

综述：伺服电机介绍及其发展前景

摘要：近年来，随着国家对制造装备及其技术改造工作的重视，随着全数字式交流永磁伺服系统的性能价格比逐步提高，交流伺服电机作为控制电机类高档精密部件，其市场需求将稳步增长。目前，中国从制造业大国正向制造业强国发展，近5年内智能伺服电机及智能伺服驱动器的应用前景将十分美好。本文综合介绍了伺服电机的相关构造及其工作原理，纵观伺服电机的发展提出了自己的一些看法，以便为相关研发人员提供参考。

关键词：伺服电机/电机分类/选型/安装/智能伺服电机

一、伺服电机基本介绍



- 定义：**在伺服系统中控制机械元件运转的发动机.是一种辅助马达间接变速装置。
- 作用：**伺服电机,可使控制速度,位置精度非常准确。将电压信号转化为转矩和转速以驱动控制对象
- 分类：**直流伺服电机和交流伺服电机。

二、伺服电机工作原理



一、交流伺服电动机

交流伺服电动机定子的构造基本上与电容分相式单相异步电动机相似.其定子上装有两个位置互差 90° 的绕组，一个是励磁绕组 R_f ，它始终接在交流电压 U_f 上；另一个是控制绕组 L ，联接控制信号电压 U_c 。所以交流伺服电动机又称两个伺服电动机。

交流伺服电动机的转子通常做成鼠笼式，但为了使伺服电动机具有较宽的调速范

围、线性的机械特性，无“自转”现象和快速响应的性能，它与普通电动机相比，应具有转子电阻大和转动惯量小这两个特点。目前应用较多的转子结构有两种形式：一种是采用高电阻率的导电材料做成的高电阻率导条的鼠笼转子，为了减小转子的转动惯量，转子做得细长；另一种是采用铝合金制成的空心杯形转子，杯壁很薄，仅0.2-0.3mm，为了减小磁路的磁阻，要在空心杯形转子内放置固定的内定子。空心杯形转子的转动惯量很小，反应迅速，而且运转平稳，因此被广泛采用。

交流伺服电动机在没有控制电压时，定子内只有励磁绕组产生的脉动磁场，转子静止不动。当有控制电压时，定子内便产生一个旋转磁场，转子沿旋转磁场的方向旋转，在负载恒定的情况下，电动机的转速随控制电压的大小而变化，当控制电压的相位相反时，伺服电动机将反转。

交流伺服电动机的工作原理与分相式单相异步电动机虽然相似，但前者的转子电阻比后者大得多，所以伺服电动机与单相异步电动机相比，有三个显著特点：

1、起动转矩大

由于转子电阻大，其转矩特性曲线如图3中曲线1所示，与普通异步电动机的转矩特性曲线2相比，有明显的区别。它可使临界转差率 $S_0 > 1$ ，这样不仅使转矩特性（机械特性）更接近于线性，而且具有较大的起动转矩。因此，当定子一有控制电压，转子立即转动，即具有起动快、灵敏度高的特点。

2、运行范围较广

3、无自转现象

正常运转的伺服电动机，只要失去控制电压，电机立即停止运转。当伺服电动机失去控制电压后，它处于单相运行状态，由于转子电阻大，定子中两个相反方向旋转的旋转磁场与转子作用所产生的两个转矩特性（ $T_1 - S_1$ 、 $T_2 - S_2$ 曲线）以及合成转矩特性（ $T - S$ 曲线）

交流伺服电动机的输出功率一般是0.1-100W。当电源频率为50Hz，电压有36V、110V、220、380V；当电源频率为400Hz，电压有20V、26V、36V、115V等多种。

交流伺服电动机运行平稳、噪音小。但控制特性是非线性，并且由于转子电阻大，损耗大，效率低，因此与同容量直流伺服电动机相比，体积大、重量重，所以只适用于0.5-100W的小功率控制系统。

三、伺服电机的选型方法

1、伺服电机和步进电机的性能比较

步进电机作为一种开环控制的系统，和现代数字控制技术有着本质的联系。在目前国内的数字控制系统中，步进电机的应用十分广泛。随着全数字式交流伺服系统的出现，交流伺服电机也越来越多地应用于数字控制系统中。为了适应数字控制的发展趋势，运动控制系统中大多采用步进电机或全数字式交流伺服电机作为执行电动机。虽然两者在控制方式上相似（脉冲串和方向信号），但在使用性能和应用场合上存在着较大的差异。现就二者的使用性能作一比较。

一、控制精度不同

两相混合式步进电机步距角一般为 1.8° 、 0.9° ，五相混合式步进电机步距角一般为 0.72° 、 0.36° 。也有一些高性能的步进电机通过细分后步距角更小。如山洋公司（SANYO DENKI）生产的二相混合式步进电机其步距角可通过拨码开关设置为 1.8° 、 0.9° 、 0.72° 、 0.36° 、 0.18° 、 0.09° 、 0.072° 、 0.036° ，兼容了两相和五相混合式步进电机的步距角。

交流伺服电机的控制精度由电机轴后端的旋转编码器保证。以山洋全数字式交流伺服电机为例，对于带标准2000线编码器的电机而言，由于驱动器内部采用了四倍频技术，其脉冲当量为 $360^\circ/8000=0.045^\circ$ 。对于带17位编码器的电机而言，驱动器每接收131072个脉冲电机转一圈，即其脉冲当量为 $360^\circ/131072=0.0027466^\circ$ ，是步距角为 1.8° 的步进电机的脉冲当量的1/655。

二、低频特性不同

步进电机在低速时易出现低频振动现象。振动频率与负载情况和驱动器性能有关，一般认为振动频率为电机空载起跳频率的一半。这种由步进电机的工作原理所决定的低频振动现象对于机器的正常运转非常不利。当步进电机工作在低速时，一般应采用阻尼技术来克服低频振动现象，比如在电机上加阻尼器，或驱动器上采用细分技术等。

交流伺服电机运转非常平稳，即使在低速时也不会出现振动现象。交流伺服系统具有共振抑制功能，可涵盖机械的刚性不足，并且系统内部具有频率解析机能（FFT），可检测出机械的共振点，便于系统调整。

三、矩频特性不同

步进电机的输出力矩随转速升高而下降，且在较高转速时会急剧下降，所以其最高工作转速一般在 $300\sim 600\text{RPM}$ 。交流伺服电机为恒力矩输出，即在其额定转速（一般为 2000RPM 或 3000RPM ）以内，都能输出额定转矩，在额定转速以上为恒功率输出。

四、过载能力不同

步进电机一般不具有过载能力。交流伺服电机具有较强的过载能力。以山洋交流伺服系统为例，它具有速度过载和转矩过载能力。其最大转矩为额定转矩的二到三倍，可用于克服惯性负载在启动瞬间的惯性力矩。步进电机因为没有这种过载能力，在选型时为了克服这种惯性力矩，往往需要选取较大转矩的电机，而机器在正常工作期间又不需要那么大的转矩，便出现了力矩浪费的现象。

五、运行性能不同

步进电机的控制为开环控制，启动频率过高或负载过大易出现丢步或堵转的现象，停止时转速过高易出现过冲的现象，所以为保证其控制精度，应处理好升、降速问题。交流伺服驱动系统为闭环控制，驱动器可直接对电机编码器反馈信号进行采样，内部构成位置环和速度环，一般不会出现步进电机的丢步或过冲的现象，控制性能更为可靠。

六、速度响应性能不同

步进电机从静止加速到工作转速（一般为每分钟几百转）需要200~400毫秒。交流伺服系统的加速性能较好，以山洋400W交流伺服电机为例，从静止加速到其额定转速3000RPM仅需几毫秒，可用于要求快速启停的控制场合。

综上所述，交流伺服系统在许多性能方面都优于步进电机。但在一些要求不高的场合也经常用步进电机来做执行电动机。所以，在控制系统的设计过程中要综合考虑控制要求、成本等多方面的因素，选用适当的控制电机。

2、伺服电机的选型计算方法：

一、转速和编码器分辨率的确认。

二、电机轴上负载力矩的折算和加减速力矩的计算。

三、计算负载惯量，惯量的匹配，安川伺服电机为例，部分产品惯量匹配可达50倍，但实际越小越好，这样对精度和响应速度好。

四、再生电阻的计算和选择，对于伺服，一般2kw以上，要外配置。

五、电缆选择，编码器电缆双绞屏蔽的，对于安川伺服等日系产品绝对值编码器是6芯，增量式是4芯。

四、伺服电机安装使用注意事项

一、伺服电机油和水的保护

A: 伺服电机可以用在会受水或油滴侵袭的场所，但是它不是全防水或防油的。因此，伺服电机不应当放置或使用在水中或油侵的环境中。

B: 如果伺服电机连接到一个减速齿轮，使用伺服电机时应当加油封，以防止减速齿轮的油进入伺服电机

C: 伺服电机的电缆不要浸没在油或水中。

二、伺服电机电缆→减轻应力

A: 确保电缆不因外部弯曲力或自身重量而受到力矩或垂直负荷，尤其是在电缆出口处或连接处。

B: 在伺服电机移动的情况下，应把电缆（就是随电机配置的那根）牢固地固定到一个静止的部分（相对电机），并且应当用一个装在电缆支座里的附加电缆来延长它，这样弯曲应力可以减到最小。

C: 电缆的弯头半径做到尽可能大。

三、伺服电机允许的轴端负载

A: 确保在安装和运转时加到伺服电机轴上的径向和轴向负载控制在每种型号的规定值以内。

B: 在安装一个刚性联轴器时要格外小心，特别是过度的弯曲负载可能导致轴端和轴承的损坏或磨损

C: 最好用柔性联轴器，以便使径向负载低于允许值，此物是专为高机械强度的伺服电机设计的。

D: 关于允许轴负载，请参阅“允许的轴负荷表”（使用说明书）。

四、伺服电机安装注意

A: 在安装/拆卸耦合部件到伺服电机轴端时，不要用锤子直接敲打轴端。（锤子直接敲打轴端，伺服电机轴另一端的编码器要被敲坏）

B: 竭力使轴端对齐到最佳状态（对不好可能导致振动或轴承损坏）。

五、伺服电动机的发展史

20 世纪 80 年代以来，随着集成电路、电力电子技术和交流可变速驱动技术的发展，永磁交流伺服驱动技术有了突出的发展，各国著名电气厂商相继推出各自的交流伺服电动机和伺服驱动器系列产品并不断完善和更新。交流伺服系统已成为当代高性能伺服系统的主要发展方向，使原来的直流伺服面临被淘汰的危机。90 年代以后，世界各国已经商品化了的交流伺服系统是采用全数字控制的正弦波电动机伺服驱动。交流伺服驱动装置在传动领域的发展日新月异。永磁交流伺服电动机同直流伺服电动机比较，主要优点有：

- (1)无电刷和换向器，因此工作可靠，对维护和保养要求低。
- (2)定子绕组散热比较方便。
- (3)惯量小，易于提高系统的快速性。
- (4)适应于高速大力矩工作状态。
- (5)同功率下有较小的体积和重量。

自从德国 MANNESMANN 的 Rexroth 公司的 Indramat 分部在 1978 年汉诺威贸易博览会上正式推出 MAC 永磁交流伺服电动机和驱动系统，这标志着此种新一代交流伺服技术已进入实用化阶段。到 20 世纪 80 年代中后期，各公司都已有完整的系列产品。整个伺服装置市场都转向了交流系统。早期的模拟系统在诸如零漂、抗干扰、可靠性、精度和柔性等方面存在不足，尚不能完全满足运动控制的要求，近年来随着微处理器、新型数字信号处理器（DSP）的应用，出现了数字控制系统，控制部分可完全由软件进行，分别称为孺豚只疹或转旌鲜谿、捌只疹的永磁交流伺服系统。

到目前为止，高性能的电伺服系统大多采用永磁同步型交流伺服电动机，控制驱动器多采用快速、准确定位的全数字位置伺服系统。典型生产厂家如德国西门子、美国科尔摩根和日本松下及安川等公司。

日本安川电机制作所推出的小型交流伺服电动机和驱动器，其中 D 系列适用于数控机床（最高转速为 1000r/min，力矩为 0.25~2.8N.m），R 系列适用于机器人（最高转速为 3000r/min，力矩为 0.016~0.16N.m）。之后又推出 M、F、S、H、C、G 六个系列。20 世纪 90 年代先后推出了新的 D 系列和 R 系列。由旧系列矩形波驱动、8051 单片机控制改为正弦波驱动、80C、154CPU 和门阵列芯片控制，力矩波动由 24%降低到 7%，并提高了可靠性。这样，只用了几年时间形成了八个系列（功率范围为 0.05~6kW）较完整的体系，满足了工作机械、搬运机构、焊接机械人、装配机械人、电子部件、加工机械、印刷机、高速卷绕机、绕线机等的不同需要。

以生产机床数控装置而著名的日本法奴克（Fanuc）公司，在 20 世纪 80 年代中期也推出了 S 系列（13 个规格）和 L 系列（5 个规格）的永磁交流伺服电动机。

L 系列

有较小的转动惯量和机械时间常数，适用于要求特别快速响应的位置伺服系统。

日本其他厂商，例如：三菱电动机（HC-KFS、HC-MFS、HC-SFS、HC-RFS 和

HC-UFS 系列)、东芝精机 (SM 系列)、大隈铁工所 (BL 系列)、三洋电气 (BL 系列)、立石电机 (S 系列) 等众多厂商也进入了永磁交流伺服系统的竞争行列。

德国力士乐公司 (Rexroth) 的 Indramat 分部的 MAC 系列交流伺服电动机共有 7 个机座号 92 个规格。

德国西门子 (Siemens) 公司的 IFT5 系列三相永磁交流伺服电动机分为标准型和短型两大类, 共 8 个机座号 98 种规格。据称该系列交流伺服电动机与相同输出力矩的直流伺服电动机 IHU 系列相比, 重量只有后者的 1/2, 配套的晶体管脉宽调制驱动器 6SC61 系列, 最多的可供 6 个轴的电动机控制。

德国宝石 (BOSCH) 公司生产铁氧体永磁的 SD 系列 (17 个规格) 和稀土永磁的 SE 系列 (8 个规格) 交流伺服电动机和 Servodyn SM 系列的驱动控制器。

美国著名的伺服装置生产公司 Gettys 曾一度作为 Gould 电子公司一个分部 (Motion Control Division), 生产 M600 系列的交流伺服电动机和 A600 系列的伺服驱动器。后合并到 AEG, 恢复了 Gettys 名称, 推出 A700 全数字化的交流伺服系统。

美国 A-B (ALLEN-BRADLEY) 公司驱动分部生产 1326 型铁氧体永磁交流伺服电动机和 1391 型交流 PWM 伺服控制器。电动机包括 3 个机座号共 30 个规格。

I.D. (Industrial Drives) 是美国著名的科尔摩根 (Kollmorgen) 的工业驱动分部, 曾生产 BR-210、BR-310、BR-510 三个系列共 41 个规格的无刷伺服电动机和 BDS3 型伺服驱动器。自 1989 年起推出了全新系列设计的掺钴盗祇 (Goldline) 永磁交流伺服电动机, 包括 B (小惯量)、M (中惯量) 和 EB (防爆型) 三大类, 有 10、20、40、60、80 五种机座号, 每大类有 42 个规格, 全部采用钕铁硼永磁材料, 力矩范围为 0.84~111.2N.m, 功率范围为 0.54~15.7kW。配套的驱动器有 BDS4 (模拟型)、BDS5 (数字型、含位置控制) 和 Smart Drive (数字型) 三个系列, 最大连续电流 55A。Goldline 系列代表了当代永磁交流伺服技术最新水平。

爱尔兰的 Inland 原为 Kollmorgen 在国外的一个分部, 现合并到 AEG, 以生产直流伺服电动机、直流力矩电动机和伺服放大器而闻名。生产 BHT1100、2200、3300 三种机座号共 17 种规格的 SmCo 永磁交流伺服电动机和八种控制器。

法国 Alstom 集团在巴黎的 Parvex 工厂生产 LC 系列 (长型) 和 GC 系列 (短型)

交流伺服电动机共 14 个规格, 并生产 AXODYN 系列驱动器。

原苏联为数控机床和机器人伺服控制开发了两个系列的交流伺服电动机。其中 ДBy 系列采用铁氧体永磁, 有两个机座号, 每个机座号有 3 种铁心长度, 各有两种绕组数据, 共 12 个规格, 连续力矩范围为 7~35N.m。2ДBy 系列采用稀土永磁, 6 个机座号 17 个规格, 力矩范围为 0.1~170N.m, 配套的是 3ДБ 型控制器。

近年日本松下公司推出的全数字型 MINAS 系列交流伺服系统, 其中永磁交流伺服电动机有 MSMA 系列小惯量型, 功率从 0.03~5kW, 共 18 种规格; 中惯量型有 MDMA、MGMA、MFMA 三个系列, 功率从 0.75~4.5kW, 共 23 种规格, MHMA 系列大惯量电动机的功率范围从 0.5~5kW, 有 7 种规格。

韩国三星公司近年开发的全数字永磁交流伺服电动机及驱动系统, 其中 FAGA 交流伺服电动机系列有 CSM、CSMG、CSMZ、CSMD、CSMF、CSMS、CSMH、CSMN、CSMX 多种型号, 功率从 15W~5kW。

现在常采用 (Powerrate) 这一综合指标作为伺服电动机的品质因数, 衡量对比

各种交直流伺服电动机和步进电动机的动态响应性能。功率变化率表示电动机连续（额定）力矩和转子转动惯量之比。

按功率变化率进行计算分析可知，永磁交流伺服电动机技术指标以美国 I.D 的 Goldline 系列为最佳，德国 Siemens 的 IFT5 系列次之。

六、智能伺服电机及智能伺服驱动器发展

近年来，随着国家对制造装备及其技术改造工作的重视，随着全数字式交流永磁伺服系统的性能价格比逐步提高，交流伺服电机作为控制电机类高档精密部件，其市场需求将稳步增长。目前，中国从制造业大国正向制造业强国发展，近 5 年内智能伺服电机及智能伺服驱动器的应用前景将十分美好。

智能伺服电机将逐渐成机器设备中应用的主流：

从电机的出现至今已经有很多次巨大发展和替代，1980 年以前，由于技术成本等原因，电机应用以直流永磁有刷电机和步进电机为主，而且主要集中在机床和国防军工行业。1980 年以后，无刷伺服电机系统逐步成为行业的主角，并且深入到各个行业的种种应用中。

中国是世界上稀土永磁材料矿藏最多的国家。随着我国稀土永磁材料的发展及电力电子及微电子技术日新月异的进步，交流伺服电机的驱动技术也很快从模拟式过渡到全数字控制式。由于交流伺服电机的驱动装置采用了先进全数字式驱动控制技术，硬件结构简单，参数调整方便，产品生产的一致性、可靠性会非常好，同时可集成复杂的电机控制算法和智能化控制功能，如增益自动调整、网络通讯功能等，大大拓展了交流伺服电机的适用领域。

随着各行业，如印刷设备、数控机床、包装设备、纺织设备、激光加工设备、机器人、自动化生产线等，对工艺精度、加工效率和工作可靠性等要求不断提高，这些领域对交流伺服电机的需求将迅猛增长，交流伺服将逐步替代原有直流有刷伺服电机和步进电机。

据调查数据显示，2009 年，有近 60% 的原用直流伺服和步进电机的客户准备更换永磁交流伺服系统，功率在 3kW 以内，其中有 90% 为 1000W 以下的伺服电机。

智能伺服电机是将伺服电机（可以是步进电机、交流伺服电机、直流无刷伺服电机、直流伺服电机或者直线电机）、伺服电机驱动器、PLC 和运动控制卡的所有功能都集成在一个电机内部。因为这种电机将运动控制的功能都集成在了一个电机本体内，所以驱动器、运动控制卡的所有功能都是针对电机做的最优的参数配置，所以可以把电机的性能发挥到最好。

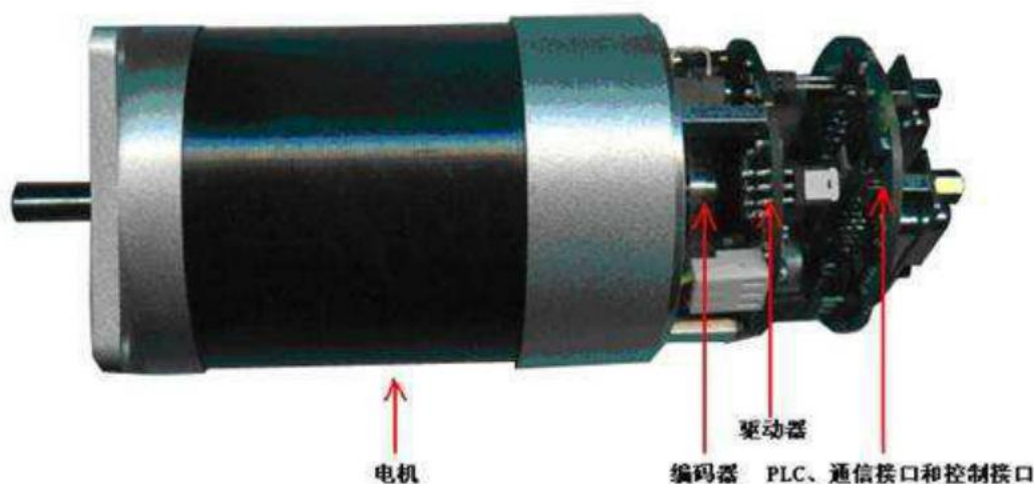
智能电机的控制可以通过 RS-232 总线进行点对点通信方式控制，也可以通过 CAN 总线（支持 CAN2.0 和 CANOpen 通信协议）实现多达 255 个轴的联动、当然也可以通过传统的外部给定脉冲方向或者模拟量控制，系统高可靠稳定性将大大节约用户设计机器的时间。

瑞默森（北京）有限公司，2010 年推出具有运动控制功能的伺服专用芯片 RealmotionDSP，并且结合彩色喷绘机、激光雕刻机、数控机床、太阳能发电站等行业应用，最新设计完成系列化高精度通用智能伺服电机，这种高集成度的智能电机得到了包扩欧美及国内的专家的一致认可，达到了国际先进水平，该项产品的出项将带动国内的电机行业、伺服驱动行业和运动控制行业水平上一个新的台阶。

目前瑞默森推出的系列智能电机功率等级涵盖了 3KW 已内的各种电机。电压等级包括：12V、24V、36V、48V、72V、...、325V，方便用户应用于电池供电或者交流电供电的各种特定的场合应用。电流等级包括：1A、2A、5A、...、20A 的驱动等级，电机和驱动器的过流均预置到 3 倍冗余，以保护用户的产品稳定性。

智能电机不仅具有高精密电机的功能，同时还涵盖了伺服电机驱动器和 PLC 的功能，用户的机器方案使用我们的智能电机将使系统的布线变的非常精简。从而大大提供用户机器的电控部分的稳定可靠性。

智能电机的典型结构见下图：



由于智能伺服电机的高集成度、高可靠性及其免维护性，比然导致智能电机逐渐替代传统的专用伺服电机和通用伺服驱动器。

七、结论

目前国产交流伺服电机及其全数字式伺服驱动器、智能伺服电机已经基本自主开发成功，在国家的大力扶持下，清华大学、华中科技大学、哈尔滨工业大学等学校的研究所对电机控制的核心算法的研究已经很成熟，而且技术水平可以说完全达到了国际一流的水平；产品功能的开发一般由企业来完成，瑞默森（北京）科技有限公司从 2001 年起一直从事智能伺服电机驱动器的产品化和产业化的研发，目前已经批量生产的各种型号的智能电机和伺服驱动器都具有很完善的功能，包括：电流环、位置环、速度环的 PID 参数实时自动调节，电机参数自动识别，电机运动控制功能，CAN 总线等，结合上位机的可视化的调试和编程界面等功能。可以看到对智能电机的功能的开发也居于国际最先进的行业水平。中国是制造业大国，制造工艺水平已经有了相当高的水平，全数字产品的特点是性能稳定、一致性好，所以产品的大批量生产也没有任何问题。

当然我们同样也可以看到，国内的产业基础比较差，很多设备的设计还是延续传统的步进或者直流有刷伺服的方案，但国内伺服电机的设计生产技术已趋于完善，目前主要是朝标准化，系列化，规模化方向发展，只有一定规模才能有高可靠性和价格低廉而富有竞争力的产品。

目前我们从国外引进的新的设备可以看一下，无论是美国惠普生产的彩色喷绘机、日本发那科生产的数控机床还是德国和瑞士的机器人，无论是民品还是工业用品都无一例外的使用交流伺服的方案。

智能电机的出现将使用户对电机的使用方法变的非常简单，用户可以不必关心驱动器如何操作、运动控制卡如何选择，当然更省去了所有的连线，大大提高了用户设计新产品的效率。它的免维护特性更让用户用得放心。目前我公司设计的智能电机与欧美处于同一个起跑线上，面对国内的巨大需求，我们相信在这个新一代的技术革新中我们将占有一个合理的市场位置。

【参考文献】

- [1]韩洪涛：《机械加工设备及工装》[M]，高等教育出版社，2004
- [2]李乐山：《工业设计思想基础》[M]，中国建筑工业出版社，2007
- [3]王仲民：《机械控制工程基础》[M]，国防工业出版社，2010
- [4]华成英：《模拟电子技术基础》[M]，高等教育出版社，2006
- [5]王勇：《磁力机械分析与设计方法》[M]，合肥工业大学出版社，2007
- [6]成大先：《机械设计的错例与禁忌》[M]，长江文艺出版社，2007
- [7]程树康：《交流伺服电机及其控制》[M]，机械工业出版社，2008
- [8]颜嘉男：《伺服电机应用技术》[M]，科学出版社，2010
- [9]郭晓波：《电机与电力拖动》[M]，北京航空航天大学，2007
- [10]程周：《电机与电气控制技术》[M]，电子工业出版社，2009
- [11]张友芬：《电机检修》[M]，中国劳动出版社，2007
- [12]才家刚：《电机使用与技术问答》[M]，化学工业出版社，2009
- [13]陈世坤：《电机设计》[M]，机械工业出版社，2004
- [14]杨渝钦《控制电机》[M]，机械工业出版社，2001
- [15]陈宝玲：《电机与电控实训》[M]，北京师大，2008
- [16]杨耕：《电机与运动控制系统》[M]，清华大学出版社，2006
- [17]巫付专：《控制电机及其应用》[M]，电子工业出版社，2008
- [18]虞俊：《数控技术》[M]，中国电力出版社，2010
- [19]李蔚：《现代制造技术》[M]，西北工大，2008
- [20]杨可桢：《机械设计基础》[M]，高等教育出版社，2006
- [21]电力科技发展与节能编委会：《电力科技发展与节能中国电机功》[M]，中国水利水电出版社，2006