

# 大型焊接构架制造过程的变形测量与分析\*

曲宝章, 孙可心, 霍东尧, 朱建宁, 卢碧红

(大连交通大学机械工程学院 大连, 116028)

**摘要** 为了全面了解焊接和退火工艺对机车转向架构架制造过程变形的影响程度,提出了以试件的 3D 平均偏差、标准偏差和四角高差作为评价指标,用光学摄影测量系统对大型构架整体定位,用三维激光扫描仪对构架进行快速数据采集,用 Geomagic-studio 快速处理点云数据,以构架设计模型作为参考基准、用 Geomagic-qualify 进行焊接和退火工序变形的分析与评价的系统化方法。研究表明,三维激光扫描仪和 Geomagic 软件相结合的方法可以实现对大型结构件制造过程变形进行全方位的快速精确测量与分析,为该类产品质量的监控提供了新手段。数据分析表明,焊接工艺是影响构架变形的主要因素,而退火工艺对构架变形的 3D 平均偏差改善量小于 0.58 mm。该结论为缩短退火时间、降低能耗与生产成本提供了科学依据。

**关键词** 变形测量;转向架构架;Geomagic;激光扫描仪

**中图分类号** TP731;TP752;TP721.1

## 引言

退火是传统转向架构架生产过程中消除残余应力减小变形的一道工序,对退火工艺的优化有助于节省工时和降低能耗。文献[1-3]以控制焊接温度、焊接质量和采用新的加工方法来控制构架变形以及使用焊接工装来保证加工精度等方法来代替退火工艺,但文献中并没有定量分析退火对变形的影响。在转向架构架制造现场调研发现,人们普遍认为影响构架变形的因素是焊接和热处理工序,而且热处理工序会很大程度矫正焊接产生的变形。构架变形对车辆装配工序产生很大影响,若变形过大,可能导致无法装配,需要进行压力校正<sup>[3]</sup>。但是,构架的焊接以及热处理工序变形具体是如何影响变形的最终结果尚无文献和实证研究结果发表。国内制造行业生产现场本构架热处理时间在 2.5 h 左右,严重影响制造成本和生产进度,也造成高能耗,而国外西门子等厂家的构架生产不需要热处理工序,因此本研究对构架制造工艺改善具有参考价值。

为了研究分析焊接和退火工艺过程对构架变形产生的影响,需全面了解构架的变形情况。在传统构架试制及量产过程中,现场构架变形的测量工具为三坐标划线仪<sup>[4]</sup>,测量时基准对齐更多依靠

工人经验来确定,效率比较低,且只能在与 3 个坐标平行的平面内进行测量,难以获取构架全局变形信息,导致虚假加工余量不足,增加生产过程的补焊工作量。因此,针对车间级快速、精确、实时的测量需求,新型手持式三维激光扫描仪应运而生。目前,国内外在管道的腐蚀测量<sup>[5]</sup>、航天器破坏部位测量<sup>[6]</sup>、汽车零部件快速测量<sup>[7]</sup>以及模具变形控制<sup>[8-9]</sup>都得到了研究和应用。

笔者以某机车转向架构架制造过程的变形为研究对象,以试件的 3D 平均偏差、标准偏差和四角高差作为评价指标,研究用三维激光扫描仪对构架进行数据采集的方法,用 Geomagic-studio 处理点云数据生成零件曲面模型的方法<sup>[10]</sup>,以及用 Geomagic-qualify 进行变形测量与分析的方法<sup>[11]</sup>。通过误差数据一致性分析、与生产现场实测数据的对比,验证提出的测量分析与评价方法的正确性,为解决生产中的上述问题提供科学依据。

## 1 大型焊接构架测量分析方案设计

转向架构架长度近 7 m,而手持式激光扫描仪只能测量长度不超过 4 m 的物体,如果扫描物体超过 4 m,会产生扫描结果不准确等问题。

笔者使用 MaxShot 光学摄影测量系统与

\* 中国北车-密歇根大学焊接结构研发中心资助项目  
收稿日期:2016-06-21;修回日期:2016-10-21

HandyScan 700 三维激光扫描仪相结合的方式对目标进行数据采集,可提升数据采集的精度。首先,使用 MaxShot 对构架进行整体坐标系建立,测量精度为 0.025 mm/m;其次,使用 HandyScan 700 用于构架的数据采集,在使用整体坐标系的前提下测量精度可达 0.03mm/m;最后,由 VXelements 模块引导的分步操作,加快扫描仪在目标部件上的定位速度,实现点云由局部坐标系到整体坐标系快速转换,缩短大型部件的测量时间。本测量系统由 Studio 对测量点云数据进行预处理,Qualify 对构架点云进行偏差分析。测量分析流程如图 1 所示。

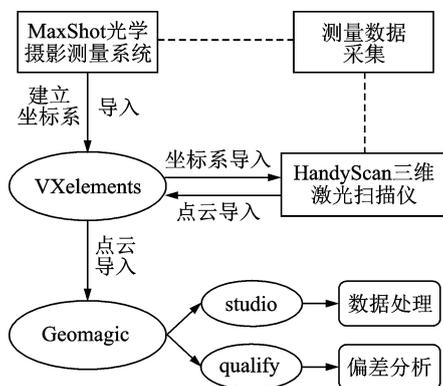


图 1 方案设计

Fig. 1 Scheme design

### 1.1 摄影测量原理

测量的结构光投射于被测量试件和 MaxShot 成三角关系,构成三角测量,从而遵循摄影测量学上的基本原理—共线方程。

MaxShot 光学坐标测量设备通过图像三角剖分使置于物体上的标志点(事先贴于被测目标)可以在三维空间中重建。在此测量范围内使用标定杆进行模型标定,一旦计算完成,光学坐标测量设备将自动使用 VXelements 生成的高精确度定位模型,从而确定被测构架在整体坐标系的位置与姿态。

### 1.2 共线方程

共线方程是光学摄影测量中最基本的方程,其核心在于像点是物点和光心的连线与图像平面的交点,即三点共线。摄影测量中有 3 个不同层次的坐标系:物空间坐标系、相机坐标系、图像坐标系,共线方程实际是通过相机坐标系作为中间坐标系来建立图像坐标系与物空间坐标系之间的关系。共线方程的齐次坐标矩阵表达式为

$$z_e \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中:  $M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \end{bmatrix}$  为投影矩阵;

$(x_w, y_w, z_w)$  为被测物体空间坐标;  $(u, v)$  为测量设备空间点对应像素坐标;  $z_e$  为转换坐标系的  $z$  轴坐标。

消去  $z_e$ , 式(1)转换为两个线性方程式,即

$$\begin{bmatrix} um_{31} - m_{11} & um_{32} - m_{12} & um_{33} - m_{13} \\ um_{31} - m_{21} & um_{32} - m_{22} & um_{33} - m_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{14} - um_{34} \\ m_{24} - um_{34} \end{bmatrix} \quad (2)$$

相机与物点之间遵循共线方程。将测量设备与被测物体空间坐标面  $O-xy$  平行,方程可写为

$$z_w = a_i \quad (3)$$

其中:  $a_i$  为常数,  $i=1, 2, \dots, n$ 。

当光源沿着  $z$  平行移动时,分别对  $z = a_1, a_2, \dots, a_n$  位置进行扫描,可认为是按固定采样间隔测量。将式(3)与式(2)联立,求解出被测物体的空间坐标  $(x_w, y_w, z_w)$ 。

### 1.3 激光扫描仪自定位原理

便携式激光扫描仪是一个数据采集系统,具有自定位功能。测量时能够不依赖固定坐标系,通过光学联系动态定位仪器与工件的坐标关系实现车间级的工件快速精确的实时扫描<sup>[12]</sup>。激光扫描仪的上下两个相机与布置在工件上的定位靶点构成三角关系,如图 2 所示,定位靶点专门设计成仪器能自动识别的圆形自反标识物。发射器发出的激光束经被测目标物上的靶点反射后传回到接收器,仪器系

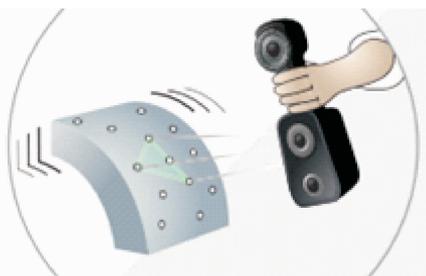


图 2 激光扫描仪自定位

Fig. 2 Self-positioning of laser scanner

统软件自动计算每帧目标点的坐标。扫描过程中, HandyScan 发出的激光束每帧扫描至少有 4 个标识点与前一帧重合,才能保证内部坐标系转换准确完成,实现扫描仪采集数据在工件坐标系中的自定位。

## 2 点云数据采集

### 2.1 构架整体坐标系建立

MaxShot 3D 摄影测量系统包含 3D 摄影测量视频摄像头和 VXshot 处理软件,它将摄影测量的高精度和速度添加到扫描仪中,对于大型部件效果尤为显著。其工作流程如下:首先,将一些编码目标点置于被测量物体上或物体所处的环境中;其次,拍摄多组照片(能反映物体全貌),启动图像三角剖分,将置于物体上的反射目标点在 3D 空间中重建。在此测量范围内用标定杆对模型进行缩放。计算完成后,3D 扫描仪将自动使用 VXshot 生成的高精确度定位模型以确定其在测量范围内的位置。

### 2.2 构架点云采集

通过测量系统平台软件 VXelements 将 MaxShot 建立的整体坐标系与 HandyScan 的局部坐标系进行连接。使用手持激光扫描仪对构架进行全部点云采集后,由 VXelements 导出 STL 文件保存备用。笔者将 STL 文件导入 Geomagic 进行数据预处理。分别将 3 个试件命名为构架 A、构架 B、构架 C。采集后的点云如图 3(a)所示。

## 3 点云数据预处理

由于存在一定的系统或随机误差,激光扫描仪采集的点云数据不能直接导入 Geomagic-qualify 软件进行分析,例如,本研究中的构架加工余量或者试件体外标识点误采等。由于直接使用采集完成的点云数据会影响最后测量分析的结果,因此在测量分析前需对数据进行预处理。

### 3.1 点云全局修复

由于构架本身体积很大,点云数据较多,很多较小的瑕疵仅凭人力无法发现并且修补,这时使用网格修改功能,对“非流行边”、“自相交”、“高度折射边”、“钉状物”、“小组件”、“小孔”进行修复。

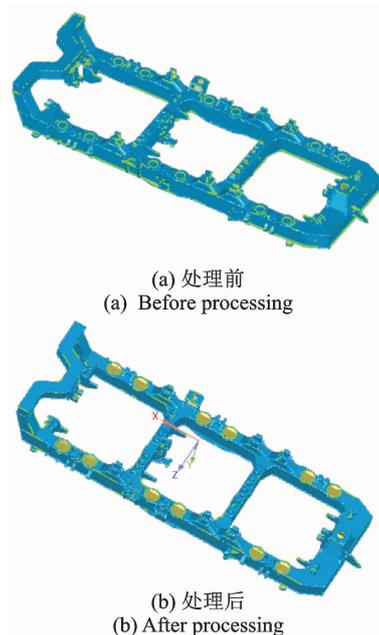


图 3 构架焊接工序点云处理前后对比  
Fig. 3 Point clouds comparison of the processing

### 3.2 特征去除

在构架点云采集时,会因为标识点等原因将一些不属于构架本身的特征采集进来,而这些特征并不会被网格修改功能修复,只能进行人机交互去除。软件的去掉特征功能可以删除模型当中意外凸起或者凹下的部分,然后根据周围的曲率自动进行修复。在操作时,要选取适宜的去掉范围,避免修复后存在不规则的三角面。

### 3.3 孔填充

由于被测构架本身的几何原因造成光学遮挡效应导致采集构架点云时会有一些孔洞等数据缺失,评价时会增大变形测量中的误差。为了减小这种效应,必须将这一部分的数据复原。利用填充孔功能将缺失的点云数据补上,但要注意被填充部位可能与其他部分曲率有差别,选择“基于曲率的填充”可以保证模型中缺失的点云按照周围点云的曲率自然过渡填充,以符合工程设计理念。

### 3.4 数据精简

处理后的点云使用封装功能转为三角面片前必须经过数据精简。因为由扫描仪采集的点云经处理后也含有百万以上的海量数据,在利用软件对图形进行后续运算时,占据绝大部分计算机的内存。Geomagic studio 软件提供的点云精简最简单方法

是设置一个采样百分比,将整体数据均匀减少,但要注意观察特征变化大的地方是否被误精简,否则需要按特征分块后再精简。精简后的数据为原始数据的 60%。

### 3.5 余量去除

在生产过程中,为了确保制造精度会预留加工余量,这些余量在最后都会被去除,比如本研究构架上的弹簧座区域需要机械加工工序找平。由于在焊接和热处理过程会采集到这些数据,因此评价之前要根据设计模型去除。构架焊接工序采集数据预处理后的点云模型如图 3(b)所示。

## 4 构架偏差分析

将构架设计模型导入到 Geomagic-qualify 软件作为误差评价的参考模型(基准),分别将构架焊接和热处理两道工序采集并预处理后的点云导入上述软件,作为测量对象进行偏差分析,进而评价构架在制造过程中的变形。

### 4.1 基准对齐

由于构架在焊接和热处理后主要的变形集中在两根侧梁的垂直方向,为了观察构架的弯曲趋势以及变形状况,需要遵循设计基准进行模型对齐。首先,在构架点云导入模型两根侧梁上盖板表面拟合一个水平面;其次,测量出两根侧梁之间的距离,在中间创建一个铅垂面,使用特征对齐对两个平面创建组进行对齐,两个平面共同约束了构架的 5 个自由度。在构架的最后一个自由度上使用最佳拟合对齐,软件不断计算调整点云和设计数据匹配,直到在最后一个自由度上的误差最小<sup>[10]</sup>。

### 4.2 构架 3D 误差比较

利用 Qulify 软件的 3D 比较功能,实现对齐点云的误差比较,可以全方位了解构架的变形状况。结果通过色谱区分,根据检测精度的要求,自定义颜色的数量,颜色显示的越多则结果越精确。首先,使用构架试件焊接工序点云模型与设计模型进行对比,即设计模型作为参考,构架试件焊接后的模型作为测试对象,评价焊接工序的构架变形;其次,以焊接后的点云模型作为参考,热处理后的点云模型作为测试对象,评价热处理工序的构架变形。笔者采用标准偏差和平均偏差分析构架的变形趋势。平均偏差反映了构架在不同制造阶段变形量的大小,标

准偏差反映了误差数据的离散程度。图 4 为试件 B 退火前后的 3D 误差比较云图。构架 A,B,C 焊接和退火后测量评价结果如表 1 所示。根据表 1 偏差数据对构架不同制造阶段的变形进行分析。结果显示,焊接工序的平均偏差远大于退火工序的平均偏差,表明退火工序对构架变形改善效果有限,退火后的 3D 平均偏差改善量小于 0.58 mm。

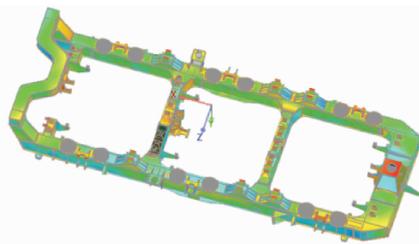


图 4 构架 B 退火前的 3D 误差比较

Fig. 4 3D error comparison of frame B in welding

表 1 试件 A,B,C 制造过程中的 3D 误差比较

Tab. 1 3D error comparison for A, B, C in manufacturing processes mm

构架试件 比较对象	A		B		C	
	标准 偏差	平均 偏差	标准 偏差	平均 偏差	标准 偏差	平均 偏差
焊接后与 设计模型 3D 比较	2.33	2.04	2.12	1.81	2.75	2.20
退火后与 设计模型 3D 比较	1.92	1.50	1.86	1.67	2.53	2.14
退火前与 退火后 3D 比较	0.84	0.58	0.57	0.37	0.45	0.40

### 4.3 标准差与平均偏差一致性检验

为判断标准差与平均偏差结果是否一致,使用  $F$  检验与  $t$  检验

$$F = s_1^2 / s_2^2 \quad (4)$$

其中:  $s_1, s_2$  分别为两样本的标准差。

$$t = \frac{|\bar{x}_1 - \bar{x}_2|}{\sqrt{\frac{((n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2)(n_1 + n_2)}{(n_1 + n_2 - 2)n_1 n_2}}} \quad (5)$$

其中:  $n_1, n_2$  分别为两样本容量。

用式(4),(5)分别对表 1 数据进行检验,试件 A 与试件 B 退火后的偏差数据得出的结果如表 2 所示。可见,在检验水准  $\alpha = 0.05$  时,不拒绝平均偏

差与标准偏差的一致性假设。

表2 标准差与平均偏差一致性分析

Tab.2 Consistency analysis of standard deviation and average deviation

参数	A	B
平均偏差	1.50	1.67
标准差	1.92	1.86
自由度	34	35
F值	1.065 5	
F临界值	2.111 4	
t值	1.355 9	
t临界值	1.676	

#### 4.4 构架四角高差评价

构架四角高差是评价一个构架变形量是否合格的重要标志,四角高差不合格直接影响车辆装配工序的基准。本案除了完成构架四角高差评价,还将利用此测量结果与生产现场评价结果进行对比,验证本研究方法的正确性。

测定构架四角高差的四点位置定义如图5所示,即左右侧架中心线分别与牵引梁中心线和支撑梁中心线的4个交点。热处理后,评价四角高差合格要求:4个点中的最高点或最低点相对设计基准的差值小于等于4mm,否则就要进行压力校正处理。将图6右上方的点设为点1,沿其顺时针方向分别为点2、点3和点4,利用之前对齐的坐标系关系,分别在上述4点对构架A,B,C试件进行高差测量。结果表明,构架A四角高差为3.46mm,构架B为3.02mm均合格,而构架C为7.69mm。超差生产现场反馈结果表明,试件C的四角高差超差,评价为不合格,需要压力校正,与笔者分析结果一致。

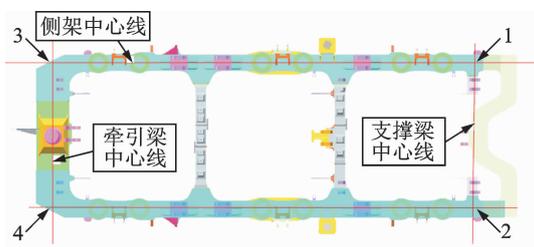


图5 构架四角高差测定位置

Fig.5 Four-angular height difference measuring positions

## 5 结束语

提出了由MaxShot光学摄影测量系统对大型构架进行整体坐标系建立,用HandyScan 700三维

光扫描仪进行目标点云数据快速精确采集,以构架设计基准进行点云对齐,结合Geomagic软件平台进行点云预处理以及制造误差分析与评价的系统化方法。案例研究表明,此方法在生产现场可方便地对大型构架的变形进行快速、全面和精确的实时测量与分析,为该产品制造质量的监控提供了新手段。分析得出了构架在不同制造阶段的3D变形信息,四角高差评价与生产实际中的传统检测结果一致,证明了这种测量和分析方法的正确性。构架制造过程各工序的3D误差信息表明,焊接工序是影响构架变形的主要因素,而退火工艺对构架变形的影响有限,3D平均偏差改善量小于0.58mm,远不及经验描述的显著。该结论为缩短退火时间、降低生产成本与能耗提供了科学依据。

## 参 考 文 献

- [1] 顾一新,齐瑞祥. 机车转向架制造工艺探讨[J]. 电力机车与城轨车辆, 2006, 29(2): 66-67.  
Gu Yixin, Qi Ruixiang. Discussion on manufacture technology of locomotive bogie frame[J]. Electric Locomotives Mass Transit Vehicles, 2006, 29(2): 66-67. (in Chinese)
- [2] 刘福才,安金勇. 转向架构架制造工艺改进[J]. 机车车辆工艺, 2008, 1: 23-24.  
Liu Fucui, An Jinyong. Bogie frame manufacturing process improvement[J]. Locomotive & Rolling Stock Technology, 2008, 1: 23-24. (in Chinese)
- [3] 李娅娜,兆文忠,卢碧红. 货车侧墙薄板结构的焊接变形预测与控制[J]. 焊接学报, 2009, 4: 25-28.  
Li Yana, Zhao Wenzhong, Lu Bihong. Welding deformation prediction and control of truck side wall sheet structure[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009, 4: 25-28. (in Chinese)
- [4] 熊骞,熊超欧. 轨道交通工程车辆转向架构架整体加工检测误差分析研究[J]. 工具技术, 2014, 48: 120-123.  
Xiong Qian, Xiong Chaoou. Traffic engineering bogie frame whole processing detection error analysis[J]. Tool Engineering, 2014, 48: 120-123. (in Chinese)
- [5] Pierre-Hugues A, Jean-Simon F. Application of 3D laser method for corrosion assessment on a spherical pressure vessel[J]. Bindt-Material Testing, 2013, 22(1): 24-32.
- [6] Pierre-Hugues A, Jerome-Alexandre L, Jean-Simon F. Improvement of aircraft mechanical damage inspection with advanced 3D imaging technologies[C]// 5th International Symposium on NDT in Aerospace. Sin-

- gapore: [s. n.], 2013: 13-15.
- [7] 陈博,李秀梅. 基于 CATIA V5 和 Geomagic Qualify 的汽车零部件质量快速检测[J]. 北京汽车, 2011, 5: 40-43.  
Chen Bo, Li Xiumei. Based on CATIA V5 and Geomagic Qualify rapid detection for auto parts quality [J]. Beijing Automotive, 2011, 5: 40-43. (in Chinese)
- [8] 倪曙,喜文飞,张鸣宇. 三维激光扫描仪在变形监测中的研究与应用[J]. 甘肃科学学报, 2013,2:105-108.  
Ni Shu, Xi Wenfei, Zhang Mingyu. Research and application of three-dimensional laser scanner in deformation monitoring[J]. Journal of Gansu Science, 2013, 2: 105-108. (in Chinese)
- [9] 王英姿,刘涛,向峰,等. 基于三维抄数控制塑件变形的应用[J]. 模具制造, 2014, 14:57-59.  
Wang Yingzi, Liu Tao, Xiang Feng, et al. 3D scanner based mold plastic deformation and its control applications[J]. Die Manufacturing, 2014, 14: 57-59. (in Chinese)
- [10] 詹春毅, 鄢春艳. 基于 Geomagic 和 Pro/E 的逆向工程技术应用[J]. 机电工程技术, 2015,6: 118-120.  
Zhan Chunyi, Yan Chunyan. Based on reverse engineering technology of Geomagic and Pro/E[J]. Electrical Engineering Technology, 2015, 6: 118-120. (in Chinese)
- [11] 周敏,杨勇,钟平福. 基于 SEREIN 600 三维激光抄数机的逆向工程研究[J]. 机械工程师, 2010, 5: 97-99.  
Zhou Min, Yang Yong, Zhong Pingfu. Based reverse engineering of SEREIN 600 three-dimensional laser scanner[J]. Mechanical Engineer, 2010, 5: 97-99. (in Chinese)
- [12] Creaform 3D. Dynamic referencing in 3D optical metrology for higher accuracy in shop floor conditions [EB/OL]. [2016-04-24]. [http://www.creaform3d.com/sites/default/files/assets/technological-fundamentals/wp\\_dynamic-referencing-in-3d-optical-metrology.pdf](http://www.creaform3d.com/sites/default/files/assets/technological-fundamentals/wp_dynamic-referencing-in-3d-optical-metrology.pdf).



**第一作者简介:** 曲宝章,男,1960年1月生,硕士、副教授。主要研究方向为轨道交通装备逆向工程与质量工程。曾发表《FRACAS based failure information management for high-speed train》(《Key Engineering Materials》2014, Vol. 620)等论文。  
E-mail:baozqu@163.com

**通信作者简介:** 卢碧红,女,1961年11月生,博士、教授。主要研究方向为轨道交通装备制造质量与RAMS工程。  
E-mail:bhlu@djtu.edu.cn

## 《振动、测试与诊断》荣获第六届华东地区优秀期刊奖

为推动华东地区期刊提高质量,加强期刊出版队伍建设,促进期刊业繁荣发展,华东地区优秀期刊评审委员会于2017年6月开展了第六届华东地区优秀期刊评选工作。经各期刊主管主办单位推荐、各有关省(市)期刊协会初评、华东地区优秀期刊评审委员会终评,共评出第六届华东地区优秀期刊234种,其中江苏省共有56种优秀期刊入选,《振动、测试与诊断》荣获第六届华东地区优秀期刊奖。