

东南大学《运载火箭变形测试虚拟仿真实验》实验指导书

学生进入大厅，熟悉实验场景，查看背景知识和实验报告，学习实验指南、各环节的步骤引导和每个操作步骤对应的知识提示。如图 1 所示。

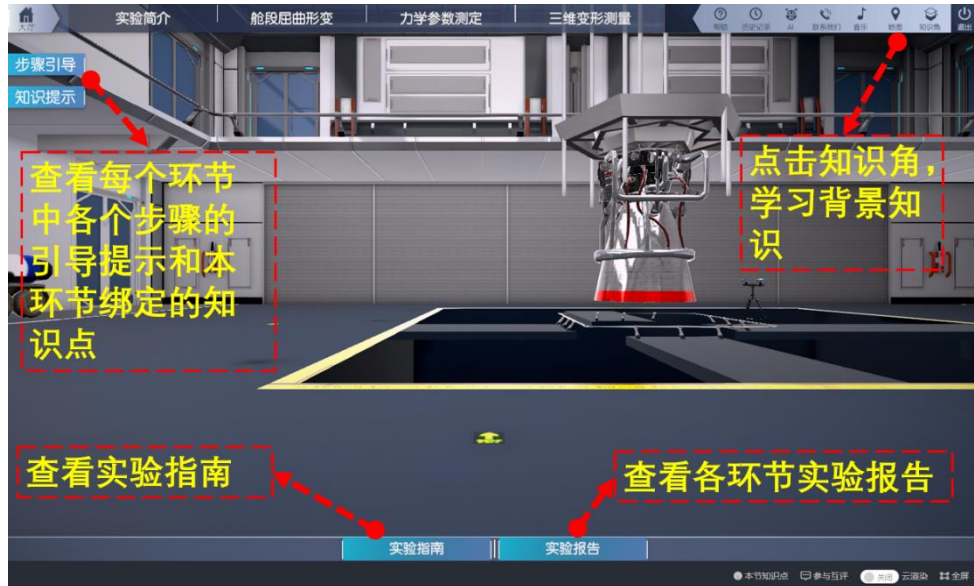
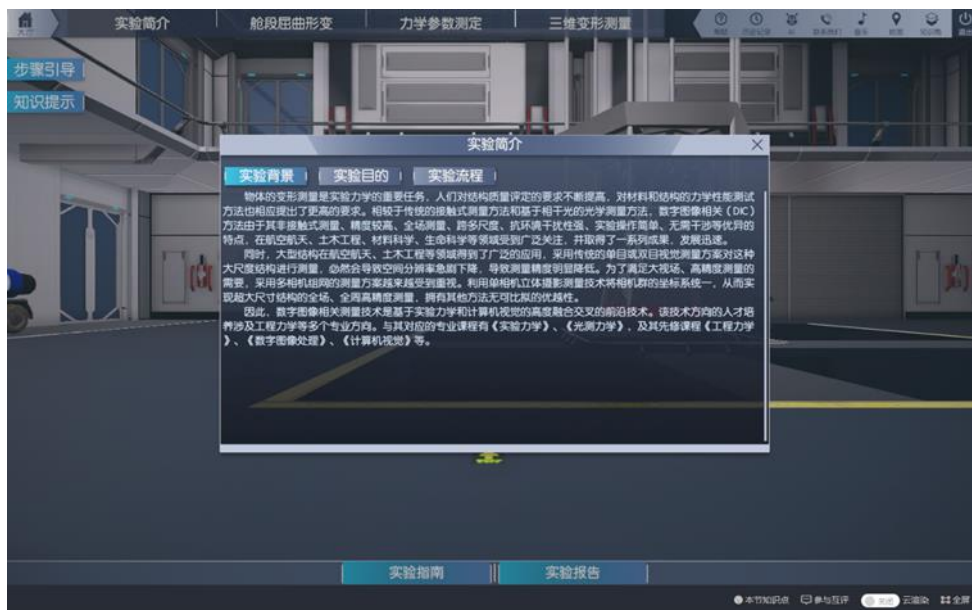
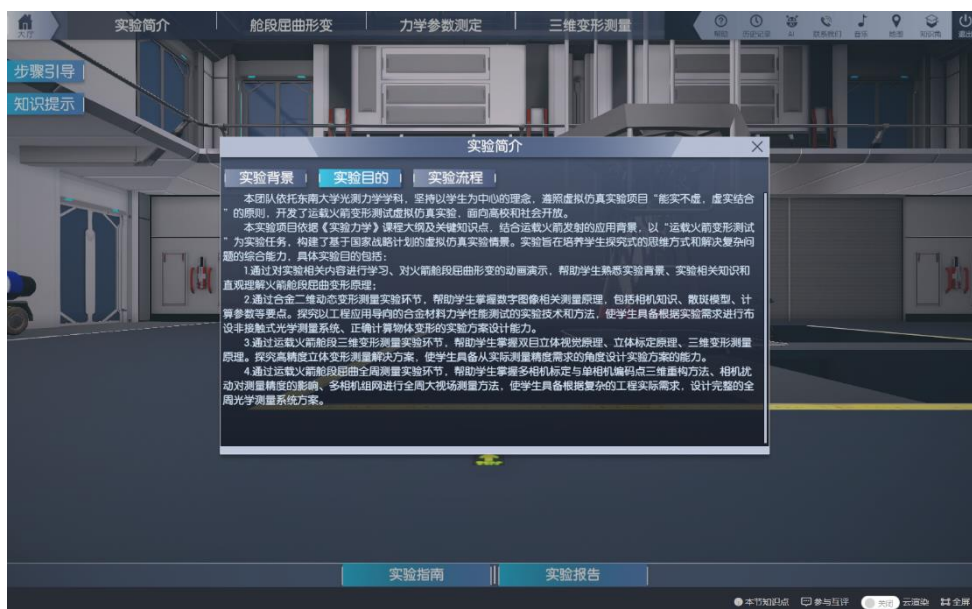


图 1 实验大厅

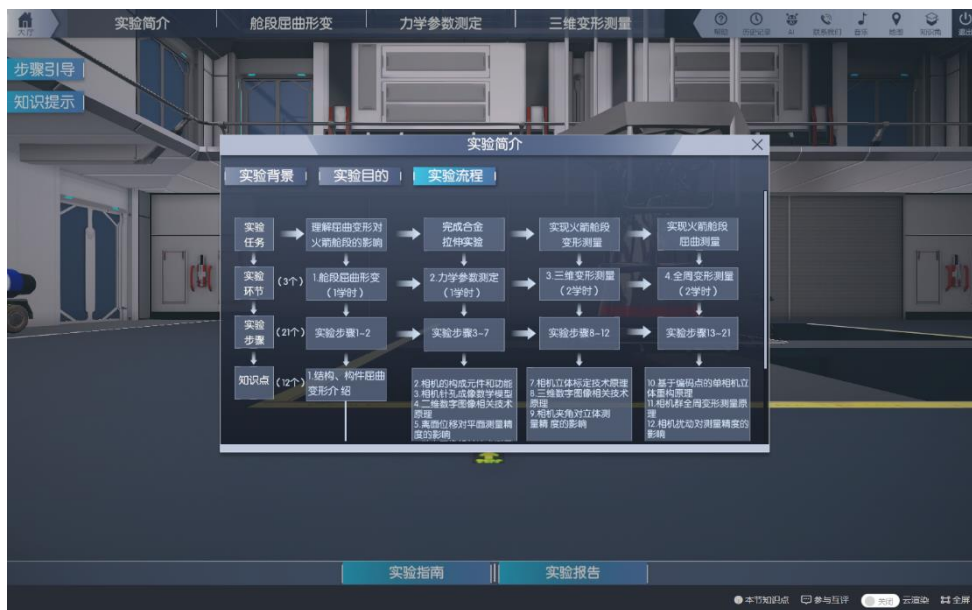
点击实验简介，了解实验的背景、目的和流程，如图 2 所示。



(a) 实验背景



(b) 实验目的



(c) 实验流程
图 2 实验简介

环节一、舱段屈曲变形



图 3 舱段屈曲变形环节

首先了解运载火箭变形测试需求。以生活中常见的场景—踩扁空汽水罐，通过观察和类比使学生对大型结构的屈曲变形有初步的认识。提出对运载火箭舱段屈曲变形的测量需求，引发学生对测量方法的思考。此步骤从生活出发，通过观察和类比将学生的思考引向运载火箭舱段的测量，锻炼学生的发现问题的能力。观看图 3 右侧易拉罐受压真实变形和仿真视频，直观了解薄壁结构的破坏模式，并观看 NASA 火箭燃料舱受压屈曲实验视频。点击翻页来自自主学习关于结构屈曲变形的知识。

步骤 1：自测题。

操作目的：考察学生对基于计算机视觉、数字图像相关、力学测试、结构屈曲破坏等背景知识的了解和掌握程度。

操作过程：点击测试题，完成 10 道单选和 6 道判断题，并点击提交，在小结报告中查看答题是否正确。

赋分模型：预习成绩，满分 8 分。根据学生 15 道自测题答题情况线型赋分，每题，正确 0.5 分，错误 0 分。

操作结果：获得自测题分数，明确正确选项，巩固背景知识。



图 4 复习自测题

环节二、力学参数测定

本环节包括“试件准备”、“测量系统布置”、“数据计算及分析”，三个子环节，对应步骤 2-6、共 5 个步骤。结合材料力学参数测定，学习一种新颖的光学非接触测量方法——数字图像相关方法。在测量金属材料力学参数的实验中，引导学生建立对二维数字图像相关方法的基本原理、主要影响因素的了解，并了解单相机二维方法的局限性，为下一环节的三维测量做铺垫。

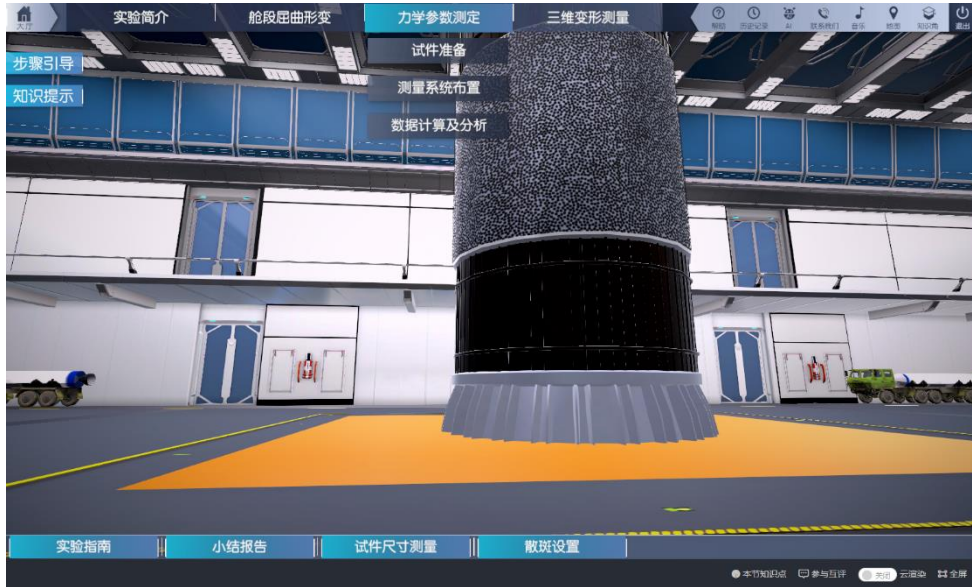


图 5 力学参数测定子环节

步骤 2：尺寸测量和散斑准备。

操作目的：考察学生对散斑的选择。散斑是数字图像相关方法中物体表面位移信息的载体，学生通过对知识角中有关知识的学习，综合被测物体大小、镜头的选择和散斑大小的制定，在此步骤选择合适的散斑，并观察自动生成的散斑的分布情况。

操作过程：

1、点击“试件准备”中的“试件尺寸测量”，进入图 6(a)界面。拖动游标卡尺到红色区域，出现如图 6(b)所示游标卡尺放大图。读取数据并填入相应框中。

2、点击“试件准备”中的“散斑设置”，进入图 7 生成散斑界面。在右侧输入散斑直径，选择覆盖率和随机度，点击“确定”，红色区域中会自动按照选定的参数生成散斑，观察散斑的分布是否合理，并作出调整。

赋分模型：操作成绩，满分 7 分（知识技能 7 分）。

知识技能分：

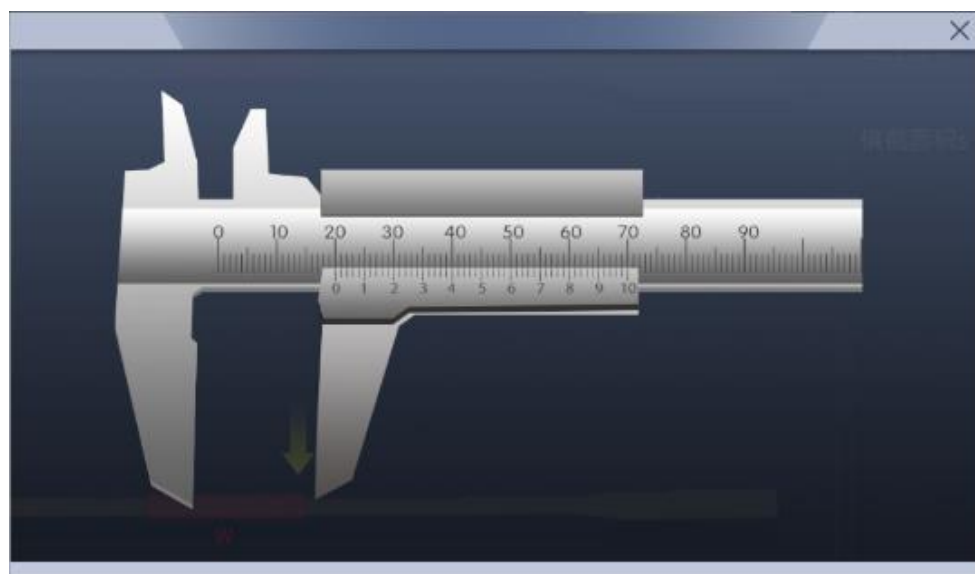
- 1) 宽 h 19.98-20.02，1 分，否则 0 分。厚 w 1.98-2.02，1 分；否则 0 分；
- 2) 散斑随机度 0.3，2 分，否则 1 分；覆盖率 50%，2 分，否则 1 分；直径填写即给 1 分；
- 3) 多次操作按最高得分记；

操作结果：散斑直径越大，单个散斑所占面积更大，在成像时所占像素越多；

覆盖率越大，散斑所占整个区域的总面积更大；随机度越大，散斑分布越杂乱无章。



(a) 试件尺寸测量



(b) 游标卡尺放大图

图 6 试件尺寸测量

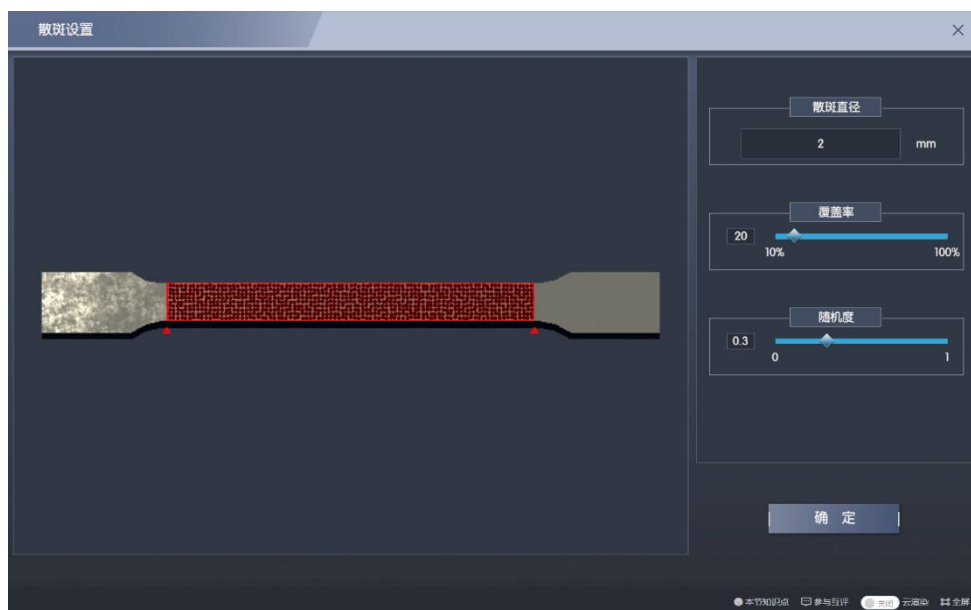


图 7 生成散斑

步骤 3：二维测量系统的布置。

操作目的：综合考察学生对镜头的选用和物距的选择。使用相同的相机时，选用焦距越大的镜头会使相机的视场角越大，能够看到的画面越多。学生需要根据被测物体的大小选择合适的镜头，并调整物距，使每个散斑所占像素在合适范围。

操作过程：

1、点击“力学参数测定”中的“测量系统布置”。在设备仪器库中的三种不同的镜头中选择合适的镜头，并将其拖动安装到大厅中的三脚架和相机上。如图 8 所示。

2、若选择广角镜头和标准镜头，点击“镜头参数”，出现图 8 中的相机和镜头参数调节画面。分别调节物距、光圈、对焦、曝光时间和帧率，调节这些参数时右下角画面中会实时显示调节效果。

3、若选择双远心镜头，点击“镜头参数”，出现图 9 中的相机参数调节画面，双远心镜头只能调节曝光时间。但因无法制作适合远心镜头的极小的散斑，在步骤 4 中无法进行相关匹配。

画面中试件应在视场中心、且对焦清晰、有较高的对比度。同时使被测物体表面的散斑所占像素大小为 3-6 个像素。

赋分模型：操作成绩，满分 6 分（知识技能 6 分）。

知识技能分：

1) 选择标准镜头，3分；广角镜头，2分；

2) 若镜头焦距为 f 毫米，散斑直径为 d 毫米，物距为 L 米。当 $0.182 \times f \times d / L$ 的值在 3-6 之间时，3分；其余 1分；

3、多次操作按最高得分记。

操作结果：当控制物距一定时，选择不同镜头，画面大小不同，广角镜头视野最大，单个散斑所占像素越少；标准镜头次之；双远心镜头只能看到试件表面很小的一块区域，但此时散斑所占像素最多。

当选择统一镜头时，物距越小，画面越大，单个散斑所占像素越多。



图 8 选择设备仪器库中不同的镜头



图 9 广角镜头、标准镜头画面调节界面

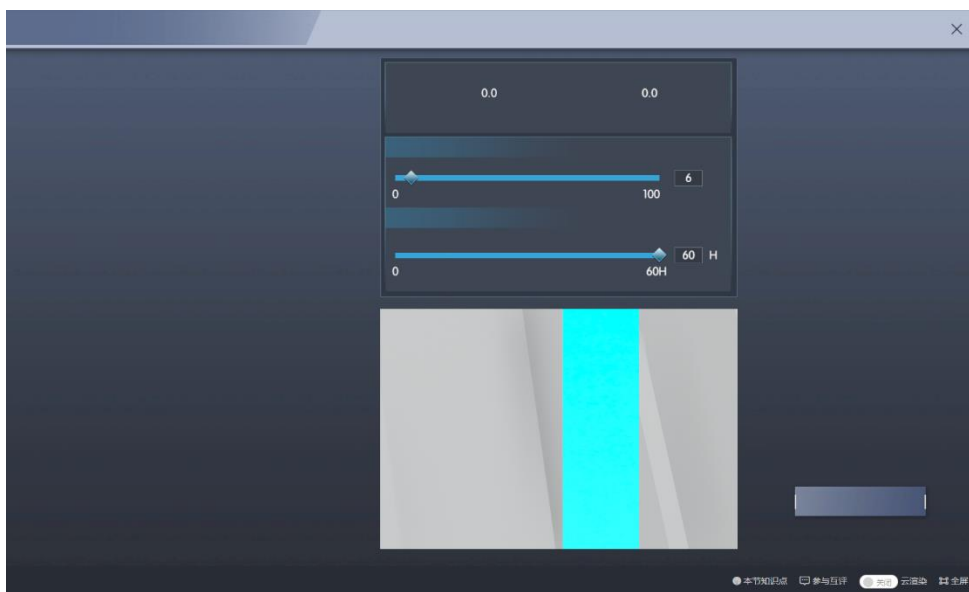


图 10 远心镜头画面调节界面

步骤 4: 数字图像相关匹配计算。

操作目的: 考察学生对数字图像相关中模板匹配原理的理解。

操作过程:

- 1、点击“力学参数测定”中的“数据计算及分析”。点击右下角“开始采集”。此时试验机开始加载，且相机所拍画面中的试件也随之被拉伸，如图 11 所示。
- 2、加载并采集完毕后，点击下方“DIC”计算，学生根据预习的知识，选择下拉框中合适的计算模板大小。点击“计算”，如图 12 所示。
- 3、图 13 所示为模板匹配界面，光标点击右侧目标图像中的绿色原点，绿色原点为模板中心。点击后绿点变为红色且出现黄色透明模板。此模板与参考图中模板进行相关匹配，相关系数实时显示。在目标图像中，从给出的一组模板中找到与参考图像模板相匹配的特定模板。
- 4、若选择远心镜头，则因无法制作适合远心镜头的极小的散斑，无法进行相关匹配。

赋分模型: 操作成绩，满分 6 分（知识技能 3 分+实验能力 3 分）。

知识技能分:

找到相匹配的子区，且相关匹配系数在 0.98 以上，3 分；0.87-0.98 之间，2 分；否则 0 分

实验能力提升分:

- 1) 若学生第一次操作知识技能满分，得 3 分；

2) 若学生没有第二次操作，且第一次操作不为满分，则实验能力提升分为 0 分；

3) 若学生第二次操作知识技能得分比第一次高，且第二次得分为满分，得 3 分；

4) 若学生第二次操作知识技能得分比第一次高，且第二次得分不为满分，得 2 分；

5) 若学生第二次操作知识技能得分不比第一次操作高，且后续尝试中知识技能得分达到过满分，得 1 分；

6) 若学生第二次操作知识技能得分不比第一次操作高，且后续尝试中知识技能得分达均未到过满分，得 0 分；

操作结果：数字图像相关方法在匹配参考图、目标图中相同的子区时，相关系数接近 1，且远高于非互相匹配的子区。



图 11 试验机加载、相机采集图像

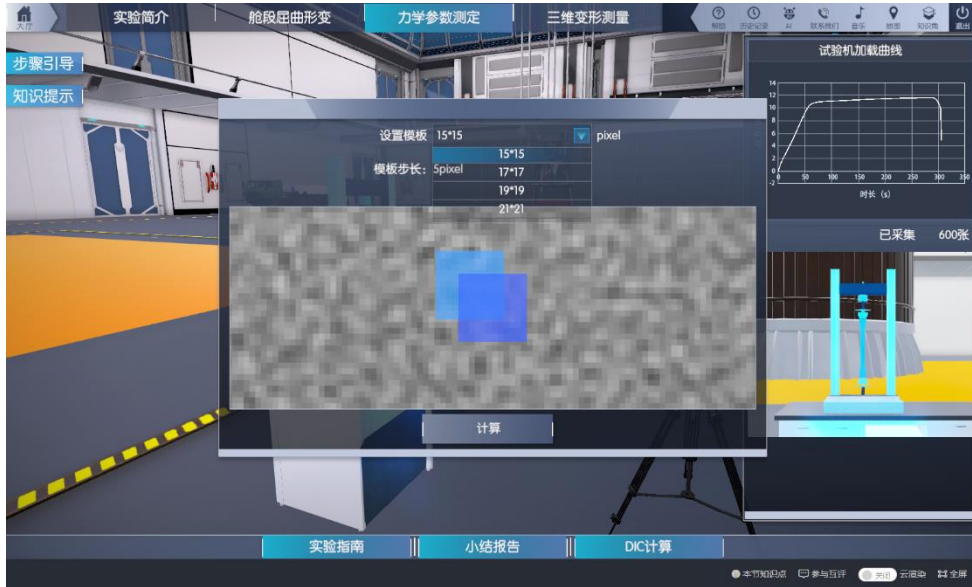


图 12 计算参数选择

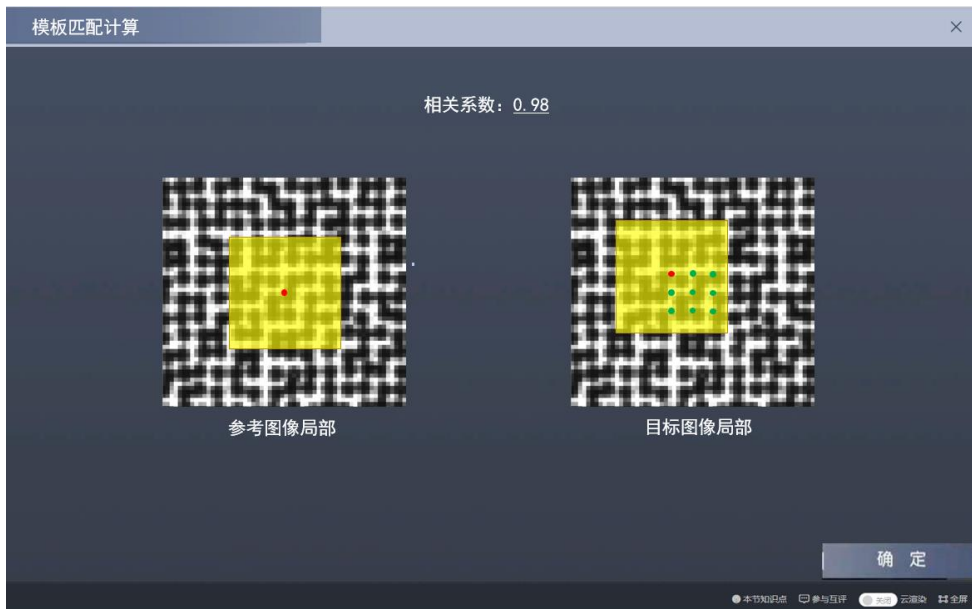


图 13 模板匹配计算

步骤 5: 力学参数计算。

操作目的: 了解数字图像相关方法非接触测量、全场变形测量的优势, 并利用得到的全场变形数据, 设置“光学引伸计”以分析材料的力学性能。

操作过程:

1、点击图 13 中“确定”后, 计算完毕, 出现图 14 中的全场变形云图。将整个变形过程分为 15 个阶段展示, 拖动右下角的滑块即可形象直观地展示试件在拉伸过程中的变形。

2、在大厅中点击“数据分析”, 出现图 15 中的界面。拖动横向和纵向光学

引伸计到试件上，点击“获取数据”分别得到荷载-应变曲线和两个光学引伸计的应变数据。根据这些数据计算得到金属材料的弹性模量和泊松比，填写到相应的框中。点击确定

赋分模型：操作成绩，满分6分（知识技能6分）。

知识技能分：

弹性模量：69-71Gpa,3分；65-69/71-75Gpa,2分；其余1分。

泊松比：0.31-0.35,3分；其余1分

操作结果：二维数字图像相关可以得到平面内丰富的变形的全场数据，可以用来测量材料的力学参数。

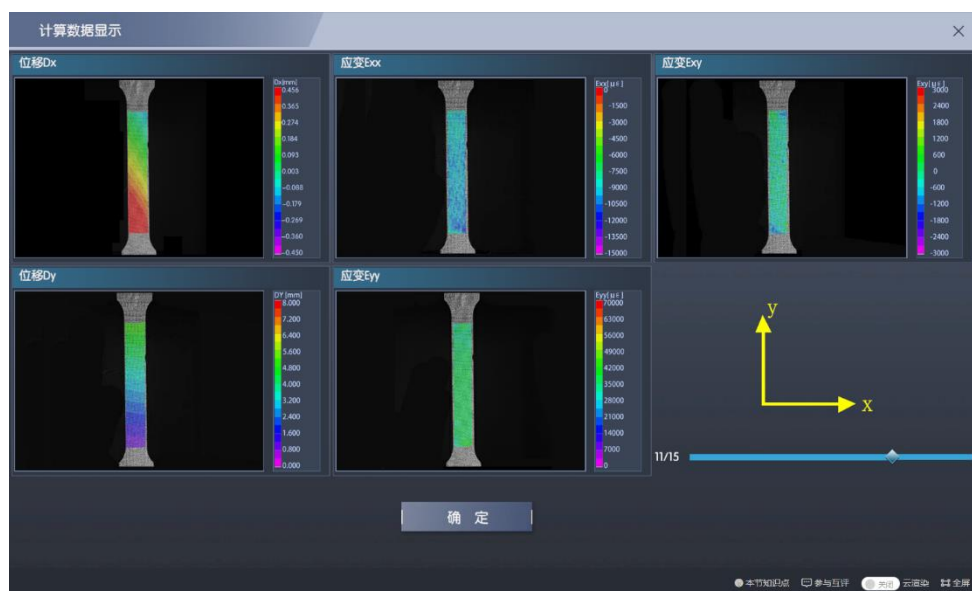


图 14 全场变形云图

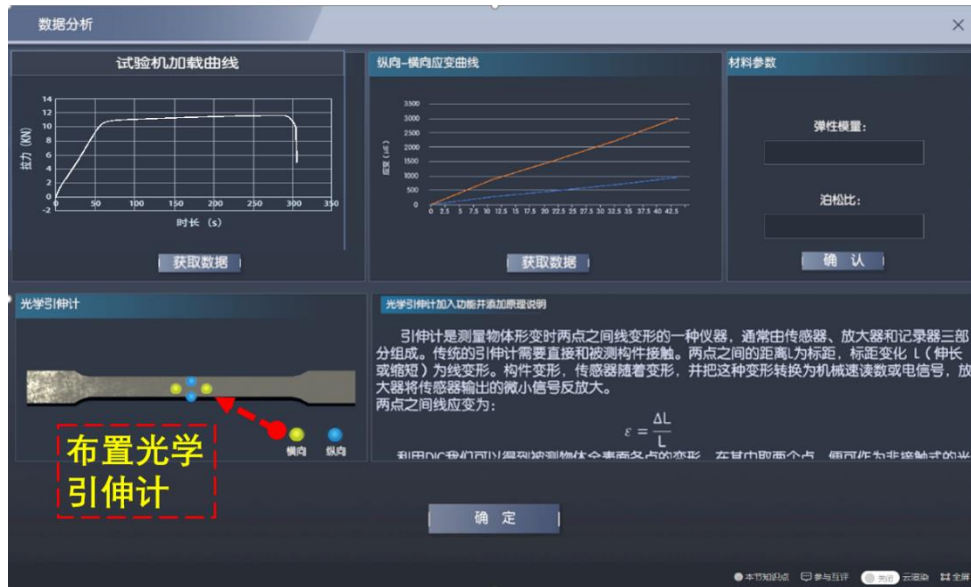


图 15 使用所测数据得到材料力学参数

步骤 6: 离面位移对二维测量的影响。

操作目的: 使学生掌握离面位移对二维测量的影响, 从而了解二维测量的局限性。引入下一环节的三维测量。

操作过程: 点击“力学参数测定”中的“测量系统布置”, 点击“离面位移的影响”, 拖动 10 中右侧的白色箭头, 观察其在左侧像面上投影长度的变化。根据右侧误差曲线和原理公式, 将此刻设置的离面位移对应的应变误差填入框中。

赋分模型: 操作成绩, 满分 4 分 (知识技能 4 分)。

知识技能分:

Δz 为离面位移, ε_{yy} 为计算所得的应变误差。若 $|\Delta z \times 1000 - \Delta \varepsilon_{yy}| / |\Delta z \times 1000| < 0.05$, 4 分; 否则 2 分。

操作结果: 远离相机的离面位移会降低图像放大率, 并在面内引入负应变。靠近相机的离面位移会提高图像放大率, 并在面内引入正应变。且微小的位移即可引入绝对值很大的应变误差。

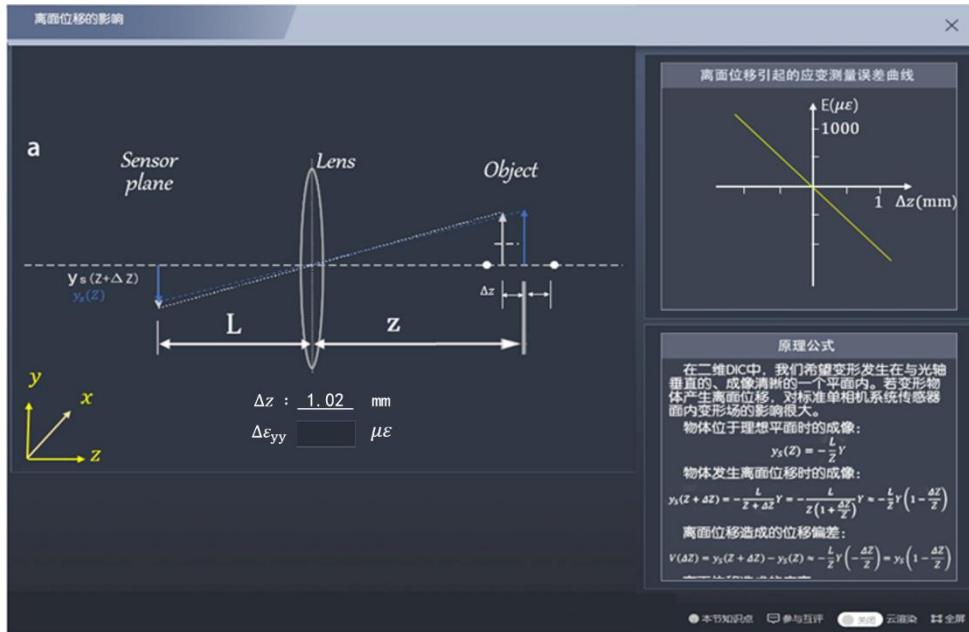


图 16 离面位移对测量精度的影响

环节三、三维变形测量

本环节包括 步骤 7-10, 共 4 个步骤。点击“三维变形测量”进入该环节。在环节二力学参数测定中我们学习了单相机二维数字图像相关方法。而本环节需要测量运载火箭的外舱, 其具有三维曲面形式。仿照人眼双目视觉的原理, 采用两个相机组成双相机三维测量系统, 测量火箭舱段表面的变形。本环节还说明了在测量超大尺寸结构时相机数量不足的劣势, 为下一环节多相机全周变形测量做铺垫。



图 17 三维测量过场动画

步骤 7: 双相机夹角对测量精度的影响。

操作目的：使学生掌握相机夹角对三维重构精度的影响，并据此选择合适的测量夹角。

操作过程：如图 18、19 所示，点击“相机夹角影响”。进入相机夹角对测量精度影响的学习界面。在框中输入不同的角度，观察重构不确定区域的形状变化。学习结束后，在图 19 中光轴夹角中填入选择的相机夹角值。

赋分模型：操作成绩，满分 5 分（知识技能 5 分）。

知识技能分：

相机夹角 30-40 度，5 分；其余 3 分；

操作结果：夹角越大，面内测量误差增大，而离面测量误差减小。应综合考虑面内和离面测量误差，选择立体角为 30-40 度左右为佳。

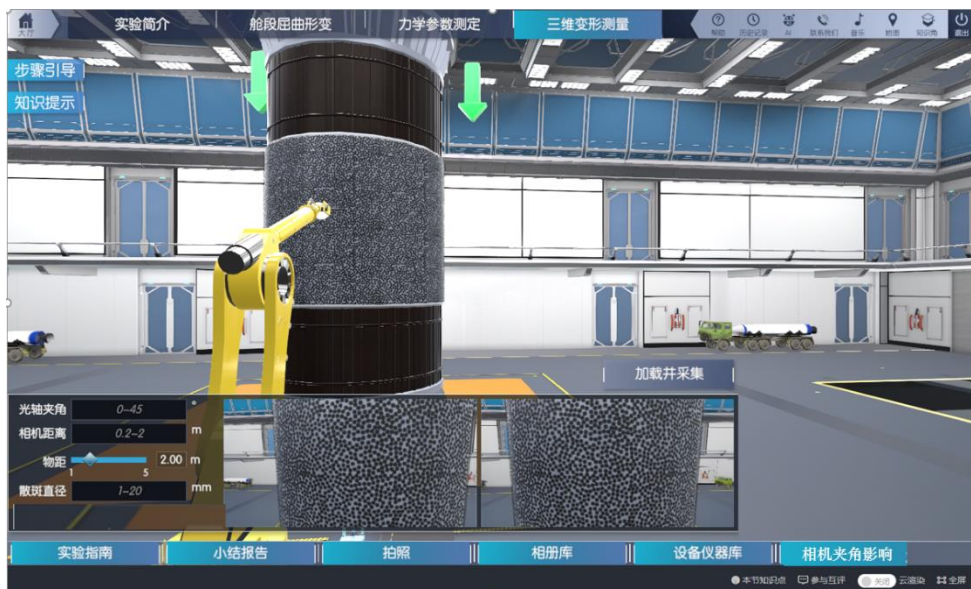


图 18 三维变形测量主界面

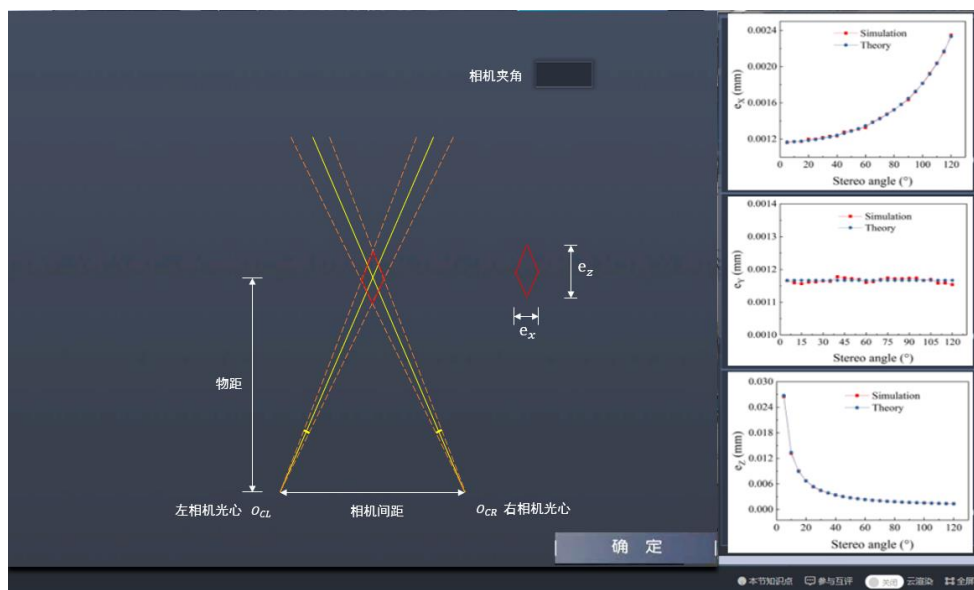


图 19 相机夹角对测量的影响学习界面

步骤 8: 三维测量系统布置和散斑选取。

操作目的: 使学生掌握三维变形测量系统的布置方法。

操作过程:

1、在大厅左下角填写相机间距、物距，如图 20 所示，大厅下方实时显示两个相机拍摄的画面，学生应根据画面的反馈，选择合适的参数，使两相机的画面尽量相同且被测物体的中心在画面中心。

2、根据学生选择的物距大小，选择合适大小的散斑。此环节所用镜头为标准镜头。

赋分模型: 操作成绩，满分 6 分（知识技能 6 分）。

知识技能分:

散斑直径为的 d 毫米，相机距离为 L_1 米，物距 L_2 米；

1) 当 $0.528 < L_1/L_2 < 0.728$ 时, 3 分；其余 1 分；

2) 当 $2.912 \times d / L_2$ 的值在 3-6 之间时，3 分；其余 1 分；

实验能力提升分:

1) 若学生第一次操作知识技能满分，得 3 分；

2) 若学生没有第二次操作，且第一次操作不为满分，则实验能力提升分为 0 分；

3) 若学生第二次操作知识技能得分比第一次高，且第二次得分为满分，得 3 分；

4) 若学生第二次操作知识技能得分比第一次高, 且第二次得分不为满分, 得 2 分;

5) 若学生第二次操作知识技能得分不比第一次操作高, 且后续尝试中知识技能得分达到过满分, 得 1 分;

6) 若学生第二次操作知识技能得分不比第一次操作高, 且后续尝试中知识技能得分均未到过满分, 得 0 分;

操作结果: 物距、相机间距和相机夹角共同决定了双相机三维测量布设。物距不变时, 相机间距越大, 相机夹角应越大; 相机间距越小, 相机夹角应越小。最终应保证两相机的画面尽量相同且被测物体的中心在画面中心。

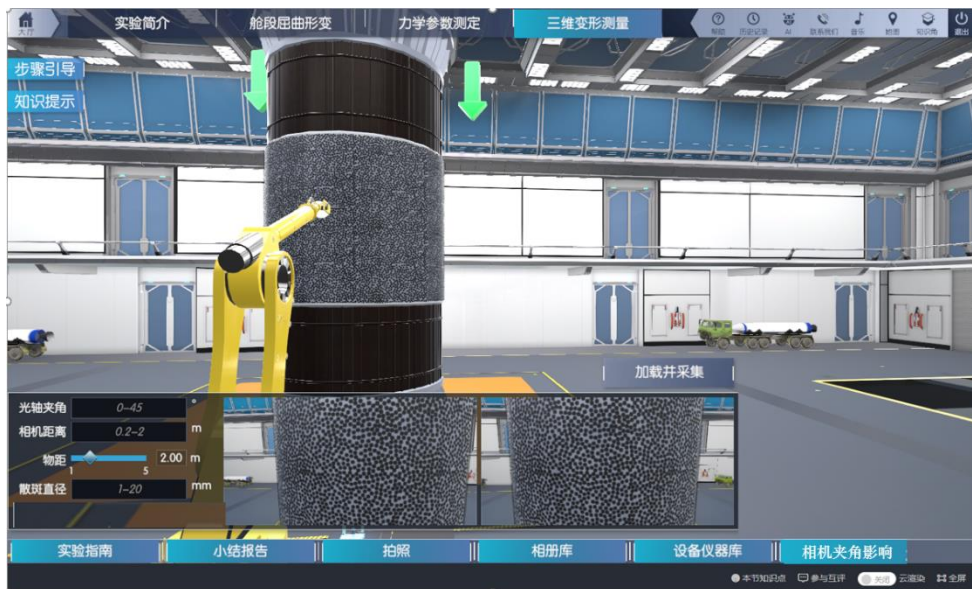


图 20 三维测量系统的布置

步骤 9: 双目相机的标定。

操作目的: 使学生掌握双目相机标定的原理和方法, 了解标定参数并为三维测量做准备。

操作过程:

1、在“设备仪器库”中将标定板拖动至画面指定位置。单击标定板, 点击“移动”, 如图 21 所示, 通过对标定板平移和旋转改变标定板的位置和姿态。点击“拍照”, 不断变换标定板的位姿, 单机拍摄按钮采集图像到标定相册库中。

2、在标定相册库中点击“开始标定”, 标定数据在图 23 中出现。学生拍摄的标定照片不同, 标定结果也不同。

赋分模型: 操作成绩, 满分 13 分 (知识技能 10 分+实验能力提升分 3 分)。

知识技能分：

根据标定的重投影误差函数赋分：

分数 $y=10-300 \times x^3$ ， x 为重投影误差 ($0 \sim 0.3$)， x 大于 0.3 为 0 分，，分数 y 四舍五入取整。

实验能力提升分：

- 1) 若学生第一次操作知识技能满分，得 3 分；
- 2) 若学生没有第二次操作，且第一次操作不为满分，则实验能力提升分为 0 分；
- 3) 若学生第二次操作知识技能得分比第一次高，且第二次得分为满分，得 3 分；
- 4) 若学生第二次操作知识技能得分比第一次高，且第二次得分不为满分，得 2 分；
- 5) 若学生第二次操作知识技能得分不比第一次操作高，且后续尝试中知识技能得分达到过满分，得 1 分；
- 6) 若学生第二次操作知识技能得分不比第一次操作高，且后续尝试中知识技能得分均未到过满分，得 0 分；

操作结果：标定图片中标定板的姿态越丰富，数量越多，标定结果越好，重投影误差越小。

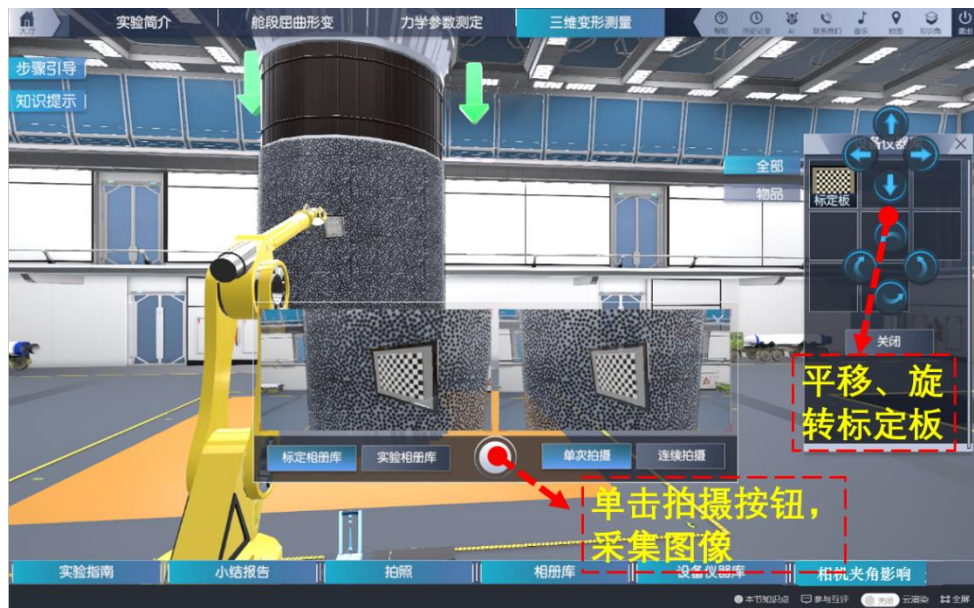


图 21 标定图像采集

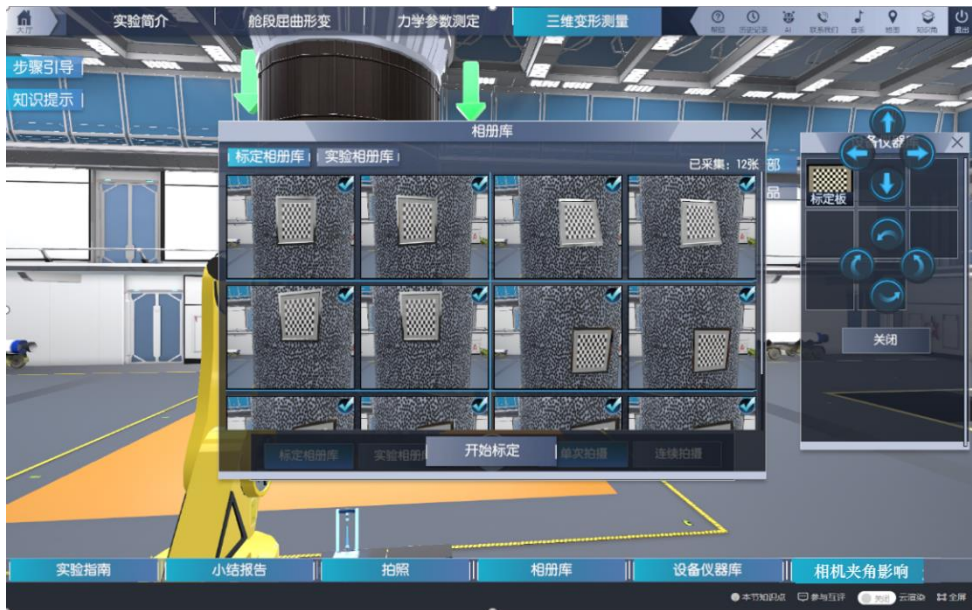


图 22 标定相册库

| 标定数据 | | | | | |
|-----------------|----------|-----------------|----------|-------------|----------|
| 左相机标定数据 | | 右相机标定数据 | | 相对位姿 | |
| center(X) | 993.0586 | center(X) | 994.553 | Angle(X) | -0.088 |
| center(Y) | 992.2715 | center(Y) | 995.0863 | Angle(Y) | 30.253 |
| Focal length(X) | 5377.875 | Focal length(X) | 5293.887 | Angle(Z) | 0.098 |
| Focal length(Y) | 5378.634 | Focal length(Y) | 5293.056 | Distance(X) | 2008.695 |
| Focal length(S) | 0.669975 | Focal length(S) | 0.293519 | Distance(Y) | -0.665 |
| Kappa1 | 0.1 | Kappa1 | 0.1 | Distance(Z) | 538.262 |

重投影误差: 0.18pixel

图 23 双目标定数据

步骤 10 局部三维变形计算。

操作目的：计算三维变形，使学生了解三维数字图像相关方法和二维数字图像相关方法的区别。并认识到双相机在测量大尺度结构时的局限性。

操作过程：如图 24，选择下拉框中合适的计算模板大小，点击“计算”，出现图 25 中的变形云图。将整个变形过程分为 15 个阶段展示，拖动右下角的滑块即可形象直观地展示部分舱体在拉伸过程中的变形。

操作结果：并认识到当需要测量的结构尺寸巨大时，双相机只能测量局部三维变形，需要多相机测量才能满足全场测量需求。

赋分模型：操作成绩，满分 4 分（知识技能 4 分）。

知识技能分：

完成操作选择模板、查看变形给 4 分，不操作 0 分

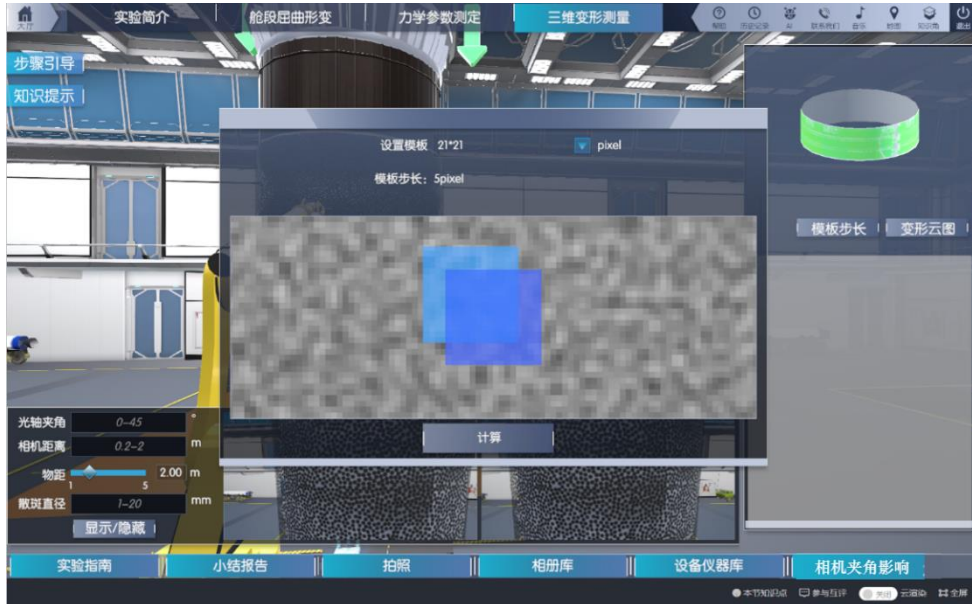


图 24 计算参数选择



图 25 三维变形云图

环节四、全周变形测量

本环节包括步骤 11-15，共 5 个步骤。环节三中只用一套双目相机测量了火箭舱段局部的变形，但火箭舱段在受压屈曲时，发生的位置是无法准确预测的，需要同时测量全周的变形，这就需要多相机组成相机网络来完成这一测量任务。

步骤 11：多相机布置学习。

操作目的：锻炼学生面对超大型结构的测量任务时，布置多相机测量方案的能力。

操作过程：点击“多相机布置学习”，进入如图 26 所示界面，选择不同的相机对数，观察画面中的布置方案、覆盖长度、覆盖角度的变化，为选择合适的方案提供参考。之后在大厅中选择测量方案中的相机对数。

赋分模型：操作成绩，满分 8 分（知识技能 8 分）。

知识技能分：

相机对数：12 对，8 分；10 对，7 分；8 对，6 分；6 对，5 分；4 对，4 分。

操作结果：所用相机数量越多，每对相机所覆盖的范围就越小，相应地测量结果也会提高。

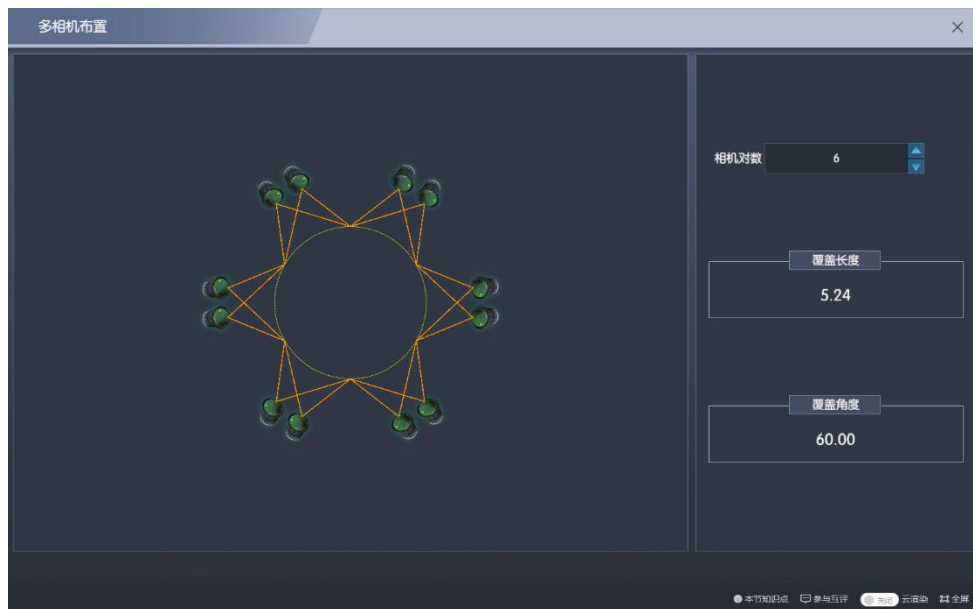


图 26 多相机布置学习

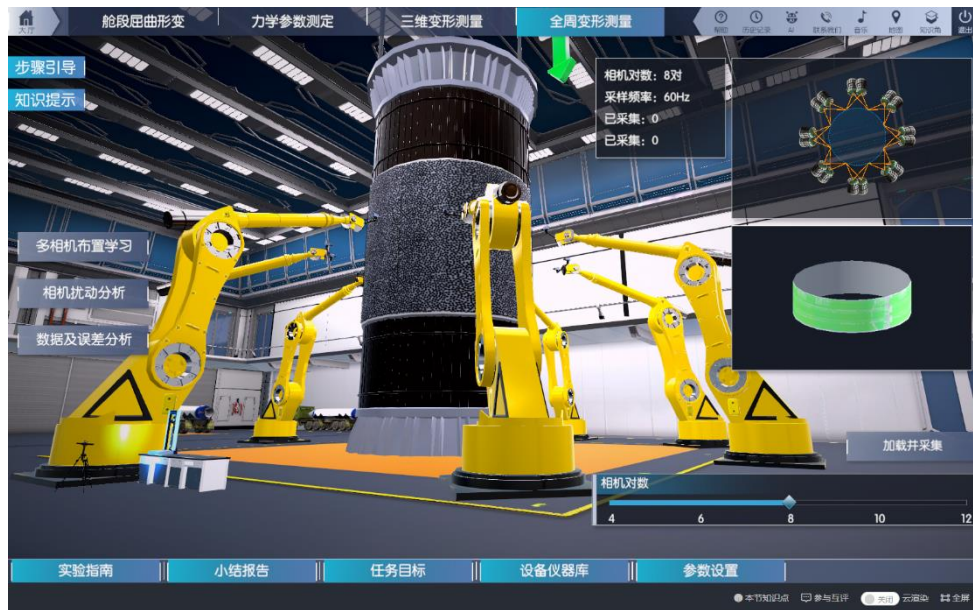


图 27 选择相机对数

步骤 12: 相机扰动对测量精度的影响。

操作目的: 使学生形象地了解“光杠杆作用”，及其对测量结果准确性的影响。当测量超大型结构时，物距可能较大。此时若环境中存在振动、气流等干扰因素使相机本身产生振动，那么由于“光杠杆作用”的存在，将测量误差将被放大。

操作过程: 点击“相机扰动分析”，在图 28 所示的画面中，学生拖动下方的滑块并任意选择一个俯仰角，俯仰角表示相机受到扰动时的微小偏转。此时画面中的黄色虚线也随俯仰角的变化而变换位置。在物距为 3m 时，学生线下计算位移误差并填写在方框中。

赋分模型: 操作成绩，满分 6 分（知识技能 6 分）。

知识技能分：

设学生设置此时扰动为 x 角秒，输入位移误差为 y 毫米；

若 $|1.2 \times y - x| / x < 0.05$ ，6 分；若 $0.05 \leq |1.2 \times y - x| / x \leq 0.2$ ，4 分；其余 2 分；

操作结果: 由于光杠杆作用，即使振动或气流等干扰使相机有微小的转角，测量误差也会被极度放大。

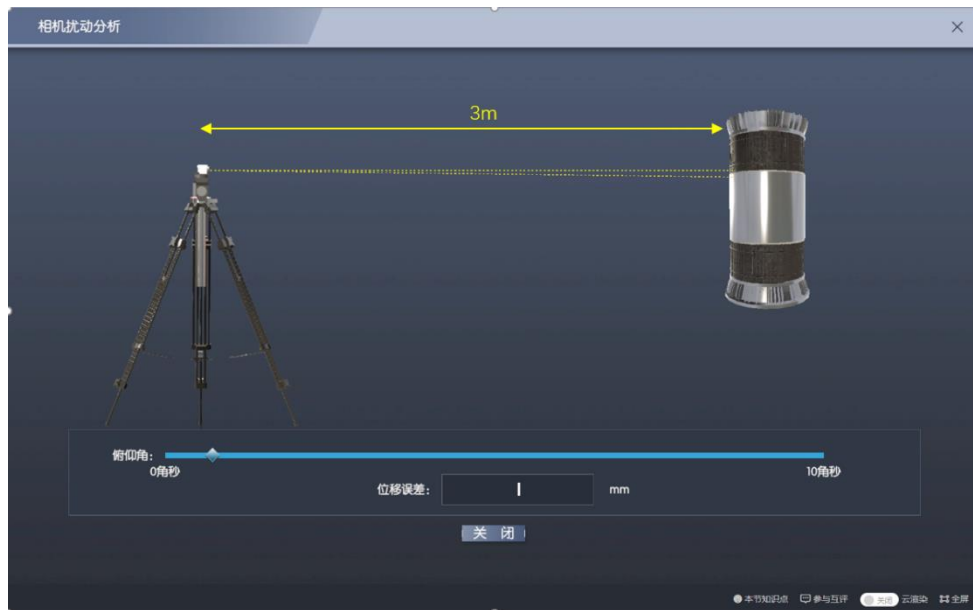


图 28 相机扰动分析

步骤 13: 基于编码点的单相机三维重构和多相机坐标统一。

操作目的: 使学生形象地理解多相机坐标统一的方法。

操作过程:

1、将设备仪器库中的标定板拖动到相机前，几组双目相机同时标定完毕。如图 29 所示。

2、将设备仪器库中的编码点拖动并固定在被测舱段表面，并选择编码点的个数。如图 30(a) 所示。

3、基于编码点的单相机三维重构完成，编码点中心的三维坐标放大显示于画面中。如图 30(b)、(c) 所示。之后，得到编码点在各双目系统中的局部三维坐标，最终将各套双目系统的局部坐标系统一在编码点坐标系中。

赋分模型: 操作成绩，满分 11 分（知识技能 8 分+实验能力 3 分）。

知识技能分:

- 1) 完成操作相机标定 3 分，未完成 0 分；
- 2) 编码点数量 120，5 分；100，4 分；80，3 分；

实验能力提升分:

- 1) 若学生第一次操作知识技能满分，得 3 分；
- 2) 若学生没有第二次操作，且第一次操作不为满分，则实验能力提升分为 0 分；
- 3) 若学生第二次操作知识技能得分比第一次高，且第二次得分为满分，得

3分；

4) 若学生第二次操作知识技能得分比第一次高，且第二次得分不为满分，得2分；

5) 若学生第二次操作知识技能得分不比第一次操作高，且后续尝试中知识技能得分达到过满分，得1分；

6) 若学生第二次操作知识技能得分不比第一次操作高，且后续尝试中知识技能得分均未到过满分，得0分；

操作结果：通过单相机三维重构建立所有编码点的三维坐标，得到编码点在各双目系统中的局部三维坐标，最终将各套双目系统的局部坐标统一在编码点坐标系中。

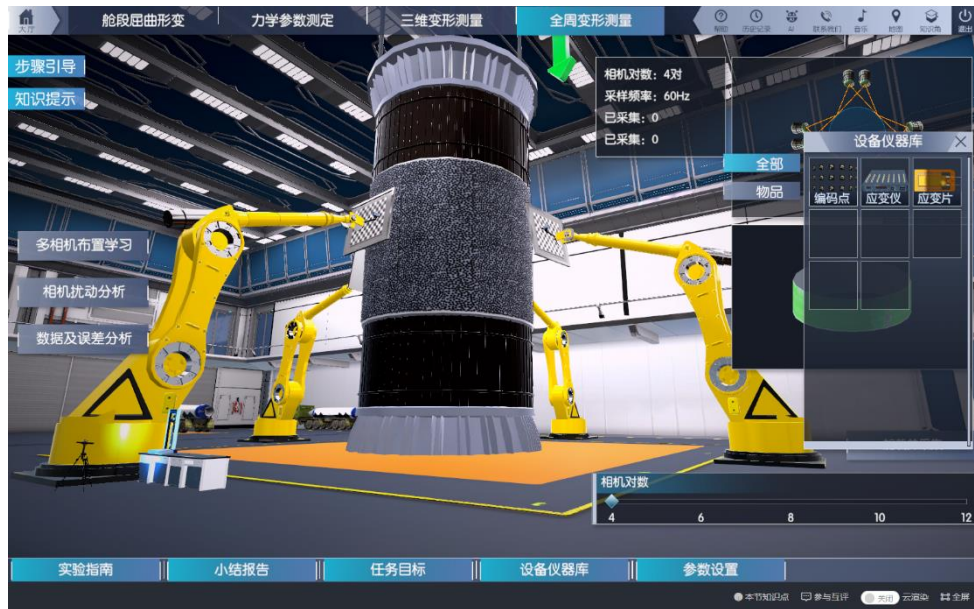


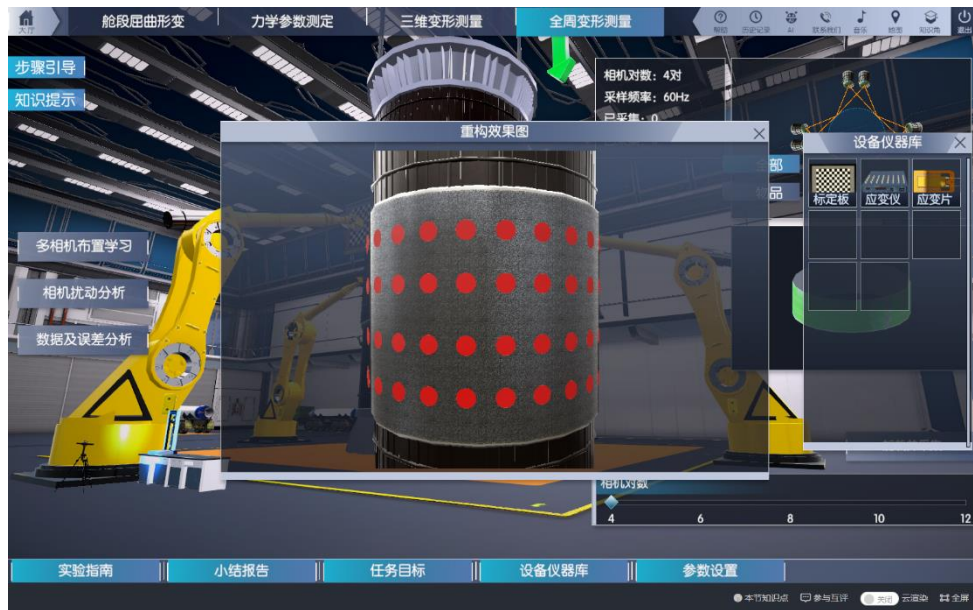
图 29 多相机标定



(a) 选择编码点个数



(b) 单相机重构



(c) 单相机重构效果

图 30 基于编码点的单相机三维重构和多相机坐标系统一

步骤 14: 应变片的布置。

操作目的: 验证 DIC 测量的可靠性, 了解多相机数字图像相关方法相比于单点测量的优势。

操作过程: 将设备仪器库中的应变片和应变仪拖动到被测舱段表面。在步骤 15 完成后, 点击大厅中的“数据及误差分析”, 对比应变片和 DIC 的单点测量信息。如图 31、32 所示。

赋分模型: 操作成绩, 满分 2 分 (知识技能 2 分)。

知识技能分:

完成操作粘贴应变片, 查看应变片与 DIC 数据对比, 2 分; 未完成 0 分。

操作结果: 对比应变片和 DIC 的应变测量数据基本一致, 验证 DIC 测量的可靠性, 应变片在测量变形时只能测量单点, 说明了多相机数字图像相关方法全场测量的优势。

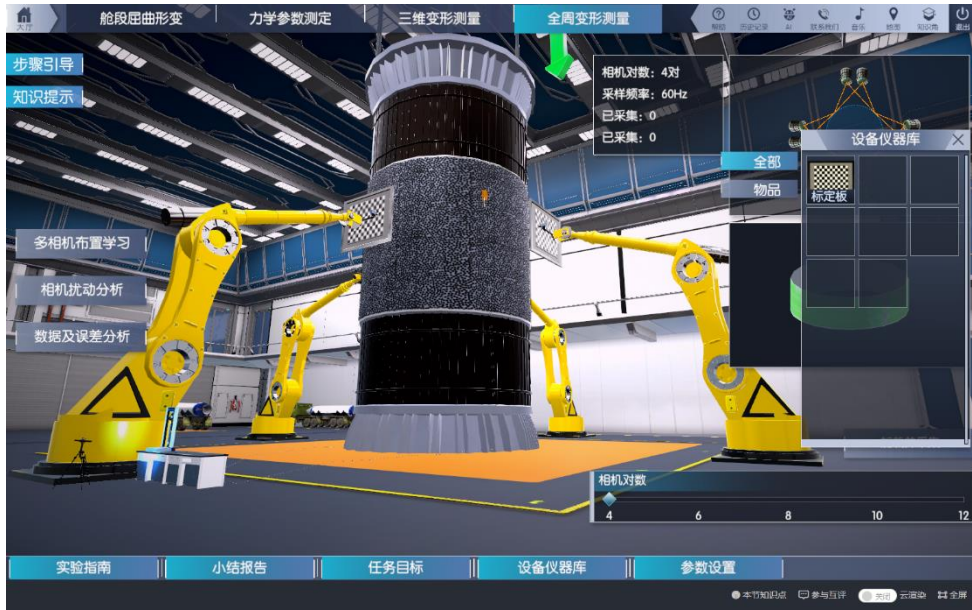


图 31 应变片的布设

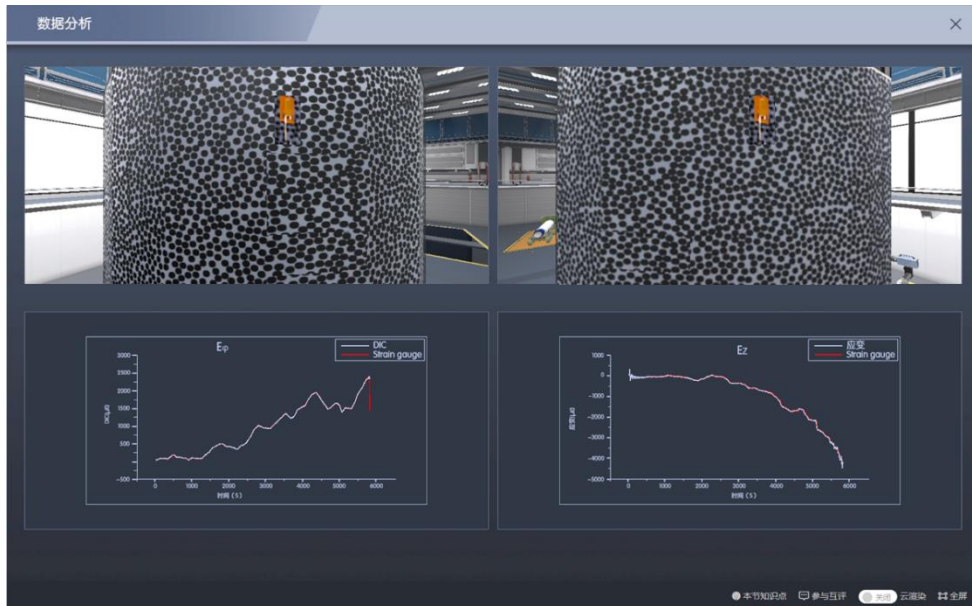


图 32 应变片和 DIC 测量数据对比

步骤 15: 全周三维变形测量结果。

操作目的: 观察全周变形云图, 直观感受屈曲变形发生的位置, 使学生认识到多相机数字图像相关方法用于大型结构全场测量的巨大优势。

操作过程: 如图 33 所示。点击大厅中的加载并采集, 输入 0-150KN 任意大小的荷载, 大厅右侧实时显示此荷载下的变形云图, 至少查看 5 个荷载下的变形云图, 观察屈曲变形规律。如图 1 所示。并可在如图 34 所示的画面中拖动滑块来查看各阶段荷载下的全场变形云图, 并在图中测量出舱段屈曲失效扩展角。

赋分模型: 操作成绩, 满分 5 分 (知识技能 5 分)。

知识技能分：

输入不同荷载 5 次，3 分；4 次，2 分；其余 1 分；不操作不加分。

测量出火箭舱段屈曲失效扩展角，28-32，2 分；其余，0 分

操作结果：多相机数字图像相关方法用于大型结构全场测量时有很大优势，清晰直观地看到屈曲发生的位置。



图 33 加载并实时显示测量结果

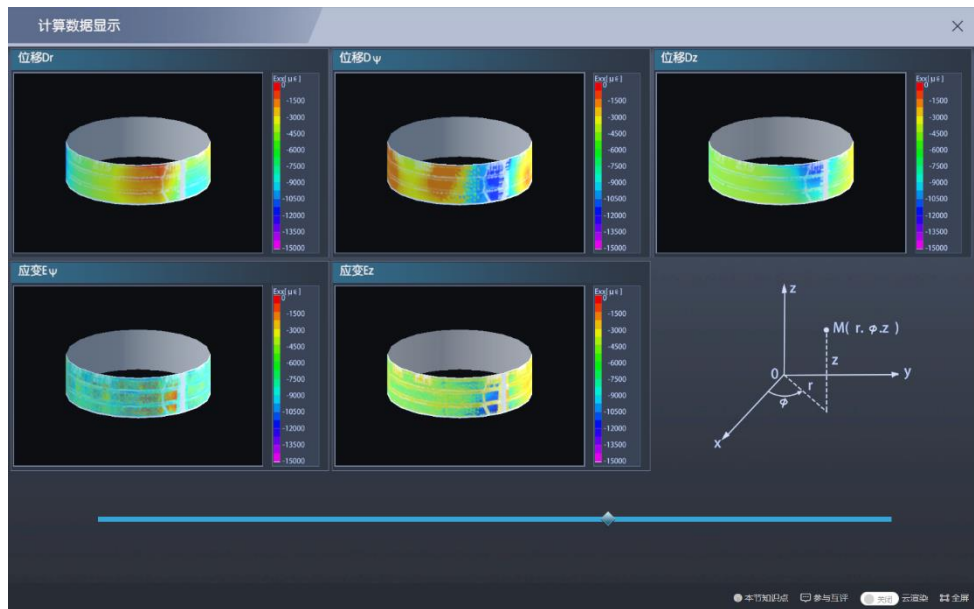


图 34 全周变形云图