

[苏联]M·M·戈赫别尔格 著

北京钢铁学校
阅览室藏书
图书馆

起重机金属结构

北京钢铁学校
图书馆藏书

TH210.3

中国工业出版社

起重機金屬結構

考慮疲勞現象的計算

〔苏联〕M·M·戈赫別爾格 著

郁永熙 刘錫山 譯

中國工業出版社

本书研究了起重机金属结构的载荷问题和各种机构工作时的动力学问题。书中还讨论了疲劳强度概念、疲劳强度设计计算原则和方法，并介绍了各种高疲劳强度的结构以及试验研究结果。书末并作了起重机金属结构疲劳强度的实例计算。

本书可供设计和使用起重机的技术工作者、高年级大学生及研究生参考，对于设计变载荷条件下工作的金属结构的技术人员亦很有参考价值。

М. М. Гохберг

**МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ КРАНОВ
РАСЧЕТ С УЧЕТОМ ЯВЛЕНИЙ УСТАЛОСТИ
МАШГИЗ, 1959**

* * *

**起重机金属结构
考虑疲劳现象的计算
郁永熙 刘锡山 译**

*

机械工业图书编辑部编辑（北京苏州胡同141号）

中国工业出版社出版（北京佟麟阁路丙10号）

北京市书刊出版业营业许可证出字第110号

中国工业出版社第一印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

开本850×1168 $\frac{1}{2}$ ·印张5 $\frac{13}{16}$ ·字数145,000

1964年9月北京第一版·1964年9月北京第一次印刷

印数0,001—4,020·定价(科七)1.10元

*

统一书号：15165·3072(一机-657)

序 言

起重機金屬結構受到變應力的作用，因為起重機是具有工作行程和空轉行程周期性作用的機器。

直至不久以前，起重機金屬結構中應力的變化是不予考慮的。但是，由於系統地改善了生產能力的利用，並且提高了勞動生產率，在最近 15~20 年中，起重設備的使用強度已顯著地增加，起重機的速度參數亦已提高。因此，至今所採用的起重機金屬結構設計和計算方法，在特重級、重級、有時在中級工作制度情況下，已經同起重機的实际使用情況不相適應。結果，常常使起重機在使用過程中必須加固金屬結構。此外，也產生過結構構件的疲勞損壞，引起嚴重的事故；有的竟使起重機傾覆，全部被毀壞。

現有的起重機金屬結構計算方法具有兩個原則性的缺點：

第一，以靜力計算代替動力計算，在計算中引入僅與起重機工作制度有關的動力修正係數。

第二，假定結構承受不變應力的作用進行計算，而不考慮結構在變應力作用下的強度。

結果，某些結構具有過大的安全係數（特別是低速運轉的起重機，包括大起重量起重機），而另一些結構的安全係數不夠（工作於高速度的、荷重達到極限值的、裝卸緊張而頻繁的起重機），它們的疲勞損壞証實了這種情況。

本著作是在文獻中第一次試圖探討起重機金屬結構考慮疲勞現象的計算。

本書分兩篇。

第一篇闡述起重機金屬結構的載荷。主要討論當起重機主要機構工作時，起重機結構中應力變化的真實特性和短暫載荷作用

下的近似計算方法。

第二篇闡述起重機金屬結構在變應力作用下的強度。討論了有關金屬結構疲勞強度的一般概念、結構構件的疲勞試驗結果、設計原則和考慮疲勞現象的起重機金屬結構計算。最後列舉了計算實例。這一篇可供在變應力作用下的各種用途金屬結構設計時應用。

書末列舉了有關的國內外參考書籍目錄。

作 者

目 次

序 言

第一篇 起重機金屬結構的載荷

第一章 起重機金屬結構載荷的分類.....	1
1. 概論.....	1
2. 自重.....	2
3. 風載荷.....	2
4. 其它載荷.....	6
第二章 起重機金屬結構動力學的共同問題.....	7
5. 動力計算簡圖.....	7
6. 力的動力作用.....	13
7. 結構的自振頻率.....	19
8. 起重機金屬結構振動的衰減.....	22
第三章 起升機構工作時金屬結構的動力學.....	26
9. 理論解析.....	26
10. 試驗結果.....	32
11. 簡化的動力計算方法.....	37
第四章 運行機構工作時金屬結構的動力學.....	42
12. 理論解析.....	42
13. 試驗結果.....	50
14. 簡化的動力計算方法.....	50
第五章 回轉機構工作時金屬結構的動力學.....	52
15. 理論解析.....	52
16. 試驗結果.....	54
17. 吊重繩傾角的簡化求法.....	55

第二篇 起重機金屬結構受到變應力作用時的強度

第六章	金屬結構疲勞強度的概念	58
18.	金屬結構的材料	58
19.	金屬結構中的局部應力	63
20.	金屬結構的疲勞強度	66
21.	起重機金屬結構的疲勞損壞	75
第七章	金屬結構構件疲勞試驗的結果	84
22.	基本金屬	85
23.	對接的焊接連接	87
24.	填角焊縫的焊接連接	91
25.	鉚釘連接	107
26.	金屬結構構件疲勞強度的一般分析	108
第八章	金屬結構的設計原則	115
27.	起重機金屬結構的典型構件和它們的有效應力集中系數	115
28.	具有高疲勞強度的結構連接和結點的設計原則	120
第九章	起重機金屬結構考慮疲勞現象的計算	129
29.	載荷及其計算組合	129
30.	計算方法的一般原則	143
31.	起重機橋架金屬結構的耐久性計算方法	157
32.	計算實例	162
	參考文獻	179

第一 篇

起重机金属结构的载荷

第 一 章

起重机金属结构载荷的分类

1. 概 論

起重机的金属结构承受各种不同的载荷作用，有静特性的，也有动特性的。它们包括：

1)起重机构件的自重，它在不动的结构中是垂直的静载荷，在移动的结构中是在垂直平面内和水平平面内的动载荷；

2)等于提升货物重量的有效载荷和吊具的重量，当起重机任一机构工作时，它们是主要在垂直平面内，但也在水平平面内的动载荷(参看第三~五章)；

3)风载荷，是能作用于任何方向的水平载荷；

4)其它载荷，温度的影响、雪、冰层及地震载荷等等。

所有上述载荷可以按作用的持续性和出现的可能性来讨论。

按作用的持续性，载荷分为：

1)经常的，不论起重机处于工作或非工作状态，它们永远作用于构件上(结构构件和固定在它们上面的机构及电气设备的自重)；

2)临时的，只在一定的时间间隔内作用于结构上；对于结构来说它们可能是活动的(有效荷重及移动小车的自重)或者是固定的，作用于结构的一定结点上(臂架端部有效荷重等)。

按出现的可能性，分为两组基本的载荷计算组合：

1)起重机工作状态下的正常载荷；

2) 起重機工作或非工作狀態下的最大(極限)載荷。

在工作狀態的正常載荷情況下應進行持久性計算；在最大載荷情況下應進行強度^①和穩定性計算。

對某些類型的起重機還須進行特殊(事故的及安裝的等等)載荷的計算。考慮特殊載荷作用時，取最小的安全系數進行驗算。

載荷的計算組合在第九章中將詳細討論。

2. 自 重

在計算起重機結構時，起重機構件的自重有重要的意義。起重機本身構件的自重常遠遠地超過被起升荷重的有效重量。例如，通用橋式起重機有效荷重的重量根據起重機起重量及跨度約為起重機自重的15%~50%；而起重量3噸到75噸的門座起重機，僅為起重機自重的4%~11%〔31〕。

因為在設計之前結構的自重還不知道，所以必須預先給定。

有幾種預先估計結構自重的方法，根據相似結構的設計資料決定重量是最可靠的方法。如果沒有這種資料，就要利用文獻中相似結構的各種重量的數值。另外，還有用於決定某些結構自重的公式〔4〕。最後，結構的自重還可用重複試算的方法來確定。如果在預先取定的同計算所得的結構自重之間有很大的差別，必須重行計算。

在計算金屬結構時，把格柵結構的自重看作集中載荷，作用於固定點(結點)；梁式結構的自重，看作沿相應構件的均布載荷。

由自重產生的動力載荷作用將在第四和第五章中討論。

3. 風 載 荷

作用於露天工作的起重機的風壓按下面公式決定：

^① 術語“持久性計算”理解為高次重複變載荷作用下的強度計算，而術語“強度計算”理解為低次重複(小於1000次)載荷作用下的強度計算〔44〕。

$$P_0 = k_0 q F_n \text{ (公斤)}, \quad (1)$$

式中 k_0 ——空气动力阻力系数，它与受风物体的外形有关（用試驗方法决定）；

q ——計算风压（公斤/米²），它决定于风速；

F_n ——起重机和荷重垂直于风向的迎风面积（米²）。

起重机的风载荷规范由ГОСТ1451-42规定，分为三类。

1. 起重机工作状态的正常风：港口起重机和浮游起重机 $k_0 q = 25$ 公斤/米²，其它起重机 $k_0 q = 15$ 公斤/米²；

2. 起重机仍能工作的极限风：港口起重机和浮游起重机 $k_0 q = 40$ 公斤/米²，其它起重机 $k_0 q = 25$ 公斤/米²；

3. 起重机非工作状态的极限风：此时 k_0 和 q 的值分别按下述指示决定。

垂直于风压方向的計算迎风面积 F_{pac} ：实体腹板结构等于起重机外廓所包含的面积；格栅结构等于起重机外廓所包含的面积减去漏空面积，即

$$F_{pac} = \Sigma f = \alpha F,$$

式中 $\alpha = \frac{\Sigma f}{F}$ ——充填系数；

Σf ——桁架构件在桁架平面上投影之和；

F ——桁架外廓所包含的面积。

格栅式起重机桁架通常 $\alpha = 0.25 \sim 0.5$ 。

当起重机具有几个并列的等高平面梁（桁架）时，其迎风計算面积：

- 1) 如果梁間的距离小于前梁的高度，則等于前梁的面积；
- 2) 如果梁間的距离等于或大于梁的高度，但小于梁的双倍高度，則等于前梁的全面积加上随后每一片梁的面积的一半；
- 3) 如果梁間的距离等于或大于梁的双倍高度，則应为所有梁的全面积。

計算时，所有后梁未被前梁复盖的部分均应全部計入。

如果荷重的迎风面积不知道，可取用表 1 的数据。

不論任何风向，空气动力阻力系数采用：

1) 对于矩形的梁和桁架 $k_0 = 1.4$;

2) 对于矩形的駕駛室、对重等 $k_0 = 1.2$;

3) 对于由管子組成的結構，按計算风压 q (公斤/米²) 和管子直徑平方 d^2 (米²) 的相乘积而定：

当 $qd^2 \leq 1.0$ 公斤时， $k_0 = 1.2$;

当 $qd^2 \geq 1.5$ 公斤时， $k_0 = 0.7$;

当 qd^2 是中間数值时， k_0 按內插法決定[42]。

表 1 荷重迎风面积

荷重的重量(吨)	1	2	3	5	10	15	20	30	50	75	100	150	200	250	300
迎风面积(米 ²)	1	1.7	2.3	3.5	6	8	10	14	20	28	35	50	60	70	80

似此，將直角型材（鋼板、角鋼及槽鋼等）改為直徑大的管子，結構所受的风压可以减少一半。因为給定工作状态风压时，估計 $k_0 = 1.4$ ，管子結構的 k_0 能比 1.4 小几成，工作风压便将小几成。

計算风压同风速 v (米/秒) 有关，并取：

$$q = \frac{v^2}{16} \text{ (公斤/米}^2\text{)} \quad (2)$$

风速决定于地理区域及离地面的距离，并且随离地面距离的增加而增大。在各个地区范圍內，計算风压按高度取为定值（見表 2），它的数值按地区的平均点决定。

在計算起重机（桥式及龍門起重机、装卸桥）桁架的抗风斜撑或塔式及錘形起重机臂架等的抗风斜撑时，計算风压均按該斜撑所在位置决定。

风力按照蒲福风級决定，它規定了风速同十二个风級之間的关系（表 3）[31]。

表2 计算风压 q (公斤/米²)

起重机设置地区	离地面的高度(米)				
	0~20	20~40	40~60	60~80	80~100
海岸, 大河下游及诺沃罗西斯克地区	100	120	140	160	180
苏联所有的其它地区	70	90	110	130	150

在强风突发的情况下, 风速的增加等于

$$v_{\text{ук}} = (1.9 \sim 1.6)v_{\text{cp}}$$

式中 v_{cp} 相当于表3的平均风速上限值。表3的计算风压是按公式(2)决定的。决定平均风压时, 取了平均风速的上限值。风速和相应的计算风压是露天地面或海面以上标准高度6米的数值。

可以看出, 表3的计算风压可能比表2中的大得多(离地面20米以内为70~100公斤/米²), 这可用海面风速大于地面风速来解释。

表3 蒲福风级

风级	风的名称	速度(米/秒)		计算风压(公斤/米 ²)	
		平均	强风突发	平均	强风突发
0	无风	0~0.5	1.0	0	0.1
1	和风	0.6~1.7	3.2	0.2	0.6
2	微风	1.8~3.3	6.2	0.7	2.4
3	弱风	3.4~5.2	9.6	1.7	5.8
4	小风	5.3~7.4	13.6	3.4	11.5
5	速风	7.5~9.8	17.8	6.0	19.8
6	猛风	9.9~12.4	22.2	9.6	30.7
7	烈风	12.5~15.2	26.8	14.4	44.7
8	极烈风	15.3~18.2	31.6	20.6	62.4
9	暴风	18.3~21.5	36.7	28.8	84.1
10	强烈暴风	21.6~25.1	42.0	39.3	110.2
11	极强烈暴风	25.2~29.0	47.5	52.5	140.8
12	飓风	>29.0	53.0	69.0	175.5

在利用蒲福風級計算結構強度時，應考慮表 3 中強風突發的數據。

風載荷本質上是動載荷。風的最大突發性是在大氣的底層，隨着離地面距離的增加而逐漸緩和。根據已有的觀察，風的突發過程平均延續 2 秒。知道了結構自振周期和風的突發增長時間，就可以確定風的動力作用（參看第六節），這對於塔形的高大設備是很重要的。在這種情況下，風壓的數值最大可能增加一倍。

4. 其它載荷

雪、冰層和溫度影響也屬於金屬結構的載荷。在一般起重機的構築物中不考慮雪和冰。

當溫度變化時，結構構件伸長或縮短所引起的溫度影響，只有在計算露天工作的靜不定系統時才考慮。初溫是建造靜不定系統時的溫度，即工廠製造或安裝時的溫度。溫度升降的範圍取為 $\pm 40^{\circ}\text{C}$ 。

在地震區域，即震源波及區域，安置起重機構築物時，應該估計水平作用的慣性力，其數值由下式決定：

$$S = k_1 P,$$

式中 $k_1 = \frac{1}{40} \sim \frac{1}{10}$ ——地震係數，按地理區域決定 [51]；

P ——自重載荷。

計算時假定慣性力是靜力作用。這些力的作用與載荷（質量）的分布相適應。

只對於空載的起重機作地震力的估計。

在很多情況下，計算起重機金屬結構應估計所謂特殊載荷。

對於具有巨大金屬結構的起重機有時要估計安裝載荷，其值可以按照起重機安裝設計決定。

對於某些類型的特殊起重機，還要估計起重機完成輔助工作所產生的載荷，例如裝料起重機推平爐料等等。這些附加載荷應

根据对起重机使用条件的研究确定。

某些类型起重机的使用条件要求估计它们的冲击载荷。例如在计算装卸桥的结构时，应该估计小车对安装在桥架上的缓冲器的冲击〔19〕。有些起重机，例如地面加料机应该估计它们相互间可能的碰撞。当然，估计这类载荷时取最小的安全系数。

第二章

起重机金属结构动力学的共同问题

5. 动力计算简图

起重机各种机构在工作时，力的作用由发动机或制动器通过该机构的驱动系统传递到金属结构上。计算时，力的作用可用分析或图解的形式表示，根据对起重机在使用条件下工作的研究结果确定它们。并可以机构主动环节的运动规律作为计算的基础。这种方法在弹性振动系统对机构的运动规律不起实际影响的情况下，特别方便。例如在第三章中，认为外界的作用可用卷筒运动的规律来表达，卷筒被看作系统的主动环节。在第四章中研究运行机构工作条件下的金属结构动力学时，以力的作用规律作为计算的基础。在此情况下，取起重机不变的运动规律作为计算基础，忽略柔性吊具的影响，将给出不十分精确的答案。

起重机各个机构的驱动由刚性和柔性的传动系统组成。刚性传动是以刚度大的弹性构件(轴)连接起来的质点系统(联轴节、齿轮等)。钢丝绳传动是柔性传动。

轴的刚度不是钢丝绳系统及金属结构的刚度所能比拟的。所以，不考虑驱动系统中刚性传动的弹性也不会降低计算金属结构的实际准确性。

起升机构〔15、22〕和运行机构〔10、22〕应变测量的試驗数据証明剛性傳动系統的彈性可以忽略不計。Д.И. 沃尔科夫 (ВОЛКОВ) 在挖掘机-起重机旋轉时对臂架动力載荷的研究中, 得出同样的結論〔13〕。

上述的試驗結果及下面列举的許多有关起重机制造中各种动力学問題的著作表明, 可以把实际的系統簡化成动力計算图。多质点的高次自由度系統, 可以用2~3个质点的系統来代替。在解决金属結構的动力学問題时, 可以利用下面的簡化图:

1) 起升机构——机构的质量同悬于彈性結構上的荷重质量用彈性联系相連結;

2) 起重机运行机构——起重机走輪部分的換算质量同金属結構的換算质量用彈性联系相連接, 金属結構上用不能拉长的繩索或剛性吊具悬挂着荷重;

3) 起重機回轉机构——起重機回轉部分的換算质量同金属結構的換算质量用彈性联系相連接, 金属結構上用不能拉长的繩索吊具悬挂着荷重。

在研究上述簡图时, 可以忽略非彈性阻力(振动衰减)〔15〕, 因为所求的是在振动第一阶段产生的最大作用力。

根据起重机的型式, 在研究結構的橫向振动时, 結構的簡图可視為不同的梁:

1) 对于桥式、龍門起重机和装卸桥, 在垂直平面內振动时視為具有或沒有悬臂的簡支梁;

2) 当上述类型起重机在水平平面內振动时, 視為自由的梁;

3) 具有臂架的回轉起重機, 無論在垂直平面內或水平平面內振动时, 均視為一端固定, 另一端自由的梁。

彈性金属結構的振动可看作具有有限自由度系統的振动。为此, 結構的均布质量, 可以根据結構簡图和质量換算点的位置用一个或几个集中的換算质量来代替。这时應該力求得到最少自由度的系統。

图 1 表示最流行的起重机等截面梁简图在第一阶振动中，即在具有最小的，所谓基本频率振动中，挠度的座标(59)。这里相应于换算点的最大座标等于一。正如起重机金属结构的应变试验所表明，第二阶频率的振动已经衰减得非常快，更高阶频率的振动就不用说了。因此，实际上在大多数情况下，只研究基本的最低频率就足够了。

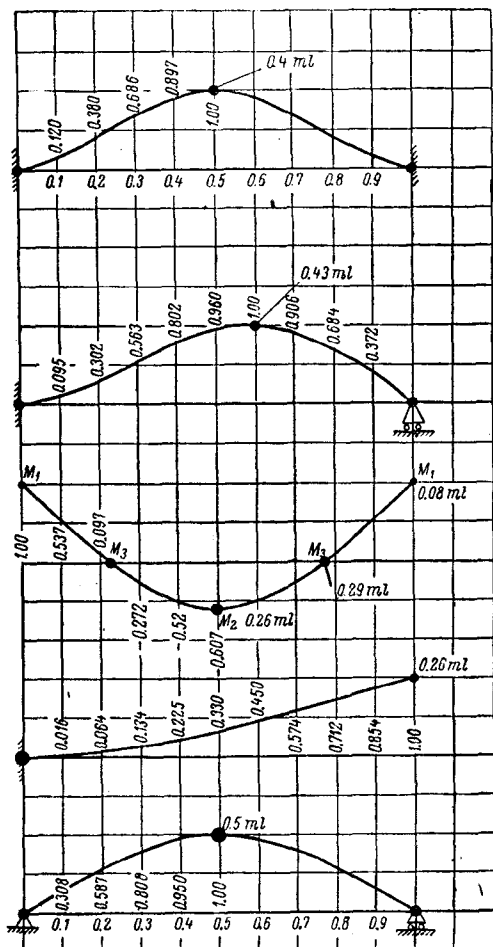


图 1 第一阶振动时的挠度座标

结构的分布质量用集中质量代替时，应从两个系统的动力等效出发，即应从保持结构在自由振动过程中最大的动能和位能值不变的条件出发。

以任何频率作自由振动的梁，在任一截面上的位移

$$y = f(x) \sin(pt + \varepsilon),$$

式中 $f(x)$ ——在振动过程中的挠度坐标；

p ——自振频率；

ε ——振动的初相。

位移速度

$$y' = pf(x) \cos(pt + \varepsilon)$$

和

$$y_{\max} = f(x), \quad y'_{\max} = pf(x).$$

分布质量为 m 的梁，动能最大值等于：

$$\frac{1}{2} \int_0^l m y'_{\max}^2 dx = \frac{p^2}{2} \int_0^l m f^2(x) dx \approx \frac{p^2}{2} \sum m f^2(x) \Delta x.$$

以几个集中质量代替分布质量 m ，得

$$\frac{p^2}{2} \int_0^l m f^2(x) dx \approx \frac{p^2}{2} \sum m f^2(x) \Delta x = \frac{p^2}{2} \sum M_i f_i^2,$$

即

$$\int_0^l m f^2(x) dx \approx \sum m f^2(x) \Delta x = \sum M_i f_i^2. \quad (3)$$

此外，梁的总质量应该保持不变，即

$$\int_0^l m dx \approx \sum m \Delta x = \sum M_i. \quad (4)$$

作为一个例子，下面研究确定单位长度均布质量为 m 的简支梁的换算质量 M 。

取换算质量位于跨度中点。从条件(3)得

$$m \sum f^2(x) \Delta x = M f^2(0.5l) = M.$$