

基于 ELECTRE 的航天测控方案评价方法

赵岳, 邢立宁, 姚锋, 贺仁杰

(国防科学技术大学 信息系统与管理学院, 长沙 410073)

摘要 针对航天测控方案评价问题, 通过对航天测控中心的实际调研, 归纳出航天测控方案评价的基本原则, 从测控方案的均衡性、集中性和效益性三个方面建立了评价指标体系. 然后设计出一种基于 ELECTRE 的测控方案综合评价方法, 并提出了测控方案的改进流程及方法. 最后通过实例仿真, 表明提出的评价指标和改进方法能够为测控方案的选择和改进提供有效的参考依据.

关键词 测控方案; 评价指标; ELECTRE; 方案改进

Space monitoring and control scheme evaluation based on the ELECTRE

ZHAO Yue, XING Li-ning, YAO Feng, HE Ren-jie

(College of Information System and Management, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract For the space monitoring and control scheme evaluation problem, this paper sums up the principles of scheduling requirements through actual research on Aerospace Monitoring Center, and establishes an evaluation index system from the balance, centralization and efficiency of the scheduling scheme. Then a method for comprehensive evaluation based on the ELECTRE and an improvement process of the scheme, are designed. Finally, simulation example shows that the proposed evaluation and improvement method can provide a valid reference for the selection and improvement of the scheduling scheme.

Keywords monitoring and control scheme; evaluation index; ELECTRE; scheme improvement

1 引言

航天测控方案是测控中心针对航天器的测控需求, 按照一定的规则和方法, 确定测控任务排序, 合理分配测控资源, 生成的完成测控工作的具体任务规划. 本文主要研究航天测控方案的综合评价问题. 航天测控调度的实质是为航天器的测控需求合理分配测控资源的调度过程, 并以测控方案的形式交由测控系统执行. 航天测控方案生成方式的发展经历了人工排序、数学规划、一般启发式算法和智能优化四个阶段. 20 世纪 80 年代, NASA(美国航空航天管理局) 首先提出航天测控调度问题, 并采用人工排序生成测控方案. Arbabi 等^[1-2] 在研究 AFSCN(美国空军卫星测控网) 的卫星调度问题时, 相继采用数学规划的方法求解中低规模的测控调度问题, 获得较好的测控方案. Burrowbridge 等^[3] 分别针对低轨卫星和中继卫星的调度问题, 采用目标为最大化被调度任务数量的贪婪算法进行求解, 获得了最优调度结果. Minton 等^[4-5] 分别设计了基于最小冲突数量的启发式方法, 交换邻域结构的搜索算法以及禁忌搜索算法. Parish^[6] 为求解地面资源优化配置问题, 设计了用于求解资源配置及任务调度问题的 GENITOR 算法, 将遗传算法引入航天测控资源调度领域. Barbulescu 等^[7] 针对 AFSCN 的航天测控优化调度问题, 对比了简单启发式算法、局部优化算法和 GENITOR 遗传算法的求解效果, 促进了智能优化算法在航天测控资源调度领域的广泛应用.

我国对航天测控调度问题的研究起步略晚但发展迅速. 在模型构建方面, 陈英武等^[8] 在合理假设的基础上, 建立了卫星任务调度问题的 CSP 模型; 金光等^[9] 在研究卫星地面站资源优化配置问题时, 建立了 Petri

收稿日期: 2012-12-28

资助项目: 国家自然科学基金(71031007, 71101150, 71071156); 宇航动力学国家重点实验室开放基金

作者简介: 赵岳(1990-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 智能优化方法, E-mail: zhaoyue08a@163.com; 姚锋(1978-), 男, 陕西咸阳人, 硕士, 讲师, 研究方向: 系统管理与优化技术; 贺仁杰(1976-), 男, 陕西河津人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向: 系统管理与优化技术; 通讯作者: 邢立宁(1980-), 男, 陕西西安人, 博士, 副教授, 研究方向: 智能优化方法、管理理论与管理决策技术, E-mail: xinglining@gmail.com.

网模型. 在优化算法方面, 李云峰等^[10] 针对卫星数传和多星测控调度问题, 设计了一系列改进型遗传算法; 陈祥国等^[11] 为求解航天测控优化调度和地面站数传调度问题, 提出了多种不同机制的蚁群算法; 另外, 张新贵等^[12] 改进了粒子群算法, 康宁^[13] 提出了航天测控调度问题的拉格朗日启发式算法.

国内外研究的发展情况表明, 目前航天测控调度问题在优化算法和资源配置方面的研究取得了长足进步, 测控方案的生成已经不难, 如何从多种测控方案中选择最为合理有效的方案并对其进行改进, 逐渐成为航天测控调度中值得注意的问题. 本文综合航天测控中心的实际需求与现有的研究成果, 针对航天测控方案的选择和改进问题, 对测控方案的评价指标、多属性决策方法以及测控方案改进流程方法进行了研究.

2 航天测控方案评价指标

2.1 航天测控方案评价的基本原则

通过对测控中心的实际调研, 发现测控调度方案的生成需要考虑多方面的目标需求, 如均衡利用测控站及测控设备, 单位时间内集中利用测控设备, 相关任务集中测控, 工作时间人性化和测控效益最大化等. 结合理论分析, 归纳出航天测控调度方案的指标需求原则:

1) 测控站利用均衡原则. 对同一航天器的跟踪测控, 应该尽量选取不同位置的测控站完成工作, 以便系统中多站联合获取测量, 保证测控精度. 同时, 为测控站均衡分配任务, 能够充分利用测控资源, 提高系统的测控效率.

2) 测控设备负担均衡原则. 在进行测控资源调度时, 需要考虑测控网中测控设备承担任务的均衡性. 即保证各测控设备承担的测控任务数相差不大, 避免出现某个测控设备承担过多的测控任务, 而其它测控设备过度空闲, 造成同一设备任务冲突和其它资源闲置浪费的不良状态.

3) 测控设备集中利用原则. 在调度决策过程中, 存在多个测控站设备可选择时, 考虑尽可能集中安排测控申请, 即由同一测控站设备在相对集中的时间段内为多个测控申请提供服务, 以提高单位时间内的测控设备利用率.

4) 相关任务测控集中原则. 具有相似任务或功能的航天测控任务称为相关任务, 其测控工作由同一组工作人员负责, 在调度过程中, 尽量保证相关任务集中于支持测控的设备, 以减少执行任务时设备选取更换的工作时间.

5) 工作时间人性化原则. 现在技术条件下, 航天测控系统尚不能完全实现自动化, 需要大量工作人员进行管理控制工作. 因此, 实际调度方案还需要考虑操作人员的工作时间合理性和任务量的可完成性. 具体而言, 要保证调度任务在测控周期内的合理分布, 尽量使任务相对集中于正常工作时间之内, 同时又不过分密集而造成冲突.

6) 测控效益最大化原则. 航天测控调度的实质是为航天器的测控需求分配测控资源, 而因为测控资源的有限性, 有效的测控方案应该保证优先级高的任务得到优先调度, 同时最大限度地满足航天器的测控需求.

2.2 航天测控方案评价的指标体系

根据航天测控方案评价的基本原则, 分别从均衡性, 集中性和效益性三个方面建立了航天测控方案评价指标体系, 如图 1 所示.

假设 $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$, 表示测控方案的任务集, $TA = (TN, P, ST, ET, D, TYPE)$ 表示任务属性, TN 表示任务编号, P 表示任务优先级, ST 表示每个任务的开始时间, ET 表示每个任务的结束时间, D 表示每个任务的持续时间, $TYPE = \{type_1, type_2, \dots, type_l\}$ 表示测控方案有 l 种任务类型.

$G = \{g_1, g_2, \dots, g_m\}$ 表示地面站资源, 其中地面站 g_i 拥有 k_i 套测控设备集合, g_i 的测控设备集合为 $F_i = \{f_{i1}, f_{i2}, \dots, f_{ik_i}\}$.

结合上述假设, 给出各评价指标的概念描述及计算公式.

2.2.1 均衡性指标

1) 测控站利用均衡度是指测控方案为测控系统中各测控站分配任务的均衡程度. 测控方案的测控站利

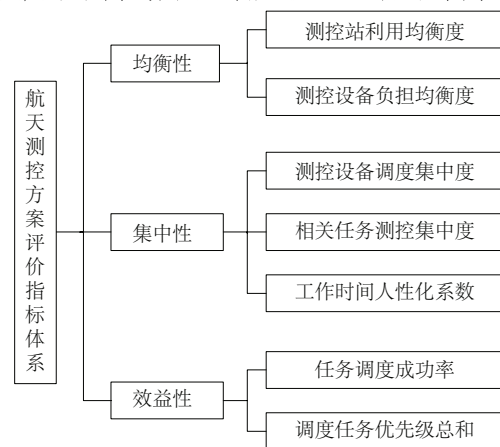


图 1 航天测控调度方案评价指标体系

用均衡度越高, 说明系统中各测控站分配的任务数量越均衡, 整个测控方案的效率越高; 反之, 测控资源的利用越不均衡, 该测控方案的效率越低. 这里引入信息熵的概念表征测控站利用均衡度. 首先定义测控站 g_i 执行任务的“概率”

$$P_i = \frac{ntg_i}{n} \quad (1)$$

其中, n 为方案的任务总数, ntg_i 为测控站 g_i 测控周期内执行任务数, 显然有 $\sum_{i=1}^m P_i = 1$.

依据信息熵的概念, 可以定义测控站执行任务的信息熵

$$H = - \sum_{i=1}^m P_i \log P_i \quad (2)$$

显然 $H \geq 0$, 信息熵的高低可以反映测控站承担测控任务的均衡程度, 熵值越高表明每个测控站分配的任务数量越接近, 测控站利用越均衡. 并且当 $ntg_1 = ntg_2 = \dots = ntg_m$ 时, $P_1 = P_2 = \dots = P_m = 1/m$, 此时, H 取得最大值, 表示为 $H_M = \log m$. 所以, 当 $P_i = 1/m$ 时, 测控站的利用达到完全均衡状态. 因此, 可以定义测控站利用均衡度, 即

$$GUE = \frac{- \sum_{i=1}^m P_i \log P_i}{\log m} \quad (3)$$

2) 测控设备负担均衡度是用来评估测控方案中测控设备承担任务均衡水平的指标. 若设备负担均衡度越高, 表明测控方案设备资源利用状态越好; 否则, 设备负担不均衡, 测控方案设备资源利用状态越差. 同样, 这里以测控方案设备资源利用状态的信息熵表征测控设备负担均衡度. 首先定义测控设备 f_{ij} 执行任务的“概率”

$$P_{ij} = \frac{ntf_{ij}}{n} \quad (4)$$

其中, n 为方案的任务总数, ntf_{ij} 为测控设备 f_{ij} 测控周期内执行任务数, 显然有 $\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^k P_{ij} = 1$. 依据信息熵的概念, 可以定义出测控设备执行任务的信息熵:

$$H' = - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^k P_{ij} \log P_{ij} \quad (5)$$

与测控站利用均衡度一样, 当 $P_{ij} = 1/n$ 时, 测控设备任务负担达到完全均衡的状态. 因此, 可以定义测控设备负担均衡度, 即

$$FTE = \frac{- \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^k P_{ij} \log P_{ij}}{\log n} \quad (6)$$

2.2.2 集中性指标

1) 测控设备调度集中度是衡量测控设备在测控周期内执行任务时间安排的集中程度. 如果测控设备调度集中度越大, 说明在相对集中的时间段内将越多的测控任务安排给同一测控设备, 则单位时间内的测控设备利用率越高; 反之, 如果测控设备调度集中度越小, 则单位时间内的测控设备利用率越低. 调度方案分配给每套测控设备的任务数量和完成任务时间是确定的, 因此, 对于地面站 g_i 的测控设备 f_{ij} 的测控设备调度集中度 $FCEf_{ij}$, 可以用该设备一天四个测控时段 (凌晨, 上午, 下午, 晚上) 上任务时间的方差定义. 假设设备 f_{ij} 在凌晨, 上午, 下午, 晚上四个时段上的执行任务的时间分别为 $time_1, time_2, time_3, time_4$, mt 为四个时段的均值, 则测控设备 f_{ij} 调度集中度为

$$FCEf_{ij} = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 (time_j - mt)^2 \quad (7)$$

同理, 可以用四个时段上测控设备执行任务时间的方差表示整个测控方案的测控设备调度集中度,

$$FCE = \frac{1}{4} \sum_{k=1}^4 (TIME_k - MT)^2 \quad (8)$$

其中, $TIME_k$ 表示时段 k 上的所有测控设备执行任务时间, MT 为四个时段上所有测控设备执行任务时间的均值.

2) 相关任务测控集中度是指相关的任务由同一套测控设备执行的集中程度, 相关测控任务越集中, 则配置资源占用的时间越少, 资源利用率越高; 反之, 相关测控任务越分散, 则执行任务时在设备选取更换方面花

费的时间越多, 操作人员工作时间越长, 资源利用率越低. 考虑每套测控设备由一组固定的工作人员操作, 以测控设备为研究对象计算相关任务测控集中度. 假设在测控周期内, 每套测控设备专门处理一种类型的测控任务, 因此, 可以用对应类型相关任务数量表示测控设备的相关任务测控集中度. 首先, 测控设备 f_{ij} 的相关任务测控集中度可定义为

$$XTC_{f_{ij}} = N_{f_{ij}}^{type_j} \quad (9)$$

其中, $type_j$ 为测控设备 f_{ij} 在测控周期内专门处理的相关任务类型, $N_{f_{ij}}^{type_j}$ 为测控设备 f_{ij} 执行的同属类型 $type_j$ 的任务总数. 因此, 可以用测控设备的相关任务测控集中度均值表示测控方案的相关任务测控集中度

$$XTC = \frac{1}{nf} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{k_i} XTC_{f_{ij}} \quad (10)$$

其中, nf 为测控设备总数.

3) 工作时间人性化系数是用来评价测控方案任务执行时间对工作人员适宜程度的指标. 现在的测控系统仍需要一定数量的技术人员操作, 因此, 工作时间人性化仍然是测控方案评价需要考虑的重要指标. 结合实际调度的需求原则, 工作时间人性化系数的计算, 主要从工作人员的作息时间方面考虑. 按照人的正常作息时间, 测控任务应该尽量多地安排在白天 (上午和下午), 而尽量少地安排在夜晚 (凌晨和晚上).

因此, 以测控方案白天和夜晚的测控任务之比表征测控方案对工作人员作息时间的适应度, 测控方案的工作时间人性化系数定义为

$$HR = \frac{DTN}{NTN} \quad (11)$$

其中, DTN 表示白天的测控任务数量, NTN 表示夜晚的测控任务数量.

2.2.3 效益性指标

1) 任务调度成功率

测控方案是测控中心为测控需求分配资源的任务安排方案, 由于资源的有限性会出现需求冲突, 无法满足所有测控需求. 任务调度成功率是衡量测控方案效益的数量型指标, 用测控方案执行的任务总数和测控中心接到的任务需求总数的比值来表示. 因此, 任务调度成功率可定义为

$$TP = \frac{n}{N} \quad (12)$$

其中, n 是调度方案执行的任务总数, N 是测控中心接到的任务需求总数.

2) 调度任务优先级总和

由于用户需求, 资源约束以及任务完成收益的不同, 测控任务具有不同的优先级, 测控方案效益的高低除了对任务调度成功率有要求, 还要考虑调度任务的优先级总和. 调度任务优先级总和是衡量测控方案效益的质量型指标, 是测控方案执行的所有任务的优先级加和. 因此, 调度任务优先级总和可定义为

$$SP = \sum_{i=1}^n P_i \quad (13)$$

其中, P_i 为测控方案中任务的优先级.

3 航天测控方案的评价和改进

3.1 基于 ELECTRE 的综合评价方法

测控中心接到航天器的测控申请后, 首先对每项测控需求属性和自身资源配置情况进行分析, 然后按照不同的规则和方法确定测控任务的排序, 会得到多种不同的测控方案. 如何从中选择出资源分配最为合理测控需求满足度最高的方案, 需要对测控方案进行评价. 通过上述评价指标能够评估测控方案的各方面效能, 如何根据测控方案的效能指标从待选测控方案组中选择最优的测控方案, 需要对测控方案进行综合评价. 因此, 本文提出了基于 ELECTRE 的综合评价方法.

ELECTRE 法是法国人 Roy 提出的建立在级别高于关系上的多属性决策问题的求解方法, 具有原理易于理解, 计算简便可程序化, 对决策矩阵信息利用相对充分等特点. 经过很多学者的深入研究, 产生了 ELECTRE-I/II/III/IV/TRI 等不同特点的多属性决策方法.

本文应用 ELECTRE 法对航天测控方案进行综合评价, 考虑到航天测控方案评价指标为明晰数据, 同时希望充分利用评价指标所提供的信息. 因此, 选用针对明晰决策数据评价方案的 ELECTRE-II 法和决策信

息利用相对充分的 ELECTRE-III 法为基础算法, 综合应用净优势值的概念^[14]和模糊环境下的 ELECTRE 法修正模型^[15], 设计出一种基于 ELECTRE 的测控方案评价方法. 首先根据各评价指标的计算公式, 计算出待评价方案的指标值, 构造出规范化的测控方案评价决策矩阵, 采用层次分析法确定评价指标的权重. 然后, 由航天测控调度人员和研究人员根据测控方案调度需求确定测控方案评价指标的比较阈值, 依次求出和谐性系数矩阵和修正型不和谐性系数矩阵, 用和谐性系数矩阵与修正型不和谐性系数矩阵的乘积表示修正型加权合计矩阵. 最后, 求出测控方案的加权合计净优势值并排序.

3.2 航天测控方案的改进

3.2.1 改进流程

在利用评价结果选择测控方案之后, 还需要对测控方案进行改进, 以提高测控方案的综合效能. 于是, 本文设计了测控方案的改进流程, 如图 2 所示. 测控方案的改进流程如下:

步骤 1 应用提出的指标体系, 计算出待改进测控方案的各项评价指标.

步骤 2 求出测控方案的评价指标加权积.

步骤 3 将测控方案的评价指标加权积与目标阈值比较, 判断测控方案是否满足要求. 若测控方案的评价指标加权积大于目标阈值, 则测控方案的效能满足要求, 测控方案的改进流程结束; 否则, 转到步骤 4.

步骤 4 对未满足要求的测控方案进行改进. 依次比较该方案每项指标观测值与设定阈值的大小, 确定不理想指标, 针对不理想指标进行测控方案的调整.

步骤 5 方案调整后, 转回步骤 1, 循环方案的改进流程, 直到该测控方案效能的评价结果满足要求.

上述流程中, 测控方案各评价指标阈值由航天测控调度研究专家和测控中心工作人员根据实际情况采用专家评分法设定, 测控方案评价指标加权积的目标阈值由各评价指标阈值加权乘积得到.

3.2.2 改进方法

在测控方案的改进过程中, 首先判断测控方案的总体效能是否满足要求, 然后针对不满足效能要求的测控方案进行改进. 依次比较评价指标, 确定不理想指标, 然后按照针对性的方法改进测控方案.

1) 均衡性指标的改进方法. 均衡性指标包括测控站利用均衡度和测控设备负担均衡度两项指标, 都是用来衡量测控资源均衡利用的尺度, 定义和计算方法相近, 主要采取“对口支援”的原则进行改进, 即将任务分配数量最多的测控站和测控设备上的任务向数量最少的测控站和测控设备上转移, 次多的向次少的转移, 如此类推, 同时新增的测控任务优先对数量较少的测控站和测控设备分配. 测控站利用均衡度的改进基于测控站进行, 测控设备负担均衡度的改进基于所有的测控设备直接进行.

2) 集中性指标的改进方法. 集中性指标包括测控设备调度集中度、相关任务测控集中度和工作时间人性化系数三项指标, 分别从三个方面表征测控方案的测控集中度. 对于测控方案的测控设备调度集中度, 主要采取基于“马太效应”的原则进行改进, 即将单位时间内任务分配数量最少的测控时段上的任务向数量最多的测控时段上转移, 次少的向次多的转移, 同时尽量将测控任务向白天的时段集中, 以增大工作时间人性化系数; 对于测控方案在相关任务测控集中度上的改进, 以测控设备为单位, 将相关测控任务尽量调整到测控周期内专属的测控设备上; 对于测控方案在工作时间人性化系数上的改进, 按照凌晨任务向上午调整, 晚上任务向下午调整的方法进行.

3) 效益性指标的改进方法. 测控方案的效益取决于任务调度成功率和调度任务优先级总和两方面. 对效益性指标不理想的测控方案进行改进, 一方面要采用任务冲突处理能力强的调度规则和方法对测控方案进行调整, 从而提高测控方案的任务调度成功率; 另一方面在多个任务出现资源冲突时, 尽量优先安排优先级大的任务, 从而提高测控方案的调度任务优先级总和.

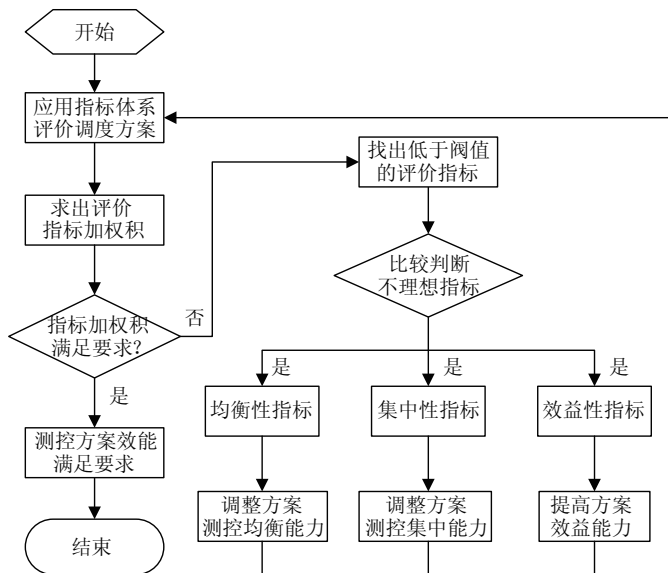


图 2 测控方案的改进流程

4 实例

4.1 航天测控方案的生成及评价

航天测控调度方案是由测控中心根据航天器的测控需求,按照一定的规则和方法生成的.在此研究一个测控中心的测控方案生成、评价和改进的过程.选取的测控中心由三个测控站组成,这三个测控站分别配备 3, 2, 4 套测控设备.设定场景,该测控中心在测控周期内接到在轨航天器的 120 个测控申请,测控需求参数要求:测控周期为一天,以分钟为单位,周期时间范围 0min~1440 min;每个测控任务持续时间为 10~20min;任务优先级定义为 1~10 十级,优先级大的任务优先调度;任务类型按功能分为跟踪、遥测、遥控和数传 4 种类型,分别表示为 A, B, C, D.

根据测控需求的属性和资源配置情况,按照一定规则和方法,生成 5 组测控任务的调度方案,任务规模如表 1 所示.

研究中以美国空军技术学院生成的用于验证卫星调度算法的 AFIT 基准数据为基础,根据实际测试需要进行改进,获得测控任务的具体数据,数据形式如表 2 所示.其中,任务开始时刻,任务结束时刻和任务执行时间三项数据的单位为分钟.

表 1 任务规模

任务编号	需求总数	任务总数	任务类型数
1	120	106	4
2	120	113	4
3	120	117	4
4	120	108	4
5	120	115	4

表 2 任务参数

任务编号	任务优先级	任务开始时刻	任务结束时刻	任务执行时间	任务类型
1	4	11	26	15	D
2	10	24	40	16	A
3	7	48	61	13	C
4	7	52	65	13	B
5	10	54	70	16	C

本文的研究重点在于测控调度方案评价和改进,这里按照随机规则生成测控方案.根据本文所提出的评价指标体系及其计算公式,计算出每个测控方案的各单项指标,实验结果如表 3 所示.

表 3 测控方案的评价指标值

方案	测控站利用均衡度	测控设备负担均衡度	测控设备调度集中度	相关任务测控集中度	工作时间人性化系数	任务调度成功率	调度任务优先级总和
1	0.9910	0.9912	2.3979	0.3029	0.9811	0.8833	570
2	0.9898	0.9906	2.7437	0.3259	1.2600	0.9417	655
3	0.9915	0.9755	4.8734	0.2230	0.7463	0.9750	624
4	0.9607	0.9775	4.1667	0.2696	0.7258	0.9000	615
5	0.9462	0.9848	3.3166	0.2748	1.0000	0.9583	627

对测控方案评价指标归一化处理,绘出 5 组方案测控效能的雷达图,如图 3 所示.图中曲线所围面积表示方案的综合效能,通过雷达图能够清晰表现各测控方案综合效能的优劣.

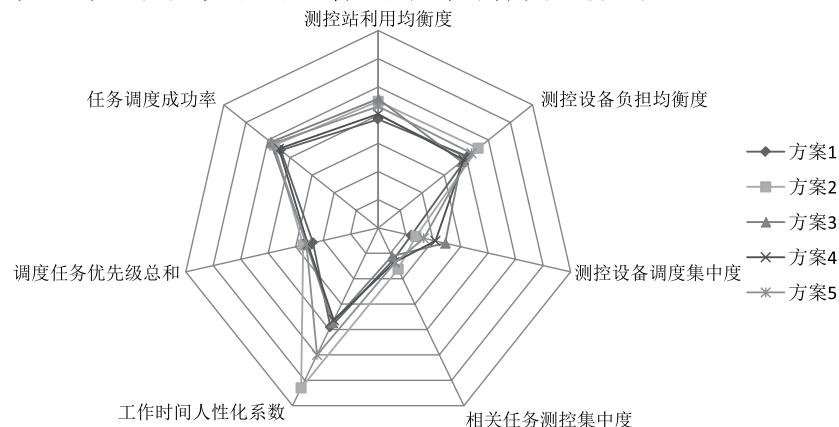


图 3 测控方案效能雷达图

应用基于 ELECTRE 的测控方案评价方法,并以 MATLAB 编程实现,对测控方案进行综合排序,排序结果为 2, 5, 3, 4, 1,即测控方案由优到劣的排序依次为方案 2,方案 5,方案 3,方案 4,方案 1.结合测控方案的评价指标以及排序结果,可以得到结论:1)均衡性评价指标相对较高,各测控站以及各套测控设备分配的任务总数和单位时段的任务数都相差不大,说明调度方案的测控资源利用比较均衡;2)集中性指标相对较

低, 单位时段内测控设备调度集中度不大, 相关任务测控集中度较低, 白天和夜晚的任务数之比接近于 1, 说明调度方案的资源集中利用率较低, 工作时间人性化水平一般; 3) 效益性指标较好, 任务调度成功率相对较高, 调度任务优先级总和和中等, 说明调度方案能够完成大部分测控任务, 但不能保证所有优先级大的任务都能优先调度; 4) 上述 5 组测控任务的调度方案是按照完全随机规则生成的, 测控站及测控设备任务分配比较均衡, 任务集中性自然较低, 同时资源约束宽松, 测控方案效益较高, 实验结果与完全随机规则的特性一致.

4.2 航天测控方案的改进过程

应用 ELECTRE 法对 5 组测控方案完成综合排序后, 按照改进流程以方案 1 为例进行测控方案的改进. 首先, 采用专家评分法确定各指标阈值和指标加权积的阈值, 如表 4 所示.

表 4 单项指标及其加权积的阈值

	测控站利 用均衡度	测控设备 负担均衡度	测控设备 调度集中度	相关任务 测控集中度	工作时间 人性化系数	任务调度 成功率	调度任务 优先级总和	指标加权 积阈值
指标阈值	0.9898	0.9848	2.3166	0.2748	0.9811	0.9417	624	0.0184

根据评价指标体系对方案 1 进行评价, 计算出方案 1 的评价指标加权积, 并与其目标阈值比较, 结果小于阈值, 需要改进方案. 然后, 依次比较该方案每项指标观测值与指标阈值的大小, 确定不理想指标为效益型指标. 针对方案 1 在效益方面的不足, 采用任务冲突处理能力强的调度规则和方法对方案 1 进行调整, 从而提高该方案成功调度任务数量, 同时尽量优先安排优先级大的任务. 按照上述方法对方案 1 进行调整, 得到改进后的测控方案. 最后, 将改进后的测控方案转回起始步骤比较, 改进后的方案 1 评价指标加权积大于目标阈值, 方案 1 的改进完成. 依次计算出改进后方案 1 的单项评价指标, 将其与其他方案再次进行综合排序, 排序结果如表 5 所示.

表 5 测控方案 1 改进前后的评价结果

	测控站利 用均衡度	测控设备 负担均衡度	测控设备 调度集中度	相关任务 测控集中度	工作时间 人性化系数	任务调度 成功率	调度任务 优先级总和	指标加权 积阈值	综合 排序
改进前	0.9910	0.9912	2.3979	0.3029	0.9811	0.8833	570	0.0183	5
改进后	0.9873	0.9906	2.3193	0.2896	1.0375	0.9500	650	0.0200	2

为清晰比较, 并给出方案 1 改进前后的测控效能雷达图, 如图 4 所示.

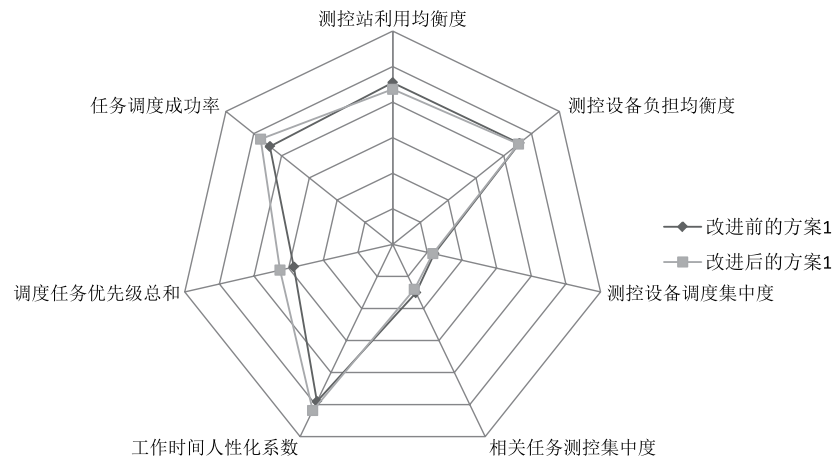


图 4 方案 1 改进前后的效能雷达图

针对方案 1 效益性指标较低的特点, 按照上述方法进行调整, 分析改进后测控方案的评价结果可以发现改进后方案的效益性指标大幅提高, 均衡性和集中性指标略微下降, 但是综合效能显著提高.

5 结束语

本文的主要创新点: 1) 结合实际测控需求, 建立了测控方案的评价指标体系, 为航天测控方案的评价提供了科学全面的评价指标; 2) 应用 ELECTRE 方法进行测控方案的综合评价, 并设计了测控方案的改进流程和方法, 解决了测控方案选择的多属性评价问题, 并能针对方案的不理想属性进行优化; 3) 通过仿真实例, 证明本文提出的测控方案评价和改进方法能够有效地解决测控方案的选择和再优化问题.

航天测控方案评价问题是一类多属性决策问题, 在进一步的研究中首先应该针对具体工程需要和问题特

点提出更为全面专业的评价指标, 应用和改进其他多属性决策方法进行方案的综合评价, 同时继续完善方案的改进流程及方法.

参考文献

- [1] Arbabi M, John A G. Interactive real time scheduling and control[C]// Proceedings of the Summer Simulation Conference, Chicago, 1985: 271–277.
- [2] Gooley T D, Borsi J J, Moore J T. Automating air force satellite control network (AFSCN) scheduling[J]. Mathematical and Computer Modelling, 1996, 24(2): 91–101.
- [3] Burrowbridge S. Optimal allocation of satellite network resources[D]. Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 1999.
- [4] Minton S. Minimizing conflicts: A heuristic repair method for constraint-satisfaction scheduling problem[J]. Journal of Artificial Intelligence Research, 1992, 58: 161–205.
- [5] Roberts M, Whitley L D, Howe A E, et al. Random walks and neighborhood bias in oversubscribed scheduling[C]// Proceedings of the 2th Multidisciplinary International Conference on Scheduling: Theory and Applications, New York, USA, 2005.
- [6] Parish S A. A genetic algorithm approach to automating satellite range scheduling[D]. Ohio: Air Force Institute of Technology, 1994.
- [7] Barbulescu L, Howe A, Whitley D. AFSCN scheduling: How the problem and solution have evolved[J]. Mathematical and Computer Modelling, 2006, 43: 1023–1037.
- [8] 陈英武, 方炎申, 李菊芳, 等. 卫星任务调度问题的约束规划模型 [J]. 国防科技大学学报, 2006, 28(5): 126–131.
Chen Yingwu, Fang Yanshen, Li Jufang, et al. Constraint programming model of satellite mission scheduling[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2006, 28(5): 126–131.
- [9] 金光, 武小悦, 高卫斌. 卫星地面站资源配置仿真研究 [J]. 系统仿真学报, 2004, 16(11): 2401–2403.
Jin Guang, Wu Xiaoyue, Gao Weibin. Simulation-based study on resource deployment of satellite ground station[J]. Journal of System Simulation, 2004, 16(11): 2401–2403.
- [10] 李云峰, 武小悦. 遗传算法在卫星数传调度问题中的应用 [J]. 系统工程理论与实践, 2008, 28(1): 158–164.
Li Yunfeng, Wu Xiaoyue. Application of genetic algorithm in satellite data transmission scheduling problem[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2008, 28(1): 158–164.
- [11] 陈祥国, 武小悦. 蚁群算法在卫星数传调度问题中的应用 [J]. 系统工程学报, 2009, 24(4): 451–456.
Chen Xiangguo, Wu Xiaoyue. Ant colony algorithm for satellite data transmission scheduling problem[J]. Journal of Systems Engineering, 2009, 24(4): 451–456.
- [12] 张新贵, 武小悦. 基于自适应粒子群算法的航天测控系统任务可靠性分配 [J]. 航空动力学报, 2012, 27(9): 2148–2154.
Zhang Xingui, Wu Xiaoyue. Mission reliability allocation of spaceflight TT& C system based on adaptive particle swarm optimization[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(9): 2148–2154.
- [13] 康宁, 武小悦, 张国亭. 航天测控调度问题的拉格朗日启发式算法 [J]. 活力与指挥控制, 2012, 37(8): 104–107.
Kang Ning, Wu Xiaoyue, Zhang Guoting. Lagrangian heuristic algorithm for TT& C scheduling problem[J]. Fire Control & Command Control, 2012, 37(8): 104–107.
- [14] Hwang C L, Masud A. Multiple objective decision making methods and applications[M]. Springer Verlag, NY, 1979.
- [15] 陈常青. 一种基于 ELECTRE 排序的简化方法 [J/OL]. 中国科技论文在线, 2005-06-17, <http://www.paper.edu.cn>.
Chen Changqing. A simplified method for sequencing based on ELECTRE[J]. Sciencepaper Online, 2005-06-17, <http://www.paper.edu.cn>.