

## 4.2 机器人腿部运动控制

机器人腿部运动控制采用虚拟模型控制（VMC）方法。通过添加弹簧-阻尼虚拟组件来建立腿部运动所需的虚拟力，然后通过虚拟力求出腿部连杆末端执行力，最后由末端执行力计算出每个关节电机所需的驱动力矩。

对于在  $y$  方向上的虚拟力  $F_y$ ，设弹簧-阻尼虚拟组件的弹性系数为  $K_{p1}$ ，阻尼系数为  $K_{d1}$ ，则用弹簧-阻尼虚拟组件来表示虚拟力  $F_y$  的方程为：

$$F_y = K_{p1}(y_{set} - y) + K_{d1}(0 - \dot{y}) \quad (4.17)$$

对于绕  $x$  轴的虚拟力矩  $T_x$ ，设弹簧-阻尼虚拟组件的弹性系数为  $K_{p2}$ ，阻尼系数为  $K_{d2}$ ，则用弹簧-阻尼虚拟组件来表示虚拟力矩  $T_x$  的方程为：

$$T_x = K_{p2}(\beta_{set} - \beta) + K_{d2}(0 - \dot{\beta}) \quad (4.18)$$

通过虚拟力计算腿部连杆末端执行力的方程已在第二章中进行推导，将式 (4.17) 和式 (4.18) 代入式 (2.27) 中得到：

$$\begin{cases} P_L = \frac{K_{p1}(y_{set}-y)-K_{d1}\dot{y}-Mg}{2} + \frac{K_{p2}(\beta_{set}-\beta)-K_{d2}\dot{\beta}}{D} \\ P_R = \frac{K_{p1}(y_{set}-y)-K_{d1}\dot{y}-Mg}{2} - \frac{K_{p2}(\beta_{set}-\beta)-K_{d2}\dot{\beta}}{D} \end{cases} \quad (4.19)$$

由末端执行力计算出每个关节电机所需驱动力矩的公式见式 (2.30)。

根据式 (2.25)、式 (2.26) 和式 (4.19)，可在 Simulink 中搭建腿部运动的仿真控制模型（见 vmc.slx），如图 4-8 所示。其中  $y'_{max}$  是关节电机角度  $\alpha$  从  $150^\circ \sim 240^\circ$  所对应  $y'$  当中的最大值乘 0.5（由 jacob.m 计算得到）， $T_L$  和  $T_R$  表示当末端执行力映射到关节电机力矩的系数取最大值时，左右侧关节电机力矩随末端执行力  $P_L$  和  $P_R$  变化的情况。通过观测 Scope 中的输出值来调节弹簧-阻尼虚拟组件的弹性系数和阻尼系数，最终设定  $K_{p1} = 100$ ,  $K_{d1} = 40$ ,  $K_{p2} = 20$ ,  $K_{d2} = 5$ 。

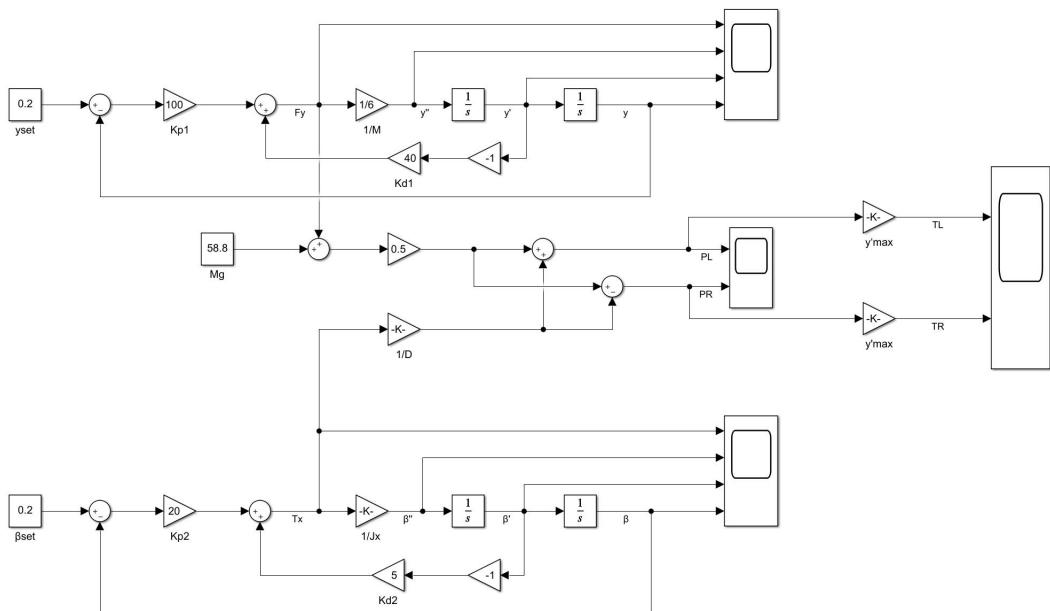


图 4-8 腿部运动的 Simulink 仿真控制模型

设定目标高度为 0.2m，模拟机器人腿部抬升过程，该过程中机体在 y 方向上的各项运动参数和虚拟力 $F_y$ 的仿真结果如图 4-9 所示，左右侧关节电机力矩的仿真结果如图 4-10 所示：

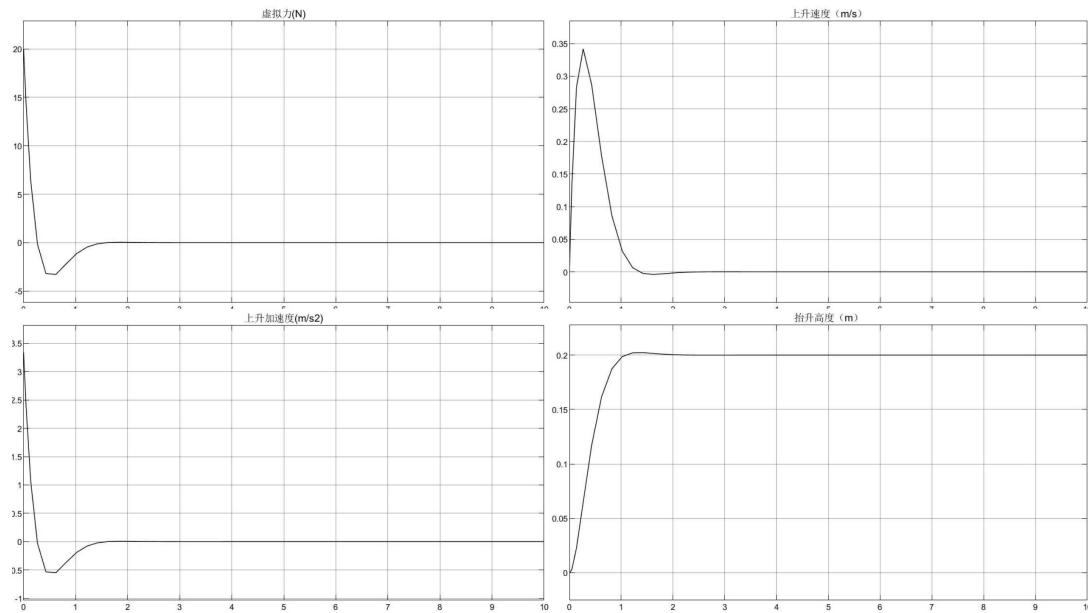


图 4-9 目标高度 0.2m 时 y 方向上的虚拟力和各项运动参数的仿真结果

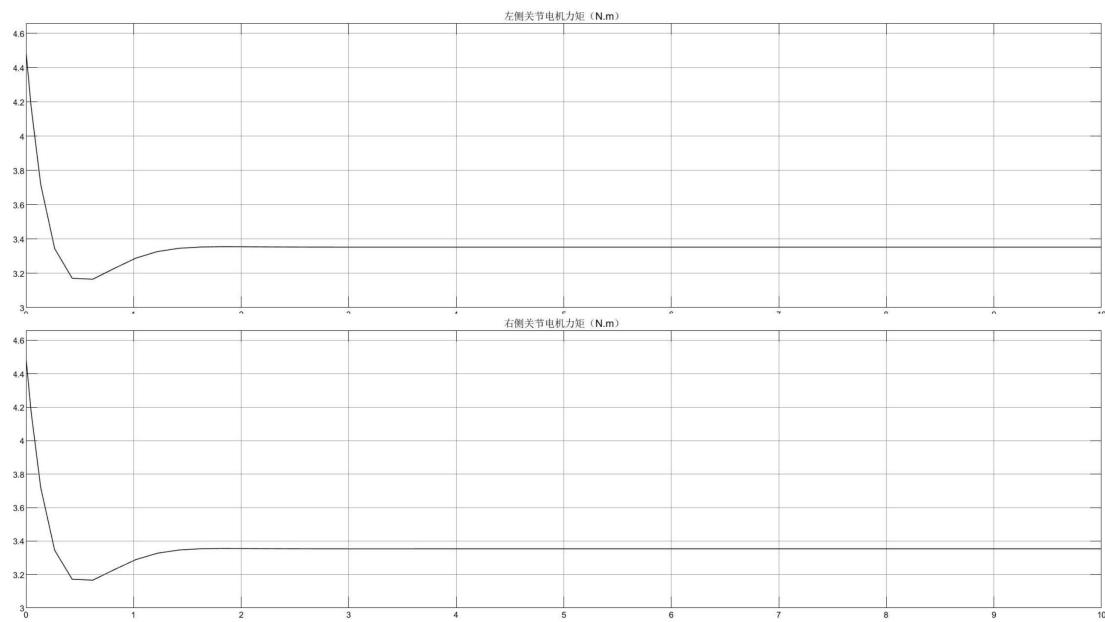


图 4-10 目标高度 0.2m 时左右侧关节电机力矩的仿真结果

从图中可以看出，机体在 1 秒左右抬升到目标高度并保持稳定，此过程中左右侧关节电机的最大力矩为 4.5N·m，在所选电机的峰值扭矩范围内，满足实际要求。

设定初始翻滚角度为  $0.2\text{rad}$ , 目标翻滚角度为  $0$ , 模拟机器人地面上自适应运动过程, 该过程中机体绕  $x$  轴旋转的各项运动参数和虚拟力矩  $T_x$  的仿真结果如图 4-11 所示, 左右侧关节电机力矩的仿真结果如图 4-12 所示:

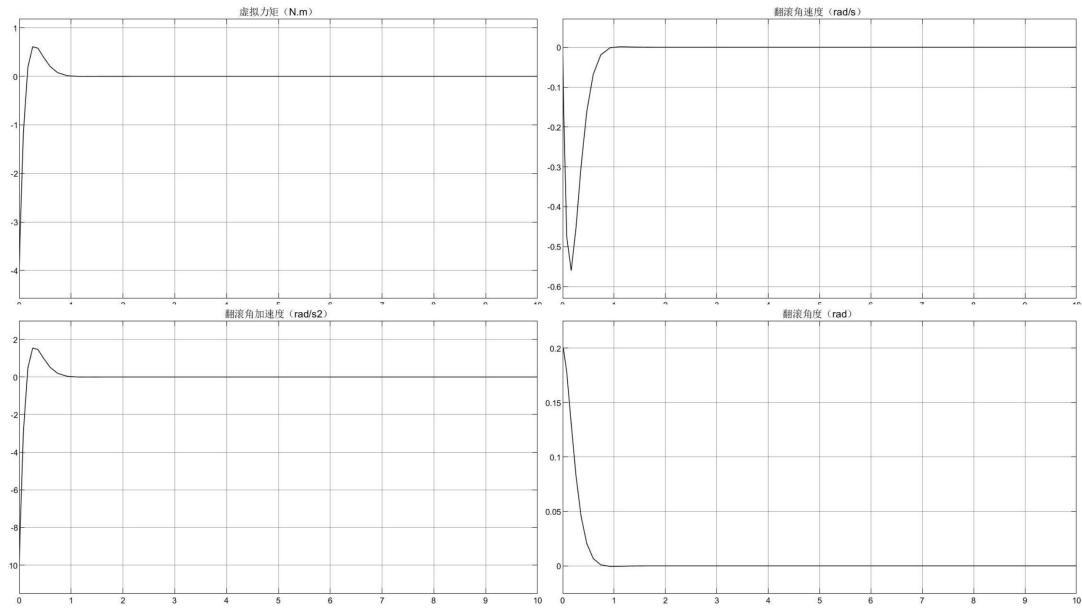


图 4-11 初始翻滚角度  $0.2\text{rad}$  时绕  $x$  轴旋转的虚拟力矩和各项运动参数的仿真结果

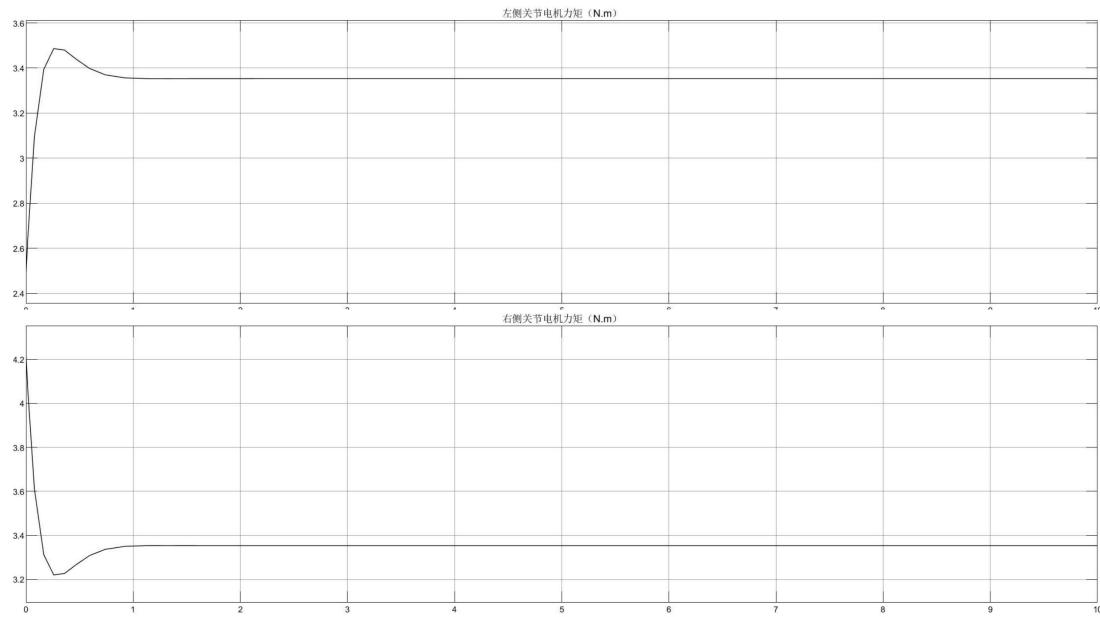


图 4-12 初始翻滚角度  $0.2\text{rad}$  时左右侧关节电机力矩的仿真结果

从图中可以看出, 机体翻滚角在 1 秒左右回到  $0\text{rad}$  并保持稳定, 此过程中左右侧关节电机的最大力矩为  $4.2\text{N}\cdot\text{m}$ , 在所选电机的峰值扭矩范围内, 满足实际要求。

设定初始翻滚角度为  $0.2\text{rad}$ , 目标高度为  $0.2\text{m}$ , 模拟机器人高度调节运动和地面上自适应运动的耦合运动, 该过程中左右侧关节电机力矩的仿真结果如图 4-13 所示, 由图中可以看出最大力矩为  $5.4\text{N}\cdot\text{m}$ , 在所选电机的峰值扭矩范围内, 满足实际要求。

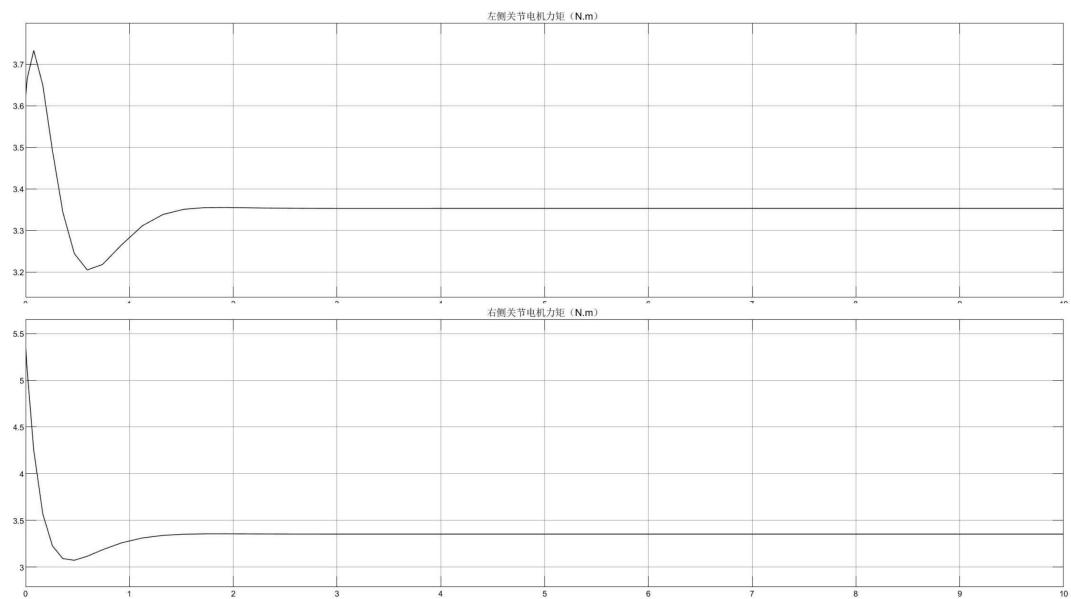


图 4-13 耦合运动时左右侧关节电机力矩的仿真结果