

认识特种电动机



项目分析

特种电动机有多种,比如伺服电动机、测速电动机、步进电动机和直线电动机等。鉴于课程标准和学习的实际情况,本项目只简要介绍步进电动机和伺服电动机。伺服电动机与前述普通电动机相比较,侧重于控制特性的高精度和快响应。步进电动机广泛应用于数控机床、自动记录仪、计算机外围设备等数字控制系统中。



项目要求

通过本项目的学习与实践,知道步进电动机的结构和工作原理,了解伺服电动机的特点、用途和分类,知道伺服电动机的基本工作原理和主要运行性能,会对步进电动机和交流伺服电动机进行简单的操作使用。

任务 3.1 认识步进电动机



任务目标

- (1) 了解步进电动机的作用和用途。
- (2) 知道步进电动机的结构和工作原理。
- (3) 了解步进电动机的特性参数和驱动电路。
- (4) 学会步进电动机的简易操作。



相关知识

步进电动机是一种由电脉冲控制的特殊同步电动机,其作用是将电脉冲信号变换为相应的角位移或线位移。步进电动机与一般电动机不同。一般电动机通电后连续转动;步进电动机则是通以电脉冲信号后一步一步转动,每通入一个电脉冲信号,只转动一个角度。因此,步进电动机又称为脉冲电动机。步进电动机可以实现信号变换,是自动控制系统和数字控制系统中广泛应用的执行元件。步进电动机在数控机床、打印机、绘图仪、机

器人控制、石英钟表等场合都有应用。

步进电动机的角位移或线位移与脉冲数成正比,其转速 n 或线速度 v 与脉冲频率 f 成正比。在负载能力范围内,这些关系不因电源电压、负载大小以及环境条件的波动而变化。步进电动机可以在很宽的范围内通过改变脉冲频率来调速;能够快速启动、反转和制动。它能直接将数字脉冲信号转换为角位移,很适合采用微型计算机控制。常见步进电动机如图 3-1 所示。

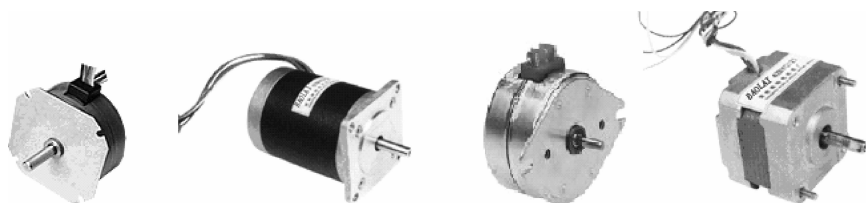


图 3-1 常见步进电动机

1. 步进电动机的分类

步进电动机的结构形式和分类方法很多。按工作原理不同,分成反应式、永磁式和永磁感应式三种。按运动状态不同,又分为旋转式、直线运动式和平面运动式三种。其中,反应式步进电动机具有步距小、响应速度快、结构简单等优点,广泛应用于数控机床、自动记录仪、计算机外围设备等数控设备。本任务仅介绍目前应用广泛的反应式旋转运动步进电动机的基本结构、工作原理及应用。

2. 反应式旋转运动步进电动机的基本结构

反应式旋转运动步进电动机有单段式和多段式两类。目前使用最多的是单段式,其结构示意图如图 3-2 所示。它的定子和转子均用硅钢片或其他软磁性材料制成,定子磁极数为相数的 2 倍,每对定子磁极上绕有一对控制绕组,称为一相。在定子磁极极面和转子外缘开有分布均匀的小齿,两者齿型和齿距相同。如果使两者齿数恰当配合,可实现使 U 相磁极的小齿与转子小齿一一对正,而 V 相磁极的小齿与转子小齿错开 $1/3$ 齿距, W 相则错开 $2/3$ 齿距。这种结构的优点在于:电动机制造简便、精确度高,每转一步所对应的转子转角(步距角)小,容易获得较高的启动转矩和运行频率;不足之处是当电动机直径较小而相数较多时,径向分相困难。

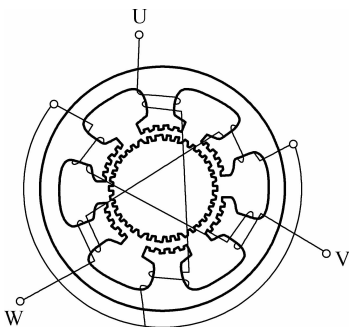


图 3-2 反应式步进电动机结构

3. 反应式步进电动机工作原理

反应式步进电动机工作原理如图 3-3 所示。当 U 相绕组通入直流电(或电脉冲)时,转子被定子磁场磁化,磁场力将转子轴线拉至与 U 相绕组轴线重合的位置。此时,若切

换为 V 相绕组通电(或电脉冲),则转子在定、转子间磁场力的作用下沿顺时针方向旋转 60° 。每转动一步,转子可以准确自锁,不会因惯性而发生错位。

上面所讲的步进电动机的“三相”不同于交流电的“三相”,它只表明定子圆周上有三套独立的控制绕组,但不能同时通电。在工程技术上,从一相通电切换到另一相通电称为一拍,而三相依次通电的运行方式称为三相单三拍运行方式。在使用中,为了减小步距角,还可 U、V 两相同时通电,使转子轴线转至 U、V 两相之间的轴线上。

这类按 UV-VW-WU 的顺序,两相同时依次通电的运行方式称为三相双三拍运行方式。此外,还可按 U-UV-V-VW-W-WU 的组合方式依次通电,称为三相六拍运行方式,其步距角更小。

为了进一步减小步距角,多采用如图 3-3 所示的槽齿结构。在 U 相通电时,U 相磁极小齿与转子小齿一一对正,V 相磁极小齿与转子小齿错开 $1/3$ 齿距,而 W 相定子与转子轴线间错开 $2/3$ 齿距。若切换为 V 相绕组通电时,转子将转过 $1/3$ 齿距,使 V 相磁极小齿与转子小齿一一对正。此时,W 相定子与转子轴线间只错开 $1/3$ 齿距。当 V 相断电,W 相通电时,转子又转过 $1/3$ 齿距,使 W 相磁极小齿与转子小齿一一对正。由此得出如下结论:设转子齿数为 Z ,步进电动机拍数为 N ,则转子每转过一个齿距,相当于在空间转过了 $360^\circ/Z$,而每一拍所转角度为齿距的 $1/N$,所以步距角为

$$\theta_s = \frac{360^\circ}{ZN}$$

可以看出,步距角与步进电动机的转子齿数成反比,与拍数成反比。例如,对于 $Z=40$ 的三相三拍步进电动机,其步距角为 3° 。

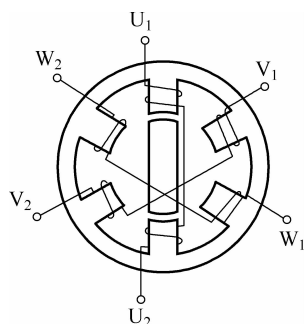


图 3-3 反应式步进电动机
工作原理

4. 步进电动机的性能指标

(1) 步距角:指输入一个电脉冲信号,步进电动机转子相应的角位移,用度数($^\circ$)表示,又称脉冲当量。

(2) 精度:指静态步距角误差和静态步距角的积累误差。

(3) 启动转矩:指步进电动机从静止状态突然启动而不失步的最大输出转矩。

(4) 最高启动频率:指步进电动机空载启动和停止时不失步的最高频率。

(5) 运行频率:指步进电动机在额定条件下无失步运行的最高频率。

5. 步进电动机的驱动电源

步进电动机是由专用的驱动电源来供电的,驱动电源和步进电动机是一个有机的整体。步进电动机的运行性能是由步进电动机和驱动电源两者配合所反映出来的综合效果。

步进电动机的驱动电源基本上包括高频信号源、脉冲分配器和脉冲放大器三个部分,

如图 3-4 虚框内所示。

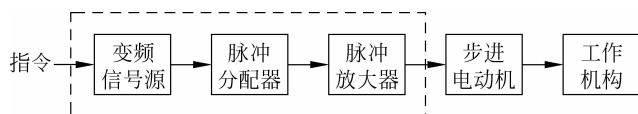


图 3-4 步进电动机的驱动电源

变频信号是一个频率从十赫兹到几十千赫可连续变化的信号发生器。变频信号源可以采用多种线路,最常见的有多谐振荡器和单结晶体管构成的弛张振荡器两种。它们都是通过调节电阻 R 和电容 C 的大小来改变电容充放电的时间常数,以达到选取脉冲信号频率的目的。

脉冲分配器是由门电路和双稳态触发器组成的逻辑电路,它根据指令把脉冲信号按一定的逻辑关系加到放大器上,使步进电动机按一定的运行方式运转。

从脉冲分配器输出的电流只有几毫安,不能直接驱动步进电动机,因为步进电动机需要几安到几十安培电流,因此在脉冲分配器后面都装有功率放大电路,用放大后的信号去推动步进电动机。



技能训练

1. 准备工作

- (1) 工具与仪表: 步进电动机控制箱操作手册。
- (2) 设备与材料: 步进电动机控制箱一台,三相反应式步进电动机一台。

2. 训练内容

本训练内容主要是观察步进电动机的运行和测定其基本特性。

(1) 熟悉步进电动机控制箱面板控制键盘功能。步进电动机控制箱面板如图 3-5 所示,各控制键盘功能如下所述。

- ① 设置键: 用于手动单步运行方式和连续运行方式的选择。
- ② 拍数键: 用于单三拍、双三拍、三相六拍等运行方式的选择。
- ③ 相数键: 用于电动机相数(三相、四相、五相)的选择。
- ④ 转向键: 用于电动机正、反转选择。
- ⑤ 数位键: 用于预置步数的数据位设置。
- ⑥ 数据键: 用于预置步数位的数据设置。
- ⑦ 执行键: 用于执行当前运行状态。
- ⑧ 复位键: 由于意外原因导致系统死机时,按此键复位。

本训练所用三相反应式步进电动机如图 3-6 所示。

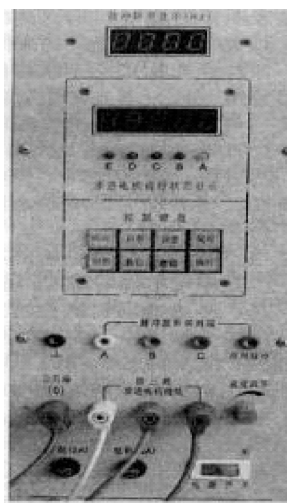


图 3-5 步进电动机控制箱

(2) 开启电源开关,观察面板上的3位数字频率计的显示。由6位LED数码管组成的步进电动机运行状态显示器自动进入9999→8888→7777→6666→5555→4444→3333→2222→1111→0000动态自检过程。然后,显示停止在系统的初态,即显示“000”。

(3) 控制系统试运行。暂不接步进电动机绕组。开启电源进入系统初态后,即可进入试运行操作。先用设置键设置成手动单步运行方式,按执行键后观察显示情况;再设置成连续运行方式,观察按下执行键后的显示情况;最后,转动速度调节旋钮,观察脉冲和运行状态的显示情况。

(4) 单步操作运行。将步进电动机绕组与控制箱面板的输出端相连接,设置成手动单步运行方式,然后按执行键。

(5) 观察步进电动机电脉冲频率与转速关系。将控制系统置连续运行状态,按执行键,步进电动机连续运转后,转动速度调节旋钮,使频率升高,观察步进电动机转速的变化情况。

(6) 空载突跳频率的测定。步进电动机连续运转后,调节速度调节旋钮使频率,提高至某频率(自动指示当前频率)。按设置键,让步进电动机停转,再重新启动电动机(按执行键),观察电动机能否运行正常。如正常,则继续提高频率,直至电动机不失步启动的最高频率,则该频率为步进电动机的空载突跳频率, $f_{st} = \underline{\hspace{2cm}}$ Hz。

(7) 空载最高连续工作频率的测定。步进电动机空载连续运转后,缓慢调节速度调节旋钮使频率提高,仔细观察电动机是否失步。如不失步,再缓慢提高频率,直至电动机能连续运转的最高频率,则该频率为步进电动机空载最高连续工作频率, $f_0 = \underline{\hspace{2cm}}$ Hz。

(8) 通过网络查看步进电动机的有关知识。



图 3-6 三相反应式步进电动机

3. 评分参考

步进电动机的运行和基本特性的测定评分参考如表 3-1 所示。

表 3-1 步进电动机的运行和基本特性的测定评分参考

序号	训练内容	评分参考	配分	得分
1	技能训练的准备	对技能训练的内容较为熟悉	10	
2	仪器、仪表的使用	正确使用万用表、转速表、实验台等设备	10	
3	电动机的接线	实验线路接线正确	20	
4	控制系统的运行操作	操作规范,通电运行成功,观察结果正确	20	
5	基本特性的测定	操作规范,数据测量正确	30	
6	技能训练的结束工作	规范、高标准地做好训练结束工作	10	
指导教师签名		日期	总评成绩	
备注:发生重大责任事故、严重违反教学纪律者得0分			学生姓名	



问题思考

- (1) 步进电动机的作用是什么？其转速是由哪些因素决定的？
- (2) 什么是步进电动机的步距角？为什么说一台三相步进电动机可以有两个步距角？
- (3) 什么是单三拍、双三拍和六拍工作方式？
- (4) 步进电动机的启动频率和运行频率与负载大小有什么关系？
- (5) 步进电动机的驱动电路包括哪些部分？

任务 3.2 认识伺服电动机



任务目标

- (1) 了解伺服电动机的特点、用途和分类。
- (2) 知道伺服电动机的外形、内部结构和各部件的作用。
- (3) 知道伺服电动机的基本工作原理和主要运行性能。
- (4) 学会对交流伺服电动机进行简单的操作。



相关知识

伺服电动机也称执行电动机，在自动控制系统中作为执行元件，其作用是将输入的控制电压信号转换为转轴的角速度或角位移输出。伺服电动机与一般的旋转电动机不一样，旋转电动机侧重于机、电能量的变换，而伺服电动机侧重于控制特性的高精度和快响应。

自动控制系统对伺服电动机有以下几方面的基本要求：

- (1) 尽可能高的快速响应性能。即转子的转动惯量小，转矩/惯量比大。
- (2) 良好的低速平稳性，无“自转现象”。即控制电压为零时，电动机迅速自动停转。
- (3) 尽可能大的调速范围。
- (4) 具有线性的机械特性和调节特性。
- (5) 过载能力强。

伺服电动机主要有交流伺服电动机和直流伺服电动机两大类。

1. 交流伺服电动机

交流伺服电动机实质上就是一种微型交流异步电动机。它的功率一般在 100W 以下。图 3-7 所示是一款交流伺服电动机的外形。

1) 交流伺服电动机的结构

交流伺服电动机的定子结构与电容运转单相异步电动机相似。如图 3-8 所示，交流伺服电动机的定子圆周上装有两个互差 90° 电角度的绕组，一个叫励磁绕组 f ，另一个叫控制绕组 C 。励磁绕组与交流电源 U_i 相连，控制绕组接输入信号电压 U_c ，所以交流伺服电动机又称两相伺服电动机。



图 3-7 一款交流伺服电动机

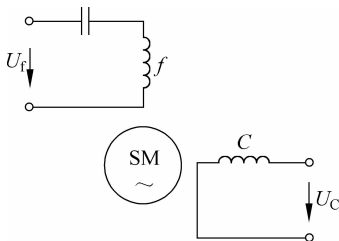


图 3-8 交流伺服电动机原理图

交流伺服电动机的转子通常做成鼠笼式,但转子的电阻比一般异步电动机大得多。为了使伺服电动机输入信号能有快速的反应,必须尽量减小转子的转动惯量,所以转子一般做得细而长。

2) 交流伺服电动机的工作原理

交流伺服电动机的工作原理和电容运转单相异步电动机相似。在没有控制信号时,定子内只有励磁绕组产生的脉动磁场,转子上没有电磁转矩作用而静止不动。当有控制电压时,定子就在气隙中产生一个旋转磁场,并产生电磁转矩,使转子沿旋转磁场的方向旋转。

3) 交流伺服电动机的控制方法

由于电磁转矩的大小决定于气隙磁场的每极磁通量和转子电流的大小及相位,即决定于控制电压 U_c 的大小和相位,所以采用下列三种方法来控制电动机,使之启动、旋转、调速和停止。

(1) 幅值控制。

幅值控制即保持控制电压 U_c 的相位角不变,仅仅改变其幅值大小。

(2) 相位控制。

相位控制即保持控制电压 U_c 的幅值不变,仅仅改变其相位。

(3) 幅相控制。

幅相控制即同时改变控制电压 U_c 的幅值和相位。

4) 交流伺服电动机的特点与应用

交流伺服电动机与单相异步电动机相比,有三个显著特点。

(1) 启动转矩大: 由于转子电阻很大,定子加控制电压,转子可立即启动运转。

(2) 运行范围宽: 在转差率 $0 \sim 1$ 的范围内,伺服电动机都能稳定运转。

(3) 无自转现象: 正常运转的伺服电动机只要失去控制电压,电动机立即停止运转。

交流伺服电动机具有无刷、高可靠性、运行平稳、噪声小、散热好和转动惯量小等优点,缺点是控制特性非线性,转子电阻大,造成损耗大、效率低。交流伺服电动机只适用于 $0.5 \sim 100\text{W}$ 的小功率控制系统中。

2. 直流伺服电动机

直流伺服电动机实质上就是一台他励式直流电动机,其外形如图 3-9 所示,其结构、



图 3-9 一款直流伺服电动机

原理与一般直流电动机基本相同。

(1) 直流伺服电动机的控制方式。

直流伺服电动机有他励式和永磁式两种,其转速由信号电压控制。信号电压若加在电枢绕组两端,称为电枢控制;若加在励磁绕组两端,称为磁极控制。由于电枢控制的直流伺服电动机的机械特性线性度较好,不需换向极;且由于电枢回路电感较小,因而电磁惯性较小,故其响应速度比磁极控制式快,所以在工程上多采用电枢控制。

(2) 直流伺服电动机的机械特性。

电枢控制式直流伺服电动机的接线原理如图 3-10(a)所示。保持 U_f 为恒值,改变电枢电压,可得到一组平行的机械特性曲线。直流伺服电动机的机械特性如图 3-10(b)所示。

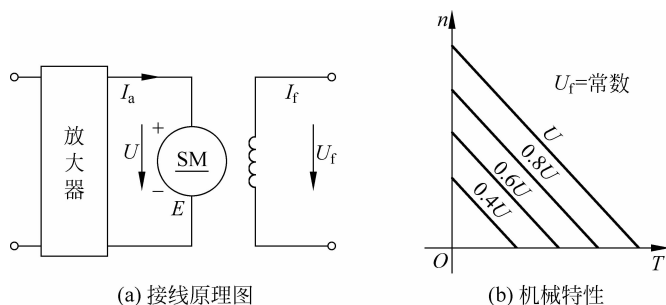


图 3-10 电枢控制式直流伺服电动机的接线原理图及机械特性

(3) 直流伺服电动机的特点与应用。

直流伺服电动机的优点是具有线性的机械特性,启动转矩大,调速范围宽广而平滑,无自转现象;且与同容量的交流伺服电动机比较,体积小,质量轻。其缺点是转动惯量大,灵敏度差;转速波动大,低速运转不平稳;换向火花大,寿命短,对无线电干扰大。

为了适应自动控制系统对伺服电动机快速响应性越来越高的要求,近年来,在传统直流伺服电动机的基础上,发展了低惯量的无槽电枢、空心杯电枢、印制绕组电枢和无刷直流伺服电动机。

低惯量直流伺服电动机多用于高精度的自动控制系统及测量装置等设备中,如电视摄像机、录音机、X-Y 函数记录仪及机床控制系统等方面。这类电动机是直流伺服电动机的发展方向,应用日趋广泛,因此在国内外引起许多使用和制造单位的重视。

直流伺服电动机一般用在功率稍大的系统中,其输出功率约为 $1 \sim 600\text{W}$ 。目前国内生产的直流伺服电动机主要有 SY 和 SZ 两个系列,SY 系列为永磁式结构,SZ 为点磁式结构。

3. 伺服电动机的应用

伺服电动机应用的领域很广。只要有动力源的,对精度有要求的场合,都可能使用

到伺服电动机,如机床、印刷设备、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相对较高的设备。



技能训练

1. 准备工作

(1) 工具与仪表: 交流电压表两块、转速表一块。

(2) 设备与材料: 三相交流调压电源一套; 交流伺服电动机、变压器(127/220V)、调压器(220/0~250V)各一台。

2. 训练内容

本训练内容是对交流伺服电动机进行简单的操作使用。

(1) 连接交流伺服电动机工作线路。交流伺服电动机工作电路如图 3-11 所示。参照工作电路,连接好如图 3-12 所示的线路。交流电压表选用 300V 量程。将交流电源输出电压调至最小,控制绕组调压器输出调至最小。

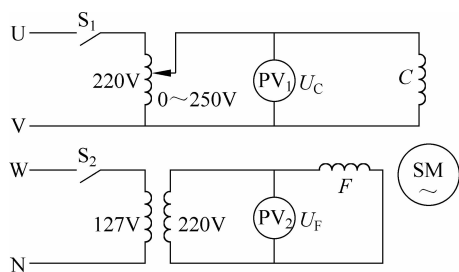


图 3-11 交流伺服电动机的工作电路

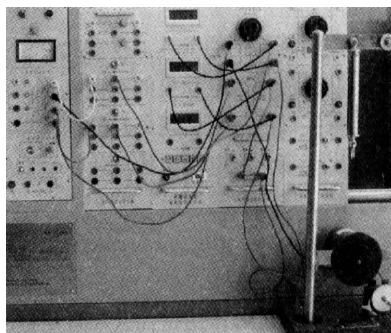


图 3-12 交流伺服电动机的实训线路

(2) 接通励磁电源开关 S_2 , 升高交流电源输出电压, 使励磁电压 $U_F = 220V$; 再接通控制电源开关 S_1 , 慢慢升高控制电压 U_C , 注意观察并记录交流伺服电动机的启动电压, $U_{st} = \underline{\hspace{2cm}} V$ 。

(3) 继续升高交流伺服电动机的控制电压和转速, 直至 $U_C = 220V$ 。

(4) 逐渐减小控制电压, 使电动机减速。用手持式转速表测量交流伺服电动机对应于不同控制电压时的转速, 记录对应的电压和转速, 测取 7、8 组数据, 记录于表 3-2 中。

表 3-2 交流伺服电动机的调速特性记录表

U_C / V								
$n / (r/min)$								

(5) 测试结果经指导教师确认后, 依次断开开关 S_2 和 S_1 。

(6) 通过网络查看伺服电动机的介绍。

3. 注意事项

(1) 控制绕组的调压器接到 U、V 相, 引入线电压 U_{UV} ; 励磁绕组的变压器接到 W 相, 引入相电压 U_W , 这样才能使 U_F 与 U_C 相位差 90° 。

(2) 测试过程中, 注意变压器和电动机的电压不能调得过高, 以防发生事故。

4. 评分参考

交流伺服电动机的操作使用评分参考如表 3-3 所示。

表 3-3 交流伺服电动机的操作使用评分参考

序号	训练内容	评分参考	配分	得分
1	技能训练的准备	对技能训练的内容较为熟悉	10	
2	仪器、仪表的使用	正确使用万用表、转速表、实验台等设备	10	
3	电动机的接线	实验线路接线正确	30	
4	电动机的操作	操作规范, 通电运行一次成功	20	
5	测调速特性 $n=f(U)$	操作规范, 数据测量正确	20	
6	技能训练的结束工作	规范、高标准地做好训练结束工作	10	
指导教师签名		日期	总评成绩	
备注: 发生重大责任事故、严重违反教学纪律者得 0 分			学生姓名	



问题思考

- (1) 伺服电动机的作用是什么? 自动控制系统对伺服电动机有什么要求?
- (2) 直流伺服电动机有哪几种控制方式? 一般采用哪种控制方式?
- (3) 技能训练中, 交流伺服电动机是如何获得相位差 90° 电角度的两相对称交流电的? 其原理是什么?



延伸阅读

伺服电动机的优点

伺服电动机和其他电动机相比, 具有如下优点。

- (1) 精度高: 实现了位置、速度和力矩的闭环控制, 克服了步进电动机失步的问题。
 - (2) 高速性能好: 一般额定转速能达到 $2000 \sim 3000 \text{ r/min}$ 。
 - (3) 适应性强: 抗过载能力强, 能承受 3 倍于额定转矩的负载, 对有瞬间负载波动和要求快速启动的场合特别适用。
 - (4) 稳定度高: 低速运行平稳, 低速运行时不会产生类似于步进电动机的步进运行现象, 适用于有高速响应要求的场合。
 - (5) 及时性强: 电动机加、减速的动态响应时间短, 一般在几十毫秒之内。
 - (6) 舒适性好: 发热和噪音明显降低。
- 简而言之, 普通电动机断电后, 因惯性会再转动一段时间后停止, 而伺服电动机和步进电动机得电就转, 失电就停, 反应极快。