doi:10.11887/j.cn.202001024 http://journal.nudt.edu.cn

海洋环境监测平行系统优化融合*

苏振东[1],杨瑞平[2],王飞跃[1]
(1. 中国科学院大学,北京 100190;2. 海军研究院,北京 100161)

摘 要:多个海洋环境监测系统之间存在的功能冗余导致资源浪费和不必要的资金投入,因此应将各个系统优化融合成有机整体来节约海洋环境监测的资源和成本。将海洋环境监测系统按照功能划分为不同的模块,在线性规划融合的基础上引入熵方法,以成本和效能指标为主要对象,通过合理分配,在确保系统优化融合后监测能力不降低的同时,尽量减少建设成本。

关键词:平行监测体系;优化融合;线性规划;熵方法
中图分类号:TN95 **文献标志码**:A **文章编号**:1001-2486(2020)01-170-06

Optimum fusion of marine environment monitoring parallel system

SU Zhendong[1], *YANG Ruiping*[2], *WANG Feiyue*[1]
(1. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. Naval Research Academy, Beijing 100161, China)

Abstract: The functional redundancy between multiple marine environmental monitoring systems leads to resource waste and unnecessary capital investment. Therefore, the systems should be integrated optimally into an organic whole to save resources and costs of marine environmental monitoring. In light of this, the Entropy method was introduced on the basis of linear programming and the marine environmental monitoring system was divided into different modules according to functions. Taking cost and efficiency index as the main object and through reasonable allocation, the construction cost can be reduced as far as possible while ensuring that the monitoring capability after optimization and integration is not reduced.

Keywords: parallel monitoring systems; optimum fusion; linear programming; entropy method

两个或两个以上的海洋环境监测系统,以任务为牵引,以通信网络为介质,有机组合成海洋环境监测体系。为认识和掌握海洋环境特点和变化规律,各级政府和各个部门都投入大量经费建立了形式多样的海洋环境监测系统,由此形成了一个又一个的“烟囱”。一方面,造成了资源的极大浪费,另一方面,对海洋自然环境带来了极大破坏。解决该问题的根本出路是:在国家层面,针对各海洋环境监测重点区域,统筹该区域的海洋环境监测系统建设,实现不同系统之间的资源信息共享,形成海洋环境监测体系。

海洋环境监测体系中的各个系统往往属于不同的部门,难以同步开展建设,更难以一次性投资建成。因此,在各海洋环境监测系统建设之前,或者存在其他海洋环境监测系统的情况下建设新的海洋环境监测系统之前,海洋领域投资建设管理决策部门应站在全局角度,从体系优化的角度对各个系统的能力进行统筹,在统筹的基础上提出新系统的建设方案,既满足各个部门对本单位投资建设海洋环境监测系统的能力期望,同时尽可能避免出现监测区域过度重叠、监测能力过度重复的现象。要实现对各个系统的统筹,应搭建各个海洋环境监测系统建设方案的平行系统,形成海洋环境平行监测体系,具体的方案策略在文献[1]中有详细描述,这里不再赘述。本文在海洋环境平行监测体系运行基础上,构建优化融合模型对各个海洋环境监测系统进行优化融合和体系评价,使海洋环境监测体系的各个系统在满足预定能力要求的基础上,尽量减少节点数量和观测设备的数量,以节约整体资源和运行成本。

1 基本思路

首先,分析不同海洋环境监测系统建设方案,对这些方案的覆盖区域、设施设备和网络连接等进行简单的叠加,形成初始海洋环境监测体系。

* **收稿日期**:2019-01-05
基金项目:国家自然科学基金资助项目(41605070)
作者简介:苏振东(1974—),男,河北保定人,博士研究生,E-mail:13601351829@163.com;
杨瑞平(通信作者),男,副研究员,博士,硕士生导师,E-mail:naasim@126.com

然后,构建初始海洋环境监测体系的平行系统,形成海洋环境平行监测体系。接着,将海洋环境平行监测体系划分为明确功能区别的各个子系统,每个子系统包含对应的设备。进一步,以体系和其中的这些子系统为基础开展系统优化融合。优化融合为最优体系并对优化融合结果进行评价,在体系层面优化海洋监测资源分配方案,同时确保优化融合后的各个系统监测效能不降低,并减少运行成本。

在系统优化融合过程中引入熵方法以追求系统的有序性,用熵值法得出各个系统的权重。最后,运用线性规划得到不同设备在优化融合后的海洋环境平行监测体系中所占的比重,也就得到了优化融合后的海洋环境平行监测体系中各种监测设备类型和数量分配的方案。

熵是系统无序程度的度量,熵方法在决策融合与信息融合有关的问题中有着较为广泛的应用。文献[2]使用熵方法实现传感器系统的决策融合以及导航系统的信息融合,使用系统融合率来表征融合系统的信息利用率,通过求联合熵的最小值点来确定系统融合率的最大值点,最终推导出信息利用率最高的融合算法。文献[3]使用熵方法进行非线性融合体系的评测,使用熵理论系统构建媒体融合的指标体系,并采用熵值法确定融合体系中不同维度的权重,最终获得各地区的融媒体发展指数。而随着机器视觉的兴起,文献[4]将熵方法应用到图像合成领域。考虑海洋监测体系的特点,可采用线性系统方法对其进行融合并利用熵方法进行评价。

2　体系融合模型

2.1　体系融合熵的概念

体系融合熵是基于普通物理学中的概念以及管理熵的相关定义,结合体系融合的特点而提出,是指在多个系统融合为体系的过程中,由于系统优化融合导致体系的有序性或无序性增大或减小的一种度量方式。熵的增加代表体系无序性的增加,反之则代表体系无序性的减小。确认系统融合为最优结构体系的依据是找到体系融合熵为最小值时的体系结构。

对于非线性体系,体系内各系统之间存在着非线性关系,很难依据熵的特征进行精确计算。海洋环境监测体系中各系统的线性关系强于非线性关系,故可以根据各系统的观测数据,采用熵方法构建系统优化融合模型。

系统的发展存在着阶段性和区域性差异,系统优化融合并不是要替代体系中的各系统。系统越成熟,其构成越复杂,系统内部熵值越大。另外,体系内不同系统的熵也不相同,受到其他系统影响越大、越传统的系统熵值越大;反之,受其他系统影响不大、善于独立完成任务的系统熵值较小[4]。

体系在熵值增加过程中之所以能够得以稳定持续发展,主要得益于体系在不断地完善与丰富,带来的负熵输入不断增大,系统调适能力也逐步增强。目前的体系评价方法有层次分析法、“三域”影响力评测法和熵值法等。熵值法在某种程度上可以尽量避免出现评价时指标权重主观偏向的问题,可以很好地反映负熵的输入情况[3]。

利用熵值法可以较好地确定评价指标体系的权重,从而计算出各维度和各项指标的评价得分。计算过程大体包括如下几步:一是指标无量纲化处理,二是通过信息熵公式计算出信息熵值,三是根据信息熵值计算效用值,四是根据效用值计算各维度和各指标权重,五是根据指标权重计算各维度和各项指标的最终得分。

2.2　海洋环境监测体系优化模型

图 1 给出了系统优化融合模型的流程框图。

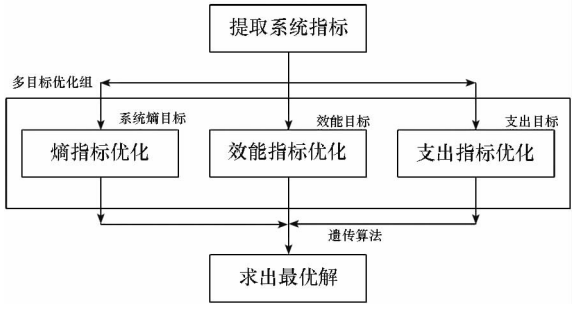


图 1　系统优化融合模型流程框图

Fig. 1　Flow chart of system optimization fusion model

系统优化融合可以从体系熵、体系效能与体系支出三个不同的角度进行分析。

2.2.1　基于体系熵的分析

在海洋环境监测系统优化融合过程中,并不是每一种环境监测设备都会一直启用,也并不是每一种启用的设备都会一直采取简并模式(即各系统共用一套监测设备,各自提取出自己需要的数据)。设第 n 种监测设备启用的概率为 $p_n(0\leqslant p_n\leqslant 1)$,在第 n 种监测设备启用的情况下采用简并模式的概率为 $q_n(0\leqslant q_n\leqslant 1)$。

体系熵值的数学模型为:

$$S_0 = \sum_{h=1}^{r} K_h S_h \tag{1}$$

式中：S_0 表示体系的熵值；$1 \leqslant h \leqslant r$，$r$ 为该体系中启用的监测设备的数量；K_h 为每种设备的权重；S_h 为该种设备产生的熵值。

根据熵值的定义，一个对象的熵值 S 可表示为：

$$S = \sum_{i=1}^{n} -P_i \ln P_i \tag{2}$$

式中，n 为该对象所拥有状态的总数，P_i 表示第 i 个状态出现的概率。

对监测设备的状态进行分析，每个监测设备都存在三种状态：不启用；启用且采用简并模式；启用但不采用简并模式。由此可将熵值 S_h 表示为：

$$S_h = -\{p_h q_h \ln(p_h q_h) + p_h(1-q_h)\ln[p_h(1-q_h)] + (1-p_h)\ln(1-p_h)\} \tag{3}$$

以 K_0 表示体系运行时的熵系数，综合式(1) ~ (3)，体系的熵值即可表示为：

$$S_0 = \sum_{h=1}^{r} K_h S_h = -K_0 \sum_{h=1}^{r} \{p_h q_h \ln(p_h q_h) + p_h(1-q_h)\ln[p_h(1-q_h)] + (1-p_h)\ln(1-p_h)\} \tag{4}$$

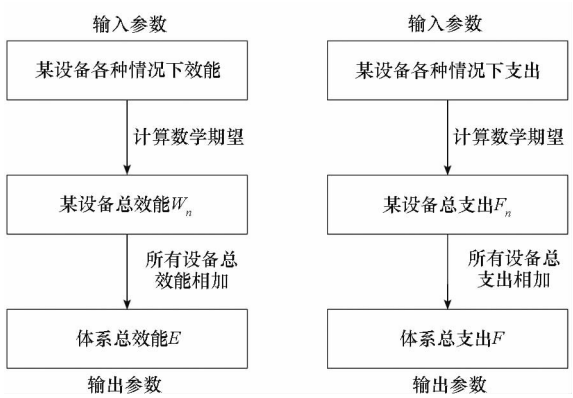
2.2.2 基于体系效能与体系支出的分析

假设该监测体系中有 k 个系统需要进行优化融合，体系中能实现某一功能的监测设备有 l 种。

对于第 n 型监测设备，采用该型设备的各个系统，其观测的区域多多少少会有所重叠，所以在计算总效能时，需要去掉各个系统效能中重叠的部分，即冗余效能。分析体系效能如下：冗余效能为 C_n，即各个监测系统使用此型设备时，共同需要的数据与结果及其带来的收益；在采用简并方案时，第 m 个系统使用此型设备所产生的效能为 $A_{n,m}$；在不采用简并方案，所有系统使用各自的设备观测时，第 m 个系统使用此型设备所产生的效能为 $B_{n,m}$；在不启用时，该型设备产生的效能为 0。该型设备在不同情况下产生的效能乘以该情况的启用概率之后相加，得到该型监测设备产生的效能的数学期望 W_n；所有的监测设备产生效能的数学期望之和，即为体系融合后的总效能 E。

对于第 n 型设备，在使用简并方案时，可认为整个体系共用一套该型设备；而不采用简并方案时，体系中每一个需要使用该型设备的系统均使用各自的一套该型设备。分析体系中支出如下：在采用简并方案时，使用此型设备的支出为 D_n；在不采用简并方案，所有系统使用各自的设备进行观测时，第 m 个系统的支出为 $E_{n,m}$；在不启用时，该型设备产生的支出为 0。该型设备在各种情况下运转支出乘以该情况的发生概率之后相加，即得到该型设备运转支出的数学期望 F_n；所有设备支出的数学期望之和为融合后体系的总支出 F。

根据以上假设参数，图 2 ~4 给出了体系总效能与总支出的计算流程及计算框图。



(a) 体系效能 (b) 体系支出

(a) Systems efficiency (b) Systems expenditure

图 2 体系效能与支出计算流程图

Fig. 2 Flow chart of system efficiency and expenditure calculation

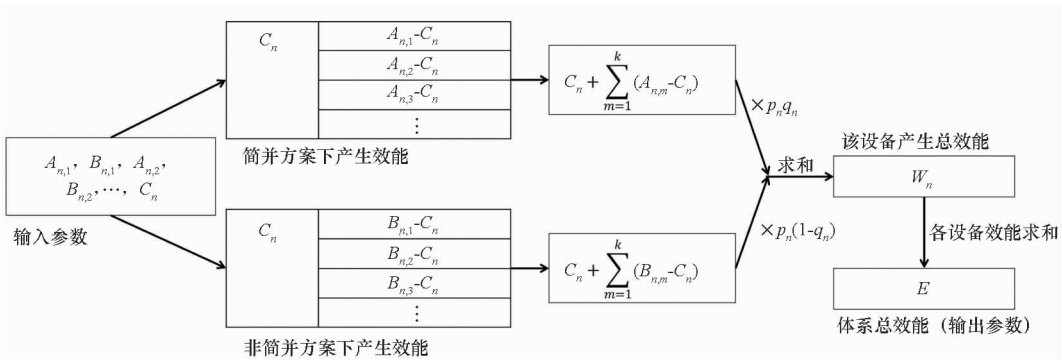


图 3 体系总效能计算框图

Fig. 3 Block diagram for calculating the total effectiveness of the systems

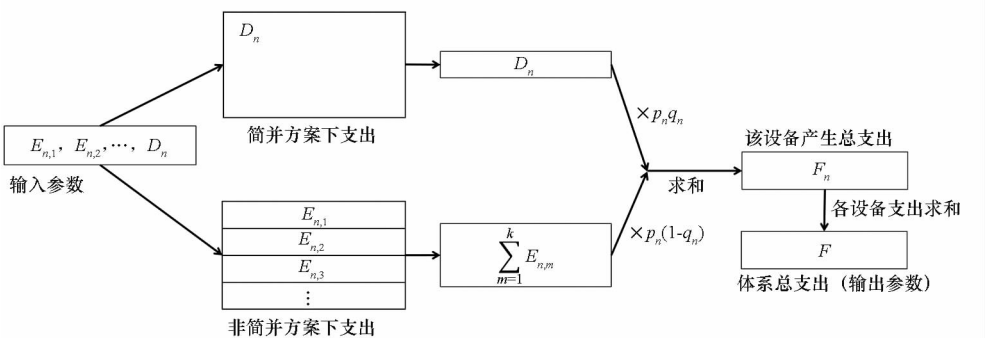


图 4　体系总支出计算框图

Fig. 4　Block diagram for the total expenditure calculation of the systems

根据以上框图,可以得到如下数学模型:

1)体系总效能的数学模型:

$$E = \sum_{n=1}^{l} W_n \tag{5}$$

$$W_n = (1-p_n)\times 0 + p_n\{q_n[C_n + \sum_{m=1}^{k}(A_{n,m} - C_n)] + (1-q_n)[C_n + \sum_{m=1}^{k}(B_{n,m} - C_n)]\} \tag{6}$$

2) 体系总支出的数学模型:

$$F = \sum_{n=1}^{l} F_n \tag{7}$$

$$F_n = p_n[(q_n D_n) + (1-q_n)(\sum_{m=1}^{k} E_{n,m})] + (1-p_n)\times 0 \tag{8}$$

3　多目标融合分析

海洋环境监测系统优化融合为最优时,体系熵与体系总支出最小,且达到体系总效能最大。因此建立式(9) 所示基本模型:

$$\begin{cases} \min: S_0 = -K_0 \sum_{n=1}^{l} \{p_n q_n \ln(p_n q_n) + p_n(1-q_n)\ln[p_n(1-q_n)] + (1-p_n)\ln(1-p_n)\} \\ \max: E = \sum_{n=1}^{l} (p_n\{q_n[C_n + \sum_{m=1}^{k}(A_{n,m} - C_n)] + (1-q_n)[C_n + \sum_{m=1}^{k}(B_{n,m} - C_n)]\} + (1-p_n)\times 0) \\ \min: F = \sum_{n=1}^{l} \{p_n[(q_n D_n) + (1-q_n)(\sum_{m=1}^{k} E_{n,m})] + (1-p_n)\times 0\} \\ \text{s.t.} \begin{cases} 0 \leqslant p_n \leqslant 1 \\ 0 \leqslant q_n \leqslant 1 \end{cases} \end{cases} \tag{9}$$

输入各类参数,则可以计算出在熵最小的基础上实现系统优化融合的最优解。

在多个系统的优化融合中,考虑同一目标或功能会用不同的设备实现,故把每个系统均拆分成若干能实现不同功能的功能单元。而系统优化融合实质上也是各个系统功能相近或相同的功能单元的融合,所以以下的分析均以各个系统的某一功能单元为对象进行分析。考虑系统的支出主要体现在运行设备时消耗的资源以及维护设备时所需的人力物力等运行及维护成本,所以下文中用成本来代表系统的支出。

融合后的功能单元中,假设所有的设备照常运行,观测结果则来自多个设备观测结果的决策融合。

设 q_i 为该功能单元采用简并模式的概率,则该功能单元的成本可表示为:

$$F_0 = \sum_{i=1}^{n} [q_i D_i + (1-q_i)E_i] \tag{10}$$

其中,D_i 表示进行简并模式时该单元的成本,E_i 表示不进行简并模式时该单元的成本。显而易见,$D_i < E_i$,所以在系统优化融合时,尽量多地采用简并模式(即增大 q_i),总成本便会有可观的减少;但考虑突发事件的存在,需要设定一定的 $1-q_i$ 值,即在突发事件时可保证有足够数量的设备应对不测。在式(10) 中,D_i 受融合策略的影响,以下主要说明融合策略以及效能指标优化和熵指标优化。

4　熵值法体系优化

4.1　熵值法评价

熵是系统无序程度的度量,信息熵值法可以用来判断某指标的离散程度[2],对以该指标为中心的系统做出资源等的分配指导。

设某一待评价体系有 m 个指标,有 n 个样本值,则指标数据矩阵为 $\boldsymbol{B} = (b_{ij})_{m\times n}$。对于每一个指标,样本值的波动越大,最终得到的熵值也越

大,即表明样本值的影响因素越多,则对其进行资源分配也有更大的意义;反之,如果某一指标的所有样本值都相等,则对其进行资源分配也就失去了意义。

熵值法评价的一般过程如下:

1) 对各指标同度量化以方便计算第 j 项指标下的第 i 个指标值的比重 p_{ij}:

$$p_{ij} = \frac{b_{ij}}{\sum_i b_{ij}} \tag{11}$$

2) 计算熵值 e_j:

$$e_j = -k\sum_i p_{ij}\ln p_{ij} \tag{12}$$

其中,$k = \frac{1}{\ln n}$。

3) 计算第j项效用值。对一项指标,指标的波动越小,熵值就越小,对应的效应值就越小,所以有:

$$g_j = 1 - e_j \tag{13}$$

4) 确定权重:

$$a_j = \frac{g_j}{\sum g_j} \tag{14}$$

5) 综合评价值:

$$v_i = \sum_{j=1}^{n} a_j p_{ij} \tag{15}$$

4.2 体系优化

在效能与熵方面,考虑系统优化融合前各个系统建设方案有所不同,选用的设备的灵敏度与精确度等也各自不同。从文献[4]中可知:对同一目标的组合观测系统,用尽可能多的子系统来进行融合,能获得更多的观测信息;而且,当各子系统提供的信息相关性越小、信息的利用率越高时,系统输出的不确定度就越小,观测信息的随机性也越小。也就是说:在体系融合过程中,既要通过多系统进行体系融合获得更多的信息,又要通过合理分配,提高获得的信息质量。所以,对于海洋环境监测体系来说,可以通过设定不同的参考权重来调整体系监测能力,提高监测信息质量。

可以证明,海洋环境监测体系通过 Shannon 信息熵函数处理后得出的决策方案的正确率与观测概率以及影响权的分布有直接关系[5],而信息熵函数的求解和处理过程是一个引入负熵的过程[6]。不妨将信息熵函数的求解过程以下面的形式进行简化。

设一个功能单元分为 m 个维度,代表这个功能单元所实现功能的不同方面,如可用相似设备观测风速和风向两方面。引入效能指标,以一个常数代表某种设备实现这一功能的能力,其中越高的效能指标即代表此设备在这方面观测可取得的精确度及灵敏度等越高。而这种效能指标需要在科学详细的评判标准下,在设备的灵敏度和精确度的基础上进行人工评定[7]。不妨设体系中有三个功能单元,能力维度分为两种,融合前体系效能指标的矩阵设定如下:

$$\boldsymbol{B}_i = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \\ b_{31} & b_{32} \end{bmatrix} \tag{16}$$

通过式(11) ~ (14)的过程可得到该单元的维度权重为:

$$\boldsymbol{a} = (a_1, a_2) \tag{17}$$

其中,熵值表示该维度的无序程度。引入性能更佳的设备进入该体系,可以为体系引入负熵,以增加体系的稳定性。

设三个系统的决策影响权为:

$$\boldsymbol{W} = (w_1, w_2, w_3) \tag{18}$$

则融合后的体系功能指标为:

$$w_1(a_1b_{11} + a_2b_{12}) + w_2(a_1b_{21} + a_2b_{22}) + w_3(a_1b_{31} + a_2b_{32}) \tag{19}$$

两个维度的功能指标分别为:

$$(b_{11}w_1 + b_{21}w_2 + b_{31}w_3, b_{12}w_1 + b_{22}w_2 + b_{32}w_3) \tag{20}$$

将体系的总功能指标最大化作为目标、将体系两个维度的功能指标分别到达某一值作为约束条件即可进行线性规划,从而得出在仅考虑效能的情况下最佳的决策影响权值。在实际设计过程中,决策影响权高的系统可作为融合中心;决策影响权低的系统可以减少运行的频率,甚至待机,其观测数据一般用作印证。

若将两个功能维度的最小功能指标设置为:

$$M_{\min} = (m_1, m_2) \tag{21}$$

则整体要求可设置为以下条件:

$$\begin{cases} \max: w_1(a_1b_{11} + a_2b_{12}) + w_2(a_1b_{21} + a_2b_{22}) + \\ \qquad w_3(a_1b_{31} + a_2b_{32}) \\ b_{11}w_1 + b_{21}w_2 + b_{31}w_3 \geqslant m_1 \\ b_{12}w_1 + b_{22}w_2 + b_{32}w_3 \geqslant m_2 \\ 0 \leqslant w_1, w_2, w_3 \leqslant 1 \\ 0 \leqslant w_1 + w_2 + w_3 \leqslant 1 \end{cases} \tag{22}$$

基于以上条件可求得最佳的决策影响权为:

$$\boldsymbol{W}_{\text{best}} = (w_{1\text{best}}, w_{2\text{best}}, w_{3\text{best}}) \tag{23}$$

以此作为系统融合的权重,可以求出融合后系统处于简并模式下的成本。

在此处,权重的分配对应在现实中可以是监测系统资源的获得量。权重高的系统分配到较多的资源,而权重小的系统仅分配维持运行的资源以及紧急使用的资源。设系统 i 在该功能单元简并模式下的成本为系统 i 的权重 w_i 与系统 i 单独运行的成本 E_i 的函数 $D_i(w_i,E_i)$,则成本计算有以下结果:

$$F_0 = \sum_{i=1}^{3}[q_iD_i(w_i,E_i) + (1-q_i)E_i] \tag{24}$$

而节省的比例则为:

$$1 - \frac{\sum_{i=1}^{3}[q_iD_i(w_i,E_i) + (1-q_i)E_i]}{\sum_{i=1}^{3}E_i} \times 100\% \tag{25}$$

也可以从成本最小化的角度进行规划:

$$\begin{cases} \min: \sum_{i=1}^{3}[q_iD_i(w_i,E_i) + (1-q_i)E_i] \\ b_{11}w_1 + b_{21}w_2 + b_{31}w_3 \geqslant m_1 \\ b_{12}w_1 + b_{22}w_2 + b_{32}w_3 \geqslant m_2 \\ 0 \leqslant w_1,w_2,w_3 \leqslant 1 \\ 0 \leqslant w_1 + w_2 + w_3 \leqslant 1 \end{cases} \tag{26}$$

由此最终亦可求得合适的决策影响权重。

5　结论

从成本、效益、熵值等方面对系统优化融合进行建模与分析,并提出了一套基于熵值法和线性规划的系统优化融合方案。基于此方案的分析,系统设计时的目标导向对系统建设方案会产生很大影响,所以在系统优化融合前应尽量做好各个系统建设方案的评估与分析,明确各个系统的功能和侧重点,尽可能提高体系的效能指标,降低系统的能力冗余度。

参考文献(References)

[1] 苏振东, 杨瑞平, 王飞跃. 海洋环境平行监测体系架构及应用[J]. 指挥与控制学报, 2018, 4(1): 32 – 36.
SU Zhendong, YANG Ruiping, WANG Feiyue. Parallel marine environment monitoring systems: architecture and application [J]. Journal of Command and Control, 2018, 4(1): 32 – 36. (in Chinese)

[2] 张成良. 基于熵理论建构的融媒体指标体系建构与评测[J]. 新媒体与社会, 2017(2): 97 – 120.
ZHANG Chengliang. Construction and evaluation of convergence media index system based on entropy theory[J]. New Media and Society, 2017(2): 97 – 120. (in Chinese)

[3] 李建勋, 柯熙政. 关于组合导航系统中的熵理论[J]. 弹箭与制导学报, 2006, 26(SA): 1092 – 1094.
LI Jianxun, KE Xizheng. Research on entropy theory in integrated navigation system [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2006, 26(SA): 1092 – 1094. (in Chinese)

[4] Luo B, Khan M M, Bienvenu T, et al. Decision-based fusion for Pansharpening of remote sensing images [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2013, 10(1): 19 – 23.

[5] 胡昌振, 谭惠民, 石岩. 多传感器系统最优决策融合的熵方法[J]. 北京理工大学学报, 1997, 17(1): 14 – 18.
HU Changzhen, TAN Huimin, SHI Yan. Entropy methods for optimal decision fusion in multi-sensor systems[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 1997, 17(1): 14 – 18. (in Chinese)

[6] Piplani R, Wetjens D. Evaluation of entropy-based dispatching in flexible manufacturing systems [J]. European Journal of Operational Research, 2007, 176(1): 317 – 331.

[7] Yu S, Efstathiou J. An introduction of network complexity[C]// Proceedings of Manufacturing Complexity Network Conference, Cambridge, 2002: 249.