

层次分析法在产品系统可靠性分析中的应用

林敬茂,江思定

(浙江科技学院 经济管理学院,杭州 310023)

摘要: 针对故障树因果图只能进行定性故障分析的局限性,将层次分析法与故障树分析法进行有机结合,构建了定量化故障树分析模型,并提出“定量化故障树分析法”。运用该法对系统故障进行量化分析,能清楚直观地描绘出系统各个组成部分对实现系统可靠性目标的相对重要性,从而有效地指导生产,提高系统可靠性。

关键词: 层次分析法;故障树分析法;定量化;模型;可靠性

中图分类号: U260.35;F273.2

文献标识码: A

文章编号: 1671-8798(2006)04-0291-04

Application of Analytic Hierarchy Process to Reliability Analysis for Product System

LIN Jing-mao, JIANG Si-ding

(School of Economics and Management, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: Contraposing the limitation that only can carry on qualitative fault analysis by fault tree causes and effects chart, this paper studies the analytic hierarchy process and the fault tree analysis, and carries on two methods organic synthesis, constructs the quantitative fault tree analysis model, and proposes the “quantitative fault tree analysis” newly technique. Utilizing this technique to carry on the quantification to the faults of system, people can describe each constituent to realizes relative importance of the system reliability goal so as to effectively instruct produce, and enhance the production system reliability.

Key words: analytic hierarchy process; fault tree analysis; quantitative; model; reliability

随着科学技术的发展,人们对产品的功能要求日益加强,对产品系统可靠性要求更高。若产品系统设计不当,可能存在着一种潜在的通路,在一定的条件下会使系统局部甚至整体失效,导致发生重大故障。因此,在产品的设计实验阶段为保证可靠性,就必须进行有效的可靠性分析。故障树分析方法(fault tree analysis,简称 FTA)是分析复杂系统可靠性和故障因果关系的有效工具和手段。故障树是

一种特殊的倒立树状逻辑因果关系图,它用规定的事件、逻辑门的符号和转移符号描述产品系统中各种事件之间的因果关系^[1]。故障树选定系统故障作为分析的顶事件,然后找出直接导致该顶事件发生的各种可能因素或因素组合。再进一步分析各个因素故障的原因,如此由上而下循序逐级进行,直至找出各底事件,就得到一棵故障树。故障树可以把系统故障的分析过程及结果用结构图形清楚准确地描

收稿日期: 2006-09-06

作者简介: 林敬茂(1984—),男,浙江苍南人,03级在读本科生,专业方向为工业工程;江思定(1974—),男,安徽无为
人,讲师,硕士,主要从事工业工程的教学与研究。

绘出来,使人们清楚地认识影响可靠性的因素及其关系。故障树因果图只能对问题进行定性的分析,但不能对各个底事件对产品顶事件的影响度的大小进行定量分析。层次分析法(the analytic hierarchy process,简称 AHP),又称多层次权重解析法,它是 20 世纪 70 年代初由美国著名运筹学家匹兹堡大学萨蒂(T. L. Saaty)教授首次提出来的。该方法是定量分析与定性分析相结合的多目标决策分析方法,把数学处理与人的经验和主观判断相结合,有效地综合测度评价决策者的判断和比较^[2]。

将层次分析法引用到系统可靠性分析中来,与故障树分析法相结合,建立定量化故障树分析模型,形成一种新的定量化的可靠性分析方法——定量化故障树分析法。它直观清晰、思路简洁、又可测度,是系统可靠性分析技术领域的一种新运用。本文将机车空气制动机产品系统故障为例,来具体说明定量化故障树分析法的运用。

1 定量化故障树分析法的应用步骤

1)首先,组织产品系统设计、使用可靠性评价

方面的专家,让专家们对产品故障进行系统分析,归纳;然后,按照科学、标准的方法画出产品系统故障树。

2)将问题层次化,即根据问题的性质和要达到的要求,将问题分解为不同的基本组成因素,并按照因素间的相互影响以及隶属关系将因素聚集组合,形成一个多层次的分析结构模型^[3]。

3)采用德尔菲法、数理统计、经验数据等手段对各个层次因素的相对重要性进行赋值,并进行相关矩阵计算,最终得出最底层各个因素对实现系统可靠性目标的相对重要性。

4)根据定量化故障树分析法计算得出的数据,并结合目前实际的生产环境,制定产品系统可靠性实现的方针措施,从而有效地指导产品生产,实现系统高可靠性。

2 应用实例

以某企业机车空气制动机为例,按照科学、标准的方法画出机车空气制动机故障树(详见文献[1])如图 1。

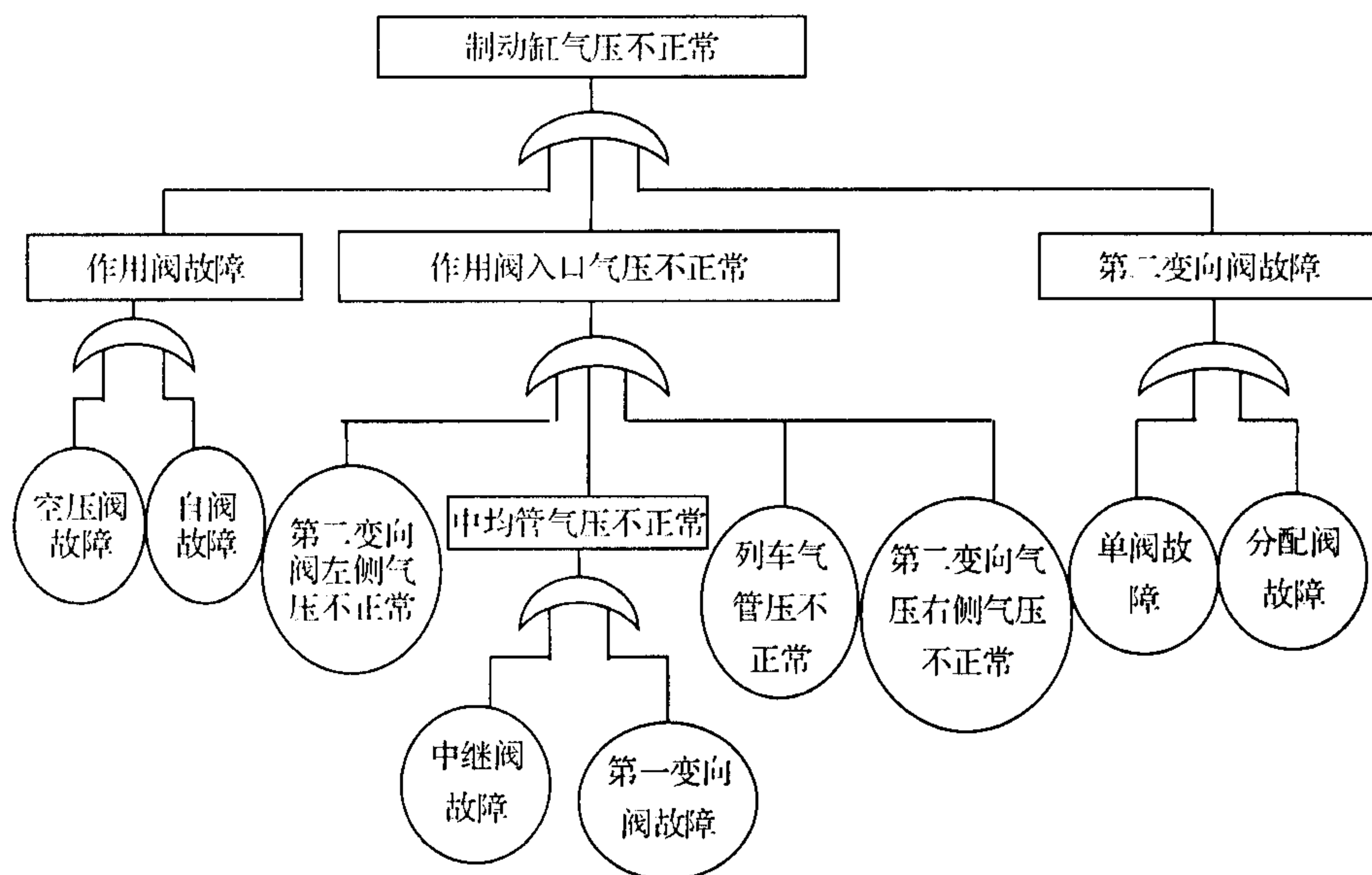


图 1 机车空气制动机故障树

2.1 建立递阶层次结构模型

根据机车空气制动机故障树,将它进行层次划分,并最终得到层次关系图(图 2)。其中,由于中继阀故障和第一变向阀故障将会导致中均管气压不正常,故将中继阀故障(D_1)和第一变向阀故障(D_2)作为中均管气压不正常(C_4)的下层隶属因素。

2.2 建立判断矩阵

判断矩阵是表示针对上一层的某因素,本层次与之有关的因素之间相对重要性的比较。在层次分析法中,一系列成对因素的相对重要性的比较是定性的,为了使决策度量化,形成数值上的判断矩阵,必须引入合适的标度值对各种相对重要度的关

系进行度量。在此,采用 1~9 标度化,把定性转化为定量(表 1)。

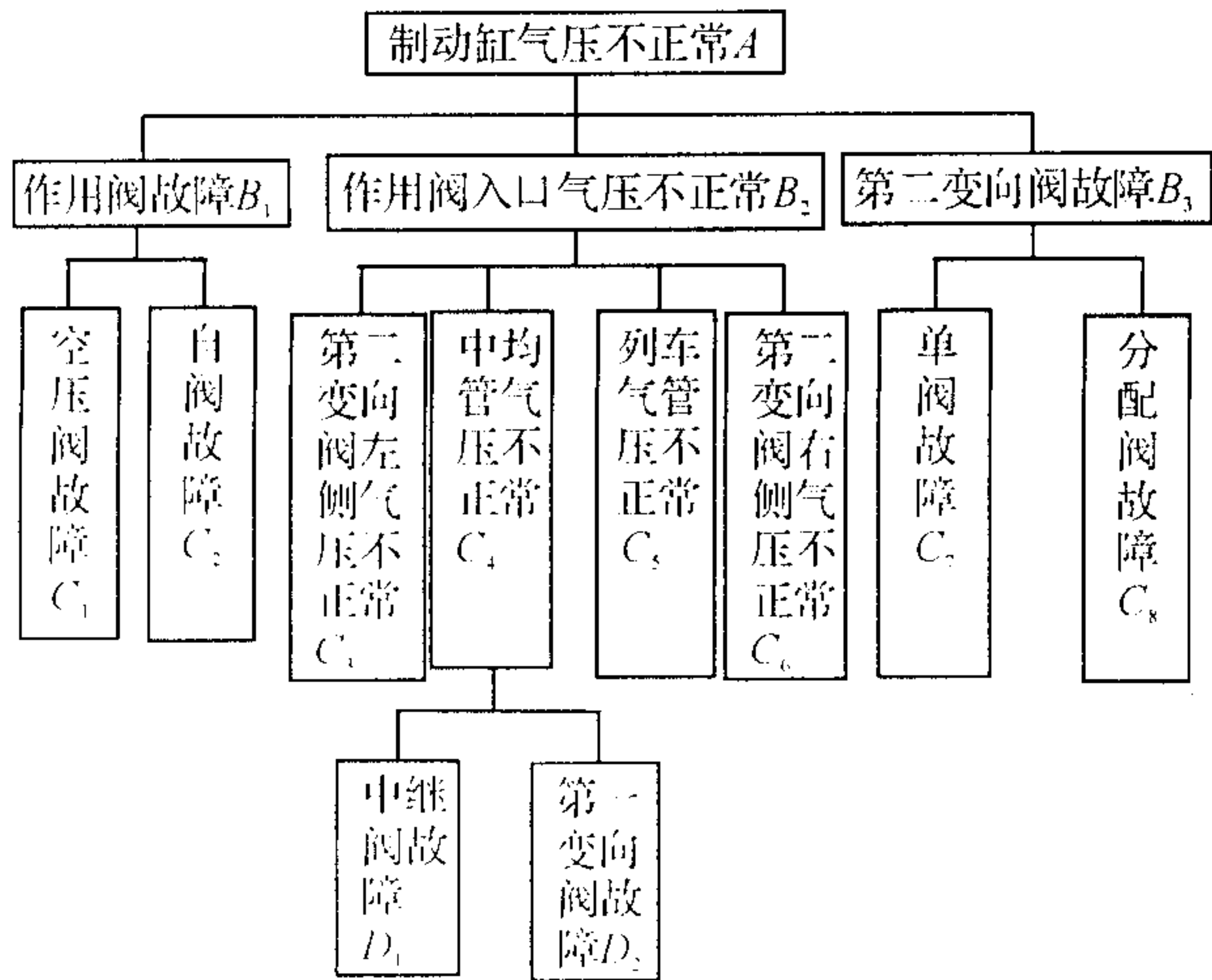


图 2 机车空气制动机故障树层次关系

表 1 判断矩阵标度及其含义

标度	含义
1	表示两个因素相比,具有同样重要性
3	表示两个因素相比,一个因素比另一个因素稍微重要
5	表示两个因素相比,一个因素比另一个因素明显重要
7	表示两个因素相比,一个因素比另一个因素强烈重要
9	表示两个因素相比,一个因素比另一个因素极端重要
2,4,6,8	介于以上两相邻判断的中值
倒数	指标 B_i 与 B_j 相比得判断值 λ_{ij} ,则 B_j 与 B_i 比较得判断值 $\lambda_{ji}=1/\lambda_{ij}$

分析导致机车空气制动机发生故障的部件,发生的概率及零部件材料等影响产品系统可靠性的各因素,制定几组度量机车空气制动机可靠性的指标,然后采用德尔菲法、数理统计等手段对可靠性指标进行分析、归纳、总结,最终得出各个层次指标之间的比较判断矩阵(表 2~6)。

表 2 比较判断矩阵一

	A	B_1	B_2	B_3
B_1		1	3	2
B_2		1/3	1	1/2
B_3		1/2	2	1

表 3 比较判断矩阵二

	B_1	C_1	C_2
C_1		1	1/8
C_2		8	1

表 4 比较判断矩阵三

	B_2	C_3	C_4	C_5	C_6
C_3		1	1/5	1/2	1/4
C_4		5	1	3	2
C_5		3	1/3	1	1/2
C_6		4	1/2	2	1

表 5 比较判断矩阵四

	B_3	C_7	C_8
C_7		1	3
C_8		1/3	1

表 6 比较判断矩阵五

	C_4	D_1	D_2
D_1		1	1/7
D_2		7	1

通过方根法,计算下一个层次各个因素对上一个层次某个因素的相对重要系数,并进行一致性检验。本文采用方根法,计算判断矩阵 M 的最大特征根 λ_{\max} 及其所对应的特征向量 W 。具体计算过程如下:

第一步,计算判断矩阵每一行元素乘积并开 N 次方,求得各行元素的几何平均值:

$$b_i = (\prod_{j=1}^n \delta_{ij})^{\frac{1}{n}} (i = 1, 2, \dots, n);$$

再把 $b_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 归一化处理,即求得最大特征值所对应的特征向量:

$$\omega_j = \frac{b_j}{\sum_{k=1}^n b_k} (j = 1, 2, \dots, n);$$

最后,可计算判断矩阵的最大特征值:

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\sum_{j=1}^n \delta_{ij} \omega_j}{\omega_i}.$$

第二步,一致性检验。由于判断矩阵的元素 δ_{ij} 是对因素关于某个评价目标的相对重要性程度的比的赋值,这些赋值是受专家和技术人员的知识水平、经验等主观因素影响的,所以,必须对判断矩阵进行一致性检验,以保证判断在大体上保持一致。

$$C.I. = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad C.R. = \frac{C.I.}{R.I.}$$

其中,表 7 给出了样本容量为 1 000 的 $R.I.$ 均值。

表 7 平均随机一致性指标 $R.I.$ 值

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$R.I.$	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

根据上述相关计算公式,可求出最大特征根、特征向量及一致性检验结果。具体计算结果如表

8 ~ 12 所示。

表 8 最大特征根、特征向量及一致性检验结果一

层次 C 因素	层次 D 因素	特征向 量 W	最大特征 根 λ_{\max}	一致性 检验
C_1	D_1	0.125 0	2	$C.R. = 0 < 0.1$ 合格
	D_2	0.875 0		

表 9 最大特征根、特征向量及一致性检验结果二

层次 B 因素	层次 C 因素	特征向 量 W	最大特征 根 λ_{\max}	一致性 检验
B_1	C_1	0.111 1	2	$C.R. = 0 < 0.10$ 合格
	C_2	0.888 9		
	C_3	0.072 9		
B_2	C_4	0.473 0	4.051	$C.R. = 0.02 < 0.1$ 合格
	C_5	0.169 7		
	C_6	0.285 4		
B_3	C_7	0.750 0	2	$C.R. = 0 < 0.10$ 合格
	C_8	0.250 0		

表 10 最大特征根、特征向量及一致性检验结果三

层次 A 因素	层次 B 因素	特征向 量 W	最大特征 根 λ_{\max}	一致性 检验
A	B_1	0.539 6	3.002 9	$C.R. = 0 < 0.10$ 合格
	B_2	0.163 4		
	B_3	0.297 0		

表 11 C 层次各因素对总排序权值计算

层次 C	B_1 0.539 6	B_2 0.163 4	B_3 0.297 0	C 层次总排序权值
C_1	0.111 1	0	0	0.059 9
C_2	0.888 9	0	0	0.479 7
C_3	0	0.729	0	0.011 9
C_4	0	0.473	0	0.077 3
C_5	0	0.169 8	0	0.027 7
C_6	0	0.284 3	0	0.046 5
C_7	0	0	0.75	0.222 8
C_8	0	0	0.25	0.074 2

注:计算总一致性检验数 $C.R._c = 0 < 0.1$ 。

表 12 D 层次各因素对总排序权值计算表

层次 D	C_1 0.059 9	C_2 0.479 7	C_3 0.011 9	C_4 0.077 3	C_5 0.027 7	C_6 0.046 5	C_7 0.222 8	C_8 0.074 2	D 层次总排序权值
D_1	0	0	0	0.125	0	0	0	0	0.009 7
D_2	0	0	0	0.875	0	0	0	0	0.067 6

注:计算总一致性检验数 $C.R._D = 0 < 0.1$ 。

从表 8 ~ 10 中可以看出,各层次的因素对上一层次的相对重要性程度是不一样的。如 A—B 关系中, $(B_1, B_2, B_3) = (0.539 6, 0.163 4, 0.297 0)$ 。再则,随机一致性比率 $C.R.$ 都是小于 0.10,故可认为建立判断矩阵时的相对重要性赋值是客观的,准确的。

由上述层次总排序重要性系数计算得,C、D 层最终影响因素对制动缸气压不正常的重要性大小顺序依次为: $C_2, C_7, C_8, D_2, C_1, C_6, C_5, C_3, D_1$ 。可见自阀故障(C_2)和单阀故障(C_7)是机车空气制动机故障的主要因素。因此,高质量的自阀部件和单阀部件是实现机车空气制动机高可靠性的关键部位。所以,在设计生产自阀和单阀时,应该采用先进的生产工艺、技术及严格的检测标准。

3 结 语

故障树因果图只能对问题进行定性分析,不能对各个底事件对产品顶事件的影响度的大小进行定量

分析。将层次分析法应用到故障树分析中,可以帮助分析人员更精确地认识到影响产品系统可靠性的主要因素及影响程度,从而有效地指导产品的生产,提高产品系统可靠性的目标。但是在使用定量化故障树分析模型时,由于判断矩阵的元素 δ_{ij} 是相对重要性程度比的赋值,这些赋值是受专家和技术人员的知识水平、经验等主观因素影响的,所以与实际有差别。至于如何更精确地对各个因素相对重要性进行赋值,将成为后续值得研究的课题。实践证明,定量化故障树分析法是一个非常有用的系统分析工具。

参考文献:

- [1] 罗国勋. 质量管理与可靠性[M]. 北京:高等教育出版社,2005.
- [2] 叶义成,柯丽华,黄德育. 系统综合评价技术及其应用[M]. 北京:冶金工业出版社,2006.
- [3] 牛芳. 新产品开发决策的评价体系分析[J]. 机械管理开发,2006(1):123-124.