DOI: 10.3901/JME.2019.07.147

多股簧绕制成型过程中时变非线性张力控制 建模及仿真*

蔡万强 王时龙 张 其 杨文翰 易力力
(重庆大学机械传动国家重点实验室 重庆 400044)

摘要: 针对当前多股簧数控加工机床存在的钢丝张力一致性不佳、张力控制系统调试效率低的问题,研究了张力产生机理,建立了时变非线性动力学模型。以 3 股钢丝的多股簧为例研究了钢丝间张力互相作用机制,并基于 Matlab / Simulink 搭建张力控制系统仿真平台,探索了某一通道阻尼突增对所有钢丝张力一致性的影响。仿真结果表明,钢丝张力突增使得钢索成型点后移,各钢丝捻角变大,进而导致放卷速度、牵引速度及张力产生波动。通过不同预设张力值下控制系统的仿真偏差与试验偏差曲线的对比,验证了仿真模型的有效性。仿真系统具有与实际张力控制系统相匹配的响应特性,仿真结果重现了多股簧实际加工过程中存在的一些现象及问题,对实际加工过程中张力控制系统参数的调整具有指导意义。

关键词: 多股簧; 张力一致性; 动力学模型; 仿真

中图分类号: TH135

Research on Time-varying and Nonlinear Tension Control Model in the Winding Process of SWHS and Simulation

CAI Wanqiang WANG Shilong ZHANG Qi YANG Wenhan YI Lili
(The State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044)

Abstract: Aiming on improving the tension consistency of wires and the debugging efficiency of tension control system, a dynamic model that describe the mechanism of tension generation is established to research the characteristics of time-varying and nonlinear system. Taking 3 wires stranded-wire helical spring (SWHS) as an example, the mechanism of tension interaction between wires is deduced. And a simulation model based on Matlab/Simulink platform is constructed to study the effect of sudden increase in resistance of a channel on tension consistency, accordingly. Sudden increase in tension causes the forming point of rope to move backward, which results in the increase of twist angle and the fluctuation of rolling speed and pulling speed. The effectiveness of the simulation model is verified by comparing the simulation deviation of the control system with the experimental deviation curve under different preset tension values. The response characteristics of simulation system is adapting to the actual system, and the result is a good way to reproduce some phenomena existing in the actual machining process, which is instructive to adjust the parameters of the tension control system.

Key words: stranded wire helical spring (SWHS); tension consistency; dynamic model; simulation

0 前言

多股螺旋弹簧(简称多股簧)是由钢索(通常由 1~3 层、3~19 股、0.4~3.0 mm 的碳素弹簧钢丝缠绕而成)卷制成型的圆柱型螺旋弹簧^[1]。与普通单股弹簧相比,多股簧具有强度高、疲劳寿命长、可靠性好、减振抗冲击性能好等优点,是自动武器、重型机械以及各种高端装备中的重要复位基础件^[2-4]。

目前国内外针对多股簧机床张力控制系统的研究很稀少,然而实际上,张力控制系统在物料输送、卷绕成型等系统中应用十分广泛。WANG 等^[5]提出一种基于模型参考的自适应 PI 控制器,改善了卷筒纸张力控制器的动态性能,但是该研究没有考虑传输速度与张力的关系、张力值估计、惯性补偿等因素,难以在工程中得到应用。LEE 等^[6]实时监测卷筒半径,通过锥度张力法对张力进行补偿,改进了卷筒印刷生产线的张力控制性能。就张力控制而言,在工程上应用最广泛的应该是传统 PID 算法^[7-9],其原理简单,使用方便,鲁棒性强,多股簧数控加工

* 国家自然科学基金资助项目(51375508)。20180418 收到初稿,20181019 收到修改稿

机床张力控制就是采用这种方式

通过对多股簧加工和工艺过程的长期观察发现, 钢丝张力的一致性不仅对钢索、弹簧的成形质量起决定性作用, 还对多股簧的强压热处理工艺有着重要影响^[10]。张力一致性不均匀的多股簧, 尽管冷成型后的外观与正常多股簧相近, 但内应力和钢丝间接触状态存在很大区别, 强压热处理后变形较大。图 1a、1b 所示分别是张力异常、张力正常情况下经强压热处理后的多股簧。

图1 多股簧强压热处理效果

影响钢丝张力的因素很多, 如: 线盘及通道的阻力、磁粉离合器的输出精度、钢丝速差^[11]。实际加工过程中, 某一个通道的阻尼突然增大会导致该通道钢丝张力的突变, 由于钢丝间的力约束和几何约束会导致其余钢丝张力发生波动, 进而影响钢丝张力的一致性。为解决钢丝张力波动的问题, 往往需要反复调整控制系统参数、阻尼孔的位置等, 加大了人工劳动量。为明确张力突变的作用机制, 提高张力控制系统的调试效率, 需要基于理论模型和试验结果对多股簧张力控制系统特性进行分析。

针对当前存在的问题, 建立了钢丝张力的产生机理模型和钢丝间的互相作用机制模型, 并基于 Matlab/Simulink 对多股簧数控加工机床的张力产生过程和控制系统响应特性进行分析, 研究三股簧中一根钢丝张力突变对钢索张力一致性的影响。本文的研究可为张力控制系统得到较为良好的初始 PID 参数, 并可以在不占用机床硬件资源的情况下实现最优 PID 参数的配置, 为多股螺旋弹簧不停机调试、批量化生产提供可能。

1 多股簧数控机床张力控制系统原理

多股簧数控加工机床的张力控制系统原理^[12]如图 2 所示。张力控制系统中, 称重传感器采集钢丝张力并转化为电流信号, 经变送器放大后被 ADAM-5510 的高速采集模块 5017-H 采集, 并通过串口线传输到上位机; 上位机读取到的张力值与张

力设定值的差值作为 PID 算法的输入量计算控制参数; PID 参数经串口线传输到上位机, 下位机通过内置 PID 算法计算得到控制量, 并通过 D/A 模块调节磁粉离合器驱动板的控制电位, 改变磁粉离合器的输出扭矩, 进而实现钢丝张力的调整。直流电机驱动板也基于以上原理, 调整直流减速电机的输出扭矩, 通过控制线盘放卷实现钢丝张力的调整。

图2 多股簧数控机床张力控制系统原理图

1. 放卷点 2. 成型点 3. 线盘 4. 蜗轮 5. GXFL-B-12 型磁粉离合器
6. 直流减速电动机 7. 导向轮 8. 分线盘 9. 预变形机构
10. 牵引轮 11. 下位机(ADAM-5510M)

2 多股簧机床张力控制模型

多股簧机床张力控制系统模型主要分为三部分: 放线端动力学模型、钢丝张力产生机理模型、钢丝间相互作用机制。根据多股簧机床张力控制原理推导了加工过程中张力产生机理的动力学模型, 并以三股钢丝螺旋弹簧(简称三股簧)为研究对象, 探究钢丝间的互相作用机制。

2.1 放线端动力学模型

在多股簧加工过程中, 钢索被牵引机构不断向前牵引, 放卷线盘以 ω_r 的转速放线。 α 为钢丝与线盘中心面的夹角, 且随加工过程呈现周期性变化, 其变化范围如图 3 所示。

图3 线盘力矩分析

在钢丝绕制过程中, 各股钢丝间张力互相影响: 当钢丝张力不一致时, 各股钢丝捻角随之发生改变, 导致各钢丝出丝速度产生差异, 使得线盘放卷速度发生波动。以线盘为研究对象, 考虑到钢丝从放线端到张力传感器之间的质量较小, 忽略钢丝因速度波动而产生的惯性力。对线盘力矩进行分析可建立力矩平衡方程

$$\frac{d(J_e \omega_r)}{dt} = TR(t) \cos \alpha - M_z - M_f \quad (1)$$

式中, T 为钢丝张力值, 由传感器测得; M_z 为作用在线盘上的阻力矩, 由磁粉离合器提供; M_f 为线盘摩擦力矩; $R(t)$ 为 t 时刻线盘的外径; J_e 为线盘的等效转动惯量。

$$J_e = J_o + J_r \quad (2)$$

式中, J_o 为线盘空载时的转动惯量; J_r 为线盘上缠绕的钢丝的转动惯量, 在加工过程中不断减小, 其计算式为

$$J_r = \int_{R_0}^{R(t)} r^2 (2\pi n r \rho) dr = \frac{1}{2} \pi n \rho (R^4(t) - R_0^4) \quad (3)$$

式中, n 为线盘上每层钢丝的圈数; ρ 为钢丝的密度; R_0 为线盘的最小内径。

假设钢丝在线盘上按图 4 所示均匀堆叠, 加工过程中线盘半径的变化过程可以描述为

$$R(t) = R_{\max} - \frac{\omega_r t d}{b} \Delta h \quad (4)$$

式中, $R_{\max}$ 为线盘满载时的外径; d 为钢丝直径; Δh 为线盘减少一层钢丝引起的高度变化, 根据几何关系有: $\Delta h = \frac{d}{2} (3 \sin 60^\circ - 1)$ 。

图4 线盘钢丝堆叠情况

由此可将式(1)改写为

$$J_e \frac{d\omega_r}{dt} = TR(t) \cos \alpha - M_z - M_f + \Delta h b \rho \omega_r^2 R^3(t) \quad (5)$$

由式(5)得出结论: 在多股簧绕制过程中, 线盘放线速度的变化、 α 角的周期性变化、线盘转动惯量的变化等因素都会导致钢丝张力的变化和波动。可见, 多股簧数控机床张力控制系统是一个时变、非线性的系统。

2.2 钢丝张力产生机理

基于图 2 的张力控制系统原理, 推导出钢丝张力产生机理的离散模型: 对钢丝出丝路径分析, 选取图 5 中放卷点 1 和成型点 2 之前的钢丝为研究对

图5 钢丝出丝路径

象; 假设钢丝与导向轮之间纯滚动; 假设牵引过程中钢丝不发生塑性变形且满足材料力学中连续性、均匀性条件。

根据胡克定律, 钢丝张力可以描述为

$$T = EA \varepsilon_{12} = \frac{EA}{l_{12}} \int_0^t (V_2 - V_1) dt \quad (6)$$

式中, ε_{12} 表示出丝路径上的钢丝应变; t 为钢丝上一定截面通过 1、2 两点所需的时间; V_1 为钢丝的放卷速度; V_2 为成型点处钢丝的牵引速度。

Δt 内钢丝伸长量的变化为

$$\Delta L(n+1) = (V_2 - V_1) \Delta t - \Delta l_2(n) \varepsilon_{12}(n) \quad (7)$$

基于等式(6)可得

$$\Delta T(n+1) = EA \frac{\Delta L(n+1)}{l_{12}} = \left(EA \frac{(V_2(n) - V_1(n))}{l_{12}} - \frac{T(n) V_2(n)}{l_{12}} \right) \Delta t \quad (8)$$

钢丝张力的离散模型为

$$T(n+1) = T(n) + \Delta T(n+1) \quad (9)$$

2.3 钢丝相互作用机制

参考多股簧加工过程中钢丝受力情况分析^[13] 可以作出成型点附近的钢丝空间分布图, 见图 6。以拧索主轴为 Z 轴、分线孔所在平面为 XY 平面建立空间直角坐标系。 P_1 、 P_2 、 P_3 分别为三根钢丝在分线盘平面内的分线孔位置。图示锥面为多股簧钢索成型点所在的理论锥面, 其中, O_0 为钢丝张力均匀时钢索的成型点。当各钢丝张力不一致时, 成型点从 O_0 偏移到 O_3 处, 此时的张力方向为 $P_i O_3 (i=1,2,3)$ 。成型点偏移过程中, 各股钢丝的捻角从 ϕ_0 分别变化为 ϕ_1 、 ϕ_2 、 ϕ_3 。图 6 中, C_i 和 C_o 分别指成型点波动时在线盘平面上的投影圆和线盘上分线孔所在圆。

图6 成型点处钢丝空间分布

根据 XY 平面内的力平衡关系, 可得

$$\sum_{i=1}^3 \mathbf{e}_i T_i \sin \varphi_i = 0 \quad (10)$$

式中, $\mathbf{e}_i (\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3)$ 表示三根钢丝张力在 XY 平面内分量的单位矢量, 钢丝捻角为

$$\varphi_i = \arctan \left(\frac{P_i O_4}{O_3 O_4} \right) \quad i = 1, 2, 3 \quad (11)$$

根据图 6 中的相似关系, 可推导 $O_3 O_4$ 的计算公式

$$O_3 O_4 = \frac{R_o - R_i}{\tan \varphi_0} \quad (12)$$

第 i 股钢丝在成型点处的牵引速度 $V_{2,i}$ 与牵引装置的牵引速度 V_0 之间的关系为

$$V_{2,i} = \frac{V_0}{\cos \varphi_i} + V_0' \quad (13)$$

式中, V_0' 表示成型点的速度, 当张力稳定时, 成型点不发生移动, 该项为零。每根钢丝的牵引速度会伴随捻角的波动而波动, 进而导致钢丝实时张力发生变化, 影响钢索成型质量。以通道 P_1 阻尼突增为例, 钢丝间“力-位置-速度-力”互相作用关系主要包括以下四个阶段: ① P_1 阻尼增大, 钢丝#1 牵引速度变小, $P_1 O_3$ 段缩短(图 6); ② 成型点偏移至 O_3 , φ_2 、 φ_3 同时增大; ③ 根据式(13), V_0 恒定不变, $\varphi_i (i=1, 2, 3)$ 角的余弦值减小, 钢丝牵引速度 $V_{2,i}$ 增大; ④ 张力控制生效之前, 线盘放卷速度 $V_{1,i}$ 可视为恒定, 根据式(6), 各钢丝张力 T_i 增大。

2.4 放线端阻力矩特性

多股簧数控加工机床张力控制系统执行元件采用 GXFL-B-12 型号磁粉离合器, 测试过程中发现该型号磁粉离合器工作特性曲线并不具备严格的线性特性, 放线端阻力矩也因此具有磁滞效应。图 7 所示为实测线盘静态阻力矩特性曲线: 磁粉离合器的输出函数经放大系数 $K = 5.128$ 放大, 磁滞效应的差异也被放大, 回程误差最大可达 $6.15 \text{ N} \cdot \text{m}$, 接近磁

粉离合器输出阈值的 $1/6$, 这会在很大程度上影响张力控制系统的响应特性。因此, 磁粉离合器的磁滞效应不容忽视。

图 7 磁粉离合器静态特性曲线

3 仿真与结果分析

3.1 仿真模型

以三股簧为例, 基于 Matlab / Simulink 平台搭建起钢丝张力控制系统仿真模型。仿真模型主要包含三个模块: 放线端动力学(基于力矩平衡)、钢丝张力产生机理、钢丝间相互作用, 如图 8~11 所示。表 1 所示为经仿真整定的三股钢张力控制系统 PID 参数, 考虑到微分环节会破坏带有频繁噪声系统的系统特性^[14], 仿真过程不考虑微分环节, 即令 $d = 0$ 。

表 1 经整定的各子系统 PID 参数

钢丝编号	比例环节 (P)	积分环节 (I)	微分环节 (D)
1	2.5	8.4	0
2	2	8	0
3	2	8	0

3.2 仿真条件

为探究一根钢丝张力波动对其他钢丝张力的影响, 在放线端动力学模型中, 将磁粉离合器的恒值输入模块替代为阶跃输入。为提高计算效率, 选择 Matlab/Simulink 中的隐式求解器 ode23tb 进行求解。

图 8 放线端动力学模型

图 9 张力产生机理模型

图 10 钢丝#1 张力模型

图 11 加入 PID 环节的张力控制系统模型

为保证仿真的可靠性，将仿真模型参数按机床和控制系统的实际参数进行设置，参数如表 2、3 所示。

3.3 仿真结果分析

根据线盘钢丝的实测预紧张力，设定三股钢丝的初始张力值分别为 80 N、100 N 和 110 N，张力控制的目标值为 100 N。钢丝#1 子系统加入阶跃信号发生器，设定 $t=8$ s 时输入大小为 50 N 的阶跃信号以模拟张力突变，各股钢丝的张力波动情况如图 12 所示。该系统控制精度高，响应速度快，初始

状态下各钢丝张力达到控制目标值的调整时间约为 2.8 s。考虑到钢丝的出丝速度 0.01 m/s，调整时间内钢索前进的长度不足 30 mm，且该段钢丝控制成索后位于多股簧前端，对多股簧成型质量的影响极小。

在 $t=8$ s 时，钢丝#1 上作用了一个 50 N 的力引起张力突变，同时根据成型点处力平衡关系，钢丝#2 和#3 的张力也随之发生扰动。在 $t=9$ s 时刻，钢丝张力已基本趋于稳定，此时的钢丝捻角也已恢复

表2 仿真模型参数

参数	数值
直径 D/mm	1
密度 $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	7810
面积 A/m^2	0.79
弹性模量 E/GPa	203.4
转角 φ_0/rad	0.6709
转动惯量 $J_0/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	0.373
长度 L/m	3.6
转矩 $M_f/(\text{N}\cdot\text{m})$	0.5
半径 R_0/mm	125
牵引速度 $V_0/(\text{m}/\text{s})$	0.01

表3 控制系统实测参数

参数	钢丝绳编号		
	#1	#2	#3
张力 T/N	100	110	80
转矩 $M_f/(\text{N}\cdot\text{m})$	15.46	16.11	12.27
半径 R_0/mm	159.64	150.98	146.65
转速 $\omega_0/(\text{rad}/\text{s})$	0.062 6	0.066 2	0.068 2

图12 多股簧加工过程各钢丝绳张力间的互相影响

图13 多股簧加工过程钢丝绳间捻角的互相影响

正常。通过对比钢丝#2和#3可以发现, 钢丝#2受到钢丝#1张力波动的影响较大, 但恢复稳定的时间较#3钢丝更短。在该组预设张力值的仿真条件下, 钢丝抗干扰能力与预设张力值呈正相关。

图14所示分别为钢丝#1、#2和#3在成型点处的放卷、牵引速度的变化规律。钢丝#1的张力突变对钢丝#2、#3的捻角造成扰动, 改变了钢丝#2和#3在成型点处的牵引速度。

值得注意的是: 这里的牵引速度是成型点处钢丝的移动速度, 随着张力控制系统PID调节过程的进行, 成型点的位置会随张力的波动在成型锥面上

(a) 钢丝#1

(b) 钢丝#2

(c) 钢丝#3

图14 钢丝在成型点处放卷、牵引速度波动情况

(图6)发生前后小幅窜动。根据式(13), 当成型点后移的速度 V'_0 足够大, 就意味着成型点处钢丝的牵引速度可能出现负值。这一现象在仿真模型的牵引速度曲线中也有所体现。

多股簧机床钢丝牵引速度在伺服电机的带动下基本保持恒定, 因此随着加工过程的进行, 线盘有效半径呈线性递减趋势。根据力矩平衡关系式(1), 开环控制下, 线盘外径的变化会引起钢丝张力增大, 如图15所示。因此, 多股簧数控机床张力控制系统采用PID模块、ADAM-5510和磁粉离合器的控制模式, 使得张力在控制目标值附近波动。事实证明, 这一模式对于多股簧张力控制系统具有较好的实用效果。

3.4 试验验证

仿真结果表明, 该控制系统钢丝从响应开始到进入稳态所经过的最长时间大约为2.8 s, 标准偏差在5 N附近小幅波动, 这与基于改进PI神经网络的多股簧张力控制系统得到的张力偏差数据基本一致^[13]。

图 15 开环控制下的钢丝张力波动情况

此外, 为验证仿真模型对张力波动情况描述的准确性, 经多次试验得到多股簧数控加工机床在不同载荷下控制系统的“载荷—偏差”曲线, 见图 16。分别设置三根钢丝的预设张力值为[70, 90, 120] N、[80, 100, 110] N、[130, 140, 150]

N, 仿真模型其余参数按表 2 设置, PID 参数按表 1 设置。结果表明, 仿真模型计算得到的张力标准差值与实测张力偏差曲线吻合度较高, 在较低的预设载荷(< 140 N)下仿真模型的计算值较为准确。

图 16 钢丝载荷—偏差关系曲线

4 结论

(1) 针对当前多股簧数控加工机床张力控制系统存在的问题, 对张力控制的时变非线性模型进行研究, 建立了多股簧钢丝动力学模型, 并明确了钢丝间互相作用机制。

(2) 仿真结果表明, 任意一个通道的张力突变都会导致其余通道钢丝捻角发生改变, 从而引起牵引速度、放卷速度以及钢丝张力的波动。

(3) 通过与试验数据的对比, 验证了仿真模型的有效性。

参 考 文 献

- [1] 闵建军, 王时龙. 多股螺旋弹簧的动态设计方法[J]. 中国机械工程, 2007, 18(8): 895-899.
- [2] MIN Jianjun, WANG Shilong. Dynamic design method for stranded wire helical spring[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering. 2007, 18(8): 895-899.
- [3] 赵昱. 多股螺旋弹簧响应特性的理论与实践[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
- [4] ZHAO Yu. Theoretical study and practice of response characteristics of multi-strand helical springs [D]. Chongqing: Chongqing University, 2015.
- [5] 田波. 冲击载荷作用下多股簧动态特性试验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
- [6] TIAN Bo. Experimental study on dynamic characteristics of multi-strand spring under impact load [D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.
- [7] 王时龙, 田波, 赵昱, 等. 基于摄动法的多股簧冲击载荷改进模型[J]. 机械工程学报, 2015, 51(7): 85-90.

- WANG Shilong, TIAN Bo, ZHAO Yu, et al. Improved shock load model of stranded wires helical springs based on perturbation method[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(7): 85-90.
- [5] WANG B, ZUO J, WANG M, et al. Model reference adaptive tension control of web packaging material[C]// In 2008 international conference on Intelligent computation technology and automation (ICICTA), IEEE, 2008: 395-398.
- [6] LEE C, KANG H, SHIN K. Advanced taper tension method for the performance improvement of a roll-to-roll printing production line with a winding process[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2012, 1(59): 61-72.
- [7] ROOPA J, GOVINDA R M. Design & implementation of closed loop PID mechanism for wire tension control (tensioner) in winding machine[J]. International Journal of Instrumentation, Control and Automation, 2011, 2(1), 37-42.
- [8] LEE J H, YUN Y W, HONG H W, et al. Tension control of wire rope in winch spooler using magneto rheological brake[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2016, 2(17): 157-162.
- [9] LI Qiang, BAI Jicheng, FAN Yinsheng, et al. Study of wire tension control system based on closed loop PID control in HS-WEDM[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 82(5-8): 1089-1097.
- [10] 王时龙, 周杰, 康玲. 多股螺旋弹簧绕制过程中的动态张力[J]. 机械工程学报, 2008, 44(6): 36-42.
- WANG Shilong, ZHOU Jie, KANG Ling. Dynamic tension of stranded wires helical spring during reeling[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(6): 36-42.
- [11] 陈朝元. 多段式张力控制系统的建模与仿真[D]. 长沙: 中南大学, 2007.
- CHEN Chaoyuan. Modeling and simulation of multi-segment tension control system [D]. Changsha: Central South University, 2007.
- [12] 周杰, 王时龙, 康玲, 等. 多股螺旋弹簧数控加工机床张力控制机构及其摇篮部件. 中国: CN104624862A[P]. 2015-05-20.
- ZHOU Jie, WANG Shilong, KANG Ling, et al. Tension control mechanism and cradle components of multi-strand helical spring CNC machining machine. China : CN104624862A[P]. 2015-05-20.
- [13] ZHANG Qi, WANG Shilong, ZHANG Anrui, et al. Improved PI neural network-based tension control for stranded wire helical springs manufacturing [J]. Control Engineering Practice, 2017, 67: 31-42.
- [14] KNITTEL D, LAROCHE E, GIGAN D, et al. Tension control for winding system with two-degrees-of-freedom H controllers [J]. Industry Applications IEEE Transactions on, 2003, 39(1): 113-120.
-
- 作者简介: 蔡万强, 男, 1995 年出生。主要研究方向为计算机集成制造系统。
E-mail: asdcaiyu@163.com
- 王时龙(通信作者), 男, 1966 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为计算机集成制造技术、先进制造技术。
E-mail: slwang@cqu.edu.cn
- 张其, 1992 年出生, 男, 硕士研究生。主要研究方向为先进制造技术。
E-mail: 1159652165@qq.com
- 杨文翰, 1991 年出生, 男, 博士研究生。主要研究方向为疲劳及微动磨损。
E-mail: 1245624380@qq.com
- 易力力, 1982 年出生, 男, 博士研究生。主要研究方向为智能制造。
E-mail: easypower@126.com