

产品设计过程建模与执行系统研究

Product Design Process Modeling and Implementation System

北京航空航天大学制造系统研究所 王振华 邓家祺

[摘要] 提出采用设计结构矩阵建立过程模型的方法,讨论了设计结构矩阵的层次结构,并基于图论知识对设计结构矩阵进行分析和改进,最后基于工作流模型和 CORBA 分布式运行协议建立了过程建模与执行系统,并应用于卫星总体概念设计过程。

关键词: 产品设计 设计结构矩阵 过程建模

[ABSTRACT] A design structure matrix (DSM) is presented as a method of process modeling, and hierarchy structure of DSM is discussed. The DSM is analyzed and improved based on the graphic knowledge. The process modeling and implementation system are built based on workflow model and CORBA distributed operation protocols, and applied in the overall concept design process of satellite.

Keywords: Product design Design structure matrix Process modeling

产品设计过程模型是产品如何进行设计的基础^[1]。当今产品开发项目中大量的设计工作,涉及众多的学科团队,需要经过多个阶段逐步细化、多次迭代才能获得满意的结果。因此在产品开发过程中,迫切需要能够计划和执行大量相互关联的、动态的设计任务,支持和表达整个产品不同阶段、不同层次以及不同学科之间具有密切交互特性的过程建模与执行系统。

从这一需求出发,本文采用设计结构矩阵^[2]DSM(Design Structure Matrix),来表达和分析产品设计过程,并基于符合工作流管理联盟(Workflow,简称 WfMC)的工作流参考模型^[3]和 OMG 发布的基于 CORBA 的分布式运行协议,建立了产品设计过程建模与执行系统,实现了 DSM 的执行、监控、交互和管理等操作,从而支持条件、等待、跳转、分层等复杂

过程的建模与运行,为整个设计提供跨部门的任务流转。

1 产品设计过程建模与分析

1.1 设计结构矩阵

通常,建立过程模型受两方面的影响:(1)选择一个合适、高效的系统分解方法,能够完全、清晰地识别组成该系统的所有子系统或组件;(2)精确表达子系统/组件之间存在的相互关系。目前建立产品过程模型存在多种有效的技术方法,如 Digraph、PERT、IDEF、DSM 等。本课题采用 DSM 作为产品过程建模的方法,其原因在于:

- (1) DSM 提供了一种简洁而可视的形式,表达复杂系统的设计过程;
- (2) DSM 可以识别任务之间存在的依赖关系,得到基于信息流的过程结构化描述;
- (3) DSM 可以用来追溯单个设计活动改变所造成的影响,更复杂的 DSM 分析可以量化这种改变对成本和计划造成的影响;
- (4) DSM 可以帮助设计人员着重考虑高度耦合的设计活动导致的迭代和重新设计;
- (5) 许多看似可行的减少设计周期的方案,实际

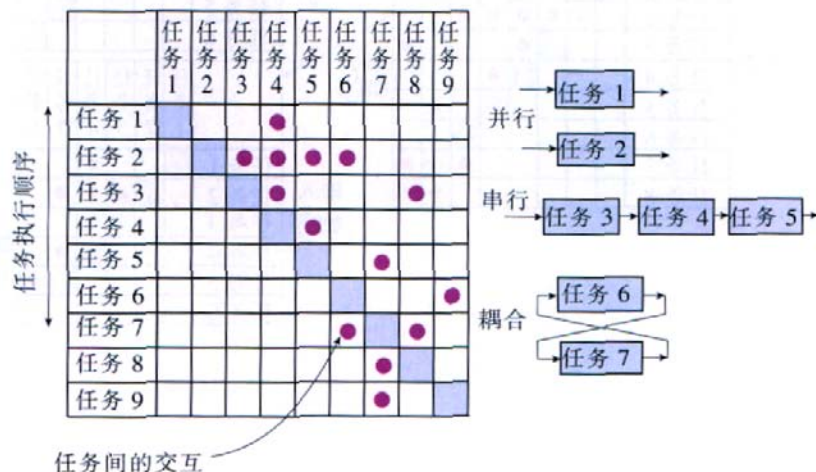


图 1 设计结构矩阵的例子

Fig.1 Example of DSM

上存在负面的影响,达不到所期望的效果。DSM 可以帮助设计人员在系统层次上降低这种风险。图 1 是一个简单的设计结构矩阵的例子。矩阵的行和列对应设计任务,对角线元素代表设计任务本身,非对角线元素代表任务之间的关联,其中每一行表示该行所对应任务对其他各行任务的支持信息,每一列表示该列所对应任务的完成需要其他各列任务的支持信息。例如,在图 1 中,第 2 行第 4 列元素被标记,表示任务 2 为任务 4 提供输入信息。

在 DSM 中,存在 3 种交互关系。如图 1 所示,任务 1 和任务 2 之间是并行关系,它们之间没有信息传递,彼此独立;任务 3、任务 4 和任务 5 是串行关系,它们之间存在顺序的信息转换;任务 7 和任务 8 是耦合关系,它们之间是彼此依赖的。

1.2 设计结构矩阵的层级结构

在实际产品开发过程中,通常会涉及大量的任务。此时采用一个大而全的 DSM 来表示整个过程,是一件非常繁琐的事情,而且 DSM 表示的直观性也会

大大降低。一种有效的方法是用由多个小型的 DSM 构成的层级结构来表示这种复杂的过程。这种方法从最高级的任务开始,依次将上一级的任务分解为一组子任务构成的第 2 级 DSM。该方法通过这种层级分解的方式,将注意力转移到较小的矩阵上,避免了大型的 DSM 带来的问题,同时也为设计人员提供在不同详细级别上灵活分析的机制。这种方法是 Grose 博士在波音公司首先提出的^[4],本文将采用该方法作为建立复杂设计过程的一种高效解决策略。

图 2 给出了 DSM 层级结构的一个简单的例子。其中,每一个矩阵的前两个任务被分解,构成低一级的 DSM。这种分层的 DSM 中存在 2 种信息交换形式:(1) 内部交换,在单个 DSM 中的信息交换,由 DSM 中的非对角元素表示;(2) 外部交换,由 2 个或多个矩阵之间的信息交换组成。用标有“输入”和“输出”的箭头表示。

1.3 基于设计结构矩阵的过程分析

DSM 的另一个优点就是可以基于 DSM 的表示形

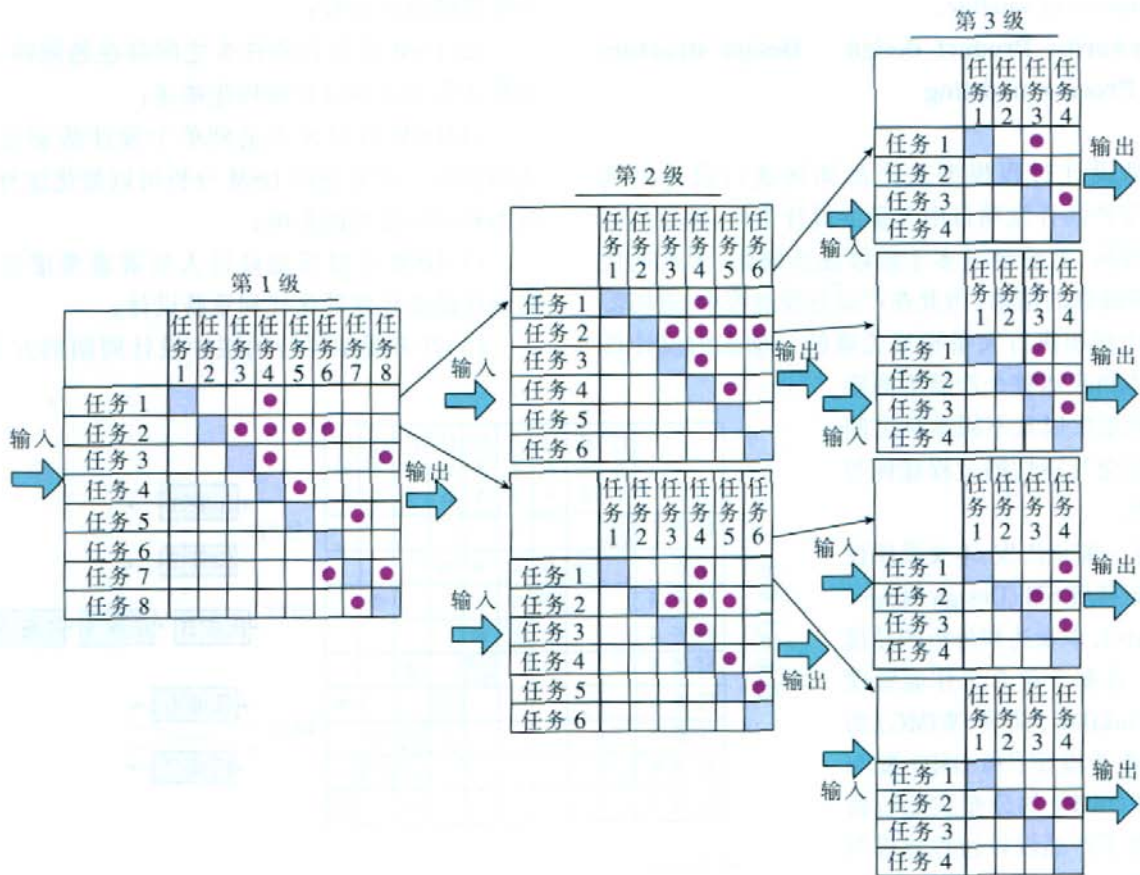


图 2 设计结构矩阵的层级结构

Fig.2 Hierarchy structure of DSM

式,对过程进行分析和改进,其目的是获得最小迭代次数与最大并行度的复合。

如果以布尔量(0或1)表示任务之间的联系,则设计结构矩阵可以转化为布尔矩阵,该矩阵等价于产品设计过程有向图的邻接矩阵。在布尔矩阵中,位于对角线下方的非零元素反映了信息的反馈,导致了设计过程的迭代。设计过程执行的理想情况是DSM能够以上三角矩阵表示,这样每个设计任务所需的信息都得到了极大满足,即不存在设计任务之间的耦合。但由于实际设计过程中很少存在没有耦合任务集的情况,因此DSM分析的第一步就是识别出耦合任务集。根据邻接矩阵可将设计过程中的耦合任务集识别问题转化为求图的强连通分支问题^[9]。

定义1 有向图 $G(n, m)$ (表示 n 个顶点, m 条边的有向图)的邻接矩阵 $H(G)=(h_{ij})_{n \times n}$ 是 n 阶方阵,定义 n 阶方阵 $P(G)=(p_{ij})_{n \times n}$,其中,

$$p_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{顶点 } i \text{ 到顶点 } j \text{ 可达} \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad i, j=1, 2, \dots, n$$

称 $P(G)$ 是有向图 G 的可达矩阵。

定义2 i, j 为有向图 $G(n, m)$ 中的2个顶点,若存在 i 到 j 的通路,则称 i 到 j 是可达的。若 G 的任意两顶点都是相互可达的,则称 G 是强连通图。

(1) 求可达矩阵的算法。

第1步 输入邻接矩阵 $H, i=1$;

第2步 对 $1 \leq j \leq n, j \neq i$,若 $h_{ij}=1$,则令

$$h_{jk}=h_{jk} * h_{ik}, \quad k=1, 2, \dots, n;$$

第3步 若 $i \leq n-1$,则令 $i=i+1$,转第2步;

第4步 令 $P=H$,再令 $p_{ii}=1, i=1, 2, \dots, n$ 。

则 P 为可达矩阵。

(2) 求图的强连通支,算法如下:

第1步 求达矩阵 P ;

第2步 令 $M=(m_{ij})$,

$$\text{其中 } m_{ij} = m_{ji} = \begin{cases} 1, & p_{ij} * p_{ji} = 1, \\ 0, & p_{ij} * p_{ji} = 0, \end{cases}$$

第3步 若 M 的第 i 行的非零元素在 j_1, j_2, \dots, j_r 列,则导出子图 $G(j_1, j_2, \dots, j_r)$ 就是图 G 的一个强连通支。

强连通支包含耦合活动集,是设计过程迭代的根源。因此,DSM分析的第二步是对第一步DSM块三角化形成的耦合对角块所包含的任务集进行分析解耦,主要有3种解耦方法:

(1) 任务聚类。将2个或多个任务聚集为单个任务从而简化DSM。但是这种方法隐含了真实的设计问题。

(2) 任务分解。将耦合任务分解为更低一级的子任务集构成的DSM,有利于解决耦合问题。但是任务的细分将使设计任务数目成几何级数增长。因此,这种方法也有一定的局限性。

(3) 任务撕裂。识别具有最少信息输入量的任务,并将其置于耦合回路的首位;当多个任务具有相同的信息输入量时,向后续任务输出信息量最大的活动应排在前面。耦合任务的有效撕裂需要详细的问题域知识,是设计过程优化重组的困难所在。Yassine等人用结构灵敏度方法分析耦合活动的信息依赖度,即对信息关联强度进行DSM重组也是一种有效的方法^[9]。

2 产品设计过程建模与执行系统

DSM提供一种建立产品设计过程结构化模型的代表方法。为了使DSM描述的过程模型能够被计算机理解和执行还需要用标准的流程定义语言来描述。现在比较通用的而且灵活的语言是 workflow 定义语言 XPDL(XML Processing Description Language),它是基于XML的可扩展的流程定义语言,可以在此基础上扩展所需功能,例如设计信息和文档的传递,DSM的层次关系等。同时,基于符合 workflow 管理联盟 WfMC 的 workflow 参考模型和 OMG 发布的基于 CORBA 的分布式运行协议,为DSM的执行、监控、互操作和管理提供标准接口,实现条件、等待、跳转、分层等复杂设计过程。整个系统结构如图3所示。

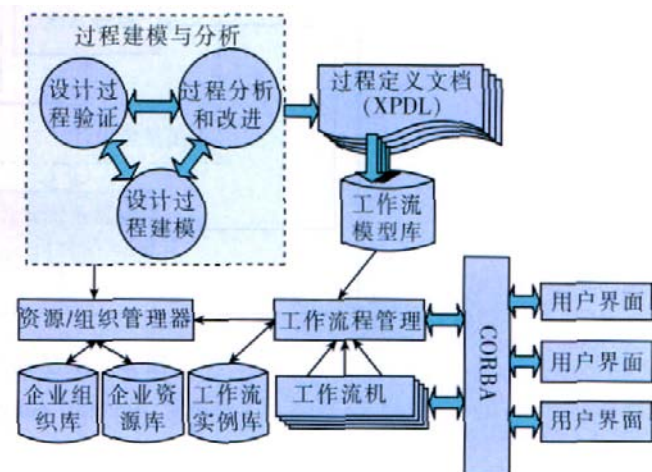


图3 产品设计过程建模与执行系统结构

Fig.3 Product design process modeling and implementation system structure

整个系统的运行分为 2 个阶段: 建模与分析阶段和运行阶段。

(1) 建模与分析阶段。用户利用建模工具, 在可视化界面下建立过程模型, 描述过程任务之间的基本相关结构和信息流, 并通过资源/组织管理器建立各个活动所需要的资源实体、组织实体及信息实体。一旦 DSM 被创建出来, 经过专业人员的验证(包括设计过程的完整性、合理性、有效性等各个方面)后, 可以进行分析和改进, 获得一个较优的 DSM 模型。该模型的相关数据被保存到数据库中, 包括各个活动、子过程、活动之间的控制流和数据流等, 便于模块的重用。

(2) 运行阶段。用户通过 workflow 管理器, 可以从工

作流实例库中同时加载和启动多个 workflow 实例。每一个 workflow 机都被作为 CORBA 对象定义其 IDL 接口。workflow 实例被启动后, 在相应的工作流机上会产生服务线程来完成状态转换、workflow 相关数据的传递以及后续活动的导航等功能, 所有结果将通过用户的浏览界面予以显示, 以便引导 workflow 参与者顺利完成任务的提交并开始新的任务。

3 应用实例

以对地观测卫星作为应用实例, 其总体概念设计流程如图 4 所示, 分为 2 个主要阶段: 体系架构设计阶段和概念设计阶段。

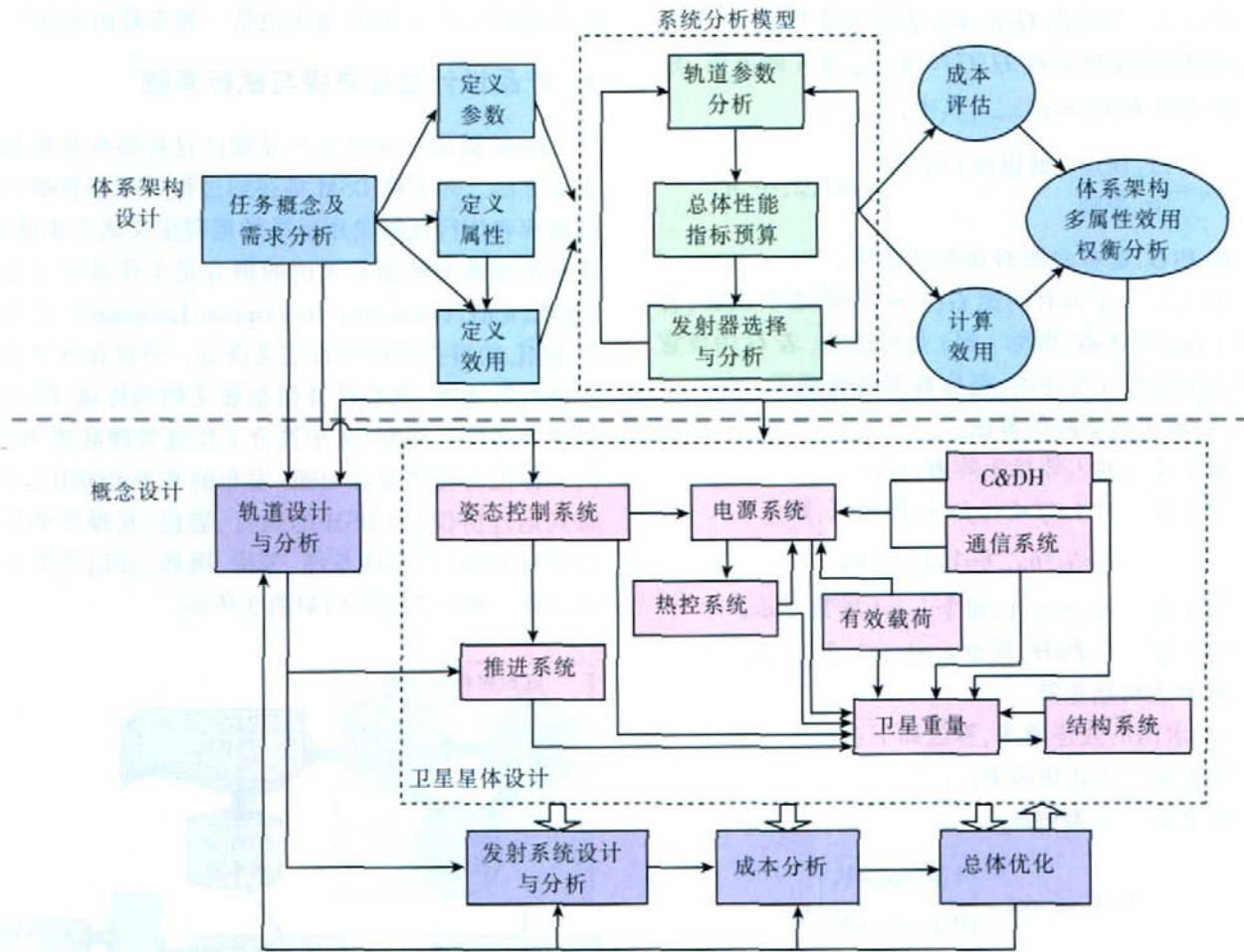


图 4 卫星总体概念设计流程

Fig.4 Overall concept design of satellite

体系架构代表了系统总体上的组成形式和功能, 经常在方案设计阶段用来表示一组设计方案, 包含描述该方案的多个关键参数(设计变量)。通过多属性效

用决策理论^[7]考察一系列由多个变量组合的体系结构, 并基于成本效用分析图进行权衡分析, 从而识别出一组较好的体系结构。

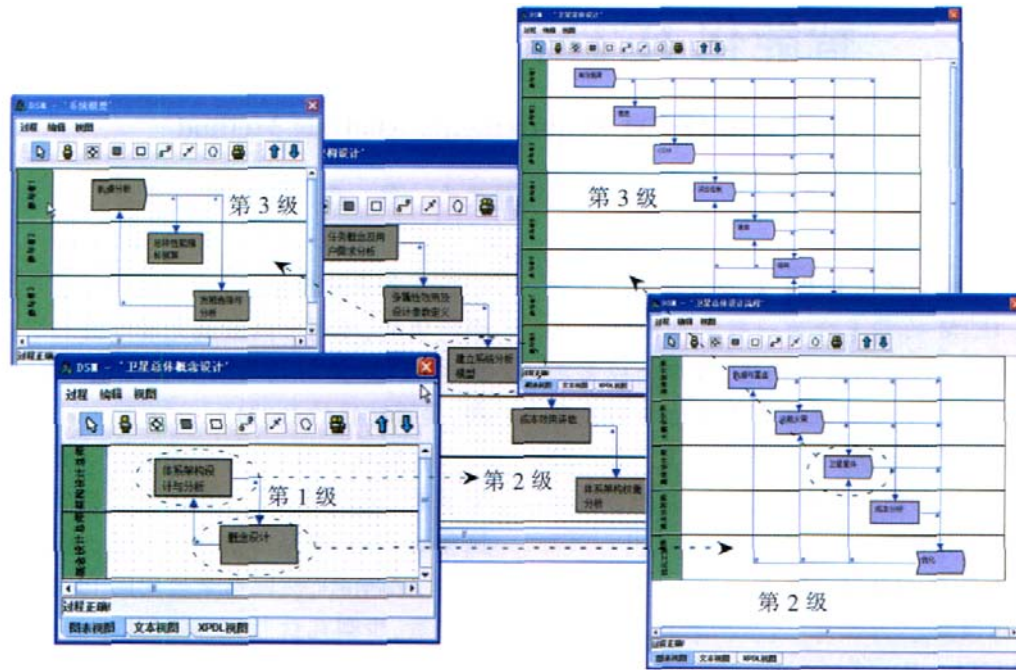


图5 卫星总体概念设计的多层DSM图

Fig.5 Multi-tiered DMS of overall concept design of satellite

根据体系架构设计结果,在概念设计阶段,采用更高一级精度的模型做进一步的分析,最终产生满足需求和约束条件的设计解。否则,返回到体系架构设计阶段,重新进行设计。这是一个反复迭代的、螺旋演进的过程,涉及到众多的过程/子过程、系统/子系统,是一个多学科、多任务、多团队协同的过程。

为了以简洁而可视化的形式表达这样一个复杂的过程,采用本文提出的过程建模与执行系统对该过程进行重新设计,可以获得一个简化、分层、清晰的用DSM表达的设计过程,并基于重组和优化算法,降低了设计中存在的不必要的反馈,如图5所示。

4 结束语

本课题采用设计结构矩阵对产品设计过程进行模型化,并基于CORBA和工作流技术实现了过程建模与执行系统。在该系统中,设计人员可以方便地建立一致的、层次化的过程模型,以简洁可视的形式表达复杂设计过程,获得整体上的过程视图,便于理解复杂过程内部及其之间的关系,从而达到更好地交流、存档和重复使用的目的。同时这种结构化方式也为复杂产品设计过程提供一种系统化的建模手段,给产品开发计划管理提供了很好的工具,有助于过程的创新和提高,缩短产品开发周期。

参 考 文 献

- [1] Herbet N, Ernst F, Lutz S, et al. Modeling of integrated product development processes. Proceedings of the 9th Annual Symposium of INCOSE, UK, 1999.
- [2] Browning T R. Applying the design structure matrix to system decomposition and integration problems: A Review and New Directions. IEEE Transactions on Engineering Management, 2001, 48(3): 292-306.
- [3] David H. The workflow reference model. UK: Workflow Management Coalition, 1995.
- [4] Nader S, Steven E, Earll M. Product Development Process Capture and Display Using Web-Based Technologies. Proceedings of the IEEE International Conferences on Systems, Man, and Cybernetics, 1998. 2664-2669.
- [5] 刘剑,贾进章,郑丹. 流体网络理论. 北京:煤炭工业出版社,2002.
- [6] Yassine A, Falkenburg D, Chelst K. Engineering design management: an information structure approach. International Journal of Production Research, 1999, 37(13): 2957-2975.
- [7] Hugh L, Daniel E. New methods of rapid architecture selection and conceptual design. Journal of Spacecraft and Rockets, 2004, 41(1): 10-18.

(责编 微凉)