

DOI:10.16356/j.1005-2615.2021.S.021

## 一种在轨卫星控制分系统风险等级预测方法

季业<sup>1,2</sup>, 崔振<sup>1,2</sup>, 徐菁宇<sup>1,2</sup>, 陈斌<sup>1,2</sup>, 徐英学<sup>1,2</sup>

(1.北京控制工程研究所,北京 100190; 2.空间智能控制技术重点实验室,北京 100094)

**摘要:**使用 2009 至 2020 年某卫星控制分系统质量案例数据,提出一种基于 BP 神经网络的在轨卫星控制分系统技术风险等级预测模型。挖掘历史相关数据,建立在轨卫星控制分系统风险评价体系。排除风险源中的冗余信息,将重要信息数据离散化后,以 BP 神经网络进行训练,最终得到在轨卫星控制分系统风险等级预测模型。通过试验验证该模型可准确有效预测在轨卫星控制分系统风险等级,为卫星在轨风险控制提供支持。

**关键词:**在轨;卫星控制分系统;风险等级;预测

中图分类号:V422.3

文献标志码:A

文章编号:1005-2615(2021)S-0130-05

### Prediction of Risk Levels for On-Orbit Satellite Control Subsystem

Ji Ye<sup>1,2</sup>, Cui Zhen<sup>1,2</sup>, Xu Jingyu<sup>1,2</sup>, Chen Bin<sup>1,2</sup>, Xu Yingxue<sup>1,2</sup>

(1. Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100190, China; 2. Science and Technology on Space Intelligent Control Laboratory, Beijing 100094, China)

**Abstract:**Based on the quality data of a certain satellite control subsystem from 2009 to 2020, a technical risk level prediction model for the on-orbit satellite control subsystem is proposed based on BP neural network. The risk assessment system of the on-orbit satellite control subsystem is established by mining historical data. After eliminating the redundant information in the risk source, the important information is discretized and trained by the BP neural network. Finally, the risk level prediction model for the on-orbit satellite control subsystem is obtained. The experimental results show that the model can accurately and effectively predict risk levels for the on-orbit satellite control subsystem, and provide support for on-orbit satellite risk control.

**Key words:** on-orbit; satellite; control subsystem; risk level; prediction

卫星控制分系统是卫星系统的子系统。近年来随着航天型号的任务量增加,中国在轨提供各种服务的卫星数量激增。然而现有的在轨稳定运行保障方法大多是在在轨风险爆发后,成立专项问题处理小组,针对问题进行归零和风险问题处理。如何在以往的案例中取得有效信息,以便更好地进行在轨风险管理是必须面对的问题。随着航天领域更加重视对风险的管理与控制,国内外许多航天领域专家都对其提出了方案。文献[1]进行了卫星风险管理的综述;文献[2]开发了一种基于决策分析的卫星风险预测工具,并应用于工程中;文献[3]引

入具体的历史实例来阐述和分析风险管理控制的方法;文献[4]站在产品保证角度,直视卫星风险管理,用案例来进行说明;文献[5]提出了一种新型的技术风险识别方法,建立了控制分系统技术风险的识别渠道;文献[6-8]则凝练出不同卫星型号风险管理中的实际操作经验;文献[9]结合航天型号实例,提出了一套基于系统工程的航天项目风险管理方法;文献[10]利用随机网络模拟方法,对航天项目可能面临的时间风险和费用风险进行预测;文献[11]以装备研制可靠性工作项目为对象,应用风险矩阵法对其极性风险等级进行预测;文献[12]通过

收稿日期:2021-04-15;修订日期:2021-06-18

通信作者:崔振,男,高级工程师,E-mail: 5277981@qq.com。

引用格式:季业,崔振,徐菁宇,等.一种在轨卫星控制分系统风险等级预测方法[J].南京航空航天大学学报,2021,53(S):130-134. Ji Ye, Cui Zhen, Xu Jingyu, et al. Prediction of a risk levels for on-orbit satellite control subsystem[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2021, 53(S):130-134.

分析大型航天研发项目的特点、风险因素以及管理过程,提出了一种新的基于Multi-agent技术的大型航天研发项目风险分析方法,进行了实验仿真,获取了项目的风险水平和关键风险因素;文献[13-14]利用风险模糊综合评价方法和AHP(Analytic hierarchy process)方法相结合的方法,构造了航天项目风险综合评价模型。

项目的核心思想,即在有限的时间、空间、预算范围内,将必要的人力、物力组织在一起,有条不紊地实现项目目标。然而,现有的项目管理研究大多站在火箭、卫星等巨型装备研制项目的角度对问题进行分析和管理,从过往项目实践而得出的项目管理经验进行推广的优势是:由顶层向基层推进的高效执行力。劣势也显而易见:基层亟须解决的问题和矛盾,未必有行之有效的渠道传递到顶层。进行面向基层的项目风险管理分析和预测的研究,以分系统的视角进行项目风险分析和预测,更贴近了项目实施的本身,有利于实现项目风险管理的精细化、可操作化和准确化。既填补航天项目管理中精细化管理的空白,又可以将基层的信息有效传递给顶层决策者。本文从卫星分系统角度出发,提出一种在轨卫星风险等级预测方法。

## 1 风险等级预测模型设计

### 1.1 风险预测模型

在轨卫星控制分系统风险等级预测模型的建立可以分为3个环节:第一步是建立风险评价指标。依据2009至2020年真实发生质量案例的资

料记录,建立卫星控制分系统研制项目风险等级评价体系,确定造成在轨卫星控制分系统的风险等级,即训练目标结果项。第二步是进行数据清洗及提炼。首先由质量问题案例中依据不同分类提炼出不同的风险因素;之后从这些数据中提炼出有效信息并舍弃无效或者效能较弱的信息;最后对这些有效信息进行离散化处理,使其成为可以使用的训练输入项。第三步是使用神经网络进行训练。将数据清洗提炼模块得到的有效信息作为输入层,将训练过程视为黑箱隐藏层,将评价指标模块建立的风险等级评价体系视为输出层,使用BP神经网络方法进行训练。

### 1.2 数据清洗提炼

将案例资料中的数据进行清洗可以得到相关风险因素,以不同分类角度出发又可将风险因素分为5组:第一组是按照质量案例确定“定位准确”和“责任明确”的原则进行风险因素分类,将风险因素定位于科研生产活动或过程的某一阶段;第二组是按照质量案例确定“机理清晰”和“过程清晰”的原则进行风险因素分类,将风险因素定位于风险爆发控制分系统单机的物理构造层面;第三组风险源是按照导致在轨卫星控制分系统风险的卫星部件种类定位进行分类,根据故障爆发的具体单机来定位风险因素;第四组风险源是按照导致在轨卫星控制分系统风险的设计寿命期进行分类;第五组风险源是按照问题实际的相对于其他相关产品的影响(举一反三)进行分类。如表1所示。

表1 风险因素表

Table 1 Risk factors

组一	编号	组二	编号	组三	编号	组四	编号	组五	编号
工艺	$a_1$	软件	$b_1$	控制计算机	$c_1$	寿命期	$d_1$	无影响	$e_1$
操作	$a_2$	电路	$b_2$	星传感器	$c_2$	延寿期	$d_2$	有限影响	$e_2$
其他	$a_3$	机械	$b_3$	控制单元驱动模块	$c_3$			重大影响	$e_3$
管理	$a_4$	光学	$b_4$	地球传感器	$c_4$				
设计	$a_5$	热学	$b_5$	推进相关	$c_5$				
设备	$a_6$			飞轮组件及线路	$c_6$				
器材	$a_7$			帆板驱动机构及线路	$c_7$				
环境	$a_8$			加速度计	$c_8$				
				激光雷达	$c_9$				
				太阳传感器及线路	$c_{10}$				
				陀螺组件及线路	$c_{11}$				

上面5组分类形成的风险因素中:第四组根据卫星寿命期进行分类,实际操作中每个卫星的设计状态即预期寿命由2年到15年不等。以现实科生产生产和卫星在轨运维中的实际经验为例:一颗设计寿命8年的卫星其真实寿命可以达到12年或更

多,由此导致第四组分类的寿命期和延寿期分类并不准确。所以将第四组因素舍弃。同时,第五组根据“举一反三”结果进行分类,在质量案例中,举一反三结果会直接影响其余在研型号的进度或采取各种策略,因此该项指标主观因素也都应舍弃。遵

循以上风险因素准则后,定义所有风险源进行离散化处理得到特征参数:该风险发生记录为“1”,不发生记录为“0”。

1.3 风险评价指标集建立

评价指标集矩阵是由不同的影响因素取值构成的矩阵集合,定性指标设计时不采用一般定性时抽象化描述性语句即“很差、差、一般、较好、好”。此类定性方法虽容易进行定性描述,但在具体实践中其主观性和操作性较强,从而导致对于评价对象的划分不准确。经过对2009—2020年在轨卫星控制分系统故障发生的故障原因及故障对卫星的影响数据研究,建立风险定性指标为以下等级:

I 影响卫星在轨服务,且影响卫星寿命。

II 影响卫星在轨服务,不影响卫星寿命或影响卫星寿命。

III 不影响卫星在轨服务及寿命,但卫星进行了硬件故障重构,影响了卫星在轨硬件状态基线,且故障机有损伤。

IV 不影响卫星在轨服务及寿命,但卫星进行了硬件故障重构,影响了卫星在轨硬件状态基线。首次发生。但故障机并未有损伤,可恢复原先的在轨工作基线。

V 不影响卫星在轨服务及寿命。卫星未进行硬件故障重构,影响了卫星在轨硬件状态基线。首次发生。但故障机并未有损伤,可恢复原先的在轨工作基线。

VI 不影响卫星在轨服务及寿命。卫星进行了硬件故障重构,影响了卫星在轨状态基线。非首次发生,但故障机并未有损伤,可恢复原先的在轨工作基线。

VII 不影响卫星在轨服务及寿命。卫星软故障自恢复失败。

VIII 不影响卫星在轨服务及寿命。卫星进行了软故障自恢复。首次发生。

IX 不影响卫星在轨服务及寿命。卫星未进行软故障自恢复。重复发生。

上述9项对应的数量化指标使用等距法进行设计,如表2所示。

表2 风险等级定量分析

Table 2 Quantitative risk analysis

风险等级	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
风险值	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1

2 试验方法

为了检验方法的有效性,安排如下试验:首先采用BP神经网络来训练风险因素输入与风险评

价指标输出间的非线性映射稳态模型,该模型拓扑结构如图1所示,其中X表示模型输入,Y表示模型输出,n表示模型输入变量个数,v表示模型输出变量个数,N表示隐含层神经元个数。下面对模型的输入输出、样本采点、模型训练等具体设计分别进行介绍。

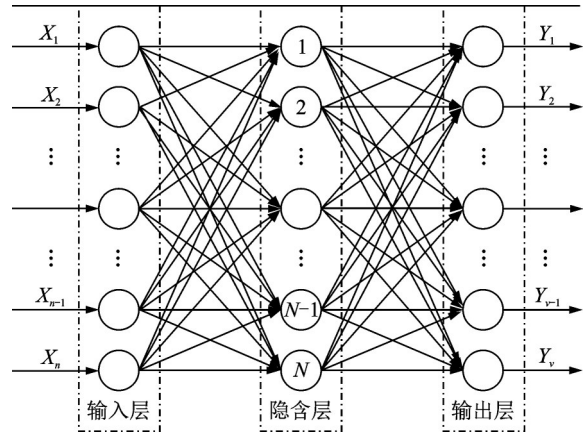


图1 BP神经网络拓扑结构图

Fig.1 Sketch map of a BP neural network

BP神经网络在进行预测前,需要利用样本数据进行学习训练:

(1)首先需要确定模型的输入项和输出项。上述模型的作用是为了寻找出不同的X排列对于Y的关系,根据1.2节案例数据清洗后可以确定输入参数  $n=24$ ,根据1.3节所述风险评价指标即为输出参数  $v=9$ 。

(2)为使风险预测模型更加准确,案例选择上更注重实效性和代表性,选取近10年的在轨卫星风险案例总计100例,按9:1的比例将其划分为模型的训练样本与检验样本,造成在轨控制分系统风险的主要因素属性为以下因素,如表3所示。

表3 风险因素转置

Table 3 Risk factor transpose

编号属性	1	2	...	99	100
$a_1$	0	0	...	1	0
$a_2$	0	0	...	0	0
$a_3$	1	1	...	0	0
$a_4$	0	0	...	1	0
$a_5$	0	0	...	1	0
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\ddots$	$\vdots$	$\vdots$
$c_1$	1	1	...	0	1
$c_{11}$	0	0	...	0	0

(3)为了提高模型精度,避免由不同原因评价标准不统一带来的误差,本文采用最大最小法对模型输入和输出进行归一化处理

$$y = (y - y_{\min}) / (y_{\max} - y_{\min})$$

式中: $y$ 代表模型输出参数, $y_{\min}$ 代表输入或输出参数的最小值, $y_{\max}$ 代表输入或输出参数的最大值。

(4)确定模型的训练函数为 Sigmoid。通过不断地试验和调试,确定隐藏神经元个数为  $N=20$ ,最大迭代次数为 1 000,训练目标最小误差为  $1 \times 10^{-3}$ ,学习率为 0.01。

### 3 试验验证和结果分析

依照上面方法,输入样本为 1 至 90 号实际案例并进行训练。由图 2 中网络训练误差曲线可以看出:当最大迭代次数为 3 时,BP 神经网络的误差满足训练误差的要求,认为神经网络训练完成。

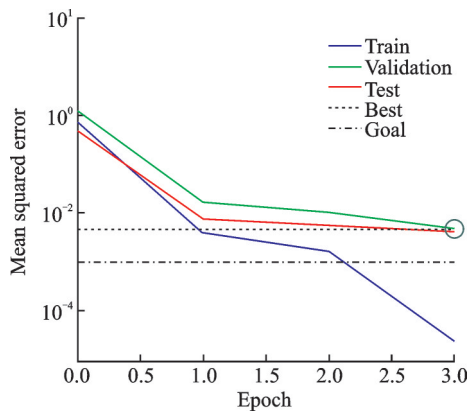


图2 训练误差曲线

Fig.2 Training error curves

将 91 至 100 号案例作为检验集,代入训练好的模型中,得到结果如表 4 所示。从检验集结果可以看出:输出结果与真实值的误差在 0.07 以内,证明该评估模型拥有一定准确性。

表4 检验集结果  
Table 4 Test set results

编号	案例风险值	案例风险等级	实际风险值	预测结果	误差
91	0.7	III	0.705	III	0.005
92	0.4	VI	0.398	VI	0.002
93	0.4	VI	0.399	VI	0.001
94	0.1	IX	0.101	IX	0.001
95	0.3	VII	0.302	VII	0.002
96	0.4	VI	0.407	VI	0.007
97	0.8	II	0.800	II	0.000
98	0.1	IX	0.102	IX	0.002
99	0.5	V	0.499	V	0.001
100	0.1	IX	0.101	IX	0.001

由于高等级的归零结果往往受诸多因素影响,造成样本累计过于稀少,100 个样本对于精准预测的说服力确实较小,如何搜集、清洗并提炼日常科

研生产中产生的非质量问题归零案例,积攒真实发生的小、细、微案例作为样本进行训练,是检验此方法并推进此方法实践的未来研究方向。

### 4 结 论

本文在风险评价指标构建时,舍弃以往的主观性、操作性较强的描述性语言,而使用更贴切在轨实际状况的全新指标体系,使风险因素和最终风险评价指标更好地对应。同时,由于训练样本案例均为归零事件,所有案例均符合技术归零五要素“定位准确、机理清晰、问题复现、措施有效、举一反三”和管理归零五要素“过程清楚、责任明确、措施落实、严肃处理、完善规章”。预测的结果可以为院级管理归零结果的方向提供支撑。最后,根据预测结果,使相关人员能够在在轨问题发生时迅速反应和靶向定位,保证在轨卫星控制分系统的安全。

#### 参考文献:

[1] ABBIE M, JONATHAN T B, DAVID R J, et al. Satellite risk analysis literature review[C]//AIAA SPACE 2011 Conference & Exposition. [S. l.]: AIAA, 2011.

[2] GAMBLE K B, LIGHTSEY E G. Decision analysis tool for small satellite risk management[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2016, 53(3): 420-423.

[3] ZHAO L. Delicacy risk management of satellite project [C]//Proceedings of International Astronautical Congress. [S.l.]:[s.n.], 2012.

[4] LARRERE J L. Risk management and lessons learned solutions for satellite product assurance[J]. Acta Astronautica, 2004, 55(3/4/5/6/7/8/9): 811-816.

[5] 季业,张云峰,徐忠宾,等.星船控制系统研制项目技术风险识别——三维模型的构建[J].项目管理技术, 2017, 15(12): 46-51.  
JI Ye, ZHANG Yunfeng, XU Zhongbin, et al. Technical risk identification of satellite ship control system development project—Construction of 3D model[J]. Project Management Technology, 2017, 15(12): 46-51.

[6] 秦素然,郝志华,朱华斌,等.资源一号 02D 卫星技术风险管理与实践[J].航天器工程, 2020, 29(6): 72-77.  
QIN Suran, HAO Zhihua, ZHU Huabin, et al. Technical risk management and practice of ZY-1-02D satellite[J]. Spacecraft Engineering, 2020, 29(6): 72-77.

[7] 刘付强,王祥,张新伟,等.高分七号卫星产品保障工作探索与实践[J].航天器工程, 2020, 29(3): 49-53.  
LIU Fuqiang, WANG Xiang, ZHANG Xinwei, et

- al. Exploration and practice of GF-7 satellite product assurance working[J]. Spacecraft Engineering, 2020, 29(3): 49-53.
- [8] 马利, 袁莉芳, 王璐, 等. 导航卫星在轨运行分析与 管理[J]. 航天器工程, 2017, 26(5): 121-125.  
MA Li, YUAN Lifang, WANG Lu, et al. Analysis and management of on-orbit navigation satellite operation[J]. Spacecraft Engineering, 2017, 26(5): 121-125.
- [9] 蒋小勇, 杨军. 基于系统工程的航天项目风险管理研究及实践[J]. 项目管理技术, 2016, 14(4): 92-98.  
JANG Xiaoyong, YANG Jun. Research and practice of aerospace project risk management based on systems engineering[J]. Project Management Technology, 2016, 14(4): 92-98.
- [10] 符志民. 基于随机网络模拟的航天项目风险分析和 评估[J]. 系统工程与电子技术, 2007(3): 375-377.  
FU Zhimin. Risk analysis and prediction of space project based on stochastic network simulation[J]. System Engineering and Electronic Technology, 2007(3): 375-377.
- [11] 潘星, 常文兵. 装备研制可靠性工作项目风险等级预 测方法研究[J]. 项目管理技术, 2009(7): 21-26.  
PAN Xing, CHANG Wenbing. Research on risk level prediction method of equipment development reliability project[J]. Project Management Technology, 2009(7): 21-26.
- [12] 李江, 雷晓刚. 基于 Multi-agent 技术的大型航天研发 项目风险分析方法[J]. 国防科技大学学报, 2012(6): 149-152.  
LI Jiang, LEI Xiaogang. Risk analysis method of large space R & D project based on multi-agent technology [J]. Journal of National Defense University of Science and Technology, 2012(6): 149-152.
- [13] 朱彬, 刘进. 航天项目风险综合评价模型研究[J]. 管 理工程学报, 2002(S1): 206-208.  
ZHU Bin, LIU Jin. Research on comprehensive risk evaluation model of space project[J]. Journal of Management Engineering, 2002(S1): 206-208.
- [14] 池宜兴, 冯雪, 刘兵. 空间科学卫星工程风险评估与 管理方法[J]. 航天器工程, 2020, 29(5): 113-118.  
CHI Yixing, FENG Xue, LIU Bing. A way of risk assessment and management of space science satellite engineering[J]. Spacecraft Engineering, 2020, 29(5): 113-118.

(编辑: 胥橙庭)