

# 基于知识工程的固体火箭发动机 装药设计技术研究

谷建光, 张为华, 王中伟, 欧海英, 解红雨

(国防科技大学 航天与材料工程学院, 长沙 410073)

**摘要:** 为了实现对以往设计经验及知识的继承和重用, 在固体火箭发动机装药设计中引入了基于知识工程的设计思想。首先建立了装药设计的 SBF 表示模型, 从产品设计角度说明了装药设计实质; 然后完成了药形选择的神经规则表示; 同时, 实现了基于案例推理的药形几何参量确定, 具体内容包括建立尺寸无关药形几何参量的案例表示模型, 给出基于案例推理的药形几何参数确定算法。最后, 结合实际应用对上述工作进行了具体实践; 并针对实际型号进行了装药设计。通过对设计结果的正确性验证, 证明该技术可行、有效。

**关键词:** 固体火箭发动机装药设计; 知识工程; 知识重用; 神经规则; 案例推理

**中图分类号:** V435 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-2793(2008)03-0208-07

## Research on design of solid rocket motor based on knowledge engineering grain

GU Jian-guang, ZHANG Wei-hua, WANG Zhong-wei, OU Hai-ying, XIE Hong-yu

(Inst. of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Tech., Changsha 410073, China)

**Abstract:** In order to make good use of the previous design experience and knowledge, the knowledge-based engineering design ideas were introduced to design of solid rocket motor (SRM) grain. Firstly, SBF representation model in grain design was derived, and the essence of grain design was described as viewed from product design. Secondly, the neural rules for grain-shape selection were finished. At the same time, the geometric parameters of the grain were determined based on case inference, including establishment of the case representation model of grain geometric parameters, determination of the algorithm of the grain geometric parameters based on case inference. Finally, the above conclusion was exemplified in actual application, and the grain design of an actual model was conducted. Accuracy verification of design results shows that the technology is feasible for SRM grain design.

**Key words:** solid rocket motor grain design; knowledge-based engineering (KBE); knowledge reuse; neural rules; case reasoning

### 1 引言

装药设计重点包括药形选择和药形几何参量确定两部分<sup>[1,2]</sup>。药形选择要综合考虑各种药形适用范围、总体技术要求及内弹道特性; 药形几何参量确定还要考虑结构完整性及侵蚀燃烧等影响因素; 这中间蕴藏着很多经验、半经验知识。从知识工程 (KBE) 角度而言, 整个装药设计过程是一个包含了对知识继承、集成、重用、创新的过程。随着固体发动机成熟型号的增多, 为提高设计效率及结果可靠性, 研究面向知识重用的设计方法及平台是装药设计及整个固体发动机设计的发展方向。Jacques L 等人于 1983 年、1985 年最早

提出了装药设计专家系统思想<sup>[3]</sup>; James Brill Clegem 于 1993 年、1994 年发表了固体发动机概念及优化设计论文<sup>[4,5]</sup>, 将肉厚系数、长径比及体积装填系数与药形的关系规则表示, 用以辅助药形的选择; 国内探索了固体发动机设计专家系统的 C 语言实现, 包括系统结构及推理机制<sup>[6,7]</sup>。但是, 基于规则的专家系统规则冲突问题难以解决; 知识获取需要人工干预, 不具备自学习功能; 对量化形式的经验数据无法应用。所有这些缺陷使得充分有效应用经验知识完成装药设计, 仍具有一定难度。

收稿日期: 2007-04-11; 修回日期: 2007-07-16。

作者简介: 谷建光 (1972—), 男, 博士生, 研究方向为基于知识工程的固体火箭发动机设计技术。E-mail: gyy121@gmail.com

目前, KBE思想和方法以知识重用为目的,广泛用于产品设计领域,基于 KBE的产品设计关键技术包括对已有设计经验、结果及过程的总结(知识获取、学习),经验、结果及过程的组织方式(知识表示),重用已有设计知识指导完成新设计(知识推理)。

文中立足于解决传统基于规则装药设计专家系统的不足,有效继承和重用以往装药设计经验知识,探索 KBE方法在固体发动机装药设计中的应用,具有很好现实意义。

2 装药设计结构 行为 功能表示模型

依据产品设计结构 行为 功能(SBF)表达模型,将总体设计技术要求归于功能属性集  $Fun$ , 总体对装药技术要求归于装药设计行为属性集  $Beh$ , 装药设计结果归于结构属性集  $Str$ , 固体火箭发动机装药设计 SBF 模型如下:

$$Fun = \{ I, F, u_F, t_b, m, D_c, L_m, \dots \}$$

其中,集合中元素依次为总冲、平均推力、推力比、工作时间、总质量、质量比、燃烧室直径、发动机长度等。

$$Beh = \{ A_b, w, \lambda_v, R_{gr}, L_{gr}, u_{A_b}, eps(K_i), (\alpha) \}$$

其中,集合中元素依次为平均燃面、肉厚、体积装填系数、药柱外径、药柱长度、燃面比、与药形相关结构完整性参数、与通气参量  $\alpha$  相关的侵蚀比,称行为输出变量。

$$Str = \{ G_s, \text{药形几何参量} \}$$

式中  $G_s$  为药形。

从产品设计 SBF 角度而言,装药设计实质就是确定  $Str$  的取值。药形选择,即依据结构 功能映射关系,由  $Fun$  中技术要求定性确定  $G_s$  取值;药形几何参量确定,即依据  $G_s$  取值和  $Beh$  中装药设计要求,定量确定药形几何参量。 $Beh$  中装药设计要求由发动机总体设计提供。

3 药形选择的神经规则表示

近年来,神经规则<sup>[8]</sup>被广泛用于知识获取领域,它继承了神经网络的训练功能,可很好地表示启发性经验知识,表示形式见图 1。

每个属性  $C_i$  被分配一个权值  $sf_i$ , 标识该属性在得出结论所起作用大小;神经规则本身分配一个阈值  $sf_0$ 。对于一组属性输入  $C_{ik} (i=1, 2, \dots, K; k=1, 2, \dots, M_i; K$  为属性个数;  $M_i$  为第  $i$  个属性的取值区间数)。

神经规则决策输出  $D$  按如下计算:

$$C_{ik} = \begin{cases} 1, a^{(i)} \in [a_{k-}^i, a_{k+}^i] \\ 0, a^{(i)} \notin [a_{k-}^i, a_{k+}^i] \end{cases}$$

$$a = sf_0 + \sum_{i=1}^K \sum_{k=1}^{M_i} sf_{ik} \cdot C_{ik}$$
$$D = f(a); \quad f(a) = \begin{cases} 1, a \geq 0 \\ 0, a < 0 \end{cases}$$

$D=1$  表示规则的药形选择决策输出成立,  $a$  表征依据训练样本所包含知识得出规则成立的确定程度;  $D=0$  表示药形选择决策输出失败,  $|a|$  表征依据训练样本所包含知识得出规则失败的确定程度。

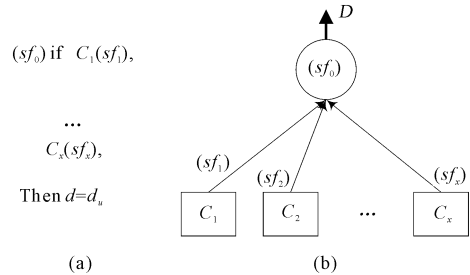


图 1 神经规则表示形式  
Fig 1 Neural rules

据文献 [1]、[2],药形选取与肉厚系数  $w_{F_s}$  长径比  $d_l$  和装填系数  $\lambda_v$  3 个性能指标有关。依据药形选择实质,通过平衡压强公式、稳态燃速公式及性能参数计算相关公式,建立与 3 个性能指标相关的参数传播约束网络<sup>[9]</sup>,见图 2。图 2 中,参数符号参照《固体火箭发动机参数符号》(QJ 1625—89)。由图 2 中参数间约束传播路径看出,  $t_b$ 、 $F/t_b$ 、 $L_{tc}$ (壳长度)、 $d_l$  5 个参数包含了药形相关 3 个性能参数的取值信息,其作为药形选择考虑的输入功能属性,以药形选择结果作为决策输出,经对设计实例的属性空间聚类<sup>[10]</sup>、构造线性系统决策规则<sup>[8]</sup>及应用标准最小平方学习算法(LMS)<sup>[11]</sup>求取权值  $sf_{ik}$  一系列操作,可构造药形选择神经规则。其中,5 个参数由  $Fun$  中的总体设计技术要求估算得到,可视为药形相关总体设计技术要求。

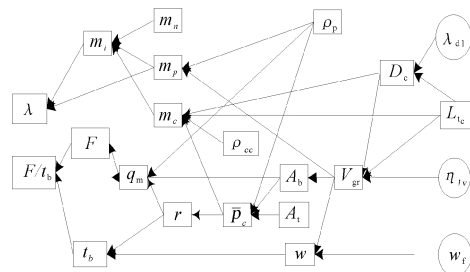


图 2 药形相关固体发动机总体设计参数约束网络  
Fig 2 Constraint network of SRM system design parameters about grain

在实际设计中,神经规则的输入功能属性  $a^{(i)}$  通



常为取值范围  $[a_l^{(i)}, a_u^{(i)}]$ , 定义实际取值范围相对其取值区间的隶属度计算函数:

$$sub_{a^{(i)}}^k = \min \left\{ \left( 1 - f \left( \frac{a_l^{(i)} - a_{k+}^i}{a_u^{(i)} - a_l^{(i)}} \right), \right), \right.$$

$$\left. \left( 1 - f \left( \frac{a_{k-}^i - a_u^{(i)}}{a_l^{(i)} - a_u^{(i)}} \right), \right) \right\}$$

式中  $f(x, y) = \begin{cases} 1, & xy > 1 \\ 0, & xy < 0 \\ xy, & 0 < xy < 1 \end{cases}$ ; 为敏感参数。

$sub_{a^{(i)}}^k$  表征了属性  $a^{(i)}$  的实际取值范围  $[a_l^{(i)}, a_u^{(i)}]$  隶属于  $a^{(i)}$  的第  $k$  个取值区间  $[a_{k-}^i, a_{k+}^i]$  的程度。此时神经规则决策输出计算变为

$$a = sf_0 + \sum_{i=1}^K \left( \max_{k=1}^{M_i} sf_{ik} \cdot sub_{a^{(i)}}^k \right)$$

式中  $a^{(i)} = \{ t_b, F/t_b, L/t_c, d_l \}$ ;  $i = 1, 2, \dots, 5$ ;  $k = 1, 2, \dots, M_i$ ;  $M_i$  为  $a^{(i)}$  属性的取值区间数。

#### 4 基于案例推理的药形几何参量确定

药形几何参量确定是建立在实例与经验基础上的一个定量行为过程。在确定药形尺寸时,除了定量计算外,设计人员还要凭借以往经验及参考相似的成熟设计实例。案例推理(CBR)可很好地实现设计人员的这一思维方式。CBR过程首先将以前成熟设计实例示成案例形式,然后从中找出当前新问题的相似案例,如果相似案例的问题属性与新问题不一致,则对相似案例进行调整,调整后相似案例的解就可作为新问题的解<sup>[12]</sup>。

以上述集合  $B_{eh}$  与  $S_{tr}$  间映射关系为出发点,将药形几何参量以药柱外径  $R_{gr}$  为比例因子进行无量纲转换,建立尺寸无关的药形几何参量传播约束网络,见图3。图3中,  $eps(K_i)$  包括固化冷却时引起的应变  $\epsilon^*$  (a) 和点火启动时内压力载荷引起的应变  $\epsilon_p^*$  (a),通过对药柱结构完整性计算模型分析<sup>[21]</sup>,  $\epsilon^*$  (a) 和  $\epsilon_p^*$  (a) 仅与药柱内孔形状相关的应力集中系数  $K_i$ 、相对肉厚  $w_f$  (或  $m$  数)、长径比  $d_l$  及推进剂、壳体材料相关,而与药柱具体尺寸无关。

由图3可知,药形几何参量输出完全传递到无因次行为变量  $w_f$ 、 $d_l$ 、 $\epsilon_{iv}$ 、 $K_i$ 、 $\epsilon$ 、 $u_{Ab}$ , 以此无因次行为变量组成问题属性集合  $M$ , 尺寸无关药形几何参量为问题解集  $N$ , 建立药形几何参量确定的案例表示模型为

$M = \{w_f, d_l, \epsilon_{iv}, K_i, \epsilon, u_{Ab}\}$   $N = \{\text{尺寸无关药形几何参量, 药柱相关计算模型}\}$

其中,药柱相关计算模型包括燃面推移计算模块、结构完整性分析模块和侵蚀函数模块。

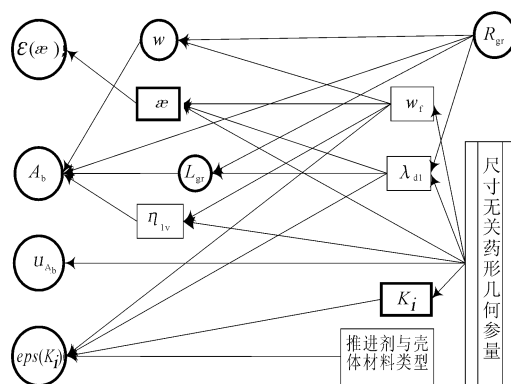


图3 尺寸无关药形几何参量约束网络

Fig 3 Constraint network of grain geometric parameters independent of size

基于 CBR 的药形几何参数确定算法如下:

(1)按照发动机总体设计给出的装药设计行为属性集  $B_{eh}$  及推进剂、壳体材料类型计算  $M$  中行为变量取值范围;

(2)相对于问题属性集  $M$ , 计算新设计任务和各案例间的相似度, 计算模型见文献[13];

(3)取一定相似度水平的案例作为相似案例, 如果其问题属性与新设计任务不一致, 则在其计算模型上进行案例调整操作; 调整分 3 个阶段:  $[w_f, d_l]$  ( $w_f, d_l$ );  $[\epsilon_{iv}, u_{Ab}]$  (药形几何参量);  $[K_i, \epsilon]$  (药形几何参量), 其方括号中为调整操作所要满足的问题属性, 小括号中为被操作对象, 整个调整过程中以集合  $B_{eh}$  中  $eps(K_i)$ , ( $\epsilon$  等限制范围作为约束条件, 整个调整过程为一个反复循环迭代过程;

(4)以设计任务所要求药柱外径  $R_{gr}$  的取值为比例因子, 将尺寸无关药形的调整结果转换为实际设计尺寸;

(5)结束。

根据所处设计状态合理选择被调整参数及其调整步, 是实现案例调整的关键。调整中, 按文献[14]适用度最大算法选择调整参数及其调整步。当出现多个调整步时, 引入文献[15]的交互式可视化思想, 通过手动按钮对所选调整步的执行, 确定出其对行为变量的影响程度, 从而进一步确定最佳调整参数及其调整步。整个调整参数及其调整步确定过程为程序计算加上人工可视化操作的半自动过程。案例数越多, 则检索出相似度大的案例可能性就越大, 调整步骤越少, 收敛越快, 方法就越有效。

药柱计算模型不同, 其对应的调整步及约束条件也不同。调整步及约束条件反映了不同类型药柱的数

值规律,同时也融会了不同药形的设计经验,其知识获取方式包括面向产品和面向设计专家两个方面,获取方式具体实现参阅文献 [16]、[17]。

5 应用

应用该装药设计方法,在固体火箭发动机集成化设计环境<sup>[18]</sup>中进行具体型号的装药设计,并给出设计结果的燃面 肉厚曲线。

5.1 药形选择神经规则构造及验证

取成熟发动机 66例作为设计实例集,按 3节步骤构造药形选择决策神经规则,功能属性  $a^{(i)}$ 取值区间见表 1。其中,星形和翼柱形药形的决策神经规则见表 2。

另取 15个成熟产品作为测试样本,对药形选择规则进行测试, $a > 0.5$ 的规则结果与实际药形值见表 3。表 3中, $t_b$ 、 $L_c$ 为解密处理后数据,非真实数据。从表 3可看出,除样本 5以外,测试结果输出均包含实际值,

且具有较大的 NP值。说明所生成的神经规则可为药形确定提供依据。其中,  $NP_{ij}$ 表示编号为  $i$ 的药形的第  $j$ 个规则的  $a$ 值。 $i$ 与药形对应关系: 1为端燃药形; 2为星形; 3为翼形; 4为多根管形; 5为车轮形; 6为锥柱形; 7为单根管形。

依据  $a$ 的意义,需说明如下:

(1)当  $a > 0$ 时,规则 NP值表征的是根据训练样本得出该药形的可取程度,由于设计结果具有多值性,最大的 NP值不一定对应实际取值,如样本 2;

(2)当  $a < 0$ 时,规则 NP值表征的是根据训练样本得出该药形的不可取程度,由于训练样本的有限性,这并不能反映规则对应的药形对该测试样本不可用,规则不能为“不可选取该药形 提供依据”;

(3)当神经规则决策输出含义为“不可取某药形”,并提供该药形选取的失败样本时,所得到的神经规则用于为“不可选取该药形 提供依据”。

表 1 药形选择决策规则的功能属性取值区间  
Table 1 The range of functional variables in grain selection neural rules

$a^{(i)}$	$[a_{1-}^i, a_{1+}^i]$	$[a_{2-}^i, a_{2+}^i]$	$[a_{3-}^i, a_{3+}^i]$	$[a_{4-}^i, a_{4+}^i]$	$[a_{5-}^i, a_{5+}^i]$	$[a_{6-}^i, a_{6+}^i]$	$[a_{7-}^i, a_{7+}^i]$
$t_b$	[55.8, 67.6]	[4.3, 6.68]	[12.5, 17.25]	[20.0, 50]	[3.5, 4.0]	[1.1, 6.3]	[136.6, 174]
$F/t_b$	[7.16, 12.7]	[3.2, 6.62]	[190.8, 386.2]	[78.45, 141.5]	[19.9, 50.8]	[0.017, 0.06]	[1.0, 3.0]
	[0.81, 0.9]	[0.59, 0.684]	[0.705, 0.8]	[0.4, 0.58]	—	—	—
$L_c$	[3.660, 5.260]	[2.261, 3.320]	[1.565, 2.200]	[800, 1.500]	—	—	—
dl	[3.2, 5.4]	[1.0, 2.1]	[6, 8.5]	[9.9, 15.3]	—	—	—

表 2 星形和翼柱药形的决策神经规则  
Table 2 Neural rules of star and finocyl grain

NP21/NP22/NP23: $sf_0 = -0.03/-0.36/0.16$ , 后件: $G_s$ =星形药形							
$a^{(i)}$	$sf_1$	$sf_2$	$sf_3$	$sf_4$	$sf_5$	$sf_6$	$sf_7$
$t_b$	0.14/-0.17/0.16	-0.14/-0.24/0.01	0.38/-0.19/0.01	-0.15/-0.25/0.01	-0.28/0.43/0.01	0.35/0.11/0.01	-0.26/0.01/0.01
$F/t_b$	0.66/-0.20/0.01	0.59/-0.17/0.01	-0.74/0.01/0.01	-0.05/0.16/0.01	0.31/0.39/0.01	-0.61/-0.12/0.01	-0.12/-0.37/0.16
	-0.04/-0.30/0.16	-0.27/0.14/0.01	0.76/0.11/0.01	-0.46/-0.27/0.01	—	—	—
$L_c$	0.36/-0.30/0.01	-0.26/-0.05/0.01	0.05/-0.03/0.16	-0.14/0.06/0.01	—	—	—
dl	-0.22/0.50/0.01	-0.48/-0.19/0.16	0.43/-0.44/0.01	0.28/-0.20/0.01	—	—	—
NP31/NP32: $sf_0 = -0.30/-0.06$ , 后件: $G_s$ =翼形药形							
$a^{(i)}$	$sf_1$	$sf_2$	$sf_3$	$sf_4$	$sf_5$	$sf_6$	$sf_7$
$t_b$	0.10/-0.01	-0.15/0.01	0.10/-0.14	-0.15/0.12	-0.02/0.01	-0.12/0.01	0.00/0.01
$F/t_b$	-0.14/0.01	-0.10/-0.04	0.00/0.01	0.00/0.01	-0.06/0.01	-0.18/0.01	0.26/-0.01
	0.15/0.10	-0.13/0.01	-0.10/-0.14	-0.18/0.01	—	—	—
$L_c$	-0.30/0.46	-0.04/0.01	-0.02/-0.35	0.09/-0.14	—	—	—
dl	-0.48/0.46	0.82/-0.50	-0.39/0.01	-0.22/0.01	—	—	—

表 3 药形选择测试样本输出结果

Table 3 Calculating results about grain selection samples

样本编号	$t_b$	$F/t_b$	$L_{tc}$	dl	真实药形	规则决策输出	$a > 0.5$ 规则输出
1	1.2	2.14	0.893	0.423	1.5	翼形	翼形、星形 $NP31(0.99)、NP23(0.98)$
2	1.4	10.4	0.699	1.122	2.73	翼形	翼形、星形 $NP32(0.62)、NP21(1.40)$
3	0.57	0.27	0.81	0.13	1.35	翼形	翼形 $NP31(0.50)$
4	1.0	0.53	0.87	0.278	1.7	翼形	翼形、星形、 锥柱形 $NP31(1.1)、NP23(0.82)、$ $NP61(0.54)$
5	0.14	6.7	0.773	0.307	3.7	翼形	星形 $NP21(0.95)$
6	1.35	11	0.882	1.092	2.73	翼形	翼形、星形 $NP31(0.55)、NP21(0.51)$
7	1.32	5.15	0.90	0.609	1.52	翼形	翼形、星形 $NP31(0.61)、NP23(0.64)$
8	0.07	15.2	0.71	0.427	9.37	星形	星形 $NP21(1.60)$
9	0.84	0.17	0.76	0.306	5.1	端燃	端燃 $NP1(0.58)$
10	1.3	1.85	0.87	0.96	5.4	锥柱形	锥柱、翼形、星形 $NP61(0.95)、NP32(0.96)、$ $NP23(0.66)$
11	0.7	1.17	0.88	0.30	1.8	锥柱形	锥柱、翼形、星形 $NP61(1.05)、NP31(0.87)、$ $NP23(0.66)$
12	0.08	77	0.58	0.52	4.0	多根管形	多根管形、单根管形 $NP41(1.32)、NP71(0.52)$
13	0.044	134.2	0.5	0.51	5.2	多根管形	多根管形 $NP41(0.75)$
14	0.11	1.27	0.526	0.164	4.1	单根管形	单根管形 $NP71(0.85)$
15	0.07	26.4	0.52	0.37	4.0	单根管形	单根管形、星形、 多根管形 $NP71(0.7)、NP22(0.66)、$ $NP41(0.54)$

5.2 尺寸无关的药形几何参量案例库构造

以星形药柱为例,取成熟设计 7 例,依据案例推理模型,构造尺寸无关星形药形几何参量,确定案例库,见表 4。表 4 中,案例 1、2 和 7 为内尖角圆化、平顶倒圆槽端星形药柱,1、2 为端面包覆,7 为端面不包覆;案例 3、4 为平角星形药柱, $r_b$  为平角半径;案例 5 为后部采用圆形截面的星形药柱, $\bar{w}_0$  为圆形截面相对肉厚;

案例 6 为椭圆形槽端星形药柱, 为椭圆短、长轴比;  $n$  为星角数; 为星边夹角; 为角度系数;  $r$  为星根过渡圆弧半径;  $r_1$  为星尖过渡圆弧半径。案例调整步及约束条件见表 5。表 5 中,“+”、“-”、“0” 分别表示设计参数增大、减小、不变;  $\epsilon ps^*(K_i)$  为药形相关结构完整性参数临界值;  $\alpha^*$  为通气参量临界值。

表 4 尺寸无关星形药形几何参量确定案例库

Table 4 Case database of star grain geometric parameters independent of size

案例	$w_f$	dl	lv	$K_i$	$\alpha$	1	2	相似 度	$n$		$r/R_{gr}$	$r_1/R$		$\bar{w}_0$	$r_d$	计算 模型	
1	0.46	3.13	0.90	4.28	113.2	1.21	1.26	0.68	6	44	0.9	0.034	0.025	—	—	—	m1
2	0.48	3.47	0.82	5.9	76.4	1.26	1.38	0.61	8	48	0.8	0.0157	0.020	—	—	—	m1
3	0.27	5	0.55	4.7	49.4	1.21	1.06	0.63	8	36	0.7	0.031	—	—	—	0.042	m2
4	0.353	5.4	0.63	5.7	52.7	1.04	1.10	0.76	6	60	0.7	0.020	—	—	—	0.050	m2
5	0.47	12.8	0.70	4.0	160.6	1.03	1.49	0.56	7	58	0.70	0.024	0.039	—	0.75	—	m5
6	0.43	3.46	0.75	4.4	77.8	1.19	1.26	0.71	7	48	0.85	0.032	0.019	0.45	—	—	m4
7	0.436	6.94	0.68	6.5	70.8	1.04	1.21	0.77	6	60	0.7	0.014	0.050	—	—	—	m3

表 5 星形药形几何参量确定的案例调整模式  
Table 5 Case adaptation mode of star grain geometric parameters

项目	被调整参数		问题属性	调整结果	所属阶段及约束
调整步及编号	(1)	$w_f$ $d_l$	$1_v \setminus \textit{eps}(K_i)$	$1_v$	
	(2)	$d_l$ $w_f$	$\alpha \setminus \textit{eps}(K_i)$	$\alpha \setminus \textit{eps}(K_i)$	
	(5)	$r_i$	$\alpha \setminus 1_v$	$\alpha \setminus 1_v$	
	(6)	$r$	$1_v$	$1_v$ $K_i$	、
	(7)	$r$ $w_f$	$1_v \setminus K_i \setminus \alpha$	$1_v$ $K_i$ $\alpha$	、
	(8)		$K_i \setminus \alpha$	$K_i$ $\alpha$	
	(9)		$u_{A_b}$ (增面比 $2$ )	$2$	
	(10)		$u_{A_b}$ (减面比 $1$ )	$1$	
	(11)	$n$	$K_i \setminus \alpha \setminus 1_v$ $u_{A_b}$	$K_i$ $\alpha$ $1_v$	
	$\textit{eps}(K_i) < \textit{eps}^*(K_i)$				
	约束条件及编号	$\alpha < \alpha^*$			
的恒面性约束 (文献 [2])					

5.3 设计实例

以国外某固体助推火箭为例,其区间形式的总体设计技术要求:  $\{L, F, t_b, m_i, D_c, L_m\} = \{[590, 660], [100, 110], [6, +], [0, 363], [0.805, 1], [0, 360], [0, +]\}$ 。据固体发动机性能计算公式和当前推进剂性能参数等,估算出与药形相关的总体设计技术要求取值范围如下:

$\{t_b, F/t_b, L_{tc}, d_l\} = \{[5.36, 6.6], [15, 20.5], [0.805, 1], [1500, 3300], [4, 14]\}$

按计算药形选择神经规则,输出结果为  $NP_1 = -0.6; NP_2 = 1.14; NP_3 = 0.4; NP_4 = 0.83; NP_5 = 0.38; NP_6 = 0.35; NP_7 = 0.98$ 。其中,下标 1~7 依次表示端燃、星形、翼柱形、多根管形、车轮形、锥柱形、单根管形。

仍考虑  $a > 0.5$ ,则药形选择结果为星形或管形(单根、多根)药柱。

以选择星形药形为例,进行发动机总体设计,同时考虑结构完整性和侵蚀,得到装药设计行为属性集  $Beh$ :

$\{\bar{A}_b, w, 1_v, R_{gr}, L_{gr}, u_{A_b} (1, 2), eps(K_i), (\alpha)\} = \{2.16, 75.7, > 0.797, 360, 2.175, (< 1.058, < 1.204), < 0.105, < 1.35\}$

依据图 3 计算,得到药形几何参量确定案例表示模型的问题属性集合  $M$  中属性的取值范围:

$M_0 = \{w_f, d_l, 1_v, K_i, \alpha_{1, 2}\} = \{0.419, 6.04, > 0.797, < 5.6, < 100, < 1.058, < 1.204\}$

计算  $M_0$  与表 4 案例的相似度,计算结果见表 4。

其中,案例 7 相似度最大为 0.77。选取案例 7 为相似案例,重用其计算模型  $m_3$  进行案例调整操作,得到药形几何参量结果。调整步骤和结果见表 6。图 4 示出了每一调整步、设计结果及实际结果的燃面肉厚曲线。

设计结果为六角星形药柱,实际结果为七角星形,但由表 6 结果和图 4 的燃面肉厚变化规律可看出,二者内弹道性能、结构完整性及与通气参量相关的侵蚀特性均非常接近,说明得出的装药设计结果是可行的。

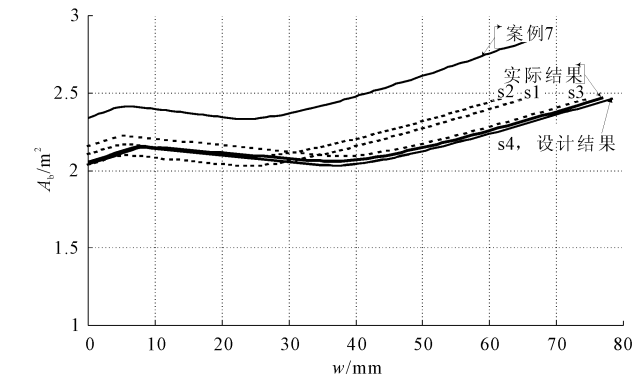


图 4 案例调整中  $A_b-w$  曲线  
Fig 4  $A_b-w$  curve during case adaptation

6 结论

(1)神经规则可集成和表示药形选择的经验性知识,其  $NP$  值对设计人员具有定量的参考价值,可有效地解决固体发动机设计中如药形等结构形式的选择问题;

表 6 案例 7调整步骤和结果  
Table 6 Adaptation step and result of No.7 case

项目	$w_f$	$d_l$	$lv$	$K_i$	$\alpha$	1	2	$n$		$r/R_{gr}$	$r_l/R_{gr}$	调整步	调整阶段及 调整目的	
案例 7	0.436	6.94	0.68	6.5	70.8	1.035	1.216	6	60	0.7	0.014	0.050	—	—
s1	0.436	6.04	0.68	6.5	61.6	1.035	1.216	6	60	0.7	0.014	0.050	$d_l$ $w_f$	装药长径比 满足要求
s2	0.419	6.04	0.66	6.5	60.9	1.037	1.181	6	60	0.7	0.014	0.050	$w_f$ $d_l$	装药肉厚 满足要求
s3	0.419	6.04	0.79	6.5	100.9	1.064	1.181	6	60	0.7	0.014	0.014	$r_l$	提高装填系数
s4	0.419	6.04	0.80	5.3	99.6	1.057	1.215	6	60	0.7	0.022	0.014	$r$ $w_f$	提高装填系数, 同时降低 $K_i$ 、 $\alpha$
设计结果	0.419	6.04	0.80	5.3	99.9	1.057	1.20	6	60	0.705	0.022	0.014		调整增面比 $\alpha_2$
实际结果	0.412	6.0	0.79	5.4	99.2	1.049	1.201	7	65	0.81	0.021	0.017	—	—
设计要求	0.419	6.04	>0.797	<5.6	<100	<1.058	<1.204	—	—	—	—	—	—	—

(2)与尺寸无关的药形几何参量案例表示,更能反映药形几何参量的本质特征和取值规律;针对同一药形,不同的药形几何参量适用于不同的行为变量输出;在装药设计中,根据行为变量要求,通过 CBR 可定量确定药形几何参量取值;

(3)引入行为变量  $K_i$ 、 $\alpha$ 使药形几何参量确定中,同时考虑了药形相关的药柱结构完整性和通气参量引起的侵蚀燃烧效应,可得到更趋合理的结果,并减少后期设计反复;

(4)由于 CBR 适用于弱理论复杂系统,对燃面变化规律与药形尺寸间无明确解析关系的三维药柱,该方法可更好发挥应用潜力;

(5)该方法无需人工建立规则推理系统,需要的只是按 SBF模型对成熟设计进行表示与存放,所以按该方法开发的装药设计系统不存在知识获取“瓶颈”问题,更具有实用价值。

参考文献:

[1] 杨南生,等. 固体火箭发动机设计与研究 [M]. 北京:宇航出版社,1990.

[2] 王元有. 固体火箭发动机设计 [M]. 北京:国防工业出版社,1984.

[3] Jacques,Roux J. Computer aided preliminary design of solid rocket motors[R]. AIAA 83-1254.

[4] James Brill Clegem. Solid rocket motor conceptual design: the development of a design optimization expert system with a hypertext user interface[R]. AIAA 93-2318.

[5] James Brill Clegem. Computer aided solid rocket motor conceptual design and optimization[R]. AIAA 94-0012.

[6] 刘金,等. 固体火箭发动机方案集成设计方法研究 [J]. 推进技术,1995,16(1).

[7] 鲍福廷. 固体火箭发动机概念设计 CAD 专家系统设计 [J]. 推进技术,1998,19(3).

[8] bannis Hatzilygeroudis, Jim Prentzas Integrating (rules, neural networks) and cases for knowledge representation and reasoning in expert systems[J]. Expert Systems with Applications, 2004: 63-75.

[9] Saridakis K M, Dentsoras A J. Case-DeSC: A system for case-based design with soft computing techniques[J]. Expert System with Applications, 2007,32: 641-657.

[10] 杨广文,等. 确定性退火技术 [J]. 计算机学报,1998,21(8).

[11] Reza Langari Fuzzy models, modular networks and hybrid learning[J]. Proceedings of the IEEE,1995.

[12] Watson I Case-based reasoning is a methodology not a technology [J]. Knowledge Based Systems, 1999, 12: 303-308.

[13] Skonin T Y, Schneider M. Design issues in fuzzy case-based reasoning[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2001, 117: 251-267.

[14] 谷建光,张为华,等. 案例调整技术在固体火箭发动机总体设计中的应用 [J]. 固体火箭技术,2007,30(4).

[15] 欧海英,张为华,等. 固体火箭发动机交互式可视化优化设计与分析 [J]. 固体火箭技术,2006,29(4).

[16] Ghassan Beydoun Incremental acquisition of search knowledge[J]. Int. J. Human-Computer Studies, 2000, 52: 493-530.

[17] 曹存根. 知识云及其在知识获取中的意义 [J]. 软件学报,1995,16(3).

[18] 解红雨,张为华. 基于 J2EE的虚拟样机集成框架研究与实践 [J]. 计算机集成制造系统-CIMS, 2004, 10(专刊): 100-104.

(编辑:崔贤彬)

