



高象平 李齐隆 丁成杰 朱慧斌 编著

拖拉机零部件优化设计

TUOLAJI LINGBUJIAN YOUHUA SHEJI

广东科技出版社

4 5219.02 0337-1
2

拖拉机零部件优化设计

高象平 李齐隆 编著
丁成杰 朱慧斌

广东科技出版社

拖拉机零部件优化设计
Tuolaji Lingbujian Youhua Sheji

高象平 李齐隆
丁成杰 朱慧斌 编著

广东科技出版社出版发行
广东省新华书店经销
广东新华印刷厂印刷
787×1092毫米16开本 18.5印张 450,000字
1989年11月第1版 1989年11月第1次印刷
印数1—1,100册

ISBN 7—5359—0318—5

S·36 定价7.00元

8219.02

2

1331253

内 容 简 介

本书主要阐述机械最优化设计在拖拉机设计中的应用。全书分为两篇。第一篇介绍机械最优化设计的基本概念和常用的最优化设计方法；第二篇介绍拖拉机零部件（离合器弹簧、变速箱、行星机构、中央传动、差速器、最终传动、转向梯形、制动器和液压悬挂机构）的优化设计。此外，还编入了弹性悬架优化设计的内容，以满足汽车、农用运输车设计的需要。书中提供的全部源程序由作者编制，在APPLE-Ⅱ和IBM微型计算机上通过。全部程序第一次发表。为了便于应用推广，书中详细介绍了各零部件优化设计的数学模型、计算框图、用BASIC语言编制的源程序，并列举了应用实例。

本书可作为高等工科院校拖拉机、汽车、工程机械等专业高年级学生和研究生教材及教学参考书，并可供从事机械设计和拖拉机、汽车、工程机械底盘设计的工程技术人员参考和应用。

序

近十几年来,随着电子计算机及计算技术的发展,根据数学规划中的最优化策略思想,已广泛使用计算机来求解机械设计中的最佳设计方案,取得了较好的经济效益,并且逐步形成一个独立的理论分支——优化设计。机械优化设计的目的是对一个已给定的机械设计问题,在技术和物质条件许可的范围内,按照某种工程技术和经济准则,寻求最佳的设计方案。虽然人类自有设计活动以来,即以追求获得最佳可行方案为目标,但是,只有与电子计算机相结合,有了严格的寻优理论体系,才使机械设计从工程师的经验类比设计的有限方案对比中,转而成为建立在科学理论体系上的高效率现代化设计。

目前机械优化设计,在我国各机械行业中获得迅速应用和发展。机械优化设计是随着工程技术和物质条件的变化而相应改变的。要对不同类型的机械进行优化设计,并要达到可行实用程度,就必须遵循机械本身的某些特殊规律。所以设计者的经验和才智,在结构参数优化中,仍是不可缺少的。本书正是作者在获得多年科研成果的基础上,把拖拉机和农用运输车的实际设计经验与优化设计相结合而编写的。这对拖拉机等行业的机械优化设计无疑是一次促进。

本书可作为高等院校汽车、拖拉机设计专业、工程机械设计专业学生的选修课教材和参考书。由于理论部分简明,实用部分算例丰富,因而亦适合当前工厂技术人员的自学和应用参考。

当前,我国拖拉机、工程机械、农用运输车等设计工作,采用机械优化设计还处于起步和研究开发阶段。现在能看到从事实际设计工作的作者,把多年在这方面的研究设计的实用程序汇编成册,供诸本行业共同使用,无疑是一件值得提倡而又立见成效的好事,虽然书中难免有某些不足之处,但我们热切希望读者共同补充和修正,开发这一工作,使拖拉机的优化设计真正完善和实用。

喻谷源于北京
一九八七年元月

前 言

在我国, 优化设计在拖拉机设计中的应用处于开始阶段, 近年来已取得可喜的成绩。基于我们多年来的研究和设计实践, 编写了“拖拉机零部件优化设计”一书, 借以促进优化设计在拖拉机设计中的应用和拖拉机设计水平的提高。

本书第一篇简明介绍了拖拉机和工程机械等优化设计中常用的优化方法。第一章概论, 第二章一维问题优化方法, 第三章无约束问题优化方法, 第四章约束优化方法。从实用出发, 各章介绍了优化方法的基本原理, 迭代过程和计算框图, 删除了纯数学上的论证和一些不常用的方法。第二篇按系统介绍了主要零部件的优化设计。第一章至第五章介绍了传动系的零部件的优化设计, 第六章和第八章介绍了转向梯形和弹性悬架的优化设计, 第七章制动器优化设计, 第九章悬挂机构优化设计。各章较详细地介绍了目标函数和约束条件的确定, 优化方法的选用, 列出框图, 给出了计算实例, 并完整地列出了实用计算程序。程序应用 BASIC 语言编写, 在 APPLE—II 微型机上调试通过。因此, 工厂设计人员在理解了基本原理以后, 可以直接把程序输入计算机进行实用验算。

本书由高象平、李齐隆主编, 参加编写的还有丁成杰、**朱慧斌**。第一篇全篇和第二篇第一章第一节、第六、七章由高象平编写, 第二篇第一章第二节、第二章第二节、第三、四、五、九章由李齐隆编写, 第二篇第二章第一节丁成杰编写, 第八章**朱慧斌**编写。书中所有程序由我们编制, 且第一次发表。

本书第一篇由航天工业部第二设计院高级工程师宫锡芳审阅, 第二篇由北京农业工程大学孙衍庆副教授审阅, 他们提出了宝贵意见和有益建议。北京农业工程大学喻谷源教授为本书撰写了序, 在此一并致谢。

由于我们的水平和经验有限, 书中疏漏和不妥之处在所难免, 敬请读者批评指正。

作 者

1987年元月于北京

目 录

第一篇 机械优化设计概论和常用优化方法

第一章 概论	1
§1—1 优化技术的发展和概况	1
一、优化设计的含义	1
二、优化技术在机械设计中的应用	1
§1—2 机械优化设计的数学模型和过程	2
一、设计变量	2
二、目标函数	3
三、设计约束	4
四、优化设计的一般过程	5
第二章 一维问题优化方法	6
§2—1 一维搜索区间的确定	6
§2—2 常用的一维优化方法	7
一、黄金分割法	7
二、二次插值法(抛物线法)	9
第三章 无约束多维问题的优化方法	14
§3—1 坐标轮换法(变量轮换法)	14
§3—2 变尺度法(DFP法)	17
§3—3 单纯形法	22
§3—4 包威尔法	26
一、原始Powell法	26
二、修正Powell法	27
第四章 约束最优化方法	32
§4—1 约束随机方向法	32
一、基本原理	32
二、算法和计算框图	35
§4—2 复合形法	36
一、基本原理	36
二、初始复合形的产生	38
三、调优迭代规则	38
§4—3 惩罚函数法	42
一、惩罚函数外点法	42

二、惩罚函数内点法	45
三、惩罚函数混合法	48
四、惩罚函数法的特点	48
§4—4 网格法	49
一、网格法的搜索过程	49
二、网格法的计算步骤与框图	49

第二篇 拖拉机零部件优化设计

第一章 离合器压紧弹簧优化设计	52
§1—1 螺旋弹簧的优化设计	52
一、螺旋弹簧的主要参数	52
二、数学模型的建立	53
三、计算框图及源程序	55
§1—2 碟形弹簧的优化设计	61
一、数学模型的建立	61
二、计算框图及源程序	65
第二章 机械式变速箱优化设计	75
§2—1 普通变速箱优化设计	75
一、机械式变速箱传动类型及其特点	75
二、计算程序编制原则	78
三、数学模型的建立	80
四、计算框图及源程序	87
五、程序使用说明	95
§2—2 行星机构的优化设计	120
一、数学模型的建立	121
二、计算框图及源程序	128
第三章 中央传动优化设计	142
§3—1 数学模型的建立	142
一、目标函数和设计变量	142
二、约束条件	144
三、确定其它参数的数学模型	147
§3—2 程序框图及源程序	149
一、符号对照	149
二、优化方法选择和框图	151
三、应用举例	151
四、源程序和运行结果	153
第四章 差速器的优化设计	164
§4—1 数学模型的建立	164

一、设计变量和目标函数	164
二、约束条件	166
§4—2 计算框图及源程序	169
一、符号对照	169
二、优化方法及框图	170
三、应用举例	170
四、源程序和运行结果	170
第五章 最终传动的优化设计	179
§5—1 数学模型的建立	179
一、目标函数和设计变量	179
二、约束条件	180
§5—2 计算框图及源程序	184
一、符号对照	184
二、优化方法及框图	185
三、应用举例	185
四、源程序和运行结果	187
第六章 拖拉机转向梯形的优化设计	196
§6—1 转向梯形的基本参数	196
§6—2 数学模型的建立	197
一、设计目标的评价条件	197
二、梯形参数 m 、 γ 的限制条件	197
三、数学模型	197
§6—3 计算框图及源程序	198
一、符号对照	198
二、优化方法和计算框图	198
三、应用举例	200
四、源程序和运行结果	200
第七章 制动器优化设计	204
§7—1 制动器的工作情况	204
§7—2 数学模型的建立	206
一、基本参数	206
二、目标函数	206
三、约束条件	206
§7—3 计算框图及源程序	207
一、符号对照	207
二、优化方法及框图	207
三、应用举例	209
四、源程序和运行结果	209

第八章 弹性悬架的优化设计	214
§8—1 悬架的功用和设计要求	214
一、悬架的功用	214
二、对悬架设计的要求	215
三、本章内容提要	215
§8—2 数学模型	215
一、已知参数	215
二、目标函数、设计变量和约束条件	216
§8—3 计算框图及源程序	231
一、符号对照	231
二、优化方法和框图	234
三、应用举例	239
四、源程序和运行结果	240
第九章 悬挂机构的优化设计	261
§9—1 数学模型的建立	261
一、目标函数	261
二、设计变量选择	265
三、约束条件	266
§9—2 计算框图及源程序	270
一、符号对照	270
二、优化方法选择和框图	271
三、应用举例	273
四、源程序和运行结果	274

第一篇 机械优化设计概论 和常用优化方法

第一章 概 论

§ 1—1 优化技术的发展和概况

一、优化设计的含义

人类从事一项工作或设计，总是存在着多种可选方案，可以用多种方法和途径来实现设计目标。这其中必有最优方案，即用最少的人力、物力和时间，取得最好的经济效益、产品结构和行动决策，这就是优化问题。

单就机械设计任务来说，所寻求的指标是多方面的，如体积小、重量轻、机械效率高、投资少等等。要满足这些条件，设计过程是很复杂的，往往要解十分复杂的多元非线性约束方程组。因此，用常规的图解法和解析法求解，无论是设计精度和计算速度都不能满足要求，有时甚至根本无法求解，所以，必须采用数值计算方法，借助于电子计算机来完成。

机械优化设计的含义是：以数学规划论为理论基础，使用优化设计方法，以电子计算机为计算工具，寻求机械设计最优参数的现代设计方法。

二、优化技术在机械设计中的应用

优化技术在机械设计方面的研究与应用，在国外，是六十年代才得到发展的；在国内，只有十几年的时间。虽然优化技术在机械设计方面的应用历史很短，但是发展速度却十分惊人，优化设计已成为现代机械设计理论和方法中的一个重要领域，并且愈来愈受到从事机械设计的科学工作者和工程技术人员的重视。机械设计使用优化设计方法，不仅可以大大缩短设计周期和提高计算精度，而且可以降低成本，改善机械性能等。因此，在机构的研究、机械的通用零部件设计，以及在各种专用机械设计和工艺设计方面，优化设计都很快地得到应用，并取得了一定的成果。

优化设计在拖拉机设计中的应用在国内还处于起步状态。显然，要适应我国现代化建设的需要，必须尽快改变目前我国拖拉机设计的现状，尽快摆脱传统的类比设计法，以提高拖拉机设计水平。所以采用优化设计和计算机辅助设计是当务之急。当然，拖拉机设计中的零部件的通用化和标准化，最优参数的制定，整机优化设计模型及方法的研究，机构设计中离散变量优化方法的研究，可靠性设计等一系列问题，需要很大的努力和艰苦的工作方能解决。可以预见，随着科学技术的日益发展，拖拉机优化设计定会以崭新的面貌展现在我们面前。

§ 1—2 机械优化设计的数学模型和过程

机械优化设计,是利用数学方法寻求机械设计问题最优化参数的。所以,首先要把机械设计问题转化为数学问题,才能利用优化设计方法,借助电子计算机进行求解。下面通过一个简单例子来说明数学模型等有关概念。

现在设计一个平底圆柱形容器,要求在容量一定的条件下,用料最省。显然,用料就是容器的表面积 S ,设计参数(尺寸)是容器的半径 R 和高度 H 。容器的表面积和容量的数学表达式如下

表面积为:

$$S = \pi R^2 + 2\pi RH \quad (1)$$

容量为:

$$V = \pi R^2 H = C \quad (2)$$

经过整理:

$$S = \pi R^2 + 2R^{-1}C$$

对上式求一阶导数并令其为零得:

$$R = \sqrt[3]{\frac{C}{\pi}}$$

将 R 值代入(2)式得:

$$H = \sqrt[3]{\frac{C}{\pi}}$$

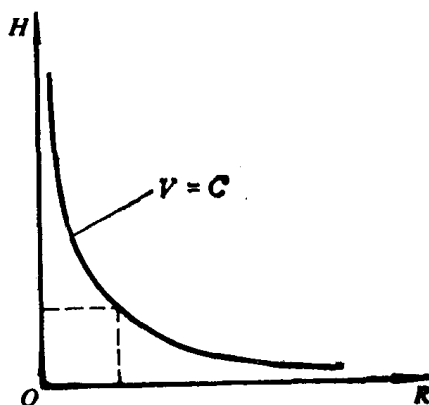


图 1-1 容量 V 与设计变量的关系曲线

由图 1-1 可以看出,可行设计方案有无穷多个,设计参数坐标点只要在曲线上,都满足 $V=C$ 的要求。但是,只有当 $R=H$ 时,用料最省。

从上分析,可以得出如下结论:数学模型是对实际问题的特征或实质的抽象,是反映各主要因素之间内在联系的一种数学形式。机械优化设计数学模型,在形式上还要求规范化,通常可归纳为,在满足一定的约束条件下,选取设计参数,使设计指标达到最小(或最大),其数学表达式为

$$\begin{aligned} & \min F(X) \quad X \in R^n \\ & \text{受约束于 } \left. \begin{aligned} g_u(X) &\leq 0 \quad u=1, 2, \dots, m \\ h_v(X) &= 0 \quad v=1, 2, \dots, p < n \end{aligned} \right\} \end{aligned}$$

通过以上简单例子表明,为建立该设计问题的数学模型,需要引用设计变量、目标函数和设计约束三个基本概念。

一、设计变量

上例中的设计变量为 R 、 H 。机械设计的一个方案常用一组参数来表示,如: $S = f(R, H)$ 。在各类不同的设计问题中,其设计变量也各不相同,概括起来有两种类型:一类是几何参数,例如:零件的直径、长度尺寸,齿轮模数,变位系数,机构运动轨迹尺寸等;另一类是物理参数,例如:力,功率,质量,效率等。机械优化设计问题中的设计变量是指那些在设计计算中可供选择的独立变量。

设计变量的数目称为设计问题的维数，如果设计变量只有一个，称为一维设计问题；若有 n 个设计变量，则称 n 维设计问题。

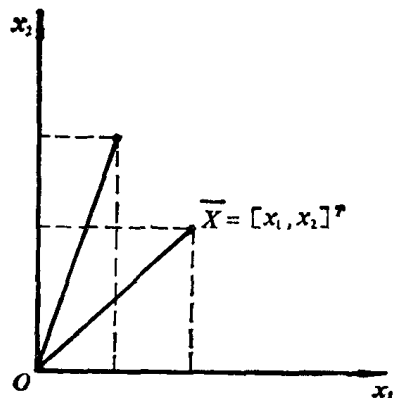


图 1-2 二维设计平面

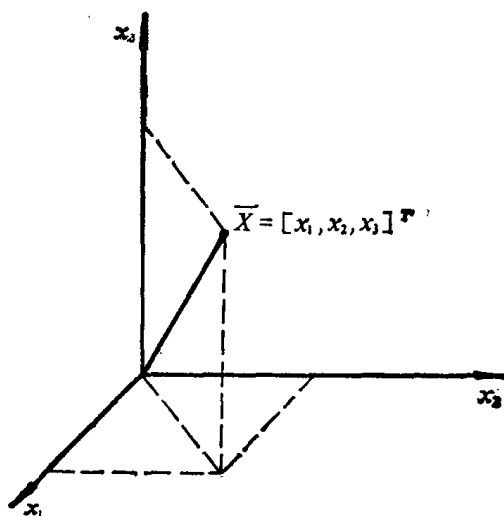


图 1-3 三维设计空间

如图 1-2 表示有两个设计变量的二维设计问题，可用平面坐标系表示。当 x_1, x_2 取不同值时，可在平面坐标系中得到不同的坐标点，每一个坐标点若用向量表示，即为二维向量。平面坐标系中设计变量 x_1, x_2 所决定的每一个坐标点，就是一个设计方案。

图 1-3 表示有三个设计变量的三维设计问题，每个设计方案即表示三维空间上的一个点。

如果有 n 个设计变量的 n 维设计问题，每个方案即表示 n 维空间中的一个点， n 维向量空间称作欧氏空间 R^n 。因为机械设计变量都是实数，所以又称 R^n 为实欧氏空间。用集合概念表示

$$X \in R^n \text{ 或 } X \in D \subset R^n$$

其中 X 是集合 D 的元素，即 X 属于 D ，记作 $X \in D$ ，又因集合 D 是集合 R^n (实欧氏空间) 的子集，所以表示为 $X \in D \subset R^n$ 。

设计变量 $n > 3$ 时，只能想象成一个抽象的超越空间。 n 维向量空间上的一个点 (一个设计方案) 可用矩阵形式表示：

$$\bar{X} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$$

设计问题的维数又表征设计的自由度。设计变量越多，设计自由度越大，即可供选择的方案越多，设计越灵活。但维数越多，设计难度越大。一般含有 2~10 个变量的为小型设计问题，10~50 个变量的为中型设计问题，50 个以上变量的为大型设计问题。机械产品一般多是中、小型设计问题。

二、目标函数

上面的例子中的用料，即是求容器的表面积问题：

$$S = \pi R^2 + 2\pi RH$$

称为目标函数（也称评价函数）。

目标函数定义：通过设计变量表示特定问题所寻求目标的数学表达式，称为目标函数。

目标函数是评价设计方案优劣的判别式。根据不同的设计要求，它可以表示机械结构的某种特性，如：结构的体积、重量、强度等；也可以表示机械结构的某些运动学或动力学特性，如：速度、加速度、传动效率、力等。在一般情况下，我们是追求目标函数的最小值，即目标函数值越小，设计方案越优。当然，对某些设计问题也可能追求目标函数的最大值（如效率最高）。在这种情况下，可以将求 $F(X)$ 极大值问题转化为求 $-F(X)$ 的极小值问题。故通常所说的最优化就是指极小化，即 $F(X) \rightarrow \min$ 。

在一个设计中，只有一个目标函数，叫单目标函数；若同时寻求几个目标，叫多目标函数。目前对单目标函数优化问题有一套较有效的方法。至于多目标函数优化问题，比较复杂，还处在研究、发展初期。所以，这里只是着重讨论单目标函数的优化设计问题。

对于有 n 个设计变量的最优化问题，目标函数的表达式为

$$F(X) = F(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

三、设计约束

上例中容器的容量 $V = \pi R^2 H = C$ ，就是设计约束。不管 R 、 H 值如何变化，要求容量总是一定的。

根据不同的设计要求，目标函数中设计变量的取值范围，往往要受种种限制，以避免设计变量“越轨”（用料最省，是在 V 一定的条件下），影响对最优设计目标的追求。这种对设计变量取值范围的限制，称为设计约束。

设计约束可以是对结构参数的限制，也可以是对机械某项性能提出的限制。前者称为边界约束，一般是对取值范围加以限制，如，机构设计中，杆件长度必须满足 $0 < l \leq l_{\max}$ ；在齿轮设计中，为避免标准齿轮的根切和结构尺寸的合理性，齿数的选择范围一般限制在 $17 \leq Z \leq 120$ 之间等。性能约束是指由机械工作性能所提出的一些限制条件。如：设计一曲柄连杆机构需要各杆的长度关系满足曲柄存在的条件，即曲柄长度 $l \neq 0$ ；齿轮设计中需要使所选的参数满足接触强度和弯曲强度条件等。

设计约束在数学模型中用不等式约束或等式约束来表示

$$g_u(X) \leq 0 \text{ (或 } g_u(X) \geq 0 \text{)} \quad u = 1, 2, \dots, m$$

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

等式约束对设计变量的约束严格，起着降维的作用（减少设计变量数）。在机械优化设计中，不等式约束更为普遍。另外，等式约束也可以用不等式约束来表示

$$h_v(X) \leq 0 \text{ 和 } h_v(X) \geq 0$$

每个约束条件都把设计空间分割为可行域和非可行域两部分。设计空间满足 $g_u(X) \leq 0$ 时称为可行域；反之 $g_u(X) > 0$ 时称为非可行域。图1-4表示了一个二维问题的情况。其约束边界所包围的区域是满足 $g_u(X) \leq 0$ ， $u = 1, 2, 3, 4$ 的设计可行域或简称为可行域。约

束边界以外的区域称为非可行域。其他有关名词术语，如可行点、边界点、约束交点等见图示。

可行域内任一点（包括边界上的点）均满足全部约束条件，称可行点，任一可行点都表示满足设计要求的可行设计方案，这样的点理论上无穷多个。优化设计的目的就是在可行域中找一个点，使目标函数值最小。从这里可看出，传统设计方法很难找出最优解。

四、优化设计的一般过程

优化设计的全过程一般可概括为建立优化设计的数学模型；选择适用的优化方法；确定必要的数据和初始设计点；编写计算机语言程序，通过计算机求解并输出计算结果；最后对计算结果进行必要的分析。见图1-5。

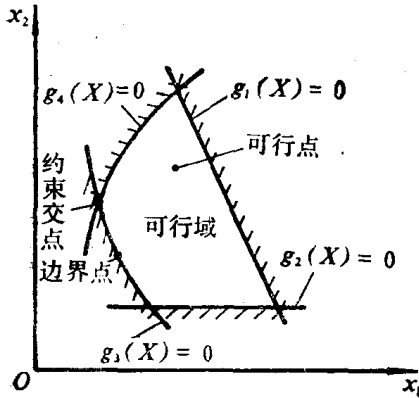


图1-4 二维问题的可行域

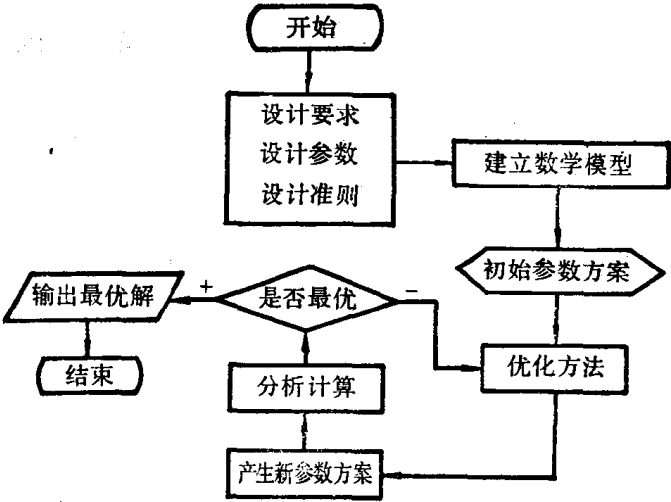


图1-5 机械优化设计过程框图

第二章 一维问题优化方法

在实际的机械优化问题中，一维问题是很少的，多数设计问题是多维的。但是一维问题优化方法是优化方法中最简单、最基本的方法，在解多维问题时经常要把多维问题化为一维问题来处理。

求一维目标函数的极小点，一般分两步走。第一步是确定搜索区间，要求该区间必须是单峰区间；第二步是在单峰区间寻找最优值（极小点）。

§ 2—1 一维搜索区间的确定

在一维搜索时，我们假设函数 $f(a)$ 具有如图2-1所示的单谷性，即在所考虑的区间内部，函数 $f(a)$ 有唯一的极小点 a^* 。为了确定极小点 a^* 所在区间 $[a, b]$ ，应使函数 $f(a)$ 在 $[a, b]$ 区间里形成“高——低——高”趋势。

为此，从 $a=0$ 开始，以初始步长 h_0 向前试探。如果函数值上升，则步长变号，即改变试探方向；如果函数值下降，则维持原来的试探方向，并将步长加倍。区间的始点、中间点依次沿试探方向移动一步。此过程一直进行到函数值再次上升时为止，即可找到搜索区间的终点。最后得到的三点即为搜索区间的始点、中间点和终点，形成函数值的“高——低——高”趋势。

图2-2表示沿 a 的正向试探。每走一步都将区间的始点，中间点沿试探方向移动一步，即进行名称替换。经过三步最后确定搜索区间 $[a_1, a_3]$ ，并且得到区间始点，中间点和终点 $a_1 < a_2 < a_3$ 所对应的函数值 $F_1 > F_2 < F_3$ 。

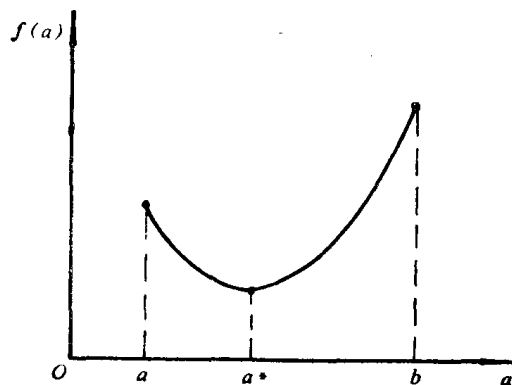


图2-1 单峰函数

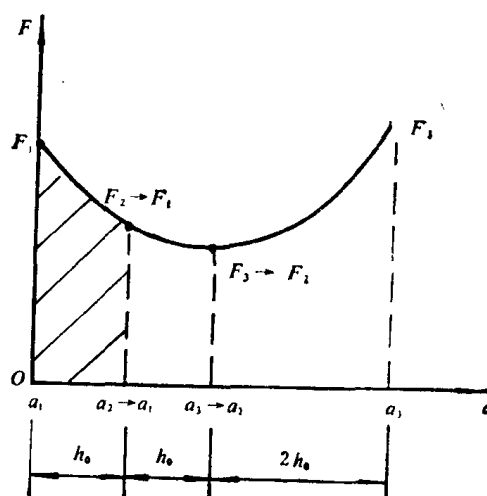


图2-2 搜索区间的确定——正向搜索

图2-8所表示的情况是, 开始是沿 a 的正向试探, 但由于函数值上升而改变了试探方向, 最后得到始点, 中间点和终点 $a_1 > a_2 > a_3$ 及它们的对应函数值 $F_1 > F_2 < F_3$, 从而形成单谷区间 $[a_3, a_1]$ 为一维搜索区间。

上述确定搜索区间方法的程序框图如图2-4所示。

开始给定 $h_0, F_1, a_1 \leftarrow 0, h \leftarrow h_0, a_2 \leftarrow h, F_2 \leftarrow f(a_2)$

- (1) 若 $F_2 > F_1$ 则 $h \leftarrow -h, a_3 \leftarrow a_1, F_3 \leftarrow F_1; a_1 \leftarrow a_2, F_1 \leftarrow F_2, a_2 \leftarrow a_3, F_2 \leftarrow F_3; a_3 \leftarrow a_2 + h, F_3 \leftarrow f(a_3)$ 若 $F_2 \leq F_1$, 则 $a_3 \leftarrow a_2 + h, F_3 \leftarrow f(a_3)$
- (2) 若 $F_3 < F_2$, 则 $h \leftarrow 2h$, 返回继续搜索, 直至 $F_3 \geq F_2$, 输出: $a_1, a_2, a_3; F_1, F_2, F_3$

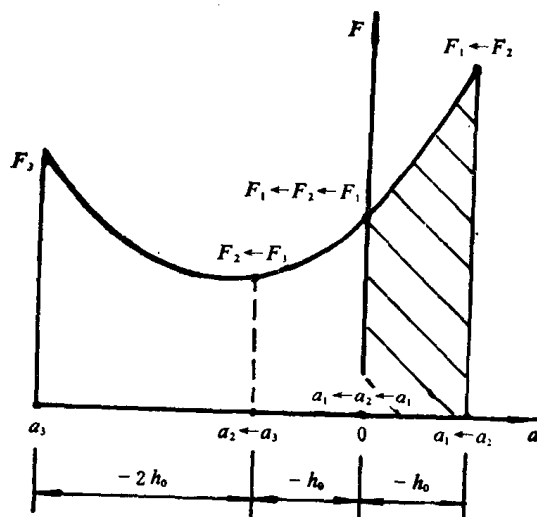


图2-3 搜索区间的确定——反向搜索

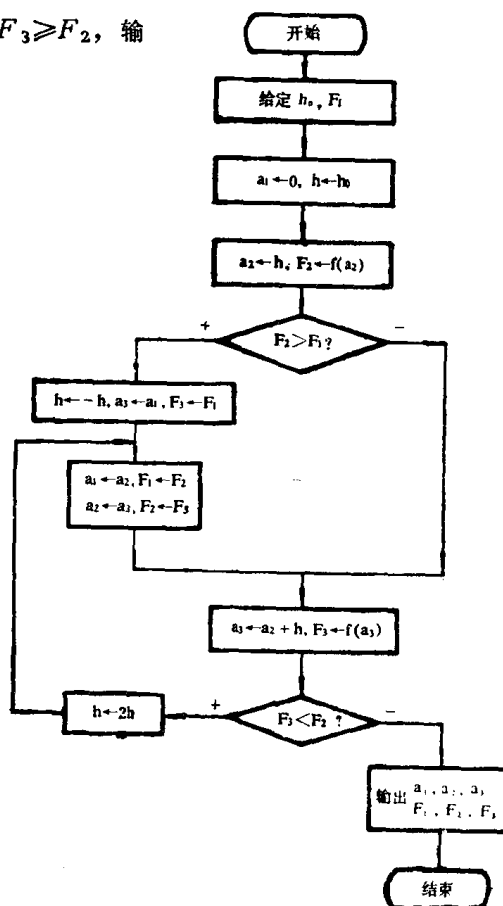


图2-4 确定搜索区间的程序框图

§ 2—2 常用的一维优化方法

一、黄金分割法

黄金分割法适用于 $[a, b]$ 区间上的任何单谷函数求极小值问题。对函数除要求“单谷”外不作其它要求, 甚至可以不连续。因此, 这种方法适应面很广。黄金分割法是在搜索区间 $[a, b]$ 内适当插入两点 a_1, a_2 , 并计算其函数值。 a_1, a_2 将区间分成三段, 应用函数的单谷性质, 通过比较函数值的大小, 删去其中一段, 使搜索区间得以缩短。然后再在保留下来的区间上作同样的处置, 如此迭代下去, 使搜索区间无限缩小, 从而得到极小点的数值近似解。