

高超声速飞行器跟踪技术综述^①

王 博¹, 贺正洪¹, 张 晶², 赵 敏¹

¹(空军工程大学 防空反导学院, 西安 710051)

²(空军工程大学 理学院, 西安 710051)

摘 要: 近年来, 临近空间高超声速飞行器受到了世界各军事强国的广泛关注, 发展迅速. 本文也正是在此背景下, 针对临近空间高超声速飞行器, 在介绍机动目标跟踪基本原理的基础上, 归纳并总结近年来机动目标跟踪算法的研究情况, 从建立合理的机动目标模型和改进滤波算法两个方面提出改进思路, 为临近空间高超声速目标跟踪系统的设计与开发提供理论上的探索与支持.

关键词: 临近空间; 高超声速飞行器; 目标跟踪

Survey on the Technology of Hypersonic Vehicle Tracking

WANG Bo¹, HE Zheng-Hong¹, ZHANG Jing², ZHAO Min¹

¹(Air Defense and Anti Missile Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

²(College of Science, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: In recent years, the near space hypersonic vehicle is widely concerned by the military in the world. The near space hypersonic vehicle develops quickly. Based on this background, this paper chooses near space hypersonic vehicle as the research object, on the basic principle of maneuvering target tracking based, summarizing the improvement direction of the algorithm of maneuvering target tracking in recent years. Starting from the maneuvering target model and adaptive filtering algorithm, improved algorithm is proposed for the idea, design and development of near space hypersonic velocity of target tracking system to provide support on theory exploration.

Key words: near space hypersonic vehicle; target tracking

目标跟踪是指根据传感器已获得的目标量测数据, 对目标状态进行精确估计的过程. 从 1937 年人类发明第一部跟踪雷达 SCR-28 至今, 许多科学家都投身于目标跟踪尤其是机动目标跟踪领域的研究工作, 使得各种类型的目标跟踪系统相继得到发展并日趋完善, 在弹道导弹防御等军事领域和交通管制(ATC)等民用领域都发挥着日益重要的作用^[1,2].

现有的关于机动目标跟踪方法的研究主要是以高速高机动目标为研究对象, 采用经典的跟踪模型及其改进形式, 通过 IMM 算法实现模型的并行滤波和滤波结果的加权融合, 从而实现在跟踪精度和算法实时性上的改进. 相较于传统的飞机、导弹等目标, 临近空间飞行器具有巡航空域高、飞行速度快、机动性能强和雷达、红外特性微弱的特点. 针对这种新的目标, 现有

防空武器作战高度上存在的真空、较小的拦截窗口以及拦截弹机动性能和末制导探测稳定性的不足使得无法有效地应对这种目标的威胁^[3]. 目前, 国外在加紧开发和验证高超声速飞行器相关技术的同时可能也在同步开发对高超声速飞行器的探测、跟踪、拦截技术. 当前, 受关注较多的主要是一些对于高超声速飞行器试验情况的介绍, 而对相应的跟踪算法的研究综述却比较少^[4].

作为实现全球打击计划的战略制衡武器, 高超声速目标非线性、高动态的运动特性也给机动目标跟踪问题的研究提出了新的挑战. 为应对这一挑战, 需要结合对高超声速飞行器目标特性、运动模型和作战模式等方面的研究, 改进和提高现有的机动目标跟踪算法, 从而为进一步的拦截防御奠定基础.

① 收稿时间:2015-03-04;收到修改稿时间:2015-04-26

1 临近空间及高超声速飞行器

临近空间具体的界限目前尚无统一的划分,我国倾向于将其定义为距地面 20km~100km 的空域,低界为国际民航组织控制区域的上界,高界依照国际航空联合会的定义,包括了大气平流层、大气中间层、和小部分增温层。

临近空间飞行器是在临近空间中飞行并完成攻击、侦查、通信、预警和导航等特定任务的飞行器^[5]。按照飞行的速度可以分为高速和低速两大类。高超声速飞行器是指以吸气式发动机或其组合发动机为主要动力的在临近空间中以大于 5Ma 速度飞行的空天飞机、高超声速轰炸机、高超声速巡航导弹以及高超声速再入滑翔导弹,具有广阔的作战空间,超

高的飞行速度,较强的突防能力,良好的杀伤效果等优势^[6]。

2 机动目标跟踪理论的关键技术

目标跟踪是指依据目标量测数据,利用各种观测和计算手段实现对目标状态建模、估计和跟踪的过程^[7-9]。当运动目标发生机动时,如果原先的模型无法准确描述目标的机动的运动特性,就会导致跟踪滤波器的发散、跟踪性能的严重下降。因而,如何解决滤波过程中目标模型参数的不确定性,从而实现对机动目标的连续稳定跟踪是多年来人们一直关注的问题^[1,4]。下面以单目标跟踪为例介绍具有机动检测的跟踪算法的基本原理^[9]。

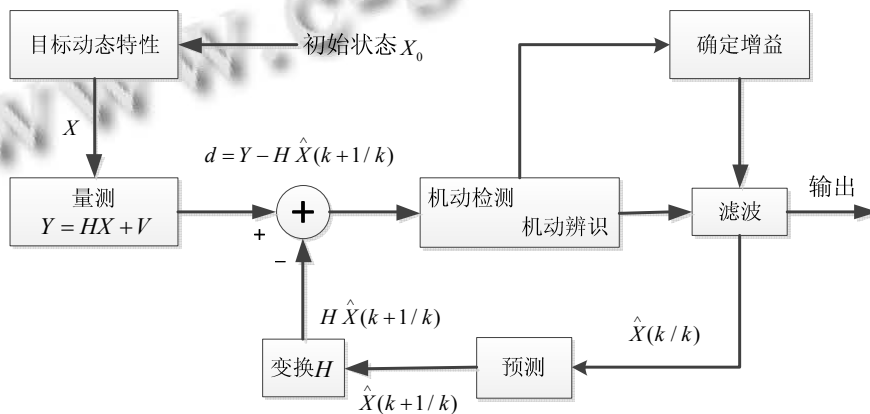


图 1 单机动目标跟踪基本原理框图

由上图可知,状态最优估计算法、目标的跟踪模型以及系统的结构设计是目标跟踪系统中三个最为重要的部分,下面分别从这三个方面阐述机动目标跟踪的关键技术:

2.1 状态最优估计算法

作为目标跟踪研究的基础和数学工具,一种好的状态最优估计算法能够为目标跟踪算法的有效实现提供必要的条件^[10,11]。

针对线性系统,从最早高斯提出的无需信号先验统计知识的最小二乘法开始,到之后的维纳滤波,再到卡尔曼(Kalman)为解决维纳滤波在应用上的缺陷而提出的卡尔曼滤波,以及人们为改善卡尔曼滤波的数值稳定性而提出的一系列数值鲁棒滤波算法,人们一直在不断丰富和完善线性系统的最优估计算法。

实际中,总是需要线性化非线性的实际系统。卡尔曼最所提出的滤波理论是在线性高斯情况下利用最

小均方误差准则获得目标状态估计的,只适用于符合高斯分布的系统中,因而其后的学者又进行了多方面的改进,包括扩展卡尔曼滤波(EKF),无迹卡尔曼滤波(UKF),中心分布卡尔曼滤波(CDKF),平方根无迹卡尔曼滤波(SRUKF),平方根中心分布卡尔曼滤波(SRCDKF)和容积卡尔曼滤波(CKF)等。此外,粒子滤波基于蒙特卡罗方法,利用粒子集表示概率的方式不受线性化误差的限制,应用范围广,是近年来研究的热点。

2.2 目标的运动建模理论

目标跟踪的精度主要取决于运动状态模型的正确性,传统的基于空气动力学目标和弹道目标的运动状态模型大概可以分为以下四类^[12]:

1)白噪声模型。将控制输入建模为白噪声,包括了匀速(CV)模型、匀加速(CA)模型和多项式模型等。该模型最为简单常用,在目标无机动时有较好的跟踪

效果. 但实际中, 当目标的运动特性复杂时, 这匀速和匀加速模型很难准确描述目标的运动特性.

2) Morkov 过程模型. 控制输入建模为 Morkov 过程, 这包括 Singer 模型及其变形, 以及“当前”统计模型等其他模型. Singer 模型有着较 CV 和 CA 模型更大的目标机动模式覆盖范围, 但这种先验模型不能有效地描述目标的随机机动. 当前统计模型本质上是非零均值时间相关模型, 较 singer 模型而言更符合目标机动的实际. 但目标匀速运动时, 存在固有的缺陷. 同时, 加速度变化范围只能在当前值邻域内变化的假设也不适用于高超声速飞行器超然冲压发动机点火时飞行速度的阶跃实际.

3) 半 Morkov 跳跃过程模型. 将控制输入建模为半 Morkov 跳跃过程. 针对 Singer 模型中加速度零均值假设的不合理性, Moose 等人提出了一种相关高斯噪声模型, 该模型具有随机开关均值, 将目标机动看作半马尔可夫过程的有限指令序列 $u(t)$, 该指令由马尔可夫转移概率确定. 为了保证收敛性, 这种方法需要预先计算的平均值, 在实际中会严重影响算法的实时性^[13].

4) 其他典型模型. 如匀速圆周、比例导引运动模型等. 一般情况下, 导引运动模型具有更高的匹配目标运动特性的能力. 例如对于弹道导弹而言, 采用依据弹道收敛原理的导引运动模型, 会使滤波过程更加逼近实际, 收敛效果更好. 但是导引运动模型的设计对于高超声速飞行器而言存在一定的难度.

2.3 目标跟踪系统结构理论

随着航空航天技术的发展, 飞行器机动性能大幅提高: F-22 能在 60° 迎角下以 $30^\circ/s$ 的速率滚转, 从而迅速改变机头指向^[7]; 高超声速巡航导弹下滑弹头横向机动后还可以飞行 $3000\sim 5000\text{km}$ 的距离^[14]. 目标非线性、高动态的运动规律使采用单一模型的自适应滤波方法无法取得较为理想的效果. 因而, 人们转向了多模型系统结构的研究.

多模型系统结构采用给定模型集作为目标在运动有效的候选集, 然后并行地运行每一组基本滤波器, 每一个基本滤波器唯一地对应模型集中的某一个模型, 最后再根据某种最优规则融合各滤波的估计值, 从而得到具有全局最优性的总估计值^[15]. 对于机动目标这种在多模型系统结构的几种运动模式间来回切换的情况, 当前的研究主要集中在交互式多模型算法(IMM)

上^[4].

多模型目标跟踪理论要解决的主要问题是怎样用最少的模型真实地反映目标的运动状态^[16]. 固定结构的多模型算法中, 需要通过增加模型的数量来覆盖目标所有可能的机动, 但是太多的模型数又会产生模型竞争, 降低估计器的性能. 因而, 变结构多模型算法根据实际需要模型集中的模型进行选择加权融合的方式就具有了一定的优势^[17].

3 高超声速跟踪的研究现状和改进思路

由于高超声速飞行器的强机动性, 我国乃至整个世界对这类目标跟踪问题的研究都还处于技术攻关的起步阶段, 就算是有的国家已经掌握了成熟的高超声速飞行器跟踪算法也不会公开发布. 因此, 我们可以参考的文献中针对这类飞行器跟踪算法的研究少之又少. 而现有的针对高速高机动目标的跟踪算法大多是针对某个典型运动阶段如再入段所做的算法上的改进研究. 以下从目标特性、跟踪模型何非线性滤波技术三个方面阐述高超声速飞行器跟踪问题的研究现状:

3.1 目标特性的研究现状

1) 运动参数的研究现状

目前, 关于高超声速飞行器的报道主要是对其研究试验情况的报道. 由于无法获得高超声速飞行器动力学试验数据, 目前也还没有系统的研究高超声速目标运动特性的文献. 目前, 对于以 X-51A 为代表的高超声速巡航导弹, 以 X-37B 为代表的空天飞机, 和以 HTV-2 为代表的再入飞行器等几种主要的高超声速飞行器的运动过程已经有一个大致的描述, 但具体的运动参数并不掌握. 因此, 目前对高超声速飞行器的运动建模主要是在参考传统建模方法的基础上, 结合高超声速飞行器的气动特性, 选取各个阶段的典型目标的运动模型进行的拼接. 文献[18]中对空天高速飞行器目标的运动特性及建模难点进行了初步分析, 采用分阶段建模的思想以 X-37B 为例给出了模型仿真结果. 在分析各阶段的运动特性的过程中, 受载飞行段是以运载飞行器的运动特征代替高超声速飞行器的运动特征, 动力飞行段的动力学分析也是在受载飞行阶段对运载器的动力学分析的基础上建立的, 在轨飞行阶段的运动学模型的建立也一定程度上参考了卫星等在轨飞行器的运动规律.

2) 周期跳跃巡航特性的研究现状

高超声速飞行器再入临近空间后一般采用跳跃巡航方式,具有飞行阻力小、热管理要求低的优点,能有效躲避现有雷达的跟踪,有着广阔的应用前景.这种轨道具有的周期性特征也给跟踪提供了重要的线索和依据,图2为飞行器跳跃巡航轨道分阶段示意图.

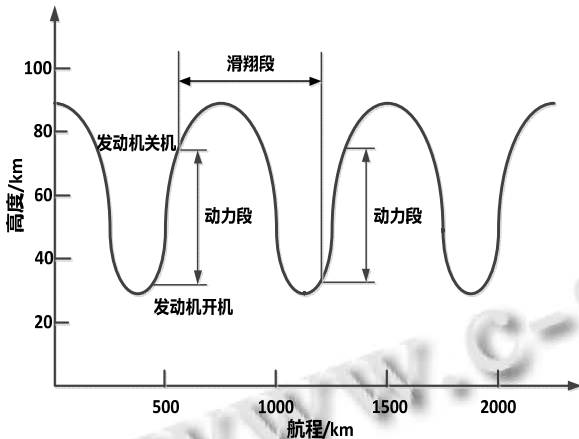


图2 跳跃巡航轨道分阶段示意图

文献[19]对比了针对某一高超声速飞行模型最省燃料的稳态巡航和周期巡航,得出了周期巡航比稳态巡航耗能低的结论.在此基础上,针对不同的飞行器模型,文献[20-21]确定了有约束最省燃料周期巡航的条件.文献[22]根据不同的已知条件,分别利用Newton-Raphson迭代法和遗传算法确定了高超声速飞行器在一般情况下周期巡航的条件,并用胞映射方法分析了初始条件的吸引域.但是对于这一重要的巡航阶段目前的研究仍然存在不足:文献[23]中利用轨道周期性的特点,将目标加速度建模为具有正弦波自相关的零均值随机过程,并据此提出了一种针对临近空间高超声速滑跃式机动目标的跟踪模型.但实际中跳跃巡航轨迹的波峰高度是在不断降低的,并不完全符合正弦规律.在没有实测数据的情况下,文献[1]中根据外弹道学原理,采用三自由度模型描述高超声速飞行器的运动,但获得的发射坐标系下的高超声速飞行器的运动曲线只是反映出了巡航高度不断下降的特点.目前,对于跳跃巡航的巡航高度范围,巡航周期,以及有动力周期巡航其超然冲压发动机点火的具体位置和攻角限制的研究还都存在不足.

3.2 跟踪模型的研究现状

对于高速高机动目标,单一、固定的模型显然不能准确描述其运动状态,当前的研究重点主要集中在

交互式多模型算法的研究上^[7].针对高超声速运动目标,文献[24]在分析高超声速飞行器特性的基础上建立了运动模型,使用交互多模型算法进行跟踪,通过100次蒙特卡洛实验,仿真验证了IMM算法应用于高超声速目标跟踪的可行性,但是仍然存在以下的不足:

1) 算法收敛速度的研究现状

文献[23]中选取了匀加速模型(CA)、匀速模型(CV)和Singer模型,通过IMM算法完成模型间的相互作用,但由于迭代过程较多,收敛速度较慢,不能满足跟踪高超声速飞行器的实时性要求.此外,运行过程变量更新不及时也会带来种种跟踪误差.文献[25]提出了一种IMM-EV算法,将IMM算法与EV相结合以设定合适的设计参数值.文献[26]也提出了相似的算法,进一步验证了IMM-EV在降低系统复杂性的同时提高了系统性能.文献[17]中所提出的引入参考加速度的交互式多模型跟踪算法只考虑了水平方向的二维运动目标的机动跟踪,忽视了高超声速飞行器的三维机动特性,且算法的收敛速度还是不够快,因而有待改进.文献[27]在文献[28]的基础上,进一步优化基本参数,仿真比较了Singer-IMM算法、CS-IMM算法的优缺点,提出了ADE-IMM算法.改进的算法在跟踪精度上具有明显优势,但实时性及跟踪误差上仍有不足.文献[29]中针对目标跟踪中状态方程和量测方程存在的非线性问题,提出了一种基于不敏卡尔曼滤波的改进“当前”统计模型自适应滤波算法(ADE-UKF),但这种算法收敛速度还有待提高,仅适用于在高超声速飞行器微机动条件下进行跟踪,在目标处于跳跃飞行等机动模式时不适用.文献[30]中提出了一种改进的交互式多模型滤波算法(IMMK-UKF-PF),利用不同的模型匹配不同类型的滤波器,充分发挥了不同滤波算法的优点.仿真结果表明,该算法大大提高了计算效率,减少了跟踪定位所用时间.但是基于粒子滤波的算法计算时间仍然较长,不能满足高超声速目标跟踪的实时性要求.

2) 跟踪精度的研究现状

文献[31]中提出融合IMM算法和单一Singer模型算法优点的IMM-Singer模型的机动目标跟踪算法.改进算法在目标跟踪精度、收敛速度等方面的性能都有明显的优势,但是仍然不能满足高超声速目标跟踪的精度要求.文献[32]中提出的基于序列似然比的变结构交互多模型算法是一种解决机动目标跟踪问题的有

效方法, 变结构的优势在于它能用更好的模型来代替更多的模型. 但是如何设计模型集和模型的转移概率从而保证较高的跟踪精度仍有待进一步的研究.

3) 模型假设适用于高超声速目标的研究现状

文献[33]中应用 IMM 算法时, 根据战术导弹这种特殊的应用对象, 以比例导引律、碰撞角约束下的比例导引律两种常用导引律为例, 推导出导引运动模型作为交互模型集; 使用不敏卡尔曼滤波器(UKF)实现了 IMM-UKF 算法, 并根据导引模型的特点引入了弹道收敛因子(FTC)自适应调节 IMM 算法中的模型转移概率. 仿真表明, 跟踪误差显著降低. 导引运动模型与被跟踪目标的运动模型匹配度更高更相似, 但是导引运动模型的设计对于高超声速飞行器而言存在较大难度.

文献[34]中提出了一种在 CS 模型下的 IMM-PF 算法. 改进算法在交互式多模型粒子滤波算法的基础上, 计算 CS 模型的概率. 仿真结果表明, 当目标以变化范围较大的加速度运动或者是状态发生突变时跟踪效果明显优于其他算法, 这对高超声速飞行器超燃冲压发动机点火前后速度的瞬时突变具有一定的现实意义. 文献[35]中针对目标短时间内的强机动转弯模式提出 AImm-CV/VM 算法, 内层由改进的机动目标当前统计模型组成, 避免了传统的当前统计模型中最大角加速度的假设取值; 外层由常速模型和曲线模型组成, 但仅适用于高超声速飞行器转弯机动时跟踪精度的提高, 在目标处于跳跃飞行等机动模式时仍不适用.

3.3 非线性滤波技术的研究现状

多模型算法本身在改进同时, 滤波方法也在不断进步, 多模型方法与各滤波方式的结合也是一个重要的研究方向. 常见的滤波方式大多是在卡尔曼滤波的基础上进行的改进, 如 EKF(扩展卡尔曼滤波), UKF(无迹卡尔曼滤波), 但是这两种方法在解决强机动问题时精度下降明显.

近年来, 粒子滤波(PF)得到快速发展, 很多学者将 IMM 算法与 PF 相结合把各模型中相对固定数目的粒子群进行交互, 粒子滤波后再进行重抽样, 这种方法改善了强机动和非线性条件下的跟踪性能^[36]. 有的学者参考无味变换的思想, 用 UKF 算法来产生粒子, 提出无味粒子滤波, 并与 IMM 算法相结合, 即 UPF-IMM 算法, 这种算法实时性和应变能力很强^[37].

由于 IMM 和 PF 本身也在进步, 改进算法的结合

也成了一种趋势, 比如将 AGIMM 与 PF 相结合, 以较小的模型覆盖了目标大范围的机动, 同时使重要性密度函数融合了最新量测信息, 具有较好的效果^[38]. 或者将一种新型的粒子滤波-变转速率粒子滤波(VRPF)与 IMM 算法结合, 即 IMM-VRPF 算法, 保留平滑区域滤波差的地方, 自适应的定位机动区域的频繁状态点以实现更准确地跟踪, 仿真显示该方法要明显优于 IMM 和 VRPF 自身^[39]. 只有同时吸收多模型算法和粒子滤波的优点, 并让他们结合得更好才能具有更好的效果, 也有学者将不同的结合方式进行对比, 文献[40]分别应用 IMM-PF, VSMM-PF, AGMM-PF 算法进行了仿真实验, 结果显示 AGMM-PF 算法要优于前两者, AGMM 由 IMM 和 VSMM 改进而来, 也证明了它的进步性.

除了粒子滤波, IMM 算法还与其他滤波方式进行了结合. 文献[41]将容积卡尔曼滤波(CKF)与 IMM 算法结合, 提出了一种基于 CKF 的交互多模型机动目标跟踪的只测角测量方法, 不但节省了计算时间, 而且在非线性系统中跟踪效果也要优于 IMM-UKF; 文献[42]将平滑变结构滤波器(SVSF)与 IMM 算法相结合, SVSF 是一种低通滤波器, 阶数越高, 值越均匀, 滤波效果越好, 对非线性目标的跟踪比较合理. 文献[42]以空中交通管制为例子, 证明 SVSF-IMM 方法的精确性要优于 IMM-EKF.

3.4 高超声速飞行器跟踪问题的改进思路

在研究针对临近空间高超声速飞行器跟踪的问题中, 首先需要对飞行器的目标特性有较为深入的了解, 之后, 从跟踪改进传感器、建立匹配目标实际运动的跟踪模型以及滤波算法优化三个方面来考虑改进方案:

1)改进跟踪传感器. 针对在临近空间飞行的目标, 可以将跟踪传感器的探测频率向两端扩展, 发展超视距雷达和激光雷达^[4]. 此外, 飞行器与大气剧烈摩擦所产生的热量使得用天基红外低轨卫星通过纯方位探测的方法在地球红外背景下发现并跟踪目标成为可能.

2)建立合理的运动模型. 临近空间飞行器的飞行过程主要包括助推段、惯性飞行段、滑翔/跳跃机动段以及末制导高速下压段. 在分析临近空间飞行器各阶段飞行特点的基础上, 可以将其飞行过程进行阶段划分, 分别用现有的经典模型和改进后的跟踪模型匹配

其运动状态,再通过 IMM 算法完成模型间的融合。

3)改进跟踪算法.作为当前解决机动目标跟踪的首选算法,IMM 算法适用于目标运动状态在多个模型间动态切换的情况^[4]。针对 IMM 算法,可以通过重新拟合 IMM 算法中的马尔可夫概率矩阵而使模型间的相互转换概率更加适用于临近空间目标的飞行特点^[43];也可以使用动态模型集代替固定结构的模型集,更加准确的描述运动状态多变的情况;还可以通过增加目标状态的维数提高跟踪的精度,减少模型误差^[44]。

4 结束语

本文以临近空间及高超声速飞行器为研究对象,从三个方面介绍了机动目标跟踪的关键技术,在此基础上结合高超声速飞行器的运动特性综述了当前机动目标跟踪研究中模型和滤波算法研究的不足之处。目前,国内外对于高超声速目标跟踪的研究还不是很多,主要停留在起步阶段,限于笔者的阅读数量,还有许多方向和资料可能并未涉及。相信对于临近空间飞行器跟踪的研究还会不断深入。

参考文献

- 1 樊友友.高速高机动目标跟踪算法及应用研究[硕士学位论文].西安:西安电子科技大学,2013.
- 2 陈亮.机动目标跟踪关键技术研究[硕士学位论文].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2012.
- 3 Wan MJ, Li PF, Li T. Tracking maneuvering target with angle-only measurements using IMM algorithm based on CKF. CMC. 2010. 92-96.
- 4 关欣,赵静,何友.临近空间高超声速飞行器跟踪技术.四川兵工学报,2011,32(8):4-6.
- 5 唐克,冯宝龙,谢保军,黄焯.临近空间飞行器开发利用现状与发展趋势.飞航导弹,2012,12(11):44-48.
- 6 蔡国飙,徐大军.高超声速飞行器技术.北京:科学出版社,2012.
- 7 周政.空天高机动目标跟踪技术研究[博士学位论文].西安:空军工程大学,2013.
- 8 关欣,赵静,何友.临近空间高超声速飞行器跟踪技术.四川兵工学报,2011,32(8):4-6.
- 9 何友,修建娟,关欣.雷达数据处理和应用.第3版.北京:电子工业出版社,2013.
- 10 史玉柱.最优估计的计算方法.北京:科学出版社,2001.
- 11 Jazwinski AH. Stochastic Processes and Filtering Theory. New York: Academic 1970.
- 12 石章松,刘忠,王航宇,孙世岩,周丰,林华.目标跟踪与数据融合理论与方法.北京:国防工业出版社,2010.
- 13 Moose RL. An adaptive state estimation solution to the maneuvering target problem. IEEE Trans. on Automation Control, 1975, 20(6): 359-362.
- 14 董来欣,谭贤四,武子彦,韩伟.一种新的高超声速目标跟踪算法.空军雷达学院学报,2012,26(2):111-114.
- 15 陈亮.机动目标跟踪关键技术研究[硕士学位论文].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2012.
- 16 许天野,徐雪松.交互多模型算法在目标跟踪领域的应用.四川兵工学报,2013,11:116-119.
- 17 董莎莎,徐一兵,李勇等.双 Markov 多假设 IMM 机动目标跟踪算法.计算机工程,2010,36(7):204-205.
- 18 张文,毛艺帆,王睿.空天高速飞行器建模技术研究.空军工程大学学报(自然科学版),2013,14(2):9-13.
- 19 Chuang CH, Morimoto H. Sub-optimal and optimal periodic solutions for hypersonic transport. Proc. of the American Control Conference, Washington, June 1995.
- 20 Dewell LD, Speyer JL. Fuel-optimal periodic control and regulation in constrained hypersonic flight. AIAA 96-3902, 1996.
- 21 Chuang CH, Morimoto H. Optimal periodic cruise for a hypersonic vehicle with constraints. AIAA 96-3876, 1996.
- 22 张忠峰,高云峰,宝音贺西.高超声速飞行器周期巡航条件的确定.力学与实践,2009,31(1):16-19.
- 23 王国宏,李俊杰,张翔宇,吴巍.临近空间高超声速滑跃式机动目标的跟踪模型.航空学报,2015,7:2400-2410.
- 24 关欣,赵静,张政超,何友.一种可行的高超声速飞行器跟踪算法.电讯技术,2011,51(8):80-84.
- 25 Ho TJ. Brief paper: a switched IMM-Extended Viterbi estimator-based algorithm for maneuvering target tracking. Automatica(Journal of IFAC), 2011, 47(1): 92-98.
- 26 Li B, Xin C. Steady state filters bank based interacting multiple-model-extended viterbi algorithm for maneuvering target tracking. Journal of Convergence Information Technology, 2012, 7(9): 212-220.
- 27 李昌玺,毕红葵,张兵,肖松.一种改进的高超声速目标跟踪算法.空军工程大学学报(自然科学版),2012,13(5):50-54.
- 28 陆晶莹.高速高机动目标 IMM 跟踪算法研究[硕士学位论文]

- 文].南京:南京理工大学,2010.
- 29 李昌玺,毕红葵,王红,张兵.一种临近空间高超声速目标跟踪算法.航天电子对抗,2012,28(4):10-13.
- 30 高宪军,霍长庚,谈欣荣.改进 IMM 的两飞行体无源定位跟踪算法.现代防御技术,2014,42(2):61-66.
- 31 谭顺成,王国宏,王娜.IMM-Singer 模型的机动目标跟踪算法.火力与指挥控制,2012,37(2):32-34.
- 32 李文静.机动目标跟踪算法.无线电工程,2012,42(1):58-61.
- 33 付斌,丁月宁,黄勇,闫杰.导引模型在 FTC 自适应 IMM-UKF 目标跟踪算法中的应用.电光与控制,2014,21(1):68-77.
- 34 霍长庚,高宪军.CS 模型下 IMM-PF 算法在机动目标跟踪中的应用.现代防御技术,2013,41(4):22-26.
- 35 崔彦凯,梁晓庚,王志刚,贾晓洪.高速高机动目标自适应 IMM 跟踪算法.计算机工程与应用,2014,50(8):198-206.
- 36 Yuan DP, Zheng JY. Interacting multiple model target tracking algorithm based on particle filtering. IEEE, 2011: 1907-1910.
- 37 Liu HJ. Adaptive interacting multiple model unscented particle filter tracking algorithm. Applied Mechanics and Materials, 2012: 906-910.
- 38 许江湖,刘忠,党玲.自适应网络交互多模型不敏粒子滤波算法.舰船科学技术,2012,34(8):18-22.
- 39 Ulker Y, Gonsel B. Multiple model target tracking with variable rate particle filter. Digital Signal Processing, 2012, 22(3): 417-429.
- 40 Zhang M, Chen WD. Variable structure multiple model particle filter for maneuvering radar target tracking. IEEE, 2010: 1754-1757.
- 41 Wan MJ, Li PF, Li T. Tracking maneuvering target with angle-only measurements using IMM algorithm based on CKF. CMC, 2010: 92-96.
- 42 Gadsden SA, Habibi SR, Kirubarajan T. A novel interacting multiple model method for nonlinear target tracking. 2010 13th IEEE Conference on Information Fusion (FUSION). 2010: 1-8.
- 43 梁彦,贾宇岗,潘泉.具有参数自适应的交互多模型算法.控制及理论与应用,2001,18(5):653-656.
- 44 Johnston LA, Krishnamurthy V. An improvement to the interacting multiple model(IMM) algorithm. IEEE Trans. on Signal Processing, 2001, 49(12): 2909-2923.