

基于CAIV的机械产品设计方案费效权衡优化

韩庆兰¹, 程晓娟^{1,2}, 徐丹¹

(1. 中南大学 商学院, 长沙 410083; 2. 湖南科技大学 工业工程系, 湖南 湘潭 411201)

摘要: 针对民用机械产品设计方案选择时,既要考虑客户对产品的功能需求,又要符合企业费用目标约束的问题,采用基于以费用为独立变量(CAIV)的费效权衡优化方法,以混凝土泵车系列产品为研究对象,运用主成分回归和层次分析(AHP)方法分别构建生命周期费用和效能模型,并以费效比为优化目标权衡得到最优方案.研究表明,采用CAIV费效权衡方法选择的设计方案,可以实现产品全生命周期成本目标的有效控制.

关键词: 以费用为独立变量(CAIV); 费效权衡; 生命周期费用; 效能

中图分类号: F224.5

文献标志码: A

Mechanical product design cost-effective trade-off based on CAIV

HAN Qing-lan¹, CHNEG Xiao-juan^{1,2}, XU Dan¹

(1. School of Businesses, Central South University, Changsha 410083, China; 2. Department of Industrial Engineering, Hu'nan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China. Correspondent: HAN Qing-lan, E-mail: hancsu@163.com)

Abstract: Aiming at the decision optimization problem of the civil mechanical product design scheme which needs to consider the customer demand of products function, but also consider cost constraints, the study is made on the concrete pump truck series performance-cost trade-offs and decision-making using cost as an independent variable(CAIV) method. The life-cycle costs and performance models are built by using principal component regression and analytical hierarchy process(AHP) methods respectively. Then the optimal solution is obtained with cost-effective ratio. The results show that the product life cycle cost targets can be controlled effectively by using the design program traded-off with CIAV.

Key words: cost as an independent variable(CAIV); cost-effective trade-off; life cycle cost(LCC); effectiveness

0 引言

机械产品全生命周期费用的70%以上由研发设计阶段决定^[1],因此,在产品阶段通过设计参数的优化来降低产品的全生命周期费用,成效更加显著.起源于美国国防系统的以费用为独立变量(CAIV)的武器装备采办费用管理技术,强调在系统设计时确定其性能参数与经济可承受性(费用目标)之间的平衡,为立足于降低全生命周期成本视角的产品设计方案选择决策提供了有效的理论指导.

国外很多学者运用CAIV思想对设计方案和费用的权衡技术进行了理论和应用上的研究,较为典型的有文献[2-9].但是,大多研究都集中在军事领域的武器装备系统,而且国内实例数据几乎都来源于美国军方的实验数据.究其原因,一是因为产品费用、效能方面的数据难以获取,尤其是产品成本数据,基本

上都属于企业的机密,从而限制了CAIV技术的推广应用;其二是CAIV只是一个费效权衡的框架,实际应用时要根据具体产品的特点来选取关键性能参数指标,构建相应的费用、效能模型,过程繁琐复杂,这也是阻碍CAIV技术由武器装备向民用产品转化的关键.根据对机械行业产品设计过程成本控制方法进行的长期研究,作者确信基于CAIV的费效权衡思想对于制造企业在产品设计阶段进行方案优选,以及用户进行产品定制方案决策有着非常重要的价值.鉴于此,本文应用CAIV方法,针对机械产品的设计方案建立费效权衡优化模型,通过模型的求解,解决企业设计阶段对产品生命周期成本进行控制的问题,实现CAIV技术在民用产品应用领域的拓展.

1 基于CAIV的费效权衡优化模型

以费用为独立变量技术(CAIV)最早起源于美国

收稿日期: 2013-05-08; 修回日期: 2013-07-31.

基金项目: 国家自然科学基金项目(71172101).

作者简介: 韩庆兰(1954—),女,教授,博士生导师,从事现代成本管理与决策技术等研究;程晓娟(1980—),女,博士生,从事现代成本管理与决策的研究.

国防系统,目的是解决二战后国家膨胀军事需求与有限的军费资源计划之间的巨大冲突.其核心思想是强调费用的可承受性,将费用放在与性能和进度同等重要的地位,强调费用是设计的输入而不是被动地输出^[7].因此,CAIV 实际上是 LCC 思想的具体应用,它将费用作为输入指标,规定其目标值和门限值,而目标值就是确定的目标成本,这样就可以将费用作为一项约束进行管理和控制,实现在设计阶段控制产品全生命周期费用的目的.

在进行系统费效分析时,CAIV 将费用、关键性能参数和系统效能均作为变量,通过建立关键性能参数、效能和费用三者之间的关系模型,在满足费用、性能等条件约束下,权衡得到三者之间的最佳平衡点.因此,以费效分析的评价值最优为决策目标,产品的性能设计参数以及费用为约束条件,可以建立如下费效权衡模型:

$$\begin{aligned} \max K &= G(E, C). \\ \text{s.t.} \quad &\begin{cases} E = F(p_1, p_2, \dots, p_r) \geq E_0; \\ C = \varphi(p_1, p_2, \dots, p_r) \leq C_0; \\ p_i^L \leq p_i \leq p_i^U, i = 1, 2, \dots, r; \\ g_j(p_1, p_2, \dots, p_r) \leq 0, j = 1, 2, \dots \end{cases} \quad (1) \end{aligned}$$

式中: $g_j(p_1, p_2, \dots, p_r)$ 表示其他设计约束条件; p_i^L 和 p_i^U 分别表示各个性能参数指标取值范围的下限和上限; E_0 表示客户对产品效能的需求,即产品效能值的下限值; C_0 表示所能承受的产品生命周期费用的最大值,即产品生命周期费用的上限值.

2 机械产品设计方案费效优化模型

2.1 实际问题描述

问题:企业在进行 X 型新型混凝土泵车设计时,希望将其寿命周期费用控制在 500 万元之内,并使得其工作效能最大.混凝土泵车由底盘、泵送系统和臂架 3 大重要部件组成,通过专家、设计者访谈和用户

调研,筛选了 12 个关键性能参数指标,分别是底盘类型 P_1 、臂架垂直高度 P_2 、臂架垂直深度 P_3 、最小展开高度 P_4 、臂节数 P_5 、整车全长 P_6 、整车自重 P_7 、混凝土排量 P_8 、输送缸行程 P_9 、发动机功率 P_{10} 、燃料箱容积 P_{11} 和排量 P_{12} .

2.2 费用模型

如表 1 所示,混凝土泵车 12 个关键性能指标之间存在着较强的相关性.从共线性诊断结果看,自变量方差扩大因子中 $VIF_2 = 760.789$, $VIF_3 = 422.182$, $VIF_7 = 115.441$,远远大于 10,说明变量之间存在严重的多重共线性,因此本文采用主成分回归的方法消除多重共线性的影响.首先利用 SPSS 17.0 对 12 个关键性能指标进行主成分分析,得到相关系数矩阵的特征根及主成分贡献率(见表 2)、初始因子载荷矩阵(见表 3)、主成分得分系数矩阵(见表 4).

根据特征值 ≥ 1 且累计贡献率 $\geq 80\%$ 的原则提取两个主成分 F_1 和 F_2 .由表 3 可知:主成分 F_1 在 P_2 、 P_3 、 P_4 、 P_5 、 P_6 、 P_7 、 P_8 、 P_9 上有较大载荷,说明 F_1 主要反映臂架垂直高度(P_2)、臂架垂直深度(P_3)、最小展开高度(P_4)、臂架节数(P_5)、整车全长(P_6)、整车自重(P_7)、混凝土理论排量(P_8)、输送缸行程(P_9)这 8 个方面的信息,综合反映了混凝土泵车的整体特征,包括泵送系统的性能技术要求和外观特征;主成分 F_2 在 P_1 、 P_{10} 、 P_{11} 、 P_{12} 上有较大载荷,说明 F_2 主要反映底盘类型(P_1)、发动机功率(P_{10})、燃料箱容积(P_{11})和排量(P_{12})这 4 方面信息,综合反映了混凝土泵车的底盘特征.

由表 4 主成分得分系数矩阵得到两主成分的表达式分别为

$$\begin{aligned} F_1 &= -0.06p_1 + 0.14p_2 + 0.139p_3 + 0.134p_4 + \\ &0.127p_5 + 0.115p_6 + 0.135p_7 + 0.131p_8 + \\ &0.128p_9 + 0.054p_{10} - 0.012p_{11} + 0.085p_{12}, \quad (2) \end{aligned}$$

表 1 关键性能指标的相关系数

指标	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_9	P_{10}	P_{11}	P_{12}
P_1	1.000											
P_2	0.134	1.000										
P_3	0.138	0.997	1.000									
P_4	0.065	0.932	0.925	1.000								
P_5	-0.079	0.779	0.761	0.799	1.000							
P_6	0.219	0.883	0.879	0.679	0.617	1.000						
P_7	0.173	0.961	0.958	0.830	0.753	0.954	1.000					
P_8	0.147	0.925	0.911	0.873	0.793	0.792	0.893	1.000				
P_9	0.139	0.836	0.832	0.650	0.611	0.923	0.926	0.774	1.000			
P_{10}	0.223	0.620	0.629	0.534	0.488	0.607	0.630	0.604	0.560	1.000		
P_{11}	0.417	0.402	0.408	0.319	0.328	0.473	0.417	0.383	0.327	0.640	1.000	
P_{12}	-0.564	-0.025	-0.022	-0.006	-0.019	-0.117	-0.056	-0.053	0.065	-0.312	-0.599	1.000

表 2 主成分分析结果

成分	特征值	贡献率/%	累计贡献率/%
1	7.591	63.257	63.257
2	2.043	17.025	80.282
3	0.745	6.212	86.494
4	0.586	4.882	91.376
5	0.356	2.963	94.339
6	0.260	2.163	96.502
7	0.223	1.862	98.364
8	0.111	0.928	99.292
9	0.058	0.485	99.778
10	0.016	0.131	99.909
11	0.010	0.084	99.993
12	0.001	0.007	100

表 3 初始因子载荷矩阵

原始变量	成分	
	F ₁	F ₂
P ₁	0.134	0.847
P ₂	0.982	-0.116
P ₃	0.977	-0.106
P ₄	0.898	-0.168
P ₅	0.761	-0.137
P ₆	0.904	0.023
P ₇	0.976	-0.076
P ₈	0.913	-0.120
P ₉	0.846	-0.196
P ₁₀	0.482	0.717
P ₁₁	0.404	0.806
P ₁₂	-0.097	-0.804

表 4 主成分得分系数矩阵

原始变量	成分	
	F ₁	F ₂
P ₁	-0.060	0.361
P ₂	0.140	-0.030
P ₃	0.139	-0.027
P ₄	0.134	-0.060
P ₅	0.127	-0.074
P ₆	0.115	0.038
P ₇	0.135	-0.009
P ₈	0.131	-0.021
P ₉	0.128	-0.039
P ₁₀	0.054	0.177
P ₁₁	-0.012	0.339
P ₁₂	0.085	-0.423

$$F_2 = 0.361p_1 - 0.03p_2 - 0.027p_3 - 0.06p_4 - 0.074p_5 + 0.038p_6 - 0.009p_7 - 0.021p_8 - 0.039p_9 + 0.177p_{10} + 0.339p_{11} - 0.423p_{12}. \quad (3)$$

然后以各个主成分的方差贡献率占两个主成分的方差贡献率之和的比重作为权重, 得到 F 的表达式, 即

$$F = \frac{63.257\%}{63.257\% + 17.025\%} F_1 + \frac{17.025\%}{63.257\% + 17.025\%} F_2 = 0.7879F_1 + 0.2121F_2. \quad (4)$$

为拟合 LCC 与 F 的关系, 运用 SPSS 17.0 进行曲线估计, 同时选取幂函数曲线模型 (power)、对数函数曲线模型 (logarithmic) 和 S 型曲线模型 (S) 进行回归.

表 5 模型汇总和参数估计值

方程	模型汇总					参数估计值	
	R	F 检验	df ₁	df ₂	sig.	常数	b ₁
logarithmic	0.886	193.993	1	25	0.000	-5 094.239	672.185
power	0.924	302.769	1	25	0.000	4.26e-5	1.959
S	0.898	219.197	1	25	0.000	7.701	-6 157.223

由表 5 可知, 3 种模型中幂函数曲线模型的拟合度最好, 可决系数 R 为 0.924, 模型解释能力最强. 由此, 得到如下费用估算模型表达式:

$$LCC = 4.26 \times 10^{-5} F^{1.959}. \quad (5)$$

将式 (2)~(4) 代入 (5), 将 LCC 转换成关键性能参数指标的函数, 即

$$LCC = 4.26 \times 10^{-5} (0.0293p_1 + 0.1039p_2 + 0.1038p_3 + 0.0929p_4 + 0.0844p_5 + 0.0987p_6 + 0.0907p_7 + 0.0988p_8 + 0.0926p_9 + 0.0801p_{10} + 0.0624p_{11} + 0.0208p_{12})^{1.959}. \quad (6)$$

2.3 效能模型

构建效能模型, 一方面是建立效能指标与性能参数之间的关系函数, 另一方面是确定应有哪些性能参

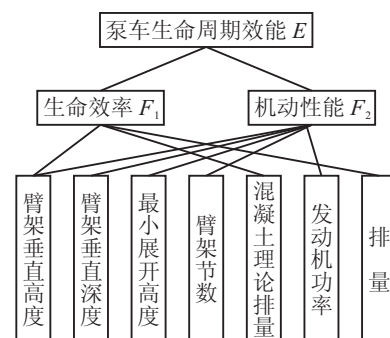


图 1 泵车生命周期效能层次结构

表 6 一致性检验及效能指标权重计算结果

判断矩阵	λ_{max}	权重向量	C.I	C.R
B_1	3.022 2	$[0.377 5, 0.271 8, 0.350 7]^T$	0.011 1	0.009 9
B_2	5.103 6	$[0.538 3, 0.070 1, 0.070 1, 0.165 8, 0.155 7]^T$	0.025 9	0.023 1
A	2	$[0.600, 0.400]^T$	0	0

数将参与权衡. 通过用户需求调查得知, 针对混凝土泵车这一特殊的工程机械设备, 工作环境的特殊性决定了泵车的臂长是首要考虑的因素; 其次, 泵车设备的工作强度很大, 因此还需要考虑混凝土泵送的效率, 即混凝土的泵送排量. 此外, 底盘和排量也是影响混凝土泵车机动性能的重要参数. 因此, 本文建立了混凝土泵车效能层次结构模型, 如图 1 所示.

为考察泵车工作效率指标 (E_1) 和机动性能指标 (E_2) 与性能参数之间的数量关系, 采用 AHP 方法, 通过专家打分确定判断矩阵, 并对判断矩阵进行一致性检验, 得到系统效能指标权重向量, 如表 6 所示.

由表 6 中 3 个判断矩阵的权重向量, 得到工作效率 E_1 、机动性能指标 E_2 与性能参数指标之间的关系为

$$E_1 = 0.377 5p_2 + 0.271 8p_8 + 0.350 7p_{12}, \quad (7)$$

$$E_2 = 0.538 3p_2 + 0.070 2p_3 + 0.070 1p_4 + 0.165 8p_5 + 0.155 7p_{10}. \quad (8)$$

总效能 E 与子效能 E_1 和 E_2 的关系为

$$E = 0.600E_1 + 0.400E_2. \quad (9)$$

结合式 (8) 和 (9), 得到混凝土本车生命周期效能模型为

$$E = 0.441 8p_2 + 0.028p_3 + 0.028p_4 + 0.066 3p_5 + 0.163 1p_8 + 0.062 3p_{10} + 0.272 7p_{12}. \quad (10)$$

2.4 费效权衡优化模型

根据 CAIV 的要求, 在建立了性能模型和费用模型之后, 还需要建立“权衡空间”, 也就是明确各设计参数的约束条件. 根据用户需求调查和企业目前技术水平, 确定混凝土泵车主要性能参数取值范围. 其中由于底盘指标属于字符型, 没有对应取值范围, 无法进行量化处理. 本文依据底盘的性能先进性、安全可靠程度、排放标准等特性以及用户使用评价, 给不同型号底盘赋予不同分值: $type_1 = 0.86$, $type_2 = 0.95$, $type_3 = 0.90$, $type_4 = 1$, $type_5 = 0.90$. 对于决策准则, 既不能单一追求效能最大, 也不能单一追求生命周期费用最小, 因此以单位费用效能为目标函数, 并且生命周期不超过 500 万, 效能值不低于 70, 得到如下费效权衡优化模型:

$$\max \frac{E}{LCC}.$$

$$\text{s.t. } LCC \leq 500;$$

$$E \geq 70;$$

$$p_1 \in [0.85, 1];$$

$$p_2 \in [42, 56], p_2 \text{ 取整数};$$

$$p_3 \in [21.3, 36.6];$$

$$p_4 \in [10, 15.2];$$

$$p_5 \in [4, 5], p_5 \text{ 取整数};$$

$$p_6 \in [11 700, 14 000], p_6 \text{ 取整数};$$

$$p_7 \in [27 000, 42 000], p_7 \text{ 取整数};$$

$$p_8 \in [140, 170], p_8 \text{ 取整数};$$

$$p_9 \in [2 000, 2 200], p_9 \text{ 取整数};$$

$$p_{10} \in [265, 300], p_{10} \text{ 取整数};$$

$$p_{11} \in [380, 400], p_{11} \text{ 取整数};$$

$$p_{12} \in [10.520, 14.256].$$

其中 LCC 为混凝土泵车生命周期费用, E 为生命周期效能, 具体函数表达式分别见式 (6) 和 (10).

这是一个复杂的非线性优化问题, 本文采用非线性规划软件 lingo 9.0 进行模型求解, 得到最优决策变量为

$$P = \{p_1, p_2, \dots, p_{12}\} = \{0.85, 56, 36.6, 15.2, 5, 11 700, 27 000, 170, 2 000, 300, 380, 14.256\},$$

其目标值为 $\max K = 0.167$, 此时系统的效能值 $E = 75.94$, 费用值 $LCC = 453.46$ 万元. 如果采用最先进的系统方案进行设计, 即所有的参数指标均采用其上限值进行设计, 则系统的效能值 $E = 82.5$, 费用值 $LCC = 560$ 万元, 而其费效比则为 $K = 0.147$. 由此可见, 通过基于 CAIV 的性能-费用的综合权衡模型, 能够得到权衡空间内的最优方案.

3 结 论

为实现设计阶段控制产品全生命周期成本的目的, 本文采用基于 CAIV 的费效权衡优化方法对机械产品进行性能参数优化设计. 以某企业混凝土泵车系列产品为研究对象, 通过专家、设计人员访谈筛选出 12 个关键性能参数, 采用主成分回归方法建立泵车生命周期费用模型; 根据用户调查结果构造泵车生命周期效能层次结构模型, 利用 AHP 法建立了混凝土泵车生命周期效能模型; 然后确定权衡空间, 以单

位费用效能最大化为优化目标, 构建了混凝土泵车费效权衡优化模型, 通过模型求解得到权衡空间内最优设计方案. 研究表明, 该方法通过建立效能、费用与关键性能指标参数三者的关系, 将费用和效能都作为约束条件对产品设计关键性能参数进行优化, 使得决策方案既能满足经济可承受性, 又能满足性能需求. 该研究成功实现了将 CAIV 的费效权衡优化方法从武器装备向民用产品领域的转移, 为民用产品设计阶段控制生命周期成本进行设计方案费效权衡提供了一种实用的决策方法.

参考文献(References)

- [1] Benjamin S Blanchard. Life cycle costing — A review[J]. *Terotechnology*, 1979, 1(1): 9-15.
- [2] Ronald Luman. Quantitative decision support for upgrading complex systems of systems[D]. Washington: The School of Engineering and Applied Science, Washington University, 1997.
- [3] Dave Broden, Pete Gilles. Assuring advanced small arms system value utilizing cost as an independent valuable (CAIV)[C]. Proc of the 2001 Joint Services Small Arms Symposium, Exhibition & Firing Demonstration. Arlington: National Defense Industrial Association, 2001: 1-33.
- [4] Philip Ardanuy, Carl Sehueler, Shawn Miller. Use of CAIV techniques to build advanced VIIRS approaches for NPOESS key EDRs[C]. Proc of SPIE, Earth Observing Systems VII. Seattle, 2002: 142-151.
- [5] Hongman Kim, James Mullins, Scott Ragon. A parallel trade study architecture for design optimization of complex systems[C]. The 46th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics Materials Conf. Austin, 2005: 1-10.
- [6] 谭云涛, 郭波. 基于 CAIV 的航空发动机性能与费用的综合权衡模型框架[J]. *航空动力学报*, 2007, 22(8): 1309-1314.
(Tan Y T, Guo B. Aircraft engine performance-cost tradeoff model framework based-on CAIV[J]. *J of Aerospace Power*, 2007, 22(8): 1309-1314.)
- [7] 谭云涛, 郭波. 基于 CAIV 的武器装备费效分析与指标决策方法研究[J]. *系统工程理论与实践*, 2007, 27(11): 48-53.
(Tan Y T, Guo B. A cost effectiveness analysis & target demonstration method based-on CAIV[J]. *System Engineering-Theory & Practice*, 2007, 27(11): 48-53.)
- [8] 谭云涛, 郭波. 以费用为独立变量的随机机会约束规划模型研究[J]. *数学的实践与认识*, 2007, 37(13): 73-78.
(Tan Y T, Guo B. Study on CAIV stochastic chance-constrained programming model[J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 2007, 37(13): 73-78.)
- [9] 李延杰, 刘晓东, 李洁. 基于 CAIV 的武器装备费用性能综合权衡模型研究[J]. *机械科学与技术*, 2011, 30(3): 368-371.
(Li Y J, Liu X D, Li J. A model of overall trade-off between weapon cost and performance using cost as an independent variable (CAIV) method[J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2011, 30(3): 368-371.)

(责任编辑: 曹洪武)