

# 叉车曲柄滑块式转向机构优化设计

马玉猛<sup>1</sup>, 侯少毅<sup>2</sup>, 陆军伟<sup>2</sup>, 袁奕雯<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>上海理工大学机械工程学院, 上海

<sup>2</sup>上海市特种设备监督检验技术研究院, 上海

收稿日期: 2024年8月21日; 录用日期: 2024年9月17日; 发布日期: 2024年9月24日

## 摘要

随着经济的飞速发展, 叉车普及率越来越高, 遍及国民经济的各行各业。叉车作业特点是高频率的转向工况。因此叉车转向机构对叉车性能十分重要。叉车转向机构的左右轮转角误差过大, 将会导致叉车轮胎磨损加剧, 使用寿命减少。为降低轮胎磨损, 提高叉车转向效率, 对转向机构进行优化设计。本文拟采用adams软件对曲柄滑块式转向机构进行建模, 对转向节臂长、转向节臂初始角、连杆长度、液压缸偏距四个参数创建设计变量, 并采用设计点坐标的方式对转向机构六个关键点进行参数化。以理论车轮外转角与实际车轮外转角的平均误差为目标函数, 先对4个变量单独进行设计研究, 再整体进行优化设计。结果表明优化后的转向机构, 最大误差减小6°, 误差最大为1.81°, 平均误差减小了81.1%。

## 关键词

叉车, 曲柄滑块式, 优化设计

# Optimisation of Crank-Slider Steering Mechanism for Forklift Trucks

Yumeng Ma<sup>1</sup>, Shaoyi Hou<sup>2</sup>, Junwei Lu<sup>2</sup>, Yiwen Yuan<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

<sup>2</sup>Shanghai Institute of Special Equipment Inspection and Technical, Shanghai

Received: Aug. 21<sup>st</sup>, 2024; accepted: Sep. 17<sup>th</sup>, 2024; published: Sep. 24<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

With the rapid development of the economy, the forklift trucks are becoming more and more popular, all over the national economy in all walks of life. Forklift operations are characterised by high-frequency steering conditions. Therefore, the forklift steering mechanism is very important to the

\*通讯作者。

文章引用: 马玉猛, 侯少毅, 陆军伟, 袁奕雯. 叉车曲柄滑块式转向机构优化设计[J]. 建模与仿真, 2024, 13(5): 5579-5585.  
DOI: 10.12677/mos.2024.135505

forklift performance. Excessive errors in the left and right wheel angles of the forklift steering mechanism will result in increased wear and reduced service life of the forklift tyres. In order to reduce tyre wear and improve forklift steering efficiency, the steering mechanism is optimally designed. This paper proposes to model the crank-slider steering mechanism using adams software, create design variables for four parameters: steering knuckle arm length, steering knuckle arm initial angle, connecting rod length, hydraulic cylinder offset, and parameterise six key points of the steering mechanism using design point coordinates. Taking the average error between the theoretical wheel external rotation angle and the actual wheel external rotation angle as the objective function, the four variables were designed and studied individually, and then optimised as a whole. The results indicate that the optimised steering mechanism has a maximum error reduction of  $6^\circ$ , with a maximum error of  $1.81^\circ$  and an average error reduction of 81.1%.

## Keywords

Forklift Trucks, Crank Slider Type, Optimised Design

Copyright © 2024 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

随着经济的飞速发展，叉车普及率越来越高，遍及国民经济的各行各业。叉车为现场设备，工作地点大多限定在生产车间、储存库、货运站及码头等有很多大件物品需要集散、搬运的地方。它的工作内容是装卸货物、堆垛以及场内短距离的搬运。叉车工作场地一般比较狭窄，搬货、作业频繁。均需多次转向因此转向系统作业十分繁忙。转向机构是叉车重要的核心部件，其作用是控制车辆行驶方向。在叉车转向机构中，由于曲柄滑块式转向机构转向性能优良，使用该机构制造的转向桥结构紧凑、可以输出较大转向力矩，该机构在叉车整车设计中得到了广泛应用[1]。低频率的直线行驶、高频率的转向是叉车作业主要特点，频繁的转向会造成叉车轮胎寿命大大缩短[2]。转向机构间的转角误差大，会造成轮胎磨损加剧，影响叉车转向性能。

目前国内学者对于叉车转向机构做了许多研究。王玲[3]等人针对某型平衡重式叉车所采用的横置液压缸转向桥故障频繁的问题，特别是转向液压缸活塞杆内漏等故障较多的情况，分别从转向桥体结构和转向液压缸结构两方面进行研究，提出改进腹板加工方式、控制转向液压缸安装表面加工平面精度、改进转向液压缸内部结构等优化改进方法。关亮亮[4]等人在 SolidWorks 中建立装配模型，并对其进行运动学仿真，进而验证所设计的转向系统基本符合设计要求，不仅在极限转向过程中基本满足四轮做纯滚动的要求。通过模拟仿真还发现转向机构的对称性，即同一极限位置的时候，左右转向节的极限转角与单个转向节处于两个极限位置时的转角相同。陈仕胜[5]等人在 adams 中建模，再通过 isight 软件采用多岛遗传算法对横置液压缸式转向桥进行了灵敏度分析。张增密[6]等人对叉车曲柄滑块式转向机构进行了几何、运动分析，建立了相应的数学模型，使用 MATLAB 软件对机构进行了优化分析。依据 MATLAB 中优化得到的尺寸数据，在 adams 软件中对其结构建模并进行了相应的仿真分析，优化结果减小了内外转角理论与实际的误差。马朝选[7]研究了主销内倾角对叉车转向的影响，以主销内倾角为变量，回正力矩最大为目标函数，对样机进行优化，提高回正力矩。在此基础上，本文采用 adams 建立了曲柄滑块式转向机构的参数化虚拟样机模型，并直接在 adams 软件中进行优化设计，可以更直观查看模型变化与运动状况，缩短转向机构实际研发时间，减小轮胎磨损。

## 2. 曲柄滑块式转向机构

曲柄滑块式转向机构结构紧凑，零件数目也比较少；转向桥相对独立布置起来较为方便；良好的转向特性和较小的转角误差，有利于减小转向阻力并降低轮胎磨损；传动角大，可达  $30^\circ$  左右，具有良好的机构力学特性；轻松实现更大的最大内轮转角，有利于减小叉车的最小转弯半径。如果保持原有的转弯半径不变，可以增大轴距，便于整体车辆结构的合理布置，行驶中的平顺性也会有所提高。

### 机构参数

转向机构简化模型如图 1 所示，图中各符号含义如下： $R_1$ ——转向节臂长度； $E$ ——液压油缸偏距； $M$ ——主销中心距； $F$ ——连杆长度； $\alpha_0$ ——转向节臂初始角； $D$ ——基距。机构参数少只有 4 个独立参数( $\alpha_0$ ,  $R_1$ ,  $E$ ,  $D$ )，容易设计。

本文机构具体参数选取如下：主销距  $M = 810$  mm、节臂初始角  $\alpha_0 = 93^\circ$ 、转向节臂长  $R_1 = 107$  mm 液压油缸偏距  $E = 56.7$  mm、连杆长  $F = 95.2$  mm。

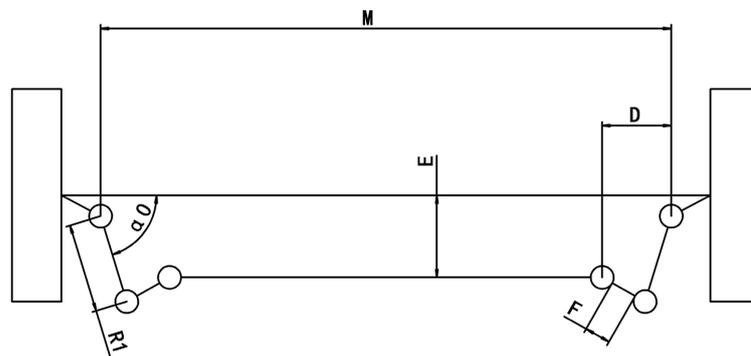


Figure 1. Schematic diagram of steering mechanism  
图 1. 转向机构示意图

## 3. 转向机构参数化模型建立

叉车设计过程有重复性劳动量大、开发周期长和成本高的缺点。因此直接通过 adams/view 中自带的零件库建立转向机构模型，并创建相应的设计变量进行模型参数化。同时也方便进行优化设计。转向机构主要是由转向桥体、转向节臂、连杆和转向液压油缸等组成的 6 连杆机构，其中转向桥体和转向油缸固定。

### 3.1. 转向机构部件建模

以零件库中的连杆作为基础，通过设计点坐标进行相应的连接。采用参数化设计点进行建模时，只需要修改设计点的坐标，就可以达到修改模型的目的。再通过数学关系使坐标值和优化设计的设计变量相结合，最终达到修改设计变量值，进而改变模型。在点表格中建立六个设计点，根据相应数学关系[8]，确定设计点坐标。

其中设计变量 DV\_1、DV\_2、DV\_3、DV\_4，分别表示转向节臂初始角、转向节臂长，连杆长度、液压油缸偏距。

### 3.2. 约束驱动施加

根据实际各构件间的运动关系可以得到叉车转向系统中共有 6 个旋转副。其中，转向桥体与地面之间施加固定副，转向桥体分别与左右转向节臂之间施加旋转副，拉杆与转向节臂之间施加旋转副，转向

油缸与地面之间施加移动副[9]。为使转向机构运动,需对其进行驱动设置。对液压缸与转向桥体之间的移动副上施加移动驱动,通过 step 函数进行设置。建立转向机构如图 2 所示。

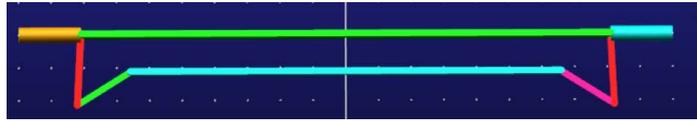


Figure 2. Steering mechanism model  
图 2. 转向机构模型

## 4. 转向机构优化设计

优化设计是从多种方案中选择最佳方案的设计方法。它以数学中的最优化理论为基础,以计算机为手段,根据设计所追求的性能目标,建立目标函数,在满足给定的各种约束条件下,寻求最优的设计方案。为使建立的转向系统尽可能满足各车轮,在转向过程中车轮轴线应相交于一点,车轮与地面间作纯滚动的理论要求。对建立好的转向机构参数化模型进行优化设计。

### 4.1. 理论转向原理

当车辆转向时,理想状态下所有车轮作纯滚动而无滑移,这意味着所有车轮的中心线交于一点,该点称为转向中心,这一定律即为阿克曼转向定律。车辆转向时,为减轻轮胎的磨损,就要使其尽量满足这一定律[10]。

叉车 4 个轮胎做纯滚动,需要满足以下关系式[11]

$$\cot \beta = \cot \alpha + M/L \quad (1)$$

其中, $\alpha$ 为内转向轮转角; $\beta$ 为外转向轮转角; $M$ 为主销间距; $L$ 为轴距。以 $\alpha$ 作为测量的车轮转角, $\beta_{理}$ 作为计算的理论车轮转角,则有

$$\beta_{理} = \arctan((L \tan \alpha)/(L + M \tan \alpha)) \quad (2)$$

叉车转向时转角误差:

$$e = |\beta_{实} - \beta_{理}| \quad (3)$$

### 4.2. 转向机构模型误差分析

误差分析要对 adams 中建立好的虚拟样机模型进行仿真,仿真时间设置为 5 s,步数设为 50。观察初始状态下的内外转角度数,以实际的内轮转角当成输入计算理论的外轮转角,再把外轮转角实际的度数并与理论计算的外轮转角度数进行对比。

因此需要先对模型建立起相应的测量函数。首先对车轮的内外转角建立测量,在转向节臂上的旋转中心建立添加到大地上的 marker 点,对位于部件上的 marker 与位于地面上的 marker 点的角度变化建立测量。然后再把内转向轮转角测量当作输入,根据理论公式建立理论转角的测量。最后把实际转角与理论转角的测量相减的绝对值建立误差测量。在建立测量时需要注意角度的单位,分清是度还是弧度,并且可以在后面乘上 1 d 来进行转换。

根据以上公式建立角度测量和误差测量,对模型进行仿真,得到最大内外转角为 79.20°、48.89°。

从图 3 可以看出,误差随着时间(即车轮转角)增大,总体呈现上升趋势。平均误差为 3.68°,最大误差 7.8°。因此为提高转向系统转向性能,需要进行优化设计。

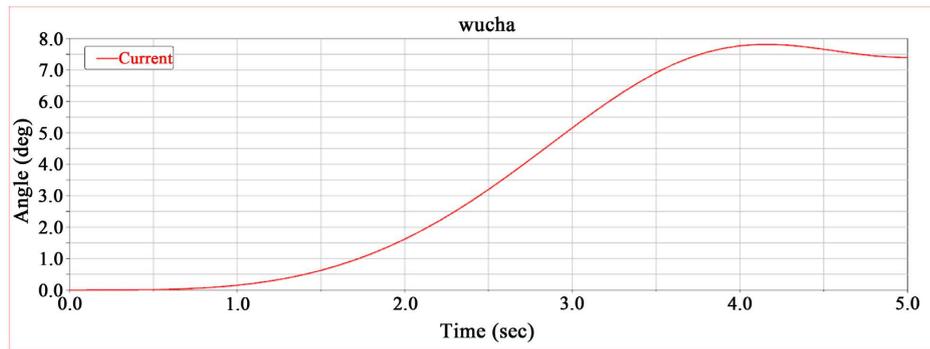


Figure 3. Theoretical and practical errors

图 3. 理论与实际误差

### 4.3. 优化设计

优化变量的选择主要考虑结构参数的设计目标及约束，但过多的设计变量也会增添仿真分析和优化迭代过程的复杂性。曲柄滑块式转向桥运动关系复杂，改变某一设计参数可以提高单项性能，但也可能会对综合性能产生不良影响。因此，应合理选择变量及其数量。本文选取设计变量为 DV\_1、DV\_2、DV\_3、DV\_4，即转向节臂初始角、转向节臂长，连杆长度、液压缸偏距。约束条件初始可以考虑空间结构等因素粗略设置，再通过优化设计 - 修改反复调试，逐步缩小限制范围，最终约束如表 1 所示。

Table 1. Variable constraint scope

表 1. 变量约束范围

变量名称	约束范围
DV_1/°	90~94
DV_2/mm	106~110
DV_3/mm	95~103
DV_4/°	56~60

在优化过程中，需要引入评价参数，本文引入转角误差这一参数，即以其中一个转角为基准，分析另外一个转角理论值和实际值的偏差[11]。优化以转向机构的仿真值与理论间的误差测量的平均值为目标函数，即

$$f(x) = \left| \beta_{\text{实}} - \arctan\left(\frac{L \tan \alpha}{L + M \tan \alpha}\right) \right| \quad (4)$$

$\beta_{\text{实}}$  直接通过角度测量得到。

首先对四个变量分别做设计研究，结果中看出变量 1 转向节臂初始角、变量 2 转向节臂长随着数值的增大平均误差增大，变量 1 的设计研究结果中目标函数的最小值为 2.7048，变量 2 的目标函数最小值为 3.40993，变量 3 连杆长度、变量 4 液压缸偏距随着数值增大，平均误差减小，变量 3 目标函数最小值为 3.06142，变量 4 目标函数最小值为 2.47513。

四次设计研究中可以看出单个改变设计变量进行优化，得出的目标函数结果不太理想，最小的平均误差还是很大。因此同时对四个变量进行优化设计。

从图 4 和图 5 看出最后一次优化，平均误差小。具体优化后的结果见图 6。内轮转角最大为 74.53°，外轮转角为 53.91°，误差最大值为 1.81°，平均误差为 0.696°。相比初始时，转向节臂初始角由 93°变为 90°，减小了 3.23%；转向节臂长度由 107 mm 变为 106 mm，减小了 0.935%；连杆长度由 95.2 mm 变为 96 mm，增

加了 8.19%；液压缸偏距由 56.7 mm 变为 60 mm，增加了 5.82%。最大误差减小了 6°，平均误差减小 81.1%。

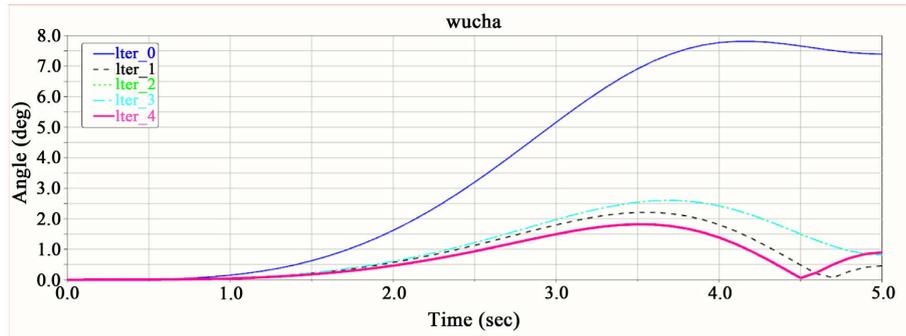


Figure 4. Plot of average error versus time in optimised design

图 4. 优化设计中的平均误差随时间关系图

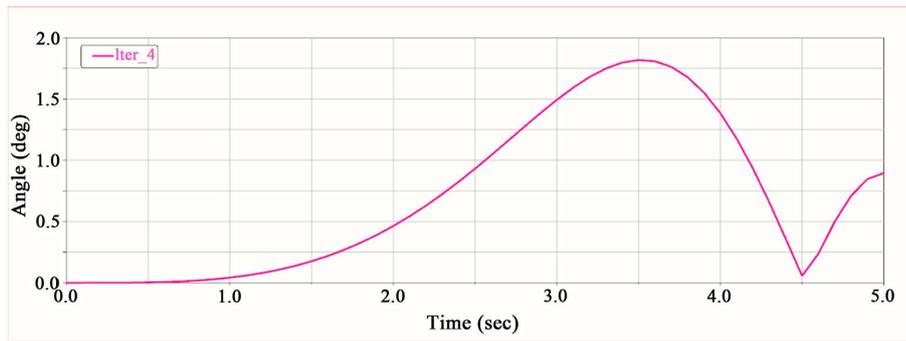


Figure 5. Plot of error versus time for optimal design

图 5. 最优设计下误差随时间关系图

目标函数

01) OBJECTIVE\_4  
 单位 : deg  
 初始值 : 3.68058  
 最终值 : 0.696798 (-81.1%)

设计变量

V1) DV\_1  
 单位 : deg  
 初始值 : 93  
 最终值 : 90 (-3.23%)

V2) DV\_2  
 单位 : mm  
 初始值 : 107  
 最终值 : 106 (-0.935%)

V3) DV\_3  
 单位 : mm  
 初始值 : 95.2  
 最终值 : 103 (+8.19%)

V4) DV\_4  
 单位 : mm  
 初始值 : 56.7  
 最终值 : 60 (+5.82%)

Iter.	OBJECTIVE_4	DV_1	DV_2	DV_3	DV_4
0	3.6806	93.000	107.00	95.200	56.700
1	0.82988	90.000	106.00	100.12	60.000
2	1.0797	90.632	106.84	103.00	60.000
3	1.0828	90.636	106.84	103.00	60.000
4	0.69680	90.000	106.00	103.00	60.000

Figure 6. Optimised design results

图 6. 优化设计结果

## 5. 结论

在 adams/view 软件中建立了曲柄滑块式转向机构模型, 施加了相应的约束和驱动, 以保证虚拟样机的正确性。并确定了对转向节臂长、转向节臂初始角、连杆长度、液压缸偏距 4 个设计变量, 根据数学关系给出转向机构六个关键设计点的参数化设计点坐标, 建立了参数化模型。可以缩短建立不同参数的转向机构模型时间, 大幅度提高了工作效率。同时方便在 adams 中进行优化设计, 并可以实时查看机构变化与运动状况。参数化模型建好后, 再以理论车轮外转角与实际车轮外转角的平均误差为目标函数, 进行优化设计。通过对 4 个变量进行单独的设计研究, 得出每个变量对目标函数的影响规律, 进而选取四个变量进行优化设计。本文得出如下结论:

(1) 通过 adams 建立参数化机构模型, 并以一组数据对模型进行了仿真, 得到内外轮转角曲线图和误差图。可以看出外轮转角的实际值与理论值相差较大。

(2) 再对机构进行设计研究和优化。设计研究得出四个变量单独对平均误差的影响规律。在约束范围内, 变量 1 转向节臂初始角、变量 2 转向节臂长随着数值的增大平均误差增大, 变量 3 连杆长度、变量 4 液压缸偏距随着数值增大。优化设计得出优化后的转向机构最大误差减小  $6^\circ$ , 误差最大为  $1.81^\circ$ , 平均误差减小了 81.1%。有效地减小了转角误差, 提高了转向机构的性能, 减小轮胎磨损。

## 基金项目

上海市市场监管局科研计划(2024-48)。

## 参考文献

- [1] 陶元芳, 卫良保. 叉车构造与设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [2] 张增密, 韩飞坡, 李逸天, 等. 基于 MATLAB 和 ADAMS 的叉车曲柄滑块式转向机构优化分析[J]. 赤峰学院学报: 自然科学版, 2020, 36(2): 75-76.
- [3] 王玲, 李少波. 叉车转向桥优化改进[J]. 工程机械, 2020, 51(7): 120-124.
- [4] 关亮亮, 范旭, 张恭砚, 等. 叉车转向机构建模及运动仿真[J]. 汽车实用技术, 2019(11): 31-32, 35.
- [5] 陈仕胜, 陈余, 王彦博. 基于多岛遗传算法的新能源叉车转向桥优化设计[J]. 起重运输机械, 2018(9): 86-90.
- [6] 卫良保, 马朝选, 张玉星, 等. 基于 ADAMS 的叉车转向动力特性分析[J]. 中国工程机械学报, 2013, 11(1): 36-40.
- [7] 孙保群, 何龙, 夏光. 基于 ADAMS 的平衡重式叉车转向系统建模与优化设计[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2016, 39(9): 1158-1162.
- [8] 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.
- [9] 曾红, 张志华, 陈静. 基于 ADAMS 的横置液压缸式叉车转向系统参数化建模与仿真[J]. 起重运输机械, 2008(4): 44-46.
- [10] 韩飞坡, 谈波, 李光宇, 等. 基于 MATLAB 和 ADAMS 的八字式转向机构优化[J]. 河南工程学院学报: 自然科学版, 2021, 33(4): 48-52.
- [11] 陈慕忱. 装卸搬运车辆[M]. 北京: 人民交通出版社, 1986.