

文章编号: 1006-9941(2017)12-1018-07

# 计算机辅助双基系固体推进剂配方概念设计方法研究

董文静, 赵宏安, 耿国华, 李满荣

(西北大学信息科学与技术学院, 陕西 西安 710127)

**摘要:** 为了降低基于优化技术求解配方问题可能无解的风险, 提出了基于质量功能展开(QFD)和公理化设计(AD)的双基系固体推进剂配方概念设计方法和模型, 利用配方概念设计系统设计了一个改性双基推进剂配方实例, 展示了该模型在推进剂配方概念设计系统中的运用效果。结果表明, 在配方概念设计阶段初步求解基本满足指标要求的配方功能成分及其边界含量, 确保后续配方详细设计(优化设计)有解。在传统的配方设计工作中, 按照“概念设计+详细设计+性能预估+再设计”的新方法能有效避免优化无解风险, 提高配方设计效率, 降低配方设计成本。

**关键词:** 概念设计; 质量功能展开; 公理化设计; 概念模型; 配方评价

**中图分类号:** TJ55; V512

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2017.12.008

## 1 引言

随着国防科技技术的不断发展, 现代火箭武器的产品用户需求也更加多元化, 如何准确有效地明确用户需求, 设计出符合客户要求的产品对设计者来说尤为重要。概念设计是产品设计的重要阶段, 通常占用整个设计环节的 75% 以上<sup>[1-3]</sup>。它直接决定最终产品的能量、安全、经济等性能的优劣程度, 因此设计出满足顾客需求的概念设计产品是双基系固体推进剂设计的关键。

传统火炸药配方设计大多是通过寻找满足配方某种需求(或设计指标)的功能组分, 再对担任不同化学机理的相关成分进行组合搭配, 最终得到配方方案。如 Long Y<sup>[4]</sup> 等为了研究低感度炸药, 将石墨与高能炸药组合, 在获得较大冲击能量的同时, 又因为石墨能使炸药能量密度减小, 热点形成的概率及灵敏度都降低, 设计出了一种具有较大动态冲击性能的奥克托今-石墨混合炸药。William A. MacCrehan 等<sup>[5]</sup> 在设计无烟火药时, 了解无烟火药的影响因素除了主要推进剂材料硝化纤维外还需要对它的添加剂硝化甘油(NG)、稳定

剂二苯胺(DPA)、硝化产物 *N*-nitrosodiphenylamine (NnDPA) 以及乙基中定剂(*N*, *N'*-diethyl-*N*, *N'*-diphenylurea, EC) 进行准确分析设计。陆明<sup>[6]</sup> 在进行高威力乳化炸药的设计时, 由于氧化剂对乳化炸药的爆炸性能起着关键作用, 因此转而研究氧化剂(硝酸铵、硝酸钠)等物质的特性。这些文献都体现了火炸药产品也是以简单的功能(如: 低感度炸药中的降敏功能)-载体(如: 低感度炸药中的石墨成分)的概念设计结构模型的思想。目前, 把双基系固体推进剂配方概念设计的思想单独提出并加以研究的报道鲜见, 仅查阅到 Шварц А Г<sup>[7]</sup> 在 1987 年莫斯科国际橡胶会议上报告了对橡胶结构和性能进行现代概念设计的思想; 随后傅圣勇<sup>[8]</sup> 初步提出对水泥建立广义的配方概念, 希望全面揭示能量、质量、成本的关系、提高水泥原料资源的配置效率。但传统的双基系固体推进剂配方设计方法中涉及的组分、性能以及功能结构之间的关系复杂, 概念知识模糊、抽象, 优化设计中常会出现因变量成分的改变、增加而无法求解出满足性能要求的成分含量最终解, 出现返工, 极大浪费成本。

质量功能展开(Quality Function Deployment, QFD)是一种由顾客需求驱动的产品开发方法<sup>[9]</sup>, 在产品的设计和制造过程中, 围绕用户需求, 令用户得到最大满意度。公理化设计(Axiomatic Design, AD)是由美国 Nam P. Suh 教授于 1990 年提出的指导设计过程的基本公理<sup>[10]</sup>, 其针对用户需求能进行功能-载体的层次映射推理, 该过程十分符合现代化学类产品

收稿日期: 2017-01-16; 修回日期: 2017-05-10

基金项目: 国家自然科学基金资助(61673319)

作者简介: 董文静(1991-), 女, 在读硕士, 主要从事计算机应用研究。  
e-mail: dongwenjing1991@163.com

通信联系人: 赵宏安(1958-), 男, 研究员, 主要从事计算机应用研究。  
e-mail: zhaqye@163.com

的设计特点。本研究结合 QFD 和 AD 的各自优势,根据双基系固体推进剂配方的设计特点,提出一种基于 QFD 和公理化设计的双基系固体推进剂配方概念设计模型。本研究提出的配方概念设计理论思想,可对配方进行前期的方案规划,保证了所有产品方案都会有解,该设想为双基系推进剂的配方设计提供新的思路。

## 2 双基系固体推进剂配方概念设计过程

### 2.1 传统公理化设计的分析

利用传统公理化设计中功能域到载体域的“Z”型映射分解对双基系固体推进剂配方进行设计,其过程为:把收集到的顾客需求用质量屋技术转化为技术需求,再将技术需求作为功能域直接映射到载体域,按照自顶向下的循环往复的过程,直至找到最终解(配方成分)。但这种功能到载体(配方成分)的直接映射只能证明“载体(配方成分)实现了某种功能”,并不能说明“为什么载体(配方成分)可以实现此功能”。所以在功能域和载体域之间引入原理域(principle domain)、措施域(measure domain),把两个域作为功能域与载体域之间的转换桥梁,在符合人类思维过程的情况下,既实现对载体的求解,又增加产品的创新设计空间。本文即在 QFD 的基础上,提出“功能域-原理域-措施域-载体域”的概念设计系统模型。

### 2.2 双基系固体推进剂配方概念设计系统模型的建立

本文基于 QFD 和 AD 建立了概念设计产品模型,将产品在“功能域→原理域→措施域→载体域”模式下进行“Z”字形循环往复映射分解,直到映射结束,得到产品概念设计的方案解。该映射过程体现了公理化设计中的域(domains)、层级(hierarchies)、Z形映射(zigzagging)三大概念<sup>[10]</sup>,采用自顶向下的方式依次向下分解。同时映射过程可分为横向映射和纵向映射,横向映射是指以功能域为起点,依次向原理域、措施域和载体域映射的过程,这是域间的映射;而纵向映射是指域内的映射,每一个域中的元素都可不断地划分相应的子元素,直到可以被右边相邻域中元素实现为止,如功能域中的功能可划分为子功能,子功能再根据是否能被子原理实现决定是否继续划分。该设计模型以层次设计的方法应用于双基系固体推进剂配方设计中,(1)方案管理便捷化,便于更加灵活、方便的对每个层中的元素进行修改、删除;(2)方案准确化,对所需配方都能找到满足性能需求的最终解;(3)方案呈多元化,可根据不同的用户需求选取配方;(4)方案呈创新性,原理域、措施域的加入使产品方案设计的

过程增加更多的创新性。基于 QFD 和 AD 的产品概念设计系统模型如图 1 所示。

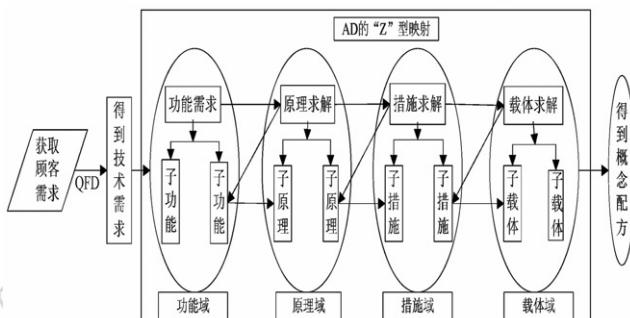


图 1 基于 QFD 和 AD 的产品概念设计系统模型

Fig. 1 The system model of product conceptual design based on QFD and AD

### 2.3 改性双基推进剂域间映射关系结构模型图建立

以改性双基推进剂配方概念设计为例,对功能域、原理域、措施域、载体域之间进行映射推理,得到改性双基推进剂域间映射结构模型图如图 2 所示。

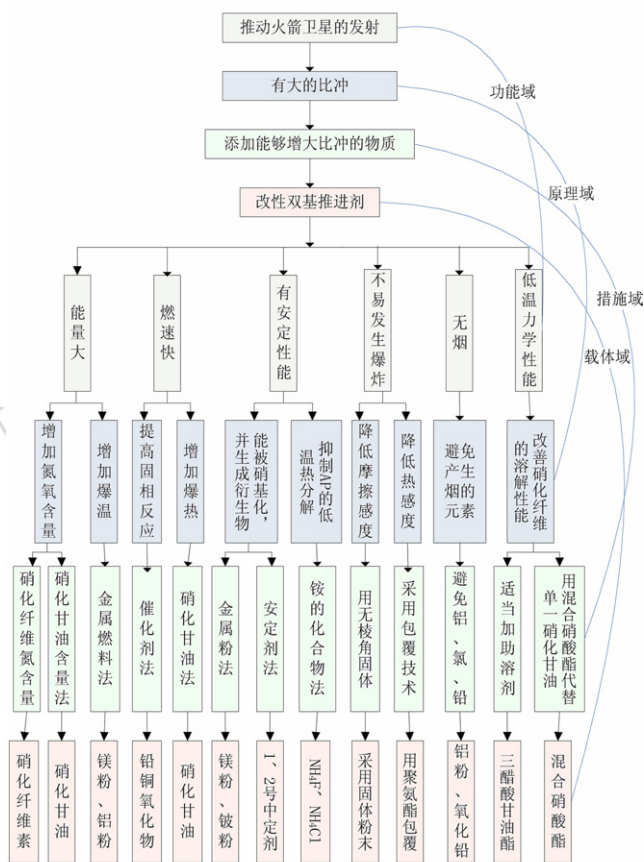


图 2 改性双基推进剂域间映射结构模型图

Fig. 2 Model of modified double-base propellant structure mapping between domains

### 3 双基系固体推进剂概念配方的评价方法及组分含量修正方法

完成对双基系固体推进剂配方的方案设计(即获得了概念配方)后,概念配方是将用户需求运用 QFD 和 AD 的概念设计产品模型,按照"功能域→原理域→措施域→载体域"的层次结构进行"Z"形循环往复映射分解,最后得到满足用户性能需求的配方功能成分,形成的配方设计方案。为了选择最优的配方方案,需要对此概念配方的性能进行初步评价。以配方的性能、代价以及可持续发展为主要考虑因素<sup>[11-13]</sup>,通过采用配方成分(组分)选取的推荐度对方案的设计结果进行评价,使推荐度成为衡量配方优劣程度的指标,为后续配方的详细设计提供指导;采用含量修正方法对配方组分进行约束,保证以最有效的含量满足顾客需求功能。

#### 3.1 配方组分选取推荐度评价方法

本文中双基系固体推进剂配方组分的推荐度用该配方在组分中功能的(强弱程度)、成本代价(大小)、可持续发展(程度)性能的加权平均值来表示。

功能强弱程度:功能强弱程度是衡量配方推荐度的重要标准,是衡量组分在配方中担任的各项功能强弱大小的能力。如双基系固体推进剂配方中担任能量性能成分的功能强弱程度;担任增塑性能成分的功能强弱程度。根据配方中组分担任功能能力的强弱程度,建立功能值定义表如表 1 所示。

表 1 功能值定义

Table 1 The definition of functional numerical value

functional performance description	value
in the formula as this function independently, and the indispensable	1.0
as the feature of strong capacity in the formula	0.5-0.9
as the feature of weak capacity in the formulation	0.1-0.4
without the capacity of realizing the function	0

成本代价大小:代价性是指获取该组分所耗费物质、精力。如通常为了提高配方的能量,往往加入燃烧时单位质量放热量大的金属粉末。铝、铍为两种可添加的金属燃料,以添加铍的理论比冲最高,其次为铝,但因为铍的资源缺乏、价格昂贵、使用代价高,所以未得到实际应用;铝的来源最广,价格便宜,所以在推进剂等火炸药产品中广泛应用。代价值定义表如表 2 所示。

表 2 代价值定义

Table 2 The definition of cost numerical value

cost performance description	value
source is wide, and the price is cheap	1.0
obtaining is relatively difficult, the price is more expensive	0.5-0.9
obtaining is very difficult and very expensive	0.1-0.4
don't get	0

可持续发展程度:可持续发展性是指该组分对于生物即环境的危害程度。如用氢化铝和氢化铍等金属氢化物来提高火炸药能量,虽然都能获得高的理论比冲,但由于铍化物为剧毒物,对环境污染严重,所以未得到实际应用。可持续发展值定义表如表 3 所示。

表 3 可持续发展值定义

Table 3 The definition of sustainable numerical value

sustainable performance description	value
don't cause pollution to ecological environment, not obviously impair people's health, can recycle and reuse	1.0
less damage to the ecological environment and human health, most can be recycled	0.5-0.9
harm is bigger for the ecological environment and human health, a small number of recyclable	0.1-0.4
serious damage to the ecological environment and human health, cannot be recycled	0

配方组分的推荐度加权平均值定义如下:

$$R(i) = R_f(i) \times w_f + R_c(i) \times w_c + R_s(i) \times w_s \quad (1)$$

式中, $R(i)$ 为配方组分*i*的加权总推荐度, $R_f(i)$ 、 $R_c(i)$ 和 $R_s(i)$ 分别为组分*i*的功能性数值、代价性数值和可持续发展性数值; $w_f$ 、 $w_c$ 和 $w_s$ 为相应的权重值,且 $w_f+w_c+w_s=1$ ,经过验证,本文中的 $w_f$ 、 $w_c$ 、 $w_s$ 定为0.7、0.2、0.1;权重值的大小由层次分析法<sup>[14]</sup>(analysis hierarchy process, AHP)或德尔菲法<sup>[15]</sup>确定。

根据以上分析,可定义配方的推荐度计算公式如(2)式:

$$H = \sum_{i=1}^{N_f} R(i) \quad (2)$$

式中, $H$ 为配方的总推荐度; $N_f$ 为配方中组分的个数, $w_f$ 、 $w_c$ 和 $w_s$ 分别指功能性、代价性、可持续发展性分别在组分中的比重。

表 4 给出常用配方中常见高能单质炸药各性能推荐值如下。

表 4 常见高能单质炸药各性能推荐值

Table 4 Recommended values of performances for common high-energy single compound explosives

acronym	functional numerical value	cost numerical value	sustainable numerical value
RDX	0.7	0.9	0.7
HMX	0.9	0.5	0.5
PETN	0.8	0.3	0.2
Tetryl	0.6	0.4	0.4
TNT	0.4	0.9	0.6

### 3.2 组分含量的修正

配方中每个子功能需求在用户方面的重要程度是各异的,而组分的含量对各子功能的影响十分重要,因此合理的利用、分配组分含量对最大限度满足用户需求来说是相当必要的。

设有  $m$  个组分的配方(1 个或多个组分对应同一种功能),不出现一种组分对应不同的功能结构,组分之间满足独立性和完整性。

(1) 选取每种功能下,措施域映射的所有载体使用频率最高的 20%。

(2) 对这些载体含量按照所对应功能的权重大小计算组分推荐的含量(这里的含量指的是整个配方总含量为 100 情况下,每种组分的推荐含量)。

计算方法如下:

$$C = 100 / (F_1 \times \beta_1 + F_2 \times \beta_2 + \dots + F_m \times \beta_m) \quad (3)$$

$$M(i) = C(F_i \times \beta_i) \quad (4)$$

式中,  $C$  表示含量指数;  $F_1, F_2, \dots, F_m$  表示分别表示第 1 到  $m$  组分的初始推荐最小值,  $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m$  表示第 1 到  $m$  组方在配方中的权值大小,  $M(i)$  表示第  $i$  个组分在原始配方总含量为 100 情况下的推荐含量。  $\beta_1 + \beta_2 + \beta_m = 1$ , 权重值的大小由经验分析法<sup>[14]</sup> 给出。

(3) 对新的组分含量进行修正。

如果  $M(i) \geq F_i$ , 则组分  $i$  的含量为  $F_i$ ; 如果  $M(i) < F_i$ , 则组分  $i$  的含量为  $M(i)$ 。

## 4 双基系固体推进剂配方概念设计系统的实现

现以改性双基推进剂为例,对概念设计方案生成模型进行说明并给出实验结果。

### 4.1 改性双基推进剂配方概念设计及分析

采用上述概念设计模型、方案结果评价方法以及含量修正方法等设计了一套适用于改性双基推进剂计算机辅助配方概念设计的原型系统,该系统具备根据用户性能需求设计满足其的概念配方、根据类型查询

相关配方、配方的具体查看以及用户管理等功能,其系统框架见图 3,其配方概念设计系统主要操作流程和关键操作界面见图 4 和图 5。

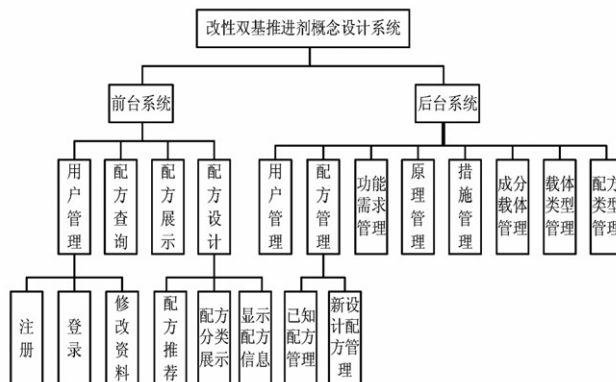


图 3 改性双基推进剂概念设计系统框架图

Fig. 3 The framework map of modified double-base propellant concept design system

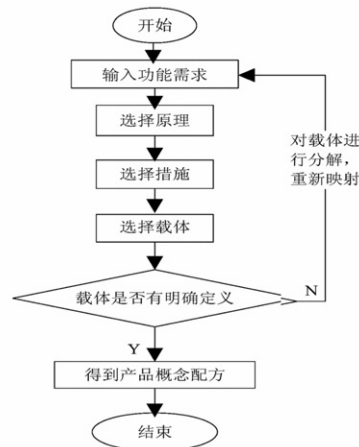


图 4 配方概念设计主要操作流程

Fig. 4 The main operation processes of designing conceptual formulation



图 5 配方概念设计关键操作界面

Fig. 5 The key operation interface of conceptual design for formulation

为了更方便地展示该系统的工作原理和过程, 现假设需要设计一个改性双基固体推进剂, 要求: 能量性能比冲为  $2400 \sim 2450 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$ ; 低特征信号为无烟或微烟, 力学性能要具有良好的低温性能, 燃速可控。将用户以上需求指标输入到配方概念设计系统中, 系统依据用户需求, 根据功能-原理-措施-载体的概念设计过程模型进行映射推理, 完成配方成分的选择及各成分的含量确定。最后利用性能预估软件对配方方案进行性能预估, 如果性能满足用户需求, 则设计结束; 若不满足, 则重新调整原理、措施、组分进行再设计。其设计结果如图 6 所示, 图中显示了配方的主要组分以及相应的含量。



图 6 改性双基推进剂配方设计结果

Fig.6 The design result of formulation for modified double-base propellant

经分析, 由概念设计模型设计的新配方与已测定性能配方库中的某配方 I<sup>[14]</sup> 的能量比冲很接近。二者的成分组成、各成分含量的对比及性能对比见表 5 和表 6。

由表 5 可知, 两个配方的主要功能成分相同, 硝化纤维 (N=12%)、硝化甘油、奥克托今的主要能量成分十分接近。另外由新配方的成分组成也可以看出新配方属于改性双基推进剂, 符合用户需求的配方类型 (设计过程中用到图 1 的概念设计模型), 由表 5 可知, 由配方概念设计系统所设计出来的新配方经性能预估得出的比冲与配方 I 中已测定比冲相差不大。

二者的差异如下: (1) 新设计的配方没有铝粉、炭黑, 由于在设计配方时依照如前所述的用户需求为无烟推进剂, 根据产生烟气的原理, 在设计过程中会避免选择铝、铅、高氯酸铵等物质, 防止产生三氧化二铝的白色固体颗粒烟雾、产生氯化氢白色气体烟雾。(2)

新设计的配方中加入了吉纳 (DINA), 由于在设计配方时要求配方具有低温力学性能, 就是要有良好延伸率, 因此在配方中加入相应的增塑剂 (溶剂) 可使大分子的作用力降低, 玻璃化温度降低、模量降低、延伸率提高。所以在配方中加入吉纳, 而且吉纳属于良好的含能增塑剂, 对于配方能量的提升也具有很好的作用。(3) 由于要求推进剂燃速可控, 故氧化铜作为双基推进剂中十分有效的催化剂加入新配方中。(4) 虽然新配方与配方 I 在小含量成分上存在一定的差异, 但不会特别影响配方的能量性能。因此可得出, 概念配方设计系统在概念设计模型、配方成分推荐以及含量修正方法的运用下得出的配方是合理的。

表 5 新设计配方与某配方 I 的成分组成及成分含量的对比  
Table 5 Comparison of the component and its content of new design formulation and formulation I

new design formulation		formulation I	
name	content/%	name	content/%
NC (N=12.0%)	50.09	NC (N=12.0%)	51.0
NG	26.92	NG	25.3
HMX	13.85	HMX	12.8
DINA	6.92	aluminum	4
2,4-dinitrodiphenylamine	1.38	carbon black	3
oxide Cu	0.69	C2	-
vaseline (VSL)	0.14	vaseline (VSL)	-

表 6 新设计的配方与某配方 I 的性能对比  
Table 6 Comparison of performances for new design formulation and formulation I

formulation	special impulse /N · s · kg <sup>-1</sup>	signature	propellant type
new design formulation <sup>1)</sup>	2444.06	no smoke	double Base
formulation I <sup>2)</sup>	2445.86	smoke	double Base

Note: 1) specific impulse estimated; 2) specific impulse determined.

由系统设计的某两种双基推进剂配方 A 与配方 B, 其主要性能指标密度都为  $1.6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , 爆热都为  $3640 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 为了选择最优的配方, 对两配方的功能值、代价值、可持续发展值进行确定, 并计算配方推荐度, 如表 6 所示, 由于配方 A 的推荐度 3.93 大于配方 B 的推荐度 3.914, 因此配方 A 为较优配方。

双基固体推进剂配方概念设计系统通过对用户关于配方的需求进行归纳、整理, 继而总结为一般的技术功能需求, 通过结合配方设计专业知识推理映射出相应实现此功能的原理、措施, 进而得到配方的具体组分, 并对其含量进行修正, 利用综合评价方法进行方案

优选,最终得到符合相应性能指标的概念设计方案。实验结果表明,采用本研究的配方概念设计模型和配

方评价以及含量修正方法给出的概念配方能后续配方详细设计工作起到指导作用。

表 6 配方 A 和配方 B 的推荐度对比

Table 6 Comparison of recommended degree of formulation A and formulation B

	basic information		the amount of plan information			recommended degree
	composition	content/%	functional numerical value	cost numerical value	sustainable numerical value	
formulation A	NC-120	54	0.9	0.85	0.8	3.93
	NG	27	0.9	0.8	0.6	
	DNT	15	0.7	0.75	0.2	
	VSL	2	0.9	0.2	0.6	
	oxide Cu	2	0.8	0.9	0.7	
formulation B	NC-120	57	0.9	0.9	0.8	3.914
	NG	28	0.9	0.82	0.6	
	centralite	11	0.9	0.6	0.6	
	DNT	11	0.7	0.7	0.2	
	VSL	1	0.9	0.1	0.6	

## 5 结 论

(1) 将质量功能展开与公理化设计的优势相结合,根据双基系固体推进剂配方的产品需求,提出一种基于 QFD 和公理化设计的双基系固体推进剂配方概念设计系统模型,并利用配方概念设计系统设计的一则改性双基推进剂配方实例展示了该模型在推进剂配方概念设计系统中的运用效果。结果表明该模型能够有效地对用户需求实施映射分解,最终获取满足用户需求指标的配方最终解(配方成分)。

(2) 提出了双基系固体推进剂配方组分的评价方法和组分含量修正方法。通过实验表明,在其支持下,可以设计出在最低成分含量下满足用户性能的配方,并根据评价指标对配方进行优选。两种方法的应用既避免了实际配方时的浪费,又对设计者的决策选择起到了指导作用。

(3) 相较于传统的配方设计方法,前期概念设计的引入,能够通过由功能需求到载体成分的映射过程保证配方一定有方案解,避免了生产中的重复返工;而且通过用户需求的科学规划设计能大量地减少详细设计的工作量,缩短了产品开发周期,为双基系固体推进剂配方设计领域提供了一种新的切实可行的方法。

### 参考文献:

[1] Wang Z, El-Gizawy A S, Billatos S B. A knowledge-based system methodology for conceptual design of mechanical systems [J]. *American Society of Mechanical Engineers Design Engineering Division*, 1996: 1-12.

[2] Casakin H. Metaphors in design problem-solving: implications for creativity[J]. *International Journal of Design*, 2007, 1(2): 23-35.

[3] Sas C, Whittaker S, Dow S, et al. Generating implications for design through design research[C] // *ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*. ACM, 2014: 1971-1980.

[4] Long Y, Liu Y G, Nie F D, et al. Theoretical study of impacting and desensitizing for HMX-graphite mixture explosive[J]. *Shock Waves*, 2012, 22(6): 605-614.

[5] Maccrehan W A, Bedner M. Development of a smokeless powder reference material for propellant and explosives analysis[J]. *Forensic Science International*, 2006, 163(1): 119-124.

[6] 陆明. 乳化炸药氧化剂选择的理论研究[J]. *爆破器材*, 2006(4): 4-7.

LU Ming. Theory study on the selection of oxidizer for emulsion explosive[J]. *Explosive Materials*, 2006(4): 4-7.

[7] Шварц А Г, 陈根度. 按照橡胶结构和性能的现代概念设计配方[J]. *橡胶参考资料*, 1986(9): 1-10.

Шварц А Г, CHEN Gen-du. The modern concept design formula of the rubber structure and performance[J]. *Rubber Resources*, 1986(9): 1-10.

[8] 傅圣勇, 秦至刚, 李启钧. 建立广义的配方概念(下)——论水泥烧成的原料配制效率[J]. *四川水泥*, 2003(1): 5-9.

FU Sheng-yong, QIN Zhi-gang, LI Qi-jun. Establish a generalized formula concept (below)——theory of cement raw material preparation efficiency of burning [J]. *Sichuan Cement Magazine*, 2003(1): 5-9.

[9] Brown P G. QFD: Echoing the voice of the customer[J]. *Bell Labs Technical Journal*, 1991, 70(2): 18-32.

[10] SUH N P. *The principles of design*[M]. London: Oxford University Press, 1990.

[11] 蒋浩龙, 王晓峰, 陈松, 等. 炸药混合技术的发展和运用[J]. *飞航导弹*, 2014(12): 74-78.

JANG Hao-long, WANG Xiao-feng, CHEN Song, et al. The development and application of explosive mixture technology[J]. *Aerodynamic Missile Journal*, 2014(12): 74-78.

[12] 李志峰, 迟淑萍, 宋仁峰. 国内外乳化炸药现状及技术发展建议

- [J]. 矿业工程, 2011(5): 42-44.
- LI Zhi-feng, CHI Shu-ping, SONG Ren-feng. Recent status and development trend of home and abroad emulsive explosive[J]. *Mining Engineering*, 2011(5): 42-44.
- [13] 任晓雪. 国外工业炸药的研究与发展[J]. 火炸药学报, 2011(5): 50-53.
- REN Xiao-xue. Study and development of foreign commercial explosives[J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2011(5): 50-53.
- [14] 西北大学·西安近代化学研究所.“改性双基推进剂配方设计专家系统”技术总结报告[R]. 西安: 西北大学·西安近代化学研究所, 2013.
- North West University · Xi'an Modern Chemistry Research Institute. "The modified double-base propellant design expert system" technology summary report[R]. Xi'an: Northwestern University · Xi'an Modern Chemistry Research Institute, 2013.
- [15] 秦吉, 张翼鹏. 现代统计信息分析技术在安全工程方面的应用——层次分析法原理[J]. 工业安全与防尘, 1999(5): 44-48.
- QIN Ji, ZHANG Yi-peng. Application of contemporary statistical information analysis method in safety engineering—the principle of AHP[J]. *Industrial Safety and Environmental Protection*, 1999(5): 44-48.
- [16] Delphi method [EB/OL]. [http://en.wikipedia.org/wiki/Delphi\\_method](http://en.wikipedia.org/wiki/Delphi_method) [2011-04-11].
- [17] 李志琴, 赵宏安, 赵凤起, 等. 基于语义网络的推进剂配方设计知识表示[J]. 含能材料, 2014, 22(4): 542-547.
- LI Zhi-qin, ZHAO Hong-an, ZHAO Feng-qi, et al. Knowledge representation of propellant formula design based on semantic network[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2014, 22(4): 542-547.

## Computer-aided Conceptual Design Method of Double-base Solid Propellant Formulation

DONG Wen-jing, ZHAO Hong-an, GENG Guo-hua, LI Man-rong

(North West University School of Information Technology, Xi'an 710127, China)

**Abstract:** To reduce the risk of probably no solution for solving the problem of formulation based on optimization technique, the conceptual design method and model of double-base solid propellant formulation based on quality function deployment (QFD) and axiomatic design (AD) were proposed. A modified double-base propellant formulation example was designed by the conceptual design system of formulation. The application effect of the model in the conceptual design system of propellant was showed. Results show that in the conceptual design step of formulation, the formulation to preliminary solve is required to basically satisfy the index requirement of formulation functional components and their boundary content to ensure the detailed design (optimization design) of subsequent formulation has solution. In traditional design work of formulation, a new method according to "conceptual design+ detailed design +performance prediction + redesign" can effectively avoid the optimization risk from solution, improve the efficiency of formula design and reduce the cost of formula design.

**Key words:** conceptual design; quality function deployment (QFD); axiomatic design (AD); conceptual model; evaluation of formulation

**CLC number:** TJ55; V512

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2017.12.008