

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.04.051

初始位姿优化控制下的汽车多级液压助力转向技术

马文倩

(西安航空职业技术学院 汽车工程学院, 陕西 西安 710089)

摘 要:针对在干扰状态下汽车多级液压助力困难,难以快速实现转向的问题,研究一种新的汽车多级液压助力转向技术。利用传感器采集汽车液压装置开关信号,优化初始姿态,分析通电状态与压力程度,判断汽车液压助力系统是否存在异常故障,提取信号特征进行误差模糊控制,计算汽车机械控制转速变化参数,得到液压助力器电压信号变化矩阵;通过迭代运算实现助力转向,根据液压助力产生摆动位移的矢量变化方程,实现汽车多级液压助力转向特性分析。计算转向运动时液压助力转向机械臂总力,根据机械运动角速度与加速度实现助力转向。实验结果表明:该技术在干扰状态下,转向角在 300° 以上时,灵敏度极高,具有较强的抗干扰能力。

关键词:初始位姿;优化控制;汽车转向;液压助力;转向技术

中图分类号:TH137 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2025)04-0284-05

Multi-Stage Hydraulic Power Steering Technology for Automobiles under Initial Pose Optimization Control

MA Wenqian

(School of Automotive Engineering, Xi'an Aviation Vocational and Technical College, Xi'an 710089, China)

Abstract:To deal with the difficulty in achieving the multi-stage hydraulic assistance and quick steering for vehicles under interference conditions, a new multi-stage hydraulic power steering technology for automobiles was studied under initial pose optimization control. Sensors were applied to collect the switch signals of the automotive hydraulic device, the initial attitude was optimized, the power on state and pressure level were analyzed, abnormal faults in the automotive hydraulic power system were determined, signal features were extracted for error fuzzy control, the mechanical control speed change parameters of the car were calculated, and the voltage signal change matrix of the hydraulic power booster were obtained. Through iterative operation, the power steering was realized, and the characteristics of multi-stage hydraulic power steering for automobiles were analyzed on the vector variation equation of swing displacement generated by hydraulic power assistance. The total force of the hydraulic power assisted steering robotic arm was calculated in steering motion, and the power assisted steering was achieved based on the angular velocity and acceleration of the mechanical motion. The experimental results show that the proposed technology, with the steering angle above 300° under interference conditions, has extremely high sensitivity and strong antinp-interference ability.

Keywords:initial posture; optimization control; automotive steering; hydraulic assistance; steering technology

0 引言

当前汽车产业发展迅速,生产、生活的各个领域都离不开汽车的使用,但汽车安全事故频发,使人们更加重视汽车的稳定控制性能,人们对汽车质量与安全的要求也越来越高。其中汽车转向装置是汽车控制十分重要的组成部分,转向功能的稳定性、驱动力、响应速度都关系着车辆的行驶安全。目前我国汽车普遍采用的是循环球式液压助力转向装置。根据转向盘转向需求,计算车辆运行速度和转向角度以及运动阻力等参数,再计算

转向所需液压助力大小,以控制液压器运动产生适量的助推力,推动转向机构执行运动位移。为了提高汽车转向操控的稳定性与灵敏度,需针对液压助力装置进行优化,合理调控转向位姿参数,设计多级液压助力转向控制系统,对多级液压助力转向结构与控制性能进行优化。

文献[1]主要针对汽车转向运动过程中液压油体积的弹性模量变化进行分析,研究液压产生助力的传动介质压缩性并建立汽车液压转向力学模型,在时域和频域角度进行模拟实验,实现汽车转向动力精准控制。但该方法对转向机构控制的

基金项目:西安航空职业技术学院学校科研基金重点项目(KJTD23-01)

作者简介:马文倩(1983—),女,陕西西安人,副教授,硕士,研究方向为自动控制、飞行器数字化制造、职业教育管理与研究等,yixie17575548011@163.com。

稳定性不高。文献[2]获取汽车转向控制的质心侧偏角与横摆角速度,通过汽车转向动力模型模拟汽车运动状态,并与理想状态对比,通过自适应模糊控制,调整液压转向控制的稳定性。但该方法却忽视了对液压助力电压信号的分析,汽车位姿控制不够灵敏。

针对以上不足,本文研究一种初始位姿优化控制下的汽车多级液压助力转向技术,并分析其稳定性。

1 初始位姿控制参数优化

汽车液压助力转向装置结构复杂,该装置在液压助力推动车辆转向过程中具有很强的灵活性,因而转向控制器具有更多不确定性,装置内部组件结构存在大量耦合,研究汽车多级液压助力转向,必须优化液压助力装置的初始位姿控制参数^[3-5]。

首先,当原始信号出现突变或断波,可能是出现了超出车辆常态运行液压范围的故障问题,在部件更换周期内进行组件替换和参数调整。采集有效时间间隔的初始位姿控制液压信号,其中含有大量干扰信号,需提取信号特征进行误差模糊控制:

$$E(s) = -\frac{C_2(s) [1+C_1(s)C_n(s)]N(s)}{1+C_1(s)C_2(s)} \quad (1)$$

式中: $E(s)$ 为干扰信号 s 影响控制系统出现的误差; $C_1(s)$ 、 $C_2(s)$ 分别为模糊控制的传递目标函数; $C_n(s)$ 为干扰信号误差降低的补偿函数; $N(s)$ 表示液压助力设备初始位姿控制外部干扰噪声因子^[6-7]。

基于误差信号进行滤波处理,调整液压转向控制模糊系数,利用模糊PID控制计算汽车机械控制转速变化参数和速度转化目标函数。

$$C_v(s) = K_{i,v} + \frac{K_{j,v}}{s} \quad (2)$$

式中 $K_{i,v}$ 、 $K_{j,v}$ 分别表示受影响的位姿控制运动位移与角位移的前馈补偿。去除误差信号干扰,实现汽车液压助力控制转速参数调整,优化控制器机械输出指令^[8-9]。优化控制器机械电路如图1所示。

运用差分进化算法,增强初始位姿控制电压补偿进化,提取前馈补偿后的汽车机械转速所需电压信号,得到液压助力器电压信号变化矩阵为

$$\begin{cases} e = [e_{aa} + e_b + e_{aab}]^T \\ e_{aa} = [e_{aa1} \quad e_{aa2}]^T \\ e_b = [e_{b1} \quad e_{b2}]^T \\ e_{aab} = [e_{aab1} \quad e_{aab2}]^T \end{cases} \quad (3)$$

式中: e 表示液压助力器电压信号变化参数; e_{aa} 为控制器输出的前馈补偿电压信号; e_b 为控制器输出的偏压补偿电压信号; e_{aab} 为控制器输出的模糊控制电压信号; T 表示初始位姿控制模糊迭代次数。

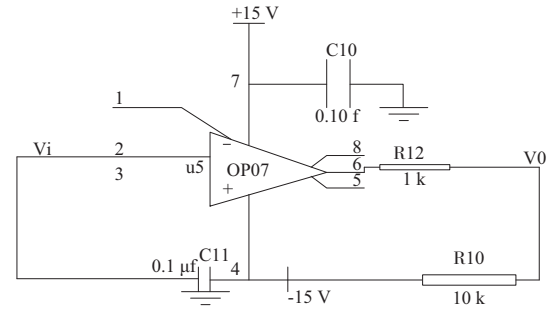


图1 优化控制器机械电路

利用差分进化对控制器电压信号进行优化,设定初始信号 i 的差分种群单位为 $x_{i1}(e)$,则差分进化的种群结构表示为

$$X_i(e) = [x_{i1}(e), x_{i2}(e), \dots, x_{in}(e)] \quad (4)$$

随机选取汽车液压助力转向设备电压信号参数,代入种群训练,提取不同训练个体单元进行合成变异:

$$X_i(e)' = x_{i1} + B(x_{i2} - x_{i3}) \quad (5)$$

式中: $X_i(e)'$ 为差分进化变异信号参数, x_{i1} 、 x_{i2} 、 x_{i3} 分别为随机选取的训练样本, B 为合成单元的变异算子^[10]。在此基础上对变异单元交叉演变,引入概率算子进行参数优化判别:

$$\begin{aligned} X_{i+1}(e)' &= x_{ij}(e) \\ \text{s.t.} \quad &\begin{cases} \text{rand}(0,1) \leq P_s \\ \text{rand}(0,1) > P_s \end{cases} \end{aligned} \quad (6)$$

式中: $X_{i+1}(e)'$ 为交叉演变概率进化参数; $x_{ij}(e)$ 为差分进化演变最优解; P_s 为交叉概率算子。若进化所得最优解小于概率算子,则表明满足参数优化要求;若结果大于概率算子,则还未达到控制参数的优化标准,需进入到下一代,按上述步骤继续进行迭代运算,直到满足进化要求^[11-12]。

基于模糊控制优化汽车液压助力转速参数控制,利用差分运算优化初始位姿电压控制,可有效调整液压助力器输出与机械控制参数精准度。

2 汽车多级液压助力转向特性分析

在汽车液压转向初始位姿控制参数优化基础上,对多级液压助力转向特性进行分析。当前汽车多级液压转向装置普遍采用循环球式助力结构。转向螺杆与摇臂组合装置具有更高的灵敏度,同时精简了助力装置结构,提高了液压泵产能的利用率。多级液压助力转向是在循环球式助力结构上增设了液压等级控制,根据汽车转向扭转幅度、阻尼系数、力矩参数,需要不同力的机械支持,设置多级液压助力控制等级^[13-15]。转向模型如图2所示。

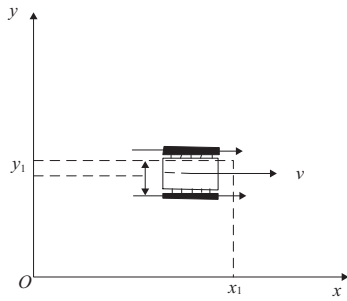


图2 转向模型

多级液压机通过反馈电压信号实现机械自由度调整控制,将机械摇臂位移位置矢量化为 $\mathbf{Y}_L$,则通过液压助力产生摆动位移的矢量变化方程为

$$\mathbf{Y}_L = (\mathbf{L}_w - \mathbf{L}_j)_i + \delta_j \times \mathbf{s}_j \quad (7)$$

式中: $\mathbf{L}_w$ 是汽车转向机械摇臂与坐标原点的位移矢量; $\mathbf{L}_j$ 为摇臂与控制基座之间的距离矢量; $\mathbf{s}_j$ 为液压助力活塞顶板在矢量坐标系中的位置矢量; δ_j 为液压控制机械摇臂摆动角度。液压助力推动机械摇臂产生位移使汽车做出转向运动,运用欧拉方程描述转向机械手动力势能表达式为

$$F_{y,L} = Z(\bar{\mathbf{Y}}_L, \mathbf{Y}_L) \bar{\mathbf{Y}}_L + M(\bar{\mathbf{Y}}_L, \mathbf{Y}_L) + G(\mathbf{Y}_L) \quad (8)$$

式中: $F_{y,L}$ 为汽车液压机械臂转向动力势能; Z 表示机械手臂运动产生的惯性质量; $\bar{\mathbf{Y}}_L$ 为机械臂运动的位移动力矢量; M 表示机械手臂运动产生的离心摩擦力; G 表示转向推动作用中机械臂受到的运动重力。通过汽车转向动力势能可划分多级液压助力等级,控制循环球式液压器发出不同的作用力,实现多级推动力的动态转向。根据汽车液压动力势能,可计算液压输出力矩阈值,分析汽车转向灵敏度

$$F_L = \cos(1 + 3(1 - e_i^2)R/4e^{i-1}) - F_z \quad (9)$$

式中: F_L 为汽车液压转向机械力矩灵敏度参数; R

为机械臂运动产生的弹性模量; e^{i-1} 为液压机械关节结构硬度比; F_z 为液压转向输出端受到的摩擦阻力。

根据上述公式可以计算出不同时间节点汽车转向液压输出力矩的变化。从计算结果可知:随着转向器运行的时间增长,液压助力机械臂受到阻力越大,产生的输出力矩也越大。说明在液压装置初始位姿控制参数优化后,此时的液压助力转向具有更高的灵敏度特性,汽车转向控制更灵敏精准,提高了液压出能的利用效率,控制效果良好。

3 汽车多级液压助力转向

汽车多级液压助力转向系统的操作原理是:根据汽车运行时的车速,控制转向所需推动力的大小。当车速较低时,需要更大的推动力来实现转向,液压泵调控更大的液压油流量,产生更大助推压力,并控制电压信号调控转向位姿运动状态。

汽车多级液压转向装置主要部件包括液压机、转向盘、转向轴、机械摇臂、运动活塞等。结合前文分析汽车液压助力转向特性,液压机根据受到摩擦力与运动阻力大小,控制机械臂产生不同力矩,推动转向器运作,并反馈在汽车操控转向盘上,操作者能感受到转向受力的不同。

当汽车右转时,转向盘向机械臂传送右转向转矩指令,转向扭杆向右扭曲,带动转向齿轮转动使液压通油管道右旋阀门打开,液压机释放大流量液压油产生液压助力。在此过程中机械臂位移受到的阻力和摩擦力会反馈到控制系统,经欧拉方程描述的式(8)计算机械臂转向动力势能,得到转向运动时液压助力转向机械臂总力为

$$\mathbf{F}_I = \mathbf{F}_{Y,R} + \mathbf{F}_{D,R} \quad (10)$$

式中: $\mathbf{F}_I$ 为进行转向运动时液压机械臂产生的总力; $\mathbf{F}_{Y,R}$ 为机械臂助推运动产生的惯性作用力; $\mathbf{F}_{D,R}$ 为机械臂运动关节产生的转向惯性力。其中惯性作用力根据机械运动角速度与加速度进行计算。

$$\mathbf{F}_{Y,R} = I_m v_a / \mathbf{F}_{Y,L} \quad (11)$$

$$\mathbf{F}_{D,R} = m_D v_D / 2 \quad (12)$$

式中: I_m 为转向运动时机械臂产生力矩的质量惯性; m_D 为机械臂关节质量参数; v_a 为机械臂转向产生的角速度; v_D 为机械臂转向的液压助力加速度。计算得到液压助力机械臂转向总力,控制液压缸流入的油压和流量,从而带动右转向活塞向右位移,产生助推作用力,带动转向杆按目标方向

转动。操作者可通过控制转向盘转矩大小,来调控多级转向液压活塞推动幅度,实现液压机多级助力转向运动。汽车左转时,液压助推转向活塞向左位移,带动转向杆向左偏转,齿轮转动使左转向液压缸阀门打开,液压油流入推动液压活塞运动助力,控制机械臂向左转向。当车辆完成转向直行时,转向盘不发出转向指令,液压助力扭杆不偏移,此时液压缸左右阀门各保持一半的开启量,两侧通油量相同,产生同样的液压助力,机械臂不产生转矩,沿方向产生直行运动作用力。

汽车初始位姿参数优化后,转向位姿参数控制更精准,使转向操作更灵敏,方位与力矩控制更准确。根据液压助力转向机械运动动力特性分析,分出级别调控液压缸活塞驱动压力水平,能更精准控制液压装置输出作用力大小,合理调节转向液压油管道阀门开放幅度,减少液压油资源浪费。

4 实例研究

为了验证本文提出的初始位姿优化控制下的汽车多级液压助力转向技术的实际应用效果,选用传统的基于高精度分析的汽车多级液压助力转向技术和基于主动分析的汽车多级液压助力转向技术进行实验对比。姿态控制结构如图3所示。

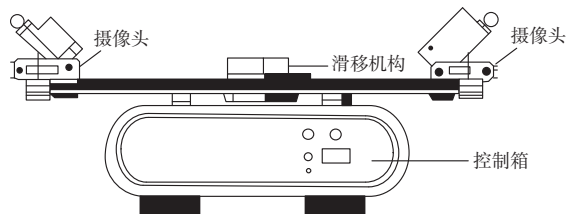


图3 姿态控制结构

在运行路径上安装摄像头,利用USB端口将转向监控摄像头与主控系统连接,记录转向情况,所有的记录信息通过转向系统传输至USB端口,通过实时传输得到汽车多级液压助力转向结果。设置的实验参数如表1所示。

表1 实验参数

参数	数值
运行电压/V	220
操作电流/A	150
工作频率/Hz	200
工作系统	Windows10
操作次数/次	10

本文设置的运行时间为300s,每隔5s记录运行状态,设置的参数不同,在检测过程中引入干扰因素,干扰因素曲线如图4所示。

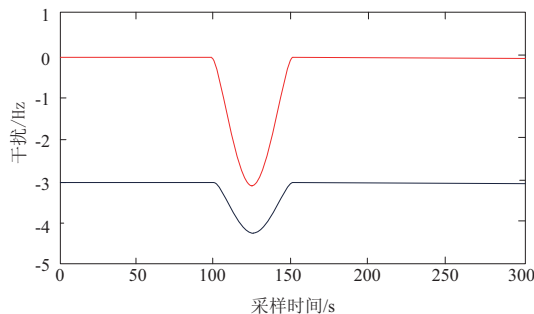


图4 干扰因素曲线

无干扰状态下汽车多级液压助力转向技术的转动角如图5所示。

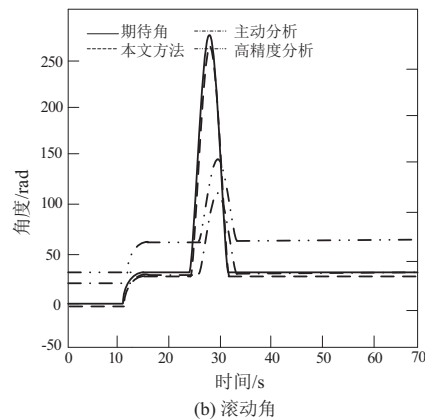
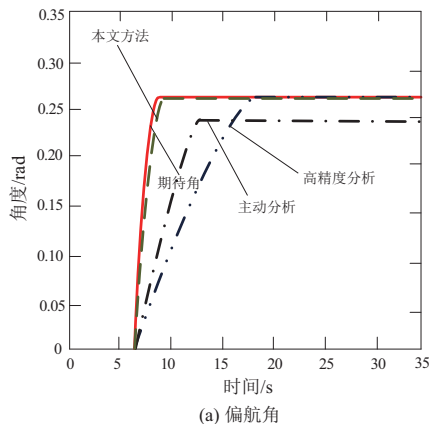


图5 无干扰状态转动角

根据图5可知,在无干扰状态下,本文提出的初始位姿优化控制下的汽车多级液压助力转向技术得到的偏航角和滚动角与期待状态几乎一致,灵敏度在99%以上,传统的基于高精度分析的汽车多级液压助力转向技术灵敏度为50%和基于主动分析的汽车多级液压助力转向技术为60%。证

明本文方法的转向偏航角和滚动角控制灵敏度较高。

干扰状态下的转动角如图 6 所示。

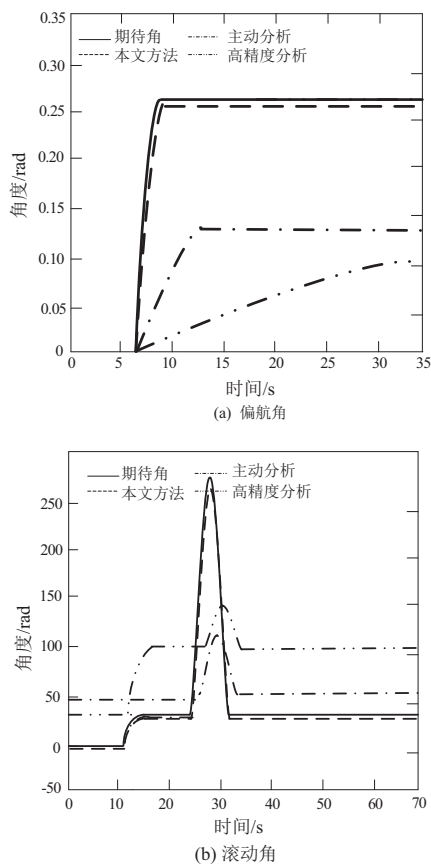


图 6 干扰状态转动角

根据图 6 可知,在干扰状态下,传统的基于高精度分析的汽车多级液压助力转向技术和基于主动分析的汽车多级液压助力转向技术偏航角和滚动角与实际角度相差极大。而本文提出的初始位姿优化控制下的汽车多级液压助力转向技术得到的偏航角和滚动角的期待状态仍旧几乎一致,灵敏度在 99% 以上,受干扰影响较小,更适合应用在实际工作中。

5 结语

针对汽车转向控制不灵敏、稳定性差等问题,研究了一种初始位姿优化控制下的汽车多级液压助力转向技术,得出以下结论。

1) 利用模糊控制去除干扰信号误差,通过差分运算对液压控制信号进行补偿,优化汽车初始位姿控制参数,提高了转向控制灵敏度。

2) 计算液压助力机械摇臂位移矢量,分析动力势能 and 灵敏度特性,得到合理的转向运动总力,有效提高液压出能利用率,经过实验证明该优化方法具有良好的控制稳定性。

参考文献:

- [1] 邱林宾,曹鑫,金纯. 高精度地下铰接式车辆全液压转向动力学建模[J]. 矿山机械,2021,49(4):18-24.
- [2] 吴昊. 新能源汽车主动四轮转向稳定性控制技术[J]. 机械与电子,2023,41(2):37-40.
- [3] 仙阿曼. 汽车循环球式液压助力转向装置优化设计[J]. 液压气动与密封,2023,43(4):24-27.
- [4] 唐坤,曹志雄. 低速自动驾驶横向跟踪控制研究[J]. 电机与控制应用,2021,48(8):72-80,89.
- [5] 刘迪迪,杨益菲,杨玉芸,等. 随机环境下电动汽车充电实时管理与优化控制算法[J]. 上海交通大学学报,2023,57(1):1-9.
- [6] 刘建均,孙艺瑕,李胜. 时滞正反馈控制下汽车悬架系统的多目标优化[J]. 计算机应用与软件,2021,38(4):32-36,131.
- [7] 张礼明,朱海清,伍开宇. 基于 ADAMS 的视觉循线搬运车转向位姿误差研究及控制[J]. 机械设计,2023,40(3):26-31.
- [8] 丰飞,杨海涛,唐丽娜,等. 大尺度构件重载高精加工机器人本体设计与性能提升关键技术[J]. 中国机械工程,2021,32(19):2269-2287.
- [9] 谢波,高榕,许富强,等. 低附着路况条件下人车共享转向系统稳定控制[J]. 吉林大学学报(工学版),2023,53(3):713-725.
- [10] 张楠,段传栋,杨逍潇,等. 装载机液压助力转向系统异响分析与治理[J]. 工程机械,2022,53(1):41-47,8-9.
- [11] 黄康文,秦训鹏,詹军,等. 重载 AGV 液压转向模糊 PID 控制[J]. 液压与气动,2021,45(7):108-115.
- [12] 傅莹龙,符立华,叶星辉,等. 基于 CAE 技术的汽车转向管柱护罩热流道注塑模具设计[J]. 工程塑料应用,2022,50(11):97-101,116.
- [13] 李建明,徐杨. 基于联合模型铰接汽车原地转向工况特性分析[J]. 机械设计与制造,2023(5):187-190.
- [14] 王梦祥,曹付义,朱潇杰,等. 履带车辆液压机械差速转向控制策略研究[J]. 现代制造工程,2023(1):50-56.
- [15] 季鹏. 双泵合流液压系统转向动力学特性与能耗分析[J]. 机械设计与制造,2021(7):217-220.

收稿日期:2023-10-17