

《远洋船舶大合拢垂直焊缝性能设计
虚拟仿真实验》

实 验 指 导 书

朱杰、浦娟 编写

适用专业：焊接技术与工程

江苏科技大学材料科学与工程学院

2019 年 1 月

远洋船舶大合拢垂直焊缝性能设计虚拟仿真实验

实验学时：4

实验类型：综合

实验要求：必须

一、实验目的

通过远洋船舶大合拢垂直焊缝性能设计虚拟仿真实验，使学生了解船舶总段建造法的基本知识，掌握 DH36 船板钢垂直气电立焊接头热影响区组织演变规律，熟悉典型焊缝缺陷形成机理及常用检测方法，掌握焊接工艺参数对焊接接头质量的影响规律，最终培养学生具备将所学焊接专业理论知识应用于远洋船舶大合拢工程实践的能力。

二、实验条件

- 1、远洋船舶大合拢垂直气电立焊仿真系统平台；
- 2、DH36 船板钢焊接接头热影响区组织仿真系统平台；
- 3、垂直气电立焊电弧行为仿真系统平台；
- 4、焊接接头无损检测仿真系统平台。

三、实验原理

船舶分段合拢采用的垂直气电立焊属于一种大线能量高效焊接技术，其接头性能薄弱环节主要位于热影响区。由此，对远洋船舶分段合拢焊接接头热影响区组织与性能的预测极其关键。针对采用 DH36 钢建造的跨区域服役远洋船舶，开发的远洋船舶大合拢垂直焊缝性能设计虚拟仿真系统可分为远洋船舶大合拢垂直气电立焊仿真、DH36 船板钢焊接接头热影响区组织仿真、垂直气电立焊电弧行为仿真和焊接接头无损检测仿真四个子系统，具体流程如图 1 所示。

实验首先利用 DH36 船板钢焊接接头热影响区组织仿真子系统，预测焊接接头热影响区组织与性能。该子系统通过设计焊接热循环关键参数 $t_{8/5}$ （热影响区从 800℃ 降到 500℃ 的时间），依次计算垂直气电立焊线能量 E 和焊缝熔合区冷却速度 w_c ，依据焊接热影响区组织连续冷却转变曲线（CCT 曲线）完成焊接接头热影响区组织构成预测。若预测的热影响区组织中出现粗大马氏体、块状贝氏体、M-A 组元等恶化热影响区性能的物相，则可返回重新设计

焊接热循环关键参数 $t_{8/5}$ ，再次进行热影响区组织构成预测。通过循环运行该子系统，最终得到较优的热影响区组织及性能。

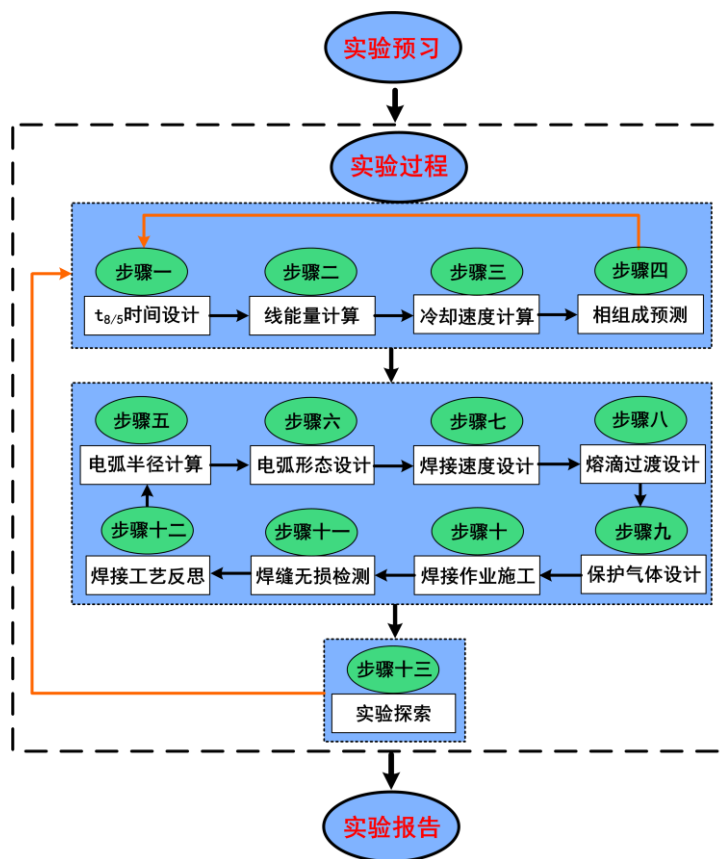


图 1 实验流程

其次，基于热影响区组织构成与性能预测较优结果确定的线能量范围，利用垂直气电立焊电弧行为仿真子系统，计算坡口形状尺寸一定时的电弧作用临界半径。结合先前确定的焊接线能量 E ，设计出电弧形态与熔滴过渡形式，从而确定焊接电流、电弧电压、焊接速度和 CO_2 保护气体流量。

接着，采用上述所得焊接工艺参数，运行远洋船舶大合拢垂直气电立焊仿真子系统，模拟 DH36 船板钢垂直气电立焊现场施焊。同时，通过该子系统观察焊接过程中的电弧形态、熔滴过渡行为和焊缝表面成形，获得焊接接头成形尺寸和力学性能（抗拉强度、硬度、冲击韧性等）。随后，运行焊接接头无损检测仿真子系统界面，进行焊接接头虚拟无损探伤，检测焊接接头是否存在裂纹、气孔、夹渣、未熔合、未焊透等缺陷。

最后，学生根据焊接接头形状尺寸和力学性能参数，结合所学焊接理论知识，分析焊接工艺参数对焊接热影响区组织及性能的影响规律，提出焊接工艺参数优化改进方向，并在远洋船舶大合拢垂直焊缝性能设计虚拟仿真系统中进行验证。

本实验依托远洋船舶分段大合拢垂直气电立焊工程应用背景，借助远洋船舶大合拢垂直焊缝性能设计虚拟仿真系统平台，使学生能够充分理论联系实际，以提高他们解决实际工程

问题的能力，为船舶等大型装备制造企业培养综合性焊接技术人才。

四、实验内容及步骤

虚拟仿真实验包括实验预习、实验操作与分析和考核学习三个环节，实验预习环节指导学生学会实验方法、理论知识及实验内容。实验操作分析环节中用户可以自主充分发挥主观能动性，根据自己的思路 and 判断完成实验。考核环节学生根据老师设置的考核内容完成考核目标。

具体步骤如下：

第 1 步：实验简介及实验预习：学生通过本步骤了解实验背景相关知识，为实验的顺利进行做好基础。学生点击实验简介及实验预习自测模块检验自学效果，如图 2 所示。通过系统交互获取学生时间及自测成绩。

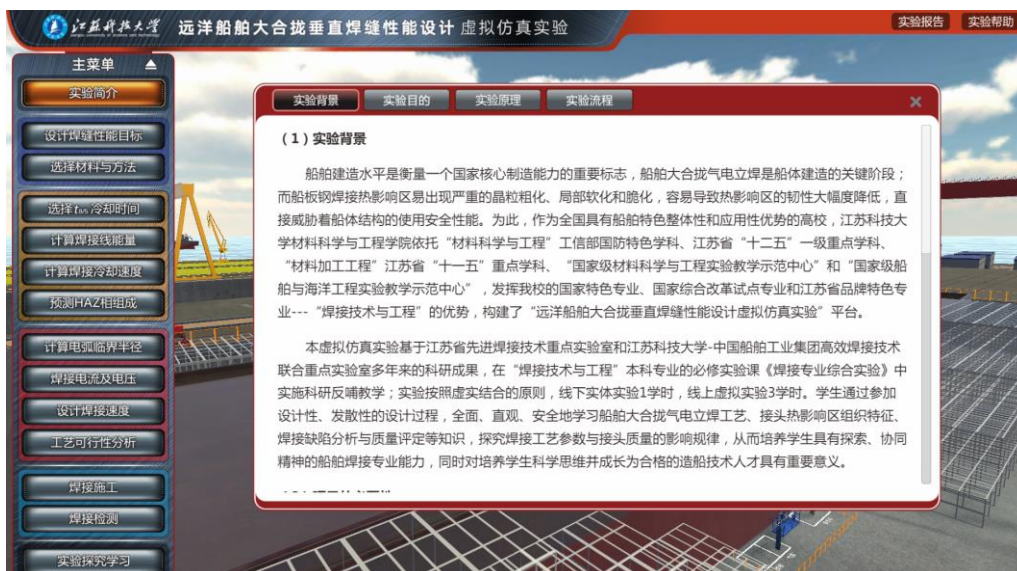


图 2 实验简介及实验预习界面

第 2 步：焊缝性能目标设计：基于预设的远洋货轮航线-好望角航线，通过分析好望角航线气候特征及海况特征，结合远洋货轮船体母材型号及成分，设计合理的船舶大合拢垂直焊缝性能目标。焊缝性能目标的确定可为后续焊接工艺设计提供设计目标，界面如图 3 所示。焊缝性能目标确定之后，进行焊缝性能目标设定合理性判断，当焊缝性能目标设计不合理时，需要重新进行设计。

第 3 步：选择焊接材料与方法：选择正确的焊接材料与焊接方法是保证实验顺利进行的前提，本内容是本实验的重要内容，是本实验能否成功的关键。学生需观察待焊坡口尺寸及待焊焊缝长度，确定焊丝型号与焊接方法，选择焊接方法和焊接材料之后，对所选择的材料及方法的可行性及合理性进行判断，当选择的焊接材料与焊接方法搭配不合理时，需重新返

回进行设计。选择焊接材料与方法界面如图 4 所示。



图 3 设计焊缝性能目标界面



图 4 选择焊接材料与方法界面

第 4 步： $t_{8/5}$ 冷却时间设计：基于远洋船舶焊接分段结构对接头力学性能（硬度、冲击韧性）的要求，利用逆向思维法，通过分析焊缝性能与 $t_{8/5}$ 之间的关系，设计 $t_{8/5}$ 冷却时间，为后续焊接线能量及焊接冷却速度的设计建立初始条件，界面如图 5 所示， $t_{8/5}$ 冷却时间决定焊缝最终力学性能。

第 5 步：焊接线能量 E 及熔合区冷却速度 ω_c 设计：以设定的 $t_{8/5}$ 冷却时间为初始条件，通过相关公式，依次计算焊接线能量 E 和熔合区冷却速度 ω_c ，如图 6 所示，焊接线能量和熔合区冷却速度计算结果决定后续实验结果的精准性。

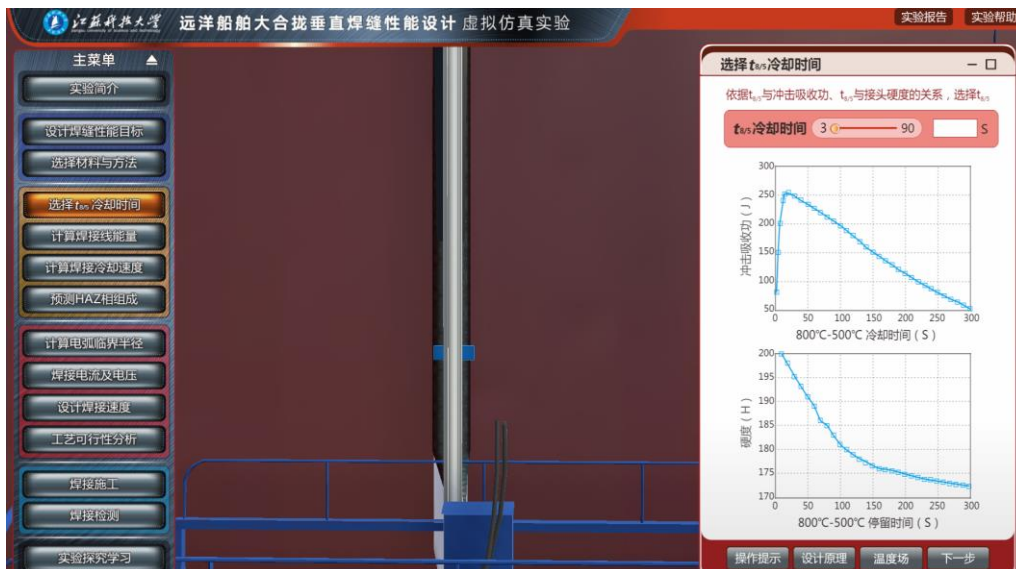


图 5 $t_{8/5}$ 冷却时间设计界面

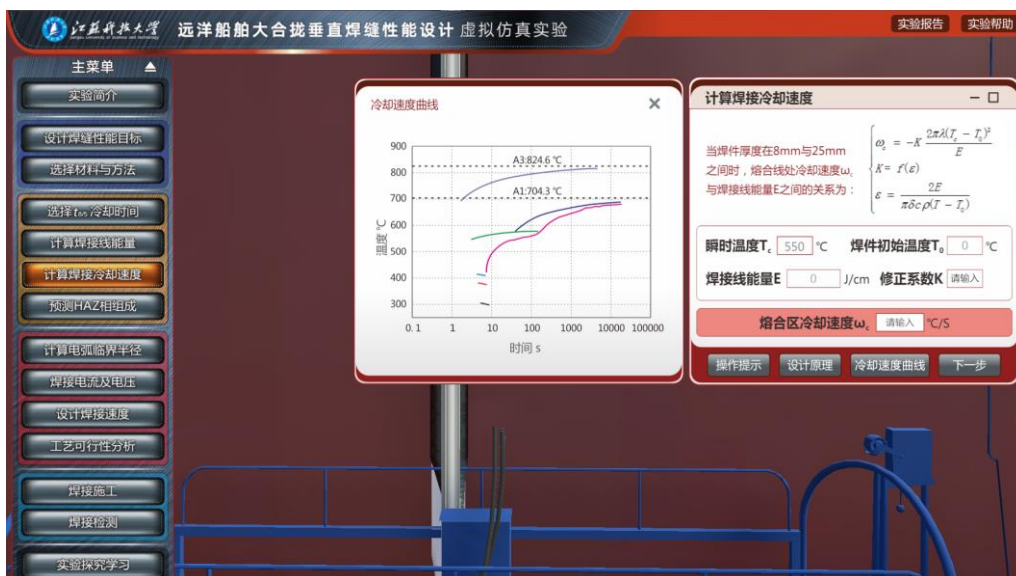


图 6 焊接线能量及熔合区冷却速度设计界面

第 6 步：热影响区相组成预测：根据焊接热影响区组织连续冷却转变曲线（CCT 曲线），结合前步计算的垂直气电立焊线能量 E 和焊缝熔合区冷却速度 ω_c ，预测焊接接头热影响区组织构成，如图 7 所示。

根据冷却速度曲线在 CCT 曲线上的位置，判断对应的焊接相组成，不同的冷却速度会获得不同的相组成。当焊接相组成中含有马氏体时，焊接相组成不合理，此时焊接性能较差，不能满足船舶航行要求。因此，当根据冷却速度判定的接头相组成中含有马氏体时，需要重新设计熔合区冷却速度。

第 7 步：电弧作用临界半径 r_H 计算：基于既定板厚 H 、焊接坡口间隙 a 和根部间隙 b ，计算电弧作用临界半径，如图 8 所示。

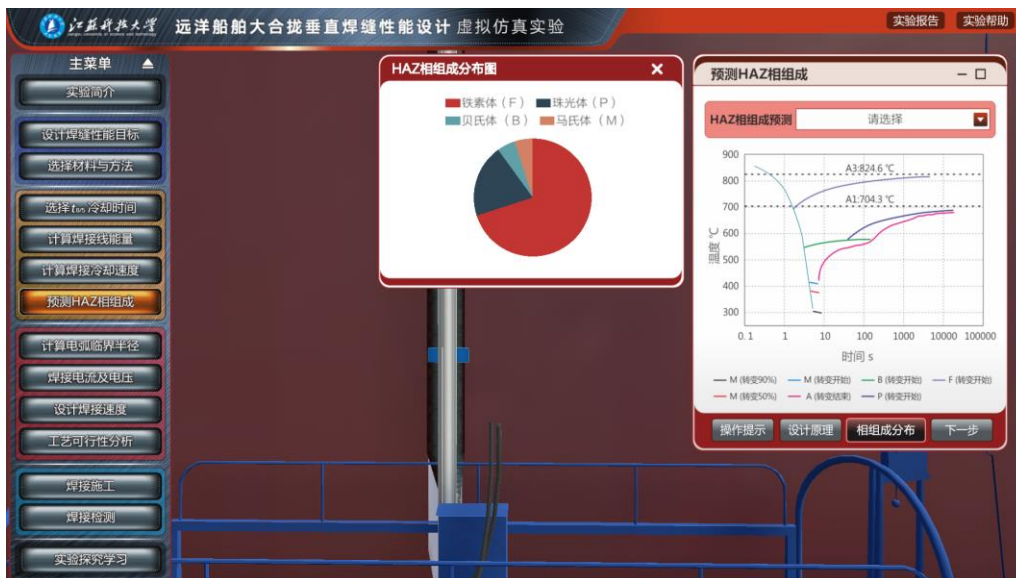


图 7 热影响区组织构成预测界面

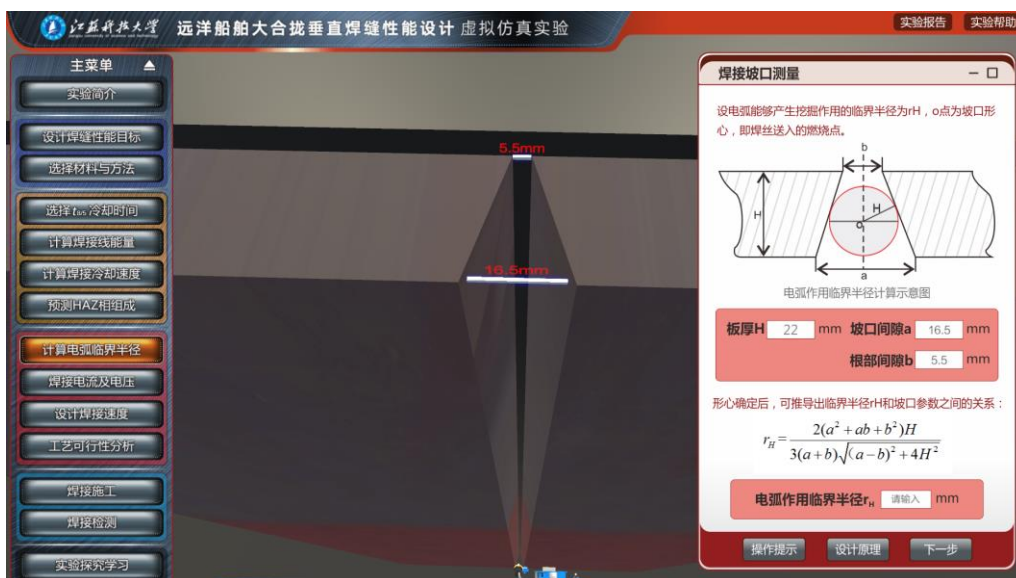


图 8 电弧作用临界半径计算界面

第 8 步：电弧形态及熔滴过渡设计：根据电弧作用临界半径 r_H 和焊接线能量 E ，设计电弧形态及熔滴过渡形式，确定焊接电流 I 及电弧电压 U ，如图 9 所示。

第 9 步：焊接速度 v 计算：根据线能量公式，结合上述确定的焊接电流及电弧电压数值，计算焊接速度 v 。

第 10 步：DH36 船板钢垂直气电立焊试焊：采用上述所得焊接工艺参数，运行远洋船舶大合拢垂直气电立焊仿真试焊功能，观察焊接过程中的电弧形态、熔滴过渡行为，分析焊接参数设定的合理性，界面如图 10 所示。当结果显示工艺参数设定不合理时，需重新设计焊接参数。



图 9 电弧形态及熔滴过渡设计界面



图 10 焊接速度和气体流量设计界面

第 11 步：气流量设定 DH36 船板钢垂直气电立焊施焊：焊接工艺参数分析可行后，即可进行正式焊接施工，在正式焊接施工之前，需通保护气，保护气是保护焊接正常成形的条件，因此，必须合理设定焊接保护气，保护气设定界面如图 11 所示。

保护气设定之后，即可开始进行正式焊接实验，运行远洋船舶大合拢垂直气电立焊施工仿真功能，模拟 DH36 船板钢垂直气电立焊现场施焊，界面如图 12 所示。观察焊接过程中的电弧形态、熔滴过渡行为和焊接温度场。

第 12 步：焊接接头无损探伤：首先观察焊缝宏观成形，其次利用虚拟 X 射线探伤仪检测焊接接头缺陷，最终对焊接接头的力学性能进行测试，分析焊接性能是否实现设计目标，如图 13 所示。



图 11 垂直气电立焊保护气设定界面

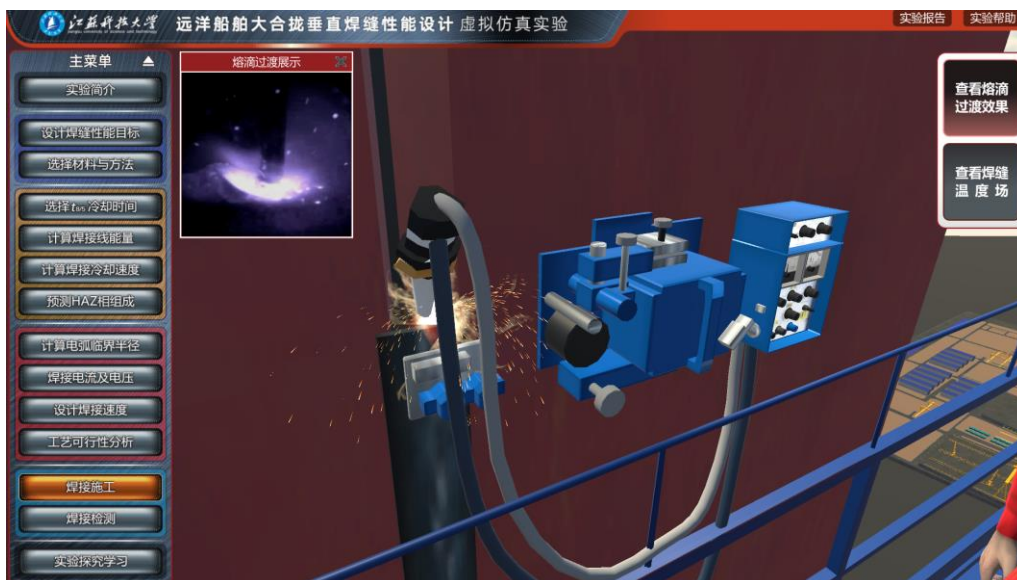


图 12 垂直气电立焊虚拟施焊界面

第 13 步：实验结果探究学习：本模块是附加模块，为选做内容。学生根据自己的学习状态自行决定是否进行，本实验内容具有一定的探索性及难度，需要学生根据探究目的进行探究，最终分析是否实现探究目标。

本部分包括两部分探究内容：(1) 探究线能量变化对远洋船舶大合拢垂直焊缝焊接过程及焊接质量的影响；(2) 探究固定焊接线能量条件下，焊接电流及焊接电压变化对远洋船舶大合拢垂直焊缝焊接过程及焊接质量的影响。探究内容需要根据焊接接头形状尺寸和力学性能参数，结合所学焊接理论知识，分析焊接工艺参数对焊接热影响区组织及性能的影响规律，提出焊接工艺参数优化改进方向，并进行验证，如图 14 所示。



图 13 焊接接头无损检测界面



图 14 实验结果探究学习界面

五、实验组织运行要求

1、任课教师定期对线上实验平台进行维护，并提前 2 周向学生公布实验安排，布置实验内容，提供实验指导书。

2、线上实验前，任课教师线下了解学生对焊接理论知识的掌握情况，帮助学生回顾焊接接头成形及组织性能相关理论知识，讲解垂直气电立焊原理、装备组成及操作方法，布置实验预习作业。

3、任课教师检查学生的线下实验预习情况，取消未完成线下实验预习学生的线上实验资格。

4、任课教师在多功能教室给学生介绍远洋船舶大合拢垂直焊缝性能设计虚拟仿真实验系统构成及各部分功能。

5、学生根据实验指导书，在计算机上运行远洋船舶大合拢垂直焊缝性能设计虚拟仿真实验系统，记录实验过程和数据，分析实验结果，用于完成实验报告。

六、思考题

1、对比分析不同 $t_{8/5}$ 对 DH36 钢热影响区组织构成的影响，并说明原因。

2、解释焊接线能量对电弧行为和熔滴过渡的影响规律。

3、分析垂直气电立焊接头成形尺寸的影响因素，以及焊接工艺参数对热影响区性能的影响规律。

4、解释垂直气电立焊接头产生焊接缺陷的原因。

七、实验报告

实验报告中要求包含实验过程记录、实验数据整理和实验结果分析，并能准确的回答思考题，最终将纸质实验报告以自然班级为单位提交给任课教师。