


捷联导引头 稳定与跟踪技术

周瑞青 刘新华 史守峡 王开斌 著



JIELIAN DAOYINTOU
WENDING
YU GENZONG JISHU



国防工业出版社

National Defense Industry Press

捷联导引头稳定与跟踪技术

周瑞青 刘新华 史守峡 王开斌 著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书共分12章,立足于国防技术前沿,系统、全面地介绍了捷联导引头稳定与跟踪技术的工程应用背景、动力学模型、稳定控制原理及其数字实现方法、鲁棒控制器设计、角跟踪技术、MATLAB建模与仿真、研究进展及展望等。本书内容翔实,覆盖面广,具有系统性和专业性强、著作内容自成体系等特点,并具有一定的实用价值。

本书主要为从事制导与伺服控制专业的科研人员和工程技术人员提供理论和实践指导,也适合作为高等学校自动控制、电子信息、导航与制导控制等相关专业的大学高年级本科生和研究生的教学参考用书,也可供从事相关专业的工程技术人员和科研人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

捷联导引头稳定与跟踪技术 / 周瑞青等著. —北京:
国防工业出版社, 2010. 8
ISBN 978-7-118-06883-2

I. ①捷... II. ①周... III. ①捷联式惯性制导-导引
头-稳定控制②捷联式惯性制导-导引头-跟踪 IV.
①TJ765.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第142429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)

腾飞印务有限公司印刷
新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 16 $\frac{1}{4}$ 字数 408 千字
2010年8月第1版第1次印刷 印数 1—4000册 定价 38.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422
发行传真:(010)68411535

发行邮购:(010)68414474
发行业务:(010)68472764

前 言

导引头技术是精确制导战术导弹的核心技术之一,用于完成对目标的自主搜索、识别与跟踪。在末制导段,导引头的性能对成功拦截目标至关重要,较差的性能会导致导弹脱靶量增大,从而降低拦截目标的概率。为满足现代战术导弹发展的需要(如要求体积小、自主性强、能对付大机动目标)以及随着高性能数字信号处理器的快速发展,导引头的小型化、数字化需求就显得尤为迫切。直接采用速率陀螺稳定视线的技术受到限制,为此,必须寻求新的稳定技术来实现视线稳定。

捷联导引头稳定与跟踪技术是一项比较新型的数字技术,属于导引头的关键技术之一,国内对该技术的应用还处于起步阶段。捷联稳定方式的基本原理为:将惯性器件固联在导引头基座上,通过坐标变换实现视线稳定。捷联稳定与跟踪技术的意义在于:

(1)对于减小导引头体积,降低研制成本,解决空间上有限制的战术导弹应用问题有现实意义;

(2)可以利用导弹自动驾驶仪惯导组合中的高精度的陀螺传感器信息,获得弹体运动角速度,通过解算来稳定视线指向,这样,同一惯性器件既可以用于视线平台的稳定,又可以为飞行控制系统提供稳定与控制需要的弹体角速率信息,不仅节省了陀螺,同时也为导引头与制导控制系统的一体化设计提供了可能性;

(3)捷联稳定控制技术也可以用于解决其他领域体积受限运动载体上平台的稳定问题,具有广阔的应用前景。

本书对捷联式导引头稳定控制与角跟踪技术进行了系统而深入的论述。重点介绍捷联式导引头视线平台的稳定控制技术及相关角跟踪系统的设计方法。对采用该技术所引起的其他问题,如捷联稳定算法的实现、用于比例导引的视线角速率提取和平台控制系统的鲁棒性设计等问题进行综合考虑,为体积受限制的导引头视线稳定与跟踪系统提供新的设计思路与方法,为工程化的导引头捷联稳定平台提供理论指导。

本书以实际工程应用为背景,立足于国防技术前沿,从导引头系统小型化需求出发,引出捷联稳定技术,全面介绍捷联导引头稳定与跟踪技术的可行性及具体实现方法,并对其数学建模与仿真、工程应用及研究进展等相关问题进行了比较系统而深入的阐述。全书分为12章。第1章为绪论,主要介绍工程应用背景与意义、国内外研究动态和发展趋势以及本书的主要内容和特色。第2~4章介绍本书的理论基础,其中:第2章介绍转动刚体运动学与动力学基本理论;第3章介绍鲁棒控制理论及其数学基础;第4章介绍目标跟踪与滤波理论。第5~9章为本书的技术应用部分,其中:第5章介绍导引头视线平台的空域稳定技术,概括目前采用的几种稳定形式,说明捷联稳定技术的应用特点;第6章根据捷联式导引头天线平台的结构特点及稳定原理,系统地建立了导引头两自由度稳定平台动力学模型,并对其耦合特性进行仿真分析;第7章对捷联稳定天线平台的稳定性进行深入研究,并给出了天线平台捷联稳定控制系统的2种具体实现方法及其仿真结果;第8章在鲁棒 H_{∞} 控制理论的基础上,根据平台数学模型,

对捷联式天线平台系统的不确定性进行分析,并进行鲁棒两自由度 H_{∞} 控制器设计及仿真;第 9 章在捷联稳定的基础上,采用卡尔曼滤波方法估计目标视线角速率,并进行角跟踪系统的总体设计。第 10~11 章介绍本书的建模仿真技术,其中:第 10 章介绍基于 MATLAB 的控制系统设计工具,包括 SIMULINK 建模与线性系统分析工具、MATLAB 控制工具箱及 MATLAB/dSPACE 集成半实物仿真系统;第 11 章介绍捷联式稳定平台数学建模与仿真方法,使用 MATLAB 与 SIMULINK 对捷联稳定平台进行建模与仿真,并给出了相应的仿真模型与仿真程序。第 12 章为技术进展与展望,介绍捷联稳定与跟踪技术的研究进展,并对发展前景做了展望。

目前,由于导引头小型化、数字化、低成本的发展需要以及高性能数字信号处理器的快速发展,捷联稳定技术越来越成为关注和研究热点之一,这也是未来导引头稳定平台的一个重要发展方向。同时,捷联寻的制导技术,包括捷联式导引头技术已经成为战术导弹发展的前沿技术,而固态共形相控阵成像技术和红外凝视焦平面阵成像技术已经成为精确制导探测技术发展中最引人注目的研究领域。随着惯性敏感技术、高分辨率捷联目标探测技术、智能化信息处理技术和高精度控制技术的成熟,捷联式导引头技术应用用于战术武器的进程将会加快,未来捷联寻的制导技术的快速发展,将会使制导武器的战术性能取得巨大进步,并使其战术运用发生巨大变化。

本书是第一作者攻读博士学位期间取得的研究成果和全体作者工作期间科研工作的总结。本书系统地介绍了捷联导引头稳定与跟踪技术及其应用前景,具有系统性和专业性强、著作内容自成体系等特点,对从事制导与伺服控制专业的科研人员和工程技术人员具有一定的参考价值,也适合于其他领域从事运动载体平台稳定问题的研究人员学习和参考。希望本书的出版能促进从事该项技术的科研人员之间的交流和探讨,并为工程技术人员提供理论指导与技术支持,从而推动该项技术的发展,加快工程应用步伐。

第一作者在攻读博士学位期间,在北京航空航天大学电子信息工程学院吕善伟教授和北京市遥感设备研究所刘新华研究员的精心指导下,开始捷联式天线平台稳定与跟踪技术的研究工作,并在北京市遥感设备研究所与其他 3 位作者合作,继续从事相关技术的科研工作。其他 3 位作者在该领域均具有一定的理论造诣和丰富的工程实践经验,使得该书理论与实践结合,内容充实。在此,特向第一作者的母校北京航空航天大学 and 导师吕善伟教授表示衷心感谢!同时,感谢北京市遥感设备研究所的领导和同事们的大力支持!

在本书撰写过程中,我们阅读和参考了大量的文献资料,在此对所有参考文献的作者和同行研究人员表示诚挚的谢意!

本书的出版得到了北京科技大学马忠贵博士的鼎力支持和鼓励,特致以最诚挚的感谢!同时,还得到了国防工业出版社王祖珮编辑的指导和帮助,一并表示衷心的感谢!

捷联式导引头技术是一个崭新的工程应用课题,还处在不断研究和发展的过程中,由于作者水平有限,书中不妥之处在所难免,恳请同行专家和广大读者批评指正。

作者

2010 年 6 月于北京

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 工程应用背景与意义	1
1.2 国内外研究动态及发展趋势	2
1.2.1 捷联式导引头与制导控制一体化技术研究状况	2
1.2.2 视线稳定平台及其控制技术研究状况	4
1.2.3 目标跟踪与视线角速率提取技术研究状况	7
1.2.4 国内外研究现状及发展趋势	8
1.3 本书的主要内容和特色	9
第 2 章 转动刚体运动学与动力学理论	11
2.1 刚体运动学	11
2.1.1 点的位置向量及其表示方法	12
2.1.2 方向余弦矩阵及其正交性	15
2.1.3 刚体的欧拉(Euler)角	18
2.1.4 哥氏(Coriolis)定理	20
2.2 四元数与刚体定位	22
2.2.1 四元数基本理论	23
2.2.2 四元数描述刚体定点转动	24
2.2.3 四元数微分方程及其数值求解	25
2.2.4 四元数与方向余弦、欧拉角的关系	29
2.3 刚体动力学	30
2.3.1 转动惯量	30
2.3.2 刚体动量矩与动量矩定理	32
2.3.3 欧拉动力学方程	33
2.4 本章小结	34
第 3 章 鲁棒控制理论	35
3.1 鲁棒控制数学基础	35
3.1.1 空间概念	35
3.1.2 矩阵的奇异值	36
3.1.3 向量和矩阵的范数	37
3.1.4 信号和系统的范数	38

3.1.5	H_{∞} 范数与 Riccati 方程	41
3.1.6	灵敏度函数和补灵敏度函数	42
3.1.7	控制系统的稳定性	44
3.1.8	李雅普诺夫方程	47
3.1.9	线性分式变换	48
3.2	鲁棒控制基本思想	51
3.3	不确定性的描述	52
3.3.1	非结构不确定性	52
3.3.2	结构不确定性	55
3.4	H_{∞} 控制理论	55
3.4.1	H_{∞} 标准控制问题	56
3.4.2	H_{∞} 标准控制包含的控制问题	57
3.4.3	不确定系统的鲁棒稳定性与鲁棒性能	63
3.5	本章小结	66
第 4 章	目标跟踪与滤波理论	67
4.1	卡尔曼滤波理论	67
4.1.1	卡尔曼滤波的基本思想	67
4.1.2	离散型卡尔曼滤波基本方程	68
4.1.3	卡尔曼滤波器运行机制	70
4.1.4	连续随机系统的离散化	73
4.2	目标机动模型	76
4.2.1	常速度模型	76
4.2.2	常加速度模型	77
4.2.3	相关噪声模型	78
4.3	常增益目标跟踪滤波器	80
4.3.1	$\alpha - \beta - \gamma$ 滤波器	80
4.3.2	$\alpha - \beta$ 滤波器	82
4.4	本章小结	83
第 5 章	导引头视线平台空域稳定技术	84
5.1	导引头概述	84
5.2	空域稳定原理	86
5.2.1	直接视线稳定	86
5.2.2	间接视线稳定	87
5.3	空域稳定方式	87
5.3.1	动力陀螺稳定	88
5.3.2	积分陀螺稳定	89
5.3.3	速率陀螺稳定	89
5.3.4	捷联稳定	91

5.4	速率陀螺稳定平台性能分析	91
5.4.1	稳定平台构成与原理	91
5.4.2	稳定回路控制系统分析	93
5.4.3	稳定平台性能评估	96
5.4.4	稳定平台系统设计原则	97
5.5	捷联稳定平台	100
5.5.1	捷联稳定平台概念	100
5.5.2	捷联稳定需要解决的问题	101
5.6	本章小结	102
第6章	捷联式天线平台系统动力学模型	103
6.1	平台系统结构与坐标系定义及变换	103
6.1.1	系统结构配置	103
6.1.2	坐标系定义与坐标变换	103
6.2	平台框架运动学关系	105
6.2.1	框架角速度	105
6.2.2	框架角加速度	106
6.3	平台框架动力学建模及其特性分析	108
6.3.1	内框动力学模型	108
6.3.2	外框动力学模型	109
6.3.3	动力学模型仿真分析	110
6.4	天线平台控制对象数学模型	112
6.5	本章小结	115
第7章	捷联式天线平台的稳定性能研究及其数字控制技术	116
7.1	捷联稳定原理	116
7.2	捷联式天线平台的稳定控制方案及稳定性能研究	118
7.2.1	天线平台的捷联稳定方案	118
7.2.2	捷联稳定性能仿真分析	120
7.3	捷联式天线平台的2种稳定实现方法	121
7.3.1	角速度补偿方法	122
7.3.2	角位置补偿方法	123
7.3.3	仿真结果与分析	126
7.4	捷联式天线平台数字稳定技术及仿真	132
7.4.1	天线捷联稳定的离散递推算法	132
7.4.2	数字仿真结果	134
7.5	本章小结	136
第8章	捷联式天线平台鲁棒两自由度 H_{∞} 控制器设计	138
8.1	具有扰动补偿的鲁棒两自由度 H_{∞} 控制器的提出	138

8.1.1	鲁棒两自由度 H_{∞} 控制器结构	138
8.1.2	鲁棒两自由度 H_{∞} 控制器性能	139
8.2	模型的不确定性分解及标准 H_{∞} 控制问题的形成	140
8.2.1	模型的不确定性分解	140
8.2.2	化为标准 H_{∞} 控制问题	141
8.2.3	广义受控对象的状态空间实现	144
8.3	捷联式天线稳定平台系统不确定性模型的建立	145
8.3.1	控制对象数学模型的不确定性分析	145
8.3.2	系统参数描述及稳定性判定	147
8.4	捷联式天线稳定平台具有扰动补偿的鲁棒两自由度 H_{∞} 控制器设计	148
8.4.1	期望性能要求	148
8.4.2	权函数的选取	148
8.4.3	设计及仿真结果	149
8.5	本章小结	154
第9章	捷联式天线平台的角跟踪系统设计	155
9.1	角跟踪系统总体设计思想	155
9.2	角跟踪系统数学建模	156
9.3	机动目标跟踪及视线角速率的估计	159
9.3.1	单通道滤波模型	159
9.3.2	仿真结果与分析	160
9.4	双通道耦合目标跟踪滤波器设计	162
9.4.1	两通道耦合滤波模型建立	162
9.4.2	滤波参数的确定	164
9.5	目标跟踪滤波与捷联稳定控制系统闭环仿真	165
9.6	本章小结	169
第10章	MATLAB 控制系统设计工具介绍	170
10.1	基于 SIMULINK 模型的图形用户接口工具	170
10.2	MATLAB 工具箱	174
10.2.1	控制系统工具箱	174
10.2.2	鲁棒控制工具箱	178
10.3	基于 MATLAB/dSPACE 的半实物仿真工具	180
10.3.1	MATLAB/dSPACE 半实物仿真思想	180
10.3.2	MATLAB/dSPACE 集成仿真系统	182
10.3.3	利用 dSPACE 进行控制系统的开发	184
10.4	本章小结	186
第11章	捷联式稳定平台 MATLAB 数学建模与仿真	187
11.1	SIMULINK 建模	187

11.1.1	稳定平台框架动力学 SIMULINK 建模	187
11.1.2	稳定平台控制系统匹配滤波模型	189
11.2	M 语言建模仿真	190
11.2.1	鲁棒控制器设计仿真	190
11.2.2	跟踪滤波器设计仿真	202
11.3	SIMULINK 与 M 语言混合建模仿真	209
11.3.1	速度与位置捷联稳定性能比较仿真	209
11.3.2	捷联稳定与跟踪滤波联合仿真	215
11.3.3	捷联稳定跟踪与制导控制一体化仿真	218
11.4	本章小结	223
第 12 章	捷联导引头技术研究进展及展望	224
12.1	概述	224
12.2	捷联稳定技术的应用	225
12.2.1	捷联稳定算法的实现	226
12.2.2	速率陀螺安装位置对捷联稳定算法的影响	230
12.3	全捷联式导引头制导技术	231
12.3.1	坐标系定义与坐标变换	232
12.3.2	捷联式干涉仪导引头系统组成	233
12.3.3	相位干涉仪导引头捷联解耦技术	234
12.3.4	天线罩引起的干涉仪测相误差及补偿措施	237
12.3.5	捷联解耦性能的误差分析	239
12.4	捷联式导引头在多模复合制导中的应用	240
12.4.1	多模复合寻的制导技术	240
12.4.2	捷联式导引头在双模复合寻的制导中的应用	242
12.5	导引头技术发展趋势	244
12.5.1	软件雷达导引头技术	244
12.5.2	智能导引头技术	245
12.6	本章小结	247
参考文献	249

第1章 绪论

1.1 工程应用背景与意义

导引头技术是精确制导战术导弹的核心技术之一,用于完成对目标的自主搜索、识别与跟踪。导引头一般位于弹体的头部,在拦截目标过程中,弹体的角运动和质心运动以及外部载荷(如风、气流等引起的扰动力矩)会通过多种方式耦合到导引头,严重影响导引头视线稳定与跟踪,为了实现可靠、高精度的目标跟踪,必须采用稳定平台来隔离弹体运动。目前,导引头视线稳定平台的结构有动力陀螺式和速率陀螺式等,其中,速率陀螺稳定平台以其较高的稳定精度和具有较大的带宽而在战术导弹中获得了广泛应用。该平台的惯性传感器位于框架轴上,利用速率陀螺“空间测速机”的性能测量视线轴在方位和俯仰方向上的惯性角速度输出,并直接反馈到力矩器控制视线反向偏转来实现视线稳定,这种稳定技术可以称为直接视线稳定技术。但这种稳定技术的缺点是伺服机构体积较大,且对惯性传感器的体积、质量和抗震动、耐高温等性能要求苛刻。对于体积受限制的战术导弹应用,平台伺服机构的体积受到严格限制,陀螺很难直接安装在伺服框架上,为此,必须寻求新的稳定方案来实现视线稳定。

基于上述需要,目前常用捷联稳定方法来解决视线稳定问题。采用捷联稳定方式,惯性测量单元位于框架基座上,与弹体捷联,提供弹体角速度信息,视线稳定必须通过复杂的数字解算才可获得,目前快速发展的高性能数字信号处理器已经能够为此提供解决方案。捷联稳定是一项比较新型的数字技术,发展捷联稳定主要用来为常规稳定结构不可行的情况提供稳定方案^[1,2]。捷联稳定的本质是将垂直于视线和对准于框架轴的那部分弹体运动测出并分离出来,然后通过解算再馈入适当的框架控制环,控制视线向扰动的反向运动,从而抵消或有效减小由弹体扰动引起的视线运动,使得视线只跟随目标运动,而不受弹体扰动的影响。

捷联稳定方式在船载、车载等武器系统中已有应用^[3,4],但是应用于弹上尚需要做进一步的研究。这主要是由于弹上导引头视线稳定系统的特殊性^[5-7],如动态响应快、环境条件恶劣和严格的体积限制,稳定指标要求较高,同时对稳定平台伺服框架的动态特性(如谐振频率、机械阻尼等)要求较宽,这就对弹上导引头捷联稳定方式提出了更高的要求。同时,与速率陀螺稳定平台相比,捷联稳定平台对传感器的测量精度具有较高的要求。传统的速率陀螺稳定平台系统中,需要了解基座运动环境信息,但只是作为一个设计参数来考虑,这些系统中,惯性传感器位于稳定平台上,因此感知的运动幅度要低于基座运动幅度两三个数量级。而在捷联稳定平台系统中,捷联惯性传感器直接测量基座运动,并且经解算后输入万向支架控制器的求和环节,用于补偿由万向支架上的相对传感器测出的基座运动扰动分量,因此,惯性传感器比例系数和万向支架传感器递增线性度对于捷联稳定技术是极为重要的。

采用捷联式稳定平台的优点是:减小了导引头体积,降低了研制成本,在限定的战术技术

条件下有较好的精度,尤其适用于空间上有限制的战术导弹应用;而且可以利用导弹自动驾驶仪惯导组合中的高精度的陀螺传感器信息,获得弹体运动角速度,通过解算来稳定视线指向。这样,同一惯性器件既可以用于视线平台的稳定,又可以为飞行控制系统提供稳定与控制需要的弹体角速率信息,不仅节省了陀螺,也为视线稳定平台与驾驶仪平台的一体化设计提供了可能。

本书对捷联式导引头稳定控制与角跟踪技术进行了系统而深入的论述。重点介绍捷联式导引头视线平台的稳定控制技术及相关角跟踪系统的设计方法。对采用该技术所引起的其他问题(如捷联稳定算法的实现、用于比例导引的视线角速率提取和平台控制系统的鲁棒性设计等)进行综合考虑,为体积受限制的导引头视线稳定与跟踪系统提供新的设计思路与方法,为工程化的导引头捷联稳定平台提供理论指导。

1.2 国内外研究动态及发展趋势

通过查阅大量国内外相关文献资料并归纳分析,可将本书中的关键技术归结为捷联式导引头与制导控制一体化技术、视线稳定平台及其控制技术、目标跟踪与视线角速率的提取技术 3 个方面,本节围绕这 3 个方面进行综述。

1.2.1 捷联式导引头与制导控制一体化技术研究状况

捷联导引头和继而出现的捷联寻的制导技术,自 20 世纪 60 年代末起,一直是美国防御工业界和军方关注和致力开发研究的领域。早在 1969 年,美国陆军导弹司令部就与佐治亚技术学院签订了合同(DAAH01-69-C-1390),进行捷联导引头产生比例制导信号的技术研究^[8],所研究的探测器包括光学-电视、红外和雷达,在当时的技术水平下,只有相控阵雷达导引头适于采用捷联方式,用比例导引拦截高速目标。同时,针对空中拦截导弹研究了几种不同的控制系统结构,发现采用捷联导引头实现比例导引需要对导引头进行补偿,具体方法有 2 种:增加导引头固有角频率(要比弹体固有频率高得多,高于 300rad/s);或者将弹体姿态信息反馈到导引头角跟踪回路,有效减小导弹机动对导引头指向的影响。早期的这些工作主要是探索捷联导引头用于空-地战术武器的可能性。

捷联寻的制导技术的发展始于 20 世纪 70 年代初期,随着惯性器件的发展和微处理机技术的进步,人们对捷联导引头的研究兴趣日益高涨。从 20 世纪 70 年代末期到 80 年代后期,美国各家公司和海、陆、空军实验室研究人员陆续发表了许多报告和文章^[9-15],其中多数是来自美国空军装备实验室的报告,主要研究在空-空导弹上使用捷联导引头的可行性。初期,由于将捷联导引头技术用于空-地导弹需要高精度的导引头元器件,要想获得与框架式导引头相同的精度,捷联式导引头的费用更高。但是随着微处理器技术的进步,1977 年已经有价格低廉、速度和存储能力足够的计算机可以用于战术武器。在这种条件下,罗克韦尔国际公司提出了抖动自适应方法^[9],该方法用于测量导引头在一个特定工作点的传递函数,其原理是在方位轴和俯仰轴方向按正弦曲线抖动弹体,并比较导引头和陀螺输出中的抖动分量,然后调整导引头的输出去补偿任意偏差。对该方法进行的评估研究结果表明,应用这种参数识别方法,捷联式导引头用于空-地战术导弹是可行的。他们还对 2 种典型的武器系统进行了六自由度数字仿真,采用抖动自适应方法获得了与框架式导引头近似的性能,这项计划于 1978 年 4 月完成。

抖动自适应方法的提出为捷联导引头的实际应用提供了可行的解决办法。1979年罗克韦尔国际公司与美国空军签订合同(F08635-79-C-0187),致力于将抖动自适应方法推广应用于空-空导弹^[10]。结果进一步证实了采用抖动自适应方法后,捷联式导引头应用于空-空和空-地导弹的可行性;同时指出,对于空-地导弹,被动雷达导引头、干涉仪、半主动激光导引头和成像红外导引头均可采用捷联方式;而对空-空导弹,具有共形天线的主动雷达导引头是最适于采用捷联方式的。仿真结果表明,在对付低机动目标(小于 $4g$)时,这种系统的性能可以与框架式导引头相媲美,对探测器和惯性传感器的精度要求适中,需要数字系统实现,而且能直接输出用于比例导引的惯性视线角速率,对自动驾驶仪设计不必作太大修改;但在对付高机动目标($9g$)时性能不好,从未来战争的要求来说,此方法是不可取的,因此未来的研究重点是大机动拦截时导弹的性能问题、传感器的限制及被动导引头,且从长远来看,预测现代控制和估计理论可能会产生更灵活的解决办法。

捷联式导引头具有很大的潜在优势,这主要是由于它可以直接固联于弹体上。这些与弹体固联的导引头,与常规的惯性稳定导引头相比,消除了跟踪速度限制和结构限制,同时减少了机械部分制造的复杂性。机械运动部分的取消又会消除俯仰与偏航跟踪通道的摩擦耦合,防止由于导弹加速度而引起的精度下降,同时增加了系统可靠性,节省了机械制造费用。但是捷联式导引头对整个制导系统也带来一定的缺陷。这种导引头的光学和电子系统会引入大的测量误差,在采用捷联式导引头进行测量时,传统的制导技术是不可行的,原因有2个方面:首先,捷联式导引头带来的误差比常规万向支架导引头更大,传统的滤波技术已不能满足要求;其次,传统的制导要求惯性参考系的测量信号,而捷联式导引头仅提供弹体系的测量信号。为了解决捷联导引头的上述问题,加之抖动自适应方法不适用于高机动拦截环境,美国空军装备实验室自1980年开始将最优控制和估计理论用于捷联寻的制导系统^[11-15],研究采用倾斜转弯短程空-空导弹模型,目标作 $9g$ 的逃避机动,导出了一个制导与估值算法。结果显示该算法在执行短程高机动拦截任务时具有很好的性能,但是不适用于远程任务,建议考虑更为适用的对偶控制理论,且要全面考虑捷联式导引头的测量噪声。

现代控制理论的应用结合捷联寻的系统的整体结构特点,发展了捷联寻的制导系统一体化设计思想。一体化是采用捷联导引头产生的新概念,传统系统中的导引回路在捷联系统中不再独立存在,而与飞行控制融合为一体,但实际上依然存在着一个以驾驶仪作为内回路的通过弹体反馈的导引回路。为实现最佳跟踪与导引,制导与控制系统必须一体化设计,不仅软件系统难以分开,硬件系统也将共同以计算机平台为依托,使结构得到最大程度的简化。1983年,美国Singer公司Kearfott分部提出了一种采用全捷联仪表的一体化系统设计方案^[16],如图1-1所示。

经过多年研究,人们发现这个方案对各种导弹——从低机动能力的空-地导弹到高机动能力的空-空导弹——都能得到好的性能。选用条件苛刻的拦截任务,即倾斜转弯导弹拦截机动目标,这是富有挑战性的设计,代表了未来制导武器的作战能力。获得惯性视线角后,关键是构造2个导航滤波器,这些滤波器能对输入视线角进行最佳处理,通过应用广义卡尔曼滤波器和制导律,形成2个正交的加速度指令。该设计方法灵活简单,但如何估计出更精确的视线角速率,以及减小比例因子不确定性和量化误差仍需要认真考虑^[17]。

相关文献介绍的捷联导引头的研究,主要从寻的制导回路总体设计出发,将导引头作为一个整体,来研究捷联式导引头如何实现导引律及其对末制导性能的影响,而且通常采用简化的导引头模型,关于导引头稳定与跟踪系统完整的分析较少。

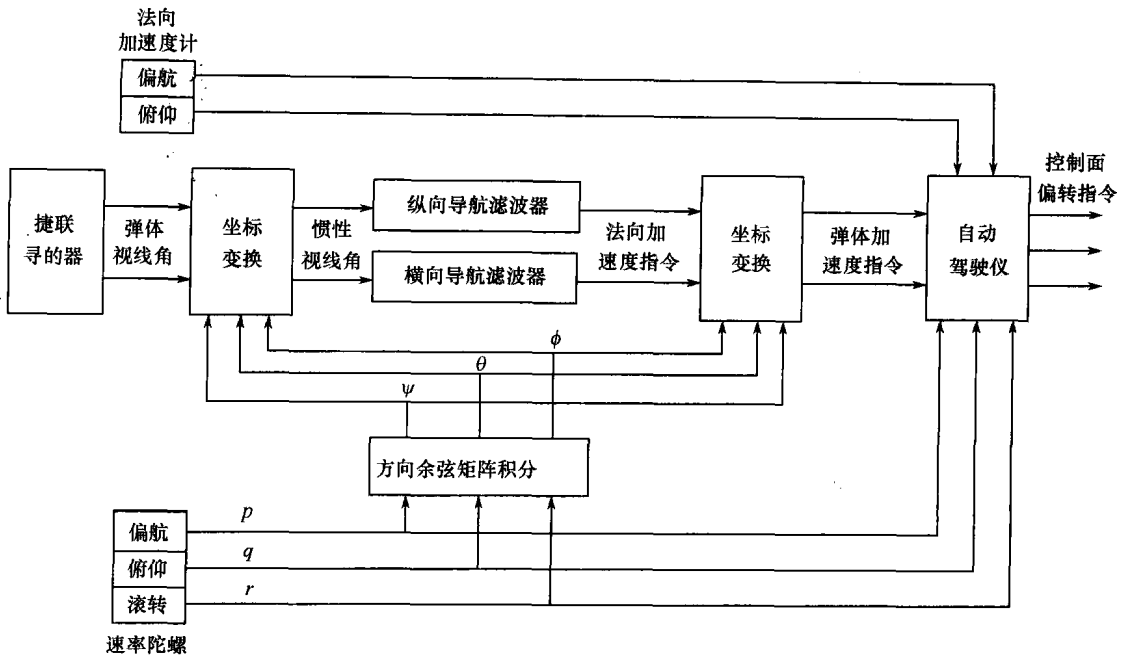


图 1-1 制导和控制系统一体化设计方案

1.2.2 视线稳定平台及其控制技术研究状况

视线稳定平台是导引头系统的一个机电子系统,用来隔离运行环境和目标探测系统,使得平台在环境中运行时能以给定方向瞄准探测器,并且在跟踪目标相对运动(这种相对运动可能是由目标运动引起的,也可能是由基座运动引起的,还可能是二者共同引起的)过程中,控制探测器的方向,保证对来自人工或自动跟踪器的输入命令可靠响应,同时为外部系统提供视线角或视线角速率的测量值,用于武器瞄准等目的。稳定控制系统主要用于精确目标跟踪、发射控制等军事应用,必须以较高的精度保持探测传感器的视线方向。然而对于战术导弹应用来说,由于恶劣的线性和旋转动态环境,要达到较高的稳定精度,将对平台控制技术提出更高的要求。

整体稳定、镜面稳定和动量盘稳定是稳定平台常见的 3 种稳定结构^[18]。整体稳定的方法通常又可分为两轴陀螺稳定平台、三轴陀螺稳定平台和四轴陀螺稳定平台,其中两轴陀螺稳定平台又分为两轴二环和两轴四环 2 类。由于两轴稳定平台固有的原理误差,它不可能完全隔离载体的扰动力矩,导致瞄准线围绕视轴旋转,要完全隔离载体扰动需要采用三轴陀螺稳定平台或两轴四环的稳定平台,这 2 种方法在原理上可以完全隔离载体的扰动,但结构比较复杂。两轴、三轴稳定技术在各国的机载侦察设备中得到了广泛的运用;三轴陀螺稳定平台在空-地导弹中得到了广泛的应用,如美国的“幼畜”AGM 65A 导弹^[19]。选择哪一种稳定结构是由许多因素决定的,其中包括传感器类型、期望运行环境、封装尺寸/质量/外形限制、期望性能水平和其他一些指标,不同的机电结构获得的期望性能水平也具有很明显的差异。一般,动量盘稳定和镜面稳定主要用于小口径的光学传感器系统,而雷达型导引头较多采用整体稳定方案。

速率陀螺稳定平台系统的性能和主要的机电设计参数之间具有密切的关系,在选择机电设计方案时,稳定性或惯性速度环性能是一个主要考虑的因素。要获得较小的稳定误差,必须

要求有高带宽的惯性速度环、适宜的万向支架摩擦转矩与惯性矩比、最佳的万向支架平衡、精确的陀螺定位和最小的电子噪声。20世纪80年代末期的研究表明,在较好的空间卫星环境下,稳定系统至少可以保持1mrad视线稳定度;舰载基座具有10mrad稳定度;借助于振动隔离系统,在恶劣的直升机环境中至少可达到5mrad稳定度。同时指出,除了几种基本机电结构外,还有许多种技术(如振动隔离、图像运动补偿(IMC)和前馈技术)可被用作稳定设计的补充方法,在必须改善一个设计的性能,或用体积更小、质量更轻、费用更低的设计来获得特定性能的情况下,可以考虑采用这些方案。然而,当时尚在发展中的信号处理技术通常只能作为机电系统的一种补偿方法,而不能代替机电系统^[20]。

随着现代战术导弹体积小、自主性强、能对付大机动目标的发展需要以及高性能数字信号处理器的快速发展,数字稳定平台的研究越来越成为研究热点之一,这也是未来导引头稳定平台的一个重要发展方向。1978年许云剑等的《数字天线定位系统与方法》^[21]详细介绍了一种跟踪雷达天线定位用的数字系统及其具体算法,公开了一种用于火控系统产生视线角速率信号的方法与系统,并进行了计算机模拟。其中主要阐述了卡塞格伦雷达天线定位用的数学方法与系统,该专利已在一个雷达系统中付诸实践,全部采用了数字技术,特别适用于机载雷达系统的环境。模拟实验表明,该系统的跟踪性能与采用速率陀螺的系统相近,而在极端不利的条件下(例如当飞机横滚速率很大时),则胜过一般的速率陀螺系统。它在跟踪回路中去掉了速率陀螺,节省了相当大的质量和体积,而且消除了速率陀螺产生的大跟踪滞后。该专利文章指出,这种方法与数字系统同样适用于采用其他形式天线的雷达系统。该专利表明国外在数字稳定平台方面的研究已取得了一定的应用成果,对后来的机载雷达空域稳定和导引头稳定平台的数字实现具有很高的参考价值。我国许多文献中都采用了类似的算法^[22-25],但是算法采用姿态角补偿法,视线角速率的求取是采用微分实现的,当测量噪声较大时显然是不可取的。如何减小传感器噪声对导引头测量精度的影响是一个值得研究的问题,同时,国内文献中并未提出捷联稳定概念。

1993年美国海军空战中心在一篇政府报告中明确提出捷联稳定(也称前馈稳定)概念^[1],目的是对捷联稳定用于空间受限的高分辨率成像导引头的可行性进行初步论证。报告给出了红外成像导引头的基线捷联稳定平台模型,并分别采用石英晶体速率陀螺(速度环带宽46Hz)和光纤陀螺(速度环带宽150Hz)作为惯性测量传感器对平台稳定性进行了预测,同时分析了平台稳定性对目标信号强度的影响。结果显示,采用光纤陀螺的平台稳定度大大高于石英晶体速率陀螺,但是利用对低带宽石英晶体速率陀螺进行匹配的技术,能够将弹体扰动耦合减小到可接受的水平,进而不必采用价格昂贵的高性能光纤陀螺,仍能达到要求的稳定性。参考文献[1]中给出的传统速率陀螺稳定平台与捷联稳定平台原理对比如图1-2和图1-3所示,从中可以看出:传统的速率陀螺稳定平台通过平台上固定的速率陀螺直接反馈平台惯性角速度来实现稳定;而捷联稳定平台需要通过捷联的惯性速率传感器与框架角位置传感器信息的合成来实现稳定,是一种数字平台。平台惯性角速率的估计是决定系统稳定性能的关键因素。文献还指出,要进一步研究捷联稳定的可行性,需要从3个轴输入弹体运动,进行三自由度万向支架仿真。

为了支持各个领域前馈稳定理论的研究和前馈稳定系统的测试,Texas Instruments(TI)公司的控制系统技术中心研制了一种前馈稳定测试台^[2]。由于测试台控制算法比较复杂,因此控制器采用了双CPU板,控制算法是通过2台位于CPU主板上的40MHz TMS320C40浮点数字信号处理器来完成的,一台用于输入输出,另一台专门用于计算。文献指出,其中的控制

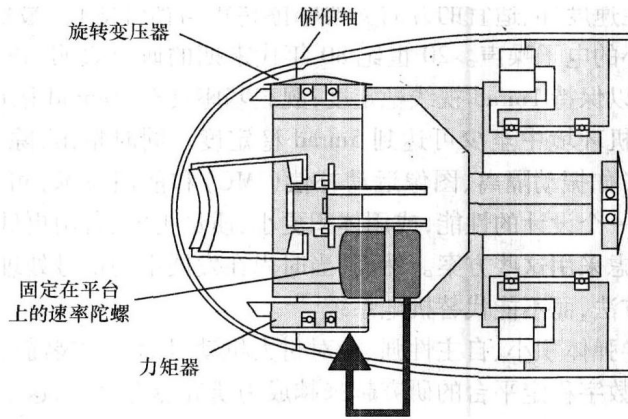


图 1-2 传统的速率陀螺稳定平台原理

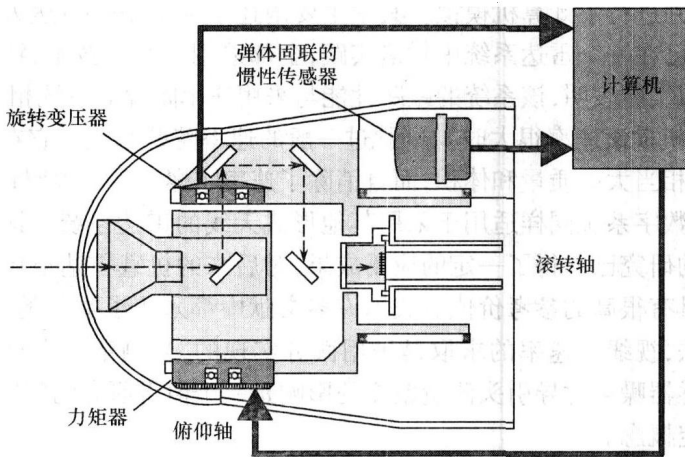


图 1-3 捷联稳定平台原理

算法是前馈稳定技术的核心。该测试台提供了一种强大的算法推导和执行环境,具有计算容量大、速度快和灵活性强等优点,可使新的思路和研究迅速得到验证,所需时间远远少于在仿真环境中进行同样的测试所花费的时间,同时该设备还提供了一种用实际硬件演示前馈概念的方法。该项研究成果为捷联稳定技术的工程应用指明了方向,具有较大的启示作用,但是并没有给出具体的算法实现。文献指出,要研究捷联稳定算法,需要理解向量分析和万向支架动力学关系^[26-29],并需要对捷联姿态算法进行深入研究^[30-33]。

近年来,为了进一步提高光电成像稳定平台的稳定精度,业内又提出了二级稳定的概念^[34,35]。它是镜面稳定和平台稳定的组合,一级稳定采用平台稳定方式实现粗调,在此基础上通过图像补偿技术稳定反射镜来实现精调,可以达到微弧度级的稳定精度。这种稳定反射镜的技术在国外的高精度侦察系统和激光通信系统中得到了广泛的应用:如 F16 的红外夜视导航系统、全球鹰无人侦察机的红外光电跟瞄平台^[36];根据文献报道,以色列已经可以做到 $15\mu\text{rad}$ 的稳定精度^[19]。我国西安应用光学研究所的纪明等人在这方面进行了深入研究并取得了一定的成果^[37-41]。

为了精确控制探测系统的视轴,使其在隔离弹体扰动的同时准确跟踪目标运动,人们采用了多种稳定平台方案和多种控制方法^[42-48],其中涉及多种探测器类型的稳定平台,如雷达、光

学等;以及多种应用武器,如弹载、舰载、车载、机载等^[49-56]。

弹载导引头视线平台多数采用两轴陀螺稳定平台,稳定系统中主要误差来源为力矩误差和传感器测量误差,其中摩擦力矩的抖动是影响平台精度的重要因素,这集中体现在低速平稳性的问题上^[57,58]。将摩擦力矩看做常值处理是不够的,需要建立合适的摩擦力模型^[59,60],并在高精度的系统中引入速度状态观测器、鲁棒自适应技术或多层前馈神经网络等控制技术来实现摩擦力矩的动态补偿和扰动力矩的抑制^[61-66]。

然而在一些宽频带、高精度的稳定和跟踪系统中,当采用经典的设计方法达到设计指标比较困难时,必须考虑引入现代控制方法^[67-69]。现代控制技术对参数扰动的鲁棒性使得它比较适用于陀螺稳定平台伺服系统的设计,其典型代表有滑模变结构控制技术、 H_{∞} 鲁棒控制技术、模糊控制技术和线性二次最优控制技术等^[70-76]。其中, H_{∞} 鲁棒控制方法自从1981年由G. Zames提出以来,得到了广泛的关注和研究^[77,78],它能够很好地解决性能要求和鲁棒稳定性要求这二者之间在伺服系统设计中的综合平衡问题,同时它对参数摄动和外部扰动不敏感,近年来在交直流伺服系统中得到了广泛的应用^[79-90]。导引头伺服系统的设计目标就是在保证鲁棒稳定性的前提下满足所要求的性能指标,因此,如何将 H_{∞} 优化方法应用到导引头稳定平台伺服系统设计中,是一个非常具有实际意义的工程应用课题。

1.2.3 目标跟踪与视线角速率提取技术研究状况

导引头是寻的制导控制回路的测量敏感部件,目标跟踪是其最主要的功能之一。对于采用比例导引的战术导弹而言,如何精确估计视线角速率是导引头系统面临的一个重要问题^[91-93]。

对于全捷联式导引头,探测器结构与弹体完全固联,只能提供弹体坐标系内对目标位置即视线角的测量。理论上可以通过下面2种方法^[8,94]来获得惯性视线角速率:

(1)将弹体姿态信息反馈到导引头输出端的去耦方法,即将弹体姿态角或角速率的信息同导引头的输出信息相结合,具体可以通过弹体姿态角和捷联导引头输出视线角相加后微分,或者将捷联导引头输出视线角微分后与弹体角速率信号相加来得到惯性视线角速率;

(2)将弹体姿态信息反馈到导引头角跟踪回路的去耦方法,即将弹体姿态角或其角速率信息反馈到导引头的角跟踪系统来稳定导引头视轴,从而实现弹体姿态扰动的去耦,得到相对于惯性空间的视线角速率。

对于线性2阶导引头来说,上述2种视线角速率提取方案均可以实现比例导引,20世纪70年代末期提出的“附加速率补偿”和“波束操纵”2种惯性视线角速率测量方法^[10](如图1-4所示)大体就是基于上述2种方案。然而,将弹体姿态信息反馈到导引头输出端的去耦方法对于防空寻的导弹的典型参数而言,制导回路是不稳定的,若要使制导回路稳定,必须将导引头角跟踪系统的带宽增加到足够大,这样便意味着导引头的跟踪带宽会远大于跟踪预计的机动目标需要的带宽,从而使系统对噪声更敏感而降低信噪比。将弹体姿态信息反馈到导引头角跟踪回路的去耦方法方案对于防空寻的导弹的典型参数而言,制导回路是稳定的,可以考虑实际应用^[8,95],但其中仍然采用了微分网络。

传统的速率陀螺稳定平台可以直接提取用于比例导引的视线角速率,而采用捷联稳定平台后,失去了直接测定视线角速率的能力,视线角速率需要通过数字计算的方法来提取。理论上,为实现各种制导与控制算法需要的惯性视线角速率,可使用对弹体坐标系内视线角取导数并变换到惯性坐标系内的方法得到,或者通过对惯性坐标系内视线角直接微分得到,但由于实