

张炳范 李午申 编

焊接最优化基础

天津大学出版社

内 容 简 介

本书结合焊接工程设计、制造、科学研究和管理方面的实际问题,首先系统介绍了一般最优化的理论和方法,其中包括线性规划、整数规划、非线性规划和动态规划等,然后介绍了焊接结构、焊接工艺规范、焊后热处理、焊条配方、焊缝化学成分、焊接变压器和管理等最优化设计实例。书末给出常用最优化算法的语言程序。

本书可作为高等工业学校焊接专业高年级学生和研究生的教材或参考书,也可供焊接工程技术人员和其他行业工程技术人员参考。

焊接最优化基础

张炳范 李午申

※

天津大学出版社出版

(天津大学内)

河北省邮电印刷厂印刷

新华书店天津发行所发行

※

开本: 787×1092毫米1/32 印张: 12³/₈ 字数: 277千字

1990年11月第一版 1990年11月第一次印刷

印数: 1—3600

ISBN 7-5618-0204-8

TM·14

定价: 2.45元

前 言

最优化技术是应用数学的一个分支，已在各种工程设计中得到广泛应用。目前，焊接工程的优化设计已成为焊接技术发展中的一个重要方面，国内外正在开展焊接工程优化设计的研究工作，并取得了可喜的成绩。这对于提高焊接工程设计水平，改进焊接产品的性能，发展计算机辅助设计和制造技术，增加社会经济效益，都具有重要意义。

但是，最优化技术在焊接领域中的应用同其他领域相比，还是比较落后的，而且没有这方面的专著。焊接技术人员不得不借助于数学、化工、结构力学等领域的优化论著开展研究工作。另外，国内许多高等学校焊接专业的研究生或本科生开设了最优化技术课程，然而缺乏反映本专业特点的教材。鉴于这种情况，为了适应焊接工程优化设计的发展和应用以及教学的需要，我们结合近年来的研究成果，吸收国内外的有关资料，编写了本书。

本书从焊接工程应用的角度出发，结合焊接生产、科学研究和管理方面的实际问题，比较扼要地介绍了最优化的理论、方法和应用。同时考虑到本书作为学习焊接工程优化设计的入门向导，所以在理论叙述方面尽可能做到通俗易懂，有些定理和公式没有证明和推导，有些公式在推导上作了简化，为便于自学，各章附有习题。

本书包括静态最优化和动态最优化两部分。前七章是有关静态最优化的内容，这是本书的重点。第一章是为学习本书作准备的。第二章主要介绍线性规划的理论、方法和在焊接中的应用。第三章至第六章介绍非线性规划的基本理论和在焊接中

广泛应用的计算方法。第七章介绍非线性规划在焊接中的应用，包括焊接规范、焊后热处理、焊条、焊缝成分、焊接变压器的优化设计。第八章结合焊接及有关工程实际简单介绍了动态规划的理论和方法。第九章介绍了常用最优化算法的语言程序。

本书得到天津大学赵裕民、曾悦坚副教授的大力帮助，天津市电焊机厂常保庆工程师等提供了若干资料，在此一并向他们表示衷心感谢。

由于水平和经验所限，书中缺点和错误在所难免，恳请读者批评指正。

作者

1987年11月

目 录

前言

第一章 焊接最优化概论	(1)
§ 1-1 最优化的内容及在焊接中的应用	(1)
§ 1-2 焊接最优化的步骤	(4)
§ 1-3 焊接最优化问题的分类	(10)
§ 1-4 最优化问题解法概述	(13)
§ 1-5 集与凸集的概念	(16)
习题.....	(18)
第二章 线性规划及在焊接中的应用	(21)
§ 2-1 线性规划的数学模型	(21)
§ 2-2 线性规划的图解法	(22)
§ 2-3 线性规划的基本定理	(29)
§ 2-4 求解线性规划的单纯形法	(30)
§ 2-5 线性规划的对偶问题	(42)
§ 2-6 线性整数规划	(45)
§ 2-7 应用实例	(59)
习题.....	(68)
第三章 非线性规划	(72)
§ 3-1 非线性规划的数学模型	(72)
§ 3-2 目标函数的无约束极值	(79)
§ 3-3 函数的凸性	(86)
§ 3-4 目标函数的条件极值	(91)

习题.....	(103)
第四章 无约束最优化问题的解法	(105)
§ 4-1 消去法	(105)
§ 4-2 插值法	(115)
§ 4-3 坐标轮换法	(119)
§ 4-4 共轭方向法	(123)
§ 4-5 单纯形加速法	(133)
§ 4-6 最速下降法	(139)
§ 4-7 共轭梯度法	(145)
§ 4-8 变尺度法	(151)
习题.....	(162)
第五章 有约束最优化问题的解法	(164)
§ 5-1 解法分类	(164)
§ 5-2 消元法	(165)
§ 5-3 拉格朗日乘子法	(167)
§ 5-4 罚函数法	(175)
§ 5-5 线性逼近法	(197)
§ 5-6 可行方向法	(201)
习题.....	(211)
第六章 焊接中多目标优化问题及优化技巧	(213)
§ 6-1 多目标优化问题	(213)
§ 6-2 数学模型的尺度变换	(224)
§ 6-3 优化方法的选择及收敛精度的确定	(227)
§ 6-4 结果分析和灵敏度分析	(230)
第七章 非线性规划在焊接中的应用	(233)
§ 7-1 焊接规范的最优化问题	(233)
§ 7-2 焊后热处理规范的最优化问题	(247)

§ 7-3	焊条的最优化设计	(250)
§ 7-4	高强钢焊缝成分的最优化问题	(256)
§ 7-5	焊接变压器的最优化设计	(259)
第八章	动态规划及在焊接中的应用	(270)
§ 8-1	动态规划的基本概念	(270)
§ 8-2	最优化原理	(274)
§ 8-3	焊接板梁的优化设计	(276)
§ 8-4	机器负荷分配的最优化	(281)
§ 8-5	换热器系列的最优化设计	(286)
习题		(291)
第九章	常用最优化算法的语言程序	(292)
§ 9-1	单纯形法语言程序	(292)
§ 9-2	黄金分割法语言程序	(303)
§ 9-3	坐标轮换法语言程序	(307)
§ 9-4	最速下降法语言程序	(314)
§ 9-5	单纯形加速法语言程序	(323)
§ 9-6	共轭梯度法语言程序	(333)
§ 9-7	变尺度法(DFP)的BASIC语言程序	(343)
§ 9-8	拉格朗日乘子法语言程序	(351)
§ 9-9	混合罚函数法的BASIC语言程序	(366)
参考文献		(385)

第一章 焊接最优化概论

§ 1-1 最优化的内容及在焊接中的应用

人们做一项工作可能有许多方案，但总希望在一切实可能的方案中选取最优的方案，即在一定条件下效果最好的方案。例如设计一个产品，希望在保证产品性能的前提下使产品的成本最低；在生产调度中希望在保证一定产量的前提下，所用的工时最少，或利润最大；在发射火箭时，希望烧完规定的燃料使速度最大，等等。在科研、生产和管理方面有大量类似的问题。以前人们是凭经验或者直觉的知识来评价方案的优劣，这种方法已不适应科学和生产的发展。因此逐渐形成了一门新的学科——最优化技术。

最优化技术是研究和解决在一切实可能的方案中寻求最优方案的科学方法。从数学上讲，它是应用数学的一个分支，是一种求极值的方法。最优化的基本思想立足于从研究对象的整体来考察和解决问题，并从组成整体的各个部分相互联系、相互影响和相互制约中寻找最优方案。因此是比较严密和精确的。最优化技术主要研究两个方面的内容：一是由生产或科技问题中抽象出最优化的数学模型（即建模）；二是求解最优化问题的理论和方法。显然，建模对解决最优化问题是十分重要的，因为模型的正确性和精度对优化的结果有很大的影响。但是，限于篇幅本书仅重点介绍求解最优化问题的理论和方法。

在20世纪50年代以前，解决最优化问题的数学方法只限于古典的微分法和变分法。由于科学技术和生产的发展，提出了大量用古典方法解决不了的最优化问题。因而以线性代数、概率论、数理统计、数值分析、集合论等现代数学为基础，产生了线性规划、非线性规划、动态规划和网络理论等新的最优化方法。60年代以后，最优化的理论和方法得到迅速发展，形成了一门新兴的学科。

应当指出，最优化技术的发展与电子计算机的出现和发展有密切的关系。因为计算机的应用为最优化提供了最有力的计算工具。这不仅仅是加快了计算速度，而且更重要的是使许多用人工无法计算的大规模最优化问题得到解决。例如，目前可用大容量高速计算机求解具有200个变量的复杂最优化问题。可以相信，随着计算机在各个部门中的普遍应用，将会更加有力地推动最优化技术的发展和运用。

由于最优化技术可以帮助人们较快地选出最优方案，或作出最优决策，因此它在科学研究、工程技术、自动控制、系统工程、产品设计、经济计划和企业管理等方面都得到广泛应用。在机械设计方面，最优化技术已用于零部件设计、机构设计、分系统设计以及工艺设备基本参数的设计，逐渐形成了机械优化设计法。

最优化技术的推广应用，对提高产品质量、降低成本、缩短生产周期等有显著作用。例如，对行星减速器优化设计的结果，使其体积缩小13%；对桥式起重机箱形主梁优化设计的结果，使其重量平均减轻14%，最大减轻35%；对一艘专用货轮横截面几何形状优化设计的结果，使其造价降低10%；对各种机构进行优化设计后，可以改善力学性能，同时提高运动精度。一般来说，最优化的问题愈复杂，优化所取得的技术经济效果

也愈显著。因此，最优化技术开始用于大系统的优化。

在国外，焊接领域中应用最优化技术已经比较普遍。国内应用最优化技术虽然较少，但已开始引起焊接科技人员的重视。下面介绍最优化技术在焊接领域中应用的简况。

(1)在焊接冶金和材料方面 利用最优化技术可获得最优药皮或焊剂配方、最优焊丝化学成分、最优熔敷金属性能、最优抗裂和抗气孔能力等等。

(2)在焊接产品设计方面 在保证产品使用要求的前提下，通过最优化设计可使焊接结构的重量最轻或成本最低。例如，设计一个焊接变压器，在保证技术性能的前提下，通过优化可使铁芯尺寸最小。

(3)在确定焊接工艺规范参数方面 运用最优化技术可获得最优焊接参数、最优预热和层间温度、最优焊后热处理规范等。

(4)在焊接自动化方面 首先运用最优化技术可以对焊接自动化设备的电子系统、液压系统、机械系统进行优化设计，以保证其可靠性，并降低成本。其次运用最优化技术可以实现对焊接规范参数的最优控制，以保证焊接质量，并提高焊接生产率。

(5)在安排焊接生产计划方面 在现有资源（人力、材料、能源、时间等）的条件下，运用最优化的方法合理安排生产计划，可使总产值最高或利润最大。

(6)在焊接生产工艺过程的设计方面 运用最优化技术可以在保证焊接质量的前提下，选择合理的工艺流程和操作方式，使加工工时最短或费用最省。

(7)在焊接生产备料方面 可以对下料进行优化，使边角余料最少；对备料的工序、各种毛坯的储备量也可以进行优化。

(8)在工厂和车间的布局、物资调配运输、材料和物资的库存、设备的更新等方面均可以通过优化获得最好的经济效益。

上述说明,焊接科研、生产和管理中有大量的最优化问题,推广应用这一技术必将取得很大的技术经济效益。

§ 1-2 焊接最优化的步骤

应用最优化方法解决焊接实际问题应按下列程序进行。

一、建立最优化问题的数学模型

要对于一个焊接实际问题进行优化,必须首先把这个问题用函数、方程式和不等式描述出来,即建立问题的数学模型。最优化问题的数学模型由三个要素组成,即设计变量、约束条件和目标函数。

1. 设计变量

在最优化问题中待定的参数称为设计变量。例如,在焊接结构的最优设计中,可以把构件的几何尺寸作为设计变量;在焊接工艺的最优设计中,可以选择焊接电流、电弧电压、焊接速度、送丝速度作为设计变量;在焊接设备电子系统的最优设计中,要确定的主要变量是电路元件(R 、 L 、 C)的数值。

对一个复杂的最优化问题,选取哪些参数作为设计变量是比较困难的,需要有丰富的知识和经验才好确定。一般讲,应该把那些选择余地不大或对目标函数影响不大的参数,根据经验定为常量,而把那些与问题本质有关的、对结果影响大的参数定为设计变量。变量数目的多少要根据具体问题确定。变量数愈多,优化的自由度愈大,愈容易达到较好的优化目标。但这会增加处理问题时的困难,计算时间也增长。所以,在可能的

条件下, 应尽量减少变量的数目。

若有 n 个设计变量 $x_1, x_2, \dots, x_n$, 则可表示为

$$X = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} = (x_1 x_2 \cdots x_n)^T \quad (1-1)$$

式中 X 为 n 维列向量, “ T ” 为转置符。

2. 约束条件

在实际工程问题中, 能够接受的最优方案常常是满足一定条件的最优方案。这些条件叫作约束条件。例如, 设计一个结构必须满足强度、刚度条件; 优化焊接参数必须满足焊缝成形和对接头性能的要求; 安排生产计划受到可用资源的限制。此外, 要求设计变量为非负或为整数值、规定设计变量的取值范围等均可作为约束条件。

如果列出的约束条件愈接近实际系统, 则最优解也愈接近实际问题的最优方案。然而, 约束条件数的增加, 将大大减少可行方案的数量, 并使计算工作量增大。

约束条件分为等式约束和不等式约束, 分别表示为

$$\left. \begin{aligned} h_i(X) &= h_i(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \\ (i &= 1, 2, \dots, m, m < n) \\ g_j(X) &= g_j(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq 0 \text{ 或 } \geq 0 \\ (j &= 1, 2, \dots, r) \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

3. 目标函数

要在一切可能的方案中寻求出最优方案, 就要确定一个评价的标准。这个标准与设计变量之间的函数关系称为目标函数, 表示为

$$S = f(X) = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1-3)$$

对目标函数进行优化, 就可以得到最优方案。在工程实际问题

中，优化目标函数就是求目标函数的极小值或极大值，即

$$\min S=f(X) \quad \text{或} \quad \max S=f(X)$$

如用效果函数（如性能指标、利润、效益、精确度、灵敏度等）作为目标函数，则最优化问题是要求极大值；如果用费用函数（人力、时间、能源、材料、占地面积、经费等）作为目标函数，则最优化问题是要求极小值。

应指出，建立目标函数是优化过程中的一项重要决策，因为它直接影响最优方案的适用价值。

综上所述，最优化问题的数学模型可归结为：在满足约束条件

$$g_j(X) \leq 0 \quad \text{或} \quad \geq 0, \quad (j=1, 2, \dots, r)$$

时，求目标函数的极值，即

$$\max S=f(X) \quad \text{或} \quad \min S=f(X)$$

建立数学模型的方法很多。例如对生产或试验数据进行统计分析，求出回归方程；对不能实际试验的问题可以通过模拟的方法建立数学模型；许多问题可以把理论公式作为数学模型；经验公式也可以作为数学模型；有些问题可以根据物理概念和逻辑推理建立数学模型。应指出，在建立数学模型时要抓住主要因素，舍去次要因素，使模型既简单，又比较准确地反映实际问题。否则，不是使计算工作量大大增加，就是使求得的解与实际不符。

〔例1-1〕 焊制一个无盖的矩形水箱，其内表面积为定值 A ，求水箱的长、宽和高，使其容积最大。

设 x_1, x_2, x_3 分别表示水箱的长、宽和高， V 表示水箱的容积，则该最优化问题的数学模型为

$$\max V = x_1 x_2 x_3$$

$$g(X) = x_1 x_2 + 2x_1 x_3 + 2x_2 x_3 - A = 0$$

$$x_1, x_2, x_3 > 0$$

〔例1-2〕 产品生产规则问题

某工厂生产A、B两种焊接产品，每天可用资源限制为：原料1600kg，面积1500m²，工时7h（420min），资源消耗系数和产值系数如表1-1所示。求这两种产品各生产多少能使总产值最大。

表 1-1 产值和资源消耗系数

项 目	A	B
占地面积(m ² /单位产量)	5	4
原料消耗(kg/单位产量)	4	5
生产率(单位/时)	60	30
产值(元/单位产量)	10	15

设A、B两种产品的产量分别为 x_1 、 x_2 ，则由问题的性质经过逻辑推理可得到如下数学模型：

$$\max f(X) = 10x_1 + 15x_2$$

$$5x_1 + 4x_2 \leq 1500$$

$$4x_1 + 5x_2 \leq 1600$$

$$\frac{x_1}{60} + \frac{x_2}{30} \leq 7$$

$$x_1 \geq 0 \quad x_2 \geq 0$$

〔例1-3〕 真空扩散焊焊接规范参数的最优化

用真空扩散焊焊接某种铁磁材料和无磁材料，通过试验得到接头强度 σ_b 、冲击韧性 α_H 、焊件的相对变形 ϵ 与焊接温度 x_1 、焊接压力 x_2 、焊接时间 x_3 的回归方程如下：

$$\sigma_b(X) = 341.1 + 20.7x_1 + 25.3x_2 + 13x_3 + 6.1x_1x_2 - 1.4x_1x_3 + 3.8x_2x_3 - 1.1x_1x_2x_3 \quad (\text{MPa})$$

$$\alpha_H(X) = 124 + 23x_1 + 19x_2 + 11x_3 - 4x_1x_2 - 6x_1x_3 + 4x_2x_3 - 3.0x_1x_2x_3 \quad (\text{KJ/m}^2)$$

$$e(X) = 1.97 + 0.78x_1 + 0.7x_2 + 0.52x_3 + 0.1x_1x_2 + 0.02x_1x_3 - 0.02x_2x_3 - 0.45x_1x_2x_3 \quad (\%)$$

试验时规范参数的变化范围为：焊接温度1273~1373K，焊接压力6~14MPa，焊接时间700~1300s。要求接头冲击韧性不小于156KJ/m²，试件相对变形量不大于3%，求焊接参数为何值时接头强度最高。

由题意，该问题的数学模型可表示为

$$\begin{aligned} \max S &= \sigma_b(X) \\ \alpha_H(X) &\geq 156 \\ e(X) &\leq 3 \\ 1273 &\leq x_1 \leq 1373 \\ 6 &\leq x_2 \leq 14 \\ 700 &\leq x_3 \leq 1300 \end{aligned}$$

二、选择求解方法编制计算程序

最优化的方法很多，各有特点，适用于不同类型问题的寻优，而每一种最优化方法又有各种求解方法。因此，必须根据最优化问题数学模型的类型、性质、规模以及对计算精度的要求，慎重地选择求解方法。选择的原则是计算程序简单，满足精度要求，稳定可靠，计算效率高，节省时间。

对于焊接科学技术和工程实际问题的寻优常常需要用计算机计算。在完成上述步骤后，即可编制计算程序。编制程序一般可用BASIC或FORTRAN语言。编制程序通常分两步进行。第一步是根据数学模型和求解方法编制程序框图（计算流程图），即把整个最优化计算过程（包括计算步骤、内容及其

逻辑关系等)用文字、方框、圆弧框和指向线等比较详细地表示出来。第二步是根据程序框图编写语言程序。在一般情况下,为节省人力和时间,可在语言程序库中选取适用的程序,或者根据具体情况对现成的程序进行局部修改后应用。本书在第九章中给出一些算法的语言程序,可供使用时参考。

将编制出的语言程序上机通过后,即可开始计算。在计算过程中要随时注意计算结果,在必要时要及时调整输入参数,使解不断得到完善。

三、结果分析及实施

处理最优化问题时,建立精确的数学模型,选择完善的求解方法固然是重要的,但还必须对计算结果作详细的分析和比较,以便取得正确、可靠的最优化方案。为了分析、比较,要求给出基本数据:最优方案的变量值、目标函数值、约束函数值和原始方案的有关数据等。

首先,要检查变量值的合理性和可行性。如果变量的值不合理,或不可行,则应查明原因。这种情况可能是由两方面原因造成的:一是所取约束条件不合适;二是数学模型中有小错误,如小数点定位和个别符号的错误。

其次,比较目标函数的最优值和原始方案的目标函数值,对最优化的效果作出判断。

再次,分析约束函数值。这对判断最优点的位置、计算结果的可靠性以及检查数学模型是否有误都是很有帮助的。

另外,还应把计算出来的数据作成数表或图线,以便为解决类似焊接工程问题时参考。

对结果分析作出肯定的结论后,一般即可组织实施。但是,对于重要的工程问题,对生产中不可控因素比较多的问题

和变量不能严格控制的问题，实施前还应该根据计算结果进行实际试验。如果试验结果与计算结果基本相符，则可进行实施，如果不符则应针对问题所在采取措施。对于那些因条件限制不能实际试验的问题，可采用模拟试验验证。

对焊接中的某些优化问题，如求最佳焊接规范、最优药皮配方，最优熔敷金属化学成分等问题，最好得到最优方案后，先进行试验验证，后投产实施。因为这类问题的数学模型一般是统计分析试验数据得出的回归方程，有一定的误差；在焊接、配料过程中存在不可避免的波动；另外还有一些不可控的因素。这些因素都可能造成偏离最优方案。因此，实施前的试验可以避免经济损失，获得检验最优方案的信息。

§ 1-3 焊接最优化问题的分类

焊接工程中的最优化问题是各式各样的，将它们进行适当的分类，对于了解最优化问题的性质和特点以及选择求解方法都是很有益的。

焊接最优化问题大体可分为以下几类：

一、线性与非线性最优化问题

如果目标函数和全部约束条件都是变量的线性函数，则这种最优化问题称为线性规划。例1-2就是一个线性规划问题。

如果目标函数或约束条件是变量的非线性函数，则这个最优化问题称为非线性规划。例1-1和例1-3都是非线性规划问题。

线性规划可以看作是非线性规划的特殊情况。显然求解线性规划比求解非线性规划容易。故人们用一系列的线性规划去