

文章编号: 2095-2163(2019)04-0230-05

中图分类号: TG156

文献标志码: A

机械式变速箱的多轴转向控制优化研究

陈伟全

(广东工业大学 华立学院, 广州 511325)

摘要: 为了提高机械式变速箱的多轴转向控制的稳定性, 提出基于非线性多刚体动力学分析的机械式变速箱的多轴转向控制方法, 构建机械式变速箱的转向动力学模型, 以输出转向力矩、换挡阻力以及负载力矩等为约束参量, 构建机械式变速箱的多轴转向控制的被控对象模型, 采用自适应迭代学习控制方法实现多轴转向力矩的最大增益调节, 采用非线性多刚体动力学分析方法进行最优控制参量估计, 结合期望轨迹的模糊跟踪识别方法实现机械式变速箱的多轴转向控制律优化设计。仿真结果表明, 采用该方法进行机械式变速箱的多轴转向控制的输出稳定性较好, 轨迹跟踪误差较低, 提高了机械式变速箱的控制品质。

关键词: 机械式变速箱; 多轴转向控制; 动力学模型; 力矩

Study on optimization of multi-axis steering control for mechanical gearbox

CHEN Wei-quan

(Huali College, Guangdong University of Technology, Guangzhou 511325, China)

[Abstract] In order to improve the stability of the multi-axis steering control of a mechanical transmission, a multi-axis steering control method for a mechanical transmission based on a nonlinear multi-rigid-body dynamics analysis is proposed, a steering dynamics model of a mechanical transmission is constructed to output a steering torque. A controlled object model of a multi-axis steering control of a mechanical transmission is constructed by using a constraint parameter such as a shift resistance and a load moment and the like, and a maximum gain adjustment of a multi-axis steering torque is realized by adopting an adaptive iterative learning control method. By using the nonlinear multi-rigid-body dynamics analysis method, the optimal control parameter estimation is carried out, and the multi-axis steering control law optimization design of the mechanical transmission is realized by combining the fuzzy tracking identification method of the expected track. The simulation results show that the output stability of the multi-axis steering control of the mechanical transmission is good, the tracking error of the track is low, and the control quality of the mechanical transmission is improved.

[Key words] mechanical transmission; multi-axis steering control; dynamic model; moment

0 引言

机械式变速箱作为汽车的主要机械部件, 是确保汽车安全稳定可靠运行的关键, 机械式变速箱的多轴转向控制是整个变速箱设计的基础, 机械式变速箱为变速换挡提供了一种高效的解决技术, 采用人工智能技术和控制技术进行机械式变速箱的多轴转向控制, 结合对机械式变速箱的控制参数调节和扰动抑制方法, 进行机械式变速箱执行器优化设计, 提高多轴转向控制能力和品质。对机械式变速箱的多轴转向控制是建立在对机械式变速箱的运行姿态参数采集和信息融合基础上, 结合对参数的稳定性调节方法进行机械式变速箱助力转向控制, 相关的控制方法研究受到人们的极大关注^[1]。

传统方法中, 对机械式变速箱的多轴转向控制主要采用模糊 PID 控制方法, 结合对运行的结构参数调节和运行动力学分析方法^[2], 进行机械式变

速箱运行的控制律设计, 取得一定的研究成果^[3], 例如, 文献[4]中提出一种基于二次型调节模型的机械式变速箱运行控制方法, 采用模糊控制方法进行参量自适应调节, 提高机械式变速箱高度和航向的控制性能, 但该方法的控制稳定性不高, 多轴调节性能不好。针对传统方法存在的弊端, 本文提出基于非线性多刚体动力学分析的机械式变速箱的多轴转向控制方法, 构建机械式变速箱的转向动力学模型, 以输出转向力矩、换挡阻力以及负载力矩等为约束参量, 构建机械式变速箱的多轴转向控制的被控对象模型, 采用自适应迭代学习控制方法实现多轴转向力矩的最大增益调节, 采用非线性多刚体动力学分析方法进行最优控制参量估计, 结合期望轨迹的模糊跟踪识别方法实现机械式变速箱的多轴转向控制律优化设计。最后进行仿真实验分析, 展示了本文方法在提高机械式变速箱的多轴转向控制能力方面的优越性能。

作者简介: 陈伟全(1990-), 男, 硕士, 实验师, 主要研究方向: 控制工程、机电一体化。

收稿日期: 2019-04-16

1 动力学模型建立和约束参量分析

1.1 机械式变速箱的转向动力学模型

为了实现机械式变速箱多轴转向的优化控制,首先构建机械式变速箱的运行运动学和动力学参数模型,机械式变速箱多轴转向的动力学过程是一个复杂的多刚体动力学模型^[5],构建一个优化目标函数来进行机械式变速箱多轴转向控制设计,以输出转向力矩、换档阻力以及负载力矩等为约束参量,采用陀螺仪、加速度计等敏感元件进行参数采集,采集的机械式变速箱动力学参数输入到控制执行器中进行信息融合处理,实现参数的自适应融合,结合Kalman滤波融合方法,进行机械式变速箱的多轴转向参数调节^[6],在不确定性和干扰作用下,构建机械式变速箱在各个方向的运行动力学方程描述为:

纵向:

$$\begin{cases} mV\dot{\theta}\cos(\sigma) = F_y; \\ J_z\dot{\omega}_{z1} + (J_y - J_x)\omega_{x1}\omega_{y1} = M_{z1}; \\ \varphi = \theta + \alpha. \end{cases} \quad (1)$$

侧向:

$$\begin{cases} -mV\dot{\sigma} = F_z; \\ J_y\dot{\omega}_{y1} + (J_x - J_z)\omega_{z1}\omega_{x1} = M_{y1}; \\ \varphi = \sigma + \beta. \end{cases} \quad (2)$$

加速:

$$J_x\dot{\omega}_{x1} + (J_z - J_y)\omega_{y1}\omega_{z1} = M_{x1}, \quad (3)$$

其中, m 为机械式变速箱的质量; V 为机械式变速箱的转向速度矢量 (Ox_2 轴) 与水平面间的转矩; F_y 为整个换档过程的控制输入惯性矩; J_z 为跟踪误差; M_{z1} 为稳态状态下的控制阻力; θ 为转向倾角; α 为侧向力; 对位置偏差引起的控制输入进行扰动调节,采用分段线性函数拟合方法^[7],得到机械式变速箱的运行运动学模型描述为如下非线性方程组:

$$\begin{cases} m\dot{V} = -mg\sin\theta - c_x q S_M + P; \\ mV\dot{\theta} = -mg\cos\theta + c_y^\alpha q S_M \alpha + P(\alpha + \delta_\varphi) + m_R l_R \ddot{\delta}_\varphi; \\ J_{z1} \ddot{\varphi} = -c_{y1}^\alpha q S_M (x_g - x_T) \alpha - q S_M m_{dz} l_k^2 \dot{\varphi} / V; \\ -P(x_R - x_T) \delta_\varphi - m_R \dot{W}_{x1} l_R \delta_\varphi - m_R l_R \ddot{\delta}_\varphi (x_R - x_T) - J_R \ddot{\delta}_\varphi. \end{cases} \quad (4)$$

其中, P 为转向力矩; S_M 为法向加速度; l_R 为机

械式变速箱对体坐标系 Oz_1 的惯性积; q 为后阶段位置偏差。对位移的跟踪误差进行自适应调整,获得推动接合套按压同步环的力,得到力学参数的动态变量为 $x = [\varphi, \dot{\varphi}, \theta]^T$,表示机械式变速箱的转向特征向量,对驱动电机进行降扭处理^[8],表示为 $\dot{x} = f(x, u)$,在极限坐标系中,得到动力学状态空间特征量为 $x_0 (x_0 = [\varphi_0, \dot{\varphi}_0, \theta_0]^T)$,表示机械式变速箱运行在平衡状态下的稳态特征值,得到机械式变速箱的非线性多刚体动力学平衡条件: $f(x_0, u_0) = 0$ 。

1.2 控制约束参量分析

以输出转向力矩、换档阻力以及负载力矩等为约束参量,构建机械式变速箱的多轴转向控制的被控对象模型,电枢电阻、电枢电感状态量为 $x = [\varphi_0 + \Delta\varphi, \dot{\varphi}_0 + \Delta\dot{\varphi}, \theta_0 + \Delta\theta]^T$, $\delta_\varphi = \Delta\delta_\varphi$,采用姿态传感器进行机械式变速箱的运行轨迹信息跟踪识别,采用局部角速度和局部线速度联合调节技术进行机械式变速箱状态参数的融合滤波,得到行机械式变速箱整个传动系统的模型线性化方程为:

$$\begin{cases} mV\Delta\dot{\theta} = (c_y^\alpha q S_M + P)\Delta\alpha + mg\sin\theta\Delta\theta + P\Delta\delta_\varphi + m_R l_R \Delta\ddot{\delta}_\varphi + F_{gr}; \\ J_{z1} \Delta\ddot{\varphi} = -c_{y1}^\alpha q S_M (x_g - x_T) \Delta\alpha - q S_M m_{dz} l_k^2 \Delta\dot{\varphi} / V - P(x_R - x_T) \Delta\delta_\varphi - m_R \dot{W}_{x1} l_R \Delta\delta_\varphi - m_R l_R \Delta\ddot{\delta}_\varphi (x_R - x_T) - J_R \Delta\ddot{\delta}_\varphi + M_{gr}. \end{cases} \quad (5)$$

其中, α 为换档阻力; F_{gr} 表示电机的电枢电流; J_R 表示电枢电感; M_{gr} 表示等效阻尼系数。考虑不同换档过程之间的耦合特征量,构建状态量约束方程,得到控制约束参量分布模型为:

$$\begin{cases} \Delta\dot{\theta} = c_1 \Delta\alpha + c_2 \Delta\theta + c_3 \Delta\delta_\varphi + c_3'' \Delta\ddot{\delta}_\varphi + \bar{F}_{gr}; \\ \Delta\ddot{\varphi} + b_1 \Delta\dot{\varphi} + b_2 \Delta\alpha + b_3 \Delta\delta_\varphi + b_3'' \Delta\ddot{\delta}_\varphi = \bar{M}_{gr}; \\ \Delta\varphi = \Delta\theta + \Delta\alpha. \end{cases} \quad (6)$$

其中, \bar{F}_{gr} 表示控制增益; \bar{M}_{gr} 表示变速箱的多轴转向扰动特征分量; $\Delta\alpha$ 表示控制增益。通过迭代更新控制输入来不断优化控制目标,实现机械式变速箱自适应鲁棒控制^[9]。

2 控制算法优化

2.1 多轴转向力矩的最大增益调节

在上述构建机械式变速箱的转向动力学模型和

控制约束参量模型的基础上,进行控制律的优化设计,本文提出基于非线性多刚体动力学分析的机械式变速箱的多轴转向控制方法,构建机械式变速箱的多轴转向控制的被控对象模型,采用自适应迭代学习控制方法实现多轴转向力矩的最大增益调节,自适应迭代学习控制函数表示为:

$$\begin{cases} \ddot{\varphi}_a = -(b_1 + \Delta b_1)\dot{\varphi}_a - (b_2 + \Delta b_2)\varphi_a - \\ (b_3 + \Delta b_3)\delta_\varphi + fd_1; \\ \ddot{\psi}_a = -(b_1 + \Delta b_1)\dot{\psi}_a - (b_2 + \\ \Delta b_2)\psi_a - (b_3 + \Delta b_3)\delta_\psi + fd_2 \\ \ddot{\gamma} = -(d_3 + \Delta d_3)\delta_\gamma + fd_3; \end{cases} \quad (7)$$

式中, φ_a 、 ψ_a 、 γ 为机械式变速箱在横向、侧向和加速度方向上的建模不确定性参数; b_1 、 b_2 、 b_3 、 d_3 为机械式变速箱在纵向运行空间中相对控制变量,为已知系数; Δb_1 、 Δb_2 、 Δb_3 、 Δd_3 为机械式变速箱的控制增益不确定系数; fd_1 、 fd_2 、 fd_3 为扰动力矩; δ_φ 、 δ_ψ 、 δ_γ 为机械式变速箱末端轨迹运行状态估计参数值。

假设机械式变速箱的外形关于 x_1Oy_1 平面对称,采用迭代学习控制来优化控制过程,得到机械式变速箱的升力系数和扭力系数的参数调节模型为:

$$\begin{cases} \ddot{\varphi}_a = -b_1\dot{\varphi}_a - b_2\varphi_a - b_3\delta_\varphi + \rho_1; \\ \ddot{\psi}_a = -b_1\dot{\psi}_a - b_2\psi_a - b_3\delta_\psi + \rho_2; \\ \ddot{\gamma} = -d_3\delta_\gamma + \rho_3. \end{cases} \quad (8)$$

其中, $\rho_1 = -\Delta b_1\dot{\varphi}_a - \Delta b_2\varphi_a - \Delta b_3\delta_\varphi + fd_1$; $\rho_2 = -\Delta b_1\dot{\psi}_a - \Delta b_2\psi_a - \Delta b_3\delta_\psi + fd_2$; $\rho_3 = -\Delta d_3\delta_\gamma + fd_3$ 为不确定项。对采样信号进行滤波处理,在线性小扰动条件下,非线性多刚体动力学分布描述为:

$$\ddot{\varphi}_a = a_1\dot{\varphi}_a + a_2\varphi_a + bu + f_d. \quad (9)$$

式中, $b > 0$; φ_a 为观测器的状态变量; u 为机械式变速箱的线性估计误差; f_d 为转动中心线旋转特征序列,根据上述分析,采用非线性多刚体动力学分析方法进行最优控制参量估计,提高多轴转向控制稳定性。

2.2 机械式变速箱的多轴转向控制

采用非线性多刚体动力学分析方法进行最优控制参量估计,结合期望轨迹跟踪方法进行控制律设计^[10],机械式变速箱运行轨迹预测方程表示为:

$$M_n\ddot{\varphi}_a + h_n(\varphi_a, \dot{\varphi}_a) = u(t) + \rho(t), \quad (10)$$

其中:

$$\rho(t) = -\Delta M\ddot{\varphi}_a - \Delta h(\varphi_a, \dot{\varphi}_a) + d(t), \quad (11)$$

利用机械式变速箱运行轨迹跟踪控制的稳定性进行轨迹跟踪参数调节,得到不确定上界为 $\bar{\rho}(t)$,应用舒尔补定理,则观测器的稳定性输出满足:

$$|\rho(t)| < \bar{\rho}(t), \quad (12)$$

在初始化的位姿参数条件下,整个换档过程的控制输入和角位移输出写成:

$$\begin{cases} f(x_1, x_2) = \frac{1}{Cm} [I_{SM}^2 - I_L^2 - I_{Na}^2 - I_K^2 - I_T^2 - I_{syn}^2 - \\ I_{SM}^1 + I_L^1 + I_{Na}^1 + I_K^1 + I_T^1 + I_{syn}^1]; \\ T_h(V_{Th}) = \frac{1}{\tau_h(V_{Th})}; \\ T_w(V_{Th}) = \frac{1}{\tau_w(V_{Th})}. \end{cases} \quad (13)$$

其中, V_{Th} 表示整个换档过程的时间步数; τ_h 表示时延; τ_w 表示控制时间窗口。如果 $f(x_1, x_2)$ 已知,采用自适应学习加权方法得到机械式变速箱的多轴转向控制输出的唯一解为:

$$u^* = -k_c e_v - f(x_1, x_2) \quad (14)$$

其中, k_c 为稳态状态下的控制率,控制误差满足:

$$\begin{cases} e_v = -K_c e_v; \\ \dot{e}_h = T_h(V_{Th}^1, e_v)h(V_{Th}^1, e_v) - T_h(V_{Th}^1)h(V_{Th}^1) - \\ T_h(V_{Th}^1, e_v)e_h - [T_h(V_{Th}^1, e_v) - T_h(V_{Th}^1)]h_1; \\ \dot{e}_w = \varphi \{ T_w(V_{Th}^1, e_v)w(V_{Th}^1, e_v) - T_w(V_{Th}^1)w(V_{Th}^1) - \\ T_w(V_{Th}^1, e_v)e_w - [T_w(V_{Th}^1, e_v) - T_w(V_{Th}^1)]w_1 \}. \end{cases} \quad (15)$$

若设 $e_v = 0$, 结合控制输入的最优更新率得到输出载荷 $p_i(t)$ ($i = 1, 2, 3$), 控制增益的表达式如下:

$$p_i(t) = e_i(0) + \dot{e}_i(0)t + \left[\frac{a_{00}}{T^2} e_i(0) + \frac{a_{01}}{T} \dot{e}_i(0) \right] t^2 + \left[\frac{a_{10}}{T^3} e_i(0) + \frac{a_{11}}{T^2} \dot{e}_i(0) \right] t^3. \quad (16)$$

其中, T 表示运行工况采样时间间隔, e_i 表示参数误差,结合期望轨迹的模糊跟踪识别方法实现机械式变速箱的多轴转向控制,综上分析,实现控制算法的优化设计。

3 仿真实验与结果分析

为了验证本文方法在实现机械式变速箱的多轴转向控制中的应用性能,进行实验分析,实验采用

Matlab 7 仿真设计,对变速箱的工况信息采样频率为 $f_s = 10 * f_0 \text{ Hz} = 10 \text{ KHz}$; 电枢电感设定为 0.005 H ; 反电动势系数为 $0.018 \text{ V} \cdot \text{s}/\text{rad}$; 传动效率为 0.87 , 等效阻尼系数为 $0.004 \text{ N} \cdot \text{ms}/\text{rad}$; 根据上述仿真参数设定,进行机械式变速箱的多轴转向控制仿真分析,在模拟实车运行条件下,变速箱的样机如图 1 所示。

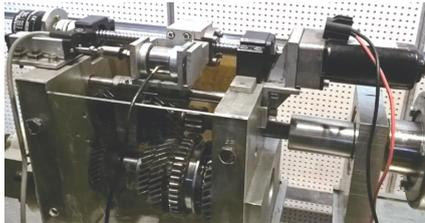


图 1 变速箱样机模型

Fig. 1 Gearbox prototype model

首先采用传感器进行机械式变速箱的多轴转向的力矩信息采集,得到转向力矩如图 2 所示。

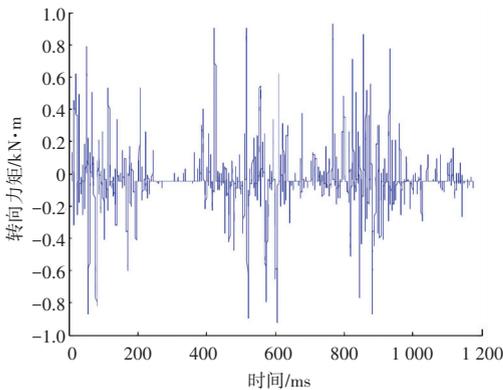


图 2 机械式变速箱的多轴转向力矩

Fig. 2 Multi-axis steering moment of mechanical gearbox

以图 2 的数据为研究样本,进行机械式变速箱的多轴转向控制,得到期望轨迹的模糊跟踪结果如图 3 所示。

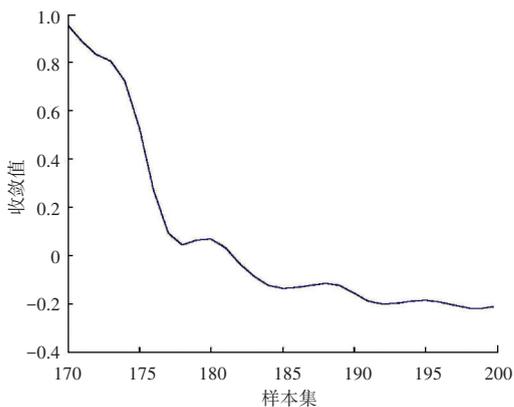


图 3 控制输出

Fig. 3 Control output

分析图 3 得知,采用本文方法进行机械式变速箱的多轴转向控制的轨迹跟踪性能较好,测试不同方法进行机械式变速箱的多轴转向控制的误差,得到对比结果如图 4 所示,分析图 4 得知,本文方法进行机械式变速箱的多轴转向控制的误差较低,提高了控制的品质。

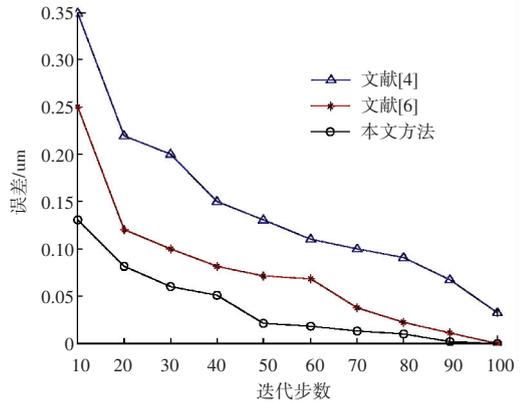


图 4 控制误差对比

Fig. 4 Control error comparison

4 结束语

本文提出基于非线性多刚体动力学分析的机械式变速箱的多轴转向控制方法,构建机械式变速箱的转向动力学模型,以输出转向力矩、换档阻力以及负载力矩等为约束参量,构建机械式变速箱的多轴转向控制的被控对象模型,采用自适应迭代学习控制方法实现多轴转向力矩的最大增益调节,采用非线性多刚体动力学分析方法进行最优控制参量估计,结合期望轨迹的模糊跟踪识别方法实现机械式变速箱的多轴转向控制律优化设计。研究得知,本文方法进行机械式变速箱的多轴转向控制的误差较低,性能较好,改善了控制精度和灵敏度。

参考文献

- [1] 姚世鹏,熊欢,兰晓霞,等. 汽车四轮转向最优控制技术的研究[J]. 船电技术,2018,38(11):33-36,42.
- [2] 刘成强,徐海港. 汽车电动助力转向系统控制策略研究[J]. 机械设计与制造,2018(10):265-268.
- [3] 靳立强,田端洋,刘阅. 电动轮汽车驱动助力转向与稳定性协调控制[J]. 机械工程学报,2018,54(16):160-169.
- [4] 何凯,林成涛,李亮,等. 电控机械式变速箱换挡过程迭代学习控制[J]. 机械工程学报,2019,55(4):84-90.
- [5] 尹冠生,姚如洋,赵振宇. 高速公路防撞垫概念模型的优化及控制参数研究[J]. 工程力学,2017,34(S1):220-226.
- [6] 桑楠,魏民祥. 基于 ESO 与 NTSM 的汽车主动前轮转向控制[J]. 南京航空航天大学学报,2018,50(4):521-527.
- [7] LORIA A. Observers are unnecessary for output-feedback control of lagrangian systems [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2016, 61(4):905-920.