

简易起重机设计手册

● 陈熙祖 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

简易起重机设计手册

© 陈熙祖 编著



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书主要介绍了起重机设计强度计算的一般知识,共分四篇。第一篇工程力学基础知识,主要包括:刚体力学;弹性力学。第二篇起重机钢结构设计、计算,主要包括:起重机设计载荷;起重载荷组合与许用应力;构件断面特性;轴心受力构件;受弯构件的计算;受扭构件计算;拉弯、压弯构件计算;起重机金属结构连接计算。第三篇:起重机零部件,主要包括:钢丝绳;滑轮及滑轮组;卷筒组及卷扬机;车轮和轨道;型钢规格和断面特性。第四篇简易起重机设计、计算,主要包括:独脚桅杆、龙门桅杆、人字桅杆;单悬臂桅杆、人字悬臂桅杆和摇臂式桅杆吊;缆索式起重机;简易起重机设计实例。

本书可供从事起重机设计、科研、生产、质量检验、机械运用等技术工作的人员使用,也可供大专院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

简易起重机设计手册 / 陈熙祖编著. — 北京:中国水利水电出版社, 2013.6
ISBN 978-7-5170-0982-5

I. ①简… II. ①陈… III. ①起重机—设计—手册
IV. ①TH210.2-62

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第142514号

书 名	简易起重机设计手册
作 者	陈熙祖 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn
经 售	电话: (010) 68367658 (发行部) 北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京嘉恒彩色印刷有限责任公司
规 格	184mm×260mm 16开本 22.25印张 802千字
版 次	2013年6月第1版 2013年6月第1次印刷
印 数	0001—2000册
定 价	86.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换
版权所有·侵权必究

序

20世纪70年代我国处于计划经济时代，一切经济活动都在计划安排之中，制造业也是如此。主管部门没有安排计划，设备就无法制造出来。在这一时期，安装火电厂的施工单位起重机械匮乏，为完成上级安排的火电厂安装任务，湖南火电建设公司只能“土法上马”，因地制宜、自行设计制造起重机械，以满足工程需要。这本《简易起重机设计手册》（以下简称《手册》），就是在这样的历史背景下，由陈熙祖同志根据自己的起重机设计经历、经验编写的。

陈熙祖同志1934年出生在江苏无锡县。1956年毕业于上海动力学校汽轮机专业（上海电力学院的前身）。1956年毕业后，分配到电力部武汉基建局调试队工作。1958年，武汉基建局撤销调试队编制，分配到武汉基建局四十二工程处汽机队湖南株洲工地工作。不久，四十二工程处划归湖南省水利电力厅机电工程局管理，成为该局的第一工程处。后几经变动，第一工程处更名为湖南省火电建设公司，陈熙祖同志一直在该单位工作，直到62岁退休。

陈熙祖同志是一位典型的老工程师，和其他老工程师们一起，务实奉献、开拓创新，在湖南火电建设公司的崛起过程中起着十分重要的作用。他一直是公司的技术负责人之一，不仅负责技术管理工作，而且自己亲自从事起重机设计工作。

1971年，在金竹山电厂两台5万kW高温高压机组安装工地上，汽轮机设备到了，但供汽机房安装、检修用的30t桥式起重机未到。为了抢施工进度，他设计了起吊重量为56t（即发电机静子的重量）的摇臂式桅杆起重机，且在工地自行制造、安装，很好地完成了对吊装精度要求很高的汽轮发电机组的安装任务，机组提前半年投产。

与此同时，他还对用于锅炉吊装的60t摇臂式桅杆吊进行了初步设计及强度计算，这台桅杆吊的设计工作全部由公司派员在长沙矿山通用机械厂内完成。由于此摇臂式桅杆吊的吊臂立于立杆中部，立杆弯矩极大，故采用了钢索自动平衡立杆弯矩，大大地提高了桅杆吊的起吊能力。此桅杆吊不仅完成了金竹山电厂一期工程2台220t锅炉的安装，还完成了该厂二期工程的第一台400t锅炉的安装。

应该讲，拥有这台桅杆吊对公司的发展是一个转折点。除了通过60t摇臂式桅杆吊的设计，公司技术人员整体素质得到提高外，更重要的是，公司历史性地拥有了第一台用于吊装高温高压锅炉的吊车，迎来了火电厂安装的机械化时代；吊装能力的提升，锅炉安装效率得到空前提高，使施工技术人员素质发生了质的飞跃，湖南火电建设公司的安装能力从此迈上了新台阶。

1979年，陈熙祖同志在金竹山电厂工地兼职完成了60t摇臂式桅杆吊改为60t塔吊的设计、计算工作。为了使塔吊的装、运、拆更为方便，将塔吊的塔身采用大人字结构，减轻了塔吊的自重。这台塔吊先后在鲤鱼江、耒阳、岳阳氮肥厂热电站及株洲电厂新厂等工地，作为主力起重机械发挥了重要作用。

1993年，陈熙祖同志采用等强度吊车梁及特殊的吊钩组设计技术，为湖南省五强溪水电站卸船码头设计了吊重300t跨距16m的简易桥式起重机（此桥式起重机无小车，将起吊装置直接固定在两大梁的中间位置）。该桥式起重机的自重仅为起重机样本上同规格起重机重量的一半。这次设计，他首次采用CAD和word软件进行辅助设计，第一次负责起重机械的全部设计工作，这年他59岁。

2002年，陈熙祖设计了吊重300t跨距10m、自重仅33t的简易液压门吊（吊钩用油缸升降，小车用移运器、链条葫芦牵引行走）。以后又设计了吊重400t/跨距10.5m、自重仅48t的简易液压门吊。该门吊具有优良的性能：一是可以一次完成大件从铁路平板车上卸车和平板汽车的装车任务；二是单独完成装、卸车任务；三是该门吊装、拆特别方便。

2003年，陈熙祖为襄樊电厂大件码头设计了吊重550t幅度16m的人字悬臂桅杆。

2008年，陈熙祖为金沙江下游向家坝水电站的复龙换流站大件码头设计吊重400t幅度23m的双人字悬臂桅杆吊。由于采用了双人字悬臂桅杆，桅杆长度、受力大大减小。因此，整个桅杆吊的重量仅为单人字桅杆重量的2/3。由于自重轻，大大地减小了桅杆安装、起吊时使用的起重机额定起重量。该桅杆吊是施工单位的，有四种组装方式，当起重量较小时，可以单独使用短人字桅杆、长人字桅杆吊装，大大地减小安装、运输的工作量、降低成本。由于地形关系，码头的平板车是垂直岸线卸船、装车，因此该桅杆吊卸船时幅度很大，但码头的建筑工程投资可以大大地减少。这台400t幅度23m的双人字悬臂桅杆吊申请了国家专利。

在陈熙祖整个工程生涯中，还设计了很多小的桥吊、门吊、桅杆吊及临时的发电机静子起吊装置等。

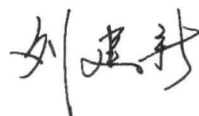
陈熙祖同志根据自己设计起重机工作的实践，花费大量时间和精力，编写了这本《手册》，这说明作为一名老工程师对事业的执着，更为可贵的是，他将自己的工程技术生命凝结为一分宝贵的文字财富，传授给年轻工程师们。《手册》的实用性是强的，在不能使用国家标准系列起重机的场合，使用该《手册》设计简易的起重机更能解决大问题；《手册》的示范性是强的，陈熙祖同志已进入高龄时期，仍不停地用笔记本电脑梳理着他工程技术的一生，这对于刚开始工作的年轻工程技术人员来说，不是很有示范意义吗。

科学技术就是生产力！陈熙祖同志和其他老工程师们一起对科学技术的应用、

创新做出了不可磨灭的贡献。应陈熙祖同志的邀请，我为《手册》作序，对我来说，与其说作序，不如说是借此机会表达我对老工程师们的敬意。

热烈祝贺陈熙祖同志编写的《简易起重机设计手册》由中国水利水电出版社出版！

国家开发投资公司原副总经理

Handwritten signature in black ink, appearing to read '刘建新' (Liu Jianjun).

2013年1月于北京

前 言

起重机是减轻笨重体力劳动、提高作业效率、实现安全生产的重要设备。本手册希望能为起重机设计者提供新的设计、计算方法和新的构件，减轻起重机重量；减轻起重机设计者工作量，提高设计效率是本手册的目的和愿望。

在起重机的设计中，为保证卷扬机钢丝绳整齐排列，如何计算最后一个转向滑轮离卷扬机卷筒中心的最小距离；如何计算钢丝绳受力后扭转角度；如何计算桅杆吊缆风绳受力等，本书提供了正确的计算公式和计算方法。

起重机构件中的各种受拉耳板，在一般的起重、运输机械书中的应力计算公式与一般概念的应力计算公式，其应力计算值相差极大，达 3.39 倍；在起重机、运输机械相关书中，耳板不同应力计算公式，其应力值也相差很大，达 1.52 倍。为此作者专门做了 13 件耳板的强度试验，试验结果证明：起重、运输机械书中的耳板应力计算公式是不对的，而与一般概念中的耳板应力（即耳板轴孔中心截面的拉应力、沿轴孔切应力）计算是相符的，详见笔者《耳板强度计算验证》一文。本手册中的耳板应力计算公式一律使用该文中所推荐的计算公式。

对单臂和人字式、悬臂式桅杆吊，在桅杆起吊幅度及桅杆支座与地锚间距离一定的条件下，如何选择桅杆受力最小、自重最轻时的桅杆最佳长度，本手册提供了非常简单的计算公式。同时，对加高桅杆地锚及采用作者创新设计的双桅杆的受力情况作比较，采用双桅杆方案更好，可大大减轻桅杆自身重量。

对地锚的计算，作者参考了大量建筑方面的书籍，主要介绍地锚的计算方法，弥补了一般起重机书籍关于地锚计算的不足。

对实腹梁的剪应力计算，一般书籍很少用腹板计算剪应力，大多用梁的全截面计算截面最大剪应力。本手册用腹板承受全部剪力的剪应力计算，与用全截面计算截面最大剪应力，将两者计算结果作比较，其截面最大剪应力是非常接近，证明用腹板承受全部剪力的剪应力计算公式是可靠的、安全的，可以大大地简化实腹梁的剪应力计算。

梁的弯矩计算用“某点一侧剪力图面积的几何和，即是该点的弯矩值”，可以非常直观地求取梁各点的弯矩值，不易搞错；更可以利用这一点，剪力图上过坐标零受力线的位置，即是梁最大（小）弯矩值的位置。很多不知均布载荷最大弯矩值位置的梁，求取弯矩最大（最小）弯矩值的位置，原本要用复杂的弯矩微分方程求解，如用上述方法求取弯矩最大（最小）值的位置则非常直观、简单。

对移动载荷的桁架梁，根据梁所在位置的弯矩、剪力值，求取桁架弦杆、腹杆受力，替代为了求取所有桁架杆件的最大受力值，而要作很多“马一克”法力图，简化了计算。

运用“CAD”制图，在计算机屏幕上直接用作图法，高精度求解所有汇交力系的受力大小（实为高精度的测量线段的长度），代替复杂的分析法求解杆力。正是由于用上述作图法能高精度地测量线段长度，因此根据桁架各杆件受力、截面大小求出杆件变形量后，算得杆件变形后的实际精确长度，再用作图法求出桁架的整体变形量，替代用传统“虚位移法”求解桁架的变形量，不仅简单、直观、精确度高，而且可求得桁架任何位置的变形量，不像“虚位移法”法，一次只能求得某一点变形量。

通常使用的工字梁侧向整体稳定计算复杂，使用范围受限制，选用系数时，工字钢型号仅分三个区段和跨度仅在10m以内等，而且仅适用轧制工字钢和H型钢。在本手册中介绍的工字梁整体侧向稳定计算方法中，将中心受压杆的计算方法用于梁侧向整体稳定计算。本方法不局限于工字钢和H型钢的侧向稳定计算，可以适用于其他截面，如：工字钢上翼板上横向组合槽钢的结构和电动葫芦单梁吊等，常用的工字梁上组合钢管和箱形梁结构的梁，均可采用本手册所创的稳定计算公式。

本手册对起重机零部件也作了改进，如将吊钩上部的推力球轴承，改用推力调心滚子轴承。由于此轴承能调心，因此在吊钩滑轮组一端高、一端低的情况下，原结构会在吊钩和叉子直柄部分产生弯矩，而采用调心推力滚子轴承后，吊钩和叉子直柄中只有拉应力而无弯应力。因此现有起重机设计手册中，吊钩直柄拉应力计算规定的安全系数达4~5倍（只计算拉应力不计算弯应力），本手册设计结构中，吊钩和叉子直柄部分无弯矩，可将上述构件的安全系数降低至一般结构件的安全系数，大大地减小了吊钩和叉子直柄部分的直径。

本手册将吊钩与叉子的销轴连接改为多耳板连接，使销轴、耳板直径大大地减小了。同时吊钩的滑轮组的隔（吊）板，根据需要可由两块改为多块，因此其减小了滑轮轴的直径。

对滑轮结构也作了改进，在滑轮的端部采用O形密封圈。由于滑轮转速低，最好使用这种密封的构件，在滑轮制造厂组装时加满防水润滑脂后，在它的寿命期内不必再加润滑脂了，简化了滑轮组的注油设施。

对受力大、滑轮数多、工作级别低的滑轮组，采用一个双向止推的NUP圆柱滚子轴承，减小了滑轮及滑轮组的宽度。

对人字悬臂桅杆，上部的起吊、起伏两组定滑轮组装在一个壳体中，同时将桅杆头部连接件采用箱形连接梁，箱形梁下部与定滑轮采用多耳板连接，简化了结

构、减轻了重量。

吊臂立于立杆中位置的悬臂桅杆吊，采用起伏滑轮连接钢丝绳与抗弯索相连的自动平衡立杆中间弯矩的设计方法，大大地降低了立杆的剩余弯矩值。

本手册以 GB/T 3811—2008《起重机设计规范》、机械工业出版社及中国铁道出版社出版的两本《起重机设计手册》、GB 50017—2003《钢结构设计规范》、《新编钢结构设计手册》为蓝本进行编写，介绍了起重机设计中强度计算的一般知识和方法。本手册编写过程中，得到骆民强极大的鼓励和指导，在此表示感谢。

由于作者水平所限，书中不妥之处，敬请读者提供宝贵意见。

作 者

2013年1月

目 录

序	
前言	
第一篇 工程力学基础知识	
第一章 刚体力学	1
第一节 力的基本性质	1
第二节 力的合成与分解	2
第三节 桁架梁杆力的求解	3
第二章 弹性力学	14
第一节 应力和应变	14
第二节 材料强度	15
第二篇 起重机钢结构设计、计算	
第一章 起重机设计载荷	18
第一节 常规载荷	18
第二节 偶然载荷	20
第三节 风载荷	22
第四节 特殊载荷	24
第二章 起重机载荷组合与许用应力	27
第一节 起重机金属结构设计的基本方法、 载荷情况与载荷组合	27
第二节 起重机机械设计的载荷、载荷情况与 载荷组合	34
第三节 金属结构	35
第三章 构件断面特性	40
第一节 截面的静矩、形心	40
第二节 截面的极惯性矩、惯性矩、惯性积及 抗弯矩、抗扭矩	41
第四章 轴心受力构件	46
第一节 轴心受力构件截面形式	46
第二节 轴心受拉构件	46
第三节 轴心受压构件	46
第四节 受压杆的长细比与稳定系数	51
第五节 格构式轴心受压杆的稳定	56
第六节 格构式轴心受压杆的填板、 剪力计算	57
第七节 轴心受力构件的计算长度和 允许长细比	57
第八节 轴心受压构件的局部稳定	60
第五章 受弯构件的计算	62
第一节 受弯构件受力计算	62
第二节 外伸梁及悬臂梁的剪力、 弯矩计算	65
第三节 受弯构件的变形计算	68
第四节 受弯构件的强度计算	81
第五节 受弯构件的抗剪强度计算	81
第六节 受弯构件轮压产生的腹板局部挤压应力 及工字钢下翼缘应力	84
第七节 受弯构件的综合强度计算	85
第八节 受弯构件的整体稳定计算	86
第九节 受弯(压)构件的腹板局部稳定 计算	93
第十节 受弯构件强度计算例题	102
第十一节 提高梁抗弯强度的措施	106
第十二节 受弯桁架的变形计算	107
第十三节 销轴连接计算	114
第六章 受扭构件计算	117
第一节 受扭构件概述	117
第二节 开口截面的扭转计算	118
第三节 闭口截面的扭转计算	123
第七章 拉弯、压弯构件计算	132
第一节 拉弯、压弯构件受力情况	132
第二节 实腹式拉弯、压弯构件强度计算	132
第三节 拉弯、压弯构件的偏心受压 稳定计算	132
第四节 梁、柱联合的公式的稳定计算	140
第五节 压弯构件的局部稳定	142
第八章 起重机金属结构连接计算	144
第一节 连接方法	144
第二节 焊缝连接	144
第三节 焊缝强度计算	145
第四节 焊缝构造要求	149
第五节 钢管结构	151
第六节 螺栓连接	156
第三篇 起重机零部件	
第一章 钢丝绳	164
第一节 钢丝绳的特性	164
第二节 钢丝绳的选择	164
第三节 钢丝绳的计算	178

第四节	钢丝绳端的固定方法	181	第五节	锚碇	265
第二章	滑轮及滑轮组	182	第二章	单悬臂桅杆、人字悬臂桅杆和摇臂式桅杆吊	274
第一节	滑轮的构造、尺寸及型式	182	第一节	单悬臂桅杆	274
第二节	滑轮组的构造、种类、倍率和效率	192	第二节	单悬臂桅杆及人字悬臂桅杆长度的选择及降低桅杆受力的方法	274
第三节	驱动滑轮	193	第三节	人字悬臂桅杆的结构	278
第四节	吊钩组	195	第四节	摇臂式桅杆吊	279
第三章	卷筒组及卷扬机	216	第五节	单悬臂吊、人字悬臂桅杆、摇悬臂桅杆吊的受力、强度计算	280
第一节	卷扬机概述	216	第六节	吊臂生根于立杆中部的摇臂式桅杆吊立杆受力、强度计算	285
第二节	卷筒组	216	第七节	摇臂式桅杆吊的结构	286
第三节	卷扬机其他问题	220	第三章	缆索式起重机	288
第四章	车轮和轨道	221	第一节	缆索起重机的分类和典型结构	288
第一节	车轮的种类和工作特点	221	第二节	缆索起重机有关尺寸的计算	290
第二节	车轮计算	223	第四章	简易起重机设计实例	293
第三节	车轮组尺寸和许用轮压	225	实例一	起吊重量 52t/起吊幅度 5.8m 的摇臂桅杆吊强度计算	293
第四节	轨道	228	实例二	起吊重量 25tf 起吊幅度 21.5m 的摇臂桅杆吊的强度计算	297
第五章	型钢规格和断面特性	231	实例三	60t 摇臂式桅杆吊	304
第一节	热轧剖分 T 型钢和 H 型钢	231	实例四	塔身采用大人字腹杆 60t 塔吊	310
第二节	热轧型钢	238	实例五	3t 摇臂式桅杆吊	325
第三节	结构用冷弯空心型钢	248	实例六	吊重 500tf/幅度 23m 的雙人字悬臂桅杆吊	326
第四篇 简易起重机设计、计算			实例七	20tf/9.5m 门型起重机强度计算	338
第一章	独脚桅杆、龙门桅杆、人字桅杆	258	参考文献		345
第一节	单桅杆的结构及性能	258			
第二节	单桅杆的计算	260			
第三节	人字桅杆	262			
第四节	桅杆缆风绳计算	263			

第一篇 工程力学基础知识

第一章 刚体力学

第一节 力的基本性质

一、力的三要素

力从宏观方面看，是物体间相互的机械作用，这

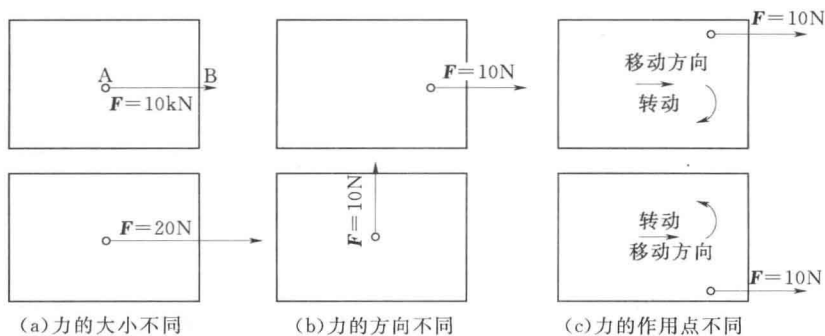


图 1-1-1 力的三要素图示

1. 力的大小

力的大小表示物体间相互作用的强弱程度，国际通用力的单位以牛 [顿] 或千牛 [顿] 度量，分别用符号 N 与 kN 表示。由于起重机械所吊的设备、材料等以吨力 (tf) 表示，所以在本《手册》的计算中，只要与其他单位不相干，均用 tf 表示，这样计算比较方便。t 理论上表示质量，1t 质量下的地球标准吸引力，即 1t 质量的物体与重力加速度 $g = 9.81\text{m/s}^2$ 的乘积，tf 与 kN、N 的换算关系为 $\text{tf} = \text{gkN} = 9.81\text{kN} = 9810\text{gN}$ 。

这里要补充一点的是，重力加速度 g ，是随所在地在地球上的位置不同、海拔不同而不同的。上面所说的 9.81m/s^2 是纬度为 45° 海平面上的值。所在位置的纬度愈小地球自转离心力大， g 愈小；海拔愈高（一般适宜人类活动的海拔为 4000m 以下），离地心愈远，引力小， g 愈小。但 g 变化不大，相差小于 1.0%，因此工程计算用 tf 是没有问题的。 g 的计算公式为

$$g = 9.78049 \times [1 + 0.0052884 \sin^2 \theta - 0.0000059 \times \sin^2 2\theta] - 0.00000286 H$$

种作用使物体的机械运动状态发生变化，或使物体发生变形。

力的三个要素，即力的大小、方向及作用点，见图 1-1-1。

式中 θ ——地球纬度， $(^\circ)$ ；

H ——地球的海拔，m。

纬度为 45° 、海平面的 g 值为

$$\begin{aligned} g &= 9.78049 \times [1 + 0.0052884 \sin^2 45^\circ \\ &\quad - 0.0000059 \sin^2 (2 \times 45^\circ)] \\ &= 9.806 \end{aligned}$$

以我国最南端的海南岛的 g 值为例，纬度为 18° ，最高海拔为 1876m，其 g 值为

$$\begin{aligned} g &= 9.78049 \times [1 + 0.0052884 \sin^2 18^\circ \\ &\quad - 0.0000059 \sin^2 (2 \times 18^\circ)] - 0.00000286 \times 1876 \\ &= 9.78 \end{aligned}$$

是标准重力加速度 9806 值的 0.998 倍，其相差很小。

以我国海拔最高、纬度较小的省会城市拉萨的重力加速度 g 为例，纬度为 30° 、海拔为 3664m， g 值为

$$\begin{aligned} g &= 9.78049 \times [1 + 0.0052884 \sin^2 30^\circ \\ &\quad - 0.0000059 \sin^2 (2 \times 30^\circ)] - 0.00000286 \times 3664 \\ &= 9.7829 \end{aligned}$$

是标准重力加速度 9.806 值的 0.9976 倍，其相差也

很小。

以上是我国重力加速度小的例子，下面是我国重力加速度大的例子，以我国最北的黑龙江省为例，纬度为 52.5° ，海拔为 0m ，则 g 值为

$$g = 9.78049 \times [1 + 0.0052884 \sin^2 52.5^\circ - 0.0000059 \sin^2 (2 \times 52.5^\circ)] = 9.813$$

是标准重力加速度 9.806 值的 1.0007 倍，其相差也很小，因此用 tf 作为力的单位在工程计算上是没有问题的。更何况任何起重机起吊的重量、试载荷的重量均是物体的重力。

2. 力的方向

当为平面时（平面力系），方向是指东、南、西、北。当为立面时（空间力系），除上述平面的东、南、西、北外，还有上、下。

3. 力的作用点

力的作用点是指力作用在物体的部位。

从图 1-1-1 中看出，力对物体作用力的大、小不同，方向不同，作用点不同，对物体起的作用是不同的。

对物体作用力的大、小不同，大的力可以推动物体运动，小的力，其值小于物体重力与地面的摩擦力时，是推不动物体的；大的力推动物体运动的速度快、加速度大；小的力推动物体运动的速度慢、加速度小。

作用力的方向不同，物体的运动方向也就不同。

力是一个既有大小、又有方向的量，是矢量。在力学中，矢量可以用一个具有方向的线段来表示，如图 1-1-1 所示。因此力的矢量用 \vec{F} 表示。

力作用在物体上的位置不同，物体运动的方式也不同。力的作用点在物体的中心或中心线的延伸线上，物体向前运动；力作用于物体的一侧，物体除向前运动外，还会使物体转动，见图 1-1-1 (c)。但此仅在物体移动前的情况，一旦物体移、转动，物体重心会向作用力延伸线靠拢而至重合，此时物体就只有移动而不再转动了。

二、作用力与反作用力及力的平衡

物体作用于地面，对地面有一压力即重力，同样地面对物体也有一反作用力，作用于物体。其他作用力也与此相同，有作用力就有反作用力。

第二节 力的合成与分解

一、力的合成

1. 汇交力系的合成

这里讲的是平面力系中的汇交力系的合成。所谓汇交力系，是所有作用分力均汇交于一点的力系，其力合成用平行四边形法则，平行四边形法则 [见图 1-1-2 (a)] 可简化为力合成的三角形法则，如图 1-1-2 (b) 所示。

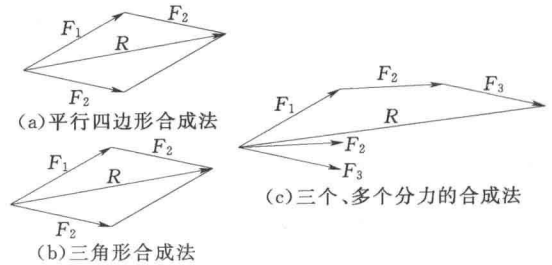


图 1-1-2 汇交力系合成法图示

当分力多于两个时，可先求两个分力的合力，再将此合力与另一分力合成，以此类推将所有分力合成为一个总合力。

当然也可以如图 1-1-2 (c) 所示的那样，将第二个分力复制、平移至第二个分力的起端，接于第一个分力的末端，再将第三个分力复制、平移至第三个分力的起端，接于位移后第二个分力的末端，依此类推，最后连接第一个分力的起端，与最后一个平移后分力的末端，即是此汇交力系的合力，求出最后的合力 R 。

分力的编号最好是根据力的方向，顺时针或反时针依次编号，如图 1-1-2 (c) 所示三个力的合成是顺时针依次编号的，这样画出来的是凸多边形，否则画出来的不是力多边形，而是一组不规则的折线组。

2. 平行力系合成

平行力系合成，其合力的大小为各分力的几何和；其合力的位置，用杠杆原理算出。见图 1-1-3 (a) 两个分力的合成，即合力所在点 B ，是两分力对此点 B 的力矩是相等的，即：

合力的大小为

$$R = F_1 + F_2$$

合力的位置，即合力 R 相对 F_1 、 F_2 的距离 L_1 、 L_2 为

$$F_1 L_1 = F_2 L_2。$$

如果有多个平行分力，见图 1-1-3 (b)，则可以在求得两个分力的合力的位置、大小后，此合力再和第三个分力合成，依此类推，将所有分力合成。

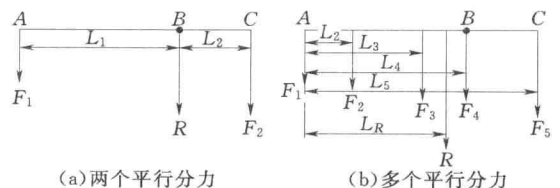


图 1-1-3 平行力系合成法图示

但可以用更简单的方法来找出多个平行分力的合力位置。即所有分力对某点，如图 1-1-3 (b) 所示，假定以最左边第一个分力 F_1 为中心，即 $L_1 = 0$ ，其他力对此点力矩几何和等于合力对此点的力矩，则

其合力对某点的距离 $x=L_R$ 为

$$L_R = \frac{\sum_1^n F_i L_i}{\sum_1^n F_i} = (F_1 L_1 + F_2 L_2 + F_3 L_3 + F_4 L_4) / (F_1 + F_2 + F_3 + F_4)$$

式中 F_i ——某分力的大小；

L_i ——某分力对某点的距离。

上式以图 1-1-3 (b) 为例，5 个分力，其中 $L_i=0$ 。

3. 一般力系合成

所谓一般力系，不是汇交力系又不是平行力系。一般力系的合成，见图 1-1-4 (a) 中 F_1 、 F_2 ，其两个分力的延长线相交在被作用物体的范围内，则可以按汇交力系来合成此两分力。

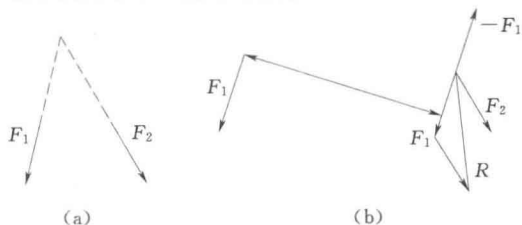


图 1-1-4 一般力系合成法图示

如图 1-1-4 (b) 所示，其作用于物体上的 F_1 、 F_2 两个分力不能在被作用物体范围内汇交，则可以用下述方式来合成：在分力 F_2 的作用点处，画一对（两个）与 F_1 大小相等、方向相反的两个分力，则其作用效果不变，并将此两分力 F_1 中与 F_2 方向基本相同的分力 F_1 与 F_2 合成，得合力 R ；另一个与 F_1 方向相反的分力 F_1 ，与原 F_1 分力组成一个力矩，即 $M=F_1 b$ ，式中 b 为复制分力 F_1 与原分力 F_1 之间的垂直距离。即两个不是汇交也不是平行的两个分力可以合成为一个合力与一个力矩，其作用效果与两个分力的作用效果是相同的。

同样，多个分力，均可以合成为一个总合力和一个总力矩。总合力的合成见前面所说，而各分力对一个物体分力矩，可采用几何相加为一个总力矩。

二、力的分解

力的分解见图 1-1-5。

如图 1-1-5 (a) 所示，有一力 F 作用于墙上的牛腿根部，求牛腿水平杆及斜撑的分力。如图 1-1-5 (b) 所示，有一力 F 作用于房顶的两根等长绳索，求两绳索的分力。

如图 1-1-5 (c) 所示，一个靠墙梯子的力的分解，其要点是梯子接触地面、墙面的反力均是垂直地面和墙面的；其次对地面的垂直压力是梯子重量的一半（空梯子）。问题是对墙面反力的求解，要通过梯子在墙面反力对梯子底部的力矩等于重力对梯子底部点的力矩，则墙面的反力为

$$P=GB/2h$$

梯子与地面的摩擦力为

$$F=\mu G$$

式中 G ——梯子重量；

μ ——梯子与地成的摩擦系数。

当 $P>F$ 时，梯子会滑倒。

墙面的反力与梯子搁在墙上的高度 h 成反比与梯子重心到梯子支承点距离（与梯子重心间的距离 $B/2$ ）成正比 [见图 1-1-5 (c)]。由此可知，当墙面的反力超过梯子在地面反力产生的摩擦力 F 时，梯子即会下滑。梯子放得越直，墙上反力越小，而梯子下部与地面的摩擦力是不变的，因此梯子不容易滑倒（上述解题中忽略墙上反力形成的下滑摩擦力）。

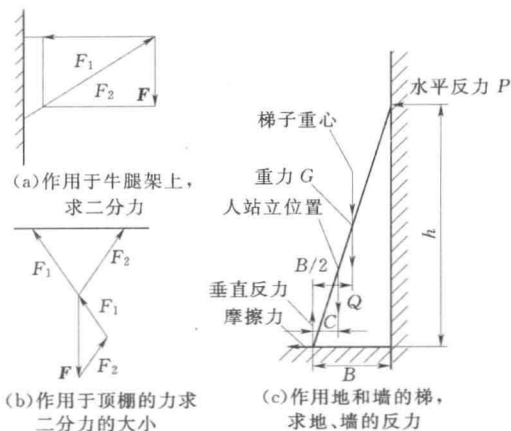


图 1-1-5 已知两分力的方向求分力的大小

当梯子上有人工作时，情况与上述不同的是，由于人在梯子上站立的位置高低不同，其受力情况是不同的，人体重量通过梯子传递，在墙体上的反力大小是不同的，但对地面的反力是不变的，亦即对地面的摩擦力不变，因此当人站立的位置高，墙面反力大，梯子容易滑倒。

此问题可以与空梯子的问题用叠加的方法求解。

梯子与地面的摩擦力为

$$F=\mu G+\mu Q$$

墙面的反力为

$$P=GB/2/h+QC/h$$

式中 G ——梯子重量；

Q ——人体的重量；

B ——梯支脚至墙的距离；

C ——人站立位置离梯立点的水平距离；

μ ——梯子与地面的摩擦系数。

当人站的位置高，即人的位置与梯子支承点的距离 C 大， P 就大，当 $P>F$ 时梯子会滑倒。

第三节 桁架梁杆力的求解

前面介绍了力的合成与分解。本节将介绍在计算

机上用 CAD 作图的方法求解力的大小,其方法是与用笔在纸上画图,求解力的方法是一样的,只是用 CAD 作图法求出力大小的精度,即线段长度的精度非常高,可以达到所需要的任何精度,这是用笔和纸的手工作图法无法达到的精度。

一、用 CAD 作图的方法求解力的大小

所谓在计算机上用作图法求解力的方法,是说在计算机上用 CAD 作图时,在显示器屏幕(下面简称屏幕)上,直接用光标在屏幕上精确地画出所需要的图形及力图。

(1) 在屏幕上画图形和测量图形上的线段的长度、角度时,其精度可以达到很高,精度的大小几乎不受任何限制。在画图前,首先要将在屏幕中的菜单“格式”中选“单位(无纲量的 10 制)”,然后选“长度”中“小数”、“精度”;“角度”中选“十进制”、“精度”。“精度”都可以选到 9 位小数的精度,而工程实际应用中选 4~5 位精度已足够了。在选“角度”单位时,要选十进制(“度以下用十进制的小数”),而不要选“度”、“分”、“秒”,这样便于计算。

(2) 在屏幕底线处,在坐标显示行中,用“COORDS”命令,将坐标显示成所划线段(光标)的起点开始的长度/角度显示;即选“2”。而“0”是不显示坐标位置值的;“1”是显示光标所在位置的从零坐标开始的 X、Y 的绝对值;“2”是显示所画线段从起点开始的线段长度及角度,而线段长度可以输入的,如长度 100.001 等。

(3) 在屏幕下部,选择“对象捕捉”,在捕捉中先选择“设置”,“设置”中有很多项,选择你需要的项目,最常用的有“端点”、“中点”、“切点”、“圆心”、“交点”、“外观交点”等。

上述工作完成后,画出需要的图形。画需要的线段的长度时,从画线的起端开始,可以输入需要的线段长度,如 100.001(是无纲量的值),即画高精度的水平与垂直线段是没有问题的。

但与直角坐标成一角度的线,其角度一般不能精确的画出,当然在画图时,尽量不先画斜线,斜线只是在画水平线、垂直线后,连接水平线与垂直线两端的连线即是所需的斜线,这样就没有必要先画与水平线成一角度的线段。当然一定要画与水平(或垂直)线成一精确角度的线时,可以采用下面的方法。

方法一是利用三角函数画出所需要精度的角度,如所要画与水平线成精确的 30° (其他角度也一样)的线,则先在屏幕上画出 100 长的水平线段,再根据 $\tan 30^\circ$,在水平线的右端点(在前面设置捕捉中,设置“端点”,保证垂直线的起点在水平线的端(终)点处),向上画出 57.735(小数点后的倍数在 8 位以下可以任你选取)长度的线段,则连接直角两线端点的线(由于捕捉菜单中选择了“端点”连接的斜线一定在端点上),此线与水平线夹角即为 30° 。当然也可

以在画了 100 长的水平线后、直接画 57.735 长的垂直线,即水平线的终点即为垂直线的起点。

另一个画精确角度线段的方法是,利用 CAD 画图转动功能,将画出长度精确的水平线,用旋转方法转过一个角度,而转过角度的精度是任你选择的,如选了一要转动的水平线,再输入需要转动的角度,如 30.002° 、 60.001° 等,即画成有一定角度的线。然后画出需要的受力图形,包括力多边形。

前面介绍了精确地画出力的多边形,包括精确地画出受力配置图,下面介绍精确地测量线段的长度、线段间的角度。第一种方法是用“标注”法测量图中的线段长度、角度,这是与画图方法相同。但要说明的是,要选择“标注”中的精度,否则即使图形画得精确,如线段长度 100.001,但“标注”精度不够,同时标注出来的尺寸精确度很小,达不到所需要的线段的精度的。因此选择标注尺寸的精度是“视图的工具”栏中选择的“标注”,选“标注式样”、选“修改”、选“单位格式”、选长度“精度”,在角度中,选“十进制度数”、“精度”,这样就可以在标注中显示你所需要显示的线段长度和角度的精度了。

上述方法标注线段长度,要在图形中出现很多的线条和箭头,一般不用此法,而图中的线段长度,用画线的方法进行测量线段的长度。如测某一线段的长度,则选择该线段的起点,当该线段是有交点(端)时,则选择了“捕捉”中“交点(端)”光标可以非常精确的落在线段的起交(端)点上,然后将光标落在线段的终(交、端)点上,则在屏幕下的坐标中可以精确地看出该线段的长度了,再将此线段长度或经计算后得出的力的大小,直接标志在该线段上,如图 1-1-7 所示。如此将上述力多边形的力全部计算好,并标志在相关的线段上,用此法计算出来的力的精度可以达到你所需要的精度。角度测量,只能用“标注”的方法精确测量角度的大小,同样可达到非常高的精度,但一般是不必测量角度的大小的。

二、桁架梁杆力的求解

桁架有桁架式的立柱、梁等的各种桁架,这里只介绍桁架梁,但桁架立柱,也可以按此法求解。

(一) 梁的剪力、弯矩的求解

梁在外力的作用下,在梁中产生剪力、弯矩,梁在各种载荷下的剪力与弯矩,见图 1-1-6。

1. 梁中间有一个集中载荷

如图 1-1-6(a) 所示,有一个中间集中载荷的梁,其两端的剪力大小相同、方向相反,梁中间弯矩最大,且弯矩成等边三角形分布。

2. 梁上有两个对称作用的集中载荷

如图 1-1-6(b) 所示,有两个对称集中载荷作用于梁上的,其两端有两个相同的剪力,两集中载荷中间的梁,无剪力,即所谓纯弯曲区,其弯矩两端为三角形分布,中间是等弯矩区。

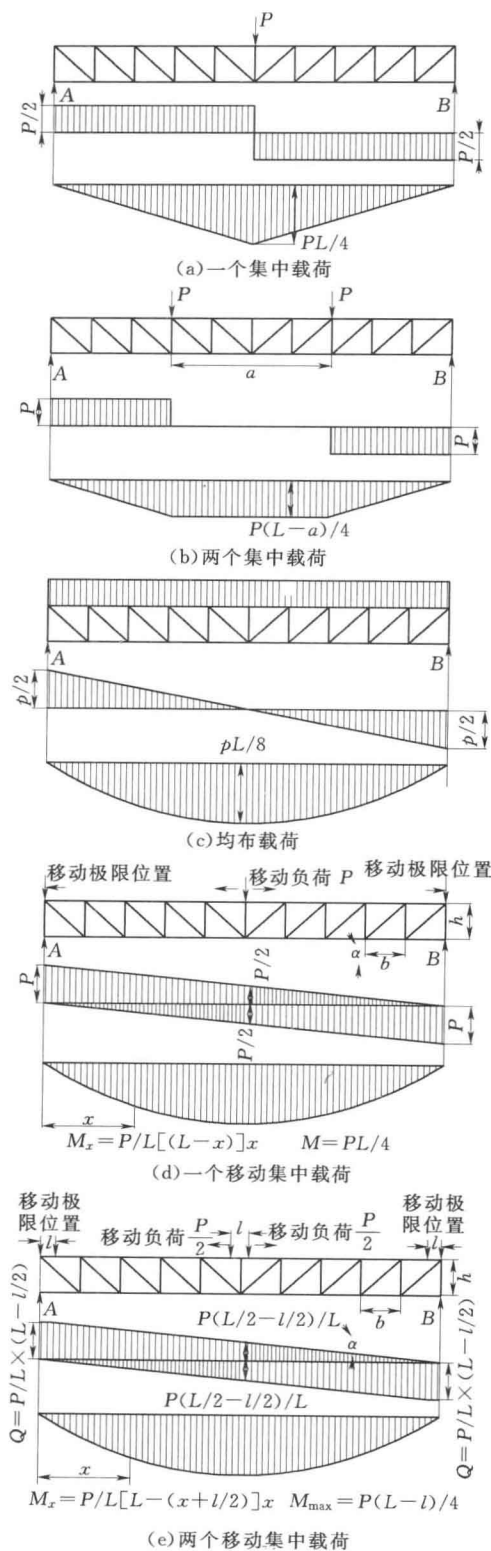


图 1-1-6 梁在各种负荷下的剪力、弯矩

3. 梁上为均布载荷

如图 1-1-6 (c) 所示，均布载荷梁，两端剪力最大，中间剪力为零；弯矩呈二次曲线分布，梁中间弯矩最大。

4. 梁上有一个移动的集中载荷

如图 1-1-6 (d) 所示，有一个移动的集中载荷的梁（桥式、门式起重机的梁，即是这种载荷的梁），假设移动载荷从一端可移动至另一端（实际桥式起重机与门式起重机的移动载荷，其终端，离两端有一小的距离），其两端的最大剪力为移动载荷 Q ，梁中间的剪力为移动载荷的一半，即 $P/2$ 。

载荷距端点 x 处梁左端的剪力为

$$Q_x = Px / L$$

当移动载荷，可移至两端部时，即 $x=0$ 、 $x=L$ 时，梁两端的剪力最大为 $Q=P$ 。

载荷在梁中间的弯矩为

$$M = PL/4$$

载荷距端点 x 处的弯矩为

$$M_x = P/L[(L-x)x]$$

式中 x ——集中载荷中间位置距离左支点的距离；

P ——集中载荷；

L ——梁的跨距。

5. 梁上有两个同时移动的集中载荷

桥吊、门吊的移动载荷不是一个集中载荷而是两个集中载荷（每个集中载荷值为 $P/2$ ），见图 1-1-6 (e)，两个载荷相同的（实际有的两个集中载荷值是不同的，但计算方法是相同的），两集中载荷间的距离为 l ， x 为左侧一个集中载荷的中心，距左端点的距离， x 与左端点的最小距离为 0，距离右端的距离为 $L-l$ ，则梁在任意点 x 位置的剪力为

$$Q_x = P/L[L - (x+l/2)]$$

左端的最大剪力为

$$Q_{Lx} = P/L(L-l/2)$$

右端的最大剪力为

$$Q_{Rl} = P/L(l/2 - P)$$

载荷距端点 x 的任意点的弯矩为

$$M_x = P/L[L - (x+l/2)]x$$

梁中间处的最大弯矩，即 $x=L/2-l/2$ 时梁的弯矩为

$$M_{max} = P(L-l)/4$$

式中 x ——左侧一个集中载荷的中心，距左端点的距离；

P ——两集中载荷的总值，即每个集中载荷为 $P/2$ ；

L ——梁的跨距；

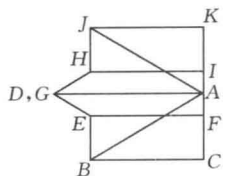
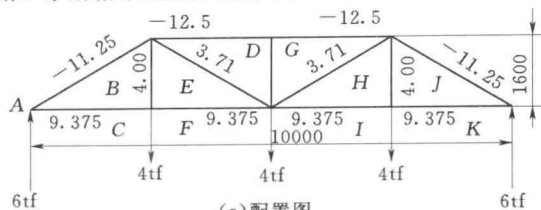
l ——两集中载荷间的距离。

图 1-1-6 中剪力分布图，与一般书上的不一样，其中剪力分布图中影形密的部分一般书上是不画出的，这部分的剪力图，却是分析斜杆承受压应力时

所需要的, 详见图 1-1-10 和图 1-1-11 的分析。

(二) 桁架梁杆力用作图法(马-克)求解

如图 1-1-7 所示桁架杆力, 用作图的方法求解, 求解桁架杆力步骤如下。



杆件受力一览表

杆件编号	AB	BC	BE	AD	DE	EF	AG
受力 (tf)	-11.25	9.375	4.00	-12.50	3.71	9.375	-12.5
杆件编号	DG	GH	HI	AJ	HJ	JK	
受力 (tf)	0.00	3.71	9.375	-11.25	4.00	9.375	

图 1-1-7 桁架力的作图求解法

(1) 严格按比例, 用 CAD 制图软件中精确的画出桁架的单线图(以桁架的弦杆、腹杆断面的形心为中心画的单线图)。

(2) 将作用于桁架上的力画上、标出大小, 并求解出桁架二端支座的反力; 当一个力不是作用于桁架的节点时, 必须将此力分解成作用于两侧节点处的两个分力。

(3) 在此单线图上编好杆件和作用力的号码, 作用力、杆件的号码编制, 在杆件及力的两侧写上编号(用阿拉伯数字或英文字母)。一个字母如没有杆件和力分时, 该字母为几个杆件及力所共用的, 如图 1-1-7 (a) 中的 A 所示, AC 为桁架左端反力, AK 为桁架右端反力; AB 为桁架左端上斜撑杆, AJ 为桁架右端上斜撑杆, AD、AG 分别为桁架上部左、右水平弦杆等。按此方法画出的图称为配置图。

(4) 画力图。上述所画的桁架单线图、作用力、反作用力(求解的支座反力)图画好后, 即可画力图了, 即画求解杆力的图。在画力图前首先要定出, 代表力的线段长度的比例, 即以线段的长度表示力的大小的比例。力图可以从两端的任意一端画起, 现以桁架左端画起, 先将代表左端支座反力的 CA(用 AC 也可)线段(力)的方向、大小按比例画出, 再从 A 端起画与配置图上 AB 杆的平行线, 从 C 端画与配置图上 BC 杆的平行线, 两线交于 B。此 ABC 力的三角形, 即表示桁架左端点的杆力求解图, 如图 1-1-7 (b) 所示。画力图时, 其杆力即线段必需与配置图上

的杆件相平行。

一个节点力的三角(多边形), 必须遵守以下的原则, 以 ABC 力的三角形边 CA 为例, C 点为起点至 A 点的线段, 即所谓力奔向节点(从配置图上看), 即表示为压力, 杆件 AB, 从力图、配置图上看, 是从 A 奔向 B 的方向, 也是奔向节点, 为压力杆, 而 BC 杆, 从力图、配置图上看, 是从 B 开始到 C 为离开节点, 为拉杆, 这是符合要求的。

当然从三角形的 AC、CB、BA 反过来看, 则其全部杆力的指向均是反的, 同样是可以的。如果是力的多边形中, 一部分力的指向(力的方向)是对的、一部分力的指向(力的方向)是不对的, 则该图是画错了方向(力的三角形图是不会画错的, 但多边形有可能画错, 得出错误的结果)。

按上述方法, 继续画 FCBEF、EBADEB 力的四边形、五边形等, 直到将力图全部画完。

(5) 根据上述所画的力图, 各力的线段长度与力大小的比例, 即可算出该杆件的受力。由于是用 CAD 画的图, 在 CAD 的软件中(在 CAD 制图中的显示屏上测出线段的长度), 其线段长度可以测量至百万分之一以上的精度, 因此用作图法求出的杆力大小, 其精度是很高的。将所有杆力算出后, 然后列表, 标出杆件受力大小、方向, 一般以力大小数字前为加正号(一般加号不标)为拉杆、负号(必须标出)为压杆。图 1-1-7 中还将杆力的大小直接标在配置图的杆件上, 这样看杆件受力就更清楚了。

从图 1-1-7 上看出, 其 D、G 在一点上, 即表示该 DG 杆力为零, 即无力杆。无力杆并不代表此杆是无用的, 它至少可以减小桁架受压上弦杆在桁架平面内的计算长度。

当桁架受力对称时, 如图 1-1-8 所示, 在桁架梁中间有一个集中载荷作用; 如图 1-1-9 所示, 在桁架梁中间有一个均布载荷作用(如桁架自重), 这种间隔非常多的桁架(实际工程上间隔比这还要多), 在作力图时, 可只画一半, 因为是对称的, 另一半的受力也就知道了。

集中移动载荷 100tf 作用在梁中间与梁自重的均布载荷, 可以分成两部分求解, 即集中载荷与自重均布载荷, 分别用图解法求出的杆力, 然后进行叠加, 如图 1-1-8(移动载荷在梁中间)和图 1-1-9(梁自重的均布载荷)所示。

图 1-1-8 为移动集中载荷 100tf 作用在梁中间, 支座反力为 50tf 求解各杆力, 并将杆力直接标注在配置图的杆件上, 其中压力在力的数值前加负号, 这样就没有必要像图 1-1-7 那样将杆力再单独列表了。

画图 1-1-9 时, 梁自重 20tf 分布在 10 个间隔的 11 个节点上, 除两端节点为 1tf 外其他中部节点载荷均为 2tf, 两支座反力均为 10tf。

画图 1-1-10 时, 是将图 1-1-8 和图 1-1-9