

黑天鹅物理模型参数测定

gazebo电机插件参数

一、插件物理模型

`gz::sim::systems::MulticopterMotorModel` 的核心公式只有两条：

代码块

1

推力： $F = \text{motorConstant} \times \omega^2$

(N, ω 为桨轴角速度，单位 rad/s)

2

反扭矩： $\tau = \text{momentConstant} \times F$

(N·m, `momentConstant` 单位是"米"，相当于等效力臂)

结论：只要拿到某个转速下的"推力 + 扭矩 + RPM"三个实测值，就能反解出 `motorConstant` 和 `momentConstant`。

二、官方台架实测数据

搜索厂商（T-Motor）官网/店铺，找到 MN601-S KV170 的**推力-扭矩-RPM 台架测试表**（配套螺旋桨为官方推荐的 P20×6，20英寸桨，跟目标46cm桨最接近）。

数据示例（节选）：

油门	RPM	推力(N)	扭矩(N·m)
40%	3272	13.87	0.33
60%	4362	24.91	0.59
80%	5395	38.56	0.88
100%	6482	56.97	1.27

三、计算motorConstant / momentConstant

对每一组数据分别计算：

```
1 motorConstant = F / ω²      (ω = RPM × π/30)
2 momentConstant = τ / F
```

多组取平均，消除单点误差：

- `motorConstant_20in` $\approx 1.20\text{e-}4$
- `momentConstant_20in` ≈ 0.0231

四、换算到目标桨尺寸

原始数据是20英寸(50.8cm)桨测的，目标是46cm桨，直径比：

代码块

```
1 比例 k = D_目标 / D_参考 = 46 / 50.8 = 0.9055
```

螺旋桨相似换算规律（假设桨距比相近）：

- 推力系数 $\propto D^4 \rightarrow$ `motorConstant` 按 k^4 缩放
- 扭矩/推力比 $\propto D \rightarrow$ `momentConstant` 按 k 线性缩放

代码块

```
1 motorConstant = 1.20e-4 × 0.9055⁴ ≈ 8.1e-5
2 momentConstant = 0.0231 × 0.9055 ≈ 0.021
```

五、估算 maxRotVelocity

思路：用电机 KV 值 × 电池电压算空载转速，再乘一个"带载折减系数"。

代码块

```
1 空载转速 ≈ KV × 电池满电电压    (170 × 50.4V(12S满电) ≈ 8570 RPM)
2 带载转速 ≈ 空载转速 × 85~90%    (桨越小负载越轻，折减系数越接近90%)
```

同时用台架数据交叉验证：20英寸桨在100%油门时实测6482RPM，桨更小(负载更轻)理论上能转得更快，两者互相印证，最终估算：

代码块

1 maxRotVelocity ≈ 750 rad/s (约7160 RPM)

⚠ 这一步误差最大，只能给出"合理估计区间"，实际要结合ESC限速/试飞验证。

六、估计的参数

这几个参数台架静态测试测不出来（需要风洞或飞行数据），只能给一个合理量级作为起点：

参数	起始值	影响
timeConstantUp/Down	0.02 / 0.03	电机+桨惯量越大，响应越慢，比小电机默认值适当调大
rotorDragCoefficient	$1.5\sim 2e-4$	前飞时的水平阻尼，静态测不出，先给经验值
rollingMomentCoefficient	$1e-6$	影响很小，一般保持默认量级
rotorVelocitySlowdownSim	10	纯视觉参数，跟动力学无关

七、质量参数

- 电机质量：官网规格表直接给出（MN601-S KV170：含引出线 250g）
- 螺旋桨质量：找**尺寸完全匹配**的官方桨型号规格（P18×6.1，直径457.2mm，正好对应单叶23cm），查其单叶重量 31.5g，双叶合计约63g
- 合计：250g + 63g $\approx$ 313g
- 电机转子部分（约50-70g）+ 桨叶63g $\approx$ 110-130g

八、最终插件示例

代码块

```
1 <plugin filename="gz-sim-multicopter-motor-model-system"
  name="gz::sim::systems::MulticopterMotorModel">
2   <jointName>rot3_Joint</jointName>
3   <linkName>rot3_Link</linkName>
4   <turningDirection>cw</turningDirection>
5   <timeConstantUp>0.02</timeConstantUp>
```

```
6    <timeConstantDown>0.03</timeConstantDown>
7    <maxRotVelocity>750</maxRotVelocity>
8    <motorConstant>8.1e-05</motorConstant>
9    <momentConstant>0.021</momentConstant>
10   <commandSubTopic>command/motor_speed</commandSubTopic>
11   <motorNumber>0</motorNumber>
12   <rotorDragCoefficient>0.00018</rotorDragCoefficient>
13   <rollingMomentCoefficient>1e-06</rollingMomentCoefficient>
14   <rotorVelocitySlowdownSim>10</rotorVelocitySlowdownSim>
15   <motorType>velocity</motorType>
16   </plugin>
```

无人机物理模型参数

1. 物理模型与质量分布拆解

基于整机（不含机械臂）质量 **8.4074 kg**，我们对系统进行了分布式刚体等效拆解。为了避免将外围质量集中处理而导致转动惯量被低估，模型被划分为以下五个核心子模块：

- **中央航电模块（含外壳）：2.3974 kg**
 - **推导逻辑：** 整机质量 - 机臂电机组 - 电池 - 纵向主杆。
 - **等效模型：** 尺寸为 $0.42\text{ m} \times 0.30\text{ m} \times 0.08\text{ m}$ 的均匀长方体，几何中心位于坐标系原点附近。
- **后置双电池组：3.0 kg ($1.5\text{ kg} \times 2$)**
 - **等效模型：** 质点/小型长方体，分布于机体后方两侧（预估坐标 $X \approx -0.20\text{ m}$, $Y \approx \pm 0.28\text{ m}$ ）。
- **纵向主杆：0.4 kg**
 - **等效模型：** 沿 X 轴贯穿机体的细长杆，有效长度约为 0.65 m 。
- **机臂连杆：2.09 kg (约 $0.5225\text{ kg} \times 4$)**
 - **等效模型：** 从机身中心延伸至电机安装位的均匀连杆。
- **电机转子与桨叶：0.52 kg ($0.13\text{ kg} \times 4$)**
 - **等效模型：** 在计算整机/纯机体惯量时视为末端质点；在计算自身局部惯量时视为薄壁圆柱体加细长薄圆盘。

2. 核心计算理论与公式

整体计算遵循多刚体动力学叠加原理。对于任何一个子部件 i ，其对系统新质心的转动惯量贡献由**自身局部惯量**和**平移产生的惯量**两部分组成。

2.1 局部转动惯量公式 (I_{local})

各组件在其几何中心处的转动惯量：

- 均匀长方体（航电模块、电池）：

- $I_{xx,local} = \frac{1}{12}m(b^2 + c^2)$
- $I_{yy,local} = \frac{1}{12}m(a^2 + c^2)$
- $I_{zz,local} = \frac{1}{12}m(a^2 + b^2)$
- (其中 a, b, c 分别为沿 X、Y、Z 轴的边长)

- 细长杆（纵向主杆）：

- $I_{yy,local} = I_{zz,local} = \frac{1}{12}mL^2$
- $I_{xx,local} \approx 0$

- 圆柱体+薄盘（电机与桨叶局部）：

- $I_{zz,local} = \frac{1}{2}m_{bell}r^2 + \frac{1}{12}m_{prop}L^2$

2.2 平行轴定理 (Parallel Axis Theorem)

将局部转动惯量平移至系统总质心：

- 绕 X 轴 (Roll): $I_{xx} = I_{xx,local} + m_i(\Delta y^2 + \Delta z^2)$
- 绕 Y 轴 (Pitch): $I_{yy} = I_{yy,local} + m_i(\Delta x^2 + \Delta z^2)$
- 绕 Z 轴 (Yaw): $I_{zz} = I_{zz,local} + m_i(\Delta x^2 + \Delta y^2)$
- (其中 $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ 为部件质心到系统总质心的三轴距离差)

2.3 惯性积 (非对角线元素) 的处理

计算公式为 $I_{xy} = - \sum m_i \Delta x_i \Delta y_i$ 。

- **处理说明：**由于机身在左右方向（Y轴）存在严格的物理对称性， I_{xy} 与 I_{yz} 严格相互抵消为 0。尽管在前后方向（X轴）因后挂电池存在轻微不对称，导致 I_{xz} 有一个极小的理论值，但在动力学仿真工程实践中，通常强制将非对角线元素置零（即进行**惯性主轴对齐**）。这有助于消除在控制算法（如 LQR 或 ESO）中不必要的强耦合非线性项。

3. 质心 (CoM) 重算算理

质心计算公式：

$$\vec{R}_{com} = \frac{1}{M_{total}} \sum_{i=1}^n m_i \vec{r}_i$$

由于航电核心模块质量（2.3974 kg）相对于重型外围部件（特别是后方共 3.0 kg 的电池）较轻，无人机的质量分布呈现“中心轻、四周重、整体偏后”的特点。

- **整机质心（含电机，8.4074 kg）**： $X_{com} \approx -0.0700$ m, $Z_{com} \approx -0.0338$ m
- **纯机体质心（剥离电机，7.8874 kg）**：由于剥离的电机分布在四角，且整机前端相对较轻，进一步扣除后，系统质心继续向后微调至 $X_{com} \approx -0.0751$ m, $Z_{com} \approx -0.0322$ m。左右质心 Y_{com} 始终保持 0.0 m。

4. 转动惯量叠加详情分析

基于平行轴定理进行累加：

1. I_{zz} （偏航轴）最大：公式中叠加了 $(\Delta x^2 + \Delta y^2)$ 。由于重型机臂、电机和外挂电池均分布在远离中心的四个角或两侧，具有极大的旋转半径，导致 Yaw 轴的转动惯量占据最高比重。
2. $I_{xx} > I_{yy}$ （横滚大于俯仰）：无人机的左右跨度（ $Y \approx \pm 0.4$ m）大于前后有效跨度。特别是两块各 1.5 kg 的重型电池挂载在两侧（ $\Delta y \approx \pm 0.28$ m），根据 I_{xx} 公式中的 $m\Delta y^2$ 项，横向的质量展开极大地增加了 Roll 轴的旋转阻力。

5. 最终配置

5.1 base_link

代码块

```
1  <inertial>
2  <pose>-0.0751 0.0 -0.0322 0 0 0</pose>
3  <mass>7.8874</mass>
4  <inertia>
5    <ixx>0.365500</ixx>
6    <ixy>0.000000</ixy>
7    <ixz>0.000000</ixz>
8    <iyy>0.189500</iyy>
9    <iyz>0.000000</iyz>
10   <izz>0.548800</izz>
11 </inertia>
12 </inertial>
```

5.2 rot1_Link 到 rot4_Link

代码块

```
1  <inertial>
2  <pose>0 0 -0.04471 0 0 0</pose>
3  <mass>0.130</mass>
4  <inertia>
```

```
5      <ixx>0.000200</ixx>
6      <ixy>0.000000</ixy>
7      <ixz>0.000000</ixz>
8      <iyy>0.000200</iyy>
9      <iyz>0.000000</iyz>
10     <izz>0.000355</izz>
11     </inertia>
12 </inertial>
```

5.3 整机参数

用于PreGME算法参数。

代码块

```
1  <ixx>0.448500</ixx>
2  <ixy>0.000000</ixy>
3  <ixz>0.000000</ixz>
4  <iyy>0.236500</iyy>
5  <iyz>0.000000</iyz>
6  <izz>0.678800</izz>
```