

# 机械设计手册

第 2 卷

主 编 徐 灏

副主编 邱宣怀 蔡春源

汪 恺 余 俊



机械工业出版社

# 目 录

## 第 8 篇 机构及机械系统设计

### 第 1 章 机构的基本概念和分析方法

1 运动副 .....	3
2 机构运动简图 .....	4
3 机构自由度 .....	12
3.1 平面机构自由度 .....	12
3.2 空间机构自由度 .....	15
3.2.1 单闭环空间机构 .....	15
3.2.2 多闭环空间机构 .....	15
4 平面机构的结构分析 .....	20
4.1 高副替换成低副 .....	20
4.2 杆组及其分类 .....	20
4.3 平面机构级别的判定 .....	21
5 平面机构的运动分析 .....	23
5.1 速度瞬心的概念及其在机构速度 分析中的应用 .....	23
5.2 机构运动分析的图解方法 .....	24
5.2.1 图解方法所依据的原理 .....	24
5.2.2 四杆机构运动分析的图解方法 .....	25
5.3 机构运动分析的解析方法 .....	27
5.3.1 II 级机构 .....	27
5.3.2 高级机构 .....	31
6 平面机构的动态静力分析 .....	34
6.1 机械工作过程中所受的力 .....	34
6.2 II 级机构的动态静力分析方法 .....	35

### 第 2 章 机构选型

1 匀速转动机构 .....	38
1.1 定传动比转动机构 .....	38
1.1.1 摩擦传动机构 .....	38
1.1.2 齿轮轮系传动机构 .....	39
1.1.3 平行四杆机构 .....	41
1.1.4 联轴器与转动导杆机构 .....	42
1.2 可变传动比转动机构 .....	43
1.2.1 有级变速传动机构 .....	43

1.2.2 无级变速传动机构 .....	44
2 非匀速转动机构 .....	47
2.1 非圆齿轮机构 .....	47
2.2 双曲柄四杆机构 .....	48
2.3 转动导杆机构 .....	49
2.4 组合机构 .....	49
3 往复运动机构 .....	50
3.1 曲柄摇杆往复运动机构 .....	51
3.2 双摇杆往复运动机构 .....	51
3.3 滑块往复移动机构 .....	53
3.4 凸轮式往复运动机构 .....	54
3.5 齿轮式往复运动机构 .....	56
4 行程放大和可调行程机构 .....	57
4.1 行程放大机构 .....	57
4.2 可调行程机构 .....	61
4.2.1 棘轮调节机构 .....	61
4.2.2 偏心调节机构 .....	62
4.2.3 螺旋调节机构 .....	63
4.2.4 摇杆调节机构 .....	64
5 间歇运动机构 .....	65
5.1 间歇转动机构 .....	65
5.1.1 棘轮间歇机构 .....	65
5.1.2 槽轮间歇机构 .....	66
5.1.3 凸轮间歇机构 .....	68
5.1.4 不完全齿轮间歇转动机构 .....	69
5.1.5 偏心轮分度定位机构 .....	70
5.2 间歇摆动机构 .....	71
5.2.1 单侧间歇摆动机构 .....	71
5.2.2 双侧间歇摆动机构 .....	71
5.2.3 中途停歇摆动机构 .....	72
5.3 间歇移动机构 .....	72
5.3.1 单侧间歇移动机构 .....	72
5.3.2 双侧间歇移动机构 .....	73
5.3.3 中途间歇移动机构 .....	74
6 换向、单向机构 .....	75

# VI 目 录

6.1 换向机构 .....	75	2 常用平面四杆机构的运动分析	
6.2 单向机构 .....	78	公式 .....	123
7 差动机构 .....	80	3 平面连杆机构设计的基本问题	
7.1 差动螺旋机构 .....	80	和方法 .....	125
7.2 差动棘轮与差动齿轮机构 .....	82	3.1 平面连杆机构设计的基本问题 .....	125
7.3 差动连杆机构 .....	83	3.2 平面连杆机构的设计方法 .....	125
7.4 差动滑轮机构 .....	84	4 导引机构的设计 .....	125
8 实现预期轨迹的机构 .....	84	4.1 几何法的基本原理 .....	125
8.1 直线机构 .....	85	4.1.1 转动极点 .....	125
8.1.1 精确直线机构 .....	85	4.1.2 等视角关系 .....	126
8.1.2 近似直线机构 .....	86	4.1.3 相对转动极点 .....	126
8.2 特殊曲线绘制机构 .....	88	4.2 实现连杆两个位置的平面四杆机	
8.3 机械加工非圆机构 .....	90	构的设计 .....	126
8.4 工艺轨迹机构 .....	92	4.3 实现连杆三个位置的平面四杆机	
9 气、液驱动连杆机构 .....	95	构的设计 .....	127
10 增力及夹持机构 .....	97	4.4 实现连杆四个位置的平面四杆机	
11 伸缩机构和装置 .....	100	构的设计 .....	128
12 间隙消除装置 .....	101	4.5 定长法设计实现连杆三个位置的	
12.1 齿轮啮合间隙消除装置 .....	101	平面四杆机构 .....	128
12.2 螺旋间隙消除装置 .....	102	4.6 定长法设计实现连杆四个位置的	
13 过载保险装置 .....	105	平面四杆机构 .....	130
14 定位联锁装置 .....	107	5 函数机构的设计 .....	130
15 工件移置机构 .....	110	5.1 用几何法按输入杆与输出杆满足	
15.1 光轴类工件移置机构 .....	112	几组对应位置设计平面四杆机构 .....	130
15.2 螺钉、销钉类工件移置机构 .....	112	5.1.1 满足两组对应位置的设计 .....	130
15.3 片、块状工件移置机构 .....	112	5.1.2 满足三组对应位置的设计 .....	131
15.4 复杂形工件转位移置机构 .....	113	5.2 用解析法实现两连架杆角位置的	
16 工作头机构 .....	114	函数关系设计平面四杆机构 .....	132
16.1 零件装配工作头机构 .....	114	5.2.1 按两连架杆预定的对应位置	
16.2 零件检验测试装置 .....	115	设计 .....	132
		5.2.2 按两连架杆角位置呈连续函	
		数关系设计铰链四杆机构 .....	133
		5.3 按从动杆的急回特性设计平面四	
		杆机构 .....	134
		5.3.1 曲柄摇杆机构的设计 .....	134
		5.3.2 曲柄滑块机构的设计 .....	135
		5.3.3 导杆机构的设计 .....	135
		5.4 按从动杆近似停歇要求设计平面	
		四杆机构 .....	136
		5.4.1 曲柄摇杆机构的设计 .....	136
		5.4.2 曲柄滑块机构的设计 .....	136
		6 轨迹机构的设计 .....	137
<b>第3章 连杆机构设计</b>			
1 平面四杆机构的应用和基本			
型式 .....	118		
1.1 平面连杆机构的特点和应用 .....	118		
1.2 铰链四杆机构的基本型式 .....	118		
1.3 平面四杆机构的基本型式及其曲			
柄存在条件 .....	118		
1.4 平面四杆机构的急回特性 .....	120		
1.5 平面四杆机构的压力角与传动角 .....	120		
1.6 平面四杆机构的运动连续性 .....	121		
1.7 平面四杆机构应用举例 .....	121		

6.1 按照给定轨迹设计平面四杆机构的原理.....137	1.1 共轭曲线、瞬心线与啮合线.....151
6.2 按连杆曲线与给定曲线准确或近似地重合来设计平面四杆机构.....137	1.2 齿廓啮合基本定律和卡姆士(Camus)定理.....151
6.2.1 实验法.....137	2 定速比传动的共轭曲线机构设计.....151
6.2.2 解析法.....138	2.1 坐标转换.....151
6.2.3 应用连杆曲线图谱法.....139	2.2 应用包络法求共轭曲线.....152
6.3 利用连杆曲线设计输出杆近似停歇和直线导向的平面四杆机构示例.....140	2.3 应用齿廓法线法求共轭曲线.....153
6.4 实现同一轨迹的相当机构.....142	2.4 应用卡姆士定理求一对共轭曲线.....154
7 气液动连杆机构.....143	2.5 过渡曲线.....154
7.1 气液动连杆机构的特点和基本型式.....143	2.6 共轭曲线的曲率半径及其关系.....156
7.2 气液动连杆机构位置参数的计算.....143	2.7 啮合角、压力角、滑动系数和重合度.....157
7.3 气液动连杆机构运动参数和动力参数的计算.....144	2.8 啮合界限点与干涉界限点.....158
7.4 气液动连杆机构基本参数的选择.....144	3 变速比传动的非圆齿轮设计.....159
7.5 气液动连杆机构的设计.....145	3.1 非圆齿轮瞬心线计算的一般方法.....159
7.5.1 按摇杆摆角 $\phi_{12}$ 及初始角 $\phi_1$ 设计对中式气液动连杆机构.....145	3.2 非圆齿轮设计计算和切齿计算.....160
7.5.2 按摇杆摆角 $\phi_{12}$ 、液压缸初始长度 $L_1$ 、活塞行程 $H_{12} = L_2 - L_1$ 设计对中式气液动连杆机构.....145	3.2.1 用展成法加工一对非圆齿轮的原理.....160
7.5.3 用作图法按摇杆摆角 $\phi_{12}$ 、许用传动角 $[\gamma]$ 和 $\lambda$ 值设计对中式气液动连杆机构.....145	3.2.2 瞬心线的两个条件.....160
7.5.4 用作图法按摇杆和活塞行程四组对应位置设计气液动连杆机构.....146	3.2.3 非圆齿轮的齿数、模数和压力角.....160
8 空间连杆机构.....146	3.2.4 应用数控机床加工非圆齿轮时的数值计算法.....161
8.1 空间连杆机构的特点和应用.....146	3.3 椭圆齿轮.....161
8.2 空间四杆机构的设计.....147	3.3.1 一对全等的椭圆齿轮传动.....163
8.2.1 按主、从动杆三组对应位置设计 RSSR 机构.....147	3.3.2 卵形齿轮传动.....164
8.2.2 按给定函数关系设计 RSSR 机构.....148	3.4 偏心圆齿轮.....167
8.2.3 按从动杆摆角和急回特性设计 RSSR 机构.....149	3.4.1 一对全等的偏心圆齿轮传动.....167
8.2.4 按主、从动杆三组对应位置设计 RSSP 机构.....150	3.4.2 偏心圆齿轮与非圆齿轮传动.....169
<b>第 4 章 共轭曲线机构设计</b>	<b>第 5 章 凸轮机构设计</b>
1 瞬心线和共轭曲线.....151	1 凸轮机构及其类型.....172
	1.1 凸轮机构的基本类型.....173
	1.1.1 平面凸轮机构的基本类型及特点.....173
	1.1.2 空间凸轮机构的基本类型及特点.....174
	1.2 凸轮机构的锁合方式.....175
	2 从动件的运动规律.....176
	2.1 一般概念.....176
	2.1.1 从动件的运动类型.....176
	2.1.2 无因次运动参数.....177

# VIII 目 录

2.1.3 运动规律的特性值及选择运动规律的原则	178
2.2 多项式运动规律	180
2.2.1 多项式的一般形式及其求解方法	180
2.2.2 典型边界条件下多项式的通用公式	180
2.3 组合运动规律	182
2.4 用数值微分法求速度和加速度	192
3 凸轮机构的压力角、凸轮的基圆半径和最小曲率半径	192
3.1 压力角	192
3.2 凸轮廓线的基圆半径	194
3.3 凸轮廓线的曲率半径	196
4 盘形凸轮廓线的设计	201
4.1 作图法	201
4.2 解析法	203
4.2.1 滚子从动件盘形凸轮	203
4.2.2 平底从动件盘形凸轮	206
5 空间凸轮的设计	206
5.1 圆柱凸轮和圆锥凸轮	206
5.2 蜗杆凸轮	208
6 高速凸轮设计简介	211
6.1 从动件对激振的位移响应	212
6.2 动力凸轮廓线设计	213
6.3 从动件的跳动	214
6.3.1 力锁合	214
6.3.2 形锁合	215

## 第6章 棘轮机构、槽轮机构和不完全齿轮机构

1 棘轮机构设计	217
2 槽轮机构设计	220
3 不完全齿轮机构设计	229

## 第7章 组合机构

1 齿轮连杆机构	236
1.1 获得近似等速往复运动的齿轮连杆机构	236
1.1.1 导杆机构通过齿轮和正弦机构联接	236
1.1.2 椭圆齿轮与正弦机构联接	237

1.2 获得大摆角的齿轮连杆机构	239
1.3 获得近似停歇运动的齿轮连杆机构	240
1.3.1 行星轮系连杆机构	240
1.3.2 齿轮曲柄摇杆机构	241
2 凸轮连杆机构	244
2.1 实现特定运动规律的凸轮连杆机构	244
2.2 实现特定运动轨迹的凸轮连杆机构	245
3 齿轮凸轮机构	248
3.1 实现特定运动规律的齿轮凸轮机构	248
3.2 实现特定运动轨迹的齿轮凸轮机构	249
4 联动凸轮机构	250

## 第8章 机构精确度

1 误差的基本概念	251
1.1 误差的定义	251
1.2 误差分类	251
1.3 机构精度的评定指标	251
1.4 随机误差	251
1.5 系统误差	252
2 机构误差	252
2.1 机构误差的基本概念	252
2.2 机构误差的产生原因和构件原始误差的分类	252
2.3 机构误差的一般关系式	253
3 平面连杆机构的原始位置误差分析	254
3.1 转化机构微小位移法	254
3.2 影响系数法	256
4 凸轮机构原始位置误差分析	258
5 齿轮机构原始位置误差分析	259
5.1 基本概念	259
5.2 齿轮机构原始位置误差的简化计算	259
5.3 齿轮机构空程误差的估算	260
5.3.1 空程误差的基本概念	260
5.3.2 齿轮机构空程误差的估算	260
6 机械传动系统位置误差的分析	262

6.1 机构串联系统位置误差的分析.....262	5.3 动力机和工作机的工作点.....282
6.2 机构并联系统位置误差分析.....263	5.4 工作点的稳定性.....284
6.3 机构混联系统位置误差分析.....263	5.5、启动特性对最大加速力矩的影响.....285
6.4 多自由度机构位置误差分析.....263	5.6 异步电动机与工作机的匹配.....285
6.5 封闭式传动机构位置误差分析.....264	5.7 汽车传动的力矩匹配和转速匹配.....286
7 设计时提高机构传动精度的一般原则和方法.....265	5.8 飞轮在匹配中的作用.....287
8 按给定的精度要求制定公差的方法.....266	6 机械系统的变形补偿.....287
8.1 等公差法.....266	7 机械系统的合理分流传递.....288
8.2 原始误差等效作用法.....266	8 机器工作循环图.....289
8.3 简易计算法.....266	
8.4 误差补偿法.....266	
<b>第9章 机械系统设计</b>	
1 基本概念.....267	
1.1 机械系统的组成.....267	
1.2 机械系统的特性.....267	
2 动力机的性能和选择.....267	
3 工作机的工况.....270	
3.1 $n-T$ 特性.....270	
3.2 工作制度.....272	
4 传动的类型及选择.....272	
4.1 传动的分类.....272	
4.2 传动类型选择的依据.....274	
4.3 各种传动的特点和应用.....275	
4.4 传动类型的选择.....280	
4.4.1 选择的基本原则.....280	
4.4.2 定传动比传动的选择.....280	
4.4.3 有级变速传动的选择.....280	
4.4.4 无级变速传动的选择.....280	
4.4.5 单流传动和多流传动的选择.....281	
5 动力机和工作机的匹配.....281	
5.1 机械系统简图.....281	
5.2 典型机械特性曲线.....282	
	第10章 机械系统动力学分析与设计
	1 机械系统的等效模型.....293
	2 等效构件的运动方程式及其求解.....294
	3 飞轮设计.....296
	3.1 飞轮转动惯量的计算.....296
	3.2 飞轮的结构尺寸设计.....298
	4 刚性转子的平衡.....299
	5 平面机构的平衡.....302
	5.1 对称机构法.....302
	5.2 对重平衡法.....303
	6 考虑构件弹性的机械动力学分析.....303
	6.1 定速比传动系统的弹性动力学分析.....304
	6.1.1 力学模型的建立.....304
	6.1.2 运动微分方程式及其求解.....305
	6.2 平面连杆机构的弹性动力学分析.....307
	6.2.1 节点力、节点变形和单元位移函数.....307
	6.2.2 动能 $E$ 及等效质量矩阵.....308
	6.2.3 势能 $U$ 及单元刚度矩阵.....308
	6.2.4 广义力的求法.....309
	6.2.5 单元运动方程式.....310
	6.2.6 系统运动方程式.....311
	6.2.7 系统运动方程式的求解.....312
	参考文献.....312

## 第9篇 造型设计和人机工程

### 第1章 机器造型设计概述

1 造型设计定义.....3
2 造型设计的组成要素.....3
3 造型设计的特征与原则.....4

4 造型设计的工作程序与步骤.....4
----------------------

### 第2章 造型设计的艺术表现法则

1 机器造型的比例与尺度.....6
1.1 定义.....6

## X 目 录

1.2 特征	6
1.3 造型设计常用比例与特征	6
1.4 常用比例的相互转换(特征矩形面的分割)	8
1.5 比例设计方法	14
2 机器形态的均衡与稳定	16
2.1 定义	16
2.2 获得均衡稳定的方法	18
3 机器形态的统一与变化	18
3.1 定义	18
3.2 造型整体统一的方法	18
3.3 造型统一中求变化的方法	22

### 第3章 机器形态的构成方法

1 定义	24
2 造型的形态要素及其形式心理	24
3 常用几何曲线的构成与演变	27
4 常用几何面的构成与演变	35
5 常用几何体的构成与演变	38
6 造型形态构成的基本法则	40
7 造型设计中的错视与矫正	44

### 第4章 机器产品的色彩设计

1 色彩性质与要素	47
2 色彩体系与表示方法	48
3 常用色彩术语	51
4 产品色彩设计的指导性原则	52
5 色彩配置的方法与效果	52
5.1 色相调和法	52
5.2 明度调和法	55
5.3 纯度调和法	56
6 色彩功能与应用	57
7 色彩的好恶	59
8 主体色的数量与配置方式	60

### 第5章 机器的装饰设计和面饰工艺

1 线条装饰与方法	62
2 面板(标牌)设计与工艺选择	63
3 机器涂饰的油漆涂料选择	68
4 机器外观件的面饰处理方法选择	72

## 第6章 机器造型的宜人性设计

1 人机工程概述	75
1.1 术语与定义	75
1.2 人机能力比较与选择	75
1.3 人的感觉通道性质与选择	76
1.4 人机关系设计的指导原则	77
2 人体尺寸数据	79
2.1 人体尺寸概念	79
2.2 成年男女人体的主要尺寸数据	79
2.3 采用人体数据百分位的建议与尺寸数值计算	88
3 人的肢体正常活动范围与空间选择	88
4 人体模板与操作姿势及空间设计	91
4.1 人体模板	91
4.2 装配、维修的操作空间尺寸	93
4.3 工作位置的平面高度与调节范围	95
4.4 操作姿态下的有利工作区域与方向	96
4.5 以身高为基准的设备与用具空间尺寸的推算图表	99
5 人的视野	101
6 人的肢体用力限度	102
6.1 成人站姿操作的用力状态与范围	102
6.2 成人坐姿操作的用力状态与范围	104
7 指示与操作装置的设计及选择	105
7.1 术语	105
7.2 指示装置的形式与排列方式选择	105
7.3 操作、调节装置形式、参数与安置空间的选择	109

### 第7章 工作环境设计

1 工作环境的照明设计	114
1.1 术语	114
1.2 工作环境照明的一般要求与参数选择	114
2 工作环境的小气候要求	119
3 工作环境的安全防护设计	119
3.1 术语	119
3.2 工作环境安全防护的一般要求与参数选择	120
参考文献	123

## 第10篇 价 值 工 程

## 第1章 价值工程的基本原理

- 1 价值工程中功能、寿命周期成本、价值的涵义 .....3
- 2 价值工程的定义与特点 .....3
  - 2.1 价值工程的定义 .....3
  - 2.2 价值工程的特点 .....3
- 3 提高产品价值的主要途径 .....4
- 4 价值工程的应用 .....4
  - 4.1 价值工程的应用范围 .....4
  - 4.2 价值工程应用的时机 .....4
- 5 价值工程的工作程序和指导原则 .....4
  - 5.1 价值工程的工作程序 .....4
  - 5.2 价值工程程序的结合 .....5
  - 5.3 开展 VE 活动的指导原则 .....5

## 第2章 机械产品价值工程对象的选择和情报收集

- 1 价值工程对象的选择 .....6
  - 1.1 价值工程对象的选择原则 .....6
  - 1.2 价值工程对象的选择方法 .....6
    - 1.2.1 经验分析法 .....6
    - 1.2.2 价值测定法 .....7
    - 1.2.3 百分数分析法 .....7
    - 1.2.4 寿命周期分析法 .....7
    - 1.2.5 成本比重分析法 .....8
    - 1.2.6 强制确定法 .....8
    - 1.2.7 最合适区域法 .....9
- 2 价值工程中的情报收集 .....10
  - 2.1 情报内容 .....10
  - 2.2 情报收集的原则 .....11

## 第3章 机械产品的功能分析

- 1 功能分析的涵义 .....12
- 2 功能定义 .....12
  - 2.1 功能定义的涵义 .....12
  - 2.2 功能定义的目的 .....12
  - 2.3 功能定义的方法 .....12
  - 2.4 功能定义的检查 .....12

- 3 功能整理 .....13
  - 3.1 功能整理的涵义 .....13
  - 3.2 功能整理的目的 .....13
  - 3.3 功能分类 .....13
    - 3.3.1 按功能的重要程度分类 .....13
    - 3.3.2 按功能的特点分类 .....13
    - 3.3.3 按用户需要分类 .....13
  - 3.4 功能整理的方法 .....13
- 4 功能评价 .....14
  - 4.1 功能评价的涵义 .....14
  - 4.2 功能评价的目的 .....14
  - 4.3 功能评价的步骤 .....14
  - 4.4 功能评价的方法 .....15
    - 4.4.1 功能现实成本的估算 .....15
    - 4.4.2 功能最低成本的估算 .....15
    - 4.4.3 功能价值的计算 .....17
    - 4.4.4 功能或功能区目标成本的确定 .....18

## 第4章 机械产品设计方案的创造和评价

- 1 方案的创造 .....19
  - 1.1 方案创造的过程 .....19
  - 1.2 方案创造的原则 .....19
  - 1.3 方案创造的方法 .....19
    - 1.3.1 自由讨论法 .....19
    - 1.3.2 哥顿法 .....19
    - 1.3.3 检核表法 .....20
    - 1.3.4 输入输出法 .....21
    - 1.3.5 方案组合法 .....22
    - 1.3.6 缺点列举法 .....22
    - 1.3.7 仿生学法 .....22
  - 1.4 方案创造的工作方法 .....22
    - 1.4.1 方案创造的思考 .....22
    - 1.4.2 方案的图形化 .....23
    - 1.4.3 方案的具体化与筛选 .....23
    - 1.4.4 方案的检查 .....23
- 2 方案的评价 .....24
  - 2.1 方案的概略评价 .....24
    - 2.1.1 概略评价的内容 .....24
    - 2.1.2 概略评价的方法 .....24
    - 2.1.3 概略评价的注意事项 .....24



Ⅺ 目 录

2.2 方案的具体化调查 .....	24	4 功能评价 .....	34
2.2.1 方案的具体化 .....	24	4.1 分析确定功能的现实成本 .....	34
2.2.2 方案的调查 .....	24	4.2 确定功能评价价值 .....	34
2.3 方案的详细评价 .....	24	5 方案的创造 .....	36
2.3.1 技术可行性评价 .....	24	6 方案的评价 .....	37
2.3.2 经济合理性评价 .....	25	6.1 技术评价 .....	37
2.3.3 方案的社会评价 .....	26	6.2 经济评价 .....	37
2.3.4 方案的综合评价 .....	26	6.3 社会评价 .....	38
3 提案的实施与最终成果的评价 .....	31	7 方案的试验验证 .....	38
3.1 提案的审批与实施 .....	31	8 VE 成果评价 .....	38
3.1.1 提案表的编制 .....	31	8.1 技术评价 .....	38
3.1.2 提案的审批 .....	31	8.2 经济效果 .....	38
3.1.3 提案的实施与跟踪 .....	31	例 2 价值工程在 J 0810 机油滤清器上的	
3.2 提案的最终成果评价 .....	32	应用 .....	38
3.2.1 提案的企业技术经济效果评价 .....	32	1 VE 对象的选择 .....	38
3.2.2 提案的社会效果评价 .....	32	1.1 VE 产品的选择 .....	38
3.3 价值工程的组织 .....	32	1.2 确定 VE 工作范围 .....	38
3.3.1 组织形式 .....	32	2 情报收集 .....	39
3.3.2 价值工程的人才结构 .....	32	3 功能定义 .....	41
3.4 开展价值工程的基础工作 .....	33	4 功能整理 .....	41
		5 功能评价 .....	42
		5.1 功能现实成本的测算 .....	42
		5.2 功能评价值的确定 .....	42
		5.3 计算成本降低幅度 .....	43
		6 方案创造和概略评价 .....	43
		7 方案的具体化和详细评价 .....	44
		8 价值工程最终成果评价 .....	44
		参考文献 .....	46

第 5 章 价值工程应用实例

例 1 价值工程在 Z 28-100 型滚丝机  
上的应用 .....

1 VE 对象的选择 .....	34
1.1 VE 产品的选择 .....	34
1.2 VE 零件的选择 .....	34
2 情报的收集 .....	34
3 功能定义和整理 .....	34

第 11 篇 疲劳强度设计

主要符号表 .....

第 1 章 概 述

1 疲劳术语 .....	5
2 循环应力与循环应变 .....	6
2.1 循环应力 .....	6
2.2 循环应变 .....	6
3 无限寿命设计与有限寿命设计 .....	7
4 疲劳的分类 .....	7

第 2 章 疲 劳 试 验

1 试样及其制备 .....	9
----------------	---

1.1 试样 .....	9
1.2 试样制备 .....	11
1.2.1 取样 .....	11
1.2.2 机械加工 .....	12
1.2.3 热处理 .....	12
1.2.4 测量、探伤与贮存 .....	12
2 试验机 .....	13
3 试验方法 .....	18
3.1 常规疲劳试验法 .....	18
3.2 成组试验法 .....	19
3.3 升降法试验 .....	20
3.4 疲劳极限的快速试验法 .....	21

3.4.1 泊洛脱法 .....	22	2. 尺寸的影响 .....	89
3.4.2 洛卡脱法 .....	23	3 表面状态的影响 .....	90
3.4.3 全循环阶梯加载法 .....	23	3.1 加工情况 .....	90
<b>第3章 疲劳图和疲劳数据表</b>		3.2 腐蚀情况 .....	91
1 S-N 曲线 .....	24	3.3 表面强化 .....	91
2 P-S-N 曲线 .....	33	4 频率影响 .....	92
3 P-S-N 曲线通用方程式中的常数		5 载荷类型的影响 .....	92
$a_P$ 与 $b_P$ .....	37	5.1 平均应力的影响 .....	92
4 等寿命曲线 .....	43	5.2 应力峰值的影响 .....	94
5 常用材料的疲劳极限 .....	48	6 环境因素的影响 .....	94
6 疲劳极限的经验公式 .....	59	6.1 腐蚀环境的影响 .....	94
<b>第4章 影响疲劳强度的因素</b>		6.1.1 载荷频率的影响 .....	95
1 应力集中的影响 .....	60	6.1.2 腐蚀方式的影响 .....	95
1.1 应力的集中与梯度 .....	60	6.1.3 腐蚀介质的 pH 值影响 .....	95
1.2 理论应力集中系数 .....	60	6.1.4 应力集中的影响 .....	96
1.2.1 带沟槽的板形零件的理论应力		6.1.5 尺寸的影响 .....	97
集中系数 .....	62	6.1.6 应力状态的影响 .....	98
1.2.2 带沟槽的圆柱形零件的理论		6.2 温度的影响 .....	98
应力集中系数 .....	63	6.2.1 低温的影响 .....	98
1.2.3 带台肩圆角的板形零件的理论		6.2.2 高温的影响 .....	98
应力集中系数 .....	67	6.3 受载方式的影响 .....	98
1.2.4 带台肩圆角的圆柱形零件的理		<b>第5章 疲劳累积损伤理论</b>	
论应力集中系数 .....	68	1 基本概念 .....	99
1.2.5 开孔的机械零件的理论应力集中		2 线性疲劳累积损伤理论 .....	99
系数 .....	70	2.1 线性累积损伤理论 .....	99
1.2.6 其他常用零件的理论应力集中		2.2 双线性累积损伤理论 .....	100
系数 .....	73	3 其他累积损伤理论 .....	101
1.3 有效应力集中系数 .....	76	3.1 科尔顿-多兰累积损伤理论 .....	101
1.3.1 带台肩圆角的圆柱形零件的有		3.2 莱维和科津累积损伤理论 .....	101
效应力集中系数 .....	77	<b>第6章 高周疲劳</b>	
1.3.2 带沟槽的圆柱形零件的有效应		1 概述 .....	102
力集中系数 .....	80	1.1 常规疲劳设计 .....	102
1.3.3 开孔的机械零件的有效应力集中		1.2 安全系数 .....	102
系数 .....	82	2 无限寿命设计 .....	106
1.3.4 其他常用零件的有效应力集中		2.1 单向应力时无限寿命设计 .....	106
系数 .....	85	2.1.1 计算公式 .....	106
1.3.5 算例 .....	88	2.1.2 算例 .....	107
1.4 用相对应力梯度求有效应力集中		2.2 多向应力时无限寿命设计 .....	107
系数 .....	88	3 有限寿命设计 .....	108
1.5 敏性系数的统计参数 .....	89	3.1 安全系数计算公式 .....	108

3.2 寿命估算	108	3.4 应力集中因素	141
3.3 算例	108	3.5 表面状态因素	141
<b>第7章 低周疲劳</b>		3.6 平均应力因素	142
1 低周疲劳的 $S-N$ 曲线	110	4 高温疲劳试验	142
1.1 应力-寿命( $\sigma_a-N$ )曲线	110	4.1 载荷谱	143
1.2 应变-寿命( $\epsilon_a-N$ )曲线	111	4.2 试样	145
2 循环应力-应变曲线	112	4.3 试验设备与试验方法	145
2.1 滞后回线	112	5 高温下的疲劳强度计算	146
2.2 循环硬化与循环软化	112	5.1 静态算法	146
2.3 循环应力-应变曲线求法	112	5.2 蠕变疲劳复合作用算法	146
3 应变-寿命曲线	113	<b>第10章 低温疲劳</b>	
3.1 曼森-科芬方程	113	1 金属在低温下的单调特性	148
3.2 四点法求应变-寿命曲线	114	2 低温下材料的疲劳数据	148
3.3 通用斜率法	115	2.1 低温下材料的疲劳极限	148
4 低周疲劳试验	115	2.2 低温时应力集中的影响	149
4.1 低周疲劳试验的试样	115	2.3 材料在低温下的 $S-N$ 曲线与等寿命曲线	151
4.2 带过渡圆弧的试样应变幅度的修正	116	3 低温疲劳强度计算	151
4.3 低周疲劳试验方法	116	<b>第11章 热疲劳</b>	
5 低周疲劳的寿命估算	117	1 热应力与热应变	152
<b>第8章 腐蚀疲劳</b>		2 热疲劳试验方法	153
1 概述	118	2.1 定性比较法	153
1.1 腐蚀疲劳术语	118	2.2 定量测定法	153
1.2 腐蚀疲劳的特性	118	2.3 热-机械疲劳试验方法	154
2 腐蚀疲劳强度	118	3 热疲劳强度与寿命估算	155
2.1 腐蚀疲劳极限	118	3.1 最大温度-寿命曲线	155
2.2 腐蚀疲劳的 $S-N$ 曲线	122	3.2 应变幅度-寿命曲线	156
2.3 影响腐蚀疲劳的因素	127	3.3 热疲劳曲线与其他疲劳曲线比较	157
3 腐蚀疲劳试验	131	4 热疲劳强度设计中的主要问题	158
3.1 试验要求	131	<b>第12章 接触疲劳</b>	
3.2 试验装置	132	1 接触应力分析	159
4 腐蚀疲劳的寿命估算	133	2 接触疲劳破坏	160
<b>第9章 高温疲劳</b>		3 影响接触疲劳的因素	161
1 高温对材料机械性能的影响	134	3.1 滑动速度因素	161
2 高温时材料的 $S-N$ 曲线	136	3.2 表面粗糙度因素	161
3 影响高温疲劳性能的主要因素	139	3.3 润滑油膜因素	162
3.1 材料因素	139	3.4 润滑剂因素	163
3.2 温度因素	139	3.5 接触物体材料因素	163
3.3 频率因素	140	3.5.1 非金属夹杂物	163

3.5.2	热处理组织状态	164
3.5.3	表层与心部硬度	164
4	接触疲劳强度计算	164
5	接触疲劳试验	166
5.1	接触疲劳试验术语	166
5.2	试验机	166
5.3	试样	167

### 第13章 随机疲劳

1	基本概念	169
2	载荷谱	169
2.1	概述	169
2.2	雨流法	170
2.3	载荷谱编制	171
3	随机疲劳强度计算	172
3.1	程序谱的疲劳强度计算	172
3.2	概率密度函数表示连续谱的强度计算	172

### 第14章 冲击疲劳

1	多次冲击强度	173
1.1	多次冲击能量-寿命(A-N)曲线	173
1.2	影响多次冲击强度的因素	173
1.2.1	材料的强度	173
1.2.2	材料的韧性	173
1.2.3	工艺与材料代用	174
2	冲击疲劳强度计算	177
3	提高多次冲击疲劳强度的措施	177

### 第15章 疲劳强度的现代设计

1	裂纹形成寿命估算——局部应力应变法	178
1.1	预备知识	178
1.1.1	真实应力与真实应变	178
1.1.2	玛辛特性	178
1.1.3	材料的记忆特性	179

1.1.4	载荷顺序效应	179
1.2	局部应力-应变分析	179
1.2.1	滞后回线方程式	179
1.2.2	诺伯法	179
1.3	裂纹形成寿命估算方法	181
1.3.1	损伤计算	181
1.3.2	估算裂纹形成寿命的步骤	181
1.4	算例	181
2	裂纹扩展寿命估算	184
2.1	脆断与裂纹扩展的判别	184
2.2	疲劳裂纹扩展速度	187
2.3	疲劳裂纹扩展寿命估算方法	191
3	裂纹扩展试验	193
3.1	试样	193
3.2	裂纹扩展试验方法	193
4	损伤容限设计	194
5	算例	194
6	疲劳强度的可靠性设计	195

### 第16章 提高零件疲劳强度的方法

1	合理选材	196
1.1	提高纯度	196
1.2	细化晶粒	196
1.3	最佳的热处理与组织状态	196
1.4	强度、塑性与韧性的合理配合	196
2	改进结构	197
3	表面强化	200
3.1	表面喷丸强化	200
3.2	表面辗压强化	202
3.3	内孔挤压强化	202
3.4	表面化学热处理	203
3.5	表面淬火	204
3.6	表面激光强化	204
	参考文献	205

## 第12篇 蠕变设计

### 第1章 概 述

1	蠕变现象	3
2	蠕变曲线	3

2.1	蠕变曲线的一般特征	3
2.2	蠕变曲线的数学表示形式	4
3	蠕变极限与持久强度	5
3.1	蠕变极限	5

# XVI 目 录

3.2 持久强度	5
4 影响蠕变与持久强度的主要因素	5
4.1 化学成分的影响	6
4.2 工艺因素的影响	6
4.3 工作条件的影响	7
4.4 零件尺寸与形状的影响	8

## 第2章 蠕变试验

1 蠕变与持久强度试验	10
1.1 蠕变试验	10
1.2 持久强度试验	13
2 加速蠕变试验	16
2.1 直接试验法	17
2.2 间接试验法	17
2.3 应力加速法	17
2.4 温度加速法	17
3 蠕变与持久强度试验数据的外推法	18
3.1 等温线法	18
3.2 时间-温度参数法 (T·T·P)	18
3.3 最少约束法	20
3.4 外推法的评价	20

## 第3章 蠕变和持久强度数据

1 黑色金属材料的蠕变与持久强度数据	21
1.1 铸铁	21
1.2 铸钢	22
1.3 碳素钢	24
1.4 普通低合金钢与合金结构钢	26
1.5 耐热钢与不锈钢	30
1.6 弹簧钢	34
1.7 高温合金	36
2 有色金属材料的蠕变与持久强度数据	40
2.1 铸造铝合金	40

2.2 钛合金	40
3 其他国家金属材料的蠕变与持久强度数据	42

## 第4章 蠕变计算

1 蠕变设计准则	55
1.1 蠕变的许用应力 $[\sigma]^T$	55
1.2 持久强度的许用应力 $[\sigma]^T$	57
1.3 高温静应力下的安全系数	58
2 单向应力状态的蠕变计算	59
2.1 恒定温度、恒定应力情况	59
2.2 恒定温度、变动应力情况	59
2.3 恒定应力、变化温度情况	60
3 三向应力状态的蠕变计算	61
4 蠕变-疲劳交互作用下的寿命计算	62
4.1 线性累积损伤法	62
4.2 应变幅划分法	62
4.3 频率修正法	64
5 蠕变设计举例	64
5.1 透平机械叶片的蠕变计算	64
5.2 梁的弯曲蠕变计算	65
5.3 受内压厚壁圆筒的蠕变计算	67

## 第5章 应力松弛

1 应力松弛曲线	69
1.1 应力松弛曲线的一般特征	69
1.2 应力松弛的经验公式	69
2 应力松弛试验	70
2.1 拉伸试验法	70
2.2 环状试样试验	70
3 应力松弛与蠕变的关系	71
4 应力松弛的试验数据	73
5 应力松弛计算与举例	76
5.1 应力松弛计算	76
5.2 应力松弛计算举例	77
参考文献	77

# 第13篇 可靠性设计

## 第1章 可靠性概念、可靠性特征量和可靠性设计程序

1 可靠性的概念	3
----------	---

2 可靠性特征量	3
2.1 可靠度	3
2.2 累积失效概率	5
2.3 平均寿命	5

2.4 可靠寿命和中位寿命	5	4.2 正态分布完全样本参数估计	60
2.5 失效率和失效率曲线	6	4.3 正态分布截尾寿命试验的参数估计	60
2.5.1 失效率	6	4.3.1 极大似然估计	60
2.5.2 失效率曲线	7	4.3.2 最佳线性无偏估计	61
2.6 可靠性特征量间的关系	9	4.3.3 简单线性无偏估计	61
3 维修性特征量	10	4.4 正态分布可靠寿命和可靠度的估计	61
3.1 维修度	10	5 对数正态分布的数值分析法	82
3.2 修复率	10	6 威布尔分布的数值分析	84
3.3 平均修复时间	10	6.1 威布尔分布的拟合性检验	85
3.4 维修性和可靠性特征量对应关系	10	6.2 威布尔分布的参数估计	86
4 有效性特征量	11	6.2.1 矩法估计	86
4.1 有效度的意义	11	6.2.2 极大似然估计	86
4.2 有效度种类	12	6.2.3 最佳线性无偏估计和简单线性 无偏估计	88
4.3 单元的有效度	12	6.3 威布尔分布的可靠度和可靠寿命	88
5 可靠性设计程序和手段	13	7 可靠性的非参数分析	112
<b>第2章 可靠性数据的图分析法</b>			
1 可靠性试验种类	17	<b>第4章 系统的可靠性</b>	
2 可靠性中常用的概率分布	17	1 不可修复系统的可靠性	116
3 频数、频率直方图和近似分布图	23	1.1 可靠性模型	116
4 累积分布函数的估计	25	1.1.1 串联系统	116
5 用正态概率纸的分析法	34	1.1.2 并联系统	116
6 用对数正态概率纸的分析法	36	1.1.3 混联系统	117
7 用威布尔概率纸的分析法	41	1.1.4 表决系统	118
7.1 两参数威布尔分布	41	1.1.5 旁联系统	118
7.2 三参数威布尔分布	43	1.1.6 复杂系统	119
7.3 分组最小值寿命试验的分析法	45	1.2 系统的可靠性特征量	120
8 中止寿命试验的分析法	47	1.3 有贮备的系统	121
<b>第3章 可靠性数据的数值分析法</b>			
1 回归分析法	50	2 可修复系统的可靠性	122
1.1 基本关系式	50	3 可靠性预计	126
1.2 几种常用概率分布的变换关系	51	3.1 可靠性预计的目的	126
1.3 概率分布的回归分析法	51	3.2 可靠性预计的方法	126
2 分布类型的假设检验	52	3.2.1 设计初期的概略预计法	126
2.1 $\chi^2$ 检验法	53	3.2.2 数学模型法	126
2.2 K-S检验法	54	3.2.3 上下限法	127
3 指数分布的数值分析	55	3.2.4 蒙特卡洛模拟法	128
3.1 指数分布的拟合性检验	55	4 可靠性分配	129
3.2 指数分布的参数估计和可靠度	56	4.1 可靠性分配的原则	129
4 正态分布的数值分析	58	4.2 可靠性分配的方法	129
4.1 正态分布的拟合性检验	58	4.2.1 等分配法	129
		4.2.2 再分配法	130
		4.2.3 比例分配法	130

# XVII 目 录

4.2.4 综合评分分配法	132	4.3 材料强度特性	169
4.2.5 动态规划分配法	132	4.4 计算系数	171
5 失效模式、效应及危害度分析 (FMECA)	135	4.5 静强度的概率设计	172
5.1 基本概念	135	4.5.1 正态分布的设计法	173
5.2 分析的过程和方法	135	4.5.2 非正态分布的设计法	175
6 故障树分析 (FTA)	138	4.6 疲劳强度的概率设计	177
6.1 基本概念	138	4.6.1 零件的疲劳强度	178
6.2 故障树的建立	140	4.6.2 按 $p-S-N$ 线图的疲劳强度计算	182
6.3 故障树的定性分析	141	4.6.3 按 $3s-S-N$ 线图的疲劳强度计算	184
6.4 故障树的定量分析	144	4.6.4 按 $3s-\sigma_m-\sigma_a$ 线图的疲劳强度计算	186
6.4.1 顶事件发生的概率	144	4.6.5 按等效应力的疲劳强度计算	190
6.4.2 重要度	145	4.6.6 受复合应力的计算法	191
7 设计评审	147	4.6.7 受不稳定变应力的疲劳强度计算	192
7.1 一般概念和要求	147	4.6.8 疲劳寿命的可靠性预计	196
7.2 设计评审点的设置	147	5 其他失效形式的概率设计	198
7.3 设计评审组	147	5.1 断裂韧性的概率设计	198
7.4 设计评审检查清单	148	5.1.1 静载抗断裂的可靠度	198
7.5 设计评审程序	148	5.1.2 变载抗断裂的可靠度	201
7.6 设计评审资料要求	149	5.1.3 变载抗断裂的可靠寿命	202
<b>第5章 概率设计</b>			
1 应力-强度模型求可靠度	151	5.2 刚度的概率设计	203
1.1 应力-强度模型	151	5.3 磨损的概率设计	204
1.2 应力-强度模型求可靠度的一般公式	151	5.3.1 磨损和磨损寿命曲线	204
1.3 数值积分法求可靠度	153	5.3.2 抗磨损的可靠度和可靠寿命	206
1.4 图解法求可靠度	154	5.4 腐蚀的概率设计	206
1.5 极限状态法求可靠度	156	<b>第6章 蒙特卡洛模拟法的应用</b>	
1.5.1 多个正态变量的情况	156	1 概述	208
1.5.2 非正态变量的情况	157	2 随机数的产生	208
1.6 可靠度的置信下限	159	2.1 $[0, 1]$ 区间均匀分布随机数的产生	209
2 可靠度与安全系数	161	2.1.1 随机数表法	209
3 随机变量函数的均值和标准差的近似计算	163	2.1.2 伪随机数法	211
3.1 泰勒展开法	163	2.2 特殊随机数的产生	212
3.2 变异系数法	164	3 应用举例	214
3.3 基本函数法	164	3.1 求随机变量函数的分布	214
4 机械强度的概率设计	168	3.2 按应力-强度模型验算可靠度	215
4.1 应力和载荷	168	3.3 在系统可靠性中的应用	216
4.2 几何尺寸	169	3.4 求可靠度的置信限	218
		参考文献	219

## 第14篇 优 化 设 计

## 第1章 机械优化设计的基本概念

1 机械设计、计算机辅助设计与优化设计 .....	3
2 优化设计的数学模型 .....	3
3 优化设计的计算机程序及其应用 .....	4
4 优化方法及机械优化问题的分类 .....	5
4.1 设计参数优化与总体方案优化 .....	5
4.2 数学优化方法 .....	5
4.3 数学规划 .....	5
4.4 动态规划和几何规划 .....	6
5 数学规划问题的基本概念及数学基础 .....	6
5.1 设计空间 .....	6
5.2 目标函数的等值线(面) .....	6
5.3 函数的一阶导数向量、二阶导数矩阵及泰勒展开式 .....	7
5.4 无约束极值问题的最优解条件 .....	7
5.5 可行域的概念 .....	8
5.6 等式约束极值问题的最优解必要条件——Lagrange (拉格朗日) 法则 .....	8
5.7 不等式约束极值问题的最优解必要条件——Kuhn-Tucker (库恩-特克) 条件 .....	9
6 非线性规划数值算法的基本思想 .....	10
7 建立优化设计数学模型的过程 .....	11
8 优化设计数学模型的几个问题 .....	12
8.1 数学模型的尺度变换 .....	12
8.2 多目标优化设计 .....	13
8.3 含离散型设计变量的优化设计 .....	13

## 第2章 最优化计算方法

1 一维搜索计算方法 .....	14
1.1 确定搜索区间的进退法 .....	14
1.2 黄金分割法(0.618法) .....	15
1.3 二次插值法 .....	16

2 无约束极值问题的解法 .....	17
2.1 运用导数信息的算法 .....	17
2.1.1 梯度法 .....	17
2.1.2 牛顿法 .....	18
2.1.3 BFGS 变尺度法和 DFP 变尺度法 .....	19
2.2 不用导数信息的算法 .....	20
2.2.1 坐标轮换法 .....	20
2.2.2 共轭方向法 .....	20
2.2.3 Powell 共轭方向法 .....	21
3 线性规划 .....	22
3.1 线性规划的应用数学模型 .....	22
3.2 线性规划问题的图解法 .....	23
3.3 线性规划数学模型的标准形式 .....	24
3.3.1 标准形式 .....	24
3.3.2 将一般形式化为标准形式的方法 .....	24
3.4 解线性规划问题的单纯形法 .....	25
3.4.1 基本解、基本可行解和最优基本可行解 .....	25
3.4.2 单纯形法的基本步骤 .....	25
3.5 两阶段单纯形法 .....	26
3.5.1 人工变量 .....	26
3.5.2 第一阶段算法 .....	26
3.5.3 第二阶段算法 .....	26
3.6 修正单纯形法 .....	27
3.6.1 单纯形法的矩阵表示 .....	27
3.6.2 修正单纯形法 .....	27
4 约束非线性规划计算方法 .....	28
4.1 概述 .....	28
4.2 构造线性规划子问题 .....	29
4.2.1 广义简约梯度法 .....	29
4.2.2 投影梯度法 .....	31
4.3 构造无约束极值子问题 .....	32
4.3.1 外点法 .....	32
4.3.2 内点法 .....	33
4.3.3 混合罚函数法 .....	35
4.3.4 增广乘法 .....	35
4.3.5 精确罚函数法 .....	36
4.4 构造二次规划子问题 .....	36
4.4.1 Powell 型序列二次规划法 .....	36



4.4.2	Biggs 型序列二次规划法	37	公式	55
4.4.3	二阶导数信息矩阵 $H^k$ 和 $B^k$ 的修正公式	38	3.2 齿轮传动优化设计的数学模型	56
4.4.4	不精确一维搜索策略	38	3.2.1 设计变量	56
4.5	直接方法	39	3.2.2 目标函数	56
4.5.1	随机试验法	39	3.2.3 约束函数	56
4.5.2	复合形法	40	3.3 参数圆整和标准化的处理方法	59
<b>第3章 常用机构及机械零部件优化设计的数学模型</b>			3.4 齿轮传动优化设计的程序结构	60
1	平面连杆机构优化设计的数学模型	41	3.5 数学模型与优化计算的联接	60
1.1	连杆机构优化设计的一般问题	41	4 流体动压滑动轴承优化设计的数学模型	61
1.1.1	运动学的优化设计	41	4.1 轴承的几何参数和计算公式	61
1.1.2	动力学的优化设计	41	4.2 圆柱轴承和椭圆轴承性能计算基本公式	63
1.2	蟹爪式装载机扒取机构的优化设计	41	4.3 动压滑动轴承优化设计的数学模型	63
1.2.1	扒取机构的运动学分析	41	4.3.1 设计变量	63
1.2.2	优化设计的数学模型	42	4.3.2 目标函数	63
1.3	四杆变幅机构的优化设计	43	4.3.3 约束函数	64
1.3.1	基本计算公式	43	4.4 流体动压滑动轴承优化设计的求解方法和程序框图	64
1.3.2	优化设计的数学模型	44	4.4.1 插值法	64
1.4	实例	45	4.4.2 曲线的拟合	65
2	盘形凸轮机构优化设计的数学模型	47	4.4.3 程序框图	65
2.1	基本计算公式	47	4.5 实例	66
2.1.1	凸轮机构升程瞬效率计算公式	47	5 圆柱螺旋弹簧优化设计的数学模型	68
2.1.2	凸轮机构接触强度计算公式	48	5.1 基本计算公式	68
2.2	优化设计数学模型	49	5.2 主要验算公式	68
2.2.1	设计变量	49	5.3 结构尺寸计算公式	69
2.2.2	目标函数	49	5.4 两层并列式压缩组合螺旋弹簧的计算公式	70
2.2.3	约束函数	49	5.5 优化设计的数学模型	70
2.3	优化设计程序框图	49	5.5.1 设计变量	70
2.4	实例	49	5.5.2 目标函数	70
3	齿轮传动优化设计的数学模型	54	5.5.3 约束函数	70
3.1	齿轮传动的基本计算公式	54	5.6 程序结构框图	71
3.1.1	渐开线圆柱齿轮传动的接触和弯曲强度计算式	54	5.7 实例	71
3.1.2	渐开线圆柱齿轮传动的胶合承载能力计算式	55	6 定轴式齿轮减速器优化设计数学模型	73
3.1.3	锥齿轮接触和弯曲疲劳强度计算		6.1 齿轮传动的计算	73
			6.2 轴的计算	73
			6.3 滚动轴承的计算	74