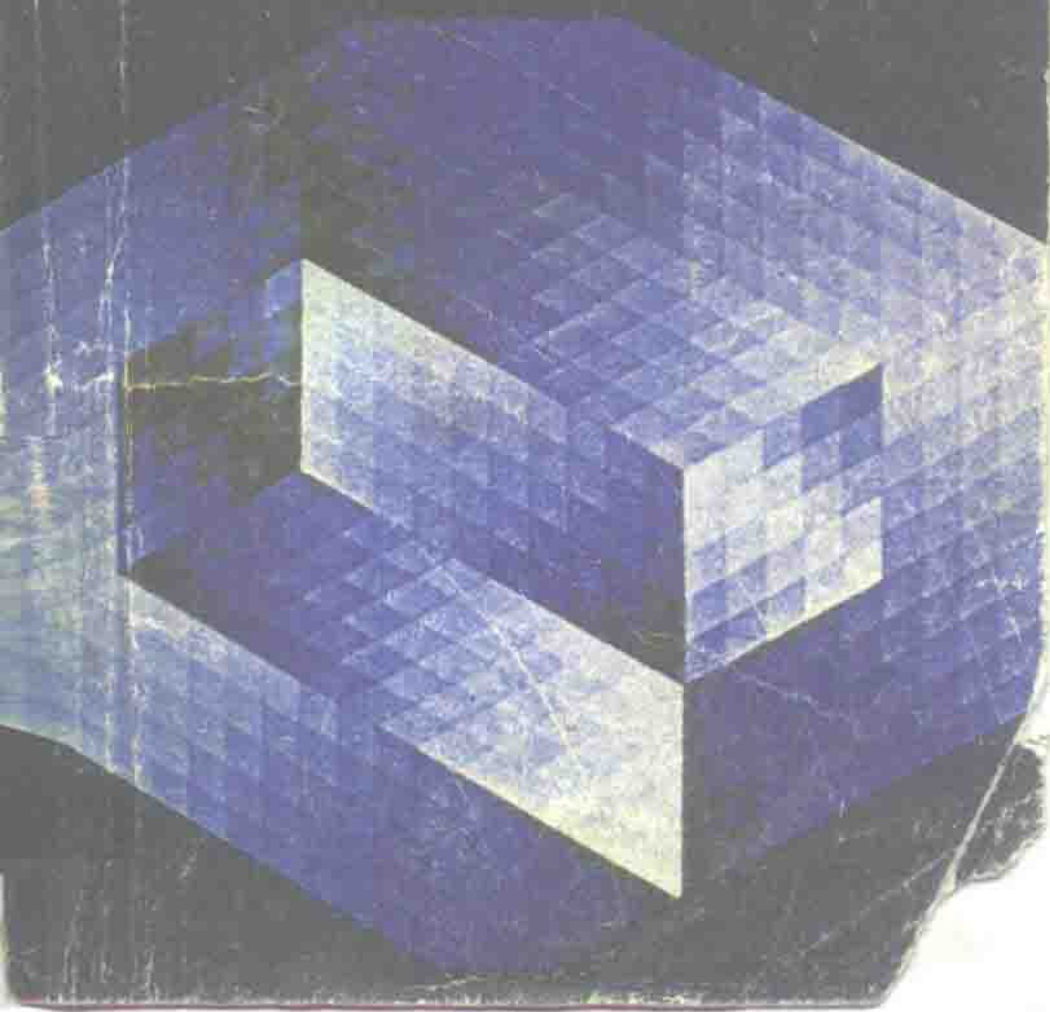


机械优化设计入门

天津科学技术出版社



机械优化设计入门

张玉凯 编

天津科学技术出版社

机械优化设计入门

张玉凯 编

责任编辑：苏飞

•

天津科学技术出版社出版

天津市赤峰道124号

天津新华印刷一厂印刷

新华书店天津发行所发行

•

开本 850×1168毫米 1/32 印张 8 字数 166,000

一九八五年 六月第一版

一九八五年 六月第一次印刷

印数：1—20,100

书号：15212·135 定价：1.85元

内 容 简 介

书中浅显地介绍了应用电子计算机进行机械优化设计的一些基本原理和方法，以通俗和实用为其主要特点，读者只需具备相当中专以上的文化水平，并掌握一定的机械设计知识即可读懂。全书基本分为三部分。第一部分为第一章，简单介绍了FORTRAN语言的基本知识和应用实例；第二部分内容包括第二章至第四章，介绍了机械优化设计的基本理论和方法；第三部分为第五章，较详细地介绍了几个机械优化设计的实例。书末附录部分介绍了优化方法涉及到的一些数学知识。

前 言

机械优化设计是以数学规划论为理论基础,运用计算机寻求机械设计最优参数的现代先进设计方法。采用这种方法可以使设计方案按预定目标达到最为完善的地步,将会带来显著的技术经济效益。机械优化设计是在计算机技术飞速发展的基础上逐渐形成和发展起来的。特别是近年来随着体积小、功能全、价格低的微型计算机的日益普及,为在广大机械行业中,尤其是在基层厂矿的设计部门中采用机械优化设计这一新技术提供了可靠的保证。同时,机械优化设计的发展和广泛使用,也将为在机械行业中推广使用微型计算机起到积极的促进作用。

目前,机械优化设计的研究和应用工作开展得还不很普遍,这是由于直接从事机械设计工作的广大工程技术人员对优化方法和计算机技术还比较生疏。为了在广大机械行业中普及和推广这一先进技术,作者根据机械优化设计教学与科研工作的经验和体会,参考国内外有关资料文献及一些单位的科研成果,编写了这本以通俗和实用为特点的入门读物,为广大工程技术人员自学入门提供一点帮助。本书读者对象为具有中专以上文化水平的广大机械设计人员。由于最优化方法涉及一些专门知识,考虑到读者知识水平参差不齐,为了突出通俗和实用的特点,本书对于各种优化方法的理论问题仅作简单通俗的论述,并尽可能采用直观的几何上的解释,读者对这部分内容基本理解就可以了。重点放在方法的掌握和运用上,力求使读者能够用学到的知识初步解决一些简单的优化设计问题,达到基本入门的目的,并为深入学习和研究机械优化设计问题打下良好的基础。

全书大体上可分为三个部分。第一部分为第一章,简单介绍

了FORTRAN语言的基本知识和应用实例，目的是使初学者能基本学会编制一些简单的程序，并能阅读后面介绍的有关优化方法的计算机源程序。具有算法语言基础的读者可以跳过此章。第二部分内容从第二章到第四章，介绍机械优化设计的基本理论和方法。鉴于多数读者可能对算法语言比较生疏，在第三、四章中还给出了几个优化方法的源程序，并加注了较为详细的解释，以便于自学。第三部分为第五章，较详细地介绍了几个优化设计实例。此外，在最后的附录部分介绍了优化方法中涉及到的一些数学基础知识，通过学习这部分内容，能加深读者对各种优化方法的理解。在学习优化设计过程中，这部分内容只要求看懂就可以了。

本书由天津纺织工学院傅保罗副教授主审。参加审阅工作的还有天津大学赵自谦副教授、马逢时副教授和周忠荣老师等。在本书的编写过程中，还得到了谢长虹、王吉仁、孙海涛等同志的积极协助。对于他们的热忱帮助和大力支持谨在此表示衷心的感谢。由于编者水平和经验有限，书中难免存在缺点和错误，深望读者给予批评、指正。

编者

1984.3

目 录

概述	(1)
第一章 FORTRAN 语言概要	(4)
§1-1 FORTRAN语言基础	(4)
一、基本概念	(4)
二、基本语句	(11)
三、外部过程	(23)
§1-2 在一般机械设计中的应用	(32)
第二章 数学模型的建立	(47)
§ 2-1 设计变量与设计约束	(47)
一、设计变量	(47)
二、设计约束	(49)
§2-2 目标函数	(52)
一、什么是目标函数	(52)
二、多目标函数的解	(53)
三、将多目标优化问题转成单目标求解的方法	(56)
§2-3 最优化问题的数学模型及几何描述	(59)
一、最优化问题的数学模型	(59)
二、最优化问题的几何描述	(60)
三、最优化过程的几何描述	(64)
§2-4 优化的迭代过程和终止判别	(66)
一、迭代算法的概念	(66)
二、优化问题的迭代过程	(68)
三、迭代点列的收敛条件和终止判别	(70)
第三章 无约束最优化方法	(73)
§3-1 一维搜索方法	(73)

一、概述	(73)
二、确定单峰区间的进退算法	(74)
三、黄金分割法 (0.618法)	(80)
四、分数法 (Fibonacci法)	(87)
五、二次插值法	(90)
§3-2 坐标轮换法	(100)
一、基本原理	(100)
二、加速步长的坐标轮换法	(100)
§3-3 共轭方向法	(105)
一、共轭方向的基本概念	(105)
二、共轭方向的生成	(107)
三、共轭方向法的迭代过程	(111)
四、框图与程序	(111)
§3-4 单纯形法	(115)
一、基本原理	(115)
二、计算方法	(116)
三、框图与程序	(120)
四、计算举例	(126)
§3-5 梯度法 (最优下降法)	(127)
一、基本原理	(127)
二、迭代步骤	(130)
三、关于梯度法的几点说明	(133)
四、框图与程序	(134)
第四章 约束最优化方法	(138)
§4-1 约束坐标轮换法	(138)
一、基本原理	(138)
二、框图与程序	(139)
§4-2 约束随机法	(143)
一、基本原理	(143)
二、随机方向的产生	(144)
三、无约束随机法的迭代步骤	(146)

四、约束随机法的基本思想	(147)
五、框图与程序	(148)
§4-3 复合形法	(151)
一、基本原理	(151)
二、迭代步骤	(152)
三、复合形法的优缺点	(157)
四、框图	(158)
五、计算举例	(158)
§4-4 惩罚函数法	(162)
一、基本原理	(162)
二、内点法	(164)
三、外点法	(166)
§4-5 正多面体法	(169)
一、基本原理	(169)
二、迭代步骤与计算方法	(169)
三、框图与程序	(172)
第五章 机械优化设计实例	(180)
§5-1 概述	(180)
一、机械优化设计概况	(180)
二、机械优化设计的一般步骤	(180)
§5-2 关于建立数学模型的一些问题	(185)
一、数学模型的尺度变换	(185)
二、数据表格及线图资料的使用	(186)
三、整数解与离散解的处理	(187)
§5-3 函数四杆机构综合的优化设计	(188)
一、确定设计变量	(188)
二、建立目标函数	(189)
三、确定约束函数	(190)
四、优化方法和计算结果	(191)
§5-4 凸轮机构的优化设计	(192)
一、基本计算公式的推导	(192)

二、优化设计的数学模型	(194)
§5-5 弹簧的优化设计	(195)
一、目标函数与设计变量	(196)
二、约束函数	(196)
三、优化方法及计算结果	(198)
§5-6 齿轮减速机的优化设计	(199)
一、单级齿轮减速机的优化设计	(199)
二、三级齿轮减速机的优化设计	(205)
§5-7 W型机构的优化设计	(213)
一、工作原理及设计要求	(213)
二、建立数学模型	(214)
三、优化方法及计算结果	(218)
附录 优化方法的数学基础知识	(220)
§1 正定矩阵的判定及其性质	(220)
一、矩阵运算的一些性质	(220)
二、二次型的标准形	(222)
三、正定矩阵及其判别法	(224)
四、正定二元二次函数的性质	(227)
§2 函数的梯度	(229)
一、方向导数	(229)
二、梯度	(231)
三、函数的二阶导数矩阵	(234)
§3 集合	(236)
一、集合的基本概念	(236)
二、凸集	(237)
三、凸函数判别法	(240)
四、凸规划的特点	(241)
§4 共轭方向	(241)
一、 n 维二次函数的共轭方向问题	(242)
二、共轭矢量的线性变换	(243)

概 述

利用计算机进行机械最优化设计,是在六十年代才发展起来的一门新技术。国内在近几年才开始从事这方面的研究与应用。值得注意的是,虽然在机械设计中采用最优化技术的历史很短,但其进展的速度却是十分惊人的。无论在机构综合、通用机械零部件设计方面,还是在各种专业机械和工艺装备的设计方面都由于采用了最优化技术而取得了显著成果。发展速度如此迅猛的原因,一方面是由于生产实践中有大批最优化的问题亟待人们去解决,另一方面是由于计算机日益广泛地使用,为采用最优化技术提供了一个得力的计算工具。

运用计算机进行机械最优化设计,对整个机械设计学科产生了十分深刻的影响,使许多过去无法解决的关键性问题,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革命,机械优化设计作为一种新兴的技术,尽管目前还不很成熟和完善,但正在日益广泛地受到人们的重视。

1. 机械优化设计的一般过程

首先谈谈什么是“优化设计”。

作出一个好的设计,不仅要使产品具有良好的性能,同时,还要求满足生产的工艺性、使用的可靠性和安全性,且费用最省、消耗最低和误差最小等。这些就是一切设计活动的最终目标。设计人员一般总要研究几个候选方案,从中选择最优者。但是,过去由于传统的设计方法受到时间和费用的限制,所能提供的选择方案非常有限,再加上受分析和计算条件的影响,要想取得一个最优方案几乎是不可能的。随着设计过程的日益计算机化,广大设计人员迫切要求为自动选取最优设计方案建立一种迅

速和有效的方法。机械优化设计方法就是在这种要求下产生和发展起来的一种自动探优的方法。

机械优化设计的一般过程与传统设计方法有所不同。它是以计算机自动设计选优为其基本特征的。一个机械优化设计的实际问题，其解决过程一般分为四个阶段：

(1) 工程设计问题的提出。首先决定设计目标，它可以是单项设计指标，也可以是多项设计指标的组合。从技术经济观点出发，机器的运动学和动力学性能、体积、重量、效率、成本、可靠性等，都可以作为设计所追求的目标。然后分析一下设计应满足的要求，主要有以下几类：一类是某些设计参数的取值范围；一类是由某种设计性能或指标根据设计规范推导出的性能要求；一类是工艺条件对某些设计参数的限制等。

(2) 建立数学模型。将以上工程设计问题用数学方程式的形式予以全面地、准确地描述，其中包括：根据设计目标建立起评价设计方案优劣的目标函数；把设计应满足的各类要求以等式或不等式的形式建立约束方程；确定哪些参数参与优选，也就是确定设计变量。这里，一是要准，必须严格地按各种规范建立相应的数学描述；二是要全，必须把设计中应考虑的各种因素全部包括进去。这两点对于整个优化设计的效果是至关重要的。

(3) 根据数学模型中函数的性质、设计的精度要求等，选择适用的优化方法，并做出相应的程序设计。

(4) 上机计算，并自动解得最优值，然后对计算结果做出分析和正确的判断，得出最优设计方案。

2. 机械优化设计的技术经济效益

近十几年来机械优化设计研究的发展情况表明，优化设计已愈来愈多地应用于产品设计中，如零部件的优化设计、机构的优化设计，工艺装备基本参数的优化设计等，而且取得了显著的经济效果。

目前，对在机械设计中最优化方法的实际应用还很难做出准

确的估价。但是有很多实例可以说明，与传统的设计方法比较，采用优化设计方法后设计方案的经济效果很显著。例如，对某一大型减速器进行优化设计，结果使其重量比原方案减轻12%；又有一行星减速器，经优化设计使其体积比原设计缩小13%；对20台桥式起重机箱式主梁进行优化设计，结果使其重量比原型平均减轻14%，最多的减轻35%。另外，对各种机构进行优化设计，可以改善机构的动力学性能，同时提高运动精度。一般来说，设计问题愈复杂，优化设计结果取得的技术经济效益也就愈显著。尽管机械优化设计方法还处在不断发展的过程中，但仅从目前已完成的一些工作实例来看，这种方法的推广和应用必将对机械工业在进一步提高产品质量、降低成本、缩短生产周期等方面产生积极的影响。

机械优化设计方法目前国内还没有普遍为广大工程技术人员所认识和掌握。这主要是由于他们对计算机的应用和优化方法还不很熟悉。编写本书的目的，就是为了帮助广大工程技术人员初步解决这一问题，达到基本“入门”。

第一章 FORTRAN语言概要

由于优化设计要利用电子计算机完成大量的计算工作，因此，要在机械设计中运用优化方法，就必须首先掌握算法语言。在本章中简要地介绍一种常用的算法语言——FORTRAN语言的基本内容及程序编制方法，结合学习几个应用实例，使初学者能够基本学会编制一些简单的程序，并能阅读后面介绍的关于优化方法的计算机源程序。算法语言本身是一门系统的完整的学科，在这里不可能全面和细致地介绍，只能作为一个引子。读者要真正学好这门知识，还需要阅读有关算法语言的专门书籍，并多上机实践，才能达到目的。

§1-1 FORTRAN语言基础

一、基本概念

1. 程序的基本结构

对于现代的电子计算机，人们需用接近数学表达形式的算法语言，把实际问题的计算方法和步骤输入计算机，才能使它来完成运算。算法语言和通常的文字语言及数学表达式都有明显的差别。下面先通过一个简单的例子，扼要地介绍FORTRAN程序的主要成分和基本结构，然后再分别介绍各种基本概念和术语。

例如已知参数 R 的值，计算并打印：

$$A = \frac{\sqrt{R^2 + 3.5R} - 5R}{3}$$

$$B = \frac{12A}{1.1A + 2.45}$$

上述计算过程的FORTRAN程序如下:

```
C  AN EXAMPLE OF FORTRAN PROGRAM
    READ (5, 11) R
11  FORMAT (F10.5)
      A = (SQRT(R * R + 3.5 * R) - 5. * R) / 3.
      B = 12. * A / (1.1 * A + 2.45)
      WRITE (12, 15) R, A, B
15  FORMAT (20X, F9.5, 15X, F9.5, 15X,
           1 F9.5)
    STOP
    END
```

这段程序共有十行。

第一行是注解行。开头的字母C，表示注解的意思。

第二行是读语句。专用名READ是读的意思。括号内的第一个整数5代表输入设备的代号，表示从该设备读入数据。第二个整数11表示按标号为11的语句所规定的格式转换读入的数据。

第三行是标号为11的格式语句。专用名FORMAT是格式的意思。括号内的内容为格式说明，标号11也称为语句标号，作为一个语句的标志。格式语句必须有语句标号，以供读/写语句引用。

第四行是赋值语句。符号“=”称为赋值号。这个赋值语句的意思是，把赋值号右端的计算结果送入左端变量A所代表的存储单元之中，称为给变量A赋值。

第五行也是赋值语句。把计算结果赋值给变量B。

第六行是写语句。专用名WRITE是写出的意思。括号中的内容与读语句的括号中的内容意义相仿。不同的是第一个整数代表的是输出设备的代号。

第七、八行是标号为15的格式语句。括号内的20X, F9.5等称为字域说明符，控制写语句执行结果的格式。注意，这个语句

写了两行。当语句一行写不完时，可以紧接着下一行写，但在下一行写内容之前要先写上上一个续行标志。第八行最左边所写的1，就是续行标志。

第九行是停语句。专用名STOP是停的意思。

第十行是结束行。专用名END表示本段程序到此结束。

通过这段程序可以归纳出以下三点：

第一，程序是由注解行、结束行和语句组成的。而行和语句是由一些基本字符构成的。

第二，书写时，一行分为三部分。第一部分书写语句标号（如果有的话）；第二部分书写续行标志（如果需要）；第三部分书写语句的内容。

第三，语句分为可执行语句和非执行语句。需要产生某种动作的，如读语句、写语句、赋值语句，称为可执行语句；提供编辑信息的如格式语句，称为非执行语句。

2. 数和变量的表示

FORTRAN语言是由一些基本字符构成的。其中包括 26 个大写的英文字母、0 ~ 9 这10个数字字符以及其它专用定义符。下面将陆续予以介绍。

FORTRAN中的常数最常用的为整型和实型两类。

整型数不允许带小数点和指数，如 0，-5，12，248均为整型数。

实型数分为：

（1）基本实型，即带有小数点的数，如：0.01，3.1416，200.等。注意，小数点后的零可以省略，但小数点不可省略，若将200.写成200则变为整型数了。

（2）指数型（E型），例如：

3.1E - 3 (3.1×10^{-3}) 2.E 0 8 (2×10^8)

1.E - 6 (1×10^{-6}) .5E + 2 (0.5×10^2)

括号里的数，表示与其等价的十进制指数形式的常数。

在计算机中，实型数的取值范围比整型数大，但它在机内是近似表示的，只能达到一定的精度，整型数则不带误差。因此，对循环次数，记录矩阵中元素行列位置的数等，必须采用整型数。

FORTRAN中的变量是用符号名来命名的。该符号名称为变量名。符号名由1至 n 个字母数字串组成，对于不同型号的计算机， n 有不同的值，一般 $n \geq 4$ ，但第一个字符必须是字母。例如：

A 3, S, PHI, MAX等都可以做变量名。

而数字开头的或含有不是字母数字的其它符号的字符串，都不能做变量名。例如：

E2.1, 2MN, Y* 1等。

注意，计算机只区分变量名中的前 n 个字符，当变量名的长度超过 n 个字符时，只截取前 n 个。

变量可以在程序中多次被赋值，该值可以通过变量名来引用。

变量名本身，可以隐含指示变量的类型。若没有特殊说明，凡是以I、J、K、L、M、N六个字母之一开头的变量名，其类型为整型，否则为实型。例如：MAX、I 3, J 0、K均为整型变量；SOM、X 3、Y、PHI都是实型变量。

由于FORTRAN语言中常数、变量均有整型与实型之分，与一般数学形式不同，需要特别注意，这是初学者经常出错的地方。

3. 数组与数组元素

在实际计算中，常常遇到带有下标的数组排列有序的数或变量。例如：

$$X = (x_1, x_2, \dots, x_{10});$$

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \end{bmatrix}$$