

doi: 10.7690/bgzdh.2023.09.019

基于系统动力学的航天测量雷达维修保障系统效能评估

许庆

(航天工程大学士官学校, 北京 102200)

摘要: 针对航天测量雷达维修保障系统效能评估难以量化和预测的问题, 设计一种基于系统动力学的维修保障系统效能评估模型。阐述系统动力学建模评估基本步骤, 给出航天测量雷达维修保障系统效能评估因果关系图和存量流图模型, 并给出主要变量的函数方程描述; 通过 Anylogic 仿真软件实现实例验证。验证结果表明: 系统动力学模型评估具有可行性和有效性, 可为持续改进航天测量雷达维修保障系统提供支撑。

关键词: 系统动力学; 航天测量雷达; 系统效能; 数学建模

中图分类号: V443+.2 **文献标志码:** A

Effectiveness Evaluation of Aerospace Tracking Radar Maintenance Support System Based on System Dynamic

Xu Qing

(School of Non-Commissioned Officer, Space Engineering University, Beijing 102200, China)

Abstract: Aiming at the problem that it is difficult to quantify and predict the effectiveness evaluation of the maintenance and support system of space measurement radar, an effectiveness evaluation model of the maintenance and support system based on system dynamics is designed. The basic steps of system dynamics modeling and evaluation are described, and the causality diagram and inventory flow diagram models for effectiveness evaluation of aerospace instrumentation radar maintenance support system are given, and the function equations for the main variables are described. The example verification is realized by Anylogic simulation software. The results show that the system dynamics model evaluation is feasible and effective, which can provide support for the continuous improvement of the maintenance support system of space measurement radar.

Keywords: system dynamics; space measurement radar; system effectiveness; mathematical modeling

0 引言

航天测量雷达直接服务于飞行器外弹道测量任务。深入全面地进行效能分析, 能科学制定技术性能指标, 最大限度地发挥航天测量雷达的综合能力。分析总体效能时可通过改变某个参数值来确定其对总体效能的影响程度。基于系统动力学研究航天测量雷达维修保障系统的动态运行, 分析各要素变量的因果关系, 以便利用敏感变量的微小变化来提高航天测量雷达的系统效能, 为今后航天测量雷达的改进发展提供依据。

1 系统动力学原理

系统动力学被称为“系统抽象仿真实验室”, 是美国学者佛利斯特针对能量反馈系统提出的仿真建模研究方法^[1]。以系统动力学为基础的建模分析具体步骤如下:

1) 系统分析。确定航天测量雷达维修保障系统

所要探讨的基本问题和主要矛盾, 形成以组织、作业、技术 3 层面设置系统主要变量。

2) 结构分析。分析系统仿真的整体和各局部模块的反馈循环机制, 定义系统仿真的各种变量和变量的类型, 绘制基于变量之间关系的因果关系图。

3) 模型建立。在形成因果关系图的基础上确定航天测量雷达维修保障系统状态变量、速率变量等辅助变量, 建立系统动力学存量流图模型。在系统动力学存量流图模型中画出各变量之间的关系, 写出该变量的函数方程表达式^[2]。

4) 模型模拟与分析。赋予程序原始数据和政策变量, 通过软件平台对模型进行模拟仿真实验, 结合结果曲线图表, 实现系统的评估预测, 分析系统短板, 寻找解决途径。

5) 模型检验与评估。检验模型运行情况, 随着认识的不断深入, 及时调整和优化航天测量雷达维修保障中动力学模型架构。

6) 模型应用。将系统动力学所构建的仿真模型系统所得到的模拟决策优化方案应用于实践的过程。

2 航天测量雷达维修保障系统效能模型

根据航天测量雷达维修保障人员的广泛调研，划层次分析维修保障任务活动的影响因素，确定组织管理、基地级维修保障作业、高新技术动员力量运用、部队级维修保障作业、器材筹措储备供应、技术支撑和风险干扰 7 个主要变量描述航天测量雷达维修保障系统效能。

假设在模型仿真周期内外部环境相对稳定，不会发生剧烈变化。系统内部渐进式发展，不会发生结构突变。采用因果链路的形式描述各要素，构建基于正负反馈结构的航天测量雷达维修保障系统效能因果关系^[3]。根据系统动力学原理^[1-2]，因果链路的箭头指向表征 2 个变量的因果关系，因果链构成

闭合循环形成反馈回路。航天测量雷达维修保障系统包含 36 条正极性因果链、7 条正反馈回路、7 条负极性因果链、3 条负反馈回路。

根据航天测量雷达系统效能影响因素以及系统各要素因果关系分析，确定系统共有 8 个状态变量、13 个速率变量、29 个辅助变量，Anylogic 软件绘制系统动力学存量流图模型，如图 1 所示。需要说明的是，在图中用实线绘制的流表示正极性；用短虚线绘制的流表示负极性；用长虚线绘制的流表示与维修保障周期有关的外生变量之间因果链；使用“<>”括起的变量表示影子变量^[4]，是为避免模型中变量之间因距离太远产生连线之间混乱的情况，而使用代替原变量或如 time 一类默认变量的替身，影子变量含义与原变量相同^[5]。航天测量雷达维修保障系统动力学存量流图模型主要变量函数方程式如表 1 所示。

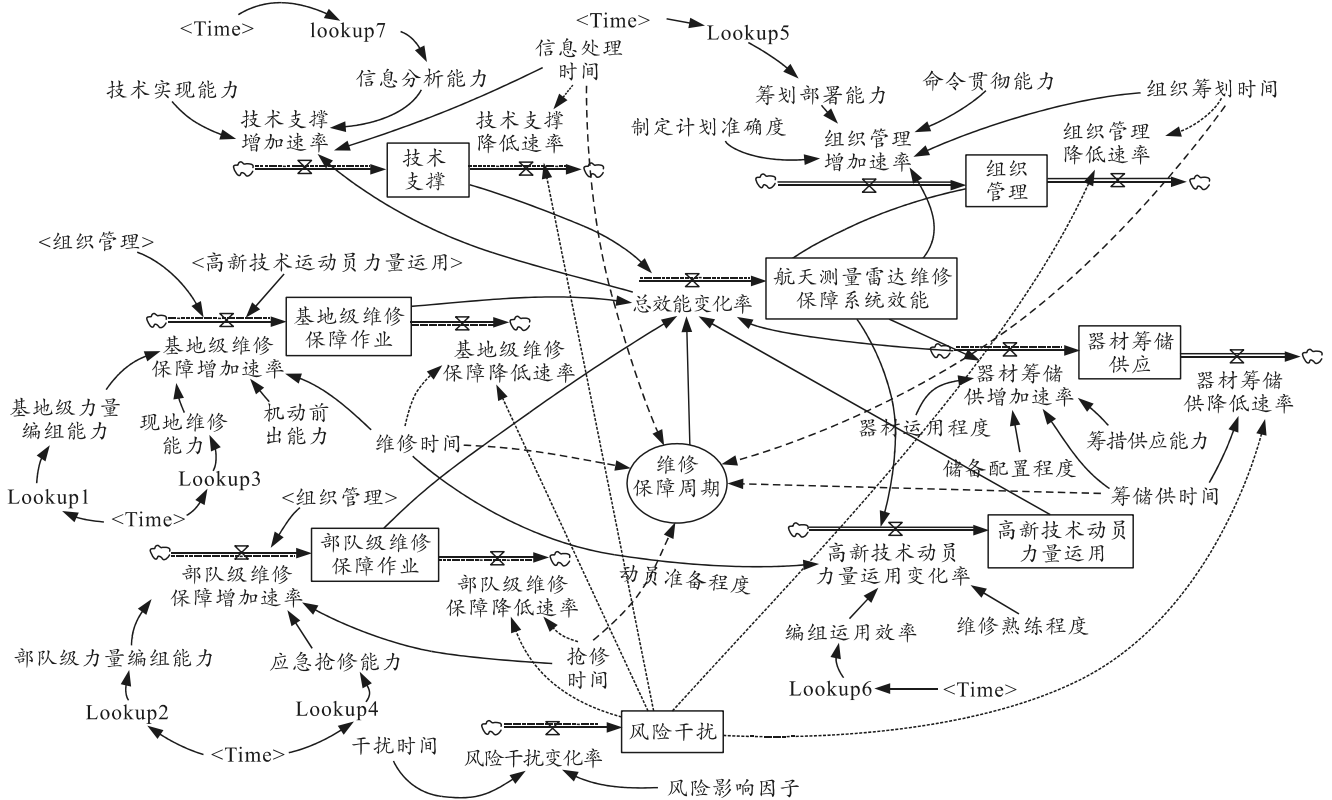


图 1 航天测量雷达维修保障系统动力学存量流图模型

表 1 中，INTEG 为积分运算符，代表积分函数；SMOOTH 为延迟运算符，代表延迟函数；风险影响因子是指斜率一定的线性增长函数，其变量方程为 RAMP({slope}, {start}, {finish})；INITIAL TIME 为模拟的初始时间；lookup 函数为表函数，用以表示 2 个变量之间的非线性关系。

3 实例验证

仿真实例起止时间为 2021 年 1 月至 2022 年 12 月，仿真基本步长为 1 个月。其中 2021 年全年 12 个月为某型航天测量雷达现实拟合，2022 年全年 12 个月为趋势预测。利用 Anylogic 软件实现建模，并设置函数方程式中参数权重和初始值。

某型航天测量雷达在 2021 年为期 12 个月的维修保障数据采集基础上，对系统动力学涉及的变量参数进行赋值。由于系统动力学模型是以能量反馈作为基本结构特征的仿真模型，模型的行为模式与结果主要取决模型的结构，而对具体参数值的变化并不敏感^[6]，所以参数的准确度只需满足系统建模的基本要求，将参数值控制在合理取值范围内即可。

在模型中，基地级力量编组能力、现地维修能

力系数、部队级力量编组能力、应急抢修能力、筹划部署能力、高新技术动员力量协调运用效率和信息分析能力共 7 个辅助变量都是时间的非线性函数。在 Anylogic 软件中导入系统动力学录取的辅助变量表函数的赋值，该软件可通过图形直观显示出表函数变化曲线。筹划部署能力与时间的表函数关系如图 2 所示。受篇幅所限，其他 6 组表函数以此类推。

表 1 航天测量雷达维修保障系统动力学存量流图模型主要变量函数方程式

主要变量	函数方程式
航天测量雷达系统效能	=INTEG(总变化率, 0.6)
总效能变化率	=(0.3×组织筹划+0.1×基地级维修保障作业活动+0.1×部队级维修保障作业活动+0.1×高新技术动员力量运用+0.2×器材筹储备+0.2×技术支持)/维修保障周期
组织筹划	=INTEG(组织筹划水平增加速率-组织筹划水平降低速率, 0.85)
基地级维修保障作业活动	=INTEG(基地级维修保障增加速率-基地级维修保障降低速率, 0.6)
部队级维修保障作业活动	=INTEG(部队级维修保障增加速率-部队级维修保障降低速率, 0.75)
高新技术动员力量运用	=INTEG(高新技术动员力量运用变化率, 0.8)
器材筹储备	=INTEG(器材筹储备增加速率-器材筹储备降低速率, 0.8)
技术支持	=INTEG(技术支持增加速率-技术支持降低速率, 0.75)
筹划部署能力	=lookup1(Time1 筹划部署投入时间)
基地级力量编组能力	=lookup2(Time2 力量编组时间)
现地维修能力	=lookup3(Time3 维修时间)
部队级力量编组能力	=lookup4(Time2 力量编组时间)
应急抢修能力	=lookup5(Time3 维修时间)
风险干扰变化率	=SMOOTH(-风险影响因子/TIMESTEP, 风险干扰时间)
维修保障周期	=抢修时间+维修时间+信息处理时间+筹储备供时间+组织筹划时间

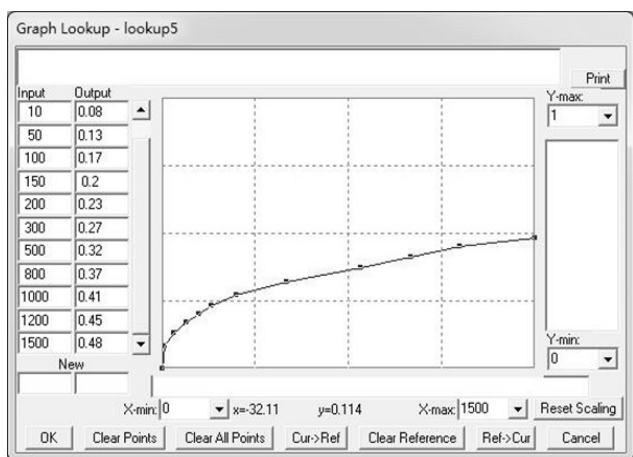


图 2 筹划部署系数与时间的表函数关系

评估数据管理系统导出的某型航天测量雷达维修保障系统 2021 年度数据，经录入拟合后，模型运行正常。通过在 Vensim 软件上进行仿真运行，得到主要状态变量的仿真模拟结果，如图 3 所示。

从图 3 可看出，航天测量雷达维修保障系统效能总体呈上升趋势，最大值发生在第 24 个月，即 2022 年 12 月，此时总效能最大值为 0.821 1，按照评价等级划分，效能处于“良好”水平，模拟评价结果能与 2022 年度实际结果基本相符并相互印证。

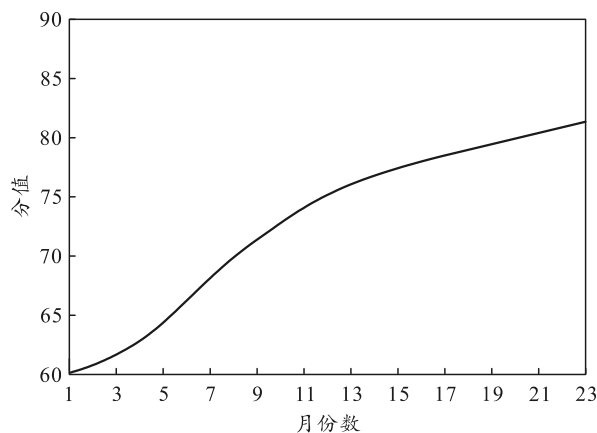


图 3 航天测量雷达系统效能仿真结果

通过对仿真结果分析，提升航天测量雷达维修保障系统效能的工作重心主要应集中在提高两级维修保障作业与技术支持 2 方面。基地级与部队级两级维修保障作业中应明确航天测量雷达维修保障任务的职能定位，通过两级联动的维修保障要素集成训练，提高航天测量雷达维修保障效能。在技术支持方面，积极探索远程故障诊断、信息化检测计量、智能储备供应的新方法，不断提高维修保障质效。

4 结束语

笔者从系统动力学建模需求分析入手，提出航

天测量雷达维修保障系统效能评估系统动力学模型的构建思路。梳理因果关系构建系统存量流图模型，并利用 Anylogic 软件得到模拟结果与实际情况进行相互验证，证明笔者所提模型基本可信。同时，系统动力学方法在计算时间、预测趋势等方面的优势更加明显，能为进一步优化航天测量雷达维修保障建设提供支撑。

参考文献：

[1] 钟永光, 贾晓菁, 钱颖, 等. 系统动力学[M]. 2 版. 北京: 中国科技出版社, 2013: 50-55.

[2] 王其藩. 系统动力学[M]. 上海: 上海财经大学出版社, 2009: 39-42.
 [3] 哈军贤, 王劲松. 基于系统动力学的网络空间作战指挥效能评估[J]. 指挥控制与仿真, 2016, 38(3): 70-75.
 [4] CHEN M R, LI X, ZHANG X, et al. A novel particle swarm optimizer hybridized with extremaloptimization[J]. Applied Soft Computing, 2010, 10(2): 367-373.
 [5] 张辽宁, 张政, 赵师, 等. 基于 SD 方法的陆军主战装备战场抢修能力评估模型[J]. 兵工自动化, 2015, 34(6): 48-51.
 [6] 许庆, 侯兴明. 基于 DAF 综合评价法的航天装备维修保障效能评估[J]. 兵工自动化, 2019, 38(1): 54-57.

(上接第 58 页)

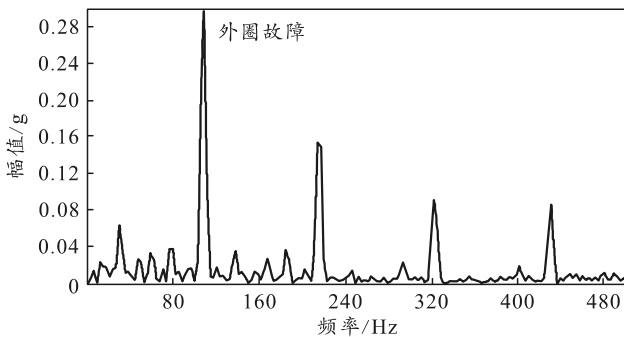


图 9 外圈故障频域波形

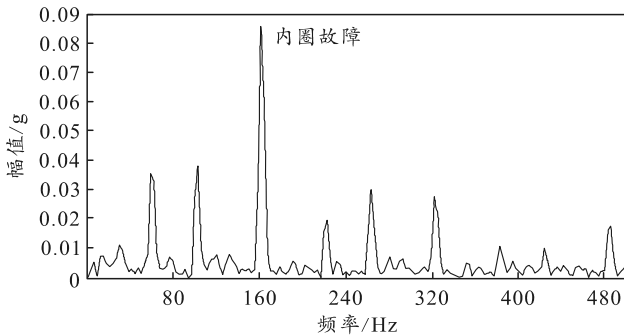


图 10 内圈故障频域波形

4 结束语

笔者结合 Matlab 和 LabVIEW 各自编程特点，进行联合编程与滚动轴承故障算法实现。利用美国西储大学轴承故障实验数据进行算法验证，结果表明：利用 Matlab 和 LabVIEW 联合编程可有效提

取滚动轴承特征故障，能用于滚动轴承故障在线监测。

参考文献：

[1] 冯春生. 基于多源不确定信息融合的数控机床滚动轴承故障诊断方法与实验研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2015.
 [2] 韩冰. 基于深度复卷积神经网络的滚动轴承故障诊断方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
 [3] 李喜红. 直驱式风力发电机轴承故障诊断方法研究[D]. 保定: 华北电力大学(保定), 2012.
 [4] 吴美玲. 滚动轴承故障巡检系统的研制与开发[D]. 保定: 华北电力大学(保定), 2009.
 [5] 王伟. 小波包和 Hibert-Huang 变换在汽轮机动静碰磨故障诊断中的应用研究[D]. 南京: 东南大学, 2011.
 [6] 李博, 熊晓燕, 李东文. 基于 LabVIEW 的 HHT 的研究与应用[J]. 机电工程技术, 2008, 37(10): 111-112.
 [7] 赵阳. 基于压缩感知的国际油价预测方法研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2015.
 [8] 曾庆虎, 邱静, 刘冠军. 基于小波相关滤波法的滚动轴承早期故障诊断方法研究[J]. 机械科学与技术, 2008, 27(1): 114-118.
 [9] 袁丹真. 基于时延随机共振和变分模态分解的机械故障特征提取方法研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2019.
 [10] 美国凯斯西储大学电机滚动轴承振动信号数据集 [EB/OL]. http://ese.groups.ase.edu/bearing_datacenter/pages/12k-drive-end-bearing-fauh-data.