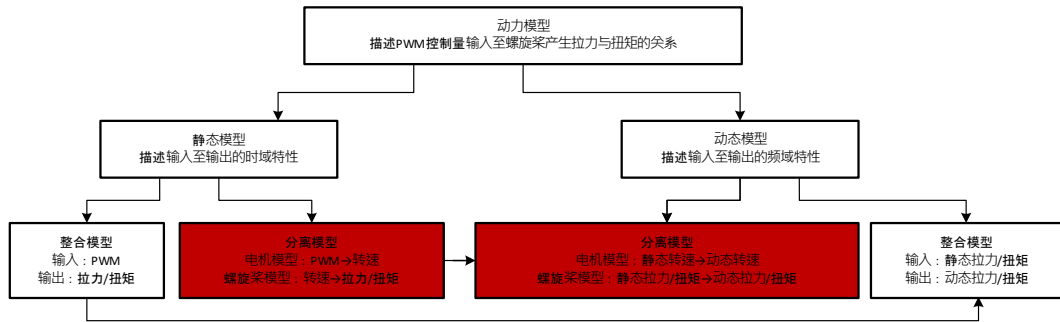


1. 实验名称及目的

1.1. 实验名称

静拉力分解模型辨识实验

1.2. 实验目的



1.3. 关键知识点

分解的静态模型是指将电机-螺旋桨单元分别拆分为电机模型与螺旋桨模型。其中电机模型描述的是电机在较低频率的 PWM 输入时，与电机的转速所满足的静态函数关系；而螺旋桨模型则描述的是电机/螺旋桨转速输入分别与螺旋桨产生的拉力与反扭力矩满足的静态函数关系。

分解的动态模型是考虑在一定频率范围的 PWM 输入时，电机 PWM 输入至转速或扭矩输出的频域模型与螺旋桨转速输入至拉力、反扭力矩输出的频域模型的串接；

2. 实验效果

3. 文件目录

例程目录: [\[安装目录\]\RflySimAPIs\4.RflySimModel\2.AdvExps\e2_MultiModelCtrl\1.MultiModelCtrl\](#)

文件夹/文件名称	说明
细分 PWM 数据.xlsx	测试台实验数据
Static_data.mat	由阶梯测油门/PWM 测试出来的单个电机+螺旋桨动力数据
FX450_Decomposed_power_model.mlx	实时脚本，包含数据处理和模型辨识的逻辑
No2_0.2to1.mat	扫频测试数据，频段为 0.2~xHz，由于动力测试台限制，我们测试的 PWM 输入信噪比较高，测量中高频信号的意义被认为不大，因为只有 30s 扫频时间

4. 运行环境

序号	软件要求	硬件要求	
		名称	数量
1	Windows 10 及以上版本	笔记本/台式电脑 ^①	1
2	RflySim 工具链		
3	MATLAB 2022A 及以上 ^③		

①：推荐配置请见：<https://rflysim.com/>

5. 实验步骤

5.1. 必做实验：导入测试台实验数据

Step 1: 导入数据

如图 1 所示，打开 MATLAB 并将 MATLAB 当前工作路径指定到数据存放位置。用 MATLAB 打开动力测试台阶梯测试的实验数据“细分 PWM 数据.xlsx”，选中所需导入的数据的列（注意最好不要导入第一行变量名称，默认输出“NaN”），选择“输出类型”为“列向量”并导入（之后的数据导入流程类似）；

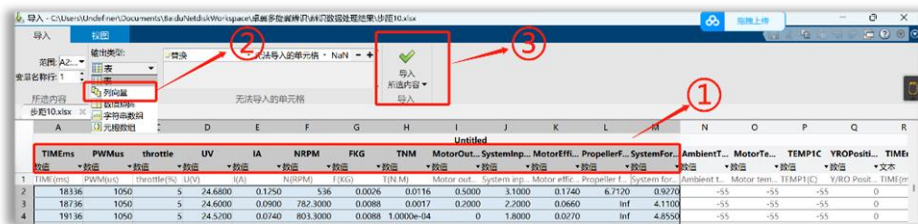
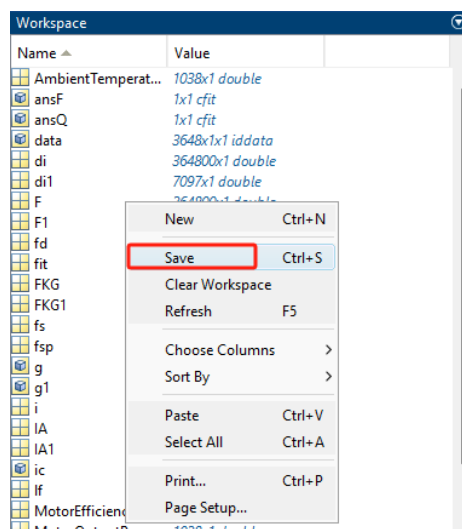
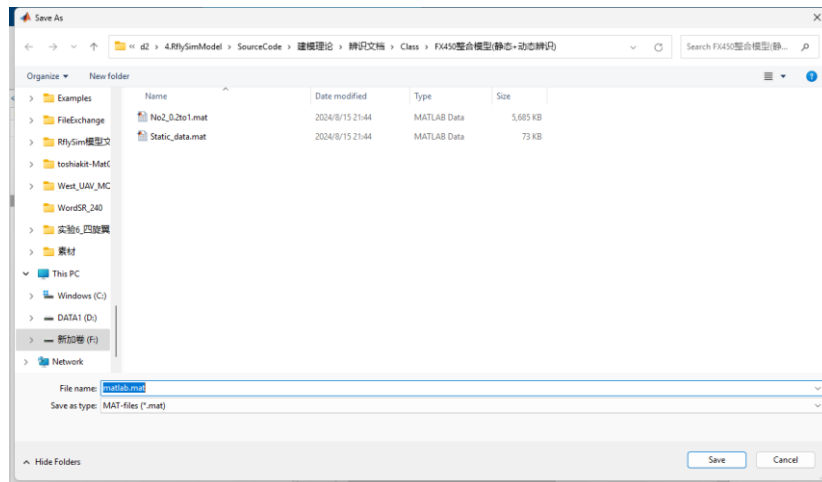


图 1 数据导入

Step 2: 保存数据



在工作空间右击，选择保存，在弹出的对话框选择保存



5.2. 必做实验：电机的静态模型

Step 1: 加载数据

导入数据后再对 PWM 及转速数据的范围进行截取：

```
1 PWMtest=PWM(1:1138); % 取上升阶梯段数据拟合
2 wtest=w(1:1138); % 截取电机转速范围
```

Step 2: 模型拟合及拟合输出

采用 `lsqcurvefit` 函数对电机 PWM 输入至转速输出进行拟合（这里考虑到 PWM 值为 1000 时转速输出应该为 0，因此待拟合函数形式为“ $c_1x^2 + c_2x - 1000^2c_1 - 1000c_2$ ”），同时输出数据与模型响应曲线的拟合图，代码为：

```
1 x=PWMtest; % x 轴变量
2 y=wtest; % y 轴变量
3 f=@(c,x) c(1).*x.^2 + c(2).*x - c(1)*1000^2 - c(2)*1000; % 待拟合函数
4 c0= [0 0]; % 参数初值
5 [cw, fval]= lsqcurvefit(f, c0, x, y); % 拟合
6 xx=1000:1:2000; % x 轴范围及分辨率给定
7 yy=f(cw, xx); % y 轴拟合曲线
8 plot(x, y, 'r', xx, yy, 'b-'); % 显示数据与拟合图
9 disp(cw); % 显示参数拟合结果
```

Step 3: 电机模型辨识结果。

➤ PWM ➡ 转速模型

经数据辨识，可以得到 PWM ➡ 转速模型形式为：

$$\omega = -0.006586164771750\rho^2 + 27.669878826020764\rho - 21083.71405427068 \quad (1)$$

模型响应与数据的拟合效果如图 2 所示。能明显看出，转速与 PWM 的静态关系

整体呈现出非线性特征，在 PWM 为 1100~1450 左右转速的线性特征比较突出。

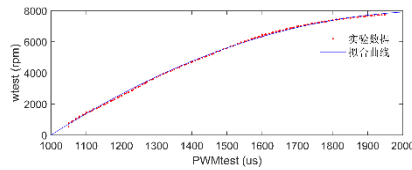


图 2 PWM-转速模型拟合效果

5.3. 必做实验：螺旋桨的静态模型

分解的螺旋桨静态模型是指转速 \rightarrow 拉力/反扭力矩的静态函数关系，可以采用以下步骤进行辨识。

Step 1: 加载数据

导入数据后再对转速、拉力和扭矩数据的范围进行截取：

```
3 wtest=w(1:1138);
4 Ttest=T(1:1138);
5 Qtest=Q(1:1138);
```

Step 2: 拉力模型拟合及拟合输出。

采用 `lsqcurvefit` 函数对转速至拉力/反扭力矩模型进行拟合（这里考虑到转速值为 0 时动力输出应该为 0，因此待拟合函数形式为 “ $c_1x^2 + c_2x$ ”），同时输出数据与模型响应曲线的拟合图，代码为：

```
1 x=wtest; % 输入
2 y=Ttest; % 输出
3 f=@(c,x) c(1).*x.^2 + c(2).*x; % 待拟合函数
4 c0= [0 0]; % 参数初值
5 [cT, fval]= lsqcurvefit(f, c0, x, y); % 模型拟合
6 xx=0: 1 : 8000;
7 yy=f(cT, xx);
8 plot(x, y, 'r.', xx, yy, 'b-'); % 拟合效果显示
```

Step 3: 反扭力矩模型拟合及拟合输出。

同理，只需要将以上代码修改 “Test” 为 “Qest” 即可对反扭力矩模型进行拟合以及输出拟合效果；

Step 4: 螺旋桨模型辨识结果。

- 转速 \rightarrow 拉力模型；
- 经数据辨识，可以得到转速 \rightarrow 拉力静态模型形式为：

$$T = 0.000000333996219098\omega^2 - 0.000288085628557935\omega \quad (2)$$

- 模型响应与数据的拟合效果如图 3 所示。不难看出，整体拟合效果非常好，证明该静态模型较符合拉力随转速的变化特性，该模型可以用来描述螺旋桨产生拉力随电机/螺旋桨转速变化的静态特性。

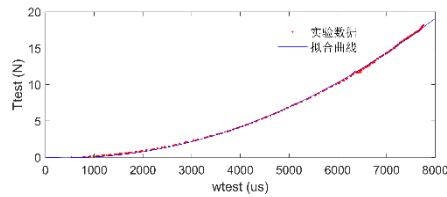


图 3 转速-拉力模型拟合效果

- 转速 \rightarrow 反扭力矩模型。
- 经数据辨识，可以得到转速 \rightarrow 反扭力矩静态模型形式为：

$$Q = 0.00000000711967740793\omega^2 - 0.00000745669922108503\omega \quad (3)$$

- 模型响应与数据的拟合效果如图 4 所示。很直观地可以知道，改模型几乎完美贴合了螺旋桨的反扭力矩特性，可以用来描述螺旋桨产生的反扭力矩随转速的变化特性。

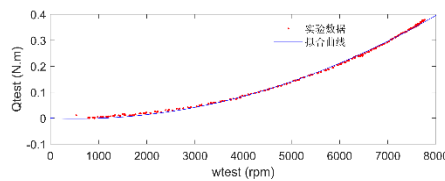


图 4 转速-反扭力矩模型拟合效果

5.4. 必做实验：电机的动态模型

分解的电机动态模型是指 PWM \rightarrow 转速的频域对应关系，可以采用以下步骤进行辨识。

Step 1: 加载数据。

按需加载对应的扫频测试数据，统一单位。

```
6 load('No2_0.2to1.mat') % 导入数据可更改
7 PWM=PWMus; % PWM 输入 (us)
8 w=NRPM; % w 为转速 (rpm)
9 t=TIMEms/1000; % 时间戳单位(ms)转为(s)
```

Step 2: 求解静态模型输出。

根据静态模型求解扫频测试 PWM 输入对应的转速输出，即：

```
1 ws = cw(1)*PWM.^2 + cw(2)*PWM - cw(1)*1000^2 - cw(2)*1000; %电机静态模型转速输出
```

Step 3: 数据滤波处理

对测量的动态转速与静态模型输出转速进行低通滤波处理：

```

1 wf=lowpass(w,lf,fs); % 动态转速滤波
2 wsf=lowpass(ws,lf,fs); % 静态模型输出转速滤波

```

Step 4: 数据降采样处理。

对测量的动态转速与静态模型输出转速进行降采样处理：

```

1 wfd=resample(wf,fd,fs);
2 wsfd=resample(wsf,fd,fs);

```

Step 5: 动力模型的频域辨识。

(频域辨识代码与整合模型中的频域辨识代码一致，只需要修改输入、输出、滤波截止频率以及降采样后的频率即可)

- PWM → 转速动态模型
- 经数据辨识，可以得到 PWM → 转速动态模型形式的 10 阶及以下最佳降阶模型（1Hz 以内）为：

$$\frac{\Omega_d(s)}{PWM(s)} = \frac{69.23s^4 - 37.68s^3 + 18.52s^2 - 2.287s + 2.74}{s^5 + 7.811s^4 - 2.574s^3 + 3.909s^2 + 0.2412s + 0.7696} \quad (4)$$

- 模型响应与数据的拟合效果如图 5 所示。可以看出，1Hz 以内的模型整体拟合效果一般，频率较低部分的拟合效果优于频率较高部分，且频率特性细节没有拟合好。因此，此模型不太适用于仿真开发。

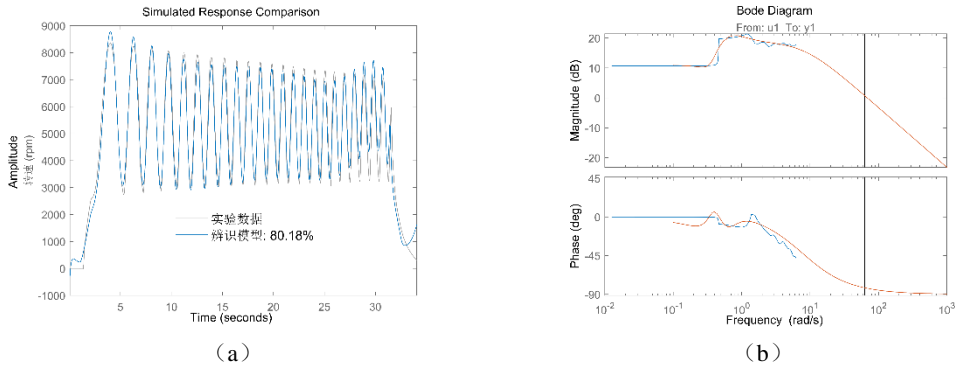


图 5 PWM-转速动态模型拟合效果

- 静态转速 → 动态转速模型
- 为了使得模型更加精确，这里我们采用两级模型来拟合 PWM → 动态转速模型。首先，第一级模型是由实际输入的 PWM 通过 PWM → 转速的静态模型计算出静态转速，如步骤③所述。第二级模型为将静态转速作为输入，动态转速做输出，可以得到静态转速 → 动态转速的频域最佳降阶模型（1Hz 内 10 阶及以下）为：

$$\frac{\Omega_d(s)}{\Omega_s(s)} = \frac{8.906s^9 - 9.108s^8 + 121.6s^7 - 138.1s^6 + 610.7s^5 - 604.6s^4 + 1369s^3 - 1004s^2 + 1164s - 402.7}{s^{10} + 6.948s^9 + 7.141s^8 + 95.94s^7 - 34.7s^6 + 511.1s^5 - 311.2s^4 + 1226s^3 - 688.5s^2 + 1112s - 376}$$

(5)

- 其模型响应与数据的拟合效果如图 6 所示。实验数据与辨识模型的拟合度明显高于单独用 PWM 输入直接辨识转速输出，且频域特性拟合较好，可适用于仿真开发当中。

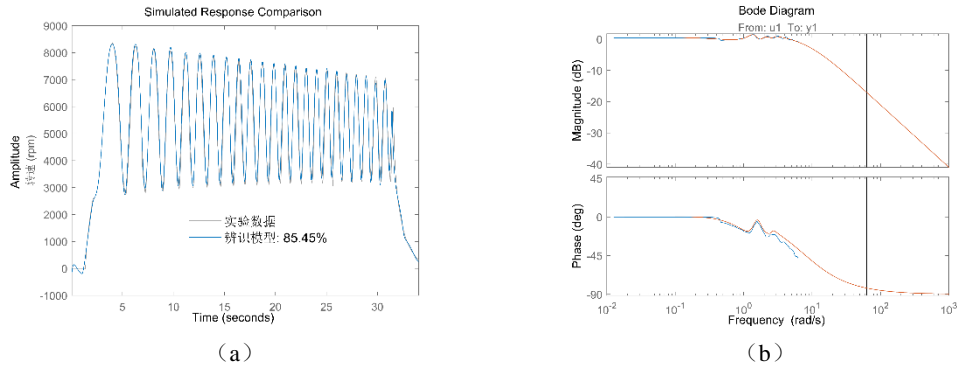


图 6 静态转速-动态转速模型

- 此外，我们还可以对二级模型进行进一步降阶。上述模型为 10 阶模型，在尽可能保留较大拟合度的情况下，模型可降阶（拟合优度为 82.24%）为 2 阶模型：

$$\frac{\Omega_d(s)}{\Omega_s(s)} = \frac{10.18s - 9.326}{s^2 + 8.014s - 9.268} \quad (6)$$

- 这极大地简化了模型的复杂度。

5.5. 必做实验：螺旋桨的动态模型

分解的螺旋桨动态模型是指转速 \rightarrow 拉力/反扭力矩的频域对应关系，可以采用以下步骤进行辨识。

Step 1: 加载数据。

按需加载对应的扫频测试数据，统一单位；

```
10 load('No2_0.2to1.mat') % 导入数据可更改
11 w=NRPM; % w 为转速 (rpm)
12 T=FKG*9.8; % 转换拉力单位(kg)到单位(N)
13 Q=TNM; % 反扭力矩 (N.m)
14 t=TIMEms/1000; % 时间戳单位(ms)转为(s)
```

Step 2: 求解静态模型输出。

根据静态模型求解扫频测试真实转速对应的静态模型拉力/反扭力矩输出，即：

```
1 Ts = cT(1)*w.^2 + cT(2)*w;
2 Qs = cQ(1)*w.^2 + cQ(2)*w;
```

Step 3: 数据滤波处理。

对测量的动态拉力/反扭力矩与静态模型输出的动态拉力/反扭力矩进行低通滤波处理：

```

1 Tf=lowpass(T,lf,fs);
2 Tsf=lowpass(Ts,lf,fs);
3 Qf=lowpass(Q,lf,fs);
4 Qsf=lowpass(Qs, lf, fs);

```

Step 5: 数据降采样处理。

对测量的动态拉力/反扭力矩与静态模型输出动态拉力/反扭力矩进行降采样处理：

```

1 Tfd=resample(Tf,fd,fs);
2 Tsfd=resample(Tsf,fd,fs);
3 Qfd=resample(Qf,fd,fs);
4 Qsfd=resample(Qsf,fd,fs);

```

Step 6: 动力模型的频域辨识。

(频域辨识代码与整合模型中的频域辨识代码一致，只需要修改输入、输出、滤波截止频率以及降采样后的频率即可)。

- 转速 ➡ 拉力动态模型；
- 经数据辨识，可以得到转速 ➡ 拉力动态模型的最佳降阶模型（5Hz 以内 10 阶及以下）形式为：

$$\frac{T_d(s)}{\Omega_d(s)} = \exp(-0.01s) \frac{0.002841s^5 - 0.003035s^4 + 0.1454s^3 - 0.007976s^2 + 0.1896s + 0.4369}{s^5 - 0.6715s^4 + 52.41s^3 + 18.58s^2 + 96.95s + 298.8} \quad (7)$$

- 模型响应与数据的拟合效果如下图所示。整体来说，拟合效果在低频段较为吻合，在频率 2Hz 左右以上频段拟合效果较差，不适合用于 2Hz 左右以上的频域模型仿真开发。

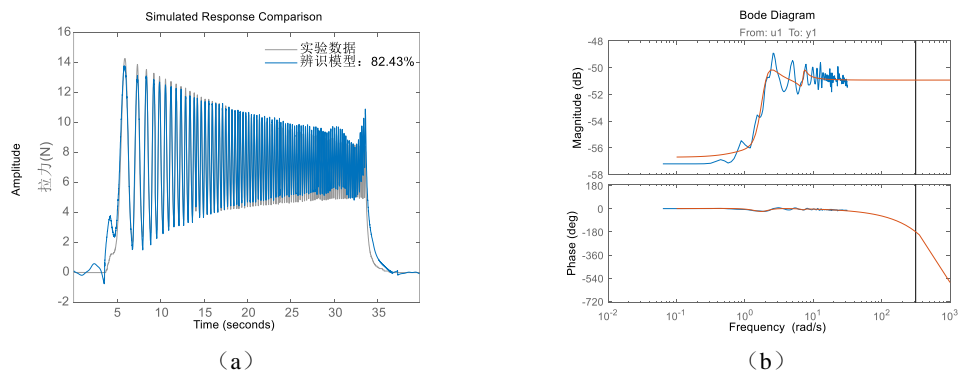


图 7 转速-拉力动态模型

- 转速 ➡ 反扭力矩动态模型；
- 经数据辨识，可以得到转速 ➡ 反扭力矩动态模型的最佳降阶模型（5Hz 以内 10 阶及以下）形式为：

$$\frac{Q_d(s)}{\Omega_d(s)} = \exp(-0.01s) \frac{0.001013s^5 + 0.0247s^4 + 1.299s^3 + 11.35s^2 - 3.53s + 26.63}{s^5 + 104.1s^4 + 5944s^3 + 2.238e05s^2 - 1.464e05s + 5.596e05} \quad (8)$$

- 模型响应与数据的拟合效果如图 8 所示。可以看出，拟合效果并不好，模型并不能良好地反映出转速 \rightarrow 反扭力矩的动态特性。因此，此模型不适用于仿真开发中。

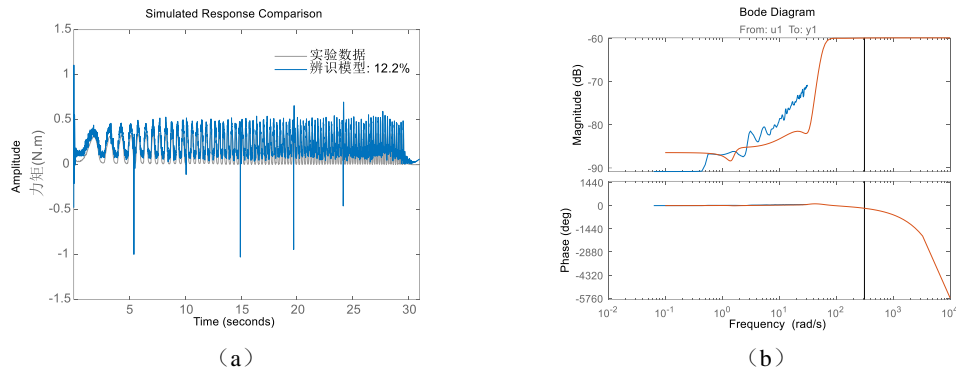


图 8 转速-反扭力矩动态模型

- 静态拉力 \rightarrow 动态拉力模型；
- 为了使得模型更加精确，这里我们也采用两级模型来拟合动态转速 \rightarrow 动态拉力模型。首先，第一级模型是由实际动态转速通过转速 \rightarrow 拉力的静态模型计算出静态拉力，如步骤③所述。第二级模型为将静态拉力作为输入，动态拉力做输出，可以得到静态拉力 \rightarrow 动态拉力的频域最佳降阶模型（20Hz 内 10 阶及以下）为 6 阶模型（拟合优度 94.59%），最后可降阶为 4 阶模型为（实际上还可以降阶，但是 4 阶模型也是可接受范围内）：

$$\frac{T_d(s)}{T_s(s)} = \frac{0.1447s^4 + 79.97s^3 + 5381s^2 + 1.17e06s + 3.689e06}{s^4 + 132.2s^3 + 1.291e04s^2 + 1.303e06s + 3.847e06} \quad (9)$$

- 模型响应与数据的拟合效果如图 9 所示。模型响应较为完美地复刻了实验的输出，而且从频域特性拟合来看，在 20Hz 范围内模型拟合都较为精确，可以用于仿真开发中。

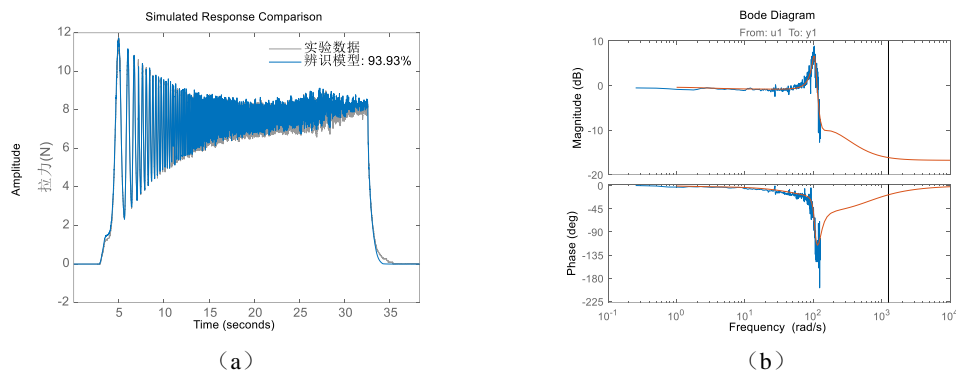


图 9 静态拉力-动态拉力模型拟合效果

- 静态反扭力矩 \rightarrow 动态反扭力矩模型。

- 我们同样采用两级模型来拟合动态转速 \rightarrow 动态反扭力矩模型。首先，第一级模型是由实际动态转速通过转速 \rightarrow 反扭力矩的静态模型计算出静态反扭力矩，如步骤③所述。第二级模型为将静态反扭力矩作为输入，动态反扭力矩作为输出，可以得到静态反扭力矩 \rightarrow 动态反扭力矩的频域最佳降阶模型（1Hz 内 10 阶及以下）为：

$$\frac{Q_d(s)}{Q_s(s)} = 0.9859 \quad (10)$$

- 模型响应与数据的拟合效果如下图所示。上述模型为一静态模型，说明反扭力矩模型较为复杂，由频率增加带来的非线性特性可能不能仅仅采用一级的静态模型来表示。另外，实际系统中，输入应该是扭矩导致产生转速，经过辨识扭矩至转速的动态模型，的确可得到较好结果（10 阶以下模型拟合优度最好为 68.13%）。但在仿真开发中，转速必须为输入，这就导致了仿真模型可能不能较为精确、偏航控制验证不理想等问题。

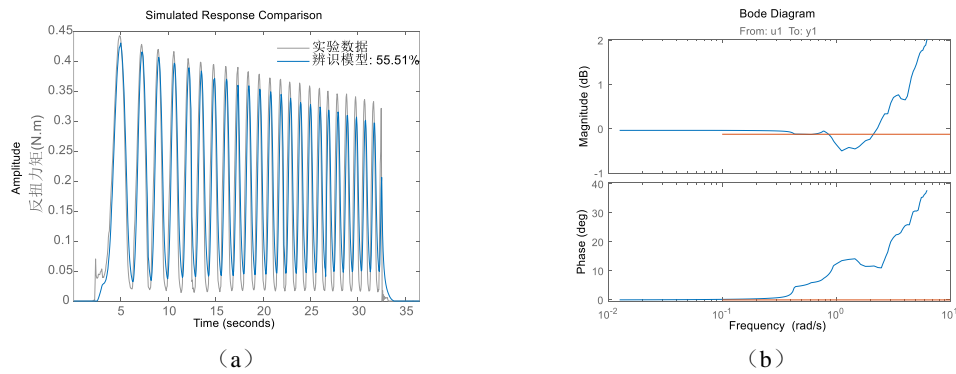


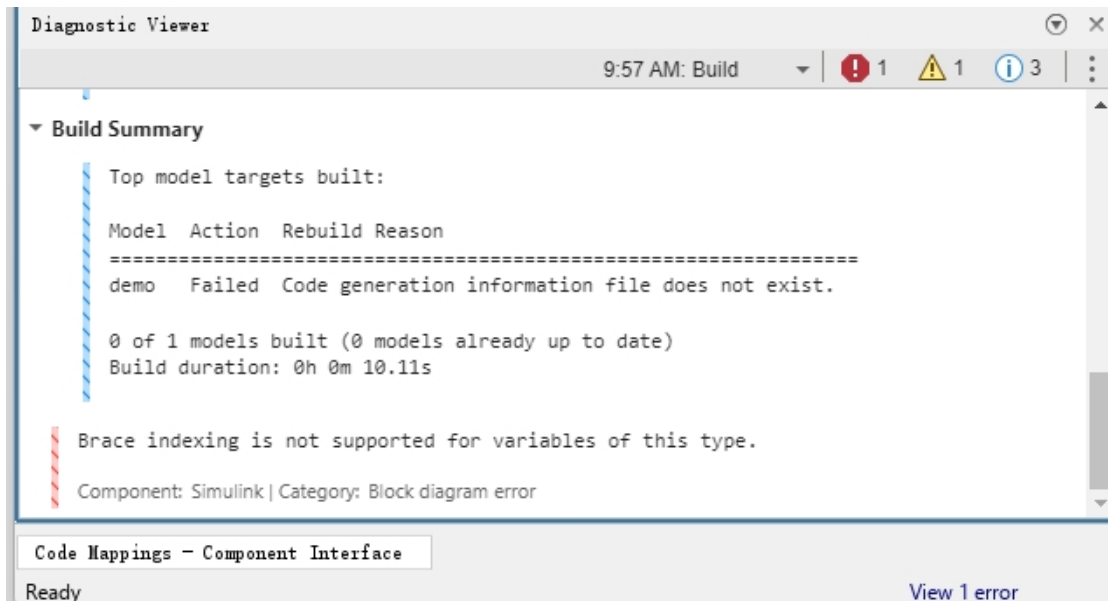
图 10 静态反扭力矩-动态反扭力矩模型拟合效果

6. 参考资料

[1].

7. 常见问题

Q1: 未正确安装 visual studio c++编译环境并配置 mex，导致 Simulink 文件编译失败



A1: 首先将低于当前 MATLAB 版本的 Visual Studio C++编译环境安装到 VS 默认安装目录，然后在 MATLAB 的命令行窗口中输入指令“mex -setup”，一般来说会自动识别并安装上支持的编译器，命令行显示“MEX 配置使用 ‘Microsoft Visual C++ 2017 (C)’ 以进行编译”的字样说明安装正确。详细环境配置参考” [RflySim 平台安装目



录]RflySimAPIs\4.RflySimModel\API.pdf “中的环境配置

Q2: 编译报错，无法加载库文件



A2: 这可能是由于安装平台时 PX4PSP 工具箱未更新到最新版, 更新 RflySim 安装包后按照如下配置重新安装平台即可

