

计算步骤	计算公式	说明 / 注释
1. 运动方程	$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = p(t)$	线性单自由度、粘滞阻尼
2. 时间离散	$t_i = i\Delta t, \Delta t = \frac{T}{N}$	等步长
3. 步内荷载假设	$p(t) = p_i = p(t_i), \quad t \in [t_i, t_{i+1}]$	零阶保持（一步恒力）
4. 基本参数	$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad c = 2m\omega_0\zeta$	由 m, k, ζ 得到
5. 阻尼频率	$\omega_d = \omega_0\sqrt{1 - \zeta^2}$	要求 $\zeta < 1$
6. 齐次解辅助项	$\text{term1} = v_i + \zeta\omega_0 u_i$	对应代码 <code>term1</code>
7. 齐次解位移推进	$u_h = e^{-\zeta\omega_0\Delta t} \left[u_i \cos(\omega_d\Delta t) + \frac{v_i + \zeta\omega_0 u_i}{\omega_d} \sin(\omega_d\Delta t) \right]$	由 (u_i, v_i) 引起的自由衰减
8. 齐次解速度推进	$v_h = e^{-\zeta\omega_0\Delta t} \left[v_i \cos(\omega_d\Delta t) - \left(\frac{\omega_0^2}{\omega_d} u_i + \frac{\zeta\omega_0}{\omega_d} v_i \right) \sin(\omega_d\Delta t) \right]$	与代码 <code>v_h</code> 一致
9. 静力位移（恒力）	$u_s = \frac{p_i}{k}$	该步恒力的静位移
10. 特解位移增量	$u_p = \frac{p_i}{k} \left[1 - e^{-\zeta\omega_0\Delta t} \left(\cos(\omega_d\Delta t) + \frac{\zeta\omega_0}{\omega_d} \sin(\omega_d\Delta t) \right) \right]$	恒力在一步内产生的响应
11. 特解速度增量	$v_p = \frac{p_i}{m\omega_d} e^{-\zeta\omega_0\Delta t} \sin(\omega_d\Delta t)$	对应代码 <code>v_p</code>
12. 位移更新	$u_{i+1} = u_h + u_p$	总响应叠加
13. 速度更新	$v_{i+1} = v_h + v_p$	总响应叠加
14. 下一步荷载	$p_{i+1} = p(t_{i+1})$	对应 <code>p_next</code>
15. 加速度反算	$a_{i+1} = \frac{p_{i+1} - c v_{i+1} - k u_{i+1}}{m}$	平衡方程反算