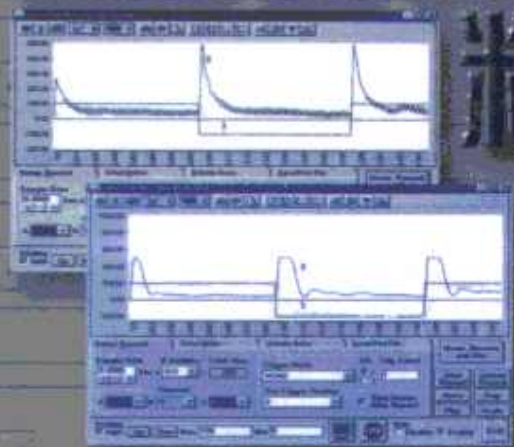


国家自然科学基金资助项目

机械工业出版社高水平著作出版基金资助项目

直线交流伺服系统的 精密控制技术



郭庆鼎
周美文

王成元
孙廷玉

编著



国家自然科学基金资助项目(NO.59875061)

直线交流伺服系统的 精密控制技术

郭庆鼎 王成元 编著
周美文 孙廷玉



机械工业出版社

本书较详细地介绍了高性能直线交流伺服系统所采用的各种控制策略与方法。这些控制方法包括 PID 控制、Smith 预估控制、解耦控制、模型参考自适应控制、滑模变结构控制、鲁棒控制、 H^∞ 控制、预见控制、智能控制等。为了便于阅读，在每章节前面，首先扼要介绍了相关概念和基本理论，为每种控制策略和方法的设计举例，提供必要的基础知识准备。

本书适合于从事数控、自动化、电气传动技术的科技工作者和高等学校研究生与高年级本科生阅读。

图书在版编目 (CIP) 数据

直线交流伺服系统的精密控制技术/郭庆鼎等编著.

—北京: 机械工业出版社, 2000

ISBN 7-111-07863-2

I.直… II.郭… III.伺服系统—自动化控制 IV.TP275

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 02574 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 李正民

封面设计: 姚毅 责任印制: 何全君

三河市宏达印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2000 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

850mm×1168mm 1/32·9.625 印张·250 千字

0 001—2500 册

定价: 20.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68993821、68326677-2527

前 言

90年代中期以后，直线驱动技术在精密定位领域中得到了广泛的应用。特别是随着对数控机床加工技术要求不断地实现高速和超高速化、精密和超精密化，高速反应能力的直线伺服进给技术——所谓的零传动方式便应运而生。由于消除了传统机械传动链所带来的一系列不良影响，因而极大地提高了进给系统的快速反应能力和运动精度，成为新一代数控机床中最具有代表性的先进技术之一。

直线电动机伺服系统与传统的“旋转电动机+滚珠丝杠”进给方式相比，虽然消除了机械传统链所带来的一些不良影响，但却增加了电气电子控制上的难度。在要求高精度微进给的场合，必须站在更高的层次上，考虑更多的摄动与扰动等不确定因素对进给运动的影响，否则，零传动将失去原来所希冀的意义。这种机械上的简化，导致增加了控制上的难度。因此，必须采用更有效的控制技术，这种“转嫁”在目前的技术水平下来看是合理的。用软件和微电子器件取代精度要求很高而又笨重的机械部件来获得更高性能，无论如何这是值得的。

在考虑控制策略和具体方法时，始终不应该忘记，我们所研究对象的模型框架是基本清晰的，而且对象是一个高精度的快速运动系统。不是所有控制策略和方法都对此是有效适用的。所以，在本书中，我们只对那些已成功应用或有望应用于此类系统的方法加以讨论。这里，不是讨论控制理论本身，只是为本书的实际设计举例和应用提供必要的基础知识，并试图把理论和实际问题结合起来，以使读者对LPMSM能有一个完整的理解。

作者在国家自然科学基金委员会的资助下（NO.59875061），进行了数年的研究工作，取得了一定的经验。作者十分愿意把它

总结出来，同时吸取国内外研究成果，编写成书，并望尽快面世。本书若能为推动我国数控机床直线伺服技术的发展做出一点贡献并唤起有关部门的重视，也就达到目的了。

在这里要感谢我的学生迟林春、王军、周悦、李蒙、郭威、孙艳娜以及王丽梅博士，没有他们的研究工作是不能完成本书编著的。同时，马俊芳高级工程师、郭淑芳工程师也为本书尽快成稿做出了辛勤的努力。我代表作者们对他们的劳动深表感谢。

由于作者水平有限，时间紧迫，书中错误一定不少，敬请各位专家和读者赐教。

郭庆鼎

1999年12月20日于沈阳

第1章 绪论

1.1 直线电动机的发展和应用简况

在许多工业领域中，被控对象的运动路径往往是直线形式。但遗憾的是，过去由于直线运动驱动器没有得到充分的发展，长期以来不得不借助于旋转电动机的旋转运动，加上机械变换环节而获得最终的直线运动，或是单向位移或是双向往复位移。显然，这种获得直线运动的方式具有“间接”的性质。如果驱动器能给被控对象提供直线运动形式的推力，以获得单向或双向的有限可控位移，那么两者在运动形式上就直接匹配一致了，省去了中间的变换环节，这就具有天然的合理性了。

以电磁原理工作的各种形式的直线电动机是提供大功率、高推力的主要执行元件。由于它能直接产生连续单向或往复短行程的直线机械运动，而不需中间机械传动变换装置，因而在国民经济各个部门都获得了应用，而且应用的前景越来越广阔。从目前的发展趋势来看，可能形成具有巨大市场的“直线运动工业”。

早在 19 世纪末与 20 世纪初就有人从事直线电动机的研究。当时研究直线电动机有两个目的，其一想用它来推动织布机上的梭子，其二想用它作为推动列车的动力，但均未获得成功。在以后很长的一段时期内，虽有少量的研究成果，但都未进入实用阶段。直至 50 年代中期，随着核动力的发展，需要抽吸钠钾混合物之类液态金属，于是就产生了作为电磁泵的直线电动机。60 年代以来，随着超高速运输系统的需要，直线电动机在这方面的应用受到了极大的重视，许多国家开展了对直线电动机的专题研究，于是直线电动机的理论和应用均获得了迅速的发展。

由于对感应式直线电动机的研究较早，电动机的结构简单，坚固耐用，适应性强，成本低，所以在各个领域首先获得推广应用。其主要用途可归纳如下：

1. 工业直线传动

- 传动带 感应式直线电动机的初级是固定不动的，次级就是传送带本身，所用材料是金属带或金属网与橡胶的复合皮带。这种采用直线电动机的传送带兼有矿车与普通皮带运输机的优点，可提高运输能力，节省投资。

- 传送车 在工业生产中，可用直线电动机驱动车子传送工件。为了实现生产自动化，要求小车能在始点、终点和沿途若干点上准确定位，直线电动机通过调速装置、速度传感器、行程开关或无触点开关的联合作用，能使小车准确定位。

- 行李和货物存取的移动装置。
- 桥式起重机或吊车的移动装置。

2. 电磁泵

由于液态金属有很高的温度，因此作为电磁泵的感应式直线电动机初级要用耐火材料覆盖，次级就是液态金属。当初级通电后，液态金属中便产生定向的驱动力，以达到泵送液态金属的目的。液态金属可以是钠、钾、铝、钢等。

3. 工业自动装置的执行器件

感应式直线电动机可以用作门、窗、阀、开关的自动开闭装置，以及自动剪切线上的送进驱动装置等。

4. 用直线电动机驱动的高速列车

近几十年来，感应式直线电动机在这方面的应用受到极大的重视，在许多工业先进国家投入了运营。直线电动机的初级固定在车身上，次级安置在地面上，用气垫（或磁垫）使车身与地面分离。用直线电动机驱动的高速列车，速度可达 400~500km/h 公里。这是感应式直线电动机最典型的应用之一。

5. 其它方面

感应式直线电动机除了以上各方面应用外，还可以用于熔

融液态金属的搅拌装置、电磁锤、车辆冲击试验台的加速装置、人造纤维的拉力试验装置等等。

以上这些方面的应用，感应式直线电动机都是作为动力转换装置而使用的，前一时期这种直线电动机是应用的主流。随着矢量控制理论的发展和微电子器件与控制技术的进步，感应式直线电动机越来越广泛地作为伺服驱动应用到高精度定位系统中。

与此同时，随着高性能永磁材料的发展和价格的降低，永磁式直线电动机在许多小功率设备中也得到了广泛应用，主要是在各种设备中作为伺服驱动和精度较高的定位控制。

1.2 高速和超高速精密加工与直线进给技术

数控机床的直线交流伺服系统是 AC 直线电动机最典型的一个应用例子。半个世纪以来，数控机床的进给驱动技术虽然历经变化，但长期以来，基本的传动形式仍然是“旋转电动机+滚珠丝杠”。近年来，随着技术的进步与加工质量和效率要求的提高，打破了传统的进给驱动方式，出现了新型的直线电动机驱动方式，大有方兴未艾之势。这主要是因为：

- 在传统的“旋转电动机+滚珠丝杠”伺服进给方式中，电动机输出的旋转运动，要经过联轴器、滚珠丝杠、滚珠螺母等一系列中间传动和变换环节以及相应的支撑，才变为被控对象——溜板和刀具的直线运动。由于中间存在着运动形式变换环节，导致了一系列不良后果。首先使传动系统的刚度降低，起动和制动初期的能量都消耗在克服上述中间环节的弹性变形上，尤其细长的滚珠丝杠是刚度的薄弱环节。弹性变形可使系统的阶次变高，从而系统的鲁棒性降低，伺服性能下降。弹性变形更是数控机床产生机械谐振的根源。

- 中间传动环节的存在，增加了运动体的惯量，在不增加系统放大倍数的情况下会使系统的速度、位移响应变慢。但增加放大倍数又会使系统的稳定性变差，较大的放大倍数可能使系

统不稳定。

- 由于制造精度的限制，中间传动环节不可避免地受到间隙死区、摩擦以及弹性影响，使系统非线性因素增加，使进一步提高系统的精度变得很困难。

- 为了提高生产率和改善零件的加工质量而发展起来的超高速加工，不但要求数控机床具有超高速运转的大功率精密主轴驱动系统，而且还要有一个反应快速灵敏、高速轻便的进给驱动系统。现在进给速度已从 $6\sim 8\text{m/min}$ 提高到 $40\sim 50\text{m/min}$ 以上，加、减速度也从 3m/s^2 提高到 $25\sim 50\text{m/s}^2$ ，这对机床进给系统的动态特性提出了十分苛刻的要求。而目前传统的传动方式所能达到的最高进给速度为 30m/min ，加速度为 3m/s^2 。这与超高速切削要求相差甚远。

上述的缺点严重地限制了切削速度的提高，为满足超高速加工的需要，革除中间传动及变换环节已是势在必行。这就使得一种崭新的进给传动方式——直线伺服电动机控制系统应运而生。

- 直线电动机最重要的优点是具有比传统旋转电动机大得多的加、减速度。由于数控机床的直线进给行程较短，一般不超过几百毫米，在很高的进给速度下，只有在瞬间达到设定的高速状态和在高速下瞬时准确停止运动，高速直线伺服电动机才有实际应用的意义。为实现曲线或曲面的精密加工，在运动轨迹的拐弯处也要求较高的加、减速度，可达到 $(1\sim 10)g$ ($g=9.8\text{m/s}^2$)，是传统旋转电动机进给方式的 $10\sim 30$ 倍。由于加、减速度大，效率高，实际可用的最高速度可达 150m/min 。

- 加、减速过程的缩短，可改善加工表面质量，提高刀具使用寿命。

- 传动刚度的提高提高了传动精度和定位精度，不存在中间环节的磨损问题，维护简单，提高了可靠性。

- 进给的行程长度不受限制。旋转电动机在实现长行程传动时，滚珠丝杠长度的增加会使惯量增加，刚度大幅度下降，

伺服品质恶化。

- 运动安静，噪声低。

目前，在数控机床上应用的主流是感应式直线交流伺服电动机和永磁式直线交流伺服电动机，现将它们的结构与驱动方式简单介绍如下。

1.3 直线交流伺服电动机及其应用简介

1. 感应式直线交流伺服电动机

它可视为将旋转式感应电动机的定子沿径向切开并将其拉直，且用一导电金属平板代替转子。感应式直线电动机结构有平面型和圆桶型两种。对于直线行程小于 0.5m 的场合，一般倾向于采用圆桶型结构。对于较长行程的感应式直线电动机通常采用平面型结构。平面型结构又分为单边或双边初级形式，而次级通常都为笼型。由于在实际中很少遇到长行程(10m 以上)的情况，所以一般将具有三相绕组的初级作为动子，次级鼠笼作为定子，两者之间大约有 1mm 的气隙。

这种感应式直线电动机一般都由 SPWM 变频器供电。电动机速度为 2~3m/s。作为伺服电动机来说，要能对其运动位置、速度、推力等参量进行快速而又准确的控制，需采用次级磁场定向的矢量变换控制。随着温度的变化，次级电阻也将产生较大的变化。为了准确实现磁场定向，要求对其进行自动补偿，这和旋转式感应电动机矢量控制的要求是一样的。

与旋转电动机不同，在其数学模型方程中用推力代替转矩。更主要的不同点是在直线电动机中，由于它的初级(铁心与绕组)的实际长度是有限的，它有一个始端与终端。这两个端部区域的磁场分布与中间位置的磁场分布显著不同，这将给电动机的运行特性带来影响，这就是通常所说的“端部效应”。这种现象只有在直线电动机中才存在。因此，如何消除端部效应的影响，也给控制系统提出了一个新的任务。

应用的典型例子是德国 Ex-cell-o 公司在 1993 年开发的 XHC240 型高速卧式加工中心, 采用转速 24000r/min 的内装电主轴, 三个进给轴均在世界上首次采用 Indramat 公司的感应式直线交流伺服电动机直接驱动进给部件, 快速移动速度最高为 60m/min, 最大加速度为 9.8m/s^2 。

2. 永磁式交流直线伺服电动机

这种直线电动机利用高能永磁体, 具有推力强度高、损耗低、时间常数小、响应快、控制比较容易等一系列特点。其主要缺点是永磁体的高成本带来整体装置的高价格, 以及在端部存在较严重的漏磁场, 特别是在单边圆桶型结构中, 漏磁现象更为严重。这种电动机也分为平面型(单边、双边)或圆桶型。对于任何一种形状, 均可将初级制成动子, 次级的永磁体作为定子。借助于支撑系统, 动子和定子之间保持恒定的气隙。用于推力或位置控制的平面型直线电动机, 其运动行程可达 3m 以上; 对于行程长度 0.5m 以下的情况, 人们往往更愿意采用圆桶型结构, 这样可以更好地利用材料, 使相应的传动装置结构更加简单紧凑。平面型直线永磁电动机的初级动子结构又可分为铁心式和无铁心式两种。在有铁心式结构中, 将电动机的动子线圈绕制在硅钢片上, 用单侧磁路产生最大的推力, 采用高性能稀土永磁体和特殊的电磁设计, 以获取更大的推力重量比和推力功率输入比, 减小推力波动。大推力使其有充分的能力加减速和移动较大的质量。

不管是平面型还是圆桶型结构, 基本上可分为矩形波电流控制和正弦波电流控制, 采用 IGBT 组成的逆变器供电, 并用 PWM 调制。虽然是电压型逆变器, 但直接受控的是电流, 在一般情况下, 采用 $i_d=0$ 的控制策略, 使电磁推力与 i_d 具有线性关系。控制系统的基本结构是 PID 组成的速度-电流双闭环控制。

应用的典型例子是美国 Ingersoll 铣床公司生产的高速卧式加工中心 HVM800 和 X、Y、Z 轴均采用永磁式同步直线伺服电动机驱动的 HVM600, 最大进给速度为 76.2m/min, 加速度 $a = (1\sim 1.5)g$ ($g = 9.8\text{m/s}^2$)。

它们的主要特性比较见表 1-1。

表 1-1 两类直线电动机性能对比表

电动机类型	永磁式	感应式
单位面积电磁推力	大	小
效率	高	低
磁极位置传感器	要	不要
可控性	好	较差
进给平稳性	好	较好
动力制动	可能	尚无
对气隙调整的要求	低	高
尘埃防护	难	易
磁吸力	常量	变量
安装时的磁吸力	大	无

由上表可见，在总体性能上永磁式直线电动机具有较大的优势，应用更为广泛。但从目前来看，由于感应式直线交流伺服电动机的成本略低，防尘与安装均较容易，并且性能已接近于永磁式直线电动机的水平，所以其应用也是很广泛的。

3. 国际几大公司产品简介

美国 Kollmorgen 公司是世界上著名的工业运动控制厂家,它所提供的永磁式直线交流伺服电动机有两大类型。一种是动子无铁心结构,由于其运动体线圈质量轻,所以可达到极高的动态性能,具有零齿槽效应和零引力的特点,在速度低于 $1\mu\text{m/s}$ 时仍然能平滑运动,适用于轻载快速反应的场合。另一种是动子有铁心结构,可以获得高达 8000N 的推力,甚至还可以制造出更大推力(最大可达 90000N)的电动机,具有特殊的反齿槽效应措施,理论上最大的加速度也可达到 15 g ($g=9.8\text{m/s}^2$) 以上。由于永磁体采用了模块化设计,所以定子长度可以根据用户的需要加长,可达到 1000mm 以上。最高速度可达 300m/min 。

日本三井精机公司生产的高速工具磨床,Z轴上下移动采用的直线电动机可达 400次/min (行程为 25mm),最高加速度为 2.3g ,加工效率提高 $2\sim 3$ 倍。

德国西门子公司的永磁式直线同步电动机最大移动速度可

达 200m/min, 最大推力可达 6600N, 最大位移为 504mm, 适用对象为高速铣床、曲轴车床、超精密车床、磨床、激光车床等。

我国台湾省上银科技公司也将直线电动机用于三坐标测量机上, 实现三轴直接驱动。

在 1994 年的美国国际机床展览会(IMTS' 94)期间, 日本著名的数控系统和伺服电动机公司 FANUC 与美国 ANORAD 公司达成协议, 美国 ANORAD 公司将其直线电动机技术转让给日本的 FANUC 公司。此后, FANUC 公司又有新的改进, 其永磁式直线伺服电动机的产品已在市场上出售。该产品的动子最高移动速度为 120~240m/min, 最大推力为 1500~9000N, 在动子质量为 34kg 时, 其实际的加速度可达 2.7g。有自冷、空冷和水冷三种型号可供用户选择。

为实现高速化的并联机构, 即所谓的“六条腿机床”, 用 6 根轴的定位控制来确定工作台位置。在 CNC 的控制下, 通过 6 根滑动柱塞的伸缩来完成刀具与工件相对运动的“六条腿机床”也称作“六足虫”。这是一种新型的多工序数控机床。俄罗斯的 Lapik 公司和美国的 Ingersoll 公司等均有产品。该机床的 6 条腿驱动, 实现其高速化与快速性, 但要求控制精度进一步提高。苏黎世高等工业大学机床工艺研究所针对“六足虫”机床的缺点, 开发出了具有新型结构的六滑块机床, 它将直线驱动技术用于了该机床的高效铣削中。目前, “三条腿”的虚拟轴机床也正在开发研究中。“六条腿”和“三条腿”并联结构机床是直线伺服系统潜在的应用领域。

4. 直线伺服控制系统在应用中存在的问题

必须清醒地看到, 数控机床采用直线电动机直接驱动, 即所谓的零传动之后, 系统参数摄动、负载扰动等不确定因素的影响将直接反映到直线电动机的运动控制中, 而没有任何中间的缓冲过程, 因此增加了控制上的困难。此外, 要求具有强制冷却系统、制动系统以及防铁屑与尘埃措施等, 都增加了装置的成本, 给推广应用带来了不利影响。这就是说, 在传动链上机械方面的

简化，必定导致电气控制上的困难，也提高了对传感器分辨率和反应能力的要求。在数控机床上采用直线电动机驱动系统对环境要求比较严格，灰尘切屑粉末要严防被导磁体吸进去，因此要加套盖，甚至要在机床内部加喷管，从内部向外喷出空气，使灰尘或铁屑不被吸入机床，这就是所谓的隔磁问题。旋转电动机的磁场封闭在电动机的内部，不会对外界造成任何影响，而直线电动机的磁场却是敞开的，有严重的“端部效应”，尤其是永磁式直线电动机，要在机床上安装一排磁力强大的磁铁，如不采取隔磁措施，就会吸住加工的切屑、运动中的金属部件、装配机床的工具以及空气中的磁性尘埃，若将其吸进直线电动机的定子与转子之间的气隙，电动机就不能工作，因此要把直线电动机的磁场用三维折叠式密封罩防护起来。

另一个问题是散热。“旋转电动机+滚珠丝杠”驱动方式的电动机安装在机床周边位置，散热条件好，不必采取特殊的散热措施。但直线电动机安装在工作台和导轨之间，处于机床腹部，散热困难，又加之低速运行时效率低，自身散热条件变坏，必须采取强有力的措施(风冷或水冷)，把电动机工作时产生的热量迅速散出，否则会直接影响机床的工作精度，降低直线电动机的推力。

全闭环控制的干扰问题，增加了伺服控制的难度。与“旋转电动机+滚珠丝杠”的进给方式不同，直线电动机进给单元没有任何中间传动环节，不能采用所谓的半闭环控制，只能采用全闭环控制。这样，工作台负荷(工件重量、切削力)的变化、直线电动机的端部效应及其在运动中的变化，对伺服系统来说都是一个外界干扰。这些干扰没有任何缓冲或减弱(不像有传动环节那样，干扰折算到电动机上就减弱很多了，中间传动环节的弹性变形在一定范围内可以起到吸收和抑制干扰的作用)，就直接作用到伺服电动机上，如果自动调节不好，就可能降低系统的性能指标甚至造成不稳定。因此，要求其位置与速度检测装置具有很高的分辨率和动态响应能力。希望系统能在线设计出具有强鲁棒

性的控制器，以尽快消除内部参数摄动和外界扰动的影响，这就对控制上提出了严格的要求。

因为要求直线电动机进给系统具有高速度、高精度和高快速性，所以要求设计出十分优良的制动系统，能快速地吸收动子的机械能和磁场储能，这是十分重要的一个环节。

当前，影响直线电动机在机床中应用的主要因素是成本。我们相信，这个问题是会逐步得到解决的。

5. 直线交流伺服系统在其他领域的应用

直线交流伺服系统除了在数控机床上应用外，还在其它许多领域中得到了广泛应用。

例如，在直角坐标 X、Y 机器人中，X、Y 双轴正交，构造简单，直线传感器藏于轴内，用于搬运物件。其行走装置使机器人在行走滑台上带载移动，而直线驱动装置可以移动焊接或喷漆机器人在较大的工作范围上工作，且能保证准确定位。

在激光、半导体加工与检查装置中，用于激光加工的进给控制中，晶片加工与切片、连线、离子注入、光刻、晶片检验等过程中都应用了直线伺服驱动；在电子工业中，用于抓放机器、插件机、屏幕打印机、线路板检测和钻孔；在纺织行业，用于地毯成簇；在航空工业中，用于飞行模拟器、重力测量装置、弹射器、宇宙飞船中的低温冷冻机；在计算机外围设备中，用于 X-Y 绘图机、高速打印机、软盘驱动设备、数控坐标测量仪、平面电动绘图机、复印机透镜移动装置等。以上所述只是直线电动机的一小部分应用。

随着微电子、控制技术、电力电子技术和精密加工技术的进一步发展，直线电动机的应用领域将不断扩大。基于电磁工作原理的除上面所介绍的感应式和永磁式直线电动机外，还有直线式开关磁阻同步电动机、直线式步进机、永磁音圈式直线电动机等，它们在相应领域中也得到了应用。

特别是为满足中凸变椭圆活塞等非圆截面零件的高精度车削加工的需要，要求在工件高速旋转时，刀具在横向上做小幅度

高频往复振动加以配合，因此采用具有高频响应特性的永磁音圈式直线电动机是适合的，以解决传统高频响应微位移装置如压电陶瓷、磁致伸缩等因行程太小，不能满足对中凸变椭圆活塞工件微进给装置的要求的矛盾。由于以电磁作用原理为基础的直线驱动在长行程、大推力、微进给技术中的主导地位，因此对于它的理论研究和应用成果很多，这也就促进了电磁驱动的发展。这是本书要研究的主要内容。从目前情况来看，在实际中应用较多的微驱动方式除了电磁微驱动外，还有利用静电荷库伦力的静动微驱动方式、利用压电晶体的逆压电效应的压电微驱动方式、利用材料热胀冷缩原理将热能转换为机械能的热微驱动方式等等。目前，还在研究超声波微驱动、直接光微驱动、超导微驱动，高分子(凝胶)微驱动等方式。实际上，微驱动在原理上都是其它形式能量转换为机械能，只要能找到一种合适的机械将某种能量以可控的方式转换为机械的精密位移，就可以开发出相应的微驱动方式。

1.4 直线交流伺服电动机的控制策略

高速和超高速加工要求伺服装置具有极高的加、减速度，从而导致了直线交流伺服电动机驱动系统的产生和发展。

一般情况下，高速或超高速机床必定是精密的数控机床，这样不但对交流伺服进给驱动的快速性提出很高要求，而且对其伺服精度也同样提出了相当高的要求。在不同时期，不同的应用领域，对“精密定位”和“超精密定位”的认识不同。据国外的调查，在1994年大多数人认为，定位精度平均在 $0.4\sim 0.5\mu\text{m}$ 之间，就属于精密定位范围，定位精度在 $0.008\mu\text{m}$ 左右就进入超精密定位范围了，在极端情况下，超精密值达到 $0.7\sim 1.0\text{nm}$ 也是有的，比原子尺寸 $0.2\sim 0.3\text{nm}$ 大不了多少。精度的提高要受到传感器精度的限制。高速和高精度这两项要求往往不易同时得到满足，是矛盾的，但在直线交流伺服系统中必须同时满足要

求。实际上，对于大多数应用来说， $1\mu\text{m}$ 左右的定位精度也就够高了。

在高精度微进给的数控机床伺服驱动系统中，由于对直线交流伺服电动机控制要求很高，所以必须站在更高的层次上考虑到一些更细微因素对系统性能的影响，诸如系统的非线性、耦合性、动子质量和粘滞摩擦系数以及电阻电感的变化、负载扰动、噪声检测、永磁体充磁的不均匀性、电源的波动、动子磁链分布的非正弦性、动子槽内磁阻的变化、环境温度和湿度的变化、电流时滞谐波、摩擦的非线性、低速时爬行，特别是端部效应引起的推力变化等，都将使伺服系统性能变坏，难以满足高精度微进给的要求。

因此，必须采取有效的控制策略抑制这些扰动。在采取各种控制方法时，基于对对象模型结构基本清楚的认识，必须从直线交流伺服电动机传动系统是一个具有高度快速性的动态系统这一具体对象的特性出发，不可能在几十毫秒的起动或制动过程中以及更为暂短的动态调节过程中实现十分复杂的控制算法。同时，要针对产生扰动的不同原因的特殊性，以相应见长的控制策略对付之。伺服系统另一个重要性能就是其对指令的跟踪能力，在理想情况下，输出能无延迟、无超调地跟踪输入指令的变化。一个成功的控制策略，必须针对具体对象的特点，满足主要要求的同时，兼顾跟踪能力和抗扰能力。在直线交流伺服系统中应用的控制策略大致归纳如下：

1. 传统的控制策略

传统的控制策略如 PID 反馈控制、解耦控制等，在交流伺服系统中得到了广范的应用。其中 PID 控制算法蕴涵了动态控制过程中的过去、现在和将来的信息，而且其配置几乎为最优，具有较强的鲁棒性，是交流伺服电动机驱动系统中最基本的控制形式，其应用广泛，并与其它新型控制思想结合，形成了许多有价值的控制策略。Smith 预估计器与控制器并联，可以使控制对象的时间滞后得到完全的补偿，这样在设计控制器时就不必考虑