

现代设计法丛书

离散论方法学

丁预展 主编

中国建筑工业出版社

现代设计法丛书

离散论方法学

丁预展 主编



中国建筑工业出版社

离散论方法学是一门综合性很强的分析、研究和设计各类工程、系统及产品的方法性学科。

本书系统地阐明了离散论方法学的理论、方法及有关实施手段，详细介绍了在信号分析、场域分析、动态计算、模态分析、优化设计、系统仿真、计算技术中的应用，以及分析解决实际问题的经验与方法步骤。书中附有实例、软件框图及程序，为工程、系统及产品的设计计算提供了行之有效的方法。书中对近年来国内外新成果和新进展作了充分反映。

本书可供设计研究院所、高等院校、厂矿企业的科研、设计及管理技术人员学习现代设计理论与方法的参考。

现代设计法丛书
离散论方法学
丁预展主编

中国建筑工业出版社出版（北京西郊百万庄）
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
三河振兴印刷厂印刷

*

开本：787×1092毫米 1/32 印张14 1/2字数，310千字

1988年2月第一版 1988年2月第一次印刷

印数1—8000册 定价2.60元

中国标准书号 ISBN7—112—00298—2/TU.194

科技新书目 163—214 统一书号，15040·5499

现代设计法丛书总序

任何一项规划、计划、管理、改革，任何一类工程、产品、施工、作品，任何一种发明、发现、创造、构思，总之，任何群体与个人、理论与实践、学科与科学、领导与决策，第一道工序就是根据客观规律进行“设计”。

通过传统经验的吸取、现代科学的运用、方法论的指导与方法学的实现，解决各种疑难问题，设计真善美的系统或事物，这门学问就称作《现代广义设计科学方法学》，简称《现代设计法》或广义设计学，她是跨学科、跨专业、纵横渗透移植的、综合性、定量性、多元性交叉学科。她揭示了现代广义设计科学的特征、属性、理论、规律、程式、途径、方法与法规，集中外古代、近代与现代科学方法论、方法学之精髓于己身，使人类最重要的活动——广义设计，产生了质的飞跃，从偶然的、经验的、感性的、静态的与手工式的传统狭义设计，上升为必然的、优化的、理性的、动态的与计算机化的现代广义设计。

《现代设计法》由既相对独立又有机联系的十一论方法学组成，其中古五论为功能论（可靠性为主体）、优化论、离散论、对应论、艺术论，老三论为系统论、信息论、控制论，新三论为突变论、智能论、模糊论。哈肯的协司论与普里高津的耗散结构论可隶属系统论与突变论，且尚未形成普适性方法学体系。十一论方法学的作用如下：

14274/06

信息论方法学（信号处理是现代设计的依据）
功能论方法学（功能实现是现代设计的宗旨）
系统论方法学（系统分析是现代设计的前提）
突变论方法学（突变创造是现代设计的基石）
智能论方法学（智能运用是现代设计的核心）
优化论方法学（广义优化是现代设计的目标）
对应论方法学（相似模拟是现代设计的捷径）
控制论方法学（动态分析是现代设计的深化）
离散论方法学（离散处理是现代设计的细解）
艺术论方法学（悦心宜人是现代设计的美感）
模糊论方法学（模糊定量是现代设计的发展）

亲爱的读者，当你事务缠身而思路枯竭时，当你经验丰富而现时莫展时，当你哲理不清而又无计策时，当你决心开拓而心力不足时，那么，有志于工作现代化、管理现代化、领导现代化、决策现代化、生产现代化、技术现代化、教学现代化……自强的读者，可从十一论方法学中吸取定性、定量的概念、观点和实用方法。

亲爱的读者，迎接国际范围面向未来、面向世界、面向现代化这一场大变革的有志之士，正在总结人类能够出色地工作、学习、生活、生产和创造的一切软、硬科学方法学，正在设计人类主、客体均能各尽其能的美好环境。让我们为此而博取百家精华，贡献自己微薄的力量吧！

中国现代设计法研究会

戚昌滋1987年6月于北京展览馆路一号

前 言

“离散论方法学”的名词是芮杏文和戚昌滋同志新著《实用创造学与方法论》及《现代设计法》两书中提出的,也是中国现代设计法研究会多次学术年会讨论的结论,认为从方法学角度来说,离散论与系统论是一对范畴,无论从自然科学、技术科学、社会科学的广义设计来看,离散论方法学可解决具体解题,系统论方法学可解决总体解题。限于篇幅,本书仅讨论工程技术问题的离散论方法学,且现代设计法十一论方法学每一论方法学都有离散问题,故本书也不可能面面俱到。

生产的发展、科学的进步,使得许多工程、系统、设备越来越完善,综合功能的高级化,往往带来工程、系统、设备的复杂化。要分析、解决这些千变万化的复杂问题往往会使传统方法无能为力。为此,人们已日益感到迫切需要提供一种能化难为易、化繁为简、化整为散的、通用、实用、高效、准确的办法。编著本书的目的就是要从方法学上为读者提供“又一把打开科学大门的钥匙”,使得各种工程技术的复杂难题能够迎刃而解。

离散论方法学(又称离散分析设计法)是一种将复杂的事物或广义系统离散成有限个或无限个简单事物或子系统来分析和处理,以求得总体的近似与圆满解决的方法。所以它是分析、解决各类复杂问题的最常用的、行之有效的的基本方法。前人在各种学科领域中已有一些应用,并已发挥了良好

的作用。本书是第一次将分散在各个领域中的离散分析理论与技术汇集在一起，吸收与运用国内外先进理论及技术，经过分析综合，从哲学观点、理论、方法、技术等各个方面进行研究、概括、充实、提高。作者们总结了十几年来在研究生教学与科学研究中积累起来的经验与成果，撰写出本著作。

全书详细阐述了离散分析法的基本理论、方法及实施手段。介绍了离散分析法在信号分析与处理、场域参数分析与计算，动力分析与响应计算，优化分析与设计、系统仿真分析与计算……等方面的应用，为工程、系统、产品、设备的设计、分析、计算提供了具体的方法。

本书的特点力求内容新颖，技术先进，方法可靠、实用。全书除了阐明必要的基本理论外，侧重于实施技术与应用，详细地介绍解决各类问题的经验，体会、方法步骤。附有实例与软件程序。故本书能为研究设计院所工程师、大专院校研究生及高年级大学生，工厂设计及管理技术人员提供各类问题分析、设计、计算方法与手段。

程维伦、王旭辉、李玉娟、赵兴华、李鸿宝、汪骏书、付汝辑、韩国民、张信志、龚汉生、覃钧、秦建堂、彭文华等同志参加了部分章或节的编写。全书编写过程中戚昌滋同志提出了许多宝贵意见与建议，谨致谢意。

限于作者水平，书中难免存在缺点与错误，恳请批评指正。

丁预展

1987.12.于北京

目 录

现代设计法丛书总序

前言

第一章 绪论	(1)
第一节 离散论方法学的意义	(1)
第二节 离散分析设计法的基本内容	(3)
第三节 离散论方法学的数学基础	(4)
第四节 离散分析设计法的力学基础	(10)
第二章 离散变量优化设计	(17)
第一节 离散设计变量及其离散空间	(19)
第二节 离散变量优化方法的基本概念	(27)
第三节 混合离散变量的直接搜索法	(32)
第四节 其它离散变量优化设计方法	(42)
第三章 随机信号的离散分析	(55)
第一节 随机信号概述	(56)
第二节 随机信号的离散表示	(61)
第三节 有限离散富利叶变换	(64)
第四节 随机信号与系统分析	(74)
第五节 工程应用	(78)

第四章 有限单元法基本原理..... (98)

第一节 平面问题..... (104)

第二节 结构的离散化..... (107)

第三节 三角形常应变单元..... (109)

第四节 单元载荷向节点移置及节点总载荷... (122)

第五节 整体刚度矩阵..... (126)

第六节 给定位移条件的引入..... (136)

第七节 计算步骤..... (141)

第八章 等参单元..... (142)

第九章 弹塑性应力分析..... (165)

第五章 大型复杂结构有限单元法及其应用软件

..... (177)

第一节 工程科学计算面对的困难..... (177)

第二节 大型复杂结构的分析处理方法..... (182)

第三节 国外结构分析有限单元法通用程序系
统的概况..... (208)

第六章 弹性力学问题的边界单元法..... (224)

第一节 弹性力学二维问题..... (226)

第二节 弹性力学三维问题..... (249)

第三节 程序..... (259)

第七章 离散分析结构动力学..... (287)

第一节 动柔度法..... (288)

第二节 传递矩阵法..... (296)

第三节	有限差分法·····	(320)
第八章	离散结构的试验模态分析·····	(343)
第一节	试验模态分析的基本原理·····	(345)
第二节	模态测试技术·····	(358)
第三节	模态参数的估计方法·····	(367)
第四节	模态分析的应用·····	(383)
第九章	离散仿真·····	(410)
第一节	基本概念·····	(411)
第二节	应用离散化模型仿真连续系统·····	(413)
第三节	采样系统仿真·····	(413)
第四节	离散事件系统仿真·····	(425)
第五节	仿真程序与语言·····	(441)

第一章 绪 论

第一节 离散论方法学的意义

一、离散是客观事物存在的基本形式之一

离散与集合是客观事物存在的基本形式、是矛盾的统一体。离散是绝对的、集合是相对的。

辩证唯物主义认为：世界是物质的、运动是物质不可分割的性质和存在方式。空间和时间是物质存在的客观形式。物质是间断的，同时又是不间断的。运动、时间、空间也是间断的、同时又是不间断的。物质是可分的，运动、时间、空间也是可分的。物质、运动、时间、空间的这些属性，为事物或系统的离散可能性提供了物质基础与理论依据。

一个系统可以离散成许多子系统、一种物质可以分解成元素、分子、原子、电子、质子，一台机器可以离散成部件、零件，一个结构件可以离散成单元，刚体运动可以分解为平动与转动，振动可以分解成多阶特征值与特征向量。一个国家可以分成省市，一个部门可以分成科室，一个工厂可以离散成许多车间、工段，一门学科可以分成各个分支…，在数学中的微积分法；化整为散、积散为整的分析、计算。在力学中的隔离体法；从整体中取出典型的局部为研究对象，进行受力分析、画出受力图。计算机科学中的离散数学；将自然数及语言离散成与一的各种集合。管理工程中的离散仿真，运输调度。体制改革中的承包责任制……等

等。都是“离散”的体现。本书中将要重点研究的有：系统离散、事件离散，信号离散、机构或结构离散，运动特性离散、计算离散……等等。

二、离散分析是认识事物的基本方法之一

一个复杂的事物或现象、要认清它的实质并不容易，但如果把它分解开来认识，可能就要容易得多，这就是“分析和综合”的作用；辩证法的要素之一就是“分析和综合的结合——各个部分的分解和所有这些部分的总和、总计”。分析和综合是人类认识世界的强有力手段。如果没有这些手段，那末甚至连感觉、知觉等最简单的基本心理活动形式也不可能。客观世界、客观事物和现象是极其复杂和具体地呈现在人们面前，具体事物是多样性的统一，如果不把具体的东西分成若干组成部分和因素，不加以分析，那末就不可能认识这个具体的东西。如果化学家不能分析出化学过程中的各个组成部分——化学元素，那末他对化学过程、对物质的化合和分解的规律就会一无所知。同样，如果经济学家不通过分析去找出因素——商品，价格、价值、剩余价值等等，去认识它们的本质，那末对社会及其经济发展规律也就无从认识。所以把一个极其复杂的“集合”，运用“离散”手段作为分析与设计事物的一种基本方法学之一，这就是离散论方法学。

离散论方法学不仅可以用来分析设计本身是离散的事物或系统；例如排队系统、库存系统及网络系统的离散仿真，规范或标准件的造型优化设计等等。也可以作为一种处理方法，用来解决本身是连续的事物或系统：例如连续介质的有限元法及边界元法，子结构模态综合分析，利用离散化模型仿真

连续系统,连续变量的离散优化、连续信号的离散处理等等。因此间断或不间断的问题均可应用离散论方法学解决。尤其当代数字计算机技术得到了飞速的发展,离散论方法学已成为研究对象——数学模型——数字计算机之间联系的纽带(图1—1)。数字计算机的广泛应用(特别是微型机的应

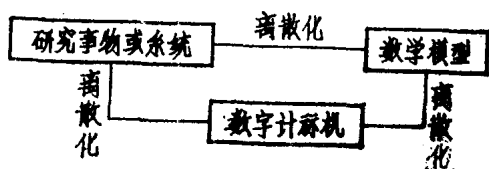


图 1—1

用),使得离散论方法学的使用越来越普遍,它已成为一种基础性的通用方法论。要解决复杂问题;必须通过离散论方法学,才能求得实际问题的细解。所以“计算机”加“离散分析”等于解决问题的“金钥匙”。它们的结合已在各种科学技术领域中显示了无比的威力。

第二节 离散分析设计法的基本内容

离散分析法是一种将复杂的事物或广义系统离散成有限个或无限个简单的事物或子系统进行分析和处理、以求得总体的近似与圆满解决的方法。

离散分析法分:离散系统的离散分析法与连续系统的离

散分析法。前者是研究对象本身性质的需要，后者只是作为一种研究方法而被采用。

就工程技术领域而言，离散分析法已在以下方面得到了切实广泛的应用：

(1) 信号分析；随机信号的离散化、快速离散变换，信号数据处理与分析。

(2) 场域分析；应力场、磁场、电场、热场、流体场等的参数分析。有限单元法、边界元法、离散元法等分析法。

(3) 动力学分析；差分法、传递矩阵法、导纳法等。

(4) 模态分析：离散结构试验模态分析等。

(5) 优化分析：混合离散变量的直接搜索法、组合型算法、适应性随机搜索法、离散惩罚函数法、组合复合型离散搜索法、整数梯度法等。

(6) 离散仿真分析：连续系统离散化模型仿真、采样系统仿真、离散事件系统仿真等。

(7) 计算机离散计算技术。

关于人文与社会科学领域的离散论方法学，本书暂不予讨论。

第三节 离散论方法学的数学基础

在工程设计中，运用一切离散数学的方法，才能解决复杂问题，现就本书所涉及的一些数学基础简述之。

一、矩阵与矩阵运算

实数或复数排列成矩形的阵形称为矩阵。以方括号或曲

线括号把排列成矩形阵式的数左右围起来，例如

$$A = [a_{ij}]_{m \times n} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{pmatrix} \quad (1-1)$$

在矩阵中，单独的数（例如 a_{11} ， $a_{12} \cdots$ ）称为元素，横排称为行，纵排称为列， a_{ij} 表示第 i 行第 j 列的元素。 $m \times n$ 称为矩阵的阶。 i 和 j 叫做元素的下标。

若两个矩阵的阶数相同，并且对应元素都相等，则这两个矩阵称为相等。即 $A=B$ 时

$$a_{ij} = b_{ij} \quad (1-2)$$

两个同阶矩阵的加减，就是对应元素的加减，即

$$C = A \pm B \quad \text{即 } C_{ij} = a_{ij} \pm b_{ij} \quad (1-3)$$

当矩阵与数相乘时，就是所有元素乘以该数

$$C = KA \quad \text{即 } C_{ij} = K a_{ij} \quad (1-4)$$

若矩阵相乘，则必须满足矩阵 A 的列数等于矩阵 B 的行数。在这种条件下，乘积 C 的元素 C_{ij} 等于矩阵 A 的第 i 行元素分别与矩阵 B 的第 j 列各对应元素的乘积之和，即

$$C = AB \quad (1-5)$$

$$C_{ij} = \sum_{k=1}^m a_{ik} b_{kj} \quad (1-6)$$

例如

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \\ b_{31} & b_{32} \end{pmatrix}$$

$$A B = \begin{pmatrix} a_{11}b_{11} + a_{12}b_{21} + a_{13}b_{31} \\ a_{21}b_{11} + a_{22}b_{21} + a_{23}b_{31} \\ a_{31}b_{11} + a_{32}b_{21} + a_{33}b_{31} \\ a_{11}b_{12} + a_{12}b_{22} + a_{13}b_{32} \\ a_{21}b_{12} + a_{22}b_{22} + a_{23}b_{32} \\ a_{31}b_{12} + a_{32}b_{22} + a_{33}b_{32} \end{pmatrix}$$

注意一般情况下矩阵的相乘是不可以交换的，即

$$AB \neq BA$$

转置矩阵：若一矩阵的行与列对换，则我们得到了一个原来矩阵的转置矩阵。矩阵A的转置矩阵以 A^T 表示，上角标T即表示矩阵转置的意思。例如

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

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

逆矩阵：用一矩阵除另一矩阵的运算、在矩阵代数中是不存在的，但是与除法类似的运算，在多数情况中是用一种叫做矩阵求逆来完成的，一个方矩阵A的逆矩阵是一个同阶的矩阵、用 A^{-1} 表示，能使

$$AA^{-1} = I \quad (1-7)$$

式中I为单位矩阵

二、张量

张量是一种描述物理状态或物理现象的数学符号的表示方法，它的特点是用它来表示物理量不会因坐标改变而改变。一个物理量在空间某点能用一个数量来表示，这个数量就是零阶张量，如果须用三个量来表示这个物理量，这就是向量，向量是一阶张量。假若须用九个量来表示这个物理量，那这个量是二阶张量。一般地 n 阶张量有 3^n 个量。

应用张量表示即利用符号的脚标表示求和、重复及微分等，可以使得如连续体力学中的方程式变为非常简短的形式。

对下列求和表达式

$$S = \sum_{i=1}^3 a_i b_i = a_1 b_1 + a_2 b_2 + a_3 b_3 \quad (1-8)$$

若将求和符号略去，则可简写成如下张量方程式：

$$S = a_i b_i \quad (i=1, 2, 3) \quad (1-9)$$

上式中的 i 包含求和的意思，即将 i 换成为1、2、3之后各项再相加。

对下列数量式

$$\begin{aligned} S = & a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 \\ & + a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + a_{23}x_3 \\ & + a_{31}x_1 + a_{32}x_2 + a_{33}x_3 \end{aligned} \quad (1-10)$$

若用张量公式可简写成

$$S = a_{ij}x_j \quad (i, j=1, 2, 3) \quad (1-11)$$

式中 a 有二个脚标， i 标表示求和， j 标表示轮换， i 称为自由标、 j 称为哑标。