

模块化拆解叉车结构分析货物特征对平衡重叉车稳定性的影响

赵 薇¹, 马玉猛¹, 刘书畅¹, 赵家旺¹, 侯少毅², 陆军伟², 袁奕雯^{2*}

¹上海理工大学机械工程学院, 上海

²上海市特种设备监督检验技术研究院, 上海

收稿日期: 2025年3月8日; 录用日期: 2025年4月1日; 发布日期: 2025年4月11日

摘 要

随着物流产业的发展, 叉车作为运输物料的重要设备, 具有很强的机动性和灵活性, 其应用场景越来越广泛, 发展前景越来越大, 然而叉车稳定性不足造成的叉车事故频发, 甚至严重影响货物及人身安全, 迫切需要合理评估叉车在各种使用工况下的稳定性问题, 为叉车事故责任鉴定及叉车安全使用提供理论支撑。本研究基于模块化拆解方法系统探究了货物特征、行驶工况等因素对平衡重叉车稳定性(横向稳定性、纵向稳定性)影响。本研究通过理论计算叉车纵向和横向所受合力矩的大小来判断其是否处于稳定状态, 即理论认为 $M_{\text{合}} = M_{\text{重}} - M_{\text{倾}} \geq 0$ 时叉车处于稳定状态。研究结果发现在静止或水平路面匀速运动状况下, 随着货物质量的增加, 叉车纵向合力矩大小逐渐减小, 即纵向稳定性降低; 随着货物质心偏离其中中心线距离的增加, 叉车横向合力矩大小逐渐减小, 即横向稳定性降低。综上所述, 本实验结果表明, 货物重量主要通过影响叉车的纵向稳定性来影响叉车稳定性, 而货物质心的偏移程度和货物质心高度主要影响叉车的横向稳定性来影响叉车的稳定性。基于上述研究结果, 本研究可较好地稳定性相关的叉车事故快速鉴定及安全使用提供基础理论数据, 为叉车结构改进与安全使用贡献应用技术的支撑。

关键词

叉车横向稳定性, 叉车纵向稳定性, 模块化拆解方法

Rapid and Accurate Stability Evaluation of Counterweight Forklift with Masts Based on Modular Dismantling Method

Wei Zhao¹, Yumeng Ma¹, Shuchang Liu¹, Jiawang Zhao¹, Shaoyi Hou²,
Junwei Lu², Yiwen Yuan^{2*}

¹School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

²Shanghai Institute of Special Equipment Inspection and Technical, Shanghai

*通讯作者。

文章引用: 赵薇, 马玉猛, 刘书畅, 赵家旺, 侯少毅, 陆军伟, 袁奕雯. 模块化拆解叉车结构分析货物特征对平衡重叉车稳定性的影响[J]. 建模与仿真, 2025, 14(4): 195-204. DOI: 10.12677/mos.2025.144278

Abstract

As one of the most common equipment for material transportation, counterbalanced trucks with mast have remarkable mobility and high flexibility, which are applied in various scenarios with expanding developmental prospects. However, with the inadequate stability, the forklifts are prone to accidents, even more posing significant risks to both goods and individuals. It is urgent to reasonably evaluate the stability of forklift under various operating conditions to provide theoretical support for forklift accident liability identification and safe use. Based on the modular disassembly method, the multiple effects of cargo characteristics and road running modes on the stability of counterbalanced forklifts through the theoretical calculations of resultant moments in the transversal directions or the longitudinal directions have been systematically investigated in the present work. It is theorized that when the stability moment of the whole forklift is greater than the overturning moment ($M = M_s - M_t \geq 0$), the forklift is in a stable state. The results revealed that the longitudinal resultant moment was decreased gradually with the increase of cargo weight when forklifts were stopped or running in a constant velocity on the horizontally surfaces. And as the distance between the cargo's center of gravity and the centerline of pallet fork was increased, the transverse resultant moment was also decreased. In conclusion, the experimental results of this study demonstrate that the weight of goods primarily influences the longitudinal stability of the forklift, thereby affecting its overall stability. Meanwhile, the offset and height of the center of gravity of the goods predominantly impact the lateral stability of the forklift, which in turn plays a critical role in determining its overall stability. The above results could provide basic theoretical data for the rapid identification and safe use of forklift truck accidents related to stability, and contribute to the technical support for the improvement of forklift truck structure and safe use.

Keywords

Lateral Stability of Forklift Truck, Forklift Longitudinal Stability, Modular Dismantling Method

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

平衡重叉车作为最常用的物料运输设备之一,具有显著的机动性和较高的灵活性,应用于各种场合,发展前景广阔。然而叉车稳定性不足造成叉车事故频发,甚至严重影响货物及人身安全,迫切需要合理评估叉车在各种使用工况下的稳定性问题,为叉车事故责任鉴定及叉车安全使用提供理论支撑。

一般在叉车的设计过程中需要综合考虑叉车的横向稳定性和纵向稳定性,这样才能保证叉车在运行过程中不会侧翻。为此,人们围绕如何准确计算叉车的稳定极限临界值展开了大量的研究。Cheema 等人[1]研究了载荷、轴距尺寸、车速、配重和前叉倾斜角度对叉车稳定性的影响,使人们对叉车的稳定性有了更深入的了解,有助于改进叉车设计。Rebelle 等人[2]开发了一个预测叉车倾覆的数值模型,可以将该模型作为一种工具来促进设计、培训和制定安全标准,以减少事故发生。Lemerle 等人[3]基于最大速度、重心位置、后桥设计特征和轮胎性能等影响参数的多体系统方法,揭示了转弯速度过大是造成叉车侧翻事故的主要原因之一。Leonardo 等人[4]以平衡重叉车的稳定性作为评价指标,构建了一种可互换设备进行装配的分析方法,该方法在实验测试中更容易执行、成本更低、耗时更短,特别是其无需对所有组件

建模, 只需对可互换设备及其预期负载进行建模。此外, Michele 等人[5]还使用多体模型来评估平衡重叉车的稳定性, 考虑了轮胎和配重组件, 这不仅可以减少一定的实验测试, 还促进了配件改良设计, 有助于在新产品设计的早期阶段提供理论支持。此外, 平衡重式叉车的数值多体模型还用于评估零负载和满负载情况下的横向稳定性, 为横向稳定性的增强控制提供了一些参考[6]。同时, 数值多体模型还可用于评估叉车家族在制造商测试协议定义的参考操作周期内所经历的动态应力[7]。杜克通过综合分析影响平衡重叉车横向稳定性的主要因素, 用 Simulink 仿真得到质心侧偏角和质心侧偏角速度相图, 根据相平面的相轨迹划分稳定性区域, 为叉车横向稳定性研究和控制提供依据[8]。姜梦平选取某型 3 吨平衡重叉车作为研究对象, 分析了叉车在空载、满载和不同举升高度工况时, 整车的横向稳定性[9]。吴宝贵等分析了叉车货物举升过程中门架铰链连接处受力情况, 分析了偏载和对称载荷下铰孔受力, 仿真分析了叉车的失稳过程, 提供了一种用于研究叉车稳定性的仿真分析方法[10]。李晓豁与吴信丽等人对电动叉车动静态稳定性失稳机理进行了研究, 提出了矢量特征法、多体解法等多种质心计算方法, 对认识叉车失稳机理具有重要参考价值[11]-[13]。谢海在建立叉车虚拟模型与数学模型的基础上, 提出了两种横向稳定控制策略, 并进行叉车横向稳定性控制, 降低了叉车侧翻概率, 提高了叉车在极限工况下的安全性[14]。陈璜与严世裕运用 Adams 创建叉车动力学仿真模型, 分析货叉载荷、路面倾斜角度和货叉升降速度对叉车稳定性的影响[15]。根据上述研究结果可以发现, 准确的叉车稳定性表征不仅对叉车的结构设计和使用具有较高的研究价值, 而且有助于识别叉车事故原因, 使事故评价者能够从根本原因确定事故责任。

虽然许多研究者对叉车的横向稳定性和纵向稳定性进行了大量的研究工作, 但是在多货物特性下快速准确表征叉车稳定性的问题还没有得到很好的解决, 特别是由于货物偏心引起的叉车稳定性变化问题给操作人员、叉车和货物埋下了严重的隐患。因此, 本研究基于模块化拆卸方法, 通过横向和纵向合成力矩的理论计算, 系统研究了货物特性对平衡重叉车稳定性的影响。

2. 模块化拆解叉车结构及叉车系统重心位置确定

2.1. 模块化拆解叉车方法介绍

本文以国产载重 3 吨内燃式平衡重叉车为例, 考虑到载重叉车的结构特点、材料特征和运动特征等因素, 将叉车的结构拆解为三个核心部分: 车身、前叉和货物。首先, 车身作为叉车的主体框架, 承载着整个叉车的重量和稳定性, 它由坚固耐用的材料构建而成, 且系统质心位置恒定不变。其次, 前叉是叉车的重要组成部分, 位于车身体前方, 通常由坚硬的金属材料制成, 具有强大的承载能力和抗压能力, 可以上下移动, 用于插入和举起货物, 以及在搬运过程中提供稳定支撑, 本文不考虑前叉部分在叉车作业过程中仰角变化, 因此可近似认为前叉的质心位置仅在 Z 轴方向变化。最后, 货物部分是叉车进行搬运和运输的核心, 它可以是各种形状和尺寸的货物, 例如托盘、箱子、货物堆栈等。通常情况下货物部分的质心位置在 X 轴、Y 轴、Z 轴三个方向均可变化。

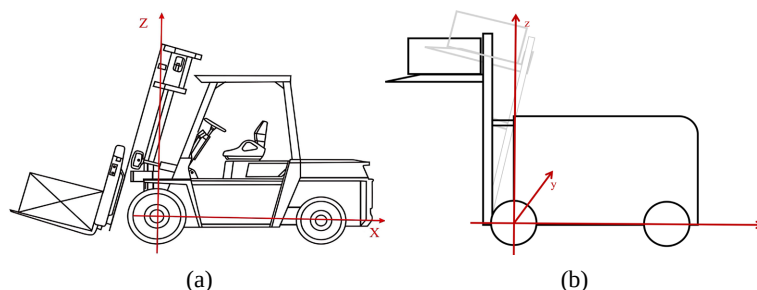


Figure 1. (a) Schematic diagram of a counterbalanced forklift; (b) Diagram of a counterbalanced forklift
图 1. (a) 平衡式叉车示意图; (b) 平衡式叉车简化模型示意图

将叉车结构模块化拆解为车身、前叉和货物三部分，当叉车零部件布置方案确定以后，可以确定各零部件的质量以及零部件的重心在叉车上的位置，进而确定叉车的重心位置。建立如图 1(b)所示，以叉车前桥中心为坐标原点，叉车水平、竖直方向为 X 轴、Z 轴，过原点且垂直于 XOZ 坐标平面方向为 Y 轴，叉车向后、向里、向上分别为 X 轴、Y 轴、Z 轴的正方向的空间坐标系。叉车在设计过程中各零部件要对称布置，即叉车的重心位于 XOZ 坐标系平面内(叉车车体和前叉的 y 坐标均为 0)。根据合力矩等于所有分力矩之和的原理建立求解叉车合成重心位置的方程，可以得到叉车车体合成重心的位置坐标和前叉合成重心的位置坐标。

叉车车体 x、y 轴方向上合力力矩：

$$\sum M_x = g_1 \cdot x_{g1} + g_2 \cdot x_{g2} + \cdots + g_n \cdot x_{gn} = G_0 \cdot x_0 \quad (1)$$

$$\sum M_z = g_1 \cdot z_{g1} + g_2 \cdot z_{g2} + \cdots + g_n \cdot z_{gn} = G_0 \cdot z_0 \quad (2)$$

$g_1, g_2, \cdots, g_n$ ：叉车车体各零部件的重量

$x_1, x_2, \cdots, x_n$ ：叉车车体各零部件重心水平坐标

$z_1, z_2, \cdots, z_n$ ：叉车车体各零部件重心垂直坐标

G_0 为叉车车体总重量

由式(1)和(2)可算出叉车车体合成重心的位置坐标 (x_0, y_0, z_0) ：

$$x_0 = \frac{\sum M_x}{G_0} \quad y_0 = 0 \quad z_0 = \frac{\sum M_z}{G_0} \quad (3)$$

叉车前叉部分 x、y 轴方向上合力力矩：

$$\sum M_x = f_1 \cdot x_{f1} + f_2 \cdot x_{f2} + \cdots + f_n \cdot x_{fn} = G_2 \cdot x_2 \quad (4)$$

$$\sum M_z = f_1 \cdot z_{f1} + f_2 \cdot z_{f2} + \cdots + f_n \cdot z_{fn} = G_2 \cdot z_2 \quad (5)$$

$f_1, f_2, \cdots, f_n$ ：叉车前叉各零部件的重量

$x_{f1}, x_{f2}, \cdots, x_{fn}$ ：叉车前叉各零部件重心水平坐标

$z_{f1}, z_{f2}, \cdots, z_{fn}$ ：叉车前叉门架直立起升不同高度时对应的各零部件重心垂直坐标

G_1 为货物总重量

G_2 为叉车前叉部分总重量

由式(5)和(6)可算出叉车前叉部分合成重心的位置坐标 (x_2, y_2, z_2) ：

$$x_2 = \frac{\sum M_x}{G_2} \quad y_2 = 0 \quad z_2 = \frac{\sum M_z}{G_2} \quad (6)$$

最后，自定义给出货物的质心位置坐标 (x_1, y_1, z_1) ，通过不同参数的赋予实现对不同货物质心位置的模拟，计算可得叉车系统的合质心位置 (x, y, z) [9]：

$$\begin{cases} x = \frac{G_0 \cdot x_0 + G_1 \cdot x_1 + G_2 \cdot x_2}{G_0 + G_1 + G_2} \\ y = \frac{G_0 \cdot y_0 + G_1 \cdot y_1 + G_2 \cdot y_2}{G_0 + G_1 + G_2} \\ z = \frac{G_0 \cdot z_0 + G_1 \cdot z_1 + G_2 \cdot z_2}{G_0 + G_1 + G_2} \end{cases} \quad (7)$$

2.2. 叉车稳定性的判断

在模块化拆解叉车结构后，我们将平衡重叉车失稳情况主要分为如图 2 所示的三种情况，即由货物

偏心引起的叉车横向失稳、货物质心前移引起的叉车纵向失稳以及货物质心高度变化引起的叉车纵向失稳[16]。我们通过理论计算叉车整体受到的合力矩 M 来判断其是否处于稳定, 即叉车整体所受稳定性力矩 M_s 大于其所受倾覆力矩 M_t , 即 $M = M_s - M_t \geq 0$ 。该判断依据结合了稳定系数法和质心法这两种常规的叉车稳定性判断方法, 通过力矩的平衡关系, 建立平衡方程计算平衡重叉车的横向、纵向稳定性能力, 此方法被广泛应用于叉车稳定性分析与控制类研究, 但是受叉车规格等多种因素影响, 不同叉车不同作业情况下其倾覆阈值有所不同, 故稳定性合力矩大小的评判数值目前没有明确的标准规定, 即在合力矩小于零的一定范围内叉车可能并没有发生完全侧翻, 仅处于为局部失稳状态, 此时如果叉车遇到颠簸碰撞情况则极易发生倾覆, 本文仅通过该判据做粗略判断, 来分析不同货物特征对平衡重叉车稳定性影响的分析。

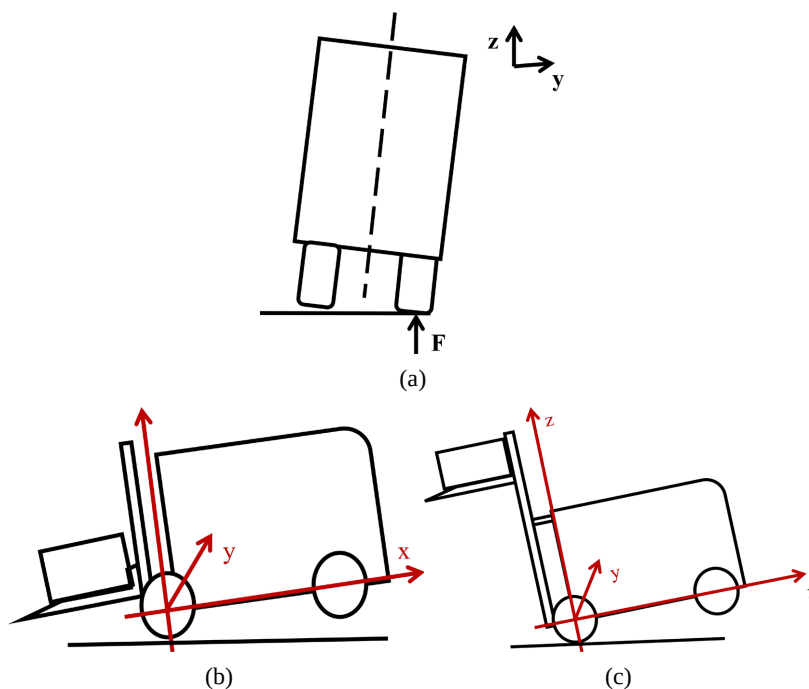


Figure 2. (a) lateral instability of the forklift caused by the eccentricity of the cargos; (b) longitudinal instability of the forklift caused by the forward movement of the center of mass of the cargos; (c) longitudinal instability of the forklift caused by the change of the height of the center of mass of the cargos

图 2. (a) 货物偏心引起的叉车横向失稳; (b) 货物质心前移引起的叉车纵向失稳; (c) 货物质心高度变化引起的叉车纵向失稳

2.3. 平衡重叉车稳定性区域及失稳情况分析

平衡重式叉车由于车架与转向桥特殊铰接结构导致相对摆动、门架起升或倾斜、所载货物质心偏移等因素影响, 整车联合质心位置总在实时改变, 如图 3(a)所示为平衡重式叉车结构支承简图, 四轮接地点 A、B、C、D 所组成的平面即叉车行驶平面。在叉车静止堆垛或举升货物时, 液压油缸锁定, 此时叉车稳定性区域如图 3(a)所示, 为 ABCD 平面, 可认为当整车联合质心位置在平面 ABCD 范围内时, 稳定性较好; 当整车联合质心位置在支承平面形成的稳定区域 ABCD 之外, 叉车就可能失稳甚至倾覆。而当叉车在转弯或做变速运动时, 由于液压支撑油缸未锁定, 平衡重叉车车体与转向桥上纵向铰轴连接, 形成易于小幅摆动的独特铰接结构, 此时平衡重叉车稳定性区域如图 3(b)所示, 为 ABE 平面, 可认为当整

车联合质心位置在车体与转向桥铰接形成的稳定性平面 ABE 范围内时, 稳定性较好; 当整车联合质心位置稳定区域 ABE 之外, 叉车就可能横向失稳甚至倾覆[17] [18]。

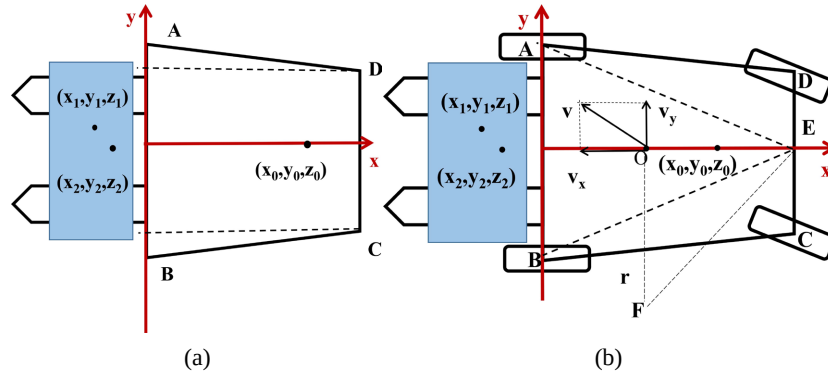


Figure 3. Diagram of forklift stability area: (a) The hydraulic cylinder is locked; (b) The hydraulic cylinder is not locked, the F in the figure represents the centripetal force of the forklift when it turns

图 3. 叉车稳定区示意图: (a) 液压缸锁紧; (b) 液压缸未锁紧, 图中的 F 表示叉车转弯时的向心力

2.4. 多种情况下模拟计算叉车所受合力矩

因此要提高叉车的横向稳定性, 需要控制整车联合质心位置处于稳定区域之内, 而在诸多因素影响下, 整车联合质心位置实际很难把握。为进一步分析货物质心变化引起系统联合质心位置的变化情况, 需要计算不同货物质心位置和叉车运动状态下叉车各部分所受合力关于倾覆边界 y 轴、AD (静止或匀速直线运动时)或 AE (转弯时)所在延长线的合力矩大小。

静止/匀速直线运动状态下叉车纵向所受合力矩计算:

$$\begin{cases} M_s = G_0 \cdot x_0 \\ M_t = F \cdot C + G_1 \cdot |x_1| + G_2 \cdot |x_2| \\ M = G_0 \cdot x_0 - (F \cdot C + G_1 \cdot |x_1| + G_2 \cdot |x_2|) \end{cases} \quad (8)$$

静止/匀速状况下, 货物质心不存在偏离, 叉车横向所受合力矩计算:

$$\begin{cases} M_s = (G_0 \cdot x_0 + G_1 \cdot x_1 + G_2 \cdot x_2) \cdot \cos \frac{A-B}{2 \cdot C} \\ M_t = F \cdot y \cdot \cos \frac{A-B}{2 \cdot C} \\ M = (G_0 \cdot x_0 + G_1 \cdot x_1 + G_2 \cdot x_2 - F \cdot y) \cdot \cos \frac{A-B}{2 \cdot C} \end{cases} \quad (9)$$

若货物偏心距为 e , 则叉车横向所受合力矩计算:

$$\begin{cases} M_s = \left\{ G_0 \cdot x_0 + G_1 \cdot \left[(|x_1| + C) \cdot \tan \frac{A-B}{2 \cdot C} - (y_1 + e) \right] + G_2 \cdot y_2 \right\} \cdot \cos \frac{A-B}{2 \cdot C} \\ M_t = F \cdot y \cdot \cos \frac{A-B}{2 \cdot C} \\ M = \left\{ G_0 \cdot x_0 + G_1 \cdot \left[(|x_1| + C) \cdot \tan \frac{A-B}{2 \cdot C} - (y_1 + e) \right] + G_2 \cdot y_2 - F \cdot y \right\} \cdot \cos \frac{A-B}{2 \cdot C} \end{cases} \quad (10)$$

其中当 $(|x_1| + C) \cdot \tan \frac{A-B}{2 \cdot C} - (y_1 + e) < 0$ 时:

$$\begin{cases} M_s = (G_0 \cdot y_0 + G_2 \cdot y_2) \cdot \cos \frac{A-B}{2 \cdot C} \\ M_t = F \cdot y \cdot \cos \frac{A-B}{2 \cdot C} - G_1 \cdot \left[(|x_1| + C) \cdot \tan \frac{A-B}{2 \cdot C} - (y_1 + e) \right] \cdot \cos \frac{A-B}{2 \cdot C} \\ M = (G_0 \cdot y_0 + G_2 \cdot y_2) \cdot \cos \frac{A-B}{2 \cdot C} - F \cdot y \cdot \cos \frac{A-B}{2 \cdot C} + G_1 \cdot \left[(|x_1| + C) \cdot \tan \frac{A-B}{2 \cdot C} - (y_1 + e) \right] \cdot \cos \frac{A-B}{2 \cdot C} \end{cases} \quad (11)$$

A: 叉车前轮轴距(mm)

B: 叉车后轮轴距(mm)

C: 叉车前后轮轴间距(mm)

2.5. 试验计算与数据分析

通过上述理论计算公式搭建, 基于 Python 进行数据处理, 基本参数设定见表 1。通过嵌套循环来模拟叉车作业的不同情况, 计算合力矩, 最后通过绘图直观体现变量对叉车稳定性的影响。

Table 1. Basic parameters of forklift truck

表 1. 叉车基本参数

车身重量(m)	3000 (kg)
前叉部分重量(m ₁)	800 (kg)
叉车前轮轴距(A)	1000 (mm)
叉车后轮轴距(B)	970 (mm)
叉车前后桥间距(C)	170 (mm)
叉车车身的坐标位置	(1,500,350) (mm)
叉车前叉部分坐标位置	(-4,000,100) (mm)

3. 结果与讨论

3.1. 叉车静止时纵向稳定性分析

对平衡重叉车静止时纵向稳定性分析, 按公式(8), 分析货物质心高度和货物质量对平衡重叉车纵向合力矩大小的影响, 如图 4 所示, 货物质量的增加和货物质心高度的增加会使平衡重叉车纵向合力矩大小显著降低; 图 4(a)表明货物质心高度的变化与叉车稳定性之间存在一定的线性关系: 相同质量的货物, 质心位置越高, 叉车纵向合力矩越小; 相同质心位置的货物质量越大, 纵向合力矩越小; 从图 4(b)可以明显观察到货物质心前移距离的变化与叉车稳定性之间存在一定的线性关系: 相同质量货物质心前移距离越大, 纵向合力矩越小。

3.2. 叉车静止时横向稳定性分析

对平衡重叉车静止时横向稳定性分析, 按公式(9), 分析货物质心偏移距离和货物质量对平衡重叉车横向稳定性的影响, 如图 5 所示, 货物质量的增加和货物质心偏移距离的增加会使平衡重叉车横向稳定性降低; 从图 5(a)可以明显观察到货物质量的变化与叉车稳定性之间存在一定的线性关系: 质心偏移距离相同的货物, 货物质量越大, 叉车横向合力矩越小; 如图 5(b)所示, 相同质量的货物, 质心偏移距离越

大, 纵向合力矩越小, 偏移距离超过横向稳定区域边界($e = 0.5 \text{ m}$ 处)后, 三个不同质量的货物都引起叉车整体横向合力小于零, 即理论处于失稳状态。

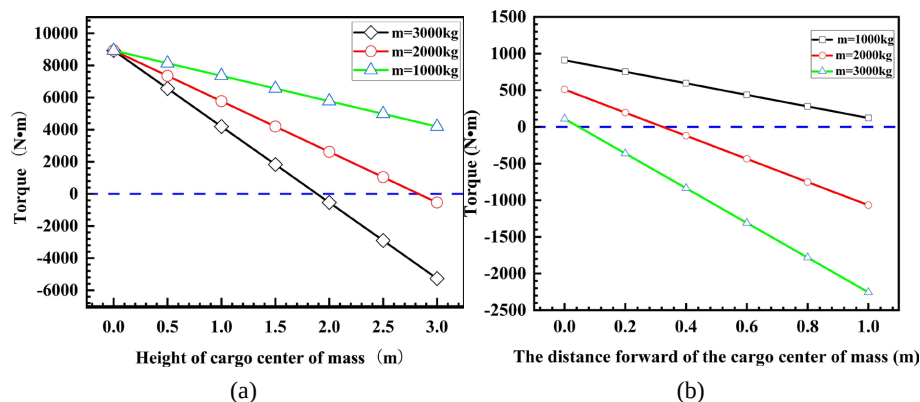


Figure 4. (a) Effects of load height on longitudinal stability; (b) Effects of the distance forward of the center of mass of the goods

图 4. (a) 质心高度对叉车纵向稳定性的影响; (b) 货物质心前移距离对叉车纵向稳定性的影响

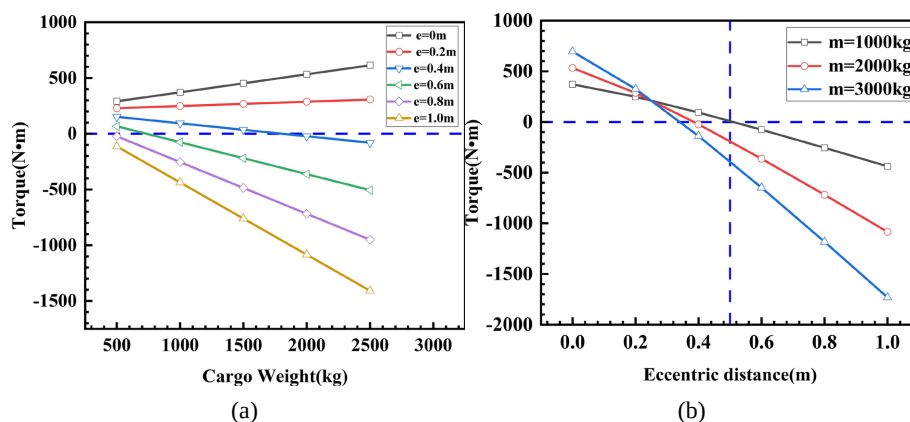


Figure 5. (a) Effects of cargo weight on lateral stability; (b) Effects of the eccentric distance of the center of mass of the cargo on lateral stability

图 5. (a) 货物重量对叉车横向稳定性的影响; (b) 货物质心偏心距离对叉车横向稳定性的影响

对平衡重叉车静止时横向稳定性分析, 按公式(10) (11), 分析一定质量($m = 2000 \text{ kg}$)的货物质心高度和质心偏移距离对平衡重叉车横向稳定性的影响: 如图 6 所示, 货物质心高度的增加和货物质心偏移距离的增加会使平衡重叉车横向稳定性降低; 从图 6(a)可以明显观察到货物质心高度的变化与叉车横向稳定性之间存在一定的线性关系: 质心偏移距离相同的货物, 货物质心高度越大, 叉车横向合力矩越小; 图 6(b)可以明显观察到相同质心高度的货物, 质心偏移距离越大, 横向合力矩越小, 偏移距离超过横向稳定区域边界($e = 0.5 \text{ m}$ 处)后, 图示六个不同质心高度的货物都引起叉车整体横向合力小于零, 即理论处于失稳状态。

4. 结论

本文首先在叉车结构基础上, 结合叉车运行过程中的系统质心的变化, 提出了一种模块化拆解叉车结构, 精准分析货物特征对平衡重叉车纵向稳定性和横向稳定性影响的方法。研究结果发现在叉车静止

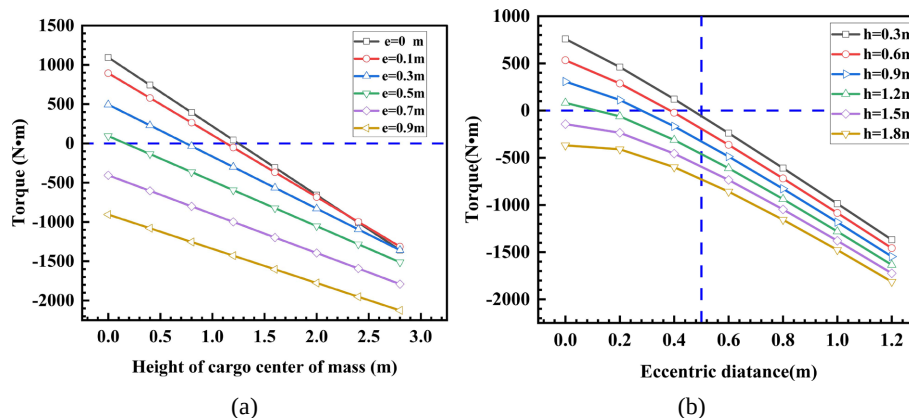


Figure 6. (a) Effects of load height on lateral stability; (b) Effects of eccentric distance on lateral stability

图 6. (a) 荷载高度对横向稳定性的影响; (b) 偏心距的影响

状况下,随着货物质量的增加,叉车纵向合力矩逐渐减小;而随着货物质心偏离其中心线距离的增加,叉车横向合力矩大小逐渐减小。由此可见,货物重量主要通过影响叉车的纵向稳定性来影响叉车稳定性,而货物质心的偏移程度和载荷高度主要通过影响叉车的横向稳定性来影响叉车的稳定性。

基金项目

上海市市场监管局科研计划(2024-48)。

参考文献

- [1] Cheema, S. and Sepehri, N. (2002) Computer Aided Stability and Safety Analysis of Forklifts. *IEEE Proceedings of the 5th Biannual World Automation Congress*, Orlando, 9-13 June 2002, 297-302.
- [2] Rebelle, J., Mistrot, P. and Poirot, R. (2009) Development and Validation of a Numerical Model for Predicting Forklift Truck Tip-Over. *Vehicle System Dynamics*, **47**, 771-804. <https://doi.org/10.1080/00423110802381216>
- [3] Lemerle, P., Höppner, O. and Rebelle, J. (2011) Dynamic Stability of Forklift Trucks in Cornering Situations: Parametrical Analysis Using a Driving Simulator. *Vehicle System Dynamics*, **49**, 1673-1693. <https://doi.org/10.1080/00423114.2010.532557>
- [4] Vita, L. and Gattamelata, D. (2023) Analytical Method for Assessing Stability of a Counterbalanced Forklift Truck Assembled with Interchangeable Equipment. *Applied Sciences*, **13**, Article No. 1206. <https://doi.org/10.3390/app13021206>
- [5] Gardella, M. and Martini, A. (2019) Multibody Models and Simulations to Assess the Stability of Counterbalance Forklift Trucks. In: Kecskeméthy, A. and Flores, F.G., Eds., *Multibody Dynamics 2019*, Springer International Publishing, 526-533. https://doi.org/10.1007/978-3-030-23132-3_63
- [6] Xia, G., Tang, X.W., Hu, J.F. and Liu, Z.Q. (2013) Adams-Based Simulation Study on Lateral Stability of Counterbalanced Forklift Trucks. *Applied Mechanics and Materials*, **464**, 105-109. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.464.105>
- [7] Martini, A., Bonelli, G.P. and Rivola, A. (2020) Virtual Testing of Counterbalance Forklift Trucks: Implementation and Experimental Validation of a Numerical Multibody Model. *Machines*, **8**, Article No. 26. <https://doi.org/10.3390/machines8020026>
- [8] 杜克. 基于相平面和侧倾分级控制的平衡重式叉车横向稳定性研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2018: 43-46.
- [9] 姜梦平. 基于主动后轮转向的平衡重叉车横向稳定性研究[D]: [硕士学位论文]. 厦门: 厦门理工学院, 2017.
- [10] 吴宝贵, 闫书法, 李绍平, 等. 基于虚拟样机技术的叉车仿真试验[J]. 机械设计, 2016, 33(4): 38-41.
- [11] 李晓豁. 万向电动叉车静态稳定性的多体解法[J]. 黑龙江科技学院学报, 2005, 15(4): 201-202.
- [12] 李晓豁. 电动叉车静态稳定性的动静分析法[J]. 黑龙江科技学院学报, 2004, 14(5): 287-289.

- [13] 吴信丽, 章文誉. 基于数据库的平衡重叉车稳定性计算[J]. 叉车技术, 2014(2): 17-21.
- [14] 谢海. 平衡重式叉车主动安全技术研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2018: 74-76.
- [15] 陈璜, 严世榕. 基于 Adams 的叉车稳定性分析[J]. 机械制造与自动化, 2015, 44(4): 108-111.
- [16] 高向革, 陈晓勇, 吴晶, 马玉琳. 叉车稳定性影响因素及应对措施分析[J]. 机电工程技术, 2023, 52(8): 299-302.
- [17] 张洋. 平衡重式叉车防侧翻控制研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2020.
- [18] 黄帅. 基于联合仿真的平衡重式叉车横向稳定性控制研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.