

大型工程项目施工系统可靠性评估

杨莉琼^{1,2},李世蓉¹,徐波¹

(1. 重庆大学 建设管理与房地产学院,重庆 400044,2. 西南科技大学 土木学院,四川 绵阳 621010)

摘要:施工系统的可靠性评估有助于减少项目风险、优化工程目标。文章综合考虑项目质量、成本、时间和安全目标,提出基于有序二元决策图(OBDD)的施工系统可靠性评估方法。该方法便于计算机实现,具有很高的计算效率,适合大型工程项目。最后,通过算例演示了施工系统可靠性的评估过程,并验证了该方法。

关键词:大型工程项目;施工系统;可靠性评估;OBDD

中图分类号:TU723 文献标志码:A 文章编号:1008-5831(2012)05-0064-06

可靠性是产品在规定条件下正确完成其功能的概率,是衡量产品质量的重要指标。产品的设计和制造过程中,忽略可靠性不仅会影响质量目标的实现,而且会造成经济损失^[1]。在建筑工程领域,传统的可靠性研究主要分析结构可靠性,即建筑结构在使用年限、正常施工和使用条件下完成预定功能的能力^[2]。大多数学者通过研究结构可靠性来分析和控制施工期的结构性能,从而把建筑产品的质量控制在规定的可靠度之上^[2-6]。近年来,综合考虑质量、成本、时间和安全等目标的施工系统可靠性正被越来越多的学者重视^[5-8]。对于三峡工程、西气东输等大型工程项目,除了建筑质量上的可靠性外,项目管理人员还应从成本、时间和安全等方面考虑整个项目的可靠性,优化施工目标。现有的施工系统可靠性研究成果并不多,主流方法是把施工系统抽象成施工网络,通过分析网络可靠性来评估施工系统。具体的成果有应用最小割集/路集、因子分解法分析施工系统可靠性,但只适用于小规模工程项目^[5-10]。对于大型项目,寻找高效的施工系统可靠性评估方法已成为重要研究课题。

笔者提出了一种基于有序二元决策图(OBDD)的施工系统可靠性评估方法。该方法将大型工程项目的施工系统抽象为随机网络,然后为网络创建OBDD结构,高效分析系统可靠性。OBDD方法便于计算机编程实现,其高效的计算和存储方式极大地改善了施工系统可靠性的评估效率,适合评估大型工程项目。

一、基于OBDD的施工系统可靠性评估

(一) 符号

A 为施工系统; $REL(A)$ 为施工系统的可靠性; G 为某施工网络; G ; $OBDD(G)$ 为施工网络 G 的 OBDD 构造函数; $RELO(OBDD(r))$ 为 OBDD 结构 r 的可靠

收稿日期:2011-06-26

基金项目:重庆市建委科研项目“重庆市民用建筑节能监管体系研究”(城科字 2009 第 23 号)

作者简介:杨莉琼(1980-),女,甘肃张掖人,西南科技大学土木学院讲师,重庆大学建设管理与房地产学院博士研究生,主要从事建筑工程管理、建筑业可持续发展研究。

度函数。

(二) 施工系统可靠性

工程项目的施工系统是由质量、成本、时间和安全等构成的多目标系统^[5]。笔者研究的施工系统可靠性是指施工过程实现其目标体系的概率,可以描述为:

REL(A) = f_g(Q, S, T, C) (1)

式中,REL(A)为施工系统可靠性,f_g为可靠度函数,Q为质量目标实现概率,S为安全目标实现概率,T为时间目标实现概率,C为成本目标实现概率。施工系统按照项目组成可以分解为若干子系统,例如某装饰工程的施工系统如图1所示,包括6个子系统(分部工程):内墙抹灰工程、门窗玻璃安装及油漆工程、内墙装饰工程、地面工程、灯具安装工程和场地清理工程。

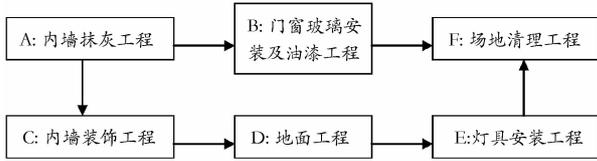


图1 某装饰工程的施工系统关系图

(三) 基于 OBDD 的施工系统可靠性评估方法

基于 OBDD 的施工系统可靠性评估方法包括如下三个步骤。

首先,确定子系统的可靠性。施工子系统的可靠性是子系统实现其施工目标的概率,任何一个目标都会影响整个子系统的顺利实现,故而在分别确定了四大目标各自可靠性的基础上,可以把整个系统视为一个由四大目标串联起来的系统模型(图2)^[7]。



图2 串联结构系统模型

施工子系统的可靠性可以描述为:

REL(A_i) = f_i(q_i, s_i, t_i, c_i) = q_i × s_i × t_i × c_i (2)

式中,REL(A_i)为第i个子系统的可靠性,f_i为第i个子系统的可靠性函数,q_i为第i个子系统的质量目标实现概率,s_i为第i个子系统的安全目标实现概率,t_i为第i个子系统的时间目标实现概率,c_i为第i个子系统的成本目标实现概率。公式(2)中的参数可采用概率分析法得到,例如采用理论概率分

布法计算混凝土施工质量目标实现概率;采用承包商完成某类施工过程的工期历史数据来分析未施工项目的目标实现概率^[4]。

其次,根据施工系统关系图抽象出施工网络。具体方法比较简单:有向边表示子系统,边的起点表示施工开始,边的终点表示施工结束。例如,依据图1所示的施工系统关系图可得到图3的施工网络。图中,e_1到e_6依次对应着子系统A、B、C、D、E、F,结点1(第一条边的起点)是该网络的源点,结点6(最后一条边的终点)是该网络的终点。

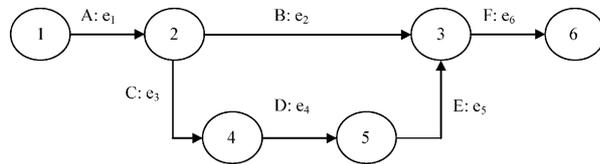


图3 某装饰工程的施工网络

最后,根据施工网络评估施工系统可靠性。施工网络的边对应着施工子系统,其可靠性可由公式(2)算出。这样,施工网络就成为由结点和边组成的随机网络。该网络的结点可靠而边不可靠,边的可靠性就是其对应的子系统可靠性。因此,可用分析一般网络可靠性的方法来评估施工系统可靠性,分析得到的随机网络可靠性就是施工网络可靠性,即施工系统可靠性。

笔者引入 OBDD 方法计算施工网络可靠度,此法便于计算机编程实现,能够高效解决复杂施工网络的可靠度计算问题。采用该方法时,必须先用一个布尔函数表示网络结构,然后根据布尔函数来计算网络可靠度。有些文献把这个布尔函数称为可靠度布尔函数,可用二叉决策图(BDD)来表示^[11-15]。图4是布尔函数f(x,y,z,w)的BDD表示形式,这是一种高效的存储结构,能很好地减少冗余计算^[12-13]。在BDD结构中,圈结点表示布尔变量,矩形表示逻辑真(bddtrue)或假(bddfals)。每一个圈结点向下发出两条边,沿实线边得到该结点取1时(变量取真值)的下一级BDD,沿虚线边得到该结点取0时(变量取假值)的下一级BDD。BDD的结点数主要依赖于变量排序,按确定的变量顺序创建BDD,就得到了OBDD。BFS(广度优先搜索)是一个比较有效的OBDD排序原则,笔者也选择该排序

原则^[11-13]。

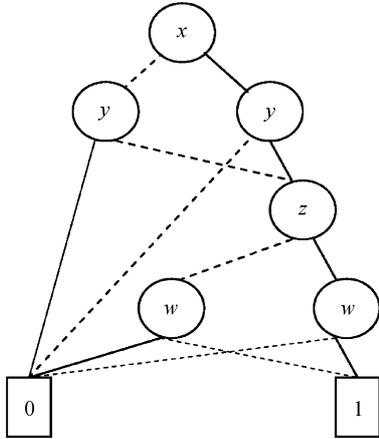


图4 OBDD 示例

(四) 利用施工网络的 OBDD 结构计算可靠度

由上述分析可知:施工网络是由可靠结点和不可靠边组成的随机网络,网络源点是第一条边的起点(第一个子系统的施工开始点),终点是最后一条边的终点(最后一个子系统的施工结束点),网络中边保持可靠的概率就是其对应子系统的可靠性。那么,可按如下两个阶段评估施工网络可靠性:首先执行 EED(边扩张图)^[12]操作创建表示施工网络可靠度布尔函数的 OBDD 结构;然后遍历 OBDD 计算网络可靠度。为施工网络创建 OBDD 的详细步骤如下。

步骤一,如果施工网络的源点和终点合并为一个结点,返回逻辑真。

步骤二,如果收缩子系统对应边得到的网络存在多余结点和边,则删除这些点和边来减少无效计算。否则,直接执行下一步。

步骤三,对于源点的每条邻接边 e :(1) 执行边扩张操作,得到子网 G_{*e} ,包括收缩 e 边,把源点并入 e 的另一个端点形成新源点,删除源点的其他邻接边;(2) 转“步骤一”去构造该子网的 OBDD,返回结果 $OBDD(G_{*e})$;(3) 依次执行 OBDD 逻辑运算,组成 OBDD 结构。

步骤四,返回网络的 OBDD 结构。

上述步骤返回 OBDD 结构后,可以通过遍历 OBDD 结构计算网络可靠度,用递归公式可描述为:

$$REL_o(OBDD(G)) = \begin{cases} 1.0, & \text{如果 } OBDD(G) = bddtrue \\ 0.0, & \text{如果 } OBDD(G) = bddfalse \\ \Pr(x_k = 1) \times REL_o(OBDD(G) |_{x_k=1}) + \\ \Pr(x_k = 0) \times REL_o(OBDD(G) |_{x_k=0}), & \\ 0 \leq k < n, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

其中, $OBDD(G) |_{x_k=1}$ 是 $x_k = 1$ (边 e_k 可靠) 的 OBDD, $OBDD(G) |_{x_k=0}$ 是 $x_k = 0$ (边 e_k 不可靠) 的 OBDD, $\Pr(x_k = 1)$ 是边 e_k 可靠的概率(对应子系统的可靠性), $\Pr(x_k = 0)$ 是边 e_k 不可靠的概率(取 $1 - \Pr(x_k = 1)$ 得到的概率值), $bddtrue$ 和 $bddfalse$ 分别表示 OBDD 结构中的逻辑真和逻辑假, k 的初始值为 0。

(五) 算例分析

下文以图 1 所示某装修工程的施工系统为例描述上述方法,已知各子系统的可靠性(表 1),该施工系统的施工网络如图 3,剩下的工作就是利用施工网络的 OBDD 计算可靠度数值。具体步骤如下。

首先,收缩网络创建施工网络的 OBDD 结构。

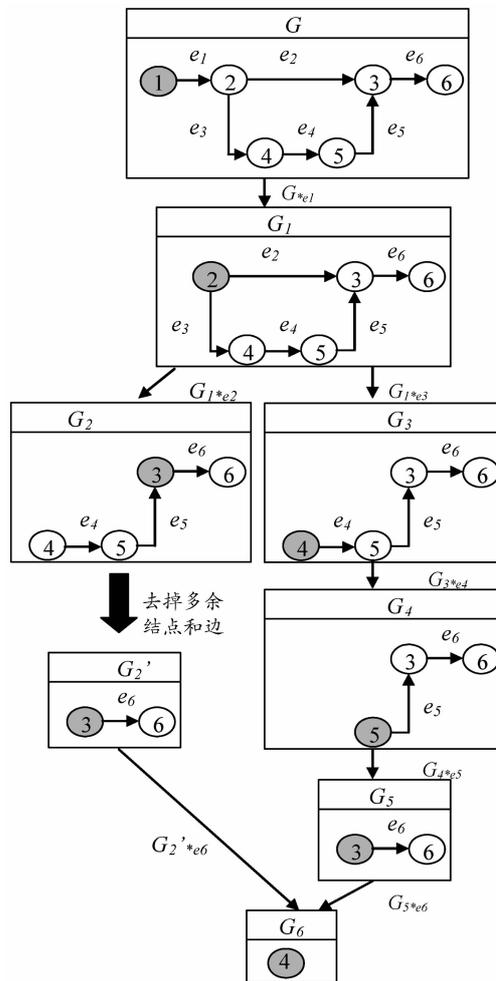


图5 网络收缩过程

执行 EED 方法收缩施工网络的过程见图 5,其中 e_i 表示第 i 个子系统。图 5 中, G 是施工网络初始结构,源点和终点分别为 1 号和 6 号结点,且阴影圆圈表示了源点。收缩网络 G 的 e_1 边得到 G_{*e_1} ,用 G_1 表示。对于网络 G_1 ,收缩 e_2 边得到 G_{1*e_2} ,用 G_2 表示;收缩 e_3 边得到 G_{1*e_3} ,用 G_3 表示。 G_2 中,4 和 5 号结点以及 e_4 和 e_5 是多余结点和边,删除这些点和边可以减少计算量,从而得到结构更简单的网络 G_2' 。而收缩网络 G_2' 的 e_6 边得到 $G_2'_{*e_6}$,用 G_6 表示。其实,网络 G_6 中,源点和终点已经合并为一个结点,无须进一步收缩。对于网络 G_3 ,收缩 e_4 边得到 G_{3*e_4} ,得到 G_4 。而对于网络 G_4 ,收缩 e_5 边得到 G_{4*e_5} ,得到 G_5 。最后,收缩 G_5 的 e_6 边得到 G_{5*e_6} ,即 G_6 。至此,网络收缩过程结束。

其次,遍历 OBDD 计算施工网络可靠度。

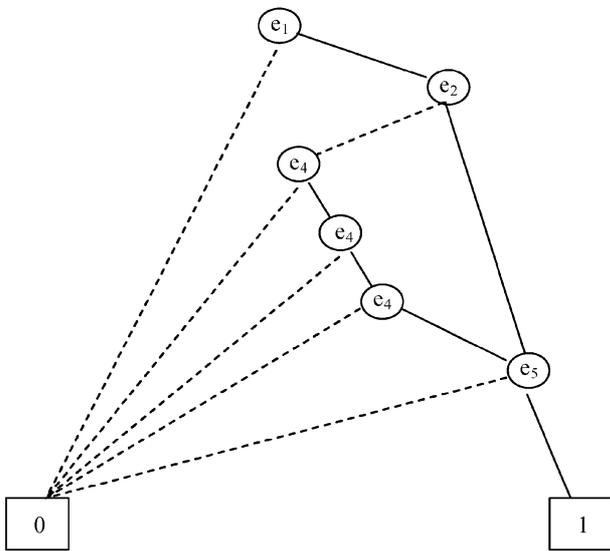


图 6 示例网络的 OBDD 结构

图 6 是上述收缩过程中执行 OBDD 逻辑运算生成的 OBDD 结构。施工网络的 6 条边对应该图的 6 个结点(OBDD 布尔变量),执行公式(3)对应的算法遍历图 6 的 OBDD 结构即可算出此施工网络的可靠度。图中布尔变量对应施工网络子系统,可利用表 1 列出子系统可靠度算出该施工网络可靠度值为 0.877 8。这与利用串并网络结构手工推算出的可靠度数值完全一致,该结果表明此工程的施工系统可靠性为 0.877 8。

表 1 施工子系统及施工网络可靠度

子系统	e_1	e_2	e_3	e_4	e_5	e_6
子系统可靠度	0.91	0.92	0.93	0.96	0.90	0.98
施工网络可靠度	0.877 8					

二、方法验证

为验证该方法的准确性,笔者选择了两个施工系统:施工系统一来自于文献[5],其子系统可靠性和施工系统可靠性数值(取值 0.816 3)均在文献中发表;施工系统二来自于某大型项目的文档,用传统的因子分解算法得到其可靠性数值为 0.835 1。

(一)施工系统一

某单层工业厂房施工系统可以分解为 12 项分部工程(子系统),施工网络如图 7 所示(此网络来源于文献[5]其中每项分部工程的可靠度采用熵权法得到)。笔者利用计算机程序实现了 OBDD 方法,计算出的可靠性数值(表 2)与文献[5]最小割集法得到的数值一致,而且历时不到 1 秒。

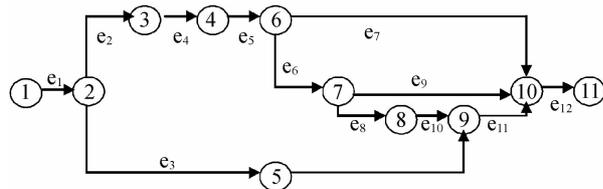


图 7 某单层工业厂房施工网络

表 2 示例网络子系统及网络可靠度

子系统	e_1	e_2	e_3	e_4	e_5	e_6
子系统可靠度	0.91	0.95	0.93	0.92	0.96	0.94
子系统	e_7	e_8	e_9	e_{10}	e_{11}	e_{12}
子系统可靠度	0.94	0.91	0.95	0.93	0.92	0.96
施工网络可靠度	0.816 3, 时间低于 1 秒					

(二)施工系统二

某超高层综合楼施工系统,由主塔楼和裙楼两部分组成,可以分解为 36 项分部工程(子系统),施

工网络如图8所示,有28个节点和36条边。假设每个子系统的可靠度都为0.9,采用计算机编程实现的OBDD方法得到施工系统可靠性为0.8351,这与因子分解法得到的数值完全一致,但计算时间不到1秒。

三、结论

工程项目施工系统可靠性的评估有助于项目

目标系统的优化实现。项目的施工过程由若干工作组成,这些工作按照一定的先后顺序组成一个有向的网络系统。计算施工系统可靠性的传统方法大多采用手工计算,效率很低,而且只适合小型施工系统。笔者采用OBDD描述大型工程项目的施工网络,高效地分析了网络可靠性,具有较高的计算效率。

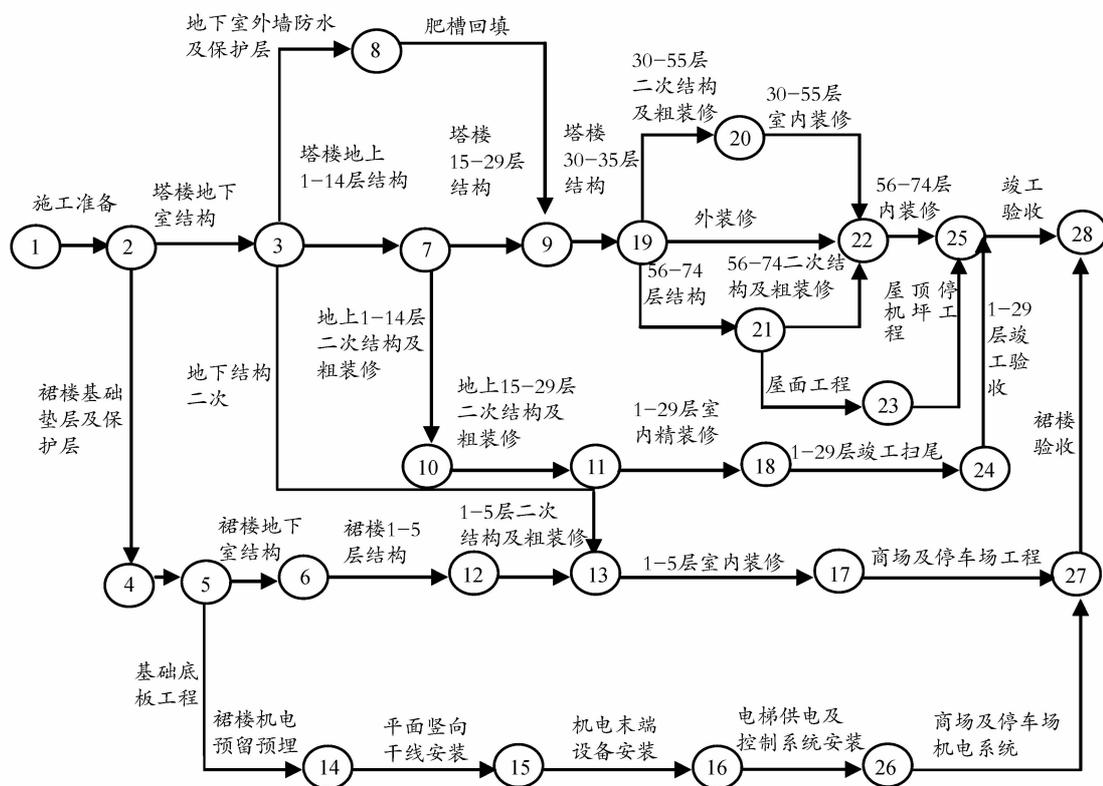


图8 某超高层综合楼施工网络

参考文献:

- [1] 宋保维. 系统可靠性设计与分析[M]. 西安:西北工业大学出版社,1998.
- [2] 金伟良,宋志刚,赵羽习. 工程结构全寿命可靠性与灾害作用下的安全性[J]. 浙江大学学报:工学版,2006,40(11):1862-1867.
- [3] 周继忠. 灰色关联故障树分析法在基坑工程放坡开挖中应用[J]. 土木工程学报,2009(8):109-112.
- [4] 巴松涛. 钢筋混凝土结构施工期质量的可靠性控制[J]. 施工技术,2000(11):34-35.
- [5] 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.
- [6] 邓铁军. 施工方案评审的可靠性分析方法[J]. 湖南大学学报:自然科学版,2001,28(1):88-92.
- [7] 陆宁. 大型施工项目管理可靠性综合控制的构架研究[J]. 重庆建筑大学学报,2007,29(2):132-134.
- [8] 晏永刚. 大型工程项目系统复杂性分析与复杂性管理[J]. 科技管理研究,2009(9):303-305.
- [9] BALL M. Computational complexity of network reliability analysis: an overview IEEE Trans [J]. Reliability, 1986, 35(8):230-239.
- [10] BALL M O, MAGNANTI T L, MONMA C L, NEMHAUSER G L. Hand books in operations research and management science, network models [M]. Amsterdam Lausanne, New York: Elsevier,1995.
- [11] LIN Y K. Two-commodity reliability evaluation of a stochastic-flow network with varying capacity weight in terms of minimal paths [J]. Computers & Operations Research,

- 2009,36(1):1050-1063.
- [12] KUO S Y, LU S K, YEH F M. Determining terminal-pair reliability based on edge expansion diagrams using OBDD [J]. IEEE Transactions on Reliability, 1999,48(3):234-246.
- [13] XING L. An efficient binary-decision diagram-based approach for network reliability and sensitivity analysis [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans, 2008,38(6):105-115.
- [14] SHRESTHA A, XING L. A logarithmic binary decision diagram-based method for multistate system analysis [J]. IEEE Transactions on Reliability, 2008,57(4):595-606.
- [15] 郭汉丁. 建设工程质量竣工备案评价机制探讨 [J]. 重庆大学学报:社会科学版, 2006,12(2):48-52.

Reliability Evaluation of Construction System for Large Projects

YANG Liqiong^{1,2}, LI Shirong¹, XU Bo¹

(1. School of Construction Management and Real Estate, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 601010, P. R. China)

Abstract: With the aid of construction system reliability evaluation, the project risks can be decreased and objects may be optimized. Under the considerations of quality, cost, time and safety, an OBDD-based method is proposed to evaluate the reliability of large construction system. This method can be easily implemented in computer, and the calculations are very efficient for large scale systems. Lastly, the examples are listed to illustrate the reliability evaluation procedure.

Key words: large project; construction system; reliability evaluation; ordered binary decision diagram

(责任编辑 傅旭东)