

基于集对分析联系数故障树的 BA 系统可靠性分析 *

黄大荣, 黄丽芬

(重庆交通大学 光电与信息技术研究所, 重庆 400074)

摘要: 为了有效管理和监测建筑设备自动化系统(BAS),提高系统可靠性,基于集对分析联系数和故障树理论研究了 BA 系统的可靠性分析方法。详细分析可能引起 BA 系统故障的各种因素,建立系统的故障树模型,并确定了系统故障原因的各种可能组合方式;引入中间状态概率的概念结合集对分析联系数理论建立了 BA 系统的可靠性评定模型;通过 BA 冷源系统的仿真实验验证了模型的可靠性和有效性。实验表明,该模型便于发现系统的薄弱环节,从而有效提高了系统的可靠性。

关键词: 故障树;集对分析联系数;中介状态概率;建筑设备自动化系统可靠性;中介可靠性

中图分类号: TP202; TU855

文献标志码: A

文章编号: 1001-3695(2010)01-0111-03

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2010.01.033

Reliability analysis of BA system based on connection number of set pair analysis and FTA

HUANG Da-rong, HUANG Li-fen

(Institute of Optoelectronic & Information Technology, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: To manage and monitor (BAS) equipment effectively and improve the system reliability, researched a reliability method of BAS based on the theory of connection number of set pair analysis and FTA. Firstly, every kind of factors, which could make the building equipment fault, was analysis deeply. Then, constructed a fault tree and confirmed the reasons of system fault in every possible combination way by the fault tree model. Secondly, established a BAS reliability evaluation model combined with the conception of intermediate probability and the theory of connection number of set pair analysis. Finally, presented an example of BA cold source system to verify the reliability and effectiveness of this model. The result shows the model is easy to find the weakness of system, so as to improve the system reliability effectively.

Key words: FTA; connection number of set pair analysis; intermediate probability; building auto system (BAS) reliability; intermediate reliability

随着我国城市化进程的推进,城市建设规模不断扩大,大型公共建筑的数量也越来越多,楼宇自动化系统(建筑设备自动化系统, BAS)的应用越来越广泛,而 BA 系统中一个关键位置出现差错将会造成极大的影响和经济损失,甚至会伤害到用户的人身财产安全。因此,BA 系统的可靠性问题受到了国内外学者和专家的重点关注,并在此领域做出了一些颇有实效的研究成果,在实际工程中取得了较好的效果。目前工程中应用较为广泛的主要有设备冗余法^[1],以及利用故障诊断软件对主要的机电设备、仪表或执行器、系统进行故障诊断,进而采取相应的应急措施^[2]。由于设备的操作受到人为因素的影响,主观性因素较大,虽然上述方法能避免一些事故的发生,但是依然会有经济损失及人员伤亡的隐患存在,因此在 BA 系统的初始设计过程中考虑系统整体的可靠性就显得尤为重要。为了解决这个问题,文献[3]将 FTA 方法引入建筑设备(电梯)故障分析中,对电梯系统建立了故障树并进行了失效分析,但是并没有对其可靠性进行定量和定性的深入分析,其可靠性分

析的结果并不是很理想。与此同时,BA 系统的很多设备本身从可靠到失效存在中间过渡现象,然而到目前为止并没有一种合理的方法能够解决这个问题。因此,本文引入王光远等人^[4]针对系统从可靠到失效存在中介过渡环节现象所提出的中介可靠性概念,与集对分析(set pair analysis, SPA)联系数(connection number, CN)以及故障树理论相结合,深入分析 BA 系统故障的各种原因,将系统或部件常介于故障与非故障之间的状态体现出来,从定量和定性两方面对其可靠性问题进行了研究,进而对设备进行管理和监测,以有效地提高系统的可靠性。

1 集对分析联系数^[5]

集对分析理论是学者赵克勤于 20 世纪 80 年代提出的,它是一种用于处理带有综合不确定性问题的数学工具。它的核心思想是把不确定性和确定性作为一个确定不确定性系统来进行数处理和辩证分析,目前已在不少领域得到了应用^[5-7]。

收稿日期: 2009-04-08; 修回日期: 2009-05-11 基金项目: 中国国家博士后科学基金资助项目(20060401018); 重庆市自然科学基金资助项目(CSTC, 2006BB2422); 重庆市教委科学技术研究资助项目(KJ060414); 重庆交通大学博士启动基金资助项目(07-01-12); 重庆交通大学研究生创新基金项目(0904)

作者简介: 黄大荣(1978-), 男, 湖北建始人, 副教授, 博士后, 主要研究方向为可靠性分析、信息处理及智能控制等(hcx1978@163.com); 黄丽芬(1982-), 女, 安徽安庆人, 硕士研究生, 主要研究方向为智能控制、计算机应用技术。

1.1 集对分析

集对分析的基本思路是从同(同一性)、异(差异不确定性)、反(对立性)三个侧面研究该元系统中两个集合在给定问题背景下的确定性联系与不确定性联系的联系,可变与转换,并用一个能充分反映上述情况的同异反联系数去系统地开展具体的研究。

1.2 联系数

联系数的一般形式为

$$U = A + Bi + Cj \quad (1)$$

其中: A, B, C 为非负实数, $j = -1$,以说明 C_j 与 A 在符号上正好相反; i 在 $[-1, 1]$ 视不同情况取值,以说明 B 有向 A 或向 C 转换的可能性; U 称为联系数; A, B, C_j 分别称为联系数的同部、异部、反部;令 $N = A + B + C$,则 N 为联系范数;令 $u = U/N, a = A/N, b = B/N, c = C/N$,联系数就转换为联系度

$$u = a + bi + cj \quad (2)$$

其中: a, b, c 分别称为同一度、差异度、对立度,这里有 $a + b + c = 1$ 这一归一化约束。

1.3 基于集对分析联系数的系统可靠性概念

根据集对分析联系数理论,假设故障树某事件可靠性为 $R_{(SPA)} = a + bi + cj$ 。其中: a 为系统顶事件或底事件发生的概率; c 表示系统顶事件或底事件不发生的概率; b 表示系统顶事件或底事件介于中间状态(即局部的暂时的轻微的故障)的概率。 b 的部分通过维修可转换为 c 的部分,同时若系统没有及时管理和监测, b 部分也可转换到 a 的部分。计算 a 值时可将事件的中间状态并入事件不发生状态,再通过常用的方法求得,计算 c 值时可将事件的中间状态并入事件发生状态,再通过常用方法求得,且 $b = 1 - a - c$ 。

联系数应用在可靠性定义中的运算规则如下:

a) 两个联系数的和

定义 1 设有联系数 $u_1 = a_1 + b_1i + c_1j, u_2 = a_2 + b_2i + c_2j$, 则 u_1 与 u_2 的和是联系数 $u = a + bi + cj$, 记做 $u = u_1 + u_2$ 。其中: $a = a_1 + a_2 - a_1a_2, c = c_1c_2, b = 1 - a - c$ 。

b) 两个联系数的积

定义 2 设有联系数 $u_1 = a_1 + b_1i + c_1j, u_2 = a_2 + b_2i + c_2j$, 则 u_1 与 u_2 的积是联系数 $u = a + bi + cj$, 记做 $u = u_1u_2$ 。其中: $a = a_1a_2, c = c_1 + c_2 - c_1c_2, b = 1 - a - c$ 。

c) 事件重要度^[8]

定义 3 设 $R_{(SPA)} = a + bi + cj$ 为联系数故障树顶事件的可靠性表达式, $R'_u = a' + b'i + c'j$ 为联系数故障树中删除底事件 u 后计算得到顶事件的可靠性表达式。底事件 x_u 的重要度定义为 $RI = |a' - a| + |b' - b| + |c' - c|$ 。

若 $RI_u > RI_v$, 则说明底事件 u 对顶事件的影响大于底事件 v 对顶事件的影响,因此,如果要提高系统的可靠性,首先考虑改进底事件 u 。

2 BA 系统的故障树模型

2.1 故障树分析法

故障树分析^[9] (fault tree analysis, FTA) 是用于大型复杂系统可靠性、安全性分析和风险评价的一种方法。它是由各种事

件符号、逻辑门符号、其他一些符号以及一些线条组成的一种倒立树状的逻辑因果关系图。故障树分析法是以各种基本单元失效为出发点,通过在系统中分析各故障之间的逻辑关系来寻找造成某个不期望事件(顶事件)的各种直接和间接原因的一种方法。其基本逻辑门及符号如图 1 所示。



图1 逻辑门的图形符号

2.2 建立 BA 系统的故障树

根据 GJB768.1 中提出的相关规则^[10], 确立 BA 系统故障树顶事件为 BA 系统工作失效。主要的中间事件为电力供应故障 E1、电梯故障 E2、照明控制故障 E3、给排水故障 E4、消防故障 E5、冷源系统故障 E6 等。具体的分解规则为: 分析每一个中间事件, 得出下一级中间事件, 逐步分解直至不能分解的底事件为止。鉴于 BA 系统非常庞大, 这里以冷源系统为例深入探讨建立故障树。其故障树如图 2 所示, 各事件的描述如表 1 和 2 所示。

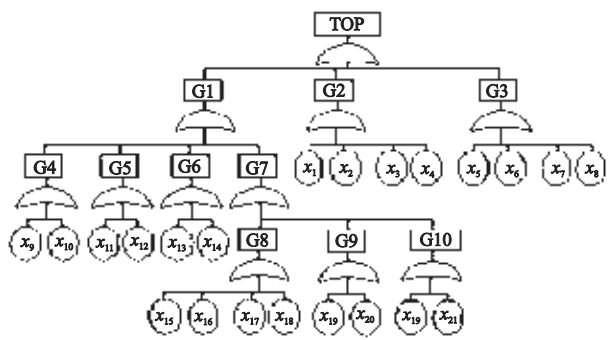


图2 冷源系统失常故障树

表 1 中间事件描述

序号	类型	故障名称	序号	类型	故障名称
Top	顶事件	冷源系统故障	G6	中间事件	冷冻水泵故障
G1	中间事件	运行故障	G7	中间事件	冷冻水机组故障
G2	中间事件	群控故障	G8	中间事件	机组运行中高压过高
G3	中间事件	信号故障	G9	中间事件	机组运行中低压过低
G4	中间事件	冷却塔风机故障	G10	中间事件	回气管及压缩机结冰
G5	中间事件	冷却水泵故障			

表 2 底事件描述及其可靠性数据

序号	故障名称	a	b	c	序号	故障名称	a	b	c
X ₁	电源断电	0.012	0.011	0.977	X ₁₂	冷却水泵过载保护	0.021	0.020	0.959
X ₂	电压过低	0.015	0.012	0.973	X ₁₃	冷冻水泵机械故障	0.001	0.001	0.998
X ₃	群控联锁电路断开	0.009	0.008	0.983	X ₁₄	冷冻水泵过载保护	0.022	0.019	0.959
X ₄	保护器件作用后未复位	0.010	0.009	0.981	X ₁₅	冷却水流量过少	0.048	0.045	0.907
X ₅	通信控制板故障	0.023	0.025	0.952	X ₁₆	水温过高	0.052	0.051	0.897
X ₆	通信线路故障	0.019	0.017	0.964	X ₁₇	冷凝器铜管/翅片积垢多	0.003	0.002	0.995
X ₇	通信线接线错误	0.003	0.000	0.997	X ₁₈	冷媒过多	0.009	0.008	0.983
X ₈	通信参数设置不合理	0.007	0.000	0.993	X ₁₉	冷媒不足	0.015	0.015	0.970
X ₉	风机机械故障	0.001	0.001	0.998	X ₂₀	过滤器堵塞	0.039	0.037	0.924
X ₁₀	风机过载保护	0.019	0.018	0.963	X ₂₁	热负荷过小	0.057	0.055	0.888
X ₁₁	冷却水泵机械故障	0.001	0.001	0.998					

3 基于集对分析联系数理论和故障树的 BA 系统可靠性分析

结合 BA 系统工程实践,研究影响 BA 系统(冷源)失效的因素,得出了 BA 系统(冷源)的故障树,下面从定性和定量两个方面对其可靠性进行分析。

3.1 定性分析

定性分析主要是研究故障树中所有导致顶事件的最小割集。割集中所有底事件发生了,顶事件必然发生。若在割集中任意去掉一个底事件,它就不再是割集了,那么称其为最小割集。一个故障树的最小割集不只一个,它可帮助发现系统可靠性的最薄弱环节。

依据上行法求得 BAS 冷源系统故障树 MCS 共 22 个,其中:一阶 MCS 有 8 个,分别为 $\{X_{15}\}, \{X_{16}\}, \{X_{17}\}, \{X_{18}\}, \{X_{19}\}, \{X_{20}\}, \{X_{21}\}$;二阶 MCS 有 6 个,分别为 $\{X_9\}, \{X_{10}\}, \{X_{11}\}, \{X_{12}\}, \{X_{13}\}, \{X_{14}\}$;三阶 MCS 有 8 个,分别为 $\{X_1\}, \{X_2\}, \{X_3\}, \{X_4\}, \{X_5\}, \{X_6\}, \{X_7\}, \{X_8\}$ 。

假定各底事件相互独立,则顶事件的 $R_{TOP} = \sum_{i=1}^{21} X_i$,即最小割集为 $\{X_1\}, \{X_2\}, \{X_3\}, \{X_4\}, \{X_5\}, \{X_6\}, \{X_7\}, \{X_8\}, \{X_9\}, \{X_{10}\}, \{X_{11}\}, \{X_{12}\}, \{X_{13}\}, \{X_{14}\}, \{X_{15}\}, \{X_{16}\}, \{X_{17}\}, \{X_{18}\}, \{X_{19}\}, \{X_{20}\}, \{X_{21}\}$ 。

3.2 定量分析

当底事件 X_i 的可靠性测度用表 2 中联系系数表示时,根据定义的联系系数和积公式可计算出顶事件的可靠性为

$$R_{TOP} = 0.36 + 0.21i + 0.43j$$

该冷源系统故障发生可能程度为 0.36,系统完全可靠的程度仅在 0.43。在最坏情况下,即事件中间状态部分均转换成完故障状态($i=1$ 时), $R_{TOP} = 0.57 + 0.43j$,系统故障发生可能性达到 0.57;而当事件中介状态被排除回归正常状态时,系统可靠性程度可达到 0.64。容易看出,虽然各底事件失效概率非常低,但由于系统结构原因,顶事件发生的概率依然很高,系统结构设计需要进一步优化。事件中间状态的概率很大,因此对

系统各部位运行状态的管理和检测是非常重要的。

根据上述公式可以计算出各底事件的相对重要度,根据计算结果容易得出:事件 $X_1, X_2, X_4, X_5, X_6, X_8, X_{10}, X_{12}, X_{14}, X_{15}, X_{16}, X_{20}, X_{21}$ 对顶事件的影响较其他事件要大些。

4 结束语

本文在深入分析 BAS 冷源系统结构状态、失效原因的基础上,建立冷源系统故障树,针对系统设备故障特点,引入事件中介概率的概念,运用集对分析联系数理论对 BA 系统可靠性进行了更全面深入的分析,发现系统结构问题所在及可靠性薄弱环节,强调工程中对系统设备进行有效的管理和监测,并为工程决策、设计与管理提供更多依据。实例验证模型的可靠性和有效性,计算方法简单,易于实现。

参考文献:

- [1] 唐钟,周小伟.大型复杂分布式控制系统可靠性及可扩展性设计[J].兵工自动化,2006,25(10):67-69.
- [2] 梅英,戴瑜兴.基于BACnet的楼宇自控系统工程设计[J].低压电器,2008(4):5-9.
- [3] 迟长春,李奎,岳大为.基于故障树分析法的建筑设备可靠性分析[J].低压电器,2007(18):5-7.
- [4] 王光远,张鹏.具有中介状态的工程系统的可靠性分析[J].土木工程学报,2001,34(3):13-17.
- [5] 蒋云良,徐从富.集对分析理论及其应用研究进展[J].计算机科学,2006,33(1):205-209.
- [6] 黄德才,赵克勤.用联系系数描述和处理网络计划中的不确定性[J].系统工程学报,1999,14(2):112-117.
- [7] 潘维加,齐兴华.控制系统联系度及分析[J].东北电力学院学报,1997,17(2):66-70.
- [8] CHANG J R, CHANG K H, LIAO S H, et al. The reliability of general vague fault-tree analysis on weapon systems fault diagnosis[J]. Soft Computing, 2006, 10(8):531-542.
- [9] 郭波,武小悦,张秀斌,等.系统可靠性分析[M].长沙:国防科学技术大学出版社,2002:75-92.
- [10] GJB768.1, 故障树分析方法:建造故障树的基本规则和方法[S]. 1989.
- [5] BLOEMEKE M, VALTORA M. A hybrid algorithm to compute marginal and joint beliefs in Bayesian networks and its complexity[C]//Proc of the 14th Annual Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence. San Mateo, California: Morgan Kaufmann Publishers, 1998: 208-214.
- [6] CHICKERING D, HECKERMAN D. Efficient approximation for the marginal likelihood of incomplete data given a Bayesian network[J]. Machine Learning, 1996, 29(2-3):181-212.
- [7] CHICKERING D, MEEK C. Finding optimal Bayesian networks[C]//Proc of the 18th Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence. San Mateo, California: Morgan Kaufmann Publishers, 2002:94-102.
- [8] COOPER G F. A Bayesian method for causal modeling and discovery under selection[C]//Proc of the 16th Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence. San Mateo, California: Morgan Kaufmann Publishers, 2000:98-106.
- [9] FRIEDMAN N. The Bayesian structural EM algorithm[C]//Proc of the 14th Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence. San Mateo, California: Morgan Kaufmann Publishers, 1998: 129-138.
- [10] FRIEDMAN N, MURPHY K, RUSSELL S. Learning the structure of dynamic probabilistic networks[C]//Proc of the 14th Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence. San Mateo, California: Morgan Kaufmann Publishers, 1998.
- [11] FRIEDMAN N, NINIO M, PEER I, et al. A structural EM algorithm for phylogenetic inference[C]//Proc of the 5th Annual International Conference on Computational Biology. New York: ACM Press, 2001: 132-140.
- [12] CHICKERING D. Learning Bayesian networks is NP-complete[M]//Learning from data: artificial intelligence and statistics. Berlin:Springer-Verlag, 1996:121-130.
- [13] DACUM P, LUBY M. Approximate probabilistic inference in Bayesian belief networks in NP-hard[J]. Artificial Intelligence, 1993, 60(1):141-153.
- [14] HENRION M. Propagating uncertainty in Bayesian networks by logic sampling[C]//Proc of the 4th Uncertainty in Artificial Intelligence Conference. 1988:149-163.
- [15] COOPER G F, HERSKOVITS E. A Bayesian method for the induction of probabilistic networks from data[J]. Machine Learning, 1992, 9:309-347.

(上接第 110 页)