

文章编号 :1000-6893(2007)04-0891-06

深空自主光学导航小行星筛选与规划方法研究

徐文明, 崔祜涛, 崔平远, 刘宇飞

(哈尔滨工业大学 深空探测基础研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150001)

Selection and Planning of Asteroids for Deep Space Autonomous Optical Navigation

XU Wen-ming, CUI Hu-tao, CUI Ping-yuan, LIU Yu-fei

(Deep Space Exploration Research Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

摘 要: 深空探测器的自主光学导航是深空探测器自主的关键技术之一,而导航路标——小行星的选择与拍照序列的规划是深空探测自主导航的重要内容。基于探测 Ivar 小行星的设计方案,在导航小行星筛选方面,提出了基于小行星可见星等、距离、相对速度以及视线夹角的筛选准则,并利用综合评估的方式进行导航小行星的筛选;拍照序列规划方面,提出差额筛选的策略优化导航性价比,并利用改进的遗传算法进行规划。数学仿真结果表明,该方法能够有效地进行小行星的选择与拍照序列的规划。

关键词: 自主光学导航; 小行星筛选与规划; 遗传算法; 差额筛选策略

中图分类号: V474.2⁺5; P135⁺.3 **文献标识码:** A

Abstract: A key technology that facilitates the autonomy of the spacecraft is to realize the autonomous optical navigation, in which the selection of the navigation signpost and asteroids and the planning of the photoing sequence are important matters. This paper proposes criterions, including visible magnitude, distance, relative velocity and angle of sight lines, on selection of asteroids, based on the the trajectory scheme of exploring Ivar. Then navigation asteroids are selected under a integral evaluation. The planning of the photoing sequence is handled with an improved genetic algorithm, along with a difference selection method which optimizes the ratio of navigation evaluation to resource consumption. Simulation result indicates that this method is valid to select navigation asteroids and plan the photoing sequence.

Key words: autonomous optical navigation; asteroids selection and planning; genetic algorithm; difference selection method

自主光学导航是实现深空探测器自主的一项关键技术,其通过对多颗合适的导航小行星进行拍照,然后在星上进行图像处理得到相关信息,从而自主地得到探测器的当前位置^[1]。而要实现自主光学导航,首先就是要筛选出适合的导航小行星。这方面,S. Delavault^[2]等人给出的筛选准则为小行星与探测器的距离、相对速度以及探测器-太阳-小行星相角;L. Chausson^[3]等人考虑了小行星的可见星等和小行星所在星空域的属性。两者都对这些准则带来的导航误差进行了分析,但是在导航小行星筛选过程中他们都没有考虑导航小行星间的约束,而且,作为自主光学导航接下来要解决的问题,即导航小行星拍照序列的规划没有进一步分析。

本文基于探测 Ivar 小行星的设计方案对小行星的筛选和拍照序列的规划问题进行研究:

(1) 对于导航小行星筛选问题,提出了更完善的筛选准则,包括小行星可见星等、相对距离、相对速度以及两两视线夹角,并利用对这些准则的综合评估进行导航小行星的筛选。

(2) 对于拍照序列规划问题,利用改进的遗传算法进行求解,并在规划过程中引入差额筛选的策略,以提高导航的性价比。

1 导航小行星筛选

1.1 导航小行星筛选准则

用于导航的小行星是通过一定的准则从已有的小行星库中筛选,前人^[2-3]给出的准则主要集中在单个小行星的属性上,而考虑到两颗导航小行星间的视线夹角的限制,提出的导航小行星筛选准则如下:

- (1) 可见星等。
- (2) 相角(小行星-探测器-太阳)。

收稿日期:2006-06-02; 修订日期:2006-09-21

基金项目:国家 863 计划(2005AA735080)

通讯作者:崔祜涛 E-mail:cht@astro.hit.edu.cn

(3) 小行星相对探测器的速度。

(4) 小行星与探测器距离。

(5) 两颗导航小行星的视线(探测器指向小行星)夹角。

其中,可见星等要求尽量小,以满足导航相机成像要求;相角尽量大,以防止太阳光进入导航相机;小行星与探测器的距离小、相对速度小以及两颗小行星间的视线夹角大、能提高导航精度。这些准则与导航相机参数有关,若选择导航相机视场为 1° ,像素宽度为 10^{-5} rad,曝光时间为 100 s,则可得相应的准则取值范围如表 1^[4]。

表 1 导航小行星的筛选准则

Table 1 Selection criteria of navigation asteroids

参数	范围
可见星等	< 12
相角/ (°)	> 135
距离/ km	< 1 000 000
相对速度/ (km · s ⁻¹)	< 7
视线夹角/ (°)	> 5

上述准则中,相角、速度和距离 3 个约束较容易实现,两颗小行星的视线矢量夹角的约束是基于前 3 个准则的综合评估,详细介绍见 1.2 节。下面着重分析可见星等的约束。

小行星在导航相机中可见星等可以衡量小行星在 CCD 相机中的成像大小(星等越大,成像越小),其除了与小行星自身的星等、反照率有关外,还与其相角相关。BDL (Bureau des Longitudes) 数据库能提供每颗小行星的轨道根数、绝对星等 H 和反照率 G 等参数^[3]。根据 Bowell 模型^[5-8],小行星可见星等 H_v 可以通过下式计算

$$H_v = H + 5 \lg (r \cdot d) - \left. \begin{aligned} &2.5 \lg [(1 - G) i_1(\alpha) + G i_2(\alpha)] \\ &i_i(\alpha) = \exp \left[-A_i \left(\tan \frac{\alpha}{2} \right)^{B_i} \right] \quad (i = 1, 2) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: r 为太阳-小行星的位置矢量; d 为探测器-小行星的位置矢量; α 为小行星-探测器-太阳相角;常数 $A_1 = 3.33$, $B_1 = 0.63$, $A_2 = 1.87$, $B_2 = 1.22$ 。

1.2 综合评估

筛选导航小行星时,上述准则对小行星的评估是单独进行的。同一颗小行星对不同的准则来说评价是不一样的,距离较小的可能速度较大,而速度小的可能相位角接近限定值,如此等等,也就

是说不可能通过一个准则筛选出最优的导航小行星。而且,某一时刻符合准则的小行星可能会很多,如儒略日 2 454 208.0 时刻,符合准则的小行星有 276 颗,而一次自主光学导航只需 12 颗^[1],这 12 颗应该是从 276 颗里面再次筛选出来的最优导航小行星序列。这就要求有一个准则去筛选最优的导航小行星,采用的方式是:先对符合可见星等、相角、距离和相对速度准则的所有小行星进行综合评估,然后按导航综合评估值排序,最后选择导航综合评估值最高的为导航小行星。

定义 小行星的导航综合评估值为小行星各项参数(可见星等、相角、距离和相对速度)的值与相应筛选准则的偏差的加权和,即

$$V = \sum_{i=1}^4 w_i Er_i \quad (2)$$

式中: w_i 为各项的权值,与各项对导航精度的影响有关; Er_i 为小行星参数与对应选择准则偏差的绝对值。

由式(2)可知,小行星的导航综合评估值越大,表明其越适合用于此次导航。每次自主光学导航,对符合准则的所有小行星按导航综合评估值从大到小进行排序,依次选择导航评估值最高小行星为导航小行星,具体步骤如下:

第 1 步 对符合准则的所有小行星按导航综合评估值从大到小进行排序。

第 2 步 选择序列中导航综合评估值最大的小行星,并将其从序列中删除。

第 3 步 把第 2 步选中的小行星作为第 1 颗导航小行星。

第 4 步 选择当前序列中导航综合评估值最大的小行星,并将其从序列中删除。

第 5 步 如果第 4 步选中的小行星与已有的导航小行星间的视线夹角均大于 5° ,则选为下一颗导航小行星,否则执行第 4 步。

第 6 步 如果已得到需要数目的导航小行星,则完成筛选,否则继续执行第 4 步。

1.3 探测 Ivar 方案的导航小行星筛选

采用上述的导航小行星筛选准则,并利用综合评估的方式,可以得到探测 Ivar 小行星的方案轨道中自主光学导航的导航小行星情况。由此可知,在两个时间段内导航小行星的数目小于 12,分别为儒略日 2 453 916.0 和 2 453 996.0 之间、2 454 468.0 和 2 454 808.0 之间,如图 1 所示。由图可以看出这两个时间段内探测器在火星轨道

以内,而小行星带在火星和木星之间,小行星与探测器距离超出准则允许的范围。

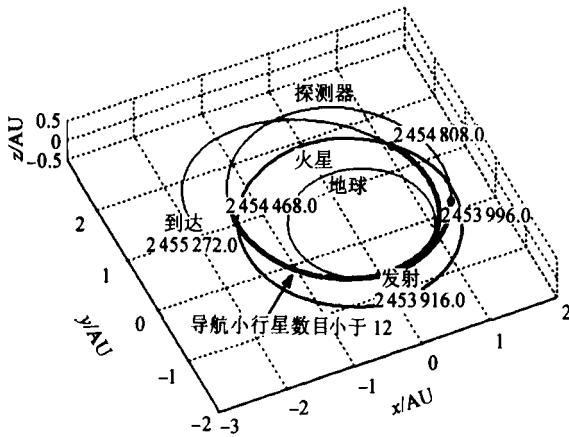


图 1 探测 Ivar 小行星方案轨道中自主光学导航

Fig. 1 Autonomous optical navigation for the trajectory scheme of exploring Ivar

2 导航小行星拍照序列规划

在筛选出导航小行星序列之后,需要对此次导航的拍照序列进行规划。一般情况下,每次导航需用 12 颗导航小行星^[1],本文采用一种差额的策略,即初始筛选出的小行星数目大于 12,而经过规划最终得到 12 颗导航小行星,差额的策略可以得到更优的解。

2.1 问题描述

导航小行星拍照序列规划中采用差额策略,则此问题可描述为:在 $n(n > 12)$ 颗小行星中,筛选出用于导航的 12 颗小行星,使整个导航过程(从初始姿态开始,依次机动完成对 12 颗小行星的拍照,然后回到初始姿态的整个过程)的性价比 Rvs 最高

$$Rvs = \frac{12}{i=1} V_i / \left(\sum_{j=1}^{13} S_j \right)^2 \quad (3)$$

式中: V_i 为用于导航的第 i 颗小行星的综合评估值; S_j 为导航过程中从对第 $j - 1$ 颗小行星拍照姿态机动到第 j 颗小行星所耗的资源量,可以用姿态机动时间来表示。其中假设初始位置(即导航前探测器相机矢量的指向点)为第 0 和 13 颗小行星,整个拍照路径构成一个回路。

此问题可归结为一个类似 TSP 问题(Traveling Salesman Problem),属于 NP 难题,其解的搜索空间与 n 成指数增长。在这个问题中,其解空间 N 为

$$N = C_n^{12} \times 12! = n(n - 1)(n - 2) \dots (n - 11) \quad (4)$$

对于这类问题很难通过全局搜索法精确地找出最优解,从而引入能找到最优解或近似最优解的快速算法很有必要,本文采用了改进的遗传算法进行求解。

2.2 改进的遗传算法

遗传算法是模拟生物在自然环境中的遗传和进化过程而形成的一种自适应全局优化概率搜索算法,遗传算法中一个较难解决的问题是如何较快地找到最优解并防止“早熟”收敛问题^[9]。

导航小行星拍照序列规划问题的求解是两个变量的商的收敛,比一般问题的解空间更大,故需要遗传算法收敛于最优的前提下,还要求收敛速度快。采用改进的遗传算法^[10]引入浓度控制策略保证群体的多样性,而贪婪交叉算子和一端固定的随机变异算子用于提高算法的收敛速度。

(1) 差额编码

个体采用所有待选的小行星序列来编码,编码串为 $(A_{Sj0}, A_{Sj1}, A_{Sj2}, \dots, A_{Sjn})$,其中 A_{Sji} 为小行星编号,随机生成的多个序列即构成了初始种群。而对个体性价比计算时仅选择个体中的回路部分,即从 A_{Sj0} 经过小行星 $A_{Sj1}, A_{Sj2}, \dots, A_{Sj12}$,然后机动回到出发点 A_{Sj0} 。初始群体经过交叉和变异操作,并最终收敛于最优解,最优解为性价比 Rvs 最大的个体。

同时,对小行星的综合评估值和所耗的资源量进行归一化,则归一化后的综合评估值 NV_j 、所耗资源量 NS_i 分别为

$$NV_j = \begin{cases} 1.0 & (j = 0) \\ V_j / \sum_{m=1}^n V_m & (j > 0) \end{cases} \quad (5)$$

$$NS_i = S_i / \sum_{m=1}^n S_m$$

式中: n 为待选小行星的数目; NV_0 为初始位置的综合评估值。因为某个回路为符合要求的解的必要条件是其包含初始位置,而通过令初始位置的综合评估值远远大于其他点,一般情况下可以保证最优解满足这一条件。

(2) 适应值函数

对个体适应值的计算采用基于序的评价函数,其具体形式为

$$F = (1 -)^{k/T} \quad (6)$$

式中: \cdot , T 为常数; k 为群中所有个体按性价比

R_{vs} 从大到小排序时当前个体的序号。

(3) 浓度控制策略

定义 第 t 代群 $P(t)$ 中耗资源相同的个体的集合称为模式 M , 群体总的模式数为 $Q(t)$, 模式 M_i 中个体的个数为 $|M_i|$, 显然群体中个体总的数目 $N = \sum_{i=1}^{Q(t)} |M_i|$, 则第 t 代的浓度定义为

$$Th(t) = \max(|M_0|, |M_1|, \dots, |M_{Q(t)}|) / N \quad (7)$$

当有个体的浓度趋近于 1 时, 表示算法收敛。

第 t 代浓度控制阈值定义为

$$\theta(t) = \frac{\theta_0}{\theta_0 + (1 - \theta_0)e^{-t/a}} \quad (8)$$

式中: θ_0 为第 0 代种群(初始种群)的浓度阈值, 一般取 $1/N$; a 为常量; 当 $t \rightarrow \infty$ 时, $\theta(t) \rightarrow 1$ 以保证算法的全局收敛性。

浓度控制策略具体实施如下:

计算第 t 代群 $P(t)$ 的浓度 $Th(t)$ 和浓度控制阈值 $\theta(t)$ 。

如果 $Th(t) > \theta(t)$, 则删除此模式中的部分个体, 使 $Th(t) \leq \theta(t)$ 。

随机生成新的个体, 并放入被删除个体的位置, 使群体的规模不变。

(4) 轮盘赌选择

交叉个体的选择采用轮盘赌方式, 此方式的过程虽然是随机的, 但每个个体被选择的机会却直接与其适应值成比例, 因此其能提高群体的平均适应值, 具体方式如下:

将群体中所有个体的适应值相加求总和, 取整后为 m 。

随机产生一个在 $0 \sim m$ 之间的整数。

从群体第一个个体开始, 将其适应值与后续的个体适应值相加, 直到累加的和等于或大于 m , 则最后一个累加的个体选作用于交叉的个体。

重复和, 直到产生个体数目与原群体相同的新群体。

(5) 贪婪交叉算子

假设经过概率选择的两个交叉父代个体为

$$\begin{cases} P1(A_{S11}, A_{S12}, \dots, A_{S1n}) \\ P2(A_{S21}, A_{S22}, \dots, A_{S2n}) \end{cases}$$

则通过贪婪交叉算子产生子代 Off 1, Off 2 的过程如下:

随机选定一个小行星 A_{Sji} 作为交叉的起

点, 分别放入 Off 1, Off 2 的第一个位置。

分别从 $P1, P2$ 中找出 A_{Sji} 右边的小行星 A_{SjiR1} 和 A_{SjiR2} , 并分别计算 A_{Sji} 到两者的距离 $d1, d2$ 。

比较 $d1$ 与 $d2$, 把较小者的对应小行星添加到 Off 1 中, 删除 $P1$ 和 $P2$ 中的 A_{Sji} , 用最后放入 Off 1 的小行星代替 A_{Sji} ; 转入, 直到 $P1$ 和 $P2$ 中的小行星个数为 1, 完成生成 Off 1。

把 中的右边改成左边, 同样的操作即可生成 Off 2。

(6) 一端固定的随机变异算子

随机变异算子是根据变异概率选择变异的个体, 并在个体编码串中随机选择两个编码, 使两者之间的编码随机排序而生成新的个体。

由于选取的回路是个体中的前一部分, 而采用随机变异算子, 个体中后一部分进入回路的概率很小, 这就影响了群体的多样性。一端固定的随机变异算子, 采用一端随机, 而另一端固定在个体最后, 这样每一次变异就能全部包含非回路的部分, 从而增加群体的多样性。

2.3 规划流程

应用改进的遗传算法求解导航小行星拍照序列规划问题, 先采用差额编码的形式对个体编码, 并通过随机方式生成初始种群, 而每一代的进化采用轮盘赌选择, 及概率的贪婪交叉算子、一端固定的随机变异算子, 并实施浓度控制策略。得到的导航小行星拍照序列为性价比最优的个体中的回路部分, 具体规划流程如图 2 所示。

```

I_GA()
{
  generation=1; // 进化代数初始化
  GAInitial(); // 初始化原始种群
  while(generation < MaxGen)
  {
    // MaxGen 为最大代数

    ControlThickness(); // 浓度控制
    CreateFitnessofPop(); // 计算适应值
    SelectPop(); // 轮盘赌选择
    CrossoverPop(); // 以交叉概率执行交叉操作
    MutationPop(); // 以变异概率执行变异操作
    generation++;
  }
  GAResult(); // 处理输出结果
}

```

图 2 规划流程

Fig. 2 Flow chart of the planning

3 数学仿真与结果分析

选择探测 Ivar 小行星的一次导航进行数学仿真以验证本文方法在导航小行星的筛选与拍照序列规划中的可行性。选取的导航时刻为儒略日 2 454 132. 0, 探测器初始姿态为 3 轴对日定向, 采用差额筛选的策略, 初选小行星数目为 20 颗。

初选得到的 20 颗导航小行星分布如图 3 所示, 表 2 给出了其综合评估值。

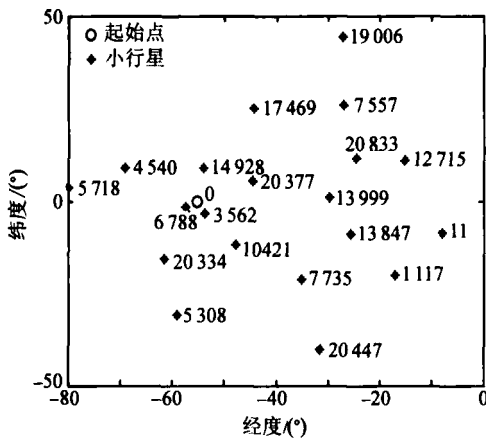


图 3 初选 20 颗小行星的分布

Fig. 3 Distribution of the initial 20 asteroids

表 2 初选 20 颗小行星的综合评估值

Table 2 Integral evaluation of the initial 20 asteroids

序号	小行星编号	综合评估值	序号	小行星编号	综合评估值
1	6 788	37. 17	11	11	16. 89
2	3 562	34. 67	12	1 117	16. 48
3	14 928	24. 16	13	13 847	16. 27
4	13 999	21. 86	14	20 334	15. 85
5	20 377	20. 28	15	5 308	15. 39
6	10 421	19. 64	16	19 006	14. 83
7	20 833	19. 58	17	5 718	14. 80
8	12 715	18. 82	18	7 557	13. 83
9	4 540	17. 26	19	1 746	13. 58
10	7 735	17. 21	20	20 447	13. 21

应用改进的遗传算法求解导航小行星拍照序列规划问题, 改进的遗传算法交叉概率为 0. 85, 变异概率为 0. 1, 种群规模为 200, 最大迭代次数为 700, 如图 4 为算法的收敛曲线。其收敛于最优导航性价比为 0. 000 164。筛选出的导航小行星编号序列为(20 377, 14 928, 6 788, 3 562, 10 421, 7 735, 13 847, 13 999, 20 833, 12 715, 11, 1 117)。由图可以看出: 算法在 300 步左右时就能收敛于最优值。

此时筛选出的导航小行星分布及其拍照顺序如图 5。拍照顺序为从 0(导航前探测器相机矢量

的指向点)开始, 依次经过(6 788, 3 562, 10 421, 7 735, 13 847, 13 999, 20 833, 12 715, 11, 1 117, 20 377, 14 928), 然后回到 0。

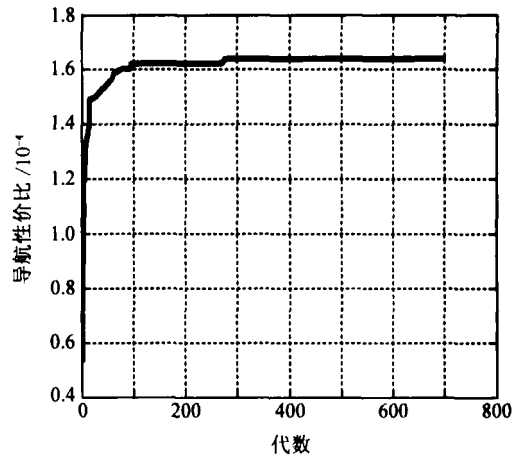


图 4 遗传算法的收敛曲线

Fig. 4 Convergence of the genetic algorithm

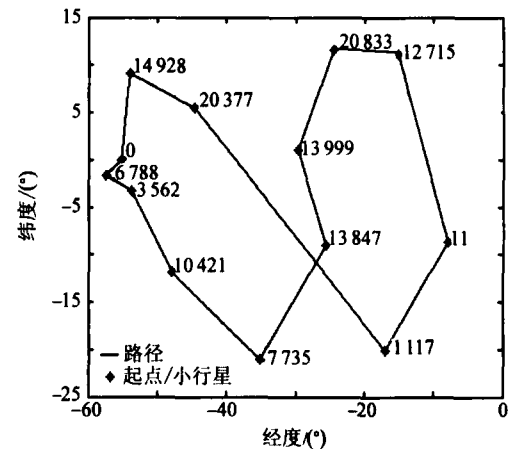


图 5 导航小行星分布及其拍照顺序

Fig. 5 Distribution and photoing sequence of navigation asteroids

当不采用差额筛选的策略时, 即直接筛选取综合评估值最大的 12 颗小行星, 则导航小行星编号序列为(6 788, 3 562, 14 928, 13 999, 20 377, 10 421, 20 833, 12 715, 4 540, 7 735, 11, 1 117)。表 3 为直接筛选与采用差额策略筛选的结果比较。

表 3 直接筛选与差额策略筛选的结果比较

Table 3 Comparison of results with the difference and direct selections

比较项	直接筛选	差额筛选
总的导航评估值	264. 02	263. 03
总的资源消耗	1 309. 4	1 266. 4
导航性价比	0. 000 154	0. 000 164

比较这两种方法得到的最终拍照序列的总的导航评估值、资源消耗量及导航的性价比,可以看出,虽然采用差额筛选时得到较小的总导航评估值,但其能够节省大量的资源消耗,从而使导航性价比更优。

在自主光学导航过程中,每一次导航的小行星筛选和规划过程相同,则上述算例具有通用性。显然,差额策略是以较小导航评估值损失换取资源消耗的大大减少,从而在总体上提高导航性价比。

4 结 论

对导航小行星的筛选和拍照序列的规划问题进行了研究。基于探测 Ivar 小行星的设计方案,对于导航小行星筛选问题,提出了包括小行星可见星等、相对距离、相对速度以及两两视线夹角的筛选准则,并利用对这些准则的综合评估进行导航小行星的筛选;对于拍照序列规划问题,利用改进的遗传算法进行求解,并在规划过程中引入差额筛选的策略,以提高导航的性价比。数学仿真结果表明本文的方法能够有效地进行小行星的选择与拍照序列的规划。

参 考 文 献

- [1] Riedel J E, Bhaskaran S, Desai S D, et al. Autonomous optical navigation (AutoNav) DSI technology validation report[R]. [S.l.]: JPL Publication, 2000.
- [2] Delavault S, Berthier J, Foliard J. Optical navigation to a near Earth object[C]. 18th ISSFD. Germany, Munich: [s. n.], 2004.
- [3] Chausson L, Elavault S. Optical navigation performance during interplanetary cruise[C]. 17th ISSFD. Russia, Moscow: [s. n.], 2003.
- [4] Bhaskaran S, Riedel J E, Synnott S P. Autonomous optical navigation for interplanetary missions[J]. Proc SPIE, 1996, 1(2810): 32-43.
- [5] Romanishin W, Tegler S C. Accurate absolute magnitudes for kuiper belt objects and centaurs[J]. Icarus, 2005, 179: 523-526.
- [6] Kaasalainen M, Torppa J, Piironen J. Models of twenty asteroids from photometric data[J]. Icarus, 2002, 159: 369-395.
- [7] Scheirich P. Models of binary near-Earth asteroids[C]. IAU Symposium, Asteroids, Comets, Meteors, 2005.
- [8] Bahcall J N. Star counts and galactic structure[J]. Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 1986, 24: 577-611.
- [9] 刘勇, 康立山, 陈玉屏, 等. 非数值并行算法——遗传算法[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 1-10.
Liu Y, Kang L S, Chen Y P, et al. Non numerical parallel algorithm - genetic algorithm[M]. Beijing: Science Press, 2000: 1-10. (in Chinese)
- [10] 谢胜利, 唐敏, 董金祥. 求解 TSP 问题的一种改进的遗传算法[J]. 计算机工程与应用, 2002, 38(8): 58-60.
Xie S L, Tang M, Dong J X. An improved genetic algorithm for TSP problem[J]. Computer Engineering and Applications, 2002, 38(8): 58-60. (in Chinese)

作者简介:



徐文明(1979 -) 男, 硕士。主要研究方向: 星载软件开发, 深空探测器自主, 3D 可视化等方面。
E-mail: xwmfhy2006@gmail.com

崔祐涛(1970 -) 男, 教授。主要研究方向: 飞行器动力学与控制, 轨道设计与优化。

E-mail: cht@astro.hit.edu.cn

(责任编辑: 鲍亚平)