

第 2 章已经从机器人的结构方面简要地介绍了轮式运动机构和履带式运动结构的外观、减速器的作用等与机器人结构密切相关的部件特性,还简要介绍了直流有刷电动机和无刷电动机的内部结构。本章将继续介绍相关知识,从驱动结构、驱动方式、驱动电路和机器人基本控制算法上进行说明。

5.1 机器人的运动机构

机器人的运动机构指承载机器人运动的底盘中内置的减速器、驱动机器人运动和动作的电动机等执行机构,本节将在第 2 章简要介绍功能和结构的基础之上,更进一步介绍相关结构特点。

5.1.1 轮式运动机构

轮式运动机构是指各类采用车轮作为外在运动基础驱动结构的机构,主要指用于固定轮的车轴、提升驱动力的减速器和输出动力的各类电动机等。本节主要介绍轮式机器人所应用的减速器等机构,即机器人底盘之内的机构。由于底盘结构与机器人的工作形式和工作环境密切相关,因此,轮式运动结构也各不相同,如图 5.1 所示。



图 5.1 不同类型的轮式机器人底盘结构和减速电动机

图 5.1(a)是一款常见的简易四轮小车的底盘,该底盘采用有机玻璃装配,配置了四个如图 5.1(d)所示的直流减速电动机(电动机与减速器封装所构成的设备可简称为减速电动机)。该减速电动机由普通直流有刷电动机和塑料减速器组成,但其组装精度、结构精度和输出转矩都很低,仅适用于循迹小车等对运行机构要求不高的场合,且该减速电动机所使用的塑料轴承重有限,难以组成中大型运动平台和承重平台。

图 5.1(b)是一款使用麦克纳姆轮构成的三轮小车底盘,图 5.1(c)是一款可实现摄影摄像设备承载功能的、带有独立悬挂的小车底盘,这些底盘使用了由全金属齿轮和无刷电动机组成的行星减速电动机,如图 5.1(e)所示。这类电动机的减速器体积小、质量轻、承载能力高、使用寿命长、运转平稳且噪声低,即使配合一般直流有刷电动机,也能够输出较大的转矩。市售的行星减速电动机一般还可以方便地配合编码器使用,实现转角测量功能。这类电动机可很容易地实现千瓦以上的输出功率和较大的承载重量,适合制作中大型运动平台。图 5.1(f)的行星减速电动机中,使用了直流无刷电动机替代了直流有刷电动机,可实现更精准的电动机控制。

5.1.2 履带式运动结构

履带式运动结构相较于轮式运动机构,与地面接触面积增大,故摩擦力增大,能够提供更好的路面适应性,但由于结构复杂度增加,因而对动力的要求也有所增加。如图 5.2 所示为两种履带式底盘。

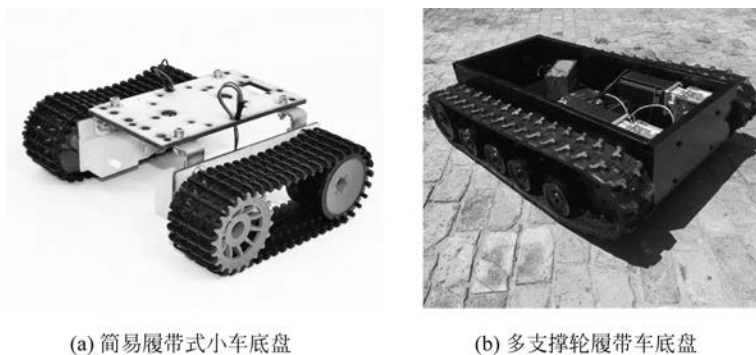


图 5.2 不同类型的履带式机器人底盘结构

如图 5.2(a)所示结构采用了与图 5.1(a)相同的有机玻璃板作为支撑材料、相同的直流电动机和塑料减速器作为驱动结构,带动前方的主动轮旋转进而拖动履带滚动,实现驱动功能。但受到结构限制,其缺点和应用领域与简易四轮小车基本一致。如图 5.2(b)所示结构配置了略大的金属减速电动机和金属支撑结构,具有较大输出功率和较大的承载重量,适合制作中大型运动平台。

常规的中小型机器人的运动结构一般都不配置转向轮等独立的转向机构,因此机器人在运动过程中,只能通过左右两侧轮或履带的差速运动来实现转向。这种转向方法的优点在于可原地转向且转弯半径小,但有受左右两侧摩擦力的影响较大、无法通过两侧差速直接估算转向角度的明显缺点。因此,机器人在运动时,必须通过传感器检测转向状态,以达到实时矫正左右差速、调整机器人姿态的目的。

5.1.3 直流有刷电动机

直流有刷电动机和直流无刷电动机的相关特性在第2章中已经做过简要介绍,本节将就选型做简要补充,并着重介绍其驱动与控制方法。这里参考东方马达公司的技术文档,简要说明直流有刷电动机的选型计算。该计算方法对无刷电动机、步进电动机和交流电动机同样具有适用性。

(1) 确认电动机规格。根据装置的规格确认电动机的要求规格,其基本项目包括:运行功能的确认、驱动时间(运行模式)、分辨率、停止精度、保持位置、电源电压及频率、使用环境。

(2) 确定驱动机构。代表性的驱动机构包括简单的旋转体、滚珠螺杆、皮带轮和齿条齿轮等。由此来确定负载计算必需的尺寸、质量、系数等。其基本项目包括:搬运物的尺寸与质量(或密度)、各零件的尺寸与质量(或密度)、可动零件滑动部的摩擦系数等。

(3) 负载计算。计算电动机输出轴上的负载转矩及转动惯量两部分;滚珠螺杆、滑轮、皮带和齿条等驱动机构的负载转矩的计算方法如下。

① 螺杆驱动的负载转矩计算,如图5.3(a)所示。

$$T_L = \left(\frac{FP_B}{2\pi\eta} + \frac{\mu_0 F_0 P_B}{2\pi} \right) \frac{1}{i} \quad (5.1)$$

$$F = F_A + mg(\sin\theta + \mu\cos\theta) \quad (5.2)$$

② 滑轮驱动的负载转矩计算,如图5.3(b)所示。

$$\begin{aligned} T_L &= \frac{\mu F_A + mg}{2\pi} \frac{\pi D}{i} \\ &= \frac{(\mu F_A + mg)D}{2 \cdot i} \end{aligned} \quad (5.3)$$

③ 皮带驱动和齿轮齿条驱动的负载转矩计算,如图5.3(c)所示。

$$T_L = \frac{F}{2\pi\eta} \frac{\pi D}{i} = \frac{FD}{2\eta i} \quad (5.4)$$

$$F = F_A + mg(\sin\theta + \mu\cos\theta) \quad (5.5)$$

④ 实测法的负载转矩计算,如图5.3(d)所示。

$$T_L = \frac{F_B D}{2} \quad (5.6)$$

公式中的相关参数定义如下。

F : 运行方向负载。

F_0 : 预负载($\approx \frac{1}{3}F$)。

μ_0 : 预压螺母的内部摩擦系数(0.1~0.3)。

η : 效率(0.85~0.95)。

i : 减速比(机构的减速比)。

P_B : 滚珠螺杆的导程。

F_A : 外力。

F_B : 主轴开始旋转时的作用力($F_B = \text{弹簧秤值} \times g$)。

m : 工作台及工作物的总质量。

μ : 滑动面的摩擦系数。

θ : 倾斜角度。

D : 最终段滑轮直径。

g : 重力加速度(一般取 9.807)。

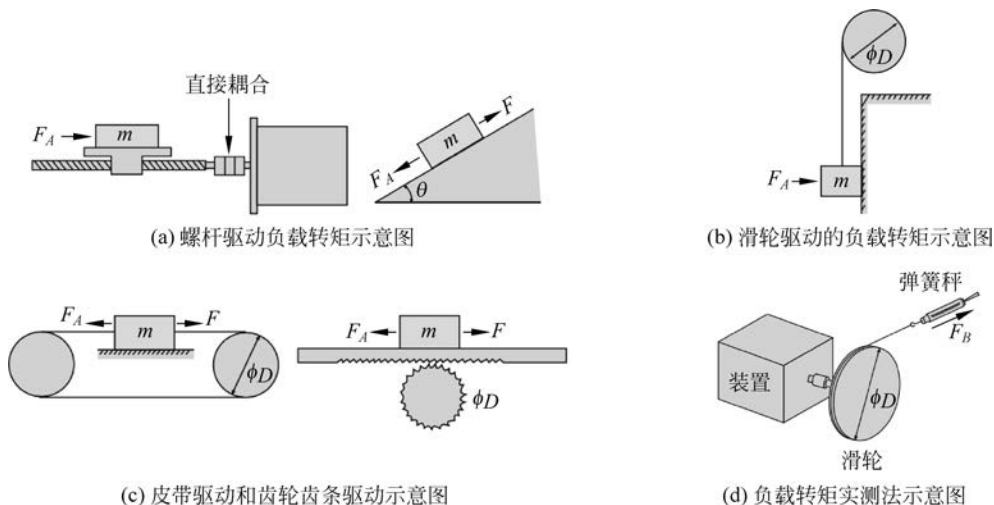


图 5.3 负载转矩的计算示意图

圆柱和角柱等不同形状的旋转物体的转动惯量计算如下。

① 圆柱的转动惯量计算,如图 5.4(a)所示。

$$J_x = \frac{1}{8}mD_1^2 = \frac{\pi}{32}\rho LD_1^4 \quad (5.7)$$

$$J_y = \frac{1}{4}m\left(\frac{D_1^2}{4} + \frac{L^2}{3}\right) \quad (5.8)$$

② 中空圆柱的转动惯量计算,如图 5.4(b)所示。

$$J_x = \frac{1}{8}m(D_1^2 + D_2^2) = \frac{\pi}{32}\rho L(D_1^4 - D_2^4) \quad (5.9)$$

$$J_y = \frac{1}{4}m\left(\frac{D_1^2 + D_2^2}{4} + \frac{L^2}{3}\right) \quad (5.10)$$

③ 不通过重心轴的长方体的转动惯量计算,其中, l 是 x 轴与 x_0 轴的距离,如图 5.4(c)所示。

$$J_x = J_{x_0} + ml^2 = \frac{1}{12}m(A^2 + B^2 + 12l^2) \quad (5.11)$$

④ 角柱的转动惯量计算,如图 5.4(d)所示。

$$J_x = \frac{1}{12}m(A^2 + B^2) = \frac{1}{12}\rho ABC(A^2 + B^2) \quad (5.12)$$

$$J_y = \frac{1}{12}m(B^2 + C^2) = \frac{1}{12}\rho ABC(B^2 + C^2) \quad (5.13)$$

公式中的相关参数定义如下。

密度方面,铁: $\rho = 7.9 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$; 不锈钢(SUS304): $\rho = 8.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$; 铝: $\rho =$

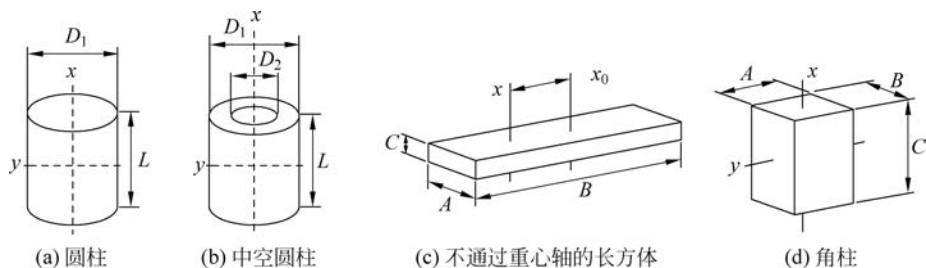


图 5.4 转动惯量的计算示意图

$2.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$; 黄铜: $\rho = 8.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$; 尼龙: $\rho = 1.1 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。

J_x : x 轴相关转动惯量。

J_y : y 轴相关转动惯量。

J_{x0} : x_0 轴(通过重心的轴)相关转动惯量。

m : 质量。

D_1 : 外径。

D_2 : 内径。

ρ : 密度。

L : 长度。

(4) 选择电动机类型。包括直流有刷电动机、直流无刷电动机、步进电动机等,或各类交流电动机,电动机类型主要由供电形式和驱动系统形式等因素决定。

(5) 选用计算。从机械强度、加速时间、加速转矩等各方面,确认电动机和减速器的规格是否符合所有要求规格,然后再确定方案。例如,为了实现传送带运送某物品的工作流程,计算应选用的减速电动机的参数,示例如图 5.5 所示。

其中,传送带和物品的主要参数,即系统需求和现有参数如下。

皮带的速度: $v_L = 0.05 \sim 1 \text{ m/s}$;

电动机的电源单相: 100 V 。

滚筒直径: $D = 0.1 \text{ m}$ 。

滚筒质量: $m_2 = 1 \text{ kg}$ 。

皮带及工作物的总质量: $m_1 = 7 \text{ kg}$ 。

外力: $F_A = 0 \text{ N}$ 。

滑动面的摩擦系数 $\mu = 0.3$ 。

皮带及滚筒的效率 $\eta = 0.9$ 。

首先,计算减速器输出轴的转速, N_G 为减速机轴转速:

$$N_G = \frac{60V_L}{\pi D} \quad (5.14)$$

再根据皮带的速度计算出滚筒的转速范围:

$$0.05 \text{ m/s} \cdots \frac{60 \times 0.05}{\pi \times 0.1} = 9.55 \text{ r/min (最低转速)}$$

$$1 \text{ m/s} \cdots \frac{60 \times 1}{\pi \times 0.1} = 191 \text{ r/min (最高转速)}$$

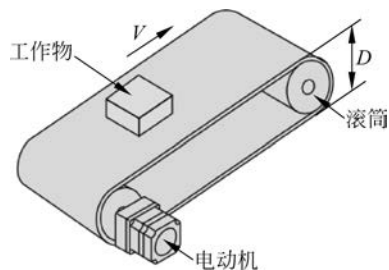


图 5.5 传送带运送某物品的工作流程

可见,在选择减速电动机时,应首先划定其输出范围能够覆盖 9.55~191。再计算传送带系统的转动惯量,皮带与工作物的转动惯量 J_{M1} 、单个滚筒的转动惯量 J_{M2} 分别为:

$$\begin{aligned} J_{m_1} &= m_1 \left(\frac{\pi D}{2\pi} \right)^2 \\ &= 7 \times \left(\frac{\pi \times 0.1}{2\pi} \right)^2 \\ &= 175 \times 10^{-4} \\ J_{m_2} &= \frac{1}{8} m_2 D^2 \\ &= \frac{1}{8} \times 1 \times 0.1^2 = 12.5 \times 10^{-4} \end{aligned}$$

则转动惯量 J_G 为:

$$J_G = J_{m_1} + 2J_{m_2} = 175 \times 10^{-4} + 12.5 \times 10^{-4} \times 2 = 200 \times 10^{-4}$$

计算滑动面摩擦力:

$$\begin{aligned} F &= F_A + mg(\sin\theta + \mu\cos\theta) \\ &= 0 + 7 \times 9.807(\sin 0^\circ + 0.3 \times \cos 0^\circ) = 20.6 \end{aligned}$$

计算负载转矩:

$$T_L = \frac{FD}{2\eta} = \frac{20.6 \times 0.1}{2 \times 0.9} = 1.15$$

一般工业情况下,安全系数 T_M/T_L 应在 1.5 以上, T_M 应满足: $T_M > 1.725$ 。

综合考虑上述参数,所选用减速电动机应满足以下条件:

- ① 转速范围覆盖要求范围,至少覆盖 9.55~191r/min。
- ② 转子转动惯量应大于理论计算,至少大于 $200 \times 10^{-4} \text{kg} \cdot \text{m}^2$ 。
- ③ 容许转矩大于 T_M ,至少大于 1.725N·m。

在选型时,除上述基本要求外,还应注意①和②一般选择超过覆盖范围区域 10%左右的即可,如某型电动机速度范围为 5.3~200r/min、转动惯量为 $225 \times 10^{-4} \text{kg} \cdot \text{m}^2$ 即可,而容许转矩则可进一步选择扩大范围,如选择 5.2N·m(4.5 倍)也较为合适,具体选型可根据厂家参数适当妥协。

5.1.4 直流无刷电动机

第 2 章中已经介绍过三相直流无刷电动机的基本机构和工作特性,本节将在该基础之上,进一步介绍电动机的控制方法,具体的实现电路则在电调电路中介绍。

传统的直流无刷电动机内部一般会内置用于检测转子位置的光电或磁电检测元件,如霍尔传感器等,以实现向驱动器发送电动机转动的位置信号的功能。以三相星形接线为例,电动机的结构如图 5.6(a)所示,接线结构如图 5.6(b)所示,霍尔传感器的输出信号如图 5.6(c)所示,无刷电动机的驱动方法如图 5.7 所示。

电动机线圈与开关管(一般选用 MOSFET)相连接,电源电路部分由 6 个 MOSFET 组成变频器,MOSFET 按照一定顺序交互重复开关,转换线圈中电流的方向,该过程如表 5.1 所示。

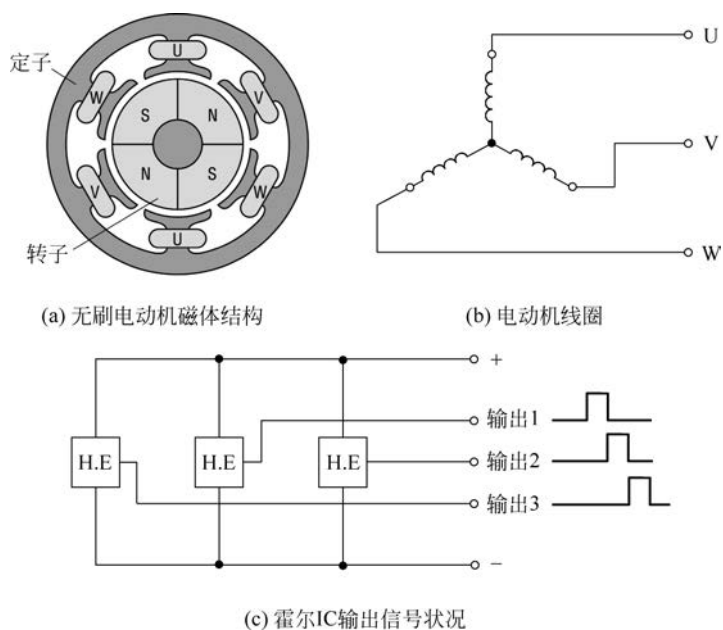


图 5.6 无刷电机构造和工作原理

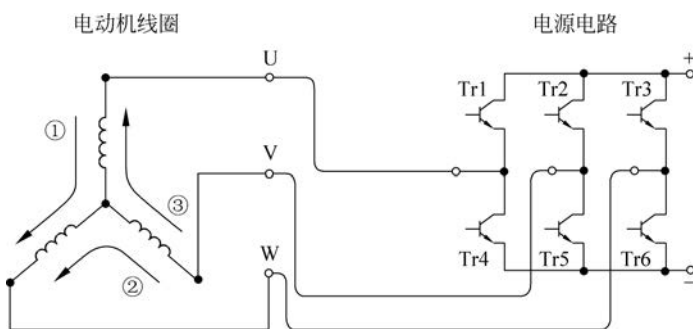


图 5.7 无刷电动机的基本驱动电路和部分步骤

表 5.1 晶体管的开关顺序(未标注为 OFF)

MOSFET\步骤	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬
Tr1	ON					ON	ON					ON	ON
Tr2		ON	ON					ON	ON				
Tr3				ON	ON					ON	ON		
Tr4			ON	ON					ON	ON			
Tr5					ON	ON					ON	ON	
Tr6	ON	ON					ON	ON					ON
U 相	N	—	S	S	—	N	N	—	S	S	—	N	N
V 相	—	N	N	—	S	S	—	N	N	—	S	S	—
W 相	S	S	—	N	N	—	S	S	—	N	N	—	S

如图 5.7 所示,以步骤①为例,此时 MOSFET Tr1 和 Tr6 为 ON 的导通状态,而其他 MOSFET 处于关闭状态,电流从“+”流经 Tr1、U 点、U 相线圈、W 相线圈、W 点,再经过 Tr6 到“-”。该过程中,U 相被励磁成 N 极,而 W 相则被励磁成 S 极,因此,转子将旋转 30° 。类似动作按照表 5.1 重复 12 次,即可以连续驱动转子旋转。可见,无刷电动机与有刷电动机相比,因为前者采用了电子换相技术,避免了电刷的机械磨损问题,也提升了控制精度。

更多的关于直流无刷电动机的资料,可以参考 Microchip 公司文档《AN885: 无刷直流 (BLDC)电动机基础》和 AN857: *Brushless DC Motor Control Made Easy*、NXP 公司文档 AZ104: *Hands-on Workshop: Motor Control Part 4-Brushless DC Motors Made Easy* 等,本书中不再赘述。

5.1.5 步进电动机

步进电动机是一种将电脉冲转换为角位移的特殊电动机,其旋转的控制精度远高于无刷电动机,但其旋转速度远低于无刷电动机。步进电动机转动时,其驱动器一般按照每次旋转一个固定角度的方式驱动,该角度称为步进角。步进角是步进电动机在设计上的最小旋转角度,体现为电动机以步进的形式旋转。通过控制电动机驱动信号的相位来控制电动机转动的速度和加速度,实现调速目的。步进电动机的外观和内部结构示意图如图 5.8 所示。

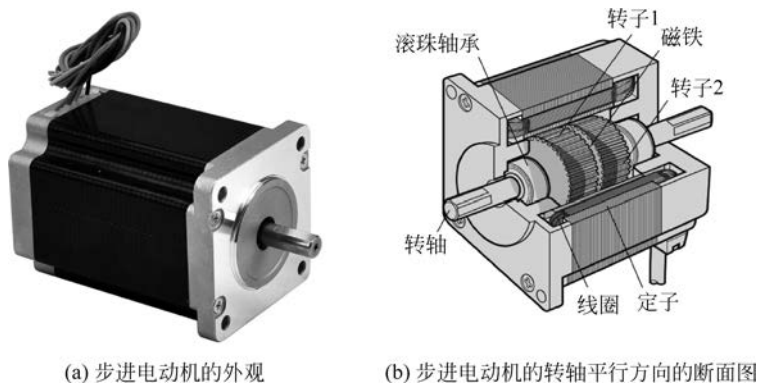


图 5.8 步进电动机的外观和内部结构示意图

步进电动机主要具有以下特性。

(1) 高精度。相比于无刷电动机或有刷电动机,步进电动机最大的特征是能够简单地实现高精度的定位控制。普通的永磁式步进电动机即可以实现 7.5° 步进角,而五相步进电动机的分辨率则可以达到 0.72° (全步进) 和 0.36° (半步级),且无累积误差,可以实现很高精度的定位。

(2) 定位保持。步进电动机在停止的状态下,仍具有励磁保持力,即使不依靠机械制动,依然可以保持停止的状态。

(3) 动作灵敏。步进电动机加速性能优越,可以做到瞬时启动、停止和正反转转换等动作。

(4) 不依赖传感器定位。步进电动机可以实现开环控制,不需要码盘和位置传感器,仅依靠输入的控制信号就可以实现速度和位置的精准控制,适合在短距离、高精度、高频度的控制场合中使用。

(5) 低速高转矩。步进电动机在低速和中速工作时,能够输出较大的转矩,高于同级别

的其他类型电动机。

(6) 高可靠。步进电动机故障率低、误动作少,使用步进电动机的系统的可靠性要高于其他“电动机+减速器+检测装置”的系统。

(7) 高输出功率。步进电动机可以在较小的体积下实现高转矩输出,优于同等体积的其他类型电动机。

(8) 无累积误差。步进电动机的精度一般是步距角的 $3\% \sim 5\%$,且由于其内部结构的关系,每一步所产生的误差不会累积到下一步中,不会产生累积误差。

(9) 较耐高温。步进电动机的温度过高会使电动机内部的磁性材料发生退磁问题,导致力矩下降甚至无法工作,因此不同类型的步进电动机的最高工作温度取决于其内部的磁性材料,一般磁性材料的退磁温度都高于 130°C ,部分甚至高于 200°C 。因此,步进电动机的工作温度普遍可以达到 80°C ,甚至更高。

(10) 高转速低转矩。步进电动机的转矩会随着转速的升高而降低,电动机各相绕组会形成反向电动势,电动机转速越快、频率越高,反向电动势越大,使相电流减小,导致力矩下降。

(11) 低转速。步进电动机只能工作在较低的转速,当转速超过一定程度时,会出现无法起动的问题。当电动机空载时,输入信号频率低于空载起动频率即可起动,但随着负载的增加,信号频率应降低方能使电动机起动。

常见的步进电动机主要有以下三种构造。

1. 永磁式步进电动机

永磁式步进电动机(Permanent Magnet Stepper Motor)一般为两相或者四相,转矩和体积较小,步进角一般为 7.5° 或 15° ,其具有成本低廉的特点。这种电动机定子采用冲压方式加工成爪形齿极,转子采用径向多极充磁的永磁磁钢。一般定子是线圈,转子是永磁铁。当定子线圈不加励磁电压时,保持转矩(Holding Torque,指步进电动机通电但没有转动时,定子锁住转子的力矩)为0,因此其转子惯性小、动态性好、响应快,且输出力矩大。

永磁步进电动机的定子和转子的轴向均分为两段,中间由隔磁片隔开,两段互相间叉开一个步距角,每段均由定子、转子以及套在定子上的一个环形绕组所组成。每段定子内孔圆周上的极片呈爪形作环形对称排列,外面并绕两套反向串联的环形绕组,定子两段环形磁钢同向同轴连接径向充磁,其结构如图5.9(a)所示。图5.9(b)绕组内部的白色爪片即为极片,用于将磁极延伸到定子环的内部。由于永磁式步进电动机主要用于计算机外设阀门控制、数控机床和自动绕线机等领域,无法应用在高精度角度输出控制领域,因此其具体工作过程不再详细介绍。

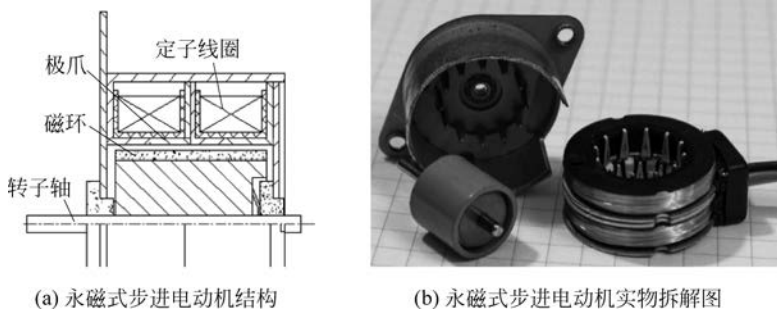


图 5.9 永磁式步进电动机结构和实物拆解图

2. 反应式步进电动机

反应式步进电动机(Reactive Stepper Motor)在步进电动机里属于比较传统的一类,步进角一般为 1.5° 。在电动机的转子上均匀分布着许多小齿,定子齿有三个励磁绕组,其几何轴线分别是与转子齿轴线错开的。电动机的位置和速度由导电次数(脉冲数)和频率成一对对应关系,而方向则是由导电顺序决定的。在市场上,一般以二、三、四、五相的反应式步进电动机为主。

3. 混合式步进电动机

混合式步进电动机(Hybrid Stepper Motor)结合了永磁式和反应式的优点,根据相数可以分为两相、三相和五相。其中,两相的步进角一般为 1.8° ,三相的步进角一般为 1.2° ,而五相的步进角一般为 0.72° 。

由于混合式步进电动机的转子本身具有磁性,在同样的定子电流下产生的转矩要大于反应式步进电动机,且其步进角通常也较小。因此,经济型数控机床等设备上大都是用混合式步进电动机进行驱动。但混合转子的结构较为复杂、转子惯量大,其快速性要低于反应式步进电动机。

混合式步进电动机的内部结构如图 5.8(b)所示,其转子由转子 1、转子 2 和永磁体构成。转子被轴向磁化,如转子 1 为 N 极时,转子 2 则为 S 极,转子的外圈一般由 50 个小齿构成,转子 1 和转子 2 的小齿于构造上互相错开了 $1/2$ 螺距。定子上拥有小齿状的磁极,磁极绕有线圈,线圈与对角位置磁极连通。通电后,磁极与对角线位置的磁极向转子方向产生相同的极性,称为一个相,即有 A 相和 B 相两个相位的步进电动机称为两相步进电动机,有 A 相、B 相、C 相、D 相和 E 相五个相位的步进电动机称为五相步进电动机,如图 5.10 所示。

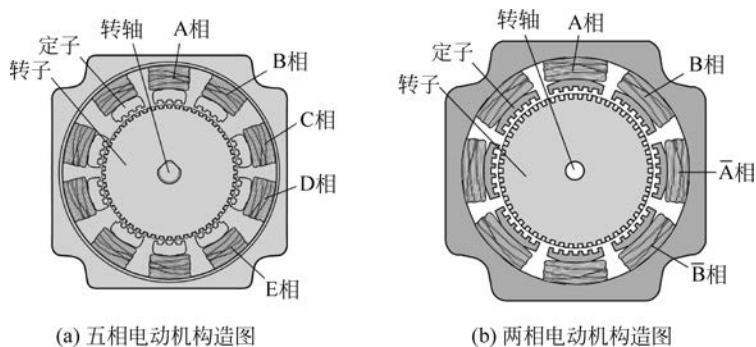


图 5.10 步进电动机的内部构造图(与转轴垂直方向的断面图)

以有 50 齿转子的五相步进电动机为例,其工作过程中转子与定子的齿位置关系如下。

(1) 将 A 相励磁。若磁极磁化成 S 极,则将与带有 N 极极性的转子 1 的小齿互相吸引,并与带有 S 极极性的转子 2 的小齿相斥,平衡后停止。此时,没有励磁的 B 相磁极的小齿和带有 S 极极性的转子 2 的小齿偏离 0.72° 。A 相励磁时的定子和转子小齿的位置关系如图 5.11(a)所示。

(2) 将 B 相励磁。由 A 相励磁转换为 B 相励磁时,B 相磁极磁化成 N 极,与拥有 S 极极性的转子 2 互相吸引,而与拥有 N 极极性的转子 1 相斥,如图 5.11(b)所示。

可见,将励磁相从 A 相励磁转换至 B 相励磁时,转子将旋转 0.72° 。随着励磁相位按照

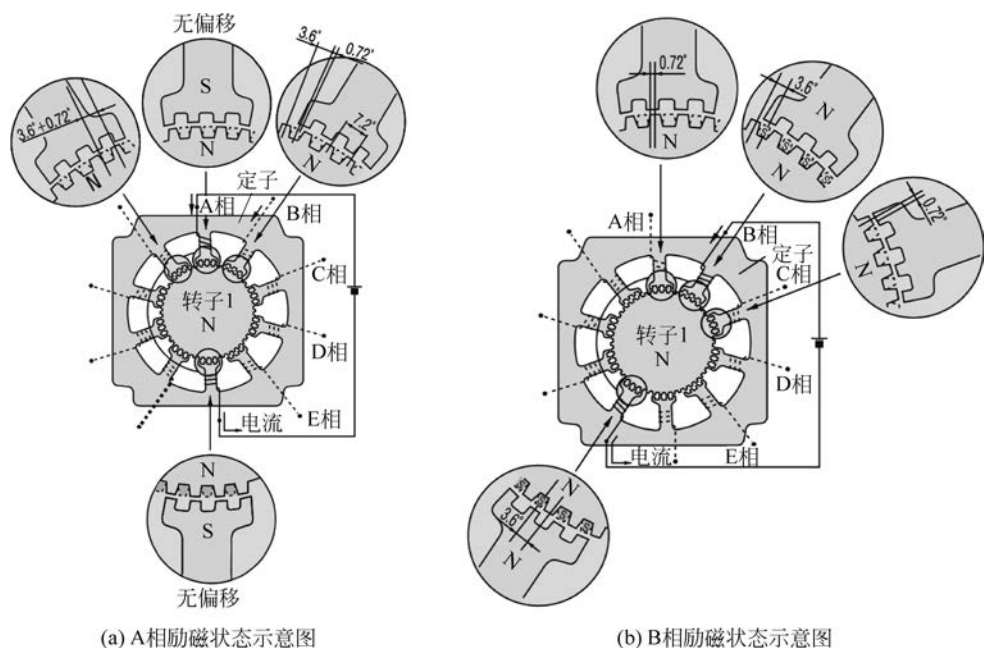


图 5.11 步进电动机的工作过程

A 相→B 相→C 相→D 相→E 相→A 相依次转换时,步进电动机会以每次 0.72° 的角度进行旋转。此外,希望做反方向旋转时,只需将励磁顺序倒转,依照 A 相→E 相→D 相→C 相→B 相→A 相励磁即可。 0.72° 的分辨率取决于定子和转子构造上的机械偏移量,所以不需要编码器等传感器即可正确定位。此外,就停止精度而言,只与定子与转子的加工精度、组装精度及线圈的直流电阻的不同等因素有关,可得 $\pm 3'$ (空载时, 0.05°) 的高停止精度。

步进电动机工作时,是由驱动控制器来进行励磁相转换的,而励磁相的转换定时则是由输入驱动器的脉冲信号所决定的。如图 5.12 所示的驱动方式是单相励磁的整步驱动方式,即步进电动机工作时只有一相处于通电励磁状态,其余相不工作。在实际运转时,为了有效利用线圈通常采用多相励磁的工作方式,如两相励磁甚至四相或五相同时励磁。以五角形接线的四相励磁的整步工作方式为例,采用与图 5.7 类似的五相桥式驱动电路驱动步进电动机,电路示意图略,各相的驱动信号如图 5.12(a)所示,每个周期的驱动信号共有 10 个节拍。而采用四-五相励磁方式则可以实现半步工作,其各相的驱动信号如图 5.12(b)所示。其中,每相的“+”表示连接电源,“0”表示该相悬空,“-”表示连接 GND。

多相励磁较单相励磁可以有效降低振动,提升电动机运行的平稳性,产生更大的转矩,不易产生失步,但多相励磁也会提升电动机的输入功率且提升了驱动信号的复杂度。

步进电动机的驱动信号周而复始变化,即可以驱动电动机转动,但步与步之间的转换受到供电的影响,以瞬变形式切换依然会产生抖动。为了保证电动机输出转矩均匀、平滑电动机转动,驱动控制上可以使用细分技术,即在转动的过程中,通过调整线圈中电流的大小,使各相产生的合力适应更精细的旋转角度。为了简化说明,以如图 5.13(a)所示的单转子两相步进电动机的 4 细分为例,如图 5.13(b)所示。其中, $\theta_1 = 22.5^\circ$ 、 $\theta_2 = 45^\circ$ 、 $\theta_3 = 67.5^\circ$,以此类推,如图 5.14(a)所示的是 B 相在 4 细分工作时的理论电流波形。可见随着电流的变化,

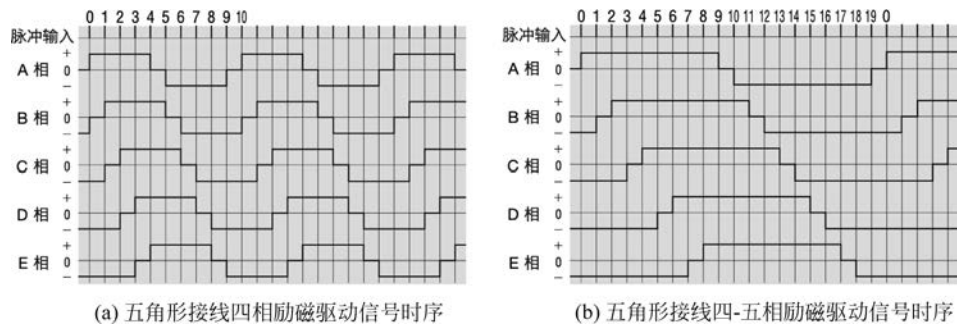


图 5.12 步进电动机的多相励磁驱动方法

电动机在完整的一周转动过程中,可以由不细分时的 8 次 45° 步进角跳变(半步)变为 16 次 22.5° 步进角跳变,因此电动机的抖动可以明显降低。进一步细化细分驱动电流,当驱动控制器达到 64 细分时,如图 5.14(b)所示的电流波形肉眼观测平滑,难以观测到阶梯变化,最大脉动电流值已经仅为最大电流的 2.45%,步进角仅为 0.88° 。

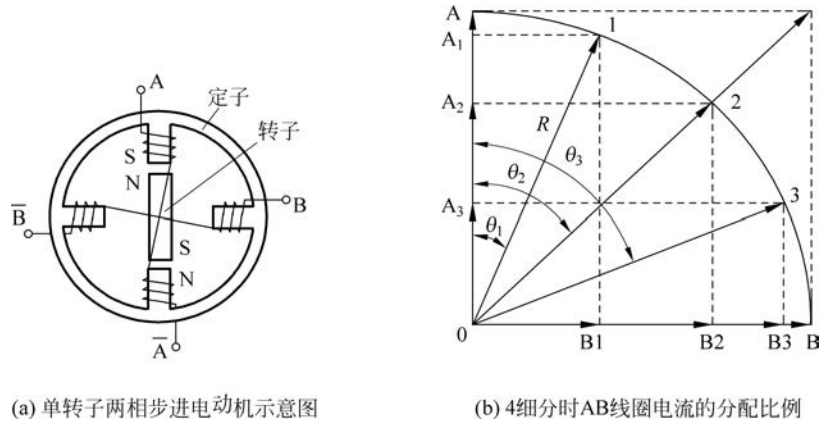


图 5.13 单转子两相步进电动机的 4 细分驱动方法

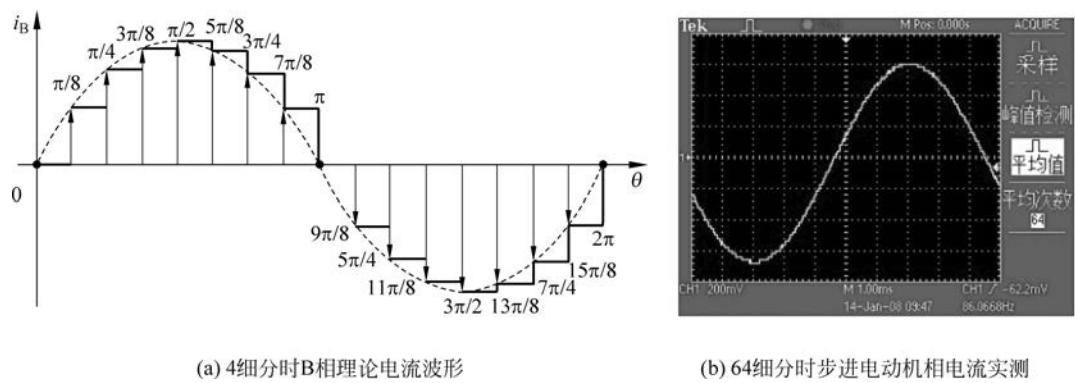


图 5.14 使用控制步进电动机时的电流波形

可见,细分技术一定程度上实现了与多相励磁类似的功能:提高了步进电动机的分辨率,减小了步进电动机的振荡且提高了输出转矩,但细分技术也有明显的缺点,细分越多,所

要计算的细分数据量就越大,占用处理器资源越多。

由上述步进电动机的工作原理,可以总结步进电动机的主要参数如下。

(1) 步距角。又称步进角,指控制系统每发出一个步进控制信号,步进电动机所转动的角度。步进角一般在步进电动机设计时就已经确定好的,属于步进电动机固有的步进角。如 86BYG350-98 型步进电动机的标定步距角为 $0.6^\circ/1.2^\circ$,表示全步工作时为 1.2° 、半步工作时为 0.6° 。特别需要注意的是,由于细分等控制驱动技术的使用,步进电动机往往可以以更为精细的步进角度进行作业。因此,步进电动机工作时的步距角和控制驱动设备密切相关,实际工作的步距角 θ_s 为:

$$\theta_s = \frac{360^\circ}{Z_r N} \quad (5.15)$$

其中, Z_r 为转子齿数, N 为一个周期的运行拍数。

(2) 相数。指电动机内部的线圈组数。目前常用的有两相、三相、四相和五相,电动机的相数不同,步距角也不同。通常相数越高、步距角越小,例如,两相步进电动机的步距角为 $0.9^\circ/1.8^\circ$ 、三相的步距角为 $0.75^\circ/1.5^\circ$,而五相的步距角则可以达到 $0.36^\circ/0.72^\circ$ 。可见,通过步进电动机自身的结构就可以实现很高的控制精度,而当使用了具有细分功能的驱动控制器之后,则可以突破固有线圈对于步距角的限制。

(3) 保持转矩。指步进电动机通电但没有转动时定子锁住转子的力矩,是步进电动机的重要参数之一,而且步进电动机在低速转动时的转矩也接近保持转矩。但步进电动机随着转速的升高而导致转矩的下降,功率也会发生变化,导致转矩难以衡量。因此厂商一般将步进电动机的保持转矩作为一项基本参数,人们提及步进电动机的转矩时一般也指保持转矩。

在命名方面,步进电动机主要有 28、42、57、86、110 和 130 等型号,其数字代表电动机底座直径。传统的步进电动机命名包括五部分:①机座号(电动机底直径);②电动机类型(BYG: 混合式,BC: 反应式,部分资料也有 H: 混合式、S 步进电动机的组合命名法);③相数;④电动机转子齿数;⑤形状与序号。例如,42BYG250FA 表示电动机底直径 42mm、混合式步进电动机、2 相、50 齿、方形,再如 57HS7630A4 表示电动机机身底座直径 57mm、混合式步进电动机、机身长度 76mm、3.0A 两相四线。但上述命名方法只能从外观和结构上表征步进电动机的参数,具体的工作参数,如相电流、保持转矩等依然需要查询其数据手册。

5.1.6 舵机

舵机是一种以输出特定角度为主的电动机,可以通过程序连续控制其转角。因此目前广泛地使用在航模、智能小车、机器人关节等需要精确控制角度且角度转动范围有一定限定的场合,比如控制航模飞机的各个舵面的角度等,这也是舵机一词的由来。舵机一般具有以下特点。

(1) 集成度高、体积紧凑。舵机将相关部件进行了高度集成和定制开发,其内部的减速器和控制、检测电路都经过了特殊的优化设计,相比于分立机构,大大减小了整体体积和重量。

(2) 外形标准、便于安装。常见的舵机外形比较标准,规格相同或规格相近的舵机在外形尺寸上往往相同,很容易进行互换,如某品牌的“高压 20kg 大扭力金属齿数字舵机”与另一品牌的“60kg 金属大扭力防水数字舵机”以及其他诸多数字舵机的尺寸几乎完全相同,在



使用中可以直接替换安装,无须调整机械机构。

(3) 输出力矩大、稳定性好。舵机内部将直流电动机输出的动力经过减速器后,可以有效提升输出力矩,实现数“百牛顿厘米”的扭力,舵机型号和参数中所标识的扭矩或扭力即为舵机在堵转时的输出力矩。

(4) 控制简单、便于和微处理器连接。舵机一般使用 PWM/PPM 信号进行控制,NE555 等常规电路和微处理器都可以简单地输出满足舵机控制要求的信号。

从结构方面分析,舵机可以看作一种直流电动机,但是该电动机与减速器、控制器和角度检测元件等部件进行了集成封装,成为一体化的机电设备。在使用时,只需要向舵机提供供电和控制信号就可以精确地实现角度的闭环控制功能。一般舵机的可旋转角度范围有 $0^{\circ}\sim 180^{\circ}$ 、 $0^{\circ}\sim 270^{\circ}$ 或 $0^{\circ}\sim 360^{\circ}$ 等多种。与直流电动机不同的是,直流电动机可以实现无限制的转动,而舵机只能在规定范围内转动,但舵机可以保持特定的转动角度。图 5.15 是舵机实物和剥离外壳后的内部结构照片。



图 5.15 舵机的外观图和内部结构示意图

舵机内部的角度检测元件通常是电位器,其优势在于可以直接根据转轴的角度输出确定的电压值,避免了计数所导致的累积误差问题。舵机在工作时,内部集成的控制器接收外界控制信号,并检测电位器输出的电压值,计算当前转轴的输出角度,控制电动机转动,调整转轴输出角度至外界控制信号的要求值,并实时检测外界负载对转轴角度的影响,回调并保持转轴输出角度。

如图 5.15(a)所示为两款舵机,除了 SG90 型 9g 舵机等微型舵机的内部减速器为塑料结构之外,大多数舵机内部都采用金属减速器。塑料减速器成本低、噪声小,但强度低,金属减速器强度高、噪声较大,但成本较高、重量较大。实现高强度、大扭力还需要外壳支撑结构的支持,舵机的外壳也分为塑料和金属材料两种,塑料外壳轻便,而金属外壳则能够为大扭力输出提供更强的支撑、为内部电动机和电路提供更好的散热功能。市场上,一般将使用塑料减速器和外壳的舵机简称为塑料舵机,使用金属减速器和外壳的舵机简称为金属舵机。

塑料舵机的齿轮和外壳在超出极限负载的条件下可能会出现崩齿、转轴发生断裂等问题,而金属舵机的齿轮和外壳则可以有效避免这些问题,但是却将超载负载转嫁到了电动机上,导致电动机发生损坏。可见,无论哪种结构都应 为舵机预留足够的负载余量,以免舵机故障损坏。

舵机一般具有三根连线,分别是 VCC 和 GND,以及一根控制信号线。舵机的控制器根

据控制信号控制电动机转动,检测电位器输出,实现闭环控制和稳定输出功能。传统舵机一般使用 PWM 作为控制信号,信号周期为 20ms,正脉宽为 0.5~2.5ms,线性对应舵机转动角度的 0°至最大角度。例如,使用 0°~180°舵机时,0.5ms 正脉宽控制信号对应舵机输出角度 0°、1.0ms→45°、1.5ms→90°、2.0ms→135°、2.5ms→180°。可见,舵机在正常供电时,外界只要通过控制信号线给舵机一个正确的 PWM 信号,舵机就能够按照该信号输出并保持相应的角度。但 20ms(50Hz)的更新速率过低,难以适应高性能的高速舵机。因此,目前部分高速舵机已经可以支持更高频率的 PWM 信号,如可以支持到 400Hz PWM 信号,其控制脉宽为 500~2500 μ s,具体使用时应遵循舵机的数据手册。

由上述舵机结构和工作原理可知,舵机的主要参数如下。

(1) 转速。舵机内部的电动机在额定电压下转速固定,经过减速器后的转轴转速也固定。舵机所标注的转速通常指舵机在无负载情况下转过 60°所需要的时间,一般舵机转速为 0.11s/60°~0.21s/60°。

(2) 转矩。部分舵机也标称为扭矩、扭力,其单位是 N·cm,测量方法为在舵盘上距舵机轴中心水平距离 1cm 处,舵机能够带动的物体重量。

(3) 额定电压。舵机厂商提供的转速和转矩等参数均与工作电压有关,如 Futaba S-9001 在 4.8V 时转矩为 38.22N·cm、速度为 0.22s/60°,在 6.0V 时转矩为 50.96N·cm、速度为 0.18s/60°。因此,在使用舵机时,应充分考虑舵机的供电电压,以及电压与转速和转矩的关系:适当提高电压可以提高舵机的转速和转矩,而电压不足时,舵机的转速和转矩则会有所降低。

(4) 尺寸、重量和材质。舵机的功率(速度×转矩)与舵机的尺寸比值可以理解为该舵机的功率密度,一般舵机的功率密度越大价格越高,因此舵机的外观重量等参数对于选择舵机也尤为重要。

市售如图 5.15(a)所示外观的舵机的转矩通常在 980N·cm 以下,更大转矩的舵机一般由分立的电动机、金属减速器和控制检测电路构成,外观可自行搜索。其使用方式与普通舵机相同,不再介绍。

5.2 机器人的驱动控制

5.2.1 PWM 驱动原理

前述内容已经多次提及 PWM 信号的产生和使用问题,本节将详细说明 PWM 的电动机控制原理。PWM(Pulse Width Modulation,脉冲宽度调制)是通过改变电动机电枢电压的接通与断开的占空比来实现转速控制的方法,其可以视为一种对模拟信号电平进行数字编码的方法。通过高分辨率计数器的使用,方波的占空比被调制用来对一个具体模拟信号的电平进行编码,使该电平仅在有(ON)和无(OFF)之间切换,而不存在其他电平状态,因此 PWM 信号仍是一种数字信号。

PWM 信号控制的电压或电流是以一种通(ON)或断(OFF)的重复脉冲序列被加到模拟负载上,接通时直流供电被加到负载上,断开时直流供电被断开。因此,可以将 PWM 看作一种控制能量运输的开关控制信号,以 PWM 对纯阻性负载的灯泡控制为例,来理解控制能量运输、调节设备工作功率更为简单。

假定某 PWM 信号的正脉冲宽度为 50%, 且正脉冲为接通, 即通与断信号的时间为 50% 和 50%, 电源电压为 $U(\text{V})$, 负载电阻为 $R(\Omega)$ 。忽略负载电阻与温度的关系, 有如下情况: ①若 PWM 开关控制信号的周期为 3600s, 则一个周期内灯泡点亮 1800s, 熄灭 1800s, 消耗的总的电能为: $\frac{1800 \times U^2}{R}(\text{J})$; ②保持整体工作时间仍为 3600s, 将 PWM 周期

改为 1s, 则 3600s 消耗的电能为: $\left(\frac{U^2}{R} \times 0.5 + 0 \times 0.5\right) \times 3600 = \frac{1800 \times U^2}{R}(\text{J})$, 灯泡则表现

出肉眼可见的亮灭变化, 但 3600s 内所消耗的总的电能相等; ③保持 3600s 的工作时间, 调整 PWM 周期为 1ms, 由计算可知, 其消耗的电能与 ①和 ②完全相同, 但从肉眼上已经观察不到亮灭变化, 反而是其亮度比正常工作时有所降低, 即功率有所降低, 但实现了连续工作。

可见, 当 PWM 信号频率足够高时, 受控设备则可以实现降低功率的工作模式, 工作功率则取决于 PWM 信号的接通时间。控制电动机的转速和转矩也可以使用 PWM, 改变电动机电枢电压接通和断开的的时间比(占空比)来控制电动机的特性, 按照一定的规律改变通、断电的时间, 即可使电动机的转速达到并保持一稳定值。对于直流电动机调速系统, 使用 PWM 进行调速是非常方便的。

最简单的 PWM 驱动装置是利用大功率晶体管的开关特性来调制固定电压的直流电源, 按一个固定的频率来控制大功率晶体管的接通和断开, 并根据需要改变一个周期内“接通”与“断开”时间的长短, 即通过改变直流伺服电动机电枢上电压的“占空比”来改变平均电压的高低, 从而控制电动机的转速。因此, 这种装置又称为“开关驱动装置”, 如图 5.16(a)所示是 PWM 控制直流有刷电动机电路的示意图。

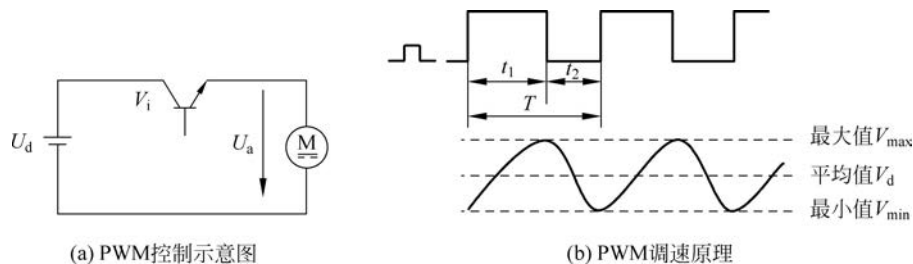


图 5.16 PWM 调速控制方法示意图

图 5.16(a)中, 三极管 V_i 以一定的频率重复地接通(导通)和断开(截止): 当三极管 V_i 导通时, 供电电源 U_d 通过三极管 V_i 施加到电动机两端, 电源向电动机提供能量。当三极管 V_i 截止时, 供电电源 U_d 停止向电动机提供能量。电动机的供电电压平均值 U_a 为

$$U_a = t_{\text{on}} U_s / T = \alpha U_d \quad (5.16)$$

其中, t_{on} 为 V_i 每次接通的时间, T 为 V_i 通断的工作周期, $\alpha = t_{\text{on}} / T$ 为占空比。可见, 改变占空比就相当于改变了电动机两端的电压平均值, 进而控制了电动机的转速。PWM 调速原理即面积等效原理如图 5.16(b)所示。

设电动机在电源电压 U_d 下的转速为 V_s , 在 PWM 信号的控制下, 与控制灯泡类似, 电动机的平均转速 V_d 为

$$V_d = V_s \alpha \quad (5.17)$$

因此, 可以将电动机的转速看作与电枢电压呈线性关系。但实际中并非线性关系, 会呈

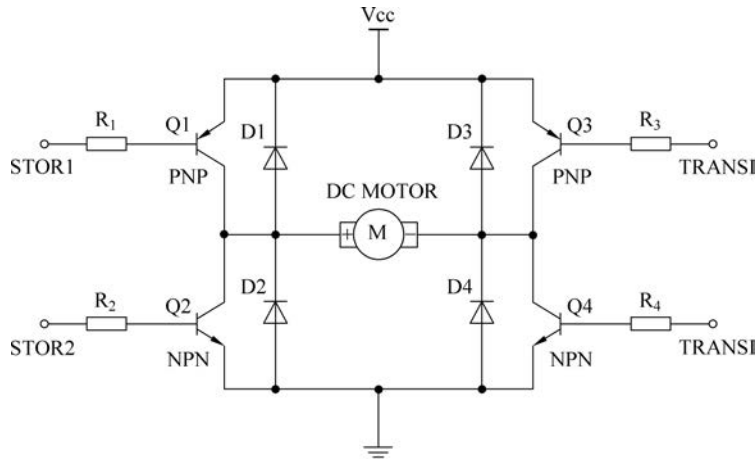
现出正比曲线关系,且与供电电压、PWM 频率、电动机类型、负载大小有密切关系。因此,在使用 PWM 控制直流有刷电动机、直流无刷电动机、交流电动机等各类电动机时,应使用编码器或定位装置以构成闭环控制系统,才能实现对电动机运动状态的精准控制。

5.2.2 H 桥驱动电路

如图 5.16(a)所示的电路尽管可以实现对直流有刷电动机的转速的控制,但该电路只能控制电动机向一个方向旋转的速度,无法通过换相的方式改变供电极性进而改变电动机的旋转方向,导致该电路在实际中难以应用在机器人领域。本节以使用 PWM 控制机器人底盘驱动电动机(带动车轮)为例,介绍最简单的 H 桥式驱动电路。

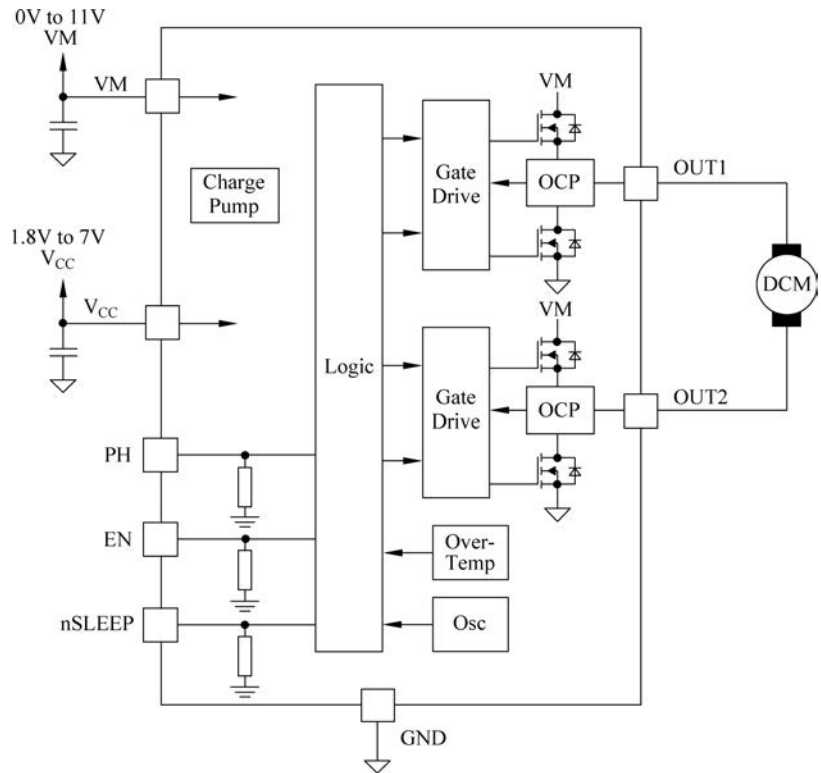
图 5.17(a)的示意图是在图 5.16(a)的非换相电路基础上进行的改进,在电路中增加了由四个可控的三极管构成的开关电路。对该电路进行定性分析可知,电路中 Q1 和 Q3 称为上桥臂,低电平时导通、高电平时关断;Q2 和 Q4 称为下桥臂,高电平时导通、低电平时关断,该电路有如下通用的组合状态:①电动机静止状态下,单独开启任何一个三极管都不产生任何效果;②当 Q1 和 Q3 同时导通、Q2 和 Q4 同时关断时,电动机 M 两端供电电压相同、不会发生旋转;③Q1 和 Q3 同时关断、Q2 和 Q4 同时导通时,电动机 M 也不会旋转;④Q1 和 Q2 同时导通会导致电源短路、Q3 和 Q4 同时导通也会导致电源短路,是禁止发生的异常状态。其中,组合状态 3 和 4 与特定的续流二极管(D1、D2、D3 或 D4)配合还能够实现对电动机 M 的短路制动功能。

由图 5.17(a)的工作特性可知,通过 PWM 信号控制 H 桥进而控制电动机有多种连接方式。如要求电动机电流由左流向右,则需要在 Q2 和 Q3 关断的同时,在 Q1 和 Q4 同时施加相位相反的 PWM 信号,或者 Q1 导通同时控制 Q4 施加 PWM 信号,或者控制 Q1 施加 PWM 信号同时 Q4 导通。但是在实际应用过程中,通过达林顿管(如 TIP122/127)或 MOSFET 等分立元件构建 H 桥电路,还应该增加逻辑控制、保护电路和功率器件驱动电路,以防止短路问题的发生。而使用 L298、DRV8838 等 H 桥集成芯片则可以解决逻辑控制和保护问题,图 5.17(b)为 DRV8838 内部功能结构图。



(a) PWM控制示意图

图 5.17 PWM 调速控制方法示意图



(b) DRV8838功能结构图

图 5.17 (续)

DRV8838 是 TI 公司生产的,用于摄像机、消费类产品、玩具和其他低电压或者电池供电的运动控制类产品的集成电动机驱动器。其内部的 H 桥由四个 N 沟道 MOSFET 构成,内阻仅 280mΩ,最大输出电流为 1.8A,电动机驱动电压为 0~11V,逻辑控制工作电压 1.8~7V。由图 5.17(b)可知,该集成驱动芯片除驱动供电 VM、逻辑供电 VCC 和共用的 GND、电动机输出 OUT1/OUT2 外,仅有 PH、EN 和 nSLEEP 三个控制信号输入。其中,PH 为相位输入控制,切换电动机供电极性;EN 为使能端,也是 PWM 信号输入端;nSLEEP 是休眠端,进入休眠状态后芯片工作电流最大仅 95nA。DRV8838 的控制逻辑如表 5.2 所示。

表 5.2 DRV8838 的控制逻辑

nSLEEP	PH	EN	OUT1	OUT2	电动机执行功能
0	X	X	Z	Z	休眠
1	X	0	L	L	制动
1	1	1	L	H	反转
1	0	1	H	L	正转

DRV8838 除了具有逻辑控制和 MOSFET 驱动功能外,内部还具有电压电流保护功能,包括:①VCC 欠压锁定功能,一旦逻辑控制电路的供电电压 VCC 低于阈值 UVLO(下降至 1.7V),H 桥中所有的 MOSFET 将关断锁定,VCC 达到 UVLO(上升至 1.8V)后,恢复正常工作;②过电流保护功能,芯片监控内部所有 MOSFET 的电流。当电流超过 I_{OCP}

(最低 1.9A、最高 3.5A)的时间达到 t_{DEG} ($1\mu\text{s}$)后,H 桥中所有的 MOSFET 将关断锁定,芯片将自动重试测试电流,当电流小于 I_{OCP} 的时间达到 t_{RETRY} (1ms)后,恢复正常工作;③过温保护功能,当芯片内核温度高于 T_j 时,H 桥中所有的 MOSFET 将关断锁定,内核温度低于 T_j 时恢复正常工作。

而 L298 内部由于采用了大功率三极管作为开关器件,因此发热也相对严重。此外,L298 内置了两个 H 桥电路,还具有最大供电电压 46V,最大工作大电流 4A,支持外接采样电阻设置过电流保护点等特性,但是 L298 内部没有设置续流二极管,用户在使用时应自行添加,以免烧毁功率器件。

L298 除了基本的驱动供电 VS、逻辑供电 VSS 和共用的 GND 之外,还包括控制 A 端 H 桥的 IN1、IN2 和 ENA(INH1)、电动机输出 OUT1 和 OUT2,控制 B 端 H 桥的 IN3、IN4 和 ENB(INH2)、电动机输出 OUT3 和 OUT4。参考 L298 数据手册中结构图,以其中的 A 端 H 桥为例,IN1 和 IN2 同为高电平时,上桥臂导通,OUT1 和 OUT2 两端无电压差,电动机不工作;IN1 和 IN2 同为低电平时,下桥臂导通,OUT1 和 OUT2 两端无电压差,电动机也不工作;只有在 IN1 和 IN2 输入不同电平时,OUT1 和 OUT2 两端才会出现电压差 VS,电动机才能旋转。

使用 L298 控制电动机调速时,与 DRV8838 相似,通过在 ENA 或者 ENB 端输入 PWM 信号,即可同步控制对向的两个三极管的开关。

在使用 PWM 信号控制各类 H 桥电路时,除了电平匹配之外,还应注意 H 桥中的功率器件的工作频率范围。在不考虑电动机型号的情况下,使用三极管作为功率器件的 H 桥的 PWM 频率可以选择几百赫至几十千赫,而使用 MOSFET 作为功率器件的 H 桥的 PWM 频率则可以最高至几兆赫。

5.2.3 电调电路

直流无刷电动机驱动过程较为复杂,需要实时检测转子的位置并快速切换 MOSFET 的开关状态。如果由机器人系统中的微处理器执行该工作,会产生非常频繁的中断事件,影响机器人系统其他任务的实时性,也会增大系统的程序的复杂度。因此,在航模和机器人领域往往不会使用系统的微处理器直接控制直流无刷电动机,而是增加一个新的微处理器,与用于直流无刷电动机驱动的 MOSFET 功率器件、检测电路、驱动电路、电源处理电路和其他电路封装在同一个模块内,对外只保留电源和控制信号的输入端和与电动机连接的输出端,这一类模块被称为电调(Electronic Speed Control,ESC)。

图 5.18(a)为航模中直流无刷电动机和电调的连接方式,可见电调仅连接了电源(电池)、电动机、编程卡(调整电调参数,非必须使用)和接收机(接收遥控器信号,输出 PWM 信号)。图 5.18(b)为某品牌的电调实物,其最高工作电压为 50V,最大持续工作电流可达 100A,瞬间电流(10s)可达 140A。可见,电调所实现的模块化集成设计,简化了直流无刷电动机的驱动流程,也提升了系统性能。

经典航模领域的 PPM 信号标准电平为 5V,周期时间是 20ms,即信号的频率是 50Hz,Arduino 的 Servo 库中默认的电调频率同为 50Hz。根据应用领域的不同,电调可以分为单向电调和双向电调两种。使用微处理器直接驱动电调时,只需要向两种电调发送正脉宽为 0.5~2.5ms 或 1~2ms 的 PWM 信号即可,以 1~2ms 信号电调为例,两种电调的区别如下。





图 5.18 直流无刷电动机电调连接方法及实物照片

(1) 单向电调。一般应用在无人机等电动机只向一个方向旋转的领域,在传输给电调的 PWM 信号中,1ms 正脉宽表示 0% 油门(指传输给电动机的功率),2ms 正脉宽表示 100% 油门。

(2) 双向电调。包括正转、反转和制动功能,应用在船模和车模等领域。在传输给电调的 PWM 信号中,1ms 正脉宽表示 100% 反转油门,2ms 正脉宽表示 100% 正转油门,1.5ms 正脉宽表示 0% 油门。

但是实质上,无论是 PWM 信号还是航模领域中广泛使用的 PPM(Pulse Position Modulation,脉冲位置调制),由于其每一个脉冲直接表征了控制含义,而没有传输数字信息,因而其本质上仍属于一种模拟信号。而且 PWM 信号很容易产生因为传输或检测精度不足所导致的误差,因而部分领域已经开始采用数字电调解决这种误差问题。

目前,数字电调协议以 Dshot 为主,包括 DShot150、Dshot300、Dshot600 和 Dshot1200 等。Dshot 协议的数据帧由三部分组成:①油门值(Throttle),11 位长度,可以表示的数字范围为 0~2047;②请求数据回传标识位(Telemetry Request),1 位长度,0 表示不向电调请求数据回传,1 为向数字电调请求数据回传,具有数据回传功能的电调则会回传电调的状态信息;③校验(CRC),4 位长度,用于验证该帧数据是否有效合法,是对前面 11 个油门值+1 个回传标志共 12 个位进行分组,每组 4 位、分 3 组,即对 3 组 4 位数据进行异或计算,取计算结果的低 4 位作为校验码插入。

Dshot 协议的数据传输方式与 DS18B20 和 DHT11 的单总线数据传输方式类似,利用脉冲序列中的高电平的时间表征数据位 0 或 1。Dshot 协议名字中所标注的数字代表通信速率,例如,Dshot600 表示每秒传输 600Kb,每个 bit 时间为 1667ns,正脉宽 625ns 表示数据位 0、正脉宽 1250ns 表示数据位 1。可见 Dshot600 每 26.7μs 即可更新一次电调状态,其速率远快于 PWM 控制的 20ms。此外,Dshot 还具有以下明显优点:①无须校准电调油门行程;②电调信号精准,无须考虑信号干扰造成的脉宽误差影响;③油门分辨率高;④更新速度快于传统的 PWM/PPM。但从价格上,相同输出电流的 DShot 电调要高于 PWM 电调。

市售电调产品非常丰富,穿越机等高端航模应选用使用 Dshot 协议的电调,以获得更快的反应速度,而智能小车、普通无人机、机器人和水下机器人使用普通 PWM 电调即可选用电调时应主要从工作电压和电流方面考虑。电调额定电压应略高于输入峰值电压,电调最大电流应高于甚至数倍于电动机正常工作电流,此外,还应考虑电调的体积和散热等问题。

5.2.4 步进电动机驱动电路

步进电动机的驱动电路与图 5.17(a)所示 H 桥驱动电路原理相似,只是每相都需要一个 H 桥驱动,因此驱动系统重复度较高、控制时序复杂度高,但电路结构简单。如图 5.19 所示,以最简单的 2 相 4 线步进电动机的非细分驱动系统为例进行说明。右半部分是 L298 标准驱动电路,A 端 H 桥和 B 端 H 桥分别驱动步进电动机的 2 相绕组,L6210 为续流二极管,A 端和 B 端防过电流采样电阻均为 0.5Ω 。

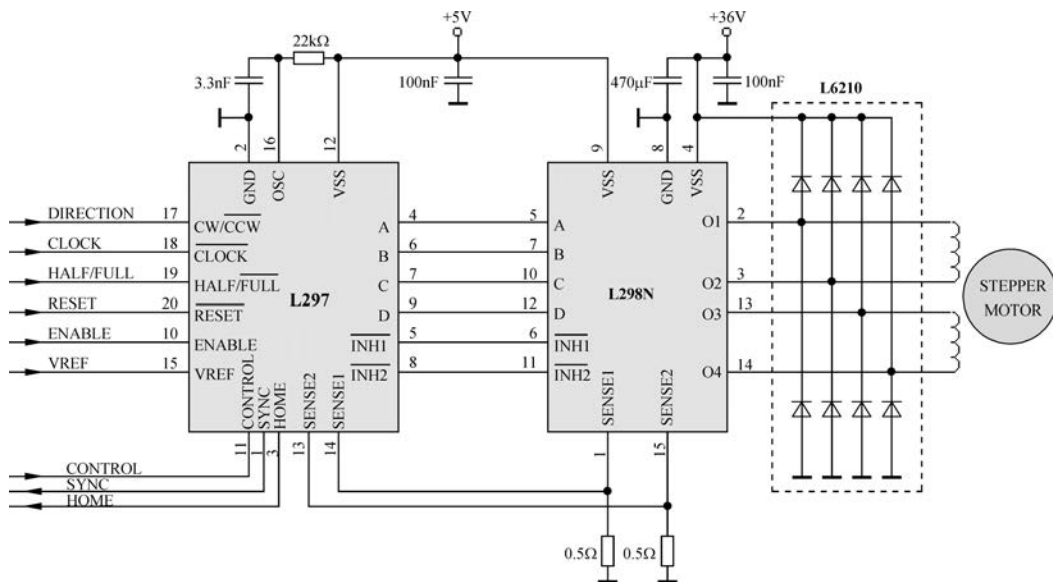


图 5.19 L297 和 L298 构成的 2 相 4 线步进电动机驱动系统

图 5.19 电路左半部分是 L297 步进电动机控制电路,内部内置了逻辑控制电路、电流控制电路、时钟电路和电流采样电路等,可以直接连接微处理器接收控制信号,并根据信号生成步进电动机的驱动信号:包括半步模式(Half Step)以及单极性(One Phase On)和双极性(Two Phase On)等。其中,半步模式下的步进角为整步的一半。L297 在顺时针驱动时 ABCD 输出流程为 $0101 \rightarrow 0001 \rightarrow 1001 \rightarrow 1000 \rightarrow 1010 \rightarrow 0010 \rightarrow 0110 \rightarrow 0100 \rightarrow 0101 \rightarrow \dots$,共计 8 拍,具体过程可参考 L297 数据手册。L297 输入端的主要功能如下。

(1) SYNC。PWM(L297 数据手册中称之为 Inhibit Chopper,斩波器)输出端,使用多个 L297 同步控制多相电动机时,应将所有 L297 的 SYNC 连接,并只在一个 L297 上使用振荡元件(OSC),而使用外部时钟时,则应连接至此引脚。

(2) HOME。复位 L297 的输出至初始状态($ABCD=0101$),且立刻输出执行。

(3) $\overline{INH1}$ 和 $\overline{INH2}$ 。禁用 L298 的 A 端(O1 和 O2)或 B 端(O3 和 O4)的 H 桥输出;当 CONTROL 端为低电平时,该引脚输出 PWM 信号调节驱动电流,防止过电流。

(4) ENABLE。使能端,低电平时则 A、B、C、D、 $\overline{INH1}$ 和 $\overline{INH2}$ 输出低电平。

(5) CONTROL。PWM(斩波器)信号输出端选择,高电平时 PWM 从 A、B、C 和 D 输出,低电平时 PWM 从 $\overline{INH1}$ 和 $\overline{INH2}$ 输出。

(6) OSC。RC 网络输入端,用于产生 PWM 信号,其频率为 $f \approx 1/0.69RC$,连接方式

如图 5.19 所示。

(7) $\overline{\text{CW/CCW}}$ 。步进电动机旋转方向控制端。

(8) $\overline{\text{CLOCK}}$ 。步进时钟输入端。

(9) $\overline{\text{HALF/FULL}}$ 。半步整步选择端。

(10) $\overline{\text{RESET}}$ 。复位输入端,输入负脉冲时,复位 L297 的输出至初始状态(ABCD=0101)。

L297+L298 的控制方式只能满足步进电动机的基本控制要求,包括整步半步控制等非细分驱动功能。而更高的控制精度、更小的步进抖动等功能则需要精细的 PWM 控制信号才能够完成,L297 中的逻辑电路显然无法胜任。若要实现如图 5.14 所示的正弦波电流,则需要在驱动端加载满足产生正弦波电流需求的 SPWM(Sinusoidal Pulse Width Modulation, 正弦脉宽调制)信号。该信号的脉冲宽度按照正弦规律变化,SPWM 技术的实现方法主要有以下 3 种。

(1) 等面积法。等面积法利用数量相同的等幅不等宽的脉冲等效代替正弦波,其实现过程为在一个采样周期内 SPWM 的脉冲面积应与正弦波片的面积相等,以计算 SPWM 的占空比,再将数据存储在存储器中。使用时可通过查表的方式生成控制开关器件通断的 PWM 信号,以达到和通入正弦波相同的效果。

该方法基于 SPWM 的控制基本原理,事先准确地计算出各开关器件的通断时刻,得出与正弦波接近的波形。这种方法也存在明显的缺陷,如占用内存大、无法调整正弦波周期等。

(2) 硬件调制法。硬件调制法是把所期望等效代替的波形作为调制信号,把接受调制的信号作为载波,通过对载波信号的调制生成所期望的波形。一般用等腰三角形作为载波,正弦信号作为调制信号,最后得到的波形就是 SPWM 信号。

这种控制方法的优点明显,采用 SG3525、TL494 和 EG8010 等纯硬件电路实现的电路具有极高的可靠性和极高的抗干扰性,不会出现微处理器程序跑飞问题。但其电路结构比较复杂,很难有精确的数字控制。

(3) 软件生成法。软件生成法就是利用软件算法的方式来实现信号的调制。随着微处理器性能的提升,使用软件可以很容易地生成 SPWM 信号。因此,通过软件生成 SPWM 的方法目前也被广泛采用。软件生成法有两种基本算法:自然采样法和规则采样法。自然采样法由于计算烦琐,很难实现实时控制,很少采用,故不做详细介绍。规则采样法是一种比较常用的工程实用方法,其原理就是用等腰三角形波为载波对正弦波进行采样,从而得到阶梯波,然后在阶梯波与等腰三角波的交点时刻,通过软件法控制开关器件的通断,即用软件方法达到硬件调制的效果。其效果与自然采样法接近,但计算量却比自然采样法小。如图 5.20 所示为利用规则采样法计算 SPWM 信号的工作原理示意图。

L298 内置了比较全面的限流保护电路和同步电路,但 L298 无法产生也无法传递 SPWM 信号。若依然使用 L298 作为驱动电路,则应选择其他电流控制芯片,如 L6506 等,具体电路连接和电阻选择应详细参考 L6506 数据手册。由控制系统产生的 SPWM 信号分别控制 2 相的电流输出即可,但电路中还应设计电流采样和检测电路,以便进行限幅和偏置工作。

采用细分功能控制步进电动机除了使用上述方法之外,还可以使用集成芯片完成,如

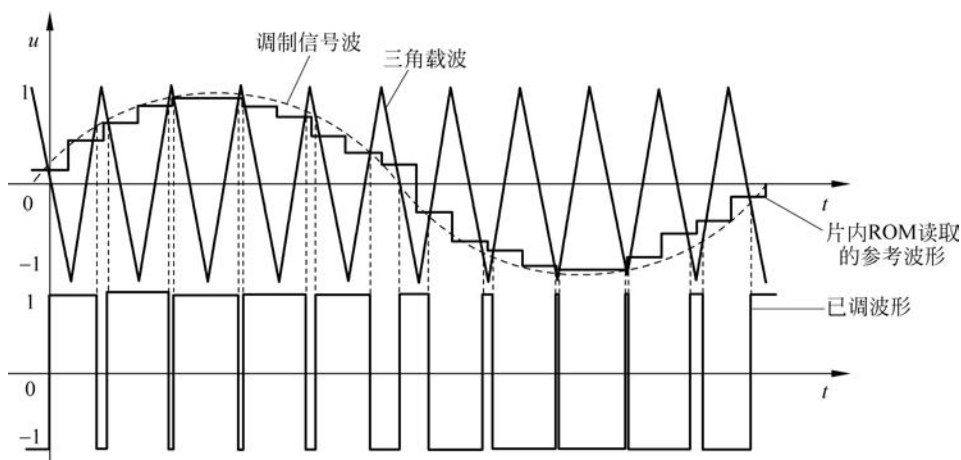


图 5.20 规则采样法计算 SPWM 信号的工作原理

TMC22xx 系列细分步进电动机控制芯片。该系列中的 TMC2208 工作电压为 4.75~36V, 峰值输出电流 2A, 通过 Microplay 技术可补偿实现 256 级细分效果、低速静音模式 (stealthChop) 和高速防抖模式 (spreadCycle) 切换, 以及较为全面的保护等功能等。还可以通过上位机软件 ScriptCommunicatorSetup 与 TMC2208 的 UART 接口通信, 配置芯片的工作参数。TMC2208 的引脚主要功能如下。

(1) 电源系统。包括用于数字通信接口的电源 VCC_IO、用于电动机驱动电源 VS 和共用的电源地 GND。此外, 还有一个 5V 电源输出 5V_{OUT}, 最大输出电流可达 25mA。

(2) 电动机驱动。包括用于驱动电动机 A 相的 OA1 和 OA2, 用于驱动电动机 B 相的 OB1 和 OB2。

(3) 电流检测。包括用于检测 A 相电流的采样电阻连接引脚 BRA、用于检测 B 相电流的采样电阻连接引脚 BRB。

(4) 控制信号。包括芯片使能控制 ENN、步进电动机控制 STEP 和 DIR, 其中, STEP 既可以默认在上升沿触发一次整步步进, 又可以通过 DEDGE 位设置为上升沿和下降沿皆可触发一次半步步进。在每次 STEP 的有效触发时, 都将检测 DIR 输入以决定电动机的转向。

(5) 辅助输入。包括与内部电荷泵相关的 VCP、CPI 和 CPO, 用于内部各功能模块的时钟控制或时钟输入 CLK, 可选的用于过电流保护的参考电压输入 VREF。

(6) 辅助输出。用于内部错误输出的 DIAG 信号, 该信号输出包括电荷泵欠电压、过温、AB 相 H 桥段路和过温, 用于输出细分 0 点位置的 INDEX 信号。

(7) 细分设置。用于设置细分模式的引脚 MS1 和 MS2, MS2 和 MS1 组合与细分对应关系为: 00 为 8 细分、01 为 2 细分、10 为 4 细分、11 为 16 细分。

(8) 通信接口。用于设置芯片内部寄存器值的 PDN_UART 接口, 采用 UART 与微处理器通信, 波特率最低 9600b/s、最高可达 500kb/s, 且具有自适应和回复功能, 采用双向通信时, TMC2208 会以相同波特率回复微处理器。

TMC22xx 系列芯片除了最大 16 细分的 TMC2208 之外, 还有最大 32 细分的 TMC2224、TMC2225 和 TMC2220 等。国产芯片方面, 也可以选择微芯的 TC1005 系列步进电动机控制驱动芯片。TC1005 能够为外接 MOSFET 提供高达 8A 的驱动电流, 此外还

支持最高 40V 工作电压、256 细分,并带有过电流、短路和过温保护等功能,且支持 SPI 通信接口,具体电路不再详述。

在使用步进电动机时,必须需要注意其特征:步进电动机是一种低速、大转矩的精确驱动设备,适用于需要连续转动的精准控制场合,通过细分还可以实现更平滑的运动,与直流电动机和舵机呈现出完全不同的特性。

5.3 机器人的驱动电源系统

机器人的驱动电源系统是为机器人驱动系统提供能源的部分,也称为动力电源系统,是机器人电源系统中的重要部分,也是机器人系统中电压最高、电流最大的部分,同时也是电流变化最快、最容易对系统造成干扰的部分。

5.3.1 功率开关电源系统

固定式机器人以及移动型有缆机器人通常使用线缆进行供电,电力设备提供的 2 相 220V_{AC} 或 3 相 380V_{AC} 或高压直流等电力通过线缆传输到机器人本体中的电源系统,将这部分系统称为机器人的外部供电系统。严格意义上,这类设备不完全属于机器人本体,但却是本体工作时不可或缺的组成部分,如工业机器人工作过程中所依赖的配电系统、各类远程移动有缆机器人的远程供电系统等。

外部供电系统是机器人运行的必要条件,是非内置电池型机器人,尤其是水下机器人、管道机器人等有缆远程作业机器人的重要动力来源。外部供电系统根据其对供电电压的处理可以分为简单传输型、类型变换型和电压变换型三种,在第 2 章中已经进行了介绍。

传输至机器人本体供电系统的电能一般无法直接使用(极少数高压大功率电动机除外),需要降压至机器人动力系统所需要的电压和足够的输出功率,尤其需要适配驱动系统的要求,包括 H 桥、电调和步进电动机驱动器等。

例如,经典的 2 相混合式步进电动机驱动器 EZM552,该驱动器最大支持 512 细分并具有全面保护功能,其驱动电压支持 20~36V、最高不超过 50V,最大工作电流 5.2A,因此该驱动器只能驱动 42、57 和 86HS22 等在该电压和功率范围内的步进电动机。对于 86HS120 等工作电压较高(40~60V)的步进电动机,则应选择 EZM872 等驱动器,驱动器的最大工作电流一般应在步进电动机最大工作电流的 1.1 倍以上。根据经验,驱动器电源除了电压必须满足要求外,若使用线性电源,电源的输出电流应取驱动器最大电流的 1.1~1.3 倍,若使用开关电源,则电流应在 1.5~2.0 倍。电源功率过大会带来体积和成本的升高,而电源功率不足则可能会导致系统无法工作等故障的发生。

外部供电系统的类型不同,机器人本体的电源设计方法也不同。使用简单传输型外部供电的机器人电源可以直接使用各类满足电压、功率、体积和安全需求的开关电源系统。

类型变换型外部供电则应使用厂商所推荐的变换模块,以便在更小体积的基础上获得更高的变换效率。如图 5.21 所示是 VICOR 公司的 VI-HAM 使用示意图,VI-HAM 通过 +OUT 和 -OUT 输出整流后直流供电,E/O 为控制输出端,用以控制 DC-DC 模块工作,A/S 端为特定的电压输出,使用时按照图 5.21 方法连接即可。

VI-HAM 可以与多种 DC-DC 模块连接工作,经过电缆传输的直流电与 E/O 控制信号

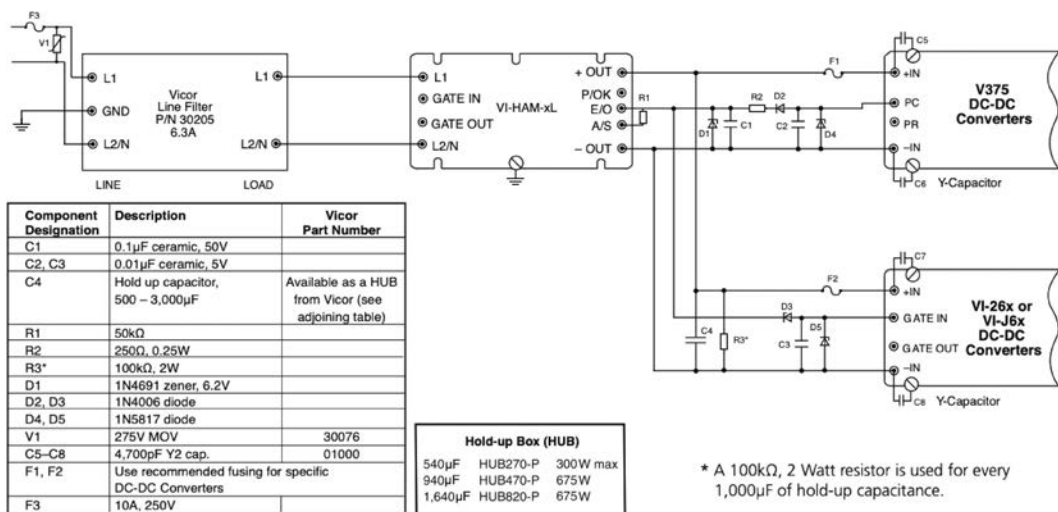


图 5.21 由 VI-HAM 模块和 DC-DC 转换器构成的电源系统

传输至机器人本体端 DC-DC 模块后,控制模块输出。可选用的 DC-DC 模块包括 VICOR 公司 MAXI、MINI 和 MICRO 系列的 DC-DC 模块、VI/VE-200 系列和 VI/VE-J00 系列模块等,如 V375A12T600BL2 模块具有高转换效率、输出电压 12V、工作温度 $-40\sim 100^{\circ}\text{C}$ 、输出功率 600W 等特性,具体各类 DC-DC 可参考其选型手册。

电压变换型外部供电的特点是在线缆中传输的电压远高于直接整流滤波后的电压,一般在 600V 以上。因此机器人本体中无法直接使用市售的民用开关电源进行 DC-DC 降压变换,必须使用高压输入模块实现该过程。以金升阳公司的 PV200-29Bxx 系列开关电源模块为例,该系列模块具有 $300\sim 1500\text{V}_{\text{DC}}$ 的超宽输入电压范围、最大 200W 输出功率、 4000V_{DC} 隔离、 $-40\sim 70^{\circ}\text{C}$ 工作温度,并具有欠电压保护、输出短路保护、过电流保护等功能,PV200-29Bxx 有 24V、36V 和 48V 三种输出电压型号,在 850V_{DC} 输入时可达 87% 的转换效率,体积为 $215\text{mm}\times 125\text{mm}\times 50\text{mm}$,重量为 1.55kg,且该模块价格高于普通 200W 开关电源,导致系统成本升高,但高压传输可以有效减小传输电流,减少线缆损耗,机器人则可以使用更轻便、更纤细、更柔软的线缆,有效减少线缆对机器人的影响,并降低线缆的成本。

除了各类开关电源和 DC-DC 模块之外,机器人系统的驱动电源也可能会包含针对小型和微型电动机所设置的小功率电源系统,其电路和原理较为通用,本节不再介绍。

5.3.2 动力电池系统

第 2 章中已经介绍了机器人所必需装备的电池管理系统,以及 BlueROV2 水下机器人中装载使用的锂电池。本节将继续介绍机器人系统中各类电池的功能作用、组成结构 and 应用范围,也包括超级电容等短期(缓存)储能设备的相关知识。

电池是一种将化学能和原子能等形式的能量直接转化为电能的方式,电池包括生活中常用的干电池、碱性电池、蓄电池、锂电池,以及超级电容和少见的燃料电池等。根据电池的储能-恢复特性,可以将电池分为一次性电池和多次电池(可充电或可补充能量)。电池是自主无缆机器人的唯一动力来源形式,包括物流仓库搬运机器人、物流派送机器人、无人机、



AUV、家用扫地机器人和纯电动汽车等,具有不可替代性。受电池能量密度的限制,这类机器人中的电池重量会随工作时间的要求而增大,例如,大疆的悟 INSPIRE2 无人机整体重量 3440g,其中电池的重量就达到了 1030g,但其飞行时间仍不足 30min。再如特斯拉纯电动汽车 Model3 的整备重量 1745kg,其中电池包的重量就达到了 478kg,覆盖了大部分汽车底盘区域,但其 EPA 测定行驶距离也只有 520km。可见,在电池驱动的各类机器人中,电池占据了机器人的大量体积和重量。该问题主要是由于现有化学电池的储能密度远低于燃油所导致的,能量密度最高的 4680 型三元锂电池的能量密度仅能达到 300Wh/kg,而汽油能量密度则可以达到 12 000Wh/kg 以上。

因此,在现有的常规电池能量密度条件限制下,需要科学地计算机器人搭载的电池的各项限制条件:①机器人负荷限制,机器人在移动和作业时,能够预留给电池系统的空间大小和重量限制,电池系统必须满足该要求;②机器人的作业功率与电量需求,统计机器人在携带了电池和载荷的情况下,完成作业时的最大功率以及总电量,所使用电池系统必须满足输出电压、最大输出电流和容量要求。此外,还应根据机器人工作场合的温度、湿度、气压等环境信息设计电池系统电芯和电路,根据电池充电或换电时间需求设计充换电系统,根据机器人的工作周期计算充电和保障系统数量。一旦市售电池系统和定制电池系统都无法满足上述要求,则需要调整机器人的设计或作业要求。

根据电池成分,机器人常用的电池主要包括以下 4 类。

1. 干电池和碱性电池

干电池就是生活中的常见电池,广泛应用于闹钟、温度计、体重秤、收音机、遥控器和万用表等耗电量极低、待机周期较长的小型设备。干电池属于原电池类型,放电电流不大、内阻较大、不能充电,且长期使用容易发生腐蚀漏液等问题。

目前,干电池已经有 100 多种类型,包括普通的锌-锰干电池、镁-锰干电池、锌-氧化汞电池和锌-氧化银电池等,以及碱性电池(碱性锌-锰干电池)。以普通锌-锰干电池为例,该电池从组成结构上又可以分为糊式锌-锰干电池、纸板式锌-锰干电池、薄膜式锌-锰干电池、氯化锌-锰干电池、四级并联锌-锰干电池和叠层式锌-锰干电池(多节微型锌-锰干电池串联叠放)等。普通干电池的化学构成和化学反应过程如下。

正极材料: MnO_2 、石墨棒。

负极材料: Zn ,且 NH_4Cl 淀粉糊状物作为主要电解液。

正极反应: $2\text{NH}_4^+ + 2\text{e}^- = 2\text{NH}_3 \uparrow + \text{H}_2 \uparrow$; 氨气和氢气分别被 Zn^{2+} 和 MnO_2 吸收:
 $4\text{NH}_3 + \text{Zn}^{2+} = \text{Zn}(\text{NH}_3)_4^{2+} + \text{H}_2 + 2\text{MnO}^{2-} = 2\text{MnO}(\text{OH})$ 。

因此正极可写为: $2\text{MnO}_2 + 2\text{NH}_4^+ + 2\text{e}^- = \text{Mn}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O} + 2\text{NH}_3 \uparrow$ 。

负极反应: $\text{Zn} - 2\text{e}^- = \text{Zn}^{2+}$ 。

总反应: $2\text{Zn} + 4\text{MnO}_2 + 4\text{NH}_4^+ = 2\text{MnO}(\text{OH}) + \text{Zn}(\text{NH}_3)_4^{2+} + \text{Zn}^{2+}$ 。

单节普通锌-锰干电池和碱性电池的电动势为 1.5V,但普通干电池由于产生的氨气会被石墨所吸附,引起电动势快速下降,导致电池放电能力变差。此外,作为电池外壳的锌筒也会参与化学反应,会导致电池外皮腐蚀变薄,导致电解液外流漏,对设备造成损害。而碱性电池则可以有效避免这种问题:碱性电池使用 KOH 替代 NH_4Cl 作为主要电解液,正极材料改为钢筒, MnO_2 层紧靠钢筒。碱性电池的化学反应过程如下。

正极反应: $\text{MnO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{e}^- = \text{MnO}(\text{OH}) + \text{OH}^-$ 。

$\text{MnO}(\text{OH})$ 在碱性溶液中有一定的溶解度： $\text{MnO}(\text{OH}) + \text{H}_2\text{O} + \text{OH}^- = \text{Mn}(\text{OH})_4^-$ ，且有： $\text{Mn}(\text{OH})_4^- + \text{e}^- = \text{Mn}(\text{OH})_4^{2-}$ 。

负极反应： $\text{Zn} + 2\text{OH}^- = \text{Zn}(\text{OH})_2 + 2\text{e}^-$ 、 $\text{Zn}(\text{OH})_2 + 2\text{OH}^- = \text{Zn}(\text{OH})_4^{2-}$ 。

总反应： $\text{Zn} + \text{MnO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{OH}^- = \text{Mn}(\text{OH})_4^{2-} + \text{Zn}(\text{OH})_4^{2-}$ 。

可见，碱性电池的化学反应过程中不会产生气体，其内阻也相对较低，但碱性电池的最大放电电流一般只有 1C（C 为电池容量，如 2000mAh 容量的电池的 1C 放电电流为 2000mA），依然难以作为动力电池为机器人提供长期的、稳定的电流输出。结构上，市售碱性电池为了避免普通锌-锰干电池外壳锌筒腐蚀变薄的问题，采用了与普通锌-锰干电池相反的结构，电池内芯为负极、电池的不锈钢外壳和顶帽为正极。常用的碱性电池的能量密度一般在 40Wh/kg 左右。

特别地，20 世纪的锌-锰干电池以锌筒作为负极，并经汞齐化处理，使表面性质更为均匀，以减少锌的腐蚀，提高电池的储能性能，电池中会含有微量汞。但自 2001 年 1 月 1 日起，我国已经规定凡进入国内市场销售的国内、外电池产品，在单体电池上均需标注汞含量，未标注汞含量的电池不准进入市场销售。自 2002 年起，禁止在国内市场经销汞含量大于电池重量 0.025% 的电池。目前现有的干电池和碱性电池绝大部分是无汞的，使用后的废旧电池是不会造成汞污染的。

2. 镍镉电池和镍氢电池

镍镉电池、镍氢电池和干电池在外观型号的命名方式上基本一致，常见型号包括 1 号、2 号、5 号和 7 号，这种命名方式源于 GB/T 8897.1—2021 原电池标准，该标准将干电池分为以下型号。

- (1) 1 号电池，国标型号 R20，英文代号 D，直径 34.2mm，高度 61.5mm。
- (2) 2 号电池，国标型号 R14，英文代号 C，直径 26.2mm，高度 50.0mm。
- (3) 5 号电池，国标型号 R6，英文代号 AA，直径 14.5mm，高度 50.5mm。
- (4) 7 号电池，国标型号 R03，英文代号 AAA，直径 10.5mm，高度 44.5mm。

与干电池不同，镍镉电池和镍氢电池属于可充电的多次电池，早期的各类充电设备使用的都是镍镉电池，其单体电压 1.2V，具有大电流放电、维护简单等优点，能量密度为 40~60Wh/kg，高于碱性电池。

镍镉电池的正极材料为球形氢氧化镍，充电时为 NiOOH ，放电时为 $\text{Ni}(\text{OH})_2$ 。镍镉电池（Nickel-Cadmium Battery, Ni-Cd）因其碱性氢氧化物中含有金属镍和镉而得名。

镍镉电池可实现 500 次以上充放电循环，经济耐用。但镍镉电池的缺点也很明显，若充放电过程对电量掌控不当，则会出现严重的记忆效应，导致电池容量和寿命大打折扣。记忆效应指电池在充电前，电池的电量没有被完全放尽，久而久之将会引起电池容量降低的现象。记忆效应会导致在电池充放电的过程中，在电池极板上产生小气泡，小气泡的堆积会减少电池极板的面积，也间接影响了电池的容量。因此，高级镍镉电池充电器普遍带有放电功能，以便在充电前先对电池放电，如 SONY 的 BCG-34HRMD 等。

此外，镍镉电池中的镉是一种有毒元素，不利于生态环境的保护。能量密度不足、记忆效应和污染环境等诸多缺点使得镍镉电池应用受限严重，尤其是在镍氢电池发明之后，镍镉电池已经基本被淘汰出各类应用领域，取而代之的是镍氢电池和锂电池。

镍氢电池中不再使用有毒的重金属元素镉，既可以避免环保问题，又可以提升能量密

度。由于其输出电压等多方面特性与镍镉电池相似,因此可以直接替代镍镉电池使用。镍氢电池的正极材料为氢氧化镍 $\text{Ni}(\text{OH})_2$ 、负极材料为储氢合金。

民用镍氢电池的能量密度为 $60\sim 80\text{Wh/kg}$,高于镍镉电池,在相同的体积下具有更大的容量。现有市售 5 号镍氢电池的容量可达到 2500mAh 以上并具有 1000+ 次的循环充放电能力。尤为重要的是,镍氢电池的记忆效应远小于镍镉电池,几乎可以做到随充随用,更适合在移动设备和太阳能供电设备中使用。此外,镍氢电池还具有一定的耐过充过放能力,这一点是镍镉电池甚至锂电池所不具有的。

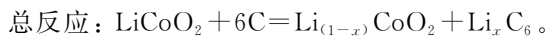
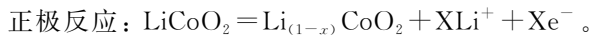
镍氢电池无毒、安全、耐过充过放的能力,以及良好的高温和低温工作特性,使镍氢电池在有较高安全需求的领域依然难以被替代,如 2020 年一汽丰田的双擎系列混合动力汽车中装配的仍然是镍氢电池组。但镍氢电池仍存在诸多不足,除了能量密度仍然较低外,镍氢电池的充电效率也仅为 66% 左右,即只有 66% 的电量被电池吸收,远低于锂电池。且镍氢电池的自放电率较高,长期不使用时,镍氢电池的电量也会出现明显消耗;镍氢电池的最大放电电流较小,目前镍氢动力电池只能达到 15C 左右,也远低于锂电池。镍氢电池的快速充电能力极低,一般只能达到 1C 左右。实际上,镍氢电池引以为自豪的安全性也正在逐渐被新型电池所替代,如比亚迪公司所研发的刀片电池,其内部使用的磷酸铁锂电池组,在电池组破损的情况下仍能够保持表面 $30\sim 60^\circ\text{C}$ 的较低温度,且无烟无明火。

3. 锂电池

锂电池是锂离子电池、锂聚合物电池这两类电池在通俗意义上的总称(以金属锂直接作为负极的锂电池是原电池的一种,属于一次电池)。锂电池彻底解决了前述各类电池能量密度低、放电电流小的问题,而且既具有快速充电能力,又具有极低的自放电率。上至玩具无人机、民航客货机和国际空间站,下至手机等民用移动设备、各类移动机器人、电动汽车、水下机器人,以及军事船只、军事潜艇等,都采用锂电池作为储能设备。锂电池已经成为目前各类电子设备中所使用得最广泛的、现阶段难以被替代的电池类型,已经深入到日常生活中。

锂电池工作时,主要依靠锂离子在正极和负极之间移动来工作。在充放电过程中, Li^+ 在两个电极之间往返嵌入和脱嵌。充电时, Li^+ 从正极脱嵌,经过电解质嵌入负极,负极处于富锂状态;放电时则相反。

锂离子电池中,通常使用石墨或石油焦炭构成负极,用 Li_xCoO_2 、 Li_xNiO_2 或 Li_xMnO_4 材料构成正极,由 LiPF_6 和碳酸酯类溶剂(二乙烯碳酸酯或二甲基碳酸酯)构成电解液,由有微孔结构的耐电解液的高分子薄膜构成隔膜,由钢壳、铝壳、镀镍铁壳(圆柱电池使用)、铝塑膜等材料构成电池外壳。以使用 LiCoO_2 作为正极材料为例,锂离子电池在充电时发生的反应为:



电池中,隔膜是关键的内层组件,允许锂离子自由通过,阻止电子通过。隔膜一般应具有如下特性:①具有绝对电子绝缘性,保证正负极的机械隔离;②有一定的孔径和孔隙率,保证低电阻和高锂离子电导率,对锂离子有极好的透过性;③由于电解质的溶剂为强极性的有机化合物,隔膜必须耐电解液腐蚀,有足够的化学和电化学稳定性;④对电解液的浸

润性好并具有足够的吸液保湿能力；⑤具有足够的力学性能，包括穿刺强度、拉伸强度等，但厚度尽可能小；⑥空间稳定性和平整性好；⑦热稳定性和自动关断保护性能好；⑧隔膜受热收缩要小，否则隔离失效易引起短路、引发电池热失控。

常见的钴酸锂、三元锂、磷酸铁锂和钛酸锂都属于锂离子电池，这四类电池的主要特性如下。

(1) 钴酸锂电池。钴酸锂是第一代商业化的正极材料。钴酸锂电池具有能量密度高、循环性好和工艺简单等优点，但是其材料中的钴的毒性较大且价格昂贵。因此，钴酸锂一般用于对重量和体积较为敏感的小型设备中，如手机等智能移动设备中。钴酸锂电池的能量密度可达 200Wh/kg 。

钴酸锂电池的标称电压为 3.7V ，过充保护电压为 $(4.28 \pm 0.025)\text{V}$ ，过放保护电压为 $(2.4 \pm 0.1)\text{V}$ ，持续放电电流为 0.2C ，最大放电电流为 0.5C ，最大充电电流为 1C ，过充会导致钴将溶解在电解液中并产生氧气，并产生树枝状的金属锂晶体，容易刺穿隔膜，导致电池短路，加热沸点和闪点都很低的碳酸酯电解液，导致电池燃烧甚至爆炸。

(2) 三元锂电池和多元锂电池。三元锂电池是指正极采用了镍、钴、锰（称为 NCM 电池）或镍、钴、铝（称为 NCA 电池）三种金属元素，电解液主要为六氟磷酸锂的一种电池。正极材料中的镍是一种活性金属，用来提升电池能量密度，带来更高的设备续航能力。钴也是一种活性金属，可以抑制阳离子的混排，从而提高电池的稳定性和使用寿命，也决定了电池的充放电速度和效率；锰或铝的主要作用是提高电池的安全性和稳定性。

根据三元锂电池中三种材料的比例，NCM 电池可以分为 NCM111、NCM523、NCM622、NCM811。NCA 电池中三种材料的比例一般为 $8:1.5:0.5$ 。目前，LG 等公司已经推出了使用镍、铜、锰、铝四种金属作为正极材料的 NCMA 四元锂电池，电池中的镍含量占 90% 。相关论文显示，NCMA 电池在容量、电池寿命和内阻方面均优于 NCA 电池和 NCM 电池，但 NCMA 四元锂电池在 2021 年下半年量产，目前资料较少。

目前，三元锂电池的标称电压已经达到了 3.7V ，在能量密度、容量上已经超过了钴酸锂电池。普通三元锂电池的循环次数可达 1000 次。如图 5.22(a) 所示的 18650 型（直径 18mm 、高度 65mm ，圆柱形）三元锂电池的能量密度达到 250Wh/kg 、21700 型（直径 21mm 、高度 70mm ，圆柱形）的能量密度则接近 300Wh/kg ，其循环次数甚至达到了 1500 次，充电电流可达 1C 、放电电流可达 $1\sim 2\text{C}$ 。因此，三元锂电池是目前动力电池的常见选择之一。此外，三元锂电池还有良好的耐低温特性，可以在 -10°C 条件下保持较好的容量。

但三元锂电池中镍材料的使用，尤其是 NCM811 等高镍电池中，由于镍的活性大，在提升了能量密度的同时，也带来了一定的安全隐患，导致了一些安全事故。高镍电池在高温下结构不稳定、 300°C 左右开始分解，并释放氧气，使电解液迅速燃烧，发生热失控问题。一般而言，镍含量越高，稳定性越差。近年来，我国发生了多起纯电动车自燃事件，包括充电自燃、行驶中自燃或静置自燃，绝大多数车辆所采用的都是各类三元锂电池。

尽管高镍三元锂电池有诸多缺点，但单单是能量密度高的这一优点就已经使其在诸多领域成为极具竞争力的产品。这一优点促使厂商为了保证电池安全，不仅增加了各种电池本体的保护措施，还在过充保护、过放保护、过温保护和过电流保护等方面增加了研发投入，以减少高镍三元锂电池的不稳定因素。另一方面，钴价过高也使得电池厂商不得不降钴升镍，使镍钴锰比例从 532 到 622 再到 811，甚至再到尚未推向市场的无钴电池 NMx 。

目前,三元锂电池主要用在各类续航敏感型移动设备上,如无人机、物流机器人和电动汽车等,常见的大疆无人机、扫地机器人、大部分电动汽车、部分超大容量移动电源中使用的都是三元锂电池。

(3) 磷酸铁锂电池(LiFePO_4 , LFP)。三元锂电池和磷酸铁锂是目前的“明星电池”,特斯拉和比亚迪两种电动汽车的畅销给两类电池都带来了巨大的市场份额。但高镍三元锂的热失控问题使其安全性备受争议,磷酸铁锂电池则在市场上主打安全性:在高温钢针穿刺实验中,电池不起火、未冒烟,电池的自燃温度可达 800°C 。磷酸铁锂电池除圆柱形外,还可以制成更容易匹配机器人空间的方形,如图 5.22(b)所示。

虽然磷酸铁锂高温特性稳定,但其缺点明显:①低温特性不佳,在 -20°C 时,电池容量只能达到常温的 $1/3$,锂离子扩散系数较常温情况下降两个数量级,当温度下降到 -40°C 时,磷酸铁锂只能保持常温容量的 20% ;②标称电压仅为 3.2V ,若要实现高压电池包则需要更多单体电池串联;③能量密度低,目前磷酸铁锂电池能量密度最大只有 160Wh/kg 。

但磷酸铁锂电池中并没有使用高价金属钴和活泼金属镍,其所使用的磷和铁均储量丰富且提取简单,使得其原材料成本大大降低。同时,磷酸铁锂电池还具有循环寿命长的优点,一般循环次数可以达到 2000 次。而且,从使用的角度出发,现有的三元锂动力电池组都不建议充满至 100% ,而是建议充电到 $80\%\sim 90\%$ 即停止充电,而磷酸铁锂电池可每次都充满至 100% 。对比三元锂电池和磷酸锂两种市场主流动力电池的特性,如表 5.3 所示。

表 5.3 三元锂和磷酸铁锂电池的主要性能对比

对比特性	三元锂电池	磷酸铁锂电池
成本	高	低
低温性能	强	差
外观形状	圆柱	圆柱、方形
高温安全性	差(300°C)	好(800°C)
循环寿命	短(<1000 次)	2000 次
能量密度	高(300Wh/kg)	低(160Wh/kg)
快充性能	好(大于 1C)	差(大于 0.5C)

因此,移动机器人在选用动力电池时,也比较容易区分选择:对体积重量敏感、对续航能力敏感的机器人,如无人机等,一般应选择三元锂电池;对环境要求敏感、对安全性要求较高的机器人,如各类服务机器人、扫地机器人等,一般应选择磷酸铁锂电池;工作温度低(0°C 左右)的场合选择三元锂、工作温度较好(25°C)的场合选择磷酸铁锂。由于装配有三元锂电池的电动汽车有自燃事故风险,目前小型货车和轿车通常采用三元锂电池,以提供更高的续航里程,而客车通常选择磷酸铁锂电池,以提高行车的安全性。

(4) 钛酸锂电池。钛酸锂既可以作为电池的负极,与三元锂或磷酸铁锂等正极材料组成 2.4V 或 1.9V 的锂离子二次电池,又可以作为电池的正极,构成 1.5V 的锂离子电池。动力电池领域的钛酸锂电池属于前者。

钛酸锂作为一种零应变材料,在使用时,锂离子在充电和放电期间的嵌入和脱嵌对钛酸锂材料的结构几乎没有影响、晶体结构几乎没有变化、容量几乎没有衰减、具有更高的锂嵌

入潜能,可以有效防止金属锂的析出和锂枝晶的形成。其理论充放电循环次数可达 3 万次以上。

钛酸锂还具有比石墨高的热力学稳定性,不容易引起电池的热失控,具有较高的安全性。另外,钛酸锂还具有优异的低温性能,快速充电能力和高性价比,因此在大规模储能等领域具有良好的应用前景。

钛酸锂电池负极材料具有体积小、重量轻、能量密度高、密封性能好、无泄漏,无记忆效应、自放电率低、充放电快、循环寿命长、工作环境温度范围宽等优点。安全、稳定、绿色环保,在通信电源领域具有非常广阔的应用前景。钛酸锂电池还可以在高温和低温环境中安全使用,在 $-50\sim+60^{\circ}\text{C}$ 均可正常充放电,既适用于寒冷的北方地区,也适用于炎热的南方地区。

但是钛酸锂电池在制造和使用中,也有着不可忽视的缺点:①钛的价格极高,导致电池成本是磷酸铁锂电池的 3 倍以上;②钛酸锂电池能量密度低,目前只有 $100\text{W}\cdot\text{h}/\text{kg}$ 左右;③电解液会与负极发生反应,持续产生气态,使电池内部压力增大,发生鼓包问题,限制了电池的使用场合、循环次数和快充性能。

综上,目前钛酸锂电池综合性能优势十分不明显,其所自豪的耐低温特性也被三元锂和磷酸铁锂电池采用“电池加热”的方式所弥补。三元锂和磷酸铁锂电池凭借自身的能量密度优势,在我国华北和东北南部地区的冬季即使消耗一部分能量用于加热,仍能取得好于钛酸锂电池的表现。

锂聚合物电池的正极、负极材料与锂离子电池无异,区别主要在于电解质的不同。锂离子电池为电解液,而锂聚合物电池多使用胶态或固态电解质。由此,锂聚合物电池具有不易漏液、形状定制灵活、可弯曲、可制成单块高压电池等优点,尤其是其能量密度,甚至可达锂离子电池的一倍。

在安全性方面,锂聚合物电池所使用的铝塑外包装可以直接反映出电池内部的状态,一旦发生安全隐患,电池一般只会鼓包、不易爆炸。使用便利性方面,锂聚合物电池可以制作成比较节约空间的方形,可以方便地与机器人本体结合,节约系统空间,常见的手机电池、智能手表和手环电池,无人机和无人船的航模电池采用的都是锂聚合物电池,如图 5.22(c)所示。



图 5.22 不同类型的锂电池外观

锂聚合物航模电池具有极好的放电性能,放电电流普遍在 10C 以上,部分电池可达 60C 以上,瞬间放电电流可达 100C 以上,可以很好地应对机器人的瞬间大电流工作需求。

锂离子电池或锂聚合物电池组成电池组时,通常采用“串(S)并(P)+容量+最大放电电流”的命名方法。如某锂聚合物电池组标称为 6S1P-12000mAh-15C,则表示该电池组由 6 组单体构成,每组单体的容量为 12 000mAh,最大放电电流 15C,可推算电池组额定电压为 $6 \times 3.7\text{V} = 22.2\text{V}$,满电 25.2V,放电极限 16.8V,最大放电电流 180A。串并联接对电池组的特性影响不同:串联只能提升电池组电压,并联只能提升电池组的容量,串联并联共同作用才能提升电池组的储能能力。目前,锂离子电池单体容量有限(18650 型三元锂电池单体最多仅 3000mAh 左右),因此只能采用并联方式提升容量。如 BlueROV2 所采用的电池组就是由 24 节电池以 4S6P 形式组成,其额定电压为 $4 \times 3.7\text{V} = 14.8\text{V}$,额定容量为 $6 \times 3000\text{mAh} = 18\,000\text{mAh}$ 。而磷酸铁锂电池和锂聚合物电池由于单体容量无上限,一般直接采用串联方式提升电压,如市售某款额定电压 25.6V、容量 270Ah 的磷酸铁锂电池组(满电约 29.4V、放电截止电压约 20V)中就是由 8 块单体容量 270Ah 的磷酸铁锂电池串联构成,并增加了平衡充电控制板、大功率保护板、电压表和电流表等电路。

4. 铅酸蓄电池

铅酸蓄电池历史悠久、技术成熟。目前广泛使用的免维护型铅酸蓄电池具有 20C 以上的大放电电流、对过充电耐受强、可靠性高、没有记忆效应、充放电控制简单、生命周期内维护简单等优点,但铅酸蓄电池重量大、充放电次数少相对较少。12V/100AH 的铅酸蓄电池重约 28kg,而 12V/100AH 的锂电池仅重约 3.1kg,且铅酸蓄电池的循环次数只有 500 次。

铅酸蓄电池以内含氧化铅活性物质的铅-锑-钙合金栏板作为正极,内含海绵状铅的铅-锑-钙合金栏板作为负极,以硫酸作为电解液。单格铅酸蓄电池的标称电压为 2.0V,使用时放电极限截止电压 1.5V,充电极限截止电压 2.4V。实际应用中,经常用 6 个单格铅酸电池串联组成标称电压 12V 的铅酸电池产品,其放电安全截止电压一般为 10V,充电安全截止电压 14V。市售产品除 12V 外,还有 24V、36V、48V 等。

镍氢电池、锂电池和铅酸蓄电池这三种电池在放电、充电和存储方面都有各自的特点,在使用时应特别注意,以免损伤电池或机器人。在放电方面,三种电池都必须遵守电池或电池组的放电电流限制和放电安全截止电压限制,保证电池的工作温度在容许范围内,电池的线缆等级满足绝缘要求和电流传输要求。此外,由于电池内阻的存在,在大电流放电时会导致电池电压瞬时降低,电池电压检测电路应避免误判问题的发生。

在充电方面,三种电池除了必须遵守电池或电池组的充电电流限制和充电安全截止电压限制,保证电池的工作温度在容许范围内,电池的线缆等级满足绝缘要求和电流传输要求之外,还必须要注意充电方式。目前三种电池使用的都是先恒流再恒压的方式,但镍氢电池组和锂电池组会由于单体之间的差异,导致整体容量的短板效应,因此应采用平衡充电器对串联电池组中的单体进行充电或定期对电池组中的单体进行容量平衡,以保持电池整体组容量充足。如果对于充电时间无要求,应尽量使用小电流充电(镍氢电池和铅酸蓄电池 0.1C 以下、锂电池 0.5C 以下),以避免电池过热等问题。

在存储方面,镍氢电池的自放电较大,长时间不充电会导致电池的永久损坏。因此,长期存储前应充满电,最长存储时间不应超过 6 个月,恢复使用时应先以低于 0.2C 的电流慢充充满以恢复电池容量;铅酸蓄电池在存储之前也应充至满电量,最长存储时间不应超过 12 个月;锂电池长期存放时充入约 80%电量即可,最长存储时间不应超过 3 个月。三种电池存储时均应注意存储的温度、湿度和绝缘性能要求,避免电池受到挤压或碰撞。

机器人系统中的开关电源可以较为容易地达到不同的输出电压和最大输出电流,甚至是双路输出电源或多路输出电源。如鸿海的 MD120-2405 型开关电源则具有 +24V 和 +5V 两组稳压输出, +24V 最大输出电流 4.8A、+5V 最大输出电流 1A,其中, +24V 可用于驱动电动机等较高电压的功率设备, +5V 可用于微处理器和继电器等较低电压的控制设备。而每个电池组通常只有一组输出电压,且该电压会随电池放电过程逐渐降低、随着电池充电过程逐渐升高,还会随着放电电流的变化而波动,这就对机器人的各部分系统提出了一定的适应性需求。如使用 6S1P 锂聚合物电池时,则动力驱动电路和各类动力部件(直流电动机或步进电动机等)必须能够完全适应电池输出电压的变化(16.8~25.2V),并适应电池电压的不规则波动。为舵机和微处理器等设备提供低电压的降压电路也需满足输入电压要求,尤其是电压变化时降压电路适应性。

可见,电源是机器人运动控制中的最基础部分,电源系统尤其是电池在机器人中占了大部分重量、是机器人中唯一的动力来源。在实际设计实施过程中,机器人中预留给电源系统的体积和重量,机器人所要求的电源电压、最大功率、电源形式、散热形式和工作环境,机器人系统所要求的最短工作时间等诸多限制因素相互制约,影响着机器人的电池、电动机和控制驱动系统的选型和设计。因此,在设计实施机器人之前,必须明确上述参数,计算并合理选择电源类型、电源电压、电池容量和构型。部分情况下,除了本节所述的单一电池组集中供电方式外,还可以采用以下方式灵活地构建机器人的电源系统。

(1) 单体分布式。指电池的单体在机器人内部不封装成统一的电池包,以独立的单体或小电池包的形式分布在机器人的各结构中,再以导线连接成为电气上统一的电池组来提升供电电压和电池容量,这种方式适用于体积敏感、无集中电池存放空间的机器人,如管道机器人、蛇形机器人等。其缺点是分布式电池之间的连线和预留的平衡充电线增加了系统的复杂度和重量。单体分布式电池依然是一个电池组,分布式存放仅仅是为了满足由于机器人体积和重量方面的需求。

(2) 电池组分散式供电。针对机器人本体的各个电力驱动模块,包括各类电动机和驱动器、舵机和驱动器、处理器和传感器等,采用独立的电池组分别供电的方法,即电池组 A 为电动机和驱动器 1 供电、电池组 B 为电动机和驱动器 2 供电、电池组 X 为模块 n 供电……各电池组之间仅共地或完全隔离、各模块之间仅通信或隔离通信。某电池组失效仅影响其所供电的模块工作,电池组之间不进行能量交换,其缺点也正在于此,难以平衡电池达到机器人的最长工作时间,容易出现供电导致的功能短板问题。

(3) 电池组分布式冗余。针对电池组分散式供电所产生的能量不均衡问题,分布式冗余系统增加了能量调度功能,允许电能可在电池组之间流动,最大程度上延长了机器人的工作周期。但是,该模式需要在机器人系统中增加具有电能调度功能的 BMS 系统,系统复杂度较高,不适用于小型机器人系统。

5.4 运动控制基础算法

机器人系统中的传感器负责检测外界状态,通信系统负责接收外界指令并向外传输信息,电源系统负责为机器人提供能源,电动机等执行机构将电能转换为机械能驱动机器人的移动和动作。从感知结果分析外界状态,计算出机器人的目标运动方式,则是机器人的“脑

部”所需要完成的工作。

随着现代机器人技术的发展,尤其是应用在机器人内部的人工智能技术的发展以及微处理技术的发展,机器人的数据处理能力越来越强、数据处理量越来越大、人工智能程度越来越高,机器人的“脑功能”也越来越强大。一定程度上,机器人也出现了与人脑类似的多层次脑结构。机器人的“大脑”位于最高层,负责处理与图像识别和语音识别等人机交互工作、运行实时操作系统或神经网络,根据外界变化进行复杂的计算,得出机器人的应对策略,这部分通常由高性能处理器(CPU)、图形处理器(GPU)、神经网络处理器(NPU)、数字信号处理器(DSP)或可编程逻辑阵列(FPGA)等构成,并可带有 Wi-Fi 或蓝牙等通信系统。机器人的“小脑”负责将上层的应对策略进行分解,分解为各个执行结构的动作类型和动作参数、执行底层的用于控制的算法,通常由高性能微处理器构成,其功能也可以由上层的高性能处理器代为完成。“脑干”和“神经”位于控制系统最底层,负责下行控制指令、上行状态数据,包括控制末端执行结构的工作、检测末端执行结构状态、采集末端传感器数据,通常由分布在各个部位的微处理器构成,所有微处理器均通过总线与“脑干连接”。

不同层次的处理机构处理能力不同、处理事务不同,但是在实际的机器人系统中,硬件上三个层次的划分又比较模糊,通常会出现高层处理器直接替代低层处理器完成对应功能的现象。机器人的“小脑”解读输出的直接指令一般难以直接控制机器人本体的动作,这是由于机器人在运动过程中,其数学模型除了受到重力的影响之外,还会因为本体构形的改变而发生改变。因此难以建立机器人的精确的数学模型,这就导致无法准确计算每一个动作的执行过程,进而要求机器人所执行的控制指令必须通过先进的控制算法的处理,使其能够适应无精确数学模型或无法通过有效测量手段获取系统参数的控制系统。因此,无精确模型的控制算法设计也是智能机器人的重要内容之一。

机器人的主要控制方法有:各类 PID 控制方法、自适应控制方法、滑模控制方法、模糊控制方法和神经网络控制方法等。上述各类控制方法都采用了闭环控制技术,即利用测量值与期望值比较,来纠正系统响应。测量值来源于其内部各类传感器,包括加速度传感器、陀螺仪和电子罗盘等,其纠正系统响应的机构以轮等执行机构为主。

5.4.1 PID 控制

1. 传统 PID 控制方法

PID 控制方法由比例单元 P、积分单元 I 和微分单元 D 组成,其控制基础是比例控制,通过积分控制消除稳态误差,通过微分控制加快惯性系统响应速度以及减弱超调趋势。PID 控制算法简单,可靠性高,在工业领域得到了大量应用,也是各类机器人的常用基本控制方法。

PID 控制将当前状态的实际值 $c(t)$ 与期望值 $r(t)$ 的偏差作为系统输入,算法根据所输入的偏差进行比例 P、积分 I 和微分 D 的线性组合运算,并将计算结果应用到被控对象。其原理如图 5.23 所示。

PID 控制器的输入输出关系为

$$u(t) = K_P \left[e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) dt + \frac{T_D de(t)}{dt} \right] \quad (5.18)$$

拉普拉斯变换后得到传递函数为

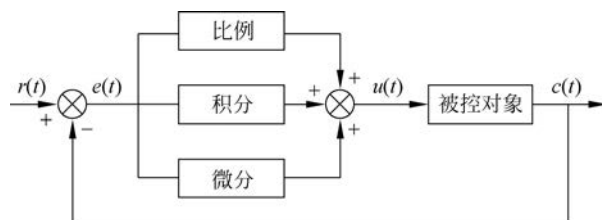


图 5.23 PID 控制系统原理图

$$G(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (5.19)$$

其中, $e(t)$ 是偏差值, K_p 是比例系数, T_i 是积分时间常数, T_d 是微分时间常数。

利用积分系数 $K_i = K_p / T_i$ 、微分系数 $K_d = K_p T_d$ 表示 PID 控制器输入输出关系, 有:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

$$G(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (5.20)$$

PID 控制器的控制效果与比例系数、积分系数和微分系数密切相关, 这里以被控对象传递函数 $G(s) = 1/(s+1)^3$ 来说明各参数的作用结果。

(1) 比例系数 K_p 。比例系数 K_p 用于将偏差值 $e(t)$ 成比例地传输到控制系统, 以增大控制系统输出的控制信号, 加速偏差值变小的趋势, 使系统快速达到目标值。如果比例系数 K_p 过小, 会导致系统达到稳定的速度过慢, 导致比例环节失效, 而 K_p 过大会使得较小的偏差引起过大的输出, 导致系统超调和振荡。如图 5.24 所示, 随着比例系数 K_p 的增大, 稳态误差减小, 但动态性能变差, 振荡比较严重、超调量增大。

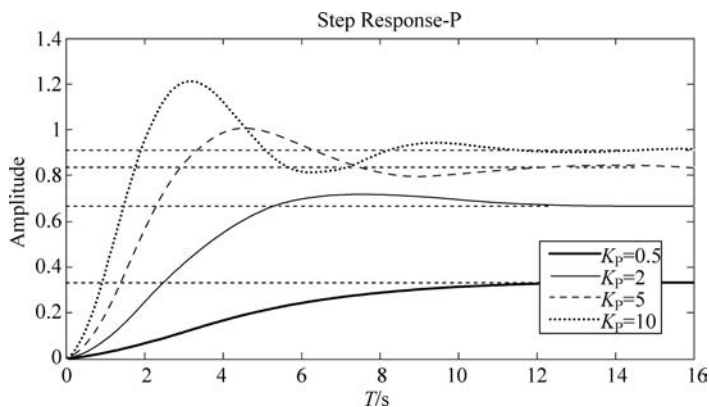


图 5.24 比例控制的系统响应

(2) 积分系数 K_i 。积分时间常数 K_i 是将控制过程中部分时间段所产生的偏差值 $e(t)$ 累积, 持续改变控制器输出的控制量大小。积分在 PID 控制器中用于消除系统达到稳定时的稳态误差, 从而提高系统的稳态精度, 稳态误差通常由外界的持续干扰产生。需要注意的是, 在系统初始状态偏差较大时, 积分容易在调解过程中出现积分饱和, 使系统出现过大的超调和持续振荡问题。如图 5.25 所示, 随着积分时间常数 T_i 减小, 静差也在减小, 但是 T_i

过小会加剧系统的振荡,甚至使系统失去稳定。实际应用中,积分作用常与另外两种调节规律相结合,组成 PI 控制器或 PID 控制器。

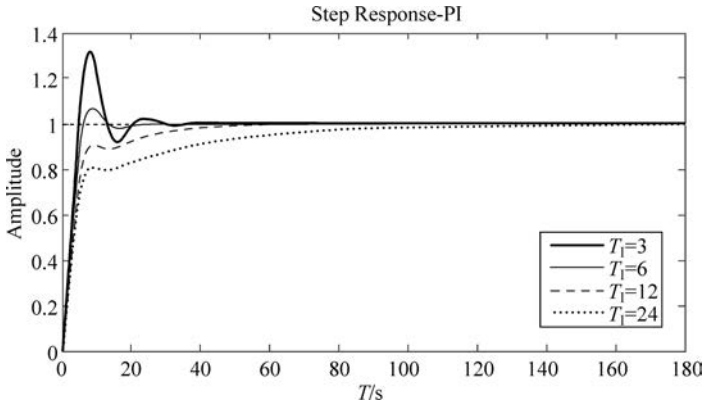


图 5.25 比例积分控制的系统响应($K_p=1$)

(3) 微分系数 K_D 。微分系数 K_D 根据偏差的变化速率来改变 PID 控制器的输出,当被控量向着预设值变化时,系统偏差趋于变小,偏差变化率为负数,在比例系数 K_p 和微分系数 K_D 的共同作用下降低系统的输出,从而降低调节速度以便系统趋于稳定,实现类似制动的效果。微分系数过小会降低系统趋于稳定的速度,而过大则会导致系统对偏差过于敏感,造成系统振荡。如图 5.26 所示,随着微分时间常数 T_D 的增加,超调量减小。

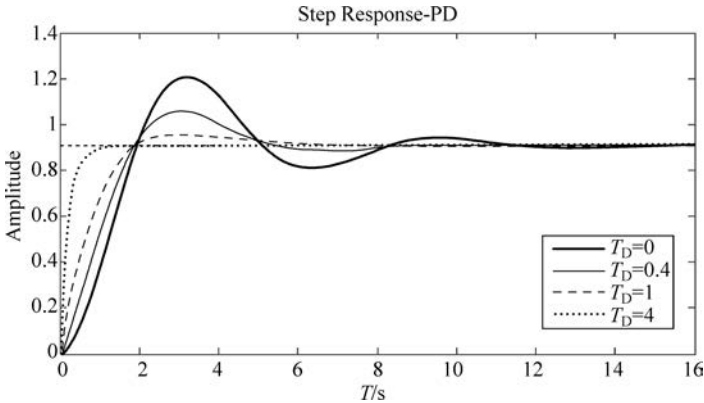


图 5.26 比例积分微分控制的系统响应($K_p=1$ 、 $T_i=1$)

2. 数字式 PID 控制

在以微处理器为核心的数字控制系统中,各传感器以数字形式采集离散的信号,在这种情况下,需要将连续的模拟 PID 算法变成离散的 PID 算法,主要有位置式 PID 和增量式 PID 两种方法。

(1) 位置式 PID 将积分项近似为各时刻的偏差与周期乘积的求和运算,微分项近似为连续两次采样的差值与周期的求商运算,即:

$$\begin{cases} \int_0^t e(t) dt \approx \sum_{i=0}^k T \times e(i) \\ \frac{de(t)}{dt} \approx \frac{e(k) - e(k-1)}{T} \end{cases} \quad (5.21)$$

其中, $e(k)$ 是第 k 次采样的偏差值, T 是采样周期, 令积分系数 $K_I = K_P T / T_I$ 、微分系数 $K_D = K_P T_D / T$, 得到离散化处理后的位置式 PID 控制关系:

$$\begin{aligned} u(k) &= K_P \left[e(tk) + \frac{T}{T_I} \sum_{i=0}^k e(i) + T_D \frac{e(k) - e(k-1)}{T} \right] \\ &= K_P e(k) + K_I \sum_{i=0}^k e(i) + K_D (e(k) - e(k-1)) \end{aligned} \quad (5.22)$$

可见, 位置式 PID 的每次输出都需要之前的所有的偏差值 $e(i)$, ($i=1, 2, 3, \dots, k$), 即该算法是一种全量的算法, 需要存储大量的历史数据并进行运算。一旦 PID 控制器的输入出现故障, 就会导致输出量发生大幅度变化, 造成系统故障。

(2) 增量式 PID 控制不进行全量输出, 仅计算增量部分, 即当前所需的输出为前一时刻的输出加上增量部分, 即连续两个周期的输出值之差:

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k-1) \quad (5.23)$$

由递推原理, 有:

$$\begin{aligned} u(k-1) &= K_P e(k-1) + K_I \sum_{i=0}^k e(i) + K_D (e(k-1) - e(k-2)) \\ \Delta u(k) &= K_P (e(k) - e(k-1)) + K_I e(k) + K_D (e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)) \end{aligned} \quad (5.24)$$

可见, 增量式 PID 相对于位置式 PID, 其控制计算简单, 无须每次都把所有历史数据做累加, 就可以避免累积误差所导致的积分饱和问题。增量式 PID 的最终控制信号是控制增量, 而不是全量, 系统异常情况下产生的错误影响很小。

PID 控制器的参数确定, 通常可以使用临界比例系数法、响应曲线法、Ziegler-Nichols 参数设定法等。此外, PID 控制器的 K_P 、 K_I 和 K_D 的调节还应遵循如下原则。

比例系数 K_P : 当系统偏差 e 正向增加时, 则需要增大 K_P , 而当 e 负向增加时, 系统会产生超调, 则应当减小 K_P 。当系统偏差 e 为 0 时, 若偏差变化率 $\dot{e}$ 为正向, 则需要增大 K_P 以减小偏差, 若 $\dot{e}$ 为负向, 则需要减小 K_P 以减小超调。

积分系数 K_I : 与 K_P 的调节方法类似, 但应注意积分饱和问题, 并且在增大 K_P 的同时减小 K_I 。

微分系数 K_D : 当系统偏差 e 正向增加, 且 K_P 增大的情况下, 可能导致微分溢出的问题, 则应当适当减小 K_D 。

增量式 PID 的控制算法流程图如图 5.27 所示。

3. 串级 PID 控制

串级 PID 控制是将两个 PID 控制器串联在一起, 第一个 PID 控制器的输出作为第二个控制器的输入, 串级 PID 分为内环控制回路和外环控制回路, 其结构如图 5.28 所示。

串级 PID 控制器中两个控制器串联工作, 以外环控制器为主导, 以保证外环主变量稳定为目的, 两个控制器协调一致, 互相配合, 内环控制器首先进行粗调, 外环控制器再进一步

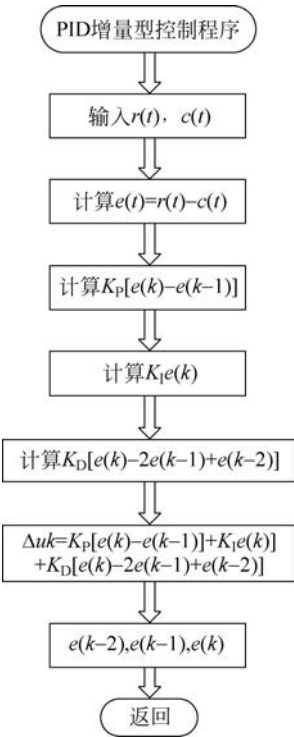


图 5.27 增量式 PID 控制算法流程图

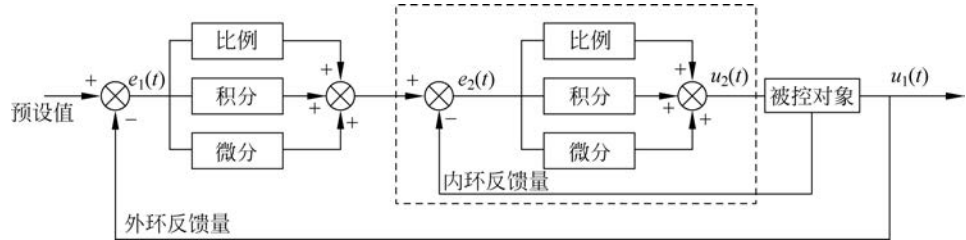


图 5.28 串级 PID 控制算法流程图

细调。串级 PID 与传统 PID 相比较,其控制效果与抗干扰能力均显著提高。

5.4.2 模糊控制

1. 模糊数学基础问题

传统的数学在相对较模糊的自然语言概念上是难以描述的,如“高、矮”“胖、瘦”等,类似的自然语言具有相当的不确定性,尤其是模糊性,而计算机语言则要求对含义具有严密的、清晰的解释,这时就需要模糊语言来解决类似的问题。语言变量能够使模糊语言在计算机中表示,使计算机能够模拟人类的思维去推理和判断,语言变量的值称为语言值,通常使用模糊集合来表示。一个完整的语言变量可以定义为一个五元体 $(X, T(X), U, G, M)$,分别表示语言变量的名称、语言值、论域、语法规则和语义规则。若存在 $a, b, c \in \{0, 1\}$,在布尔代数中有以下性质。

- (1) 基本定律: $a \vee 1=1, a \vee 0=0, a \wedge 1=a, a \wedge 0=0$ 。
- (2) 幂等律: $a \wedge a=a, a \vee a=a$ 。
- (3) 交换律: $a \wedge b=b \wedge a, a \vee b=b \vee a$ 。
- (4) 结合律: $(a \wedge b) \wedge c=a \wedge (b \wedge c), (a \vee b) \vee c=a \vee (b \vee c)$ 。
- (5) 吸收率: $(a \vee b) \wedge b=b, (a \wedge b) \vee b=b$ 。
- (6) 分配律: $(\alpha \vee \beta) \wedge \gamma=(\alpha \wedge \gamma) \vee (\beta \wedge \gamma), (\alpha \wedge \beta) \vee \gamma=(\alpha \vee \gamma) \wedge (\beta \vee \gamma)$ 。
- (7) 复原率: $(\alpha^c)^c=\alpha$ 。
- (8) 补余律: $\alpha \vee \alpha^c=1, \alpha \wedge \alpha^c=0$, 不适用于模糊逻辑运算。

模糊逻辑对应于模糊集合论, 模糊逻辑运算满足除了补余律之外的布尔代数性质, 此外还满足 De Morgan 对偶律:

$$\begin{aligned}(\alpha \vee \beta)^c &= \alpha^c \wedge \beta^c \\(\alpha \wedge \beta)^c &= \alpha^c \vee \beta^c\end{aligned}\quad (5.25)$$

对于补余运算, 有:

$$\begin{aligned}\alpha \vee \alpha^c &\neq 1, \quad \text{而} \quad \alpha \vee \alpha^c = \max(\alpha, 1-\alpha) \\ \alpha \wedge \alpha^c &\neq 0, \quad \text{而} \quad \alpha \wedge \alpha^c = \min(\alpha, 1-\alpha)\end{aligned}\quad (5.26)$$

在模糊集合中, 论域 U 上的一个模糊集合 A 指对于论域 U 中的任意元素 $u \in U$, 都指定了闭区间 $[0, 1]$ 中的一个数 $u_A(u) \in [0, 1]$ 与之对应, 称为 u 对 A 的隶属关系, 即定义了一个映射 u_A :

$$\begin{aligned}u_A: U &\rightarrow [0, 1] \\ u &\mapsto u_A(u)\end{aligned}\quad (5.27)$$

该映射称为模糊集合 A 的隶属函数, 模糊集合完全由其隶属函数刻画。例如, 描述成年人年龄的“青年、中年、老年”, 将这三个年龄特征使用模糊集合 A 、 B 和 C 表示, 其论域都为 $U=[1, \infty)$, 年龄 u 是该论域中的元素, 按照基本认知可以建立隶属函数, 如图 5.29 所示。

如果有 $u_1=30$, u_1 对 A 的隶属度 $u_A(u_1)=0.75$, 表示 30 岁属于“青年”的程度是 0.75, 如果 $u_2=40$, u_2 对 A 的隶属度 $u_A(u_2)=0.25$, u_2 对 B 的隶属度 $u_B(u_2)=0.5$, 表示 40 岁已经不太属于“青年”了, 比较接近中年, 但属于中年的程度又只有 0.5, 显然这种表述能够更准确地表述人们的认知。模糊数学基础主要包括模糊集合、隶属函数、模糊关系和模糊推理四方面。

(1) 模糊集合的表示方法。主要分为连续和离散两种情况。对于连续域的论域, 通常采用 Zadeh 表示法:

$$\tilde{A} = \int_U \tilde{A}(u)/u \quad (5.28)$$

其中, 积分并非常规积分运算, 而是用来表示各元素与隶属度对应关系的总和, 即论域中的每个元素 u 都定义了相应的隶属度函数 $\tilde{A}(u)$ 。

对于离散有限集 $\{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ 的论域 U , 有 Zadeh 表示法和向量表示法, Zadeh 表示法有:

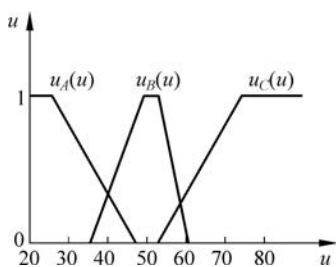


图 5.29 “青年”“中年”“老年”的隶属函数

$$\tilde{A} = \frac{u_A(u_1)}{u_1} + \frac{u_A(u_2)}{u_2} + \dots + \frac{u_A(u_n)}{u_n} \quad (5.29)$$

其中,加法也非常规求和运算,而是用来表明每个元素 u_i 都定义了相应的隶属度函数 $u_A(u_i)$ 。向量表示法则是给论域中元素一定的表达顺序,如:

$$\tilde{A} = \{u_A(u_1), u_A(u_2), \dots, u_A(u_n)\} \quad (5.30)$$

(2) 隶属函数。常见的隶属函数有三角形和正态型两种,三角形隶属函数如下。

$$u_F(x) = \begin{cases} \frac{x-b}{a-b}, & b \leq x \leq a \\ \frac{c-x}{c-a}, & a < x \leq c \\ 0, & x < b \text{ 或 } x > c \end{cases} \quad (5.31)$$

正态型隶属函数如下:

$$u_F(x) = e^{-\left(\frac{x-a}{b}\right)^2} \quad (5.32)$$

(3) 模糊关系。设 $A \times B$ 是集合 A 和集合 B 的直积,以 $A \times B$ 为论域定义的模糊集合 R 称为 A 和 B 的模糊关系,即对于 $A \times B$ 中的任一元素 (a, b) 都指定了其对 R 的隶属度 $u_R(a, b)$, R 的隶属度 u_R 可以看作如下映射:

$$\begin{aligned} u_R: A \times B &\rightarrow [0, 1] \\ (a, b) &\mapsto u_R(a, b) \end{aligned} \quad (5.33)$$

模糊关系可以用模糊矩阵、模糊图和模糊集三种形式表示,通常用模糊矩阵表示二元模糊关系,即 $A \times B$ 的模糊关系 R 可以用下列 $m \times n$ 阶矩阵表示:

$$\mathbf{R}_{A \times B} = (r_{ij})_{m \times n} = (u_R(a_i, b_j))_{m \times n} \quad (5.34)$$

其中, $i=1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, n$ 。

(4) 模糊推理。又称模糊逻辑推理,是指在确定的模糊规则下,由已知的模糊命题推出新的模糊命题作为结论的过程。模糊推理是一种近似推理,典型的模糊推理方法包括 Mamdani 模糊推理法、Larsen 推理法、Zadeh 推理法、Takagi-Sugeno 模糊推理法。

Mamdani 模糊推理法是最常用的一种,其模糊蕴涵关系 $R_M(X, Y)$ 定义简单,可以通过模糊集合 A 和 B 的笛卡儿积(最小)求得,即

$$u_{\tilde{R}_M} = u_{\tilde{A}}(x) \wedge u_{\tilde{B}}(y) \quad (5.35)$$

Larsen 模糊推理法又称为乘积推理法,与 Mamdani 模糊推理法相似,但在激励强度的求取与推理合成时,用乘积运算取代了取小运算。

Zadeh 推理法与 Mamdani 模糊推理法相比,同样采用取小合成运算原则,但其模糊关系的定义是不同的。Takagi-Sugeno 模糊推理法便于建立动态系统的模糊模型,在模糊控制中得到了广泛应用,其典型的模糊规则形式为:

$$\text{IF } x \text{ is } A \text{ AND } y \text{ is } B \text{ THEN } z = f(x, y) \quad (5.36)$$

其中, A 和 B 是前件中的模糊集合, $z = f(x, y)$ 是后件中的精确函数。可见,该模型以“IF...THEN...”的规则形式将非线性系统表示成为一系列局部线性子系统的线性组合,通过隶属度函数将线性子系统连接起来,从而达到通过线性控制理论对模糊系统进行分析和控制的目标。

2. 模糊控制器

模糊控制(Fuzzy Control)是一种模拟人类推理与决策的智能化控制策略,在无法准确建立数学模型的复杂非线性运动控制系统中有着巨大的优势。其本质是根据经验数据将系统中一些精确参数值按照一定规律模糊化为模糊量,如大、中、小等,由计算机对模糊量进行模糊推理之后分析出合适的控制策略并完成模糊化控制量的输出,最终经过反模糊化后形成准确的控制量并执行,其结构如图 5.30 所示。

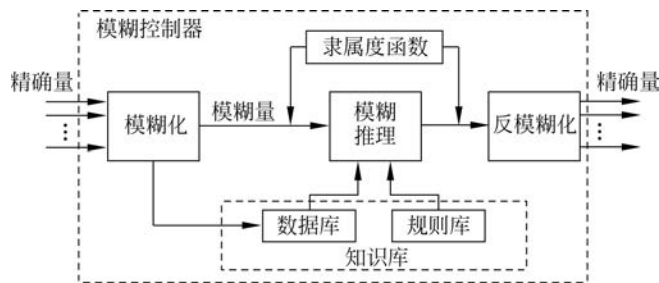


图 5.30 模糊控制器的基本结构

模糊控制器主要包括模糊化、知识库、模糊推理和反模糊化四部分,各部分功能如下。

(1) 模糊化。其主要作用是将输入的模糊控制器的精确量转换为模糊控制器所需要的模糊量,模糊语言变量值是一个模糊集合,所以模糊化方法应给出从精确量到模糊集合的转变方法,模糊化的结果是模糊论域上输出。模糊化的关键在于模糊量化的划分,划分过少会导致系统认知误差或认知错误,而划分过细会增加模糊控制的运算量,偏离模糊控制的意义。一般的 PID 控制可以将模糊量划分为 7 级。

(2) 知识库。包括数据库和规则库两部分。数据库用于向模糊推理过程提供模糊数据,规则库是根据研究人员和工程人员的长期经验总结出来的模糊语言规则。规则库使得模糊控制器具有一定人类的逻辑,通常使用一系列“IF...THEN...”语句表示输入和输出的关系。例如:

R1: IF E is A1 AND(or) EC is B1 THEN U is C1
R2: IF E is A2 AND(or) EC is B2 THEN U is C2
...
Rn: IF E is An AND(or) EC is Bn THEN U is Cn

其中,E 和 EC 是输入变量,A_x 和 B_x 是规则,U 是输出变量。

(3) 模糊推理。模糊推理首先在已经总结出的模糊语言规则中找出与当前输入相匹配的规则,然后根据寻找到的规则进行推理,即完成寻找匹配和规则推理两个过程。常见的模糊推理方法有通过模糊推理得到输出值所属模糊论域的 Mamdani 方法和通过模糊推理得到该规则对应的函数或常数的 T-S 推理方法等。

(4) 反模糊化。又称解模糊过程,其主要目的是能反映控制量的精确值。反模糊化主要有最大隶属度法,重力中心法和加权平均法等。常用的重力中心法又称代数法,其连续积分计算表达式为

$$y_0 = \frac{\int_y \mu(y) y dy}{\int_y \mu(y) dy} \quad (5.37)$$

对于具有 n 个输出量化的离散情况表达式为:

$$y_0 = \frac{\sum_{i=1}^n \mu(y_i) y_i}{\sum_{i=1}^n \mu(y_i)} \quad (5.38)$$

3. 模糊控制器设计方法

模糊控制器的设计就是控制器各个部分准则的设计,主要包括控制量的选取、模糊化过程、模糊规则设计和解模糊四个过程。

(1) 控制量的选择。模糊控制器的作用是根据人类的控制经验,模仿人工进行控制,而人类进行控制时,是有选择地观察被控对象的当前状态和变化趋势,凭借经验对被控对象进行控制。所以在常规的模糊控制器中,选取被控对象输出变量的偏差值 e_i 和偏差变化率 $\dot{e}_i$ 为输入,而把被控制量定为模糊控制器的输出变量。

对于 ROV 的运动控制器而言,其所控制的 ROV 本体运动速度较低,各种运动状态之间彼此独立,耦合不严重。因此,在设计模糊控制器时,可以认为 ROV 的各种运动之间是独立的,并对 ROV 的各种运动设计模糊控制器,包括纵向运动控制器、横向运动控制器和垂向运动控制器等,并将在对应控制方向与目标点的偏差值 e_i 和偏差变化率 $\dot{e}_i$ 作为输入,将推进器需要输出的推力作为控制器的输出变量 F 。

(2) 模糊化过程。模糊化过程使用偏差值 e_i 和偏差变化率 $\dot{e}_i$ 作为输入,其主要功能是将非模糊数据转换为模糊数据。该过程需要实现论域变化和定义模糊集合与隶属函数两个功能。

e_i 和 $\dot{e}_i$ 都是通过传感器采集和计算过的非模糊变量,其论域属于实数域上的一个连续闭区间,需要将其转换到模糊控制器的内部论域 $[-1,1]$ 上,实现输入变量的正则化。例如,ROV 纵向运动时可设定最远目标点为 5m,最大运动速度 0.6m/s,即 $x_m = 5\text{m}$, $v_m = 0.6\text{m/s}$,将 e_i 和 $\dot{e}_i$ 的实际值除以 x_m 和 v_m ,得到正则化的输入变量:

$$\begin{aligned} e_i^* &= e_i / x_m \\ \dot{e}_i^* &= \dot{e}_i / v_m \end{aligned}$$

其中, $e_i^* \in [-1,1]$, $\dot{e}_i^* \in [-1,1]$,同理可以得到输出变量的论域变换值 F^* 。

论域变换后, e_i 和 $\dot{e}_i$ 仍是非模糊的普通变量,需要通过定义模糊集合和隶属函数将其模糊化。对其定义若干模糊集合,并在其内部论域上规定各个模糊集合的隶属函数,得出 e_i^* 和 $\dot{e}_i^*$ 对各个隶属函数的隶属度,即可实现把普通变量变为模糊变量的过程。一般可以将正则化的输入输出变量,将 e_i^* 、 $\dot{e}_i^*$ 和 F^* 定义为 9 个模糊集合(常规情况下可以简化为 7 个或 5 个模糊集合): NL(也写作 NB,负大)、NM(负中)、NS(负小)、NZ(负零)、Z(也写作 ZO,零)、PZ(正零)、PS(正小)、PM(正中)、PL(也写作 PB,正大)。而变量的模糊集合的隶属函数可以选择 Sigmoid 函数、高斯函数、或三角形函数。

图 5.31 的对称、均匀分布的全交迭三角函数是一种最常用的隶属函数。其对称性指正

负两边的图形对称,均匀分布性指每个三角形的中心点在论域上均匀分布,分别分布在-1、-0.75、-0.5、-0.25、0、0.25、0.5、0.75和1上,全交迭则指每个三角形的底边的端点恰好在相邻两个三角形的中心点处。

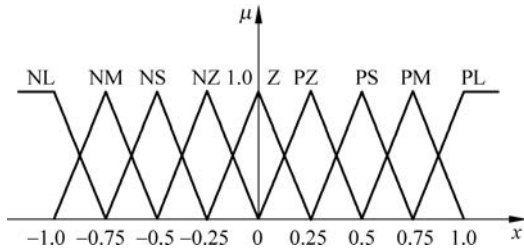


图 5.31 对称、均匀分布、全交迭的三角形隶属函数

(3) 模糊规则设计。根据输入的模糊集合的数量即可确定模糊规则的数量, e_i^* 和 $\dot{e}_i^*$ 各有9个模糊集合,因此共有81条模糊规则,如表5.4所示。

表 5.4 设计的模糊规则

z		e_i^*								
		NL	NM	NS	NZ	Z	PZ	PS	PM	PL
$\dot{e}_i^*$	NL	1.0	1.0	1.0	1.0	0.8	0.6	0.3	0.0	0.0
	NM	1.0	1.0	1.0	1.0	0.7	0.4	0.1	0.0	-0.1
	NS	1.0	1.0	1.0	0.7	0.5	0.2	0.0	-0.2	-0.4
	NZ	1.0	1.0	0.7	0.4	0.2	0.0	-0.2	-0.4	-0.6
	Z	1.0	0.7	0.4	0.2	0.0	-0.2	-0.4	-0.7	-0.8
	PZ	0.6	0.4	0.2	0.0	-0.1	-0.4	-0.6	-0.8	-1.0
	PS	0.3	0.1	0.0	-0.2	-0.4	-0.6	-0.8	-1.0	-1.0
	PM	0.0	0.0	-0.2	-0.4	-0.7	-0.8	-1.0	-1.0	-1.0
	PL	0.0	-0.1	-0.4	-0.6	-0.8	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0

(4) 解模糊。常用的解模糊方法有最大隶属度平均法、重心法和加权法。以加权法为例,将语言变量 z 各模糊集合的隶属函数定义为单点,模糊规则变为

$$R_i: \text{ IF } x=A_i \text{ and } y=B_i, \text{ then } z=z_i$$

其中, $z_i(i=1,\cdots,n)$ 是论域 $Z=[-1,1]$ 上的实数,若规则的激活度为 α_i ,则解模糊结果 z_0 为

$$z_0=\frac{\sum\limits_i^n\alpha_iz_i}{\sum\limits_i^n\alpha_i}\tag{5.39}$$

5.4.3 模糊PID控制

模糊PID控制是将传统的PID控制技术与模糊控制相结合,利用模糊控制器作为PID参数调节器的一种复合型智能控制方法。传统PID控制器的控制效果受其自身参数的影响和制约,固定的参数使PID的调节能力受到限制。而模糊控制器单独控制系统时,又不

具备积分能力,无法在系统遇到持续干扰时消除稳态误差。因此将 PID 控制和模糊控制相结合,构成模糊 PID 控制器,结合两种控制方法的优点,既保留 PID 的快速调节能力,又使得其在模糊控制作用下具备了自我调节参数的自适应能力。模糊 PID 控制器能够在不同环境下准确输出并具备解决复杂非线性系统问题的能力,且模糊控制器具备智能型较高、输出平缓等优良特性。

模糊 PID 控制器的工作原理如下:首先利用被控制量的预期值与当前反馈值之间的偏差,以及偏差的导数作为模糊控制器的输入,即构成二维模糊 PID 控制器。而后通过模糊控制器输出 PID 参数调节量,将调节量与原始的三个参数相加后得到当前系统调节所需要的控制参数。模糊 PID 控制结构如图 5.32 所示,控制流程如图 5.33 所示。

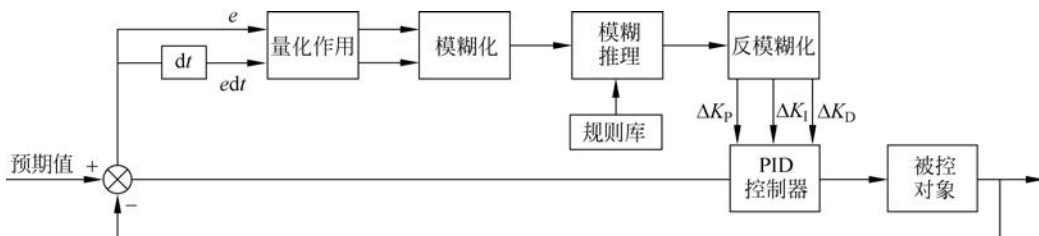


图 5.32 模糊 PID 结构图

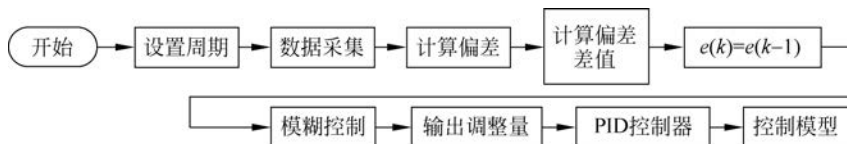


图 5.33 模糊 PID 工作流程图

1. 模糊 PID 控制器的设计实例

MATLAB 中的模糊逻辑工具箱提供了建立模糊控制器的方法,实现确定语言变量、编辑隶属度函数和模糊规则等功能,还可以将参数保存为 FIS 文件并导入到 simulink 模块中模糊 PID 控制器进行仿真分析。

(1) 确定语言变量。在 MATLAB 的命令行窗口内输入“fuzzy”即可打开逻辑设计器(Fuzzy Logic Designer),通过菜单 Edit→Add Variable 增加 Input: E 和 EC,即 e 和 $\dot{e}$,增加 Output: delta-Kp、delta-Ki 和 delta-Kd,即 PID 的三个参数的调节量 ΔK_p 、 ΔK_i 和 ΔK_d ,如图 5.34 所示。

(2) 编辑输入和输出变量的隶属度函数。通过菜单 Edit→Membership Function Editor 打开隶属度函数编辑器,对 Input 和 Output 的隶属度进行编辑。首先是模糊化过程,对 ROV 的输入量 E 和 EC 进行离散化处理。转变为论域上所需要的模糊语言,假设其论域为

$$E, EC = [-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3]$$

同样假设 ΔK_p 、 ΔK_i 和 ΔK_d 在模糊集上的论域:

$$\Delta K_p, \Delta K_i = [-0.3, -0.2, -0.1, 0, 0.1, 0.2, 0.3]$$

$$\Delta K_d = [-0.03, -0.02, -0.01, 0, 0.01, 0.02, 0.03]$$

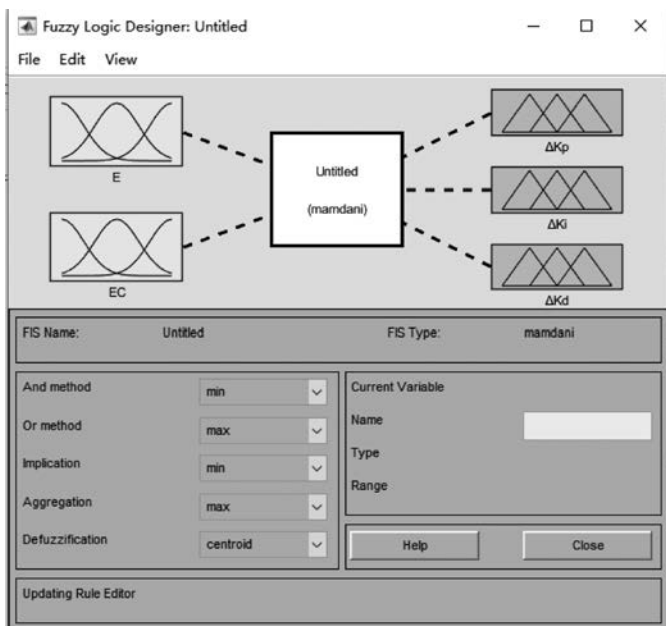


图 5.34 模糊变量界面

为了简化运算复杂度,选用对称三角形(Trimf)函数作为模糊语言变量的隶属函数,其隶属值只与直线斜率的运算有关,分为 7 个等级(NB、NM、NS、ZO、PS、PM、PB),分别设置 5 个变量,以 E 为例,如图 5.35 所示。

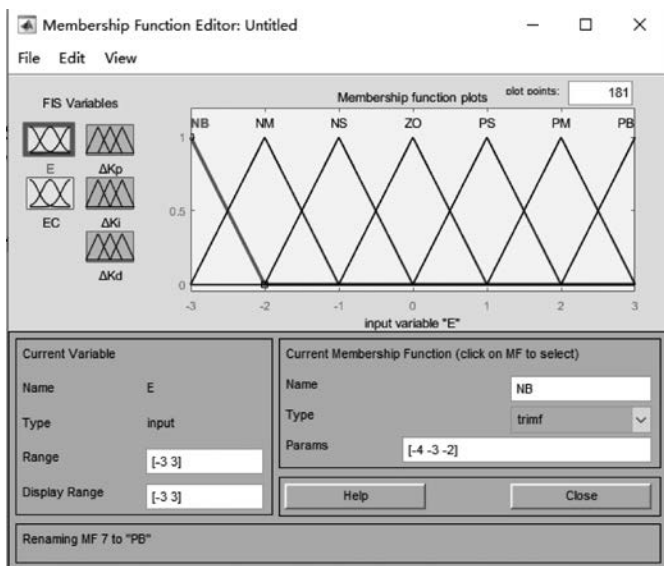


图 5.35 隶属度函数图

故有 E 的隶属度如表 5.5 所示。

表 5.5 E 的隶属度

隶 属 度		E 的输入量												
		-3.0	-2.5	-2.0	-1.5	-1.0	-0.5	0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
模 糊 语 言 值	NB	1.0	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	NM	0	0.5	1.0	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	NS	0	0	0	0.5	1.0	0.5	0	0	0	0	0	0	0
	ZO	0	0	0	0	0	0.5	1.0	0.5	0	0	0	0	0
	PS	0	0	0	0	0	0	0	0.5	1.0	0.5	0	0	0
	PM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.5	1.0	0.5	0
	PB	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.5	1.0

模糊控制器采用模糊规则对传统 PID 控制的三个参数进行模糊推理并调整参数,在调整过程中应当遵循以下三个原则。

① ΔK_p 整定原则。当偏差 e 正向增加时, ΔK_p 为正向,则需要增大 K_p 的值。当偏差 e 负向增加时,系统处于超调状态。此时,应该降低 K_p 的值。而当偏差 e 为零时,若 $\dot{e}$ 为负向,则系统超调过大,应降低 K_p 的值。若 $\dot{e}$ 为正向,为了降低偏差,应增加 K_p 的值,如表 5.6 所示。

表 5.6 ΔK_p 模糊控制规则表

$E \backslash EC$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB

② ΔK_I 整定原则。调节方法与 K_p 类似,但应该防止积分饱和,并在增大 K_p 的值时,减小 K_I 。其整定的模糊规则表如表 5.7 所示。

表 5.7 ΔK_I 模糊控制规则表

$E \backslash EC$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZO	NS
NS	NB	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
PS	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PB
PM	ZO	ZO	PS	PS	NM	PB	PB
PB	ZO	ZO	PS	PM	NM	PB	PB

③ ΔK_D 整定原则。当偏差 e 正向增大时, K_p 的增加可能会引起微分溢出,因此在增大 K_p 时,应当减小 ΔK_D 的值。其整定的模糊规则表如表 5.8 所示。

表 5.8 ΔK_D 模糊控制规则表

$E \backslash EC$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PS	NS	NB	NB	NB	NM	PS
NM	PS	NS	NB	NM	NM	NS	ZO
NS	ZO	NS	NM	NM	NS	NS	ZO
ZO	ZO	NS	NS	NS	NS	NS	ZO
PS	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
PM	PB	PS	PS	PS	PS	PS	PB
PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB

(3) 通过菜单 Edit→Rule Editor 打开模糊规则编辑器,创建模糊控制规则表,如图 5.36 所示。

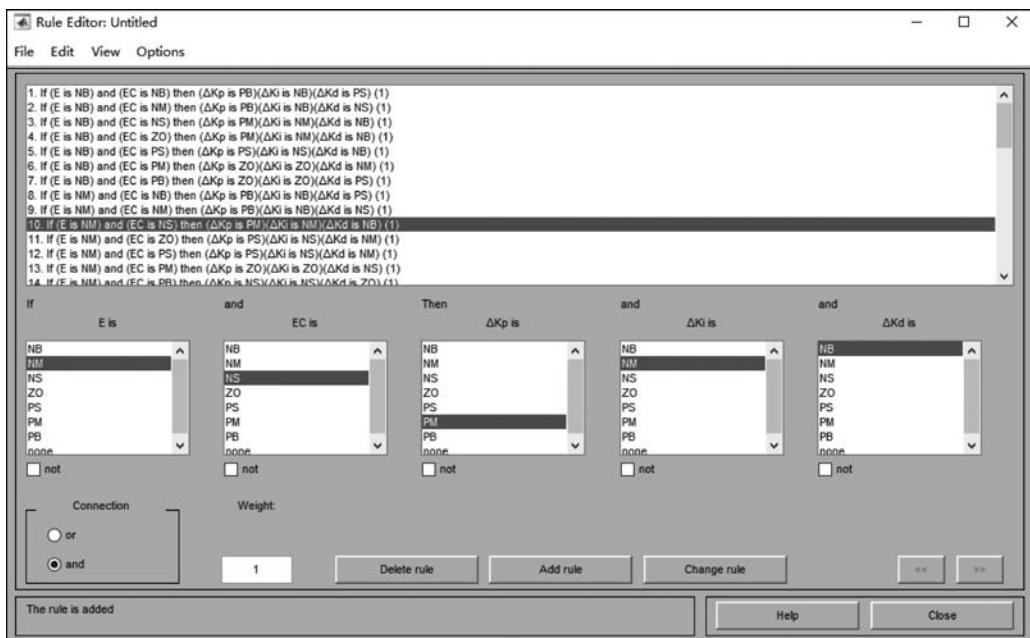


图 5.36 编辑模糊控制规则表

(4) 调试模糊推理系统。可以通过 MATLAB 对创建好的模糊控制器进行调试,打开模糊推理输入输出曲面视图(Surface View)和模糊规则观测器(Rule Viewer),以审核模糊控制器的完整性,如图 5.37~图 5.40 所示。

2. 模糊 PID 控制算法流程

模糊 PID 控制器的目标就是运用模糊推理的方法,对系统的偏差和偏差变化率进行处理、查表和运算,通过模糊控制器动态寻找合适的 PID 参数值,使得机器人处于最佳运动状态。需要特别注意,这个寻找过程是动态的、持续执行的,以达到一直保持机器人最佳状态的目的。下面选取可以在三维空间中自由移动的 ROV,并以控制 ROV 到达特定的位置为例,说明模糊 PID 控制算法基本流程,如图 5.41 所示。

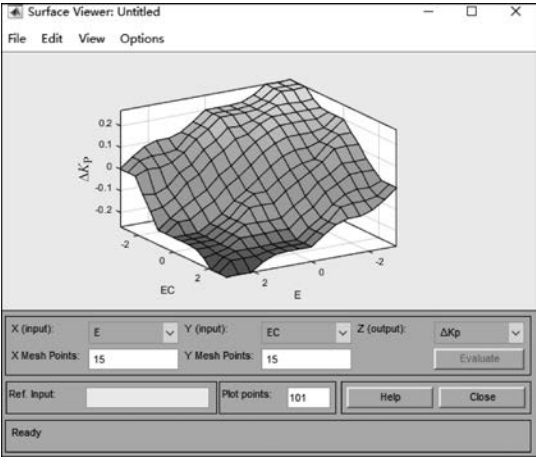


图 5.37 ΔK_p 特征曲面

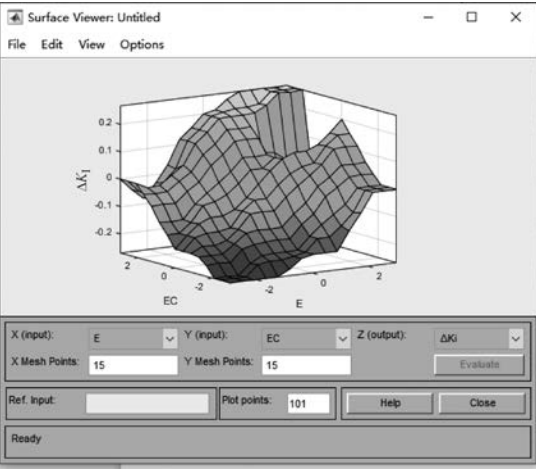


图 5.38 ΔK_i 特征曲面

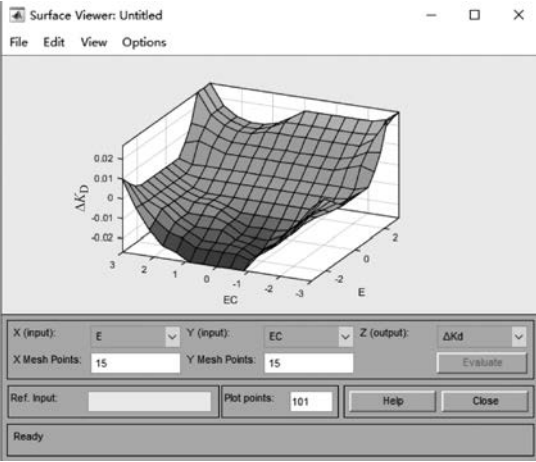


图 5.39 ΔK_d 特征曲面

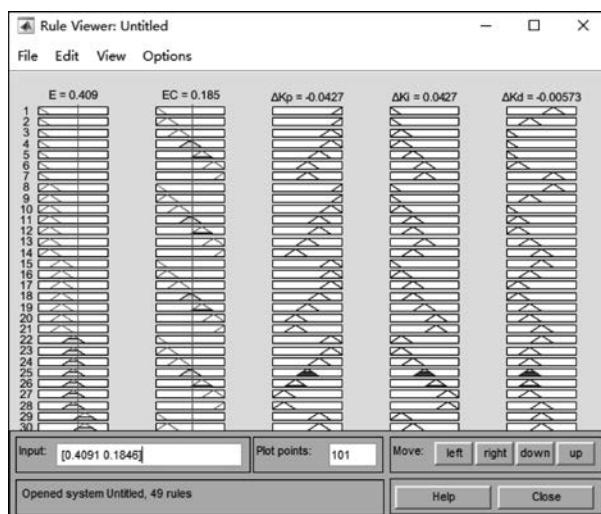


图 5.40 输入输出曲面视图

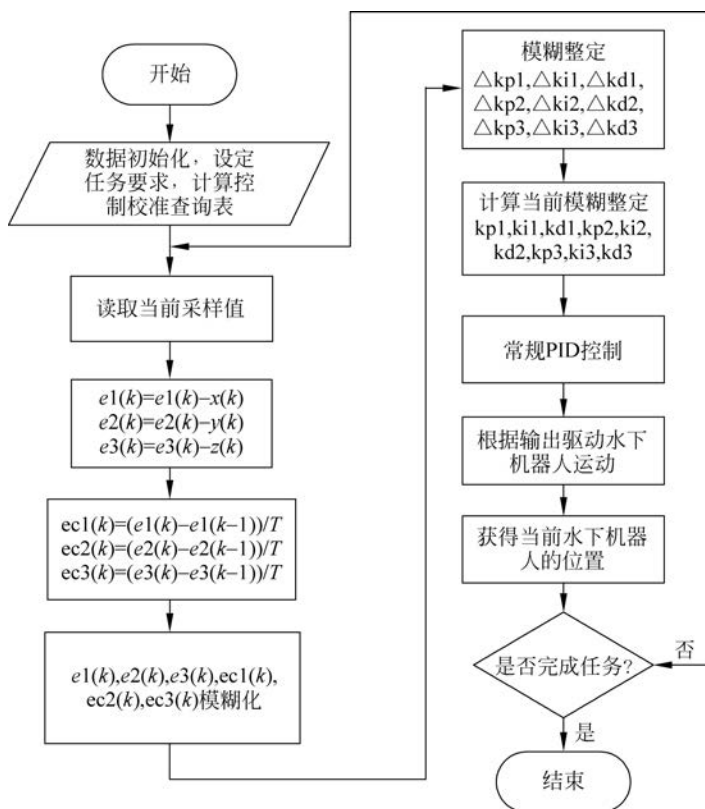


图 5.41 模糊 PID 控制程序流程图

3. 模糊 PID 控制仿真

继续以 ROV 在水中的运动为例,介绍模糊 PID 控制仿真方法。ROV 在水下作业时,其各种运动通常都在操作员的控制下执行。但 ROV 中常用的定深(保持 ROV 深度)和定

向(保持 ROV 艏向)是 ROV 常用的两种需要自动执行的作业,也是考察 ROV 性能的重要指标,通过各类方法实现这两个功能是 ROV 的基本要求。这里主要针对定深和定向两个功能进行模拟仿真,在进行模糊 PID 仿真同时,也进行传统数字 PID 的仿真作为对比。

(1) 定深仿真。在仿真前应先确定 ROV 的深度传递函数,ROV 的原地定深运动是指 ROV 利用垂向推进器来实现的深度保持功能,对垂向运动的水动力方程进行简化,可得到深度对垂向运动的传递函数:

$$H_z(s) = \frac{1}{Ns} \tag{5.40}$$

其中, N 是由相关水动力实验测量并计算得到的常数,例如,某重型 ROV 的 N 为 112.4。通过 Simulink 构建 ROV 的运动控制仿真结构,设定其中的 $K_P=35, K_I=0.4, K_D=5, \Delta K_P=15, \Delta K_I=5, \Delta K_D=20$,在 ROV 运动到特定深度的过程中,假设 ROV 艏向不发生改变、形态等方面也不发生改变,选用简化后的传递函数,如图 5.42 所示。

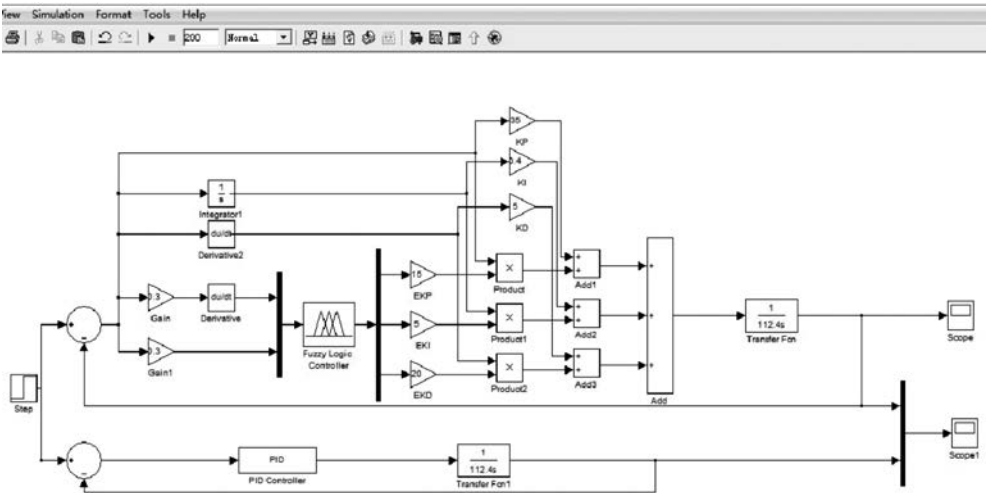


图 5.42 ROV 深度控制结构图

取阶跃函数作为输入,模糊 PID 控制和传统 PID 控制的仿真结果如图 5.43~图 5.46 所示。

仿真结果表明,如果机器人艏向不变,深度变化 1m 后,采用模糊 PID 控制的黄线明显调节的时间比采用传统 PID 控制的红线时间短,响应速度快。虽然未消除超调量,但已经基本接近 0 超调量。同时随着时间延长,黄线更加平稳,波动小,控制效果比较平滑,仿真效果如图 5.43 所示。

如果机器人艏向不变,深度变化 2m 后,与 1m 的波形图变化不大,采用模糊 PID 控制效果好于采用传统的 PID 控制。仿真结果充分体现出了模糊 PID 控制的优越性,改善了动态性能,使系统更加稳定,仿真效果如图 5.44 所示。

如果机器人艏向不变,深度变 5m 后,采用模糊 PID 控制的黄线明显调节的时间比采用传统 PID 控制的红线时间短,响应速度快。同时随着时间延长,黄线更加平稳,波动小,控制效果比较平滑。但同时两种控制方式均出现超调量增大的趋势,采用模糊 PID 控制的黄线的变化速度和幅度明显小于传统 PID 控制,仿真效果如图 5.45 所示。

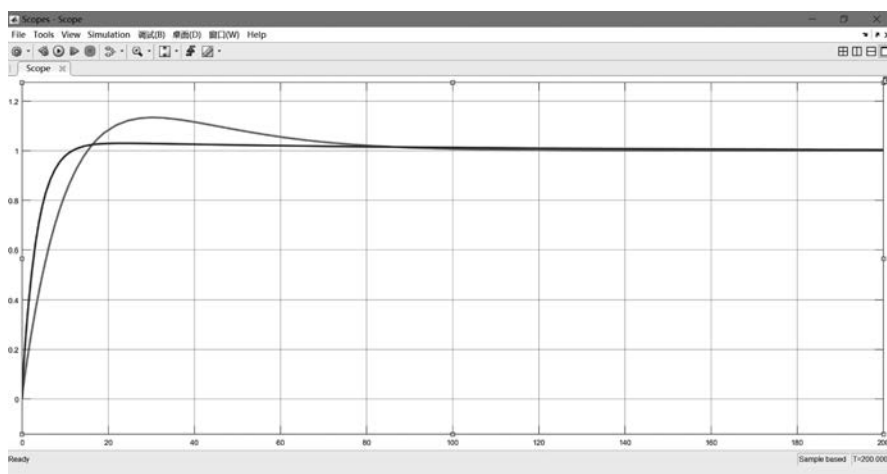


图 5.43 定艏向深度变化 1m 的仿真图

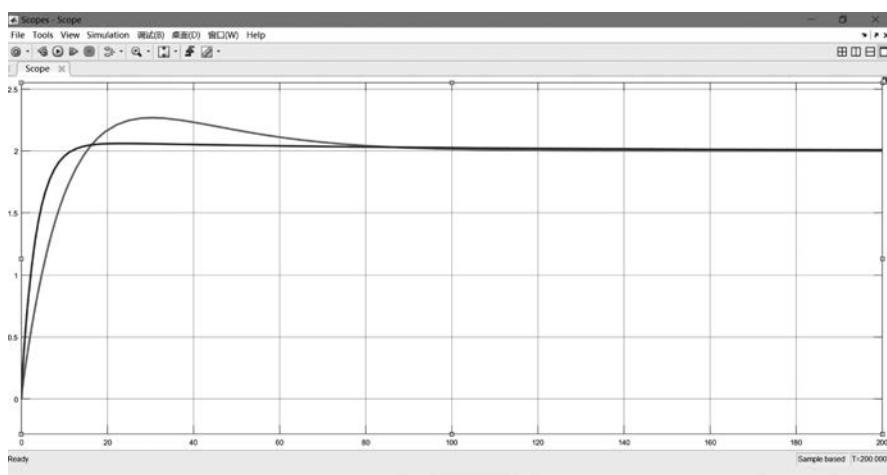


图 5.44 定艏向深度变化 2m 的仿真图

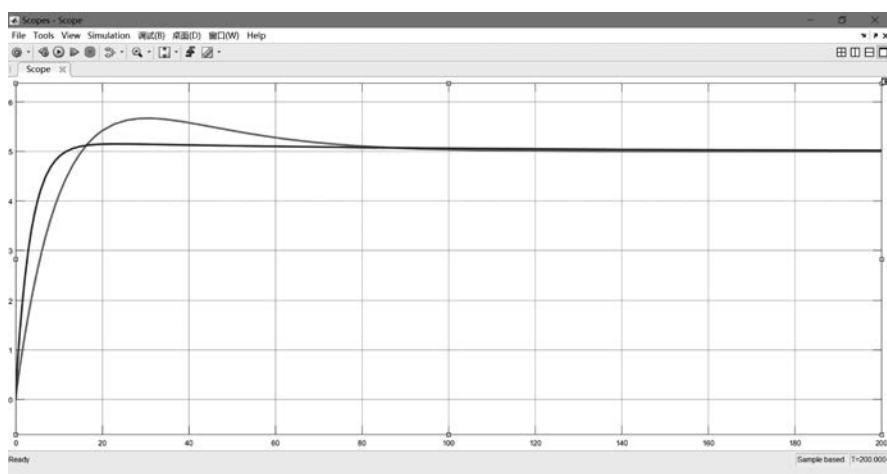


图 5.45 定艏向深度变化 5m 的仿真图

如果机器人艏向不变,深度变化 10m 后,采用模糊 PID 控制的黄线明显调节的时间比采用传统 PID 控制的红线时间短,响应速度快。同时随着时间延长,黄线更加平稳、波动小,控制效果比较平滑。但同时两种控制方式均出现超调量增大的趋势,采用模糊 PID 控制的黄线的变化速度和幅度明显小于传统 PID 控制,仿真效果如图 5.46 所示。

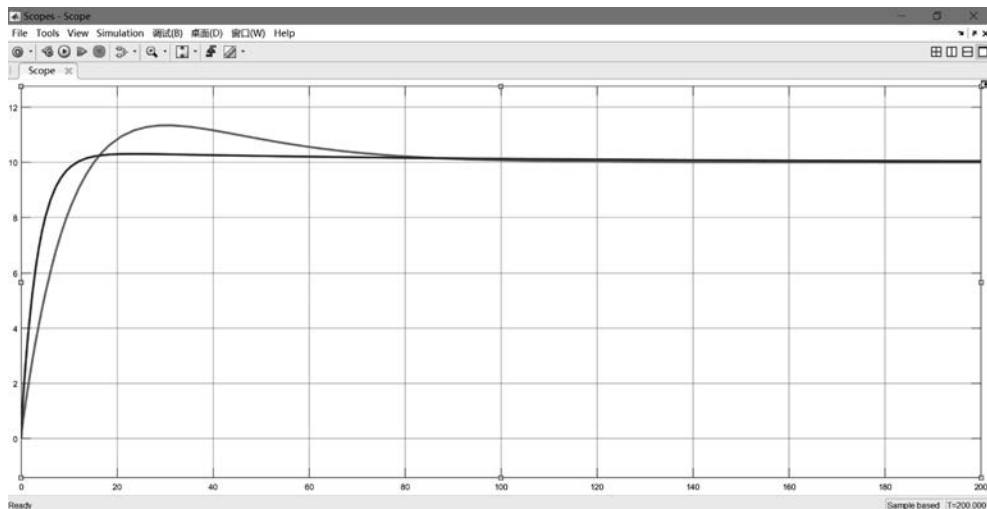


图 5.46 定艏向深度变化 10m 的仿真图

由此可见,在所选的 4 种深度条件下,当偏差信号产生后,模糊 PID 控制能够提高系统的增益,更快地形成控制调节。虽然模糊 PID 控制仍然未完全消除超调量,但是已经基本接近 0 超调量,控制效果比较平滑。系统响应速度明显快于传统 PID 控制,达到稳定所需时间明显短于传统 PID 控制。模糊 PID 控制在 ROV 的控制过程中,表现出了其优越性,改善了动态性能,使系统更加稳定。从超调方面对比,两种控制方式均出现了超调量增大的趋势,但模糊 PID 控制的超调量随着深度加深的变化速度和幅度明显小于传统 PID 控制,自适应性强于传统 PID 控制,呈现出比较稳定的特点,装备可操作性更强。反观传统 PID 控制,随着深度的加深,超调量不断增大,且变化幅度越来越大,回调响应时间滞后,呈现出不稳定性。

(2) 定向仿真。同样,确定简化后的 ROV 艏向对侧推力矩的传递函数为:

$$H_{\psi}(s) = \frac{1}{Ns} \quad (5.41)$$

其中, N 是由相关水动力实验测量并计算得到的常数,对于某重型机器人 N 为 65.39。

通过 Simulink 构建 ROV 的运动控制仿真结构,设定其中的 $K_p=40$, $K_i=0.4$, $K_d=10$, $\Delta K_p=15$, $\Delta K_i=5$, $\Delta K_d=30$ 。在 ROV 运动到特定方向的过程中,假设 ROV 深度不发生改变,形态等方面也不发生改变,选用简化后的传递函数,如图 5.47 所示。

设置 ROV 在定深 8m 条件下,通过左右的螺旋桨控制,实现向左或者向右旋转的情形。同样取阶跃信号作为输入,通过调节阶跃信号的幅度值进行模拟角度的变化。模糊 PID 控制和传统 PID 控制的仿真结果如图 5.48 和图 5.49 所示。

仿真结果表明,如果机器人保持深度 8m 不变,艏向变化 1° 后,采用模糊 PID 控制的黄线表明更快地形成控制调节,能够提高系统的增益,且基本接近 0 超调量,控制效果比较平

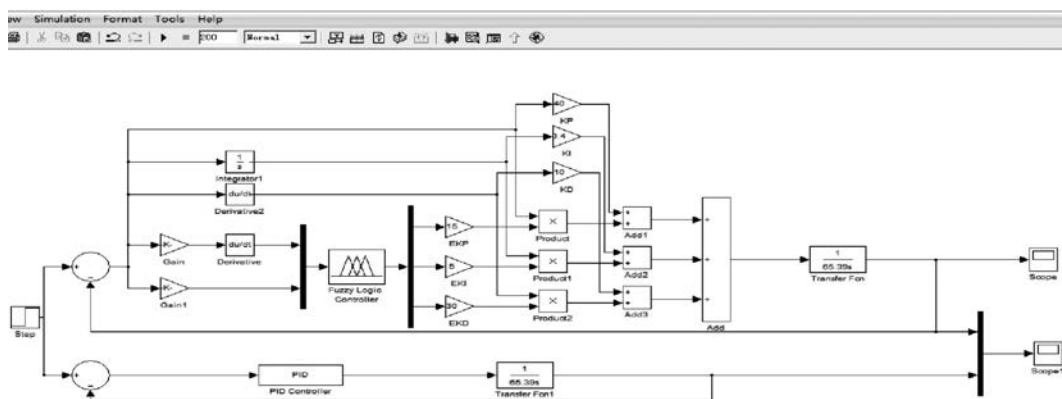


图 5.47 ROV 艏向控制结构图

滑。系统响应速度明显快于传统 PID 控制,达到稳定所需时间明显短于传统 PID 控制。同时随着时间延长,模糊 PID 控制更加平稳,波动小,控制效果比较平滑,仿真效果如图 5.48 所示。

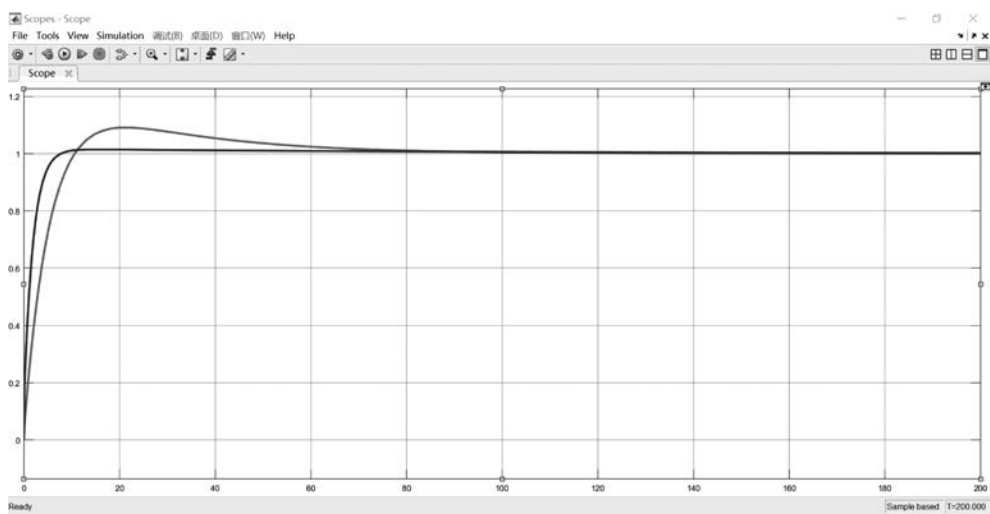


图 5.48 定深艏向变化 1° 的波形图

如果机器人保持深度 8m 不变,艏向变化 5° 后,与 1° 的波形图变化不大,还是采用模糊 PID 控制效果好于采用传统的 PID 控制。充分体现出模糊 PID 控制的优越性,改善了动态性能,使系统更加稳定,仿真效果如图 5.49 所示。

类似地,继续进行了 10° 、 20° 、 45° 和 90° 的仿真,结果显示,模糊 PID 控制效果普遍好于采用传统的 PID 控制,尽管依然存在超调现象,但模糊 PID 控制效果比较平滑、系统响应速度明显快于传统 PID 控制,达到稳定所需时间明显短于传统 PID 控制。模糊 PID 在控制该 ROV 过程中,改善了动态性能,使系统更加稳定。

模糊 PID 控制不仅继承了传统 PID 控制系统的简单实用、易于操作、精确高效、较好鲁棒性等优点,同时模糊控制还具有适应性强、相符度高等优势。但模糊 PID 控制的控制能力有限,难以应对不确定性的动力学系统。因此更复杂的机器人系统应选用性能更加优越

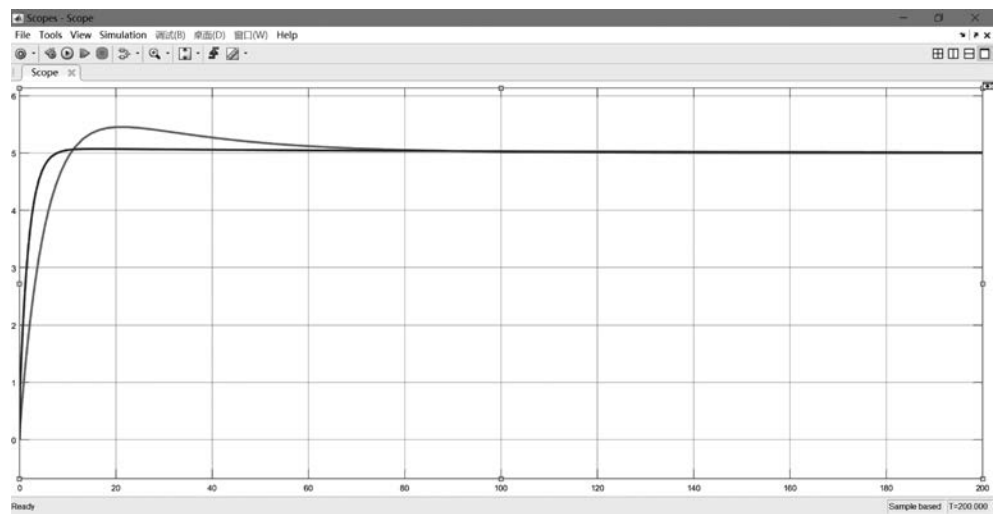


图 5.49 定深艏向变化 5 度的波形图

的控制方法,如滑模控制方法、模糊滑模控制方法、变结构滑模控制方法、自适应滑模控制方法和反步滑模控制方法等,但是这些方法过于复杂,本书不再介绍。

5.5 水下机器人的运动控制

第 2 章介绍水下机器人结构时,已经介绍了水下机器人的推进器的基本特性和基本结构。本节将对两种推进器在水下机器人系统中的控制与驱动方法进行补充论述,尤其将介绍液压推进系统的结构和特性,水下机器人的人控制算法则可沿用 PID 或模糊 PID 等算法。

5.5.1 电力推进系统

水下机器人的电力推进系统与常见的轮式移动机器人和多旋翼无人机的电力系统结构非常接近,其基本结构如图 5.50 所示。

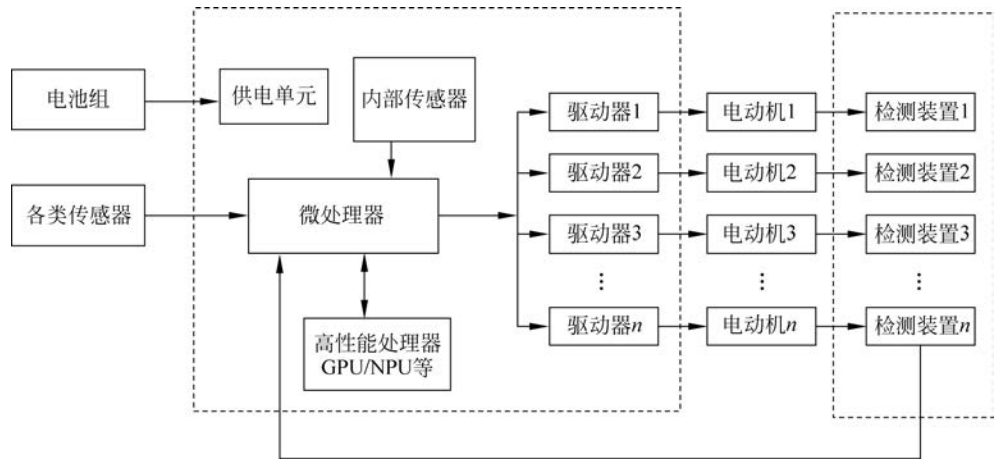


图 5.50 水下机器人电力推进系统结构

水下机器人、轮式机器人和多旋翼无人机三种移动机器人的电力推进系统结构类似,主要包括:用于向电动机供电和其他低电压设备供电的电池组和供电系统、用于检测外界状态和机器人自身状态的传感器、用于完成指令解析和基本控制的微处理器、用于执行高级人工智能算法的 GPU 等、用于将控制信号转换为电力输出的驱动器、用于将电能转换为机械能的电动机,此外还有可以不使用的电动机检测装置,上述各部分已经在前序章节中分别做出了介绍,本节不再阐述。三类移动机器人在推进系统上,最大的差别在于驱动器和电动机形式,如表 5.9 所示。

表 5.9 三种移动机器人推进系统对比

结 构 对 比	水下机器人	轮式机器人	多旋翼无人机
电动机形式	直流无刷电动机	直流有刷电动机	直流无刷电动机
最高电动机转速	$<4000\text{rev/min}$	$<1000\text{rev/min}$	$>5000\text{rev/min}$
驱动电路	电调	H 电桥	电调
驱动设备	推进器	减速电动机+轮	螺旋桨
电动机检测	无必要	可选	无必要

5.5.2 液压推进系统

液压推进系统较多应用于大功率 ROV,系统主要由液压源、控制阀组和液压推进器(由液压马达驱动)组成。ROV 由于节能需要及发热限制要求,一般采用恒压变量系,恒压变量控制方式主要有以下两种: Triton 型 ROV 采用的 C 型半桥控制液压泵的变量机构、ISE 公司生产的海狮号等 ROV 采用 B 型半桥来控制变量机构,另外,为保护电动机不超载还增加了恒功率控制。而海沟号 ROV 则采用了溢流阀控系统,同时为了减小噪声使用了特殊形式的螺杆泵。阀控系统具有响应较快、结构简单、成本低的优点,但由于液压泵不能调节输出流量、溢流损失大,系统效率、低发热量大,为此,海沟号安装了冷却系统,以保证液压油工作在正常温度。具体液压系统泵的原理不再详细介绍。

液压推进器由液压马达驱动,与电动机推进器相比,具有较高的力矩惯量比,且加速性能强,可实现高频正反转。推进器根据液压马达种类,可分为定量马达式和变量马达式。变量马达结构较为复杂,内部不仅装有变量控制机构来改变斜盘的倾斜角度,而且集成了高精度位置传感器以方便构成闭环控制。在 ROV 推进系统中,液压马达大多由伺服阀控制,然而随着比例技术的发展,比例阀应用到推进系统控制也逐渐增多。

液压推进系统与电动机式相比,主要有以下特点:可实现无级调速,调速范围大,操纵性能好,传动平稳,不易受外界负载的影响,液足马达产生的扭矩大,系统响应快,换向迅速,重量功率比大,质量轻,结构紧凑;容易实现过载保护和水深补偿、可靠性高;液压油的流动性和润滑性利于系统散热性和延长元件寿命。此外,由于目前水下作业型机械手一般采用液压驱动,液压推进型 ROV 则不需要额外增加动力源。虽然液压控制系统有其固有的优势,但它是一个非常典型的非线性系统,控制性能相对较差。不仅存在死区、磁滞、液动力、油液泄漏和阀芯摩擦等非线性因素,而且液压特征参数会随外界温度和压力波动而变化,对推进系统稳定性和控制算法提出了更高的要求。本节仅以海马号 4500m 深海 ROV 为例介绍其液压推进系统结构。

深海 ROV 液压推进系统主要包括液压泵站、补偿系统、控制阀箱、螺旋桨推进器和电气控制系统等,其推进系统各部分参数如表 5.10 和图 5.51 所示。

表 5.10 深海 ROV 液压推进系统参数

参 数	性 能 指 标	说 明
额定功率	100kW	为系统提供大功率输出
工作水深	4500m	满足 ROV 的水深工作要求
水平最大推力	880kgf	满足 ROV 水平运动速度要求
垂直最大推力	780kgf	满足 ROV 垂直运动速度要求
压力传感器	检测充油压力	提供水深压力补偿
控制方式	闭环控制	实现较高的控制精度
液压泵站	双机双泵	有高压和低压切换功能
推进器阀箱	8 功能控制	使用易维护的比例阀
自补偿油箱	12L 补偿容积	使液压系统内压力高于海水环境压力
材料种类	6061T6、316L、FR	满足海水防腐蚀要求

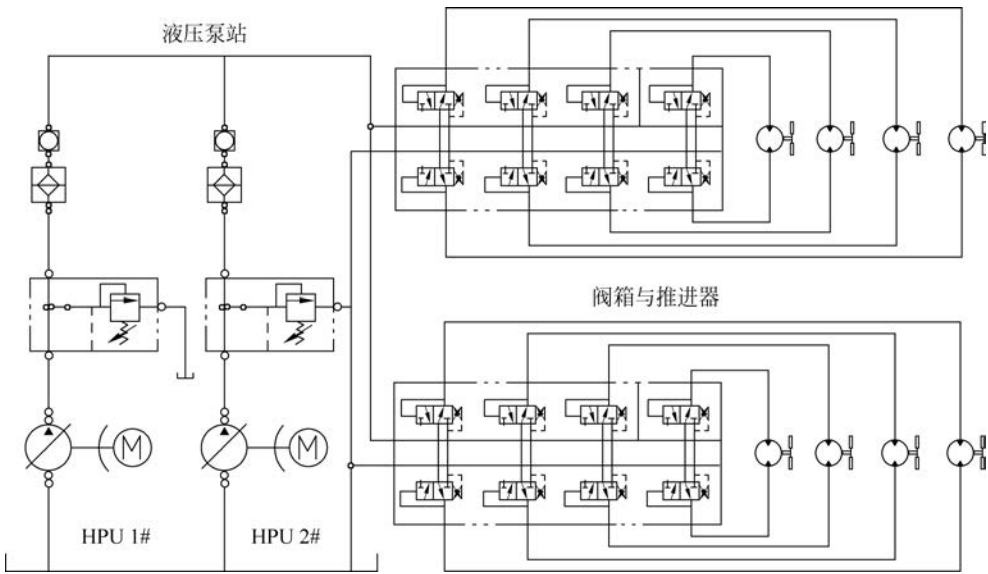


图 5.51 深海 ROV 液压推进系统液压原理图

深海 ROV 的双泵排量不同：小排量主泵为 45mL/r、大排量泵为 71mL/r，小排量主泵的控制压力比大排量泵略高 0.5MPa。当 ROV 推进系统所需流量不到一个泵的全流量时，只有限压高的小泵自动适应负载流量、系统压力稍高，而限压低的大泵基本处于零流量输出状态。当 ROV 所需流量超过一个泵的全流量时，系统压力降至大泵设定值，小泵全流量输出，大泵自动适应负载流量。此外，为保证系统安全，在泵的出口位置和合流单向阀之间各串联了一个安全阀。

为了使水下液压系统适应不同水深下的作业要求，一般都会在系统中设置压力补偿器，使系统回油压力或是静态充油设备内部压力与海水压力相等，并随水深变化自动调节。ROV 液压推进系统压力补偿系统主要由压力补偿器和自补偿油壳构成，实现对因温度等因

素造成的容积变化进行实时补偿。压力补偿器主要由弹簧、滚动膜片、有机玻璃或金属外壁、放气螺塞和位移传感器等组成。油液的补偿量不仅与深度有关,还与温度密切相关。水深越大,压力越高,补偿量越大;温度越高,油液体积膨胀量越大,补偿量会明显减小。为适应海洋水深及温度的大范围变化,压力补偿系统需设计足够的补偿容量才能保证系统正常工作。

液压推进器是液压推进系统的重要组成部分,其性能直接影响 ROV 的运动和作业能力。与电推进器的组成类似,液压推进器主要由定量液压马达、桨叶和导流罩组成。液压马达不仅内含转速齿轮可供测速,而且在马达前部专口设计了推力轴承,不仅可使推进器结构更紧凑,而且不需要增加额外的充油补偿结构。此外,定制的液压马达还将常规的油封结构改为机械密封结构,可显著增加工作可靠性,延长使用寿命。

小 结

机器人必须依靠运动机构实现自身的移动。本章介绍了机器人的运动机构,尤其是相关的电动机特性、电动机工作原理、电动机控制方式、电动机驱动电路和机器人的供电系统等。从软件角度,本章介绍了电动机常见的驱动方式、PID 和模糊 PID 控制算法,并以水下机器人的控制为例,进行了控制算法的仿真。最后,本章总体介绍了水下机器人的运动控制系统结构。

至此,本书已经介绍了机器人系统的基本软硬件结构和控制算法,这些系统已经能够构成一台机器人,但如何让机器人具有更高级的智能性,将在第 6、7 章中介绍。

习 题

1. 对比轮式运动机构和履带式运动机构的优缺点。
2. 直流无刷电动机相较于有刷电动机,有哪些显著的优势?
3. 步进电动机主要具有哪些特性?
4. 对比三元锂电池和磷酸铁锂电池的主要性能。
5. 模糊 PID 控制具有哪些特点?