

# 装配可靠性的动态贝叶斯网络建模与分析

张根保 刘 佳 葛红玉

重庆大学,重庆,400044

**摘要:**为了提高产品的整机可靠性,提出了可靠性驱动的装配技术(reliability driven assembly technology,RDAT)的概念。根据可靠性要求,首先利用结构分析和设计技术(structured analysis and design technique,SADT)对所装配产品进行功能分析,得到“元动作”粒度的 SADT 模型。然后采用具有时间特性的动态贝叶斯网络对 RDAT 进行了建模,将“元动作”级别的 SADT 模型转化为相应的动态贝叶斯网络模型。最后以某加工中心的托盘交换架进行实例分析,在装配产品和功能动作为多态系统的情况下,验证了该建模与仿真方法的有效性。

**关键词:**装配可靠性;动态贝叶斯网络;功能分析;多态系统

**中图分类号:**TH161

**DOI:**10.3969/j.issn.1004-132X.2012.02.019

## Modeling and Analysis for Assembly Reliability Based on Dynamic Bayesian Networks

Zhang Genbao Liu Jia Ge Hongyu

Chongqing University,Chongqing,400044

**Abstract:** For improving the reliability of products, a reliability driven assembly technology (RDAT) was presented. According to the requirements of reliability, structured analysis and design technique(SADT) was firstly applied to functioning analysis, then the last level of SADT model could be obtained. The dynamic Bayesian networks(DBN) which can depict the time was applied to modeling for RDAT, the SADT model was converted to corresponding DBN model. At last, while the system and functional actions were multi-states, the pallet changer of some machining center was taken as an example to verify the effectiveness of the model and simulation analysis method.

**Key words:** assembly reliability; dynamic Bayesian network; functioning analysis; multi-state system

## 0 引言

装配是将各种零部件组合在一起实现产品的

功能,是保证产品质量的重要环节。装配技术的研究目的在于以快速、可靠、低成本的方法在设计上实现产品的改善<sup>[1]</sup>。国内外学者对装配过程的相关技术进行了许多研究。Yang 等<sup>[2]</sup>用约束和自由度方法对虚拟装配技术进行了研究;邹冀华等<sup>[3]</sup>建立了数字化技术的柔性对接装配技术体系,为大型飞机部件的对接装配提供了理论支持;文献<sup>[4-5]</sup>讨论了协同装配技术的研究方法。由

收稿日期:2011-02-28

基金项目:国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2009AA04Z119);国家自然科学基金资助项目(50835008);国家科技重大专项(2009ZX04014-016;2009ZX04001-013;2009ZX04001-023;2010ZX04014-015);数字制造装备与技术国家重点实验室开放基金资助项目

and Manufacture,2007,47(3/4):666-672.

- [3] Bamberg E, Rakwal D. Experimental Investigation of Wire Electrical Discharge Machining of Gallium-doped Germanium[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 197(1/3): 419-427.
- [4] 袁根福,曾晓雁.单晶硅的激光铣削试验研究[J].激光技术,2003,27(5):163-165.
- [5] 赵万生.先进电火花加工技术[M].北京:国防工业出版社,2003.
- [6] 刘志东,汪炜,田宗军,等.太阳能硅片电火花电解高效切割研究[J].中国机械工程,2008,19(14):1673-1677.
- [7] 邱明波,黄因慧,刘志东,等.太阳能硅片制造方法研究现状[J].机械科学与技术,2008,27(8):1017-1020.
- [8] Fujino M, Okamoto N, Masuzawa T. Development of Multi-purpose Microprocessing Machine[C]//

Proc. of ISEM XI. Lausanne, 1995: 613-620.

- [9] Yu Z, Masuzawa T, Fujino M. 3D Micro-EDM with Simply Shaped Electrode[J]. Annals of the CIRP, 1997, 46(1): 1-8.
- [10] 刘光壮,杨晓冬.电火花铣削加工技术及其发展状况[J].电加工,1998(1):1-5.
- [11] 胡仁平.电加工中规则电极的保护层产生规律的仿真研究[D].上海:华东交通大学,2006.
- [12] 邱明波.半导体晶体材料放电加工技术研究[D].南京:南京航空航天大学,2009. (编辑 张 洋)

**作者简介:**刘志东,男,1966年生。南京航空航天大学机电学院教授、博士研究生导师。主要研究方向为特种加工及机电一体化。发表论文80余篇。鲁清,男,1986年生。南京航空航天大学机电学院硕士研究生。邱明波,男,1982年生。南京航空航天大学机电学院博士后研究人员。田宗军,男,1971年生。南京航空航天大学机电学院教授。黄因慧,男,1945年生。南京航空航天大学机电学院教授、博士研究生导师。

由此可见,装配技术的研究对于提高产品设计与制造具有重要作用,然而对装配工艺过程中可靠性因素的考虑却未见报道。国内制造厂家(特别是高档数控机床制造商)通常采用购买国外高质量零部件的方式来保证产品质量,尽管这些零部件本身的可靠性水平很高,但装配完成后的产品质量和可靠性却远远达不到国外水平。本文提出了可靠性驱动的装配技术(reliability driven assembly technology, RDAT)的概念,将可靠性落实到装配过程中。首先通过功能分析将产品功能逐级分解为相应零部件的“元动作”,然后通过控制“元动作”的可靠性来保证产品功能的正常发挥,即保证所装配产品的可靠性。

基于概率推理的贝叶斯网络是为解决不确定性、不完整性问题而提出的,相对于拟合建模和神经网络建模方法,它在解决复杂设备不确定性和关联性引起的问题上具有很大优势<sup>[6]</sup>,在系统建模、故障诊断、数据挖掘、决策支持等领域应用广泛。因此本文采用具有时间特性的动态贝叶斯网络对装配工艺过程进行可靠性建模分析,将功能分析的结构分析和设计技术模型转化为相应的动态贝叶斯网络模型,并在贝叶斯网络的推理基础上对 RDAT 的模型进行可靠性分析和仿真。最后以某加工中心的托盘交换架为例证明该方法的有效性,为 RDAT 的进一步研究提供理论基础。

## 1 可靠性驱动的装配技术建模与分析

### 1.1 可靠性驱动的装配技术简述

为了提高产品整机可靠性,将可靠性引入到装配工艺过程中,提出了 RDAT 的概念。RDAT 主要从功能实现的可靠性出发,由上而下地考虑产品的装配过程,对产品的相关功能采取预防性保证措施。在装配工艺编制中对这些预防性保证措施进行重点考虑,并在装配工艺中实现定性体现和定量控制,从而保证产品的可靠性。而传统装配工艺主要从机械结构和工作原理出发,由下而上地考虑产品的装配过程,对产品的相关精度指标进行控制。

根据国家标准 GB-6583 的规定,可靠性的定义为“产品在规定的条件下、规定的时间内完成规定的功能的能力”。当产品不能满足规定的功能或者满足得不好时,就意味着产品的可靠性出了问题。可靠性的目的之一是保证产品的相关功能得到正常发挥,因此 RDAT 应该从功能分析出发,通过对功能进行层层分解得到相应零部件的“元动作”,通过保证“元动作”的可靠性来实现产

品整机的可靠性,并可以通过“元动作”的相关数据对装配产品进行可靠性的定量分析。因此基于功能分析的 RDAT 能够对产品功能和零部件“元动作”实现逻辑层次分解,通过“元动作”可靠性的控制实现产品可靠性的控制,或通过“元动作”的相关数据对所装配产品的可靠性进行定量研究。

### 1.2 基于功能分析的 SADT 模型

根据 RDAT 的概念要求,首先应该对产品进行功能分析。结构分析和设计技术(structured analysis and design technique, SADT)由 Ross 等<sup>[7]</sup>在 20 世纪 70 年代提出,由最开始的软件工程迅速发展到其他领域,并得到了广泛应用。本文利用 SADT 方法对 RDAT 进行功能分析<sup>[8]</sup>,并建立相应的 SADT 模型,如图 1 所示。框图中间的产品功能可能为决策信息的转化或物质的转化,因此作为决策信息或物质转化的输入流和输出流是不同的。该方法基于零部件的功能分解,得到产品功能的相关动作,每个产品功能包括几个输入流和输出流。在 RDAT 中,对于产品的功能分析如图 1 所示,输入流包括产品的功能动作(having to do of the function, HDF)、产品的功能需求(function requirement, FR),输出流(output flow of the function, OF)表示产品功能的结果。



图 1 RDAT 的 SADT 模型

同时,功能动作又分为一级动作、二级动作甚至三级动作等,一级动作主要是指实现产品功能的最直接动作,二三级动作主要是指具体的某零件(小单元)的动作(若某加工中心分度工作台的回转转动是一级动作,蜗杆和蜗轮的转动则是二级动作),将最后一级动作定义为“元动作”。其中,SADT 模型可以用  $A_n$ (下标  $n$  表示动作级别,  $n=1,2,\dots$ ) 来表示分解的层次级别,  $A_1$  表示产品级的功能分析,得到的功能动作为一级动作。因此为了得到完整的“元动作”粒度的 SADT 模型,需要对图 1 所示的产品级模型继续进行分解,对所有 HDF 进行进一步的 SADT 分解,并对 HDF 的相互关系进行分析。由于 HDF 运动的周期性,当某 HDF 的正常工作是另一 HDF 正常工作的前提时,则将该功能动作的功能输出作为另一功能动作的 FR。如此层层分解可以建立最后一级(“元动作”粒度)的 SADT 模型,通过“元动作”的定量分析实现产品的性能分析。

由于 SADT 模型具有静态特性,并且贝叶斯

网络模型具有通过模板化对复杂系统建模的能力,能够直观表示真实的因果关系,能够综合考虑历史数据和专家意见,能够很容易添加节点实现模型的更新<sup>[9-10]</sup>。因此将 RDAT 的 SADT 模型转化为动态贝叶斯网络模型,通过动态贝叶斯网络模型对 RDAT 进行全面动态的可靠性定量分析。

### 1.3 动态贝叶斯网络模型的建立

贝叶斯网络是一个有向无环图(directed acyclic graph, DAG),其节点代表随机变量,节点之间的有向弧代表随机变量间的条件依赖关系。它以概率论为基础,以图论的形式表达随机变量的关联关系。贝叶斯网络具有双向推理特性<sup>[11]</sup>,不但可以实现正向推理,由先验概率推导出后验概率,即因果推理,还可利用公式由后验概率推导出先验概率,即诊断推理。然而贝叶斯网络没有考虑时间因素对变量的影响,沿时间轴变化的贝叶斯网络(Bayesian network, BN)为动态贝叶斯网络(dynamic Bayesian networks, DBN)。DBN 能够通过网络拓扑结构反映变量间的概率依存关系和变量随时间变化的情况,不但能够对变量所对应的不同特征之间的依存关系进行概率建模,而且能很好地反映特征之间的时序关系<sup>[12]</sup>。同时 DBN 与卡尔曼滤波、神经网络和隐性马尔科夫链相比,在非线性、可解释性、可因式分解性、可扩展性和语义性等方面更具优势<sup>[13]</sup>。因此本文采用 DBN 模型对 RDAT 进行建模分析,将图 1 的 SADT 模型转化为 DBN 模型,如图 2 所示。可见只有 HDF 具有时间特性,即 HDF 节点存在  $t$  和  $t+1$  时刻的动态特性。

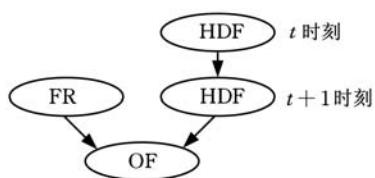


图 2 RDAT 的动态贝叶斯网络模型

由此可见, RDAT 从功能分析出发,通过 SADT 分析得到所装配产品的所有相应 HDF 和 FR。然而由于 HDF 的复杂性,要建立完善的 DBN 模型,需要对 SADT 模型进一步分解,建立“元动作”粒度级别的 SADT 模型。

### 1.4 DBN 模型的可靠性分析

在传统可靠性分析中,一般把研究对象看作二态系统,即对一个元件/系统来说,或者完全失效,或者完全可靠,然而实际情况往往存在不完全失效状态,并且很多失效往往为不完全失效状态。

Barlow 等<sup>[14]</sup>提出了多态系统的概念,利用最小路集和最小割集对系统进行了可靠性分析。文献<sup>[15]</sup>利用 BN 的不确定性推理和图形化表达,通过概率分布表对多状态系统可靠性进行了定性分析和定量评估。

根据可靠度的定义,可将装配可靠度定义为:在规定条件下和规定时间内,所装配产品完成规定功能的概率或程度,并用  $R_a$  表示,其取值范围为  $[0,1]$ 。假设装配产品及功能动作具有以下三种状态:①产品或功能动作处于完全正常工作状态;②产品或功能动作处于部分失效状态;③产品或功能动作处于完全失效状态。用  $X=0,1,2$  来表示这三种状态,则所装配产品的装配可靠度可定义为

$$R_a = P(X = 0) \quad (1)$$

假设  $A$  是一个变量,存在  $n$  个状态  $a_1, a_2, \dots, a_n$ ,则由全概率公式可以得出

$$P(B) = \sum_{i=1}^n P(B | A = a_i)P(A = a_i) \quad (2)$$

因此可以依据式(2)得到先验概率  $P(B)$ 。

对于动态贝叶斯网络  $(B_0, B_{-})$ ,其中,  $B_0$  是标准贝叶斯网络,  $B_{-}$  是包含两个时间片的贝叶斯网络,相邻两个时间片的各变量之间的条件分布为

$$P(z_t | z_{t-1}) = \prod_{i=1}^N P(z_{t,i} | P_a(z_{t,i})) \quad (3)$$

式中,  $z_{t,i}$  为在  $t$  时间片中的第  $i$  个节点;  $P_a(z_{t,i})$  为时间片中第  $i$  个节点的父节点集,  $P_a(z_{t,i})$  可能在同一时间片内,也可能位于上一个时间片。

由式(2)、式(3)可知,所装配产品的装配失效效率  $\lambda_a$  和装配可靠度  $R_a$  可以由“元动作”的失效效率分布和影响情况得到,从而实现 DBN 模型的可靠性定量分析。

## 2 实例分析

为了证明该建模方法的可行性,现对某加工中心的托盘交换架进行实例分析。托盘交换架的主要功能是实现工作台在加工工位和装卸工位的交换。交换架通过齿轮齿条实现回转,通过升降油缸的进出油实现交换架的升降。托盘交换架的装配要求主要是保证转动灵活、定位精确。首先对托盘交换架进行 SADT 功能分析,产品功能“交换”的 HDF 为交换架回转、交换架上升和交换架下降。

### 2.1 托盘交换架的动态贝叶斯网络模型

根据托盘交换架系统的 SADT 分析模型,对交换架回转和交换架升降的 HDF 不断分解,对

HDF 之间的相互关系分析,并将交换架下降作为托盘交换架工作周期的结束,建立最后一级的 SADT 模型。将此模型转化为相应的 DBN 模型,如图 3 所示,其中节点  $D_i (i=1,2,\dots,5)$  表示 SADT 模型的功能元动作,具体含义见表 1。关联节点  $E, F$  表示联合影响因子,即还能继续分解的 HDF (交换架上升、交换架回转),节点  $X$  代表系统结束状态,即交换架下降。

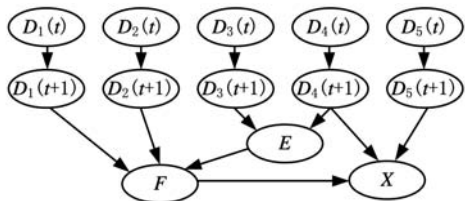


图 3 托盘交换架 RADT 的 DBN 模型

表 1 各“元动作”的失效率

元动作	失效率(%/kh)	
齿条横向移动 $D_1$	$\lambda_1 = 0.25$	$\lambda_2 = 0.2$
齿轮轴转动 $D_2$	$\lambda_1 = 0.2$	$\lambda_2 = 0.15$
上端感应开关正常工作 $D_3$	$\lambda_1 = 1.5$	$\lambda_2 = 1$
升降油缸正常工作 $D_4$	$\lambda_1 = 0.75$	$\lambda_2 = 0.65$
下端感应开关正常工作 $D_5$	$\lambda_1 = 1.5$	$\lambda_2 = 1$

由图 3 可知,  $D_4$  同时为  $E$  和  $X$  的“元动作”,即升降油缸的正常工作同时影响交换架的上升和下降,从而影响托盘交换架的正常工作。因此贝叶斯网络通过节点的简单建立能够实现系统复杂特性的快速建模。

### 2.2 托盘交换架 DBN 模型的可靠性分析与仿真

为了对托盘交换架进行定量的可靠性分析,首先对托盘交换架装配可靠性模型所有“元动作”的相关失效率进行收集,利用“元动作”的相应数据对托盘交换架的可靠性进行定量研究。根据 1.4 节的假设,各“元动作”具有三种状态,并且各“元动作”在各失效状态的失效率如表 1 所示。

由图 3 所示的托盘交换架 DBN 模型和式 (2),利用贝叶斯网络的推理算法可得托盘交换架的装配可靠度

$$R_a = P(X = 0) = \sum_{F, D_1, D_5} P(X = 0 | F, D_1, D_5) \sum_{D_1, D_2, E} P(F | D_1, D_2, E) \sum_{D_3, D_4} P(E | D_3, D_4) \cdot P(D_1)P(D_2)P(D_3)P^2(D_4)P(D_5) \quad (4)$$

其中,  $\sum_{A, B} P(Z | A, B)$  为节点  $Z$  在所有  $A, B$  状态下的条件概率之和。

为了对装配可靠度进行计算,需要利用式 (2)、式 (3) 对式 (4) 继续分解,直到“元动作”粒度的相关数据。同时托盘交换架的装配失效率  $\lambda_a$  可以由托盘交换架的分布情况和装配可靠度计算得到。

由于 BayesiaLab 不仅能够对多态系统的 DBN 进行快速精确分析,而且通过“元动作”的失效率和贝叶斯推理算法能够对系统可靠性进行定量分析和仿真<sup>[16]</sup>,因此本文采用 BayesiaLab<sup>[17]</sup> 软件对托盘交换架的装配可靠性模型进行可靠性分析和仿真。

利用 BayesiaLab 建立托盘交换架 RADT 的 DBN 模型,并将系统结束状态  $X$  作为监测目标,对  $X=0, 1, 2$  三种状态下的失效率曲线进行仿真,得到  $t=3000h$  时托盘交换架系统的装配失效率曲线,如图 4 所示。

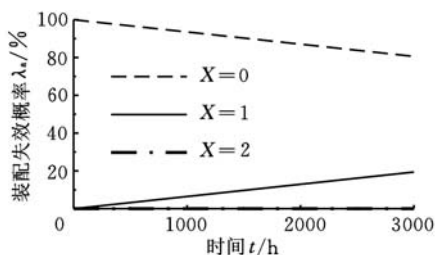


图 4 托盘交换架的装配失效率曲线

由图 4 的装配失效率曲线图可知,  $t=3000h$  时的托盘交换架的装配失效率  $\lambda_a=0.1943$ 。由式 (4) 和图 4 的装配失效率曲线可知,  $t=3000h$  时的托盘交换架的装配可靠度  $R_a = P(X = 0) = 0.89931$ 。

同时,由托盘交换架的装配失效率曲线可知,托盘交换架的部分失效曲线( $X=1$  时的曲线)明显比完全失效曲线( $X=2$  时的曲线)陡峭,即托盘交换架的大部分失效都是部分失效引起的,因此对托盘交换架装配工艺的制定应首先考虑部分失效的控制。例如对于“元动作” $D_4$  (升降油缸的正常工作),升降油缸的不灵活属于部分失效状态,应该从液压系统故障或连接松动出发(如油压不足、漏油、密封不好、液压油不清洁、油路堵塞、密封圈拉毛、油缸连接松动等)进行可靠性装配工艺的制定与控制。

由以上分析可知,通过对托盘交换架 RADT 进行动态贝叶斯建模,利用功能分析 SADT 模型不仅能够迅速实现逻辑性分解,而且通过“元动作”的相关数据和相应分析软件能够对托盘交换架进行可靠性定量分析和仿真。利用分析与仿真结果能够对 RADT 进行针对性的制定与控制。

同时该研究方法不需要计算最小路集或最小割集,能够实现 RDAT 的快速建模。

### 3 结语

为了在装配环节提高产品可靠性,本文提出了 RDAT 的概念,根据可靠性相关要求首先对 RDAT 进行功能分析,对功能动作不断分解来建立完善的 SADT 模型,通过转化后的动态贝叶斯网络实现了 RDAT 的逻辑层次建模,利用“元动作”粒度级别的相关数据和相应分析软件不仅能够对多态复杂系统进行简单建模,而且能够迅速方便地进行可靠性的定量分析和仿真,最后以某加工中心的托盘交换架为例验证了此方法的有效性。然而由于条件有限,RDAT 的动态贝叶斯网络模型并没有考虑“元动作”的维修率,这也是笔者进一步研究的重点。

### 参考文献:

- [1] Wang Yutao, Shen Yua, Liu Dongcai, et al. Key Technique of Assembly System in an Augmented Reality Environment [C]//Second International Conference on Computer Modeling and Simulation, Sanya, China, 2010: 133-137.
- [2] Yang Rundang, Fan Xiuming, Wu Dianliang, et al. Virtual Assembly Technologies Based on Constraint and DOF Analysis[J]. Robotics and Computer-integrated Manufacturing, 2007, 23(4): 447-456.
- [3] 邹冀华, 刘志存, 范玉青. 大型飞机部件数字化对接装配技术研究[J]. 计算机集成制造系统, 2007, 13(7): 1367-1373.
- [4] Kong S H, Noh S D, Han Y G, et al. An Agent-based Collaborative Assembly Process Planning System[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2006, 28(1/2): 176-183.
- [5] 谭建荣, 万昌江, 刘振宇. 组件化虚拟样机单元协同装配技术研究[J]. 计算机集成制造系统, 2006, 12(4): 557-562.
- [6] 吴雄彪, 姚鑫骅, 傅建中. 基于贝叶斯网络的数控机床热误差建模[J]. 中国机械工程, 2009, 20(3): 293-296.
- [7] Ross D T, Schoman K. Structured Analysis for Requirements Definition [J]. IEEE Transaction on Software Engineering, 1977, 3(1): 6-15.

- [8] Weber P, Jouffe L. Complex System Reliability Modelling with Dynamic Object Oriented Bayesian Networks(DOBN)[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2006, 91(2): 149-162.
- [9] Ren J, Jenkinson I, Wang J, et al. An Offshore Risk Analysis Method Using Fuzzy Bayesian Network [J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering—Transactions of the ASME, 2009, 131(4): 10.1115/1.312412312.
- [10] Jones B, Jenkinson I, Yang Z, et al. The Use of Bayesian Network Modelling for Maintenance Planning in a Manufacturing Industry[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2010, 95(3): 267-277.
- [11] 尹晓伟, 钱文学, 谢里阳. 贝叶斯网络在机械系统可靠性评估中的应用[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2008, 29(4): 557-560.
- [12] 郭武, 李文辉, 关菁华, 等. 基于动态贝叶斯网络的虚拟盆景仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(1): 103-107.
- [13] Stengel M. Introduction to Graphical Models, Hidden Markov Models and Bayesian Networks[D]. Toyohashi, Japan: Toyohashi University of Technology, 2003.
- [14] Barlow R E, Wu A S. Coherent Systems with Multi-state Components[J]. Mathematics of Operations Research, 1978, 3(4): 275-281.
- [15] 尹晓伟, 钱文学, 谢里阳. 基于贝叶斯网络的多状态系统可靠性建模与评估[J]. 机械工程学报, 2009, 45(2): 206-212.
- [16] Weber P, Jouffe L. Reliability Modeling with Dynamic Bayesian Networks [C]//5th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes. Washington D C, 2003: 57-62.
- [17] Bayesia Limited Company. BayesiaLab Academic Edition[EB/OL]. [2008-12-20]. <http://www.bayesia.com>.

(编辑 张 洋)

**作者简介:**张根保,男,1953年生。重庆大学机械工程学院教授、博士研究生导师。研究方向为机床可靠性、现代质量工程、先进制造技术、可重构制造装备和企业信息化等。出版学术专著10部。发表论文300余篇。刘 佳,男,1985年生。重庆大学机械工程学院硕士研究生。葛红玉,女,1982年生。重庆大学机械工程学院博士研究生。