

## 基于粒子群算法的并行公差优化设计模型求解

刘超, 刘少岗

(天津科技大学机械工程学院, 天津 300222)

**摘要:** 建立了以最小制造成本为目标, 以装配功能要求和工序加工能力为约束的并行公差优化设计模型. 将粒子群工具箱作为并行公差优化设计模型的求解工具, 并给出具体的流程. 最后, 通过一个实例的求解验证利用基于粒子群工具箱的粒子群算法求解并行公差优化模型的可行性. 通过与已有结果的比较, 说明了该方法在求解非凸规划问题时的优越性.

**关键词:** 并行公差; 成本公差函数; 粒子群算法; 粒子群工具箱

**中图分类号:** TH124      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1672-6510(2013)01-0067-04

### Solution of Concurrent Tolerancing Optimization Design Model Based on Particle Swarm Optimization Algorithm

LIU Chao, LIU Shaogang

(College of Mechanical Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China)

**Abstract:** Firstly, a concurrent tolerance optimization design model was established. Minimum manufacturing cost was used as the optimization goal, and the assembly function requirement and machining capability were given as the restriction conditions of the model. Then, the particle swarm optimization toolbox (PSOt) was used to find out the solution to the concurrent tolerance optimization design model, and the detailed process was given. Finally, the optimization result for an example was given to illustrate the validity of the particle swarm optimization (PSO) based on PSOt. Compared with the existing result, the proposed method is better in solving non-convex programming problems.

**Key words:** concurrent tolerance; cost-tolerance function; particle swarm optimization; PSOt

并行公差优化设计模型是一个非凸规划问题, 是离散变量和连续变量混合的优化模型, 一般存在多个局部最优解<sup>[1]</sup>, 因此采用常规的算法很难得到满意的优化结果. 粒子群算法 (particle swarm optimization, PSO) 是一种模拟鸟群飞行的仿生算法, 有着个体数目少、计算简单、鲁棒性好等优点, 在各类多维连续空间优化问题上均取得非常好的效果<sup>[2]</sup>. 目前在公差优化设计中, 粒子群算法主要被用于装配公差的分配<sup>[2-4]</sup>: 文献[2]提出了一种基于基本粒子群算法的装配公差优化分配方法; 邱晔等<sup>[3]</sup>提出了一种层次分析法与基本粒子群算法相结合的方法; 董银月<sup>[4]</sup>提出了一种改进的 PSO 算法, 同样是对装配公差优化设计进行了研究. 这些算法搜索效率低、操作困难, 对各

类复杂程度不同的优化问题通用性较差, 目前还没有相关文献将粒子群工具箱用于并行公差优化设计模型的求解. 粒子群工具箱 (particle swarm optimization toolbox, PSOt) 在处理约束条件和种群初始化方面均优于基本粒子群算法<sup>[5]</sup>及改进的粒子群算法 (带压缩因子的粒子群算法、权重改进的粒子群算法和混合粒子群算法). 本文将基于粒子群工具箱的粒子群算法用于并行公差优化设计模型的求解, 通过实例验证, 取得了较好的效果.

### 1 并行公差优化设计模型

并行公差优化设计将经济性作为公差设计的评

收稿日期: 2012-05-30; 修回日期: 2012-09-20

基金项目: 天津科技大学科学研究基金资助项目 (20100226)

作者简介: 刘超 (1988—), 男, 河北衡水人, 硕士研究生; 通信作者: 刘少岗, 副教授, liusg2006@tust.edu.cn.

价指标,其优化目标是在保证装配功能要求和工序加工能力约束的前提下设计出尽可能大的工序公差.可见,该模型由目标函数和约束条件组成<sup>[6]</sup>.

### 1.1 目标函数

以最小制造成本为目标函数:

$$\min C_s = \sum_{i=1}^N \sum_{h=1}^{P_i} C_{ih}(T_{ih}) \quad (1)$$

式中: $N$  为零件设计尺寸和公差总数; $P_i$  为第  $i$  个零件的工序尺寸和公差总数; $T_{ih}$  为第  $i$  个零件设计尺寸的第  $h$  道加工工序公差; $C_{ih}(T_{ih})$  为  $T_{ih}$  对应的制造成本.

我国中型机械类企业中等批量加工时,平面特征的加工成本公差模型<sup>[7]</sup>为

$$C_{ih}(T_{ih}) = 5.026 \text{e}^{-15.8903T_{ih}} + \frac{T_{ih}}{0.3927T_{ih} + 0.1176} \quad (2)$$

### 1.2 约束条件

(1) 装配尺寸链的功能要求约束为

$$\sum_{i=1}^N \sum_{h=1}^{P_i} T_{ih}^2 \leq T_{z_0}^2 \quad (3)$$

式中,  $T_{z_0}$  为产品预期的装配功能要求.

(2) 工序加工能力约束为

$$T_{ih}^- \leq T_{ih} \leq T_{ih}^+ \quad (i=1, \dots, N; h=1, \dots, P_i) \quad (4)$$

式中,  $T_{ih}^-$  和  $T_{ih}^+$  分别为工序公差  $T_{ih}$  的经济下限和上限.

## 2 PSO在并行公差优化设计中的应用

### 2.1 PSO及PSOt简介

PSO 是一种模拟鸟类飞行的仿生学算法,近来以其个体数目少、计算简单、鲁棒性好、对待优化的目标函数没有连续可微的要求等特点,在各类优化设计问题中得到广泛应用. PSO 首先初始化一群随机粒子,然后通过迭代找到最优解.其基本原理是在每一次迭代中,粒子通过跟踪两个“极值”来更新自己:个体极值和全局极值<sup>[8]</sup>. 本文应用美国北卡罗来纳州立大学航空与机械系教授 Brian Birge 开发的 PSOt,实现了 PSO 在并行公差优化设计中的应用.该工具箱将 PSO 的核心部分封装起来,提供给用户的为算法的可调参数.用户只需要定义需要

优化的函数,并设置好算法的具体参数,在 Matlab 中通过调用工具箱主函数即可实现问题的优化求解<sup>[9]</sup>.

### 2.2 PSOt在Matlab环境中的实现

(1) 定义适应度函数:适应度函数用于计算粒子的适应度值进而评价粒子的优劣.在并行公差优化设计中,制造成本的高低是评价优化结果好坏的最好标准.将成本函数作为适应度函数,最小的制造成本对应着问题的最优解.针对优化模型存在装配功能要求和 PSOt 的特点,利用罚函数的思想,将部分约束并入适应度函数(具体方法在实例中详细说明).

(2) 参量初始化:可以采用随机或人工的方法进行初始化.本文用人工的方法在参数变化范围内选取一组初始解.

(3) 设定自变量的取值范围及其参数.

(4) 调用 PSOt 主函数进行粒子群寻优.

## 3 实例

图 1 为一齿轮装配机构<sup>[10]</sup>,主要由箱体、齿轮轴、端盖、轴承及垫片等组成.各零件设计尺寸已由结构和功能要求确定,它们分别为  $Y_1=100 \text{ mm}$ ,  $Y_2=10 \text{ mm}$ ,  $Y_3=81.5 \text{ mm}$ ,  $Y_4=10 \text{ mm}$ ,  $Y_5=20 \text{ mm}$ ,  $Y_6=115 \text{ mm}$ ,  $Y_7=5 \text{ mm}$ . 装配体的装配功能要求:箱体 1 与端盖 3 的装配间隙量  $Z_1=(1.5 \pm 0.4) \text{ mm}$ ,以保证端盖 3 与轴承 5 之间压力的恒定;箱体 1 与垫片 6 的装配过盈量  $Z_2=(1.5 \pm 0.35) \text{ mm}$ ,以保证箱体 1 与端盖 3 之间有好的密封性,同时又不超过垫片 6 的耐压强度.

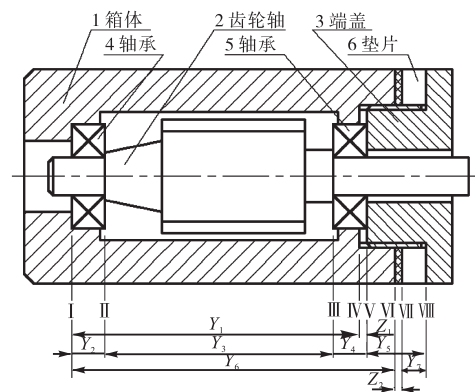


图 1 齿轮装配部件及其尺寸链  
Fig. 1 Geer assembly and its dimension chains

### 3.1 并行公差链

根据装配结构的主要设计功能要求,不难给出装配功能尺寸方程:

$$\begin{cases} Z_1 = -Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4 \\ Z_2 = Y_2 + Y_3 + Y_4 + Y_5 - Y_6 - Y_7 \end{cases} \quad (5)$$

使用统计模型,将装配功能公差表示为下面的不等式:

$$\begin{cases} T_{Z_1}^2 \geq T_{Y_1}^2 + T_{Y_2}^2 + T_{Y_3}^2 + T_{Y_4}^2 \\ T_{Z_2}^2 \geq T_{Y_2}^2 + T_{Y_3}^2 + T_{Y_4}^2 + T_{Y_5}^2 + T_{Y_6}^2 + T_{Y_7}^2 \end{cases} \quad (6)$$

根据图2和表1可得如下加工方程:

$$\begin{cases} Y_1 = X_{12} - X_{13} \\ Y_3 = -X_{32} + X_{33} - X_{34} \\ Y_5 = X_{53} \\ Y_6 = X_{62} - X_{63} = X_{12} - X_{63} \end{cases} \quad (7)$$

用统计法得到的混合公差为

$$\begin{cases} T_1^2 \geq T_{12}^2 + T_{13}^2 \\ T_3^2 \geq T_{32}^2 + T_{33}^2 + T_{34}^2 \\ T_5^2 \geq T_{53}^2 \\ T_6^2 \geq T_{62}^2 + T_{63}^2 = T_{12}^2 + T_{63}^2 \end{cases} \quad (8)$$

对于标准件(轴承4和5、垫片6)给定公差分别为  $T_2 = T_4 = 0.02 \text{ mm}$ ,  $T_7 = 0.2 \text{ mm}$ ,经计算化简得到并行混合公差为

$$T_{12}^2 + T_{13}^2 + T_{32}^2 + T_{33}^2 + T_{34}^2 \leq 0.6392 \text{ mm} \quad (9)$$

$$T_{32}^2 + T_{33}^2 + T_{34}^2 + T_{53}^2 + T_{62}^2 + T_{63}^2 \leq 0.4492 \text{ mm} \quad (10)$$

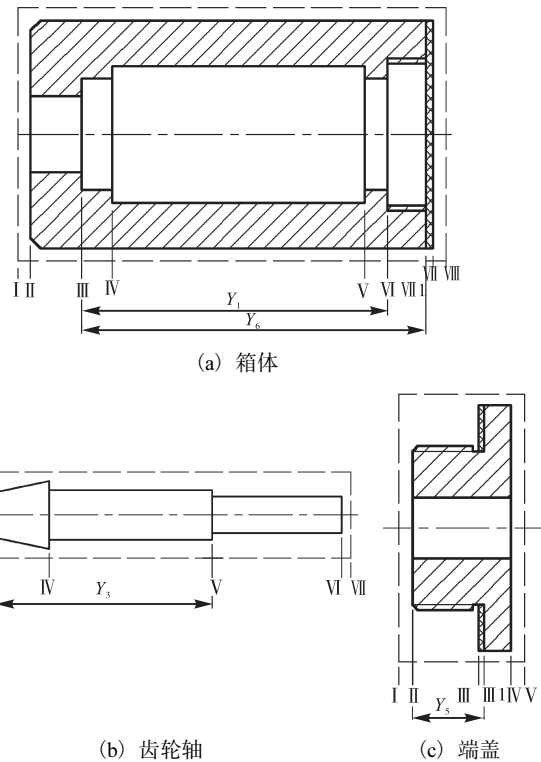


图2 相关零件的工艺尺寸链

Fig. 2 Critical dimensions of related parts

### 3.2 目标函数

$$\min C_s = \min \sum_{i=1}^N \sum_{h=1}^{P_i} C_{ih}(T_{ih}) = \min(C_{12} + C_{13} + C_{32} + C_{33} + C_{34} + C_{53} + C_{62} + C_{63}) \quad (11)$$

其中

$$C_{ih}(T_{ih}) = 5.026 1e^{-15.890 3T_{ih}} + \frac{T_{ih}}{0.392 7T_{ih} + 0.117 6}$$

### 3.3 加工能力约束

相关工序的经济公差范围约束见表1.

表1 零件的轴向加工规划

Tab. 1 Axial process plan of related parts

零件	序号	工序	基准面	加工面	工序尺寸/mm	工序公差	公差范围/mm
箱体	11(61)	铣削	VIII	VII	$X_{11} = X_{61} = 2$	$T_{11} = T_{61}$	0.05 ~ 0.10
	12(62)	钻孔	VII	III	$X_{12} = X_{62} = 115.2$	$T_{12} = T_{62}$	0.05 ~ 0.10
	13	车削	VII	VI	$X_{13} = 15.2$	$T_{13}$	0.05 ~ 0.10
	63	磨削	VII	VII1	$X_{63} = 0.2$	$T_{63}$	0.01 ~ 0.05
齿轮轴	31	车端面	I	II	$X_{31} = 2$	$T_{31}$	0.05 ~ 0.10
	32	车削	II	III	$X_{32} = 16$	$T_{32}$	0.05 ~ 0.10
	33	截断	II	VI	$X_{33} = 141.5$	$T_{33}$	0.05 ~ 0.10
	34	车削	VI	V	$X_{34} = 44$	$T_{34}$	0.05 ~ 0.10
端盖	51	车端面	I	II	$X_{51} = 2.0$	$T_{51}$	0.05 ~ 0.10
	52	车槽	II	III	$X_{52} = 19.8$	$T_{52}$	0.05 ~ 0.10
	53	磨削	II	III1	$X_{53} = 20$	$T_{53}$	0.10 ~ 0.50

### 3.4 优化求解

(1) 定义适应度函数: 以最小制造成本为目标, 利用罚函数原理将装配尺寸链的功能要求约束并入目标函数, 设定罚常数为  $10^8$ , 适应度函数变为

$$\min C_s = \min (C_{12} + C_{13} + C_{32} + C_{33} + C_{34} + C_{53} + C_{62} + C_{63} + 10^8 \times [\max(0, R_1)]^2 + 10^8 \times [\max(0, R_2)]^2) \quad (12)$$

其中

$$R_1 = T_{12}^2 + T_{13}^2 + T_{32}^2 + T_{33}^2 + T_{34}^2 - 0.6392 \text{ mm}$$

$$R_2 = T_{32}^2 + T_{33}^2 + T_{34}^2 + T_{53}^2 + T_{62}^2 + T_{63}^2 - 0.4492 \text{ mm}$$

(2) 参数设定: 最大速度为 4; 待优化函数的维度为 8; 粒子初始位置向量为 [0.05 0.05 0.05 0.01 0.05 0.05 0.01]; 参数 PSOParams = [50 1 000 40 2 2 0.9 0.4 750 1e-25 250 NaN 0 1];

(3) 调用 PSOT 主函数进行寻优, 结果见表 2.

表 2 两种优化算法的比较

Tab. 2 Comparison of two kinds of optimization algorithm

方法	公差/mm												成本/元
	$T_{12}$	$T_{13}$	$T_{62}$	$T_{63}$	$T_{32}$	$T_{33}$	$T_{34}$	$T_{53}$	$T_1$	$T_6$	$T_3$	$T_5$	
本文	0.100 0	0.100 0	0.100 0	0.050 0	0.100 0	0.100 0	0.100 0	0.050 0	0.200 0	0.150 0	0.300 0	0.050 0	15.250 8
文献[10]	0.100 0	0.100 0	0.100 0	0.050 0	0.086 7	0.086 7	0.086 7	0.050 0	0.141 4	0.111 8	0.150 1	0.050 0	15.780 0

### 3.5 结果比较

为验证所用算法的有效性, 将文献[10]与文中所求结果一同列入表 2 进行比较.

经比较可得如下结论: PSO 容易获得较大的加工工序公差和较小的制造成本. 达到了预期的获得较大加工公差和减小制造成本的优化目标, 符合优化的目的.

## 4 结 语

本文实现了 PSOT 在并行公差优化设计中的应用, 并通过实例求解验证了 PSO 在求解非凸规划问题以及离散变量和连续变量混合优化模型的可行性, 对并行公差优化设计中求解复杂离散优化模型具有一定的参考价值.

作为 CAD/CAM 集成的关键技术, 计算机辅助公差设计还难以与目前的 CAD、CAM、CAPP 相集成. 因此, 建立通用性好、集成能力强、综合考虑产品设计与制造过程中影响公差设计因素的并行公差优化设计模型是今后研究的重要内容.

### 参考文献:

[1] 方红芳. 计算机辅助工序尺寸及其公差设计[M]. 上海: 东华大学出版社, 2000: 81-103.

[2] 匡兵, 黄美发, 钟艳如, 等. 基于粒子群算法的装配公差优化分配[J]. 机械设计与制造, 2009(2): 35-37.

[3] 邱晞, 牟伟强, 魏生民. 基于层次分析法与粒子群算法的飞机装配公差[J]. 航空制造技术, 2010(16): 66-69, 72.

[4] 董银月. 基于蒙特卡洛方法和改进 PSO 算法的装配公差优化设计[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.

[5] 龚纯, 王正林. 精通 MATLAB 最优化计算[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009: 270-343.

[6] 张根保, 赵建衡. 机械产品精度的并行优化设计: 数学模型[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 1998, 21(1): 12-20.

[7] 方红芳, 吴昭同. 并行公差设计与工艺路线技术经济评价方法[J]. 机械工程学报, 2000, 36(4): 74-77, 85.

[8] 纪震, 廖惠连, 吴青华. 粒子群算法及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009.

[9] 史峰, 王辉, 郁磊, 等. MATLAB 智能算法 30 个案例分析[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2010: 157-161.

[10] Peng H P, Jiang X Q, Liu X J. Concurrent optimal allocation of design and process tolerances for mechanical assemblies with interrelated dimension chains[J]. International Journal of Production Research, 2008, 46(24): 6963-6979.

责任编辑: 常涛