

面向离合器接合过程控制的不确定性估计

李晓祥, 王安麟, 李晓田

(同济大学机械与能源工程学院, 201804, 上海)

摘要: 为解决非平稳随机循环载荷等不确定性因素造成的变速离合器接合过程平稳性问题, 提出了面向离合器接合过程控制的不确定性估计方法。以某5 t装载机V型工况重载后退作业离合器接合过程为研究对象, 通过对其扭转振动方程降阶处理, 在构建非平稳随机循环载荷不确定项参数表达与离合器接合摩擦转矩时变模型的基础上, 得到离合器接合过程主从动端转速差的不确定性表达。通过变速器参数标定、台架试验及数值仿真, 结果表明该方法可实现离合器接合平稳特性分析及不确定项阈值估计。所提出的不确定性估计方法对类似强不确定性离合器接合的鲁棒控制器设计具有参考价值。

关键词: 离合器; 不确定性; 估计; 控制

中图分类号: TH623.9 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202007003 **文章编号:** 0253-987X(2020)07-0017-08



OSID 码

Uncertainty Estimation for Clutch Engagement Process Control

LI Xiaoxiang, WANG Anlin, LI Xiaotian

(School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: To solve the problem of clutch engagement smoothness caused by uncertain factors such as non-stationary random cyclic load, a method for estimating the uncertainty of the clutch engagement process control is proposed. Taking the clutch engagement process of heavy load reverse operation of a 5 t loader under V-type working condition as the research object, the uncertainty expression of the speed difference between the driving and driven ends of the clutch engagement is obtained by reducing the order of the torsional vibration equation of the clutch engagement process and on the basis of constructing the parameter expression of non-stationary random cyclic load uncertainty and the time-varying model of clutch engagement friction torque. Transmission parameter calibration, bench test and numerical simulation are conducted, and the results show that the method can realize the analysis of clutch engagement smoothness and the uncertainty threshold estimation. The uncertainty estimation method proposed in this paper is of reference value in the design of robust controllers for the clutch engagement with similar strong uncertainty.

Keywords: clutch; uncertainty; estimation; control

土方机械的工况复杂多变, 所受外载荷等激励动态时变且剧烈。离合器作为动力传递系统中广泛

使用的元器件, 其良好的接合性能可减少外载荷对传动系统零部件的冲击, 延长机器的使用寿命^[1-3]。

收稿日期: 2019-12-31。 作者简介: 李晓祥(1984—), 男, 博士生; 李晓田(通信作者), 男, 讲师。 基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFC0810203)。

网络出版时间: 2020-03-12

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20200311.1957.004.html>

离合器接合过程动态特性除与自身结构和传动轴参数有关外,还受到外部输入激励的影响^[4-6]。输入激励和自身结构特征变化对离合器接合过程品质控制的设计有较大影响,良好的控制器性能有利于提高离合器使用寿命和降低失效。

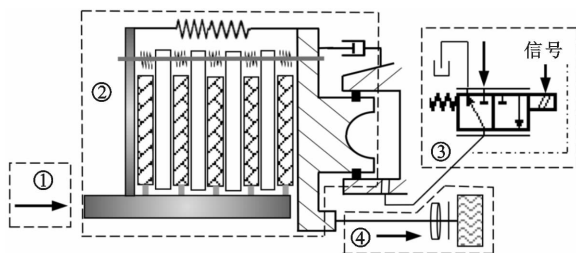
近年来,国内外对离合器失效进行了大量的研究,更多的是集中在能够直观判断的离合器热失效方面,对不确定因素变化引起的失效研究相对较少^[7-9]。离合器作为非线性动力传动系统中的重要组成部分,其接合过程受到的影响和制约主要表现在动态摩擦特性上,而该特性与扭转振动密切相关。分析不确定因素变化对扭转振动特性的影响有助于离合器接合控制设计,可降低不确定因素带来的接合稳定性问题。Centea 等分析了摩擦系数的变化对离合器接合振动的影响,但未考虑外部激励^[10-11]。Boswick 等通过仿真得到离合器扭转振动与摩擦速度、控制压力及外载荷相关,未考虑不确定项影响问题^[12]。国内胡宏伟等通过摩擦系数变化对接合过程的影响进行了仿真分析^[13-14]。Luo 将扭转振动影响参数分为设计和动态变化参数,未考虑外部激励等因素^[15]。何红等通过建立摩擦接触面模型来分析离合器接合稳定性,偏于单一因素的影响^[16-17]。土方机械离合器接合过程是一个复杂的、强非线性的系统,存在着多物理场耦合以及内外因素不确定项变化,建立以试验数据为基础的参数化模型,对其控制器设计及性能提高具有一定的工程应用价值。

以某 5 t 装载机 V 型工况重载后退中离合器接合过程为研究对象,基于实测数据,对输入激励参数化模型表达和多稳态工况下参数进行优化,通过变速器参数标定、台架试验及数值仿真可实现离合器接合过程平稳特性分析及不确定项阈值估计。

1 离合器接合扭转振动模型及解析

1.1 离合器接合过程描述

图 1 为离合器接合过程系统简图。文献[18-19]对油压控制系统中压力控制模块和鲁棒控制方法进行了阐述,可知输入激励和动摩擦系数的不确定性变化可转换至离合器控制油压的不确定模型进行控制设计。离合器接合品质常用的评价指标冲击度和滑磨功,主要集中在离合器摩擦片与钢板之间开始接触直至两者转速差为零的阶段^[20]。通过对该阶段输入激励和其结构参数变化带来的不确定项阈值估计,有助于接合过程控制器设计,对提高车辆使用寿命和驾乘舒适性有重要的意义。



①—动力输入激励;②—离合器执行机构;
③—油压控制系统;④—负载端激励。

图 1 离合器接合过程系统简图

1.2 离合器接合扭转振动模型及解析

机器作业过程中的阻力构成复杂且处于动态变化中,这种非平稳随机阻力矩通过传动系统传递至离合器输出端,以此建立的离合器接合过程三自由度动力学模型如图 2 所示,输入激励 T_i 和输出激励 T_o 分别作用于离合器主、从动端。

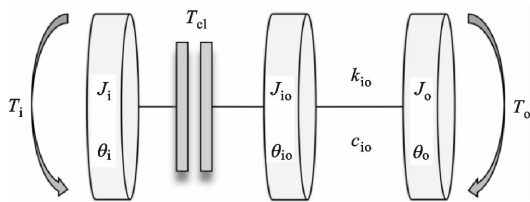


图 2 三自由度离合器接合动力学模型

对于该动力学模型,离合器接合过程扭转振动微分方程为

$$\left. \begin{aligned} J_i \ddot{\theta}_i &= T_i - T_{cl} \\ J_{io} \ddot{\theta}_{io} &= T_{cl} - c_{io}(\dot{\theta}_{io} - \dot{\theta}_o) - k_{io}(\theta_{io} - \theta_o) \\ J_o \ddot{\theta}_o &= c_{io}(\dot{\theta}_{io} - \dot{\theta}_o) + k_{io}(\theta_{io} - \theta_o) - T_o \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: J_i 、 J_{io} 、 J_o 分别为动力端等效至离合器输入端转动惯量、摩擦片从动端转动惯量和负载端等效转动惯量; θ_i 、 θ_{io} 、 θ_o 分别为转动惯量 J_i 、 J_{io} 、 J_o 对应的绝对角位移; T_i 、 T_{cl} 、 T_o 分别为动力端等效至离合器输入端的转矩、离合器传递的摩擦转矩和负载端等效至离合器输出端的转矩; c_{io} 和 k_{io} 分别为负载端等效的阻尼系数和转动刚度。

为更好地分析输入激励和各参数对离合器接合平稳性的影响,通过转速差时间历程可直观表达。令 $\delta_1 = \theta_i - \theta_{io}$, $\delta_2 = \theta_{io} - \theta_o$, 在式(1)基础上自由度减少后等效的动力学方程分别为

$$\ddot{\delta}_1 - \frac{c_{io}}{J_{io}} \dot{\delta}_2 - \frac{k_{io}}{J_{io}} \delta_2 = \frac{T_i}{J_i} - \left(\frac{1}{J_i} + \frac{1}{J_{io}} \right) T_{cl} \quad (2)$$

$$\ddot{\delta}_2 + c_{io} \left(\frac{1}{J_{io}} + \frac{1}{J_o} \right) \dot{\delta}_2 + k_{io} \left(\frac{1}{J_{io}} + \frac{1}{J_o} \right) \delta_2 = \frac{1}{J_o} T_o + \frac{1}{J_{io}} T_{cl} \quad (3)$$

在初始时刻,假设转动惯量 J_{i0} 和 J_o 。对应模型中的转速相同,初始条件为

$$\left. \begin{aligned} \delta_1(0) &= \theta_i(0) - \theta_{i0}(0) \\ \dot{\delta}_1(0) &= \dot{\theta}_{i0}(0) \\ \delta_2(0) &= 0 \\ \dot{\delta}_2(0) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

通过待定系数法确定特解后,对式(2)和(3)的转速差通解分别为

$$\begin{aligned} \dot{\delta}_1 &= e^{-\zeta\omega_n t} \left(\frac{\zeta\omega_n \sin(\omega_d t) + \omega_d \cos(\omega_d t)}{\omega_n^2} \right) \cdot \\ &\quad \left(\frac{Ac_{i0}\omega_d + Bc_{i0}\zeta\omega_n - Bk_{i0}}{J_{i0}} \right) + \\ &\quad e^{-\zeta\omega_n t} \left(\frac{\omega_d \sin(\omega_d t) - \zeta\omega_n \cos(\omega_d t)}{\omega_n^2} \right) \cdot \\ &\quad \left(\frac{Ak_{i0} + B\omega_d c_{i0} - A\zeta\omega_n c_{i0}}{J_{i0}} \right) + \\ &\quad \left(\frac{T_i}{J_i} + \frac{T_o}{J_{i0} + J_o} - \frac{J_i + J_{i0} + J_o}{J_i(J_{i0} + J_o)} T_{cl} \right) t + C \quad (5) \\ \dot{\delta}_2 &= -e^{-\zeta\omega_n t} A\omega_d \sin(\omega_d t) - \zeta\omega_n e^{-\zeta\omega_n t} A \cos(\omega_d t) + \\ &\quad e^{-\zeta\omega_n t} B\omega_d \cos(\omega_d t) - \zeta\omega_n e^{-\zeta\omega_n t} B \sin(\omega_d t) \quad (6) \end{aligned}$$

式中: $A = -(J_{i0} T_o + J_o T_{cl}) / (k_{i0} J_{i0} + J_o)$; $B = A\zeta\omega_n / \omega_n$; $C = \dot{\theta}(0) - \omega_d (Ac_{i0}\omega_d + Bc_{i0}\zeta\omega_n - Bk_{i0}) / (\omega_n^2 J_{i0}) + \zeta (Ak_{i0} + B\omega_d c_{i0} - A\zeta\omega_n c_{i0})$; $\zeta = c_{i0} / 2(k_{i0} J_{eq})^{1/2}$, $J_{eq} = J_{i0} J_o / (J_{i0} + J_o)$; $\omega_n = (k_{i0} / J_{eq})^{1/2}$; $\omega_d = \omega_n (1 - \zeta^2)^{1/2}$ 。

通过以上解析可知, T_i 、 T_{cl} 、 T_o 、 c_{i0} 和 k_{i0} 等因素与离合器接合过程动态特性相关。为分析载荷和摩擦系数等因素变化带来的不确定性对离合器接合过程平稳性的影响及不确定项阈值,建立参数化模型表达下离合器接合过程控制的不确定性估计方法,具体流程如图 3 所示。下面分别针对输入激励 T_i 、 T_{cl} 、 T_o 和参数 c_{i0} 、 k_{i0} 展开阐述。

2 输入激励参数模型及相关不确定性

2.1 现场试验

为构建离合器输入输出端参数化模型,需准确获取工况下的实测数据。在平整的场地对某厂家 5 t 装载机进行现场测试,碎石中夹杂少量松散土作为作业对象,进行了 V 型、L 型和 T 型 3 种典型工况空、重载下各 12 组数据测试。部分元器件的安装如图 4 所示,主要元器件有 INDAM36 数据采集仪、Barksdale 流量和压力传感器、MPS-S-MA 位移传感器、HAL-12 霍尔转速传感器以及 HX902 转矩传感器等。在误差为零、满足香农采样定理等前提下进行多次测试,以获得若干样本数据。

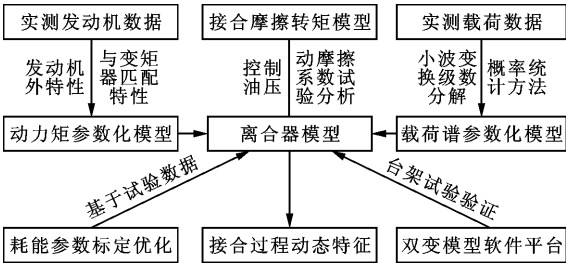


图 3 参数分析流程图

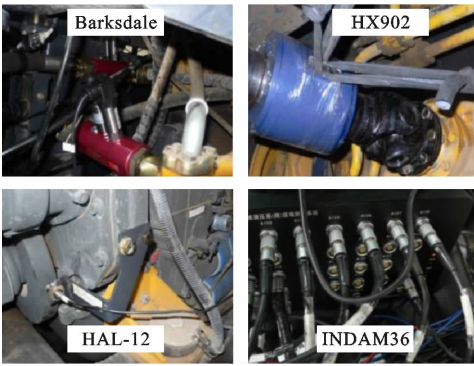


图 4 部分元器件安装图

2.2 载荷激励模型构建及其不确定性

选取空重载后退离合器接合过程的实测数据,采用标准差检验法,将载荷信号中的奇异值剔除,不同条件下多组数据均值处理后的曲线如图 5 所示。通过数据对比可知,重载幅值变化范围最大,与文献[21-23]的研究一致。

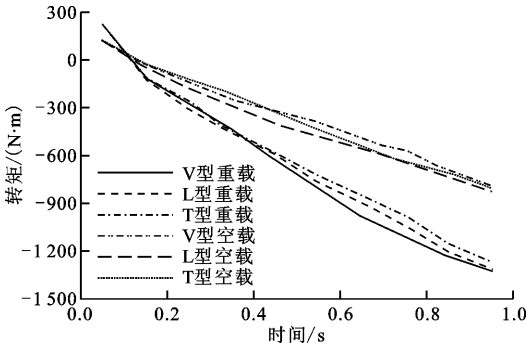


图 5 不同工况下载荷数据对比

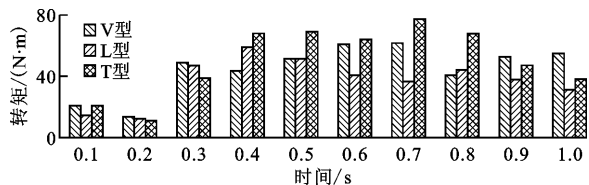
对该过程随机试验样本数据的平稳性进行轮次检验,可知信号非平稳。为构建参数化载荷谱模型,采用小波变换级数分解方法对信号进行处理。小波变换可将信号分解为不同频率的信号且保持总能量不变,是一种时间窗和频率窗均可改变的时频局部化分析方法,特别适合低频信号变化缓慢而高频信号变化迅速的信号处理。多分辨率分析作为一种重要的小波变换方法,对能量有限的载荷信号 $T(t)$ 在尺度参数为 2^j 下进行分解,通过低通滤波器

得到低频分量 $A_{j-1}f$ 和高通滤波器得到高频分量 $D_{j-1}f$, 如下式^[24]所示

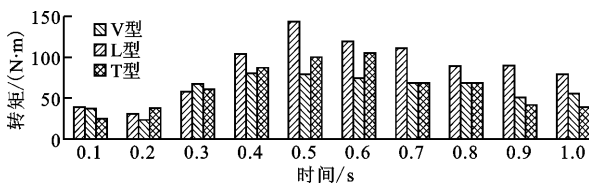
$$\left. \begin{aligned} A_j f &= A_{j-1} f + D_{j-1} f \\ A_{j-1} f &= \sum_{k \in Z} a_k^{j-1} \phi(2^{j-1} x - k) \\ D_{j-1} f &= \sum_{k \in Z} d_k^{j-1} \psi(2^{j-1} x - k) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中: a_k^{j-1} 与 d_k^{j-1} 分别为近似系数和细节系数; ϕ 为尺度函数, 与低通滤波器相对应; ψ 为小波函数, 与高通滤波器相对应。

选用适于振动数据处理的 db10 小波为基本小波函数, 以分解尺度为 2 层对载荷信号数据进行处理, 处理后的空、重载高频分量符合均值为零的正态分布, 其标准差时间历程分布如图 6 所示。



(a) 空载随机项标准差时间历程



(b) 重载随机项标准差时间历程

图 6 不同工况下随机项标准差时间历程分布图

通过以上分析可知, 载荷谱激励模型可由非平稳趋势项和均值为零的正态分布构建, V 型重载随机项在不同工况下数据范围最大, 选取该阶段载荷谱参数化模型作为离合器接合过程的输入激励。

2.3 动力矩激励模型构建

与 2.2 节所选工况相对应, 对动力输入端数据进行模型构建。在实际应用过程中, 装载机变速箱输入端不安装转矩传感器, 离合器输入转速和转矩通过发动机和变矩器的匹配计算获得。首先, 建立踏板位移与发动机零转矩转速的函数关系; 其次, 通过空载测试建立发动机实际输出转矩表达式; 最后, 根据挡位接合信息和变矩器特性曲线近似地获得变矩器出口转速和转矩。

发动机转速与油门踏板位移测试曲线如图 7 所示。空载零转矩转速 n_0 与油门踏板位移 x_d 的函数表达式为

$$n_0 = a_0 x_d^n + a_1 x_d^{n-1} + \cdots + a_{n-1} x_d + a_n \quad (8)$$

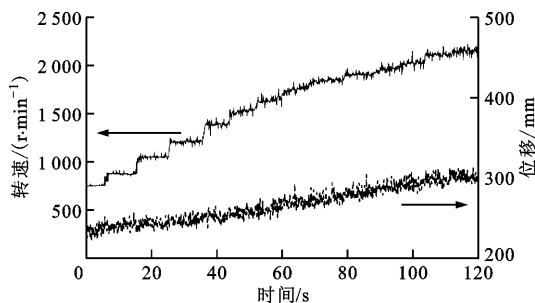


图 7 发动机转速和油门踏板位移曲线

在图 7 数据和式(8)基础上, 拟合后的结果如图 8 所示, 相关系数为 0.955, 近似表征精度高, 在一定程度上可作为其函数映射关系表达。拟合公式为

$$n_0 = -0.2018425x_d^2 + 127.59x_d - 1.80093 \times 10^4 \quad (9)$$

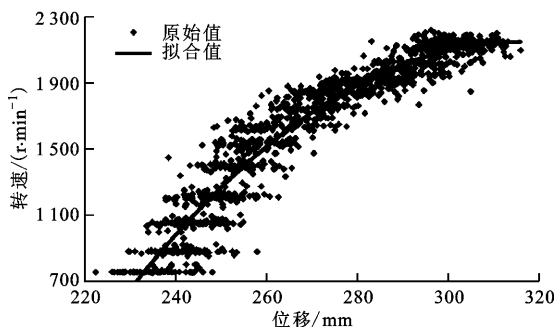


图 8 发动机转速与油门踏板位移拟合结果

发动机试验外特性 $T-n$ 曲线可由两个多项式 T_1 和 T_2 拟合表达

$$\left. \begin{aligned} T_1 &= k_0 n^m + k_1 n^{m-1} + \cdots + k_{m-1} n + k_m \\ T_2 &= K_T (n - n_0) \\ T_0 &= \min(T_1, T_2) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中: T_1 为发动机外特性曲线上某一转速对应的转矩; T_2 为某一脚踏板位移对应的调速段上的转矩; K_T 为调速段直线的斜率; T_0 为发动机输出的实际转矩。利用最小二乘法拟合外特性表达式, 得其系数分别为 $k_0 = -3.927$, $k_1 = 0.001303$, $k_2 = -1.2481$, $k_3 = 1145.265$, 同时具有较高的一致性相关程度。

根据挡位信息和辅助元器件功率损耗可得变矩器输入数据, 结合变矩器特性参数, 对变矩器涡轮输出转矩和转速数据均值化处理后的随机项数据符合均值为零的正态分布, 通过传动系统的传递关系可获得离合器输入激励参数化模型, 详细数据处理过程不再赘述。

2.4 摩擦系数不确定项及接合摩擦转矩模型

结合控制策略并考虑离合器接合过程冲击度和

滑磨功,为使输入控制油压与实际工作设定值较为一致,除考虑输入控制信号外,油温、转速和压力对摩擦系数也有重要影响。某次试验数据如图 9 所示。离合器摩擦系数为非线性变化,完全接合后为静摩擦,与动摩擦系数相差大,所需油压降低,造成压力保持阶段油压突变,使系统受到压力冲击。同时,受材料的损耗及热变形等影响,摩擦系数亦发生不确定性变化。因此,在离合器接合过程,摩擦系数选用方面应避免幅度变化过大和考虑不确定项变化。

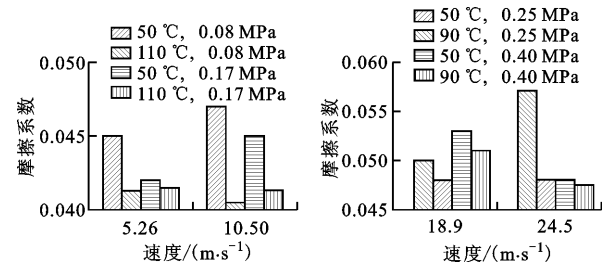


图 9 不同条件下摩擦系数随速度的变化

在文献[22]离合器最优控制油压的基础上,摩擦系数的选择考虑了工作温度和压力突变影响,建立的接合摩擦转矩表达式为

$$T_{cl}(t) = \mu(t)A_pZR_m\left(p_c - \frac{F_s}{A_p} + p_d\right) \quad (11)$$

式中: $\mu(t)$ 为摩擦系数; A_p 为离合器活塞面积; Z 为摩擦副数量; R_m 为摩擦片等效半径; p_c 为离合器控制油压; F_s 为弹簧力; p_d 为离合器油液动压力。

3 变速箱参数标定及模型验证

考虑离合器接合过程参数中阻尼系数、弹性参数和离合器综合模型等理论数据与实际应用有一定的偏差,通过对变速箱模型及多个稳态工况的标定来确定离合器各参数。为使标定过程计算效率提高,采用键合图方法将物理模型转化为数学模型,并结合复合形法等优化方法建立了仿真平台,如图 10 所示。仿真平台有建模、控制信号设置、运行和优化等功能,可实现零部件参数标定、系统动态仿真及标定等。

3.1 参数标定及优化

阻尼系数对系统稳态和瞬态都有影响,而转动惯量和弹性系数仅对系统的瞬态有影响。若以瞬态试验数据对阻尼系数进行标定,难以排除转动惯量和弹性系数的影响,故采用稳态试验数据对阻尼系数标定。以发动机转速、前后轴转矩之和作为输入,以输出的前轴转速与试验测试转速的差值最小为标定策略,选取的 4 个稳态工况在某不同参数组合下

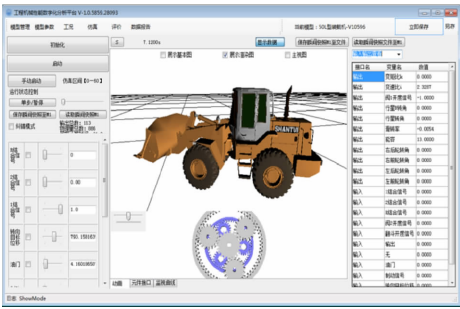


图 10 仿真平台界面图

的标定结果如图 11 所示,图中结果证明了所用标定策略的准确性。

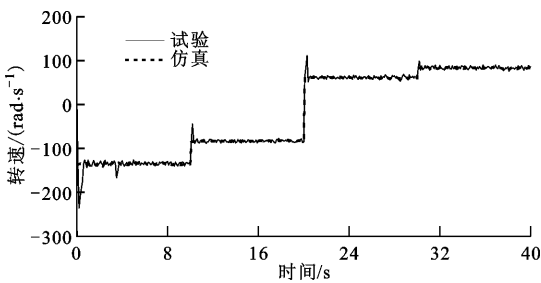


图 11 标定策略验证结果图

变速箱输出轴理论转矩与实际测试转矩之差,即为变速箱内部阻尼造成的摩擦损失。在通过多工况求解一些参数初值的前提下,以转速差最小为优化目标,以阻尼、转动刚度、库仑力矩等为设计变量,根据试验测试数据、标定策略进行标定优化,收敛过程如图 12 所示,标定时 c_{i0} 为 $38.8 \text{ mN} \cdot \text{m} \cdot \text{s}/\text{rad}$, k_{i0} 为 $200 \text{ kN} \cdot \text{m}/\text{rad}$ 。

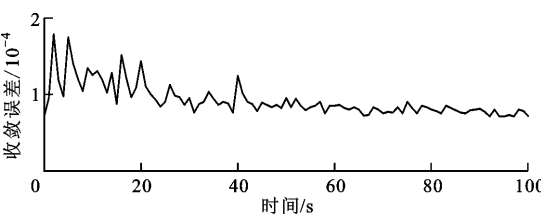


图 12 优化过程收敛图

3.2 模型试验验证

在 3.1 节变速箱稳态参数优化的基础上,在空载时对模型参数的准确性进行试验验证。考虑变速箱与变矩器一体结构的特殊性,采用同样方法对变矩器进行了动态标定,不再叙述。变速箱试验台架和损失功率对比分别如图 13 和图 14 所示。

根据图 14 所得的仿真与试验损失功率相对误差如表 1 所示,可知模型仿真与试验数据相差很小,进一步说明了离合器接合过程所用数学模型的准确性。



图 13 变速箱试验台架

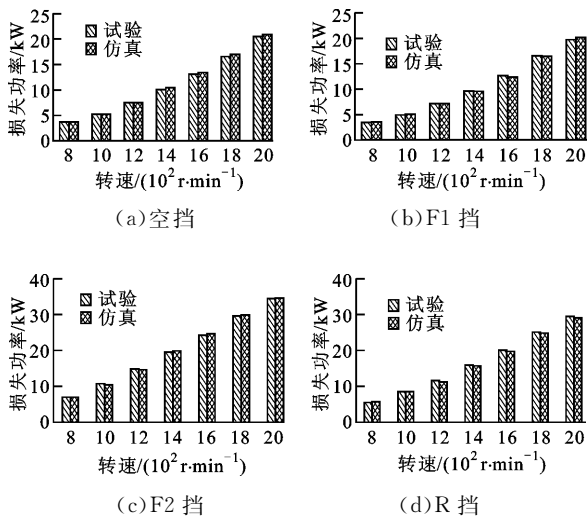


图 14 仿真与试验损失功率对比图

表 1 仿真与试验损失功率的相对误差

转速/ ($r \cdot \text{min}^{-1}$)	损失功率相对误差/%			
	空挡	F1 挡	F2 挡	R 挡
800	1.69	0.54	1.32	2.53
1 000	0.52	1.83	1.93	0.12
1 200	0.92	0.43	0.61	2.48
1 400	2.49	1.71	1.09	1.73
1 600	2.33	1.60	1.47	1.69
1 800	1.89	1.39	1.00	1.28
2 000	1.75	2.00	0.65	1.33

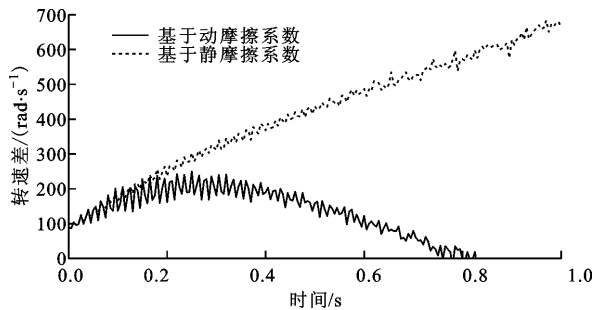
4 仿真与分析

基于上述模型验证、相关参数标定等,采用 MATLAB 进行离合器接合过程扭转振动仿真分析。结合实际工程应用和离合器速度差平均波动幅值(AFA)评价准则^[25],分析动摩擦系数和载荷谱变化带来的不确定性对离合器接合过程平稳性影响并估计其阈值。

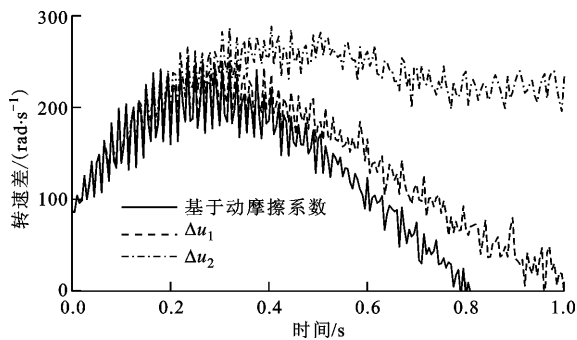
4.1 摩擦系数不确定性分析

实际应用中,当动静摩擦系数相差较大、离合器

接合速度和控制压力较小时,振颤现象较为严重。通过式(11)可知,控制油压的数值设计主要由摩擦接合转矩和摩擦系数决定,摩擦系数的不确定性可转化至控制油压和流量的摄动模型进行控制设计,通过摩擦系数不确定性分析有利于油压轨迹跟踪控制器设计。图 15a 为根据动静摩擦系数设计的控制油压下离合器接合转速差变化曲线,与实际应用中摩擦系数对接合过程的影响相符合,即控制油压的设计不能随着摩擦系数负斜率突变而降低。图 15b 为摩擦系数不确定项 Δu_1 、 Δu_2 变化时的接合曲线,在控制压力设计曲线保持不变时,不确定项边界变化对离合器接合时间有影响,摩擦系数不确定摄动变化的阈值估计,对离合器接合控制中油压设计提供了数值变化范围参考。



(a) 摩擦系数变化



(b) 不确定项变化

图 15 不同摩擦系数和不确定项下的接合变化曲线

4.2 载荷谱不确定性分析

图 16 为载荷谱随机项中不确定项 ΔT_1 、 ΔT_2 对离合器接合过程的影响曲线。随着随机项标准差的增大,离合器接合转速差波动变大,将增加摩擦片磨损和扭转振颤,但接合时间基本无变化。结合 AFA 数值要求和仿真数据,可估计不确定性阈值范围。分析作业工况载荷特征和对其不确定性边界估计,有助于离合器接合控制器在不同模式下的鲁棒设计。

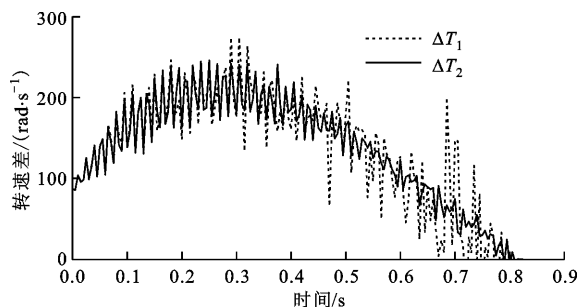


图 16 载荷不确定项变化下的接合曲线

5 结 论

(1)以 V 型、T 型和 L 型工况试验为基础,根据其数据特征采用不同数学方法进行参数化模型表达,在一定程度内可有效地作为输入激励来表征其性能特征及相关不确定性。

(2)借助键合图和优化算法得到阻尼、转动刚度等参数数值,且通过变速器试验验证了损失功率的相对误差在 0.12%~2.53% 的范围内,可为提高离合器接合过程扭转振动方程中参数解析的精准度提供数据支撑。

(3)动摩擦系数和载荷谱不确定项对接合平稳性的影响分析及阈值估计,可为接合鲁棒控制器设计提供参考。

参考文献:

- [1] HAJ-FRAJ A, PFEIFFER F. Optimal control of gear shift operations in automatic transmissions [J]. Journal of the Franklin Institute, 2001, 338(2/3): 371-390.
- [2] MENG F, ZHANG H, CAO D P, et al. System modeling and pressure control of a clutch actuator for heavy-duty automatic transmission systems [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(7): 4865-4874.
- [3] WAN Guoqiang, LI Keqiang, PEI Ling, et al. Optimal tracking control for automatic transmission shift process [J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2015, 24(4): 458-465.
- [4] ZOU Qian, RAO C, BARBER G, et al. Investigation of surface characteristics and tribological behavior of clutch plate materials [J]. Wear, 2013, 302(1/2): 1378-1383.
- [5] LI M, KHONSARI M M, MCCARTHY D, et al. Parametric analysis of wear factors of a wet clutch friction material with different groove patterns [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers,

Part J Journal of Engineering Tribology, 2017, 231(8): 1056-1067.

- [6] BERGER E J, SADEGHI F, KROUSGRILL C M. Analytical and numerical modeling of engagement of rough, permeable, grooved wet clutches [J]. Journal of Tribology, 1997, 119(1): 143-148.
- [7] YANG L K, MA B, AHMADIAN M, et al. Pressure distribution of a multidisc clutch suffering frictionally induced thermal load [J]. Tribology Transactions, 2016, 59(6): 983-992.
- [8] PISATURO M, SENATORE A. Simulation of engagement control in automotive dry-clutch and temperature field analysis through finite element model [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 93: 958-966.
- [9] JACOBSSON H. Aspects of disc brake judder [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers; Part D Journal of Automobile Engineering, 2003, 217(6): 419-430.
- [10] CENTEA D, RAHNEJAT H, MENDAY M T. The influence of the interface coefficient of friction upon the propensity to judder in automotive clutches [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers; Part D Journal of Automobile Engineering, 1999, 213(3): 245-258.
- [11] CENTEA D, RAHNEJAT H, MENDAY M T. Non-linear multi-body dynamic analysis for the study of clutch torsional vibrations (judder) [J]. Applied Mathematical Modelling, 2001, 25(3): 177-192.
- [12] BOSTWICK C C, SZADKOWSKI A. Self-excited vibrations during engagements of dry friction clutches [J]. SAE Transactions, 1998, 107(2): 689-701.
- [13] 胡宏伟,周晓军,杨先勇,等. 离合器接合过程中抖动及其影响因素的分析 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2009, 43(3): 535-539.
HU Hongwei, ZHOU Xiaojun, YANG Xianyong, et al. Analysis of clutch engagement judder and its influence factors [J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2009, 43(3): 535-539.
- [14] 颜克志,方宗德,张国胜. 汽车离合器接合过程中的稳定性分析研究 [J]. 机械科学与技术, 2007, 26(5): 615-618.
YAN Kezhi, FANG Zongde, ZHANG Guosheng. Stability analysis and study of automotive clutch engagement [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2007, 26(5): 615-618.
- [15] LUO J. Friction-induced vibration and dynamic instability finite element analysis; application of disc brake squeal [D]. Cincinnati, USA: The University of Cin-

- cinnati, 1995.
- [16] 何红, 徐自力, 王存俊, 等. 盘式拉杆转子非连续摩擦接触界面功能失效机理研究 [J]. 西安交通大学学报, 2018, 52(7): 130-138.
- HE Hong, XU Zili, WANG Cunjun, et al. Failure mechanism of discontinuous friction contact interfaces of disk-type rod fastening rotors [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2018, 52(7): 130-138.
- [17] SHIN K, BRENNAN M J, OH J E, et al. Analysis of disc brake noise using a two-degree-of-freedom model [J]. Journal of Sound and Vibration, 2002, 254(5): 837-848.
- [18] 李晓祥, 王安麟, 樊旭灿, 等. 面向离合器接合过程的比例电磁阀动态特性模型与设计 [J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(5): 47-53.
- LI Xiaoxiang, WANG Anlin, FAN Xucan, et al. Dynamic characteristics model and design of proportional solenoid valve for clutch engagement process [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, 54(5): 47-53.
- [19] 李晓祥, 王安麟, 樊旭灿, 等. 非平稳随机循环工况离合器接合优化及跟踪控制 [J/OL]. 哈尔滨工业大学学报. [2019-12-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1235.t.20190929.1724.002.html>.
- LI Xiaoxiang, WANG Anlin, FAN Xucan, et al. Optimization and tracking control of the clutch engagement process under non-stationary random cyclic conditions [J/OL]. Journal of Harbin Institute of Technology. [2019-12-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1235.t.20190929.1724.002.html>.
- [20] 葛安林, 吴锦秋, 郭万富. 自动控制离合器接合特性的研究 [J]. 吉林工业大学学报, 1988, 18(2): 70-80.
- GE Anlin, WU Jinqiu, GUO Wanfu. Engaging characteristics of clutch under automatic control [J]. Journal of Jilin University of Technology, 1988, 18(2): 70-80.
- [21] 李晓祥, 王安麟, 付志翼. 面向典型换挡工况重构的参数化试验载荷模型 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020, 52(1): 43-49.
- LI Xiaoxiang, WANG Anlin, FU Zhiyi. Parameterized test load model for typical shifting condition reconstruction [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2020, 52(1): 43-49.
- [22] 张英爽, 王国强, 王继新, 等. 工程车辆传动系载荷谱编制方法 [J]. 农业工程学报, 2011, 27(4): 179-183.
- ZHANG Yingshuang, WANG Guoqiang, WANG Jixin, et al. Compilation method of power train load spectrum of engineering vehicle [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(4): 179-183.
- [23] 许纯新, 张云龙, 诸文农. 具有分段作业特点的非平稳随机载荷的制谱方法研究 [J]. 机械工程学报, 1993, 29(2): 46-51.
- XU Chunxin, ZHANG Yunlong, ZHU Wennong. Study on load spectrum preparation of non-stationary random load with sectional operating characteristics [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 1993, 29(2): 46-51.
- [24] 姜涛, 付志翼, 王安麟. 一种非平稳随机循环工况下的参数化载荷模型 [J]. 东北大学学报(自然科学版), 2016, 37(6): 845-850.
- JIANG Tao, FU Zhiyi, WANG Anlin. Parameterized load model under non-stationary random cyclic conditions [J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 2016, 37(6): 845-850.
- [25] 杨立昆, 李和言, 马彪. 湿式离合器接合过程摩擦振动机理研究 [J]. 振动与冲击, 2016, 35(9): 117-122.
- YANG Likun, LI Heyan, MA Biao. Friction-induced vibration of wet clutches [J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(9): 117-122.

(编辑 荆树蓉)