

快速避障三维最优轨迹规划研究

刘鹤鸣, 黄长强, 黄汉桥, 丁达理
(空军工程大学航空航天工程学院, 西安 710038)

摘要: 针对无人作战飞机自主化任务需求, 提出了一种“人在回路上”的UCAV自主任务规划解决方案; 针对该方案中的UCAV快速自主轨迹规划需求, 提出了基于高斯伪谱法的快速轨迹规划解决方案。该方案在充分考虑UCAV的气动力特性、发动机推力特性及大气环境特性的基础上建立了高精度的UCAV模型, 详细分析并构建了比较真实的UCAV飞行包线约束模型和三维战场环境约束条件, 在此基础上, 构建了基于最优控制理论框架的UCAV轨迹规划模型; 最后, 详细分析并实现了采用GAUSS伪谱法求解该问题的实现过程。仿真结果表明, 该方法能以较高的精度和速度生成满足各种复杂约束要求, 连续并且真实可行的最优轨迹。

关键词: 无人作战飞机; 三维最优轨迹规划; 飞行包线; 高斯伪谱法

中图分类号: V279

文献标志码: A

文章编号: 1671-637X(2013)03-0001-05

Fast and Optimal Three Dimensional Trajectory Planning with Obstacle Avoidance Performance

LIU Heming, HUANG Changqiang, HUANG Hanqiao, DING Dali

(Engineering College of Aeronautics and Astronautics, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: A “man-in-the-loop” task planning strategy was proposed to satisfy the growing autonomous need for Unmanned Combat Aircraft Vehicles (UCAVs). A fast trajectory planning scheme was put forward based on Gauss Pseudospectral Method (GPM) considering the requirement of UCAVs. In the scheme, the UCAV aerodynamic characteristics, the thrust characteristics and the influence of atmosphere environments were taken into consideration, based on which a UCAV model with high accuracy was built up. A trajectory planning model was built up based on optimal control theory and analysis to various complicate constraints such as the UCAV flight envelop in real environment and three dimensional obstacle battlefields. Finally, the basic principle of using GPM to solve the optimal control problem for UCAV trajectory planning was analyzed. Simulation results show that GPM can generate a continuous, viable and optimal trajectory satisfying various complicated constraints.

Key words: Unmanned Combat Aircraft Vehicle (UCAV); 3D optimal trajectory planning; flight envelop; Gauss Pseudospectral Method(GPM)

0 引言

UCAV执行侦察和对地攻击等任务时面临复杂的战场环境。目前采用的远程操控模式给地面“飞行员”和通信带宽造成了沉重的负担, 不利于UCAV性能的充分发挥^[1]。因此, 如何提升UCAV在执行任务过程中的自主能力已成为当前研究的一个热点。

轨迹规划技术是UCAV自主任务规划的关键技术。文献[2]指出, 有效的障碍规避策略对于无人机顺利完成任务十分重要。针对这一需求, 文献[3]首先建立无人机原始运动库(primitive motion library), 然后基于该运动库采用在线的A*算法进行轨迹规划。文献[4]利用摄像机探测无人机周围环境, 并利用动态网格记录障碍的位置, 最后采用人工势场的方法规划无人机轨迹。文献[5]采用粒子群优化算法规划航迹点, 并利用B样条曲线将航迹点拟合为三维飞行航迹。上述方法的主要问题是难以完善地考虑无人机的动力学和运动学约束, 因而难以保证规划轨迹的

收稿日期: 2012-09-03

修回日期: 2012-10-19

基金项目: 航空科学基金(20105196016)

作者简介: 刘鹤鸣(1984—), 男, 湖南常德人, 博士生, 研究方向为无人飞行器武器系统总体技术。

可飞性和最优性。

近年来,以伪谱法为代表的一类直接法受到国内外研究者的普遍关注,并成功应用^[6]。该方法采用最优控制理论的通用框架,因而可以很方便地处理运动规划过程中各种复杂的动力学约束;同时,该方法采用正交多项式将各种复杂的微分/积分约束转化为非线性规划问题求解,从而避免了传统的间接法求解庞特里亚金最优性条件的困难。目前发展比较完善的伪谱法包括 GAUSS 伪谱法, Radau 伪谱法以及 Legendre 伪谱法等^[7]。GAUSS 伪谱法最早于 2005 年由 Benson 提出。文献[8]指出,GAUSS 伪谱法的 KKT 条件与离散一阶最优性条件具有等价性。且相对于 Radau 伪谱法以及 Legendre 伪谱法,GAUSS 伪谱法具有更高的求解精度和收敛速度^[9]。因此,本文采用 GAUSS 伪谱法求解 UCAV 避障三维最优轨迹。

1 UCAV 自主任务规划系统总体框架

传统的“人在回路中”的远程操控模式使地面飞行员局限于单架无人机的远程操控,难以同时完成任务规划、多机协同等上层任务。一种可行的解决方案是采用人在回路上的监控模式。由地面“飞行员”向无人机发送任务指令;由无人机翻译指令,并决定完成上述任务所需要执行的步骤。这一翻译过程一方面基于数据链发送过来的任务指令和相关信息,另一方面也基于无人机自身探测和处理的相关环境和自身状态信息。最终由无人机将任务的执行方案通知“飞行员”。采用该方案可以使飞行员摆脱繁琐的底层飞行控制细节,而将关注焦点集中于顶层的多机任务协同、任务规划等。依据该模式设计的 UCAV 自主任务规划系统总体框架如图 1 所示。

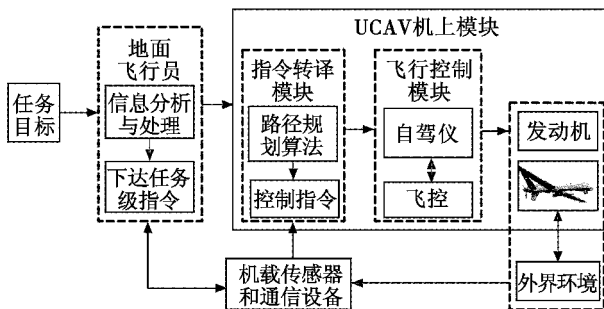


图1 UCAV 自主任务规划系统

Fig.1 UCAV auto task planning system

2 轨迹规划问题数学建模

文献[10]指出,最优控制理论是求解轨迹规划问题最合适的一般框架,本文也基于此进行求解,其数学模型为

$$\begin{cases} \min J = \Phi[X(t_0), t_0, X(t_f), t_f] \\ \dot{X}(t) = f[X(t), U(t), t] \\ C[X(t), U(t), t] \leq 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: J 为性能指标; $X(t) \in \mathbf{R}^n$ 为状态变量; $U(t) \in \mathbf{R}^m$ 为控制变量; t 为时间,下标0和 f 分别表示初始和终端时刻。数学模型在满足状态方程和约束条件的同时,使性能指标最小。

2.1 UCAV 运动建模

为了准确描述 UCAV 在运动过程中必须满足的各种约束条件,首先对 UCAV 建立状态模型^[11]:记状态变量 $X = [x, y, h, v_u, \gamma, \psi, m]^T$,控制量 $U = [\delta, \alpha, \mu]^T$ 。

$$\dot{X} = [\dot{x}, \dot{y}, \dot{h}, \dot{v}_u, \dot{\gamma}, \dot{\psi}, \dot{m}]^T = \begin{bmatrix} v_u \cos \gamma \cos \psi + W_x \\ v_u \cos \gamma \sin \psi + W_y \\ v_u \sin \gamma + W_h \\ \frac{\delta T_{\max} \cos \alpha - D}{m} - g \sin \gamma - \dot{W}_x \cos \gamma \cos \psi - \dot{W}_y \cos \gamma \sin \psi - \dot{W}_h \sin \gamma \\ \frac{(L + \delta T_{\max} \sin \alpha) \cos \mu}{m v_u} - \frac{g}{v_u} \cos \gamma + \frac{\dot{W}_x \sin \gamma \cos \psi}{v_u} + \frac{\dot{W}_y \sin \gamma \sin \psi}{v_u} - \frac{\dot{W}_h \cos \gamma}{v_u} \\ \frac{(L + \delta T_{\max} \sin \alpha) \sin \mu}{m v_u \cos \gamma} + \frac{\dot{W}_x \sin \psi}{v_u \cos \gamma} - \frac{\dot{W}_y \cos \psi}{v_u \cos \gamma} \\ - c \delta T_{\max} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: x, y, h 分别为经度、纬度和高度; v_u 为UCAV的真空速; $\gamma, \psi, \alpha, \mu$ 分别为航迹倾角、航向角、攻角、滚转角; m 为UCAV的质量; g 为重力加速度; $D = 0.5 \rho v_u^2 S C_D$ 和 $L = 0.5 \rho v_u^2 S C_L$ 分别为空气阻力和升力, ρ 为空气密度,采用1976年美国标准大气密度数据; (W_x, W_y, W_z) 和 $(\dot{W}_x, \dot{W}_y, \dot{W}_z)$ 分别为风速和风力加速度沿坐标轴的分量; c 为燃油消耗系数; $T = \delta T_{\max}$ 为发动机推力; $\delta \in [0, 1]$ 为油门位置; T_{\max} 为最大可用推力。

2.2 发动机推力模型

发动机最大可用推力模型涉及因素众多,采用F-4发动机推力数据进行拟合^[12]。

$$T_{\max} = [1, Ma, Ma^2, Ma^3, Ma^4]^*$$

$$\begin{bmatrix} 30.21 & -0.668 & -6.877 & 1.951 & -0.1512 \\ -33.80 & 3.347 & 18.13 & -5.865 & 0.4757 \\ 100.80 & -77.56 & 5.441 & 2.865 & 0.4757 \\ -78.99 & 101.40 & -30.28 & 3.236 & -0.1089 \\ 18.74 & -31.60 & 12.04 & -1.785 & 0.09417 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ h \\ h^2 \\ h^3 \\ h^4 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: Ma 为马赫数;推力的单位为4448.222 N。

2.3 考虑飞行包线的UCAV运动约束建模

目前,大多数航迹规划算法没有考虑UCAV实际的

飞行包线对规划的攻击轨迹的约束,因而规划轨迹的可飞性难以保障,同时无法充分发挥平台的机动性能。为了对UCAV对地攻击过程建立更加准确的约束模型,在UCAV三自由度模型的基础上,考虑如下约束条件

$$\left\{ \begin{array}{l} \gamma_{\min} \leq \gamma(t) \leq \gamma_{\max} \\ \mu_{\min} \leq \mu(t) \leq \mu_{\max} \\ \alpha_{\min} \leq \alpha(t) \leq \alpha_{\max} \\ 0 \leq \delta(t) \leq 1 \\ m_{\min} \leq m(t) \\ |\dot{\alpha}(t) + \dot{\gamma}(t) \cos \mu(t) + \dot{\psi}(t) \cos \gamma(t) \sin \mu(t)| \leq Q_{\max} \\ |\dot{\mu}(t)| \leq P_{\max}(\alpha(t), h(t), Ma(h(t), v(t))) \\ C_L(\alpha(t), M(h(t), v(t))) \leq C_{L, \max}(Ma(h(t), v(t))) \\ |\ddot{\alpha}(t)| \leq \ddot{\alpha}_{\max} \\ |\ddot{\mu}(t)| \leq \ddot{\mu}_{\max} \\ |n_x(t)| \leq n_{\max} \\ \frac{1}{2} \rho(h(t)) v^2(t) \leq q_{\max} \\ H_{\min} \leq h(t) \leq H_{\max} \end{array} \right. \quad (4)$$

式中： m_{\min} 为携带最小安全燃油量时的飞行器全重； Q_{\max} 为俯仰方向最大角度变化率； P_{\max} 为当前迎角、马赫数和高度下滚转方向角度变化率； $Ma(h(t), v(t))$ 为UCAV当前高度和速度下的马赫数； $C_{L, \max}(Ma)$ 为当前马赫数下的最大升力系数； n_{\max} 为飞行器所能承受的最大法向过载； ρ 为UCAV当地大气密度； q_{\max} 为最大动压头； n_{\max} 为最大过载约束； $H_{\min} = H(x, y) + H_{\text{safe}}$ ， $H(x, y)$ 为当前位置点的地形高度信息， H_{safe} 为最小离地安全距离。

2.4 三维环境数字建模

为了用数学模型简单地描述三维外界环境,取如下路径约束来代表轨迹规划中需要满足的障碍规避要求。

$$h(x, y, z) = \left\| \frac{(x - x_c)}{a}, \frac{(y - y_c)}{b}, \frac{(z - z_c)}{c} \right\|_p - 1 \geq 0 \quad (5)$$

式中， $\|x, y, z\|_p = (x^p + y^p + z^p)^{\frac{1}{p}}$ 。采用 $h(x, y, z) \geq 0$ 形式的路径约束的主要优势是可以平滑地将外部障碍处理为可微分的代数形式。图2为不同的取值下障碍物的形状。

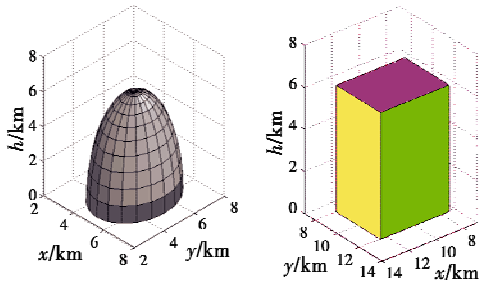


图2 三维环境数字建模

Fig.2 Three dimensional battlefield modeling

2.5 目标函数

规划轨迹的飞行时间对于UCAV非常重要,缩短UCAV的飞行时间可提高其对敌打击的突然性,同时降低自身损伤风险,因此采用目标函数

$$\min J_1 = t_f \quad (6)$$

另一方面,算法解算的结果均为期望的滚转角、俯仰角等控制量,要使UCAV稳定跟踪规划航迹,还需要自驾仪和飞控系统跟踪上述控制量。对于副翼、方向舵等机械系统而言,如果期望的控制量变化太快,很可能导致上述机械系统控制紊乱,从而降低了UCAV的实际跟踪效果。因此,滚转角和俯仰角变化率也是需要优化的指标之一。

$$\min J_2 = \int_{t_0}^{t_f} \left[\left(\frac{d(mu)}{dt} \right)^2 + \left(\frac{d\alpha}{dt} \right)^2 \right] dt \quad (7)$$

最终的目标函数采用上述两式加权的形式,依据UCAV的实际跟踪性能,通过调整权系数,能够在时间最短和轨迹实际跟踪效果之间进行权衡。最终的目标函数为

$$\min J = w_1 * (t_f - t_0) + w_2 * \int_{t_0}^{t_f} \left[\left(\frac{d(mu)}{dt} \right)^2 + \left(\frac{d\alpha}{dt} \right)^2 \right] dt \quad (8)$$

3 基于GPM的快速求解策略

伪谱法是近年来发展比较快的一种全局配置法^[9],其基本思想是将控制变量和状态变量在配置点附近进行离散化,并利用拉格朗日插值多项式来逼近真实的控制变量和状态变量,通过对插值多项式进行求导和积分运算来替代原先各种复杂的动力学/运动学约束,最终将最优控制问题转换为非线性规划问题进行求解。不同伪谱法的区别主要是配置点的选择不同。高斯伪谱法采用分布在区间(-1,1)上的n个Legendre-Gauss点 (τ_1, \dots, τ_N) 。随着N增加,插值多项式的拟合误差成指数降低^[12]。其基本步骤如下。

1) 记最优控制问题的状态变量和控制变量分别为 $X(t), U(t)$ 。则最优控制问题模型为

$$\left\{ \begin{array}{l} \min J = \phi[x(t_0), t_0, x(t_f), t_f] + \int_{t_0}^{t_f} L(x(t), u(t), t) dt \\ \dot{X}(t) = f[X(t), U(t), t] \\ C[X(t), U(t), t] \leq 0 \\ \phi[X(t_0), t_0, X(t_f), t_f] = 0 \end{array} \right. \quad (9)$$

式中： J 为性能指标； t_0, t_f 分别为初始和终止时间。首先取 $t = \frac{t_f - t_0}{2} \tau + \frac{t_f + t_0}{2}$ ，通过映射变换将时间区间转换到 $\tau \in [-1, 1]$ ，如

$$\begin{cases} \min J = \phi[x(-1), t_0, x(1), t_f] + \\ \quad \frac{t_f - t_0}{2} \int_{-1}^1 L(x(\tau), u(\tau), \tau) d\tau \\ \frac{dX}{d\tau} = \frac{t_f - t_0}{2} f[X(\tau), U(\tau), \tau] \\ C[X(\tau), U(\tau), \tau] \leq 0 \\ \phi[X(-1), t_0, X(1), t_f] = 0 \end{cases} \quad (10)$$

2) 确定配点的数目 N , 取初始端点 $\tau_0 = -1$, 并采用如下的 $N+1$ 个拉格朗日插值多项式拟合状态变量

$$\begin{cases} x(\tau) \approx X(\tau) = \sum_{j=1}^{N+1} X(\tau_j) L_j(\tau) \\ L_j(\tau) = \prod_{i=0, i \neq j}^N \frac{\tau - \tau_i}{\tau_j - \tau_i} \end{cases} \quad (11)$$

式中, $L_j(\tau)$ 为 Lagrange 插值多项式, 其中插值点包括 Legendre-Gauss (LG) 配置点 $\{\tau_1, \dots, \tau_N\}$ 和非配置点 τ_0 。控制变量的拟合方法与状态变量相似, 但插值点仅包含配置点。

$$u(\tau) = U(\tau) = \sum_{i=1}^N U_i \hat{L}_i(\tau) \quad (12)$$

由于终端时间 t_f 未被配置, 所以采用高斯积分估计终端状态

$$X(1) \approx \bar{X}(\tau_f) = X_0 + \frac{t_f - t_0}{2} \sum_{k=1}^N \omega_k f(X_k, U_k, \tau_k; t_0, t_f) \quad (13)$$

3) 采用高斯积分法则对性能指标进行离散化处理。

$$\min J = \phi[x(t_0), t_0, x(t_f), t_f] + \frac{t_f - t_0}{2} \sum_{k=1}^N \omega_k \cdot f(X_k, U_k, \tau_k; t_0, t_f) \quad (14)$$

式中, ω_k 是高斯权重。

假定状态方程和约束条件在配点处严格满足

$$\begin{cases} \phi[X(t_0), t_0, X(t_f), t_f] = 0 \\ C[X_k, U_k, \tau_k; t_0, t_f] \leq 0 \\ \sum_{i=0}^N X_i D_{ki} - \frac{t_f - t_0}{2} f(X_k, U_k, \tau; t_0, t_f) = 0 \end{cases} \quad (15)$$

至此, 连续系统最优控制问题被转化为受一系列代数约束的参数优化问题, 借助于常用的大规模非线性求解工具包即可求解此非线性规划问题。SONPT 软件包采用序列二次优化算法 (SQP), 具有 S 收敛性好、计算效率高、边界搜索能力强等优点。

4 仿真结果及分析

使用 Matlab 2011a 和 SNOPT 7.1 对上述算法进行仿真。处理器为 1.8 GHz Intel Celeron 430, 2 GB 内存。UCAV 部分参数采用 F4 战斗机飞行参数。

UCAV 在起始点 ST(0.2, 0.12, 3) km, 初始马赫数 $Ma = 0.7$, 航迹倾角 $\gamma_0 = 0^\circ$, 航向角 $\psi_0 = 90^\circ$, 初始质量

$m_0 = 17680$ kg, 气动特征面积 $S = 49.24$ m²。目标位置 TG(9, 8.5, 3.5) km, 要求 UCAV 在目标位置的航迹倾角和滚转角均为 0° 。部分约束如表 1 所示, 其他数据通过查表获得。

UCAV 飞行区域内发现有两个障碍物, 如图 3 所示。针对下述两种情形进行仿真: 1) $w_1 = 1, w_2 = 0$ 即时间最短; 2) $w_1 = 0, w_2 = 1$ 即控制量角度变化率最小。

表 1 平台机动性能约束

$[\gamma_{\min}, \gamma_{\max}] / (^\circ)$	$[\mu_{\min}, \mu_{\max}] / (^\circ)$	$[\alpha_{\min}, \alpha_{\max}] / (^\circ)$
$[-89, 89]$	$[-60, 60]$	$[-10, 30]$
$Q_{\max} / ((^\circ) \cdot s^{-1})$	$\ddot{\mu}_{\max} / ((^\circ) \cdot s^{-2})$	$\ddot{\alpha}_{\max} / ((^\circ) \cdot s^{-2})$
25	120	40
$[Tf_{\min}, Tf_{\max}] / s$	h_{\max} / km	n_{\max} / g
$[0, 150]$	12	6.8

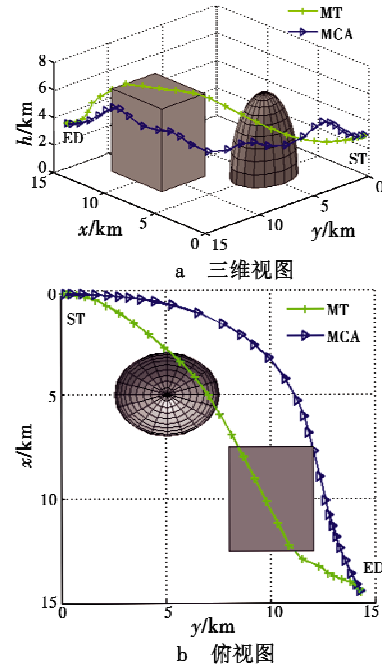


图 3 不同情形下 UCAV 规划攻击轨迹

Fig. 3 UCAV trajectory under different circumstance
算法运行结果如表 2 所示。

表 2 算法运行结果

	飞行时间/s	算法运行时间/s
情形 1	75	13.1
情形 2	120.7	15.7

由仿真结果可见, 虽然算法考虑的约束条件较多, 但算法规划时间较短, 且规划的轨迹比较平滑, 能够满足 UCAV 平台的机动性能约束。另一方面, 算法规划轨迹与其他(如文献[5])等不考虑 UCAV 平台的运动学/动力学模型得出的轨迹之间存在较大差别, 这是因为, 采用智能算法等其他算法规划的轨迹没有考虑到

UCAV 平台在实际的飞行过程中各个方向的运动存在一定的耦合关系。

5 结论

本文基于 UCAV 智能化发展需求,提出了一个基于“监控模式”的自主任务规划系统总体框架,在此基础上,针对该系统快速自主轨迹规划需求,提出了一套基于 GAUSS 伪谱法的实时轨迹规划算法,该算法考虑了比较真实的 UCAV 平台的飞行包线约束,且能够顺利避开外界环境的各种障碍,满足自主任务规划系统的快速避障轨迹规划需求。论文研究内容对于最终构建 UCAV 平台具有一定的参考意义和工程应用价值。

参考文献

- [1] Office of the Secretary of Defense. Unmanned systems roadmap 2007-2032 [R]. DoD, Washington DC, 2007.
- [2] ANUSHA M, PADHI R. Evolving philosophies on autonomous obstacle/collision avoidance of unmanned aerial vehicles [J]. Journal of aerospace computing, information, and communication, 2011, 8(2): 17-41.
- [3] RICHARDS N D, SHARMA M, WARD D G. A hybrid a star automation approach to on-line path planning with obstacle avoidance[C]//Chicago: Intelligent Systems Technical Conference, 2004: 1-17.
- [4] SEAN Q M, JACK W L. Dynamically sized occupancy grids for obstacle avoidance[C]//Toronto: AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, 2010; AIAA-2010-7848.
- [5] JUNG L F, KALIVARAPU J, OLIVER V J, et al. Path planning of unmanned aerial vehicles using B-splines and particle swarm optimization [J]. Journal of aerospace computing, information, and communication 2009, 6(4): 271-290.
- [6] GONG Qi, LEWIS L R, ROSS I M. Pseudospectral motion planning for autonomous vehicles [J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 2009, 32(3): 1039-1045.
- [7] RAO A V. A survey of numerical methods for optimal control [J]. Advances in the Astronautical Sciences, 2009, 135(1): 497-528.
- [8] BENSON D A, HUNTINGTON G T, THORVALDSEN T P, et al. Direct trajectory optimization and costate estimation via an orthogonal collocation method [J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2006, 29(6): 1435-1440.
- [9] HUNTINGTON G T, BENSON D, RAO A V. A comparison of accuracy and computational efficiency of three pseudospectral methods[C]//Proceedings of AIAA Guidance, Navigation and Control Conference, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Hilton Head, 2007, AIAA-2007-6405: 1-43.
- [10] BETTS J T. Survey of numerical methods for trajectory optimization [J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 1998, 21(2): 193-207.
- [11] 张煜, 张万鹏, 陈璟, 等. 基于 Gauss 伪谱法的 UCAV 对地攻击武器投放轨迹规划[J]. 航空学报, 2011, 32(7): 1240-1251.
- [12] HUNTINGTON G T. Advancement and analysis of a Gauss pseudospectral transcription for optimal control problems [D]. Boston: MIT, 2007.

声 明

本刊已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社、北京万方数据股份有限公司、重庆维普资讯有限公司等在其网络平台和系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文,著作权使用费与本刊稿酬一并支付。作者向本刊提交文章发表的行为即视为同意我部上述声明。