

冶金机电系统优化设计的一种解耦方法^①

易幼平 钟 掘

(中南工业大学机电工程学院, 长沙 410083)

张寅南

(湖南省科学技术委员会, 长沙 410001)

摘 要 针对冶金机电系统存在复杂耦合关系的特点, 引用分形几何中的概念将机电系统分解为易于描述和求解的简单子系统。根据模式识别理论识别系统最有希望的可能解空间, 运用多目标决策方法对系统分形解进行合成, 提出采用分解-并行-合成的设计策略和建立综合科学理论、经验知识、专家判断力的集成设计系统是机电系统解耦设计的关键。

关键词 分形 解耦 优化设计

中图分类号 TF301 TF302

数学规划法是优化设计的传统方法, 它包括整数规划、几何规划、随机规划、多目标规划等分支, 算法有单纯形法、复合形法以及罚函数法等。数学规划法对问题的数学性态有严格的要求, 针对复杂机电系统优化设计的问题显得有些无能为力, 这种背景下出现了一些面向工程的优化设计方法, 这些方法没有严格的数学背景, 但可以解决传统方法不能解决的优化问题。近年来, 优化方法的研究进入到人工智能优化阶段, 出现了基于知识的优化设计系统, 主要采用专家系统技术实现寻优策略的自动选择和优化过程的自动控制, 还出现了一系列体现人工智能思想的寻优策略, 如遗传算法、进化算法、退火算法、人工神经网络等。这些方法对数学模型的性态无特殊限制, 并具有某种程度的并行处理功能。

我国学者在离散和随机变量优化、结构优化、智能优化、智能建模和复杂系统优化方法学^[1-5]等领域的研究进行了卓有成效的工作, 但对系统进行全局优化的研究较少, 特别是对于存在复杂耦合问题大型机电系统的优化设计, 目前还没有形成从微观到宏观完整的理论与方法, 本文针对机电系统的优化问题, 用分形理论对复杂系统进行解耦设计, 研究实现分

形技术的对策。

1 冶金机电系统的两个重要特征

冶金机电系统是一个由诸多因素耦合作用的复杂系统, 在系统的组成和结构上具有以下重要特征:

(1) 冶金机电系统一般由多个相互关联的机械、液压、气动、电力、电子、物流、界面等子系统组成, 各子系统之间存在着相互作用的耦合关系, 这种耦合关系受工艺参数、子系统的过程状态等诸多因素的制约, 而每个子系统包含多个具有特定功能的模块。因此, 冶金机电系统是一个复杂的系统。

(2) 冶金机电系统与环境之间存在物质、能量和信息的交换, 一方面, 系统是人-机系统, 操作人员通过改变系统的运行状态完成预期功能; 另一方面, 系统的外部环境依时间而变化, 影响着系统的参数和运行状态。因此, 整个系统又是一个复杂的开放系统^[6]。

2 系统解耦设计的分形原理

分解算法是处理复杂问题优化设计的一种

① 收稿日期: 1997-11-28 易幼平, 男, 31岁, 讲师, 博士

有效方法,即将一个优化原问题分解成若干个维数较小的优化子问题,再分别优化这些变量少、约束少的子问题,最后综合考虑它们之间的耦合关系。本文引用分形几何中的概念^[7],将机电系统的优化问题进行分形,即按一定原则将复杂系统用若干个易于描述和求解的简单子系统来逼近。

2.1 系统的分形

机电系统设计可描述成一个欧氏空间 R^n 上的集合 $\Omega(D, E) \in R^n$, 其中 D 是设计变量集,它是一个待定的人工系统; E 是设计环境集,它是 D 应满足的条件。系统的设计过程就是在集合 $\Omega(D, E)$ 上寻找一组满足设计环境 E 要求的设计变量 D , 这样 $\Omega(D, E)$ 是由一系列 D 和 E 的不同对应关系所组成的集合。

应用系统分形思想将 $\Omega(D, E)$ 逐级分解为若干个(针对集合 D 中的元素)不交的子集 $\Omega_i(D_i, E_i) (i = 1, 2, \dots, n)$, 且这些子集与 $\Omega(D, E)$ 之间满足

$$\Omega(D, E) = \bigcup_{i=1}^n (\Omega_i(D_i, E_i)) \quad (1)$$

在式(1)中如果设 $\mu(\cdot)$ 为相应集合的变量数(即集合 D_i 中的元素数目), 则 $\mu(\cdot)$ 具有以下三个性质:

- (1) $\mu(\emptyset) = 0$;
- (2) 若 $D_1 \subseteq D_2$, 则 $\mu(D_1) \leq \mu(D_2)$;
- (3) 若将 $\Omega(D, E)$ 分成了 $\Omega_1(D_1, E_1), \Omega_2(D_2, E_2), \dots, \Omega_n(D_n, E_n)$, 即 n 个分形系统, 则

$$\mu(D) = \mu\left(\bigcup_{i=1}^n D_i\right) = \sum_{i=1}^n \mu(D_i) \quad (2)$$

$\mu(\cdot)$ 满足分形几何中对测度的定义, 称 $\mu(D)$ 是集合 D (或 Ω) 的测度, 用来表示分形系统所解决问题的范围。

设计环境 E 是 R^n 上的有限集合的并, 集合 E 具有下列性质:

- (1) 若集合 E 随集合 D 的分形而划分成了 $E_1, E_2, \dots, E_n$, n 个子集, 则:

$$E = \bigcup_{i=1}^n E_i \quad (3)$$

$$(2) \text{ 有时 } \bigcap_{i=1}^n E_i \neq \emptyset$$

或对于 $\forall j, k \in (1, 2, \dots, n)$ 且 $j \neq k$, 则有

$$E_j \cap E_k \neq \emptyset \quad j \neq k \quad (4)$$

(3) $E_i (1, 2, \dots, n)$ 的某些子集中存在着 D 的元素, 即有些分形系统的求解环境中包含着一些设计变量。

由以上分析可知, 在分形过程中各分形系统之间的独立性越高, 对系统求解越有利。因此, 机电设计系统分形时应遵循以下原则:

- (1) 若将机电系统 $\Omega(D, E)$ 分解为 $\Omega_1(D_1, E_1), \Omega_2(D_2, E_2), \dots, \Omega_n(D_n, E_n)$ n 个分形系统, 则对设计变量 D 来说, 应满足

$$\bigcap_{i=1}^n D_i = \emptyset \quad (5)$$

$$D_j \cap D_k = \emptyset \quad \forall j, k \in (1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

$$D = (D_1, D_2, \dots, D_n) = \bigcup_{i=1}^n D_i \quad (7)$$

- (2) 各分形系统在满足建模要求的情况下, 应尽量使其简单化, 同时各分形系统之间的独立性越高越好;

- (3) 若 $\Omega(D_i, E_i)$ 的解是分形系统 $\Omega_k(D_k, E_k)$ 环境 E_k 中的元素, 应使 $\Omega_i(D_i, E_i)$ 在 $\Omega_k(D_k, E_k)$ 之前求解。

2.2 系统的求解

复杂工程系统的求解可以认为是经过三种运算(模式运算、符号运算和数据运算)实现两个基本过程(识别最有希望的可能解空间, 在可能解子空间中搜索可行解)。所谓识别最有希望的可能解空间, 就是动态地规定可能解的边界。这个可能解空间是整个可能解空间的一个子空间, 它的尺度要足够大以包括最有希望的可能解, 同时又要足够小以避免组合爆炸问题。如果在当前子空间上的搜索以失败结束, 就要重新识别最有希望的可能解子空间。

模式识别这门学科在形成和发展的初期, 主要应用于信息处理、自动控制、图象处理及文字与物体的识别等领域, 近年来人们发现在工程设计中也存在许多模式识别及分类的问题, 这些问题与传统的应用领域既有许多相同之处又有其自身的特点。因此, 许多学者都在研究与之相适应的模式识别的理论与方法。

实现模式识别涉及以下四个问题:

(1) 特征参数。这些特征参数代表着当前工程设计问题所必须满足的关于环境和要求的关键约束。

(2) 设计模式。它们代表着已有的、成功的、典型的设计方案或者自然对象,对应着当前情形下的“最优”解答。

(3) 权函数。它们一般是特征参数的函数,反映了这些特征参数对于识别结果的相对的、动态的影响程度。

(4) 实现模式识别的算法。

2.3 系统的合成

由以上分析可知,当分形系统的设计环境 E 之间相互独立时,分形解就是全局理想解,分形解的简单组合就是相应系统的全局理想解。而有些区域内的分形系统,由于它们之间存在着耦合关系,它们的理想解未必就是全局理想解,而后采用相应的合成方法求出各分形系统的全局理想解。

分形解的合成技术是机电系统整体优化的重要部分,根据机电系统设计的特点,本文运用多目标决策的方法对分形解的合成问题进行研究。

令分形系统 B_i 的解集 $D_i = (d_i^1, d_i^2, \dots, d_i^{l_i})$ 中的每一个元素 d_i^j 是 B_i 的可行解。其中: $i = 1, 2, \dots, m$; $d_i^j = (d_{i1}^j, d_{i2}^j, \dots, d_{in_i}^j)$ 有 n_i 个变量; $j = 1, 2, \dots, l_i$ 。为了分析方便,对 $B_i (i = 1, 2, \dots, m)$ 和系统 A 的合成过程进行如下假设:

设 B_i 分形系统的某个可行解 d_i^j 确定以后,与 d_i^j 相对应的其它分形系统可行解取值集合为 $D_k^j (k = 1, 2, \dots, m, \text{且}(k \neq i))$;显然, $D_k^j \subseteq D_k$, 且 $D_k^j \subseteq \emptyset$ 。此时当系统 A 的一个合成解 D 满足式(8)、(9)的要求时, D 必然成为系统 A 的一个可行解。

$$D = (d_1, d_2, \dots, d_{i-1}, d_i, d_{i+1}, \dots, d_m) \quad (8)$$

$$d_k \in D_k^j \subseteq D_k, (k = 1, 2, \dots, m, k \neq i) \quad (9)$$

显然这个假设条件说明各分形系统所有可

行解的合成是系统 A 的一个可行解集,这样由 m 个分形系统所合成的系统 A 的可行解集合 Ω_A 中的元素个数是有限可数的。如果事先将 Ω_A 中的元素找出,并求出影响这些元素的目标值,则在 Ω_A 中寻优的过程,实际上是一个多目标决策的过程。目前多目标决策方法主要有专家评议法(Delphi法)、层次分析法(AHP法)和模糊综合评判法等。

3 系统解耦设计的关键技术

用分形法实现机电系统解耦设计需要解决以下关键技术:

(1) 设计策略

冶金机电系统是一个复杂的开放系统,难以用基于解析的数学模型进行描述,宜采用分解-并行-合成的设计策略,在设计时首先按系统的空间结构层次及时序阶段完成各部分、各阶段的设计,而这些层次和阶段的设计可以由不同的设计者同步或异步进行。在各层次、各阶段的设计完成后,再进行整体性能的优化设计,而在整体性能的设计过程中,各部分的设计仍然并行在整体设计中,即整体设计可随时要求各部分或某一部分重新设计。

(2) 优化算法

处理复杂系统优化问题的方法目前主要有神经网络和遗传算法,但还存在很多的不足,因此在处理机电系统优化问题时还要引入一些新理论、新方法。通过分形使整体设计时的知识规范化,事先确定整体设计的样本空间,克服神经网络和遗传算法不适于处理复杂多变的知识类型的不足,同时可减少使用这两种方法时的计算量,引入分形几何的概念以解决病态可行域问题,引入人工智能和模糊理论使多目标优化算法的权重确定更为合理。

(3) 知识库

机电系统涉及的知识繁多,如果不作简化,难以在计算机系统中表示出来。宜采用专家系统、神经网络、模糊理论等方法,找出各种知识的较为理想的表达式,并确定一

种起协调作用的管理策略, 构造有效的知识库。用模糊集合的隶属度理论和影射理论建立一个虚拟知识库, 为当前的设计过程和知识库之间建立起内在联系, 使得设计时系统仅搜索知识库中与当前设计有关的知识而不是全部知识。

(4) 软件集成

分形法的实现需要开发相应的软件系统, 它涉及知识库、图形系统、专家系统和优化设计软件等, 在现有软件基础上, 通过选择有相容性的软件平台和选用与这些软件系统相容的计算机语言进行集成与开发, 形成应用分形原理进行解耦设计的新软件系统。

REFERENCES

1 Lu Jingui *et al* (陆金桂等). *Science in China* (中国科学), 1994, 24(6): 653–658.

2 Pan Shuangxia *et al* (潘双厦等). *Chinese Journal of Mechanical Engineering* (机械工程学报), 1995, 31(6): 27–33.
 3 Li B L and Chen Yong. *ASME Paper* 86-DET-43, 1986.
 4 Feng Pei'en, Ni Qidong and Beitz W. *Konstruktion*, 1992, 44: 423–430.
 5 Wan Yaoqing (万耀青). *Evaluation of Mechanical Optimization Method Modelling, Model Library and Optimization Method* (机械优化设计建模、模型库与优化方法评价). Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1995.
 6 Qian Xuesen *et al* (钱学森等). *Natural Journal* (自然杂志), 1990, 13(1): 3–10.
 7 Mandelbrot B. *Fractals: Form, Chance and Dimension*. San Francisco: Freeman, 1977.
 8 Chen Qin (陈勤). *Journal of Dalian University of Technology* (大连理工大学学报), 1992, 32(1): 40–45.

A DECOUPLING METHOD FOR METALLURGICAL MECHANICAL-ELECTRIC SYSTEM OF OPTIMIZATION

Yi Youpin, Zhong Jue and Zhang Yinnan[†]

College of Mechanical and Electrical Engineering,

Central South University of Technology, Changsha 410083, P. R. China

[†] *Hunan Science and Technology Commission*

ABSTRACT Aimed at the characteristic of metallurgical mechanical-electrical system which existed complex coupling problem, the authors quoted the conception of fractal to resolve mechanical-electrical system into simple subsystems, which are easy to be described and to be solved, then identified the most expectant probable solving space in the light of the model identification theory and applied the mutiple-target decision method to compose the system fractal solving. At last it was put forward that adopting the design strategy of resolving-parallel-composing and building up the integrated design system that synthesized the science theory, the experience knowledge and the expert judgment, are the key to decoupling design in mechanical-electrical system.

Key words fractal decoupling optimization design

(编辑 何学锋)