

集成 TRIZ 的机加夹具方案公理化设计*

黄斌达¹, 周来水^{1,2}, 安鲁陵^{1,2}, 卫 炜^{1,2}, 卜庆奎¹

(1. 南京航空航天大学 机电学院 南京 210016; 2. 江苏省精密与微细制造技术重点实验室 南京 210016)

摘要:目前在制造企业中,机加夹具方案设计多依赖于设计者的经验,对已有夹具实例的重用度不高,整个方案设计过程缺乏科学的理论框架作为指导。针对该问题,将公理设计(AD)理论和发明问题解决理论(TRIZ)相结合,提出了集成 TRIZ 的机加夹具方案公理化设计方法。在构建机加夹具多级实例库的基础上,设计了机加夹具功能-结构分解与映射算法,将夹具方案生成过程转化为基于功能需求检索多级夹具实例的过程,从而可快速生成机加夹具初始方案,之后运用 AD 独立公理对初始方案进行耦合性分析,确定存在耦合的夹具功能;通过构建机加夹具方案设计属性与 TRIZ 冲突矩阵 39 个工程参数之间的关联表,将耦合夹具功能快速转化为 TRIZ 工程参数,并运用 TRIZ 冲突消解工具解决机加夹具方案中的功能耦合问题;提出了基于模糊信息公理的机加夹具方案评价方法,分别计算定性和定量的夹具评价指标的信息量,为夹具方案的优选提供科学的决策依据。最后以某航空发动机机匣铣削夹具的方案设计为例,验证了所提方法的有效性和可行性。

关键词:公理设计;TRIZ;机加夹具;方案设计

中图分类号: TH122 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.25

Configuration axiomatic design method for the machining fixtures integrating TRIZ

Huang Binda¹, Zhou Laishui^{1,2}, An Luling^{1,2}, Wei Wei^{1,2}, Bu Qingkui¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;
2. Jiangsu Key Laboratory of Precision and Micro-Manufacturing Technology, Nanjing 210016, China)

Abstract: In the manufacturing enterprises, machining fixture scheme design is rely heavily on the designer's empirical knowledge, and it is lack of a theoretic framework to guide the process of machining fixture configuration. This leads to poor design standardization, quality difference, and low reuse efficiency on existing fixture case. Thus, a design method based on integrating Axiomatic Design (AD) and TRIZ is proposed firstly. The design case of fixture is decomposed on the basis of AD theory, and meanwhile, the multi-hierarchy case database is constructed. Then, the function decomposition algorithm is designed to search for sub-solutions for sub-FR. After that, the fixture initial design schemes is generated and then using independent Axiom to analyze coupling. To achieve the rapid transformation from fixture scheme design attributes to TRIZ engineering parameters, the associated table between TRIZ engineering parameters and fixture scheme design is built. The fixture scheme decoupling design can be implemented by using TRIZ conflict resolving theories. Finally, the effectiveness and feasibility of this method are verified in a milling fixture scheme design for the aero-engine casing.

Keywords: axiomatic design(AD); TRIZ; machining fixture; configuration design

1 引 言

方案设计是机加夹具设计的关键环节,是夹具设计

理论和大量实践经验相结合的创造性技术劳动^[1],也是后续夹具结构建模的基础。这一阶段的决策将直接决定夹具的最终性能,同时该阶段产生的设计缺陷很难通过后续设计过程弥补。

夹具方案设计是一个知识重用与创新的过程,一方面,夹具方案设计过程中需大量应用已有的设计实例、经验公式、参数数据等各类设计知识;另一方面,在重用已有知识的同时,需要根据新的夹具设计要求对知识进行重新组合及变更修改,使之能满足新的设计要求^[2]。近年来,研究者将多色集合理论^[3]、混合推理技术^[4-5]、可拓集理论^[6]等产品设计理论和技术引入到夹具方案设计领域,但相关研究多集中在夹具方案设计中的个别关键点,没有为夹具方案设计的整个过程提供科学的理论框架及评判标准。

为提高机加夹具方案设计过程的规范化水平,并实现对企业已有夹具资源的有效重用,本文将公理设计(axiomatic design, AD)理论和 TRIZ 理论有效集成,提出了集成 TRIZ 的机加夹具方案公理化设计方法,充分利用 AD 和 TRIZ 理论的优势,为机加夹具方案设计提供一套科学的理论框架,同时对机加夹具初始方案生成、夹具初始方案功能耦合性分析、耦合消解方法及方案评价问题进行了研究。在此基础上,开发了集成 TRIZ 的机加夹具方案公理化设计系统,以机匣铣削夹具方案设计为例进行应用验证。

2 集成 TRIZ 的机加夹具方案公理化设计模型

机加夹具方案设计的主要任务是设计出满足夹具总功能和分功能的结构解,即将夹具的功能需求向夹具结构转化,主要包括如下几方面。

1) 机加夹具功能-结构的分解与映射

机加夹具功能-结构的分解与映射是夹具方案设计的核心,主要涉及两个方面:(1)夹具功能的分解。旨在将抽象的夹具总功能分解为一系列具体的子功能,直至子功能足够容易实现;(2)夹具功能-结构的映射。为夹具的总功能和分功能确定相应的夹具结构,夹具结构可以是已有的夹具资源,也可以是全新设计。

目前在大部分制造企业中,机加夹具的功能-结构分解与映射多由设计者凭借自身的设计经验和知识积累完成,一些优秀的夹具设计结构无法得到有效重用,增加了设计与制造成本。此外,由于缺乏科学的方法论作指导,致使整个功能-结构分解与映射过程规范性较差,从而阻碍了夹具方案设计自动化、智能化水平的提高。

2) 机加夹具方案功能耦合性分析及消解

当零件结构较为复杂时,对应的机加夹具的设计复杂性也将有所提高,此时夹具方案中的功能需求之间通常会产生不必要的干涉(即功能耦合),功能耦合不仅会

影响夹具方案的整体性能,同时也会对后期夹具的优化设计带来不便。因此,有必要在夹具方案设计阶段发现并消解功能耦合问题,以提高夹具的设计质量。当前很多制造企业普遍由夹具设计人员凭借直觉和经验发现并消解功能耦合,缺乏科学的夹具方案功能耦合性分析及耦合消解的公理和方法,进而对夹具设计质量的提高产生不利影响。

3) 夹具方案的评价

在机加夹具功能-结构的分解与映射过程中,若某些功能需求存在多个结构解,对应的夹具方案就不唯一;而在夹具方案进行功能耦合消解时,可能也会有多条解耦思路,从而生成多个夹具方案,此时,就需要对所有夹具方案进行评价,并选出最优的夹具方案。目前较流行的方案评价方法有层次分析法^[7]、模糊综合评价法^[8]等,这些方法对决策者的知识水平和经验依赖程度较高,在一定程度上易影响评价结果的正确性^[9]。

AD 理论将产品设计过程看做是用户域、功能域、物理域和过程域之间自顶向下的多层次分解映射过程,并给出了域间映射的框架和方法^[10-11]。因而可将机加夹具方案设计中的功能需求和夹具结构对应为功能域与物理域中的元素,再结合 AD 理论指导整个机加夹具功能-结构的分解与映射过程。

此外,AD 提供了信息公理和独立公理两个设计公理,信息公理以信息量最少的方案为最佳方案,通过设计范围体现出用户需求和各指标的相对重要性,可避免决策者主观认识对夹具方案评价结果的影响,而独立公理则可为夹具方案设计中的功能耦合提供分析工具,但 AD 理论没有给出具体的解耦方法。

TRIZ 理论中的“设计冲突”和 AD 中的“设计耦合”非常类似,同时 TRIZ 提供了多种解决冲突问题的工具,但 TRIZ 在系统性生成设计方案方面存在不足^[12-15]。基于此,本文将 AD 和 TRIZ 有效集成,构建了集成 TRIZ 的机加夹具方案公理化设计模型,该模型可分为 3 部分:(1)基于 AD 的夹具初始方案的生成及功能耦合性分析。在 AD 框架下重用已有夹具实例进行夹具功能-结构分解与映射,生成夹具初始方案,之后基于 AD 独立公理对夹具初始方案进行耦合性分析,确定存在耦合的夹具功能参数。(2)基于 TRIZ 的夹具初始方案功能耦合消解。将耦合功能转换为 TRIZ 工程参数,运用 TRIZ 解耦工具,结合实际夹具设计知识消解功能耦合问题,实现夹具方案的解耦设计。(3)基于模糊信息公理的夹具方案评价。基于模糊信息公理计算每个解耦设计后符合独立公理的夹具方案的信息量,最终以信息量最少的方案作为最优方案。

3 基于 AD 的机加夹具初始方案生成及功能耦合性分析

3.1 基于 AD 的机加夹具初始方案生成

3.1.1 机加夹具多级实例库构建

机加夹具的结构与工件模型的几何外形以及加工方法紧密相关,一般而言,同类型零件中相同机加工序对应的机加夹具结构具有高度相似性,因此,在机加夹具方案设计过程中,应尽可能应用以前成熟的夹具产品、夹具功能结构和夹具元件,以提高夹具设计效率,减少夹具的设计和制造成本。

为实现对已有夹具设计实例的重用,运用文献[16]提出的设计实例多级分解方法,将企业已有的同类夹具产品实例进行多级分解,构建树状夹具多级实例库,实例库中的实例可表示为:

$$CB = \{F, C, W, P\} \quad (1)$$

式中:CB 为夹具多级实例库中的实例, F 为夹具实例对应的功能属性, C 为夹具实例模型属性, W 为夹具实例的工件属性, P 为夹具实例的工艺属性。

在式(1)中, F 可表示为:

$$F = \{F_g, F_t, F_n, F_d\} \quad (2)$$

式中: F_g 为功能属性等级,分为产品级、功能模块级和元件级; F_t 为功能属性的类型,分为标准、通用和专用3类; F_n 为功能属性的名称; F_d 为功能尺寸。

在式(1)中, C 可表示为:

$$C = \{C_s, C_n, C_m, C_p\} \quad (3)$$

式中: C_s 为夹具实例模型的序列号, C_n 为夹具实例模型的名称; C_m 为夹具实例三维模型,为缩短基于已有夹具实例生成新夹具模型的时间,采用文献[17]提出的夹具主模型建模方法进行夹具实例三维模型的构建; C_p 为实例模型的预览图。

在式(1)中, W 可进一步表示为:

$$W = \{W_t, W_m, W_o, W_h\} \quad (4)$$

式中: W_t 为工件类型,如机匣件、叶盘件、盘环件等; W_m 为工件材料; W_o 为工件生产批量; W_h 为工件热处理状态,如调质、淬火、退火等。

在式(1)中, P 可进一步表示为:

$$P = \{P_1, P_s, P_m, P_f\} \quad (5)$$

式中: P_1 为工序类型,如车、铣、钻等; P_s 为加工阶段,如粗加工、半精加工、精加工等; P_m 为加工设备; P_f 为加工特征,如平面、外圆、内孔等。夹具多级实例库中实例的属性类型如表1所示。

表1 夹具实例属性

Table 1 Properties of fixture case

属性名称	属性类型	属性名称	属性类型		
F	F_g	字符型	W	W_t	字符型
	F_t	字符型		W_m	字符型
	F_n	字符型		W_o	数值型
	F_d	数值型		W_h	字符型
C	C_s	字符型	P	P_1	字符型
	C_n	字符型		P_s	字符型
	C_m	字符型		P_m	字符型
	C_p	字符型		P_f	字符型

3.1.2 机加夹具实例检索

机加夹具实例检索的实质是夹具方案设计需求和夹具实例之间的相似匹配问题,二者之间的匹配程度可以用相似度来表征。

根据夹具实例中各类属性的不同,将夹具实例检索分为两种。

1) 精确检索。用夹具实例的序列号或名称直接检索夹具实例。对应的相似度计算方法为:

$$S = \begin{cases} 1, & V(C_s) = V(C'_s) \text{ 或 } V(C_n) = V(C'_n) \\ 0, & V(C_s) \neq V(C'_s) \text{ 或 } V(C_n) \neq V(C'_n) \end{cases} \quad (6)$$

式中: $V(C_s)$ 和 $V(C_n)$ 分别为实例库中夹具实例的序列号和名称, $V(C'_s)$ 和 $V(C'_n)$ 分别为检索夹具实例时输入的序列号和名称。

2) 模糊综合检索。若设计者不知道目标夹具实例的序列号和名称信息,可进行模糊综合检索。首先分别确定设计需求和夹具实例的功能属性相似度、工件属性相似度和工艺属性相似度,之后求各相似度权重值之和(各属性权重值由自身重要性决定,总和为1^[18]),得到设计需求和设计实例的综合相似度,如式(7)所示,若综合相似度大于预设阈值 ξ ,则该实例可称为设计需求的相似实例,将实例库中所有的相似实例按照综合相似度由大至小排列,最终由设计者根据实际需求选择合适的夹具设计实例作为设计方案的初始解。

$$S = \omega_F \cdot S_F + \omega_W \cdot S_W + \omega_P \cdot S_P \quad (7)$$

式中: ω_F 、 ω_W 和 ω_P 分别为功能属性、工件属性和工艺属性的权重,计算方法参见文献[19]; S_F 、 S_W 和 S_P 分别为功能属性、工件属性和工艺属性的相似度,计算方法如下:

$$S_X = \sum_{i=1}^n (\omega_{X_i} \cdot S_{X_i}) \quad (8)$$

式中: $X \in \{F, W, P\}$; ω_{X_i} 为 S_{X_i} 对应的权值,且有 $\sum_{i=1}^n \omega_{X_i} = 1$;

S_{X_i} 为 X 中第 i 个属性的相似度,根据属性类型的不同,制定对应的计算方法,具体为:

$$S_{X_i} = \begin{cases} 1, & V(X_i) = V(X'_i), \\ 0, & V(X_i) \neq V(X'_i), \end{cases} \quad X_i \text{ 为字符型属性} \quad (9)$$

$$1 - \frac{|V(X_i) - V(X'_i)|}{\max(V(X_i), V(X'_i))}, \quad X_i \text{ 为数值型属性}$$

3.1.3 基于 AD 和夹具多级实例库的机加夹具功能-结构分解与映射

AD 理论中给出了功能-结构逐层分解和映射的基本框架,但并没有给出具体的操作和实现方法^[20],基于此,本文根据机加夹具的设计特点,结合夹具多级实例库及实例检索方法,设计了基于 AD 和夹具多级实例库的机加夹具功能-结构分解与映射算法,具体步骤如下。

1) 确定一级功能需求 FR_1, FR_2, \dots, FR_s , 设定初始功能级 $N=1$, 最大分解层级数 N_{\max} 。

2) 根据 3.1.2 节给出的夹具实例检索算法在夹具多级实例库中搜索与 FR_s 匹配的夹具实例,若有满足要求的实例,则进入步骤 4); 否则进入步骤 3) 进行下一级功能分解。

3) 对 FR_s 进行进一步分解,得到二级功能需求,同时令 $N=2$ 。设 FR_{im} 为第 i 个一级功能需求分解后的第 m 个二级功能需求,根据 FR_{im} 在夹具多级实例库中检索能与之匹配的实例,若有,则进入步骤 4); 否则继续分解 FR_{im} , 同时令 $N=N+1$, 重新在实例库中搜索满足功能需求的实例。

4) 若根据某一 FR 节点从实例库中搜索到满足要求的夹具实例,则将该实例定为该 FR 的初始解 DP , 并保存二者的关联关系。

5) 当所有 FR 节点都找到满足功能需求的实例,或 $N=N_{\max}$ 时,功能分解停止。若在功能分解停止后仍未搜索到 FR 对应的实例,则需要设计人员根据该 FR 定制对应的 DP 。

6) 根据 FR 和 DP 之间的映射关系构建夹具初始设计方程式,形成夹具初始方案。

3.2 夹具初始方案的功能耦合性分析

假定在夹具初始方案中,某一层功能分解中的两个功能需求 FR_i 和 FR_j 对应的夹具结构分别为 DP_i 和 DP_j , 设计方程式为:

$$\begin{cases} FR_i \\ FR_j \end{cases} = \begin{bmatrix} A_{ii} & A_{ij} \\ A_{ji} & A_{jj} \end{bmatrix} \begin{cases} DP_i \\ DP_j \end{cases} \quad (10)$$

根据 AD 独立公理, FR_i 和 FR_j 之间的耦合性可用如下规则确定:

若 $\begin{bmatrix} A_{ii} & A_{ij} \\ A_{ji} & A_{jj} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$, 则 FR_i 和 FR_j 之间存在功

能耦合,此时必须重新设计夹具结构消解功能耦合;

若 $\begin{bmatrix} A_{ii} & A_{ij} \\ A_{ji} & A_{jj} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$ 或 $\begin{bmatrix} A_{ii} & A_{ij} \\ A_{ji} & A_{jj} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$, 则

FR_i 和 FR_j 之间存在功能耦合,此时需重新设计夹具结构或调整设计顺序消解功能耦合;

若 $\begin{bmatrix} A_{ii} & A_{ij} \\ A_{ji} & A_{jj} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$, 则 FR_i 和 FR_j 之间不存在

功能耦合。

4 基于 TRIZ 的夹具初始方案功能耦合消解

运用 TRIZ 解决原理解决夹具初始方案的功能耦合问题,首先需要将夹具方案的设计属性转化为 TRIZ 工程参数,之后确定夹具方案设计中欲改善的参数和恶化的参数,在此基础上从 TRIZ 冲突矩阵中找到解决冲突的发明原理^[21],结合相关夹具设计知识实现夹具方案功能耦合的消解。

4.1 夹具方案设计属性向 TRIZ 工程参数的转化

TRIZ 工程参数是冲突矩阵的重要组成部分^[22],为实现夹具方案设计属性向 TRIZ 工程参数的快速转化,在分析每类夹具方案设计属性特点的基础上,构建了夹具方案设计属性与 TRIZ 工程参数的关联表,如表 2 所示。

表 2 夹具方案设计属性与 TRIZ 工程参数关联表
Table 2 Associated table between TRIZ engineering parameters and fixture scheme design

功能需求	设计属性	TRIZ 工程参数编号
定位要求	定位方向	12, 13, 27, 29, 33, 34, 36
	定位位置	6, 10, 11, 12, 13, 14, 27, 29, 32, 33, 34, 36
夹紧要求	夹紧结构刚性	2, 6, 10, 11, 12, 13, 14, 26, 27
	夹紧力大小	10, 11, 12, 13, 14, 27, 31, 35
夹紧要求	夹紧力方向	13, 14, 26, 27, 31, 33, 36
	夹紧力作用点位置	6, 12, 13, 14, 27, 29, 33, 36
支承要求	支承结构刚性	6, 8, 12, 13, 14, 27,
	支承力大小	4, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 27, 29, 31, 32, 35
支承要求	支承力方向	12, 13, 14, 27
	支承力作用点位置	12, 13, 14, 27, 29, 32, 33, 34

4.2 夹具方案功能耦合消解

基于夹具方案设计属性与 TRIZ 工程参数关联表,运用 TRIZ 冲突矩阵和发明原理消解夹具方案功能耦合,具体步骤为如下。

1) 根据 3.2 节给出的功能耦合性分析方法,确定初始方案中存在冲突的功能参数,明确应改善的功能参数,

并确定被恶化的功能参数。

2) 对照夹具方案设计属性与 TRIZ 工程参数关联表, 结合夹具方案设计知识, 将存在冲突的功能参数转化为 TRIZ 工程参数。

3) 根据确定的 TRIZ 工程参数, 在 TRIZ 冲突矩阵中查找发明原理。分析所得的各个发明原理的可用性, 在确定最终的发明原理之后, 将 TRIZ 原理解转换为夹具方案设计领域解, 实现夹具方案功能耦合的消解, 得到新的夹具方案。

4) 基于 AD 独立公理对新夹具方案进行耦合性分析, 若仍存在功能耦合, 则重复步骤 1) ~ 3), 否则将新夹具方案定为最终夹具方案的备选方案。

5 基于模糊信息公理的机加夹具方案评价

基于信息公理的方案评价方法必须事先知道各评价指标的确切数值, 才能计算对应的信息量, 而在夹具方案评价中通常兼有定量和定性两类评价指标, 其中定性指标由于其评价值的模糊性, 导致其信息量很难精确计算。模糊数学理论可以较好地解决定性描述和定量数值之间的相互转换问题, 基于此, 本文将模糊数学理论应用到信息公理中, 实现对机加夹具方案的评价, 为夹具方案的优选提供依据。

运用 AD 信息公理进行机加夹具方案评价, 首先需要计算各个备选夹具方案的信息量, 最终通过比较, 以信息量最少的方案为最优^[23]。

针对定量的评价指标, 信息量 I 的计算方法为:

$$I = \log_2 \frac{R_s}{R_c} \tag{11}$$

式中: R_s 为系统范围; R_c 表示公共范围, 是系统范围和设计范围的重叠部分, 如图 1 所示。

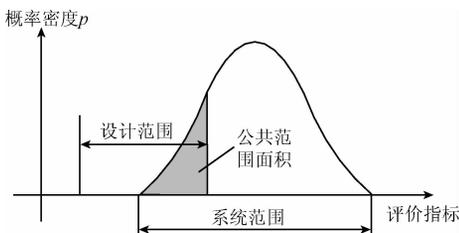


图 1 设计范围、系统范围和公共范围示意图

Fig.1 Design range, system range and common range of functional requirement

针对定性的评价指标, 需要将其等级概念的评价结果 (如好、一般、差等) 转换为定量数值, 在此引入模糊数学理论, 将设计范围的隶属函数曲线所围成的面积定义为模糊设计范围, 系统范围的隶属函数曲线围成的面积

定义为模糊系统范围, 模糊设计范围与模糊系统范围相交的部分定义为模糊公共范围, 则信息量的计算方法为:

$$I = \log_2 \frac{R_{fs}}{R_{fc}} \tag{12}$$

式中: R_{fs} 为模糊系统范围, R_{fc} 表示模糊公共范围。

其中, 隶属函数的选用方法为: 若夹具方案评价指标为一般线性关系, 则可选择三角形或梯形分布等具有线性过渡带的隶属函数分布; 若夹具方案评价指标为非线性关系, 则可选择正态型、岭型、柯西分布等具有非线性过渡带的隶属函数分布^[23-24]。

通过对某航空发动机制造厂进行调研, 确定机加夹具结构的定性评价指标有可加工性、可装配性及通用性。基于以上定性评价指标的特点, 采用梯形分布函数作为夹具定性评价指标的模糊隶属函数, 如图 2 所示, 对应的隶属度 $\mu(x)$ 的计算方法为:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a - a_2 \\ \frac{a_2 + x - a}{a_2 - a_1}, & a - a_2 < x \leq a - a_1 \\ 1, & a - a_1 < x \leq a + a_1 \\ \frac{a_2 - x + a}{a_2 - a_1}, & a + a_1 < x \leq a + a_2 \\ 0, & a + a_2 < x \end{cases} \tag{13}$$

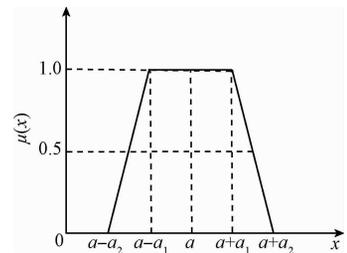


图 2 梯形分布函数

Fig.2 Trapezoidal distribution function

6 实例研究

以上述方法为基础, 本文开发了机加夹具方案设计系统, 以某铣削航空发动机机匣外型面夹具为例, 验证本文所提方法的有效性和实用性。

6.1 铣削机匣外型面夹具初始方案生成及功能耦合性分析

6.1.1 铣削机匣外形面夹具功能需求分析

某航空发动机机匣属于对开机匣, 材料为 TC4, 其外型面分布有大量的岛屿、凸台、安装边、凹槽等特征, 属于典型的大尺寸多特征薄壁结构, 在加工中易变形, 因此, 在设计夹具时, 除基本的夹紧功能和定位功能外, 应提供支承功能。

6.1.2 铣削机匣外型面夹具功能结构分解与映射

根据3.1节提出的夹具初始方案生成算法,构建航空发动机铣削机匣外型面夹具初始方案:首先确定夹具一级功能需求(FR_1 机匣定位, FR_2 机匣夹紧, FR_3 机匣支承),并设定初始功能级($N=1$),最大分解层级数($N_{max}=3$)。之后根据一级功能需求在夹具多级实例库中检索夹具实例,以 FR_2 机匣夹紧功能需求为例说明夹具实例模糊检索过程: FR_2 功能属性与某螺旋夹紧结构实例属性信息如表3所示,根据式(8)可得 $S_F=0.6$ 、 $S_W=0.73$ 、 $S_P=0.88$,再运用式(7)可得该螺旋夹紧结构实例与 FR_2 之间的综合相似度 $S=0.74$ 。假定相似度阈值 $\xi=0.8$,则该螺旋夹紧结构实例不符合 FR_2 的要求,需计算其他夹紧结构实例与 FR_2 的相似度。若有满足 $\xi \geq 0.8$ 的夹具实例,则将其作为 FR_2 的结构解,并建立 FR_2 和该实例之间的映射关系,否则需要对 FR_2 进行下一级分解。

表3 螺旋夹紧结构实例与夹紧功能属性对比

Table 3 Attributes comparison of screw clamping structure case and clamping function

属性	权重	子属性	权重	设计实例	功能需求	S_{X_i}
F	0.35	F_g	0.15	功能模块	功能模块	1
		F_t	0.27	通用夹具	标准夹具	0
		F_n	0.33	底面夹紧	底面夹紧	0
		F_d	0.25	70	63	0.9
W	0.28	W_t	0.38	对开机匣	对开机匣	1
		W_m	0.20	TA19	TC4	0
		W_o	0.31	100	130	0.77
		W_h	0.11	退火	退火	1
P	0.37	P_t	0.46	铣削	铣削	1
		P_s	0.12	粗加工	精加工	0
		P_m	0.16	5轴CNC	5轴CNC	1
		P_f	0.26	外型面	外型面	1

采用同样的方法进行其他夹具功能-结构的分解与映射,最终得到铣削机匣外型面夹具初始方案的功能和结构分别为:

$$\left\{ \begin{matrix} FR_{11} \\ FR_{12} \\ FR_{13} \\ FR_{21} \\ FR_{22} \\ FR_{23} \\ FR_{24} \\ FR_{31} \\ FR_{32} \\ FR_{33} \end{matrix} \right\} = \left\{ \begin{matrix} \text{机匣径向定位} \\ \text{机匣轴向定位} \\ \text{机匣角向定位} \\ \text{提供可靠的夹紧力} \\ \text{夹紧力大小调节} \\ \text{夹紧力方向控制} \\ \text{夹紧力作用点控制} \\ \text{提供可靠的支承力} \\ \text{支承力大小调节} \\ \text{支承力方向控制} \end{matrix} \right\} \quad (14)$$

$$\left\{ \begin{matrix} DP_{11} \\ DP_{12} \\ DP_{13} \\ DP_{21} \\ DP_{22} \\ DP_{23} \\ DP_{24} \\ DP_{31} \\ DP_{32} \\ DP_{33} \end{matrix} \right\} = \left\{ \begin{matrix} \text{环形支承板} \\ \text{短芯轴} \\ \text{定位销} \\ \text{转动标准压板} \\ \text{带肩六角螺母} \\ \text{调节支承} \\ \text{双头螺柱} \\ \text{调节支承} \\ \text{六角薄螺母} \\ \text{支承座} \end{matrix} \right\} \quad (15)$$

对应的夹具初始方案设计矩阵为:

$$\left\{ \begin{matrix} FR_{11} \\ FR_{12} \\ FR_{13} \\ FR_{21} \\ FR_{22} \\ FR_{23} \\ FR_{24} \\ FR_{31} \\ FR_{32} \\ FR_{33} \end{matrix} \right\} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \left\{ \begin{matrix} DP_{11} \\ DP_{12} \\ DP_{13} \\ DP_{21} \\ DP_{22} \\ DP_{23} \\ DP_{24} \\ DP_{31} \\ DP_{32} \\ DP_{33} \end{matrix} \right\} \quad (16)$$

根据3.2节给出的夹具功能耦合性分析方法,可判断出该夹具初始方案中存在 $\{FR_{21}, FR_{22}\}$ 及 $\{FR_{31}, FR_{33}\}$ 两组耦合功能。

6.2 铣削机匣外型面夹具初始方案功能耦合消解

1) FR_{21} 和 FR_{22} 之间的功能耦合消解

FR_{21} (为机匣提供可靠的夹紧力)和 FR_{22} (夹紧力大小调节)之间的耦合原因是:为保证机匣件在铣削过程中不松动,使用带肩六角螺母 (DP_{22}) 施加较大的夹紧力经转动标准压板 (DP_{21}) 作用到机匣夹紧面。但由于机匣属于薄壁件,若施加的夹紧力过大,会导致机匣变形,而若夹紧力过小,则不能保证机匣的切削刚性,这就影响了螺母的可调节范围,也降低了夹具的可操作性。因此 FR_{21} 和 FR_{22} 的冲突可描述为“系统的可靠性提高导致夹紧力的可调性变差”。参照夹具方案设计属性与TRIZ工程参数关联表,将 FR_{21} 对应为 TRIZ 参数 27(可靠性), FR_{22} 对应为 TRIZ 参数 35(适应性及多用性),基于此,系统给出了4条发明原理,分别为 35(参数变化)、13(反向)、8(重量补偿)、24(中介物)。

通过对发明原理进行分析,选择发明原理 24(中介物)和 35(参数变化)指导解耦过程,发明原理 24 提供了一条改进思路:在压板夹紧面增加一层质地较软的尼龙塑料垫片,如图3(a)所示,使夹紧力不直接由压板作用到工件上,可以起到缓冲的作用,提高夹具的可操作性。

改进后的夹紧结构设计方案为:

$$\begin{Bmatrix} DP_{21} \\ DP_{22} \\ DP_{23} \\ DP_{24} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \text{转动标准压板 / 尼龙塑料垫片} \\ \text{带肩六角螺母} \\ \text{调节支承} \\ \text{双头螺柱} \end{Bmatrix} \quad (17)$$

发明原理 35 提供了另一条改进思路:可将原方案中的标准压板改为宽头压板,如图 3(b)所示,增加压板压紧面的面积,从而提高压紧结构的可靠性,减小带肩六角螺母调节压紧力过程时对压紧效果的影响。改进后的夹紧结构设计方案为:

$$\begin{Bmatrix} DP_{21} \\ DP_{22} \\ DP_{23} \\ DP_{24} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \text{转动宽头压板} \\ \text{带肩六角螺母} \\ \text{调节支承} \\ \text{双头螺柱} \end{Bmatrix} \quad (18)$$

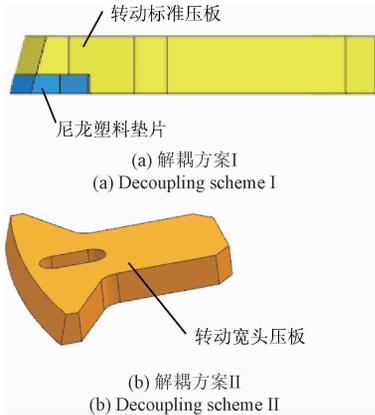


图3 夹紧结构解耦设计方案

Fig. 3 Decoupling design of clamping structure

以上两种压紧结构方案对应的设计矩阵均为对角矩阵,符合 TRIZ 独立性要求,因此,需要分别对两种方案的性能作评价,取最优方案作为最终的夹具方案。

2) FR_{31} 和 FR_{33} 之间的功能耦合消解

FR_{31} (为机匣提供可靠的支承力)和 FR_{33} (支承力方向控制)之间的耦合原因是调节支承既要保证机匣件的切削刚性,使机匣在切削时不变形;又要使支承力方向与支承面法线共线,保证支承的效果,从而提高机匣制造精度。因此,该组冲突可描述为“系统的可靠性提高可能会导致支承精度变差”。参照夹具方案设计属性与 TRIZ 工程参数关联表,将 FR_{31} 对应为 TRIZ 参数 27(可靠性)、 FR_{33} 对应为 TRIZ 参数 29(制造精度),基于此,系统给出了 3 条发明原理,分别为 11(预补偿)、35(改变颜色)和 21(分割)。

通过对发明原理进行分析,选择发明原理 21(分割)指导解耦过程,将原设计方案中的 DP_{31} 调节支承零件分解为刚性支承和调节螺钉,如图 4 所示,对应的,增加一个 FR 节点(支承力作用点位置),则新的夹具功能需求为:

$$\begin{Bmatrix} FR_{31} \\ FR_{32} \\ FR_{33} \\ FR_{34} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \text{提供可靠的支承力} \\ \text{支承力大小可调节} \\ \text{支承力方向控制} \\ \text{支承力作用点控制} \end{Bmatrix} \quad (19)$$

同时,为保证相关部件能正常装配,在原方案中增加导向块。改进后的支承结构设计方案为:

$$\begin{Bmatrix} DP_{31} \\ DP_{32} \\ DP_{33} \\ DP_{34} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \text{刚性支承} \\ \text{调节螺钉} \\ \text{导向块} \\ \text{支承座} \end{Bmatrix} \quad (20)$$

该支承结构方案对应的设计矩阵为对角矩阵,符合 TRIZ 独立性要求,一般而言,若生成的设计方案是唯一的,则无需进行信息量计算,即视该方案为最优。

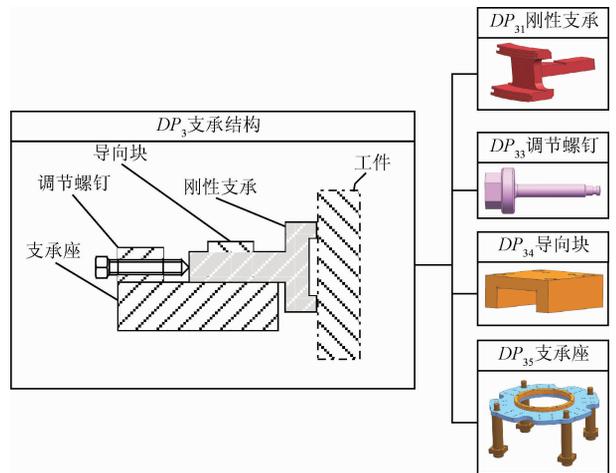


图4 解耦设计后的铣削机匣外型面夹具方案

Fig. 4 Scheme of finish-milling outside profiles of compressor casing after decoupling design

6.3 基于模糊信息公理的铣削机匣外型面夹具方案评价

在对 FR_{21} 和 FR_{22} 进行解耦时产生了两种夹具设计方案:1) DP_{21} 选用转动标准压板 + 垫片;2) DP_{21} 选用转动宽头压板。运用模糊信息公理对这两种方案进行评价。

通过对航空发动机制造厂进行调研,确定铣削机匣外型面夹具结构的评价指标为:装夹精度、可加工性、可装配性、通用性和成本。其中,定量评价指标有装夹精度和成本;定性评价指标有可加工性、可装配性和通用性,分为“好”、“较好”、“一般”、“较差”和“差”5个评价等级。方案 I 和方案 II 对应的每个指标的评价结果如表 4 所示。同时,确定各评价指标的设计范围:装夹精度要求 0.90 以上,可加工性要求一般以上,可装配性要求较好以上,通用性要求较好以上,成本要求 0.95 以下。然后,根据各方案的评价等级确定各指标的模糊系统范围,从而确定出模糊公共范围,最后计算出各方案对各指标的模糊信息量。以可加工性为例,计算两种方案的模糊信息量。如图 5 所示,图中阴影部分是评价值为可加工性

评价值为“较差”时的模糊公共范围,评价为“较差”和“较好”的模糊系统范围均为 $(2 + 4) \times 0.5 = 3$ 。两种方案的信息量分别为:

$$\text{方案 I : } I = \text{Log}_2\left(\frac{3}{3}\right) = 0 \quad (21)$$

$$\text{方案 II : } I = \text{Log}_2\left(\frac{3}{1 \times 0.5 \times 0.5}\right) = 3.5834 \quad (22)$$

其余计算结果如表 5 所示。

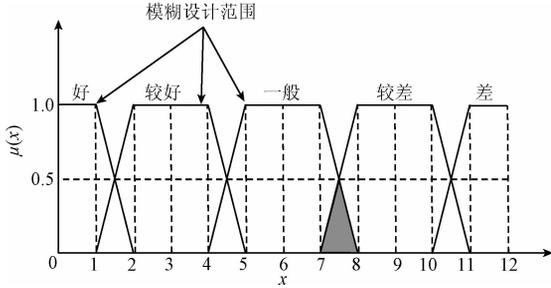


图 5 可加工性隶属函数曲线

Fig.5 Membership functions of clamping of machinability

表 4 机匣铣削夹具设计评价指标及因素集

Table 4 Evaluation indicators of milling fixture for casing

评价指标集	方案 I	方案 II
装夹精度	0.98	0.95
可加工性	较好	较差
可装配性	一般	较好
通用性	好	较差
成本	0.85	0.94

表 5 机匣铣削夹具设计方案评价信息量计算结果

Table 5 Information content of milling fixture for casing

评价指标集	方案 I	方案 II
装夹精度	0.012 7	0.045 1
可加工性	0	3.585 4
可装配性	3.585 4	0
通用性	0	∞
成本	0.024 5	0.091 1
总信息量	3.622 6	∞

由表 4 的计算结果可以看出,方案 I 的信息量比信息 II 更小,因此,根据 AD 信息公理可知,方案 II 为最优设计方案,根据该方案设计的机匣铣削夹具三维结构模型如图 6 所示,该夹具现已成功应用于某航空发动机制造企业的机匣铣削加工中,应用结果表明,该夹具完全满足机匣外型面的铣削加工要求,且综合性能优异。

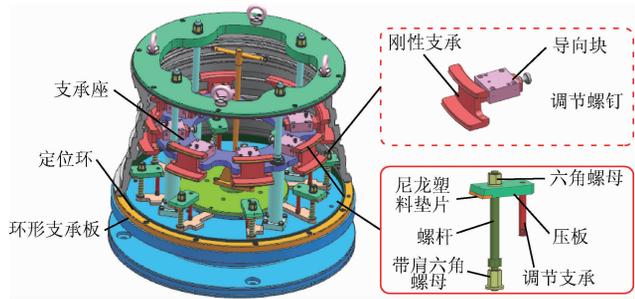


图 6 精铣机匣外型面夹具结构模型

Fig.6 Structure model of finish-milling outside profiles of compressor casing

7 结 论

将公理设计和 TRIZ 有效结合,提出了集成 TRIZ 的机加夹具方案公理化设计方法,为机加夹具方案设计过程提供了一个科学的理论框架,也为夹具方案设计系统的开发提供了理论基础。

给出了机加夹具多级实例库的构建方法,在此基础上设计了基于 AD 和多级实例库的夹具方案生成算法,实现夹具初始方案的快速生成;给出了机加夹具方案功能耦合性判断的方法,通过分析设计矩阵可快速确定存在耦合的功能;建立了夹具方案设计属性与 TRIZ 冲突矩阵 39 个工程参数之间的关联表,便于将夹具方案设计属性快速转化为 TRIZ 工程参数,提高夹具方案的解耦效率;建立了基于模糊信息公理的机加夹具方案评价方法,通过综合评判机加夹具的定性和定量评价指标,为夹具方案的优选提供参考;开发了机加夹具方案设计系统,并以铣削机匣外型面夹具为例验证了本文所提方法的有效性。

参考文献

[1] 杜江,李原,史琦,等. 夹具方案设计的混合推理方法研究 [J]. 西北工业大学学报, 2001, 19 (3): 376-380.
 DU J, LI Y, SHI Q, et al. Configuration design of fixture using hybrid reasoning method [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University. 2001, 19 (3): 376-380.
 [2] 史丰荣,韩华伟,周维华. 焊装夹具方案设计智能化 CAD 技术研究 [J]. 中国工程机械学报, 2010, 8 (2): 248-252.
 SHI F R, HAN H W, ZHOU W H. Intelligent CAD technology for welding fixture conceptualization [J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2010, 8 (2): 248-252.
 [3] 姜莉莉,李德治,周鑫,等. 基于多色集合的连杆清洗夹具概念设计 [J]. 机床与液压, 2013, 41 (7): 131-134.

- JIANG L L, LI D ZH, ZHOU X, et al. Concept design of connecting rod cleaner fixture based on polychromatic sets [J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2013, 41(7): 131-134.
- [4] 秦国华,叶海潮,崔跃,等.面向计算机辅助夹具设计的修訂式定位方案设计算法[J].*计算机集成制造系统*,2012,18(10): 2145-2150.
- QIN G H, YE H CH, CUI Y, et al. Computer aided fixture design oriented modified design algorithm for fixture locating scheme [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2012,18(10): 2145-2150.
- [5] 罗晨,王欣,苏春,等.基于案例推理的夹具设计案例表示与检索[J].*机械工程学报*,2015,51(7): 136-143.
- LUO CH, WANG X, SU CH, et al. Case representation and retrieval under a case-based reasoning system for fixture design[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015,51(7): 136-143.
- [6] 胡茶根,殷国富,曾定洲,等.汽车车身焊接夹具方案设计知识可拓重用模型[J].*四川大学学报:工程科学版*,2014,46(5):195-200.
- HU CH G, YIN G F, ZENG D ZH, et al. Knowledge extension reuse model of scheme design for welding fixture in automobile body [J]. *Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition*, 2014,46(5): 195-200.
- [7] 刘远宏,刘建敏,江鹏程,等.基于改进AHP和模糊评价的装备测试性参数选择[J].*中国测试*,2015,41(7):24-27.
- LIU Y H, LIU J M, JIANG P CH, et al. Selection of equipment testability parameters based on improved AHP and fuzzy evaluation[J]. *China Measurement & Test*, 2015,41(7):24-27.
- [8] 钟群芳,郭长欢,黄建.基于多层模糊评估模型的直升机供电系统综合评估方法[J].*国外电子测量技术*,2015,34(11):27-31.
- ZHONG Q F, GUO CH H, HUANG J. Comprehensive evaluation method of helicopter power supply system based on multi-hierarchy fuzzy evaluation model [J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2015, 34(11): 27-31.
- [9] 朱舟,余绍俊,于勃,等.WSN节点中能量管理方案设计[J].*电子测量与仪器学报*,2015,29(12): 1798-1805.
- ZHU ZH, YU SH J, YU B, et al. Designing solar lithium battery management system in wireless sensor nodes [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2015,29(12):1798-1805.
- [10] LINKE B S, DORNFELD D A. Application of axiomatic design principles to identify more sustainable strategies for grinding [J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2012, 31(4): 412-419.
- [11] BAHADIR M C, SATOULU S I. A novel robot arm selection methodology based on axiomatic design principles [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 71(9):2043-2057.
- [12] 刘晓敏,田松龄,王自伟.基于改进当前实现树的产品技术冲突确定方法[J].*计算机集成制造系统*,2013,19(2): 348-353.
- LIU X M, TIAN S L, WANG Z W. Defining method research of technological conflict based on improved current reality tree [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2013,19(2): 348-353.
- [13] 刘志峰,高洋,胡迪,等.基于TRIZ与实例推理原理的产品绿色创新设计方法[J].*中国机械工程*,2012,23(9):1105-1112.
- LIU ZH F, GAO Y, HU D, et al. Green innovation design method based on TRIZ and CBR principles[J]. *China Mechanical Engineering*, 2012, 23(9): 1105-1112.
- [14] KREMER G O, CHIU M C, LIN C Y, et al. Application of axiomatic design, TRIZ, and mixed integer programming to develop innovative designs: a locomotive ballast arrangement case study [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012, 61(5-8): 827-842.
- [15] CZESLAW C. Application of TRIZ approach to machine vibration condition monitoring problems[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2013, 41(1-2): 328-334.
- [16] 王体春,钟诗胜,王威.基于公理化设计的多级实例知识重用技术研究[J].*计算机集成制造系统*,2008,14(5): 833-841.
- WANG T CH, ZHONG SH SH, WANG W. Knowledge reuse of multi-hierarchy case based on axiomatic design[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2008, 14(5): 833-841.
- [17] 黄斌达,周来水,安鲁陵,等.工序模型驱动的航空发动机零件机加夹具变型设计方法[J].*航空学报*,2017,38(1): 420091-1-420091-15.
- HUANG B D, ZHOU L SH, AN L L, et al. A process-model-driving derivative design method for the machining fixtures of aircraft engine parts[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2017,38(1): 420091-1-420091-15.
- [18] 崔文玲,潘静,何改云,等.基于类心和特征加权的特征选择算法[J].*电子测量技术*,2015,38(3): 26-29.
- CUI W L, PAN J, HE G Y, et al. Class center and feature weighting based feature selection algorithm[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2015, 38(3):26-29.

- [19] 严爱军,钱丽敏,王普. 案例推理属性权重的分配模型比较研究[J]. 自动化学报,2014,40(9):1896-1902.
YAN AI J, QIAN L M, WANG P. A comparative study of attribute weights assignment for case-based reasoning[J]. Acta Automatica Sinica 2014, 40 (9): 1896- 1902.
- [20] 刘晓敏,黄水平,陈智钦,等. 基于TRIZ与AD的海草夹苗机械手概念创新设计及可靠性研究[J]. 机械工程学报,2016,52(5):40-46.
LIU X M, HUANG SH P, CHEN ZH Q, et al. Conceptual innovation design of seaweed planter manipulator based on TRIZ & AD and reliability analysis[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(5):40-46.
- [21] YAN W, ZANNI M C, CAVALLUCCI D, et al. An ontology-based approach for inventive problem solving[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2013, 27(1):175-190.
- [22] 胡旭洁,刘继红. 集成TRIZ的计算机辅助公理化设计系统[J]. 计算机集成制造系统,2010,16(11):2321-2326.
HU X J, LIU J H. Computer-aided axiomatic design system integrating TRIZ [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2010, 16(11):2321-2326.
- [23] 肖人彬,程贤福,廖小平. 基于模糊信息公理的设计方案评价方法及应用[J]. 计算机集成制造系统,2007,13(12):2332-2338.
XIAO R B, CHENG X F, LIAO X P. Evaluation method and its application for design scheme based on fuzzy information axiom [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2007, 13(12):2332-2338.
- [24] 姜万录,杨凯,董克岩,等. 基于CHMM的轴承性能退

化程度综合评估方法研究[J]. 仪器仪表学报,2016,37(9):2014-2021.

JIANG W L, YANG K, DONG K Y, et al. Research on comprehensive evaluation method for bearing performance degradation based on continuous hidden Markov model[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(9):2014-2021.

作者简介



黄斌达,分别在2008年和2011年于南昌航空大学获得学士学位和硕士学位,现为南京航空航天大学博士研究生,主要研究方向为数字化设计与制造。

E-mail:hbd880331@126.com

Huang Binda received his B. Sc. degree and M. Sc. degree both from Nanchang Hangkong university in 2004 and 2011, respectively. Currently, he is a Ph. D. candidate in Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. His main research interests include digital design and manufacturing.



周来水(通讯作者),分别在1986年、1989年和1996年于南京航空航天大学获得学士学位、硕士学位和博士学位,现为南京航空航天大学机电学院教授、博士生导师,主要研究方向为数字化设计与制造技术。

E-mail:zlsme@nuaa.edu.cn

Zhou Laishui (Corresponding author) received his B. Sc. degree, M. Sc. degree and Ph. D. degree all from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 1986, 1989 and 1996, respectively. Currently, he is a professor and Ph. D. supervisor in Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. His main research interests include digital design and manufacturing.