

装备科技翻译图书基金资助专著

导航系统的信息 可靠性、检测与诊断

(俄) С.П.德米特里耶夫, Н.В.科列索夫, А.В.奥西波夫 著

杨亚非 朱 蕾 吴 磊 译

高 伟 张明华 审校



国防工业出版社

National Defense Industry Press

装备科技翻译图书基金资助专著

导航系统的信息 可靠性、检测与诊断

[俄] C. П. 德米特里耶夫, H. B. 科列索夫, A. B. 奥西波夫 著

杨亚非 朱蕾 吴磊 译

高伟 张明华 审校

国防工业出版社

· 北京 ·

著作权合同登记 图字:军—2010—063 号

图书在版编目(CIP)数据

导航系统的信息可靠性、检测与诊断/(俄)德米特里耶夫,(俄)科列索夫,(俄)奥西波夫著;杨亚非,朱蕾,吴磊译. —北京:国防工业出版社,2010.11
ISBN 978-7-118-07030-9

I. ①导… II. ①德… ②科… ③奥… ④杨…
⑤朱… ⑥吴… III. ①导航-检测 IV. ①TN96

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 196030 号

本作品中文专有出版权由中华版权代理中心代理取得,由国防工业出版社独家出版。

※

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)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 880×1230 1/32 印张 7¼ 字数 146 千字

2010 年 11 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 42.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

译 序

导航系统是运动载体(包括飞机、舰船和航天器等)上不可或缺的重要设备,可为其控制系统提供必要的位置、速度和姿态等参数。导航系统根据任务需求,可包含惯性导航系统、卫星导航系统信号接收机、计程仪、陀螺罗经等。

研究导航系统的信息可靠性、检测和诊断系统故障对确保所提供信息的有效性和精确性具有至关重要的意义,也是保障运动载体安全的有效措施。

本书作者所在单位是俄罗斯“电气仪表”中央科学研究所。该研究所是俄罗斯在高精度导航、陀螺、重力测量和航海无线电通信领域的主力研究所。该研究所的主要研究工作达到世界领先水平。研究所每年举办圣彼得堡组合导航系统国际会议,此会议在导航、陀螺仪和运动控制领域里有着广泛的学术影响,每年都有来自世界近二十个国家的近二百位学者参加。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,该期刊在国际上有一定的影响力。

本书的内容概括了该研究所多年来在导航系统的信息可靠性、系统故障检测与诊断方面的研究成果,这无疑会给我国从事此方面研究的科研工作者以很好的启迪。

译者特别感谢哈尔滨工业大学王子才院士和北京航空航天

大学房建成教授,是两位专家的大力推荐使译者得以申请到装备科技翻译图书基金。

本书由杨亚非、朱蕾、吴磊共同翻译完成,由高伟、张明华审校。

由于译者水平有限,如有不妥之处,敬请各位读者批评指正。

译者

2010年8月

前 言

可靠性是任何工程系统的重要特性指标。对于导航系统以及任何信息测量装置,这一概念原来都包含有精度的含义。所以,在讨论导航系统可靠性的同时,也要讨论该系统的另一个最重要的特性指标——精度。总之,导航系统的可靠性是综合的概念,它包含两个部分,即书中所称的仪表可靠性和信息可靠性。前者是传统含义上可靠性的特性,后者是精度的特性。因此,系统的故障同样可以分为两类:仪表故障和信息故障。如果仪表故障是由导航系统的某一元件不完好造成的常见故障,那么信息故障却是完全特殊的情形。出现信息故障时,尽管导航系统的所有仪器都是完好的,但是至少有一个导航参数的处理误差超出了规定的允差范围。这些情形与仪表故障比,按产生频率来说,并不罕见。例如,为了防止这种情形发生,在自主式系统中规定对所处理的信息进行周期性校正。但是通常这还不够,还要求对类似事件有更快速的反应。为了及时发现这些事件,要使用专门的信息检测与诊断工具,这就是组成本书基础的基本概念。无疑,本书所阐述的综合问题会产生许多问题,如:信息故障产生的原因是什么?如何计算导航系统的信息可靠性?如何用最好的方式构建检测与诊断导航系统信息故障的算法?这时对被检测过程使用什么样的数学模型?所有这些问题都能够在本书中找到答案。

本书包括绪论和四章内容。

绪论对接下来的叙述起实质性作用,绪论中讨论了导航系统信息可靠性的概念。

第一章介绍一些可靠性、检测与诊断方面的现代理论,足够用于研究信息故障。

第二章为信息可靠性计算问题。特别介绍了由马尔可夫随机过程描述的导航系统误差模型。

第三章讨论导航系统中信息故障及干扰的检测与诊断问题。所使用的知识是统计决策和多元滤波理论。

最后,在第四章列出了卫星导航系统和自主式组合导航系统检测与诊断算法的具体应用实例,并对自主式组合导航系统提供了两个方案:一个是由三个惯性导航系统(INS)组成的导航系统;另一个是由两个惯性导航系统组成的导航系统(小冗余导航系统)。

为了扩大感兴趣的读者的范围,并且确保不用其他辅助文献就能够掌握本书的基本思想,作者在某些章节简要地叙述了必要的数学知识——概率论(附录1)、随机过程理论(2.1节和2.2节)、统计决策理论(3.1节)。另外,作者力求不省略说明所用公式的来源。

本书总结了俄罗斯“电气仪表”中央科学研究所(圣彼得堡)多年间在导航系统信息可靠性、检测与诊断问题上的科研工作成果。所引用的共性结果对于自由信息测量装置也是正确的,但是由于作者的专业兴趣,具体的应用与航海导航系统有关。

本书作者要特别感谢俄罗斯科学院 V. G. 别什霍诺夫院士和 B. S. 维什金工学副博士对所进行研究工作的支持,同样感谢对本书的完善提出建议的所有朋友及同事。

目 录

绪论	1
第一章 工程系统可靠性通用理论基础	10
1.1 工程系统仪表可靠性的概率估计	10
1.2 事件最简单的流与工程系统的马尔可夫模型	15
1.3 工程冗余系统的可靠性	23
1.4 工程系统的检测与诊断	31
第二章 导航系统的误差模型及信息可靠性估计	39
2.1 标量随机过程的特殊指标	41
2.2 向量马尔可夫过程	50
2.3 导航系统随机误差模型	54
2.4 随机马尔可夫过程的尖峰信号富克 - 普朗克 - 柯尔莫哥罗夫方程	66
2.5 扩散误差模型的导航系统信息可靠性估计	72
2.6 阶跃误差模型的导航系统信息可靠性估计	80
第三章 导航系统中信息故障和干扰的检测与诊断方法 ..	88
3.1 作为决策问题的信息故障和干扰的检测与诊断 ..	89
3.2 用于决策信息故障和干扰的检测与诊断问题的 已知方法综述	95
3.3 确定性动态系统状态的估计	100

3.4	随机动态系统状态的最优估计	107
3.5	利用多选滤波的优化方法来 - 检测与诊断导航系统中的信息故障和干扰	117
3.6	利用多选滤波的次优方法来检测与诊断导航系统中的信息故障和干扰	130
第四章	导航系统信息故障和干扰的检测与诊断实例	139
4.1	卫星导航系统完整性检测	139
4.2	自主式冗余航海导航系统中信息干扰的检测与诊断	149
4.3	自主式小冗余航海导航系统中信息干扰的检测与诊断	160
附录 1	概率论的基本概念	181
附录 2	黎卡提方程的解	189
附录 3	在区间 τ 上不超出由一阶马尔可夫过程给定水平的概率	194
附录 4	卡尔曼滤波关系式的推导	203
参考文献		212

绪 论

充分估计系统的有效性是所有工程系统设计的重要阶段。评价工程系统的有效性原则上取决于系统的用途,就像导航系统和所有信息测量系统一样,它们的用途就是根据传感器所采集的数据处理并提供全部信息参数。这时,利用导航系统所解决的现实问题是多种多样的。其中在航海应用中可以分为船舶在给定航迹上稳定,船舶在某点上的动态定位,钻井时平台坐标的确定,海底地形测绘时牵引装置坐标的确定等。显然,导航系统有效性的基本组成是导航参数处理时要确保的精度及可靠性。

达到必要的精度是一个复杂的科技问题,可以通过建立完善的原始信息传感器(敏感元件)、编制有效的信息处理算法和使用不同导航系统组合的方法解决这一问题。许多现代的导航系统,特别是用于水下对象的自主式导航系统的特点是冗余性(结构冗余和信息冗余)。这一点可以从现代导航系统的组成实例(见图 B.1)看出。

在图 B.1 所示的导航系统中有若干子系统,其中有惯性导航系统、测程仪、卫星导航系统信号接收机、陀螺罗经以及用于实现信息综合处理的电子计算机。这类导航系统通常被称为组合式导航系统或导航综合系统。

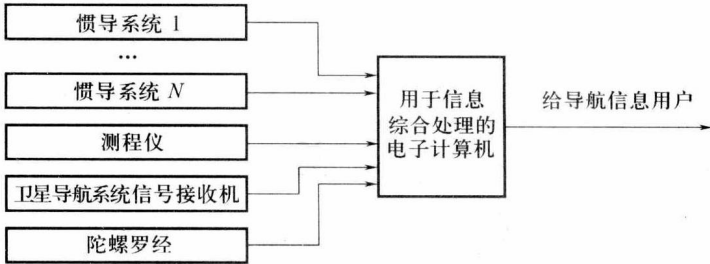


图 B.1 组合式导航系统结构

简要介绍一下估计导航系统精度时所要使用的方法。精度被认为是导航系统的一个属性,它确保在某一允许的范围内求出所处理参数的误差特性。通常,参数误差被当作随机过程来研究,这是因为影响信息传感器的示值的原因很多^[27,28,59],因此精度的估计方法带有随机性。这时对精度提出要求的方法可能是多种多样的,而选择哪种方法首先取决于设定的目标。这里可以分为两个基本方案:方案1,目标是对所设计或所验证系统提出精度要求;方案2,对处于使用中的系统提出精度要求。通常在设计或验证时要对误差的统计特性提出要求,在使用时要对误差的实现提出要求。

在导航系统设计或验证时,确定对导航系统的精度要求的方法可以分为两种:一种是使用位置的椭圆误差和圆误差,另一种是使用所处理的导航参数误差的 p - 分位数^[48]。

在使用椭圆误差和圆误差的概念时,所要求的定位精度可由椭圆或由圆来表示,以此限定所确定物体的可能位置区域。按照起源,椭圆误差是坐标处理误差向量的二维高斯概率分布密度的等水平线,而圆误差是用圆表示统计数据,它等同于椭圆

误差。

在使用误差的 p - 分位数概念时,对某一参数处理精度的要求是通过给出误差 $x(t)$ 的 χ_p 值 (p - 分位数)的方法表述的。 χ_p 值为在 t 时刻 $x(t)$ 不大于给定值 p 的概率 $P(|x(t)| < \chi_p)$ 。对于同一个 p - 分位数,但在给定的时间区间 T 上的要求可能是不一样的(更严格的要求)。在这两种情况中使用某一给定的允许水平和不超过这一水平的概率。在实际中,通常将水平值选为 3σ (σ 为误差的均方值),这在误差值概率分布密度的高斯假设中是指水平的分位数 $p = 0.997$ 。

在使用导航系统阶段,为表述对某些参数处理精度的要求,给出误差的瞬时值 $x(t)$ 所允许的水平 x_0 ,有

$$|x(t)| < x_0 \quad (\text{B. 1})$$

这时,通常选取对应于最大水平 p 的分位数值作为 x_0 。对误差特性的所有限制都根据该导航系统实际应用任务的条件来指定。例如,如果任务是导引船舶通过狭窄的海峡,那么 x_0 值就根据海峡的宽度确定。

导航系统有效性的另一个重要参数是它的可靠性。下面将要证实如果导航系统的可靠性严格按照全苏国家标准处理,那么表明,它本身具有精度性质。为了使系统在使用过程中能够解决它所面临的所有问题,系统应该处于具有工作能力的状态中,也就是应该完成给定的功能,将基本参数值保持在标准技术文件规定的范围之内。这时,系统在一定使用条件下保持工作状态的特性称作可靠性。有时,系统中可能产生对工作能力的干扰——故障,如果故障能自我排除,并且是短时间的,称作

事故。

系统的任何故障都是有某种原因的。传统上认为,系统的故障是由系统元件的缺陷导致的,在全苏国家标准中^[22,23],元件与所提出的要求的任何不相符被认定为缺陷。这时,缺陷对元件工作的影响是有差别的,可分为不显著的缺陷和临界缺陷。不显著缺陷对元件的继续使用是无关紧要的,而临界缺陷正好相反,会导致元件故障,也可能引起系统故障。缺陷的出现不一定马上引起系统故障。故障可能晚些发生,或者完全不发生。系统故障出现滞后原因可能是在缺陷产生时刻和随后某一时间段上,缺陷对系统工作能力的影响较弱。例如,元件存在缺陷时,系统不出现故障的原因是系统的冗余。

在实际中,传统上使用的估计系统可靠性的方法考虑的只是那些由仪器元件中临界缺陷产生的和通过替换缺陷(发生故障的)元件就可以修复的故障^[4,38]。这时系统的可靠性取决于系统的组成及其元件的数目,每个元件的可靠特性参数,这些元件组成系统的方式,以及给定的使用规则(所使用的检测、诊断与修复的工具和程序)。

影响故障出现的原因众多,所以故障产生的过程是随机的。因此,为了估计系统的可靠性,使用各种统计参数表示系统遭受的故障程度,例如,在 $(0, t)$ 间隔上系统无故障工作概率 $P(t)$ 。在当系统无冗余,并且其元件的故障在统计上独立这一最简单的情况下,系统的这一参数由其元件在进行相应试验结果中得到的类似参数的乘积来确定。

将能工作状态和故障的概念具体应用到导航系统。显然,

如果导航系统能处理具有误差的导航参数,确定的参数不超过给定公差,那么该导航系统处于能工作状态。由此可见,对导航系统来说,能工作状态的概念与可靠性的概念都包含有精度的概念。今后,导航系统中即便有一个被处理出来的导航参数具有大的误差或者有一个完全没有被处理出来,就认为导航系统发生了故障事件。注意,故障这一定义引自 I. B. 切尔巴诺夫和 E. P. 格里泊的著作^[18]。

表示导航系统发生故障的事件可能与式 (B. 1) 不同,例如,在给定的时间间隔 $(0, t)$ 上,出现高于给定的水平 x_0 、长度不小于 Δ 的尖峰信号(时间上限制的)或出现长度不小于 Δ 、不少于 n 个的尖峰信号,就认为是故障事件。在图 B. 2 上列出了导航系统故障实例。在时刻 t_1 、 t_2 和 t_3 所产生误差的尖峰信号,根据故障的定义,它们可以被认定为故障,也可以不被认定为故障。

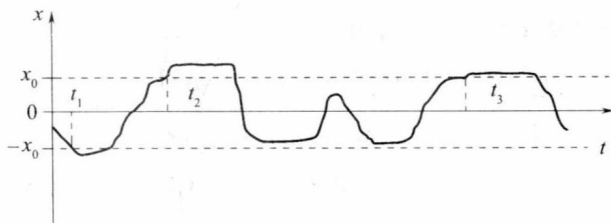


图 B. 2 导航系统故障实例

显然,导致导航系统故障的可能是其元件的临界缺陷(故障)。下面将导航系统的这些故障称为仪表故障。但是,导航系统的特征是:在元件中不存在临界缺陷的情况下系统也可能出现故障。那些非仪表故障称为信息故障。导航系统信息故障

的重要特性是在信息故障出现后,系统或者是自修复,或者只需要校正一下它的内部信息,不需要更换元件,就可修复。正是这一特性成为使用“信息故障”这一术语的依据。

如果对导航系统的任何部件,包括对它的子系统和原始信息传感器提出精度要求,同样地可以确定信息故障的概念。那么就可以对故障进行分类,如图 B.3 所示。

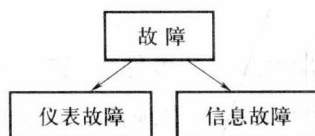


图 B.3 导航系统故障分类

如上所述,导航系统仪表故障的原因是其元件的临界缺陷。信息故障产生的原因是多种多样的,它与具体导航系统的特性有关。这是一些伴随着导航系统内部的或外部的物理过程所发生的异常事件,这些事件也可导致导航系统误差中的异常事件产生,这种现象称为信息干扰。

导航信息干扰的原因可以分为以下类型:

- (1) 与导航系统传感器有关的原因;
- (2) 与信息处理计算装置有关的原因(仪表失效和软件错误);
- (3) 组织筹备性的原因(例如,由于不利的气象条件,自主式导航系统没有及时校正)。

与第二类和第三类有关的事件,由于它们的特性,文中不作研究。下面将第一类的内容展开叙述一下。可以将其细分为以下三个子类:

(1) 在完好的传感器中进行的内部物理过程中的异常事件;

(2) 对传感器的功能来说,传感器中不能导致灾难性后果的无关紧要的缺陷;

(3) 在影响传感器工作的外部介质中的异常。

例如,对于航海导航系统来说,第三子类可能包含航行条件中的异常、无线电信号和水声信号分布条件中的异常等。属于航行条件中异常的,除了摇摆外,还可能是热场、电磁场和重力场的不均匀性。

注意到,引起导航系统信息故障的外部介质中的异常可能产生意外情况,这些情况在对导航系统的要求中未被预见到。显然,在估计导航系统的可靠性时不应考虑这些信息故障。

根据信息干扰的出现方式,可以将其分为两组,第一组信息干扰以增大的传感器额定误差形式呈现出来,增大误差的产生相当少见。其中的信息干扰是由第一子类物理原因所引起的。第二组信息干扰是以传感器的额外的异常误差的形式呈现的。其中的信息干扰是由第二子类和第三子类物理原因所引起的。称第一组信息干扰为传感器子系统、导航系统误差中的尖峰信号;称第二组信息干扰为额外的异常误差。

解释一下误差中尖峰信号的产生机理。认为,误差的充分描述是将它表示成随机过程的形式。并且,在导航系统(导航系统的子系统或传感器)情况中,通常描述有着复杂的多分量结构,也就是误差表示成几个随机过程和的形式。显然,即使在这些过程的标称属性下也可能产生这样的事件:各种分量值以

同一符号相加,对于导航系统的总误差则会产生异常的尖峰信号。在一般情况中,不排除这样的情形:导航系统误差的一个单独取的分量取一个异常大的值。在类似的实际情况中,通常注意到描述误差时使用高斯概率分布密度的理由,由于对于所描述过程允许有无穷值,所以,它实际上是不可实现的数学模型。

对于导航系统来说,信息干扰的后果可能是多种多样的。它可能导致导航系统的信息故障,并且与干扰事件有关的故障事件的产生可能无滞后或者带一些滞后,有时完全显著滞后,这与导航系统误差的结构有关。信息干扰可能不会导致导航系统的信息故障,但如果信息故障的概念对组成导航系统的子系统或原始信息传感器来说也是确定的,它可以导致它们产生信息故障。如果信息故障的值不显著,那么它可能没有任何以上所指出的后果。

综上所述,导航系统可靠性的概念是综合的,其中包含两个分量:仪表可靠性(仪表故障可靠性)和信息可靠性(信息故障可靠性)(图 B.4)。第一个分量代表导航系统传统理解上的可靠性的特性,第二个分量代表精度的特性。实践表明,在导航系统运行时信息故障发生是相对频繁的。因此,精密导航系统组成中经常包含有防止信息故障的基于利用结构、信息和算法冗余的设备,以及信息故障和干扰的检测与诊断设备。对于误差不稳定,且不能及时执行校正程序,必然导致信息故障的自主式导航系统来说,防止信息故障的设备具有特别重要意义。

所述的概念可以明确实际中常用的导航系统可靠性估计方