

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2018.06.006

数控机床滚珠丝杠副摩擦力矩研究进展

梁玉鹏, 李梦奇, 邓霜梅, 王 斌

(邵阳学院 机械与能源工程系, 湖南 邵阳 422000)

摘要: 基于数控机床滚珠丝杠副摩擦力矩产生的机理, 分析了组成摩擦力矩的各个因素, 从滚珠在返回器中产生的摩擦、润滑剂产生的摩擦、滚珠的滑动摩擦和滚动摩擦, 以及摩擦力矩模型的建立等方面进行评述。结果表明, 当前的研究在普遍性、实用性和系统性方面还存在不足, 在充分考虑滚珠丝杠副摩擦力矩的波动性和运行的平稳性的基础上, 建立普遍适用的摩擦力矩分析模型, 是将来研究的方向。

关键词: 数控机床; 滚珠丝杠副; 摩擦力矩

中图分类号: TH117.1

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2018)06-0034-05

Research Progress on the Friction Torque of Ball Screws of Computerized Numerical Control Machine Tools

LIANG Yupeng, LI Mengqi, DENG Shuangmei, WANG Bin

(Department of Mechanical and Energy Engineering, Shaoyang University, Shaoyang Hunan 422000, China)

Abstract: Based on the mechanism of the friction torque generated by the ball screw of CNC machine tools, an analysis has been made of the factors that constitute the friction torque, followed by a review of the friction produced by the balls in the regenerator, the friction produced by the lubricant, the sliding friction and rolling friction of the balls, and the establishment of the friction torque model. The results show that the current research is still insufficient in terms of its universality, practicality, and systemicity. It is acknowledged that it will be the development trend to establish a universally applicable friction torque model, with a full consideration given to its stability and volatility.

Keywords: computerized numerical control machine tool; ball screw pair; friction torque

滚珠丝杠副是广泛用于进给系统的关键部件^[1]。摩擦是影响滚珠丝杠副传动效率的主要因素, 它不仅消耗能量, 而且引起的热变形会影响其定位的精度, 产生的磨损会缩短其使用寿命^[2-3]。因此, 对摩擦力矩的研究显得尤为重要。

1 滚珠丝杠副摩擦力矩的来源

滚珠丝杠副中的摩擦力矩, 按照产生机理的不同

主要来源有: 滚珠与丝杠及螺母滚道之间的摩擦、滚珠之间的滑动摩擦、滚珠在返回器中的摩擦以及润滑剂的黏性摩擦^[4]。滚珠丝杠副摩擦力矩分解示意图如图1所示。其中, 楔紧效应所产生的摩擦力矩是滚珠螺旋副中摩擦力矩的主要因素, 它的大小和变化直接影响滚珠螺旋副总的摩擦力矩大小及稳定性^[5]。

收稿日期: 2018-04-28

基金项目: 湖南省研究生创新基金资助项目(CX2016B685), 邵阳学院研究生创新基金资助项目(CX2016SY001)

作者简介: 梁玉鹏(1992-), 男, 辽宁朝阳人, 邵阳学院硕士生, 主要研究方向为专用设备设计与制造,

E-mail: 1013338090@qq.com

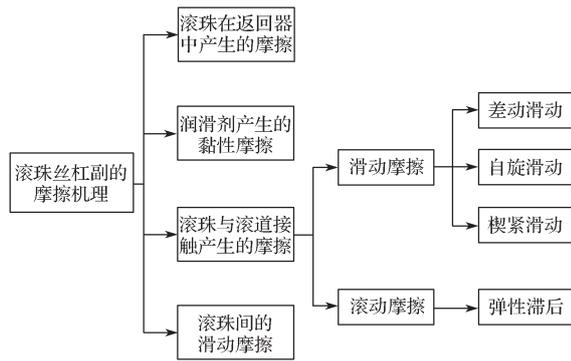


图 1 滚珠丝杠副摩擦机理分解图

Fig. 1 Decomposition mechanism of ball screw pair friction

1.1 滚珠在返回器中的摩擦

滚珠在返回器中的摩擦是指滚珠进出返回器时接触的碰撞力摩擦和滚珠在返回器滚道内的滑动摩擦^[6]。王恒等^[7]对滚珠丝杠副返回器入口和出口处滚珠的微观动态运动信息和受力平衡做了相关分析,得到在其他参数一定的前提下,滚珠丝杠出口处摩擦力矩的大小,主要受滚珠与滚道间的摩擦因数的影响。所以在现实的加工中,应尽量使反向器滚道光滑,以减少出口处因挤压而造成的阻碍效应,并建立考虑反向器影响的滚珠丝杠副摩擦力矩计算模型:

$$M = M_h + M_g + M_b + M_v + M_r + M_c \quad (1)$$

式中: M_h 为滚珠与滚道的滑动摩擦力矩;

M_g 为滚动摩擦力矩;

M_b 为滚珠之间的滑动摩擦力矩;

M_v 为润滑剂产生的黏滞阻力矩;

M_r 为反向器入口处的摩擦力矩;

M_c 为反向器出口引起的摩擦力矩。

1.2 润滑剂产生的黏性摩擦

在有润滑剂作用下的滚珠丝杠副中,滚珠运动需要克服润滑剂产生的黏性摩擦力。阻力大小取决于润滑剂的量,文献[8]根据弹流润滑理论求得了润滑剂引起的阻力大小。

1.3 滚珠与滚道接触产生的摩擦

1.3.1 弹性滞后引起的摩擦力矩

滚珠丝杠副理想模型下的滚压接触不会产生阻力,但事实上不存在绝对的弹性体,即使在弹性极限范围内,一个加载到卸载的过程中也有能量消耗^[9],从而产生弹性滞后。

早在 1958 年,Greenwood 和 Tabor^[10]估算了弹性滞后引起的滚动阻力。在 1962 年,Drutowski^[11]通过实验证明,滚动摩擦力与受力材料体积呈线性关系。文献[12]对滚动摩擦机理从摩擦学观点进行了探讨,得出了滚动阻力来自微观滑动和弹性滞后,但并未对其进行进一步的数学验证。文献[13]通过对

承受预加载荷的滚动直线导轨副的分析,建立了弹性滞后摩擦力矩损失数学模型,并指出滚珠在受法向载荷的作用下将发生法向变形。对于该变形问题,应将滚珠与滚道的法向接触简化成球形弹性体与半空间平面的接触问题。文献[14]根据 Hertz 理论,对滚动体与沟槽的接触处进行了研究,得出了由弹性滞后所引起的摩擦力矩与所加载荷关系的数学模型,并得出了弹性滞后所引起的摩擦损失与所选材料有关的结论。文献[15]指出,滚珠受外载荷作用时发生变形现象,形变过程是因为材料内摩擦作用导致的结构阻尼消耗了一些能量;并通过试验得到弹性滞后所消耗的能量与应变幅度的平方成正比的关系。文献[16]以行星滚柱丝杠副为研究对象,基于赫兹接触理论和等效球的方法,充分考虑和分析了接触角、螺旋升角、滚柱牙数和外载荷的影响,建立了行星滚珠丝杠副传动效率的计算模型,分别计算了丝杠侧和螺母侧由弹性滞后引起的摩擦阻力:

丝杠侧摩擦阻力

$$M_{fs} = N_0 \sum_{i=1}^{\tau} \frac{3}{8} \gamma B_s m_{bs}^3 \sqrt{\frac{3E'_s}{2\kappa_s} N_i^{\frac{4}{3}}}; \quad (2)$$

螺母侧摩擦阻力

$$M_{fn} = N_0 \sum_{i=1}^{\tau} \frac{3}{8} \gamma B_n m_{bn}^3 \sqrt{\frac{3E'_n}{2\kappa_n} N_i^{\frac{4}{3}}}. \quad (3)$$

式(2)~(3)中: N_0 为滚柱个数;

τ 为滚柱螺纹牙数;

γ 为能量损失系数;

$B = \frac{R}{2}$, 其中等效球半径 $R = \frac{d_r}{2 \sin \beta}$, d_r 和 β 分别

是滚柱中径与接触角;

m_b 为椭圆参数;

κ 为等效球曲率;

N 为等效球压力;

E' 为等效球的等效弹性模量。

1.3.2 差动滑动引起的摩擦力矩

滚珠在滚道中运动,因为外加预紧力的影响,在接触点处会发生接触变形,发生变形处是椭球面,存在滚动差动滑动和自转差动滑动所带来的差动滑动摩擦。在一定的载荷下差动滑动摩擦力矩与滚道接触点的直径、接触材料摩擦因数、接触椭圆的长半轴的长度及滚珠的直径有关。

文献[13]依据 Hertz 理论建立了差动滑动摩擦损失数学模型,该模型假定系统承受预加载荷并且钢球处于匀速运动状态,将其用于差动滑动摩擦力矩的分析,能简化计算,容易得到稳定解。文献[17]通过对高速球轴承接触区内的差动滑动状态的分析,并考

考虑弹流润滑状态下润滑油的流变特性,进而了解差动滑动速度、滚滑比、摩擦因数等在接触范围的分布情况,进而确定了高速球轴承的差动滑动摩擦热量。文献[18]分析轴承各球受力与运动状态,采用对球表面摩擦切应力和相对滑动速度的乘积在整个接触区域内进行积分的方法,计算差动滑动热量。文献[19]根据高速滚动轴承中球与滚道属于弹流润滑状态,通过验证球与滚道间接触区域的摩擦切应力,建立了差动滑动生热模型。

1.3.3 自旋滑动引起的摩擦力矩

滚珠在滚动时会产生接触角,当滚珠沿着滚道切线方向运动的同时,伴随产生绕自身轴线的自旋运动。在一定载荷下,接触副的滑动摩擦因数、接触椭圆的长半轴尺寸以及第二类完全椭圆积分,会影响自旋滑动的摩擦力矩。

文献[16]在文献[12]的基础上,通过对滚珠与丝杠间的自旋运动,得到丝杠侧与螺母侧的自旋滑动摩擦力矩。滚柱在运动过程中始终绕平行于螺杆轴线的轴转动。文献[20]通过虚拟仿真技术对滚子丝杠进行了运动学研究,对滚子自转的转速进行理论值与实际值的比较和分析,得出滚子与丝杠之间相对滑动主要存在于法线方向上。

综上所述,滚珠丝杠副的自旋滑动是引起摩擦力矩的主要因素之一,而且随着轴向载荷增大摩擦力矩随之增大。

1.4 滚珠间的滑动摩擦

滚珠丝杠副的螺旋传动难以实现在滚珠间加上类似于轴承的保持架,因此滚珠间的滑动摩擦无法避免,滚珠间的摩擦力矩为

$$M_b = \mu_b \frac{D_w}{2} F_b, \quad (4)$$

式中: μ_b 为滚珠间摩擦因数;

D_w 为滚珠直径;

F_b 为滚珠间摩擦力。

2 摩擦力矩分析模型

为消除轴向间隙提高滚珠螺旋副的传动刚度,通常采用双螺母预加载荷的滚珠螺旋副,即在一个丝杠轴上装配两个螺母,通过螺母间的相互作用,使螺母、丝杠滚道面与滚珠接触点间预加一定载荷,产生一定的弹性变形,从而消除螺旋在双向传动时的轴向间隙、提高接触刚度。

文献[21-23]通过从滚珠直旋副滚道的弹性接触角度,对其进行理论分析,得到了接触应力与变形摩擦力矩的数学模型。文献[24]在文献[21-23]模型的

基础上,分析了在预紧力的干预下,滚珠丝杠副进出滚道的受力分析方法,推导出摩擦力矩波动的计算模型,并通过实验验证了随着预紧力的增大,滚珠丝杠副的摩擦力矩波动变大。文献[25]通过分析滚珠丝杠运行中的滚珠与滚道接触面间的滚滑接触特性,构建了蠕滑率与自旋率的表达式并结合Kalker理论,建立了滚珠与滚道接触面间的摩擦力模型;通过实验验证得出蠕滑率和自旋率主要受此接触面上接触角的影响,而蠕滑率和自旋率影响了滚珠与滚道接触面间的滑动行为。

对滚珠丝杠副施加轴向预紧载荷,可以减少滚珠丝杠副的反向间隙。由于滚珠丝杠副的组成结构,当滚珠在滚道中平稳运行时,滚珠丝杠副的摩擦力矩主要来源有滚珠与滚道之间的摩擦、滚珠之间的摩擦、滚珠对返回器的冲击以及润滑剂的黏滞阻力,则滚珠丝杠副的总摩擦力矩为其叠加值^[26]。

文献[27]在没有考虑滚珠的波动影响时,建立了一个计算滚珠丝杠副摩擦力矩的数学模型,并使用此数学模型计算的结果是一个平均值。文献[28]在滚珠丝杠副的空载状态下,分析预加载力和螺母扭矩对空载摩擦力矩的影响建立数学模型,并确定其对摩擦力矩的传动效率,得到了预加载力和螺杆速度对空载摩擦力矩的影响误差介于0.4%和4.2%之间。文献[29]对精密滚珠丝杠副摩擦力矩进行了平稳性研究。文献[30]给出单个球与内圈或外圈接触沿接触面法线产生的自旋摩擦力矩分析模型。文献[31]对接触区存在两条纯滚动线的自旋滑动,推导出摩擦力矩损失模型,并分析了润滑剂的黏性摩擦力矩模型、不同情况下的球受力摩擦力矩模型、保持架受力摩擦力矩模型。

3 结论与展望

数控机床滚珠丝杠副的摩擦力矩的大小,是衡量机床质量的重要参数,摩擦力矩会降低机床的定位精度和加工精度。本文从滚珠在返回器中产生的摩擦、润滑剂产生的摩擦、滚珠的滑动摩擦和滚动摩擦,以及摩擦力矩模型的建立等方面,对滚珠丝杠副摩擦力矩研究进展进行综述。

滚珠丝杠副因其结构特点,摩擦力矩会有较大波动,从而影响其运行的平稳性和定位精度。虽然学者们已着手研究加工误差、润滑介质及运行工况对摩擦力矩波动性的影响,但研究结果并不统一。

滚珠丝杠副产生摩擦力矩的来源较多,不仅要考虑滚珠丝杠副本身的结构尺寸、加工误差、材料及热处理方法,以及工作载荷、运转速度、润滑条件及环境参数等相关因素,而且要考虑各因素之间相互作用

用、相互干扰。通过分析各因素对摩擦力矩的影响情况,明确最大影响因素,并分析各因素间的交互作用,是降低摩擦力矩的主要途径。

总之,已有的研究在普遍性、实用性和系统性方面还存在不足。在充分考虑滚珠丝杠副摩擦力矩的波动性和运行的平稳性的基础上,建立普遍适用的摩擦力矩分析模型,是将来研究的方向。

参考文献:

- [1] WEI C C, LAI R S. Kinematical Analyses and Transmission Efficiency of a Preloaded Ball Screw Operating at High Rotational Speeds[J]. Mechanism and Machine Theory, 2011, 46(7): 880-898.
- [2] FUKADA S, FANG B, SHIGENO A. Experimental Analysis and Simulation of Nonlinear Microscopic Behavior of Ball Screw Mechanism for Ultra-Precision Positioning[J]. Precision Engineering, 2011, 35(4): 650-668.
- [3] XU Z Z, LIU X J, KIM H K, et al. Thermal Error Forecast and Performance Evaluation for an Air-Cooling Ball Screw System[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2011, 51(7/8): 605-611.
- [4] 冯虎田. 滚珠丝杠副动力学与设计基础 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2015: 5-6.
FENG Hutian. Ball Screw Support Dynamics and Design Basis[M]. Beijing: China Machine Press, 2015: 5-6.
- [5] 陈勇将, 汤文成. 微型滚珠丝杠副摩擦力矩模型的建立与实验验证 [J]. 东南大学学报(自然科学版), 2011, 41(5): 982-986.
CHEN Yongjiang, TANG Wencheng. Theoretical and Experimental Research on Friction Torque Model of Micro-Type Ball Screw[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2011, 41(5): 982-986.
- [6] BRACCESI C, LANDI L. A General Elastic-Plastic Approach to Impact Analysis for Stress State Limit Evaluation in Ball Screw Bearings Return System[J]. International Journal of Impact Engineering, 2007, 34(7): 1272-1285.
- [7] 王恒, 张俊杰, 王永泉, 等. 考虑反向器影响的滚珠丝杠副摩擦力矩计算模型 [J]. 机械工程学报, 2016, 52(7): 97-103.
WANG Heng, ZHANG Junjie, WANG Yongquan, et al. A Calculation Model for Friction Torque of Ball Screws Considering the Influence of Reversers[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(7): 97-103.
- [8] HOUPERT L. Ball Bearing and Tapered Roller Bearing Torque: Analytical, Numerical and Experimental Results[J]. Tribology Transactions, 2002, 45(3): 345-353.
- [9] 曹琦. 航天工况下滚珠丝杠的接触特性及摩擦效率分析 [D]. 南京: 南京理工大学, 2013.
CAO Qi. Analysis of Contact Characteristics and Friction Efficiency of Ball Screws Under Space Flight Conditions[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2013.
- [10] 温诗铸, 黄平. 摩擦学原理 [M]. 3版. 北京: 清华大学出版社, 2008: 3-4.
WEN Shizhu, HUANG Ping. Principles of Tribology[M]. 3rd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2008: 3-4.
- [11] 纪敬虎, 符永宏, 王祖权, 等. 激光表面跨尺度结构化机械密封摩擦性能 [J]. 排灌机械工程学报, 2012, 30(4): 452-456.
JI Jinghu, FU Yonghong, WANG Zuquan, et al. Tribological Property of Mechanical Seal with Laser-Induced Multi-Scale Surface Texturing[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2012, 30(4): 452-456.
- [12] 汪志城. 滚动摩擦机理和滚动摩擦系数 [J]. 上海机械学院学报, 1993, 15(4): 35-43.
WANG Zhicheng. A Mechanism of Rolling Friction and The Coefficient of Rolling Friction[J]. Journal of Shanghai Institute of Machinery, 1993, 15(4): 35-43.
- [13] 孙健利, 张朝辉. 关于滚动直线导轨摩擦力与预紧力关系的研究 [J]. 华中理工大学学报, 1997, 25(3): 47-49.
SUN Jianli, ZHANG Zhaohui. A Study of the Relation Between the Frictional Force and Pretightening Force in the Rolling Linear Guide[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 1997, 25(3): 47-49.
- [14] 靳谦忠, 杨家军, 孙健利. 行星式滚柱丝杠副的摩擦机理研究 [J]. 华中理工大学学报, 1998, 26(6): 82-83, 96.
JIN Qianzhong, YANG Jiajun, SUN Jianli. The Research on Friction Mechanism of the Planetary Roller Screw[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 1998, 26(6): 82-83, 96.
- [15] 高仕赵, 徐国宾. 基于能量损耗的球轴承阻力臂计算方法 [J]. 排灌机械工程学报, 2014, 32(5): 416-421.
GAO Shizhao, XU Guobin. Energy Loss-Based Computational Method for Moment Arm of Frictional Resistance in Ball Bearings[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2014, 32(5): 416-421.
- [16] 马尚君, 刘更, 佟瑞庭. 行星滚柱丝杠副摩擦力矩及传动效率研究 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2013, 45(11): 74-79.
MA Shangjun, LIU Geng, TONG Ruiting. The Frictional Moment and Transmission Efficiency of

- Planetary Roller Screw[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2013, 45(11): 74-79.
- [17] 吴明星, 吴维, 郭凯, 等. 基于流变特性的球轴承差动滑动摩擦热量研究[J]. 北京理工大学学报, 2014, 34(1): 11-15.
WU Mingxing, WU Wei, GUO Kai, et al. Study on the Differential Sliding Friction Heat of Ball Bearings Based on the Rheological Properties[J]. Transaction of Beijing Institute of Technology, 2014, 34(1): 11-15.
- [18] 李欢锋, 李小虎, 张燕飞, 等. 基于摩擦生热和接触应力的角接触球轴承结构参数分析[J]. 轴承, 2015(2): 1-5.
LI Huanfeng, LI Xiaohu, ZHANG Yanfei, et al. Analysis on Structural Parameters for Angular Contact Ball Bearings Based on Friction Heat Generation and Contact Stress[J]. Bearing, 2015(2): 1-5.
- [19] 雷默涵, 姜歌东, 梅雪松, 等. 高速球轴承微接触弹流摩擦及生热分析[J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(4): 81-88.
LEI Mohan, JIANG Gedong, MEI Xuesong, et al. Micro-Contact EHL Friction and Heat Generation Analysis of High Speed Ball Bearings[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(4): 81-88.
- [20] 陈小芬, 李东波, 史翔. 滚子螺旋传动中滚子与丝杠之间相对滑动的机制研究[J]. 机床与液压, 2013, 41(9): 54-57.
CHEN Xiaofen, LI Dongbo, SHI Xiang. Mechanism Research on Relative Sliding Between Roller and Screw in Roller Screw Transmission[J]. Machine Tool and Hydraulics, 2013, 41(9): 54-57.
- [21] MEI X S, TSUTSUMI M, TAO T. Study on the Load Distribution of Ball Screws with Errors[J]. Mechanism and Machine Theory, 2003, 38(11): 1257-1269.
- [22] 杜平安. 滚珠直旋副滚道弹性接触分析[J]. 电子科技大学学报, 1994, 23(3): 280-285.
DU Ping'an. Analysis of the Elastic Contact Deformation and Rated Load of Ball Straight-Rotary Pair[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 1994, 23(3): 280-285.
- [23] 姜洪奎, 宋现春. 大导程滚珠丝杠副螺母的截形计算与加工仿真[J]. 工具技术, 2006(4): 47-51.
JIANG Hongkui, SONG Xianchun. Truncation Calculation and Machining Simulation of Large-Lead Ball Screw Nut[J]. Tool Engineering, 2006(4): 47-51.
- [24] 康献民, 傅卫平, 王大承, 等. 预紧力对滚珠丝杠副摩擦力矩波动的影响分析及试验[J]. 机械传动, 2010, 34(6): 46-50.
KANG Xianmin, FU Weiping, WANG Dacheng, et al. Analysis and Experiment of Effect of Preload Force on Ball Screw Friction Torque Fluctuation[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2010, 34(6): 46-50.
- [25] 陈勇将, 汤文成, 尹飞鸿, 等. 双螺母垫片预紧式滚珠丝杠副摩擦行为分析[J]. 南京理工大学学报, 2016, 40(4): 392-398.
CHEN Yongjiang, TANG Wencheng, YIN Feihong, et al. Dynamic Friction Behavior Analysis of Plate Preloaded Double-Nut Ball Screw[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2016, 40(4): 392-398.
- [26] 张佐营. 高速滚珠丝杠副动力学性能分析及其实验研究[D]. 济南: 山东大学, 2008.
ZHANG Zuoying. Analysis and Experiment Study on Dynamic Performance of High-Speed Precision Ball Screw Mechanism[D]. Jinan: Shandong University, 2008.
- [27] OLARU D, PUIU G C, BALAN L C, et al. A New Model to Estimate Friction Torque in a Ball Screw System[C]//Proceeding of Product Engineering: Eco-De-Sign, Technologies and Green Energy. Romania: A Dvanced-Summer Institute, 2004: 333-346.
- [28] BARBU S, TELEA D, POPP L O. Study on Improving the Functional Performance of Linear Motion Systems[J]. Applied Mechanics and Materials, 2015, 760(3): 583-588.
- [29] 张佐营, 宋现春, 李志, 等. 精密滚珠丝杠副摩擦力矩平稳性的研究[J]. 中国机械工程, 2009, 20(22): 2722-2726.
ZHANG Zuoying, SONG Xianchun, LI Zhi, et al. Research on the Stabilization of Friction Torque of Precision Ball Screws[J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(22): 2722-2726.
- [30] HOUPERT L. Numerical and Analytical Calculations in Ball Bearing[C]//Proceedings of the 8th European Space Mechanisms and Tribology Symposium. Toulouse: [s. n.], 1999: 283-290.
- [31] 姜绍娜, 陈晓阳, 顾家铭, 等. 陀螺框架轴承摩擦力矩分析[J]. 机械工程学报, 2016, 52(7): 60-68.
JIANG Shaona, CHEN Xiaoyang, GU Jiaming, et al. Analysis of Friction Moment of Gyroscope Frame Bearing[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(7): 60-68.

(责任编辑: 邓光辉)