

<http://bhxb.buaa.edu.cn> jbuaa@buaa.edu.cn

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2022.0489

对地观测卫星姿态控制系统效能评估方法

曹寅¹, 程月华^{1,*}, 高波², 张燕华¹, 徐贵力¹

(1. 南京航空航天大学自动化学院, 南京 211100; 2. 中国西安卫星测控中心, 西安 710000)

摘 要: 卫星系统效能评估问题, 是卫星提高工作效率和卫星方案优化设计的基础。以对地观测卫星姿态控制系统作为效能评估的对象, 通过对卫星的任务需求进行分析, 建立对地观测卫星姿态控制系统效能评估指标体系; 基于灰色关联分析相关理论, 引入熵权法计算指标权重, 建立效能评估模型, 计算得到综合灰色关联度, 实现卫星姿态控制系统效能评估; 通过数据验证所建体系具有可实现性与实用性。

关 键 词: 卫星姿态控制系统; 效能评估; 灰色关联分析; 熵权法; 对地观测卫星

中图分类号: V448; N941.5

文献标志码: A

文章编号: 1001-5965(2024)05-1655-10

随着空间技术和对地观测技术的飞速发展, 对地观测卫星势必会承担着更多、更加复杂的任务, 这也就对卫星的性能提出了越来越高的需求。为找准卫星系统的短板, 实现卫星系统的效能优化, 对卫星系统进行效能评估成为研究热点^[1]。从评估对象来说, 卫星系统效能评估研究工作可分为2类。一种是以卫星系统整体作为评估对象, 对系统的综合效能开展研究。Rivett 和 Pontecorvo^[2] 为实现对澳大利亚大片领土进行监察的需求, 分别评估了单星、8星和16星3种设计方案的任务观测能力, 从中选出了8星的最优方案, 从而节约了研究成本。Bolkunov 等^[3] 从功能效率、监管系统的有效性和成本效率3个方面进行评估, 提出了全面评估导航卫星系统有效性的一般性方法。Shao 等^[4] 针对通信卫星系统组成子系统多、状态多、数据不准确和不足的特点, 构建了 G-Lz-ADC 效能评估模型, 在评估多状态复杂系统的有效性方面具有较好的适用性。易山^[5] 将具有不确定性因素影响的效能指标代入到卫星效能评估体系中, 并运用不确定的层次分析法和熵权法结合的方法对指标赋予权重, 使评估结果更具有实用性。卫星是由有效载

荷、结构、电源、姿态控制等各个分系统组成的一个复杂而庞大的系统, 随着研究工作的深入, 另一种是效能评估对象细化到了卫星各分系统。Kazakeviciute-Januskeviciene 等^[6] 研究了对遥感卫星的遥感图像分割效果, 通过确定主观和客观分割质量指标之间的相关性来评估卫星图像分割的有效性。Muhuri 团队^[7] 对光学卫星的雪覆盖监测效能进行评估, 并在西班牙比利牛斯山脉和美国内华达山脉的测试点进行了数据验证。Wang 和 Zhao^[8] 分析了飞行器姿态控制系统的结构, 建立了分级性能评价指标体系, 提出了一种基于数据的姿态控制系统性能评估方法。闻新等^[9] 将卷积神经网络和快速卷积算法相结合, 提出了对卫星姿态控制系统进行实时故障诊断的方法。钱晨^[10] 基于卫星遥测数据开展卫星姿态控制系统评估工作, 找出了卫星姿态控制系统的故障所在。

国内外针对卫星效能评估的研究越发深入, 在任务需求分析、指标体系构建及综合效能评估等方面有了不少的工作。但早期卫星效能评估工作主要集中在对卫星系统的综合效能评估, 对卫星各分系统的效能评估工作成果较少, 近些年才逐步开展

收稿日期: 2022-06-16; 录用日期: 2022-06-23; 网络出版时间: 2022-11-21 08:34

网络出版地址: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20221117.1705.001

* 通信作者. E-mail: chengyuehua@nuaa.edu.cn

引用格式: 曹寅, 程月华, 高波, 等. 对地观测卫星姿态控制系统效能评估方法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2024, 50 (5): 1655-1664.

CAO Y, CHENG Y H, GAO B, et al. Effectiveness evaluation method for earth observation satellite attitude control system [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2024, 50 (5): 1655-1664 (in Chinese).

卫星各分系统的评估工作。在此基础上开展对地观测卫星的姿态控制系统效能评估研究,对于卫星设计、研制或在轨运行阶段中具有很强的现实意义。而当前对卫星姿态控制系统的评估工作主要为健康评估和故障诊断,对姿态控制系统的工作效能研究较少;由于传感器测量误差和算法精度等因素的影响,使工作过程中存在系统误差,且通常会出现卫星实际工作数据难以获取导致样本不够充足的情况,呈现出灰色系统的特点,采用传统的效能评估方法会使结果不准确。因此,本文以对地观测卫星姿态控制系统作为研究对象,建立了对地观测卫星姿态控制系统效能评估指标体系。同时考虑到评估对象的灰色特点,引入灰色系统理论中灰色关联分析法建立效能评估模型,并采用熵权法计

算权重,实现了卫星姿态控制系统的效能评估。

1 对地观测卫星姿态控制系统效能指标确定

1.1 评估指标来源

姿态控制系统主要负责使卫星按照预定的姿态和轨道飞行,保证卫星的性能,以完成空间任务,在卫星系统中起着极其重要的作用。卫星姿态控制系统的控制模型如图 1 所示,控制器接收到姿态信号后,传递指令给执行机构,执行机构机动使卫星本体姿态角发生偏转,机动时姿态敏感器不断测量当前卫星姿态信息,解算出卫星的姿态反馈给控制器,以调节卫星机动速度,直至卫星达到期望姿态。

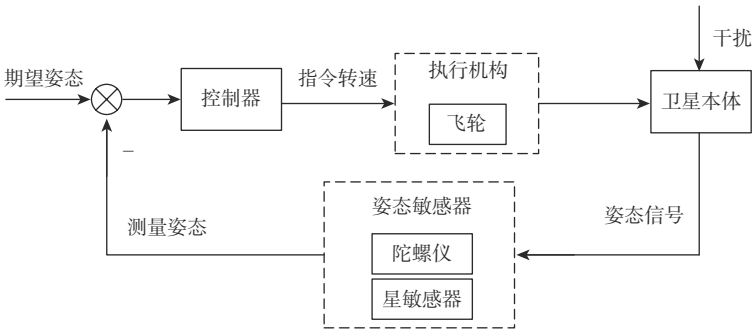


图 1 卫星姿态控制系统控制模型
Fig. 1 Control model for satellite attitude control system

从现阶段对地观测卫星的任务需求看,对地观测卫星工作能力的关键影响要素包括传感器、卫星平台、运行轨道等。卫星主要由传感器等测量器件和工作平台组成,传感器是卫星执行对地观测任务的核心部件,传感器的配置决定了卫星系统的性能。卫星平台上搭载着各种传感器,兼具姿态控制、通信、能源、测控等功能,其性能优劣也会对卫星工作能力产生影响。卫星运行轨道则会决定卫星的姿态与位置,并在一定程度上影响卫星的成像能力。对卫星姿态控制系统进行评估,主要考虑传感器和卫星平台这 2 个影响因素。据此,构建效能指标评估体系,如图 2 所示。描述对地观测卫星姿态控制系统工作能力的有最大侧摆角、姿态角确定精度、姿态角指向精度等 7 个指标。

1.2 指标定义和解算方法

1.2.1 姿态角指向精度

经三轴转动后,卫星预期指向与实际指向之间的偏差为姿态角指向精度。设单位向量 δ ,经过按欧拉角顺序(3-2-1)旋转,将初始单位向量 δ 旋转角度 $\theta=[\alpha,\beta,\gamma]$ 转到预定位置成为向量 δ' 。由于转动过程中会产生误差 T , T 的来源有测量误差、算法误

差、控制系统误差等。初始单位向量 δ 不可能转到预定位置成为向量 δ' ,而是转到 δ'' ,则有:

$$\delta'' = \rho(\theta, T) \cdot \delta \tag{1}$$

$$\rho(\theta, T) = \text{Rot}(z, \gamma + \Delta\gamma) \text{Rot}(y, \beta + \Delta\beta) \text{Rot}(x, \alpha + \Delta\alpha) \tag{2}$$

式中: $\rho(\theta, T)$ 为总旋转矩阵; $\Delta\gamma$ 、 $\Delta\beta$ 、 $\Delta\alpha$ 为由误差

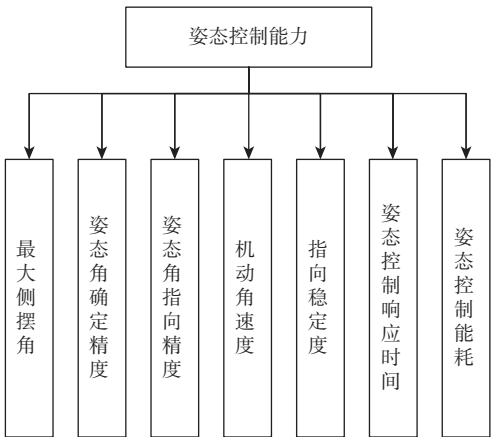


图 2 卫星姿态控制系统效能指标体系
Fig. 2 Effectiveness index system for satellite attitude control system

T 引起的三轴误差, 从而指向误差可以描述为

$$\sigma = \delta'' - \delta' = [\rho(\theta, T) - \rho(\theta)] \cdot \delta \tag{3}$$

式中: $\rho(\theta)$ 为理想旋转矩阵, 可计算得到指向误差 $\sigma = [\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3]$, 指向精度 $\sigma_0 = \max(|\sigma|)$ 。

1.2.2 姿态角确定精度

姿态角确定精度即卫星的三轴姿态测量精度 $\hat{\sigma}$, 姿态角确定精度属于系统能力指标, 取决于卫星所使用的姿态测量敏感器和卫星姿态估计算法。姿态确定指的是根据卫星搭载的姿态测量敏感器的数据信息, 由姿态估计算法给出参考系下卫星姿态的精确估计^[11]。本文采用滤波输出角度的统计值, 作为姿态角确定精度。

1.2.3 机动角速度

机动角速度指卫星在进行姿态机动的时间内三轴姿态角的变化速率, 反映了卫星的机动能力。机动角速度可表示为

$$\omega_a = \left[\frac{\varphi_a}{t_1 - t_0}, \frac{\varphi_y}{t_1 - t_0}, \frac{\varphi_z}{t_1 - t_0} \right] = [\omega_x, \omega_y, \omega_z] \tag{4}$$

式中: ω_a 为平均机动角速度; t_0 为机动的开始时间; t_1 为机动的结束时间; φ_x 、 φ_y 、 φ_z 为姿态机动前后三轴姿态角的差值。当时间间隔较小时, 所求得的 ω_a 为瞬时角速度, 本文取机动过程平均角速度 $\omega_m = \max |\omega_a|$ 为评估指标。

1.2.4 指向稳定度

对于卫星姿态控制系统, 其任务可分为姿态稳定和姿态机动 2 方面。姿态稳定是使卫星姿态保持在给定方位上, 如对地定向、对日定向; 姿态机动则是使卫星从一种姿态过渡到另一种姿态的再定向过程。卫星在保持姿态稳定时间内, 姿态角因干扰而随时间变化的速率称为姿态稳定度。

卫星保持姿态稳定的时间周期内, 三轴姿态稳定度为

$$\omega' = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i}{n} = [\omega'_x, \omega'_y, \omega'_z] \tag{5}$$

式中: ω' 为三轴的姿态稳定度; ω_i 为稳态时间内的瞬时角速度。在该时间内的姿态稳定度 $\Delta|\omega| = \max |\omega'|$, 本文以达到指向姿态后, 角速度的统计特性均值来描述指向稳定度。

1.2.5 姿态控制响应时间

卫星开始进行姿态控制, 至卫星过渡到目标姿态后并保持姿态稳定所耗费的时间称为姿态控制响应时间 t 。

本文中, 当卫星三轴姿态与目标姿态误差均在指向精度 ($\sigma_0 \pm 5\%$) 范围内, 认为其达到了姿态稳定。

1.2.6 姿态控制能耗

卫星开始进行姿态机动到结束姿态机动的工

作时间内, 姿态控制系统所消耗的能量称为姿态控制能耗。

设在时间周期 $[t_1, t_2]$ 内, 卫星进行姿态控制, 在这期间卫星作用在某一轴上的控制力矩为 M , 则消耗的能量 E 为

$$E = \int_{t_1}^{t_2} M dt \tag{6}$$

按式 (6) 分别计算卫星三轴机动消耗的能量 E_x 、 E_y 、 E_z , 故姿态控制能耗 E_0 为

$$E_0 = E_x + E_y + E_z \tag{7}$$

1.2.7 最大侧摆角

卫星在执行观测任务时, 确保卫星能顺利观测到地面目标的侧摆角称为观测摆角。由于卫星偏航轴向上的摆角只影响目标观测的方向角, 对卫星观测摆角没有影响, 本文只考虑俯仰和翻滚轴向上的观测摆角。利用空间几何关系有:

$$\begin{cases} \theta_p = \arctan\left(\frac{y}{z}\right) \\ \theta_R = \arctan\left(\frac{x}{z}\right) \end{cases} \tag{8}$$

式中: $[x, y, z]$ 为给定时刻待观测目标在卫星轨道坐标系下的位置坐标; θ_p 和 θ_R 分别为卫星在俯仰和翻滚轴向的摆角。设卫星的最大侧摆角为 θ_{\max} , 若待观测目标可见, 则应满足角度关系 $|\theta_p| \leq \theta_{\max}$, $|\theta_R| \leq \theta_{\max}$ 。

将原始数据按上述方法可求解得到效能指标矩阵 A 为

$$A = [\sigma_0, \hat{\sigma}, \omega_m, \Delta\omega, t, E_0, \theta_{\max}] \tag{9}$$

2 基于灰色关联分析的评估模型

卫星系统效能评估过程中, 不同效能指标的来源各不相同, 指标之间的联系部分已知, 部分未知, 难以完全确定; 且通常会出现卫星实际工作数据难以获取导致样本不够充足的情况, 呈现出灰色系统的特点, 故选用灰色系统理论中的灰色关联分析法来进行评估。

本文基于邓氏灰色关联分析理论, 同时引入熵权法计算指标权重以区分不同指标的重要性, 建立了对地观测卫星姿态控制系统效能评估模型。系统总体评估流程如图 3 所示, 首先, 建立效能指标体系, 并研究指标解算方法求解出效能指标值; 然后, 将指标标准化, 进行指标权重的求解; 最后, 结合指标权重构建灰色关联分析模型, 对观测过程进行效能评估。

2.1 指标标准化处理

由卫星数据计算得到的指标值, 具有类型、趋势性及量纲等数据口径不一致的问题。姿态控制

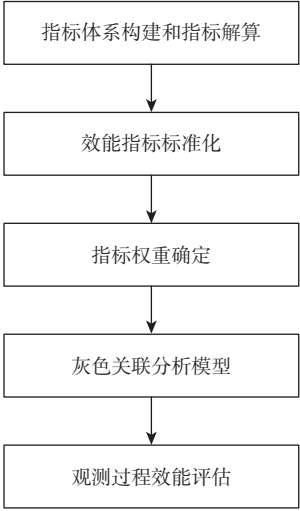


图3 效能评估流程

Fig. 3 Effectiveness assessment process

响应时间的单位为s, 机动角速度的单位为(°)/s, 无法直接进行比较; 不同指标的取值区间跨度较大, 例如指向稳定度通常在 $10^{-4} \sim 10^{-3} (^{\circ})/s$, 姿态控制响应时间通常为十几秒; 指标的趋势也不完全相同, 有的指标如机动角速度越大越好, 有的指标如姿态角指向精度越小越好。

如果直接利用指标的原始数据进行效能评估, 要么困难较大, 要么评估方案不科学, 造成评估结果不合理。因此, 在进行评估之前, 要先对指标进行标准化处理。根据指标值的趋势性, 可分为效益型指标、成本型指标、适中型指标等^[12]。在本文中, 姿态角指向精度、指向稳定度、姿态控制能耗、姿态控制响应时间、姿态角确定精度为成本型指标, 机动角速度和最大侧摆角为效益型指标。

若为效益型指标, 即指标值越大越好, 则可按式(10)将其标准化:

$$I = \begin{cases} 0 & I_0 < I_{\min} \\ \frac{I_0 - I_{\min}}{I_{\max} - I_{\min}} & I_{\min} \leq I_0 \leq I_{\max} \\ 1 & I_0 > I_{\max} \end{cases} \quad (10)$$

若为成本型指标, 即指标值越小越好, 则可按式(11)将其标准化:

$$I = \begin{cases} 0 & I_0 > I_{\max} \\ \frac{I_{\max} - I_0}{I_{\max} - I_{\min}} & I_{\min} \leq I_0 \leq I_{\max} \\ 1 & I_0 < I_{\min} \end{cases} \quad (11)$$

式中: I_0 为某个效能指标计算值; I 为标准化后的指标值, $[I_{\min}, I_{\max}]$ 为指标的目标取值范围区间, 该区间可根据卫星任务需求或指标值的特征选取。

2.2 熵权法确定权重

由于评估体系中每个指标值包含的信息量存在差异性, 因此, 在卫星姿态控制系统综合评估过程中, 各指标值所占有的权重应该不同。对于在不

同机动过程中差异性较大的指标, 其包含的信息量较大, 应取较大的权重值; 在不同机动过程中差异性较小的指标, 信息量较小, 应取较小的权重值。

熵权法正是通过指标值所含信息量的差异性来计算权重的方法。熵的概念来源于热力学, 文献^[13]在此基础上提出了信息熵的概念, 解决了对信息的量化度量问题。根据信息论中的定义, 信息熵的值越小, 指标的离散程度越大, 所包含的信息量就越大, 该指标的权重越大^[14]。熵权法计算指标权重的基本步骤如下。

步骤1 按2.1节方法对效能指标进行预处理。假设预处理后的指标共有 m 组, 效能指标数目为 n 个, 将指标矩阵 A 进行预处理后得到矩阵 $A_{m \times n} = [a_{ij}]_{m \times n}$, 其中, a_{ij} 为第 i 组姿态控制过程的第 j 个预处理后的效能指标。

步骤2 计算第 i 组姿态控制过程中第 j 个效能指标在其指标序列中所占的比重 p_{ij} 为

$$p_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{k=1}^m a_{kj}} \quad (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n) \quad (12)$$

其中, $\sum_{i=1}^m p_{ij} = 1 \quad (j=1, 2, \dots, n)$, 且 $p_{ij} \in [0, 1]$ 。

步骤3 计算第 j 个效能指标的熵值 e_j 为

$$e_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln p_{ij} \quad (13)$$

步骤4 计算第 j 个效能指标的差异系数 g_j (见式(14)), g_j 越大表明该指标越重要, 且 $g_j \in [0, 1]$ 。

$$g_j = 1 - e_j = 1 + \frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln p_{ij} \quad (14)$$

步骤5 计算第 j 个效能指标的权重 ω_j 为

$$\omega_j = \frac{g_j}{\sum_{j=1}^m g_j} \quad (15)$$

2.3 灰色关联分析

对卫星姿态控制系统来说, 系统的工作情况越接近理想状态, 其解算得到的指标值越接近目标值, 相应的系统效能也就越高。因此, 可通过计算不同机动过程的指标序列与理想序列的接近程度, 用接近程度表征系统效能, 来实现卫星姿态控制系统的效能评估。

灰色关联分析是灰色系统理论中一个重要的研究方法, 其基本思想是确定参考序列和比较序列的曲线几何形状来判断其之间的联系是否紧密, 可以用来计算指标序列和理想序列的接近程度^[15]。最早的灰色关联分析研究成果是邓氏灰色关联分析模型, 该模型基于灰关联四公理, 根据序列对应点之间的距离关系度量系统不同因素发展趋势的

相似性。本文基于邓氏灰色关联分析模型,设计的效能评估模型主要包括以下几个步骤。

步骤 1 预处理后得到矩阵 $\mathbf{A}_{m \times n} = [a_{ij}]_{m \times n}$, 其中, a_{ij} 为第 i 组姿态控制过程的第 j 个预处理后的效能指标。

步骤 2 按 2.2 节权重计算方法方法计算得到指标权重向量 $\boldsymbol{\omega} = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)^T$ 。

步骤 3 确定最优参考序列和最差参考序列:

$$\begin{cases} \mathbf{A}^+ = [\max(a_{i1}), \max(a_{i2}), \dots, \max(a_{in})] = \\ \quad [a_1^+, a_2^+, \dots, a_n^+] \\ \mathbf{A}^- = [\min(a_{i1}), \min(a_{i2}), \dots, \min(a_{im})] = \\ \quad [a_1^-, a_2^-, \dots, a_m^-] \end{cases} \quad (16)$$

式中, \mathbf{A}^+ 为最优参考序列, \mathbf{A}^- 为最差参考序列。

步骤 4 分别计算每组指标与最优参考序列和最差参考序列的距离矩阵:

$$\begin{cases} \mathbf{B}_{m \times n}^+ = \begin{bmatrix} b_{11}^+ & b_{12}^+ & \dots & b_{1n}^+ \\ b_{21}^+ & b_{22}^+ & \dots & b_{2n}^+ \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ b_{m1}^+ & b_{m2}^+ & \dots & b_{mn}^+ \end{bmatrix} \\ \mathbf{B}_{m \times n}^- = \begin{bmatrix} b_{11}^- & b_{12}^- & \dots & b_{1n}^- \\ b_{21}^- & b_{22}^- & \dots & b_{2n}^- \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ b_{m1}^- & b_{m2}^- & \dots & b_{mn}^- \end{bmatrix} \end{cases} \quad (17)$$

式中: $b_{ij}^+ = |a_{ij} - a_i^+|$; $b_{ij}^- = |a_{ij} - a_i^-|$; $\mathbf{B}_{m \times n}^+$ 为指标与最优参考序列的距离矩阵; $\mathbf{B}_{m \times n}^-$ 为指标与最差参考序列的距离矩阵。

步骤 5 确定灰色关联分辨系数

灰色关联分辨系数 ρ_j 是计算灰色关联度时人为取值的一个常数,一般根据经验取 0.5,但本文中不同效能指标序列的特性不同,姿态角指向精度、指向稳定度等指标序列波动较大,而姿态角确定精度和最大侧摆角的指标序列较为平缓。 ρ_j 根据经验取值对序列的灰色关联度计算结果影响较大,会使得到的评估结果不准确。

应根据序列情况动态确定灰色关联分辨系数 ρ_j , 当序列波动较大时, ρ_j 应该取较小值,以减小异常值对结果的影响;当序列较平时, ρ_j 应该取较大值,以体现关联度的整体性^[16]。动态确定灰色关联分辨系数的方法如下:

$$\begin{cases} M^+ = \max_{j=1}^n \max_{i=1}^m b_{ij}^+ \\ m^+ = \min_{j=1}^n \min_{i=1}^m b_{ij}^+ \\ M^- = \max_{j=1}^n \max_{i=1}^m b_{ij}^- \\ m^- = \min_{j=1}^n \min_{i=1}^m b_{ij}^- \end{cases} \quad (18)$$

式中: M^+ 、 m^+ 、 M^- 、 m^- 分别为距离矩阵 $\mathbf{B}_{m \times n}^+$ 和 $\mathbf{B}_{m \times n}^-$ 中的最大值和最小值,其某一列元素的平均值如式(19)所示。

再计算中间变量 ε_j^+ 、 ε_j^- (见式(20)), 根据其大

小确定灰色关联分辨系数。

$$\begin{cases} b_j^+ = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m b_{ij}^+ & j = 1, 2, \dots, n \\ b_j^- = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m b_{ij}^- & j = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (19)$$

$$\begin{cases} \varepsilon_j^+ = \frac{b_j^+}{M^+} & j = 1, 2, \dots, n \\ \varepsilon_j^- = \frac{b_j^-}{M^-} & j = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (20)$$

式中: b_j^+ 和 b_j^- 分别为距离矩阵 $\mathbf{B}_{m \times n}^+$ 和 $\mathbf{B}_{m \times n}^-$ 某一列元素的平均值。

设最优序列和最差序列的灰色关联分辨系数为 $\rho^+ = [\rho_1^+, \rho_2^+, \dots, \rho_n^+]$, $\rho^- = [\rho_1^-, \rho_2^-, \dots, \rho_n^-]$, 其中, ρ_j^+ 和 ρ_j^- 分别为

$$\begin{cases} \rho_j^+ = \begin{cases} 1.5\varepsilon_j^+ & \frac{1}{\varepsilon_j^+} > 3 \\ 2\varepsilon_j^+ & 2 \leq \frac{1}{\varepsilon_j^+} \leq 3 \\ 0.9 & 0 < \frac{1}{\varepsilon_j^+} < 2 \\ 0.5 & \varepsilon_j^+ = 0 \end{cases} \\ \rho_j^- = \begin{cases} 1.5\varepsilon_j^- & \frac{1}{\varepsilon_j^-} > 3 \\ 2\varepsilon_j^- & 2 \leq \frac{1}{\varepsilon_j^-} \leq 3 \\ 0.9 & 0 < \frac{1}{\varepsilon_j^-} < 2 \\ 0.5 & \varepsilon_j^- = 0 \end{cases} \end{cases} \quad (21)$$

式中: ρ_j^+ 和 ρ_j^- 为第 j 个指标的灰色关联分辨系数。

步骤 6 分别计算与最优序列和最差序列的灰色关联系数矩阵, 其系数为

$$\begin{cases} \xi_{\theta}^+ = \frac{m^+ + \rho_j^+ M^+}{b_{ij}^+ + \rho_j^+ M^+} \\ \xi_{\varphi}^- = \frac{m^- + \rho_j^- M^-}{b_{ij}^- + \rho_j^- M^-} \end{cases} \quad (22)$$

ξ_{ij}^+ 和 ξ_{ij}^- 分别为 a_{ij} 与最优序列和最差序列的灰色关联系数, 系数矩阵为

$$\begin{cases} \boldsymbol{\xi}^+ = \begin{bmatrix} \xi_{11}^+ & \xi_{12}^+ & \dots & \xi_{1n}^+ \\ \xi_{21}^+ & \xi_{22}^+ & \dots & \xi_{2n}^+ \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \xi_{m1}^+ & \xi_{m2}^+ & \dots & \xi_{mn}^+ \end{bmatrix} \\ \boldsymbol{\xi}^- = \begin{bmatrix} \xi_{11}^- & \xi_{12}^- & \dots & \xi_{1n}^- \\ \xi_{21}^- & \xi_{22}^- & \dots & \xi_{2n}^- \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \xi_{m1}^- & \xi_{m2}^- & \dots & \xi_{mn}^- \end{bmatrix} \end{cases} \quad (23)$$

式中: $\boldsymbol{\xi}^+$ 与 $\boldsymbol{\xi}^-$ 为指标与最优序列和最差序列的灰色关联系数矩阵。

步骤 7 分别计算第 i 组指标向量对于最优、最次参考指标序列的灰色关联度 R_i^+ 和 R_i^- 分别为

$$\begin{cases} R_i^+ = \sum_{j=1}^n \omega_j \xi_{ij}^+ & i = 1, 2, \dots, m \\ R_i^- = \sum_{j=1}^n \omega_j \xi_{ij}^- & i = 1, 2, \dots, m \end{cases} \quad (24)$$

步骤 8 计算综合灰色关联度

设第 i 组序列隶属于最优参考序列的系数为 μ_i , μ_i 越大该序列越接近最优序列。基于最小二乘原理, 将误差的平方和减到最小, 构造目标函数如下:

$$f(\mu_i) = \min \left\{ \sum_{i=1}^m \left\{ [(1-\mu_i)R_i^+]^2 + [\mu_i R_i^-]^2 \right\} \right\} \quad (25)$$

求导取极值点可解得综合灰色关联度为

$$R_i = \mu_i = \frac{(R_i^+)^2}{(R_i^+)^2 + (R_i^-)^2} = \frac{1}{1 + \left(\frac{R_i^-}{R_i^+}\right)^2} \quad (26)$$

式中: R_i 为第 i 个控制过程的综合灰色关联度, R_i 越大, 代表该卫星姿态控制过程效能越高, 通过计算综合灰色关联度可实现对卫星姿态控制系统的效能评估。

3 效能评估实例分析

3.1 气浮台介绍

为保证卫星姿控系统在太空中运行时能稳定

地工作, 需要预先在地面进行大量的模拟实验。但是由于地球引力的存在, 地面上无法准确的模拟卫星在太空中的工作环境。随着卫星仿真模拟技术不断发展, 气浮仿真平台就应运而生, 其可利用高压气膜在系统的接触部位喷射气体, 使得平台接触部位相互分离, 从而模拟外太空微重力及微摩擦的环境。卫星利用气浮仿真平台实现的全物理仿真实验与传统的数学仿真相比, 可替代因无法用准确数学模型描述的仿真环节, 并将其直接代入控制回路中, 从而可实现卫星特定功能的仿真。气浮仿真平台进行卫星模拟成本低且可多次重复使用, 是国内外进行卫星地面模拟的主要方法^[17]。

微型三轴气浮台系统如图 4 所示, 气浮台系统由计算机测试系统、三正一斜装的飞轮、陀螺和视觉定姿系统组成。气浮台上设置有多个同心圆靶标, 视觉定姿系统通过工业相机拍摄特征靶标图像, 采用图像处理技术提取靶标位置, 再利用姿态确定算法解算出气浮台的当前姿态。对计算机测试系统加载机动指令, 气浮仿真平台可按照姿态控制系统的控制模型进行姿态机动, 模拟卫星在太空的机动状态。本文以该系统进行卫星姿态机动仿真, 获取实验数据。

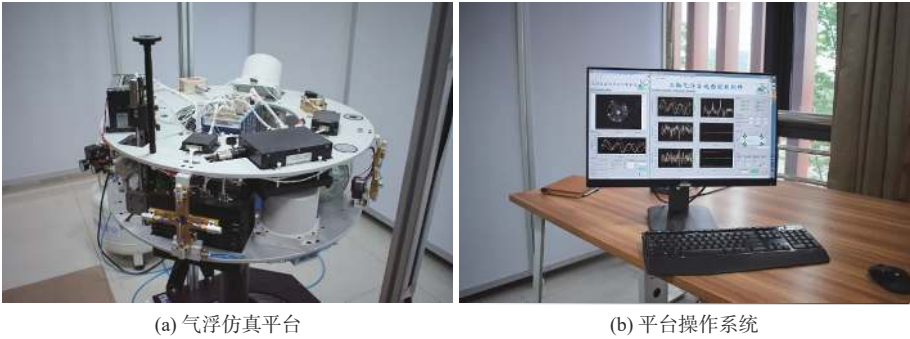


图 4 微型三轴气浮台系统
Fig. 4 Micro triaxial air floatation table system

3.2 评估结果

采用气浮仿真平台模拟卫星在轨运行的状态, 对该平台加载卫星姿态控制指令, 通过计算机控制系统实时得到对应的卫星姿态机动模拟数据。按 1.2 节提到的指标解算方法得到各机动过程的效能指标, 如表 1 所示。

按 2.1 节方法将效能指标标准化, 结果如表 2 所示。

再按 2.3 节的方法计算灰色关联度, 综合灰色关联度计算结果如图 5 所示, 并对结果进行优劣排序, 如表 3 所示, 将最优与最差过程指标数据对比如图 6 所示。

由评估结果可知, S13 和 S17 机动过程综合灰色关联度较大, 姿态控制系统效能更高; S19 和 S11 机动过程综合灰色关联度较小, 姿态控制系统效能比较差。这几个机动过程的效能指标对比如图 6 所示, S13 过程中姿态角指向精度和指向稳定度均达到最优, 且其余指标值都比较优秀, 故效能评估结果最优; S17 过程在指向稳定度等多项指标上为最优值, 但是机动角速度这一指标较差, 所以评估结果排在前列但略差于 S13 过程。S11 过程在机动角速度这项上达到最优, 但在指向稳定度这一项上最差; S19 过程在最大侧摆角和姿态控制响应时间上为最优值, 但是在姿态角指向精度和姿态控制能

表 1 机动过程效能指标							
Table 1 Motorized process effectiveness indicators							
编号	姿态角指向精度/(°)	指向稳定度/((°)·s ⁻¹)	机动角速度/((°)·s ⁻¹)	姿态控制能耗/J	姿态控制响应时间/s	姿态角确定精度/(°)	最大侧摆角/(°)
S1	0.138 7	0.008 5	0.885 2	0.122 8	9.400 0	0.080 0	31.263 7
S2	0.133 1	0.011 5	0.819 6	0.157 3	14.200 0	0.080 0	31.263 7
S3	0.109 8	0.009 4	0.950 8	0.117 5	9.400 0	0.080 0	28.178 6
S4	0.088 1	0.017 7	0.852 4	0.074 7	11.600 0	0.080 0	28.178 6
S5	0.149 2	0.008 5	0.918 0	0.076 8	8.800 0	0.080 0	31.253 4
S6	0.104 6	0.010 3	0.918 0	0.162 6	12.000 0	0.080 0	32.735 2
S7	0.124 8	0.017 8	0.918 0	0.157 3	7.200 0	0.080 0	32.735 2
S8	0.109 5	0.018 1	1.016 3	0.116 5	6.200 0	0.080 0	31.255 4
S9	0.098 8	0.013 7	1.049 1	0.105 2	5.400 0	0.080 0	31.263 7
S10	0.105 1	0.007 5	1.180 3	0.169 7	10.200 0	0.080 0	31.263 7
S11	0.121 5	0.054 6	1.016 3	0.131 7	14.000 0	0.080 0	30.252 4
S12	0.086 2	0.010 9	0.819 6	0.050 6	8.200 0	0.080 0	31.263 7
S13	0.085 3	0.009 1	0.950 8	0.105 8	6.200 0	0.080 0	31.282 7
S14	0.063 4	0.015 2	0.918 0	0.105 7	12.400 0	0.080 0	31.250 0
S15	0.106 6	0.023 6	0.983 5	0.092 3	7.400 0	0.080 0	31.243 0
S16	0.075 3	0.008 5	0.655 7	0.044 8	5.200 0	0.080 0	31.280 0
S17	0.113 6	0.006 0	0.885 2	0.077 2	5.200 0	0.080 0	31.280 0
S18	0.159 6	0.027 1	0.918 0	0.116 1	9.000 0	0.080 0	32.674 2
S19	0.275 0	0.013 8	0.918 0	0.325 7	4.600 0	0.080 0	32.674 2

表 2 效能指标标准化结果							
Table 2 Standardized results of performance indicators							
编号	姿态角指向精度	指向稳定度	机动角速度	姿态控制能耗	姿态控制响应时间	姿态角确定精度	最大侧摆角
S1	0.742 0	1.000 0	0.770 4	0.772 0	0.706 7	0.800 0	0.908 0
S2	0.779 3	0.925 0	0.639 2	0.427 0	0.386 7	0.800 0	0.908 0
S3	0.934 7	1.000 0	0.901 6	0.825 0	0.706 7	0.800 0	0.522 3
S4	1.000 0	0.615 0	0.704 8	1.000 0	0.560 0	0.800 0	0.522 3
S5	0.672 0	1.000 0	0.836 0	1.000 0	0.746 7	0.800 0	0.906 7
S6	0.969 3	0.985 0	0.836 0	0.374 0	0.533 3	0.800 0	1.000 0
S7	0.834 7	0.610 0	0.836 0	0.427 0	0.853 3	0.800 0	1.000 0
S8	0.936 7	0.595 0	1.000 0	0.835 0	0.920 0	0.800 0	0.906 9
S9	1.000 0	0.815 0	1.000 0	0.948 0	0.973 3	0.800 0	0.908 0
S10	0.966 0	1.000 0	1.000 0	0.303 0	0.653 3	0.800 0	0.908 0
S11	0.856 7	0.000 0	1.000 0	0.683 0	0.400 0	0.800 0	0.781 6
S12	1.000 0	0.955 0	0.639 2	1.000 0	0.786 7	0.800 0	0.908 0
S13	1.000 0	1.000 0	0.901 6	0.942 0	0.920 0	0.800 0	0.910 3
S14	1.000 0	0.740 0	0.836 0	0.943 0	0.506 7	0.800 0	0.906 3
S15	0.956 0	0.320 0	0.967 0	1.000 0	0.840 0	0.800 0	0.905 4
S16	1.000 0	1.000 0	0.311 4	1.000 0	0.986 7	0.800 0	0.910 0
S17	0.909 3	1.000 0	0.770 4	1.000 0	0.986 7	0.800 0	0.910 0
S18	0.602 7	0.145 0	0.836 0	0.839 0	0.733 3	0.800 0	1.000 0
S19	0.000 0	0.810 0	0.836 0	0.000 0	1.000 0	0.800 0	1.000 0

耗均为最差,故这 2 个过程效能评估结果垫底,要提升其效能表现可从指向稳定度和姿态角指向精度等方面着手(见表 2 加粗部分)。

综上,本文提出的基于灰色关联分析的效能评

估模型,可以实现对地观测卫星姿态控制系统的效能评估。但当不同过程工作情况类似,即各指标包含的信息量较少时,效能评估结果会不太准确,在后续的研究中可针对这一问题进行改进。

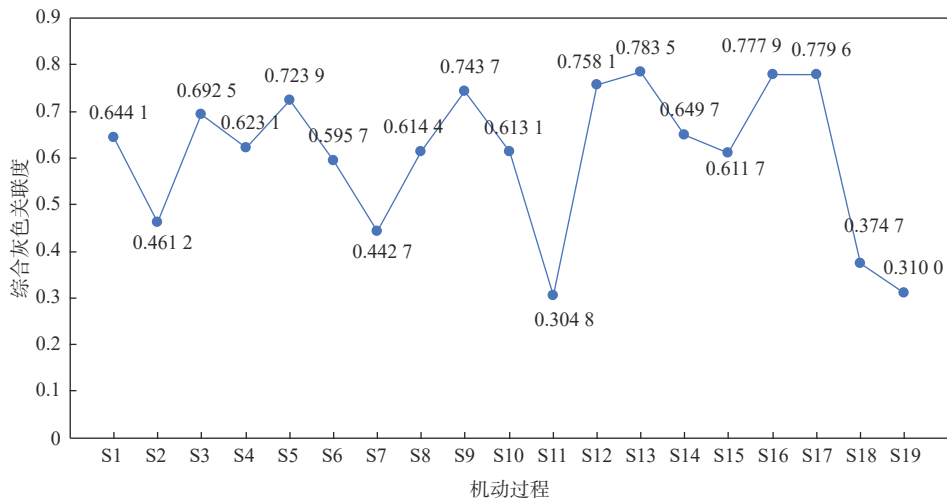


图 5 综合灰色关联度评估结果

Fig. 5 Integrated grey correlation assessment results

表 3 综合评估结果

Table 3 Comprehensive assessment results

编号	最优序列关联度	最差序列关联度	综合灰色关联度
S13	0.910 9	0.478 8	0.783 5
S17	0.902 0	0.479 6	0.779 6
S16	0.935 4	0.499 9	0.777 9
S12	0.875 0	0.494 2	0.758 1
S9	0.834 0	0.489 7	0.743 7
S5	0.815 2	0.503 4	0.723 9
S3	0.774 9	0.516 3	0.692 5
S14	0.727 5	0.534 2	0.649 7
S1	0.703 6	0.522 9	0.644 1
S4	0.715 1	0.556 2	0.623 1
S8	0.668 1	0.529 3	0.614 4
S10	0.720 9	0.572 7	0.613 1
S15	0.709 4	0.565 2	0.611 7
S6	0.696 6	0.573 9	0.595 7
S2	0.561 0	0.606 4	0.461 2
S7	0.522 8	0.586 6	0.442 7
S18	0.502 4	0.649 0	0.374 7
S19	0.502 7	0.750 0	0.310 0
S11	0.481 5	0.727 2	0.304 8

3.3 方法对比

优劣解距离法和模糊综合评价法是常用的综合效能评估方法。优劣解距离法通过计算评价指标与优劣解之间的相对贴近程度,从而对研究对象打分确定最优方案,具备直观的几何意义。模糊综合评价法是一种基于模糊数学理论的综合评价方法。该方法根据模糊数学的隶属度理论把定性评价转化为定量评价,即用模糊数学对受到多种因素制约的事物或对象作出一个总体的评价,具有结果清晰、系统性强的特点。分别采用优劣解距离法和模糊综合评价法对气浮台数据进行处理,评估结果如表 4 所示。

灰色关联分析,优劣解距离法和模糊综合评价 3 种方法的评估结果中最优的机动过程均为 S13,对应的综合评估值分别为 0.783 5、0.946 4 和 0.971 7。灰色关联分析法结果中最差的为 S11 机动过程,优劣解距离法和模糊综合评价法最差的机动过程是

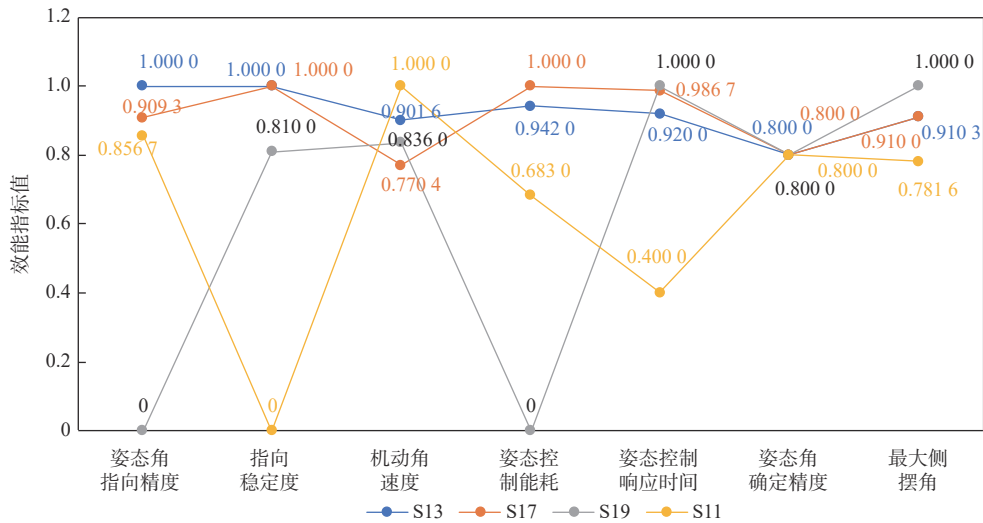


图 6 效能指标值对比

Fig. 6 Comparison of efficiency index values

表 4 评估结果对比		
Table 4 Comparison of assessment results		
灰色关联分析	优劣解距离法	模糊综合评价
0.783 5(S13)	0.946 4(S13)	0.971 7(S13)
0.779 6(S17)	0.925 5(S17)	0.971 1(S17)
0.777 9(S16)	0.885 6(S9)	0.959 3(S16)
0.758 1(S12)	0.881 1(S12)	0.948 6(S12)
0.743 7(S9)	0.837 0(S5)	0.935 4(S9)
0.723 9(S5)	0.836 0(S16)	0.921 1(S5)
0.692 5(S3)	0.835 1(S3)	0.905 8(S3)
0.649 7(S14)	0.798 1(S1)	0.870 2(S1)
0.644 1(S1)	0.781 3(S14)	0.867 2(S14)
0.623 1(S4)	0.746 7(S8)	0.838 9(S8)
0.614 4(S8)	0.731 4(S4)	0.834 9(S4)
0.613 1(S10)	0.663 5(S6)	0.801 7(S15)
0.611 7(S15)	0.654 8(S15)	0.798 7(S10)
0.595 7(S6)	0.653 3(S10)	0.795 9(S6)
0.461 2(S2)	0.628 9(S2)	0.740 8(S2)
0.442 7(S7)	0.599 1(S7)	0.720 1(S7)
0.374 7(S18)	0.516 5(S18)	0.655 7(S18)
0.310 0(S19)	0.468 6(S11)	0.595 7(S11)
0.304 8(S11)	0.430 0(S19)	0.564 9(S19)

注: (Si)表示机动过程。

S19, 综合评估值分别为 0.310 0、0.430 0 和 0.564 9。由此可得, 3 种方法的最大最小评估结果差值分别为 0.473 5、0.516 4、0.406 8。优劣解距离法的差值最大, 本文的灰色关联分析结果差值次之, 模糊综合评价法最小。最大最小评估结果差值越大, 表明评估结果的跨度区间较大, 能更加有效地区分不同机动过程的优劣性。

由表 2 数据可知, S16 机动过程在指向稳定度、姿态控制能耗、响应时间和最大侧摆角 4 项指标上均优于 S9 机动过程, 仅在机动角速度这一指标比 S9 差。在优劣解距离法的评估结果中, 机动过程 S9 综合评估值优于 S16, 这一评估结果不太合理, 灰色关联分析和模糊综合评价中则不存在这种问题。综上所述, 与常用的效能评估方法相比, 本文提出的灰色关联分析较为合理, 更适用于卫星姿态控制系统的效能评估。

4 结 论

1) 通过卫星任务需求分析构建了对地观测卫星姿态控制系统效能评估指标体系, 并根据对地观测卫星系统运行原理与模型, 给出本文评估指标体系中各效能指标的定义和解算方法。

2) 基于灰色关联分析理论建立效能评估模型, 并采用熵权法计算得到效能指标的权重, 对卫星姿

态控制系统进行综合效能评估。

3) 通过气浮仿真平台模拟对地观测卫星的姿态机动, 验证了本文评估模型的可行性, 为卫星系统的优化工作提供了参考。

后续的研究工作可在指标权重确定和评估模型构建等领域开展, 进一步考虑指标数据的其他特性, 如相关性、不确定性等对评估过程的影响, 进一步优化卫星姿态控制系统效能评估结果。

参考文献 (References)

[1] GUO H D, FU W X, LIU G. Chinese earth observation satellites[C]//Proceedings of the Scientific Satellite and Moon-Based Earth Observation for Global Change. Berlin: Springer, 2019: 189-243.

[2] RIVETT C, PONTECORVO C. Improving satellite surveillance through optimal assignment of assets: DSTO-TR-1488[R]. Canberra: Australian Government Department of Defense, 2003: 1-36.

[3] BOLKUNOV A I, KRASIL'SHIKOV M N, MALYSHEV V V. Comprehensive assessment of the effectiveness of navigation satellite systems[J]. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2022, 61(3): 430-446.

[4] SHAO R R, FANG Z G, TAO L Y, et al. A comprehensive G-Lz-ADC effectiveness evaluation model for the single communication satellite system in the context of poor information[J]. *Grey Systems:Theory and Application*, 2022, 12(2): 417-461.

[5] 易山. 基于不确定性的遥感卫星系统效能评估[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021: 10-35.
YI S. Effectiveness evaluation of remote sensing satellite system based on uncertainty[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021: 10-35(in Chinese).

[6] KAZAKEVICIUTE-JANUSKEVICIENE G, JANUSONIS E, BAUSYS R. Evaluation of the segmentation of remote sensing images[C]//Proceedings of the 2021 IEEE Open Conference of Electrical, Electronic and Information Sciences. Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-7.

[7] MUHURI A, GASCOIN S, MENZEL L, et al. Performance assessment of optical satellite-based operational snow cover monitoring algorithms in forested landscapes[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2021, 14: 7159-7178.

[8] WANG Y X, ZHAO Y Y. A data-based performance evaluation method for aircraft attitude control system[C]//Proceedings of the 2021 40th Chinese Control Conference. Piscataway: IEEE Press, 2021: 6691-6696.

[9] 闻新, 龙弟之, 王俊鸿, 等. 基于 1D-CNN 的卫星姿态控制系统故障诊断方法[J]. *兵工自动化*, 2020, 39(7): 1-6.
WEN X, LONG D Z, WANG J H, et al. Fault diagnosis method of satellite attitude control system based on 1D-CNN[J]. *Ordnance Industry Automation*, 2020, 39(7): 1-6(in Chinese).

[10] 钱晨. 基于遥测数据的卫星姿态控制系统故障检测方法[D]. 杭州: 浙江大学, 2021: 11-59.
QIAN C. Satellite attitude control system fault detection method based on telemetry data[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021:

11-59(in Chinese).

[11] 肖磊. 基于星敏感器和陀螺组合的卫星姿态确定方法研究[D]. 长春: 中国科学院大学 (中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2021: 9-39.
XIAO L. Research on satellite attitude determination method based on the combination of star-sensor and gyroscope[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2021: 9-39(in Chinese).

[12] LIU S F, IIN Y. Grey Systems: Theory and application[M]. Berlin: Springer, 2010: 44-45.

[13] 黄乾坤, 吴娅辉. 最大熵原理及改进方法的研究现状[J]. 计测技术, 2022, 42(1): 9-17.
HUANG Q K, WU Y H. Research status of the maximum entropy principle and improved methods[J]. Metrology & Measurement Technology, 2022, 42(1): 9-17(in Chinese).

[14] 郑天芳, 曲娜, 张帅, 等. 基于 AHP-熵权法的高层建筑电气火灾风险评价[J]. 沈阳航空航天大学学报, 2022, 39(1): 69-76.
ZHENG T F, QU N, ZHANG S, et al. Electrical fire risk assess-

ment of high-rise buildings based on AHP-entropy weight method[J]. Journal of Shenyang Aerospace University, 2022, 39(1): 69-76(in Chinese).

[15] XIAO X P, GUO H. Optimization method of grey relation analysis based on the minimum sensitivity of attribute weights[C]//Proceedings of the Advances in Grey Systems Research. Berlin: Springer, 2010: 177-189.

[16] 东亚斌, 段志善. 灰色关联度分辨系数的一种新的确定方法[J]. 西安建筑科技大学学报 (自然科学版), 2008, 40(4): 589-592.
DONG Y B, DUAN Z S. A new determination method for identification coefficient of grey relational grade[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2008, 40(4): 589-592(in Chinese).

[17] 李旭东. 基于气浮台的航天器姿轨控地面模拟系统关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020: 9-25.
LI X D. Research on key technologies of spacecraft attitude and orbit control ground simulation system based on air float platform[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020: 9-25(in Chinese).

Effectiveness evaluation method for earth observation satellite attitude control system

CAO Yin¹, CHENG Yuehua^{1,*}, GAO Bo², ZHANG Yanhua¹, XU Guili¹

(1. School of Automation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211100, China;
2. China Xi'an Satellite Monitoring and Control Center, Xi'an 710000, China)

Abstract: The problem of satellite system effectiveness assessment is the basis of satellite efficiency improvement and satellite program optimization design. Taking the attitude control system for earth observation satellite attitude control system as the object of effectiveness assessment, an analysis of satellite requirements is conducted to establish the effectiveness assessment index system for the earth observation satellite attitude control system. Based on the theory related to gray correlation analysis, the entropy weight method was introduced to calculate the index weights, and the effectiveness assessment model was established to calculate the comprehensive gray correlation degree, and realize the effectiveness assessment of satellite attitude control system. The realizability and practicality of the established system were verified through data.

Keywords: satellite attitude control system; effectiveness evaluation; grey relational analysis; entropy weight method; earth observation satellite