

JIXIE JIEGOU SHEJI ZHUNZE

机械

YU SHILI

结构设计

◆ 吴宗泽 主编

准则与实例



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

# 机械结构设计准则 与实例

吴宗泽 主编



机械工业出版社

本书共七章,详细地介绍了机械结构设计的基本要求和准则。内容包括:机械结构设计概论,提高强度、刚度和延长寿命的结构设计准则,提高精度的结构设计准则,符合人机工程学设计准则、避免或减小对人类损害的结构设计准则,改进零部件结构工艺性的结构设计等。书中配有大量的结构设计实例及案例分析,更便于理解和应用。

本书适合从事机械结构设计的工程技术人员和高等院校相关专业师生参考和使用。

## 图书在版编目(CIP)数据

机械结构设计准则与实例/吴宗泽主编. —北京:机械工业出版社, 2006.3

ISBN 7-111-18789-X

I. 机… II. 吴… III. 机械设计:结构设计  
IV. TH122

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 026438 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:曲彩云

责任编辑:白刚 版式设计:张世琴 责任校对:程俊巧

封面设计:张静 责任印制:洪汉军

北京京丰印刷厂印刷

2006 年 5 月第 1 版·第 1 次印刷

890mm × 1240mm A5 · 10.5 印张 · 308 千字

0 001—5 000 册

定价:28.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68326294

编辑热线电话 (010) 68351729

封面无防伪标均为盗版

# 前 言

机械结构设计是机械设计的重要组成部分，没有结构就没有机器。使用者注意的是机器的功能和性能，而对于设计和制造者，他们设计和制造的是一套机械结构，而这套结构具有能够满足使用者要求的功能和性能。所以结构是把设计—制造—使用者联系起来的纽带，是设计、制造、使用的具体对象，是使用性能的物质承担者。各种分析、计算、试验的目的，都是为了把结构设计制造得更好，他们的工作最后都要落实在结构设计上面。

但是许多机械设计教学的重点往往在分析和计算方面，在这方面花费了大量的时间和精力，而对结构设计注意相对不足。其原因之一是理论计算系统完整，运用了数学、力学等基础，容易教授和理解，而结构设计涉及的问题很多，影响因素广泛，具体规律总结得不够完整，有关知识较难总结和传授。我曾经多次听到我国著名机械工程专家雷天觉院士谈到机械设计应该加强综合，而目前注意分析过多。这的确是这位经验丰富的专家的经验之谈，也是我的导师郑林庆教授多年来一直主张的观点。我在多年从事机械设计教学、研究等工作中深深体会到这些老专家的观点具有很大的指导意义，对我的成长和发展起了很大的指导作用，终生受用不尽。

这本书就是我这些年来参加生产、研究、教学、审查设计和阅读有关国内外资料的回忆、归纳、综合和总结。

我认为结构设计和理论计算不是对立和矛盾的，正是有了一定的理论基础才能够更深刻地理解结构设计中发现的问题和设计经验，并能够“举一反三”，把个别的经验或现象变成有用的规律和知识，指导解决更多的设计问题。

我在写本书的时候，回忆了很多自己的亲身经历，当时的种种猜测和分析经过实际的检验而得到正确的解决，这些由实践得到的知识终身难忘，至今回忆起来仍然是十分生动、具体，回味无穷。这些只

## IV 前 言

---

能在本书中作出最基本的介绍，希望读者从本书中受到一些启发，在自己的工作实践中不断总结提高，与时俱进，逐渐积累丰富的经验，成为一个熟练的机械设计工程师。希望读者不要把本书作为机械结构设计知识的汇编，而是从中体会到学习和积累机械结构设计知识和能力的方法和途径，也许这样会得到更好的效果。

参加本书编写的有：卢颂峰、冯中鎏、高志、刘莹、刘向锋、肖丽英、滕启、王忠祥等。

本书编写时间匆匆，有些地方可能考虑不够全面，分析不够深入，甚至有错误，希望各位读者不吝指正，并致感谢。

编 者

2006年4月

# 目 录

## 前言

<b>第一章 机械结构设计概论</b> .....	1
第一节 机械结构设计的任务和工作内容 .....	1
第二节 机械结构设计的基本条件和要求 .....	5
第三节 机械结构设计的准则 .....	8
第四节 机械零件的自由度分析——满足 运动要求的结构设计准则 .....	9
第五节 机械结构方案设计的技巧 .....	19
第六节 结构方案的选择和评价 .....	30
第七节 机械结构设计发展简史 .....	39
<b>第二章 提高强度、刚度和延长寿命的结构设计准则</b> .....	45
第一节 机械结构合理受力的准则 .....	45
第二节 提高静强度的结构设计准则 .....	54
第三节 提高疲劳强度的结构设计准则 .....	63
第四节 提高接触强度的结构设计准则 .....	82
第五节 提高抗冲击强度的结构设计准则 .....	91
第六节 提高刚度的结构设计准则 .....	96
第七节 提高耐磨性的结构设计准则 .....	107
第八节 提高抗腐蚀性的结构设计准则 .....	114
<b>第三章 提高精度的结构设计准则</b> .....	119
第一节 概述 .....	119

第二节	阿贝 (Abbe) 原则——被测尺寸 与读数尺共线准则 .....	120
第三节	误差补偿准则 .....	122
第四节	传动机构误差传递准则 .....	127
第五节	误差均化原理——采用多点接触提高精度准则 .....	129
第六节	误差合理配置准则 .....	134
第七节	消除空回准则 .....	135
第八节	选用适当的材料准则 .....	137
<b>第四章</b>	<b>符合人机工程学设计准则 .....</b>	<b>138</b>
第一节	基于人体形态学的设计准则 .....	138
第二节	基于人体感觉器官要求的设计准则 .....	143
第三节	基于人体力学的设计准则 .....	150
第四节	按美学造型要求的人机学设计准则 .....	152
<b>第五章</b>	<b>避免或减小对人类损害的结构设计准则 .....</b>	<b>156</b>
第一节	机械结构设计的安全准则 .....	156
第二节	减小机械噪声的结构设计准则 .....	158
第三节	绿色设计准则 .....	162
第四节	提高舒适性的结构设计 .....	164
<b>第六章</b>	<b>改进零部件结构工艺性的结构设计 .....</b>	<b>165</b>
第一节	概述 .....	165
第二节	铸件的工艺性 .....	166
第三节	焊、粘、铆件的工艺性 .....	173
第四节	锻造零件的结构工艺性 .....	182
第五节	冲压零件的结构工艺性 .....	188
第六节	工程塑料零件的工艺性 .....	191
第七节	机械加工件的结构工艺性 .....	192
第八节	机械零部件装配的工艺性 .....	196
第九节	机械零件修配的工艺性 .....	198

---

第十节 考虑回收的结构工艺性 .....	199
<b>第七章 结构设计实例 .....</b>	<b>201</b>
第一节 机械系统方案的结构设计 .....	201
第二节 连接件结构设计 .....	209
第三节 传动件结构设计 .....	221
第四节 减速器结构设计 .....	230
第五节 滚动轴承部件的结构设计 .....	246
第六节 滑动轴承结构设计 .....	280
第七节 导轨结构设计 .....	301
第八节 大型机械零件结构设计 .....	313
<b>参考文献 .....</b>	<b>323</b>



# 第一章 机械结构设计概论

## 第一节 机械结构设计的任务和工作内容

机械设计的过程可以分为以下几个阶段：

(1) 调查决策阶段 根据市场需求、用户委托或主管部门下达的任务，进行可行性研究和专家听证会确定设计任务，制定设计任务书。

(2) 研究设计阶段 提出机械的工作原理，进行必要的分析比较，确定最佳的总体方案。

(3) 技术设计阶段 进行设计计算和结构设计，完成全部设计图样和技术文件（包括设计说明书、使用说明书等）。

(4) 试制阶段 通过试制和试验，必要时先制造样机，经过一次或多次的改进，才能得到性能稳定、能够投放市场的产品样机。

(5) 生产销售阶段 正式进行批量生产，投入市场，并在生产和使用中继续不断改进和提高产品的质量。

机械结构设计的任务和工作内容是：在机械整体方案确定以后，采用各种方法，确定机械零部件所采用的原理、形状、构造、材料、尺寸公差等，并将设计结果表现为生产图样或生产机械所需的全部技术资料。它的主要工作是在技术设计阶段。

但是以上各阶段的工作是互相密切联系、互相影响的。在某一阶段进行中或完成以后，在后续工作中都可能发现前面的工作局部甚至全部有不当之处，会有局部或全部的否定，进行重新设计，这在机械设计工作中是会经常遇到的。例如，在结构设计时可能发现原来制定的方案有局部甚至根本的不合理，需要修改。在加工、装配、使用、维修的过程中，改进产品结构，修改设计，也是机械设计不可忽视的必要工作。正是由于机械设计中的不断反复，才使其设计结果达到最优。因此，在机械设计中前面的设计工作也常常考虑后面的工作要求，例如总体方案设计时，经常要考虑一些主要结构设计的重要问

## 2 机械结构设计准则与实例

题，以避免或减少工作的反复，加快设计进度。因此在实际工作中，设计的几个阶段互相联系，不能简单地划分和隔离。

因此，结构设计在机械设计中是一个十分重要的组成部分。这是因为：

1) 产品设计是否成功在于它的使用性能能否满足使用者的要求，而产品的性能是通过产品的结构体现出来的，或者说是产品的结构所具有的。产品的结构是其性能的物质基础。没有正确的结构设计，就不可能得到具有符合性能要求的产品。

2) 机械产品生产面对的是产品的结构，加工机械产品就是要生产出具有合格结构（如形状、尺寸、精度、表面粗糙度、材料、硬度等）的产品。

3) 机械设计的结果表现为其结构（如图样），计算、实验和分析是为了提高结构设计的质量而采用的，都可以看作是提高结构设计质量的手段。

4) 在机械设计中，结构设计实际上贯穿机械设计的整个过程，所花费的时间常需占据最大的部分，在许多情况下，它能直接决定设计的成败。

5) 虽然结构设计是在总体方案确定以后进行的，但是确定总体方案时往往不得不考虑结构设计的一些重要问题。如主要零件的制造工艺，大型零件的加工和运输是否能够解决等，作为有关方案是否能够成立的一个重要条件。

所以，可以说结构设计组成机械设计的核心和主体部分。

### 【案例分析 1.1】 中华世纪坛的总体设计<sup>[6]</sup>

中华世纪坛是北京市迎接 21 世纪的建筑工程，以《易经》中的“天行健，君子以自强不息。地势坤，君子以厚德载物”的思想作为展示中华民族精神的依据。为此要求重达 3000t、直径 47m 的代表“天”的圆坛以 4~6h 一周的速度转动。对于这一工程，提出了三个传动方案。

(1) 水浮卸荷方案（图 1-1） 该方案中，旋转圆坛下部为一直径 35m 的圆筒，放在直径 36m 的水槽中，圆筒底部距水槽 0.8m，水槽内水深 2.5m。由水承载旋转圆坛 95% 的重量，其余 5% 则由承载

滚轮支持。由于水的摩擦阻力非常小而承载能力大，所以对传动和支撑装置的要求相应较低。此方案设计新颖，转动灵活，平稳性好。但其不足之处是：水槽占据一定高度（中华世纪坛总高度有很严格的限制），水在冬天会结冰，夏天会发臭（都可以采取一些防止措施），遇地震等情况容易被破坏，如水池裂开而漏水等。

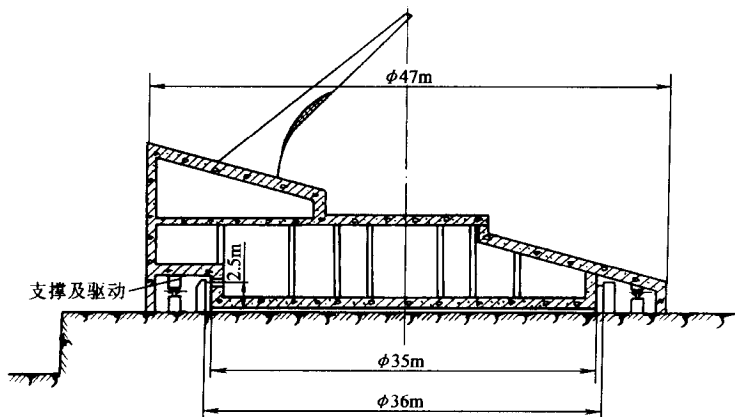


图 1-1 中华世纪坛水浮卸荷方案

(2) 摩擦传动方案（图 1-2） 该方案旋转圆坛由三圈共 296 个直径 1m 的塑料轮支持，在旋转圆坛下面有一钢圈，用摩擦轮驱动钢圈。这一方案的优点是：用塑料轮承载，用钢圈和摩擦轮传动，两种功能分开安排，符合“功能分担”的设计原理。其难点是塑料承载轮有老化问题，支撑面很大而其平面度加工要求高，有一定难度，拖动钢圈的圆度和与回转中心的同心度也是加工的难点。

(3) 钢轮支撑与驱动方案（图 1-3） 在直径为 13.6m 和 39m 的内环和外环圆周上分别安置 32 台和 64 台车组，每车组有 2 个钢制车轮，车轮直径 600mm，宽度 160mm。旋转圆坛有中心圆筒，用 20 个滚轮作中心定位。外圈车轮有 16 个驱动轮，各由电动机、减速器、离合器、万向联轴器和驱动车轮组成，用电气控制解决各驱动电动机均载问题。这一方案的优点是结构原理明确，便于加工，安装、使用、管理简单。

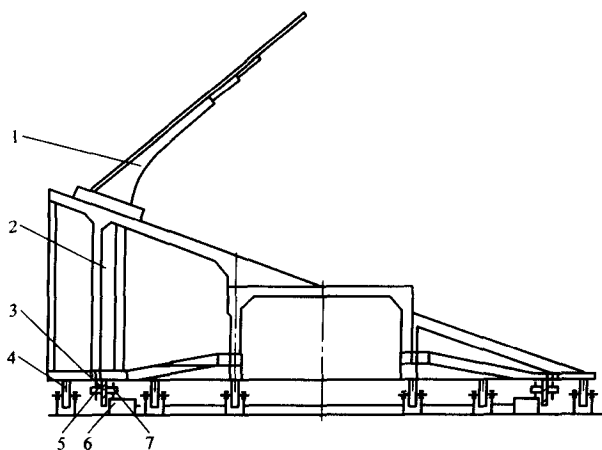


图 1-2 中华世纪坛摩擦传动方案  
 1—时空探针 2—钢结构 3—钢圈 4—塑料轮  
 5—压紧轮 6—传动装置 7—摩擦轮

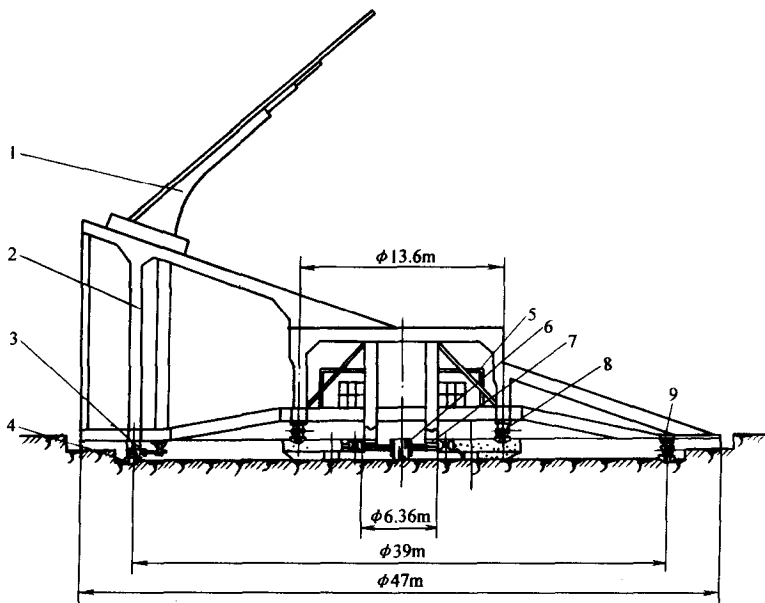


图 1-3 中华世纪坛钢轮支撑与驱动方案  
 1—时空探针 2—钢结构 3—驱动车组 4—外环导轨 5—环形控制室  
 6—导电滑环 7—中心定位筒 8—内环车组 9—外环从动车组

以上三个方案是以竞标的方式由不同的单位提出的。聘请专家对以上方案进行分析比较和讨论,向提出方案的单位提出问题,由各单位把提出的方案逐渐深入和明确,其优缺点也充分地专家和主持该项目的单位所掌握,经全面和仔细的分析比较,确定选用方案3。

在方案确定以后,随着设计和施工的进展,为了确保设计的可靠实现,专门进行了实验室实验和现场测试,证明了此方案切实可行。

**【讨论】** 在这一意义重大的机械设计中,充分分析比较了各种方案,选择了最优的结构方案,为了保证有足够的拖动力,使旋转圆坛能够顺利地转动,进行了摩擦力、拖动功率等多项实验,使该方案有了可靠的基础,使设计的关键——保证圆坛转动,能够顺利地实现。最后保证了中华世纪坛在21世纪到来之前,屹立在北京,安全可靠的运转。这是一个慎重选择总体方案,紧紧地抓住关键问题,使一个意义重大的设计项目获得成功的典型实例。

## 第二节 机械结构设计的基本条件和要求

进行机械结构设计必须清楚地了解对结构设计的全部要求和条件。如果设计师参加或主持了调查决策和制定总体设计方案的全过程,就对结构设计的要求有了清楚的了解。如果没有参加上述过程,在开始进行结构设计以前,必须仔细了解下列几方面的基本要求和条件:

### 1. 机械系统的功能要求

1) 设计的机械系统应具有的功能及其各主要部分(如部件)应具有的分功能,总体和各部分的性能参数(如生产率、压力、运动范围、速度等)。

2) 输入或输出的能量、材料或信号的具体要求,如机床的精度、信号的信噪比、破碎块料的大小和形状、负荷的大小及其变化情况等等。

3) 对机械系统本身的具体要求,如机械本身的尺寸和重量的限制、寿命和可靠性要求等。

### 2. 使用者和环境条件

1) 环境影响。环境中的尘埃和砂石、海水、湿度、温度、气候(雨、雪、风、暴风等)、辐射、腐蚀性介质、电场、磁场等。

2) 物质条件。动力、燃料、原材料、润滑剂及各种辅料的供应情况。

3) 使用者的技术水平。操作者的技术水平和熟练程度, 保养、维护和修理的情况及技术水平等。

4) 使用者的经济条件。购置费、维护费用、材料和各项开支费用及使用本机械系统的经济效果。

5) 安全的条件。人身和健康的安全要求, 噪声和污染(排污)的允许界限。

6) 使用者的特殊情况。如某些国家、地区对不同颜色、造型的特殊爱好或禁忌等。

### 3. 工艺条件

1) 加工技术和设备的水平, 大型、精密设备的情况, 关键工艺的掌握情况, 掌握新工艺、新材料、新技术的情况等。

2) 标准化、系列化的情况。

3) 对保养维护、修理的要求和得到配件的条件。

### 4. 市场及其他情况

1) 当前市场上有无类似产品, 情况如何? 设计、生产该产品我们有什么优势?

2) 本产品涉及的技术是否有专利? 是否已有其他人掌握了有关的专利? 对本产品的开发和设计有什么影响?

3) 当前市场容量和今后的市场预测, 该产品今后发展的展望。

4) 国家对本产品的生产和使用有什么限制或要求?

5) 设计、生产的进度要求。

结构设计是机械设计的第三个阶段, 结构设计师应该对前面各阶段考虑的主要问题和设计意图有较全面的了解。这样才能充分发挥结构设计师的智慧和创造性, 把结构设计工作作为在前面创造性工作的基础上进一步创造的过程。此外, 还应注意各部分结构之间的互相配合, 以取得总体结构的最佳效果。必要时可能要修改甚至推翻前两个阶段的结论。

**【案例分析 1.2】** 制定设计任务书时缺乏调查、分析，导致设计失败

图 1-4a 所示为一冲床，用于薄板冲压，鉴于它重量较大，有人提出一种新结构。提出新结构的出发点是老式冲床的机架为 C 形，除拉伸应力以外，所受弯曲应力很大，导致机架重量增加。提出一种框架式结构（图 1-4b），冲压工作载荷由两个活动立柱承受，机架的重量可以减轻。

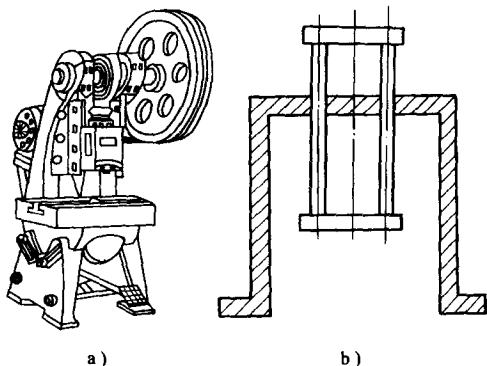


图 1-4 冲床的改进方案设计  
a) 普通冲床 b) 改进方案简图

实践结果证明，此改进设计不成功。主要原因有：

- 1) 采用双立柱结构以后，限制了工件的尺寸，不能冲压大型零件。由于冲床是一种通用的设备，要求使用性能较广泛。新设计只适用于冲压较窄的条形材料。
- 2) 由于新设计传动装置位于机床下面，使新机床工作台的高度尺寸比原设计高，使用时不方便，尤其在工件尺寸和重量较大时。
- 3) 新设计较多地考虑减轻重量，而机架的刚度较差，在机械加工时，机架有颤动。

**【讨论】** 此项设计不成功的原因是没有按照机械设计的规定步骤开发新产品。首先，没有明确新机床的使用条件和使用要求，由结构强度合理方面考虑多，而对一般冲床的使用要求调查研究不足，不明确要设计一台专用于条形材料冲压的专用冲床还是一台通用冲床。对冲床工作台高度的限制没有预先提出明确的要求。其次，对加工底面时，机架要倒放在刨床上面，两个腿为薄板结构，会发生颤动预计不足。事后总结才认识到，由于工作中的严重不足，该项设计不成功是必然的。

### 第三节 机械结构设计的准则

进行机械设计工作的现代工程师应具备三个方面的知识：基础理论、工程知识和实际经验。必须把以上三方面的知识互相融合，才能达到不断积累，灵活运用，指导设计的作用。建立“结构设计准则系统”是实现这一想法的现实而合理的途径。杨文斌在《机械设计》杂志上面发表了他建立的“结构设计准则系统”，包括：

- 1) 符合防腐要求的结构设计准则。
- 2) 符合工艺特性的结构设计准则。
- 3) 符合材料特性的结构设计准则。
- 4) 符合装配特性的结构设计准则。
- 5) 符合功能要求的结构设计准则。
- 6) 符合环保要求的结构设计准则。
- 7) 符合安全要求的结构设计准则。
- 8) 符合可靠性要求的结构设计准则。
- 9) 遵循力学原理的结构设计准则。
- 10) 遵循美学原理的结构设计准则。
- 11) 遵循生理学原理的结构设计准则。
- 12) 遵循经济学原理的结构设计准则。

其中有一些项目还可以分为若干子项目，如“符合工艺特性的结构设计准则”下面有焊接、铸造、锻造、冷冲压、切削等设计准则。

本书则按照设计要求提出另外的设置设计准则的系统。查用方便。如：

- 满足运动要求的结构设计准则；
- 提高强度、刚度和寿命的结构设计准则；
- 提高精度的结构设计准则；
- 提高抗腐蚀性的结构设计准则；
- 降低噪声的结构设计准则；
- 绿色结构设计准则；
- 提高工艺性结构设计准则；
- 按照“结构设计准则”的设计案例。



## 第四节 机械零件的自由度分析——满足运动要求的结构设计准则

机械的基本性质之一是有确定运动，为此必须满足运动要求的设计准则。

常用的方法是机械零件的自由度分析方法，它与“机械原理”课程中讲的机构自由度有联系，但是有很大的不同。

### 一、机械零件的自由度

一个机械零件在空间有六个自由度，即沿  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  三个轴的轴移动和绕  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  三个轴的转动，如图 1-5a 所示。这六个自由度可以用简图 1-5b 表示，三根空心坐标轴表示移动方向，未涂黑者表示可沿该方向移动，全部涂黑者表示沿该方向不能移动，一半涂黑者表示沿该方向可向一边移动，不能向另一边移动（参看图 1-6）。坐标轴端部的圆圈表示是否可以绕该轴自由转动，也用是否涂黑表示。

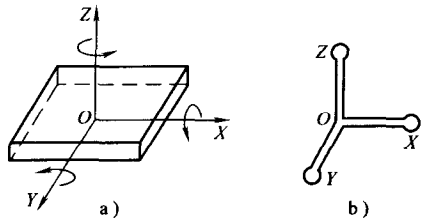


图 1-5 机械零件的自由度  
a) 零件自由度 b) 自由度简图

假设互相接触的零件都是刚体，在它们的接触部位是沿点、线或面接触，两零件之间的作用力沿法线方向，则常见的两零件之间的连接形式及其对自由度的约束如表 1-1 所示。

### 二、自由度分析在支承件设计中的应用

图 1-6a 中，两个轴承支持着一根轴，轴上有一轴肩，此轴只有一个绕  $X$  轴转动的自由度，沿  $X$  轴方向不能向左动，能向右动，因此其自由度简图如图 1-6b 所示。此结构如需设法消除沿  $X$  轴向右移动的可能性，可以另加一轴肩来解决（图 1-7）。支承面  $A$  相当于表 1-1 的结构 6，支承面  $B$  相当于该表中的结构 1。

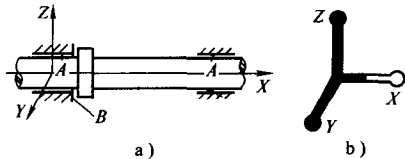


图 1-6 轴的自由度（一）  
a) 轴系结构 b) 自由度简图