

RASM 一体化制导与控制系统体系结构设计

韩蕾^{1,2}, 李聪颖¹, 杜小雪³, 徐珂文¹

(1, 山东烟台海军航空工程学院 7 系, 264001; 2, 中科院国家空间科学中心, 100190; 3, 山东青岛北海舰队军械处, 266071)

摘要: 本文分析了 RASM 完成反舰任务的需要, 借鉴混合动态系统的概念、航天器自主控制体系结构的设计思想以及无人机自主飞行控制的体系结构, 提出了完成该任务所需要的具有层次结构的混合的一体化制导与控制系统的体系结构, 将 RASM 通讯交互、制导与控制任务管理、弹道生成、制导回路以及控制回路集中在一个框架中, 形成一个具有层次结构的混合系统。通过对整个系统功能的分析可知, 这种基于功能分解的层次化、模块化结构, 使整个系统具有较好的鲁棒性, 且容易修改与维护, 为以后模块的扩展打下了基础。

关键词: 再入反舰导弹; 指挥控制体系结构; 一体化制导控制系统

0 引言

再入反舰导弹 (Reentry Anti-ship Missile) RASM 作为一种可以快速、可靠地从地面发射进入空间后再入或者从空间轨道转移进入再入轨道的精确打击武器, 其功能和性能指标必须放在现在和未来的技术平台和综合背景下来确定, 充分考虑军事需求所带来的苛刻技术指标要求与当前或者未来一段时间内工程实现的可行性。在攻防对抗日趋激烈的背景下, 为了实现有效突击, 必须使得 RASM 武器系统能够及时准确地获取侦察信息, 能够适应先进但同时层次与结构都比较复杂的指挥与控制体系, 同时自身具备强大的生存能力、适应能力, 具备较高的智能化水平。对于再入条件要求苛刻的 RASM, 安全性与可靠性是其实现快速反应、精确打击的前提条件, 这对制导与控制系统提出了新的挑战, 而制导与控制系统的体系结构是系统各个功能集成的基础, 是控制系统具备自主能力的关键所在。^{[1]-[5]}

RASM 一体化制导与控制系统主要解决: 制导与控制任务管理技术、弹道离线及在线生成技术、制导与控制技术以及系统的集成与测试。制导与控制任务管理可以在不确定情形下, 根据指令或者自身侦测到的信息, 实时地对整个系统进行规划与决策, 统一调度各个分系统, 使其协调工作, 实现自主飞行。弹道离线及在线生成技术、制导与控制技术使得 RASM 沿弹道剖面的飞行具有较好的鲁棒性。系统的集成与测试对整个系统进行综合。

1 需求分析及总体结构

1.1 一体化制导与控制系统体系结构需求分析

为适应接入网络中心战体系结构, 执行反舰任务的需要, RASM 无法离开与指挥中心的信息交互, 需要获得必要的监视、侦察、情报信息, 接收指挥指令等, 从而具备应对防空威胁的能力, 对高机动性目标进行精确打击的能力。通讯交互能力是 RASM 制导与控制系统所不可缺少的。

RASM 飞行过程复杂, 各过程之间按照预定规则进行阶段过渡, 为保证较好的飞行品质, 往往需要为不同的阶段, 设计不同的制导与控制子系统或者是不同的参数。不同的系统之间在进行切换时, 往往会出现控制系统性能下降的情况。为保障系统的正常工作, 需要有一个任务管理机制, 对整个弹载制导与控制系统的状态切换进行管理。

1.2 RASM 制导与控制系统四层次体系结构

文献[6]给出了混合系统有一种三层次结构框架, 包括离散事件层、连续事件层以及中间层。处于最底层的连续时间层包括执行机构、被控对象和传感器, 是实际的物理系统。离散事件层为一有限状态机形式的决策器, 决策器根据被控对象的状态来决定被控对象的离散行为。两层之间的相互作用通过中间层实现, 中间层是有限个控制器, 对应不同的离散事件。文献[7]借用这种混合系统设计了三层次的 RLV 的制导与控制系统体系结构。

本文参考混合系统三层次结构框架设计思路, 设计 RASM 制导与控制系统的体系结构。整个系统采用自上而下的模块化、层次化设计思路, 形成一个具有层次结构的混合系统。按照系统功能需求, 将系统划分为若干个模块, 每个模块实现一定的功能, 若干模块组成混合系统的一个层次, 使整个系统结构清楚, 易于维护。

为有效对敌舰艇编队目标进行突击, 我方反舰导弹自身需要具备较高的智能化水平、很强的适应性、极强的生存能力, 同时, 还需要具备与各平台间通讯交互的能力。

RASM 制导与控制系统分为四个大的层次 (图 1): 通讯交互 (离散事件层)、制导与控制任务管理 (离散事件层)、制导与控制回路 (中间层)、执行机构与被控对象 (连续时间层)。每个层次之间都具有较

好的自主性、交互性和反应性。在这种基于功能分解的体系结构中，每个层次又由不同的模块组成。通讯交互层主要通过数据链完成与各平台的通讯与交互，接收来自指挥中心的命令，实现情报共享、毁伤评估等。制导与控制任务管理层主要是指不同飞行状态下的任务管理；制导与控制回路主要包括：弹道剖面、制导回路和控制回路；最底层包括：执行机构、弹体以及传感器。每个模块之间都是相对独立的，改变一个模块的内容一般不会影响其它模块的工作。

通讯交互层负责与指挥中心之间互相传递信息，并将来自指挥中心的各种指令传递给制导与控制任务管理层，任务管理层根据指令，管理和调度制导与控制层的运行，制导与控制层管理和调度最底层的运行；反过来，每一个下层都对其上层的输出做出响应，同时将本层的输出反馈到上层，从而实现指挥中心可干预的准自主飞行。这种体系结构将通讯交互、制导与控制任务管理、弹道设计、制导回路与控制回路集成在一个框架中。

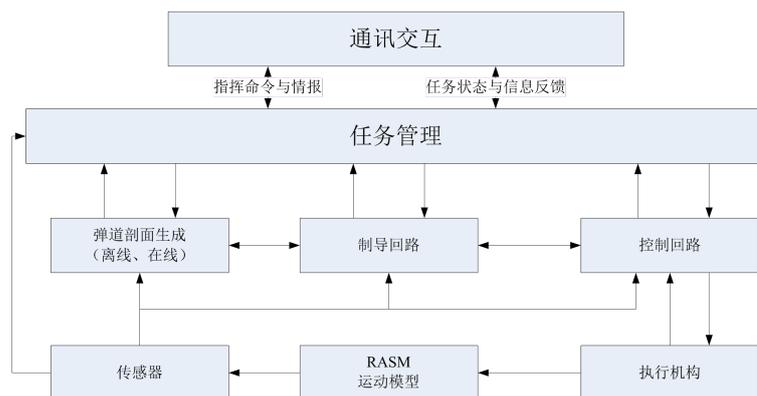


图 1 RASM 制导与控制系统结构图

RASM 制导与控制系统体系结构中每个层次的设计都基于下一个层次子系统的运行，并且是以分层一致的方式实现的。这意味着上层的策略在满足上层目标的同时也不会违背底层的约束。这种层次化的结构容易修改与维护，模块化的设计为以后模块的扩展提供了方便。

2 RASM 通讯交互功能信息网络

通讯交互层主要通过数据链完成 RASM 与各平台之间的通讯与交互，以增强导弹自身的安全性，提高打击的快速性和准确性。RASM 从发射到命中目标，需要飞行较长时间，此时舰艇目标可能会进行机动，这需要指挥中心为飞行中的 RASM 提供目标信息情报支援。

3 RASM 制导与控制任务管理

制导与控制任务管理层根据被控对象当前的状态信息、制导和控制指令信息、飞行动力学数据，自主地做出保障系统正常运行的决策。制导与控制回路根据制导与控制任务管理层的决策做出相应的反应，生成可飞的最优或次优弹道剖面、选择合适的制导回路与控制回路，通过相应的制导规律和控制规律解算控制量的输出，控制执行机构的动作，同时将执行机构的反馈信息反馈到制导与控制任务管理层，使其参与到任务管理的决策过程中。

制导与控制任务管理模块用来管理 RASM 的使命级任务，是导弹制导与控制系统的指挥中心，搜集 RASM 所有的状态信息和飞行动力学数据，做出相应的决定，实现准自主飞行。

制导与控制任务管理用于形成制导与控制任务管理的逻辑和决策的模型。用于决策的 RASM 信息主要来自制导与控制系统、传感器系统以及执行机构系统等。这些系统提供的信息，大部分是一些连续的信号，如跟踪误差信号、待飞距离、姿态信号等。为形成离散系统，必须对连续量设定阈值，进行量化。

4 RASM 飞行弹道设计

弹道剖面、制导回路与控制回路形成相互串联的多回路闭环系统，制导与控制任务管理模块收集各个子系统的信息，从全局的角度做出决定，对整个系统进行协调。

弹道剖面、制导回路和控制回路通过制导与控制任务管理模块相互联系，使整个系统具有较好的交互性和反应性。

弹道剖面、制导与控制回路处于整个系统的中间层，这一层次本身又分为 3 个子层次：弹道剖面、制导回路和控制回路。这 3 个层次又是一个自上而下、自外而内的层次结构。弹道剖面处于最外层，它产生

RASM 安全返回的弹道剖面, 为下一层的制导回路提供指令信号。制导回路处于弹道剖面和控制回路的中间, 跟踪弹道剖面, 为控制回路提供指令信号。制导回路的性能决定了 RASM 是否能够沿弹道飞行, 实现飞行任务的目标。控制回路处于最内层, 它响应制导回路提供的指令信号, 控制 RASM 的稳定飞行。控制回路是影响 RASM 飞行安全的回路, 它直接与 RASM 的飞行动力学特性相结合。飞行动力学特性在某种意义上是 RASM 系统的高度概括, 对于 RASM 的安全性、可靠性和操纵性都是至关重要的。

弹道剖面、制导回路和控制回路三者相互影响, 相互依赖。系统设计时既要保证三者的无缝连接, 又要追求整个回路的性能。

4.1 RASM 弹道剖面生成

高超声速再入阶段弹道剖面的生成模块融合了离线弹道设计技术和在线弹道生成技术。不同的飞行阶段根据不同的制导与控制特点, 采用不同的弹道剖面生成技术, 使弹道设计技术各尽所能。RASM 对制导与控制系统的性能要求与高度成反比, 高度越低, 要求越高。

弹道离线及在线生成技术是制导与控制系统的核心技术, 制导与控制系统的很大程度需要依赖于弹道生成技术。离线弹道设计可以对弹道剖面进行精雕细刻, 而在线弹道设计可以减小对预先弹道设计的依赖, 拓宽 RASM 的飞行走廊和初始飞行条件的限制, 产生具有较好鲁棒性的弹道剖面, 同时提高系统安全性和可靠性。无论离线弹道生成还是在线弹道生成, 弹道剖面一般包括: 能量剖面、动压剖面、高度剖面、速度剖面等, 它们都为制导回路提供制导指令。

4.2 制导与控制回路设计

制导回路与控制回路是一个典型的内/外回路结构, 控制回路本身并不能用来完成飞行任务, 只有和制导回路结合起来控制回路才能实现它的价值。制导回路通过制导规律给控制回路提供控制指令, 控制回路跟踪制导回路给出的控制指令。制导回路必须通过控制回路而产生作用, 控制回路属于制导回路的内回路。飞行速度和高度的变化产生内回路的指令信号, 同时飞行速度和高度的变化又是通过飞行控制内回路的作用得以具体实现。制导回路与控制回路具有一定的依赖性、自主性和互动性, 两者之间通过制导与控制任务管理模块联系起来。控制回路将当前状态反馈到任务管理模块, 任务管理根据控制回路状态通知制导回路进行增益调整。

为了适应中止情形, 正常的制导与控制系统必须适应中止情形所要经历的状态, 正常的制导与控制系统的的设计更具有一般性。正常的制导与控制系统按照飞行任务与特点分为: 上升段、高超声速再入阶段、大空域机动及末端能量管理段、超音速突防及末制导段。

控制回路需要满足 RASM 在整个飞行任务中的稳定性和安全性要求, 制导回路则要完成飞行任务的要求, 保证 RASM 安全地到达目标区域。RASM 无动力飞行过程是一个能量综合管理与控制的过程。从制导任务的角度来看, 需要对能量、动压和高度进行综合控制; 从物理强度限制的要求考虑, 则需考虑动压和法向过载的约束控制; 从控制的角度, 既需要增稳控制, 又需要对姿态和迎角进行约束。整个制导与控制回路包括多个控制变量、多个约束限制变量, 而这些约束限制必须动态实现。因此, 无动力制导与控制系统是一个多控制目标系统、多回路系统和多重动态约束系统。制导与控制回路在整个飞行过程中采用多回路结构, 形成“主一次”回路的形式。主回路是基本的控制, 次回路则是为了满足 RASM 各种动态约束而设计的控制回路, 以保证 RASM 的飞行安全。主回路与次回路之间通过不同的飞行状态和任务要求进行切换。

5 结论

本文针对 RASM 的任务特点及基本弹道特性, 根据弹道中各飞行阶段的制导与控制特点, 设计了具有层次结构的一体化制导与控制系统体系结构。将通讯交互、制导与控制任务管理、弹道生成、制导回路与控制回路都集中在一个框架中, 形成具有层次结构的制导与控制系统体系结构。

根据 RASM 飞行状态划分提出了制导与控制管理的主要目标, 并提出了飞行弹道剖面、制导回路和控制回路的方案设计。

参考文献:

- [1] 张翼飞, 邓方林, 顾文锦. 反舰导弹末端机动弹道设计及弹道仿真[J]. 计算机仿真, 2005, 22(2): 19-22
- [2] 陈晓娟. 反舰导弹末端机动弹道的实现研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2007 年
- [3] 孙明玮. 反舰导弹机动与导引配合的弹道设计研究[J]. 现代防御技术, 2007, 35(1): 23-26
- [4] 马良, 姜青山, 汪浩, 周强. 反舰导弹对舰空导弹的机动突防模型研究[J]. 海军航空工程学院学报, 2008, 23(2): 185-188
- [5] 李聪颖, 韩蕾, 许晓飞等. 基于微分平坦的再入反舰导弹末端能量管理段控制[C]. 第三十届中国控制会议论文集, 2011, 烟台: 807-811
- [6] 邹明能, 唐万生. 一类混合动态系统的控制综合[J]. 系统工程学报, 2004, 19(4): 329-336
- [7] 孙春贞. 重复使用运载器末端区域能量管理与无动力自动着陆技术研究[D]. 南京航空航天大学, 2008