机构和机械零部件优化设计

王文博　主编

机械工业出版社

机构和机械零部件优化设计

王　启　陈乃虹　曹　鸥
田福秀　孙志勇　李凤强　编
佟士懋　冯秀清　张　堃

王文博　主编

机 械 工 业 出 版 社

D.44E.1 / 58

本书在阐明常用机械优化设计方法的基础上，着力阐述常用机构和通用机械零部件的优化设计。内容主要分三部分：第一部分主要介绍机械优化设计的基本知识、理论和常用优化方法；第二部分为常用机构（连杆机构、凸轮机构和齿轮机构等）的优化设计；第三部分为通用机械零部件（带、链传动、齿轮传动、行星齿轮传动、轴和轴承、弹簧等）的优化设计。附录为常用优化方法的电算程序。

本书可供从事机械设计的工程技术人员学习与参考，也可作为大专院校机械类专业的教材或参考书。

机构和机械零部件优化设计

王　启　陈乃虹　曹　鸥
田福秀　孙志勇　李凤强　编
佟士懋　冯秀涵　张　莅

王文博　主编

*

责任编辑：钱宗蕾　版式设计　罗文莉
封面设计：姚　毅　责任校对：熊天荣
责任印制：王国光

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）
（北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号）
机械工业出版社印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 787×1092 1/32·印张 9 7/8·字数 216 千字
1990年 3月北京第一版·1990年 3月北京第一次印刷
印数 0,001—5,600 ·定价：7.50 元

*

ISBN 7-111-01902-4/TH·319

前　言

机械优化设计是顺应电子计算机技术的迅猛发展和广泛应用而产生的现代机械设计方法之一。它的出现，对整个机械设计学科和机械设计实践都产生了十分深刻的影响，使过去许多难以解决的设计课题，获得了重大突破。可以说它正在引起机械设计领域里的一场重大变革，正在受到人们日益广泛的重视。

尽管在机械设计中采用最优化技术的历史很短，但其进展却极其惊人。无论在机构综合、机械零部件的设计方面，还是在各种机械和工艺装备的设计方面，机械优化设计都取得了引人注目的成果。可以断定，进一步推广机械优化设计，对普遍提高机械设计水平、机械产品质量、降低产品成本、缩短设计和生产周期等方面，都会产生重大的影响和显著的效益。为此，我们编写了本书，供广大机械设计工作者和大专院校机械专业的学生阅读和参考。

目前已出版的有关专著和教材多偏重于最优化理论和方法的阐述。因此，在编写本书时，我们立意在实用，故特别注重本书的简明性、通俗性和实用性。简而言之，力求深入浅出，通俗易懂，便于读者顺利自学和尽快掌握。

全书主要分三部分：第一部分（第一至第五章）介绍机械优化设计的基本知识、理论和常用优化方法；第二部分（第六至第十章）为常用机构的最优综合（设计）；第三部分是通用机械零部件的优化设计。附录为常用优化方法（BASIC 语言）的电算程序。

本书的编者有：湖北汽车工业学院曹鸥、田福秀（第三、九章），河北化工学院孙志勇（第八章及第十六章§16-1），山东纺织工学院李凤强（第七章），北京机械工程学院冯秀清、佟士懋、张堃（第二、十四章、第十六章§16-2）和北京服装学院王启、陈乃虹、王文博（其余各章），附录程序由曹鸥、王启编制。全书由王文博主编并统稿。

由于编者水平有限，编写时间又较仓促，故缺点和谬误在所难免，敬请读者不吝批评指正。

编　者

1988年9月

试读结束，需要全本PDF请购买 www.ertongbook.com

目　录

第一章　机械优化设计导论……………………………… 1
§1-1　优化设计的基本概念 ………………………………… 1
§1-2　优化设计的数学模型 ………………………………… 4
§1-3　优化设计的方法和步骤 ……………………………12
§1-4　优化设计中的迭代计算 ……………………………13
第二章　优化方法的数学基础……………………………18
§2-1　函数的二次型及其系数矩阵的正定性 ……………18
§2-2　函数的梯度和二阶导数矩阵 ………………………22
§2-3　多元函数的极值问题 ………………………………26
§2-4　凸函数和凸规划概述 ………………………………30
§2-5　共轭方向 ……………………………………………33
第三章　一维优化方法……………………………………36
§3-1　概述 …………………………………………………36
§3-2　初始搜索区间的确定 ………………………………37
§3-3　黄金分割法 …………………………………………41
§3-4　二次插值法 …………………………………………44
第四章　无约束最优化方法………………………………51
§4-1　概述 …………………………………………………51
§4-2　坐标轮换法 …………………………………………52
§4-3　共轭方向法 …………………………………………59
§4-4　鲍威尔方法 …………………………………………65
§4-5　变尺度法 ……………………………………………72
第五章　约束最优化方法…………………………………86
§5-1　概述 …………………………………………………86
§5-2　约束坐标轮换法 ……………………………………87

§5-3 约束随机方向法……90
§5-4 复合形法……94
§5-5 惩罚函数法……102
第六章 机构优化设计引论……118
§6-1 概述……118
§6-2 机构最优设计的数学模型……122
§6-3 优化方法的选择……126
第七章 连杆机构优化设计……128
§7-1 概述……128
§7-2 再现函数平面四杆机构的优化设计……132
§7-3 再现连杆角位移的平面四杆机构的优化设计……139
§7-4 再现轨迹平面四杆机构的优化设计……142
§7-5 再现连杆角位移与轨迹的平面四杆机构的优化设计……148
§7-6 平面六杆机构的优化设计……153
第八章 凸轮机构优化设计……159
§8-1 偏置直动滚子从动件盘状凸轮机构的优化设计……159
§8-2 摆动滚子从动件盘状凸轮机构的优化设计……166
§8-3 圆柱凸轮机构的优化设计……172
第九章 变位齿轮机构优化设计……179
§9-1 概述……179
§9-2 优选变位系数的准则和目标函数……180
§9-3 优选变位系数的约束条件……187
§9-4 优选变位系数的数学模型和优化方法……190
第十章 组合机构的优化设计……195
§10-1 再现复杂运动规律的齿轮连杆机构的优化设计……195
§10-2 再现复杂轨迹的齿轮连杆机构的优化设计……203
第十一章 机械零部件的优化设计……208
§11-1 引言……208
§11-2 机械零部件优化设计的数学模型……209
§11-3 优化方法和最优解……214

第十二章　挠性件传动的优化设计……………………… 218
§12-1　三角带传动的优化设计 ……………………… 218
§12-2　套筒滚子链传动的优化设计 ………………… 223
第十三章　齿轮传动的优化设计……………………… 228
§13-1　概述 ………………………………………… 228
§13-2　直齿圆柱齿轮传动的优化设计 ……………… 229
§13-3　斜齿圆柱齿轮传动的优化设计 ……………… 232
§13-4　直齿圆锥齿轮传动的优化设计 ……………… 237
§13-5　蜗杆传动的优化设计 ………………………… 240
§13-6　多级齿轮传动的传动比最优分配 …………… 244
第十四章　行星齿轮传动优化设计…………………… 250
§14-1　2K-H型行星齿轮传动的优化设计 ………… 250
§14-2　渐开线少齿差行星齿轮传动的优化设计 …… 256
第十五章　轴承和轴的优化设计……………………… 263
§15-1　液体动压滑动轴承的优化设计 ……………… 263
§15-2　钢丝滚道非标准球轴承的优化设计 ………… 270
§15-3　轴的优化设计 ………………………………… 272
第十六章　其它零件的优化设计……………………… 276
§16-1　普通圆柱螺旋弹簧的优化设计 ……………… 276
§16-2　螺栓组联接的优化设计 ……………………… 282
附录　常用优化方法的BASIC语言程序 ……………… 286
一、进退法程序 ………………………………………… 287
二、黄金分割法程序 …………………………………… 288
三、二次插值法程序 …………………………………… 288
四、鲍威尔法程序 ……………………………………… 289
五、DFP法程序 ………………………………………… 293
六、内点惩罚函数法程序 ……………………………… 293
七、混合惩罚函数法程序 ……………………………… 299
八、约束随机方向法程序 ……………………………… 301
九、复合形法程序 ……………………………………… 303
主要参考文献……………………………………………… 307

第一章　机械优化设计导论

§1-1　优化设计的基本概念

机械优化设计是很有成效的现代设计方法之一。它是先将机械设计问题转化为最优化问题，然后选择适当的最优化方法，应用电子计算机技术，从满足各种设计要求的全部可行方案中，自动寻求最优设计方案的一种先进设计方法。

通常在解决同一设计问题时，可能有许多不同的设计方案。其中总有某一方案在客观条件许可下满足设计要求的使用性能最佳，或使用寿命最长，或体积（重量）最小，或成本最低等。这样的设计方案就称为最优设计方案。如果将影响这些设计要求的因素作为设计参数，并用它们作为变量，构成相应的函数 $f(X)$ 来模拟这些设计要求，则最优设计方案就是使该函数获得最小值或最大值的一组参数值。

反映设计最优化要求的函数 $f(X)$ 称为目标函数或评价函数，其中变量 $X=[x_1,\ x_2,\ \cdots,\ x_n]^T$ 是以各设计参数为分量的列矢量，称为设计变量，它代表 n 维欧氏空间 R^n 中的一个点，故又可称为设计点。目标函数在客观条件许可下的极小值 $\min f(X)$ 或极大值 $\max f(X)$ 称为最优值，记作 $f(X^*)$。使目标函数获得最优值 $f(X^*)$ 的设计点则称为最优点，记作 X^*。限制设计变量取值的客观条件，则称为设计约束或约束条件。它们也是设计变量 X 的函数，可分为不等式和等式两类，称为不等式约束和等式约束，分别记作 $g_u(X)\geqslant 0\ (u=1,\ 2,\cdots,m)$ 和 $h_v=0\ (v=1,2,\ \cdots,\ p)$。

为了具体而直观地表述最优化设计的一些基本概念，我们来研究如下一个易于几何描述的二元函数的最优化问题，即求函数

$$f(X)=(x_1-2)^2+x_2^2$$

在满足约束条件：$g_1(X)=x_1-x_2+2\geqslant 0$；$g_2(X)=-x_1^2+x_2-1\geqslant 0$；$g_3(X)=x_1\geqslant 0$；$g_4(X)=x_2\geqslant 0$；$h(X)=x_1+x_2-2=0$下的最小值$\min f(X)$及对应的最优点$X^*=[x_1^*,\ x_2^*]^T$。在优化设计中，通常把该优化问题写成如下形式：

$$\begin{aligned}
&\min f(X)=(x_1-2)^2+x_2^2\\
&\text{s.t.}\ g_1(X)=x_1-x_2+2\geqslant 0\\
&\qquad g_2(X)=-x_1^2+x_2-1\geqslant 0\\
&\qquad g_3(X)=x_1\geqslant 0\\
&\qquad g_4(X)=x_2\geqslant 0\\
&\qquad h(X)=x_1+x_2-2=0
\end{aligned}$$

这种表达式就称为最优化问题的数学模型。其中 s.t 表示设计变量取值受约束于 $g_1(X)$等约束条件。

如图1-1 a 所示，利用图解分析法可清楚地看出，该二元函数 $f(X)$的空间图形为一圆形抛物面，约束条件 $g_1(X)$是一个铅垂的约束平面，$g_2(X)$是一个直立的约束抛物面，$g_3(X)$和 $g_4(X)$是坐标为 x_1，$x_2\geqslant 0$ 的空间。用平行于 x_1ox_2 的平行平面切割目标函数$f(X)$曲面所得的曲线，是一条条目标函数值相等的线，称为等值线。如图1-1 b 所示，这些等值线在坐标平面 x_1ox_2 的投影是同心圆族，它们表明目标函数值由外向内逐渐减小。显然，如果该问题不受任何约束条件限制时，其最优点为 $X_0^*=[x_1^*,\ x_2^*]^T=[2,0]^T$，目标函数最优值 $f(X_0^*)=0$，即在同心圆族的中心。

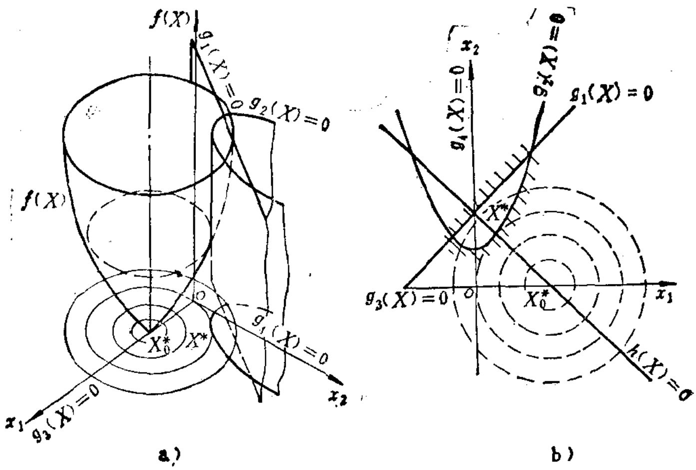

图 1-1

图1-1 b 中由不等式约束 $g_u \geqslant 0$（$u=1, 2, 3, 4$）边界围成的阴影线区域，都满足不等式约束件，如果不计等式约束$h(X)=0$，其中任一点均可作为可行设计点，故称为可行域，范围外的区域则称为非可行域。但在本例中，由于有等式约束 $h(X)$的限制，因此可行域缩小为不等式约束区域（阴影线区）内等式约束的一段线段。由图示可以看出，X_0^* 不在可行域内，附上约束条件后，本问题的最优点为 $X^*=[0.618, 1.382]^T$。

一般地说，如果 $f(X)$的无约束极小点在可行域之内，则约束条件对最优解没有影响；反之，如果 $f(X)$无约束极小点在可行域之外，则约束最优点只能在可行域边界上，亦即在目标函数较小值的等值线与约束曲线的切点或约束曲线的交点上。本例最优点 X^*在 $g_2(X)=0$ 和$h(X)=0$两线

试读结束，需要全本PDF请购买 www.ertongbook.com

的交点上。

可以把上例的几何描述推展到一般二元函数的优化问题中去。由极值理论可知，在极点附近，具有两个变量的目标函数的等值线为近于同心的椭圆族，椭圆族的中心即为函数的极值点。

再把这种几何描述扩展到几个变量的优化问题中去。如果令目标函数 $f(X)=f[x_1, x_2, \cdots, x_n]$为一系列常数值，则可在 n 维实欧氏空间形成一系列相应的超等值面，在极小值附近的超等值面是一族近似的超椭球面(当 $n=3$ 时，等值面在极小值附近为近似的椭球面)。若取各不等式约束函数值为零，则在 n 维空间又形成若干个超约束曲面，这些面围成的 n 维空间 D 就是可行域。对于无约束问题，超等值面族的中心就是最优点。对于约束优化问题，若超等值面族的中心在可行域内，该中心也是最优点；反之，约束最优点可能是目标函数较小值的超等值面与某个超约束曲面的切点，或者是目标函数较小的某些超约束面的交点。

显然，求这样的最优点和目标函数的最优值需要大量的复杂的运算，并非手工计算所能实现的。因此，只有电子计算机出现后，才使最优化设计变为现实。

综上所述，优化设计包括两部分内容：一是科学地分析设计任务，并将其转化为最优化问题，建立起便于优化的数学模型；另一个是选用适当的最优化方法，编出设计程序，利用电子计算机自动寻求最优解。

§1-2 优化设计的数学模型

建立数学模型是作优化设计的关键。优化数学模型是在确立结构方案（例如机构运动简图、零部件的结构形式等）

和优化目标之后建立的。不同的结构方案可有不同的数学模型。因此，在建立数学模型之前，应仔细审核结构方案是否合理、先进。有时也可以选择几种不同的结构方案，分别建立数学模型进行优化设计，然后对它们的优化结果进行比较，从中选取最优的设计方案。

优化的数学模型应当有足够的精确度和尽可能的简单，以保证优化结果的正确性并简化求解方法和求解过程。这是建立优化数学模型的共同准则。

建立优化设计的数学模型，包括选择设计变量、构造目标函数和确定约束条件三项内容。

一、设计变量

在优化设计中，机构或机械零部件的设计方案是由一组参数来表示的。其中有些参数值可根据具体情况或设计经验预先给定，在优化过程中这些参数值保持不变，故称为设计常量，例如材料的弹性模量、许用应力等；另有一些参数与其他参数之间存在一定的依赖关系，在优化过程中，它们的数值随其他参数值变化而变化，称为非独立变量，例如两级齿轮减速器总传动比给定时，两级传动比 i_1 和 i_2 就互为反比。若把 i_1 作为独立变量，则 i_2 就是非独立变量。在优化设计中，设计变量是指那些需要优选的独立的设计参数。

一个最优化问题中所包含的设计变量的数目常称为维数。设计变量愈多，维数愈高，设计自由度就愈大，也就愈易得到理想的最优设计方案。但是，也必然使问题复杂化，给最优化带来更多的困难。因此，一般应尽量减少设计变量数，尽可能按照成熟的经验将一些参数定为设计常量，而只将那些对目标函数影响较大的设计参数定为设计变量。

按照设计变量的多少，通常把最优化设计分为三种类

型：小型，维数 $n<10$；中型，$n=10\sim50$；大型，$n>50$。在机构和机械零部件的优化设计中，多属于中小型优化设计。

设计变量 $X(x_1, x_2, \cdots, x_n)$ 是一组设计参数，构成一个数组，在 n 维实欧氏空间 R^n 对应一个设计点，可用一列矩阵或其转置来简记，即

$$X=[x_1, x_2, \cdots, x_n]^T$$

式中 T 表示矩阵的转置。矩阵中的各个元素是组成设计变量的参数值，在 n 维设计空间中，是一设计点的诸坐标值。

设计点的集合称为设计空间，在机械优化中设计变量都是实数，因此设计空间是实欧氏空间 R^n，利用集合的概念，可写作

$$X \in R^n$$

对于二维优化，空间 R^2 是一个平面；对于三维优化，空间 R^3 则是个立体空间，也称为三维空间。对于 $n>3$ 的 R^n 空间，则只能想像为一个超越空间。

一组设计变量或一个设计点 X，即代表一个设计方案。最优设计方案的符号为 X^*。

设计变量有连续量和离散量之分。若设计变量能取连续值且都有实际意义，它就是连续变量。若设计变量只能间断地取值才有实际意义，例如齿轮齿数只能取整数，齿轮模数、轴承孔径等必须符合国家标准，这样的一些变量就称为离散变量。对于离散变量，有两种处理方法，一种是按离散变量的优化方法解决，另一种是先按连续量优化，在求得优化解后，再进行圆整或标准化，以求得一个实用的最优方案。

二、目标函数

目标函数也称为评价函数，它是评价设计方案优劣的标准。一项机械设计方案的优劣，总可以用一些设计指标来衡

量，例如性能指标（效率、承载能力、可靠性、平均速度、加速度等）、结构指标（体积、重量等）、经济性指标（生产率、工时、成本等）。由于这些设计指标可表示为设计变量的函数，就被称为目标函数，记为

$$f(X)=f(x_1,\ x_2,\ \cdots,\ x_n)$$

优化设计就是要寻求一个最优点 X^*，使目标函数值达到最优值 $f(X^*)$。通常取最优值为目标函数的最小值 $\min f(X)$，即

$$f(X^*)=\min f(X)$$

这是因为目标函数的最大值问题可处理为其负值最小值问题。

按追求目标的多少，将目标函数区分为单目标函数（按单一目标建立的函数）和多目标函数（按两个或两个以上目标建立的函数）。例如，对于图1-2所示的港口起重机，若仅以连杆 2 上 M 点轨迹的铅垂偏差 Δy 最小为追求目标，所建建立的目标函数就是单目标函数；如果在追求 Δy 最小的同时，还追求 M 点水平移动速度波动值 Δv 最小和驱动力矩变化量 ΔM 最小，这样建立起来的综合性目标函数

$$f(X)=f(x_1,\ x_2,\ x_3)=f(\Delta y,\ \Delta v,\ \Delta M)$$

就是多目标函数。

单目标函数求解过程简捷明确；多目标函数求解就比较繁难，但可获得更佳的最优设计方案。对于多目标函数，可有多种处理方法，这里只介绍两种方法：

1. 线性加权组合法，即将每个目标函数 $f_i(X)$ 乘以相应的权因子 W_i，然后相加，组成一个组合目标函数，即

$$f(X)=\sum_{i=1}^{k} W_i f_i(X)\quad(i=1,\ 2,\ \cdots,\ k)$$

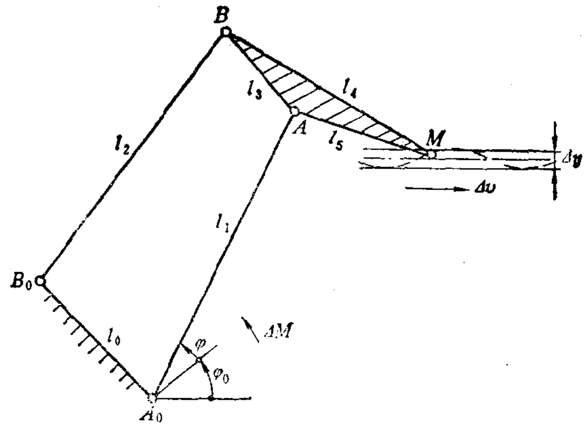

图 1-2

权因子 W_i 的大小决定于各项目标的数量级及其重要程度。

2．主要目标法，就是将最重要的一个目标作为目标函数，而将其余次要目标处理为约束函数的方法。这实际上是把多目标函数转化为单目标函数。

三、约束条件

约束条件是对设计变量取值的限制，都是设计变量的函数，故又称为约束函数。约束一般分为两类：

1．边界约束，又称区域约束，即考虑各设计变量取值范围的约束，如构件长度 l_i（$i=1, 2, \cdots, n$）应满足 $l_{i\max} \leqslant l_i \leqslant l_{i\min}$。由此可写出不等式约束方程

$$g_1(X) = l_i - l_{i\min} \geqslant 0$$

$$(i = 1, 2, \cdots, n)$$

$$g_2(X) = l_{i\max} - l_i \geqslant 0$$

2．性能约束，又称功能约束或状态约束。这种约束反

映了对设计对象或状态方面的要求。例如，在设计曲柄摇杆机构时，必须满足有曲柄的要求，即最短杆为曲柄且与其他任一杆长之和必小于另两杆长之和；又，为了保证机构有良好的传力性能，要求传动角不得小于最小许用传动角。

按数学表达式，约束可分为不等式约束和等式约束，在最优化数学模型中，要求把约束函数写成统一的格式，通常写为：

$$g_u(X) \geqslant 0 \quad (u = 1, 2, \cdots, m)$$

$$h_v(X) = 0 \quad (v = 1, 2, \cdots, p)$$

m 和 p 分别代表不等式和等式约束的个数。m 值不受限制，但 p 值必须小于设计变量的维数，如果 $p = n$，设计方案就成唯一的确定值，也就无法优化了。

有约束条件的优化问题称为约束优化问题，否则为无约束问题。在机构和机械零部件的优化中，绝大多数是约束优化问题。

对于约束优化问题，满足全部约束条件的设计点，在实欧氏空间 R^n 形成的集合，称为可行设计区域，简称可行域；其余区域则为非可行域。可行域内的设计点称为可行设计点或内点，否则为非可行设计点或外点。处于不等式约束边界上的设计点称为边界设计点，也是可行设计点。

四、数学模型表达式

无约束最优化问题的数学模型的一般形式为

$$\min f(X) \quad X \in R^n$$

约束最优化问题的数学模型的一般形式为

$$\min f(X) \quad X \in D \subset R^n$$

$$\begin{aligned} \text{s.t.}\ g_u(X) &\geqslant 0 \quad u = 1, 2, \cdots, m \\ h_v(X) &= 0 \quad v = 1, 2, \cdots, p \end{aligned}$$

试读结束，需要全本PDF请购买 www.ertongbook.com