
机器人驱动原理概述-1



朱秋国

控制科学与工程学院

Email: qgzhu@zju.edu.cn

2021年3月16日

课程内容

- ▶ **主要驱动：**

- ▶ **电机驱动**

- ▶ **气动驱动**

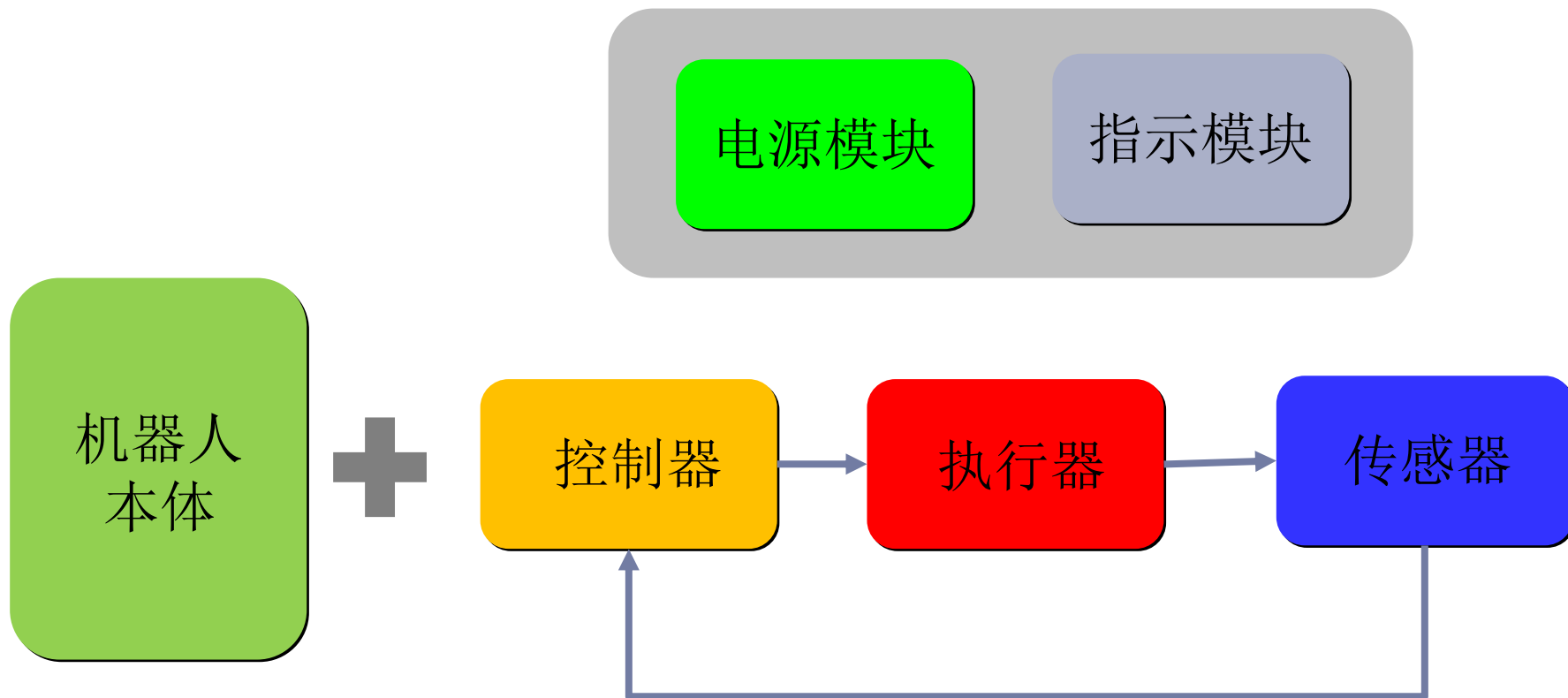
- ▶ **液压驱动**

- ▶ **新型驱动**



1. 概述

机器人系统框图



功能模块

传感模块

颜色传感器：用以颜色识别

光电对管：用以进行寻线，模块识别

碰撞开关：用以检测是否触碰

摄像头：用以图像识别

执行模块

直流电机：小车行走
舵机：进行机械手操纵
气缸：直线伸缩运动
真空泵：物体吸取

所有动作均由控制模块中的单片机进行控制

其它模块

电源模块：为所有模块提供电源

指示模块：显示各个位置的工作是否正常，用以进行必要的调试和修理的参照

我们要完成的动作有哪些？

行进与转弯

平台升降

抓取物品

释放物品

用基本的驱动完成复杂的各种运动

▶ 一、电机驱动

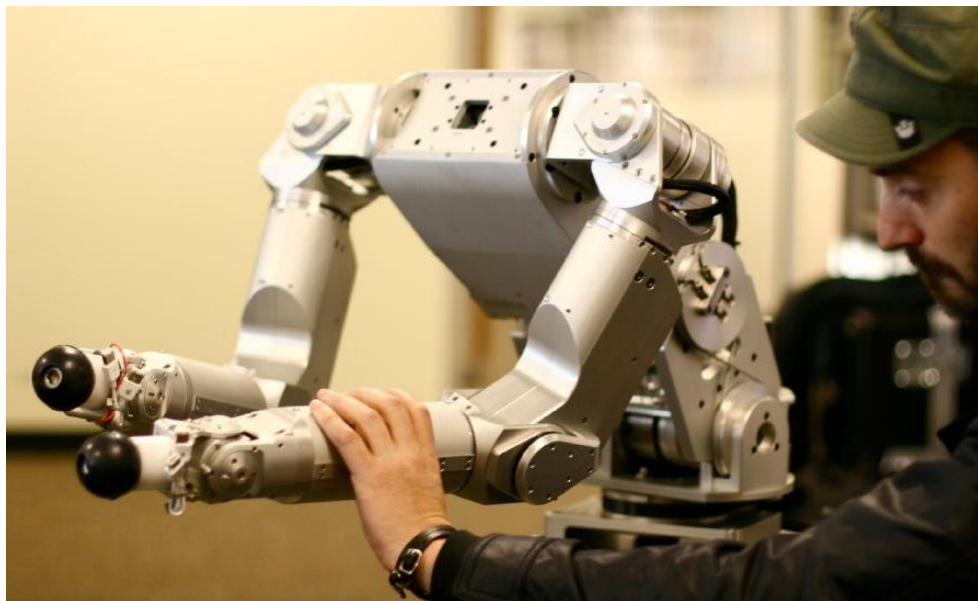
- ▶ 电机是日常生活中最常用和最普遍的驱动方式。
- ▶ 优点：控制调节简单、稳定性较好。
- ▶ 缺点：力矩小、刚度低，常常需要配合减速器使用。
- ▶ 典型应用：工业机器人、服务机器人等。



► 电机驱动应用



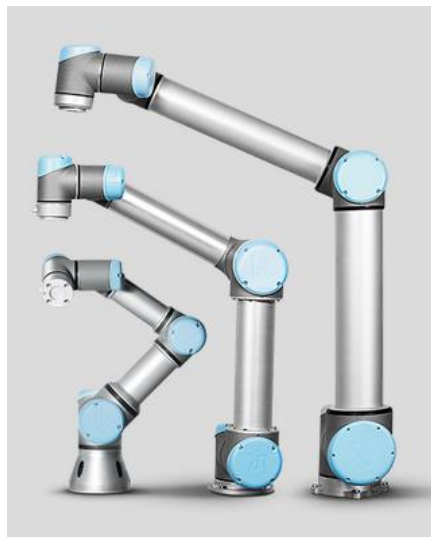
ABB YUMI



Google MEKA



KUKA LBR iiwa



UR3/5/10



Kinova

电机驱动应用：机器狗

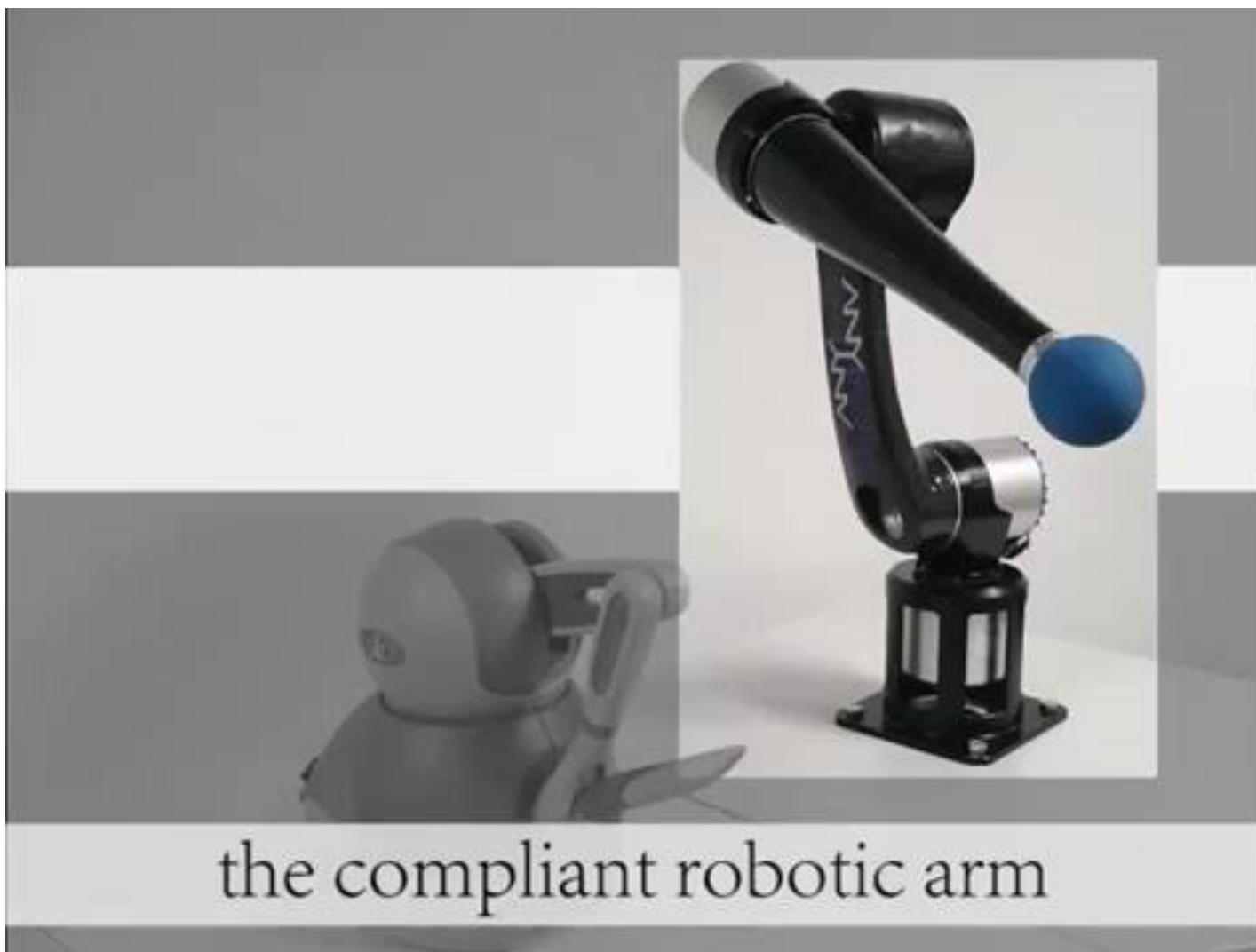


电机驱动应用：柔性关节

low-impedance
torque control

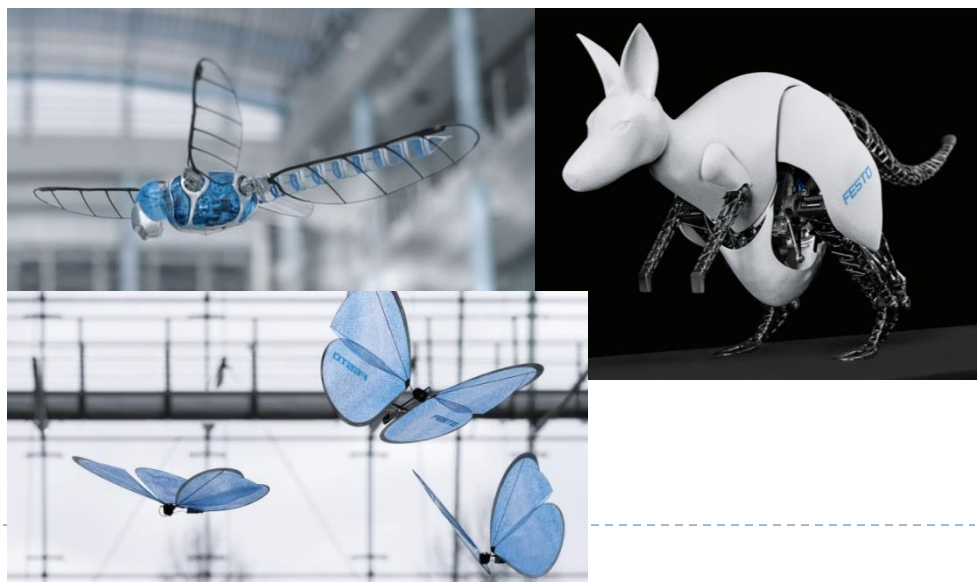
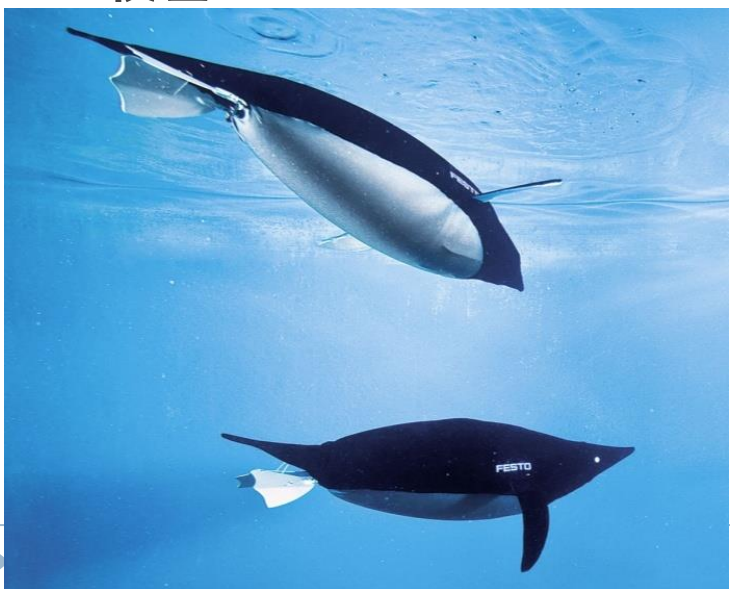


电机驱动应用：柔性机械臂

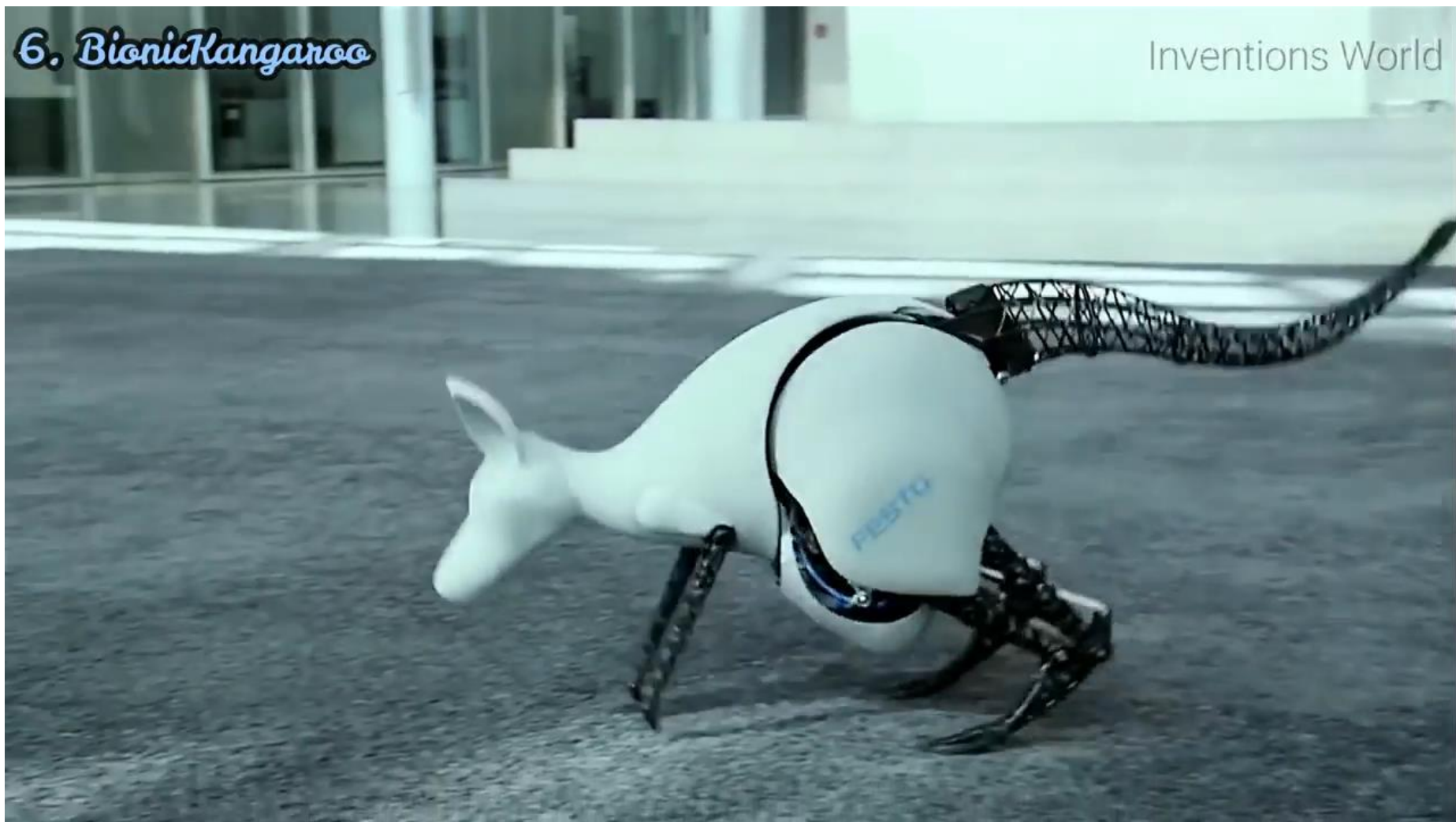


▶ 二、气压驱动

- ▶ 气压驱动以空气压缩为动力源，也是机器人驱动的一种重要形式。
- ▶ 气动式主要有气缸、气阀、管路等元件组成。
- ▶ 优点：气源获得方便、成本低、动作快。
- ▶ 缺点：输出功率小，体积大。一般而言，其工作噪声较大、控制精度较差。

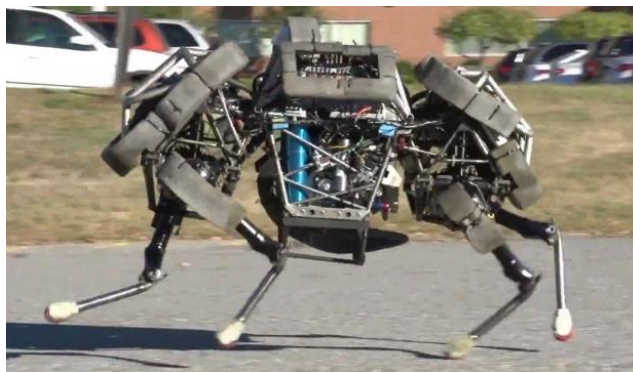


气动驱动应用

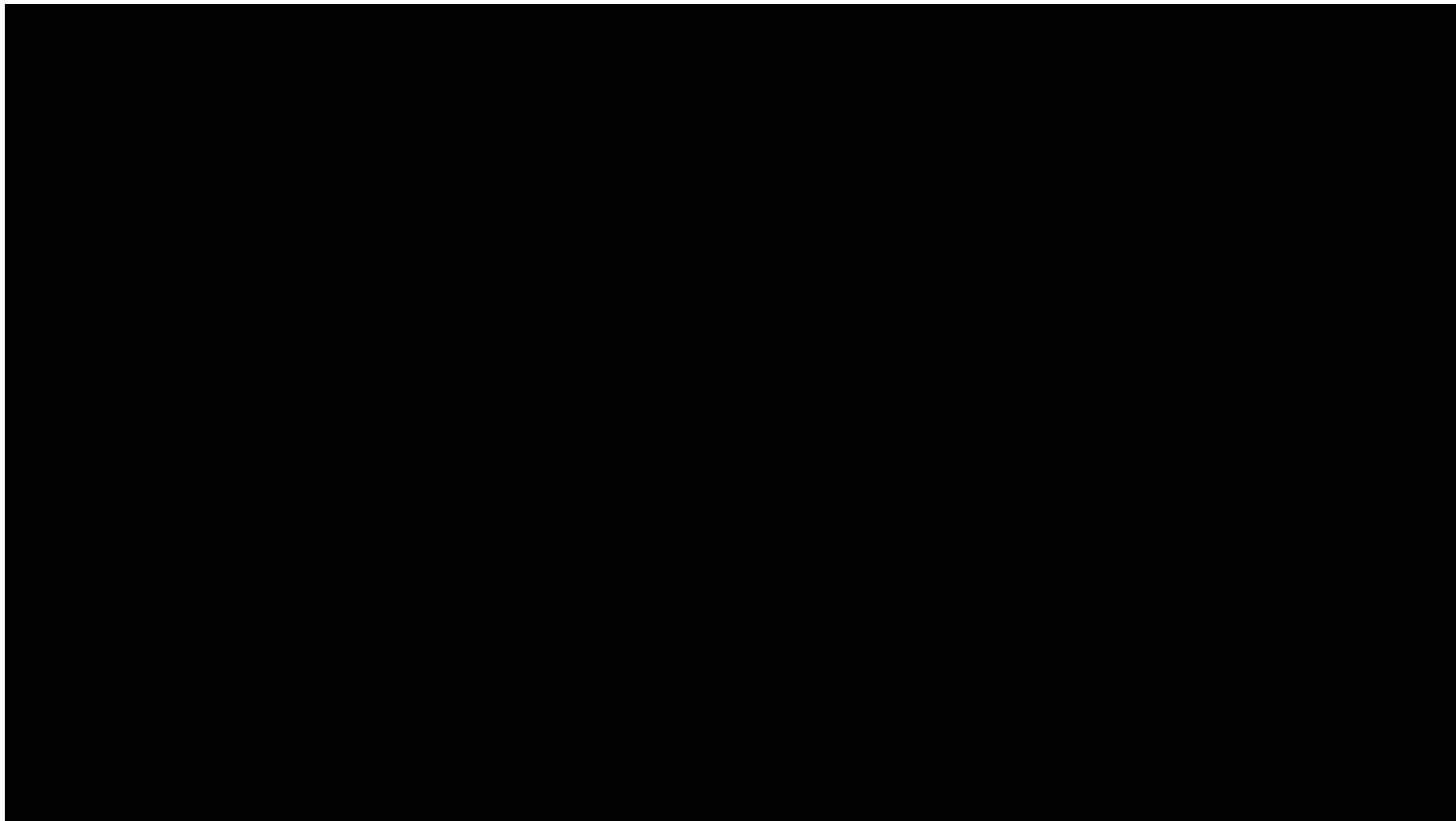


▶ 三、液压驱动

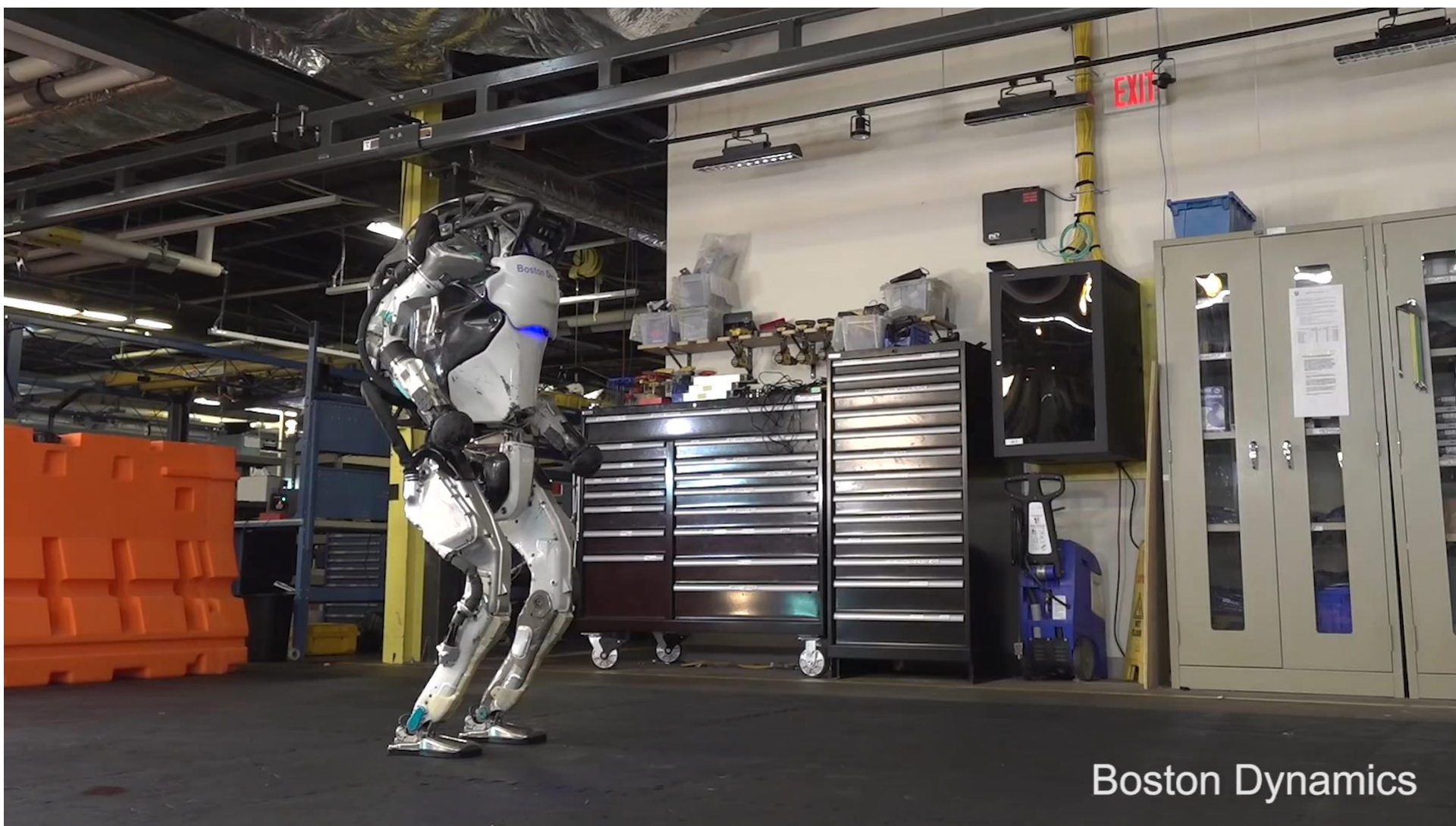
- ▶ 液压式主要有液压缸、液压马达、阀等组成。
- ▶ 优点：重量轻、尺寸小、动作平稳、快速性好、产生的力/力矩非常大。
- ▶ 缺点：易漏油、维护困难；不确定性和非线性因素多，控制和校正不如电气式方便。
- ▶ 在机器人中的应用较少，但正在逐步增加。



液压驱动应用：机器狗



液压驱动应用：机器人



Boston Dynamics



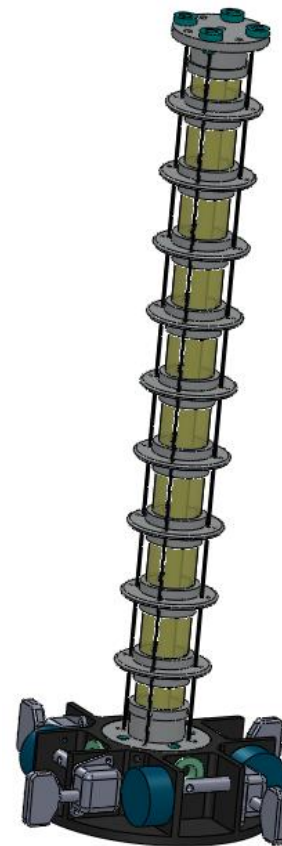
▶ 四、新型驱动

软体机器人的驱动方式主要取决于所使用的智能材料，一般有：

- 介电弹性体（DE）
- 形状记忆合金（SMA）
- 形状记忆聚合物（SMP）
- 离子聚合物金属复合材料（IPMC）



软体机器人



SMA柔性脊柱

其他驱动应用：软体机器人



2. 电机工作原理

二、直流电机

直流电机

可以输出力矩和速度，如小车的直线运动、转弯等。

需要驱动芯片以及控制方式。

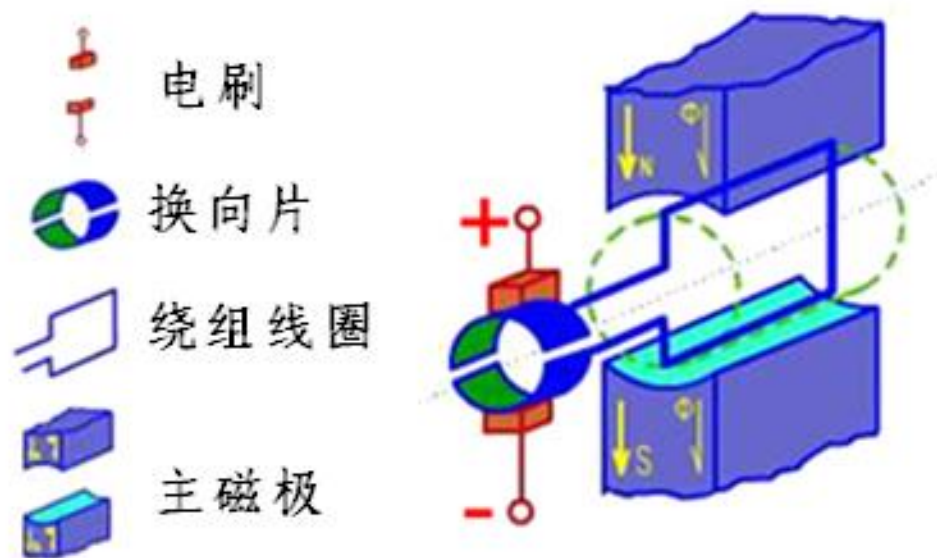
舵机

用于角度、位置伺服，如机械手转动；

PWM波（占空比可变的方波）控制。

1、直流有刷电机

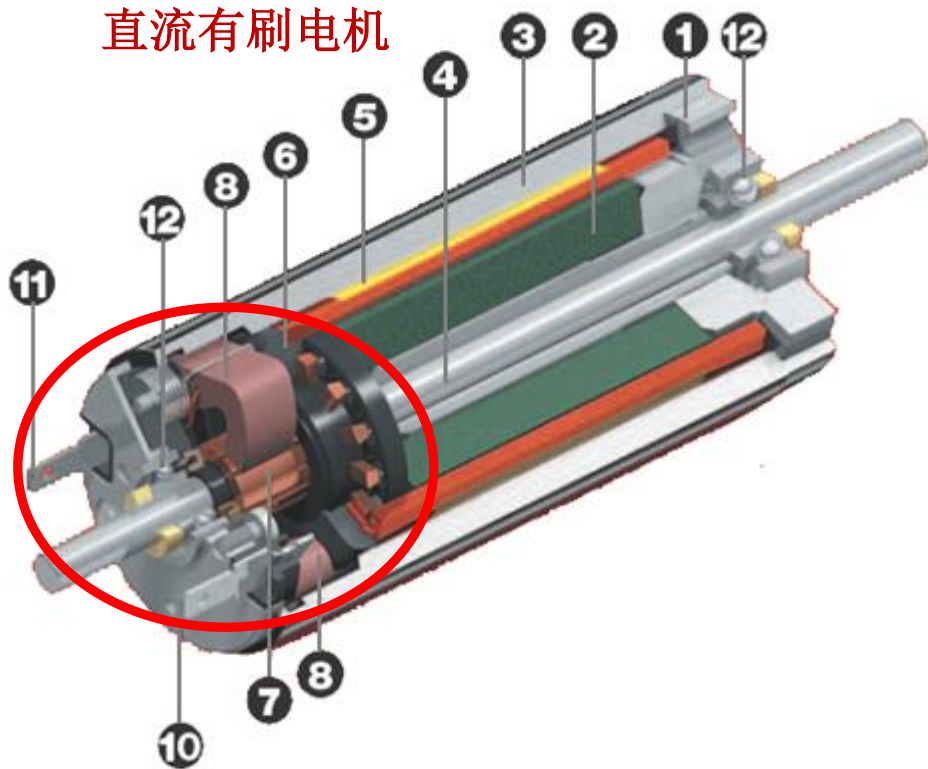
有刷直流电机结构及工作原理



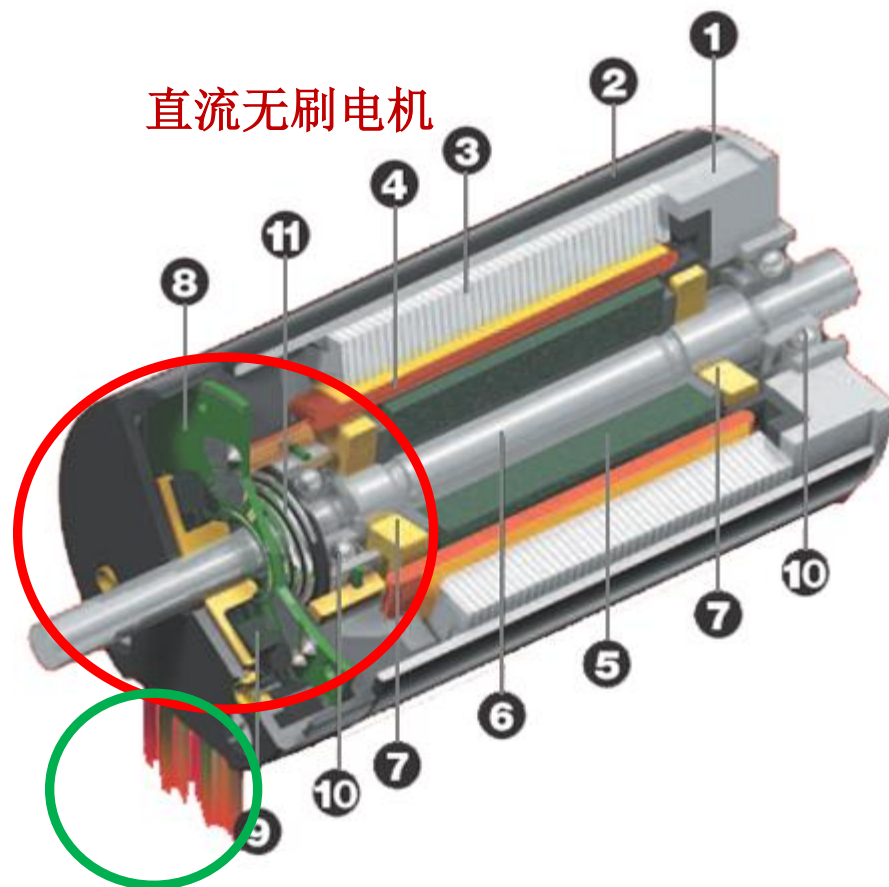
- 有刷直流电机由**磁极**、**电枢绕组**、**电刷**和**换向片**组成。
 - 磁极在工作中固定不动，称为**定子**（用于产生磁场）
 - 电枢绕组是转动部分，称为**转子**

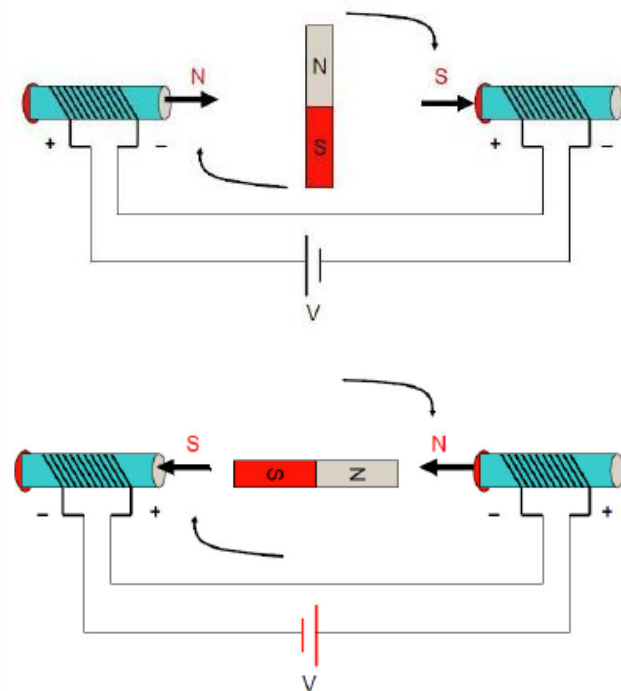
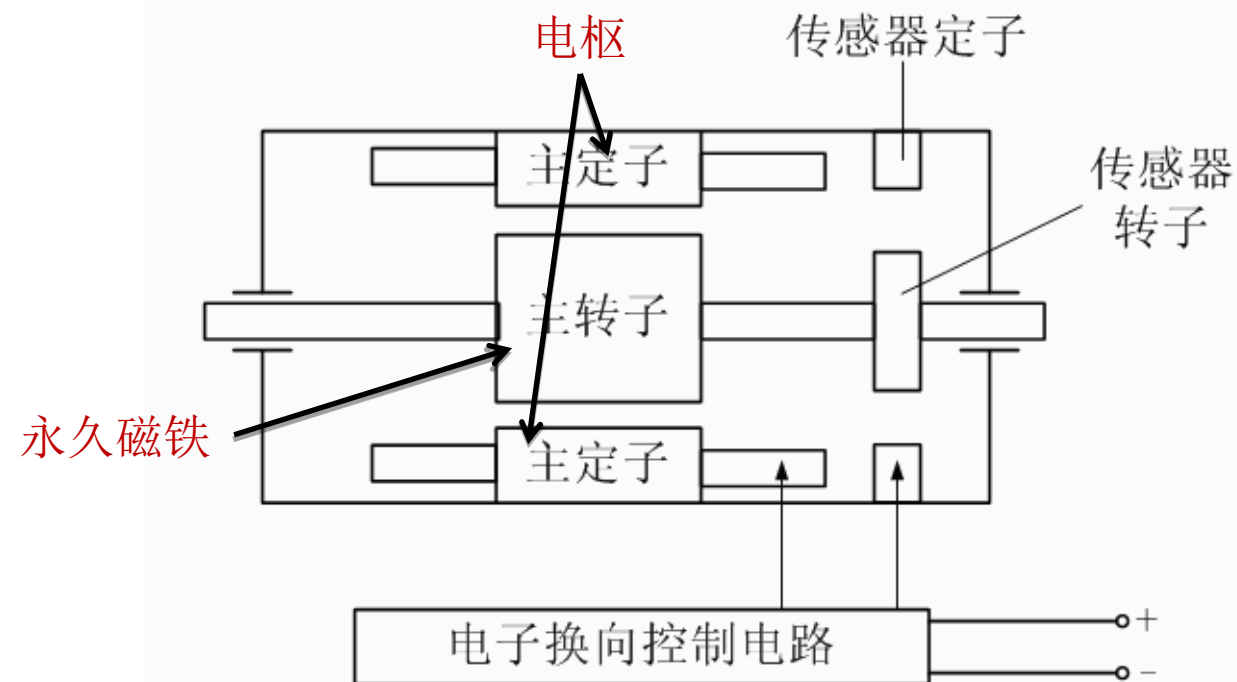
2、无刷直流电机（BLDCM）

直流有刷电机



直流无刷电机

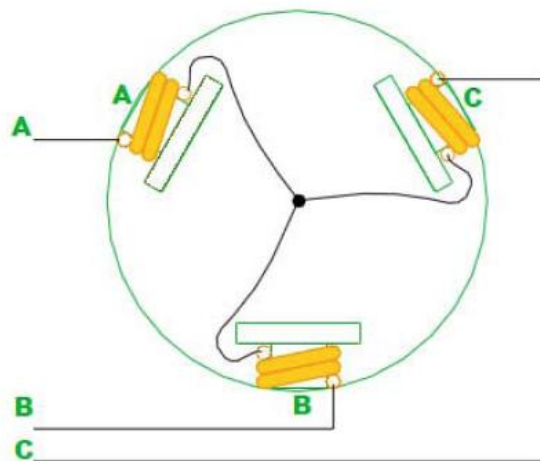




- 1、无刷直流电机由**电机本体**、**位置传感器**、**电子换向电路**三大部分组成。
- 2、电机主体由主定子、主转子组成。**主转子是永久磁铁**，**主定子是电枢**。当定子绕组通直流电时，与转子作用产生电磁转矩，定子电流必须根据转子的位置变化适时换向，才能获得单一方向的电磁转矩，使电机转动。

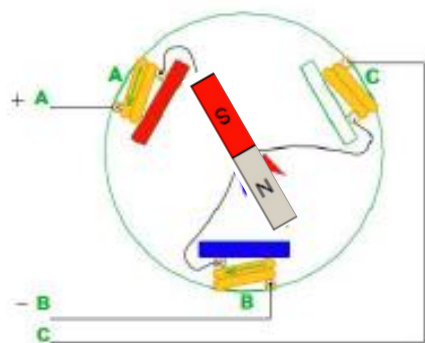
无刷直流电机结构

一般而言，无刷电机的绕组有星形联结方式和三角联结方式，而三相星形联结（Y型）的二二导通方式最为常见。我们以三相3绕组2极（1对极）为例：

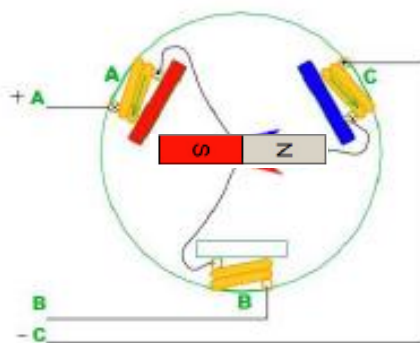


整个电机就引出三根线A, B, C。当它们之间两两通电时，有6种情况，分别是AB, AC, BC, BA, CA, CB。

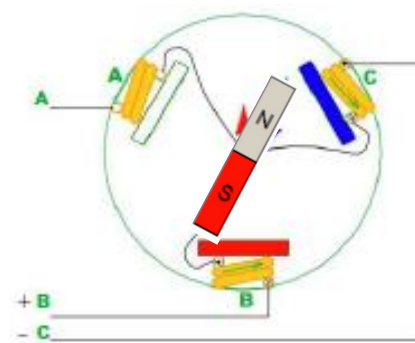
红色和蓝色分别表示磁感应强度的方向



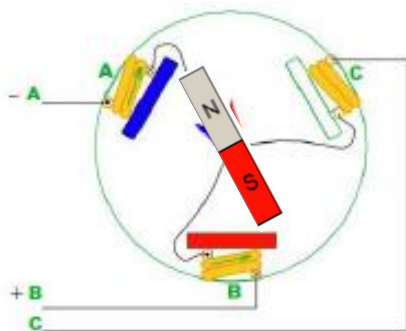
(a) AB 相通电情形



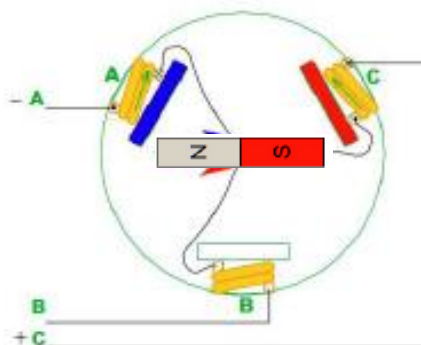
(b) AC 相通电情形



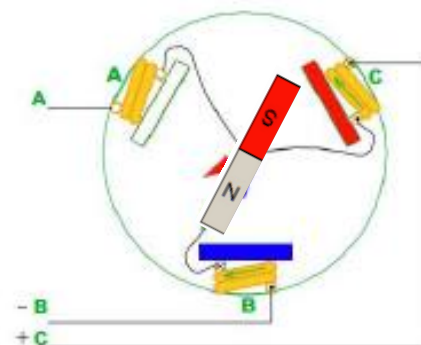
(c) BC 相通电情形



(d) BA 相通电情形

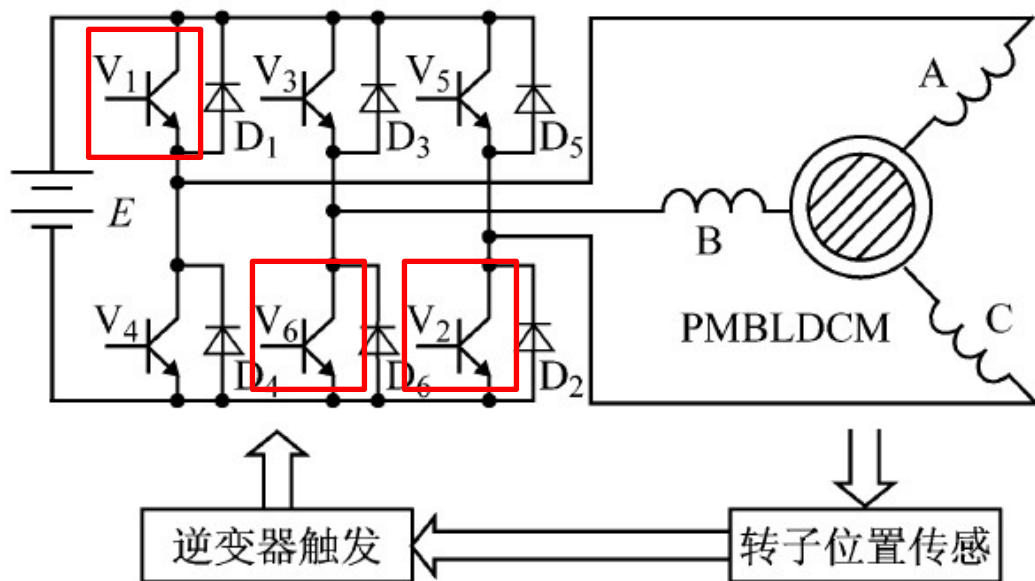


(e) CA 相通电情形



(f) CB 相通电情形

注意：换相只与转子位置有关，与速度无关



六臂全桥驱动原理图

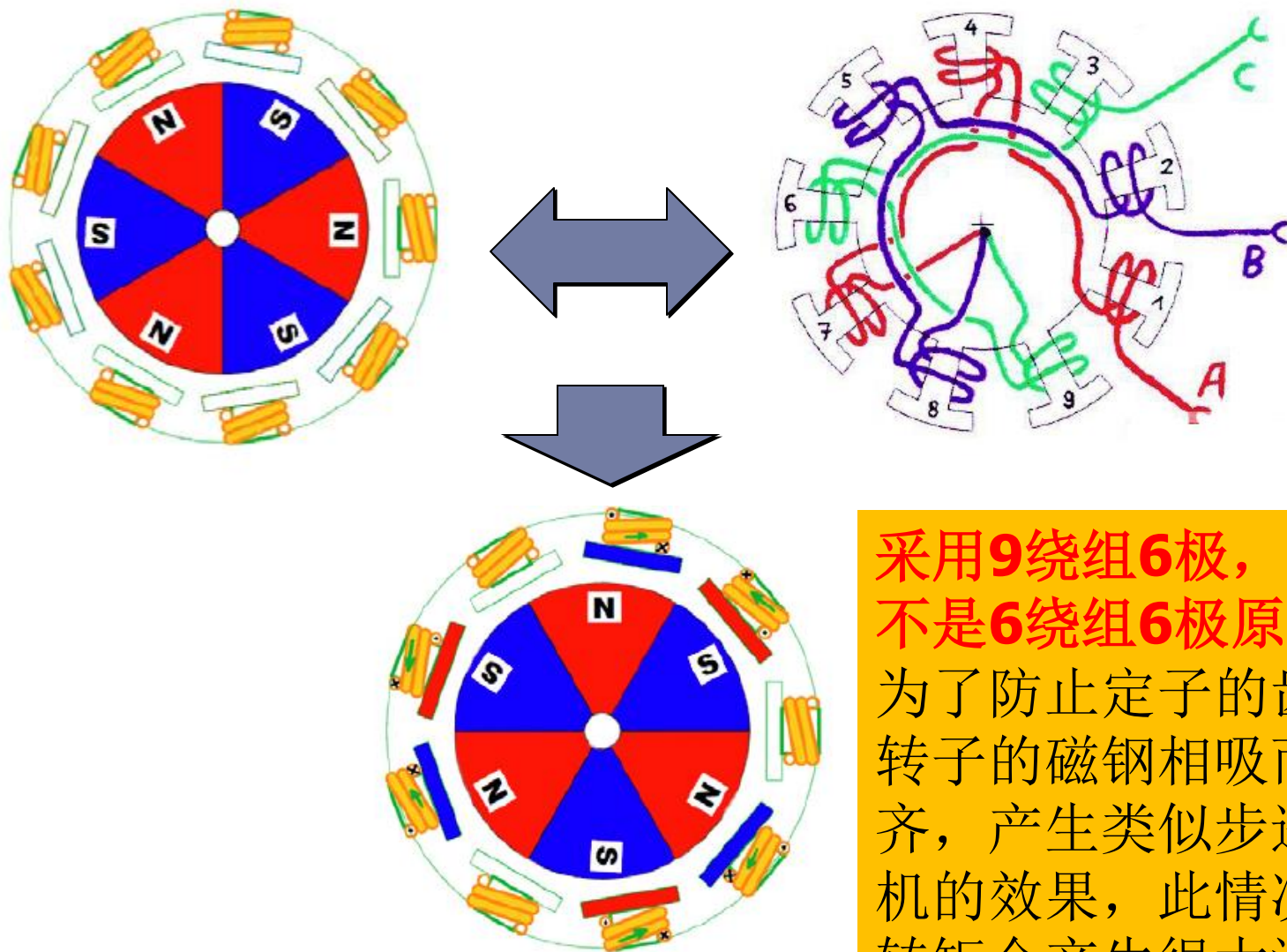


绕组导通的状态

位置传感器：光电编码器、霍尔传感器。

一般在电机的不同位置上装三个霍尔传感器，就可测出转子的位置。

我们再以三相9绕组6极（3对极）为例：



采用9绕组6极，而不是6绕组6极原因：
为了防止定子的齿与转子的磁钢相吸而对齐，产生类似步进电机的效果，此情况下转矩会产生很大波动。

3、三个最重要的物理量

电枢电动势 E_a 、电磁转矩 T 和电磁功率 P

$$E_a = K_e n$$

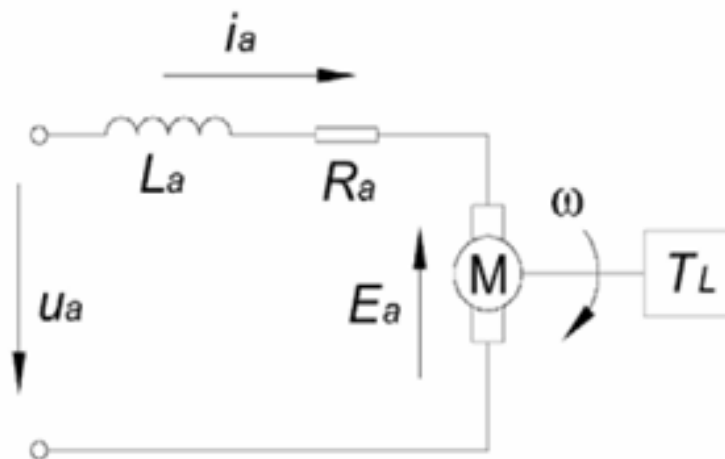
$$T = K_m I$$

$$P = E_a \cdot I = T \cdot \omega$$

K_e 是速度常数

K_m 是力矩常数

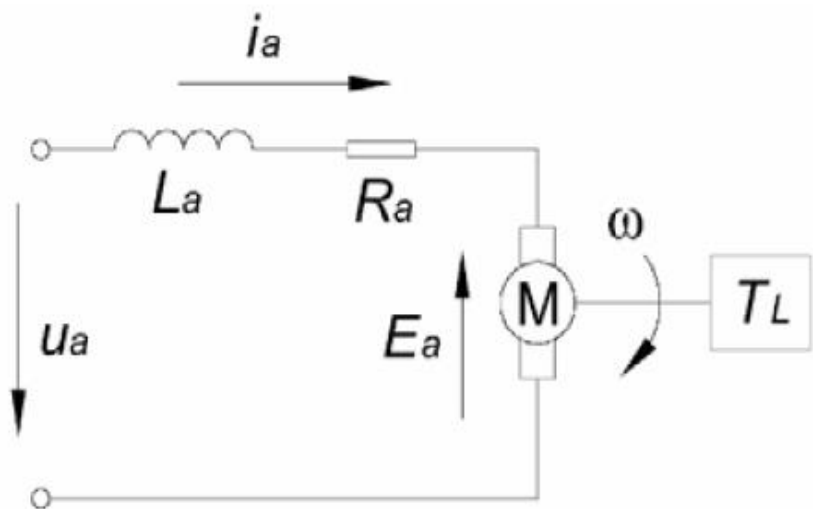
n 是电机转速， I 是电枢电流， ω 是角速度



- 转速与感应电动势成正比
- 力矩与电流大小成正比

4、转矩和转速的关系

直流伺服电机电枢等效电路



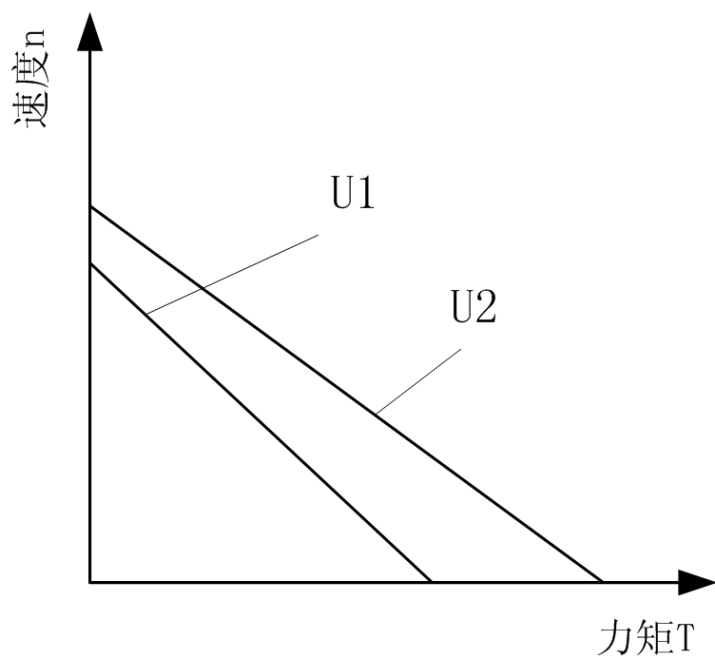
$$U = E_a + I \cdot R_a = K_e \cdot n + I \cdot R_a$$

$$n = \frac{U - I \cdot R_a}{K_e}$$

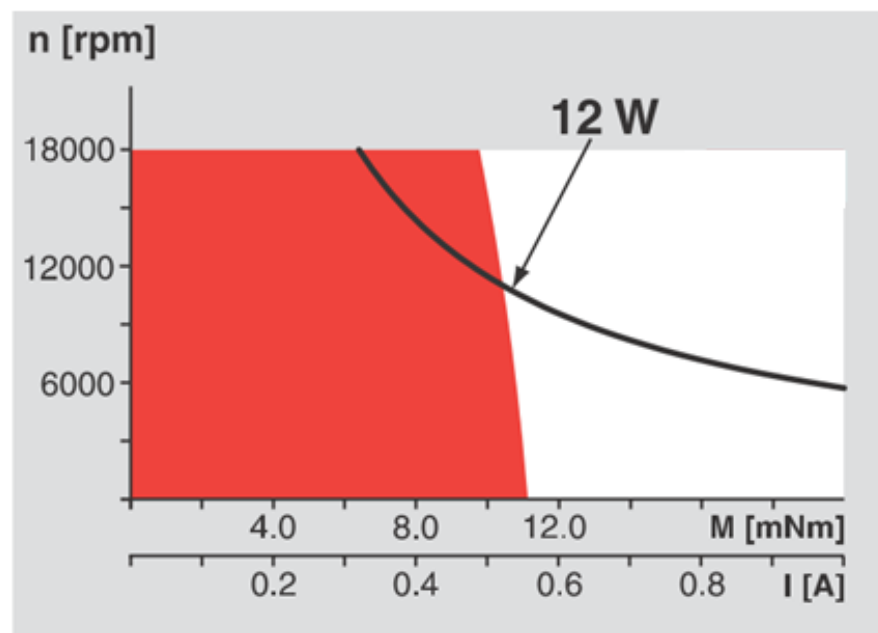
简单起见，可以忽略电枢回路中的调节电阻。

检查电机是否烧坏，可以通过测量电机绕组的值是否正常来判断。

转矩和转速的关系



转矩/速度曲线



某电机产品的转矩/速度曲线

- 1、斜率(速度/转矩常数)越小,说明电机的刚性越好,越“硬”。
- 2、斜率是电机本身决定的,与端电压和速度无关。

5、电机的控制与仿真

直流电机电枢等效电路方程：

电压平衡方程：
$$u_a(t) = R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + E_a(t)$$

感应电动势方程：
$$E_a(t) = K_e \omega$$

电磁转矩方程：
$$T(t) = K_t i_a(t)$$

转矩平衡方程：
$$T(t) = J \frac{d\omega(t)}{dt} + B\omega(t) + T_d(t)$$

其中， J 、 B 分别为等效到电机轴上的转动惯量和阻尼系数； K_e 、 K_t 分别为感应电动势系数和电磁转矩系数； $T_d(t)$ 为电机空载转矩和负载等效到电机轴上的转矩之和。



对上式进行拉普拉斯变换，可得

$$\begin{cases} U_a(s) = R_a I_a(s) + L_a s I_a(s) + E_a(s) \\ E_a(s) = K_e \Omega(s) \\ T(s) = K_t I_a(s) \\ T(s) = J s \Omega(s) + B \Omega(s) + T_d(s) \end{cases}$$

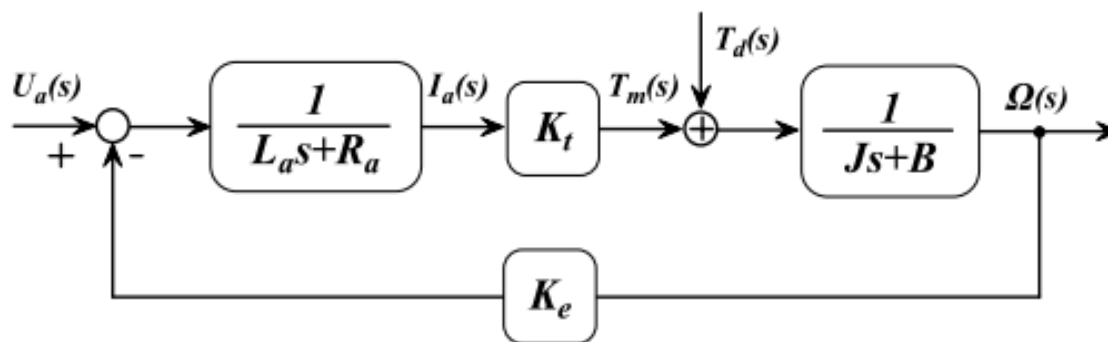
消除中间变量 $I_a(s)$ 后，可以得到以电枢电压 $U_a(s)$ 为输入变量，电机转速 $\Omega(s)$ 为输出变量的传递函数：

$$\frac{\Omega(s)}{U_a(s)} = \frac{K_t}{L_a J s^2 + (L_a B + R_a J) s + R_a B + K_e K_t}$$

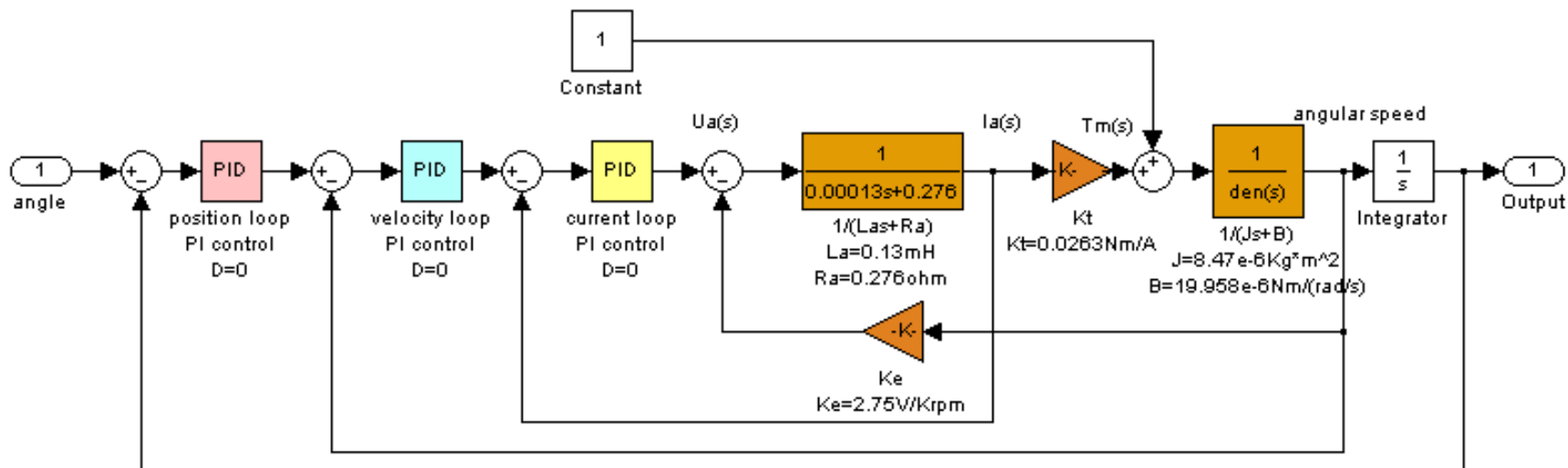
二阶系统



可得电机的控制模型，等效框图如下所示：



加入PID控制：



得到电机的电流、速度和位置控制（也称三环控制）

电机参数表:

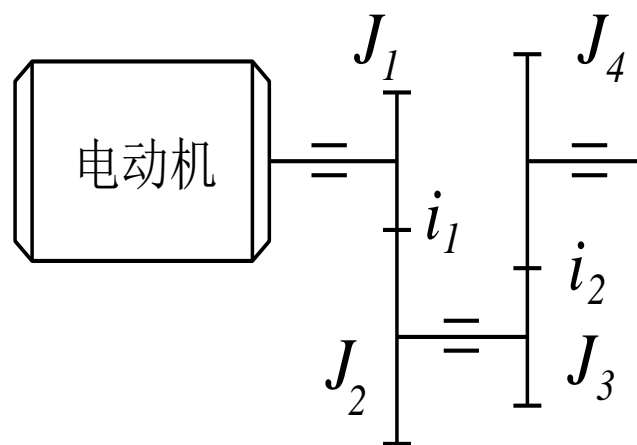
- Stock program
- Standard program
- Special program (on request!)

		Order Number														
		118776	118777	118778	118779	118780	118781	118782	118783	118784	118785	118786	118787	118788	118789	118790
Motor Data																
1	Assigned power rating	W	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90
2	Nominal voltage	Volt	15.0	30.0	42.0	48.0	48.0	48.0	48.0	48.0	48.0	48.0	48.0	48.0	48.0	48.0
3	No load speed	rpm	7070	7220	7530	7270	6650	5970	4750	3810	3140	2570	2100	1620	1290	1060
4	Stall torque	mNm	872	949	1070	966	878	766	613	493	394	320	253	194	155	125
5	Speed / torque gradient	rpm / mNm	8.45	7.77	7.17	7.63	7.68	7.89	7.86	7.84	8.09	8.19	8.47	8.55	8.54	8.80
6	No load current	mA	245	124	93	77	69	60	45	34	27	22	17	13	10	8
7	Starting current	A	44.9	24.4	20.3	15.5	12.9	10.1	6.43	4.16	2.74	1.83	1.18	0.704	0.448	0.298
8	Terminal resistance	Ohm	0.334	1.23	2.07	3.09	3.72	4.75	7.46	11.5	17.5	26.2	40.5	68.2	107	161
9	Max. permissible speed	rpm	8200	8200	8200	8200	8200	8200	8200	8200	8200	8200	8200	8200	8200	8200
10	Max. continuous current	A	4.00	2.74	2.15	1.78	1.63	1.45	1.17	0.944	0.768	0.630	0.508	0.392	0.313	0.256
11	Max. continuous torque	mNm	77.7	107	113	111	111	110	111	112	111	110	109	108	108	107
12	Max. power output at nominal voltage	W	152	175	206	181	150	118	75.0	48.4	31.8	21.2	13.7	8.07	5.10	3.36
13	Max. efficiency	%	81	84	86	85	85	84	83	82	80	79	77	74	72	69
14	Torque constant	mNm / A	19.4	38.9	52.5	62.2	68.0	75.8	95.2	119	144	175	214	276	346	418
15	Speed constant	rpm / V	491	246	182	154	140	126	100.0	80.6	66.4	54.6	44.7	34.6	27.6	22.9
16	Mechanical time constant	ms	6	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
17	Rotor inertia	gcm²	65.5	65.5	69.6	65.0	64.5	62.7	62.8	62.8	60.7	59.9	57.9	57.2	57.2	55.5
18	Terminal inductance	mH	0.09	0.34	0.62	0.87	1.04	1.29	2.04	3.16	4.65	6.89	10.30	17.10	26.90	39.30
19	Thermal resistance housing-ambient	K / W	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2
20	Thermal resistance rotor-housing	K / W	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
21	Thermal time constant winding	s	27	27	29	27	27	26	26	26	25	25	24	24	24	23



6、转动惯量的匹配

负载的转动惯量折合到主动轴上时，从动轴上的转动惯量和阻尼系数都要除于传动比的平方，负载转矩除于传动比。



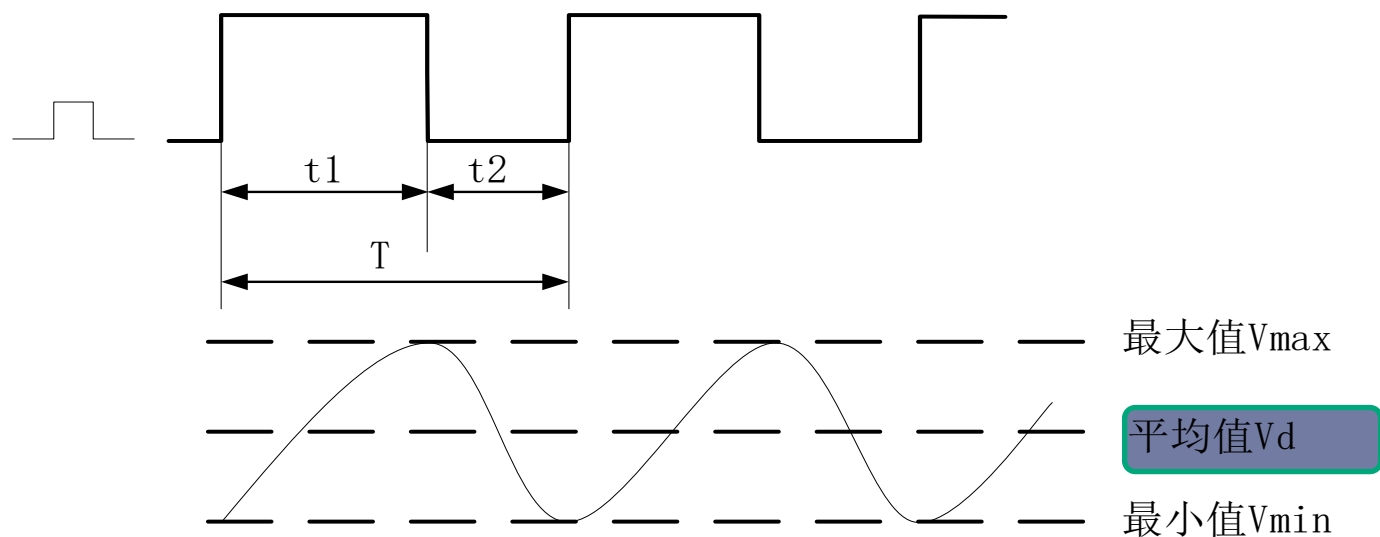
$$J_L = J_1 + \frac{J_2 + J_3}{i_1^2} + \frac{J_4}{i_1^2 i_2^2}$$

对于直流电机而言，高动态的伺服系统，一般要求：
电机的转动惯量 $J_M < (2-3)J_L$ (J_L 为负载的等效转动惯量)



7、直流电机PWM调速

用改变电机电枢电压接通与断开的的时间占空比来控制电机转速的方法，称为**脉冲宽度调制(PWM)**。



电机PWM调速原理

在脉冲的作用下，当电机通电时，速度增加；电机断电时，速度逐渐减少。只要按一定规律改变通、断电时间，即可让电机转速得到控制。

设电机永远接通电源时，其转速最大为 V_{\max} ，设占空比为 $D=t_1/T$ ，则电机的平均速度为

$$V_d = V_{\max} \cdot D$$

V_d : 电机的平均速度

V_{\max} : 电机全通时的最大速度

$D = t_1/T$: 占空比

得到结论：

- 1、电机的转速与电机电枢电压成比例，而电机电枢电压与控制波形的占空比成正比；
- 2、电机的速度与占空比成比例，占空比越大，电动机转得越快，当占空比等于1，电机转速最大。

思考题1：

请描述一下电机转子由静止状态加速到额定转速的过程？

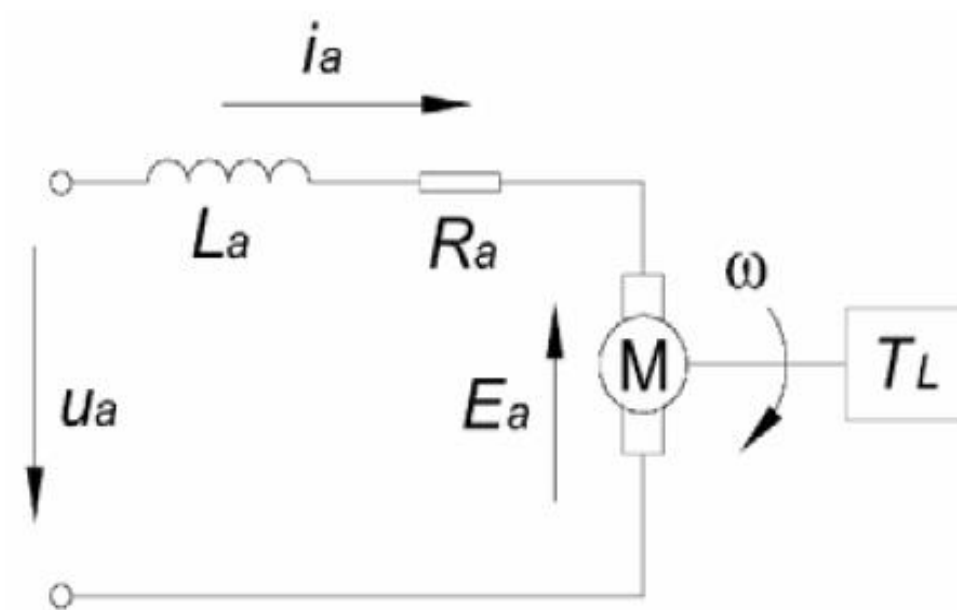


图. 直流电机简化模型

The End.

Thanks for your attention.

