

# 弹簧手册

---

TANHUANG  
SHOUCE

张英会

刘辉航 主编

王德成

机械工业出版社

# 弹 簧 手 册

张英会 刘辉航 王德成 主编

张英会 刘辉航 王德成  
郭荣生 陆培根 郭 斌  
万文霞 张新兰 姜 膺 编  
余 方 周平钢 马风英  
夏 琦 包希曾 孙守贤



机械工业出版社

本手册在总结国内外有关先进理论和生产技术的基础上,对弹簧的设计方法、材料、加工工艺和检测等各方面进行了较为系统的阐述,以求提高弹簧的设计理论、方法和制造水平。手册共有 23 章。手册在设计方面以阐述圆柱螺旋弹簧为主,对于国内书刊反映较少的不等节距螺旋弹簧、截锥涡卷螺旋弹簧、非圆弹簧圈螺旋弹簧、多股螺旋弹簧,以及仪器仪表用膜片膜盒和压力管等弹性元件都进行了较为深入的分析 and 介绍。尤其对应用日益广泛的橡胶弹簧和空气弹簧也做了较详细的阐述。

本手册系统地介绍了弹簧用材料的标准、性能及其工艺性,从而加强了选择材料的意识。对弹簧的制造方法、热处理工艺和检测等实践性强的内容,在总结经验的基础上,加以理论分析,使其更具有指导性。

本手册可为各行业设计、制造和使用弹簧的工程技术人员和工人提供基础理论、数据和标准规范等,也可供机械专业的研究人员和师生参考。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

弹簧手册/张英会,刘辉航,王德成主编. —北京:机械工业出版社, 1997. 6

ISBN 7-111-05555-1

I. 弹… II. ①张… ②刘… III. 弹簧-技术手册 IV. T

H135-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 02371 号

出版人: 马九荣 (北京市百万庄南街 1 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 刘文伯、陈国威 版式设计: 冉晓华 责任校对: 李秋荣

封面设计: 姚毅 责任印制: 路琳

机械工业出版社印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

1997 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

787mm×1092mm<sup>1</sup>/<sub>16</sub>·30.25 印张·2 插页·736 千字

0 001—4 000 册

定价: 58.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

## 前 言

弹簧及弹性元件广泛应用于机械、仪表、电器、交通运输工具以及日常生活器具等行业，是一个涉及面比较大的基础零件。近年来，随着科学技术的发展，国内外在弹簧的研究和生产技术方面都有不同程度的发展。本手册在总结国内外有关先进理论和生产技术的基础上，对弹簧的设计方法、材料、加工工艺和检测等进行了较为系统的阐述，以求提高弹簧的设计理论、方法和制造水平。

弹簧应用广泛，类型繁多，而且新的类型不断出现。本手册以阐述普通圆柱螺旋弹簧为主，对于国内书刊反映较少的不等节距螺旋弹簧、截锥涡卷螺旋弹簧、非圆弹簧圈螺旋弹簧、多股螺旋弹簧，以及仪器仪表用膜片膜盒和压力管等弹性元部件都进行了比较深入的分析 and 介绍。尤其对应用日益广泛的橡胶弹簧和空气弹簧也做了较详细的阐述，一方面介绍它们的性能和设计方法，另一方面也起到推广的作用。

本手册从基本理论出发，对主要弹簧的设计计算方法做了比较系统的分析和推导，以期能使设计人员对其有比较全面系统的了解，从而达到正确和灵活运用这些方法的目的。另外，对于一些弹簧的设计计算方法进行了研究和完善，如不等节距弹簧、非圆弹簧圈弹簧、扁截面螺旋弹簧和弹簧的疲劳强度等的设计计算公式，就是在综合归纳的基础上进一步完善而推导出来的，经过这些年的多方验证是可行的。为了便于计算，还绘制了一些计算用图。

此外，本手册系统地介绍了弹簧用材料的标准、性能及其工艺性，从而加强了选择材料种类的意识。对弹簧的制造方法、热处理工艺和检测等实践性强的内容，在总结经验的基础上，加上理论分析，使其更具有指导性。

参加本手册编写的人员有：北京科技大学张英会、夏琦、马风英；中国人民解放军 1001 厂刘辉航、王文霞；机械工业部机械科学研究院王德成、张新兰、姜膺、余方；青岛四方车辆研究所郭荣生；西安昆仑机械厂包希曾；齐齐哈尔卫东机械制造厂孙守贤；张家港第二弹簧厂陆培根、周平钢；扬州西湖弹簧厂郭斌。手册在编写过程中，得到了中国机械工程学会中国弹簧技术学组、失效分析分会弹簧失效及预防委员会、中国人民解放军 1001 厂、机械工业部机械科学研究院等领导的大力支持。中国弹簧技术学组成员肖椿霖、苏德达、崔俊山、万桂香、陶国贤、李亚青等同志也给予了多方面支持。同时，手册编写得到了中国人民解放军 1001 强力弹簧研究所的具体协助。在此对上述单位和同志们表示衷心感谢。

本手册是参照机械工业出版社 1982 年出版的《弹簧》一书和 1996 年出版的《机械工程手册·机械零部件设计卷》中的弹簧、飞轮篇编的，对于未参加本手册编写的原两书作者表示谢意。

本手册稿经北京理工大学丁法乾教授审校，提出了很多宝贵意见，使原稿得到了进一步完善，在此表示深切谢意。

本手册缺点错误在所难免，欢迎读者批评指正。

中国弹簧技术学组组长 张英会 教授  
中国弹簧技术学组秘书长 刘辉航 教授级高级工程师  
中国弹簧技术学组成员 王德成 高级工程师

1996 年 12 月

# 目 录

前言	
弹簧常用符号和单位	
<b>第1章 总论</b> .....	1
1 弹簧的基本性能 .....	1
1.1 弹簧的特性线和刚度 .....	1
1.2 弹簧的变形能 .....	3
1.3 弹簧的自振频率 .....	5
1.4 弹簧系统受迫振动的振幅 .....	5
2 弹簧的类型 .....	6
2.1 圆柱螺旋弹簧 .....	6
2.2 非圆柱螺旋弹簧 .....	8
2.3 其他类型弹簧 .....	10
3 弹簧技术发展现状 .....	14
3.1 弹簧设计的发展 .....	14
3.2 弹簧材料的发展 .....	15
3.3 弹簧加工技术的发展 .....	16
4 我国弹簧的标准化 .....	17
5 国外弹簧标准化 .....	18
<b>第2章 弹簧材料</b> .....	23
1 概述 .....	23
1.1 通用弹簧钢的现状与发展 .....	23
1.2 铜合金和镍合金 .....	24
1.3 高弹性和恒弹性合金 .....	25
1.4 非金属材料 .....	25
2 弹簧钢 .....	25
3 热轧弹簧钢 .....	29
3.1 热轧弹簧圆钢 .....	29
3.2 热轧弹簧扁钢 .....	30
3.3 热轧梯形弹簧钢 .....	31
4 冷拔钢丝与冷轧钢带 .....	32
4.1 硅锰弹簧钢丝 .....	32
4.2 铬钒弹簧钢丝 .....	33
4.3 阀门用铬钒弹簧钢丝 .....	33
4.4 铬硅弹簧钢丝 .....	34
4.5 弹簧垫圈用梯形钢丝 .....	34
4.6 高速工具钢丝 .....	36
4.7 弹簧钢、工具钢冷轧钢带 .....	36
5 冷拔强化钢丝与冷轧强化钢带 .....	38
5.1 碳素弹簧钢丝 .....	38
5.2 琴钢丝 .....	39
5.3 弹簧用不锈钢丝 .....	41
5.4 阀门用油淬火回火铬钒合金弹簧 钢丝 .....	42
5.5 阀门用油淬火回火碳素弹簧钢丝 .....	43
5.6 油淬火回火碳素弹簧钢丝 .....	44
5.7 油淬火回火硅锰合金弹簧钢丝 .....	44
5.8 阀门用油淬火回火铬硅合金 弹簧钢丝 .....	45
5.9 热处理弹簧钢带 .....	46
5.10 弹簧用不锈钢冷轧钢带 .....	49
6 弹性合金 .....	51
6.1 高弹性合金 .....	51
6.2 弹性元件用合金 .....	52
7 铜合金及镍合金 .....	53
7.1 硅青铜线 .....	56
7.2 锡青铜线 .....	56
7.3 白铜线 .....	56
7.4 铍青铜线 .....	57
7.5 镍铜合金线 .....	57
7.6 镍线 .....	58
7.7 铝青铜带 .....	58
7.8 锡青铜带 .....	59
7.9 铝白铜带 .....	60
7.10 锌白铜带 .....	61
7.11 镍及镍合金带 .....	61
8 非金属弹簧材料 .....	61
8.1 橡胶 .....	61
8.2 增强塑料 .....	63
9 各种弹簧材料的技术标准 .....	67
10 弹簧材料的选择 .....	70
<b>第3章 螺旋弹簧的制造技术</b> .....	77
1 概述 .....	77
1.1 弹簧制造业的类型 .....	77
1.2 弹簧制造工艺卡的编制 .....	77
2 冷成形弹簧的制造 .....	79

2.1 冷成形弹簧的常用材料 .....	80	3.2 拉伸弹簧几何尺寸的检测 .....	131
2.2 冷成形弹簧的制造工艺 .....	80	3.3 扭转弹簧几何尺寸的检测 .....	133
2.3 弹簧的卷制 .....	80	4 圆柱螺旋弹簧特性的检测 .....	135
2.4 弹簧的去应力退火 .....	85	4.1 拉伸和压缩弹簧特性的检测 .....	135
2.5 弹簧的端面磨削 .....	88	4.2 扭转弹簧特性的检测 .....	139
2.6 弹簧的校正工艺 .....	90	5 圆柱螺旋弹簧立定及永久变形的 试验 .....	141
2.7 螺旋拉伸和扭转弹簧的制造 .....	90	6 弹簧的无损检测 .....	141
3 弹簧加工的工艺装置 .....	91	6.1 弹簧的超声波检测 .....	141
3.1 弹簧工艺装置的设计方法和步骤 .....	91	6.2 弹簧的磁粉检测 .....	142
3.2 弹簧工艺装置设计注意事项和 技术参数 .....	92	6.3 弹簧的渗透法检测 .....	143
3.3 弹簧典型工艺装置示例 .....	93	7 弹簧热处理和表面处理质量的 检测 .....	143
4 热成形弹簧的制造 .....	97	7.1 弹簧热处理质量的检测 .....	143
4.1 材料切断及料端处理 .....	97	7.2 弹簧表面处理质量的检测 .....	145
4.2 坯料的加热及卷制成形 .....	98	8 弹簧抛丸质量的检测 .....	146
<b>第4章 弹簧的热处理、强化处理和 表面处理 .....</b>	<b>103</b>	9 弹簧疲劳性能和松弛率的检测 .....	149
1 弹簧的热处理工艺 .....	103	10 弹簧的冲击试验 .....	151
1.1 弹簧的淬火和回火 .....	103	<b>第6章 弹簧的疲劳强度 .....</b>	<b>152</b>
1.2 弹簧的热处理设备 .....	105	1 变应力的类型和特性 .....	152
1.3 碳素弹簧钢的热处理 .....	108	2 疲劳失效机理概述 .....	154
1.4 合金弹簧钢的热处理 .....	108	3 疲劳曲线(S-N曲线) .....	155
1.5 铜合金的热处理 .....	110	4 影响弹簧疲劳强度的因素 .....	156
1.6 不锈钢的热处理 .....	111	5 弹簧的疲劳试验 .....	157
1.7 高温弹性合金和钛合金的热处理 .....	112	6 疲劳试验数据的处理 .....	160
2 弹簧的强化处理 .....	113	7 极限应力图及其绘制方法 .....	166
2.1 弹簧的立定处理、强压 (强拉、强扭)处理 .....	114	8 弹簧安全系数的计算 .....	169
2.2 弹簧的抛丸处理 .....	116	9 受稳定变应力螺旋压缩弹簧的 最佳设计原则 .....	170
3 弹簧的表面处理 .....	119	10 受不稳定变应力弹簧的计算 准则 .....	172
3.1 弹簧的金属保护层 .....	119	11 断裂力学在弹簧设计中的应用 简介 .....	174
3.2 弹簧的化学保护层 .....	120	<b>第7章 圆柱螺旋弹簧的基本理论 .....</b>	<b>176</b>
3.3 弹簧的非金属保护层 .....	121	1 圆柱螺旋弹簧的几何参数 .....	176
<b>第5章 弹簧的检测和试验 .....</b>	<b>123</b>	2 圆柱螺旋弹簧的受力分析 .....	177
1 概述 .....	123	3 圆柱螺旋弹簧的应力分析 .....	180
2 弹簧材料的检验 .....	124	4 圆柱螺旋弹簧的变形分析 .....	184
2.1 弹簧材料表面质量的检验 .....	124	5 圆柱螺旋弹簧的稳定性 .....	192
2.2 弹簧材料力学性能的检验 .....	125	5.1 圆柱螺旋压缩弹簧的稳定性 .....	192
2.3 弹簧材料金相组织的检验 .....	126		
2.4 弹簧材料化学成分的检测 .....	127		
3 圆柱螺旋弹簧几何尺寸的检测 .....	127		
3.1 压缩弹簧几何尺寸的检测 .....	128		

5.2 圆柱螺旋扭转弹簧的稳定性 .....	196	计算 .....	230
6 圆柱螺旋弹簧的自振频率 .....	198	9 受轴向和径向载荷作用的圆柱螺旋	
7 弹簧受冲击载荷作用时的应力和		压缩弹簧的设计计算 .....	231
变形分析 .....	202	9.1 螺旋弹簧的径向刚度 .....	231
<b>第8章 圆柱螺旋压缩弹簧</b> .....	205	9.2 螺旋弹簧的径向稳定性 .....	232
1 圆柱螺旋压缩弹簧的特性 .....	205	9.3 螺旋弹簧的切应力 .....	232
2 圆柱螺旋压缩弹簧的结构 .....	206	10 圆柱组合螺旋压缩弹簧的设计	
2.1 圆柱螺旋压缩弹簧的结构形式和		计算 .....	233
参数计算 .....	206	10.1 等变形并列式组合压缩弹簧 .....	233
2.2 圆柱螺旋压缩弹簧的典型图样 .....	209	10.2 不等变形并列式组合压缩弹簧 .....	235
3 圆柱螺旋压缩和拉伸弹簧的		10.3 直列式组合压缩弹簧 .....	237
许用应力 .....	210	11 圆柱螺旋弹簧的优化设计计算 .....	237
4 圆柱螺旋压缩弹簧的设计计算 .....	211	12 圆柱螺旋弹簧的可靠性设计	
4.1 圆柱螺旋压缩弹簧的基本计算		计算 .....	241
公式 .....	211	12.1 弹簧的概率设计 .....	242
4.2 圆形截面材料的圆柱螺旋压缩		12.2 可靠性设计中的均值和标准	
弹簧 .....	212	离差 .....	243
4.3 矩形截面材料的圆柱螺旋压缩		13 圆柱螺旋压缩弹簧的调整结构 .....	246
弹簧 .....	213	<b>第9章 圆柱螺旋拉伸弹簧</b> .....	249
4.4 方形截面材料的圆柱螺旋压缩		1 圆柱螺旋拉伸弹簧的特性 .....	249
弹簧 .....	215	2 圆柱螺旋拉伸弹簧的结构设计 .....	250
4.5 扁形截面材料的圆柱螺旋压缩		3 圆柱螺旋拉伸弹簧的设计计算 .....	253
弹簧 .....	216	4 圆柱螺旋拉伸弹簧的拉力调整	
4.6 圆柱螺旋压缩弹簧的计算公式 .....	216	结构 .....	254
5 圆柱螺旋压缩弹簧的设计计算		<b>第10章 圆柱螺旋扭转弹簧</b> .....	259
法 .....	218	1 圆柱螺旋扭转弹簧的特性 .....	259
5.1 应用基本公式设计算法 .....	218	1.1 扭转弹簧的基本几何参数和特性 .....	259
5.2 弹簧直径 $D$ (或 $D_1$ 、 $D_2$ ) 为定值时		1.2 扭转弹簧的试验扭矩和试验扭矩下的	
的设计算法 .....	220	变形角 .....	259
5.3 弹簧为最小质量、或最小体积、或最		2 圆柱螺旋扭转弹簧的结构设计 .....	259
小自由高度的设计算法 .....	221	2.1 扭转弹簧的结构型式 .....	259
5.4 弹簧的图解设计法 .....	222	2.2 扭转弹簧的结构参数计算 .....	261
5.5 矩形和圆形截面材料压缩弹簧的		3 圆柱螺旋扭转弹簧的许用	
比较选择算法 .....	225	弯曲应力 .....	262
6 大螺旋角圆柱螺旋压缩弹簧的		4 圆柱螺旋扭转弹簧的设计	
设计计算 .....	227	计算公式 .....	263
6.1 圆形截面材料螺旋压缩弹簧 .....	227	4.1 圆形截面材料扭转弹簧的	
6.2 矩形截面材料螺旋压缩弹簧 .....	228	设计计算 .....	264
7 圆柱螺旋压缩弹簧受振动载荷时		4.2 矩形截面材料扭转弹簧的设计	
的设计计算 .....	228	计算 .....	264
8 强压处理的圆柱螺旋弹簧的设计		4.3 椭圆形截面材料扭转弹簧的设计	

计算 .....	265	3 扭杆弹簧的变形和应力计算 .....	303
4.4 扭转弹簧的疲劳强度校核 .....	265	3.1 圆形截面扭杆弹簧的变形和 应力计算 .....	303
4.5 扭转弹簧的简易算法 .....	268	3.2 矩形和方形截面扭杆弹簧的变形和 应力计算 .....	304
4.6 组合扭转弹簧的设计计算 .....	269	4 扭杆弹簧的端部结构和有效工作 长度 .....	307
5 圆柱螺旋扭转弹簧的安装示例 .....	270	5 扭杆弹簧的材料和许用应力 .....	308
<b>第 11 章 非圆形弹簧圈螺旋     弹簧 .....</b>	<b>271</b>	6 扭杆弹簧的制造和检验 .....	309
1 矩形和方形弹簧圈螺旋压缩弹 簧 .....	271	<b>第 14 章 多股螺旋弹簧 .....</b>	<b>312</b>
1.1 矩形弹簧圈弹簧的几何尺寸关系 .....	271	1 多股螺旋弹簧的类型与特性 .....	312
1.2 矩形弹簧圈弹簧的设计计算 .....	271	2 无中心股多股螺旋压缩弹簧 .....	313
2 椭圆形弹簧圈螺旋压缩弹簧 .....	275	2.1 无中心股多股螺旋压缩弹簧及钢索 结构 .....	313
2.1 椭圆形弹簧圈弹簧的几何尺寸 关系 .....	275	2.2 无中心股多股螺旋压缩弹簧的 设计计算 .....	316
2.2 椭圆形弹簧圈弹簧的设计计算 .....	275	2.3 无中心股多股螺旋压缩弹簧的 几何尺寸系列 .....	319
3 卵形弹簧圈螺旋压缩弹簧 .....	276	3 有中心股多股螺旋压缩弹簧 .....	319
3.1 卵形弹簧圈弹簧的几何尺寸关系 .....	276	3.1 有中心股多股螺旋压缩弹簧的 钢索结构 .....	319
3.2 卵形弹簧圈弹簧的设计计算 .....	276	3.2 有中心股多股螺旋压缩弹簧的设计 计算 .....	320
<b>第 12 章 非线性特性线螺旋弹簧 .....</b>	<b>280</b>	4 多股螺旋扭转弹簧 .....	323
1 不等节距圆柱螺旋压缩弹簧 .....	280	5 多股螺旋弹簧的材料和许用应力的 选取 .....	324
2 截锥螺旋压缩弹簧 .....	283	6 多股螺旋弹簧的制造工艺 .....	324
2.1 截锥螺旋压缩弹簧的几何尺寸 .....	283	6.1 多股螺旋弹簧的缠制 .....	324
2.2 截锥螺旋压缩弹簧的变形和强度 计算 .....	285	6.2 多股螺旋弹簧的钳工加工 .....	324
3 中凹和中凸形螺旋弹簧 .....	290	6.3 多股螺旋弹簧的回火 .....	325
3.1 等螺旋角中凹形螺旋弹簧开始有 弹簧圈接触后的变形与强度计算 .....	291	6.4 多股螺旋弹簧的立定或强压处理 .....	325
3.2 等节距中凹形螺旋弹簧开始有弹簧圈 接触后的变形与强度计算 .....	292	6.5 多股螺旋弹簧的表面处理 .....	325
3.3 等应力中凹形螺旋弹簧开始有弹簧圈 接触后的变形与强度计算 .....	292	7 多股螺旋弹簧的试验和检验 .....	326
4 截锥涡卷螺旋弹簧 .....	293	7.1 多股螺旋弹簧的特性及极限偏差 .....	326
4.1 等螺旋角截锥涡卷螺旋弹簧开始有弹 簧圈接触后的变形与强度计算 .....	294	7.2 多股螺旋弹簧的试验载荷 .....	326
4.2 等节距截锥涡卷螺旋弹簧开始有弹簧 圈接触后的变形与强度计算 .....	294	7.3 多股螺旋弹簧的尺寸及极限偏差 .....	326
4.3 等应力截锥涡卷螺旋弹簧开始有弹簧 圈接触后的变形与强度计算 .....	295	7.4 多股螺旋弹簧速压或疲劳试验 .....	327
<b>第 13 章 扭杆弹簧 .....</b>	<b>301</b>	<b>第 15 章 碟形弹簧 .....</b>	<b>330</b>
1 扭杆弹簧的结构、类型和用途 .....	301	1 碟形弹簧的类型与结构 .....	330
2 扭杆弹簧的载荷计算 .....	302	1.1 普通碟形弹簧的结构 .....	330
		1.2 碟形弹簧的特点 .....	334



2 碟形弹簧的载荷与变形关系 .....	334	5 环形弹簧结构参数荐用值 .....	369
2.1 无支承面碟形弹簧的载荷与 变形关系 .....	335	<b>第 17 章 片弹簧、线弹簧和弹性</b>	
2.2 有支承面碟形弹簧的载荷与变形 关系 .....	338	<b>挡圈</b> .....	374
2.3 碟形弹簧的刚度和变形能 .....	340	1 片弹簧 .....	374
2.4 碟形弹簧的特性曲线 .....	340	1.1 直片弹簧的计算 .....	375
3 碟形弹簧的应力计算 .....	341	1.2 弯片弹簧的计算 .....	379
3.1 碟形弹簧的应力计算公式 .....	341	1.3 变刚度片弹簧的计算 .....	383
3.2 碟形弹簧实际应力的分布情况 .....	343	1.4 受轴向和横向载荷作用的片弹簧的 计算 .....	384
4 碟形弹簧的强度和许用应力 .....	344	1.5 片弹簧的结构和应力集中 .....	384
5 碟形弹簧的设计 .....	345	1.6 片弹簧的材料和许用应力 .....	385
5.1 标准碟形弹簧的选择 .....	345	2 线弹簧 .....	386
5.2 非标准碟形弹簧的设计 .....	347	2.1 圆弧形线弹簧的计算 .....	386
6 组合碟形弹簧 .....	348	2.2 圆弧和直线构成的线弹簧的 计算 .....	387
6.1 碟形弹簧的组合方式和特性 .....	348	3 弹性挡圈 .....	387
6.2 摩擦力对组合碟形弹簧特性 的影响 .....	349	<b>第 18 章 板弹簧</b> .....	389
6.3 组合碟形弹簧设计中应注意的 问题 .....	350	1 板弹簧的类型和用途 .....	389
7 其他类型碟形弹簧计算简介 .....	351	2 板弹簧的结构 .....	390
7.1 梯形截面碟形弹簧计算公式 .....	351	2.1 弹簧钢板的截面形状 .....	390
7.2 锥状梯形截面碟形弹簧计算公式 .....	351	2.2 主板端部结构 .....	390
7.3 圆板弹簧 .....	352	2.3 副板端部结构 .....	391
8 碟形弹簧的制造 .....	353	2.4 板弹簧的固定结构 .....	392
8.1 碟形弹簧材料的选择 .....	353	3 单板弹簧的计算 .....	392
8.2 碟形弹簧的技术要求 .....	354	4 多板弹簧的计算 .....	393
8.3 碟形弹簧典型制造工艺 .....	355	4.1 主要尺寸和参数的计算 .....	393
8.4 碟形弹簧的典型工作图 .....	357	4.2 各板片工作应力和自由状态下曲率 半径的计算 .....	398
<b>第 16 章 环形弹簧</b> .....	362	5 变刚度和变截面板弹簧的计算 .....	402
1 环形弹簧的结构和特性 .....	362	5.1 变刚度板弹簧的计算 .....	402
2 环形弹簧的设计计算 .....	363	5.2 变截面板弹簧的计算 .....	404
2.1 环形弹簧的受力分析 .....	363	6 板弹簧的材料、强化技术、许用 应力和试验 .....	405
2.2 环形弹簧外圆环的应力计算 .....	363	6.1 板弹簧的材料与强化技术 .....	405
2.3 环形弹簧内圆环的应力计算 .....	365	6.2 板弹簧的许用应力 .....	405
2.4 环形弹簧的变形计算 .....	366	6.3 板弹簧的试验 .....	405
2.5 环形弹簧的变形能 .....	367	<b>第 19 章 平面涡卷弹簧</b> .....	407
2.6 环形弹簧的试验载荷和试验 载荷下的变形 .....	367	1 平面涡卷弹簧的结构、特点 和用途 .....	407
2.7 环形弹簧的结构参数计算 .....	367	2 平面涡卷弹簧的变形和刚度 计算公式 .....	407
3 环形弹簧的材料和许用应力 .....	369		
4 环形弹簧的制造和技术要求 .....	369		

2.1 非接触形平面涡卷弹簧的变形和刚度计算公式 .....	407	<b>第 22 章 橡胶弹簧</b> .....	439
2.2 接触形平面涡卷弹簧的变形和刚度计算公式 .....	410	1 橡胶弹簧的类型和弹性特性 .....	439
3 平面涡卷弹簧的设计计算 .....	411	1.1 橡胶弹簧的类型 .....	439
3.1 平面涡卷弹簧的基本计算公式 .....	411	1.2 橡胶弹簧的变形计算 .....	439
3.2 非接触形平面涡卷弹簧的设计计算 .....	411	2 橡胶弹簧的静刚度计算 .....	441
3.3 接触形平面涡卷弹簧的设计计算 .....	412	2.1 圆柱形橡胶弹簧 .....	441
3.4 平面涡卷弹簧设计时应注意的问题 .....	414	2.2 圆环形橡胶弹簧 .....	441
4 定载荷和定扭矩平面涡卷弹簧 .....	414	2.3 矩形橡胶弹簧 .....	442
5 平面涡卷弹簧的材料、制造和许用应力 .....	415	2.4 端部带圆角的橡胶弹簧 .....	443
6 平面涡卷弹簧的端部固定型式 .....	415	2.5 截锥形橡胶弹簧 .....	445
<b>第 20 章 膜片及膜盒</b> .....	419	2.6 空心圆锥橡胶弹簧 .....	446
1 膜片及膜盒的类型和特性 .....	419	2.7 衬套式橡胶弹簧 .....	446
1.1 膜片及膜盒的类型 .....	419	2.8 组合式橡胶弹簧 .....	448
1.2 膜片的特性曲线 .....	420	2.9 衬套式橡胶弹簧挤缩加工的影响 .....	448
1.3 膜盒的特性设计 .....	422	2.10 橡胶弹簧的相似法则 .....	449
2 膜片的设计计算 .....	422	3 橡胶弹簧的动态力学性能 .....	449
2.1 平面膜片特性计算 .....	422	4 橡胶弹簧的许用应力 .....	450
2.2 位移与压力成线性关系的波纹膜片 .....	423	5 橡胶弹簧的设计 .....	450
2.3 位移与压力成非线性关系的波纹膜片 .....	423	5.1 橡胶弹簧材质的选择 .....	450
2.4 按照给定的特性曲线计算膜片 .....	427	5.2 橡胶弹簧的形状和结构设计 .....	451
2.5 波纹膜片有效面积的计算 .....	427	6 橡胶弹簧的性能试验 .....	452
2.6 膜片的牵引力 .....	428	6.1 硬度试验 .....	452
3 膜片的材料 .....	428	6.2 粘结性能试验 .....	452
<b>第 21 章 压力弹簧管</b> .....	431	6.3 静特性试验 .....	452
1 压力弹簧管的类型和特性 .....	431	6.4 动特性试验 .....	453
1.1 压力弹簧管的类型 .....	431	6.5 振动疲劳试验 .....	453
1.2 压力弹簧管的特性 .....	432	7 橡胶-金属螺旋复合弹簧 .....	453
2 压力弹簧管的设计计算 .....	433	<b>第 23 章 空气弹簧</b> .....	455
2.1 承受低压的单圈薄壁弹簧管的计算 .....	434	1 空气弹簧的特点 .....	455
2.2 承受高压的单圈厚壁弹簧管的计算 .....	435	2 空气弹簧的类型 .....	455
2.3 异形截面弹簧管的计算 .....	436	3 空气弹簧的刚度计算 .....	457
2.4 螺旋和平面涡卷弹簧管的计算 .....	437	3.1 空气弹簧的垂直刚度 .....	457
3 压力弹簧管的材料 .....	437	3.2 空气弹簧的横向刚度 .....	458
		4 空气弹簧的减振阻尼 .....	462
		5 空气弹簧的试验方法 .....	464
		6 气弹簧 .....	465
		6.1 不可锁定气弹簧 .....	465
		6.2 可锁定气弹簧 .....	466
		<b>参考文献</b> .....	467
		<b>附录 我国弹簧行业厂家介绍</b> .....	468

# 第1章 总论

弹簧是一种机械零件，它利用材料的弹性和结构特点，在工作时产生变形，把机械功或动能转变为变形能（位能），或把变形能（位能）转变为机械功或动能。由于这种特性，它适用于：1) 缓冲或减振，如破碎机的支承弹簧和车辆的悬架弹簧等；2) 机械的储能，如钟表、仪表和自动控制机构上的原动弹簧；3) 控制运动，如气门、离合器、制动器和各种调节器上的弹簧；4) 测力装置，如弹簧秤和动力计上的弹簧。除此之外，在机械设备、仪表、日用电器以及生活器具上也都使用着各式各样的弹性元件，如螺母防松弹簧垫圈，零件在轴上定位用的卡环，门的启闭装置，玩具的发条等。

## 1 弹簧的基本性能

在设计弹簧时，应该考虑的基本工作性能有以下几方面：1) 弹簧的特性线，即载荷和变形的关系；2) 弹簧的变形能；3) 弹簧的自振频率；4) 弹簧受迫振动时的振幅。现对这些性能简单介绍如下。

### 1.1 弹簧的特性线和刚度

载荷  $F$ （或  $T$ ）与变形  $f$ （或  $\varphi$ ）之间的关系曲线称为弹簧的特性线，如图 1-1 所示。弹簧的特性线大致有三种类型：1) 直线型；2) 渐增型；3) 渐减型。有些弹簧的特性线可以是以上两种或三种类型的组合（图 1-2），称为组合型特性线。如截锥涡卷弹簧的特性线（图 1-2a），加载起始一段为直线型，变形达到一定程度后特性线便成为渐增型；碟形弹簧的特性线（图 1-2b），起始为渐减型，后为渐增型，整个特性线呈 S 形；又如环形弹簧的特性线（图 1-2c），加载时为直线型，而卸载时则为渐增型。采用组合弹簧也可以得到组合的特性线，如图 1-2d 所示为两个不同高度的并列组合螺旋弹簧的特性线。加载开始只有一个弹簧承受载荷，所以特性线只是受载荷那个弹簧的特性线。当受载弹簧在载荷作用下变形到一定程度，另一个弹簧也开始承受载荷，这时特性线开始转变为两个弹簧受载的特性线，因而其斜率发生了变化。

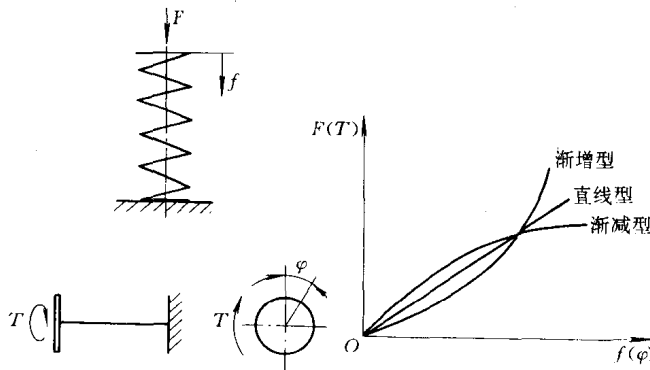


图 1-1 弹簧的特性线

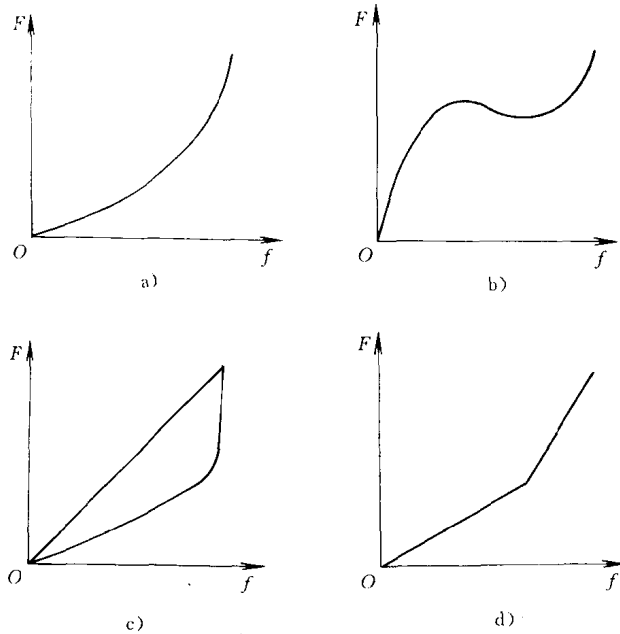


图 1-2 组合型特性线

a) 截锥涡卷弹簧 b) 碟形弹簧 c) 环形弹簧 d) 组合弹簧

载荷增量  $dF$  (或  $dT$ ) 与变形增量  $df$  (或  $d\varphi$ ) 之比, 即产生单位变形所需的载荷, 称为弹簧的刚度, 对于压缩和拉伸弹簧的刚度为

$$F' = \frac{dF}{df} \quad (1-1a)$$

对于扭转弹簧的刚度为

$$T' = \frac{dT}{d\varphi} \quad (1-2a)$$

特性线为渐增型的弹簧, 刚度随着载荷的增加而增大; 而渐减型的弹簧, 刚度随着载荷的增加而减小。至于直线型的弹簧, 刚度则不随载荷变化而变化, 即

$$F' = \frac{dF}{df} = \frac{F}{f} = \text{常数} \quad (1-1b)$$

$$T' = \frac{dT}{d\varphi} = \frac{T}{\varphi} = \text{常数} \quad (1-2b)$$

因此, 对于具有直线型特性线的弹簧, 其刚度也称为弹簧常数。

单位力使弹簧所产生的变形, 即刚度的倒数称为弹簧的柔度。

弹簧的特性线对于设计和选择弹簧的类型起指导性的作用。由图 1-2a 所示截锥涡卷弹簧特性线上可以看到, 当载荷达到一定程度时, 弹簧的刚度急剧增加。由于这种特性, 当弹簧受到过大载荷时, 弹簧的变形增加的比较小, 从而可以起到保护弹簧的作用。所以, 具有这种特性线的弹簧适用于空间小、载荷大的情况。如空气弹簧带有高度控制阀, 则其特性线如图 1-2b 所示 S 形, 这是车辆悬架装置的理想状态。因为这种曲线的中间区段的刚度比较低, 而在拉伸和压缩行程的末了区段刚度逐渐增加。这样, 可以保证车辆在正常运行时很柔软, 而在通过坎坷的路面, 空气弹簧被大幅度拉伸和压缩时, 逐渐变硬, 从而能限制车体的振幅。又如图 1-2c 所示环形压缩弹簧或板弹簧的特性线, 表明在加载与卸载过程中弹簧消耗了一部分

摩擦功,或者说吸收了一部分能量。因此,具有这类特性线的弹簧,适用于减振和缓冲。

设计弹簧时,可用分析的方法计算出它们的特性线。但即使是最精确和最仔细的计算,其结果和实际的数值总有一定程度的差异,这是由于制成的弹簧不可避免的存在着一定的工艺误差,以及材料组织非绝对均匀性所造成的。所以,在设计弹簧时,如需要保证特性线的要求,必须经过试验,反复修改有关尺寸,最后达到所需要的特性线。

在设计非线性特性线弹簧时,有的要考虑静变形。如图 1-3 所示,静变形系指过特性线上任意点  $a$ ,作切线与横坐标轴相交,其切点与  $a$  点在横坐标轴上投影的距离即变形量  $f_s$ ,称为切点  $a$  对应载荷  $F_s$  的静变形。

## 1.2 弹簧的变形能

当设计缓冲或隔振弹簧时,弹簧的变形能,也就是在受载荷后所能吸收和积蓄的能量,应该进行计算。

如图 1-4 所示载荷变形图,其变形能对拉伸和压缩弹簧为

$$U = \int_0^f F(f)df$$

对扭转弹簧为

$$U = \int_0^\varphi T(\varphi)d\varphi$$

就是图中划垂直线阴影部的面积。

当特性线为直线时,则

$$U = \frac{Ff}{2} = \frac{F'f^2}{2} \quad (1-3a)$$

$$U = \frac{T\varphi}{2} = \frac{T'\varphi^2}{2} \quad (1-4a)$$

另外,变形能的另一表示形式为最大工作应力  $\tau$  或  $\sigma$  和弹簧材料体积  $V$  的方程,即

$$U = k \frac{V\tau^2}{G} \quad (1-3b)$$

或

$$U = k \frac{V\sigma^2}{E} \quad (1-4b)$$

式中  $G$ ——弹簧材料的切变模量;

$E$ ——弹簧材料的弹性模量;

$k$ ——比例系数,对不同类型的弹簧有不同的值。它标志着材料的利用程度,所以也称为利用系数,其值见表 1-1。

各种类型弹簧变形能的计算公式见表 1-1。

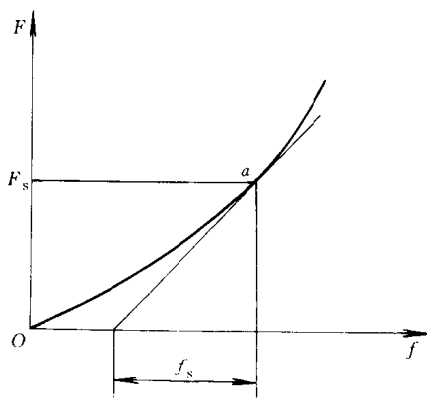


图 1-3 弹簧静变形示意图

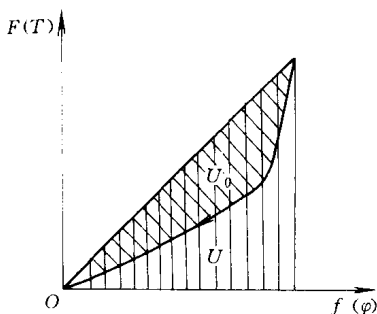


图 1-4 具有能量消耗弹簧的变形能

表 1-1 各种弹簧变形能的计算公式和其比值

弹 簧 类 型	变形能 $U$ 计算公式	利用系数 $k$	变形能的比值 <sup>①</sup>
直杆的拉伸或压缩	$k \left( \frac{V\sigma^2}{E} \right)$	$\frac{1}{2}$	1.00
一端固定的矩形板弹簧		$\frac{1}{18}$	0.11
板弹簧		$\frac{1}{6}$	0.33
圆形截面材料螺旋扭转弹簧		$\frac{1}{8}$	0.25
矩形截面材料螺旋扭转弹簧		$\frac{1}{6}$	0.33
平面蜗卷弹簧		$\frac{1}{6}$	0.33
圆形截面材料扭杆弹簧	$k \left( \frac{V\tau^2}{G} \right)$	$\frac{1}{4}$	0.43
方形截面材料螺旋拉伸或压缩弹簧		$\frac{1}{6.5}$	0.27
矩形截面材料螺旋拉伸或压缩弹簧	$\frac{1}{k_1} \left( \frac{V\tau^2}{2G} \right)$ <sup>②</sup>	—	—

① 比值按  $G \approx \frac{E}{2.6}$ ,  $\tau \approx \frac{\sigma}{\sqrt{3}}$  换算的。

② 系数  $k_1$  见表 13-1。

从式中可以看出,变形能与模量  $G$  和  $E$  成反比,因此,低的模量对于要求大的变形能有利。同样,正如以后从弹簧刚度计算式中可以看到的那样,低的模量对弹簧刚度也有利。又变形能的大小与最大工作应力的平方成正比,增大应力就意味着要求材料有高的弹性极限,高的弹性极限也对应着高的模量。但应力是以平方形式出现的,所以在选择材料时,它起决定性作用。

在设计弹簧时,为了得到大的变形能,从方程式中看出,可提高弹簧材料的体积或者应力,或者两者同时提高。

当加载和卸载的特性线不重合时,如图 1-4 所示,加载与卸载特性线所包围的面积(图中具有斜线阴影部分),就是弹簧在工作过程中由于内耗和摩擦所消耗的能量  $U_0$ 。此值愈大,说明弹簧的减振和缓冲能力愈强。 $U_0$  与  $U$  之比称为阻尼系数  $\psi$ , 即

$$\psi = \frac{U_0}{U} \quad (1-5)$$

评定缓冲弹簧系统效能的指标为缓冲效率  $\eta$ , 其计算式为

$$\eta = \frac{\frac{1}{2}mv^2}{F_{\max}f_{\max}} \quad (1-6)$$

式中  $m$ ——冲击物体的质量;

$v$ ——冲击物体与弹簧系统接触时的速度;

$F_{\max}$ ——最大冲击载荷;

$f_{\max}$ ——缓冲系统的最大变形。

最理想的情况为  $\eta=1$ 。但具有线性特性线的弹簧缓冲系统,其刚度为定值,则  $\eta$  的最大

值为 1/2。粘弹性缓冲系统，如橡胶缓冲系统，其效率要高些。

### 1.3 弹簧的自振频率

当弹簧受到高频振动载荷的作用时，为了检验这种受迫振动对弹簧系统的影响，需要计算弹簧系统的自振频率。根据理论推导（见第 7 章 6 节）可知各类弹簧自振频率  $\nu$  可用下式计算

$$\nu = \sqrt{\frac{F'}{m_e}} \quad (1-7)$$

式中  $F'$  —— 弹簧的刚度；

$m_e$  —— 当量质量，它是弹簧本身的质量和弹簧所联结的质量的综合值（见表 7-5），如图 1-5 所示弹簧系统，其  $m_e = m + \zeta m_s$ ； $\zeta$  为质量转化系数，与弹簧类型有关，其值见图 7-17，图 1-5a 情况  $\zeta = 0.33$ ，图 1-5b 情况  $\zeta = 0.23$ 。

### 1.4 弹簧系统受迫振动的振幅

图 1-6 为机器设备或车辆的减振弹簧系统。为了检验弹簧减振效果和分析弹簧的受力，则需要计算弹簧系统的振幅。

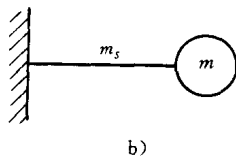
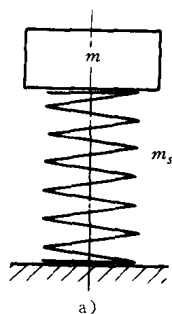


图 1-5 弹簧振动示意图

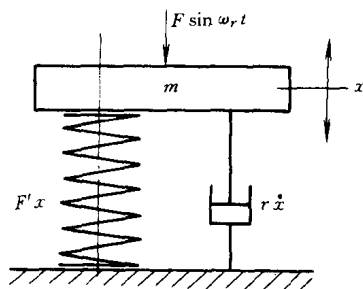


图 1-6 弹簧的支承或悬架系统

当弹簧系统的振动体受到激振力  $F \sin \omega_r t$  的作用（图 1-6），或其支承（弹簧的固定端）受到激振位移  $f \sin \omega_r t$  的作用时，其受迫振动可表示为

$$x = f_a \sin (\omega_r - \varphi)$$

式中  $f_a$  —— 受迫振动的振幅；

$\varphi$  —— 振动体位移与激振函数之间的相位差。

受迫振动的振幅  $f_{\max}$  与所使用阻尼的大小和类型有关。对于粘性阻尼，设其阻尼力为  $r \dot{x}$ ，当振动体受到激振力  $F \sin \omega_r t$  作用时，其振幅

$$f_a = \frac{f}{\sqrt{(1-\lambda^2)^2 + (2\zeta\lambda)^2}} \quad (1-8)$$

当支承弹簧的固定端受到激振位移  $f \sin \omega_r t$  的作用时，振动体的绝对振幅

$$f_a = \frac{f \sqrt{1 + (2\zeta\lambda)^2}}{\sqrt{(1-\lambda^2)^2 + (2\zeta\lambda)^2}} \quad (1-9)$$

$$\lambda = \frac{\omega_r}{\omega} = \frac{\nu_r}{\nu}$$

$$\zeta = \frac{r}{r_c}$$

$$r_c = 2 \sqrt{mF'}$$

式中  $f$ ——在与激振力幅值  $F_a$  相等的静力作用下系统的静变形；

$\lambda$ ——系统频率比；

$\omega$  和  $\nu$ ——系统的自振角频率和频率；

$\zeta$ ——系统的阻尼比；

$r$ ——系统的阻尼系数；

$r_c$ ——系统的临界阻尼系数；

$F'$ ——弹簧的刚度。

由图 1-7 可以看出,当  $\lambda = \nu_r / \nu \approx 1$  时,振幅急剧增大,这就是共振现象。在共振区附近,振幅的大小主要取决于阻尼的大小,阻尼越小,振幅越大。共振时的振幅,由式 (1-8) 可知为

$$f_a = \frac{f}{2\zeta} = \frac{F}{r\omega} = \frac{F}{2\pi r\nu} \quad (1-10)$$

如阻尼甚小,则共振振幅将很大。

当  $\lambda = \nu_r / \nu$  与 1 有一定的距离之后,振幅急剧下降,阻尼的影响也随之减小。当  $\lambda > \sqrt{2}$ , 即  $\nu < \nu_r / \sqrt{2}$  时,振幅  $f_a$  小于静变形  $f$ , 这也就是防振的理论基础。

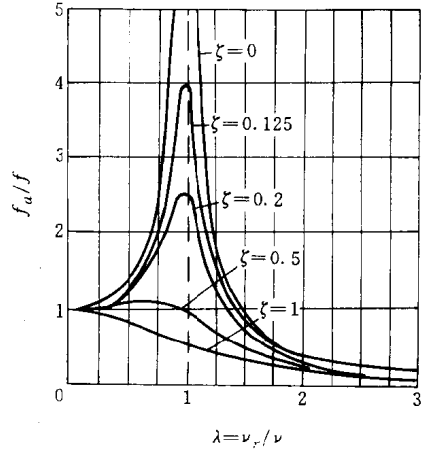


图 1-7 系统  $f_a/f$  与  $\lambda$  和  $\zeta$  的关系

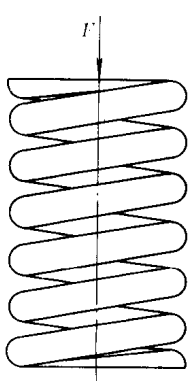
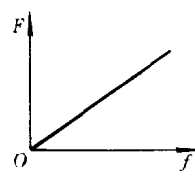
## 2 弹簧的类型

弹簧的类型很多,其分类方法也很多。按结构形状来分,弹簧大致分为圆柱螺旋弹簧、非圆柱螺旋弹簧和其他类型弹簧,现分述如下。

### 2.1 圆柱螺旋弹簧

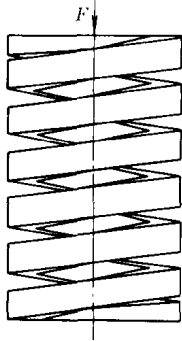
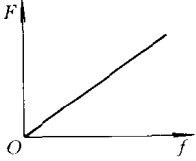
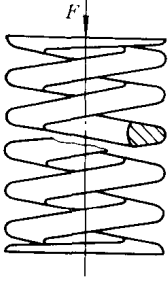
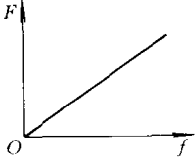
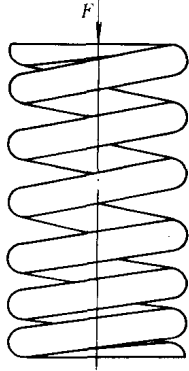
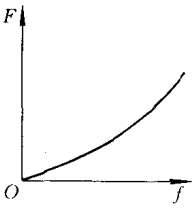
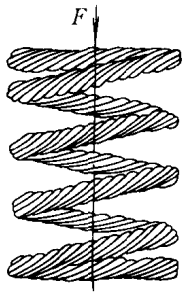
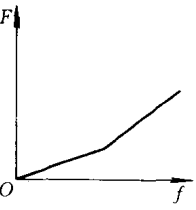
圆柱螺旋弹簧应用广泛,按其承受载荷的性能又分为螺旋压缩、螺旋拉伸和螺旋扭转弹簧等。有关它们的结构和性能见表 1-2。

表 1-2 圆柱螺旋弹簧的类型及特性

名称和结构	特性线	性能
圆截面材料圆柱螺旋压缩弹簧 		特性线呈线性,结构简单,制造方便,应用最广



(续)

名称和结构	特性线	性能
<p>矩形截面材料圆柱螺旋压缩弹簧</p> 		<p>在所占空间相同时，矩形截面材料比圆截面材料能吸收的能量多，刚度更接近于常数</p>
<p>扁截面材料圆柱螺旋压缩弹簧</p> 		<p>性能同矩形，截面材料圆柱螺旋压缩弹簧，但其工艺性和疲劳性能优于前者</p>
<p>不等节距圆柱螺旋弹簧</p> 		<p>当弹簧压缩到开始有簧圈接触后，特性线变为非线性，刚度及自振频率均为变值，利于消除或缓和共振的影响，可用于支承高速变载荷机构</p>
<p>多股螺旋弹簧</p> 		<p>当载荷大到一定程度后，特性线出现折点。比相同截面材料的普通螺旋弹簧强度高，减振作用大。在武器和航空发动机中常有使用</p>