

# 直线电机在高档数控机床上的应用现状

## Application of Linear Motor in High-End NC Machine Tool

北京交通大学机械与电子控制工程学院 张倩 万里冰  
清华大学机械工程学院 赵彤



张倩

北京交通大学机械与电子工程学院机械电子专业研究生。研究方向为传感与检测技术。目前参与的课题有：清华大学机械学系与南通科技投资集团股份有限公司联合开展的攻关项目“数控机床双丝杠及直线电机驱动高速进给系统研究与应用”。

高档数控机床一般是指具有高速、高精度和多轴加工能力的机床。这就要求高档数控机床的进给驱动系统必须具备很高的加速度,来实现高的进给效率。但传统数控机床的驱动系统大都采用旋转电机通过中间转换装置(例如链条、钢丝绳、传动带、齿条或丝杆等机构)转换为直线

直线电机进给系统采用零传动方式,彻底改变了传统的滚珠丝杠传动方式存在先天性缺点,并具有速度高、加速度大、定位精度高、行程长度不受限制等优点,令其在数控机床高速进给系统领域逐渐发展为主导方向,成为现代制造业设备中的理想驱动部件,使机床的传动结构出现了重大变化,并使机床性能有了新的飞跃。

运动的。由于这些装置或系统有中间转化传动机构,所以整机存在体积大、效率低、精度低等问题。而直线电机进给系统采用零传动方式,彻底改变了传统的滚珠丝杠传动方式存在先天性缺点,并具有速度高、加速度大、定位精度高、行程长度不受限制等优点,令其在数控机床高速进给系统领域逐渐发展为主导方向,成为现代制造业设备中的理想驱动部件,使机床的传动结构出现了重大变化,并使机床性能有了新的飞跃。

### 直线电机在机床上的应用优势

直线电机可以直接驱动刀具工作台,这样就取消了驱动电机和工作台之间的一切中间传动环节,从而克

服了传统驱动方式的传动环节带来的缺点,提高了机床的动态灵敏度、加工精度和可靠性。与传统旋转电机相比,直线电机有其显著的优势:

(1) 高速响应性。丝杠等机械传动机构的取消,使整个闭环伺服系统的动态性能大大提高。直线电动机用于机床进给的驱动中,超高速切削的最大进给速度可达120~250m/min,加速度可达到 $2\sim 10g^{[1]}$ 。

(2) 高精度性。机械传动链的取消,消除了机械变速机构所带来的一些不良影响,如摩擦、机械后冲、弹性变形等对系统伺服性能的影响<sup>[2]</sup>。

(3) 行程不受限制<sup>[3]</sup>。传统的丝杠传动受丝杠制造工艺限制,一般为4~6m,更长的行程需要接长丝杠,而采

用直线电机驱动,理论上定子可无限加长,且制造工艺简单,现已有大型高速加工中心 X 轴长达 40m 以上。

## 国内外直线电机在机床行业中的应用与发展

### 1 国外现状

直线电机的历史最早可追溯到 1840 年 Wheatstone 开始提出和制作了略具雏形但并不成功的直线电机。在国外,直线电机在机床业的应用甚至成为一种“热点”,得到了广泛关注。目前世界上直线伺服电机及其驱动系统的知名供应商有:德国 Siemens 公司、Indramat 公司,日本 Fanuc 公司、三菱公司,美国 Anorad 公司、科尔摩根公司,瑞士 ETEL 公司。

美国 Anorad 公司是国际上最大的直线电机供应商之一,80 年代初其自行研制的正弦波永磁交流直线电机和方波无刷直流直线电机已在 Ingersoll 公司的高速加工中心 HVM800 和 HVM600 上获得成功应用,其最大进给速度为 76.2m/min,加速度为 1~1.5g<sup>[4]</sup>。这轰动了当时国际机床届,被誉为世界机床技术的新高峰。日本 Fanuc 公司采用美国 Anorad 的转让技术生产的具有代表性的产品为 L17000C3/2is,其最大推力 17000N,最大速度 240m/min,最大加速度 30g。德国 Siemens 公司设计的 1FN3 系列电机,最大进给力为 20.7kN,速度为 836m/min,其驱动器设计紧凑,可进行无磨损的力传输,适用于高速铣床、曲轴车床、超精密车床、磨床、激光车床等。

世界机床展是机床行业的盛会,聚集着各个国家先进的机床产品,在近几年的展会上,采用直线电机驱动技术的机床成为主流实用机床。第 26 届 JIMTOF 上,作为日本主要机床制造之一的山崎马扎克,展出的复合加工机床 HYPER VARIAXIS 630 为直线电动机驱动的 5 轴立式加工中心,在 5 轴联动加工工件的基础上,

提高了快速进给速度,总体加工时间可以缩短 30%~40%,由于采用直线电动机驱动,能够保持很好的刚性,进一步提高了加工精度。HYPER VARIAXIS 630 适合加工飞机和发电设备等使用的叶轮等零件及汽车零部件,可加工直径 730mm × 高度(长度)500mm、重量 500kg 以下的工件。且其根据人体工程学进行设计,使操作更加方便,为此还获得了日本国内的一些奖项。2011 年欧洲机床展上,DMG 和 Mori Seiki 交叉换股合作,首次展出 SPRINT42/8 linear。新型 SPRINT 42 linear 的主轴和副主轴采用 Swiss-type 转换套件和直接驱动技术,降低了长、短车削件的生产成本,从而在同类产品中脱颖而出。该产品的其他亮点包括:两个径向滑板上的直接测量系统确保加工过程的最高可靠性;快移速度为 40m/min、加速为 1g 的 X1 轴上使用的直线驱动装置,确保最高的准确性和动态性能;主轴和副主轴与动力刀具配合,可用作标配的两个 Y 轴和两个 C 轴,屑屑换刀时间仅为 0.24s。

### 2 国内现状

目前,我国已经有许多科研院所进行了直线电机在机床上的应用研究,并制造了相关典型产品,如北京机床研究所研发的电火花成形机床 GV754L,它快速进给速度高达 24m/min,加速度达 1.5g;北京机电院高技术股份公司研发的 VS1250 型立式加工中心,其 X/Y 轴采用直线电机,快进速度达到 120m/min,加速度达 1.5g;沈阳机床集团研发的车铣中心 X 轴直线电机快进速度为 60m/min;清华大学研发的 G-CNCP200 活塞车床 X 轴采用直线电机;而北京航空航天大学研发的凸轮磨床头架驱动用直线电机,精度显著提高,且无振纹。其他主要的研究单位有中科院电工所、西安交通大学等许多学校,主要成果有:冲压机、拉伸机、送料机、粒子加速器、

直线电机驱动门等<sup>[5]</sup>。在 2008 年,南通科技与清华大学合作成立了清华大学·南通科技数控机床技术联合研发中心,南通科技股份有限公司研发了高速立式加工中心 VH1100,其 X、Y 坐标轴分别采用直线电机驱动和双直线电机同步驱动,Z 坐标轴采用双丝杠伺服电机同步驱动,最大直线进给速度为 120m/min,广泛应用于汽车、军工、航空航天行业,能精密、高效、自动地加工复杂形面的零部件。而清华大学针对此机床的热态特性和法向磁吸力问题进行了研究,校企联合发明了“可抵消重力影响的双直线永磁同步电机水平进给平台”。第六届中国数控机床展上,汉江机床有限公司展出目前国内首台采用直线电机驱动的四轴三联动全自动高精度万能外圆磨床,该机床专用于精密磨削内外圆柱形和圆锥形工件,精度高、功能多。哈尔滨泰富实业有限公司和哈工大承担国家重大专项完成数控机床用大推力直线电机及驱动装置,使其额定速度最高达 240m/min,最大加速度为 10g。

## 直线电机在数控机床上应用的关键技术问题

直线电机在机床上应用,即用直线电机代替传统的滚珠丝杠和伺服电机进给系统,这极大的改变了机床的结构。同时,直线电机驱动在普遍使用后,一些过去没有关注的问题开始浮现,严重影响了直线电机所应发挥的优良特性。

### 1 发热问题

直线电机初级铜损和铁损会使线圈发热,由于直线电机处于散热条件较差的机床内部,造成散热困难,而且直线电机的绕组、铁芯就处在机床导轨附近,将严重引起机床导轨的热变形<sup>[6]</sup>。

对此国内外学者和知名公司都提出了结构优化和冷却结构设计的方案。清华大学的孙洁等人进行了

三维温度场仿真,同时设计了相应的水冷系统<sup>[7-8]</sup>。国际上,西门子开发了1FN6系列电机,其内部集成了精密水冷却管路,温升被控制在允许范围内;韩国的In-Ung Eun针对直线电机对工作台的热变形影响提出了电机隔热层方案,并通过实验验证了隔热层的有效性<sup>[9]</sup>。

## 2 法向磁吸力问题

法向力是引起机床驱动系统机械结构变形的主要原因,对于高速高精度数控机床,这必将降低机床的加工精度。另外,法向力的波动造成进给系统摩擦力的波动,从而导致机床推力的波动,也会使机床的加工精度降低。较高的法向力也给装配工作、隔磁工作增加了难度。因此,在直线电机驱动的进给系统中,必须采取有效的减小法向力的措施。目前,主要通过采用双边型结构的设计方法来解决法向磁吸力引起的问题。

但实际应用时,双边型结构成本、运行费用高,所以很少采用,因此,可将直线电机定子、动子、直线导轨副结合起来设计机床,以抵消或减少直线电机法向磁吸力,图1为双直线电机驱动的进给系统结构简图。

此结构采用双直线电机,两直线电机分别布置在工作台左右两侧,利用直线电机初、次级间的法向磁吸力,使得工作台在水平方向受力大小相等、方向相反,合力为零。此实例实现了对于直线电机初、次级及直线

导轨副的合理布置,有效地抵消了法向力对于机床的影响,提高了机床的加工精度。

## 3 直线电机边缘效应问题

直线电机与旋转电机最大的区别在于直线电机铁心是长直的、两端是开端的。由于铁心及安置在其槽中的绕组在两端不连续,所以各相之间的互感不相等,存在纵向边缘效应和横向边缘效应,会使直线电机产生推力波动<sup>[10]</sup>。因此,要对直线电机进行有效的电磁场分析。近几年,国内外学者利用解析法和有限元数值分析法对直线电机进行磁路分析,并通过优化永磁体的形状和排列方式、降低永磁磁励密度、初级采用无铁心和多级结构、增加槽的数目、加大气隙等措施可以减小推力波动。

## 4 隔磁与防护措施

由于永磁直线同步电机次级采用永磁体,会产生较大的磁场力,而且直线电动机是敞开式的,布置在机床工作台附近,因此,工件、切削和工具等磁性材料很容易被该磁场吸住,如果杂物被吸附到气隙表面,会严重影响气隙大小,改变磁场力,引起推力波动。因此,必须采用有效的措施进行隔磁、防护措施。如在初、次级与连接板间布置尼龙等隔磁装置,减少磁场对床身以及工作台的影响。

直线电机可提供较大的速度、加速度,在运行过程中,增加了控制的难度。由于直线电机存在强大的惯

性冲击,因此直线电机动子两侧必须采用缓冲防撞装置,以免在动子失控后发生危险。

## 结束语

近年来,直线电机系统成本不断下降,在机床成本中的比重明显下跌。但目前采用直线电机驱动仍比传统的传动装置价格更高。因此,直线电机的应用仍着眼于高性能机床,特别是精密高速加工机床、特种加工机床、大型机床。直线电机在机床上的应用已不是样品,因此,机床应用直线电机技术渐趋产业化,在新的需求和新材料新技术的推动下,直线电机将获得更大发展。

## 参考文献

- [1] 叶云岳. 直线电机在现代机床业中的应用与发展. 电机技术, 2010, 3: 1-5
- [2] 李绪成. 直线电机在数控机床中的应用及发展趋势. 北京: 北京机电院高技术股份有限公司, 2005.
- [3] Bin Y, Li X. Adaptive robust motion control of linear motors for precision manufacturing. *Mechatronics*, 2002(12): 595-616.
- [4] 张伯霖, 潘珊珊, 于兆勤, 等. 直线电机及其在超高速机床上的应用. *中国机械工程*, 1997, 8(4): 85-88.
- [5] 唐丽娟, 齐亮, 王庆东. 国产直线电机在机床中的应用研究. *装备制造*, 2010, 1: 10.
- [6] Jang C, Kim J, Kim Y. Thermal resistance modeling of linear motor driven stages for chip mounter applications // 8th intersociety conference on thermal and thermomechanical phenomena in electronic systems, San Diego, USA, 2002.
- [7] 刘泉, 张建民, 孙洁, 等. 平板式永磁直线电动机的热分析与冷却系统设计. *北京理工大学学报*, 2005, 25(3): 194-197.
- [8] 孙洁, 刘成颖. 永磁同步直线电动机冷却系统结构设计. *现代制造工程*, 2006, 4: 108-111.
- [9] In-Ung Eun. Effects of insulation layer upon the thermal behavior of linear motors. *Ksme international journal*, 2003, 1: 896-905.
- [10] 钟声, 申群太. 单边直线感应电机边缘效应的补偿及控制. *采矿技术*, 2008, 1: 66.

(责编 亦非)

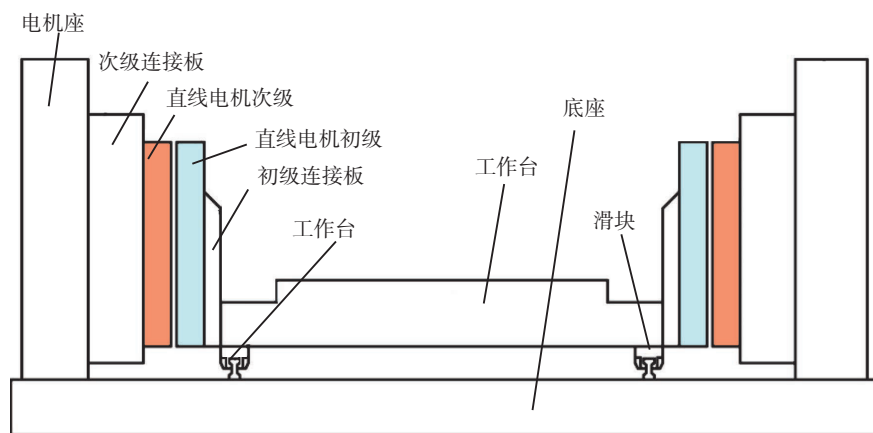


图1 双直线电机驱动进给系统