

基于并行子系统的飞行器多学科稳健优化设计

续 斌, 张恒喜, 马 利, 解 江

(空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038)

摘 要:研究了并行子系统稳健优化设计方法在飞行器设计中的应用。分别采用并行子系统稳健优化设计、系统分析和并行子系统分析3种不同方法进行了计算,得出的稳健结果表明并行子系统稳健优化设计方法优于其它2种方法。该方法主要有3大改进:一是在MDO环境中,增加了不确定性的分析;二是允许系统层使用离散变量;三是在系统协调过程中,采用人工神经网络的响应面提供定量的近似信息。

关键词:并行子系统稳健优化设计;飞行器设计;多学科设计优化

中图分类号: V222 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2007)06-0005-03

飞行器设计包含大量的学科或子系统,属于高度耦合的集成系统。多学科设计优化^[1](Multidisciplinary Design Optimization, MDO)是一种充分利用学科之间耦合作用,设计系统和子系统的集成设计技术,采用多学科优化技术可以降低生产成本、缩短产品设计周期^[2-3]。

然而,在飞行器系统设计中,许多不确定的信息和因素涉及大量的随机性、模糊性等问题。如果仅限于利用已认知的信息进行设计,必然存在着设计方法的合理性问题与设计结果的可信度问题。因此,在MDO中应该全面考虑系统可能存在的各种确定性和非确定性因素。随着概率统计^[4]、模糊数学理论的发展和应用,形成了一种已经获得广泛关注的设计思想——稳健设计^[5]。多学科稳健优化设计方法主要是在进行多学科优化设计时考虑复杂系统的不确定性、模糊性因素,使优化解具有稳健性。

并行子空间优化算法(CSSO)和协同优化算法^[6](CO)仅应用于求解确定性优化设计问题^[7],且都不允许在系统层使用离散设计变量,两者计算耗时,常常难以收敛^[8-9]。因此,本文研究的目的是改进并行子空间优化算法和协作优化算法方法,同时又考虑不确定性因素,也就是说,在多学科设计环境中集成稳健优化设计。文献[10]中提出了将并行子系统与稳健优化设计相结合的设想,但并没有应用于实际,本文将二者结合并应用到飞行器设计实例中。

1 基本思想

在并行子系统稳健优化设计方法中,每个学科都具有不确定性分析和优化运算的功能,并通过网络与系统层进行通讯。其基本思想是各学科通过不确定分析确定可控变量和不可控变量,并采用正交实验计算变量的均值和方差;各学科在满足自身的局部约束下独立并行地执行稳健优化计算,其优化目标是尽量减少与其它学科之间耦合变量的不一致性;各学科的设计信息不需要传递给其它学科,只传递给系统层;系统层不仅要进行不确定分析,而且还要协调各学科之间耦合变量的不一致性。

2 应用实例

本文在飞行器设计研究中引入并行子系统稳健优化设计方法,选用简单的实例对该算法进行验证,其目的是说明并行子系统稳健优化设计算法允许系统层有离散变量及其有效性。

收稿日期:2006-06-06

作者简介:续 斌(1980-),男,山西定襄人,博士生,主要从事军用飞机型号发展工程研究;

张恒喜(1937-),男,江苏姜堰人,教授,博士生导师,主要从事军用飞机型号发展工程研究。

这个算例包含 1 个连续变量(x_1), 2 个离散变量(x_2, x_3), 2 个状态变量(y_1, y_2), 4 个中间参数(p_1, p_2, p_3, p_4), 该问题的确定性优化模型可表示为

$$\begin{cases} \min. f(x) - 5p_3y_1 + \frac{y_2}{p_2} + p_1 \sin(\frac{p_4x_1}{5}) + 130 \\ \text{s. t.} & g_1 = y_1 - 60 \leq 0 \\ & g_2 = y_2 - 60 \leq 0 \\ \text{D. V.} & -10 \leq x_1 \leq 10 \end{cases} \quad (1)$$

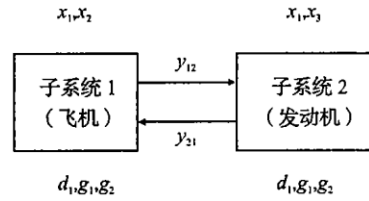


图 1 耦合算例

将研究对象分解成为飞机总体和发动机 2 个子系统。如图 1 所示, 2 个子系统模型数学上描述为: 子系统 1 见式(2); 子系统 2 见式(3)。

$$\begin{cases} z = \{x_1\}, x_1 = \{x_1, x_2\}, y_1 = \{y_{12}\} \\ F_{d1} = 0.5y_{12} + \frac{y_{21}}{p_2} + p_1 \sin(\frac{x_1\pi}{30}) + 130 \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} z = \{x_1\}, x_2 = \{x_1, x_3\}, y_2 = \{y_{21}\} \\ F_{y21} = \sqrt{Y_{12}} \sin p_4 + x_1 + 1 \\ F_{d2} = 5p_3y_{12} + \frac{y_{21}}{10} + 10 \sin(\frac{p_4x_1}{5}) + 130 \end{cases} \quad (3)$$

式中: p_1, p_2, p_3, p_4 的值是由离散变量决定的, 如表 1 所示。比如, 若 $x_2 = 7$, 那么 $p_1 = 10, p_2 = 1$, 即 p_1 和 p_2 是由 x_2 决定的。

表 1 离散设计变量

X_2	p_1	p_2	X_3	p_3	p_4
1	3	9	1	0.2	π
2	4	5	2	-0.2	$\pi/2$
3	6	9	3	-0.1	$\pi/3$
4	8	3	4	0	$\pi/4$
5	2	7	5	0.1	$\pi/6$
6	7	8			
7	10	1			

当采用并行子系统稳健优化设计算法求解时, 学科层稳健优化模型 1 和 2 分别可用式(4)和式(5)表示, 系统层稳健优化模型可用式(6)表示。

学科层稳健优化模型 1:

$$\begin{cases} \min. J_1 = (\mu_{x1} - \mu_{x1}^0)^2 + (\mu_1 - \mu_2^0)^2 + (\sigma_{x1} - \sigma_{x1}^0)^2 + (\sigma_{y1} - \sigma_{y1}^0)^2 \\ \text{s. t.} & y_1 + \left| \frac{\partial y_1}{\partial x_1} \right| \Delta x_1 + \left| \frac{\partial y_1}{\partial y_{21}} \right| \Delta y_{21} + \Delta y_1 \leq 60 \\ \text{D. V.} & X^1 = [\mu_{x1}, \mu_{x2}]^T \end{cases} \quad (4)$$

式中: Δy_1 表示因 x_2 变化引起的 y_1 的偏差。

学科层稳健优化模型 2:

$$\begin{cases} \min. J_2 = (\mu_{x1} - \mu_{x1}^0)^2 + (\mu_1 - \mu_{x3}^0)^2 + (\sigma_{x1} - \sigma_{x1}^0)^2 + (\sigma_{y1} - \sigma_{y1}^0)^2 \\ \text{s. t.} & y_2 + \left| \frac{\partial y_2}{\partial x_1} \right| \Delta x_1 + \left| \frac{\partial y_2}{\partial y_{21}} \right| \Delta y_{21} + \Delta y_2 \leq 60 \\ \text{D. V.} & X^2 = [\mu_{x1}, \mu_{x3}]^T \end{cases} \quad (5)$$

式中: Δy_2 表示因 x_3 变化引起的 y_2 的偏差。

系统层稳健优化模型:

$$\begin{cases} \min. F = \lambda_1 J_1^* + \lambda_2 J_2^* + \lambda_3 (\mu_f - \mu_f^*)^2 + \lambda_4 (\sigma_f - \sigma_f^*)^2 \\ \text{s. t.} & J_i^* = 0 \\ \text{D. V.} & \mu_z = [\mu_{z1}, \mu_{z2}, \mu_{z3}]^T \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 和 λ_4 是权重, 而且它们满足关系式: $\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 = 1$

并行子系统稳健优化设计方法的计算过程始于选择初始样本数据库。为此, 我们构造了一个初始试验。试验开始于 3 个设计点, 1 个是基准点, 另 2 个是由每次只有一个设计变量在基准附近变化所产生的其它设计点。在试验中, 选取设计变量在基准附近波动其范围的 10%, 且初始设计点选在各个设计变量变化范围的中点。基于这个试验, 就可创建两个 BP 网络, 其网络输出值分别用于近似 J_1^* 和 J_2^* 。这两个网络的收敛误差均为 0.001。

目标函数的 $f(x)$ 的收敛过程如图 2 所示, 4 次协调迭代结果如表 2 所示。

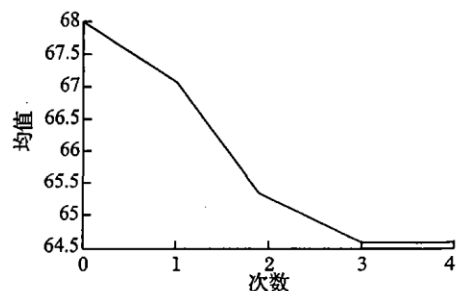


图 2 算例的收敛历史

为了比较不同方法的特性,表3分别列出了采用并行子系统稳健优化设计方法、系统分析方法和并行子系统分析方法3种不同方法得出的稳健结果。

表2 并行子系统稳健优化设计方法产生的稳健解

迭代次数	μ_{x1}	μ_{x2}	μ_{x3}	μ_f
1	9.986	6	4	67.543
2	-9.565	5	2	65.843
3	-4.086	6	2	64.722
4	-4.078	6	2	64.732

表3 3种不同方法得出的稳健优化解

变量名	并行子系统稳健优化	系统分析	并行子系统分析
μ_{x1}	-4.078	-4.809	-4.032
μ_{x2}	6	6	4
μ_{x3}	2	4	2
μ_f	64.732	65.456	67.354

3 结论

从表3可知,系统分析方法和并行子系统分析方法得出的结果接近于并行子系统稳健优化设计方法的稳健最优解,但是就目标函数而言,并行子系统稳健优化设计方法的目标值最好。

与CSSO和CO方法相比,并行子系统稳健优化设计方法主要有摘要中提到的三大改进,即:在MDO环境中增加了不确定性的分析;允许系统层使用离散变量;在系统协调过程中,采用神经网络响应面提供定量的近似信息。

参考文献:

- [1] 余雄庆,丁运亮.多学科设计优化算法及其在飞行器设计中的应用[J].航空学报,2000,21(1):1-6.
- [2] Balling R J, Wilkison C A. Execution of multidisciplinary design optimization Approaches on common test problems[J]. AIAA Journal, 1997, 35(1): 178-186.
- [3] Kroo I, Altuss Braun R. Multidisciplinary Optimization Methods for Aircraft Preliminary Design[R]. AIAA-94-102.
- [4] 郭书祥,吕震宙,李为吉,等.论基于概率模型的结构可靠性优化设计[J].空军工程大学学报:自然科学版,2001,2(2):67-70.
- [5] 陈立周.稳健设计[M].北京:机械工业出版社,1999.
- [6] Sobieski J, Kroo I. Aircraft Design Using Collaborative Optimization[R]. AIAA-96-0715.
- [7] 陈小前.飞行器总体优化设计理论与应用研究[D].长沙:国防科学技术大学,2001.
- [8] Braun R D, Gage P, Kroo I. Implementation and Performance Issue in Collaborative Optimization[R]. AIAA-96-4017.
- [9] 胡峪.多学科设计优化方法与技术的应用[D].北京:北京航空航天大学,2001.
- [10] Du X, Chen W. Efficient Uncertainty Analysis Methods for Multidisciplinary Robust Design[J]. AIAA Journal, 2002, 38(8): 1471-1478.

(编辑:姚树峰)

Study of Aircraft Multidisciplinary Robust Design Optimisation Based on Concurrent Subsystem

XU Bin, ZHANG Heng-xi, MA Li, XIE Jiang

(The Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: This paper introduces the Concurrent Subsystem Robust Design Optimisation method, and studies the simple application of the method to the design of an aircraft. The Concurrent Subsystem Robust Design Optimisation method and other two different methods are adopted in computation; the robust result indicates that the Concurrent Subsystem Robust Design Optimisation method is better than the other two methods. There are three ameliorations in the new method, the first one is that uncertainty analysis is added under MDO circumstance. Secondly, it is allowed to use disperse variable in the system level. Thirdly, neural network response surface is applied to providing measurable information.

Key words: Concurrent Subsystem Robust Design Optimisation; aircraft design; multidisciplinary design optimisation