

立卷夹钳大作业计算报告

一、项目背景

双臂立卷夹钳属于重力式吊具，用于夹取输送卷心立式放置的钢卷。它由多杆机构组成，完成夹取，自锁，运输，卸载等多项作业。当夹钳吊起时由于自身重力作用产生闭合外钳臂的趋势，外钳口相向运动逐渐闭合；同时内钳臂带动内钳口产生背向扩张运动，当内外钳口夹持住竖直放置的钢卷后依靠夹持力所产生的摩擦力将钢卷吊起。夹钳的主要工作参数如下：

夹钳自重为 13000kg；

外钳口间距离变化为 1130mm-2600mm；

内钳口间距离变化为 800mm-950mm；

夹持钢卷的重量范围为 4000kg-40000kg，

钢卷的近似密度可采用 $\rho = 7.5\text{g/mm}^3$

夹钳所有部件均由 Q235 钢制造而成，材料参数如下表：

Q235 钢 弹性模量 E 剪切模量 G 波松比 μ

208GPa	80GPa	0.3
--------	-------	-----

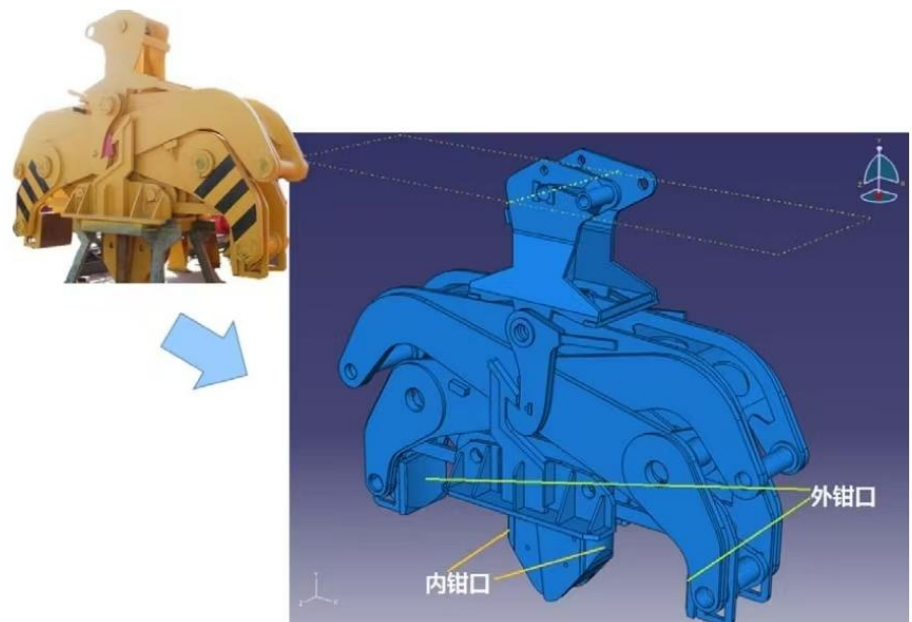
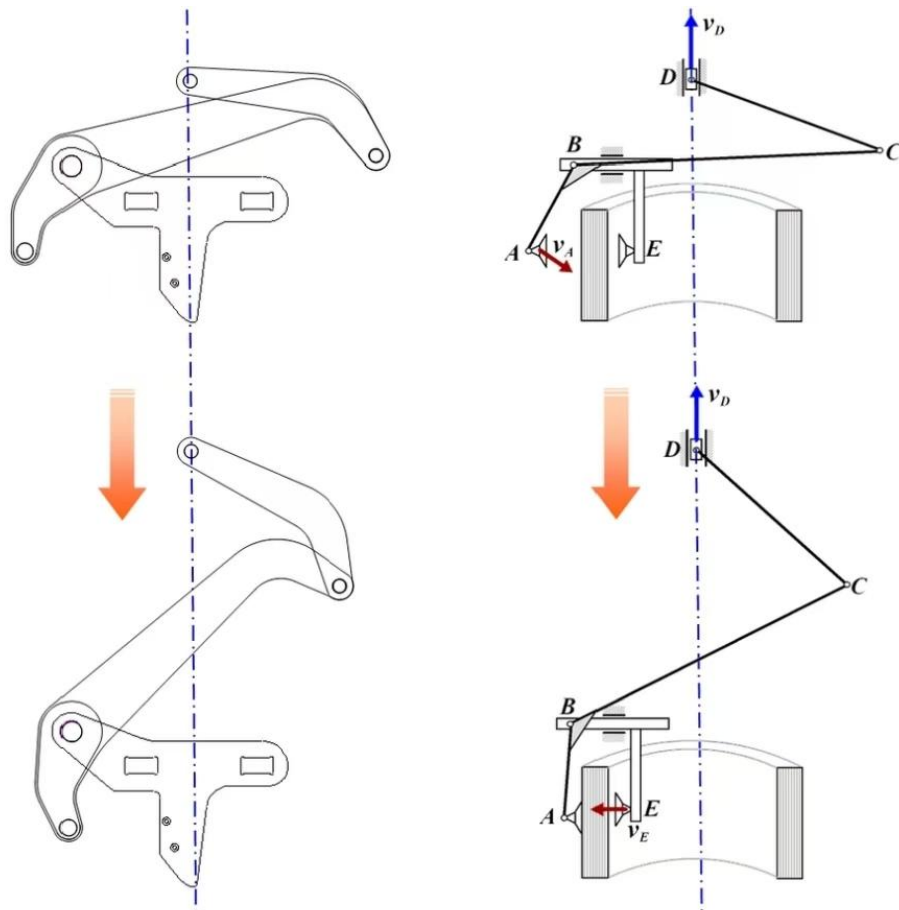


图 1 双臂立卷夹钳

二、作业分析

1、第一次翻转课堂：立卷夹钳静力学问题



这项任务总共解决了 3 个问题：钢卷尺寸与吊装力计算，机构几何角度分析，A 点夹持力静力学计算并且最后给出了总结与建议。

对于问题 1：钢卷几何尺寸推导，已知参数：钢卷质量 $m = 44$ 吨 $= 44000$ kg，宽度 $L = 2000$ mm，钢的密度 $\rho = 7.5 \times 10^{-6}$ kg/mm³。

体积计算：钢卷体积 $V = m / \rho = 44000 / (7.5 \times 10^{-6}) \approx 5.605 \times 10^9$ mm³。

外径计算：设钢卷外径为 D ，内径为 d 。根据圆环柱体体积公式 $V = \pi(D^2 - d^2)b/4$ ，代入已知量并整理得： $D = \sqrt{(4V/(\pi b) + d^2)}$ 。若取内径 $d = 800$ mm，则计算可得外径 $D \approx 2091.6$ mm。

夹持范围校核：计算结果表明，钢卷外径 2091.6mm 在夹钳外钳口夹持范围 (1130~2600mm) 内，内径 800mm 在内钳口夹持范围 (800~950mm) 内，夹钳尺寸设计合理，能够适配该钢卷。

总吊装力计算，吊装力组成：总吊装力需考虑钢卷自重、夹钳自重以及吊装辅助件（如吊钩、钢丝绳等）的重量。各分项载荷：钢卷重量：44 吨；夹钳自重：13 吨；辅助件重量：3 吨。

总吊装力： $F = 44 \text{ 吨} + 13 \text{ 吨} + 3 \text{ 吨} = 60 \text{ 吨}$ 。

D 点分担吊装力：假设吊装力由两侧对称分担，则单侧 D 点承受的竖直吊装力为总吊装力的一半，即 $F_D = 30 \text{ 吨}$ 。

对于问题二：机构几何角度分析，建立机构坐标系，基于杆件长度与夹角关系，求解各连杆与水平轴的夹角，为静力学建模提供几何基础。

已知参数：竖直吊装力：在 D 点施加竖直向上的吊装力 $F_D = 30000 \text{ kgf}$ ；构件自重：外钳臂自重 $G_1 = 430 \text{ kg}$ ， $G_2 = 1100 \text{ KG}$ ，吊装臂自重 $G_3 = 510 \text{ kg}$ ，作用于各自重心；水平反力：在 A 点和 B 点存在水平方向的约束反力，用于平衡机构所受的水平分力；摩擦力：在钳口与钢卷接触面存在摩擦力，其大小与正压力（夹持力）和摩擦系数 μ （取 0.3）相关。

计算过程：以 A 点为矩心，对整个机构列写力矩平衡方程 $\sum M_A = 0$ 。通过求解力矩平衡方程，可得 A 点的水平夹持力 $F_A \approx 12590 \text{ kg}$ 。由于夹钳为双臂对称结构，两侧 A 点共同提供夹持力。因此，双侧总夹持力 $F \approx 2 * 12590 = 25180 \text{ kg}$ ，即约 25.2 吨。此力为确保钢卷在吊装过程中不滑脱的关键力。

第一次翻转课堂总结：建议在精确的三维 CAD 模型基础上进行运动学与动力学仿真，以获取更精确的杆件角度、速度、加速度及动态载荷。基于本次静力学分析结果，可对钳臂、连杆等关键构件进行拓扑优化或尺寸优化，以实现结构轻量化并保证足够的强度和刚度。

2、第二次翻转课堂：立卷夹钳的吊装臂分析及销轴设计

本次翻转课堂总共解决了 4 个问题：对 A 点夹持力的重新计算；对销轴材料和吊装臂材料的研究；吊装臂的横截面设计及强度校核；设计 B 点和 C 点的连接销轴尺寸。

对于问题一：通过对夹钳整体的静力分析，得出：A 点的夹持力 $N = 143.3 \text{ t}$ ，D 点水平方向力 $N = 46870 \text{ kg}$ ，B 点正交力合力 $F = 1443000 \text{ kg}$ ，C 点正交力合力 $F = 55493 \text{ kg}$ 。

对于问题二：已知参数：销轴材料：Q345 钢， $n = 2.5$ ，许用切应力 $= 69 \text{ MPa}$ ，

$\sigma_s = 345\text{MPa}$ ；吊装臂材料：Q235 钢， $n=1.5$ ，许用应力 $=156.67\text{MPa}$ ， $\sigma_s=235\text{MPa}$ 。

将销轴材料与许用应力进行强度校核，算出许用切应力为 69MPa ，C 点 $t=50\text{mm}$ ， $b=520\text{mm}$ ，B 点应加强衬板厚度 10mm 。

对于问题三：将 CD 杆看成二力杆，算出 D 点的合力，在进行应力校核，得出符合要求的结论。

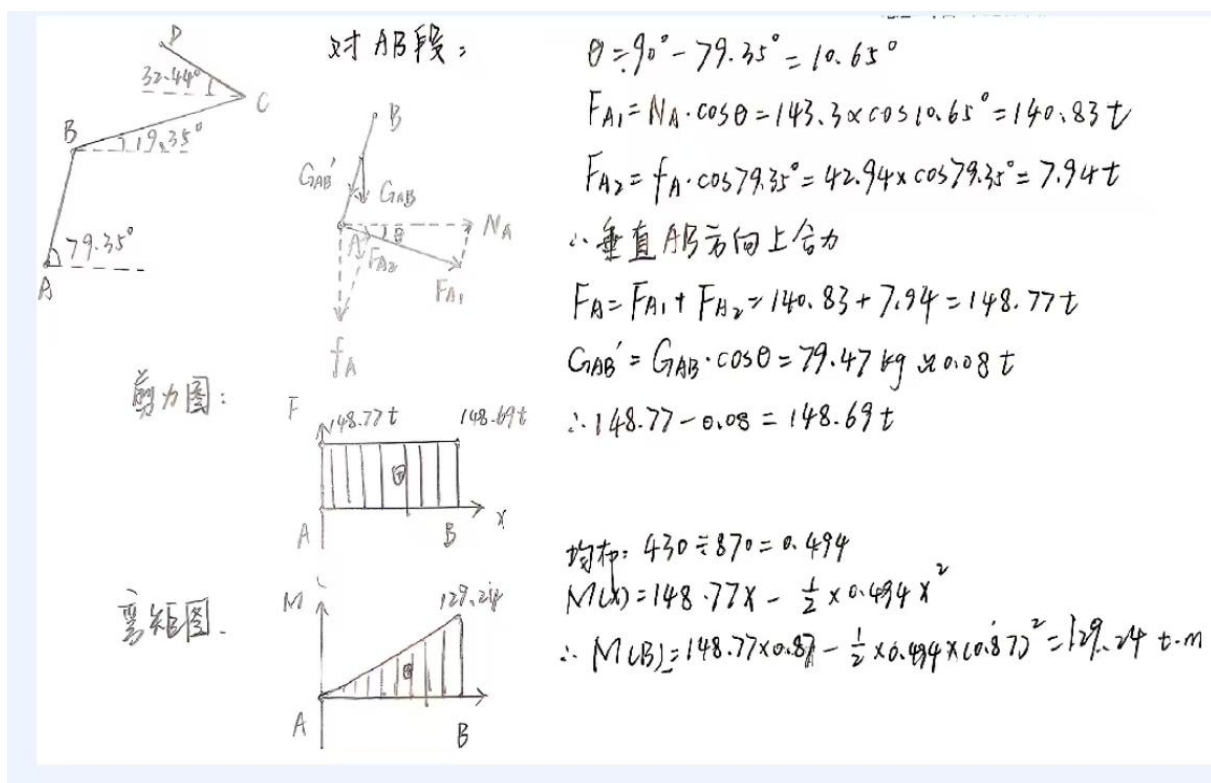
对于问题四：算出 B 点和 C 点的应力值，得出 B 点的销轴直径取 162mm ，C 点的销轴直径取 101mm ，以便于生产。

但是缺少了总结，我在此补充，这份报告围绕立卷夹钳的关键受力部件，完成了四项核心工作：重新计算 A 点夹持力以修正静力分析结果；研究销轴与吊装臂的材料选型；进行吊装臂横截面设计及强度校核；确定 B 点和 C 点连接销轴的尺寸。整体为夹钳的结构安全性与可靠性提供了完整的力学验证与设计依据，但是在最后所讲的面积形状没有确定，没有对吊装臂的厚度进行讨论，还需进一步明确。

3、第三次翻转课堂：双臂立卷夹钳外钳臂弯曲内力分析

本次翻转课堂总共解决了 3 个问题：绘制外钳臂剪力图及弯矩图，对比多种重力简化方案，分析危险截面并给出了建议。

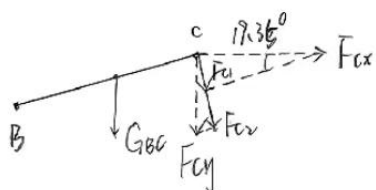
对于问题一：按照小组讨论的重力载荷形式，基于所在小组设计作业 I 得出的外钳臂受力情况，绘制外钳臂 ABC 的剪力图和弯矩图。



对于问题二：给出了两种重力简化方案，分别绘制内力图，并讨论各简化方案的合理性。方案一：重力均布简化——认为 AB、BC 段各为矩形等截面，自重沿轴线均匀分布；方案二：重力集中简化——将每段构件自重等效为一个集中力，作用在重心位置。最后进行合理性讨论：方案一（均布）优点：更接近连续体实际，能反映自重沿全长的连续效应，画出的内力图更平滑；方案二（集中）优点：计算简易，能快速定位最大内力位置，在初步估算中很实用。得出结论：外钳臂沿轴线截面线性变化，更接近变截面梁，但作为初步静力分析，均布载荷简化（方案一）能提供更连续的分佈规律，是更合理的工程简化。若杆件足够短，两种方案

结 果 相 近。

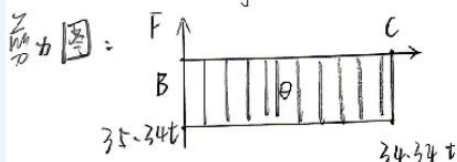
对BC段:



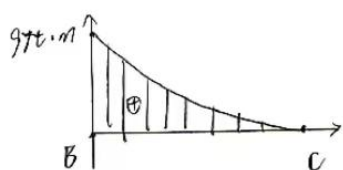
垂直于BC方向上C点合力

$$F_C = F_{C1} + F_{C2} = F_{Cx} \times \sin 19.35^\circ + F_{Cy} \times \cos 19.35^\circ = 34.34 \text{ t}$$

$$G'_{BC} = G_{BC} \times \cos 19.35^\circ = 1038 \text{ kg} \approx 1 \text{ t}$$



$$\therefore 34.34 + 1 = 35.34 \text{ t}$$



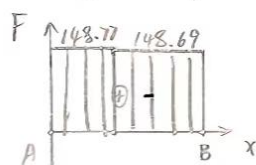
均布: $1100 \div 2780 = 0.396$

$$M(x) = 34.34x + \frac{1}{2} \times 0.396x^2$$

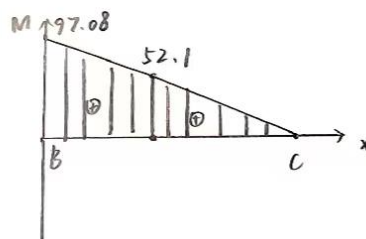
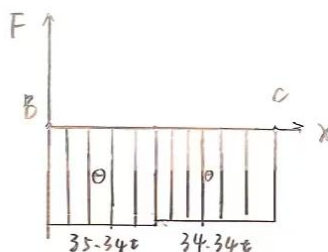
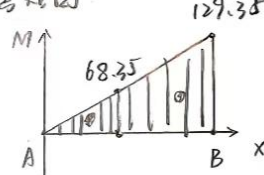
$$M(B)_+ = 34.34 \times 2.78 + \frac{1}{2} \times 0.396 \times 2.78^2 = 97 \text{ t.m}$$

对于问题三: 得出危险截面位置: B 点截面。原因: (1) 从弯矩图看, B 点是 AB 段与 BC 段的交汇点, 且承受最大的轴力。(2) 弯矩最大: AB 段 A、B 点弯矩均很大, 但 B 点因 $\angle ABC = 120^\circ$ 形成应力集中, 弯矩在 B 点处达到峰值。(3) 轴力复杂: B 点受 AB 段和 BC 段传来的弯曲应力叠加。(4) 截面突变: AB 段、BC 段厚度不同, 垂向深度在 B 点最大, A、C 端最小。截面尺寸在 B 点的急剧变化会引起显著的应力集中。

轴力图:



弯矩图:



最后提出设计建议

(1) 增大 B 点截面尺寸：在 B 点连接处，增大截面高度和厚度，以降低弯曲正应力。(2) 圆角过渡：在 AB 段过度至 B 点、BC 段过度至 B 点的位置，采用大圆角平滑过渡，严禁出现尖角，以减小应力集中。(3) 补强板设计：在 B 点铰接孔周围，焊接加强衬板，并确保补板范围覆盖高弯曲应力区，增强局部强度。材料校核：基于弯曲正应力和剪应力，按组内选定的 Q235 钢许用应力进行校核，若不足需进一步加厚。

4、第四次翻转课堂：双臂立卷夹钳外钳臂强度分析

本次翻转课堂主要解决以下问题：基于所在小组设计作业的受力分析结果以及小组设计作业得出的外钳臂内力图，分析外钳臂的组合变形形式，并计算外钳臂的强度。

首先确定组合变形的形式和危险截面的选取。

外钳臂在工作时主要承受：

弯矩：由 A 点夹持力、B 点铰接力以及自重产生，使杆件发生弯曲。

轴力：沿杆件轴线方向的拉压力（此处经计算为拉力）。

因此，外钳臂的变形形式为 弯拉组合变形。由于外钳臂属于细长杆，剪力引起的切应力很小，忽略不计。

根据上一次翻转课堂的弯矩图，B 截面的弯矩最大（ $M_b = 129.24 \text{ t} \cdot \text{m}$ ），且该截面存在铰接孔（半径 80 mm），引起应力集中。因此，取 B 截面 作为强度校核的危险截面。

之后再汇总之前翻转课堂得到的已知条件：材料：Q235 钢，屈服强度为 235 MPa；工作安全系数为 1.5；许用应力约等于 156.7 Mpa；B 截面几何尺寸：高度 $h = 600 \text{ mm}$ ，宽度 $b = 75 \text{ mm}$ ；开孔半径 $r = 80 \text{ mm}$ ；B 截面内力：弯矩 $M_b = 129.24 \text{ t} \cdot \text{m} = 129.24 \times 9.8 \times 1000 = 1.2666 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{mm}$ ；轴力 $N_b = 276,141 \text{ N}$ （拉力，正号）；应力集中系数：参照吊装臂开孔处取 $K = 3$ （偏安全）。

再进行计算分析：先计算出不开孔的截面参数和开孔后的净面积，以此计算出

轴向拉应力, 名义弯曲正应力, 算出组合应力, 考虑到开孔带来应力集中, 实际最大应力发生在孔边缘, 再进行强度校核, 得出强度不足的结论。

No. _____
Date _____

不开孔时的截面参数:

$$A = b \times h = 75 \text{ mm} \times 600 \text{ mm} = 45000 \text{ mm}^2$$
$$W = \frac{bh^2}{6} = \frac{75 \times 600^2}{6} = 4.5 \times 10^6 \text{ mm}^3$$

开孔后的净面积:

$$A_{\text{孔}} = \pi r^2 = \pi \times 80^2 \approx 20106 \text{ mm}^2$$

净面积: $A_{\text{净}} = A - A_{\text{孔}} = 45000 - 20106 = 24894 \text{ mm}^2$

轴向拉应力:

$$\sigma_n = \frac{N_B}{A_{\text{净}}} = \frac{276141}{24894} \approx 11.09 \text{ MPa}$$

名义弯曲正应力 (最大边缘处)

$$\sigma_b = \frac{M_B}{W} = \frac{1.2666 \times 10^9}{4.5 \times 10^6} \approx 281.5 \text{ MPa}$$

名义组合应力:

$$\sigma = \sigma_n + \sigma_b = 11.09 + 281.5 = 292.6 \text{ MPa}$$

考虑开孔集中:

实际最大应力发生在孔边缘:

$$\sigma_{\text{max}} = K \cdot \sigma = 3 \times 292.6 = 877.8 \text{ MPa}$$

强度校核:

$$\sigma_{\text{max}} = 877.8 \text{ MPa} > [\sigma] = 156.7 \text{ MPa}$$

$\therefore$ 强度严重不足, 不安全。

强度不足的结论在案例分析中不常见, 因此需要分析产生原因以及改进方案。

可能产生的原因：（1）强度不足：弯矩过大：129 t·m 的弯矩对于宽度仅 75mm 的截面来说过于巨大，抗弯截面模量 $W=4.5 \times 10^6 \text{ mm}^3$ 太小。（2）开孔应力集中：半径 80mm 的孔严重削弱局部强度，应力集中系数高达 3。（3）材料强度偏低：Q235 的许用应力仅 156.7 MPa，无法承受如此高的应力。

改进建议：（1）增大截面宽度：若将宽度增加至 150 mm，则抗弯模量 W 变为 $9.0 \times 10^6 \text{ mm}^3$ ，弯曲应力降为 140.8 MPa，组合应力约 152 MPa（略低于许用值），基本满足无孔情况。但开孔后仍需处理应力集中。（2）优化开孔位置：将铰接孔移至截面中性轴（高度中点）附近。在中性轴处弯曲应力为零，开孔只影响净面积，不会产生弯曲应力集中，可大幅降低局部应力。（3）增加局部加强板：在 B 截面周围焊接厚度 20~30mm 的加强衬板，相当于局部增加宽度，有效降低孔边挤压应力和拉应力。（4）改用更高强度材料：采用 Q345 钢（ $\sigma_s=345 \text{ MPa}$ ，许用应力 $[\sigma]=230 \text{ MPa}$ ），可提升约 47% 的承载能力。（5）采用变截面或工字形截面：在弯矩最大的 B 区域加大截面高度或采用工字形，以较小的重量获得更大的抗弯模量。

最后总结分析：在给定的工况下（钢卷重 44t，吊装力 60t，外钳臂宽度取 75mm），外钳臂 B 截面的最大组合应力达到 877.8 MPa，远超 Q235 钢的许用应力 156.7 MPa，现有设计不安全。必须按上述建议对截面尺寸或开孔位置进行改进，并建议实际设计时采用更合理的宽度（如 150mm）或更高强度材料。

5、第五次翻转课堂：立卷夹钳冲击分析

需要解决的工程问题是：（1）开始提升时，所允许的所能达到的最大吊装加速度（用动静法分析）；（2）如果向下放置钢卷时，由于操作失误，导致钢卷距离拖挂车的货板高度为 10mm 时意外脱落，落于货板的中间部位，请分析货板所承受的最大动应力。

对于问题一：使用动静法，将加速度变为惯性力后重新进行静力学分析。由于随着质量的改变构件之间的作用力也会发生改变，所以需要和第一次小组作业一

样进行分析，算出夹持力 F_N 后通过摩擦系数算出摩擦力再对钢卷进行牛二分析算出最大吊装加速度。实际算完后 $F_N = 143294 \times (g+a)$, $4 \times \mu \times F_N$ 永远大于 $G \times (1+a/g)$ 。因此得出结论：在最大吊装力及杆件承受范围内无论 a 多大都能吊起来。

对于问题二： $\sigma_d = K_d \times \sigma_{st}$ 由于货板较薄且钢卷很重，因此 K_d 应该只会大于 2 一点点，对 σ_d 影响较小，可以先算出静止时的最大正应力，再乘对应位置的 K_d 得到最大动应力。但是最大应力就已经大于许用应力了，因此这个货板不能留。

得出结论：通过查阅资料和计算可看出 $h \geq 0.09716$ 时就满足挠度条件，因此为了避免货板太厚成本太高，可以选择加厚货板和增加横梁来减小挠度，同时更换屈服强度更大的材料做货板来满足强度校核。三种方法一起用来改善货板受力情况。

6、第六次翻转课堂：双臂立卷夹钳外钳臂优化分析

需要解决的问题是：传统等截面实际方案过于保守，造成材料利用率低、设备自重过大。因此我们要实现结构减重轻量化，提升吊装作业的效率。

分析研究对象：外钳臂 AB 长 870mm，BC 段长 2780mm，夹钳作业时主要承受弯曲载荷，弯矩分布极不均匀。B 点为弯矩峰值点，是为危险截面，沿钳臂轴线延伸，弯矩从 B 点向两端呈递减趋势，需要重点关注 B 点的强度设计。核心思想是实现材料效能的最大化，即，“强处加粗，弱处减细”，让构件沿轴线各截面的最大应力接近或等于材料的许用应力。我们通过变截面函数匹配来实现，即，通过建立截面高度沿轴线的变化函数 $h(x)$ ，使抗弯能力与弯矩分布精准匹配。核心公式为 $\sigma(x) = M(x)/W_z(x) = [\sigma]$ 。

计算过程：先进行受力分析，画出剪力图和弯矩图，可得弯矩沿轴线呈线性三角形分布，得 B 点的最大弯矩约为 580KN m，用积分法得 BC 的弯矩变化规律为 $M(x) = M_{max} \times (1-x/l)$ ，AB 段承受弯矩约为 190KN m。

总结：综合本次优化过程和组间对比，有四大方法可以优化设计。

(1) 等强度匹配原则，让材料力学性能与构件受力状态高度契合，实现材料的

充分利用，避免过度设计。

（2）分段差异化设计，针对构件不同区段的工况特性，在有衬板段采用“增宽降高”

策略无衬板段则“调高配弯”，实现精细化，定制化的截面设计方案。

（3）强度与构造兼顾，在满足受力强度的基础上，严格保留端部最小构造高度，确保制造工艺能够顺利实现，兼顾理论与实践。

（4）平滑过度原则，截面变化区域采用抛物线等平滑曲线进行过度，从细节上保障整体结构的长期安全与稳定性。

三、 总结与感悟

通过本次立卷夹钳课程设计与多次翻转课堂分析，我们围绕夹钳的工作原理、静力学受力、吊装臂与销轴设计、外钳臂内力与强度校核、冲击分析以及结构优化等内容，较为系统地完成了对双臂立卷夹钳关键部件的计算与分析。报告从钢卷尺寸与吊装力的确定出发，逐步深入到机构几何关系、危险截面判断、连接件尺寸设计以及外钳臂轻量化优化，基本形成了较完整的设计分析思路。

在分析过程中，我们不仅验证了原始方案在部分工况下的可行性，也发现了现有设计中存在的一些问题，例如外钳臂 B 截面在开孔和大弯矩共同作用下强度不足，说明实际工程设计不能只满足基本受力要求，还必须充分考虑应力集中、局部加强、材料选型及结构优化等因素。这使我们更加深刻地认识到，机械设计并不是简单的公式代入，而是需要结合受力特点、制造工艺和安全储备进行综合判断。

通过这次大作业，我进一步加深了对材料力学、机械设计和工程分析方法的理解，也体会到理论计算与工程实际之间仍然存在差距。后续若要继续完善本设计，还应进一步明确吊装臂截面形状与厚度参数，结合三维建模、有限元分析和实际工况，对关键部位进行更精细的校核与优化，以提高设计结果的可靠性和工程应用价值。

