

国防科学技术大学惯性技术实验室优秀博士学位论文丛书

捷联惯导动基座对准新方法及 导航误差抑制技术研究

Research on a New Moving-base
Alignment Approach and Error
Depression of Strapdown Inertial Navigation System

练军想 吴文启 吴美平 胡小平 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

国防科学技术大学惯性技术实验室优秀博士学位论文丛书

捷联惯导动基座对准新方法及 导航误差抑制技术研究

**Research on a New Moving - base Alignment
Approach and Error Depression of Strapdown
Inertial Navigation System**

练军想 吴文启 吴美平 胡小平 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

捷联惯导动基座对准新方法 & 导航误差抑制技术研究/练军想等著. —北京:国防工业出版社,2016.6

(国防科学技术大学惯性技术实验室优秀博士学位论文丛书. 自主导航理论与方法)

ISBN 978-7-118-10262-8

I. ①捷… II. ①练… III. ①捷联式惯性制导—导航误差—研究 IV. ①V448.131

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 093797 号

※

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 9½ 字数 166 千字

2016 年 6 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—1500 册 定价 50.00 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

国防科学技术大学惯性技术实验室
优秀博士学位论文丛书
编委会名单

主任委员 胡小平 吴美平

委 员 杨功流(北京航空航天大学)
陈家斌(北京理工大学)
李四海(西北工业大学)
徐晓苏(东南大学)
蔡体菁(东南大学)
刘建业(南京航空航天大学)
赵 琳(哈尔滨工程大学)
胡柏青(海军工程大学)
王跃钢(火箭军工程大学)
吴文启(国防科学技术大学)

秘 书 练军想

序

大学之道,在明明德,在亲民,在止于至善。

——《大学》

国防科学技术大学惯性导航技术实验室,长期从事惯性导航系统、卫星导航技术、重力仪技术及相关领域的人才培养和科学研究工作。实验室在惯性导航系统技术与应用研究上取得显著成绩,先后研制我国第一套激光陀螺定位定向系统、第一台激光陀螺罗经系统、第一套捷联式航空重力仪,在国内率先将激光陀螺定位定向系统用于现役装备改造、首次验证了水下地磁导航技术的可行性,服务于空中、地面、水面和水下等各种平台,有力地支撑了我军装备现代化建设。在持续的技术创新中,实验室一直致力于教育教学和人才培养工作,注重培养从事导航系统分析、设计、研制、测试、维护及综合应用等工作的工程技术人才,毕业的研究生绝大多数战斗于国防科技事业第一线,为“强军兴国”贡献着一己之力。尤其是,培养的一批高水平博士研究生有力地支持了我军信息化装备建设对高层次人才的需求。

博士,是大学教育中的最高层次。而高水平博士学位论文,不仅是全面展现博士研究生创新研究工作最翔实、最直接的资料,也代表着国内相关研究领域的最新水平。近年来,国防科学技术大学研究生院为了确保博士学位论文的质量,采取了一系列措施,对学位论文评审、答辩的各个环节进行严格把关,有力地保证了博士学位论文的质量。为了展现惯性导航技术实验室博士研究生的创新研究成果,实验室在已授予学位的数十本博士学位论文中,遴选出 23 本具代表性的优秀博士学位论文,分成五个专题,结集出版,以飨读者。这五个专题分别是:(1)激光陀螺惯导系统技术;(2)地磁导航技术;(3)嵌入式组合导航技术;(4)航空重力测量技术;(5)自主导航理论与方法。

结集出版的目有三:其一,不揣浅陋。此次以专著形式出版,是为了尽可能扩大实验室的学术影响,增加学术成果的交流范围,将国防科学技术大学惯性导航技术实验室的研究成果,以一种“新”的面貌展现在同行面前,希望更多的同仁们和后来者,能够从这套丛书中获得一些启发和借鉴,那将是作者和编辑都倍感欣慰的事。其二,不宁为是。以此次出版为契机,作者们也对原来的学位论

文内容进行诸多修订和补充,特别是针对一些早期不太确定的研究成果,结合近几年的最新研究进展,又进行了必要的修改,使著作更加严谨、客观。其三,不关毁誉,唯求科学与真实。出版之后,诚挚欢迎业内外专家指正、赐教,以便于我们在后续的研究工作中,能够做得更好。

在此,一并感谢各位编委以及国防工业出版社的大力支持!

吴美平

2015年10月09日于长沙

前 言

本书针对捷联惯性导航领域两个方面的关键技术——惯性系动基座对准技术和导航误差转动抑制技术开展研究。主要研究工作包括以下 5 个方面:

(1) 系统研究了捷联惯性导航惯性系对准方法。提出了一种利用重力矢量的特征、借助 FIR 滤波器抑制高频噪声的惯性系对准新方法。根据空间矢量的相互关系,推导了惯性系对准精度与惯性器件误差之间的关系式。设计了两级抽取、分段滤波的 FIR 低通数字滤波器组,为抑制基座扰动提供了有效手段。研究了惯性系对准方法的快速性和大失准角条件下对准性能。与传统对准方法的比较分析表明:惯性系对准方法具有对准速度快、适用于任意失准角,而且不损失对准精度的优越性能。

(2) 根据惯性系对准方法的基本原理,结合车载捷联系统对于机动性对准的需求,提出了利用两次短时停车的车载行进间惯性系对准方法,分析了停车位置偏差对精度的影响。结合舰载捷联系统对于航行状态下的对准需求,提出了匀速直航条件下的惯性系迭代对准方法,仿真实验证明了该方法的可行性。

(3) 采用中等精度($0.01^{\circ}/h$)的激光陀螺捷联系统进行惯性系对准实验,方位对准精度为 $0.04^{\circ}(1\sigma)$ 。对于地面扰动环境,新方法完成对准需时 200s;对于转台摇摆、船载系泊以及舰载系泊环境,新方法实现对准的时间不超过 300s。与传统反馈控制对准方法相比,新方法在对准速度上明显占优,而且不需要粗对准。实施了行进间对准实验,实现了车载高精度机动对准。设计了以惯性系迭代对准作为粗对准的两步对准方案,实现了舰载近似匀速直航状态下的快速对准。

(4) 在充分研究了惯性系对准新方法后,本书对惯性导航领域中的另一项关键技术开展了研究:惯性导航误差抑制技术。推导了转动条件下惯性导航误差的解析表达式,对静态和转动两种误差解析式进行对比分析,指出了设计转动角速度时应该规避的谐振频点。分别就往复转动、间断型转动、多轴转动等方式对于导航误差的抑制机理开展研究,推导了往复转动条件下导航误差的解析表达式,利用仿真手段分析了间断型转动对于导航误差的抑制效果。研究表明,合

理的转动可以显著抑制器件误差和标定误差的影响。综合比较各种转动方式的优缺点,提出了转动方式的评价准则,为设计实际的转动抑制方案提供了理论指导。

(5) 设计数学仿真模型,对理论推导的解析结果进行验证,证明了转动条件下导航误差解析表达式的正确性。转台实验和仿真分析均表明:在单轴转动条件下,绕方位轴的往复连续转动具有最优的误差抑制效果。针对某型水面舰船对于惯性导航定位的精度需求,设计采用连续往复转动抑制方案的原理样机,系泊和航行实验的结果表明,采用 $0.01^{\circ}/\text{h}$ 的激光捷联系统,8h 的定位误差为3海里。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.1.1 导航技术对社会发展的影响	1
1.1.2 惯性导航基本问题	2
1.2 捷联惯导系统初始对准与导航误差抑制技术的发展现状	3
1.2.1 捷联惯性导航初始对准技术的发展现状	3
1.2.2 捷联惯性导航误差补偿与误差抑制	9
1.2.3 本书的研究动机	11
1.3 本书的研究内容、组织结构与主要贡献	11
1.3.1 本书的研究内容	11
1.3.2 本书的组织结构	12
1.3.3 本书的主要贡献	13
第 2 章 捷联惯导惯性系对准方法研究	14
2.1 惯性系对准基本原理	14
2.1.1 静基座条件下的惯性系对准	14
2.1.2 动基座条件下的惯性系对准	15
2.2 惯性系对准误差分析	17
2.2.1 陀螺漂移误差的影响	18
2.2.2 加速度计零偏误差的影响	20
2.2.3 与传统对准方法误差分析的比较研究	22
2.3 基座扰动对惯性系对准的影响	25
2.3.1 车载环境的频域特性	25
2.3.2 舰载系泊环境的频域特性	27

2.3.3	FIR 低通滤波器设计与实现	28
2.4	惯性系对准快速性分析	31
2.4.1	惯性系对准快速性分析	31
2.4.2	反馈控制对准快速性分析	32
2.4.3	最优估计对准快速性分析	33
2.5	惯性系对准大失准角问题	33
2.5.1	传统对准方法中的大失准角问题	33
2.5.2	惯性系对准中的大失准角问题	34
2.6	本章小结	34
第 3 章	典型环境下惯性系对准方法的应用研究	36
3.1	车载行进间惯性系对准	36
3.1.1	惯性系 i 与中间过渡坐标系 m 的关系	37
3.1.2	中间过渡坐标系 m 与当前导航系 n 之间的关系	38
3.1.3	行进间对准分析	39
3.2	舰载匀速直航条件下的惯性系迭代对准	42
3.2.1	匀速直航迭代对准方法	42
3.2.2	匀速直航迭代对准数学仿真	43
3.3	本章小结	45
第 4 章	惯性系动基座对准实验验证	47
4.1	扰动条件下惯性系对准实验	47
4.1.1	双轴位置单轴速率转台对准实验	48
4.1.2	车载对准实验	51
4.2	系泊状态下惯性系对准实验	53
4.2.1	转台摇摆对准实验	53
4.2.2	湖试系泊对准实验	57
4.2.3	海试系泊对准实验	59
4.3	行进间惯性系对准实验	60
4.4	舰载匀速直航条件下的对准实验	61
4.5	本章小节	66

第5章 惯导系统误差转动抑制机理研究	67
5.1 惯性器件误差激励的导航误差转动抑制机理	67
5.1.1 转动对于陀螺漂移影响的抑制	67
5.1.2 转动对于加速度计零偏影响的抑制	81
5.2 标定误差激励的导航误差转动抑制机理	86
5.2.1 转动对于陀螺标定误差影响的抑制	86
5.2.2 转动对于加速度计标定误差影响的抑制	89
5.3 各种转动方式的比较与分析	92
5.3.1 往复转动	92
5.3.2 间断型转动	97
5.3.3 单轴、双轴与三轴转动	101
5.3.4 转动方式的评价准则	101
5.4 本章小结	102
第6章 惯导系统误差转动抑制实验研究	104
6.1 仿真实验	104
6.1.1 数学仿真模型	104
6.1.2 陀螺漂移激励的导航误差仿真分析	105
6.1.3 加速度计零偏激励的导航误差仿真分析	109
6.1.4 陀螺标定误差激励的导航误差仿真分析	112
6.1.5 加速度计标定误差激励的导航误差仿真分析	113
6.1.6 往复转动和间断型转动仿真分析	114
6.1.7 转动方式比较	117
6.2 转台实验	120
6.2.1 静态实验	121
6.2.2 单向连续转动实验	122
6.2.3 间断型转动实验	124
6.2.4 连续往复转动实验	125
6.3 舰载惯性导航系统误差抑制的实例	126
6.3.1 系泊状态下的导航误差抑制	127

6.3.2 航行状态下的导航误差抑制	127
6.4 本章小结	131
第7章 结论与展望	133
7.1 主要研究结论	133
7.2 研究展望	134
参考文献	135

第1章 绪 论

1.1 引 言

► 1.1.1 导航技术对人类社会发展的影响

在人类认识自然、改造世界的伟大历史进程中,对导航技术的探索和运用总是不断地推陈出新,叠彩纷呈。从周易出现的时代起,人们就认识到利用天文、地理的方法来观察和探索未知世界的重要性:“仰以观於天文,俯以察於地理,是故知幽明之故”(《易经·系辞上传》)。在战国时期,人们琢磨天然磁石,制成最早的指南仪器——司南。后来,经过长期实践和反复试验,司南被改造成为指南鱼和指南针。指南针的发明,有力地促进了我国航海事业的发展。公元12世纪以后,指南针传到了阿拉伯国家和欧洲,又大大推动了世界航海事业的发展 and 中西方文化的交流。如果说指南针的发明是中国古代先民对于地理知识长期探求的结晶,那么,600年前,明代航海家郑和所发明的“过洋牵星术”,则是人们成功运用天文知识进行导航的一个重要范例。除了上述典型的发明,还出现了用于指示固定方向的指南车、计量行驶距离的鼓车等。这些导航领域的早期发明,无不闪耀着中国古代先民的智慧之光,在人类文明史上留下了不可磨灭的功勋。

到了近现代,西方国家的科学技术研究异军突起,对导航技术的发展产生了极为重要的影响。牛顿经典力学理论体系的创立,推动导航理论和技术取得了长足的进步。1851年,法国科学家 Jean Foucault 发明了傅科摆^[1]。1923年德国科学家舒勒(M. Schuler)研制成功不受基座加速度影响的机械系统,向人们直观地展示了舒勒原理的奇特内涵。第二次世界大战末期,德国工程师首次在 V2 火箭上安装了依据惯性原理设计的三轴陀螺仪操纵系统,使之成为最早投入使用的弹道导弹,因而载入史册。从此,以惯性定律为基本原理的惯性导航理论和方法进入了加速发展的快车道。1958年夏,安装在“鹦鹉螺”号核潜艇上的惯性导航系统成功引导该潜艇首次穿过北极冰盖。借助于先进的惯性导航技术,先

后有 5 艘航天飞机穿梭于地面发射场和人造空间站之间。安装有惯性导航、天文导航设备的探测器已经成功登陆火星,标志着人类在探索太空的进程中又迈出了坚实的一步。所有这些惊人的成就,无不展示着以牛顿力学为基础的惯性导航技术对于人类文明的卓越贡献。当 NASA 研制的“阿波罗”11 号飞船成功着陆月球表面后,有人在伦敦 Westminster 教堂的艾萨克·牛顿墓碑前留下的一句告慰,常常使 Draper 实验室的 Richard H. Battin 教授感动得热泪盈眶^[2]: Sir Isaac – the Eagle has landed. ①

1.1.2 惯性导航基本问题

导航技术对人类社会发展的影响如此深远,那么,到底什么是导航呢?目前,对于“导航”的定义是:引导载体安全准确地沿着所选定的路线、在预定的时间到达目的地的技术和方法^[3-8]。当前常用的导航方法有天文导航、无线电导航、卫星导航和惯性导航等^[6, 9, 10]。其中,惯性导航是以牛顿第二定律(惯性定律)为基础,利用陀螺仪和加速度计测量载体角运动和线运动,计算载体位置、速度和姿态的技术^[11, 12]。由陀螺仪、加速度计和处理器构成的测量部件称为惯性测量单元(Inertial Measurement Unit, IMU),实现惯性导航的软、硬件设备统称为惯性导航系统(Inertial Navigation System, INS)。早期的惯性导航系统利用陀螺稳定平台建立实际的三维空间测量基准,因而被称为平台式惯性导航系统(Gimbaled INS, GINS);20 世纪 70 年代后,随着微电子技术和计算机技术的进步,人们采用虚拟的数学平台取代物理平台,将惯性传感器直接和载体固联,形成所谓捷联式惯性导航系统(Strapdown INS, SINS)^[13]。SINS 不需要建立复杂的机电平台,体积小,质量轻,功耗低,可靠性大大增强。目前,SINS 被广泛应用于各类载体的导航,在绝大多数领域已经取代 GINS。

惯性器件技术、误差补偿与抑制技术、导航算法以及初始对准技术是当前 SINS 研究领域的四个主要关键技术^[14]。陀螺仪和加速度计是开发捷联式惯性导航系统的两大关键器件^[7, 15]。随着挠性陀螺、激光陀螺、光纤陀螺、半球谐振陀螺以及微惯性器件技术日臻成熟,势必大力推动 SINS 向着低成本、高精度、高可靠性的方向发展。对 SINS 导航算法的研究是惯性导航领域的热点,涌现出了一大批富有创造性的成果^[16-34]。在惯性导航领域,对于 SINS 初始对准技术、SINS 误差建模与抑制技术的研究方兴未艾^[7, 14, 35]。

① 艾萨克爵士——鹰已降落。意指飞船已成功降落月球表面。Richard H. Battin, MIT/Draper 实验室教授,领导了“阿波罗”飞船的主控、制导和导航系统的设计和开发工作。

1.2 捷联惯导系统初始对准与导航误差抑制技术的发展现状

1.2.1 捷联惯性导航初始对准技术的发展现状

1.2.1.1 初始对准的基本方法

INS 在进入导航工作状态之前都必须进行初始化,主要包括三个方面的工作:①给定初始速度和初始位置;②惯导平台(含实际平台和数学平台)的初始对准;③惯性传感器的测漂和定标。第一项任务比较简单,容易实现。第三项任务在陀螺和加速度计性能比较稳定的情况下,不一定每次启动都要进行,而惯导平台的初始对准在每次启动后都必须进行。对平台式惯导系统而言,初始对准是使平台坐标系与导航坐标系对准,这是一个物理过程;而对捷联式惯导系统而言,初始对准是确定初始时刻的姿态矩阵^[3]。对准精度和对准速度是初始对准的两项重要技术指标。初始对准的精度对惯导系统的导航精度有着重要影响,初始对准的速度在很大程度上决定了武器系统的快速反应能力,因此要求对准精度高、对准时间短,既精又快^[36-40]。

按不同的划分标准可以把惯性导航系统初始对准方式作如下分类:按对外部信息的依赖程度,可分为主动式对准和非主动式对准;按是否需要更高精度主惯导提供匹配参数,可分为传递对准和自对准;按对准的阶段,一般可分为粗对准和精对准;按基座的运动状态,可分为静基座对准和动基座对准。在复杂的海洋环境中,由于阵风、洋流、浪涌的影响,舰艇无法对地静止,因而只能采取动基座对准的方法完成初始对准^[41-45]。同样,地面车辆在行进过程中、起飞前在跑道上滑行的飞机都需要采取动基座对准方法完成初始对准^[46-49]。从广义上讲,导弹、鱼雷等制导兵器的传递对准也属于动基座对准的范畴。传递对准所研究的重点是如何准确估计主惯导与子惯导的安装误差、臂杆矢量、船体或机翼变形等参数^[50-72]。本书研究的重点是 SINS 的自对准问题,有关主子惯导匹配的传递对准问题不在本书探讨的范围之内,因此,下文中所有涉及“动基座对准”的表述,如非特别注明,均指动基座自对准。

典型的捷联惯导系统初始对准方法有解析对准、罗经效应对准以及最优估计对准等方法。由于重力矢量和地球转动角速度矢量在地理系中精确已知,并

可通过陀螺和加速度计测量得到,这两个不共线的矢量常被用于解析对准^[73-75]。重力矢量和地球转动角速度矢量的测量值中不可避免地包含基座运动的干扰,因而解析对准方法常用于静基座对准,或者动基座条件下的粗对准^[9]。多位置对准可以归入解析对准的范畴,通过转动不同的位置,消除陀螺漂移影响,静态多位置对准的结果往往可以达到较高的精度。

罗经效应方位对准是实现动基座精对准的方法之一。罗经效应方位对准的基本原理如下:假定水平对准已实现、方位粗对准已完成,由于方位失准,导致地球转动角速度矢量在向东轴上存在投影分量,引起北向轴不在水平方位,从而可以利用北向速度误差来修正方位角,最终达到方位精对准的目的^[1, 5, 73, 76-85]。对大失准角情况而言,罗经效应对准方法需要粗对准过程,对准时间较长,不利于武器系统快速反应和快速机动。Cannon^[76]利用线性系统理论对传统罗经对准方法进行研究,介绍了主流的罗经系统方案,均采用反馈控制的方法实现初始对准,并指出罗经对准的三大难题:陀螺漂移和速度测量误差制约罗经对准精度;对准的快速性与对准精度的矛盾;高纬度地区精确对准的问题。其成果对于捷联系统罗经对准仍然有一定的指导意义。

以卡尔曼滤波为代表的状态空间最优估计对准方法是当前 SINS 初始对准研究的热点^[10, 71, 72, 86-97],而可观性分析则是最优估计对准方法研究的难点。系统状态可观测性分析包括两个方面的内容:①判断系统是否完全可观测;②对于不完全可观测的系统,进一步判断哪些状态量可观测,哪些状态量不可观测,以及状态的可观测程度。线性定常系统的可观测性分析相对比较容易,可以通过计算观测矩阵的秩来确定。对于线性时变系统的可观测性分析,Goshen - Meskin 和 Bar - Itzhack^[71, 72]提出了将时变系统分解为分段线性定常系统的可观测性分析方法,指出当载体机动状态发生变化时,系统状态变量的可观性会增强,从而提高对准精度和缩短对准时间。对于系统状态变量的可观测度分析,常用的有两类方法:一类是基于估计误差协方差阵的特征值方法^[87],另一类是基于系统矩阵奇异值分解的奇异值方法^[98]。

对于任何初始对准方法,首先需考虑对准精度。如果对准精度不满足要求,即使其他方面的性能再优越,该对准方法也不可取。只有在对准精度满足要求的前提下,然后考虑其他方面的性能才有价值。下面就在对准精度满足需求的条件下,分别从对准的基座扰动问题、快速性问题和失准角问题三个方面对目前的研究成果进行评述。

1.2.1.2 基座扰动对初始对准的影响

对于惯性导航系统扰动基座初始对准问题,一直都是惯性导航学术界关注

的热点。此处“扰动”泛指振动、阵风、浪涌等各种车载、机载以及舰载动基座对准环境。

万德钧教授^[99]研究了在随机摇摆基座上的捷联惯导系统初始对准,提出了一种新的卡尔曼滤波机械编排方法,推导了8状态的捷联惯导水平姿态和方位对准的系统方程,引入了巴特沃斯低通滤波器对观测信息进行预处理,通过上述措施,促进了卡尔曼滤波器的收敛。为了降低惯性传感器的噪声水平,El-Shermy^[100]引入了多尺度小波分解对IMU输出信号进行预处理。出于同样的降噪目的,Zhang^[101]在静基座对准过程中引入了数字低通滤波器。Fang^[102]引入了低通滤波器抑制中间微分过程产生的噪声影响。

徐晓苏^[103]研究了舰载捷联航姿系统的动基座初始对准,对初始对准的误差特性进行了分析,提出了在初始对准的同时,对陀螺随机漂移进行估计的双位置对准方法,并对该方法进行可行性分析和计算机仿真。Yeon^[75]较为明晰地推导了捷联系统地面解析粗对准的原理,并分析了粗对准的误差特性,通过选择不同的参考矢量,导出了不同的误差关系式,对地面对准具有指导意义。Heung^[78]从统计理论的角度对罗经对准的误差进行描述,在误差分析中引入了伪状态,将方差阵转化为对角阵,以简化分析。

程向红^[98]研究了捷联惯性导航系统的动基座初始对准,提出了可观测性分析和可观测度分析的奇异值分解(SVD)方法,将分段线性定常理论(PWCS)从定性分析发展到定量分析,研究了各种运动基座条件下的可观测性和可观测度问题,对两轴摇摆运动条件下的对准进行了半实物仿真试验。该研究成果用于静基座条件下的初始对准比较成功,但应用于动基座条件时,还有局限性,具体表现为方位对准精度不高,有时甚至发散。Hua^[80]研究了以1海里/h为定位精度指标的动基座罗经对准和INS/GPS组合导航,设计了高阶的Kalman滤波器,并利用零速修正等手段,分析了纬度、惯性传感器误差、测量噪声、基座扰动等关键参数对准精度的影响及其相互关系,研究结论认为对准精度与基座运动密切相关,水平误差角可观测,因而收敛快,但是方位误差角收敛较慢。Fomitchev^[104]等研究了捷联罗经动基座对准的精度估计和陀螺漂移修正算法。

从上述文献可以看出,对于扰动基座对准问题,主要处理思路有三种:其一,直接采用数字低通滤波器或者小波分析等频域方法,分离噪声,保留有用的测量或估计信息。其二,从统计理论等角度,对初始对准模型的误差特性进行分析,根据误差特点,选择合适的处理办法。其三,对状态空间模型的可观测性进行分析,通过选择可观的状态、机动方式等措施,处理动基座对准问题。在处理各自所关注的基座扰动问题时,这些措施都发挥了明显的作用。