DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2010.16.020

基于层次分析法与粒子群算法的飞机装配公差多目标优化

Multi-Objective Optimization of Aircraft Assembly Tolerance Based on Analytic Hierarchy Process and Particle Swarm Optimization Algorithm

西北工业大学现代设计与集成制造技术教育部重点实验室　邱　晞　牟伟强　魏生民

[摘要]　飞机研制过程中合理的装配公差分配是提高装配准确度和一次装配成功率、降低研制成本的有效途径。本文提出了面向装配性能、加工成本和装配操作复杂度的多目标装配公差优化模型；采用层次分析法与粒子群算法相结合的方法对飞机装配公差多目标优化模型进行求解，用层次分析法确定权重因子并以多目标装配公差优化模型作为适应度函数；最后，以某型飞机外襟翼的一个组件装配公差为例对算法进行验证，计算表明装配公差优化结果能够达到设计要求，可以提高装配公差优化的精度和效率。

关键词：装配性能　加工成本　操作复杂度　层次分析法　粒子群算法

[ABSTRACT]　In the process of designing and manufacturing of aircraft, a reasonable assembly tolerance allocation is an effective way to improve the assembly accuracy, decrease the manufacturing cost and increase the success ratio of assembly at one time. So, firstly the multi-objective optimization model of assembly tolerance oriented on the assembly performance, the manufacturing cost and the assembly complexity is presented here. Secondly, a new method combined Analytic Hierarchy Process (AHP) with Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm is employed to solve the multi-objective optimization model by using AHP to determine the weight factors and get the optimization model as a fitness function. Finally, the method is applied in a flap component assembly tolerance for a certain type of aircraft, which proves the optimization results can meet the design requirements and improve assembly tolerance efficiency.

Keywords: Assembly performance　Manufacturing cost　Assembly complexity　AHP　PSO

公差优化就是已知尺寸链中封闭环的公差，按照一定的方法和约束条件，优化分配尺寸链中各组成环公差。由封闭环的基本公式可知封闭环公差等于所有组成环公差的和，当封闭环公差已知，而各组成环公差未知时，各组成环的公差分配方案是多种多样的。在机械设计制造中，合理的公差分配是降低生产成本和保证产品性能的关键。因此，在保证产品性能要求的前提下，围绕着降低生产成本而进行的装配公差优化分配的研究成为当前公差设计的热点之一。制造成本是产品生产成本的一个重要组成部分[1]，当零件公差设计得比较小，产品的制造成本就比较高；反之，产品的制造成本就比较低。为此，许多研究人员以最小的制造总成本为目标建立优化模型，进行装配公差优化分配的研究。此类优化方法在以盈利为目的的产品设计中是十分可取的，然而在飞机生产装配过程中，成本往往并不是最重要的，而飞机的性能指标和生产周期更是不可或缺的考虑因素[2]。飞机装配公差设计的最终目的就是为了获得合理的、优化的公差分配方案。因此，本课题综合考虑公差分配对飞机性能和生产周期的影响，提出了面向飞机装配性能、加工成本、装配工艺性的多目标公差优化模型。

面向多目标的飞机装配公差优化分配模型是一个比较复杂的非线性模型。传统的公差优化分配方法是根据航空行业标准、技术条件和技术人员的经验对装配公差进行初步分配，然后采用概率法进行核算。这种方法需要大量的统计数据，对公差分配中出现的问题估计不足，经常导致返工。使用遗传算法进行装配公差优化分配是目前应用较广的方法，但是该方法通常应用于单目标公差优化问题，且遗传算法存在收敛速度慢和早熟等缺点。为提高优化算法的效率，本课题提出层次分析法与粒子群算法相结合的方法对面向多目标的飞机装配公差优化问题进行研究。最后，以某型飞机外襟翼的一个组件装配公差优化为例对算法进行验证，结果表明基于层次分析法与粒子群算法的装配公差优化结果能够达到设计要求，可以提高装配公差优化分配的精度和效率。

1 装配公差多目标优化模型建立

1.1 装配公差单目标函数确定

1.1.1 装配性能－公差数学模型

装配性能通常由装配准确度进行度量,装配性能作为产品设计制造必须满足的最重要的技术指标,它与公差联系非常紧密,而且对装配尺寸链中各组成环的公差值有非常严格的要求。一般地,公差值越小,误差累积就越小,越容易分配设计的功能,装配后越容易保证设计要求,装配性能也就越好。根据文献 [3] 对装配性能－公差关系的数学描述,选用负指数多项式模型,即:

$$P(T)=P_0+P_1\frac{1}{T^m}\ ,\qquad(1)$$

其中, P_0 为零件装配时需要满足的基本性能; P_1 为因公差变化而可调的最大装配性能; m 为公差对装配性能的影响程度参数; T 为装配尺寸链任意组成环的公差。

1.1.2 加工成本－公差数学模型

加工成本是机械产品总成本的重要组成部分,影响加工成本的许多因素中零件公差起着重要的作用。由于设计公差和制造成本之间存在着密切的联系,在保证产品装配精度的前提下,成本高低是优选公差分配不同方案的主要指标。目前,许多学者已经建立了公差与成本的数学模型 [4]。本课题选用模型简单、应用广泛的负平方模型:

$$C(T)=a_0/T^2\ ,\qquad(2)$$

其中, a_0 为参数; T 为装配尺寸链任意组成环的公差。

1.1.3 装配操作复杂度－公差数学模型

在飞机生产装配过程中,装配操作复杂度会受产品公差的影响。公差要求越宽松,装配操作就越简单,相互连接的零部件修配量越小,机械加工、协调等就能按要求顺利、快速地装配起来。由参考文献 [5] 选用指数模型:

$$O(T)=d_0T^{-d_1}\ ,\qquad(3)$$

其中, d_0、d_1 为参数; T 为装配尺寸链任意的组成环公差。

1.2 面向多目标的装配公差优化模型

飞机装配公差设计的最终目的就是为了获得合理的、优化的公差分配方案。一般地,一个合理、优化的装配公差分配方案可以获得良好的装配性能、合适的加工成本和较好的装配操作性;反之,将可能导致装配性能差、加工成本高、装配操作复杂度大等问题。为了实现最优的装配公差分配方案,本课题采用优化方法建立面向装配性能、加工成本、装配操作复杂度的多目标综合优化数学模型。基于上述单目标模型,以经典加权求和法建立面向装配性能、加工成本和装配操作复杂度的多目标装配公差优化模型(设综合目标值越小越好):

$$\begin{cases}\min F(T)=\min\sum\limits_{i=1}^{n-1}[\alpha_i/P(T_i)+\beta_iC(T_i)+\gamma_iO(T_i)]\\ S.T.\qquad \alpha_i+\beta_i+\gamma_i=1\\ \qquad\qquad \min T_i\leqslant T_i\leqslant\max T_i\ ,\quad i\in[1,n-1]\\ \qquad\qquad \min T_n\leqslant\sum\limits_{i=1}^{n-1}\Delta T_i\leqslant\max T_n\end{cases}\ ,\qquad(4)$$

其中, α_i、β_i、γ_i 分别为装配性能、加工成本和装配操作复杂度对组成环的影响系数,其和为 1; T_i 为装配尺寸链中第 i 个组成环的公差值,其公差值取值范围最大值为 $T_{i\max}$,最小值为 $T_{i\min}$; T_n 为装配尺寸链中的封闭环公差值, $\min T_n$ 为封闭环的最小公差值, $\max T_n$ 为封闭环的最大公差值; ΔT_i 为装配尺寸链中组成环公差上限与公差下限之差。 $\min T_n\leqslant\sum\limits_{i=1}^{n-1}\Delta T_i\leqslant\max T_n$ 是由装配尺寸链关系确定的,装配尺寸链中各组成环公差最终累计构成装配封闭环公差,为了满足装配性能要求,通常在设计时就会根据装配性能的设计要求给定封闭环公差。

2 基于层次分析法与粒子群算法的装配公差多目标优化

2.1 变量定义

粒子群优化 (Particle Swarm Optimization, PSO) 算法中,优化问题的解相当于搜索空间中的一只鸟,并把鸟称之为"粒子"。每个粒子都有一个由被优化的函数决定的适应值 (Fitness Value),还有一个速度和位置,可以决定它们飞行的方向和距离,然后粒子们就追随当前的最优粒子在解空间中搜索 [6]。本文相关变量定义如下。

(1)粒子。

类似于遗传算法中的染色体, PSO 中粒子为基本的组成单位,代表解空间的一个候选解。设解向量为 D 维变量,则当算法迭代次数为 t,第 i 个粒子 $X_i(t)$ 可表示为 $X_i(t)=(x_{i1}(t),x_{i2}(t),\cdots,x_{ij}(t),\cdots,x_{iD}(t))^{\mathrm{T}}$ 。其中, $x_{ij}(t)$ 是粒子 i 在第 t 次迭代中第 j 维解空间的位置,即第 i 个候选解中的第 j 个待优化变量,对应于本文装配尺寸链中的第 j 个待优化组成环的公差 t_j。

(2)种群。

粒子种群 (Population) 由 m 个粒子组成,代表 m 个候选解。经过 t 次迭代产生的种群: $Pop(t)=[X_1(t),X_2(t),\cdots X_i(t)\cdots X_m(t)]^{\mathrm{T}}$ 。其中, $X_i(t)$ 为种群中的第 j 个粒子。

(3)粒子速度。

粒子速度表示粒子在单位迭代次数位置的变化,即代表解变量的粒子在 D 维空间的位移:

$V_i(t)=(v_{i1}(t),v_{i2}(t),\cdots,v_{iD}(t))^{\mathrm{T}}$，其中，$v_{ij}(t)$ 为第 i 个粒子在解空间第 j 维的速度。

（4）适应度函数。

适应度函数 (fitness function) 由优化目标决定，用于评价粒子的搜索性能，指导粒子种群的搜索过程。算法迭代停止时，适应度函数最优的解变量即为优化搜索的最优解。本文中，适应度函数 f_i 对应于面向多目标的飞机装配公差优化模型，即：

$$f_i=\min F(T)=\min\sum_{i=1}^{n-1}[\alpha_i/P(T_i)+\beta_iC(T_i)+\gamma_iO(T_i)]$$

$$=\min\sum_{i=1}^{n-1}[\alpha_i\Big/(P_0+P_1\frac{1}{T_i^m})+\beta_ia_0/T_i^2+\gamma_id_0T_i^{-d_1}]\ ,\quad(5)$$

其中，适应度函数 f_i 越小越好，式中各个参数如上定义。

（5）个体极值。

个体极值是单个粒子从搜索初始到当前迭代对应的适应度最优的解，用 $pbest$ 表示其位置，如下所示：

$$pbest_i(t+1)=\begin{cases}pbest_i(t)\ ,\text{若}\ f[X_i(t+1)]\geqslant f[pbest_i(t)]\\ X_i(t+1)\ ,\text{若}\ f[X_i(t+1)]<f[pbest_i(t)]\end{cases}。$$

（6）全局极值。

全局极值是整个粒子群从搜索初始到当前迭代对应的适应度最优的解，用 $gbest$ 表示其位置，如下所示：

$$gbest(t)\in\{P_0(t),P_1(t),\cdots P_m(t)\}^{\mathrm{T}}\ ，且$$

$$f[gbest(t)]=\min\{f[P_0(t)],f[P_1(t)],\cdots f[P_m(t)]\}^{\mathrm{T}}\ 。$$

2.2 初始解产生

粒子群算法的初始解由随机方法产生。所产生的初始粒子 X 的位置向量的各个分量应满足装配尺寸链中各个组成环的公差要求，即：

$$t_{j\min}\leqslant x_{ij}\leqslant t_{j\max}\ ,\ j\in\{1,2,\cdots,n-1\}\ 。$$

其中，x_{ij} 为粒子 i 在第 j 维空间的位置分量；$t_{j\ \min}$、$t_{j\ \max}$ 为装配尺寸链中第 j 个组成环公差的最小值与最大值；$n-1$ 为装配尺寸链组成环的个数。

所产生的初始粒子 X 的速度向量的各个分量应满足如下条件：$v_{ij}\leqslant(t_{j\max}-t_{j\min})$，$j\in\{1,2,\cdots,n-1\}$。其中，$v_{ij}$ 为粒子 i 的速度 V 的第 j 个速度分量；$t_{j\ \min}$、$t_{j\ \max}$ 为装配尺寸链中第 j 个组成环公差的最小值与最大值；$n-1$ 为装配尺寸链组成环的个数。

2.3 更新机制

PSO 初始化为一群随机粒子（随机解），通过迭代找到最优解。在每一次迭代中，粒子通过跟踪两个“极值”来更新自己。第一个为个体极值，另一个为全局极值。在找到这两个极值后，粒子根据如下的公式（6）、（7）来更新自己的速度和位置：

$$v_{ij}(t+1)=v_{ij}(t)+c_1\gamma_1(pbest_{ij}(t)-x_{ij}(t))+c_2\gamma_2(gbest_j(t)-x_{ij}(t))\ ,\quad(6)$$

$$x_{ij}(t+1)=x_{ij}(t)+v_{ij}(t+1)\ ,\quad(7)$$

其中，c_1、c_2 为加速因子（或称学习因子），分别调节向个体最好粒子和全局最好粒子方向飞行的最大步长；γ_1、γ_2 是 [0,1] 之间的随机数。

PSO 算法中，对问题最优解的局部与全局搜索能力对求解过程非常重要，为此，文献 [7] 提出了带有惯性权重的改进粒子群算法，其进化方程为：

$$v_{ij}(t+1)=w(t)v_{ij}(t)+c_1\gamma_1(pbest_{ij}(t)-x_{ij}(t))+c_2\gamma_2(gbest_j(t)-x_{ij}(t))\ ,\quad(8)$$

其中，惯性权重 w 类似模拟退火中的温度，较大的 w 有较好的全局收敛能力，而较小的 w 有较强的局部收敛能力。因此，随着迭代次数的增加，惯性权重 w 应不断减小，从而使得粒子群算法在初期具有较强的全局收敛能力，而晚期具有较强的局部收敛能力，一般惯性权重 w 应满足 [8]：

$$w(t)=0.9-\frac{t}{\mathrm{Max}number}\times0.5\ ,\quad(9)$$

其中，t 为当前迭代次数；Max$number$ 为最大截止迭代次数。

2.4 权重因子确定

适应度函数 f_i 中的权重因子 α_i、β_i、γ_i 采用系统工程理论中的层次分析法求解。首先确定准则 C_i，本文中 C_i 即为装配尺寸链中的各个组成环 t_i（装配尺寸链组成环数为 $n-1$），准则 C_i 所支配的下一层元素为 u_{i1}、u_{i2}、u_{i3}，分别代表装配性能、加工成本、装配操作复杂度，它们对于准则 C_i 的相对重要性即权重为 α_i、β_i、γ_i；其次采用两两比较方法，即：对于准则 C_i，元素之间哪一个更重要，重要的程度如何，通常按 1 ～ 9 比例标度对其重

表1 标度的含义

标度	含义
1	表示两个元素相比，具有同样重要性
3	表示两个元素相比，前者比后者稍重要
5	表示两个元素相比，前者比后者明显重要
7	表示两个元素相比，前者比后者强烈重要
9	表示两个元素相比，前者比后者极端重要
2,4,6,8	表示上述相邻判断的中间值
倒数	若元素 j 与 k 的重要性之比为 a_{jk}，那么元素 k 与元素 j 重要性之比为 $a_{jk}=1/a_{jk}$

要性程度赋值[9]，表 1 中列出了 1 ～ 9 标度的含义。

对于准则 C_i，m 个元素之间相对重要性的比较得到一个两两比较判断矩阵 $A_i=(a^i{}_{jk})_{m\times m}$，其中 $a^i{}_{jk}$ 是元素 u_{ij} 和 u_{ik} 相对于 C_i 的重要性的比例标度；最后将判断矩阵 A_i 的 m 个行向量归一化后的算术平均值近似作为权重向量，即：

$$\omega^i{}_j=\frac{1}{m}\sum_{k=1}^{m}\frac{a^i{}_{jk}}{\sum_{t=1}^{n}a^i{}_{tk}}, \tag{10}$$

其中，$i=1,2,\cdots,n-1;\ j=1,2,\cdots,m$。由此可得到适应度函数中的各个权重因子。

2.5 算法步骤

基于层次分析法与粒子群算法的飞机装配公差多目标优化求解步骤如下：

（1）首先根据公式（10）确定多目标优化模型中的权重因子，并按 2.2 节初始化粒子群。将 $pbest(t)$ 设置为粒子当前的位置，将 $pbest(t)$ 设置为初始化粒子群中适应度最优对应的粒子位置。

（2）则按公式（7）、（8）更新粒子的位置和速度。

（3）按公式（5）计算更新后粒子的适应度函数值。如果更新后粒子的适应度函数值小于 对应的适应度函数值，则更新个体极值，将其设置为该粒子的当前位置；如果更新后粒子群中所有粒子的适应度函数值中最优的小于 $pbest(t)$ 对应的适应度函数值，则更新全局极值，将其设置为当前粒子群中适应度最优对应的粒子位置。

（4）判断当前的迭代次数是否小于设定的最大截止迭代次数 Max$number$，如果是，迭代次数增加一次，即 $t=t+1$，转到步骤（2）；否则停止迭代，输出最优解，即装配尺寸链中各组成环公差的最优解。

3 试例验证

本文以某型飞机外襟翼的一个组件为应用对象，对所提出的基于层次分析法与粒子群算法的飞机装配公差多目标优化进行实例验证。某型飞机外襟翼三维模型如图 1 所示。在本组件的实际装配过程中，以机翼蒙皮为基准，其误差由外向里，最后累积到骨架上。本组件的装配准确度要求是插耳 1 与插耳 2 在装配完成后，两孔中心距的误差为 0.20；本组件装配所形成的尺寸链为平面尺寸链，如图 2 所示，其中 l_8 为封闭环，组件中各个零件的公差范围见表 2。

采用本文提出的基于层次分析法与粒子群算法的飞机装配公差多目标优化方法对外襟翼组件公差优化进行求解，得到的装配尺寸链公差优化结果如表 3 所示。优化结果表明：该方法计算效率良好，公差优化结果满足装配要求，能够为飞机装配过程中的公差设计提供理论参考。

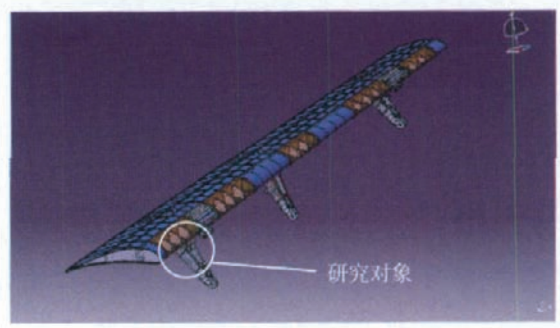

图1 某型飞机外襟翼三维模型

Fig.1 Outer flap 3D model for a certain type of aircraft

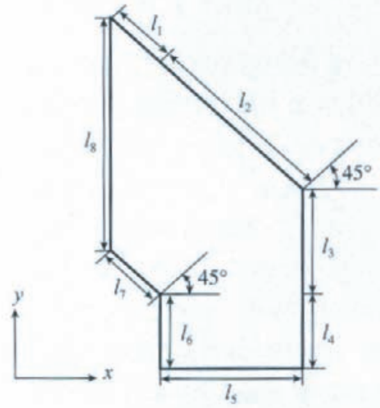

图2 装配尺寸链

Fig.2 Assembly dimension chain

表2 组件中各零件公差范围

装配尺寸链组成环	公差 T 的范围
l_1	[−0.26，0.26]
l_2	[−0.38，0.38]
l_3	[−0.44，0.44]
l_4	[−0.41，0.41]
l_5	[−0.20，0.20]
l_6	[−0.40，0.40]
l_7	[−0.34，0.34]

表3 组件公差优化结果

组成环公差	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_7
优化结果	0.12	0.11	0.10	0.08	0.17	0.28	0.23

4 结束语

本文在总结国内外学者对公差优化问题研究的基础上，针对飞机装配过程中的公差优化分配，根据飞机行业自身特点建立了面向飞机的装配性能、加工成本、

（下转第 72 页）

这样加工出来的零件底面基本上接近设计要求的表面光度。根据表 1 中给出的刀具参数,机床转速给到最大转速 24000r/min,精铣底面走刀路线轨迹图如图 6 所示。

图5 精铣底面操作界面

Fig.5 Interface of finish milling underside

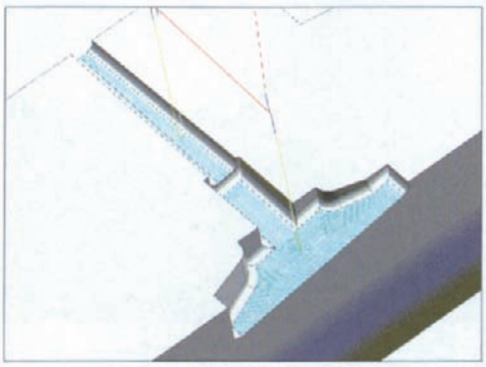

图6 精铣底面走刀轨迹

Fig.6 Tool rout of finish milling underside

4.4 拐角减速问题的处理

高速铣削过程当中最重要的问题就是如何处理被加工零件的拐角问题,如果处理不当刀具将会在拐角处产生过切,直接影响零件的加工精度,甚至会使零件报废。本文在编程过程中是采用 UG 型腔铣和固定轴铣命令中角和进给率控制菜单来实现拐角减速控制的,菜单界面如图 7 所示。

5 结束语

以上介绍的就是利用 FIDIA DP165 高速铣削中心以加工叶片精铸模具一个榫头模具为例的全部加工过程,通过对上述模具的加工可以看出该高速铣机床非常适合于加工各种模具零件,加工效率非常高,模具零件表面质量也非常好。通过对 UG 软件如何编程的介绍能够看出该软件是一种非常好的自动编程软件,能够同时满足机床低速铣削和高速铣削的需要,是一种优秀多

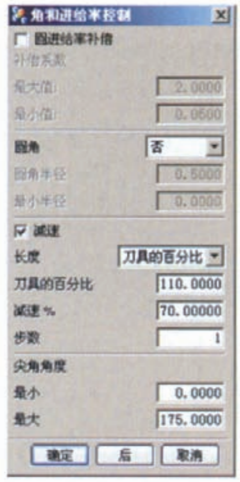

图7 角和进给率控制菜单

Fig.7 Control-menu of angle and give speed

轴铣加工编程软件,在实际应用中会起到事半功倍的效果。

(责编 侧卫)

(上接第 69 页)

装配操作复杂度的多目标综合优化数学模型,提出了基于层次分析法与粒子群算法求解飞机装配公差多目标优化模型的方法,采用层次分析法确定多目标优化模型中的权重因子,并以优化模型的评价函数作为粒子群算法中的适应度函数,同时给出了算法求解步骤。最后,以某型飞机外襟翼的一个组件公差优化实例验证了算法的有效性与可行性。

参 考 文 献

[1] 姬舒平, 孙宏伟 . 一种新的公差优化数学模型的研究 . 哈尔滨工业大学学报, 2000, 6 (3): 12–16.

[2] 王云渤, 张关康 . 飞机装配工艺学 . 北京: 国防工业出版社, 1990.

[3] 张开富 . 飞机部件装配误差累积分析与容差优化方法研究 [D]. 西安: 西北工业大学 , 2006.

[4] CHASE K W, GREENWOOD W H. Least cost tolerance allocation for mechanical assemblies with automated process selection. Manufacturing Review, 1990,3(1):49–59.

[5] 李光丽 . 含形位公差的飞机零部件装配公差建模与分析 [D]. 西安: 西北工业大学 , 2009.

[6] 杨 伟, 李岐强 . 粒子群优化算法综述 . 中国工程科学, 2004,5(5):87–93.

[7] Shi Y, Eberhart R. A modified particle swarm optimizer. 1998 IEEE International Conference on Evolutionary Computation Proceedings, IEEE World Congress on Computational Intelligence,1998: 69-73.

[8] 段晓东, 王存睿 . 粒子群算法及其应用 . 沈阳: 辽宁大学出版社 . 2007,10.

[9] 汪应洛 . 系统工程 . 北京: 机械工业出版社, 2007.

(责编 泰山)