

捷联式惯性导航系统设计原理

[俄] В.В.马特维耶夫 (В.В.Матвеев) 著
В.Я.拉斯波波夫 (В.Я.Распопов)
贾福利 陶 冶 王兴岭 饶 鑫 译
刘为任 王 凯 审校



Основы Построения
Бесплатформенных Инерциальных
Навигационных Систем



国防工业出版社
National Defense Industry Press

捷联式惯性导航系统设计原理

Основы Построения Бесплатформенных
Инерциальных Навигационных Систем

[俄] B.B. 马特维耶夫 (B.B. Матвеев) 著
B.Я. 拉斯波波夫 (B.Я. Распопов)

贾福利 陶冶 王兴岭 饶鑫 译

刘为任 王凯 审校

国防工业出版社

· 北京 ·

著作权合同登记 图字:军-2014-057 号

图书在版编目(CIP)数据

捷联式惯性导航系统设计原理/(俄罗斯)马特维耶夫,
(俄罗斯)拉斯波波夫著;贾福利等译. —北京:
国防工业出版社,2017.1

ISBN 978-7-118-10944-3

I. ①捷… II. ①马… ②拉… ③贾… III. ①捷联式
惯性制导-系统设计 IV. ①V448.131

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 273814 号

Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем/В. В. Матвеев,
В. Я. Распопов/-СПб.: ,2009.-280с.

ISBN 978-5-900780-73-3

本书简体中文由 ГИЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электрон»» 出版社授权国防工业出版社出版发行,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)

三河市众誉天成印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 17 $\frac{3}{4}$ 字数 357 千字

2017 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 98.00 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

现代捷联式惯性导航系统的特点是启动时间短、可靠性高、体积小、质量小,并且随着新型惯性敏感元件(陀螺仪、加速度计)技术快速发展和高速大容量计算机性能的不断完善,捷联式惯性导航系统技术得到迅速发展,精度不断提高。在低成本、短期中精度导航中呈现出替代平台式惯性导航系统的趋势,在对质量、外形尺寸、可靠性等方面严格要求的场合有着潜在的应用前景,其应用领域也由原来的舰艇、船舶、航空飞行器、陆地车辆等扩展到航天飞机、星际探测、制导武器、大地测量、资源勘测、地球物理测量、海洋探测、铁路、隧道、机器人控制、摄像机、儿童玩具等。

随着惯性技术的发展,捷联式惯性导航系统的应用愈发广泛。目前国内有多家企业单位,如研究所、高等院校、专业机构等从事捷联式惯性导航系统的研制工作,研究人员对捷联式惯性导航系统的兴趣正在增加,研究队伍不断壮大。介绍捷联式惯性导航系统的书籍也逐渐增多,大部分书籍是针对某些学术问题进行理论分析,要读懂这类书籍需要具备非常扎实的数学知识,这对非数学专业的导航系统设计人员及惯性技术相关专业技术人员提出了极高的要求。有的书籍则是完全以教学为目的,不能有效地将理论和实际结合起来。本书主要特点是通俗易懂地叙述了捷联式惯性导航系统的设计原理,随后即可着手研究参考文献中给出的更加专业的书籍。翻译本书的初衷是希望给国内刚刚步入捷联式惯性导航系统设计领域的专业人员及相关专业大学生、研究生提供较好参考,以便引导更多人员从事捷联式惯性导航系统的研究。

本书的两位作者均在俄罗斯图拉国立技术大学控制仪表教研室工作,其中:В.Я.Распопов教授是控制仪表教研室主任、俄罗斯杰出科学家、著名航空仪表设计专家、国际“导航与运动控制”学会成员,主要研究方向为实用陀螺仪及陀螺稳定器、近程战术导弹弹载陀螺控制仪表、微型技术系统、无人飞行器用航空电子设备等;В.В.Матвеев是图拉国立技术大学控制仪表教研室副教授、技术科学副博士,研究方向为惯性导航系统、组合导航系统及微机械敏感元件。本书叙述了利用欧拉-科雷洛夫角、方向余弦、四元数等运动学参数设计捷联式惯性导航系统的原理。研究了捷联式惯性导航系统中所用陀螺仪和加速度计的工作原理。重点分析

了捷联式惯性导航系统的误差,给出了捷联惯性导航系统精度评定公式。叙述了捷联式惯性导航系统与其他导航系统的组合问题,给出了组合导航系统中应用卡尔曼滤波器的实例。本书中结合了捷联式惯性导航系统相关课题及实验室实践课程内容,特别叙述了利用工程技术人员和高校大学生都比较熟悉的 MATLAB 软件对捷联式惯性导航系统的设计进行仿真,给出了利用不同运动学参数对捷联式惯性导航系统的陀螺敏感元件进行仿真的框图。书中配有相应例题及自测问题,以供读者巩固所学知识。本书适合高校导航相关专业大学生及研究生阅读,也可供从事自主导航技术研究的工程技术人员和科研人员参考。

译者特别感谢北京理工大学汪顺亭院士和北京航空航天大学房建成院士在本书翻译过程中提出的宝贵建议。感谢哈尔滨工业大学光电工程学院段小明副教授、西南物理研究所王莉工程师在翻译资料搜集过程中提供的帮助。在本书翻译、出版过程还得到了国防工业出版社编辑的鼓励和帮助,在此表示感谢!

本书由贾福利、陶冶、王兴岭、饶鑫共同翻译,贾福利统稿,由刘为任、王凯审校。

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

2016年8月

惯性导航系统(ИНС)理论原理是“导航与运动控制”方向专业人才培养教学大纲的课程之一。在不同高校内,这类课程的教学大纲中既包括标准课程也包括专业课程,这主要由教研室的科研方向及用户的订购情况决定。

标准课程主要包括:①载体实时位置坐标惯性解算原理及导航系统无扰性(М.舒勒原理)研究;②惯性敏感元件(加速度计和陀螺仪)的理论基础及原理;③几何式、半解析式和解析式惯性导航系统设计原理、误差模型及初始对准方法。

惯性导航系统理论方面的书籍和文章共有 100 多种。但可惜的是,大部分著作出版于 20 世纪 50—70 年代,目前已经成为馆藏珍本,例如,Г.О.Фридлендер^[27]和 А.А.Якушенков^[29]的书出版量虽不大,却全面涵盖了惯性导航系统的设计问题。А.Ю.Ишлинский^[14]、П.В.Бромберг^[6]的基础研究显然也不是以教学为目的,但是他们在书中对某些学术问题的研究可作为教科书编写的范例。在近代作品中我们必须提到 В.Д.Андреев 在惯性导航系统理论方面的两卷本著作^[1],要读懂这部著作需要扎实的知识和充足的时间,因为所有材料均紧密结合原文,该书可作為一部比较好的惯性导航系统理论参考书。

近 10 年的一系列著作主要定位惯性导航系统领域的专业人员,而 С.П.Дмириев、Л.П.Несенюк 的著作^[10,28]也完全应用于教学环节,其中也包括 О.Н.Анучин、Г.И.Емельянцеv、О.А.Степанов 在组合导航系统领域的著作^[2,24]。

捷联式惯性导航系统(БИНС)领域的著作随着宇宙火箭技术的发展也逐渐增多。在该领域出版的主要是捷联式惯性导航系统理论和设计方面的著作。这里必须提到 В.Н.Бранец 和 И.П.Шмыглевский 的著作^[3,4],但是要掌握上述著作中的内容必须有扎实的数学知识,然而遗憾的是,在当前高校的大学生以及多数专家当中这点还是比较欠缺的。按照 А.Н.Крылов 院士的说法,如果不经常利用高等数学这门学科,迟早就会将部分基础和专业章节知识严重遗忘。伴随着第 4 代战机航空电子设备的现代化改装,向第 5、6 代战机过渡以及必须研制高机动飞行器(包括无人机)机载控制系统的迫切需求,近年来研究人员对捷联式惯性导航系统的兴趣正在增加。另外,多功能自主移动式机器人的作用越发广泛,在利用其解决专门问题时也要求其组成上配备捷联式惯性导航系统。

因此,目前存在两种情况:一是对捷联式惯性导航系统的需求增加;二是缺少在所引用的数学注释方面通俗易懂的捷联式惯性导航系统理论基础教学参考书。上述两种情况促使了本部教学参数书的出现,该书主要面向“导航与运动控制”方向的高校大学生。本书的主要思想是介绍捷联式惯性导航系统的设计原理,随后即可着手研究参考文献中给出的更加专业的著作。

本书同样可供在捷联式惯性导航与定位定向系统设计领域工作的工程师、专业技术人员、高校研究生及教师参考。

该书特点是各章、节叙述比较充分,并且内容通俗易懂。特别是用单独一章的篇幅叙述在大学生和工程技术人员中都比较熟悉的 MATLAB 软件及其扩展包 Simulink 环境下对捷联式惯性导航系统进行仿真。这一章可作为高校“惯性导航系统”方向实验室实习课程的一部分。

在本书的编写过程中,作者认真学习了一些著作,并在必要时仔细研究了参考文献中列出的主要著作。作者有效利用了捷联式惯性导航系统相关课题的文章材料,以及在俄罗斯科学院 В.Г.Пешехонов 院士领导下由中央科学电器研究所(ЦНИИ «Электроприбор»)组织举办的组合导航系统国际年会材料文集中的论文,还有“Гирскопия и навигация”杂志中刊登的文章。

作者感谢“极地”科学研究所(НИИ «Полюс» им. М.Ф.Стельмах)副所长 В.Г.Дмитриев 和莫斯科航空学院(МАИ)技术科学博士 В.А.Мельников 教授在激光陀螺仪和弦式加速度计方面提供的材料及建议,同样感谢中央科学电器研究所(ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»)技术科学博士 О.А.Степанов 提出的宝贵建议。

特别指出,本书中的部分内容是以提高专业技能为目的讲座、实验室及实践课程中内容,这些课程均是在图拉国立技术大学(Тульский государственный университет)控制仪表教研室专门为俄罗斯联邦扎巴巴赫核能中心(ФГУП РФ ЯЦ им. Е.И. Забабахина)和米丘林斯克“进步”工厂(ОАО «Мичуринский завод «Прогресс»))的工程师们设置的(2006—2007年)。

作者感谢提供本单位产品成套信息宣传册的企业相关部门的同事,这些企业包括拉明斯克仪表设计局(ОАО «Раменское приборостроительное конструкторское бюро»))、拉明斯克仪表制造厂(Раменский приборостроительный завод)、皮尔姆科研生产仪表设计公司(Пермская научно-производственная приборостроительная компания)、米秋林斯克“进步”工厂(завод «Прогресс»))等。

作者特别感谢提供产品样品的相关企业,对这些样品的研究可以比较深入地阐述捷联式惯性导航系统基准组件选择的相关问题。感谢“速度-航空”开放式股份有限公司(ОАО «Темп-Авиа»)科研副所长 В.В.Лосев(技术科学副博士)、皮尔姆科研生产仪表设计公司(ПНППК)副所长 В.С.Ермаков(技术科学副博士)、米秋林斯克“进步”工厂开放式股份有限公司(ОАО «Мичуринский завод

《Прогресс》)所长 В.А.Дмитриев(电子科学副博士)。

本书第1、2章和第3.1、3.2节由 В.Я.Распопов 编写,第4、5、6章和第3.3、3.4、3.5节由 В.В.Матвеев 编写。

作者感谢图拉国立技术大学控制仪表教研室的 Ю.В.Иванов 教授(技术科学博士)、Д.М.Малютин 副教授(技术科学副博士)、Р.В.Алавуев 副教授(技术科学副博士)对本书个别章节内容的讨论,同时感谢该教研室研究生 А.В.Никулин、В.В.Лихошерст、Р.В.Ершов,他们对本书内容计算机排版方面做了大量工作。

作者感谢审阅者 А.А.Одинцов 教授(技术科学博士)和 Ю.В.Филатов 教授(技术科学博士)对完善本书内容方面提出的宝贵建议。如果没有俄罗斯科学院院士 В.Г.Пешехонов 教授的全面支持帮助,本书的出版发行是不可能的,在此特别感谢!

参 考 文 献

- [П1] Андреев В.Д. Теория инерциальной навигации. Кн. I .Автономные системы. Кн. II . Корректируемые системы. -М.: Наука, 1966, 1967.
- [П2] Анучин О.Н., Емельянец Г.И. Интегрированные системы ориентации и навигации для морских подвижных объектов / Под общ.ред.чл.-кор.РАН В.Г.Пешехонова. -СПб., 1999. - 357 с.
- [П3] Бранец В.Н., Шмыглевский И.П.Применение кватернионов в задачах ориентации твердого тела.М.: Наука.1973.-320 с.
- [П4] Бранец В.Н., Шмыглевский И.П.Введение в теорию бесплатформенных инерциальных навигационных систем. -М.: Наука, 1992.-280 с.
- [П5] Броксмейер Ч. Ф. Системы инерциальной навигации. -Л.: Судостроение, 1967.
- [П6] Бромберг П.В. Теория инерциальных систем навигации. -М.: Наука, 1979-296 с.
- [П7] Борговые сисетмы навигации и ориентации искусственных спутников Земли/ О.Н.Анучин, И.Э. Комарова, Л.Ф.Порфирьев. -СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электронприбор», 2004.-326 с.
- [П8] Гореиштейн И.А., Шульман И.А., Сафарьян А.С. Инерциальная навигация. -М.: Сов. радио, 1962.
- [П9] Гироскопические системы. Гироскопические приборы и сисетмы: Учеб. для вузов/ Д.С.Пельпор, И. А.Михалев, В.А.Бауман и др./Под ред.Д.С.Пельпора.2-е изд., перераб.и доп. -М.: Высш. школа, 1988. -424 с.
- [П10] Дмитриев С. П., Пелевин А. Е. Задачи навигации и управления при стабилизации судна на траектории. -СПб: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электронприбор», 2002.-159 с.
- [П11] Захарин М.И., Захарин Ф.М. Кинематика инерциальных систем навигации. -М.: Машиностроение, 1968.
- [П12] Инерциальные навигационные системы морских объектов/ Д.П.Лукиянов, А.В.Молчанов, А.А. Одинцов, И.Б.Вайсгант/ Под.ред.Д.П.Лукиянов. -Л.: Судостроение, 1989.-184 с.
- [П13] Инерциальная навигация/ Под ред О'Доннела. -М.: Наука, 1968.
- [П14] Ишлинский А.Ю. Ориентация, гироскопы и инерциальная навигация. -М.: Наука, 1976. -672 с.
- [П15] Климов Д.М.Инерциальная навигация на море. -М.: Наука, 1984.-118 с.
- [П16] Лебедев Р.К.Стабилизация летательного аппарата бесплатформенной инерциальной системой.М.:

Машиностроение.1977.–144 с.

- [П17] Лукомский Ю.А., Пешехонов В.Г., Скороходов Д.А. Навигация и управление движением судов. – СПб.:Элмор, 2002. –360 с.
- [П18] Лурье А.И. Аналитическая механика. –М.: Изд-во физ.-мат.лит., 1961. –824 с.
- [П19] Мак-Клур К.Л. Теория инерциальной навигации/Пер.с англ. –М.: Наука, 1964. –300 с.
- [П20] Пешехонов В.Г. Ключевые задачи современной автономной навигации//Гироскопия и навигация. – 1996. –№1. –С.48–55.
- [П21] Помыкаев И.И., Селезнев В.П., Дмитроченко Л.А. Навигационные приборы и системы. – М.: Машиностроение, 1983.
- [П22] Ривкин С.С., Ивановский Р.И., Костров А.В. Статистическая оптимизация навигационных систем. –Л.: Судостроение, 1976. –284 с.
- [П23] Селезнев В.П. Навигационные устройства. –Л.: Машиностроение, 1974. –660 с.
- [П24] Степанов О.А. Применение теории нелинейной фильтрации в задачах обработки навигационной информации. –СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электронприбор», 1998. –370 с.
- [П25] Степанов О.А. Особенности построения и перспективы развития навигационных инерциально-спутниковых систем./Интегрированные инерциально-спутниковые системы навигации: Сб. статей. –СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электронприбор», 2001.
- [П26] Управление и наведение беспилотных маневренных летательных аппаратов на основе современных информационных технологий/Под ред. М. Н. Красильщикова и Г. Г. Себрякова. – М.: Физматлит. 2003. –280 с.
- [П27] Фридлендер Г.О. Инерциальные системы навигации. –М., Физматлит, 1961.
- [П28] Челпанов И.Б., Несенюк Л.П., Брагинский М.В. Расчет характеристик навигационных гироскопов. –Л.: Судостроение. 1978. –264 с.
- [П29] Якушенко А.А. Основы инерциальной навигации. –М.: Морской транспорт, 1963. –146 с.

缩 略 词

ИНС——惯性导航系统

БИНС——捷联式惯性导航系统(也称无平台式惯性导航系统)

ГСП——陀螺稳定平台

КНС——综合导航系统

ИМ——惯性检测质量

ЧЭ——敏感元件

ДУС——角速度传感器

ЛА——飞行器

МЭМС——微机电系统

ЭСГ——静电陀螺仪

МСГ——磁悬浮陀螺仪

ПГ——浮子积分陀螺仪

ВОГ——光纤陀螺仪

КЛГ——环形激光陀螺仪

ВТГ——半球谐振陀螺仪(也称固体波动陀螺仪)

ДНГ——动力调谐陀螺仪

ММГ——微机械陀螺仪

НГ——不可控(自由)陀螺仪

РВГ——转子振动陀螺仪

ММА——微机械加速度计

主 要 符 号

坐标系(三面体)

$OX_g Y_g Z_g$ ——地理坐标系(标准坐标系);

$\tilde{O}\tilde{X}_g \tilde{Y}_g \tilde{Z}_g$ ——解算的地理坐标系;

$OXYZ$ ——载体坐标系(与载体固连的坐标系);

$OX_u Y_u Z_u$ ——惯性坐标系;

$O_0 X_0 Y_0 Z_0$ ——地球坐标系;

$O\xi\eta\zeta$ ——静止坐标系(推导泊松方程和四元数方程时利用)。

运动学参数

ψ ——偏航角; θ ——俯仰角;

γ ——横滚角; φ ——纬度;

λ ——经度; h ——高度;

$\omega_X, \omega_Y, \omega_Z$ ——载体坐标系 $OXYZ$ 的绝对角速度向量在其各轴上的投影;

$\omega_{X_g}, \omega_{Y_g}, \omega_{Z_g}$ ——地理坐标系 $OX_g Y_g Z_g$ 的绝

对角速度向量在其各轴上的投影;

$V_{X_g}, V_{Y_g}, V_{Z_g}$ ——载体的线速度向量在地理坐标系 $OX_g Y_g Z_g$ 各轴上的投影;

n_X, n_Y, n_Z ——表观(视)加速度向量在载体坐标系 $OXYZ$ 各轴上的投影;

$n_{X_g}, n_{Y_g}, n_{Z_g}$ ——表观(视)加速度向量在地理坐标系 $OX_g Y_g Z_g$ 各轴上的投影;

g ——重力加速度;

R_3 ——地球半径;

R ——地心距载体质心的距离;

α ——捷联式惯性导航系统的方位误差;

β, χ ——垂线(水平)建立误差;

$\Delta\varphi, \Delta\lambda, \Delta h$ ——纬度、经度和高度的确定误差;

$\Delta\psi, \Delta\theta, \Delta\gamma$ ——偏航角、俯仰角和横滚角确定误差;

$\varepsilon_X, \varepsilon_Y, \varepsilon_Z$ ——陀螺漂移;
 $\delta a_X, \delta a_Y, \delta a_Z$ ——加速度计误差。

正交变换矩阵

A ——从地理坐标系 $OX_gY_gZ_g$ 向载体坐标系 $OXYZ$ 的变换矩阵;
 B ——从惯性坐标系 $OX_uY_uZ_u$ 向地理坐标系 $OX_gY_gZ_g$ 的变换矩阵;
 C ——从载体坐标系 $OXYZ$ 向地理坐标系 $OX_gY_gZ_g$ 的变换矩阵 ($C = A^T$);
 C_u ——从地理坐标系 $OX_gY_gZ_g$ 向惯性坐标系 $OX_uY_uZ_u$ 的变换矩阵 ($C_u = B^T$);
 D ——从载体坐标系 $OXYZ$ 向惯性坐标系 $OX_uY_uZ_u$ 的变换矩阵;
 E ——单位矩阵;
 E_r ——误差矩阵;
 F ——从地理坐标系 $OX_gY_gZ_g$ 向解算的地理坐标系 $\tilde{O}\tilde{X}_g\tilde{Y}_g\tilde{Z}_g$ 的变换矩阵。

四元数

A ——描述从地理坐标系 $OX_gY_gZ_g$ 向载体坐标系 $OXYZ$ 变换的固有四元数;
 $\mathcal{N}_g, \mathcal{N}$ ——表观加速度向量在地理坐标系 $OX_gY_gZ_g$ 内和载体坐标系 $OXYZ$ 内的超复数映像;
 Ω_g, Ω ——地理坐标系 $OX_gY_gZ_g$ 和载体坐标

系 $OXYZ$ 的绝对角速度向量;
 Θ ——误差四元数。

随机过程描述

$m_x(t), D_x(t), K_x(t, t')$ ——数学期望、离散差和相关函数;
 $S(\omega)$ ——谱密度;
 μ ——相关函数的衰减系数。

状态空间

$x(t)$ ——系统状态向量;
 $w(t)$ ——扰动向量;
 $z(t)$ ——测量向量;
 $v(t)$ ——测量误差向量;
 $A(t)$ ——状态矩阵;
 $G(t)$ ——扰动矩阵;
 $H(t)$ ——观测矩阵;
 $Q(t), R(t)$ ——扰动强度矩阵和测量误差矩阵

其他符号

- 方括号内的符号表示斜对称矩阵 (如 $[\omega]$);
- 由捷联式惯性导航系统解算的参数加上标“~”表示 (如 $\tilde{V}$);
- 利用卡尔曼滤波器得到的估计值加上标“^”表示 (如 $\hat{x}$)

目录

引言	1
参考文献	5
第 1 章 捷联式惯性导航系统设计方案	6
1.1 利用加速度计和角速度传感器设计捷联式惯性导航系统	6
1.2 纯加速度计式捷联式惯性导航系统	10
1.3 利用加速度计和不可控陀螺仪设计捷联式惯性导航系统	12
参考文献	13
自测问题	14
第 2 章 惯性敏感元件	15
2.1 加速度计	15
2.1.1 广义特性	15
2.1.2 轴式加速度计和摆式加速度计	18
2.1.3 弦式加速度计	30
2.1.4 结构和技术特性	36
2.1.5 小结	49
2.2 陀螺仪	50
2.2.1 广义特性	50
2.2.2 激光陀螺仪和光纤陀螺仪	52
2.2.3 固体波动陀螺仪	64
2.2.4 动力调谐陀螺仪	77
2.2.5 微机械陀螺仪	88
2.2.6 小结	104
参考文献	106
自测问题	107

第3章 基于加速度计和角速度传感器设计的捷联式惯性导航系统	109
3.1 利用欧拉-科雷洛夫角设计捷联式惯性导航系统	109
3.2 利用方向余弦设计捷联式惯性导航系统	119
3.2.1 泊松方程	119
3.2.2 利用两个泊松方程设计捷联式惯性导航系统	123
3.2.3 利用一个泊松方程设计捷联式惯性导航系统	127
3.3 利用四元数设计捷联式惯性导航系统	128
3.3.1 有限转动轴	128
3.3.2 罗德里格-哈密顿参数	132
3.3.3 四元数	133
3.3.4 四元数矩阵	141
3.3.5 四元数动态方程	145
3.3.6 利用四元数设计捷联式惯性导航系统	147
3.4 捷联式惯性导航系统的算法分析	150
3.5 捷联式惯性导航系统的初始对准	152
参考文献	153
自测问题	154
第4章 捷联式惯性导航系统误差模型	158
4.1 捷联式惯性导航系统误差基础分析	159
4.1.1 由当地垂线误差引起的捷联式惯性导航系统误差	159
4.1.2 由加速度计误差引起的捷联式惯性导航系统误差	162
4.1.3 由陀螺漂移引起的捷联式惯性导航系统误差	164
4.1.4 捷联式惯性导航系统垂线通道误差	166
4.1.5 捷联式惯性导航系统北向通道误差结构框图	167
4.2 捷联式惯性导航系统的向量误差模型	169
4.3 捷联式惯性导航系统标量误差模型	179
4.4 捷联式惯性导航系统姿态参数确定误差方程	184
参考文献	188
自测问题	189
第5章 组合导航系统	190
5.1 随机过程理论基础	190
5.1.1 用随机过程描述的惯性敏感元件误差	190

5.1.2	数学期望	191
5.1.3	随机过程离散差和均方根误差	192
5.1.4	分布函数和分布密度	192
5.1.5	相关函数	193
5.1.6	向量随机过程	194
5.1.7	平稳随机过程	194
5.1.8	随机过程谱概念	195
5.1.9	白噪声	197
5.1.10	指数相关随机过程	197
5.1.11	经过线性系统的随机过程状态	198
5.1.12	合成滤波器	200
5.1.13	惯性敏感元件误差的随机过程模型	201
5.2	组合导航系统的设计方案	201
5.2.1	补偿方法	202
5.2.2	滤波方法	204
5.3	组合导航系统中连续卡尔曼滤波器	206
5.3.1	状态空间内的系统模型	206
5.3.2	初始条件	209
5.3.3	连续卡尔曼滤波器	211
5.3.4	可观测性	216
5.4	组合导航系统中离散卡尔曼滤波器	222
5.4.1	状态变换矩阵	223
5.4.2	定常系统	224
5.4.3	离散模型	225
5.4.4	离散卡尔曼滤波器算法	229
5.4.5	离散卡尔曼滤波器的计算方法	230
5.5	惯性-卫星组合导航系统	236
5.5.1	独立组合方案	237
5.5.2	弱组合方案	238
5.5.3	强组合方案	239
5.5.4	深组合方案	240
参考文献		245
自测问题		247
第6章 在 MATLAB\SIMULINK 环境下捷联式惯性导航系统		
算法仿真		248
6.1	姿态算法	248

6.1.1	利用欧拉-科雷洛夫角设计姿态算法	248
6.1.2	利用方向余弦设计姿态算法	254
6.1.3	利用四元数设计姿态算法	258
6.2	利用卡尔曼滤波器对惯性敏感元件进行标定	262
6.2.1	在 Simulink 工具包中随机作用仿真模块	262
6.2.2	利用卡尔曼滤波器标定惯性敏感元件	264
参考文献		267

引言

专业名词“导航”(来自拉丁语“navigo”——乘船航行)可引申为领航的方法。目前,把导航理解为引导控制运动载体(如飞机、火箭、舰船、潜艇、卫星等)按照给定路线运动的理论和实践。从狭义上讲,导航可以理解为解决航行问题,即确定运动载体当前的位置坐标。从广义上讲,导航可以理解为解决航行问题,并利用得到的导航信息控制载体质心的运动。本书仅是研究狭义上解决航行的问题,即确定载体当前的位置坐标。

利用自主设备实现的导航,即基于载体上的加速度计、陀螺仪和时钟信息完成的导航称为惯性导航^[B.12]。惯性导航的基本思想是对测得的加速度进行二次积分。加速度具有绝对特性,由于受到惯性力的作用,载体内部的测量设备能敏感到载体运动的加速度。

利用不同物理原理(机械、光学等)设计的所有测量设备均对惯性力有反应,从而可在不利用任何外界信息的情况下确定载体加速运动的变化情况^[B.14]。因此,载体位置坐标的惯性测量方法同时钟、天文钟等测量时间与外界无关的特性相似^[B.6]。换句话说,利用宇宙万物间存在的物理规律建立的惯性导航思想与人类建立的同外界的联系无关。

在惯性导航中利用的与物体惯性有关的物理现象属于力学规律,这些规律在惯性坐标系中也是正确的,在惯性导航系统中要对惯性坐标系以相应的精度(仪表误差)进行人工模拟。这就是“惯性导航”专业名词的由来^[B.17]。

研究物体在平面上受到外力作用下的运动问题可以给出惯性导航最简单的解释。牛顿第二定律给出了加速度 a 、物体质量 m 和作用力 F 之间的关系:

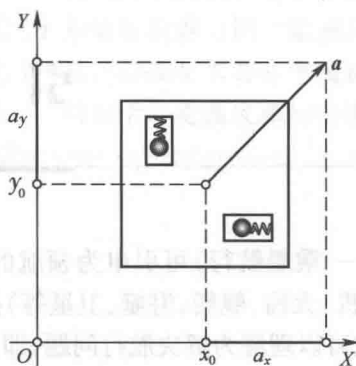
$$ma = F \quad (B.1)$$

根据牛顿第二定律,测得作用在物体上外力后原理上即可求得物体的位置信息。在已知初始条件下对式(B.1)进行积分后即可确定物体的位置坐标(导航信息)。但是,测量作用在物体上的外力十分困难。例如,如果运动载体是舰船,则作用在其上的外力有推进装置产生的推力、运动阻力及不能准确描述的各种干扰力。因此,测量载体的加速度(而不是作用在载体上的外力)是合理的。

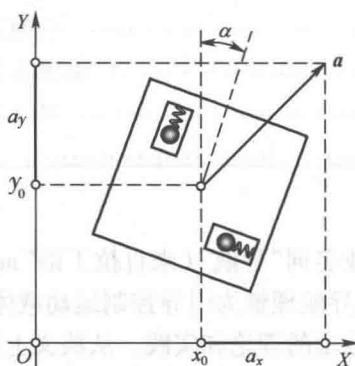
如果以坐标系 OXY 作为研究的平面,如图 B.1(a)所示,则根据速度定义有

$$v_x = \frac{dx}{dt}$$

式中: v_x 为运动速度在 OX 轴上投影; x 为沿 OX 轴位移。



(a) 加速度计敏感轴平行于 OX 轴和 OY 轴



(b) 加速度计敏感轴相对坐标系转动角 α

图 B.1 物体在平面上的运动

对上述速度等式进行积分后可得

$$x - x_0 = \int_0^t v_x dt \quad (\text{B.2})$$

式中: x_0 为坐标初值。

根据加速度的定义有

$$a_x = \frac{dv_x}{dt} \quad (\text{B.3})$$

式中: a_x 为载体运动加速度在 OX 轴上投影。

对式 (B.3) 积分后可得

$$v_x = v_{0x} + \int_0^t a_x dt \quad (\text{B.4})$$

式中: v_{0x} 为初始速度在 OX 轴上的投影。

将式 (B.4) 关于时间进行积分, 并将式 (B.2) 代入得到的表达式后可得

$$x = x_0 + v_{0x}t + \int_0^t \int_0^t a_x dt dt \quad (\text{B.5})$$

因为是在平面上研究问题, 可以按照式 (B.5) 的形式补充上另一个坐标的方程:

$$y = y_0 + v_{0y}t + \int_0^t \int_0^t a_y dt dt \quad (\text{B.6})$$

式中: a_y 为载体运动加速度在 OY 轴上的投影; y_0 、 v_{0y} 分别为沿 OY 轴上位置、速度初值。

这样一来, 如果加速度计敏感轴与某导航坐标系 (此时为 OXY) 的各轴平行, 则可以通过对所测得的加速度 a_x 、 a_y 进行二次积分来解决导航问题。但是, 在实