

# 基于系统论和 TRIZ 理论的空轨货运动车设计

武月琴<sup>1</sup>, 武雨飞<sup>1</sup>, 史志远<sup>2</sup>

(1.西华大学, 成都 610039; 2.武汉理工大学, 武汉 430070)

**摘要:** **目的** 改善当前中小型港口水铁联运衔接能力不足, 运输低效、交通拥堵的问题。**方法** 首先对水铁联运的现状进行调研分析, 运用系统论的研究方法, 确定公路运输是集疏运系统的薄弱环节, 在现有研究的基础上发现空轨符合未来联运发展的方向, 对空轨货运动车的系统及组件进行分析, 利用“人-机-环境”理论与 TRIZ 理论分析空轨货运动车的设计, 并减少内部物理冲突与技术冲突, 得到最终的设计方案。**结果** 以系统论和 TRIZ 理论为依据, 设计出一款水铁联运、清洁高效、无人驾驶的全自动空轨货运动车。**结论** 综合使用两种方法, 可以从宏观与微观层面找到系统的薄弱环节、减少内部矛盾, 更加准确有效地设计空轨货运动车, 满足中小型港口低成本、高效率、占地少的需求, 具有一定的理论参考与实际研究价值。

**关键词:** 系统理论; TRIZ; 空轨; 工业设计

**中图分类号:** TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2023)04-0406-07

**DOI:** 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.04.051

## Design of Suspended Monorail of Freight Based on System Theory and TRIZ Theory

WU Yue-qin<sup>1</sup>, WU Yu-fei<sup>1</sup>, SHI Zhi-yuan<sup>2</sup>

(1.Xihua University, Chengdu 610039, China; 2.Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

**ABSTRACT:** The work aims to solve the problems of inadequate capacity, inefficient transportation and traffic congestion of ship and railway intermodal transport in small and medium-sized ports. Firstly, the current status of ship and railway intermodal transport was investigated and analyzed. The research method of system theory was adopted to determine that highway transport was a weakness in the collection and distribution system. On the basis of existing research, it was found that the suspended monorail was in line with future intermodal transport development. Then, the system and components of the suspended monorail of freight were analyzed. The design of suspended monorail of freight was analyzed by "Human-Machine-Environment" Theory and TRIZ Theory and the internal physical and technical conflicts were reduced to get the final design. Based on system theory and TRIZ theory, a fully automatic clean, efficient and unmanned suspended monorail of freight with ship and railway intermodal transport was designed. The two methods can be used in combination to find the weakness of the system, reduce the internal conflicts from macro and micro levels, and design the suspended monorail of freight more accurately and effectively to meet the needs of small and medium-sized ports with low cost, high efficiency and small land area, which has certain theoretical reference and practical research value.

**KEY WORDS:** system theory; TRIZ; suspended monorail; industrial design

《水运“十四五”发展规划》指出水运行业要充分发

水铁联运, 做好与其他运输方式的融合发展。目前水铁联运主要有“水公铁”“水铁”两种模式<sup>[1]</sup>, “水公

收稿日期: 2022-09-14

基金项目: 四川省社会科学重点研究基地四川矿产资源研究中心 (SCKCZY2022-YB023); 四川省 2021-2023 年高等教育人才培养质量和教学改革项目 (JG2021-919)

作者简介: 武月琴 (1982—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为设计史与产品创新系统, 设计产业。

通信作者: 武雨飞 (1998—), 女, 硕士生, 主攻工业设计、地域文化与产品设计。

铁”模式因公路运输的灵活性与适应性而占比较多,近 70%需要公路短驳。但从成本、运输批量和能耗方面来看,公路运输难以完全承担联运重任<sup>[2]</sup>,与城市共用交通网络易造成交通拥堵,延长运输时间,降低运输效率,增加运输过程的碳排量,有悖于高质量发展的长远计划。因此,需要将现有技术创造性地应用于“水”“铁”连接,以达到节能减排、绿色发展的目的。

### 1 基于系统论的水铁联运问题分析

水铁联运由装卸机械、运输机械、信息共享与交流平台、资金流通渠道、物资运输路线、场域作业等构成,并受社会环境和自然环境的影响,这些因素共同构成一项复杂的系统性工程。对复杂系统的研究需要从全局考虑,以综合性、整体性、最优化的观念分析问题,才能建立有效的研究框架,明确问题主次与各因素间的限制,达到系统整体平衡与高效运行的目的。利用系统性的设计思维,可以增强分析过程的整体性与逻辑性<sup>[3]</sup>,辅助设计具体产品<sup>[4]</sup>,进行“人-机-环境”的系统设计<sup>[5]</sup>及服务设计<sup>[6]</sup>。因此,可以借助系统论的设计思想,以水铁联运整体为研究对象,按功能目的拆解为多个子系统及子系统间的联系方式,从系统整体角度考虑优化,着重考虑整体效益与局部效益的关系、系统整体与外部环境制约的关系,协调水路系统与铁路系统之间的关系,以最佳的方式处理问题,达到整体的最高效益。

“水铁”模式依托港口国际性的功能,以港口为媒介,直接在港口后方铺设铁路线,用装卸设备和搬运设备实现火车与货船的物资交换,减少中转环节。在该模式下,人主要负责信息处理和后勤维修,参与的直接搬运任务较少,主要由机械自主完成货物装卸,因此,将“机-环境”系统作为研究重点。“水铁”

系统可以分为水路运输系统、铁路运输系统以及平台转运系统,水路与铁路运输系统通过平台转运系统相连接,平台转运系统除提供装卸设备、短距离搬运设备、物流信息服务之外,还必须提供足够的场域用于货船和货运火车停靠站的建设、货物装卸作业以及货物堆放储存。由于商品货物运量快速增长,原有铁路铺设线以及码头停靠位的数量不能满足需要,需要更多的建设场地,因此,地方可供建设面积是制约“水铁”联运发展的因素之一。此外,由于铁路运力紧张、运输组织不协调、缺少物流公共信息平台、定价机制差异大、运输利益分配较不合理<sup>[7]</sup>,以及联运建设的经济成本较大,维修费用较高,所以这种货运模式占比较小,更适用于国际化的大型港口,中小型港口仍以“水公铁”为主,因此将中小型港口作为研究对象,以提出更合理的转运方式。

中小型港口货运量较少,出于成本与时间的考虑,公路接驳水路与铁路是最常用的方式,也就是“水公铁”转运模式。用“机-环境”系统理论<sup>[8]</sup>分析“水公铁”集疏运方式中的要素组成、相互作用方式和要素与环境之间的联系,找到系统中的薄弱环节,明确制约因素,进而加以改进。“水公铁”集疏运系统见图 1,通过分析可知,在目前的系统中,货车运输效率受机动车与非机动车数量限制,以及天气条件、地理环境和人口密度的影响,是制约因素最多的二级子系统;水路运输系统虽然受水文气象影响且航速较慢,但具有运量大、运费低,对环境破坏小的优点,且涉及国际运输,难以改进与代替。根据 TRIZ 技术系统进化模式可知,公路运输系统是最影响整体运输效率的环节。结合现有交通形式,提出以下改进方向:一是使用地下或空中运输网络,减少地面交通压力;二是使用无人控制车辆,提高运输效率;三是铺设轨道,降低环境影响。

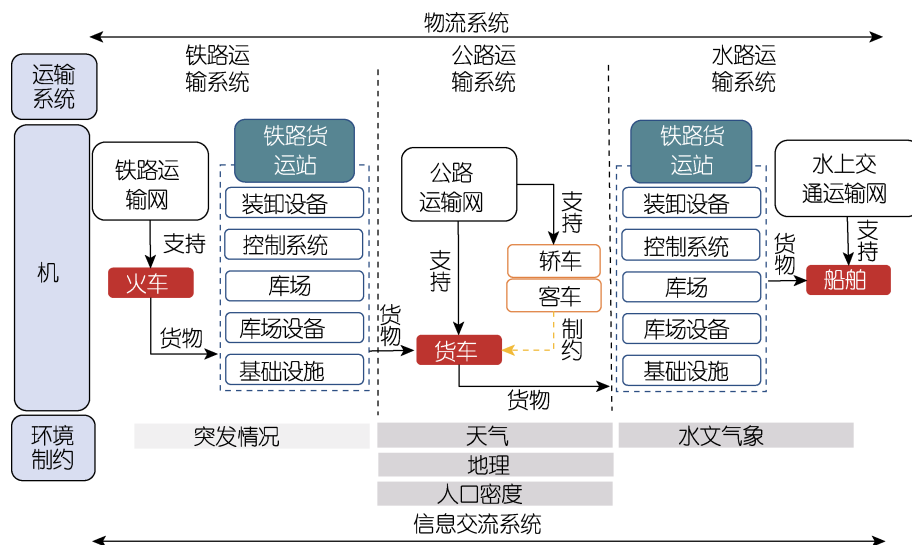


图 1 “水公铁”集疏运系统  
Fig.1 Collection and distribution system of "ship, highway and railway"

## 2 “人机环境”系统下的空轨货运动车设计

对比现有交通方式发现,空轨交通基本符合以上方向,可替代“水公铁”模式中的公路运输,空轨全称为悬挂式空中轨道,列车位于轨道下方,由墩柱支撑在空中,能够分担地面交通压力,提高运输效率,具有安全可靠、造价低廉、适应程度高、占地面积小的优点。第一条空轨线路是1901年德国建造的乌帕塔尔线,具有客运功能,随后在多特蒙德工业大学建造空轨,便于学生校内通行;日本在引入空轨技术后进行了本土化改良,建造了东山动物园线、千叶线等,具有观光游览、客运通行的功能,在速度和承运人数上都有所提升;我国目前建成了青岛四方试验线、开封中建试验线、武汉中铁试验线和开封中建试验线;在能源选择和使用方式上有所创新,中唐集团将超级锂电池作为新能源空轨列车动力源,取消管道线,简化空轨系统组成。

国内对空轨车的挂车方案<sup>[9]</sup>、国内的适应性<sup>[10]</sup>、集疏运系统<sup>[11]</sup>、装卸工艺等进行了研究<sup>[12]</sup>,综合国家知识产权局网站的相关专利检索结果,依据TRIZ技术进化模式可知,空轨集疏运技术尚处于关键技术涌现的婴儿期。结合上述案例,空轨的发展方向有三个方面:一是中长距离运输,目前空轨主要用于短距离运输,但建设长度呈增长趋势;二是功能目的本土化,根据本地需要改动空轨组件,可用于城市客运、观光游览、园内通行以及其他功能;三是空中货运,空轨技术有较大进展,载重和速度有明显提升,能源动力向绿色、持久方向发展,具备绿色货运的技术条件。

### 2.1 “机-环境”系统下的空轨货运动车设计

港口货运量大,输送货物需求强烈,因此可将空轨功能本土化,将空轨系统引入港口货运,替代或分流部分公路运输,承担货运功能。结合实例与现有文献,可以将空轨货运系统划分为动车系统、轨道系统、供电系统、运行控制系统、信息系统和站点装卸系统六个子系统<sup>[11]</sup>。基于“机-环境”系统理论,可以得到六个子系统与环境之间的相互作用关系,见图2。

可以得知动车系统是整个系统的核心,且动车系统受制约因素最多。动车系统在尺寸上需与集装箱的尺寸相匹配,满足载重要求且起吊过程平稳安全,同时还会受到港口环境气候的影响,港口气候潮湿且风力较强,对动车防锈措施以及起吊装置的稳定性有一定要求,因此,主要对动车系统进行设计。

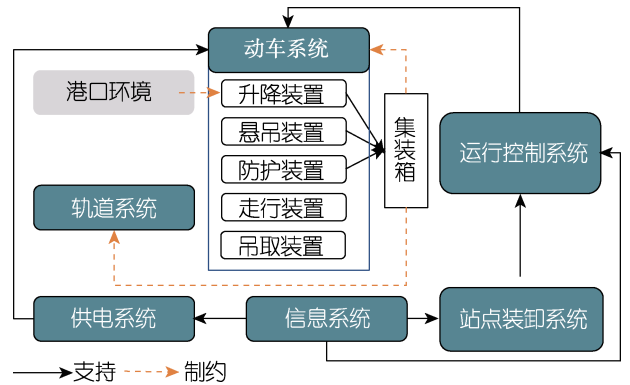


图2 空轨货运系统分析

Fig.2 Analysis on suspended monorail of freight system

空轨货运动车由走行装置、防护装置、升降装置、吊取装置、悬吊装置组成<sup>[11,13-14]</sup>。走行装置:由走行轮、导向轮、摇枕装置、牵引装置和制动装置构成牵引电机,从而驱动走行轮滚动,进而带动整个动车前进;导向轮贴合轨道梁侧壁,在导向轨内行走,负责控制列车转向;由于货物通常在20t左右,且位置较高,有坠落风险,需由防护装置加强集装箱在运输过程中的稳定性。升降装置由卷扬机、钢丝绳组成,卷扬机通过控制钢丝绳的长短实现集装箱的取放;吊取装置包括上下两部分,上方为车架,下方为吊具,吊具通过将悬锁插入集装箱角件的椭圆孔内,连杆机构推动悬锁转动90°卡紧角件,以实现集装箱的固定;悬吊装置用以连接走行装置与吊取装置,并装有液压减震器和止挡橡胶,减少空轨在行走过程中的横向振动(见图3)。

空轨货运动车不与地面接触、不受人的操作影响,而主要受气候环境、极端天气的影响。港口位于沿海位置,以季风气候为主,冬季风力较大,春季风

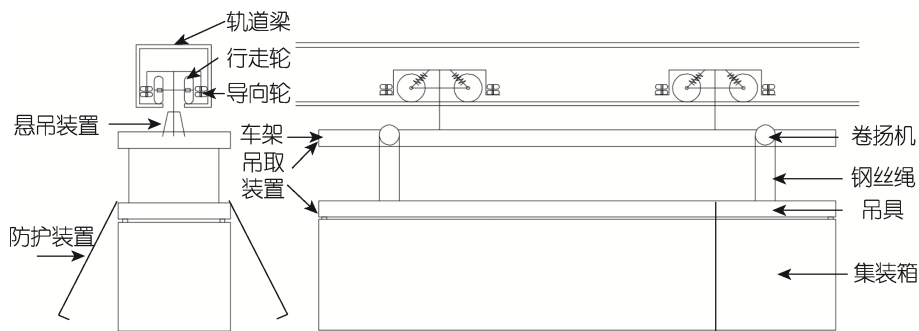


图3 空轨货运动车示意图

Fig.3 Schematic diagram of suspended monorail of freight

向多变但风力较弱。运输过程中空轨货运动车容易受到横向风力的影响, 稳定性与安全性下降, 根据牛顿第二定律公式, 列车受到的横向风力的计算公式为:

$$F = \frac{\rho s v^2}{2} \quad (1)$$

式中,  $\rho$  为空气密度;  $s$  为车体侧面积;  $v$  为横风速度。空气密度、横风速度是不可控因素, 只能通过减少受力面积来减小风阻, 升降装置、吊取装置与集装箱侧面积相比受风力影响小, 因此主要从减小集装箱侧面积入手, 而集装箱侧面积属于不可妥协因素, 需进一步借助 TRIZ 理论工具解决物理矛盾。空轨货运动车的长度由集装箱的外尺寸决定。国际标准集装箱外尺寸有 4 种分类, 各类长宽相同、高度略有差异, 详细尺寸见表 1<sup>[15]</sup>。其中 20 ft 与 40 ft 的集装箱最常用, 因此, 将车架长度与吊具常用长度设置为 20 ft。

表 1 国际标准集装箱外尺寸  
Tab.1 Outer dimensions of international standard container ft

类型	长	宽	高
A	40	8	9 或 8
B	30	8	9 或 8
C	20	8	8
D	10	8	8

## 2.2 “人”对空轨货运动车的设计影响

利用“人-机-环境”系统理论整体分析空轨货运动车的设计, “人”作为产品的服务对象应重点考虑, 从视觉听觉触觉多感官满足人的心理需求、审美需求以及安全需求。由于空轨货运动车使用无人驾驶系统, 所以“人”因素是指空轨货运动车的维修人员以及空轨货运线附近的行人。从安全角度出发, 应避免工作人员或行人位于车辆下方, 而空轨货运动车在运输过程中必然经过港口作业区与城区, 因此可以通过设计提醒下方人员远离。考虑到人主要的信息接受方式为视觉与听觉, 那么提示信息可表现为灯光与声音提醒。人眼视度为 124°, 而灯光位于货运动车顶部和底部时不易被观察到, 因此货运提示灯应位于吊具侧面下方位置, 确保可视性。声音提示以变化间断的

方式呈现, 否则容易造成人的听觉疲劳, 降低警惕性, 声音的大小为 70~110 dB, 足够引起注意且不损伤听力。

从心理需求出发, 空轨货运动车发出远离信息的同时也要给人以安全感, 提高人的心理接受度。现有空轨货运动车以功能形态为主, 是工程结构的产物, 而暴露的复杂结构容易让人感到紧张不安, 因而需要弱化“工程属性”, 增加“产品属性”。最简单的方式是添加外壳将结构包裹在内, 同时具有保护内部结构的功能, 根据现有空轨货运动车的结构, 外壳需分为上下两部分, 便于装卸集装箱, 颜色以黄色与黑色为主, 与周围环境形成反差, 使人警戒。对于维修人员应考虑维修的便捷性, 整体外壳容易更换, 局部外壳具有可拆性。

## 3 运用 TRIZ 理论工具解决问题

### 3.1 明确改进方向

发明问题解决理论<sup>[16]</sup> (TRIZ) 主要包括 39 个工程参数、40 条发明创造原理、分离原理、理想解等创新工具与模型, 可融合可拓学、AHP 等方法辅助设计思维<sup>[17-18]</sup>, 快速找到问题本质, 创造性地解决问题并进行产品设计。解决问题首先要明确问题, 因而可以先明确空轨货运系统的理想解, 找到理想解与目前系统的差距, 进而精确定义问题, 随后对应矛盾冲突原理, 将冲突转化为 39 个工程参数, 然后对照冲突矩阵查询解决原理, 在此基础上提出解决方案, 根据理想化水平公式确定解决方案是否成立。空轨货运动车的现实案例主要参照青岛港的空轨货运系统, 理想解与目前状态的对比见表 2, 由此可见主要的设计对象为吊取装置、升降装置、防护装置。

### 3.2 建立冲突模型

前文提到的集装箱侧面积需减小但又不可改动的情况, 是待解决的第一个冲突。集装箱常用 20 ft、40 ft 两种尺寸, 10 ft、30 ft 使用较少, 为提高工作效率、增加吊具的适应性, 需要同时满足四种尺寸。目前集装箱的取放主要通过吊具进行操作, 大部分集装箱专用机械使用伸缩式吊具<sup>[19]</sup>, 能够根据集装箱尺寸

表 2 理想解与实例的对比  
Tab.2 Comparison of ideal solutions and actual cases

系统结构	理想解	实例
吊取装置	稳定、精准地抓取集装箱, 质量轻, 结构简单, 体积小	主要使用液压伸缩式集装箱吊具, 适应多种尺寸但重量大, 系统复杂
升降装置	体积小、质量轻、结构稳定、耗能少	卷扬机与钢丝绳配合完成吊具升降, 成本较低但稳定性一般
防护装置	结构简单、功能稳定	中间增加两组抓夹, 增加安全性
走行装置	磨损少、噪音小、运行稳定	橡胶轮胎、噪音小、减震好
悬吊装置	功能稳定、结构简单	刚性连接, 有一些减震装置



伸长或缩短,然而这种吊具结构较为复杂,重量较大,与空轨货运动车的轻量化要求相矛盾,此为第二个冲突。第三个冲突是卷扬机和钢丝绳配合吊具实现集装箱升降,但钢丝绳在起吊过程中并不平稳,与实现精准抓放集装箱的目标相矛盾,属于技术冲突。

冲突一为物理冲突,解决物理冲突的方法有空间分离原理、时间分离原理、条件分离原理、整体与局部分离原理,综合40条发明创造原理,最终选择使用时间分离原理和动态化原理。增加风向感应装置,并在悬吊装置与吊取装置之间增加旋转装置,可根据风向自主旋转吊具,使集装箱侧面积小的一面迎风。冲突二是物理冲突,吊具尺寸需同时满足4种尺寸,结合生产成本与工作效率进行考虑,融合使用空间分离原理与复制原理。以三节车架为一组,一节使用液压伸缩式集装箱吊具,满足全尺寸集装箱使用;两节为机械吊具,同时满足20 ft与40 ft集装箱使用。同时满足两种尺寸属于物理冲突,可利用冲突原理进一步分析,将空间分割原理与维数变化原理相结合,吊具长度为40 ft,使用两组旋锁装置,每组4个,在垂直方向划分两个层次,下方一组用于固定40 ft集装箱,上方一组固定20 ft集装箱,改进后的吊具简图如图4所示。图4中橙线下方为40 ft集装箱的旋锁装置,20 ft集装箱的则在上方,在吊运时,集装箱与旋锁装置的空间位置互不冲突。

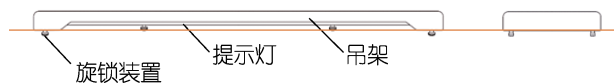


图4 吊具示意图

Fig.4 Schematic diagram of container spreader

对冲突三进行技术矛盾描述,结合39个工程参数得到表3,查阅冲突矩阵表,得到对应的发明原理为1、13、35,分别对应分割、反向以及参数变化。

对于可靠性和系统复杂性的矛盾,可以得到以下两种解决方案:第一种,应用原理1和13,将卷扬机、钢丝绳以及下方吊具与整体分割,由地面升降车完成接取集装箱任务,固定、防护集装箱则由上方吊取装置完成,能够减轻车体重量、降低系统复杂性;第二种,应用原理35,将柔性绳索改为刚性的升降装置,提升操作准确度。减少元素间的相互作用或元素数量,可以增强系统的稳定性<sup>[20]</sup>,因此选择使用方案一。梳理以上解决方案后,发现旋转装置的位置与车架成组运行的方式产生了新的矛盾,即在车架成组运行的情况下,旋转装置无法运作,产生了物理冲突。综合使用空间分割原理与中介物原理,将吊取装置改为车架、旋转装置、吊具三层结构,旋转装置能够带动吊具与集装箱同时旋转。

表3 技术冲突分析

Tab.3 Analysis technical conflicts

技术冲突	希望改进的技术特性	恶化的技术特性
如果不使用钢丝绳,那么精度增加,但是结构变复杂	27 可靠性	36 系统的复杂性

## 4 设计方案的提出

空轨货运动车在空中运行时间长、距离地面高且路途较远,需添加二级防护装置增加集装箱在运输过程中的稳定性与安全性,现有装置在吊车两侧添加两组防护栏,防护栏底部向内弯折以支撑集装箱的底侧梁。在运输过程中集装箱底部中央压力最大,可改变防护装置的形态增加对集装箱底部的支持力。延长横向防护栏至底部中央,连接同侧两组防护栏的底部,防护栏形态贴合集装箱,使用时两组防护栏在集装箱底部接触,增加对集装箱底部的支持力。由于一级防护装置旋锁与二级防护装置防护栏不可同时使用,存在物理冲突,可以通过时间分离原理与周期性作用原理进行解决。起吊时旋锁先锁紧集装箱,随后防护栏旋转固定集装箱;放置集装箱时则顺序相反。根据表1集装箱尺寸,利用三角函数(式2)可以算出防护栏的旋转角度 $\theta$ 约为 $26.7^\circ$ ,考虑集装箱的尺寸误差以及能源节省,将 $\theta$ 设置为最大值 $30^\circ$ ,防护栏在 $0^\circ$ 至 $30^\circ$ 进行旋转,空载时防护栏处于垂直状态。由于集装箱高度不统一,防护栏需具备伸缩功能以适应集装箱尺寸,采用液压伸缩机构实现该功能。

$$\arctan \theta = \frac{x_{\text{横}}}{y_{\text{纵}}} \quad (2)$$

结合现有技术,空轨货运动车的系统组成与技术参数见表4。空轨货运动车系统,由走行装置、旋转装置、防护装置、吊取装置、悬吊装置、提示装置构成。使用ATP/ATO系统实现空轨货车无人驾驶;从空气动力学及心理学角度考虑,外壳扁平,采用流线型降低风阻,颜色以黄黑为主,使人警觉并与周围环境相区别;在外壳周围增加光带、发声器,以视觉、听觉的方式提醒行人与工作人员远离;使用时间分离原理和动态化原理,通过增加旋转装置解决集装箱受力面积与横向风阻的矛盾,旋转装置根据风向带动吊具以及集装箱旋转,始终以集装箱最小的侧面迎风,减少空轨货运动车受到的横向风阻;改善二级防护装置,增强对集装箱底面的支持度,并应用时间分离原理与周期性作用原理合理安排旋锁装置与二级防护装置的工作顺序;应用技术冲突原理解决可靠性与系统复杂性的矛盾,从系统稳定性考虑,选择简化吊取装置,由地面升降车完成集装箱装卸;运用复制原理,以三节车架为一组进行运输,可满足全尺寸集装箱的使用

需求, 最多可同时运输三种尺寸的集装箱, 综合运用空间分割原理与维数变化原理, 能提高 20 ft 与 40 ft 集装箱的运输质量; 每节车架长 12.33 m, 车架间距为 1 m。空轨货车每日工作时长为 22 h, 最高运行速度为 50 km/h, 车体下净空为 5.5 m, 整体的设计方案见图 5。

两种方法综合使用的过程实际是将问题逐步拆解、逐步细化的过程, 遵循“发现问题—分析问题—解决问题”的规律, 与设计流程的逻辑相符, 具有合理性。前期的使用系统分析, 有两个目的, 一是整合

复杂信息, 使之有序化、系统化, 便于理清逻辑思路; 二是明晰系统中的薄弱环节, 缩小问题范围。联系系统论与 TRIZ 理论的关键在于问题定义, 系统论将问题缩小至产品范围, 理想解与实际模型相对比, 进一步将问题清晰化, 最终准确定义拟解决的问题与矛盾, 并利用创新工具解决。这个过程将宏观的问题把握与微观的细节考究相结合, 研究范围由大到小、研究内容由面到点, 两者互为补充, 层层递进, 形成一种新的综合式研究方法, 提供一种新的设计思路。

表 4 空轨货运动车的系统组成及技术参数  
Tab.4 System composition and technical parameters of suspended monorail of freight

部件分类	技术参数	功能作用
走行装置	4 655 mm×1 620 mm×1 151 mm	牵引车辆移动
旋转装置	Φ2 239 mm	随风向调整货车角度, 降低风阻
防护装置	旋转角度 0°~30°	二级防护, 防止坠落
吊具 1	11 892 mm×3017 mm×580 mm	固定 20 ft、40 ft 集装箱
吊具 2	最短 3 192 mm×3 017 mm×580 mm 最长 11 892 mm×3 017 mm×580 mm	固定全尺寸集装箱
车架	12 331 mm×3 017 mm×848 mm	连接走行装置与旋转装置, 放置电机等机械结构



图 5 最终方案示意图

Fig.5 Schematic diagram of the final solution

### 5 结语

空轨高效、绿色、安全的特点使其发展空间更广阔, 本研究在现有的空轨技术、港口货运技术和空轨货运系统研究的基础上, 进一步探讨空轨货运动车的设计。基于“人机环境”理论, 结合空轨货运的实际情况, 从“机-环境”“人”角度, 明确限制因素与设计要点, 在现有技术的基础上做进一步设计改良。使

用 TRIZ 工具细化解决空轨货运动车系统中的矛盾冲突, 设计出了一辆能够降低风阻、绿色安全、持续高效的空轨货运动车。两种方法的综合使用为以后的设计问题提供了一种新思路, 也为空轨货运发展提供了一种可能的解决方案。

### 参考文献:

- [1] 刘道宽. 水铁联运无缝衔接关键技术研究浅谈[J]. 中国水运(下半月), 2018, 18(4): 66-67.  
LIU Dao-kuan. Discussion on Key Technology of Seamless Connection between Water and Rail Combined Transport[J]. China Water Transport, 2018, 18(4): 66-67.
- [2] 张利, 赵守香, 张铎. 我国多式联运存在问题及发展策略[J]. 现代管理科学, 2020(2): 62-64.  
ZHANG Li, ZHAO Shou-xiang, ZHANG Duo. Problems and Development Strategies of Multimodal Transport in China[J]. Modern Management Science, 2020(2): 62-64.
- [3] 王申. 基于一般系统论的设计思维逻辑模型分析[J]. 中国建筑装饰装修, 2020(1): 82-84.  
WANG Shen. Analysis of Logical Model of Design Thinking Based on General System Theory[J]. Interior Architecture of China, 2020(1): 82-84.
- [4] 李萌, 王枫红. 系统论在现代纸制家居产品设计中的应用与研究[J]. 图学学报, 2018, 39(4): 679-683.  
LI Meng, WANG Feng-hong. On System Theory in Application to Modern Paper Household Product[J]. Journal of Graphics, 2018, 39(4): 679-683.
- [5] 尹俊方, 孙虎, 冉秋艺. 基于“人-机-环境”系统的智能名优采茶机设计研究[J]. 包装工程, 2021, 42(12):

- 183-190.  
YIN Jun-fang, SUN Hu, RAN Qiu-yi. Design and Research of Intelligent Famous and Excellent Tea Picking Machine Based on "Human-Machine-Environment" System[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(12): 183-190.
- [6] 厉珺, 杨志麟, 时迪. 系统论视野下的手机 APP 引导页设计解读[J]. 包装工程, 2015, 36(20): 130-134.  
LI Jun, YANG Zhi-lin, SHI Di. Interpretation of Mobile Phone APP Guide Page Design from the Perspective of System Theory[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(20): 130-134.
- [7] 丁立群. 竞争合作博弈下集装箱铁水联运发展问题研究[J]. 物流技术, 2018, 37(8): 59-62.  
DING Li-qun. Problems in Development of Container Rail-Water Intermodal Transportation under Competition-Cooperation Game[J]. Logistics Technology, 2018, 37(8): 59-62.
- [8] 孙虎, 周洁, 雷颜瑞. 基于人机环境系统的喷流式挖藕机改良设计[J]. 包装工程, 2019, 40(22): 130-135.  
SUN Hu, ZHOU Jie, LEI Yan-rui. Improved Design of Jet Flow Lotus Root Digger Based on Man-Machine Environment System[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(22): 130-135.
- [9] 周亮. 悬挂式单轨列车挂车方案及其工艺设备的研究[J]. 科技创新与生产力, 2022(5): 118-120, 123.  
ZHOU Liang. Research on Trailer Scheme and Process Equipment of Suspended Monorail Train[J]. Sci-Tech Innovation and Productivity, 2022(5): 118-120, 123.
- [10] 余浩伟, 徐银光, 李涛, 等. 悬挂式单轨交通在国内的适应性研究[J]. 铁道工程学报, 2019, 36(4): 70-74.  
YU Hao-wei, XU Yin-guang, LI Tao, et al. Research on the Adaptability of Suspended Monorail in China[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2019, 36(4): 70-74.
- [11] 殷健, 李永翠, 耿卫宁, 等. 智能空轨集疏运系统设计[J]. 水运工程, 2021(8): 74-79.  
YIN Jian, LI Yong-cui, GENG Wei-ning, et al. Design of Intelligent Air-Rail Collecting and Distributing System[J]. Port & Waterway Engineering, 2021(8): 74-79.
- [12] 汪宇亮. 集装箱空轨货运系统装卸工艺设计及应用[J]. 铁道货运, 2022, 40(8): 22-29.  
WANG Yu-liang. Design and Application of Container Loading and Unloading Technology of Air-Rail Freight System[J]. Railway Freight Transport, 2022, 40(8): 22-29.
- [13] 康兴东, 徐崇, 张国栋, 等. 日本悬挂式单轨系统的应用与发展[J]. 国外铁道车辆, 2019, 56(5): 1-7.  
KANG Xing-dong, XU Chong, ZHANG Guo-dong, et al. Application and Development of Suspended Monorail System in Japan[J]. Foreign Rolling Stock, 2019, 56(5): 1-7.
- [14] 王建才. 基于空轨方式的天津港集装箱铁水联运方案研究[J/OL]. 铁道标准设计:1-8[2022-10-08].  
WANG Jian-cai. Research on the Scheme of Combined Transportation Between Train and Ship on the Tianjin-Containers' Port Base on Mode of Suspended Monorail[J/OL]. Railway Standard Design:1-8[2022-10-08].
- [15] 张变亚. 运输管理与集装箱实务[M]. 北京: 化学工业出版社, 2019.  
ZHANG Bian-ya. Transportation Management and Container Practice[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2019.
- [16] 徐起贺, 刘刚, 戚新波. TRIZ 创新理论实用指南[M]. 3 版. 北京: 北京理工大学出版社, 2019.  
XU Qi-he, LIU Gang, QI Xin-bo. Practical Guide to TRIZ's Innovation Theory[M]. 3rd ed. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2019.
- [17] 陈美, 檀润华, 曹国忠, 等. 可拓与 TRIZ 融合辅助设计思维过程研究[J]. 包装工程, 2022, 43(20): 169-178.  
CHEN Mei, TAN Run-hua, CAO Guo-zhong, et al. Process of Design Thinking with Extenics and TRIZ[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(20): 169-178.
- [18] 范峰源, 郝巍东. 基于 AHP 分析法与 TRIZ 理论的可折叠座椅设计研究[J]. 包装工程, 2022, 43(20): 311-317.  
FAN Feng-yuan, HAO Wei-dong. The Design of Foldable Seat Based on AHP Method and TRIZ Theory[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(20): 311-317.
- [19] 符敦鉴. 岸边集装箱起重机[M]. 2 版. 武汉: 湖北科学技术出版社, 2007.  
FU Dun-jian. Shore Container Crane[M]. 2nd ed. Wuhan: Hubei Science & Technology Press, 2007.
- [20] 王金柱. 基于系统论的技术设计的简单性原则[J]. 系统科学学报, 2015, 23(4): 37-39, 109.  
WANG Jin-zhu. The Principle of Simplicity of the Technology Design Based on System Theory[J]. Chinese Journal of Systems Science, 2015, 23(4): 37-39, 109.

责任编辑: 马梦遥