

文章编号: 1006-4710(2013)03-0273-06

基于径向基函数代理模型的改进协同优化方法

魏锋涛, 宋俐, 李言, 李振

(西安理工大学 机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 为了改善协同优化方法的收敛性能并提高求解效率, 提出了一种基于径向基函数代理模型的改进协同优化方法。该方法采用基于光滑参数优化径向基函数代理模型, 构造了协同优化方法系统级约束的近似模型, 并将置信域和均匀设计方法相结合, 完成近似模型的不断更新, 引入粒子群优化算法完成了系统级和学科级优化问题的求解。利用数值计算和减速器设计两个典型算例对所提方法进行了验证, 求解结果表明了改进协同优化方法可行且有效。

关键词: 改进协同优化方法; 径向基函数; 代理模型; 粒子群优化算法

中图分类号: TP301.6

文献标志码: A

Improved Collaborative Optimization Method Based on Radial Basis Function Surrogate Model

WEI Fengtao, SONG Li, LI Yan, LI Zhen

(Faculty of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: In order to improve convergence performance and computational efficiency of the conventional collaborative optimization method, an improved collaborative optimization method based on radial basis function surrogate model is proposed in this paper. In this method, the approximate optimization models of constraint conditions in system-level are constructed using radial basis function surrogate model, and are updated by uniform design method combined with confidence regions, and the particle swarm optimization algorithm is introduced to the system-level optimization and disciplinary-level optimization. The improved collaborative optimization method is tested by using numerical calculation and decelerator design as two typical examples. The process and result verify the feasibility and effectiveness of the proposed method.

Key words: improved collaborative optimization method; radial basis function; surrogate model; particle swarm optimization algorithm

协同优化方法(Collaborative Optimization, 简称CO)是由斯坦福大学 Kroo 等人于 1994 年在一致性约束优化方法基础上提出的。该方法具有高度的学科自治性, 其组织结构与现代工程设计分工形式一致, 成为在多学科设计优化领域受到高度关注和广泛应用的一种非常有效的优化设计方法^[1-2]。

协同优化方法是一个二级优化框架, 将优化问题分解为一个系统级优化和多个并行的子学科级优化问题。通过系统级优化的等式约束条件来保证学

科间的一致性, 而系统级等式约束条件又必须通过各个子学科优化获得, 当子学科级最优解非常接近系统级期望值时, 系统级约束条件的梯度将会变得特别小, 致使系统级收敛缓慢甚至无解^[3]。针对上述问题, 许多学者提出了一些改进措施, 例如文献[3]将系统级一致性等式约束松弛为不等式约束, 提出了松弛因子法, 但松弛因子的选取比较困难; 文献[4]从几何的角度出发, 对协同优化方法的优化过程进行分析, 提出了利用学科间的不一致信息对

收稿日期: 2013-05-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60903124); 西安理工大学科学研究基金资助项目(102-211112)。

作者简介: 魏锋涛, 男, 讲师, 博士生, 主要研究方向为现代优化设计理论与方法、复杂产品多目标多学科设计优化。

E-mail: weifengtao@xaut.edu.cn。宋俐, 女, 教授, 主要研究方向为结构优化设计。李言, 男, 教授, 博导, 主要研究方向为机电测控技术、精密加工技术及计算机集成制造与生产控制技术。

系统级一致性约束进行动态松弛的方法;文献[5]利用罚函数法,将系统级一致性约束下的优化问题转换为无约束优化问题进行求解等。这些改进措施在子学科较多的情况下,还要满足系统级的兼容约束,则系统级求解依然会相当困难,收敛速度较慢,并且松弛因子和惩罚因子的选择也比较困难。

本文利用基于光滑参数优化径向基函数代理模型,构造协同优化方法系统级约束的近似模型,同时,考虑到优化结果对初始点的选取比较敏感,甚至不收敛,将粒子群优化算法引入协同优化方法的系统级和学科级进行优化求解,提出一种改进的协同优化方法,并结合典型数值算例和工程算例对改进方法进行了验证。

1 协同优化方法

协同优化方法将复杂的工程系统设计问题分解为一个系统级优化和多个并行的子学科级优化问题。在优化设计过程中,系统级给各个学科级传递系统设计变量的期望值,各学科级在满足本学科约束条件的前提下,使优化结果与系统级传递下来的设计变量期望值差距最小,并将各个学科级优化结果返回系统级,系统级通过一致性约束对各学科间设计变量的不一致进行协调。协同优化方法的计算框架如图 1 所示,具体说明如下。

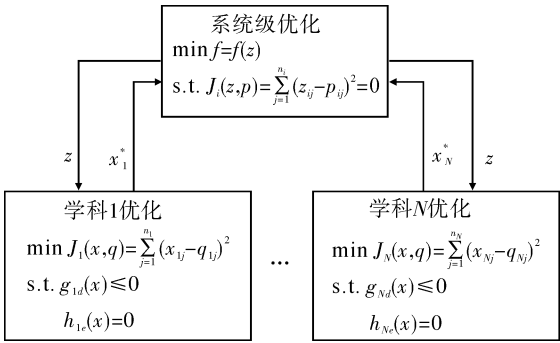


图 1 协同优化方法计算框图
Fig.1 Calculation diagram of collaborative optimization method

1) 系统级优化

$$\min f = f(z)$$
$$\text{s. t. } J_i(z,p) = \sum_{j=1}^{n_i} (z_{ij} - p_{ij})^2 = 0$$
$$(i = 1, 2, \cdots, N)$$
(1)

式中, f 为系统级目标函数, z 为系统级优化设计变量, z_{ij} 表示第 j 个系统级设计变量被分配到了第 i 个学科中; p 为系统级设计参数变量, 它是学科级优化设计变量的最优解, p_{ij} 表示第 j 个设计变量的最优解, 是由第 i 个学科级优化得到的。 J 为系统级的一

致性约束, N 个子学科共有 N 个一致性约束; n_i 为系统级分配到第 i 个学科级优化中的设计变量个数。

2) 学科级优化(以第 i 个学科为例)

$$\min J_i(x,q) = \sum_{j=1}^{n_i} (x_{ij} - q_{ij})^2$$
$$\text{s. t. } g_{id}(x) \leq 0$$
$$h_{ic}(x) = 0$$
(2)

式中, q 为学科级优化目标变量, 即系统级分配下来的系统级设计变量 z ; x 为学科级设计变量, g, h 为学科级优化约束。

3) 系统级与学科级的关系

$$p_{ij} = x_{ij}^*, q_{ij} = z_{ij}$$
(3)

协同优化方法所采用的二级结构具有一定的局限性, 系统级优化问题的表述形式致使系统级优化十分困难。在标准协同优化方法中, 系统级优化问题的约束条件采用一致性等式约束, 这是一种理想状态, 在实际设计计算中, 有时系统级优化问题的可行域很有可能不存在, 不满足库恩-塔克 (Kuhn-Tucker, 简称 K-T) 稳定条件, 从而导致优化结果不稳定、不收敛, 利用代理模型技术构造系统级约束的显式数学解析式是解决上述问题的有效途径。本文将基于光滑参数优化的径向基函数代理模型引入协同优化方法, 构造系统级约束的近似模型, 以改善收敛性能并提高求解效率。

2 基于光滑参数优化的径向基函数

在常用的近似方法中, 主要有响应面、Kriging 模型、径向基函数和支持向量机等方法, 而径向基函数具有各向同性、形式简单等优点, 得到了广泛的应用。径向基函数^[6-7]是以径向函数为基函数通过线性叠加构造的模型, 可表示为:

$$\tilde{f}(x) = \sum_{i=1}^n w_i \phi(\|x - x_i\|)$$
(4)

式中, n 为样本点数目; $\|x - x_i\|$ 为待测点 x 和第 i 个样本点 x_i 之间的欧式距离; w_i 为样本点的权重系数; ϕ 为基函数, 常用的基函数形式主要有多项式 $\text{MQ}(\phi(r) = \sqrt{(r^2 + c^2)})$ 、高斯 $\text{GS}(\phi(r) = \exp(-cr^2))$ 、薄板样条 $\text{TPS}(\phi(r) = r^2 \log(cr^2))$ 和立方体 $(\phi(r) = (r^2 + c)^3)$ 等^[8], 其中, c 为光滑参数, r 为待测点 x 与任意样本点之间的欧式距离。

当选取 n 个样本点便可以得到方程组 $Y = A w$, 通过求解该方程组得到权系数 w :

$$w = Y A^{-1}$$
(5)

式中, Y 为样本点的函数值, A 为基函数矩阵, w 为权系数, 其表达式为:

$$\mathbf{Y} = [f(x_1), f(x_2), \dots, f(x_n)]$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \phi(\|x_1 - x_1\|) & \phi(\|x_1 - x_2\|) & \dots & \phi(\|x_1 - x_n\|) \\ \phi(\|x_2 - x_1\|) & \phi(\|x_2 - x_2\|) & \dots & \phi(\|x_2 - x_n\|) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \phi(\|x_n - x_1\|) & \phi(\|x_n - x_2\|) & \dots & \phi(\|x_n - x_n\|) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{w} = [w_1, w_2, \dots, w_n]^T$$

由式(5)可知,对于一组的样本点而言,基函数矩阵 $\mathbf{A}$ 决定了权系数 $\mathbf{w}$,必然也就决定了代理模型的构造。由于光滑参数 c 会影响插值精度和基函数矩阵 $\mathbf{A}$ 的条件数,光滑参数 c 越大,每个样本点产生的影响域就越大,构造的模型就越平滑,代理模型就越精确,但随着基函数矩阵 $\mathbf{A}$ 的条件数急剧增加,模型精度可能会出现突然降低的情况。因此,对插值精度来说,光滑参数 c 存在临界值,在临界值以前,近似的误差是递减的。当选择的光滑参数 c 超过这个临界值以后,误差会剧烈振荡,主要原因是由于条件数过大,致使权系数 $\mathbf{w}$ 的求解不稳定造成的^[9-10]。

通常情况下,光滑参数 c 的选择仅凭设计者的经验进行取值,本文选取常用的高斯型基函数 $\phi(r) = \exp(-cr^2)$,以均方根误差 RMSE 作为误差评价标准,把含有光滑参数 c 的 RMSE 函数作为优化目标函数使其取值最小,考虑到基函数矩阵条件数过大会导致求解结果不准确,将含有光滑参数 c 的基函数矩阵的条件数作为约束条件,对光滑参数 c 进行优化取值,即:

$$\min \text{RMSE}(c) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (f(x_i) - \tilde{f}(x_i, c))^2}{n}}$$

$$\text{s. t. } \text{Cond}(\mathbf{A}) < \lambda \quad (6)$$

式中, n 为采样点的个数; $f(x_i)$ 和 $\tilde{f}(x_i, c)$ 分别为样本点的实际函数值和近似模型预测值; λ 为基函数矩阵 $\mathbf{A}$ 的条件数阈值, λ 的大小取决于求解病态矩阵的能力,一般建议 λ 取为 10^{15} 。

3 基于径向基函数代理模型的改进协同优化方法

3.1 构造系统级约束的径向基近似模型

在协同优化方法中,学科级目标函数的最优值与系统级优化问题设计变量期望值之间存在函数关系,而这种真实的函数关系一般是很难获取的,只能通过一些拟合或插值方法得到,本文利用基于光滑参数优化径向基函数代理模型来构造系统级约束的

近似模型。

假设系统优化模型有 1 个系统级和 m 个子学科级,系统级分别传递给 m 个子学科级 k 组目标变量值 $(Z_1, Z_2, \dots, Z_k)$, m 个子学科级优化后得到各学科级的最优目标函数值分别为 $J_i = (j_{i1}, j_{i2}, \dots, j_{ik}) (i=1, 2, \dots, m)$,再根据这 k 组系统级设计变量期望值和各学科的 k 个最优目标函数值利用式(4)构造径向基函数代理模型,得到系统级约束的近似模型。

3.2 改进协同优化方法

在用径向基函数代理模型构造系统级约束的基础上,将置信域与均匀设计方法相结合完成样本点选取和近似模型的更新,提出了基于径向基函数代理模型的协同优化方法,其计算流程如图 2 所示。

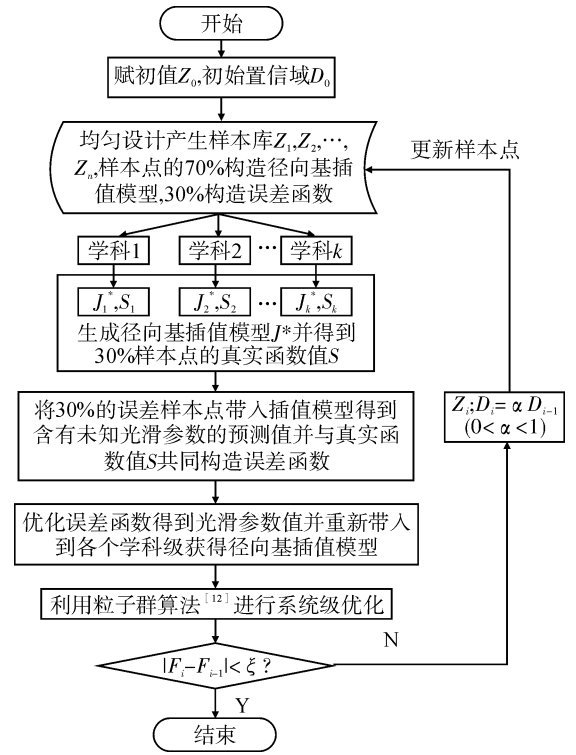


图2 基于径向基函数代理模型的改进协同优化方法计算流程图

Fig. 2 Calculation diagram of improved collaborative optimization method based on radial basis function surrogate model

4 算例及分析

4.1 典型数值算例

由 Shankar 等人提出的二次函数优化问题,是用来测试多学科协同优化方法性能的典型算例之一,其数学模型如下:

$$\min f(\mathbf{x}) = x_1^2 + x_2^2$$

$$\text{s. t. } x_1 + \beta x_2 \leq 4$$

$$\beta x_1 + x_2 \geq 2$$

式中, β 为可变参数,现取 $\beta = 0.5$,作为一般优化问题其最优解为 $\mathbf{x}^* = [x_1, x_2]^T = [0.8, 1.6]^T$,此时目标函数值为 $f_{\min} = 3.2$ 。为了研究协同优化方法的特点,按照标准协同优化的思想将该算例分解成 1 个系统级优化问题和 2 个学科级优化问题。

系统级优化问题:

$$\min f(\mathbf{z}) = z_1^2 + z_2^2$$
$$\text{s. t. } J_1^* = (z_1 - x_{11}^*)^2 + (z_2 - x_{12}^*)^2 = 0$$
$$J_2^* = (z_1 - x_{21}^*)^2 + (z_2 - x_{22}^*)^2 = 0$$

学科级 1 优化问题:

$$\min J_1 = (z_1 - x_{11})^2 + (z_2 - x_{12})^2$$
$$\text{s. t. } c_1 = x_{11} + 0.5x_{12} - 4 \leq 0$$

学科级 2 优化问题:

$$\min J_2 = (z_1 - x_{21})^2 + (z_2 - x_{22})^2$$
$$\text{s. t. } c_2 = 0.5x_{21} + x_{22} - 2 \geq 0$$

为了便于标准 CO 方法的快速收敛,在标准 CO 方法中对系统级约束进行松弛^[4]。

该算例分别利用标准 CO 方法(约束松弛)和径向基 CO 方法进行求解,系统级和学科级均采用文献[12]中的改进粒子群优化算法。

选取 4 个不同初始点^[11]进行优化计算,两种方法的求解结果如表 1 所示,径向基 CO 方法的目标函数优化迭代过程变化曲线如图 3 所示。

表 1 标准 CO 方法(约束松弛)和径向基 CO 方法优化结果

Tab. 1 Optimization results of standard and improved collaborative optimization method

序号	初始点	标准 CO 方法(约束松弛)			径向基 CO 方法		
		最优解	目标函数值	迭代次数	最优解	目标函数值	迭代次数
1	$X_1 = [2, 3]^T$	$[0.801\ 1, 1.603\ 2]^T$	3.212 0	38	$[0.802\ 9, 1.601\ 3]^T$	3.208 8	25
2	$X_2 = [-1, 2]^T$	$[0.790\ 5, 1.599\ 1]^T$	3.182 0	31	$[0.799\ 7, 1.599\ 8]^T$	3.198 9	18
3	$X_3 = [10, -2]^T$	$[0.791\ 5, 1.595\ 1]^T$	3.170 8	40	$[0.802\ 5, 1.595\ 7]^T$	3.190 2	24
4	$X_4 = [0, 1]^T$	$[0.801\ 1, 1.602\ 7]^T$	3.210 4	29	$[0.801\ 6, 1.599\ 3]^T$	3.200 3	19

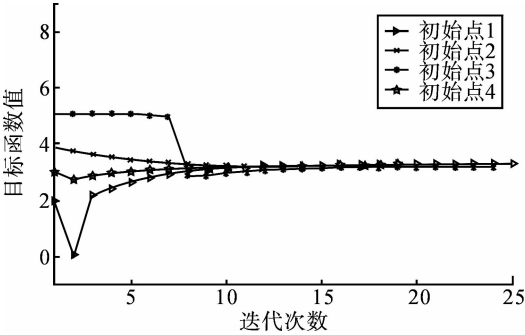


图 3 径向基 CO 方法不同初始点的优化迭代过程变化曲线

Fig. 3 Iterative curves of different initial design points based on improved collaborative optimization method

由表 1 和图 3 可以看出,标准 CO 方法(约束松弛)基本可以收敛到最优解附近,但是迭代次数相对较多;径向基 CO 方法对于不同的初始点均能收敛到最优解附近,求解精度高,稳定性好,而且迭代次数明显减少。

4.2 工程算例

减速器多学科设计优化问题是美国国家航空与航天局(National Aeronautic and Space Administration, NASA)评估多学科设计优化方法性能的十个标准算例之一,常用来测试多学科协同优化方法的性能。该问题是在满足减速器齿轮的弯曲和接触应力及轴的扭转变形和应力等约束条件下,使得

减速器的体积达到最小(或重量最轻),其优化设计数学模型如下:

$$\begin{cases} \min f(\mathbf{X}) = 0.7854x_1x_2^2(3.3333x_3^2 + 14.9334x_3 - 43.0934) - 1.5079x_1(x_6^2 + x_7^2) + 7.477(x_6^3 + x_7^3) + 0.7854(x_4x_6^2 + x_5x_7^2) \\ \text{s. t. } g_j(\mathbf{X}) \leq 0 \quad (j = 1, 2, \dots, 11) \end{cases}$$

其中:

$$g_1(\mathbf{X}) = \frac{27}{x_1x_2^2x_3} - 1 \leq 0 \text{ (齿轮弯曲应力约束);}$$
$$g_2(\mathbf{X}) = \frac{397.5}{x_1x_2^2x_3^2} - 1 \leq 0 \text{ (齿轮接触应力约束);}$$
$$g_3(\mathbf{X}) = \frac{1.93x_4^3}{x_2x_3x_6^4} - 1 \leq 0 \text{ (轴 1 横向变形约束);}$$
$$g_4(\mathbf{X}) = \frac{1.93x_5^3}{x_2x_3x_7^4} - 1 \leq 0 \text{ (轴 2 横向变形约束);}$$
$$g_5(\mathbf{X}) = \frac{\left[\left(\frac{745x_4}{x_2x_3}\right)^2 + 1.69 \times 10^6\right]^{\frac{1}{2}}}{110x_6^3} - 1 \leq 0 \text{ (轴 1 应力约束);}$$
$$g_6(\mathbf{X}) = \frac{\left[\left(\frac{745x_5}{x_2x_3}\right)^2 + 157.5 \times 10^6\right]^{\frac{1}{2}}}{85x_7^3} - 1 \leq 0 \text{ (轴 2 应力约束);}$$

$$g_7(\boldsymbol{X}) = \frac{x_2x_3}{40} - 1 \leq 0; g_8(\boldsymbol{X}) = \frac{5x_2}{x_1} - 1 \leq 0;$$
$$g_9(\boldsymbol{X}) = \frac{x_1}{12x_2} - 1 \leq 0; g_{10}(\boldsymbol{X}) = \frac{1.5x_6 + 1.9}{x_4} - 1 \leq 0;$$
$$g_{11}(\boldsymbol{X}) = \frac{1.1x_7 + 1.9}{x_5} - 1 \leq 0;$$
$$2.6 \leq x_1 \leq 3.6; \quad 0.7 \leq x_2 \leq 0.8;$$
$$17 \leq x_3 \leq 28; \quad 7.3 \leq x_4 \leq 8.3;$$
$$7.8 \leq x_5 \leq 8.3; \quad 2.9 \leq x_6 \leq 3.9;$$
$$5.0 \leq x_7 \leq 5.5$$

式中, x_1 为齿面宽度, x_2 为齿轮模数, x_3 为小齿轮齿数, x_4 和 x_5 为轴承间的距离, x_6 和 x_7 分别为大小齿轮轴的直径。该减速器算例的最优解为 $\boldsymbol{X}^* = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7]^T = [3.50, 0.70, 17.00, 7.30, 7.71, 3.35, 5.29]^T$,此时目标函数值为 $f_{\min} = 2\,996.3$ 。

按照协同优化的思想,将该问题分解为 1 个系统级和 3 个子学科级优化问题。

系统级优化问题:

$$\min f = f_1 + f_2 + f_3$$
$$\text{s.t. } J_1^* = (z_1 - x_{11}^*)^2 + (z_2 - x_{12}^*)^2 + (z_3 - x_{13}^*)^2 = 0$$
$$J_2^* = (z_1 - x_{21}^*)^2 + (z_2 - x_{22}^*)^2 + (z_3 - x_{23}^*)^2 = 0$$
$$J_3^* = (z_1 - x_{31}^*)^2 + (z_2 - x_{32}^*)^2 + (z_3 - x_{33}^*)^2 = 0$$

学科级 1 优化问题:

$$\min J_1 = (z_1 - x_{11})^2 + (z_2 - x_{12})^2 + (z_3 - x_{13})^2$$
$$\text{s.t. } f_1 = 0.7854x_{11}x_{12}^2(3.3333x_{13}^2 + 14.9334x_{13} - 43.0934)$$
$$g_j - 1 \leq 0 \quad (j = 1, 2, 7, 8, 9)$$

学科级 2 优化问题:

$$\min J_2 = (z_1 - x_{21})^2 + (z_2 - x_{22})^2 + (z_3 - x_{23})^2$$
$$\text{s.t. } f_2 = 7.477x_{27}^3 + 0.7854x_{25}x_{27}^2 - 1.5079x_{21}x_{27}^2$$
$$g_j - 1 \leq 0 \quad (j = 1, 2, 4, 6, 7, 8, 9, 11)$$

学科级 3 优化问题:

$$\min J_3 = (z_1 - x_{31})^2 + (z_2 - x_{32})^2 + (z_3 - x_{33})^2$$
$$\text{s.t. } f_3 = 7.477x_{36}^3 + 0.7854x_{34}x_{36}^2 - 1.5079x_{31}x_{36}^2$$
$$g_j - 1 \leq 0 \quad (j = 1, 2, 3, 5, 7, 8, 9, 10)$$

表 2 中列出了 NASA 给出的 4 个不同的初始设计点^[5],其中 $\boldsymbol{X}_1$ 、 $\boldsymbol{X}_2$ 和 $\boldsymbol{X}_3$ 为可行域之内的设计点, $\boldsymbol{X}_4$ 为可行域之外的设计点,分别利用标准 CO 方法(约束松弛)^[4]和径向基 CO 方法对上述优化模型进行求解,系统级和学科级均采用文献[12]中的改进粒子群优化算法。两种方法求解结果如表 3 和表 4 所示,径向基 CO 方法的目标函数优化迭代过程变化曲线如图 4 所示。

表 2 不同初始设计点

Tab. 2 Different initial design points

序号	初始点 $\boldsymbol{X}_i = [x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, x_{i4}, x_{i5}, x_{i6}, x_{i7}]^T$	初始点目标函数值
1	$\boldsymbol{X}_1 = [2.80, 0.71, 25.0, 7.90, 7.599, 3.0, 5.099]^T$	3 931.98
2	$\boldsymbol{X}_2 = [2.65, 0.63, 18.0, 6.80, 6.400, 3.0, 5.099]^T$	2 310.63
3	$\boldsymbol{X}_3 = [3.5, 0.7, 17.0, 7.30, 7.715, 3.35, 5.287]^T$	2 990.71
4	$\boldsymbol{X}_4 = [2.0, 0.4, 9.0, 4.0, 4.5, 1.5, 3.0]^T$	3 228.69

表 3 标准 CO 方法(约束松弛)优化结果

Tab. 3 Optimization results of standard collaborative optimization method

初始点	最优解	目标函数值	迭代次数
$\boldsymbol{X}_1$	$[3.501, 0.702, 16.953, 7.306, 7.724, 3.356, 5.287]^T$	2 997.58	66
$\boldsymbol{X}_2$	$[3.499, 0.701, 17.021, 7.306, 7.713, 3.352, 5.285]^T$	3 001.53	73
$\boldsymbol{X}_3$	$[3.503, 0.701, 17.004, 7.300, 7.715, 3.349, 5.285]^T$	2 999.39	31
$\boldsymbol{X}_4$	$[3.499, 0.699, 17.001, 7.301, 7.718, 3.353, 5.287]^T$	2 990.62	47

表 4 径向基 CO 方法优化结果

Tab. 4 Optimization results of improved collaborative optimization method

初始点	最优解	目标函数值	迭代次数
$\boldsymbol{X}_1$	$[3.498, 0.701, 17.008, 7.296, 7.705, 3.349, 5.283]^T$	2 996.58	23
$\boldsymbol{X}_2$	$[3.492, 0.702, 17.004, 7.293, 7.714, 3.342, 5.279]^T$	2 993.90	39
$\boldsymbol{X}_3$	$[3.506, 0.703, 16.963, 7.296, 7.708, 3.352, 5.279]^T$	2 999.27	11
$\boldsymbol{X}_4$	$[3.502, 0.701, 17.003, 7.302, 7.706, 3.343, 5.286]^T$	2 997.74	12

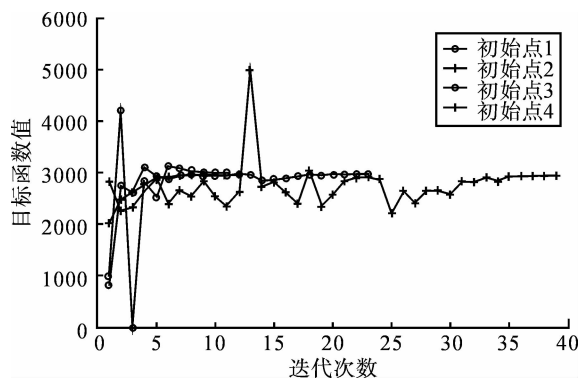


图4 径向基CO方法不同初始点的
优化迭代过程变化曲线

Fig.4 Iterative curves of different initial design points
based on improved collaborative optimization method

通过表3、表4和图4可以看出,标准CO方法(约束松弛)和径向基CO方法均能收敛到最优解附近,但是径向基CO方法对于不同的起始设计点收敛更加稳定,相较于标准CO方法(约束松弛),其迭代次数明显减少,求解效率有所提高。

以上两算例求解结果表明,本文所提出的改进协同优化方法求解多学科设计优化问题是可行的和有效的,能够改善收敛性能并提高求解效率。

5 结 语

本文针对标准协同优化方法学科级最优解接近系统级期望值时,系统级约束条件的梯度将会变得非常小,以致系统级收敛缓慢甚至无解,同时,考虑优化结果对初始点的选取比较敏感,甚至不收敛,将径向基函数代理模型和粒子群优化算法引入协同优化框架,研究了一种基于径向基函数代理模型的改进协同优化方法。算例仿真计算结果表明,本文的改进协同优化方法收敛稳定性好,迭代计算次数少,求解精度和效率高,是一种可行的、有效的方法,可用于解决多学科设计优化问题。

参考文献:

- [1] 王振国,陈小前,罗文彩. 飞行器多学科设计优化理论与应用研究[M]. 北京:国防工业出版社,2006:267-285.
- [2] 刘克龙,姚卫星,余雄庆. 几种新型多学科设计优化算法及比较[J]. 计算机集成制造系统,2007,13(2):209-216.
- Liu Kelong, Yao Weixing, Yu Xiongqing. Some new algorithms for multidisciplinary design optimization and their comparison[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems,2007,13(2):209-216.

- [3] Alexandrov N M, Lewis R M. Analytical and computational aspects of collaborative optimization for multidisciplinary design[J]. AIAA Journal, 2002, 40(2):301-309.
- [4] Li Xiang, Li Weiji, Liu Changan. Geometric analysis of collaborative optimization[J]. Structural Multidisciplinary Optimization,2008,35(4):301-313.
- [5] 韩明红,邓家提. 协同优化算法的改进[J]. 机械工程学报,2006,42(11):34-38.
- Han Minghong, Deng Jiati. Improvement of collaborative optimization[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2006,42(11):34-38.
- [6] Gutmann H M. A radial basis function method for global optimization[J]. Journal of Global Optimization,2001,19:201-227.
- [7] 彭磊,刘莉,龙腾. 基于动态径向基函数代理模型的优化策略[J]. 机械工程学报,2011,47(7):164-170.
- Peng Lei, Liu Li, Long Teng. Optimization strategy using dynamic radial basis function metamodel[J]. Journal of Mechanical Engineering,2011,47(7):164-170.
- [8] Krishnamurthy T. Comparison of response surface construction methods for derivative estimation using moving least squares,kriging and radial basis functions[C]//46th AIAA / ASME / ASCE / AHS / ASC Structures, Structural Dynamics & Materials Conference, AIAA 2005-1821, Austin, Texas: AIAA,2005.
- [9] Wei Yuexing, Xu Lin, Chen Xiangqian. The radial basis function shape parameter chosen and its application in engineering[C]//IEEE International Conference on Intelligent Computing and Intelligent Systems,2009.
- [10] 魏月兴. 径向基插值近似方法理论与应用研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2009:27-29.
- Wei Yuexing. Research on theory and application of radial basis function approximation[D]. Changsha: National University of Defense Technology,2009:27-29.
- [11] 蒋鲁佳,辛万青. 协同优化方法算例研究[J]. 计算机应用,2008,28(12):111-113.
- Jiang Lujia, Xin Wanqing. Case study of collaborative optimization[J]. Journal of Computer Applications,2008,28(12):111-113.
- [12] 魏锋涛,宋俐,李言. 基于改进粒子群算法的四辊轧机机座结构优化设计[J]. 中国机械工程,2012,23(19):2361-2365.
- Wei Fengtao, Song Li, Li Yan. Optimal structural design of 4-roller rolling mill frame based on an IPSO algorithm[J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(19):2361-2365.

(责任编辑 王卫勋)