

# 基于 ELM 的航空制孔机器人定位精度补偿方法

薛 雷<sup>1</sup>, 李汝鹏<sup>1</sup>, 周庆慧<sup>1</sup>, 汤海洋<sup>1</sup>, 方 伟<sup>1</sup>, 陈冬冬<sup>2</sup>, 袁培江<sup>2</sup>

(1. 上海飞机制造有限公司, 上海 200436;

2. 北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 北京 100191)

**[摘要]** 针对航空制孔机器人绝对定位精度补偿中存在的建模复杂及运算量大的问题, 提出了一种基于极限学习机的绝对定位精度补偿方法。该方法通过将机器人视为一个黑箱系统, 忽略机器人的几何因素和非几何因素的影响, 通过高精度的激光跟踪仪测量获得机器人的末端运动误差, 采用极限学习机建立机器人误差预测模型。由机器人误差预测模型获得机器人在期望位置的位置偏差, 通过修正机器人位置坐标来实现机器人的绝对定位精度补偿。最后该方法在航空制孔机器人上进行了试验, 试验结果显示机器人的绝对位置误差的平均值和最大值分别降低了 75.69% 和 78.16%。

**关键词:** 定位精度补偿; ELM; 航空制孔机器人

## A Calibration and Compensation Method Based on ELM for Aviation Drilling Robot

XUE Lei<sup>1</sup>, LI Rupeng<sup>1</sup>, ZHOU Qinghui<sup>1</sup>, TANG Haiyang<sup>1</sup>, FANG Wei<sup>1</sup>, CHEN Dongdong<sup>2</sup>, YUAN Peijiang<sup>2</sup>

(1. Shanghai Aircraft Manufacturing Co., Ltd., Shanghai 200436, China;

2. School of Mechanical Engineering & Automation, Beihang University, Beijing 100191, China)

**[ABSTRACT]** In order to solve the problems that modeling was complex and a large computation was costed for calibration and compensation of aviation drilling robot, a calibration and compensation method based on extreme learning machine was proposed. The aviation drilling robot was regarded as a black-box system in this method which ignored the influence of geometric factors and non-geometric factors of robot. Then, according to robot positional errors measured by a high-accuracy laser tracker, a robot error prediction model based on extreme learning machine was trained and established. Next, the positional error in desired position could be predicted by robot error prediction model and the robot position was compensated to achieve the robot calibration. Final, experimental studies were carried on an aviation drilling robot. The experimental results showed that the mean and maximum positional error of robot was reduced by 75.69% and 78.16%, respectively.

**Keywords:** Calibration and compensation; ELM; Aviation drilling robot

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2017.22.091

航空制孔机器人作为现代飞机装配过程中非常重要的一种自动化设备, 与手工制孔以及传统的制孔设备相比, 能够有效地消除人为误差, 同时其灵活性和效率都有了很大的提升<sup>[1-2]</sup>。飞机的体积较大, 各个零部件分别加工, 而零部件之间主要通过机械连接进行装配<sup>[3]</sup>。目前的飞机装配的高精度化, 对制孔机器人的定位精度也提出了极高的要求, 一般精度需要达到  $\pm 0.5\text{mm}$ , 而一些重要零部件对位置精度要求更高。而作为制孔机器人末端执行器的载体, 工业机器人的移动定位精度决定了整个制孔机器人系统的定位精度。一般的工业机器人的重复定位精度可达  $\pm 0.06\text{mm}$ , 但是绝对定位精度可能仅有 1~3mm, 距离制孔机器人的定位精度要求还有较

大的差距。因此, 机器人定位精度补偿技术是航空制孔机器人自动化制孔技术中的一项关键技术。

目前, 机器人绝对定位补偿主要采用对机器人运动学参数进行识别修正的方法, 以此提高机器人的绝对定位精度<sup>[4]</sup>。这种方法首先对机器人进行运动学建模, 借助高精度测量设备进行机器人的误差测量, 接着对机器人的运动学模型进行参数识别, 最后进行误差补偿。参数识别即通过优化算法对机器人模型中的参数进行优化, 通常使用最小二乘法<sup>[5]</sup>或其他类似算法进行求解。Nubiola 等<sup>[6]</sup>采用 MD-H 模型的方法对 ABB IRB 1600 机器人进行建模, 通过 FARO 激光跟踪仪对机器人误差进行测量, 并通过线性弹簧模型最小二乘法

进行参数识别,经过补偿后,机器人的平均定位误差为0.364mm,最大误差为0.696mm。Newman等<sup>[7]</sup>采用改进的D-H模型以及最小二乘法,同时借助SMX激光跟踪仪对Motoman P-8型机器人进行参数识别。Lightcap等<sup>[8]</sup>用了Micro Val PFX454触发式测头测量机测量,并利用Levenberg-Marquardt进行参数识别,将Mitsubishi PA10-6CE型机器人的精度提高至均值0.33mm,最大0.71mm。Mustafa等<sup>[9]</sup>通过指数积模型的方法将ABB IRB 4400型机器人的精度提升至均值0.293mm,最大0.822mm。国内对于机器人精度补偿也有了较深入的研究,王一<sup>[10]</sup>通过MD-H模型和拟合轴线的方法将ABB IRB 2400的精度提升至误差均值0.62mm,最大0.99mm。任永杰等<sup>[11]</sup>采用D-H模型和最小二乘法,精度可达均值0.44mm。李定坤等<sup>[12]</sup>采用MD-H模型和迭代法所得的精度为均值0.47mm,最大0.64mm。这些方法存在建模复杂、运算量大的问题。

当前,神经网络研究已经取得了很大的进展,发展出了各种不同类型的神经网络,可以适用于不同领域的功能需求。其中,单隐层前馈神经网络(Single-hidden Layer Feedforward Networks, SLFNs)广泛地运用于模式识别、信号处理、自动控制等领域。SLFNs具有泛化能力好、学习能力强等优点,理论上能够逼近任意的非线性函数。但是其自身又具有训练速度慢,可能获得局部最优解等问题。新加坡南洋理工的黄广斌团队在文献[13-14]中提出了极限学习机算法(ELM, Extreme Learning Machine)。ELM实际上是一种特殊的单隐层前馈神经网络,该算法简化了普通神经网络的训练环节,首先直接设定隐层节点数,然后对于隐层节点的学习参数进行随机赋值。通过最小二乘法可直接求解出隐节点间的连接权值 $\beta_i$ ,整个算法的求解一步完成,无须迭代,根据文献[15-16]的论述,ELM不仅求解速度更快且泛化能力更强。

本文基于ELM原理提出了一种新的机械臂建模,这种建模方法不需要对机器人复杂运动学几何参数进行逐个标定,通过将机器人视为一个黑箱系统,忽略机器人的几何因素和非几何因素的影响,通过高精度的激光跟踪仪测量获得机器人的末端运动误差,建立机器人误差预测模型。由机器人误差预测模型获得机器人在期望位置的位置偏差,然后修正机器人移动位置坐标,便可消除机器人的绝对定位误差。

## 1 ELM 误差补偿方法

### 1.1 ELM原理

如图1所示,给定学习样本 $(X, T)$ ,其中 $X = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in \mathbf{R}^n$ ,  $T = (t_1, t_2, \dots, t_n) \in \mathbf{R}^n$ ,则隐节点数为 $m$ 的单层前馈神经网络的输出为:

$$f(x_j) = \sum_{i=1}^m \beta_i G(\alpha_i, b_i, x_j), j = 1, \dots, N \quad (1)$$

式中, $\alpha_i$ 和 $b_i$ 为隐节点函数的学习参数, $\beta_i$ 为隐节点间的连接权值, $G(\alpha_i, b_i, x_j)$ 为 $x_j$ 关于第 $i$ 隐节点的输出。和函数神经网络的隐节点的激活函数为:

$$G(\alpha_i, b_i, x_j) = g(\alpha_i x_j + b_i), b_i \in \mathbf{R} \quad (2)$$

对于 $m$ 个隐节点的ELM,存在 $\alpha_i, b_i$ 及 $\beta_i$ 可以使得:

$$\sum_{i=1}^m \beta_i G(\alpha_i, b_i, x_j) = t_j, j = 1, \dots, N \quad (3)$$

$$\varepsilon_j = \sum_{i=1}^m [\beta_i G(\alpha_i, b_i, x_j) - t_j], j = 1, \dots, N \quad (4)$$

神经网络的求解过程就是寻找最优的 $\alpha_i, b_i$ 及 $\beta_i$ 使得样本误差 $\varepsilon$ 最小。

公式(3)中的等式可以写为:

$$H\beta = T \quad (5)$$

式中:

$$H = \begin{pmatrix} G(\alpha_1, b_1, x_1) & \dots & G(\alpha_m, b_m, x_1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ G(\alpha_1, b_1, x_N) & \dots & G(\alpha_m, b_m, x_N) \end{pmatrix}$$

$$\beta = [\beta_1, \dots, \beta_m]^T$$

随机给定 $\alpha_i, b_i$ 的值,则矩阵 $H$ 为已知矩阵,则 $\beta_i$ 可通过代入 $H$ 的广义逆求解。

$$\beta = H^+ T \quad (6)$$

式中: $H^+ = (H^T H)^{-1} H^T$

得到输出权值后即可完成ELM模型。

### 1.2 位置误差预测与补偿

本文以制孔机器人的TCP点(Tool Center Point,工具中心点)作为误差补偿的对象。如图1所示,三层神经网络的输入层有3个节点,分别为TCP点的理论位置 $P(x_p, y_p, z_p)$ ;隐层有 $n$ 个节点;输出层有3个节点,分别为理论位置的偏差 $\Delta P(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ 。学习样本为 $(P, \Delta P)$ ,根据上文的方式对学习样本进行训练,可以得到误差预测的ELM模型。然后将需要进行误差预测的TCP理论点坐标带入该模型,输出即为该点的预测误差 $\Delta \hat{P}$ :

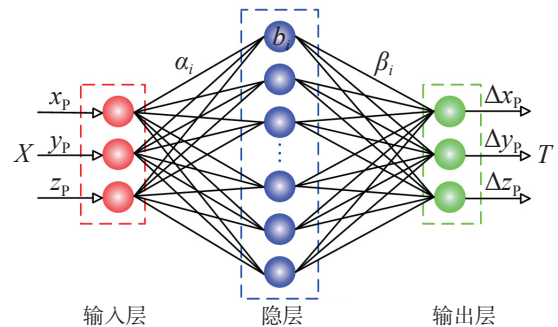


图1 三层极限学习机结构

Fig.1 Structure of a three-layer extreme learning machine

$$P' = P + \Delta \hat{P} \quad (7)$$

根据公式(7)可得到补偿后的位置坐标  $P'(x_p, y_p, z_p)$ , 将补偿后的位置坐标输入到机器人控制器中即可实现位置补偿。

## 2 试验与讨论

航空制孔机器人精度补偿试验平台主要由工业机器人、激光跟踪仪、靶球和制孔末端执行器组成,如图2所示。制孔末端执行器安装在工业机器人末端,靶球球心位于末端执行器主轴轴线上。工业机器人型号为KR210 R2700,由KUKA公司生产,其重复定位精度为 $\pm 0.06\text{mm}$ 。本试验采用Leica公司的AT901型激光跟踪仪,其测量精度为 $7.5\ \mu\text{m} + 3\ \mu\text{m}/\text{m}$ 。

### 2.1 TCP标定

本文将机器人TCP作为精度补偿的具体研究对象,在精度补偿之前需要对TCP进行标定,获得TCP点相对于工业机器人法兰坐标的位置关系。本文中运用的是XYZ四点法,四点法的操作过程是将待测工具的TCP点从4个不同的方向移动到同一个参照点,要求每次移动机器人的位姿不同。机器人的控制系统通过解算4个不同位姿下法兰中心的位置参数来求得TCP相对法兰坐标的坐标值。如图2所示,由于不能采用靠近真实参考点的方式对靶球进行标定,所以采用了在激光跟踪仪配合下的“虚拟对尖法”。控制机械臂移动使靶球靠近假定的虚拟点坐标,当误差小于 $0.02\text{mm}$ (激光跟踪仪的精度)时可以认为靶球已经和虚拟点重合。分别从4个位置移动到该虚拟点,机械臂即可解算出靶球座的位置,即为TCP相对于法兰坐标的坐标。

### 2.2 坐标系统一

如图3所示,由于激光跟踪仪坐标系与工业机器人的世界坐标系 $\{W\}$ 之间的关系不确定,故在获得TCP相对于法兰坐标的相对关系后需要对二者进行统一。

为了简化建立坐标的过程,提高所建坐标的精度,本文提出了新的坐标系拟合方法,步骤如下:

(1)将靶球安装在机器人的TCP上,移动机器人沿着世界坐标系的 $X$ 轴平移,使用激光跟踪仪记录下运动轨迹上的点。

(2)记录点 $O_A$ 的理论值,即靶球在相对于机器人世界坐标的理论坐标值。

(3)移动机器人的TCP沿着世界坐标系的 $Z$ 轴平移,使用激光跟踪仪记录下运动轨迹上的点。

(4)通过在激光跟踪仪的测量软件上拟合出测得的两条直线,分别作为新建坐标系 $\{R\}$ 的 $X_R$ 轴与 $Z_R$ 轴,步骤2中记录的点 $O_A$ 作为坐标系 $\{R\}$ 的原点。

(5)读取步骤2所记录的 $O_A$ 点在机器人世界坐标

系中的坐标值,将新建的坐标系 $\{R\}$ 对应地平移该坐标值数值的距离。则所建的坐标系就能较为精确地与世界坐标系 $\{W\}$ 重合,至此便可以得到激光跟踪仪坐标系下的世界坐标系。

### 2.3 误差测量

首先根据上文所述方法建立坐标系以及标定机器人的TCP点,在工业机器人工作空间中规划出了一个 $1000 \times 1000 \times 2000$  (mm)的空间。在Robmaster离线编程软件中编制工业机器人TCP运动点和轨迹(图4),生成机器人执行程序。用激光跟踪仪对TCP的运动点进行测量。本次试验共获得2617个点的理论位置和测量位置,二者的差即为位置误差 $\Delta P(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ ,其绝对位置误差 $D$ 的表达式为:

$$D = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2} \quad (8)$$

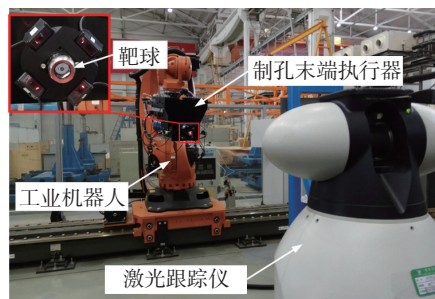


图2 试验平台

Fig. 2 Experimental setup

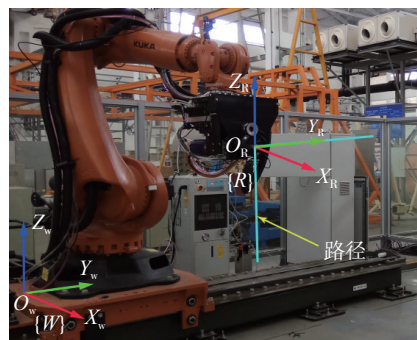


图3 建立机器人世界坐标系

Fig. 3 Constructing the world coordinate system of robot

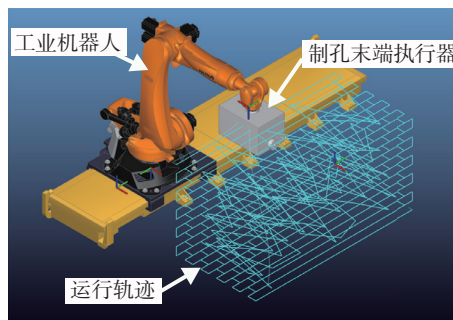


图4 离线编程

Fig. 4 Off-line programming

2.4 误差估计及数据分析

将获得的 2617 组数据中随机选取 1000 组数据用于 ELM 模型的训练。ELM 的隐层节点个数为 25, 隐层激活函数为 S 型函数。在规划的矩形空间中随机选取 150 个点进行验证。误差补偿前与补偿后的在 XYZ 轴的误差及绝对位置误差  $D$  如图 5 所示。工业机器人 TCP 的位置误差在补偿前和补偿后的数据统计如表 1 所示。根据图 5 和表 1 可知, 通过 ELM 补偿后机器人的位置误差在范围和幅度上有了明显的下降, 最大绝对位置误差从 1.1489mm 下降到了 0.2509mm, 下降约 78.16%。位置误差均值从 0.4044mm 下降到了 0.0983mm, 下降约 75.69%。通过试验结果可以看出基于 ELM 的机械臂精

表1 机器人的位置误差数据补偿前后对比

方向	补偿前后	范围 /mm	均值 /mm	标准差 /mm
X	前	[-0.3633,0.8688]	0.0601	0.2321
	后	[-0.1320,0.1076]	0.0016	0.0387
Y	前	[-1.0971,0.8389]	-0.1185	0.3395
	后	[-0.2288,0.2003]	-0.0060	0.0695
Z	前	[-0.3127,0.4867]	0.0428	0.1633
	后	[-0.1678,0.1765]	0.0031	0.0729
D	前	[0.1045,1.1489]	0.4044	0.2253
	后	[0.0233,0.2509]	0.0983	0.0443

度补偿方法能够满足航空制孔机器人的位置精度要求。

3 结论

本文提出了一种基于 ELM 的绝对定位精度补偿方法, 将机器人视为一个黑箱系统, 用极限学习机逼近机器人的实际运动学模型, 进而进行位置误差的预测。通过在航空制孔机器人上的试验, 补偿试验结果显示该方法具有位置误差预测精度高、建模简单、运算速度快等优点。但是, 该方法仍然存在一定的局限性, 由于神经网络的特点, 需要训练的数据较其他方法更多。

参考文献

[1] 杜宝瑞, 冯子明, 姚艳彬, 等. 用于飞机部件自动制孔的机器人制孔系统[J]. 航空制造技术, 2010(2): 47-50.  
 DU Baorui, FENG Ziming, YAO Yanbin, et al. Robot drilling system for automatic drilling of aircraft component[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010(2): 47-50.  
 [2] 赵建国, 郭洪杰, 王丽秀, 等. 飞机数字化柔性精准装配技术研究及应用[J]. 航空制造技术, 2014(21): 32-35.  
 ZHAO Jianguo, GUO Hongjie, WANG Lixiu. Study and application technology on digital flexible accurate assembly for aircraft[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014(21): 32-35.  
 [3] 王巍, 俞鸿均, 高雪松, 等. 面向自动钻铆机的机身壁板模块化工装设计[J]. 航空制造技术, 2015(21): 34-38.

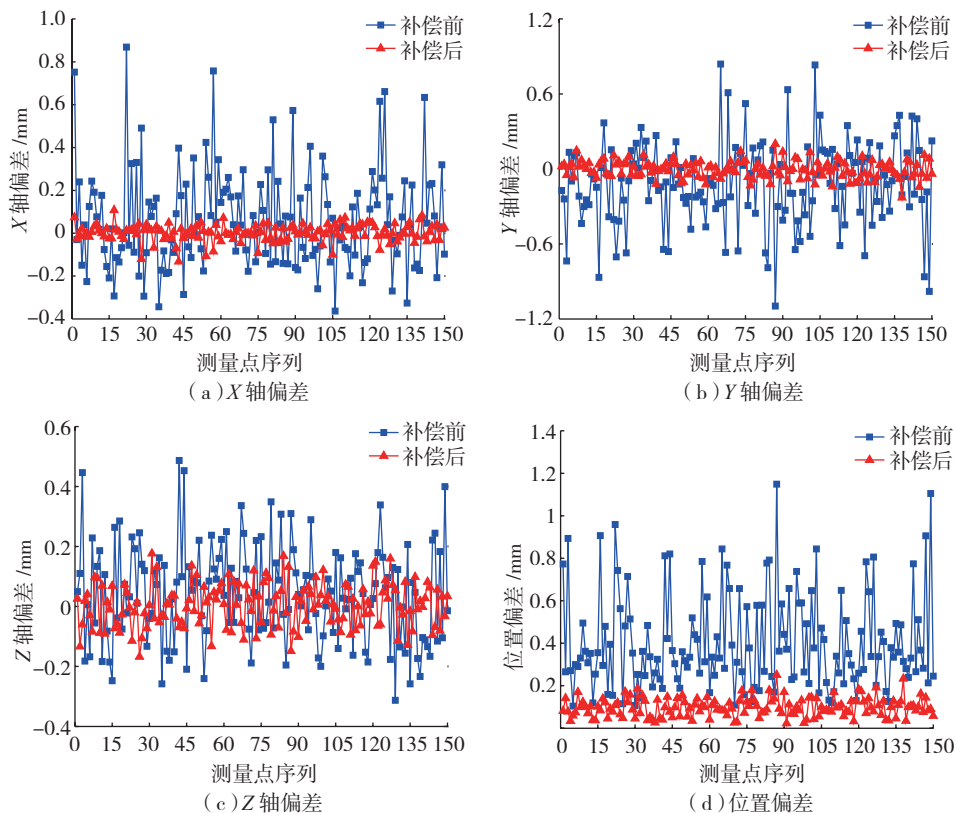


图5 机器人的位置误差补偿前后对比

Fig.5 Comparison of positional errors of robot before and after compensation

WANG Wei, YU Hongjun, GAO Xuesong, et al. Modular tooling design of aircraft fuselage panel for automatic drill and riveting machine[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2015(21): 34–38.

[4] 白云飞, 丛明, 杨小磊, 等. 基于6参数模型的6R串联机器人运动学参数辨识[J]. *机器人*, 2015, 37(4): 486–492.

BAI Yunfei, CONG Ming, YANG Xiaolei, et al. Kinematic parameter identification for 6r serial robots based on a 6-parameter model[J]. *Robot*, 2015, 37(4): 486–492.

[5] VEITSCHEGGER W K, WU C H. Robot calibration and compensation[J]. *IEEE Journal on Robotics and Automation*, 1989, 4(6): 643–656.

[6] NUBIOLA A, BONEV I A. Absolute calibration of an ABB IRB 1600 robot using a laser tracker[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2013, 29(1): 236–245.

[7] NEWMAN W S, BIRKHMIR C E, HORNING R J, et al. Calibration of a Motoman P8 robot based on laser tracking[C]// *Proceedings of the IEEE international Conference on Robotics and Automation*. San Francisco: IEEE, 2000: 3597–3602.

[8] LIGHTCAP C, HAMNER S, SCHMITZ T, et al. Improved positioning accuracy of the PA10-6CE robot with geometric and flexibility calibration[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2008, 24(2): 452–456.

[9] MUSTAFA S K, TAO P Y, YANG G, et al. A geometrical approach for online error compensation of industrial manipulators[C]// *Proceedings of 2010 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, Montreal. San Francisco: IEEE, 2010: 738–743.

[10] 王一. 面向测量的多关节运动机构误差模型及标定技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2009.

WANG Yi. Study on error model and calibration technology of measurement-oriented motion mechanism with multi-joint[D]. Tianjin: Tianjin University, 2009.

[11] 任永杰, 郝继贵, 杨学友, 等. 基于距离精度的测量机器人标定模型及算法[J]. *计量学报*, 2008, 29(3): 198–202.

REN Yongjie, ZHU Jigui, YANG Xueyou, et al. Measurement robot calibration model and algorithm based on distance accuracy[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2008, 29(3): 198–202.

[12] 李定坤, 叶声华, 任永杰, 等. 机器人定位精度标定技术的研究[J]. *计量学报*, 2007, 28(3): 224–227.

LI Dingkun, YE Shenghua, REN Yongjie, et al. Research on robot's positioning accuracy calibration[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2007, 28(3): 224–227.

[13] HUANG G B, ZHU Q Y, SIEW C K. Extreme learning machine: a new learning scheme of feedforward neural networks[C]// *2004 IEEE International Joint Conference on Neural Networks*. Budapest, 2004.

[14] HUANG G B, ZHU Q Y, SIEW C K. Extreme learning machine: theory and applications[J]. *Neurocomputing*, 2006, 70(1–3): 489–501.

[15] FREUND Y, SCHAPIRE R F. Experiments with a new boosting algorithm[C]// *Proceedings of 13th International Conference on Machine Learning*. Bari, 1996: 148–156.

[16] ROMERO E, ALQUEZAR R. A new incremental method for function approximation using feed-forward neural networks[C]// *Proceedings of the 2002 International Joint Conference on Neural Networks*. Honolulu, 2002.

通讯作者: 薛雷, 工程师, 研究方向为民机先进装配柔性装备技术、机

器人制孔铆接、柔性轨爬行机器人应用, E-mail: xuelei@comac.cc。

(责编 逸飞)

(上接第90页)

检测中的发展和应用现状[J]. *材料导报*, 2014(7): 125–129.

YAO Zhongbo, ZHANG Yubo, WANG Haidou, et al. Development and application of infrared thermography in parts' NDT[J]. *Materials Review*, 2014(7): 125–129.

[6] 陈大鹏, 毛宏霞, 肖志河. 红外热成像无损检测技术现状及发展[J]. *计算机测量与控制*, 2016(4): 1–6, 9.

CHEN Dapeng, MAO Hongxia, XIAO Zhihe. Infrared thermography NDT and its development[J]. *Computer Measurement & Control*, 2016(4): 1–6, 9.

[7] 张剑, 齐暑华. 红外热成像技术在复合材料无损检测中的应用现状[J]. *工程塑料应用*, 2015(11): 122–126.

ZHANG Jian, QI Shuhua. Application of infrared thermography in non-destructive testing of composite[J]. *Engineering Plastics Application*, 2015(11): 122–126.

[8] 郭云力. 碳纤维增强树脂基复合材料雷击损伤的研究[D]. 济南: 山东大学, 2014.

GUO Yunli. Investigation of lightning strike for carbon fiber reinforced resin matrix composites[D]. Ji'nan: Shandong University, 2014.

[9] 刘松平, 刘菲菲. 复合材料雷击损伤超声成像检测[J]. *航空制造技术*, 2015(7): 26–29.

LIU Songping, LIU Feifei. Ultrasonic imaging testing composite lightning damage[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2015(7): 26–29.

[10] 马虎. 红外热波无损检测技术在直升机维修中的应用[J]. *直升机技术*, 2005(2): 46–48.

MA Hu. The infrared thermal wave nondestructive testing technology in the application of the helicopter maintenance[J]. *Helicopter Technique*, 2005(2): 46–48.

[11] 马保全, 周正干. 航空航天复合材料结构非接触无损检测技术的进展及发展趋势[J]. *航空学报*, 2014, 35(7): 1787–1803.

MA Baoquan, ZHOU Zhenggan. Progress and development trends of composite structure evaluation using noncontact nondestructive testing techniques in aviation and aerospace industries[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2014, 35(7): 1787–1803.

[12] 蔡毅, 王岭雪. 红外成像技术中的9个问题[J]. *红外技术*, 2013(11): 671–682.

CAI Yi, WANG Lingxue. Nine problems in infrared imaging technology[J]. *Infrared Technology*, 2013(11): 671–682.

[13] 邓晓东, 成来飞, 梅辉, 等. C/SiC复合材料的定量红外热波无损检测[J]. *复合材料学报*, 2009, 26(5): 112–119.

DENG Xiaodong, CHENG Laifei, MEI Hui, et al. Infrared thermal wave imaging for nondestructive detection and measurement of the C/SiC composites[J]. *Acta Material Composite Sinica*, 2009, 26(5): 112–119.

[14] 曹文浩. 基于红外热成像的内部孔洞缺陷检测方法研究[D]. 杭州: 中国计量大学, 2013.

CAO Wenhao. Research on infrared thermography detection method for inner holes defects[D]. Hangzhou: China Jiliang University, 2013.

通讯作者: 李慧娟, 硕士、高级工程师, 研究方向为主动式红外热成像检测、激光剪切散斑检测、泄漏检测等无损检测新技术, E-mail: lhj1900@126.com。

(责编 逸飞)