

永磁直线同步电动机法向力对机床结构变形的影响^{*}

尹宜勇¹ 祝莉平² 贾志新¹ 赵彤³

(1. 北京科技大学机械工程学院, 北京 100083; 2. 南通科技投资集团股份有限公司通科研究院, 南通 226400;
3. 清华大学精密仪器与机械学系, 北京 100084)

【摘要】 在建立永磁直线同步电动机驱动结构机械模型的基础上,采用有限元仿真分析运动部件在不同位置时法向力变化对龙门结构横梁变形的影响,得出横梁在 y 轴方向的变形曲线。实验测得横梁背面变形,并与仿真结果对比分析,得出电动机定子磁场对应的法向力。实验结果验证了仿真结果的正确性。

关键词: 永磁直线同步电动机 法向力 结构变形 机床

中图分类号: TG502.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2011)06-0219-05

Structure Deformation of Machine Tools Caused by Permanent Magnet Linear Synchronous Motor's Normal Force

Yin Yiyong¹ Zhu Liping² Jia Zhixin¹ Zhao Tong³

(1. School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China
2. Institute of Tontec, Tontec Technology Investment Group Co., Ltd., Nantong 226400, China
3. Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract

On the basis of permanent magnet linear synchronous motor (PMLSM) feeding system mechanical model, effects of normal force of moving parts in different stroke to deformation of a gantry type beam were analyzed by finite element method. A curve corresponding to y directional deformation of the beam was achieved and the deformation of the beam was measured. The normal force of PMLSM was achieved by finite element simulation and relevant experiments. Deformation of the tool point was analyzed by finite element method and compared with the experimental results. The simulation results were verified to be reliable.

Key words Permanent magnet linear synchronous motor, Normal force, Structure deformation, Machine tool

引言

进给系统的性能对机床的跟踪及定位精度有重要作用^[1],直线电动机驱动进给系统的“零传动”具有高速、高精度特性^[2~5]。直线电动机驱动系统存在垂直于进给方向的法向力。法向力使电动机推力产生波动^[6],从而增加电动机装配的难度,引起进给系统的结构变形。

目前,已有文献对直线电动机法向力进行了研

究^[7~9],但是这些研究成果只是测量了电动机法向力,并没有考虑法向力对进给系统结构变形的影响。直线电动机的法向力在机床通断电状态均存在,仅由定子永磁体引起的法向磁吸力是本文的研究重点。

本文以 VH1100 高速立式加工中心 x 、 z 轴进给系统为研究对象,利用有限元仿真和实验,分析龙门结构横梁和刀具点变形,研究永磁直线同步电动机法向磁吸力对机床结构变形的影响。

收稿日期: 2010-12-10 修回日期: 2011-01-17
^{*} 国家科技重大专项资助项目(2009ZX04002-051)
作者简介: 尹宜勇,博士生,主要从事机械制造及其自动化研究,E-mail: yinyiyong_ustb@163.com
通讯作者: 赵彤,副教授,主要从事数控机床和直线电机研究,E-mail: zhaotong@mail.tsinghua.edu.cn

1 机床有限元模型建立

VH1100 高速立式加工中心 x 、 y 轴分别采用单、双永磁直线同步电动机驱动, z 轴采用双丝杠驱动, 如图 1、2 所示。

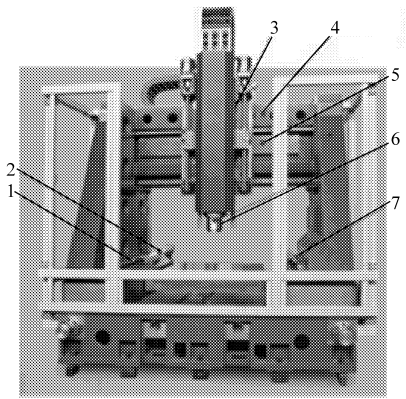


图 1 VH1100 高速立式加工中心

Fig. 1 VH1100 high-speed vertical machining center

1、5、7. 直线电动机定子 2. 封闭式钢带 3. 立滑板 4. 横梁
6. 电主轴

1.1 x 、 z 轴驱动结构机械三维模型基础

VH1100 高速立式加工中心是由多个零部件组成的复杂系统。考虑到床身和左右立柱的静刚度较大, 只建立 x 、 z 轴进给系统的有限元模型。三维实体模型如图 2 所示。

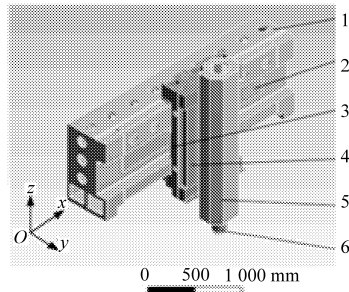


图 2 x 、 z 轴进给系统三维模型

Fig. 2 3-D model of x -axis and z -axis feeding system

1. 横梁 2. 直线电动机定子 3. 直线电动机动子 4. 立滑板
5. 主轴箱 6. 主轴头

由于横梁、立滑板和主轴箱内部结构的复杂性, 不利于数值求解, 因此对横梁和立滑板进行了简化处理。因为静力学分析的是各个部件总体受力情况, 而不是微小局部的应变, 所以可忽略横梁、立滑板和主轴箱上的螺纹孔。这些部件之间存在 2 种连接关系: ①固定连接。横梁与 x 轴方向直线导轨、直线电动机定子与横梁、 x 轴方向滑块与立滑板、立滑板与直线电动机动子、立滑板与 z 轴方向直线导轨、主轴箱与 z 方向滑块、主轴头与主轴箱是用螺栓、螺钉或者铆钉连接在一起。在 ANSYS Workbench 中用“绑定”方式来模拟固定连接。②导轨与滑块连

接。横梁上安装了 x 轴方向导轨, 立滑板安装了 x 轴方向滑块和 z 轴方向导轨, 主轴箱背面安装了 z 轴方向滑块。因为滑块与导轨通过滚动体接触, 所以滑块和导轨之间存在接触刚度。

1.2 直线导轨接触刚度

x 轴方向直线导轨副型号为 MR55。如图 3 所示, 弹性钢球与导轨接触面倾角为 45° 。弹性钢球在负载作用下产生两个方向的变形位移。 x 轴方向直线导轨与滑块存在 y 、 z 两个方向上(图 2)的接触刚度。

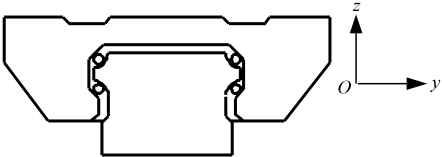


图 3 直线导轨与滑块的横断面

Fig. 3 Cross-section of guide rail and slide

查询产品手册可求 x 轴方向滑块与直线导轨面 y 、 z 方向的接触刚度 k_{xy} 、 k_{xz} 为

$$k_{xy} = k_{xz} = 2.4 \times 10^3 \text{ N}/\mu\text{m} \tag{1}$$

z 轴方向直线导轨副型号为 SHS55V。 z 轴方向导轨与滑块存在 x 、 y (图 2)两个方向上的接触刚度。查询产品手册可求 z 轴方向滑块与直线导轨面 x 、 y 方向的接触刚度 k_{zx} 、 k_{zy} 为

$$k_{zx} = k_{zy} = 7.0 \times 10^3 \text{ N}/\mu\text{m} \tag{2}$$

z 轴方向导轨与滑块不存在 z 方向的接触刚度, 此接触刚度是由双丝杠系统提供的, 可把丝杠系统的轴向刚度 K_r 等效分配到 z 轴方向 6 个滑块上。

$$\frac{1}{K_r} = \frac{1}{K_s} + \frac{1}{K_N} + \frac{1}{K_B} \tag{3}$$

式中 K_s ——螺杆轴向刚度, $\text{N}/\mu\text{m}$

K_N ——螺母轴向刚度, $\text{N}/\mu\text{m}$

K_B ——轴承轴向刚度, $\text{N}/\mu\text{m}$

螺杆两端为角接触球轴承, 其型号分别为 30TAC62BDFDC10 和 30TAC62BSUC10, 通过手册查得轴向刚度分别为 $1\,520 \text{ N}/\mu\text{m}$ 和 $1\,030 \text{ N}/\mu\text{m}$ 。丝杠采用双端固定, 采用基本额定动负载的 7.5% 为预拉伸力, 查阅手册可以求出预拉伸力为 $3\,700 \text{ N}$ 。 L 为丝杠安装间距, 在中间位置丝杠轴向刚度最小。丝杠的安装间距 L 为最大行程、螺母长和轴端余量之和, 即

$$L = 700 + 146 + 300 = 1\,146 \text{ mm} \tag{4}$$

螺纹轴底槽直径 d_r 为 34.4 mm , 可求螺纹轴端面面积 A 为 929.4 mm^2 。纵向弹性系数 E 为 $2.06 \times 10^5 \text{ MPa}$ 。负载作用点间距 d 为 573 mm 。螺杆的轴向刚度为

$$K_s = \frac{AEL}{d(L-d)} \times 10^{-3} = 668.3 \text{ N}/\mu\text{m} \quad (5)$$

螺母型号为 BSS4020-6E,通过查阅有关手册可得该型号螺母轴向刚度为 868 N/μm。实际螺母轴向刚度为理论刚度的 80%,即 $K_N = 694 \text{ N}/\mu\text{m}$ 。可由式(3)求得 K_r 为 219 N/μm。 z 轴方向滑块与导轨面 z 方向的接触刚度为

$$K_{zz} = \frac{2K_r}{6} = 73 \text{ N}/\mu\text{m} \quad (6)$$

1.3 载荷处理

此模型除了受重力之外,还受直线电动机定子对直线电动机动子产生的法向磁吸力。法向磁吸力是一对面力。加载时一个施力面为直线电动机动子与横梁相对的端面,另一个施力面为直线电动机动子与横梁相对端面在直线电动机定子上的投影面。

因为此型号永磁直线同步电动机的最大推力为 11 000 N,最大磁吸力为 33 000 N,额定推力为 4 400 N,所以假设机床未通电时的磁吸力为 13 200 N。 z 轴的伺服电动机、电动机座和电主轴重力约为 2 800 N。其施力面为立滑板上面安装电动机座和轴承座的 4 个端面。立滑板、主轴箱及其他零部件的重力在有限元仿真中进行了考虑和设置。上述零部件在机床坐标系中的重心位置如表 1 所示。

表 1 重心位置坐标
Tab.1 Position of gravity center

零部件	x/mm	y/mm	z/mm
立滑板	-63	553	1 425
主轴箱	-310	283	1 425
伺服电动机	-212	553	1 425
电动机座	-212	553	1 425
电主轴	-212	553	1 425

2 机床有限元模型仿真

在 ANSYS Workbench 中,可以用弹簧来模拟直线导轨接触刚度。 x 轴进给系统中有 6 个滑块,每个滑块需要用 2 个弹簧来模拟(y 、 z 两个方向的接触刚度)。 z 轴进给系统中有 6 个滑块,每个滑块需要用 3 个弹簧来模拟(x 、 y 、 z 3 个方向的接触刚度)。

因为法向磁吸力随着直线电动机动子移动,其波动值很小,所以认为立滑板、主轴箱等运动部件在 x 轴有效行程内的不同位置,横梁受到是一个作用点沿 x 轴方向变化而大小不变的法向磁吸力。因为 x 轴进给系统有效行程为 1 000 mm,法向磁吸力随着直线电动机动子的移动,其作用点在改变。所以要对立滑板、主轴箱等运动部件在 x 轴有效行程内

不同位置的受力进行分析。

首先对立滑板、主轴箱等运动部件处于 x 轴有效行程中心位置时进行分析。 x 轴进给系统在 y 轴方向变形如图 4 所示,横梁背面中心位置由于法向磁吸力的作用向里面凹进一定位移。横梁背面中上部和中部两个探针点在 y 轴方向的变形分别为 10.956 μm 和 13.522 μm。

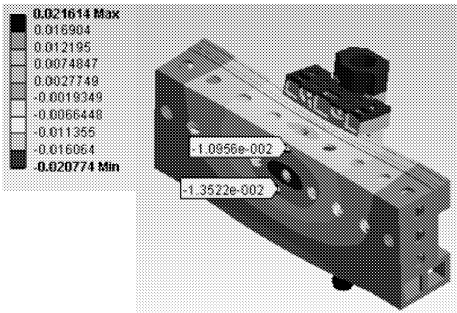


图 4 x 轴进给系统 y 方向变形等值图
Fig. 4 y -axis deformation of x -axis feeding system

其次,立滑板、主轴箱等运动部件在中心位置沿 x 轴向右移动 50 mm,获取横梁背面中上部和中部两个探针点的变形。每次立滑板都沿 x 轴向右移动 50 mm,直到走完 500 mm。

再次,立滑板、主轴箱等运动部件在中心位置沿 x 轴向左移动 50 mm,获取横梁背面中上部和中部两个探针点的变形。每次立滑板都沿 x 轴向左移动 50 mm,直到走完 500 mm。

因为 z 轴进给系统有效行程为 300 mm,所以对主轴箱、主轴头等运动部件在 z 轴行程内不同位置 y 方向变形进行分析。

首先对主轴箱、主轴头等运动部件处于 z 轴行程最下端时进行分析。 z 轴进给系统在 y 轴方向变形如图 5 所示,主轴头和主轴检测棒由于法向磁吸力的作用向工作台内侧凹进一定位移。主轴头探针点和主轴检测棒探针点的 y 轴方向变形分别为 24.436 μm 和 30.238 μm。

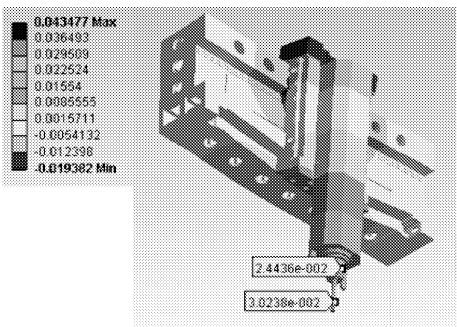


图 5 z 轴进给系统 y 方向变形等值图
Fig. 5 y -axis deformation of z -axis feeding system

其次,主轴箱、主轴头等运动部件沿 z 轴方向向上移动 50 mm,获取主轴头探针点和主轴检测棒探针

点的 y 轴方向变形。每次主轴箱、主轴头等运动部件都沿 z 轴方向向下移动 50 mm,直到走完 300 mm。

3 实验

如图 6 所示,在与固定点相连的支架上安装日本 Keyence 公司的 LK - G30 型激光位移传感器。其测量范围为 (30 ± 5) mm,再现性为 $0.05 \mu\text{m}$,温度特性为 0.01% 的 F. S. / $^{\circ}\text{C}$ (F. S. = ± 5 mm)。



图 6 测量横梁变形时的激光位移传感器安装位置图
Fig. 6 Fixed position of laser displacement sensor on the beam

在 y 轴方向调试激光发射端与横梁背面之间的距离,尽量使激光发射端和横梁背面之间的距离在激光位移传感器测量范围的中间。用砂纸打磨横梁背面测点区域的油漆,获取横梁背面测量点的真实变形。机床在 x 轴方向最左端每次进给 50 mm,进给后等待横梁变形稳定后再进行测量。测量行程为 1 000 mm,测量 21 次。

如图 7 所示,在 y 轴方向调试激光发射端与主轴检测棒之间的距离,尽量使激光发射端和主轴检测棒之间距离在激光位移传感器测量范围的中间。机床在 z 轴方向最下端每次进给 50 mm,进给后等待主轴头检测棒变形稳定后再进行测量。测量行程为 300 mm,测量次数为 7 次。

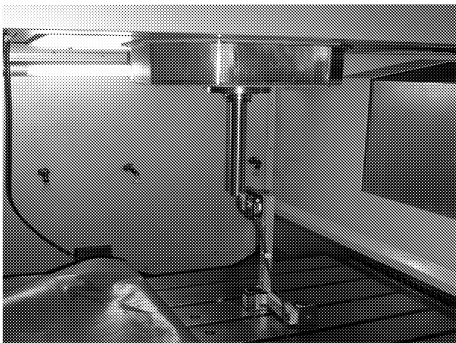


图 7 测量主轴检测棒变形时的激光位移传感器安装位置图
Fig. 7 Fixed position of a laser displacement sensor on the workbench

图 8 为横梁背面有限元仿真结果与实验结果对比。 x 轴为 x 轴进给系统从左端移动到右端的位移

变量, y 轴为横梁背面测点与固定点的 y 方向变形差值。

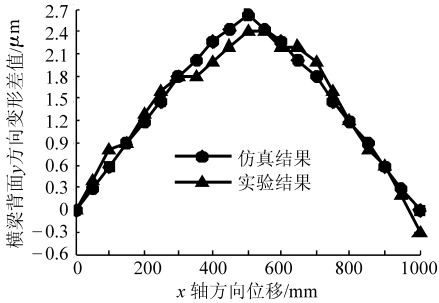


图 8 x 轴位移变化对变形差值的影响
Fig. 8 Effects of displacement in x -axis to deformation in y -axis during simulation and experiments

从仿真数据中可以看出,立滑板、主轴箱从左端移动到中间的过程中,横梁背面测量点的变形差值越来越大,变形差值最大点在有效行程的中间位置,其值约为 $2.6 \mu\text{m}$ 。过了 500 mm 行程后,变形差值逐渐减小,进给到 1 000 mm 后变成最小。从实际测量中可以看出,立滑板、主轴箱等运动部件从左端移动到 700 mm 的过程中,横梁背面测量点的变形差值越来越大,最大约为 $2.4 \mu\text{m}$ 。然后从 700 mm 到 1 000 mm,测量点变形差值越来越小。

通过对比可以看出:在法向磁吸力为 13 200 N 时,仿真的 VH1100 高速立式加工中心横梁背面测量点的变形差值与实验获取的变形差值之间的相对误差在 15% 以内。得出永磁直线同步电动机的法向磁吸力约为 13 200 N。仿真分析的结果和实验测试结果之间的微小误差主要是有限元模型建立过程中对横梁、立滑板和主轴箱的简化导致的。实验数据的不对称性主要是刀库座和机床防护罩的安装不对称造成的。

图 9 为主轴检测棒有限元仿真结果与实验结果对比。 x 轴表示主轴检测棒探针点变形与主轴头处于最下端时主轴检测棒变形的差值。差值为正值表示在此位置刀具点变形与主轴头处于最下端时刀具点变形相比偏向工作台外侧。 y 轴表示 z 轴进给

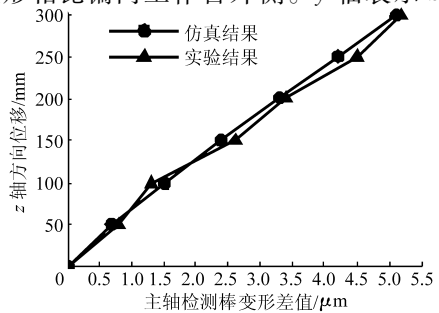


图 9 z 轴位移变化对变形差值的影响
Fig. 9 Effects of displacement in z -axis to deformation in y -axis during simulation and experiments

系统从底端移动到上端的位移变量。仿真值和实验值相对误差的绝对值在 15% 以内,验证了模型和仿真的可信性。

从仿真和实验数据中可以看出,主轴箱从最下端移动到 300 mm 的过程中,刀具点变形逐渐偏向工作台外侧,其值约为 5.2 μm 。

4 结论

(1) 通过对横梁背面有限元仿真和实验测量相

结合的方法,得出仅由永磁直线同步电动机定子引起的法向磁吸力约为 13 200 N。分析了有限元仿真和实验结果之间存在偏差的原因。

(2) 针对 VH1100 高速立式加工中心进行了实验,将刀具点变形仿真结果与实验结果进行对比,相对误差绝对值小于 15%,证明了模型和仿真的可信性。

(3) 得出永磁直线同步电动机法向磁吸力对机床刀具点变形的影响。在 z 轴进给方向 300 mm 行程中,大约有 5.2 μm 的变形差值。

参 考 文 献

1 刘丽兰,刘宏昭,吴子英,等. 考虑摩擦和间隙影响的机床进给伺服系统建模与分析[J]. 农业机械学报, 2010, 41(11): 212 ~ 218.

Liu Lilan, Liu Hongzhao, Wu Ziyang, et al. Modeling and analysis of machine tool feed servo systems with friction and backlash[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(11): 212 ~ 218. (in Chinese)

2 王先逵,陈定积,吴丹. 机床进给系统用直线电机综述[J]. 制造技术与机床, 2001(8): 18 ~ 21.

Wang Xiankui, Chen Dingji, Wu Dan. Overview of linear motor used in machine tool feeding system[J]. Manufacturing Technology and Machine Tool, 2001(8): 18 ~ 21. (in Chinese)

3 Brandenburg G, bruckl S, Dormann J, et al. Comparative investigation of rotary and linear motor feed drive systems for high precision machine tools[C]//6th International Workshop on Advance Motion Control, Nagoya, Japan, 2000: 384 ~ 389.

4 叶云岳. 直线电机在现代机床业中的应用与发展[J]. 电机技术, 2010(3): 1 ~ 5.

Ye Yunyue. Application and development of the linear motor in the modern machine tool industry[J]. Electrical Machinery Technology, 2010(3): 1 ~ 5. (in Chinese)

5 郭庆鼎,赵希梅. 直线电动机在机床伺服驱动应用中的若干问题与展望[J]. 电气应用, 2006, 25(4): 130 ~ 133.

Guo Qingding, Zhao Ximei. Some issues and application prospect for the linear servo motor drive control in machine tool[J]. Electrotechnical Application, 2006, 25(4): 130 ~ 133. (in Chinese)

6 郭瑶瑶,刘成颖,王先逵. 机床进给系统用永磁直线电机法向吸力的研究[J]. 中国机械工程, 2007, 18(10): 1 174 ~ 1 177.

Guo Yaoyao, Liu Chengying, Wang Xiankui. Study on normal force in permanent magnet linear motor in machine tool feeding system[J]. China Mechanical Engineering, 2007, 18(10): 1 174 ~ 1 177. (in Chinese)

7 刘少克,罗昆. 中低速磁悬浮列车用直线电机法向力的测试研究[J]. 机车电传动, 2003(1): 32 ~ 34.

Liu Shaoke, Luo Kun. Test and analysis on normal force of linear motor for mid-to-low speed maglev trains[J]. Electric Drive for Locomotive, 2003(1): 32 ~ 34. (in Chinese)

8 Huang R,Zhou J P, Kim G T. Minimization design of normal force in synchronous permanent magnet planar motor with halbach array[J]. IEEE Transactions on Magnetic, 2008, 44(6): 1 526 ~ 1 529.

9 郭泽阔. 利用磁悬浮原理测试直线电机动推力和垂直力方法的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2007.

Guo Zekuo. The study of measure on thrust and vertical force of linear induction motor used maglev principle[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2007. (in Chinese)

(上接第 229 页)

5 Spur G,Mette U. Spannkraftsensoren ermöglichen kontinuierliche spannfutterdiagnose[J]. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb;ZWF,1997,92(1 ~ 2):53 ~ 56.

6 刘鸿文. 材料力学[M]. 2 版. 北京:高等教育出版社,1992:141 ~ 177.

7 刘鸿文. 材料力学实验[M]. 北京:高等教育出版社,2006.

8 徐芝纶. 弹性力学[M]. 4 版. 北京:高等教育出版社,2006:71 ~ 80.

9 刘延柱,陈文良,陈立群. 振动力学[M]. 北京:高等教育出版社,1998:130 ~ 135.