

# 基于 Mixed Logit 模型的土木系统工程 可靠性预测

曹毅,魏连雨,马士宾,于欢

河北工业大学土木工程学院,天津 300401

**摘要** 将土木工程与系统工程相结合,应用 Mixed Logit 模型研究了土木系统工程的可靠性。通过对问卷调查数据的 SPSS 统计与信度分析,确定了影响土木系统工程可靠性的关键因素,建立了相应的 Mixed Logit 模型,并以多元统计分析软件 SAS 进行模拟,对土木系统工程的 3 种典型模式 DBB、PMC 和 EPC 进行了可靠性预测。结果显示,DBB 模式的可靠性指标为 83.69%,而 PMC、EPC 模式的可靠性指标分别为 76.03%和 71.39%,表明 DBB 模式具有较高的可靠性。该预测方法及结果可为土木系统工程的应用研究提供理论依据。

**关键词** 土木系统工程;可靠性;Mixed Logit 模型

**中图分类号** TL372+.3

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.21.003

## Reliability Analysis of Civil Systems Engineering Based on Mixed Logit Model

CAO Yi, WEI Lianyu, MA Shibin, YU Huan

College of Civil Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401

**Abstract** The mixed Logit model is used to study the reliability of the civil systems engineering in combination with the civil engineering and the systems engineering. The SPSS software is used to make the statistical and reliability analyses of the survey data, and the key indicators that affect the reliability of the civil systems engineering are obtained. In the meanwhile, an appropriate mixed Logit model is established, and the multivariate statistical analysis software SAS is used for simulation and reliability analyses with respect to the three typical modes of civil systems engineering—DBB, PMC, and EPC. It is shown that the reliability index of DBB mode is 83.69%, while those of the PMC model and the EPC mode are 76.03% and 71.39%, which indicates that that DBB mode has the highest reliability. The results and the method provide a theoretical basis for the applications of the civil systems engineering modes.

**Keywords** civil system engineering; reliability; Mixed Logit model

### 0 引言

土木系统工程是指运用系统工程的方法,对土木工程项目进行分析、评价、预测、决策,以取得合理、经济、最优的工程建设效果<sup>[1-3]</sup>。目前国内对土木系统工程的研究,仍集中在对土木系统工程各种模式的概念和特点的描述阶段。要将土木系统工程应用于实际工程项目,不仅要知道其各种模式在设计、施工、管理等方面的优势及不足,而且更为重要的是,要分析影响土木系统工程决策的因素,对各种模式的可靠性进行量化研究,才能针对不同的建设项目选择合适的系统模

式<sup>[4,5]</sup>。Mixed Logit 模型是以 Logit 模型为基础发展而来,其模型约束条件更自由,且不受分布函数的限制,摒弃了 Logit 的比值无关性局限,是应用范围较广的一种离散选择模型<sup>[7,8]</sup>。本文在充分考虑土木系统工程影响因素的基础上建立 Mixed Logit 模型,研究土木系统工程模式的可靠性,为进一步的应用研究提供参考。

### 1 土木系统工程关键影响因素的分析

选择土木系统工程的 3 种典型模式 DBB (Design-Bid-

收稿日期:2013-03-05;修回日期:2013-06-17

基金项目:河北省科技计划项目(12217636)

作者简介:曹毅,博士研究生,研究方向为结构工程及土木系统工程,电子邮箱:coflaau@163.com

Build, 设计-招标-建造)、PMC(Project Management Contract, 项目-管理-承包)和 EPC(Design-Procurement-Construction, 设计-采购-建设),进行可靠性影响因素的分析和选取。采用电子邮件等方式对天津市的土木建筑机构及相关工作人员进行问卷调查,共收到问卷调查报告 939 份,运用 SPSS 软件对调查数据进行统计分析,确定了影响土木系统工程模式可靠性的 10 项关键因素,即工程经验、项目管理承包商类型、业主技术力量、工程规模、工程项目目标控制、合同的规范性、政府出台的新法律法规、业主管理能力、工程技术难度、以及总承包商的项目估价。以克朗巴哈(Cronbach)  $\alpha$  值为评判标准,对影响土木系统工程可靠性的上述因素进行信度检验<sup>[6]</sup>,检验结果列于表 1。

在土木建筑项目中,信度的标准要求是 Cronbach  $\alpha$  值应该达到 0.7 以上,最小不低于 0.6。从表 1 可以看出,各影响因素相对于土木系统工程 3 种典型模式的 Cronbach  $\alpha$  值均超过了 0.7,符合信度的标准要求。

表 1 土木系统工程可靠性影响因素的信度分析  
Table 1 Analysis of factors affecting civil systems engineering reliability

土木系统工程模式	影响因素	Cronbach $\alpha$ 值
DBB	业主工程经验	0.836
	业主技术力量	0.798
	工程项目目标控制	0.857
	合同的规范性	0.792
	政府出台的新法律法规	0.753
PMC	业主管理能力	0.742
	项目管理承包商类型	0.813
	工程规模	0.785
	工程项目目标控制	0.857
EPC	工程技术难度	0.732
	工程项目目标控制	0.857
	总承包商的项目估价	0.778

## 2 土木系统工程可靠性预测模型的建立

假定所选择的土木系统工程模式的可靠性  $U_{in}$  由可预测的确定因素  $V_{in}$  和不可预测的随机因素  $\varepsilon_{in}$  两部分构成,即  $U_{in}=V_{in}+\varepsilon_{in}$ <sup>[9]</sup>,并假定  $V_{in}=\beta X_n=\beta_1x_{1n}+\beta_2x_{2n}+\dots+\beta_kx_{kn}(k=1,2,\dots,10;n=1,2,\dots,10)$ ,其中  $X_n=(x_{1n},x_{2n},\dots,x_{kn})$  为确定因素的特征变量,向量  $\beta=(\beta_1,\beta_2,\dots,\beta_k)$  中的元素均为变量,分别表示各种关键影响因素的大小。

那么土木系统工程模式  $i$  对工程项目  $n$  的可靠性可用 Mixed Logit 模型表示为

$$P_n(i)=\int \frac{\exp(\beta'x_{in})}{\sum_{j=1}^J \exp(\beta'x_{jn})} f(\beta/b, \Omega) d\beta \quad (1)$$

式中,  $b$  和  $\Omega$  分别为向量  $\beta$  的均值和协方差阵,为需要标定的参数;函数  $f(\beta/b, \Omega)$  为向量  $\beta$  的分布密度函数。

式(1)为 Logit 模型的积分式<sup>[2]</sup>,其选择概率  $P_n(i)$  可以看作 Logit 模型选择概率的加权平均值,权重由分布密度函数  $f(\beta/b, \Omega)$  决定。 $f(\beta/b, \Omega)$  为某种分布密度函数,可以是正态分布、对数正态分布、均匀分布、三角分布等,可依据具体的情况对分布函数的形式做出选择。

对于公式(2),由于影响土木系统工程各模式可靠性的关键因素存在交叉性,关键因素  $m$  是土木系统工程模式  $i$  与  $j$  的共同影响因素,那么当工程项目  $n$  选择模式  $i$  时,因为关键因素的相同使得模式  $i$  的选择概率对模式  $j$  产生影响,用交叉弹性  $E_{inx_j^m}$  表示当工程项目  $n$  选择模式  $i$  时  $i$  与  $j$  的相互影响,来表明土木系统工程模式  $i$  与  $j$  并不是独立不相关的。土木系统工程模式  $i$  对工程项目  $n$  的可靠性  $P_n(i)$  相对于土木系统工程模式  $j$  的第  $m$  个影响因素的交叉弹性为<sup>[10]</sup>

$$E_{inx_j^m} = \frac{\partial P_{in}}{\partial x_{jn}^m} / \frac{P_{in}}{x_{jn}^m} = - \left[ \beta^m L_{jn}(\beta) \left[ \frac{L_{in}(\beta)}{P_{in}} \right] f(\beta/b, \Omega) d\beta \right] \quad (2)$$

其中  $L_{in}(\beta)$  为工程项目  $n$  选择土木系统工程模式  $i$  的概率,

$$L_{in}(\beta) = \frac{\exp(\beta'x_{in})}{\sum_{j=1}^J \exp(\beta'x_{jn})} \quad (3)$$

由上述可知,当土木系统工程模式  $i$  的第  $m$  个影响因素发生改变时,其他各模式的可靠性变化程度是不同的,它取决于影响因素的特性和待估参数向量的分布函数。因此 Mixed Logit 模型克服了 Logit 模型比值无关性的缺陷。如果采用合适的分布函数和变量, Mixed Logit 模型可以在任何精度上趋近于任何一种随机效用模型。

## 3 土木系统工程典型模式的可靠性预测

目前国外开发的统计分析系统软件 SAS (Statistics Analysis System) 和离散选择软件 ALogit, 提供了 Mixed Logit 模型的求解程序。本文利用 SAS 软件对所建 Mixed Logit 模型进行仿真模拟,对土木系统工程的 3 种典型模式 DBB、PMC 和 EPC 进行可靠性预测。

### 3.1 模型参数设置

根据 Mixed Logit 模型的定参原则和土木系统工程模式的性质,将业主工程经验、项目管理承包商类型分别设为 2 个常变量  $\beta_1$  和  $\beta_2$ ,将合同的规范性  $\beta_6$ 、政府出台的新法律法规  $\beta_7$ 、业主管理能力  $\beta_8$  设为哑元变量,合同规范取值为 1,否则取值为 0;政府出台法律法规取值为 1,否则取值为 0;业主具有较强的管理能力取值为 1,否则取值为 0。依据 EPC 模式的概念,将总承包商的项目估价设为 EPC 模式的专有变量  $\beta_{10}$ 。将业主技术力量  $\beta_3$ 、工程规模  $\beta_4$ 、项目目标控制  $\beta_5$ 、工程技术难度  $\beta_9$  设为辅助变量。上述变量的初始值均为通过 SPSS 分析调查数据得出的数值,列于表 2。

表 2 影响各模式可靠性的关键因素变量初值选取表

Table 2 Original value table of key factors affecting reliability

影响因素变量	DBB	PMC	EPC
$\beta_1$	0.5961	0	0
$\beta_2$	—	0.3742	0
$\beta_3$	0.8933	—	0
$\beta_4$	0	0.7218	0
$\beta_5$	0.5172	0.5172	0.5172
$\beta_6$	1	0	0
$\beta_7$	1	0	0
$\beta_8$	1	0	0
$\beta_9$	0	0.6490	0
$\beta_{10}$	0	0	0.4869

### 3.2 模型求解步骤

由上节可知,适用于土木系统工程的 Mixed Logit 模型的表达式(1)是非显性的,只能求出其数值解,若  $\beta$  的维数大于 2,进行积分运算是非常复杂的,因此采取仿真算法求解模型。

首先,求解模式  $i$  对工程项目  $n$  的仿真可靠性  $\check{P}_{in}$ 。

第 1 步:给定  $b$  和  $\Omega$ ,从密度函数  $f(\beta/b, \Omega)$  中随机抽取一个随机向量  $\beta$ , 记为  $\beta^r$ ,首次抽取时记为  $r=1$ 。

第 2 步:由公式(3),计算  $L_m(\beta^r)$  的值。

第 3 步:重复第 1、2 步骤  $R$  次(一般为 500~1000 次),取  $L_m(\beta^r)$  的均值作为可靠性仿真值,即

$$\check{P}_{in} = \frac{1}{R} \sum_{r=1}^R L_m(\beta^r) \quad (4)$$

同时,构造极大似然算子。记样本容量为  $N$ ,可供选择的土木系统工程模式个数为  $J$ ,定义辅助变量

$$y_{in} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$$

模式  $i$  对项目  $n$  的可靠性为 1,其他模式对项目  $n$  的可靠性为 0,样本的仿真似然函数为

$$L_S(\beta) = \prod_{n=1}^N \prod_{i=1}^J \check{P}_{in}^{y_{in}} \quad (5)$$

对式(5)取对数求解仿真极大似然算子,即

$$\max L_S(\beta) = \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^J y_{in} \ln \check{P}_{in} \quad (6)$$

再次求解  $b$  和  $\Omega$ ,改变  $b$  与  $\Omega$  的值,运用 Newton-Rapson 法进行计算,直到仿真极大似然算子取得最大值为止。其中  $\beta$  在分布区域上出现变号,且结果收敛时,仿真极大似然算子取得最大值。

### 3.3 模型仿真求解

鉴于正态分布的非偏态性质,适用于中性变量所对应的参数,即可正也可负的参数。除了业主工程经验跟项目管理

承包商类型两个常变量外,设置  $\beta_3$ ~ $\beta_{10}$  这 8 个待估参数的密度函数服从正态分布,运用多元统计分析软件 SAS 所提供的仿真算法,对 Mixed Logit 模型实施初步求解,假定方差  $\Omega=0$ ,计算结果列于表 3。

表 3 Mixed Logit 模型的初步仿真结果

Table 3 Preliminary simulation results of mixed logit model

参数	估量	误差	$t$ 值	$P_r >  t $	梯度
$\beta_1$	-7.1506	1.1314	-4.088	<0.0001	-7.04662E-3
$\beta_2$	-2.2365	1.1822	-1.131	0.2633	2.781598E-4
$\beta_3$ - $b$	-0.5683	0.1467	-3.989	<0.0001	-8.46856E-4
$\beta_3$ - $\Omega$	0.002896	1.2133	0.001	0.9982	0.80842
$\beta_4$ - $b$	-2.6138	1.2526	-2.098	369	0.068424
$\beta_4$ - $\Omega$	0.0606	3.6381	0.021	0.9866	0.098593
$\beta_5$ - $b$	-0.0752	0.0258	-2.919	0.0035	0.065912
$\beta_5$ - $\Omega$	0.0746	0.0248	2.989	0.0029	-7.88491E-5
$\beta_6$ - $b$	6.3861	1.1003	5.779	<0.0001	-4.18648E-3
$\beta_6$ - $\Omega$	0.0352	6.5322	0.011	0.9958	-0.04216
$\beta_7$ - $b$	5.6456	1.0918	5.168	<0.0001	-0.01368
$\beta_7$ - $\Omega$	0.1906	2.9336	0.061	0.9481	-0.04403
$\beta_8$ - $b$	0.0242	0.006231	3.849	0.0001	-0.02929
$\beta_8$ - $\Omega$	0.003248	0.0146	0.231	0.8212	0.018891
$\beta_9$ - $b$	1.3085	0.3244	4.029	<0.0001	-3.72082E-3
$\beta_9$ - $\Omega$	0.0584	2.7936	0.021	0.9833	0.017909
$\beta_{10}$ - $b$	-0.4052	0.1136	-3.556	0.0004	-9.91117E-3
$\beta_{10}$ - $\Omega$	0.0916	0.2258	0.089	0.9322	-1.87012E-5

根据表 3 所列的计算结果可以看出,业主技术力量  $\beta_3$ 、工程规模  $\beta_4$ 、合同的规范性  $\beta_6$ 、政府出台的新法律法规  $\beta_7$ 、业主管能力  $\beta_8$ 、工程技术难度  $\beta_9$ 、总承包商的项目估价  $\beta_{10}$  等参数所对应的  $\Omega$  的  $t$  值均不在原假设  $\Omega=0$  的拒绝域,因此接受原假设,即上述参数的方差应为 0,也就是说这些参数均为固定值。

对工程项目目标控制的系数参数  $\beta_5$  采用正态分布函数,其他参数均采用固定值,重新对基于可靠性的 Mixed Logit 模型进行求解,其结果列于表 4。

表 4 Mixed Logit 模型的第二次仿真结果

Table 4 The second simulation results of mixed logit model

参数	估量	误差	$t$ 值	$P_r >  t $	梯度
$\beta_1$	-7.1506	1.1132	-6.238	<0.0001	-0.00808
$\beta_2$	-2.2365	1.1875	-1.878	0.0596	-0.10942
$\beta_3$	-0.4592	0.1091	-4.209	<0.0001	0.010598
$\beta_4$	-3.5206	1.1071	-3.177	0.0016	0.102812
$\beta_5$ - $b$	-0.0592	0.0178	-3.299	0.0010	-0.03932
$\beta_5$ - $\Omega$	0.0611	0.0187	3.235	0.0014	-0.01302
$\beta_6$	5.7825	0.7616	7.588	<0.0001	-0.00127
$\beta_7$	5.0174	0.7122	7.048	<0.0001	0.012893
$\beta_8$	0.0238	0.005112	4.617	<0.0001	0.252958
$\beta_9$	0.9256	0.2601	3.556	0.0004	-0.00284
$\beta_{10}$	-5.4730	0.0896	-6.088	<0.0001	-0.00346

表4中,“估量”一栏为SAS软件计算得出的 $\beta_1 \sim \beta_{10}$ 的值,是进行模型计算的基础。 $P_i$ 代表可信度水平 probability,  $P_i > |t|$ 表示可信度超出 $t$ 检验值的程度,可反应预测结果的置信水平,如 $\beta_1$ 的 $P_i > |t|$ 的值为 $<0.0001$ ,即表示 $\beta_1$ 的可信度预测结果与 $t$ 检验值相差小于 $0.0001$ , $t$ 检验置信水平达到了 $1 - 0.0001 = 99.99\%$ 以上。由此可知,各参数的 $t$ 检验置信水平都达到了 $94\%$ 以上,且目标控制参数 $\beta_5$ 服从 $N(-0.0592, 0.0611^2)$ 的正态分布。在实际中,目标控制 $\beta_5$ 贯穿整个土木系统工程项目的全过程,成本、质量、进度3项指标随着控制协调能力的高低而变化,控制协调能力较高,则工期、成本、质量得到保证,目标控制的效益为正,即 $\beta_5$ 为正值,否则 $\beta_5$ 就有可能为反向的,即存在负值。因此,目标控制参数 $\beta_5$ 的正态分布与实际情况相符合。

### 3.4 预测结果

通过SAS软件的仿真计算,得到土木系统工程关键影响因素 $\beta_1 \sim \beta_{10}$ 的估量值,再将这些估量值代入所建立的Mixed Logit模型中,按照3.2节所述步骤进行计算,得出土木系统工程3种典型模式DBB、PMC、EPC的可靠性指标分别83.69%、76.03%和71.39%,表明DBB的可靠性最高。

按照离散选择模型的最大效用理论,项目 $n$ 在选择模式 $i$ 时,总是以效益最大化为基本准则,在DBB模式中,业主能够自主选择设计咨询方,再根据项目的特征采用投标方式选择工程承包商,相互独立的设计方和施工方相互监督,可使工程项目的质量得到保障。因此,DBB是一种能够使土木系统工程整体功能达到最优且具有较高可靠性的系统模式。

目前DBB已在海外被作为一种通用的土木系统工程模式而广泛应用于实际工程建设中<sup>[9,10]</sup>,国外实践对DBB可靠性的认可也与本文方法的预测结果是一致的。

## 4 结论

本文应用Mixed Logit模型对土木系统工程进行可靠性预测,是土木工程与系统工程相结合的一次创新性研究。在研究中,设计了内容全面的调查问卷,对土木系统工程可靠性的影响因素进行了大范围调查,并用SPSS软件对调查数据进行统计与信度分析,保证了原始数据的可信度。在分析选取关键影响因素的基础上建立了Mixed Logit模型,用多元

统计分析软件SAS进行仿真模拟,预测了土木系统工程3种典型模式的可靠性,表明DBB是一种具有较高可靠性的系统模式。本文的预测方法及结果,可为我国土木工程领域开展土木系统工程应用研究提供参考。

### 参考文献 (References)

- [1] 孙燕. 随机效应半参数Logit模型的惩罚似然估计研究[J]. 统计研究, 2013, 30(4): 10-15.  
Sun Yan. Statistical Research, 2013, 30(4): 10-15.
- [2] 蔚欣欣, 陆化普, 李悦. 考虑用户风险态度的不确定离散交通网络设计模型[J]. 北京工业大学学报, 2013, 39(6): 102-107.  
Wei Xinxin, Lu Huapu, Li Yue. Journal of Beijing University of Technology, 2013, 39(6): 102-107.
- [3] 陆化普, 李悦, 蔚欣欣. 供给与需求不确定的离散交通网络设计模型[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2012, 42(2): 27-32.  
Lu Huapu, Li Yue, Wei Xinxin. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2012, 42(2): 27-32.
- [4] Dogan D. Numerical optimization for mixed logit models and an application[R]. Atlanta, GA: Georgia Institute of Technology, 2008.
- [5] Canaviri J. A rand parameter logit model for modeling health care provider choice in Bolivia [R]. MPRA -paper -3263, Munich: Munich Personal RePEc Archive, 2007.
- [6] 徐兮, 张义. SPSS在拱桥轴线变形观测回归拟合中应用[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2007, 26(6): 64-66.  
Xu Xi, Zhang Yi. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science Edition, 2007, 26(6): 64-66.
- [7] 唐秋生, 马先婷, 叶建. 基于DHGF评价模型的物流园区风险管理研究[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2010, 29(5): 824-827.  
Tang Qiusheng, Ma Xianting, Ye Jian. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science Edition, 2010, 29(5): 824-827.
- [8] 许晟. 土木系统工程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.  
Xu Sheng. Civil systems engineering [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2006.
- [9] Peter B, Jacek D. The future of the Canadian oil stands: Engineering and project management advances [J]. Energy & Environment, 2011, 22 (5): 579-596.
- [10] Nancy M, Naomi J, Denise A, et al. Exploring project management continuing professional development in engineering construction [J]. Construction Management and Economics, 2012, 30(8): 639-651.

(责任编辑 韩星明)

### 《科技导报》“研究论文”栏目征稿

“研究论文”栏目专门发表自然科学、工程技术领域具有创新性的研究论文,要求学术价值显著、实验数据完整、具有原始性和创造性,同时应重点突出、文字精炼、引证及数据准确、图表清晰,并附中、英文摘要以及作者姓名、所在单位、通信地址、关键词等信息。在线投稿:www.kjdb.org。