

doi: 10.7690/bgzdh.2024.03.004

数字孪生应用于装备质量管理的 AHP-SWOT 分析

王 茁, 王亚彬, 王 帅

(陆军工程大学石家庄校区装备指挥与管理系, 石家庄 050003)

摘要: 针对当前装备质量管理方面存在的预测精度较低、数据不够全面、虚实交互不充分等问题, 利用 SWOT 方法分析数字孪生技术应用于装备质量管理的优势、劣势、机会和威胁 4 类战略指标。用层次分析法 (analytic hierarchy process, AHP) 对所有战略指标进行权重分析, 构建战略强度坐标系, 通过其重心所处的象限确定 SO 机会型战略; 从 5 方面对该技术的进一步发展提出对策建议。结果表明, 该分析可为当前装备质量管理工作提供参考。

关键词: 数字孪生; 装备质量管理; AHP; SWOT 分析; 对策

中图分类号: E919 **文献标志码:** A

AHP-SWOT Analysis of Digital Twin Applied to Equipment Quality Management

Wang Zhuo, Wang Yabin, Wang Shuai

(Department of Equipment Command and Management, Shijiazhuang Campus, Army Engineering University of PLA, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: In view of the problems in current equipment quality management, such as low prediction accuracy, incomplete data and insufficient interaction between virtual and real, the SWOT method is used to analyze the advantages, disadvantages, opportunities and threats of four strategic indicators of digital twin technology applied to equipment quality management. The weight of all strategic indicators is analyzed by analytic hierarchy process, (AHP) method, and the coordinate system of strategic intensity is constructed, and the SO-opportunity strategy is determined by the quadrant of its center of gravity, and the countermeasures and suggestions for the further development of the technology are put forward from five aspects. The results show that the analysis can provide a reference for the current equipment quality management.

Keywords: digital twin; equipment quality management; AHP; SWOT analysis; countermeasures

0 引言

装备质量管理是指在装备全寿命过程中实施的确定质量方针、目标和职责等全部管理职能的活动, 涉及装备从研制到维修的全过程, 而部队是使用装备的主体, 装备质量在使用过程中得到充分体现。笔者重点就使用阶段即装备交付部队之后的装备质量管理工作进行分析, 目的是充分发挥、保持、恢复和改善装备质量, 保持装备的完好性, 满足部队作战、训练及执行任务的需要。长期以来, 国内外围绕武器装备管理, 在管理思想、管理方法、管理技术等方面都进行了创新, 如“全系统、全寿命”的管理思想^[1]、“基于状态”的管理思想^[2]等; 但目前来看, 装备质量管理方面还存在预测精度较低、数据不够全面、虚实交互不充分等问题, 影响了装备质量管理的效果。

数字孪生是以数字化方式创建物理体的虚拟模型, 充分利用物理模型、传感器更新、运行历史等数据, 集成多学科、多物理量、多尺度、多概率

的仿真过程, 在虚拟空间中完成映射, 从而反映相对应的物理实体的全生命周期过程^[3]。通过数字孪生, 物理世界中装备运行数据会同步至虚拟世界中, 虚拟世界中的模型和数据也会与装备进行交互。数字孪生技术的实时交互、超前预测等特点, 将为装备质量管理的数字化、可视化、智能化提供支撑。

1 SWOT 要素分析

SWOT 分析法又称态势分析法, 主要是运用各种调查研究方法分析研究对象所处的各种环境因素, 其中, “S”代表优势 (strength), “W”代表劣势 (weakness), “O”代表机会 (opportunity), “T”代表威胁 (threat)^[4]。外部环境因素包括机会因素和威胁因素, 指外部环境对研究对象产生的有利或不利的影 响; 内部环境因素包括优势因素和劣势因素, 指研究对象自身存在的积极或消极因素。通过将研究对象的优势、劣势、机会、威胁因素列举出来, 根据抓住机会、规避威胁、发挥优势、克服劣势的基本原则, 可为研究对象发展提出具体的指导对策。

收稿日期: 2023-11-11; 修回日期: 2023-12-17

基金项目: 陆军装备技术基础项目 (212LJ42002)

第一作者: 王 茁 (1992—), 男, 河北人。

1.1 机会

1.1.1 国家军队越来越重视

国家和军队对数字孪生等新技术的重视程度越来越高。国家层面，2020年5月，“新基建”首次写入政府工作报告，在对该项热点的讨论中，“数字孪生”被不少代表和委员提及；2020年9月，工信部副部长强调，要前瞻部署一批5G、人工智能、数字孪生等新技术应用标准；2021年3月，国家“十四五”规划纲要中提出“探索建设数字孪生城市”^[5]。军队层面，2021年2月，全国人大代表、陆军研究院高级工程师王明孝提出，数字孪生可以推动军事装备向智能化方向发展，是当前军事装备领域应用研究的一项关键技术，通过建立装备运行数据库，用数字孪生模型装备全生命周期的所有数据和参数，再通过既定算法人工智能分析，便能掌握装备在实际过程中的使用和管理情况^[6]。

1.1.2 研究领域越来越深入

目前，国内已经形成了一定规模的学术群体，涉猎多个学科和专业^[7]。陶飞等^[8]提出了数字孪生的概念模型、运行机制和关键技术等内容，对该领域的发展起到引领作用；张玉良等^[9]对数字孪生的体系结构和实施路径进行了详细分析，在航空产品装配工艺方面成果丰硕；张旭辉等^[10-11]在智能掘进、设备维修等方面取得较新的研究进展。

1.1.3 配套技术越来越成熟

数字孪生技术是建立在许多新兴技术的基础上发展起来的，相关配套技术的成熟度直接影响数字孪生技术的应用。通过物联网技术在装备上布设传感器网络，能够实现对装备运行状态数据的实时采集，实现虚实互联与集成；运用大数据分析技术对采集的海量数据进行处理，实现对装备质量状态的判断及预测；5G技术的普及将进一步解决数据采集及实现信息空间与物理空间的实时交互、一致性与同步性等问题；云计算、超级计算、量子计算等使建模与仿真不再受到计算能力的局限；虚拟现实(virtual reality, VR)与增强现实(augmented reality, AR)可以为装备质量管理的可视化提供支撑^[12]。

1.2 威胁

1.2.1 标准体系缺失

数字孪生还缺乏相关术语、系统架构、适用准则、相关模型、数据、连接与集成、服务等标准的

参考^[13]，标准体系的缺失严重阻碍了数字孪生技术的应用与发展，导致模型间、数据间、模型与数据间集成难、一致性差等问题，可能会造成新的孤岛。

1.2.2 安全风险增大

部队对武器装备的数据信息有着严格的保密要求。数字孪生技术需要在武器装备上安装大量的传感器等设备，不断地采集装备的数据信息并进行上传，这样就增大了装备数据丢失、被盗的风险，如果存在安全漏洞的话，甚至可能会使装备遭到攻击而瘫痪^[14]。

1.2.3 观念不易改变

部队在装备质量管理方面已经积累了一定的经验，对新生事物有时持谨慎态度。由于技术还不够成熟，数字孪生的引入很难在短期内见到成效，加上新技术对管理人员的能力素质提出了更高的要求，而现有管理人员对新事物的接受能力有所差别，这也阻碍了数字孪生技术在部队装备质量管理上的推广使用。

1.3 优势

1.3.1 数据获取更全面

一些关键部位的数据受其安装位置、运行环境等因素影响并不能直接测量，数字孪生技术可以借助传感器采集该关键部位周围的相关数据，并在虚拟模型中进行模拟计算，推测出那些无法直接测量的数据^[15]，这样就能使数据更加完善。

1.3.2 预测分析更准确

装备质量管理不仅要着眼于当前装备的故障情况，也要通过对当前状态的评估来预计未来一段时间内的健康状况及剩余寿命。利用数字孪生技术实时交互、超前预测等特点，可以通过传感器采集不同故障现象下的典型数据特征，并利用神经网络等算法不断地学习训练，通过运行虚拟模型产生的相关数据与故障典型数据特征对比，便能精准实现故障预测^[16]和寿命预测^[17]。

1.3.3 专家经验数字化

在传统的装备质量管理中，装备故障大多依靠维修人员或专家来进行判断，但受个人能力的局限性、经验的缺乏等客观因素影响，难免会对故障及时准确地进行判断造成一定影响。通过数字孪生可将专家经验以数字化的形式储存起来，便于查询、借鉴，即使对于维修经验不足的使用分队来说，也

能够通过该系统迅速判断并排除故障。

1.3.4 寿命周期全覆盖

数字孪生技术能够应用于装备质量的全寿命周期管理。研发阶段运用数字孪生技术，随着设计进度的推进，不断完善的数字孪生体具有了数字样机的功能^[18]，可以进行仿真、参照和对比，以提出先进、合理、可量化、可考量的战技指标，实现预先监测、评估，保证装备功能各项性能的完好性；制造生产阶段实现装备生产全透明、多方交互；使用阶段充分集合历史数据、采集数据，科学预测装备质量状态。

1.4 劣势

1.4.1 成本投入相对较高

数字孪生应用涉及复杂武器系统的建模仿真、海量运行数据的管理以及复杂系统虚拟现实技术的应用等，我军装备型号复杂多样。若现阶段大量应用数字孪生技术，需要耗费大量的人力物力，而且受技术水平的限制，提高装备质量管理的效果可能也不会很明显。

1.4.2 模型构建还有差距

现有数字孪生模型大多仅是构建了物体的几何外形，而要想真正实现通过虚拟模型来客观真实地反映物理实体，还需对其进行物理、行为、规则约束等多维度地构建，而当前对于复杂装备实现起来还比较困难^[19]。

1.4.3 数据处理能力不足

数据处理包括数据的采集、传输、存储等，受传感器质量和工作环境的影响，数据采集的精确度还需进一步提高，同时现有的网络传输设备也难以满足装备运行产生的大量数据的高速传输需求^[20]。对于数据的存储，也要通过优化数据存储结构、删除大量冗余数据，实现装备全寿命周期数据的有效管理。

1.4.4 成熟应用案例较少

通过搜索国内数字孪生技术应用的有关文献，可看出其研究热点领域集中在数字孪生技术、智能制造和智慧城市等方面，而在装备全寿命管理、装备健康管理领域的研究和应用相对较少，尤其是尚未检测到针对我军复杂装备、新型装备的实际特点开展基础性的资料。

通过以上对 4 方面战略指标的分析，可得到

SWOT 影响因素表，如表 1 所示。

表 1 SWOT 影响因素

外部机会(O)		外部威胁(T)	
O ₁ : 国家军队越来越重视	O ₂ : 研究领域越来越深入	T ₁ : 标准体系缺失	T ₂ : 安全风险增大
O ₃ : 配套技术越来越成熟		T ₃ : 观念不易改变	
内部优势(S)		内部劣势(W)	
S ₁ : 数据获取更全面	S ₂ : 预测分析更准确	W ₁ : 成本投入相对较高	W ₂ : 模型构建还有差距
S ₃ : 专家经验数字化	S ₄ : 寿命周期全覆盖	W ₃ : 数据处理能力不足	W ₄ : 成熟应用案例较少

2 构建基于 AHP 方法的 SWOT 判断矩阵

传统的 SWOT 分析法属于定性分析方法，而定性分析存在一定的缺陷，即容易受到人们知识水平、思维能力的限制，造成一定的误判。SWOT 分析法将数字孪生应用于装备质量管理的影响因素进行分析的前提下，采用层次分析法(AHP)通过专家打分得到各因素的权重值，是对单独应用 SWOT 分析方法存在的定量分析不足问题的改良，使分析更加科学全面^[21]。

2.1 确定量化标准

将影响数字孪生技术应用于装备质量管理的相关因素，进行统一的量化管理，纳入同一个量化组，使其具有相同的参考指标，便于进行标准化分析。通过邀请专家用表 2 的评分标准对各影响因素打分并求取平均值的方式确定各因素的初始分值。

表 2 SWOT 影响因素评分量化

评分	优势	劣势	机会	威胁
10	优势非常明显	劣势非常明显	机会非常大	威胁非常大
8	优势很明显	劣势很明显	机会比较大	威胁比较大
5	优势一般	劣势一般	机会一般	威胁一般
3	优势不明显	劣势不明显	机会比较小	威胁比较小
0	没有优势	没有劣势	没有机会	没有威胁

2.2 确定指标权重

2.2.1 构建影响因素判断矩阵

邀请专家对同一层次各要素的重要性进行两两比较，分别构建出优势、劣势、机会、威胁因素判断矩阵，如表 3—6 所示。

2.2.2 计算特征向量

在 AHP 中，根据以上构造的影响因素判断矩阵，可得到同一层次各指标之间的相对重要性权重值。

采用算术平均法，对优势因素判断矩阵进行处理，得到优势因素特征向量(权重值)为：

$$W_s = [0.1437, 0.4618, 0.1186, 0.2760]^T。$$

表 3 优势因素判断矩阵

S	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄
S ₁	1.00	0.25	2.00	0.33
S ₂	4.00	1.00	3.00	2.00
S ₃	0.50	0.33	1.00	0.50
S ₄	3.00	0.50	2.00	1.00

表 4 劣势因素判断矩阵

W	W ₁	W ₂	W ₃	W ₄
W ₁	1.00	0.25	2.00	0.33
W ₂	4.00	1.00	3.00	2.00
W ₃	0.50	0.33	1.00	0.50
W ₄	3.00	0.50	2.00	1.00

表 5 机会因素判断矩阵

O	O ₁	O ₂	O ₃
O ₁	1.00	4.00	0.50
O ₂	0.25	1.00	0.33
O ₃	2.00	3.00	1.00

表 6 威胁因素判断矩阵

T	T ₁	T ₂	T ₃
T ₁	1.00	2.00	5.00
T ₂	0.50	1.00	4.00
T ₃	0.20	0.25	1.00

利用一致性检验公式：

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{[AW]_i}{n\omega_i}； \tag{1}$$

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}； \tag{2}$$

$$CR = CI / RI。 \tag{3}$$

随机平均一致性指标如表 7 所示。

表 7 随机平均一致性指标

阶数	1.00	2.00	3.00	4.00
n	0.00	0.00	0.58	0.89
阶数	5.00	6.00	7.00	8.00
n	1.12	1.24	1.32	1.41

n=4 时，查表 7 得 RI=0.89，代入一致性检验公式，得：

$$CR=0.059 < 0.1。$$

其一致性检验合格。

同理分别求得劣势、机会、威胁特征向量：

$$W_w = [0.0797, 0.5827, 0.1973, 0.1403]^T；$$

$$W_o = [0.3603, 0.1274, 0.5123]^T；$$

$$W_t = [0.5679, 0.3339, 0.0982]^T。$$

经一致性检验均合格。

2.2.3 因素量化

通过确定量化标准，在赋予量化因素不同权重的基础上，通过专家打分法获得因素量化值，得因

素量化如表 8 所示。

表 8 影响因素量化

因素	专家打分(平均值)	权重	加权分	总分
S ₁	5	0.1437	0.7185	6.0815
S ₂	7	0.4618	3.2326	
S ₃	4	0.1186	0.4744	
S ₄	6	0.2760	1.6560	
W ₁	-3	0.0797	-0.2391	-4.9454
W ₂	-6	0.5827	-3.4962	
W ₃	-4	0.1973	-0.7892	
W ₄	-3	0.1403	-0.4209	
O ₁	7	0.3603	2.5221	7.2575
O ₂	5	0.1274	0.6370	
O ₃	8	0.5123	4.0984	
T ₁	-6	0.5679	-3.4074	-5.2733
T ₂	-5	0.3339	-1.6695	
T ₃	-2	0.0982	-0.1964	

2.2.4 构建战略强度坐标系

将量化因素的加权分分别填入 4 维坐标系中，形成 SWOT 战略四边形，计算四边形重心坐标。在战略强度坐标系中，优势 S=(0, 6.0815)，劣势 W=(0, 4.9454)，机会 O=(7.2575, 0)，威胁 T=(-5.2533, 0)。

四边形重心的坐标公式为：

$$g(x, y) = g\left(\sum_{i=1}^n \frac{x_i}{4}, \sum_{i=1}^n \frac{y_i}{4}\right)。 \tag{4}$$

代入数据得：g(x, y) = g(0.4961, 0.2840)。

战略方位角：

$$\theta = \arctan\left(\frac{y}{x}\right) = \arctan(1.2425) = 29.79^\circ；$$

战略正强度：U = O × S = 44.1365；

战略负强度：V = T × W = 26.0786；

战略强度系数：ρ = U / (U + V) = 0.6286；

战略向量：a = (ρ, θ) = (0.6286, 29.79°)。

通过以上计算得到如图 1 所示的 SWOT 战略强度坐标系。

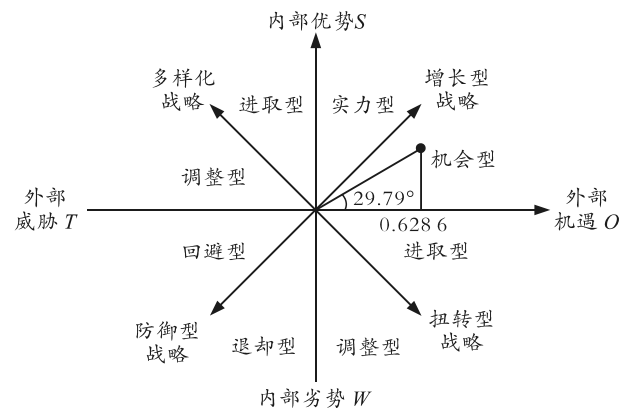


图 1 SWOT 战略强度坐标系

从战略强度坐标系来看，数字孪生应用于装备质量管理适合 SO 战略，且属于其中的机会型战

略。即从目前来看数字孪生技术自身优势较为突出，外部机会又能支持该技术在装备质量管理领域的快速发展；因此，应充分抓住外部机会，发挥内部优势，加快数字孪生技术在装备质量管理领域的应用。

3 对策建议

针对数字孪生应用于装备质量管理适合采取机会型战略的特点，对该技术的进一步发展提出 5 点对策建议。

1) 加大政策扶持，集智协同攻关。

新技术的应用很难在短期内见到很好的效果，需做好长期研究的准备。数字孪生的概念在 2003 年由美国 Grieves 教授提出，2011 年美国空军提出将该技术应用于飞行器。而我国的研究集中出现在 2017 年，且目前大多停留在理论层面，相对于其他国家已经有所滞后，必须持续高度重视技术的发展，加大政策扶持和科研投入，同时要立足于高质量发展，发挥制度优势，集中力量办大事，汇聚一批优秀的科技人才，集智攻关，才能不断缩小技术差距并居于领先地位。

2) 拓展军民融合，打破行业壁垒。

加强科技研发力度，必须全面统筹规划军地双方的科研资源，加强同国家有关部门、地方政府的沟通协调，充分利用地方院校、科研院所、民用企业的科研资源优势，打破军地研发的行业壁垒，实现先进民用技术的资源共享和成果转化，提高研发效率，节约研发资源。

3) 合理技术引进，加强自主创新。

技术创新能力决定了国家的核心竞争力，真正的核心技术是买不来的，但自主创新不等于关起门来搞创新，绝不能排斥技术引进。数字孪生的核心技术有很多，比如多领域多尺度融合建模技术、数据采集传输管理技术、VR 技术等，每一项技术的不足都会制约数字孪生技术的进一步发展；因此，要不断跟踪数字孪生技术的发展前沿，合理引进、自主创新，加强相关核心技术的研发，对于数字孪生技术的发展十分必要。

4) 完善标准体系，促进提质增效。

制约数字孪生技术发展的一个重要因素是标准体系的缺失。从目前来看，各研究团队的研究还没能达成一致的结论，没有统一的标准，导致其在研究和落地应用过程中存在交流困难、集成困难、协作困难等问题，以及模型间、数据间、模型与数据

间、系统间集成难、一致性差、兼容性低、互操作难等问题。为促进该技术提质增效，标准委员会及相关技术研究需进一步对标准体系进行研究完善，建立行业数据规范，提高数据处理的安全性，以便顺利完成数据的交换、集成与融合工作。

5) 科学系统论证，追求总体收益。

应用数字孪生技术可提高装备质量管理水平，但也会导致一定费用的产生，需从费用和效益 2 方面来综合衡量。一方面，传感器的选择配置是数字孪生技术的重要内容之一，随着武器装备复杂程度的提高，传感器配置的成本也越来越大，在满足系统数据测量要求的前提下尽可能地降低成本是研究中必须解决的问题；另一方面，构造整体装备的数字孪生模型有时也没有必要，可重点分析影响装备质量的关重部件，建立关重件的孪生模型，减少工作量和节约成本。

4 结束语

笔者利用 AHP-AWOT 分析方法，分析数字孪生技术应用于装备质量管理的内外部因素，构建 SWOT 战略强度坐标系，得出数字孪生应用于装备质量管理的发展战略适用机会型发展战略。结合机会型发展战略的特点，对该技术的下一步发展提出了 5 点建议。需要说明的是，笔者是针对当前外部和内部环境因素下的 SWOT 静态定性分析，未来随着外部环境和内部条件的不断变化，SWOT 分析的结果和战略也应不断调整和更新。

参考文献：

- [1] 郝建平. 装备全系统全寿命管理[M]. 石家庄: 军械工程学院, 2007: 1.
- [2] 安进, 徐廷学, 曾翔, 等. 基于状态评估的导弹装备质量管理决策[J]. 国防技术基础, 2017(4): 12-17.
- [3] 张轩, 凌云. 基于数字孪生的智慧营区信息系统建设[J]. 信息化研究, 2020, 46(3): 51-56.
- [4] 王璐瑶. 区块链技术应用于档案开放的 SWOT 分析[J]. 机电兵船档案, 2021(6): 53-55.
- [5] 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要[N]. 人民日报, 2021-03-13.
- [6] 钱晓虎, 王凌硕. 加快数字孪生技术的军事应用[N]. 解放军报, 2021-02-19.
- [7] 赵亮, 许娜, 张维. 我国数字孪生研究的进展、热点和前沿—基于中国知网核心期刊数据库的知识图谱分析[J]. 实验技术与管理, 2021, 38(11): 96-104.