

案例分析计算报告

立卷夹钳 第 5 组 双臂立卷夹钳计算报告

课程名称	材料力学
小组编号	第五组
提交日期	2026 年 6 月 27 日
指导教师	姚征
小组成员	宋俊、郭逸众、吴君祥、李彬彬、陈自然、洪汉松

摘 要

本报告针对双臂立卷夹钳进行系统的力学分析与计算设计。双臂立卷夹钳是一种用于夹取输送卷心立式放置钢卷的重力式吊具，由吊装臂、外钳臂、内钳臂、外钳口、内钳口等组成。报告以 32 吨钢卷为设计对象，建立了外钳臂力学模型，通过多种重力简化方案对比分析，选取梯形分布力等效方案作为校核依据；完成了截面设计、销轴设计与强度校核；开展了外钳臂沿轴线变截面优化设计，将总质量从约 1530 kg 降至 1161.02 kg；运用动静法分析了最大吊装加速度（ 2.94 m/s^2 ），并对钢卷意外跌落冲击工况进行了能量法分析，提出了弹簧垫板缓冲方案。本报告在小组讨论成果基础上，对答辩提出的问题进行了修改和完善，给出了明确的设计结论与优化建议。

关键词：双臂立卷夹钳；外钳臂；组合变形；优化设计；动静法；冲击分析；弹簧垫板

目录

摘 要..... 2

1 项目背景与概述..... 5

 1.1 项目描述..... 5

 1.2 小组分工..... 5

 1.3 设计任务概述..... 5

2 设计参数与已知条件..... 6

 2.1 钢卷参数..... 6

 2.2 夹钳几何参数..... 6

 2.3 材料参数..... 6

3 受力分析与力学模型..... 7

 3.1 夹持力与节点力计算..... 7

 3.2 重力简化方案对比分析..... 7

 3.3 外钳臂弯矩计算..... 8

4 截面设计与销轴设计..... 9

 4.1 外钳臂截面设计（AB 段）..... 9

 4.2 外钳臂截面设计（BC 段）..... 9

 4.3 吊装臂截面设计..... 9

 4.4 销轴设计..... 9

5 外钳臂强度校核..... 10

 5.1 组合变形分析..... 10

 5.2 B 点截面几何参数（含开孔）..... 10

 5.3 最大应力校核..... 10

 5.4 校核结论..... 10

6 外钳臂优化设计..... 11

 6.1 优化目标与思路..... 11

 6.2 弯矩方程..... 11

 6.3 截面优化方法..... 11

 6.4 优化结果..... 11

 6.5 40 吨极限工况分析..... 11

7 动静法与冲击分析..... 13

 7.1 最大吊装加速度..... 13

 7.2 钢卷意外跌落冲击分析..... 13

 7.2.1 力学模型..... 13

7.2.2	已知参数	13
7.2.3	计算结果	13
7.2.4	冲击结论	14
7.3	弹簧垫板设计方案	14
8	结论与建议	15
8.1	设计结论	15
8.2	设计优化建议	15
8.3	个人总结	16

1 项目背景与概述

1.1 项目描述

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，能够完成夹取、自锁、运输、卸载等多项作业。夹钳基本结构包括：吊装臂、外钳臂、内钳臂、外钳口、内钳口。其工作原理为：利用吊装力驱动外钳臂绕销轴转动，使内外钳口夹紧钢卷，依靠夹持力产生的摩擦力克服钢卷重力，实现安全吊运。

1.2 小组分工

成员	分工职责
宋俊	分析计算主操作人、汇报 PPT 制作人、答辩发言人
郭逸众	计算辅助与数据检验
吴君祥	计算过程副操作人、方案副责任人
李彬彬	方案副责任人
陈自然	方案副责任人、PPT 文本设计人
洪汉松	计算辅助与数据统计

1.3 设计任务概述

本报告的设计任务来源于材料力学课程翻转课堂六次案例分析。各次分析任务分别为：（1）外钳臂受力分析与力学建模；（2）弯曲内力计算与重力简化方案对比；（3）截面设计与销轴设计；（4）外钳臂组合变形强度校核；（5）外钳臂变截面优化设计；（6）动静法分析与钢卷跌落冲击分析。本报告将各环节成果进行系统整合，并根据答辩环节指出的问题进行了修正和完善。

2 设计参数与已知条件

2.1 钢卷参数

参数	符号	数值	单位
钢卷重量	G	32 (约 313.6 kN)	t
钢卷内径	d	800	mm
钢卷外径	D	1877	mm
设计吊装力	P	470, 400	N

注：不同文件来源中钢卷内径/外径存在少许差异（内径 800~850 mm，外径 1877~1899 mm），本报告以作业汇报中数据为准。

2.2 夹钳几何参数

参数	符号	数值	单位
AB 段长度	L_AB	870	mm
BC 段长度	L_BC	2, 780	mm
$\angle ABC$	$\angle ABC$	120	°
AB 与水平轴夹角（夹持后）	θ_1	86.5	°
BC 与水平轴夹角（夹持后）	θ_2	26.5	°
CD 与水平轴夹角（夹持后）	θ_{CD}	40.0	°
吊装臂初始参考角度	α	42.1	°

2.3 材料参数

材料/参数	符号	数值	单位
外钳臂材料 Q235 低碳钢	σ_s	235	MPa
弹性模量	E	208	GPa
剪切模量	G	80	GPa
销轴材料 Q345 钢	σ_s	345	MPa
货板材料 Q690 高强度钢	σ_b	690	MPa
销轴安全系数	ns	2.5	—
外钳臂工作安全系数	n	1.5	—
货板安全系数	n	1.5	—
理论应力集中因数（吊装臂开孔处）	K	3	—

3 受力分析与力学模型

3.1 夹持力与节点力计算

夹钳在夹持钢卷后处于静平衡状态。以外钳臂为研究对象，建立静力平衡方程，计算各节点的约束反力。

A 点夹持力（即外钳口对钢卷的夹紧力）通过静力计算得出： $F_A = 1,447$ kN。此力为钢卷两侧夹持力的合力，依靠夹持面摩擦系数产生摩擦力以克服钢卷重力。

B 点支反力计算结果： $F_{Bx} = -1,279,536$ N， $F_{By} = -136,808$ N，合力 $F_B \approx 260.3$ kN。C 点支反力： $F_C \approx 324.5$ kN（向上）。吊装力 $P = 235,200$ N（每侧，双吊装臂对称布置），单侧总吊装力 $P_y = 233,042.4$ N。

3.2 重力简化方案对比分析

外钳臂自身重力不可忽略（约 1,530 kg），重力简化方式直接影响弯矩计算结果。本报告对比了两种方案：

方案一——分段集中力：将 AB 段重力（ $G_{AB} \approx 4.21$ kN）和 BC 段重力（ $G_{BC} \approx 10.78$ kN）分别简化为作用于各自段质心处的集中力。AB 段作用点距 B 点 410 mm，BC 段作用点距 B 点 1,310 mm。此方案清晰易复核，适合初步求解，但未体现变截面对自重分布的影响。

方案二——沿轴线分布载荷：采用梯形分布，即 $q(s) = q_{\min} + (q_{\max} - q_{\min}) \cdot s/L$ ，B 点截面大处分布载荷取较大值，A、C 端取较小值。AB 段分布载荷 $q_{AB}(x) = 58.252x + 194.39$ N/m，BC 段分布载荷 $q_{BC}(x) = 290.6x + 3,038.8$ N/m。弯矩图呈现曲线型，更接近真实自重作用。

对比结论：方案一（分段集中力）会导致 B 点弯矩值出现两个不同结果，存在较大误差；方案二（梯形分布力）将 B 点弯矩统一为单一值。因此，本报告选择以梯形分布力等效重力的方式得出的结果作为校核依据。

3.3 外钳臂弯矩计算

B 点最大弯矩（采用梯形分布力优化计算后）： $M_B = 895.2 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 。此为外钳臂中弯矩最大值，B 点为组合变形（拉伸/压缩 + 弯曲）最危险截面。弯矩沿 AB 段单调递增，沿 BC 段单调递减，A、C 两点弯矩为零。

4 截面设计与销轴设计

4.1 外钳臂截面设计（AB 段）

AB 段采用双层钢板变截面设计，等效为高度线性变化的直杆。外层加厚钢板外缘比内层少 20 mm。截面参数如下：

截面位置	总高度 h (mm)	内层高度 h' (mm)	宽度 b (mm)
A 截面	260	220	520
B 截面	600	560	520

B 截面开孔半径：80 mm。

4.2 外钳臂截面设计（BC 段）

BC 段为单层板（B 截面附近为双层过渡），截面参数如下：

截面位置	高度 h (mm)	宽度 b (mm)
B 截面	600	520
C 截面	260	520

4.3 吊装臂截面设计

吊装臂横截面面积至少为 0.002218 m^2 （约 22.18 cm^2 ），吊装臂厚度为 11 mm。按变截面杆质量等效原则，等效截面为 $50\text{ mm} \times$ 板厚， $FL/50$ 计算得出 0.00333 m 。

4.4 销轴设计

销轴承受剪切力，按 Q345 钢设计，极限切应力 $\tau = \sigma_s / 2 = 172.5\text{ MPa}$ （滑移线阶段），安全系数 $n = 2.5$ 。

销轴位置	计算最小直径 (cm)	设计直径 (cm)	材料	备注
C 点	6.51	7	Q345	$t=50\text{ mm}$, $b=520\text{ mm}$
B 点	10.998	11	Q345	加强衬板 10 mm

注：C 点处板厚 $t = 50\text{ mm}$ ，宽度 $b = 520\text{ mm}$ ；B 点处设加强衬板，厚 10 mm 。设计直径均大于计算最小直径，满足安全要求。

5 外钳臂强度校核

5.1 组合变形分析

外钳臂在吊运过程中同时承受轴向力（拉伸/压缩）和弯曲力矩，属于典型的组合变形问题。AB 段受拉，BC 段受压；B 点弯矩最大（895.2 kN·m），A、C 两点弯矩为零。因此，将 B 点作为组合变形强度校核的关键截面。

5.2 B 点截面几何参数（含开孔）

参数	AB 段方向	BC 段方向	单位
抗弯截面模量 W	7.89×10^4	8.952×10^4	cm ³
横截面积 A	0.032	0.022	m ²

5.3 最大应力校核

许用应力： $[\sigma] = \sigma_s / n = 235 / 1.5 \approx 156.67 \text{ MPa} \approx 1.57 \times 10^8 \text{ Pa}$

AB 段最大应力（B 点）： $\sigma_{\max_AB} = N/A_1 + M/W_1 = 129.41 \times 10^3 / 0.032 + 129.41 \times 10^3 / (7.89 \times 10^4) \approx 1.175 \times 10^8 \text{ Pa}$

对比： $\sigma_{\max_AB} = 1.175 \times 10^8 \text{ Pa} \leq [\sigma] = 1.57 \times 10^8 \text{ Pa}$ ，满足强度要求。

BC 段最大应力（B 点）： $\sigma_{\max_BC} \approx 1.563 \times 10^8 \text{ Pa} \leq [\sigma] = 1.57 \times 10^8 \text{ Pa}$ ，基本满足强度要求。

注：由于 AB、BC 杆均有横截面积变化，强度校核的最大值未必精确位于 B 点，而在其附近。A 点仅存在拉力，弯矩为零，且 A、B 拉力分别为 125.2 kN 和 129.41 kN，差距不大，故舍去 A 点分析。C 处受压，不存在因弯曲导致的危险。

5.4 校核结论

外钳臂在 32 吨钢卷设计工况下，B 截面组合变形最大应力均不超过 Q235 钢材的许用应力 156.67 MPa，结构强度满足设计要求。但 BC 段最大应力已接近许用值，建议适当增大 B 截面附近高度或增加衬板以预留更充裕的安全裕度。

6 外钳臂优化设计

6.1 优化目标与思路

优化目标：在保证最大应力不超过许用应力的前提下，设计截面高度沿轴线变化的函数关系，使外钳臂重量最小化。

优化思路：将外钳臂重力按比例分配至 A、B、C 三个节点，据此建立沿轴线的弯矩方程，然后根据弯矩分布确定各截面所需的最小抗弯截面模量，反推截面高度，实现等强度设计。

6.2 弯矩方程

AB 段弯矩方程： $M_{AB}(x) = 1,028.9 x \quad \text{kN} \cdot \text{m} \quad (0 < x \leq 0.87 \text{ m})$

BC 段弯矩方程： $M_{BC}(x) = 859.143 - 328.9 x \quad \text{kN} \cdot \text{m} \quad (0 < x < 2.78 \text{ m})$

6.3 截面优化方法

采用沿轴线的高度 h 和 h' 的修正（BC 段无外部衬板）。AB 段截面抗弯系数： $W_{AB} = (0.52 \cdot h^3 - 0.075 \cdot h'^3) / (0.15 \cdot h)$ ，取等号时重量最小。BC 段截面抗弯系数： $W_{BC} = 0.1 \cdot h^2$ （无衬板）。

根据各截面的弯矩值计算所需的抗弯截面模量，反算最小截面高度，沿轴线逐点优化。

6.4 优化结果

部件	优化前质量 (kg)	优化后质量 (kg)	减重比例
AB 段	430	328.92	23.5%
BC 段	1,100	832.10	24.4%
外钳臂总质量	1,530	1,161.02	24.1%

优化后外钳臂总质量由约 1,530 kg 降至 1,161.02 kg，减重约 368.98 kg（24.1%），在保证强度的前提下显著降低了用材。

6.5 40 吨极限工况分析

基于载荷与应力的线性关系，对 40 吨钢卷极限工况进行了初步分析。结果表明，在 40 吨钢卷下需重新校核外钳臂质量。最优设计方案应遵循以下原则：

安全性（正应力不超过许用应力，预留安全系数）、用料节省、结构简洁、便于安装维护检测。

7 动静法与冲击分析

7.1 最大吊装加速度

吊运过程中钢卷受加速运动影响，夹持力提供的摩擦力需同时克服钢卷重力和惯性力。基于达朗贝尔原理（动静法），将惯性力视为虚拟外力叠加到静力平衡方程中。

已知：钢卷重量 $G = 313.6 \text{ kN}$ ，摩擦系数 $f = 0.1$ ，夹持力可提供摩擦力 $F_f = 407.68 \text{ kN}$ （单侧）。经动静法分析，最大允许吊装加速度 $a = 2.94 \text{ m/s}^2$ 。

此加速度限值表明：实际吊运操作中，起吊和制动加速度应严格控制在 2.94 m/s^2 以下，否则夹持摩擦力将不足以克服钢卷惯性力，存在滑脱风险。

7.2 钢卷意外跌落冲击分析

工况描述：向下放置钢卷时，操作失误导致钢卷距离货板高度 10 mm 时意外脱落。需分析货板能否安全承受冲击。

7.2.1 力学模型

采用双对称集中力模型。钢卷为环形结构，非点载荷；货板弯曲变形，跨中挠度最大，钢卷底部中间区域脱离接触，实际由两侧区域与货板接触传力。等效为两个对称集中力 $G/2$ 作用于钢卷两侧。

7.2.2 已知参数

参数	符号	数值	单位
简支梁总长（轮距）	L	7.5	m
钢卷外径	D	1.899	m
接触间距	S	2.8005	m
货板宽度	b	2.5	m
货板厚度	t	20	mm
货板材料	—	Q690 ($\sigma_b \approx 690 \text{ MPa}$)	—
许用应力 ($n=1.5$)	$[\sigma]$	460	MPa
弹性模量	E	2.06×10^{11}	Pa
截面惯性矩	I	1.667×10^6	m^4
跌落高度	h	0.01	m

7.2.3 计算结果

静挠度： $\Delta_{st} = 6.101 \times 10^{-3} \text{ m}$

冲击系数： $K_d = 3.069$

最大静弯矩： $M_{st} = 439.1 \text{ kN} \cdot \text{m}$

最大动弯矩（能量法）： $M_d = K_d \times M_{st} \approx 1,347.6 \text{ kN} \cdot \text{m}$

最大动应力（能量法）： $\sigma_d \approx 806.95 \text{ MPa}$

叠加法验证最大动应力： $\sigma_d \approx 2,527.5 \text{ MPa}$

7.2.4 冲击结论

最大动应力（806.95 MPa）远超材料许用应力（460 MPa），货板不能安全承受钢卷从 10 mm 高度跌落的冲击。货板将发生明显塑性变形，甚至存在局部屈服和结构失效风险。

7.3 弹簧垫板设计方案

为确保操作安全，设计弹簧垫板缓冲装置，布置在货板与车轮支撑点之间。采用橡胶-钢板叠层弹簧，吸收冲击能量，降低最大冲击载荷。

设计参数	符号	数值	单位
货板等效刚度	k_b	$\approx 4.64 \times 10^4$	N/m
允许最大压缩量	δ_s	0.03 (30)	m (mm)
每侧总承载力	P_{side}	$\approx G/2 = 1.57 \times 10^5$	N
设计承载力 (n=1.5)	F_{design}	2.36×10^5	N
弹簧总刚度	k_s	$\approx 7.87 \times 10^6$	N/m
每侧布置数量	—	4	块
单块刚度	k_0	$\approx 1.97 \times 10^6$	N/m

设计 8 块橡胶-钢板叠层弹簧垫板（每侧 4 块），可有效缓冲钢卷跌落冲击，降低最大冲击载荷，保障货板结构安全。

8 结论与建议

8.1 设计结论

本报告通过对双臂立卷夹钳的系统力学分析，得出以下设计结论：

(1) 吊装臂：横截面面积 $\geq 0.002218 \text{ m}^2$ ，厚度 11 mm，满足强度和刚度要求。

(2) 销轴设计：C 点销轴直径 7 cm，B 点销轴直径 11 cm，均采用 Q345 钢，安全系数 $n=2.5$ ，满足剪切强度要求。

(3) 外钳臂：B 点最大弯矩 $895.2 \text{ kN} \cdot \text{m}$ ，为组合变形（拉伸+弯曲）最危险截面。优化后总质量 1,161.02 kg，较优化前减重 24.1%。强度校核满足 Q235 许用应力 156.67 MPa 的要求。

(4) 外钳口：外钳口夹持力最初计算值为 $F_A = 1,447 \text{ kN}$ ，根据老师点评指正后得出符合实际的外钳口夹持力为 $F_A = 1033.6 \text{ kN}$ 。

(5) 吊装加速度限值：最大允许吊装加速度 2.94 m/s^2 ，操作时应严格控制。

(6) 冲击安全：10 mm 跌落冲击下货板不安全，需加装 8 块弹簧垫板（单块刚度约 1.97 MN/m ），布置于货板与车轮支撑点之间。

8.2 设计优化建议

(1) B 点附近截面为重点加强区域，可适当增大截面高度或厚度以预留更大的安全裕度。

(2) AB/BC 过渡处采用较大圆角，避免截面突变引起的应力集中。

(3) B 点铰孔周围建议局部加厚或增设加强板，以应对开孔削弱效应。

(4) 货板加装弹簧垫板缓冲装置，推荐采用橡胶-钢板叠层弹簧结构。

(5) 建议对 40 吨极限工况进行完整校核，以评估现有设计的承载潜力上限。

8.3 个人总结

通过本次案例分析计算，本人对双臂立卷夹钳从力学建模到结构优化的完整设计流程有了深入理解。在六次翻转课堂的讨论与答辩中，逐步纠正了初始计算偏差（如重力简化方案的选择、弯矩值的统一），并学习了动静法和冲击能量法在工程实际中的应用。本次报告的撰写过程，不仅是对各环节计算成果的系统整合，更是对材料力学核心知识体系——静力平衡、弯曲内力、组合变形强度理论、优化设计和动载荷分析——的综合运用与反思。

除此之外，我了解到，理论计算需与实际结合，并在实际基础和生活经验的基础上进行不断的调整与修正。为使结果更加准确，学会借助像 AutoCAD 的绘图工具、Solidworks 的力学分析组件和 Matlab 进行困难的数学计算等计算机程序工具简化计算和模拟过程是十分必要的。

机械设计过程中最难的莫过于设计，那意味着考虑全面、设计生活化、基于人的结构和安全可靠。材料力学考虑的正是如何让结构安全可靠，如何解决拉伸、弯曲、扭转、冲击、应力集中和组合变形等安全问题。后续若要继续完善本设计，还应进一步结合三维建模、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，以增加设计结果可靠的全面性和提高机械工程设计的实际应用价值。