

直驱电动机的发展及应用

华中科技大学国家数控技术研究中心 宋 宝博士



直驱电动机的原理及类型

直驱电动机是直接驱动式电动机的简称，主要指电动机在驱动负载时，不需经过传动装置。由于直驱电动机避免使用了传动带等传动设备，而这些传动部件恰恰是系统中故障率较高的部件，所以使用直驱电动机的系统，从技术上讲应具有更低的故障率。使用传动装置（如减速齿轮、带轮等）的机械系统，常常结构复杂，体积庞大，重量增加，而且带来系统运行成本、噪声及传动效率等方面的多种问题。直驱电动机的诞生使得驱动装置变得更紧凑，重量更轻，控制起来也更加容易。直驱电动机根据其制造的原理不同主要可以分为两类，力矩电动机和直线电动机。

（1）力矩电动机。直流力矩电动机的工作原理与普通直流电动机相同，不同之处在于其结构。为了

在一定体积和电枢电压下产生大的转矩额低的转速，直流力矩电动机一般做成扁平式结构，电枢长度与直径之比一般为0.2左右，极对数较多。为了减小转矩和转速的波动，选用较多的槽数和换向片数。通常采用永磁体产生磁场。定子是由软磁材料制成的带槽的圆环，槽中楔由铜板制成，兼作换向片，槽楔两端伸出槽外，一段作为电枢绕组接线用，另一端排列成环形换向器。转子的所有部件用高温环氧树脂烧铸成整体。

交流力矩电动机分为单相和三相两种，分别是单相感应电动机和三相感应电动机的基本系列派生的，结构和安装尺寸与基本系列一致。不同之处在于，其转子导条通常采用较高电阻率的材料，如黄铜、纯铜、铝锰合金等，转子电阻较普通感应电动机大得多，因而其

机械特性与普通感应电动机明显不同。

（2）直线电动机。直线电动机是一种通过将封闭式磁场展开为开放式磁场，将电能直接转化为直线运动的机械能，而不需要任何中间转换机构的传动装置。直线电动机的结构可以看作是将一台旋转电动机沿径向剖开，并将电动机的圆周展开成直线而形成的。其中定子相当于直线电动机的初级，转子相当于直线电动机的次级，当初级通入电流后，在初次级之间的气隙中产生行波磁场，在行波磁场与次级永磁体的作用下产生驱动力，从而实现运动部件的直线运动。

近几年来，直线电动机技术已经应用到数控机床直线运动驱动系统中，代替传统的伺服电动机+滚珠丝杠副驱动系统，取得了巨大的成功。

直驱电动机的特点

力矩电动机和直线电动机由于制造原理不同，在实际应用中也有着各自不同的特点。

1. 力矩电动机

典型的传动装置从电动机到运动部件间包含一系列的机械传动元件，使得传动链长、传动效率低、制造成本高、结构复杂。中间传动环节的存在，不仅导致反向间隙、摩擦以及传动刚度降低等机械结构问题，增大非线性误差，而且还会

引起一定程度的弹性变形,整个系统的阶次变高,系统的鲁棒性降低等。因此取消中间传动环节已成为当前机械装备功能部件研究的主流方向之一,开发力矩电动机正是解决这一重大问题的关键技术手段。传统的港机如码头桥式起重机的提升结构也是以电动机+减速箱驱动滚筒的结构形式来进行工作的,因此可以用力矩电动机直接驱动来代替电动机+减速箱的结构。

用力矩电动机代替传统电动机实现直接驱动,取消了传统的传动系统,具有以下突出优点:

(1) 动态响应速度快。由于取消了系统中一些响应时间常数较大的机械传动部件,从而使整个闭环控制系统动态响应性能大大提高,系统的反应更加灵敏。这意味着采用直驱系统可具有更大的加速度以及更短的定位时间。

(2) 传动刚度高。由于采用直接驱动,避免了因中间传动环节的弹性变形、摩擦磨损以及反向间隙所造成的运动滞后现象,提高了其传动刚度;同时由于减小了机械磨损,因此可靠性也大大提高。

(3) 定位精度高。由于消除了中间传动机构中的传动间隙,减少了插补运动时因传动系统滞后带来的跟踪误差,可大大提高机床的定位精度。除此之外,传统的调速系统采用旋转变压器或光电编码器测量平台的转速和位置,只能构成半闭环控制系统,不能计入传动机构的误差;而在直驱系统中,由力矩电动机直接驱动运动平台,因此测量的速度和位置自然就是实际的速度和位置,这时采用旋转变压器构成的闭环系统便是全闭环调速系统。因此,单纯从硬件上来说,直

驱系统可以达到更高的精度,当然最终的伺服精度还是要取决于伺服系统的控制性能。

(4) 传动效率高。由于没有中间传动环节,消除了中间传动环节机械磨损时的能量损耗,传动效率大大提高。

(5) 运动噪声低和零保养。由于没有中间传动机构的机械振动,运动噪声大大降低;同时磨损的器件只剩下旋转或直线的轴承,因此假如只要做到永久性润滑和一次性装配,就可以实现零保养。

2. 直线电动机

直线电动机直接产生直线运动而不需要任何中间转换机构,特别适用于直线运动场合。与传统旋转电动机相比,采用直线电动机驱动的装置具有以下优点:

(1) 直线电动机直接产生直线运动,动子一般和负载直接相连,省去了丝杠、齿轮或者链条等中间传动机构,提高了传递效率。

(2) 直线电动机不仅本身结构简单,而且中间传动连接附件少,从而简化了运动系统结构,提高了系统的可靠性,减小了机械摩擦带来的噪声干扰。

(3) 直线电动机加速度大,可以在短行程内产生极高的直线速度。

(4) 直线电动机不受离心力束缚,因此直线运行速度无限制。

(5) 直线电动机初级具有规则形状,安放电枢绕组之后可以使用环氧树脂等进行封装,使其不易受雨水以及化学气体或液体的侵蚀,可应用于恶劣工作环境中。

由于直线电动机的固有结构形式,与旋转电动机相比,也存在一些无法避免的缺点。

(1) 直线电动机的结构具有多样性,其结构根据应用场合的不同千差万别,与已经系列化的旋转电动机相比,直线电动机主要应用于一些特殊场合,需求量少,生产厂家也较少,很难形成统一的、规格化的直线电动机配件,因此限制了直线电动机的发展。

(2) 由于材料、加工精度以及电气性能等原因导致直线电动机的气隙比旋转电动机的大,直线电动机的效率和功率因数均低于同等规格的旋转电动机。

(3) 直线电动机具有开断的初级结构,磁场不对称,由此产生了端部效应,由于端部效应存在使励磁电流存在畸变,带来了推力波动等问题。

(4) 直线电动机的机械加工精度要求高,成本较高。

直驱电动机的应用

力矩电动机和直线电动机在工业应用中有着十分重要的作用,它们包括机床、注塑、包装、印刷机械、轧钢机械、石油装备等各个领域。

1. 力矩电动机

力矩电动机及驱动装置可广泛应用于机床上的旋转运动。近年来,国内五轴加工机床市场的需求正在迅速增加,国产五轴加工机床也趋向成熟,国内已经有多个厂商生产五轴加工中心。1999年原多棱数控机床股份有限公司推出国内首台五轴联动数控龙门镗铣床,桂林机床股份有限公司、北京第一机床厂、济南二机床集团有限责任公司、沈阳机床(集团)有限责任公司也陆续推出了自己的五轴加工中心,汉川机床有限责任公司推出了

XH2420/5X五轴联动龙门加工中心, 2007年南通科技投资集团股份有限公司推出了MCH63型精密卧式加工中心, 2007年杭州机床集团有限公司推出了MKL7150×16/2型七轴五联动数控强力成形磨床。上述五轴加工中心的关键部件精密转台和双摆角铣头均采用力矩电动机直接驱动。

力矩电动机及驱动装置的应用范围是非常广阔的, 不仅能应用于机床工业, 还可以应用于注塑、包装、印刷机械、轧钢机械、石油装备等。高内禀转矩力稀土永磁大转矩力矩电动机还可应用于半导体组装和加工、汽车车架焊接定位器、天文望远镜的天线驱动和定位系统的高精度应用。在风力发电、兵器装备和航空航天领域也可得到应用。

简而言之, 过去使用传统的传动机构、传动链条、调速皮带的场合都可以用力矩电动机替代。

2. 直线电动机

直线电动机目前广泛应用于各行各业, 其中包括军事、民用、工业自动化和交通运输等领域。

(1) 直线电动机在军事领域中的应用。直线电动机在军事中的应用研究起步很早, 美国海军提出了建造电磁弹射系统(EMALS)的构想, EMALS与传统蒸汽弹射装置相比具有效率高、被弹射物体出口速度可以调节等特点。EMALS的建造使得直线电动机电磁弹射技术又重新受到关注。

(2) 直线电动机在民用领域中的应用。直线电动机在民用生活电器等方面应用广泛, 产品繁多。洗衣机、缝纫机、窗帘机、食品切片机等均有采用直线电动机驱动的

产品。值得一提的是直线压缩机在空调、冰箱等制冷产品中的发展。直线压缩机采用直线振荡电动机驱动, 与传统的旋转压缩机相比具有高效、低噪声等优点, 韩国LG成功开发直线振荡电动机压缩机并将其应用在其公司的冰箱中。

(3) 直线电动机在物流中的应用。传统的物料传输、包裹、分拣系统采用旋转电动机驱动, 传动机构中包含连杆或者链条等附件, 增加了系统的复杂性并且降低了传输的快速性。

为了解决这些问题, 一些发达国家研制直线电动机驱动的物流传输系统和包裹分拣系统, 比较著名的有瑞士邮电部门的邮袋吊挂传输设备, 日本东京多摩邮局采用的邮包分拣系统, 德国BEUMER公司的交叉带分拣系统和倾斜托盘分拣系统。

BEUMER公司的分拣系统均采用直线电动机驱动。直线电动机分拣系统具有以下优点: 分拣效率高、系统振动小, 可对易损件进行分拣; 系统可以进行灵活的模块化布局, 容易拆装和扩展。

(4) 直线电动机在工业自动化领域中的应用。直线电动机在工业自动化中的应用非常广泛, 例如冶金工业中的MHD泵、直线电动机驱动的自动绘图仪、直线电动机冲床等, 其中直线电动机在数控机床中的应用研究是近些年的研究热点。

直驱电动机的发展趋势

直接驱动方式取消了从电动机到工作台(或拖板)之间的一切中间传动环节, 将机床进给传动链的长度缩短为零, 因此这种传动方式又被称为“零传动”。与传统驱动方式相比, “零传动”方式能直接

提供转矩给执行机构, 突破了许多结构性的技术极限, 具有转矩大、损耗低、响应速度快等特点, 能提高系统的动态响应速度、加工精度和定位精度, 使数控机床可以达到传统驱动方式无法达到的性能指标, 具有明显的优势。

与此同时, 直接驱动技术也给电气传动增加了相当大的技术难度, 带来了许多需要迫切解决的技术难题。例如, 在电动机方面, 因为取消了机械传动装置, 所以要求转台电动机自身能够产生较大的转矩, 同时还要求电动机自身具有尽量低的转矩波动; 在控制系统方面, 要求控制系统具有较高的跟踪能力, 对参数变化以及外界扰动具有较强的鲁棒性能。

直线电动机是直线驱动系统的关键组成部件。直线电动机的控制性能受多种因素制约和影响, 其中直线电动机的动力学特性是其运行过程中的重要影响因素。直线电动机的特性不仅取决于其控制系统的硬件组成部分的制造水平, 而且决定于直线电动机中所采用的控制策略。

由于省去了中间传动装置, 直线电动机的传动刚度有所提高, 其传动精度和可靠性得到明显地改善。但是恰恰由于缺少旋转电动机的中间传动装置, 直线电动机更容易受到外部干扰的影响, 从而使其自身具有更为明显的非线性特性, 以致直线电动机设定的保持不变的控制策略与其系统固有特性不能在运行过程始终保持匹配。因此对于直线电动机的控制系统的研究也是很重要的。MW

(收稿日期: 20140102)