

工程项目施工系统可靠性及计算方法研究

史玉芳^{1,2}, 李慧民¹, 陆 宁³

(1. 西安建筑科技大学土木学院, 陕西 西安 710055; 2. 西安科技大学管理学院, 陕西 西安 710054;

3. 长安大学建筑工程学院, 陕西 西安 710061)

摘 要:系统可靠性理论与方法是近年来系统工程与管理科学领域的一个研究热点,而工程项目管理领域的系统可靠性及其应用研究尚处于开始探索阶段.基于工程项目管理的目标体系,提出了工程项目施工系统可靠性的概念,界定其内涵为工程项目的质量可达性、成本经济性、资源均衡性、工期合理性和施工安全性的总和.根据工程项目施工系统组合性和层次性的特点,构建了施工系统可靠性计算的金字塔模型,运用不变化最小路集法计算工程项目施工系统的可靠性,并给出了系统可靠性计算的符号表达式.最后,工程实例验证了该方法的有效性.为工程项目施工系统可靠性理论与方法研究做了有益的尝试.

关键词:工程项目;施工系统;施工可靠性;不变化最小路集

中图分类号: TU721

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2011)01-0125-06

1 国内外研究现状综述及概念界定

1.1 系统可靠性及施工可靠性方面的研究现状

系统可靠性理论是本文研究的重要理论基础.可靠性是一门新兴的工程学科,产品的可靠性已成为衡量产品质量的重要指标之一.可靠性工程起源于军事领域,由于它给企业与社会带来了巨大的经济效益,在更广泛的领域里推广应用,主要涉及航空、航天、电子、机械及生产制造等领域.而在建筑领域,有关可靠性的研究和应用仅局限于建筑结构可靠性.1986年,美国洲际公路和交通官员联合会(AASHTO)在《AASHTO路面结构设计准则》中首次把可靠性概念引入基础设施管理领域.

目前,对施工管理领域可靠性的理论与应用研究还属于探索阶段.鉴于文献检索的有限性,截至目前为止,国内尚未见有准确地对工程项目施工系统可靠性的定义,文献[1]中提出了对施工可靠性的一些理解,本文将对这一概念及内涵进行界定.虽然施工可靠性一直未作为一个专门的概念提出,但与施工生产可靠性相关的一些工作,随着施工生产技术和管理工作而早为施工管理人员所关注,主要表现为工艺技术与施工方法的可靠性评判分析,是一种狭义的可靠性研究.分析国内外学者的研究,主要表现为在工程施工技术与组织管理中运用可靠性原理处理施工进度控制、质量控制、成本控制和安全管理等一些技术与管理的的问题上.20世纪80年代初期,前苏联学者C·A·乌沙茨基在其编著的《城市建设组织计划与管理》中提到可靠性指标是反映施工流水作业设计质量和功能的主要标志并对可靠度进行了分析计算^[2].网络计划技术中的PERT、GERT、QGERT、VERT这些方法,都运用了概率方法进行可靠性分析,见文献[3-4].

综上所述,可靠性工程及理论已经在很多领域推广应用,但基于系统可靠性技术的工程项目施工系统研究成果甚为少见.目前对于施工可靠性的研究,缺乏系统的定义,现有的具有施工可靠性意义上的研究,也仅仅局限于单个目标控制的可靠性分析,或是某个施工技术与管理方法的可靠性评价,在理论原理与分析方法上缺乏施工系统可靠性的系统研究与探讨.

既然可靠性是衡量系统性能和状况的重要指标之一,则可以用它来度量施工系统这一特定系统的

收稿日期:2010-03-12 修改稿日期:2010-12-29

基金项目:陕西省自然科学基金资助项目(2005E211)

作者简介:史玉芳(1980-),女,山东济南人,博士生,讲师,主要从事工程项目管理教学与科研工作.

运行状况. 工程项目施工系统与制造业生产系统二者本身就具有趋同性, 同样都具有复杂的生产流程, 最终都要求提供规定质量的产品. 基于这种启示, 将生产制造系统中常用的可靠性及管理理论应用于工程施工领域是值得尝试的一个研究方向. 因此, 以系统可靠性理论为基础, 基于施工可靠性这一新的视角, 对工程项目施工系统进行研究, 具有重要的理论与现实意义.

1.2 工程项目施工系统可靠性的内涵与界定?

产品的可靠性已成为衡量产品质量的重要指标之一. 根据国家标准规定, 产品可靠性的确切含义是“产品、系统在规定条件下和规定时间内完成规定功能的能力^[5]”. 可靠度是衡量系统可靠性大小的数量指标, 是指产品、系统在规定条件下和规定时间内完成规定功能的概率.

此处借鉴系统可靠性理论及管理思想, 结合 Harold Kerzner 对成功项目管理^[6]的定义, 界定了施工系统可靠性这一概念的含义, 是指工程项目施工生产过程中, 在规定的时间内, 在限定的费用条件下, 安全有效地实现规定的工程质量的能力. 该指标在此具有特定的内涵, 即工程项目的工期合理性、成本经济性、质量可达性和施工安全性的总和, 即为工程项目施工系统的可靠性, 简称为施工可靠性.

2 工程项目施工系统可靠性的研究框架

工程项目施工系统可靠性理论与方法研究, 属于较新的一个研究课题. 该课题的研究框内容大致分以下几个方面:

(1) 工程项目施工系统可靠性指标的内涵界定;

(2) 将工程项目施工过程划分为若干个工作单元(子系统), 基于概率论与数理统计、蒙特卡罗模拟及事故树分析法等理论, 从工作单元的工作时间、成本、质量及安全四个方面进行综合考虑, 测定各工作单元(子系统)的施工可靠性;

(3) 基于网络系统可靠性计算原理和方法, 计算整个施工网络系统的可靠性;

(4) 制定工程项目施工系统可靠性的评价标准;

(5) 开展工程项目施工系统可靠性的优化研究.

本文主要涉及(1)、(3)两个方面, 也即在各工作单元(子系统)的施工可靠性测定完毕的前提下, 研究整个施工系统可靠性如何计算问题. 关于工程项目施工系统各工作单元施工可靠性的测定、系统可靠性的判别标准及可靠性优化等内容, 限于篇幅, 此处不展开研究.

3 工程项目施工系统可靠性的计算

3.1 计算思路

根据施工系统的组合性和层次性特点, 计算整个系统的可靠性首先要确定组成网络系统的各级子系统的施工可靠性. 因此, 施工系统的可靠性可采用金字塔式模型计算. 基于系统工程思想, 对工程项目施工系统进行分解, 可得到施工系统可靠性计算的金字塔模型^[7], 如图 1 所示.

这样下一级子系统的可靠性数据向上一级折合, 再把折合信息与上一级信息综合, 进行各级子系统可靠性的定量计算. 由此可见, 工程项目施工系统可靠性的计算思路为: 从塔底工序的可靠性开始计算, 逐级往上, 最后得到整个施工系统的可靠性. 计算步骤如下:

(1) 确定最底层也即施工工序的可靠性. 组成网络系统的各级子系统级别愈低, 可靠性数据越容易得到, 而且得到的数据将越精确. 工序可靠性的测定方法见文献^[8].

(2) 根据各工序在所属分项或分部工程中的逻辑关系, 确定分项或分部子系统的可靠性计算表达式, 在给定工序可靠性的情况下即可求出该分部或分项子系统的可靠性.

(3) 按以上方法自下而上逐级折合和综合, 直到得到整个施工系统的可靠性.

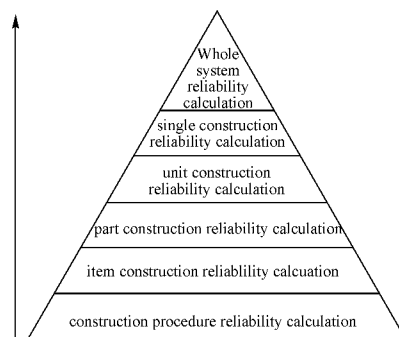


图 1 施工系统可靠度计算的金字塔模型

Fig. 1 Pyramid model for calculating the construction system reliability

3.2 工程项目施工系统可靠性的计算方法

关于网络系统可靠性的计算,国内外学者已经进行了不少研究,并且提出了许多计算途径,大体上可以分为真值表法、全概率分解法、蒙特卡诺图法、最小路集、最小割集法等^[9].对于大型复杂网络系统,基于最小路集和最小割集的方法计算十分有效,目前应用也最广.本文采用不交化最小路集法求解施工系统的可靠性.该方法分两个步骤:(1)求出网络系统的最小路集;(2)将最小路集不交化,进而得出网络系统可靠性的计算表达式.

3.2.1 用邻接矩阵法求解系统最小路集

邻接矩阵法是求解复杂网络系统最小路集的一种适宜的计算机算法.方法原理如下:
给定一个有 n 个节点的网络 G (有向,无向或混合型),设 C 为 G 的关联矩阵, $C = [c_{ij}]$, $1 \leq i \leq n$, $1 \leq j \leq n$,其中:

$$c_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{若节点 } i, j \text{ 之间无弧直接相连} \\ x & \text{若节点 } i, j \text{ 之间有弧 } x \text{ 直接相连} \end{cases}$$

且当 $i = j$ 时, $c_{ij} = 0$.

定义 $C^r = [c_{ij}^{(r)}]$, $r = 2, \dots, n-1$,其中 $c_{ij}^{(r)} = \sum_{k=1}^n c_{ik} \cdot c_{kj}^{(r-1)}$, $c_{ij}^{(r)}$ 表示从点 i 到点 j 的长度为 r 的最小路的全体.

在网络 G 中,任意两节点之间最小路的最大长度 $\leq n-1$.所以对关联矩阵 C 而言,若 $r \geq n$,必有 $C^r = 0$.因此,可以得到任意两节点 i, j 之间的最小路的全体为:

$$L_S = \bigcup_{r=1}^{n-1} c_{ij}^{(r)} \quad (c_{ij}^{(1)} = c_{ij}) \tag{1}$$

式中 L_S 表示系统的最小路集.

在工程项目施工系统中,只需求出网络图 G 中输入节点(编号为 1)到输出节点(编号为 n)的所有最小路集.因此,从输入节点到输出节点的最小路集的全体可写成:

$$L_S = \bigcup_{r=1}^{n-1} c_{1n}^{(r)} \quad (c_{1n}^{(1)} = c_{1n}) \tag{2}$$

这样,只要通过多次乘法就可求得最小路集的全体.

3.2.2 改进 BDD 算法将最小路集不交化,得出系统可靠性计算的符号表达式

1)BDD 的基本概念

BDD(Binary Decision Diagram)是 BDP(Binary Decision Program)的图形化表示,它采用二叉树形式表示一个布尔逻辑函数^[10],是有向的、节点具有标号的二叉树 (V, N) ,其中 V 为节点集, N 为标号集. BDD 是一个有根节点的有序二叉树,每个分枝代表节点变量的一次取值(左枝取 1,右枝取 0).从根节点出发到叶节点的每条路都表示布尔函数中各变量的一次赋值.最后不交化的最小路集为从根节点到叶节点为 1 的所有路径.

2)BDD 算法求网络系统可靠性的步骤

(1) 获得系统的逻辑结构函数.

设系统共有 m 条最小路集 (L_1, L_2, \dots, L_m) ,系统逻辑结构函数为 $f = \sum_{i=1}^m L_i$.

(2) 将 f 用 BDD 表示.为了减小 BDD 的子树数目,对 BDD 的生成顺序提出如下方法^[11]:

- ① 定义 f 中各变量 x_i 的长度 $L(x_i)$ 为布尔函数式中包含该变量的各项的弧数的最小值.
- ② 任取 $L(x_i)$ 最小的变量进行 BDD 的 1-0 分枝(即对该变量赋值).当有多个 $L(x_i)$ 相等时,取在 f 的项中出现次数最多的变量 x_i 进行 BDD 分枝;若出现次数相等时,则任取一变量.

(3) 在 BDD 上搜索从根节点到叶节点为 1 的路径,即可得 f 的不交化最小路集 $\{NL_1, NL_2, \dots, NL_d\}$.

(4) 网络系统的可靠性可用下面的概率和公式直接进行计算

$$R_S = \text{Prob}(f = 1) = \sum_{i=1}^d \text{Prob}(NL_i) \tag{3}$$

3) 改进的不变化算法

对最小路集不变化运算时分两部分进行,先选出长度为 $n-1$ 的最小路集全体,将它们分别化为不交和.具体做法是:对于 $L_{r+1}, L_{r+2}, \dots, L_m$ 这些长度为 $n-1$ 的最小路集,在保持原有的弧不变外,网络图的所有弧中没有包括在该条最小路内的 $t-n+1$ 条弧取逆加入,这样就完成了长度为 $n-1$ 的每条最小路集的不变化处理.其余长度小于 $n-1$ 的最小路集,采用 BDD 算法化为不交和.这样改进了以往将全部最小路集用 BDD 不变化的方法,简化了不变化运算量.

3.3 算法编程实现

该算法可通过编制计算机程序实现,程序框图如图 2 所示.

程序采用 C++ 语言,由 11 个子程序构成.在邻接矩阵乘法运算时,为了简化计算,只需用原来的关联矩阵和每次乘出的矩阵的最后一列相乘,极大的减少了运算量,节省了内存,提高了运算速度.在进行复杂网络系统可靠性的不变化最小路集计算之前,为简化计算量,把最小路集按路长由小到大升序排列.在编程过程中采用动态内存分配,每个模块完成相应运算功能后立即释放内存,以便节省内存、提高运算速度.整个程序实现过程直观且简便,程序运行结果可提供网络系统的节点数、子系统数、关联矩阵、全部最小路集、不变化最小路集、网络系统可靠性符号表达式及系统总的可靠性.

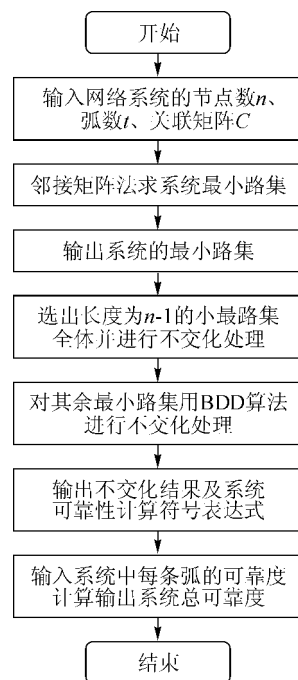


图 2 系统可靠性算法程序框图

Fig. 2 Calculation program for system reliability

4 工程应用示例

4.1 工程背景资料

已知某建筑工程项目由 13 项分部分项工程组成.为简化计算,分部分项工程为整个施工系统的一个子系统,用 x_i 表示.其施工网络计划如图 3 所示.

图 3 中各子系统表示的工程内容见表 1 所示.按文献 [8] 中方法事先测定了各子系统的可靠性,见表 1.

4.2 用邻接矩阵法求施工系统的最小路集

该例的关联矩阵为:

$$C = \begin{bmatrix} 0 & x_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & x_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & x_{12} & x_9 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & x_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_4 & 0 & 0 & x_{11} & x_{10} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x_5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x_6 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x_7 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x_8 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x_{13} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

用邻接矩阵法求得该系统的最小路集共有 5 条:

$$L_S = \{x_1 x_9 x_{13}, x_1 x_8 x_{12} x_{13}, x_1 x_2 x_3 x_{10} x_{13}, x_1 x_2 x_3 x_8 x_{11} x_{13}, x_1 x_2 x_3 x_4 x_5 x_6 x_7 x_8 x_{13}\}$$

4.3 求不变化最小路集并得出系统可靠性计算的符号表达式

根据前述不变化运算方法对已求得的最小路集进行不变化,生成的 BDD 如图 4 所示.

在图 4 中搜索从根节点到叶节点为 1 的路径,得到不变化后的最小路集为:

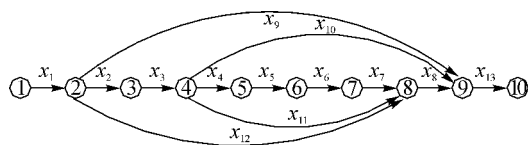


图 3 某工程项目施工网络计划图

Fig. 3 An example of construction network

表 1 分部分项工程子系统的可靠性

Tab. 1 Subsystem Reliability

Subsystem	Work name	$R(x_i)$
x_1	Earth work	0.92
x_2	Foundation	0.81
x_3	Main project	0.82
x_4	Install door & window	0.95
x_5	Plaster of inner wall	0.81
x_6	Floor project	0.82
x_7	Install door & window leaf	0.73
x_8	Painting	0.91
x_9	Install pipeline	0.75
x_{10}	Roof project	0.87
x_{11}	Plaster of external wall	0.79
x_{12}	Build and remove scaffold	0.85
x_{13}	Completion approval	0.89

$$f = x_1 x_9 x_{13} + x_1 x_8 \bar{x}_9 x_{12} x_{13} + x_1 x_2 x_3 \bar{x}_8 \bar{x}_9$$
$$x_{10} x_{13} + x_1 x_2 x_3 x_8 \bar{x}_9 x_{10} \bar{x}_1 2 x_{13} + x_1 x_2$$
$$x_3 x_8 \bar{x}_9 \bar{x}_{10} x_{11} \bar{x}_{12} x_{13} + x_1 x_2 x_3 x_4 x_5 x_6$$
$$x_7 x_8 \bar{x}_9 \bar{x}_{10} \bar{x}_{11} \bar{x}_{12} \bar{x}_{13}$$

整个施工系统的可靠度 R_s 的计算符号表达式为：

$$R_s = R(x_1) \times R(x_9) \times R(x_{13}) + R(x_1) \times R(x_8) \times [1 - R(x_9)] \times R(x_{12}) \times R(x_{13}) + R(x_1) \times R(x_2) \times$$
$$R(x_3) \times [1 - R(x_8)] \times [1 - R(x_9)] \times R(x_{10}) \times R(x_{13}) + R(x_1) \times R(x_2) \times R(x_3) \times R(x_8) \times [1 - R(x_9)] \times R(x_{10}) \times [1 - R(x_{12})] \times R(x_{13}) + R(x_1) \times R(x_2) \times R(x_3) \times R(x_8) \times [1 - R(x_9)] \times [1 - R(x_{10})] \times R(x_{11}) \times [1 - R(x_{12})] \times R(x_{13}) + R(x_1) \times R(x_2) \times R(x_3) \times R(x_4) \times R(x_5) \times R(x_6) \times R(x_7) \times R(x_8) \times [1 - R(x_9)] \times [1 - R(x_{10})] \times [1 - R(x_{11})] \times [1 - R(x_{12})] \times R(x_{13})$$

将表 1 中各子系统的可靠度带入以上符号表达式,计算得系统可靠度 $R_s=0.8014$.

5 结 论

本文基于系统可靠性理论,将施工系统可靠性引入工程项目管理中,对工程项目施工系统可靠性理论和方法开展了探索性和创新性的研究,主要取得以下几点结论：

- (1)界定了工程项目施工系统可靠性的概念,其含义是指工程项目的质量可达性、成本经济性、资源均衡性、工期合理性和施工安全性的总和。
- (2)在分析工程项目施工系统组合性和层次性的基础上,构建了施工系统可靠性计算的金字塔模型。
- (3)根据网络系统可靠性原理,建立了施工系统可靠性计算的算法模型,运用邻接矩阵法求解网络系统的最小路集,改进了最小路集的不变化算法并通过编程实现. 算法改进主要体现在不变化时将长度为 $n-1$ 最小路集按照不变化原理直接获得不变化结果. 而以往的 BDD 算法是将系统所有的最小路集都按 BDD 进行分枝运算. 与同类算法相比,改进的算法有较小的分枝树及可靠性表达式中有较少的项。
- (4)工程实例应用验证了该方法的有效性,为工程项目施工系统可靠性理论与方法研究做了有益的尝试,为后续开展基于系统可靠性的施工目标优化研究提供了基础。

参考文献 References

[1] 邓铁军. 结构工程施工系统可靠性理论方法及其应用的研究[D]. 长沙:湖南大学, 2007:4-7.

DENG Tie-jun. Research on theory and method of reliability in structural engineering construction system[D].

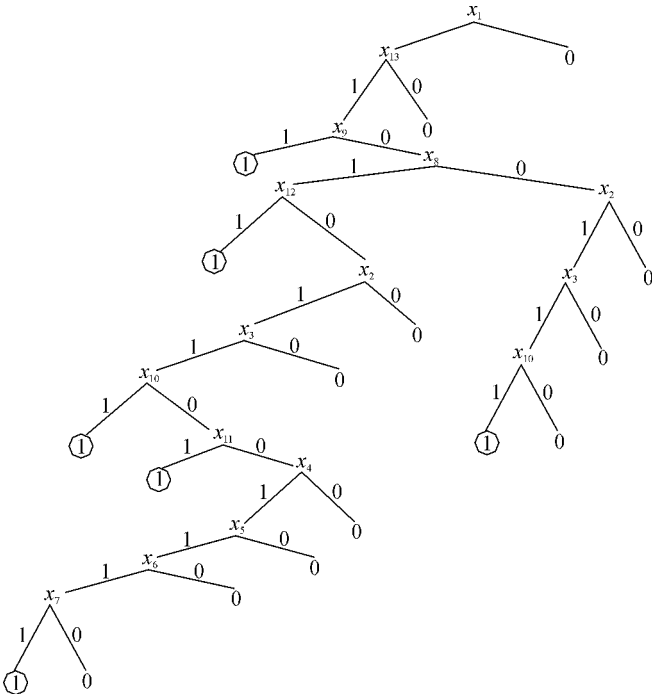


图 4 不变化运算的 BDD 结果
Fig. 4 Binary decision diagram

- Changsha: Hunan university, 2007:4-7.
- [2] (苏)C. A. 乌沙茨基, 刘统畏. 城市建设组织计划与管理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1988:45-62.
WUTZKI C A, LIU Tong-wei. Urban construction planning and management[M]. Beijing: China Construction Industry Press, 1988:45-62.
- [3] 中国建筑学会. 工程网络计划技术规程教程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000:3-15.
Chinese Architectural Society. Course of network planning technique[M]. Beijing: China Construction Industry Press, 2000:3-15.
- [4] KERNER H. Project management: A systems approach to planning, scheduling and controlling[M]. New York: John Wiley & Son, Inc. Press, 2006:417-451.
- [5] 梅启智, 廖炯生, 孙惠中. 系统可靠性工程基础[M]. 北京: 科学出版社, 1992:76-87.
MEI Qi-zhi, LIAO Jiong-sheng, SUN Hui-zhong. Engineering foundation of system reliability[M]. Beijing: China Science Press, 1992:76-87.
- [6] 杰弗里 K. 宾图. 项目管理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009:1-5.
JEFFREY K P. Project management achieving competitive advantage[M]. Beijing: China Machine Press, 2009:1-5.
- [7] STWART M G. Role of load history in reliability - based decision analysis of ageing bridges[J]. Journal of Structures Engineering, ASCE, 1999, 125(7):776-783.
- [8] 陆 宁, 史玉芳. 施工工序子系统可靠性的确定方法研究[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2006, 38(3): 311-315.
LU Ning, SHI Yu-fang. Calculation method of construction working procedure[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech.: Natural Science Edition, 2006, 38(3):311-315.
- [9] 曹晋华, 李 伟, 刘 斌. 可靠性理论、方法及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1994:98-102.
CAO Jin-hua, LI Wei, LIU Bin. Reliability theory, method & application[M]. Beijing: China Machine Press, 1994: 98-102.
- [10] 李东魁. 网络系统可靠度的 BDD 算法[J]. 通信技术, 2009, 42(11):149-150.
LI Dong-kui. New algorithm for computing network system reliability[J]. Communications Technology, 2009, 42(11):149-150.
- [11] 武小悦, 沙基昌. 网络系统可靠度的 BDD 算法[J]. 系统工程与电子技术, 1999, 21(7): 72-73.
WU Xiao-yue, SHA Ji-chang. A BDD algorithm for network reliability[J]. Systems Engineering and Electronics, 1999, 21(7): 72-73.

Research on construction system reliability of construction project and its calculation method

SHI Yu-fang^{1,2}, LI Hui-min¹, LU Ning³

(1. School of Civil Eng., Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China; 2. School of Management, Xi'an Univ. of Sin & Tech., Xi'an 710054, China; 3. School of Civil Eng., Chang'an Univ., Xi'an 710061, China)

Abstract: System reliability theory is becoming a focus of international management science and system engineering research, though specific studies are still at a starting stage in the field of construction project management. According to objective system of engineering project, the connotation of construction system reliability is defined that it is the sum of quality attainability, cost economies, resource equilibrium, working time credibility and construction safety of engineering project. Based on the hierarchy and composability of project construction system, a pyramid model is built. Based on the principle of network reliability, a method of disjointed minimal paths set is proposed and the symbol expression formula is given to calculate construction system reliability. This method proved efficient and accurate by an example and it's a useful try on theory and method research of engineering project system reliability.

Key words: engineering project; construction system; construction reliability; disjointed minimal paths set