



普通高等教育“十二五”规划教材

工程力学

Engineering Mechanics

郭光林 何玉梅 张慧玲 安逸 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

014061625

TB12-43

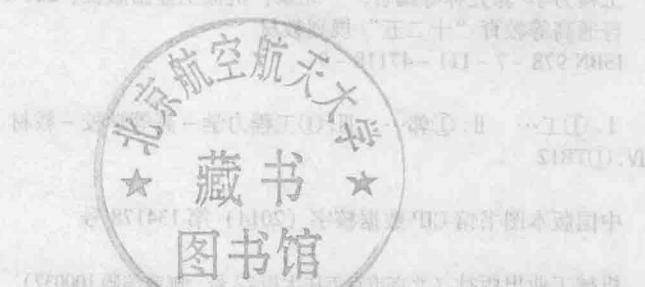
122

普通高等教育“十二五”规划教材

工程力学

郭光林 何玉梅 张慧玲 安逸 编著

试用 目录 索引 (CIS)



TB12-43

122

机械工业出版社



北航 C1748102

ESCALAOSIO

本书是为适应近年来由于高教改革，多数高校对工程力学课程的教学内容和学时数进行了调整这种新形势而编写的。

本书的主要特色有：突出基本概念，陈述简单明了；内容上由浅入深，循序渐进；形式上图文结合，力求清晰；注重将问题的分析与工程背景相结合，以提高学生的兴趣；增加了能量法一章，有助于培养学生应用能量法分析和解决问题的能力。全书共15章，主要内容包括：绪论、力的概念和物体的受力分析、力矩的概念和力系的等效与简化、刚体和刚体系统的平衡问题、材料力学的基本概念、轴向拉伸和压缩、剪切和挤压的实用计算、扭转、弯曲内力、弯曲应力和强度、弯曲变形和刚度、应力状态分析和强度理论、组合变形、压杆稳定、能量法、动载荷和疲劳强度等。

本书为高等学校本科工科各专业工程力学课程的教材，也可供独立学院、高职高专、成人高校师生及有关工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

工程力学/郭光林等编著. —北京: 机械工业出版社, 2014. 7
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978 - 7 - 111 - 47118 - 9

I. ①工… II. ①郭… III. ①工程力学 - 高等学校 - 教材
IV. ①TB12

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 134178 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：李永联 责任编辑：李永联 任正一

版式设计：霍永明 责任校对：张莉娟

责任印制：刘 岚

北京京丰印刷厂印刷

2014年9月第1版·第1次印刷

184mm × 260mm · 16 印张 · 387 千字

标准书号：ISBN 978 - 7 - 111 - 47118 - 9

定价：29.50 元

凡购本刊，如有读页、倒页、脱页，由本社负责赔偿。读者服务 网络服务

已婚服务社服务员

住服务一部：(010) 68361666
销售一部：(010) 68326294

销 售 部: (010) 88320294
锁 销 部: (010) 88370640

读者购书热线：(010) 88379023

读者购书热线：(010) 88579203

教材网 <http://www.ampedu.com>

教材网: <http://www.empedai.com>
机工官网: <http://www.wuchong.com>

机工官博：<http://weibo.com/cmp1952>

机工官博：<http://weibo.com/cmp1952>
封面无防伪标识为盗版

封面无防伪标均为盗版

Preface

“工程力学”是各高等学校工程类专业开设的专业基础课。近年来，随着高等教育改革的不断深化，多数高等学校对工程力学课程的教学内容及学时进行了调整，本书就是为了适应这种新的教学形势而编写的。

本教材的主要特色有：

- 1) 突出基本概念，陈述简单明了。在介绍力、力偶和力系规律时，既强调了空间概念，又突出了平面力系的特点及应用，使学生更易理解掌握。
- 2) 内容上由浅入深，循序渐进。由基本变形到组合变形，环环紧扣。
- 3) 形式上图文结合，力求清晰。
- 4) 注重将问题的分析与工程背景相结合，例题和习题尽可能提取工程问题，以提高学生的学习兴趣。
- 5) 有别于许多同类教材，本书增加了能量法这一章，有助于培养学生应用能量法分析和解决问题的能力。

本书由何玉梅编写第1~第3章；张慧玲编写第4~第10章；郭光林编写绪论、第11~第15章；安逸编写附录A、B，并承担书中部分插图的绘制工作。

由于编者业务水平所限，书中不足之处在所难免，恳请读者批评指正。

编 者

1	绪论
2	第1章 平面假设与静力学公理
3	第2章 力系的简化与平衡条件
4	第3章 平面力系的平衡
5	第4章 平面内力系
6	第5章 平面弯曲
7	第6章 常规杆件
8	第7章 弹性力学基础
9	第8章 杆件的强度
10	第9章 杆件的刚度
11	第10章 杆件的稳定性
12	第11章 能量法
13	第12章 组合变形
14	第13章 斜弯曲
15	第14章 拉压弯曲
16	第15章 扭转
17	第16章 弯曲与扭转的组合
18	第17章 静定梁
19	第18章 静定拱
20	第19章 静定刚架
21	第20章 静定平面桁架
22	第21章 静定平面刚架
23	第22章 静定平面刚架
24	第23章 静定平面刚架
25	第24章 静定平面刚架
26	第25章 静定平面刚架
27	第26章 静定平面刚架
28	第27章 静定平面刚架
29	第28章 静定平面刚架
30	第29章 静定平面刚架
31	第30章 静定平面刚架
32	第31章 静定平面刚架
33	第32章 静定平面刚架
34	第33章 静定平面刚架
35	第34章 静定平面刚架
36	第35章 静定平面刚架
37	第36章 静定平面刚架
38	第37章 静定平面刚架
39	第38章 静定平面刚架
40	第39章 静定平面刚架
41	第40章 静定平面刚架
42	第41章 静定平面刚架
43	第42章 静定平面刚架
44	第43章 静定平面刚架
45	第44章 静定平面刚架
46	第45章 静定平面刚架
47	第46章 静定平面刚架
48	第47章 静定平面刚架
49	第48章 静定平面刚架
50	第49章 静定平面刚架
51	第50章 静定平面刚架
52	第51章 静定平面刚架
53	第52章 静定平面刚架
54	第53章 静定平面刚架
55	第54章 静定平面刚架
56	第55章 静定平面刚架
57	第56章 静定平面刚架
58	第57章 静定平面刚架
59	第58章 静定平面刚架
60	第59章 静定平面刚架
61	第60章 静定平面刚架
62	第61章 静定平面刚架
63	第62章 静定平面刚架
64	第63章 静定平面刚架
65	第64章 静定平面刚架
66	第65章 静定平面刚架
67	第66章 静定平面刚架
68	第67章 静定平面刚架
69	第68章 静定平面刚架
70	第69章 静定平面刚架
71	第70章 静定平面刚架
72	第71章 静定平面刚架
73	第72章 静定平面刚架
74	第73章 静定平面刚架
75	第74章 静定平面刚架
76	第75章 静定平面刚架
77	第76章 静定平面刚架
78	第77章 静定平面刚架
79	第78章 静定平面刚架
80	第79章 静定平面刚架
81	第80章 静定平面刚架
82	第81章 静定平面刚架
83	第82章 静定平面刚架
84	第83章 静定平面刚架
85	第84章 静定平面刚架
86	第85章 静定平面刚架
87	第86章 静定平面刚架
88	第87章 静定平面刚架
89	第88章 静定平面刚架
90	第89章 静定平面刚架
91	第90章 静定平面刚架
92	第91章 静定平面刚架
93	第92章 静定平面刚架
94	第93章 静定平面刚架
95	第94章 静定平面刚架
96	第95章 静定平面刚架
97	第96章 静定平面刚架
98	第97章 静定平面刚架
99	第98章 静定平面刚架
100	第99章 静定平面刚架
101	第100章 静定平面刚架
102	第101章 静定平面刚架
103	第102章 静定平面刚架
104	第103章 静定平面刚架
105	第104章 静定平面刚架
106	第105章 静定平面刚架
107	第106章 静定平面刚架
108	第107章 静定平面刚架
109	第108章 静定平面刚架
110	第109章 静定平面刚架
111	第110章 静定平面刚架
112	第111章 静定平面刚架
113	第112章 静定平面刚架
114	第113章 静定平面刚架
115	第114章 静定平面刚架
116	第115章 静定平面刚架
117	第116章 静定平面刚架
118	第117章 静定平面刚架
119	第118章 静定平面刚架
120	第119章 静定平面刚架
121	第120章 静定平面刚架
122	第121章 静定平面刚架
123	第122章 静定平面刚架
124	第123章 静定平面刚架
125	第124章 静定平面刚架
126	第125章 静定平面刚架
127	第126章 静定平面刚架
128	第127章 静定平面刚架
129	第128章 静定平面刚架
130	第129章 静定平面刚架
131	第130章 静定平面刚架
132	第131章 静定平面刚架
133	第132章 静定平面刚架
134	第133章 静定平面刚架
135	第134章 静定平面刚架
136	第135章 静定平面刚架
137	第136章 静定平面刚架
138	第137章 静定平面刚架
139	第138章 静定平面刚架
140	第139章 静定平面刚架
141	第140章 静定平面刚架
142	第141章 静定平面刚架
143	第142章 静定平面刚架
144	第143章 静定平面刚架
145	第144章 静定平面刚架
146	第145章 静定平面刚架
147	第146章 静定平面刚架
148	第147章 静定平面刚架
149	第148章 静定平面刚架
150	第149章 静定平面刚架
151	第150章 静定平面刚架
152	第151章 静定平面刚架
153	第152章 静定平面刚架
154	第153章 静定平面刚架
155	第154章 静定平面刚架
156	第155章 静定平面刚架
157	第156章 静定平面刚架
158	第157章 静定平面刚架
159	第158章 静定平面刚架
160	第159章 静定平面刚架
161	第160章 静定平面刚架
162	第161章 静定平面刚架
163	第162章 静定平面刚架
164	第163章 静定平面刚架
165	第164章 静定平面刚架
166	第165章 静定平面刚架
167	第166章 静定平面刚架
168	第167章 静定平面刚架
169	第168章 静定平面刚架
170	第169章 静定平面刚架
171	第170章 静定平面刚架
172	第171章 静定平面刚架
173	第172章 静定平面刚架
174	第173章 静定平面刚架
175	第174章 静定平面刚架
176	第175章 静定平面刚架
177	第176章 静定平面刚架
178	第177章 静定平面刚架
179	第178章 静定平面刚架
180	第179章 静定平面刚架
181	第180章 静定平面刚架
182	第181章 静定平面刚架
183	第182章 静定平面刚架
184	第183章 静定平面刚架
185	第184章 静定平面刚架
186	第185章 静定平面刚架
187	第186章 静定平面刚架
188	第187章 静定平面刚架
189	第188章 静定平面刚架
190	第189章 静定平面刚架
191	第190章 静定平面刚架
192	第191章 静定平面刚架
193	第192章 静定平面刚架
194	第193章 静定平面刚架
195	第194章 静定平面刚架
196	第195章 静定平面刚架
197	第196章 静定平面刚架
198	第197章 静定平面刚架
199	第198章 静定平面刚架
200	第199章 静定平面刚架
201	第200章 静定平面刚架
202	第201章 静定平面刚架
203	第202章 静定平面刚架
204	第203章 静定平面刚架
205	第204章 静定平面刚架
206	第205章 静定平面刚架
207	第206章 静定平面刚架
208	第207章 静定平面刚架
209	第208章 静定平面刚架
210	第209章 静定平面刚架
211	第210章 静定平面刚架
212	第211章 静定平面刚架
213	第212章 静定平面刚架
214	第213章 静定平面刚架
215	第214章 静定平面刚架
216	第215章 静定平面刚架
217	第216章 静定平面刚架
218	第217章 静定平面刚架
219	第218章 静定平面刚架
220	第219章 静定平面刚架
221	第220章 静定平面刚架
222	第221章 静定平面刚架
223	第222章 静定平面刚架
224	第223章 静定平面刚架
225	第224章 静定平面刚架
226	第225章 静定平面刚架
227	第226章 静定平面刚架
228	第227章 静定平面刚架
229	第228章 静定平面刚架
230	第229章 静定平面刚架
231	第230章 静定平面刚架
232	第231章 静定平面刚架
233	第232章 静定平面刚架
234	第233章 静定平面刚架
235	第234章 静定平面刚架
236	第235章 静定平面刚架
237	第236章 静定平面刚架
238	第237章 静定平面刚架
239	第238章 静定平面刚架
240	第239章 静定平面刚架
241	第240章 静定平面刚架
242	第241章 静定平面刚架
243	第242章 静定平面刚架
244	第243章 静定平面刚架
245	第244章 静定平面刚架
246	第245章 静定平面刚架
247	第246章 静定平面刚架
248	第247章 静定平面刚架
249	第248章 静定平面刚架
250	第249章 静定平面刚架
251	第250章 静定平面刚架
252	第251章 静定平面刚架
253	第252章 静定平面刚架
254	第253章 静定平面刚架
255	第254章 静定平面刚架
256	第255章 静定平面刚架
257	第256章 静定平面刚架
258	第257章 静定平面刚架
259	第258章 静定平面刚架
260	第259章 静定平面刚架
261	第260章 静定平面刚架
262	第261章 静定平面刚架
263	第262章 静定平面刚架
264	第263章 静定平面刚架
265	第264章 静定平面刚架
266	第265章 静定平面刚架
267	第266章 静定平面刚架
268	第267章 静定平面刚架
269	第268章 静定平面刚架
270	第269章 静定平面刚架
271	第270章 静定平面刚架
272	第271章 静定平面刚架
273	第272章 静定平面刚架
274	第273章 静定平面刚架
275	第274章 静定平面刚架
276	第275章 静定平面刚架
277	第276章 静定平面刚架
278	第277章 静定平面刚架
279	第278章 静定平面刚架
280	第279章 静定平面刚架
281	第280章 静定平面刚架
282	第281章 静定平面刚架
283	第282章 静定平面刚架
284	第283章 静定平面刚架
285	第284章 静定平面刚架
286	第285章 静定平面刚架
287	第286章 静定平面刚架
288	第287章 静定平面刚架
289	第288章 静定平面刚架
290	第289章 静定平面刚架
291	第290章 静定平面刚架
292	第291章 静定平面刚架
293	第292章 静定平面刚架
294	第293章 静定平面刚架
295	第294章 静定平面刚架
296	第295章 静定平面刚架
297	第296章 静定平面刚架
298	第297章 静定平面刚架
299	第298章 静定平面刚架
300	第299章 静定平面刚架
301	第300章 静定平面刚架
302	第301章 静定平面刚架
303	第302章 静定平面刚架
304	第303章 静定平面刚架
305	第304章 静定平面刚架
306	第305章 静定平面刚架
307	第306章 静定平面刚架
308	第307章 静定平面刚架
309	第308章 静定平面刚架
310	第309章 静定平面刚架
311	第310章 静定平面刚架
312	第311章 静定平面刚架
313	第312章 静定平面刚架
314	第313章 静定平面刚架
315	第314章 静定平面刚架
316	第315章 静定平面刚架
317	第316章 静定平面刚架
318	第317章 静定平面刚架
319	第318章 静定平面刚架
320	第319章 静定平面刚架
321	第320章 静定平面刚架
322	第321章 静定平面刚架
323	第322章 静定平面刚架
324	第323章 静定平面刚架
325	第324章 静定平面刚架
326	第325章 静定平面刚架
327	第326章 静定平面刚架
328	第327章 静定平面刚架
329	第328章 静定平面刚架
330	第329章 静定平面刚架
331	第330章 静定平面刚架
332	第331章 静定平面刚架
333	第332章 静定平面刚架
334	第333章 静定平面刚架
335	第334章 静定平面刚架
336	第335章 静定平面刚架
337	第336章 静定平面刚架
338	第337章 静定平面刚架
339	第338章 静定平面刚架
340	第339章 静定平面刚架
341	第340章 静定平面刚架
342	第341章 静定平面刚架
343	第342章 静定平面刚架
344	第343章 静定平面刚架
345	第344章 静定平面刚架
346	第345章 静定平面刚架
347	第346章 静定平面刚架
348	第347章 静定平面刚架
349	第348章 静定平面刚架
350	第349章 静定平面刚架
351	第350章 静定平面刚架
352	第351章 静定平面刚架
353	第352章 静定平面刚架
354	第353章 静定平面刚架
355	第354章 静定平面刚架
356	第355章 静定平面刚架
357	第356章 静定平面刚架
358	第357章 静定平面刚架
359	第358章 静定平面刚架
360	第359章 静定平面刚架
361	第360章 静定平面刚架
362	第361章 静定平面刚架
363	第362章 静定平面刚架
364	第363章 静定平面刚架
365	第364章 静定平面刚架
366	第365章 静定平面刚架
367	第366章 静定平面刚架
368	第367章 静定平面刚架
369	第368章 静定平面刚架
370	第369章 静定平面刚架
371	第370章 静定平面刚架
372	第371章 静定平面刚架
373	第372章 静定平面刚架
374	第373章 静定平面刚架
375	第374章 静定平面刚架
376	第375章 静定平面刚架
377	第376章 静定平面刚架
378	第377章 静定平面刚架
379	第378章 静定平面刚架
380	第379章 静定平面刚架
381	第380章 静定平面刚架
382	第381章 静定平面刚架
383	第382章 静定平面刚架
384	第383章 静定平面刚架
385	第384章 静定平面刚架
386	第385章 静定平面刚架
387	第386章 静定平面刚架
388	第387章 静定平面刚架
389	第388章 静定平面刚架
390	第389章 静定平面刚架
391	第390章 静定平面刚架
392	第391章 静定平面刚架
393	第392章 静定平面刚架
394	第393章 静定平面刚架
395	第394章 静定平面刚架
396	第395章 静定平面刚架
397	第396章 静定平面刚架
398	第397章 静定平面刚架
399	第398章 静定平面刚架
400	第399章 静定平面刚架
401	第400章 静定平面刚架
402	第401章 静定平面刚架
403	第402章 静定平面刚架
404	第403章 静定平面刚架
405	第404章 静定平面刚架
406	第405章 静定平面刚架
407	第406章 静定平面刚架
408	第407章 静定平面刚架
409	第408章 静定平面刚架
410	第409章 静定平面刚架
411	第410章 静定平面刚架
412	第411章 静定平面刚架
413	第412章 静定平面刚架
414	第413章

Contents

前言	1
绪论	1
0.1 工程力学的研究对象	1
0.2 工程力学的研究任务	3
0.3 工程力学的研究方法	3
第1章 力的概念和物体的受力分析	5
1.1 力的概念和静力学基本公理	5
1.2 约束和约束力	7
1.3 受力分析和受力图	10
习题	13
第2章 力矩的概念和力系的等效与简化	15
2.1 力对点之矩和力对轴之矩	15
2.2 力偶及其性质	18
2.3 力系的简化	20
习题	25
第3章 刚体和刚体系统的平衡问题	27
3.1 力系的平衡方程	27
3.2 刚体和刚体系统的平衡问题	30
3.3 平面简单桁架的受力分析	35
3.4 静定和静不定问题的概念	38
习题	39
第4章 材料力学的基本概念	42
4.1 外力 内力 截面法	42
4.2 应力	43
4.3 应变 小变形假设	44
4.4 杆件受力和变形的基本形式	45
习题	46
第5章 轴向拉伸和压缩	48
5.1 轴向拉伸和压缩的工程实例	48
5.2 轴力和轴力图	49
5.3 拉伸或压缩杆件横截面上的正应力	50
5.4 拉伸或压缩杆件的变形	51
5.5 拉伸或压缩杆件的强度计算	53
5.6 拉伸和压缩时材料的力学性能	56
5.7 拉伸或压缩静不定问题	60
5.8 温度应力和装配应力	62
5.9 应力集中的概念	64
习题	65
第6章 剪切和挤压的实用计算	69
6.1 剪切实用计算	69
6.2 挤压实用计算	70
习题	72
第7章 扭转	74
7.1 扭转的概念	74
7.2 扭矩和扭矩图	75
7.3 圆轴扭转时横截面上的切应力和强度计算	76
7.4 圆轴扭转时的变形和刚度计算	82
习题	84
第8章 弯曲内力	86
8.1 弯曲的概念	86
8.2 剪力和弯矩	89
8.3 剪力方程和弯矩方程 剪力图和弯矩图	91
8.4 载荷集度、剪力和弯矩间的微分关系	95
习题	99
第9章 弯曲应力和强度	102
9.1 纯弯曲和横力弯曲	102

9.2 纯弯曲正应力	102
9.3 弯曲切应力	108
9.4 弯曲强度的计算	113
9.5 提高梁强度的措施	119
习题	122
第 10 章 弯曲变形和刚度	126
10.1 弯曲变形的基本概念	126
10.2 挠曲线微分方程 积分法	127
10.3 叠加法	132
10.4 弯曲刚度计算	136
10.5 提高梁刚度的措施	138
10.6 简单的静不定梁	139
习题	140
第 11 章 应力状态分析和强度理论	144
11.1 应力状态的概念	144
11.2 平面应力状态分析的解析法	145
11.3 平面应力状态分析的图解法	147
11.4 三向应力状态简介	149
11.5 广义胡克定律	153
11.6 应变能密度	156
11.7 强度理论概述	158
11.8 常用的四种强度理论	158
11.9 莫尔强度理论	163
习题	164
第 12 章 组合变形	167
12.1 基本概念	167
12.2 斜弯曲	168
12.3 拉伸（压缩）和弯曲的组合 变形	172
12.4 弯曲和扭转的组合变形	174
习题	178
第 13 章 压杆稳定	182
13.1 压杆稳定的概念	182
13.2 压杆的临界载荷 欧拉公式	183
13.3 经验公式 临界应力总图	185
13.4 压杆稳定性设计	189
13.5 提高压杆稳定性的措施	193
习题	194
第 14 章 能量法	198
14.1 杆件的应变能计算	198
14.2 互等定理	199
14.3 莫尔积分及图乘法	201
习题	207
第 15 章 动载荷和疲劳强度	209
15.1 基本概念	209
15.2 等加速直线运动构件的动应力	209
15.3 等角速旋转构件的动应力	210
15.4 冲击载荷和冲击应力	213
15.5 交变应力和疲劳破坏	216
15.6 疲劳极限及其影响因素	219
习题	222
附录	224
附录 A 平面图形的几何性质	224
A.1 静矩和形心	224
A.2 惯性矩和惯性半径	226
A.3 惯性积	228
A.4 平行移轴公式	228
A.5 转轴公式 主惯性矩	229
习题	233
附录 B 型钢表	234
参考文献	248

绪 论

0.1 工程力学的研究对象

力学和工程学的结合，促成了工程力学的形成和发展。无论是在历史悠久的土木工程、水利工程、机械工程和船舶工程中，还是在后起的航空航天工程、核技术工程、生物工程中，工程力学都有着广泛的应用。力学的发展使汽车发动机效率提高了约 $1/3$ 。仅以小轿车为例，全世界每年节省燃料费约2000亿美元，排气污染减少了90%以上。力学解决了各种飞行器的空气动力学性能问题、推进器动力学问题、飞行稳定性和操纵性问题及结构和材料的强度问题等。

20世纪以来，工程力学发展的标志性成就有：人类载人航天技术（见图0-1）、高速磁悬浮列车、跨江大桥、超高层建筑和巨型水利枢纽（如长江三峡水利工程，见图0-2）等。



图0-1 发现号航天飞机



图 0-2 长江三峡水利工程

可以预见，在未来的科技发展中，工程力学仍将展示出永恒与旺盛的生命力并发挥巨大的影响。

工程力学所研究的物体大多数是由固体材料做成的，而固体材料在外力作用下都会发生变形，故称为变形固体。变形固体在外力作用下所产生的物理现象是各种各样的，为了便于研究，常常舍弃那些与所研究的问题无关或关系不大的特征，而只保留其主要特征，并通过作出某些假设将所研究的对象抽象成一种“理想化模型”。在工程力学中，将物体抽象成两种计算模型：刚体和理想变形固体。

刚体是指在外力作用下，大小和形状都不变的物体。

理想变形体是指对实际变形体的材料作出一些假设，使其理想化，以便于研究和计算。

理想变形体材料的基本假设有：

(1) 连续性假设 即认为材料无间隙地分布于物体所占的整个空间中。根据这一假设，物体内因受力和变形而产生的内力和位移都将是连续的，因而可以表示为各点坐标的连续函数，从而有利于建立相应的数学模型。

(2) 均匀性假设 即认为物体内各点处的力学性能都是一样的，不随点的位置而变化。

按此假设，从构件内部任何部位所切取的微元体，都具有与构件完全相同的力学性能。同样，通过试样所测得的材料性能，也可用于构件内的任何部位。应该指出，对于实际材料，其基本组成部分的力学性能往往存在不同程度的差异，但是，由于构件的尺寸远大于其基本组成部分的尺寸，按照统计学观点，仍可将材料看成是均匀的。

(3) 各向同性假设 即认为材料沿各个方向上的力学性能都是相同的。我们把具有这种属性的材料称为各向同性材料，如低碳钢、铸铁等。在各个方向上具有不同力学性能的材

料则称为各向异性材料，如由增强纤维（碳纤维、玻璃纤维等）与基体材料（环氧树脂、陶瓷等）制成的复合材料。本书仅研究各向同性材料的构件。按此假设，我们在计算中就不用考虑材料力学性能的方向性，而可沿任意方位从构件中截取一部分作为研究对象。

0.2 工程力学的研究任务

工程力学是研究物体机械运动的一般规律和工程构件的设计计算原理的科学。通常包括静力学和材料力学等内容。静力学主要研究力系的规律，特别是力系的平衡规律及其工程应用，在静力学中，通常将变形体简化为刚体。而材料力学主要研究构件（等截面直杆）的设计计算原理及其应用，此时通常采用理想变形体模型。为了保证机械或工程结构能正常工作，要求每一个构件都具有足够的承受载荷的能力，即需满足强度、刚度和稳定性的要求。

所谓强度指构件抵抗破坏（断裂或产生显著塑性变形）的能力。构件有足够的强度是保证其正常工作最基本的要求。例如，构件工作时发生意外断裂或产生显著塑性变形是不容许的。

所谓刚度指构件抵抗弹性变形的能力。为了保证构件在载荷作用下所产生的变形不超过许可的限度，必须要求构件具有足够的刚度。例如，如果机床主轴或床身的变形过大，将影响加工精度；齿轮轴的变形过大，将影响齿与齿间的正常啮合等。

所谓稳定性指构件保持原有平衡形式的能力。在一定外力作用下，构件突然发生不能保持其原有平衡形式的现象，称为失稳。构件工作时产生失稳一般也是不容许的。例如，桥梁结构的受压杆件失稳将可能导致桥梁结构的整体或局部塌毁。因此，构件必须具有足够的稳定性。

构件的设计，必须符合安全、适用和经济的原则。材料力学的任务是：在保证满足强度、刚度和稳定性要求的前提下，以最经济的代价，为构件选择适宜的材料，确定合理的形状和尺寸，并提供必要的理论基础和计算方法。一般说来，强度要求是基本的，只是在某些情况下才提出刚度要求。至于稳定性问题，只是在特定受力情况下的某些构件中才会出现。

0.3 工程力学的研究方法

工程力学的研究方法主要有三种：理论分析方法、实验方法和计算机方法。

1. 理论分析方法

静力学中的物体受力分析、力系简化与力系等效、力系平衡等这些理论分析方法使工程结构的静力分析成为可能。

而材料力学也主要依据内力分析、变形和应力计算等理论分析方法来解决构件的强度、刚度和稳定性问题。

此外，工程力学还面临着许多新设计思想和新结构形式的挑战，这些也需要运用理论分析方法进行探索性研究和设计。

必须指出，上述许多理论方法是建立在一些基本假使之上的，其计算结果的可靠性往往还需要实验方法来验证。

2. 实验方法 本课已（第 1 章、第 2 章）指出过由吸能材料得冲击载荷时，工程力学结构分析的步骤是首先确定计算模型，然后选择理论方法进行结构的强度、刚度和稳定性计算。在此过程中，计算模型的合理与否往往需要通过实验检验，比如需要通过实验来测定材料的力学性能，甚至最终工程力学的理论分析结果还得通过实验来检验。还有一些尚无理论分析结果的问题，也必须借助于实验的手段来解决。所以，实验研究和理论分析都是工程力学解决问题的重要手段。图 0-3 所示为飞机静载试验。

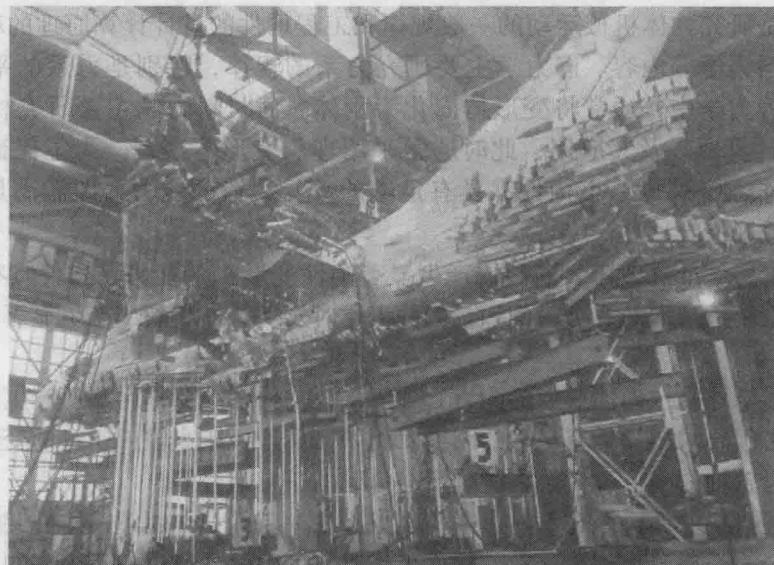


图 0-3 飞机静载试验

3. 计算机方法

现代计算机技术的飞速发展和广泛应用，为工程力学开辟了新的研究方法，使得所能解决的问题要比以前单纯地运用理论分析方法和实验方法广泛得多、深刻得多。现在即便是传统的理论分析方法和实验方法，往往也需要计算机协助完成。比如计算机方法可以帮助推导理论公式，计算机应用专用软件可以进行工程结构计算、分析和设计，计算机还可以采集实验数据和分析实验结果。在工程设计和研究的前沿领域，利用计算机技术可以方便地进行模拟分析和研究。图 0-4 所示为人造骨骼的计算机分析。



图 0-4 人造骨骼的计算机分析

第1章 力的概念和物体的受力分析

内 容 提 要

(1) 力与力系的概念

(2) 静力学基本公理

(3) 工程中常见的约束及约束力的分析

(4) 物体受力分析的基本方法

1.1 力的概念和静力学基本公理

1.1.1 力的概念

1. 力与力的投影

力是物体间的相互机械作用，这种作用使物体的机械运动状态发生变化。力对物体产生的效应一般可分为两个方面：一是物体运动状态的改变，称为力的运动效应；一是物体形状的改变，称为变形效应。

力是矢量，力对物体的作用效果决定于三个要素：力的大小、力的方向和力的作用点，其单位为牛〔顿〕(N)。

在空间直角坐标系中，力可用其在坐标轴上的投影表示为

$$\mathbf{F} = F_x \mathbf{i} + F_y \mathbf{j} + F_z \mathbf{k} \quad (1-1)$$

如图 1-1 所示。式 (1-1) 中， F_x ， F_y ， F_z 分别为力矢量 \mathbf{F} 在 x 轴、 y 轴、 z 轴上的投影，是代数量。

2. 力与力系

作用在物体上的力的集合称为力系。

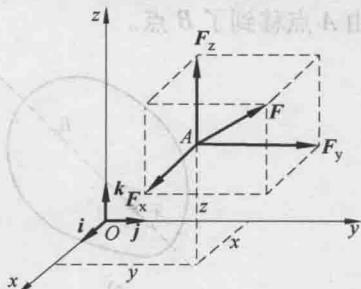


图 1-1 力的直角坐标表示

作用在实际物体上的力系有各式各样。如果力系中力的作用线都分布在同一平面内，则称其为平面力系；如果力系中力的作用线并不都分布在同一平面内，而是呈空间分布的，则称其为空间力系；如果力系中力的作用线都汇交于一点，则称其为汇交力系；如果力系中力的作用线都平行，则称其为平行力系。

使同一刚体产生相同作用效应的力系称为等效力系。作用于刚体、并使刚体保持平衡的力系称为平衡力系，或零力系。

如果某力系与一个力等效，则这一力称为力系的合力，而该力系中的各个力则称为这一合力的分力。

1.1.2 静力学基本公理

静力学中常用的基本公理有：二力平衡公理、加减平衡力系公理、作用力与反作用力定律和刚化原理。

1. 二力平衡公理

刚体在两个力作用下保持平衡的必要和充分条件是：这两个力沿着同一作用线，大小相等，方向相反，如图 1-2 所示，称为二力平衡公理，即

$$\mathbf{F}_1 = -\mathbf{F}_2 \quad (1-2)$$

这个公理表明了作用于刚体上的最简单的力系平衡时所必须满足的条件。满足二力平衡公理的刚体也称为二力构件或二力体。

2. 加减平衡力系公理

在作用于刚体的力系中，加上或减去任意的平衡力系，不会改变原力系对刚体的作用效应，称为加减平衡力系公理。

加减平衡力系公理是研究力系简化的重要依据。根据上述公理可以导出以下推论：

推论 I：力的可传性原理——作用于刚体上某点的力，可以沿其作用线移到刚体内任意一点，而不改变该力对刚体的作用效应。

设 \mathbf{F} 作用于刚体上 A 点，如图 1-3a 所示，根据加减平衡力系公理，可在力的作用线上任一点 B 加上一对大小均为 F 的平衡力 \mathbf{F}_1 、 \mathbf{F}_2 （见图 1-3b），新力系 $(\mathbf{F}, \mathbf{F}_1, \mathbf{F}_2)$ 与原来的力 \mathbf{F} 等效。而 \mathbf{F} 和 \mathbf{F}_1 为二力平衡的力系，减去后不改变原力系的作用效应（见图 1-3c）。于是，力 \mathbf{F}_2 与原力系 \mathbf{F} 等效。力 \mathbf{F}_2 与力 \mathbf{F} 大小相等，作用线和指向相同，只是作用点由 A 点移到了 B 点。

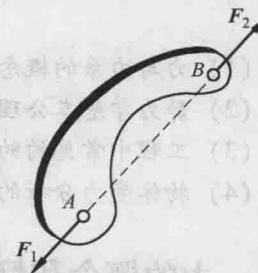


图 1-2 二力构件

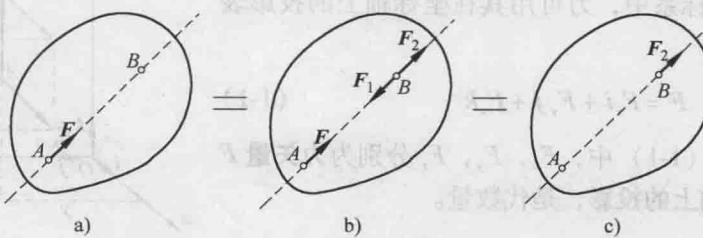


图 1-3 力的可传性原理

由此表明，对于刚体，力的作用点已不是决定力的作用效应的要素，可以为力的作用线代替，因此，作用于刚体上的力的三要素是：力的大小、方向和作用线。

推论 II：三力平衡汇交定理——作用于刚体上三个相互平衡的力，若其中两个力的作用线汇交于一点，则第三个力必在同一平面内，而且第三个力的作用线一定通过汇交点。

如图 1-4a 所示，在刚体的 A 、 B 、 C 三点上，分别作用三个相互平衡的力 \mathbf{F}_1 、 \mathbf{F}_2 、 \mathbf{F}_3 ，其中 \mathbf{F}_1 和 \mathbf{F}_2 的作用线或延长线汇交于 O 点，根据力的可传性原理，将 \mathbf{F}_1 、 \mathbf{F}_2 移到汇交点 O ，如图 1-4b 所示，由力的平行四边形法则得合力 \mathbf{F}_{12} ，则有力 \mathbf{F}_3 应与 \mathbf{F}_{12} 平衡，那么力 \mathbf{F}_3 必定与 \mathbf{F}_1 和 \mathbf{F}_2 共面，且通过力 \mathbf{F}_1 与 \mathbf{F}_2 的交点 O 。

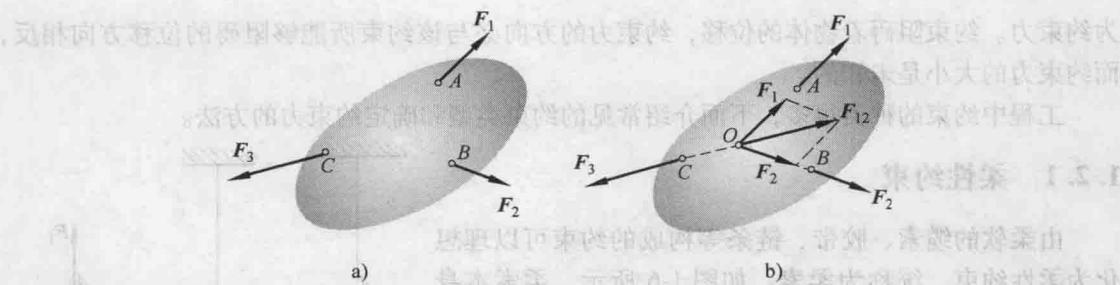


图 1-4 三力平衡汇交定理

3. 作用力与反作用力定律

作用力与反作用力总是同时存在，两个力的大小相等、方向相反，沿着同一作用线，分别作用在两个相互作用的物体上。

这个公理概括了物体间相互作用的关系，表明作用力和反作用力总是成对出现的。

必须强调的是，由于作用力和反作用力分别作用在两个物体上，因此，不能认为作用力与反作用力相互平衡。

4. 刚化原理

变形体在某一个力系作用下处于平衡，如将此变形体刚化为刚体，其平衡状态保持不变，称为刚化原理。

这个公理提供了把变形体模型化为刚体的条件。

如图 1-5 所示，绳索在等值、反向、共线的两个拉力作用下平衡，如将绳索刚化为刚性杆，其平衡状态保持不变。但是，绳索在等值、反向、共线的两个压力作用下不能平衡，这时绳索就不能刚化为刚性杆，因为刚性杆在上述两种力系作用下都是平衡的。

由此可见，刚体的平衡条件是变形体平衡的必要条件，而非充分条件。



图 1-5 刚化原理

1.2 约束和约束力

作用在物体上的力可分为两类：一类是主动力，例如物体的重力、风力、气体压力等，主动力的大小一般是已知的；另一类是约束物体对于被约束物体的约束力。

物体的运动如果没有受到其他物体的直接制约，例如飞行中的飞机、火箭、炮弹等，这类物体在空间的位移不会受任何限制，称为自由体。物体的运动如果受到其他物体的直接制约，例如在地面上行驶的车辆受到地面的制约、桥梁受到桥墩的制约、各种机械中的轴受到轴承的制约等，这类物体在空间的位移受到限制，称为非自由体或受约束体。

对非自由体的某些位移起限制作用的周围物体称为约束。约束对被约束物体的作用力称

为约束力。约束阻碍着物体的位移，约束力的方向必与该约束所能够阻碍的位移方向相反，而约束力的大小是未知的。

工程中约束的种类很多，下面介绍常见的约束类型和确定约束力的方法。

1.2.1 柔性约束

由柔软的缆索、胶带、链条等构成的约束可以理想化为柔性约束，统称为柔索。如图 1-6 所示，柔索本身只能承受拉力，因此，这种约束对物体的约束力也只能是拉力，作用在接触点，方向沿着柔索并背离物体。

在图 1-7 所示的带轮传动机构中，带虽然有紧边和松边之分，但两边的带所产生的约束力都是拉力，只不过紧边的拉力要大于松边的拉力。

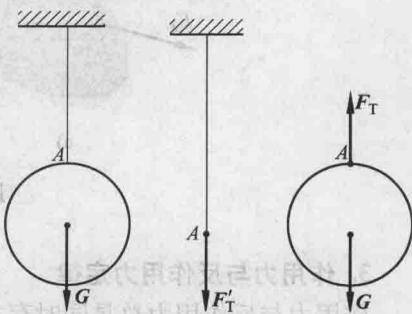
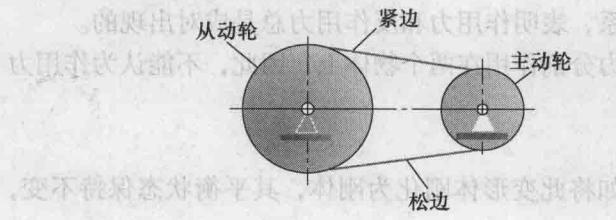
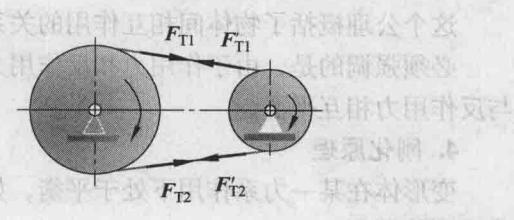


图 1-6 柔性约束



a)



b)

图 1-7 带轮的约束力

1.2.2 刚性约束

若约束物体与被约束物体都是刚体，则二者之间为刚性接触，这种约束称为刚性约束。下面介绍几种常见的刚性约束。

1. 光滑支承面约束

支持物体的固定面、啮合齿轮的齿面、机床中的导轨等，当摩擦忽略不计时，都属于光滑支承面约束。

两个物体的接触面处光滑无摩擦时，约束物体只能限制被约束物体沿接触面公法线并向约束内部方向的运动，而不限制沿接触面公切线方向的运动。因此，光滑支承面约束对物体的约束力作用在接触点处，方向沿着接触面的公法线方向，并指向被约束物体。如图 1-8 所示。

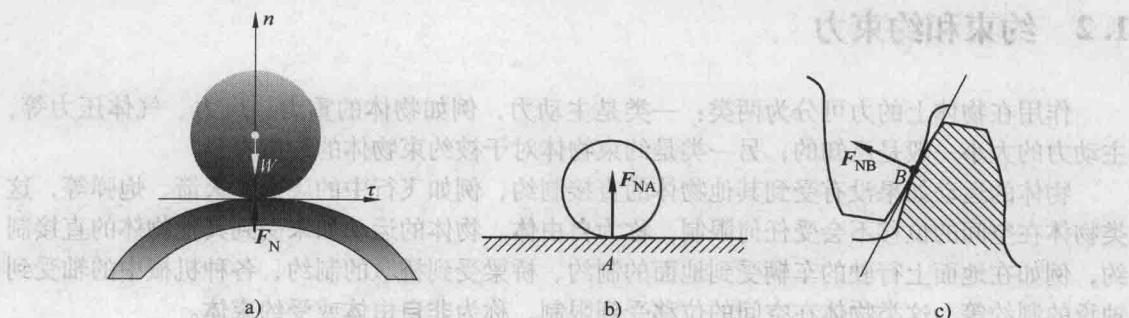


图 1-8 光滑面约束

2. 光滑平面圆柱铰链

如图 1-9 所示, 两个带有销钉孔的构件通过圆柱销钉联接而成, 称为活动铰链, 这时两个相连的构件互为约束与被约束物体。这种联接允许两构件绕销钉轴有相对转动, 而不能有相对移动。在光滑接触情况下, 若将销钉与被约束物体视为一整体, 则其与约束物体之间为线(销钉圆柱体的母线)接触, 在平面图形上则为一点。由于销钉的圆柱体与圆孔之间有间隙, 接触点的位置随主动力而改变, 约束力通过圆孔中心, 大小和方向均不能确定, 所以通常用两个相互垂直的分量 F_{Ax} 、 F_{Ay} 来表示。

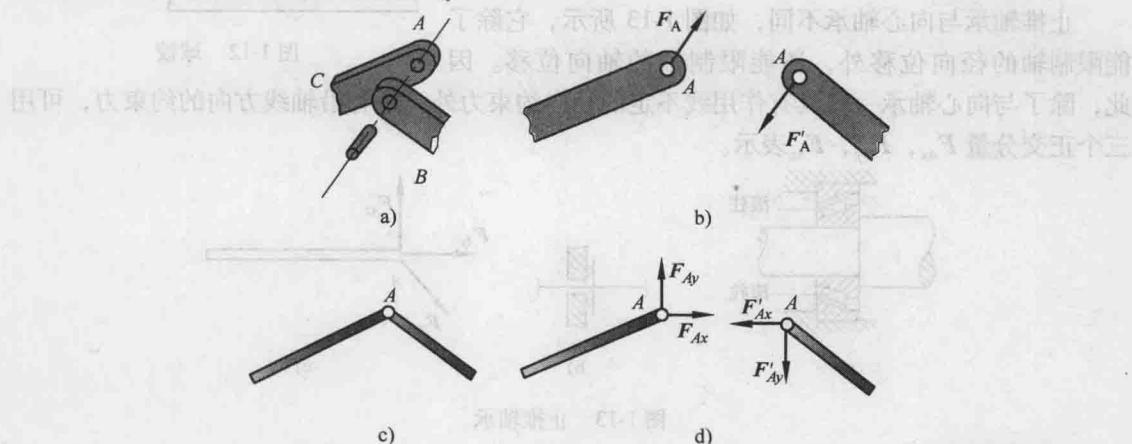


图 1-9 光滑圆柱铰链

在实际工程结构中, 如果铰链联接中有一个固定在地面或机架上作为支座, 则称为固定铰链支座, 如图 1-10 所示。

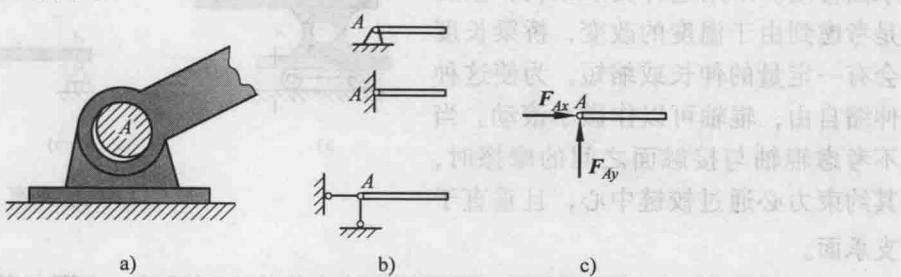


图 1-10 固定铰链支座

支承传动轴的向心轴承, 如图 1-11 所示, 也是一种光滑铰链约束, 轴可在轴承孔内任意转动, 也可沿孔的中心线移动, 但不能沿径向向外移动, 约束力可表示为 F_{Ax} 、 F_{Ay} 。

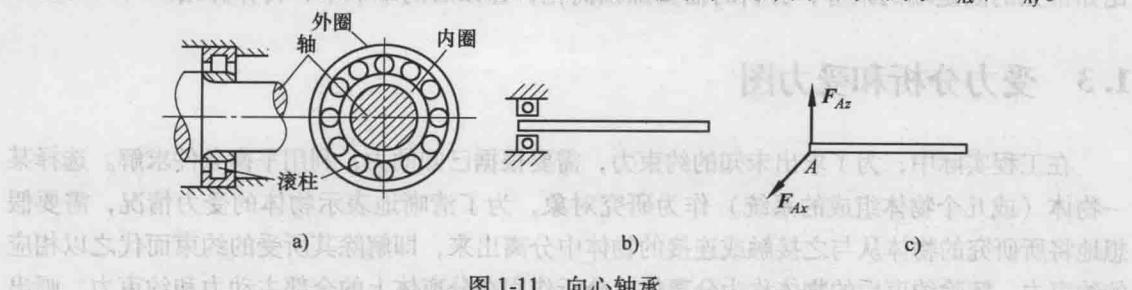


图 1-11 向心轴承

3. 光滑球形铰链

球形铰链简称球铰。如图 1-12 所示，通过圆球与球窝将两个构件连接在一起，这种约束使构件的球心不能有空间任意方向的移动，只能绕球心任意转动。忽略摩擦，与圆柱铰链分析类似，球铰的约束力是通过球心但方向不能预先确定的一个空间力，可用三个正交分量 F_{Ox} , F_{Oy} , F_{Oz} 表示。

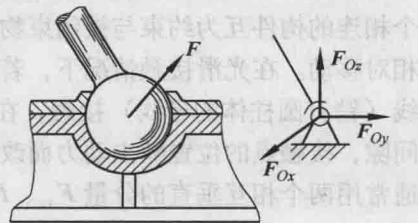


图 1-12 球铰

4. 止推轴承

止推轴承与向心轴承不同，如图 1-13 所示，它除了能限制轴的径向位移外，还能限制轴的轴向位移。因此，除了与向心轴承一样具有作用线不定的径向约束力外，还有沿轴线方向的约束力，可用三个正交分量 F_{Ax} , F_{Ay} , F_{Az} 表示。

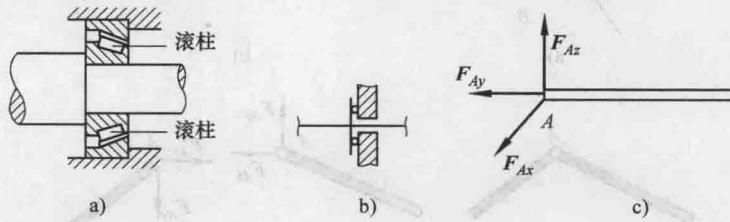


图 1-13 止推轴承

5. 辊轴支座

在桥梁、屋架结构中采用的辊轴支承，如图 1-14 所示，是在铰链支座与光滑支承面之间安装几个辊轴而构成的，可以沿支承面移动。采用这种支承结构，主要是考虑到由于温度的改变，桥梁长度会有一定量的伸长或缩短，为使这种伸缩自由，辊轴可以作微小滚动。当不考虑辊轴与接触面之间的摩擦时，其约束力必通过铰链中心，且垂直于支承面。

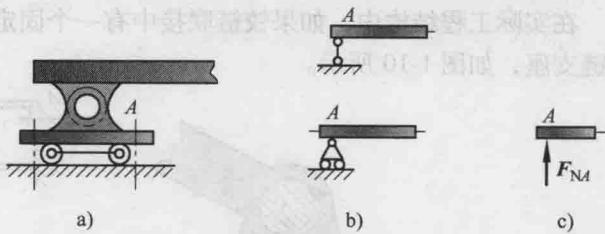


图 1-14 辊轴支座

一般工程结构中的辊轴支承，既限制被约束物体向下运动，也限制其向上运动。因此，约束力 F_N 垂直于接触面，可能指向被约束物体，也可能背离被约束物体。

以上只介绍了几种简单约束，在工程中，约束的类型远不止这些，有的约束比较复杂，比如常见的固定端约束等，分析时需要加以简化，在以后的章节中，再作介绍。

1.3 受力分析和受力图

在工程实际中，为了求出未知的约束力，需要根据已知的力，利用平衡条件求解。选择某一物体（或几个物体组成的系统）作为研究对象，为了清晰地表示物体的受力情况，需要假想地将所研究的物体从与之接触或连接的物体中分离出来，即解除其所受的约束而代之以相应的约束力。解除约束后的物体称为分离体。分析作用在分离体上的全部主动力和约束力，画出

每个力的作用位置和力的作用方向，称为分离体的受力图。这种分析过程称为受力分析。

当选择若干个物体组成的系统作为研究对象时，作用于系统上的力可分为两类：系统外的物体作用于系统内的物体上的力——外力，系统内物体间的相互作用力——内力。应该指出，内力和外力的区别不是绝对的，内力和外力，只有相对于某一确定的研究对象才有意义。由于内力总是成对出现的，不会影响所选择的研究对象的平衡状态，因此，在受力图上不必画出。此外，当所选择的研究对象不止一个时，要正确应用作用力与反作用力定律，确定相互联系的研究对象在同一约束处的约束力应该大小相等、方向相反。

例题 1-1 杆 AB 受重力 W 作用，如图 1-15a 所示，所有接触处均为光滑接触，试画出其受力图。

解：(1) 取分离体：解除 AB 杆约束，即
将 AB 杆从图 1-15a 中取出，其分离体如图 1-
15b 所示。

(2) 画出主动力：在图 1-15b 所示的分离
体上画上主动力 W。

(3) 分析约束类型，画出约束力：AB 杆
在 A、D 处为光滑面约束，在 E 处为柔性约束。
由于杆在 A、D 光滑面接触处约束力沿其公法
线方向，因此，在 D 处约束力 F_{ND} 垂直于杆的
表面；在 A 处约束力 F_{NA} 垂直于与杆接触的约束表面。在 E 处柔性约束的约束力 F_T 应沿柔
体的方向，并且为拉力。

于是 AB 杆的受力图如图 1-15b 所示。

例题 1-2 平面承重支架如图 1-16a 所示，在 C 点上作用荷载 F_P ，若不计各杆件的重
力，试分别画出杆 AC 和 BD 的受力图。

解：(1) BD 杆的受力图：在不计自重的情况下，BD 杆仅在 B、D 两处受约束力，BD
杆又处于平衡状态，因此，BD 杆为二力构件（即二力杆），所以 B、D 两端的受力一定沿着
B、D 的连线方向。于是，BD 杆的受力图如图 1-16c 所示，而且 B 点和 D 点的约束力 F_B 和
 F_D 满足 $F_D = -F_B$ 的关系。

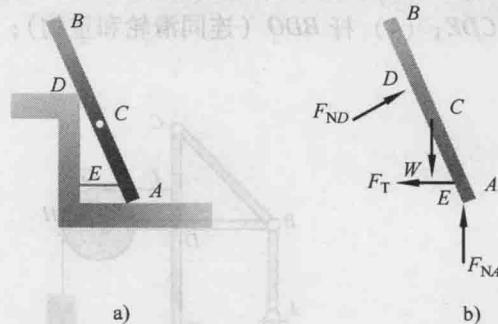


图 1-15 例题 1-1 图

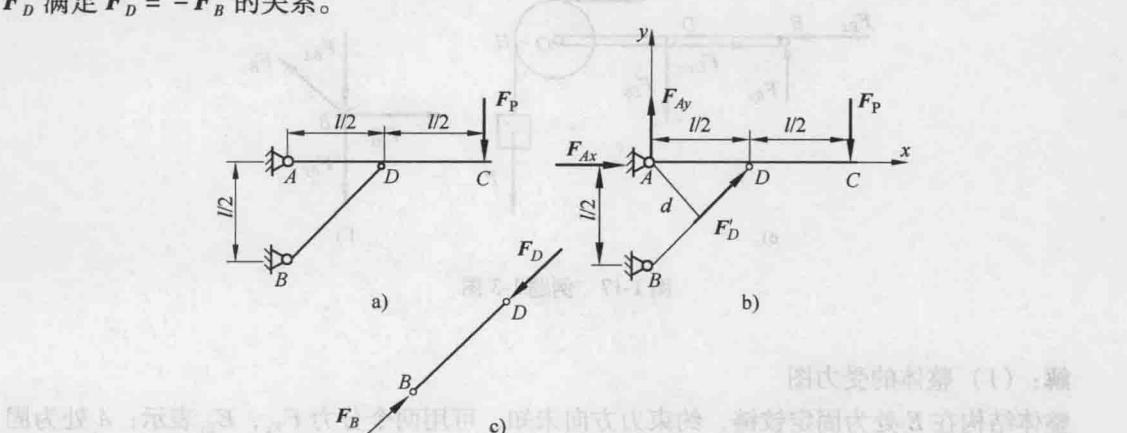


图 1-16 例题 1-2 图