

最优惯性导航与统计滤波

〔法〕 P. 富尔 等著

605913

吴维熊 张在良 译 校



最优惯性导航与统计滤波

〔法〕 P. 富尔 等著

吴维熊 张在良 译校



C0318287

国防工业出版社

内 容 简 介

本书是一本介绍统计滤波理论及其在惯性导航系统中应用的著作。它是理论与实践的产物。书中介绍了统计滤波的一般理论。分析了惯性导航系统的误差、初始对准以及混合导航系统。此外,还介绍了加速度表、陀螺及惯性平台,并对它们的作用原理、工艺和设计进行了详细地描述。

本书对于从事惯性导航系统的系统分析人员,研制惯性元件的工程技术人员以及大专院校有关专业的师生都有直接的参考价值。此外,对于从事应用数学处理问题的人员也值得参考。

Navigation inertielle optimale

et filtrage statistique

P. FAURRE

DUNOD

PARIS 1971

*

最优惯性导航与统计滤波

〔法〕 P. 富尔 著等

吴维熊 张在良 译校

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092¹/₃₂ 印张13 282千字

1986年12月第一版 1986年12月第一次印刷 印数: 001—920册

统一书号: 15034·3025 定价: 2.65元

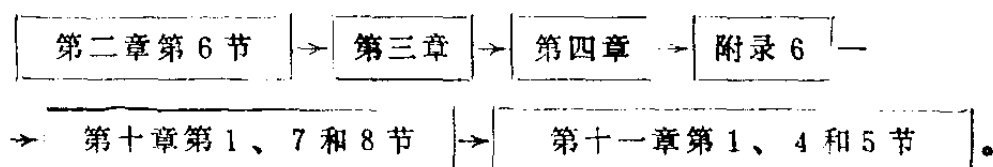
HK47/12

前 言

本书是为惯性导航系统或混合系统的使用者、设计者以及对递推统计滤波方法及其应用感兴趣的人们写的。

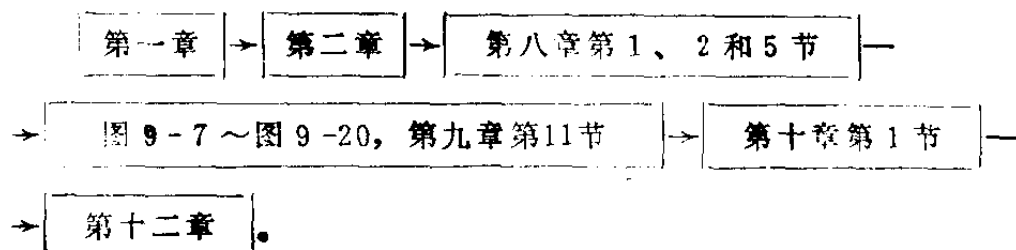
如果希望认真地了解最优混合惯性导航问题，当然应当阅读全书。然而，作者力图把本书写得更便于读者可以用下面三种不同的方法进行部分地、有针对性地研究。

一方面，我们可以把本书看作是实时信息处理方法（统计滤波）的一个入门性介绍。这样，最优导航系统就是一个很好的应用实例。从这个角度看，本书必将引起应用数学的研究者与大学生们的兴趣。在这种观点下的阅读计划是：

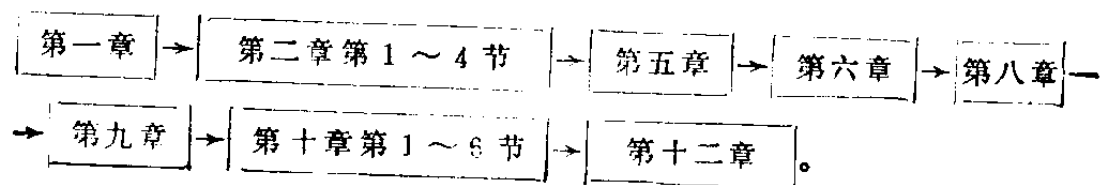


由于最优导航器的主要子系统是由一个或几个惯性系统所组成的，所以我们相当详细叙述相应的理论与技术，这样，我们这本包括惯性系统概念和实际应用的著作，对于大学生、实际应用者和工程师是很有用的。

从惯性系统实际应用者的观点考虑，建议读者可按照下列计划阅读：



那些愿意更详细地研究概念与工艺技术问题的读者及设计师们可按下列计划阅读:



HK47/12

原作者为中译本所撰序言

我们十分荣幸，在宋健先生的推动下，通用机械与电气公司(SAGEM)一些同事们在几年前撰写的最优惯性导航与统计滤波一书的中文译本首次出版了。在这里，我们对译者们出色的翻译工作表示衷心地感谢。

自从1971年本书法文版发行以来，在航海、航空与地面交通领域里，纯惯性导航与混合导航已获得显著的发展。

一方面，我们看到在1971年还处于研制过程中的新技术现在已经转向工业生产。例如，由SAGEM公司研制的ULISS航空惯性系统应用了动力调谐陀螺。它的基本原理曾在本书第五章第2.2节中提到。再如，采用了由大规模集成电路LSI单片电路所制成的数字处理单元，从而使计算速度比当时的AE51型计算机要快十倍。

另一方面，近年来获得的结果说明：本书中叙述的系统设计方法是卓有成效的。这些理论既涉及到统计滤波（第四章），初始对准（第十章）或混合系统（第十一章），又涉及到在第十一章第5节中所提出的综合这些系统的方法论。

使我们感到兴奋的是，根据卡尔曼滤波理论建立的更为复杂的系统在法国海军中得到实际应用时，中译本即将出版。借助于我们所研制的“ALIDADE”方法，装备在航空母舰上的“超级军旗”飞机惯性系统能在最大海情下用不到10分钟的时间实现初始对准，而用不着在飞行甲板上对飞机的定位采取任何措施。借助于最优滤波理论（第十一章），装备

在航空母舰上的惯性-奥米伽-计程仪 (INERTIE-OMEGA-LOCH) 参考系统能提供有关的位置、速度与姿态信息, 并通过远距离传输把这些信息传输给飞行甲板上的所有飞机。通过利用卡尔曼滤波进行计算的陀螺罗盘 (其原理见第十章), 每一飞机的惯性系统可以实现自主式对准。因此在航空母舰上实现的初始对准可与在陆地上当飞机不动时的对准具有同样的性能。

到目前为止, 某些混合系统已经研制成功, 其中还有一些正在研制过程中。在航空方面, 为了改善重型客机A300的着陆安全与精度, 我们特别应用惯性-奥米伽 (INERTIR-OMEGA), 惯性-测距设备(INERTIR-DME) 系统以及惯性-仪表着陆系统(INERTIE-ILS)耦合方法。在海上导航方面, 我们应用海上位置混合系统来实现海洋学与地球物理学考察船的精确定位〔除工业方法以外, 在这种系统中还利用了卫星(TRASIT)定位信息〕。在海军方面, 我们也采用了完善的混合系统, 这种系统能以很高的精度与灵敏度给出舰船的位置、速度与姿态。最后, 还有一个崭新而具有广泛应用前途的领域, 这就是类似坦克那种车辆的陆地导航。对于这类导航, 混合的目的在于更好地使用来自惯性平台、位置传感器 (车轮的滚动) 与补充的信息 (例如, 行驶或停止)。

在各个领域里, 通过建立误差模型、模拟及借助于数值滤波方法来综合最优或次优回路的系统方法被证明是十分有效的。

假如我们现在来撰写这本书, 肯定要做某些必要的修改和补充。但“系统”部分将没有明显的变化, 尽管我们也许更强调建立捷联式元件和无平台系统的误差模型的问题 (在第八章第6节中我们曾提到过)。

同时，我们将会更详细地叙述动力调谐陀螺的功能，它现在已达到我们曾详细介绍过的液浮陀螺在1971年时的成熟程度。

最后，我们将补充说明，在今后的十年内，惯性元件将要更新现有的工艺与技术，而作为我们目前积极研究的对象则是：静电悬浮陀螺、激光陀螺和磁核共振陀螺。

因此，我们认为这部著作的大部分在今天仍然是有价值的。

我们诚挚地希望这本书能够在你们这个伟大而友好国家——中华人民共和国的大学生、工程师与科学工作者中间引起兴趣。

从惯性系统的先驱者德雷珀(Draper)教授、J. 卡尔庞蒂埃(J. Carpentier)总工程师以及统计滤波的先驱者N. 维纳(N. Wiener)、R. E. 卡尔曼(Kalman)教授的文献里，我们汲取了宝贵的教益。因此，我们也希望，当人们运用那些科学与技术的最基本成果来解决实际问题时，我们这本综合了有关专题研究和实际应用的书能够对读者产生应有的教益。

祝愿中法两国在共同合作的过程中取得进步。

皮埃尔·富尔(P. FAURRE)

1979年4月

译 序

本书是一本介绍统计滤波理论及其在惯性导航系统中应用的专著。它的主要作者皮埃尔·富尔曾在卡尔曼教授指导下研究过随机过程的马尔可夫表示方法，并于1967年获得美国斯坦福大学物理博士学位。之后，他参加法国SAGEM公司的惯性导航系统研制工作，成功地把卡尔曼滤波理论应用于实际系统。本书就是他和参加SAGEM公司惯性导航系统研制的其他几位专家，如斯梅桑(C.MESSAN)，贝利奥雷(P.LLORET)，勒·康贝莱(L. CAMBERLEN)根据实际工作经验而写出的。因此，我们可以把这部著作看成是理论与实践相结合的产物。同时，它对于我国陆、海、空领域内各种载体导航系统的研究者与设计者具有直接参考价值。

本书介绍了统计滤波的一般理论，把此理论应用于惯性导航系统的初始对准，得出了在最优与次优初始对准情况下的结果；应用于混合导航系统，经过比较获得了最优混合导航系统。同时，本书还给出了导航系统的误差以及设计导航系统的综合方法。

此外，本书还介绍了加速度表、陀螺仪及惯性平台，并对它们的作用原理、工艺和设计进行了详细地描述。

在翻译过程中，考虑到七十年代以来计算机技术，尤其是微处理机的迅速发展，原书中第八章所着重介绍的数字微分分析器实际上已不再应用，所以我们删去了这一章。第十

四章（民航的惯性导航）与第十三章均属于典型实例，我们将第十四章删去，这样既节省了篇幅而又不失本书的系统性。

在本书翻译过程中，得到了许多同志的大力支持。宋健同志赞助了这项工作并邀请作者为中文版写了序言。金凤才同志对第五、六、七章进行了初校。对此表示深切的谢意。

由于我们文字及业务水平有限，译文一定存在不少缺点错误，希望读者批评指正。

目 录

引 论

第一章 惯性导航引论

- 1.1 没有外部辅助的导航 1
- 1.2 力学定律和相对原理的回顾 2
- 1.3 测量 $\vec{f}$ 和 $\vec{\omega}$ 仪表的原理 3
- 1.4 惯性导航器 5

第二章 简化的情况：单轴系统沿一条子午线的导航

纯惯性系统

- 2.1 问题的描述与理想功能 9
- 2.2 实际功能与误差方程 11
- 2.3 高度通道的不稳定性 15
- 2.4 初始对准 16

混合系统

- 2.5 误差的阻尼 17
- 2.6 最优混合系统 20

系统的理论原理和统计滤波

第三章 线性动态系统

- 3.1 动态系统 31
- 3.2 线性微分系统（外部描述） 34
- 3.3 线性微分系统（内部描述） 37
- 3.4 线性微分系统的可控性 43

3.5	线性微分系统的可观测性	48
3.6	线性微分系统的稳定性	53
3.7	线性差分系统摘要	55

第四章 统计滤波

4.1	二阶随机函数	59
4.2	二阶随机函数的线性变换与谱表示	61
4.3	维纳滤波	64
4.4	随机函数的马尔可夫表示	70
4.5	卡尔曼-布西递推滤波器, 离散观测情况	76
4.6	卡尔曼-布西递推滤波器, 连续观测情况	80
4.7	奇异递推滤波器	84
补充 1	有理谱矩阵的因式分解	90
补充 2	卡尔曼-布西滤波器的稳定性	96
补充 3	卡尔曼-布西滤波器的灵敏度	99
补充 4	递推滤波器的数值模拟	112

元 件

第五章 陀螺仪

5.1	陀螺仪原理、方程与传递函数	114
5.2	陀螺的轴承与敏感元件的悬浮	122
5.3	单自由度液浮陀螺仪的详细研究	129
5.4	陀螺仪的数字控制	136
5.5	误差分析	141
5.6	测量方法介绍	144
5.7	性能	150

第六章 加速度表

6.1	作用原理	151
6.2	不同类型的加速度表	153
6.3	单自由度摆式加速度表的详细描述	157

6.4	摆式加速度表的回路及编码	163
6.5	误差	167
6.6	测量方法	169
6.7	性能	173

第七章 惯性平台

7.1	概论	175
7.2	平台的热量调节	187
7.3	关于基准位置的初始跟踪	190
7.4	以陀螺仪为准的框架伺服系统	193
7.5	伺服平台的运动学, 倒翻筋斗过程	202

导 航 系 统

第八章 纯惯性系统的机械化

8.1	应用伺服平台时不同机械化方案的描述	210
8.2	应用伺服平台时的导航机械化方程	214
8.3	三种机械化方案的例子	215
8.4	上述几种机械化方案的比较	221
8.5	导航与制导参数	224
8.6	捷联式系统的机械化	228

补充 1 为了使一坐标系保持局部相切于一曲面

而加给这个坐标系的旋转 233

补充 2 椭球形地球与曲率张量 236

第九章 惯性导航系统的误差

9.1	引言	240
-----	----	-----

误 差 方 程

9.2	平台座与仪表误差	241
9.3	计算机座与关于 ψ 的方程	244
9.4	位置误差方程	246

9.5 误差的解释.....	248
----------------	-----

误差方程的积分

9.6 高度与铅垂速度通道的不稳定性.....	250
9.7 当载体速度不大或为常值时的误差.....	250
9.8 在阻尼系统情况下的误差.....	255
9.9 当工作几小时情况下的近似解.....	260
9.10 在计算机上的数值模拟	269

误差的统计分析

9.11 惯性系统的仪表误差与动态误差的随机特性	272
9.12 误差协方差方程与数值模拟	275

第十章 惯性系统的初始对准, 古典方法与最优方法

10.1 对准的一般原理	283
--------------------	-----

古典的观点

10.2 自主对准与初始校准的最大精度	285
10.3 对准的基本方程	287
10.4 一阶对准	288
10.5 二阶的普通对准	291
10.6 一阶、二阶对准与更复杂的对准的比较	295

最优的观点

10.7 用状态向量形式陈述初始对准问题	299
10.8 最优与次优初始对准	301

第十一章 混合导航系统, 古典方法与最优方法

11.1 混合或有助导航系统概论	309
11.2 混合系统的综合	313
11.3 古典的有阻尼混合系统	316

11.4	最优混合系统	323
11.5	关于最优系统综合的方法论	333

第十二章 惯性导航系统, SAGEM 公司的惯性

导航器(NSI)

12.1	SAGEM公司惯性导航器(NSI)的说明	338
12.2	功能结构, 输入/输出信号	339
12.3	惯性部件(UI)	340
12.4	显示与控制部件(UCV)	348
12.5	工作模式的确定	349
12.6	对准	350
12.7	导航	356
附录 I	向量和矩阵的符号规定	359
附录 II	坐标系的变换	362
附录 III	旋转的参数表示	368
附录 IV	拉普拉斯变换	374
附录 V	Z变换	381
附录 VI	微分方程的数值积分	384
参考文献		398

引 论

第一章 惯性导航引论

皮埃尔·富尔

1.1 没有外部辅助的导航

自古以来导航就是指引导载体到最终目的地的技术以及为此目的而确定载体位置和速度，但是所有的导航原理（惯性导航除外）都是利用运动物体以外的自然现象（天文位置、测量相对于环境介质的速度、多普勒速度、罗兰定位等等）。

人们可能会提出如下的问题：有没有可能不用任何外部辅助系统而进行导航呢？不难看到，解决这个问题具有重大的意义。

军事上的意义：得到一种绝对保密并且不受干扰的导航系统。

民用方面的意义：导航的可靠性既不依赖于外部的辅助系统（罗兰等），又不受外部干扰（云、磁暴等）的影响。

现在从概念上并用图 1-1 来概括我们的问题。假设有一只盒子，它对于外部所有的辐射屏蔽得很完善，在盒子的里面有一试验者，他有足够时间进行任何物理试验。我们的问题就在于，这时他能够确定他的位置、速度与姿态吗？

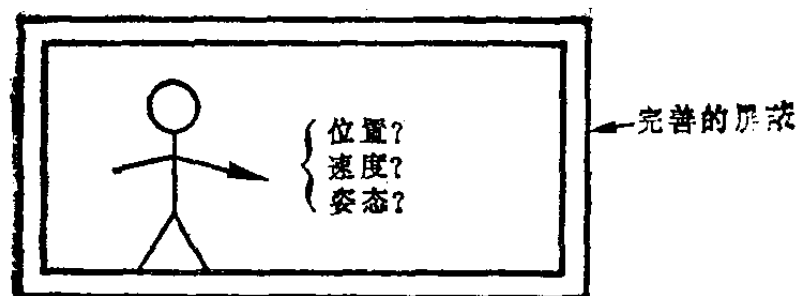


图1-1 惯性导航的问题

1.2 力学定律和相对原理的回顾

1.2.1 我们知道，相对于通过地球中心 C 并对恒星有固定方向的诸轴而言（这组轴或坐标系称为惯性或伽利略坐标轴，今后用 $[i]$ 表示），力学基本定律可写成：

$$\left(\frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} \right)_i = \ddot{\vec{r}} = -\frac{\vec{F}}{m} = \vec{j} + \vec{g} \quad (1.1)$$

式中

$\vec{r}$ ——位置向量（见图1-2）；

$\left(\frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} \right)_i$ 或 $\ddot{\vec{r}}$ ——位置向量相对于坐标系 $[i]$ 的二阶导数；

$\ddot{\vec{r}}$ ——惯性加速度（或绝对加速度）；

$\vec{F}$ ——全部作用力；

$\vec{g}$ ——作用于每单位质量的万有引力；

$\vec{j}$ ——比力 = 除 $\vec{g}$ 以外，单位质量上所有作用力的总和（发动机的推力、升力、阻力、地面反作用力等）。

1.2.2 除 $\vec{r}$ 位置向量外，我们还用 $\vec{\omega}$ 表示图 1-1 中盒子相对于惯性空间的瞬时旋转角速度向量。