

超地平覆盖飞行器组网星座优化设计

王绍凯, 崔红正, 韩 潮

(北京航空航天大学 宇航学院, 100191 北京)

摘要: 对超地平覆盖飞行器的概念及特性进行了简要的描述, 以该类飞行器中的通用航空飞行器(CAV)为例, 对该类型飞行器组网星座的优化设计进行了研究. 首先基于单个CAV对地覆盖区域的分析, 提出了一种几何意义更加清晰和简单的CAV再入对地覆盖区域的分析方法; 其次通过提出等效的CAV星座覆盖性能指标—平均轨道响应时间, 建立了CAV组网星座优化设计的数学模型; 最后通过采用遗传算法对CAV组网星座进行了优化设计. 通过分析优化设计的结果, 说明了这种设计方案的有效性.

关键词: 超地平覆盖; CAV; 组网星座; 优化设计; 遗传算法

中图分类号: V412.4

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2013)07-109-06

Constellation optimization design for hyper-horizon coverage vehicles

WANG Shaokai, CUI Hongzheng, HAN Chao

(School of Astronautics, Beihang University, 100191 Beijing, China)

Abstract: In the paper, the concept of hyper-horizon coverage vehicle was briefly described, and the optimization of the Common Aero Vehicle (CAV) constellation was investigated. First, based on the analysis of earth coverage of a single CAV, a new method was proposed to analyze the earth coverage of CAV, which was simple and geometrical meaningful. Then a math model of the optimization of a CAV constellation was established by introducing the concept of average visit time on orbit, which was an equivalent coverage performance of CAV constellation. At last, genetic algorithm was used to optimize the parameters of CAV constellation and the results validated the proposed method and mathematical model.

Key words: hyper-horizon coverage; CAV; constellation; optimization design; genetic algorithm

对于资源卫星、通信卫星和定位卫星等的地面覆盖分析通常在于评估卫星最远的可观测点, 受可见性约束的影响, 而这些点对卫星的仰角往往大于 0° , 即卫星是在这些点当地水平之上的. 而一些采用升力再入方式的飞行器, 从其选定的再入点开始, 由于其升力的影响及再入制导律等的影响, 从而使其可到达的地面的最远的边界点不受可见性的约束, 如图1所示. 这些点对再入点位置的仰角可以小于 0° , 即飞行器是在这些边界

点当地水平之下的, 此类飞行器就叫做超地平覆盖飞行器. 此类飞行器主要有可重用的轨道机动飞行器, 通用航空飞行器, 高性能机动再入飞行器^[1], 高超声速滑翔飞行器^[2]等. 目前, 针对此类飞行器的研究主要集中在单个飞行器的再入轨迹优化, 制导技术的研究^[1-3]和气动建模^[2]等, 组网星座等方面的研究相对较少. 所以本文从该类飞行器中的一种通用航空飞行器(The Common Aero Vehicle - CAV)出发, 对该类飞行器组网星座优化设计进行了一定的研究.

通用航空飞行器^[4]是一种可以通过空间或由空间投放和配送载荷、物资以及武器, 具有多种投放飞行任务能力的再入飞行器系统. 自身不带动力, 可用多种发射工具(弹道导弹、运载火箭、HCV、SOV等)发射, 再入后依靠其独特的气动外

收稿日期: 2012-08-06.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11002008); 国家重点基础研究发展计划资助项目(2009CB723906).

作者简介: 王绍凯(1984—), 男, 博士研究生;

崔红正(1984—), 男, 博士;

韩潮(1960—), 男, 教授, 博士生导师.

通信作者: 王绍凯, wskbuaa1984@gmail.com.

形进行滑翔,依靠自身的控制舵和 GPS/INS 复合制导系统进行机动和控制. CAV 是美国未来全球精确打击体系中最重要武器,是其他武器平台作战的重要备选有效载荷.

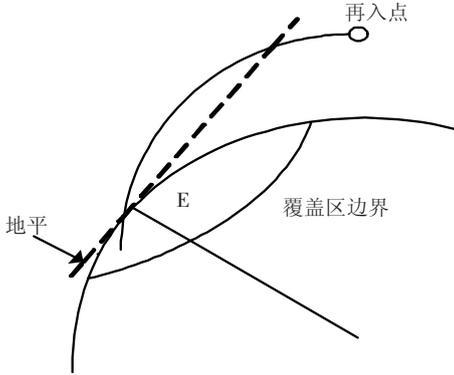


图1 超地平覆盖示意图

近年来,针对 CAV 的研究也得到了广泛的开展,这些研究主要集中在 CAV 的再入,地面覆盖及 CAV 星座的设计几个方面. Jorris^[5] 通过数值解法研究了满足一定约束条件的 CAV 最优再入轨迹, Anderson J^[6] 和赵瑞安^[7] 研究了 CAV 的地面覆盖分析,提出了 CAV 星座概念,即多个通用航空飞行器以指定性能覆盖指定的地面区域,并在此基础上采用街区覆盖方法和改进的街区覆盖方法对投放系统的星座设计进行了一定的阐述. 本文在上述文献[6]和[7]的基础上,通过对 CAV 对地面覆盖分析的简化和覆盖性能指标的转化,提出了基于 CAV 覆盖分析的星座设计方法,实现了 CAV 星座优化设计计算,并应用于两个不同的星座设计算例,结果表明该方法是可行的.

1 单个 CAV 地面覆盖分析

CAV 的地面覆盖分析与通常的资源卫星、通信卫星和定位卫星的地面覆盖分析不同. 首先,通常的卫星多在于评估卫星星下点最远的可观测点,而这里则必须研究投放飞行器的再入终迹^[7],即当指定一个再入点时,再入飞行器在地球表面上可达区域边界的曲线. 这个再入终迹的大小主要决定于投放飞行器轨道平面的倾角、投放飞行器的性能,特别是最大升阻比 E^* . 其次,CAV 不像通常卫星那样可以随意瞬间操作,它必须在有限的时间内穿过大气层,而且一般要求投放飞行器要保证在作出对地面攻击决策时刻开始起算的某个时间段内,到达预定落点,称此时间为投放窗口.

在对 CAV 的地面覆盖进行分析时,文献[7]中提出了如下基本假设:

1) 地球为非旋转球形地球;

2) 大气密度随高度按指数分布;

3) 引力加速度在整个轨道上为常数;
根据文献[7],CAV 的再入运动方程为

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dh}{dt} &= v \sin \gamma, \\ \frac{d\theta}{dt} &= \frac{v \cos \gamma \cos \psi}{(R_E + h) \cos \phi}, \\ \frac{d\phi}{dt} &= \frac{v \cos \gamma \sin \psi}{R_E + h}, \\ \frac{dv}{dt} &= -\frac{C_D S \rho_0 e^{-h/H} v^2}{2m} - g_0 \sin \gamma, \\ \frac{d\gamma}{dt} &= \frac{1}{v} \left[\frac{C_D S \rho_0 e^{-h/H} v^2}{2m} E^* \cos \sigma - \left(g_0 - \frac{v^2}{R_E + h} \right) \cos \gamma \right], \\ \frac{d\psi}{dt} &= \frac{1}{v} \left[\frac{C_D S \rho_0 e^{-h/H} v^2}{2m} \frac{\sin \sigma E^*}{\cos \gamma} - \frac{v^2}{R_E + h} \cos \gamma \cos \psi \tan \phi \right]. \end{aligned} \right. \quad (1)$$

式中, h 为高度, θ 为惯性系中的经度, ϕ 为惯性系中的纬度, v 为速度, γ 为当地速度倾角, ψ 为航向角, E^* 为最大升阻比, S 为飞行器迎风最大横截面积, C_D 为阻力系数, ρ_0 为海平面平均大气密度, σ 为滚转角, m 为质量, g_0 为引力加速度常量.

为了构造再入飞行器的轨迹,必须对最小纵程经度 θ_{fmin} 和最大纵程经度 θ_{fmax} 之间的每一个规定的最终纵程经度 θ_f 都求出其最大横程纬度 $\lambda_{max} = \max \phi_f$, 这是一个以升力和滚转角为控制变量,动力学约束为 CAV 再入运动方程,代价函数为使最终横程取最大的最优控制问题. 文献[4]基于一定的滚转角控制率给出了 θ_{fmin} 和 θ_{fmax} 的求解方法. 基于 θ_{fmin} , θ_{fmax} 及 CAV 的最大升阻比 E^* 可以构造出 CAV 的完全终迹. 如图 2 所示.

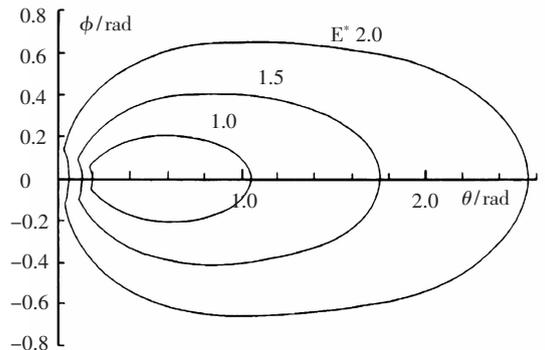
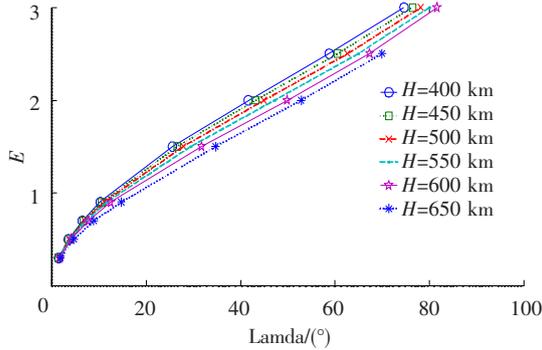


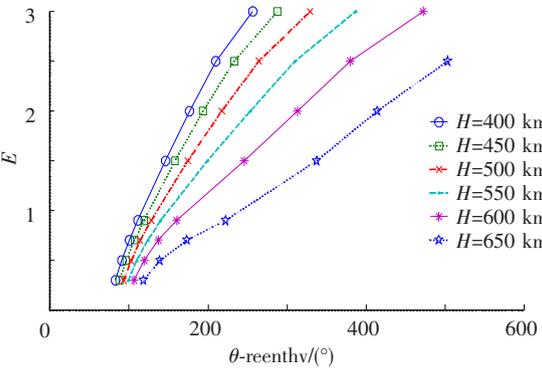
图2 CAV 的完全终迹

阮春荣^[8] 给出了再入飞行器的最大升阻比对再入过程中可变滚转角控制律的影响,并给出了最大升阻比与最优滚转角的关系,这样就可以采用求

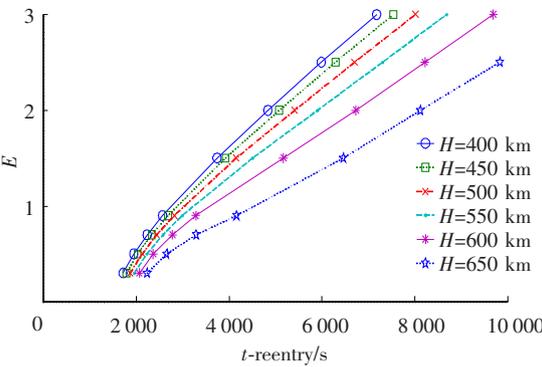
出的最优滚转角对再入运动方程进行数值积分,从而求得最大横程纬度 $\lambda_{\max} = \max \phi_f$ 以及相应的再入时间 t_{reentry} 和纵程经度 θ_{reentry} 的方法. 通过求解,再入飞行器的最大升阻比,轨道高度以及求得的再入终迹的各项指标之间的关系如图3所示:



(a) 不同轨道高度和升阻比下 CAV 最大横程纬度



(b) 不同轨道高度和升阻比下 CAV 再入纵程经度



(c) 不同轨道高度和升阻比下 CAV 再入时间

图3 不同轨道高度和最大升阻比下的各项再入指标

基于上述再入终迹的各项指标,本文构造了CAV对地覆盖再入终迹的区域范围.沿CAV轨道面切个剖面,如图4所示.

如上述对再入终迹的定义,上图4中A点即为最小纵程经度的位置,B点为最大纵程经度的位置,D点为中间且最大横程位置,可以认为DC为覆盖区域的宽度的一半为 λ_{\max} . 该区域可以视为CAV在图4中轨道位置时对地面“覆盖区域”.根据图4中的几何关系,该区域等效于以地心O点为顶点,以向量 \vec{OD} 为视场中心轴,短半轴锥角

和长半轴锥角分别为 α 和 β 的椭圆锥与地球相交的区域,而且锥角满足如下关系式:

$$\begin{cases} \alpha = \lambda_{\max}, \\ \beta = \frac{\theta_{\max} - \theta_{\min}}{2}. \end{cases} \quad (2)$$

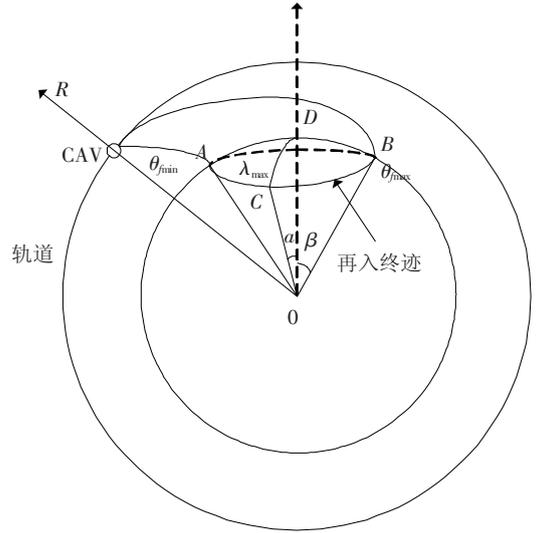


图4 CAV 再入终迹剖面示意图

这样,判断地面点是否在CAV的再入终迹内的条件就等效为判断地面点是否在以地心O点为顶点,以向量 \vec{OD} 为对称轴,锥角分别为 α 和 β 的椭圆锥内的条件.其中,向量 \vec{OD} 可以根据CAV的轨道位置向量 \vec{OR} 及最大横程纬度D点所相对应的再入纵程经度 θ_{reentry} 求得.

如图5所示,沿视场中心轴 (Z_R 轴) 方向,过地面点S做剖切面,可得椭圆锥视场在该地面点的椭圆形视框.如果地面点S位于该椭圆框内,那么该地面点在椭圆锥视场内.

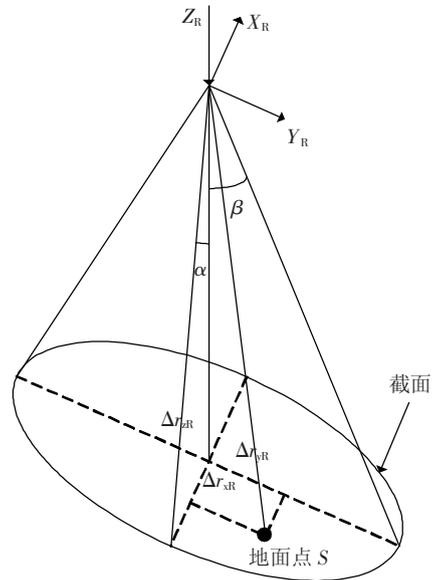


图5 椭圆锥视场几何模型

该椭圆形边界可用如下数学方程来描述:

$$\left(\frac{x}{\Delta r_{zR} \tan \alpha}\right)^2 + \left(\frac{y}{\Delta r_{zR} \tan \beta}\right)^2 = 1. \quad (3)$$

则地面点位于该椭圆形边界内的条件为

$$\left(\frac{\Delta r_{xR}}{\Delta r_{zR} \tan \alpha}\right)^2 + \left(\frac{\Delta r_{yR}}{\Delta r_{zR} \tan \beta}\right)^2 \leq 1. \quad (4)$$

另外,尽管 CAV 到达终迹各点的时间是变化的,但为了简化分析,只对终迹最宽处的点感兴趣,认为 $t_{reentry}$ 为一常值,不考虑在 $t_{reentry}$ 之前的落地点. 这种简化方法是一种保守的估计,可以应用于星座的优化设计分析.

2 CAV 星座对地覆盖性能指标及计算步骤

本文定义地面点被 CAV 星座覆盖的平均响应时间 t_{visit} 为该点随机发出覆盖请求开始到该点被覆盖为止的等待时间. 由于 CAV 从再入点到其到达再入终迹地面区域,经过了再入时间 $t_{reentry}$, 所以该响应时间应该由两部分组成,即自决策时刻起 CAV 在轨道上的飞行时间 $t_{onorbit}$ 和再入时间 $t_{reentry}$, 为了满足 CAV 星座投放窗口时间 TTT 的要求,地面点被 CAV 星座覆盖的平均响应时间应满足如下关系式:

$$t_{visit} = t_{onorbit} + t_{reentry} < TTT. \quad (5)$$

本文定义 $t_{onorbit}$ 为 CAV 的“平均轨道响应时间”,即地面点随机发出覆盖请求开始到 CAV 飞行到该地面点能被覆盖对应的再入点的时间. 根据式(5),则此星座的“平均轨道响应时间”应该满足

$$t_{onorbit} < TTT - t_{reentry} \quad (6)$$

由于普通卫星对地覆盖的约束条件为是否可见,即是否满足地面最小工作仰角,没有再入过程,所以卫星对地面点的响应时间即指的是卫星轨道上的飞行时间. 所以本文定义的 CAV 星座的“平均轨道响应时间”的计算方法等同于普通卫星星座对地面点可见的平均响应时间的计算方法. 具体如下

CAV 星座对地面覆盖性能指标的计算采用改进的网格点仿真法^[9]. 改进的网格点仿真法的基本思想是首先将区域化分成若干网格,然后根据单个 CAV 覆盖地面点时需要满足的条件,计算 CAV 对每一个网格点的覆盖时刻集;然后合并所有 CAV 的覆盖时刻集;最后根据合并后得到的星座覆盖时刻集计算星座对地面点的覆盖性能指标. 其步骤如下所示:

1) 求解单个 CAV 对单个网格点的覆盖时刻集;其中,设星座中 CAV 总数为 Q ,第 k 个 CAV 队

网格点的覆盖次数为 $n_k, k = 0, \dots, Q. t_{in}^{in}, t_{out}^{out}$ 表示第 k 个 CAV i_k 次覆盖的起始和终止时刻. 则每个 CAV 的覆盖函数为

$$f_k(t) = \begin{cases} 1 & t \in \bigcup_{i_k=1}^{i_k=n_k} [t_{in}^{i_k}, t_{out}^{i_k}], \\ 0 & t \notin \bigcup_{i_k=1}^{i_k=n_k} [t_{in}^{i_k}, t_{out}^{i_k}]. \end{cases} \quad (7)$$

2) 合并生成 CAV 组网星座对单个网格点的覆盖时刻集;合并后星座覆盖函数为

$$f(t) = \sum_{s=1}^Q f_s(t) = \begin{cases} \dots & \\ 0 & \end{cases} \quad (8)$$

3) 统计得到 CAV 星座对所有网格点的覆盖统计性能指标. 根据上面两步的计算,设合并后星座 k 重覆盖次数为 $n, t_{in}^{in}, t_{out}^{out}$ 分别表示第 i 次覆盖起始时刻和终止时刻,则星座 k 重覆盖时刻集为 $\bigcup_{i=1}^n [t_{in}^i, t_{out}^i]$,其计算方法如下

$$\begin{cases} t_{in}^1 = \min(t_{in}^{i_k}), \\ t_{in}^1 = \min(t_{out}^{i_k}) & f(t) \geq k, \forall t \in [t_{in}^1, t_{out}^1]. \\ t_{in}^{i+1} = \min(t_{in}^{i_k}), \\ t_{in}^{i+1} = \min(t_{out}^{i_k}) & f(t) \geq k, \forall t \in [t_{in}^{i+1}, t_{out}^{i+1}]. \end{cases} \quad (9)$$

式中: $i_k = 0, \dots, n_k.$

4) 根据下式覆盖时刻集统计得到 CAV 星座对所有网格点的“平均轨道响应时间”性能指标:

$$t_{onorbit} = t_{MeanResponseTime} = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (t_{in}^{i+1} - t_{out}^i)^2 + (t_{in}^1 - t_{begin})^2 + (t_{end} - t_{out}^n)^2}{2(t_{end} - t_{begin})}. \quad (10)$$

3 CAV 组网星座构型优化设计

星座优化设计问题是一个连续变量和离散变量混合优化问题,需要设定优化目标函数 $f(X)$, 以及约束条件 $g(X)$. 其中, X 为星座优化参数. 一般情况下,为了考虑星座设计成本和发射成本,要求星座满足一定的覆盖条件时的 CAV 总数最少,即把 CAV 总数 T 作为优化目标,此时星座的覆盖性能“平均轨道响应时间”,用 $g(X)$ 表示,由于其投放窗口为 TTT, 则 $0 \leq g(X) \leq (TTT - t_{reentry})$ 作为约束条件. 取 σ 为一个很大的正数,根据罚函数法将有约束优化转化为无约束优化.

另外,针对 CAV 的任务特性,选择全球覆盖,纬度带覆盖等覆盖方式进行分析,并建立优化数学模型.

由于椭圆轨道上的每一点的轨道高度都不一

样,使 CAV 在每一时刻的再入时间都在发生变化,这跟前述 CAV 对地覆盖分析的简化情况不符,故在本文中,对于 CAV 组网星座的轨道采用圆轨道。

全球覆盖和纬度带覆盖:

考虑到全球覆盖和纬度带覆盖的对称性,故采用均匀对称的 Walker 星座构型^[12-13]。其中,其中 Walker- δ 星座得到了普遍承认和广泛应用。

Walker 星座是一种对称星座,它的设计参数包括卫星总数 T ,轨道平面数 P ,相位因子 F ,轨道倾角 i ,轨道高度 a ,故星座的构型可表示为 $T/P/F:i/a$ 。Walker 星座的 P 个轨道平面按升交点赤经均匀分布,每个轨道平面内均匀分布 $S(S = T/P)$ 颗卫星,相邻轨道平面内相同站序号的卫星之间的相位差为

$$\Delta u = 2\pi F/T. \quad (11)$$

式中: $F = 0, 1, \dots, P - 1$ 。设 Walker 星座中第 1 个轨道面的升交点赤经为 Ω_1 ,第 1 个轨道面内第 1 颗卫星的平近点角为 M_{11} ,则第 k 个轨道面的升交点赤经为

$$\Omega_k = \Omega_1 + (k - 1) \times 2\pi/P, k = 2, 3, \dots, P. \quad (12)$$

式中: k 为轨道面序号。

其它卫星的平近点角为

$$M_{kj} = M_{11} + (k - 1) \times 2\pi \times F/T + (j - 1) \times 2\pi/S, k = 1, 2, \dots, P, j = 1, 2, \dots, S. \quad (13)$$

式中: j 为轨道面内卫星的序号。

其星座优化数学模型为

$$\begin{cases} \max f(X) = \max(-\sum_1^P S_j), \\ 0 \leq g(X) \leq TTT - t_{reentry}, \\ X = (S, P, F, i, a, e, \omega, \Omega_1, M_{11})^T. \end{cases} \quad (14)$$

满足,

$$\begin{cases} S_l < S < S_u, \\ P_l < P < P_u, \\ F_l < F < F_u, \\ a_l < a < a_u, \\ i_l < i < i_u, \\ 0 < \Omega_1 < 2\pi, \\ 0 < M_{11} < 2\pi. \end{cases} \quad (15)$$

式中:“ l ”代表变量的下界,“ u ”代表变量的上界。因为为圆轨道,设置 $e = 0, \omega = 0$ 。

4 算例分析

本节采用全局寻优的优化算法遗传算法^[14-15]对上述优化数学模型进行优化。算例包含了全球覆盖和纬度带覆盖两种,初始条件的设置如表 1 和表 2 所示,其中包含了仿真采用的基本初始条件和优化算法相关的如优化目标,约束条件,优化的搜索空间等。

表 1 算例中基本初始条件设置

	CAV 参数				覆盖区域				预报器	仿真开始时间	仿真结束时间
	最大升阻比	质量/kg	横截面积 /m ²	投放窗口/min	经度/(°)		纬度/(°)				
全球覆盖	1.5	1 000	10	90	-180	-180	-90	-90	二体	2011-01-01	2011-01-06
纬度带覆盖					-180	-180	-90	-90			

表 2 算例中优化算法初始条件设置

星座类型	优化目标	约束条件	搜索空间				遗传算法参数	
			P	S	a/km	$i/(°)$	算法群体规模	迭代次数
全球覆盖	Walker- δ 星座中	$0 \leq t_{orbit} =$	3-10	2-10	6 678.14- 7 078.14	20-90	50	100
纬度带覆盖	星座构型 CAV 个数最少	$t_{MeanResponseTime} \leq (TTT - t_{reentry})$						

表 3 中列出了上述两个算例的仿真计算结果,包含了优化所得的最优星座的构型,每个在轨 CAV 的轨道要素,优化计算的时间及整个星座的覆盖性能指标等结果。

在表 3 遗传算法的计算结果中,实现了算例中 CAV 星座对全球覆盖和纬度带覆盖的要求,且“平

均轨道响应时间”也满足小于 $(TTT - t_{reentry})$ 的约束要求。星座中的 CAV 个数分别为 10 个和 6 个,其轨道高度分别为 6 778. 14 km 和 6 903. 22 km,其“平均轨道响应时间”分别为 871. 53 s 和 571. 13 s,再入时间分别为 3 738 s 和 4 306 s,星座中的轨道要素如表 3 所示。

表 3 算例星座优化计算结果

覆盖类型	CAV 个数	轨道面数	平均轨道响应时间	再入时间	a/km	e	$i/(^\circ)$	$\Omega/(^\circ)$	$\omega/(^\circ)$	$M/(^\circ)$
全球覆盖 CAV 星座	10	5	871.53 s	3 738 s	6 778.14	0	69.01	274.24	0	164.21
								274.24		344.21
								346.24		236.21
								346.24		56.21
								58.24		308.21
								58.24		128.21
								130.24		20.21
								130.24		200.21
								202.24		92.21
								202.24		272.21
纬度带覆盖 CAV 星座	6	3	571.13 s	4 306 s	6 903.22	0	28.37	172.06	0	207.66
								172.06		27.66
								292.06		327.66
								292.06		147.66
								52.06		87.66
								52.06		267.66

由上述结果可知,虽然上述两种算例不是同种覆盖模式,但当轨道高度降低,再入时间变小时,其对应的“平均轨道响应时间”增大,这种变化趋势,验证了本文算法考虑的约束条件情况.相比于文献[6]和[7]只从纯几何的街区覆盖实现对地面区域的全覆盖,本文的算法从 CAV 轨道运动规律的基础上,考虑了覆盖地面点的条件,通过采用 CAV 星座覆盖性能指标“平均轨道响应时间”的约束条件,并应用优化算法,最后给出了更明确和有效的定量分析结果.

5 结 论

1)对单个 CAV 再入终迹进行分析,通过计算得到的再入终迹各参数的特征,对其再入终迹进行等效简化,提出了一种新的几何意义更加清晰和简单的 CAV 对地覆盖区域的分析方法.

2)将上述新的单个 CAV 对地覆盖分析的方法应用到星座优化设计中,并提出了 CAV 星座对地面覆盖的等效性能指标“平均轨道响应时间”.结合此种星座性能指标,建立了数学模型,并利用传统的优化算法对此类星座进行优化设计,得到了满足相应约束的 CAV 星座构型结果,得到的结果说明了此设计方法的有效性.

3)相比于文献[6]和[7]只从纯几何的街区覆盖实现对地面区域的全覆盖进行比较,本文提出的 CAV 星座优化设计方法给出了更明确和有效的定量分析结果.

参考文献

[1] 薛松柏. 升力再入飞行器轨道规划与制导技术研究 [D]. 北京:北京航空航天大学, 2011:1-7.
 [2] 刘建霞. 高超声速滑翔式飞行器气动热建模与分析 [D]. 长沙:国防科技大学, 2008:1-10.
 [3] 胡正东. 天基对地打击武器轨道规划与制导技术研究 [D]. 长沙:国防科技大学, 2009:1-19.

[4] PHILLIPS T H. A common aero vehicle (CAV) model, description, and employment guide [R]. [S. l.]: Schafer Corporation for AFRL and AFSPC, 2003:1-12.
 [5] JORRIS T R. Common aero vehicle autonomous reentry trajectory optimization satisfying waypoint and no-fly Zone Constraints [D]. Alabama: Air University, 2007:1-9.
 [6] ANDERSON J. Optimal constellation design for orbital munitions delivery system [D]. Alabama: Air University, 2004:1-47.
 [7] 赵瑞安. 空间武器轨道设计 [M]. 北京:中国宇航出版社, 2008:348-413.
 [8] 阮春荣. 大气中飞行的最优轨迹 [M]. 茅振东译. 北京:中国宇航出版社, 1987:202-215.
 [9] 韩潮, 邓丽, 徐嘉. 星座覆盖性能评估的改进网格点仿真法 [J]. 计算机仿真, 2005, 22(12):21-56.
 [10] 闫野, 任萱, 陈磊. 卫星对地球覆盖情况的判据及算法探讨 [J]. 宇航学报, 1999, 20(2):55-60.
 [11] 徐敏, 程凤舟, 陈士橹. 视函数法分析卫星覆盖研究 [J]. 飞行力学, 2000, 18(3):10-13.
 [12] WALKER J G. Some circular orbit patterns providing continuous whole earth coverage [J]. Journal of the British Interplanetary Society, 1971, 24 (11): 369-384.
 [13] WALKER J G. Coverage predictions and selection criteria for satellite constellations [R]. RAE Technical Report 82116, Fort Belvoir; Defense Technical Information Center, 1982:1-66.
 [14] ERIC FRAYSSINHES, ALCATEL ESPACE. Investigating new satellite constellation geometries with genetic algorithms [C]//Proceedings of AAS/AIAA Astrodynamics Specialist Conference, Reston, VA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1996:582-588.
 [15] 王瑞, 马兴瑞, 李明. 采用遗传算法进行区域覆盖卫星星座优化设计 [J]. 宇航学报, 2002, 23(3):24-28.

(编辑 苗秀芝)