工程科学学报，第 38 卷，第 10 期：1482－1488，2016 年 10 月
Chinese Journal of Engineering，Vol. 38，No. 10：1482－1488，October 2016
DOI：10.13374/j.issn2095－9389.2016.10.018；http://journals.ustb.edu.cn

基于模糊综合评判的移动电源火灾风险分析

黄国忠[1)]✉，丁　洁[1)]，谢志利[2)]，谢　婷[1)]，杨　晓[1)]

1）北京科技大学土木与环境工程学院，北京 100083　2）国家质检总局缺陷产品管理中心，北京 100101
✉ 通信作者，E-mail：hjxhuanggz@163.com

摘　要　针对移动电源火灾事故频发的安全现状，本文采用能量转换和模糊综合评判的方法构建移动电源火灾风险评价模型，并对移动电源火灾风险进行评价．为增加评判过程的客观性，分别采用事故树基本事件结构重要度和相对差异函数对评判模型中评价因子的权重和隶属度进行分析和计算．评判结果表明移动电源火灾事故风险等级处于一般安全与比较危险之间，与实际情况相符合．

关键词　移动电源；火灾风险分析；模糊逻辑；事故树
分类号　X956

Fire risk analysis of the mobile power pack based on the fuzzy synthetic evaluation model

HUANG Guo-zhong[1)]✉，*DING Jie*[1)]，*XIE Zhi-li*[2)]，*XIE Ting*[1)]，*YANG Xiao*[1)]

1）School of Civil and Environmental Engineering，University of Science and Technology Beijing，Beijing 100083，China
2）AQSIQ Defective Product Administrative Center，State General Beijing 100101，China
✉ Corresponding author，E-mail：hjxhuanggz@163.com

ABSTRACT　Due to the present situation of frequent fire accidents caused by the mobile power pack，fire risk based on the energy transfer theory and the fuzzy synthetic evaluation model was analyzed in the paper．Furthermore，fault tree analysis and the relative difference function are combined with the model to determine the weight values and memberships of evaluation factors．The evaluation results show that the risk level of fire accidents caused by the mobile power pack is between the safe and the more dangerous，which is agreed with the practical situation.

KEY WORDS　mobile power packs；fire risk analysis；fuzzy logic；fault trees

2010 年以来随着移动终端电池续航力不足短板的凸显，移动电源（mobile power pack，MPP）以其随时随地充电的优点被广泛应用．然而由于国内外移动电源国家强制性标准缺失，市场管理混乱，其燃烧爆炸事故随之频发，国家质检总局 2014 年发布移动电源安全预警．目前国内外对移动电源安全性研究较少，主要集中在锂离子电芯性能及材料方面[1]．因此，本文从产品安全系统工程和本质安全的角度出发，结合事故事例，将 USB 接口移动电源作为一个整体，采用模糊综合评判方法分析其火灾风险，并为移动电源设计改进提供科学支持．

1　移动电源火灾危险源辨识

危险源辨识是风险指标体系构建的基础工作，是保证风险指标体系合理性和科学性的主要依据[2]．通过对移动电源危险源进行辨识，从产品固有特性、使用因素、环境因素等方面分析寻找可能影响其发生火灾的主要因素，从而为风险评估指标的构建提供技术依据．移动电源主要组成部分为锂离子电芯、印刷电路板（PCB）和外壳，其工作时系统能量转换如图 1 所

收稿日期：2016－03－15
基金项目：国家质量监督检验检疫总局科技计划资助项目（2015QK242）

示[3-5]. 其中,锂离子电芯是能量转化及储存单元,主要组成部分为正负极、隔膜、电解液和外壳,但具有较强的热不稳定性,目前其高危险性仍然是世界性难题. 正常使用时,电芯内部化学能、电能及热能的转化达到动态平衡; 当温度升高时,锂离子电芯内部发生一系列化学连锁反应,化学能向热能异常转化,迅速释放出大量热量并伴随有可燃性气体产生,当达到其燃点时自燃甚至爆炸.

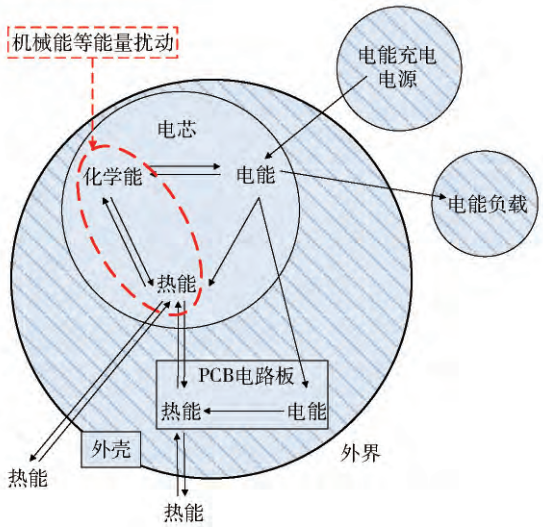

图 1 移动电源系统能量转换

Fig. 1 System energy conversion of the mobile power pack

电芯内部由外界热扰动而引起的化学能向热能的异常转换,是造成移动电源火灾事故的根源. 从图 1 分析,异常转化路径如下: (1) 电芯自身材料选择及制作工艺缺陷,导致电芯固有的维持其内部能量转化动态平衡的能力不足; (2) 外界环境高温、印刷电路板高温以及散热能力缺陷导致电芯内部热量积累,内部温度升高诱发化学反应放热; (3) 过充电、过放电、过电流、意外短路等不良使用习惯,导致电芯内部有锂枝晶产生或正负极塌陷,使得极化现象严重,大量电能向热能异常转化而诱发化学反应放热.

印刷电路板是规范能量转化,防止能量意外释放的重要部件,主要由充电管理模块、升压模块、保护模块以及电量指示模块组成. 其中充电管理模块和升压模块的作用是规范充放电过程中电压及电流; 保护模块主要提供过充、过放、过流及短路保护作用. 印刷电路板在使用过程中会释放大量热量,影响自身可靠性以及电芯热量分布,所以印刷电路板上电子元件的合理布局及其可靠性是影响移动电源安全性的重要因素.

外壳是移动电源的最后一道安全防线,在正常使用时,起到保护内部组件及散热的功能; 发生事故时,防止能量继续释放造成伤害,起到阻止火灾发展及爆炸的功能. 所以移动电源外壳材料的抗机械撞击能力、散热能力及阻燃能力是影响移动电源安全性的重要因素.

2 建立模糊综合评判模型

影响移动电源着火的安全性因素多而复杂,相互影响且具有不确定性. 同时,目前没有关于移动电源准确权威的法律法规标准,很多参数的安全性取值更加难以界定. 此外,事故树是一种从结果演绎推理到原因的分析方法,即以火灾为顶事件依次查找引起火灾的各项具体原因,直观明了,逻辑性强. 因此,模糊综合评价方法结合事故树方法适宜于分析评估移动电源火灾风险. 各类火灾风险分析方法主要特点见表 1.

本文在传统模糊综合评判模型基础上,分别采用事故树(FTA)、基本事件结构重要度、层次分析法(AHP)及相对差异函数,进行评估指标体系的构建、评价因子权重的赋值以及隶属度的选取. 其中,层次分析法由于具有系统性、简洁实用、所需定量数据信息较少等优点被广泛应用于各个领域; 相对差异函数是一种确定分布函数的方法,该方法与物理概念符合较好,且模型中的参数可根据实际中的参数自由调节,以适合各指标的不同特点[6]. 以上几种方法结合可减少评判过程的主观性[7],提高评估结果的可信度.

表 1 火灾风险分析方法

Table 1 Fire risk analysis methods

类别	方法	特点
定性分析	安全检查表	侧重于辨识危险源,需要根据标准事先编制,适用于定期检查
	危险与可操作性分析	对火灾区域可能存在的伤害类别、发生条件及后果等进行简单分析,用于事前危险分析
	危险与可操作性分析	分析系统可能出现偏差的原因及后果,适用于化学工业火灾
半定量分析	火灾安全评估系统	该方法属于动态决策法,评估对象为部分公共机构和居民区
	火灾风险指数	适用于建筑房屋着火,该方法包括方针、目标、策略、参数和考核五个决策水平
	古斯塔夫法	该方法适用对象为结构复杂的公共区域
定量分析	事件树方法	定性了解事件变化过程,定量计算事故每个阶段发生概率,适用于各类系统
	事故树方法	该方法是一种从结果演绎推理到原因的分析方法,直观明了,逻辑性强,适用于各类系统
	模糊综合评价方法	定量分析不能准确定义的多因素事件,适用于安全因子分级模糊的评估对象,多数风险评估采用此方法

2.1　根据事故树建立评估指标体系

事故树是一种从结果演绎推理到原因的分析方法，本文采用事故树构建评估指标体系，可较为全面地概括评价因子，科学划分层次结构.

2.2　根据事故树和层次分析法确定权重

事故树基本事件结构重要度体现了基本事件（原因）对顶上事件（结果）的影响程度，层次分析法方案层各因素的权重体现了其对目标层的重要程度. 基于结构重要度和权重的一致性，本研究分别采用结构重要度和层次分析法构造判断矩阵，结合两种评价法得到权重 W' 和 W''，确定评价因子的权重：

$$W=\frac{\alpha W'+\beta W''}{\alpha+\beta}. \tag{1}$$

其中 α 和 β 为权重系数，为标度因子 φ 与 CR 因子 ε 之和. CR 为层次分析模型总排序随机一致性比率，CR 因子 ε 体现出判断矩阵计算过程中的误差；$a_{i/j}$ 为准则层/指标层不同因素的权重；$\mathrm{CI}_{i/j}$ 为准则层/指标层不同因素下指标层/方案层判断矩阵的 CI 值；$\mathrm{RI}_{i/j}$ 为随机一致性检验指标. 标度因子 φ 体现选择不同标度时的误差.

$$\begin{cases}\varepsilon=1-\dfrac{\mathrm{CR}-\mathrm{CR}_{\min}}{\mathrm{CR}_{\max}-\mathrm{CR}_{\min}}=1-10\mathrm{CR},\\ \mathrm{CR}=\dfrac{\sum\limits_{i=1}^{m}\left(a_i\mathrm{CI}_i\sum\limits_{j=1}^{n}a_j\mathrm{CI}_j\right)}{\sum\limits_{i=1}^{m}\left(a_i\mathrm{RI}_i\sum\limits_{j=1}^{n}a_j\mathrm{RI}_j\right)},\\ \mathrm{CI}=\dfrac{\sum\limits_{i=1}^{n}\dfrac{[DC][W]_i}{nW_i}-n}{n-1}.\end{cases} \tag{2}$$

根据层次分析法标度方法的比较结果，不同标度下的标度因子见表 2.

表 2　不同标度下的标度因子

Table 2　Scale factors at different scales

标度	3	5	7	9	11	13	15	17	18	26
φ	0.461	0.759	0.928	1.000	0.850	0.746	0.694	0.623	0.584	0.409
标度	30	34	36	44	52	60	68	75	85	90
φ	0.383	0.318	0.292	0.207	0.168	0.142	0.090	0.077	0.032	0

2.3　根据相对差异函数确定隶属度

对专家打分结果，参照建筑火灾安全评价时确定评价因子隶属度的方法，采用相对差异函数模型减少人主观判断的差异性，以此确定各安全等级的隶属度[8].

隶属度函数模型如下式：

$$\begin{cases}D_A(u)=\dfrac{x-a}{M-a}, & x\in[a,M];\\ D_A(u)=-\dfrac{x-a}{c-a}, & x\in[c,a].\end{cases}$$

$$\begin{cases}D_A(u)=\dfrac{x-b}{M-b}, & x\in[M,b];\\ D_A(u)=-\dfrac{x-b}{d-b}, & x\in[b,d].\end{cases}$$

$$\mu_A(u)=[1+D_A(u)]/2. \tag{3}$$

$\mu A(u)/\mu A^c(u)$ 为 u 吸引/排斥性质 A 的相对隶属度；$[a,b]_{ij}/[c,d]_{ij}$ 为第 i 个因素的第 j 个等级的标准值区间/上下界区间；$D_A(u)$ 为 u 对 A 的相对差异度，$D_A(u)=\mu A(u)-\mu A^c(u)$；$M$ 为区间 $[a,b]_{ij}$ 中 $D_A(u)=1$ 的点值.

3　移动电源火灾事故的模糊综合评判

事故树基本事件结构重要度体现了对评价对象的影响程度，层次分析法中方案层各评价因子的权重体现了对目标层的重要程度. 基于基本事件结构重要度和评价因子权重的一致性，可将两者结合提出一种改进的层次分析法以确定评价因子的权重；并运用相对差异函数确定评价因子对各安全等级的隶属度，减少主观因素影响，提高结果准确性.

3.1　绘制事故树，建立评估指标体系

综合事故调查及危险源辨识结果，移动电源火灾事故树及指标体系[8]如图 2 和表 3 所示. 图 2 中 T 代表事故树顶事件，A ~ K 代表事故树一系列中间事件.

3.2　构造判断矩阵及确定各评价因子的权重

3.2.1　确定权重 W' 及系数 α

将事故树转变为成功树，运用求其最小径集的方法，得出基本事件结构重要度 I_φ，并根据式（4）构造判断矩阵，其中 a_{ij} 根据四舍五入原则取整数，最大 $a_{ij}=12$ 为标度值，查表 2 可知标度因子（φ）=（0.8506 + 0.7468）/2 = 0.7987，根据式（2）得到 CR 因子（ε）= 0.9993，因此权重因子 α = 标度因子（φ）+ CR 因子（ε）= 1.7980.

$$\begin{cases}a_{ij}=\dfrac{\chi(i)}{\chi(j)}, & \text{当}\chi(i)\geqslant\chi(j);\\ a_{ij}=\dfrac{\chi(j)}{\chi(i)}, & \text{当}\chi(i)<\chi(j).\end{cases} \tag{4}$$

3.2.2　确定权重 W'' 及系数 β

本研究选用 1 ~ 9 标度来构造判断矩阵[9]，数值的

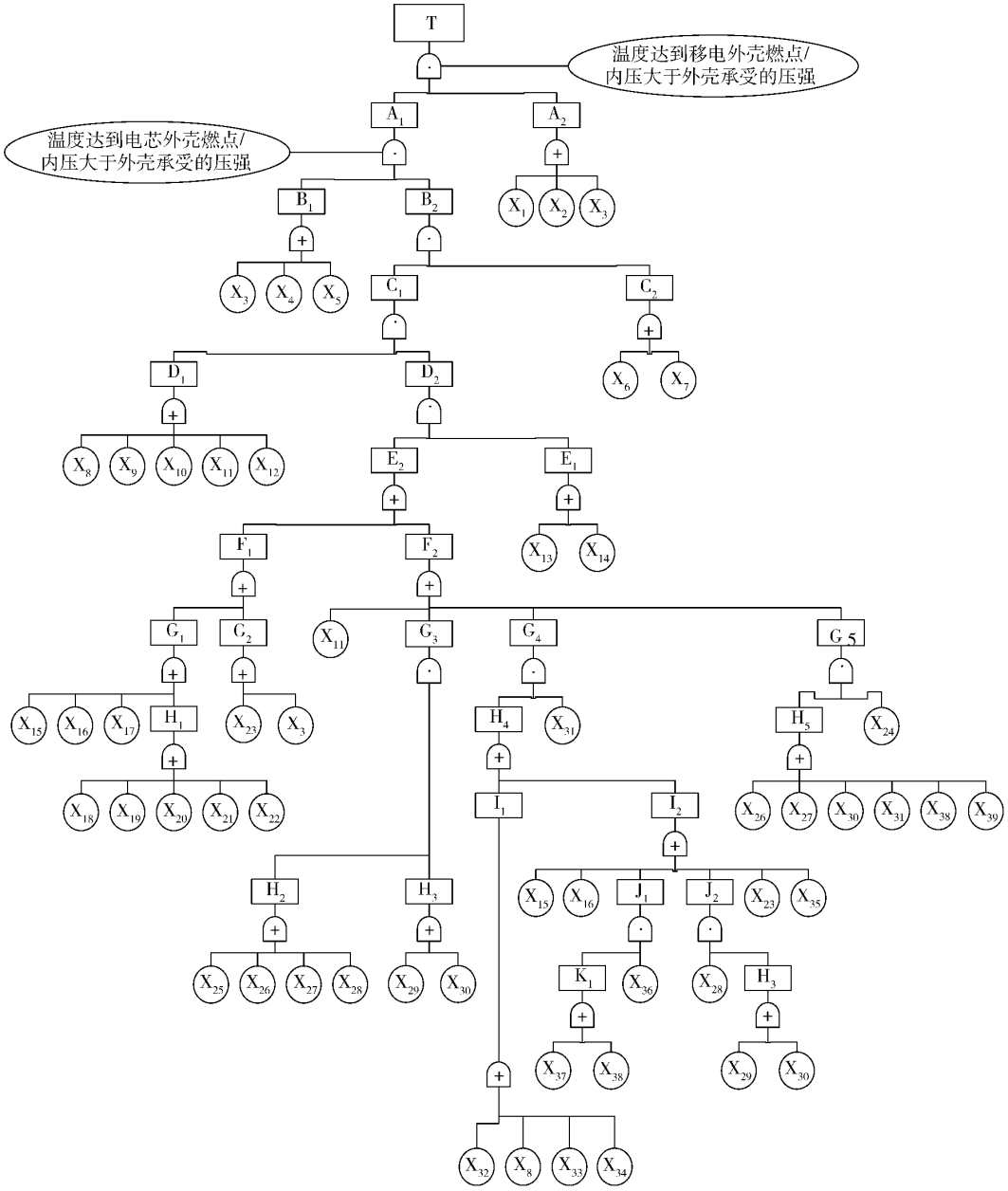

图 2 移动电源火灾事故树

Fig. 2 Fire fault tree of the mobile power pack

大小与相互比较的两者相对重要程度的差距成正比. 传统层次分析法的最大标度为 9,查表 2 可知标度因子(φ) = 1.0,根据式(2)得到 CR 因子(ε)为 0.9936,故权重因子 β = 标度因子(φ) + CR 因子(ε) = 1.9936.

3.2.3 确定权重集

以 $U_{23}-X_{(23)}$ 判断矩阵的构造及权重值的计算为例,根据公式(1)确定权重集,见表 4.

3.3 建立模糊综合评价的评价集

取各评价因子安全等级评价集为 V = {安全,比较安全,一般安全,比较危险,危险},这五个安全等级用数值 1 ~ 5 来表示,各评价因子的标准值以区间的形式给出,标准区间为

$$I_{a,b} = \{[a,b)_1, [a,b)_2, [a,b)_3, [a,b)_4, [a,b]_5\} = \{[100,80), [80,60), [60,40), [40,20), [20,0]\}.$$

3.4 根据相对差异函数确定隶属度

选取市场上某品牌常用的移动电源作为研究对象,由四节 3000 mA·h 的18650 电池并联而成的电芯和一块单层覆铜电路板组成,其相关信息如图 3 及表 5 所示.

运用专家打分法,邀请 30 位相关领域专家参照评价集 V 对评级因子的安全现状进行打分,取加权平均值为评价值.

根据实际情况和 $I_{a,b}$,构造变动区间的范围值区间

表 3　移动电源火灾风险指标体系

Table 3　Fire risk index system of the mobile power pack

目标层	准则层	指标层	方案层					
移动电源火灾风险 U	移动电源固有的热稳定性 U_1	设计制造对其热稳定性的影响 U_{11}	设计容量	X_{17}	设计安全合理性	X_8	电芯、印刷电路板电路板相关检测合格	X_{16}
			制作工艺的精湛程度	X_{15}	电芯单元平衡一致性	X_{25}		
		电芯固有的热稳定性 U_{12}	正极材料热稳定性	X_{18}	负极材料热稳定性	X_{19}	黏结剂等添加剂热稳定性	X_{22}
			电解液热稳定性	X_{20}	隔膜热稳定性	X_{21}		
		移动电源的散热能力 U_{13}	电芯外壳材料的散热能力	X_9	移电外壳的散热能力	X_{10}	—	—
	热失控的触发因素 U_2	使用因素 U_{21}	过电流	X_{39}	过充电	X_{28}	快速充电	X_{27}
			过放电	X_{36}	短路	X_{33}	超寿命使用	X_{23}
			机械撞击	X_{39}	针刺挤压	X_{35}	—	—
		物的因素 U_{22}	移电使用磨损	X_3	充电器不匹配或故障	X_{26}	—	—
		环境因素 U_{23}	环境潮湿	X_{34}	环境高温	X_{11}	空气不流通	X_{12}
	热异常管理监控系统 U_3	管理系统 U_{31}	印刷电路板充电管理系统	X_{30}	升压管理系统	X_{38}	—	—
		热控制系统 U_{32}	印刷电路板过电流保护	X_{24}	正温度系数热敏电阻元件温度保护	X_{13}	印刷电路板短路保护	X_{31}
			印刷电路板过充电保护	X_{29}	电流断流装置	X_6	印刷电路板过放电保护	X_{37}
			印刷电路板温度保护	X_{14}	电芯隔膜切断保护	X_7	—	—
	防护系统 U_4	电芯外壳防护 U_{41}	电芯外壳材料防火等级	X_4	电芯外壳材料防爆强度	X_5	—	—
		移电外壳防护 U_{42}	移电外壳材料防火等级	X_1	移电外壳材料防爆强度	X_2	—	—

表 4　$U_{23}-X_{(23)}$ 判断矩阵及权重值

Table 4　$U_{23}-X_{(23)}$ judgment matrix and weight values

利用事故树构造判断矩阵					利用层次分析法构造判断矩阵				权重
$U_{23}-X_{(23)}$	X_{34}	X_{11}	X_{12}	W'	X_{34}	X_{11}	X_{12}	W''	W
环境潮湿 X_{34}	1	1/2	3	0.300	1	1/5	3	0.188	0.241
环境高温 X_{11}	2	1	6	0.600	5	1	7	0.731	0.669
空气不流通 X_{12}	1/3	1/6	1	0.100	1/3	1/7	1	0.081	0.090

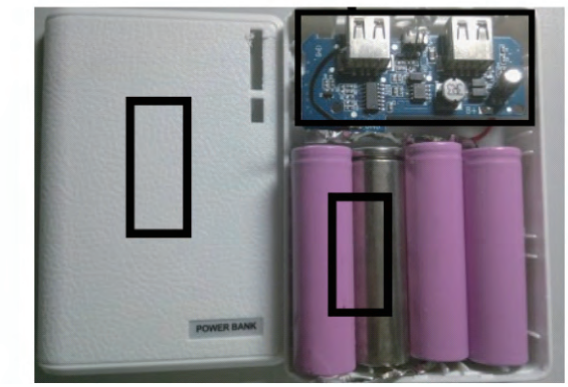

图 3　某品牌移动电源结构示意图

Fig. 3　Diagram of a brand mobile power structure

$I_{c,d}$，并确定五个等级的 M 值：

$$I_{c,d}=\{[c,d]_1,[c,d]_2,[c,d]_3,[c,d]_4,[c,d]_5\}=\{[100,60],[100,40],[80,20],[60,0],[40,0]\},$$

$$M=\{100,80,50,20,0\}.$$

以 $U_{23}-X_{(23)}$ 为例，分别将 X_{34}、X_{11} 和 X_{12} 的评价值

表 5　某品牌移动电源相关参数

Table 5　Related parameters of a brand mobile power

购买渠道	实体店
价格	60 元
容量	12000 mA·h
输入	5 V/1 A
输出	5 V/1 A & 5 V/2 A
相关认证	ROHS，CE，FCC，VCCI

80、25 和 30 带入式(3)进行归一化计算，得出各个评价因子的安全隶属度向量，见表 6.

表 6　$U_{23}-X_{(23)}$ 的安全隶属度

Table 6　Subordinated vectors of safety grades of $U_{23}-X_{(23)}$

指标层	方案层	权重	隶属度
环境因素 U_{23}	环境潮湿 X_{34}	0.241	(0.5，0.5，0，0，0)
	环境高温 X_{11}	0.669	(0，0，0.091，0.636，0.273)
	空气不流通 X_{12}	0.090	(0，0，0.2，0.6，0.2)

3.5 评判结果

依据最大隶属度原则,对各影响因子进行安全性等级模糊综合评判,并用级别特征值来判断评价结果的优劣.

$$U=(0.180,0.187,0.187,0.303,0.142),$$

$$V=1\times0.180+2\times0.187+3\times0.187+4\times0.303+5\times0.142=3.037.$$

得出安全等级是 3 级(一般安全),偏向 4 级(比较危险).

4 结果与分析

4.1 结果分析

(1) 风险评判结果与 2014 年国家质检总局对移动电源质量监测分析结果一致——"中等风险与严重风险之间"[10],说明改进的评判模型符合实际.

(2) 根据风险评判结果,可以判断目前移动电源产品存在较大的火灾安全隐患.

(3) 将移动电源火灾事故影响因子归纳为:(A) 设计及质量问题($X_8>X_{16}>X_{15}>X_{26}>X_{25}>X_9=X_{10}$);(B) 电芯固有热稳定性($X_{18}>X_{20}>X_{21}>X_{19}>X_{22}>X_{17}$);(C) PCB 电路板可靠性($X_{30}=X_{38}>X_{13}=X_{14}>X_{29}=X_{31}>X_6=X_7>X_{24}>X_{37}$);(D) 外壳可靠性($X_4=X_5>X_1=X_2$);(E) 使用环境安全性($X_{11}>X_{34}>X_{12}$);(F) 使用习惯安全性($X_{35}>X_3>X_{33}>X_{28}>X_{27}>X_{23}=X_{32}>X_{39}>X_{36}$) 六大类. 各大类权重及平均评价值分布如图 4 所示. 影响移动电源安全性的因素权重排序为 B > A > D > C > F > E,评价值排序为 B > C > D > E > F > A.

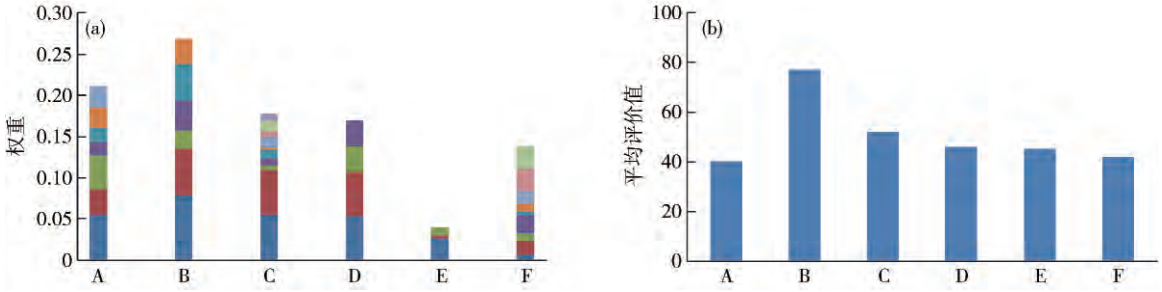

图 4 评价因子. (a) 权重; (b) 平均评价值

Fig. 4 Evaluation factors: (a) weigh; (b) average evaluation values

B 为电芯固有热稳定性. 正极材料(X_{18}) 与电液(X_{20}) 的热稳定性占有最高权重,因为正极材料的分解反应以及与电解液的反应迅速释放大量热量,并伴有可燃性气体生成,是造成电池热失控而引发事故的主要原因,所以增加电芯正极材料及电解液的热稳定性是保证其固有热稳定性的有效方法.

A 为设计及质量问题. 设计安全合理性(X_8)、产品质量(X_{16}) 及制作工艺(X_{15}) 依次占有最高权重,因为设计及质量上的缺陷降低了产品的使用及安全性能.

C 和 D 分别为 PCB 电路板及外壳的可靠性,是可控的. 对比权重与评价值可得,二者的权重较高,但平均评价值比较低,说明仍具有很大的改进空间.

E 和 F 分别为环境和人的不安全因素,是不可控的. 在提醒消费者注意移动电源的安全使用的同时,应从移动电源的选材、结构、安全设计等方面出发增加产品的本质安全性,减少环境、使用习惯等不可控因素的权重.

4.2 控制措施

通过上述分析,结合表 7 中移动电源事故统计情况,从移动电源本身及消费者的使用角度提出控制措施:

(1) 从设计和材料的选择两个方面增加移动电源的本质安全性. ①选择恰当的电芯材料增加其热稳定性;②尽量选择低功耗的电子元器件,并对其合理排列,以减少 PCB 电路板的热生成量及其对电芯的影响;③选择导热系数大的移动电源外壳材料来增加散热量;④增强保护电路可靠性,减少能量意外释放概率;⑤增加电芯外壳及移动电源外壳的强度和阻燃能力,以此来有效阻止事故发展.

(2) 从购买和使用两个方面增加安全性. ①购买移动电源时,从正规渠道购买通过国家质检的移动电源,劣质移动电源不仅充放电能力差,安全性也没有保证;②选择适当容量的移动电源,因为容量越大意味着着火危险性也越大;③选择合适的电源适配器,防止过充、过放电及大电流充放电;④不要将移动电源置于温度高,空气密闭的环境中;⑤不要将手机和移动电源叠放在一起充电,也不要在充电过程中使用手机.

5 结论

(1) 运用能量转移及改进的模糊综合评判分析方法,构建移动电源火灾风险评估模型.

(2) 提出移动电源火灾风险的影响因子,并对影响重要度与平均评价值进行排序.

表 7　移动电源事故统计

Table 7　Accident statistics of the mobile power pack

事故类型	事故描述	事故后果		产品		
		自燃	爆炸	3C 认证	山寨	不详
充电	放在桌子上充电	4	11	4	5	6
	摔了一下，继续充电	0	1	0	1	0
	移动电源上覆盖被子等易燃物	0	1	1	0	0
放电	边给手机充电边打电话	1	1	1	1	0
	放在包里给手机充电	8	3	1	0	10
	正常给手机充电	1	2	0	0	3
	高温环境下给手机充电	0	1	0	0	1
闲置	无外界扰动	3	1	1	1	2
	将移动电源放在阳台	0	2	0	1	1
	摔了一下	1	0	0	0	1
	放在包中/行李箱中	5	1	1	1	4
其他	强行拆开/用钥匙撬移动电源/项链等导体卡在 USB 接口	3	1	0	0	4
	移动电源家庭作坊起火	0	2	0	0	2
合计		26	27	9	10	34

（3）根据风险评价结果提出应从设计制造、购买使用等方面采取有效措施提高移动电源的安全性.

参 考 文 献

[1] Wu K，Zhang Y，Zeng Y Q，et al. Safety performance of lithium-ion battery. *Prog Chem*，2011，23(2-3)：401
（吴凯，张耀，曾毓群，等. 锂离子电池安全性能研究. 化学进展，2011，23(2－3)：401）

[2] Sun B，Xiao R C. Bridge fire risk assessment system based on analytic hierarchy process-fuzzy comprehensive evaluation method. *J Tongji Univ Nat Sci*，2015，43(11)：1619
（孙博，肖汝诚. 基于层次分析-模糊综合评价法的桥梁火灾风险评估体系. 同济大学学报(自然科学版)，2015，43(11)：1619）

[3] Thackeray M M，Wolverton C，Isaacs E D. Electrical energy storage for transportation: approaching the limits of，and going beyond，lithium-ion batteries. *Energy Environ Sci*，2012，5：7854

[4] Li H F，Pang J，Lu S G. Study on safety performance of Li-ion power batteries under deviant use. *Chin J Power Sources*，2013，37(12)：2235
（李会峰，庞静，卢世刚. 锂离子电池滥用条件下的安全性研究. 电源技术，2013，37(12)：2235）

[5] Xia L，Li S L，Ai X P，et al. Safety enhancing methods for Li-ion batteries. *Prog Chem*，2011，23(2-3)：328
（夏兰，李素丽，艾新平，等. 锂离子电池的安全性技术. 化学进展，2011，23(2－3)：328）

[6] Shi J Y，Pan K. Application of weight-variable theory and the relative difference functions to construction fire risk assessment. *J Saf Environ*，2008，8(4)：157
（石剑云，潘科. 变权和相对差异函数在建筑火灾风险评估中的应用. 安全与环境学报，2008，8(4)：157）

[7] Zhang T N，Li J L. Application of multi-step fuzzy comprehensive evaluation. *J Harbin Eng Univ*，2002，23(3)：132）
（张铁男，李晶蕾. 对多级模糊综合评价方法的应用研究. 哈尔滨工程大学学报，2002，23(3)：132）

[8] Saaty T L，Tran L T. On the invalidity of fuzzifying numerical judgments in the analytic hierarchy process. *Math Comput Modell*，2007，46(7)：962

[9] Pang Y，Zhang X X，Zhang N，et al. Assessment on the lithium-ion batteries products quality risk management. *Manuf Autom*，2015，37(4)：48
（庞瑶，张霄霄，张楠，等. 基于层次分析法的锂离子电池产品质量风险管理评估. 制造业自动化，2015，37(4)：48）

[10] Liu H W. Report on risk monitoring of mobile power pack. *China Qual Certif*，2014(12)：30
（刘胡炜. 来自移动电源风险监测的报告. 质量与认证，2014(12)：30）