



相关极值 导航系统理论

A. A. 克拉索夫斯基
[苏] H. H. 别洛格拉佐夫 著
Г. H. 契根
任思聪 译

航空工业出版社

638452

TN966

02

不

相关极值导航系统理论

A.A. 克拉索夫斯基

(苏) И.Н. 别洛格拉佐夫 著

Г.П. 契根

任思聪 译



C0162720

航空工业出版社

1986

hhs/ob

内 容 提 要

本书阐述了利用空间和表面地球物理场(地形场、异常地球磁场等)的新型导航系统进行算法综合的理论基础。算法综合是借助最优估计、辨识和控制理论的一般方法和专门方法来实现的。这些方法是独创性的,并可用来解决很广泛的现代科学和技术问题。在使用地球物理场进行导航的问题中,利用了包括相关函数的模拟计算和求取极值的算法两者相结合的相关极值算法。书中引用了很多相关极值的算法的例子,介绍了对其功能进行解析和数值研究的结果。这些结果形成了这类系统的实用理论。

本书可供专门从事信息优化处理和导航工作的科学工作者、工程技术人员及高年级大学生使用。

相关极值导航系统理论

A. A. 克拉索夫斯基

[苏] И. Н. 别洛格拉佐夫 著

Г. П. 契 根

任 思 聪 译

航空工业出版社出版

(北京安定门外北苑大院2号)

新华书店北京发行所发行

北京市通县向阳印刷厂印刷

1986年11月第1版

1986年11月第1次印刷

787×1092毫米 1/32

印张: 15⁷/8

印数: 1—1,500

字数: 356千字

统一书号: 15448·5

定价: 2.90元

译 者 序

随着现代科学技术的发展和国防建设的需要，对系统控制性能的要求越来越高。一方面，在运载体的导航及制导上特别重视自主性的要求；另一方面，高性能微型计算机的长足进展及广泛应用又对上述要求的实现提供了强有力的技术保证。这样，就有可能使运载体和导航系统组成一个统一的整体，使其按一定的函数关系和对目标泛函求极值的方法，用优化算法进行综合，从而理想地实现预定目标。

但是，如果不用其他系统对自主式导航系统进行修正的话，那么就会使得导航系统要么精度有限，要么在技术实现上将产生很大困难，从而使造价很高，同时也可能在对抗干扰、增强隐蔽性方面受到限制。

近十多年来，在自主式导航技术中利用地球物理场，尤其是利用地形(有时是地图)匹配技术的先进方法日益受到人们的重视，由此而改善了无人驾驶飞机、巡航导弹、洲际导弹等的制导或定位性能，也提高了制导炸弹和轰炸机等的投弹命中率。例如，利用地形匹配辅助的惯性导航系统，其定位圆概率误差可以达到20~30米的程度，这对实现国防现代化具有很大的现实意义。此外，地形匹配技术还可用于地球资源的探测、气象条件的预报和环境情况的分析，因而也就更加引起了人们对其进行研究和探讨的兴趣。

另外，就优化算法来讲，尽管微型计算机的功能及技术水平业已达到很高的程度，但对实现复杂系统的实时控制来讲，仍然是难以满足要求的。因此，针对一个非常复杂的组

合导航系统，如何在尽量不降低其性能的基础上实行次优化综合，以便简化分析和降低对计算机性能的要求，这也是十分有意义的和迫切需要给予解决的问题。

《相关极值导航系统理论》一书为解决上述问题建立了必要的理论基础，并且针对组合式导航系统的构成方案、优化综合以及数据处理方法，比较系统地阐述了有关内容，同时还给出了大量的数字模拟结果。因此把这本书翻译出版，便于从事导航和信息处理的有关科技人员、研究生和高年级大学生参阅，是很有必要的。

限于水平及时间，在翻译中难免存在错误及欠妥之处，希望读者批评指正。对在翻译过程中给予帮助的同志译者在此表示衷心感谢。

译 者

1984.8.

目 录

前言	(1)
导论	(3)
第一章 非寻的最优估计、辨识和控制的理论	
基础	(8)
§1.1 按广义功判据优化的基本定理和分离 定理	(8)
§1.2 估计坐标的算法	(20)
§1.3 精确估计的充分条件	(31)
§1.4 估计问题中信息的分离与再分配	(38)
§1.5 辨识算法	(45)
§1.6 具有预报模型的最优控制算法	(48)
§1.7 相关极值系统中估计问题的特点	(57)
第二章 寻的估计方法的理论基础	(68)
§2.1 统计解的理论基础	(68)
§2.2 递推寻的估计	(90)
§2.3 递推寻的估计的特定情况	(106)
§2.4 递推寻的估计的连续模拟	(116)
第三章 地球物理场和导航系统的数学模型	(131)
§3.1 相关极值导航系统理论中统计方法的 根据	(131)
§3.2 空间场的数学模型	(139)
§3.3 惯性系统误差的数学模型	(153)

第四章	相关极值导航系统中的非寻的估计算法	(190)
§4.1	最简单非寻的相关极值导航系统算法 的综合及解析研究	(190)
§4.2	最简单非寻的相关极值导航系统算法 数学模拟的某些结果	(215)
§4.3	利用光滑场的相关极值导航系统中的 算法与过程	(241)
§4.4	非寻的相关极值导航系统精度的综合 近似解析估值	(248)
§4.5	无平台惯性非寻的相关极值导航系 统[4.6]	(260)
§4.6	估计高度的算法.....	(270)
§4.7	具有有限维观测矢量的象重合相关极 值系统[4.2]	(293)
第五章	相关极值导航系统中的寻的估计算法	 (306)
§5.1	问题的提出、平均失误率公式的推导、 最优决策规则	(306)
§5.2	用泛函值矢量统计特性表示的失误率.....	(322)
§5.3	混合估计运动目标位置和速度的最优 寻的算法 [5.5]、[5.6]	(331)
§5.4	同时利用好几个场的相关极值导航系 统的最优寻的算法[5.8].....	(344)
第六章	相关极值导航系统的递推寻的估计算法	(355)
§6.1	垂直机动时惯性系统误差的递推寻的 估计[6.1]	(355)
§6.2	利用递推寻的估计时简化传统传感器 组成的可能性 [6.4].....	(370)

§6.3	在低高度和越障飞行状态下惯性系统 误差的递推寻的估计	(382)
§6.4	多普勒-航向系统误差的递推寻的估计 ...	(387)
第七章 相关极值惯性系统回路的综合和最优修		
	正状态的选择	(394)
§7.1	非寻的估计状态矢量时的相关极值惯 性系统修正回路的综合	(394)
§7.2	寻的估计状态矢量时的相关极值惯性 系统修正回路的综合	(405)
§7.3	相关极值惯性系统最优修正方式的选 择.....	(424)
第八章 组合导航系统的算法保障		
§8.1	导航方法与最优判据	(436)
§8.2	组合导航系统的算法	(442)
§8.3	相关极值导航系统、最优轨迹控制和 组合导航系统的结构	(461)
附录		(477)
参考文献		(493)

前 言

在出现机载数字计算机以后，飞机、舰船和其他运动体的导航系统就变成了复杂的综合系统，在这些系统(惯性、航向多普勒和其他系统)中确定或计算坐标都是自主实现的。由于其误差要随时间积累，于是就根据无线电(近程、远程、全球的)导航系统、机载雷达和定向瞄准装置的信号对其进行系统的和随机的修正。

本书将研究一类比较新的导航系统(综合系统)的构造原理与理论。它们不是借助人工导航场，而是利用地形场、地球特异磁场等来实现修正。这类系统的工作原理是以对观测装置(场传感器)的信号与保存在机载记忆装置中的地图进行对比作基础的。

无论是用研究的方法还是用最优算法的严格综合措施来建立这类系统的算法，都会有计算互相关函数和求取该函数极值的结构。因此把这类系统叫做相关极值系统。

本书主要讲述相关极值导航系统的实用理论。

相关极值系统的理论主要是由苏联学者在其著作中发展的。但是在很多书中[1、5、10]都没有触及相关极值系统的综合问题。而本书则把主要注意力集中在最优和次优相关极值导航系统的综合问题上，并引出了好几种新的算法。这本著作的大部分内容是研究有关相关极值导航系统的各种过程，同时还研究了构成导航系统和一般应用中的相当广泛的估计、辨识和控制问题及其方法。阐述问题时例举了大量的例子和

数学模拟材料。

本书基本上以作者们原来的工作为基础。它可供从事导航和飞行控制专业的工程技术人员、研究生、科技工作者和高年级大学生阅读。

第一、第八章是由A.A.克拉索夫斯基写的；第二、第三、第五、第六、第七章和§4.7是由И.Н.别洛格拉佐夫写的；第四章由A.A.克拉索夫斯基和Г.П.契根合写。B.П.达拉欣克教授审阅了全稿并提出许多有益的建议，作者在此表示衷心的感谢。

导 论

相关极值系统是各式各样的，并且有各自不同的用途。根据每一瞬间由场拾取的有用信号按其容量和特性进行分类是相关极值系统较方便的分类方法之一。因此，相关极值系统可分为从点上（相关极值系统-I）、从线上（相关极值系统-II）和从面上（画面）（相关极值系统-III）拾取即时信息的不同系统（见图B.1）。

对于使用点探测法的系统（相关极值导航系统-I），既可利用表面场（地貌、光学或无线电的反差及其他场），也可利用空间场（异常磁力、重力场）。这些系统在苏联首先是由本书的作者们于1961年提出的。

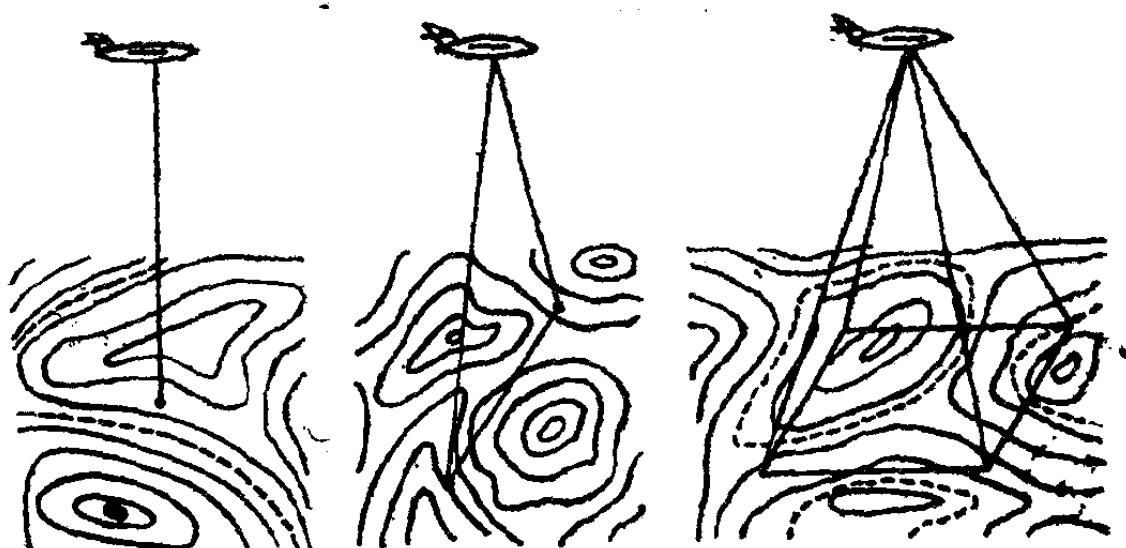


图 B.1 相关极值导航系统的分类

从一条线或一个画面拾取瞬时信息的系统（相关极值导航系统-II和系统-III）只能利用表面场而不能利用空间场，因

为与空间场的相关半径相比,运动目标一般具有很小的尺寸。

根据用途,相关极值导航系统-Ⅰ和系统-Ⅱ很接近形象辨识和图象重合系统,В.П.达拉欣克(В.П.Тарасенко)对这类系统的某些形式详细地进行了研究。

应当指出,除上述的三种形式外,相关极值系统和相关极值导航系统还有在好几个点上、好几条线上用扫描方法同时拾取信息的中间形式。很明显,沿一条线快速扫描的就近于相关极值导航系统-Ⅰ,而沿地表扫描的则近于相关极值导航系统-Ⅱ。

本书主要讨论相关极值导航系统-Ⅰ。但书中所述的一般理论在一定程度上也可推广到§1.7、§4.7和附录中所描述的相关极值导航系统-Ⅱ和系统-Ⅲ。相关极值导航系统-Ⅰ理论的发展可分成三至四个方向性的阶段。

第一阶段形成了相关极值导航系统连续模拟方案伪平稳状态的理论。把确定坐标时的过渡过程(相关极值导航系统回路中的过渡过程)进行得足够慢的这种状态叫做相关极值导航系统-Ⅰ的伪平稳状态。在伪平稳状态下,过渡过程的长度(即运动目标经过的距离)应当至少是所用场相关半径的几十倍。和其他的极值系统一样,伪平稳状态的近似理论已变成普通的随动系统理论,它们在一般情况下是非线性的。作者在六十年代的工作主要都是按这种理论进行的。在这些工作中研究过的相关极值导航系统的连续算法都可以归属于非寻的算法。也就是在这些算法中没有更多的假设,并且对相关函数极值的逼近是直接用斜率法或类似方法实现的。这类算法的主要缺点是非最优的,并且在超过所用场相关半径的初始偏差很大的情况下它是发散的[6]。所提出的消除大偏差的特定方法对这类算法[6]没有实际意义。

还在六十年代,主要在И.Н.别洛格拉佐夫(И.Н.Белоглазов)的研究中就已经开始发展第二种方向——寻的相关极值导航系统的理论。在寻的相关极值导航系统中,在现有时刻前 i 的某一时间间隔上要给出很多关于目标真实运动的假设。对于每一种假设都有从一块场图上取得的确定性值与其相对应。

在一定的时间间隔上把记录的场传感器信号与对应于所用假设的全部实现相比较。比较是用计算某种泛函的方法实现的。对应于泛函极值的假设就认为是真实值。

寻的相关极值导航系统的理论是以普通的统计解理论为基础的。

相关极值导航系统的寻的算法原则上没有初始误差量的限制,但是,在多参数估计的情况下,要求机载数字计算机具有很强的工作能力。由于这种缘故,近年来有两个相关极值导航理论的新方向(最优非寻的算法和最优混合算法)得到了急剧的发展。

相关极值导航系统的最优非寻的算法来源于对非平稳观测场和未给出导航场等特殊问题进行解析描述的卡尔曼滤波器。

这个方向的进一步发展便导致使机载数字计算机在计算关系方面实现更为经济的算法。

综合算法是寻的和非寻的算法的结合,它是以严格地求解最优问题为基础的。

在以作者所做工作的主要结果为基础写成的这本书中,除了第一方面(在一定程度上已经陈旧了)的内容之外,另一方面的问题也都得到了反映。

本书的第一章是非寻的最优估计、辨识和控制的理论基

基础。这里所研究的广义功极小原理、相应的分离定理、辨识和控制算法都超出了相关极值导航系统的范畴，但是在保证机载综合系统的算法上还会用到它们。

估计算法、收敛的充分条件(精确估计的条件)、在估计问题中的识别及信息的再分配是非寻的相关极值导航系统的理论基础。

第二章所研究的是寻的估计方法的理论基础。在这一章中，除了已知的统计解理论基础(§2.1)外，还叙述了综合(递推寻的)估计方面的新鲜材料。

第三章对地球物理场和无修正导航系统的数学模型进行了简略的研究。

第四章对相关极值导航系统估计的非寻的算法进行了详细研究。其中要对观测一个或几个导航场并同时测量其他参数的、无论是最简单的还是比较复杂的多参数估计算法进行综合。还要分析很多相关极值导航系统方案的收敛条件和精度的近似解析理论估值。将给出数字模拟的结果并把它们与近似解析理论进行比较。

这一章的内容既有理论意义，又有实际意义。对以后的章节，特别是有关寻的算法的第五章，都可以这样说。最优决策规律算法的综合也在这里得到了体现。被研究的是对运载体位置和速度作混合估计的最优寻的算法，它们是利用好几个场的寻的相关极值导航系统。

第六章专门叙述组合的、也正是相关极值导航系统的递推寻的算法。组合算法综合了寻的和非寻的算法的优点：能够在很大的初始误差条件下工作；同时也可能在中等功能的机载数字计算机上进行高精度、多参数的估计。因此，应用这类算法的可能性是十分广阔的。

如上所述，相关极值导航系统是与这种或那种惯性、多普勒-航向或其他形式的辅助导航系统相结合的。这种系统在以后命名为“粗”系统。相关极值导航系统与粗系统的结合可能是单向的(解析的)，这时不存在相关极值导航系统的反馈作用；也可能是双向的，这时则具有用相关极值导航系统修正粗系统的闭合回路。

在上述章节中所分析的系统都是单向的。

在第七章中利用寻的和非寻的相关极值导航系统来综合惯性系统的修正回路。在这一章中分析了综合系统在利用离散(非连续)导航场时的优化问题。

在最后一章中叙述了构成综合导航系统的一般问题。其中简要地研究了导航方法和运动轨迹的优化判据；给出了驾驶和导航之间可能的功能差别。在这种情况下，除了估计导航坐标以外，形成最优轨迹控制的任务同样依赖于综合导航系统。可以表明，如果在惯性坐标系中和按广义功极小的原则对轨迹进行优化时，轨迹的最优化可由中等功能的机载数字计算机来完成。

第一章 非寻的最优估计、辨识 和控制的理论基础

如象前面已经指出的那样,在非寻的系统中不存在寻的问题,因而也就没有终点假设集。在这里,假设只是一个,但参数(坐标)可以从无限连续(对连续系统)集中取值。非寻的系统的一般理论基础是现代最优估计、辨识和控制理论。众所周知,这些理论的内容是非常丰富的。相应的文献真是成千上万。在这里只能引用对解决复杂的实际问题最有效的那些原理和结果。在自控范畴内这是以综合功极小判据或准则为基础的理论[1.1~1.5, 1.22];而在估计和辨识范畴内则是卡尔曼滤波器及其变体,这些也可用上述判据的观点进行阐述。

§1.1 按广义功判据优化的 基本定理和分离定理

下面介绍,在对象(控制过程)是用柯西普通微分方程描述的、控制泛函是二次型的、并且没有噪声(确定性问题)时,按照广义功判据,优化的基本定理的表达式和证明。连续系统的一系列概括性定理在著作[1.1, 1.2, 1.6, 1.7]中都可以找得到。

a) 连续过程的基本定理

对于由方程

$$\dot{x}_i + f_i(x, t) = \sum_{j=1}^m \varphi_{ij}(x, t) u_j \quad (1.1)$$

$$i=1, 2\cdots, n$$

所描述的过程在泛函

$$I=V_3[x(t_2)]+\int_{t_1}^{t_2} Q(x,t)dt+\frac{1}{2}\int_{t_1}^{t_2}\sum_{j=1}^m\frac{u_j^2+u_{j\text{on}}^2}{k_j^2}dt \quad (1.2)$$

极小意义上的控制是

$$u_j=u_{j\text{on}}=-k_j^2\sum_{k=1}^n\varphi_{kj}(x,t)\frac{\partial V}{\partial x_k} \quad (1.3)$$

式中 $V=V(x,t)$ 是李雅普诺夫方程

$$\frac{\partial V}{\partial t}+\sum_{i=1}^nf_i\frac{\partial V}{\partial x_i}=-Q \quad (1.4)$$

在边界条件 $V_{t=t_2}=V_3$ 时的解；而 $x=(x_1, x_2\cdots, x_n)$ ——状态矢量； $f_i, \varphi_{ij}, Q, V_3$ ——给定的连续函数； $k_j^2>0$ ——给定的系数。

泛函(1.2)式包含着有限个状态的给定函数 $V_3(x(t_2))$ 。该泛函叫做广义功限定(或准确定的)泛函。“广义功”泛函或判据的这种称呼本身在很大程度上是条件性的。它反映出除了作为一般判据(列多夫-卡尔曼)和关于综合控制功 u_j 的项之外，在它里面还包含最优系统关于控制功的项

$$\frac{1}{2}\int_{t_1}^{t_2}\sum_{j=1}^m\frac{u_{j\text{on}}^2}{k_j^2}dt$$

在广义上讲，这里的功被理解为对加权控制平方和的积分值。在专门给定系数 k_j 的情况下它可以有能的量纲，也就是在 t_2-t_1 时间内由控制所作的实际功。这个定理最简单的一种证明如下。