

大型精密机床横梁变形补偿技术

中捷机床有限公司 (辽宁沈阳 110142) 郭志超 王世超 孙中权

当前,大跨距的重型龙门式机床已成为能源、电力、航空航天及船舶等行业必需的重型加工设备。大型龙门式机床突出特点之一,就是大跨距的横梁部件,其机械性能的好坏直接影响到机床的最终加工精度。而跨距增大随即带来的就是横梁严重的自重变形,如何有效地解决这一问题,并以此为基础促使大跨距龙机床精度的进一步提高,便成各机床厂家及相关科研机构的重要攻关课题。对于运动式的大跨距重载横梁,如何有效保障分析结果的可靠性、如何准确处理加工过程中与实际装配中的位置差异性带来的数据处理等问题都鲜见报道。

1. 横梁工艺分析

传统的横梁由于跨距较短、自重变形小,所以横梁的导轨都是按直线加工的。对于跨距稍大的横梁在安装调试过程中就会发现横梁因为自重及承载发生了塌腰变形,致使机床横梁方向直线度不合。此时传统的修正方法就是按照经验反复加修,这不但影响了安装进度,还会造成极大地成本浪费。

此外,传统的修正方法过于依赖主观经验,难于形成严谨的技术体系,对于大跨距横梁的变形加工、修复更是难以实现。为此,本文提出基于加工阶段,通过有限元分析和现场实际检测相结合的方法来解决这一问题,并明确相关技术要点,确保技术的准确性。

文中分析选用的横梁为铸铁材质,横梁长度13 m,滑枕及滑板部件在横梁导轨面上滑动。如图1中上导轨的5面与下导轨的3面为移动部件的X向基准定位约束,下导轨1面提供Z向的基准定位约束。

该龙门产品在验收时要求滑板沿横梁方向运行的正向和侧向直线度均小于0.03 mm,即需要通过适

当的工艺手段保障安装后的横梁导轨基准面的直线度处于精度许可范围内。如图2为按照传统的直线

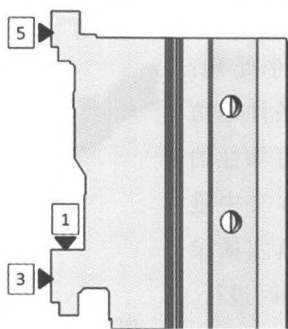


图1 横梁导轨基面图

加工方法加工后的横梁于安装状态下的变形情况,最大弯曲变形量达0.34 mm,若在机床Z轴的滑枕长度在内,其装配后的精度固然与要求相差甚远。可见传统的直线加工方法难以满足大跨距横梁导轨的直线度要求,而横梁较长其修复加工的过程也必然复杂难以进行。接下来文中就将介绍一种基于有限元分析的变形补偿技术—仿形加工方法。

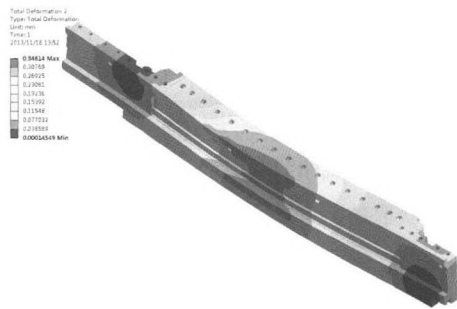


图2 横梁工作状态变形图

2. 横梁仿形加工

仿形加工技术的难点是如何找到轮廓准确的仿形加工数据。大型龙门机床多为动梁结构,横梁在立柱上处于“立式”状态,即工作状态,固定由两

侧导轨及背部压板、两侧下端的丝杠母座及一单侧下端的导向导轨共同作用实现，此时横梁的承载主要是自身及其上面左右滑动部件的重量；处于加工状态下的横梁多处于“仰式”状态，此时横梁仅承受自身重力，其支撑方式由加工需求及工艺要求决定，通常采用四点支撑放置。加工状态与工作状态姿势上的区别，也增加了仿形数据的获取难度。本文以1面为例，以有限元分析和实际检测为基础，通过模型修正与数据拟合的办法求取横梁1基面的仿形加工曲线，具体过程如下。

(1) 横梁有限元模型的建立（见图3）：对横梁模型进行适当简化，忽略横梁上螺栓孔等非重要结构。

边界条件处理：
合理的边界条件是仿真计算结果可靠性的重要保障。本文中进行的分析与真实横梁的加工过程同时进行，经过数次的加工实践数据与模拟计算数据的真实对比，保障了模型边界条件的准确性。

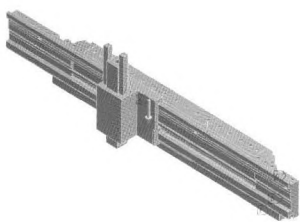


图3 有限元模型加载图

横梁承载的模拟：对于横梁承载研究过程中采用模型加载的方式，即建立完整的移动部件模型，通过固定联接、摩擦联接等方法将移动部件模型与横梁导轨联接起来。

(2) 仿形曲线获取与检验：仿形加工的目的之一就是通过对横梁导轨“加肉”的方式抵消自身及滑枕结构重量带来的横梁塌腰变形。在横梁行程范围内按200 mm长度分成若干个工作位置，分析移动部件及自重在各个位置产生的横梁变形，并采集对应导轨数据，完成曲线获取。

曲线获取的具体过程如下：分析加工状态下的横梁1面的变形曲线。如图4所示，理想的横梁模型“仰式”四点支撑放置，定义导轨面变形的拾取路径，路径位于导轨面的中心线处，其近似于模拟导轨面的平均变化值。拾取点间隔距离参照直线度检测仪器的测量间距（200 mm），并与之后计算中拾取点位置统一。

通过有限元计算获取导轨面1加工状态对应的直线度曲线如图5所示（横坐标为数据拾取点标号，

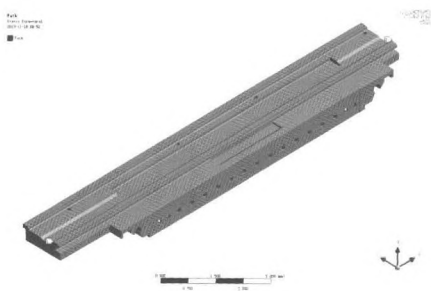


图4 加工位置示意图

其余对应的实际检测标号一致，下同）。

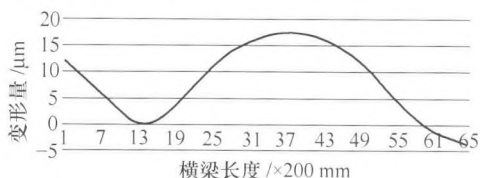


图5 加工状态导轨面变形曲线

模拟工作状态下的横梁1面的变形曲线：将理想的横梁及移动部件模型“竖立”放置，并模拟其真实的边界条件，最终获取不同工作位置对应的1面各拾取点连成的曲线如图6所示。

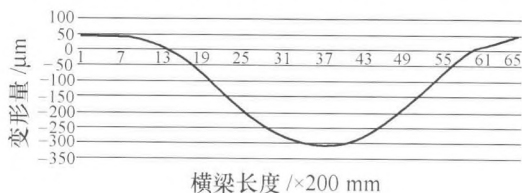


图6 工作状态导轨面变形曲线

曲线数据拟合处理：上述步骤中计算的是横梁的“塌腰”弯曲变形曲线，而为了保持好导轨面平直就需要对上图6中的曲线，相对原点反置，得到如图7中的曲线A。处于加工位置的横梁由于自重1面也产生了变形B，所以将图中曲线A与曲线B做减差，进而得到仿形加工曲线C。

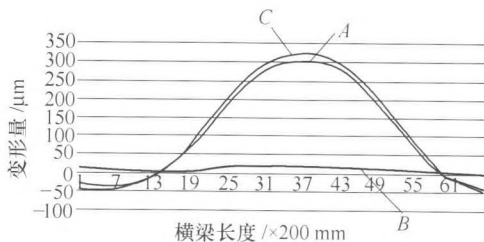


图7 拟合曲线

有限元模型的检验与修正：在第1步我们已经获取了加工状态的横梁1面变形如图8中曲线A。同样采取有限元分析横梁导轨1面在无负载状态的“立式”变形如图8中曲线C。将曲线A与曲线C作

差得到图 8 中曲线 B，即理论状态横梁导轨“仰式”与“立式”的变形差值。

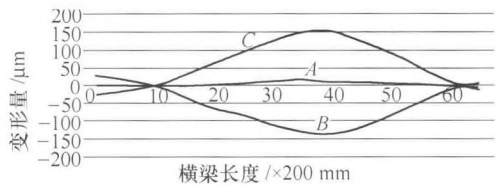


图 8 理论变形曲线

在检测实际导轨变形时，首先，我们在横梁的半精加工后采用直线度测量仪对“仰式”状态下按直线方式加工的横梁导轨 1 面直线度进行测量。其次，将横梁由“仰式”放置转换成“立式”放置 24 h 后，检测导轨 1 面的直线度。同样将两者作差得到如图 9 中的实线。

为了检验横梁的变形规律及变形量，我们采用理论变形差值与实际变形差值相对比，来确保我们的仿形加工曲线可靠。为了更直观地显示二者关系，排除必然的微小测量误差，这里对理论曲线加载了适当的误差范围，结果如图 9 所示，真实曲线位于理论推导曲线的 ±0.02 mm 误差范围内，即模型准确实体变形可靠。

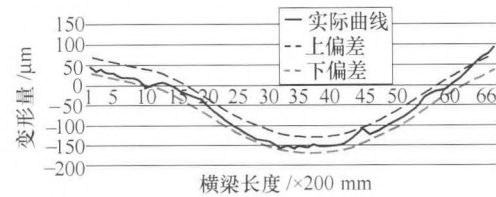


图 9 变形验证曲线

反之，若真实曲线与理论曲线偏差过大，则需将模型边界条件、横梁加工时的固定办法进行统筹分析找出问题，修改相关约束条件重新分析。如果排除此类问题，将对仿形曲线进行补偿后进行加工。

3. 结语

对比分析该大型横梁曲线补偿加工前后的直线度：横梁“仰式”放置，将导轨面分别采用自重曲线补偿加工和直线方式加工两种方式。加工后翻转为“立式”状态静置 24 h 后检测导轨面 1 的直线度，如图 10 所示曲线 A 为曲线补偿式加工后基面 1 的直线度检测值，曲线 B 为直线方式加工后基面 1 的直线度检测值，将曲线对应的关键点位置数值表格化，

如附表所示。

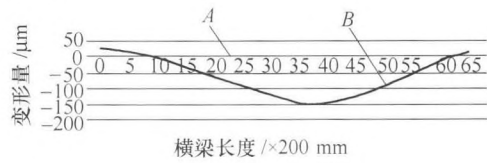


图 10 补偿加工前后直线度对比

通过附表中的数值可知，采用直线加工时基面 1 出现“塌腰”变形，最大变形 0.149 mm，而仿形加工后则基本上避免了“塌腰”，对比仿形加工前后数据基面 1 的直线度由 0.14 mm 提高到了 0.02 mm，由此可见该技术的正确运用，对保证这种大跨距横梁导轨的直线度要求至关重要。

直线度对比表 （单位：0.001 mm）

标号	0	5	10	15	20	25	30
仿形前	25	16	-1	-32	-65	-94	-124
仿形后	-12	-18	0	8	12	15	14

标号	35	40	45	50	55	60	65
仿形前	-148	-149	-126	-94	-50	-10	12.5
仿形后	20	20	15	12	15	10	0

采用仿形加工技术后横梁实际运行时的 Y 轴直线度检测：通过激光干涉仪测量已安装完毕的龙门加工中心滑板沿横梁 Y 向移动的直线度，且系统不参与补偿。直线度检测结果如图 11 所示，刀尖处的正侧向直线度最大偏差均小于 0.03 mm 达到验收要求。

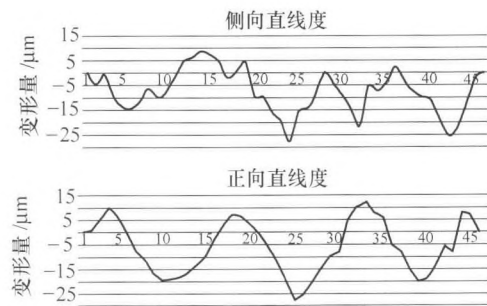


图 11 直线度实测曲线

通过理论分析传统的加工方法不能满足类似文中介绍的大跨距横梁的精度要求。而通过有限元分析及数据拟合获取横梁的仿形加工轨迹曲线，并进一步对横梁进行仿形加工，这种方法能有效地解决大型横梁的加工难题，保障了大跨距横梁产品的高精度要求得以实现，同时还为其他类似零件提供了典型示范。**MW** （收稿日期：20140312）