

系统的仿真模型，以对 ADRC 飞行控制器的控制性能进行验证。下面，将首先分析 ADRC 的控制性能；然后，考察 $x-\theta$ 和 $y-\phi$ 通道所采用的 PD-ADRC 双闭环控制器的性能。

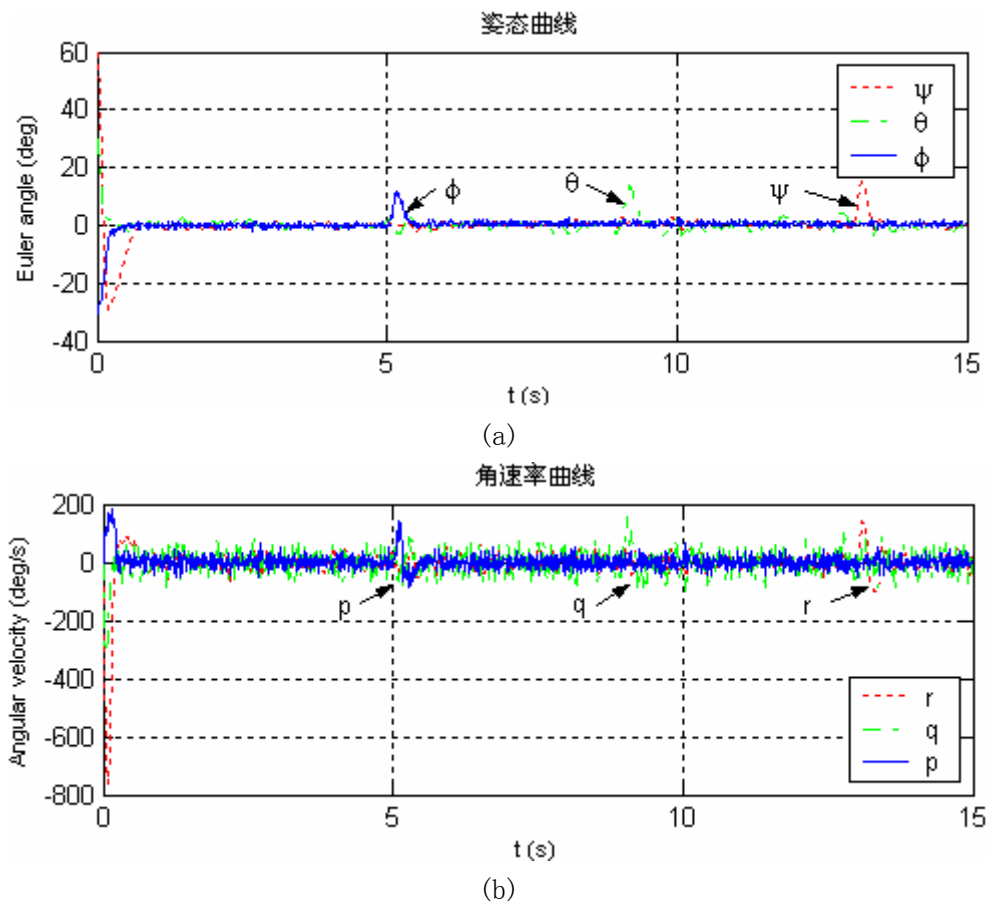
§ 4.4.1 ADRC 控制仿真结果与分析

系统 (4.30) ~ (4.31) 的直接驱动部分都采用了 ADRC 控制器。应用 ADRC 的一大难点在于其参数的调节，需要根据 §4.3.3 给出的原则进行整定。选取控制周期 $h = 0.001$ ，则 TD 的快速因子 $r = 100000$ ，滤波因子 $h_0 = 10h$ ；ESO 的六个参数选取为 §4.3.3 中的推荐值；NLSEF 的参数整定结果见表 4.1。

表 4.1 NLSEF 参数整定结果

参数\通道	z	Ψ	θ	Φ
β_1	400	67	130	120
β_2	380	23	90	85

假设飞行器的初始高度为 0，偏航角为 60° ，俯仰角为 30° ，横滚角为 -30° ；控制目标是让飞行器在高度为 $1m$ 位置，实现姿态增稳控制；为了检验控制器的鲁棒性，对状态反馈变量添加了 5% 的高斯白噪声；另外，还在 $5s$ 、 $9s$ 和 $13s$ 时刻，分别考虑了三个姿态角发生突变的情况。



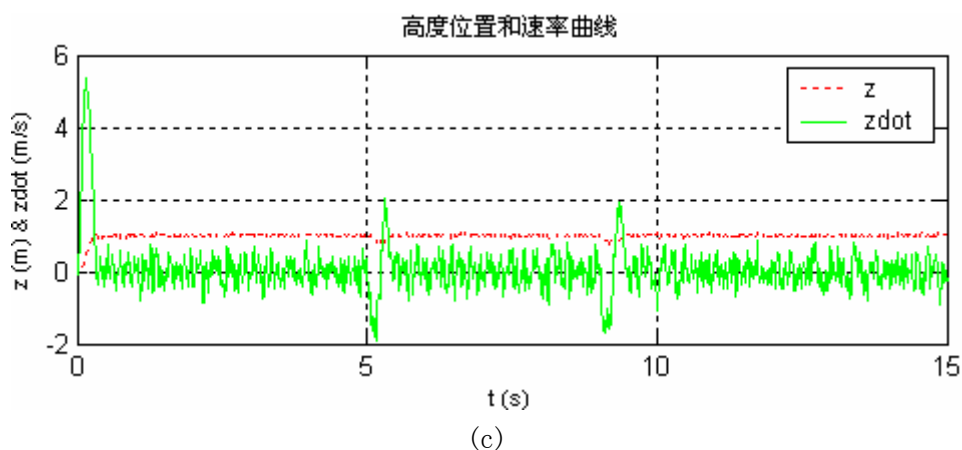
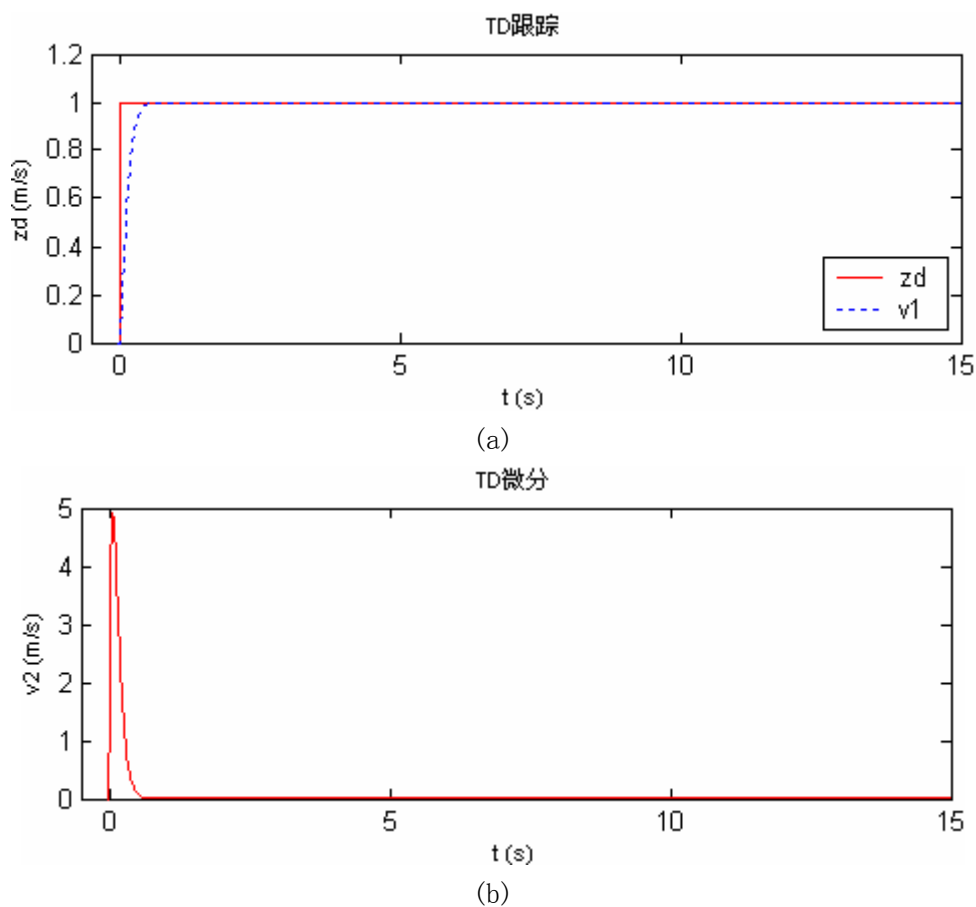


图 4.4 基于 ADRC 的姿态增稳和飞行高度控制仿真曲线

从图 4.4 可以看到，在 ADRC 控制器的控制之下，飞行器在 1s 时间内就可以完成调整，实现姿态增稳和飞行高度控制。另外，对于传感器噪声和状态突变，ADRC 具有良好的鲁棒性来克服其影响。此外，由图(c)还可以看到，飞行器发生俯仰和横滚转动时，飞行高度均会受到影响。

接下来，将分别通过 z 通道 TD、 θ 通道 ESO 的输出曲线来说明 ADRC 是如何“安排过渡过程”和进行“扰动估计”的，以进一步分析其性能。

图 4.5 z 通道 TD 安排过渡过程

由图 4.5 可以看到，TD 在输入信号发生阶跃跳变的时候，安排了一个“过渡过程”，其输出 v_1 能快速而又无超调地跟踪阶跃输入信号 z_d ， v_2 则是 z_d 的广义微分。TD 的作用主

要在于：柔化了 z_d 的变化，从而减少系统输出的超调，增强 ADRC 的鲁棒性。

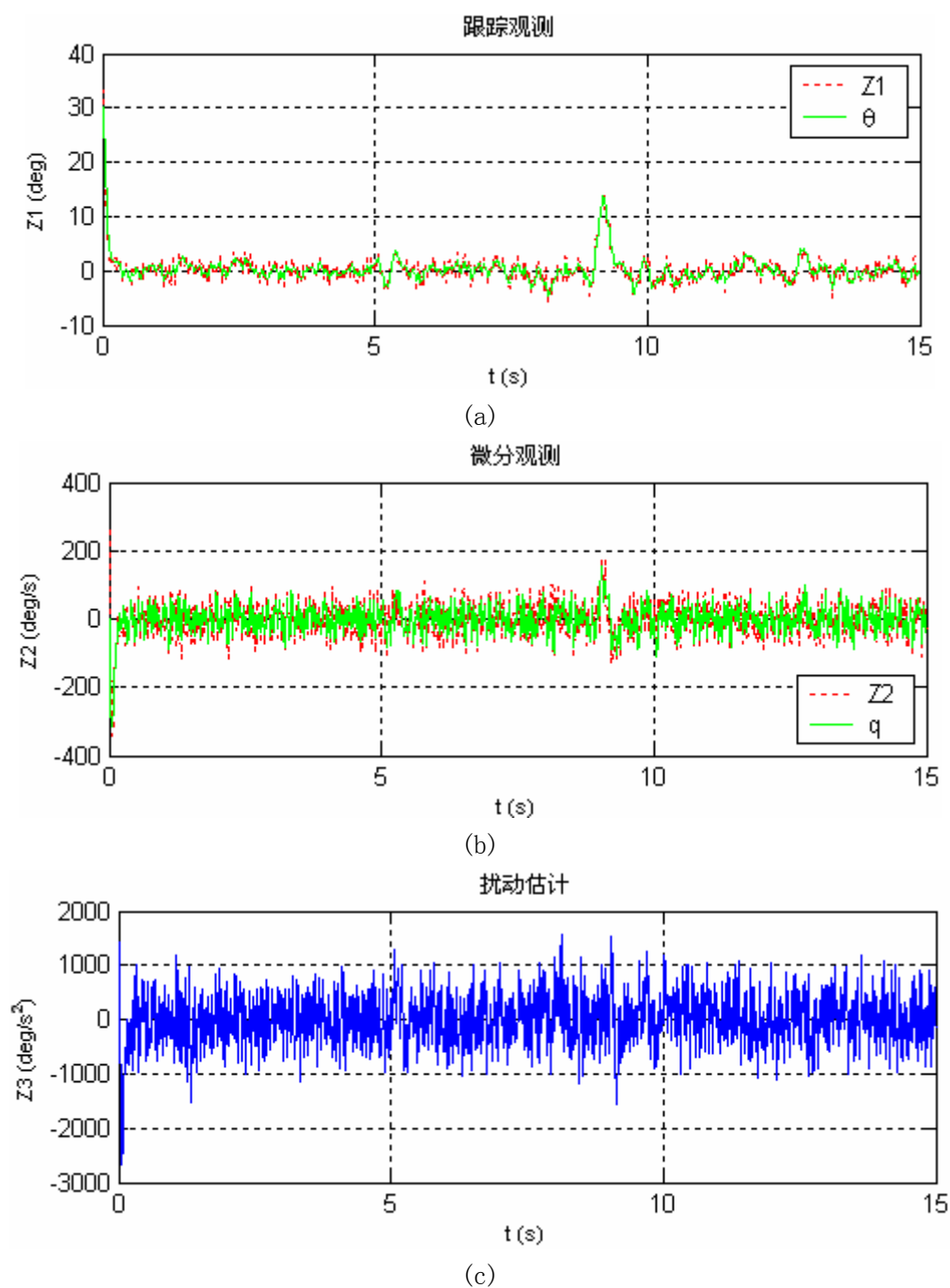


图 4.6 θ 通道 ESO 观测扩张状态

ESO 可以根据量测量和控制量观测出系统的各阶状态变量， θ 通道 ADRC 控制器的 ESO 观测结果如图 4.6。从图(a)和(b)中可以看到，在有噪声的情况下，ESO 的跟踪、微分输出仍然可以很好地观测出 θ 通道的角度和角速率。图(c)为实时估计出的“系统总扰动”，通过它可以实现模型和外扰的补偿，从而达到改造对象模型，将非线性、不确定的系统近似线性化和确定性化。

§ 4.4.2 PD-ADRC 控制仿真结果与分析

设定飞行器在 $x-y$ 平面内的初始位置、速度均为 0，初始俯仰、横滚角为 30° ，角速率为 $40^\circ/s$ ；控制目标是使飞行器悬停于 $x-y$ 平面原点位置。为此，分别在 θ 、 ϕ 通道 ADRC 控制器的基础之上增加外环 PD 控制，形成新的 $x-\theta$ 、 $y-\phi$ 双闭环控制。通过调节，获得外环控制参数为： $K_{p\theta} = 1.05$ ， $K_{d\theta} = 0.3$ ， $K_{p\phi} = 1.1$ ， $K_{d\phi} = 0.25$ ，内环参数见 §4.4.1，仿真结果如图 4.7。

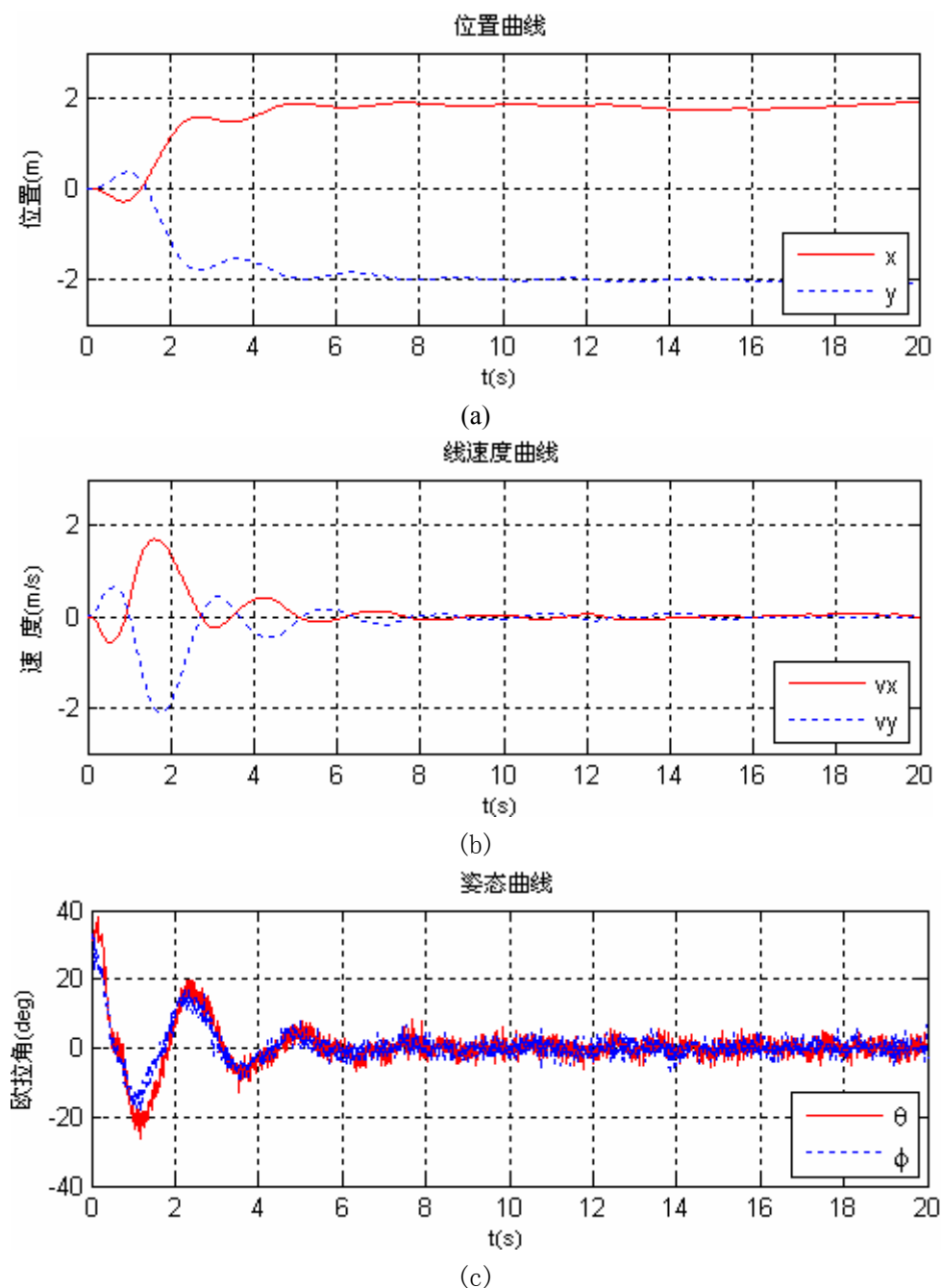


图 4.7 $x-\theta$ 、 $y-\phi$ 通道 PD-ADRC 控制仿真曲线

从图 4.7 可以看到，在 PD-ADRC 的控制之下，飞行器的最终悬停位置不是 $x-y$ 平面

的原点，而是大约在 $(2 - 2)m$ 处。可见，PD-ADRC 双闭环控制器可以实现微小型四旋翼无人直升机悬停控制，但不能实现定点悬停控制。尽管调节时间比较长，但是调整过程比较平缓，超调量小，飞行器平稳地飞向并悬停于稳定点。此外，还可以看到 PD-ADRC 具有一定的鲁棒性，可以克服传感器噪声的影响。

以上，通过仿真实验检验并分析了基于 ADRC 的微小型四旋翼无人直升机飞行控制方法的有效性和鲁棒性。仿真结果表明：ADRC 控制器可以很好地实现姿态增稳和高度控制，具有调节时间短，超调量小，鲁棒性好的优点，但也有结构复杂，参数多、难整定的缺点；PD-ADRC 控制器可以实现悬停控制，且具有一定的鲁棒性。

§ 4.5 本章小结

本章讨论了基于 ADRC 的微小型四旋翼无人直升机飞行控制问题。在§3.3.1 和§3.3.2 的基础之上，进一步简化动力学模型；针对模型直接驱动部分设计 ADRC 控制器；为了实现悬停控制，在原有 ADRC 姿态控制器的基础之上，增加一个 PD 控制器作为外环，并利用 Lyapunov 方法分析了 PD-ADRC 双闭环控制器的稳定性。仿真结果验证了 ADRC 控制器和 PD-ADRC 双闭环控制器的有效性与鲁棒性。