

民机典型机翼结构的多层次制造成本模型研究^{*}

Study on Multi-Level Manufacturing Cost Model of Civil Aircraft Wing Structure

上海交通大学航空航天学院 赵曼 宋文滨
中国商用飞机有限公司市场研究中心 李晓勇

[摘要] 机翼的结构设计不仅要满足强度、刚度等力学性能要求,还要考虑制造成本因素。纵观国内外主要的成本估算模型,难以找到可以适用于设计全过程各个阶段的成本模型,同时基于历史数据的重量成本法的模型缺乏与主要设计参数的直接耦合,难以在整个设计过程中使用。而基于 CAE 软件的多层次成本模型可以比较好地解决这个问题。文中根据飞机不同设计阶段的特点,提出一种新的多层次成本模型的方法,并通过将成本模型直接与 CATIA 中的参数化模型相结合,建立多个涉及不同细节、又相互关联的递进的结构模型。

关键词: 民机机翼结构 多层次制造成本模型 CAE

[ABSTRACT] Wing structural design not only needs to meet the strength, stiffness and other mechanical requirements, the issue of manufacturing cost should also be considered. Based on a review on various cost should also be considered estimation models at home and abroad, it is found that costing methods based on historical weight estimations lack the direct coupling between cost and major design parameters, therefore inappropriate for use in the entire design process. To tackle this problem, a new multi-level cost model implemented within commonly used CAE tool is presented.

Keywords: Civil aircraft wing structure Multi-level manufacturing cost model CAE

民用飞机经济性的主要衡量指标是直接使用成本,其受到 2 个方面因素的影响,包括飞机的价格和使用经济性。对于民机制造商而言,在提高飞机使用经济性的同时,降低飞机的制造成本可以有效提高飞机定价的灵活性和市场竞争力。通常可以采用的措施包括:先进的设计分析手段、先进材料以及整体化结构来提高飞机的制造经济性。

同时,飞机的经济性实现不仅仅决定于研制技术水

平,还需要管理体制和软件体系的配合,尤其是成本估算和成本管理。其中成本估算,特别是设计中结合 CAE 工具的成本估算具有非常重要的意义。

成本估算是实现飞机结构全寿命成本控制与管理的基础,而制造成本估算是整个全寿命成本估算模型的基础,最终可实现从产品设计特征到产品制造成本的转换过程,并反馈给设计人员,通过改进设计和完善制造工艺,实现低成本设计制造的目标。因此,制造成本分析技术是评价材料产品性价比的重要技术手段^[1],同时制造成本估算是飞机制造商提高市场竞争力的决定性因素之一。

1 制造成本估算发展历史及趋势

制造成本评估技术的发展大致经历了 3 个阶段。早期出现的评估模型是以生产活动和工艺技术为基础的,简称作业成本法(Activity-Based Costing, ABC)。“作业消耗资源,产品消耗作业”是美国学者 Copper 和 Kaplan 提出的成本计算思想^[2]。这种思想认为产品成本是生产产品所需要的各个作业的成本之和,而作业成本是作业消耗资源的数量与单位资源费用之积。虽然作业成本法具有很好的算法特性,但它的基本理论不能完全满足实际所需,因此,它必须与其他理论相结合使用才能获得令人满意的效果^[2]。现阶段飞机制造企业多采用的是基于制造物料清单 MBOM 的成本模型^[3]以及工业工程 IE (Industry Engineering) 与作业成本法相结合的成本控制体系^[2]。

随着成本数据的丰富,又出现了以产品重量和复杂性为基础的参数成本评估模型(Parametric Cost Modeling, PCM),很多研究工作都证明它能够用于产品的概念设计阶段。美国兰德(RAND)公司在飞机寿命周期费用分析领域开展了大量的研究工作。1967 年提出关于飞机发展与采购费用分析的第 1 种模型 DAPCA I,1971 年建立 DAPCA II,1976 年建立 DAPCA III,最终建立 DAPCA IV^[4]。这个费用模型主要用于研制费用的估算,通过产量及熟练曲线效应的修正后也可用于生产费用及单机价格的估算。1985 年, Roskam 开发了 PRICE-H

^{*} 中国商飞上海飞机设计研究院项目(10GFH-SF01-119)资助。

模型,它将加工、装配和材料的复杂性系数、可靠性规范的复杂性系数以及零部件个数作为成本驱动因子^[5],这样建模有利于对制造成本降低的分析。Galorath 公司开发的制造成本估算商业软件 SEER-DFM 融合了参数法的优点^[6],采用半经验算法来得到直接和间接加工工时,最终实现成本的估算。参数成本模型在工业界已获得了广泛的应用,它的估算公式比较简单,但是结果的准确性与历史数据的收集数量具有很大的联系。因此,当对使用新材料和新工艺飞机的制造成本进行估算时,由于历史数据收集比较困难,数据贫乏,缺乏应用先进材料和先进工艺的飞机数据库,所以精度不够,灵敏性较低。

使用作业成本法或参数法进行成本评估需要根据现有的原准机型,收集与产品的生产活动有关的成本和工艺数据,因此限制了模型对新发展的制造工艺技术的应用。随着先进材料和先进工艺的采用,提出了基于工艺过程的制造工艺成本模型(Manufacturing Process Cost Modeling, MPCM)。目前基于工艺的成本模型主要包括 Blanc 等人 1976 年为 Northrop 建立的先进复合材料成本估算模型 ACCEM、Kumar 等人 1991 年开发的复合材料制造成本模型 MCMC 以及麻省理工学院与波音公司 1994 年联合开发的 COSTADE 模型^[5]。MPCM 模型的基础是根据材料构件的加工与装配工艺过程所建立的尺寸和复杂性标定定律。这种模型需要考虑所有相关的工艺步骤,并且根据主要的制造成本分类,如材料、制造、装配等,并对其进行详细的估算从而构建模型,因此制造工艺成本模型比参数成本模型更为精确,且能够根据工艺条件的变化实现快速更新。制造工艺成本模型把制造过程逐级分解为多个独立的制造子过程进行成本估算,其基本出发点是将加工成本与结构的设计特征、材料、加工方法^[7-8]关联起来,所以需要涉及到制造工艺有所了解,在估算的初始阶段需要更多的细节信息,所以就不适用于飞机设计前期阶段的成本估算。此外, MPCM 模型具有保密性。

飞机设计阶段包括概念设计、初步设计和详细设计 3 个阶段。随着设计过程的深入,确定的参数会越来越详尽,成本估算也会越来越准确。由于上述各类制造成本估算模型所涉及参数的详细度不同,所以它们的使用时期都是有限制的。ABC 估算法精度较高,但必须在产品设计完成后进行;参数法是产品设计早期阶段应用较广的一种方法,相对的精确度会比较低;工艺法需要对所涉及到的制造工艺有一定了解,所以不适用于设计初期的成本估算。本文针对飞机不同设计阶段与不同成本模型的特点,并考虑设计过程的连贯性和传递性,使用常用的 CATIA 工具,实现多层次的制造成本模型,以满

足飞机设计全过程的需求。

2 制造成本估算模型

2.1 传统的重量法模型

传统的参数法多从宏观角度对成本进行估算,即将起飞重量作为主要的成本驱动因子。例如最典型的参数模型兰德 DAPCAIV,如下:

$$C = AE^{a_1} W^{a_2} R^{a_3}, \quad (1)$$

式中, A 、 a_1 、 a_2 、 a_3 为回归系数, E 为效能指数, W 为飞机空重, R 为飞机固有可用度^[7]。

该组模型是按 1986 年的物价标准,同时基于硬铝合金飞机来建立的,所以如果飞机的基本材料发生变化,则估算公式中应考虑设计与制造复杂性的提高,即要考虑材料修正系数 K ^[9],如表 1 所示。此外, DAPCAIV 模型的成本估算结果要应用物价膨胀率 CEF 来修正到所选择的年度。飞机成本的各部分并不是用同一膨胀率改变,例如工程师工资的膨胀率常比有硬铝合金的原材料成本增长得慢,如表 2 所示。

表1 制造成本模型材料修正系数K取值

材料种类	硬铝合金	碳素复合材料	玻璃钢	钢	钛合金
K	1.0	1.5~2.0	1.1~1.2	1.5~2.0	1.7~2.2

表2 物价膨胀率CEF取值

物价膨胀率 CEF (2011 年相对于 1986 年)	工时工资膨胀率	材料价格膨胀率
取值	1.764	1.6023

2.2 多层次成本模型

飞机不同设计阶段中确定的参数域度是不同的,所以为了有效利用各个阶段已确定的参数来尽可能提高参数成本模型的精确度,同时也为了保证模型的连贯性,满足成本模型可以持续使用的必要条件,需要建立符合不同设计阶段、不同给定参数层次的成本模型,即多层次制造成本模型。

随着飞机设计阶段的深入,已知参数也会逐渐变得详细,参数化结构模型也变得越来越能反映结构件的加工细节,如图 1 所示。一般而言,所处的设计阶段越早,飞机的已知参数越少,成本估算的困难就越大,估算结果也越不精确。由此看出,对于不同设计阶段的参数结构模型,它们所对应的成本估算模型是不同的。随着设计参数的细化,成本模型的驱动因子将越来越能反映设计特征、结构布置、工艺制造过程特性。多层次的制造成本模型需要能够反映这一特点。

在模型建立之前,首先要明确制造成本的构成。制造成本大致分为3个部分:材料成本、生产成本以及其他成本。生产成本进一步可划分为加工工艺成本和装配工艺成本;其他成本主要包括准备成本和模具成本等。由于单位工时成本是工人工时成本、机器设备成本及管理费用之和,所以其他成本中不再考虑管理成本。

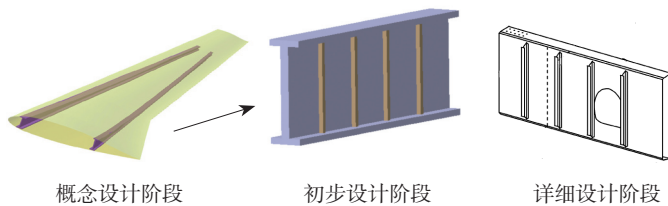


图1 不同设计阶段的翼梁设计特征

Fig.1 Wing structural design at different design stages

$$T_{\text{第一层次材料成本}} = f(\text{外形几何参数 / 重量, 单位材料费用}), \quad (2)$$

$$T_{\text{第一层次生产成本}} = f(\text{外形几何参数, 重量}), \quad (3)$$

$$T_{\text{2/3层次材料成本}} = f(\text{体积, 密度, 材料价格}), \quad (4)$$

$$T_{\text{2/3层次生产成本}} = f(\text{加工 / 装配工艺时间, 单位工时劳动成本}), \quad (5)$$

$$T_{\text{第二层次工艺时间}} = f(\text{外形和内形几何参数, 重量}), \quad (6)$$

$$T_{\text{第三层次工艺时间}} = f(\text{外形和内形几何参数, 刀具参数, 切削用量}), \quad (7)$$

$$T_{\text{1/2/3层次其他成本}} = \text{百分比} \times (C_{\text{1/2/3层次材料成本}} + C_{\text{1/2/3层次加工成本}} + C_{\text{1/2/3层次装配成本}}). \quad (8)$$

飞机概念设计阶段的主要结果包括飞机的重量估算结果、布局形式、主要几何参数、动力装置选择、飞机的性能评估等,所以适合这一阶段的第一层次制造成本模型是在给定外形几何参数和重量的基础上建立的,因此材料成本和生产成本模型都是外形几何参数或重量的函数,见公式(2)和(3)。飞机初步设计阶段是在概念设计基础上得到更加详尽的几何模型,并对飞机的重量和性能进行更准确的评估,对设计细节进行进一步的分析和评估。所以第二层次的制造成本模型相较于第一层次成本模型而言,添加了更加详细的内形几何参数。在详细设计阶段会完成标准件在内的所有零件的设计,并进行详细的重量校核,同时伴随飞机详细设计工作的另外一项内容就是工艺设计,即加工和装配工艺参数的确定。所以相对于前两个层次成本模型而言,第三层次成本模型中会进一步涉及到刀具参数、切削用量等加工装配工艺参数以及更加具体详尽的几何参数。后二者的制造成本模型中,材料成本均是体积、密度及单位材料成本的函数,见公式(4),所以材料成本最终将会与外形和内形几何参数、材料选择相关;生产成本模型通过加工或装配工艺时间与相应的单位工时劳动成本的乘积获得,见公式(5),其中,第二层次模型中的工艺时间是由内外形几何参数及重量的经验公式估算求

得,第三层次模型的工艺时间由外形和内形几何参数、刀具参数以及切削用量来共同确定,分别见公式(6)和(7)。在这3个不同层次的制造成本模型中,其他成本都是作为各自材料成本、加工成本和装配成本之和的百分比来处理的,见公式(8)。

3个层次的成本模型采用方法的差异反映了3个设计阶段的主要特点,同时3种方法通过与统一的CATIA模型相结合,实现了参数在不同设计阶段的一致性和连贯性。与CATIA模型的结合使得结构设计师能够方便的掌握成本信息,同时提供了进一步发展基于CAE的多学科集成设计工具的基础。

3 多层次制造成本模型的CATIA实现

飞机设计涉及到气动分析、结构分析、性能计算和经济性估算等多个方面,所以是典型的多学科设计优化问题,其中气动与结构分析是机翼设计中的两大重要内容。为了为各个学科提供一个统一的高精度几何模型来避免模型不统一带来的误差,同时也为了解决各个学科重复建模的问题,目前的发展趋势是将多学科设计优化MDO与CAD软件相结合。所以本文将零部件的制造成本模型与CATIA V5设计平台相连接,这样不仅可以使零部件CAD模型参数变更时,成本自动发生对应的变更和估算,同时还可以指导设计参数和工艺参数的选择,达到经济性、性能和布局的最优化选择。

零部件制造成本估算模型的CATIA实现主要是通过Excel来实现的。CATIA模型中自定义参数分为输入参数、成本驱动因子和制造成本3个组别,其中成本驱动因子由输入参数的取值直接绑定。将CATIA中成本驱动因子参数全部导入Excel表格中,通过VB语言将制造成本估算模型转化为Excel自定义函数,并在Excel中完成对零部件制造成本的估算,最终将结果返回到CATIA树状结构的制造成本参数项中,这样当零部件的参数化模型发生变化时,相应的成本估算结果也会在界面发生自动变更。成本模型的CATIA实现方法如图2所示。多层次制造成本模型的CATIA实现本质上是在上述成本模型CATIA实现的基础上,将输入参数、成本驱动因子和制造成本参数支点进一步细化和划分。以翼梁为例,飞机设计阶段确定了机翼的几何参数后就可进一步推导出翼梁的外形几何参数取值。本文将翼梁的设计阶段大致分为3个阶段:

(1)第一设计阶段给定了翼梁的长、宽、高以及支柱的长度和布置参数,但是支柱的具体细节还未经处理,所以这个阶段(第一层次)的输入参数相对比较少,大致包括工字梁的长、宽、高以及支柱的长、宽、高。

(2)第二阶段是在第一个设计水平的基础上,对支

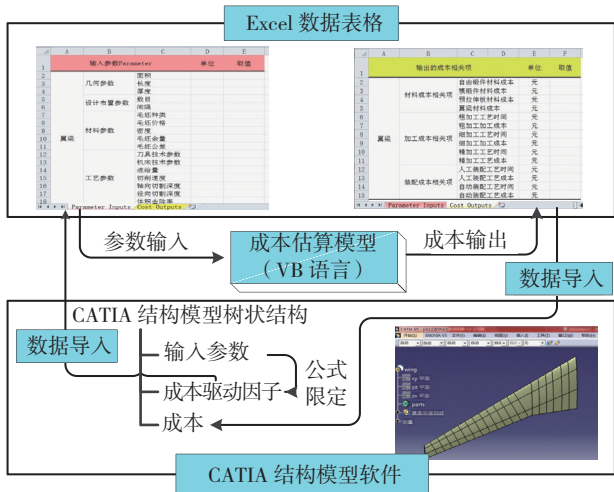


图2 多层次制造成本模型的CATIA实现

Fig. 2 CATIA implementation of multi-level cost estimation model

柱进行细节处理得到的。例如切削出槽口,使支柱的截面呈现工字型。此时的输入参数除了包含第一层次模型中已有的参数之外,又出现了槽口深度、高度,支柱边缘厚度等几何参数。

(3)第三设计阶段是对工字梁的接口处及腹板进行钻孔处理,由此可看出这个阶段的输入参数会在第二层次的基础上增添了结合孔和减轻孔直径参数,以及刀具和切削加工的工艺参数。在 Excel 表格中套用上述不同层次的输入参数和成本模型即可求得不同层次参数化模型下的对应制造成本,并最终返回到 CATIA 树状结构中,使设计者可以直观地了解参数变化对成本的影响。

4 估算结果及参数敏感性分析

为验证本文思路的可行性,采用典型单通道民用运输机的机翼翼梁作为算例,翼翼长度一般是机翼展长的95%,这里可以取为14637mm;高度和宽度一般与当处翼型的厚度分布相关;支柱截面类型为工字型,布置7根等间距支柱。零部件尺寸发生变化时,不仅会造成外形布置的变化,重量也会相应发生变化,从而进一步引起成本发生变化。本文以机翼前梁的制造成本为例,研究机翼前梁尺寸发生变化时对部件成本的影响趋势,并最终从成本和重量的角度对零部件的设计进行方向性的指导。本文先侧重研究翼翼宽度变化对制造成本的影响。在基于重量的参数成本模型中,以硬铝合金为材料, K 取值为1,飞机经济巡航速度为454kn,代入兰德模型 DAPCA IV 得到不同宽度和重量下的制造成本,具体如图3~图6所示。

从图3可看出,随着翼翼宽度的增加,应用重量法估算求得的材料成本、生产成本及质量检查成本也随之

几乎以线性比例增大。其中生产成本所占比例最大,且增长速率最快;材料成本比质量控制成本略大,增长速率几乎相近,但略大一些。所以在制造过程中,我们最主要关注的成本是材料成本和生产成本,对于质量检测成本可以当作其余成本的某个比例来估算。

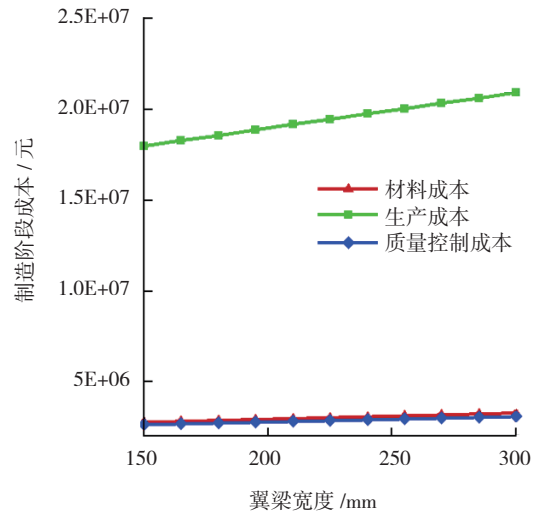


图3 传统重量估算法中制造成本随翼翼宽度的变化

Fig.3 Variation of cost using traditional weight method

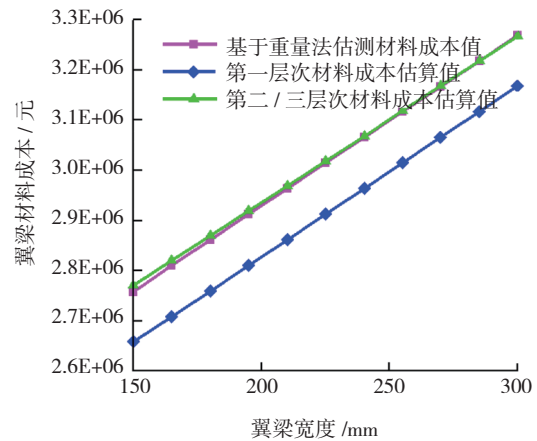


图4 4种模型的材料成本对比

Fig.4 Material cost of four cost models

从图4可以看出,应用重量法成本模型估算出的材料成本,会随着翼翼宽度的增大而增加,且变化趋势几乎接近线性关系。多层次成本模型中,第一层次材料成本模型是有关翼翼长度、宽度和高度的多元线性模型,第二和第三层次的材料成本模型相同,是有关翼翼长度、宽度和高度的三次非线性多元模型。应用第一层次模型估算出的材料成本,会随着宽度的增加以线性关系增大,但比基于重量法的估算值小,准确性低。应用第二和第三层次模型估算出的材料成本,会随着翼翼宽度的增加以线性关系增加,与重量法相对比,变化趋势趋

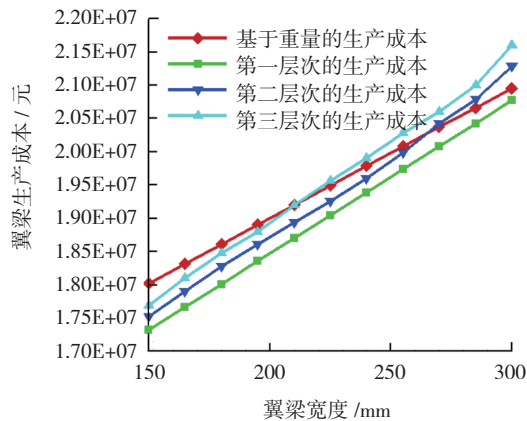


图5 4种模型的生产成本对比

Fig.5 Manufacture cost of four models

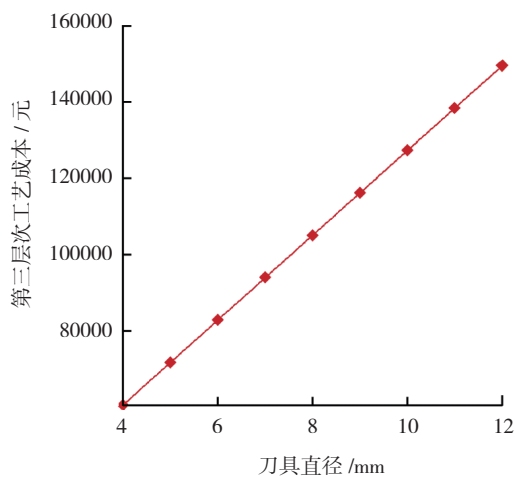


图6 刀具直径对工艺成本的影响

Fig.6 Effect of cutter diameter on process cost

缓,但二者估算值比较接近,准确度较第一层次模型高。

从图5可以看出,应用重量法成本模型估算出的生产成本,会随着翼梁宽度的增大而增加,且变化趋势几乎接近线性关系。多层次生产成本模型中,第一层次模型是有关翼梁长度、宽度和高度的多元线性函数,第二层次模型和第三层次模型虽然不同,但均是有关翼梁几何参数、支柱几何参数、加工装配工艺参数和材料参数的多元非线性模型。应用第一层次模型估算出的生产成本,会随着宽度的增加以线性关系增大,但估算值相对于重量法普遍偏小,准确性较低。应用第二层次模型估算出的生产成本,会随着翼梁宽度的增加几乎以指数关系增加;与基于重量法相比,变化趋势趋陡,且宽度大于一定值时,多层次生产成本会大于重量法生产成本值;与第一层次模型估算值相比,越来越接近于实际,灵敏性高,准确性高。应用第三层次模型估算出的生产成本,会随着翼梁宽度的增加以指数关系增加,但与其余几种模型相比较,变化趋势趋缓,对参数的灵敏性更高,

准确度更高。

从图6可以看出,随着第三层次模型中考虑到的加工工艺参数刀具直径的增大,相应的加工工艺成本也会随之增大,且变化趋势接近于线性。所以多层次成本模型将成本与内形几何参数、加工工艺参数联系起来,不仅可以提高成本估算精确度,同时还可以提高生产加工成本估算的灵敏性,可以用于指导工艺流程的制定。

从上述曲线还可以看出,3个成本模型对共享参数的灵敏度趋势相同,又能够反映细节参数的影响趋势。随着翼梁宽度的增加,零部件的成本会相应的增大,所以在对飞机零部件进行设计时,应注意在满足结构承载要求的前提下,尽量减小翼梁宽度来降低重量和成本。

5 结论

制造成本估算是飞机制造商提高市场竞争力的决定性因素,同时在DOC的构成和优化中也占有重要地位,所以在飞机设计中越来越重视制造成本的估算。为了满足不同设计阶段,不同范围参数条件下成本的估算,本文提出“多层次成本模型”这一建模概念和方法,并在CATIA中对其进行了实现。这样不仅可以直观地在CATIA参数化建模界面显示成本估算结果,还可以指导设计参数、布置参数和工艺参数的选取,达到包含经济性的优化设计。但是目前模型的精确度以及适用性还应在以后的发展中逐渐得到进一步的验证和提高。

参考文献

- [1] 叶强. 复合材料结构制造成本分析模型及其应用[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008.
- [2] 魏法杰, 张人千. 现代飞机制造成本控制方法研究. 航空学报, 2000(1): 39-42.
- [3] 闫彦, 张振明. 基于作业成本法的飞机产品成本估算研究. 机械设计与制造, 2008(10): 229-231.
- [4] 严盛文, 郭基联, 张蕾. 基于效能指数的军用飞机经济性建模. 空军工程大学学报(自然科学版), 2009(1): 28-32.
- [5] Eaglesham M A. A Decision support system for advanced composites manufacturing cost estimation[D]. Ph.D. Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, 1998: 4-7.
- [6] Markus K. Cost/Weight Optimization of Aircraft Structures[D]. KTH School of Engineering Sciences, Stockholm, Sweden, 2008.
- [7] Roha N M, Dean E B. Toward manufacturing and cost considerations in multidisciplinary aircraft design. AIAA-96-1620:2602-2612.
- [8] Curran R, Kundu A K, Wright J M, et al. Modeling of aircraft manufacturing cost at the concept stage. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2006, 31(3): 407-420.
- [9] 程不时, 李云军, 王智宇. 飞机设计手册·第5册. 北京: 航空工业出版社, 2005.

(责编 夏宛)