

DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640X.2015.04.013

晋良海, 梁巧秀, 韩兰珍, 等. 多施工任务多设备配套的系统可靠性分析[J]. 水利水运工程学报, 2015(4): 81-85. (JIN Liang-hai, LIANG Qiao-xiu, HAN Lan-zhen, et al. System reliability analysis of multi-construction task with multi-equipment matching [J]. Hydro-Science and Engineering, 2015(4): 81-85.)

多施工任务多设备配套的系统可靠性分析

晋良海¹, 梁巧秀¹, 韩兰珍¹, 肖山喜², 李 宸¹

(1. 三峡大学 水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 深圳市水务规划设计院, 广东 深圳 518000)

摘要: 工程施工系统是由多阶段多施工任务多设备配套组成的复杂系统。针对施工复杂系统设备配套的失效风险问题, 采用二元决策图(Binary Decision Diagrams, BDD)图示法分析任务与设备配套的可靠性。首先将某施工系统的各阶段抽象成串并联关系的混合框图结构并建立此结构的故障树, 然后利用共同失效组件对故障树进行简化, 再基于递归法将简化后的故障树转化为BDD, 最后求得BDD里不相交的“0”分支的概率总和即为任务与设备配套系统的可靠度。该方法能够有效解决施工复杂系统设备配套的失效风险问题, 运算复杂度低, 结果合理, 并在工程实例中得到验证, 具有广泛的应用价值。

关键词: 多施工任务; 可靠性; 二元决策图; 设备配套; 共同失效组件

中图分类号: TV53

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2015)04-0081-05

工程施工系统是由执行不同功能的多个阶段构成的任务系统。面对由不同阶段施工设备配套组成的复杂系统, 要实现各类预定的功能, 完成相应的工作任务, 这就要求整个系统具有较高的可靠性。在以往的研究中, 大多施工任务只考虑了设备的优化配置, 并没有考虑优化后系统的可靠度; 并且, 系统可靠度不高或系统失效, 直接影响到施工进度和费用。因此, 对多阶段任务施工系统设备配套可靠性问题分析研究显得非常重要。

目前, 对施工可靠性的研究还不成熟, 国内尚未对施工系统可靠性进行统一定义^[1]。胡汉卿等^[2]指出提高水电设备的经济性和可靠性, 是水电设备优化设计的方向; 前苏联学者 C. A. 乌沙茨基等^[3]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; 狄鹏等^[4]提出了一种考虑多阶段的舰船任务可靠性分配方法; Z. Tang 等^[5]利用 BDD 来研究多阶段任务系统的共因失效问题; 夏雨等^[6]应用非概率凸集模型处理结构不确定性, 结合有限元分析, 得到坝体单元的非概率可靠度指标。近年来, 针对设备配套问题, 国内外学者也做了大量研究。蒲宝山^[7]针对薄煤层综采工作面的特点, 对其设备选型配套技术进行了理论分析与应用研究; 晋良海等^[8]运用线性规划理论探讨露天石方开挖工程中的风动力优化配置问题, 解决钻孔机械配套选型问题; D. K. H. Chua 等^[9]将工程施工作为一种动态模型, 基于关键资源和空间上的要求, 提出了建立 PDM++ 框架来处理施工调度问题的方案; 张斌等^[10]从设备全寿命管理、设备调剂配套原则、提高设备利用率等三方面阐述了设备调剂配套管理高效模式以及优化设备调剂配套的相关方法。

综上所述, 国内外学者主要研究在工程施工技术与组织管理方面运用可靠性原理处理施工进度控制、质

收稿日期: 2014-12-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51379110); 湖北省教育厅重点项目(D20131301); 水电工程施工与管理湖北省重点实验室(三峡大学)开放基金资助项目(2014KSD02)

作者简介: 晋良海(1973—), 男, 四川简阳人, 副教授, 博士, 主要从事水利水电建设项目运筹、施工安全工效研究。

E-mail: 754780248@qq.com

量控制和成本控制等一些技术与管理的問題^[11]。现有研究成果大多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,没有多阶段任务施工系统设备配套可靠性研究成果,并且对设备配套的可靠性计算没有统一的准则。针对以上问题,提出一种基于 BDD 的多阶段任务施工系统设备配套的可靠性计算模型。该模型具有如下特点:①模型的可重用性和灵活性;②跨阶段的依赖性建模;③解决方法的简单性。该模型适用于解决多阶段任务系统的可靠性问题。因此,本文采用此方法解决施工复杂系统设备配套的失效风险问题,为设备与任务配套系统的可靠性提供评价准则,具有广泛的应用价值。

1 数学模型

假设某施工作业有 n 个阶段,需施工设备 m 台,第 i 阶段设备配套结构为 S_i ,第 $i+1$ 阶段设备配套结构为 S_{i+1} 。假设第 i 阶段中,需设备 I 和设备 II 与 III 中的任意一设备正常工作就能完成阶段 i 的任务;第 $i+1$ 阶段中,需设备 I, II, IV 中有一个能正常工作就可以完成阶段 $i+1$ 的任务;第 $i+2$ 阶段中,需设备 V 和设备 I 与 III 中的任意一设备正常工作就能完成阶段 $i+2$ 的任务;第 $i+3$ 阶段中,需设备 I, II 和 III 都能正常工作才能保证阶段 $i+3$ 的任务顺利完成。阶段 i 到阶段 $i+3$ 为串联关系,具体见图 1。

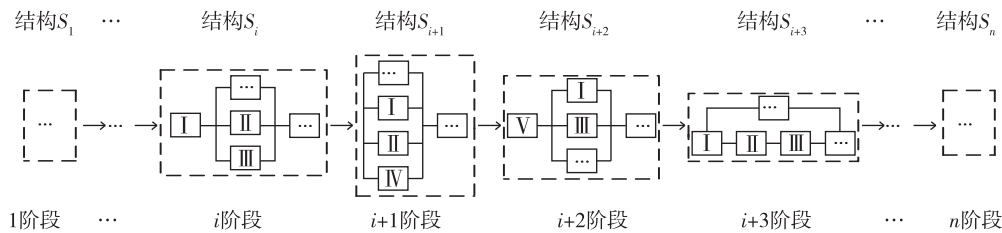


图 1 串并联混合结构

Fig. 1 Mixed series-parallel structure

2 分析与建模

2.1 故障树模型

建立故障树,首先要分析 i 到 $i+3$ 这 4 个阶段之间的逻辑关系。由图 1 可知,4 个阶段中,只要有 1 个阶段在施工期间内失效,则整个多阶段任务就失败了,所以 4 个阶段是“阶段或”的关系,即 4 个阶段与整个系统是“或门”的逻辑关系。用 Φ 表示整个系统失效, Φ_i , Φ_{i+1} , Φ_{i+2} , Φ_{i+3} 分别表示阶段 $i, i+1, i+2, i+3$ 失效。4 个阶段虽然使用相同工序,但是这些工序在不同阶段的工作环境不一样,导致各项指标都不同,所以在故障树模型中采用 A_i , B_i , C_i , D_i 和 E_i 分别表示在第 i 阶段设备 I, II, III, IV 和 V。由此可以构建整个故障树模型见图 2。

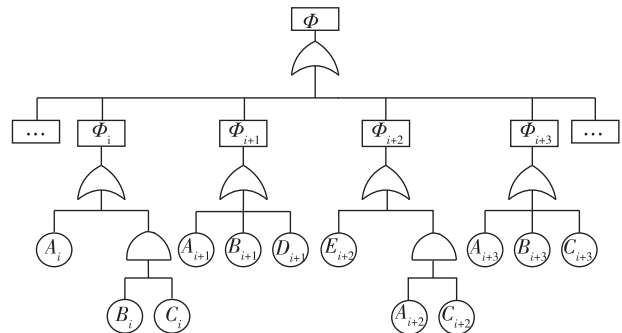


图 2 故障树模型

Fig. 2 A fault tree model

2.2 底事件化简

在施工系统中,如果某个组件在 $i+1$ 阶段直接导致了整个系统失效,那么在 i 阶段和之前该组件出现过的所有阶段,该组件失效都将直接导致系统失效,则该组件称为共同失效组件^[12],记为 N 。

对于共同失效组件 N ,假设其在 $i+1$ 阶段直接导致系统失效,则在第 1 到 i 阶段中,如果 N 在与门下,删去代表 N 的底事件所在的整个与门;如果 N 在或门下,则删去代表 N 的底事件。

根据共同失效组件对图2的故障树进行化简, 简化过程如下: 故障树中存在共同失效组件 A, B 及 C , 删去 Φ_{i+2} 中的 A 及其所在子树, 删去 Φ_{i+1} 和 Φ_i 。对故障树重新整理, 得到简化后的故障树(见图3)。

2.3 二元决策图

按照从上到下, 从左到右的 BDD 排序规则, 图3中故障树底事件的排序为 $E_{i+2} < A_{i+3} < B_{i+3} < C_{i+3}$ 。根据递归法的思想^[13], 从故障树底层的中间事件开始, 用基本事件逐层向上置换, 并利用 ite 结构进行编码。

$$\Phi_{i+2} = E_{i+2} = \text{ite}(E_{i+2}, 1, 0) \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \Phi_{i+3} = A_{i+3} + B_{i+3} + C_{i+3} &= \text{ite}(A_{i+3}, 1, 0) + \text{ite}(B_{i+3}, 1, 0) + \text{ite}(C_{i+3}, 1, 0) = \\ &\text{ite}\{A_{i+3}, 1, \text{ite}[B_{i+3}, 1, \text{ite}(C_{i+3}, 1, 0)]\} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\Phi = \dots + \Phi_{i+2} + \Phi_{i+3} + \dots = \dots + \text{ite}\{E_{i+2}, 1, \text{ite}[A_{i+3}, 1, \text{ite}(B_{i+3}, 1, \text{ite}(C_{i+3}, 1, 0))]\} + \dots \quad (3)$$

根据 Φ 的 ite 结构, 得到施工系统的 BDD 模型(见图4)。分析图4, 得到一条从根节点出发到终点节点0的路径: $\dots E_{i+2} A_{i+3} B_{i+3} C_{i+3} \dots$ 。

2.4 可靠性计算

该系统的可靠度为这些不相交的“0”分支的概率总和:

$$\Phi_s = \Pr\{\dots E_{i+2} A_{i+3} B_{i+3} C_{i+3} \dots\} \quad (4)$$

因为此施工系统整体是一个串联系统且设备之间统计独立, 即整个施工系统的可靠度计算模型为:

$$\Phi_s = \dots P_{i+2}^e P_{i+3}^a P_{i+3}^b P_{i+3}^c \dots \quad (5)$$

3 工程算例

某水电工程料场开挖分3个阶段。第1阶段为覆盖层剥离及软弱夹层清除, 第2阶段为钻爆作业, 第3阶段为石料装运。第1阶段中, 采用潜孔钻(A)配合空压机(B)进行作业, 然后用反铲(C)或装载机(D)集渣至下部装运平台配合自卸车(E)运输至弃渣场。第2阶段中, 采用潜孔钻(A)或液压钻(F)配合空压机(B)进行钻爆作业。第3阶段中, 先用反铲(C)或装载机(D)将爆破后的石料从上方剥落至对外公路平台, 再由电铲(G)配合自卸车(E)将开采的石料运至砂石料加工厂。料场开挖施工步骤为: 覆盖层剥离及清除软弱夹层(Ⅰ阶段)→钻爆作业(Ⅱ阶段)→石料装运(Ⅲ阶段)。其中, Ⅰ阶段: $\{A(5\text{台}) \cap B(3\text{台})\} \cap \{C(3\text{台}) \cup D(2\text{台})\} \cap \{E(4\text{台})\}$; Ⅱ阶段: $\{A(7\text{台}) \cup F(3\text{台})\} \cap \{B(3\text{台})\}$; Ⅲ阶段: $\{C(3\text{台}) \cup D(4\text{台})\} \cap \{G(2\text{台}) \cap E(5\text{台})\}$ 。

上述算例的串并联混合结构图、故障树模型图、简化的故障树模型图及 BDD 模型图分别见图5和6。

该系统的可靠度为这些不相交的“0”分支的概率总和:

$$\begin{aligned} \Phi_s = \Pr\{A_1 A_2 B_2 C_3 G_3 E_3\} &+ \Pr\{A_1 \bar{A}_2 F_2 B_2 C_3 G_3 E_3\} + \Pr\{A_1 A_2 B_2 \bar{C}_3 D_3 G_3 E_3\} + \\ &\Pr\{A_1 \bar{A}_2 F_2 B_2 \bar{C}_3 D_3 G_3 E_3\} \end{aligned} \quad (6)$$

即整个施工系统的可靠度计算模型为:

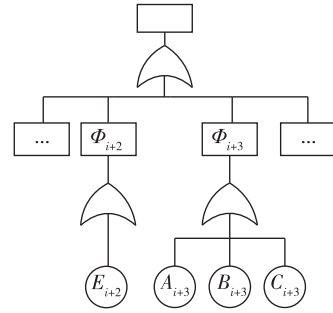


图3 简化的故障树模型

Fig. 3 A simplified fault tree model

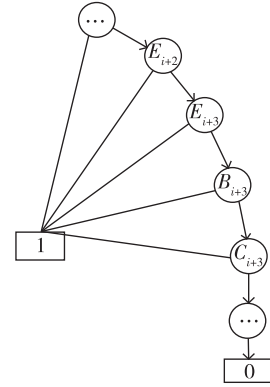


图4 BDD 模型

Fig. 4 A BDD model

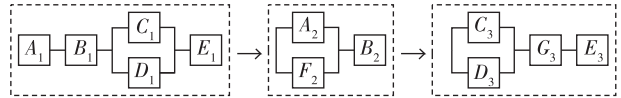


图5 串并联混合结构

Fig. 5 Mixed series-parallel structure

$$\Phi_s = P_1^a P_2^a P_3^b P_3^c P_3^e + P_1^a P_2^a P_2^f P_2^b P_3^c P_3^e + P_1^a P_2^a P_2^b P_3^d P_3^c P_3^e + P_1^a P_2^a P_2^f P_2^b P_3^d P_3^c P_3^e \quad (7)$$

假设设备 A, B, C, D, E, F 及 G 的失效概率都为 0.1, 计算可得整个施工系统可靠度 $\Phi_s = 0.7080$, 则在料场的开挖过程中施工系统的可靠性较高。施工人员可根据不同设备的失效概率对设备进行合理的调度使用, 提高施工系统的可靠性及施工效率。

4 结 语

用二元决策图图示法解决施工复杂系统设备配套的失效风险问题, 针对求解多阶段任务施工过程中设备配套的可靠性给出合理的计算方法, 并为设备与任务配套系统的可靠性提供评价准则。通过一个工程算例验证模型及其算法, 表明模型能用于求解多施工任务多设备配套的系统可靠度, 运算复杂度低, 能大大提高计算的科学化水平, 有广阔应用前景。但就目前研究现状来看, 此方法只能求出整个任务的失效概率, 不能反映各个阶段末的可靠性, 还需作进一步的深入研究。

参 考 文 献:

- [1] 史玉芳, 李慧民, 陆宁. 工程项目施工系统可靠性及计算方法研究[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2011, 43(1): 125-130. (SHI Yu-fang, LI Hui-min, LU Ning. Research on construction system reliability of construction project and its calculation method [J]. Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2011, 43(1): 125-130. (in Chinese))
- [2] 胡汉卿. 关于水电设备可靠性研究和可靠性管理问题[J]. 水利水电技术, 1985(8): 26-30. (HU Han-qing. Problems about hydropower equipment reliability research and reliability management [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 1985(8): 26-30. (in Chinese))
- [3] 乌沙茨基 C A, 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. (USCHATZ KI C A, LIU Tong-wei. Urban construction planning organization and management [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1988. (in Chinese))
- [4] 狄鹏, 黎放, 杨晶, 等. 考虑多阶段任务的舰船任务可靠性分配方法[J]. 海军工程大学学报, 2014, 26(3): 108-112. (DI Peng, LI Fang, YANG Jing, et al. A reliability allocation method for ship multistage mission [J]. Journal of Naval University of Engineering, 2014, 26(3): 108-112. (in Chinese))
- [5] TANG Z, XU H, DUGAN J B. Reliability analysis of phased mission systems with common cause failures[C]//Proc Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS 2005), 2005: 313-318.
- [6] 夏雨, 张仲卿, 赵小莲, 等. 基于非概率可靠度理论的拱坝安全度评价[J]. 水利水运工程学报, 2010(3): 79-83. (XIA Yu, ZHANG Zhong-qing, ZHAO Xiao-lian, et al. Safety analysis of arch dam based on non-probability theory [J]. Hydro-Science and Engineering, 2010(3): 79-83. (in Chinese))
- [7] 蒲宝山. 较薄煤层高效开采工作面设备优化配套研究[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2006. (PU Bao-shan. Equipment optimization on high-efficient exploitation working face of thin coal seam [D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2006. (in Chinese))
- [8] 晋良海, 周厚贵, 田斌. 约束下石方钻孔机械配套选型优化分析[J]. 水电能源科学, 2006, 24(3): 49-51. (JIN Liang-hai, ZHOU Hou-gui, TIAN Bin. Optimization analysis of rock borer configuration with some restrictions [J]. Water Resources and Power, 2006, 24(3): 49-51. (in Chinese))
- [9] CHUA D K H, YEOH K W. PDM++: Planning framework from a construction requirements perspective [J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2011, 137(4): 266-274.

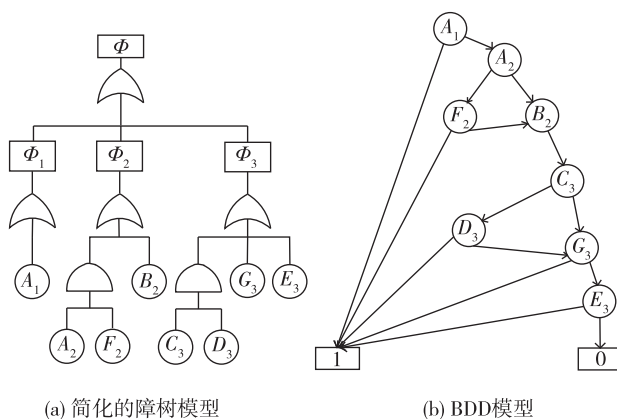


图 6 简化的故障树模型和 BDD 模型

Fig. 6 A simplified fault tree model and a BDD model

- [10] 张斌,刘青华,张建铭,等. 神东矿区千万吨矿井群设备管理模式研究[J]. 煤炭学报, 2010, 35(11): 1939-1944. (ZHANG Bin, LIU Qing-hua, ZHANG Jian-ming, et al. Equipment management mode of coalmine group with annual production over 10 Mt per each mine in Shendong mining area[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(11): 1939-1944. (in Chinese))
- [11] 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. (DENG Tie-jun. Research on the theory and method of reliability in structural engineering construction system [D]. Changsha: Hunan University, 2007. (in Chinese))
- [12] 王楠,杜素果. 一种多阶段任务系统的 BDD 排序新方法[J]. 科学技术与工程, 2010, 10(17): 4217-4224. (WANG Nan, DU Su-guo. A novel binary decision diagram variable ordering approach on phased mission system[J]. Science Technology and Engineering, 2010, 10(17): 4217-4224. (in Chinese))
- [13] 胡涛,杨春辉,杨建军. 多阶段任务系统可靠性与冗余优化设计[M]. 北京:国防工业出版社, 2012: 28-31. (HU Tao, YANG Chun-hui, YANG Jian-jun. System reliability in multi-stage tasks and design of redundancy optimization[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012: 28-31. (in Chinese))

System reliability analysis of multi-construction task with multi-equipment matching

JIN Liang-hai¹, LIANG Qiao-xiu¹, HAN Lan-zhen¹, XIAO Shan-xi², LI Cheng¹

(1. College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. Shenzhen Water Planning and Design Institute, Shenzhen 518000, China)

Abstract: An engineering construction system is a complex one which involves multi-stage and multi-construction tasks as well as multi-equipment matching. With regard to the risks caused by the equipment matching failures in a complex construction system, a binary decision diagram method is applied to analyze the matching reliability between tasks and equipments in this study. Firstly, a hybrid diagram with the mixed series-parallel structure (cascade and multiple) is abstracted from each stage of the construction system and a fault tree is built, and then the fault tree is simplified through the simultaneous component failure. Based on the recursion method, the simplified fault tree is transferred to the binary decision diagram method. Finally, the probability sum of non-intersect branch pointing to “0” in the binary decision diagram from the above steps is the reliability of both the equipment matching system and the tasks. This method, with lower computation complexity, applicable in practical projects, and reasonable in analysis results, can effectively solve the risk problems during failures in the complex construction system, has the value of extensive application in the civil engineering construction in the future.

Key words: multi-construction task; reliability; binary decision diagram; equipment matching; simultaneous component failure