

基于改进遗传算法的滑翔增程弹控制参数优化设计

陈琦¹, 王中原¹, 常思江¹, 舒敬荣²

(1. 南京理工大学能源与动力工程学院, 南京 210094; 2. 陆军军官学院, 合肥 230031)

摘要: 为了获得滑翔弹 PID 控制器的俯仰角指令最佳跟踪效果, 将基于实数编码的自适应遗传算法与精英保留策略相结合, 同时对遗传操作做相应改进, 采用改进后的算法对控制器参数进行寻优。为获取满意的过渡过程动态特性, 改进了 ITAE 性能指标。最后以某滑翔弹的俯仰角稳定回路为研究对象, 分别采用改进 Powell 算法、基本遗传算法和改进遗传算法进行优化计算。仿真结果表明, 改进后的遗传算法搜索能力和效率得到明显提升, 研究结果可为今后的控制器优化设计提供一定的参考。

关键词: 滑翔增程弹; 控制器参数; 优化; 自适应; 遗传算法

中图分类号: TJ765.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2014)10-0020-04

Control Parameter Optimization of Extended Range Munitions Based on Improved GA

CHEN Qi¹, WANG Zhong-yuan¹, CHANG Si-jiang¹, SHU Jing-rong²

(1. School of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;
2. Army Officer Academy, Hefei 230031, China)

Abstract: To obtain the best control performance for gliding Extended Range Munitions (ERMs), the real coding based adaptive genetic algorithm was combined with the best-keeping countermeasure, and corresponding improvement was made to the genetic operations. The improved algorithm was used for optimization of the control parameters. An improved ITAE valuation function was used to get the best dynamic response of the controller during the transition. Taking an ERM pitch angle controller as an example, the improved Powell algorithm, traditional genetic algorithm and the improved genetic algorithm were used respectively to optimize the control parameters. The numerical simulations show that the improved genetic algorithm has the best searching capability. The results are meaningful to the controller design for ERMs.

Key words: gliding Extended Range Munition(ERM); control parameter; optimization; adaptive; genetic algorithm

0 引言

滑翔增程是目前采用的较为有效的一种弹箭增程技术。滑翔增程弹在到达弹道顶点后, 通过俯仰舵使全弹产生一个攻角, 增加弹体升力, 使弹道下降趋缓, 炮弹向前滑翔飞行, 进而达到增加射程的目的。目前, 该技术在国内外已受到广泛关注, 文献[1-2]对滑翔增程弹的方案弹道特性进行了研究; 文献[3]采用法向

加速度为零和最大升阻比的方法设计了滑翔增程弹的滑翔弹道; 文献[4]利用二次序列规划法和最大升阻比对俯仰舵偏角规律进行了优化。但这些文献绝大部分集中在对方案弹道的研究上, 而对如何控制弹体按预定规律运动则没有过多介绍。PID 控制器作为过程控制领域的一种标准控制器, 因具有参数物理意义清楚、易于在线调整等特点, 而得到广泛应用^[5], 因此, 可以将 PID 控制器应用到滑翔弹的控制上。然而 PID 控制器参数的整定和优化却是一个困难的问题, 目前常用的优化方法包括单纯型法、梯度法、专家整定法等^[6]。这些方法在一定程度上可以取得较好的寻优效果, 但还是存在一些弊端, 比如: 单纯型法对初值比较敏感, 容易陷入局部最优解, 造成寻优失败; 专家整定

收稿日期: 2013-08-21 修回日期: 2013-12-02

基金项目: 国家自然科学基金(11272356); 中国博士后科学基金(2013M541676)

作者简介: 陈琦(1989-), 男, 江苏连云港人, 博士生, 研究方向为弹箭制导与控制技术。

法又需要太多的经验,不同的目标函数对应不同的经验,整理知识库将会是一项巨大的工程^[5-6]。因此,有必要寻求一种实用的方法来解决这一难题。本文提出用遗传算法对 PID 控制器的参数进行优化,同时为了提高基本遗传算法的优化效率,采用实数编码,引入自适应交换、变异算子,并改进选择策略,增强算法的搜索能力和鲁棒性。

1 基本遗传算法的改进

遗传算法是基于自然选择和基因遗传学原理的搜索方法,它将“优胜劣汰、适者生存”的生物进化原理引入待优化参数形成的编码串种群中,按一定的适应度函数和一系列遗传操作对个体进行筛选,直至得出最优解^[7-8]。其中,遗传操作(选择、交叉、变异)是算法的关键,它直接影响算法的精度、效率和稳定性。

在利用遗传算法求解问题时,编码方式的选择至关重要,相比于实数编码,二进制编码增加了交换运算的计算量,同时还需对实际参数进行编码解码,从而增加了额外的计算时间^[9]。鉴于此,本文采用实数编码。为了保证搜索得到的最优个体不会因为选择、变异、交换算子的操作而遭破坏,本文将父代种群中适应度最大的 0.05*N* 个(5%)优良个体直接传递到子代种群中,对父代种群剩下的 0.95*N* 个(95%)个体按各自的适应度从小到大排序,将其复制到匹配池中,然后按轮盘赌方式进行选择。这样就防止了最优个体被破坏,提高了算法的收敛速度。

在基本的遗传算法中,交叉概率 P_c 与变异概率 P_m 均为定值,这就具有很大的盲目性^[9]。为此,引入自适应交换算子和变异算子,使得 P_c 、 P_m 可以随适应度自动改变,当种群个体适应度趋于一致或趋于局部最优时,增大 P_c 、 P_m 的值,当群体适应度比较分散时,减小 P_c 、 P_m 的值。同时,适应值高于平均适应值的个体,对应较低的 P_c 、 P_m ,使解得以保护进入下一代;而低于平均适应值的个体,对应较高的 P_c 、 P_m ,使得解被淘汰。基于以上分析, P_c 、 P_m 按式(1)和式(2)进行自适应调整。

$$P_c = \begin{cases} P_{c1} - \frac{(P_{c1} - P_{c2})(f' - f_{avg})}{f_{max} - f_{avg}}, & f' \geq f_{avg} \\ P_{c1}, & f' < f_{avg} \end{cases} \quad (1)$$

$$P_m = \begin{cases} P_{m1} - \frac{(P_{m1} - P_{m2})(f_{max} - f)}{f_{max} - f_{avg}}, & f \geq f_{avg} \\ P_{m1}, & f < f_{avg} \end{cases} \quad (2)$$

交叉概率的选择决定了交叉操作的频率,频率越高,可以越快地收敛到最有希望的最优解区域,因此,一般选取较大的交叉率,但太高的频率也可能导致过早收敛,交叉概率一般取为 0.4 ~ 0.9^[9],本文取 $P_{c1} = 0.9$,

$P_{c2} = 0.4$;变异率的选取一般受种群大小、染色体长度等影响,通常选取很小的值,一般为 0.001 ~ 0.1^[9],本文取 $P_{m1} = 0.1$, $P_{m2} = 0.001$; f_{max} 为群体中最大的适应度值; f_{avg} 为每代群体的平均适应度值; f' 为待交叉的两个个体中较大的适应度值; f 为待变异个体的适应度值。

随机选取匹配池中两个父代按照概率 P_c 交叉,交叉操作按式(3)进行。

$$\begin{cases} X = cV_1' + (1 - c)V_2' \\ Y = (1 - c)V_1' + cV_2' \end{cases} \quad (3)$$

式中: V_1 、 V_2 为匹配池中随机选取的父代; X 、 Y 为交叉后的子代; c 为随机数,且 $c \in (0, 1)$ 。

交叉后的种群个体按概率 P_m 进行变异,设 V 为待变异的染色体,取 $M > 0$ 适当大,随机选取变异方向 d ,若 $V + M \cdot d$ 不可行,置 M 为 0 到 M 间的随机数直到可行为止,若在规定的代数内还不能找到可行解,置 $M = 0$,由 V 变异产生的后代为 $V + M \cdot d$ 。图 1 为改进遗传算法的流程图。

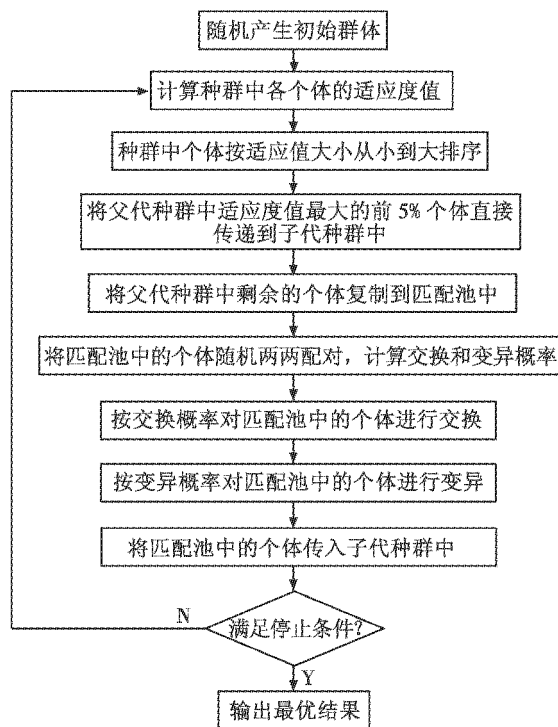


图 1 改进遗传算法流程图

Fig. 1 Flow chart of the improved genetic algorithm

2 滑翔弹俯仰角稳定回路设计及优化模型的建立

2.1 俯仰角稳定回路控制器设计

俯仰角稳定回路由弹体环节、舵系统及姿态控制律组成,具体结构如图 2 所示。本文的主要工作即优化参数 K_p 、 K_D 、 K_I ,最终使系统的性能达到最优。

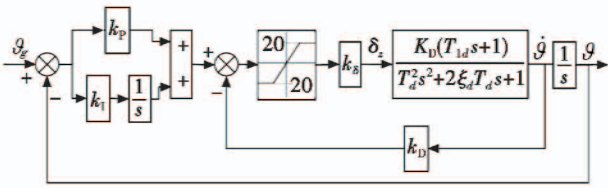


图 2 俯仰角稳定回路结构图
Fig. 2 Diagram of pitch control loop

2.2 优化设计目标函数及约束

为了获取满意的动态过程动态特性,采取在时间与绝对误差积分 (ITAE) 指标的基础上增加对部分性能的罚函数的方法构造优化目标函数。这样可以利用 ITAE 的优势,较少考虑阶跃响应的初始偏差,而着重权衡暂态响应后期的偏差,使过渡过程既快速又平稳。

ITAE 指标为 $J_{ITAE} = \int_0^{\infty} t|e(t)|dt$,为了防止控制量过大和上升时间过长,增加控制输入的平方项和上升时间项,则

$$J = \int_0^{\infty} (t|e(t)|dt + c_1u^2(t))dt + c_2t_u \quad (4)$$

式中: $e(t)$ 为系统误差; $u(t)$ 为控制器输出; t_u 为上升时间; c_1, c_2 为权值。

为了避免超调,采用变权重的惩罚功能,即

$$J = \begin{cases} \int_0^{\infty} (t|e(t)|dt + c_1u^2(t) + c_3\sigma)dt + c_2t_u, & \sigma < 0.1 \\ \int_0^{\infty} (t|e(t)|dt + c_1u^2(t) + 100c_3\sigma)dt + c_2t_u, & \sigma \geq 0.1 \end{cases} \quad (5)$$

式中: σ 为系统输出量与终值的差; c_3 为权值。由式(5)

表 1 各算法的优化结果对比

Table 1 Results of different optimization algorithms

算法类型	控制器参数			系统单位阶跃相应指标			
	K_p	K_i	K_D	评价函数 J	上升时间/s	超调量/%	稳态误差/%
改进 Powell 算法	8.6172	2.0284	0.5334	1.4961	0.2357	1.83	0.35
基本遗传算法	9.8311	2.7510	0.4423	1.3017	0.1596	1.64	0.36
改进遗传算法	10.0013	3.0081	0.3773	1.2936	0.1326	1.58	0.35

基本遗传算法和改进遗传算法的评价函数 J 的优化过程如图 3 所示。图 4 表示各算法的优化结果代入系统后得到的单位阶跃响应曲线,图 5 为改进遗传算法的优化结果代入系统后得到的开环频率特性曲线。

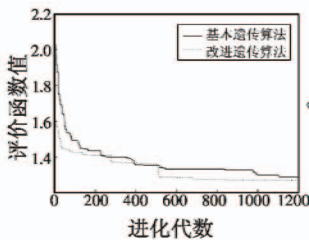


图 3 评价函数的优化过程
Fig. 3 Optimization process of the evaluation function

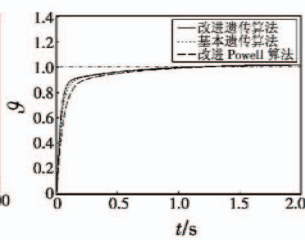


图 4 系统的单位阶跃响应
Fig. 4 The step response of the system

可知,当超调量较大时(大于等于 0.1),对其的惩罚因子相应地增加为原来的 100 倍。

为了使控制系统达到既快速又平稳的效果,需对其动态性能提出相应的指标。结合工程实际与文献 [10],提出如下指标: $t_u < 0.5$ s, $\sigma < 5\%$, $\varepsilon < 3\%$, $\gamma > 45^\circ$, $h > 6$ dB。其中: ε 为稳态误差; γ 和 h 分别为开环系统的相位裕量和幅值裕量。将上述指标作为优化过程中的约束函数,保证最终设计出的控制系统满足所提的性能指标。

3 算例与结果分析

以某滑翔弹的俯仰角稳定回路为研究对象,在飞行弹道某特征点处进行 PID 控制器的优化设计。在该特征点,弹体传递函数为^[10]

$$W_{\delta_z}^o = \frac{K_D(T_{1d}s+1)}{s(T_d^2s^2+2\xi T_d s+1)} \quad (6)$$

式中: $K_D = 1.4634$; $T_{1d} = 0.53386$; $T_d = 0.038969$; $\xi = 0.046626$ 。舵的控制增益 K_s 取为 1,参数 K_p 的取值范围为 $[0, 30]$, K_i, K_D 的取值范围为 $[0, 5]$,遗传算法的种群大小取为 30,取权值 $c_1 = 0.01, c_2 = 2, c_3 = 10$ 。为了验证改进遗传算法的正确性以及考核其与基本遗传算法相比所具有的优势,选用基本遗传算法、改进遗传算法和传统算法中的改进鲍威尔法分别对该模型进行优化计算,其中,基本遗传算法的交叉概率取为 0.7,变异概率取为 0.05^[8-9]。计算结果如表 1 所示,其中,遗传算法为进化 1200 代后的计算结果。

从表 1 的数据可以看到,改进遗传算法和基本遗传算法的优化结果相近,且明显优于改进 Powell 算法。同时也可以看出,各算法得到的结果均满足所提的性能指标。从图 3 可看出,改进遗传算法的收敛速度高于基本遗传算法,后者需进化 1000 多代才可达到最优值,而前者只需进化不到 600 代,这说明改进后算法的优化效率得到了明显的提升。

图 4 展示出优化后系统的单位阶跃响应非常理想,改进和基本遗传算法的优化结果相近,且优于改进 Powell 算法。从图 5 可看出,经改进遗传算法优化后,开环系统的相位裕量约为 87° ,幅值裕量接近 100 dB,说明闭环系统具有较强的稳定性和鲁棒性。从以上分析可以看出,改进遗传算法在控制器参数的优化上是

可行的,并且能够取得理想的优化效果。

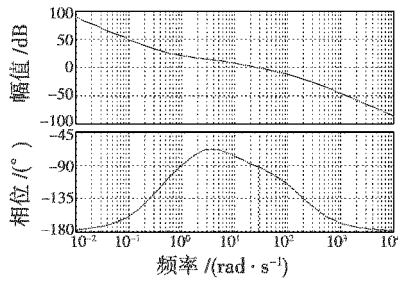


图 5 系统开环频率特性曲线

Fig. 5 The open-loop frequency characteristic curve

图 6 和图 7 显示出控制系统对方案弹道的跟踪效果。

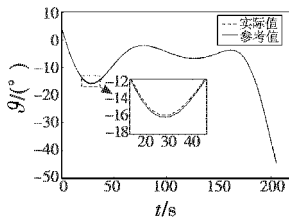


图 6 俯仰角跟踪曲线

Fig. 6 Pitch angle tracking curve

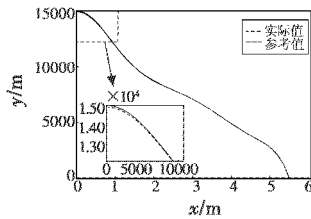


图 7 弹道跟踪曲线

Fig. 7 Reference trajectory tracking curve

其中方案弹道采用文献[11]中的方法进行设计,滑翔起点(x_0, y_0, z_0)为(0 km, 15 km, 0 km),终点(x_T, y_T, z_T)为(55 km, 0 km, 0 km)。图 6 显示出控制系统对指令俯仰角具有较好的跟踪效果,从图 7 可看出,实际弹道仅在起始阶段与方案弹道存在一定的偏差,之后吻合较好。从以上分析可知,在全弹道飞行、各参数时变的条件下,控制系统仍具有较好的控制效果。

4 结论

通过算例仿真以及结果分析可以得出以下结论。

1) 遗传算法相对于传统的优化方法具有较强的空间搜索能力。采用实数编码方式的遗传算法,并对选择、交叉和变异操作进行改进,引入精英保留策略、自适应交叉变异算子等概念,使得改进后的遗传算法的全局搜索能力和优化效率得到明显的提升。

2) 利用改进遗传算法对滑翔弹 PID 控制系统的参数 K_p, K_i, K_d 进行优化设计,得到的优化方案使系统对指令信号的响应更加快速,达到了优化目的。本文选取的控制系统具有一定的普遍性,验证了改进遗传算法在火箭控制领域的适用性和可行性,可为今后的研究提供一定的参考。

参考文献

[1] 史金光,王中原,易文俊.滑翔增程弹方案弹道特性的

研究[J].弹道学报,2003,15(1):51-54.

SHI J G, WANG Z Y, YI W J. A study on the projectile trajectory characteristics of gliding extended range projectile[J]. Journal of Ballistics, 2003, 15(1):51-54.

[2] 易文俊,王中原,史金光,等.带鸭舵滑翔增程炮弹方案弹道研究[J].南京理工大学学报:自然科学版,2008,32(3):322-326.

YI W J, WANG Z Y, SHI J G, et al. Trajectory of glided extended-range projectile with canards configuration[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology: Natural Science, 2008, 32(3):322-326.

[3] 史金光,王中原,曹小兵,等.滑翔增程弹滑翔弹道设计[J].南京理工大学学报:自然科学版,2007,31(2):147-150.

SHI J G, WANG Z Y, CAO X B, et al. Design of glide trajectory for glide range-extended projectile[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology: Natural Science, 2007, 31(2):147-150.

[4] 史金光,王中原,涂四华.求解滑翔增程弹较优舵偏角方法[J].弹箭与制导学报,2005,25(4):717-719.

SHI J G, WANG Z Y, TU S H. The calculating method on a suitable angle of lift-canards of gliding extended range projectile[J]. Journal of Projectile, Rockets, Missiles and Guidance, 2005, 25(4):717-719.

[5] 刘金琨.先进 PID 控制 MATLAB 仿真[M].北京:电子工业出版社,2004.

LIU J K. Advanced PID control and MATLAB simulation [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004.

[6] 周德俭.智能控制[M].重庆:重庆大学出版社,2005. ZHOU D J. Intelligent control[M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2005.

[7] 李克婧,张小兵.改进型遗传算法在弹丸结构优化设计中的应用[J].南京理工大学学报:自然科学版,2009,33(3):339-343.

LI K J, ZHANG X B. Application of improved genetic algorithm to optimization design of projectile structure[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology: Natural Science, 2009, 33(3):339-343.

[8] ANTONY AROKIA DURAI RAJ K, RAJENDRAN C. A genetic algorithm for solving the fixed-charge transportation model: Two-stage problem[J]. Computers and Operations Research, 2012, 39:2016-2032.

[9] 王立平,曹立明.遗传算法——理论、应用与软件实现[M].西安:西安交通大学出版社,2003.

WANG L P, CAO L M. Genetic algorithm—theory, application and software realization[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2003.

的仿真只是在单一平台上进行,下一步应努力实现分布式的作战资源再调度。此外,现在的仿真都是建立在任务既定的基础之上,所有设定任务的属性都是固定不变的,但是在实际作战过程中,战斗情况瞬息万变,各任务随着时间的推移对资源的需求也在变化中,而在一些特殊情况下,紧急任务的插入也会造成资源需要重新调度,因此,如何在动态变化的情况下实现资源的再调度是下一步重点研究的方向。

参 考 文 献

- [1] GHALLAB M, NAU D, TRAVERSO P. Automated planning: Theory and practice[M]. San Francisco: Morgan Kaufmann, 2004.
- [2] 鲁音隆. 多兵种联合作战战役任务计划方法研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2004.
- LU Y L. Research on algorithm of task planning in joint campaign[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2004.
- [3] 谢斌,林华. 联合战场资源调度问题综述[J]. 舰船电子工程,2013,33(10):23-26.
- XIE B, LIN H. Survey on joint battlefield resources scheduling problem[J]. Ship Electronic Engineering, 2013, 33(10):23-26.
- [4] LEVCHUK G M, LEVCHUK Y N, LUO J, et al. Normative design of organizations—Part I: Mission planning[J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics—Part A: Systems and Humans, 2002, 32(3):346-357.
- [5] 包卫东,王江峰,张茂军. 一种改进的基于 MDLS 与 GA 的作战资源分配算法[J]. 火力与指挥控制,2008,33(9):18-21.
- BAO W D, WANG J F, ZHANG M J. A novel algorithm of task resource distribution based on MDLS and GA[J]. Fire Control and Command Control, 2008, 33(9):18-21.
- [6] 张杰勇,姚佩阳,周翔翔,等. 基于 DLS 和 GA 的作战任务——平台资源匹配方法[J]. 系统工程与电子技术,2012,34(5):947-954.
- ZHANG J Y, YAO P Y, ZHOU X X, et al. Approach to operation task and platform resource matching based on DLS and GA[J]. Systems Engineering and Electronic, 2012, 34(5):947-954.
- [7] 林华,周翔,董银文. 海战场资源属性数据库的建立[J]. 舰船电子工程,2013,33(4):101-102.
- LIN H, ZHOU X, DONG Y W. Establishment of naval field resources attribute database[J]. Ship Electronic Engineering, 2013, 33(4):101-102.
- [8] 梅文华,蔡善法. JTIDS/Link16 数据链[M]. 北京:国防工业出版社,2007.
- MEI W H, CAI S F. JTIDS/Lin16 data link[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007.
- (上接第 23 页)
- [10] 钱杏芳,林瑞雄,赵亚男. 导弹飞行力学[M]. 北京:北京理工大学出版社,2008:49-57.
- QIAN X F, LIN R X, ZHAO Y N. Missile flight dynamics[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2008: 49-57.
- (上接第 27 页)
- [4] MOON G Y, KIM Y D, CHO S B. Variable structure control with optimized sliding surface for aircraft control system[Z]. AIAA 2004-5420.
- [5] 罗生. 最优滑模制导律设计与仿真[J]. 航空兵器,2012(1):34-37.
- LUO S. The optimal sliding mode guidance law design and simulation[J]. Aero Weaponry, 2012(1):34-37.
- [6] 黄汉桥,黄长强,赵辉,等. 考虑前馈作用的 BTT 导弹自动驾驶仪设计方法研究[J]. 西北工业大学学报,2012,30(3):307-313.
- HUANG H Q, HUANG C Q, ZHAO H, et al. An effective design method of BTT missile autopilot considering feed-forward effect[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2012, 30(3):307-313.
- [7] 周凤岐,周军,郭建国. 现代控制理论基础[M]. 西安:西北工业大学出版社,2011:200-218.
- ZHOU F Q, ZHOU J, GUO J G. Modern control theory[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2011:200-218.
- [8] ZHAO S Y, ZHOU R, WEI C. Design and feasibility analysis of a closed-form guidance law with both impact angle and time constraints[J]. Journal of Astronautics, 2009, 30(3):1065-1072.
- [11] 陈小庆,侯中喜,刘建霞. 基于直接配点法的滑翔轨迹快速优化设计[J]. 航空计算技术,2010,40(1):37-41.
- CHEN X Q, HOU Z X, LIU J X. Reentry trajectory optimization for hypersonic glide vehicle[J]. Aeronautical Computing Technique, 2010, 40(1):37-41.