

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201707037



针织物热定型质量因素的团树传播

周丽春, 罗孝雯, 金福江

(华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 首先,通过研究针织物热定型过程的生产流程、机械构造,采集生产过程质量数据、工艺数据和设备状态,并分析质量数据异常的原因.然后,通过相关分析确定对热定型克质量有影响的各环节及其对应变量,建立质量因素分析拓扑结构.最后,将各变量纳入具有因果关联的网络结构中,采用基于团树传播算法的贝叶斯推理规则,利用团树间的信息传递计算出各变量对克质量的影响程度.结合某企业实例进行分析,结果表明:文中方法可实现热定型质量指标影响因素的精确定量分析.

关键词: 热定型; 贝叶斯网络; 团树传播算法; 质量因素分析

中图分类号: TS 195.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2019)01-0106-07

Clique Tree Propagation for Heat Setting Quality Factor of Fabric

ZHOU Lichun, LUO Xiaowen, JIN Fujiang

(College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: Firstly, the production process and mechanical structure of the fabric heat setting are researched. The reason of the abnormal quality data are analyzed through the acquired production process quality data, process data and the equipment state. Then, through the correlation analysis, each link and its corresponding variables which have influence on the quality of the heat setting gram are determined and the topology frame of the quality analysis system is established. Lastly, the variables are put into the network structure with causal correlation and the influence degrees of each variable on the gram by information transmission between clique trees is calculated by using the Bayesian inference rules based on Clique tree propagation algorithm. Combining with example from the company to analyze, the results show that the proposed method can realize precise quantitative analysis of influencing factors of heat setting quality indicators.

Keywords: heat setting; Bayesian networks; clique tree propagation algorithm; quality factors analysis

ISO 9000 族标准提出采用过程模式^[1]控制产品质量,即将闭环控制思想运用于质量控制中.质量分析环节是闭环控制中最重要的一环,是指已知生产工艺、操作、设备状态数据,得到影响质量指标数据异常的因素.由影响因素得到质量结果是多对一的确定性问题,而从质量结果分析出影响因素属于一对多的不确定性问题.常用的质量因素分析方法有控制图方法、数据建模分析及概率图分析方法.在质量因素分析研究中,周静^[2]在印染生产过程质量分析与预测系统研究中用控制图的方法分析判断造成色差的主要原因,但控制图仅限于二维及二维以下的因素分析,且控制图只能定性分析影响因素.顾宇峰^[3]采用主元分析方法,建立染色环节的质量分析模型,对染色过程的质量提高有很大的帮助,但该方法受生产过程因素影响较大,分析结果不稳定,不适用于变量较多的情况.徐兰等^[4]运用贝叶斯网络推

收稿日期: 2017-07-14

通信作者: 周丽春(1978-),女,讲师,博士,主要从事染整复杂系统建模与控制的研究. E-mail:zhoumi@hqu.edu.cn.

基金项目: 福建省科技厅产学研重大项目(2016H6015);福建省科技计划引导性项目(2017H0022)

理分析汽车发动机产品质量与其组成的零部件之间的影响关系,证明贝叶斯网络的分析有效性. 根据染整企业历史数据统计,热定型过程产生质量问题的比重最大^[5-6],也是产品返修率最高的工序,故该工序成为染整企业最需要加大力度改善生产质量和调整管理方案的环节. 因此,研究热定型质量因素分析对实现染整质量控制,提高染整产品质量具有重要作用. 本文通过研究热定型过程质量数据、生产过程和机械构造各个方面,建立热定型过程质量分析贝叶斯网络模型,并采用基于团树传播算法的贝叶斯推理规则,简化推理复杂度,从质量结果逆推分析出各质量因素对最终质量的影响程度.

1 热定型质量指标的影响因素

以克质量、门幅、含水率等为布匹质量评判指标,由于质量指标繁杂,所以以克质量问题进行研究,选择成品克质量与实际克质量的差值作为最终的质量评价指标.

经数据的分析对比及现场操作的实际考察,可从设备方面、操作方面、布料种类方面考虑其对克质量的影响,再经过对每个环节的生产工艺流程的仔细研究,可将这 3 类再细分.

1.1 设备方面对质量指标的影响因素

分析定型机的机械构造和生产过程,将设备(EP)分为 5 个部分:进布架(CFF)、整纬机(WK)、前车(FP)、烘箱(DO)和后车(BP).

设备方面对质量指标的影响有 11 个基础机械部分的因素,如图 1 所示.

1.2 操作方面对质量指标的影响因素

操作方面(OP)是指人工机械操作、工艺设置,由前车工(BW)、后车工(AW)和操作工(CW)组成. 操作方面对质量指标的影响有 10 个具体的因素,如图 2 所示.

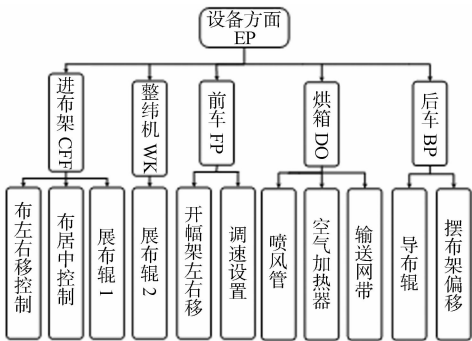


图 1 设备方面影响因素

Fig. 1 Influence factor of equipment

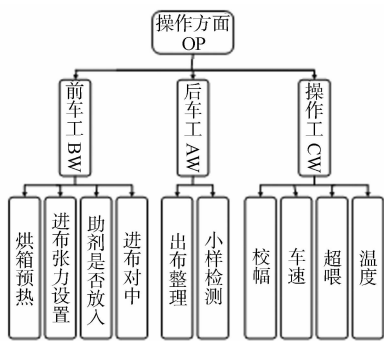


图 2 操作方面影响因素

Fig. 2 Influence factor of operation

1.3 布料种类对质量指标的影响因素

实验在针织物基础上进行,所以在布料种类(TC)中主要讨论弹力布(JC),分为 JC30S+40D, JC40S+20D, JC40S+30D 等 3 种型号的弹力布对质量指标的影响.

2 贝叶斯网络建模

2.1 贝叶斯网络

贝叶斯网络用图形化的方式直观地表示相关变量之间的因果关系,由有向无环图(DAG)和条件概率表(CPT)组成^[7-8]. 有向无环图由节点和有向弧组成,节点代表变量,是对任何问题的抽象,如热定型设备的状态、工艺参数值或人工操作情况等. 有向弧表示节点变量间的因果、概率关系. 条件概率表表示变量间的依赖关系.

2.2 质量指标与影响因素的相关性分析

由上文可得到对克质量差有影响的各项因素. 结合数据和专家经验,各因素均为变量,其中,克质量、拉幅、车速、超喂、温度属于数值变量,其余变量为属性变量.

为了满足贝叶斯网络的建模要求,将属性变量转化为虚拟变量,连续的数值变量转化为离散变量^[9],二状态的变量设置,如表 1 所示. 多状态变量的设置,如表 2 所示.

表 1 二状态变量设置表
Tab. 1 Two-state variables setting

一级变量	二级变量	变量取值	一级变量	二级变量	变量取值
设备方面(EP)	进布架(CFF)	发生 1;不发生 2	操作方面(OP)	前车工(BW)	发生 1;不发生 2
	整纬机(WK)	发生 1;不发生 2		后车工(AW)	发生 1;不发生 2
	前车(FP)	发生 1;不发生 2		操作工(CW)	发生 1;不发生 2
	烘箱(DO)	发生 1;不发生 2	布料种类(TC)	相关 1;不相关 2	
	后车(BP)	发生 1;不发生 2			

表 2 多状态变量设置表
Tab. 2 Multistate variables setting

三级变量	变量取值	三级变量	变量取值
布左右移控制(Lrc)	1: 偏左;2: 居中;3: 偏右	进布张力设置(Fti)	1: 大于标准值;2: 小于标准值
布居中控制(Cc)	1: 居中;2: 未居中	助剂是否添加(Ai)	1: 添加;2: 未添加
展布辊 1(Iw1)	1: 转速快;2: 正常;3: 慢	进布对中(Icc)	1: 设置;2: 未设置
展布辊 2(Iw2)	1: 转速快;2: 正常;3: 慢	出布整理(Ocs)	1: 整齐;2: 散乱
开幅架左右移(Slr)	1: 偏左;2: 居中;3: 偏右	小样检测(Sd)	1: 检测;2: 未检测
调速设置开关故障(Ss)	1: 故障;2: 未故障	拉幅(Tet)/cm	1: 0~5;2: 6~10;3: >10
喷风管(Sgp)	1: 正常运行;2: 间歇运行	车速(Smv)/m·min ⁻¹	1: <25;2: 25~28
空气加热器(Ah)	1: 正常运行;2: 间歇运行	烘箱预热(Ao)/min	1: <10;2: >10
输送网带(Cbm)	1: 正常运行;2: 间歇运行	温度(Tep)/℃	1: 180~195;2: 196~200;3: >200
导布辊(Tr)	1: 转速快;2: 正常;3: 慢	克质量差(Gwd)/g·m ⁻²	1: <-5;2: -5~+5;3: >+5
超喂(Ovf)	1: 0.10~0.30;2: 0.31~0.50;3: 0.51~0.60	弹力布(JC)	1: JC30S+40D;2: JC40S+20D;3: JC40S+30D
摆布架偏移(Oas)	1: 偏左;2: 居中;3: 偏右		

由于变量较多,结合某纺织企业数据和相关经验,采用相关分析^[10]确定主要因素,相关分析结果如表 3 所示.

表 3 克质量差与各变量间的相关分析结果
Tab. 3 Correlation analysis results between difference of gram weight and variables

变量	Lrc	Cc	Iw1	Iw2	Slr	Ss	Fti	Ai	Icc	Ocs	Sd
克质量差	0.297	-0.144	-0.118	0.096	0	0	0.144	0	0.164	0	0
变量	Tet	Ah	Smv	Cbm	Tr	Oas	Ovf	Tep	Ao	JC	Sgp
克质量差	-0.287	-0.297	-0.260	0.152	0.325	0	-0.236	-0.274	-0.365	0.022	0.365

表 3 分析了克质量差与各变量之间的相关性,但在部分变量之间也存在相关性.操作工把控全局,初次设置工艺参数后,会根据实时变化调整参数,其中,烘箱内的喷风管和空气加热器对于定型的温度方便有直接的影响;进布张力设置,是指工人手工对布匹进行的张力大小设置,该张力会影响布后续的拉幅值,所以前车工的进布张力设置与拉幅有直接关系;经过多项工艺参数的研究,不同的布料种类所设置的车速不同,所以推断布料种类与车速有关.

为了进一步提高贝叶斯网络推理的准确性,对各变量进行相关性分析.结果表明:空气加热器、喷风管与温度间的相关性分别为-0.542 和-0.600;车速与弹力布种类的相关性为 0.788;进布张力设置与拉幅的相关性为-0.743.由此可知,以上分析的这些变量间有显著相关性.

2.3 热定型过程贝叶斯网络结构模型

贝叶斯网络结构是由节点和有向弧组成^[10],节点代表各影响因素和克质量差,有向弧表示该弧连接的两个变量之间存在互相影响的关系.贝叶斯网络有如下 5 个主要构建步骤.

1) 确定影响克质量变量的一级变量{EP,OP,TC},二级变量{CFF,WK,DO,BP,BW,CW},三级变量{Lrc,Cc,Iw1,Iw2,Sgp,Ah,Cbm,Tr,Ao,Fti,Icc,Tet,Smv,Ovf,Tep,JC}.

2) 在一张空白图上,先将三级变量放入空白图中,用有向弧连接空气加热器与温度,喷风管与温度,弹力布种类与车速,进布张力设置与拉幅,箭头指向温度、车速和拉幅.

3) 将二级变量放入上图中,根据表 1,2 的划分,用有向弧连接对应的一级变量和二级变量,箭头指

向二级变量.

- 4) 将一级变量放入图中,用有向弧连接一级变量和二级变量,箭头指向一级变量.
- 5) 将最终质量指标克质量差放入图中,用有向弧连接最终质量指标和一级变量,箭头即指向克质量差.

按照上述步骤即可完成热定型过程质量因素分析的贝叶斯网络模型构建. 其中,终端的节点为克质量差,次层节点为一级变量,初始节点为三级变量,即直接造成质量影响的各项基础影响因素^[11]. 在初始节点和终端节点之间还存在一些过渡的节点即为二级变量,网络拓扑结构,如图 3 所示.

2.4 先验概率假设

对于三级变量,即该贝叶斯网络中的根节点可通过查询数据或由以往专家经验获得其先验概率值. 设 B_i 有 m 个观测样本,使 B_i 取值为 i 的样本数 $m_i, i=1,2$ 或 $i=1,2,3$,且 $\sum m_i=m$. 因此,对于研究中有大量历史统计数据的部分,各个影响因素的先验概率为

$$P(B_i = i) = m_i / m.$$

(1)

3 贝叶斯网络推理

为了缩短推理时间和降低推理的复杂度,采用团树传播算法^[12-13]. 文中主要应用于原因推理,证据变量为最终质量指标克质量差,查询变量为各项影响因素,从而推理出各影响因素对质量的影响程度.

3.1 端正图的构造

端正图是在贝叶斯网络图的基础上转变而来的. 第一步,找到同一个节点的多个父节点,将父节点两两相连;第二步,去掉所有有向边的箭头,即可完成端正图的构建,如图 4 所示.

3.2 变量消元顺序的确定

采用最大势搜索算法^[9]确定消元顺序. 规则如下:第一步,对一个含有 n 个变量节点的端正图,先任选一个节点作为最后一个消元点,编号为 n ;第二步,找出该图中拥有最多相邻节点是已编号节点的未编号节点,将该未编号节点编号为 $n-1$ 号;第 k 步,按照第二步的方法找到此未编号节点,将其编号为 $n-k+1$ 号. 若在某一步中这样的未编号节点有多个,任选一个编号即可. 当所有节点都被编号后,按编号从小到大的顺序作为变量消元的顺序. 由此可知,文中的消元顺序为:JC, Ao, Icc, Fti, Smv, Tet, Ovf, BW, CW, Iw2, Tr, Lrc, Cc, Iw1, BP, CFF, Tep, Ah, Cbm, Sgp, WK, DO, OP, TC, EP, Gwd.

3.3 团树的构建

采用图消元的算法来构建团树,如图 5 所示. 从一个贝叶斯网络的端正图出发,按照一定的顺序对该端正图中的变量节点进行消元. 在消元过程中,消去一个变量 A 之前,先构造一个由 A 及 A 所有相邻的变量节点组成的团;消元结束后,将过程中所产生的团用一定的方式连接起来,得到一颗覆盖贝叶斯网络的团树^[14].

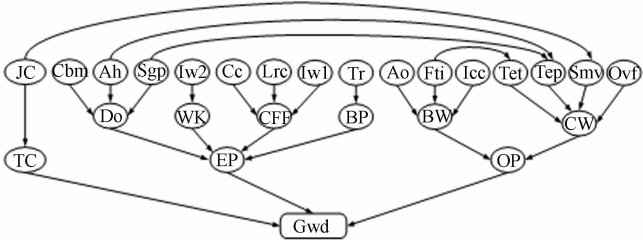


图 3 贝叶斯网络结构拓扑图

Fig. 3 Bayesian network structure topology

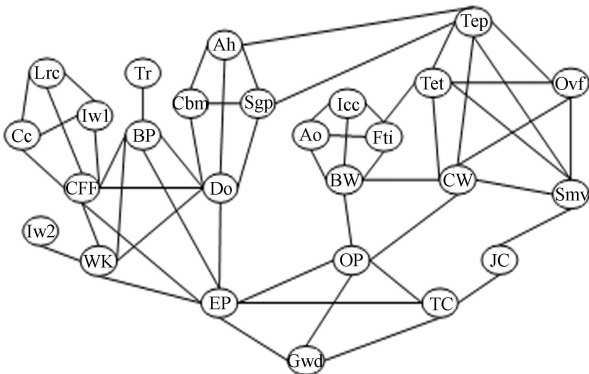


图 4 端正图的构建

Fig. 4 Construction of moral graph

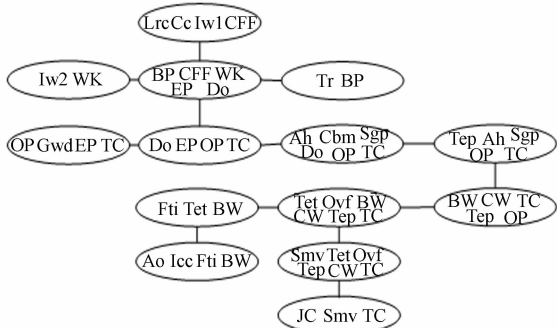


图 5 贝叶斯网络的团树

Fig. 5 Clique tree of the Bayesian network

3.4 后验概率计算流程

为直观说明计算流程,以简单贝叶斯网络 2 为例.

1) 为团树中的每个团赋值. 找到贝叶斯网络中的节点相应的概率分布, 存贮于对应团中,如图 6 所示. 团间的传递信息为

$$\left. \begin{aligned} \varphi_1(A) &= \sum_X P(X)P(A \mid X), & \varphi_2(C) &= P(B = y \mid C), \\ \varphi_1(A) &= \sum_C P(C \mid A)\varphi_2(C), & \varphi_2(C) &= \sum_A P(C \mid A)\varphi_1(A). \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

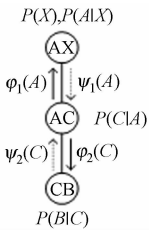


图 6 团树 2

Fig. 6 Clique tree 2

2) 设置证据. 将证据变量赋值带入团中的概率分布. 团中(图 6)可设置证据 {B=y}.

3) 任选一个含有查询变量的团作为枢纽节点,从叶节点开始,逐步向枢纽节点的方向进行信息传递^[15],该信息即是从相邻团中或得的概率函数. 为了实现多变量的查询,信息传递分为收集和分发两个阶段. 例如,图 6 中的实线部分为信息分发;虚线部分为信息收集;[AC]团为枢纽节点. 信息传递和信息的收集可由式(1)表示.

4) 答案提取. 对于每一个非证据变量都可以成为查询变量,均可在包含其的团中将信息提取出来,作为后验概率. 例如,从[AC]团中提取出 $P(A \mid B = y)$,其计算式为

$$P(A \mid B = y) = \frac{\sum_C P(C \mid A)\varphi_1\varphi_2}{\sum_{C:A} P(C \mid A)\varphi_1\varphi_2} = \frac{P(A, B = y)}{P(B = y)}.$$

同理,用上述信息传递的方法可从团[AX]中提取出变量 X 的后验概率,即

$$P(X \mid B = y) = \frac{\sum_A P(A \mid X)P(X)\varphi_1\varphi_2}{\sum_{A:X} P(A \mid X)P(X)\varphi_1\varphi_2} = \frac{P(X, B = y)}{P(B = y)}.$$

通过构建团树的方法,后验概率与贝叶斯网计算后验概率的计算结果一致,团树推理模型有效.

4 实例部分

根据式(1)和专家经验给出各变量的先验概率和条件概率表. 部分二状态、三状态根节点的先验概率,如表 4,5 所示;温度的条件概率表,如表 6 所示.

表 4 二状态根节点先验概率

Tab. 4 Priori probability of root nodes of two-state

序号	Cc	Sgp	Ah	Cbm	Ao	Fti	Icc
1	0. 90	0. 95	0. 90	0. 97	0. 37	0. 45	0. 88
2	0. 10	0. 05	0. 10	0. 03	0. 63	0. 55	0. 12

表 5 三状态根节点先验概率

Tab. 5 Priori probability of root nodes of three-state

序号	Lrc	Iw1	Iw2	Tr	Ovf	JC
1	0. 15	0. 05	0. 05	0. 11	0. 03	0. 25
2	0. 73	0. 80	0. 80	0. 75	0. 45	0. 36
3	0. 12	0. 15	0. 15	0. 14	0. 52	0. 39

同理,可得出其他变量的条件概率表(CPT). 由于所涉及的变量较多,就不一一列出.

4.1 正向推理

当弹力布种类为 JC30S+40D,超喂为 0. 21~0. 40,即 {JC=1,Ovf=2}的情况下,推理计算出最终质量指标克质量差的概率,最终质量的合格率为 62. 2%,克质量比客户要求的最低重量偏低的概率为 18. 8%,克质量比客户要求的最高

表 6 温度的条件概率表

Tab. 6 CPT of temperature

序号	Ah=1		Ah=2	
	Sgp=1	Sgp=2	Sgp=1	Sgp=2
1	0. 10	0. 02	0. 40	0. 25
2	0. 85	0. 63	0. 40	0. 56
3	0. 05	0. 35	0. 20	0. 19

重量偏高的概率为 19.0%。由此可知,布料种类和超喂的选择对最终质量克质量的影响程度还是比较大的。然而,在该情况下,克质量偏轻和偏重的概率差距较小,符合工厂的实际生产情况。

4.2 逆向推理

为了更详细地分析每个部分对质量的影响程度,把变量按照表 1 的等级进行划分,最终质量指标为证据变量,其余因素为查询变量,查询变量分为一级变量、二级变量和三级变量。

4.2.1 一级变量、二级变量推理结果 设置证据变量,当最终质量指标克质量差(Gwd)不同情况时,一级变量设备方面、操作方面、布料种类,以及二级变量进布架、整纬机、烘箱等导致的概率推理结果,如图 7 所示。

由图 7 可知:当最终质量克质量小于用户可接受范围的下限,或者最终质量克质量大于用户可接受范围的上限时,即最终质量不合格时,一级变量中操作方面对其产生的影响最大;相应的,在二级变量中操作工操作导致的质量不合格所在的比例最大,其次是后车和整纬机部分。当最终质量克质量在用户可接受范围内时,即克质量差在-5~+5 时,设备方面发生问题的概率、操作方面发生状况的概率、布料种类不同的概率都相对较低。

4.2.2 三级变量推理结果 为了进一步探寻各个环节对最终质量产生的影响程度,推理得出三级变量在不同质量情况下的变化。当质量检测在客户要求范围内时,各个变量出现问题的概率都相对较低。仔细分析各变量的取值,将取值中表示该变量不合格的项发生的概率加一起,用于表示该变量产生问题的概率,汇总结果如表 7 所示。

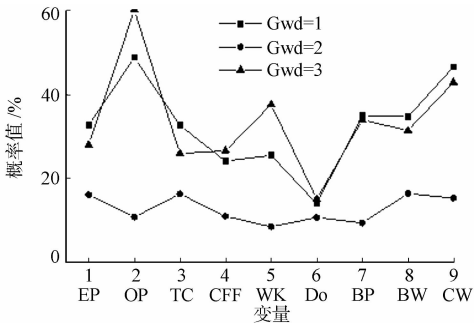


图 7 不同变量情况下质量不合格概率值
Fig. 7 Quality disqualification probability value under the different variables

表 7 推理结果汇总
Tab. 7 Summary of reasoning results

变量	不合格概率汇总		变量	不合格概率汇总		变量	不合格概率汇总	
	Gwd=1	Gwd=3		Gwd=1	Gwd=3		Gwd=1	Gwd=3
Lrc	0.515	0.504	Cc	0.579	0.642	Iw1	0.715	0.554
Iw2	0.509	0.681	Sgp	0.272	0.186	Ah	0.083	0.065
Cbm	0.332	0.283	Tr	0.570	0.584	Ao	0.461	0.243
Icc	0.282	0.249	Tet	0.758	0.695	Smv	0.321	0.218
Ovf	0.388	0.879	Tep	0.702	0.523			

由表 7 可知:当最终质量克质量小于用户可接受范围的下限时,即 Gwd=1 时,变量车速发生问题的概率最大,其次是展布辊 1 及温度;车速过慢的概率大于车速过快的概率,而温度偏高的概率也远高于温度偏低的概率;当最终质量克质量大于用户可接受范围的上限时,即 Gwd=3 时,超喂发生问题的概率最大,其次是车速和展布辊 2,而超喂偏高的概率高于偏低的概率,车速过快的概率大于车速过慢的概率。

由表 7 还可知:两种情况下,空气加热器和喷风管发生问题的概率都偏低。由于进布张力设置(Fti)和弹力布类型(JC)两项变量取值的特殊性,Fti 设置在 3 种状态下设置情况几乎不影响,JC 中 JC40S+20D 更容易导致克质量低于客户要求,JC40S+30D 克质量则易高于客户要求。

4.2.3 结果分析 由推理可知,一级变量中对克质量问题影响最大的为操作方面;二级变量中影响最大的为操作工部分,其次是整纬机部分和后车部分;三级变量中,车速、温度、超喂这 3 部分由操作工操控的工艺参数变量是影响较大的部分,其次是展布辊 1 和展布辊 2。根据工厂提供的质量不合格数据,因操作工设置工艺参数错误,从而导致的克质量偏差高达 86%,而对于空气加热器和喷风管发生问题的概率偏低。经过现场情况的勘察,该设备较少发生故障,可见推理结果符合实际生产情况,因此,推理模型有效。

企业改善热定型克质量最首要是加强培养员工操作方面的知识,特别是操作工在工艺参数设定方面的经验积累,即使在很确切的参数设定下,也要根据实时监测变化情况进行调节,以及设备的定期维

护和检测。当克质量偏轻时,车速、温度、展布辊 1 这些方面要着重加强控制和调整;当克质量偏重时,对超喂、车速和展布辊 2 部分的设置要进行调节和改善。工厂可参照推理结果有目标地解决现场设备运行问题 and 提高人工管理效率,从而提高产品的生产一次合格率。

5 结论

通过分析企业的现场设备机械构造和各个生产环节的操作流程,确定变量名称和取值,并根据历史数据分析各变量与最终质量指标之间的相关性,得出最终影响因素变量和贝叶斯结构模型。贝叶斯的参数学习主要通过查询变量的历史信息,得出先验概率和条件概率表,采用贝叶斯团树传播的推理方法得出各变量在不同取值的概率值,并结合工厂实例综合精准定量分析出各变量对克质量差的影响程度。

通过该分析可以使工厂的管理人员针对出错概率高的环节加强操作培训和严格管理,并增强相应设备的监管和维护,对提高产品的生产质量从源头改善提供了可靠的依据,也完成了质量闭环控制中最关键的质量分析环节。

参考文献:

- [1] 罗国英,林修齐. 2000 版 ISO 9000 族标准质量管理体系教程[M]. 北京:中国经济出版社,2003.
- [2] 周静. 印染生产过程质量分析与预测系统研究[D]. 厦门:华侨大学,2008.
- [3] 顾宇峰. 染整生产过程质量控制关键技术研究与应用[D]. 厦门:华侨大学,2010.
- [4] 徐兰,苏翔. 基于贝叶斯网络的复杂质量结构产品系统关键质量要素识别方法[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版),2015,29(2):193-198. DOI:10.3969/j.issn.1673-4807.2015.02.017.
- [5] 任佳,苏宏业. 印染热定型机煤、电能耗建模及优化求解研究[J]. 仪器仪表学报,2013,34(3):582-587. DOI:10.3969/j.issn.0254-3087.2013.03.015.
- [6] 赵迪. 染整热定型工艺模型及数字化设计系统研究[D]. 厦门:华侨大学,2015.
- [7] MOTOMURA Y. Bayesian network softwares (Bayesian network)[J]. Journal of Japanese Society for Artificial Intelligence,2002,17(5):559-565.
- [8] 王双成. 贝叶斯网络学习、推理与应用[M]. 1 版. 上海:立信会计出版社,2010.
- [9] WANG Fei,LIU Dayou,XUE Wanxin. Discretizing continuous variables of Bayesian networks based on genetic algorithms[J]. Chinese Journal of Computers,2002,25(8):794-800.
- [10] 张慧永. 基于贝叶斯网络的交通事故态势研究[D]. 吉林:吉林大学,2013.
- [11] 张连文,郭海鹏. 贝叶斯网引论[M]. 北京:科学出版社,2006.
- [12] BENSI M,KIUREGHIAN A D,STRAUB D. Efficient Bayesian network modeling of systems[J]. Reliability Engineering and System Safety,2013,112(2):200-213. DOI:10.1016/j.ress.2012.11.017.
- [13] POOLSAPPASIT N,DEWRI R,RAY I. Dynamic security risk management using Bayesian attack graphs[J]. IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing,2011,9(1):61-74. DOI:10.1109/TDSC.2011.34.
- [14] 李志瑶,宗芳. 贝叶斯网络推理分析的团树传播算法:以停车行为分析为例[J]. 长春大学学报,2012,22(5):506-507.
- [15] HOTA P K. Security constrained economic environmental dispatch through fuzzy based gravitational search algorithm[J]. Procedia Technology,2015,6(4):411-419. DOI:10.12691/ajee-3-2-4.

(责任编辑:钱筠 英文审校:吴逢铁)