

基于神经网络的飞行控制性能 的在线监测与评估

1

课题研究背景

2

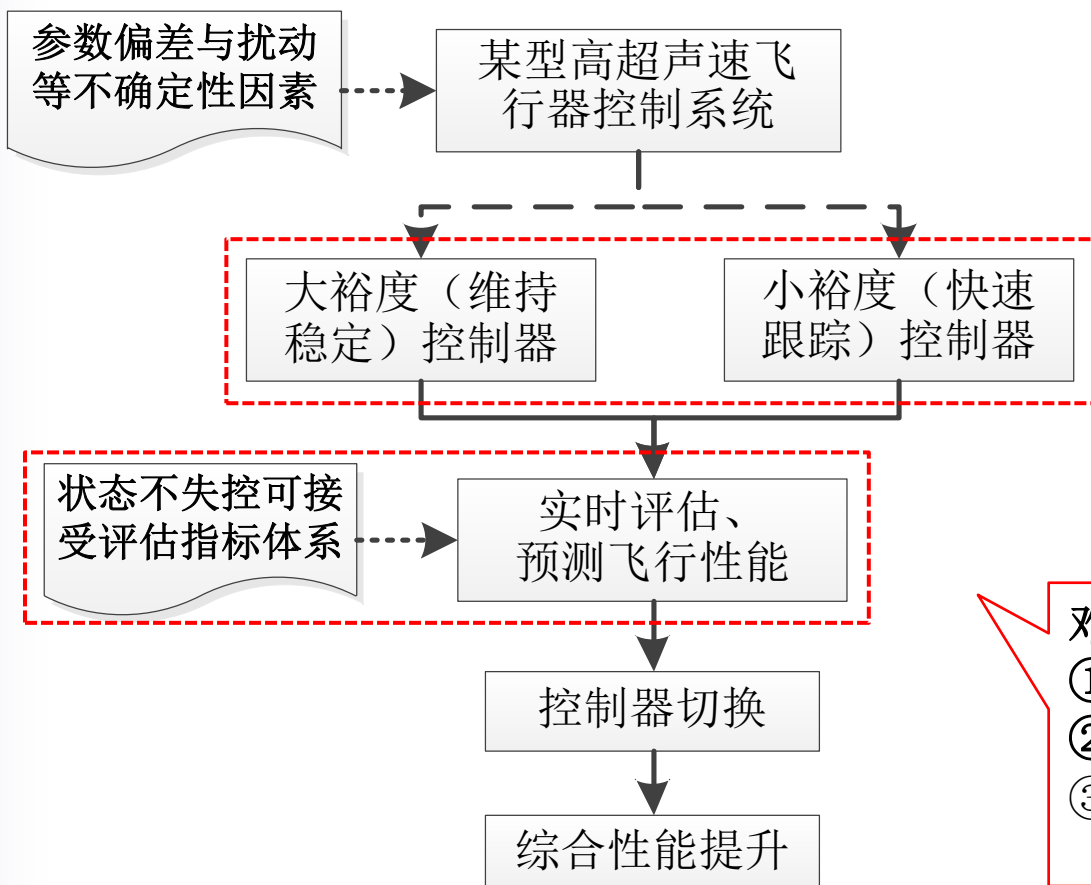
研究过程与结果

3

总结与问题

1 课题研究背景

➤ 项目背景：稳定与跟踪综合性能提升的姿态控制技术研究



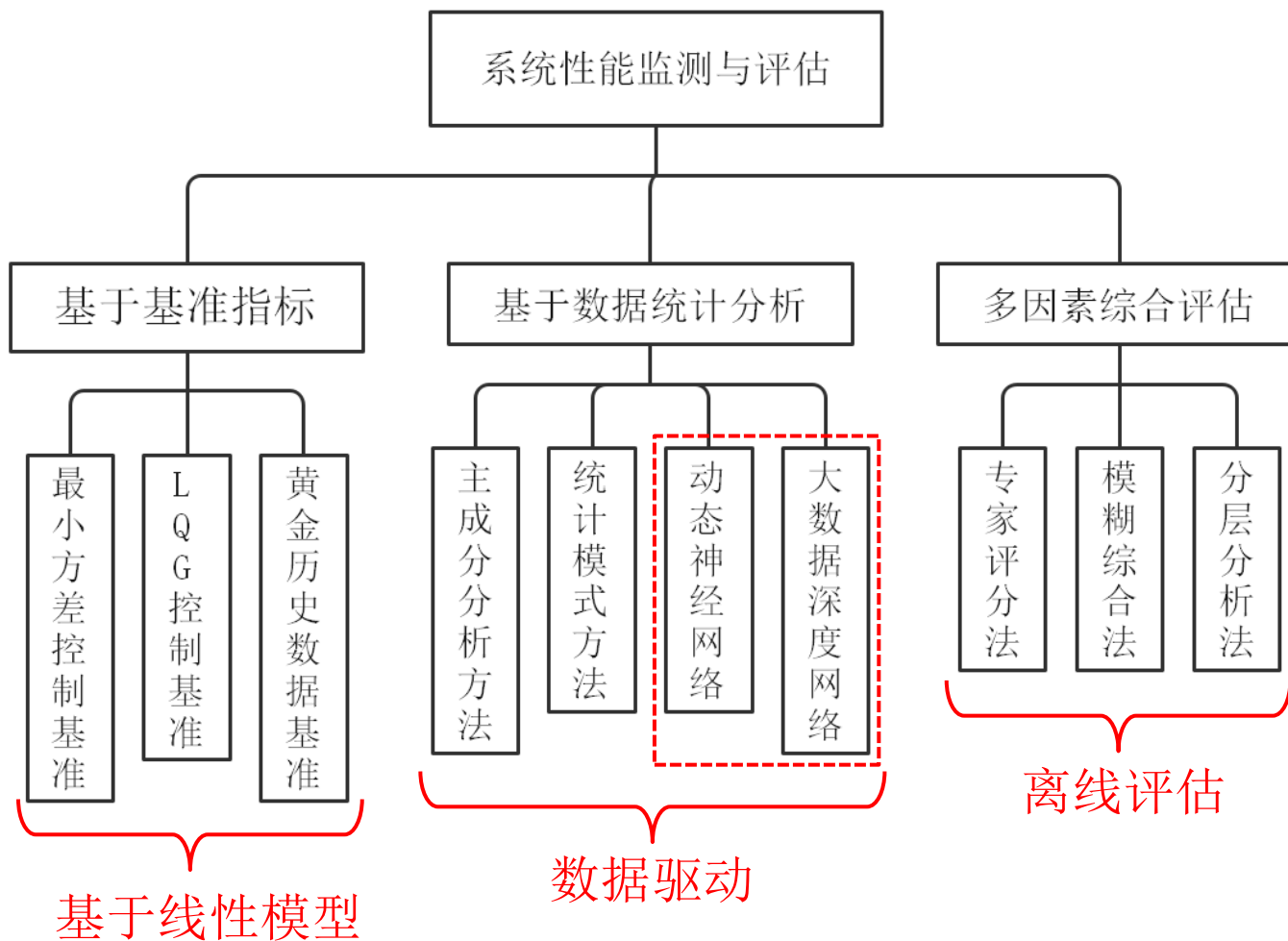
使用基于智能抽样的随机鲁棒优化方法设计不同裕度的控制器（该部分内容已完成，但存在问题）

难点：

- ① 实时评估控制性能
- ② 状态不失控可接受
- ③ 控制切换（已有部分工作）

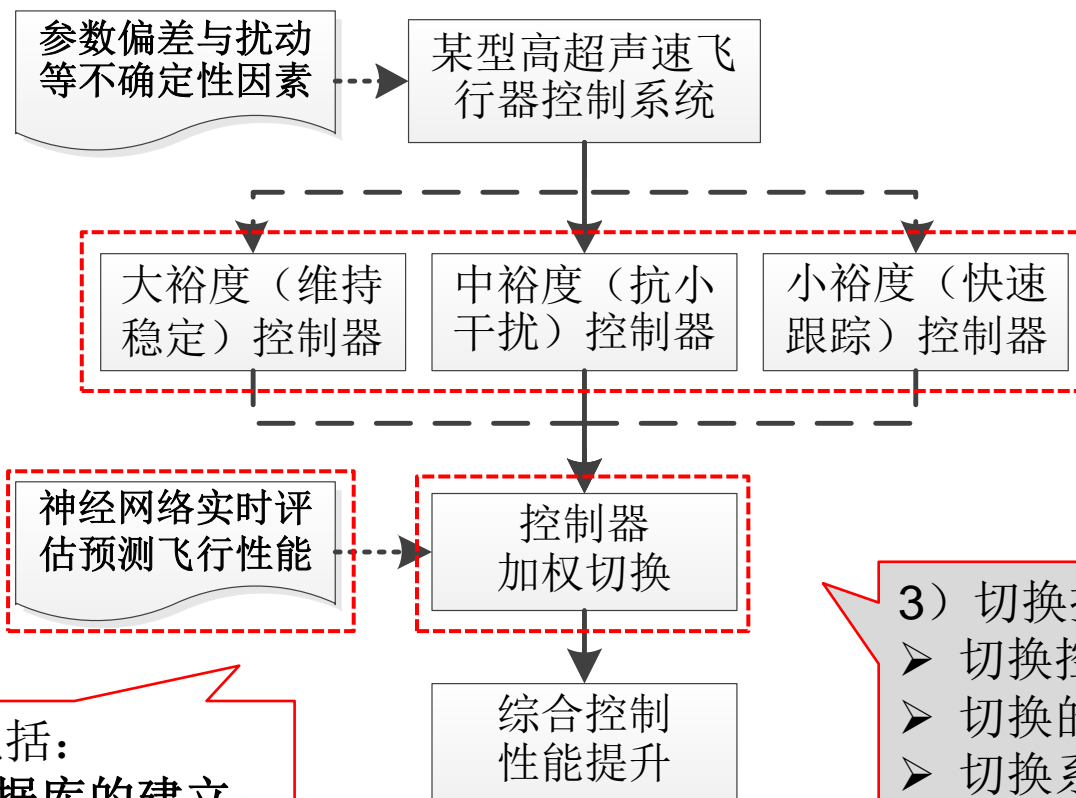
1 课题研究背景

➤ 方法调研：控制系统性能评估方法



2 研究过程与结果

2.1 主要研究内容



1) 针对原有工作存在的问题，作出改进：重新设计多级控制器。

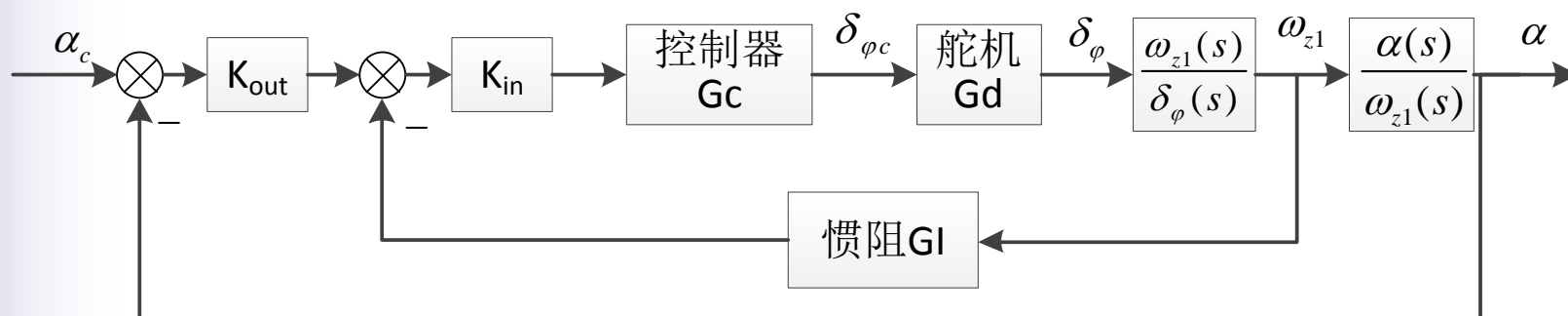
2) 主要包括：

- 离线数据库的建立；
- 网络的训练和测试；
- 在线评估仿真验证。

3) 切换控制相关问题：

- 切换控制策略；
- 切换的平滑性；
- 切换系统的稳定。

2.2 多级控制器设计



俯仰通道控制结构框图

- 内环校正网络（控制器）： $G_c(s) = \frac{1 + bs / \omega_1}{1 + s / \omega_1}$
- 内环开环传函： $G_{in}(s) = K_{in} G_c(s) G_d(s) G_I(s) \frac{\omega_{z1}(s)}{\delta_\phi(s)}$
- 外环开环传函： $G_{out}(s) = K_{out} \cdot K_{in} \cdot \frac{G_c(s) G_d(s) \frac{\alpha(s)}{\delta_\phi(s)}}{1 + K_{in} G_c(s) G_d(s) G_I(s) \frac{\omega_{z1}(s)}{\delta_\phi(s)}}$

2.2 多级控制器设计

原参数设计过程：

- 基于全弹道性能值优化校正网络参数；
- 按照给定的控制性能同时优化内外环增益。

大裕度性能

	性能指标类别	设计需求	权重
特征根	稳定性	均在左半平面	5
频域	内环幅值裕度	幅值裕度> 8dB	2
	内环相位裕度	相位裕度> 45度	2
	外环幅值裕度	幅值裕度> 20dB	2
	外环相位裕度	相位裕度> 85度	2
时域	内环稳态误差	< 25%	1
	外环稳态误差	< 5%	1
	外环超调量	< 5%	1

参数
优化
结果

特征点	Kin_s	Kout_s	Kin_b	Kout_b
61	-54	5.2	-50	2
65	-88	4.25	-60	2
75	-180	4.25	-90	2
90	-565	6	-284	2
110	-1470	6	-900	6
130	-1010	6	-612	6
145	-1050	6	-528	6

小裕度性能

小裕度性能	特征根	稳定性	均在左半平面	5
	频域	内环幅值裕度	幅值裕度 > 4dB	2
		内环相位裕度	相位裕度 > 25度	2
	时域	内环稳态误差	< 25%	1
		外环稳态误差	< 5%	1
		外环超调量	< 5%	1
		外环调节时间	< 1s	2

$$G_{out}(s) = K_{out} \cdot K_{in} \cdot \Delta(s)$$

性能指标的设定是否合理??

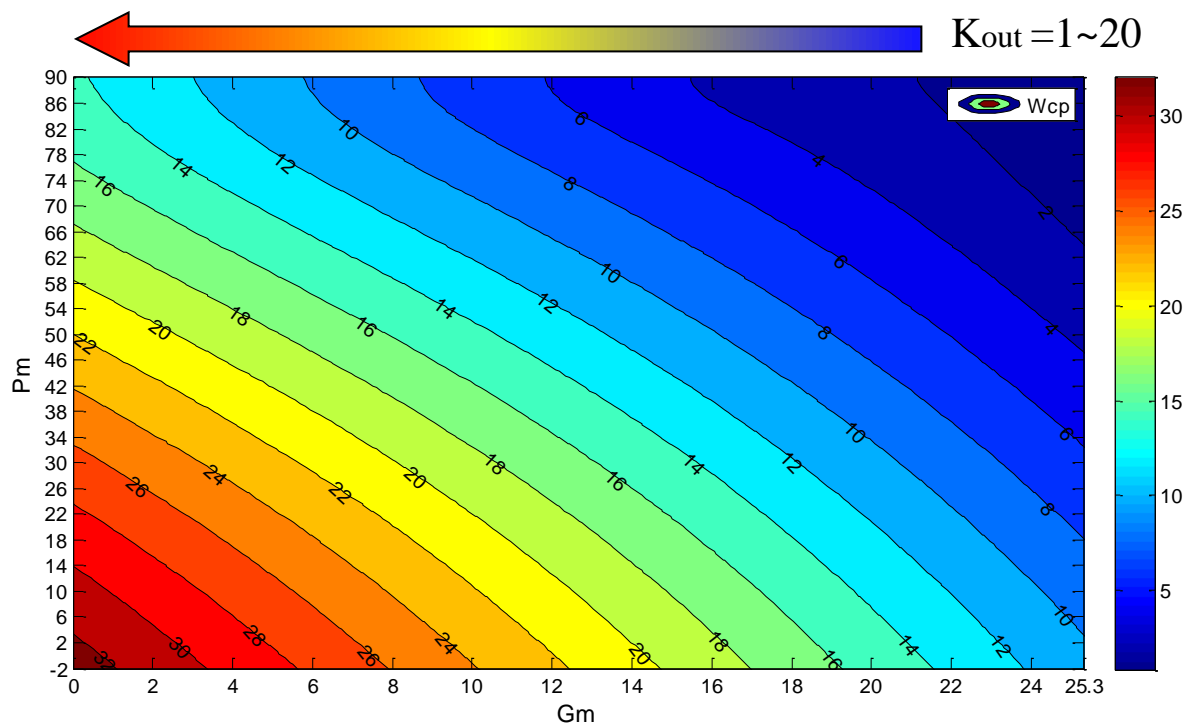
- 关于大小裕度、稳定与跟踪；
- 关于内外环串级控制。

2.2 多级控制器设计

新的参数设计思路：

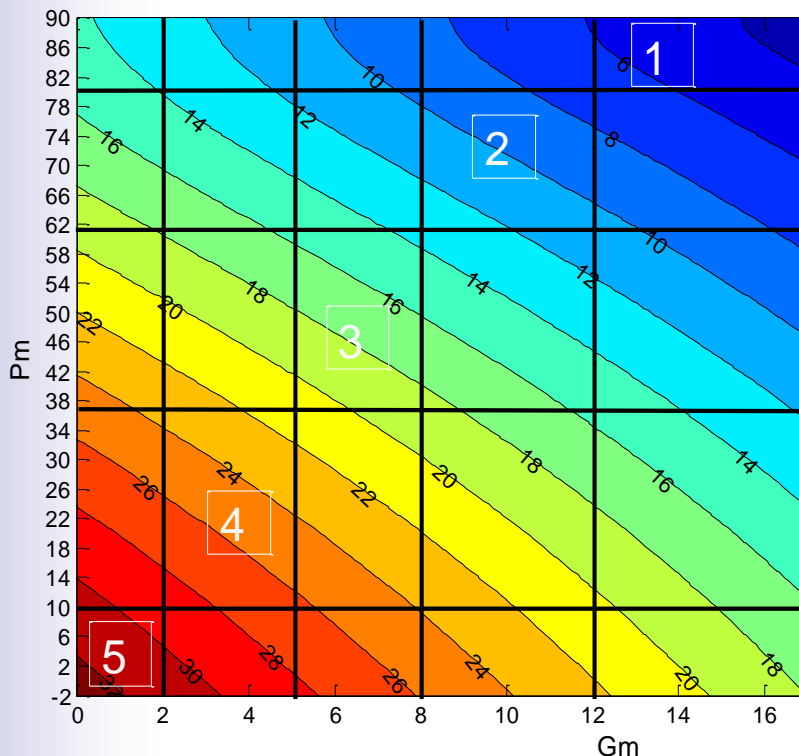
- 基于全弹道性能值优化校正网络参数；
- 设计内环增益，使内环满足足够大的裕度；
- 设计外环增益，使系统具有不同的裕度和跟踪性能。

特征点70s，内环裕度48deg/12dB，外环增益渐变得到系统裕度变化情况如下：



2.2 多级控制器设计

按照幅相裕度区间划分控制器等级如下：



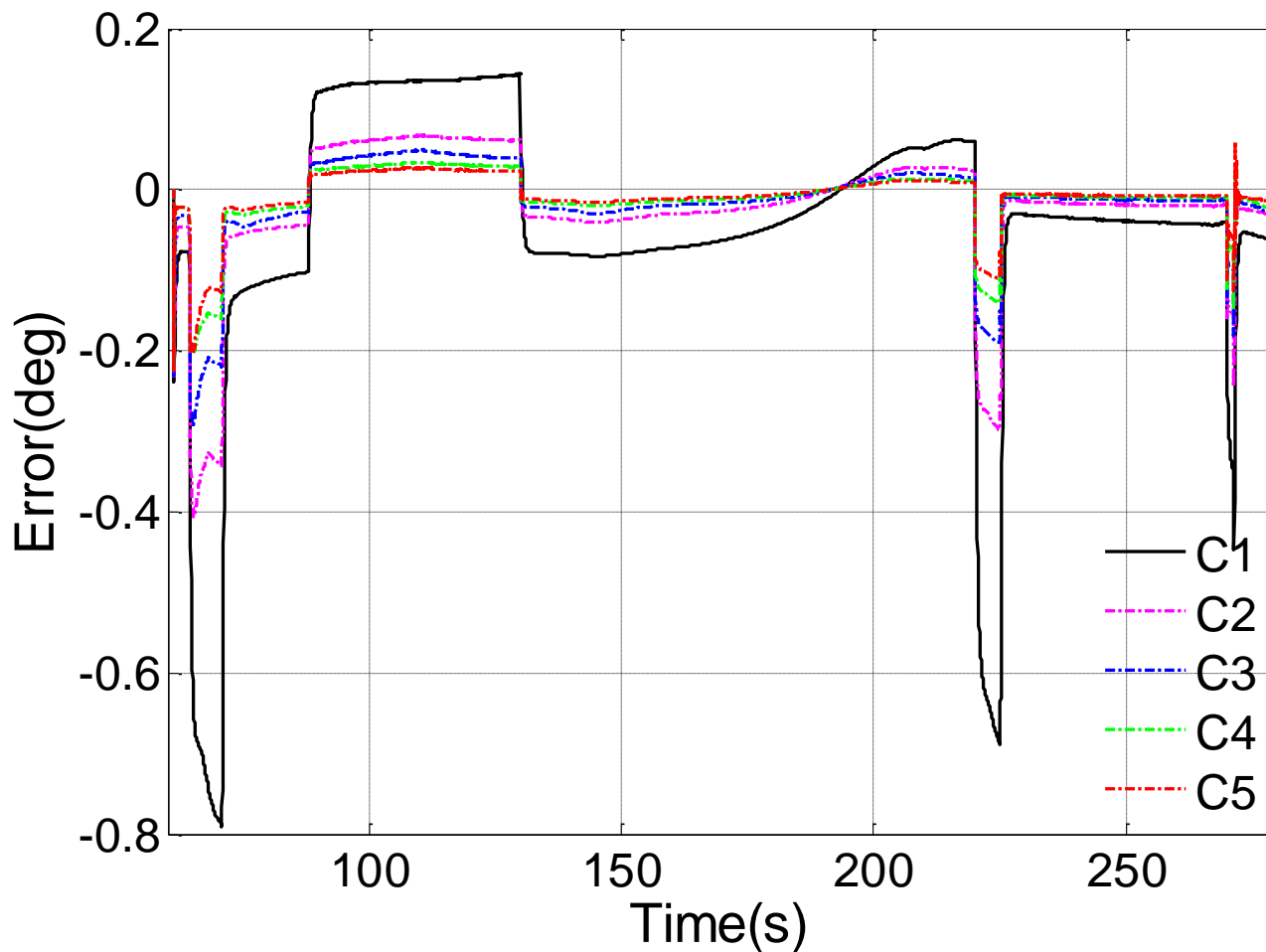
参数
设计

特征点	Kin	Kout_ 1	Kout_ 2	Kout_ 3	Kout_ 4	Kout_ 5
70	-45	3	7	11	15	19
88	-180	3	7	11	15	19
130	-440	3	7	11	15	19
160	-250	3	7	11	15	19
220	-35	3	7	11	15	19
225	-65	3	7	11	15	19
270	-54	3	7	11	15	19

各特征点的内环裕度相同
时，外环增益可取相同值，
便可实现相似的性能。

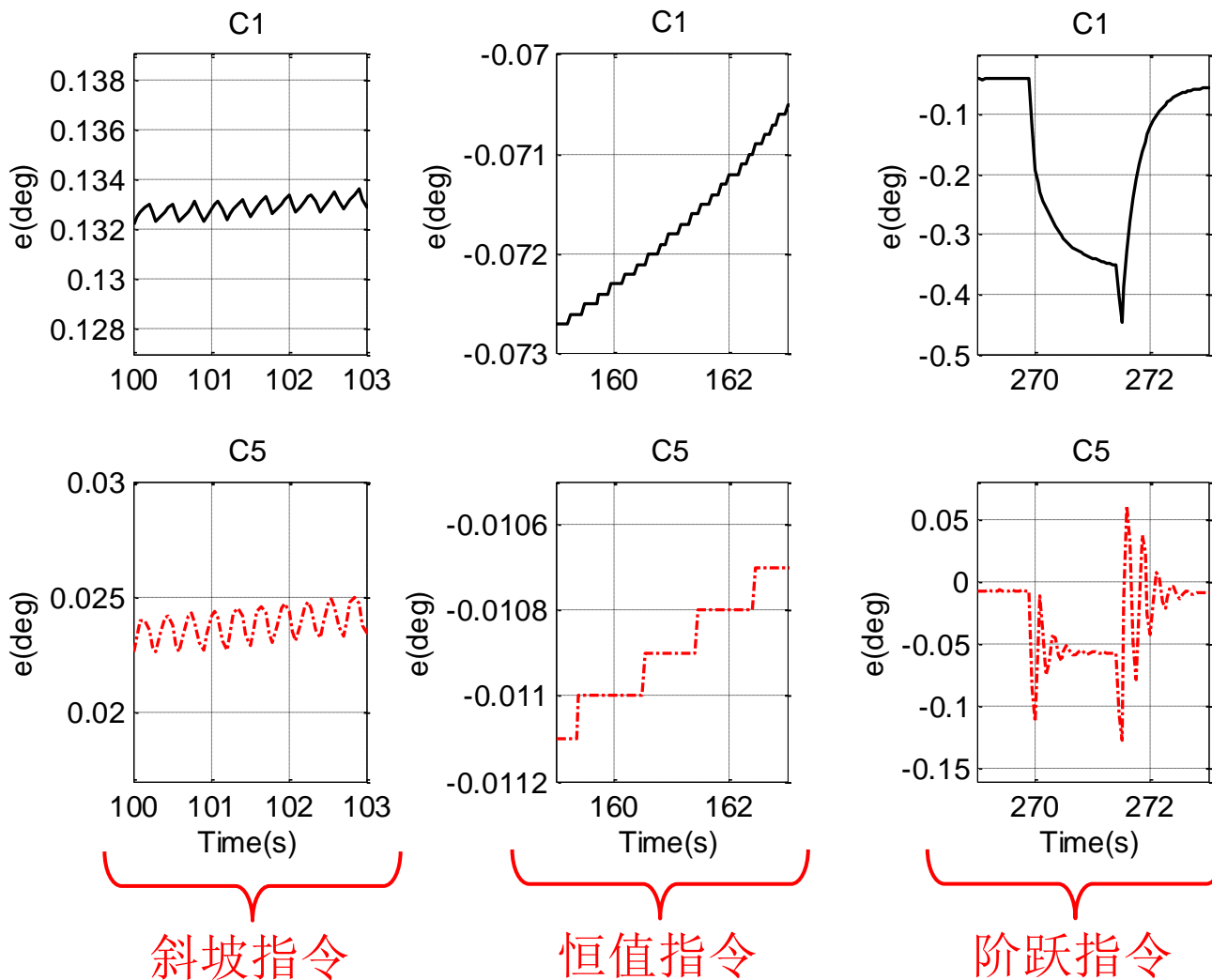
2.2 多级控制器设计

非线性六自由度仿真下，多级控制器俯仰通道的实际控制效果：



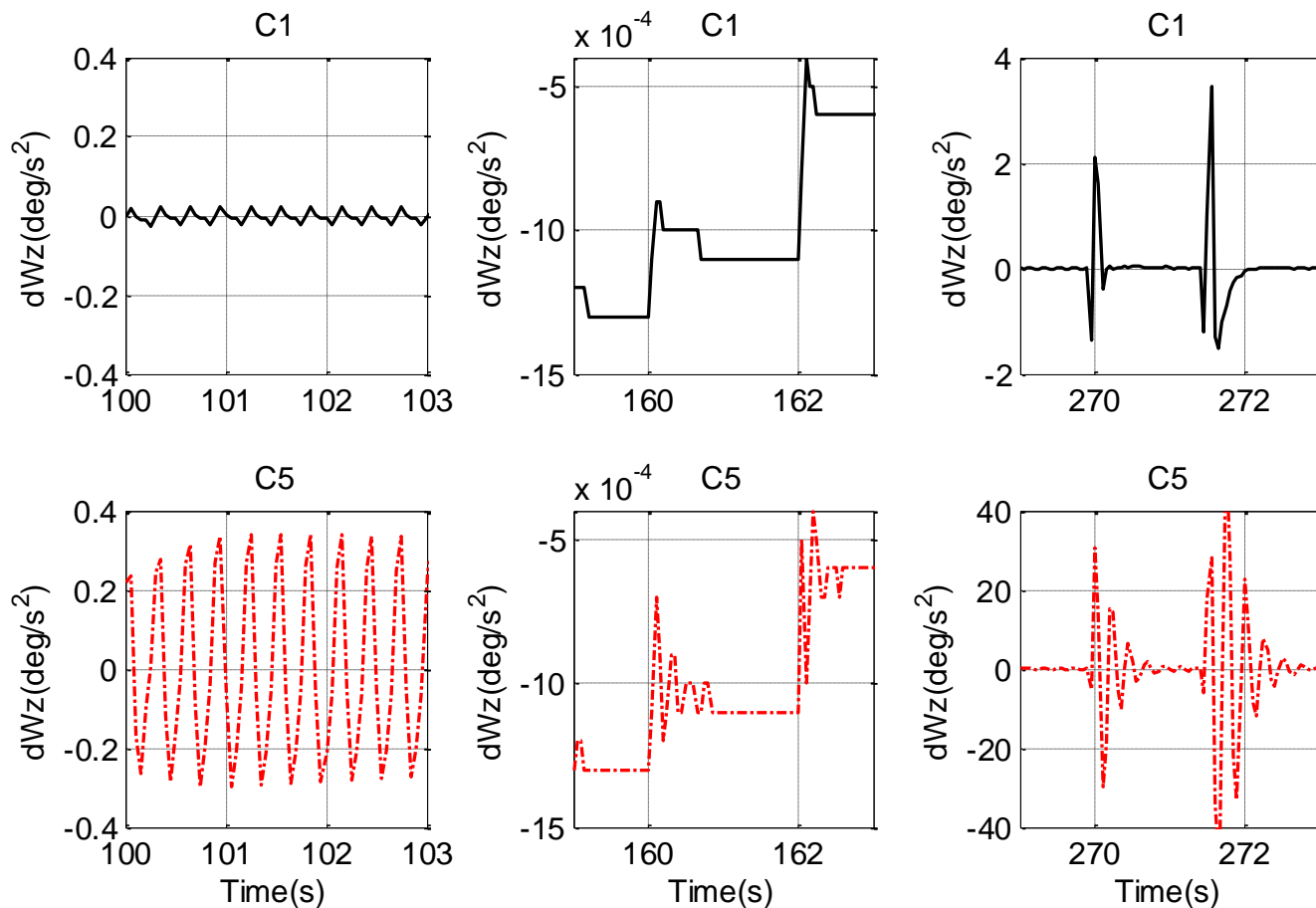
2.2 多级控制器设计

某些特征点（100s, 160s, 270s）的控制误差放大对比（控制1和5）图：



2.2 多级控制器设计

三个特征点处的角加速度对比图

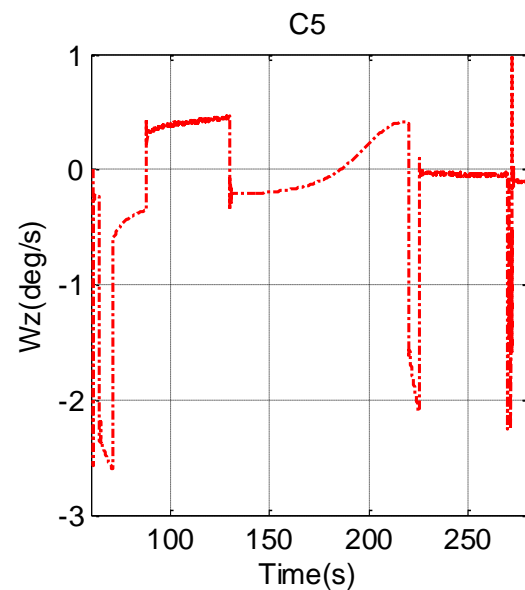
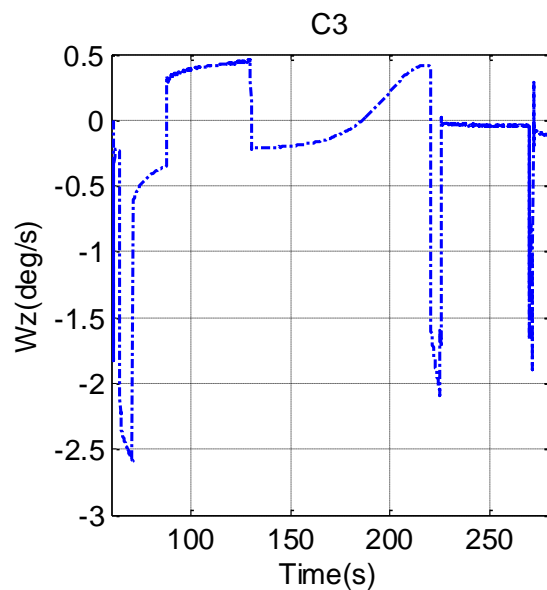
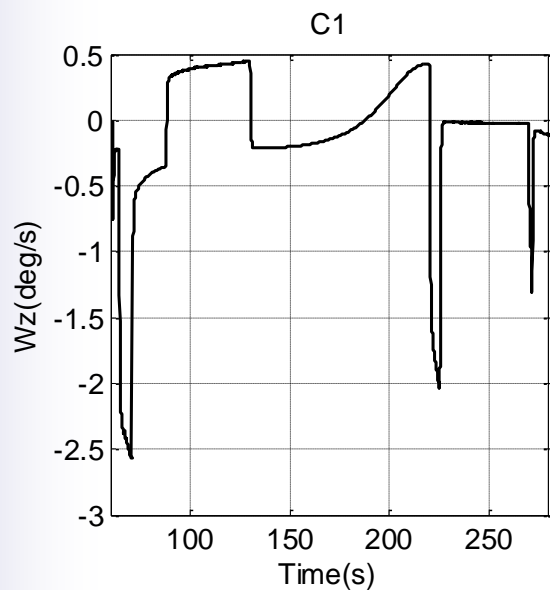


不同级别的控制器下，系统状态量的幅值大小、变化的平滑性（震荡程度）等指标均有较明显的区分。

2.2 多级控制器设计

不同控制器下，系统其他状态量对比图：

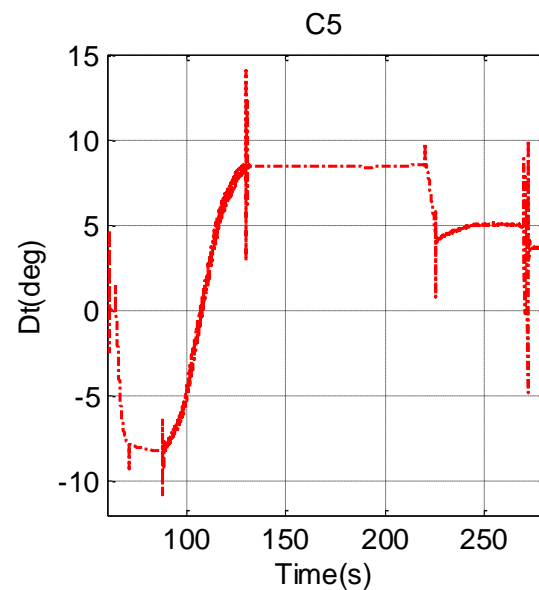
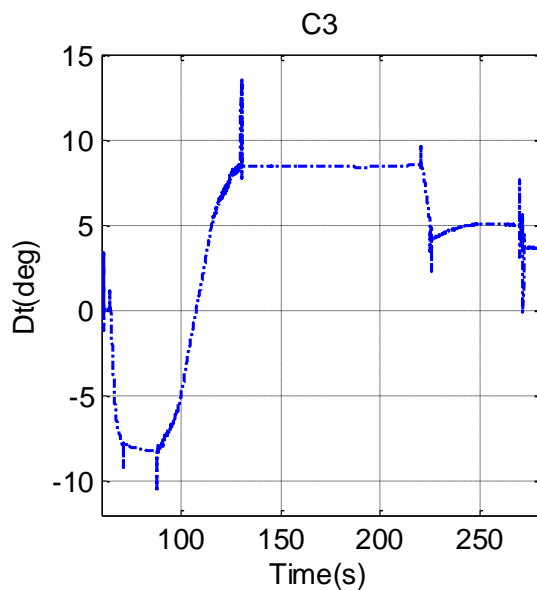
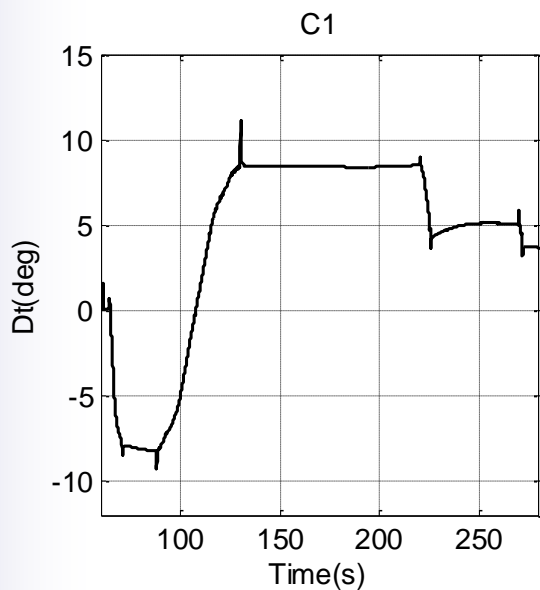
角速度对比图



2.2 多级控制器设计

不同控制器下，系统其他状态量对比图：

舵偏角对比图

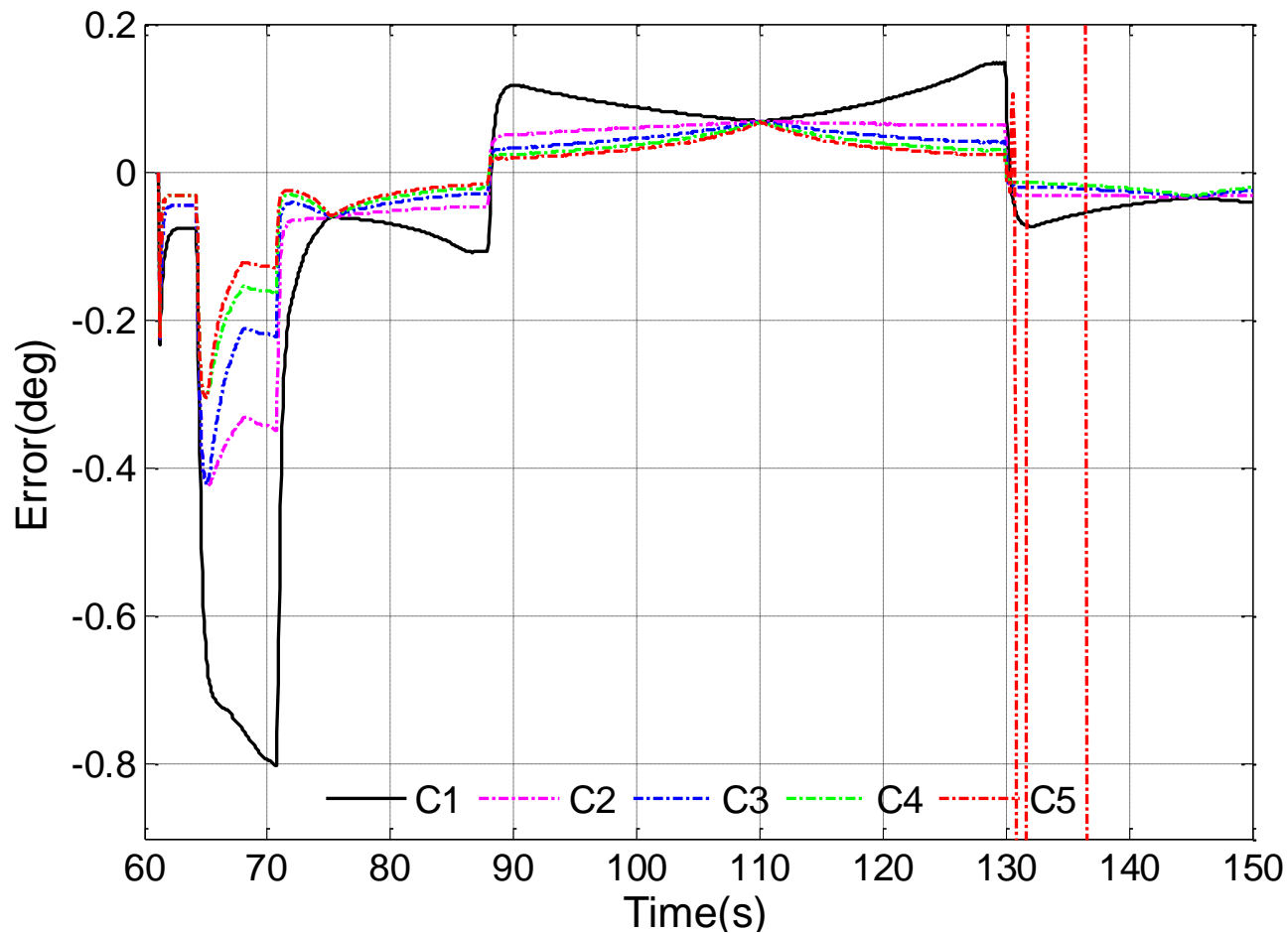


对于项目中的**难点1**：状态不失控可接受评价体系？

如果认为**第4或5等级控制器**下的系统属于状态不失控可接受的情况，则可通过**对控制性能的识别（评估）**来判断系统是否处于不失控可接受状态。

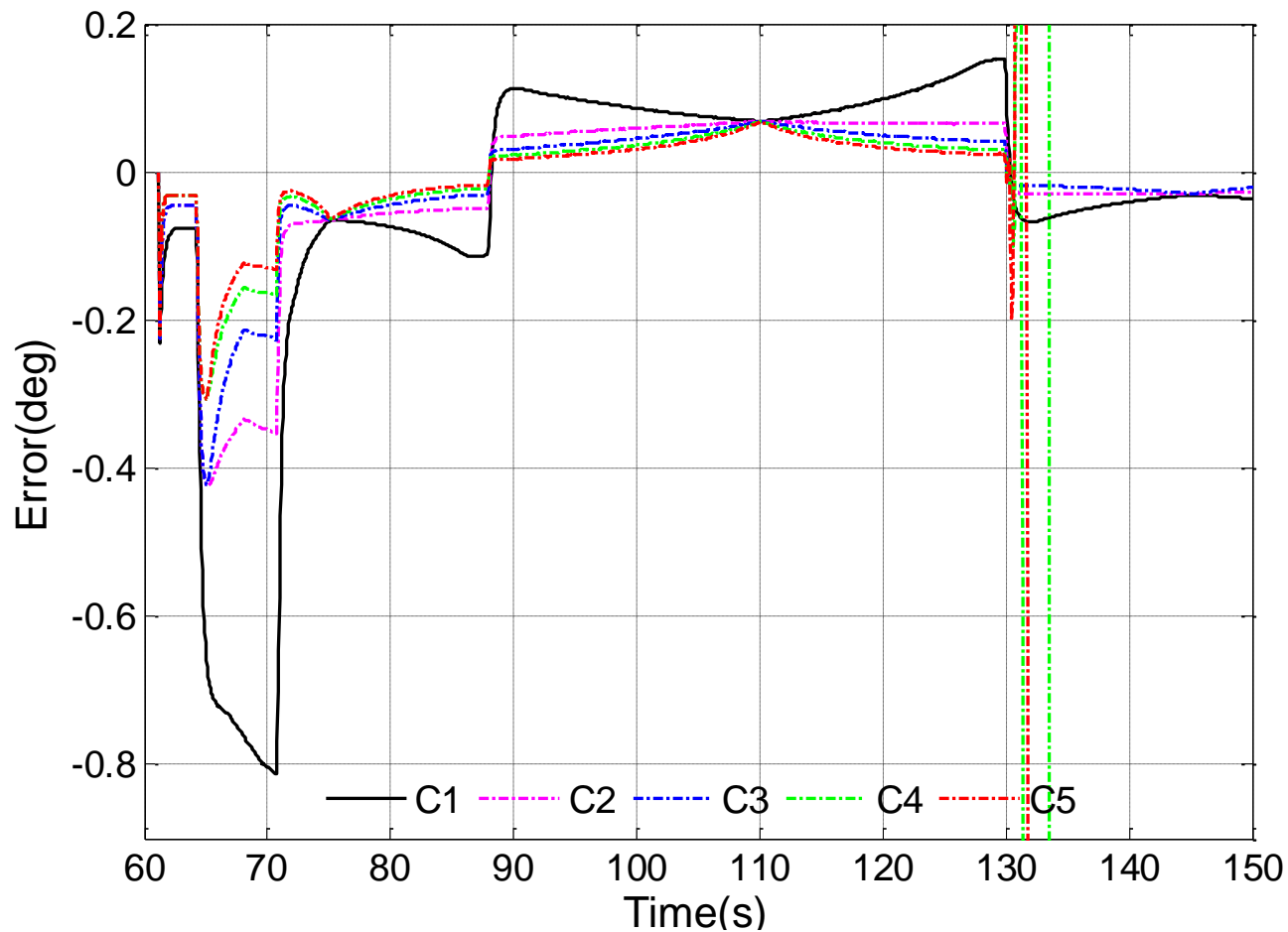
2.2 多级控制器设计

不同控制器下，参数偏差10%时，系统的控制性能：



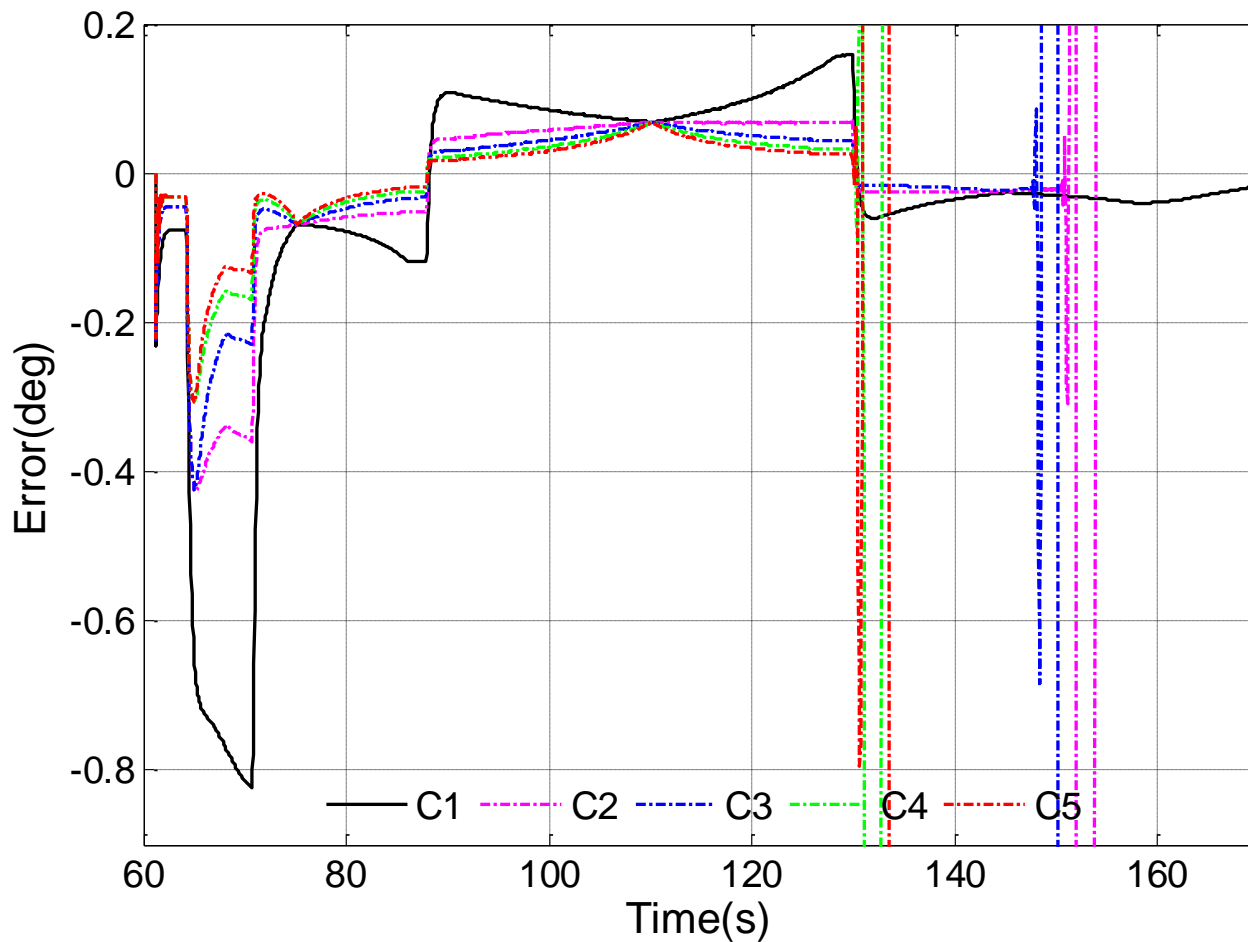
2.2 多级控制器设计

不同控制器下，参数偏差20%时，系统的控制性能：



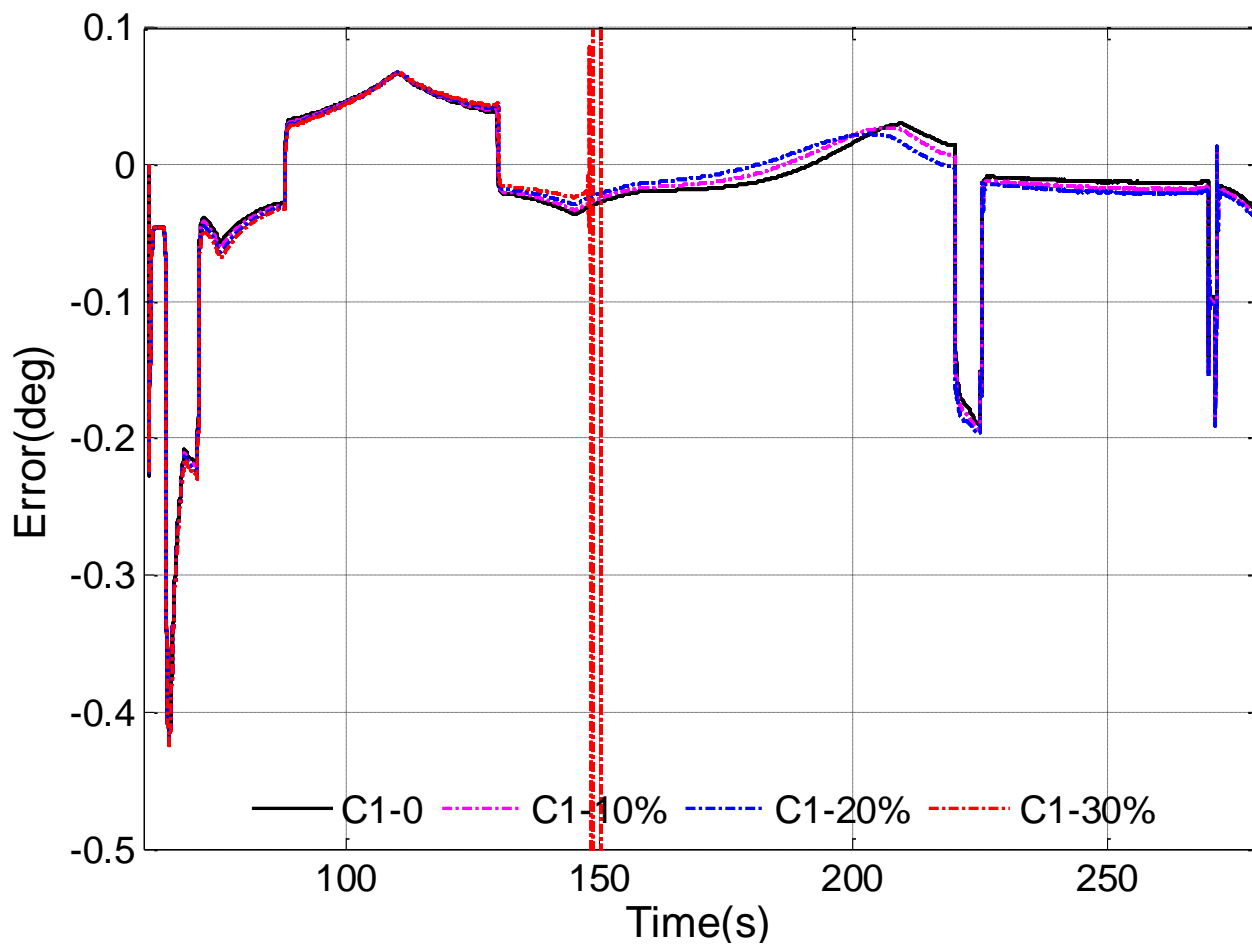
2.2 多级控制器设计

不同控制器下，参数偏差30%时，系统的控制性能：



2.2 多级控制器设计

第3级控制器在不同程度参数偏差下，系统的控制性能：



2.2 多级控制器设计

小结:

该种多级控制器设计思路的优点:

➤ 5级而非2级?

1) 实现更好的控制性能; 2) 对于状态的识别, 具有更好的容错性;

- 调节各特征点的内环增益使其内环性能相似, 则外环增益可取相同值, 简化了参数优化工作;
- 将状态不失控可接受的概念具体化为控制器的控制性能, 给出了处理方法;
- 各级控制器的内环参数相同, 外环参数不同, 参数加权的实质是外环参数线性叠加, 参数变化后的控制性能的变化情况容易分析;
- 便于神经网络性能评估工作的开展。

随之带来的缺点:

- 多级控制器的切换策略更为复杂, 需要重新制定方案。

2.3 神经网络性能评估

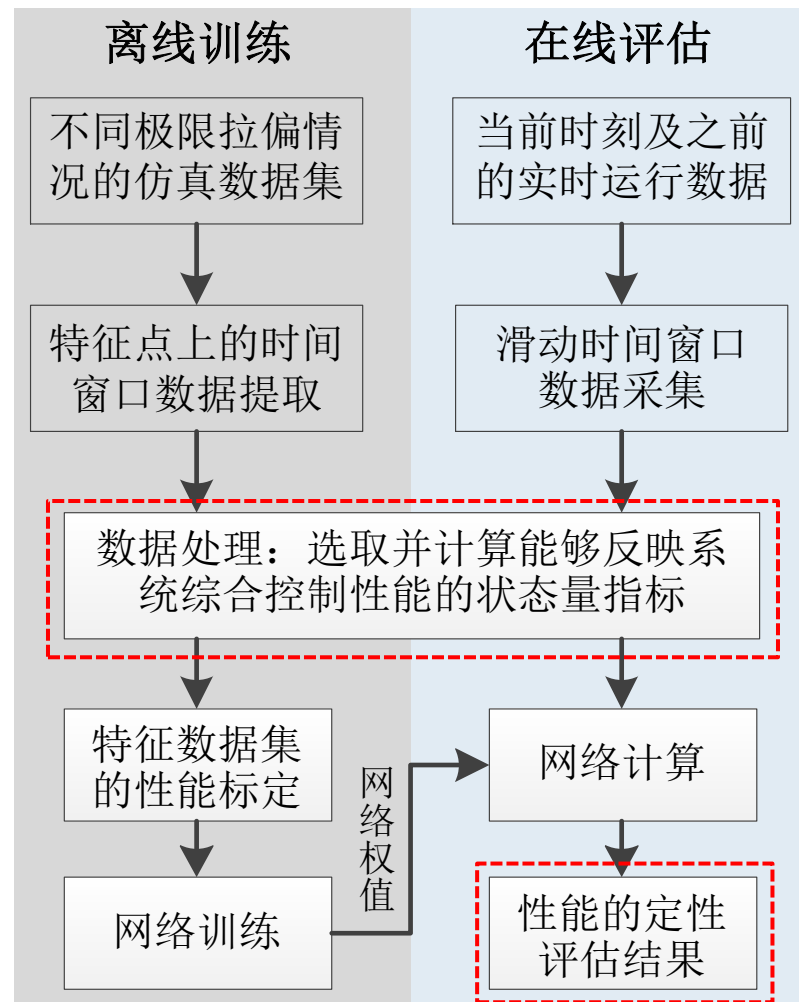
➤ 原理:

按照**小偏差假设**，用某工作点的线性模型代表该点附近各点的控制模型，因此该点的附近的**时域状态量和频域的裕度性能有对应的关系**。

因此，对不同控制器在不同拉偏情况下的离线仿真数据，取各特征点的时间窗口 $[t_i - Nh * L, t_i + (N - 1)h * R]$ 内的状态量数据构成离线数据库；在线运行时考察窗口 $[t_{k-N}, t_{k-1}]$ 内的数据进行预测评估，具体实施过程如右图：

难点：

- 离线数据库的建立；
- 网络的**输入输出量**的选取



➤ 离线数据库的建立

主要包括两部分：

- 1) 特征点裕度计算与标定；
- 2) 特征点窗口数据的截取和处理

数据样本个数：

7个特征点*

5级不同裕度的控制器*

6种不同幅值的拉偏*

8组拉偏极限情况+

35个无拉偏的点

=1715个样本

增加数据样本的方法：

- 2种不同的时间窗口大小 ($T=1.5s, 2s$) ,
- 3种窗口大小的左右宽度 $L=0.2, 0.4, 0.6$.
 $[t_i - Nh * L, t_i + (N - 1)h * R]$

当前方案下，最多有 $1715 * 6 = 10290$ 个样本

Name ^	Value	Min	Max
Data_In_Out_0	<35x31 double>	-11.8791	270
Data_In_Out_0_1	<35x31 double>	-11.8791	270
Data_In_Out_0_2	<35x31 double>	-11.8791	270
Data_In_Out_1	<272x31 double>	-11.6324	270
Data_In_Out_1_1	<272x31 double>	-11.6324	270
Data_In_Out_1_2	<272x31 double>	-11.6324	270
Data_In_Out_2	<272x31 double>	-9.9186	270
Data_In_Out_2_1	<272x31 double>	-9.9186	270
Data_In_Out_2_2	<272x31 double>	-9.9186	270
Data_In_Out_3	<264x31 double>	-16.0594	270
Data_In_Out_3_1	<264x31 double>	-16.0594	270
Data_In_Out_3_2	<264x31 double>	-16.0594	270
Data_In_Out_4	<248x31 double>	-15.3172	270
Data_In_Out_4_1	<248x31 double>	-15.3172	270
Data_In_Out_4_2	<248x31 double>	-15.3172	270
Data_In_Out_5	<228x31 double>	-14.3302	270
Data_In_Out_5_1	<228x31 double>	-14.3302	270
Data_In_Out_5_2	<228x31 double>	-14.3302	270
Data_In_Out_6	<221x31 double>	-14.0223	270
Data_In_Out_6_1	<221x31 double>	-14.0223	270
Data_In_Out_6_2	<221x31 double>	-14.0223	270
Data_bx	<31x4620 double>	-16.0594	270
Data_mx	<31x3080 double>	-16.0594	270
Data_sx	<31x1540 double>	-16.0594	270
TrainData_b	<4620x31 double>	-16.0594	270
TrainData_m	<3080x31 double>	-16.0594	270
TrainData_s	<1540x31 double>	-16.0594	270
Train_Data_bx	<4620x31 double>	-16.0594	270
Train_Data_mx	<3080x31 double>	-16.0594	270
Train_Data_sx	<1540x31 double>	-16.0594	270
rowrank	<1x4620 double>	1	4620

➤ 网络的输入输出量的选取

● 输入量选取分为五类：

1) 控制指令相关量；2) 角度控制误差相关量；3) 角速度控制相关量；4) 角加速度相关量；5) 舵偏的相关量，及其相关统计指标，具体如下表：

1) 指令的变化率的最大值	7) 角速度误差的方差	13) 舵偏最大值
2) 角误差的最大值	8) 角速度误差的震荡次数	14) 舵偏导的最大值
3) 角误差的均值	9) 角加速度最大值	15) 角误差的方差
4) 角误差的平方误差积分	10) 角加速度的方差	16) 角速度的最大值
5) 角误差的震荡次数	11) 角加速度误差的震荡次数	17) 角加速度均值
6) 角速度误差最大值	12) 角加速度误差的衰减速率	18) 舵偏的方差

● 输出量为五个控制器等级：

一级到五级控制器分别用[1 0 0 0 0]; [0 1 0 0 0]; [0 0 1 0 0]; [0 0 0 1 0]; [0 0 0 0 1] 表示，以识别出最大值位置为正确识别。

➤ 神经网络的训练与测试

使用基本的数据库（1540个样本）进行训练和测试，前4/5数据训练，后1/5测试。结果如下：

```
>> assessment_network
```

```
Error_c1 =
```

```
0.0710
```

```
correct_rate1 =
```

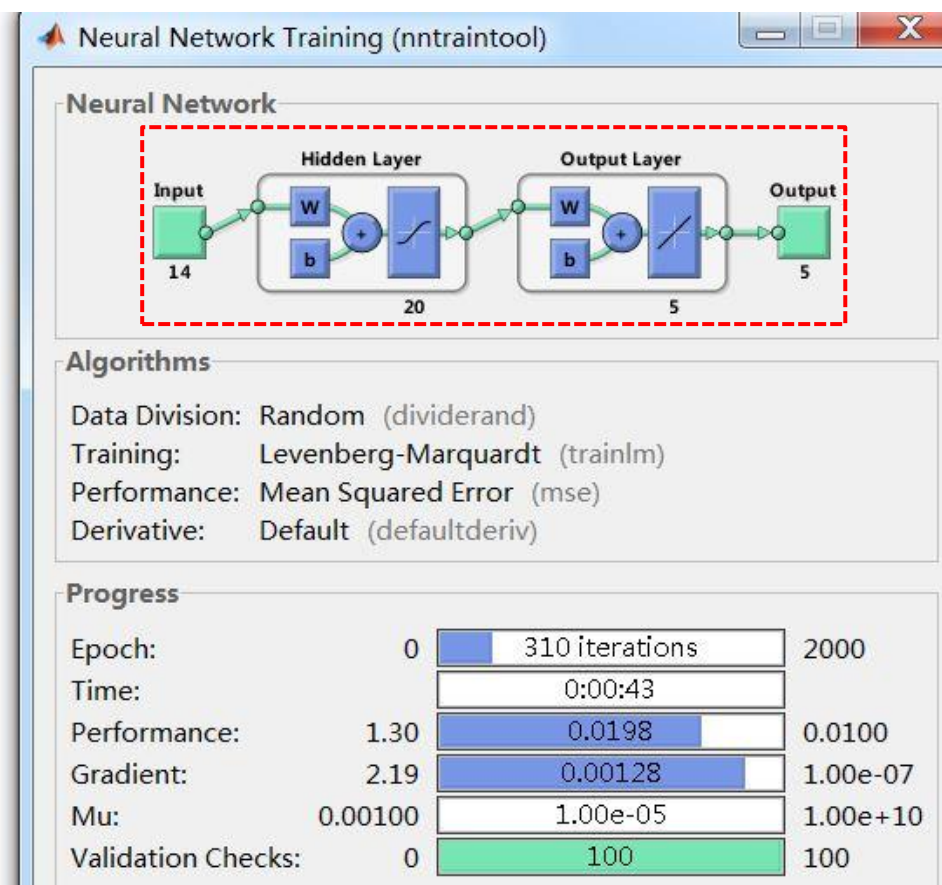
```
0.8961
```

```
Error_c2 =
```

```
0.0053
```

```
correct_rate2 =
```

```
0.9214
```



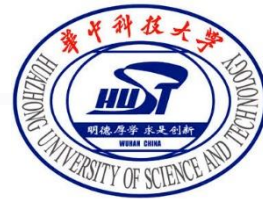
3 总结与问题

当前工作存在的问题：

- C++程序尚未调好，**在线评估的测试结果**暂时没给出；
- 识别**正确率有待提高**，可改进的地方有：
 - 1) 人工检查数据的标定，剔除坏数据；
 - 2) 进一步选取试验神经网络的输入数据，找到最佳的指标量；
 - 3) 使用拓展的数据库训练网络。

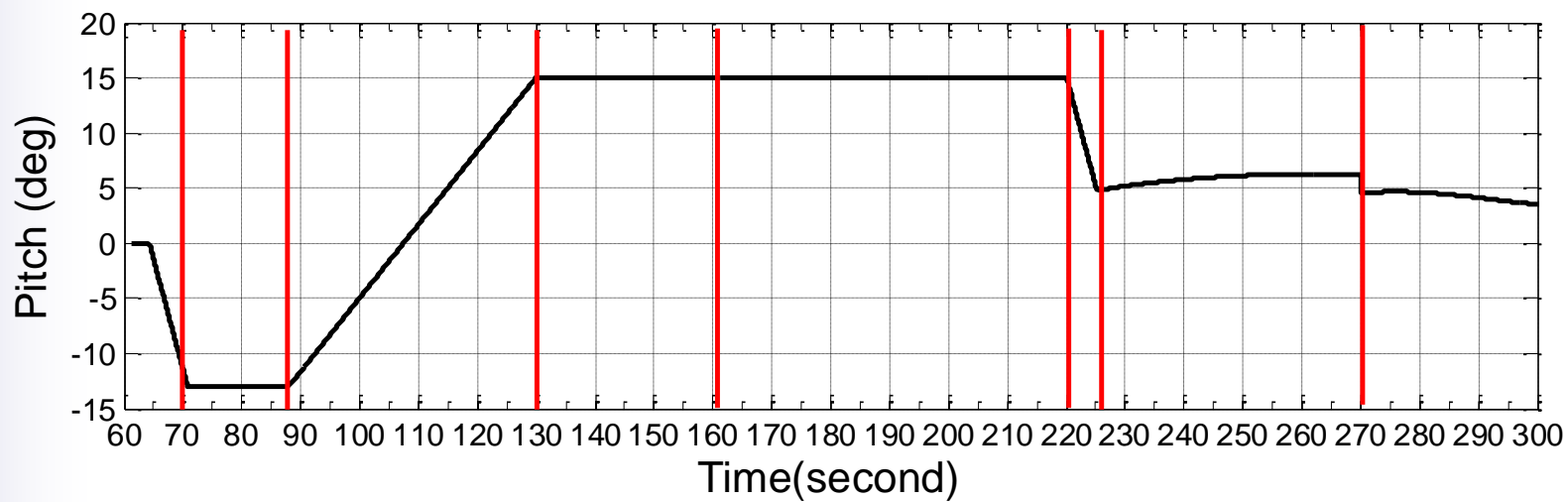
其他问题：

- 目前的神经网络方案验证这个思路可行，数据库已经建好，**深度网络识别的方案**可以开展？
- 偏实用，若要整理成小论文，有哪些**可补充的理论背景**？



谢谢！

根据指令变化选择特征点如下：



2.2 多级控制器设计

按照幅相裕度区间划分控制器等级如下：

	幅值裕度	相角裕度	截止频率（带宽）	说明
内环	$10 < G_m < 12\text{dB}$	$45 < P_m < 50 \text{ deg}$	$15 < W_c < 25 \text{ rad/s}$	内环裕度保持在足够大的范围
外环	$> 12\text{dB}$	$> 85 \text{ deg}$	$< 12 \text{ rad/s}$	裕度等级 1：优秀
	$8 < G_m < 12\text{dB}$	$65 < P_m < 85 \text{ deg}$	$12 < W_c < 18 \text{ rad/s}$	裕度等级 2：良好
	$5 < G_m < 8\text{dB}$	$40 < P_m < 65 \text{ deg}$	$18 < W_c < 24 \text{ rad/s}$	裕度等级 3：中等
	$2 < G_m < 5\text{dB}$	$10 < P_m < 40 \text{ deg}$	$24 < W_c < 30 \text{ rad/s}$	裕度等级 4：可接受
	$< 2 \text{ dB}$	$< 10 \text{ deg}$	$> 30 \text{ rad/s}$	裕度等级 5：不可接受