

基于有限时间理论的 飞行器机动突防方法

郭 杨 王仕成 著



科学出版社

基于有限时间理论的 飞行器机动突防方法

郭 杨 王仕成 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书以弹道导弹机动突防问题与有限时间理论为研究对象,研究弹道导弹在不同飞行阶段的机动突防方法。全书涵盖以下内容:在对导弹突防问题机理分析的基础上,分别在有限时间框架内建立导弹机动反拦截模型、带有防御器的导弹反拦截模型、考虑拦截方探测效能的导弹机动变轨模型;针对导弹机动突防设计问题,研究基于有限时间系统理论的控制设计方法;针对初段拦截器拦截方案提出一种采用防御器的弹道导弹突防方案;比较分析弹道导弹中段拦截方案及突防方案,提出考虑拦截方探测系统动态的中段机动变轨方案;针对弹道导弹末段机动突防的问题,利用有限时间 H_2 性能指标对拦截脱靶量与机动消耗的能量进行综合评价,研究系统分析与设计的准则,并在此基础上提出相应的机动突防方法。

本书可作为飞行器制导与控制等专业本科生和研究生的教材,也可供制导控制领域的研究人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

基于有限时间理论的飞行器机动突防方法/郭杨,王仕成著. —北京:科学出版社,2018.1

ISBN 978-7-03-056444-3

I. ①基… II. ①郭…②王… III. ①弹道导弹-飞行器-空中突防
IV. ①E927.13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 018209 号

责任编辑:魏英杰 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张 伟 / 封面设计:陈 敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京中石油彩色印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 1 月第 一 版 开本:B5 (720×1000)

2018 年 1 月第一次印刷 印张:9 3/4

字数:196 000

定价:90.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

随着导弹防御系统的发展,弹道导弹突防问题变得日益突出。现有的弹道导弹机动突防的研究成果往往缺乏对机动突防过程中所关注的主要性能指标的综合评价手段,对机动变轨的效能无法进行定量分析,从而限制了进一步优化设计突防策略的能力。同时,随着各种导弹防御技术的不断发展,也有必要研究新型突防方案,以期更有效地保证和提高弹道导弹的生存能力。因此,针对弹道导弹武器发展过程中面临的亟待解决的重要问题,尤其是导弹防御系统日益严重的威胁态势,本书将以导弹机动突防问题与有限时间理论为主要研究对象,以期对导弹机动突防过程中的一些制导问题加以研究和解决。

根据导弹突防过程中面临的不同情形,本书以弹道导弹机动突防为背景,在有限时间理论的框架下,分别对弹道导弹初段、中段与末段的不同情形下的机动突防方案和方法进行研究。

本书不仅反映了王仕成教授和我近年来的研究工作,更是饱含了各位师长和同仁的指导与帮助。

姚郁教授引领我进入这个充满活力与挑战的领域,他要求严格而又给予发挥的空间,使我受益匪浅。同时,姚老师正直严谨,谦虚勤奋,极富个人魅力,他解决问题的思路与人格魅力令人敬佩和折服。学无止境,希望不会辜负他当年的期望。

感谢哈尔滨工业大学控制与仿真中心的马克茂老师、贺风华老师、杨宝庆老师对我的悉心指导与帮助,祝愿制导控制与半实物仿真课题组成为国际一流的研究团队。

中国科学院数学与系统科学研究院的程代展研究员、中国航天科技集团公司一院十所的季登高博士、加拿大多伦多大学的 Hugh H. T. Liu 教授、火箭军装备研究院的邓定辉高级工程师、以色列理工学院的 Shima Tal 副教授、美国普渡大学的 Dengfeng Sun 助理教授从不同方

面为我的研究工作提供了帮助与支持,在此向他们表示感谢。

火箭军工程大学博士生张帅为本书的出版做了大量工作,一并表示感谢。

本书受到国家自然科学基金青年基金项目(61304239)和国家自然科学基金面上项目(61673386)的资助。

弹道导弹突防策略涵盖的范围很广,远不止本书所研究的几种情形和相应的方法。除了从机动的角度提高突防能力,还可以使用其他各种反侦查、反拦截手段,也可以主动干扰、破坏敌方的导弹防御系统,甚至可以从武器发展规划、政治与外交的角度提高导弹的突防能力。如何协调好这些策略和手段之间的相互关系,选择最符合国家利益的武器发展方案,是导弹突防能力研究中需要关注的问题。

弹道导弹的攻防对抗持续了数十年,控制科学也发展了近百年,而军事技术的对抗与人类对未知世界的探索永无止境,愿本书的研究工作能为控制理论和国防事业的发展尽一份绵薄之力。

限于作者水平,书中不足之处在所难免,恳请读者指正。

郭 杨

2017年6月于古城西安

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 背景	1
1.2 弹道导弹机动突防相关问题的研究现状及分析	3
1.2.1 机动反拦截问题	3
1.2.2 机动变轨突防问题	7
1.2.3 三体制导问题	10
1.3 有限时间理论的研究现状及分析	11
1.3.1 有限时间稳定理论	11
1.3.2 基于有限时间范数指标的分析及设计方法	12
1.4 本书的主要研究内容及章节安排	13
第 2 章 弹道导弹机动突防模型的建立	15
2.1 引言	15
2.2 坐标系及质点相对运动学	16
2.2.1 坐标系	16
2.2.2 质点相对运动学	17
2.3 导弹机动反拦截模型的建立	19
2.3.1 末制导系统的构成及分析	19
2.3.2 导弹机动反拦截模型	22
2.4 带有防御器的导弹反拦截模型的建立	24
2.4.1 三体相对运动模型	25
2.4.2 带有防御器的导弹反拦截模型	26
2.5 考虑防御方探测效能的导弹机动变轨模型的建立	28
2.5.1 导弹中段运动模型	29

2.5.2 拦截方探测模型	31
2.5.3 考虑拦截方探测效能的导弹机动变轨模型	32
2.6 小结	34
第3章 基于有限时间理论的控制设计方法	35
3.1 引言	35
3.2 有限时间有界的定义及相关引理	35
3.2.1 有限时间有界的定义	36
3.2.2 有限时间稳定及有限时间有界条件	37
3.3 有限时间输入输出镇定方法	38
3.3.1 有限时间输入输出稳定的定义及相关引理	39
3.3.2 有限时间有界条件下的有限时间输入输出镇定方法	40
3.3.3 微分线性矩阵不等式的数值解法	42
3.4 基于有限时间 H_2 范数性能指标的控制设计方法	43
3.4.1 L_p 空间及有限时间范数	43
3.4.2 基于有限时间 H_2 范数性能指标的控制设计方法	45
3.4.3 系统带有不确定性时的保性能控制设计方法	47
3.5 基于有限时间 H_∞ 范数性能指标的控制设计方法	50
3.5.1 有限时间 H_∞ 性能指标	50
3.5.2 时滞情形下基于有限时间范数性能指标的控制设计方法	51
3.5.3 有限时间有界条件下的 H_∞ 控制方法	54
3.6 小结	57
第4章 基于有限时间输入输出稳定理论的初段反拦截方法	59
4.1 引言	59
4.2 弹道导弹初段突防方案确定	60
4.2.1 弹道导弹初段拦截方式分析	60
4.2.2 弹道导弹初段突防方案分析	65
4.2.3 采用防御器的弹道导弹初段反拦截方案	67
4.3 采用防御器的弹道导弹初段突防方案分析	69
4.3.1 防御器制导策略分析	69
4.3.2 防御器速度与加速度需求分析	71

4.4 采用防御器的反拦截制导方法	73
4.4.1 非合作情形下的反拦截制导方法	73
4.4.2 合作情形下的反拦截制导方法	76
4.4.3 面临多个拦截器情形下的反拦截制导方法	78
4.5 仿真分析	79
4.5.1 非合作情形	80
4.5.2 合作情形与非合作情形比较	81
4.5.3 面临多个拦截器情形	87
4.6 小结	90
第5章 基于有限时间 H_∞ 性能指标的中段机动变轨方法	91
5.1 引言	91
5.2 弹道导弹中段突防方案确定	92
5.2.1 弹道中段导弹防御系统工作过程分析	93
5.2.2 弹道导弹中段机动变轨突防方案的确定	95
5.3 弹道导弹中段机动变轨效能分析	97
5.3.1 机动变轨效能的 T-H 方程描述	97
5.3.2 机动变轨效能分析	100
5.3.3 仿真分析	102
5.4 脉冲推力情形下的机动变轨方法	104
5.4.1 脉冲推力情形下的机动变轨设计问题描述	104
5.4.2 脉冲推力情形下的机动变轨设计方法	105
5.4.3 仿真分析	106
5.5 连续推力情形下的机动变轨方法	110
5.5.1 连续推力情形下的机动变轨设计问题描述	110
5.5.2 连续推力情形下的机动变轨设计方法	111
5.5.3 仿真分析	113
5.6 小结	116
第6章 基于有限时间控制理论的末段机动与制导方法	118
6.1 引言	118
6.2 弹道导弹末段机动反拦截突防策略分析	120

6.2.1 弹道导弹机动对拦截器的影响分析	120
6.2.2 无法获取相对运动信息情形下反拦截策略分析	123
6.3 实时获取相对运动信息情形下的机动反拦截方法	125
6.3.1 有限时间 H_2 性能指标及问题描述	125
6.3.2 基于有限时间 H_2 性能指标的最优机动方法	127
6.3.3 保性能机动反拦截方法	129
6.4 基于有限时间理论的抗饱和和制导方法	131
6.4.1 弹道导弹抗饱和和制导问题的描述	132
6.4.2 基于有限时间理论的导弹抗饱和和制导设计	133
6.5 小结	138
第7章 总结与展望	139
7.1 总结	139
7.2 展望	140
参考文献	142

第 1 章 绪 论

1.1 背 景

冷战结束之后,美国放弃执行“星球大战”计划,转而执行弹道导弹防御计划。1999 年 3 月,美国通过弹道导弹防御(BMD)计划,正式将弹道导弹防御列为美国国策。9·11 事件后,美国进一步加快了 BMD 计划的实施。弹道导弹防御计划主要包括国家导弹防御(NMD)系统和战区导弹防御(TMD)系统。NMD 系统属于美国弹道导弹防御局提出的面向 21 世纪的技术总计划中的重点开发项目。其主要任务是保护美国本土 50 个州免受远程战略弹道导弹的有限核攻击。TMD 系统也是 BMD 计划重点发展的反导武器系统,美国在加紧发展自己的同时,还推动其他国家和地区与其合作发展 TMD 系统。在亚太地区,美国谋求把日本、韩国和中国台湾地区纳入其战区导弹防御系统。

由此可见,美国企图通过 BMD 计划削弱可能的敌对国家的战略威慑能力,扩大自己的战略优势,并控制盟国和相关地区,同时借助自己强大的科技、军事和经济实力拖垮竞争对手,对可能的敌对国家保持战略威慑态势。

为了打破这种垄断,同时考虑到导弹防御系统的高难度与拦截弹道导弹的难度,俄罗斯没有以全面发展自己的导弹防御系统的方式来展开新一轮的军备竞赛,而是重点发展导弹突防技术,用较少的投入以求快速改变这种垄断局面。同样,对于中国来讲,导弹防御系统投入高、研制周期长,而且弹道导弹易攻难防,因此在目前的情形下,重点发展弹道导弹突防技术是一种适合我国政治、军事上的需求和经济、技术上能够获得的支持的合理选择。

导弹防御系统包含天基、地基、海基的各种探测设备、各种拦截器及相应的指挥通信系统。其作战过程精密而复杂,任何一个环节出现

问题,都会使整个系统的效能严重下降^[1]。因此,针对不同的拦截设备,拦截过程中的不同阶段可采取相应的突防措施,如图 1-1 所示。机动变轨和机动反拦截都属于导弹机动突防范畴,它们的主要区别在于机动反拦截考虑突防导弹与拦截器的交战过程,导弹机动的目的是通过机动直接导致拦截器脱靶;机动变轨考虑突防导弹与拦截方探测系统之间的关系,通过机动改变初始弹道,使拦截一方对突防导弹弹道预测的不确定度增大而导致拦截失败。另外,释放防御器也可以看成是一种机动反拦截突防方式。它是指弹道导弹释放出带有制导能力的飞行器,此飞行器用于拦截欲攻击弹道导弹的敌方拦截器,从而掩护弹道导弹突防。

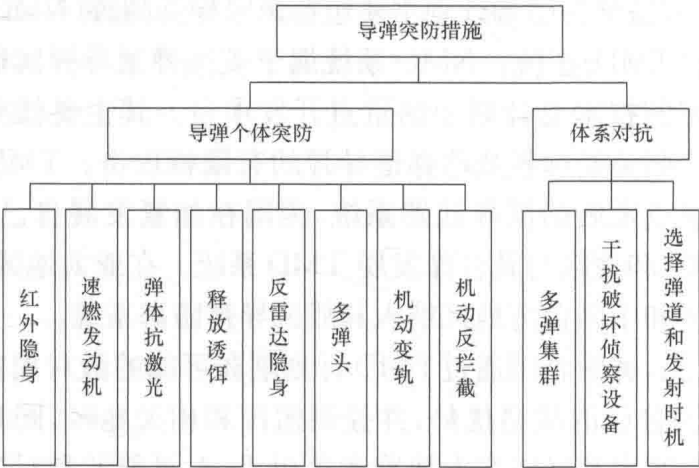


图 1-1 导弹突防措施分类

较其他突防方式,机动突防可以弥补弹道导弹弹道容易被预测以致被拦截的缺陷,并且能更好地利用弹道导弹的速度优势,同时具有进一步提高落点精度的潜力^[2],以及可靠性高和突防效果好的特点,是一种效费比很高的突防方式。鉴于此,此项技术受到了广泛的关注,也取得了一系列的研究成果^[3-5],如跳跃式弹道、拉起-俯冲弹道、摆动等形式的再入段周期性机动,以及一些学者提出的智能规避策略和突防制导律等。一些弹道导弹也成功地应用了机动突防技术,如美国的潘兴 II、俄罗斯的白杨 M 等,其生存能力获得了大幅的提高。

然而,从公开发表的文献来看,这些研究成果往往对机动突防过程中所关注的主要性能指标缺乏综合评价手段,对机动变轨的效能无法进行定量分析,从而限制了进一步优化设计突防策略的能力。同时,随着导弹防御系统的不断发展,也有必要研究新型突防方案,以期更有效地保证和提高弹道导弹的生存能力。而航空航天技术的发展也使这些突防方案的提出和实现成为可能。

由于导弹机动突防过程中涉及各种制导问题,而这些问题往往表现为有限时间动力学特性,即制导过程在有限时间内结束,所关注的性能指标也往往定义在有限时间内。因此,针对弹道导弹武器发展过程中面临导弹防御系统威胁亟待解决的重要问题,本书将以导弹机动突防问题与有限时间理论为研究对象,以期利用有限时间理论对导弹机动突防过程中的一些制导问题加以研究和解决。弹道导弹的突防能力已成为衡量武器系统效能的关键性指标,因此本书的研究对于提高弹道导弹的生存能力,巩固和增强我国的战略威慑力有着重要的意义。

1.2 弹道导弹机动突防相关问题的研究现状及分析

根据导弹突防过程中面临的不同情形,可以将导弹机动突防问题划分为机动反拦截突防问题、机动变轨突防问题与三体制导问题。这三个问题在研究对象和研究方法上必然有所不同,评价指标也会各有侧重。

1.2.1 机动反拦截问题

虽然机动反拦截突防问题是随着各种导弹拦截系统的发展才逐渐受到重视,但这方面的理论研究起源于制导系统设计中的最坏目标机动问题(the worst target maneuver problem)和飞机机动反拦截时的追踪逃逸问题(pursuit-evasion game)。

1. 最坏目标机动问题

目标机动对于脱靶量的影响是制导系统设计时所关心的重要问题。研究表明,一个适当时刻的阶跃机动可以产生一定的脱靶量,而阶

跃机动的开始时刻如果距离末制导结束时刻太短或太长(相对于拦截器的过载响应时间),脱靶量会变得很小^[6]。因此,最坏目标机动问题就变得引人注目。

针对这一问题,Shinar^[7]最先提出此问题,并用最优控制的方法加以解决:对相对运动线性化得到了脱靶量的表达式 $m_0 = \lim_{R \rightarrow 0} (y_T - y_M) = y(t_f)$, 其中 m_0 为拦截脱靶量, y_T 和 y_M 分别为目标和拦截器在视线法向方向的位移, t_f 为终止时刻, R 为视线长度。他给出一种 Bang-Bang 控制的最优机动策略——突防一方在相遇过程中不断变换自己横向加速度的符号,变换的周期与拦截器的比例导引系数有关。随后,Shinar^[8]在三维空间中研究此问题,考虑了输入受限等更一般的情形,并给出了解决方法。近年来,Shinar 和其他学者将这一问题的研究进一步推向实用化,这些研究分别考虑了非线性模型、变速接近、高阶系统动力学模型、突防与拦截双方的信息不对称情形,双方均存在最大过载限制情形,以及拦截方对于突防方躲避机动的估计方法和相应的制导律^[9-16]。

Zarchan 在文献[17]中进一步提出制导系统简化模型来分析此问题,该模型在之后的研究中被广泛采用。在此基础上,他应用伴随化方法分析了正弦机动对拦截脱靶量的影响。结果表明,正弦机动的频率和幅值,以及拦截器的制导时间常数、有效导航比和可用过载大小等因素影响拦截脱靶量。

Ohlmeyer 随后在此基础上研究了目标正弦机动对比例导引制导系统最终均方根脱靶量的影响^[18]。考虑目标初始相位均匀分布,假设导弹动态为一阶惯性环节,推导了均方根脱靶量的解析表达式,分析结果可以推广到高阶弹体动态,以及导弹加速度饱和情形。最后,给出了均方根脱靶量与有效导航比、制导时间常数、导弹可用过载、目标机动幅度和机动频率之间的关系。Yanushevsky^[19]应用伴随方法,基于平面拦截线性模型,分析了目标最优机动策略,给出了目标最佳的正弦机动频率。

姜玉宪^[20]首次提出导弹机动突防问题有其特殊性,主要表现在关注拦截脱靶量的同时还需要考虑机动消耗的能量等指标。随后,崔静

和姜玉宪在文献[3]中给出了摆动式机动引起的拦截脱靶量解析解,并指出拦截脱靶量存在一个随机动开始时刻逐渐减小至零的暂态分量,说明预测相遇时刻对于突防策略的选取具有重要意义。吴启星以导弹中段突防为背景,分析了在三维空间中在不同方向施加机动冲量对拦截脱靶量和导弹落点的影响^[4]。文献[5]认为,在弹道中段大气稀薄,突防导弹可以提前探测到拦截器,在此前提下分析了最佳机动的时机和机动方式,还给出了实施机动之后回归初始弹道的算法。

虽然最坏目标机动问题受到关注的时间很长,得到的研究成果也较为全面,但正如这个问题的起源一样,这些研究成果往往被用来指导制导系统的性能分析与设计。如果利用这些成果进行机动反拦截策略设计往往会出现如下问题。

① 只考虑通过机动造成拦截脱靶量的最大化,而忽略了突防过程中的其他两个主要性能指标——突防消耗的能量和对最终打击精度影响。

② 机动反拦截突防也只是需要一定的拦截脱靶量来保证自身的生存,而不是拦截脱靶量越大越好。

③ 进行最坏目标机动往往需要知道飞行剩余时间(time-to-go),即突防一方能够实时获得拦截器的运动信息,这在实际应用中也需要考虑和讨论。

2. 追踪逃逸问题

与最坏目标机动问题相比,追踪逃逸问题给予逃逸方更广阔的空间和更多的信息。它研究的是在追逃双方均可以获得当前相对运动信息的情形下,追逃双方各自如何采取最优的运动策略使得最终结果对自己最为有利。这个问题的典型解决方法是微分对策理论。微分对策理论将此问题归结为双边极值问题,在体现对抗性方面具有其独特的优势,并且在模型上不需要做过多的简化,但双边极值的求解非常复杂,大大限制了其工程应用。

微分对策理论最早由 Isaacs^[21]提出,美国科学家 Friedman^[22]于1971年严格证明了微分对策值与鞍点的存在性,从而奠定了微分对策

坚实的理论基础,微分对策理论日趋成熟,其应用范围也逐步扩大。在应用该理论解决追踪逃逸问题上,Jarmark 等^[23]考虑飞机的机动能力限制,解决空战中双方对抗的问题。飞机面临导弹拦截时的最佳机动策略由 Breitner^[24]利用间接多路径搜索方法求得。Kelley 等^[25]用简化的近圆共面轨道模型,研究了两个机动能力相当的空间飞行器的追逃对策问题。张秋华^[26]在此背景下以轨道数量为状态变量,在双方均为径向连续可变小推力的假设条件下,研究推导出可变推力的最优控制量。Menon 等^[27,28]发展出了微分对策制导律。Horie 等^[29]以三维空间中的两架战斗机空中格斗为背景,考虑算法的收敛性和快速性,研究了微分对策的数值解法。

虽然微分对策理论在解决此问题时有其独特优势,但离实际应用还有一定差距。这不仅是由于在决策过程中需要知道对方的状态,而这在真实场景中很难精确观测,而且迄今还没有找到一种完善的实时算法^[30]。

若将机动反拦截问题想定为追踪逃逸问题,应用微分对策理论进行解决,则存在如下问题。

① 突拦双方都需要对当前的相对运动状态有足够的观测能力,并且均能实时计算出对己方的最佳策略,以当前武器发展水平来看,这在短时间内是很难实现的。

② 拦截一方即使应用微分对策制导律,也很难对目标机动状态和飞行剩余时间做出准确估计,而这会大大影响制导的效能。

③ 微分对策求解的复杂性导致实时性很难保证。

综上所述,导弹机动反拦截问题现有的研究成果对拦截脱靶量、突防消耗的能量等突防过程中重要的性能指标缺乏统一的度量及评价方法,往往只以拦截脱靶量作为评价指标,同时兼顾多个指标的研究成果也只是先分别研究机动策略与某单一性能指标的映射关系,再综合调整机动策略^[4]。因此,在系统设计中,缺少进行性能指标综合优化的手段,存在系统分析与设计脱节的问题。同时,已有的主要模型^[17]有小角度的假设,虽然简化了分析方法,但模型的适用范围受到限制。

1.2.2 机动变轨突防问题

机动变轨突防是通过机动变轨造成导弹防御系统对突防导弹的状态估计和预测不准确而导致拦截失败,因此其针对的对象是敌方的探测和指挥控制系统。若要对机动变轨突防的效能进行定量分析,就需要了解敌方的探测和指挥控制系统的工作原理。下面对机动变轨和机动目标跟踪两个问题的研究现状分别进行叙述和分析。

1. 机动变轨问题

由于不考虑具体的拦截过程,并且弹道中段不能利用空气动力进行机动,因此机动变轨突防重点关注机动消耗的能量和对打击精度的影响。虽然大气层外脉冲机动变轨方法在卫星变轨中被广泛使用,但以导弹突防为背景的变轨方法研究在国外公开发表的文献中鲜有见到。国内的相关研究文献也集中发表于近几年:文献[31]研究了在弹道中段施加不同方向的机动冲量时对导弹落点偏差的影响,并在此基础上进行了突防发动机的参数优化设计。文献[32]~[34]分别研究了导弹平面、异面、轴向机动变轨方式,在满足最终弹道经过打击目标点的条件下推导出了脉冲点火约束方程,设计出了由几条不同椭圆弧段组成的弹道。文献[35]在此基础上将脉冲点火约束方程进一步简化,给出了多次机动变轨的弹道设计方法。文献[36]将传统弹道导弹的抛物线弹道中段设计成有多个波峰的跳跃式弹道,并通过弹道优化,寻找平均跳跃幅度最大时导弹的飞行方案。文献[37]建立了统计模型,比较了传统的抛物线弹道与跳跃式弹道的突防能力。

2. 机动目标跟踪问题

当目标做非机动运动时,容易建立跟踪模型,并且可以得到较高的跟踪精度。当目标发生机动时,由于其机动的不可预测性,使得理想建模和精确跟踪都变得非常困难。机动目标跟踪问题的研究集中在机动目标建模、滤波和预测方法的改善,主要机动目标运动模型如图1-2^[38]所示。

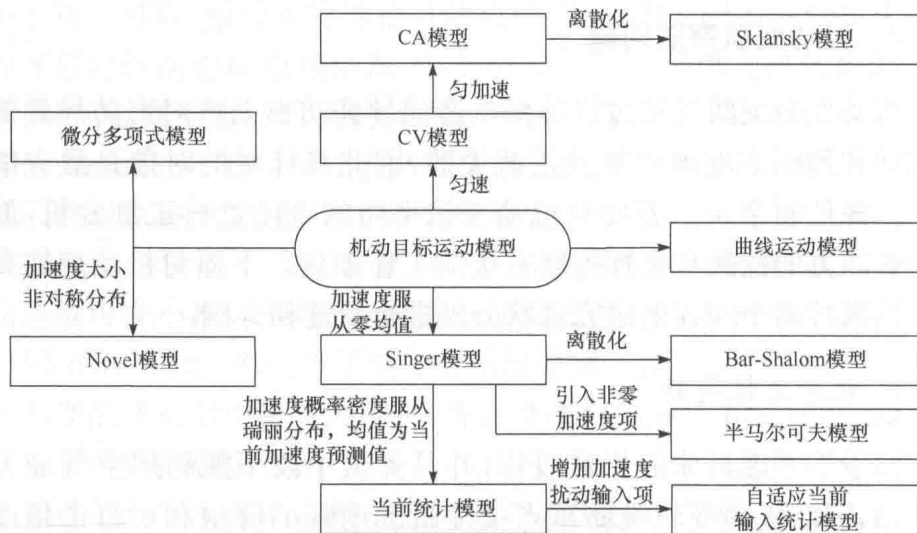


图 1-2 主要机动目标运动模型及其相互关系

CV 和 CA 模型是将目标运动先验地定义为简单的匀速或匀加速运动,而对于目标跟踪系统来说,描述目标运动的加速度是一个较复杂的问题。目标机动的随机输入存在多种假定,如时间上相互独立的零均值高斯白噪声、时间相关的零均值高斯噪声、随机切换均值的高斯噪声,以及非零均值时间相关高斯噪声等。Singer^[39]提出时间相关模型(Singer 模型),该模型及其一系列修正模型是迄今最具影响力的模型,认为目标加速度是一个平稳的、时间相关的随机过程,系统噪声为时间相关的有色噪声序列,机动发生时刻是随机的。但是,由于机动加速度均值不为零,因此加速度均匀分布的假设与实际情况存在差别,当加速度较大且变化剧烈时,Singer 模型准确性就会大大下降。针对 Singer 模型机动加速度均匀分布假设的不合理性,Moose 等提出具有随机开关均值的相关高斯噪声模型,该模型把机动看作相应于半马尔可夫过程描述的一系列有限指令。该指令由马尔可夫过程的转移概率来确定,转移时刻为随机变量。由此得到形式上与 Singer 模型相似的模型,其中引入了一个非零加速度,用来改进 Singer 模型中机动为零均值的假设^[40,41]。在实际应用中,非零加速度项难以准确给出其精确程度,直接影响到速度和位置估计精度。机动目标“当前”统计模型由周宏仁提