

文章编号: 1001- 2486(2009) 06- 0073- 04

# 基于 MOEA/D 的柔性结构燃料—时间多目标优化控制研究\*

张青斌, 丰志伟, 刘泽明, 杨 涛

(国防科技大学 航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:** 利用基于分解的多目标优化算法(MOEA/D)研究了柔性航天器多目标优化的 rest-to-rest 机动问题。基于空间飞行器刚柔耦合动力学方程,提出了最小时间—最少耗能的多目标优化控制模型;给出了基于 MOEA/D 的算法框架,并对柔性飞行器空间机动问题进行了多目标优化控制的分析设计;典型算例表明该算法可有效地应用于柔性航天器姿态机动控制器的分析设计之中。

**关键词:** 多目标优化; 柔性航天器; 姿态机动

**中图分类号:** V448      **文献标识码:** A

## Fuel-time Multiobjective Optimal Control of Flexible Structures Based on MOEA/D

ZHANG Qing-bin, FENG Zhi-wei, LIU Ze-ming, YANG Tao

(College of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** A multi-objective optimization for rest-to-rest maneuvers of flexible spacecraft is presented by using MOEA/D (Multiobjective Evolutionary Algorithm based on Decomposition). The multiobjective control design functions which deal with the minimal maneuver time and fuel consume are developed by using rigid-flexible couple dynamics model of spacecraft. A new MOEA/D approach is introduced for maneuvers problem of flexible spacecraft control system. The simulation results show that the approach can be efficiently realized in design and analysis of flexible spacecraft.

**Key words:** multiobjective optimization; flexible spacecraft; attitude maneuvers

现代航天器常常带有柔性附件,具有非常复杂的动力学特性,给姿态和控制系统的分析设计带来了极大的困难<sup>[1]</sup>。精确定向和快速机动是这类航天器的重要任务,也是其姿态控制器分析与设计的难点。针对柔性航天器 rest-to-rest 机动问题, Singh 等<sup>[2]</sup>研究了最优控制形状的反对称性; Wie 等<sup>[3]</sup>研究了无阻尼柔性结构鲁棒最优控制问题,得到了“bang-off-bang”脉冲序列是燃料/时间最优输入方式的重要结论。在目前相关研究中,主要是针对最小机动时间、燃料消耗或两者加权组合形式的单目标进行优化控制研究<sup>[4]</sup>,几乎没有基于多目标优化理论的最优控制研究。然而,在航天器的工程实际之中,控制分析设计任务通常需要解决多个冲突性很强的指标,基于单目标的优化设计具有一定的片面性。随着多目标优化理论和算法的发展,学者们开始关注基于多目标优化的最优控制问题。比如 Sunar<sup>[5]</sup>等研究了刚柔耦合飞行器结构和控制的多目标优化设计问题; Mainenti<sup>[6]</sup>等研究了刚体卫星机动的时间—耗能多目标优化控制问题。

目前有很多求解多目标的优化算法,如非劣排序遗传算法(NSGA, NSGA2)、强度 Pareto 遗传算法(SPEA, SPEA2)、Pareto 存档进化算法(PAES)等;也有许多有效的进化策略,如精英保留机制、外部存档等<sup>[7]</sup>。这些算法的核心目的是在尽量小的计算量的情况下,寻求较均匀的 Pareto 近似解。

本文应用了最近提出的基于分解的多目标进化算法(MOEA/D),该算法原理简单,易与具体工程问题相结合,便于工程实现。本文结合柔性航天器的空间机动问题,首先建立了无阻尼空间柔性结构的基于时间—耗能的多目标优化控制模型;然后给出了 MOEA/D 的框架,根据权重系数调整控制输入的约束

\* 收稿日期: 2009- 06- 16

基金项目: 国防科技大学预研基金国际合作资助项目(CJ07- 01- 01)

作者简介: 张青斌(1975—),男,副教授,博士。

形式,进而缩小了优化空间、降低了计算量;最后,通过典型算例验证了本文算法的正确性和有效性。本文的研究成果可应用到某柔性航天器姿态机动的控制器设计之中。

## 1 动力学模型

假设柔性空间结构无结构阻尼,则其系统动力学方程可以表示为

$$M\dot{x} + Kx = bu \quad (1)$$

式中,  $M$  为质量矩阵,  $K$  为刚度矩阵,  $b$  是控制影响矢量,  $x$  和  $u$  是状态矢量和标量控制输入。对于无残余振动的 rest-to-rest 机动问题,其边界条件为

$$x(0) = 0, \quad x(t_f) = x_f, \quad \dot{x}(0) = 0, \quad \dot{x}(t_f) = 0 \quad (2)$$

在姿态机动的控制器设计之中,通常机动时间最少和耗能最低是两个具有很强冲突性的设计指标。据此,本文针对工程实际提出了如下两个优化目标:

$$\begin{cases} J_1 = t_f \\ J_2 = \int_0^{t_f} |u| dt \end{cases} \quad (3)$$

式中,前者表示机动时间,后者表示能量消耗。

若假设采用喷气式阶跃控制输入,则系统的控制输入可以表示为多个阶跃输入的叠加形式。对于此类型控制,一般有如下约束:

$$|u| \leq 1, \quad t \in [0, t_f] \quad (4)$$

根据 Singh 和 Wie 等<sup>[3-4]</sup>的研究,柔性航天器姿态机动的最优控制为“bang-off-bang”的控制形式,且输入脉冲序列具有反对称性。据此,本文采用如图 1 所示的阶跃输入序列,图中  $T_i$  ( $i = 1, 2, \dots, N-1$ ) 为阶跃输入的第  $i$  个开关时间点,  $T_N$  为机动的中间时刻。若系统具有奇数个柔性模式,则  $N = n + 1$ ; 否则  $N = n + 2$ 。

通过上述建模工作,可以将燃料和时间两目标优化控制问题,转化为带有等式和不等式等复杂约束条件的多目标参数优化问题<sup>[4]</sup>,其目标函数为

$$\begin{cases} J_1 = 2T_N \\ J_2 = 2 \sum_{i=1}^{N-1} (-1)^{i+1} T_i \end{cases} \quad (5)$$

约束条件为

$$\sum_{i=1}^{N-1} (-1)^i \cos \omega_k (T_N - T_i) + \cos \omega_k T_N = 0, \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

$$\frac{\Phi_0}{\theta} \left[ 2T_N^2 + \sum_{i=1}^{N-1} (-1)^i \left( \frac{2T_N - T_i}{2} \right)^2 + \sum_{i=1}^{N-1} (-1)^i \frac{T_i^2}{2} \right] = 1 \quad (7)$$

$$T_N > T_{N-1} > \dots > T_2 > T_1 > 0 \quad (8)$$

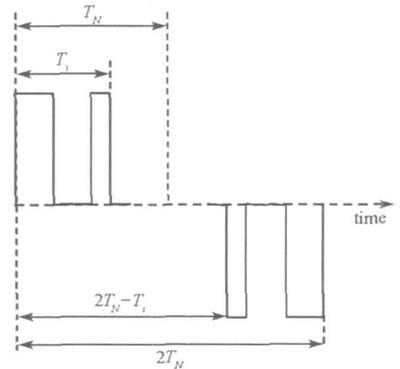


图 1 控制输入的形状

Fig. 1 Shape of input

## 2 基于分解的多目标优化算法

多目标优化问题可以定义如下:

$$\min F(x) = (f_1(x), \dots, f_m(x))^T, \quad \text{subject to } x \in \Omega \quad (9)$$

其中,  $\Omega$  是决策(变量)空间,  $F: \Omega \rightarrow \mathbf{R}^m$  由  $m$  个实值的目标函数组成,  $\mathbf{R}^m$  称为目标空间。定义  $\{F(x) | x \in \Omega\}$  为可达目标集。

MOEA/D 将多目标优化问题明确分解成  $N$  个标量形式的单目标优化子问题,然后在进化过程同时求解这些子问题。因为两个相邻子问题的优化解应该非常相似,所以在 MOEA/D 中每个子问题可使用其相邻子问题的优化信息,进而可以提高优化效率,减少计算量。下面简要介绍 MOEA/D 的大体思路<sup>[8]</sup>。

若使用 Tchebycheff 分解方法, 则可将原始多目标优化问题分解成  $N$  个标量优化问题, 令  $\lambda^1, \dots, \lambda^N$  为均匀分布的一组权重矢量,  $z^*$  为参考点, 则第  $j$  个子问题的目标函数为

$$g^{te}(x | \lambda^j, z^*) = \max_m \left\{ \lambda^j | f_i(x) - z_i^* | \right\} \quad (10)$$

因为  $g^{te}$  关于  $\lambda$  连续, 所以当  $\lambda^i$  和  $\lambda^j$  彼此接近时, 则  $g^{te}(x | \lambda^i, z^*)$  的优化解应该接近  $g^{te}(x | \lambda^j, z^*)$  的优化解, 于是与  $\lambda^i$  接近的关于  $g^{te}$  的任何信息都对优化  $g^{te}(x | \lambda^j, z^*)$  有帮助。在 MOEA/D 中, 根据权重矢量  $\lambda^i$  的距离来定义其相邻子问题, 进而相邻问题的优化信息可以共享。该算法大体包括初始化、更新和停止等三个过程, 算法如下:

#### Step 1 初始化

1.1 记 Pareto 解集  $EP = \emptyset$ 。

1.2 计算与第  $i$  个权重矢量最近的  $T$  个权重索引集, 记为  $B(i) = \{i_1, \dots, i_T\}$ , 其中,  $\lambda^{i_1}, \dots, \lambda^{i_T}$  是  $\lambda^i$  的  $T$  个最近的权重矢量。

1.3 随机或根据具体问题产生初始种群  $x^1, \dots, x^N$ , 并设置  $FV^i = F(x^i)$ 。

1.4 根据具体问题初始化  $z = (z_1, \dots, z_m)^T$ 。

#### Step 2 更新

2.1 从  $B(i)$  中随机选择两个指标  $k, l$ , 使用遗传算子从  $x^k$  和  $x^l$  中产生新解  $y$ 。

2.2 改进: 根据具体问题对  $y$  进行修改得到  $y'$ 。

2.3 更新  $z$ : 对  $j = 1, \dots, m$ , 若  $z_j < f_j(y')$ , 则  $z_j = f_j(y')$ 。

2.4 更新相邻问题解: 对  $j \in B(i)$ , 若  $g^{te}(y' | \lambda^j, z) \leq g^{te}(x^j | \lambda^j, z)$ , 则  $x^j = y'$ ,  $F(x^j) = F(y')$ 。

2.5 更新  $EP$ : 从  $EP$  中删除被  $F(y')$  支配的矢量。如果  $EP$  中没有支配  $F(y')$  的矢量, 则将  $F(y')$  加入  $EP$ 。

#### Step 3 停止判据

如果满足预先设定的停止判据, 则停止并输出种群; 否则转入 Step 2。

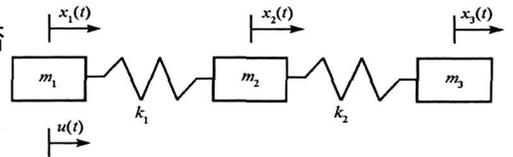


图 2 3—质量—弹簧系统

Fig. 2 3-mass-spring system

### 3 仿真算例

对于空间柔性结构 rest-to-rest 机动, 一般可用“质量—弹簧”系统进行等效, 因此研究如图 2 所示的典型柔性结构, 其质量为  $m_1, m_2$  和  $m_3$ , 弹簧系数为  $k_1$  和  $k_2$ 。假设控制输入作用在第一个质量块上, 且控制目的为使所有质量块进行 rest-to-rest 机动。

该系统矩阵形式的动力学方程如下:

$$\begin{bmatrix} m_1 & & & \\ & m_2 & & \\ & & & \\ & & & m_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \ddot{x}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 & -k_1 & & \\ -k_1 & k_1+k_2 & -k_2 & \\ & & -k_2 & k_2 \\ & & & k_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (11)$$

边界条件如下:

$$\begin{cases} x(0) = 0, & x(t_f) = x_f \\ \dot{x}(0) = 0, & \dot{x}(t_f) = 0 \end{cases} \quad (12)$$

由于模态数量为偶数 ( $n = 2$ ), 所以需要确定  $N = n + 2 = 4$  个参数。优化目标函数如下:

$$\begin{cases} J_1 = 2T_4 \\ J_2 = 2T_1 + 2(T_3 - T_2) \end{cases} \quad (13)$$

约束条件可由式 (6)~(8) 给出。

Singh 等研究表明, 当权重系数不同时, 最优控制输入形式也有不同。因此, 在采用 MOEA/D 进行具体优化时, 根据权重系数调整决策(变量)空间, 进而缩小了优化空间、降低了计算量。本文仿真分析了两种典型情况, 一种情况假设质量块间的刚度为无穷大, 于是该系统等效于单质量系统, 且取  $x_f = 1$ ; 另一种情况则是取  $m_1 = m_2 = m_3 = 1, k_1 = k_2 = 1, x_f = 1$ , 该情况下系统为柔性结构系统。前者具有解析形

式的最优解;后者只能通过一定的优化算法来获得数值解。图3是在第一种情况下,采用MOEA/D计算得到的近似 Pareto 前端和解析解,图中两条曲线几乎重合,充分表明了算法和程序的正确性。

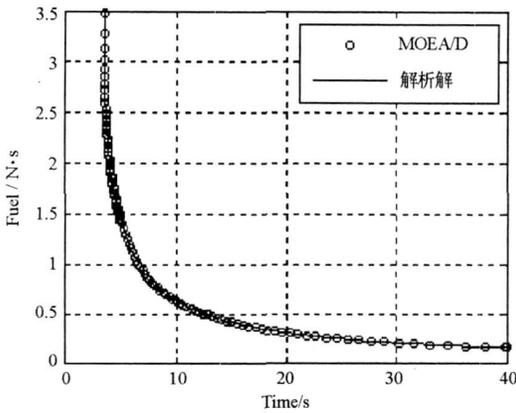


图3 等效单质量系统的 Pareto 前端  
Fig.3 Pareto set of equivalent system

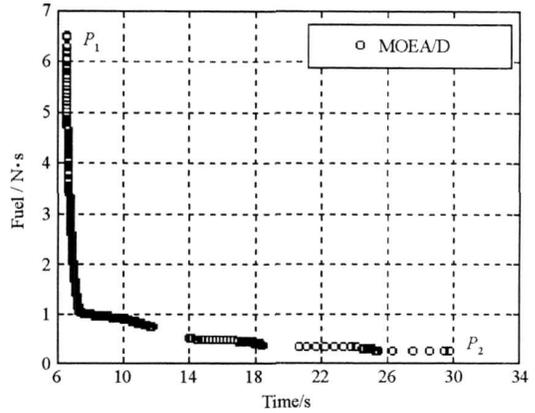


图4 3-质量-弹簧系统 Pareto 前端  
Fig.4 Pareto set of 3-mass-spring system

图4是在第二种情况下,采用MOEA/D所获得的近似 Pareto 最优解,从图中可以看出, Pareto 最优解并非连续曲线。图中  $P_1$  和  $P_2$  点分别表示近似 Pareto 最优解中最小时间和最小耗能所对应的解。由于约束条件的非线性(含有三角函数的等式约束条件),导致了最优机动时间和最少耗能的关系具有若干个突变点,图4中近似 Pareto 最优解曲线初步反映了这种非连续性,该仿真结果与 Singh 等<sup>[4,9]</sup>的分析结论一致。这里需要强调的是,由于本文引入了多目标优化算法,所以得到了较均匀的近似 Pareto 最优解;然而 Singh 等仅仅利用加权法将时间-能量问题转化为单目标问题来处理,所以他们无法在非凸性的均衡面上得到所有的 Pareto 最优解<sup>[10]</sup>。图5是近似 Pareto 最优解中  $P_1$  点对应的输入曲线和系统位移曲线;图6是近似 Pareto 最优解中  $P_2$  点对应的输入曲线和系统位移曲线,图5和图6表明  $P_1$  和  $P_2$  的所对应的控制输入形式具有不同的对称性,这与文献的结论一致,同时也说明了本文算法的正确性。

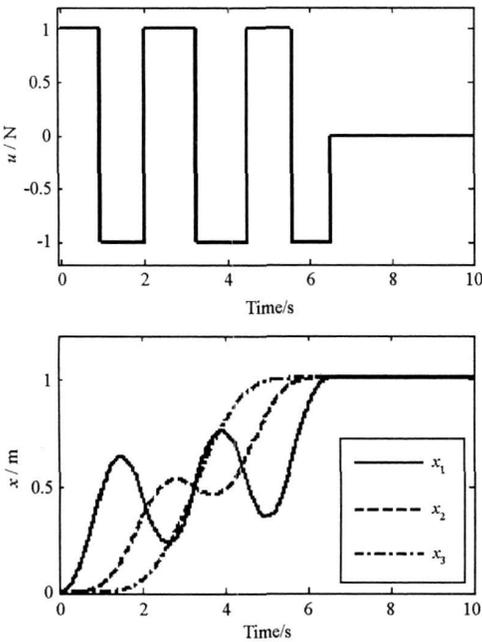


图5  $P_1$  点的控制输入和位移响应曲线  
Fig.5 Input and response v. s. time of  $P_1$

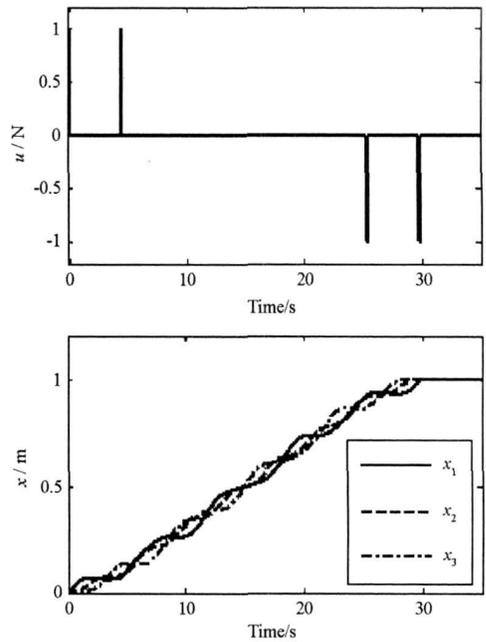


图6  $P_2$  点的控制输入和位移响应曲线  
Fig.6 Input and response v. s. time of  $P_2$

- [8] Martorell S, Sanchez A, Serradell V. Age-dependent Reliability Model Considering Effects of Maintenance and Working Conditions [J]. Reliability Engineering and System Safety, 1999, 64: 19– 31.
- [9] Sheu S H, Yeh R H, et al. A Bayesian Perspective on Age Replacement with Minimal Repair [J]. Reliability Engineering and System Safety, 1999, 65: 55– 64.
- [10] Chiang J H, Yuan J. Optimal Maintenance Policy for a Markovian System under Periodic Inspection [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2001, 71: 165– 172.
- [11] Jiang R, Ji P. Age Replacement Policy: A Multi-attribute Value Model [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2002, 76: 311– 318.
- [12] Lyer S. Availability Results for Imperfect repair [J]. Sankhya: the Indian Journal of Statistics, 1992, 54(2): 249– 259.
- [13] Zhao M. Availability for Repairable Components and Series System [J]. IEEE Transactions Reliability, 1994, 43(2): 329– 334.
- [14] Wang H, Pham H. Availability and Maintenance of Series Systems Subject to Imperfect Repair and Correlated Failure and Repair [J]. European Journal of Operational Research, 2006, 174: 1706– 1722.
- [15] 刘元生, 张传富, 张童, 等. 基于 Markov 链的分布式仿真系统最佳检查点间隔研究[J]. 国防科技大学学报, 2005, 27(5): 73– 77.
- [16] Grall A, Berenguer C, Dieulle L. A Condition-based Maintenance Policy for Stochastically Deteriorating Systems [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2002, 76: 167– 180.
- [17] Bloch-Mercier S. A Preventive Maintenance Policy with Sequential Checking Procedure for a Markov Deteriorating System [J]. European Journal of Operational Research, 2002, 147: 548– 576.
- [18] Van Noortwijk J M, Van der Weide J A M, et al. Gamma Processes and Peaks over-threshold Distributions for Time dependent Reliability [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2007, 92: 1651– 1658.
- [19] Kallen M J, Van Noortwijk J M. Optimal Maintenance Decisions Under Imperfect Inspection [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2005, 90: 177– 185.
- [20] Liao H T, Elsayed A, Chan L Y. Maintenance of Continuously Monitored Degrading Systems [J]. European Journal of Operational Research, 2006, 175: 821– 835.
- [21] Ross S M. Stochastic Process[M]. 2<sup>nd</sup> ed., New York, Wiley, 1996.

(上接第 76 页)

## 4 结论

本文针对空间刚柔耦合动力学系统的多目标优化控制问题,提出基于最小时间和最少耗能的多目标优化控制模型;应用 MOEA/D 针对 rest-to-rest 空间机动问题仿真分析了柔性结构系统机动的多目标优化控制问题。本文的研究成果可以应用于刚柔耦合航天器的姿态机动优化设计之中,具有一定的工程应用价值。

## 参考文献:

- [1] 马兴瑞, 王本利, 苟兴宇. 航天器动力学——若干问题进展及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [2] Singh G, Kabanba P T, McClarnoch N H. Planar Time-optimal Control, Rest-to-rest Slewing of Flexible Spacecraft [J]. AIAA Journal of Guidance, Control and Dynamics, 1989, 12(1): 71– 81.
- [3] Wie B, Sinha R, Sunkel J, et al. Robust Fuel and Time-optimal Control of Uncertain Flexible Space Structures[C]// AIAA Guidance, Navigation and Control Conference, 1993: 939– 948.
- [4] Hartmann R, Singh T. Fuel/Time Optimal Control of Flexible Space Structures[C]// AIAA Guidance, Navigation and Control Conference, 1995: 91– 101.
- [5] Sunar M, Kahraman R. A Comparative Study of Multiobjective Optimization Methods in Structural Edesign [J]. Turk. J. Engin. Environ. Sci., 2001(25): 69– 78.
- [6] Mainenti I, DeSouza L C G, Sousa F L D, et al. Satellite Attitude Control Using the Generalized Extremal Optimization with a Multi-objective Approach [C]// Proceedings of COBEM, 2007.
- [7] 黄敏, 陈国龙, 郭文忠. 基于表现型共享的多目标粒子群算法研究 [J]. 福州大学学报, 2007, 35(3): 365– 368.
- [8] Zhang Q, Li H. MOEA/D: A Multiobjective Evolutionary Algorithm Based on Decomposition [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2006.
- [9] Singh T. Fuel/Time Optimal Control of the Benchmark Problem [J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 1995, 18(6): 1225– 1230.
- [10] 崔逊学. 多目标进化算法及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.