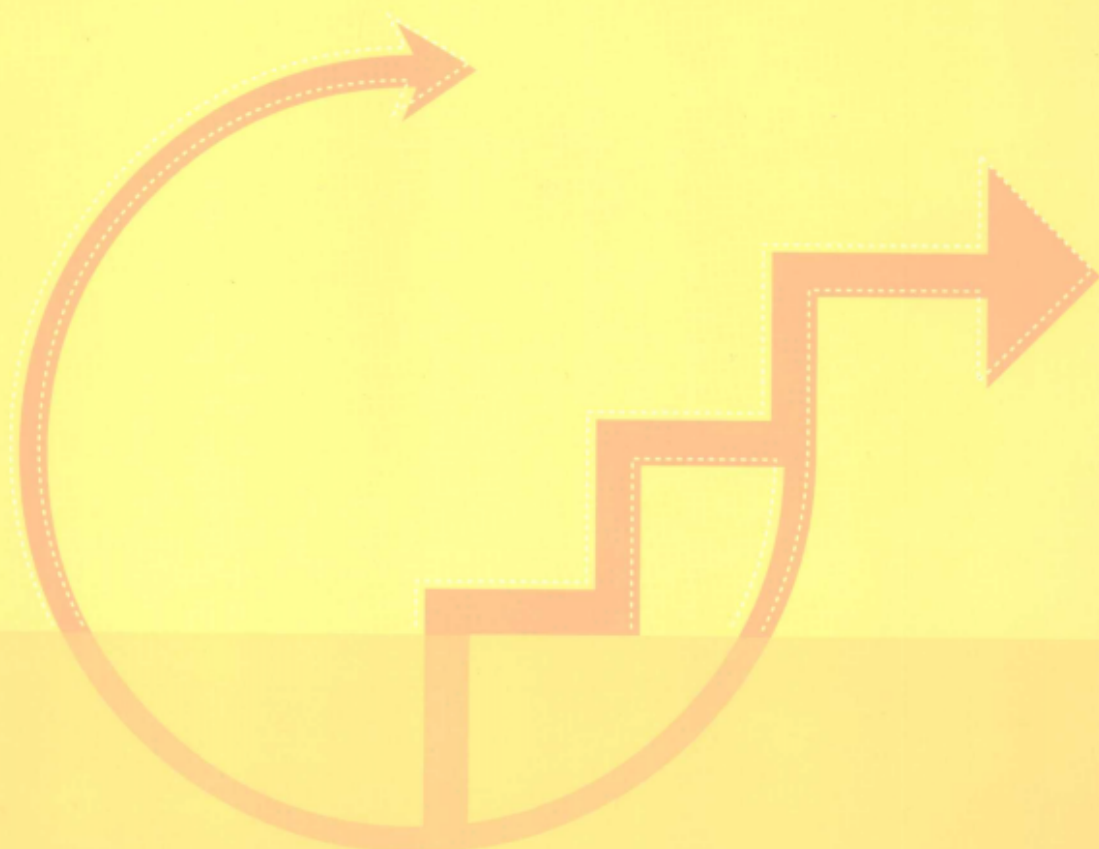


建筑施工计算及安全技术丛书

起重吊装计算及安全技术

主 编 卜一德

副主编 秦家顺 乔治华



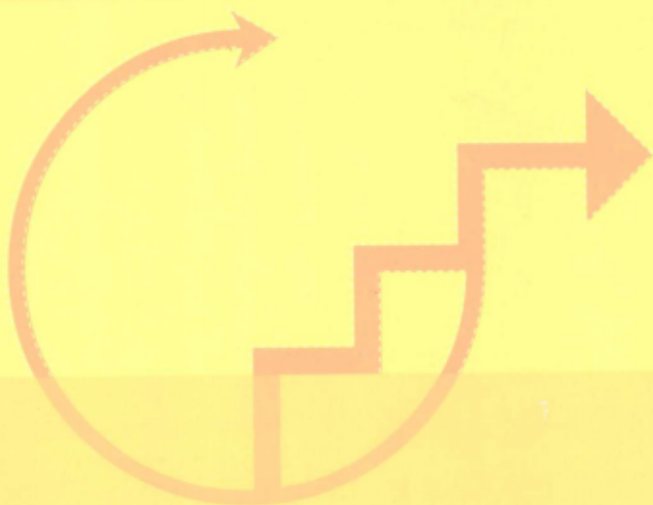
中国建筑工业出版社

责任编辑：酆锁林 曾 威

封面设计：楚 楚

建筑施工计算及安全技术丛书

- 脚手架结构计算及安全技术
- 基坑支护与模板计算及安全技术
- 起重吊装计算及安全技术
- 垂直运输设备计算及安全技术



经销单位：各地新华书店、建筑书店

网络销售：本社网址 <http://www.cabp.com.cn>

网上书店 <http://www.china-building.com.cn>

博库书城 <http://www.bookuu.com>

图书销售分类：建筑施工·设备安装技术（C10）

ISBN 978-7-112-09870-5



9 787112 098705 >

(16574)定价：36.00 元

▲ 建筑施工计算及安全技术丛书

起重吊装计算及安全技术

主 编 卜一德

副主编 秦家顺 乔治华

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

起重吊装计算及安全技术/卜一德主编. —北京: 中国
建筑工业出版社, 2008

(建筑施工计算及安全技术丛书)

ISBN 978-7-112-09870-5

I. 起… II. 卜… III. ①起重机械-吊装-工程计
算②起重机械-安全技术 IV. TH21

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 015754 号

建设工程的起重吊装是施工活动中的一个极其重要的分项工程, 它具有独特的技术特点, 同时也有相当的风险性。本书详尽介绍了与起重吊装有关的计算和安全技术。全书共五章, 主要内容包括结构吊装计算、缆索吊装施工计算、桥梁架设安装计算、土法吊装与吊装索具受力分析、起重吊装安全技术等。本书可供工程建设施工技术人员和起重工、建筑机械驾驶员阅读, 也可以供建筑工程相关专业教学参考。

* * *

责任编辑: 郇锁林 曾 威

责任设计: 董建平

责任校对: 梁珊珊 王金珠

建筑施工计算及安全技术丛书
起重吊装计算及安全技术

主 编 卜一德

副主编 秦家顺 乔治华

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

霸州市顺浩图文科技发展有限公司制版

北京市书林印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 16 $\frac{1}{4}$ 字数: 400 千字

2008 年 6 月第一版 2008 年 6 月第一次印刷

印数: 1—3000 定价: 36.00 元

ISBN 978-7-112-09870-5

(16574)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

作者简介



卜一德，1937年2月出生于重庆市潼南县，教授级高级工程师，终身享受国务院特殊津贴专家。曾就职于中国建筑第八工程局，长期担任技术领导工作。组织并参与的酒泉卫星发射基地垂直总装测试特种厂房和亚洲第一池——济南市污水处理厂蛋形消化池等施工成套技术研究项目，分别获国家科技进步一等、三等奖。工作多年来，勤奋学习、勇于实践、积累了丰富的专业知识和实际工作经验，业绩斐然。

退休后，不遗余力，从事专业写作，先后完成了《油漆防水工》、《房地产开发经营管理实用手册》（一、二版）、《建筑工程施工旁站监理实用手册》、《地板采暖与分户热计量技术》（一、二版）、《建造师职业手册——房屋建筑工程》、《建筑安全工程师实用手册》、《建筑施工项目材料管理》和即将出版的《绿色建筑技术指南》等十余本著作。

同时身为山东省地方标准审定专家组成员，参加了《地板采暖技术规程》、《硬泡聚氨酯保温防水工程技术规范》（GB 50404—2007）等多部地方和国家技术标准审定工作。

前 言

起重吊装作业在工程建设、机械设备运输、维修安装及生产中发挥着重要作用，是国家规定的特殊作业工种。它要求从业人员具有较强的力学理论知识和丰富的实践经验。随着起重机械现代化水平的不断提高，对起重吊装作业人员素质的要求也越来越高，本书正是为此目的而编写的。

本书主要包括：结构吊装计算、缆索吊装施工计算、桥梁架设安装计算、土法吊装与吊装索具受力分析、起重吊装安全技术等，共分为五章。

本书由卜一德（教授级高级工程师、享受国务院特殊津贴专家）担任主编，由秦家顺（高级工程师、一级建造师）、乔治华（高级工程师、国家注册监理师）担任副主编，参加编写的人员有：刘培丰、丁玉清、春贵、卫华、向红、石玉、卜利华、张友德、卜显富、吴蓉等。

本书在编写过程中参考了一些文献资料，在此，谨向有关作者致以衷心感谢。

编 者

目 录

第一章 建筑结构吊装计算	1
第一节 吊装索具设备计算	1
1. 吊绳计算	1
2. 吊装工具计算	4
3. 滑车和滑车组计算	16
第二节 卷扬机牵引力及锚固压重计算	22
1. 手动卷扬机（绞磨）推力计算	22
2. 电动卷扬机牵引力计算	23
3. 卷扬机卷筒容绳量计算	25
4. 卷扬机底座固定压重计算	25
第三节 锚碇计算	28
1. 垂直（桩式）锚碇计算	28
2. 水平（卧式）锚碇计算	28
3. 水平（卧式）锚碇容许拉力计算	33
4. 活动锚碇计算	35
第四节 吊装起重设备选用和稳定性计算	36
1. 起重机工作参数选用计算	36
2. 起重机臂杆长度计算	37
3. 起重机需用数量计算	42
4. 起重机稳定性验算	43
5. 起重机最大安全起重量及性能参数计算	61
6. 起重机加辅助装置计算	62
第五节 钢筋混凝土柱子吊装绑扎点位置计算	65
1. 等截面柱绑扎吊点位置计算	65
2. 变截面柱绑扎吊点位置计算	69
3. 变截面柱吊点位置近似计算	74
第六节 预制钢筋混凝土柱的吊装方法和吊装验算	76
1. 预制钢筋混凝土柱的吊装方法	76
2. 吊装验算	77
第七节 重型柱双机抬吊负荷分配计算	80
1. 一点绑扎抬吊负荷分配计算	81
2. 两点绑扎抬吊负荷分配计算	82
第八节 钢筋混凝土柱子无缆风校正稳定性验算	83
1. 钢筋混凝土柱子无缆风校正稳定性验算	83
2. 钢筋混凝土柱子无缆风校正稳定性验算实例	84

第九节 钢筋混凝土柱子校正温差影响位移计算	84
1. 钢筋混凝土柱子校正温差影响位移计算	84
2. 钢筋混凝土柱子校正温差影响位移计算实例	86
第十节 梁、板绑扎起吊位置及吊索内力计算	86
1. 梁、板起吊位置计算	86
2. 梁、板起吊吊索内力计算	87
第十一节 屋架吊装计算	89
1. 屋架吊装绑扎计算	89
2. 裂缝宽度验算	89
3. 屋架翻身扶直验算	91
4. 屋架吊装吊索内力计算	95
5. 屋架运输验算	96
第十二节 塔桅构件整体吊装计算	99
1. 人字桅杆整体吊装塔类结构计算	99
2. 独脚桅杆整体吊装塔类结构计算	106
第二章 缆索吊装施工计算	108
第一节 缆索吊装系统计算	108
1. 主索(承重索)计算	108
2. 起重索计算	113
3. 牵引索计算	114
4. 扣索计算	116
5. 横移索计算	117
6. 塔架缆风索计算	118
第二节 塔架计算	121
1. 塔架高度计算	121
2. 塔架外力计算	121
3. 人字形木塔架计算	122
4. 桅杆式钢塔架计算	125
5. 万能杆件塔架计算	127
6. 重力式锚碇稳定性验算	127
第三节 构件移运、安装计算	128
1. 构件移运计算	128
2. 吊点计算	128
3. 安装计算	129
第四节 拱肋吊装过程中的稳定性与强度验算	131
1. 拱强度验算	131
2. 裸拱稳定性验算	132
第三章 桥梁架设安装计算	136
第一节 吊装计算	136
1. 吊索内力计算	136
2. 吊索容许拉力计算	138
3. 链条计算	140

第二节 拴吊用具计算	142
1. 卡环计算	142
2. 绳卡计算	142
第三节 滑车与滑车组计算	145
1. 滑车计算	145
2. 滑轮组计算	146
第四章 桅杆能力计算与吊装索具受力分析	149
第一节 各种桅杆能力计算	149
1. 独木桅杆垂直吊装能力计算	149
2. 两木搭垂直吊装能力计算	149
3. 独钢管桅杆垂直吊装能力计算	150
4. 钢管人字架垂直吊装能力计算	150
5. 角钢结构桅杆垂直吊装能力计算	151
6. 桅杆式起重机的受力分析及校核	151
7. 倾斜与无偏心弯矩作用的桅杆吊装能力修正方法	157
8. 桅杆能力计算理论	157
第二节 缆风绳初张拉力及桅杆压力计算	161
1. 受力分析	161
2. 计算过程	161
第三节 各种桅杆吊装形式的索具受力分析与选择	163
1. 无偏心弯矩作用的垂直独桅杆吊装	163
2. 倾斜独桅杆吊装	166
3. 双夺式桅杆吊装	171
4. 回转桅杆吊装	177
第四节 桅杆竖立与移动索具受力分析	183
1. 旋转法竖立桅杆索具受力分析	183
2. 移动桅杆牵引力计算	186
第五节 设备起吊前牵引拉力与后控制拉力计算	187
1. 设备重心位置分析	187
2. 设备起吊前牵引拉力计算	187
3. 设备起吊后控制拉力计算	188
第六节 远离基础设备吊装索具简要受力分析	189
1. 起吊（抬头）时的受力分析	189
2. 起吊离地（脱排）时的受力分析	189
第七节 直立单桅杆扳吊索具受力分析	191
1. 起吊（抬头）时起扳滑车组受力	191
2. 设备旋转支承点的水平推力	191
3. 设备旋转支承点的垂直压力	192
4. 设备溜放力 S'	192
5. 临界角度的确定	192
第八节 桅杆底铺垫	193
1. 桅杆基础的许用抗压应力	193

2. 桅杆垫底板的核算	193
第五章 起重吊装安全技术	196
第一节 起重作业人员岗位安全要求	196
1. 特种作业人员基本条件	196
2. 起重作业人员应具备的条件	196
3. 起重作业人员岗位职责	198
第二节 起重作业人员安全操作技术	200
1. 起重机司机	200
2. 起重指挥安全操作技术基本要求	205
3. 起重司索工安全操作技术要求	206
4. 起重安装拆卸工（维修工）安全操作技术基本要求	206
第三节 起重联络信号	207
1. 使用信号的基本规定	208
2. 信号管理有关规定	208
3. 指挥信号的应用	208
第四节 司索工操作工序	212
1. 准备吊钩	212
2. 捆绑吊物	213
3. 挂钩起吊	213
4. 摘钩卸载	213
5. 搬运过程的指挥	213
第五节 起重方案的确定	214
1. 方案确定依据的基本参数和条件	214
2. 起重作业现场布置	214
3. 起重设备的配备	214
第六节 起重作业前的准备	215
1. 基本准备工作	215
2. 起重作业人员准备工作	215
第七节 物体吊点选择的原则	216
1. 试吊法选择吊点	216
2. 有起吊耳环的物件	216
3. 长形物体吊点的选择	216
4. 方形物体吊点的选择	217
5. 机械设备安装平衡辅助吊点	217
6. 两台起重机吊同一物体时吊点的选择	217
7. 物体翻转吊点的选择	218
第八节 吊装物体的绑扎方法	219
1. 柱形物体的绑扎方法	219
2. 长方形物体的绑扎方法	220
3. 绑扎安全要求注意事项	221
第九节 起重作业安全技术	221
1. 相关作业安全技术	221

2. 作业现场安全管理	230
第十节 起重机械使用安全技术	231
1. 基本要求	231
2. 履带式起重机	234
3. 汽车、轮胎式起重机	235
4. 塔式起重机	236
5. 桅杆式起重机	240
6. 卷扬机	241
附录	242
起重吊运指挥信号	242
参考文献	255

第一章 建筑结构吊装计算

第一节 吊装索具设备计算

1. 吊绳计算

(1) 白棕绳（麻绳）容许拉力计算

白棕绳，又称棕绳、麻绳，以剑麻为原料，性软，吊装工程一般用于起吊轻型构件和作受力不大的缆风、溜绳等。

白棕绳的容许拉力，可按下式计算：

$$[F_z] = \frac{F_z}{K} \quad (1-1)$$

式中 $[F_z]$ ——白棕绳（麻绳，下同）的容许拉力（kN）；

F_z ——白棕绳的破断拉力（kN），常用白棕绳的规格及破断拉力见表 1-1；旧绳取新绳的 40%~50%；

K ——白棕绳的安全系数，按表 1-2 取用。

白棕绳的容许拉力亦可按以下经验式计算：

$$[F_z] \approx d(\text{mm}) \times d(\text{mm}) \div 0.2 \text{ (N)} \quad (1-2)$$

白棕绳技术性能

表 1-1

直径(mm)	圆周(mm)	每卷重量 (长 250m)(kg)	破断拉力 (kN)	直径(mm)	圆周(mm)	每卷重量 (长 250m)(kg)	破断拉力 (kN)
6	19	6.5	2.00	22	69	70	18.5
8	25	10.5	3.25	25	79	90	24.00
11	35	17	5.75	29	91	120	26.00
13	41	23.5	8.00	33	103	165	29.00
14	44	32	9.50	38	119	200	35.00
16	50	41	11.50	41	129	250	37.50
19	60	52.5	13.00	44	138	290	45.00
20	63	60	16.00	51	160	330	60.00

麻绳安全系数

表 1-2

麻绳的用途	使用程度	安全系数值 K
一般吊装	新绳	3
	旧绳	6
作缆风绳	新绳	6
	旧绳	12
作捆绑吊索或重要的起重吊装		8~10

【例 1-1】 设用一根直径 20mm 的白棕绳作一般小型构件的捆绑吊索，试求容许拉力？

【解】

查表 1-1 知直径 20mm 的白棕绳破断拉力为 16kN，同时由表 1-2 查得 $K=8$ 。

其容许拉力由式 (1-1) 得： $[F_z] = \frac{F_z}{K} = \frac{16}{8} = 2\text{kN}$

或由式 (1-2) 得： $[F_z] = \frac{d \times d}{0.2} = \frac{20 \times 20}{0.2} = 2000\text{N} = 2\text{kN}$

故知直径 20mm 的白棕绳容许拉力为 2kN。

(2) 钢丝绳容许拉力计算

钢丝绳系由几股钢丝子绳和一根绳芯（一般为浸油麻芯）捻成，具有强度高，弹性大，韧性、耐磨性、耐久性好，磨损易于检查等优点。结构吊装中常采用 6 股钢丝绳，每股由 19、37、61 根直径为 0.4~3.0mm 的高强钢丝组成。通常表示方法是：6×19+1、6×37+1、6×61+1；前两种使用最多，6×19 钢丝绳多用作缆风绳和吊索；6×37 钢丝绳多用于穿滑车组和吊索。

钢丝绳的容许拉力可按式计算：

$$[F_g] = \frac{\alpha F_g}{K} \quad (1-3)$$

式中 $[F_g]$ ——钢丝绳的容许拉力 (kN)；

F_g ——钢丝绳的钢丝破断拉力总和 (kN)；

α ——考虑钢丝绳之间荷载不均匀系数，对 6×19、6×37、6×61 钢丝绳， α 分别取 0.85、0.82、0.80；

K ——钢丝绳使用安全系数，按表 1-3 取用。

F_g 可从表 1-4 查得，如无表时，可近似地按下式计算：

$$F_g \approx 0.5d^2 \quad (1-4)$$

式中 d ——钢丝绳直径。

钢丝绳安全系数及需用滑车直径

表 1-3

钢丝绳的用途	安全系数 K	滑车直径
缆风绳及拖拉绳	3.5	$\geq 12d$
用于滑车时：手动的	4.5	$\geq 16d$
机动的	5~6	$\geq 16d$
作吊索：无绕曲时	5~7	—
有绕曲时	6~8	$\geq 20d$
作地锚绳	5~6	—
作捆绑吊索	8~10	—
用于载人升降机	14	$\geq 30d$

注： d 为钢丝绳直径。

6×19 钢丝绳的主要规格及荷重性能

表 1-4

直径(mm)		钢丝总断面 积(mm ²)	参考重量 (kg/100m)	钢丝绳公称抗拉强度(N/mm ²)				
钢丝绳	钢丝			1400	1550	1700	1850	2000
				钢丝绳破断拉力总和 F _g 不小于(kN)				
6.2	0.4	14.32	13.53	20.0	22.1	24.3	26.4	28.6
7.7	0.5	22.37	21.14	31.3	34.6	38.0	41.3	44.7
9.3	0.6	32.22	30.45	45.1	49.9	54.7	59.6	64.4
11.0	0.7	43.85	41.44	61.3	67.9	74.5	81.1	87.7
12.5	0.8	57.27	54.12	80.1	88.7	97.3	105.5	114.5
14.0	0.9	72.49	68.50	101.0	112.0	123.0	134.0	144.5
15.5	1.0	89.49	84.57	125.0	138.5	152.0	165.5	178.5
17.0	1.1	103.28	102.3	151.5	167.5	184.0	200.0	216.5
18.5	1.2	128.87	121.8	180.0	199.5	219.0	238.0	257.5
20.0	1.3	151.24	142.9	211.5	234.0	257.0	279.5	302.0
21.5	1.4	175.40	165.8	245.5	271.5	298.0	324.0	350.5
23.0	1.5	201.35	190.3	281.5	312.0	342.0	372.0	402.5
24.5	1.6	229.09	216.5	320.5	355.0	389.0	423.5	458.0
26.0	1.7	258.63	244.4	362.0	400.5	439.5	478.0	517.0
28.0	1.8	289.95	274.0	405.5	449.0	492.5	536.0	579.5
31.0	2.0	357.96	338.3	501.0	554.5	608.5	662.0	715.5
34.0	2.2	433.13	409.3	306.0	671.0	736.0	801.0	
37.0	2.4	515.46	487.1	721.5	798.5	876.0	953.5	
40.0	2.6	604.95	571.7	846.5	937.5	1025.0	1115.0	
43.0	2.8	701.60	663.0	982.0	1085.0	1190.0	1295.0	
46.0	3.0	805.41	761.1	1125.0	1245.0	1365.0	1490.0	

注：表中粗线左侧，可供应光面或镀锌钢丝绳，右侧只供应光面钢丝绳。

【例 1-2】 吊装构件采用 6×19、直径 18.5mm、钢丝强度极限为 1400N/mm² 的钢丝绳作起重滑车组的起重绳，用卷扬机牵引，求该绳的容许拉力。

【解】

由表 1-4 查得 6×19、直径 18.5mm 的钢丝绳的钢丝破断拉力总和为 F_g=180kN；取不均匀系数 α=0.85，由表 1-3；取安全系数 K=5.5，

钢丝绳的容许拉力由式 (1-3) 得

$$[F_g] = \frac{\alpha F_g}{K} = \frac{0.85 \times 180}{5.5} = 27.8 \text{ kN}$$

当没有钢丝绳技术性能表时，钢丝绳的破断拉力可由式 (1-4) 近似计算得：

$$F_g = 0.5 \times 18.5^2 = 171 \text{ kN}$$

$$[F_g] = \frac{0.85 \times 171}{5.5} = 26.4 \text{ kN}$$

查表与估算两者相差约 5%，可以满足要求。

(3) 钢丝绳的复合应力和冲击荷载计算

钢丝绳在承受拉伸和弯曲时复合应力按下式计算：

$$\sigma = \frac{F}{A} + \frac{d_0}{D} \cdot E_0 \leq [\sigma] \quad (1-5)$$

式中 σ ——钢丝绳承受拉伸和弯曲的复合应力 (N/mm^2);

F ——钢丝绳承受的综合计算荷载 (kN);

A ——钢丝绳钢丝截面积总和 (mm^2);

d_0 ——单根钢丝的直径 (mm);

D ——滑轮或卷筒槽底的直径 (mm);

E_0 ——钢丝绳的弹性模量 (N/mm^2);

$[\sigma]$ ——钢丝绳的容许拉应力 (N/mm^2)。

在起重吊装作业中, 钢丝绳应防止冲击荷载 (如紧急刹车等) 作用, 冲击荷载对设备和钢丝绳均有损害, 冲击荷载可按下式计算 (图 1-1):

$$F_s = Q \left(1 + \sqrt{1 + \frac{2EAh}{QL}} \right) \quad (1-6)$$

式中 F_s ——冲击荷载 (N);

Q ——静荷载 (N);

E ——钢丝绳的弹性模量 (N/mm^2);

A ——钢丝绳截面积 (mm^2);

h ——落下高度 (mm);

L ——钢丝绳的悬挂长度 (mm)。

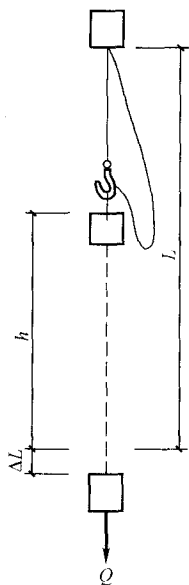


图 1-1 冲击荷载计算简图

【例 1-3】 设采用一根 6×37 直径 17.5mm 钢丝绳, 钢丝绳总截面积 $A = 111.53\text{mm}^2$, 钢丝绳的弹性模量 $E = 7.84 \times 10^4 \text{N}/\text{mm}^2$, 吊重 (静荷载) $Q = 20.5\text{kN}$, 悬挂长度 $L = 5\text{m}$, 落下距离 $h = 250\text{mm}$, 试求其冲击荷载。

【解】

冲击荷载由式 (1-6) 得:

$$\begin{aligned} F_s &= Q \left(1 + \sqrt{1 + \frac{2EAh}{QL}} \right) \\ &= 2.05 \times 10^4 \left(1 + \sqrt{1 + \frac{2 \times 7.84 \times 10^4 \times 111.54 \times 250}{2.05 \times 10^4 \times 5000}} \right) \\ &= 2.05 \times 10^4 (1 + 6.6) \\ &= 15.58 \times 10^4 \approx 156\text{kN} \end{aligned}$$

由计算可知冲击荷载为 156kN , 是静荷载的 7.6 倍。

2. 吊装工具计算

(1) 卡环计算

卡环又称卸甲, 是吊索与吊索或吊索与构件吊环之间连接的常用工具, 它由弯环与销子两部分组成。一般卡环的主要规格和安全荷重可按表 1-5 取用。

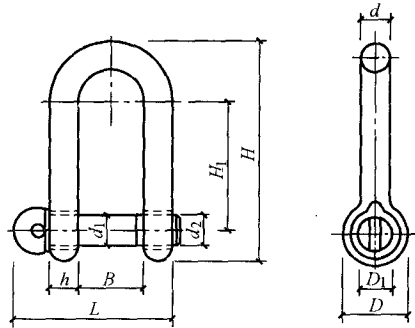
施工现场作业中, 卡环的容许荷载, 可根据卡环的销子直径按以下近似式计算:

$$[F_k] \approx (35 \sim 40) d^2 \quad (1-7)$$

式中 $[F_k]$ ——卡环的容许荷载 (N);
 d ——卡环销子直径 (mm)。

常用卡环规格及安全荷重

表 1-5



型 号	使用负荷		D	H	H ₁	L	d	d ₁	d ₂	B	重量 (kg)
	(N)	(kg)	(mm)								
0.2	2450	250	16	49	35	34	6	8.5	M8	12	0.04
0.4	3920	400	20	63	45	44	8	10.5	M10	18	0.09
0.6	5880	600	24	72	50	53	10	12.5	M12	20	0.16
0.9	8820	900	30	87	60	64	12	16.5	M16	24	0.30
1.2	12250	1250	35	102	70	73	14	18.5	M18	28	0.46
1.7	17150	1750	40	116	80	83	16	21	M20	32	0.69
2.1	20580	2100	45	132	90	98	20	25	M22	36	1.00
2.7	26950	2750	50	147	100	109	22	29	M27	40	1.54
3.5	34300	3500	60	164	110	122	24	33	M30	45	2.20
4.5	44100	4500	68	182	120	137	28	37	M36	54	3.21
6.0	58800	6000	75	200	135	158	32	41	M39	60	4.57
7.5	73500	7500	80	226	150	175	36	46	M42	68	6.20
9.5	93100	9500	90	255	170	193	40	51	M48	75	8.63
11.0	107800	1100	100	285	190	216	45	56	M52	80	12.03
14.0	137200	1400	110	318	215	236	48	59	M56	90	15.58
17.5	171500	1750	120	345	235	254	50	66	M64	100	19.35
21.0	205800	2100	130	375	250	288	60	71	M68	110	27.83

【例 1-4】 设已知卡环的销子直径为 18.5mm，试求卡环的容许荷载。

【解】

卡环的容许荷载由式 (1-7) 得：

$$[F_k] = 37.5d^2 = 37.5 \times 18.5^2 = 12834\text{N}$$

查表 1-6 得销子直径 $d_1 = 18.5\text{mm}$ ，卡环使用负荷为 12250N，两者较为接近。

(2) 绳卡计算

绳卡又称夹头或轧头，用于固定钢丝绳的夹接，常按结构形式分为马鞍式、抱合式、骑马式等。

1) 马鞍式、抱合式绳卡数量可按下式计算：

$$n_1 = \frac{P}{2T(f_1 - f_2)K} = 1.667 \frac{P}{2T} \quad (1-8)$$