

doi: 10.7690/bgzdh.2026.04.013

一种基于“五原则”的宇航元器件自主可控度评估方法

郝红星¹, 于荣欢¹, 郭静¹, 胡华全²

(1. 航天工程大学航天信息学院复杂电子系统仿真重点实验室, 北京 101416;

2. 航天工程大学航天信息学院卫星导航教研室, 北京 101416)

摘要: 针对宇航元器件的自主可控度评估问题, 提出一种基于“五原则”的宇航元器件自主可控度评估方法。该方法包含分档原则、最低分原则、及格线原则、专家打分原则和一票否决原则, 构建三层宇航元器件自主可控度评估指标体系, 共包含 30 项指标。结合指标体系, 对评估方法进行论述, 结合一票否决原则提出了否决函数, 使评估过程更加普适化。研究表明, 该方法能为宇航元器件的自主可控度评估提供重要参考。

关键词: 宇航元器件; 自主可控; 评估指标; 一票否决; 五原则**中图分类号:** TP273 **文献标志码:** A

An Autonomous Controllability Evaluation Method for Aerospace Components Based on Five Principles

Hao Hongxing¹, Yu Ronghuan¹, Guo Jing¹, Hu Huaquan²(1. *Science and Technology on Complex Electronic System Simulation Laboratory,**Space Engineering University, Beijing 101416, China;*2. *Teaching and Research Section of Satellite Navigation, Space Engineering University, Beijing 101416, China)*

Abstract: Aiming at the problem of autonomous controllability evaluation of aerospace components, an autonomous controllability evaluation method of aerospace components based on “five principles” is proposed. The method comprises a grading principle, a lowest score principle, a passing line principle, an expert scoring principle and a one-vote veto principle, and a three-layer evaluation index system for the autonomous controllability of aerospace components is constructed, and the evaluation index system comprises 30 indexes. Combined with the index system, the evaluation method is discussed, and the veto function is put forward combined with the principle of one-vote veto, which makes the evaluation process more universal. The results show that the method can provide an important reference for the evaluation of the autonomous controllability of aerospace components.

Keywords: aerospace components; autonomous and controllable; evaluation index; one-vote veto; five principles

0 引言

宇航元器件作为一种重要资源其自主可控能力具有非常重要意义, 在新形势下, 对能满足航天工程使用需要的高品质元器件的需求不断扩大, 也对宇航元器件的质量保证工作提出了新的挑战 and 更高的要求。目前面临的主要问题包括: 宇航关键元器件技术大都掌握在国外公司手里, 一些国产化元器件只是表面性的国产化, 一些重要部件不能够自己生产。

当前信息安全形势日益紧迫, 而宇航元器件是国家信息基础设施, 其信息安全更是至关重要, 自主可控是提高宇航元器件本质安全的重要举措。经验证明, 严格的审查和合理的评估是宇航元器件真正自主可控的前提。自主可控生态环境的建设与完

善是实现宇航元器件全谱系国产化的重要途径。宇航元器件自主可控生态分析评估研究是一个新的课题, 国内对该领域的研究和相关文献较少。为实现宇航元器件自主可控生态分析评估, 需要确定标准和评判方法对宇航元器件自主可控生态进行判定, 对宇航元器件生产、应用进行规范。

关于宇航元器件自主可控方面的研究, 国内的研究主要分为发展现状与工作推进研究、管理模式研究和特定领域的自主可控程度评估研究。

在发展现状与工作推进研究方面, 文献[1]结合我国现有航天关键元器件的发展现状及需求提出了我国实现航天关键元器件自主发展的迫切性, 并通过分析美欧等航天元器件的发展, 对我国航天关键元器件的自主发展提出建议。游君等^[2]对航天元器

收稿日期: 2024-12-11; 修回日期: 2025-01-05

基金项目: 国防科技重点实验室基金(6142401002022108)

第一作者: 郝红星(1987—), 男, 山东人, 博士。

件国产化的目标与核心意义进行了说明，并且结合实际对具有代表性的元器件国产化进程进行描述。文献[3]分析了航天元器件发展现状和面临问题，并且指出从责任落实、制度建设、需求梳理、优化统型、供应商管理等方面自主发展航天元器件的思路。文献[4]对航天产品使用电子元器件的风险特征及推进情况存在的问题进行了描述，并提出了航天元器件自主可控工作机制和实施方案，指出了进行国产化元器件的必要性。王敬贤等^[5]结合国内航天型号关键元器件国产化工作实践，阐述了元器件国产化的内涵和目标。总之，我国越来越重视对于宇航领域元器件的自主可控发展。

在管理模式研究方面，文献[6]提出了建立健全元器件优选目录、“一用多研”研发管理模式、持续推进“迭代更新”的元器件选用管理模式和完善元器件应用验证管理的模式，基于此提出了自主可控元器件的质量管理。朱佳曦^[7]研究优化了我国当前的元器件管理体系，指出通过对国内航天机构实行统一管理保障元器件的高品质。张斌等^[8]分析了宇航元器件PCS体系建设过程中影响产品质量风险的关键因素，提出了质量风险控制方法和产品质量问题应对措施。单月晖等^[9]通过梳理分析西方强国的航天元器件标准体系建设对我国的建设提出了意见建议。

在特定领域的自主可控程度评估研究方面，文献[10]针对软件自主可控度的评价问题，从软件代码克隆检测、软件演化及溯源3方面进行分析，并设计相应的工具以实现自主可控度的评估。文献[11]提出了一种基于负面清单的装备建设自主可控评估的量化模型。文献[10]和[11]主要是针对通用设备的自主可控度评估问题。针对航天元器件的自主可控问题，文献[12]对航天元器件的自主与可控的概念进行了研究，并提出自主可控的量化方法，通过“要素赋值法”进行自主程度的量化评估。胡云龙等^[13]针对航天测发系统中的基础软硬件设备的国产化情况进行了分析，并且对于自主可控能力的评估方法进行了研究。文献[14]针对国产航天元器件的自主可控应用验证问题，提出了元器件生产过程要素评价、功能性能验证、质量可靠性验证、应用适应性验证4方面的评价指标，并且构成了质量能力体系。上述自主可控度评估研究，部分针对通用的计算机或者软件进行评估，部分针对航天特定领域，例如航天测发领域的自主可控情况进行评估。由于自主

可控度评估的研究较少，因此，笔者重点关注宇航元器件的自主可控度评估，通过确定评估原则，构建指标体系，确定评估方法，得出评估结果的方法对航天元器件的自主可控进行评估。

1 宇航元器件自主可控度评估流程

宇航元器件的自主可控度评估应当构建指标体系，然后根据指标体系确定对应变量的测量方法，对应于指标体系中的每个指标获取测量值，最后运用指标综合方法，将测量值进行综合，获取最终的评估结果。评估步骤如图1所示。

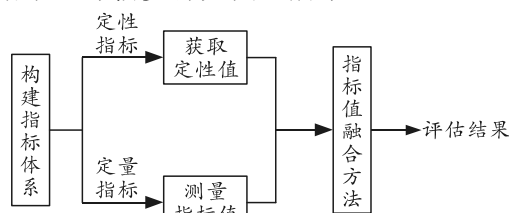


图1 宇航元器件评估流程

为了更好地实施评估，根据宇航元器件自主可控度评估特点，针对指标体系的构建和指标值的测量问题，笔者提出“五原则”。

1) 分档原则。在评估过程中，采用分档原则，根据系统工程中的理论，定性指标的档次一般以5~7个为宜，因此在评估过程中，每项指标根据其重要程度选择其最高档为{1, 3, 5, 7, 9} 5档中的一项，对于总体评估结果中重要的指标，设置评估最高分9，也就是说其满分为9。而对于在评估结果中不是很重要的指标，则设置该指标评估值的满分为1。通过指标对应满分对指标的重要程度进行分档，进而约束该指标的评估值对于最终评估结果的影响。

2) 最低分原则。对于某项指标，若其涉及多方面，且多方面的指标参考值在不同情况下，采取最低档和最低分原则作为该项指标的评估值。例如对于指标“全过程地域”，某个宇航元器件的生产涉及到多个环节，而且每个环节的地域不同，若生产涉及地点为 P_1, P_2, \dots, P_n 中 n 点的个数，每个地点对应的评估值为 $V_{P_1}, V_{P_2}, \dots, V_{P_n}$ 最终的评估值为：

$$V_P = \min\{V_{P_1}, V_{P_2}, \dots, V_{P_n}\}。 \quad (1)$$

3) 及格线原则。针对某具体指标，根据“分档原则”能够确定该指标的最高分，但是对于该指标最终的评估结果，采用及格线原则进行评估值的确定。一般情况下，设置该指标的评估值分为3档，

其中间档为该指标的及格值。根据最低档对应的指标情况有：最低档对应于该项指标没有任何效果，则对应 0 分；虽然该项指标是最低档，但是对于最终评估结果还是有一定作用，则采用最高分的 10% 或者 1 分。例如对于某指标的满分为 9 分，则该指标的中间档为 $9 \times 0.6 = 5.4$ 指标对于最终评估的分档为 9、5.4、0(或者 1 分)；若最高分设置为 3 分，则该指标对应的分档为 3、1.8、0(或者 1 分)；而当最高分为 1 时，该指标对应的分档为 1、0.6、0(或者 0.1 分)。

4) 专家打分原则。由于评测中有很多指标是无法进行定量描述的；因此，为了能够进行定量评估，对于其中的一些指标应当采用定性指标定量化方式实现。在该研究中，对于定性指标定量化过程采用专家打分法，依据相关佐证材料给出相应的分数或者档次。例如对于人员技术指标，由于衡量指标的参考值分为“全”“够用”和“无”3 个档次。什么情况下才能够评价为“够用”，需要依据提供的材料通过专家评判方法进行确定，进而确定相应的分值。

5) 一票否决原则。一些指标对于宇航元器件的自主可控具有决定性的意义，这种指标具有一票否决作用。若某宇航元器件对应该指标的最终评价分值为 0，则完全否认该宇航元器件的自主可控度，即整体自主可控度评估结果为 0；例如对于指标全过程地域，若该指标为 0，则表明该宇航元器件的某生产地域处于国外而且是非公开的，在这种情况下，很容易出现断供，因此这样就否决了该宇航元器件的自主可控程度；例如企业所有制，如果某宇航元器件的生产企业所有制为外资独资或控股，则很容易出现外资撤资而造成的停产，因此该指标一票否决该宇航元器件的自主可控程度。

2 指标体系构建

根据航天元器件的自主可控要求，分析自主可控的影响因素并且结合航天元器件的特点，构建指标体系如表 1 所示。

2.1 生产过程要素

宇航元器件生产过程要素评价目的是通过对待验证器件研制厂家调研评估，对元器件的过程控制、制造和工艺、设计能力进行评价，提前识别短板与风险，保障后续供货的稳定可靠。

表 1 宇航元器件自主可控评估指标体系

一级指标	二级指标	三级指标	满分	指标参考值	
生产过程要素 (53%)	过程控制 (19%)	全过程地域 (一票否决)	5	境内、境外公开、境外非公开	
		企业所有制 (一票否决)	5	国有独资或控股、民营、外资独资或控股	
		质量控制	1	严格、一般、无	
		人员技术	7	全、够用、无	
		人员管理	1	全、够用、无	
	制造与工艺 (25%)	芯片线(含工艺文件)(一票否决)	9	全、够用、无	
		封装线(含工艺文件)(一票否决)	7	全、够用、无	
		原材料(晶片、管壳、试剂)	3	全、够用、无	
		测试软件	3	全、够用、无	
		测试硬件	3	全、够用、无	
	设计能力 (9%)	设计用硬件	3	全、够用、无	
		设计软件	3	全、够用、无	
		设计相关技术	3	全、够用、无	
	需求满足度 (23%)	基础性能 (10%)	电学性能 (一票否决)	5	满足、够用、不满足
			环境性能 (一票否决)	5	满足、够用、不满足
质量等级 (3%)		宇航标准(宇航用元器件相关标准)	3	QML-Q、QML-V、QML-QML、Non-QML	
成本与价格 (4%)		与国外比价格	1	不高于、2 倍，高于 2 倍	
		供货周期	3	1 年内，3 年内，3 年以上	
验证与改进 (6%)	验证	3	元器件\整机\飞行、元器件\整机、元器件		
	改进	3	好、够用、无		
企业稳定性 (12%)	标准与资质 (6%)	标准	3	宇标、国军标、企标	
		资质	3	宇航认定+国军标认证、国军标认证、用户认证	
	经济效益(3%)	营收	3	盈利、平衡、亏损	
	维护保障 (3%)	保障能力	3	全、够用、无	
生态 (12%)	市场 (6%)	用户量	3	> 10%，1%~10%，<1%	
		认可度	3	> 80%，30%~80%，<30%	
	政策 (1%)	产业政策	1	完善、一般、缺乏	
		生态企业完备	3	完备、一般、缺乏	
正向循环 (5%)	解决用户问题	1	及时、一般、滞后		
	生态社区	1	完善、一般、缺乏		
总分			100		

1) 过程控制主要是对生产过程中地域、公司所有制、质量管控、人员的管理与技术等自主可控影响因素进行评估，其指标采取最低化原则，即完整的生态链中所得的最低分：① 全过程地域是指宇航元器件生产过程中的地域；② 企业所有制是指企业所有者或所有权的结构，本指标主要考察企业资本的可控性；质量控制指企业内部是否有一套完

整严格的质量管控体系，能够确保宇航元器件在出厂前进行严格的质量管控，确保宇航元器件的质量和性能的达标；③ 人员技术是指人员的相关技术水平和能力，其评估主要通过专家评估打分的方式，最终给出3个档次，最终的评估依据3个档次开展；④ 人员管理主要考察公司或者企业对于人员管理情况的正规性和有效性，其评估主要通过专家对公司人员的管理制度打分方式进行分档，最终的评估分值按照档次进行给出。

2) 制造与工艺是指宇航元器件在制造过程中相关生产线的完整可控程度，该研究针对的制造与工艺主要包括芯片线、封装线、原材料、测试软件和测试硬件的完整可用程度：① 芯片线是指宇航元器件的芯片生产线是否比较完善，其分值通过专家评估方式划档，然后根据所属档次进行评估；② 封装线主要是指宇航元器件生产后的封装工艺多设计的全产业链情况；③ 原材料是指与宇航元器件生产相关的晶片、管壳、试剂等相关材料的完整性；④ 测试软件是满足宇航元器件性能测试、功能测试相关的测试软件是否齐全够用；测试硬件是满足宇航元器件性能测试、功能测试相关的测试硬件设备与工具是否齐全够用。

3) 设计能力主要是指宇航元器件设计过程中的对外依赖性来分析其自主可控程度，其中设计能力主要体现在宇航元器件设计过程中的软件、硬件以及相关技术：① 设计硬件是指宇航元器件设计过程中的硬件设备的完备性；② 设计软件是指宇航元器件在设计过程中的相关软件功能是否满足需求；③ 设计相关技术是指宇航元器件在设计过程中所涉及的相关技术能不能满足设计的相关需求。

2.2 需求满足度

一级指标需求满足度主要衡量宇航元器件能否满足实际应用的需求，其虽然与自主可控程度关系不大，但是通过自主可控能力所生产的宇航元器件应当能够满足基本的需求，这样的自主可控才是有意义的。因此这项指标内容主要考察自主可控元器件对基本需求的满足程度。

1) 基础性能是指宇航元器件满足基本需求的能力，主要包括元器件的电学性能和环境性能：① 电学性能是指元器件的电学性能应当符合标准化的要求，重复性和稳定性比较好。电学性能进一步细分有包括静态、动态、可靠性以及极限能力测试等。电学性能依据满足需求、基本满足需求和不能满足需求3个档次进行质量评价；宇航元器件由于其工作

环境为太空，太空中具有微重力，真空没有热对流等特点，因此其环境需求具有独特性。② 元器件的环境性能是指宇航元器件抵抗环境因素不被破坏的能力，是一项重要的质量特性；③ 质量等级是指宇航元器件的质量标准，其根据宇航元器件的相关标准进行评估。

2) 由于宇航元器件等级要求极高，以确保在极端环境下的可靠性和稳定性。根据质量等级的不同，宇航元器件分为QML-Q、QML-V、QML-QML和Non-QML。根据质量等级的不同，宇航元器件的分值不同，一般情况下，质量等级高的宇航元器件可以应用于低要求的设备上，因此赋予高等级质量的宇航元器件比较高的评价分值。

3) 成本与价格是衡量国产自主可控宇航元器件的经济性能，主要包括价格和供货周期2个指标：

① 价格主要是与国外同性能元器件的价格之比作为衡量指标：

$$p = p_i / p_e \quad (2)$$

式中： p_i 为元器件的国内销售价格； p_e 为元器件的国外销售价格。根据 p 的大小可以确定“与国外比价格”指标的最终分值。

② 供货周期与价格有一定的关系，而且电子元器件产品的时效性比较关键，所以根据供货周期对最终自主可控能力进行评估。

4) 验证与改进主要是元器件的验证与改进的水平，主要是指对于元器件的验证和质量问题归零的管理能力：① 验证依据等级可以分为元器件级别验证、整机级别验证和飞行级别验证；② 改进主要是指依据国际标准化组织发布的ISO18238:2015《航天质量问题归零管理》标准，最终形成的质量问题归零制度化、标准化和规范化管理。

2.3 企业稳定性

一级指标企业稳定性主要衡量企业的生命力，为企业在外界各种因素的影响下所表现出的稳定程度。该指标下主要包括标准与资质、经济效益和维护保障3个二级指标。标准与资质是指宇航元器件生产企业所采用的标准和所具有的资质。其下设标准和资质2个指标，标准包括宇标，国军标和企标，其中宇标是标准化机构根据宇航产品的特殊要求按照规定程序编制和审定的指令性技术文件。宇航标准涉及宇航产品的设计宇航产品的涉及、试制、试验、生产、使用和贸易活动，并有专业标识和编号。国军标是为了保证军用元器件的质量，对元器件所

制定的一系列的标准与要求, 以备对航天的国内部分别红和优质的元器件。为了保证军用元器件的质量, 我国制定了一系列元器件标准, 在二十世纪七十年代末期制定了“七专”7905 技术协议和二十世纪八十年代初期制定的“七专”8406 技术条件, 是我国军用元器件标准的基础。其中“七专”指专人、专机、专料、专批、专检、专技、专卡或专线。

企业标准是在企业范围内需要协调、统一的技术要求、管理要求和工作要求所制定的标准, 是企业组织生产、经营活动的依据。根据标准的不同, 可以为综合评估设定不同的分值。资质是指企业所具有的资质, 包括 3 个等级, 其中最高等级是通过宇航和国军标双认证, 最低档为用户认证。经济效益主要是指企业的盈收情况, 因为盈利企业具有较强的生命力, 因此宇航元器件的生产企业具有较高的盈利其生存力较强, 不会出现倒闭等情况而断货。维护保障是指元器件企业的售后服务保障能力, 企业是否具有专业机构或者部门能够进行后期的保障和维护。

2.4 生态

生态是指与电子元器件相关上下游, 生态系统任意环节消失, 那么此生态就会慢慢(或很快)失去活力, 生态中的组成会慢慢消失, 最终整个生态消失。该一级指标下面设置了市场、政策和正向循环 3 个二级指标。

市场是指宇航元器件的销售情况, 主要包括用户量和认可度。其中用户量体现了宇航元器件的市场量, 认可度体现了宇航元器件的质。用户量的衡量采用总用户需求的比例来进行衡量, 则可以根据用户量的比例确定评价分值:

$$p_c = N_c / N_t \quad (3)$$

式中: N_t 为宇航元器件的市场需求总量; N_c 为宇航元器件的市场用户量。

认可度与宇航元器件的市场用户量有关系, 因此认可度应当与用户量有关系, 则用户满意衡量指标为:

$$S = N_s / N_c \quad (4)$$

式中: N_s 为一宇航元器件的用户满意数; N_c 为宇航元器件的市场用户量。可以根据“认可度”指标值确定最终分值。

政策主要是与产业相关的政策体系的完善程度, 其下面设置产业政策指标。

正向循环主要为整个宇航元器件的生产企业与

相关链条是否完善, 其下面设置生态企业完备、解决用户问题和生态社区 3 个指标: 生态企业完备是指宇航元器件的相关生态企业比较完备, 没有关键环境或者关键部件依赖于国外等情况; 解决用户问题指标主要指用户问题的解决途径和解决手段是否多样, 是否有强大的团队或者组织能够完成问题的解决; 生态社区是指与该宇航元器件相关的生态社区, 针对生态建设中的开发者、产品商、集成商等利益相关人员, 能够提供不同的生态赋能服务, 汇聚自主可控的产业力量, 形成自主可控的技术交流、攻关适配协作中心。

3 评估实施

定义了指标体系后, 对于指标体系中的最终指标, 笔者制定指标体系中三级指标为 P_i , $i=1, 2, \dots, 30$ 用“五原则”中的分档原则和及格线原则, 确定最终的指标最高分 $S_{i,max}$ 评估分值 N_i 中最大分值如表 1 所示, 总分为 100 分。为了实施评估, 则最终的评估结果为:

$$S = \sum_{i=1}^{30} S_i \quad (5)$$

同时, 根据宇航元器件自主可控评估特点, 将 6 个指标设置为一票否决指标, 为了方便对一票否决指标进行评估, 定义如下否决函数:

$$d(x) = \begin{cases} x, & x > 0 \\ -100, & x = 0 \end{cases} \quad (6)$$

为了实现否决, 定义负值惩罚, 即当一票否决指标最终的指标测量值为 0 时, 则该项指标的最终得分为 -100, 若当所有的指标测量值融合后, 存在一票否决指标的测量值为 0 的情况, 则最终的评价分值必定小于 0, 在此情况下, 最终的评估结果出现负值的情况下, 则完全否决该航天元器件的自主可控度, 即自主可控度为 0。

4 结论

笔者针对宇航元器件的自主可控评估问题开展研究, 主要的贡献包括:

1) 提出了基于“五原则”的评估方法。五原则中, 分档、最低分和及格线主要是指指标测量值的设定采用的原则, 专家打分主要是针对定性指标量化而采用的原则, 一票否决是针对自主可控评估的特点, 针对自主可控度影响比较大的指标而采用的原则。