

文章编号:1000-6893(2008)06-1605-07

基于协调变量的多导弹协同制导

赵世钰, 周锐

(北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院, 北京 100191)

Multi-missile Cooperative Guidance Using Coordination Variables

Zhao Shiyu, Zhou Rui

(School of Automatic Science and Electrical Engineering, Beijing University of
Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

摘要: 根据多导弹协同攻击的特点和要求,提出了一种具有一定通用性的双层协同制导结构。该双层协同制导结构由底层导引控制和上层协调控制组成。其中底层导引控制由分散于各个导弹的本地制导律来实现,上层的协调控制可通过集中式或分散式的协调策略来实现。基于该协同制导结构并针对多导弹同时击中目标这一特定协同任务,给出了一种具体可行的多导弹协同制导律。该协同制导律把具有导引时间限制的制导律和基于协调变量的协调策略相结合,具有控制能量的次优性,结构简单且具有解析解形式。数字仿真算例验证了其良好的性能。

关键词: 多导弹; 制导律; 协同制导; 协调变量; 协调策略

中图分类号: TJ765.3 **文献标识码:** A

Abstract: A two-level cooperative guidance architecture for multi-missile attack is proposed. The architecture is composed with local guidance for each missile on the lower level and a coordination strategy on the upper level. It provides a general solution to some categories of multi-missile cooperative control problems. Based on the notion of decentralized guidance and centralized coordination, an application of the architecture to the salvo attack is investigated. A new practical cooperative guidance law, which could automatically guide missiles to hit the stationary target simultaneously, is devised. It is a combination of the guidance law with constraint on guidance time and the coordination strategy based on coordination variables. The cooperative guidance law is quite feasible because of its analytical form, and it is suboptimal in the sense of control energy. Numerical simulations are presented to demonstrate the effectiveness of the cooperative guidance law.

Key words: multi-missile; guidance law; cooperative guidance; coordination variable; coordination strategy

随着反导技术的不断发展,陆基和海基反导系统日趋成熟,导弹突防难度日益加大^[1]。现代信息化战争强调体系间对抗和多系统协同作战。与力图提高单枚导弹突防能力的技术(如文献[2])相比,多导弹协同攻击是一种更符合现代信息化战争思想的作战方法。通过充分利用各导弹自身的性能特点、实现相互间的战术和技术配合,多导弹协同攻击不仅可以大大提高突防能力,还能够完成单枚导弹不可能完成的任务,如实现战术隐身、增强电子对抗能力和对运动目标的识别搜捕能力^[3]。

多机器人系统的协同控制已经成为国内外的研究热点。协同控制涉及内容十分广泛,从应用对象的角度来讲,目前协同控制主要应用于卫星^[4]、无人机^[5]、水下自治机器人^[6]和自动化高速公路系

统^[7]。与无人机和地面机器人相比,多导弹间的协同有其自身特点。导弹的运动速度很高,这要求多导弹协同控制方法的实时性更高、通信量更小。另外导弹只能向前飞行,不可能盘旋、静止或者倒退,其弹道应尽可能平直,避免过多的转弯。而无人机和地面机器人通常并没有这些限制要求,所以适用于其他多机器人系统的协同控制方法(如文献[8-9])往往并不能直接应用于多导弹协同。

目前从公开发表的文献来看,对导弹协同制导问题的研究还比较少。文献[3]对导弹协同攻击的意义等概念性问题进行了探讨。文献[10]提出了具有导引时间限制的制导律(Impact-time-control Guidance, ITCG),并通过事先给所有导弹指定相同的导引时间,实现了反舰导弹的齐射攻击。然而这种方法需要人为地事先指定导引时间,并且在导引过程中导弹之间没有动态的信息交互。因此这是一种开环的控制方法,并不能实

收稿日期:2007-09-03; 修订日期:2007-11-16

基金项目:国家自然科学基金(60674103);国家“863”计划(2006AA04Z260);航空科学基金(2006ZC51026)

通讯作者:赵世钰 E-mail: zhaoshiyu@asee.buaa.edu.cn

现真正意义上的导弹协同。

基于协调变量的协同控制^[11]是一种通用的控制方法,为解决协同控制问题提供了一种具有普遍意义的方法策略。该方法以“协调变量”为核心;具有通信量小、分布性好的特点;可以由集中式和分散式两种协调策略来实现。基于协调变量的协同控制已经成功地应用于无人机协同控制问题^[12],也为多导弹协同控制提供了可能的解决方案。

本文提出了以具有解析形式的制导律为底层导引控制,以集中式或分散式协调策略为上层协调控制的双层协同制导结构。并且基于该协同制导结构,把ITCG与基于协调变量的协同控制方法相结合,给出了一种具体可行的多导弹协同制导方法,实现了多导弹同时击中目标的协同攻击任务。这种包含底层制导律和上层协调算法的协同制导方法结构简单且具有解析解,在本文中被称为“协同制导律”。

1 具有导引时间限制的制导律

文献[10]提出了一种ITCG。该制导律可导引导弹在事先指定的时刻击中目标。考虑到本文将在多处引用到该制导律,下面对其进行简要介绍并给出相关结果,详细的推导过程请参看文献[10]。

考虑图1所示的二维平面导引问题。 x, y 和 θ 分别表示导弹的横、纵坐标和速度方向角。导弹速率 V 保持恒定不变。目标静止位于 (x_f, y_f) 。 a 为导弹的法向加速度。 T_p 为人为事先指定的期望导引时间。导弹的运动学方程为

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = V \cos \theta \\ \frac{dy}{dt} = V \sin \theta \\ \frac{d\theta}{dt} = \frac{a}{V} \end{cases}$$

初始和终端条件为

$$\begin{cases} x(0) = 0, y(0) = 0, \theta(0) = \theta_0 \\ x(T_f) = x_f, y(T_f) = y_f, T_f = T_p \end{cases}$$

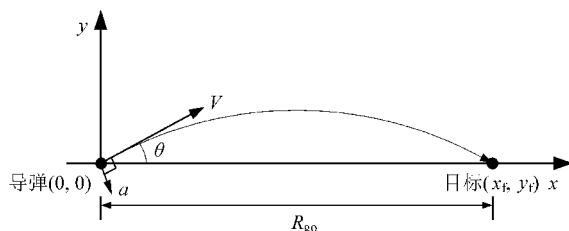


图1 制导几何关系

Fig. 1 Guidance geometry

具有终端时间限制条件的导引问题可以转化为如下线性化系统的最优控制问题:

$$\begin{bmatrix} \frac{dy}{dx} \\ \frac{d\theta}{dx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{\sqrt{V^2}} \end{bmatrix} a_B + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{\sqrt{V^2}} \end{bmatrix} a_F \quad (1)$$

初始条件为

$$x_0 = 0, \quad y(x_0) = 0, \quad \theta(x_0) = \theta_0 \quad (2)$$

终端条件为

$$y(x_f) = y_f \quad (3)$$

代价函数为

$$J = \frac{1}{2} \int_{x_0}^{x_f} a_B^2(x) dx \quad (4)$$

导引时间限制条件为

$$\int_{x_0}^{x_f} \sqrt{1 + \theta^2(x)} dx = VT_p \quad (5)$$

导弹的法向加速度在这里被分成两个部分,即 $a = a_B + a_F$ 。

首先将 a_F 视为常值,联立式(1)~式(4),由最优控制理论可解得

$$a_B = a_p - \frac{3}{2} a_F \quad (6)$$

式中: $a_p = NV\lambda$ 为由纯比例导引律给出的控制量, N 为导航比, λ 为视线角。然后将式(1)、式(5)和式(6)联立,可解得

$$a = a_B + a_F = a_p - \frac{60V^5}{a_p R_{go}^3} (\bar{T}_{go} - \hat{T}_{go}) \quad (7)$$

式中: R_{go} 为弹目距离; \bar{T}_{go} 为指定的期望导引时间; $\hat{T}_{go} = \left(1 + \frac{\theta^2}{10}\right) R_{go} / V$ 为纯比例导引的剩余时间估计。

ITCG实际上是在纯比例导引律(PNG)的基础上,通过增加一个修正项来实现对导引时间的控制。值得指出的是,该制导律有一个十分关键的问题还没得到解决,即可以事先指定的导引时间的有效范围并没有给出。指定的导引时间如果过大或过小都可能导致制导律失效。目前该制导律最大的局限性正在于此。可指定的导引时间的有效范围能否确定将在很大程度上影响该制导律在理论和实际应用中的价值大小。制导律推导过程中多次的近似和线性化处理增大了解决该问题的难度。

2 基于协调变量的协同控制

2.1 协调变量和协调函数

文献[11]提出了协调变量(Coordination

Variable)和协调函数(Coordination Function)的概念,并试图为多运动体的协同控制提供一种通用的解决方案。文献[12]进一步丰富了基于协调变量的协同控制策略,并且将这种策略应用于多固定翼无人机的协同控制中。

信息的共享是多运动体实现协同的必要条件,运动体之间能够实现协同所必需的最少量的信息被称为协调变量^[12]。如果每个运动体都能得到一致的协调变量并据此产生相应的动作,那么协同就能够实现。

设有 n 个运动体,记 χ_i, U_i 和 R^c 分别为第 $i(i=1,2,\dots,n)$ 个运动体的状态空间、控制量空间和协调变量空间。相应的,记 $x_i \in \chi_i, u_i \in U_i$ 和 $\theta_i \in R^c$ 分别为第 i 个运动体的状态量、控制量和协调变量。其中状态量 x_i 可以是广义的状态,如运动体自身信息和环境信息等。设 $f_i: \chi_i \times U_i \rightarrow R^c$, 在状态 x_i 下,第 i 个运动体的可行协调变量集为

$$\Theta_i(x_i) = \bigcup_{u_i \in U_i(x_i)} f_i(x_i, u_i)$$

设 $f_i^{\dagger}: \chi_i \times \Theta_i \rightarrow U_i$,

$$u_i = f_i^{\dagger}(x_i, \theta_i)$$

控制量 u_i 是状态量 x_i 和协调变量 θ_i 的函数。对于特定状态 x_i , 一个确定的协调变量 θ_i 对应唯一的控制量 u_i 。如果所有运动体得到了一致的协调变量,即 $\theta_1 = \dots = \theta_n = \theta^*$, 则在 $\{u_i | u_i = f_i^{\dagger}(x_i, \theta^*), i=1,2,\dots,n\}$ 的控制下,系统必能完成协同任务。除了共同的协同目标,每个运动体还有各自的性能指标。协同控制在能完成协同任务的前提下,还应满足一定的性能指标要求(例如控制能量最小,运动时间最短等)。各个运动体的性能指标用协调函数来衡量。设 $J_i: \chi_i \times U_i \rightarrow R$, 第 i 个运动体的协调函数为

$$\phi_i(x_i, \theta_i) = J_i(x_i, f_i^{\dagger}(x_i, \theta_i))$$

本质上讲,协调函数就是代价函数,用于在协调变量的可行集内确定最优的协调变量值。

2.2 集中式和分散式协调策略

应用基于协调变量的协同控制方法来设计协同控制律可以分为 4 步^[12]:

- (1) 明确协同目标。
- (2) 确定协调变量和协调函数。
- (3) 设计集中式协调策略。
- (4) 设计分散式协调策略。

关于设计步骤的细节请参看文献[12], 这里

值得指出的是基于协调变量的协同控制允许两种协调策略:集中式协调策略和分散式协调策略。如果运动体系统中部分或所有个体能够得到全局信息,那么使全局代价函数达到最小值得到的集中式协调策略是可行的。但是如果个体无法得到全局信息而只能得到其相邻运动体的信息,这时就有必要设计分散式协调策略。分散式协调策略的设计可以在集中式协调策略的设计之后进行。利用协调一致(Consensus Seeking)算法将已经得到的集中式协调策略进行分散化设计,即可得到分散式协调策略。当然这并不是说分散式协调策略只能通过这种方法得到。另外目前对协调一致算法的研究也是一个热点,可参看相关文献(如文献[13-16])。

在集中式协调策略(见图 2)中存在一个集中协调单元,该协调单元位于能够与所有运动体交互信息的平台上,例如领弹、预警机或地面站等。当然如果可能的话,每个运动体都可以拥有一个集中协调单元。所有运动体将协调必需的状态信息传送给集中式协调单元,该单元直接计算出统一的协调变量值 θ^* , 然后将其广播至所有运动体。各个运动体根据这个协调变量值产生响应,整个系统的协同就得以实现。集中式协调策略实现起来比较简单,但是集中式协调单元应能得到系统的全局信息,这在实际应用中有时是不易实现的。而且集中式协调单元在系统中处于一个核心位置,这导致了系统的一个弱点,即:集中协调单元的失效将致使整个系统的协调控制失败,因此系统的可靠性和鲁棒性较差。

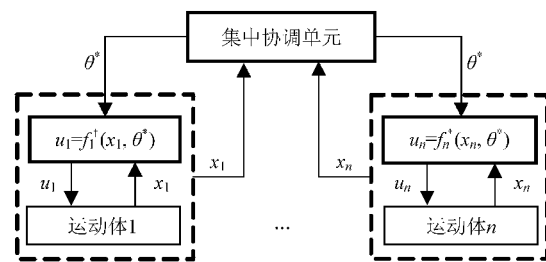


图 2 集中式协调策略

Fig. 2 Centralized coordination architecture

在分散式协调策略(见图 3)中没有集中协调单元,取而代之的是分散在各个运动体中的分散协调单元。设 N_i 表示与第 $i(i=1,2,\dots,n)$ 个运动体相邻的运动体的集合。每个运动体首先生成自己的协调变量值 θ_i , 然后根据 $\theta_j(j \in N_i)$ 不断修正自己的协调变量值,使得 θ_i 最终收敛于一致的

值 θ^* 。事实上,各个运动体的分散协调单元根据相邻运动体修正自己协调变量值的算法就是协调一致算法。集中式协调策略中一致的协调变量值 θ^* 是直接给出的,分散式协调策略中的 θ^* 是由各个运动体的协调变量 θ_i 逐渐收敛趋于一致而得到的。所以从系统获取一致的协调变量值的速度上来讲,集中式协调策略的性能更优。不过分散式协调策略不要求系统中某单元必须能够得到全局信息。即使各个运动体都不能得到全局信息,而只能得到其相邻运动体的信息,当系统拓扑结构满足一定条件时^[14],各个运动体的协调变量值仍可以在协调一致算法的控制下趋于一致。

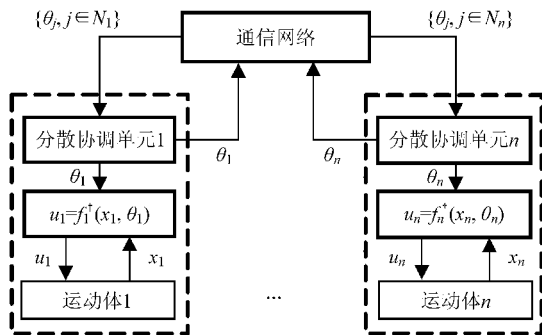


图 3 分散式协调策略

Fig. 3 Decentralized coordination architecture

3 多导弹协同制导律设计

3.1 双层协同制导结构

多导弹协同制导是一个具有高性能要求的控制问题,利用已经成功应用于其他多机器人系统的协同控制方法往往不能满足其实时性高、通信量小和弹道平直等要求。可以考虑采用一种双层的控制结构来实现协同制导(见图 4)。该双层协同制导结构包含:底层导引控制和上层协调控制。底层导引控制由分散位于各个导弹的本地制导律完成,而上层协调控制则由协调策略来实现。

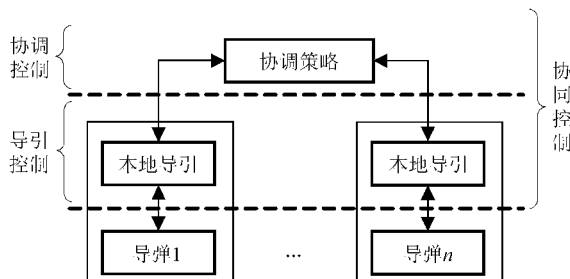


图 4 双层协同制导结构

Fig. 4 Two-level cooperative guidance architecture

将制导律引入到多导弹协同制导是该双层协同制导结构中最为关键的思想。制导律是专门为导弹导引设计的控制律,具有解析解,简单易实现,且满足导弹的飞行特点。然而以往的制导律大都只适用于单枚导弹,其设计之初并没有考虑多枚导弹协同的问题,不能直接应用于多导弹协同制导。可应用于底层导引控制的制导律应具备一个重要特征:该制导律应该具有一个或多个“可控量”。也就是说,该制导律除了能够完成导引任务以外,还应能够实现对特定量的控制,比如制导律能够控制导弹的导引时间^[10]、终端入射角度^[17]甚至路径点^[18]等。如果制导律具有可控量,就可以取该可控量为协调变量。上层协调策略根据一定的代价函数可以得到一致的协调变量值,各个导弹按照这个一致的协调变量值在本地制导律的引导下即可实现协同。因此,找到适合于给定协同任务的、具有可控量的制导律是基于此结构设计协同制导律的一个关键点。

上层协调策略可以是集中式的,也可以是分散式的。但是不论采用哪种协调策略,总的协同制导结构都属于分散式控制结构。因为导弹的导引指令完全在本地计算完成,而非由上层集中计算然后下发到各个导弹,上层协调算法只是起到了协调管理的作用,所以不会存在集中控制器计算负载过大的问题。不同的协调策略会对系统的实时性、可靠性以及通信量等产生较大影响,如何选取合适的协调策略也是协同制导律设计中的关键问题。

该双层协同制导结构具有一定的通用性,为导弹协同制导律的设计提供了一种可行的解决方案。针对不同的协同任务,结合相应的制导律和协调策略即可得到合适的协同制导律。

3.2 基于协调变量的协同制导律

下面根据双层协同制导结构设计一种具体的协同制导律,该协同制导律能控制多导弹完成同时击中目标的协同任务。其底层导引控制采用已有的 ITCG 来实现;上层协调控制采用集中式协调策略。因此,这是一种“分散式导引+集中式协调”的协同制导律。

接下来设计集中式协调算法。为了与导弹的速度方向角 θ 相区别,本节用 ξ 来表示协调变量。

假设共有 n 枚导弹参与协同攻击,要求同时击中目标。ITCG 具有一个“可控量”即期望导引时间 \bar{T}_{g0} ,因此取协调变量 ξ 为期望导引时间

\bar{T}_{go} :

$$\xi = \bar{T}_{go}$$

显然如果各个导弹的期望导引时间能够达成一致,那么在 ITCG 的导引下多导弹必能同时击中目标。

对于第 $i(i=1,2,\dots,n)$ 枚导弹,由式(7)可得其导引控制量为

$$u_i = a_{pi} - \alpha_i(\xi - \hat{T}_{goi}) \quad (8)$$

式中:

$$\alpha_i = \frac{60V_i^5}{a_{pi}R_{goi}^3}$$

取第 i 枚导弹的协调函数(即代价函数)为

$$\phi_i(x_i, \xi) = J_i(x_i, f_i^1(x_i, \xi)) = u_i^2 \quad (9)$$

即分别以各导弹的控制能量作为其各自的代价函数。由于采用集中式协同策略,综合考虑所有导弹的代价函数,取各个导弹的代价函数之和为集中协调函数,即总的代价函数是所有导弹控制能量之和:

$$J_T(\phi_1(x_1, \xi), \dots, \phi_n(x_n, \xi)) = \sum_{i=1}^n \phi_i(x_i, \xi) \quad (10)$$

各导弹的协调变量一致取值为

$$\xi^* = \arg \min_{\xi \in \cap \Theta_i(x_i)} J_T(\phi_1(x_1, \xi), \dots, \phi_n(x_n, \xi)) \quad (11)$$

即取使总代价函数达到最小的 ξ^* 作为协调变量的值。从物理意义上可理解为:取使系统总的控制能量消耗最小的导引时间为期望的导引时间。联立式(8)~式(10)可得总代价函数为

$$J_T(\phi_1(x_1, \xi), \dots, \phi_n(x_n, \xi)) = \left(\sum_{i=1}^n \alpha_i^2\right)\xi^2 - 2\left(\sum_{i=1}^n \alpha_i^2 \hat{T}_{goi} + \sum_{i=1}^n \alpha_i a_{pi}\right)\xi + \sum_{i=1}^n (a_{pi} + \alpha_i \hat{T}_{goi})^2$$

式中: $J_T(\phi_1(x_1, \xi), \dots, \phi_n(x_n, \xi))$ 为 ξ 的二次函数。结合式(11)可得

$$\xi^* = \left(\sum_{i=1}^n \alpha_i^2 \hat{T}_{goi} + \sum_{i=1}^n \alpha_i a_{pi}\right) / \sum_{i=1}^n \alpha_i^2$$

取 $\sigma = \sum_{i=1}^n \alpha_i a_{pi}$, 可化为

$$\xi^* = \left(\sum_{i=1}^n \alpha_i^2 \hat{T}_{goi} + \sigma\right) / \sum_{i=1}^n \alpha_i^2 \quad (12)$$

分析式(12)可知协调变量最优值实际上是各个导弹的剩余时间估计值的广义加权平均数。事

实上,实际过程中附加项 σ 与 $\sum_{i=1}^n \alpha_i^2 \hat{T}_{goi}$ 相比很小,往往不在一个数量级上。如果忽略附加项 σ , 则可得协调变量次优值:

$$\xi^\dagger = \sum_{i=1}^n \alpha_i^2 \hat{T}_{goi} / \sum_{i=1}^n \alpha_i^2 \quad (13)$$

式中: $\alpha_i = \frac{60V_i^5}{a_{pi}R_{goi}^3}$ 。 ξ^\dagger 并非严格最优解,但是其物理意义十分明显:多导弹通过协商得到的期望导引时间值就是各个导弹剩余时间估计值的加权平均数。

式(13)就是集中式协调算法。本文使用集中式协调策略来实现多导弹协同制导,期望导引时间由集中协调单元直接计算得到。如果要实现分散式协调策略,可以以式(13)为基础,通过应用协调一致算法来得到。实际上,对式(13)的分散化设计是一个典型的加权平均协调一致问题,关于协调一致算法和分散化设计问题可参看相关文献(如文献[15-16]),本文不再详述。

由 ITCG 对各个导弹进行本地导引控制,由协调算法式(13)对多导弹进行协调控制,二者相结合就得到了协同制导律(见图 5)。第 i 枚导弹将协同需要的信息(α_i, \hat{T}_{goi}) 传送给集中协调单元。集中式协调单元根据集中式协调算法式(13)得到协调变量次优值,然后将其广播至所有导弹。各个导弹在收到统一的协调变量值以后,根据式(8)可得到其导引控制量 u_i ,整个导弹编队在分散导引控制 $\bigcup_{i=1}^n u_i$ 的控制下完成协同任务,同时击中目标。

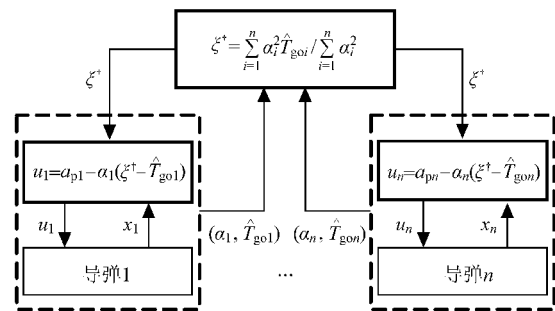


图 5 协同制导律

Fig. 5 Cooperative guidance law

实际应用中, $a_{pi}(i=1,2,\dots,n)$ 的绝对值可能很小。绝对值很小的数位于分母上将导致数值特性很差,因此在式(13)的分子分母上同时乘以 $\prod_{j=1}^n a_{pj}^2$, 可得到数值特性良好的结果:

$$\xi^i = \sum_{i=1}^n \left(\frac{V_i^5}{R_{goi}^3} \prod_{j=1, j \neq i}^n a_{pj} \right)^2 \hat{T}_{goi} / \sum_{i=1}^n \left(\frac{V_i^5}{R_{goi}^3} \prod_{j=1, j \neq i}^n a_{pj} \right)^2$$

由于采用了合适的导弹制导律, 底层导引控制完全符合导弹的飞行特点, 导引的实时性不存在问题。集中式协调算法式(13)具有解析解, 形式简洁, 协调实时性也可得到保证。而且协调一致所需通信量很小, 导弹需要发送的信息仅包括 α_i 和 \hat{T}_{goi} , 需要接收的信息仅有一项即 ξ^i 。

4 仿真结果与分析

为了验证前面提出的协同制导律性能, 下面对其进行数字仿真。设共有 5 枚导弹参与协同攻击, 要求同时击中目标。目标静止位于 (0, 0) m, 导弹初始时刻的参数如表 1 所示。

表 1 导弹初始参数

Table 1 Initial parameters of missiles

导弹	坐标/m	航向角/(°)	速度/(m·s ⁻¹)
1	(-6 894, -5 785)	70	280
2	(-3 249, -8 927)	95	320
3	(2 329, -8 693)	135	250
4	(8 426, -7 071)	120	330
5	(9 397, -3 420)	115	300

首先, 在纯比例制导律的导引下(取导航比为 3.5), 5 枚导弹的导线轨迹如图 6 所示。导引时间分别为: 32.84, 30.12, 36.78, 33.63, 34.74 s。其中导弹 3 的导引时间最长, 为 36.78 s。最长导引时间和最短导引时间之差 $\Delta T = 6.66$ s。 ΔT 与各个导弹导引时间比值均在 20% 左右, 说明 5 枚导弹的导引时间之间存在相对较大的差别。

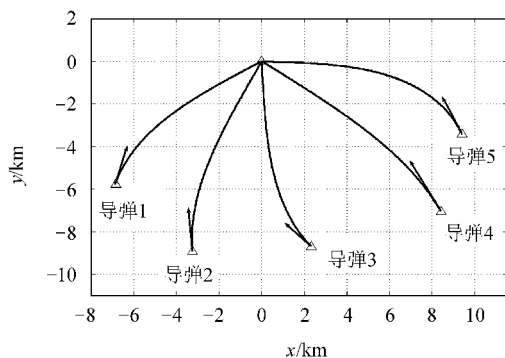


图 6 纯比例导引下的导弹轨迹

Fig. 6 Trajectories of PNG

将协同制导律应用于该系统, 5 枚导弹同时击中目标(见图 7)。协同导引时间为 36.15 s, 与纯比例导引下导引时间最大值, 即导弹 3 的导引时间 36.78 s 相比, 两者很接近。在纯比例导引下导引时间最长的导弹(导弹 3)的弹道最为平直, 而其他导弹的弹道相对比较弯曲。这从物理

意义上也容易理解: 原来最慢的导弹会选择较平直的路线尽可能快地接近目标, 而原来相对较快的导弹都必须绕些弯路以等待最慢的导弹。

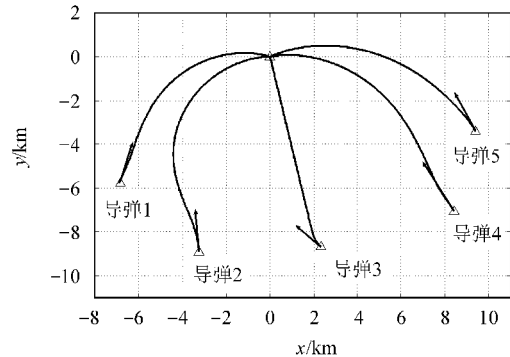


图 7 协同制导下的导弹轨迹

Fig. 7 Trajectories of cooperative guidance

图 8 为协同制导过程中, 协调变量次优值(即期望导引时间)、各导弹剩余时间估计值及其与协调变量的误差的曲线图。从图中可以看出, 协调变量很快收敛, 并且各导弹剩余时间与协调变量的误差最终收敛于零。注意到协调变量收敛后与导弹 3 的剩余时间几乎完全重合, 而比其他导弹的略大。从式(13)加权平均的角度也容易理解: 在多导弹协商决定共同的期望导引时间时, 剩余时间最大的导弹权值最大, 对协商结果的影响最大。这一点也可以从图 9 中得到验证。图 9 为协同制导过程中各个导弹权值的变化情况, 可以看出在权值收敛后导弹 3 的权值最大且接近于 1, 说明 5 枚导弹中导弹 3 的剩余时间对期望导引时间的影响最大。

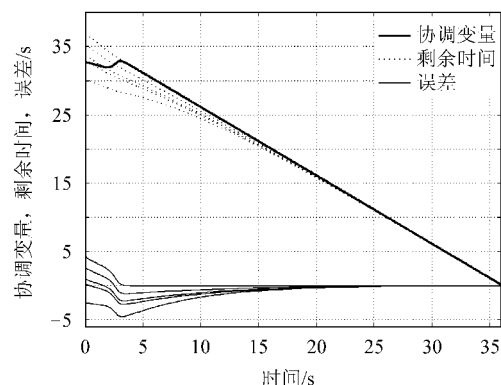


图 8 协调变量、剩余时间及其误差

Fig. 8 Coordination variable, time-to-go and error of cooperative guidance

从仿真结果来看, 该协同制导律实现了多导弹协同制导, 完成了同时击中目标的任务, 并且导弹弹道平直, 协调变量收敛迅速, 协同导引时间短。

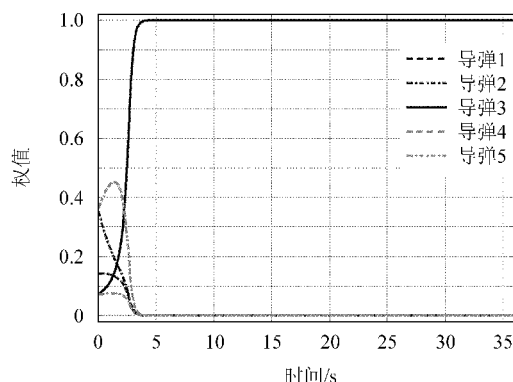


图9 各导弹权值

Fig. 9 Weights of the missiles

5 结论

本文提出了一种双层协同制导结构,并在此基础上,给出了一种具体可行的能实现多导弹同时击中目标的协同制导律。该双层协同制导结构为导弹协同问题提供了一种具有一定通用性的解决方案。在基于此双层协同制导结构的协同制导律设计过程中,如何根据特定的协同任务,得到合适的制导律将是必须解决的问题。另外,如何结合制导律给出性能优良的协调算法以及寻找更好的导弹协同制导体系结构也是将来值得研究的问题。

参 考 文 献

- [1] 关世义. 飞航导弹突防技术与战术导论[J]. 战术导弹技术, 2006(4): 1-8.
Guan Shiyi. Introduction to penetration technologies and tactics for aerodynamic missile[J]. Tactical Missile Technology, 2006(4): 1-8. (in Chinese)
- [2] 顾文锦, 赵红超, 王凤莲, 等. 导弹末端机动的一体化控制模型[J]. 宇航学报, 2004, 25(6): 677-680.
Gu Wenjin, Zhao Hongchao, Wang Fenglian, et al. Integrative control model of missiles terminal maneuver[J]. Journal of Astronautics, 2004, 25(6): 677-680. (in Chinese)
- [3] 张克, 刘永才, 关世义. 体系作战条件下飞航导弹突防与协同攻击问题研究[J]. 战术导弹技术, 2005(2): 1-7.
Zhang Ke, Liu Yongcai, Guan Shiyi. An investigation into the issues of penetration and cooperative engagement for aerodynamic missile under the condition of systems countermeasures[J]. Tactical Missile Technology, 2005(2): 1-7. (in Chinese)
- [4] Carpenter J R. Decentralized control of satellite formations[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2002, 12(2/3): 141-161.
- [5] Chandler P R, Pachter M. UAV cooperative control[C]//Proceedings of the American Control Conference. 2001: 50-55.
- [6] Stilwell D J, Bishop B E. Platoons of underwater vehicle: communication, feedback, and decentralized control[J]. IEEE Control System Magazine, 2000, 20(6): 45-52.

- [7] Wit C C, Brogliato B. Stability issues for vehicles platooning in automated highway systems[C]//Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Control Application. 1999: 1377-1382.
- [8] Dimarogonas D V, Kyriakopoulos K J. On the rendezvous problem for multiple nonholonomic agents[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2007, 52(5): 916-922.
- [9] 周明, 孙树栋, 彭炎午. 基于遗传算法的多机器人系统中协调式路径规划[J]. 航空学报, 2000, 21(2): 146-149.
Zhou Ming, Sun Shudong, Peng Yanwu. A centralized coordinated path planning method based on genetic algorithm for multiple mobile robots[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2000, 21(2): 146-149.
- [10] Jeon I S, Lee J I, Tahk M J. Impact-time-control guidance law for anti-ship missiles[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2006, 14(2): 260-266.
- [11] McLain T W, Beard R W. Coordination variables, coordination functions, and cooperative timing missions[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2005, 28(1): 150-161.
- [12] Beard R W, McLain T W, Nelson D B, et al. Decentralized cooperative aerial surveillance using fixed-wing miniature UAVs[J]. Proceedings of the IEEE, 2006, 94(7): 1306-1324.
- [13] Moreau L. Stability of multiagent systems with time-dependent communication links[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2005, 50(2): 169-182.
- [14] Olfati-Saber R, Murray R M. Consensus problems in networks of agents with switching topology and time-delays[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2004, 49(9): 1520-1533.
- [15] Xiao L, Boyd S. Fast linear iterations for distributed averaging[J]. Systems and Control Letters, 2004, 53(1): 65-78.
- [16] 俞辉, 蹇继贵, 王永骥. 多智能体时滞网络的加权平均一致性[J]. 控制与决策, 2007, 22(5): 558-565.
Yu Hui, Jian Jigui, Wang Yongji. Weighted average-consensus for networks of multi-agent with time-delays[J]. Control and Decision, 2007, 22(5): 558-565. (in Chinese)
- [17] Lee J I, Jeon I S, Tahk M J. Guidance law to control impact time and angle[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2007, 43(1): 301-309.
- [18] Ryoo C K, Shin H S, Tahk M J. Optimal waypoint guidance synthesis[C]// Proceedings of the 2005 IEEE Conference on Control Applications. 2005: 1349-1354.

作者简介:

赵世钰(1984-) 男, 硕士研究生。主要研究方向: 飞行器制导与控制。

Tel: 010-82338672

E-mail: zhaoshiyu@asee.buaa.edu.cn

周锐(1968-) 男, 博士, 教授。主要研究方向: 飞行器制导与控制。

E-mail: zhr@buaa.edu.cn

(责任编辑: 张利平, 孔琪颖)