

DOI:10.16356/j.1005-2615.2022.01.004

空间滚珠直线导轨阻力测试设备研制与试验研究

李德伦¹, 杨旭¹, 张英², 张运¹, 王兆阳³, 邵英奇²

(1. 空间智能机器人系统技术与应用北京市重点实验室, 北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094; 2. 北京邮电大学现代邮政学院, 北京 100876; 3. 陆军装甲兵学院, 北京 100071)

摘要: 随着深空探测、在轨服务等空间技术的发展, 直线传动机构在空间技术中的应用变得越来越广泛。滚珠直线导轨作为常用的直线传动机构, 通常与滚珠丝杠等其他直线传动机构联合使用, 用于承受直线传动过程中附加的力和力矩, 从而达到简化滚珠丝杠受力情况、提高滚珠丝杠的运行平稳性和寿命的目的。直线导轨的阻力是反映其运行状态、进行在轨故障判断的重要参数。本文设计了一套直线导轨阻力测试设备, 进行了直线导轨运行阻力测试, 根据运行阻力与方向无关的原则, 设计了合理的数据补偿方式, 排除了测试过程中重力因素的影响, 找到了阻力和力矩载荷的关系, 对于研究滚珠直线导轨在力矩载荷下的阻力性能具有一定的指导意义。

关键词: 空间; 滚珠直线导轨; 阻力测试; 设备; 直线传动

中图分类号: V444 文献标志码: A 文章编号: 1005-2615(2022)01-0034-07

Development and Experimental Research on Resistance Force Measurement Equipment for Space Rolling Linear Guide

LI Delun¹, YANG Xu¹, ZHANG Ying², ZHANG Yun¹, WANG Zhaoyang³, SHAO Yingqi²

(1. Beijing Key Laboratory of Intelligent Space Robotic Systems Technology and Applications, Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, CAST, Beijing 100094, China; 2. School of Modern Post, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China; 3. Army Armored Forces Academy, Beijing 100071, China)

Abstract: With the development of space technologies such as deep space exploration and on-orbit services, the application of linear transmission mechanism in aerospace technology has become more and more extensively. As a commonly used mechanism to realize linear transmission, rolling linear guide is usually used in conjunction with other linear transmission mechanisms such as ball screws to bear additional forces and torques in linear transmission, so as to simplify the force of the ball screw and improve the smooth operation and life of the ball screw. The resistance force of the rolling linear guide is an important parameter that reflects its status and it can help to the judge the on-orbit faults of the rolling linear guide. This paper designs a set of rolling linear guide test equipment and carries out the resistance force test of the rolling linear guide. According to the principle that the resistance force has nothing to do with the motion direction, a reasonable data compensation method is designed, the influence of the gravity factor in the test process is excluded, and the relationship between the resistance force and the torque load is found. And it has certain guiding significance for the study of the resistance performance of the rolling linear guide under torque loads.

Key words: space; rolling linear guide; resistance force test; equipment; linear transmission

收稿日期: 2021-11-30; 修订日期: 2022-01-10

通信作者: 张英, 女, 副教授, 硕士生导师, E-mail: graduate_yingzh@bupt.edu.cn。

引用格式: 李德伦, 杨旭, 张英, 等. 空间滚珠直线导轨阻力测试设备研制与试验研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2022, 54(1): 34-40. LI Delun, YANG Xu, ZHANG Ying, et al. Development and experimental research on resistance force measurement equipment for space rolling linear guide[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2022, 54(1): 34-40.

随着航天技术的发展,深空探测领域中常用的采样机构、载人登月领域中的着陆缓冲机构、在轨服务中的执行机构和末端执行器等对直线运动副的需求越来越多。滚珠直线导轨是一种精密直线导向部件,具有导向精度高、定位精度高、运动平稳、承载能力大、摩擦力小等诸多优点^[1],正在被越来越广泛地应用于空间各种传动机构中。在使用过程中,滚珠直线导轨往往与滚珠丝杠配合使用,用于导向并承受运动过程中的力和力矩。

滚珠直线导轨在运动过程中,滚珠在滑块沟道、返回器沟道和导轨沟道组成的半封闭空间中运动。一般情况下,滚动体绕自身轴线转动,同时又绕沟道滚动,在滚动的同时,滚动体沿沟道还伴随有一定的滑动,当接触角不等于零时,滚珠还存在绕接触面的法向滑动,即自旋滑动,高速运转时,滚珠还可能有因陀螺力矩而产生附加运动。此外,滚珠的运动还受到滚珠直线导轨的结构参数、工作条件、润滑状况以及制造精度等诸多因素的影响,因此,滚珠直线导轨中滚珠的运动和受力非常复杂^[2-4]。Houpert、耿宝龙等建立了接触区压力的计算模型,通过分析差动滑动、弹性滞后对接触摩擦力的影响,获得了预加载荷与摩擦力的关系和滚柱直线导轨副运动摩擦力计算公式^[5-7]。

空间应用中,滚珠直线导轨工作在无人环境下,运行阻力是判断其在轨运行状态的重要遥测参数。因此,测试并记录滚珠直线导轨在不同力矩载荷、不同速度、不同寿命阶段下的运行阻力,与在轨运行各阶段的滚动直线导轨在给定载荷下的运行阻力等遥测数据及其变化进行横向分析比对,即可对滚珠直线导轨的产品状态进行判断。因此,研究滚珠直线导轨在不同载荷下的运动阻力对于判断产品在轨运行状态、提早发现风险等具有极其重要的意义。

1 空间滚珠直线导轨

1.1 产品状态

文中测试的滚珠直线导轨型号为 GGB20 AAL,为四点接触式结构,主要由滑块、返回器、导轨和钢球 4 部分组成,其中,滑块长度 L 为 40 mm,两侧沟道间距 B 为 20 mm,高度 H 为 30 mm,如图 1 所示。

为了适应空间环境,避免冷焊现象,滚珠直线导轨采用了空间脂润滑的方式,在滑块沟道和导轨沟道等工作面上涂覆 LW-2 润滑脂,起到减少摩擦

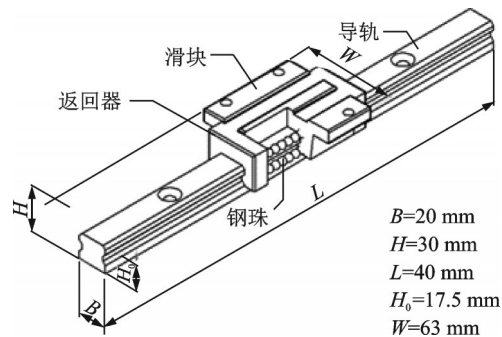


图1 滚珠直线导轨组成示意图

Fig.1 Composition diagram of rolling linear guide

力、确保运行平稳、提高运动寿命的作用。

1.2 坐标系定义

为了形象说明滚珠直线导轨的载荷,定义 X 方向力矩为倾覆力矩, Y 方向力矩为扭转力矩、 Z 方向力矩为翻转力矩,如图 2 所示。

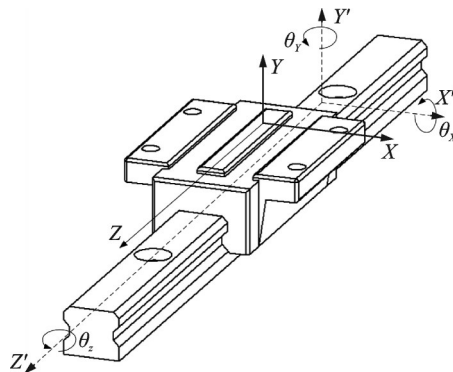


图2 滚珠直线导轨及其坐标系

Fig.2 Rolling linear guide and it's coordinate

1.3 受力分析

滚珠直线导轨工作过程中,滑块沟道、导轨沟道和滚动体表面为工作面,运动过程中,滑块受到的外加载荷会按照一定的规律分布到对应位置的滚珠上^[8-13]。当滑块承受 M_x 方向或 M_y 方向的力矩载荷时,滚珠的法向载荷沿 Z 向分布如图 3 所示;当滑块承受 M_z 方向的力矩载荷时,滚珠的受力及其在法向载荷沿 Z 向分布如图 4 所示。

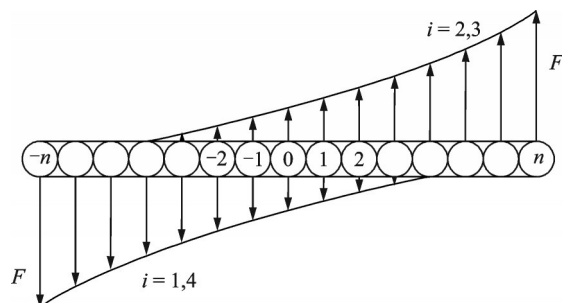


图3 力矩 M_x 或 M_y 作用下的滚动体载荷分布图

Fig.3 Load distribution under bending moment M_x or M_y

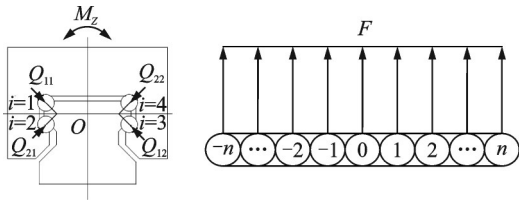


图4 力矩 M_z 作用下的滚动体载荷分布图

Fig.4 Load distribution under bending moment M_z

2 阻力测试系统搭建

2.1 测试设备系统设计

滚珠直线导轨阻力测试设备主要由机械、控制和软件3个子系统组成。其中,机械子系统是主体结构,用于滚珠直线导轨的固定和加载;控制子系统控制并驱动电机组件运动,推动滚珠直线导轨做直线往复运动;软件子系统主要用于完成各种参数设置、指令下发、数据/采集/处理/导出等^[14],如图5所示。

该套测试设备采用高强度铝型材搭建,具有成本低、传动链短、控制方法简单有效、加载方便、可实时监测载荷力矩变化等优点。

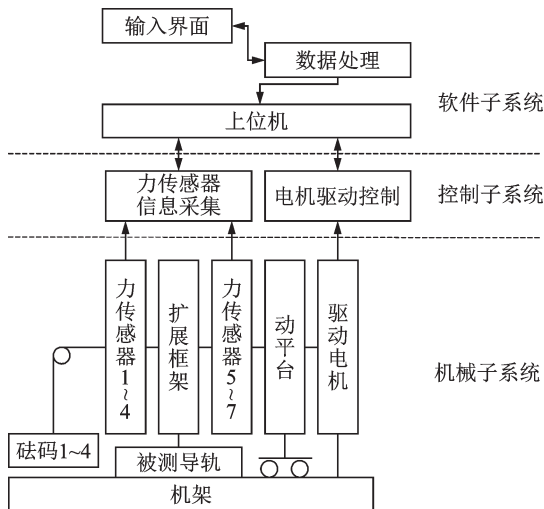


图5 滚珠直线导轨阻力测试设备组成与连接图

Fig.5 Composition and connection diagram of resistance force test equipment for rolling linear guide

2.2 阻力测试原理

测试设备上共配置7个力传感器,型号为大洋DY107,量程1~50 kg,精度0.01 N。传感器1和2、3和4连接在扩展框架和机架之间,分别用于监测X方向、Y方向力矩。传感器5和6连接在扩展框架和动平台之间,用于监测Z方向力矩。传感器7连接在扩展框架与动平台之间,用于测量滚动直线导轨的运行阻力。调整1和2、3和4、5和6处砝码的质量,力传感器7的读数即为对应载荷下的运行阻力。砝码、力矩传感器的布置如图6所示。

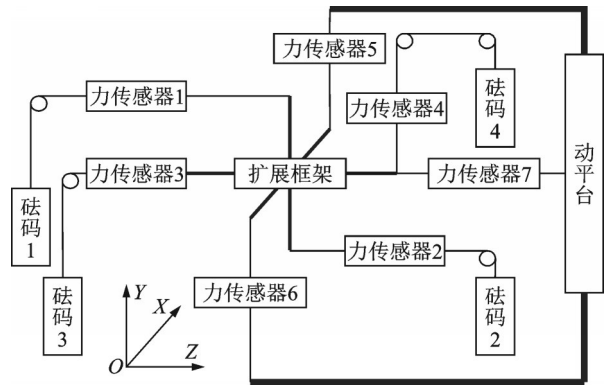


图6 加载方式与力传感器布置示意图

Fig.6 Schematic diagram of loading and force sensor arrangement

2.3 机械子系统设计

机械子系统主要由机架、扩展框架、动平台、驱动电机和配重模块5部分组成。被测导轨安装在机架上,滑块与扩展框架连接,动平台底部安装滚动轮,可以在机架上移动。X向加载装置和Y向加载装置安装在扩展框架和机架之间,通过砝码实现加载,Z向加载装置安装在扩展框架和动平台之间,通过张紧绳实现加载。X向和Y向加载测试时,驱动电机推动动平台和导轨滑块运动,Z向加载时,驱动电机推动动平台、导轨滑块和扩展框架运动。测试设备如图7所示。

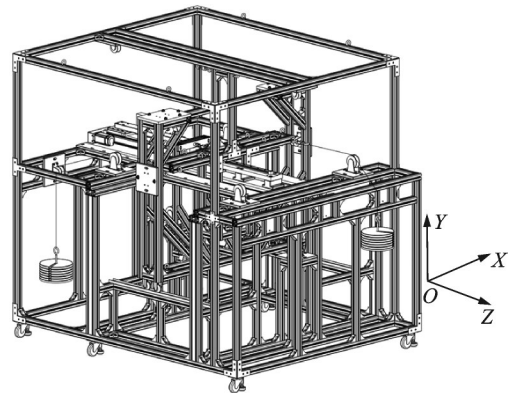


图7 滚珠直线导轨阻力测试设备

Fig.7 Resistance force test equipment of rolling linear guide

2.4 控制子系统设计

控制子系统主要由上位机、驱动器、控制器和变送器等组成,用于完成伺服电机的速度/位置控制和力传感器数据的传输。伺服电机型号为MHMF012L1V2M,驱动器型号为MADLT05SF多功能型。伺服电机采用速度控制,上位机发送数字指令给单片机,单片机利用D/A模块将数字信号转换成模拟信号(电压),并传递给驱动器,驱动器根据电压的大小进行电机的速度控制。上位机与驱动器通过USB接口进行通讯,实现参数设

定及状态监视等功能,与控制器采用 UART 串口通讯,实现指令和数据的传输,与变频器通过 485 总线进行通信,并通过通道地址完成力传感器信号的快速采集。控制子系统的拓扑结构如图 8 所示。

伺服电机的闭环速度控制采用了传统的 PI 控制技术,在控制回路中引入了积分项,将积分项作为反馈引入控制回路中,减小系统的稳态误差。

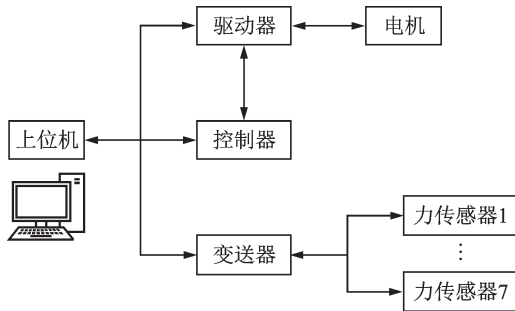


图 8 滚珠直线导轨阻力测试设备控制系统拓扑结构
Fig.8 Control system topology of rolling linear guide resistance force test equipment

2.5 软件子系统设计

基于 Qt Creator 进行了滚动直线导轨阻力测试设备软件子系统的开发,并利用 C++ 完成了图形用户界面应用程序的开发。软件界面分成通讯设置与状态显示区、测试状态设置区、测试数据显示区和测试曲线区,可以设置通讯方式、速度补偿、力传感器补偿、运动方向、运动模式和测量周期等参数。通过软件界面可以监测通讯状态、运行阻力、滑块位置和滑块速度等重要数据,实时绘制滑块运动过程中的阻力曲线,并导出运动速度、运行阻力等重要数据至 Excel 中。软件子系统的测试界面如图 9 所示。

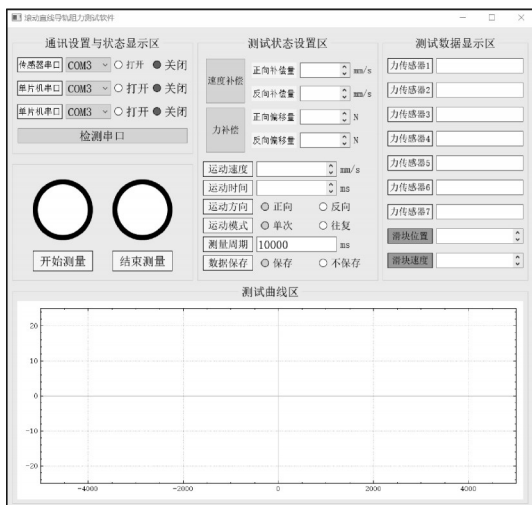


图 9 滚珠直线导轨阻力测试设备软件界面
Fig.9 Software interface of rolling linear guide resistance force test equipment

3 试验条件与测试流程

3.1 试验条件

(1) 测试前,对滚珠直线导轨进行跑合,跑合过程中,滚珠直线导轨分别以 5、10、15 和 20 mm/s 的速度往复运动 10 次;

(2) 单向加载测试时,滚珠直线导轨以 10 mm/s 的速度往复运动 10 次;

(3) 单向加载测试时,单方向最大载荷 200 N·m,初始载荷为 0,0~50 N·m 之间按照 5 N·m 递增,50~200 N·m 之间按照 10 N·m 递增,测试完 200 N·m 后,200~50 N·m 之间按照 10 N·m 递减,50 N·m~0 之间按照 5 N·m 递减;

(4) 除更换砝码导致阻力测试有停顿以外,导轨载荷不变时,运行阻力测试连续进行。

3.2 试验测试流程

滚珠直线导轨阻力测试流程如图 10 所示。

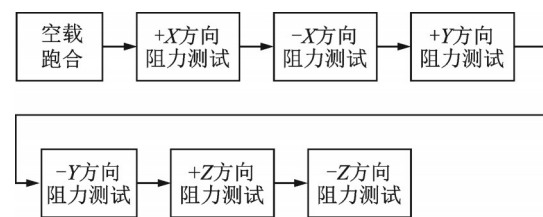


图 10 滚珠直线导轨阻力测试流程
Fig.10 Resistance force test process of rolling linear guide

4 试验结果分析

4.1 数据补偿

当外加力矩不变时,滚珠直线导轨正向、反向运动的阻力数值应该大小相等、符号相反。测试时,由于测试设备在导轨运动方向上存在高度差,导致正反向的运动阻力不一致,因此,在进行滚珠直线导轨数据分析前,首先对高度差导致的零位偏差进行补偿。具体补偿方法为:记给定载荷下 10 次正向运动阻力平均值为 F_{x+} ,10 次反向运动阻力平均值为 F_{x-} ,定义补偿量为

$$\Delta F = (F_{x+} + F_{x-}) / 2 \quad (1)$$

则补偿后的 10 次正向运动阻力平均值和 10 次反向运动阻力分别为

$$F'_{x+} = F_{x+} - \Delta F = (F_{x+} - F_{x-}) / 2 \quad (2)$$

$$F'_{x-} = F_{x-} + \Delta F = (F_{x-} - F_{x+}) / 2 \quad (3)$$

从式(2,3)中可以看出,补偿后,在给定载荷下,滚珠直线导轨正向、反向运动的平均阻力数值相等、符号相反。因此,利用补偿后的 +X 方向、+Y 方向和 +Z 方向的数据对滚珠直线导轨的运行阻力和波动量等技术指标进行分析。

4.2 控制系统速度平稳性测试

定义速度平稳性为 $(v_{\max} - v_{\min}) / (v_{\max} + v_{\min})$,测试前,对控制系统的速度平稳性进行测试。电机正向运动时,运动速度在598~603 r/min之间波动,速度平稳性为0.83%;电机反方向运动时,速度在-606~-602 r/min之间波动,速度平稳性为0.66%,满足设计指标的要求。

4.3 滚珠直线导轨阻力测试

绘制滚珠直线导轨在不同方向、不同载荷下的正向、反向运动的平均运行阻力如图11所示。

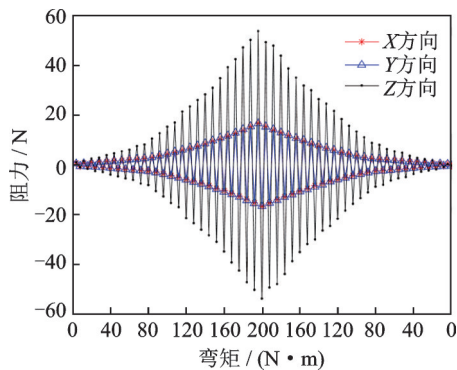


图11 滚珠直线导轨运行阻力曲线

Fig.11 Average curves of resistance force of rolling linear guide

对图11中滚珠直线导轨运行阻力曲线进行分析,得到以下结论:

(1)滚珠直线导轨运行阻力随着载荷的增加而增加。

(2)载荷越大,运行阻力增加的速度越快。

(3)滚珠直线导轨在承受 M_x 、 M_y 载荷时,两者曲线重合,与1.3节中的滚动体载荷分布规律一致。

(4)滚珠直线导轨在承受 M_x 、 M_y 载荷时运行阻力的增加速度明显小于承受 M_z 载荷时运行阻力的增加速度。究其原因,导轨承受 M_z 载荷时的力臂 B (20 mm)小于承受 M_x 、 M_y 载荷时的力臂 L (40 mm),从而使得导轨承受 M_z 载荷时作用在滚动体上的法向载荷 F_z 大于承受 M_x 、 M_y 载荷时作用在滚动体上的法向载荷 F_x 、 F_y ,而载荷越大,运行阻力增加的速度越快,最终导致滚珠直线导轨承受 M_z 载荷时的运行阻力大于承受 M_x 、 M_y 载荷时的运行阻力。

4.4 数据波动分析

定义阻力波动量为 $(F_{\max} - F_{\min}) / (F_{\max} + F_{\min})$,计算不同弯矩对应的波动量,计算0、5、...、200、...、5、0 N·m等各个载荷点下波动量,将各载荷下的波动量连接成线,得到滚珠直线导轨运行阻力的波动量与力矩载荷的关系,如图12所示。统

计导轨在0~50 N·m(轻载)和50~200 N·m(重载)下运行阻力波动量的最大值和平均值,如表1所示。

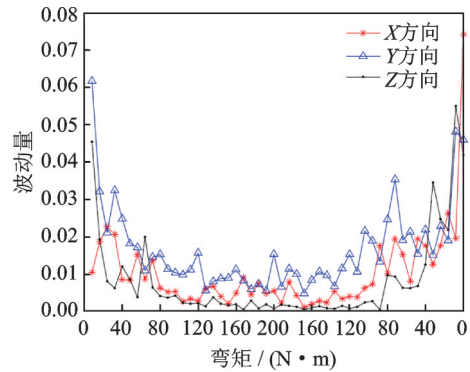


图12 滚珠直线导轨运行阻力波动曲线

Fig.12 Resistance force fluctuation curves of rolling linear guide

表1 滚珠直线导轨运行阻力数据波动分析汇总表

Table 1 Summary table of rolling linear guide resistance force fluctuation

力矩载荷/(N·m)	运行阻力波动		
	F_x	F_y	F_z
0~50	0.018 1	0.025 5	0.017 2
50~200	0.005 1	0.011 0	0.002 0

对图12中的曲线和表1中的波动量进行分析,得到以下结论:

(1)滚珠直线导轨运行阻力的波动量随着载荷的增加而减小,说明随着载荷增加,滚珠直线导轨运行更加平稳。

(2)滚珠直线导轨承受 M_z 载荷的运行阻力波动量小于承受 M_x 、 M_y 载荷时的运行阻力波动量,说明滚珠直线导轨在承受 M_z 载荷时运行更加平稳。这与导轨在承受 M_z 载荷时滚动体在整个运动过程中载荷不变、导轨在承受 M_x 、 M_y 载荷时滚动体在整个运动过程中载荷一直变化的受力情况一致。

4.5 曲线拟合

最小二乘法是求解最优化问题的经典方法,由勒让德和高斯在18世纪初期分别创立,是曲线或者曲面拟合最常用最有效方法。递推最小二乘法在上一次迭代估计结果的基础上,利用新得到的数据根据递推算法对上一次迭代估计的结果进行修正,从而递推得出新的参数估计值。这样,对一个接一个新的数据进行一次次的参数估计,直到参数估计值达到所要求精度为止^[15-17]。

首先采用二次多项式、三次多项式、四次多项式和 $F = ax^b + c$ 对滚珠直线导轨承受 M_x 、 M_y 、 M_z 载荷时运行阻力进行拟合,采用递推最小二乘法确定拟合公式的系数,获得拟合误差,然后利用均方根

误差 RMSE 和确定系数 R-square 对拟合结果进行评价,如表 2 所示。

表 2 拟合误差汇总表

Table 2 Summary table of fitting errors

拟合曲线	拟合误差(RMSE/R-square)		
	X	Y	Z
$F=ax^4+bx^3+cx^2+dx+e$	0.053 0	0.062 0	0.535 6
	0.999 9	0.999 9	0.999 2
$F=ax^3+bx^2+cx+d$	0.054 0	0.063 0	0.527 5
	0.999 9	0.999 9	0.999 1
$F=ax^2+bx+c$	0.059 8	0.061 9	0.515 4
	0.999 9	0.999 9	0.999 1
$F=ax^b+c$	0.108 2	0.106 2	0.567 7
	0.999 6	0.999 6	0.999 0

在进行曲线拟合时, RMSE 越小、R-square 越接近 1, 曲线拟合效果越好。从表 2 中可以看出: 几种拟合方式的确定系数 R-square 都超过 0.999, 但是均方根误差 RMSE 表明采用三次曲线、四次曲线进行拟合效果更好; 四次曲线比三次曲线提高有限, 但增加了很多的计算量。综合考虑拟合误差和计算量的大小, 选取三次曲线作为滚珠直线导轨运行阻力与力矩载荷之间关系的拟合曲线。

利用三次曲线对滚珠直线导轨在承受单方向力矩载荷下的运行阻力进行拟合, 得到最终的拟合曲线和残差分布分别如图 13 和图 14 所示, 拟合公

式和最大拟合误差如表 3 所示。

表 3 最终拟合公式和最大拟合误差

Table 3 Final fitting formula and maximum fitting error

载荷方向	拟合公式				最大拟合误差
	a	b	c	d	
X	1.70E-7	2.26E-4	2.84E-2	0.455	0.112 3
Y	2.62E-8	2.38E-4	3.35E-2	0.293	0.125 9
Z	1.37E-8	1.15E-4	0.165 2	1.025	1.287 8

对图 13、14 和表 3 中的拟合公式和拟合误差进行分析, 得到以下结论:

(1) 采用三次曲线可以较好地拟合滚珠直线导轨运行阻力与单方向力矩载荷的关系。

(2) 滚珠直线导轨在承受 M_x 、 M_y 载荷时运行阻力的拟合曲线几乎完全一致。

(3) M_x 和 M_y 载荷下的残差基本小于 0.13 N, M_z 载荷下的残差小于 1.30 N, 这是由以下两个因素导致的: 一是 M_z 载荷下的运行阻力相比 M_x 和 M_y 载荷下运行阻力数值更大, 二是测试 M_z 载荷下的运行阻力时, 动平台抵消 Z 向力矩时产生了附加的阻力, Z 向力矩越大, 作用在动平台滑轮处的附加阻力越大, 引入的误差越大, 最终导致 M_z 载荷下的残差相对较大。

5 结 论

为了获得空间润滑状态下滚珠直线导轨运行阻力与单方向力矩载荷的关系, 为在轨运行提供数据支撑, 本文研制了一套滚珠丝杠导轨阻力测试设备。利用该设备对某型号用空间润滑状态下的 GGB20AAL 四点接触滚珠直线导轨的运行阻力进行了测试, 测试数据重复性良好, 测试速度平稳, 通过对数据进行补偿, 找到了和运行阻力与导轨承载的力矩载荷之间的关系, 测试结果与理论分析的趋势相同, 主要结论如下:

(1) 滚珠直线导轨运行阻力随着载荷的增加而增加, 两者可以用三次曲线拟合。

(2) 作用在滚动体上的载荷越大, 运行阻力的增加量越大。

(3) 滚珠直线导轨在力矩作用下的运行阻力表现出各向异性, M_x 和 M_y 载荷下的运行阻力几乎完全一致, M_z 载荷下的运行阻力大但运行更加平稳。

(4) 在 0~200 N·m 力矩载荷范围内, 随着载荷增加, 滚珠直线导轨的运行更加平稳。

(5) 滚珠直线导轨的运行阻力可以用于在轨比对, 支持滚珠直线导轨的在轨故障判定与预示。

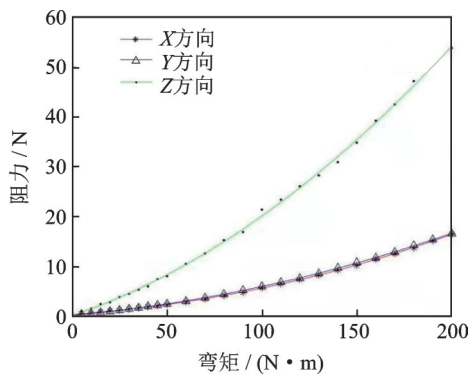


图 13 滚珠直线导轨运行阻力曲线拟合

Fig.13 Resistance force fitting curves of rolling linear guide

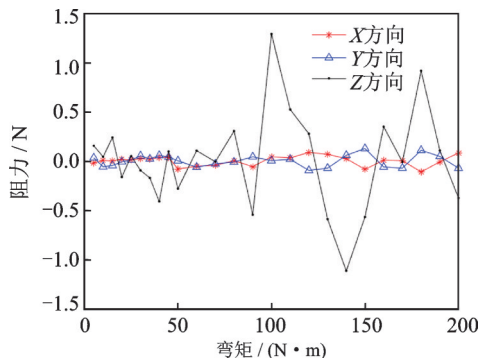


图 14 滚珠直线导轨运行阻力拟合残差曲线

Fig.14 Resistance force fitting residual curves of rolling linear guide

参考文献:

- [1] 王盘铭. 滚动直线导轨副的力学性能研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
WANG Panming. Study on the mechanical properties of rolling linear guide pairs [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006.
- [2] LI Linlin, YANG Jiajun. Surface roughness effects on point contact elastohydrodynamic lubrication in linear rolling guide with fractal surface topographies [J]. *Industrial Lubrication & Tribology*, 2018, 70 (4): 589-598.
- [3] 孙健利, 刘建素, 杨克冲, 等. 影响滚动直线导轨副摩擦力的因素[J]. *制造技术与机床*, 1995(12): 26-28, 3.
SUN Jianli, LIU Jiansu, YANG Kechong, et al. Factors affecting friction of rolling linear guide [J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 1995 (12): 26-28, 3.
- [4] SHIMIZU S, SAITO E, UCHIDA H, et al. Tribological studies of linear motion ball guide systems [J]. *Tribology Transactions*, 1998, 41(1): 49-59.
- [5] HOUPERT L. CAGEDYN: A contribution to roller bearing dynamic calculations. Part I: Basic tribology concepts [J]. *Tribology Transactions*, 2009, 30(1): 1-9.
- [6] HOUPERT L. CAGEDYN: A contribution to roller bearing dynamic calculations. Part II: Description of the numerical tool and its outputs [J]. *Tribology Transactions*, 2009, 53(1): 10-21.
- [7] 耿宝龙. 滚动直线导轨副摩擦分析及试验方法研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
GENG Baolong. Rolling linear guide friction analysis and study of experimental methods [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012.
- [8] 周晶晶. 滚动直线导轨副运动性能理论分析与对比试验研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2016.
ZHOU Jingjing. Theoretical analysis and comparative experimental study of sub-motion performance of rolling linear guides [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2016.
- [9] 高飞, 姜大志. 直线滚动导轨反向器回珠曲线曲率半径的优化设计 [J]. *机械设计与制造*, 2007, 199(9): 16-18.
GAO Fei, JIANG Dazhi. Optical design of steel ball slewing curve radius of LMRG [J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2007, 199(9): 16-18.
- [10] YI Y S, YOON Y K, JAE S C, et al. Dynamic analysis of a linear motion guide having rolling elements for precision positioning devices [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2008, 22(1): 50-60.
- [11] WU J S, CHANG J C, TSAI G A, et al. The effect of bending loads on the dynamic behaviors of a rolling guide [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2012, 26(3): 671-680.
- [12] CHENG D J, YANG W S, PARK J H, et al. Friction experiment of linear motion roller guide THK SRG25 [J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2014, 15(3): 545-551.
- [13] 叶坤奇, 周长光, 冯虎田, 等. 特定五维载荷工况下滚动直线导轨副载荷分布研究 [J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2021(5): 27-32, 37.
YE Kunqi, ZHOU Changguang, FENG Hutian, et al. Research on load distribution of rolling linear guide under specific 5D loading condition [J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2021(5): 27-32, 37.
- [14] 徐丹. 滚动直线导轨副综合性能试验装置的结构优化及试验研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2015.
XU Dan. Structural optimization and experimental study of the rolling linear guide sub-comprehensive performance test device [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2015.
- [15] CAMPANELLI M, DUCK B, EMERY K. Quantifying and reducing curve-fitting uncertainty in ISC [C] // Proceedings of 2015 IEEE 42nd Photovoltaic Specialist Conference (PSVC). New Orleans, LA, USA: IEEE, 2015: 1-6.
- [16] 许金鑫, 由强. 任意阶次多项式最小二乘拟合不确定度计算方法与最佳拟合阶次分析 [J]. *计量学报*, 2020, 41(3): 388-392.
XU Jinxin, YOU Qiang. Uncertainty calculation for arbitrary order polynomial least-square fitting and analysis of the best fitting order [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2020, 41(3): 388-392.
- [17] MALENGO A, PENNECCHI F. A weighted total least-squares algorithm for any fitting model with correlated variables [J]. *Metrologia*, 2013, 50(6): 654-662.

(编辑: 胥橙庭)