

# 直线电机在现代机床业中的应用与发展

叶云岳

浙江大学(310027)

## Application & Development of the Linear Motor in the Modern Machine Tool Industry

Ye Yunyue

Zhejiang University

### 1 直线电机在机床中的应用优势

直线电机具有结构简单,无接触运行,噪声低,速度和精确度高,控制容易,维护方便,可靠性高等优点。随着超高速切削、超精密加工等先进制造技术发展,对机床各项性能提出了越来越高的要求。尽管当前世界先进的交直流旋转电机伺服系统性能已大有改进,但由于受到传统机械结构(即旋转电动机+滚珠丝杠)进给传动方式的限制,有关伺服性能指标难以得到突破性提高。随着微电子技术、现代控制理论以及计算机技术的飞速发展,直线电动机驱动系统迅速成为机床驱动的新趋势,国际机床行业掀起了直线电动机热。

直线电动机驱动具有高推力、高速、高精度、平滑进给运动等特性。机床进给系统采用直线电动机直接驱动与原旋转电动机传动方式的最大区别是:取消了从电动机到工作台之间的机械中间传动环节。即把机床进给传动链的长度缩短为零,故这种传动方式称为“直接驱动”

(Direct Drive),也称“零传动”。直接驱动避免了丝杠传动中的反向间隙、惯性、磨擦力和刚性不足等缺点,带来了原旋转电动机驱动方式无法达到的性能指标和优点。主要表现在以下几个方面:

#### (1) 高响应性

一般来讲,电气元器件比机械传动件的动态

响应时间要小几个数量级。由于系统中取消了响应时间较大的如丝杠等机械传动件,使整个闭环伺服系统动态响应性能大大提高。

#### (2) 高精度性

由于取消了丝杠等机械传动机构,因而减少了传动系统滞后所带来的跟踪误差。通过高精度直线位移传感器(如 $\mu$ 级),进行位置检测反馈控制,大大提高机床的定位精度。

#### (3) 速度快、加减速过程短

机床直线电机进给系统,能够满足60m/min~200m/min或更高的超高速切削进给速度。由于具有高速响应性,其加减速过程大大缩短,加速度一般可达到2g~20g。

#### (4) 传动刚度高、推力平稳

“直接驱动”提高了传动刚度。直线电动机的布局,可根据机床导轨的形面结构及其工作台运动时的受力情况来布置,通常设计成均布对称,使其运动推力平稳。

#### (5) 行程长度不受限制

通过直线电动机的定子的铺设,就可无限延长动子的行程长度。

#### (6) 运行时噪声低

取消了传动丝杠等部件的机械摩擦,导轨副可采用滚动导轨或磁悬浮导轨(无机械接触),使运动噪声大大下降。

#### (7) 效率高

由于无中间传动环节,也就取消了其机械摩

擦时的能量损耗,系统效率大大提高。

直线电动机系统的开发应用,将引起机床行业的传统进给机械结构发生变革。通过先进的电气控制,不仅简化了进给机械结构,更重要的是使机床的性能指标得到很大提高。目前,世界上最知名的机床厂家几乎无一例外地都推出了直线电机驱动的机床产品,品种覆盖了绝大多数机床类型。

## 2 国外直线电机在机床业中的应用与发展

自1993年德国Ex-Cell-O公司研发出世界第一台直线电机驱动工作台的加工中心以来,直线电机已在不同种类机床上得到应用。进入21世纪以来,国外直线电机在机床业中的应用得到迅速的发展,越来越多的机床制造商选用直线电机作为机床的动力源。2001年,世界著名的DMG公司已有28种机型采用直线电机驱动,年产1500多台,约占总产量的1/3。其它著名公司还有Indramat、Siemens等。

日本沙迪克(SODICK)公司早在1996年,就开始在电火花成形机上采用直线电机,自行研制了专用的直线电机及与其相匹配的NC系统,继后又应用到电火花切割机上。日本除SODICK公司外,还有以生产数控系统和伺服电机著称的Fanuc公司与美国Anorad公司达成协议,Anorad公司把直线电机技术转让给Fanuc。日本Mazak公司开发的HMC F3-660L加工中心,直线电机驱动三轴,快移速度高达208m/min,加速度3.12g,各轴在120m/min速度下进行高速加工。此外,日本的松浦机械所、丰田工机、OKUMA、东京芝浦电气、森精机制作所、新日本工机和大隈等公司也生产采用直线电机的各种机床。

美国Precitech公司的Nanofom200,是超精密数控机床,用直线电机驱动。主要加工大型太空望镜的镜面,使用金刚石刀具,加工精度达到 $0.025\mu\text{m}$ 。克莱斯勒汽车公司购买了美国Ingersoll公司6台X/Y/Z三轴直线电机驱动的HVM600卧式加工中心,用来生产高级汽车发动

机汽缸盖。该机床主轴转速20000r/min,这6台加工中心每天生产300个汽缸盖,相当于11台非直线电机驱动的加工中心的生产量。Cincinnati公司为航宇工业生产的HyperMach系列机床,采用了直线电机驱动,他们在该机床上加工一个整体薄壁飞机构件,仅用了30分钟,若用一般高速铣床加工需要3小时,用普通数控铣床加工则需要8小时。

法国公司也生产采用直线电机的加工中心,如Renault Automation生产的Urane20和25,这些机床上所有的坐标轴移动都采用了直线电机。另外如ForestLine'公司也推出了它的Linear Minumac直线电机机床,在EMP' Pairs 99展会上展出,专门用于加工大型零件。

意大利JOBS公司自1999年开发出LinX直线电机驱动的龙门加工中心后,至2003年LinX系列产品已占全公司总产量的60%,并成为公司的主要利润来源。该公司为航宇和模具制造业生产的大型高速铣床产品,采用直线电机驱动,加工时间可减少50%,机床结构还得到简化(减少零件数25%)。意大利的Vigolzone公司也采用了直线电机技术。

瑞士ETELSA公司将直线电机用于激光刻模机,制作VLSI(超大规模集成电路)。

直线电机也出现在等离子切割机、坐标测量机、水喷射切割机以及锯床、磨床等机床上。如今在四大有影响的国际机床展览会上,直线电机机床的展出数量越来越多。

第19届日本国际机床展上,共展出8台采用直线电机作进给传动的机床。它们是森精机制作所的HVM600卧式加工中心、新日本工机的80L超高速多轴加工中心、大隈的超高速卧式加工中心、丰田工机的高速加工机床、松浦机械制作所的超高速小型加工中心和Taylor Mobson的两轴小型超精密镜面加工机床。此外,还有自动压力机领域的AID ENGINEERING和山田公司展示的高速成形机床。

2000年上海国际模具加工机床展览会上,日本SODICK公司展出了永磁直线电动机伺服系

统电火花成型机床。2001年北京国际数控机床展上, DMC85 Vlinear所有的轴都采用双直线电机, 拥有2g的加速度和120m/min的快移速度。在2001年欧洲机床展上, 有几十家公司展出直线电动机驱动的高速机床, 快移速度达100m/min~120m/min, 加速度1.5g~2g, 其中尤以德国DMG公司与日本MAZAK公司最具代表性。

2002年日本机床展中参展的524台数控机床中, 有25家公司41台机床采用直线电机进给驱动, 其中包括加工中心11台、电加工机床7台、磨床6台、非球面加工机和微型微细加工机5台、专用机床3台、激光加工机2台、车磨复合机床1台和铣削加工单元(FMC)1台。

2003年中国国际机床展上, 德国GROB公司展出BZ500L高速卧式加工中心, 主轴转速18000r/min, 直线电机驱动X/Y/Z三轴, 行程均为630mm, 快移速度120m/min, 加速度分别为1g~3g, 参展的还有德国DMG公司的DMC64V立式加工中心和EMAG公司的VG110DS立式车磨中心, 都使用了直线电机驱动技术。

2005年中国国际机床展上, DMG公司产品有三分之一采用了直线电机驱动技术。

2007年的中国国际机床展上, 意大利普瑞玛工业公司的切割机采用直线电机并联驱动方式, 可实现6g的加速度。每分钟可切割超过1000个孔, 而市场上目前最快的激光切割机也只能加工600个孔。德国DMG公司推出的GMX250车铣加工中心, Z轴采用直线电机驱动, 精度高、动态性能好。

目前, 世界上有许多直线伺服电机及其驱动系统的供应商如: Siemens、Indramat、FANUC、三菱、安川、富士、日立、Anorad、Kollmogen、Baldor、Aerotech、L.D、Copley和ETEL等, 如图1~图3。



图1 世界第一台采用直线电机的立式车床

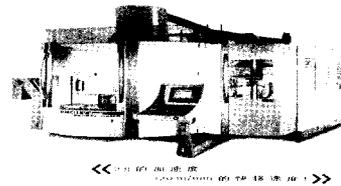


图2 DMC85 Vlinear-所有轴采用双直线电机

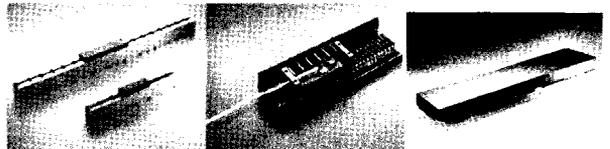


图3 机床上用的直线电机

### 3 直线电机在国内机床业中的应用与发展

直线电机在国内机床上的应用尚处于样机的研发阶段。清华大学研究了长行程永磁直线伺服单元; 北京机电院研制了直线电机驱动的加工中心; 北京机床研究所开发了直线电机驱动的电火花成型机床; 浙江大学与一些企业合作开发了直线电机驱动的磨床、压力机、锯床、雕刻机、坐标测量机、线切割机床等; 广东工业大学开发了由直线感应电机驱动的高速数控机床进给单元; 国防科技大学在活塞非圆切削中采用直线电机来驱动刀具; 北京航空航天大学、北京理工大学与有关单位合作共同完成了永磁直线电机驱动铣床等。

2001年中国国际机床展上, 南京四开公司推出一台自行研制开发的高速数控直线电机机床, 其X轴采用直线电机直接驱动, 光栅尺闭环反馈, 加工非圆截面异形螺纹, 其刀具最大的加速度达到4g~5g, 最大进给速度超过100m/min。2003年中国国际机床展上, 展出了北京机电院高科技股份公司推出的VS1250直线电机驱动的加工中心, 该机床主轴X/Y轴采用直线电机驱动, 行程分别为1250/630mm, 最大快移速度80/120m/min, 最大加速度0.8/1.5g。2005年济南捷迈数控公司推出采用直线电机的LCT-0305/2型数控精密激光划线机, 用于陶瓷片、半导体基体等材料的切割、划线及钻孔。2006中国国际金属加工展

会上,深圳市大族激光科技股份有限公司展出了直线电机激光切割机CLX3015A。2007年中国国际机床展上,杭机集团展出在国内首次应用直线电机的平面磨床MUGK7120X5,该数控超精密平面磨床采用立柱中腰移动专利技术,垂直微量进给为 $0.1\mu\text{m}$ ,有三轴联动修整功能,可实现非平表面的成形磨削。北京机电院高科技股份也展出了直线电机机床样机,见图4。

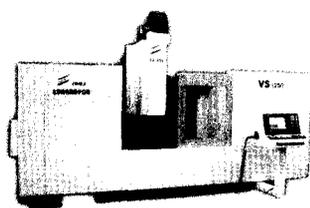


图4 北京机电院高科技股份公司的直线电机机床样机

## 4 直线电机在机床领域的发展趋势与注意的问题

### 4.1 直线电机在机床领域的发展趋势

从2003年开始,我国已成为全球最大的机床消费国,也是世界上最大的数控机床进口国。目前,国内外在机床用直线电机及其系统的研究开发主要有下述几方面的趋势。

(1) 直线电机与驱动控制系统不断提高、完善,技术日趋成熟

直线电机及其驱动控制系统在技术上已日趋成熟,已具有传统传动装置无法比拟的优越性能。过去人们所担心的直线电机推力小、体积大、温升高、可靠性差、不安全、难安装和难防护等问题,随着电机制造技术的改进,已不再是大问题。而驱动与控制技术的发展又为其性能拓展和安全性提供了保证,选择合适的直线电机及驱动控制系统,配以合理的机床设计,完全可以生产出高性能、高可靠性的机床。现在直线电机驱动进给速度 $100\text{m}/\text{min}$ ,加速度 $1\text{g}\sim 2\text{g}$ 的机床已很普遍,已有机床达到快进 $240\text{m}/\text{min}$ ,加速度 $5\text{g}$ 的指标(日本AMADA激光切割机)。高速度高加速度的传动已在加工中心、数控铣床、车床、

磨床、复合加工机床、激光加工机床及重型机床上得到广泛应用,

(2) 成本下降,性价比更好,但仍以高、特为主

近年来,直线电机系统成本不断下降。但目前采用直线电机驱动仍比传统的传动装置价格要高。因此,直线电机的应用应着眼于高性能机床,特别是精密高速加工机床、特种加工机床、大型机床,解决传统传动方法不能解决的问题。另外,提高加工精度和加工效率也会提升机床的价值。

(3) 直线电机在机床上的应用渐趋产业化

直线电机在机床上的应用已不是样品,不是个例,如上所述,有的公司已占其总产量的 $1/3$ 。有的公司产品已占全公司总产量的 $60\%$ ,并成为公司的主要利润来源。有专家预测,未来几年,世界上将有 $20\%\sim 40\%$ 的数控机床采用直线电机进给驱动,而这些机床都是高档机床,因此其产业化前景是不言而喻的。

### 4.2 应用中仍然需注意的几个问题

(1) 电机的结构选择与设计

不同的机床要采用不同的电机结构。由于直线电机的铁心两端断开,其中的绕组两端也不连续,这就使得直线电机的磁场和电流在纵向和横向上产生畸变,即边端效应。设计中必须充分考虑它的影响,并采取一些有效的措施。作为永磁直线电机,它的齿槽效应引起的推力波动,也应采用一些措施予以削弱。

(2) 控制策略

直线电机和工作台之间没有任何中间传动环节,这就使得各种外界扰动、负载扰动直接作用在电机上;同时直线电机特有的边端效应的影响以及其特殊运动方式下重力和摩擦力的影响,会使运动方向推力变得难以控制。这就要求位置和速度检测装置有很高的分辨率和动态响应能力。系统要有鲁棒性很强的控制器,以消除内部参数扰动和外界干扰的影响。

(3) 隔磁问题

与旋转电机不同,直线电机的磁场是敞开的

尤其采用永磁式直线电机时,要在机床床身上安装一排磁力强大的永久磁铁。因此,必须采取隔磁措施,否则直线电机将会吸住加工中的切屑、金属工具和工件等。这些微粒如被吸入定子和转子之间的气隙中,直线电机就不能正常工作。

(4) 散热问题

直线电机的初、次级绕组在进行电磁能量转换的过程中产生的热量将使温度升高,直线电机一般位于机床的腹部,散热条件比较差,当采用感应式直线电机时,发热问题就更为严重。直线电机的绕组、铁心就贴在机床导轨上,其结果必将造成机床导轨的热变形,影响机床的工作精度。另外,发热问题也会影响电机本身的性能,同一型号的电机有冷却的推力峰值可以达到无冷却时的2倍。

应该说,近些年我国在机床直线电机及驱动控制技术的研发和应用方面取得了一些成绩,并有了一些阶段性的进展,但从整体上看,与世界先进水平相比,差距依然很大。无论产品的性能、品种,还是在机床上的应用方面都还处于起步阶段。众所周知,我国机床业目前依旧存在着产品结构不合理的现象,经济型数控机床偏多,产品技术含量不高,高档型数控机床技术水平与世界先进国家相比,差距甚远。目前,国家从政策上不断加大对机床行业的扶持力度,机床行业正面临着难得的历史发展机遇。国家还制定了《数控机床产业发展专项规划》,通过重点引进与自主开发相结合的办法,推动我国机床业的快

速发展。

综上所述,直线电机在世界制造装备业中已开始得到了可喜的应用,其前景是诱人的。如何很好地开拓这块处女地,是机床界和直线电机界需要共同努力的事,我们相信,随着直线电机技术和现代控制技术的不断发展,随着科技发展对机床业的更高要求,直线电机在世界制造装备业中的应用将会越来越快,将会取得很大的发展。

参 考 文 献

- 1 叶云岳. 直线电机原理与应用. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- 2 叶云岳. 新型直线电机驱动装置与系统. 北京: 冶金工业出版社, 2000.
- 3 叶云岳等. 中国直线电机应用成果汇编. 北京: 冶金工业出版社, 2001.
- 4 叶云岳等. 中国直线电机论文选编. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- 5 叶云岳等. 直线电机技术手册. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- 6 叶云岳. 现代驱动技术与智能化浙江大学研究生教材. 2001.
- 7 叶云岳. 直线电机在现代机床加工业中的应用. 在中国机械工程学会上的报告. 2007.11.
- 8 叶云岳, 杨天夫. 直线电机在制造技术装备中的应用综述. 世界制造技术与装备市场. 2002.

(收稿日期: 2010-04-07)



作者简介: 叶云岳, 浙江大学电气工程学院教授、博士生导师, 浙江大学航天电气与微特电机研究所所长, 中国电工技术学会理事, 中国电工技术学会直线电机专委会主任。长期从事直线电机与现代驱动技术, 计算机辅助电机优化设计与制造, 航天电气与微特电机以及磁浮驱动技术方面的科研, 教学工作, 发表论文100余篇, 荣获科技进步奖10余项, 获授权专利20余项。

美国NEMA MG1-2006电动机和发电机标准译文

NEMA MG1-2006电动机和发电机标准(2007.11第一次修订)是当前有效版本,对制造符合美国标准的电机产品和电机出口至北美市场具有指导意义,本版NEMA标准与原2003版相比,有较大篇幅的修改及增加,涉及的有高效、温升、试验和NEMA50Hz电机的相关指标等。

本2007修订版NEMA标准,作为内部资料供业内同行参考。酌收工本费150元/本(含邮资费)可从邮局汇款订购。

地址: 上海市灵石路702号甲205室《电机技术》编辑部 邮编: 200072

电话: 021-66313243 66313311-1060 传真: 021-66313243