航空科学技术
Aeronautical Science & Technology
May. 15 2018 Vol. 29 No.05 55-65

考虑经济可承受性的直升机总体方案评估

邓修权[1,*]，张江侠[1]，孙需要[2]，宁振雷[2]

1. 北京航空航天大学 经济管理学院，北京 100191

2. 北京精密机电控制设备研究所，北京 100076

摘　要：随着新技术、新材料应用的增多，在直升机工业发展过程中，人们不再只注重装备的效能，也越来越重视其经济可承受性。直升机总体方案的评估和决策是直升机研制过程中的关键环节，本文考虑将经济可承受性作为关键评价指标之一，构建直升机总体方案的评价指标体系，并对各指标进行说明分解，同时给出了各指标的确定方法。在构建的评价指标体系基础上，提出用层次分析法（AHP）确定指标权重，用三角模糊数对定性语言描述进行定量化处理，在逼近理想解排序方法（TOPSIS）框架下构建直升机总体设计方案评估模型。最后本文给出了算例分析，验证了评价指标体系和评估模型的有效性。

关键词：直升机；总体方案；经济可承受性；指标体系；评估

中图分类号：V219　　**文献标志码**：A　　DOI:10.19452/j.issn1007-5453.2018.05.055

因直升机具有独特的飞行性能，在军用和民用方面具有不可或缺的地位，特别是以美国等为代表的世界强国都在竞相发展直升机工业。目前，直升机型号发展过程中，人们不再只注重直升机的效能，同时越来越重视直升机的经济可承受性。我国直升机工业发展势头强劲，在大力发展高性能先进直升机的同时，其经济可承受性问题的相关研究是十分必要且具有重要意义的。

美国学者雅克－甘斯勒将经济可承受性定义为“保持技术优势，以可承受的价格采购高性能武器”[1]，也可以解释为用尽可能少的费用满足用户期望的装备能力。目前，国内外关于经济可承受性总体方案的评估研究大都在飞机研制领域。参考文献 [2] 中将经济可承受性、生存性、可用性、能力、安全性 5 个指标作为军用飞机总体方案的评估指标。参考文献 [3] 将任务能力、可用性或战备完好性、战时生存性、安全性、经济可承受性、研制风险等 5 个指标作为作战飞机总体设计方案评审一级指标。参考文献 [4] 将生命周期费用、作战能力、可靠性、维修性、保障性、安全性、生存性和适应性作为作战飞机的评价准则，并提出用多目标决策、蛛网图法、综合评估法来评估作战飞机总体方案。另外，国内学者还研究了导弹武器系统研制方案的评审指标体系，提出将先进性、经济性、可行性作为三个一级评价指标[5]。针对直升机的相关研究中，曹义华在其直升机效能评估方法研究中[6]指出效能评估指标体系包括随机性指标、模糊性指标、灰色性指标、物理指标和综合性指标等，并指出武器系统效能可以表达为作战能力、可用度、可靠度、保障度 4 个指标值的乘积。在参考文献 [7] 中，提出将可靠性、维修性、保障性、测试性作为直升机可用性的评价指标，并研究运用层次分析法和模糊综合评价法对其进行评估。

直升机总体方案的决策是其研制设计过程中的关键环节，对直升机的全寿命周期费用起着决定性的作用[8,9]。本文考虑将经济可承受性作为关键评价指标之一，构建一套科学的总体方案评价指标体系和评价方法，以期辅助相关研究，也可指导工程人员在直升机型号研制设计时，研究出具备良好经济可承受性的先进直升机。

1 直升机经济可承受性与性能之间的内在联系

经济可承受性的含义，可以从几个方面来理解，宏观上讲，航空等装备的发展战略需符合社会经济承受能力和技术研制能力；更进一步可理解为装备研制生产等所需经费需在军费中保持适当比例，不引起军费结构失衡。更具体地讲，可理解为高性能装备研制生产、使用保障的过程中效率是否高、是否符合效费比原则。装备研制设计和总体方案阶

收稿日期：2017-11-16；　退修日期：2018-01-18；　录用日期：2018-04-06

基金项目：航空科学基金（2015ZG51075）

* 通信作者 . Tel.：010-82338939　E-mail：dengxiuquan@126.com

引用格式：Deng Xiuquan, Zhang Jiangxia, Sun Xuyao, et al. Evaluation of helicopter conceptual design considering economic affordability [J]. Aeronautical Science & Technology, 2018,29(05)：55-65. 邓修权，张江侠，孙需要，等．考虑经济可承受性的直升机总体方案评估 [J]. 航空科学技术，2018,29(05)：55-65.

段的决策，是装备获得良好经济可承受性的关键。

以直升机为例，其设计方案中各性能指标要求的高低，直接决定了生命周期费用的高低，也影响了直升机的经济可承受性。性能指标越关键，影响越大。这是因为各性能指标的要求都会与费用产生联系，一般来说，性能要求越高，产生的费用越大；假若一味追求先进技术、高性能，效能要求虽得到满足，但必然会带来巨大的研发、生产、维护保障等费用；关键是如何在一定的预算下，获得最佳性能的直升机。目前相关研究中，常通过按费用设计（Design For Cost，DFC）、费用作为独立变量（Cost As an Independent Variable，CAIV）等理论方法进行方案设计，以便获得良好的经济可承受性。本文关注于考虑经济可承受性的总体方案评估，暂不对这类理论方法的具体运用做深入研究。图 1 为直升机经济可承受性与性能之间内在联系的概括示意图，性能和费用的综合权衡是经济可承受性内涵的部分体现。

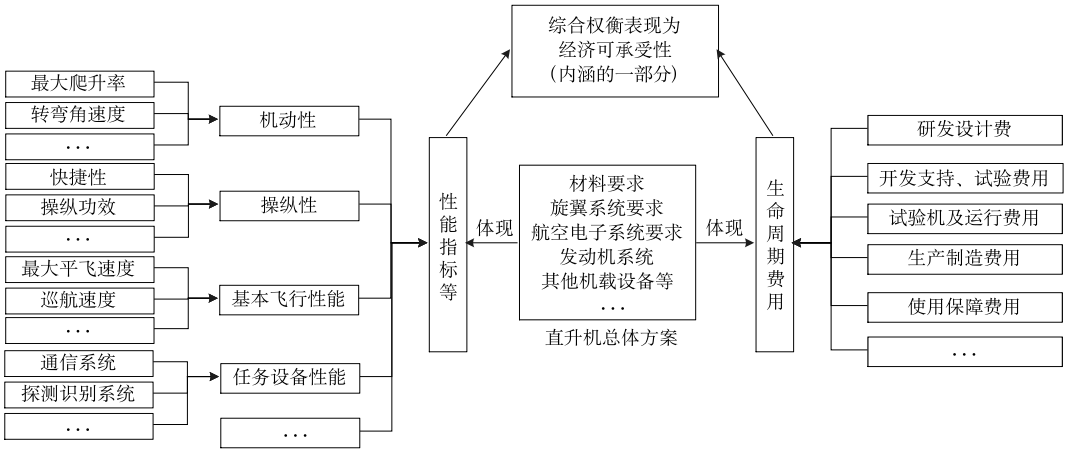

图 1 经济可承受性与性能的相关联系

Fig.1 The links between economic affordability and performance

2 评价指标体系的构建

2.1 评价指标体系的构建原则

在各备选方案已经设计好待决策的情况下，方案评价指标体系的设计构建会影响到评价结果的合理性和科学性，并且所构建的评价指标体系的层次数量、指标数量规模以及具体指标的差别，还会影响到各备选方案决策过程、计算过程等的复杂性。因此，建立评价指标体系时，需要依据一定的原则，以确保指标体系的科学合理性。本文构建直升机总体设计经济可承受性评价指标体系时，所依据的指标体系设计原则包括以下 5 个方面：(1) 客观性：各指标是客观存在的，能真实地反映直升机总体设计方案的各项性能、特点。(2) 独立性：所构建的评价指标体系中各指标之间应尽可能地保持相互独立非耦合，减少指标之间内涵的重叠。(3) 完备性：所构建评价指标体系能够全面地反映被评估的直升机方案的各个方面。(4) 简洁性：在基本能满足直升机方案评价需求的情况下，要求尽量选取少量最合理的关键指标，来评价不同备选方案。(5) 可度量性：选取评价指标过程中，尽量选取可定量估算的评价指标。

2.2 分级指标的构建及分解

本文在建立直升机评价指标体系的过程中，依据指标体系设计原则、循序渐进、结合实际和已有相关研究成果，并通过面谈或者问卷调查等方式咨询相关专家，构建出直升机总体方案评价指标体系，图 2 为本文构建的三级指标体系层级示意图。直升机总体方案评价指标体系中有三个二级指标，分别是效能、经济可承受性、研制风险。

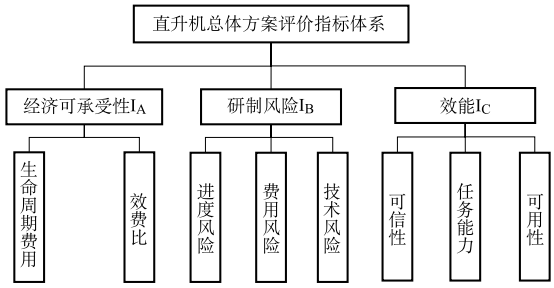

图 2 直升机三级指标体系层级图

Fig.2 Helicopter three-level evaluation index system

(1) 效能

当设计研发一款新型直升机，一般来说，首要考虑的问

题是直升机的各项性能如何设计，直升机的各项性能综合反映，即是直升机的效能。因此，本文选取效能这一指标，表征直升机的综合性能表现。关于效能的指标分解，相关研究较多，其中 ADC 模型是美国工业界武器系统效能咨询委员会提出的效能评估模型，较为经典和普遍适用。ADC 效能评估模型，将效能分解为可用性（A）、可信性（D）、任务能力（C）三个指标。可用性是指装备在开始执行任务时，装备所处状态的度量；可信性是在已知的直升装备处于执行任务的状态下，在后续的执行任务过程中，装备系统能可被信任地持续工作的状态的度量；任务能力就是指直升装备达到任务目标能力的度量。本文借鉴 ADC 效能评估模型，将效能分解为可信性、任务能力、可用性。

（2）经济可承受性

随着各种新材料、先进技术等在直升机上的运用，以及直升机系统越来越复杂，由此而产生的相关费用则是直线上升，但相关预算不可能相应直线上升，经济可承受性问题越来越成为直升机研发设计过程中的关键问题之一。因此，本文选取经济可承受性这一指标，表征直升机的经济性。关于经济可承受性指标的分解，本课题研究小组通过咨询某直升机所和某陆航所相关专家，并结合国内外的相关研究，将其分解为生命周期费用和效费比。用生命周期费用来表征直升机的经济可承受性是必要的，但又是不充分的，生命周期费用是反映经济可承受性的重要指标，但不能全面地反映经济可承受性，需要和效费比指标一起综合权衡才可以达到经济可承受性的评价[10]。效费比表征的是直升机综合性能和费用的比值，是一个权衡评估指标。若生命周期费用相同，效费比大者，经济可承受性优。

（3）研制风险

直升机的研发设计存在巨大的风险，一般包括技术、费用、进度等风险。若直升机方案阶段不充分考虑研制风险，造成研制失败，必将造成巨大、无可挽回的损失；因此，本文选取研制风险这一指标，表征直升机方案的风险性。研制风险一般会分解为技术风险、费用风险、进度风险。

2.3 各指标的说明及分解计算

2.3.1 经济可承受性的说明及分解计算

直升机的经济可承受性指标主要表征直升机相关的经济特性，需综合考虑生命周期费用和直升机装备的性能要求。

（1）生命周期费用

直升机生命周期费用（Life Cycle Cost，LCC）是直升机从开始研究论证、方案设计、试制试飞、批量生产、使用、维护和保障等一系列费用的总和，它是一种衡量直升机系统总费用和经济性的综合参数。生命周期费用的估算一般按研制、采购和使用保障三个相互独立的阶段分别进行，生命周期费用的组成可以按 5 种费用叠加，即：

$$\mathrm{LCC}=C_1+C_2+C_3+C_4+C_5 \tag{1}$$

式中：C_1 为研究、设计和试制费用，C_2 为试验和鉴定费用，C_3 为采购投资费用（批生产费用），C_4 为使用维护和保障费用，C_5 为退役处理费用。生命周期费用在实际方案评价中，常转化为每飞行小时费用来进行表达。

（2）效费比

效费比是指单位直升机生命周期费用所获得的直升机效能，它直接反映了生命周期费用的利用率。如果单从直升机的费用角度看问题，则费用越少越好，因而得出直升机效能越简单越好的结论；而如果单从直升机的效能角度看问题，则直升机的效能越高越好，从而得出直升机性能越先进越复杂越好，但无论是哪种结论都具有片面性。

直升机的效费比可用效费比指数来表达，在直升机效费比定义中，直升机效能 E 和直升机生命周期费用 LCC 的单位不同，效费比的量值还会随 E 和 LCC 的单位的变化而变化，不直观，也不便于对比评判，为此需将效费比无量纲化表示，提出效费比指数：

$$M(\mathrm{M})=\frac{M(\mathrm{E})}{M(\mathrm{LCC})} \tag{2}$$

式中：M（M）为直升机效费指数，M（E）为无量纲化的直升机效能，M（LCC）为无量纲化的直升机生命周期费用。

$$M(\mathrm{E})=\frac{\mathrm{E}}{\mathrm{E}_{jz}} \tag{3}$$

式中：E_{jz} 为选中的基准直升机效能，E 为待评的直升机效能。

$$M(\mathrm{LCC})=\frac{\mathrm{LCC}}{\mathrm{LCC}_{jz}} \tag{4}$$

式中：LCC_{jz} 为选中的基准直升机生命周期费用，LCC 为待评的直升机生命周期费用。

2.3.2 研制风险的说明及分解计算[11~14]

研制风险是指直升机型号研制发展中，在规定的技术、费用、进度等约束条件下，未达到研制要求目标的概率。研制风险与直升机的设计要求、技术复杂程度、研制生产方的技术储备能力、经费保障、计划控制等诸多因素有关。

（1）技术风险

技术风险指直升机研制中，在规定时间内和一定的经费保障条件下，未达到战术技术指标要求的可能性。产生技术风险的主要因素有：技术过于复杂、性能指标太高、技术储备不足、研制管理水平不足等。为降低技术风险，一般要求直升机总体方案中新技术的比例为 10%~15%，超过 20%

则方案不予审批。技术风险量化可以用技术风险概率指数来表达，技术风险概率指数可用如下计算公式计算：

$$P_{ra}=\sum\frac{\alpha_i p_{di}\sigma_{ai}}{A_i} \tag{5}$$

式中：P_{ra} 为技术风险概率指数，p_{di} 为新技术研究失败的概率，A_i 为新技术应用能使相应性能指标获得的性能增量，σ_{ai} 为新技术应用时相应性能指标增量的劣向（性能下降方向）标准差，α_i 为各性能指标在各系统中的权重系数。其中，p_{di}，α_i 可通过专家评判法获得。

（2）费用风险

费用风险指直升机型号发生经费超出计划，进而导致研制经费不足，无法满足需求的可能性。费用风险将直接影响直升机型号质量，如果费用风险过高，有可能使直升机样机因缺少经费而试验不充分、不及时，从而影响项目研制成功的概率。产生费用风险的主要因素有：研制经费没有按照计划进行拨付；论证阶段没有考虑新技术的验证风险，从而导致预算过低；国家宏观经济调节的影响；国际上直升机相关原材料、配套设备等价格的上升等。费用风险可以用费用风险概率指数表达，其计算公式如下：

$$P_{rc}=\frac{\sigma_{cp}}{C_e}=\frac{\sum\sigma_{ci}}{\sum C_{ei}} \tag{6}$$

式中：P_{rc} 为费用风险概率指数；C_{ei} 为直升机系统中所包含的各类设备的费用均值；σ_{ci} 为各类设备费用正的标准差。

（3）进度风险

进度风险指直升机型号研制无法按照预定的时间计划完成研制任务的可能性。如果进度风险概率过高，将会导致研制周期被迫延长。另外，由于新技术的迭代速度加快，过于冗长的研制周期将可能导致直升机型号失去继续研制的意义。进度风险可以用进度风险概率指数表达，其计算公式如下：

$$P_{rt}=\frac{\sigma_{tp}}{T_e}=\frac{\sqrt{\sum\sigma_{ti}^2}}{\sum T_{ei}} \tag{7}$$

式中：P_{rt} 为进度风险概率指数；T_{ei} 为直升机系统研制过程中关键工序路线上各工序的平均完成时间；σ_{ti}^2 为关键工序路线上个工序完成时间的方差。

2.3.3 效能说明及分解计算 [8, 15, 16]

效能是表征直升机总体性能水平的特征指标。从直升机型号研制的目标出发进行分析，研制一个新型号的直升机，是为了得到期望的效能水平，因此可以说，高效能是直升机型号研制的出发点，也是直升机总体设计方案实现的主要目标之一。

（1）可信性

直升机的可信性是指直升机在执行任务的状态下继续执行本任务或者其他类型任务，能够完成规定任务的能力。直升机可信性的实质，是描述直升机在完成任务期间所处的功能状态，即直升机是否能连续工作的能力。直升机的可信性可分解为任务可靠性、适应性、安全性等。

任务可靠性是指直升机在执行规定的任务期间，完成规定任务而不出现故障的概率。任务可靠性的计算可用如下公式表达：

$$R(t+\Delta t\mid t)=\frac{P\{\varepsilon\geqslant t+\Delta t|\varepsilon\geqslant\Delta t\}}{P\{\varepsilon\geqslant t\}}=\frac{P\{\varepsilon\geqslant t+\Delta t\}}{P\{\varepsilon\geqslant t\}} \tag{8}$$

这里的 R 即为任务可靠性度量，t 为在规定的条件下，直升机处于无故障工作状态的某时刻，Δt 为再继续正常工作的时间。

适应性是指直升机在执行规定的任务过程中，如运输、巡逻、侦察、消防等任务，受周边环境（如雷雨等自然环境、机身产热过多等诱发环境等）的影响，能够继续完成任务不受环境过载影响的能力。

安全性是指直升机执行任务期间，直升机上的系统和设备连续处于能工作状态的一种能力。常用直升机发动机引起的损耗指数 EAI 作为直升机的安全性表征：

$$\mathrm{EAI}=\frac{N_{\mathrm{p}}-N_{\mathrm{LCE}}}{N_{\mathrm{p}}} \tag{9}$$

式中：N_{p} 为在服役的某型号直升机数；N_{LCE} 为发动机引起的事故造成的某型号直升机的损失数。

（2）任务能力

任务能力指直升机所具备的圆满完成各方面任务的能力。一般直升机的任务能力指标从机动性能、操纵性能、基本飞行性能、任务设备性能、稳定性能等 5 个方面进行评估。

机动性是指直升机在一定的时间间隔内，能够灵活改变飞行高度、速度和方向的各项机动能力。可将机动性用发动机加速性、最大爬升率、转弯角速度、过载飞行能力、单位剩余功率、最大垂直上升率等来表征。操纵性是直升机是否容易操作的体现。较高的直升机操纵性要求要有良好的操纵功效、响应速度快、力矩大小符合人体功效学、角速度阻尼和响应灵敏性匹配恰当等。基本飞行性能是直升机基本飞行参数的综合体现，包括不可逾越速度、最大平飞速度、巡航速度、使用升限、无地效悬停升限、有地效悬停升限、航程、航时、巡航半径等。任务设备性能就是指直升机平台相同，所搭载的不同组合的任务设备，形成不同的直升机型号。在直

升机平台上基本上会包含通信系统、导航系统、综合显示及管理系统、探测识别系统、飞行控制系统；在军用直升机上，还会有火控系统、红外系统等。稳定性是直升机的一种运动属性。直升机的稳定性的定义为：直升机保持飞行状态稳定的能力，也就是直升机能够抵制外界扰动的能力。

（3）可用性

可用性是指直升机在某一特定瞬间维持其功能的概率，也可以用直升机在一段时间内维持直升机完整功能的时间比例来表达。直升机的可用性一般可以用基本可靠性、维修性及保障性来表征。

基本可靠性是指直升机平台本身的可靠性要求，在直升机总体设计时，必须规定对直升机可靠性的定性要求，并且对直升机整机和各部分都要规定其可靠性的定性要求。

维修性是指直升机处于故障状态时，在规定的条件和程序下，经维修达到正常可使用状态时，维修难易程度的大小。直升机的维修性指标常可用直升机每飞行小时平均维修时间、平均修复时间两个指标量来综合度量。

直升机的每飞行小时平均维修时间是指在规定的条件下，直升机系统直接维修时间与其总飞行时间的比例。直升机的平均修复时间（MTTR）可用公式来表达，公式如下：

$$\mathrm{MTTR}=\sum_{i=1}^{n}(\lambda_K M_{ctk})/\sum_{i=1}^{n}\lambda_K \tag{10}$$

式中：M_{ctk} 为第 K 个部件平均修复时间；λ_K 为第 K 个部件故障率；n 为可维修的部件个数。

保障性是直升机的设计特性以及后勤资源能够满足直升机平时的任务能力完好性的度量。保障性是一种设计特性，直接影响直升机的最大使用效率、战备完好性、寿命周期费用、人员和技术要求等。保障性可以使用直升机的任务能力完备性 A_0 来衡量：

$$A_0=\frac{\mathrm{MTBM}}{\mathrm{MTBM+MDT}} \tag{11}$$

式中：MTBM 为直升机平均维修间隔时间；MDT 为直升机平均不能工作时间。

综上所述，本文对所构建的三级评价指标体系进行了进一步分解，如图 3 所示。需要特别说明的是，针对不同用途的直升机，如武装直升机、运输直升机、战勤直升机等，可在本文所构建的考虑经济可承受性的直升机总体方案评价指标体系的基础上，对三级指标中任务能力指标的分解进行改进，以便适用不同特定用途的直升机的方案评估。

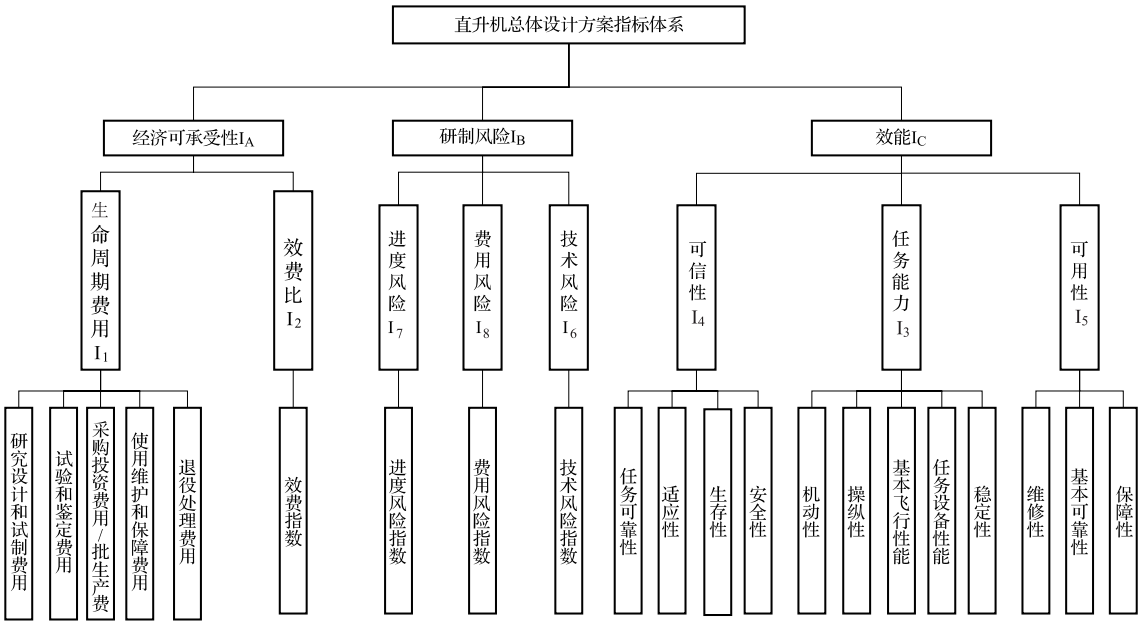

图 3　考虑经济可承受性的直升机方案评价指标体系

Fig.3　Helicopter evaluation index system considering economic affordability

3 评估模型的建立

在实际的直升机总体设计方案评价方法中，决策信息来源主要有两类：一是每个评价指标进行量化后的属性值，二是直升机总体设计方案评价指标的权重。通过分析直升机总体方案各评价指标，不难发现，整个评价指标体系所包含的各指标类型不一致，可分为效益型和成本型、定性指标和定量指标；各指标的取值或评价值也不相同，有精确实数型、区间数型、模糊数型、语言型等。考虑到一般性，以生命

周期费用、效费比、任务能力、可信性、可用性、技术风险、进度风险、费用风险 8 个三级指标为例，表 1 列举了各指标的属性说明。

表 1 直升机方案评价指标类型及指标值属性说明

Table 1 Helicopter indexes type and value attribute description

编号	指标名称	指标类型	属性值说明
I1	生命周期费用	成本型	精确实数型
I2	效费比	效益型	区间数型
I3	任务能力	效益型	模糊语言型
I4	可信性	效益型	模糊语言型
I5	可用性	效益型	模糊语言型
I6	技术风险	成本型	区间数型
I7	进度风险	成本型	区间数型
I8	费用风险	成本型	区间数型

逼近理想解排序方法（TOPSIS）是一种多属性决策方法，基本思想是通过综合考虑备选方案到正理想解和负理想解的距离，进而计算各备选方案距理想解的相对贴近度，来进行评价方案的相对优劣关系。正理想解是一个虚拟的最优方案，它的属性值都达到了备选方案中的最优值；而负理想解是一个虚拟的最劣方案，它的各项指标都达到了备选方案的最差值。本文提出了运用层次分析法（AHP）确定指标权重，用三角模糊数对定性语言描述进行定量化处理，在 TOPSIS 框架下进行直升机总体设计方案的评价。在此模型下，需确定不同的数值类型的规范化方法和备选方案距正 / 负理想解的距离的定义。

3.1 基于 AHP 加权模糊 TOPSIS 评估模型的建立

3.1.1 确定权重

步骤 1：根据建立的指标评价模型，在各层指标元素中进行两两相互对比，构造出比较判断矩阵。用 a_{ij} 表示第 i 个因素相对于第 j 个因素的比较结果，则有：

$$\boldsymbol{R}=(a_{ij})_{n\times n}=\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & & a_{2n} \\ \vdots & & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \tag{12}$$

其中：$a_{ij}=1/a_{ij}$ (13)

步骤 2：对判断矩阵进行处理，计算各层的指标的权重。计算得出的权矢量为：

$$\boldsymbol{w}=[w_1,\quad w_2,\quad \cdots,\quad w_n]^{\mathrm{T}} \tag{14}$$

步骤 3：计算最大特征值 $\lambda_{\max}$：

$$\lambda_{\max}=\sum_{i=1}^{n}\frac{[\boldsymbol{Rw}]_i}{nw_i} \tag{15}$$

式中：$[\boldsymbol{Rw}]_i$ 是 $\boldsymbol{Rw}$ 矢量中的第 i 个元素。

步骤 4：进行一致性检验，如果一致性检验合格，则得到各层次指标相对于上层指标的权重；否则调整判断矩阵，直至一致性指标合格。一致性检验的计算公式为：

$$\mathrm{CI}=\frac{\lambda_{\max}-n}{n-1} \tag{16}$$

式中：n 为矩阵的维数，实际为同一矩阵指标的个数；$\lambda_{\max}$ 为矩阵的最大特征值。

步骤 5：根据各专家的专业知识、经验以及研究方向确定各专家的经验系数，然后综合各专家判断矩阵计算所得的权重，乘以该专家经验系数，得到最终各指标权重。

3.1.2 不同类型的评价指标值的规范化方法

（1）精确实数型属性值的规范化方法

a_{ij} 为原始数据，b_{ij} 为规范化后的数据。

效益型：

$$b_{ij}=\frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=0}^{m}a_{ij}^2}} \tag{17}$$

成本型：

$$b_{ij}=\frac{1/a_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=0}^{m}(1/a_{ij})^2}} \tag{18}$$

（2）区间数型属性值的规范化方法

记 $a_{ij}=[a_{ij}^{\mathrm{L}}, a_{ij}^{\mathrm{U}}]$，规范化之后的矩阵记为 $b_{ij}=[b_{ij}^{\mathrm{L}},\quad b_{ij}^{\mathrm{U}}]$。则有：

效益型：

$$b_{ij}^{\mathrm{L}}=\frac{a_{ij}^{\mathrm{L}}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{m}(a_{ij}^{\mathrm{U}})^2}},\ b_{ij}^{\mathrm{U}}=\frac{a_{ij}^{\mathrm{U}}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{m}(a_{ij}^{\mathrm{L}})^2}} \tag{19}$$

成本型：

$$b_{ij}^{\mathrm{L}}=\frac{1/a_{ij}^{\mathrm{U}}}{\sqrt{\sum_{i=0}^{m}(1/a_{ij}^{\mathrm{L}})^2}},\ b_{ij}^{\mathrm{U}}=\frac{1/a_{ij}^{\mathrm{L}}}{\sqrt{\sum_{i=0}^{m}(1/a_{ij}^{\mathrm{U}})^2}} \tag{20}$$

（3）模糊数型属性值的规范化方法

模糊数这里用三角模糊数表示，规范化前、规范后分别记为：

$a_{ij}=[a_{ij}^{\mathrm{L}}, a_{ij}^{\mathrm{M}}, a_{ij}^{\mathrm{U}}]$ 和 $b_{ij}=[b_{ij}^{\mathrm{L}}, b_{ij}^{\mathrm{M}}, b_{ij}^{\mathrm{U}}]$

效益型：

$$b_{ij}^{\mathrm{L}}=\frac{a_{ij}^{\mathrm{L}}}{\sqrt{\sum_{i=0}^{m}(a_{ij}^{\mathrm{U}})^2}},\ b_{ij}^{\mathrm{M}}=\frac{a_{ij}^{\mathrm{M}}}{\sqrt{\sum_{i=0}^{m}(a_{ij}^{\mathrm{M}})^2}},\ b_{ij}^{\mathrm{U}}=\frac{a_{ij}^{\mathrm{U}}}{\sqrt{\sum_{i=0}^{m}(a_{ij}^{\mathrm{L}})^2}} \tag{21}$$

成本型：

$$b_{ij}^{\mathrm{L}}=\frac{1/a_{ij}^{\mathrm{U}}}{\sqrt{\sum_{i=0}^{m}(1/a_{ij}^{\mathrm{L}})^2}},\ b_{ij}^{\mathrm{M}}=\frac{1/a_{ij}^{\mathrm{M}}}{\sqrt{\sum_{i=0}^{m}(1/a_{ij}^{\mathrm{M}})^2}},\ b_{ij}^{\mathrm{U}}=\frac{1/a_{ij}^{\mathrm{L}}}{\sqrt{\sum_{i=0}^{m}(1/a_{ij}^{\mathrm{U}})^2}} \tag{22}$$

（4）语言型属性值的规范化方法

一般来说，对于定性属性，一般用极差、很差、差、较差、一般、较好、好、很好、极好 9 个定性等级来进行描述，见表 2。

表 2 定性指标转化成三角模糊数

Table 2 Qualitative indicators into triangular fuzzy number

评价语言变量	三角模糊数	评判标度
极差	(0.0, 0.1, 0.2)	0.1
很差	(0.1, 0.2, 0.3)	0.2
差	(0.2, 0.3, 0.4)	0.3
较差	(0.3, 0.4, 0.5)	0.4
一般	(0.4, 0.5, 0.6)	0.5
较好	(0.5, 0.6, 0.7)	0.6
好	(0.6, 0.7, 0.8)	0.7
很好	(0.7, 0.8, 0.9)	0.8
极好	(0.8, 0.9, 1.0)	0.9

3.1.3 距离的定义

（1）关于精确实数型值的距离，使用欧氏距离：设 a_{ij} 为第 i 个方案在第 j 个指标处的取值；a_j^+ 表示指标 j 的正理想取值，a_j^- 为负理想取值，则第 i 个方案距正理想解的距离为：

$$d_i^+=\sqrt{\sum_{j=1}^{m}(a_{ij}-a_j^+)^2},\ i=1,2,\ \cdots,n \tag{23}$$

第 i 个方案距负理想解的距离为：

$$d_j^-=\sqrt{\sum_{j=1}^{m}(a_{ij}-a_j^-)^2},\ i=1,2,\ \cdots,n \tag{24}$$

（2）关于区间数型：设 $\tilde{a}=[a^{\mathrm{L}},a^{\mathrm{U}}]$；$\tilde{b}=[b^{\mathrm{L}},b^{\mathrm{U}}]$ 是两个任意正区间数，$D(\tilde{a},\tilde{b})$ 为区间数 $a=[a^{\mathrm{L}},a^{\mathrm{U}}]$ 到区间数 $b=[b^{\mathrm{L}},b^{\mathrm{U}}]$ 的距离。则：

$$D(\tilde{a},\tilde{b})=\frac{\sqrt{2}}{2}\sqrt{(a^{\mathrm{L}}-b^{\mathrm{L}})^2+(a^{\mathrm{U}}-b^{\mathrm{U}})^2} \tag{25}$$

设 $\tilde{a}_j^+=[a_j^{\mathrm{L}+},a_j^{\mathrm{U}+}]$ 为指标 j 的正理想取值；$\tilde{a}_j^-=[a_j^{\mathrm{L}-},a_j^{\mathrm{U}-}]$ 为指标 j 的负理想取值，则第 i 个方案距正理想解的距离为：

$$D_i^+(\tilde{a},\tilde{a}^+)=\frac{\sqrt{2}}{2}\sqrt{(a_{ij}^{\mathrm{L}}-a_j^{\mathrm{L}+})^2+(a_{ij}^{\mathrm{U}}-b_j^{\mathrm{U}+})^2} \tag{26}$$

则第 i 个方案距负理想解的距离为：

$$D_i^-(\tilde{a},\tilde{a}^-)=\frac{\sqrt{2}}{2}\sqrt{(a_{ij}^{\mathrm{L}}-a_j^{\mathrm{L}-})^2+(a_{ij}^{\mathrm{U}}-b_j^{\mathrm{U}-})^2} \tag{27}$$

（3）关于三角模糊数型：设 $\tilde{a}=[a^{\mathrm{L}},a^{\mathrm{M}},a^{\mathrm{U}}]$；$\tilde{b}=[b^{\mathrm{L}},b^{\mathrm{M}},b^{\mathrm{U}}]$ 均为三角模糊数，则 $D_{\mathrm{H}}(\tilde{a},\tilde{b})$ 为两个三角模糊数的距离，即：

$$D_{\mathrm{H}}(\tilde{a},\tilde{b})=\sqrt{(a^{\mathrm{L}}-b^{\mathrm{L}})^2+(a^{\mathrm{M}}-b^{\mathrm{M}})^2+(a^{\mathrm{U}}-b^{\mathrm{U}})^2} \tag{28}$$

设 $\tilde{a}_j^+=[a_j^{\mathrm{L}+},a_j^{\mathrm{M}+},a_j^{\mathrm{U}+}]$ 为指标 j 的正理想取值；$\tilde{a}_j^-=[a_j^{\mathrm{L}-},a_j^{\mathrm{M}-},a_j^{\mathrm{U}-}]$ 为指标 j 的负理想取值，则第 i 个方案距正理想解的距离为：

$$D_{\mathrm{H}_i}^+(\tilde{a},\tilde{a}^+)=\sqrt{(a_{ij}^{\mathrm{L}}-a_j^{\mathrm{L}+})^2+(a_{ij}^{\mathrm{M}}-a_j^{\mathrm{M}+})^2+(a_{ij}^{\mathrm{U}}-a_j^{\mathrm{U}+})^2} \tag{29}$$

第 i 个方案距负理想解的距离为：

$$D_{\mathrm{H}_i}^-(\tilde{a},\tilde{a}^-)=\sqrt{(a_{ij}^{\mathrm{L}}-a_j^{\mathrm{L}-})^2+(a_{ij}^{\mathrm{M}}-a_j^{\mathrm{M}-})^2+(a_{ij}^{\mathrm{U}}-a_j^{\mathrm{U}-})^2} \tag{30}$$

以上为各种类型的属性值距离的计算方法。

3.2 基于 AHP 加权的模糊 TOPSIS 模型计算步骤

在 TOPSIS 框架下的评价模型的计算步骤可概括为：(1) 用层次分析法确定各指标综合权重；(2) 对原始决策矩阵进行处理，求得规范化决策矩阵；(3) 确定正、负理想解 Z^+、Z^-；(4) 分别计算各个方案指标值到正理想点和负理想点的指标的距离，并分别将实数型、区间数和模糊数的距离归一化处理；(5) 计算每个方案到理想解的加权距离；(6) 计算每个方案的相对贴近度。

以基于 AHP 加权的模糊 TOPSIS 评估模型为核心的直升机总体方案评估流程如图 4 所示。

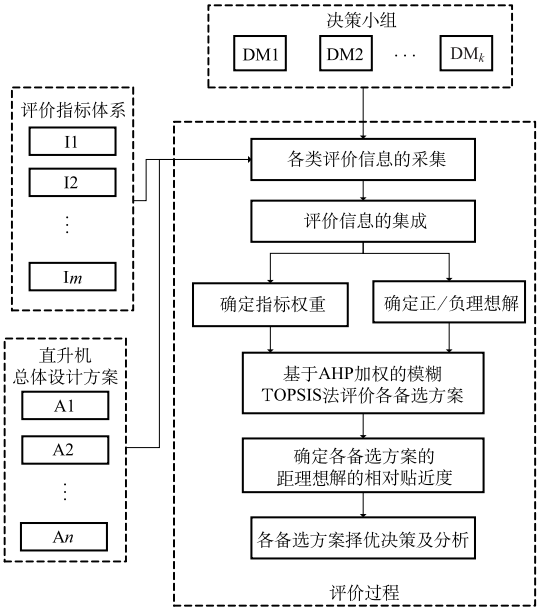

图 4 基于 AHP 加权的模糊 TOPSIS 方法的直升机总体设计方案评价程序

Fig.4 Helicopter evaluation process based on AHP weighted fuzzy TOPSIS method

TOPSIS 方法本身存在逆序问题。逆序问题是指一定数量的决策方案集合 A 内，新增加若干个决策方案，重新进行计算后，原来集合 A 内的决策方案排序发生变化的情况。

举例说明，假设在原集合 A 内，评判结果方案 A1<A2，但增加新方案重新排序后，变成 A2<A1 的现象。逆序问题产生的根本原因是：引入新决策方案后，理想解发生了变化，解决的办法就是通过专家经验设定绝对正 / 负理想解[17]。所谓绝对正理想解即指取所有评价指标的最优理想值，所有可能的备选方案的指标取值都不会超过这个最优理想值；反之，则是绝对负理想解。

本文所建立的基于 AHP 加权的模糊 TOPSIS 评价模型在实际操作中，可以通过专家经验或国际标准，设定直升机评价指标的绝对正负理想解，进而实现对不同样本量的决策方案的客观评价。为此，基于本文所构建的评价模型，若在原有样本集合内，新增若干个样本，则原样本集内样本的优劣相对排序不会发生改变，评价模型也不会受到样本量影响。综上所述，本文所建立的总体方案评价模型具有逻辑清晰、易于操作、适用性强、评价效果可靠等优点。当获得基础数据后，如权重对比打分矩阵、底层指标评价矩阵等，可通过 Matlab 等工具编程实现具体计算过程。

4 算例分析

4.1 算例说明

本文在选取案例时，选取了国际合作开发的多用途直升机，所选取的直升机用途类似、使用要求类似，所涉及的均为各型号的基本型，不讨论其改型，使其具有较好的可比性。本文选取的直升机[18, 19]分别为 EC-135，EC-155，BK117，S-92，相关指标数据来自于直升机的性能参数文件以及咨询相关专家等，各指标原始值见表 3。

表 3　4 种型号直升机底层指标取值

Table 3　Four types of helicopters bottom index value

编号	直升机型号方案			
	EC-135	EC-155	BK117	S-92
	A1	A2	A3	A4
I1	1380	1651	1150	2923
I2	[4.32, 4.89]	[6.80, 6.94]	[4.97, 5.23]	[7.78, 7.91]
I3	较好	好	好	很好
I4	较好	很好	一般	好
I5	好	好	较好	很好
I6	[0.03, 0.04]	[0.04, 0.05]	[0.02, 0.04]	[0.06, 0.07]
I7	[0.02, 0.03]	[0.01, 0.02]	[0.03, 0.04]	[0.04, 0.05]
I8	[0.02, 0.03]	[0.03, 0.04]	[0.01, 0.02]	[0.05, 0.06]

4.2 基于 AHP 加权的模糊 TOPSIS 评价

（1）确定指标权重

关于指标权重的计算，邀请多位相关专家，对评价指标进行打分，得出判断矩阵；运用层次分析法，最终得各指标的综合权重为：

$$W=[W_{I1}, W_{I2}, W_{I3}, W_{I4}, W_{I5}, W_{I6}, W_{I7}, W_{I8}]^T=(0.0504, 0.11, 0.2873, 0.1873, 0.1973, 0.0667, 0.051, 0.05)^T$$

（2）初始评价矩阵的规范化处理

在获得初始评价数据后，需对语言性评价进行模糊量化处理，进而进行规范化处理。由表 2 及式（17）~ 式（22）可得表 4 和表 5，分别为评价值的三角模糊量化处理及规范化处理。

表 4　语言型评价值三角模糊化处理

Table 4　Language evaluation value triangular fuzzification

	A1	A2	A3	A4
I1	1380	1651	1150	2923
I2	[4.32, 4.89]	[6.80, 6.94]	[4.97, 5.23]	[7.78, 7.91]
I3	(0.5, 0.6, 0.7)	(0.6, 0.7, 0.8)	(0.6, 0.7, 0.8)	(0.7, 0.8, 0.9)
I4	(0.5, 0.6, 0.7)	(0.7, 0.8, 0.9)	(0.4, 0.5, 0.6)	(0.6, 0.7, 0.8)
I5	(0.6, 0.7, 0.8)	(0.6, 0.7, 0.8)	(0.5, 0.6, 0.7)	(0.7, 0.8, 0.9)
I6	[0.03, 0.04]	[0.04, 0.05]	[0.02, 0.04]	[0.06, 0.07]
I7	[0.02, 0.03]	[0.01, 0.02]	[0.03, 0.04]	[0.04, 0.05]
I8	[0.02, 0.03]	[0.03, 0.04]	[0.01, 0.02]	[0.05, 0.06]

（3）确定正负理想解

正理想解是各指标的所有取值都达到了备选方案中的最优值，负理想解是各指标的所有取值都达到了备选方案的最差值。从规范化后的评价矩阵中可得出正、负理想解。

正理想解：

$$Z^{+}=\begin{Bmatrix}0.6545;[0.6113,0.6456];(0.4358,0.5685,0.7448);\\(0.4616,0.6065,0.8017);(0.4358,0.5685,0.7448);\\[0.3721,1.1612];[0.4191,1.4687];[0.4224,1.4884]\end{Bmatrix}$$

负理想解：

$$Z^{-}=\begin{Bmatrix}0.2575;[0.3394,0.3991];(0.3113,0.4264,0.5793);\\(0.2637,0.3790,0.5345);(0.3113,0.4264,0.5793);\\[0.2126,0.3870];[0.1677,0.3671];[0.1408,0.2976]\end{Bmatrix}$$

（4）计算各待评价方案指标值到正、负理想点指标值的距离，并进行归一化处理。由式（23）~ 式（30）可计算得出表 6。归一化计算是将各备选方案精确实数型距离、区间数型距离、三角模糊数型距离分别除以各自对应指标距离之和，这里进行归一化是由于各数型距离定义的不同，含义也不尽相同，因此，对距离进行了归一化处理，见表 7。

表 5 规范化处理后的评价决策矩阵
Table 5 Normalized decision matrix

	A1	A2	A3	A4
I1	0.5454	0.4559	0.6545	0.2575
I2	[0.3394, 0.3991]	[0.5343, 0.5664]	[0.3905, 0.4268]	[0.6113, 0.6456]
I3	(0.3113, 0.4264, 0.5793)	(0.3735, 0.4974, 0.6621)	(0.3735, 0.4974, 0.6621)	(0.4358, 0.5685, 0.7448)
I4	(0.3297, 0.4548, 0.6236)	(0.4616, 0.6065, 0.8017)	(0.2637, 0.3790, 0.5345)	(0.3956, 0.5307, 0.7127)
I5	(0.3735, 0.4975, 0.6620)	(0.3735, 0.4975, 0.6620)	(0.3113, 0.4264, 0.5793)	(0.4358, 0.5685, 0.7448)
I6	[0.3721, 0.7741]	[0.2977, 0.5806]	[0.3721, 1.1612]	[0.2126, 0.3870]
I7	[0.2794, 0.7343]	[0.4191, 1.4687]	[0.2095, 0.4896]	[0.1677, 0.3671]
I8	[0.2816, 0.7442]	[0.2112, 0.4961]	[0.4224, 1.4884]	[0.1408, 0.2976]

表 6 备选方案各指标到正理想方案距离
Table 6 Distance between each indicator and the optimal solution

	A1	A2	A3	A4
I1	0.1094	0.1986	0	0.397
I2	0.2595	0.0781	0.2198	0
I3	0.2511	0.1256	0.1256	0
I4	0.2685	0	0.4028	0.1342
I5	0.1256	0.1256	0.2511	0
I6	0.2737	0.4138	0	0.5589
I7	0.5286	0	0.7080	0.7989
I8	0.5355	0.7173	0	0.8652

表 7 归一化处理数据
Table 7 The datas of each distance normalized

	A1	A2	A3	A4
I1	0.1551	0.2817	0	0.5631
I2	0.4655	0.1401	0.3943	0
I3	0.4999	0.2500	0.2500	0
I4	0.3333	0	0.5001	0.1666
I5	0.2500	0.2501	0.4999	0
I6	0.2195	0.3321	0	0.4484
I7	0.2597	0	0.3478	0.3925
I8	0.2528	0.3387	0	0.4085

同理可计算到负理想解的规范化矩阵。

(5) 计算各备选方案到正、负理想解的加权距离，即各指标权重与各指标距理想解的距离的乘积。距正理想解的距离：$(d_{A1})^{+}=0.3549$；$(d_{A2})^{+}=0.1898$；$(d_{A3})^{+}=0.3252$；$(d_{A4})^{+}=0.1298$。同理可计算各备选方案到负理想解的距离为：$(d_{A1})^{-}=0.1408$；$(d_{A2})^{-}=0.3163$；$(d_{A3})^{-}=0.1812$；$(d_{A4})^{-}=0.3615$。

(6) 计算相对贴近度：

$$C_{A1}=\frac{(d_{A1})^{-}}{(d_{A1})^{+}+(d_{A1})^{-}}=0.2840;\ C_{A2}=\frac{(d_{A2})^{-}}{(d_{A2})^{+}+(d_{A2})^{-}}=0.6249;$$

$$C_{A3}=\frac{(d_{A3})^{-}}{(d_{A3})^{+}+(d_{A3})^{-}}=0.3578;\ C_{A4}=\frac{(d_{A4})^{-}}{(d_{A4})^{+}+(d_{A4})^{-}}=0.7356$$

因此，相对贴近度 $C_{A4}>C_{A2}>C_{A3}>C_{A1}$。

从相对贴近度可知，方案 A4，即 S-92 型号直升机具有最高的综合评价值。相关资料显示，S-92 实际综合评价是最高的，EC-155 次之。可以看出，所选 4 种型号直升机的实际综合评估结果和本文应用基于 AHP 加权的模糊 TOPSIS 评价所得的结论是一致的，也验证了本文构建的直升机总体方案评估模型是有效的。

5 结论

本文对考虑经济可承受性的直升机总体方案评估进行了研究，提出了直升机总体方案的评价指标体系和总体方案评价模型。本文提出的直升机总体方案评价指标体系包括经济可承受性、研制风险、效能三个二级指标，并对每个二级指标进行了说明及分解计算；其中将经济可承受性分解为生命周期费用和效费比，以期比较全面地反映出经济可承受性的内涵。本文基于直升机评价指标体系特点和要求，构建了基于 AHP 加权的模糊 TOPSIS 评价模型，即运用 AHP 法确定指标综合权重，给出精确实数型、区间数型、模糊数型等指标值的规范化公式及距离的定义，从而在 TOPSIS 框架下进行方案评价决策。

本文在构建直升机总体方案评价指标体系及算例中指标数据的获取、权重的确定等过程中，都保证有一定数量的相关专家参与，从而确保了本文研究成果的科学合理性。另外，当单独对备选方案某一方面，如效能、经济可承受性等，也可运用本文的评价指标体系和评估模型进行方案

评价。本文所构建的直升机总体方案评价指标体系，在实际工程运用中，须结合具体直升机型号研制要求，进行更进一步的分解细化，以便于综合评价。本文的研究成果对其他航空装备的方案评估也具有重要的参考意义。

参考文献

[1] 甘斯勒 . 美国国防工业转轨 [M]. 第 2 版 . 北京：国防工业出版社 , 1998.
Gan Sile. The U.S. national defense industry transition [M].2nd ed. Beijing：National Defense Industry Press, 1998.（in Chinese）

[2] Mavris D N, Delaurentis D A. An integrated approach to military aircraft selection and concept evaluation[R]. AIAA-95-3921, 1995.

[3] 刘晓东 , 宋笔锋 . 作战飞机总体设计方案评审指标体系研究 [J]. 系统工程与电子技术 , 2004, 26(4)：449-453.
Liu Xiaodong, Song Bifeng. Research on evaluation index system for overall design of combat aircraft [J]. Systems Engineering and Electronic Technology, 2004, 26(4)：449-453.（in Chinese）

[4] 黄俊 , 武哲 , 孙惠中 , 等 . 作战飞机总体设计评价准则和评估方法研究 [J]. 航空学报 , 2000(1)：70-73.
Huang Jun, Wu Zhe, Sun Huizhong, et al. Research on evaluation criteria and evaluation methods of operational aircraft overall design [J].Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2000(1)：70-73.（in Chinese）

[5] 周文松 , 蔡春涛 , 周卿吉 , 等 . 导弹武器系统方案评审指标体系研究 [J]. 系统工程与电子技术 , 2001, 23(11)：18-21.
Zhou Wensong, Cai Chuntao, Zhou Qingji, et al. Research on missile weapon system evaluation index system [J]. Systems Engineering and Electronic Technology, 2001, 23(11)：18-21.（in Chinese）

[6] 曹义华 . 直升机效能评估方法 [M]. 北京：北京航空航天大学出版社 , 2006.
Cao Yihua. Helicopter effectiveness evaluation method [M]. Beijing：Beihang University Press, 2006.（in Chinese）

[7] 张冀 , 李书 , 贺天鹏 , 等 . 直升机 RMS 与测试性综合评估模型研究 [J]. 系统工程与电子技术 , 2016, 38(2)：470-475.
Zhang Ji, Li Shu, He Tianpeng, et al. Research on integrated evaluation model of helicopter RMS and testability [J]. Systems Engineering and Electronic Technology, 2016, 38(2)：470-475.（in Chinese）

[8] 倪先平 , 蔡汝鸿 . 直升机技术发展现状与展望 [J]. 航空学报 , 2003, 24(1)：15-20.
Ni Xianping, Cai Ruhong. Development and prospect of helicopter technology [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2003, 24(1)：15-20.（in Chinese）

[9] 路录祥 , 王新洲 . 军用直升机型号发展工程 [M]. 北京：航空工业出版社 , 2009.
Lu Luxiang, Wang Xinzhou. Military helicopter model development project [M]. Beijing：Aviation Industry Press, 2009.（in Chinese）

[10] 张恒喜 , 郭基联 , 董彦非 . 现代飞机效费分析 [M]. 北京：航空工业出版社 , 2007.
Zhang Hengxi, Guo Jilian, Dong Yanfei. Cost effectiveness analysis of modern aircraft [M]. Beijing：Aviation Industry Press, 2007.（in Chinese）

[11] 钟小军 , 刘刚 , 狄鹏 . 舰船设计方案技术风险评估指标体系研究 [J]. 工程设计学报 , 2012, 19(5)：335-339.
Zhong Xiaojun, Liu Gang, Di Peng. Research on technical risk assessment index system of ship design scheme [J]. Journal of Engineering Design, 2012, 19(5)：335-339.（in Chinese）

[12] 吕建伟 . 装备研制的风险管理方法探讨 [J]. 系统工程与电子技术 , 2002, 24(5)：8-10.
Lv Jianwei. Discussion on risk management method of equipment development[J]. Systems Engineering and Electronic Technology, 2002, 24(5)：8-10.（in Chinese）

[13] 张子剑 . 复杂装备研制风险管理研究 [D]. 天津：天津大学 , 2007.
Zhang Zijian. Research on risk management of complex equipment development[D].Tianjin：Tianjin University, 2007.（in Chinese）

[14] 李寿安 , 宋笔锋 , 王庆锋 . 军用飞机研制风险的模糊综合评价方法 [J]. 电光与控制 , 2009, 16(2)：22-25.
Li Shouan, Song Bifeng, Wang Qingfeng. Fuzzy comprehensive evaluation method for developing risk of military aircraft [J]. Electronics Optics & Control, 2009, 16(2)：22-25.（in Chinese）

[15] 张杰 . 效能评估方法研究 [M]. 北京：国防工业出版社 , 2009.
Zhang Jie. Research on effectiveness evaluation method [M]. Beijing：National Defense Industry Press, 2009.（in Chinese）

[16] 温广杰 , 钟京立 , 谢健 . 基于 ADC 和层次分析法的指挥所通信效能评估模型构建 [J]. 现代电子技术 , 2015, 450(19)：37-39.

Wen Guangjie, Zhong Jingli, Xie Jian. Construction of communication equipment effectiveness evaluation model of command post based on ADC and analytic hierarchy process [J]. Modern Electronic Technology, 2015, 450(19)：37-39.（in Chinese）

[17] 陈伟 . 关于 TOPSIS 法应用中的逆序问题及消除的方法 [J]. 运筹与管理 , 2005, 14(5)：50-54.
Chen Wei. On the problem and elimination of rank reversal in the application of TOPSIS method[J]. Operations Research & Management Science, 2005, 14(5)：50-54.（in Chinese）

[18] 倪先平 . 直升机手册 [M]. 北京：航空工业出版社 , 2003.
Ni Xianping. Helicopter manual [M]. Beijing：Aviation Industry Press, 2003.（in Chinese）

[19] 菲利普 · 布莱 . 世界各国直升机精粹 [M]. 北京：人民邮电出版社 , 2015.
Philip B. Helicopter essence all over the world [M]. Beijing：Posts & Telecom Press, 2015.（in Chinese）

作者简介

邓修权（1972— ） 男，博士，副教授。主要研究方向：工业工程、复杂性管理。
Tel：010-82338939 E-mail：dengxiuquan@126.com

张江侠（1989— ） 男，硕士。主要研究方向：工业工程、直升机经济性评价。
Tel：18811775733 E-mail：18811775733@163.com

孙需要（1987— ） 男，硕士，工程师。主要研究方向：伺服系统总体设计、结构设计与优化仿真分析。
Tel:010-68754351 E-mail：bluesky7119@163.com

宁振雷（1983— ） 男，工程师。主要研究方向：电液比例与伺服控制。
Tel:010-88530582 E-mail:nzhl007@163.com

Evaluation of Helicopter Conceptual Design Considering Economic Affordability

Deng Xiuquan[1,*], Zhang Jiangxia[1], Sun Xuyao[2], Ning Zhenlei[2]

1. School of Economics and Management, Beihang University, Beijing 100191, China

2. Beijing Research Institute of Precise Mechatronics and Controls, Beijing 100076, China

Abstract: With the application of new technology and new materials in the process of helicopter industry development, people no longer only focus on the effectiveness of equipment, but also pay more and more attention to its economic affordability. The evaluation and decision-making of the helicopter's overall scheme has been the key link in the process. This paper took the affordability as one of the first-level evaluation indexes, establish the evaluation index system of the helicopter, and explains the indexes. What's more, methods of determining the indicators were also given. On the basis of the evaluation index system, this paper put forward the method of determining the weight of the index by the Analytic Hierarchy Process (AHP), quantifying the qualitative language description with the triangular fuzzy number, and evaluating the conceptual design of the helicopter under the Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution (TOPSIS) framework. Finally, an example was given to validate the effectiveness of the evaluation index system and the evaluation model.

Key Words: helicopter; conceptual design; economic affordability; index system; evaluation

Received: 2017-11-16； **Revised:** 2018-01-18； **Accepted:** 2018-04-06

Foundation item: Aeronautical Science Foundation of China (2015ZG51075)

***Corresponding author.Tel.:** 010-82338939 **E-mail:** dengxiuquan@126.com