

起重机动力学

〔苏联〕M. C. 柯馬罗夫 著

陈克兴 刘慰儉 陈先霖 译



中国工业出版社

起重机动力学

[苏联] M. C. 柯馬罗夫 著

陈克兴 刘慰儉 陈先霖 译



中国工业出版社

本书是根据苏联机械出版社1962年出版的“起重机动力学”（增订二版）翻译的。书中研究了起重机驱动系统在工作过程中的动载现象，把起重机看作具有几个自由度的弹性系统。系统中各零件的运动用微分方程表示，最后给出了可以用来确定起重机零件的动载荷与计算载荷的公式，并附有实际计算例题。

本书供高等学校起重运输机专业和冶金机械专业师生参考，同时也供从事起重机工作的工程设计人员和科学研究人员使用。

本书第三、四章由陈克兴翻译，第五章和第六章中的第一、二节由陈先霖翻译，前言、第一、二、七、八章、附录和第六章中的第三节由刘慰俭翻译，全书总校由陈克兴、刘慰俭担任。

М. С. Комаров
ДИНАМИКА ГРУЗОПОДЪЕМНЫХ МАШИН
Издание 2-е, переработанное
и дополненное
МАШГИЗ
Москва 1962 Киев

* * *

起重机动力学
陈克兴 刘慰俭 陈先霖 译

*

冶金工业部工业教育司编辑（北京雍和大街78号）

中国工业出版社出版（北京佟麟阁路西10号）

北京市书刊出版业营业许可出字第110号

中国工业出版社第三印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

开本 $850 \times 1168 \frac{1}{32}$ ·印张 $9\frac{1}{2}$ ·字数246,000

1965年8月北京第一版·1965年8月北京第一次印刷

印数0001—1,610·定价（科五）1.20元

*

统一书号：K15165·3963（冶金-615）

序 言

現代的起重運輸機械是種類極多的、用來提升和移動各種貨物的設備。

通用的和專用的起重機（卷揚機、吊車、提升機等）是起重運輸機械中的一種。這些機器是當前笨重勞動機械化的基礎，而沒有這種機械化就談不上勞動生產率的提高。

現代各個工業部門的新發展，要求增大起重機的起重量和提高其工作速度。這些要求不僅由提高起重機生產率的必要性所決定，而且也由各種生產過程的特殊性所決定。此外，常常要求現代起重機能按照很複雜的軌跡移動貨物並保證在規定地點準確停止。

起重機的發展方向是：

1. 增大起重量到 300 噸和 300 噸以上；
2. 提高移動貨物的工作速度到 120 米/分，而在專用起重機中達 200 米/分以上；
3. 增大服務面積（起重機小車的行走距離超過 1000 米，貨物的提升高度超過 100 米）；
4. 通過採用經濟斷面的鋼材和優質材料，通過用焊接件和鍛件代替鑄件以及選擇形狀合理的零件、部件等措施來減輕結構的重量；
5. 通過計算方法和製造工藝的改進來提高工作的可靠性和安全性；
6. 採用最現代化的驅動系統和起動裝置（離子驅動、接觸控制、遙控等）。

增大起重量，特別是提高起重機的工作速度，將加強動載現象對起重機本身工作的影響，並要求採取更現代化的措施來保障工作人員的安全。

IV

起重机的工作時間由三个重复的阶段組成：起動（加速）阶段，稳定運轉阶段和停車（制動）阶段。在上述每一个阶段中，起重机的工作都伴随着复杂的动載現象。这些动載現象在一定程度上影响到被移动貨物的运动性质、起重机的强度和稳定性。

因此，要解决关于提高起重机工作速度和增大起重量的可能性的問題，就必须研究起重机在使用过程中所产生的复杂的动載現象。

在起重机的技术文献中，特別在最近，对动力学問題給予很大注意。

在起重運輸机械的教科书、参考书〔17〕、〔32〕和其它书籍中，研究动載現象时一般都假設起重机的所有零件是絕對刚性的，而且起動和制動都是等加速和等減速的。上述假設仅提供了近似地解决动力学問題的可能性，而在很多情况下导致很大的不精确性。由于高生产率起重机的应用，要求更全面更精确地研究起重机的动力学。这种研究的必要性在于：力图在考虑到起重机使用的真实条件下，获得动載荷值的实际确定方法。近几年来，很多单位研究起重机动力学时在不同程度上考虑了下列因素：起重机零件的弹性，起動和制動特性，驅動装置的反影响，等等。这些研究工作有一部分发表在教科书〔9〕、〔13〕中，文献〔8〕、〔12〕、〔21〕、〔39〕、〔41〕的图表中和〔1〕、〔11〕、〔15〕、〔18〕、〔22〕、〔28〕、〔35〕等其它文章中。

本书研究了起重机使用过程中所产生的动載現象，叙述了起重机零件中所受計算載荷的解析确定法。有了动載荷产生原因的明确概念、动載荷的变化性质及其数学表达式，我們就有可能在具体条件下选择起重机的最佳参数关系，以減少計算載荷，并能精确地确定起重机零件的安全尺寸。

随从于动載現象的基本条件取为：起重机零件的刚性是有限的，而各零件的运动看作是随時間变化的力参数作用的结果。在必要时还要考虑驅動的反影响。起重机的計算簡图表現为推算的能量耗散系統，也就是有能量輸入或輸出的系統。在起重机中，能

量的輸入可以发生在具有电力驱动的情况下（当外载荷增大时，电流也自动增长）。在可能发生的能量輸出方面，应当考虑到电能輸回电网的情况（当电动机处在发电机工作状态时），还有在克服外界阻力的損耗上，这些損耗表现为外载荷形式或者被引入系統零件的刚性值中。

本书的第一版是在1953年出版的。在此后的几年中，作者和其他科学工作者对起重机动力学进行了很多新的研究。所以本版与第一版有很大的区别：补充了新的章节（第一章和第八章），大大地扩充了对起重机动力学普遍方程与吊重提升和移动的动力学的叙述，并增加了新的实际計算例題。

作者考虑了对本书第一版的全部批評意見，然而作者并不认为本书新版已对起重机动力学作了完整的研究，也不认为所采用的研究方法已經是十分完美的了。因此，作者将感謝并接受一切批評意見。

目 录

序言

第一章 起重机的简图及其工作条件	1
1. 起重机的分类	1
2. 起重机及其机构的外载荷	6
3. 起重机机构动加载的典型情况	7
第二章 起重机的驱动和制动装置	10
1. 起重机的驱动类型及其应用	10
2. 起重机驱动系统的机械特性	12
3. 起重机的制动	21
4. 起重机中电力驱动的起动和制动过程分析	23
5. 用解析式表示驱动装置速度和加速度的近似法	36
6. 驱动系统中力参数的解析表示法	45
7. 起重机驱动系统的动功率和起动功率	46
第三章 起重机动力学的普遍方程	58
1. 引言	58
2. 起重机机构的推算系统	62
3. 单质量系统运动方程	67
4. 二质量系统运动方程	72
5. 三质量系统运动方程	89
6. 无穷多个质量系统的运动方程	93
7. 自锁系统的振动特点	102
第四章 吊重升降的动力学	107
1. 概述	107
2. 提升和下降悬吊着的吊重	107
3. 吊重从弹性支座上骤然升起(突然扯起)	142
4. 弹性吊架的计算	162
5. 吊重下落到弹性基础上	168
6. 用悬臂提升和下降吊重	179

7. 用提升机构翻轉吊重	187
第五章 吊重移动时的横向摆动	194
1. 概述	194
2. 水平移动机构起动及制动时吊重的摆动	194
3. 起重机撞在弹性止挡器上时吊重的摆动	200
4. 弹性止挡器(緩冲器)的計算	205
第六章 起重机走行机构和迴轉机构动力学	210
1. 概述	210
2. 走行机构的起动和制动	212
3. 旋轉机构的起动和制动	229
第七章 起重机各机构同时工作时所产生的动載現象	241
1. 概述	241
2. 吊重提升机构和横向移动机构同时起动和制动	241
3. 旋轉机构和吊重横向移动机构同时工作	244
4. 在吊重提升机构工作的同时提升或下降起重机悬臂	250
第八章 起重机在动荷力作用下的稳定性	254
1. 概述	254
2. 正常提升吊重时起重机的稳定性	258
3. 吊重突然扯起时起重机的稳定性	265
4. 吊重突然脫掉时起重机的稳定性	269
附录	274
附录 I. 起重机驅動装置非稳定过程的速度、加速 度和時間	274
附录 II. 起重机驅動装置的功率	278
附录 III. 机构(动力)推算簡图的实际作法	278
附录 IV. 确定吊重提升机构动載荷的实际計算公式	285
附录 V. 确定走行机构和迴轉机构动載荷的实际計算 公式	288
附录 VI. 計算起重机机构同时工作时所产生的載荷 的实际建議	290
参考文献	294

第一章 起重机的簡图及其工作条件

1. 起重机的分类

起重技术在我国的发展服从于下列基本要求：即最大限度地使全部笨重劳动机械化，促进劳动生产率的提高。国民經济各部門的发展，要求起重机具有高的貨物移动速度、大的起重量，并能完成复杂的运输操作。由此提出了建立一系列特殊结构起重机的必要性，并规定了发展苏維埃起重运输机械制造业的基本方向：与发展我国国民經济的任务相适应，增加起重机的产量，扩大品种，改进结构。

起重机可按各种軌迹移动貨物。在研究起重机工作过程中所产生的动載現象时，下列因素是很重要的：貨物移动的方向，几个机构同时工作的可能性和其他类似的特征。实际上，就是根据这些特征来对起重机进行分类的。

現有起重机的基本型式可分为下列几种类別和組別^①。

第一类 貨物能在一个方向上（提升和下降）运动的起重机。它們可分为下列几种：

1. 垂直提升用的卷筒型起重机（图1）。属于这种起重机的有：吊車的所有提升机构、建筑用卷揚机、卷筒型电梯的卷揚、矿井提升机等。

在一般情况下，上述机构都是安装在弹性基础（金属结构）上的，并具有平衡重。在这些机构中，通常用鋼绳或鏈条作为引工具。应当把貨物的基础（从这基础提起貨物）看成是弹性的。

① 下面的某些分类方法借自文献〔17〕和〔32〕。

2. 垂直提升用的无卷筒型起重机（图2）。属于这种起重机的有：载客和载货的无卷筒型提升机（电梯）。它们与第一种起重机不同的是借钢绳和绳轮之间的摩擦力来使货物提升。

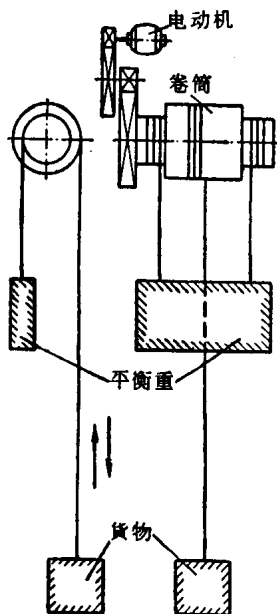


图1 具有一个运动方向的卷筒型起重设备简图

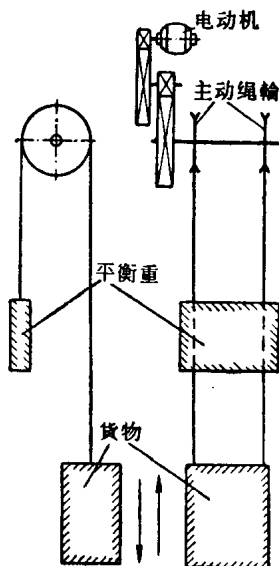


图2 具有一个运动方向的无卷筒型起重设备简图

3. 倾斜提升用的起重机（图3）。属于这种起重机的有：高炉装料用的提升机（料车上料机）、载客和载货的倾斜式提升机（铁索提升机）。它们的提升机构可以是卷筒型的，也可以是无卷筒型的。这种提升机通常具有两个容器（料车、车厢）；当载重容器提升时，空容器下降，后者起了平衡重的作用。

第二类 货物能在两个方向上（提升和水平移动）移动的起重机。它们可分为下列几种：

1. 能使货物提升和水平直线移动的起重机（图4）：单轨起重小车，移动式电葫芦，带小车的非旋转的固定式墙装起重机，固定式缆索起重机等。上述设备可以使货物在垂直平面内沿任何

軌迹移动。

2. 能使貨物提升和作水平圆周运动的起重机(图5)。

属于这种起重机的有所有伸距不变的固定式迴轉起重机。两个机构配合工作, 就能使貨物在圆柱面内沿任何軌迹移动。

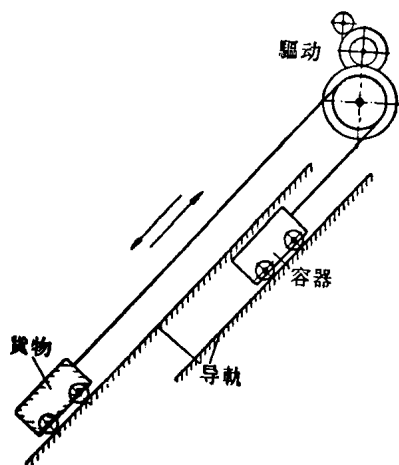


图 3 倾斜提升貨物的起重设备简图

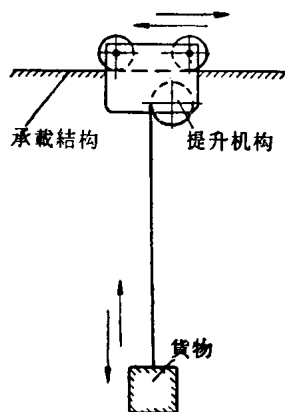


图 4 具有二个直綫运动的起重设备简图

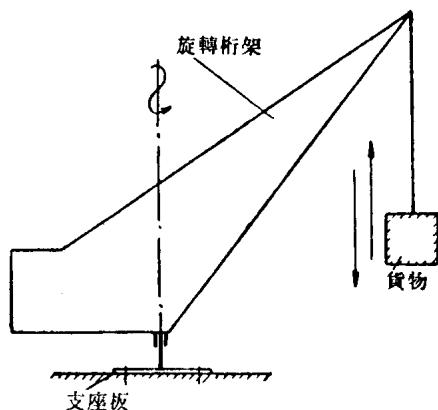


图 5 具有一个直綫运动和一个迴轉运动的起重机简图

第三类 貨物能在三个方向上移动的起重机。所有这一类起重机在各机构配合工作时，能使貨物沿任意的空間軌迹移动，这类起重机可分为下列几种：

1. 能使貨物在一个垂直方向（提升）和两个水平直綫方向上移动的起重机(图 6)：所有的桥式起重机，帶小車的装卸桥，帶小車的門型、高架式和半高架式起重机，帶小車的墙装起重机，平行移动的纜索起重机等。

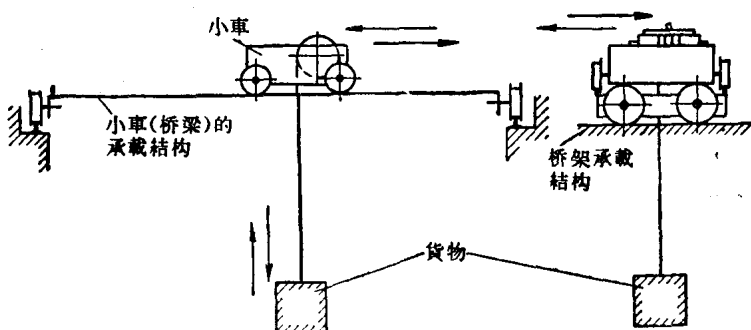


图 6 具有三个直綫运动的起重机简图

2. 能使貨物在一个垂直方向（提升）、一个水平直綫方向（同整个起重机一起）和一个水平迴轉方向上移动的起重机（图 7）：帶迴轉起重机的装卸桥，伸距不变的鉄路式、汽車式、履带式 and 步行式迴轉起重机，伸距不变的行走悬臂起重机等。

3. 能使貨物在一个垂直方向（提升）、一个水平直綫方向（在机器本身的范围内）和一个水平圓周（旋轉）方向上移动的起重机（图 8 和 9）：帶小車的迴轉式起重机，帶小車的錘式起重机，帶鉸鏈挺臂的起重机等。

4. 能使貨物在一个垂直方向（提升）、一个水平圓周（旋轉）方向和一个垂直圓周方向上（悬臂位置改变时）运动的起重机（图10）：所有靠改变悬臂的位置来变化伸距的固定式迴轉起重机，双腿起重机，单斗式挖土机，动臂起重机等。

第四类 具有四个和更多个移动貨物的机构的起重机。凡

(移动货物的) 机构数目为四个或更多的起重机都属于这一类，如：装料机，装入起重机，爪式起重机，伸距可变的移动式廻轉起重机等。从研究起重机工作中所产生的动载现象的观点来看，

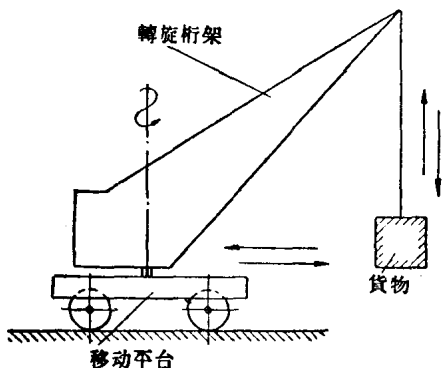


图 7 具有二个直线运动和一个廻轉运动的起重机简图

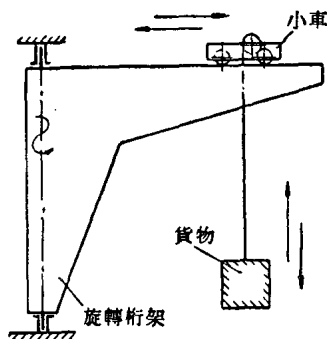


图 8 具有二个直线运动和一个廻轉运动的起重机简图

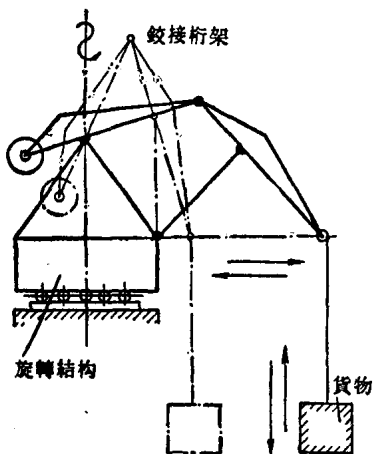


图 9 具有二个直线运动和一个廻轉运动的起重机简图

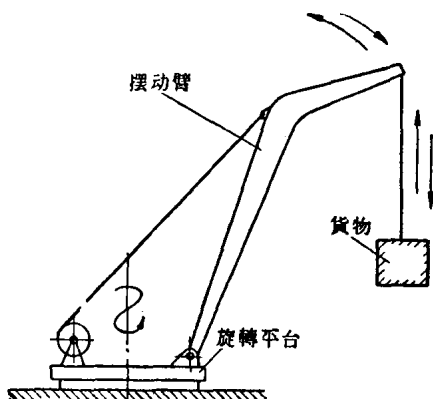


图 10 具有二个廻轉运动和一个直线运动的起重机简图

第四类起重机和第三类无原则区别，因为在这两类情况下，货物都可沿空间的任何轨迹移动。但是第四类起重机比较复杂，它們

具有較多的机构，所以同时組合运动的可能性很大，因而要求进行更复杂的动載計算。但是对第四类的每种机器的研究，可以从研究第三类机器的一些原則出发。所以我們不准备專門列出第四类机器的概括性簡图。

2. 起重机及其机构的外載荷

在工作过程中，起重机及其机构要克服下列載荷：貨物的重量（貨物提升机构和靠改变悬臂位置来改变伸距的变幅机构），摩擦力（某些貨物提升机构，水平移动机构和起重机的迴轉机构），风負荷和雪負荷（所有在露天工作的起重机）。

上述載荷叫做外載荷或靜載荷，它們和动載荷一起組成計算載荷。下面說明确定靜載荷的方法并列举它們作用在起重机及其机构上的方式。

貨物提升机构的載荷 这些机构能垂直地或傾斜地移动成件的、散体的和液体的貨物。抓取成件的貨物是靠捆扎鋼繩或專門的吊具（电磁盘、夹鉗、耙子、夹子等）来实现的。

鋼繩的結構和貨物的捆扎方法使司机有可能預先拉紧鋼繩并把貨物平稳地从基础上提起来。用电磁盘提升貨物的情况与上相似。用刚性吊具（夹鉗、耙子等）抓取貨物时的情况就比较不利，此时常会发生所謂突然扯起的現象，就是当吊具达到相当大运动速度时貨物离开支座。不論采用什么抓取方法，如果司机不能看到貨物（例如港口起重机从船上卸貨时），也都可能发生突然扯起。

当貨物傾斜提升时，机构只要克服貨物重量的一部分，但同时还要克服貨物与导轨間的摩擦力。成件貨物的重量通常是已知的，或者可以根据体积和比重求得。

有时提升机构用来翻轉成件的貨物。在这种情况下，貨物的部分重量会对提升鋼繩产生冲击作用。散体和液体貨物通常用某种容器（桶、槽等）进行运输。

在某些情况下，吊具本身就当容器用（抓斗）。应当記住，

确定块状和散体貨物的重量，不是根据体积比重，而是根据堆比重并考虑到它們的湿度和块度。

走行机构和旋转机构的载荷 小車或起重机走行机构的靜載荷就是車輪同軌道之間和心軸同軸承之間的摩擦力。通常把总摩擦阻力叫做走行阻力。这个力的大小取决于軌道的反作用力、軸承和車輪的結構及尺寸。走行阻力可近似地当作起重机移动部分加貨物重量的一部分来加以确定；对現代的小車和起重机來說，单位走行阻力的平均值为8~14公斤/吨〔27〕。确定走行阻力比較精確的方法列于起重机教程中〔9〕、〔17〕。

走行阻力对走行机构的作用不同于重力的作用。如果說重力的大小与方向經常不变、且与貨物的运动无关的話，那末走行阻力仅在移动部分运动时才起作用，且作用方向始終与运动方向相反。严格地說，走行阻力与运动速度有关，它随速度的提高而增大。

在旋轉机构中，迴轉靜力矩的大小取决于支承中反作用力的大小，取决于支承的結構和尺寸。迴轉阻力矩作用在迴轉机构上的特点与走行阻力相同。

风载荷和雪载荷 风载荷可取为常量，对机器的具体結構來說，可根据当地的最大风压值来計算。按ГОСТ 1451-42，风压 q 取25公斤/米²（除港口起重机和浮动式起重机之外的全部起重机）到40公斤/米²（港口起重机和浮动式起重机）〔17〕。在确定起重机的迎风面积时，应考虑到空气动力阻力系数 k 。此系数对桁架和腹板結構通常取1.4，对鋼繩和拉条取1.2〔17〕。确定风载荷的公式如下：

$$P_s = qkF, \quad (1-1)$$

式中 F ——起重机的迎风面积。

雪载荷（如果起重机有积雪的鋪板）取100公斤/米²。

3. 起重机机构动加载的典型情况

机器的动加载一般发生在非稳定运动阶段（起动和制动时）。

机器的动加载类型有:

1. 起重设备的动加载发生在垂直移动货物的提升机构作下列工作时:

- 1) 当货物自由吊挂着时,机构往提升方向起动(图11, a);
- 2) 当货物自由吊挂着时,机构往下降方向起动(图11, b);
- 3) 机构在提升自由吊挂着的货物时停车(制动)(图11, c);
- 4) 机构在下降自由吊挂着的货物时停车(制动)(图11, d);
- 5) 在货物从支座扯起的同时,机构往提升方向起动(突然扯起)(图12, a);
- 6) 在货物放到支座上的同时,机构制动(图12, b);
- 7) 用起重机悬臂提升货物;
- 8) 翻转货物(图13)。

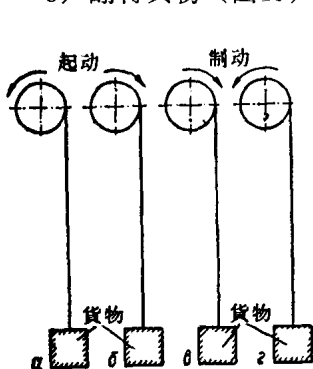


图 11 提升机构正常起动和制动的方

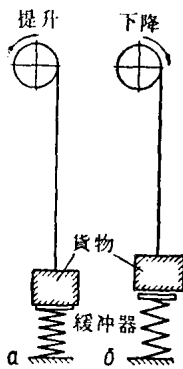


图 12 货物提升和下降的方式

a —货物从弹性支座上突然扯起;
 b —货物下放到弹性支座上

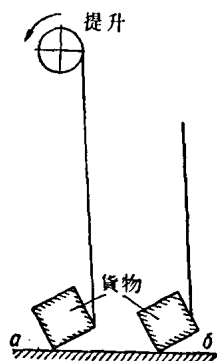


图 13 用提升机构翻转货物

a —钩住货物的一角;
 b —钩住货物的中部

2. 起重设备的动加载发生在水平移动货物的机构作下列方式的起动和制动时:

- 1) 当货物自由吊挂着时,水平移动机构起动(图14);

2) 当貨物自由吊挂着时，水平移动机构 停車（制动）（图14）；

3) 由于起重机运动部分或起重机本身碰到止挡器而使水平移动机构停止（图15）。

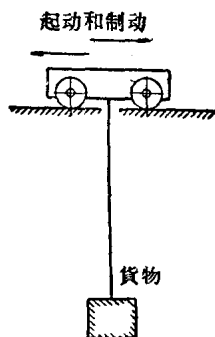


图 14 水平移动貨物的
机构的起動和制動

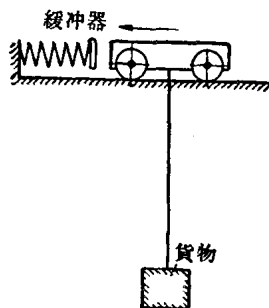


图 15 起重机或小车撞到
終点緩衝器上

3. 起重設備的动加载也发生在起重机各机构进行各种方式的配合工作时：

- 1) 提升机构和水平移动机构同时起動和制動；
- 2) 起重机的迴轉机构和水平移动貨物的机构同时工作；
- 3) 在提升或下降貨物的同时，起重机的悬臂提升或下降。