

滚珠直线导轨副产品互换性技术优化研究

■ 大连高金数控集团有限公司（辽宁 116620） 吕 祎

摘要：从导轨、滑块的关键精度着手，对滚珠直线导轨副产品进行技术优化研究，最终确定关键工序的加工方法、精度保证手段和检测方法。优化后的互换性产品的关键精度、预紧力均可满足要求。

随着滚珠直线导轨副产品的广泛应用，互换性产品市场需求量愈来愈大。滚珠直线导轨副互换性产品的关键精度、制造工艺技术优化研究及试验迫在眉睫。特以长930mm的LBA25滚珠直线导轨副为例，诠释互换性技术优化研究，以便为互换性产品的大批量生产积累经验。

1. 关键精度

非互换性产品保证产品不同的预紧力最为关键，常规做法是依据导轨、滑块不同的节距，装配时更换不同规值大小的钢球来实现。互换性产品精度分为P、H和N级，预紧力为V0~V2。保证导轨、滑块互换是核心，一旦选定钢球规值，是不允许更换钢球直径大小的，故须严格控制导轨和滑块的节距、滚道两边等高以及偏差方向一致性。又因圆弧滚道截面形状与滚道接触点位置一致性对互换性产品预紧力影响极大，且导轨、滑块成形金刚石滚轮制造精度非常重要，特将导轨、滑块金刚石滚轮滚道轮廓关

键精度与沟槽中心距公差均收紧至 $\pm 0.002\text{mm}$ ，且选进口金刚石滚轮来保证。

2. 导轨制造工艺

互换性导轨成品精度保障措施为：选进口意大利法力图CNC—6000高精度导轨磨床（见图1）、进口专用电永磁力夹具、滚轮滚道轮廓精度与沟槽中心距公差提高至 $\pm 0.002\text{mm}$ 的进口金刚石滚轮；用一套砂轮修整器完成左、右立式磨头上所安装的砂轮修整（见图2）；关键工序用成形磨方法；机床具有三轴联动功能，在一次装夹中完成导轨A基准面、两侧面滚道成形磨（见图3）。

加工方法的优点为：首先，保证导轨两侧滚道工作面轮廓位



图1 意大利法力图CNC—6000高精度导轨磨床

置精度一致性；其次，保证导轨两侧滚道等高 0.003mm 超高的尺寸精度；再次，卧式磨头加工导

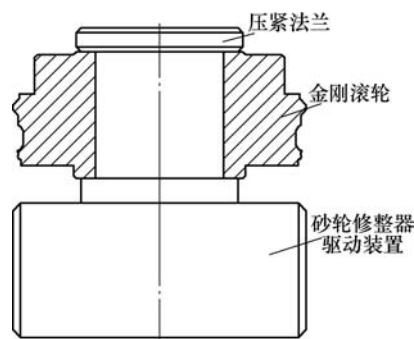


图2 左、右立式磨头砂轮修整器简图

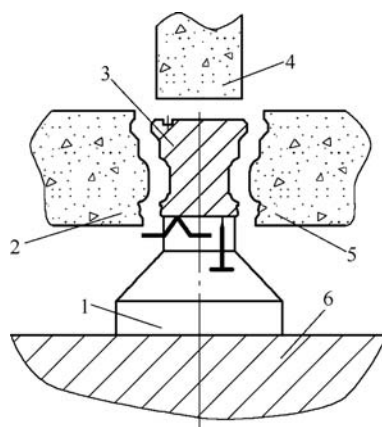


图3 LBA25滚珠直线导轨三轴联动成形磨削原理简图

1.进口电永磁力夹具 2.左立式磨头砂轮
3.LBA25导轨 4.卧式磨头砂轮
5.右立式磨头砂轮 6.导轨磨床工作台

轨安装基准面，使滚道对导轨安装底面的尺寸精度与位置精度得以保证；最后，保证设计、工艺和测量基准相统一，减少装夹、定位误差，磨出高精度产品。

机床精度：左立式、右立式和卧式磨头进行成形磨时，滚道及各安装基准面一次磨成形，磨后尺寸精度可达到0.003mm；同一截面内同一尺寸一致性为0.003mm；各滚道的尺寸及位置公差为 $\pm 0.005\text{mm}$ ；表面粗糙度值 $R_a=0.4\mu\text{m}$ 。

通过优化导轨制造工艺，最重要的是实现以导轨为基准的滑块互换，以满足用户更换滑块的要求。导轨优化前、后对比如图4所示。

3. 滑块制造工艺

互换性滑块成品精度保障措施：选进口意大利高精度全闭环数控滑座磨床；进口专用电永磁力夹具，依次装夹14件工件；滚轮滚道轮廓精度与沟槽中心距公差提高至 $\pm 0.002\text{mm}$ 的进口金刚石滚轮；左、右砂轮修整器完成其磨头上安装的砂轮修整；基于左、右两端等高磨头，利用左、

右磨头前、后相位之差，实现差动磨；关键工序用成形磨方法加工，实现一次装夹多件成形磨加工。

加工方法的优点为：设计、工艺和测量基准相统一，减少装夹误差、定位误差，磨出高精度产品。

机床精度：左立式、右立式磨头进行成形磨时，滚道及各安装基准面一次磨成形，磨后尺寸精度可达到0.003mm；同一截面内同一尺寸一致性为0.003mm；各滚道的尺寸及位置公差为 $\pm 0.005\text{mm}$ ；表面粗糙度值 $R_a=0.4\mu\text{m}$ 。

不仅如此，还对滑块的加工工艺、毛坏、加工余量和尺寸精度进行了优化。

若采用热轧毛坏，则工序为：下料→正火→铣A、C面（见图5）→铣B、D面→刨标记槽→铣凹槽→粗磨A、C面→粗磨B、D面→精铣凹槽→精铣圆弧沟槽→铣顶面凹槽→刨台阶及斜面→锯断→渗碳→铣长度两面→铣圆弧面→倒外角→倒内角→半精磨A、C面→半精磨B面→钻两端面孔→钻安装孔→螺纹孔口倒角→

攻螺纹→淬火→喷砂→磷化→精磨长度两面→精磨A、C面→精磨B、D面→成形磨圆弧沟槽→退磁、清洗→检测→作标记。共34道工序。

若采用冷拉毛坏，则工序为：下料→真空正火→渗碳→半精磨A、C面→半精磨B、D面→钻两端面孔→钻安装孔→螺纹孔口倒角→攻螺纹→淬火→喷砂→磷化→以铣代磨长度两面→精磨A、C面→精磨B、D面→成形磨圆弧沟槽→退磁、清洗→检测→作标记。共19道工序。

热轧毛坏余量大，加工部位多。用冷拉成形技术后，零件成形率高，加工部位、余量大大减少，金属利用率大幅提高。尤其是选用真空正火热处理技术，变形量大约为0.03~0.06mm，无氧化皮，为后序加工出高精度滑块奠定了坚实的基础。滑块毛坏优化前、后对比如图5所示。

用冷拉毛坏，加工工序减少15道，成本降低，生产周期缩短。最重要的是实现了以滑块为基准的导轨互换，以满足用户更换导轨的要求。滑块优化前、后对比如图6所示。

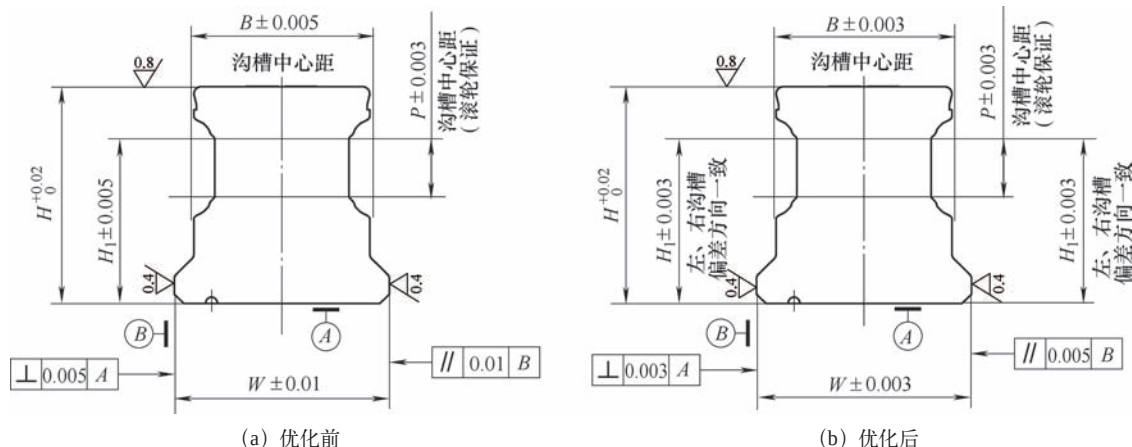


图4 导轨优化前、后对比

4. 检测方法

导轨的结构简单,沟槽中心距($B \pm 0.003$)mm、左右两侧沟槽等高($H_1 \pm 0.003$)mm一致性、平行度0.005mm以及垂直度0.003mm各项精度由机床保证;沟槽中心距($P \pm 0.003$)mm精度由进口金刚石滚轮保证。涉及精度影响因素较少,检测相对容易。这样以来,就可委托检测仪供应商MARPOSS公司,在原进口意大利MARPOSS-CNC高精度滚动直线导轨精度检测仪基础上进行改造,即可完成LBA25滚珠直线导轨的精度自动检测(见图7)。

然而滑块截面结构复杂, 沟槽中心距 ($W_1 \pm 0.003$) mm、左右两侧沟槽等高 ($H_1 \pm 0.003$) mm 一致性、平行度 0.005 mm 以及垂直度 0.003 mm 各项精度由机床保

证；沟槽中心距 ($P \pm 0.003$) mm 精度由进口金刚石滚轮保证。且尺寸多、影响精度因素多，检测难度大。常规情况下，首先，滑块的精度包括：滚道对安装基准面（两个）的平行度及位置度，滚道之间的位置度及平行度；其次，滑块的精度测量属于多要素、相互关联的测量，测量项目达10多项；再次，用传统的手工检测，准确性低，检测技能要求高，精度低、误差大，测量环境苛刻，不能准确反映滑块精度的真实值，是制约产品一致性及提高生产效率的瓶颈。在迫不得已的情况下，与检测仪制造商联合开发专用精密数控滚珠滑块沟槽精度检测装置（见图8），即可完成LBA25滚珠滑块的精度自动检测。该装置的最大特点是：对被

测要素与测量基准面之间的位置关系进行线性检测, 加上不同界面检测的数据, 经过计算处理, 形成全面的精度数据, 不但可以提高产品精度, 也可以提高滑块的一致性控制, 提高生产效率。精度准确性可达到 $0.001\ 1\text{mm}$ 之内。检测效率提高了10倍以上。

5. 试验设备及要求

试验设备采用直线导轨副专用检测平板,精度为0级,包括弹簧式拉力计、测量表座及指示器(分辨率:2 μ m/格)。

检测类型为生产型检测，环境温度17~23℃，湿度≤70%。

产品为大连机床集团有限责任公司TD500A钻、攻加工中心机床(见图9)。导轨副型号:LBA25-930FFL2-4V2(X轴);数量:10副,导轨形式、

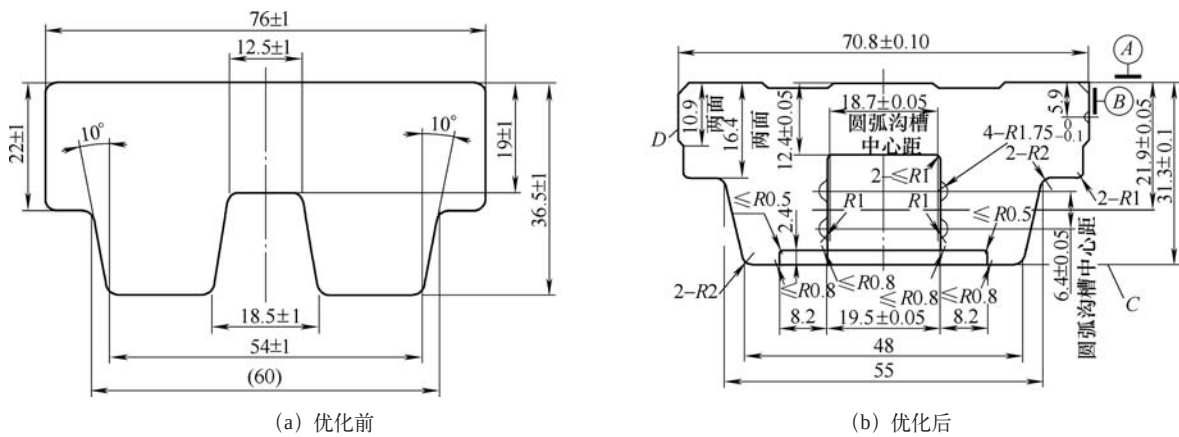


图5 滑块毛坯优化前、后对比

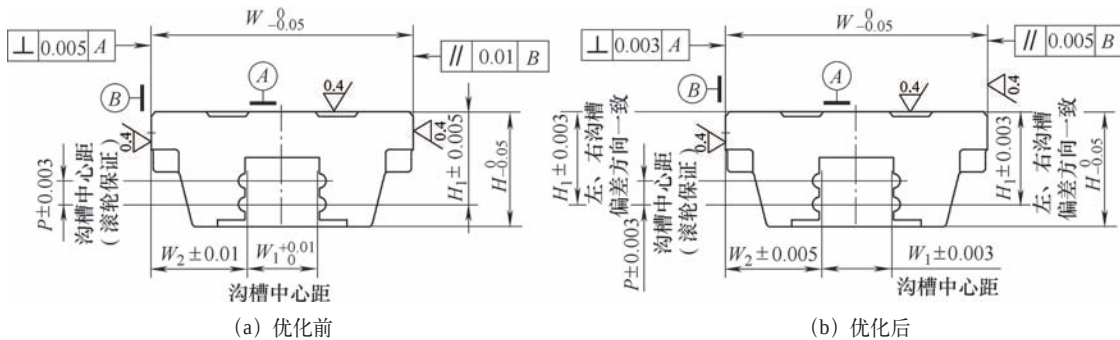


图6 滑块优化前、后对比

规格：LBA 25；滚动体形式：钢球型；滑块形式：加长法兰型；预紧力：V2（中载），精度：4级。精度按JB/T 7175.2—1993机床用滚动直线导轨副验收技术条件检验（见图10），不检测同组

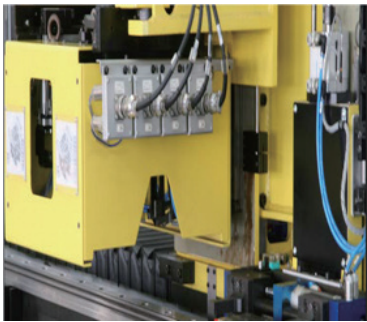


图7 LBA25导轨检测仪

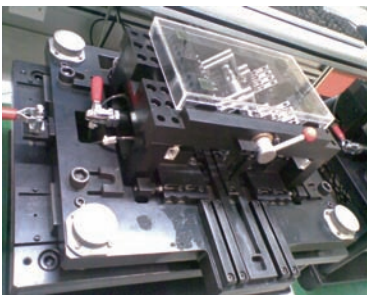


图8 LBA25滑块检测装置



图9 TD500A钻、攻加工中心机床

高度变动量 ΔH 、同组宽度变动量 ΔW 两项精度。

6. 检测步骤及要求

（1）互换性直线导轨副装配试验、检测，在导轨装配车间进行，步骤如下：①先选出基准导轨、基准滑块（节距尺寸为设计公差中间值的零件）。②根据V2预紧力要求，初装基准滑块组件（未装密封件），记下所配钢球规值数值大小。③将基准滑块套在基准导轨上，再紧固在测量平板上。④根据JB/T 7175.4—2006滚动直线导轨副第4部分：验收技术条件要求，检测导轨副4项精度，不检测同组高度变动量 ΔH 、同组宽度变动量 ΔW 两项精度。⑤依照“LBA系列滚珠直线导轨副预紧力值”，用弹簧式拉力计测试基准滑块预紧力大小，记录所配钢球规值数值大小。⑥将基准滑块组件推至互换性导轨（9副）上，用弹簧式拉力计检测预紧力变化（范围0~5N）。⑦初装互换性滑块组件（19件），依次推至基准导轨上，逐一检测其预紧力变化（范围0~5N）。⑧互换性滑块组件随机推上互换性导轨（每副导轨装2件），逐一检测预紧力变化（范围0~5N）。⑨随机抽取两副互换性导

轨副，紧固在专用平板上，按JB/T 7175.4—2006滚动直线导轨副第4部分：验收技术条件要求，检测6项精度。

（2）互换性导轨副装在TD500A机床上，检测水平、垂直两个方向动态精度。

7. 检测数据

精度检测数据如表1所示。预紧力检测数据如表2所示，其中预紧力变化范围为0~5N。H-SY-04（Z）-J基准滑块在互换性导轨上预紧力检测数据如表3所示，其中预紧力变化范围为0~5N。互换性滑块在H-SY-03（G）-J基准导轨上预紧力检测数据如表4所示。互换性滑块在互换性导轨上（随机组合）预紧力检测数据如表5所示。任意2副互换性导轨副精度检

表1 精度检测数据（单位： μm ）

项目	公差	实测值
C面对A面的平行度 A_1	17	6
D面对B面的平行度 A_2	17	9
高度极限偏差H	± 50	-22
宽度极限偏差W	± 60	16

表2 预紧力检测数据（单位：N）

基准滑块编号	公差	实测值
H-SY-04（Z）-J	10~15	13

表3 H-SY-04（Z）-J基准滑块在互换性导轨上预紧力检测记录表（单位：N）

互换性导轨编号	预紧力	
	公差	实测值
H-SY-01（G）	10~15	13
H-SY-02（G）		14
H-SY-04（G）		15
H-SY-05（G）		12
H-SY-06（G）		15
H-SY-07（G）		15
H-SY-08（G）		12
H-SY-09（G）		12
H-SY-10（G）		14

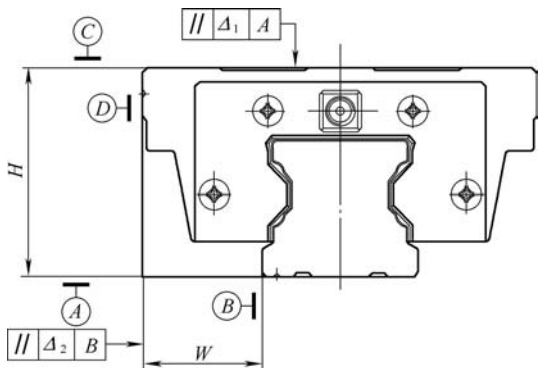


图10 动态精度检测

表4 互换性滑块在H-SY-03 (G) -J
基准导轨上预紧力检测记录表
(单位: N)

互换性导轨编号	预紧力	
	公差	实测值
H-SY-01 (Z)	10~15	15
H-SY-02 (Z)		14
H-SY-03 (Z)		15
H-SY-05 (Z)		13
H-SY-06 (Z)		15
H-SY-07 (Z)		10
H-SY-08 (Z)		13
H-SY-09 (Z)		15
H-SY-10 (Z)		14
H-SY-11 (Z)		12
H-SY-12 (Z)		15
H-SY-13 (Z)		11
H-SY-15 (Z)		14
H-SY-16 (Z)		13
H-SY-17 (Z)		14
H-SY-18 (Z)		11
H-SY-19 (Z)		10
H-SY-20 (Z)		15

表5 互换性滑块在互换性导轨上
(随机组合) 预紧力检测记录表
(单位: N)

互换性 导轨编号	互换性 滑块编号	预紧力	
		公差	实测值
H-SY-03 (G) -J	H-SY-04 (Z) -J	10~15	13
	H-SY-05 (Z)		15
H-SY-01 (G)	H-SY-06 (Z)		15
	H-SY-09 (Z)		14
H-SY-02 (G)	H-SY-02 (Z)		13
	H-SY-07 (Z)		14
H-SY-04 (G)	H-SY-11 (Z)		15
	H-SY-15 (Z)		12
H-SY-05 (G)	H-SY-01 (Z)		14
	H-SY-08 (Z)		12
H-SY-06 (G)	H-SY-03 (Z)		11
	H-SY-14 (Z)		14
H-SY-07 (G)	H-SY-17 (Z)		15
	H-SY-12 (Z)		14
H-SY-08 (G)	H-SY-16 (Z)		12
	H-SY-19 (Z)		13
H-SY-09 (G)	H-SY-13 (Z)		12
	H-SY-20 (Z)		10
H-SY-10 (G)	H-SY-18 (Z)		14
	H-SY-10 (Z)		10

测数据如表6所示。互换性导轨副
装在TD500A机床上的精度检测
数据如表7所示。

表6 任意2副互换性导轨副精度检测
记录表 (单位: N)

项目	公差	实测值	
		导轨编号 H-SY-06 (G)	导轨编号 H-SY-02 (G)
C面对A面的 平行度 A_1	17	6	8
D面对B面的 平行度 A_2	17	9	6
高度极限偏差H	± 50	-20	-16
同组高度 变动量 ΔH	20	4	6
宽度极限偏差W	± 60	15	20
同组宽度 变动量 ΔW	25	9	12

表7 互换性导轨副装在TD500A机床
上的精度检测记录表 (单位: μm)

项目	公差	实测值	
		导轨编号 H-SY-06 (G)	导轨编号 H-SY-02 (G)
C面对A面的 平行度 A_1	17	8	8
D面对B面的 平行度 A_2	17	10	8

8. 优缺点分析

由以上试验结果可以看出:

(1) 垂直、水平两个方向直
线度 (产品动态精度) 全部达到3
级, 特别是垂直方向的直线度有
60%达到了2级, 高于4级精度。
除了取决于机床精度外, 最重要
的是取决于机床三轴联动磨方式
和滚轮的制造精度, 彻底解决了
导轨安装基准面与沟槽之间平行
度难以保证的问题。

(2) 在互换性产品关键精
度优化中, 收紧导轨、滑块安装
基准面到圆弧沟槽的高度极限尺
寸 ($H \pm 0.005$) mm、滑块侧基
准面到圆弧沟槽宽度极限尺寸
($W_2 \pm 0.005$) mm, 既保证导轨

副高度极限尺寸、宽度极限尺
寸, 又易于实现两个滑块的等
高、等宽尺寸。

(3) 互换性产品中的导轨和
滑座加工误差、预紧力难以控制
在一定范围内, 达不到“互换”
要求。本次试验的10副互换性导
轨副预紧力全部达标, 变化范围
均在0~5N, 容易实现互换, 验
证了互换性产品关键精度、制造
工艺的准确性。

(4) 手工检测导轨、滑块精
度稳定性不佳 (宽度极限尺寸测
量最为明显), 效率低, 无法与
高效自动检测媲美, 难以满足大
批量生产, 这都是亟待解决的问
题。

9. 结语

通过对直线导轨副进行产
品关键精度、制造工艺及检测方
法的优化, 经TD500A钻削中心
配套的10副互换性导轨互换性试
验, 验证了直线导轨副互换性产
品优化的准确性、合理性和可行
性。装配效率显著提高, 批量化
生产获得有力保证。

参考文献:

- [1] 杨叔子. 机械加工工艺师手册
[M]. 北京: 机械工业出版社,
2001.
- [2] 锻压技术手册编委会. 锻压技术
手册 (下册) [M]. 北京: 国防
工业出版社, 1988.
- [3] 田长生. 金属材料及热处理[M].
西安: 西北工业大学出版社,
1985.
- [4] 徐学林. 互换性与测量技术基础
[M]. 长沙: 湖南大学出版社,
2007.

MW (收稿日期: 20170512)