速度计信息进行双重积分后得到载体航程的增量 L ,通过简单的关系式 $\Delta\varphi = L/R$ 即可确定纬度增量,式中 R

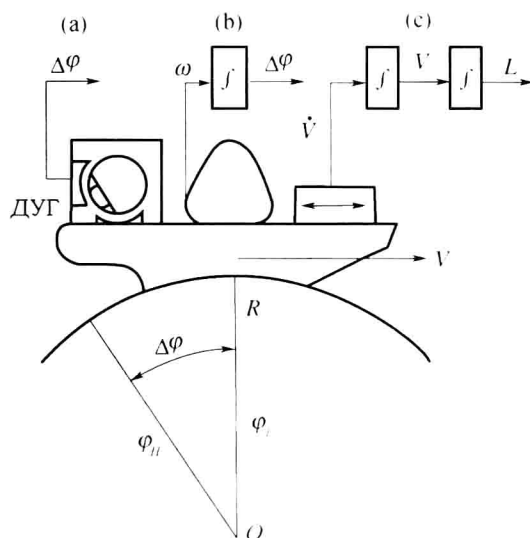


图 1.1 惯性信息源

(a) 自由陀螺仪; (b) 速率陀螺仪; (c) 加速度计

为地球半径。

在实际情况下,安装有惯性敏感元件的运动载体均要进行摇摆,这就不能利用上述给出的几种简单示例解决导航问题。为了稳定角位置,要将加速度计安装在陀螺稳定平台上。为了消除地球重力分量对加速度计示数的影响,要建立一个能把陀螺稳定平台稳定在水平位置上的闭环系统。

下面分析一维惯性导航系统的工作过程。载体在子午圈平面上沿着不旋转地球的大圆弧向北运动,并且只有俯仰角一个转动自由度(见图 1.2)。载体上安装有一个单轴陀螺稳定平台,平台由具有陀螺角度传感器(ДУГ)和力矩器(ДМ)的陀螺仪(Г)、稳定电机(СД)和平台角度传感器(ДУ)组成。陀螺稳定平台与坐标系 xyz 固连,如图 1.2 所示(y 轴沿纸面向内)。

稳定轴 y 轴垂直子午圈平面向西。当施加到陀螺仪力矩器 ДМ 上的控制信号为零时,陀螺转子相对惯性坐标系的位置不变,陀螺稳定平台(见 1.4 节)同样也不会绕 y 轴相对惯性坐标系改变自身的角位置。

如果通过力矩器将沿 z 轴指向的控制力矩施加到陀螺转子上,则

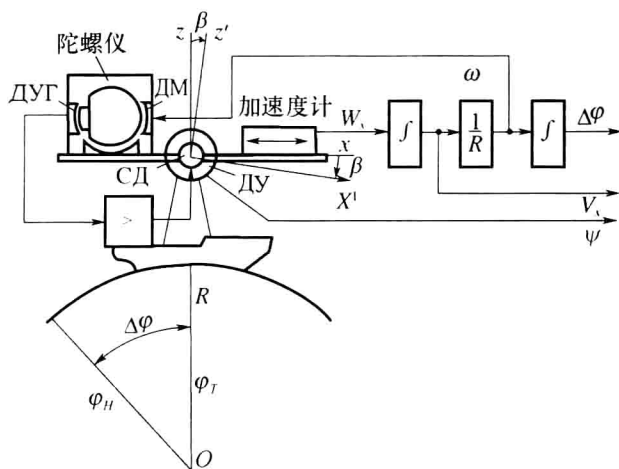


图 1.2 一维惯性导航系统示意图

ДУГ—陀螺角度传感器;ДМ—力矩器;СД—稳定电机;ДУ—角度传感器。

转子开始进动,使稳定平台绕 y 轴转动。此时,平台旋转的角速度和方向取决于控制力矩的大小和方向。在平台上同样也安装有加速度计 A ,其测量轴与平台 x 轴一致,并且在初始时刻对准在水平面上沿子午圈指北。

由加速度计测量的、与载体表现加速度在 x 轴上的投影成比例的信号为:

$$W_x = \dot{V}_x - g_x$$

式中 $\dot{V}_x$ ——载体绝对加速度在 x 轴上的投影;

g_x ——重力加速度在 x 轴上的投影,当认为平台保持水平时,满足 $g_x = 0$ 。

在第一积分器输出端的信号与载体沿 x 轴的运动速度成比例:

$$V_x = \int_0^t W_x dt + V_0$$

式中 V_0 —— $t=0$ 时载体的速度。

当载体沿地球球形表面运动时,当地垂线的转动角速度 $\omega = \dot{\varphi} = V_x/R$ 。

第一积分器输出的信号经过按比例 $1/R$ 放大后施加到陀螺力矩器上。在力矩器产生的力矩 M 作用下陀螺仪在子午圈平面内以角速度 $\omega = M/H = V_x/R$ 进动。陀螺稳定平台复示该运动,以同样的角速度 ω 旋转,使平台保持在当地水平位置上。将稳定平台角位置的这种修正原理称为积分修正原理。该原理由苏联工程师 Л. М. Кофман 和 Е. Б. Левенталь 于 1932 年首次提出^[3]。在第二积分器的输出端可以得到载体的航程信息或纬度增量 $\Delta\varphi$,在平台角度传感器的输出端可以得到载体俯仰角 ψ 。

在实际方案中,由于干扰的影响以及初始对准误差的存在均会引起稳定平台振荡。我们假设,由这些因素引起的垂线建立误差为 β ,则平台会达到新位置 $x'y'z'$ (如图 1.2 所示)。此时,载体表观加速度在加速度计输入轴上的投影为:

$$W_{x'} = W_x \cos\beta - (g - V_x^2/R) \sin\beta$$

对于海上运动载体而言,离心加速度 V_x^2/R 与重力加速度 g 相比很小,可以忽略。如果我们认为角 β 为小角度,则有:

$$W_{x'} = W_x - g\beta \quad (1.1)$$

根据图 1.2 可得:

$$\omega' = \dot{\varphi}' = -\frac{1}{R} \int W_{x'} dt \quad (1.2)$$

$$\varphi' = \int \omega' dt \quad (1.3)$$

对表达式 (1.3) 关于时间进行二次求导后,结合式 (1.2) 可得: $\ddot{\varphi}' = \dot{\omega}' = W_{x'}/R$ 。由于 $W_x = R \ddot{\varphi}$,结合表达式 (1.1) 可得: $\ddot{\varphi}' = \ddot{\varphi} - g\beta/R$ 。另有 $\beta = \varphi' - \varphi$,则有:

$$\ddot{\beta} + g\beta/R = 0 \quad (1.4)$$

方程 (1.4) 满足角 β 以 $T = 2\pi \sqrt{R/g} = 84.4\text{min}$ 的舒勒 (Shuler) 周期振荡。得到的结果证明,这种惯性导航系统方案可以模拟当地垂线,而满足舒勒振荡条件时的垂线建立误差与载体的加速度 W_x 无关,并且以舒勒周期的谐波规律振荡(振荡周期等于摆长为 R 的物理摆的周期)。

上面给出的一维惯性导航系统结构示意图阐述了惯性导航的基本原理,并得到了最简单关系式。三维空间惯性导航系统更具实际意义,这种系统方程的建立则需要考虑地球旋转。

1.2 惯性导航系统中利用的加速度计

测量载体表观加速度的加速度计是惯性导航系统的重要元件。利用加速度计可以确定载体角度姿态。原则上仅利用一组相互间按固定方式配置的加速度计即可设计惯性导航系统。我们研究利用加速度计作为加速度测量装置,通过对其测量的加速度进行积分来确定载体质心的线位移。

现代惯性导航系统利用的加速度计应该具有较高的精度特性、小质量尺寸以及适合与数字计算机匹配连接的数字输出接口。高精度的要求决定了必须详细分析加速度计的作用原理、结构方案及主要误差源。

1. 轴式加速度计的微分方程

在加速度计的一种常见方案中(如图 1.3 所示),刚体 1 是直接处于加速度作用下的敏感元件,它可沿 x 轴直线运动^[15,21,32]。弹簧 2 产生的、与敏感元件位移成比例的拉力(压力)会阻止敏感元件的移动,而阻尼器 3 产生的、与敏感元件相对加速度计壳体运动速度成比例的阻尼力同样也会阻止敏感元件的运动。利用电位计 4 可将敏感元件的位移转换成电信号。因为敏感元件仅是直线运动,这种类型的加速度计称为轴式加速度计,而 x 轴称为加速度计的测量轴,加速度计测量加速度在该轴上的投影。

当没有加速度时弹簧拉力相等,加速度计敏感元件的质心位于坐标系 Oxz 的起点(O)。在惯性力的作用下,敏感元件相对加速度计壳体移动位移 x ,该值与沿 x 轴作用的表观加速度 W_x 成比例。

用各作用力代替其实际关系后,可以将敏感元件的质心作为自由质点写出其运动方程:

$$m(W' + W_x) = F_x$$

式中 m ——加速度计敏感元件的质量；

W' ——敏感元件质心在坐标系 Oxz 中的加速度；

W_x ——载体上 O 点处的表观加速度,该点为坐标系 Oxz 的起点；

F_x ——包括反作用力在内的所有力的投影。

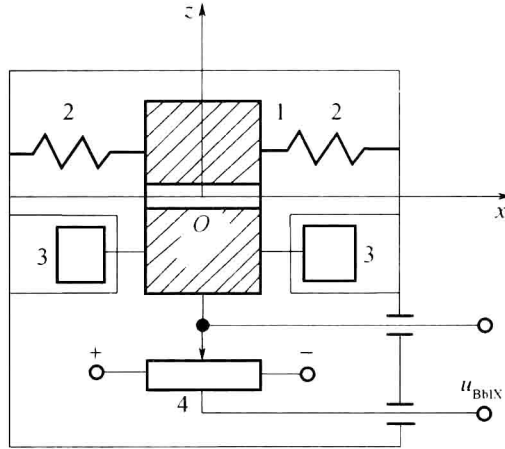


图 1.3 轴式加速度计示意图

1—刚体;2—弹簧;3—阻尼器;4—电位计。

因为敏感元件只能沿 x 轴运动,则有:

$$m\ddot{x} = -mW_x - Cx - Sx + F_{\text{TP}} \quad (1.5)$$

式中 Cx, Sx ——弹簧和阻尼器的恢复力；

F_{TP} ——摩擦力。

很容易将方程(1.5)变为下列形式:

$$\ddot{x} + 2d_0\omega_0\dot{x} + \omega_0^2x = -W_x + F_{\text{TP}}/m \quad (1.6)$$

式中 $d_0 = S/(2\sqrt{C/m})$ ——阻尼系数；

$\omega_0 = \sqrt{C/m}$ ——敏感元件无阻尼振荡的固有频率。

在多数情况下利用另一个形式的轴式加速度计方程:

$$T^2\ddot{x} + 2d_0T\dot{x} + x = -W_x m/C + F_{\text{TP}}/C$$

式中 $T = \sqrt{m/C}$ 。

因此,线性轴式加速度计测量与坐标系 Oxz 的坐标起点固连的运

动载体质点的表观加速度在其测量轴上的投影。

如果敏感元件的平衡位置与运动载体的质心一致,则载体质心的运动方程为:

$$m_0 \mathbf{W} = m_0 \mathbf{g}' + \mathbf{F} \quad (1.7)$$

式中 m_0 ——载体质量;

$\mathbf{F}$ ——所有非引力的合力(拉力、推力等);

$m_0 \mathbf{g}'$ ——假设载体实体所占体积内的重力场均匀时载体质心处的万有引力。

写出方程(1.7)在 x 轴上的投影形式为:

$$W_x - g'_x = F_x / m_0$$

由方程可知,加速度计测量的表观加速度由非引力作用决定。

2. 摆式加速度计

这种加速度计是当敏感元件在加速度计壳体坐标系中存在角位移时测量加速度的(如图 1.4 所示)。

摆式加速度计的敏感元件是一个质量为 m 的扁平摆。摆的质心距离其转轴的距离为 l 。螺旋式弹簧 1 限制扁平摆绕经过点 O 轴(垂直于纸面)的旋转角度 β 。与轴式加速度计一样,摆式加速度计也测量表观加速度在其测量轴上的投影,摆式加速度计的测量轴在平衡位置垂直于摆臂(如图 1.4 中的 $O\eta$ 轴)。

摆式加速度计敏感元件(扁平摆)的运动方程有如下形式^[15,20,28]:

$$I_\xi \ddot{\beta} + B\dot{\beta} + C'\beta = mlW_\eta \cos\beta + mlW_\xi \sin\beta + M_\xi \quad (1.8)$$

式中 I_ξ ——浮子摆的惯性力矩;

B ——角度阻尼系数(在图 1.4 中未画出阻尼器);

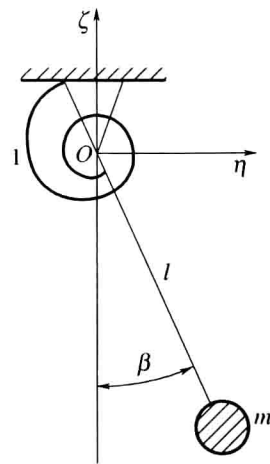


图 1.4 摆式加速度计示意图

C' ——弹簧的角刚度；

W_η 、 W_ζ ——载体表观加速度在 η 轴和 ζ 轴上的分量；

M_ξ ——有害力矩总和。

将方程(1.8)变换为式(1.6)的形式,可得:

$$\ddot{\beta} + 2d_0\omega_0\dot{\beta} + \omega_0^2\beta = \frac{mlW_\eta}{I_\xi}\cos\beta + \frac{mlW_\zeta}{I_\xi}\sin\beta + \frac{M_\xi}{I_\xi} \quad (1.9)$$

式中 $\omega_0 = \sqrt{C'/I_\xi}$ ——无阻尼固有振荡频率；

$d_0 = B/(2\sqrt{C'I_\xi})$ ——阻尼系数。

摆式加速度计的测量轴与 η 轴一致,但是加速度计对沿 ζ 轴的加速度分量 W_ζ 是敏感的。此时,由表达式(1.9)可见,角 β 也越大,加速度分量 W_ζ 影响就越大。

与前面的轴式加速度计一样,假设 $W_\eta = \text{const}$ 、 $W_\zeta = \text{const}$ 、 $\ddot{\beta} = \dot{\beta} = 0$,当 β 为小角度时有:

$$\beta = \frac{(mlW_\eta + M_\xi)}{(I_\xi\omega_0^2 - mlW_\zeta)}$$

显然,交叉失真误差较小的条件是: $\omega_0^2 \gg mlW_\zeta/I_\xi$ 。因此,忽略有害力矩 M_ξ 后,摆式加速度计的静态特性可写为如下形式:

$$\beta \approx mlW_\eta / (I_\xi\omega_0^2)$$

3. 弦式加速度计

这类加速度计与前面分析的加速度计一样,均属于直接变换类型加速度计,但是与其他加速度计的区别是其输出信号的频率方式能保证加速度计方便与舰载数字计算机(ЦБМ)进行接口匹配。

弦式加速度计(如图 1.5 所示)的作用原理是以弦拉力变化时可改变其固有振荡频率的弦特性为基础^[15]。质量为 m 的敏感元件 2 通过在测量轴 x 方向上具有小刚度的薄振动片 3 保持垂向位移。预张力为 F_0 的弦线 1、4 限制了敏感元件 2 的水平位移。