

① 97, 27 (6) 461-466  
1997/95035x/027/006

## 开放网—交互式并行系统的模型\*

郝克刚

TP393

(西北大学计算机科学系, 710069, 西安; 61岁, 男, 博士生导师)

**摘要** 定义了开放网的静态结构、动态行为、系统的进程, 讨论了开放网及其进程的分解与合成、抽象对象、开放网的外部特性——黑盒理论及开放网的层次结构等基本问题。由于开放网引入了系统与外部的交互机制及层次结构, 它可以作为交互式并行系统, 特别是规模较大的复杂系统的描述与分析的工具。

**关键词** Petri网; 开放网; 交互式并行系统; 复杂系统; 层次化结构

**分类号** TP311.5

Petri网是公认的描述和分析并行系统的比较好的模型。但是, 由于它固有的一些特性, 使得它在实际的应用中受到很大的限制, 主要表现在如下几个方面:

(1) 传统的Petri网, 没有反映系统与外部交互的机制, 它基本上是一种封闭系统的模型。Petri网的行为是由初始标识开始的, 在执行过程中外部无法干预, 它也不对外部产生任何影响。从外部功能来看它只适合于描述那种初值—结果型系统即所谓转换型系统(Transition Systems)<sup>[1,2]</sup>。然而客观实际是相当复杂的, 严格讲任何系统都不可能是完全封闭的。大量的系统是开放型的, 与外部不断进行信息交换的交互式系统或称为反应型系统(Reactive Systems), 参见文献1, 2。

(2) 由于缺少与外界交互的机制, 从而无法对Petri网进行外部功能的抽象。所以从本质上讲Petri网理论是个白盒理论, 无法研究黑盒理论有关的问题, 如外部功能的等价, 以及外部功能等价意义下的变换和化简等。

(3) 由于上述的特点, Petri网很难层次化。因为层次化的基本思路是系统由层次结构图描述, 上层图中的一个结点是下层图的外部功能的描述, 而下层图是上层图相应结点功能的具体实现。由于缺少外部功能的抽象, 从而很难把Petri网描述成为层次的结构。这些就为Petri网在规模较大的复杂系统的应用中带来难以克服的困难。

近年来, 围绕上述问题, 有不少学者开展了研究工作, 并有许多进展, 高级Petri网的引入<sup>[3]</sup>在某种意义上也可以说是在Petri网中引入了层次。它是对系统位子集和转移集的一种划分<sup>[4]</sup>。也就是说, 高级网中的一个位子(转移)代表P/T网中的若干个位子(转移)。高级网的引入在实际应用中确实增加了表达能力, 但这毕竟不是通常意义下的分层结构。Huber等人的“层次着色网”可以说是在Petri网中引入层次结构的关键性的一步<sup>[5]</sup>。也有一些学者用这种模型来描述交互式系统和作为面向对象方法的模型<sup>[6,7]</sup>。但这种层次结构仍有很大的限制。

本文提出的开放网概念是Petri网的一种扩充, 比较完整地解决上述问题。Petri网和层次着色网都

\* 国家科委 863 高科技基金资助课题

收稿日期: 1997-06-19

\*\* Huber P, Jensen K, Shapiro R M. Hierarchies in coloured petri nets. Bonn: 10 th International Conference on Application and Theory of Petri Nets, 1989

\*\*\* Tse T H, Cheng C P. Towards a 3-dimensional net-based object-oriented development environment. Technical Report TR-92-05(1992), 1~24

可以看作是它的特例。开放网可以作为理想的描述与分析开放型交互式并行复杂系统的模型。

本文结构如下：第一节讨论输入输出机制，定义开放网的静态结构；第二节讨论开放网的动态行为，引入开放网进程的概念；第三节引入描述外部特性的抽象对象概念，讨论开放网的外部特性，即开放网的黑盒理论；第四节讨论开放网的层次结构，并以5个哲学家就餐为例，说明对复杂系统的层次描写。

### 1 开放网的静态结构

开放网是传统的 Petri 网(P/T 网)的一种扩充。我们在 Petri 网的基础上增加两类结点，一类称为外部位子，一类称为外部转移，在图形中用虚线图形表示，或将其画在系统边界的外边。另外增加4种类型的联接(弧函数)，以反映4种与外界交互的手段：主动的输入、输出和被动的输入、输出。相应地，将原 Petri 网中的结点称为内部结点。

定义1 开放网，我们称六元组  $\sigma = (P, T, P^0, T^0, I, M_0)$  为开放网，其中

(1)  $P, T, P^0, T^0$  为互不相交的有限集。分别称为内部位子集，内部转移集，外部位子集和外部转移集。

(2) 映射  $I = I_{P \rightarrow T} \cup I_{T \rightarrow P} \cup I_{P^0 \rightarrow T} \cup I_{T \rightarrow P^0} \cup I_{P \rightarrow T^0} \cup I_{T^0 \rightarrow P}$ ，其中：

$$\begin{aligned} I_{P \rightarrow T} &\in (P \times T)_{MS}, & I_{T \rightarrow P} &\in (T \times P)_{MS}, \\ I_{P^0 \rightarrow T} &\in (P^0 \times T)_{MS}, & I_{T \rightarrow P^0} &\in (T \times P^0)_{MS}, \\ I_{P \rightarrow T^0} &\in (P \times T^0)_{MS}, & I_{T^0 \rightarrow P} &\in (T^0 \times P)_{MS}. \end{aligned}$$

(3)  $M_0: P \cup P^0 \rightarrow N$ ，但对任何  $P^0 \in P^0, M_0(P^0) = 0$ 。

我们用  $S_{MS}$  表示  $S$  上所有多重集的集合。对于开放网也可以有相应的图形表示。图1就是一个开放网的例子(哲学家就餐)。网中  $t_E^0, t_T^0, P_F^0, P_E^0$  是外部结点。为了下面叙述方便，我们将凡与外部结点相连的内部结点称为接口结点，即：

定义2 接口结点，我们将：

$$P^I = \{p \in P \mid \exists t^0 \in T^0 : I(p, t^0) \neq 0 \vee I(t^0, p) \neq 0\},$$

$$T^I = \{t \in T \mid \exists p^0 \in P^0 : I(p^0, t) \neq 0 \vee I(t, p^0) \neq 0\},$$

分别称为接口位子集和接口转移集。如图1中  $P^I = \{P_F\}, T^I = \{t_T, t_E\}$ 。

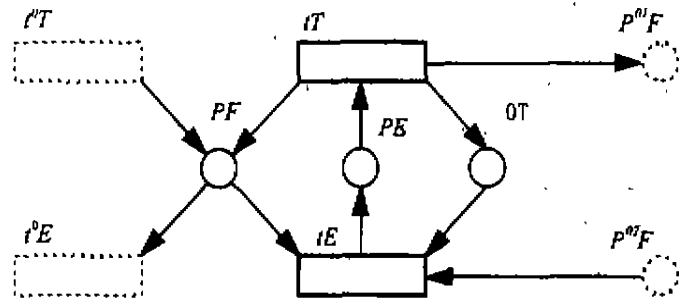


图1 一个开放网的例子(哲学家就餐)

Fig. 1 An Example of an Open Net (the Dining Philosopher)

### 2 开放网系统的动态行为

开放网系统的动态行为既要考虑其内部 Petri 网的标识的变化还要考虑它同外部结点的关系，即受外部条件的制约和对外部的影响。然而我们在讨论开放网时，是把它放在一个尚未确定的外部环境下，进行一般性地讨论，从而我们不可能涉及外部位子的确切的托肯数，也不涉及外部转移是否可激发以及何时激发。于是直观地讲，我们总是设想外部位子中有取之不尽的托肯可使用。对外部转移，只要其相应的内部位子中的托肯数满足条件，即可激发。我们用  $S_{GMS}$  表示  $S$  上所有广义多重集的集合。所谓  $S$  上的广义多重集，是指  $S$  到整数集上的映射： $S \rightarrow \text{Int}$ 。它与普通多重集的区别在于它允许负系数。

定义3 标识，我们称  $M = M^I \cup M^0, M^I \in P_{MS}, M^0 \in P^0_{GMS}$ 。是开放网  $\sigma = (P, T, P^0, T^0, I, M_0)$  的标识。

对于开放网，在标识  $M$  下转移  $t \in T \cup T^0$  称为是可激发的，它的条件是：

$$\forall p \in P[M(p) \geq I(p, t)],$$

也就是说它与外部位子中的托肯数无关。在 $t$ 激发后 $M$ 的后继标识状态 $M'$ 定义为:对所有 $p \in P \cup P^0$ ,  
 $M'(p) = M(p) - I(p, t) + I(t, p)$ 。

显然,对所有 $p \in P$   $M'(p) \geq 0$ 。但是对于 $p \in P^0$ 就有可能 $M'(p) < 0$ 。这正是引入广义多重集概念的原因。

为了确切地描述开放网的动态行为,我们需要把 Petri 网进程的概念加以扩充,定义开放网进程。我们先从定义出现网开始:

**定义 4** 出现网,将满足下述条件的三元组  $N = (B, E, F)$  称为出现网:

- (1)  $B, E$  是两个互不相交的有限集,  $B \cap E = \emptyset$ , 分别称为条件结点集和事件结点集。
- (2) 在  $B$  和  $E$  的有些元素之间有有向弧相连,即  $F \subseteq (B \times E) \cup (E \times B)$ , 称为弧集。
- (3)  $B$  中元素的入向弧和出向弧的个数(入度和出度)均不超过 1,即

$$\forall b \in B: |{}^*b| \leq 1 \wedge |b^*| \leq 1.$$

其中  $b$  的前集  ${}^*b$  和后集  $b^*$  的定义如下:

$$\begin{aligned} {}^*b &= \{e | (e, b) \in F\}, \\ b^* &= \{e | (b, e) \in F\}. \end{aligned}$$

- (4) 网中无循环,即不存在满足下述条件的结点序列  $x_1, \dots, x_n \in B \cup E$ ,  
 对任何  $i = 1, \dots, n-1, (x_i, x_{i+1}) \in F$  且  $x_1 = x_n$ 。

由此定义可知,两结点间方向相同的有向弧至多只能有一条,不允许多重弧。 ${}^*b$  和  $b^*$  也是普通意义下的集合而不是多重集。

显然,可以把  $F$  看作是结点集  $X = B \cup E$  中的一种二元关系,而且由条件 4 可证  $F$  的自反传递闭包  $F^*$  形成  $X$  上的偏序,记作  $\leq$ 。

**定义 5** 出现网偏序,设  $N = (B, E, F)$  是出现网,令  $X = B \cup E, \leq = F^*$ ,称  $(X, \leq)$  是与出现网  $N$  关联的偏序集。

对于偏序集,我们可以定义链、线(即最大链)、反链、切(即最大链)、极大(max)、极小(min)等概念。

**定义 6** 开放网的进程,设  $\sigma = (P, T, P^0, T^0, I, M_0)$  是一开放网,  $N = (B, E, F)$  是一出现网,  $g$  是一映射  $g: B \cup E \rightarrow P \cup T \cup P^0 \cup T^0$ , 如果  $N, g$  满足下述条件,则称  $\lambda = (N, g)$  是  $\sigma$  的一个进程。

- (1) 对任何  $b \in B, g(b) \in P \cup P^0$ ; 对任何  $e \in E, g(e) \in T \cup T^0$ 。
- (2) 对任何  $e \in E, g({}^*e) = {}^*g(e)$ , 而且  $g(e^*) = g(e)^*$ 。
- (3) 对任何  $b \in B^0, |{}^*b \cup b^*| = 1$ 。

定义中,  ${}^*e$  是  $e$  的前集:  ${}^*e = \{b | (b, e) \in F\}$  是普通意义下的集合,但这个集合在  $g$  下的象  $g({}^*b)$  一般是个多重集,  ${}^*g(e)$  一般也是个多重集,所以,条件 2 中的符号是多重集意义下的相等。对于  $g(e^*) = g(e)^*$  也类似。条件 3 中的  $B^0 = \{b \in B | g(b) \in P^0\}$  是外部条件结点集。

**定义 7** 头进程,若开放网  $\sigma$  的一个进程  $\lambda = (N, g)$  满足条件:  $g(\text{Min}(N) \cap B^N) = M_0$ , 则称  $\lambda$  是  $\sigma$  的一个头进程,其中  $B^N = \{b \in B | g(b) \in P\}$ 。

开放网的所有头进程的集合描述了  $\sigma$  的动态行为。

### 3 开放网的外部特性(黑盒理论)

传统的 Petri 网,由于没有与外界的交互机制,它的理论仅限于白盒理论,即研究的是系统内部的结构和状态的变化和控制。而开放网由于有了与外界的交互式机制,从而可以从外部来观察这个系统,把系统的内部结构与状态的变化隐藏起来,只考虑系统的外部功能。这就是所谓的黑盒理论。传统的自动机与外界的联系多限于系统工作开始和终止时,而且输入、输出多为线性序列,因而它的外部功能多可用字上的函数或谓词来表达,如 Turing 机的功能可用字上的部分递归函数或递归可枚举集等来表

达。而开放网具有并行和交互机制,它与外部的联系不仅是并行的而且还贯穿于系统运行的过程之中。如果说传统的自动机是封闭系统或转换型非交互式系统的模型的话,那么开放网,特别是它的黑盒理论将为建立和研究交互式并行复杂系统的概念模型起到重要的作用。下面我们要引入一个概念,用于描写开放网的外部功能,也就是开放网对外部世界可见的部分。我们把它称为“抽象对象”,而把既有内部结构又有外部功能的开放网称为是抽象对象的实现。

**定义 8 抽象对象**,称  $O = (S, A)$  是一个抽象对象,其中  $S$  是抽象对象的界面,  $A$  是由抽象对象的行为组成的集合,分别定义如下:

**定义 9 抽象对象的界面**,我们称五元组  $S = (P^I, T^I, P^O, T^O, I^O)$  为抽象对象的界面,其中:

(1)  $P^I, T^I, P^O, T^O$  为互不相交的有限集,分别称为接口位子集,接口转移集,外部位子集,外部转移集。

(2)  $I^O: (P^I \times T^O) \cup (T^O \times P^I) \cup (T^I \times P^O) \cup (P^O \times T^I) \rightarrow N$ 。

**定义 10 抽象对象的行为**,设  $S$  是一抽象对象的界面,将下述四元组  $\lambda$  称为是抽象对象的一个动态行为  $\lambda = (E^I, E^O, \leq^O, g^O)$ 。

(1)  $E^I, E^O$  是互不相交的有限集。

(2)  $(E^I \cup E^O, \leq^O)$  是偏序集。

(3)  $g = g^I \cup g^O, g^I: E^I \rightarrow T^I, g^O: E^O \rightarrow T^O$ 。

**定义 11 开放网的相关抽象对象**,设有一开放网  $\sigma = (P, T, P^O, T^O, I, M_0)$ ,则将下述抽象对象  $O = (S, A)$  称为  $\sigma$  的相关抽象对象,其中:

$S = (P^I, T^I, P^O, T^O, I^O), P^I, T^I, P^O, T^O$  与  $\sigma$  中的相同,  $I^O \subseteq I$  (注:即  $D(I^O) \subseteq D(I)$ , 当  $x \in D(I^O)$  时  $I^O(x) = I(x)$ )。

$A$  为由所有  $\sigma$  中的头进程  $\lambda$  按下述方法构造的抽象对象行为  $\mu$  的集合。设

$\lambda = (N, g), N = (B, E, F), (B \cup E, \leq)$  是与  $N$  关联的偏序集。令  $\mu = (E^I, E^O, \leq^O, g^O)$ , 其中  $\leq^O \subseteq \leq, g^O \subseteq g, E^I = \{e \in E \mid g(e) \in T^I\}, E^O = \{e \in E \mid g(e) \in T^O\}$  与  $\lambda$  中的相同,可证(证明从略)这样定义的  $\mu$  是抽象对象的行为。

**定义 12 抽象对象的实现**,对于抽象对象  $O = (S, A)$ ,若有一开放网  $\sigma$ ,使得  $O$  是  $\sigma$  的相关抽象对象,则称开放  $\sigma$  是抽象对象  $O$  的一个实现。

显然,一个抽象对象可以有多个实现,体现了外部特性相同而内部特性不同,这就是所谓的黑盒理论。从而,可以讨论功能等价和在外部功能等价意义下的化简等问题。

**定义 13 开放网的功能等价**,两个开放网  $\sigma_1$  和  $\sigma_2$ ,若是同一抽象对象的实现,则称  $\sigma_1$  和  $\sigma_2$  是外部功能等价的,记作  $\sigma_1 \cong \sigma_2$ 。

**定义 14 开放网的简化**,设  $\tau$  是开放网集上的一种测度函数,若开放网  $\sigma_1$  和  $\sigma_2$  外部功能等价:  $\sigma_1 \cong \sigma_2$ , 而且  $\tau(\sigma_2) < \tau(\sigma_1)$ , 则称  $\sigma_2$  是  $\sigma_1$  的化简。

对于不同的测度函数可以有不同类型的化简,例如,测度可以是结点数、位子数、转移数或弧的数量等。

## 4 开放网的层次结构

按照系统论的分析<sup>[7]</sup>,任何大系统都具有层次结构。这在分析和设计复杂系统时显得格外重要。传统 Petri 网没有层次结构,位子和转移结点数过大已成为 Petri 网理论在规模较大的复杂系统应用中难以克服的障碍。近年来,不少学者为此做过努力。例如高级网的基本思想就是将位子(或转移)进行合并,在 Petri 网结构中引入某种意义上的层次结构。层次着色网是在 Petri 网中引入层次结构的关键的一步。他将上层网中的位子(或转移)用下层子网来加细。但是,由于 Petri 网没有与外界交互的机制,严格说来,下层的子网并不是 Petri 网。而且上层的一个位子(转移)也不可能完全地反映下层子网的‘外部特性’。由于开放网有外部结点和接口结点的概念以及反映系统与外部交互作用的机制,从而为系统

的合成与分解提供了条件,为层次结构模型的建立奠定了基础。

设有两个开放网  $\sigma_1$  和  $\sigma_2$ ,我们在  $\sigma_1$  的部分外部结点集和  $\sigma_2$  的部分接口结点集间建立耦合函数  $\varphi$ ,在  $\sigma_2$  的部分外部结点集和  $\sigma_1$  的部分接口结点集间建立耦合函数  $\Psi$ 。按耦合函数将外部结点的子集相应地合并到对方的接口结点上,就可以形成一个合成的开放网。设有  $n$  个开放网组成的集合  $\Sigma = \{\sigma_1, \dots, \sigma_n\}$ ,  $\Sigma$  中所有  $\sigma_i$  与  $\sigma_j$  间有耦合函数对与其相应,而且要求这些函数的定义域互不相交。用  $\Phi$  表示所有这些耦合函数对组成的集合。把用类似方法构造的开放网  $\sigma$  称为是由  $\Sigma$  按  $\Phi$  合成的,记作  $\sigma = C(\Sigma, \Phi)$ 。

有了上述的合成机制,把一个开放网的合成过程描写出来就是它的层次结构。例如一个开放网  $\sigma = C(\Sigma, \Phi)$ ,  $\Sigma = \{\sigma_1, \dots, \sigma_n\}$ ,这是顶层分解而  $\sigma_i = C(\Sigma_i, \Phi_i)$  可以看成第二层分解,余此类推,形成一个树。一个开放网可以由带有若干层分支的树构成。由于所有的合成都只是与开放网的外部特性有关,一个由顶向下的开放网分解或者设计过程可以看成是抽象对象分解和实现的过程。下层的开放网可以看成是上层某抽象对象的实现。

例如5位哲学家的例子,它的顶层图如图2所示。此图描述了各哲学家  $\sigma_1, \dots, \sigma_5$  相互之间的联系。而每个哲学家本身的结构则如图1所示,可以作为各  $\sigma_i$  加细的下层图,也可以看成是其上层图中抽象对象的实现。

此外,我们还可以引入抽象对象类(类型)的概念(类似于文献[2]中的 Page)。如上例中,图1定义了哲学家的类,图2的各哲学家的加细都是哲学家类的实例,这样就避免了设计中的重复。

## 5 结束语

本文引入了开放网,定义了它的静态结构和动态行为,引入了抽象对象的概念,研究了它的外部特性——黑盒理论、开放网的层次结构、抽象对象类型等问题。开放网可作为研究交互式并行复杂系统的数学模型。由于篇幅的限制,本文只讨论了一些基本的问题,还有不少的理论问题值得研究,如开放网分析、化简、抽象对象理论和高级开放网等。开放网的应用也有待进一步的开发。我们相信开放网理论的提出会引起各方面学者的兴趣。

## 参 考 文 献

- 1 Manna Z, Pnueli A. The Temporal Logic of Reactive and Concurrent Systems. New York: Springer-Verlag, 1992. 3~5
- 2 Manzz, Pnueli A. Temporal Verification of Reactive and Concurrent Systems. New York: Springer-Verlag, 1995. 1~5
- 3 Jensen K. Coloured Petri Nets: A high level language for system design and analysis. In: Lecture Notes in Computer Science. Vol. 483. New York: Springer, 1990. 342~416
- 4 郝克刚,葛玮.论高级 Petri 网的等价谱系.计算机学报,1993,16(7):553~558
- 5 Abouaissa H, Rahenasold B, Femey M, et al. Generic models for representing reactive and complex systems using

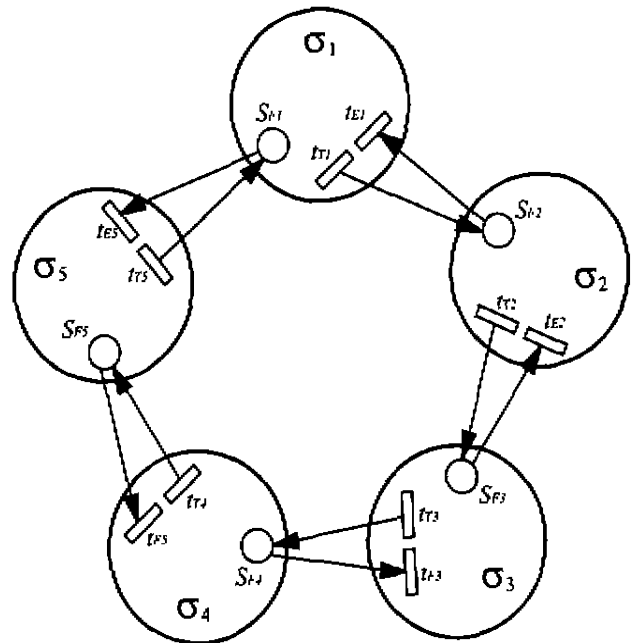


图2 5位哲学家就餐的顶层图

Fig.2 The Top-level Digram of Five Dining Philosophers

hierarchical coloured petri nets. Petri Net Newsletter, 1995, 48, 27~48

- 6 葛玮,王斌君,郝克刚.一种基于 Petri 网的半形式化面向对象的开发方法.西北大学学报(自然科学版),1995,25(5),425~429
- 7 郝克刚.面向对象模型和软件系统论.西北大学学报(自然科学版),1993,23(5),397~403

责任编辑 曹大刚

## Open Net—a Model for Interactive and Cocncurrent Systems

Hao Kegang

(Department of Computer Science, Northwest University, 710069, Xi'an)

**Abstract** A new concept called Open Net is introduced, which is an extension of Petri Net by adding interactive mechanism between systems. The Open Net can be considered as an ideal model for interactive and concurrent, especially for large scale complex systems. The interactive mechanism is discussed and the definitions for static structure and dynamic behavior of Open Net are introduced. Some related problems are also discussed, such as composition and decomposition, black box theory and hierarchy structure of Open Nets.

**Key words** Petri Net; Open Net; interactive system; concurrence; complex system; hierarchy structure

· 学术动态 ·

### 我校多项成果荣获陕西省教委科技进步奖

陕西省教委 1997 年度科技进步奖评选揭晓,我校在竞争激烈的情况下获奖 17 项,在全省高校中仅次于西安交通大学而居第二位。在获奖成果中:一等奖 5 项,有耿信笃,时亚丽,边六交,冯文科,白泉,卫引茂,张玲,马凤,张瑞燕的“液相色谱中溶质统一保留模型及生物大分子构象变化”;周立发,吕明才,李文厚,符俊辉,柳益群,谢志清,林晋炎,刘林玉,冯乔的“区域地质、物探综合解释剖面图编制研究报告”;屈长征,曹启升,耿堤的“非线性偏微分方程的对称群及可解性”;阎宏涛,杨胜科,邢延伟,曹云鹤的“激光光热光谱分析”;车自成,刘洪福,刘良的“中天山造山带的形成与演化”。二等奖 8 项:有吴淑荣,熊为森,畅柱国,王开鹰的“新稀土化合物合成及热化学性质研究”;刘买利的“核磁共振波谱学中的最高量子相干法研究”;周立发,李文厚,符俊辉,柳益群,苗建宇的“博格达南缘构造特征及形成机理”;张复新的“秦岭贱金属硫化物矿床的海底火山喷流沉积成因及古剥蚀面古构造”;陆治国,郭金川,朱长军,周引穗的“气体激光器高频至微波放电激励理论研究”;郝克刚,葛玮,鱼滨,华庆一,杨卫东等的“面向对象的分析与设计工具—OMTTOOL”;柳益群,武富礼,李文厚,梅志超,任战利等的“陕甘宁盆地东部古生界和上三叠统储集层及含油气性研究”;柳益群,周立发,李文厚等的“吐鲁番—哈密盆地储集层评价与预测”。三等奖 4 项,有:师萍等“企业技术进步评价指标设计”;耿国华等的“Foxbase 高级程序设计方法、技巧与实例”;宋纪蓉的“双硫脲水相直接光度法的研究及应用”;张小燕的“液体彩色火焰灯”等。

(马林安)