凝聚态物理探究式教学教师指导手册

32 学时安排 讨论课组织 评价量规与实施记录

物理学院 研究生课程教学材料 2026 年 11 月

课程定位与安排

本手册供物理学院研究生《凝聚态物理》《凝聚态物理导论》教学使用。课程为 2 学分、32 学时，其中讲授 26 学时、研讨 6 学时。数值计算安排在作业和讨论中，拓展推导与前沿专题可用于课前阅读或期末报告。

课程从哈密顿量出发，引导学生求出可观测量。教师讲解能带、输运、平均场及拓扑模型的基本推导。学生记录预测，并用数值计算、解析极限或实验资料检验预测。

研讨课围绕模型对应的测量量、拓扑判据和平均场解的稳定性分别展开。教师可依据课前作业选择有代表性的解法，组织学生比较各自采用的假设。

32 学时教学安排

单元	类型与学时	主题	核心内容
1	讲授 2 学时	Drude 与 Sommerfeld	T1、T2，单位、费米面与热窗
2	讲授 2 学时	Bloch 近自由电子 LCAO	B1 至 B3，矩阵与重叠
3	讲授 2 学时	方格 石墨烯与边界	B4 至 B8，DOS 及终止条件
4	讨论 2 学时	第一次讨论 模型到可测量量	任务一二三，磁阻与能带归一化
5	讲授 2 学时	半经典运动与量子几何	T3 至 T5，B11
6	讲授 2 学时	Boltzmann 与热电响应	T6 至 T8，散射时间和 Mott 关系
7	讲授 2 学时	有限场输运与边界条件	T9、T10，张量求逆
8	讲授 2 学时	量子振荡与量子输运	T11 至 T14 及 Kubo Landauer 专题
9	讲授 2 学时	Chern QSH 与晶体拓扑	B12 至 B18，保护条件
10	讨论 2 学时	第二次讨论 拓扑证据链	任务四五，体指标与边界对照
11	讲授 2 学时	原子磁性 交换与自旋波	M1 至 M6，响应与近似
12	讲授 2 学时	Hubbard 及材料平均场	M7 至 M10，磁性半导体与量子阱的简化计算

单元	类型与学时	主题	核心内容
13	讲授 2 学时	交错磁性与自旋群	M11 至 M13，SOC 前后对称性
14	讲授 2 学时	BCS 与超导电磁学	SC1 至 SC10，能隙 GL Josephson
15	讲授 2 学时	非常规配对与拓扑超导	SC11 至 SC14，配对核与 BdG
16	讨论 2 学时	第三次讨论 平均场与证据审查	任务六至十选题汇报，报告复算

合计 32 学时，其中讲授 26 学时、讨论 6 学时。

课前与课中支架

每个计算单元提前发出两项材料：最多两页的必要定义和一项可在纸上预测的问题。学生先提交预测，不先分发完整答案。课堂最初 10 分钟抽取两种常见观点并保留其假设；中段由教师完成最容易出错的一步推导，例如张量求逆、完整区因子或双计数常数；最后让学生用一个反例检验初始观点。

对编码经验不足的学生提供只包含输入、矩阵构建接口和绘图接口的骨架，保留核心物理步骤由学生填写。学生可以用自己熟悉的软件，评价标准是公式、可复算性和结论，不是工具品牌。遇到矩阵求解错误时依次检查维数、厄米性、单位、对称性和解析极限，再调整求解器。

分层任务采用同一物理目标：基础层复现给定参数并通过极限检查；提高层改变一个假设并给出对照；拓展层比较竞争模型或论文中的不同近似。拓展量不得替代基础正确性，计算更大矩阵但没有粒子数和能量检查不能获得更高证据分。

第一次讨论课 模型怎样变成可测量量

课前要求：每组带来任务一的单带与双带磁阻图，以及任务二的一张 DOS 图。教师预先检查文件能否打开，但不替学生修正物理结论。每组指定主讲、质询与记录角色，第二次讨论时轮换。

预测与推导　先请学生判断纵向电导率随磁场减小是否意味着纵向电阻率增大。两组交换推导，核对张量求逆和霍尔符号，再用单带极限检验。随后每组只改变一个参数，比较完全补偿和部分补偿的结果。

数据核验　在态密度任务中，各组改变网格和展宽，比较积分态数与峰高。讨论结束时，每位学生用一个反例说明，一条纵向电阻率曲线能否唯一确定双带模型参数，态密度峰增高是否意味着总态数增加。

教师答案支架：单各向同性带求逆后 ρxx 不随 B；完全补偿 ρxx/ρ0=1+ueuhB²；补偿但迁移率不同仍有 Hall。方格 DOS 奇点是态重新分布，积分每自旋每原胞为 1。若学生结果不符，先检查单位、简并因子和积分窗口，不直接告诉其改哪一行代码。

第二次讨论课 拓扑结论需要哪些证据

课前要求：任务四或五的解析判断、体谱、边界谱和空间权重至少各一项。安排一组担任“替代解释组”，专门寻找同样图像的平庸解释；质询目标是结论所依赖的假设，而非否定同学。

分组判断　先给出非零陈数的绝缘体、存在局域缺陷态的普通绝缘体和间接能带重叠的体系，请学生指出区分它们所需的证据。随后改变 SSH 链的边界终止方式或 QWZ 模型本征矢的相位，在不同条件下检验结论。

交换复算　各组交换程序复算一个参数点，记录网格、最小能隙及相邻本征态的重叠。结束讨论时，学生说明坐标与贝里曲率的约定怎样影响陈数符号，以及怎样与具体测量的电压方向对应。

教师答案支架：QWZ m=−1、1、3 的下带 C 为+1、−1、0，本课程 σxy=−Ce²/h；SSH t1=0.6、t2=1 且给定终止有端态，改变终止必须重新判断。整数算法可在粗网格给错误整数，必须检查间隙、网格与边界。评分奖励发现模型条件不足，不能要求学生把所有案例都认成拓扑。

第三次讨论课 平均场解与材料证据

各组从哈伯德磁性、磁性半导体与量子阱、BCS 能隙或基塔耶夫链中选取一题，列出初值、收敛残差和控制量。教师统一交错磁矩、序参量及化学势的符号约定。

研讨与质询　请学生先判断程序收敛是否足以确认基态。各组展示一个模型、一个核验数值和一项适用条件，随后交换参数点复算，核对固定粒子数与固定化学势的区别。讨论材料研究时分别指出模型预言、简化计算与实验观察。

结论修订　各组根据质询修订结论，个人记录下一步最能区分不同解释的检验。汇报组数较多时，可分组同时交流，最后集中讨论共性问题。

教师点评　教师讨论要点包括哈伯德平均场的双计数修正、相同粒子数和温度下的自由能比较，以及 BCS 数方程与能隙方程的联立求解。基塔耶夫链还应检验正负能谱、边界局域性和链长依赖，并与周期边界比较。

课程考核及评分

课程总评由平时作业（20%）、期末课程论文或文献报告（70%）、课堂参与及讨论（10%）组成。各项评分分别考查物理论证、计算核验、书面表达和个人贡献。

平时作业 20 分：模型与推导 6 分，数值正确及单位 4 分，对照和收敛 5 分，可复算文件 3 分，反思 2 分。建议以至少三次基础任务的平均表现计分，并允许一次订正；订正须保留原错误及解释，不能覆盖原记录。

期末报告 70 分：问题与模型边界 10 分，理论推导 15 分，计算实现和可复算性 15 分，证据交叉验证 15 分，物理解释与局限 10 分，引用与表达 5 分。每项按“完整且准确”“主要正确但缺一项”“部分正确且影响结论”“缺失或不能支持结论”四档评分，分别对应该项满分的 100%、75%、50%、0 至 25%；教师应写出扣分对应的具体证据。

课堂讨论 10 分：准备与材料 2 分，物理论证 3 分，针对性提问和回应 3 分，个人反思与贡献 2 分。发言次数不能直接替代质量，内向学生可通过书面质询与复算记录证明贡献。小组共同结果与个人贡献分开记录，避免整组同分掩盖实际差异。

报告评价的具体锚点

高质量报告示例：比较 QWZ 三组质量，先解析预测 C，再做多网格及随机规范检查，最后计算条带权重，明确 Hall 符号与间接隙。即使没有加入新材料，只要证据闭环完整也可获高分。

中等报告示例：能正确复现 $m=-1$ 的 $C=1$ 与边态，但没有平庸对照，也未记录网格。模型计算可以给主要分，交叉验证与可复算部分相应扣分。低质量报告示例：只有网上边态图和“拓扑保护所以无耗散”的结论，既无模型参数也无可检查推导，应在证据项给低分。

均匀平均场报告的高分要求不是磁矩或能隙尽量大，而是定义清楚、残差正确、固定粒子数一致、双计数处理正确、不同初值和竞争分支比较充分。发现原先结论因间接隙重叠而失效，应视为成功的探究结果。

演示视频的使用方法

五部视频依次演示双载流子磁阻、SSH 能带与边缘态、QWZ 拓扑相变、哈伯德平均场自洽和基塔耶夫链的拓扑超导。播放前展示模型参数，请学生预测变化趋势。播放后请学生用方程或独立计算解释观察到的变化。

不把视频完整播放当作讨论课的主要活动。每次选取一段，在三个位置停顿：变化前预测、临界附近检查、最终状态反思。若视频没有展示数值收敛，学生应从随附程序补充。字幕、坐标和色标同时说明物理含义，颜色只作辅助，不能让学生凭红蓝猜磁矩或拓扑数。

教学材料归档与改进记录

教师按教学单元保存任务单、匿名作业、修订稿、评分依据和教学反思。用于课堂展示的学生作品应征得作者同意并隐去个人信息。

课程反馈问卷可问“哪一步最难”“哪项证据改变了判断”“哪种支架最有用”，并保留自由意见。报告反馈时区分样本数量、回收方式与局限，不以少量自愿意见推断总体显著提升。下一轮改进优先处理反复出现的单位、简并因子、固定控制量和证据不足问题，而非只增加前沿名词。