

面向 C2 组织的探索性分析模型构建研究

刘振亚 罗旭辉 修保新 张维明

(国防科技大学信息系统管理学院 长沙 410073)

摘 要 C2 组织探索性分析模型是进行 C2 组织优化设计理论探索性分析验证的基础和关键。围绕 C2 组织探索性分析模型的构建问题,阐述了 C2 组织探索性分析模型的特征,明确了分析模型的设计需求,提出了分析模型的构建原则与基本方法,并对分析模型的层级映射关系进行了分析,以指导 C2 组织探索性分析模型的构建。

关键词 C2 组织,探索性分析模型,探索性建模

中图法分类号 TP338.6 **文献标识码** A

Research on Modeling of Exploratory Analysis Model for C2 Organization

LIU Zhen-ya LUO Xu-hui XIU Bao-xin ZHANG Wei-ming

(School of Information System and Management, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract Exploratory Analysis Model for C2 organization is the key for validating the methodology of organizational design based on the Exploratory Analysis. In order to modeling the Exploratory Analysis Model, this paper expounded the characteristics of the Exploratory Analysis Model for C2 organization, defined the requirement, and advanced the principle and methodology for modeling. The hierarchy mapping was also analyzed.

Keywords C2 organization, Exploratory analysis model, Exploratory analysis modeling

探索性分析方法是 RAND 公司提出的定量系统分析方法,其目标是通过理解不确定性对所研究系统的潜在影响,为战略决策的制定和修订提供量化的依据。运用探索性分析方法对 C2 组织优化设计理论和方法进行实验验证和分析,能够面向复杂使命环境,从 C2 组织所包含的不确定性因素出发,全面考察 C2 组织优化设计方法在复杂使命环境中的表现,能够适应复杂战场环境下 C2 组织设计研究的复杂性与敏捷性需求。基于探索性分析的 C2 组织优化设计理论验证从过程上可以分为两个阶段,即探索性建模阶段和探索性分析阶段。探索性建模阶段的目的是建立探索性分析模型,探索性分析方法的关键是对研究问题进行分析建模,其探索是基于分析模型的探索^[1]。因此,构建 C2 组织探索性分析模型是实现 C2 组织优化设计理论探索性分析验证的基础和关键。

探索性分析模型,是探索性分析的基础,分析模型应该具有什么样的模型结构,采用什么方法及怎样构建有效的分析模型是分析建模问题的关键。探索性分析面向高层策略分析,需要通过对系统进行快速分析来获取问题的全面认识,要求分析模型必须具备敏捷性。同时,C2 组织探索性分析面向组织复杂使命环境,要求分析模型必须能全面细致地考察使命环境的不确定性因素对 C2 组织优化设计理论的影响。因此,在 C2 组织设计验证的探索性分析模型构建过程中引入粒度计算理论,顶层分析模型采用粗粒度分析模型,满足分析模型的敏捷性与低成本需求;对于需要详细考察与分析的使命环境不确定因素则转入细粒度模型讨论,以满足分辨率

(Resolution)与详细度(Level of Detail)要求。探索分析过程中应结合使用不同粒度的模型和模型族来研究问题。多粒度建模是探索性分析的使能技术。

1 C2 组织探索性分析模型

探索性分析要求分析模型必须支持快速计算,能够对大量不确定性因素进行探索,所以探索性分析方法的分析模型主要是输入维数较少的低分辨率模型,具有构建成本低、维护和使用费用低、适合快速调整分析等特点。由于低分辨率模型在问题细节刻画上的缺陷,C2 组织设计探索性分析验证单纯依赖低分辨率模型难以理解不确定使命环境下 C2 组织设计的深层现象,需要通过较高分辨率的模型进行讨论和分析。因此,C2 组织探索性分析模型是多分辨率的模型或模型族,是在不同分辨率或抽象层次上一致地对 C2 组织设计的描述。C2 组织探索性分析过程中主要运行低分辨率模型,当低分辨率模型分析处理结果的精细程度无法满足需要时,则转入高分辨率模型进行分析处理。

多分辨率的 C2 组织探索性分析模型的优势主要体现在以下几个方面:

(1)多分辨率模型符合层次性认知需要。

认知具有层次性,数据同样也具有层次性。模型是现实问题的抽象、真实世界的简化,需要处理来自不同层次的数据,得出一个可信的结果。认知和数据的层次性决定模型的层次性,这就要求模型具有不同的分辨率层次。多分辨率的 C2 组织探索性分析模型的研究符合人们的思维习惯,有助于

从不同层次、不同角度全面地考察 C2 组织的设计。

(2) 多分辨率建模可以降低模型的开发费用。

模型的分辨率越高,其结构就越复杂,模型的开发和检验就越困难。随着模型分辨率的提高,所要求的输入数据也在增长,使得数据的收集和输入工作变得十分困难,计算能力需求成指数增长,模型解算时间大大增加。而多分辨率的 C2 组织探索性分析模型既可以保持模型的逼真度,又可以减少一些不必要的复杂度,以较合理的费用解决实际问题。

(3) 不同分辨率模型各有其适用领域

不同的问题需要不同的分辨率,不同的分辨率模型具有不同的用途。高分辨率模型能够抓住事物的细节,而低分辨率的模型能更好地揭示事物宏观的、本质的属性,建立同一事物的一系列不同分辨率的模型能够提高模型解决问题的能力。多分辨率的 C2 组织探索性分析模型中,高分辨率模型可以用于研究 C2 组织设计的细节,低分辨率模型可以从宏观上把握 C2 组织的总体特性。

区别于一般意义上的实体模型、仿真模型,C2 组织探索性分析模型描述的行为是 C2 组织所具有的能力和功能的整体体现,是组织的宏观整体行为,而不是组织内部单个个体或系统的具体行为。分析模型的变量是问题的抽象变量和聚合变量,是在一定聚合程度上的平均结果。分析模型描述的变量之间的交互,是相对长的一个分析周期内的过程平均。

多分辨率的 C2 组织探索性分析模型是对 C2 组织设计的多层次抽象。一般来说,一个模型本身仅能辅助分析者回答和诊断问题域中的部分问题。而多层次抽象和多类型抽象则可以表达问题域的许多方面,因而可以适应多数问题的要求。C2 组织探索性分析模型便于不同人员理解,研究 C2 组织与 C2 组织设计。同时,C2 组织探索性分析模型的多层次抽象可以使 C2 组织的模型在不同的详细程度和分辨率上实现,为探索性分析实验提供了灵活性。

2 C2 组织探索性分析模型的构建

多分辨率建模的研究目前在国际上还是一个比较新的领域,早期的代表性工作是 20 世纪 90 年代初 RAND 公司 Davis 等人根据 DARPA 的需求所做的一些研究^[2]。C2 组织探索性分析模型是多分辨率的模型或模型族,分析模型是通过 C2 组织设计过程的多层次抽象而建立的。

2.1 C2 组织探索性分析模型构建原理

多分辨率的 C2 组织探索性分析模型的构建原则是,从 C2 组织设计过程出发,根据观察问题的角度和数据获取的层次,通过模型的聚合与解聚,构建不同分辨率的 C2 组织探索性分析模型,使分析模型既满足 C2 组织设计探索性分析验证的快速计算要求,又能够具体反映使命环境的不确定性对 C2 组织设计的影响。分析模型的建立是自顶向下的解聚分解与自底向上的聚合校验相结合的过程。从顶向下意味着通过低分辨率模型来观察 C2 组织设计问题,而且确定一系列的高分辨率模型来研究其中感兴趣的狭窄部分内容。自底向上是指将高分辨率问题的解决方案综合到高层问题中。建模过程中,高分辨率模型自底向上通过聚合抽象构造低分辨率模型,并对其进行校准,使其能较准确地验证 C2 组织设计;低分辨率模型自顶向下通过解聚分解对高分辨率模型进行解释,使其能详细反映使命环境哪些不确定性因素会强烈影响

C2 组织设计。

C2 组织探索性分析模型是基于探索性分析的 C2 组织设计验证的基础和支撑。如图 1 所示,C2 组织探索性分析模型需要满足 3 个方面的需求:第一,分析模型能够对 C2 组织要素(使命目标、使命环境、组织结构与组织状态等)进行描述,即 C2 组织与行为模型是 C2 组织设计的基本出发点;第二,探索性分析模型能够对 C2 组织过程的不确定性来进行描述,即 C2 不确定性描述模型通过分析 C2 组织过程不确定性来构建 C2 组织设计验证的探索空间;第三,根据 C2 组织设计验证的具体需要,建立 C2 组织测度模型,它是进行 C2 组织设计验证的依据。

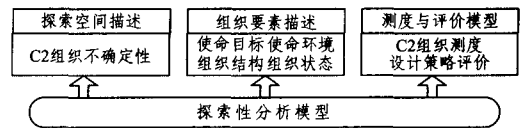


图 1 探索性分析模型描述内容

2.2 C2 组织探索性分析模型的聚合与分解

聚合是指用一个合计量来置换一组变量,即将模型从分辨率尺度上的较高点映射到较低点的模型操作过程。聚合通常被看作是包含在抽象过程中的特例,分解则是将变量分解为其它变量组的相反过程,分解的目的是将一个基本模型的复杂性降到较低水平。

设多分辨率的 C2 组织探索性分析模型的变量网络如图 2 所示,Y 代表模型的输出, X_1, X_2, X_3 代表低分辨率模型的输入变量; $X_4 - X_{11}$ 代表高分辨率模型的输入变量,则^[3]

$$\text{低分辨率模型关系表达式可表示为} \\ Y = F(X_1, X_2, X_3) \quad (1)$$

$$\text{高分辨率模型关系表达式可表示为} \\ Y = F(G_1(X_4, X_5, X_6), G_2(X_7, X_8), G_3(X_9, X_{10}, X_{11})) \quad (2)$$

$$\text{低分辨率变量用高分辨率变量表示为} \\ X_1 = G_1(X_4, X_5, X_6) \\ X_2 = G_2(X_7, X_8) \\ X_3 = G_3(X_9, X_{10}, X_{11}) \quad (3)$$

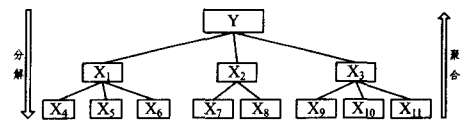


图 2 模型的聚合与分解

通过式(3)将低分辨率模型(1)转化为高分辨率模型(2)的过程即为模型自顶向下的分解过程,将高分辨率模型(2)转化为低分辨率模型(1)的过程即为模型自底向上的聚合过程。在执行探索性分析过程中,一般运行分辨率较低的模型。当需要更多的细节时,触发分解,执行高分辨率模型。当不再需要细节时,触发聚合,执行分辨率较低的模型。

出于保持不同分辨率模型间一致性的需要,分析模型的构建需要有自底向上的校验过程与自顶向下的解释过程和模型的聚合与分解相对应。

输入参数和模型结构参数的合理性很大程度上决定了模型的有效性,任何层次的模型都依赖于该层次上的模型数据。C2 组织探索性分析的低分辨率模型的输入参数以及模型的有效性需要通过高分辨率模型进行校验。

如图3所示,低分辨率模型A有 A_1, A_2, A_3 共3个输入。输入参数 A_1 由模型 X_1 的输出进行校验,模型 X_1 是输入参数为 $X_{11} - X_{1m}$ 的高分辨率模型。同理,输入参数 A_2 和 A_3 分别由高分辨模型 X_2 和 X_3 的输出进行校验。

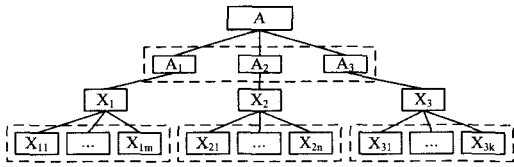


图3 模型的校验与解释

高分辨模型是对问题域中部分内容的详细描述,因此要构建一个对高分辨率模型结果比较满意的解释是比较困难的,但这种解释在一个低分辨率的分析模型中很容易得出。低分辨率的分析模型高度聚合,层次化的模型结构非常清晰,适合进行因果推理,具备针对高分辨率模型运行结果的解释能力。

3 C2 组织探索性分析模型的层级关联分析

C2 组织探索性分析模型的构建是一个聚合与分解的过程,多分辨率的分析模型是对 C2 组织设计过程的多层抽象,分析模型的不同分辨率层级之间存在从属关系或相互作用的关系。C2 组织探索性分析模型的层级关联分析主要对分析模型中不同分辨率模型所构成的位置层次结构而形成的交互进行相应的分析,主要包括基本模型及其输入输出关联、层级映射等。层级关联分析是分析模型构建的基础。在进行 C2 组织探索性分析过程中,如果当前分辨率模型不能满足探索性分析需要,则通过层级关联映射转入满足分析计算需求的分辨率层级。

3.1 基本模型

基本模型是对 C2 组织探索性分析模型中某一分辨率层级上模型的组成要素 (Y, X, C) 以及各要素之间相互关联 (R) 的描述。其中, F 表示模型的输出, X 表示模型的输入变量, C 表示模型所需遵循的各种约束。因此,基本模型可以表示为

$$BM = \{Y, X, C, R\} \quad (4)$$

基本模型中的关联 (R) 主要包括输入输出的关联和模型运行过程中对输入变量以及输出变量的约束,如式(5)所示。其中,等号右边的 F 和 C 分别表示对应的分析处理法则和约束法则,而 E 表示外部环境,也是该分析处理的一个约束因素。

$$R: \begin{cases} Y = F(X) \\ C = C(Y, X, E) \end{cases} \quad (5)$$

基本模型中的相互关联并没有涉及同分辨率层级或其它层级的模型,实质上它所描述的只是 C2 组织探索性分析模型中某个模型本身的输入输出组成以及二者所形成的逻辑关系,如图4所示。

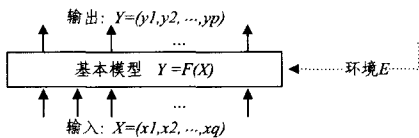


图4 C2 组织探索性分析模型的基本模型

图4中,每个基本模型都可以包括任意多个输入变量和

任意多个输出变量,例如图中所示的 q 个输入变量和 p 个输出变量,即 $X=(x_1, x_2, \dots, x_q)$ 和 $Y=(y_1, y_2, \dots, y_p)$,此时所对应的约束关系为 $F=(f_1, f_2, \dots, f_p)$,并且对于任意输出变量所对应的输入变量集 $X_k (\forall y_k \in Y, f_k \in F, y_k = f_k(X_k))$ 均有 $X_k \subseteq X$ 成立。因此,分析模型第 n 层级的第 i 个基本模型可以表示为

$$BM_{n,i} = \{Y_{n,i}, X_{n,i}, C_{n,i}, R_{n,i}\}$$

3.2 C2 组织探索性分析模型的层级关联映射

对于多分辨率层级的 C2 组织探索性分析模型,设 y 为分析模型 $n+1$ 层级上所有基本模型的输出所组成的集合 Y_{n+1} 中的某个元素,如果其同时满足 $y \in X_{n,i}$,那么记 Y_{n+1} 中所有具有该特性的元素组成的集合为 Y_{n+1}^i ;另一方面,对于 $X_{n,i}$ 中的任一元素 x ,如果其同时满足 $x \in Y_{n+1}^i$,则有 $X_{n,i} = Y_{n+1}^i$ 。此时可以定义层级 n 到层级 $n+1$ 间的映射为

$$\begin{cases} Y_{n,i} = F_{n,i}(X_{n,i}) = F_{n,i}(Y_{n+1}^i) \\ C_{n,i} = C_{n,i}(Y_{n,i}, X_{n,i}, E) = C_{n,i}(Y_{n,i}, Y_{n+1}^i, E) \end{cases}$$

设 $\delta \in Y_{n+1}^i$,则 $\exists j, k$,使得 $\delta = Y_{n+1,j,k}$,即 δ 为第 $n+1$ 层级上第 j 个基本模型的第 k 个输出变量。因此 δ 可以进一步表示为

$$\delta = f_{n+1,j,k}(X_{n+1,j,k})$$

其中, $X_{n+1,j,k}$ 和 $f_{n+1,j,k}$ 分别表示第 $n+1$ 层级上第 j 个基本模型的第 k 个输出变量 δ 所对应的输入变量集合及其对应的约束条件。类似地, X_{n+1} 和 F_{n+1} 表示第 $n+1$ 层级所有基本模型的所有输入变量及其所有对应的约束条件。由此可得

$$Y_{n+1}^i = F_{n+1}^i(X_{n+1}^i)$$

其中, $F_{n+1}^i \subseteq F_{n+1}$, $X_{n+1}^i \subseteq X_{n+1}$ 。

综上所述,C2 组织探索性分析模型的层级映射关系可以表示为

$$\begin{aligned} Y_{n,i} &= F_{n,i}(Y_{n+1}^i) = F_{n,i}(F_{n+1}^i(X_{n+1}^i)) = G_{n,i}(X_{n+1}^i) \\ C_{n,i} &= C_{n,i}(Y_{n,i}, Y_{n+1}^i, E) = C_{n,i}(G_{n,i}(X_{n+1}^i), F_{n+1}^i(X_{n+1}^i), E) \\ &= Q_{n,i}(X_{n+1}^i, E) \end{aligned}$$

多分辨率的 C2 组织探索性分析模型的层级映射说明,一定条件下,低分辨率基本模型的分析处理通过一定的映射关系都可以转化为对高分辨率系列要素的分析处理,所不同的只是各种映射法则的差别,如图5所示。需要注意的是,C2 组织探索性分析模型中并不是所有的基本模型都能够通过层级映射直接转化为对相邻层级的某些基本模型进行处理。层级映射的前提条件是高层级基本模型的所有输入变量都能直接表示为相邻低层级的基本模型的某些输出(即 $X_{n,i} = Y_{n+1}^i$)。如果不能满足该条件,则层级映射就无法进行。

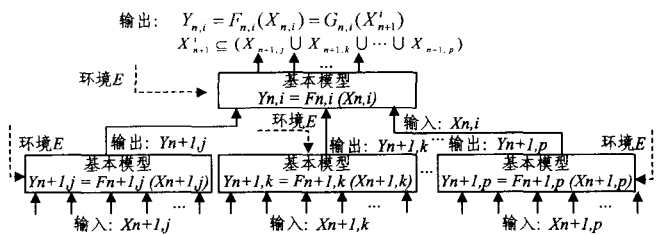


图5 C2 组织探索性分析模型的层级映射

3.3 C2 组织探索性分析模型的软构层映射

当层级映射的某高层级基本模型的所有输入变量不能直接表示为相邻低层级的基本模型的某些输出时,层级映射就

不能直接应用。因此,为了更为清晰地阐释不同层级间基本模型的交互映射关系,可以在高层级的基本模型和其低层级的基本模型之间增加一个逻辑中间层级,而这个逻辑中间层级又恰好将该层级基本模型的输入及其低层级基本模型间的输出有机地衔接起来,从而保证了层级映射能够在这两个层级之间进行。这种逻辑中间层之所以被称为“软构层”,是因为它不是 C2 组织的物理结构组成部分,因而并不构成一个层级;但是它却又具有在 C2 组织探索性分析模型的层级映射中存在的必要性,因为通过它能更好地解释探索性分析模型的各个分辨率层级间的层级映射关系。

如图 6 所示,假设某基本模型所在层级为 n ,那么增加软构层后,软构层模型所在层级应该为 $n+1$,而其低层级基本模型的层次为 $n+2$ 。由图可知,基本模型和组成该基本模型的低层级基本模型间由于没有直接的输入输出关联,因而不能建立直接的层级映射关系。但是,增加软构层之后,基本模型和组成该基本模型的低层级基本模型之间的层级映射关系可以通过软构层的两次层级映射来完成。

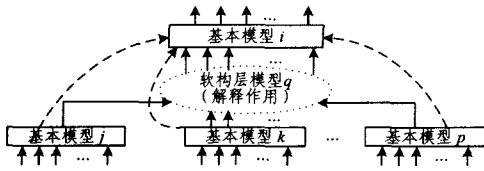


图 6 结构层级概念模型中的软构层映射

由于基本模型 i 分析处理的输入直接来自软构层模型 q 分析处理的输出,所以基本模型和相应的软构层模型间可以进行层级映射,即

$$X_{n,i} \subseteq Y_{n+1,q} \Rightarrow Y_{n,i} = F_{n,i}(X_{n,i})$$

$$F_{n,i}(X_{n,i}) = F_{n,i}(Y_{n+1,q}) = F_{n,i}(F_{n+1,q}^i(X_{n+1,q})) = G_{n,i}(X_{n+1,q}^i)$$

其中,

$$Y_{n+1,q}^i \subseteq Y_{n+1,q}$$

$$X_{n+1,q}^i \subseteq X_{n+1,q}$$

$$F_{n+1,q}^i \subseteq F_{n+1,q}$$

同理可得软构层模型和相应的低层级系统层节点间的层级映射,即

$$X_{n+1,q} \subseteq (Y_{n+2,j} \cup Y_{n+2,k} \cup \dots \cup Y_{n+2,p}) \Rightarrow Y_{n+1,q} = F_{n+1,q}$$

$$(X_{n+1,q}) = F_{n+1,q}(Y_{n+2}^q) = F_{n+1,q}(F_{n+2}^q(X_{n+2}^q))$$

(上接第 244 页)

文法产生 ϵ 句子的简单方法。相应地,限制了 FA 中开始状态的作用,使得开始状态只接收输入串的第 1 个字母。提出了 ϵ -NFA 转换为正则文法和 NFA 的方法,并通过实例进行了验证。

参考文献

[1] 蒋宗礼. 形式语言与自动机理论(第 2 版)[M]. 北京:清华大学出版社,2008

[2] 陈有祺. 形式语言与自动机[M]. 南京:南开大学出版社,1999

[3] Sipser M. Introduction to the theory of computation[M]. Boston, USA: PWS Publishing Company, 1997

$$= G_{n+1,q}(X_{n+2}^q)$$

其中,

$$Y_{n+2}^q \subseteq (Y_{n+2,j} \cup Y_{n+2,k} \cup \dots \cup Y_{n+2,p})$$

$$X_{n+2}^q \subseteq (X_{n+2,j} \cup X_{n+2,k} \cup \dots \cup X_{n+2,p})$$

$$F_{n+2}^q \subseteq (F_{n+2,j} \cup F_{n+2,k} \cup \dots \cup F_{n+2,p})$$

结合以上两种层级映射,基本模型和组成该基本模型的低层级基本模型之间的层级映射关系可表示为

$$Y_{n,i} = F_{n,i}(F_{n+1}^i(X_{n+1}^i)) = F_{n,i}(F_{n+1}^i(Y_{n+2}^q))$$

$$= F_{n,i}(F_{n+1}^i(F_{n+2}^q(X_{n+2}^q))) = \Psi_{n,i}(X_{n+2}^q)$$

其中,

$$Y_{n+2}^q \subseteq (Y_{n+2,j} \cup Y_{n+2,k} \cup \dots \cup Y_{n+2,p})$$

$$X_{n+2}^q \subseteq (X_{n+2,j} \cup X_{n+2,k} \cup \dots \cup X_{n+2,p})$$

$$F_{n+2}^q \subseteq (F_{n+2,j} \cup F_{n+2,k} \cup \dots \cup F_{n+2,p})$$

综上所述,C2 组织的每个高层级的基本模型都可以相应地添加一个软构层模型,与低层级的基本模型间建立关联映射,软构层模型的数量代表了整个 C2 组织中所包含的各层级基本模型的数量。软构层的逻辑作用使得层级映射可以在 C2 组织的不同分辨率模型的各个层级之间依次进行下去,从而确保了整个 C2 组织探索性分析模型的层级映射的完备性。

结束语 构建 C2 组织探索性分析模型是实现 C2 组织优化设计理论探索性分析验证的基础和关键。本文围绕 C2 组织探索性分析模型的构建问题,阐述了分析模型的特征,明确了分析模型的描述内容,提出了分析模型的构建原则与基本方法,并对分析模型的层级映射关系进行了分析。在此基础上设计与构建 C2 组织探索性分析模型,进一步实现了探索性分析环境,对 C2 组织优化设计理论和方法进行了实验验证和分析。

参考文献

[1] 周少平,李群,王维平. 探索性分析建模[J]. 计算机仿真,2006(4):50-53

[2] Davis P K, Bigelow J H. Experiment in Multi-resolution Modeling[R]. MR-1004- DARPA. 1998

[3] 耿振余,毕义明. 基于探索性分析法仿真的建模方法研究[J]. 情报指挥控制系统与仿真技术,2005(4):31-34

[4] 周启海. NFA→FA→GFA 的自动转换算法[J]. 电子科技大学学报,2005,34(3):234-236

[5] 周启海. 有穷自动机的规范化[J]. 计算机科学,2004(增刊):156-157

[6] Hopcroft J E, Ullman J D. Introduction to Automata Theory, Languages and Computation[M]. Addison-Wesley, 1979: 112-134

[7] 张选芳. 形式语言中的上下文无关和上下文相关[J]. 电子科技大学学报,1997,26(4):435-439

[8] 蒋龙龙,陈文字. 利用等价类构造有限状态自动机[J]. 计算机科学,2006,33(11):272-275