

引文格式: 石双江, 陈文亮, 王子昱. 面向干涉量控制的铆钉智能选配技术研究[J]. 航空制造技术, 2021, 64(10): 74-79, 85.

SHI Shuangjiang, CHEN Wenliang, WANG Ziyu. Research on intelligent matching technology for rivets to control interference[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(10): 74-79, 85.

面向干涉量控制的铆钉智能选配技术研究

石双江, 陈文亮, 王子昱

(南京航空航天大学机电学院, 南京 210016)

[摘要] 干涉铆接是飞机装配的关键工艺之一, 干涉量控制对提高铆接件的疲劳寿命有十分重要的意义。为准确控制干涉量, 首先对铆钉尺寸进行基于视觉的快速测量; 其次, 分别采用传统等公差分配方法与基于果蝇选配方法对铆钉进行分组, 并以匹配成功率和匹配质量作为评价指标进行评价; 最后, 自主研发一套基于果蝇算法的铆钉总窝孔智能选配系统。与传统的等公差带分组相比, 系统匹配成功率从 76.84% 提高到 90.85%, 配对质量从 0.8927 提高到 0.9096。

关键词: 干涉铆接, 铆钉尺寸测量, 智能选配, 果蝇算法

Research on Intelligent Matching Technology for Rivets to Control Interference

SHI Shuangjiang, CHEN Wenliang, WANG Ziyu

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

[ABSTRACT] Interference riveting is one of the key technologies in aircraft assembly. The control of riveting interference is very important to improve the fatigue life of riveted parts. Firstly, in order to control the interference accurately, the rivets were measured quickly based on machine vision. Secondly, the rivets were grouped by the equal tolerance and the group matching based on fruit fly optimization algorithm respectively. The matching rate and matching quality were used as evaluation indexes. Finally, an intelligent matching system for rivet and countersink based on fruit fly optimization algorithm was developed. Compared with the traditional equal tolerance zone grouping, the matching rate of the system is improved from 76.84% to 90.85%, and the matching quality of the system is improved from 0.8927 to 0.9096.

Keywords: Interference riveting; Rivet measurement; Intelligent matching; Fruit fly optimization algorithm

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2021.10.074

飞行过程中飞机发生的强度问题 80% 以上是由疲劳破坏造成的, 而疲劳破坏多发生于铆接件的连接处, 因此飞机铆接件的疲劳寿命在一定程度上决定飞机整体结构的疲劳寿命^[1]。铆钉连接是飞机结构连接的重要形式之一, 干涉铆接作为一种提高疲劳寿命的连接方式, 与普通铆接相比疲劳寿命可提高 2~9 倍^[2]。田冬凤等^[3]在研究影响铆接结构抗疲劳强度工艺的基础上, 分析墩头高度对干涉量、受力均匀性及孔周应力的影响, 进一步讨论墩头高度对铆接结构抗疲劳性的影响。陈

允全等^[4]通过试验研究钛合金结构的干涉配合铆接对疲劳性能的影响, 得出干涉铆接能降低铆接件周边的应力, 提高连接件的疲劳寿命, 此外, 发现钉孔间隙对疲劳寿命有较大的影响。方俊等^[5]提出对钛合金结构件采用干涉铆接工艺的方法, 通过普通锤铆试验, 研究不同直径铆钉的外伸量和钉孔间隙等工艺参数与干涉量的关系, 并得出控制理想干涉量的最佳钉孔间隙和铆钉外伸量。Jiang 等^[6]提出通过选择钉杆长度和压铆力来控制干涉量的方法, 并通过试验进行验证。符文科等^[7]在

分析普通铆接不足之处的基础上,设计一套钛合金铆接的专用夹具,解决铆钉杆偏移、墩头形状尺寸不合格和干涉量不均匀等问题,提高干涉铆接的质量。

由上文可知,铆钉和铆窝孔配合精度是准确控制干涉量的前提,而目前铆钉和铆窝孔的尺寸测量多数采用人工抽检的方式,其测量效率低,易受人的主观影响,难以达到测量精度要求。为提高铆钉测量的精度和效率,马鑫晟等^[8]研制了一套基于机器视觉的铆钉外形尺寸测量系统,利用 LabVIEW 完成图像处理工作,实现数据的同步保存、数据分析和报表等功能。郭全民等^[9]使用机器视觉对铆钉进行测量,采用改进的最大类间方差法(OTSU)、Blob 分析和轮廓跟踪等算法提高铆钉的测量精度和降低误检率。丁力平^[10]在对 CCD 相机的采集图像清晰度分析的基础上,提出一种适合不同类型铆钉尺寸测量的自动调焦方法。

在保证铆钉尺寸测量精度的基础上,通过控制钉孔间隙,可以使铆接的干涉量处在最佳范围内。而控制钉孔间隙,需要根据铆窝孔直径合理地选择相应直径的铆钉。在研究钉孔选配问题的基础上,提出基于果蝇算法的铆钉自动分组方法,通过测量获得铆窝孔尺寸,采用智能选配方法,对铆钉进行合理的分组,减少铆接时铆钉选择的工作量,最大限度满足铆钉和铆窝孔的间隙处在理想的范围内,使铆接后的干涉量满足工艺要求。同时,研制一套能够自动调焦的柔性化铆钉尺寸快速测量系统。

1 基于视觉的铆钉尺寸快速测量方法

1.1 铆钉尺寸快速测量系统工作原理

铆钉尺寸快速测量系统的工作原理如下:首先选择待测铆钉的型号,启动系统开始测量,步进电机调整 CCD 相机到合适的位置,同时振动盘开始启动上料,铆钉经过振动盘和直振器后以一定的排列方式输送到测量平台上。

光纤传感器感应到铆钉,发出信号使相机进行拍照,图像信息发送至图像采集卡,图像采集卡将图像信息转换为数字信号发送至工控机,事先编写好的软件对图像进行处理和判断,将不合格的铆钉送入废品类,合格的铆钉按公差进行二次分类。工控机的显示屏实时显示测量的结果。铆钉尺寸快速测量系统工作流程如图 1 所示。

1.2 铆钉轮廓特征提取

图像传感器在采集的过程中,由于受到传感器本身的属性、电路结构和外部工作环境的影响,会造成各种噪声,如高斯噪声和均值噪声等。而在图像处理中,需要根据噪声的特征和边缘特点等,选择合适的滤波算法,常用的滤波算法有均值滤波、中值滤波和高斯滤波。

中值滤波对噪声有良好的滤除作用,优点是在滤除图像噪声的同时,不影响图像的边缘信息,使图像不会变得模糊,所以选择中值滤波作为滤波方法。此外,中值滤波的算法较为简单,易于通过硬件实现。中值滤波的公式如式(1)所示。

$$g(x, y) = \text{median}_{(i, j) \in W} \hat{g}(x_i, y_j) \quad (1)$$

式中, $\hat{g}(x_i, y_j)$ 为原图灰度值, i, j 分别为扫描窗口像素点位置; W 为扫描窗口; median 为取中值操作。

图像二值化在数字图像处理中占有突出的地位。图像二值化是将图像中像素点的灰度值设置为 255 或 0,将图像转化为仍能够反映目标整体与细节特征的黑白二值图的过程。最大类间方差法(OTSU)是常用的图像二值化处理方法。OTSU 法的基本思想是先根据一个初始的阈值,将图像暂时分为两类,计算两类图像之间的方差,依据所得方差更新阈值后,依据所得的阈值再将图像分为两类,重新计算两类之间的方差,如此往复直到该方差变为最大,即认为此时的阈值为最佳阈值。其基本公式如式(2)所示。

$$\mu_A = \frac{1}{N_A} \sum_{(i, j) \in A} f(i, j) \quad (2)$$

$$\mu_B = \frac{1}{N_B} \sum_{(i, j) \in B} f(i, j) \mu_A \quad (3)$$

$$\sigma(Th) = N_A(Th)N_B(Th)[\mu_A(Th) - \mu_B(Th)]^2 \quad (4)$$

式中, μ_A 和 μ_B 为图像 A 和图像 B 的像素平均值, N_A 和 N_B 为图像 A 和图像 B 中像素个数, $f(i, j)$ 为图像表达式, σ 为图像类间方差, Th 为二值化阈值。

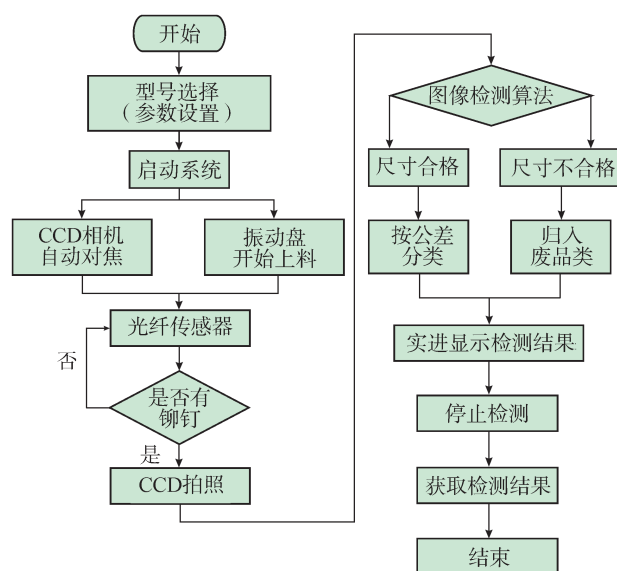


图1 铆钉尺寸快速测量系统流程图

Fig.1 Flow chart of quick measurement for rivet

在飞机铆钉尺寸快速测量过程中,需要将铆钉轮廓特征提取出来,减少图像处理的数据量,并在轮廓的基础上进行尺寸测量。常用的边缘提取算子有 Roberts 算子、Sobel 算子、Prewitt 算子、Lapacian 算子和 Canny 算子。Canny 算子在一阶微分算子上改进后,提高边缘的定位精度,减少漏检率,边缘较为连续。比较后采用 Canny 算子对图像进行边缘提取, Canny 算子效果图如图 2 所示。

最终铆钉尺寸自动测量算法流程图如图 3 所示,铆钉图像信息在传递到工控机上后,经过中值滤波消除噪声、OTSU 二值化使铆钉对象更明显、Canny 算子提取边缘特征后,再对提取的边缘特征进行尺寸测量,最后得到铆钉的钉杆直径、钉帽直径、钉帽高度和铆钉长度参数,之后依据装配需要,选择相应的参数对铆钉进行分类。

1.3 铆钉尺寸快速测量平台搭建

按照前文的铆钉尺寸快速测量系统的工作原理对飞机铆钉尺寸快速测量设备进行硬件结构设计,设计的结构如图 4 所示。飞机铆钉尺寸自动测量设备由铆钉自动上料模块、旋转测量平台、图像测量模块和自动分拣模块组成。铆钉通过自动上料模块被传送到玻璃盘组成的运动测量平台上,运动测量平台将铆钉移动到各个测量位置,图像测量模块判断铆钉是否合格,若铆钉

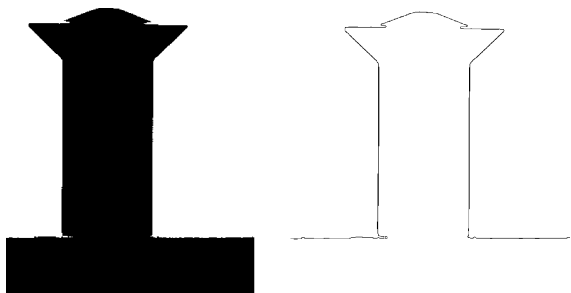


图2 铆钉轮廓提取
Fig.2 Extraction of rivet contour

合格则对其进行二次分类,再将铆钉移动到对应的料仓口,通过气嘴吹气将铆钉送入料仓。

自动上料模块由振动盘和直振器组成。设定振动盘控制器的电压和频率,振动盘以一定的频率和振幅振动,盘内底部的铆钉受到振动沿螺旋轨道上升,上升过程中经过筛选和调整,铆钉能有序地排列,输出到直振器。直振器通过振动使铆钉向前运动到运动测量平台上,铆钉在测量平台上经由纠偏装置,以正确的位置运动到相机前方进行拍照测量。

运动测量平台由玻璃盘和伺服电机组成。伺服电机驱动玻璃盘转动,伺服电机受工控机控制转速,能够更加准确和平稳地运行,结合自动上料模块,调节设备的测量速度,配合铆钉的生产节拍。玻璃盘下装有 6 个调整高度的旋钮,方便调整玻璃盘的水平度,提高铆钉尺寸的测量精度。

图像测量模块由电缸和相机组成,在选择型号后,工业相机运动到预设的工作位置,保证铆钉出现在画面中央,图像清晰。当铆钉运动经过光纤传感器时,光纤传感器发送信号给工控机,触发相机拍照,拍照所得的图像信息经由网线传输给图像采集卡,工控机通过图像算法计算出铆钉的直径、高度、钉帽的高度、钉帽的直径等参数,依据合格铆钉的参数范围,判断铆钉是否合格,合格的铆钉按照钉身直径再次分类。

自动分拣模块由气泵、过滤调压阀、电磁阀、气嘴等组成。气泵输气经由过滤调压阀,调整气压并滤去气体中的杂质和水汽。依据图像测量模块对铆钉的分类,电磁阀控制气嘴吹气的时间点,将铆钉吹到不合格或是各公差段的料仓内,实现铆钉正废品等类别的分类。

2 基于果蝇算法的铆钉镗窝孔智能选配技术

2.1 铆钉镗窝孔智能选配系统工作原理

基于果蝇算法的铆钉镗窝孔智能选配系统的工作原理如下:首先制定当前的生产任务,开始镗窝制孔,制



图3 铆钉尺寸自动测量算法流程
Fig.3 Process of rivet automatic detection algorithm

孔完成后对孔径进行测量。在已有的铆钉数据库里,选择相应类型和规格的铆钉,生成选配任务。根据铆窝制孔孔径的分布,对孔径分组的组数和上下限偏差进行计算,计算后判断铆钉的库存是否充足。若缺少铆钉,则自动生成相应铆钉的清单,补充铆钉;若铆钉库存充足,则生成分组选配的的方案,结束选配。铆钉铆窝孔智能选配系统流程如图5所示。

2.2 基于果蝇算法的铆钉选配

铆钉铆窝孔装配过程需要考虑两个目标:一个是装配质量 Q ,另一个是装配成功率 N ,在分组过程中需要使这两个目标值尽可能提高。若将铆钉分组匹配方案

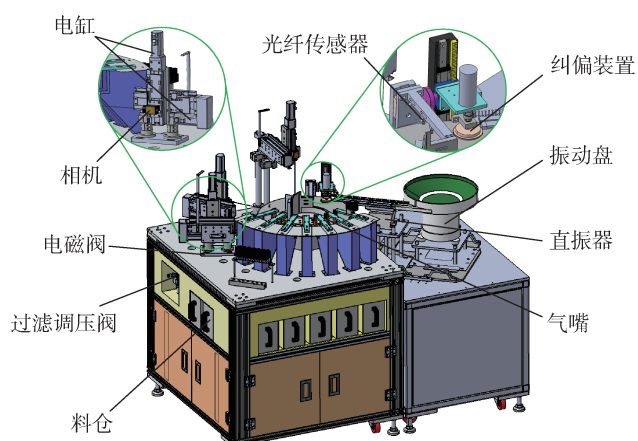


图4 飞机铆钉尺寸快速测量设备硬件结构

Fig.4 Hardware structure of fast measuring equipment for aircraft rivet

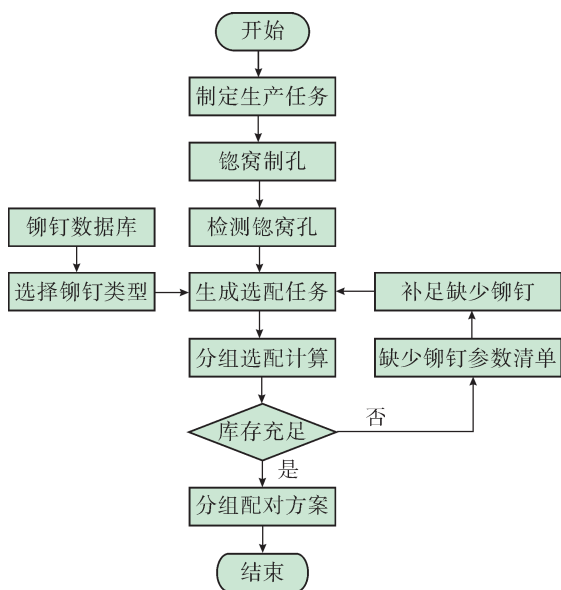


图5 铆钉铆窝孔智能选配系统流程

Fig.5 Flow chart of intelligent matching system for rivet and countersink

记为 S ,目标函数记为 F ,则铆钉分组选配的目标函数公式为:

$$\max F(S) = [Q(S), N(S)] \quad (5)$$

式中, $F(S)$ 为优化目标, $Q(S)$ 为装配质量函数, $N(S)$ 为装配成功率函数。依据田口损失质量模型,估算由于单个铆钉铆窝孔的配合误差导致的质量损失的适应度函数如式(6)所示。

$$q(y) = \begin{cases} 1 - \frac{1-\lambda}{T^2[\max(\alpha, \beta)]} (y-O)^2, & y \in [O-\alpha T, O+\beta T] \\ 0, & y \in (-\infty, O-\alpha T) \cup (O+\beta T, +\infty) \end{cases} \quad (6)$$

式中, λ 表示铆钉铆窝孔的实际装配公差落在装配精度要求的上下限时的接受程度, T 表示装配要求的公差带大小, α 和 β 是大于 0, 和为 1 的系数, y 表示实际装配时铆钉铆窝孔的装配公差, O 为装配的理想公差值。在对单组铆钉铆窝孔配对的基础上,对生产任务中全部铆窝孔进行配对,并对配对结果进行综合评价。将全部铆钉铆窝孔匹配简化成单组铆钉铆窝孔配对关系,再通过累加定义该批选配方案 S 的装配质量 Q :

$$Q(S) = \sum [\omega \cdot q(y)] \quad (7)$$

式中, ω 为每对零件的权值。为充分利用库存中的飞机铆钉,尽可能与所有的铆窝孔配对,减少装配过程中剩余的铆钉数量,采用装配成功率公式(式8)得到选配成功率:

$$N(S) = \frac{n_1}{n} \cdot 100\% \quad (8)$$

式中, n_1 为已经配对的零件个数, n 为库存零件的总个数。铆钉和铆窝孔的选配过程,实际上是求解目标函数最大值的过程,可以采用优化算法对其求解。果蝇优化算法是一种基于果蝇寻找食物的行为演变出全局寻优的方法^[11],该算法具有计算量小和易于实现的优点,所以比较适合解决工业生产中的问题。

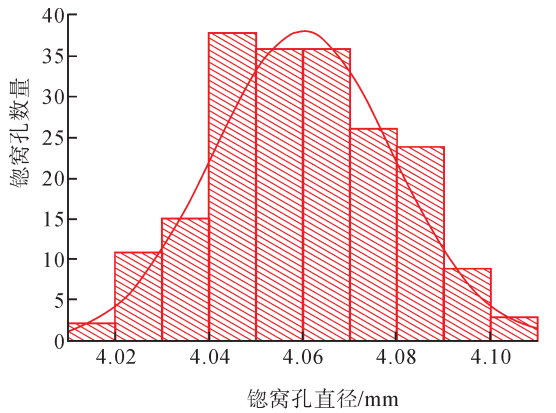
现在以一批铆窝孔和铆钉为例,根据铆窝孔直径对铆钉进行分组选配,以提高铆钉铆窝孔装配质量。铆窝孔和飞机铆钉的尺寸分布如图6所示。

依据铆窝孔的尺寸分布,使用果蝇算法对铆钉尺寸的分组进行寻优计算,配对质量全局寻优图和果蝇觅食路线如图7所示。从图中可以看到果蝇算法收敛速度快,在迭代 89 次后便收敛,并取得较好的配对质量。

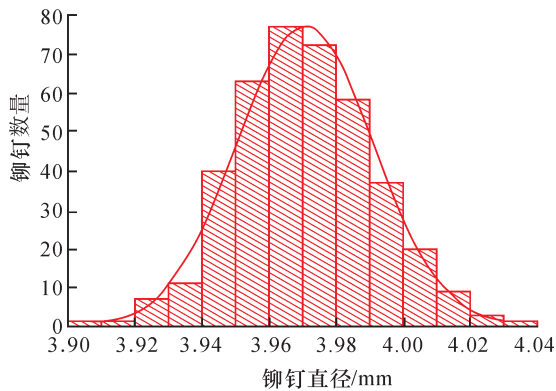
通过测量加工完成的铆窝孔,对铆钉分别采用传统的等公差宽度分组和果蝇算法分组。各组的分组情况如表1所示。将分组后的铆钉和铆窝孔进行配对,计算匹配的成功率和配对质量。通过使用果蝇算法将匹配的成功率从 76.84% 提高到 90.85%,配对质量从 0.8927 提高到 0.9096。

2.3 铆钉铤窝孔选配系统搭建

为实现铆钉铤窝孔自动选配的功能,本文设计开发一套铆钉铤窝孔选配系统,该系统分为界面层、算法层、数据层3大部分,如图8所示。



(a) 铤窝孔尺寸分布



(b) 铆钉尺寸分布

图6 铤窝孔和飞机铆钉的尺寸分布

Fig.6 Distribution of countersink and aircraft rivets

数据层是整个铆钉铤窝孔选配系统的根基,包含选配系统运行中需要的各种数据,即铆钉的库存、铤窝孔参数、装配工艺要求和装配历史方案等。

算法是整个系统的核心部分,整个系统的搭建、实现和运行都是围绕着算法层来实现的,算法层包括铆钉铤窝孔的数据输入、选配任务的输入、针对工艺要求的分组选配的参数设定、基于果蝇算法的分组选配、分组方案的输出等。

界面层是用户和选配系统实现交互的应用窗口,用户对系统的各种操作都必须在界面上实现。用户可以在界面制定生产任务,依据不同类型的铤窝孔选择合适的铆钉型号,根据装配工艺要求设置分组选配的参数,进行分组选配的运算,记录分组选配的结果等。

铆钉铤窝孔选配系统的界面如图9所示,界面分为4个部分:零件信息尺寸界面、工艺参数设置界面、选配参数界面和选配结果界面。零件信息尺寸界面可以显

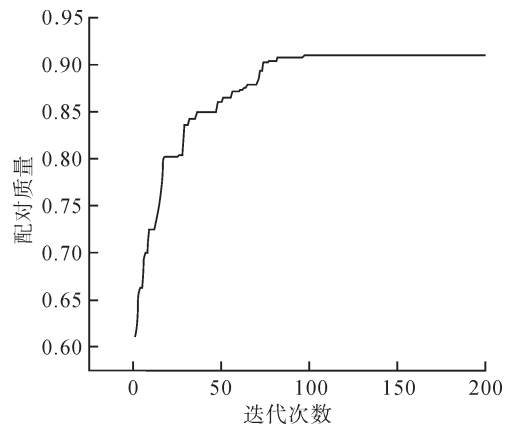


图7 果蝇算法迭代过程

Fig.7 Iterative process of fruit fly optimization algorithm

表1 等公差分组与果蝇算法分组数据对比

Table 1 Comparison of equal tolerance zone grouping and grouping based on fruit fly optimization algorithm

名称	等公差宽度分组		果蝇算法分组	
	铆钉直径/mm	铤窝孔的通孔直径/mm	铆钉直径/mm	铤窝孔的通孔直径/mm
第1组	[3.930,3.950]	[4.010,4.030]	[3.930,3.952]	[4.015,4.030]
第2组	[3.950,3.970]	[4.030,4.050]	[3.952,3.984]	[4.030,4.062]
第3组	[3.970,3.990]	[4.050,4.070]	[3.984,4.005]	[4.062,4.084]
第4组	[3.990,4.010]	[4.070,4.090]	[4.005,4.023]	[4.084,4.100]
第5组	[4.010,4.030]	[4.090,4.110]	[4.023,4.030]	[4.100,4.110]
成功率/%	76.84		90.85	
配对质量	0.8927		0.9096	

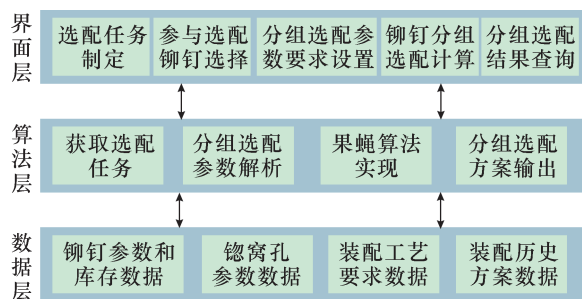
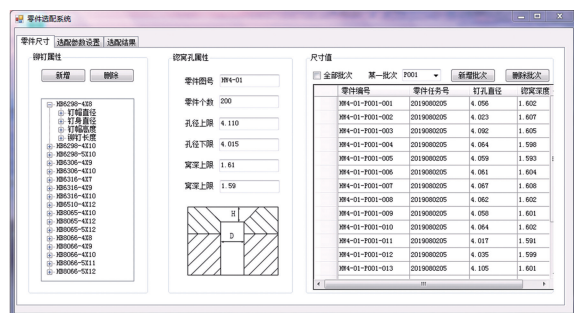


图8 铆钉铆窝孔选配系统框架

Fig.8 Framework of matching system for rivet and countersink



(a) 铆钉选择界面



(b) 选配结果界面

图9 铆钉铆窝孔选配系统界面

Fig.9 Interface of matching system for rivet and countersink

示各类型铆钉的尺寸参数信息和铆窝孔信息,可以对零件的类型进行添加和删除;工艺参数设置界面对钉孔间隙的最佳取值范围和理想值进行设定;选配参数界面是对选配算法的相关参数进行设置,包括种群数目、配对质量和成功率要求;选配结果界面显示各分组的上下限值、配对质量和成功率。

3 结论

(1)为提高干涉量控制的准确度,本文从铆钉尺寸快速测量入手,通过机器视觉的方法,快速测量铆钉的尺寸参数,提高铆钉测量工作的效率和精度。

(2)提出基于果蝇算法的铆钉铆窝孔选配技术,通过测量到的铆钉和铆窝孔尺寸数据,对铆钉进行分

组。试验结果表明,与传统的分组方法相比,配对成功率从 76.84% 提升到 90.85%,配对质量从 0.8927 提高到 0.9096。

(3)设计开发铆钉铆窝孔选配系统,该系统操作方式简单,运行速度快,选配的成功率和匹配质量高,具有很好的应用前景。

参考文献

[1] 范玉青. 飞机数字化装配——飞机数字化装配技术综述: 飞机制造的一次革命性变革[J]. 航空制造技术, 2006, 49(10): 42-48.

FAN Yuqing. An overview of aircraft digital assembly technology: A revolutionary revolution in aircraft manufacturing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2006, 49(10): 42-48.

[2] 杨亚文, 李永策, 段宝. 干涉铆接及其新的成形方法[J]. 沈阳航空工业学院学报, 1999, 16(4): 19-22.

YANG Yawen, LI Yongce, DUAN Bao. Intervening concerted riveting and a new riveting method[J]. Journal of Shenyang Institute of Aeronautical Engineering, 1999, 16(4): 19-22.

[3] 田东风, 韦红余, 陈文亮, 等. 铆接结构抗疲劳性的工艺影响分析[J]. 机械科学与技术, 2013, 32(9): 1332-1336.

TIAN Dongfeng, WEI Hongyu, CHEN Wenliang, et al. Effect of riveting process on fatigue resistance for riveted structure[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2013, 32(9): 1332-1336.

[4] 陈允全, 曹增强, 秦龙刚, 等. 钛合金结构干涉配合铆接疲劳试验研究[J]. 航空制造技术, 2017, 60(4): 83-86.

CHEN Yunquan, CAO Zengqiang, QIN Longgang, et al. Research on fatigue experimental of interference fit riveting of titanium alloy structure[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(4):83-86.

[5] 方俊, 曹增强, 陈允全, 等. 钛合金结构干涉配合铆接工艺研究[J]. 航空制造技术, 2015, 58(10): 66-69, 78.

FANG Jun, CAO Zengqiang, CHEN Yunquan, et al. Study on interference-fit riveting process on titanium alloy structure[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(10): 66-69, 78.

[6] JIANG L P, CHEN W L, WANG M, et al. Approach to interference riveting process control of aircraft automatic drilling and riveting[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014, 31(6): 609-614.

[7] 符文科, 马贵春, 王迎. 基于墩头轮廓钛合金铆接夹具的优化设计[J]. 航空制造技术, 2017, 60(6): 105-109.

FU Wenke, MA Guichun, WANG Ying. Optimal design of titanium alloy riveting fixture based on heading outline[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(6): 105-109.

(下转第85页)

参考文献

- [1] 何金梅, 郑榜伟, 关明强. 特种加工技术及其在我国航空发动机制造中的应用[J]. 航空制造技术, 2015, 58(15): 77-79, 82.
- HE Jinmei, ZHENG Bangwei, GUAN Mingqiang. Special machining technology and its application in aeroengine manufacturing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(15): 77-79, 82.
- [2] 于冰. 面向航空制造的电加工技术应用与发展[J]. 航空制造技术, 2015, 58(11): 49-52.
- YU Bing. Application and development of electric machining technology of aeronautical manufacturing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(11): 49-52.
- [3] 刘晓萌, 白基成. 微细电火花加工放电状态特性及其识别方法[J]. 航空制造技术, 2017, 60(14): 37-43.
- LIU Xiaomeng, BAI Jicheng. Characteristics of micro EDM discharge state and its identification method[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(14): 37-43.
- [4] 连芬, 唐一平, 卢秉恒. 电火花加工间隙状态的鉴别与检测方法[J]. 电加工与模具, 2000(2): 10-13.
- LIAN Qin, TANG Yiping, LU Bingheng. Identification and detection of gap state in EDM[J]. Electromachining & Mould, 2000(2): 10-13.
- [5] 周明. 微细电火花加工放电状态辨识与预测的理论和方法[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.
- ZHOU Ming. The methodology of discharging-state identification in micro electrical discharging machining (micro-EDM)[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006.
- [6] HAN F Z, WACHI S, KUNIEDA M. Improvement of machining characteristics of micro-EDM using transistor type isopulse generator and servo feed control[J]. Precision Engineering, 2004, 28(4): 378-385.
- [7] ASAD A B M A, ISLAM M T, MASAKI T, et al. Analysis of micro-EDM electric characteristics employing plasma property[J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2018, 20: 36-50.
- [8] LI Z K, BAI J C. Impulse discharge method to investigate the influence of gap width on discharge characteristics in micro-EDM[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 90(5-8): 1769-1777.
- [9] 李淑娟, 辛彬, 杨宇祥, 等. 放电加工极间等离子体伏安特性与间距建模研究[J]. 机械工程学报, 2019, 55(5): 232-240.
- LI Shujuan, XIN Bin, YANG Yuxiang, et al. Investigation of plasma volt-ampere characteristics and gap modeling of EDM[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(5): 232-240.
- [10] KOU Z J, HAN F Z. Machining mechanisms and characteristics of moving electric arcs in high-speed EDM milling[J]. Procedia CIRP, 2018, 68: 286-291.
- [11] MASUZAWA T, SATA T. The occurring mechanism of the continuous arc in micro-energy EDM by RC circuit[J]. Journal of the Japan Society of Electrical Machining Engineers, 1971, 5(9): 35-52.
- [12] FAN Y S, BAI J C. Study on volt-ampere characteristics of spark discharge for transistor resistor pulse power of EDM[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 96(9-12): 3019-3031.
- [13] 李政凯, 白基成, 凡银生, 等. 电火花线切割节能脉冲电源放电间隙特性研究[J]. 电加工与模具, 2013(6): 41-45.
- LI Zhengkai, BAI Jicheng, FAN Yinsheng, et al. Research on discharge gap characteristics of energy-saving pulse generator of WEDM[J]. Electromachining & Mould, 2013(6): 41-45.
- [14] 菅井秀郎. 等离子体电子工程学[M]. 张海波, 张丹, 译. 北京: 科学出版社, 2002.
- Sugai Hideo. Plasma electronic engineering[M]. ZHANG Haibo, ZHANG Dan, trans. Beijing: Science Press, 2002.

通讯作者: 白基成, 教授, 研究方向为特种加工工艺及装备、微细加工工艺及装备, E-mail: jichengbai@hit.edu.cn.

(责编 古系)

(上接第79页)

- [8] 马鑫晟, 程帅, 翟程远, 等. 基于 LabVIEW 的铆钉外形尺寸检测系统设计[J]. 工业控制计算机, 2011, 24(11): 83-84.
- MA Xinsheng, CHENG Shuai, ZHAI Chengyuan, et al. Design of detect system for rivet dimensions based on LabVIEW[J]. Industrial Control Computer, 2011, 24(11): 83-84.
- [9] 郭全民, 胡辉. 基于机器视觉的多铆钉自动检测算法研究[J]. 传感器与微系统, 2013, 32(4): 48-50, 53.
- GUO Quanmin, HU Hui. Research of automatic detection algorithm for multi-rivets based on machine vision[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2013, 32(4): 48-50, 53.
- [10] 丁力平. 一种航空铆钉自动检测系统研制[J]. 航空制造技术, 2017, 60(21): 50-55.
- DING Liping. Development of an automatic detection system for aeronautic rivets[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(21): 50-55.
- [11] PAN W T. A new fruit fly optimization algorithm: Taking the financial distress model as an example[J]. Knowledge-Based Systems, 2012, 26(2): 69-74.
- 通讯作者: 陈文亮, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为高效数控加工、板料成形 CAE 软件开发、数字化飞机装配技术等, E-mail: cwlme@nuaa.edu.cn.

(责编 古系)