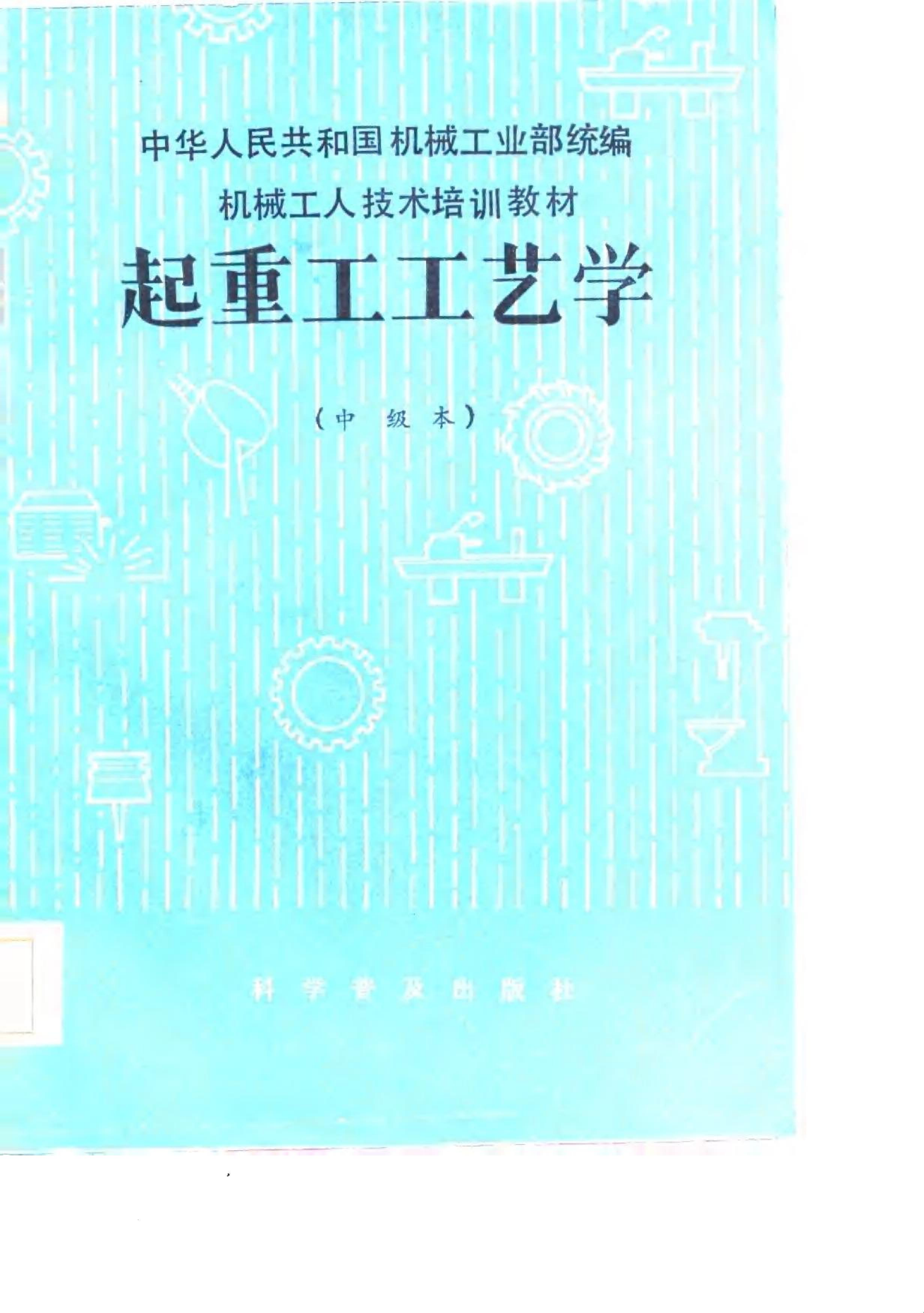




中华人民共和国机械工业部统编

机械工人技术培训教材

# 起重工艺学

(中级本)

科学普及出版社

本书是机械工业部统编的机械工人技术培训教材，它是根据《工人技术等级标准》和教学大纲编写的。主要内容有力学的基本知识，如力的性质、力的分解与合成、力矩、力偶、重心、摩擦等；地锚的各种类型、作用、设置方法及受力计算；麻绳和钢丝绳的结构、用途及负荷计算；一般起重机械的构造、使用方法及负荷计算；设备的运输、吊装方法、注意事项；起重架子的构造、架设方法与使用注意事项等。本书除可做4~6级起重技术工人的培训教材外，并可供专业技术人员学习与参考。

本书由吴洪生同志编写，陈古陶、顾华胜、朱敦伟同志审查。

中华人民共和国机械工业部统编  
机械工人技术培训教材  
**起重工艺学**

(中级本)

责任编辑：李 宝

\*

科学普及出版社出版（北京海淀区白石桥路32号）  
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售  
北京怀柔平义分印刷厂印刷

开本：787×1092毫米<sup>1</sup>/<sub>16</sub> 印张：17<sup>3</sup>/<sub>4</sub> 字数：421千字

1985年1月第1版 1985年1月第1次印刷

印数：1—44,000册 定价：2.55元

统一书号：15051·1136 本社书号：0932

对广大工人进行比较系统的技术培训教育，是智力开发方面的一件大事，是一项战略性的任务。有计划地展开这项工作，教材是关键。有了教材才能统一培训目标，统一教学内容，才能逐步建立起比较正规的工人技术教育制度。

教材既是关键，编写教材就是一件功德无量的事。在教材行将出版之际，谨向为编写这套教材付出辛勤劳动的同志们致以敬意！

机械工业部第一副部长

杨 铨

一九八二年五月

## 前 言

为了更好地落实中共中央、国务院《关于加强职工教育工作的决定》，对工人特别是青壮年工人进行系统的技术理论培训，以适应四化建设的需要，现确定按初级、中级、高级三个培训阶段，逐步地建立工人培训体系，使工人培训走向制度化、正规化的轨道，以期进一步改善和提高机械工人队伍的素质。我们组织了四川省、江苏省、上海市机械厅（局）和第一汽车厂、太原重型机器厂、沈阳鼓风机厂、湘潭电机厂，编写了三十个通用工种的初级、中级的工人技术培训教学计划、教学大纲及其教材，作为这些工种工人技术理论培训的统一教学内容。

编写教学计划、教学大纲及其教材的依据，是原一机部颁发的《工人技术等级标准》和当前机械工人队伍的构成、文化状况及培训的重点。初级技术理论以二、三级工“应知”部分为依据，是建立在初中文化基础上的。它的任务是为在职的初级工人提供必备的基础技术知识，指导他们正确地使用设备、工夹具、量具，按图纸和工艺要求进行正常生产。中级以四、五、六级工“应知”部分为依据，并开设相应的高中文化课，在学完了初级技术理论并具有一定实践经验的工人中进行。它的任务是加强基础理论教学，使学员在设备、工夹具、量具、结构原理、工艺理论、解决实际问题 and 从事技术革新的能力上有所提高（高级以七、八级工“应知”部分为依据，这次未编）。编写的教材计有：车工、铣工、刨工、磨工、齿轮工、镗工、钳工、工具钳工、修理钳工、造型工、化铁工、热处理工、锻工、模锻工、木模工、内外线电工、维修电工、电机修理工、电焊工、气焊工、起重工、煤气工、工业化学分析工、热工仪表工、锅炉工、电镀工、油漆工、冲压工、天车工、铆工等工艺学教材和热加工的六门基础理论教材：数学、化学、金属材料及其加工工艺、机械制图、机械基础、电工基础。

在编写过程中，注意了工人培训的特点，坚持了“少而精”的原则。既要理论联系生产实际，学以致用，又要有理论的高度和深度；既要少而精，又要注意知识的科学性、系统性、完整性；既要短期速成，又要循序渐进。在教学计划中对每个工种的培养目标，各门课程的授课目的，都提出了明确的要求，贯彻了以技术培训为主的原则。文化课和技术基础课的安排从专业需要出发，适当地考虑到今后发展和提高的要求，相近工种的基础课尽量统一。

这套教材的出版，得到了有关省、市机械厅（局）、企业、学校、研究单位和科学普及出版社的大力支持，在此特致以衷心的感谢。

编写在职工人培训的统一教材，是建国三十年来第一次。由于时间仓促，加上编写经验不足，教材中还难免存在不少缺点和错误，我们恳切地希望同志们试行中提出批评和指正，以便进一步修改、完善。

机械工业部工人技术培训教材编审领导小组

一九八二年五月

## 目 录

|                         |     |
|-------------------------|-----|
| 第一章 起重基本知识 .....        | 1   |
| 第一节 力的基本概念 .....        | 1   |
| 第二节 平面汇交力系 .....        | 5   |
| 第三节 平面任意力系 .....        | 12  |
| 第四节 重心 .....            | 25  |
| 第五节 摩擦力与惯性力 .....       | 27  |
| 第六节 材料计算的基本概念 .....     | 33  |
| 第二章 地锚 .....            | 41  |
| 第一节 桩锚 .....            | 41  |
| 第二节 炮眼锚 .....           | 47  |
| 第三节 坑锚 .....            | 48  |
| 第三章 麻绳、钢丝绳、吊钩、吊环 .....  | 55  |
| 第一节 麻绳 .....            | 55  |
| 第二节 钢丝绳 .....           | 58  |
| 第三节 吊钩与吊环 .....         | 68  |
| 第四章 一般起重机械 .....        | 82  |
| 第一节 独木桅杆起重机 .....       | 83  |
| 第二节 圆木人字桅杆起重机 .....     | 95  |
| 第三节 金属桅杆起重机 .....       | 110 |
| 第四节 三角架桅杆及龙门桅杆 .....    | 120 |
| 第五节 系缆式桅杆起重机 .....      | 121 |
| 第六节 移动式起重机 .....        | 146 |
| 第七节 绳索起重机(走线滑车) .....   | 162 |
| 第五章 设备的运输和装卸 .....      | 166 |
| 第一节 设备的运输 .....         | 166 |
| 第二节 设备的安装和装车与卸车方法 ..... | 172 |
| 第六章 设备的吊装方法 .....       | 176 |
| 第一节 桥式起重机的吊装方法 .....    | 176 |
| 第二节 钢筋混凝土预制构件的吊装 .....  | 199 |
| 第三节 设备、机件的吊装 .....      | 218 |
| 第七章 架子的绑结 .....         | 233 |
| 第一节 绑架子的材料 .....        | 233 |
| 第二节 单面架子的绑结 .....       | 235 |
| 第三节 双面架子的绑结方法 .....     | 238 |
| 第四节 四面架子的绑结方法 .....     | 239 |
| 第五节 烟囱等圆形架子的绑结 .....    | 240 |
| 第六节 贮水塔等多边形架子的绑结 .....  | 241 |
| 第七节 其它架子的绑结 .....       | 242 |
| 第八节 扣件式钢管脚手架 .....      | 244 |

|                                          |     |
|------------------------------------------|-----|
| 第九节 架子绑结、使用和拆除的注意事项 .....                | 248 |
| 附 录: .....                               | 250 |
| 一、热轧等边角钢 (YB166-65) .....                | 250 |
| 二、热轧不等边角钢 (YB167-65) .....               | 253 |
| 三、热轧普通工字钢 (GB706-65) .....               | 256 |
| 四、普通低合金热轧轻型工字钢 .....                     | 257 |
| 五、热轧普通槽钢 (GB707-65) .....                | 258 |
| 六、普通低合金热轧轻型槽钢 .....                      | 260 |
| 七、常用材料容重表 .....                          | 260 |
| 八、圆钢的几何及力学特性 .....                       | 261 |
| 九、钢轨 .....                               | 263 |
| 十、钢管的几何及力学特性 .....                       | 264 |
| 十一、几种截面的几何及力学特性 .....                    | 266 |
| 十二、简单梁的支点反力、剪力、最大弯矩及挠度计算表 .....          | 269 |
| 十三、木结构轴心受压构件的稳定系数 $\varphi$ .....        | 271 |
| 十四、2号钢和3号钢轴心受压构件的稳定系数 $\varphi$ .....    | 271 |
| 十五、16锰钢和16锰桥钢轴心受压构件的稳定系数 $\varphi$ ..... | 272 |
| 十六、不对称受压构件外形修正系数 $\mu_2$ 表 .....         | 272 |
| 十七、对称受压构件外形修正系数 $\mu_2$ 表 .....          | 273 |
| 十八、受压构件端部固定方式修正系数 $\mu_1$ 表 .....        | 273 |
| 十九、格构式构件换算长细比 $\lambda_0$ 计算公式表 .....    | 274 |
| 二十、滑轮组的连接法及其效率 $\eta$ 与拉力值 .....         | 275 |

# 第一章 起重基本知识

## 第一节 力的基本概念

在起重、装卸和搬运工作中都离不开力学知识，力的基本概念及其简单计算是起重工应当掌握的基本知识。

### 一、力和力的单位

力是一个物体对另一个物体的作用，这种作用使物体的运动状态发生改变或者使物体的形状发生改变。力在作用时，需有两个物体才能相互产生作用力。

力的单位是公斤力或吨力，一吨力等于1000公斤力。

### 二、力的三要素

力作用在物体上，要使物体产生预想的效果，这种效果不但与力的大小有关，而且与力的方向和力的作用点有关。在力学中，把力的大小、方向和作用点称为力的三要素。力的三要素中任何一个要素改变了，力的作用效果也随之改变。

力的大小表明物体间作用力的强弱程度；力的方向表明在该力的作用下，静止的物体开始运动的方向，作用力的方向不同，物体运动的方向也不同；力的作用点是物体上直接受力作用的点。以拖运设备箱为例，见图1-1(a)。在A点先用小于摩擦力的力a来拖运，设备箱不会发生运动；用稍大于摩擦力的力b来拖运，设备箱开始作等速运动；用大于摩擦力一倍的力c来拖运，设备箱很快作加速运动。以上三个力大小不同，所产生的效果也不同。如果在A点用同样大小的力向前拉设备箱时，设备箱就前进；而向后推设备箱时，设备箱就后退，见图1-1(b)。这说明作用力的方向不同，设备箱移动的方向也随之变化。如果作用在设备箱上的力大小相等，方向相同，但力的作用点不同，如图1-1(c)中的A、B，则所起的效果也不同。力作用在A点时，拖运设备箱就比较平稳；当力作用在B点时，拖运时容易使设备箱向拖运方向倾倒。

再以绞磨为例（见图1-2），如在推杆的头部A点用大小不同的两个力a与b来推绞磨，如图1-2(a)，当用较大的力b推动时，绞磨就转得快，用较小的力a推动时，绞磨就转得慢，力更小时，绞磨就不会转动。在A点用

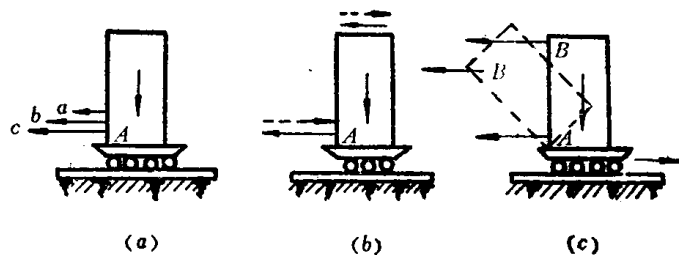


图 1-1 拖运设备箱的力示意图

一个力顺时针方向推绞磨时，绞磨就按顺时针方向转动；反之，绞磨就按逆时针方向转动，见图1-2(b)。如按图1-2(c)用大小相等、方向相同的力，分别在推杆的头部A、中部B和根部C去推绞磨，产生的效果也不相同。力作用在A点时，绞磨能很快的转动；力作用在B点时，绞磨的转动速度就较慢；力作用在C点时，绞磨的转动就更慢，甚至不会转动。

上述例子说明，在力的三要素中任何一个要素发生了变化，都会影响作用效果。

在力学中，可以用一条带箭头的线段，把力的三要素都表示出来。具体作法是：从力的作用点起，沿力的方向画一条线段，使线段的长度跟力的大小成正比例，即用一定长度的线段表示一定大小的力。最后在线段的末端画上箭头，表示力的方向。这种表示力的方法叫做力的图示。如图1-3中，线段AB长4厘米，用1厘米代表100公斤力，所以，AB线段表示400公斤力。在力学上，把只有大小的量称为标量，如时间、面积等量。兼有大小和方向的量称为矢量。力是矢量。

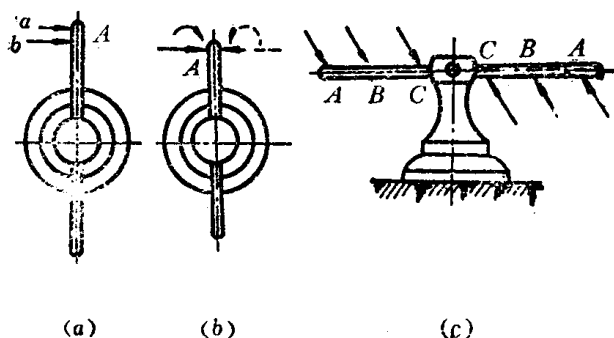


图 1-2 绞磨推力示意图

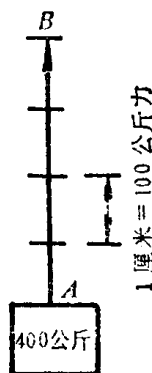


图 1-3 力的图示

### 三、力的性质

经过长期的实践，人们逐渐认识了关于力所遵循的许多规律，其中最基本的规律可以归纳为以下几方面

#### (一) 二力平衡原理

要使物体在两个力的作用下保持平衡的条件是：这两个力大小相等，方向相反，且作用在同一直线上，如图1-4所示。用矢量等式表示即

$$P_1 = -P_2$$

#### (二) 力的可传性

通过力的作用点沿力的方向的直线叫做力的作用线。在力的大小、方向不变的条件下，力的作用点的位置，可以在它的作用线上移动而不会影响力的作用效果，这就是力的可传性。如图1-5(a)中，力作用在A点，直线AB是力P的作用线，此时是拉车，当力P作用点移到B点时见图1-5(b)，则是推车，在此两种情况下，只要力P的大小、方向不变，其作用效果也是完全相同的。

#### (三) 作用力和反作用力

力是物体间的相互作用，因此它们必然是成对出现的。一物体以一力作用于另一物体



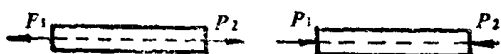
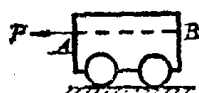


图 1-4 两力平衡



(a)



(b)

图 1-5 力的可传性

上时，另一物体必以一个大小相等、方向相反且沿同一作用线的力作用在此物体上。如图 1-6 中，一绳索的下端吊着一重锤，绳索给以重锤的作用力为  $T$ ，重锤给绳索的反作用力为  $T'$ 。 $T$  和  $T'$  大小相等，方向相反，且作用在同一直线上。

应注意的是，作用力与反作用力是分别作用在两个物体上的，不能看成是两个平衡力而互相抵消。如图 1-7 所示，将一重球放在桌面上，重球对桌面有一个作用力  $N$ ，桌面对重球即有一反作用力  $N'$ ，力  $N$  作用在桌面上，力  $N'$  作用在重球上。根据作用力和反作用力的原理，此两力大小相等，方向相反，沿同一直线分别作用在桌面和重球上。从分析重球上的受力情况可知，球上受两个力的作用，球的重力  $G$  和桌面给重球的反作用力  $N'$ ，根据两力平衡的原理，此两力大小相等、方向相反、沿同一直线，同时作用在重球上，是一个平衡力系。

#### (四) 力的平行四边形法则

作用在物体上的一群力称为力系。如用一个力来代替整个力系，而不改变此力系对物体的作用效果，这个力就称为该力系的合力，这个过程就是力的合成。力的平行四边形法则是相交于一点的两个力的合成方法，是力系合成的基础。

如图 1-8，作用在物体上同一点的两个力  $P_1$ 、 $P_2$ ，可以合成为一个合力  $R$ ，合力  $R$  也作用在该点，其大小和方向是以  $P_1$ 、 $P_2$  为邻边所组成的平行四边形的对角线。图中线段  $AD$  表示合力  $R$  的大小和方向，这就是力的平行四边形法则。

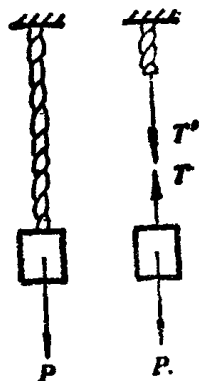


图 1-6 作用力和反作用力

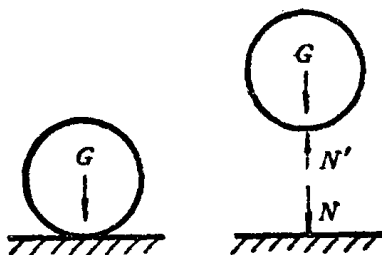


图 1-7 重球的受力分析

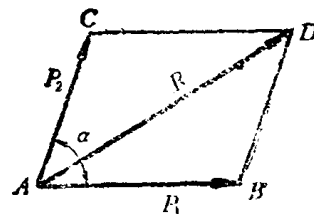


图 1-8 两力的合成

由力的平行四边形法则可知：力的合成不能用算术的办法相加，而必须按矢量的运算法几何相加。用矢量等式表示即

$$R = P_1 + P_2$$

由于平行四边形对边相等，图 1-8 中的两个三角形完全相同，因此在求合力时，不必画出整个平行四边形，只画出其中一个三角形即可。如图 1-9，先画任意一已知力  $P_1$ ，

AB, 再由 $P_1$ 的矢量末端B为起点作 $BC = P_2$ , 连接 $P_1$ 的矢量起点A和 $P_2$ 矢量末端C得到的矢量就是合力 $R$ , 这样画出的三角形叫做力三角形。

根据余弦定理及正弦定理, 合力 $R$ 的大小和方向可用下式计算

$$R = \sqrt{P_1^2 + P_2^2 + 2P_1P_2\cos\alpha} \quad (1-1)$$

$$\frac{R}{\sin\alpha} = \frac{P_1}{\sin\alpha_2} = \frac{P_2}{\sin\alpha_1} \quad (1-2)$$

运用平行四边形法则, 同样可以将一个力分解为两个力。由于同一对角线可以画出任意多个平行四边形, 因而一个力可以分解成任意多组的两个分力。在起重作业中, 常将一个力分解成两个互相垂直的分力。例如, 利用斜道装卸重物时, 为了合理设计斜道的倾角 $\alpha$  (见图1-10) 需要将重物的重量 $G$ 沿斜面和垂直斜面的方向分解, 已知分力的方向便可作力的平行四边形。如图所示, 沿斜面方向的分力为 $W$ , 垂直于斜面的分力为 $N$ , 其计算式为:

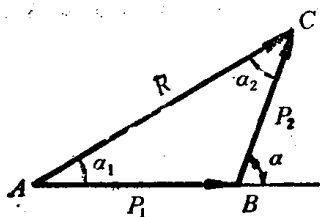


图 1-9 力三角形

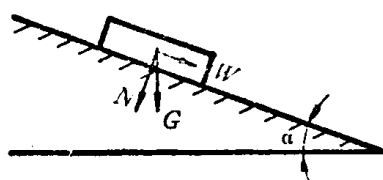


图 1-10 斜道滑移重物

$$\left. \begin{aligned} W &= G\sin\alpha \\ N &= G\cos\alpha \end{aligned} \right\} \quad (1-3)$$

在起重、运输作业中, 为了便于选用合理的工机具, 有时需要将一个力分解为互相垂直的两个力, 或将两个力合成一个力。此时便可用力的平行四边形法则进行。

#### 四、示 力 图

为了清楚地表示出物体的受力情况, 常将被分析的物体从周围的物体中分离出来, 即单独画出所分析的物体的简单轮廓图, 并表示出它所受到的全部的力, 这种图形称为示力图。

一般画示力图有下面三个步骤:

1. **确定分析对象** 把被分析的物体从周围物体中分离出来, 并画出它的简单的轮廓图。
2. **进行受力分析** 分析物体上的作用力。
3. **画出作用在被分析物体上的全部力。**

【例 1】 图1-11所示为天车吊起砂箱, 试分别画出砂箱和吊钩的受力图。

【解】 画砂箱的受力图, 如图1-11(b), 以砂箱为分析对象进行分析。

(1) 画出砂箱简单的轮廓。

(2) 进行受力分析, 作用在砂箱上的力有砂箱的重力 $G$ , 作用在砂箱的重心, 钢丝绳

对砂箱的作用力 $T_1$ 、 $T_2$ 为沿着绳索方向的拉力。

(3) 画出作用在砂箱上的全部力。

画吊钩的受力图, 如图1-11(c)。吊钩的自重忽略不计, 作用在吊钩上的力为 $T$ 、 $T_1'$ 、 $T_2'$ 。

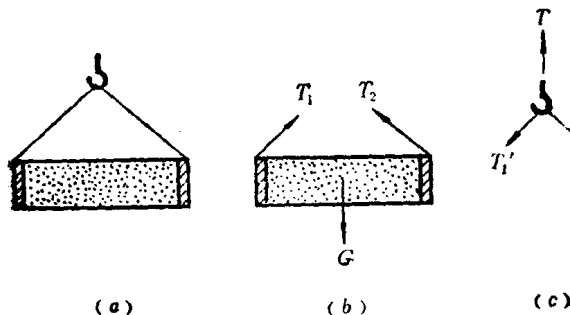


图 1-11 砂箱及吊钩的受力图

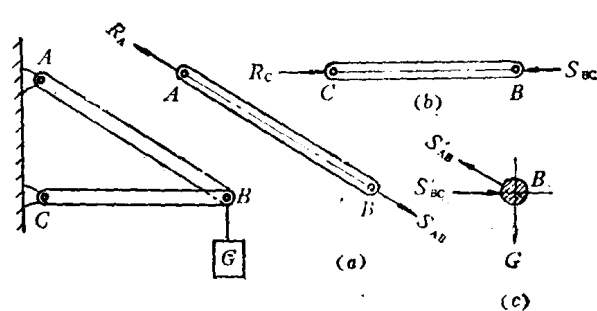


图 1-12 三角架示力图

比较图1-11(b)及图1-11(c), 可以看出,  $T_1$ 和 $T_1'$ 是一对作用力和反作用力, 其大小相等, 方向相反, 沿同一条直线, 分别作用在砂箱和吊钩上。同样,  $T_2$ 和 $T_2'$ 也是一对作用力和反作用力。

【例2】一三角架如图1-12所示, 在三角架的销轴B上挂一重量为 $G$ 的重物, 如不计三角架本身的重量, 试画出杆AB、BC及销轴B的示力图。

【解】(1) 取AB杆为分析对象。当杆的自重不计时, AB是只受两个力作用的平衡体。由力的平衡条件可知力 $R_A$ 和力 $S_{AB}$ 沿AB杆的中心轴AB, 其示力图如图1-12(a)所示。

(2) 取BC杆为分析对象, 杆自重不计时, BC杆与AB杆一样, 是两力作用的平衡物体, 其作用力 $R_C$ 及 $S_{BC}$ 等值、反向、共线。

(3) 取销轴B作为分析对象, 销轴B在力 $G$ 、 $S'_{BC}$ 、 $S'_{AB}$ 的作用下平衡, 力 $S'_{BC}$ 为力 $S_{BC}$ 的反作用力, 力 $S'_{AB}$ 为力 $S_{AB}$ 的反作用力, 如图1-12(c)所示。

## 第二节 平面汇交力系

在力系中, 如果所有力的作用线都在同一平面内, 则这个力系叫做平面力系。在平面力系中, 如果各力的作用线都汇交于一点, 这样的力系叫做平面汇交力系。平面汇交力系在起重作业中是经常遇到的, 如分析桅杆的受力情况时就会遇到平面汇交力系。

### 一、平面汇交力系合成的几何法

#### (一) 两个共点力的合成

作用在物体上的任意两个不平行的力 $P_1$ 和 $P_2$ 见图1-13(a), 根据力的可传性, 将两力分别沿它们的作用线移到汇交点, 即成为作用在物体同一点上的两个力。它们的合力可根据力的平行四边形法则来确定, 如图1-13(b), 同时也可以用力学的三角形法则确定其合力,

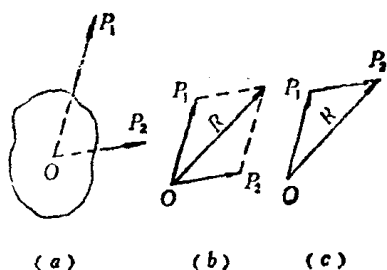


图 1-13 两个共点力的合成

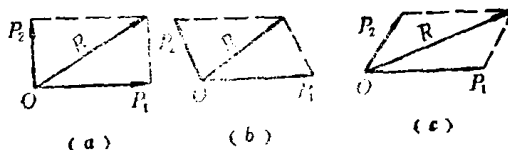


图 1-14 两分力间的夹角对合力的影响

如图1-13(c)所示, 合力 $R$ 的作用线通过汇交点。用矢量等式表示为

$$R = P_1 + P_2$$

合力的大小和方向不仅与分力的大小有关, 而且还与两分力间的夹角有关, 如图1-14所示。

当两个分力的夹角减小时, 合力增大, 反之合力减小。当夹角为零度时, 即两分力的方向相同, 此时合力最大, 其值为两分力之和, 合力的方向与两分力同。当夹角为 $180^\circ$ 时, 即两分力方向相反, 此时合力为最小, 其值为两分力的差值, 方向与较大的分力相同, 如图1-15所示。

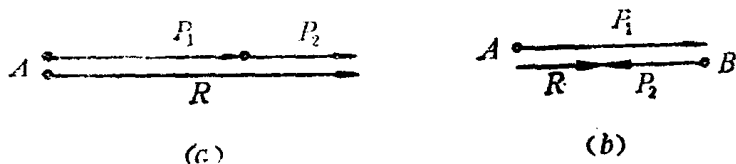


图 1-15 同一直线上的两个力的合成

## (二) 作用于一点, 互成角度的多个力的合成

如图1-16所示, 求平面汇交力系 $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$ 、 $P_4$ 的合力 $R$ 。

多个力的合成可连续应用力的三角形法则, 首先画出多个力在 $A$ 点互交的方向, 见图1-16(a), 先求出力 $P_1$ 与 $P_2$ 的合力 $R_1$ , 再求出 $R_1$ 与 $P_3$ 的合力 $R_2$ , 最后将力 $R_2$ 与 $P_4$ 合成得合力 $R$ 。从以上的作图结果可以看出, 合力 $R_1$ 、 $R_2$ 并不影响合力 $R$ 的大小及方向, 因此可以不必画出, 只需将已知分力按其大小及方向依次首尾相接, 最后便可得到合力 $R$ ,

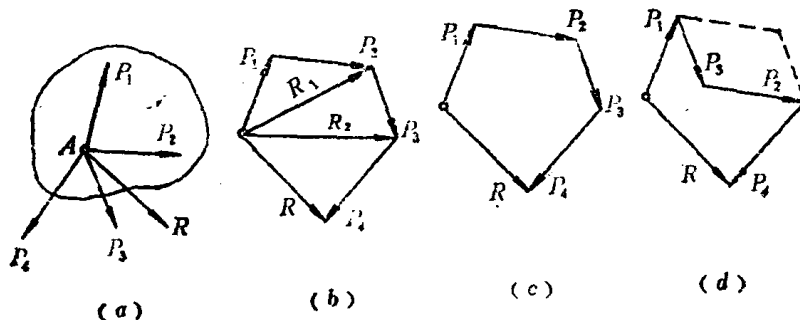


图 1-16 求多个汇交力系的合成

此种求合力的方法称为力多边形法则，用矢量等式表示为

$$R = P_1 + P_2 + P_3 + P_4$$

画力多边形时，可以改变各分力相加的次序，但最后求得的合力不变，如图1-16(d)所示。

【例1】如图1-17所示，有两夹角为 $70^\circ$ 的分力，已知分力 $AC$ 为2000公斤力， $AB$ 为4000公斤力，用图解法求合力 $AD$ 是多少？

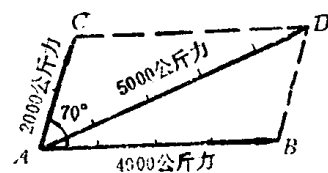


图 1-17 两力的合成图解法

【解】(1)以平行四边形法计算，取比例线段1厘米代表1000公斤力，并顺着力的方向将 $AB$ 和 $AC$ 两力按比例画出，取 $AB$ 长4厘米，代表4000公斤力，取 $AC$ 长2厘米，代表2000公斤力，经 $B$ 及 $C$ 点分别作 $AC$ 与 $AB$ 的平行线段交于 $D$ 点，连接 $AD$ ，量得 $AD$ 长5厘米，表示合力 $AD$ 为5000公斤力。

(2)以数学计算法计算为

$$\begin{aligned} P &= \sqrt{P_1^2 + P_2^2 + 2P_1P_2\cos\alpha} \\ &= \sqrt{4000^2 + 2000^2 + 2 \times 4000 \times 2000 \cos 70^\circ} \\ &= \sqrt{16000000 + 4000000 + 16000000 \times 0.3420} \\ &\approx 5047 \text{ 公斤力} \end{aligned}$$

由图1-17可知， $AB$ 和 $AC$ 的合力 $AD$ 的大小是随着 $AB$ 与 $AC$ 两力的夹角的大小而变化的。两力的夹角越大，则合力越小；反之，两力的夹角越小，则合力越大。当夹角为零时， $AB$ 与 $AC$ 两力就完全重合，此时两力即在一条直线上，并且方向相同，合力 $AD$ 最大，其数值为

$$\begin{aligned} AD &= AB + AC \\ &= 4000 + 2000 = 6000 \text{ 公斤力} \end{aligned}$$

当夹角为 $180^\circ$ 时， $AB$ 与 $AC$ 两力也在一直线上，但方向相反，此时合力 $AD$ 最小，其数值为

$$\begin{aligned} AD &= AB - AC \\ &= 4000 - 2000 = 2000 \text{ 公斤力} \end{aligned}$$

【例2】如图1-18所示，使用滑车组拖运设备箱，已知拉力 $P$ 为4000公斤力，滑车组钢丝绳引出端的拉力为2120公斤力，钢丝绳的引出端的方向与滑车组受力方向互成 $90^\circ$ 夹角，用图解法求 $A$ 点滑车的合力是多少？

【解】选取比例线段1厘米代表1000公斤力，根据滑车受力方向和滑车组钢丝绳引出端拉力方向按比例画出线段 $AB$ 和 $AC$ ，且互相垂直；以 $B$ 、 $C$ 两点作 $AC$ 、 $AB$ 的平行线段并相交于 $D$ 点，连接 $AD$ ，其线段即为所求的合力，按比例尺量得 $AD$ 长为4.5厘米，即合力 $AD = 4500$ 公斤力。求取 $A$ 点合力的作用，主要是供合理地选取 $A$ 点所使用的滑车和绑扎钢丝绳。

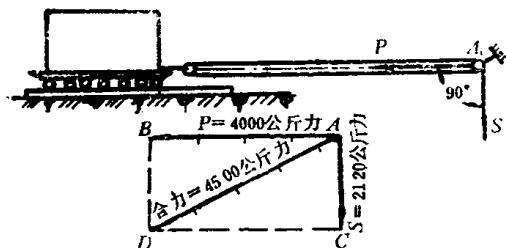


图 1-18 设备拖运滑车合力的图解法

【例3】如图1-19所示，起吊一根预制梁。已知预制梁重 $Q = 10000$ 公斤力，用两根9米长的千斤绳起吊，千斤绳的两头分别系结在预制梁的吊耳上，两吊耳间的距离 $BC$ 为8米，求 $AB$ 与 $AC$ 两根千斤绳的分力是多少？

【解】(1)以图解法计算，选取比例线段1厘米代表1000公斤力。按比例画出从吊钩 $A$ 点到 $D$ 点的垂直线 $AD = 10$ 厘米，代表预制梁重 $Q = 10000$ 公斤力；在 $A$ 点画出平行于千斤绳受力方向的两条直线 $AB$ 与 $AC$ ；通过 $D$ 点画出分别平行于 $AC$ 和 $AB$ 的平行线 $DB$ 和 $DC$ ，并与两直线交于 $C$ 、 $B$ 两点，构成平行四边形 $ABDC$ ，则 $AB$ 与 $AC$ 即为 $AD$ 的两个分力。量得 $AB$ 与 $AC$ 的长度各为5.5厘米，即表明每根千斤绳受力为5500公斤力。

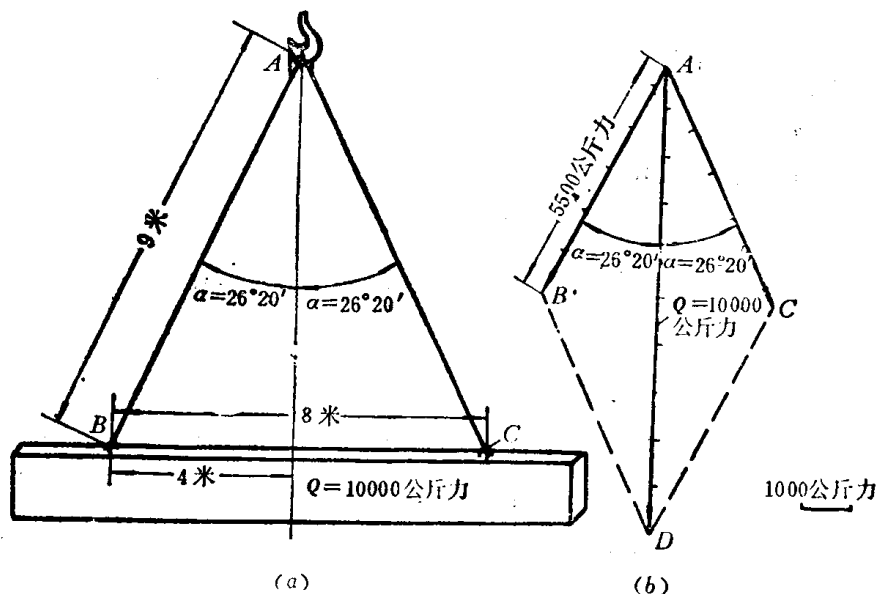


图 1-19 千斤绳受力图解法  
(a) 示意图；(b) 矢量图

(2)以数学方法计算，每根千斤绳所受的力可根据三角形的余弦关系求得，即

$$S = \frac{Q}{n \cos \alpha} \quad (1-4)$$

式中  $n$ ——使用千斤绳的根数；

$\alpha$ ——千斤绳与吊重垂线间的夹角。

$$\begin{aligned} S &= \frac{10000}{2 \cos 26^\circ 20'} \\ &= \frac{10000}{2 \times 0.8962} \\ &\approx 5570 \text{ 公斤力} \end{aligned}$$

从以上两种方法求得的结果看，计算法的精确程度较图解法为高，但图解法比较简单，是工程上常用的一种方法。

如果在公式1—4中，用 $K_1$ 代替式中 $\frac{1}{\cos \alpha}$ ，则公式1—4可改写成

$$S = K_1 \frac{Q}{n} \quad (1-5)$$

式中  $K_1$ ——随 $\alpha$ 角变化的系数，见表1-1。

随 $\alpha$ 角变化的 $K_1$ 值表

表 1-1

| $\alpha$ | 0° | 15°   | 20°  | 25°  | 30°  | 35°  | 40°  | 45°  | 50°  | 55°  | 60° |
|----------|----|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|
| $K_1$    | 1  | 1.035 | 1.06 | 1.10 | 1.15 | 1.22 | 1.31 | 1.41 | 1.56 | 1.75 | 2   |

【例4】 图1-20为一独脚桅杆，已知：吊重 $Q = 3000$ 公斤力，桅杆长 $L = 8$ 米，起重滑车组与桅杆之间的夹角为 $15^\circ$ ，缆风绳与地面之间的夹角为 $30^\circ$ ，拖拉绳与地面之间的夹角为 $20^\circ$ ，滑车组钢丝绳引出端的拉力 $S = 1200$ 公斤力，用图解法分析独脚桅杆的受力情况。

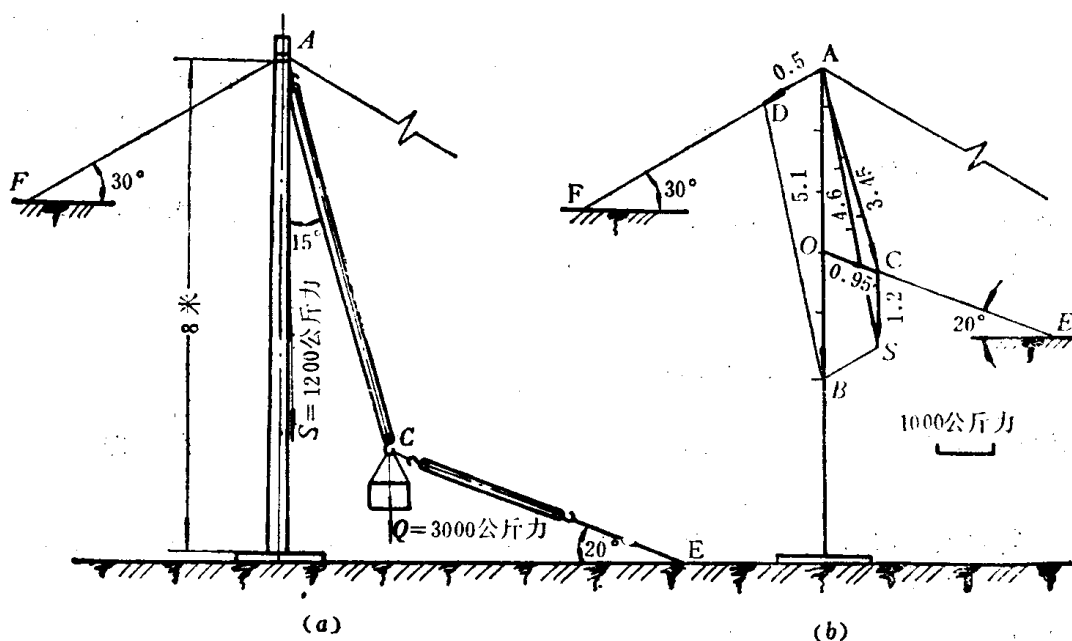


图 1-20 独脚桅杆各点受力图解法  
(a)示意图；(b)矢量图

【解】 (1)按比例画出整个桅杆的布置图，选取比例线段，以1厘米代表1000公斤力。

(2)从A点画AO线段，使 $AO = 3$ 厘米，即代表吊重 $Q = 3000$ 公斤力，然后过A点画出滑车组受力方向线AC，与过O点作拖拉绳受力方向线OE相交于C点，由C点作平行于桅杆AB的线段CS，长度为1.2厘米，表示滑车组钢丝绳引出端拉力 $S = 1200$ 公斤力，作SB平行于AD，连接AS，并作BD平行于AS。此图形就是独脚桅杆各点受力的矢量多边形。

(3)测量各线段的长度即可求得各点的受力大小：

$AC = 3.45$ 厘米，表示起重滑车组受力为3450公斤力；

$AD = 1.05$ 厘米，表示缆风绳受力为1050公斤力；

$OC = 0.95$ 厘米，表示拖拉绳受力为950公斤力；

$AB = 5.1$ 厘米，表示独脚桅杆受轴向压力为5100公斤力；

$AS = 4.6$ 厘米，表示作用于滑车组定滑车上的合力为4600公斤力。

## 二、平面汇交力系平衡的几何条件

在起重、运输作业中都离不开力的平衡，并通过力的平衡去解决每个作用点的受力问题。力的平衡是指物体在两个或两个以上的力的作用下，物体处于静止或等速直线运动状态，此时作用于该物体上的合力等于零。研究力的平衡的目的，是利用力的平衡原理，由已知的力去求解作用在物体上全部未知力。

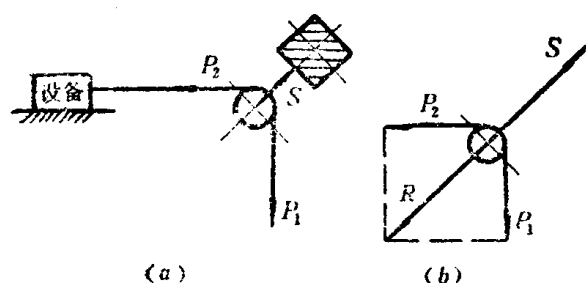


图 1-21 导向滑车力的平衡  
(a) 示意图；(b) 矢量图

图1-21所示为拖运设备箱时，绑扎在柱子上的导向滑车。当系结导向滑车的千斤绳拉紧后，滑车就不再移动。此时导向滑车上有三个力 ( $P_1$ 、 $P_2$ 和 $S$ ) 在同时作用，系结导向滑车的千斤绳所受的力与拖拉钢丝绳的合力大小相等，方向相反，并作用在同一条直线上，见图1-21 (b)，这样导向滑车便处于平衡状态。

任何物体，在两个力同时作用下处于平衡状态时，只要知道其中一个力的大小和方向，则另一个力就可以根据力的平衡原理求出。

## 三、平面汇交力系合成的解析法

用几何法解题时，有直观、明瞭、简捷的优点，但有一定的误差。在工程上还有另一种解题方法，此方法就是解析法。

平面汇交力系的解析法，是通过力在直角坐标轴的投影（分力），将矢量运算化为代数数量运算的一种方法。

### (一) 力在直角坐标上的投影

设有一力 $P$ ，用线段 $AB$ 表示，在力所在平面内，取直角坐标系 $OX$ 、 $OY$  (见图1-22)。

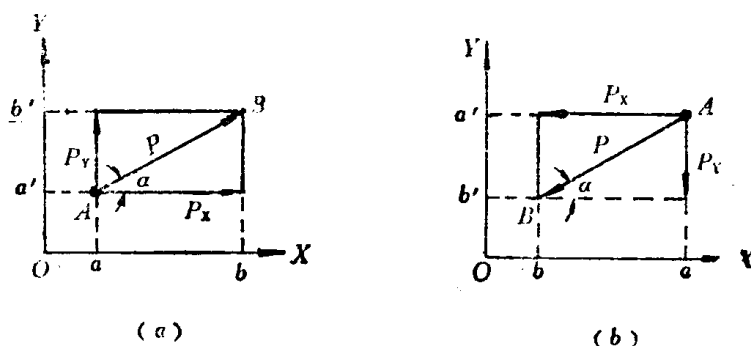


图 1-22 力在坐标轴上的投影

从线段 $AB$ 的两端分别作 $X$ 轴和 $Y$ 轴的垂直线，得垂足 $a$ 、 $b$ 和 $a'$ 、 $b'$ 。则线段 $ab$ 和 $a'b'$ 分别为力 $P$ 在 $X$ 轴和 $Y$ 轴上的投影（分力）。投影为代数量，其符号规定为：当力沿坐标轴的分力指向与坐标轴方向一致时，则力在该坐标轴上投影为正值，反之，为负值。如图



1-22(a)中, 力 $P$ 在 $X$ 轴、 $Y$ 轴上的投影 $ab$ 、 $a'b'$ 为正值, 在图1-22(b)中, 力 $P$ 在 $X$ 轴、 $Y$ 轴上的投影 $ab$ 、 $a'b'$ 为负值。因为投影 $ab$ 和 $a'b'$ 的数值与分力 $P_x$ 、 $P_y$ 的数值相等, 所以通常用 $P_x$ 、 $P_y$ 代表力 $P$ 在 $X$ 轴、 $Y$ 轴上的投影。如已知力 $P$ 的大小和它与 $X$ 轴的夹角 $\alpha$ , 则投影 $P_x$ 、 $P_y$ 的值可按式计算

$$\left. \begin{aligned} P_x &= \pm P \cos \alpha \\ P_y &= \pm P \sin \alpha \end{aligned} \right\} \quad (1-6)$$

如果已知力 $P$ 在直角坐标轴上的两个投影 $P_x$ 、 $P_y$ , 则力 $P$ 的大小和它与坐标轴 $X$ 的夹角 $\alpha$ 可按式进行计算

$$\left. \begin{aligned} P &= \sqrt{P_x^2 + P_y^2} \\ \operatorname{tg} \alpha &= \frac{P_y}{P_x} \end{aligned} \right\} \quad (1-7)$$

## (二) 合力投影定理

如图1-23所示的吊环上作用一平面力系, 用力的多边形法则可以求出该力系的合力 $R$ , 如图1-23(b)。现任选一直角坐标 $OX$ 、 $OY$ , 将力系中的各力 $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$ 、 $P_4$ 及其合力都投影到 $X$ 轴上, 得

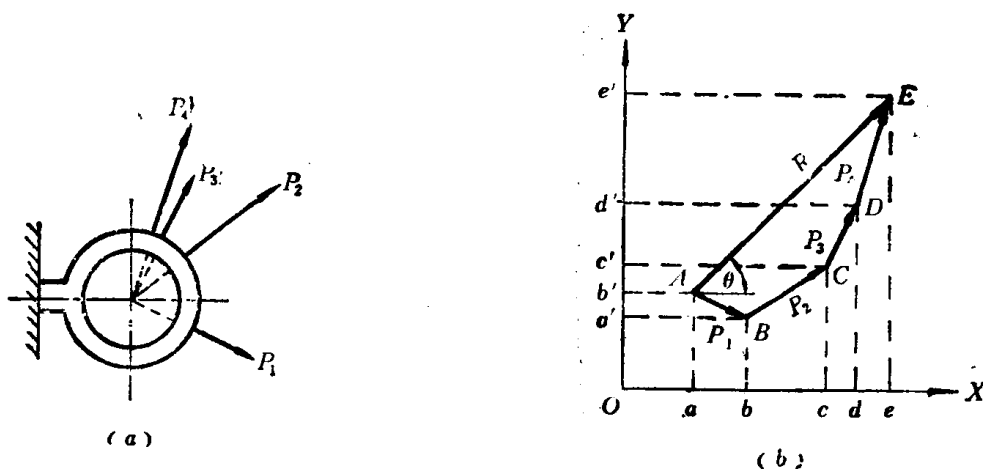


图 1-23 吊环受力

$$P_{1x} = ab, P_{2x} = bc, P_{3x} = cd, P_{4x} = de, R_x = ae$$

从图中可以看出

$$ae = ab + bc + cd + de$$

即

$$R_x = P_{1x} + P_{2x} + P_{3x} + P_{4x}$$

按上述方法, 同样可以得

$$R_y = P_{1y} + P_{2y} + P_{3y} + P_{4y}$$

上面的结果同样符合任意多个力的情况, 即

$$\left. \begin{aligned} R_x &= P_{1x} + P_{2x} + \dots + P_{nx} = \sum P_x \\ R_y &= P_{1y} + P_{2y} + \dots + P_{ny} = \sum P_y \end{aligned} \right\} \quad (1-8)$$

由此可得出结论: 合力在任一轴上的投影等于它的各分力在同一轴上投影的代数和。