

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.06.010

# 基于改进并行子空间优化方法 的机床主轴设计研究\*

刘 凯<sup>1</sup>, 罗伟林<sup>1\*</sup>, 赖宇阳<sup>2</sup>, 方立桥<sup>2</sup>

(1. 福州大学 机械工程与自动化学院, 福建 福州 350116; 2. 北京树优信息技术有限公司, 北京 100062)

**摘要:** 为了使 CSSO 方法在系统级优化时能用于自主筛选来自各子学科间的设计变量的最优值以提高系统级优化效率和收敛速度, 提出了一种改进型的并行子空间优化方法(improved concurrent subspace optimization, I-CSSO)。该方法在传统 CSSO 方法基础上通过增加一个自动筛选程序, 即将各子学科优化方案及系统级优化方案进行了对比, 从中优选出最优方案作为下一轮迭代的初始方案进行了优化, 同时应用拉丁超立方试验设计方法采取样本点并构建了数据库, 近似模型基于径向基神经网络模型。以某一机床主轴设计优化为例, 基于 Isight 平台搭建了所设计的 I-CSSO 方法框架, 并与传统的 CSSO 方法进行了对比。研究结果表明: 所提出的 I-CSSO 方法有效提高了算法的计算效率。

**关键词:** 多学科优化设计; 并行子空间优化方法; 拉丁超立方; 近似模型; 机床主轴设计

中图分类号: TH122; TP181

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2015)06-0788-05

## Optimization design of the spindle of a machine tool based on an improved CSSO

LIU Kai<sup>1</sup>, LUO Wei-lin<sup>1\*</sup>, LAI Yu-yang<sup>2</sup>, FANG Li-qiao<sup>2</sup>

(1. College of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China;

2. Beijing SOYOTEC Co. Ltd., Beijing 100062, China)

**Abstract:** Aiming at selecting optimal design variables of each sub discipline and then passed them to system level when it was optimizing in CSSO method, improving the optimization efficiency and convergence speed of system level, an improved concurrent subspace optimization (I-CSSO) was proposed. An automatic screening process was added for the proposed method based on the traditional CSSO, that is, by comparing schemes from sub-disciplines and system level, an optimal scheme was determined and taken as the initial scheme for next iteration, meanwhile Latin hypercube of DOE method was used to set up a database, an approximate model was constructed by using radial basis function neural Network. I-CSSO was incorporated into Isight platform and applied to the design of a machine tool spindle. The results indicate that the efficiency of the proposed I-CSSO gains over the conventional CSSO.

**Key words:** multidisciplinary design optimization (MDO); concurrent subspace optimization (CSSO); latin hypercube method; approximate model; design of machine tool spindle

## 0 引 言

一个复杂的工程系统往往由多个子系统组成并且存在相互耦合关系, 从而使得系统的优化设计存在着较大的难度。传统的优化方法是将在系统中占主要作

用的成分作为系统的设计目标, 而将其他次要因素作为约束条件, 这种方法人为地割离了学科间的耦合关系。因此, 传统的设计优化方法已经不能满足工程实际需要。多学科设计优化 (MDO) 方法为解决这一难题提供了一种有效途径<sup>[1]</sup>。MDO 方法一般包括单级

收稿日期: 2015-01-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51079031)

作者简介: 刘 凯(1989-), 男, 湖南邵阳人, 主要从事多学科优化设计方面的研究. E-mail: 748876858@qq.com

通信联系人: 罗伟林, 男, 博士, 副教授, 硕士生导师. E-mail: wlluo@fzu.edu.cn

优化方法和多级优化方法。并行子空间优化方法 (concurrent subspace optimization, CSSO) 是其中的一种多级优化方法<sup>[2-3]</sup>。该方法在系统级采用学科近似模型,在学科级采用精确分析模型,将多学科优化设计问题进行分解,是一种适合于大型工程系统分布式设计的 MDO 方法。

近年来,国内外的研究者对此开展了广泛的研究。李发生等人<sup>[4]</sup>将 CSSO 方法应用到无人机总体设计中,并对基于神经网络响应面的 CSSO 方法及其在无人机总体方案设计优化中进行了研究。程家林等人<sup>[5]</sup>将 CSSO 方法应用于复合材料加筋板结构优化设计,有效的解决了变量耦合的问题,同时避免了对大量的设计变量进行优化计算。邓思琪等人<sup>[6]</sup>利用外惩罚函数法对机床主轴进行了建模优化。贺谦等人<sup>[7]</sup>基于单循环方法的可靠性分析与并行子空间设计优化方法结合进行了涡轮叶片优化设计。冯玉龙等人<sup>[8]</sup>使用并行子空间协同优化设计方法对复合材料加筋板结构的布局参数和铺层顺序进行优化。姚雯等人<sup>[9]</sup>在处理协调子学科优化结果和保证整个优化过程的稳定收敛的困难时,提出了基于多学科活跃区域交叉优化的 CSSO 方法。出于综合开发利用多个现有的优化程序的想法,姚雯等人<sup>[10]</sup>提出了多学科可行法与 CSSO 方法相结合的多阶段多层次的 MDO 方法,给相关研究工作者提供了新思路。

为了使 CSSO 方法在系统级优化时能自主筛选来自各子学科间的设计变量的最优值,提高系统级优化效率和收敛的快速性,本研究提出一种改进型的并行子空间优化方法(improved concurrent subspace optimization, I-CSSO)。首先应用拉丁超立方采取样本点并构建数据库,然后基于径向基神经网络构建近似模型,最后将各子学科优化方案及系统级优化方案进行对比,从中优选出最优方案作为下一轮迭代的初始方案进行优化。笔者将该方法应用于某一机床主轴设计:以主轴刚度为约束条件,主轴质量、外伸端挠度和主轴切应力为子学科目标函数,通过归一化处理,将这3个目标函数转化成单一目标并作为系统级目标函数进行优化。

## 1 I-CSSO 方法

### 1.1 传统 CSSO 方法分析

CSSO 方法是一种两级 MDO 方法,包含一个系统级优化器和多个子学科优化器。每个子学科独立地优化一组互不关联的设计变量。在优化中,某个子学科中的状态变量计算通过该学科的精确定模型得到,而其

他子学科的状态变量和约束计算则通过近似模型来得到<sup>[11]</sup>。优化结果可以共同组成新的设计点,如果满足迭代要求,则输出优化解,否则作为新一轮优化的初始值。

CSSO 算法的基本框架如图 1 所示。

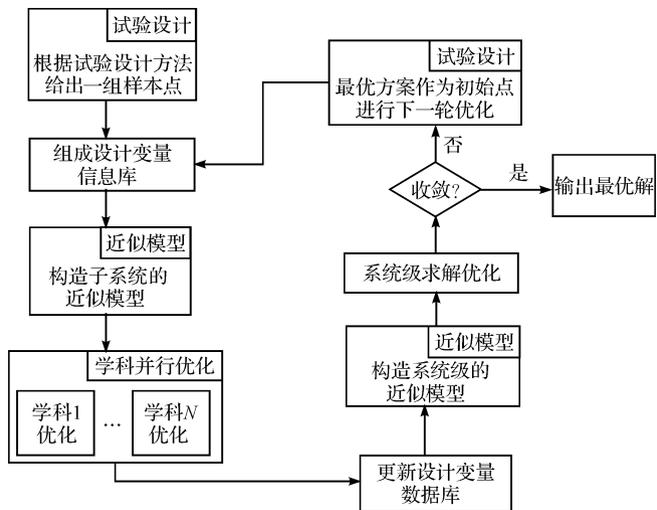


图 1 CSSO 算法的基本框架

CSSO 方法的主要计算流程为:通过试验设计采取样本点并组成设计变量信息库,然后构建子系统的近似模型<sup>[12]</sup>;子学科  $i$  的优化通过学科精确分析计算得出,其它  $N-1$  个学科分析则由近似模型计算给出。子学科优化后,通过增加一组更好的试验样本点来更新设计变量数据库,从而构建系统级近似模型来计算系统目标函数。

在该优化过程中,存在的问题是:各子学科优化传递给系统级的设计变量期望值不能自动筛选出最优值作为系统级优化的基准值,如果设计变量和设计空间足够大,将严重影响系统级的计算效率从而加重收敛的困难。为了解决这个问题,本研究在系统级求解优化过程中增加优化方案筛选程序,提出了改进型 CSSO (I-CSSO) 方法。

### 1.2 改进型 CSSO 算法

本研究所提出的改进型 CSSO 方法的大体框架与传统的 CSSO 方法相似,不同之处在于系统级增加了优化方案筛选程序,即在  $N$  个子学科与系统级优化后,通过比较  $N$  个子学科优化方案和系统级优化方案,将  $N+1$  个方案中的最优方案作为系统下一轮迭代的初始方案,直到系统收敛为止。计算流程如图 2 所示。其中,试验设计方法采用拉丁超立方构建初始设计方案数据库,基于径向基神经网络构建子学科级和系统级的近似模型。

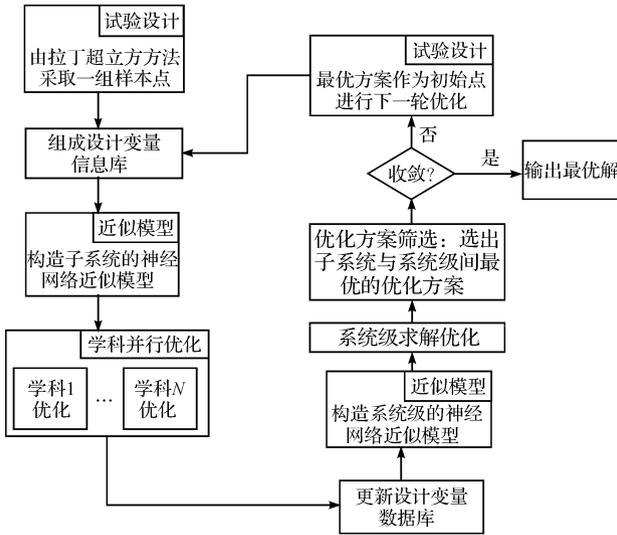


图2 I-CSSO方法框架

## 2 机床主轴的设计优化

### 2.1 数学模型的建立

机床主轴是机床中重要零件之一,一般为多支承空心阶梯轴。以某一机床主轴为例,笔者应用本研究提出的I-CSSO说明其优化设计过程。

该主轴的力学模型如图3所示。

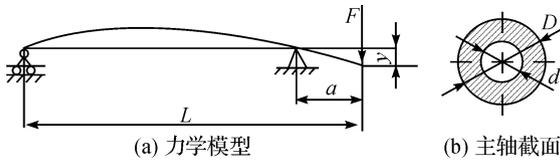


图3 机床主轴简图

$d, D$ —主轴内径和外径; $L$ —轴长; $l$ —跨距; $a$ —外伸端长度; $y$ —外伸端挠度; $F$ —作用在主轴外伸端处的载荷

设计主轴时,往往需要考虑3个重要的因素:

- 一是尽量减轻机床主轴的质量,以减少材料消耗;
- 二是保证主轴外伸端挠度尽量小,以提高加工精度;
- 三是保证主轴的强度。

综合以上3个因素,取设计变量为: $\mathbf{X} = (x_1, x_2, x_3)^T = (D, l, a)^T$ 。

建立子学科级目标函数,分别对应主轴质量、外伸端挠度和主轴切应力:

主轴质量(子学科1),目标函数为:

$$f_1(X) = \frac{1}{4} \pi (D^2 - d^2) (l + a) \rho \quad (1)$$

外伸端挠度(子学科2),目标函数为:

$$f_2(X) = \frac{64Fa^2(l+a)}{3\pi E(D^4 - d^4)} \quad (2)$$

主轴切应力(子学科3),目标函数为:

$$f_3(X) = \frac{T}{W_n} \quad (3)$$

式中: $T$ —轴所受扭矩; $W_n$ —抗扭截面模量, $W_n = \pi(D^4 - d^4)/16D$ 。

系统级目标函数设为:

$$\min f_{\text{sys}} = \mu_1 f_1(X) + \mu_2 f_2(X) + \mu_3 f_3(X) \quad (4)$$

式中: $\mu_1, \mu_2, \mu_3$ —权重系数,且满足:

$$\mu_1 + \mu_2 + \mu_3 = 1 \quad (5)$$

约束条件的确定:

(1) 主轴的刚度是一个重要的性能指标,其外伸端的挠度 $y$ 不得超过规定值 $[y]$ :

$$g_1(X) = f_2(X) - [y] \leq 0 \quad (6)$$

(2) 轴外伸端扭转角约束不得超过许用值 $[\theta]$ :

$$g_2(X) = \frac{32T(l+a)}{G\pi(D^4 - d^4)} - [\theta] \leq 0 \quad (7)$$

(3) 强度条件,主轴切应力不得超过许用值 $[\tau]$ :

$$g_3(X) = f_3(X) - [\tau] \leq 0 \quad (8)$$

(4) 边界条件: $50 \leq D \leq 150$ ;  $210 \leq l \leq 600$ ;  $90 \leq a \leq 150$ 。

### 2.2 基于 Isight 的自动优化

本研究利用 Isight 搭建的I-CSSO框架如图4所示。主要步骤包括:

(1) 采用试验设计技术对初始点进行采样,并通过试验设计组件的后处理功能对设计变量进行灵敏度分析、主效应分析以及交互效应分析。本研究计算中,利用拉丁超立方试验设计方法,在设计空间采取140个样本点。设计变量对目标函数的贡献率如图5所示,黑色的条形表示正效应,灰色表示负效应。由图5可以看出,外径对主轴质量的贡献率最大,对外伸端挠度及主轴切应力的贡献则呈现负效应,同时,还可以发现设计变量的耦合关系对目标函数的影响,如 $D-l$ ,  $a-l$ ,  $a-D$ 的耦合关系对子学科2(外伸端挠度)的贡献呈负效应。

(2) 由数据库中的设计变量及对应的状态变量,构建系统的近似模型。本研究采用了径向基神经网络近似模型,该模型能够很好地表述高度非线性系统,易于处理连续/离散设计变量,并且具有非常高的可信度。

(3) 搭建子空间系统优化模块。根据前面建立的数学模型分成3个子学科问题,系统级问题则通过归一化方法进行处理,即满足式(5)。

(4) 优化方案筛选。优化结束后,本研究将3个子学科优化方案和系统优化方案进行比较,将4个方案中最优方案作为优化方案保存,然后作为下一轮的迭代优化的初始方案。随着优化迭代循环不断进行,响应面越来越精确,最终收敛到一个最优解,从而停止迭代。

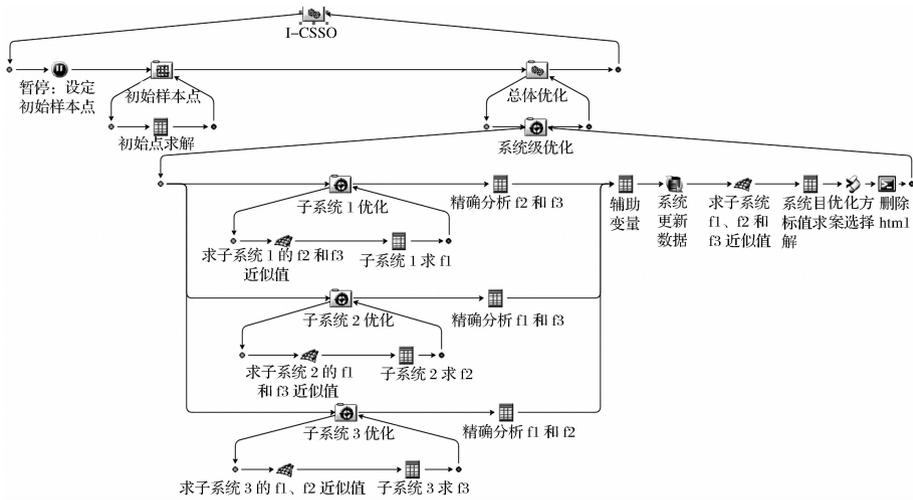


图 4 基于 I-CSSO 的机床主轴设计优化

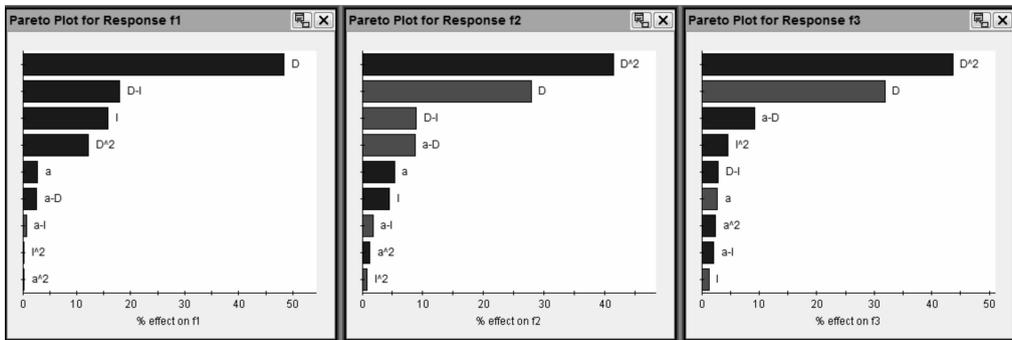


图 5 设计变量对目标函数的贡献率

### 2.3 优化结果及分析

机床主轴设计参数取为<sup>[13]</sup>:  $d = 45 \text{ mm}$ ,  $F = 15 \times 10^3 \text{ N}$ , 许用挠度  $[\gamma] = 0.125 \text{ mm}$ , 扭转许用切应力为  $[\tau] = 220 \text{ MPa}$ , 许用扭转角  $[\theta] = 0.02 \text{ rad}$ , 主轴材料的密度为  $\rho = 7\,800 \text{ kg/m}^3$ , 弹性模量  $E = 210 \text{ GPa}$ , 剪切模量  $G = 80 \text{ GPa}$ , 主轴转速  $n = 80 \text{ r/min}$ , 主轴输入功率  $P = 7.5 \text{ kW}$ 。

变量的初始值取  $X = [100, 250, 100]$  (单位: mm)。系统级和子学科级都采用序列二次规划算法, 优化结果如表 1 所示。表 1 中还给出了与传统 CSSO 方法的对比。从表 1 可以看出, 与传统的 CSSO 方法对比, 本研究所提出的计算效率有明显提高, 系统级优化的迭代次数大为减少, 验证了 I-CSSO 方法的可行性, 为

将来应用于大型复杂系统的优化问题提供了技术参考。

表 1 优化结果

| 参数            | 优化结果    |         |
|---------------|---------|---------|
|               | CSSO    | I-CSSO  |
| $D/\text{mm}$ | 60.91   | 60.65   |
| $l/\text{mm}$ | 210     | 210     |
| $a/\text{mm}$ | 90      | 90      |
| 质量/kg         | 3.039   | 3.038   |
| 外伸端挠度/mm      | 0.124 9 | 0.124 9 |
| 主轴切应力/MPa     | 29.32   | 29.33   |
| 系统级迭代次数       | 68      | 26      |

优化迭代过程如图 6、图 7 所示。其中, 系统级的目标函数迭代过程如图 6 所示, 子系统的目标函数迭

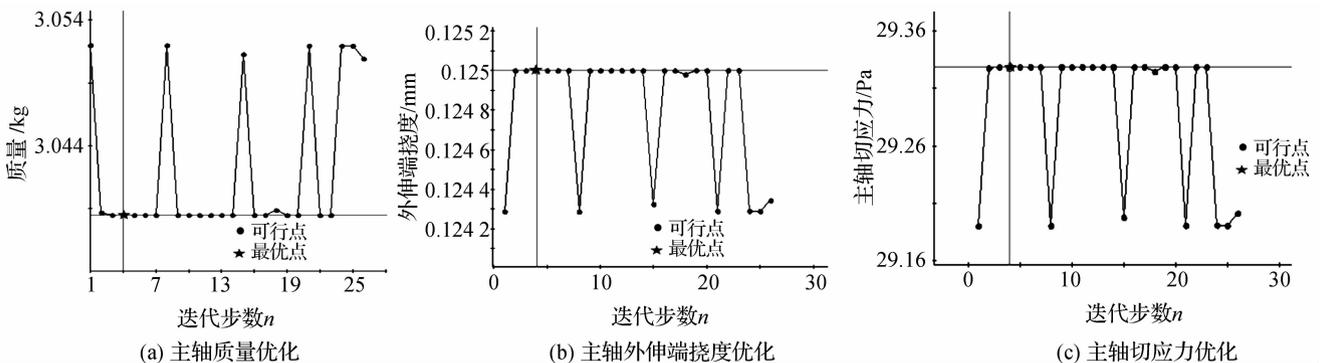


图 6 系统级目标函数优化

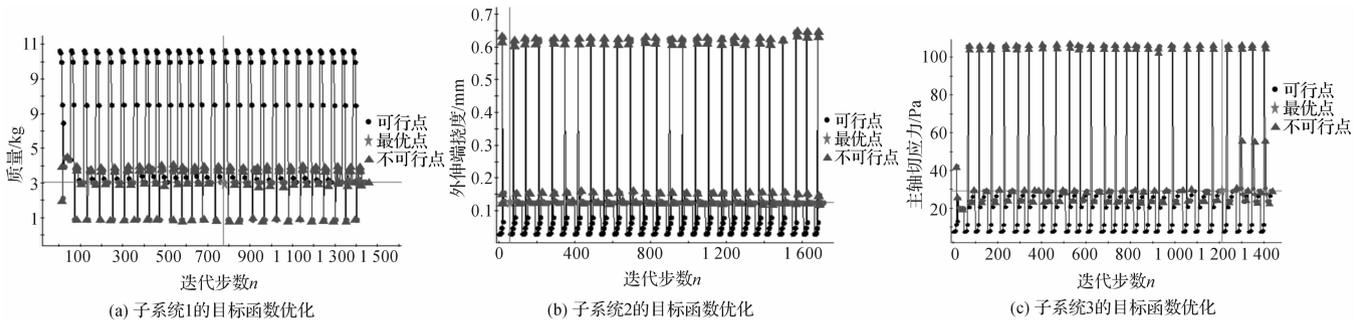


图 7 子系统的历史迭代图

三角形—不可行解,点—可行解,五角星形—优化过程中的最优解

代过程如图 7 所示。

### 3 结束语

本研究提出一种改进型的并行子空间优化方法,结合某一机床主轴设计初步验证了该方法的有效性,研究发现:

(1)采用拉丁超立方试验设计方法进行样本点采样,选用径向基神经网络模型构建近似模型,通过将一个复杂系统分解为不同的子学科,可降低分析计算的难度。

(2)优化结果表明:通过改进试验设计方法在优化中的作用,筛选出子学科优化方案与系统优化方案中最优方案作为下一步迭代的初始方案,从而加快了系统级迭代收敛的速度。

(3)对比现有的并行子空间方法,本研究所提出的 I-CSSO 方法具有更好的寻优能力,大大缩短了设计周期,是工程计算中的一种十分有效的多学科设计优化算法。

进一步的研究将结合更复杂的工程实例验证和确认本研究所提出的方法的有效性。

### 参考文献 (References):

[1] SOBIESZCZANSKI-SOBIESKI J, HAFTKA R T. Multidisciplinary aerospace design optimization survey of recent developments[J]. *Structural Optimization*, 1997, 14(1):1-3.

[2] SOBIESZCZANSKI-SOBIESKI J. Optimization by decomposition: a step from hierarchic to non-hierarchic systems[R]. NASA Langley Research Center Hampton, 1988.

[3] RENAUD J E, GABRIELE G A. Approximation in nonhierarchic system optimization[J]. *AIAA*, 1994, 32(1):198-205.

[4] 李发生,周 洲,恭喜盈. 并行子空间优化在无人机总体设计中的应用[J]. *计算机仿真*, 2007, 24(10):292-298.

[5] 程家林,冯玉龙,姚卫星. 复合材料加筋板结构优化设计的并行子空间法[J]. *航空工程进展*, 2013, 4(3):53-55.

[6] 邓思琪,马登云,郑卫刚. 机床主轴结构参数优化设计[J]. *机床与液压*, 2014, 42(12):90-93.

[7] 贺 谦,李元生,敖良波,等. 基于单循环方法的涡轮叶片可靠性及多学科设计优化[J]. *推进技术*, 2011, 32(5):658-663.

[8] 冯玉龙,程家林,姚卫星. 复合材料加筋板结构的并行空间协同优化设计方法[J]. *南京航空航天大学学报*, 2013, 45(3):360-366.

[9] YAO Wen, CHEN Xiao-qian, OU-YANG QI, et al. A Concurrent Subspace Optimization Based on Multidisciplinary Active Regional Crossover Optimization [C]//51st AIAA Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference 18<sup>th</sup> AIAA Adaptive Structures Conference 12<sup>th</sup>. Orlando: [s. n.], 2010:1-9.

[10] YAO Wen, CHEN Xiao-qian, OU-YANG QI, et al. A surrogate based multistage-multilevel optimization procedure for multidisciplinary design optimization [J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2012, 45(4):559-574.

[11] SELLAR R S, BATILL S M, RENAUD J E. Response surface based, concurrent subspace optimization for multidisciplinary system design[C]//34<sup>th</sup> Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. AIAA. Reno: [s. n.], 1996:96-714.

[12] 王晓青,王小军,王国辉. 基于 Isight 平台的并行子空间算法研究[J]. *宇航学报*, 2007, 28(2):414-418.

[13] 李万详. 工程优化设计与 Matlab 实现[M]. 北京:清华大学出版社, 2010.

[编辑:李 辉]

### 本文引用格式:

刘 凯,罗伟林,赖宇阳,等. 基于改进并行子空间优化方法的机床主轴设计研究[J]. *机电工程*, 2015, 32(6):788-792.

LIU Kai, LUO Wei-lin, LAI Yu-yang, et al. Optimization design of the spindle of a machine tool based on an improved CSSO[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2015, 32(6):788-792.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>