

基于重心驱动的设计方法研究及其 在高性能机床开发中的应用

关晓勇¹ 刘春时¹ 徐志祥² 李焱¹

1. 沈阳机床集团设计研究院, 沈阳, 110142 2. 大连理工大学, 大连, 116023

摘要:论证了双驱动系统并不是解决重心驱动技术应用的唯一性优化方案,提出了通过驱动力的方向选择、零部件重量的合理分布等使 Steiner 距离得到有效抑制以实现重心驱动的方法。在此基础上,将单驱动系统引入设计,丰富了重心驱动的内涵。最后,将基于重心驱动的设计方法应用于一款模具加工中心的改进设计,通过对其精度的分析,证明了所提观点的合理性。

关键词:机床设计;驱动系统;误差抑制;重心驱动技术

中图分类号: TG502.1 **文章编号:** 1004—132X(2011)18—2170—05

Research on Design Methods Concerning Drive at Center of Gravity Feed Principle and Its Application in Development of High Performance Machine Tools

Guan Xiaoyong¹ Liu Chunshi¹ Xu Zhixiang² Li Yan¹

1. Design and Research Institute, Shenyang Machine Tool Group, Shenyang, 110142

2. Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning, 116023

Abstract: It is clarified that twin drive system is not exclusively optimum for solving the application of DCG(drive at center of gravity), and that Steiner distance can be reduced or even deleted by the choice of driving force direction, the rational weight distribution of some components, etc. According to this, single drive system was introduced as a valuable supplement for the machine design based on DCG. Lastly these opinions were proved to be reasonable by accuracy evaluation for a die and mould machining center using single drive system.

Key words: machine tool design; feed drive system; error suppression; drive at center of gravity(DCG)

0 引言

满足高效率、高精度的生产需求,一直是机床

产品发展的原动力。提高机床加工效率的重要手段就是不断提高机床的动态特性,以获得更高的速度和加减速能力。而高加减速的结果是导致工件、刀具之间振动的增加,机床精度的下降^[1-3]。

收稿日期:2010—11—10

基金项目:“十一五”国家科技重大专项(2009ZX04010—021)

- [2] 白仲航,檀润华,张鹏,等.基于 TRIZ 的带式输送机输送带结构的进化研究[J].机械设计与研究,2009,25(4):20-23.
- [3] 施楣梧,高惠芳.用 TRIZ 理论和方法促进纺织技术创新[M].北京:中国纺织出版社,2010.
- [4] 牛占文,徐燕申,林岳,等.发明创造的科学方法论—TRIZ[J].中国机械工程,1999,10(1):84-89.
- [5] Emily M S. From Russia with TRIZ[J]. Mechanical Engineering,2003,125:18-20.
- [6] 檀润华.创新设计—TRIZ 发明问题解决理论[M].北京:机械工业出版社,2002.
- [7] 戴庆辉,张伟.新型液压起重器驱动机构的创新设计[J].机械设计与研究,2006,22(6),106-108.
- [8] 张卫国,张国全,何海,等.运用 TRIZ 理论解决复杂机电产品的创新设计问题[J].机械设计与研究,2005,21(3):15-18.
- [9] Terninko J. Su—Field Analysis[J]. TRIZ Journal, 2000(2),23-29.

- [10] Altshuller G S. The Innovation Algorithm, TRIZ, Systematic Innovation and Technical Creativity [M]. Worcester: Technical Innovation Center, INC.,1999.
- [11] Glazunov V N. The Search of Principles of Action in Technical Systems,“Methods of Problem Analysis and Decision Searching in Techniques” Book 4 [M]. Moscow:Echnoi Transport,1990.
- [12] Savransky S D. Engineering of Creativity[M]. Boca Raton:CRC Press,2000.

(编辑 何成根)

作者简介:刘江南,女,1965年生。湖南大学机械与运载工程学院教授。研究方向为机械产品创新设计、机械系统优化设计、机构学。发表论文 20 余篇。赵世雄,男,1989年生。湖南大学机械与运载工程学院本科生。刘秋平,男,1986年生。湖南大学机械与运载工程学院硕士研究生。

为了使效率和精度得以兼顾,重心驱动技术(drive at center of gravity, DCG)^[4]被提出,其作用是在不损害机床刚度的前提下,通过对驱动力作用点的优化——驱动力作用于移动部件的重心,达到抑制加减速所引起的振动干扰的目的,从而提高机床的精度。

但是,由于机床的移动部件间的彼此位置是不断变化的,而且,由于工件的装入或工件种类的变化等,都会引起机床运动部件重心位置的变化,而这种变化会引起 Steiner 距离^[5]的产生,造成力矩的不平衡,从而,引起驱动系统不必要的弹性变形,进而诱发振动,影响加工精度。通过双驱动来解决 Steiner 距离的抑制问题^[4],尽管会在很大程度上抑制振动的产生,但双驱动系统也有其自身难以避免的缺点——引入同步误差。

本文首先介绍重心驱动技术对精度改善的原理,同时指出双驱动系统的不足,并在此基础上,对重心位置的变化给机床精度造成的影响做出分析,提出驱动力方向选择的必要性;通过驱动力方向选择及配重思想的引入,以期在设计阶段最大程度地抑制 Steiner 距离的产生,即降低重心位置变动给精度造成的负面影响。最后,将单驱动系统引入基于重心驱动的设计,并应用于一款模具加工中心的改进,通过与原有设计的比较,证明了本文所提出观点的正确性。

1 DCG 的提出及双驱动系统的不足

如图 1a 所示,一个质点可以沿导轨方向自由滑动,如果驱动力恰好作用于质点,则驱动力 F 仅会引起驱动元件(如滚珠丝杠)的轴向弹性变形,而这个变形是使质点获得相应的加速度所不可避免的,并由数控系统在很大程度上做出补偿^[6],而不会引起导轨等部件产生多余的扭转形变。如图 1b 所示,如果驱动力 F 不是作用于质点,而是偏离质点一个距离,则会引起一个扰动扭矩 T 。这个扭矩会引起导轨等部件产生扭转形变,从而引起驱动系统不必要的振动干扰,进而影响机床精度。

因为机床中的被驱动部件是沿着坐标轴方向不断运动的,所以,驱动力的作用点偏离重心的状况也就不可避免。为了解决这个问题,如图 1c 所示,双驱动系统被认为是实现重心驱动的必要条件^[4],理由是双驱动的两个驱动力所产生的扭矩大小相等、方向相反,因而驱动系统就不会产生扭曲和振动。

但是,因零部件加工、装配等因素的存在,使

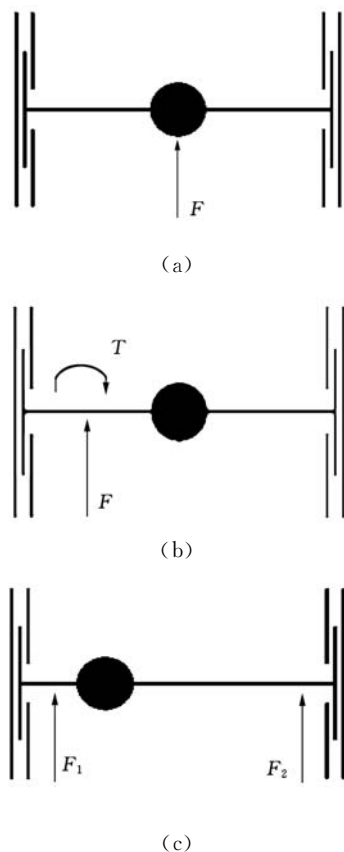


图 1 重心驱动原理概念描述简图

得两个进给轴之间的几何精度、空间位置精度、摩擦特性等都存在差异;因而,尽管数控系统可以监控双驱动系统两个进给轴之间的位置差值,如西门子系统通过指令 MD37120 GANTRY_POS_TOL_ERROR[X1]来设置该差值,但只能将其控制在一定误差以内^[6-7],即同步性误差在理论上是不可能完全避免的。因此,双驱动系统尽管能够取得很好的抑制振动效果,但也存在其固有的缺陷,因而只能是重心驱动理论的应用方法之一;尤其对于重心位置相对不变的情况,双驱动系统会由于引入了同步性误差而对机床的精度产生负面影响,而单驱动系统则不存在这样的误差。鉴于以上原因,有必要对重心驱动理论的应用问题做出更深入的分析。

2 基于重心驱动技术的机床设计原则

2.1 驱动力方向与重心位置变化方向相一致原则

如图 2 所示,将质点的最初位置定为坐标原点 $O_1(0,0,0)$,驱动力 F 沿 X 轴方向作用于点 O_1 ,则如前所述,此时不会有扰动扭矩的产生。当质点的位置由 O_1 变动到 $O_5(d,0,0)$ 时,由于驱动力依然通过质点,所以,仍然不会产生扰动扭矩。也就是说,当质点位置的变动方向与驱动力

的方向一致时,没有扰动扭矩产生,重心驱动技术对精度的改善效果不变。所以,在机床设计中,应优先选择重心位置的变动方向作为施加驱动力的方向。

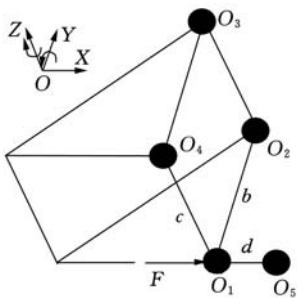


图 2 驱动力方向敏感性分析简图

2.2 扰动方向最少的设计原则

加工中心要完成对工件的加工,至少要具有 3 个互相垂直的直线坐标轴 X、Y、Z,以实现刀具与工件间三维的相对运动。因此,设计过程中无论怎样选择,刀具或工件中有一个至少要做两个坐标轴方向(笛卡尔坐标)的复合运动。这将最终导致重心偏离于驱动力方向的情况不可避免。但是,其对机床精度的干扰程度也是与设计阶段驱动力方向的选择相关联的。

如图 2 所示,若质点从 O_1 运动到 $O_3(0, b, c)$ 时,则会同时产生绕 Y 轴、Z 轴的扰动扭矩 T_1 和 T_2 。这将诱发两个不同方向的振动干扰,因而对精度造成的损害程度将达到最大。通过双驱动系统也不能同时对两个方向的扰动力矩有抑制效果,这种状况是重心驱动设计应尽可能避免的。

当质点由 O_1 变动到 $O_2(0, b, 0)$ 或 $O_4(0, 0, c)$ 时,则相对于驱动力 F 只有单一方向的扰动扭矩产生影响,这种状况在机床的设计中是不可避免的。但是,扰动扭矩 T 的大小与质点位置的变动距离 b, c 成正比,因而,应对 b, c 的大小进行抑制。此时,重心驱动技术的应用则转化为对 Steiner 距离的抑制问题。

2.3 Steiner 距离抑制的重量分配原则

Steiner 距离定义为运动部件重心与驱动力作用线之间的垂直距离,即图 2 中的 b, c 。当 Steiner 距离为零时,即是理想的重心驱动。通过增加运动部件的方法也可以充分抑制 Steiner 距离,以实现理想的重心驱动的效果^[8]。其基本思想如图 3 所示,假设质点 1 的质量、速度、加速度分别为 m, v, a ,通过增加质点 2 使其质量、速度、加速度分别为 m', v', a' ,这样可以保证驱动力 F 始终不会产生附加扰动力矩。但是这种增加运动部件数量的做法在经济性和复杂性

上限制了其应用范围。此外,这种做法还会导致机床尺寸成倍增加。因此,这种设计方法只能应用于尺寸规格很小的超精密加工机床的设计。

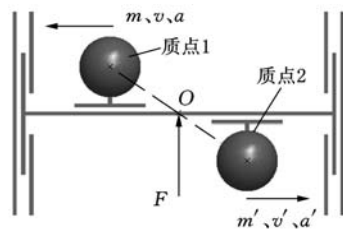


图 3 增加运动部件的配重方法

简单可行的策略之一是将运动部件的重心进行优化配置——将被驱动部件的重心配置到容易施加驱动力的位置,以实现重心驱动。假设运动部件的总质量 m_{Σ} 由 k 个零部件组成,即 $m_{\Sigma} = m_1 + m_2 + \dots + m_k$,其配置的目标是在满足相应功能的前提下,令向量 r 的模数 $\|r\|$ 最小, $\lim \|r\| \rightarrow 0$,模数 $\|r\|$ 即是 Steiner 距离,如图 4 所示。其中,向量 r 定义为

$$r = (m_1 r_1 + m_2 r_2 + \dots + m_k r_k) / m_{\Sigma}$$

当 Steiner 距离得到充分抑制时,单驱动系统的应用则更具优势:因为单驱动系统不存在双驱动系统的同步性误差问题,并且在机床的结构设计中更具灵活性。

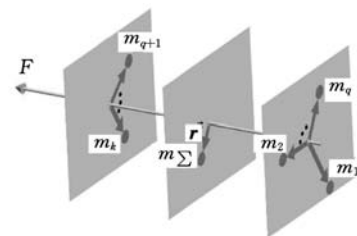


图 4 配重方法示意图

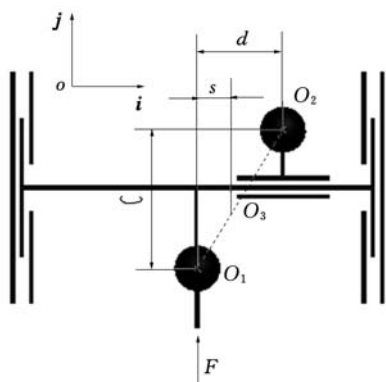


图 5 复合运动引发的 Steiner 距离示意图

对于存在复合运动的情况,如图 5 所示,运动坐标 i, j 代表机床 3 个直线坐标轴 X、Y、Z 中任意两个的组合。两个运动的部件的重心分别是 O_1 和 O_2 ,其质量分别为 m_{O1} 和 m_{O2} ,则 j 轴运动的总的质量为 $m_{O1} + m_{O2}$,其重心点为 O_3 。由于 i 轴的

运动,重心 O_3 的位置将不断变化,因而,相对于驱动力 F 的 Steiner 距离 s 也将随之变动。易求得其数学表达式为

$$s = m_{O2} d / (m_{O1} + m_{O2})$$

从中可以看出,Steiner 距离 s 与 i 轴的运动部件质量 m_{O2} 及其行程成正比,而与重心位置相对不变的质量 m_{O1} 成反比。为此,在机床设计中,为缩短 Steiner 距离以提高机床精度,应减轻诱发 Steiner 距离的移动部件的重量,并优化其行程。在设计阶段,可以通过移动部件的合理选择——刀具(主轴及主轴箱)与工件中重量较轻的做复合坐标运动,并可借助于紧凑设计^[5]减小诱发 Steiner 距离的重量以及优化其行程,以达到提高机床精度的设计目标。

3 原理样机的设计及精度对比

3.1 原理样机的设计

模具零件的加工,要求其具有非常高的尺寸精度及表面光洁度,因而,对机床的动态特性和抑制振动能力都提出很高的要求。为满足激烈的市场竞争,沈阳机床集团开发了多款模具加工中心,并不断做出改进设计。图 6 所示是沈阳机床集团现有的具有代表性的某款模具加工中心,该款机床采用门式结构,横梁采用双驱动系统做前后移动,实现 X 轴进给;滑板在横梁上左右移动实现 Y 轴进给;滑枕上下运动实现 Z 轴进给。

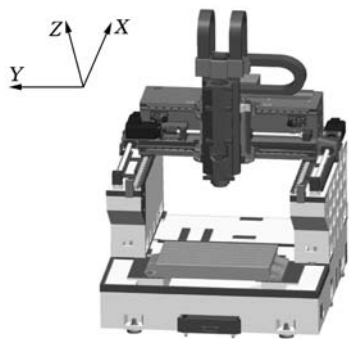
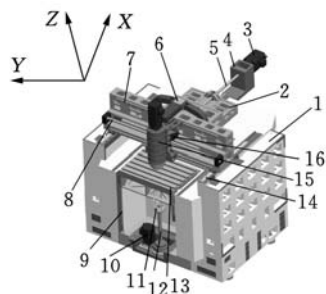


图 6 改进设计前的某款模具加工中心

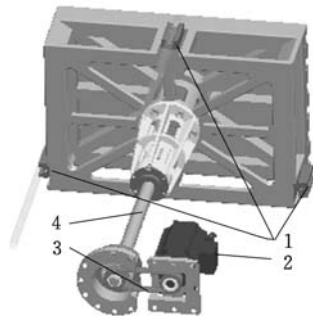
通过对重心驱动原理的研究,现改进设计的该款机床结构如图 7 所示。改进设计中,快速移动速度 $45\text{m}/\text{min}$ 、最大加速度 $10\text{m}/\text{s}^2$ 保持不变。由于模具零件的质量一般在 $50\sim 500\text{kg}$,个别大型零件的质量在 $500\sim 1000\text{kg}$,在这个承重范围内,使用 Z 轴工作台的上下移动来实现重心驱动优化是完全可行的。德国 DMG 公司的 DMU monoBLOCK 系列产品也采用了这种设计,但其并未能实现重心驱动。改进设计后的工作台使用 3 根单滑块的导轨做 3 点支撑,丝杠、滑块相对于

工作台的布置如图 8 所示,使驱动力作用于工作台的中心,并通过有限元分析,使其设计的尺寸与质量最优化分布。与滑枕上下移动的设计相比较,随加工零件质量的差异,Z 轴驱动力是相当的或稍有增大,但是,改进后因工件的质量变化所引起的 Z 轴方向的重心位置变化与驱动力方向一致,而重心在 X、Y 轴方向的变化与工件的对称性及其在工作台上的摆放位置相关,变化很小并可人为的避免。



- 1. 床身 2. 横梁 3. X 轴伺服电机 4. X 轴电机支座
- 5. X 轴高精度滚珠丝杠 6. Y 轴拖链 7. Y 轴高精度直线导轨
- 8. Y 轴高精度滚珠丝杠 9. Z 轴高精度直线导轨
- 10. Z 轴伺服电机 11. Z 轴丝杠支座 12. Z 轴高精度滚珠丝杠
- 13. 工作台 14. X 轴高精度直线导轨
- 15. 主轴箱 16. Y 轴伺服电机

图 7 重心驱动优化设计的模具加工中心



- 1. 滑块及调整垫 2. 电机及支撑 3. 同步带 4. 丝杠及支撑

图 8 工作台组件结构图

这种设计的连带优点是极大地减轻了 Y 轴(主轴箱)的左右移动质量,从而缩短了 X 轴驱动的 Steiner 距离,且该距离是单方向的。同时,Y 轴由丝杠旋转传动改为由丝母旋转传动;这样,通过电机、拖链、拖链支架等零部件位置的合理分布,以及 Y 轴两根导轨的阶梯布置,使 Y 轴驱动达到重心驱动的效果。

横梁采用具有较长尾翼的结构(图 7),这样既便于单驱动的采用,也使滑块之间的支撑距离和支撑刚度增大,同时可方便调整 X 轴电机支座 4 的高度,以消除 Steiner 距离。此外,因单驱动系统的使用,横梁上原有安装双驱动丝杠的位置(图 6),可以为 Y 轴的防护拉罩提供安装空间,因而,横梁较改进前的设计,左右的跨距缩短了约

120 mm,这对改善机床的精度是非常有利的。

3.2 样机的精度分析

采用 Renishaw 激光干涉仪对利用重心驱动技术改进设计的机床进行的定位精度、重复定位精度的检测结果,以及根据 GB/T 1742.2-2000 对测试曲线进行的分析表明,尽管 X 轴行程最大,并有复合运动存在(图 9),但由于在设计阶段对其做了细致的抑制振动处理,最终得出的 X 轴的定位精度为 $2.112\mu\text{m}$,最大单向重复定位精度为 $1.539\mu\text{m}$ 。Z 轴的行程最小,只有 400 mm,并且是理想的重心驱动,在工件质量变化的情况下,测得的精度仍然最高(图 10),其定位精度为 $1.486\mu\text{m}$,最大单向重复定位精度为 $0.769\mu\text{m}$ 。

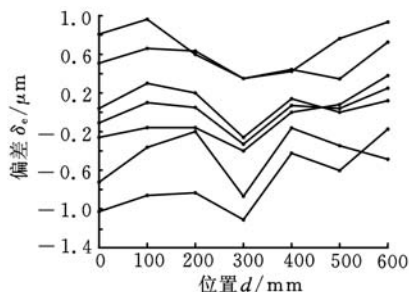


图 9 改进后的机床 X 轴精度测试曲线

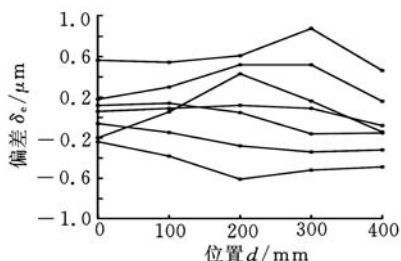


图 10 改进后的机床 Z 轴精度测试曲线

而改进前的原机床,尽管 X 轴使用了双驱动进给设计,但由于滑板、主轴箱复合运动的叠加,以及没有考虑到 Steiner 距离的抑制问题,故抑制振动效果并不理想;另外,由于 Y、Z 轴没有采用重心驱动,所以,在使用同等精度等级的导轨、丝杠、数控系统等关键部件的情况下,其精度较改进后低很多,X 轴的定位精度最高,也只有 $3.525\mu\text{m}$,最大单向重复定位精度则达到 $2.974\mu\text{m}$,如图 11 所示。

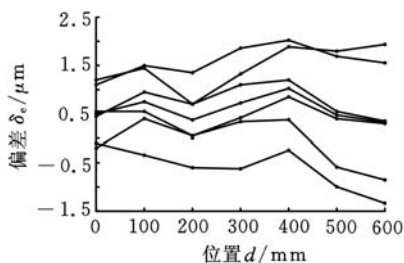


图 11 改进前的机床 X 轴精度测试曲线

4 结束语

重心驱动技术的重要优势就是抑制机床的振动,进而提高机床的精度。因刀具与工件处于机床振动的末端,因而对零件的加工质量将产生重要影响。本文系统论述了重心驱动技术的原理,并对其在机床设计中的应用策略作了深入的探讨;通过指出双驱动系统存在的不足,以及对 Steiner 距离抑制方法的探讨,证明了单驱动系统在重心驱动技术应用中存在的价值,从而使机床的结构设计更具灵活性。将所提出观点应用于一款模具加工中心的改进设计,取得了优异的应用效果。

参考文献:

- [1] Heisel U, Feinauer A. Dynamic Influence on Work-piece Quality in High Speed Milling[J]. Annals of the CIRP, 1999, 48(1): 321-324.
- [2] Heisel U, Gringel M. Machine Tool Design Requirements for High-speed Machining[J]. Annals of the CIRP, 1996, 45(1): 389-392.
- [3] Wickert J A, Mote C D. Current Research on the Vibration and Stability of Axially Moving Materials [J]. Shock and Vibration Digest, 1998, 20(1): 3-13.
- [4] Hiramoto K, Hansel A, Ding S. A Study on the Drive at Center of Gravity(DCG) Feed Principle and Its Application for Development of High Performance Machine Tool Systems [J]. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2005, 54(1): 333-336.
- [5] Brecher C, Utsch P, Klar R. Compact Design for High Precision Machine Tools [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2010, 50: 328-334.
- [6] Heidenhain. Technical_Manual_iTNC530_en-技术手册[M]. 北京: Heidenhain 公司出版社, 2007.
- [7] Siemens. BA_HMIDevice_MobilePanel177_chs [M]. 北京: Siemens 公司出版社, 2005.
- [8] Wang Z G, Cheng X, Nakamoto K. Design and Development of a Precision Machine Tool Using Counter Motion Mechanisms[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2010, 50: 357-365.

(编辑 何成根)

作者简介: 关晓勇,男,1976 年生。沈阳机床集团设计研究院工程师。主要研究方向为数控机床及其功能部件。刘春时,男,1964 年生。沈阳机床集团设计研究院教授级高级工程师。徐志祥,男,1965 年生。大连理工大学机械工程学院教授。李 焱,男,1967 年生。沈阳机床集团设计研究院高级工程师。