

矿山设计系统的解耦理论与方法^①

王新华

(中南工业大学资源开发工程系, 长沙 410083)

摘 要 在对大型工程设计系统的特点与优化方法作了详细分析的基础上, 以矿山设计系统为例, 讨论了设计系统的分形性质及原则, 提出了分形系统的求解模式和分形解的合成技术, 最后指出了在实现解耦理论与方法的过程中应注意的因素。

关键词 矿山设计 组合式系统 最优化 设计支持系统

矿山设计系统同其它大型工程设计系统一样, 是设计环境非常复杂的组合式复杂大系统。过去人们对此类系统使用的优化方法多数是针对某一局部区域的局部优化, 所得到的解难以保证是全局理想解。因此近年来整体优化方法的研究受到了人们的重视, 但至今尚未形成一套完整的理论体系。本文介绍了作者针对组合式系统的特点, 以矿山设计系统为例, 建立起此类系统整体优化的解耦理论与方法。

1 系统的特点与优化方法的分析

现在人们已清楚地认识到从系统科学的角度出发, 矿山设计系统具有以下特点: (1) 设计过程在数学上的不可描述性; (2) 设计方法往往是基于知识的逻辑产生而非严格的数学归纳或演绎; (3) 设计过程中的处理对象多数是图形或用数学方法难以描述的知识或经验; (4) 整体相异与局部相似性; (5) 设计环境的复杂多变性。

如果将过去对此系统的优化方法进行归纳分析, 可将其分为基于案例的求解模式、基于数学模型的求解模式和基于计算机技术的求解模式三类。由于这些模式大部分为局部优化, 所以其应用就受到了一定的限制。目前整体优化主要有耦合法与解耦法两大类。耦合法是通盘考虑各子系统的耦合, 在整个大系统解的空

间中寻优, 研究的重点是如何改进其优化方法去解这类大规模的优化问题; 解耦法则是把大系统优化分解为主规划和若干个相应子系统优化的子规划, 各子系统独立优化后, 将得到的理想解或可行解子空间输给主规划, 主规划按全局优化的原则进行全局协调优化。与耦合法相比, 解耦法可较好地反映大型工程设计系统的特点。

2 系统的分形性质及原则

所谓系统的分形就是依据一定的原则将一复杂的大系统用若干个易于描述和求解的简单子系统来逼近或覆盖。由于设计问题的一般数学模型为:

$$\left. \begin{array}{l} \text{Optimize: } z = f(D) \\ \text{on Subject to: } F_i(D, E) \end{array} \right\} \quad (1)$$

式中 $D(d_1, d_2, \dots, d_n)$ 是一组设计变量, 它是需要确定的一个人工系统; $f(D)$ 是目标函数; E 是设计环境; $F_i(D, E) (i = 1, 2, \dots, m)$ 表示在 E 下 D 应满足的某些定性或定量的要求。

对于式(1) 可以看作欧氏空间 R^n 上的集合 $\Omega(D, E) \in R^n$, 其中 D 和 E 被称为变量集和环境集。根据已有的研究成果和作者对此系统的分析^[1] 及目前的实际设计方法可以看出, D 中的某一子集 $D_i \subset D$ 一定与 E 中的一个子

① 收稿日期: 1995- 06- 30; 修回日期: 1995- 11- 06 王新华, 男, 35岁, 博士

集 $E_i \subseteq E$ 有对应关系, 且满足:

$$D_i \xrightarrow{\quad} E_i \quad (2)$$

如果将 $\Omega(D, E)$ 划分成 $\Omega_1(D_1, E_1)$, $\Omega_2(D_2, E_2)$, ..., $\Omega_n(D_n, E_n)$ n 个子系统(或称分形系统), 与变量子集 D_i 对应的环境子集 E_i 与 E 相比要简单得多, 亦即 D_i 的求解在 E_i 下要比在 E 下容易得多, 这也说明 $\Omega(D, E)$ 具有良好的分形性质。而且每个 D_i 唯一确定 E_i 的范围, 反之则不成立, 这就确定了在将 $\Omega(D, E)$ 划分成 $\Omega_i(D_i, E_i)$ 时, 必须以 D 中的元素为分形对象, 将 $\Omega(D, E)$ 划分成 n 个不交(对 D 中的元素而言)的子集。

在分形以后若定义 $\mu(\bullet)$ 为其相应集合的变量个数, 则 $\mu(\bullet)$ 具有以下三个性质:

$$\textcircled{1} \mu(\emptyset) = 0 \quad (3)$$

$$\textcircled{2} \text{若 } D_1 \subseteq D_2, \text{ 则: } \mu(D_1) \leq \mu(D_2) \quad (4)$$

$$\textcircled{3} \mu(D) = \mu\left(\bigcup_{i=1}^n D_i\right) = \sum_{i=1}^n \mu(D_i) \quad (5)$$

可以看出 $\mu(\bullet)$ 满足分形几何^[2]中对测度的定义, 这里称 $\mu(D)$ 是 D 的测度, 用以表示 D 所涉及的范围。

同时, 经过满足式(3)~(5)的分形而得到的环境子集 $E_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 也具有以下三个性质:

$$\textcircled{1} E = \bigcup_{i=1}^n E_i \quad (6)$$

$$\textcircled{2} E_j \cap E_k = \emptyset, \forall j, k \in (1, 2, \dots, n); j \neq k \quad (7)$$

$$\textcircled{3} \text{某些 } D_i \cap E_j \neq \emptyset, \forall i, j \in (1, 2, \dots, n); i \neq j \quad (8)$$

其中式(8)是建立优化模型时必须充分注意的问题, 若 E_j 中包含 D_i 的元素, 则 D_i 必须在 D_j 前求解, 才能保证其全局最优性。

通过上述分析可见, 在将 $\Omega(D, E)$ 分成 $\Omega_i(D_i, E_i) (i = 1, 2, \dots, n)$ 时, 须满足以下原则:

$$\textcircled{1} D = (D_1, D_2, \dots, D_n) = \bigcup_{i=1}^n D_i \quad (9)$$

$$\textcircled{2} D_i \cap D_j = \emptyset, \forall i, j \in (1, 2, \dots, n); i \neq j \quad (10)$$

③ 尽量避免 $E_i \cap D_j \neq \emptyset$ 、而 $D_i \cap E_j \neq \emptyset$ 且 $i \neq j$ 的情况, 若出现称 $\Omega_i(D_i, E_i)$ 和 $\Omega_j(D_j, E_j)$ 为相互关联的分形系统。

3 分形系统的求解模式

3.1 分形系统的 $M + N$ 求解模式

虽然将 $\Omega(D, E)$ 划分成了许多分形系统 $\Omega_i(D_i, E_i) (i = 1, 2, \dots, n)$, 但是仍有许多分形系统的 D_i 中含有定性和定量两种变量, 所以仍无法采用前述的三种求解模式进行描述, 通过对各分形系统的分析, 作者提出了一种新的求解模式—— $M + N$ 求解模式。这种模式被定义为在 M 个过程中运用 N 种算法。

归纳各分形系统的求解过程和步骤, 每个分形系统的求解一定是在以下4个过程中的某些过程上进行的: (1) 在整个解的空间 R 中寻找包含理想解在内的可行解子空间 R^* 的过程; (2) 在 R^* 上寻找理想解的过程; (3) 关联分形系统解的调整过程; (4) 分形解的合成过程。而且由于其复杂性, 这些过程有时不可能都采用一种算法就可以解决问题, 归纳起来, 在分形系统的求解过程中至少需要采用专家推理、图形处理和定量计算等几种算法。很显然每个分形系统所采用的求解过程和算法不可能完全相同, 就是同一分形系统如果条件不同也可能需要采用不同的求解过程和算法, 这充分说明了 $M + N$ 求解模式能全面而有效地描述各分形系统的求解过程和方法。

然而, 如何来实现 $M + N$ 求解模式呢? 这需要结合各分形系统求解的实质综合考虑。在矿山设计过程中, 经过多年的发展, 许多分形系统解的空间中都有固定的模式, 如井筒形式有立井、斜井和平峒之分等等, 分形系统求解的过程实际上是在这些模式中选择一个合理的作为所求的解。这样分形系统的求解过程就是一个模式识别的过程, 亦即 $M + N$ 求解模式是一个模式识别的过程, 或者说这种模式识别的过程是由 $M + N$ 求解模式来实现的。

3.2 模式识别的文法

模式可以表示成一组函数 $f_i(X)$ ($i = 1, 2, \dots, m$) 或一组变量 $D = (d_1, d_2, \dots, d_n)$ 的有机组合 $F(f_i(X))$ 或 $F(D)$ 。由 D 的不同取值所组成的模式集合 Q_F 称为模式类, 即: $Q_F = \{F(D_1), F(D_2), \dots, F(D_h)\}$, 且 $F(D_i)$ 满足:

$$\textcircled{1} F(D_i) \neq \emptyset \quad (11)$$

$$\textcircled{2} F(D_k) \cap F(D_r) = \emptyset, k \neq r \quad (12)$$

$$\textcircled{3} Q_F = \sum_{i=1}^h F(D_i) \quad (13)$$

一个模式的识别过程必须有相应的文法对其进行描述, 且一种理想的文法, 可以清楚地看出模式的识别过程, 为计算机实现创造条件。在目前已有的模式文法中主要有一维文法和多维文法^[3], 但它们都是针对文字、图纹、物体等识别系统建立的, 不适用于矿山设计系统的识别问题。为此, 本文建立了一种随机几何文法来描述各分形系统的模式识别过程。

一个随机几何文法 G 被定义为六元组:

$$G = \{V_N, V_T, S, R, E, P\} \quad (14)$$

其中, 有穷集合

$$V_N = \{S, t_1, t_2, \dots, t_m\} \quad (15)$$

为非终结符集, 或称中间模式元集, 它相当于在识别过程中所需要的中间变量。

$$V_T = \{d_1, d_2, \dots, d_n\} \quad (16)$$

为终结符集, 或称基本模式元集, 它是在设计过程中所要确定的设计变量集合, 确定了基本模式元, 也就确定了所要解决的问题。

$S \in V_N$ 为初始符号, 或称初始模式, 它表示了模式识别过程的起点, 但有些分形系统中这个起点并不明显。

$$R = \{r_1, r_2, \dots, r_l\} \quad (17)$$

称为规则集, 或称产生式规则集, 它体现了模式的搜索方法及有关规定, 一般地, 每一个产生式规则形如:

$$\begin{aligned} r_i: \alpha_i \rightarrow \beta_{ij}, P_{ij}, \\ (i = 1, 2, \dots, l; j = 1, 2, \dots, h) \end{aligned} \quad (18)$$

其中

$$\alpha_i \in \{V_N \cup V_T\}^* \quad (19)$$

$$\beta_{ij} \in V^+ (e_i/e_i \in E) \quad (20)$$

若以 M 表示 $\{V_N \cup V_T\}$, 则 M^* 是任意集合 M 的闭包, 它是符号的有限集 M 上所有子集的集合, 其中包含空集 $\emptyset$, 并定义:

$$M^+ = M^* - \emptyset \quad (21)$$

式(18)中的 P_{ij} 表示由 β_{ij} 产生出 α_i 的概率为 P_{ij} ($0 \leq P_{ij} \leq 1$), 并定义:

$$\bar{P}_{ij} = 1 - P_{ij} \quad (22)$$

为由 β_{ij} 不能产生出 α_i 的概率。

若模式 A 由一系列的产生式规则 r_i ($i = 1, 2, \dots, l_A$) 导出, 并且假设一个产生式规则的应用与其它产生式规则无关, 则导出模式 A 的概率为:

$$P(A/G, r_k \in R \text{ 且 } r_k \in r_i) = \frac{1}{l_A} \sum_{k=1}^{l_A} P_k \quad (23)$$

其中 P_k 是由产生式规则 r_k 通过 β_{kj} 产生 $\alpha_k \in V_T$ 的概率 P_{kj} 。同时, 若存在着一系列的符号 α_i ($i = 1, 2, \dots, N$) 使得:

$$\alpha_U \rightarrow \alpha_1 \rightarrow \alpha_2 \rightarrow \dots \rightarrow \alpha_N \quad (24)$$

表示 $\alpha_U \in V_T$ 由 $\alpha_1 \in V_N$ 导出, 而 α_1 由 $\alpha_2 \in V_N$ 导出, $\dots$, α_{N-1} 由 $\alpha_N \in V_N$ 导出, 则导出 α_U 的概率 P_U 为:

$$P_U = \prod_{i=1}^N P_i \quad (25)$$

其中 P_i 表示由 α_i 导出 α_{i-1} 的概率。

$$E = \{e_1, e_2, \dots, e_s\} \quad (26)$$

为环境控制集, 用以描述待识别系统所给出的条件。

如果将式(18)同专家知识和经验联系起来, 则它具有式(27)的含义:

$$\text{IF } \beta_{ij} \text{ THEN } \alpha_i, P_{ij} \quad (27)$$

它与专家系统中的产生式规则具有很好的吻合性, 所以 G 能够很好地描述各分形系统的知识处理问题, 是一种理想的模式文法。

3.3 基本模式元的选择与识别

所谓基本模式元是指组成模式的基本单元, 它反映了模式结构的基本特征。基本模式

元的解确定以后,也就确定了所要求的模式,显然 $\Omega_i(D_i, E_i) (i = 1, 2, \dots, n)$ 中的基本模式元就是变量子集 D_i 中的元素,基本模式元的个数为 $\mu(D_i)$ 。

并不是任何分形系统中的基本模式元都是清楚的,所以,需要对其进行提取,提取的方法如图 1 所示。这是一种描述提取法,它必须首先弄清模式类的个数,然后进行提取。如井筒形式及数目分形系统的模式类 Q 为:

$$Q = \{ \text{立井开拓, 斜井开拓,} \\ \text{平峒开拓, 混合开拓} \} \quad (28)$$

而这些模式的特征主要体现在井筒倾角和数目两方面,如两个倾角为 90° 的井筒为立井开拓,所以此分形系统的基本模式元为:

$$V_T = \{ \text{井筒倾角 } \alpha_i, \text{井筒数目 } S \} \quad (29)$$

基本模式元确定以后,就要确定相应的识别方法,由于这里的模式识别是基于知识的模式识别,因此,其识别方法与知识处理方法有密切的关系。在目前知识处理方法中主要有基于规则的推理(Rule-Based Reasoning: RBR)、基于模型的推理(Model-Based Reasoning: MBR)和基于案例的推理(Case-Based Reasoning: CBR)三种,鉴于矿山设计系统中许多专家知识和经验是用图形来表述的,难以抽象出产生式规则和数学模型,加之这些方法并没有改变知识的性质,所以,基本模式元的识别采

用了以 CBR 为基础的方法建立。CBR 的一般结构如图 2 所示。它是近几年来针对组合式系统而提出的一种推理方法,它能有效地将知识处理、图形处理及数值计算等算法结合在一起,是实现 $M+N$ 求解模式的理想方法^[4]。

4 分形解的合成技术

在将 $\Omega(D, E)$ 实施分形以后,不可避免地会出现一些具有相互关联性质的分形系统,由于这种关联性,无论采用何种求解顺序都无法单独求其全局理想解。此时,一般在模式识别过程中先求其各分形系统的可行解子空间,然后再采用合成的方法合成其全局理想解。

设区域 A 由 m 个相互关联的分形系统 $B_i (i = 1, 2, \dots, m)$ 组成; B_i 的变量集为 $d_i = (d_i^1, d_i^2, \dots, d_i^{n_i})$; 可行解子空间为 D_i ; D_i 中的第 i 个元素与 B_k 的 D_k 中有对应关系的元素为 $D_k^i \subseteq D_k (k = 1, 2, \dots, m; i \neq k)$ 。这样各分形系统可行解子空间中元素的不同组合构成了 A 的可行解空间 Ω_A , 且 Ω_A 是有限可数的,合成的过程就是从 Ω_A 中选择一个最理想的元素作为区域 A 的解,由于影响选择的因素很多,所以这是一个多目标评判的过程。

若 Ω_A 中的元素不多,且能够计算出所有影响因素的指标值,则采用目前已有的多目标

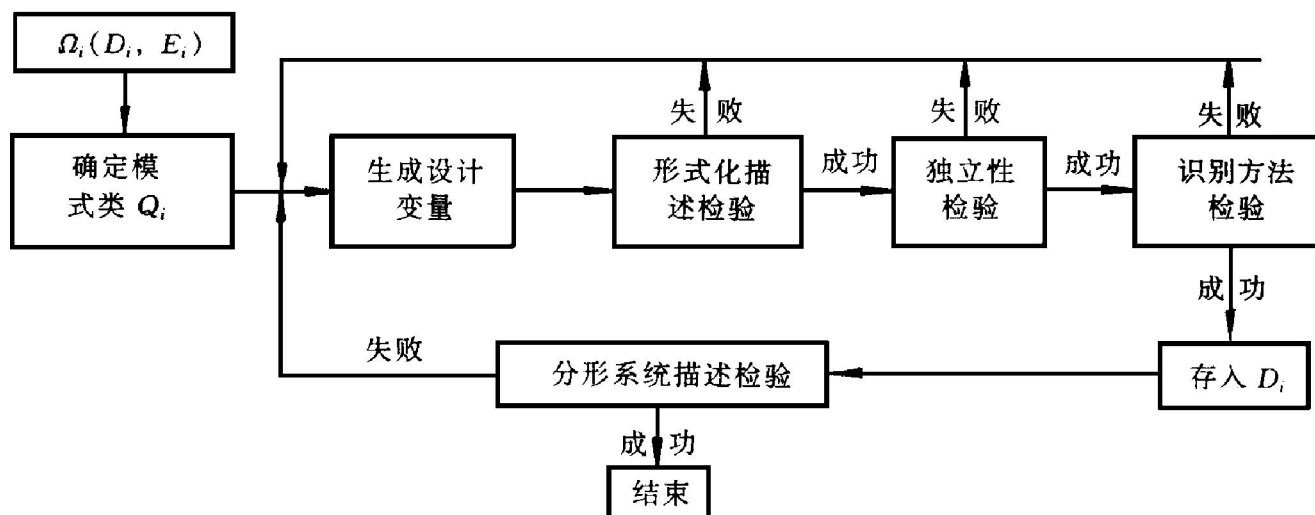


图 1 基本模式元提取过程图

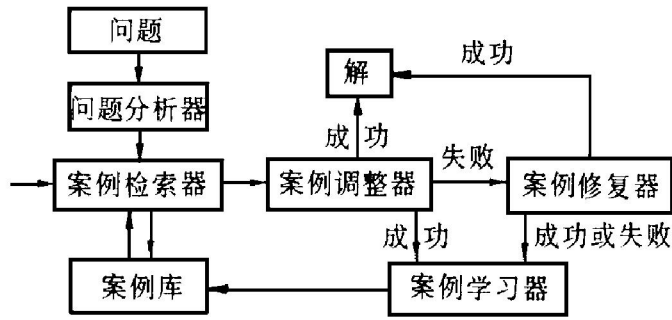


图2 CBR的一般结构图

决策模型就能求出 A 的理想解, 但当 m 个数比较大, 且 D_i 中的元素比较多时, 人工合成 Ω_A 也非易事。同时, 在合成中若从某一分形系统的解开始, 顺序地从其它分形系统中寻找出相应的可行解与之合成, 则 A 的合成过程可分为图3所示的 m 个阶段。针对这个特点, A 的合成可以采用下述的动态交互协调迭代合成法。

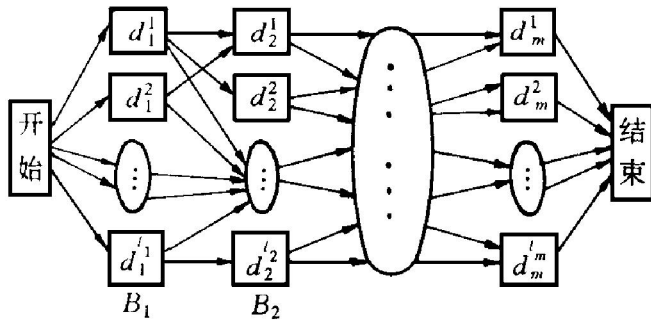


图3 分形解合成过程示意图

首先令迭代次数计算器 $k = 0$ 。

步骤(1) 计算分形系统的目标值

先令 $k = k + 1$, 根据 B_k 的特点确定影响 B_k 理想解选择的目标 $f_1, f_2, \dots, f_{n_k}$ 的性质和计算, 并给出各目标的权值 W , 设 D_k 中 l_k 个方案 n_k 个目标值为:

$$F = \begin{pmatrix} f_{11} & f_{12} & \cdots & f_{1l_k} \\ f_{21} & f_{22} & \cdots & f_{2l_k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{n_k 1} & f_{n_k 2} & \cdots & f_{n_k l_k} \end{pmatrix} \quad (30) \text{ 采}$$

步骤(2) 目标值的无量纲化

由于 F 中的值有不同的量纲, 故应采用式

(31) ~ (33) 将其无量纲化。

① 当指标值越大越好时:

$$r_{ij} = \frac{f_{ij} - f_{ik}^-}{j_{ik}^+ - f_{ik}^-}, \quad i = 1, 2, \dots, n_k; j = 1, 2, \dots, l_k. \quad (31)$$

② 当指标值越小越好时:

$$r_{ij} = \frac{f_{ij} - f_{ik}^+}{j_{ij}^- - f_{ik}^+}, \quad i = 1, 2, \dots, n_k; j = 1, 2, \dots, l_k. \quad (32)$$

③ 当指标值介于中间某个值最好时:

$$r_{ij} = \begin{cases} 1 - \frac{f_{ik}^+ - f_{ij}}{f_{ik}^+ - \min\{f_{ik}\}}, & \text{当 } f_{ij} < f_{ik}^+ \\ 1 - \frac{f_{ik} - f_{ij}}{\max\{f_{ik}\} - f_{ik}^+}, & \text{当 } f_{ij} \geq f_{ik}^+ \end{cases} \quad (33)$$

其中 $f_{ik}^+, f_{ik}^-, \max\{f_{ik}\}, \min\{f_{ik}\}$ 分别为 B_k 中 i 个目标的最佳值、最劣值、最大值和最小值。通过对 F 中各值的计算得与 F 相应的无量纲矩阵 $R = \{r_{ij}\}_{n_k \times l_k}$ 。

步骤(3) 求 B_k 中各方案的综合目标值 Z_k^j

$$Z_k^j = \frac{\max\{y_k\} - y_k^j}{\max\{y_k\} - \min\{y_k\}}, \quad j = 1, 2, \dots, l_k \quad (34)$$

其中 $y_k^j = \sum_{i=1}^{n_k} w_i r_{ij}, j = 1, 2, \dots, l_k \quad (35)$

$\max\{y_k\}, \min\{y_k\}$ 分别为 $\{y_k^j\}$ 中的最大值和最小值。

步骤(4) 决策者偏好的介入与迭代值的计算

所谓决策者的偏好是决策者在决策过程中通过主观判断, 在综合考虑各种因素(主要是模型无法考虑的因素)的条件下, 对方案决策的一种倾向性。在这里决策者有两种偏好性, 一是对 D_k 中的元素的偏好性, 设给定的值为 $\Lambda = (\lambda_k^1, \lambda_k^2, \dots, \lambda_k^{l_k})$; 另一种是决策者对 D_k 中的 j 元素与 D_{k-1}^j 中的 i 元素合成时的偏好性, 设给定的值为 Φ_{ki} 。则第 k 次迭代的迭代值 X_k^i 为:

$$X_k^i = \max\{\alpha_{ki} \cdot (Z_k^j + X_{k-1}^i)\}, \quad i \in I_{k-1}^j \quad (35')$$

$$\text{其中 } \alpha_{ki}^j = \frac{\varphi_{ki}^j}{\sum_{i \in I_{k-1}^{kj}} \varphi_{ki}^j} \lambda_k, \text{ 对 } \forall i \in I_{k-1}^{kj};$$

$$j = 1, 2, \dots, l_k \quad (36)$$

I_{k-1}^{kj} 为 D_{k-1}^{kj} 中所有元素的下标编号集。

并将使式(36)成立的 i^* 记入 P_k^j 中。对每个 $j = 1, 2, \dots, l_k$ 都采用式(36), 即得 B_k 中 l_k 个方案的迭代结果。

步骤(5) 迭代结果的协调过程

以 D_k 中的元素为终点, 从 P_k^j 中导出 k 步迭代的合成方案, 供决策者评价, 若没有通过转步骤(4), 否则, 当 $k < m$ 时转步骤(1), 当 $k \geq m$ 时停止迭代选择理想方案, 一般认为综合迭代值最大者最理想。

可以看出上述迭代即为动态规划的逆序迭代法, 其最优越性是显而易见的。

5 解耦理论与方法的实现

根据目前对计算机在设计领域中应用的现状分析^[5], 解耦理论的实现需采用设计支持系统而非自动设计系统。并且在建立设计支持系统时应注意以下几个方面: (1) 应具有灵活性较高的设计对象描述能力。也就是说设计支持系统应能灵活地表现设计系统的各个侧面, 并

能正确地推断侧面的变更及各侧面的相互关系; (2) 具有明确的设计程序, 设计程序是指各分形系统求解时的先后次序及相互关系; (3) 设计支持系统应设计成组合式系统, 以便于局部区域的使用; (4) 应具有良好的界面以保证决策者的介入。

根据上述原则, 作者采用这一理论体系建立了用于煤矿生产矿井采区设计的支持系统 MDDSS (Mining-District Design Support System)^[6], 该系统包括数据库及管理子系统、CBR 子系统和辅助决策子系统三大部分, 并成功地应用到生产实践中, 取得了良好的效果。

参考文献

- 1 王新华, 骆中洲, 蒋国安. 见: 第二届现代采煤技术国际学术讨论会论文集. 阜新: 1993: 309- 316.
- 2 谢和平等. 分形几何——数学基础与应用. 重庆: 重庆大学出版社, 1991: 100- 200.
- 3 周冠雄. 计算机模式识别. 武汉: 华中理工大学出版社, 1990: 20- 30.
- 4 王新华, 吴兰荪. 山东矿业学院学报, 1995, (2): 271- 275.
- 5 王新华. 有色金属设计, 1995, (1): 1- 6.
- 6 王新华, 李恩忠. 冶金矿山设计与建设, 1995, (2): 17- 21.

DECOUPLING THEORY AND APPROACH OF MINING DESIGN SYSTEM

Wang Xinhua

*Department of Resources and Exploitation Engineering,
Central South University of Technology, Changsha 410083*

ABSTRACT Based on detailed analyses of characteristics and optimizing approaches of large-scale engineering design system, the decoupling features and principles of design system were discussed with mining design system as an example. Then the solving pattern of decoupling system and the composing technique were proposed. Finally, some factors were listed which should be considered when implementing the decoupling theory and approach.

Key words mining design coupled system optimizing design support system

(编辑 何学锋)