

1-2-2019

Multi Criterion Variable Weight Comprehensive Evaluation Method of Guidance and Control System

Yuxiao Wang

Control and Simulation Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China;

Songyan Wang

Control and Simulation Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China;

Chao Tao

Control and Simulation Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China;

Yang Ming

Control and Simulation Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Multi Criterion Variable Weight Comprehensive Evaluation Method of Guidance and Control System

Abstract

Abstract: The evaluation of guidance and control system is necessary in the process of vehicle development. In view of lacking of effective comprehensive evaluation methods and the corresponding auxiliary software, *the performance evaluation methods of vehicle guidance and control systems are researched, the structure of the system is analyzed, and a hierarchical performance evaluation index system is established. Considering the varying degrees of the data reliability and independence of each index, a variable-weight comprehensive method with multi-criteria is proposed.* A performance evaluation example of vehicle guidance and control system is given which shows that the proposed method weights the index comprehensively. A reasonable evaluation result is given considering the balance of system performance, which provides available method for the follow-up guidance and control system performance evaluation.

Keywords

guidance and control system, performance evaluation, index system, index calculation methods, multi-index comprehensive

Recommended Citation

Wang Yuxiao, Wang Songyan, Chao Tao, Yang Ming. Multi Criterion Variable Weight Comprehensive Evaluation Method of Guidance and Control System[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(2): 435-442.

制导控制系统的多准则变权综合评估方法

王雨潇, 王松艳, 晁涛, 杨明

(哈尔滨工业大学 控制与仿真中心, 哈尔滨 150080)

摘要: 制导控制系统性能评估工作在飞行器研发过程中必不可少, 然而完整的综合评估方法和相应的支撑工具目前还比较缺乏。鉴于此, 对飞行器制导控制系统性能评估方法进行研究, 分析了系统的结构关系, 建立了层次化的性能评估指标体系; 针对飞行器评估的数据可靠性、指标分辨率不一等特点, 提出了多准则构权的变权综合方法; 最后给出了飞行器制导控制系统性能评估实例。实例表明, 所提出方法的定权依据较为科学, 并且可以兼顾系统的均衡性给出合理评价结果, 为制导控制系统性能评估提供了可用方法和工具。

关键词: 制导控制系统; 性能评估; 指标体系; 指标计算方法; 多指标综合

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2018) 02-0435-08

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201802009

Multi Criterion Variable Weight Comprehensive Evaluation Method of Guidance and Control System

Wang Yuxiao, Wang Songyan, Chao Tao, Yang Ming

(Control and Simulation Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: The evaluation of guidance and control system is necessary in the process of vehicle development. In view of lacking of effective comprehensive evaluation methods and the corresponding auxiliary software, the performance evaluation methods of vehicle guidance and control systems are researched, the structure of the system is analyzed, and a hierarchical performance evaluation index system is established. Considering the varying degrees of the data reliability and independence of each index, a variable-weight comprehensive method with multi-criteria is proposed. A performance evaluation example of vehicle guidance and control system is given which shows that the proposed method weights the index comprehensively. A reasonable evaluation result is given considering the balance of system performance, which provides available method for the follow-up guidance and control system performance evaluation.

Keywords: guidance and control system; performance evaluation; index system; index calculation methods; multi-index comprehensive

引言

随着如今战争需求的不断升级, 以自动化技术



收稿日期: 2015-03-01 修回日期: 2016-01-06;
作者简介: 王雨潇(1990-), 男, 黑龙江, 博士生, 研究方向为导航、制导与控制; 王松艳(1976-), 女, 黑龙江, 副教授, 研究方向为导航、制导与控制; 晁涛(1983-), 男, 黑龙江, 副教授, 研究方向为导航、制导与控制。

为基础的精确制导武器已逐步代替传统型武器成为了当今战场的主导。而制导控制系统正是精确制导武器最为重要的核心^[1], 在精确制导武器研发过程中, 为了对武器研发工作进行有效指导, 并降低试验次数, 需要对制导控制系统进行科学、系统的评估与鉴定。而在武器系统的不断发展过程中, 制导控制系统也日益复杂, 很难用单一的标准或指标

<http://www.china-simulation.com>

对其进行直接的评价。因此,需要一套科学有效的方法,将复杂的制导控制系统分解,形成可以直接评价的子系统,逐一进行评价最终完成评估工作。

目前已有学者使用一些评估手段来考验飞行器的制导控制性能^[2],并将评估应用于一些飞行器型号研发,以此指导并帮助其开发研制,最终性能评估结果以图示或评分的方式来给出^[3-4]。一些文献针对不同的控制系统进行了分析,并建立了相应的评估指标体系与综合方法。文献[5]分析了防空导弹制导系统的组成、结构和功能,提出了防空导弹制导控制系统的性能度量。根据综合性能评估指标体系的构建原则,建立了防空导弹制导控制系统综合性能评估指标体系,并分析了各层指标的含义,为后续防空导弹制导控制系统的综合性能评估工作提供了有效依据;文献[6]分析了高超声速滑翔再入飞行器的系统特点,研究了对此类飞行器的性能评估方法,构建出性能评估指标体系和相应评估模型对再入飞行器系统进行了有效评估。

本文对制导控制系统性能评估方法进行了研究,首先对制导控制系统进行了定性分析,按一定分类提出了制导控制系统评估指标,建立了评估指标体系,给出了底层指标计算方法;基于层次分析法提出了一种多准则变权综合方法,并结合实例对提出方法提供了有效验证。

1 制导控制系统性能评估指标体系的构建

对飞行器制导控制系统性能进行评估,首先要对制导控制系统进行深入分析,对系统中的各个影响因素进行挑选、归纳和分类,明确各因素之间的关系,构建科学、合理、具有层次化的评估指标体系^[7],然后利用合适的评估综合方法进行评估与鉴定。因此,建立一个科学、合理的评估指标体系是评估工作的前提,把制导控制系统的性能影响因素提炼出来,按照从属和关联关系把它们按照一定的层次结构搭建起来,便构成了飞行器制导控制系统性能评估指标体系。目前已有一些学者对制导控制

系统性能评估指标体系进行了构建,文献[8]中将飞行器制导控制系统性能分为制导和姿控两个子系统性能,分别从制导系统的过程状态、控制约束、终端精度和姿控系统的动态品质、通道解耦以及对风干扰适应能力等方面进行综合考虑,最终建立了层次化的性能评估指标体系。

本文在已有的指标体系上加以改进,加入了指令平稳度类指标和指令跟踪能力指标,并且考虑了除风干扰外的大气密度及气动系数偏差影响,形成了更为全面、科学的评估指标体系,下面对改进的指标部分进行简要的说明。

(1) 指令平稳度类指标

飞行过程中,不仅对指令大小有一定约束,同时还要考虑指令的变化平稳度,如果输出的控制指令变化较大、较频繁,不仅会增大飞行器的能量损耗,同时也对控制系统和执行机构性能提出较高的要求。因此,从节约飞行器能量和降低控制与执行机构需求的角度出发,将指令平稳度作为性能评估指标。并将其细分为攻角指令的平稳度和倾侧角指令的平稳度。

(2) 跟踪能力指标

姿态控制子系统的输入是制导子系统输出的攻角与倾侧角指令,如果不考虑伺服系统对控制效果产生的影响,则攻角与倾侧角的实际值与指令偏差越小,说明姿态控制子系统的控制效果越好。因此,将飞行过程中攻角和倾侧角指令的跟踪效果作为评价姿态控制子系统性能的指标。

(3) 适应性指标

飞行器的制导控制系统是在不考虑外扰和内部不确定性情况下进行设计的,要求飞行过程中满足状态约束、终端约束和控制约束条件。为了考察飞行器的适应能力,在仿真模型中加入干扰模型,其中包括:气动参数偏差、大气密度偏差和风干扰,以飞行器在干扰情况下的终端指标表现作为评价飞行器适应能力的指标。

由此分别给出制导和姿控子系统性能评估指标体系如图1、图2所示。

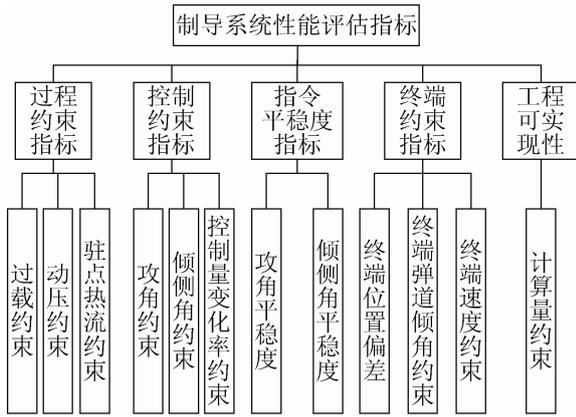


图 1 制导系统性能评估指标体系

Fig.1 Performance evaluation index system of guidance subsystem

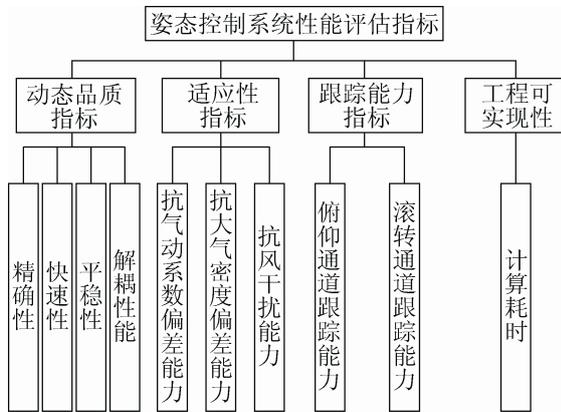


图 2 姿态控制系统性能评估指标体系

Fig.2 Performance evaluation index system of attitude control subsystem

2 综合评估方法研究

在多指标综合评估中, 指标的权值和指标的单项值是影响合成结果中的重要因素。在单项指标值已经确定的情况下, 权值的改变无疑会导致评估结果的变化。权值的确定表现了评价者对各指标重要程度的评判和对指标评价能力大小的评判; 在专家群组评价中, 需要将专家意见按照某种加权方式组合起来, 这也反应出各专家评价权威程度和评价者对专家的信任程度。因此, 单项指标分值的确定和加权方法的选择是评估过程中非常重要且不可或缺的一环。

2.1 指标值无量纲化方法

评估指标体系中的各指标类别不一, 计算所得

到的指标值相差很大, 量纲也各不相同, 如何将各指标的评估结果综合起来是一个需要解决的问题。

本文根据不同的指标特点, 对应有多种标准化方法, 本方案中采用适应所建立底层指标的几种方法。首先对每个评估参数 X 设置边界值 a 、 b , 然后根据指标的评估细则, 令评估参数 X 采用匹配的标准化计算方法得到评价分值, 定义 M 值对应 100 分, L 值对应 0 分, 即将不同的底层指标值映射到 $[0, 100]$ 。以线性递减形式标准化函数为例, 如图 3 所示。

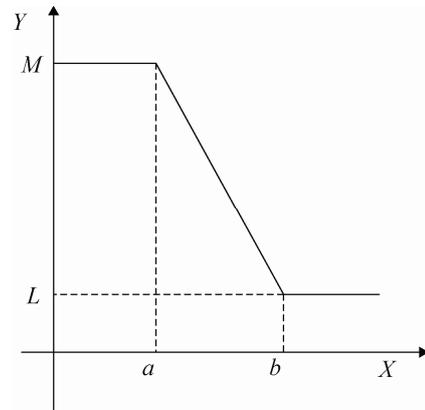


图 3 线性递减函数示意图

Fig.3 Linearly decreasing function

对应计算表达式为:

$$y = \begin{cases} M & , x \leq a \\ (M - L) \frac{b - x}{b - a} + L & , a < x < b \\ L & , x \geq b \end{cases} \quad (1)$$

2.2 多定权准则的变权综合方法

2.2.1 定权方法选择

在得到单项指标的评分值以后, 还需要将各单项指标按照一定方法综合起来, 才能得到最终的评估结果。

首先需要将各项单指标根据各自的重要程度、分辨率或可信度等标准进行权重分配, 得到各自的权重值, 然后按照一定的方法对单项指标分值进行综合加权, 将各单指标分值转化为最终的综合评估分值。因此, 在对指标进行综合时,

首先的也是最为重要的工作是对各指标进行赋权, 赋权是否科学、合理, 直接影响到最终评估结果的可信度和可靠性。

由于制导控制系统可以建立层次化的评价指标体系, 每层的指标因素之间相对独立, 并且每层相互比较指标相对较少, 综合考虑方法的适用性与计算易行性, 采用属性层次模型(AHM)方法来确定各指标相对权重。

(i) AHM 评判模型

AHM 又名属性层次模型, 类似于 AHP 方法, 它同样是基于两两比较的方法得到指标的权重值。但它与 AHP 方法的标度方法不同, 它基于另一种称为球赛模型的方法来进行两两重要性比较。

设元素 u_1, u_2, \dots, u_n 为 n 个球队, 每两个球队进行 1 场比赛, 每场比赛为 1 分。 u_i 和 u_j 比赛 ($i \neq j$)。 u_i 得分 μ_{ij} , u_j 得分 μ_{ji} 。 准则 C 为得分。 问题: 已知 $A = \mu_{ij}$, $1 \leq i, j \leq n$, 在准则 C 下对元素进行排序, 即按得分多少对元素排序。

(ii) 构造权向量

上述模型中, μ_{ij} 满足 $\mu_{ij} \geq 0$, $\mu_{ji} \geq 0$, $\mu_{ij} + \mu_{ji} = 1$, $i \neq j$, $\mu_{ii} = 0$ 。

满足上式的 μ_{ij} 称为相对属性测度, 矩阵 (μ_{ij}) 称为属性判断矩阵。 如果 $\mu_{ij} > \mu_{ji}$, 则称 μ_{ij} 比 μ_{ji} 强, 记为 $\mu_i > \mu_j$ 。 若属性判断矩阵 (μ_{ij}) 满足当 $\mu_i > \mu_j$, $\mu_j > \mu_k$ 时, 有 $\mu_i > \mu_k$, 则称 (μ_{ij}) 具有一致性。 对属性判断矩阵一致性检验方法如下:

$$\text{令 } g(x) = \begin{cases} 1, x > 0.5 \\ 0, x \leq 0.5 \end{cases}, I_i = \{j : g(\mu_{ij}) = 1, 1 \leq j \leq n\}.$$

属性判断矩阵 (μ_{ij}) 具有一致性的必要充分条件是: 对任何 i , 当 I_i 非空时有

$$g(\mu_{ik}) - g\left(\sum_{j \in I_i} g(\mu_{jk})\right) \geq 0, 1 \leq k \leq n \quad (2)$$

u_i 的得分为 $f_i = \sum_{j=1}^n \mu_{ij}$ 。 $(f_1, f_2, \dots, f_n)^T$ 为属性排序向量。 我们注意, 属性排序向量是判断矩阵中所有列向量之和。 可知 $\sum_{i=1}^n f_i = n(n-1)/2$ 。 即:

$$w = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T, w_i = 2f_i / n(n-1) \quad (3)$$

称 w 为相对属性权向量。

2.2.2 多准则定权模型

我们决定一个指标权重的时候总是依据某一个准则的, 这个准则成为指标定权准则。 在复杂的评估工作中, 定权准则不一定是唯一的。 因为指标权值大小代表的内容可以是多方面的, 例如, 指标的重要程度、指标分辨能力大小等, 都可以作为指标的定权准则。 每个准则同样也可以拥有子准则, 产生一个定权准则的递阶层次结构, 如图 4 所示。

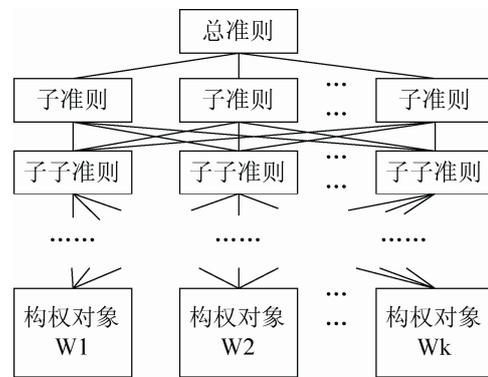


图4 定权准则递阶图
Fig.4 Weight rules structure

针对上文所建制导控制系统指标体系的特点, 本文规定了 3 个权值分配准则: 指标重要性、指标分辨度和数据可靠性。 图 5 表示了该制导控制系统权重准则因素的分层结构。

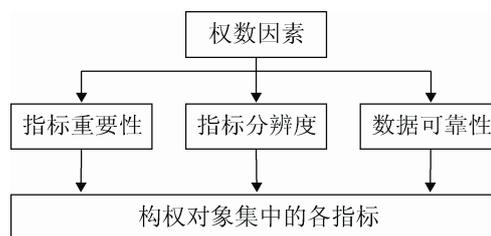


图5 构权因素分解层次图
Fig.5 Factor decomposition hierarchy

这里可以认为权重因素准则是同等地位的, 也可以对准则进行权重分配, 以满足不同的评估对象, 得到更科学、合理的评估结果。

若在进行权重分配时有 m 个权重因素准则,

在构权对象集中有 n 个指标, 假设 m 个权重因素准则的权重向量 $A = (a_1 a_2 \cdots a_m)^T$, 而在第 i 个准则下的对象指标权重向量为 $B_i = (b_{i1} b_{i2} \cdots b_{in})^T$, 则构权对象指标的权重分配矩阵 $B = (B_1 B_2 \cdots B_m)$ 。

于是构权对象指标的综合权重为:

$$W = BA = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1m} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{n1} & b_{n2} & \cdots & b_{nm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11}a_1 + b_{12}a_2 + \cdots + b_{1m}a_m \\ b_{21}a_1 + b_{22}a_2 + \cdots + b_{2m}a_m \\ \vdots \\ b_{n1}a_1 + b_{n2}a_2 + \cdots + b_{nm}a_m \end{bmatrix} \quad (4)$$

2.2.3 变权重处理方法

常权综合的各指标权重确定遵照了一定的定权准则, 可以相对合理地展现出指标之间相对的重要程度, 在一般情况下可以科学、合理地反映出被评价对象在各因素层面上的综合优度。然而制导控制系统性能评估是以最终飞行任务成败为核心评估标准的, 系统中任何一个因素的性能不达标都可能导致飞行器的飞行任务失败。而制导控制系统性能评估指标体系是一个多层次多因素的综合评估指标体系, 当一个底层指标的评估结果较差时, 它在由下到上的多次加权综合中会被其它指标的信息淹没, 对总评估指标评价结果的影响微乎其微。这显然是不合理的, 我们需要对评估结果较差的指标“惩罚”, 使不合格的指标在最终的总评估结果中充分地体现出来, 从而做出相对正确、科学的评估决策。

在这里, 我们利用因素空间理论^[9]中的均衡函数来实现指标变权综合。

首先, 给出变权综合的公理化定义:

定义 2.1: 所谓一组(m 维)变权是下述 m 个映射 $\omega_j(j=1,2,\cdots,m)$:

$$\omega_j : [0,1]^m \rightarrow [0,1],$$

$$(x_1, x_2, \cdots, x_m) \mapsto \omega_j(j=1,2,\cdots,m)$$

满足以下三条公理:

$$1) \text{ 归一性: } \sum_{j=1}^m \omega_j(x_1, x_2, \cdots, x_m) = 1;$$

2) 连续性:

$\omega_j(x_1, x_2, \cdots, x_m)(j=1,2,\cdots,m)$ 关于每个变元 x_j 连续;

3) 惩罚性: $\omega_j(x_1, x_2, \cdots, x_m)(j=1,2,\cdots,m)$ 关于每个变元 x_j 单调下降。

汪培庄教授曾给出确定一类变权的经验公式^[10], 即考虑了指标重要性选择上的人为偏好, 又保证了系统的均衡性, 对低分指标起到了惩罚作用。

其基本思想是在常权基础上, 通过在权数中融入指标值, 将常权修改为变权, 具体方法如下:

首先对于二维变权 $\omega_j(x_1, x_2)(j=1,2)$, 假设其中两个指标的常权比为 $\lambda = \frac{\omega_2}{\omega_1}$, 则令

$$\frac{\omega_2(x_1, x_2)}{\omega_1(x_1, x_2)} = \lambda \frac{x_1}{x_2} = \frac{\omega_2 x_1}{\omega_1 x_2}, \text{ 通过权重归一化可得:}$$

$$\begin{cases} \omega_1(x_1, x_2) = \frac{\omega_1 x_2}{\omega_1 x_2 + \omega_2 x_1} \\ \omega_2(x_1, x_2) = \frac{\omega_2 x_1}{\omega_1 x_2 + \omega_2 x_1} \end{cases} \quad (5)$$

以二维变权为基础, 对于 m 维变权 $\omega_j(x_1, x_2, \cdots, x_m)(j=1,2,\cdots,m)$, 首先按照二维变权的思路得到 m 维变权每组两两比较的变权比:

$$\frac{\omega_j(x_i, x_j)}{\omega_i(x_i, x_j)} = \lambda \frac{x_i}{x_j} = \frac{\omega_j x_i}{\omega_i x_j} \quad (6)$$

那么 m 维变权 $\omega_j(x_1, x_2, \cdots, x_m)(j=1,2,\cdots,m)$ 应满足两个条件, 每两个指标的变权比应满足上式, 且 $\omega_j(x_1, x_2, \cdots, x_m)(j=1,2,\cdots,m)$ 满足归一化公理, 即:

$$\begin{cases} \frac{\omega_j(x_1, x_2, \cdots, x_m)}{\omega_i(x_1, x_2, \cdots, x_m)} = \frac{\omega_j x_i}{\omega_i x_j} \\ \sum_{i=1}^m \omega_i(x_1, x_2, \cdots, x_m) = 1 \end{cases} \quad (7)$$

经计算可得:

$$\omega_i(x_1, x_2, \cdots, x_m) = \frac{\omega_i}{\sum_{j=1}^m \frac{\omega_j}{x_j}} \quad (8)$$

当采用上述变权均衡函数时, 最终的权重在很

大程度上由指标分值决定,而先前的权重分配信息会被“淹没”。这样与我们的根本目的不符,这里我们希望在单个指标性能差于一定标准时对其进行“惩罚”,而在这个标准以内时尊重主观重要性分配。即指标在某个评分值以下时才对其权重进行加大。

这里我们在上述变权均衡函数基础上,作如下修改:

设有函数:

$$f(x) = \begin{cases} 1 & x > 0 \\ 0 & x \leq 0 \end{cases} \quad (9)$$

这里我们设置一个指标分值的标准 x_0 , 修改变权均衡函数如式(10)所示:

$$\omega_i(x_1, x_2, \dots, x_m) = \frac{\omega_i [1 + f(x_0 - x_i)(x_0 - x_i)\rho]}{\sum_{j=1}^m \omega_j [1 + f(x_0 - x_j)(x_0 - x_j)\rho]} \quad (10)$$

式中: ρ 为变权系数, $\rho > 0$ 。

ρ 的值越大,变权幅度越大,变权效果越明显。假设设定 $\rho = 0.05$ 、 $x_0 = 80$, 那么若某一层指标分值均高于 80, 那么根据式(10)的均衡函数变权处理, 所有指标权值不变; 若某个指标分值低于 80, 那么均衡函数会根据它的具体分值对其进行一定程度的权重惩罚, 惩罚的程度根据变权系数 ρ 来确定, 而其它符合分值标准的指标之间权重比保持不变。

2.2.4 群组 AHM 定权方法

(1) 专家综合权重确定方法

专家综合权重包括主观权重和客观权重。主观权重是根据专家以往的学术水平、道德水平、工作经验、对所评仿真系统的熟悉程度等确定的, 通常在专家对所评仿真系统进行分析之前已经确定。

专家客观权重基于个体判断与群体判断偏差量来确定。如果某位专家的个体判断与群体判断的偏差较小, 则表示该专家的观点受到群体的普遍支持, 那么这位专家应该有较高的客观权重。因此, 专家 e_k 的客观权重计算如式(11):

$$\lambda_k^{(d)} = \frac{1 / \left(\sum_{i=1}^m \|A_k^s - A_i^s\|_F \right)}{\sum_{i=1}^m \left(1 / \left(\sum_{j=1}^m \|A_i^s - A_j^s\|_F \right) \right)} \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (11)$$

(2) 专家综合权重确定

利用式(12)将专家的客观权重和主观权重加以综合, 得到专家 e_k 的综合权重:

$$\lambda_k = t_1 \lambda_k^{(s)} + (1 - t_1)(t_2 \lambda_k^{(c)} + (1 - t_2) \lambda_k^{(d)}) \quad (12)$$

式中: t_1, t_2 为调节系数, 满足 $0 \leq t_1, t_2 \leq 1$ 。 t_1 越小, 表示越重视专家在评估工作中的实际表现; t_2 越小, 表示越重视群体意见的一致性。

(3) 计算综合判断矩阵

设 $A_k = (a_{ij}^{(k)})_{n \times n}$ 是专家 e_k 给出的判断矩阵, $k = 1, 2, \dots, m$, λ_k 表示专家 e_k 的权重, 且满足 $\lambda_k \geq 0$, $\sum_{k=1}^m \lambda_k = 1$; 令 $\bar{A} = (\bar{a}_{ij})_{n \times n}$, 其中 \bar{a}_{ij} 由式(13)给出

$$\bar{a}_{ij} = \prod_{k=1}^m (a_{ij}^{(k)})^{\lambda_k}, \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad (13)$$

称 \bar{A} 为 A_1, A_2, \dots, A_m 的 Hadamard 凸组合^[11], 即加权几何平均综合判断矩阵。

2.2.5 多准则变权群组 AHM 综合方法步骤

步骤 1: 邀请具有制导控制相关领域背景、不同知识结构的多位专家组成专家评估小组, 并根据专家的学术水平、道德水平、工作经验及对具体对象的熟悉程度等确定专家主管权重。

步骤 2: 根据飞行器系统特点, 定义若干个指标权重比较的准则。分别根据每个比较准则, 请各专家将指标元素进行两两比较, 按照 AHM 方法给出每个准则下比较元素的判断矩阵并进行一致性检验, 直到通过为止。

步骤 3: 根据各专家给出的判断矩阵, 计算专家的客观权重, 并与主管权重加以综合, 得到专家综合权重。

步骤 4: 利用 Hadamard 凸组合计算出专家组的综合判断矩阵, 并计算得到各指标的权重向量。

步骤 5: 根据准则间的权重比, 对得到的权重向量进行加权综合, 得到归一化的综合权重向量。

步骤 6: 计算各指标值, 得到每个指标的评估结果, 根据上文的变权重处理方法对权重向量进行变权, 得到变权后的权重结果。

步骤 7: 将每一层的指标评价分值, 按照指标的权重向量综合起来, 逐层向上评分, 最终得到的以分值的形式来描述的评价结果。

3 制导控制系统评估示例

(1) 指标值计算及标准化

根据上节所建的指标体系, 本节对其底层指标进行计算和指标标准化。这里以制导系统的攻角指令平稳度为例, 其他指标操作方法类似。

首先要选择计算指标时所需要的数据, 制导系统的攻角指令平稳度所评价指标针对飞行器整个过程的攻角指令变化情况, 此指标是提取过程中攻角指令数据列, 然后计算数据的方差获得。

由仿真数据来计算指标值。攻角指令平稳度根据攻角指令的方差值来界定, 选择计算方法为方差计算, 计算数据列的方差值。

$$V = \sum_{i=1}^n \left(\alpha_c[i] - \frac{\sum_{j=1}^n \alpha_c[j]}{n} \right)^2 \quad (14)$$

式中: V 为指标值; t 为仿真时间; α_c 为攻角指令; n 为数据长度; h 为仿真步长。

根据上述公式仿真计算得到指标值为 4 521.7。

为了得到统一化的评分结果, 需要选择标准化函数, 这里我们希望攻角指令越平稳, 打分越高, 即评估分值应该随着方差的增大而降低。选择单调递减的标准化函数, 设置上下边界值, 得到标准化结果为 78.2, 即单项评估分值。

(2) 指标权重确定

根据上文所提出综合方法为非根指标分配权重, 首先构造同父指标的指标之间两两比较矩阵。以过程约束的三个指标为例, 得到各准则下的判断矩阵如表 1~3。并对表中判断矩阵进行一致性检验, 若未通过一致性检验, 则需重新分配权重直到通过为止。

根据上文提出的多准则权重确定模型, 得到指标权重向量如表 4。

表 1 相对重要程度判断矩阵

指标	过载约束	动压约束	驻点热流约束
过载约束	0.5	0.7	0.7
动压约束	0.3	0.5	0.5
驻点热流约束	0.3	0.5	0.5

表 2 指标分辨率判断矩阵

指标	过载约束	动压约束	驻点热流约束
过载约束	0.5	0.5	0.5
动压约束	0.5	0.5	0.5
驻点热流约束	0.5	0.5	0.5

表 3 数据可靠性判断矩阵

指标	过载约束	动压约束	驻点热流约束
过载约束	0.5	0.5	0.5
动压约束	0.5	0.5	0.5
驻点热流约束	0.5	0.5	0.5

表 4 综合权重向量

	过载约束	动压约束	驻点热流约束
权重	0.44	0.28	0.28

根据上文提出的变权函数, 对得到的权重向量进行变权调整。指标评分情况如表 5 所示, 依据均衡函数得到变权之后的权重向量如表 6。

表 5 评分结果

	过载约束	动压约束	驻点热流约束
评估分值	71.364 760	85.478 32	91.589 131

表 6 变权结果

	过载约束	动压约束	驻点热流约束
权重	0.53	0.235	0.235

(3) 综合计算

如上文所述方法,将指标体系中每个底层指标值进行无量纲化,并将每层指标都进行相应的权重分配,得到各底层指标评估分值和各层指标的权重向量,自下向上逐层进行加权综合计算,最终得到评估结果,对系统综合评估结论和后续评估分析提供了数据支撑。

另外,在权重分配结果中变权均衡函数对分值低的指标起到了惩罚和放大的作用,以此对系统全面性和均衡性提出了更高的要求。

4 结论

本文为飞行器制导控制系统建立了较为完整的层次化的制导控制系统性能评估指标体系。依据所提出的多准则变权综合方法对飞行器制导控制系统进行了综合评估。

所提出方法的优势在于,考虑了飞行器数据可靠性和指标分辨率等因素,使评估指标定权更为科学;另外变权重综合方法着重考查了系统的均衡性,有效地反映出系统的“短板”,避免了较差环节被其它指标淹没。

更为全面、合理的指标体系及相应的指标算法是下一步研究的重点,此外软件功能也会逐步完善,以便后续评估研究工作的开展。

参考文献:

- [1] 傅若玮, 宋执环. 控制系统性能评估的研究现状与展望[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2009, 37(增1): 226-229.
Fu R W, Song Z H. Control systems performance assessment: a survey and prospect[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition), 2009, 37(S1): 226-229.
- [2] Hanson J. Advanced guidance and control project for reusable launch vehicles[C]// AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit. 2000: 1-10.
- [3] Rea J R, Putnam Z R. A comparison of two Orion skip entry guidance algorithms[C]// AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit. 2007: 6424-6442.
- [4] Hanson J M, Jones R E. Test results for entry guidance methods for space vehicles[J]. Journal of guidance, control, and dynamics. (S0731-5090), 2004, 27(6): 960-966.
- [5] 宋贵宝, 吉礼超, 刘冬. 防空导弹制导系统综合效能评估指标体系研究[J]. 战术导弹技术, 2009, 5: 11.
Song G B, Ji L C, Liu D. Research on Comprehensive Effectiveness Evaluation Criteria System of Guidance and Control System of Anti-aircraft Missile[J]. Tactical Missile Technology, 2009, 5: 11.
- [6] 汤锦祖, 张欣光. 高超声速飞行器滑翔再入性能评估[J]. 火力与指挥控制, 2012, 37(8): 120-123.
Tang J Z, Zhang X G. Research on Performance Evaluation for Hypersonic Reentry Glide Vehicle[J]. Fire Control & Command Control, 2012, 37(8): 120-123.
- [7] 苏为华. 论统计指标的构造过程[J]. 统计研究, 1996 (5): 34-37.
Su W H. The construction process of statistical indicators[J]. Statistical Research, 1996(5): 34-37.
- [8] 马卫华. 高超声速飞行器制导与控制性能评估方法[J]. 航天控制, 2012, 30(4):7-12.
Ma W H. Research on Evaluation Method of Guidance and Control Performance for Hypersonic Vehicle[J]. Aerospace Control, 2012, 30(4):7-12.
- [9] 李洪兴. 因素空间理论与知识表示的数学框架(VIII)——变权综合原理[J]. 模糊系统与数学, 1995, 9(3): 1-9.
Li H X. Factor space theory and mathematical framework of knowledge representation (VIII)——Variable weight synthesis principle[J]. Fuzzy Systems and Mathematics, 1995, 9(3): 1-9.
- [10] 汪培庄. 模糊集与随机集落影[M]. 北京: 北京师范大学出版社, 1985: 34-50.
Wang P Z. Fuzzy Sets and Projectable Random[M]. Beijing: Beijing normal university press, 1985: 34-50.
- [11] 张忠, 方可, 杨明. 基于群组 AHP 的复杂仿真系统可信度评估方法[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(11): 2569-2572.
Zhang Z, Fang K, Yang M. Method for complex simulation credibility evaluation based on group AHP[J]. Systems Engineering and Electronics, 2011, 33(11): 2569-2572.