

多星测控系统资源配置效能评价指标体系研究

展跃全 赵育善

(北京航空航天大学)

摘要 对资源配置效能进行评价,是多星测控过程中对航天器提供测控支持的一个重要环节。综合考虑卫星用户、地面站资源拥有方和测控中心控制方等三方观点,可以提出主要评价指标,建立主要多星测控系统资源配置效能评价指标体系,并利用层次分析法(AHP)对诸多影响因素进行初步定性、定量分析,划分层次结构图,给出相关数学模型,同时通过实例分析对模型和算法进行验证。

关键词 多星测控 资源配置 评价指标 层次分析法

随着我国航天事业的发展,特别是越来越多的中低轨道卫星进入太空,使得航天测控设备特别是通用型航天测控设备面临多星同时过站、同时要求测控支持的越来越严重的形势。测控网中的测控资源所能支持的卫星数量总是有限的。当测控网同时支持多颗卫星测控服务时,这些测控源就需要合理的调度、分配,以便尽量满足各个卫星的需求。当所支持的卫星数量超过一定限度时,各卫星对测控资源的需求就会产生冲突,出现争用测控资源,一些卫星的测控需求无法得到满足。

由于地面站设备费用较高,如何经济、科学、合理地确定各类设备的数量及其在各地面站的分布,对设备进行最优调度,实现地面系统资源共享与合理分配,提高地面设备的使用率,充分发挥地面站资源投资效益,最大限度地满足各类卫星任务的需要,是一个迫切需要研究解决的重大问题。

多星测控系统是个复杂动态系统,对地面站进行配置优化时,难于给出其解析模型,即难于给出配置效益(目标矢量 Y)与配置方案(决策矢量 X)之间的解析关系,因此该问题属于黑箱或灰箱问题。解决地面系统资源配置优化问题需要在卫星任务确定的前提下,不断改变地面资源的配置,以便搜索使系统整体收益最大的地面资源配置方案。在搜索过程中,每进行一步便需要对当前资源配置条件下的资源能力进行一次评估,来判断该资源配置的优劣。可见,如何

对系统资源配置方案进行有效的评估是前提。

本文从卫星用户需求观点、地面站资源拥有方观点和测控中心控制方观点等三个方面出发,根据制定评估指标时遵循的原则,提出了对多卫星资源配置进行评估的指标,建立了效能评价指标体系,并运用层次分析法对指标间权重的确定进行了研究。

1 评价指标体系

1.1 建立评价指标体系的原则

评价指标体系是对系统进行评价的基础和依据,评价指标体系是否合理、完整、可测、无冗余,直接关系到最后的评价结果。评估指标体系应该既能反映实际问题对系统的功能需求,又能反映不同层次评价指标之间的相互关系。选择合适的指标体系是进行系统评估的关键。在建立地面站系统资源配置评价指标体系时应遵循:

(1)科学性原则。指标的定义和计算应能真实反映系统资源配置效能的影响因素;

(2)独立性原则。尽可能不重复考虑评估问题中的某一个方面;

(3)完备性原则。所建立的指标体系覆盖范围要广,要能从各个方面综合反映资源配置效能;

(4)一致性原则。建立评价指标体系一方面要能反映系统资源配置效能的客观实际情况,另一方面要能反映出主观上对不同评价指标的偏好,并尽量

使二者保持一致。

1.2 评价指标体系

多星测控系统资源配置方案与具体的任务背景紧密联系的,因此对系统资源配置方案进行效能评价可考虑通过在相同的调度策略下基于不同配置方案产生的最优调度方案进行评价,进而评价配置方案的优劣。

影响多星测控系统资源配置的因素主要有三个方面:卫星用户、地面站和测控中心。从卫星用户的角度出发,主要关心地面资源能否满足其测控需求;地面站主要关心测控设备的使用效率;测控中心主要关心测控覆盖率和任务满意率。综合三方对地面站资源配置方案效能的偏好,依据建立评价指标体系的原则,通过对众多评价指标的筛选,建立资源配置方案效能评价指标体系。

1.2.1 反映卫星用户观点的指标

对卫星的服务包括测控和数据接收两种,“对卫星服务的满足程度”从地面站系统对所服务的所有卫星的综合情况来反映地面系统资源配置效能,是反映地面站系统资源配置效能的重要指标之一。设卫星数量为 N ,具体的各分指标计算方法如下:

(1)服务总时间比:卫星服务时间是卫星用户比较关心的问题,比如对侦察卫星,要求在过站时尽可能长时间地传输数据。该指标定义为卫星用户申请的服务时间与实际得到的服务时间之间的比值,反映了卫星用户对地面站资源提供服务的总体满意度。

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{\sum_{i=1}^N T_i} \quad (1)$$

其中, t_i 为卫星 i 得到的服务时间; T_i 为卫星申请的服务时间;

(2)服务总圈数比:由于近地卫星轨道高度低,地面站对其可跟踪弧段比较短,为了保证精密测轨,地面站需要提供足够的测控圈数。该指标定义为卫星运行的测控圈数与实际得到的服务圈数之间的比值,反映了卫星用户对地面站资源提供的测控圈数的满意度。

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^N q_i}{\sum_{i=1}^N Q_i} \quad (2)$$

其中, q_i 为卫星 i 得到的服务圈数; Q_i 为卫星 i 运行圈数;

(3)平均每圈服务次数:平均每圈服务次数用于衡量地面站对卫星提供服务的频率,这是数传任务用户和测控任务用户都很关心的指标。该指标定义为各卫星在星历时间内每圈服务次数的总和,即:

$$\chi = \frac{\sum_{i=1}^N p_i}{\sum_{i=1}^N P_i} \quad (3)$$

其中, p_i 为卫星 i 接受服务的总次数; P_i 为卫星 i 申请的测控总圈数;

(4)平均最大测控间隙:最大测控间隙反映了测控用户对地面站资源能力的需求,平均最大测控间隙定义为各卫星相邻服务间隔时间最大值的平均值,即:

$$t = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \max \{ t_{0,j+1,i} \sim t_{1,j,i} \} \quad (4)$$

其中, $t_{0,j+1,i}$ 为卫星 i 接受第 $j+1$ 次服务的开始时间; $t_{1,j,i}$ 为卫星 i 接受第 j 次服务的结束时间。

1.2.2 反映测控中心控制方观点的指标

从测控中心的角度来看,影响多卫星地面站资源配置效能的因素主要在于测站布局的合理性、调度任务的成功率等方面,具体的各分指标计算方法如下:

(1)测控覆盖率:测控站的测控覆盖范围决定了该站与卫星之间保持星地通信的空间和时间范围,为了保证飞行任务的完成,测控覆盖范围应该首先满足关键飞行事件的覆盖,如入轨段、交会对接、返回再入段等。该指标定义为测控弧段总长度与卫星飞行时间之比,飞行时间根据调度策略来定,比如调度计划期设定为一天,飞行时间即为一天。

$$\varepsilon = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{t_i}{T} \quad (5)$$

其中, t_i 为卫星 i 对地面站的可见时间总和; T 为卫星的飞行时间;

(2)任务满意率:在卫星用户提出的所有任务申请中,调度成功的任务申请包括那些没有设备冲突情况下调度成功的申请,又包括那些有设备冲突但通过具体冲突解决策略调度成功的申请。任务满意

率定义为调度成功的任务申请的百分比。

$$\phi = \frac{\sum_{i=1}^N l_i}{\sum_{i=1}^N L_i} \quad (6)$$

其中, l_i 为卫星 i 申请成功的任务数; L_i 为卫星 i 提出的任务申请数;

(3) 任务优先级总数: 在航天测控任务中, 不同航天器的优先级是不同的, 同一航天器的测控弧段的重要性也是不一样的。任务优先级由专家论证来决定, 当任务冲突时优先调度级别较高的任务。该指标是调度成功的任务优先级的综合, 在一定程度上反映了相同调度策略下不同地面站资源配置方案完成任务的能力。

$$K = \sum_{i=1}^N k_i \quad (7)$$

其中, k_i 为卫星 i 已调度成功任务优先级之和。

1.2.3 反映地面站资源拥有方观点的指标

从地面站资源拥有方来看, 关键是如何最大限度地提高地面设备的使用效率, 充分发挥地面应用系统的能力。达到经济合理地确定设备数量及其在各个地面站的分布的目的。设地面站数为 M , 设备台数为 K , 地面站 m 拥有的设备数为 K_m , 具体的各分指标计算方法如下:

(1) 平均设备利用率: 该指标是衡量地面站服务强度的指标, 体现了地面站的设备资源是否得到充分地应用, 其定义为所有地面站设备处于服务状态的工作时间总和与调度计划期的比值。工作时间为设备开关机起止时间, 包括设备预热、测控区间长度、换星调整工作参数耗时等。

$$\alpha = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \frac{1}{K_m} \sum_{i=1}^{K_m} t_{m,i} \quad (8)$$

其中, $t_{m,i}$ 为地面站 m 的第 i 个设备的工作时间;

(2) 设备可靠性: 是指在正常条件下设备自身的工作可靠性, 其定义为设备工作时间与设备正常工作及维修故障的时间和之间的比值, 设备故障时间包括设备正常维护所用时间。

$$\lambda = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \frac{1}{k_m} \sum_{i=1}^{k_m} \frac{TB_{m,i}}{TB_{m,i} + TF_{m,i}} \quad (9)$$

其中, $TB_{m,i}$ 为地面站 m 的第 i 个设备的正常工作时间; $TF_{m,i}$ 为地面站 m 的第 i 个设备的故障时间;

2 利用 AHP 法确定指标权重

在构成测控系统资源配置效能评价指标体系中各指标对系统配置方案效能的影响程度是不同的, 因此要对配置方案的效能作综合评价必须首先确定各指标的相对权重。指标权重一方面应该从客观的角度反映每个评价指标的相对重要性, 另一方面, 它又应反映决策者对各类评价指标主观上的相对重视程度。本文提出采用层次分析法来确定指标权重。

层次分析法(AHP)是一种定性与定量分析相结合的决策方法, 它将决策者对复杂对象的决策思维过程数字化。应用这种方法, 决策者可通过各元素之间简单的判断比较和简单计算, 就可以得出不同方案的权重, 为最佳方案的选择提供基础。

AHP 法解决问题的基本思路是从系统的层次性特征出发由高到低划分若干层次, 建立一个金字塔式的树状层次结构以描述元素之间的相互关系。根据对一定客观现实的判断, 对每一层次元素相对于上一层次元素的重要性给予定量表示, 利用数学方法确定表达每一层次的全部元素的相对重要性次序的权值, 通过排序结果, 对问题进行分析和决策。

2.1 建立递阶层次结构

根据问题的性质和要达到的总目标, 将问题分解成不同的元素, 并按照元素之间的相互影响, 将元素按不同的层次进行分类, 从而形成一个多层次的结构。

根据本文第一章的分析描述, 已经建立了递阶层次结构。目标层为多卫星地面站资源配置效能, 准则层为卫星用户、测控中心和地面站。

2.2 构造两两判断矩阵

在每一层次, 可按一准则, 通过该层元素之间的判断比较, 根据所比较两元素的重要程度, 按照 1~9 标度法形成判断矩阵, 通过计算矩阵的特征值和特征向量, 得出该元素对于该准则的权重。

假定上一层次元素 C_k 作为准则, 对下一层次元素 A_1, A_2, \dots, A_n 有支配关系, 本步骤使用 1~9 的比例标度, 对 A_1, A_2, \dots, A_n 进行两两比较, 得出判断矩阵 A :

$$A = (a_{ij})_{n \times n}$$

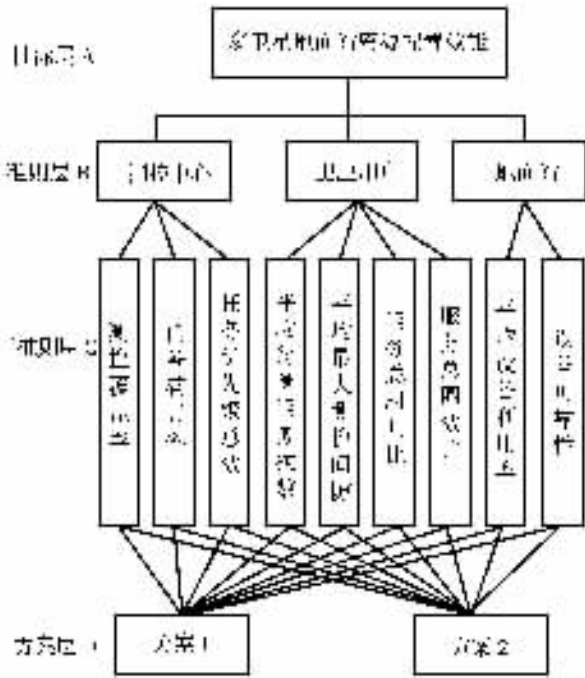


图 1 层次结构图

1~9 的标度方法是在心理学的研究基础上,将思维判断进行了量化。在区分事物质的差别时,人们总是使用相同、较强、强、很强、极端强的语言,再进一步细分,可以在相邻的两级中插入折中的提法,因此对于大多数决策判断来说 1~9 级的标度是适用的。心理学的实验表明,大多数人对不同事物在相同属性上差别的分辨能力在 5~9 级之间。

2.3 计算单一准则下的相对权重

本文采用特征根方法来进行排序权向量的计算。解判断矩阵 A 的特征根问题:

$$Aw = \lambda_{\max} w \quad (10)$$

这里 λ_{\max} 是 A 的最大特征根, w 是相应的特征向量。所得到的 w 经归一化后就可作为权重向量。由正矩阵的 Perron 定理可知, λ_{\max} 存在且唯一, w 由正分量组成。本文计算 A 的特征值,公式如下:

任取非零向量 $u_0 \in R^n$

$$\begin{aligned} \eta_{k-1} &= \sqrt{u_{(k-1)}^T u_{k-1}} \\ y_{k-1} &= u_{k-1} / \eta_{k-1} \\ u_k &= Ay_{k-1} \\ \beta_k &= y_{k-1}^T u_k \\ k &= 1, 2, \dots \end{aligned} \quad (11)$$

当 $|\beta_k - \beta_{k-1}| / |\beta_k| \leq \varepsilon$ (允许误差) 时, 迭代终止,

以当前的 β_k 作为 λ_{\max} , 以 y_{k-1} 作为 w 。

2.4 计算各层元素的组合权重

为了得到递阶层次结构中每一层次中所有元素相对于总目标的相对权重, 需要把第三步的计算结果进行适当的组合。这一步骤是由上而下逐层进行的。最终计算结果得出最低层次元素, 即决策方案优先顺序的相对权重。

假定已经计算出第 $k-1$ 层元素相对于总目标的组合排序权重向量 $a^{k-1} = (a_1^{k-1}, a_2^{k-1}, \dots, a_m^{k-1})^T$, 第 k 层在 $k-1$ 层第 j 个元素作为准则下元素的排序权向量为 $b_j^k = (b_{1j}^k, b_{2j}^k, \dots, b_{nj}^k)^T$, 其中不受支配(即与 $k-1$ 层第 j 个元素无关)的元素权重为零。令 $B^k = (b_1^k \dots b_m^k)$, 则第 k 层 n 个元素相对于总目标的组合排序权重向量由下式给出:

$$a^k = B^k a^{k-1} \quad (12)$$

更一般地, 有排序的组合权重公式:

$$a^k = B^k \dots B^3 a^2 \quad (13)$$

式中 a^2 为第二层次元素的排序向量, $3 \leq k \leq h$, h 为层次数。

2.5 一致性检验

在得到判断矩阵 A 时, 有时免不了出现判断上的不一致, 因而还需要利用一致性指标来检验。指标公式为:

$$\begin{aligned} CR &= CI / RI \\ CI &= (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) \end{aligned} \quad (14)$$

其中, RI 为平均随机一致性指标, 表 1 给出了 1~9 阶的判断矩阵的 RI 值。

表 1 平均随机一致性指标 RI 值

阶数	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

当 $CR < 0.1$ 或 $\lambda_{\max} = n, CI = 0$ 时, 认为判断矩阵具有满意的一致性, 否则需调整矩阵中的元素以使其具有满意的一致性。

对于递阶层次组合判断的一致性检验, 则有:

$$CI = \sum_{i=1}^m a_i CI_i, RI = \sum_{i=1}^m a_i RI_i, CR = CI / RI \quad (15)$$

其中, a_i 表示上一层元素 A_i 对于总目标的权重。

3 算例分析

设有 10 颗卫星,5 个地面站,每个地面站均配备一套测控设备,调度周期为 1 周,要完成的测控任务共计 200 个。为了确定地面站资源的配置优化方案,专家要求通过对各评价指标进行综合评价,为任务决策提供支持。

(1) 根据图 1 的递阶层次结构图分别构造各阶判断矩阵。

以目标层次 A 的元素为准则,按照 1~9 标度法,对准则层 B 中各元素进行比较,得到 A~B 层判断矩阵:

表 2 A~B 层判断矩阵

A	B ₁	B ₂	B ₃
B ₁	1	1	1
B ₂	1	1	1
B ₃	1	1	1

以目标层次 B 的元素 B_i 为准则,按照 1~9 标度法,对子准则层 C 中的元素 C₁、C₂、C₃ 进行两两比较,得到 B₁~C 层判断矩阵:

表 3 B₁~C 层判断矩阵

B ₁	C ₁	C ₂	C ₃
C ₁	1	1/5	1/3
C ₂	5	1	3
C ₃	3	1/3	1

相同的可以得到 B₂~C、B₃~C 判断矩阵,限于篇幅,不再列出。

(2) 根据判断矩阵求出最大特征值 λ_{max} 及其特征向量并归一化,并进行一致性校验。

以 B₁~C 层判断矩阵为例,可得出 C 层元素对 B₁ 测控中心的相对排序权重。

$$W = \begin{pmatrix} 0.1506 \\ 0.9161 \\ 0.3715 \end{pmatrix} \quad \begin{aligned} \lambda_{\max} &= 3.0385 \\ CI &= 0.0193 \\ RI &= 0.58 \\ CR &= 0.0333 \end{aligned}$$

CR=0.0333<0.1 表明判断矩阵具有满意的一致性。

相同的可以得到 B₂~C、B₃~C 判断矩阵的相对排序权重,限于篇幅,不再列出。

(3) 计算组合权重。

根据上一步得出的 B 层元素的排序向量,由公式(13)可求出 C 层元素相对于总目标的权重排序向量为:

$$\alpha^3 = (0.0870, 0.5290, 0.2145, 0.2338, 0.0591, 0.4537, 0.2631, 0.5478, 0.1826)$$

由公式(15)可进行一致性校验,得:

CI=0.019,RI=0.8546,CR=0.0222<0.1 满足一致性校验。

通过上述层次分析法的应用,已经确定了各评价指标的权重。可以看出,对于卫星用户来说,服务总时间比最重要,对测控中心来说,任务满意率最重要,而对地面站来说,平均设备利用率最重要,这与人们的经验判断也是相符的。

另外,由于评价指标体系中的各项指标的量纲和量级不同,为了可比性,需要对指标进行无量纲化处理,文献[5]中给出了一种改进的功效系数法。

4 结束语

多星测控系统资源配置问题是一种多属性决策问题,通过建立资源配置效能评价指标体系对资源配置方案进行定性的分析和定量的效能评价,为资源配置方案的选优决策提供依据。

本文建立了多星测控系统资源配置效能评价指标体系,给出了利用层次分析法(AHP)来确定指标权重的方法和步骤,为解决此类多属性决策问题提供了较好的思路。这种方法在很大程度上摒弃了人的主观性,但无论是判断矩阵的建立,还是各指标的选择和评分,都是人通过分析,主观确定的,从最终的决策结果来看,结果是否正确,取决于判断矩阵的构造和各指标的选择与评分,这些都是层次分析法有待完善和补充的,也有待于我们在今后的实践中更进一步的探讨和完善。另外随着我国航天事业的不断发展,为了满足我国多星测控系统不断提高的测控需求,对效能评价指标体系的研究还需要针对具体问题提出更专业更精确的指标。 ◇

参 考 文 献

[1] 郝岩.航天测控网[M].北京:国防工业出版社,2004
 [2] 王远振,高卫斌,聂成.多星地面站系统资源配置优化研究综述[J],系统工程与电子技术,2004年,第26卷第4期,第437~439页
 [3] 吴云鹤.测控弧段优先级的确定及量化[J],飞行器测控学报,2001年,第20卷第4期,第16~20页
 [4] 许光辉.运筹学基础手册[M].北京:科学出版社,1999
 [5] 董丽,林国龙,孟燕萍,杨斌.基于 AHP 的上海市内河海事站点资源配置评估[J],水运管理,2007年,第29卷第8期,第31~34页
 [6] Wesley S, Shen H. Supply chain reengineering using a core process analysis matrix and object-oriented simulation [J]. Information & Mngagement. 2002, 39(5): 345~358