

# 改进遗传算法的飞机结构件装配序列优化研究

陈龔斌,李欢庆

(中航西安飞机工业集团股份有限公司,陕西 西安 710089)

**摘要:**为获取最佳的装配序列,提高飞机装配效率,扩展装配序列多样性,设计改进遗传算法的飞机结构件装配序列优化方法,以此作为飞机结构件装配序列优化的评价指标并设计对应的约束条件。依据评价指标及对应的约束条件,建立装配序列优化的目标函数;利用改进遗传算法求解目标函数的解。实验证明:该方法可有效优化装配序列,提高装配效率;在同种群容量时,该方法获取的可行装配序列数量较多,即装配序列多样性更佳,且收敛速度较快。

**关键词:**改进遗传算法;飞机结构件;装配序列优化;装配聚合性;约束条件;模糊集

**中图分类号:**V262.4<sup>+</sup>1; TP391 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2023)06-0221-05

## Research on Assembly Sequence Optimization of Aircraft Structural Parts Based on Improved Genetic Algorithm

CHEN Yanbin, LI Huanqing

(Avic Xi'an Aircraft Industry Group Company Ltd., Xi'an 710089, China)

**Abstract:** To obtain the best assembly sequence, accelerate the aircraft assembly efficiency and expand the diversity of assembly sequence, an aircraft structure assembly sequence optimization method based on improved genetic algorithm is designed, with which being the evaluation index for the optimization of aircraft structure assembly sequence, the corresponding constraints are designed. According to the evaluation indexes and corresponding constraints, the objective function of assembly sequence optimization is established. The objective function is solved by improved genetic algorithm. The experiments show that the designed method can effectively optimize the assembly sequence, accelerate the aircraft assembly efficiency, and obtain more numbers of feasible assembly sequences in the same group capacity with better diversity of assembly sequences and faster convergence speed.

**Keywords:** improved genetic algorithm; aircraft structural parts; assembly sequence optimization; assembly and cohesion; constraint conditions; fuzzy sets

## 0 引言

国家发展战略中的关键部分之一为飞机制造业。飞机制造过程中装配序列属于较为关键的环节,装配序列涵盖了CAD数据与工艺数据等<sup>[1-3]</sup>,通过计算机辅助生成科学的、规范的装配序列,而装配序列确定了飞机制造时的复杂性与可靠性<sup>[4]</sup>。合理的装配序列,可提升飞机装配效率,降低装配成本。传统的装配序列大多依靠人工确定,在装配时经常出现不合理的情况<sup>[5]</sup>,浪费装配时间。飞机结构件数量越多,传统装配序列的缺陷问题越严重。吴国祥等<sup>[6]</sup>以装配有限约束矩阵与非正交干涉矩阵为前提,塑造装配序列优化模型,依据装配方向与工具的不一致性获取适应度函数,利用模因算法求解优化模型,获取最佳的装配序列。该方法在飞机装配序列优化中是有效与可行的,但该方法对解空间的拓展性较差,搜索到的有效范围难度较高,即搜索效率较差,需删掉大量不可行装配序列才能获取最优装配序列,种群多样性较差;刘晓阳

等<sup>[7]</sup>利用多色集合理论建立装配序列层次结构树模型,通过蚁群算法求解该模型,获取最佳的装配序列,该方法在装配序列优化中具有一定的可行性,但该方法确定信息素残留系数与转移概率参数时困难较大,收敛速度较慢,易于陷入局部最优解,装配序列优化效果较差。为此本文研究改进遗传算法的飞机结构件装配序列优化方法。利用轴向包围盒扫描的粗检测法与步进式动态干涉检测法,生成飞机结构件装配的干涉矩阵,创新性地改进遗传算法,求解飞机结构件装配序列优化的数学模型。改进后的遗传算法不用遍历全部解空间便可获取最优解,在组合优化的组合爆炸问题中应用效果较优,全局搜索能力强<sup>[8]</sup>,有效缩小搜索空间,提升收敛速度,为飞机制造过程中提供更佳的结构件装配序列,提高了装配效率。本文的创新点在于利用改进遗传算法在遗传算法中引入飞机结构件装配干涉矩阵,对其进行改进,提升算法的收敛速度,缩减变异计算量;利用模糊集理论确定飞机结构件装配序列优化的适应度函数,实现装配序列优化。

**基金项目:**航空工业西安飞机翼装配厂提质增效项目(JYXMGJ-2022-004)

**第一作者简介:**陈龔斌(1993—),男,甘肃定西人,工程师,本科,研究方向为飞机装配技术管理、数字化装配技术,mzchenyanbin@163.com。

# 1 基于改进遗传算法的飞机结构件装配序列优化方法

## 1.1 飞机结构件装配序列优化的评价指标及约束条件

影响飞机结构件装配序列质量的原因颇多,优化装配序列的目的为在大量装配序列内选择装配效果最佳、时间最少的序列。飞机结构件装配序列优化的评价指标为装配方向一致性、装配几何可行性、装配聚合性与装配效率。量化求解这些评价指标,设计对应的约束条件,构造飞机结构件装配序列优化的数学模型。装配方向一致性代表飞机结构件装配重定向次数。飞机结构件需尽可能以同一方向进行装配<sup>[9-10]</sup>,重定向次数与飞机结构件装配时的翻转安装消耗时间息息相关。飞机结构件具有大量的大挠度钣金件和大曲率壁板件等不规则结构件,这些结构件在装配过程中的装配方向无法通过一般坐标系中的正交方向表达,需要将结构件连接特征的切线方向作为装配重定向方向。将装配方向定义为  $V = \{\pm X_i, \pm Y_i, \pm Z_i, d_1^i, d_2^i, \dots, d_\theta^i\}$ 。其中,  $\pm X_i, \pm Y_i, \pm Z_i$  为坐标系方向,  $d_\theta^i$  为装配序列中第  $j$  个特殊结构件需要重定向的第  $\theta$  个装配方向。

令随机可行飞机结构件装配序列为  $O = \{O_1, O_2, \dots, O_N\}$ , 依据  $O$  内全部飞机结构件装配方向变更总次数, 能够获取装配序列的最少重定向次数, 计算公式如下:

$$\alpha = \sum_{i=2}^V v_i \quad (1)$$

式中  $v_i$  为飞机结构件装配方向变更情况。若  $v_i = 1$ , 说明装配方向变更, 需重定向; 若  $v_i = 0$ , 说明装配方向无变更。

装配方向重定向次数的约束条件为重定向次数越少越好。

装配几何可行性的约束条件为各结构件间出现干涉情况次数越少, 飞机结构件装配序列可装配性就越好。装配聚合性代表飞机结构件装配工具的改变次数, 飞机结构件装配时, 需尽可能降低装配工具的改变次数, 令同一工具的装配任务集中至一起, 缩短装配时间<sup>[11-13]</sup>。令每个飞机结构件装配工具集是  $T = \{T_1, T_2, \dots, T_N\}$ , 那么  $O$  的装配工具改变次数  $\beta$  如下:

$$\beta = \sum_{j=2}^N g_j \left( g_j = \begin{cases} 0 & T_i = T_{j-1} \\ 1 & T_i \neq T_{j-1} \end{cases} \right) \quad (2)$$

根据式(2)可知,  $O$  一定时, 如果  $q_j$  的装配工具  $T_i$  和  $q_j$  之前的  $T_{i-1}$  不一致, 那么说明  $T$  的改变次数加一次。

装配聚合性的约束条件如下:

令存在 3 种不同质量的飞机结构件  $m_a, m_b, m_c$ , 同时  $m_a < m_b < m_c$ , 随机选择一个质量是  $m_j$  的飞机结构件, 那么  $m_j$  的装配工具  $T_j$  按照式(3)来确定。

$$T_j = \begin{cases} T_a & m_j \leq m_a \\ T_b & m_a \leq m_j \leq m_b \\ T_c & m_b \leq m_j \leq m_c \end{cases} \quad (3)$$

飞机结构件由上至下的装配方式可提升装配效率。每个飞机结构件的装配次数公式如下:

$$\delta = \left( \sum_{n_d} \partial_d \times n_d + \sum_{n_h} \partial_h \times n_h + \sum_{n_u} \partial_u \times n_u \right) / n \quad (4)$$

式中:  $n$  是飞机结构件总装配次数;  $n_d, n_h, n_u$  是  $d, h, u$  的次数, 同时  $n_d + n_h + n_u = n$ ;  $\delta$  是飞机结构件装配总效率;  $\partial_d, \partial_h, \partial_u$  是  $d, h, u$  的效率, 同时  $\partial_d > \partial_h > \partial_u$ 。

依据飞机结构件装配序列优化的评价指标及对应的约束条件为重定向次数最少、装配工具改变次数最少、每个飞机结构件的装配次数最少, 建立飞机结构件装配序列优化的目标函数即数学模型, 公式如下:

$$\min F = \omega_1 \times \alpha + \omega_2 \times \beta + \omega_3 \times \delta \quad (5)$$

式中  $\omega_1, \omega_2, \omega_3$  是飞机结构件装配序列优化评价指标的权重。

## 1.2 基于改进遗传算法的装配序列优化数学模型求解

利用改进遗传算法求解飞机结构件装配序列优化的数学模型, 令每个飞机结构件装配序列代表改进遗传算法内的一个个体, 个体内每个基因代表一个飞机结构件, 模型求解步骤如下:

①确定模型参数即待装配的飞机结构件数量  $n$ , 通过十进制整数编码方式编码基因;

②确定初始装配序列个体种群大小  $H$ 、交叉概率  $p_c$ 、基因组变异概率  $p_m$ ;

③初始化  $H^{[14]}$ , 将其当成装配序列个体父代的种群;

④输入飞机结构件装配时的干涉矩阵, 匹配特征信息, 依据飞机结构件装配序列优化评价指标的约束条件, 确定  $H$  的可行性, 求解装配序列优化的适应度函数;

⑤展开选择、交叉与变异操作;

⑥获取新一代装配序列个体种群  $H'$ , 求解其适应度函数;

⑦设置适应度函数  $f(O)$  的条件, 衡量步骤⑥获取的  $f(O)$  是否符合条件;

⑧不符合结束条件情况下, 在  $H'$  内选取两个装配序列个体  $i'$  与  $j'$ , 同时  $i' \neq j'$ , 将  $i'$  与  $j'$  当成装配序列的父代返回步骤③;

⑨符合结束条件情况下, 输出最优的飞机结构件装配序列。

1) 飞机结构件装配干涉矩阵

装配几何可行性代表飞机结构件依据装配顺序装配结构件时, 各结构件彼此无干涉, 说明各结构件均存在可行的装配方向。在遗传算法中引入飞机结构件装配干涉矩阵对其进行改进, 可提升算法的收敛速度, 缩减变异计算量并根据异构飞机结构件的装配重定向特征增加非正交坐标方向, 由此来提高装配干涉矩阵的正确性。令飞机按照  $V$  方向装配  $i$  个一般飞机结构件  $q_i$  和  $o$  个异构结构件  $q_o$  时, 与全部装配完成的结构件间的干涉矩阵为  $R$ , 令  $q_i$  按照  $V$  方向装配时和  $q_o$  出现干涉情况是  $U_{jok}$ 。  $U_{jok} = 0$  情况下, 代表  $q_i$  和  $q_o$  没有干涉;  $U_{jok} = 1$  情况下, 代表  $q_i$  和  $q_o$  出现干涉。按照  $x, y, z$  方向的干涉矩阵分别包含  $R_{+x}, R_{+y}, R_{+z}, R_{-x}, R_{-y}, R_{-z}$ 。干涉矩阵中  $U_{+jok} = U_{-jok}$ , 就是  $q_i$  按照  $x, y, z$  方向装配时和按照非正交坐标方向  $\theta$  装配的异构件  $q_o$  的干涉情况, 与  $q_i$  按照  $-x, -y, -z$  方向装配时和  $q_o$

的干涉情况一致,因此通过  $R_{+x}$ 、 $R_{+y}$ 、 $R_{+z}$  可推理获取  $R_{-x}$ 、 $R_{-y}$ 、 $R_{-z}$ , 则通过  $R_{+x}$ 、 $R_{+y}$ 、 $R_{+z}$  构建的干涉矩阵可代表飞机结构件按照  $x$ 、 $y$ 、 $z$ 、 $-x$ 、 $-y$ 、 $-z$  方向装配过程中的干涉情况,集成的  $R$  表达式如下:

$$R = \begin{bmatrix} U_{11x}U_{11y}U_{11z} & U_{12x}U_{12y}U_{12z} & \cdots & U_{1nx}U_{1ny}U_{1nz} & U_{1n\theta} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ U_{n1x}U_{n1y}U_{n1z} & U_{n2x}U_{n2y}U_{n2z} & \cdots & U_{nnx}U_{nny}U_{nnz} & U_{nn\theta} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$R$  内各行、各列分别代表装配完成的飞机结构件与待装配飞机结构件,  $R$  可简化成各列飞机结构件按  $k$  方向装配至指定位置情况,和完成装配飞机结构件的干涉情况。根据  $R$  的  $U_{+jok} = U_{-jok}$  特点得知,可利用各行  $q$  按  $-k$  方向拆卸过程中的  $U$ , 替换各列  $q$  按  $k$  方向的  $U$ 。

利用轴向包围盒扫描的粗检测法与步进式动态干涉检测法,生成飞机结构件装配的干涉矩阵,具体步骤如下:

①构建飞机的三维模型<sup>[15]</sup>,存储模型中每个飞机结构件的三维几何信息;

②依据装配树顺序选择主动飞机结构件  $q_j$ ,塑造  $q_j$  的轴向包围盒;

③选择  $q_j$  的拆卸移动方向  $-k$ ;

④遍历装配树,按照顺序选取被动飞机结构件  $q_o$ ,利用轴向包围盒扫描的粗检测法,判断  $q_j$  与  $q_o$  是否出现干涉,若未出现干涉,那么  $U_{+jok} = 0$ ,反之,继续步骤⑤;

⑤依据步长移动  $q_j$ ,检测  $q_j$  与  $q_o$  是否出现干涉,若出现干涉,那么  $U_{+jok} = 1$ ;反之,反复操作步骤⑤,以  $q_j$  与  $q_o$  出现干涉为止;

⑥如果全部  $q_j$  均完成干涉检测,那么输出集成  $R$  的  $U_{+jok}$ ;反之,返回步骤④;

⑦衡量  $x$ 、 $y$ 、 $z$ 、 $-x$ 、 $-y$ 、 $-z$  方向是否均完成干涉检测,如果  $x$ 、 $y$ 、 $z$ 、 $-x$ 、 $-y$ 、 $-z$  方向均完成干涉检测,那么输出集成  $R$  获取  $U_{+jox}$ 、 $U_{+joy}$ 、 $U_{+joz}$ ;反之,返回至步骤③;

⑧以全部  $q_j$  均完成干涉检测为止,输出集成  $R$ ,即完成飞机结构件装配干涉矩阵的构建;反之,返回至步骤②。

## 2) 装配序列优化的适应度函数

利用模糊集理论确定飞机结构件装配序列优化的适应度函数。最佳的飞机结构件装配序列为各项评价指标最佳的可行序列,确定装配序列优化的适应度函数过程中,需将装配序列的评价问题变更成判断每个装配序列的装配效果,各项评价指标均为影响装配效果的因素。因此,利用装配难度判断飞机结构件装配序列的装配效果,总装配难度的求解公式如下:

$$B = \sum_{j=1}^n \eta_j + \sum_{j=1}^n \theta_j + \sum_{j=1}^n \mu_j + \sum_{j=1}^n \varpi_j \quad (7)$$

式中: $\eta_j$  是第  $j$  个飞机结构件重定向变化难度因子,即装配  $x_{j-1}$  后再展开  $x_j$  装配时的重定向变化难度因子; $\theta_j$  是第  $j$  个飞机结构件装配方向变化难度因子,即装配  $x_{j-1}$  后再展开  $x_j$  装配时的装配方向变化难度因子; $\mu_j$  是第  $j$  个飞机结构件装配工具变化难度因子,即装配  $x_{j-1}$  后再展开  $x_j$  装配时的装配工具变化难度因子; $\varpi_j$  是第  $j$  个飞机结构件装配方式变化难度因子,即装配  $x_{j-1}$  后再展开  $x_j$  装配时的装配方式变化难度因子。 $\eta_j$ 、 $\theta_j$ 、 $\mu_j$  与  $\varpi_j$  的取值区间是  $[0,1]$ ,

则在随机一个飞机结构件装配时,  $\max(\eta_j + \theta_j + \mu_j + \varpi_j) = 0$ , 因此,装配序列优化的适应度函数如下:

$$f(O) = \sum_{j=1}^n 4j - \left( \sum_{j=1}^n \eta_j + \sum_{j=1}^n \theta_j + \sum_{j=1}^n \mu_j + \sum_{j=1}^n \varpi_j \right) \quad (8)$$

## 2 实验结果与分析

以某型飞机为研究对象,利用 VC++ 工具编写应用程序验证本文方法优化该飞机结构件装配序列的有效性,该飞机通过机翼壁板与油箱盖等结构件组建而成。

通过确定本文方法中改进遗传算法内交叉概率与变异概率的数值,提升本文方法飞机结构件装配序列优化的效果,交叉概率确定结果如图 1 所示。分析图 1 可知,各交叉概率时,本文方法均可有效获取个体适应度函数值,随着交叉概率的增长,本文方法获取最佳个体适应度函数值的收敛速度越快。实验证明:为提升本文方法求解最优飞机结构件装配序列的速度,交叉概率需选择  $0.6 \sim 0.9$ 。

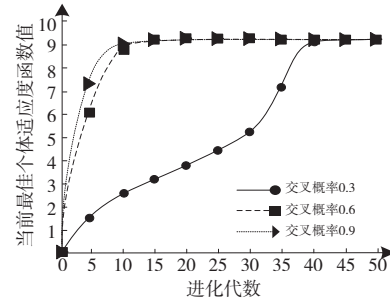


图 1 交叉概率确定结果

变异概率确定结果如图 2 所示。分析图 2 可知,各变异概率时,本文方法均可有效获取个体适应度函数值,随着变异概率的增长,本文方法获取最佳个体适应度函数值的收敛速度越慢。实验证明:为提升本文方法求解最优飞机结构件装配序列的速度,变异概率需选择  $0.1$ 。

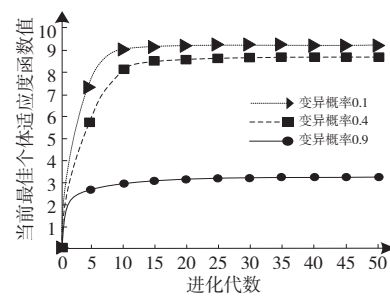


图 2 变异概率确定结果

确定交叉概率与变异概率后,利用本文方法为该型机翼优化结构件装配序列,该机翼结构件组成如图 3 所示。

飞机结构件的初始装配序列为翼梁、加强肋 a、桁条 b、桁条 a、上蒙皮、翼肋、下蒙皮、加强肋 b、前墙、后墙。依据评价指标及对应的约束条件,建立装配序列优化的目标函数,利用改进遗传算法求解目标函数的解。根据解得到优化后的飞机结构件装配序列为翼梁、加强肋 a、前墙、后墙、加强肋 b、翼肋、桁条 a、上蒙皮、桁条 b、下蒙皮,具体如表 1 所示。

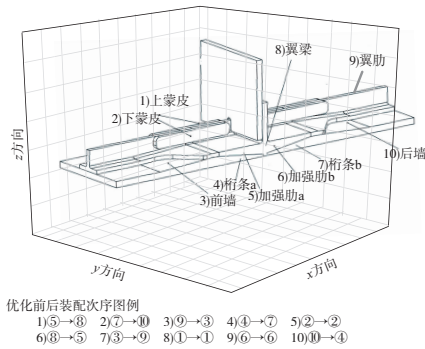


图3 机翼结构件几何说明

分析表1可知,本文方法可有效优化该机翼的结构件装配序列,优化前后的装配序列装配工具改变总次数分别

为30次与20次,优化后的装配序列装配工具改变次数明显低于优化前,说明优化后的装配序列装配聚合性较优。优化前后的装配序列重新定向次数分别为4次与2次,优化后的装配序列重新定向次数较少,说明优化后的装配序列装配方向一致性较优。优化前的装配序列共出现3次干涉情况,优化后的装配序列并未出现干涉情况,说明优化后的装配序列可装配性较优,即装配几何可行性更佳。优化前后的装配序列由上至下装配方式的次数分别为38次与59次,优化后的装配序列由上至下装配方式的次数明显高于优化前,因为这种装配方式次数越多,飞机结构件装配效率越高,所以优化后的装配序列装配效率较高。实验证明:本文方法可有效优化飞机结构件装配序列,优化后的装配序列装配方向一致性、装配聚合性与装配几何可行性均较优,可有效提升飞机结构件的装配效率。

表1 飞机结构件初始装配序列及优化后的装配序列

项目	装配序列									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
飞机结构件	翼梁	加强肋 a	桁条 b	桁条 a	上蒙皮	翼肋	下蒙皮	加强肋 b	前墙	后墙
装配工具改变次数/次	4	4	3	2	3	3	2	3	4	2
初始装配序列										
装配平动方向	-x	+x	+x	+x	-x	+x	+y	+z	+z	+x
装配转动方向	绕 x 顺转	绕 x 逆转	绕 x 逆转	绕 x 逆转	绕 x 逆转	绕 x 顺转	绕 y 逆转	绕 z 逆转	绕 z 逆转	绕 x 逆转
重新定向	否	否	否	是	否	否	否	是	是	是
是否出现干涉情况	否	否	是	是	否	是	否	否	否	否
由上至下装配方式次数/次	5	3	2	3	3	2	7	3	4	6
飞机结构件	翼梁	加强肋 a	前墙	后墙	加强肋 b	翼肋	桁条 a	上蒙皮	桁条 b	下蒙皮
装配工具改变次数/次	3	3	3	1	2	2	1	2	2	1
优化装配序列										
装配平动方向	-x	+x	+z	+x	+z	+x	+x	-x	+x	+y
装配转动方向	绕 x 顺转	绕 x 逆转	绕 z 逆转	绕 x 逆转	绕 z 逆转	绕 x 顺转	绕 x 逆转	绕 x 逆转	绕 x 逆转	绕 y 逆转
重新定向	否	否	否	是	否	否	否	否	是	否
是否发生干涉情况	否	否	否	否	否	否	否	否	否	否
由上至下装配方式次数/次	7	5	6	8	5	5	5	5	4	9

选择文献[6]模因算法的装配序列优化方法与文献[7]蚁群算法的装配序列优化方法作对比,记作方法1与方法2。分析3种方法在不同种群规模时,优化飞机结构件装配序列时获取可行装配序列的数量,结果如图4所示。分析图4可知,随着种群容量的增加,3种方法的可行装配序列数量均呈上升趋势,本文方法的可行装配序列数量上升速度最快,当种群容量达到80时,本文方法的可行装配序列数量趋于稳定,达到48个左右,其余两种方法均在种群容量为140时,其可行装配序列数量才趋于稳定,收敛速度明显慢于本文方法,且最高可行装配序列数量分别为23个、27个左右,明显低于本文方法。实验证明:在不同种群容量时,本文方法优化获取的可行装配序

列数量最高,且收敛速度最快,有效扩展了装配序列的多样性,为工作人员提供更多的装配选择。

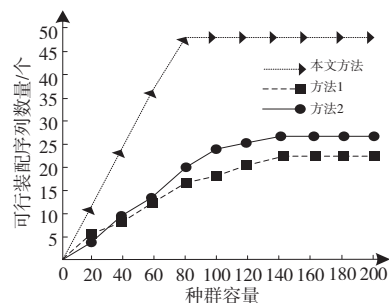


图4 可行装配序列数量分析结果

### 3 结语

装配序列在飞机制造时非常重要,属于决定飞机制造质量的关键因素,优化装配序列能获得更为合理的装配序列,可加快飞机制造效率,提升飞机质量。为此研究改进遗传算法的飞机结构件装配序列优化方法,可获得最佳的装配序列,提升飞机结构件装配方向一致性与装配聚合性等,提高飞机装配效率,为飞机制造领域提供更好的服务。

#### 参考文献:

- [1] 张秋月, 安鲁陵, 岳炬德, 等. 基于遗传算法的飞机复合材料结构装配压力大小与布局的优化[J]. 复合材料学报, 2019, 36(6): 1546-1557.
- [2] 朱永国, 邓斌, 霍正书, 等. 小样本检测数据驱动的飞机结构件装配关键偏差源诊断[J]. 中国机械工程, 2019, 30(22): 2725-2733.
- [3] 王华敏, 秦国华, 胡政, 等. 面向加工变形控制的航空整体结构件拓扑优化设计方法[J]. 机械工程学报, 2019, 55(21): 127-138.
- [4] 侯正航, 何卫平. 基于数字孪生的飞机装配状态巡检机器人的建模与控制[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(4): 981-989.
- [5] 刘殷杰, 田锡天, 耿俊浩, 等. 飞机薄壁零件装配偏差建模与仿真分析[J]. 机床与液压, 2020, 48(2): 138-143.

- [6] 吴国祥, 胡晓宇. 基于模因算法的飞机装配序列规划[J]. 南京航空航天大学学报, 2019, 51(3): 288-296.
- [7] 刘晓阳, 刘恩福, 靳江艳. 基于蚁群算法的异步并行装配序列规划方法[J]. 机械工程学报, 2019, 55(9): 107-119.
- [8] 刘振鹏, 王雪峰, 薛雷, 等. 实数编码遗传算法的改进及并行化实现[J]. 河北大学学报(自然科学版), 2019, 39(1): 86-92.
- [9] 罗建军, 王嘉文, 王明明, 等. 机器人在轨构建空间桁架结构的装配序列规划方法[J]. 宇航学报, 2021, 42(4): 437-449.
- [10] 白利征, 阎鑫, 齐少璞, 等. 基于几何推理有向图的装配序列规划[J]. 机械设计, 2020, 37(3): 72-76.
- [11] 赵海鸣, 蔡进雄, 付彪, 等. RV-E 减速器的装配序列规划研究[J]. 机械传动, 2019, 43(9): 1-8.
- [12] 李爱平, 赵亚西, 张家骅, 等. 考虑装配关系复杂性的多目标装配线平衡优化方法[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(7): 1665-1675.
- [13] 李思良, 袁庆霓, 胡淞, 等. 复杂装配体多层次装配路径规划研究[J]. 计算机仿真, 2020, 37(3): 178-182, 242.
- [14] 梁利东, 贾文友, 江本亦, 等. 定位关系在装配序列规划中的应用研究[J]. 机械科学与技术, 2021, 40(5): 762-768.
- [15] 王鹏, 杨明亮, 李哲人, 等. 基于改进遗传算法的TMD阻尼器的优化布置[J]. 机床与液压, 2019, 47(16): 17-21, 29.

收稿日期: 2022-05-04

(上接第 206 页)

### 3.3 主观评价

为进一步验证优化后样车客观测试结果的准确性,对优化前后声音样本进行了主观评价。运用上述介绍的等级评分法对采集到的关门声样本进行主观评价,采用如表 1 所示的 10 分制打分标准,根据总体响度、尖锐度、振颤、突出感、豪华感、低廉等特征进行主观评价。最后,通过对 24 个评价结果进行成对比较法检验,剔除 2 个不合格的评分后,对余下 22 个评价者的打分进行求和取平均,计算得到的优化前后主观评价价值如表 7 所示。结果表明优化后比优化前提高了 31.9%, 满足要求。

表 7 优化前后主观评价价值

主观评价价值	优化前	优化后	改善量
分值	5.98	7.89	1.91

### 4 结语

针对某自主品牌乘用车关门声品质较差的问题,结合主观评价,对样车开展客观测试和优化设计,使得优化后的样车关门声品质优于对标车。结果表明:在声品质主观评价中先采用等级评分法进行打分,然后利用成对比较法对等级评分法的结果进行验证,可剔除掉不可靠的个体,使得主观评价结果更具可靠性。通过独立运行法能在车门声品质开发中快速分析出不同措施对声品质的贡献量

大小,具有可操作性强、便于工程化应用的特点。在车门声品质开发中,采用主客观评价相结合的方式,可以快速准确地诊断出问题所在,对于改善车门声品质和提高工作效率均具有显著的优势。

#### 参考文献:

- [1] LEE S K. Objective evaluation of interior sound quality in passenger cars during acceleration[J]. Journal of Sound and Vibration, 2008, 310(1/2): 149-168.
- [2] 田玉珠, 李洪亮, 苏丽俐, 等. 应用声学定位技术对汽车关门声品质的改进设计[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(13): 286-290.
- [3] 谢明睿, 刘海红, 吴澍平, 等. 某 SUV 车门关门声品质建模及优化[J]. 应用声学, 2017, 36(6): 490-496.
- [4] 张守元, 李玉军, 杨良会. 某电动汽车车内噪声改进与声品质提升[J]. 汽车工程, 2016, 38(10): 1245-1251.
- [5] 庞剑. 汽车车身噪声与振动控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.
- [6] 刘哲, 高云凯, 解馥荣. 电动汽车关门声品质预测模型研究[J]. 汽车工程, 2021, 43(12): 1858-1864.
- [7] 李占营. 门锁系统的优化设计及其对车辆声品质的影响[J]. 汽车技术, 2016(3): 13-17.
- [8] 胡远志, 雷雨, 郑光泽, 等. 车身密封性对车内噪声的影响[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2014, 28(9): 1-6.
- [9] 刘强, 岳洋, 马芳武, 等. 汽车声学封装材料性能与应用效果研究[J]. 功能材料, 2012, 43(增刊 1): 73-77.

收稿日期: 2022-06-24