



以费用为独立变量的装备 寿命周期费用评价与管理



黄训江 著



科学出版社

内 容 简 介

随着高新技术的日益飞速发展,现代生产装备系统越来越复杂,与此相对应的全寿命周期费用也越来越高昂,现有理论与方法往往很难对装备系统效费做出全面、科学、合理的评价与解释。不仅如此,随着并行工程、敏捷制造、精益生产等先进制造技术的发展,装备制造业的生产组织管理模式也发生了翻天覆地的变革,装备生产企业越来越以客户为中心进行装备的研发、生产制造,为了适应这一变化,同时为了解决传统装备寿命周期费用评价管理中的“重技术、轻费用”的问题,本书提出和研究以费用独立变量(CAIV)为核心理念的装备系统全寿命周期费用评价及管理的系列技术与方法,以供装备系统研发、设计、管理及科研等人员借鉴和参考。

本书适合矿山机械、石油石化、冶金、发电机组等装备制造企业研发设计人员,国防装备论证、研发设计人员,各行业设计院中设计人员,各高校从事技术经济研究及学习人员等阅读与参考。

图书在版编目(CIP)数据

以费用为独立变量的装备寿命周期费用评价与管理/黄训江著. —北京:科学出版社, 2012. 6

ISBN 978-7-03-034788-6

I. ①以… II. ①黄… III. ①工业生产设备-设备时间利用率-研究 IV. ①TB4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 127365 号

责任编辑:马 跃/责任校对:张怡君

责任印制:阎 磊/封面设计:蓝正设计

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京九天志诚印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012 年 6 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2012 年 6 月第一次印刷 印张: 12 1/4

字数: 244 000

定价: 52.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

伴随着高新技术的日益飞速发展,现代生产装备系统越来越复杂,与此相对应的全寿命周期费用也越来越高昂,现有理论与方法难以对装备系统效费做出全面、科学合理的评价与解释,不仅如此,伴随着并行工程、敏捷制造、精益生产等先进制造技术的发展,装备制造业的生产组织管理模式也发生了翻天覆地的变革,装备生产企业越来越以客户为中心进行装备的研发、生产制造。为了适应这一变化,同时解决传统装备寿命周期费用评价管理中的“重技术、轻费用”的问题,本书提出了基于 CAIV 的装备系统全寿命周期费用评价与管理理论,并对其关键技术进行研究。

CAIV 是美国军方近年来迅速发展起来并付诸应用的一项武器装备费用管理理论与技术,它通过装备采办方、使用方与生产方的全过程、全系统、全寿命内的协作以采用创新性技术与管理手段来有效降低装备的全寿命周期费用,给美军武器装备采办带来了巨大的军事经济效益,但 CAIV 毕竟是美国军方发展起来的一项新技术,由于民用装备多具有生产工具属性以及我国装备制造的特殊国情和费用数据的保密性等原因,在我国开展基于 CAIV 的装备全寿命周期费用评价与管理应具有自己的独特性,本书结合我国国情,主要对以下内容进行了研究。

首先,本书对装备全寿命周期费用评价与管理关键技术的国内外研究概况进行详细评价与综述,表明我国装备寿命周期费用评价管理理论及应用研究与国外相比所处的劣势地位,指出装备寿命周期费用评价管理理论未来的发展趋势,进而提出在我国进行基于 CAIV 的装备费用评价管理的理论体系及其主要研究框架内容。

其次,本书对实施 CAIV 过程中的装备效能评估技术进行研究,在该部分内容中,本书以 WSEIAC 模型为基础,综合考虑可靠性、维修性、保障性等因素对装备系统效能的影响,分别构建了装备系统可用性、可信性和系统效能综合评估模型,便于及时准确地对装备系统真实效能水平进行全方位评价。

本书第三部分对实施 CAIV 过程中装备费用估算技术进行研究,本部分是本书研究的重点内容之一,在研究中本书不盲目追求算法的复杂性和新颖性,而是以工程实践应用为基础,注重费用估算的现实可操作性以及估算结果的准确性和可解释性。本书针对不同的估算目的和估算要求构建了大量不同的估算模型,每一种估算模型都不是万能的,其本身没有优劣之分,所区别是各个不同模型所适用的最佳环境条件。为了提高估算模型的估算精度和泛化能力,满足小样本条件下装备费用估算要求,本书提出了基于最小二乘支持向量机的装备费用估算方法,并以

此为基础构建了增量式和在线式学习算法,在本部分最后指出科学合理地组合运用这些模型将有助于提高模型的估算能力。

本书第四部分对实施 CAIV 过程中装备效费决策技术进行研究,探讨装备效费优化决策的步骤和程序,提出四阶段装备效费决策优化过程,并给出关键费用影响因素的求取、关键性能参数的确定等决策基础问题的求解算法,在该部分内容中主要解决了不同 IPT 间的递阶集成决策问题、效费多目标柔性决策问题和定费用条件下的系统优化决策等问题。

本书第五部分对基于 CAIV 的装备开发过程建模及优化技术进行研究。基于活动的建模方法提高了装备全系统、全过程、全寿命优化的现实可操纵性,并为 ABM 奠定基础,通过基于实例推理和模糊规则推理的方案优选,可以确定全局最优的装备开发方案。该部分还对装备开发过程各个活动任务及费用目标的分配进行研究。

本书第六部分主要对装备供应商选择及其维修决策分析技术进行研究,分别构建了装备供应商选择及其后期维修决策的数学模型,并给出算例。

本书第七部分为费用估算技术及定费用条件下的装备开发决策技术的应用算例。第八部分为本书结论与展望部分,对本书的研究内容进行总结,并指明了进一步研究的方向。本书各部分研究内容以费用为主线组成一个有机整体,其中第一部分为实施 CAIV 提供理论基础,第二部分和第三部分分别为实施 CAIV 中的装备效费权衡决策提供效能和费用数据基础,第四部分为实施 CAIV 提供决策技术基础,第五部分为实施 CAIV 提供方案优选和改进工具,第六部分为实施 CAIV 的过程管理提供技术支持。

目 录

前言

1 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 寿命周期费用评价与管理理论研究综述	4
1.3 寿命周期费用评价与管理关键技术的国内外研究概况	8
1.3.1 装备效能评价技术的研究与发展	8
1.3.2 装备寿命周期费用估算技术的研究与发展	9
1.3.3 装备效能、费用综合评价与决策技术的研究与发展	14
1.3.4 装备开发过程中费用优化与控制的研究与发展	16
1.4 现有研究中存在的问题与不足	16
1.5 装备寿命周期费用评价管理理论与技术的发展趋势	18
1.6 本书的主要研究内容及其结构安排	19
参考文献	23
2 装备效能评估技术研究	25
2.1 装备效能评估概述	25
2.1.1 效能概述	25
2.1.2 装备效能评估原则	27
2.1.3 系统效能评估方法	28
2.1.4 基于 RMS 的装备效能评估	31
2.2 基于 RMS 装备可用度评估	32
2.2.1 衡量装备可用度的相关指标	33
2.2.2 单系统的装备可用度评估	35
2.2.3 多系统的装备可用度评估	36
2.3 基于 RMS 的装备可信度评估	40
2.3.1 不可修复装备的可信度评估	41
2.3.2 可修复装备的可信度评估	43
2.3.3 部分阶段可修复、部分阶段不可修复条件下装备可信度评估	45
2.4 基于 RMS 的装备效能评估与应用	46
2.4.1 装备固有能能力评估	46
2.4.2 基于 RMS 的装备效能综合评估	47

2.4.3	面向装备选型和优化设计的装备系统效能综合评估	48
2.5	本章小结	49
	参考文献	50
3	装备费用估算技术研究	52
3.1	装备全寿命费用估算相关内容与程序	52
3.1.1	装备寿命周期费用估算基础工作	52
3.1.2	装备费用分解结构	54
3.1.3	装备费用估算基本方法	55
3.2	装备费用估算数据的采集与整理	58
3.2.1	数据采集的原则	59
3.2.2	数据采集的步骤与程序	59
3.2.3	费用数据的来源及其采集内容	60
3.2.4	费用数据采集形式的设计	62
3.2.5	费用数据的处理	63
3.3	回归分析在装备费用估算中的应用	66
3.3.1	多元回归分析技术在装备费用估算中的应用	66
3.3.2	偏最小二乘回归法在装备费用估算中的应用	69
3.3.3	岭回归在装备费用估算中的应用	70
3.4	基于 BP 网的装备费用估算	71
3.5	基于灰色理论的装备费用估算	75
3.5.1	中心费用值数列生成	75
3.5.2	中心费用值数列的 GM(1,1)模型及其预测	77
3.5.3	模型检验	78
3.5.4	结果分析及模型改进	79
3.5.5	模型应用	79
3.6	基于 Elman 网的装备费用估算	80
3.7	本章小结	83
	参考文献	84
4	基于 LS-SVM 的装备费用估算	86
4.1	标准 SVM 在装备费用估算中的应用	86
4.1.1	装备费用估算的数学问题表达	87
4.1.2	基于 SVM 的装备费用估算模型的构建	88
4.2	基于 LS-SVM 的装备费用估算	90
4.2.1	基于最小二乘支持向量机的装备费用估算	91
4.2.2	最小二乘支持向量机与最小二乘法在装备费用估算中的对比分析	92

4.3	基于 LS-SVM 的装备费用在线学习算法	95
4.3.1	基于 LS-SVM 的装备费用增量式学习算法	95
4.3.2	基于 LS-SVM 的装备费用在线式学习算法	98
4.3.3	装备费用估算模型的选用	100
4.4	本章小结	102
	参考文献	103
5	基于 CAIV 的装备效费权衡优化决策	105
5.1	实施 CAIV 的装备效费权衡优化决策基础	105
5.1.1	基于 CAIV 的装备效费权衡优化决策程序	105
5.1.2	关键性能参数的确定	108
5.1.3	装备系统效费权衡相关概念	108
5.1.4	关键费用影响因素的确定	110
5.2	基于 IPT 群的装备开发综合决策过程研究	111
5.2.1	基于 IPT 群的装备系统开发综合决策模型	112
5.2.2	模型的计算与求解	115
5.2.3	基于 IPT 群的装备开发综合决策过程	116
5.3	基于模糊推理的装备效费多目标柔性决策	117
5.3.1	效费决策评价论域及模糊隶属函数	118
5.3.2	基于 Takagi-Sugeno 模糊推理的装备效费决策模型	119
5.3.3	装备效费权衡多目标决策模型的求解	121
5.3.4	基于模糊推理的装备效费决策过程	122
5.4	定费用条件下的装备最优开发决策	123
5.4.1	用户需求到装备特性指标之间的转换	123
5.4.2	用户需求和装备特性指标重要度评价	125
5.4.3	定费用约束条件下的装备最优开发决策	127
5.5	本章小结	128
	参考文献	128
6	基于 CAIV 的装备开发过程建模及优化	130
6.1	基于 CAIV 装备开发过程建模	130
6.1.1	装备开发过程建模的内容	131
6.1.2	装备系统开发的管理过程	132
6.1.3	基于 CAIV 的装备 IDEF 开发过程模型	134
6.2	基于 CAIV 的装备开发过程分析及优化	138
6.2.1	基于实例推理的过程优选及局部改进	140
6.2.2	基于规则推理的过程改进	140

6.2.3	基于 GA 的过程优化	142
6.3	装备开发过程中任务及费用资源的优化分配	145
6.3.1	任务间耦合关系的解耦	146
6.3.2	装备开发任务的分配	147
6.3.3	IPT 间费用资源的分配	148
6.4	本章小结	150
	参考文献	150
7	装备寿命周期费用管理	152
7.1	装备供应商的选择	152
7.1.1	企业生产装备供应商选择评价指标体系	152
7.1.2	装备供应商选择综合评价模型	154
7.1.3	应用算例	156
7.2	企业生产装备的维修决策分析	157
7.2.1	企业装备系统维修管理活动对系统可靠性影响分析	158
7.2.2	生产装备系统维修决策模型	160
7.2.3	案例分析	162
7.3	本章小结	163
	参考文献	163
8	应用实例分析	165
8.1	装备费用估算实例	165
8.1.1	基于 LS-SVM 的手机价格估算实例	165
8.1.2	卷扬式起重机费用估算实例	168
8.1.3	基于 LS-SVM 的防空导弹费用估算实例	171
8.2	定费用条件下的最优开发方案决策案例分析	174
8.3	本章小结	177
	参考文献	177
9	结论与展望	178
9.1	结论	178
9.2	展望	179
	参考文献	181
	附录	182

1 绪 论

1.1 引 言

随着高新技术的发展,特别是信息技术、微电子技术和微机电技术的飞速发展,装备向集成化、大型化、精密化、柔性化方向发展,其性能和复杂性越来越高,结构日益复杂,规模日益庞大,采购价格越来越高,不仅如此,装备在使用和维修保障过程中的费用也迅速增加,形成了所谓的“冰山效应”(图 1.1)。而与此相对应的则是企业都普遍面临装备更新改造与费用预算有限的矛盾,企业出现了巨大的费用缺口。费用与需求的不匹配使得企业不得不减少订购数量,或者推迟研制或者冒险采用不成熟的装备研制方案,最终造成企业出现重大经营管理风险,生产成本费用不仅没有随订购数量减少而降低,反而由于生产技术工艺落后或者是风险管理成本高昂等原因而迅速提高。这种情况迫使各国都在寻求与发展新的装备寿命周期费用评价与优化技术,在保持装备效能不变的同时,尽可能地降低装备的全寿命周期费用(life cycle cost, LCC),以提高该国制造企业的国际市场竞争能力。

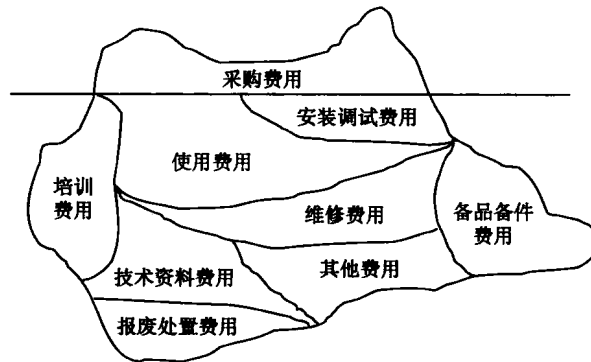


图 1.1 装备 LCC“冰山效应”分布图

现代市场竞争理念的转变,促使以装备制造业为主的制造企业一方面更加全方位地注重产品的功能、上市速度、质量、成本、服务、环保(F. T. Q. C. S. E.)等要素,另一方面也更加注重与上下游企业及用户之间的联系,强调相互之间的协作,各方在相互信任的基础上彼此相互合作,以设计开发出性能真正满足用户需求、寿命周期费用低廉的装备产品。同时装备本身又具有许多不同于一般制造产品的许

多特点:①装备多具有生产工具的性质,是被用来制造产品的特殊产品;②装备具有完整的寿命周期,从设计、制造、安装、运行使用到最后报废处置经历较长的时间跨度;③技术含量高,制作工艺复杂,是多学科、多专业领域共同合作的结晶;④成套特性,装备特别是大型技术装备一般是单件订单式生产,由制造商负责提供全套装备及日后的维修维护等任务;⑤成本费用高昂,装备采办不仅前期的订购费用支出高昂,而且对后期的运营维修保障的投入也十分巨大;⑥风险巨大,高昂的投资支出、复杂的制造工艺、多变的市场使装备需求方面面临着巨大的财务风险、技术风险、市场风险等风险因素;⑦一次需求,终身服务。这些特点决定了装备费用评价及管理所适用的理论方法与技术要不同于一般普通商品的成本费用评价与管理技术,它要更侧重于全寿命周期过程的评价。

装备的寿命周期费用是指装备从论证、研制、生产、使用和保障,直到退役和材料回收的全过程所发生费用的总和。传统的寿命周期费用主要包括设计与研制费用、生产制造费用、使用费用、维修和保障费用、退役和处理费用、故障损失费用等内容。随着人们对环保的日益重视以及全球市场竞争激烈的加剧,必须对寿命周期费用所涵盖的范围予以拓展,装备寿命周期费用还应包括以下两部分内容:①环保及生态费用,主要指装备使用过程中的排弃物、废弃物处置费用,装备回收处置费用以及由于装备涉及高污染、高能耗所引起的税收等费用支出;②交易成本费用,主要指装备生产完成后,交易双方为达成交易所花费的广告费、讨价还价费用、包装、运输等费用支出以及由于装备涉及资产专用性而给装备带来的无形贬值。为便于论述,在以后章节中,本书所指装备费用均为装备的全寿命周期费用。

随着现代生产的发展,企业市场竞争的激烈程度日益加大,企业制造成本费用日益成为企业取胜的法宝。而与此同时,传统的寿命周期费用评价及管理技术已远不能适应现代制造业发展的需求,它们大多片面注重装备设计研制阶段的费用缩减,并不是真正意义上的全系统、全过程的费用缩减,而且它们也割裂了各方之间的相互依赖关系,各方孤立地进行装备的性能、费用、进度之间的权衡,局部的权衡最优化并不一定是装备制造全寿命周期内的权衡最优化,因而传统的寿命周期费用评价及管理技术所权衡优化出的寿命周期费用并不是真正最优的全生命周期费用,结果造成所生产的装备产品市场竞争力不强,从而大大降低了有限资源与资金的使用效率,也阻碍了制造业特别是装备制造业的发展,而起源于20世纪90年代美国军方的以费用为独立变量(cost as an independent variable, CAIV)^[1,2]的武器装备采购管理技术则为我们提供了一种新的装备寿命周期费用评价与管理思路。

同样,我国装备系统内也存在着采购费用与RMS及性能要求的相互矛盾,开展装备全寿命周期费用的综合分析技术研究,学习与吸收国外先进的费用管理理论与方法,无疑对增强我国企业装备水平,提高我国工业企业的国际市场竞争能力

具有重大的战略意义。我国学者虽然很早就认识到了对装备全寿命周期费用进行评价与管理的重要性,但由于我国尚未建立起科学合理的现代企业制度及市场竞争体制,企业管理制度比较混乱,对装备 LCC 进行评价与管理所需的基础费用数据不充分、不完全,数据的采集也较为困难,其本身涉及的学科、专业技术领域较多,研究需要多学科、多专业、多领域的交叉,再加上装备制造项目在项目评价领域多从属于某一具体建设项目或者技术改造项目,学者及业界对宏观上的投资项目的财务评价较为重视,而忽视了其中具体的、核心所需的装备经济评价与管理的研究,导致我国对装备寿命周期费用的评价及管理无论是理论研究还是实际应用成果都不甚理想。从研究成果来看,除文献[3]对此进行专门研究外,其他研究成果较为分散,研究成果的先进程度与国外相比也较为落后。从目前实际研究及应用来看,国内目前对装备的寿命周期费用评价及管理还处于定费用设计阶段(DTC),即便如此,这也还只是处于推广应用阶段,其应用成果比较鲜见,而 DTC 由于自身所存在的局限性,早在 2002 年便被美国军方抛弃。

装备费用评价管理理论与技术研究的落后使得目前国内装备费用评价多采用参照系统及经验方法,这些方法存在主观因素影响大、难以先期对指标做出科学合理评估和验证、各指标缺乏权衡与协调、难以评估指标要求对后续阶段的影响及风险等不足。因此,在 CATV 基础上的装备全寿命费用评价与管理的研究对提高我国企业的现代化水平及市场竞争能力具有十分重大的意义和作用。①提高我国工业制造业系统的质量,进而增强我国企业的竞争能力。由于历史原因,长期以来,我国企业在装备采购、安装运营过程中片面追求装备的技术性能而忽视了日后的运营和维护以及装备 RMS 水平的要求与管理,结果造成装备的技术性能提高而生产能力却下降的尴尬局面,而基于 CAIV 的装备全寿命周期费用评价与管理的研究,能够很好地提高我国企业技术装备的 RMS 水平,大大提高工业制造业系统的质量。②提供决策支持,降低企业经营风险。由于装备的费用是先天的,其在装备的设计阶段就已确定,传统的装备费用评价与管理方法很难在设计阶段科学合理地预估装备的费用与装备的使用完好率、效能、风险、进度之间的关系,而基于 CAIV 的装备全寿命周期费用的评价与管理的研究,通过运用大量先进的技术手段和方法,对装备的效能、进度、风险、费用进行估测,并通过彼此间的相互权衡,为装备的效能需求与费用在设计阶段的权衡决策提供依据,把各种风险和不确定性解决在装备的设计阶段,从而大大降低后期经营风险。③降低寿命周期费用。装备全寿命周期费用的评价与管理,必定重视装备的运营费用和维修保障费用的降低,既降低了各种生产原材料的消耗,也直接减少了装备的人力、备件供应、维修保障器材的需求,同时,由于现代企业制造装备的日益复杂性,维修费用与保障费用越来越大,在 LCC 中所占比例越来越高,而本研究必将提高装备的费用管理水平,使得装备具有寿命长、故障少、易维修、易保障的特点,从而使其具有较高的性能及

较低的 LCC, 达到最佳效费比。④鼓励创新, 便于推动我国装备制造业的现代化建设。装备的效能、费用、进度的权衡不是靠牺牲进度或者效能要求来降低费用, 而是通过采用激进的费用管理策略, 激励制造方通过技术创新、制度创新降低费用, 所降低的费用又可用于新的装备采购或者研发, 从而大大提高我国企业的现代化水平。⑤现代管理科学思想与理论的运用, 能大大提高装备制造系统的管理水平。由于装备制造系统生产的装备多属企业长期生产性资本, 具有特殊的管理特色与氛围, 而随着装备系统日益复杂, 在装备的采办过程中不仅涉及大量的管理科学理论与方法, 而且还涉及组织间(装备用户研制方与生产方)的组织与协调的管理方法, 基于 CAIV 的装备 LCC 评价与管理技术的研究, 必然涉及费用-性能综合产品组(cost & performance IPT, CPIPT)的组织与协调研究工作, 它的应用必能大大提高我国企业的现代化管理水平。

1.2 寿命周期费用评价与管理理论研究综述

寿命周期费用评价与管理起源于费用效益分析(cost-benefit analysis, CBA)。1936年美国治水法案对 CBA 方法的成功应用, 使得 CBA 方法向各个领域推广使用, 并于 20 世纪 50 年代被国防系统所采用。随着军事装备的性能越来越高, 结构复杂性也越来越强, 采购费用及使用与保障费用大幅增加, 美军为了解决庞大的军事需求与有限国防预算之间的巨大缺口问题, 对 CBA 方法不断地进行扩展和完善, 形成了一套完整的、全新的寿命周期费用管理理论与技术方法体系。20 世纪 60 年代, 美国国防部首次提出寿命周期费用问题和寿命周期费用评价法。美国弗吉尼亚州立工业大学教授兼美国后勤学会副会长布兰查德(Blanchard)教授将其定义为: 它是一种系统分析的方法, 被用来对选择的方案进行系统设计定型、计划、生产、保障等全方位的评价, 对寿命周期费用与效益进行权衡优化的一种费用管理方法。到 20 世纪 70 年代初期, 美国国防部颁布了大量文件, 大力倡导寿命周期费用评价管理技术在国防采办项目中的应用, 大大提高了国防预算资金的使用效率, 并进一步提高了美军战斗装备的战斗完好性, 增强了美军的军事战斗能力。在此推动下, 寿命周期费用管理技术迅速由军用推广到政府民用项目及各个产业部门, 1976 年发布的《州和地方政府采办应用寿命周期费用评价原理指南》得到了政府的赞同, 已有超过 20 个州和联邦部门以法律或其他形式推行寿命周期费用评价与管理, 通过寿命周期费用评价管理技术在产业部门的有效实施, 大大降低了装备产品的寿命周期费用, 提高了装备产品的市场竞争力, 从此寿命周期评价管理技术开始跨出美国国门被迅速推广到日本等国家。

寿命周期费用评价管理技术产生后, 先后经历了费用作战效能分析(cost & operation effectiveness analysis, COEA)、基线费用估计(baseline cost estimate)、

独立费用估计(independent cost estimate)、限费用设计(design to cost, DTC)、应有费用(should cost)、可能费用(could cost)等发展阶段,给装备制造业和其他产业部门带来了巨大的经济效益,特别是承包商综合后勤保障(contractor logistics support, CLS)的广泛应用更进一步降低了装备的寿命周期费用。运用寿命周期费用评价管理技术所带来的巨大经济效益,引起各国的普遍重视,寿命周期费用评价法被逐步纳入各个国家相应的质量管理标准体系中,来加以强化实施。1996年9月 IEC300-3-3《寿命周期费用评价》标准的颁布,标志着寿命周期费用评价法正式纳入到了 ISO9000 族质量管理体系之中。2004年7月国际电工委员会(IEC)对1996年发布的 IEC300-3-3 进行修改完善后,又发布了 IEC-60300-3-3《寿命周期费用评价》第二版供各国实施应用。

寿命周期费用评价管理技术之所以能够受到如此广泛的重视,并且能够在各国各个产业部门推广使用,就在于它从系统的观点出发,在有限的费用与资源约束条件下,寻求装备产品“从摇篮到坟墓”整个寿命周期内费用、性能的最优化,它有效地克服了片面的重性能轻费用、重初期采购费用轻后期使用与保障费用、重技术轻经济等传统思想的束缚,能够在装备设计初期就将寿命周期费用作为一项设计参数,来与进度、性能以及装备的可靠性、维修性、保障性(reliability, maintainability, supportability, RMS)进行综合权衡分析,因而可以开发出寿命周期费用低廉、运营安全可靠的装备产品,给各方均带来巨大的经济效益。

在上述各种装备费用评价管理技术的应用与研究中,限费用设计(DTC)无论对美国军方还是民用装备的评价都产生了巨大的影响,并带来巨大的经济利益,仅 F16 战斗机采办一项就给美军带来 42 亿美元的费用节省^[4]。但随着并行工程、柔性生产、敏捷制造等先进生产制造技术的广泛应用,限费用设计所具有的局限性也日益凸现:①对前期的费用预估精度要求过高;②费用要求限制过死,应用于僵硬,缺乏随生产进度、订购数量及其他客观条件变化而变化的灵活性;③对相关各方的合作强调不够,人为分割了彼此之间的联系等问题。因此美国军方迫切需要一种更加先进的寿命周期费用管理理论来应对日益增长的军事需求与有限国防预算之间的矛盾问题。20世纪90年代美国军方提出了以费用为独立变量的装备费用评价管理技术。为验证其有效性并解决实施过程中的难点问题,美国国防部专门成立两个工作组分别从理论和应用两方面对这种新的装备费用评价管理技术进行研究,理论组由防务制造委员会(defense manufacturing council)领导,该工作组于1995年12月发表研究报告,阐述了 CAIV 的概念、实质、主要技术途径和预期的应用,应用组由国防部长办公室(office of the secretary of defense, OSD)领导,其成员包括八个目前正在进行的采办项目的代表以及来自 OSD、防务分析研究所(institute for defense analyses, IDA)和防务系统管理学院(defense systems management college, DSMC)的代表。通过在八个 CAIV 的示范项目(flag-

ship program)中实施 CAIV,研究实施 CAIV 中的问题和解决措施。通过研究小组与工业界的共同努力,CAIV 的概念及其技术理论体系逐渐成熟,它吸收了以前所有费用评价管理理论的优点,并克服了以前费用评价管理技术的缺陷,是以前所有费用评价管理理论的集大成者。

CAIV 技术方法是一种覆盖整个装备项目寿命周期内可能出现的各个层次和各方面问题的费用管理方法,它将费用作为输入而不是输出,改变了过去基于“性能满足或超过需求”的竞争,使费用成为设计的结果而不是设计的驱动因素,强调费用本身也是项目需求和目标的组成部分;它强化费用和性能之间的权衡,过去“需求是刚性的”,不可能因为费用而进行折中,而 CAIV 认为费用与性能有同等的权重;它强调与鼓励创新,寻求创新方案来实现目标,而不是依靠增加费用或削减要求;它强调“可承受得起”的概念,大幅度削减目标费用,并将缩减费用作为激励措施,鼓励创新;它强化项目采购过程中的风险管理,明确费用风险、进度风险和性能风险的相互管理,建立完善的风险管理模式与组织机构,使参与项目工作的一切人员都能建立风险意识,在设计、研制和生产安装系统时考虑风险问题,人人都应负起处理风险的责任。

基于 CAIV 的装备寿命周期费用评价与管理在强调经济上的可承受性的同时,用户、设计者、制造者以及销售者等各方之间的合作是装备制造全过程的合作过程,不仅着重费用、效能、进度、风险在设计阶段的权衡优化,而且还要遍及装备的生产、销售、使用、维护一直到装备的处置回收全过程的权衡优化。用户参与装备采购的全过程中,仅以关键性能参数(key performance parameter, KPP)的形式提出装备的效能需求,而不详细地限定制造加工工艺过程,以给予装备设计方、生产方足够的灵活性来设计、生产装备,它们通过采用灵敏简单设计(smart simple design)技术、产品零部件的共享性、共用性技术以及成熟可靠的新技术(commercial off the shelf, COTS)等措施去权衡空间内优化设计、生产装备,从而可以全方位地降低装备的寿命周期费用。

随着 CAIV 的不断成熟,其应用范围也不断扩展,美国国防部在 1996 年 3 月发布的 DoD5000. 2-R“重大防务采办项目和重大自动化信息系统采办项目必须遵循的程序”中,要求:所有采办类别(ACAT)为 I 和 IA 类的项目,都必须符合 CAIV 的原则。2002 年 1 月美军国防部负责采办、技术与后勤的副部长奥尔德里奇签署的“以费用为独立变量”经费管理方式备忘录,要求各军种采办执行官在 2003 年前 100% 的项目引入“以费用为独立变量”计划,在国防采办项目中全面实施 CAIV,彻底抛弃了实施多年的 DTC 费用管理技术。

与国外相比,我国学者虽然较早就已意识到开展全寿命周期费用评价管理技术研究的重大意义,但一方面由于长期以来,我国装备制造业一直是国民经济的薄弱环节,加之西方国家对我国生产技术装备进口的封锁,我们对生产技术装备的需

求一直停留在渴求层次,对装备的需求只是技术上的满足,而很少考虑经济因素;另一方面我国企业长期受计划经济影响,企业部门及机构设置也受前苏联的影响较深,既缺乏有公信力的、系统的装备成本费用数据,也缺乏既懂技术又懂经济的复合型人才,再加上寿命周期费用评价管理研究所跨学科范围众多,工作量和难度较大,综合导致了我国寿命周期费用评价管理理论的研究起步较迟。

20 世纪 80 年代初,我国军队和地方的一些单位和个人开始尝试引用和借鉴国外的先进费用管理理论和研究成果,通过初步的应用和研究,取得了一定的成绩。1987 年中国设备管理协会成立了设备寿命周期费用委员会,开始向国内厂矿企业大力推行寿命周期费用评价法在设备管理中的应用,特别是 20 世纪 90 年代中期,通过相关学术期刊杂志、学术研讨会议、讲座等形式教育和培训了大批的寿命周期费用管理人员,相关的研究也取得了飞速发展。1992 年 GJB1364《装备费用-效能分析》的颁布标志着寿命周期费用评价法步入正轨,1998 年颁布的 GJBz20517《武器装备寿命周期费用估算》对武器装备的寿命周期费用的估算方式与方法以及装备效能、费用数据的搜集工作做出了规定。与军方相比,寿命周期费用评价在我国民用项目中的应用和研究则更处于一种相对落后的局面,既缺乏相关标准和规定,也缺乏相关的应用理论指导,一些企业和单位多是借鉴国外或者军方的相关成果来进行装备的寿命周期费用评价和管理工作,即便如此,一些单位还是建立了有关的管理制度和规定,向寿命周期费用管理迈出了极为宝贵的一步,并取得大量的经济效益,特别是在鞍钢、武钢等冶金系统中,其应用更为规范、成熟,应用成果也更为明显。但总体来讲,我国寿命周期费用评价技术自 20 世纪 90 年代研究热潮过后,对装备寿命周期费用的研究进入发展相对缓慢时期,无论是实践应用还是理论与国外的差距都越来越大,亟须在跟踪与学习国外先进的费用管理理论的同时,结合我国国情和企业生产实际,大力开展装备全寿命周期费用的评价及管理理论与技术研究。

虽然从总体来说,我国对装备寿命周期费用评价管理技术的研究较国外大为落后,但也逐步形成了一批比较稳定的研究队伍。从理论界研究来看,在民品领域,大连理工大学、浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室的厉正平、潘双夏、冯培恩等主要从设计方法学的角度重点对设计阶段的产品成本建模、分析及优化与控制等进行了研究,并取得了一系列丰硕成果,完善与丰富了面向费用 (design for cost, DFC) 设计的理论与技术体系,华南理工大学胡树华等基于产品创新工程的研究也对产品寿命周期费用的评价与性能的优化设计进行了研究,上海大学 CIMS 和机器人中心陈晓川等对并行工程环境下的 DFC 中费用估算及其估算框架进行了研究,在军品领域,空军工程大学、北京航空航天大学、海军工程大学、北京理工大学、西北工业大学等分别根据不同武器装备系统的特点对武器装备系统的寿命周期费用的估算技术进行了全面研究,所取得的理论成果较为丰富,并取得

了一定应用成果。

1.3 寿命周期费用评价与管理关键技术的国内外研究概况

基于 CAIV 的装备寿命周期费用评价管理技术主要包括:以 CPIPT 组织为核心的 IPT 管理模式及内部协调激励机制研究,CAIV 风险管理机制研究,装备效能评价技术研究,装备 LCC 估算技术研究,RMS 效能、费用、进度、风险等因素的综合权衡分析模型研究五方面的内容,根据本书实际研究内容,主要对装备的效能评价技术、费用估算技术以及效费优化决策技术的国内外发展研究概况分别进行研究综述。

1.3.1 装备效能评价技术的研究与发展

美国工业界武器装备效能咨询委员会认为:装备效能是衡量一个装备满足一组特定任务要求程度的量度,是装备可用性、可信赖性和能力的函数。

$$E = A \cdot D \cdot C \quad (1.1)$$

式中, $E=(e_1, e_2, \dots, e_i, \dots, e_m)$ 为装备效能; $A=(a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_n)$ 为装备可用度, a_i 为某一任务开始时装备处于*i*状态的概率, n 为可能的状态数; D 为 $n \times n$ 阶矩阵,代表装备的可信度, d_{ij} 为任务开始时装备处于*i*状态,在预期的任务期间内处于*j*状态的概率; C 为 $n \times m$ 阶矩阵,代表装备固有能力的,其中 c_{ij} 为装备在*i*状态下完成第*j*项任务的能力。

北京航空航天大学康锐等^[5]对装备的效能函数进行了扩展,该扩展假定,装备可用度(A)中只考虑基本可靠性、基本维修性、保障性3方面的影响;装备可信度(D)则只考虑任务可靠性、任务维修性的影响;系统固有能力的(C)为0-1矩阵(1表示装备处于完好状态即能完成规定的任务,0表示装备处于故障状态无法完成任务);装备初始状态只有完好和故障两种状态,则可得装备的RMS效能:

$$E_{RMS} = A \cdot D \cdot C \quad (1.2)$$

式中, $A=f(R_b, M_b, S)$, R_b 、 M_b 、 S 分别为基本可靠性参数、基本维修性参数、保障性参数; $D=\phi(R_m, M_m)$, R_m 、 M_m 分别为任务可靠性参数、任务维修性参数。

海军广州舰艇学院吴晓锋以及海军装备论证研究中心钱东^[6]认为,若装备执行的任务是相互独立的,那么,其系统效能为

$$E = \prod_{k=1}^m A \cdot D \cdot C_k \quad (1.3)$$

式中, E 为系统效能; m 为系统所执行的任务数。

空军工程大学王卓健等^[7]在上述研究成果的基础上,对执行任务中不可修复

装备的效能评价模型进行了进一步的扩展,指出不可修复模型只是不可修复装备执行单阶段单任务时的一种效能评价模型,作者对装备执行单阶段多任务以及多阶段多任务的情况进行了探讨。

1.3.2 装备寿命周期费用估算技术的研究与发展

科学合理的装备采办过程要求在装备采办开始阶段就要对其在效能、费用、进度、风险之间进行综合权衡分析,这就需要及时、准确、迅捷的费用预估技术为其提供支持,因此需要加大装备寿命周期费用估算技术研究力度,以有效控制和减少装备寿命周期费用。美国从 20 世纪 60 年代以来就开展了关于寿命周期费用估算的研究工作,经过多年研究,已取得许多成果。我国自 20 世纪 80 年代开始引进与开展寿命周期费用的研究工作以来,也取得了一定的进展。

目前费用估算通常采用四种基本方法:类比法、参数法、工程法和实际值推测法^[8,9]。这些方法对每个寿命周期阶段有不同适用性。虽然从理论上说,在寿命周期各阶段可以单独或交叉使用不同的方法计算费用,但是所处阶段决定着方法的适用性。在方案探索阶段和论证确认阶段早期还没有详细的设计,费用估算一般在系统级进行。在论证确认阶段后期,全尺寸研制、生产以及使用与保障阶段,费用估算一般反映工程的详细设计,装备的费用是各个分系统、部件费用估算之和。通常,在装备寿命周期的早期阶段,类比法是最有效的,它可以用来对未来的费用进行大致估算。随着设计的稳定并且有更多的信息可以利用时,参数法就成为比较有用的方法。随后,在有了详细的装备设计要求和规定时,工程法和实际值推测法就成为比较适当的费用估算手段。由此可见,每种费用估算方法均有其优缺点和适用范围。一般来说,任何装备寿命周期费用估算都不能完全依靠一种方法,实际费用估算应该是多种方法的灵活运用。

20 世纪中叶,美国兰德(RAND)公司受美国军方委托,针对飞机发动机寿命周期及费用问题开展了大量的研究工作,以改善新武器系统研制、生产费用的估算方法。1967 年提出第一种参数模型 DAPCA-I(development and procurement cost of aircraft, DAPCA),随后在 1971 年建立 DAPCA-II 模型,于 1976 年完成了 DAPCA-III 的研究工作。该模型是目前美国估算飞机工程研制和生产费比较完整的模型。兰德公司在建立 DAPCA 模型的过程中还就有关问题作了许多研究工作,建立了不同费用项目的机体计划总费用的估算模型,考虑了难度指数和将样本分为子样本的机体计划总费用的估算模型等问题。

格鲁门(GRUMMAN)航空公司于 1976 年建立了 MLCCM 模型(module life cycle cost model, MLCCM),随后在样本中补充了 F-15A、F-16A、A-10A 等新型飞机的数据,但建模方法和模型结构未作修改,于 1980 年将模型更新。该模型是美国建立的包含范围较为广泛的一个参数模型,可用于分别估计算机体、发动机和电