

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2018.06.013

基于多点阵列式三维成像的变压器绕组 超声波检测系统研究*

涂正宏¹, 李 磊², 徐鹏程², 刘彦文², 王 昕^{1*}

(1. 上海交通大学 电工与电子技术中心, 上海 200240;

2. 国网吉林省电力有限公司 四平供电公司, 吉林 四平 136000)

摘要:针对目前变压器绕组超声波成像方法检测效率低以及适用范围窄的问题,对超声波阵列技术在变压器绕组变形检测中的应用进行了研究,设计了一种基于多点阵列式三维成像的变压器绕组超声波检测系统。该系统通过多路超声波对绕组变形进行了带电检测,根据多点阵列式三维坐标生成算法快速地得到了绕组的三维状态图,并将健康绕组和变形绕组进行对比得到了变形的量化表示图;利用该系统对实际电力变压器的绕组变形情况进行了现场测试。研究表明:该系统能够在不影响变压器正常运行的情况下对高压侧绕组进行超声波检测,高效地生成绕组的三维图像,并显示出绕组变形量的具体数值,实现了对变压器绕组变形的量化表示,系统的检测效率高、直观性好、安全性突出。

关键词:变压器绕组;超声波检测;多点阵列;三维成像;量化表示

中图分类号:TM407

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2018)06-0613-05

Transformer winding ultrasonic detection system based on multi-point array 3D imaging

TU Zheng-hong¹, LI Lei², XU Peng-cheng², LIU Yan-wen², WANG Xin¹

(1. Center of Electrical & Electronic Technology, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. Siping Power Supply Company, Jilin Electric Power Company, State Grid Corporation of China, Siping 136000, China)

Abstract: Aiming at the problems of low detection efficiency and limited detection scope of the current transformer winding ultrasonic method, the application of ultrasonic array technology in transformer winding deformation detection was studied. A transformer winding ultrasonic detection system based on multi-point array 3D imaging was presented. The system was used to detect the winding by multiple ultrasonic waves. According to multi-point array 3D coordinate generation algorithm, the 3D state diagrams of the windings were obtained quickly. And the quantitative distortion diagrams were obtained by comparing the healthy windings with the deformed windings. Then the system was used to conduct on-site testing on the winding of an actual power transformer. The results indicate that this system can detect the high-voltage side windings without affecting the normal operation of the transformer, generate the 3D images of the windings efficiently and show the specific values of the winding deformation. This system can realize the quantitative representation of the transformer winding deformation and it is efficient, intuitive and secure.

Key words: transformer winding; ultrasonic testing; multi-point array; 3D imaging; quantitative representation

收稿日期:2017-11-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61673268);国家自然科学基金重点项目(61533012)

作者简介:涂正宏(1993-),男,湖北黄冈人,硕士研究生,主要从事变压器绕组检测方面的研究。E-mail: tutujiayou68@sjtu.edu.cn

通信联系人:王 昕,男,博士,副教授,硕士生导师。Email: wangxin26@sjtu.edu.cn

0 引言

电力变压器故障极大地影响着电力系统的安全和稳定^[1-2]。作为引起变压器故障的重要原因,绕组变形受到了广泛关注。电力、不当运输等因素都可能引起绕组变形^[3]。

为了检测绕组变形,一系列检测方法被提出来。传统的 3 种检测方法为低压脉冲(LVI)法,短路阻抗(SCR)法和频响分析(FRA)法^[4-5]。低压脉冲法由于重复性差,现在较少应用到实际检测中;短路阻抗法根据短路阻抗变化来推断形变,频响分析法通过分析频响特性变化来推断形变,这两种方法都对严重形变有一定的检测效果^[6];在这两种方法基础上,形成了扫频阻抗方法^[7],通过一次测试就能得到扫频阻抗曲线和短路阻抗值,并据此对判断绕组状态,可看作是短路阻抗法和频响分析法的结合,具有比频响分析法更好的测试重复性和抗干扰性。但是,上述方法都是离线方法,实际检测时必须要对变压器进行停电操作,停电将带来大量不必要的经济损失。

为实现绕组的带电检测,振动信号分析法得到了应用^[8]。一种基于振动信息的绕组形变诊断方法被提出,该方法能够在变压器运行的情况下,采用小波包变换对绕组不同状态下振动信号进行分析,对绕组不同状态进行了分类诊断^[9]。但该方法只能通过振动信号分析对绕组变形进行间接的推断,难以实现对形变的直观、量化表示。

为实现直观的带电检测,基于超声波测距的绕组三维成像检测方法被提出^[10],根据高频超声波在变压器外壳和绕组之间的传播路径,并基于距离转换算法得到绕组直观的三维成像。但是,该成像检测方法只适用于变压器绕组的单点成像,检测效率较低,而且该方法只适用于与线圈径向垂直的绕组表面,检测范围有限。

为此,本文将提出基于多点阵列式三维成像的变压器绕组超声波检测系统。

1 绕组超声波阵列检测方法

超声波检测方法能不影响变压器运行状态的基础上实现变压器绕组变形的检测,通过单路超声波或者多路超声波对变压器进行多点检测,得到表示绕组状态的多个距离参数。

该方法原理如图 1 所示。

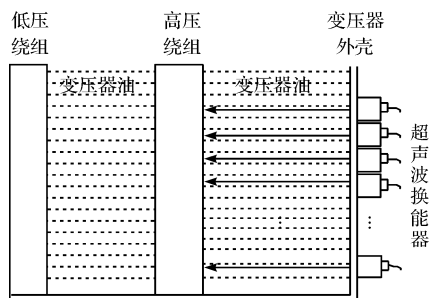


图 1 绕组超声波检测方法原理图

超声波发射换能器发射超声波依次穿过变压器油箱外壳和变压器油,在绕组表面发生反射,反射回来的超声波信号被在变压器油箱表面的接收换能器接收,忽略超声波在变压器外壳中与在变压器油中速度有差异这一影响因素,则有:

$$l = vt \quad (1)$$

式中: t —超声波传播时间; l —超声波传播的路程; v —超声波在变压器油中传播速度。

根据超声波的传播路程的变化情况,结合超声波换能器的位置参数,即可得到绕组表面的结构变化情况,从而实现绕组变形的直观量化检测。

2 多点阵列式三维成像检测方法

2.1 多点阵列式三维坐标生成算法

多点阵列式三维坐标生成算法,只需各个测点的发射、接收换能器放置位置以及各测点超声波传播时间就能确定所有测点的三维坐标,从而能将绕组的整体状态用三维图像直观地表示出来。

多点阵列式三维坐标生成可分两种情况,第一种是接收与发射换能器位于同一表面,另外一种接收与发射换能器位于不同表面。两种情况原理图如图 2 所示。

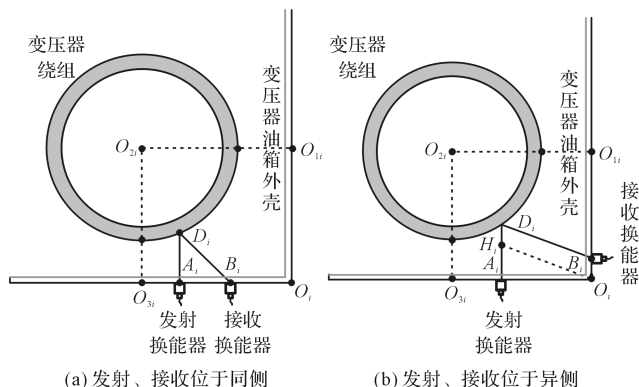


图 2 多点阵列式三维坐标生成算法原理

在点($i = 1, 2, 3, \dots, n$)发射的超声波先穿过油

箱外壳经变压器油到达被检测点并发生反射,回波信号被安放在点的接收换能器接收,检测该过程中超声波的传播时间。取 x_i 为点 A_i 到 O_i 的距离,取 y_i 为点 A_i 到 D_i 的距离,取 Z_i 为点 O_i 到油箱底部的垂直距离。 D_i 坐标记为 (x_i, y_i, z_i) ,三维坐标列向量 $\mathbf{D}$ 记为 $(D_1, D_2, \dots, D_i, \dots, D_n)^T$ 。

当发射和接收换能器位于同侧表面时,给出符号规定:

$$\begin{cases} \mathbf{K} = [\overline{A_1 B_1}, \overline{A_2 B_2}, \dots, \overline{A_i B_i}, \dots, \overline{A_n B_n}]^T \\ \hat{\mathbf{K}} = [\overline{A_1 B_1^2}, \overline{A_2 B_2^2}, \dots, \overline{A_i B_i^2}, \dots, \overline{A_n B_n^2}]^T \\ \mathbf{L} = [\overline{A_1 D_1}, \overline{A_2 D_2}, \dots, \overline{A_i D_i}, \dots, \overline{A_n D_n}]^T \\ \hat{\mathbf{L}} = [\overline{A_1 D_1^2}, \overline{A_2 D_2^2}, \dots, \overline{A_i D_i^2}, \dots, \overline{A_n D_n^2}]^T \\ \hat{\mathbf{M}} = [\overline{B_1 D_1^2}, \overline{B_2 D_2^2}, \dots, \overline{B_i D_i^2}, \dots, \overline{B_n D_n^2}]^T \\ \mathbf{T} = [t_1, t_2, \dots, t_i, \dots, t_n]^T \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\overline{A_i B_i}$ —点 A_i 到点 B_i 距离; $\overline{A_i D_i}$ —点 A_i 到点 D_i 距离; $\overline{B_i D_i}$ —点 B_i 到点 D_i 距离; t_i —检测正常绕组时第 i 路超声波传播时间。

由几何关系可得:

$$\mathbf{K} + \mathbf{L} = v\mathbf{T} \quad (3)$$

$$\hat{\mathbf{K}} + \hat{\mathbf{M}} = \hat{\mathbf{L}} \quad (4)$$

联立上式可得:

$$\mathbf{L} = \frac{v\mathbf{T}}{2} - \frac{\hat{\mathbf{K}}}{2v} \text{diag}[t_1^{-1}, t_2^{-1}, \dots, t_i^{-1}, \dots, t_n^{-1}] \quad (5)$$

只要 $\mathbf{T}$ 确定,就能得到列向量 $\mathbf{D}$,从而能将绕组被检测点用三维图像表示出来。

当发射和接收换能器位于异侧表面时,补充符号规定:

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{N}} = [\overline{O_1 A_1^2}, \dots, \overline{O_i A_i^2}, \dots, \overline{O_n A_n^2}]^T \\ \mathbf{R} = [\overline{O_1 B_1}, \dots, \overline{O_i B_i}, \dots, \overline{O_n B_n}]^T \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\overline{O_i A_i}$ —点 O_i 到点 A_i 距离; $\overline{O_i B_i}$ —点 O_i 到点 B_i 距离。

同样,根据几何关系可得:

$$\begin{aligned} \mathbf{L} = \frac{v\mathbf{T}}{2} + \frac{\mathbf{R}}{2} - \frac{\hat{\mathbf{N}}}{2} \text{diag}[(vt_1 - \overline{O_1 B_1})^{-1}, \\ (vt_2 - \overline{O_2 B_2})^{-1}, \dots, (vt_i - \overline{O_i B_i})^{-1}, \\ \dots, (vt_n - \overline{O_n B_n})^{-1}] \end{aligned} \quad (7)$$

当 $\mathbf{T}$ 确定,计算可得到 $\mathbf{L}$,从而得出三维坐标列向量 $\mathbf{D}$,即能将绕组表面相应点用三维图像表示出来。

2.2 绕组形变的多点阵列式量化表示算法

由于绕组的变形会引起三维图像相应的变化,可以根据三维图像中某点的变化量大小来判断绕组表面

对应点的绕组变形程度。

设 D'_i 是被测量点变形之后的位置,定义变压器绕组变形之后的三维坐标列向量 $\mathbf{D}'$ 为 $(D'_1, D'_2, \dots, D'_i, \dots, D'_n)^T$ 。 B'_i 为变形之后的超声波回波接收点,并给出符号规定:

$$\mathbf{K}' = [\overline{A_1 B'_1}, \overline{A_2 B'_2}, \dots, \overline{A_i B'_i}, \dots, \overline{A_n B'_n}]^T \quad (8)$$

$$\hat{\mathbf{K}}' = [\overline{A_1 B'^2_1}, \overline{A_2 B'^2_2}, \dots, \overline{A_i B'^2_i}, \dots, \overline{A_n B'^2_n}]^T \quad (9)$$

$$\mathbf{L}' = [\overline{A_1 D'_1}, \overline{A_2 D'_2}, \dots, \overline{A_i D'_i}, \dots, \overline{A_n D'_n}]^T \quad (10)$$

$$\mathbf{T}' = [t'_1, t'_2, \dots, t'_i, \dots, t'_n]^T \quad (11)$$

式中: $\overline{A_i B'_i}$ —点 A_i 到点 B'_i 距离; $\overline{A_i D'_i}$ —点 A_i 到点 D'_i 距离; t'_i —检测变形绕组时第 i 路超声波传播时间。

绕组形变的多点阵列式量化表示算法,可以分4种基本情况对绕组变形量进行量化表示:

(1) 健康绕组检测时发射和接收位于同侧表面,变形绕组检测发射和接收也位于同侧表面;

(2) 健康绕组检测时发射和接收位于同侧,而变形绕组检测时发射和接收位于异侧;

(3) 健康绕组检测时发射和接收位于异侧,而变形绕组检测时发射和接收位于同侧;

(4) 健康绕组检测时发射和接收位于异侧,而变形绕组检测时发射和接收也位于异侧。

定义绕组变形量的 n 维列向量:

$$\Delta\mathbf{L} = [\overline{D_1 D'_1}, \overline{D_2 D'_2}, \dots, \overline{D_i D'_i}, \dots, \overline{D_n D'_n}]^T \quad (12)$$

$$\Delta\mathbf{L} = \mathbf{L} - \mathbf{L}' \quad (13)$$

式中: $\overline{D_i D'_i}$ —点 D_i 到点 D'_i 距离。

根据 $\Delta\mathbf{L}$ 对变压器绕组变形情况进行定量定性表示,由 $\Delta\mathbf{L}$ 中各元素 $\overline{D_i D'_i}$ 的正负来判断被测点变形性质,通过各元素的绝对值大小来实现绕组变形的量化表示。

量化表示算法不局限于检测与线圈径向垂直的绕组表面,可适用于不规则的内凹和外凸等形变。当 $\overline{D_i D'_i} < 0$ 时,表明在该点发生了内凹形变, $\overline{D_i D'_i} > 0$ 时,表明在该点发生了外凸形变。

2.3 绕组多点阵列式三维成像检测方法

多点阵列式三维成像检测方法,首先根据多点阵列式三维坐标生成算法可以得到绕组表面的三维状态表示图,对绕组整体状态进行判断;然后根据多点阵列式量化表示方法,结合健康绕组的距离参数,得到绕组变形的量化表示图,直观地显示出绕组变形程度的具体数值。

本研究根据变压器绕组多点阵列式三维成像检测方法,模拟得到 20×41 个点的变形绕组的三维状态表示图,如图3所示。

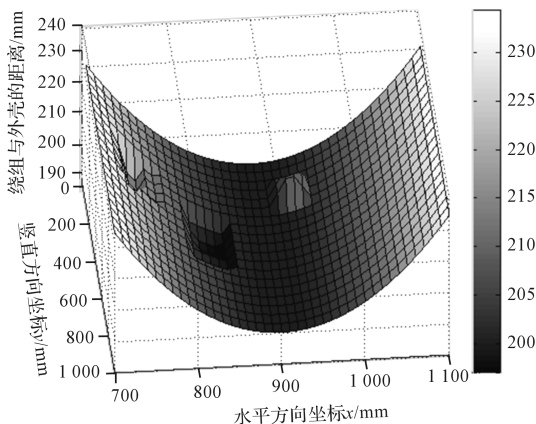


图3 变形绕组三维状态模拟图

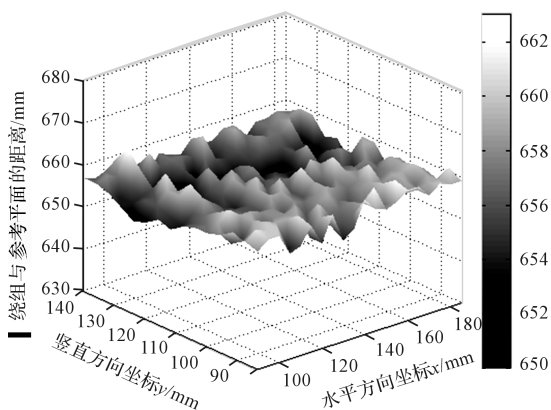


图4 高压侧片绕组三维状态表示图

3 系统设计

基于 STM32 系列 MCU, 本文研制了绕组超声波检测系统。系统由超声波换能器阵列、超声高压驱动电路、回波信号处理电路、主控制电路以及上位机等部分组成。检测时 STM32F103 发射大于 10 个周期的 3.3 V 的 400 kHz 方波脉冲信号, 超声高压驱动电路将其转换成数百伏的脉冲高压, 激励超声波发射换能器阵列产生 400 kHz 超声波阵列。换能器表面涂抹耦合剂, 与外壳紧密接触, 因此超声波能穿透外壳, 途径绝缘油在绕组表面发生反射, 回波被涂有耦合剂的接收换能器接收。系统能同时驱动四路发射换能器, 发射和接收换能器一一对应, 放在外壳同一高度, 接收换能器水平移动直至接收稳定回波。通过定时器计时得到超声波的传播时间, 并通过串口传输到上位机进行处理, 上位机根据多点阵列式三维坐标生成算法和量化表示算法生成绕组的三维图像, 从而实现对绕组的带电检测。

4 现场应用

本文对某油浸式变压器进行了现场测试。在与绕组表面距离较近的外壳上, 避开外壳表面有加强筋、散热片等结构的区域, 选择好合适的换能器放置区域, 并在换能器和外壳上涂上耦合剂进行耦合, 然后在该区域上安放换能器对变压器内部的部分绕组进行检测。

本研究基于多点阵列式三维坐标生成算法, 对散点数据进行处理, 得到该变压器部分高压侧绕组的三维状态表示图, 如图 4 所示。

由图 4 可以看出: 该片段绕组表面的最大凹陷和凸起程度均在 15 mm 左右, 故推断绕组局部状态较为正常。为进一步判断该片段绕组是否发生整体变形并得到变形量的具体值, 对绕组变形的量化表示图进行分析。

量化表示图如图 5 所示。

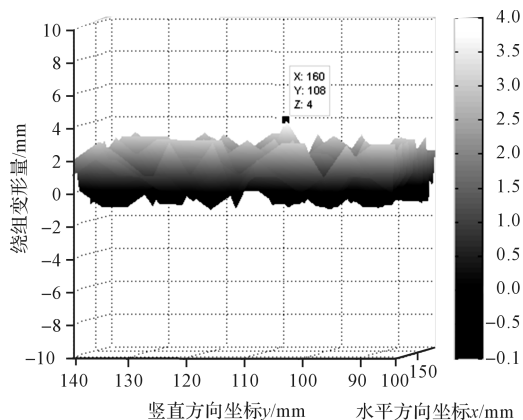


图5 高压侧片绕组变形的量化表示图

当前状态与正常状态相比仅出现了最大值为 4 mm 的外凸形变, 可知该片段绕组未发生明显的位移和形变。故综合上述分析可以得出: 该片段绕组未发生明显变形, 该部分绕组状态较为良好。自该变压器被检测之日起, 经过了近两年的正常运行, 未发生任何绕组变形导致的故障, 验证了该系统检测结果的可靠性。

5 结束语

本文提出了基于多点阵列式三维成像的变压器绕组超声波检测系统。系统的主要创新点如下:

(1) 提出了绕组的多点阵列式三维坐标生成算法, 克服了单点成像效率低的缺陷, 实现了多点同时坐标生成;

(2) 提出了绕组形变的多点阵列式量化表示算法, 实现了对多种不规则变形的量化表示, 拓展了绕组变形检测范围;

(3) 设计了变压器绕组超声波检测系统, 与电力变压器无任何电气连接, 实现了带电检测。

该系统能够对绕组进行三维成像检测, 具有效率高、直观性好、安全性高等优势。缺点是因变压器结构原因, 绕组部分区域如低压侧绕组难以探测。

参考文献(References):

- [1] YAO Chen-guo, ZHAO Zhong-yong, CHEN Yu, et al. Transformer winding deformation diagnostic system using online high frequency signal injection by capacitive coupling [J]. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, 2014, 21(4): 1486-1492.
- [2] MEHDI B, MOHAMMAD S N, TREVOR B. Advanced transformer winding deformation diagnosis: moving from off-line to on-line[J]. **IEEE Sensors Journal**, 2012, 12(6): 1649-1659.
- [3] ZHAO Zhong-yong, YAO Chen-guo, HASHEMNIA N, et al. Determination of nanosecond pulse parameters on transfer function measurement for power transformer winding deformation[J]. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, 2016, 23(6): 3761-3770.
- [4] LIU Si-wei, LIU Yi, LI Hua, et al. Diagnosis of transformer winding faults based on FEM simulation and on-site experiments[J]. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, 2016, 23(6): 3752-3760.

- [5] 许 渊,弓艳朋,刘有为,等. 变压器绕组频率响应数据的图块频点分析法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(6): 91-97.
- [6] 黄 华,周建国,姜益民,等. 阻抗法和频响法诊断电力变压器绕组变形[J]. 高电压技术, 1999, 25(2): 70-73.
- [7] 刘 勇,汲胜昌,杨 帆,等. 检测变压器故障的扫频阻抗法特性研究及应用[J]. 高电压技术, 2016, 42(10): 3237-3245.
- [8] 王丰华,段若晨,耿 超,等. 基于“磁-机械”耦合场理论的电力变压器绕组振动特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(9): 2555-2562.
- [9] 张 彬,徐建源,陈江波,等. 基于电力变压器振动信息的绕组形变诊断方法[J]. 高电压技术, 2015, 41(7): 2341-2349.
- [10] LIU Wei-jia, WANG Xin, ZHENG Yi-hui, et al. The on-line monitoring of the winding deformation of transformer based on the improved ultrasonic ranging method[J]. **Applied Mechanics & Materials**, 2014, 672(10): 1159-1162.

[编辑:周昱晨]

本文引用格式:

涂正宏,李 磊,徐鹏程,等. 基于多点阵列式三维成像的变压器绕组超声波检测系统研究[J]. 机电工程, 2018, 35(6): 613-617.

TU Zheng-hong, LI Lei, XU Peng-cheng, et al. Transformer winding ultrasonic detection system based on multi-point array 3D imaging[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2018, 35(6): 613-617.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(上接第 607 页)

4 结束语

本研究介绍了 U 形冰箱门壳钣金成型自动化设备。在分析大型钣金件产品的成型工艺特点基础上,采用辊轧成型方法,实现复杂槽型的渐变成型;通过精密磨具挤压成型方法,实现门壳拼角处的叠边结构;采用吸盘机械手,解决了大型薄板结构安全稳定抓持难题;采用现场总线技术和西门子 S7-300PLC,实现全生产线自动化生产。

经过长期生产检验表明:设备工作稳定、运行良好,生产的产品外形美观、尺寸精度高,各项指标达到技术要求,生产节拍不大于 35 s/套,废品率低于 0.1%。

参考文献(References):

- [1] 冯 强. 典型自动化生产线的组装[M]. 北京:高等教育出版社, 2016.
- [2] 章 飞,翟 斌. 钣金展开与加工工艺[M]. 2 版. 北京:

机械工业出版社, 2007.

- [3] 邹 平. 机械设计实用机构与装置图册[M]. 北京:机械工业出版社, 2007.
- [4] 孙凤琴. 模具制作工艺与设备[M]. 北京:中国轻工业出版社, 2003.
- [5] 李 文,冯 毅,张金武. 基于 PLC 控制的吸盘式气动机械手设计[J]. 液压气动与密封, 2016(2): 35-38.
- [6] 廖常初. S7-300/400 PLC 应用技术[M]. 4 版. 北京:机械工业出版社, 2016.
- [7] 胡志刚. 基于 S7-200 PLC 的气动机械手控制系统设计[J]. 机械工程师, 2014(3): 120-121.
- [8] 谢亚青. 基于 PLC 的五自由度模块化气动搬运机械手研制[J]. 机械设计与制造, 2009(1): 180-181.
- [9] 王建军. 搬运机械手及 PLC 控制系统设计[J]. 液压气动与密封, 2010(10): 16-18.
- [10] 王月芹. 基于 PLC 的机械手控制系统设计[J]. 液压与气动, 2011(9): 41-43.

[编辑:周昱晨]