第 40 卷 第 5 期
2014 年 5 月

北京工业大学学报
JOURNAL OF BEIJING UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Vol. 40 No. 5
May 2014

超跨距横梁 Z 向导轨面起拱曲线设计与优化

郭铁能，王志亮，蔡力钢，崔亚辉
（北京工业大学 机械工程与应用电子技术学院，北京 100124）

摘 要：针对数控重型龙门铣床超跨距横梁由于跨度大、质量大，安装完毕后由于重力和溜板滑枕作用力会向下弯曲，其中 Z 向导轨面的最大挠度可达到 1 mm，严重影响加工精度的问题，采用对导轨面预起拱的方法来补偿横梁变形对加工精度的影响. 首先，采用有限元方法分析超跨距横梁实际工作时的变形，并采用多项式对溜板滑枕在各位置时横梁 Z 向导轨面的变形进行拟合；充分考虑由于溜板跨度带来的 2 条变形曲线对起拱曲线的影响，提出了基于这 2 条变形曲线进行起拱曲线设计和优化的方法. 分析以往各种起拱曲线对刀尖点变形的影响，结果表明：所提出的优化方法较以往的起拱方法更能有效降低横梁变形对机床精度的影响.

关键词：超跨距横梁；变形曲线；起拱曲线

中图分类号：TH 161⁺.1；TH 161⁺.5　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0254－0037(2014)05－0653－08

Design and Optimization of the *Z*-guided Face Camber Curve of Super-span Cross-rail

GUO Tie-neng, WANG Zhi-liang, CAI Li-gang, CUI Ya-hui
(College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: As super-span cross-rail of NC heavy-duty planer type milling machine tool has a super span and heavy mass, it will bend down after being installed with a heavy mass and the force caused by bottom slid and quill. The largest deformation of Z-guided face attains 1 mm, which seriously influences the machining accuracy. Machining an arch camber in advance is used to compensate for the influence caused by deformation of the cross-rail. Finite element method is used to analyze the deformation of the super-span cross-rail when working. Multinomial is used to fit the deformation curve based on deformation of the Z-guided face of the cross-rail when the bottom slid and quill is at any position. This paper takes into consideration the impact on camber curve as the bottom slid's span brings about two deformation curves. A method based on the two deformation curves is put forward to design and optimize the camber curve. By comparing various camber curves' effects on the deformation of the milling head, results show that the optimization method can effectively reduce the influence of cross-rail's deformation on the machine tool's accuracy.

Key words: super-span cross-rail; deformation curve; camber curve

数控重型龙门铣床由床身、滑座、立柱、横梁、连接梁、溜板和滑枕 7 部分组成，如图 1 所示. 滑座带动整台机床在床身上运动，完成 X 向进给；立柱上安装有丝杠，丝杠可带动横梁上下运动，完成 Z 方向进给；滑枕也可相对溜板做上下移动，完成 W 轴向（Z 向辅助轴）进给；横梁上有 3 个导轨面，溜板在

收稿日期：2013-01-15
基金项目：国家重大专项资助项目(2010ZX04001-041)；国家自然科学基金资助项目(50905004)
作者简介：郭铁能(1975—)，男，讲师，主要从事振动与机床动力学方面的研究，E-mail：gtn@bjut.edu.cn

这 3 个导轨面和横梁接触并沿着这 3 个导轨面左右移动以完成 Y 向进给.

随着中国大型电力、航空航天、大型船舶、工程机械等相关行业的发展,该类数控重型龙门铣床的规格越来越大. 如某机床厂生产的数控龙门铣床,其横梁已长达 15 m,仅横梁质量就达到 100 t. 横梁由于跨距大、质量非常大,再加上安装在横梁上的溜板和滑枕的质量,就使得 Z 向导轨面在各个受力的综合作用下向下凹陷,本文分析表明横梁 Z 向导轨面中部最大变形接近 1 mm,如果不消除该变形,将严重影响机床的加工精度.

为了解决大型机床由于重力变位产生几何误差的问题,清华大学的张伯鹏等[1]提出了利用制造信息差和自演进补偿技术改善制造装备精度的途径,即在箱形横梁内设置辅助梁,并在横梁和辅助梁之间设置 3 个出力可控的液压千斤顶,通过优化千斤顶的出力模式来减小铣头位置的向下变位和偏转角. 此方法虽然理论上能解决横梁重力变位产生几何误差的问题,但在具体实施时(尤其在针对超跨距横梁时)存在 2 个缺陷:1) 在箱形横梁内设置辅助梁并在二者之间加液压千斤顶,在安装时非常困难;2) 液压千斤顶的存在增加了设备和故障点,从而增加了设备成本,也导致了长期使用时难以保证其精度.

一些研究者为了减小横梁变形对刀尖轨迹的影响,研究了用优化横梁结构的方法来增加横梁刚度,减小横梁变形来提高机床精度. 罗传林等[2]、谢黎明等[3]、Zatarain 等[4]分别用不同的优化方法研究了增加横梁刚度的途径,并分别验证了提高横梁刚度方法的可靠性,为提高横梁刚度提出了宝贵的建议. 尽管通过优化结构能够增加横梁整体刚度,减小误差,随着横梁跨度不断增加,横梁导轨面的变形仍然不可避免.

为此,一些研究者通过分析溜板在不同位置时横梁的变形得到横梁导轨的变形曲线,再依据变形曲线设计起拱曲线,并在加工横梁时在导轨面增加一定的余量来抵消变形的影响,由此来保证机床精度[5-7]. 然而,溜板和横梁的接触面有左右 2 个. 上述研究者将左右 2 条变形曲线取平均后进行起拱曲线设计,本文分析结果表明,采用该方法起拱后的铣头水平移动的直线度误差为 10^{-3} mm,角度偏差为 2×10^{-5} rad,国家标准对这 2 个指标的规定分别为 0.04 mm 和 10^{-5} rad,这种方法虽然基本满足了国家标准的要求,但国家标准仅规定最低的精度要求,要

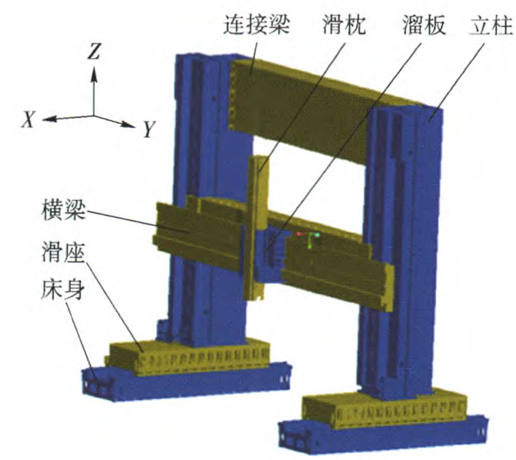


图 1 数控重型龙门铣床

Fig. 1 NC heavy-duty planer type milling machine tool

提高机床的精度还需要对起拱曲线进行优化. 郭铁能等[6]还验证了用有限元方法计算超跨距横梁变形时的可靠性.

影响横梁变形的因素主要包括:横梁自身重力、溜板和滑枕由于自身重力产生的对横梁的压力及机床所受切削负荷和其本身的热变形等. 由于切削负荷和热变形要远小于由于重力产生的变形,因此一般忽略其对横梁变形的影响. 本文采用有限元方法对横梁 Z 向导轨面的变形进行了分析,基于该变形,同时考虑 Z 向导轨面上溜板和横梁左右 2 个接触面对起拱曲线的影响,采用优化算法对起拱曲线进行了优化. 最后对比了不同的起拱曲线对铣头刀尖点的精度影响,为解决横梁加工时的导轨面起拱问题提供了途径和方法.

1 横梁的有限元分析

1.1 横梁介绍

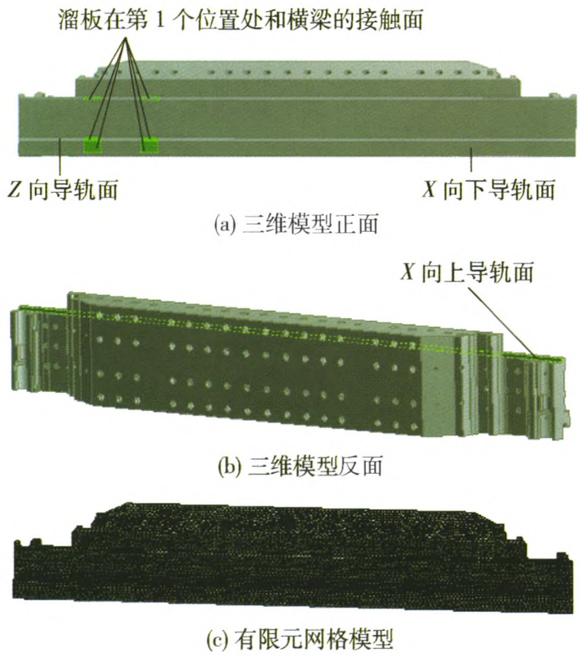
本文研究的横梁长达 15 m,质量为 99.716 t,如图 2 所示. 与机床坐标系相同,横梁的重力反方向为 Z 向,长度方向为 Y 向,前后方向为 X 向.

该横梁材料为 QT600,其相关参数为:密度 7.200 t/m^3,弹性模量 174 GPa,泊松比 0.275.

图 2(b)所示为横梁的有限元网格模型. 该网格模型中节点数目为 464 702,单元数目为 259 926.

1.2 横梁的边界条件和受力

横梁的上下运动(Z 向)是通过丝杠驱动. 通过压板,横梁紧贴在立柱的导轨面. 导轨接触面处由静压油支撑,静压油支撑刚度大. 因此,在横梁上下移动的情况下,其 X 向接触面和 Z 向接触面完全固定,如图 3 所示. 在有限元建模中,此处 X 方向和 Z



(a) 三维模型正面

(b) 三维模型反面

(c) 有限元网格模型

图 2　横梁模型

Fig. 2　Model of super-span cross-rail

方向只施加单方向的约束. 考虑到热膨胀的因素，横梁 Y 方向一端运动固定，而另一端自由. 因此，在有限元模型中约束也按照实际情况施加.

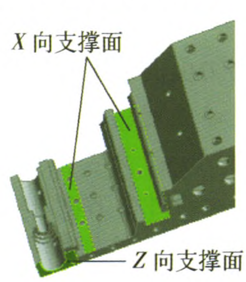


图 3　约束示意图

Fig. 3　Constraint sketch map

溜板与滑枕通过丝杠驱动系统可在横梁上左右移动(见图 1). 不同型号的龙门铣床、溜板和滑枕的质量也有差别，从十几吨到三十多吨不等，本文针对的机床其溜板和滑枕质量达 26 t. 在单个导轨面上溜板与横梁有左右 2 个接触面(见图 2 高亮显示部分)，同立柱导轨一样，横梁导轨的各接触面也均为静压油支撑，通过压板等可保证溜板紧贴横梁的导轨面. 作用在横梁导轨的单个接触面受力如图 4 所示. 根据横梁、溜板和滑枕的安装情况，溜板的平衡方程为

$$\begin{cases} \sum M = 0 \\ \sum F_X = 2F_1 - 2F_2 = 0 \\ \sum F_Z = G - 2P = 0 \end{cases} \tag{1}$$

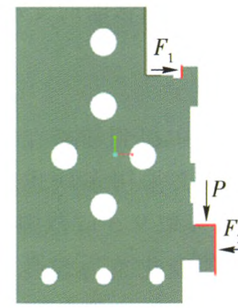


图 4　载荷示意图

Fig. 4　Load sketch map

由式(1)可分析得到载荷数值 $F_1 = F_2 = 55$ kN，$P = 135$ kN. 在有限元分析中，需要将这些力折算到接触面上.

各接触面的面积：上、下导轨 X 向接触面分别为 0.086 m × 0.45 m、0.35 m × 0.45 m；下导轨 Z 向接触面 0.164 m × 0.45 m.

考虑溜板与横梁接触面通过静压支撑，静压作用区域内压力比较均匀，因此可将载荷数值转化成面压载荷施加在横梁导轨与溜板的各接触面上.

1.3　分析及结果提取

横梁变形分析中，不同的加工装卡方式对横梁的起拱曲线影响也很大. 目前横梁加工时主要采用 2 种装夹方式：一种是在横梁底面均匀布置垫铁，横梁处于理想的无变形状态；另一种是模拟横梁安装状态进行装卡. 本文针对第 1 种装夹方式进行分析. 此外，与横梁相连接的立柱及床身也会对横梁变形产生影响，但其变形相对于横梁变形非常小，予以忽略.

横梁变形分析中，Z 向导轨面变形相对于其他导轨面最为明显，限于文章的篇幅，本文的起拱曲线分析和优化针对 Z 向导轨面. 其他导轨面的变形可以用同样的方法进行分析和解决.

横梁的变形会随溜板和滑枕在横梁上不同位置而发生改变，因此，横梁的变形曲线是溜板和滑枕在横梁不同位置所产生的变形构成. 由于机床加工范围的限制，溜板只能在横梁中部 9.5 m 范围内移动. 为了得到变形曲线，在 9.5 m 范围内均匀选取 21 个点，分别对应了溜板在横梁上的 21 个位置，对溜板在这 21 个位置的情况分别进行求解，然后对该曲线进行逼近，获取变形曲线.

在分析接触面变形过程中，先提取单个接触面上所有节点的变形数据，对该接触面每个节点的变形进行平均，得到溜板和滑枕在该位置(溜板中心的 y 坐标值)时接触面的变形，然后改变溜板和滑枕

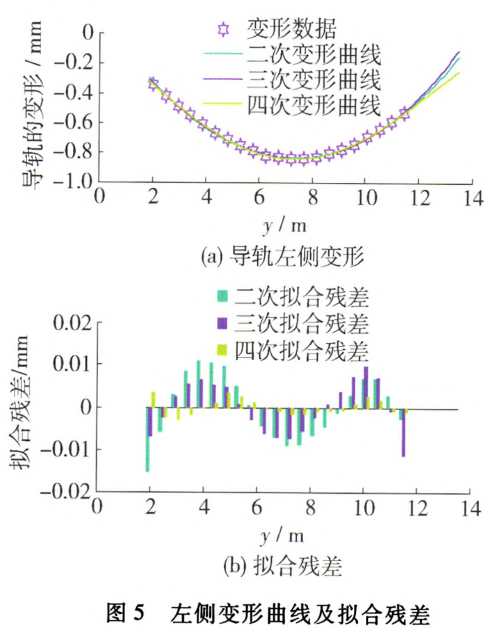
的位置获取下一个位置接触面的变形.

2 变形曲线逼近

由横梁变形分析中得到溜板在横梁上的 21 个位置的分析结果. 本文采用多项式对该 21 个不同位置进行曲线逼近,获取 9.5 m 范围内的变形曲线. 考虑到横梁的变形值变化较为缓慢,且随着溜板在横梁上移动,溜板的 Z 向位移先变大再变小,分别采用二、三、四次多项式拟合变形曲线,比较用几次多项式拟合曲线的合适程度.

图 2 中的高亮部分为溜板在第 1 个位置处和横梁的接触面. 由于每条导轨有 2 个接触位置,因此每个位置单条导轨面均有 2 个接触变形.

将 21 个左侧接触面和 21 个右侧接触面的变形分别拟合成左侧接触面的变形曲线和右侧接触面的变形曲线. 图 5、6 分别为二、三、四次拟合得到的左右两侧的变形曲线和拟合残差. 从二次拟合到四次拟合,拟合残差承递减趋势.



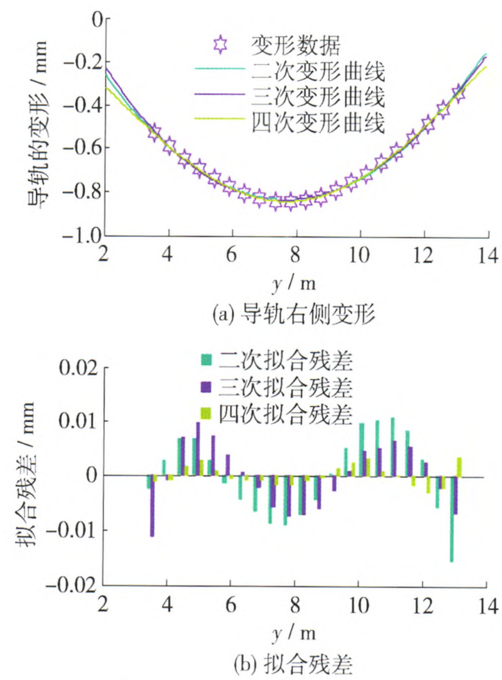
(a) 导轨左侧变形

(b) 拟合残差

图 5 左侧变形曲线及拟合残差

Fig. 5 Left deformation curve and residual

根据 GB T 19362—1 龙门铣床检验条件精度检验的要求,铣头水平移动(Y 轴线)的直线度要求是 1 000 mm 测量长度内公差为 0.02 mm,测量长度每增加 1 000 mm,公差增加 0.01 mm,最大公差为 0.04 mm;局部公差:在任意 500 mm 测量长度上公差为 0.01 mm. 从上面拟合的结果可见,二次和三次多项式拟合的残差最大值都在 0.01 mm 以上,如果用这 2 种结果为基础来设计起拱曲线,拟合曲线的误差已超出标准要求,最终的优化结果显然难以满足国家标准要求. 四次多项式拟合的变形曲线残差不超过 0.005 mm,本文采用四次以上多项式拟合的变形曲线为基础来设计导轨的起拱曲线.



(a) 导轨右侧变形

(b) 拟合残差

图 6 右侧变形曲线及拟合残差

Fig. 6 Right deformation curve and residual

3 起拱曲线设计与优化

3.1 起拱曲线与刀尖点误差的关系

首先假设 $g(x)$ 为起拱曲线方程;$f_L(x)$ 为左侧接触面变形曲线;$f_R(x)$ 为右侧接触面变形曲线;$d(x)$ 为铣头水平移动时在 YOZ 平面内的直线度误差;$\theta(x)$ 为铣头水平移动时在 YOZ 平面内的角度偏差;ΔL 为左右 2 个接触面之间的距离.

21 个位置处左侧接触面的变形拟合得 $f_L(x)$,相应的为 $f_R(x)$. 基于 $f_L(x)$ 和 $f_R(x)$ 优化得到 $g(x)$. 横梁 Z 向导轨面未变形的情况下为一水平面,理想情况下的刀尖点轨迹也为一条直线,如图 7 所示. 通过对导轨面进行合理预起拱可使刀尖点轨迹趋向于一条直线,即减小铣头水平移动的直线度误差.

则

$$d(x)=\left\{\left[f_L\left(x-\frac{\Delta L}{2}\right)+g\left(x-\frac{\Delta L}{2}\right)\right]+\left[f_R\left(x+\frac{\Delta L}{2}\right)+g\left(x+\frac{\Delta L}{2}\right)\right]\right\}\Big/2 \quad (2)$$

$$\theta(x)=\left\{\left[f_L\left(x-\frac{\Delta L}{2}\right)+g\left(x-\frac{\Delta L}{2}\right)\right]-\left[f_R\left(x+\frac{\Delta L}{2}\right)+g\left(x+\frac{\Delta L}{2}\right)\right]\right\}\Big/\Delta L \quad (3)$$

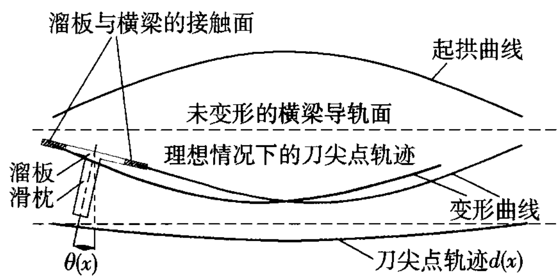


图 7　起拱曲线与刀尖点轨迹

Fig. 7　Sketch map of camber curve and path of the milling head

可用 $d(x)$ 和 $\theta(x)$ 来衡量起拱曲线的优劣，$d(x)$ 和 $\theta(x)$ 越小，起拱曲线越好，机床的精度越高.

3.2　起拱曲线设计与优化

文献[5-7]采用将 2 条变形曲线取平均再取反的方法进行起拱曲线设计，即

$$g(x) = -\frac{f_L(x) + f_R(x)}{2}$$

由于本文采用多项式对变形曲线进行拟合，则起拱曲线可表示为

$$g(x) = \sum_{i=0}^{n} a_i x^i$$

为了获得最优的起拱曲线，需采用优化算法使得 $d(x)$ 和 $\theta(x)$ 最小. 本文采用优化算法使得 $(d(x))^2$ 和 $(\theta(x))^2$ 在横梁的有效工作区域（即溜板和滑枕的工作区间[1 750，13 250]）内最小，即目标函数为

$$\min\int_{1\,750}^{13\,250}(d(x))^2\mathrm{d}x,\min\int_{1\,750}^{13\,250}(\theta(x))^2\mathrm{d}x$$

得到 $a_i, i=0,1,\cdots,n$，进而得到优化的起拱曲线方程. 为了获得两者之间的协调，再设定目标函数为

$$\min\left[\int_{1\,750}^{13\,250}(d(x))^2\mathrm{d}x + k\int_{1\,750}^{13\,250}(\theta(x))^2\mathrm{d}x\right]$$

通过 k 调节 2 个极值函数的关系. 将目标函数 $\min\int_{1\,750}^{13\,250}(d(x))^2\mathrm{d}x$ 和 $\min\int_{1\,750}^{13\,250}(\theta(x))^2\mathrm{d}x$ 相比，为方便计算取 k 等于比值的整数部分，改变 k 的值重复优化过程可得到目标函数随 k 的变化情况.

3.3　优化算法简介

3.3.1　模式搜索算法

模式搜索算法（pattern search method）[8]是一种求解优化问题的方法，它不要求任何目标函数梯度信息，该算法可求解那些目标函数不可微、甚至不连续的问题. 模式搜索算法确定一个点的序列，这个点序列呈现越来越接近理想点的趋势. 在每一步，该算法搜索在当前点周围的一系列点，称为网格（mesh）. 当前点是指该算法在前一步计算出来的点. 该算法通过把当前点与一个称为模式（pattern）的固定向量集的标量倍数相加来构成网格. 如果算法在网格中找到一个新点，且在该点比在当前点使目标函数得到改善，则该算法在下一步就将新点作为当前点.

3.3.2　fminsearch 函数

fminsearch 函数使用一种称为 Nelder-Meade 单纯形的算法[9]来求一个多实变量、无约束非线性单实值函数的最小值. 对于单实变量的情况该算法可搜索到函数的全局最小值，但是对于多实变量的函数，该算法搜索得到的结果不能保证是全局最小值. 本文用该算法搜索 5 个和 6 个实变量函数的最小值，不能确定搜索结果是全局最小值，但是用该算法搜索的结果已经非常理想.

3.4　优化效果对比

将以下几种情况下设计与优化起拱曲线的效果进行对比：

1）与以往的研究者一样取

$$g(x) = -\frac{f_L(x) + f_R(x)}{2}$$

2）目标函数为 $\min\int_{1\,750}^{13\,250}(d(x))^2\mathrm{d}x$

3）目标函数为 $\min\int_{1\,750}^{13\,250}(\theta(x))^2\mathrm{d}x$

4）目标函数为

$$\min\left[\int_{1\,750}^{13\,250}(d(x))^2\mathrm{d}x + k\int_{1\,750}^{13\,250}(\theta(x))^2\mathrm{d}x\right]$$

分别简化为情况 1、情况 2、情况 3 和情况 4.

3.4.1　四次拟合情况下优化的结果

采用四次多项式对变形曲线进行逼近，优化后的起拱曲线如图 8 所示，通过式(2)(3)得到相对应的刀尖点变形如图 9、10 所示. 此 3 种情况下起拱曲线的表达式如下：

情况 1

$$g(x) = 1.196\,3\times10^{-16}x^4 - 3.588\,85\times10^{-12}x^3 + 1.992\,5\times10^{-8}x^2 + 1.048\,65\times10^{-4}x + 0.071\,429$$

情况 2

$$g(x) = 1.196\,0\times10^{-16}x^4 - 3.588\,0\times10^{-12}x^3 + 1.959\,8\times10^{-8}x^2 + 1.096\,7\times10^{-4}x + 0.058\,841$$

情况 3

$$g(x) = 7.564\,6\times10^{-17}x^4 - 2.269\,9\times10^{-12}x^3 + 9.287\,1\times10^{-9}x^2 +$$

$$1.159\,8\times10^{-4}x+0.071\,429$$

从图 9 可见,第 2 种情况下直线度误差最大值的数量级为 10^{-5} mm,远优于第 1 种情况下的 10^{-3} mm.

从图 10 可见,第 3 种情况下角度偏差最大值的数量级为 10^{-12} rad,远优于第 1 种情况下的 10^{-5} rad.

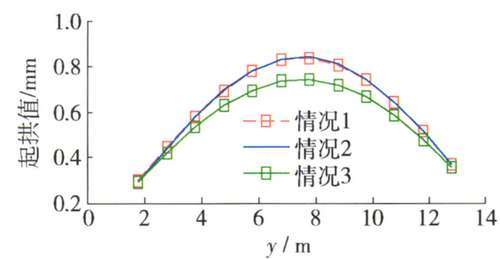


图 8 前 3 种情况下的起拱曲线

Fig. 8 Camber curve of the first three cases

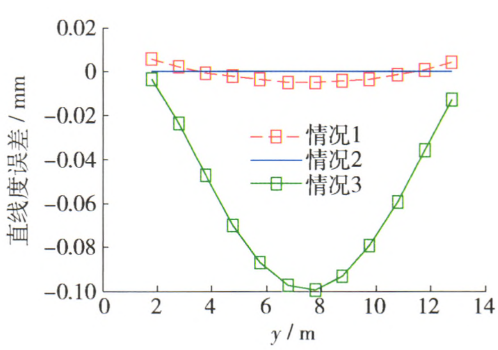


图 9 前 3 种情况下的直线度误差

Fig. 9 Straightness accuracy of the first three cases

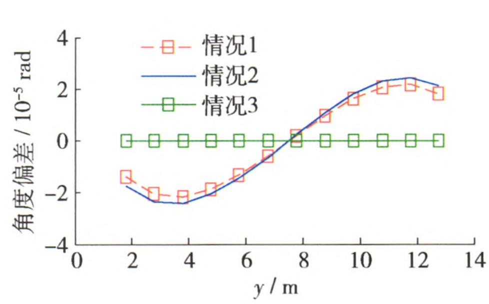


图 10 前 3 种情况下的角度偏差

Fig. 10 Angular misalignment of the first three cases

图 11、12、13 是第 4 种情况下,加入参数 k 之后的优化结构,从图中可以看出优化结果 k 的变化趋势.

3.4.2 五次拟合情况下优化的结果

采用五次多项式对变形曲线进行逼近,优化后的起拱曲线如图 14 所示,通过式(2)(3)得到相对应的刀尖点变形如图 15、16 所示.

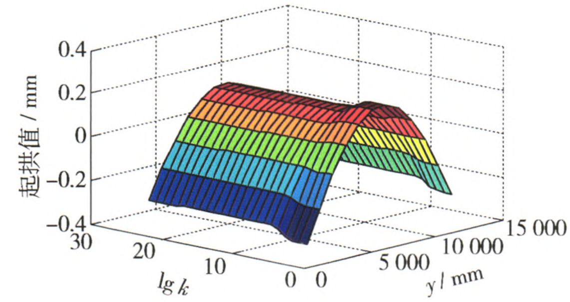


图 11 第 4 种情况下的起拱曲线

Fig. 11 Camber curve of the 4th case

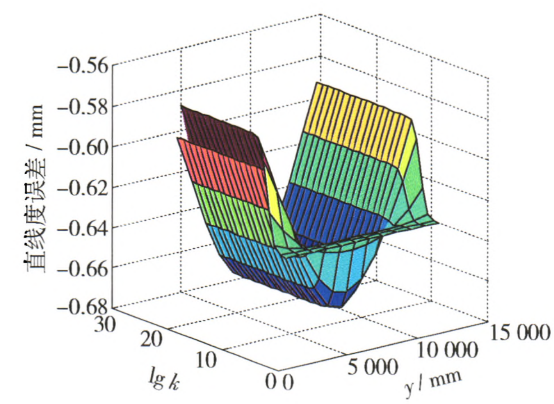


图 12 第 4 种情况下的直线度误差

Fig. 12 Straightness accuracy of the 4th case

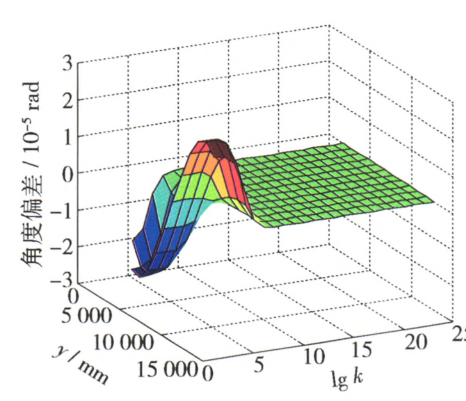


图 13 第 4 种情况下的角度偏差

Fig. 13 Angular misalignment of the 4th case

此三种情况下起拱曲线的表达式如下:

情况 1

$$g(x)=0x^5+1.719\,25\times10^{-16}x^4-5.157\,55\times10^{-12}x^3+3.678\,4\times10^{-8}x^2+2.847\,5\times10^{-5}x+0.193\,743\,5$$

情况 2

$$g(x)=3.073\,5\times10^{-34}x^5+1.196\,3\times10^{-16}x^4-3.588\,7\times10^{-12}x^3+1.960\,9\times10^{-8}x^2+$$

$$1.0962\times10^{-4}x+0.058906$$

情况 3

$$g(x)=-5.5513\times10^{-24}x^5+3.4311\times10^{-17}x^4-1.0251\times10^{-12}x^3-3.6383\times10^{-9}x^2+1.6985\times10^{-4}x+0.1937435$$

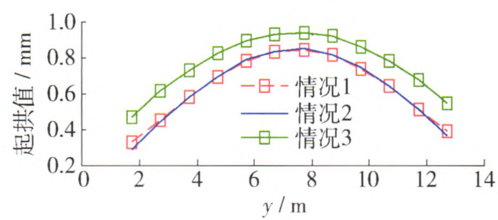


图 14　前 3 种情况下的起拱曲线

Fig. 14　Camber curve of the first three cases

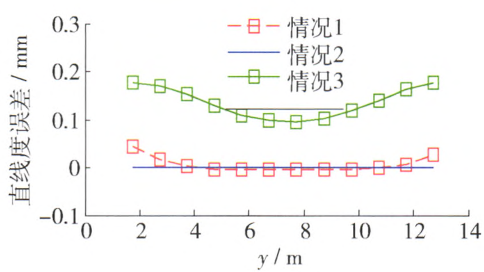


图 15　前 3 种情况下的直线度误差

Fig. 15　Straightness accuracy of the first three cases

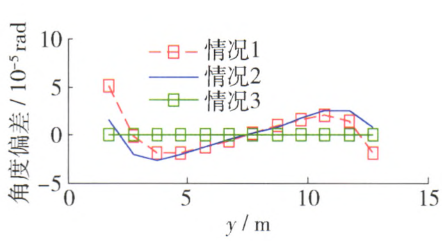


图 16　前 3 种情况下的角度偏差

Fig. 16　Angular misalignment of the first three cases

由图 15 可见，第 2 种情况下直线度误差最大值的数量级为 10^{-10} mm，远优于四次拟合情况下的 10^{-5} mm，更优于第 1 种情况．由图 16 可见，第 3 种情况下角度偏差最大值的数量级为 10^{-14} rad，远优于四次拟合情况下的 10^{-12} rad，更优于第 1 种情况．

图 17～19 是第 4 种情况下加入参数 k 之后的优化结果．从图中可看出优化结果随 k 的变化趋势．由优化结果可见，用优化算法求得的铣头水平移动的直线度误差的数量级为 10^{-5} mm 至 10^{-10} mm，角度偏差的数量级为 10^{-12} rad 至 10^{-14} rad，且用五次多项式拟合变形曲线比用四次多项式可得到更好的曲线．加入参数 k 之后，k 越小，优化的结果越接近于第 2 种情况，k 越大，优化的结果越接近于第 3 种情况．这种结果间接地证明了优化方法的可靠性．k 的具体取值要保证 $d(x)$ 和 $\theta(x)$ 的数量级都在国家标准或行业标准要求的范围内，因此工程实际中 k 的取值还要根据实际需要来确定．

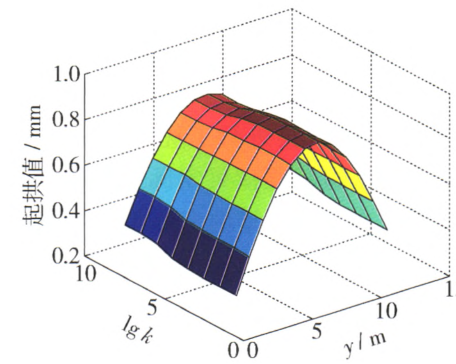


图 17　第 4 种情况下的起拱曲线

Fig. 17　Camber curve of the 4th case

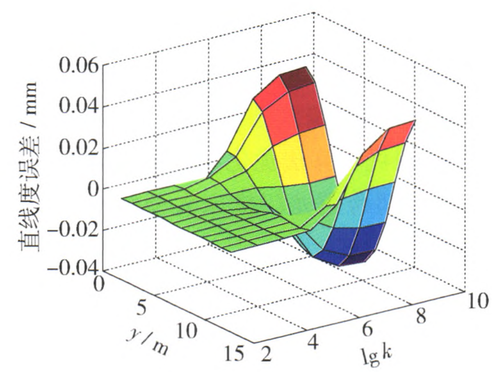


图 18　第 4 种情况下的直线度误差

Fig. 18　Straightness accuracy of the 4th case

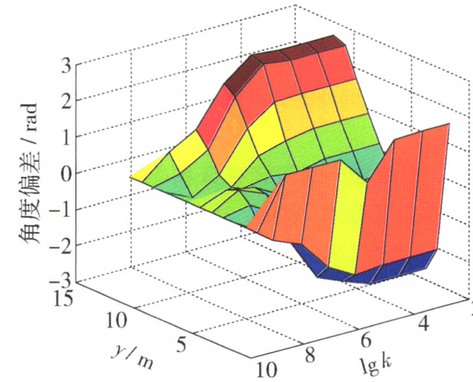


图 19　第 4 种情况下的角度偏差曲线

Fig. 19　Angular misalignment of the 4th case

起拱曲线的误差来源于 2 部分：一是拟合曲线的误差；二是优化曲线的误差．通过优化算法，优化曲线造成的误差已经抑制到远低于拟合曲线造成的误差．而 4 次拟合曲线的误差超不过 5 μm，因此二者之和也在国家标准要求的范围内．

4 结论

1）对超跨距横梁 Z 向导轨面起拱曲线进行了设计，并用优化算法对其进行了优化. 首先用有限元方法仿真计算了超跨距横梁实际工作时的变形，并拟合了横梁 Z 向导轨变形的变形曲线. 考虑了溜板左右 2 个接触面对变形曲线的影响，采用优化算法分多种情况设计和优化了起拱曲线. 经分析，采用优化算法得到起拱曲线远优于以往起拱曲线设计方法的效果.

2）通过本文提出的优化方法，已将横梁的起拱曲线误差中由于曲线设计带来的误差降到了最低. 而横梁的起拱曲线误差主要来自变形曲线拟合残差和起拱曲线优化误差. 通过优化设计，铣头水平移动直线度误差和角度偏差已经远低于国家标准规定的值. 本文采用优化算法优化起拱曲线取得了良好的效果，为国产超跨距龙门机床大型结构件设计提供了有力的借鉴.

参考文献：

[1] 张伯鹏，张年松. 机床横梁重力变位的自演进补偿[J]. 清华大学学报：自然科学版，2006，46(2)：191-193.
ZHANG Bo-peng, ZHANG Nian-song. Self-evolutionary compensation of machine tool crossbeam deformation induced by gravity [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2006, 46 (2): 191-193. (in Chinese)

[2] 罗传林，李锻能. 龙门式机床横梁的结构设计研究[J]. 机电工程技术，2006，35(3)：45-47.
LUO Chuan-lin, LI Duan-neng. Design and research of the structural of cross-rail in the planer type machines [J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2006, 35(3): 45-47. (in Chinese)

[3] 谢黎明，李大明，沈浩，等. 基于有限元分析的现场铣床横梁结构优化[J]. 组合机床与自动化加工技术，2008，9：73-75.
XIE Li-ming, LI Da-ming, SHEN Hao, et al. Optimum design of scene milling machine beam based on finite element analysis [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2008, 9: 73-75. (in Chinese)

[4] ZATARAIN M, LEJARDI E, EGANA F. Modular synthesis of machine tools [J]. Annals of the CIRP, 1998, 47(1): 333-336.

[5] 郭铁能，席方剑，蔡力钢，等. 重载大跨距横梁承载曲线分析与实验研究[J]. 北京工业大学学报，2011，37(8)：1129-1135.
GUO Tie-neng, XI Fang-jian, CAI Li-gang, et al. Load curve analysis and experimental study of long span and heavy load crossbeam [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2011, 37(8): 1129-1135. (in Chinese)

[6] 郭铁能，崔亚辉，蔡力钢，等. 装卡方式对超跨距横梁 Z 向导轨面起拱曲线加工的影响[J]. 北京工业大学学报，2013，39(6)：811－816.
GUO Tie-neng, CUI Ya-hui, CAI Li-gang, et al. The influence of the chucking mode on the manufacture of the Z-guide face camber curve of super-span beam [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2013, 39(6): 811－816. (in Chinese)

[7] 程强，董雪娇，刘志峰，等. 大跨度重载横梁导轨接触的变形分析[J]. 北京工业大学学报，2012，38(1)：12-16.
CHENG Qiang, DONG Xue-jiao, LIU Zhi-feng, et al. Deformation analysis of slideway contact of a long span and heavy load crossbeam [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2012, 38(1): 12-16. (in Chinese)

[8] 雷英杰，张善文，李续武，等. MATLAB 遗传算法工具箱及应用[M]. 西安：西安电子科技大学出版社，2005.

[9] LAGARIAS J C, REEDS J A, WRIGHT M H, et al. Convergence properties of the nelder-mead simplex method in low dimensions [J]. SIAM Journal on Optimization, 1998, 9(1): 112-147.

（责任编辑　杨开英）