

作者：郭男

适用课程：结构力学

## 框架结构力学分析与优化设计

摘要：本案例依托真实结构设计项目，详细阐述框架结构从荷载计算到方案优化的全流程，聚焦于结构力学中内力分析、位移验算等核心知识点的工程应用，为《结构力学》课程提供“理论+实践”的教学载体。

关键词：框架结构；内力分析；位移验算；结构优化；工程实践

### 一、背景介绍

总建筑面积达 32465m<sup>2</sup>，地上 7 层、局部地下 1 层，建筑高度约 31.95m，采用钢筋混凝土框架结构并局部结合钢结构。该项目虽为中型公共建筑，却因功能特殊性蕴含着丰富的设计难点与技术挑战——例如高荷载（5kN/m<sup>2</sup>）对框架梁截面设计的影响、大开间需求与结构刚度的平衡、局部钢结构（如中庭采光顶）与混凝土框架的连接节点处理等，这些特点使其成为结构力学及相关课程教学中的理想实际案例。

在教学中引入该项目，可依托其“框架结构为主、局部钢结构辅助”的混合体系，引导学生从多维度展开分析：从结构设计角度，通过手算框架梁柱内力、对比局部钢结构与混凝土构件的受力差异，巩固力法、位移法等核心知识点。这种教学模式能有效弥合理论与实践的差距，使学生在综合应用课程知识的过程中，直观感受结构设计如何服务于建筑功能，同时在模拟团队协作解决“结构方案优化”等问题时，提升团队协作与创新能力。

### 二、项目案例

#### （一）项目案例内容

在建筑设计方面，该项目配备了详尽的平面图、立面图、剖面

图及效果图，各图纸既各司其职又相互呼应，为设计落地与教学应用提供了扎实依据。

平面图精准呈现了各楼层的功能分区逻辑：地下1层为自行车库及水泵房，地上公共服务区采用“大厅居中”的布局，用不同线宽标注具体范围，同时以箭头标注主入口至各功能区的最短流线，确保人流疏散效率，通过虚实线划分单间的位置，且各区域均预留通行宽度，兼顾使用便捷性与安全性。

立面图以玻璃幕墙与面砖的组合造型为核心，既标注了不同材质的拼接节点与色彩参数，又通过比例缩放体现建筑与周边道路、绿地的空间关系，既满足城市规划要求，又通过陶板遮阳格栅与周边建筑的现代风格形成呼应，实现美学设计与环境协调的统一。

剖面图则清晰展示了建筑内部的空间层次：从地下1层到地上大厅，再到地上标准阅览报告厅，各楼层标高与竖向空间关系一目了然，不仅为结构梁高设计、柱网布置提供了基准，也为给排水立管、暖通风管的穿层路径规划预留了空间，成为衔接建筑功能与技术实施的关键纽带。

结构设计部分，明确了钢筋混凝土框架的布置和局部钢结构的设置。框架结构的梁柱尺寸、配筋情况均经过精确计算和设计：柱截面随楼层荷载递减，混凝土强度等级 C50-C35，纵向钢筋采用 HRB400 级，箍筋在节点加密区间距 $\leq 100\text{mm}$ ，以确保承受建筑的竖向荷载和水平荷载（地震、风荷载）；梁配筋兼顾受弯、受剪承载力及挠度控制。局部钢结构采用 Q235B、Q335 钢材，门式刚架与组合梁的截面尺寸及连接节点（高强螺栓、预埋件焊接）均按受力需求设计，与混凝土框架形成协同受力体系。

## （二）关键点

### 1. 核心知识点：

（1）超静定结构中的“多余约束”在工程实践中具有极其重要的

意义。它们并非真正多余，而是提供了超出维持几何不变性所需的最少数目的约束。这些额外的约束使结构能够更有效地抵抗外部荷载引起的变形，显著提高结构的整体刚度。

同时，多余约束的存在赋予了结构关键的重分布能力，当局部发生破坏或遭遇意外荷载时，内力可重新分配至其他约束路径，从而保障了结构的整体稳定性和安全性。因此，多余约束在提升结构刚度、控制变形以及增强结构鲁棒性和冗余度方面发挥着不可或缺的作用。

(2) 荷载组合的原则主要涵盖基本组合和偶然组合两类情况。基本组合通常涉及永久荷载（如结构自重）与可变荷载（如活荷载或风荷载）的组合，以确保结构在日常使用中的安全性；偶然组合则考虑地震作用或其他极端事件的影响，目的是评估结构在意外条件下的稳定性。

(3) 位移验算的必要性在于防止结构因变形过大而影响其正常使用功能或导致非结构构件（如墙体、门窗或装饰部件）的破坏。在结构设计中，这一过程通过精确计算和验证位移量，确保结构在荷载作用下的变形控制在安全阈值内，从而避免功能失效或附加损伤，保障整体工程的可靠性和耐久性。

## 2. 技能点：

(1) 快速判断结构静定或超静定次数：通过计算结构整体的自由度数目与其所受到的外部约束及内部约束提供的约束总数之间的关系，迅速确定该结构属于静定结构（几何不变且无多余约束）还是超静定结构（几何不变但存在多余约束），并明确其超静定次数（即多余约束的数量）。此方法常用于梁、刚架、桁架等结构体系的初步分析。

(2) 力法方程的建立与求解：首先选取基本结构作为分析基础，然后绘制单位弯矩图以反映单位荷载作用下的内力分布，同时绘制

荷载弯矩图以描述实际荷载效应，最后基于这些图形建立力法方程并进行数值求解；

### 3. 态度点：

(1) 数据严谨性：荷载取值必须严格遵循现行规范要求，严禁任何形式的主观简化或自行降低标准（例如，活荷载取值不得低于规范明确规定的最小值，恒荷载的统计与取值同样需符合规范具体条文）；任何对荷载的简化或调整均需具备充分的规范依据或经严格论证批准，否则将导致安全隐患或设计偏差，因此必须严格确保所有荷载数据的来源可靠、计算准确且完全合规。

(2) 安全优先：在截面优化设计中，必须始终以满足结构强度和刚度要求为根本前提，确保整体安全性与可靠性；绝不能仅为了追求经济性而忽视这些关键性能指标，否则可能导致结构失效或安全隐患。

(3) 团队合作精神：学生需通过团队协作完成结构方案设计优化。小组成员能主动分配角色（如荷载统计员、内力计算员、规范核查员），并定期组织方案讨论会，针对“梁截面优化是否影响建筑净高”“柱网布置如何兼顾设备管线穿行”等矛盾点开展技术辩论。尤其在模拟设计冲突时，学生普遍学会以结构计算数据（如挠度验算结果对比）作为决策依据，而非仅凭主观经验争论。这种协作模式显著提升了协调能力。

(4) 终身学习的态度：案例中呈现的工程实践复杂性使学生深刻认识到结构设计知识体系的动态发展特性。这种基于真实工程问题的自主探究习惯，显著提升了其追踪行业前沿、适应技术更新的内生动力。通过案例学习，学生不仅掌握了当前规范要求下的分析方法，更培养了面对未来工程挑战时持续学习、主动更新知识库的核心素养，为其成长为适应行业快速发展的工程师奠定了关键态度基础。

### （三）教学使用

#### 1. 教学组织

采用“1+3+1”模式进行课程安排，该模式具体包括一课时用于案例引入，通过真实案例激发学习动机；三课时用于分组实操，促进学生在团队协作中实践技能；以及一课时用于成果点评，结合师生反馈巩固学习效果，确保教学过程高效且目标导向。

首先进行案例引入，下发结构施工图，提出问题“如何确保框架不会在荷载作用下破坏？”；

其次进行分组实操：3-4 人一组，分别负责荷载计算、内力分析、位移验算，模拟设计团队分工；

最后进行成果点评：邀请专业教师对各组计算报告进行点评，重点对比手算与软件结果的差异原因。

#### 2. 过程设计

（1）案例引入，以“问题驱动”激活学习动机，聚焦图书馆框架结构的核心安全问题。

课前 5 分钟下发核心结构资料，包括标准层框架结构施工图、荷载参数表及 7 度抗震设防要求，让学生快速了解项目背景。

抛出核心问题：“该图书馆书库区域荷载是阅览区的 2 倍，如何通过力学分析确保框架梁柱在承受高荷载时不发生破坏？”

明确本阶段学习任务——通过分析该框架结构的荷载传递、内力分布及位移变形规律，掌握超静定框架的力学分析方法，为后续优化设计奠定基础

模拟工程团队分工，以“真实设计流程”为脉络，让学生在协作中完成从“荷载到验算”的全流程实践。3-4 人一组，每组设“荷载计算岗”“内力分析岗”“位移验算岗”，明确职责边界：  
荷载计算岗：负责统计书库区域框架梁的恒荷载（梁自重、楼板自重+面层）与活荷载（藏书荷载），按规范进行荷载组合（1.3 恒

+1.5 活），输出线荷载计算书；-内力分析岗：基于荷载结果，采用力法手算该框架在竖向荷载作用下的梁跨中弯矩、柱端剪力，绘制内力图；位移验算岗：根据内力分析结果，计算框架的层间位移角，验证是否满足规范限值（ $\leq 1/550$ ），若超限则初步提出调整建议（如增大梁截面）。

第一阶段：各岗独立完成基础计算，记录关键数据（如荷载值、内力结果），组长协调数据传递（荷载结果作为内力分析的输入条件）；第二阶段：组内交叉复核，重点检查“荷载组合是否正确”“力法基本结构选取是否合理”“位移计算公式是否适用”，形成初步计算报告；第三阶段：针对“内力超限”“位移超标”等问题，全组讨论优化方向（如调整梁截面尺寸、增加配筋），补充 2-3 条具体建议并说明力学依据。

每组派 1 名代表汇报 5 分钟，重点说明：①荷载计算的关键参数；②内力分析的手算与软件结果差异；③位移验算结论及优化建议。教师点评聚焦三个核心维度：准确性：检查荷载统计是否遗漏（如是否计入梁自重）、内力图绘制是否符合“弯矩图与剪力图对应关系”、位移计算是否考虑刚度折减；协作性：评估组内数据传递的流畅度（如荷载结果是否及时反馈给内力分析岗）、问题讨论的深度（如是否分析“软件结果为何偏小”）；工程性：点评优化建议的可行性。教师结合案例强调“力学分析不是目的，而是解决工程问题的工具”——如该图书馆书库区域最终通过“梁截面优化+高强钢筋应用”实现了“安全+经济”的平衡，引导学生理解“计算服务于设计”的本质。通过“1+3+1”模式，学生既能掌握超静定框架的力学分析方法，又能在团队协作中体会“分工—协作—优化”的工程逻辑，最终实现“从理论计算到工程应用”的能力跨越。

### 3. 考核方法

采用“过程性考核+成果性考核”相结合的方式，全面评估学生

的理论应用能力、团队协作能力及工程问题解决能力，具体如下：

过程性考核：聚焦分组实操环节的参与度与任务完成质量，细化为三个维度：

①分工履职情况-依据各组提交的“分工记录表”及成员个人工作手册，评估每位学生在岗位中的履职成效：荷载计算岗：检查荷载统计的完整性（是否包含梁自重、楼板荷载、活荷载折减等）、荷载组合的规范性（是否符合 1.3 恒+1.5 活等组合规则），数据误差需 $\leq 5\%$ ；内力分析岗：评估手算法/位移法的步骤完整性（基本结构选取、单位弯矩图绘制、方程求解等）、内力图绘制的准确性（符号、比例、关键点标注）；位移验算岗：验证位移计算公式的适用性（是否区分弹性位移与塑性位移）、验算结果的合理性（是否结合规范限值判断是否超限）。

②团队协作表现-从“数据传递效率”“问题解决协作”“角色互补性”三方面评分：数据传递：检查荷载数据、内力结果在组内的传递是否及时、无偏差，是否形成“荷载—内力—位移”的闭环数据链；问题讨论：根据组内会议纪要，评估对“内力超限”“软件与手算结果差异”等问题的讨论深度，是否有明确的分析逻辑；角色互补：观察是否存在“一人包办”或“分工脱节”现象，优秀团队需体现“各岗输出有衔接、问题讨论有共识”。

③计算过程规范性-重点考核力学分析的严谨性：手算过程：公式引用是否正确（如位移计算公式是否包含刚度修正系数）、计算步骤是否完整（如超静定次数判定、力法方程建立过程）、数值计算是否准确（允许误差 $\leq 10\%$ ）。

2. 成果性考核：以最终提交的“框架结构力学分析与优化报告”为核心，结合汇报答辩表现评分：

①报告质量-内容完整性：需包含荷载计算书、内力分析过程（、位移验算结论、优化方案建议及力学依据，缺一不可；逻辑严谨性：

各部分内容需形成因果链（如“因荷载较大导致内力超限，故建议增大梁截面以提高承载力”），优化建议需明确“调整参数”及“预期效果”；工程关联性：是否结合图书馆功能需求分析优化方案的可行性（如避免建议“大幅增大柱截面”影响使用空间）。

②答辩表现-汇报清晰度：能否简明阐述计算核心结果、优化思路及关键结论，时间控制在5分钟内；问题回应：针对教师提问能否准确回应，体现对知识点的灵活运用；团队配合：汇报时成员是否分工补充（如计算岗解释数据来源，分析岗回应方法选择），展现团队协作的默契度。

过程性考核占比60%，其中：分工履职情况（20%）、团队协作表现（20%）、计算过程规范性（20%）；成果性考核占比40%，其中：报告质量（30%）、答辩表现（10%）。通过综合评分，全面、客观地评价学生的学习成果和能力水平。

#### 4. 教学效果

核心知识点应用熟练度提高，学生对超静定结构求解（力法、位移法）的掌握从“被动套公式”转向“主动选方法”：在课后测试中，能结合图书馆框架特点自主选择位移法求解的学生占比大幅度提升，且计算步骤完整性达标率也有所提高；针对“荷载组合”这一难点，通过书库高荷载与阅览区常规荷载的对比计算，学生对“基本组合与地震组合的适用场景”理解准确，能清晰说明“为何书库区域需优先采用1.3恒+1.5活组合”。

理论与规范的衔接更紧密，大部分学生能在计算中主动引用《混凝土结构设计规范》中的条款，解决了传统教学中“知公式、不知来源”的问题。在位移验算环节，学生不仅能完成计算，还能解释“为何图书馆需严格控制位移——避免过大变形导致书架倾斜、玻璃幕墙开裂”，体现出对规范背后工程逻辑的理解。

工程实践技能明显改善，学生在课程设计中展现出更强的实操



能力：能独立完成从“荷载统计→内力分析→优化建议”的全流程，并通过力学计算对比经济性，体现出“计算服务于设计决策”的工程思维。

分组实操中，“荷载计算岗与内力分析岗数据传递脱节”的问题发生率有所降低，能形成“分工明确、数据闭环、讨论充分”的协作模式。同时，案例的“真实性”激发了学生的探究欲：课后主动查阅图书馆施工资料、咨询老师；课堂讨论中，学生自发提出“钢结构采光顶与混凝土框架的连接节点如何受力”等延伸问题，体现出从“完成任务”到“探究本质”的转变。

### （三）其他相关说明和附件

图纸，详见附件。



















