

设计· DESIGN

结构

车建明 谢庆森 编著



 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

设计 · 结构

车建明 谢庆森 编著

 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

结构设计是产品设计中技术设计的一个重要环节,是涉及问题最多、最具体、工作量最大的工作阶段,是一种蕴藏着巨大优化和创新潜力的工作。它要求设计师掌握多门基础理论知识,更要求设计师具备丰富的工程知识和实践经验。本书内容主要包括:第1章结构设计导论;第2章结构设计的计算方法;第3章典型零件的结构设计;第4章方便制造与操作的结构设计;第5章结构创新设计;第6章反求设计与创新;第7章典型机械的创新与进化;第8章计算机辅助分析与设计。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

设计·结构/车建明,谢庆森编著. —北京:北京理工大学出版社,
2009.8

ISBN 978-7-5640-2347-8

I. 设… II. ①车…②谢… III. 产品-结构设计-高等学校-教材
IV. TB472

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 097974 号

出版发行/北京理工大学出版社

社 址/北京市海淀区中关村南大街5号

邮 编/100081

电 话/(010) 68914775(办公室) 68944990(批销中心) 68911084(读者服务部)

网 址/http://www.bitpress.com.cn

经 销/全国各地新华书店

印 刷/保定市中画美凯印刷有限公司

开 本/889毫米×1194毫米 1/16

印 张/8.25

字 数/189千字

版 次/2009年8月第1版 2009年8月第1次印刷

印 数/1~4000册

定 价/21.00元

责任校对/陈玉梅

责任印制/边心超

图书出现印装质量问题,本社负责调换

序 / PREFACE

设计是一种文化，是可以传承的，是连续的；设计是一种精神，是富有感染力的，是多元的。历史上，中国的“造物”文化在人类农耕时代和手工业时代物质生产领域里写下了最辉煌灿烂的篇章，无论是制陶、冶炼、制造还是建筑都彰显了中华民族的智慧与骄傲。然而当工业时代来临之际，代表着工业社会的一切先进的科学技术、全新的文化理念，不一样的社会价值观，快速来到我们国人面前时，我们这些“天工开物”的后代子孙们面对设计却显得如此的陌生和力不从心，在设计的目的、设计的价值、设计的责任等众多问题上尽存几多茫然、几多误解和几多失误。理清设计与工业、设计与艺术、设计与经济、设计与社会、设计与教育、设计与人类发展等各种关系，建立科学的设计理论体系已成当务之急。

在设计领域里几十年的摸爬滚打和不断自省之余，中国设计师对自己所扮演的角色逐渐看出端倪，越发的体会到在这个日益开放、多元、交流的世界体系中，作为这个物质世界载体的最初企划，设计者肩负了太多的责任与文化使命，并深深地领悟到所扮演的不再是工匠、美工，而时代赋予设计师最严肃的冠名——思想者。作为设计师，首先应该具备的是工业社会所需要的人文素质，要以国际眼光来思考我国未来的现代工业建设，成为具有工业社会的正面的价值观念、社会道德、社会群体思维和行为方式的人。

设计是关于生活的哲学，它涉及人与物之间的平衡，人与自然之间的平衡，自然科学与人文科学之间的平衡，经济、物质发展与文化、精神发展之间的平衡。设计师要有大“爱”之心，正如西安交通大学李乐山教授所讲：“工业设计不是设计师个人的激情活动，而应当具有哲学思考能力、文化意识、社会责任感和设计伦理。”“工业设计是以开拓创新思维方式来规划工业时代的未来社会。”针对不同历史时期不同的社会焦点，建立与之相对应的设计思想体系是一个不断实践、不断探索、不断完善的艰苦过程。如果说我们现在所做的一些工作能对工业时代的设计理念创新有所裨益，则感到无限的欣慰。天津大学的老师们所编写的一套工业设计丛书是以人文科学中的社会学、心理学、认知学为依据探讨设计各领域分支的前沿思想和理论体系。力图在体现中国文化的前提下补充和完善工业设计技术。这仅仅是一个开始，如果是一个可以引导和吸引更多的有识之士加入进来的开始，那就是我们巨大的成功。

天津大学机械工程学院教授

许秋霖

目录 / CONTENTS

第 1 章 结构设计导论	1	4.7 宜人结构设计	61
1.1 结构设计概述	1	第 5 章 结构创新设计	64
1.2 结构设计的特点	1	5.1 结构的演绎创新设计	64
1.3 结构设计的要求	4	5.2 零件功能的创新设计	67
1.4 结构设计的基本原则和步骤	5	5.3 材料变异创新设计	72
第 2 章 结构设计的计算方法	7	5.4 提高性能的结构创新设计	74
2.1 机械结构的计算简图	7	第 6 章 反求创新与设计	77
2.2 结构承载能力的设计计算方法	12	6.1 概述	77
2.3 许用应力	14	6.2 反求设计的内容与过程	79
第 3 章 典型零件的结构设计	16	6.3 反求实例分析	84
3.1 壳体、箱体结构设计	16	第 7 章 典型机械的创新与进化	88
3.2 支撑件的结构设计	21	7.1 机床	88
3.3 连接件的结构设计	26	7.2 动力机	93
3.4 密封件的结构设计	39	7.3 机器人	96
3.5 传动件的结构设计	44	7.4 自行车	103
第 4 章 方便制造与操作的结构设计	54	第 8 章 计算机辅助分析与设计	107
4.1 铸造件的结构设计	54	8.1 有限元分析	107
4.2 模压件的结构设计	56	8.2 三维实体造型设计	116
4.3 注塑件的结构设计	57	参考文献	126
4.4 机加工件的结构设计	58		
4.5 装配输送的结构设计	58		
4.6 结构简化设计	59		

第1章 结构设计导论

如图 1-1 所示,在设计销钉定位结构时,必须考虑到销钉应易于从销钉孔中拔出,因此就有了把销钉孔做成通孔的结构、带螺纹尾的销钉(有内螺纹和外螺纹)的结构等。对于盲孔,为避免孔中封入空气引起装拆困难,还应该有通气孔。

如图 1-2 所示,采用径向锥销和半圆键加紧定螺钉的固定轴上零件的方法,在实际应用中都要求配作,在装配时,进行这些加工效率是比较低的,而采用轴用弹簧卡圈作轴向固定则要好些。

如图 1-3 所示的考虑节料的冲压件结构。可以将零件设计成能相互嵌入的形状,这样既不降低零件的性能,又可以节省很多材料。

如图 1-4 (a) 所示的零件采用整体锻造,加工余量大。修改设计后采用铸锻焊复合结构,将整体分为两部分 [见图 1-4 (b)], 下半部分为锻成的腔体,上半部分为铸钢制成的头部,将两者焊接成一个整体,可使毛坯重量减轻一半,机加工量也减少了 40%。

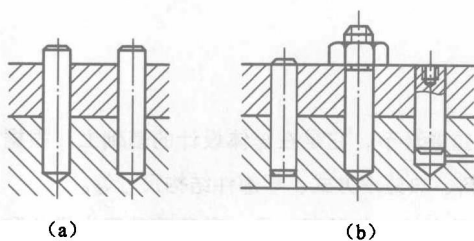


图 1-1 保证销钉容易装拆
(a) 错误结构; (b) 改进结构

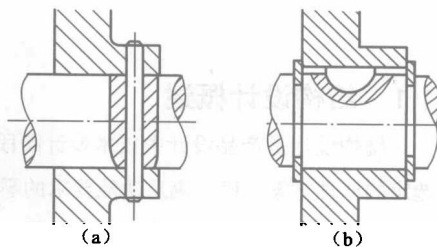


图 1-2 轴毂连接的结构
(a) 较差结构; (b) 改进结构

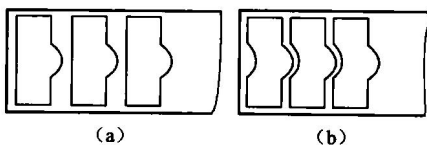


图 1-3 考虑节料的冲压件结构
(a) 较差结构; (b) 改进结构

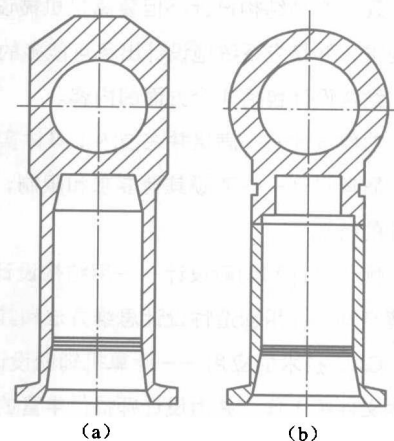


图 1-4 锻件改为铸锻焊结构
(a) 较差结构; (b) 改进结构

2. 细节性特点

结构设计是一种细节性设计。与原理方案设计相比,结构设计是通过许多细节设计来兼顾产品的各种要求,细节的总和就是质量,现代技术产品的竞争焦点不是其工作原理,而是产品的技术指标。

细节不是无关大局的小节。它的差别能导致整个产品的技术、经济性能的显著差异。结构细节决定了产品质量的高低。实际中,绝大多数机械故障和质量问题,不是因为工作原理,而是错误的或不合理的结构细节所致。结构上的细节缺陷可能导致整个零件难以甚至无法制

造和实现其功能。

细节并不简单,细节的改进也不是唾手可得的,需要设计者掌握相应的专业知识和实践知识。改进设计是一个需要亲自体验的渐进过程,理解别人的设计和自己亲自设计其难易程度是有天壤之别的。

如图1-5所示,为减小零件的加工量、提高配合精度,应尽量减少配合长度。如果必须有很长的配合面,则可将孔的中间部分加大,这样中间部分就不必精密加工,加工方便,配合的效果较好。

如图1-6所示,如零件两部分交接处有直角转弯,则会在该处产生较大的应力集中。设计时可将其直角转弯改为斜面和圆弧过渡,这样可以减少应力集中,防止热裂。

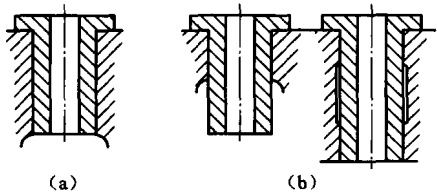


图1-5 注意减小加工面

(a) 较差结构; (b) 改进结构

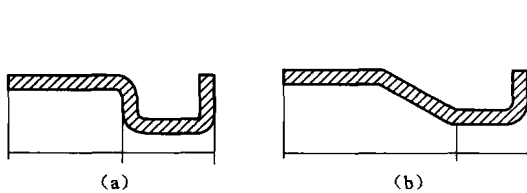


图1-6 避免较大内应力结构

(a) 较差结构; (b) 改进结构

如图1-7所示的凸缘,用的是先加工成整圆,切去两边再加工两端圆弧的方法。在零件的形状变化并不影响其使用性能的条件下,在设计时应采用最容易加工的形状。

如图1-8所示,螺纹孔孔边如果不倒角,则螺纹容易被碰坏,碰坏后易产生装拆困难,但如果将钉孔口倒角则可以避免。

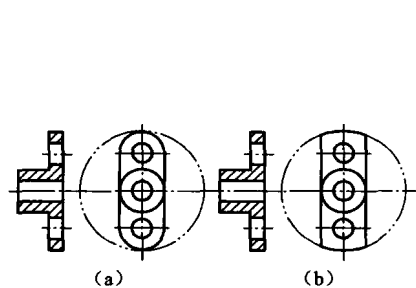


图1-7 凸缘结构

(a) 较差结构; (b) 改进结构

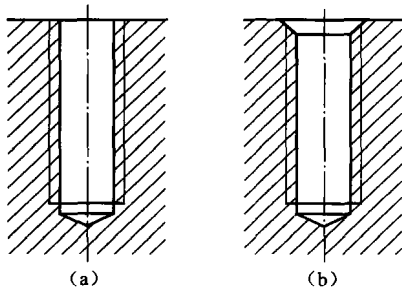


图1-8 螺纹孔结构

(a) 较差结构; (b) 改进结构

3. 多样性特点

通过改变零件结构本身的形态——形状、位置、数目、尺寸,零件的材料,零件间的连接方式、运动方式等,可以得到许多不同的机械结构方案。

满足同样功能的结构的多样性,得到一个尽可能大的结构设计方案解空间,是进行结构创新设计中的一个不可缺少的环节,是进行结构创新设计和优化设计的重要前提。

如图1-9所示即为改变零件结构本身的形态所得到的不同的滚动导轨结构方案。

4. 创造性特点

市场竞争日益激烈,需求向个性化发展,人们对产品质量的提高永无止境,因此,创新设计在现代产品设计中的作用越来越重要,并将是未来技术产品开发的竞争焦点。

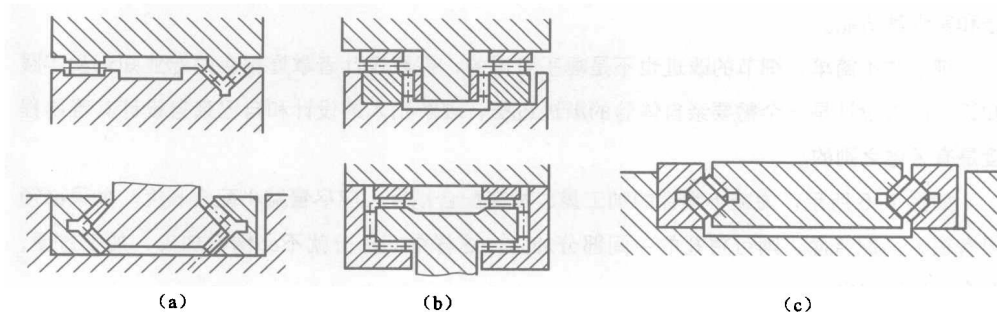


图 1-9 滚动导轨的结构形式

(a) 三角形滚动导轨；(b) 矩形滚动导轨；(c) 十字交叉滚动导轨

结构创新设计就是要构造出大量可供优选的可能性方法，即构造出大的优化求解空间，为优化设计提供依据，这是结构设计中最具创造性的地方。

创新设计是一种创造性的思维活动，运用创造性的思维方法能显著地提高产品设计师的创造设计能力。在对过去的经验和知识的分解和综合基础之上，充分发挥设计师的创造性能力，将会设计出性能更完善的产品。

基于上面对结构设计特点的分析可知，实践性特点是结构设计最基本的特点。设计师只有积累了一定的实践经验，才能从容地处理一些貌似细节的问题，才能充分理解结构设计的多样性问题，才能充分发挥设计师的创造能力。

1.3 结构设计的要求

结构设计过程要统筹兼顾多种技术、经济和社会的要求，即结构设计有很多实际限制。例如发动机，它不仅要满足将化学能转化为机械能这一功能要求，而且还要满足下列诸多要求：较少的制造使用费用、高的效率、较低的噪声、较低的有害物质排放、长的使用寿命、高的可靠性、小的体积、低的自重、便于制造、便于安装、便于检查、便于维护和修理、便于废品回收、便于资源再利用等。

结构设计对上述这些要求的满足程度决定了该产品的性能和市场竞争能力。这里将结构设计的众多要求概括为下列几类：和市场有关的要求、和环境有关的要求、和社会有关的要求、和生产有关的要求、和故障有关的要求。

1. 和市场有关的要求

市场的要求是最高要求，是结构设计、产品开发的最终归宿。结构设计者首先要弄清楚所设计的产品是为什么样特定的市场准备的，工业化国家和发展中国家，个人消费和集团消费所要求的重点是不同的。技术现状、竞争对手状况和市场需求是市场要求的重点。

2. 和环境有关的要求

这一要求有两方面：其一是产品对环境的影响；其二是环境对产品的干扰。技术产品在生产、使用和报废的全过程应对环境（人、动物、植物、空气、水、大地）不产生负担和损害。产品对环境的影响有噪声、辐射（热、光、无线电波、放射线）、振动和有害物质排放等。而技术产品遭受的干扰包括物理、化学或生物式的。物理式的干扰有空气潮湿、灰尘、脏物结垢、光、冷、热、静电聚集和重力变化等。化学式的干扰有腐蚀和氧化等。

3. 和社会有关的要求

技术产品是为满足人类社会的需求而开发生产的,因此它不能和社会的要求相违背。这些要求通常以规范、标准、规定、法律、专利等形式加以确定。产品设计一定要注意这些方面的要求和限制。

4. 和生产有关的要求

技术产品要开发、加工、储藏、运输和销售,这一系列过程中的很多要求必须在设计过程中考虑到。这些要求统称为生产要求,可分为下列几个方面:开发要求、加工要求、装配要求、检测要求、储存和运输要求、使用要求、保养要求、修理要求、回收要求、报废要求。

开发要求指产品开发部门要有对应的能力、经验和试制手段。

加工要求首先指产品可以通过现有的加工方法被加工出来;其次,这种加工方法要方便、可靠,特别是要尽量利用本企业的加工条件。加工要求可进一步分为工艺要求、公差要求和易被加工材料的要求。其中工艺要求又可分为冲压工艺要求、切削工艺要求、焊接工艺要求、锻造工艺要求和热处理工艺要求等。

对装配、检测、储存、运输的要求就是要求结构设计使这些过程成为可能,尽量使这一过程方便。

对于使用要求,首先应考虑到任何产品都不是孤立的系统,它必须和其他系统联系,即有接头和交接面问题。这种交接面既可能是技术系统之间,也可能是人一机之间。例如,机械连接、插头、离合器和管道等,功能数据如转矩、力、转速、电流强度、电压和频率等。使用要求还包括使用方便、食用安全、使用愉快。

对于保养修理要求指结构设计应使保养、修理的要求尽量低,即次数少、间隔长,也较方便。

回收报废要求是指产品不能作为原用途使用时,还可用于其他要求较低的场合,或其中部分系统可继续在其他场合利用。在完全丧失了使用功能以后,即报废以后,其材料应便于回收再利用,毫无利用价值的原材料应便于处理成对环境无负担的形式。

5. 和故障有关的要求

这一要求是指在结构设计阶段,应采用适当的防范措施,避免一些消极因素的产生,至少尽量避免这些消极因素的影响。消极因素包括摩擦、磨损、内应力、材料疲劳、老化、腐蚀、发热和热膨胀、蠕变、自振和共振、自重等。这里的关键是在结构设计阶段要能准确认识到可能发生的故障及其原因,因此,了解该产品的使用经验和工作环境条件非常有益。

1.4 结构设计的基本原则和步骤

影响结构的因素较多。完成不同功能的零件结构不一样,功能相同的零件的结构也千差万别。机械结构纷繁复杂,因此并没有一个统一的结构设计标准。

下面只是介绍一下结构设计过程的基本原则和基本步骤,这样可以对结构设计过程有一个大致的了解,当然不能按部就班地按基本步骤进行设计。

结构设计过程基本原则是:从内到外、从重要到次要、从局部到总体、从粗略到精细,统筹兼顾,权衡利弊,反复检查,逐步改进。

结构设计的基本步骤:

- ① 明确结构的主要任务和要求;

- ② 熟悉与待设计结构类似的已知结构;
- ③ 估算结构的主要尺寸;
- ④ 选择结构中相关的标准件、通用件等;
- ⑤ 用创新设计等各种方法系统地产生多个新方案;
- ⑥ 按技术、经济和社会指标评价, 选择最佳方案;
- ⑦ 寻找所选方案中的缺陷和薄弱环节;
- ⑧ 对照各种要求、限制, 从细节上反复改进;
- ⑨ 校核结构强度、刚度以及其他功能指标;
- ⑩ 绘制装配图及零件工作图;
- ⑪ 编写技术说明书。

下面举一实例来说明结构设计的过程。这里重点突出基本结构草图的设计过程, 其他设计步骤都略去。

例: 有两个壁厚分别为 δ 的直壁需用螺栓连接, 见图 1-10 (a), 试设计该螺栓连接结构。

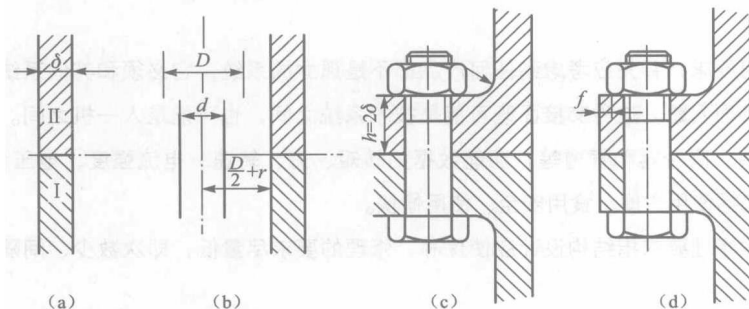


图 1-10 螺栓连接结构设计

解: 首先确定螺栓的直径 d 。 d 由螺栓所要承担的载荷根据计算或经验确定, 一般来说 $d=1.25\delta$, 然后确定螺栓离壁外表面的距离。为此, 需要先明确螺栓头的直径 D 、壁面和法兰过渡区半径 r 。 D 由 d 确定, 有标准可查。 r 根据经验约为一半壁厚。所以螺栓轴心到直壁外表面的距离是 $\frac{D}{2}+r$, 见图 1-10 (b)。接着确定法兰厚度 h , 这里取 $h=2\delta$, 这样便可按标准画螺栓和螺母, 见图 1-10 (c)。法兰宽度根据螺母、螺栓头大小以及一定的余量 f 确定, f 主要根据铸件精度和构件大小而定。螺栓和法兰之间要留有间隙, 具体数值根据规范确定。此外, 不要忘记倒角, 见图 1-10 (d)。

在结构设计过程中, 常常是先画特性面 (或工作面) 草图, 然后在特性面之间添加 “材料”, 从局部到整体逐步扩展设计。在此过程中, 可通过改变特性面的大小、方位, 连接件的数量、材料, 连接方式等, 不断比较各种可能的结构, 选择最佳方案。

第2章 结构设计的计算方法

2.1 机械结构的计算简图

实际的结构一般都很复杂, 想要完全按照结构的真实情况去进行分析, 往往很难办到, 对于少数问题也许有可能, 但从实际观点来看是没有必要的。因此, 对实际结构进行力学分析时, 总是需要做出一些简化和假设, 略去某些次要因素, 保留其主要受力特性, 从而使计算切实可行。这种把实际结构作适当简化, 用作力学分析的结构图形, 就称为结构计算简图, 或叫做结构计算模型。

一般说来, 在进行结构简化和假设时, 应当符合以下两条原则: 第一, 结构计算简图必须能够反映实际结构的主要受力特性, 确保计算结果可靠; 第二, 在满足计算精度要求的条件下, 结构计算简图应当尽量简单, 使得计算方便可行。

2.1.1 结构体系、构件以及构件间联系的简化

严格讲, 实际的结构都是空间结构, 然而, 对于绝大多数的空间结构, 其主要承重结构和力的传递路线, 大多是由若干平面组合形成的。由于平面力系的计算要比空间力系简单得多, 所以通常总是尽可能地把它简化为平面结构来计算。

对桁架结构, 在计算简图中杆件通常以其轴线来代表, 曲率不大的微曲杆件可以用直的轴线或折线段来代替。

结构中各杆件相互之间是通过“结点”连接的, 结点本身往往是很复杂的。但在计算时通常都简化为“铰结点”和“刚结点”两种。铰结点是指连接杆件的节点时光滑无摩擦的理想铰, 各杆可绕此铰结点作相对转动, 因此铰结点上的弯矩为零。当然无摩擦的理想铰在实际结构中是不存在的。但是当杆件的长度与直径之比较大时, 可以将结构中的结点简化为理想铰结点, 这样可使计算大大简化, 而所求得的主要内力基本上是符合实际受力情况的。由于真实结点与铰结点的差异, 发生在结点附近的附加弯应力与轴向应力想必是很小的, 在一般情况下可忽略不计。

1. 支座的简化

支座是用来支撑其他部件或零件的结构件。在传递力的过程中, 支座将承受支反力, 同时也阻止所支撑部件在支座方向上的位移。在工程实际中, 支座分为刚性支座和弹性支座,

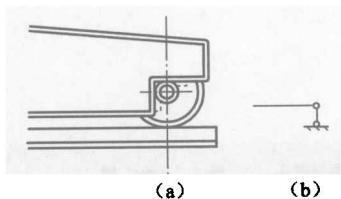


图 2-1 活动铰支座

(a) 桥式起重机横梁与车轮；
(b) 结构简图

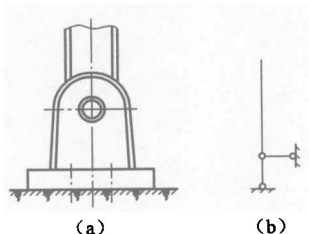


图 2-2 固定铰支座

(a) 支座；(b) 结构简图

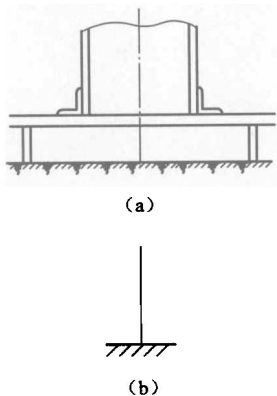


图 2-3 固定支座

(a) 固定支座实例；(b) 结构简图

刚性支座又分为 3 类。

(1) 活动铰支座

其特点是在支撑部分有一个铰结构或类似于铰结构的装置，其上部结构可以绕铰点自由转动，而铰结构又可沿一个方向自由移动。如桥式起重机横梁与车轮用轴相接，可以绕轮轴转动，车轮则可以在轨道上自由滚动 [如图 2-1 (a) 所示]。这种支座可以简化为活动铰支座 [如图 2-1 (b) 所示]，它产生垂直方向的支反力，其作用线沿着支座链杆方向。

(2) 固定铰支座

它与活动铰支座的区别在于整个支座不能移动，但是被支撑的部件可以绕一固定轴线自由转动 [如图 2-2 (a) 所示]，制作简图见图 2-2 (b)。支座反作用力通过支座铰点，其大小和方向由作用在所支撑的部件上的载荷所决定。

(3) 固定支座

这种支座的特点是，当部件或零件用这种支座与基础或其他部件相连接后，支座所支撑的部件或零件不能转动或移动。固定支座的实例见图 2-3 (a) 所示。图中上部分用焊接方法固接于基础上，支座简图见图 2-3 (b)。支座反力除具有支反力外还有支反力矩。

以上为刚性支座的 3 种基本形式，当支座的位移和支反力不处于同一平面时，称为空间支座。

在实际结构中，经常会遇到支座结构在外载荷作用下产生较大的弹性变形，这种情况下的支座称为弹性支座。

同一空间支座，在分解成平面结构进行分析时，支座的形式有可能是不一样的。如塔式起重机臂架的根部通过转轴与塔架相连 [如图 2-4 (a) 所示]。在臂架起升平面，由于臂架根部可以绕轴 O 点转动，不能承受弯矩，这时就可以认为是固定铰支座。而在回转平面，由于两铰点作用，可以承受绕垂直轴的弯矩，一般可以作为固定端处理，整个臂架就是悬臂梁 [如图 2-4 (b) 所示]。

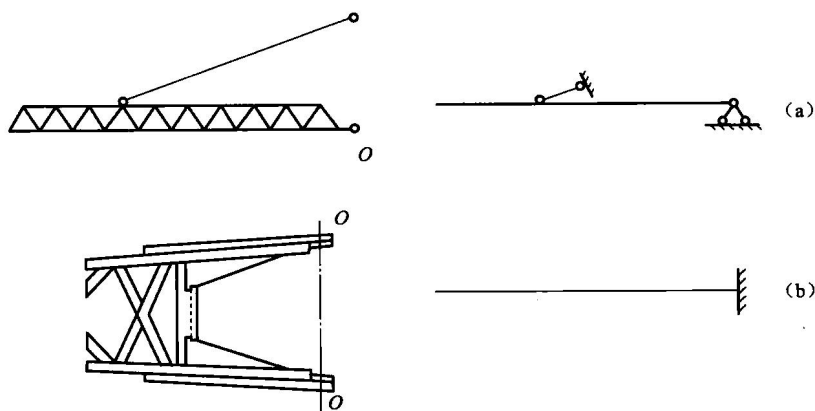


图 2-4 塔式起重机臂架的结构简图

(a) 起升平面计算简图；(b) 回转平面计算简图

即使对同一平面的支座，有时针对分析对象的不同，也有可能取两种支承形式。对于图 2-5 (a) 龙门起重机，在分析时可以取图 2-5 (b) 和图 2-5 (c) 两种支承形式，它们在实际中都可能出现，结构的内力分布是不一样的。在图 2-5 (b) 的情况下，横梁的弯矩较大。

在图 2-5 (c) 的情况下, 支腿中的弯矩较大。所以对以上两种情况都应进行计算。

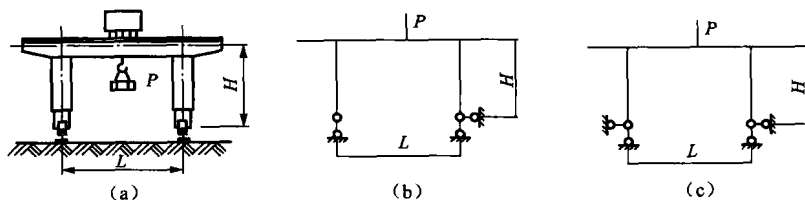


图 2-5 龙门起重机

(a) 实物图; (b) 支承形式之一; (c) 支承形式之二

在对结构加约束时, 还应该注意分析约束对结构所产生的反力特征。如载重汽车的车架中, 与前车轮相连的前悬挂采用纵向滑轮式结构的钢板弹簧。见图 2-6 (a), 前车轮和钢板弹簧都表现为弹性元件。由于前悬挂的对称性, A 与 B 处所受垂直反力基本相等。在计算车架时, 若简单地如图 2-6 (b) 所示在 A, B 两点加弹性支座, 这样, A 处和 B 处的垂直反力不可能相等。这时, 可以如图 2-6 (c) 所示加约束, 即前悬挂 (钢板弹簧) 用变截面梁来模拟, 轮胎则在垂直方向用弹性支座模拟, 纵向与横向可以用活动铰支座模拟。

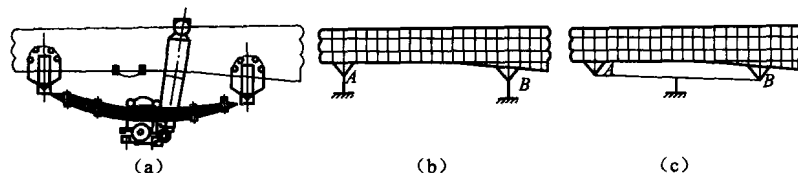


图 2-6 车架

(a) 实物图; (b) 结构简图之一; (c) 结构简图之二

另外, 在实际结构中, 由于钢板弹簧的前端为固定铰链, 后端可在支架内纵向移动, 所以图 2-6 (c) 中, 模拟钢板弹簧的变截面梁在 A 和 B 两端的转动自由度均应释放, 同时在 B 端的轴向位移自由度也应释放。这样处理基本可以反映车架前端的支承情况。

确定支承形式后, 一般可以直接沿相应的坐标轴方向加约束 (包括弹性约束)。但是对与坐标轴不平行的斜支座和弹性斜支座, 则不能简单地用坐标轴方向的约束替代, 而应以等效杆单元来模拟。

2. 载荷的简化

对机械与汽车结构进行分析时, 载荷通常是给定的。根据不同的计算工况确定载荷, 是保证分析计算结果反映工程结构实际情况的前提。

由于计算上的需要, 载荷可以按不同的方法分类。

根据载荷在结构上的分布情况, 可以分为以下两种。

(1) 集中载荷

当外载荷作用在结构上的区域很小时, 可以认为这种载荷是集中载荷, 如龙门起重机的轮压, 塔式起重机臂架上变幅小车的轮压、吊重, 挖掘机的挖掘阻力等。在载重汽车中, 发动机的重力也是以集中载荷的形式作用在车架上的。

(2) 分布载荷

如果作用在结构上的载荷, 其位置是连续变化的, 即载荷作用在一定面积或一定长度上,

称其为分布载荷。如分布载荷的集中度是均匀的,则为均匀载荷。结构的自重、风载荷、由质量引起的惯性力等,通常都作为分布载荷。

根据载荷作用随时间变化的情况,可以分为以下两类。

(1) 静载荷

当载荷的大小、方向和作用点不随时间变化时,称为静载荷或固定载荷。如结构自重。

(2) 动载荷

当载荷的大小、方向和作用点随时间变化时,称为动载荷。其中,如仅仅是载荷的作用点随时间而变时,又常常称为移动载荷。动载荷作用在结构上时一般都是一个过程,如起重机吊重的离地起升过程。吊重由地面到离地、直到平稳上升,臂架结构将承受一个十分复杂的动载荷。又如汽车在正常行驶过程中突然制动,在制动过程中,汽车结构也将承受很复杂的动载荷。桥式类型起重机的起重小车的移动对主梁而言是典型的移动载荷。

机械结构承受的动载荷,其大小与变化情况不仅与施加的载荷本身有关,而且与承受载荷的结构刚度有关。在动载荷作用下的结构分析方法完全不同于静载荷作用时的分析方法。结构在动载荷作用下,经常发生结构振动现象,因此,动载荷作用下的分析比静载荷作用时要复杂得多。

在形成计算模型时,计算载荷组合一定要根据相应规范、标准所规定的计算工况来确定。对同一结构进行分析时,可以有多种计算工况,如对汽车起重机车架进行有限元分析时,臂架位置可以位于正侧方、正后方和在后支腿上方,这三种工况都应进行计算。因为它们都有可能使车价的应力分布出现最不利情形。

对同一结构进行分析时,针对不同部件的考核又有不同的载荷组合。如龙门起重机,在对主梁进行考核时,应把载荷作用在主梁跨中,这时主梁受力最大。而对支腿进行考核时,则应把载荷作用在支腿附近(自然应是小车能够行驶到的位置)。对这两种不同的载荷组合都应计算。

在确定计算载荷时,除根据不同工况计算实际载荷组合外,也常用单位载荷作用法。其方法是计算出同一工况中不同的载荷在单位值作用时的结果,然后根据实际工况的载荷直接把相应的计算结果加权叠加,从而得出实际工况下的结果。如对汽车起重机车架进行分析时,首先分别计算在回转中心作用单位垂直力、绕纵轴的单位弯矩和绕横轴的单位弯矩时的情形,然后计算出臂架在不同位置时的实际垂直力、绕纵轴弯矩和绕横轴弯矩,根据它们与单位力的权值把相应点的计算结果加权叠加,就可得出实际位移和应力值。

以上是有关形成计算简图(计算模型)的一般原则。应当指出,一个结构的计算简图并非永远是永远不变的。一方面,它将随着人们认识的发展、计算技术的进步以及不断放宽的简化要求,使计算简图更趋近于结构的实际工作情况。另一方面,也应因需要不同而异,例如,在结构初步设计时,为了粗略估算杆件的截面,可以选用比较简单的计算简图,而在正式设计时,则又采用比较复杂更能反映实际情况的计算简图作精确计算。

2.1.2 载荷及其组合

大多数情况下,产品的结构是承受载荷的。根据载荷的性质可划分为自重载荷、工作载荷、惯性载荷、冲击载荷、自然载荷以及其他载荷。根据载荷作用的概率可划分为基本载荷、附加载荷和特殊载荷。所有载荷并非始终作用在结构上,因此,在设计结构时通常根据各类

机械的实际工况，将载荷先组合，然后进行结构计算。

1. 载荷种类

工程机械常见外载荷分为5类。

(1) 自重载荷

自重载荷是指机械的结构、机构和电气设备等的重力。机械自重及其在各部件的分布在设计之前为未知数。由于结构自重载荷占了机械总重量的很大比例，因此，自重载荷的正确估定和计算十分重要。通常，可参考类型相似、参数相近的机械结构进行估算，或者利用一些经验公式（查相应设计手册）初步确定。有的机械（如起重运输机）金属结构的自重载荷也可根据类似结构的自重表查阅获取。经过估算或查阅后的自重载荷，在初步设计计算后再作修正。一般要求理论计算值与实际重量误差小于10%，若误差较大必须复算。

自重的分布根据结构形式而定。通常，板梁实体结构的自重视为均布载荷，桁架结构的自重可假定为均匀分布作用在桁架的结点上，机械装置及电气设备等的自重视为集中载荷作用在相应部位上。

机械非作业时，自重载荷为静态。当机械作业时，因结构振动自重载荷将产生动载效应。在结构设计时习惯上计入动载系统来考虑，即自重载荷乘上相应的载荷增长系数以反映自重载荷的动载效应。动载系数根据各种机械作业时振动状况而定，由相应机械设计手册查取。

(2) 工作载荷

机械结构在工作状态中承受的载荷称为工作载荷。工作载荷是结构主要承受的载荷。比如起重机的起升载荷、挖掘机的挖掘阻力和物料重量、装载机的铲装阻力和物料重量等。

由于机械作业时都存在较大振动，使结构产生附加的动应力，因此，在计算工作载荷时往往应考虑动载效应。比如，起重机械的起升载荷，在起重质量突然离地起升或下降制动时，结构将产生冲击振动，从而增大了起升载荷的静力值。计算时常用一个大于1的动载系数乘以起升载荷静值来表示，该动载系数可由理论计算和试验研究获得。

(3) 惯性载荷和冲击载荷

机械的惯性载荷和冲击载荷均属于动力载荷。惯性载荷又称惯性力。通常包括机械的变幅机构非稳定运动时作变速运动的质量惯性力、回转机构工作时回转质量的法向惯性力和回转机构非稳定运动时回转质量的切向惯性力、机械自身质量等的水平惯性力。冲击载荷是指运行机构沿道路或轨道行驶时，由于道路不平或轨道接头的影响，对结构产生的垂直方向的最大振动惯性力。

惯性载荷和冲击载荷均计入相应的动力系数，动力系数的确定根据各类机械的不同而不同。

(4) 自然载荷

自然载荷是指结构受自然环境因素影响所造成的载荷，如风、雪、冰、温度变化和地震等载荷。

上述载荷中除风载荷外，其余载荷对于常用机械而言，如用户无特殊要求，机构设计中一般不考虑。风载荷是自然载荷中的重要载荷，这是因为工程机械大多在露天作业，尤其是一些机械（如塔式起重机、龙门起重机等）高达几十米，受风载影响很大。因此，对起重机等类工程机械必须考虑风载荷的作用。

风载荷是大小和方向均为随机的水平力，由风压和受风物体的体型尺寸所确定。风压与风速和空气密度有关。风速变化不大的阵风视为静风压，用于一般起重运输机械设备的结构

计算。对于高耸起重机结构，还应计入风压脉动引起的结构风振。

(5) 其他载荷

其他荷载包括结构在运输或安装过程中产生的震动冲击力、捆扎力、吊装力等特殊载荷；机械偏斜运行时，轨道作用在车载上的水平侧向力；机械试验时的试验载荷等。

2. 载荷组合

上述载荷都是随机变量，对结构的作用也是随机过程。根据这些载荷的不同特点以及载荷出现的频率程度，可分为3类。

(1) 基本载荷

始终和经常作用在结构上的载荷，包括自重载荷、工作载荷、惯性载荷和冲击载荷；

(2) 附加载荷

机械在正常工作状态下结构所受到的非经常性作用的载荷，包括工作状态下作用在结构上的最大风载荷、机械运行过程中引起的水平侧向力等；

(3) 特殊载荷

机械处于非工作状态或试验状态下的载荷，包括非工作状态下最大风载荷、安装载荷、试验载荷、碰撞载荷和湿度载荷等。

所有的各种载荷，不可能同时作用于结构上，因此，在结构设计时，应根据各种机械的实际工况，将可能同时作用在机械结构上的载荷进行合理组合，然后进行结构计算。

各类工程机械的载荷组合是不同的。如按《起重机设计规范》要求，起重机械结构分为3类载荷组合。

(1) 第一类载荷组合

第一类载荷组合仅考虑基本载荷。这一组组合是起重机最多有两个机构同时处于非稳定状态。该组合用于对结构进行疲劳计算。

(2) 第二类载荷组合

第二类载荷组合考虑基本载荷和附加载荷同时作用。这一组合是起重机结构正常工作状态下具有可靠的强度和稳定性的重要设计载荷。该组合用于对构件和机构零件进行强度、稳定性和刚度计算。

(3) 第三类载荷组合

第三类载荷组合考虑基本载荷和特殊载荷同时作用，或基本、附加与特殊载荷同时作用。产生此类载荷组合时，起重机是处于非作业状态。该组合用于验算露天作业的起重机结构的最大静强度、弹性稳定性和整机倾覆稳定性。

2.2 结构承载能力的设计计算方法

结构计算的目的是保证结构在载荷作用下安全可靠地工作，既要满足强度、稳定性、刚度等条件，又要符合经济要求。根据计算中安全系数处理方法的不同，结构的计算方法分为许用应力法和极限状态法两种。

2.2.1 许用应力法

机械结构直接承受变化很大的动载荷和反复载荷。一般情况下，不考虑钢材的塑性变形，即以钢材弹性阶段为计算依据，结构的极限应力不得超过屈服极限。