

自动化与智能化技术

考虑车辆轴荷比与弯矩极值的三维负载分布图构建方法

闫军^{a*}, 漆荣刚^a, 吕炜东^a, 王皓冬^b

(兰州交通大学 a.机电技术研究所 b.交通运输学院, 兰州 730070)

摘要: **目的** 探究货车装载平衡问题中货物质量分配的精确量化方法, 旨在为实际装车提供指导。**方法** 针对在标准载重下的某品牌货车, 通过力学分析建立平衡方程, 建立以最佳轴荷分配和最小化车厢弯矩为优化目标的数学模型, 并纳入车厢允许弯矩、载荷转移比 (LTR) 及货物平均密度等约束条件。采用改进的模拟退火算法进行迭代优化, 寻找最优装载布局, 并利用 Matlab 软件进行三维负载分布图的绘制。**结果** 根据三维负载分布图, 对某装车平台生成的装车方案进行优化, 优化方案轴荷比为 0.387 3, 较原方案更加接近理想轴荷比, 同时车厢弯矩峰值也降到 4 579。总体表现为货物总重心分布更合理, 弯矩和剪力图更平滑, 表明车辆负载状态得到明显改善。**结论** 考虑轴荷比与弯矩极值的三维负载分布图构建方法, 能够解决具体货车装车场景下货物质量精确分配的难题, 优化了车辆的载重平衡, 减少了安全隐患。实例验证表明, 可依据该方法生成装车指导图并调整装载布局, 对实际装车作业具有指导价值。

关键词: 公路运输; 装载布局; 改进模拟退火算法; 轴荷分布; 弯矩

中图分类号: TB48

文献标志码: A

文章编号: 1001-3563(2024)23-0212-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.23.023

Method for Constructing a Three-dimensional Load Distribution Map Considering Vehicle Axle Load Ratio and Bending Moment Extreme Values

YAN Jun^{a*}, QI Ronggang^a, LYU Weidong^a, WANG Haodong^b(a. Institute of Mechanical and Electrical Technology, b. School of Transportation,
Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

ABSTRACT: The work aims to investigate precise quantification methods for weight distribution in truck loading balance, with the objective of providing guidance for practical cargo loading operations. Focusing on a certain brand of truck under standard load, a balance equation was established through mechanical analysis, and a mathematical model with the optimization objectives of optimal axle load distribution and minimizing the bending moment of the carriage was established, and constraints such as the allowable bending moment of the carriage, load transfer ratio (LTR), and average density of goods were incorporated. An improved simulated annealing algorithm was adopted for iterative optimization to search for the optimal loading layout, and Matlab software was used to draw a three-dimensional load distribution map. According to the three-dimensional load distribution map, the loading plan generated by a certain loading platform was optimized, with an axle load ratio of 0.387 3, which was closer to the ideal axle load ratio than the original plan. At the same time, the peak bending moment of the carriage was also reduced to 4 579. The overall performance was that the distribution of the total center of gravity of the goods was more reasonable, and the bending moment and shear force diagrams were smoother, indicating a significant improvement in the vehicle's load state. In conclusion, the method of constructing a three-dimensional load distribution map considering the axle load ratio and bending moment extreme values can solve the problem of precise distribution of cargo weight in specific truck

收稿日期: 2024-05-20

基金项目: 国家自然科学基金 (62262037)

*通信作者

loading scenarios, optimize the vehicle's load balance, and reduce safety hazards. Example verification proves that the method can be used to generate loading guidance maps and adjust the loading layout, which has guiding values for actual loading operations.

KEY WORDS: highway transportation; loading layout; improved simulated annealing algorithm; axle load distribution; bending moment

随着现代物流的发展,人们对货物装载的质量和效率提出了更高的要求。在物流装配中,货物装载布局对装配运输的安全性、车辆利用率、车辆使用寿命、作业效率以及业务流程的规范都有着深刻的影响。三维装载问题属于非确定性多项式难问题(NP-Hard),结合实际考虑轴重分配、装载平衡以及车厢允许弯矩等现实约束使问题求解难度进一步增大。能够定量确定车厢各位置最优载重分布以指导装车方案,对于装载问题具有积极意义。

目前,国内外学者对货物装载问题已有大量研究,在装车时载重分布方面也有较多策略。朱向^[1]在选择装载位置策略时以一般极点法为基础,结合质量因素以对称布局形式进行装载位置选择;在另一篇文章中朱向等^[2]采用框架式布局策略,先确定若干对全局重心平衡起调控作用的货物单元即核心堆布局框架,再填充其他影响较小的货物,从而简化装载问题;雷定猷等^[3]根据现实装载经验,提出了先放置核心货物单元以构造货物“骨架”,再放置其他非核心货物的“中心骨架法”;Costa等^[4]采用层排列方法解决货车装载问题中质量分布均衡和负载稳定性的问题;郭玉华等^[5]基于货物重容比采用类Frist Fit划分算法求得承载车辆的装载布局算法;张英贵等^[6]首先将实际货物划分为重货、平货及轻货,优先确定质量或密度较大的货物分布于接近车辆转向架两边的位置,其余位置填充较轻货物,更符合车架承载能力分布规律。在考虑货物装载布局的平衡性约束时,Trivella等^[7]提出货物装载问题中的纵向、横向和竖直方向3个子约束;Huang等^[8]要求货物总重心位置必须保持在一定的范围内,以确保装载的高效性和稳定性;Nishiyama等^[9]加入货物的密度、稳定性和脆弱性等影响车辆行驶平稳的因素;Ramos等^[10]使用力矩方程,根据某型号车辆最大允许轴荷、最小驱动轴载荷和法规等约束分别绘制出该型号车辆纵向和横向的车辆载荷分布图,该图首次量化了某型号车辆允许的货物总重心安全约束范围。

综上,当前货物装载问题从货物摆放策略到装载平衡约束方面都有较多研究,但在具体量化车厢各位置最优质量分布以指导实际装车上仍需进一步研究。

1 货车装载影响因素和负载均衡分析

1.1 货物装载重心平衡

车辆的重心位置直接影响其动力输出效率、灵活转向能力以及抗侧翻稳定性。货物重心的纵向位置直

接影响车辆的轴荷分配,一般来说,前轴荷应该占总载重的30%~40%。前轴荷过轻,车辆在高速行驶时容易产生抖动;过重,则会增加车辆的转向阻力,影响操控性。后轴荷应该占总载重的60%~70%。后轴荷过轻,车辆在行驶过程中容易打滑;过重,会增加车辆的阻力,影响燃油经济性。同时,维持较低且横向居中的重心有助于改善车辆操控性,尤其是在转弯时能有效减少侧倾风险,增强驾驶安全性。

1.2 集重允许弯矩

车辆在承载货物时,车厢各部位所承受的弯矩是衡量其结构安全与稳定性的关键指标。在研究车厢弯矩时,因为车架结构是左右对称的,左右纵梁的受力相差不大,故将车厢简化为由若干纵向排列支撑在汽车前后轴上的简支梁^[11],通过对每个简支梁受力分析求其剪力及弯矩,确定整个车厢的剪力和弯矩曲面图。为确保货车行驶安全性,必须严格控制因不均匀装载导致的局部集重问题,以防车厢产生超出允许范围的弯矩,进而引发潜在的结构损坏或失稳风险。

1.3 负载均衡

在对货车负载均衡的研究中,李平^[12]以货物总重心到车厢几何中心的距离为衡量依据。Ramos等^[10]以车辆允许最大载荷和法规等约束首次绘制车辆横纵向负载分布图,车货总重心在其范围内即视为满足负载均衡。本文通过对货物装载位置的调整,纵向车辆负载均衡以车货总重对车辆的轴荷比与车辆生产厂家提供的最佳轴荷比的差值为衡量依据,而横向车辆负载均衡依然以车辆左右侧车轮负载平衡为目标,同时兼顾货物集重问题寻求货物装载方案。

2 力学分析及数学模型

图1所示是1辆货运卡车简图,设车厢纵向长度以靠近车头侧为起始,长度为 U_x 。横向以左前侧为起始位置,宽度为 U_y ,将车厢划分为 U_y 行和 U_x 列的承重网格。 $G(x,y)$ 为放置于 x 列 y 行的质子对车厢底板施加的重力, X 、 Y 分别为代表车厢中所放置质子的横纵坐标的一维数组, T_{WB} 为货车前后轴距, D 为前轴到车厢前壁的距离, H_u 为车辆前轴到空车重心的距离, T 是左右侧轮胎中心线间的距离, W 是车厢宽度, U 为货车空车质量, C_g 是空车重心。简化车辆为刚体模型,建立平移和旋转静力平衡方程^[9]。

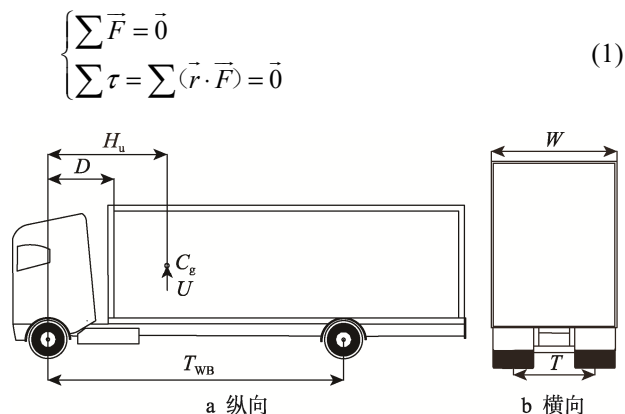


图 1 集装箱卡车纵横示意
Fig.1 Vertical and horizontal schematic diagram of container trucks

如图 2 所示, 分别对位于坐标 \$(x_1, y_1)\$ 和 \$(x_2, y_2)\$ 处的质子进行受力分析, 因为车架结构是左右对称的, 左右纵梁的受力相差不大, 故将车厢简化为由若干纵向排列支撑在汽车前后轴上的简支梁 (如简支梁 \$AB\$), 对 \$(x_1, y_1)\$ 点质子受力分析可得前后轴提供的支撑力 \$T_F(x_1, y_1)\$ 和 \$T_B(x_1, y_1)\$。进一步将 \$T_F(x_1, y_1)\$ 和 \$T_B(x_1, y_1)\$ 分解可得左前、右前、左后和右后 4 部位车轮负载 \$T_{LF}(x_1, y_1)\$、\$T_{RF}(x_1, y_1)\$、\$T_{LB}(x_1, y_1)\$ 和 \$T_{RB}(x_1, y_1)\$。

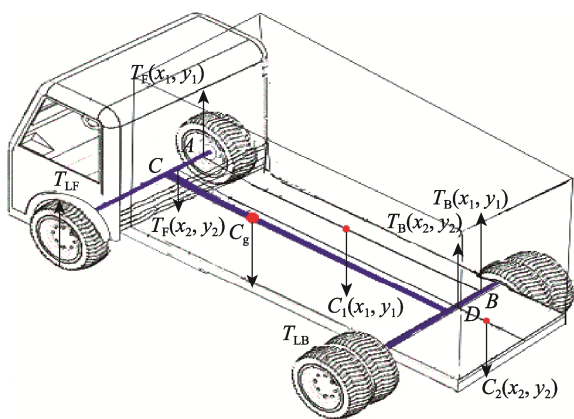


图 2 货车受力分析
Fig.2 Analysis diagram of truck force

2.1 目标函数构建

装车方案评价函数 \$f(X, Y)\$ 代表总优化目标, 由车辆轴荷比优化函数 \$CG(X, Y)\$ 和车厢弯矩极值 \$M_b\$ 组成。\$\alpha\$ 和 \$\beta\$ 分别为评价函数的轴荷比和车厢弯矩极值的权重, \$\alpha = A_{lb}/G(X_0, Y_0)\$。确保前期车辆轴荷比优化函数的主导地位, 需要 \$\alpha\$ 足够大, 同时避免过度压制车厢弯矩优化函数, 防止 \$\alpha\$ 过大; 而 \$\beta\$ 需要 \$M_b\$ 小于车厢允许最大值时优先级远低于轴荷比, 当接近 \$M_b\$ 时优先级远高于轴荷比。因此采用动态权重法, 令 \$\beta(M_b) = 1/(M_b - A_{lb})\$, 常量 \$\alpha\$ 的取值由 \$CG(X, Y)\$ 和 \$M_b\$ 具体数值来调整。

$$f(X, Y) = \alpha CG(X, Y) + \beta M_b \quad (2)$$

$$\alpha = A_{lb} / G(X_0, Y_0)$$

$$\beta = 1 / (M_b - A_{lb})$$

$$\begin{cases} CG(X, Y) = (l_{Ver}(X, Y) - d_{Bestl}) + (l_{Hor}(X, Y)) \\ M_b = \max(F_{Bend}(X, Y)) \end{cases}$$

s.t.

$$X \in (\min x, \max x) \quad (3)$$

$$Y \in (\min y, \max y)$$

$$F_{Bend}(x, y) \leq A_{lb}$$

$$T_{LF} < T_{ALLF}$$

$$T_{LB} < T_{ALLB}$$

$$T_{RF} < T_{ALLF}$$

$$T_{RB} < T_{ALLB}$$

式中: \$M_b\$ 为车厢弯矩峰值, \$l_{Ver}(X, Y)\$ 和 \$l_{Hor}(X, Y)\$ 分别为车货纵向和横向荷载比, \$d_{Bestl}\$ 为该款货车最佳前后轴荷比。\$T_{ALLF}\$、\$T_{ALLB}\$ 分别为前、后轮胎允许最大负荷, \$A_{lb}\$ 为车厢允许最大弯矩, \$G(X_0, Y_0)\$ 为待优化方案的轴荷比。

2.2 货物纵向力矩分析

根据质子在不同位置的受力分析建立力学方程, 竖直方向质子重力 \$G(x, y)\$ 于车辆前后轴负荷平衡建立竖直方向方程。旋转静力方面以质心为参考点建立支撑力的力矩平衡方程, 得到车辆纵向力学方程。

$$\begin{cases} T_F(x, y) + T_B(x, y) = G(x, y) \\ T_F(x, y) \cdot (D + x) = 0 < x \leq (T_{WB} - D) \\ T_B(x, y) \cdot (T_{WB} - x - D) \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} G(x, y) + (-T_F(x, y)) = T_B(x, y) \\ T_B(x, y) \cdot (x - T_{WB} + D) = (T_{WB} - D) < x \\ (-T_F(x, y)) \cdot T_{WB} \end{cases} \quad (5)$$

式 (4) 为质子纵向位置在后轴之前的平衡方程, 式 (5) 为质子纵向位置位于后轴之后的平衡方程。

2.3 货物横向力矩分析

横向力学方程分别以质子位于左侧轮轴支撑点左侧、左右轮轴支撑点之间和右侧轮轴支撑点右侧 3 种情形做受力分析, 将前后轴简化为简支梁计算货车左右两侧车轮载荷比, 同样建立竖直方向重力平衡方程和力矩平衡方程。

$$\begin{cases} T_{LF}(x, y) = T_F(x, y) + (-T_{RF}(x, y)) \\ T_F(x, y) \cdot (\frac{W-T}{2} - y) = (-T_{RF}(x, y)) \cdot T \end{cases} \quad 0 < y < \frac{W-T}{2} \quad (6)$$

$$\begin{cases} T_F(x, y) = T_{LF}(x, y) + T_{RF}(x, y) \\ T_{LF}(x, y) \cdot (y - \frac{W-T}{2}) = \frac{W-T}{2} < y < \frac{W+T}{2} \\ T_{RF}(x, y) \cdot (\frac{W+T}{2}) \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} T_{RF}(x, y) = (-T_{LF}(x, y)) + T_F(x, y) \\ (-T_{LF}(x, y)) \cdot T = \\ T_F(x, y) \cdot (y - \frac{W+T}{2}) \end{cases} \quad \frac{W+T}{2} < y < W \quad (8)$$

$$l_{Ver}(X, Y) = \frac{\sum_{X,Y} (T_{LF}(x, y) + T_{RF}(x, y))}{\sum_{X,Y} (T_{LF}(x, y) + T_{RF}(x, y) + T_{LB}(x, y) + T_{RB}(x, y))} \quad (9)$$

$$l_{Hor}(X, Y) = \frac{\sum_{X,Y} (T_{LF}(x, y) + T_{LB}(X, Y)) - \sum_{X,Y} (T_{RF}(x, y) + T_{RB}(X, Y))}{\sum_{X,Y} (T_{LF}(x, y) + T_{LB}(X, Y))} \quad (10)$$

2.4 空车力矩分析

车辆空重作用力在车辆轴负荷中直接影响整车重心位置,影响较大,需要对其进行力学分析。

$$\begin{cases} T_F(x, y) + T_B(x, y) = U \cdot g \\ T_F(x, y) \cdot H_u = T_R(x, y) \cdot (T_{WB} - H_u) \end{cases} \quad (11)$$

式中: g 取 9.8 m/s^2 。

2.5 弯矩分析

根据车辆车轴支撑力和货物重力即可绘制车厢剪力数据,对剪力数据做积分运算得到车厢弯矩数据。

$$\begin{cases} F_{Share}(x, y) = \begin{cases} \sum_1^x G(x, y) + T_F(y) + T_B(y) & x \geq 450 \\ \sum_1^x G(x, y) + T_F(y) & x < 450 \end{cases} \\ F_{Bend}(x, y) = \sum_1^x (F_{Share}(x, y) \cdot L_{Step}) \end{cases} \quad (12)$$

式中: F_{Share} 和 F_{Bend} 数组与车厢矩阵同型,分别表示网格上的剪力值和弯矩值, L_{Step} 表示网格纵向间距。

3 改进模拟退火算法设计及 Matlab 三维图

3.1 改进模拟退火算法

3.1.1 算法思想及改进

经过多年发展,三维装箱的求解方法有线性规划

法^[13]、树搜索法^[14]等确定性算法以及遗传算法^[15]、粒子群优化算法^[16]等启发式算法,然而货车装载优化问题属于复杂组合最优化问题,不仅无法给出最优解,而且使用启发式算法容易使其陷入局部最优解。因此本文采用融合了惯性搜索及自适应步长调整机制的改进模拟退火算法。

模拟退火算法模拟热力学退火过程,通过引入随机扰动和接受概率函数实现在解空间全局范围内有效避免局部最优,实现广度搜索。为增强寻优能力和导向性,引入惯性搜索策略,促使算法迭代过程中保持对历史最优区域的关注。该算法还采用了自适应步长调整机制,根据搜索进程动态调整粒子搜索步长:初期赋予较大步长以充分覆盖解空间并进行全局寻优;随着迭代深入,逐渐减小步长以在高潜力区域进行精细局部搜索。这种设计确保了算法在处理卡车装货问题时,既能兼顾全局优化以探寻潜在的最佳轴荷分配方案,又能于后期精确收敛至最优解附近。

3.1.2 初始装载位置生成

选用正态随机分布的方法来设定质子的起始装载位置。具体实施方案:每个代表理想货物的质子其沿车辆纵向和横向都按照正态分布的原则进行随机赋值,对超出车厢边界的质子约束。车辆几何中心被选定作为该正态分布的均值点,同时保证初始正态分布曲面体积与货物总质量相等,曲面峰值小于最大货物密度(图3)。这一设计符合实际装载中货物普遍放置规律,同时尽可能考虑货物的实际约束。

3.1.3 最优解搜索

考虑车辆轴荷分配和最小弯矩极值的某型号货车最优装载分布优化算法如下:

输入: 车厢空间集合 S , 货车几何尺寸 T_{WB} 、 H_u 、 D 、 T 、 W 、 C_g , 空车质量 U , 车厢最大允许弯矩阈值集合 A_{lb} , 货物质心集合 G , 迭代时间 T , 货车轴荷分配权重 α , 货车弯矩权重 β 。初始温度 T_e , 温度衰减系数 k 。

步骤1: 利用正态分布函数随机生成初始货物分布方案,计算初始方案的轴荷负载、剪力以及弯矩。计算初始方案下目标函数值 $f(X, Y)$ 。

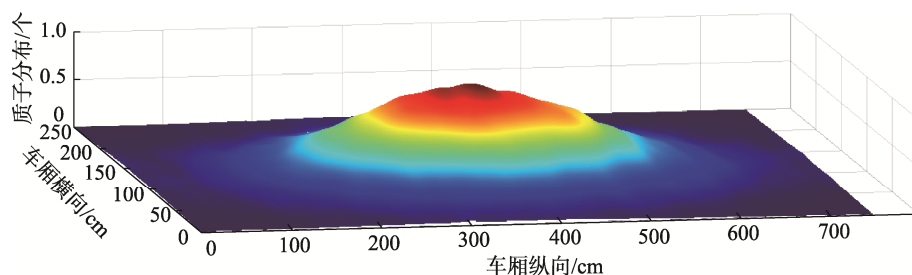


图3 初始粒子分布图
Fig.3 Initial particle distribution map

步骤2: 粒子迭代算法: 粒子更新融合自适应惯性权重由随机参量、优参量和最优参量3部分组成, 3部分参量权重和步长均采用自适应系数, 迭代前期随机权重和较优占比较大, 拥有较好的全局寻优能力, 后期最优参量权重大大增加, 提高解在特定区域的寻优能力。

步骤3: 新装载方案判定 $f(X_i, Y_i)$, 若新方案更优则接受新方案, 更新惯性参量; 若新方案更差则用 Metropolis 准则判定, 允许以一定的概率接受非最优解, 从而跳出局部最优解的陷阱。

步骤4: 绘制最终装载方案的三维指导装车图, 并生成对应的剪力图和弯矩图。

3.1.4 车辆允许弯矩约束

为避免迭代过程中粒子过度集中于某点出现集重现象, 设计了1种与车厢空间坐标体系相一致的禁忌表 B_{mtt} 。当车厢某位置由于粒子堆叠产生的弯矩达到其最大允许弯矩阈值时, 该位置在禁忌表中将被标记为禁入状态, 即赋值为1, 随机落在该位置的质子需要向周围区域迁移。确保在粒子扩散搜索阶段, 任何可能导致弯矩超限的粒子迁移行为都将被有效禁止, 从而维持装载方案的整体安全性和均衡性。通过实施这种空间约束管理方法, 粒子能够在满足车辆结构承载能力的前提下更合理地分布于车厢各区域。

$$\begin{cases} B_{mtt}(x, y) = 1 & F_{Bend}(x, y) = A_{lb}(x, y) \\ B_{mtt}(x, y) = 0 & F_{Bend}(x, y) < A_{lb}(x, y) \end{cases} \quad (13)$$

式中: $A_{lb}(x, y)$ 为车辆车厢在 (x, y) 位置能承受

最大弯矩。

3.2 三维负载分布图绘制

采用数据插值法能够基于有限数量离散数据点的观测值, 推断相邻区域内未被测量点的潜在状态, 从而减少了对实验及测试资源的依赖。在本研究中, 鉴于实际运算能力等条件限制, 本文采用 50 000 个离散质点来模拟货物的装载特性。为了得到平滑的装载特性曲面图并确保总体装载量不变, 定义了1个二维高斯核函数作为滤波器基础, 运用线性空间滤波算法生成对应的滤波掩模。通过卷积运算, 遍历模拟数据的每个像素位置, 并将该位置的像素值与相应的滤波掩模进行加权求和处理, 最终获得了既保留原始数据总值又呈现光滑连续变化的装载特性曲面图像, 见图4和图5。

4 实例分析

针对某品牌 4×2 货运卡车装载场景, 其自质量为 6 050 kg, 标准载质量为 11 820 kg, 轴距为 580 cm, 车厢尺寸为 750 cm×250 cm, 空车纵向重心位置在车厢起 257 cm 处, 对该型车辆装载标准质量为 11 820 kg 的货物, 前、后轮允许最大负荷分别为 3 250 kg 和 5 750 kg, 车厢允许最大弯矩为 16 000 N·m, 并将车辆几何和承重数据输入寻优算法中。通过某平台装箱算法生成图6初始装载方案, 并展示在图7的货物总重心分布图上。对该初始装载方案进行力学计算, 绘制车厢在该装载方案下受到的剪力和弯矩分布, 分别描绘成图8的剪力图和图9的弯矩图。

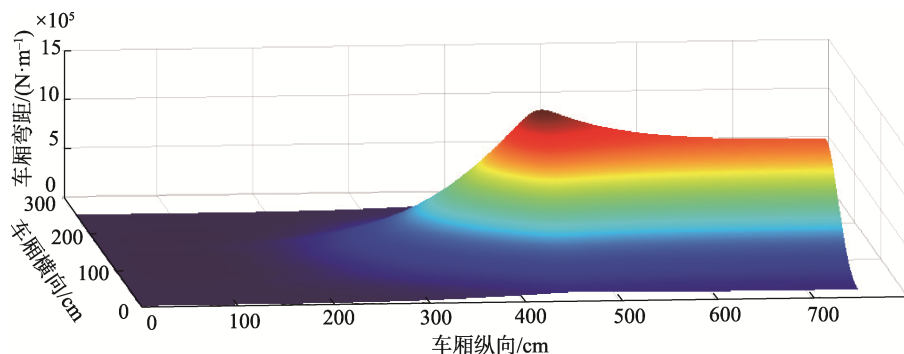


图4 弯矩图

Fig.4 Bending moment diagram

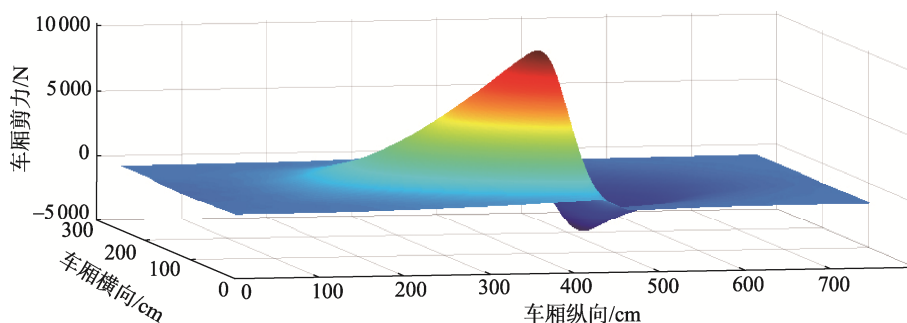


图5 剪力图

Fig.5 Shear force diagram

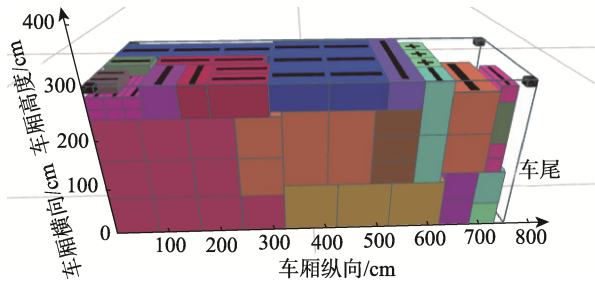


图 6 初始装载方案
Fig.6 Initial loading plan

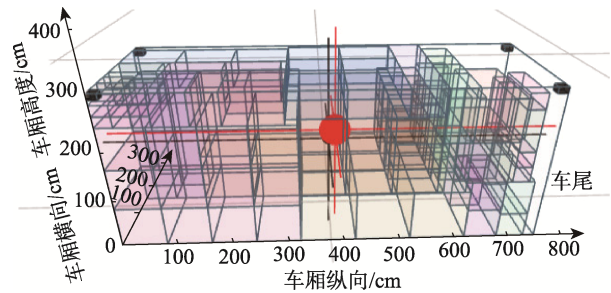


图 7 货物重心分布图
Fig.7 Distribution map of cargo center of gravity

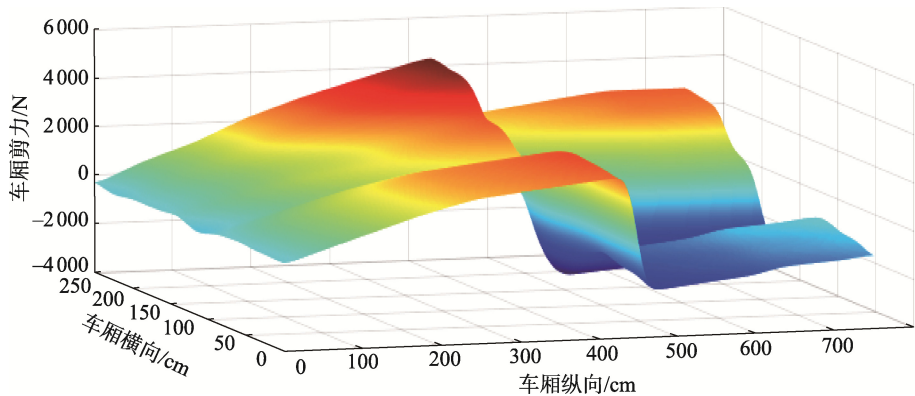


图 8 剪力图
Fig.8 Shear force diagram

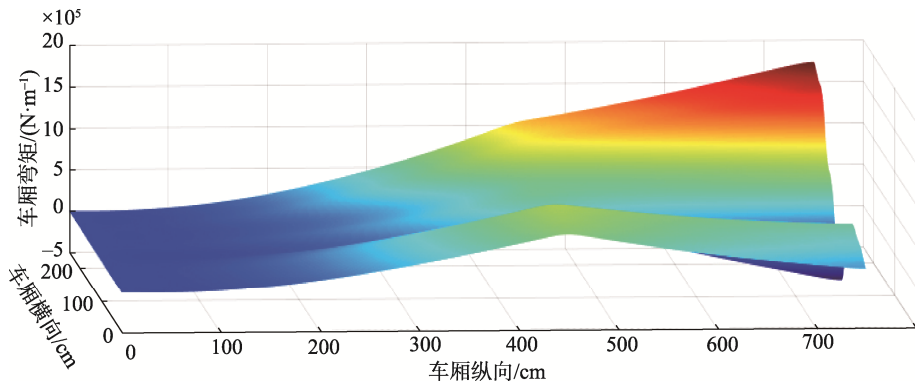


图 9 弯矩图
Fig.9 Bending moment diagram

运用改进模拟退火算法对初始装载方案进行了优化,根据初始装载方案的轴荷比和弯矩峰值数据,令 $\alpha=400$, $\beta=0.000\ 200\ 4$ 。优化后生成的装车指导图如图 10 所示,根据此指导图重新配置货物装载,使得重货集中在车厢纵向 (300,450) 区间以及 (150,300) 和 (400,500) 区间内的次重货布置更为

适宜,而轻货则填充剩余空间。根据指导图调整装载方案,新的装车方案如图 11 所示,其重心图 (图 12)、剪力图 (图 13) 和弯矩图 (图 14) 体现出显著的改善:弯矩峰值降低,前后轴荷分配更加理想,从而提高了货车在各种载重条件下的行驶安全性和承载效率。

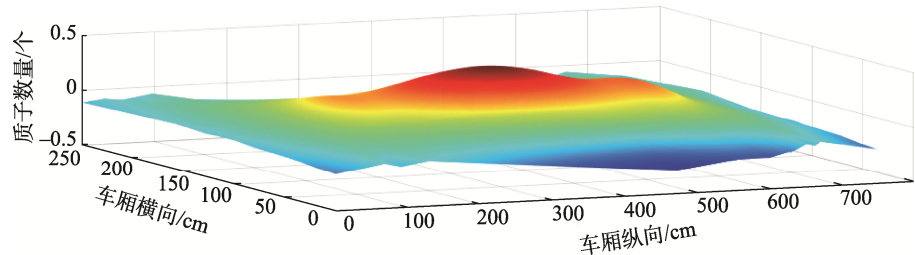


图 10 该型号车在额定载重下的三维负载分布图
Fig.10 3D load distribution map of this model of vehicle under rated load

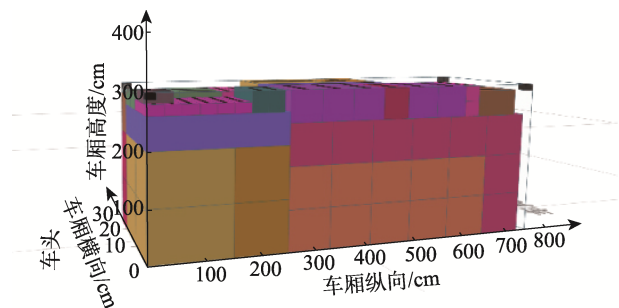


图 11 优化实例装车方案
Fig.11 Optimized loading plan

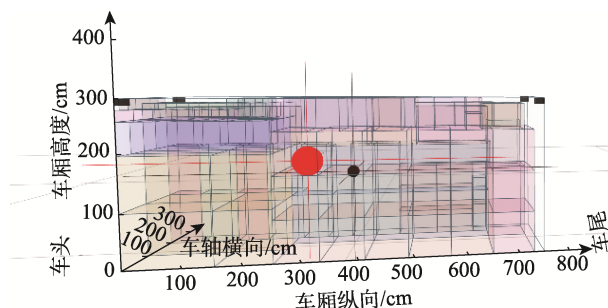


图 12 优化实例重心图
Fig.12 Optimized center of gravity

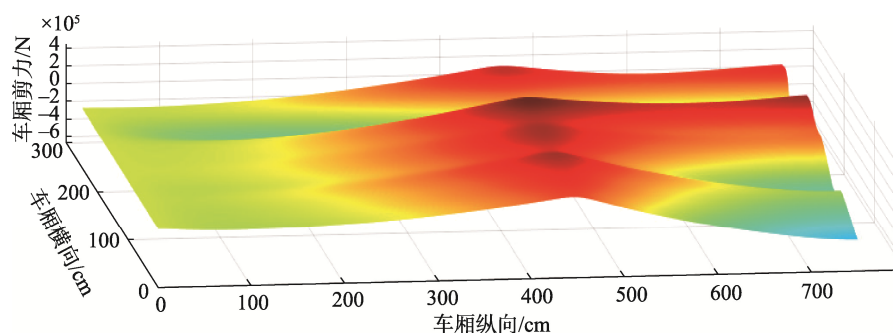


图 13 优化实例剪力图
Fig.13 Optimized shear force

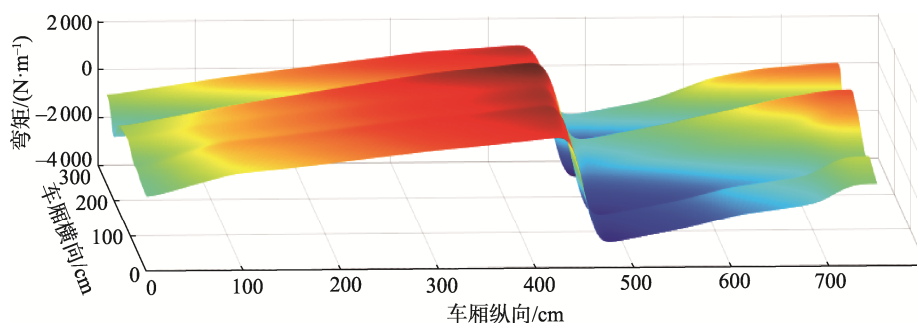


图 14 优化实例弯矩图
Fig.14 Optimized bending moment

表 1 结果对比表明，相较于实例平台装车方案，优化装车方案的前后轴荷比为 0.387 3，更接近于最佳轴荷比 1/3，分配更加科学，同时也兼顾了车厢弯矩因素，优化后的装车方案具有更小的弯矩峰值。由此说明基于改进模拟退火算法所生成的装车图对于实际装车在车辆轴荷和避免集重方面具有指导意义。

表 1 结果对比
Tab.1 Comparison of results

	前后轴 荷比	剪力 峰值/N	弯矩 峰值/(N·m ⁻¹)	货物 重心/cm
初始方案	0.226 2	4 252	16 990	(387,121)
优化方案	0.387 3	2 088	4 579	(284,134)

5 结语

本研究构建了货车三维负载分布图，结合惯性搜

索与自适应步长调整机制，利用改进的模拟退火算法，求解了在满足车厢允许弯矩和载荷转移比约束条件下的最佳轴荷分配问题。分析了车辆装载重心平衡与车厢弯矩对安全性、效率和稳定性的影响，并通过力学建模，生成了在满载重状况下的装载分布模型。实例表明，这种方法成功指导了实际货物装载方案，优化了轴荷分配，降低了重心偏移，确保了货车在各种载重状态下的安全行驶性能与承载效率。未来，将进一步探索装车指导图与车辆三维装载算法的结合，旨在面对复杂物流场景，能够在提高装载环节的效率与自动化程度的同时，保障货车行驶安全。

参考文献：

- [1] 朱向. 带轴重约束货物平衡装载问题优化研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2015, 15(5): 164-171.

- ZHU X. Optimization of Freights Loading Problem with Balancing and Axle Weight Constraints[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2015, 15(5): 164-171.
- [2] 朱向, 雷定猷. 带平衡约束三维装箱问题的双层混合遗传算法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2015, 15(2): 203-209.
- ZHU X, LEI D Y. Bi-Level Hybrid Genetic Algorithm for Three-Dimensional Container Loading Problem with Balancing Constrains[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2015, 15(2): 203-209.
- [3] 雷定猷, 洪舒华, 张英贵. 集装箱轻重货物混合平衡装载模型与算法[J]. 计算机工程与应用, 2020, 56(8): 233-240.
- LEI D Y, HONG S H, ZHANG Y G. Model and Algorithm for Container Mixed Balanced Loading of Light and Heavy Cargo[J]. Computer Engineering and Applications, 2020, 56(8): 233-240.
- [4] COSTA G D M, CAPTIVO E M. Weight Distribution in Container Loading: A Case Study[J]. International Transactions in Operational Research, 2016, 23(1/2): 239-263.
- [5] 郭玉华, 陈治亚, 汤波, 等. 多车多件货物装载布局优化模型与算法[J]. 中国铁道科学, 2011, 32(3): 111-116.
- GUO Y H, CHEN Z Y, TANG B, et al. Optimization Model and Algorithms for Loading and Packing Multi-Category Freights into Multi-Vehicle[J]. China Railway Science, 2011, 32(3): 111-116.
- [6] 张英贵, 姚璿华, 高全, 等. 铁路集装箱混合货物平衡装载布局优化模型与算法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2022, 22(2): 214-222.
- ZHANG Y G, YAO Y H, GAO Q, et al. Optimization Model and Algorithm of Balanced Loading Layout of Railway Container Mixed Goods[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2022, 22(2): 214-222.
- [7] TRIVELLA A, PISINGER D. The Load-Balanced Multi-Dimensional Bin-Packing Problem[J]. Computers & Operations Research, 2016, 74: 152-164.
- [8] HUANG Y Y, HUANG S F, JIN C. 3D-Container Loading Problem with a Distribution Plan Based on Hybrid Quantum Genetic Algorithm[J]. Economic Computation and Economic Cybernetics Studies and Research, 2021, 55(4/2021): 117-132.
- [9] NISHIYAMA S, LEE C, MASHITA T. Solving 3D Container Loading Problems Using Physics Simulation for Genetic Algorithm Evaluation[J]. IEICE Transactions on Information and Systems, 2021, E104.D(11): 1913-1922.
- [10] RAMOS A G, SILVA E, OLIVEIRA J F. A New Load Balance Methodology for Container Loading Problem in Road Transportation[J]. European Journal of Operational Research, 2018, 266(3): 1140-1152.
- [11] 朱容庆. 重型载重汽车车架轻量化设计研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2006: 21-22.
- ZHU R Q. Research on Lightweight Design of Heavy Truck Frame[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2006: 21-22.
- [12] 李平. 基于Trucksim的公路弯道路段车辆安全速度仿真研究[D]. 西安: 长安大学, 2017: 70-71.
- LI P. Simulation Research on Vehicle Safety Speed in Highway Curved Section Based on Trucksim[D]. Xi'an: Chang'an University, 2017: 70-71.
- [13] 沈秀敏. 基于整数线性规划方法的集装箱装载布局优化问题研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2013: 32-41.
- SHEN X M. Research on Container Loading Layout Optimization Based on Integer Linear Programming Method[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2013: 32-41.
- [14] 陈元文. 基于优先保持策略遗传算法的三维装箱问题[J]. 包装工程, 2021, 42(15): 211-218.
- CHEN Y W. Three-Dimensional Container Loading Problem Based on Genetic Algorithm with Priority Retention Strategy[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(15): 211-218.
- [15] 邢志伟, 侯翔开, 李彪, 等. 基于动态四叉树搜索的民航行李车码放算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2022, 48(12): 2345-2355.
- XING Z W, HOU X K, LI B, et al. Civil Aviation Luggage Cart Stacking Algorithm Based on Dynamic Quadtree Search[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2022, 48(12): 2345-2355.
- [16] 张长勇, 张倩倩, 翟一鸣, 等. 基于改进粒子群算法的航空行李在线装载优化[J]. 包装工程, 2021, 42(21): 200-206.
- ZHANG C Y, ZHANG Q Q, ZHAI Y M, et al. Online Luggage Loading Optimization Based on Improved Particle Swarm Algorithm[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(21): 200-206.