

基于机械强度分析的集装箱标准化尺寸优化研究

张洪勇

天津中集集装箱有限公司, 天津 300461

DOI:10.61369/ETQM.2025060008

摘要： 本文围绕集装箱设计与性能展开研究，深入探讨机械强度分析在集装箱设计中的应用，阐述其基本原理、应用现状及对安全性与可靠性的保障作用。分析集装箱标准化尺寸现状，指出现有尺寸在运输效率方面的不足以及尺寸标准化对物流成本和供应链效率的影响，揭示尺寸不统一给多式联运带来的困难。研究影响集装箱机械强度的关键因素，包括材料选择、结构设计和使用环境。基于机械强度分析，详细介绍集装箱尺寸优化模型的建立过程，涵盖优化目标函数、约束条件的确定，优化算法的选择与应用以及机械强度分析结果在优化模型中的融合。旨在为提升集装箱性能、优化运输效率提供理论与实践依据。

关键词： 集装箱；机械强度分析；标准化尺寸；尺寸优化模型；多式联运

Research on the Optimization of Standardized Container Sizes Based on Mechanical Strength Analysis

Zhang Hongyong

Tianjin CIMC Container Co., Ltd. Tianjin 300461

Abstract： This article focuses on container design and performance, exploring the application of mechanical strength analysis in container design and elaborating on its basic principles, current application status, and its role in ensuring safety and reliability. The article analyzes the current situation of standardized container sizes, pointing out the deficiencies of existing sizes in transportation efficiency and the impact of size standardization on logistics costs and supply chain efficiency. It also reveals the difficulties caused by inconsistent sizes in multimodal transportation. The key factors affecting the mechanical strength of containers are studied, including material selection, structural design, and operating environment. Based on mechanical strength analysis, the article details the process of establishing a container size optimization model, covering the determination of optimization objective functions and constraints, the selection and application of optimization algorithms, and the integration of mechanical strength analysis results into the optimization model. The aim is to provide theoretical and practical basis for improving container performance and optimizing transportation efficiency.

Keywords： container; mechanical strength analysis; standardized size; size optimization model; multimodal transportation

引言

在全球经济一体化深入发展的当下，物流行业呈现蓬勃态势，集装箱运输作为其中的关键环节，地位愈发重要。随着国际贸易规模的不断扩大，集装箱运输量持续增长，其高效、便捷的特性成为全球物流体系顺畅运行的重要保障。集装箱标准化在提升运输效率、降低物流成本方面的作用不可忽视。标准化的集装箱能够实现不同运输方式间的无缝对接，简化装卸流程，减少货物损耗，大幅提高港口、货场等设施的作业效率，降低整体物流成本。而且，标准化还有利于集装箱的循环利用，减少资源浪费，对环境保护具有重要意义。基于机械强度分析的集装箱标准化尺寸优化研究，对于进一步完善集装箱运输体系，推动物流行业高质量发展，具有重要的现实意义和长远的战略意义。

一、机械强度分析在集装箱设计中的应用

（一）机械强度分析的基本原理

机械强度分析是工程领域中至关重要的技术手段。它基于力

学原理，主要研究机械构件在各种外力作用下抵抗变形和破坏的能力。其基本原理包括静力学、动力学和材料力学等。静力学用于分析物体在平衡状态下的受力情况，确定构件的尺寸和形状；动力学研究物体受力后的运动规律，保证机械系统稳定运行；材

料力学则关注材料受力时的变形和破坏规律，帮助选择合适的材料^[1]。在工程应用中，机械强度分析广泛应用于桥梁、建筑、机械装备等领域。通过对结构进行精确的分析，能够预测其在实际使用中的性能和寿命，为设计优化和制造工艺改进提供关键依据，确保机械结构的安全可靠与高效运行。

（二）机械强度分析在集装箱设计中的应用现状

在集装箱设计领域，机械强度分析成果斐然，积累了丰富经验。设计人员运用有限元分析等先进手段，针对集装箱在堆码、吊装、运输等不同工况下的受力状况展开模拟。例如，在对某专用集装箱的研究中，经分析明确其箱盖结构强度欠佳，需配备专用吊具，以此保障使用安全。另有针对保温集装箱与通用货物集装箱的有限元仿真计算表明，在各类工况下，两者的最大应力均小于材料许用应力，强度完全符合要求。这些实践成果为集装箱设计筑牢科学根基，让集装箱得以在复杂多变的环境中安全稳定运行，极大地提升了运输效率，也有力保障了运输过程中的安全性。

（三）机械强度分析对集装箱安全性和可靠性的保障

机械强度分析对确保集装箱安全性与可靠性意义重大。精确计算和分析可提前察觉设计里的潜在缺陷，像应力集中区域、结构薄弱环节等，进而开展优化改进，有效防止在实际使用时出现断裂、变形等危险状况。基于强度分析结果，在材料挑选环节，能够精准选择符合要求的材料，使集装箱在承受各类载荷时具备充足的强度与刚度。通过静强度和刚度测试等试验进行验证，能进一步核验集装箱的安全性能。此外，机械强度分析还可对集装箱的使用寿命做出预测，为维护保养工作提供有力指导，保证集装箱在整个生命周期内都安全可靠，切实保障货物在运输途中完好无损^[2]。

二、集装箱标准化尺寸的现状分析

（一）现有集装箱尺寸标准概述

国际上集装箱尺寸标准以国际标准化组织 ISO 所制定的为主，常见有 20GP、40GP 及 40HC 等类型。20GP 内部尺寸 5898mm×2352mm×2393mm，载重 17.5 吨；40GP 内部尺寸 12032mm×2352mm×2393mm，载重 28 吨；40HC 高度增加，内部尺寸 12032mm×2352mm×2698mm。这些标准集装箱在全球贸易中广泛应用，涵盖了海洋、铁路、公路等多种运输方式，为货物运输提供了基本框架。它们使得不同国家和地区间的货物运输能够实现规范化操作，保障了全球物流体系的顺畅运行，是国际贸易高效开展的重要基础，在促进世界经济交流与合作中发挥着不可替代的作用。

（二）现有尺寸在运输效率上的不足

现有集装箱尺寸在提高运输效率方面存在诸多不足。一方面，国际、国内木工板、装饰板等标准板材规格是：宽 4 英尺×长 8 英尺（1 220 毫米×2 440 毫米），铝合金型材、电工管、方管等标准管材长度是 6 000 毫米；但是，20 英尺海运集装箱内尺寸是（5 898×2352×2385），2440 毫米-2 352、宽度小了 88，平

放 2 张板材尺寸不足、横放 1 张放不下，浪费有效空间，长度方向（1220×5）-5898 毫米小了 202（图 1）；长度 6 000 的管材装不进 20 英尺海运集装箱，6 000-5 898 小了 102；40 英尺海运集装箱与 20 英尺集装箱情况基本相同^[3]。另一方面，集装箱外部尺寸与部分运输工具存在冲突，比如我国铁路车皮货载限宽 3000 毫米，公路运输车辆限宽 2500 毫米，而国际标准集装箱宽度 2438 毫米，在铁路和公路运输时，会出现空间浪费或无法适配的情况，影响运输效率。再者，不同行业对集装箱尺寸需求各异，现有尺寸难以满足多样化需求，导致空间利用率低，增加了运输成本。

（三）尺寸标准化对物流成本和供应链效率的影响

尺寸标准化对物流成本与供应链效率有着极为深远的影响。从物流成本角度而言，标准化使得物流链各环节能够实现高效衔接。在货物运输与装卸过程中，因尺寸标准统一，操作流程得以简化，从而减少了操作成本，降低了货物在这些环节可能产生的损耗，切实有效地降低了整体物流成本。在供应链效率方面，标准化的集装箱、托盘等载具优势显著。不同运输方式，如公路、铁路、海运之间，借助标准化尺寸可实现无缝对接，货物周转时间大幅缩短，供应链的响应速度明显加快，进而全面提升了整体供应链的运行效率^[4]。此外，标准化尺寸对于集装箱的循环利用十分有利。统一的尺寸便于集装箱在不同运输场景和物流环节中重复使用，减少了因尺寸不兼容导致的资源浪费现象，这对于推动物流行业的可持续发展，实现资源的高效利用，有着举足轻重的意义。

（四）尺寸不统一对多式联运的困难

尺寸不统一为多式联运带来了重重阻碍。在多式联运体系下，公路、铁路、海运等不同运输方式对集装箱尺寸有着各自的标准和适配要求。当集装箱尺寸不统一时，在运输方式转换节点，如从公路运输换装至铁路运输，或是从铁路运输衔接海运时，极易出现装卸困难的情况。货物无法顺利、快速地完成转运，导致等待时间大幅延长，不仅增加了运输过程中的时间成本，还因延误造成额外的经济支出，极大地降低了运输效率。同时，尺寸不统一严重影响运输设备的兼容性。一些特制或标准尺寸的运输工具，难以适配非标准尺寸的集装箱，使得运输工具的装载空间无法得到充分利用，造成资源闲置与浪费。这种状况阻碍了多式联运流程的顺畅推进，长此以往，不利于物流行业构建高效、协同的运输体系，对物流行业的整体健康发展形成制约。

三、影响集装箱机械强度的关键因素

（一）材料选择对强度和耐久性的影响

材料选择对集装箱的强度和耐久性至关重要。钢制集装箱强度高、结构牢，焊接性高，水密性好，价格低廉，但重量大、防腐性差。铝合金集装箱重量轻，外表美观，防腐蚀，弹性好，加工方便，使用年限长，缺点在于造价高，焊接性能差^[5]。玻璃钢集装箱强度高，刚性好，内容积大，隔热、防腐、耐化学性好，易清扫，修理简便，不过也存在重量大、易老化的问题。不同材料的集装箱在面对不同的运输环境和货物需求时，其强度和耐久

性表现各异，选择合适的材料是保证集装箱性能的基础。

（二）结构设计与机械强度的关系

集装箱的结构设计与机械强度紧密相连。底框作为主要受力部件，其支撑梁的不同布置方式会影响整体结构强度。如某研究对20尺标准集装箱底框的两种支撑梁布置方式进行有限元仿真分析，为设计提供参考。节点设计也极为关键，传统集装箱结构节点处易出现应力集中、波纹板面外鼓曲、角柱面外失稳等情况，而外框内箱结构则能实现“强柱弱梁”的要求。船级社针对不同货运方式规定了多项检验标准，结构设计时需满足这些标准，如全铝集装箱要优先关注堆码和横向刚性测试^[6]。合理的结构设计能保证集装箱在各种工况下拥有足够的机械强度，确保运输安全。

（三）使用环境对集装箱强度的影响

温度、湿度等使用环境因素对集装箱强度影响显著。在高温环境下，集装箱材料可能会发生热膨胀，导致结构变形，影响强度。例如长时间暴露在烈日下的集装箱，内部温度大幅升高，材料性能可能下降。而低温则会使材料变脆，抗冲击性能降低，增加断裂风险。湿度方面，高湿度易引发材料锈蚀，如钢制集装箱在潮湿环境中腐蚀速度加快，强度减弱。凝露现象还会产生冷凝水，对箱内货物和结构造成损害。不同地区的气候差异、运输过程中的温湿度变化，都会对集装箱的强度带来挑战，需采取相应措施来应对。

四、基于机械强度分析的集装箱尺寸优化模型建立

（一）优化目标函数和约束条件的确定

在基于机械强度分析的集装箱尺寸优化模型中，目标函数通常设定为集装箱体积利用率最大化，以实现资源的高效利用，提高运输效率。约束条件方面，首先是重量约束，集装箱内货物的总重量不能超过其最大载重量。其次是尺寸约束，货物的尺寸需满足集装箱内部空间限制，且集装箱自身尺寸要适应运输工具和装卸设备的规格^[7]。还有稳定性约束，货物需得到充分支撑，避免运输中因晃动损坏。方向约束也不可忽视，货物摆放需遵循一定规则，确保装卸和运输安全。这些约束条件共同保障了优化模型在实际应用中的可行性和有效性，为后续优化算法的选择与应

用奠定基础。

（二）优化算法的选择与应用

对于集装箱尺寸优化，混合启发式算法表现出色。它结合了块装载算法的剩余空间启发式算法与模拟退火算法，在多约束条件下，针对大规模集装箱装载问题，能有效提高空间利用率^[8]。块装载算法可生成简单块和复合块，降低问题复杂度。模拟退火算法则通过模拟固体退火过程，在搜索过程中引入随机因素，避免陷入局部最优，从而找到更优的装载方案。还有智能装箱计算软件中的算法，能根据货物信息生成最优装载方案，提升空间利用率，降低运输成本，提高装载效率。这些算法在实际应用中，通过计算机技术实现自动化计算，为集装箱尺寸优化提供了有力的工具。

（三）机械强度分析结果在优化模型中的融合

将机械强度分析结果融入优化模型至关重要。一方面，可通过有限元仿真等方法，获取集装箱在不同尺寸和结构下的应力、应变等强度数据，将其作为约束条件纳入优化模型。例如在底框结构设计中，不同支撑梁布置方式的强度分析结果，可指导优化模型中的尺寸参数选择^[9]。另一方面，可利用克里金模型与粒子群算法等优化方法，将强度分析结果转化为约束条件嵌入算法中，实现尺寸参数的寻优^[10]。在多目标优化中，将结构强度与质量、刚度等目标一同考虑，通过模态分析等确保优化后的集装箱在满足强度要求的同时，具备良好的整体性能，使优化模型更加全面、科学。

五、结束语

本研究聚焦基于机械强度分析的集装箱标准化尺寸优化展开深入探究。研究发现，机械强度分析在集装箱设计中意义重大，是保障其安全可靠的关键。通过对现有集装箱尺寸标准的分析，明确其在运输效率等方面存在不足。而材料选择、结构设计以及使用环境等因素均对集装箱机械强度产生重要影响。在建立尺寸优化模型时，合理确定优化目标函数与约束条件，选择合适的优化算法，并将机械强度分析结果融入其中，能有效提升集装箱的性能与运输效率，为物流行业的进一步发展提供有力支持。

参考文献

- [1]黄啟盛.面向PI集装箱的组合适配算法[D].武汉理工大学,2022.DOI:10.27381/d.cnki.gwlgw.2022.001045.
- [2]孙希强.超宽分体式恒温集装箱箱体设计分析实验[D].华南理工大学,2018.
- [3]席平.关于21英尺、41英尺陆运集装箱尺寸的探讨[J].大陆桥视野,2021,(06):43-44.
- [4]汪涛,刘子健.集装箱包装设计链改良与空间装配方案设计研究[J].包装与设计,2024,(01):110-111.
- [5]高佳鑫,黄志祥,陈斌,等.基于货物集装箱的受限空间轰燃火灾行为研究[J].武汉理工大学学报(信息与管理工程版),2023,45(06):868-874.
- [6]张雨奇,邓婧蓉.集装箱式应急医疗空间医护区的标准化模数设计[J].中国建筑装饰装修,2023,(08):89-91.
- [7]刘亚欣,李琪.坡度堆场下集装箱吊取的分析[J].珠江水运,2022,(14):58-60.DOI:10.14125/j.cnki.zjsy.2022.14.029.
- [8]王梦蛟.多传感器融合的集装箱拆垛视觉系统研究[D].哈尔滨工业大学,2022.DOI:10.27061/d.cnki.ghgdu.2022.003795.
- [9]Lee W L W.考虑集装箱放关情况的自动化集装箱码头船舶配载研究[D].上海交通大学,2022.DOI:10.27307/d.cnki.gsjtu.2022.000194.
- [10]陈振宇,马淑梅.改进型出口集装箱堆场堆存方案设计与仿真[J].水运管理,2021,43(10):15-19+29.DOI:10.13340/j.jsm.2021.10.005.