

## 高超声速飞行器的弹道优化评估方法\*

胡怀中, 郭茹霜, 官厚娟, 魏石磊

(西安交通大学 电子与信息工程学院, 陕西 西安 710049)

**摘要:**高超声速飞行器弹道优化算法的综合评估对选取最优的弹道优化算法具有重要的参考意义。根据高超声速飞行器的特性,将其弹道分解为上升段、巡航段及俯冲段三个阶段,分别给出了各阶段的性能评价指标和对各阶段性能评价指标赋权的典型方法,并结合灰色关联度分析理论提出了弹道优化算法的综合评估方法。评估实例表明,该方法能定量地对多种弹道优化方法所生成的弹道进行综合性能评估,并能对备选优化方法的优劣进行排序。

**关键词:**高超声速飞行器;弹道优化;综合评估;灰色关联度

**中图分类号:**V412.1;V412.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2015)01-117-04

## Evaluation method for hypersonic vehicle trajectory optimization

HU Huaizhong, GUO Rushuang, GONG Houjuan, WEI Shilei

(School of Electronic and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** Comprehensive evaluation for hypersonic vehicle trajectory optimization algorithm has good reference value on selecting optimal trajectory optimization algorithm. According to the features of hypersonic vehicle, trajectory was decomposed into ascent, cruise and descent stages; the performance evaluation indices of each stage and the typical methods of weighting for performance evaluation index were given respectively. Combining with the analysis theory of grey correlation degree, a comprehensive evaluation method of trajectory optimization algorithm was proposed. The calculation results show that the method can quantitatively evaluate trajectories produced by trajectory optimization methods and sort the alternative optimization methods by merits.

**Key words:** hypersonic vehicle; trajectory optimization; comprehensive evaluation; grey correlation degree

高超声速飞行器因其具有飞行速度快、突防能力强、射程远以及杀伤力大等特点成为未来信息化作战中的主要武器<sup>[1]</sup>。高超声速飞行器的弹道优化是制导与控制领域中的核心问题,其对于飞行器提高作战性能、减少燃料消耗、延长寿命以及满足特定任务有着十分重要的意义。

弹道优化是一个复杂受约束的优化问题,针对不同的优化目标,不同种优化方法的性能各异。对于高超声速飞行器,弹道优化是一个多目标、多层次、多关联、多约束的非线性高维优化问题。由于不同的弹道优化方法生成的目标弹道各不相同,因而针对各种优化方法展开的综合性能评估对选取最优弹道优化方法具有重要的指导意义。传统上对飞行器弹道优化方法的评估多采用蒙特卡洛随机打靶方法和层次分析方法(Alytic Hierarchy Process, AHP)。然而蒙特卡洛随机打

靶方法一般都是针对一种弹道设计或优化方法进行评估<sup>[2,3]</sup>,不适于对多种优化方法进行对比评估。AHP<sup>[4]</sup>虽然可用于多种弹道间的对比评估,但因其在某些情况下不具备保序性<sup>[5]</sup>,并且采用随机一致性比率小于0.1作为判断一致性的依据,缺乏科学性,导致采用此方法所得结果的正确性受到质疑。而同样是求解多目标决策问题的灰色关联度分析方法是一种定量分析多数据序列关联关系的方法,与AHP相比,该方法不存在因保序性引起的倒序问题,而且原理明晰实现简单。结合灰色关联度分析的思想,提出了一种高超声速飞行器弹道优化算法的综合评估方法,其可以对不同弹道优化算法进行有效对比评估。

### 1 弹道综合评价指标体系

高超声速飞行器弹道设计是一个非线性、多

\* 收稿日期:2014-07-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61075001)

作者简介:胡怀中(1974—),男,陕西西安人,副教授,博士, E-mail: huhuaizhong@263.net

目标、多约束的高维优化问题<sup>[6]</sup>,对其弹道优化结果进行综合评估的首要条件是建立科学、客观的评价指标体系。

根据高超声速飞行器的特性,其弹道一般可划分为三个阶段,分别为上升段、巡航段和俯冲段。由于超高声速飞行器在每个阶段的任务不同,其飞行状态也具有很大差异,因此需要针对不同的飞行阶段分别建立弹道性能评价指标。根据各飞行阶段的任务及其约束条件,分别给出高超声速飞行器在上升段、巡航段和俯冲段的性能评价指标,如表 1 所示。

表 1 各飞行阶段弹道性能评价指标  
Tab. 1 Trajectory performance evaluation index of different stages

上升段	巡航段	俯冲段
上升时间 $t_{asc}/s$	巡航飞行时间 $t_{cruise}/s$	俯冲时间 $t_{dec}/s$
速度高速约束满足度 $\Delta(H, Ma)/km$	巡航飞行距离 $L_{cruise}/km$	最大攻击距离 $L/km$
最大法向过载 $n_{max}$	最大法向过载 $n_{max}$	最大法向过载 $n_{max}$
最大瞬时吸热率 $Q_{max}/J$	总吸热率 $Q/J$	Z 轴方向位移 $z/km$
最大动压 $q/Pa$	最大动压 $q/Pa$	末端速度 $v_w/(km/h)$
攻角 $\alpha/(\circ)$	最大攻角 $\alpha_{max}/(\circ)$	末端速度倾角 $\theta_w/(\circ)$
消耗燃料 $\Delta m/kg$	最大消耗燃料率 $B_{max}/(g/(kW \cdot h))$	
关机点参数 波动 $N$		

## 2 弹道性能评价指标权重的确定

高超声速飞行器弹道优化方法的综合性能评价指标有若干个,而各个指标对于弹道优化方法的综合评估并不是同等重要。为了体现各个评价指标在评价指标体系中的重要程度,需要对各个指标赋予不同的权重系数。一般来说,权重确定方法可分为三类,包括主观赋权法、客观赋权法及主客观联合赋权法。

典型的主观赋权法<sup>[7]</sup>是专家打分法,该方法凭借专家经验对各指标的重要程度进行打分,以此确定权重。该方法确定的权重符合指标的物理特性,能表征各指标的本质属性,但该方法没有利用实际的实验数据,当专家经验不足时会导致较大偏差。典型的客观赋权有熵权法<sup>[8]</sup>、CRITIC 方法<sup>[9]</sup>等,此类方法的优点是能充分利用各指标的实际实

验数据对指标赋权重,但该方法没有考虑指标的物理意义,也存在一定缺陷。主客观联合赋权法<sup>[10]</sup>是将主观赋权法和客观赋权法结合起来,兼顾专家经验和实验数据的信息,以此确定指标权重,避免了主观赋权法和客观赋权法带来的差异。

由于客观赋权法需要大量的弹道样本参与评价,而目前通过各种优化方法得到的高超声速飞行器弹道有限,利用客观赋权法得到的弹道性能指标权重的客观性很难保证。在侧重考虑弹道优化评估方法,而获得权重过程和精度相对次要的情况下,本文采用比较真实的专家打分法,对弹道各指标的重要程度打分,确定权重。

## 3 基于灰色关联度分析方法的综合评估

灰色关联度分析方法<sup>[11]</sup>是一种定量分析多数数据序列关联关系的方法,也是一种求解多指标性能评估问题的重要方法。其基本思想是根据数据列曲线的几何形状的接近程度来判断关联程度,曲线越接近,相应的关联度就越大,反之越小。但如果多条曲线形状相差不大,用直观分析法很困难,则需要量化的方法来计算因素间的关联度大小。

结合灰色关联度的思想,运用灰色关联度方法的数学模型对超高声速飞行器轨道性能进行综合评估。

灰色关联度分析方法依据的数学模型如式(1)所示。

$$\mathbf{R} = \mathbf{E} \times \mathbf{W} \quad (1)$$

式中,  $\mathbf{R} = [r_1, r_2, \dots, r_m]^T$  为  $m$  个被评价对象的评价结果向量。  $\mathbf{E}$  为各指标的评判矩阵:

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} \xi_1(1) & \xi_1(2) & \dots & \xi_1(n) \\ \xi_2(1) & \xi_2(2) & \dots & \xi_2(n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \xi_m(1) & \xi_m(2) & \dots & \xi_m(n) \end{bmatrix}, \quad \text{其中}$$

$\xi_i(k)$  是第  $i$  个方案的第  $k$  个指标与第  $k$  个最优指标的关联系数。  $\mathbf{W} = [w_1, w_2, \dots, w_n]^T$  为  $n$  个评价指标的权重向量,其中  $\sum_{j=1}^n w_j = 1$ 。

采用灰色关联度分析方法进行综合评价的具体计算过程如下:

### 1) 确定最优指标集 $F^*$

设最优指标集为  $F^* = [j_1^*, j_2^*, \dots, j_n^*]$ , 其中  $j_k^* (k=1, 2, \dots, n)$  为第  $k$  个指标的最优值。最优值一般是各个方案数据中的最大值或者最小值,或者是决策者公认的最优值。确定了最优指标集之后,可以构造矩阵  $\mathbf{D}$ :

$$D = \begin{bmatrix} j_1^* & j_2^* & \cdots & j_n^* \\ j_1^1 & j_2^1 & \cdots & j_n^1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ j_1^m & j_2^m & \cdots & j_n^m \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中,  $j_k^i$  为第  $i$  个方案的第  $k$  个指标的原始数据。

## 2) 指标值的预处理

指标值的预处理方法可以采用线性归一、最大值、最小值等方法对弹道性能指标值进行预处理,这里不详细介绍。对矩阵  $D$  进行预处理之后,得到矩阵  $C$ :

$$C = \begin{bmatrix} c_1^* & c_2^* & \cdots & c_n^* \\ c_1^1 & c_2^1 & \cdots & c_n^1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_1^m & c_2^m & \cdots & c_n^m \end{bmatrix} \quad (3)$$

## 3) 确定评价指标的权重向量

评价指标的权重确定可以采用第2节弹道性能指标权重的计算方法,这里不展开讨论。

## 4) 计算综合评价结果

根据灰色矩阵理论,将  $\{c^*\} = [c_1^*, c_2^*, \dots, c_n^*]$  作为参考序列,将  $\{c^i\} = [c_1^i, c_2^i, \dots, c_n^i]$  作为被比较序列,则第  $i$  个方案的第  $k$  个指标与第  $k$  个最优指标的关联系数  $\xi_i(k)$  可以通过式(4)计算得到。

$$\xi_i(k) = \frac{\min_k |c_k^* - c_k^i| + \rho \max_k |c_k^* - c_k^i|}{|c_k^* - c_k^i| + \rho \max_k |c_k^* - c_k^i|} \quad (4)$$

式中,  $\rho \in [0, 1]$  为分辨系数,一般取  $\rho = 0.5$ 。

由式(4)可以计算得到式(1)中的矩阵  $E$ ,式(1)中的评价结果  $r_i$  即可求得为:

$$r_i = \sum_{k=1}^n w(k) \times \xi_i(k) \quad (5)$$

关联度  $r_i$  越大,说明  $\{C^i\}$  与最优指标  $\{C^*\}$  越接近。最终根据各关联度  $r_i$  的计算结果,便可以得出各方案的优劣排序。

## 4 评估实例

以高超声速飞行器上升段为例,选取了四种常用的弹道优化方法对某飞行任务的上升段弹道实施了优化,并利用灰色关联度方法对其优化结果进行了性能评估,以获得各优化方法的优劣排名。由于选定不同优化方法得到的评估结果不一样,在着重考虑评估方法的情况下,并不具体指明四种优化方法。

### 4.1 明确上升段性能评价指标及最优值评定准则

高超声速飞行器上升段的性能评价指标有上

升时间、速度高度约束满足度、最大法向过载、最大瞬时吸热率、最大动压、攻角、消耗燃料和关机点参数波动。其中上升时间是飞行器上升过程中所需要的时间,时间越短越好;速度高度约束满足度是描述飞行器速度和高度满足约束条件的程度,其值越大越好;最大法向过载是指过载矢量沿与飞行速度方向垂直投影的临界值,表征了导弹改变飞行速度大小和方向的幅度,该值越小则飞行器机动幅度越小;最大瞬时吸热率和最大动压越小越好;攻角是速度矢量  $V$  在纵向对称面上的投影与导弹纵轴之间的夹角,弹道优化中攻角越小弹道越平稳;此外,上升段末助推器关机时会带来较大的扰动,关机前后飞行器质量、外形及动力都发生突变,因此要尽力减小关机点波动参数,使飞行参数平稳过渡。

### 4.2 对上升段性能评价指标赋权

由于篇幅考虑,在获得权重过程和精度相对不重要的情况下,本例采用相对真实的专家打分法对导弹上升段性能指标赋予权值,其赋权结果如表2所示。由于数据保密的需要,表2中权重值与实际值有一定差异,但不影响评价方法的有效性。

表2 性能评价指标权重

Tab.2 weights of performance evaluation index

上升段性能指标	权重
上升时间 $t_{asc}/s$	0.0057
速度高速约束满足度 $\Delta(H, Ma)/km$	0.1420
最大法向过载 $n_{max}$	0.0527
最大瞬时吸热率 $Q_{max}/J$	0.0473
最大动压 $q/Pa$	0.1735
攻角 $\alpha/V$	0.1898
消耗燃料 $\Delta m/kg$	0.2965
关机点参数波动 $N$	0.0625

### 4.3 实施弹道优化并计算其性能评价指标数值

由于本例侧重于基于灰色关联度弹道优化评估方法的介绍,对具体优化方法不做太多关心,且选择不同的优化方法的评估结果也不一样,因此在没有指明优化方法的情况下,选用了四种不同的弹道优化方法,分别优化得到某飞行任务上升段弹道,并进一步计算得到上升段各项性能评价指标数值,如表3所示。由于数据保密性的要求,这里只给出归一化后的结果。

### 4.4 各优化方法的综合评价

将表3中数据代入式(2)~(5),得到灰色关联度方法对各优化方法的综合评价结果,如表4所示。

表 3 各项性能指标在不同弹道优化方法中的值

Tab.3 Value of each performance evaluation index in different trajectory optimization methods

指 标	方法 1	方法 2	方法 3	方法 4	最优值
上升时间 $t_{asc}/s$	0.632 452	0.807 480	0.655 806	0.610 834	0.610 834
速度高速约束满足度 $\Delta(H, Ma)/km$	0.598 023	0.650 282	0.761 264	0.975 036	0.975 036
最大法向过载 $n_{max}$	0.720 433	0.905 492	0.467 862	0.695 803	0.467 862
最大瞬时吸热率 $Q_{max}/J$	0.519 086	0.899 075	0.677 827	0.723 938	0.519 086
最大动压 $q/Pa$	0.539 761	0.955 620	0.748 042	0.678 770	0.539 761
攻角 $\alpha/V$	0.788 022	0.539 999	0.697 785	0.849 032	0.539 999
消耗燃料 $\Delta m/kg$	0.575 349	0.873 070	0.651 641	0.639 739	0.575 349
关机点参数波动 $N$	0.494 593	0.610 323	0.881 216	0.968 915	0.494 593

表 4 优化方法的评估

Tab.4 Evaluation of optimization method

优化方法	关联度	排名
方法 1	0.7582	1
方法 2	0.5260	4
方法 3	0.6150	3
方法 4	0.6458	2

从表 4 中数据可以看出,方法 1 的评价结果与最优值的关联度为 0.7582,排名第一。方法 4 的评价结果与最优值的关联度为 0.6458,排名次之,方法 3 和方法 2 的评价结果与最优值关联度分别为 0.6150 和 0.5260,排名靠后。由此可得出结论:针对本实例分析中的某飞行任务的上升段,优化方法 1 得到的弹道具有最优性能。

### 5 结论

高超声速飞行器弹道优化问题是一个多目标、多层次、多关联、多约束的非线性的高维优化问题,因此决定了对弹道优化方法的综合评估本质上是一个多指标决策问题。针对高超声速飞行器飞行的三个飞行阶段分别建立了评价弹道性能的评价指标体系,并通过主观赋权法赋予了各指标的权重,进而通过灰色关联度分析方法对高超声速飞行器弹道的优化方法进行评估,评估实例体现了其可行性和有效性。

### 参考文献 (References)

[1] Moses P L, Rausch V L, Nguyen L T, et al. NASA hypersonic flight demonstrators-overview, status, and future plans [J]. Acta Astronautica, 2004, 55(3): 619-630.

[2] Walton V, Anderson L, Orgun M, et al. A short final approach performance evaluation technique [C]//AIAA Guidance, Navigation and Control Conference, New Orleans, Louisiana, 1991:627-634.

[3] Rinat K, Ben-Asher J Z. Worst-case distributions for performance evaluation of proportionally guided missiles [J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 2000, 23(5): 895-898.

[4] 吴殿廷,李东方. 层次分析法的不足及其改进的途径 [J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2004, 40(2):264-268.  
WU Dianting, LI Dongfang. The shortage of the analytic hierarchy process and its improving way [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science Edition), 2004, 40(2): 264-268. (in Chinese)

[5] 蔚林巍. 层次分析法的缺陷及其分析 [J]. 管理工程学报, 1993, 7(4):221-226.  
WEI Linwei. The defect of the analytic hierarchy process and the analysis [J]. Journal of Management Engineering, 1993, 7(4):221-226. (in Chinese)

[6] 蔡远利,魏倩,支强. 基于层次分析方法的飞行器轨道性能评估 [C]//第 13 届中国系统仿真技术及其应用学术年会论文集, 2011:23-27.  
CAI Yuanli, WEI Qian, ZHI Qiang. Analytic hierarchy process based performance evaluation for flight trajectories [C]//System Simulation Technology & Application (Volume 13), 2011:23-27. (in Chinese)

[7] 薛会琴. 多属性决策中指标权重确定方法的研究 [D]. 兰州:西北师范大学, 2008.  
XUE Huiqin. The study of the method to determine index weight of the multiple attribute decision making [D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2008. (in Chinese)

[8] Zou Z H, Yun Y, Sun J N. Entropy method for determination of weight of evaluating indications in fuzzy synthetic evaluation for water quality assessment [J]. Journal of Environmental Sciences, 2006, 18(5):1020-1023.

[9] 王晖,陈丽,陈恩,等. 多指标综合评价方法及权重系数的选择 [J]. 广东药学院学报, 2007, 23(5):583-589.  
WANG Hui, CHEN Li, CHEN Ken, et al. Multi-index comprehensive evaluation method and the selection of weight coefficient [J]. Journal of Guangdong College of Pharmacy, 2007, 23(5):583-589. (in Chinese)

[10] Yeh C H. A problem-based selection of multi-attribute decision-making methods [J]. International Transactions in Operational Research, 2002, 9(2): 169-181.

[11] 杜栋,庞庆华,吴炎. 现代综合评价方法与案例精选 [M]. 北京:清华大学, 2008.  
DU Dong, PANG Qinghua, WU Yan. Modern comprehensive evaluation method and case selection [M]. Beijing: Tsinghua University, 2008. (in Chinese)