

信息系统

建模与结构复杂性

● 王景光 著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



中央财经大学“211”三期专项资助

信息系统建模与 结构复杂性

王景光 著

机械工业出版社

前 言

信息系统的广泛应用始于 20 世纪 60 年代。历经近半个世纪的演进与发展,其功能、规模与作用范围不断扩大,已经成为现代社会组织提高能力与素质、进行改革与创新的重要手段。伴随着信息技术的不断进步,在广大系统开发人员的探索和努力下,其应用的深度与广度不断扩大,并开始在人们工作、学习和生活的各个方面发挥着日益重要的作用。

进入 21 世纪,信息系统的开发环境发生了深刻的变化。技术条件的改善和软硬件产品的不断更新换代,为系统开发人员提供了各种可供选择的工具和手段,然而,随着应用领域的不断扩大,系统的规模和复杂性也大大提高了,凭经验处理系统的顶层设计问题,难以对所涉及的大量工程、技术以及资源的有效配置问题进行充分的研究、分析和讨论。这已成为信息系统开发过程中首先要解决的问题之一,而这正是现有信息系统开发方法中较为薄弱的环节。

现代信息系统基本上可定义为复杂大系统。在系统开发的前期,如何论证系统的复杂程度并进行技术可行性研究,是系统开发生命周期过程中的重要环节。Petri 网作为一种形式化的描述工具,在复杂网络系统的建模和性能分析过程中有着广阔的应用前景。针对在新的技术环境下信息系统开发所面临的问题,本书提出了一种基于 Petri 网理论的信息系统资源配置模型和规范化的建模方法。该模型从系统顶层设计的角度出发,以网络形式描述了各类信息资源在系统中的分布。在此基础上,进一步推导了静态条件下系统结构复杂性的定量描述公式,给出了网络描述下系统的结点特性和系统网络核心层的分析方法,并讨论了它们之间的



内在联系，从而初步建立起了基于资源配置模型的信息系统性能分析方法。该方法可以有效地用于各类复杂系统的建模与性能分析，可供广大系统分析人员借鉴。

在本书的著述过程中，参考并借鉴了国内外众多同行专家与学者的文章和著作，并汲取了他们的学术观点和研究成果，在此一并表示感谢。

著 者

主要符号

PN (Petri Net): 佩特里网

$\cap$: 交集

$\cup$: 并集

$\Phi = \{ \}$: 空集

$\{0\}$: 零集

$N = \{0, 1, 2, \dots\}$: 非负整数集

$N^+ = \{1, 2, 3, \dots\}$: 正整数集

$\times$: 两集合 (空间) 的笛卡儿乘积

∞ : 无穷大

$\rightarrow$: 且有

$\rightarrow$: 映射

$\Rightarrow$: 等价于

$\text{pre}(x_1, x_2)$: 结点 x_2 上的输入关联函数, (x_1, x_2) 为 x_2 上的入弧

$\text{post}(x_1, x_2)$: 结点 x_2 上的输出关联函数, (x_2, x_1) 为 x_2 上的出弧

$\text{dom}(F)$: 集合 F 所含有偶之第一个元素所成集合

$\text{con}(F)$: 集合 F 所含有偶之第二个元素所成集合

目 录

前 言

主要符号

第 1 章 导论	1
1.1 引言	1
1.2 内容提要	2
1.3 信息系统开发方法回顾	4
1.3.1 结构化分析与设计方法	5
1.3.2 快速原型方法	5
1.3.3 面向对象的方法	6
1.3.4 计算机辅助软件工程方法	7
1.4 信息系统开发方法体系	9
1.4.1 信息系统开发思想	10
1.4.2 信息系统开发体系结构	11
1.4.3 信息系统开发建模技术	14
1.4.4 信息系统模型性能分析	15
第 2 章 Petri 网理论	18
2.1 引言	18
2.2 Petri 网理论简介	19
2.2.1 Petri 网基本概念	19
2.2.2 P/T 系统和 Petri 网	21
2.2.3 Petri 网性能分析	25
2.3 Petri 网发展综述	26
第 3 章 基于 Petri 网的信息系统资源配置模型	38
3.1 引言	38



3.2 信息系统建模	39
3.3 信息系统中的信息资源配置模型	44
3.3.1 接口说明	44
3.3.2 功能定义	46
3.3.3 资源约束	48
3.3.4 信息资源配置 Petri 网模型集成	51
3.4 信息系统中的资源配置模型	55
3.4.1 人力资源的定义和描述	55
3.4.2 资源配置的合理性分析	58
第4章 信息系统模型结构特性	63
4.1 引言	63
4.2 模型结构复杂性	64
4.2.1 Petri 网结构复杂度定义	64
4.2.2 Petri 网结构关联复杂度分析	68
4.2.3 系统结构复杂度的应用讨论	70
4.3 Petri 网模型的结点特性与系统结构可扩展性	72
4.3.1 Petri 网与网眼	73
4.3.2 结点与系统的耦合关系	76
4.3.3 结点特性与系统结构可扩展性	78
4.4 Petri 网模型核心层网络与系统可靠性	79
4.4.1 点边赋权有向网络图的加权核度与加权核	80
4.4.2 Petri 网的核度与核	82
4.4.3 网络核心层分析与系统可靠性	84
第5章 信息系统模型结构特性的相关性	92
5.1 引言	92
5.2 结构复杂性与系统可扩展性	92
5.3 结构复杂性与系统可靠性	96
第6章 信息系统模型计算机仿真	107
6.1 引言	107



6.2	ISPNMA 的激活窗口及开始对话框	107
6.3	建立模型	108
6.4	性能分析	110
第 7 章	应用研究	112
7.1	引言	112
7.2	案例分析 1: 某公司 MIS 物资管理子系统	112
7.2.1	物资管理子系统信息资源配置模型的建立	112
7.2.2	物资管理子系统信息资源配置模型性能分析	116
7.2.3	物资管理子系统人力资源配置模型	119
7.3	案例分析 2: 某公司 MIS 生产管理子系统	121
7.3.1	生产管理子系统信息资源配置模型的建立	121
7.3.2	生产管理子系统信息资源配置模型性能分析	124
7.3.3	生产管理子系统人力资源配置模型	130
7.4	案例分析 3: 某市就业信息管理和服务系统	133
7.4.1	就业信息系统信息资源配置模型的建立	133
7.4.2	就业信息系统信息资源配置模型性能分析	136
7.4.3	就业信息系统人力资源配置模型	139
7.5	案例分析比较	141
结束语		143
参考文献		145

1.1 引言

现代管理的核心是决策。决策过程包括发现机会或问题、明确目标、探索方案、预测与评价、抉择等阶段。各类信息的采集、加工、传输和利用贯穿于上述各个阶段。只有充分掌握和利用信息,才能对各种情况进行全面的分析、预测、评价,最终作出正确的抉择。由此可见,信息已成为现代管理活动中具有重要战略意义的资源。

管理信息的特点是量大、来源面广和形式多样。为了能够有效地支持管理和辅助决策,对信息的处理必须做到及时、准确、适用和经济。从这个意义上讲,人工方式和传统的电子数据处理方式已远远不能满足管理人员的需求。任何一个企业或组织,为了能够在激烈的竞争环境中求生存、求发展,必须在组织、运行、管理和决策过程中采用现代化的信息技术手段,建立支持企业发展全过程的信息系统,并借助于信息系统来解决自身的信息需求问题。信息系统是企业管理者的得力工具和助手,信息系统的开发和进步则是管理现代化的重要标志之一。

信息系统开发方法的研究和发展始于20世纪60年代末。由于当时开发工具和技术手段的落后,对系统开发方法的研究主要集中在应用软件开发和各种技术过程的实现上,在系统规划和总体布局方面多凭经验进行。进入21世纪,信息系统的开发环境发生了深刻的变化。技术条件的改善和软硬件产品的不断更新换代,为系统开



发人员提供了各种可供选择的工具和手段。然而，系统的规模和复杂性也大大增加了，凭经验处理系统的顶层设计问题，难以对所涉及的各类信息资源进行合理的分配和有效的管理。这已成为系统开发过程中首先要解决的问题之一，而这正是现有信息系统开发方法中较为薄弱的环节。

Petri 网是一种系统建模工具，创建于 1962 年。在此之后的许多研究成果表明，它在计算机、自动控制等领域具有显著的效果。而在此基础上发展起来的通用网论则已成为研究复杂系统结构设计的有力而严格的形式化工具。但 Petri 网在信息系统开发过程中，尤其在系统顶层设计阶段的应用研究尚未见到。本书就是在 Petri 网理论的基础上，从系统顶层设计的角度出发，提出和建立了在新的开发环境下能够反映各类信息资源分布状况的信息系统资源配置模型，并通过对该模型的量化分析，给出某些与系统特性相关的评价指标，以指导系统的开发。

1.2 内容提要

结构化分析与设计方法、快速原型方法、面向对象的方法和计算机辅助软件工程方法，是目前信息系统建设过程中较常采用的系统开发方法。由于考虑问题的角度不同和解决问题的侧重点不同，上述四种方法既有它们各自的优势，又有其不足，这些已在信息系统开发实践中得到了证实。先进的计算机技术和通信技术的融入，使得现行的信息系统开发环境发生了巨大的变化。技术的不断进步、设备的不断更新和信息系统规模的不断扩大，使现有的系统开发方法和工具颇感“力不从心”。在信息系统的开发过程中，多功能、多产品、多技术的集成，客观上要求我们必须采用新的思想和方法去思考和解决问题，才能克服现有方法论的不足。本章 1.3 节将对现有方法作一简单的回顾，并在 1.4 节中提出信息系统开发方法体系的概念。该方法体系以系统论思想为指导，既包括现有开发方法中用到的各种开发工具和技术，又补充了本文提出的系统资源配置模型和相应的建模及分析技术。

Petri 网作为一种形式化的描述模型，在大型复杂网络系统的建



模和分析过程中有着广阔的应用前景。作为本书的重要理论基础,第2章简要介绍了 Petri 网的各种基本特性、发展过程、目前的应用现状,并对它的应用前景作了分析。第3章提出了基于 Petri 网理论的信息系统资源配置模型的概念、定义和相应的建模技术。该模型的创新之处是它在实现系统功能的前提下,直观地描述了制约各功能正常运行的各类信息资源在网络环境下的分布和配置情况,还提出并建立了对信息系统的有效运行起重要作用的人力资源 Petri 网描述模型。通过对该模型的分析 and 优化,可得出一种较为合理的人力资源在信息系统中的分配方案。由于在该模型中所描述的某些衔接和制约关系完全可以通过在实际工作过程中制订相应的行为规则来实现,故有较高的实用价值。

信息系统的开发技术已得到了较大的发展,但在对信息系统的性能分析和评价方面则缺乏严格定量的方法,大多凭经验或试验的方法。本书第4章在信息系统资源配置模型的基础上,着重研究和改善了现有信息系统开发方法中最为薄弱的环节,即对系统性能的分析。这一章的内容分为三部分:第一,定义了信息系统结构复杂度的定量描述公式。该公式的推导思想基于在网络环境下系统功能对系统资源的竞争和共享特性的分析,并主要由系统组成要素的数量特性和关联特性两部分来描述,对此,书中给出了充分性说明。系统结构复杂度是对信息系统开发难度和总体设计方案的定量描述和评价,它有利于项目的前期论证和设计方案的优选。第二,对系统网络构成中各结点组成要素与网络总体结构的关联特性进行了一定的分析,并由此得出了系统关键要素结点的定义和分析算法。系统关键要素结点对系统结构的应变能力 and 可扩展性分析有一定的实际意义。第三,通过对点边赋权有向网络图加权核度与加权核的推广应用,给出了 Petri 网模型描述下信息系统网络结构核心层的分析方法,基于这种核心层分析,可以通过最少的设备冗余来获得较高的系统可靠性。

本书第5章对在前一章中定义的三个系统性能之间的关系进行了一定的研究,其中主要有结构复杂性与结点特性之间的关系、结构复杂性与核心层网络构成之间的关系,并从中揭示了在网络环境



下信息系统的结构复杂性、网络连通性、结构稳定性和系统可靠性之间的内在联系。

第6章简要介绍了我们在VB平台上开发出来的Petri网建模与性能分析软件包（Information Systems Petri Net Modeling & Analysing, 简称ISPNA）的基本构成和主要功能。在大型复杂信息系统项目建设过程中，ISPNA可以极大地提高系统Petri网的建模与分析效率，并大大减轻系统开发人员的劳动强度。

以上4章的内容构成了本书的主要框架。第7章通过笔者实际参加的两个信息系统开发项目，对本书提出的信息系统Petri网资源配置模型的合理性、建模方法和性能分析方法进行了论证，并获得了令人满意的结果。

需要说明的是，对于系统结构复杂度评价标准的制定，要有大量实例分析结果的积累才会客观和合理，这是一项长期的工作，需要广大信息系统建设者的共同努力。

1.3 信息系统开发方法回顾

20世纪50~60年代是信息系统概念形成并蓬勃发展的年代。当时，由于计算机在数据处理领域的突破，使得以计算机为主体的电子数据处理系统迅速在工商、财务和行政管理等领域应用开来。20世纪70年代，随着应用程度的深入和应用领域的扩大，为了更好地指导信息系统的开发，人们开始着手系统开发方法的研究。时至今日，可以说在这方面已取得了长足的进步。

信息系统开发方法研究的主要对象是信息系统开发的规律、开发过程的认知体系、系统分析和设计的一般理论，以及具体的开发工具和技术等。人们从不同的角度对信息系统的开发过程和规律进行总结和归纳，并在实践中不断地丰富、完善和提高，逐渐形成了目前在信息系统开发过程中较常采用的一些方法。这些方法中，在我国有一定影响且应用较广的有：结构化分析与设计方法（简称SA/SD方法）、快速原型方法、面向对象的方法（简称O-O方法）和计算机辅助软件工程方法（简称CASE方法）。下面就对这些方法作一简单介绍。



1.3.1 结构化分析与设计方法

结构化分析与设计方法是自顶向下的结构化方法、工程化的系统开发方法和生命周期方法的结合。它的基本思想是：用系统工程的思想 and 工程化的方法，按用户至上的原则，结构化、模块化、程序化地对系统进行分析、设计和实施。其主要特点表现为：

- 1) 用户参与。
- 2) 先逻辑、后物理。
- 3) 自顶向下。
- 4) 工作成果描述标准化。

SA/SD 方法是在传统的各种系统开发方法的基础上建立起来的一种系统化方法。该方法的突出优点是在强调系统开发过程整体优化的前提下来考虑具体的分析设计问题。这种方法避免了开发过程的混乱状态，是迄今为止应用最普遍、最成熟的一种开发方法。

但随着时间的推移和应用的深入，这种方法也逐渐暴露出了一些缺点和不足，其中较为突出的是：

- 1) 用户对即将建立的新系统没有直观的预见性。
- 2) 开发起点较低，所使用的分析工具（各种图表）大部分要靠手工绘制，致使开发周期过长。
- 3) 这种方法要求系统开发人员在系统分析过程中必须充分掌握用户的各种需求、管理现状并预见可能发生的变化，这不太符合人们循序渐进地认识事物的客观规律。
- 4) 系统维护困难、工作量大。

1.3.2 快速原型方法

快速原型方法是 20 世纪 80 年代在计算机软件技术、关系数据库技术、第四代程序设计语言（4GLs）和各种系统开发工具不断发展的基础上提出的一种从设计思想、工具到手段的全新的系统开发方法。原型法并无任何高深的理论与技术，也不像 SA/SD 方法那样提倡按部就班、循序渐进的开发过程，而是一开始就凭借着系统开发人员的工作经验和对用户需求的理解，在一个软件开发工具的支



持下，以最短的时间给出一个实实在在的系统原型，然后在这个原型基础上，与用户反复进行磋商修改，最终形成实际的系统。

与 SA/SD 方法相比，原型法具有如下几方面的特点：

1) 从认识论角度看，原型法更多地遵循了人们认识客观事物的规律，因而更容易为人们所接受。

2) 原型法从系统分析初期就引入了模拟手段，沟通了人们的思想，缩短了用户与系统开发人员之间的距离，从而为尽早地发现和纠正错误创造了条件。

3) 充分利用最新的软件开发工具，节省了系统开发的时间和费用，其技术含量和开发效率都得到了较大的提高。

该方法的最大优点是用户的直接参与，可尽早获得更完整、更确切的需求与设计，而且可以直接通过改进原型而得到新的目标系统，极大地提高了软件开发生命周期的总体效益。然而，作为一种具体的开发方法，原型法也有一定的适用范围和局限性，特别是对于那些规模较大、模块之间的逻辑关系较强的系统，原型的建立工作比较复杂，因此，原型法主要适用于规模较小、处理过程相对比较简单的系统。应该说，原型法是对 SA/SD 方法的发展和补充。这种相互补充、相互促进的系统开发方法是今后信息系统开发的发展方向。

1.3.3 面向对象的方法

面向对象的方法是 20 世纪 80 年代中后期在各种面向对象的程序设计语言基础之上逐步发展起来的。该方法认为，客观世界是由各种各样的对象组成的，每种对象都有各自的内部状态和运动规律，不同对象之间的相互作用和联系就构成了各种不同的系统。因此，从面向对象的角度出发去认识和开发系统，自 20 世纪 90 年代以来已成为一种全新的系统开发思路，并在信息系统开发领域内受到广泛的关注。

对象是 O-O 方法的主体，以对象为主体 O-O 方法可简单解释为：

1) 任何复杂系统都是由对象组成的。



2) 对象由属性和方法构成。属性反映了对象的信息特征, 方法则是用来定义改变属性状态的各种操作。

3) 对象之间的联系主要是通过传递消息来实现的, 传递方式由方法所规定的操作过程来定义和完成。

4) 对象按其属性可进行归类, 类 (class) 具有一定的结构层次, 各层次之间通过继承来关联。

5) 对象又是一个经过“封装” (encapsulation) 了的实体。这种封装了的对象可以用程序设计中的模块来实现。

O-O 方法所具有的特点如下:

1) O-O 方法以对象为基础, 利用特定的软件工具直接完成从对象客体的描述到软件结构之间的转换。

2) 对象是问题空间中客观实体的抽象, 而客观实体在复杂多变的环境和用户需求的变更中是相对稳定的, 因此, 用 O-O 方法建立起来的系统可重用性好, 并具有较强的应变能力。

3) O-O 方法在系统分析、设计和实现阶段均采用以对象为基本单元的统一模型, 故各开发阶段之间有良好的衔接, 简化了不同阶段之间转换映射的繁杂过程, 缩短了系统开发周期,

然而, 客观世界的对象五花八门, 在系统分析阶段用这种方法进行抽象是比较困难的, 且在某些情况下, 纯面向对象的模型并不能很好地满足软件系统的要求, 其实用性受到限制和影响。

同原型法一样, O-O 方法在应用中也必须依赖软件开发工具的支持。另外, 在大型信息系统开发项目中, 如果一开始就采用 O-O 方法从分析系统对象入手, 容易造成系统结构不合理的问题, 因此, 在实践中, 往往将 SA/SD 方法与 O-O 方法配合使用, 以取得较好的效果。

1.3.4 计算机辅助软件工程方法

如果严格地从认知方法论的角度看, 计算机辅助软件工程方法并不能算是一门真正独立意义上的“方法”。早期的 CASE 方法是以工具和辅助开发环境的面貌出现的。随着技术的发展和人们认识的加深, CASE 方法逐渐从各种可进行需求分析、功能分析、生成各种



结构化图表（如数据流图、E-R 图、层次图、状态图）等工具演变成可支持整个信息系统开发生命周期和软件开发过程的大型综合系统。正是从这个意义上讲，CASE 方法的概念也从一些具体的开发工具发展成为一种独特的、以自动化环境支持为基础的系统开发方法。

CASE 结构由 CASE 中心库和一组围绕中心库工作的 CASE 软件工具组成。作为一个大型综合辅助开发环境，CASE 支持：

- 1) 系统开发战略规划和需求分析各个阶段，如各种需求分析工具、战略规划、功能分析、数据定义和数据流程分析等。
- 2) 各种图形方式和多窗口的开发平台，允许用户在这个平台上用不同的开发方法工作，如数据流图、层次图、E-R 图、矩阵图等。
- 3) 支持由分析设计各个部分向实施和维护应用的机器自动转换过程，直至实际问题的最后求解。

目前，CASE 方法还是一个发展中的概念。该方法既支持自顶向下的结构化系统开发方法，也支持面向对象的方法和原型法，因此，它是一种很有发展前途的系统开发方法。

在以上四种常用的信息系统开发方法中，迄今为止还很难绝对地从应用角度来评价其优劣。虽然每种方法较前一种方法都有所发展，但就目前的技术水平看，这种发展只是局部地弥补了其不足，就整体而言很难完全替代。下面从以上几种方法对系统开发过程中的几个主要环节支持的情况来进行简单的比较说明。

(1) 快速原型方法 这是一种基于 4GLs 的快速模拟方法，它通过模拟以及对模拟后原型的不断讨论和修改最终建立系统。要想将这样一种方法应用于一个大型信息系统开发过程中的所有环节是不太可能的，故它多被用于小型局部系统或处理过程比较简单的系统设计到实现环节。

(2) 面向对象的方法 这是一种围绕对象来进行系统分析和系统设计，然后用面向对象的工具建立系统的方法。这种方法可以普遍适用于各类信息系统的开发，但很难涉足系统分析以前的开发环节。

(3) CASE 方法 这是一种除系统调研以外全面支持系统开发



过程的方法，同时也可以说是一种自动化的系统开发方法。从方法学的角度看，它具有前面各种方法的特点，同时又具有自身的特点——高度自动化。在这种方法的应用以及 CASE 工具自身的设计中，自顶向下、模块化、结构化是贯穿始终的。

综上所述，由于考虑问题的角度和解决问题的出发点不同，在上述各种方法中，只有结构化系统开发方法是真正能比较全面支持整个系统开发过程的方法，其他几种方法尽管都有各自的许多优点，但都只能作为对结构化系统开发方法在局部开发环节上的补充，暂时还都不能替代其在系统开发过程中的主导地位，尤其是在目前系统开发工作量最大的系统调查和分析这两个重要环节上。

需要指出的是，包括结构化开发方法在内的四种信息系统开发方法中，对系统顶层设计和系统设计方案的性能分析和评价技术都显得过于薄弱，就一个完整的方法体系而言，这不能不说是一种不足，因此，在现有的开发方法中引入新的内容和技术，将是今后信息系统开发方法领域研究的重要课题之一。

1.4 信息系统开发方法体系

信息系统开发是一个复杂的技术过程，在不同的阶段要解决不同的问题。开发方法应能支持系统整个开发过程，并能对不同的问题提供不同的解决方法和手段。信息系统开发方法体系（Set of Information System Development Method，简称 SISDM）是一种在系统论思想指导下，运用系统工程方法，集多种开发工具为一体的综合性系统开发方法。与各种单一系统开发方法相比较，其最大的不同在于引进了通用网论中的建模与分析工具，建立了基于 Petri 网的信息系统资源配置模型。借助于这个模型，使得在系统顶层设计阶段对系统性能的某些定量分析成为可能。信息系统开发方法体系的基本组成框架可以用图 1-1 表示，即由信息系统开发（简称 ISD）思想、信息系统开发体系结构、信息系统开发建模技术、信息系统开发模型分析技术等四部分组成。