

基于 OPTIMUS 的叉车转向机构的优化设计

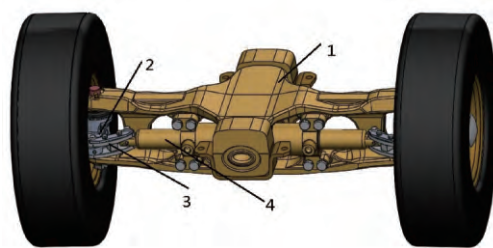
撰文 / 安徽合力股份有限公司 袁正 高静轩 李戈操 田红周

以叉车转向机构为研究对象，利用 Adams 建立其运动学参数化模型，并在 OPTIMUS 中采用自适应遗传优化方法，针对外轮转角误差最大值对目标进行优化，以及选取外轮转角误差最大值和活塞杆最大行程两个目标，使用 Min-Max 方法进行多目标优化分析，优化后的机构，转向操作灵敏、轮胎磨损降低。

一、概述

电叉车转向机构现在普遍采用（图 1）横置液压缸式转向机构，这种结构具有形式简单、机构紧凑、布置方便和偏转角大等优点。但是在转向机构设计过程中会遇到一些难题，比如车轮转角误差过大会影响轮胎磨损、油缸径向力大会导致油缸漏油、油缸行程大会引起机构干涉和油缸布置困难、转向油缸推力（或者进油量）要求大则导致转向操作的灵敏性差等问题，并且这些问题之间会相互牵制与制约，很难同时实现的最优设计，因此优化设计方法（特别是多目标优化方法）需要被引入到叉车转向机构的设计过程中。

本文在某款叉车转向机构现阶段设计参数的基础上（图 2），重点通过 DOE 手段研究设计输入参数（节臂长度 q 、节臂与桥体横向夹角 α 、油缸偏置距离 e 和活塞杆长度 h ）与设计输出量（外轮转角误差最大值、活塞杆最大推力、活塞杆行程、活塞杆最大径向力、活塞杆最大推力与最小推力比值）在设计区域中的相关性、通过自适应遗传算法研究以内轮转角误差最大值为目标，其他设计输出量为约束在设计参数区域内的全局优化设计，以及结合 DOE 分析结果选取内轮转角误差最大值和活塞杆行程为多目标，采用 Min-Max 多目标优化方法得到 Pareto 前沿，以上优化分析结论可以很好地指导叉车转向桥机构设计，具有很强的工程应用价值。



1. 桥体 2. 节臂 3. 连杆 4. 转向液压油缸

图 1 叉车曲柄滑块式转向机构

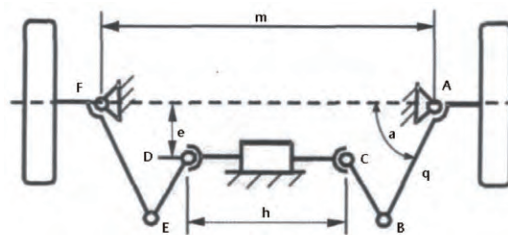


图 2 叉车转向机构设计参数与结构简图

二、叉车转向机构分析

1. 阿克曼转向特性

对于后桥转向的四支点平衡重叉车，车辆转向时要求转弯中心应是前桥中心线与两后轮各自的中心线的延长线交点（图 3 中 o 点），这样才能保证各车轮在转向时均作纯滚

动，避免车辆在转向时轮胎与地面滑动而增大阻力和加快轮胎磨损。

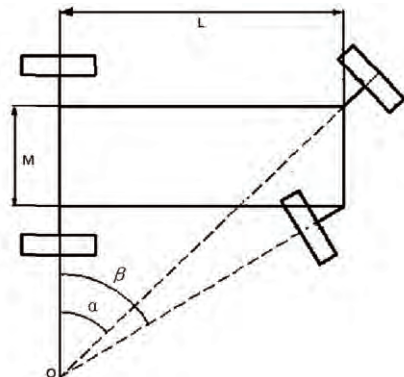


图3 叉车转向机构理论的内外轮转角关系图

叉车在转向时其内轮的偏转角要比外转向轮的偏转角大，当内外轮均作纯滚动运动时，它们转角之间应符合如公式1的关系。

$$\operatorname{ctg} \alpha - \operatorname{ctg} \beta = \frac{M}{L} \quad (1)$$

其中， L 为叉车轴距， M 为主销间距， α 为外轮理论转角， β 为内轮理论转角。

2. 转向机构的受力分析

假设左右转向轮曲柄所受的力矩相等均为 M_s ，液压缸活塞杆轴线与左右连杆的夹角分别为 α_1 和 α_2 ，节臂长度为 q ，受力图如图4、5所示，因此可推导液压缸活塞推力、液压缸活塞杆与连杆连接处的径向分力、液压缸缸体承受的纵向力为公式2~4所示。

$$\begin{aligned} F &= P_1 + P_2 = (M_s / H_1) \cos \alpha_1 + (M_s / H_2) \cos \alpha_2 \\ &= M_s [\cos \alpha_1 / (q \sin \omega_1) + \cos \alpha_2 / (q \sin \omega_2)] \\ &= \frac{M_s}{q} \left(\frac{\cos \alpha_1}{\cos \omega_1} + \frac{\cos \alpha_2}{\cos \omega_2} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

$$F_1 = \frac{M_s \sin \alpha_1}{q \cos \omega_1} \quad F_2 = \frac{M_s \sin \alpha_2}{q \cos \omega_2} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} N_1 &= [F_1(S_1 + S_3) + F_2 S_2] / S_3 \\ N_2 &= [F_1 S_1 + F_2(S_2 + S_3)] / S_3 \end{aligned} \quad (4)$$

三、优化模型

1. Adams 中运动学模型建立

在 Adams 中建立转向桥参数化运动学模型如图6所示，整个机构对称布置，含有五个运动构件，六个旋转运动副，其中旋转角度驱动在 A 点，为转向的内轮转角，从中间位

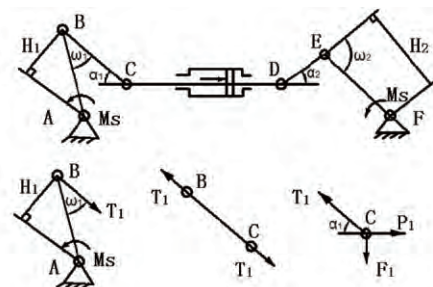


图4 液压缸活塞杆推力分析

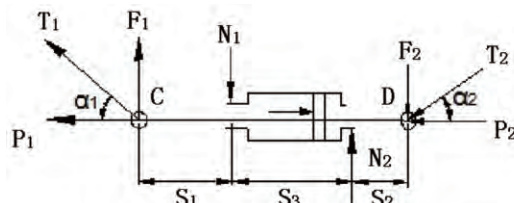


图5 液压缸活塞杆径向力分析

置可向左偏转 80° ，在 E 铰接点测量角度 $\angle DEF$ ，并设置角度传感器，当此处的传动角小于 5° 时，仿真将停止，仿真过程中测试 F 铰接点的偏转角度，即转向的实际外轮转角，并与理论外轮转角作差后取绝对值得到外轮转角误差，同时结合公式2~4计算出活塞杆推力、活塞杆径向力与转向力矩的比值，活塞杆行程等设计输出量。本文中研究的叉车转向桥初始设计变量如表1所示。叉车轴距和主销间距分别为1600mm和808mm，在 Adams 中计算得到的主要设计输出参数（活塞杆行程、外轮转角误差、活塞杆推力与转向力矩比值、活塞杆与连杆连接处的径向分力与转向力矩比值）与内轮转角关系如图7所示。



图6 Adams 中转向桥的参数化运动学模型

表1 初始设计变量及其范围

设计变量	初始值	变化范围
节臂长度 q	86.35 (mm)	[60,100]
节臂与桥体横向夹角 a	86.63 ($^\circ$)	[80,95]
油缸偏置距离 e	27.4 (mm)	[20,50]
活塞杆长度 h	490.5 (mm)	[450,550]

2. OPTIMUS 中优化模型建立

在 OPTIMUS 中建立优化系统模型（图8），首先依据表1定义设计变量初始值及其范围，然后驱动 Adams 脚本文件计算输出外轮转角误差向量、活塞杆行程向量、活塞杆

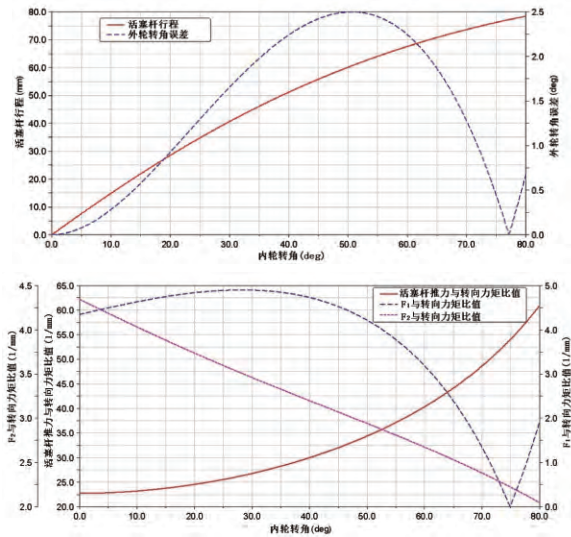


图7 结构优化前设计输出参数与内轮转角关系图

推力与转向力矩比值向量、活塞杆径向分力与转向力矩比值向量,最后计算下列设计输出量: 外轮转角误差最大值(max_obj)、活塞杆最大行程(max_xc)、活塞杆推力与转向力矩比值最大值(max_F)、活塞杆径向分力与转向力矩比值最大值(max_N)、活塞杆最大推力与最小推力比值(R_F)。

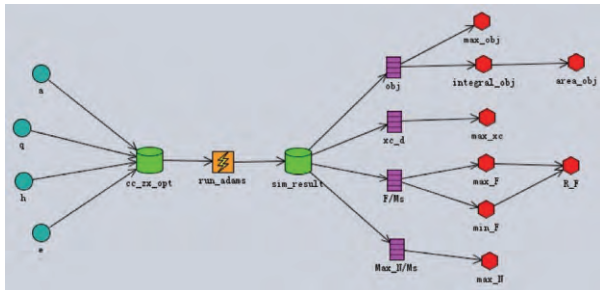


图8 OPTIMUS 中优化系统建模

四、优化结果

1. 单目标自适应遗传算法结果

首先采用拉丁超立方(Latin-Hypercube)法进行1000次DOE实验,得到设计输入参数和输出参数的相关性系数值如图9所示,这样可以初步判断外轮转角误差最大值仅与油缸偏置距离在设计区域内正相关,也就是说随着油缸偏置距离增大外轮转角误差最大值变大,这样会加剧轮胎磨损;活塞杆最大行程受活塞杆长度影响最大,与其他设计参数关系不大;活塞杆推力最大值与节臂长度、节臂与桥体横向夹角关系密切;活塞杆径向分力最大值与油缸偏距、节

臂长度相关性很大;活塞杆推力的波动系数与节臂桥体之间横向夹角成负相关。

	a	q	h	e	max_obj	max_xc	max_F	max_N	R_F
a	1.000	-0.009	0.007	-0.005	-0.536	-0.052	-0.374	-0.018	-0.629
q	-0.009	1.000	0.002	-0.014	-0.413	0.926	-0.758	-0.531	-0.283
h	0.007	0.002	1.000	0.001	-0.079	-0.025	-0.086	0.169	-0.110
e	-0.005	-0.014	0.001	1.000	0.388	0.074	0.125	0.603	0.150
max_obj	-0.536	-0.413	-0.079	0.388	1.000	-0.447	0.803	0.609	0.816
max_xc	-0.052	0.926	-0.025	0.074	-0.447	1.000	-0.670	-0.556	-0.195
max_F	-0.374	-0.758	-0.086	0.125	0.803	-0.670	1.000	0.537	0.823
max_N	-0.018	-0.531	0.169	0.603	0.609	-0.556	0.537	1.000	0.301
R_F	-0.629	-0.283	-0.110	0.150	0.816	-0.195	0.823	0.301	1.000

图9 设计输入参数与输出参数的相关性系数

通过以上DOE分析可以为下一步优化分析获得一些有用信息,本论文中的优化方法选取自适应遗传算法(Self-Adaptive Evolution)。在张德进和李道亮的研究《横置液压缸式转向机构优化设计》中对叉车转向机构外轮转角误差最大值有明确规定,一般要小于 2° ,但是初始设计状态下外轮转角误差最大值为 2.5° ,因此选择外轮转角误差最大值为优化目标在设计变量区域内进行全局优化,优化前后设计输出参数值如表2所示,外轮转角误差得以减小,控制在 1° 以内,优化后设计参数值分别为:节臂长度为99.3mm、节臂与桥体横向夹角为 88.4° 、油缸偏置距离为44.6mm和活塞杆长度为549.9mm,优化后活塞杆长度明显增加,活塞杆行程增大,其他设计输出量均有一定程度的减小,这对转向机构设计有较大改进作用。用优化后的设计参数带入Adams软件中计算得到的主要设计输出参数(活塞杆行程、外轮转角误差、活塞杆推力与转向力矩比值、活塞杆与连杆连接处的径向分力与转向力矩比值)与内轮转角关系如图10所示。

表2 优化前后设计输出参数值

设计输出参数	初始值	优化值
max_obj	$2.5(^{\circ})$	$0.96(^{\circ})$
max_xc	78.4(mm)	90.9(mm)
max_F	60.9(mm-1)	42.9(mm-1)
max_N	4.89(mm-1)	4.82(mm-1)
R_F	2.68	2.16

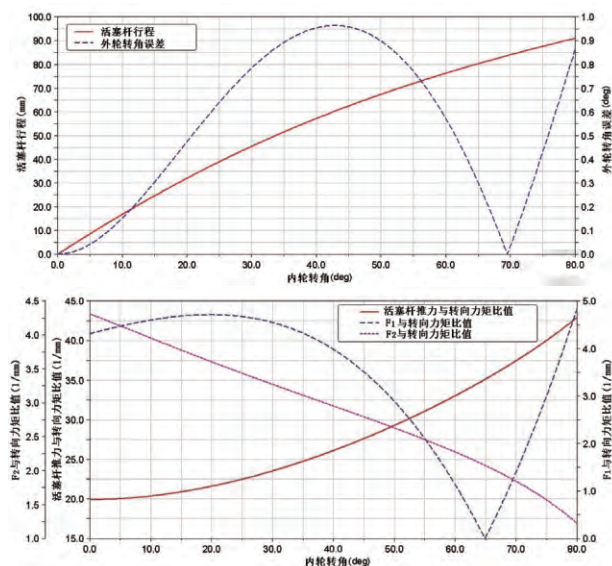


图 10 结构优化后设计输出参数与内轮转角关系图

2. 多目标优化算法结果

从上述 DOE 分析和单目标遗传算法优化过程可以看出活塞杆最大行程与其他设计输出量成负相关关系，也就是说活塞杆最大行程与外轮转角误差最大值两者之间是相互制约的，很难达到同时最小的目标，因此选取这两个输出量为目标，采用 Min-Max 方法进行多目标优化，优化后得到的 Pareto 最优解集如图 11 所示，这样可以权衡活塞杆最大行程和外轮转角误差最大值两个目标，选取一种设计方案，使得轮胎磨损尽可能小同时用有利于油缸布置、避免机构干涉现象。

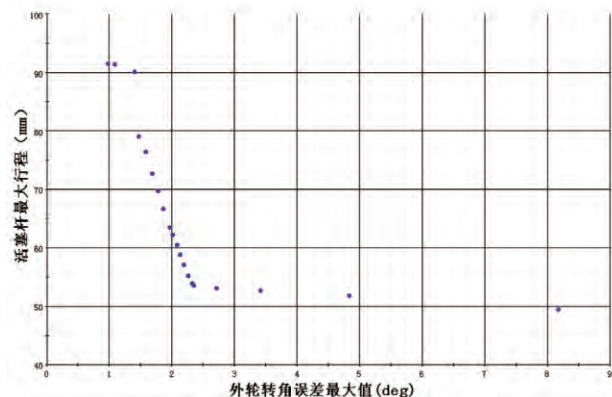


图 11 多目标优化的 Pareto 前沿

五、结语

文章针对某款叉车转向机构进行了优化设计研究，采用自适应遗传算法是一种全局优化算法，优化效率高并且可以得到在设计区域内的全局最优解，同时采用多目标优化算法得到 Pareto 最优解集，这样可以权衡多个设计目标，使得设计方案考虑地更加全面，通过上述分析可得出以下结论。

(1) 单目标自适应遗传算法得到的机构设计方案较之初始机构方案有很大改进，外轮转角误差可以控制在 1° 以内，满足降低轮胎磨损的标准要求；同时活塞杆推力和推力波动系数有显著降低，这样提高转向操作的灵敏性和可靠性。此外，活塞杆径向力最大值也有一定降低，有利于提高油缸使用寿命。

(2) 多目标优化得到了 Pareto 最优解集，解集中给出了综合考虑活塞杆最大行程和外轮转角误差最大值为目标的若干设计方案。

此款叉车转向机构经过优化设计后，样机测试反馈转向操作更加灵敏、驾驶员操作强度降低，而且不存在漏油，轮胎磨损等故障，达到预期效果。