

# 基于激光及三维虚拟场景技术的表面平整度 在线检测系统

姜 迈

(中国刑事警察学院 刑事犯罪侦查系, 沈阳 110854)

**摘要:** 文章提出了一种基于激光及三维场景仿真技术瓷砖表面平整度检测方法; 上位机使用 Multigen Creator 完成检测线三维场景建模, 结合 Vega Prime 进行仿真, 并在 vs2010 单文档程序框架进行集成; 由于实际测量过程中真值往往是不可知的, 因此探讨了采用不确定度对激光器纵向角偏移误差进行分析的方法, 通过分析可知, 在纵向偏移角小于 3 度情况下, 激光传感器安装偏差导致的不确定性小于 0.12 mm; 通过不同实验环境下测试可知, 本在线检测系统具有极高精度和重复稳定性, 检测精度可达 0.02 mm, 本系统可以扩展应用到多种领域的在线表面检测系统中。

**关键词:** 表面平整度; 激光检测技术; 不确定度分析; 虚拟场景建模; 重复性试验

## Surface Flatness Online Detection System Based on Laser Detection-3D Visual Scene Technology

Jiang Mai

(Criminal Investigation Department, China Police University National, Shenyang 110854, China)

**Abstract:** This paper presents a ceramic tiles surface flatness online detection based on laser technique and 3D visual scene simulation technology. The overall design scheme was given and we established the detection system's 3D scene modeling through Multigen Creator and Vega Prime visual simulation software, then, apply them into a single document framework based on vs2010. The true value often can't be obtained in the practical measuring process, so the uncertainty of the laser installing angle offset error was analyzed, and we know the offset error uncertainty lower than 0.12 mm under 3 degrees. Through different experimental environments tests we knew this online detection system with high accuracy and replicate stability detection precision can reach 0.02 mm. This system can be applied for many fields online surface detection system.

**Keywords:** surface flatness; laser measurement technique; uncertainty analysis; virtual scene modeling; replicate tests

## 0 引言

我国陶瓷砖品种及产量居世界首位, 然而由于技术、工艺和管理等其他方面与国际水平还是有很大差距。由于瓷砖在烧制过程中会产生弯曲、翘曲、扭曲等变形而造成平整度误差, 因而表面平整度是重要的检测指标之一, 会直接影响产品的质量。目前国内大多数厂家对瓷砖表面平整度检测基本上是采取人工抽样以及手工检测的方法, 缺乏统一标准, 主观性强, 同时由于长时间的连续劳动, 检测结果容易受到人员生理、心理和经验的影响, 因而存在漏检率高、测量误差大及生产效率低等弊端。因此, 开发一种能够完成瓷砖表面平整度测量并进行产品分类的自动检测设备具有重要的现实意义。本文基于 vs2010 单文档框架平台并结合 Creator/Vega 三维图形显示软件设计开发瓷砖表面平整度在线检测系统, 检测精度可达 0.02 mm, 能够极大的满足实际系统需求。

## 1 平整度定义

按照国标 GB/T3810.2-2006 的相关规定, 陶瓷砖平整度

主要决定于以下 3 个指标: 中心弯曲度、边弯曲度和翘曲度。其中, 中心弯曲度是指陶瓷砖中心点偏离由 4 个角点中的 3 点所确定的平面上的距离; 边弯曲度是指陶瓷砖的一条边的中点偏离两个端点所确定的直线的距离; 翘曲度是由陶瓷砖的 3 个角点所确定一个平面, 第 4 个角点偏离该平面的距离<sup>[1]</sup>。为此设计如图 1 所示瓷砖特征点分布图, 通过使用激光位移传感器<sup>[2]</sup>对采集到的 A~I 共计 9 个点的位移坐标值的计算, 最终得出陶瓷砖平整度的评价价值。

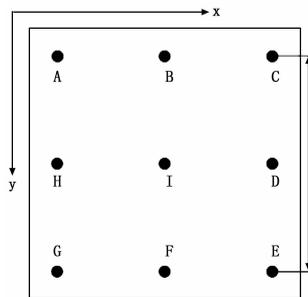


图 1 特征点分布图

## 2 检测方案设计

激光器获得的 9 个位移量坐标后, 应与基准量比较, 得到各点的相对位移。基准量是指在被测点中选定某点为基准点,

收稿日期: 2014-06-10; 修回日期: 2014-07-14。

基金项目: 国家自然科学基金(61203255; 61175089)。

作者简介: 姜 迈(1982-), 男, 辽宁抚顺人, 博士, 讲师, 主要从事模式识别方向的研究。

如选取 I 点为基准点，该点到测量标准板的距离为  $H_I = h$ 。设各点实际测得的距离分别为  $H_A, H_B, H_C, H_D, H_E, H_F, H_G, H_H, H_I$ ，结合图 1，则各点的相对位移量如表 1 所示 ( $L$  为瓷砖尺寸)。

表 1 各点相对位移量

| 特征点 | 相对位移量           | 各点坐标              |
|-----|-----------------|-------------------|
| A   | $H_A - H_I$     | $(0, 0, H_a)$     |
| B   | $H_B - H_I$     | $(L/2, 0, H_b)$   |
| C   | $H_C - H_I$     | $(L, 0, H_c)$     |
| D   | $H_D - H_I$     | $(L, L/2, H_d)$   |
| E   | $H_E - H_I$     | $(L, L, H_e)$     |
| F   | $H_F - H_I$     | $(L/2, L, H_f)$   |
| G   | $H_G - H_I$     | $(0, L, H_g)$     |
| H   | $H_H - H_I$     | $(0, L/2, H_h)$   |
| I   | $H_I - H_I = 0$ | $(L/2, L/2, H_i)$ |

为满足上述平整度测量要求，设计陶瓷砖平整度检测装置试验平台，该平台主要由激光发射模块与感应光电外部触发模块两部分组成。激光发射模块产生三束垂直向下的激光束，从而获得陶瓷砖表面的高度信息<sup>[3]</sup>；感应光电模块用来同步激光位移传感器发射激光的时间。具体流程如图 2 所示。

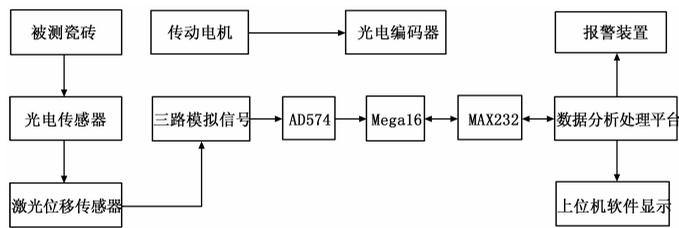


图 2 表面平整度测量流程图

当被测陶瓷砖运行到外触发感应发光光电相应位置时，触发 3 个激光位移传感器将被测陶瓷砖表面前 3 个特征点 A、B、C 距离值存储至单片机中，同时光电编码器将驱动电机的速度信息上传至单片机。通过计算编码器传递过来的脉冲数，单片机有选择的提取被测陶瓷砖中间 3 个特征点 H、I、D 及最后 3 个特征点 G、E、F 到激光器的距离，激光器最后一共获得陶瓷砖表面 9 个位移量坐标<sup>[4-5]</sup>。

### 3 测量系统不确定度分析

由于在实际测量过程中真值或约定真值往往是不可知的，测量结果附有不确定度的说明时才是完整和有意义的。激光器安装偏差对于激光器采样值产生误差，本测量方案中，激光器主要安装偏差有两种，一种为纵向角偏移误差，另一种为横向角偏移误差。

由于计算方法一致，本文以图 3 所示纵向角偏移不确定分析为例，纵向角偏移误差会导致激光器在瓷砖上的投影点发生改变，在标准情形下，激光器发射端在瓷砖表面投影点为 A，此时激光器探测距离为  $M$ ；若在安装过程中激光器在逆时针方向上发生纵向角偏移，则发射端投影点为 A1，相应探测距离变为  $M1$ ，由三角函数关系可知，A 点位移量偏差  $dH_A$  为

$$dH_A = M1 \times (1 - \cos\alpha) \quad (1)$$

由精度值为 0.01 mm 的激光位移传感器重复 12 次测量 A1 点垂直距离，测得数据见表 2，其中纵向偏移角  $\alpha = 3^\circ$ 。

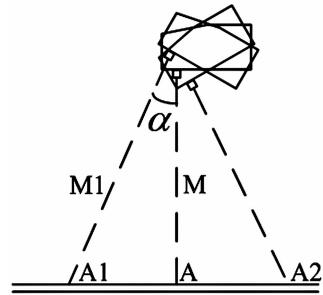


图 3 激光器纵向角安装偏移误差

(安装误差最大值)

1) 计算位移量偏差  $dH_A$  测量结果估计值：

激光器在逆时针方向上发生纵向角偏移后探测距离  $M1$  的测量平均值为： $\overline{M1} = 71.118 \text{ mm}$ ，在纵向偏移角  $\alpha = 3^\circ$  情况下，则 A 点位移量偏差估计值为  $dH_A \approx 71.118 \times (1 - 0.9986) = 0.0975 \text{ mm}$ 。

2) 不确定度评定：

分析测量方法可知，对 A 点位移量偏差测量不确定度影响显著的主要因素有：探测距离  $M1$  测量重复性引起的不确定度  $u_1$ ；激光位移传感器示值误差引起的不确定度  $u_2$ ；皮带流水线在传输过程中振动引起的激光器示值误差不确定度  $u_3$ 。分析这些不确定度特点可知，不确定度  $u_1$  应采用 A 类评定方法，而不确定度  $u_2, u_3$  应采用 B 类评定方法<sup>[6]</sup>。

由 A 点位移量偏差 12 次测量求得的平均值标准差  $\sigma_{HA} = \sqrt{(M1_i - \overline{M1})^2} = 0.0212 \text{ mm}$  ( $i = 1, 2, \dots, 12$ )，则位移量偏差标准不确定度  $u_{HA} = \sigma_{HA} = 0.0212 \text{ mm}$ 。又因为  $\partial dH_A / \partial M1 = 1 - \cos\alpha = 0.0014 \text{ mm}$ ，故由位移量偏差  $dH_A$  测量重复性引起的标准不确定度分量为，其自由度  $\nu_1 = 12 - 1 = 11$ 。

$$u_1 = \left| \frac{\partial dH_A}{\partial M1} \right| u_{HA} = 2.968 \times 10^{-4} \quad (2)$$

由说明书获得激光测距仪误差范围  $\pm 0.001 \text{ mm}$ ，取均匀分布，按式  $u_x = a/\sqrt{3}$  计算激光测距仪示值误差引起的标准不确定度分量  $u_{laser} = 0.001/\sqrt{3} = 0.00058$ ，由此引起的 A 点位移量偏差标准不确定分量为：

$$u_2 = \left| \frac{\partial dH_A}{\partial M1} \right| u_{laser} = 8.12 \times 10^{-7} \quad (3)$$

取相对标准差  $\sigma_{u_2}/u_2 = 35\%$ ，其自由度  $\nu_2 = 1/2 \times 0.35^2 = 4$ 。

皮带流水线在传输过程中会产生振动，这也会产生“抖动”误差，由安装说明书获得抖动误差范围  $\pm 1 \text{ mm}$ ，同理按式  $u_x = a/\sqrt{3}$  计算振动误差引起的标准不确定度分量  $u_{vib} = 1/\sqrt{3} = 0.5774$ ，由此引起的标准不确定分量为：

$$u_3 = \left| \frac{\partial dH_A}{\partial M1} \right| u_{vib} = 8.0836 \times 10^{-3} \quad (4)$$

相应自由度  $\nu_3 = 4$ 。

3) 不确定度合成：

因不确定度  $u_1, u_2, u_3$  相互独立，相互间的相关系数为 0，因此合成不确定度为：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} = 8.3804 \times 10^{-3}$$

$$\text{相对应自由度 } \nu = \frac{u_c^3}{\sum_{i=1}^3 \frac{u_i^3}{\nu_i}} = 4.4568$$

4) 扩展不确定度及不确定报告:

取置信概率  $P = 0.975$ , 自由度  $\nu = 5$ , 查  $t$  分布表得  $t_{0.025}(5) = 2.571$ , 即包含因子  $k = 2.571$ 。于是, 纵向角偏移的扩展不确定度为:

$$U = ku_c = 2.1546 \times 10^{-2} \text{ mm}$$

用扩展不确定度评定纵向角偏移测量的不确定度, 则测量结果为

$$V = (0.0975 \pm 2.1546 \times 10^{-2}) \text{ mm} \quad \nu = 5$$

由此可见激光传感器安装偏差导致的纵向角偏移最大误差小于 0.12 mm, 同理计算横向角偏移误差 0.07 mm, 完全能满足测量系统的精度要求。

### 4 试验结果分析

#### 4.1 分级评定标准

分别求出墙地砖的边弯曲度、中心弯曲度和翘曲度的误差值后, 根据国家标准, 对瓷砖平整度进行分等级。具体如下。

1) 中心弯曲度: 若  $d_c \leq 0.3\% \times \sqrt{2}L$ , 该砖为优等品; 若  $d_c > 0.4\% \times \sqrt{2}L$ , 该砖为不合格品;  $0.3\% \times \sqrt{2}L < d_c \leq 0.4\% \times \sqrt{2}L$ , 该砖为合格品。

2) 边弯曲度: 若  $d_L \leq 0.3\% \times L$ , 该砖为优等品; 若  $d_L > 0.4\% \times L$ , 该砖为不合格品;  $0.3\% \times L < d_L \leq 0.4\% \times L$ , 该砖为合格品。

3) 翘曲度: 若  $d_w \leq 0.3\% \times \sqrt{2}L$ , 该砖为优等品; 若  $d_w > 0.4\% \times \sqrt{2}L$ , 该砖为不合格品;  $0.3\% \times \sqrt{2}L < d_w \leq 0.4\% \times \sqrt{2}L$ , 该砖为合格品。

其中平整度值取  $D = \max\{d_c, d_L, d_w\}$ , 等级分类结果按三项中最低等级来确定, 如有一项优, 一项合格, 一项不合格, 那么该砖为不合格。若某项指标不合格, 则令  $b_i (i = C, L, W) = 0$ ; 若某项合格, 则令  $b_i = 1$ ; 若某项指标为优等品, 就令  $b_i = 2$ 。取  $S = b_L \times b_C \times b_W$ 。当  $S = 0$ , 输出不合格; 当  $S = 1, 2, 4$  时, 输入合格品; 当  $S = 8$  时, 输入为优等品<sup>[7]</sup>。

#### 4.2 试验结果分析

被测瓷砖尺寸为 200 mm×200 mm, 皮带流水线速度为 10 m/min, 若瓷砖间隔距离为 100 mm, 理论上可满足 30 块/分钟的瓷砖检测速度。上位机软件平台基于 VS2010 单文档程序框架, 采用 Multigen-Paradim 公司 Creator 三维建模软件由于添加了颜色、纹理、材质和光照信息, 可以增加三维场景真实感, 它所支持的 Open flight 数据格式标准是世界上领先的可

视化数据库标准, 结合仿真开发软件 Vega Prime 完全能满足测量系统高可靠、硬实时性要求<sup>[8-9]</sup>。图 4 软件运行界面, 下方为实时接收到的 9 个特征点高度信息及平整度分级结果。

为了全面检测在线系统性能, 分别设计连续性、背景光改变、角度旋转三组独立实验。预先在静止状态下测量标准砖平整度值为 0.23。首先在保持测试条件不变的情况下, 对标准砖 A 的平整度进行连续测量, 并对测量结果进行比较, 试验共进行了 20 组, 实验结果如图 5 所示。

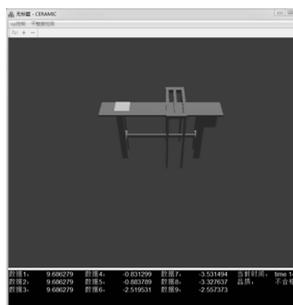


图 4 软件运行界面图

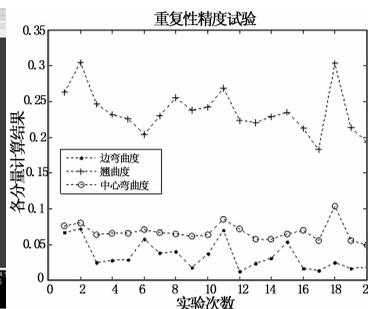


图 5 重复性精度试验

由于白天和晚上的光照条件不同, 这就有必要比较在背景光发生变化的情况下检测系统对同一块标准砖的检测结果。试验中, 对标准砖 A 分别在自然光光照条件下和夜间日光灯光照条件下各进行了 20 次测量。

同时瓷砖进入检测装置的方向具有任意性, 在实际的检测环境中, 我们仅允许进行一次检测。因此, 被检测瓷砖以 90°、180°、270°方向进行检测系统时, 检测结果应保持一致。同样, 对 3 个角度方向各进行独立试验 20 次。

分别将重复性试验、背景光变化试验及方向角改变试验平整度各分量统计结果的均方差值归纳到表 2 中。可以看到, 在连续性试验中, 系统对同一块标准砖平整度的实测结果基本一致, 并都与标准砖平整度的真值相符; 在背景光发生变化的情况下, 系统对同一块标准砖平整度的实测结果基本一致, 变化不大。而在瓷砖进入角度发生改变的情况下, 系统对同一块标准砖平整度的实测结果波动较大, 这主要是由于瓷砖方向改变造成表面特征点提取偏移引起的, 例如在瓷砖进入检测系统前加入角度定位装置, 可有效提高系统精度。

通过表 2 不同试验条件下均方差值波动, 可以发现由于受到不确定因素的影响, 个别数值明显偏离其它测量值而形成粗大误差, 可通过狄克逊准则剔除异常值<sup>[10]</sup>。由试验结果可知, 翘曲度值往往决定了表面平整度值, 最后一行平整度均值 0.209 4, 与标准砖平整度对比可知, 系统精度可达 0.02 mm。

表 2 重复性试验

| 均方差   | 连续性     | 自然光     | 室内光     | 90°     | 180°    | 270°    |
|-------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 边弯曲度  | 0.019 3 | 0.020 9 | 0.040 3 | 1.348 6 | 0.012 3 | 1.880 4 |
| 翘曲度   | 0.031 5 | 0.042 3 | 0.053 0 | 2.561 0 | 0.057 6 | 0.165 3 |
| 中心弯曲度 | 0.012 1 | 0.013 8 | 0.042 7 | 1.789 8 | 0.017 4 | 1.853 2 |
| 均值    | 连续性     | 自然光     | 室内光     | 90°     | 180°    | 270°    |
| 边弯曲度  | 0.035 0 | 0.042 0 | 0.053 6 | 0.110 2 | 0.039 5 | 0.168 2 |
| 翘曲度   | 0.236 0 | 0.162 7 | 0.180 7 | 0.211 1 | 0.192 6 | 0.273 4 |
| 中心弯曲度 | 0.067 8 | 0.058 6 | 0.071 6 | 0.058 6 | 0.082 4 | 0.133 5 |
| 平整度值  | 0.236 0 | 0.162 7 | 0.180 7 | 0.211 1 | 0.192 6 | 0.273 4 |

### 4 测试验证

将该测试系统应用到某型号舵机的测试中，并进行功能验证，试验结果如表 1 中所示。测试数据经系统判断合格，如若不合格，则会显示为红色字体，用于提醒测试人员。

实践证明：该测试系统对被测舵机进行测试，测试过程中该设备工作稳定可靠，测试结果真实的反映了被测舵机的状态，提高了批量测试的效率，使舵机的自动测试更加简便快捷，实用可靠。

表 1 测试结果

|            |           | 负载测试数据  |         |         |
|------------|-----------|---------|---------|---------|
| 舵通道        |           | 1       | 2       | 3       |
| 阶跃响应       | 角速度 / (°) | 89.96   | 108.85  | 99.36   |
|            | 负载电流 / A  | 2.47    | 2.47    | 2.47    |
| 频率响应       | 峰值比       | 0.82    | 0.95    | 0.91    |
|            | 相位差 / (°) | -139.28 | -104.68 | -108.52 |
| 滞环测试 / (°) |           | 0.83    | 0.59    | 0.58    |
| 线性度 / (%)  |           | 0.64    | 0.62    | 0.36    |

备注：此表为常温性能测试记录

### 5 结论

测试验证结果表明，本文选用 LabVIEW 编程技术与 PXI 总线技术研制的舵机综合性能测试系统，功能全面，可全面满足数字式舵机的性能测试要求。实现了波形实时显示、自动测量、记录、分析、处理及打印等功能，人机界面友好，操作方

便，快捷，提高了测试效率，节约了人力资源，提高了参数测量的准确性。

此外，采用任意波形发生器可适应多种测试项目的测试需求；采用自动生成通讯协议方式可适应多种不同的数字通信方式；通过可调整的工艺底座及可更换加载杆等设计，可适应不同的力矩加载要求，舵机供电电压范围宽且可调。可适应不同数字舵机的测试要求，在一定程度上，提高了舵机综合性能测试系统的通用性。

该设计为实现数字化舵机的综合性能测试提供了更高效、稳定的解决方案。

#### 参考文献：

[1] 牛海发, 牛明博. 无人机舵机测试系统软件设计与应用 [J]. 测控技术, 2006, 25 (12): 64-67.

[2] 岳宏达, 何卫国, 曾漫. 基于 PXI 总线的舵机综合性能测试系统 [J]. 计算机测量与控制, 2013, 21 (9): 2339-2341.

[3] 陈敏, 汤晓安. 虚拟仪器软件 LabVIEW 与数据采集 [J]. 小型微型计算机系统, 2001, 22 (4): 501-503.

[4] 牛海发, 牛明博. 一种基于虚拟仪器的舵机测试系统研制 [J]. 实验技术与管理, 2007, 24 (2): 67-71.

[5] 韩大伟, 周军, 于晓洲. 基于 PXI 总线的导弹自动测试系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2008 (11): 1650-1652.

[6] 陈锦威, 史步海. 基于 LabVIEW 的船用发电机特性试验测试系统 [J]. 工业控制计算机, 2007, 20 (3): 81-82.

[7] 谭营, 许化龙, 曲从善. 基于 PC /104 总线的舵机测试系统设计 [J]. 弹箭与制导学报, 2007, 27 (4): 55-57.

[8] 杨乐平, 李海涛, 赵勇, 等. LabVIEW 高级程序设计 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.

(上接第 52 页)

### 5 结论

目前国内对陶瓷砖表面平整度检测基本以人工为主，本文依照国标陶瓷砖表面平整度检测标准，提出了基于激光技术在线平整度检测系统总体设计方案。由于测量装置的特点，如激光位移传感器示值误差、皮带流水线的“抖动”误差等都会对系统的测量结果产生很多不确定因素。通过不确定度分析可知，在纵向偏移角  $\alpha = 3^\circ$  情况下，激光传感器安装偏差导致的不确定性小于 0.12 mm，不会对测量结果精度产生影响。通过对不同试验环境下平整度多次重复性试验可知，本检测系统具有极高精度和重复稳定性，检测精度可达 0.02 mm。基于 vs2010 单文档框架，结合 Creator/Vega 三维仿真软件开发的上位机显示平台，具有直观方便、可扩展性强，便于调试维护等优点，可以广泛应用于航天飞行器建模、战场视景仿真、刑侦现场勘查场景重建、工业检测等多个领域。

#### 参考文献：

[1] GB/T3810.2 - 2006, 陶瓷砖试验方法 第二部分：尺寸和表面质量的检验 [S].

[2] 陈骥, 王鑫, 曹久大, 等. 高速 CCD 激光位移传感器 [J]. 光学精密工程, 2008, 16 (4): 611-616.

[3] 盖志刚, 赵杰, 杨立, 等. 一种新型激光智能水位测量系统的研制 [J]. 光电子·激光, 2013, 24 (3): 569-572.

[4] 谢晋, 韦风, 田牧纯. 微纳 V 槽脆/塑性域切削的 3D 激光检测及评价 [J]. 光学精密工程, 2009, 17 (11): 2771-2778.

[5] 刘会朴. 陶瓷砖平整度在线检测系统的研究 [D]. 天津: 天津大学, 2009.

[6] 段亚轩, 陈永权, 赵建科, 等. 长焦距激光光学系统焦距测试方法 [J]. 中国激光, 2013, 40 (4): 187-193.

[7] 聂陶荪, 王庆松, 胡鸿豪, 等. 墙地砖表面平整度自动连续检测技术 [J]. 中国陶瓷工业, 2004, 11 (2): 9-11.

[8] 殷宏, 王志东, 许继恒. 基于 Creator/Vega 的战场视景仿真 [J]. 解放军理工大学学报 (自然科学版), 2005, 6 (2): 137-141.

[9] 彭亮, 黄心汉. 基于 VC 和 Vega Prime 联合开发的巡航导弹仿真系统研究 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2010, 41 (1): 219-224.

[10] 王瑞华, 王普. 隔离型换热节能系统的粗大误差检测研究 [J]. 国外电子测量技术, 2012, 31 (1): 45-47.