

Analysis of Key Constraints of Satellite Orbits Based on Grey Correlation Method

Yang Zhao, Jian Wang, Xiao Zhang, Dong Yan

China Academy of Space Technology Space Star Technology Co. Ltd., Beijing
Email: 709177981@qq.com

Received: Mar. 29th, 2019; accepted: Apr. 12th, 2019; published: Apr. 19th, 2019

Abstract

In recent years, agile optical remote sensing satellites have become the development direction of a new generation of remote sensing satellites. Agile satellites have a large number of operating parameters and performance index parameters when they are in-orbit observation. There is a certain implicit relationship between them. In this paper, the satellite in-orbit application strategy software is used to simulate the fine observation scenes of key targets, and a series of satellite on-orbit working parameters and performance index parameters are obtained. In this paper, the integration time, ground sampling distance (GSD), imaging width, imaging strip length, imaging strip number and five performance indicators are selected as the analysis objects, and the gray correlation method is used to correlate the performance index with the on-orbit parameters. The mining of rules, mining the key factors affecting various performance indicators, and analyzing the mining results, provides a basis for reducing or eliminating the constraints on the imaging performance indicators, simplifying the complexity of the simulation system, and improving the ease of use and ease of use of agile satellites laid the foundation.

Keywords

Grey Correlation Method, Constraint Condition, Performance Index, Key Influencing Factor

基于灰色关联法的卫星在轨关键约束影响分析

赵阳, 王剑, 张晓, 严冬

中国空间技术研究院, 航天恒星科技有限公司, 北京
Email: 709177981@qq.com

收稿日期：2019年3月29日；录用日期：2019年4月12日；发布日期：2019年4月19日

摘要

近年来，敏捷光学遥感卫星成为新一代遥感卫星的发展方向。敏捷卫星在轨对地观测成像时具有大量的工作参数与效能指标参数，二者之间存在一定的隐含关系。本文利用卫星在轨应用策略软件对重点目标精细观测场景进行仿真，得到一系列卫星在轨工作参数与效能指标参数。本文选择积分时间、地面采样间隔(GSD)、成像幅宽、成像条带长度、成像条带数五项效能指标作为分析对象，使用灰色关联法对仿真数据进行效能指标与在轨参数之间关联规则的挖掘，挖掘出影响各效能指标的关键因素，并对挖掘结果进行分析，为今后减少或消除对成像效能指标影响较小的约束条件，简化仿真系统的复杂性提供了依据，也为提升敏捷卫星的好用性与易用性奠定了基础。

关键词

灰色关联法，约束条件，效能指标，关键影响因素

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

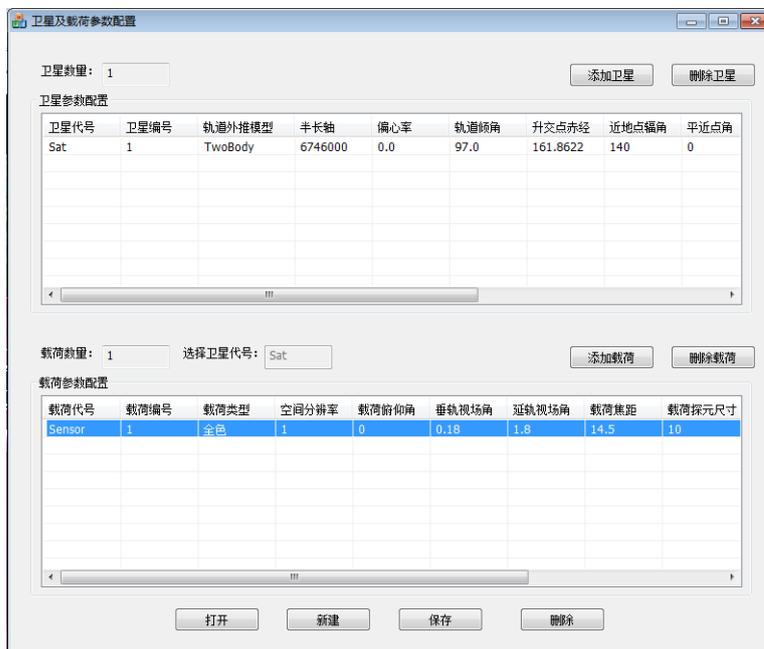
1. 引言

具有动中成像能力的光学遥感卫星成为了新一代敏捷遥感卫星的发展方向[1]。其不仅具备传统卫星成像前后快速姿态机动的能力，而且可以在成像过程中实现边姿态机动边成像的能力[2]。近年来，我国航天事业得到了飞速的发展，相继发射了“高分”、“高景”等一系列高分辨率敏捷遥感卫星，很大程度上提高了我国对地观测的能力，为实现空间监测、国土资源观测、等任务提供了技术的支撑。

敏捷遥感卫星在执行对地观测任务时，有多种观测模式可选择，如被动推扫模式、主动扫描成像模式，同轨多点目标成像模式、同轨多条带成像模式、同轨多角度成像模式等。同时，卫星在轨工作时有大量的工作参数，如卫星的在轨运行姿态参数、卫星轨道参数、观测点经纬度、扫描地速、成像时长、太阳帆板工作参数、数据存储与传输参数等。此外，对于不同的观测模式，敏捷卫星成像的效能，如辐射质量、空间效能、几何质量、目标获取应用能力、任务响应时效、资源利用能力等，也不尽相同。因为工作参数与效能指标的多元性与复杂性，效能指标难以得到准确的评估值。

仿真模拟法是评估遥感卫星效能的常用方法之一[3]。该方法以计算机模拟为基础，通过设定卫星成像的约束条件参数，如轨道六要素、姿态角、姿态角速度、姿态角加速度、地面站参数，任务参数等，通过仿真实验，由实验结果或者经过计算后得到效能指标的估计值。

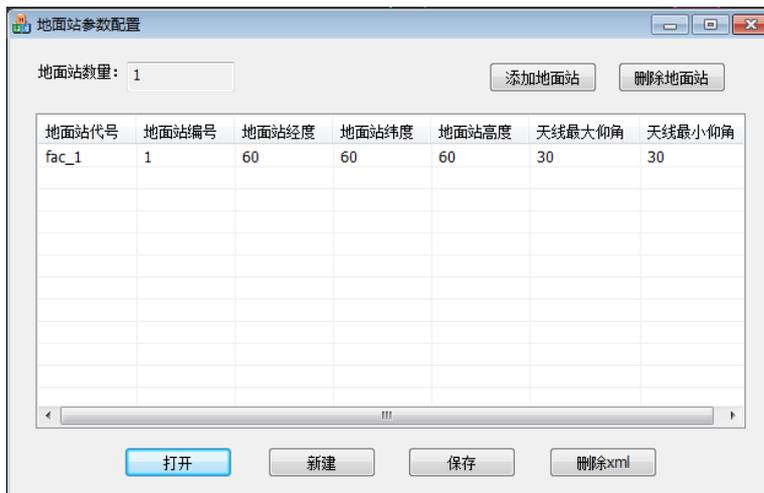
卫星在轨应用策略仿真软件是使用仿真模拟法评估卫星在轨观测效能的软件，利用该仿真软件可对卫星在轨对地成像过程在多种模式下进行模拟仿真，得到一系列仿真数据，仿真界面如图1所示。敏捷卫星在轨成像主动推扫与被动推扫的观测模式[4]。该软件可仿真的工作模式有匀角速度主动推扫模式、匀地速主动推扫模式、匀积分时间主动推扫模式、单点/单条带目标模式、同轨多点目标模式、同轨多条带拼接模式、同轨多角度模式。



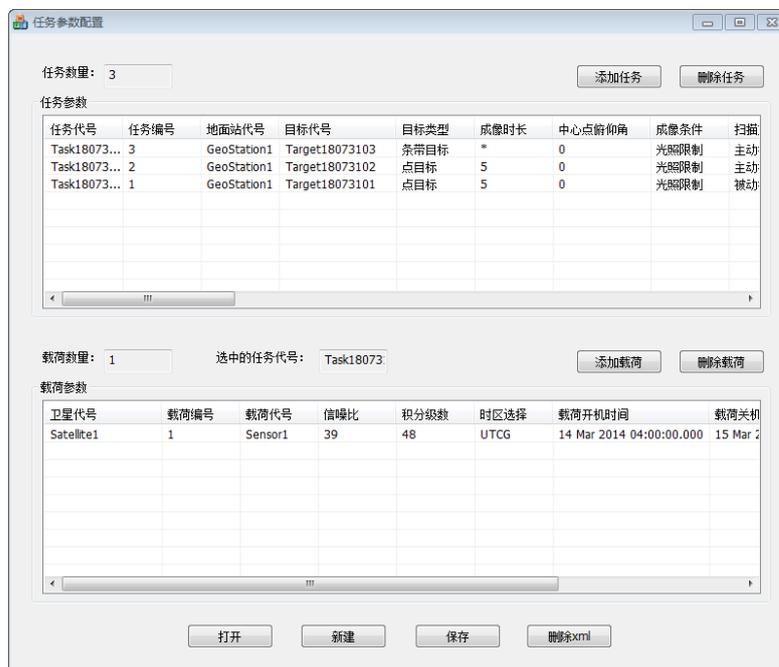
(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Figure 1. Satellite on-orbit application strategy software simulation interface. (a) Satellite parameter setting interface; (b) Target configuration interface; (c) Ground station parameter configuration interface; (d) Task parameter configuration interface; (e) Order configuration interface

图 1. 卫星在轨应用策略软件仿真界面图。(a) 卫星参数设置界面; (b) 目标设置界面; (c) 地面站参数配置界面图; (d) 任务参数设置界面; (e) 订单配置界面

卫星在轨应用策略仿真软件所仿真数据中，约束条件与效能指标这两类数据之间包含有一定的隐藏关系，但敏捷卫星的各约束条件对于各效能评估指标的影响程度不相同。因此，对于敏捷遥感卫星的而言，挖掘各效能指标的关键影响因素，为今后有针对性的提出减少和消除使用约束，提升敏捷遥感卫星使用的好用性与易用性有着重要的作用与意义。

2. 重点目标精细观测参数选择

重点目标精细观测主要是针对重要地物及其周边物理属性进行的高精度、多手段、多方向的综合观测，目的是为了获取目标全方位、深层次、细节化的精细特征。该观测任务主要针对空间分布面积和范围不大，但对目标结构、纹理、光谱、形态等辐射、几何特性探测精细程度具有较高要求的目标。

针对重点目标精细观测任务的特点，其主要的效能指标为辐射质量，几何质量[5]。利用卫星在轨应用策略仿真软件，设置模拟目标，在匀积分时间主动推扫成像模式、同轨多条带成像模式、同轨立体成像模式三种模式下，进行仿真，得到数据挖掘的原始数据。在效能指标中选择 GSD [6]、积分时间[7]、成像幅宽[8]、成像条带长度、成像条带数作为挖掘的对象。

3. 灰色关联分析法

关联规则又称相关性分析，其目的是揭示数据之间的没有直接表示出来的关系[9]。卫星在轨观测时具有大量的约束条件，对于不同的效能指标，各约束条件的影响程度不同，分析各效能指标的关键影响因素，即挖掘出与各效能指标关联度最强的约束条件。

关联规则挖掘所挖掘的数据有着不同的数据类型，可分为布尔型数据与数值型数据[10] [11]。布尔型数据多为离散的、种类化的，显示了这些变量之间的相互关系，多对应于描述事件的发生与否，而数值型数据则包含了一些连续的数据，一般对应参数优化配置或最优方案的选择[12]。

通过卫星在轨观测仿真所得到约束参数与效能指标数据均为数值型数据，因此选择数值型数据关联规则算法进行挖掘。对于数值型数据，最常用的关联规则算法是灰色关联分析法[13]。灰色关联分析法，由邓聚龙教授于 1982 年提出，是将因素之间发展趋势的相似或相异的程度，亦即“灰色关联度”，作为衡量因素间关联程度的一种方法[14]。

以下是灰色关联法的算法步骤[15]，如图 2。

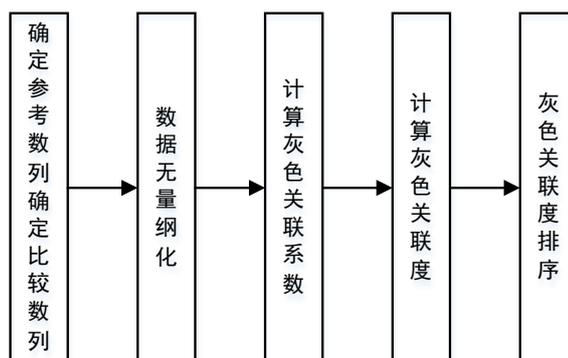


Figure 2. Grey correlation algorithm flow

图 2. 灰色关联法算法流程

1) 确定系统的参考数列和比较数列：参考数列是反映系统行为特征的数列，比较数列是影响系统行为因素组成的数列。在本文中，将卫星在轨成像效能指标作为参考数列，各在轨约束参数作为比较数列。

2) 对参考数列和比较数列进行无量纲化处理：由于系统中各数据所表示的物理意义不同，导致数据的量纲也不相同，不便于进行比较，或在比较时不易得到正确的结论。因此在进行灰色关联度计算分析时，都要事先进行数据的无量纲化处理。

3) 求参考数列与比较数列的灰色关联系数 $\xi(X_i)$ ：所谓关联程度，实质上是曲线间几何形状的差别

程度。因此曲线间差值大小，可作为关联程度的衡量尺度。对于一个参考数列 X_0 有若干个比较数列 X_1, X_2, \dots, X_n ，各比较数列与参考数列在各个时刻(即曲线中的各点)的关联系数 $\xi(X_i)$ 可由公式(1)算出：

$$\xi_{oi} = \frac{\Delta(\min) + \rho\Delta(\max)}{\Delta_{oi}(k) + \rho\Delta(\max)} \quad (1)$$

式中 ρ 为分辨系数，一般在 0~1 之间，通常取 0.5，其值越小，分辨力越强，当其不大于 0.5463 时，分辨力最好。第二级最小差记为 $\Delta(\min)$ 。两级最大差记为 $\Delta(\max)$ 。各比较数列 X_i 曲线上的每一个点与参考数列 X_0 曲线上的每一个点的绝对差值记为 $\Delta_{oi}(k)$ 。

4) 灰色关联度的计算：因为关联系数是参考数列与参比较数列在各个时刻(即曲线中的各点)的关联程度值，所以它的数值不止有一个，而信息过于分散不利于对数据进行整体性的比较。因此有必要将各个时刻(即曲线中的各点)的灰色关联系数集成为一个值，即取其平均值，作为比较数列与参考数列间关联程度的数量表示，即灰色关联度 r_i ，如公式(2)：

$$r_i = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \xi_i(k) \quad (2)$$

r_i 是比较数列 x_i 对参考数列 x_0 的灰关联度，也被称为序列关联度、平均关联度、线关联度。 r_i 值越接近 1，说明相关性越好，反之，相关性越差。

5) 关联度排序：因素间的关联程度，主要是用关联度的大小次序描述，而不仅是关联度的大小。将 m 个子序列对同一母序列的关联度按大小顺序排列起来，便组成了关联序，记为 $\{x\}$ ，它反映了对于母序列来说各子序列的“优劣”关系。若 $r_{oi} > r_{oj}$ ，则称 $\{x_i\}$ 对于同一母序列 $\{x_0\}$ 优于 $\{x_j\}$ ，记为 $\{x_i\} > \{x_j\}$ ； r_{oi} 表示第 i 个子序列对母序列特征值。由此可得到各效能指标数列的关键约束排序。

4. 卫星在轨关键约束影响分析结果

本文设定一系列虚拟目标，利用卫星在轨应用策略仿真软件对卫星在轨观测进行了仿真。通过灰色关联法的分析，求得各约束与效能指标之间的灰色关联度如表 1 所示。

Table 1. Gray correlation table of various performance indicators and on-orbit parameters

表 1. 各效能指标与在轨参数的灰色关联度表

约束因素	积分时间	GSD	成像幅宽	条带长度	条带数目
半长轴	0.702493	0.698339	0.670854	0.698134	0.657273
偏心率	0.576747	0.674191	0.740099	0.598	0.551954
轨道倾角	0.514303	0.604912	0.66136	0.538379	0.499153
升交点赤径	0.534926	0.636888	0.696123	0.54381	0.500942
近地点幅角	0.698196	0.687324	0.659467	0.686199	0.648052
真近点角	0.756477	0.741708	0.655932	0.801078	0.776039
平近点角	0.759013	0.738254	0.650648	0.802049	0.778146
俯仰角	0.570311	0.618723	0.670813	0.618734	0.598443
滚动角	0.545808	0.63239	0.684431	0.579383	0.544638
偏航角	0.579362	0.651443	0.700409	0.608837	0.564528
合成角	0.660858	0.773867	0.76513	0.635675	0.594678
俯仰角速度	0.541061	0.635654	0.69218	0.547688	0.506386
滚动角速度	0.616587	0.727744	0.798297	0.66612	0.640337

Continued

偏航角速度	0.718814	0.909964	0.877682	0.730485	0.652859
合成角速度	0.651351	0.767499	0.832287	0.676874	0.624758
俯仰角加速度	0.608358	0.701024	0.76609	0.654519	0.613871
滚动角加速度	0.517469	0.584566	0.623417	0.511527	0.475995
偏航角加速度	0.650546	0.746044	0.790693	0.670721	0.624136
斜距	0.674705	0.852573	1	0.689238	0.626333
扫描地速	0.662247	0.826071	0.953863	0.678715	0.618425
摄影点经度	0.752789	0.737008	0.685618	0.769624	0.721818
摄影点纬度	0.773999	0.705987	0.649744	0.774319	0.740173
卫星高度	0.554495	0.652486	0.719879	0.59173	0.546884
星下点经度	0.6908	0.739426	0.733671	0.696305	0.649951
星下点纬度	0.770949	0.713225	0.657133	0.775668	0.735703
条带编号	0.592714	0.690056	0.728103	0.617692	0.554302
每一条带成像时长	0.66511	0.722436	0.718881	0.728701	0.584628
太阳帆板转角	0.652449	0.746817	0.800457	0.713908	0.673775
太阳天顶角	0.502381	0.588662	0.638522	0.509367	0.47463
太阳高度角	0.6603	0.737106	0.776111	0.714132	0.663667
每 1/8 s 的数据量	0.48592	0.537799	0.571907	0.515611	0.480247

由表 1 可知, 对于上述五种效能指标而言, 其关键影响约束不同, 现总结如下:

1) 影响积分时间的关键影响约束为: 摄影点经纬度、星下点经纬度、轨道平近点角、真近点角。

其中, 摄影点经纬度决定了卫星在观测摄影时刻的姿态, 星下点经纬度决定了卫星在观测摄影时刻的在轨道中的位置, 轨道平近点角与真近点角影响摄影时刻轨道的参数, 这些参数进而影响到了观测成像的积分时间。

2) 影响 GSD 的关键影响约束为: 卫星偏航角速度、扫描地速、斜距。

其中, 卫星偏航角速度影响了 CCD 成像的像元尺寸, 由此修正了成像的质量, 借此影响到 GSD 的大小; 扫描地速主要影响了 CCD 像元在 y 轴方向的大小; TDI-CCD 相机单行像元数目固定, 斜距通过影响相机与成像目标之间的距离来影响 GSD 的数值。

3) 影响成像幅宽的关键影响约束为: 斜距、扫描地速、卫星偏航角速度、太阳帆板转角。

其中, 与 GSD 类似, 斜距通过直接影响 GSD, 进而影响到成像的幅宽; 扫描地速主要影响了 CCD 像元在 y 轴方向的大小; 卫星偏航角速度影响了 CCD 成像的像元尺寸, 以此影响成像的幅宽。

4) 影响成像条带长度的关键影响约束为: 真近点角、平近点角、星下点纬度、摄影点纬度; 影响成像条带数的关键影响约束为: 真近点角、平近点角、摄影点纬度、星下点纬度。

成像条带长度、成像条带数可表示卫星在轨观测的范围, 可知影响卫星在轨观测范围的主要影响因素为真近点角、平近点角、星下点纬度、摄影点纬度。其中, 真近点角、平近点角通过影响轨道的形状来影响成像条带的长度, 星下点纬度与摄影点纬度决定了卫星在观测摄影时刻在轨道中的位置与姿态, 而由于遥感卫星多为太阳同步轨道, 轨道倾角接近 90° , 接近于极轨大椭圆轨道, 经度的对轨道高度的影响很小, 而纬度对轨道高度的影响较大。

5. 总结与展望

本文利用卫星在轨应用策略软件, 对重点目标精细观测场景在多种模式下进行仿真, 得到仿真数据

后,使用灰色关联法,对GSD、积分时间、成像条带长度、成像幅宽、成像条带数这五项成像效能指标进行数据相关性分析,挖掘出了影响对应成像效能指标的主要影响因素。

利用本文所挖掘的结果,在今后的研究及卫星在轨应用策略仿真过程中,可只利用关联程度最大的约束条件作为输入,减少或消除对成像效能指标影响较小的约束条件,简化卫星在轨应用仿真的复杂性,同时也能够保证仿真数据的准确性,以此做到提高卫星的易用性与好用性。也为今后使用回归拟合模型代替卫星在轨应用仿真系统并简化数据挖掘模型奠定了基础。

参考文献

- [1] 胡堃,陈刚,孙韬,等.一种大倾角敏捷成像卫星影像的直接定位方法[J].测绘科学,2015,40(2):59-65.
- [2] 段岑薇.卫星动态成像对平台稳定度的需求分析[J].信息通信,2018(8):27-28.
- [3] 刘锋,李琳,孟新.遥感卫星系统能力指标体系构建模式研究[J].航天返回与遥感,2017(6):40-45.
- [4] 张新伟,戴君,刘付强.敏捷遥感卫星工作模式研究[J].航天器工程,2011,20(4):32-38.
- [5] 佚名.航天光学遥感技术[M].北京:中国科学技术出版社,2011.
- [6] 杨秀策,王建荣,周瑜.卫星侧摆摄影对影像地面采样间隔的影响[J].测绘科学与工程,2014(5):25-29.
- [7] Gao, J., Huang, R., Nie, K., *et al.* (2017) Simulation and Optimization of Optical Performance of Time-Delay-Integration Complementary Metal-Oxide-Semiconductor Image Sensor Based on Hybrid Charge-Digital Accumulation Architecture. *Optical Engineering*, **56**, Article ID: 083108.
- [8] 胡芬,金淑英.高分辨率光学遥感卫星宽幅成像技术发展浅析[J].地理信息世界,2017(5):53-58.
- [9] Barkhordari, M. and Niamanesh, M. (2018) Kavosh: An Effective Map-Reduce-Based Association Rule Mining Method. *Journal of Big Data*, **5**, 25. <https://doi.org/10.1186/s40537-018-0129-4>
- [10] 邓景毅.事务间数值型关联规则的数据挖掘[D]:[硕士学位论文].广州:暨南大学,2003.
- [11] 李云燕.仿真数据相关性分析方法研究[D]:[硕士学位论文].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.
- [12] 胡玉伟,马萍,杨明,等.基于改进灰色关联分析的仿真数据综合一致性检验方法[J].北京理工大学学报,2013,33(7):711-715.
- [13] 佚名.异步不等速率航迹速率比对区间灰数关联算法的性能影响仿真分析[J].计算机与数字工程,2018,46(11):2217-2220.
- [14] 李守林,赵瑞,陈丽华.基于灰色关联分析和TOPSIS的物流企业创新绩效评价[J].工业技术经济,2018(4):12-21.
- [15] Xie, C., Bai, J., Wen, Z., *et al.* (2018) Lightning Risk Assessment of Transmission Lines Based on D-S Theory of Evidence and Entropy-Weighted Grey Correlation Analysis. *Energy Internet & Energy System Integration*, Beijing, 26-28 November 2017, 1-6.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2163-145X, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: hjdm@hanspub.org