

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 α 从 $150^\circ \sim 240^\circ$ 所对应 y' 当中的最大值乘 0.5（由 jacobi.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 $K_{p1} = 100$ ， $K_{d1} = 40$ ， $K_{p2} = 20$ ， $K_{d2} = 5$ 。

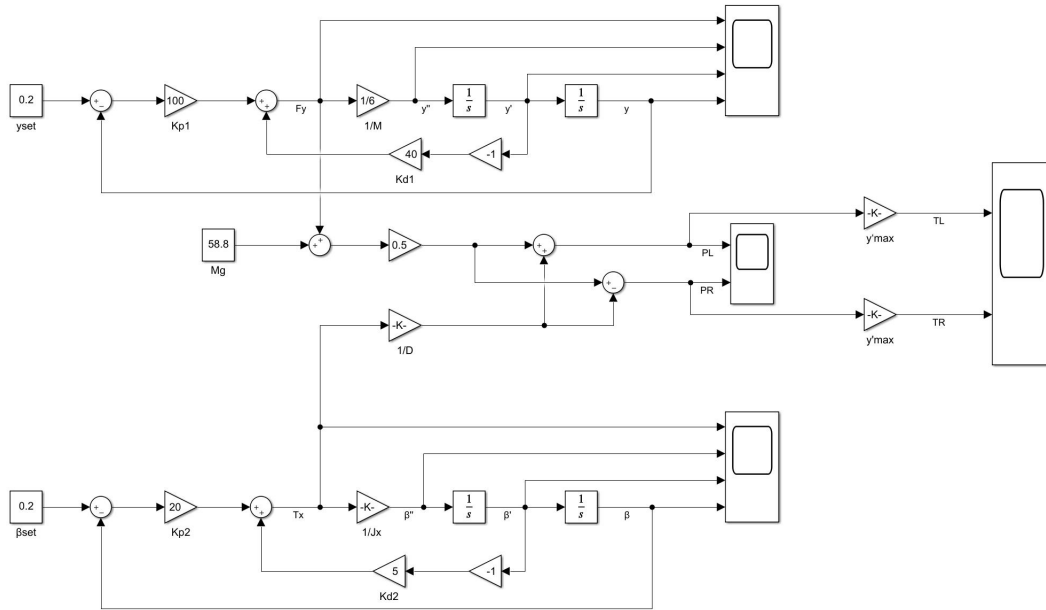


图 4-8 腿部运动的 Simulink 仿真控制模型

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：

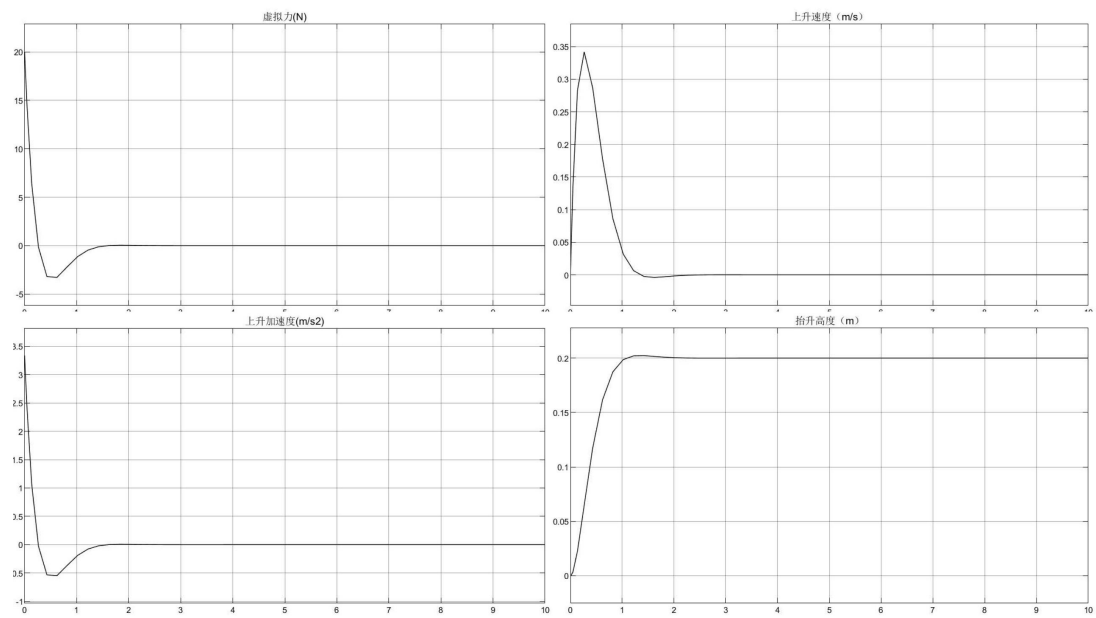


图 4-9 目标高度 0.2m 时 y 方向上的虚拟力和各项运动参数的仿真结果

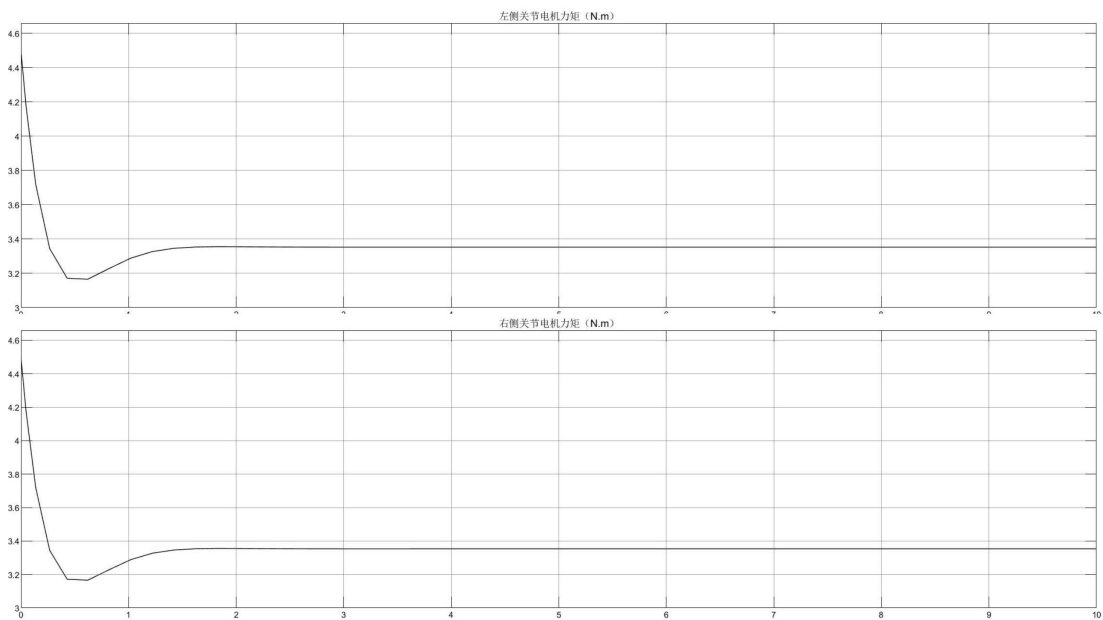


图 4-10 目标高度 0.2m 时左右侧关节电机力矩的仿真结果

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 $4.5\text{N}\cdot\text{m}$ ，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 0.2rad ，目标翻滚角度为 0 ，模拟机器人地面自适应运动过程，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：

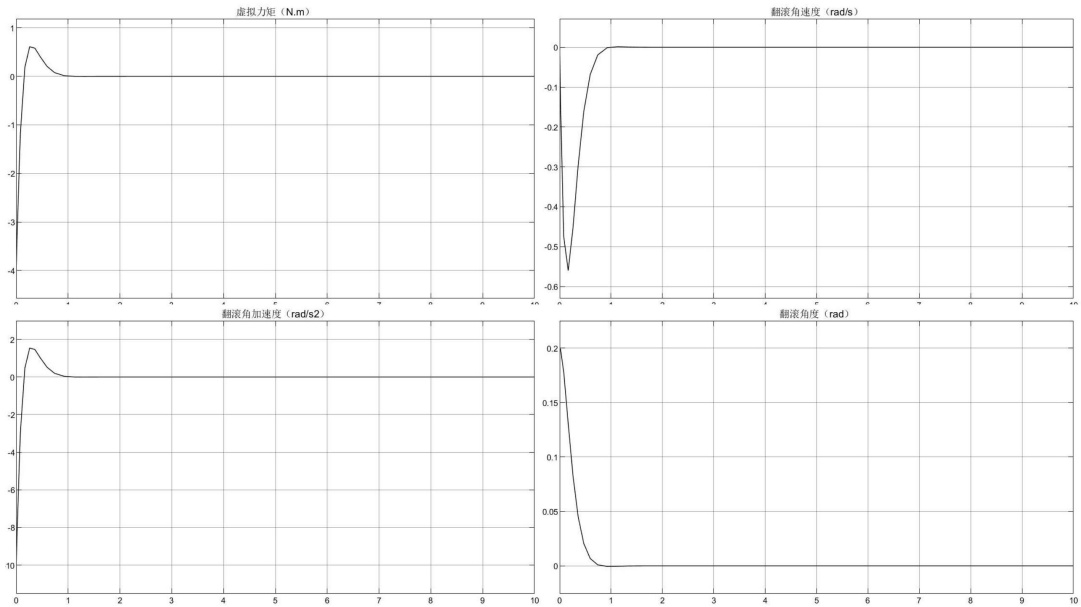


图 4-11 初始翻滚角度 0.2rad 时绕 x 轴旋转的虚拟力矩和各项运动参数的仿真结果



图 4-12 初始翻滚角度 0.2rad 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 0rad 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 0.2rad ，目标高度为 0.2m ，模拟机器人高度调节运动和地面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