

基于混合粒子群算法的上升段 交会弹道快速优化设计

李振华, 鲜 勇, 雷 刚, 张大巧, 刘炳琪
(中国人民解放军第二炮兵工程大学七系, 西安 710025)

摘 要: 基于梯度搜索的高效性和粒子群搜索的随机性,提出了一种混合粒子群算法,并应用该算法研究了运载火箭上升段交会弹道快速优化设计问题.以运载火箭与目标飞行器在交会时刻的距离最小为目标函数,设计了运载火箭飞行程序,建立了运载火箭上升段交会弹道优化模型,同时分别采用混合粒子群算法、遗传算法和粒子群算法进行求解.仿真结果表明:基于本文算法对运载火箭上升段交会弹道进行优化设计,平均交会位置误差为 4.137 m,较遗传算法减少了 17.940 m,平均优化耗时 488.922 s,较粒子群算法缩短了 2342.125 s.混合粒子群算法搜索速度较快,收敛精度较高,可用于运载火箭上升段交会弹道的快速优化设计.

关 键 词: 混合粒子群算法; 运载火箭; 飞行程序; 交会弹道; 快速优化

中图分类号: V412.1

文献标志码: A

Rapid optimization design of ascent rendezvous trajectory for launch vehicles based on hybrid particle swarm algorithm

LI Zhen-hua, XIAN Yong, LEI Gang, ZHANG Da-qiao, LIU Bing-qi

(The Seventh Department, the Second Artillery Engineering University,
the Chinese People's Liberation Army, Xi'an 710025, China)

Abstract: Based on efficiency of gradient search and randomness of particle swarm search, a hybrid particle swarm algorithm was proposed, and applied to research the rapid optimization design of ascent rendezvous trajectory for launch vehicles. Regarding the minimum distance between launch vehicles and target aircraft at intersection point as the objective function, the flight program of solid launch vehicles was designed and an optimization model of ascent rendezvous trajectory was established, and solved by the hybrid particle swarm algorithm, genetic algorithm and particle swarm algorithm. The simulation results indicated that: the algorithm can solve the optimization design problem effectively, the average error of rendezvous position was 4.137 m, 17.940 m less than genetic algorithm, and the average optimization time was 488.922 s, 2342.125 s shorter than particle swarm algorithm. The algorithm can be applied to the rapid optimization design of ascent rendezvous trajectory for launch vehicles because of its faster search speed and higher convergence accuracy.

Key words: hybrid particle swarm algorithm; launch vehicle; flight program; rendezvous trajectory; rapid optimization

随着空间科学技术的发展,快速进入空间的技术需求日益迫切,运载火箭轨迹优化技术备受关注.轨迹优化是运载火箭总体优化设计的重要

组成部分,它关系到能否正确使用和充分发挥运载火箭总体性能的大问题^[1].运载火箭上升段交会弹道优化设计是一类最优控制问题^[2-3],所涉及

的攻角、过载、控制等约束,性能指标等参数与运动微分方程组的求解息息相关,采用传统优化算法^[4]求解该问题时往往会出现初始点敏感、局部收敛和耗时过长等问题,无法最大程度的发掘飞行器的潜能。

近年来,现代启示算法以其独特的机制和优点,在飞行器设计领域得到越来越广泛的应用^[5].遗传算法效法自然界生物进化过程,基于“适者生存”的原理求解约束优化问题.鉴于其全局、并行、高效的优化性能以及较强的鲁棒性,大量学者将其应用于轨迹优化领域^[8-9].例如,文献[10]研究了遗传算法在导弹飞行程序设计中的应用;文献[11]基于混合遗传算法研究了行星探测轨道优化设计问题等.研究表明,基于遗传算法进行轨迹优化,求解精度较高,但收敛速度较慢.与遗传算法类似,粒子群算法作为智能优化算法的一种,因其参数设置少、收敛速度快等优点,在轨迹优化领域的应用日益受到关注^[12-13].文献[14]采用粒子群算法对固体运载火箭弹道优化设计问题进行了研究;文献[15]基于改进粒子群算法研究了航天器在固定时间内燃料最省的多脉冲交会问题等.仿真结果表明,采用粒子群算法进行弹道优化,收敛速度较快,但求解精度较低。

鉴于上述问题,本文将梯度搜索的思想融入粒子群算法之中,提出了一种新的混合粒子群算法,即利用梯度搜索的高效性和粒子群搜索的随机性解决粒子群算法易“早熟”及收敛精度低等问题.仿真结果表明,本文提出的算法收敛精度较高、搜索速度较快,可用于实现运载火箭上升段交会弹道的快速优化设计。

1 运载火箭飞行程序设计

本文研究二级运载火箭上升段交会弹道快速优化设计问题.运载火箭由一级发动机和二级发动机组成,各级发动机采用时间关机工作模式.假定运载火箭在飞行过程中运动姿态时刻处于瞬时平衡状态,按照标准弹道飞行.运载火箭经过一级动力飞行段、二级动力飞行段和自由飞行段完成与目标飞行器的交会任务.交会任务是指运载火箭在给定时间内到达给定位置.运载火箭飞行程序具体设计如下^[1-16].

1.1 一级飞行段

运载火箭一级段飞行时序可分为垂直上升段、程序转弯段、跨声速飞行段和一级分离段.其飞行程序的设计应根据飞行时序的不同而不同。

一级飞行程序设计如下:

$$\varphi_{cx}(t) = \begin{cases} \pi/2 & t \leq t_1 \\ \alpha + \theta + \omega_z t & t_1 < t \leq t_2 \\ \theta + \omega_z t & t_2 < t \leq t_3 \\ \varphi_{cx}(t_3) & t_3 < t \leq t_{k1} \end{cases} \quad (1)$$

式中

$$\alpha = -4\tilde{a}e^{a(t_1-t)}(1 - e^{a(t_1-t)}) \quad (2)$$

其中 t 为时间, t_1 为运载火箭垂直上升时间; α 为运载火箭的飞行攻角; $\tilde{a}$, a 为弹道转弯快慢的控制参数; θ 为弹道倾角; t_2 为程序转弯结束时刻; t_3 为跨声速飞行结束时刻; t_{k1} 为一级分离结束时刻。

1.2 二级飞行段

二级飞行空气动力对运载火箭的运动影响很小,因此假定运载火箭在真空引力场中飞行.飞行程序角采用分段线性化方法进行设计,具体形式如下:

$$\varphi_{cx}(t) = \begin{cases} \varphi_{cx1} + \dot{\varphi}_{cx1}(t - t'_1) & t'_1 < t \leq t'_2 \\ \varphi_{cx2} + \dot{\varphi}_{cx2}(t - t'_2) & t'_2 < t \leq t'_3 \\ \varphi_{cx3} + \dot{\varphi}_{cx3}(t - t'_3) & t'_3 < t \leq t'_4 \\ \varphi_{cx4} + \dot{\varphi}_{cx4}(t - t'_4) & t'_4 < t \leq t'_5 \\ \varphi_{cx5} & t'_5 < t \leq t_{k2} \end{cases} \quad (3)$$

式中 t'_1 为第一飞行阶段开始时刻; t'_2 为第一飞行阶段结束时刻; t'_3 为第二飞行阶段结束时刻; t'_4 为第三飞行阶段结束时刻; t'_5 为第四飞行阶段结束时刻; φ_{cx1} 为一级段结束时的飞行程序角; $\varphi_{cx5} = \varphi_{cx}(t'_5)$; $\dot{\varphi}_{cx1}$, $\dot{\varphi}_{cx2}$, $\dot{\varphi}_{cx3}$, $\dot{\varphi}_{cx4}$ 为控制导弹飞行程序角变化快慢的参数; t_{k2} 为二级分离结束时刻。

1.3 自由飞行段

自由飞行段,运载火箭依靠主动段终点获得的能量作定向飞行.飞行过程中,程序角保持不变。

2 上升段交会弹道优化模型

2.1 约束条件

运载火箭上升段交会弹道优化的约束条件主要包括微分方程组约束、路径约束、初始状态约束和终端状态约束等。

微分方程组约束具体可参考文献[17],初始状态约束和终端状态约束如式(4)所示,路径约束如式(5)所示。

$$\begin{cases} t_{t1} + t_{t2} + t_{t3} = t_m \\ \Theta_{\min} \leq \Theta_i \leq \Theta_{\max} \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} (n_y - n_{y,\max}) \leq 0 \\ (q - q_{\max}) \leq 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中 t_{t1}, t_{t2}, t_{t3} 分别为一级飞行时间、二级飞行时间和无动力飞行时间; t_m 为目标飞行器从起飞时刻运行至交会点所用的时间; θ_i 为交会时刻运载火箭的当地弹道倾角; $\theta_{\min}, \theta_{\max}$ 分别为交会弹道倾角的下限和上限; n_y, q 分别为法向过载和动压; $n_{y\max}, q_{\max}$ 为法向过载限定值和动压限定值。

2.2 优化设计变量

由第 1 节分析可得, 运载火箭上升段交会弹道优化设计变量为

$$\mathbf{X} = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8)^T = (t_1, \tilde{\alpha}, a, A_f, \dot{\varphi}_{cx1}, \dot{\varphi}_{cx2}, \dot{\varphi}_{cx3}, \dot{\varphi}_{cx4}) \quad (6)$$

式中 x_1 为垂直起飞时间; x_2, x_3 程序转弯控制参数; x_4 为瞄准方位角; $x_5 \sim x_8$ 为二级飞行程序角控制参数。

2.3 目标函数

本文研究运载火箭与目标飞行器的交会问题, 因此选取运载火箭与目标飞行器在交会时刻的距离 d_i 最小作为优化问题的目标函数, 即

$$F(\mathbf{X}) = \min \{d_i(\mathbf{X})\} \quad (7)$$

3 基于混合粒子群算法的上升段交会弹道快速优化设计

3.1 混合粒子群算法设计

基本粒子群算法中, 粒子通过跟踪个体最优解和全局最优解更新其位置向量和速度向量, 该过程使得粒子群体迭代初期的全局搜索能力以及迭代后期的局部搜索能力较弱。本文以此为切入点, 将梯度搜索的思想融入粒子群算法之中, 提出了一种新的混合粒子群优化算法。该算法利用相邻代群体的全局最优值产生搜索梯度, 基于梯度搜索实现粒子群体搜索的高效性, 同时通过调整梯度大小解决了基本粒子群算法易“早熟”及精度低等问题, 实现了运载火箭上升段交会弹道的快速优化设计。基本步骤如下:

步骤 1 种群初始化

随机初始化第 1 代群体与第 2 代群体各微粒的位置向量和速度向量, 计算各微粒的适应度值, 记录前两代群体个体最优及全局最优。

步骤 2 适应度评价

评价各微粒的适应度值, 若 $f(\mathbf{p}_g^k)$ 优于 $f(\mathbf{p}_g^{k-1})$, ($k > 1$), 则执行步骤 3, 否则执行步骤 4, 其中 k 为迭代次数, $\mathbf{p}_g^k$ 当前代最优个体。

步骤 3 梯度法更新最优个体

取第 $k-1$ 代群体与第 k 代群体对应的全局最优个体位置矢量差值的系数倍为搜索梯度, 即 $\mathbf{dx}^k = \beta(\mathbf{p}_g^k - \mathbf{p}_g^{k-1})$, 计算适应度值 $f(\mathbf{x}^k + \mathbf{dx}^k)$ 。若 $f(\mathbf{x}^k + \mathbf{dx}^k)$ 优于 $f(\mathbf{x}^k)$, 则搜索成功, 并沿着该梯度方向继续搜索; 否则搜索完毕。由此可得第 k 代群体全局最优个体的二次优化解 $(\mathbf{p}_g^k)'$, 令 $\mathbf{p}_g^k = (\mathbf{p}_g^k)'$ 。

其中 β 为比例系数, 一正常数, β 越大, 算法全局搜索能力越强, β 越小, 算法局部搜索能力越强, β 的取值策略为

$$\beta(t) = \beta_{\text{start}} - \frac{\beta_{\text{start}} - \beta_{\text{end}}}{k_{\max}} k \quad (8)$$

步骤 4 改进粒子群算法生成新一代种群

以第 k 代群体当前最优位置 $\mathbf{p}_g^k$ 为起点, 产生新一代种群。位置向量和速度向量的更新公式如式(9)所示, 式中, 惯性权重采用线性递减权重, 学习因子采用异步变化学习因子^[18]。

$$\begin{cases} \mathbf{v}_{ij}^{k+1} = \omega \mathbf{v}_{ij}^k + c_1 r_1 (\mathbf{p}_{ij}^k - \mathbf{x}_{ij}^k) + c_2 r_2 (\mathbf{p}_{gj}^k - \mathbf{x}_{ij}^k) \\ \mathbf{x}_{ij}^{k+1} = \mathbf{x}_{ij}^k + \mathbf{v}_{ij}^{k+1} \end{cases} \quad (9)$$

步骤 5 终止条件判定

判断优化结果是否达到给定精度或迭代次数是否达到给定值。若满足给定条件, 则终止迭代, 并输出最优解, 否则转步骤 2。

3.2 上升段交会弹道快速优化

取优化设计变量为粒子群各微粒的位置向量, 以交会时刻运载火箭与目标飞行器的距离差为适应度函数, 基于本文提出的混合粒子群算法对运载火箭上升段交会弹道进行优化设计, 优化流程如图 1 所示。

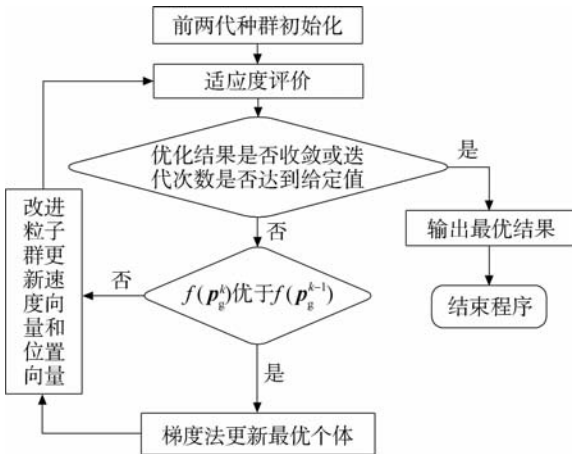


图 1 上升段交会弹道优化流程图

Fig. 1 Flow chart of ascent rendezvous trajectory optimum

4 仿真计算与结果分析

以某二级运载火箭为例,基于本文提出的混合粒子群算法对运载火箭上升段交会弹道进行优化.粒子群大小取 20,最大迭代次数取 30,惯性权重最大值为 0.9,最小值为 0.4,学习因子 c_1 的初始值为 2.5,终止值为 0.5,学习因子 c_2 的初始值为 0.5,终止值为 2.5, β 的初始值为 2.5,终止值为 0.5.

给定设计变量的取值范围,仿真计算 50 次,得到设计变量优化结果的平均值,如表 1 所示,表中 A_f 为瞄准方位角.混合粒子群算法适应度收敛曲线如图 2 所示.

表 1 设计变量优化结果

参数	取值上限	取值下限	平均优化结果
t_1/s	5	3	4.460 615
$\bar{\alpha}/\text{rad}$	0.087	0.017	0.051 384
a	0.4	0.1	0.272 334
A_f/rad	0.349	0.087	0.181 422
$\dot{\varphi}_{cx1}/(\text{rad/s})$	0.1	-0.1	-0.022 514
$\dot{\varphi}_{cx2}/(\text{rad/s})$	0.1	-0.1	-0.000 739
$\dot{\varphi}_{cx3}/(\text{rad/s})$	0.1	-0.1	-0.001 498
$\dot{\varphi}_{cx4}/(\text{rad/s})$	0.1	-0.1	-0.005 715

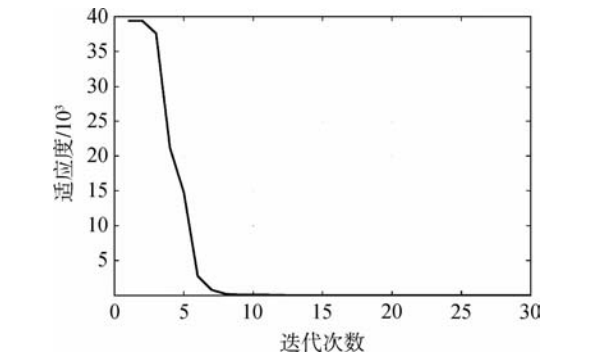


图 2 混合粒子群算法适应度收敛曲线
Fig. 2 Fitness convergence diagram of hybrid particle swarm algorithm

飞程序角随时间的变化曲线如图 3 所示,运载火箭与目标飞行器在地心大地直角坐标系下的交会轨迹如图 4 所示.

分别采用文献[10]所述遗传算法和文献[14]所述粒子群算法对运载火箭上升段交会弹道进行

优化,其中遗传算法种群大小取 50,最大世代数取 100;粒子群算法种群大小取 50,最大迭代次数取 100.遗传算法和粒子群算法适应度收敛曲线如图 5 所示.

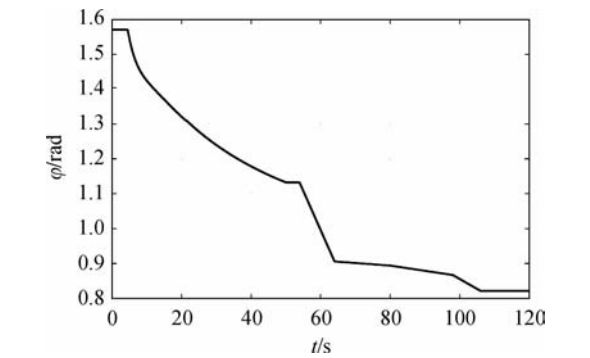


图 3 飞程序角随时间的变化曲线
Fig. 3 Diagram of flight program versus time

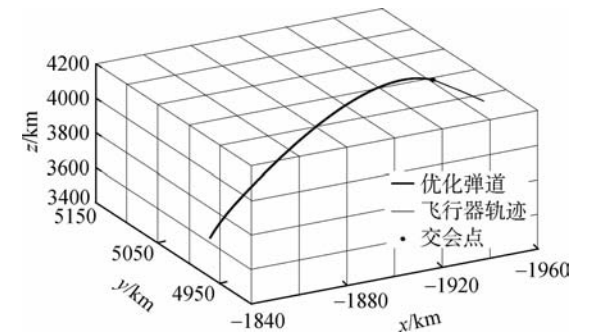


图 4 运载火箭与目标飞行器交会轨迹示意图
Fig. 4 Diagram of launchvehicles and target aircraft rendezvous trajectory

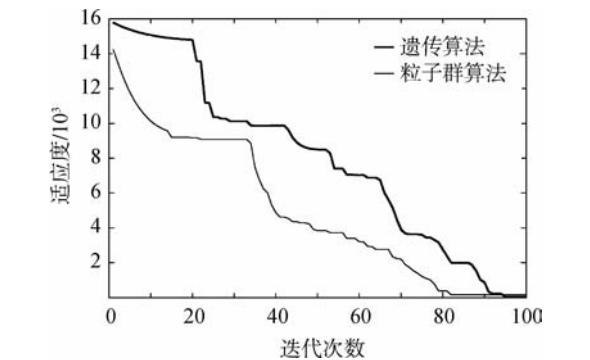


图 5 适应度收敛曲线
Fig. 5 Fitness convergence diagram

由图 5 可知,在求解弹道优化问题时,遗传算法收敛精度较高,粒子群算法搜索速度较快.

采用 3 种优化算法对运载火箭上升段交会弹道进行优化,仿真计算 50 次,得到性能参数优化结果的统计值,如表 2 所示.

表 2 性能参数优化结果

Table 2 Optimization results of performance parameters

算法	平均交会距离/m	平均优化耗时/s
混合粒子群算法	4. 137 368	488. 922
遗传算法	22. 077 227	3 657. 828
粒子群算法	157. 704 053	2 831. 047

由仿真结果可知,本文提出的混合粒子群优化算法使得粒子种群能够快速有效地跳出局部最优优点,有效解决了基本粒子群算法易“早熟”及精度低等问题,全局寻优能力及收敛速度较文献[10]、文献[14]所述遗传算法和粒子群算法有了显著提高,可用于实现运载火箭上升段交会弹道的快速优化设计。

5 结 论

本文在提出一种新的混合粒子群优化算法的基础上,研究了该算法在二级运载火箭上升段交会弹道快速优化设计中的应用,主要工作和研究结论如下:

- 1) 设计了运载火箭飞行程序,建立了运载火箭上升段交会弹道优化模型;将梯度搜索的思想融入粒子群算法之中,提出了一种新的混合粒子群优化算法。
- 2) 分别采用本文算法、遗传算法^[10]和粒子群算法^[14]对运载火箭上升段交会弹道优化设计问题进行了研究。仿真结果表明,在求解弹道优化问题时,遗传算法收敛精度较高,粒子群算法搜索速度较快。
- 3) 基于本文提出算法对运载火箭上升段交会弹道进行优化设计,平均交会位置误差为 4. 137 m,较遗传算法减少了 17. 940 m,平均优化耗时 488. 922 s,较粒子群算法缩短了 2 342. 125 s。可见,本文提出算法搜索速度较快,收敛精度较高,可用于运载火箭上升段交会弹道的快速优化设计。

参考文献:

[1] 龙乐豪,总体设计(上)[M]. 北京:宇航出版社,1989.
[2] 雍恩米,陈磊,唐国金. 飞行器轨迹优化数值方法综述[J]. 宇航学报,2008,29(2):397-406.
YONG Enmi,CHEN Lei,TANG Guojin. A survey of numerical methods for trajectory optimization of spacecraft [J]. Journal of Astronautics,2008,29(2):397-406. (in Chinese)

[3] 杨希祥,张为华. 基于 Gauss 伪谱法的固体运载火箭上升段轨迹快速优化研究[J]. 宇航学报,2011,32(1):15-20.
YANG Xixiang,ZHANG Weihua. Rapid optimization of ascent trajectory for solid launch vehicles based on gauss pseudospectral method[J]. Journal of Astronautics,2011,32(1):15-20. (in Chinese)
[4] 杨希祥,李晓斌,肖飞,等. 智能优化算法及其在飞行器优化设计领域的应用综述[J]. 宇航学报,2009,30(6):2051-2061.
YANG Xixiang,LI Xiaobin,XIAO Fei,et al. Overview of intelligent optimization algorithm and its application in flight vehicles optimization design[J]. Journal of Astronautics,2009,30(6):2051-2061. (in Chinese)
[5] 罗亚中,唐国金,周黎妮. 混合遗传算法及其在运载火箭最优上升轨道设计中的应用[J]. 国防科技大学学报,2004,26(2):5-8.
LUO Yazhong,TANG Guojin,ZHOU Lini. Hybrid genetic algorithm and its application to the optimal ascent trajectory design of the vehicle[J]. Journal of National University of Defense Technology,2004,26(2):5-8. (in Chinese)
[6] Bessette C R,Spencer D B. Optimal space trajectory design: a heuristic-based approach[R]. Tampa,FL: AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting,2006.
[7] Roberto A,Michele L,Ryan P S,et al. Aero-gravity-assist maneuvers:coupled trajectory and vehicle shape optimization[J]. Journal of Spacecraft and Rockets,2007,50(168):113-120.
[8] 黄友锐. 智能优化算法及其应用[M]. 北京:国防工业出版社,2008.
[9] Coverstone C V. Near optimal low thrust trajectories optimization via microgenetic algorithms[J]. Journal of Guidance,Control and Dynamics,1996,20(1):196-198.
[10] 鲜勇,许立军. 遗传算法在导弹飞行程序设计中的应用研究[J]. 系统仿真学报,2009,21(5):1502-1504
XIAN Yong,XU Lijun. Study of designing trajectory missile's flight process based on genetic algorithm[J]. Journal of System Simulation,2009,21(5):1502-1504. (in Chinese)
[11] Crain T P,Bishop R H,Fowler W T. Interplanetary flyby mission optimization using a hybrid global/local search method[J]. Journal of Spacecraft and Rockets,2000,37(4):468-473.
[12] Mateen-ud-Din Q,HE Linshu,Tarek E. Rapid trajectory optimization using computational intelligence for guidance and conceptual design of multistage space launch vehicles [R]. San Francisco,California: AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit,2005.
[13] Al-Garni A,Kassem A H. On the optimization of aerospace plane ascent trajectory[J]. Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences,2007,50(168):113-120.
[14] 杨希祥,江振宇,张为华. 基于粒子群算法的固体运载火箭上升段弹道优化设计研究[J]. 宇航学报,2010,31(5):

1304-1309.

YANG Xixiang,JIANG Zhenyu,ZHANG Weihua. A particle swarm optimization algorithm based solid launch vehicle ascent trajectory optimum design[J]. Journal of Astronautics,2010,31(5):1304-1309. (in Chinese)

[15] 冉茂鹏,王青. 一种基于 EPSO 的航天器交会轨迹优化方法[J]. 宇航学报,2013,34(9):1195-1201.

RAN Maopeng,WANG Qing. Spacecraft rendezvous trajectory optimization method based on EPSO[J]. Journal of Astronautics,2013,34(9):1195-1201. (in Chinese)

[16] 孙丕忠,夏智勋,郭振云. 水平空中发射固体运载火箭轨道设计与优化[J]. 固体火箭技术,2004,27(2):87-90.

SUN Pizhong,XIA Zhixun,GUO Zhenyun. Trajectory calculation optimization of horizontally air-launched vehicle with wings[J]. Journal of Solid Rocket Technology,2004,27(2):87-90. (in Chinese)

[17] 张毅,肖龙旭,王顺宏. 弹道导弹弹道学[M]. 长沙:国防科技大学出版社,1993.

[18] 汪定伟,王俊伟,王洪峰,等. 智能优化方法[M]. 北京:高等教育出版社,2007.

(编辑:叶 青)