



机床用直线电机

江苏海安县机械厂 (226600) 张国梁

1. 前言

机械运动具有两种基本形式：直线运动和旋转运动。由于电动机的广泛应用，快速而稳定的旋转运动较容易得到，许许多多的直线运动往往都是通过旋转运动转换而来。机床上学到的直线运动是由传统的“旋转电机+滚珠丝杠”进给传动方式得到的。随着时代的进步、科技的发展，对机床加工的速度、精密度等提出了更高的要求，而机床上传统的“旋转电机+滚珠丝杠”进给传动方式，由于受自身结构的限制，在进给速度、加速度、快速定位、精度等方面很难有突破性的提高，已无法满足超高速切削、超精密加工对机床进给系统伺服性能提出的更高要求。

为了得到高质量的直线运动，近年来，世界上一些发达国家开始将直线电机技术应用于数控机床中。直线电机是一种将电能直接转换成直线运动机械能的电力装置。由直线电机直接产生直线运动，与传统伺服电机通过滚珠丝杠副得到的直线运动相比，具有很多优点：起动推力大、传动刚度高、动态响应快、定位精度高、精度保持时间长、运动速度范围宽、行程长度不受限制等。特别是由于直线

电机无离心力结构，故直线移动速度不受限制；而且其加速度非常大，最高可达 $10g$ ($g = 9.8 \text{ m/s}^2$)，能实现起动时瞬间达到高速，高速运行时又能瞬间准停。因此，只有在高速、精密加工机床的进给系统中采用直线电机直接驱动方式，才能获得所需的高进给速度和进给加速度。研究开发推力大、行程长、精度高的机床用直线电机，主要应用于加工中心、激光切割、等离子切割和电火花加工机床上。采用这种技术，使机床制造达到了滚珠丝杠副无法达到的水平。

从 1840 年 Wheatstone 开始提出和制作了略具雏形的直线电机至今，直线电机的发展经历了漫长的历史过程。直到 20 世纪中叶，由于控制系统、材料、制造技术的不断发展，直线电机的制造受到世界各国的重视。

世界上一些发达国家，许多著名电气企业均在研究和开发直线电机产品，直线电机产品在工业、交通运输业、军工、民用上均获得了成功的应用。1993 年德国 Escell-0 公司生产的 XHC-240 型高速加工中心是世界上最早使用直线电机驱动的机床，轰动了国际机床界，于是各国纷纷研制带直线电机的机床。目前，直线电机在车床、铣床、磨床、加工中心、电加工机床、压力机、激光加工机床等加工设备上均获得了应用。可以说世界上一些主要的机床制造商都已生产并采用直线电机驱动的金属切削机床。

我国直线电机的研究和应用发展是从 20 世纪 70 年代初开始的，在直线电机研究方面虽然也取得了一些成绩，但与国外相比，其推广应用方面尚存在很大差距。

机床用直线电机在机床上的大量使用，能提升我国机床制造业的整体技术水平，大大增强我国机床制造产品在国际市场的竞争力。能促进上、下游行业，如磁性材料、金属、压铸、机床制造等行业的发展。因此，规模开发机床用直线电机，将会推动我国科技、经济的发展和社会的进步，带来巨大的效益。

根据查新，国内有机床中应用直线电机的文献

第二销直径的作用。但在垂直于连心线方向上，由于定位销直径没有减小，故工件的转角误差没有增大，保证了工件的加工精度。在精镗过程中，由于镗杆 $\phi 25 \text{ mm}$ 比较细，加工过程中由于切削力作用产生

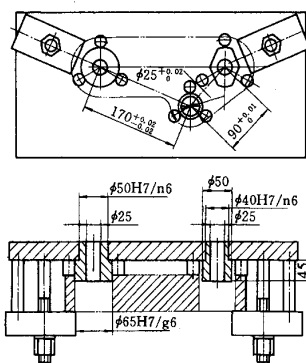


图 3

振动，引起 $\phi 35^{+0.025}_0 \text{ mm}$ 孔形状误差，在夹具体上设计一导向套，起导向定位作用，消除了由于切削力、振动引起的工件孔超差，工装设计如图 3。

(收稿日期：20031128)



报道,如清华大学精密仪器与机械学系研制的基于大行程微进给机构的智能化中凸变椭圆活塞数控车床,研究的微进给机构以专门研究的直线电机为执行元件,激光干涉仪为测量装置,采用模糊推理自校正PID和非线性重复学习等智能控制策略,使之综合具有高频响、大行程、高精度、大驱动力和高刚度的特点。以该研究成果为基础,研究了直线电机伺服单元,开发了中凸变椭圆活塞数控车床,但未见有规模化的产业报道。

2. 规模化开发机床用直线电机需解决的问题

(1) 结构设计。直线电机的铁心是长直的、两端开槽的铁心,由于铁心及安置在其槽中的绕组两端不连续,所以各相之间互感不相等,存在纵向端效应及横向端效应,其磁路复杂,非线性强。

①磁路设计。直线电机内磁场分布的计算是磁路设计的基础,由于结构的特殊性使得直线电机存在端部效应。建立精确的有限模型,采用数值解法——有限元素法(FEM)计算电机的磁场分布。

磁路设计的重点是减少推力波动。通过优化永磁体形状和排列方式,降低永磁励磁密,初级采用无铁心和多极结构,增加槽的数目,加大气隙等措施,有效减少推动波动。

②机械结构设计。机械结构设计重点是冷却系统的设计,从冷却系统着手进行优化设计是提高直线电机的性能的一条捷径。直线电机热特性的分析,也采用元素有限方法,在计算结果的基础上对冷却进行优化设计。

(2) 电机防尘、防切屑、防磁和安全保护等方面的研究。

(3) 控制技术的研究。控制技术是直线电机设计的重点和难点,直线电机运行直接驱动负载,负载的变化直接反作用于电机,加之外界干扰,如工件及刀具质量、切削力的变化等,电机参数的变化也直接影响电机的正常运行。另外,直线导轨的摩擦力、电机本身的槽效应和端部效应等等,都给控制带来困难。

(4) 性能测试和质量检测。确定直接电机测试项目及指标,设计制造相应的测试方法及测试平台,对直线电机的各项参数,如速度、加速度、静态力、动态力、位移、精度等进行准确测试。

3. 我国研究开发的直线电机的特色及创新

(1) 直线电机以一个部件实现直线移动,取消

了从电机到工作台的一切中间环节,把工作台进给传动链的长度缩短为零,即“零传动”,可实现无接触传递力,只有导轨处有摩擦力,没有机械损耗,运动平稳,维护简单,使用寿命长,寿命比滚珠丝杠副长10倍。

(2) 速度范围宽。机床用直线电机速度范围宽,可从每秒几微米到数米,最大运动速度可达70m/min,适于高速切削,速度是交流伺服和滚珠丝杠传动方式的数倍。

(3) 精度和重复精度高。由于机床用直线电机没有中间环节,系统精度高,可达亚微米级,全程范围内定位精度 $0.8 \sim 1\mu\text{m}$,重复定位精度 $0.8 \sim 1\mu\text{m}$ 。

(4) 安装容易。可直接安装在机床上,有防切屑、切削液防护、隔磁、防尘装置。

(5) 控制系统可靠。采用工控机和基于数字信号处理器(DSP)的全数字伺服控制系统方案,形成上下位机的分层制度,增强控制系统的鲁棒性,有效减少推力波动,使控制系统稳态精度高,动态响应快,抗干扰能力强。

(6) 制造工艺先进。采用新型永磁材料,研究先进制造工艺,提高产品部件的国产化水平,降低产品成本,产品售价只有国外同类产品的1/4。

主要技术参数:

- ①行程 1 000 ~ 2 000mm。
- ②最大运动速度 60 ~ 70m/min。
- ③全程范围内定位精度 $0.8 \sim 1\mu\text{m}$, 重复定位精度 $0.8 \sim 1\mu\text{m}$ 。
- ④加速度 $(1 \sim 1.5) g$ 。
- ⑤连续推力 1 000 ~ 2 000N。
- ⑥有隔磁, 防尘装置。
- ⑦有冷却系统。

4. 结束语

清华大学从事直线电机的技术和应用研究已有多年,成果丰硕,研究开发的高响应直线电机已在机床上得以应用。从1994年开始就对机床用高推力大行程直线电机进行研究,并在2001年得到国家“十五”科技攻关项目的支持,目前已完成两轮样机试制,对可靠性进行进一步的研究。

有专家对未来市场进行过预测,预计在今后五年内,我国的机床直线电机的需求将会直线上升,在2000~2010年将达数控机床总量的20%。

(收稿日期:20031103)