

基于 TRIZ 解决航空航天用吸波贴片成本高的问题

韩静, 谭琳, 冯辉霞, 陈娜丽, 赵丹, 霍佳鑫

(兰州理工大学 石油化工学院, 兰州 730050)

摘要: **目的** 解决隐身飞机在飞行过程中因吸波贴片自身过重产生巨大的飞行成本, 吸波贴片在飞行条件下易产生划痕、损伤、材料损耗快, 以及因修复工序复杂、耗时长产生大量维护费用等问题。**方法** 应用 TRIZ 理论进行分析求解, 通过采用功能模型分析、因果分析等找到航空航天用吸波贴片成本高的关键缺陷, 利用技术矛盾分析、物理矛盾分析、物场模型及标准解、小人法等工具得到多个解决方案。经过综合评估最终找到经济、易于实现的解决方案。**结果** 通过运用 TRIZ 理论, 并且通过综合评价找到了减少吸波贴片成本的最优方案: 吸波贴片中的吸波体由掺杂杂原子的石墨烯构成了多孔结构, 增加了其吸波性能; 再将材料与自愈合材料相结合, 增加其自愈能力, 从而得到吸波性能好、质量小、自愈合能力强的吸波贴片。**结论** 文中得出的结果对减少隐身战机吸波贴片成本的研究具有一定的理论指导意义, 有助于减少高集成设备过多对人类及环境产生的危害。

关键词: TRIZ 理论; 吸波贴片; 因果分析; 矛盾分析; 小人法

中图分类号: TB33 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2023)09-0104-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.09.013

Solution to Problem of High Cost of Microwave Absorbing Patches for Aerospace Based on TRIZ

HAN Jing, TAN Lin, FENG Hui-xia, CHEN Na-li, ZHAO Dan, HUO Jia-xin

(School of Petrochemical Technology, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

ABSTRACT: The work aims to solve the problems of the huge flight cost caused to the stealth aircraft by the excessive weight of the microwave absorbing patch, the easy scratches, damage and fast material loss of the microwave absorbing patch under flight conditions and the complex repair process, long time and a large amount of maintenance costs. The TRIZ theory was applied to analyze and solve the problems. The key defects for the high cost of the microwave absorbing patch for aerospace were found by functional model analysis and causality analysis. Then, several solutions were obtained by technical contradiction analysis, physical contradiction analysis, material field model and standard solution, small man method and other tools. After comprehensive evaluation, an economical solution easy to implement was found. By TRIZ theory and comprehensive evaluation, the optimal scheme to reduce the cost of the microwave absorbing patch was found. The absorbing body of the microwave absorbing patch was composed of a porous structure of graphene doped with heteroatoms, which increased its absorbing performance. Then, the material was combined with the self-healing material to increase its self-healing ability, so as to obtain the microwave absorbing patch with good absorbing performance, small weight and strong self-healing ability. The research results have a certain theoretical significance to reduce the cost

收稿日期: 2023-03-24

基金项目: 国家科技部 2020 年重点研发计划创新方法工作专项 (SQ2020IMG100001); 国家西部地区自然科学基金项目 (21664009); 国家西部地区自然科学基金项目 (51063003)

作者简介: 韩静 (1997—), 女, 硕士生。

通信作者: 冯辉霞 (1966—), 女, 博士。

of microwave absorbing patch in stealth aircraft, which is helpful to reduce the harm to human and environment caused by highly integrated devices.

KEY WORDS: TRIZ theory; microwave absorbing patch; causality analysis; contradiction analysis; small man method

发明问题解决理论 (TRIZ) 是由前苏联学者根里奇·阿奇舒勒 (Ahshuller G S) 及其研究小组于 1964 年最先提出的^[1]。TRIZ 是一整套系统性的、基于知识的创新方法体系, 包括创新思维、分析工具以及解题工具等。小人法、九屏幕法、IFR 法、STC 算子等是用来辅助创新的思维方法; 功能分析、因果分析、技术矛盾分析、物场分析、技术系统进化法则以及发明问题解决算法 ARIZ 是用来分析问题的工具; 用于解决问题的工具包括 39 个工程参数、76 个标准解、40 条发明原理以及科学效应库^[2]。应用 TRIZ 进行创新, 可以获得较高质量的创新产品, 降低产品开发成本, 进而提升产品及企业的竞争力^[3-4]。

在现代战争中, 雷达是探测目标最可靠的手段, 因此雷达隐身技术是隐身技术的重点^[5]。然而, 在日益重要的飞机隐身技术中, 电磁波吸收材料的作用和地位逐渐突出。在隐身飞机上贴敷吸波贴片可以吸收侦察电波、衰减反射信号, 从而突破敌方雷达的防区。然而吸波贴片产生了巨大的飞行成本以及维护费用。本文利用 TRIZ 理论有效降低了航空航天中吸波贴片的成本和维护费用, 大大提高了吸波贴片的吸波性能。

1 问题分析

1.1 问题描述

吸波贴片通过吸收电磁波来达到飞机隐身的目的, 然而吸波贴片在隐身飞机的飞行过程中产生大量费用。其一是吸波贴片自身过重, 造成负载以及能耗增加, 因此产生巨大的飞行成本; 其二是吸波贴片因不耐受严苛的高低温环境、雨水的腐蚀和流体的磨损带来巨大的维护费用; 其三由于隐身飞机每飞行一个小时需要大约 3 个月的时间进行修复, 吸波贴片需要全部去除并且重新修, 因此这是产生大量维护费用的另一个原因。针对以上问题, 运用 TRIZ 理论进行分

析, 并研究解决方案。

1.2 IFR 最理想解

最理想解 (Ideal Final Result, IFR) 就是在解决问题之初抛开各种客观限制条件, 通过理想化来定义问题的最理想解, 以明确理想解所在的方向和位置, 保证在问题解决过程中沿着此目标前进并获得最理想解, 从而避免了传统创新涉及方法中缺乏目标的弊端, 提升了创新设计的效率^[6]。IFR 分析流程如表 1 所示。

1.3 功能分析

功能分析是建立工程系统的结构组成及相互作用, 回答“它是干什么的”, 并且通过评价其性能水平, 分为有用功能、有害的功能, 不足的功能和过度的功能。通过运用功能分析, 分析组件之间的相互作用来构建功能模型, 研究系统和超系统组件的功能和用途, 找出技术系统中存在的不足^[7]。

针对吸波贴片成本高的问题进行系统分析, 通过对技术系统的功能分析, 系统组件有树脂黏合剂、吸波体 (铁磁体、陶瓷材料)、橡胶透波体; 超系统有雨水、热场、流体、重力场、机身; 系统的作用对象为电磁波。吸波贴片分为三大部分: 第 1 部分为橡胶透波体使电磁波进入材料内部; 第 2 部分为吸波体在内部吸收电磁波; 第 3 部分为橡胶透波体和吸波体这两部分混合, 通过树脂黏合剂黏附到机身上。其中的核心材料是吸波材料, 目前应用于飞机隐身的吸波材料最常见的是可以磁吸收的铁磁体和可以介电吸收的陶瓷材料, 然而由于他们的密度较大 (铁磁体 ρ 为 $8 \times 10^3 \sim 16 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 陶瓷 ρ 为 $3.5 \times 10^3 \sim 4.9 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$), 导致在重力场的作用下使得飞机产生了巨大的负重。吸波贴片的各元件功能组件模型如图 1 所示。

表 1 IFR 分析流程
Tab.1 IFR analysis process

序号	思维分析步骤	实际问题分析结果
1	设计的最终目标?	降低吸波贴片的修复成本
2	最理想解?	吸波贴片没有维修成本, 可以完成自我修复
3	达到理想解的障碍是什么?	吸波贴片没有自我修复功能
4	出现这种障碍的原因是什么?	吸波贴片没有自我修复的结构
5	不出现这种原因的条件是什么?	吸波贴片有自我修复的结构、成分、性能
6	创造这些条件所用的资源是什么?	空间资源、物质资源、功能资源

1.4 因果分析

因果分析是从系统存在的问题入手，层层分析形成问题的原因，直到找到问题产生的根源，以便提出解决问题的对策及方案。

将吸波贴片成本高作为初始问题，寻找解决问

题的关键，具体分析如图2所示。通过因果分析^[8]发现，导致吸波贴片成本高的原因是透波体受流体摩擦易破损，酸雨腐蚀黏合剂，高低温环境腐蚀透波体，高温下黏合剂的黏合度降低，吸波贴片受损后需全部更换，陶瓷质量过大，铁磁体质量过大等。

正常功能	——>	系统组件	
不足功能	- - - ->	超系统组件	
有害功能	~ ~ ~ ~>	作用对象	

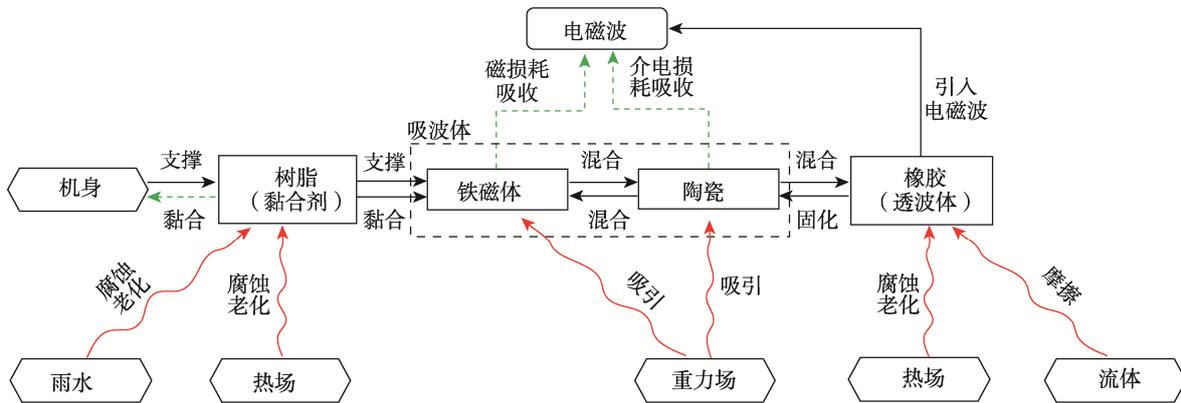


图1 功能模型
Fig.1 Functional model

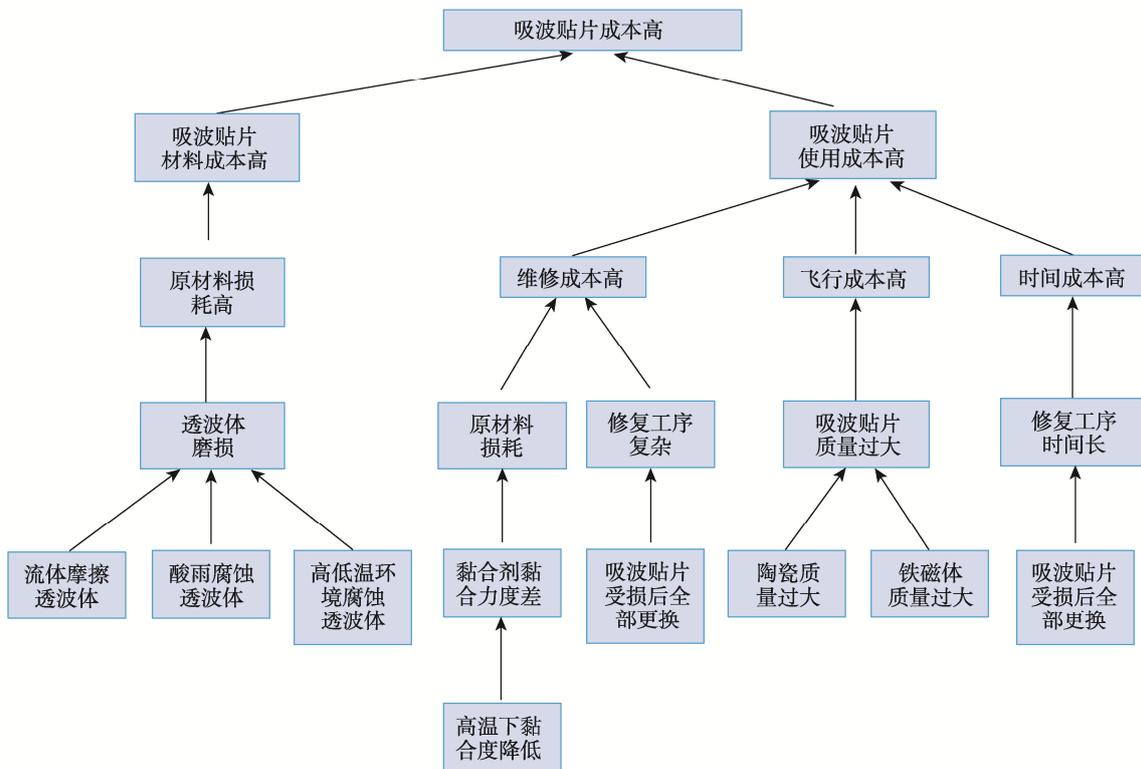


图2 因果链分析
Fig.2 Causality chain analysis

2 解决问题

共运用最终理想解法、因果分析直接解决、裁剪、物场分析、技术矛盾、物理矛盾和小人法这 7 种方法解决问题。

2.1 以“吸波贴片修复工序复杂”为入手点解决问题

2.1.1 利用最终理想解法解决问题

根据表 1 对 IFR 的分析, 得到最终理想解为吸波贴片有自我修复能力。因此得到方案 1, 即吸波贴片选用三硫代碳酸盐自修复材料, 当贴片开裂时, 吸波贴片可以完成自我修复。

2.1.2 运用因果分析可以直接解决的问题

针对吸波贴片受损后全部更换的问题, 得到解决方案 2, 即综合使用贴片技术和喷涂技术, 对受损较小的贴片使用喷涂技术进行修复, 对受损较大的贴片则重新更换。

2.2 以“吸波贴片质量过大”为入手点解决问题

2.2.1 利用裁剪工具解决问题

裁剪优化系统: 裁剪掉密度大的铁磁体和陶瓷材料, 由密度小的石墨烯替代, 保留其损耗电磁波的功能, 如图 3 所示。

根据裁剪法得到解决方案 3, 即用材质轻的石墨烯 ($2.2 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$) 替代铁磁体和陶瓷材料。

2.2.2 利用技术矛盾解决问题

要想改善技术系统中的某一特性或某一参数时, 经常会引起系统中另一特性或参数的恶化。把组成矛盾的双方内部性能转化成 39 个工程参数中的 2 个参数^[9-10]。

针对如何避免吸波贴片自重使飞行费用高的问题, 由裁剪法得出采用质地轻的石墨烯代替铁磁类和陶瓷类材料的方法。然而石墨烯贴片的导电能力强, 导致电磁波无法进入材料内部。转换成 TRIZ 标准冲突, 改善的参数: 1. 运动物体的质量, 恶化的参数: 27. 可靠性。对应的发明原理: 3. 局部质量原理、11. 事先防范原理、1. 分割原理、27. 廉价替代品原理。依据 11. 事先防范原理, 得到解决方案 4, 即在石墨烯中加入杂原子, 改善石墨烯的结构, 在降低飞行成本的同时提高了石墨烯贴片的吸波性能。

2.2.3 利用物理矛盾解决问题

物理矛盾是一个技术系统的工程参数具有相反的需求^[11]。解决物理矛盾可以采用分离的方法, 包括空间分离、时间分离、条件分离、系统级别分离。

由物场分析得出问题点, 为了“增加吸波性能”, 需要参数“吸波贴片的厚度”为“厚”, 但又为了“减轻飞行成本”, 需要参数“吸波贴片的厚度”为“薄”, 即, 吸波贴片的厚度既要“厚”又要“薄”。基于关系分离推荐的解决物理矛盾的发明原理: 3. 局部质量、17. 空间维数变化、19. 周期性作用、31. 多孔材料、32. 改变颜色、40. 复合材料^[12]。依据 31. 多孔材料原理, 得到解决方案 5, 即将吸波贴片制成多孔材料贴片, 通过引入多重反射提高吸波性能, 并且减少了原料的使用量, 从而大量减轻了飞行成本。

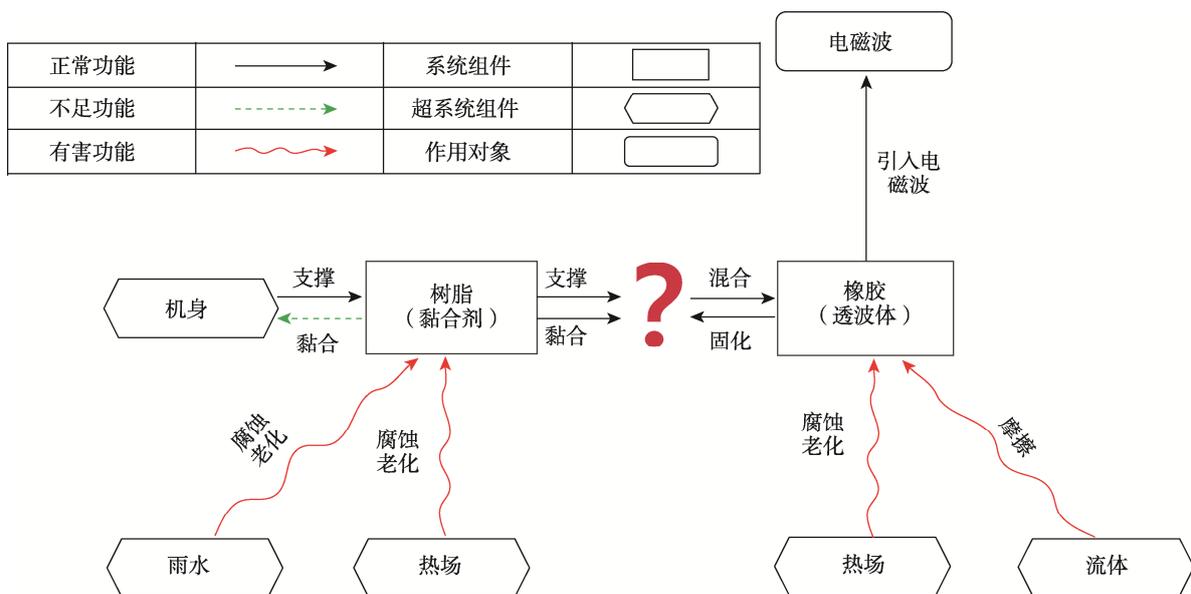


图 3 裁剪模型
Fig.3 Trimming model

2.3 以“吸波贴片修复工序时间长”为入手点解决问题

针对吸波贴片修复工序时间长的问题,得到解决方案6,即使用机器人智能修复的技术手段修复受损的吸波贴片,减少修复时间。

2.4 以“原材料磨损高”为入手点解决问题

2.4.1 运用因果分析可以直接解决的问题

针对透波体在飞行条件下受流体摩擦易磨损的问题,得到解决方案7,即在橡胶透波体表面添加耐摩擦材料聚氨酯薄膜,能有效阻止流体摩擦透波体。

2.4.2 运用资源分析可以直接解决的问题

资源是一切可以被人类用来解决问题的物质、能量、信息和其属性的总称^[13-14]。资源分析是从系统的高度研究分析资源,挖掘系统的隐形资源、派生资源;关注系统资源间的有机联系;合理地组合、配置、优化资源结构;提升系统资源的应用价值或理想度。以耐高温能力不足的吸波贴片为研究对象,对当前技术系统进行资源分析,如图4所示。

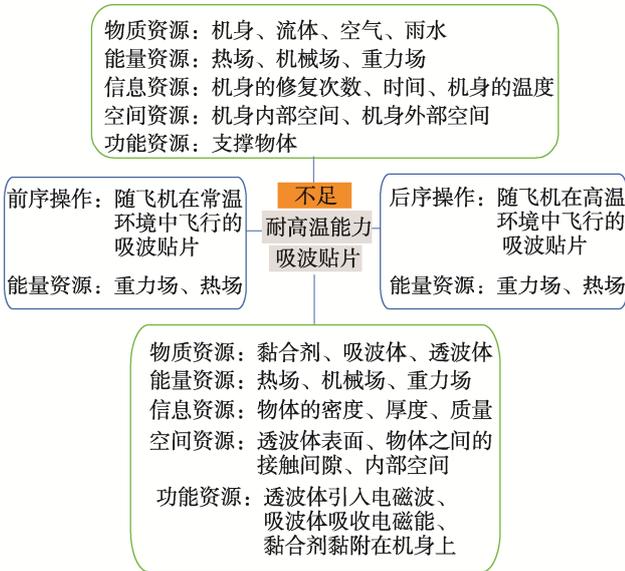


图4 资源分析
Fig.4 Resource analysis

2.4.3 运用物场分析工具解决问题

物场分析是根据建模原理,通过描述产品(技术系统)内组件之间的相互关系,从而全面分析产品,获得产品创新设计的解决方案,实现所需功能的分析方法^[15]。在使用物场模型的过程中,要根据模型所描述的功能问题类型来确定问题的性质,同时,要参考76个标准解,为设计者激发创新思维而创造条件^[16]。

根据所建问题的物场模型,应用标准解决流程,

得到1.2.1节中标准解:在S1和S2之间引入S3消除有害作用^[17],物场模型见图5。在物场模型中,F表示场,S1、S2和S3表示物质,箭头S2指向S1,表示S2对S1有作用F。当F为热场,S1为透波体,S2为空气时,引入S3改性膨胀石墨相变材料,得到解决方案9,即在透波体表面添加改性膨胀石墨相变材料,当外界温度不适宜时,可为透波体调节温度,使透波体免受温度冲击热胀冷缩产生的热应力损害。当F为化学场,S1为硅橡胶透波体,S2为酸雨时,引入S3硅氟橡胶透波体,得到解决方案10,即将硅橡胶改用耐酸雨腐蚀的氟硅橡胶材料作为透波体,阻止酸雨腐蚀硅橡胶透波体。

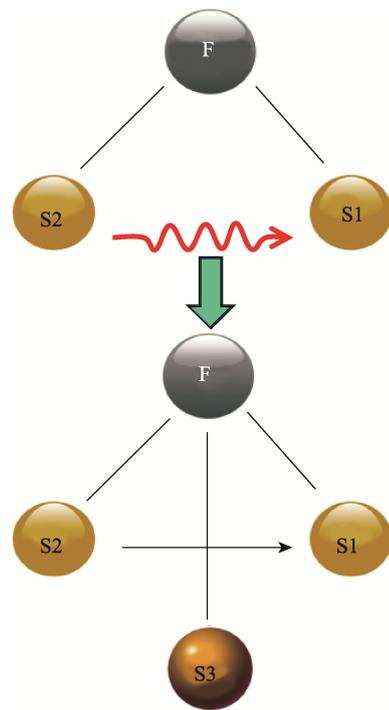


图5 问题的物场模型
Fig.5 Substance-field model of the problem

2.4.4 利用技术矛盾解决问题

针对如何降低黏合剂的摩擦损耗率的问题,采用加入硬度强、耐磨性材料的方法解决。然而黏合剂与吸波体的黏合力减小,转换成TRIZ标准冲突,改善的参数:23.物质损失,恶化的参数:30.作用于物体的有害因素。对应的发明原理:33.同质性原理、22.变害为利原理、30.柔性壳体和薄膜原理、40.复合材料原理。依据33.同质性原理,得到解决方案11,即黏合剂的树脂材料改用与吸波贴片相近的硅橡胶材料,增强层间结合强度,避免应力在结构变化处集中,造成吸波贴片产生裂纹而失效。

2.4.5 利用小人法解决问题

小人法用一组小人来代表这些不能完成特定功

能部件, 通过能动的小人, 实现预期的功能, 是从解决方案模型到实际解决方案的过渡^[18]。

在小人法模型中, 如图 6 所示, 蓝色小人为黏合剂, 黄色小人为吸波体, 红色小人为透波体, 绿色小人为相变材料, 紫色小人为耐摩擦薄膜, 飞机在飞行过程中, 发现紫色、绿色、红色和黄色的小人在飞行过程中有不同程度的磨损。其中绿色和紫色的小人在流体冲刷的作用下结合力减弱, 容易被剥离, 因此设想将紫色、绿色、红色和黄色的小人打乱, 可以在原子层上极大地增加他们相互作用的表面积, 使得他们变得牢固。因此得到解决方案 12, 即将聚氨酯薄膜耐磨性材料、改性膨胀石墨相变材料、吸波体和透波体混合, 增加分子间的结合力, 降低材料的脱落率, 提高吸波贴片的使用寿命。

3 最终方案选择

通过分析各个方案的技术先进性以及目前的可实施性, 各方案分析评价如表 2 所示, 可以看出评分较高的是方案 1、方案 4、方案 5。通过分析该技术系统的最终理想解^[19], 将这几个方案结合, 得到最终

解如下: 吸波贴片中的吸波体由掺杂原子的石墨烯构成多孔结构, 增加其吸波性能; 再将材料与自愈合材料相结合, 增加其自愈能力, 从而得到吸波性能好、质量小、自愈合能力强的吸波贴片。

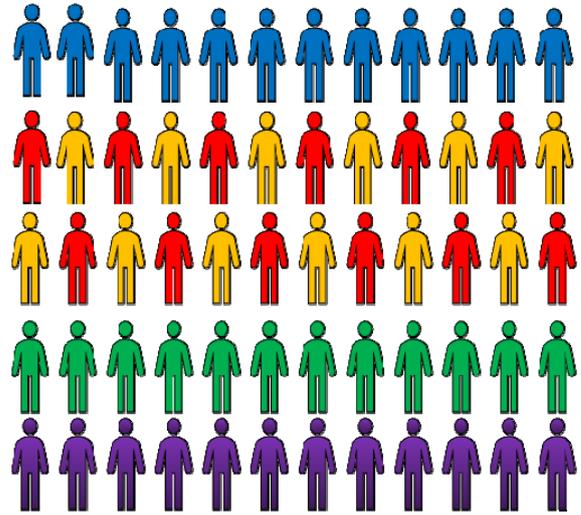


图 6 小人模型
Fig.6 Small man model

表 2 各方案分析评价
Tab.2 Analysis and evaluation of each scheme

序号	名称	优点	缺点	技术先进性	目前可实施性
1	吸波贴片选用三硫代碳酸盐自修复材料	维修成本减少	生产技术难度大	★★★★☆	★★☆☆☆
2	综合使用贴片技术和喷涂技术	修复程序简化	贴片修复不完整	★★☆☆☆	★★★★☆
3	裁剪铁磁体、陶瓷, 由石墨烯替代	材料成本减少	吸波贴片的吸波性能降低	★★★★☆	★★★★☆
4	在石墨烯中加入杂原子	飞行成本减少	产品成本增加	★★★★☆	★★★★☆
5	将吸波贴片制成多孔材料贴片	飞行成本减少	生产技术难度大	★★★★☆	★★★★☆
6	使用机器人智能修复	修复时间减少	修复成本增加	★★★★☆	★★★★☆
7	在橡胶透波体表面添加耐摩擦材料聚氨酯薄膜	吸波贴片的耐摩擦性提高	产品成本增加	★★☆☆☆	★★★★☆
8	将橡胶改用硅橡胶材料	吸波贴片的耐高温性提高	材料成本增加	★★★★☆	★★★★☆
9	在透波体表面添加改性膨胀石墨相变材料	透波体耐热应力冲击提高	生产技术难度大	★★★★☆	★★★★☆
10	透波体材料由硅橡胶改用耐酸雨腐蚀的氟硅橡胶材料	延长材料的使用寿命	产品成本增加	★★★★☆	★★★★☆
11	黏合剂由树脂材料改用与吸波贴片相近的硅橡胶材料	吸波贴片的使用寿命增加	条件苛刻	★★★★☆	★★★★☆
12	将聚氨酯薄膜耐磨性材料、改性膨胀石墨相变材料、吸波体和透波体混合	吸波贴片的使用寿命增加	产品成本增加, 技术难度增加	★★★★☆	★★★★☆

4 结语

通过运用 TRIZ 原理,对吸波贴片成本高的问题进行功能分析和因果分析。然后通过裁剪法、物场分析法、技术矛盾法、物理矛盾法和小人法这 5 种解题方法得到多个解决方案。最后通过方案综合评价得到最佳方案,进而减少了吸波贴片的成本。本文对减少隐身战机吸波贴片成本的研究有较好的启发,另外对高集成设备过多导致的电磁污染问题提供了解决思路,有助于减少高集成设备过多对人类及环境产生的危害。

参考文献:

- [1] 段倩倩, 侯光明. 国内外创新方法研究综述[J]. 科技进步与对策, 2012, 29(13): 158-160.
DUAN Qian-qian, HOU Guang-ming. A Summary of Research on Innovative Methods at Home and Abroad[J]. Science & Technology Progress and Policy, 2012, 29(13): 158-160.
- [2] 陈敏慧, 蒋艳萍, 吕建秋. TRIZ 国内外研究现状、存在问题及对策研究[J]. 科技管理研究, 2015, 35(1): 24-27
CHEN Min-hui, JIANG Yan-ping, LYU Jian-qiu. The Research Actuality of TRIZ and the Existing Problems and Countermeasures Research[J]. Science and Technology Management Research, 2015, 35(1): 24-27
- [3] 高天才, 李平平, 李静. 基于 TRIZ 理论的汽车制动器创新设计[J]. 汽车实用技术, 2016(7): 60-62.
GAO Tian-cai, LI Ping-ping, LI Jing. Automotive Brake Innovation Design Based on TRIZ[J]. Automobile Applied Technology, 2016(7): 60-62.
- [4] 王秀宇, 李昂, 王志刚. 应用 TRIZ 理论解决旅行分装按压瓶二次密封渗漏问题[J]. 包装工程, 2022, 43(9): 189-196.
WANG Xiu-yu, LI Ang, WANG Zhi-gang. Solving the Leaking Problem of Packing Pressing Bottle after Second Seal Based on TRIZ Theory[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(9): 189-196.
- [5] 袁利娜, 解二伟, 张雪峰, 等. 雷达隐身涂层测厚技术的现状与发展趋势[J]. 电镀与精饰, 2022, 44(9): 37-43.
YUAN Li-na, XIE Er-wei, ZHANG Xue-feng, et al. Status and Prospect of Thickness Measurement for Radar Stealth Coating[J]. Plating & Finishing, 2022, 44(9): 37-43.
- [6] 李梅芳, 赵永翔. TRIZ 创新思维与方法理论及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2017: 3-4.
- [7] LI Mei-fang, ZHAO Yong-xiang. Theory and Application of TRIZ Innovative Thinking and Method[M]. Beijing: China Machine Press, 2017: 3-4.
- [7] XU H, WANG Y, ZHAO D, et al. Based on TRIZ Methodology Design and Preparation of a Robust Skeletal Superhydrophobic Perfluoropolysiloxane and Polyani-line/Epoxy Resin Composite Coating with Outstanding Anti-Corrosion Performance[J]. Bulletin of the Chemical Society of Japan, 2021(10): 94.
- [8] 王成军, 张玉平, 沈豫浙. 基于 TRIZ 理论的抛挂装置优化设计[J]. 机电工程, 2020, 37(9): 1115-1120.
WANG Cheng-jun, ZHANG Yu-ping, SHEN Yu-zhe. Optimization Design of Throwing Device Based on TRIZ Theory[J]. Mechanical & Electrical Engineering Magazine, 2020, 37(9): 1115-1120.
- [9] 王文龙, 马明旭, 胡耀中, 等. TRIZ 理论在无人机集群发射回收装置设计中的应用[J]. 机械设计与制造, 2020(12): 108-112.
WANG Wen-long, MA Ming-xu, HU Yao-zhong, et al. Application of TRIZ Theory in Design of Launch Recovery Device for UAV Cluster[J]. Machinery Design & Manufacture, 2020(12): 108-112.
- [10] 朱玉杰, 曹嘉平, 高志勇. 基于 TRIZ 理论的智能汽车窗帘设计[J]. 重庆理工大学学报(自然科学版), 2020, 34(12): 53-58.
ZHU Yu-jie, CAO Jia-ping, GAO Zhi-yong. Innovation Design of Intelligent Automobile Curtain Based on TRIZ Theory[J]. Journal of Chongqing Institute of Technology, 2020, 34(12): 53-58.
- [11] 李源浩. 一种成熟先进的创新方法——TRIZ[J]. 信息系统工程, 2021(7): 137-140.
LI Yuan-hao. A Mature and Advanced Innovation Method—TRIZ[J]. China CIO News, 2021(7): 137-140.
- [12] 谭琳, 陈娜丽, 王传文, 等. 运用 TRIZ 理论解决纤维素酶利用率低的问题[J]. 当代化工, 2023, 52(2): 435-441.
TAN Lin, CHEN Na-li, WANG Chuan-wen, et al. Solution of the Problem of Low Utilization Rate of Cellulase by TRIZ Theory[J]. Contemporary Chemical Industry, 2023, 52(2): 435-441.
- [13] 平恩顺, 檀润华, 孙建广. 基于 TRIZ 的机械产品突破性创新设想产生过程研究[J]. 中国机械工程, 2014, 25(18): 2439-2446.
PING En-shun, TAN Run-hua, SUN Jian-guang. Research on Ideas Generation Process for Mechanical Product Radical Innovation Based on TRIZ[J]. China Mechanical Engineering, 2014, 25(18): 2439-2446.

- [14] 周杨, 邓援超, 王爱群, 等. 基于 TRIZ 理论的纸盒成型机主轴结构的优化设计[J]. 包装工程, 2018, 39(9): 125-130.
ZHOU Yang, DENG Yuan-chao, WANG Ai-qun, et al. Optimal Design of the Spindle Structure of Carton Forming Machine Based on TRIZ Theory[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(9): 125-130.
- [15] 王旭, 夏晓鸥, 罗秀建, 等. TRIZ 理论在矿物加工行业中的应用与发展[J]. 中国矿业, 2020, 29(S2): 356-360.
WANG Xu, XIA Xiao-ou, LUO Xiu-jian, et al. Application and Development of TRIZ Theory in Mineral Processing Industry[J]. China Mining Magazine, 2020, 29(S2): 356-360.
- [16] 何涛. 基于 TRIZ 理论解决耐火材料热震试验装置温度波动大的问题[J]. 河南科技, 2019(20): 32-35.
HE Tao. Solving the Problem of Large Temperature Fluctuation of Refractory Thermal Shock Test Device Based on TRIZ Theory[J]. Journal of Henan Science and Technology, 2019(20): 32-35.
- [17] 韩宏彦, 杨欣然, 刘玉, 等. 基于 triz 理论解决瓷砖铺贴不平整和空鼓问题[J]. 科学技术创新, 2022(3): 123-126.
HAN Hong-yan, YANG Xin-ran, LIU Yu, et al. Solved the Problem of Ceramic Tile Paving Unevenly and Hollowing Based on TRIZ Theory[J]. Scientific and Technological Innovation Information, 2022(3): 123-126.
- [18] 马晓颖, 杨金辉, 李元本, 等. 应用 TRIZ 理论解决实验室废钠处置的难题[J]. 实验室科学, 2020, 23(1): 195-198.
MA Xiao-ying, YANG Jin-hui, LI Yuan-ben, et al. Solving the Problem of Eliminating Waste Sodium of the Laboratory Based on TRIZ Theory[J]. Laboratory Science, 2020, 23(1): 195-198.
- [19] 吴新江, 郑鏊, 张汜允, 等. TRIZ 理论在解决工业烟气管道掉灰问题中的应用[J]. 宁德师范学院学报(自然科学版), 2020, 32(2): 145-150.
WU Xin-jiang, ZHENG Liu, ZHANG Si-yun, et al. Applying Research of TRIZ Theory in Solving the Ash Drop Problem of Industrial Flue Gas Pipeline[J]. Journal of Ningde Teachers College (Natural Science), 2020, 32(2): 145-150.

责任编辑: 曾钰婵