滚柱直线导轨副的刚度分析

华中科技大学 （湖北武汉 430074） 张新宝 刘曙光 孙健利
广东高新凯特股份有限公司 （江门 529100） 冯建文 赵美玲 杨炫召

随着高速、重载、高精数控机床的发展，对滚柱直线导轨副提出了更高的性能指标，而刚度、额定静载荷作为滚柱直线导轨副的重要性能参数，分别影响到直线导轨副的精度及承载能力。本文对滚柱直线导轨副在受到垂直载荷，x、y、z 方向力矩载荷时的刚度进行了分析。

1. 滚柱直线导轨副的刚度及额定静载荷计算

滚柱直线导轨副的载荷有 6 个方向，如图 1 所示。刚度按其承受载荷方向分为受垂直力 F_y 时刚度，受侧向力 F_z 时刚度，受转矩 M_x 时刚度，受转矩 M_y 时刚度，受转矩 M_z 时刚度。由于滚柱直线导轨副为四方向等载荷型结构，因此受垂直载荷时刚度和受侧向载荷时刚度相同，受 M_y 载荷时刚度与受 M_z 载荷时刚度也相同，因此，刚度计算时只需计算受垂直载荷、M_x 载荷、M_y 载荷时的刚度。

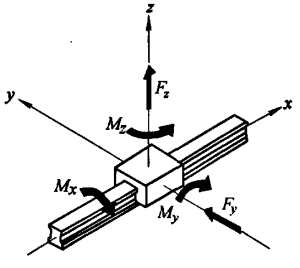


图1 导轨副坐标系

（1）单个滚柱的受力分析 滚柱与平面接触为线接触，当受载时，滚柱与平面将会发生接触变形，受载区将会变成一矩形，受力分布为椭圆分布。对于轴承钢，有限长滚柱轴心相对于平面的弹性趋近量可由 Palmgren 经验公式计算得出

$$\delta_n = 7.68 \times 10^{-5} Q_n^{0.9} / l_e^{0.8} \quad (1)$$

式中 Q_n——法向力；

l_e——滚柱有效长度。

（2）受垂直载荷时刚度计算 滚柱直线导轨副在承受向下垂直载荷时，只有下两列滚柱承受载荷，其受力如图 2 所示。

设加载在滑块上的载荷为 F_y，滑块向下位移为 δ，则

$$\begin{cases} Q_n = F_y/(2Z\cos\alpha) \\ \delta = 2\delta_n \cos\alpha \end{cases} \quad (2)$$

由式（1）、式（2）可得滑块向下位移为 δ 时每个滚柱受法向力大小为

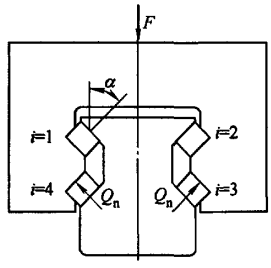


图2 垂直载荷时受力分析

$$Q_n = (2 \times 7.68 \times 10^{-5})^{-10/9} \delta^{10/9} (\cos\alpha)^{-10/9} l_e^{8/9} \quad (3)$$

由式（2）、式（3）可得受垂直载荷时滚柱直线导轨副的刚度计算公式

$$F_y = 2ZQ_n\cos\alpha = (2 \times 7.68 \times 10^{-5})^{-10/9} l_e^{8/9} \delta^{10/9} (\cos\alpha)^{-1/9} Z \quad (4)$$

（3）M_x 力矩载荷时刚度计算 滚柱直线导轨副承受 x 方向转矩时，只有第 1、3 列滚柱或第 2、4 列滚柱承受载荷，其受力分析如图 3 所示，图中，$l = (P_z + P_y)\cos\alpha$。

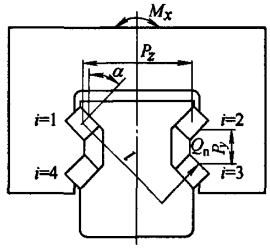


图3 M_x 载荷时受力分析

由于滚柱直线导轨副每列有 Z 个滚柱承受载荷，设滑块转角为 θ，则有

$$\begin{cases} M_x = ZQ_n l = ZQ_n(P_z + P_y)\cos\alpha \\ \theta = \dfrac{2\delta_n}{l/2} = \dfrac{4\delta_n}{l} = \dfrac{4\delta_n}{(P_z + P_y)\cos\alpha} \end{cases} \quad (5)$$

根据式（5），可求得受 M_x 载荷时刚度计算公式

$$M_x = 8 \times 10^3 [(P_z + P_y)\cos\alpha]^{19/9} l_e^{8/9} Z\theta^{10/9} \quad (6)$$

（4）M_y 力矩载荷时刚度计算　当滚柱直线导轨副受到外载荷转矩 M_y 作用时，每一列只有大约一半的滚柱承受载荷，第 1、2 列各有一半滚柱承受载荷，并且受力方向相反。设 l_t 是滚道的有效接触长度，Z 为有效接触滚柱数，其受力分析如图 4 所示。

图中，$n = \begin{cases} Z/2 & (\text{当 } Z \text{ 为偶数时}) \\ (Z-1)/2 & (\text{当 } Z \text{ 为奇数时}) \end{cases}$

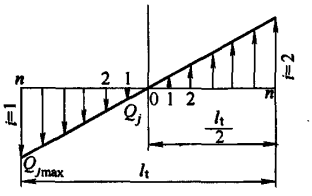


图4　M_y 载荷时受力分析

设第 n 个滚柱法向变形为 $\delta_{j\max}$，则根据公式（2）可得滑块转角为

$$\theta = 4\delta_{j\max}\cos\alpha/(l_t - D_w) \quad (7)$$

第 n 个滚柱受力最大，设为 $Q_{j\max}$，则

$$\begin{cases} Q_j = \dfrac{jQ_{j\max}}{n} \\ l_j = \dfrac{l_t j}{2n} \\ M_y = 4\sum\limits_{j=1}^{n} Q_j l_j \cos\alpha = 2\dfrac{Q_{j\max}}{n^2} l_t \cos\alpha \sum\limits_{j=1}^{n} j^2 \end{cases} \quad (8)$$

把式（7）代入式（8），即可求出 M_y 载荷时刚度计算模型

$$M_y = 1.6 \times 10^4 \frac{l_t l_e^{8/9} \cos^{-1/9}\alpha}{n^2} (l_t - D_w)^{10/9} \theta^{10/9} \sum_{j=1}^{n} j^2 \quad (9)$$

2. 数值计算与试验比较

本试验以广东高新凯特精密机械有限公司提供的 LGR35EA 型滚柱直线导轨副进行，该型导轨参数如附表所示。

LGR35EA 导轨参数表

型号	D_w/mm	l_e/mm	Z	P_z/mm	P_y/mm	α（°）	l_t/mm
LGR35EA	4.5	4.8	18	33.1	11.6	45°	81

滚柱直线导轨副受垂直载荷，M_x、M_y、M_z 载荷时的理论刚度和试验刚度曲线分别如图 5 ~ 图 8 所示。

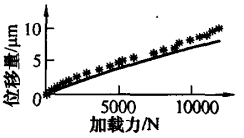


图5　垂直载荷时刚度曲线

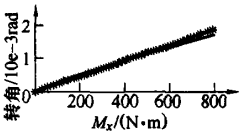


图6　M_x 载荷时刚度曲线

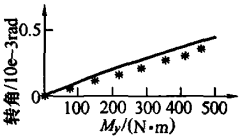


图7　M_y 载荷时刚度曲线

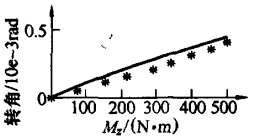


图8　M_z 载荷时刚度曲线

3. 结语

由以上各图可知，理论模型与试验结果线性相关，能较好反应试验结果。但理论模型与试验值存在一定差距，经分析，可能是由下列原因造成的：预紧力的作用，导轨和滑块裙部变形，滚道面和滚柱的精度误差。

MW　（收稿日期：20101015）

杰克机床两款数控高速随动曲轴磨床通过鉴定

2011 年新年伊始，江西杰克机床有限公司承担的国家科技部“十一五”国家科技支撑计划“汽车关键零件精密加工装备与工艺”子课题“数控高速随动曲轴磨床”系列产品，日前顺利通过了专家的鉴定与验收，产品被评价达到国际先进水平。这是该公司继 2010 年在高端数控曲轴磨床领域成功研制“异形零件高速精密磨削关键技术与高速随动数控磨床”项目后的又一项达到国际先进水平的项目产品。

此次鉴定会的规格与影响得到杰克集团董事会的高度重视，集团总裁与董事长在鉴定会现场观摩时，向有关专家与领导表示，在“十二五”期间，杰克集团将加大对杰克机床产业的投入，加快产业升级与产品转型，力争企业创业版上市。

近年来，杰克机床加大科技开发投入，整合了一支复合型的研发团队，在高端数控磨床领域屡有斩获。公司产品先后在军工企业中实现了替代进口；在国内一些知名企业的曲轴与凸轮轴的生产线上，杰克机床以优良的性价比深受用户的青睐。