

机械系统动力学仿真学习报告分析



学院： 国家卓越工程师学院

班级： 23 级明月科创实验班 1 班

姓名： 王子诺

学号： 20235459

摘要

本报告旨在通过 ADAMS 软件对斯特林发动机进行动力学仿真，分析关键部件受力并进行力学校核，同时结合 Matlab 中 Simulink 系统仿真软件进行联合仿真，掌握现代工程设计工具的应用方法。报告结构包括理论基础、建模过程、仿真分析、优化讨论、学习总结及展望。

一、仿真背景介绍

ADAMS 是一款专业的多体动力学仿真软件，广泛应用于机械系统的建模、仿真和优化。它能够精确模拟复杂机械系统的运动学和动力学行为，输出关键部件的受力、位移等数据，为工程设计提供可靠依据。而 Simulink 可以打开与 ADAMS 的接口，定义输入输出变量实现整体的联合仿真，对设计结果提供理论支撑。

二、理论基础

斯特林发动机基于闭合的热力学循环，主要包括等温压缩、等容加热、等温膨胀和等容冷却四个过程。外部热源加热工质，驱动活塞运动，通过曲轴-连杆机构将热能转化为机械能。动力学分析需关注活塞-连杆-曲轴系统的运动特性和受力分布。

机械系统动力学研究物体在力作用下的运动行为，包括运动学（描述运动轨迹）和动力学（分析力和力矩）。关键方程包括牛顿第二定律（ $F=ma$ ）和欧拉动力学方程，用于计算部件的受力和加速度。

多体动力学分析通过建立系统的数学模型，求解各部件的运动和受力。ADAMS 采用拉格朗日方程或牛顿-欧拉方法，结合约束条件，求解复杂系统的动态响应。

ADAMS 通过建立多体模型，定义部件间的几何约束、运动驱动和外载荷，求解系统的运动方程。仿真结果包括力、力矩、位移等，可用于应力分析和力学校核。力学计算通常基于有限元法或经典力学公式，验证部件是否满足强度要求。

三、斯特林发动机建模

3.1 模型导入

根据斯特林发动机的设计图纸，在 ADAMS 中导入主要部件模型，包括：

活塞：圆柱体，定义质量和材料属性。

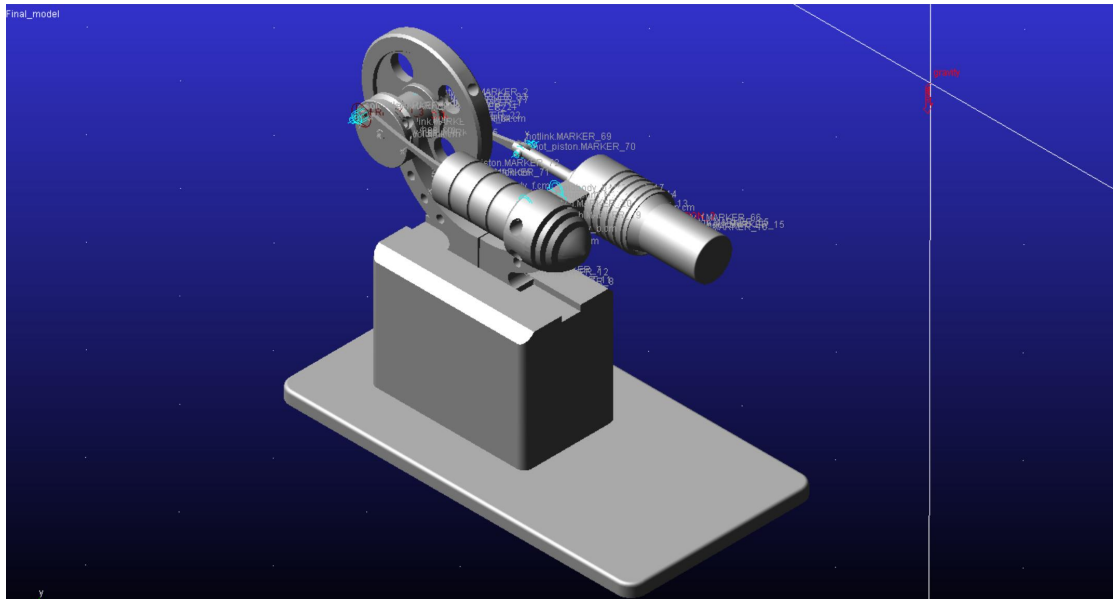
连杆：细长杆件，设置长度和截面参数。

轴承：旋转部件，定义转动惯量。

飞轮：旋转部件，按照相位差设置。

机体：固定基座，设置刚性约束。

我们为所有部件添加了材质属性，设置为铝合金和钢，按照质量特性进行赋值。



(导入的模型图 Final_model)

在进行仿真前，我们需要对单位进行统一，使用国际标准单位制，如下图：



(ADAMS 中单位设置)

并为了模拟真实运动，我们需要根据连接情况添加相应的运动副，定义以下约束：

活塞与机体：平移副，限制活塞沿轴向移动。

连杆与活塞：旋转副，允许相对旋转。

连杆与曲轴：旋转副，传递运动。

曲轴与机体：旋转副，定义转动自由度。确保约束无冗余，避免模型过约束或欠约束。

我们对运动副添加了摩擦力（参考网络资源设置摩擦系数进行仿真），并为底座等进行了固定。

对于进行润滑过的运动副，我们使用以下较小的摩擦系数：

- 静摩擦系数 (Mu Static)：设置为 0.2（模拟润滑油效果）。
- 动摩擦系数 (Mu Dynamic)：设置为 0.1。
- 摩擦力过渡速度 (Friction Transition Velocity)：设置为 0.1mm/s，表示静摩擦到动摩擦的过渡速度。

而对于未润滑过的运动副，则使用较大的摩擦系数：

- 静摩擦系数 (Mu Static)：设置为 0.3。
- 动摩擦系数 (Mu Dynamic)：设置为 0.25。

3.2 驱动、接触力与载荷定义

驱动：在轴承上施加恒定角速度 $1000.0d * time$ ，即每秒 1000deg/s 进行转动，模拟发动机运行的过程，确保运行过程中连接无误。

对整体的重力：启用 ADAMS 重力模块，设置方向为沿 y 轴的负方向，设置为-9.80665。

接触力：我们对热端飞轮设置了力矩，但未设置大小，后面作为系统输入接口。

3.3 模型验证与调试

通过 ADAMS 的模型检查功能，验证自由度正确。运行初步仿真，观察活塞运动轨迹和曲轴转动符合预期。调试过程中修正了连杆长度偏差和约束冲突问题，确保模型准确。

```
验证模型: .Final_model
-1 Gruebler 数 (近似自由度)
16 移动部件 (不包括地面)
  4 Cylindrical Joints
  1 Revolute Joints
  2 Translational Joints
 11 Fixed Joints

3 自由度关于 .Final_model
```

四、动力学仿真分析

4.1 仿真目标与参数设置

仿真目标：分析活塞、连杆和曲轴在运行中的受力，提取关键数据用于力学校核。设置仿真参数：

仿真时间：5 秒（覆盖多个循环）。

时间步长：0.005 秒（保证精度）。

求解器：Gear Stiff（适合刚性系统）。

4.2 斯特林发动机部件受力仿真

运行仿真，记录以下数据：

活塞：受到连杆的反力。

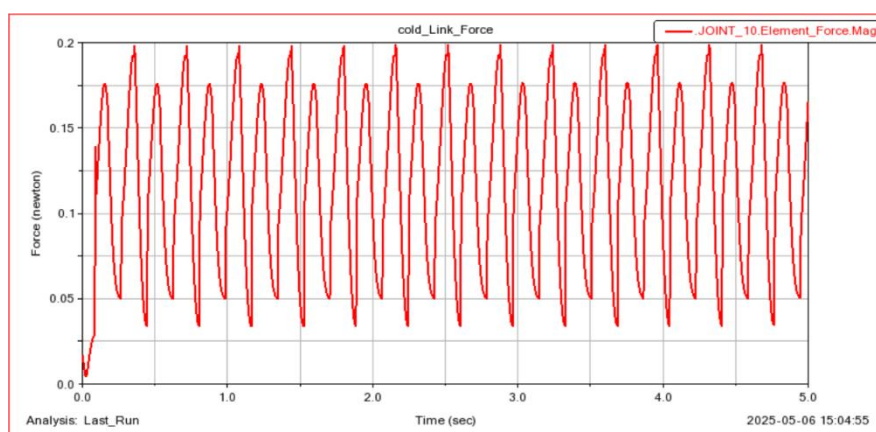
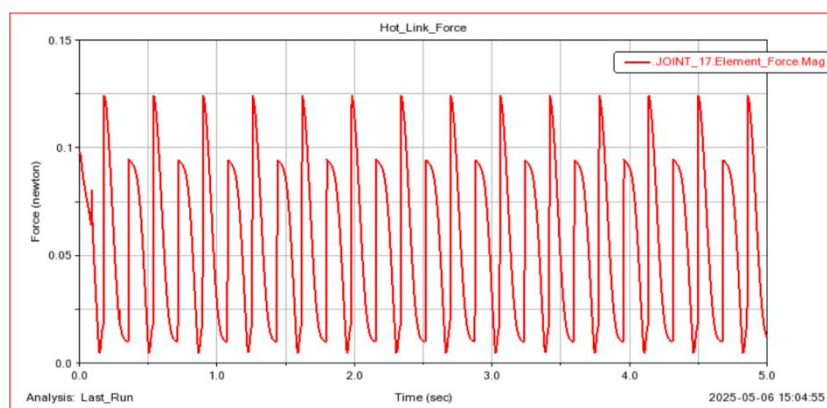
连杆：两端铰链处的力和力矩。

轴承：旋转副处的约束力和力矩

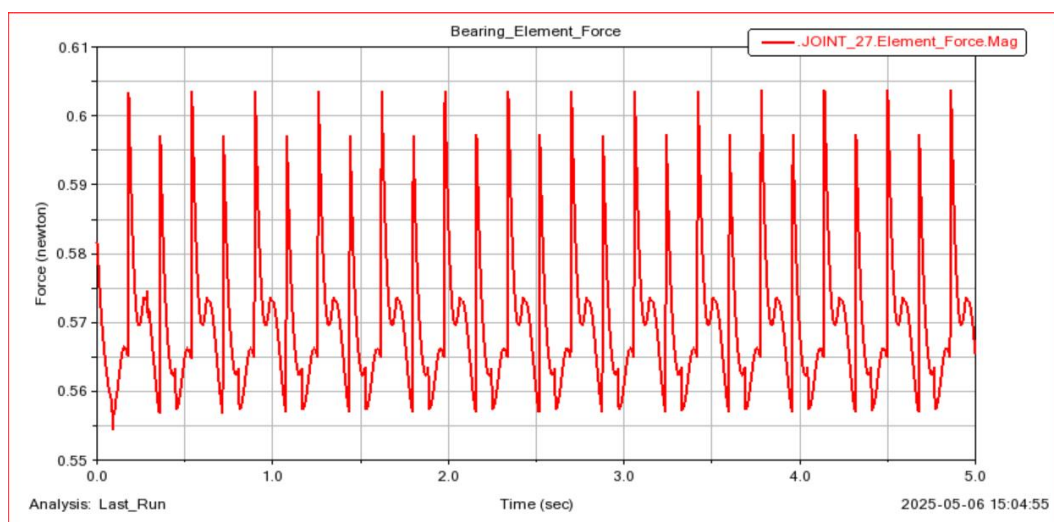
4.3 仿真结果提取

仿真结果通过 ADAMS 后处理模块提取，结果如下：

上方分别是冷缸连杆和热缸连杆在斯特林发动机仿真时所受到的约束力。



连杆受力：冷端最大拉力约 0.2N，压应力较小；热端最大压力为 0.125N。而且整体的受力曲线随着时间周期性变化，运动较为平稳，但是在刚刚启动时需要一个突变的力进行启动。



（轴承所受的约束力）

根据轴承所受的约束力，我们可以发现，轴承在周期内最大受力为 0.605N 左右，但是在轴承的可承受范围内，可见设计的合理性。

五、力学计算校核

5.1 关键部件应力分析

飞轮厚度 $t=5\text{ mm}=0.005\text{ m}$ ，受力面积近似为边缘截面积：

$$A = t * w$$

飞轮宽度为 0.01m ;

$$A = 0.005 * 0.01 = 5 * 10^{-5} \text{m}^2$$

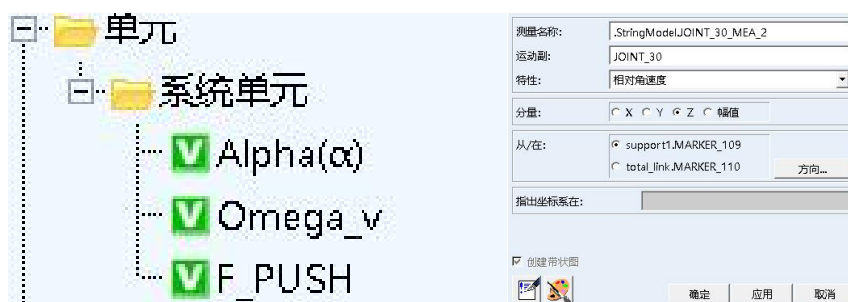
$$\sigma = \frac{F_{\max}}{A} = 0.0121 \text{MPa}$$

校核：应力 0.0121MPa 远小于铝合金屈服强度 200MPa ，飞轮强度安全。

六、联合仿真过程

6.1 数据接口设置

首先我们对接口进行定义，定义 F_PUSH 作为作用在飞轮上的力矩，使用 VARVAL(.StringModel.F_PUSH) 函数将力矩映射到力矩上，实现力的输入。同时使用 Omega_v 表示飞轮的角速度，基于 z 轴的角速度。使用 Alpha 测量飞轮转过的角度（此处是累加的角度，后面会进行处理）。



6.2 机械系统导出

为了建立联合仿真的接口，我们需要将机械模型进行导出，将定义好的系统单元分别作为输入和输出进行导出，然后在 Matlab 中运行 ADAMS 导出的可执行文件，使用 adams_sys 即在 matlab 中得到 adams_sub。



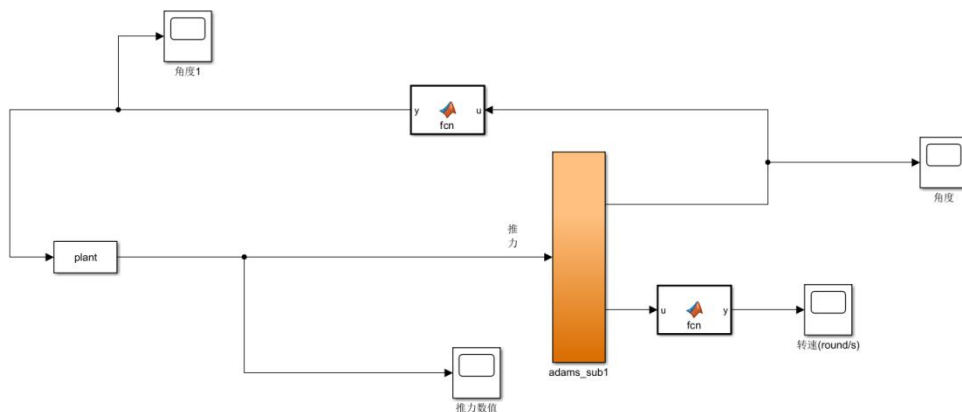
(机械系统导出界面)

然后为了拓展整个系统，将热学耦合仿真部分加入进去，我们将 `adams_sub` 这个子系统复制到一个全新的 Simulink 仿真文件中，这样我们就可以开始我们的联合仿真系统构建了。

6.3 联合仿真系统框架完善

为了把热力学计算部分加入到仿真中，我们需要定义一个 S-function 来完成这一部分的计算，一次我们定义了一个 `plant.m` 文件，内含我们热缸、冷缸的相关参数以及飞轮的转矩等参数，结合上面的理想气体状态方程进行热力学计算。

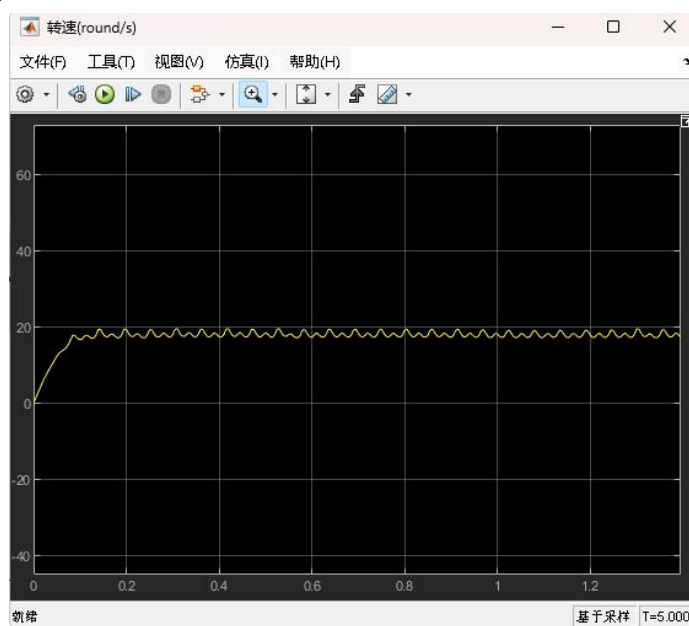
可以发现在整个系统中，我们添加了几个函数对数据进行处理，上方的函数是将累加的角度值映射到 $0 \sim 2\pi$ 之间，从而读取到实时的角度位置，然后我们通过实时的角度进行计算此时热缸的体积，热缸活塞的压力。此时通过这个推力，就可以算出飞轮的力矩，作为输入直接输入到 `adams` 的子系统，计算下一时刻的转速和角度进行更新。在输出转速的过程中，将弧度制转化成 `rps`，直接验证转速。



七、联合仿真结果分析

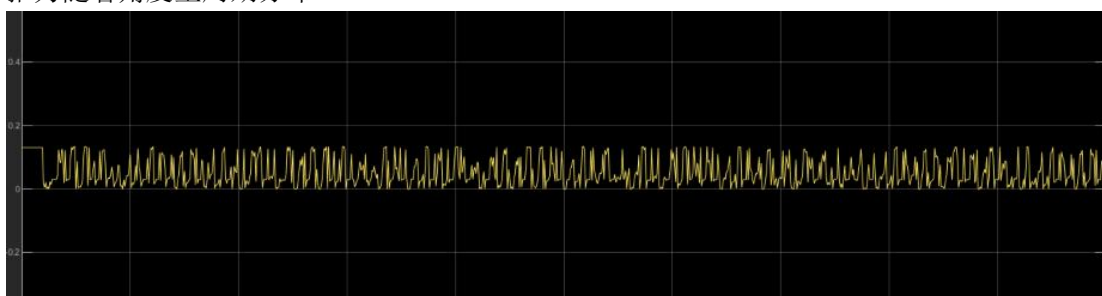
7.1 转速、力矩综合分析

在通过联合仿真分析后，可以发现转速曲线最后稳定在 18 rps 左右，仿真整体趋于稳定状态，角度（未处理）在逐步累积，在开始时需要一个反向突变力来为系统提供初始扰动，后续基本呈线性增长。

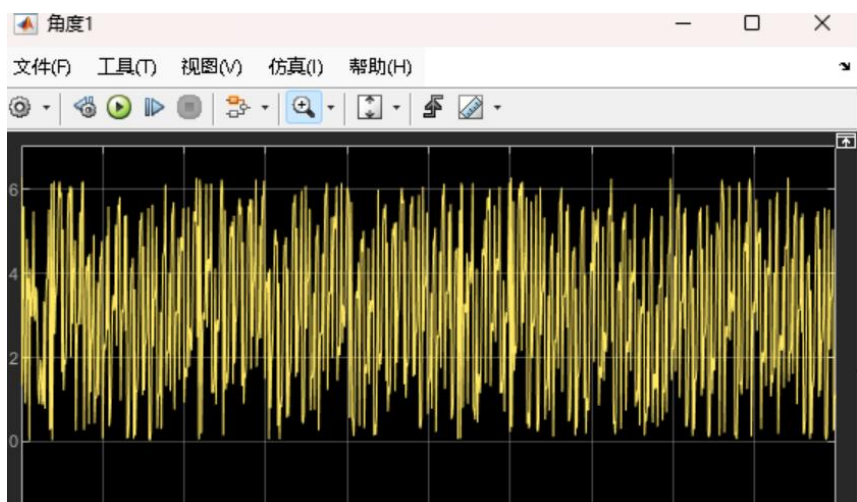


（Scope 转速）

而通过观察力矩的 Scope 图像，可以发现整体力矩在 0-0.15N • M 的范围内进行波动，整体推力随着角度呈周期分布。



而在处理后的角度 Scope 可以看到，整体的角度很好的映射到了 0-2pi 内，随着上一秒的输入而更新此时状态。



7.2 联合可视化分析

在打开 Interactive 动画演示后，可以直观地观察到斯特林发动机内部各部件在仿真过程中的动态行为。活塞在热缸与冷缸之间做往复直线运动，连杆随之驱动曲轴完成连续旋转，飞轮角速度逐渐趋于稳定，整体运动过程符合预期的周期性特征。但是使用互动界面有可能会

会导致计算出现错误，因此官方也不建议使用这种方法去仿真（其实设置好步长就没什么问题）。

八、优化与讨论

8.1 联合仿真结果的工程意义

仿真结果表明，斯特林发动机关键部件受力合理，满足强度要求。活塞和连杆的受力分布为后续优化提供了数据支持，曲轴扭矩分析有助于提高传动效率。

8.2 基于受力分析与仿真的部件优化建议

- 连杆：增加截面积或采用高强度材料，进一步提高疲劳寿命。
- 活塞：优化密封设计，减小工质压力波动。同时减小热端缸的容积以增大初始推力，为系统带去一定的扰动。
- 曲轴：调整轴径，降低剪应力，提高耐久性。

8.3 仿真过程中遇到的问题与解决方案

- 问题 1：初始模型自由度错误，导致仿真失败。
解决：检查约束设置，删除冗余铰链副。
- 问题 2：仿真结果振荡，数据不稳定。
解决：减小时间步长，调整求解器参数。

九、结论与展望

9.1 研究总结

本研究通过 ADAMS 对斯特林发动机进行了动力学仿真，成功分析了关键部件的受力并完成了力学校核，验证了设计方案的可行性，达到了预期学习目标。并且通过前后两次使用 adams 仿真，验证了初版斯特林发动机在无法工作的原因是由于热缸体积过大的猜想，并给最终版的斯特林发动机提供了理论支持。