

重慶大學

《工程設計》

最終報告



2024 至 2025 學年第 2 學期

項目名稱：《工程設計——斯特林發動機》

學院專業：國家卓越工程師學院

專業班級：23 級明月科創實驗班 2 班

學生組號：第一組

學生姓名：郝博文

學 號：20234021

任課教師：皮陽軍，宋代平，廖全

目录

1. 项目背景	1
2. 需求分析	1
3. 设计过程与方案概述	1
3.1 第一代斯特林发动机:	2
3.1.1 三维设计:	2
3.1.2 气缸设计与加工工艺:	4
3.1.3 关键零部件选型设计:	5
3.1.4 反思与总结:	6
3.2 第二代斯特林发动机:	6
3.2.1 三维设计:	6
3.2.2 气缸设计与加工工艺:	7
3.2.3 关键零部件选型设计:	9
3.2.4 反思与总结:	10
3.3 第三代斯特林发动机:	10
3.3.1 三维设计:	10
3.3.2 气缸设计与加工工艺:	11
3.3.3 关键零部件选型设计:	12
3.3.4 反思与总结:	13
4. 热力学循环计算分析	13
4.1 热力学循环计算	13
4.1.1 扫气容积计算	13
4.1.2 施密特模型循环功公式	14
4.1.3 功率计算:	14
4.1.4 效率分析:	15
4.2 参数优化建议	15
4.2.1 相位角优化	15
4.2.2 传动机构匹配	15
4.2.3 活塞行程优化	15
4.3 关键数据总结	16
5. ADAMS 与 Matlab 联合仿真	16
5.1 流程图:	16
5.2 理想假设条件:	18
5.3 初设参数预处理:	18
5.3.1 气缸内的平均气压	18
5.3.2 配气活塞的转动惯量	19
5.3.3 配气活塞的力	19
5.3.4 预估结果	19
5.4 ADAMS 仿真:	20
第一步: 设置环境 (正常重力场)	20
第二步: 从 Solidworks 中导入模型 (xt 格式)	21
第三步: 设置零部件材料属性	21
第四步: 设置零件副 (固定副+旋转副*5+平移副*2)	22

第五步：设置重力和接触面（生成摩擦力）	22
第六步：设置变量	23
第七步：在 ADAMS 中预搭建 Simulink 平台	23
5.5 Simulink 联合仿真	24
5.5.1 平台搭建	24
5.5.2 斯密特等温分析	25
5.5.3 Simulink 仿真结果	27
6. 迭代过程与实验记录	29
6.1 迭代过程：	29
第一版-无实物	29
第二版-实物（斯特林一代）	29
第三版-无实物（ γ 型）	30
第四版-实物（斯特林二代）	31
第五版-实物（斯特林二代）	32
第六版-实物（斯特林二代）	32
第七版-实物（斯特林三代）	33
6.2 实验记录：	34
第一次实验报告	34
第二次实验报告	35
第三次实验报告	36
第四次实验报告	36
第五次实验报告	37
第六次实验报告	39
第七次实验报告	40
第八次实验报告	41
第九次实验报告	42
第十次实验报告	43
7. 项目心得体会	44
8. 附：	44
改图记录：	44
采购记录：	49
代码：	52
Controls_Plant_0.m	52
Plant.m	54
ADAMS_CoSimulation.mlx（修正前）	55

1. 项目背景

斯特林发动机作为一种外燃式热机，具有燃料适应性广、噪声低、理论效率高等优势，但其结构精度要求高、密封性难保障，制约了普及应用。

本课程以设计制造一台斯特林发动机为目标，要求通过酒精灯驱动，最终输出功率小于 0.5w，并能持续运行 30 分钟以上。

功能项目	指标
最大输出功率	0.5W
热源	普通酒精灯
连续运行时间	不小于30分钟

2. 需求分析

首先，要做一款斯特林发动机，需要考虑的地方大致可以分为选型，结构，参数，材料，加工，装配几个方面。

比如，为了保证其能够在酒精灯的驱动下长时间运转，那么对材料的热稳定性就有一定要求。

其次，做出的斯特林发动机输出功率存在限制，那么在设计时就需要对其进行参数的考虑和仿真计算。

此外，由于本课程最终的要求是做出一款实物发动机，因此除开理论上的计算，还需要考虑使用什么样的材料、工艺、装配方法等，使其尽可能达到理想的设计目标。

基于上述对于项目目标的需求分析，我们展开了具体的设计方案，详情如下。

3. 设计过程与方案概述

为了达到目标，我们本学期先后设计了共三版斯特林发动机（不包括非原理

上的改动)，并经历了数此计算、实验、迭代。

基本思路是首先根据对需求的分行进行相关的理论计算和仿真，再根据计算和仿真结果对设计进行修改，然后将修改后的设计进行加工和实物装配，经过实验测试之后再对出现的问题进行分析，从而反馈设计上的缺陷并进行修改，在通过仿真进行相应调整和拟合。如此循环往复、多次迭代，最后得到能够满足要求的发动机。

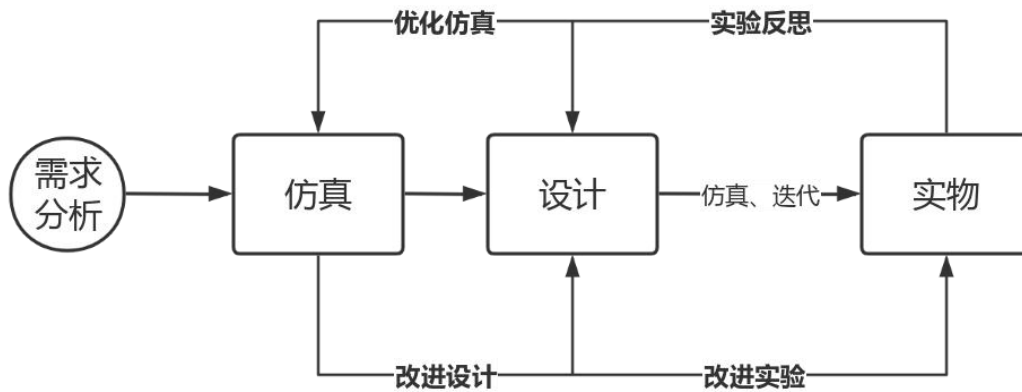


图 3.1 项目流程

3.1 第一代斯特林发动机：

首先，第一版斯特林发动机我们选择设计为 β 型，这种构型的斯特林发动机特点是单杠、结构简单。

3.1.1 三维设计：

此处我先对本项目使用的建模软件进行一个简要介绍，我使用的建模软件是 Autodesk 公司旗下的 Fusion360，之所以使用这个软件源于其齐全的功能和美观的界面，并能将作品上传至云文档进行保存，防止丢图。此外最重要的原因是，从大一开始我一直在使用 Fusion360，累计使用时长已超过数百小时。

下图是我们设计的第一版 β 型斯特林发动机：

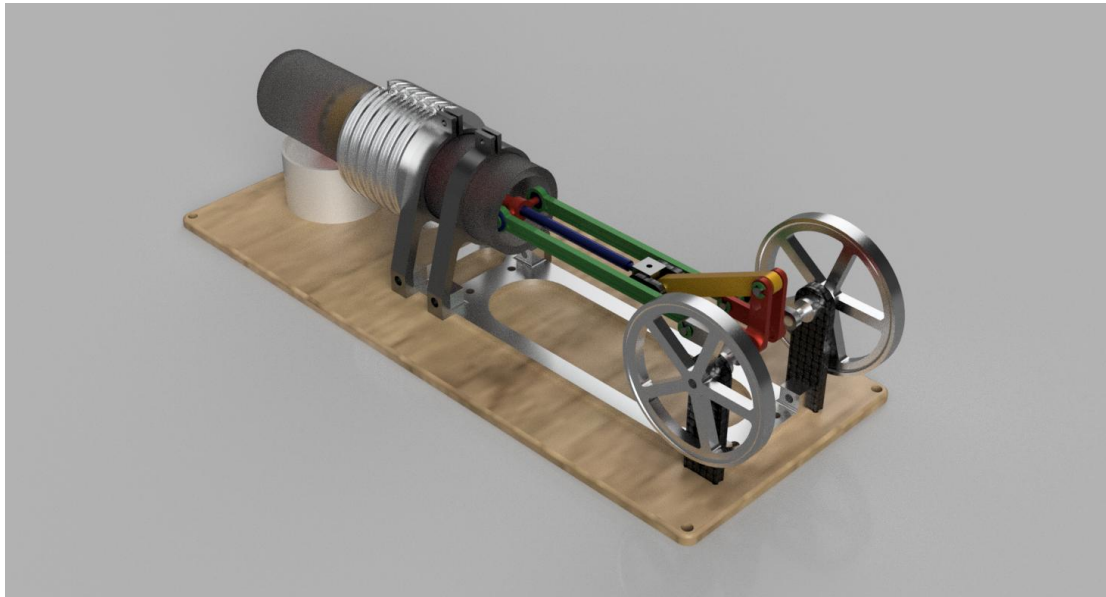


图 3.1.1.1 斯特林一代爆炸图

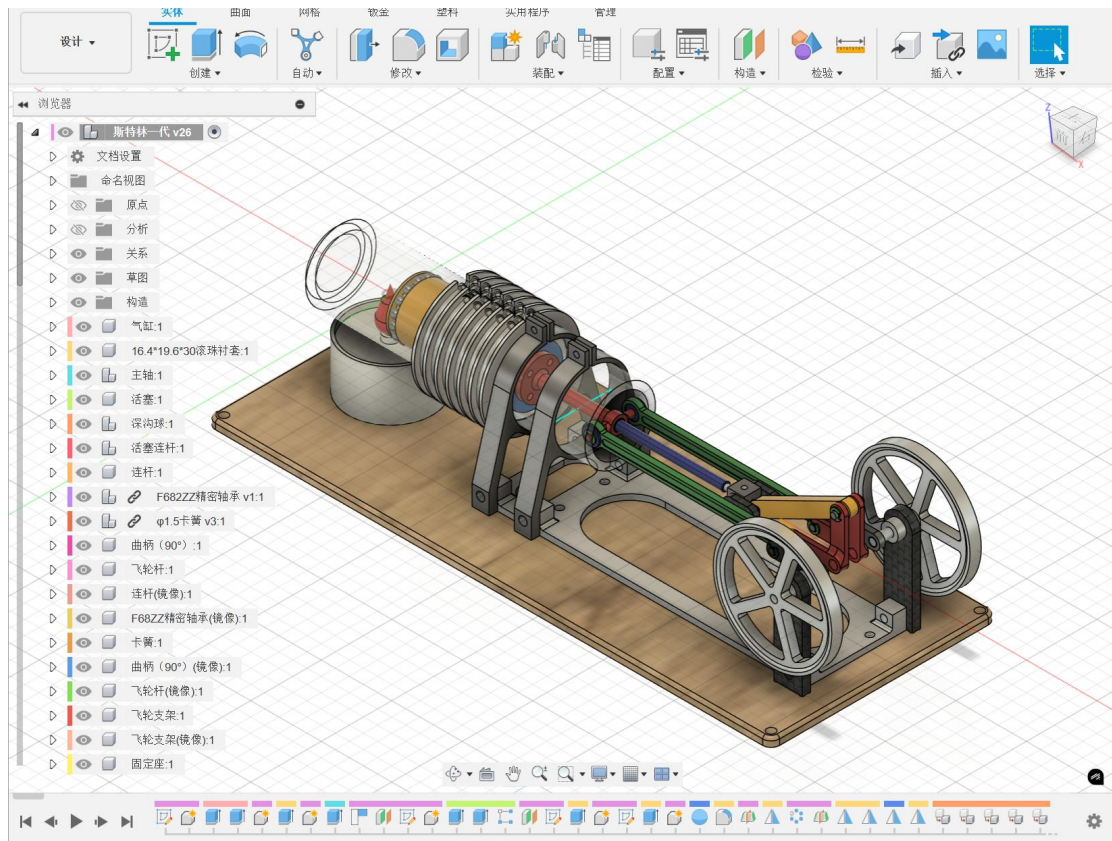


图 3.1.1.2 斯特林一代建模

由于初次尝试制作斯特林发动机，这一版的许多设计偏向于理想化，导致加工、装配时无法达到设计时的目标，因此存在较多缺陷。

3.1.2 气缸设计与加工工艺：

斯特林一代为β型，特点是单缸，这一版的气缸参数为深度100mm，内径20mm，壁厚2.5mm，材料选择上使用金属铝，具有良好的导热性、可加工性和热稳定性。

为了能够保证动力活塞与气缸间形成公差密封，工艺上我们选择了CNC数控加工，对于动力活塞外径和气缸内径分别选用了H8/g7的公差控制，并对其接触面采用了磨砂和精加工的表面处理工艺，将其粗糙度控制在Ra1.6。

核心部件	材质	尺寸	公差
气缸	铝	d20*D25*L100	内孔H8: -0.00+0.03
热端活塞	铜, 钢	d16.4*D19.6*L30	内径配合: 16mm 滚珠配合: 20mm
冷端活塞	铝	d6*D20*L7	内孔H8:-0.00+0.02 外轴g7: -0.02+0.00
散热器	铝	d25*D35*L25	内孔H8: -0.00+0.03

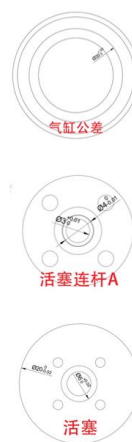


图 3.1.2.1 CNC 加工参数

然而，此版气缸的长径比达到了5，这对于CNC金属工艺来说过大了，容易导致弹刀、断刀风险，且不易控制公差。因此我们除了对参数进行了修改，还使用了二次分别加工的方法，即对气缸缸体单独加工，再将气缸底座焊接上去。

最终气缸的密封效果和内壁光滑程度能够达到理想预期。

此外，本次CNC的加工商是我在淘宝上咨询到的一位商家，尽管最终加工能够达到预期，但个体加工商存在报价不严谨、加工速度、细节控制不足等问题。这也让我们吸取了经验，在第二第三代斯特林发动机加工时选择了大厂。

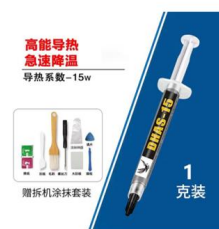
3.1.3 关键零部件选型设计：



水冷循环散热
增大冷热端温



非标定做 可开发票
厂家直销
Φ4 - Φ100 铜/铝/塑
滚珠导套
双端支撑，减小阻力，增加同轴



高能导热
急速降温
导热系数-15w
1克装
硅脂导热，填补缝隙
加快气缸冷热循环功



微型轴承，过渡衔接
提高系统稳定性



Φ1.5*0.4
500个
锰钢挡圈限位，
防止转轴轴向移动



细软胶管，水循环
配合水泵使用

图 3.1.3.1 零件采购

第一代斯特林发动机的部分核心零件如上图所示。

首先，在轴系方面，我使用了 F682ZZ 法兰微型轴承，用于衔接双曲柄连杆机构，达到稳定过渡，并通过 $\phi 1.5*0.4$ 锰钢挡圈对其进行限位。

配气活塞选择可以说是此版发动机的一个亮点，由于配气活塞和气缸间不需要形成公差密封，因此稳定性和保证气体流通就成为了其第一需求。基于此需求，我想到了使用滚珠导套来代替 CNC 配气活塞。滚珠导套的优势有以下三点：

①滚珠形成多端支撑：在发动机的高速运转下，活塞的上下晃动会被放大，造成严重影响，而滚珠导套与气缸内壁间可形成多端点支撑，提高系统的稳定性，同时能够解决 β 型斯特林发动机最大的难点之一——同轴度问题，让活塞始终保持一条直线的运动轨迹。

②滚珠间隙保证气体流通：导套本身与气缸内壁存在间隙，而间隙中仅存在部分滚珠，因此能够保证冷热腔之间的气体交换。

③轻量化减小转动惯量：滚珠导套整体材质为黄铜，但是由于结构中空，因此重量轻，这在发动机高速运转的情况下十分重要，能够有效降低运动时的惯量，提高机械效率。

值得一提的是，这一版斯特林发动机的一个 T 型连接件由于形状不规则，不满足 CNC 加工工艺，因此我选择了当下广泛应用于模具和航空航天领域的金属 3D 打印工艺，效果超出预期。

3.1.4 反思与总结:

正如上文所说,本次斯特林发动机的设计过于理想化,部分结构(如传动机构)无法达到理想目标,且整体尺寸的设计较小,对于加工和零件的精细化要求高,不易达到。

因此最后的成品效果是:每个部分单独检验能够达到要求,但组装成整体后存在问题,无法运转。

在综合考量之下,我们决定,结合老师下发的模型和课堂知识,重新设计一版 γ 型斯特林发动机。

3.2 第二代斯特林发动机:

3.2.1 三维设计:

斯特林二代选用 γ 型,在结构上主要将其分为冷缸、热缸、气缸连接件、气缸支架、飞轮支架、底座这几个方面。

其中值得一提的亮点是,使用一个连接件将冷热气缸连接起来,这种紧固方式可以保证冷热缸之间的相对位置不会发生变化,从而保证了系统的稳定性。此外,气缸部分和飞轮部分的分体式设计又为实际运动和装配时的偏差提供了的盈余,以防每个部分都是紧固导致运转时的卡顿(这一点老师曾在指出赵秀成组的问题时提到过)。

此外,支架和底座之间通过螺纹连接,借助预紧力将其牢牢固定为一体,这里的螺丝为沉头螺丝,以倒置的形式从底座打入支架中,从而将螺丝头的部分嵌入底座中,避免了螺丝头的突出。

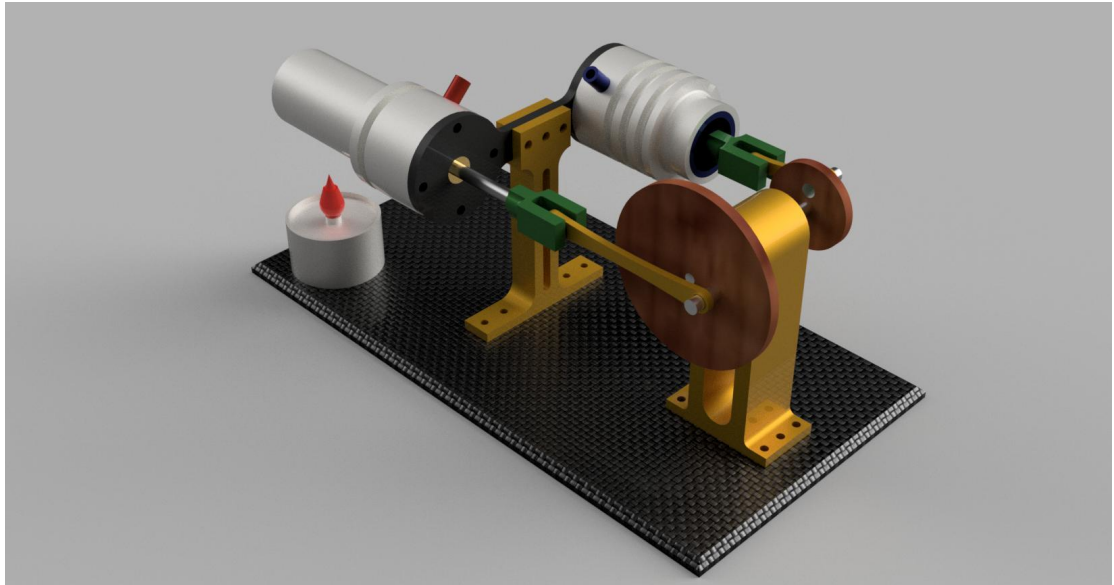


图 3.2.1.1 斯特林二代爆炸图

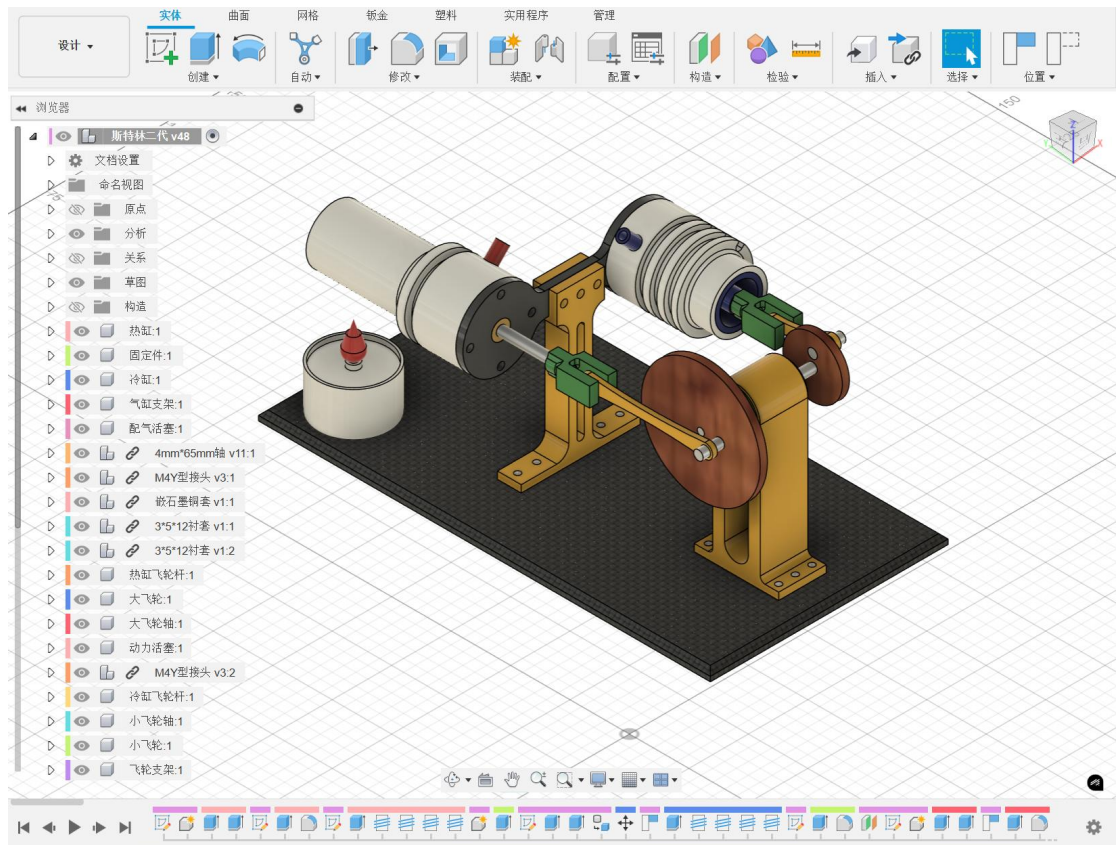


图 3.2.1.2 斯特林二代建模

3.2.2 气缸设计与加工工艺：

γ 型斯特林发动机和 β 型斯特林发动机的最大区别在与气缸， γ 型将冷热缸分开变为两个气缸。在经过热循环计算和仿真验证后，我们将其参数设为：

物理参数	数值 (单位)
配气活塞行程	16mm
动力活塞行程	10mm
配气活塞直径	18.5mm
动力活塞直径	20mm
热缸直径	20mm
冷缸直径	20mm
热缸深度	65mm
冷缸深度	40mm
相位角	90°

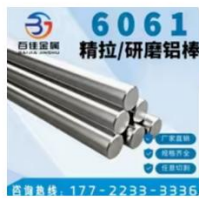
在充分吸取了斯特林一代中使用打印件导致缺陷的经验后,本次加工工艺全部采用 CNC, 材质为金属铝。这里我制作了一份表格来对两种工艺进行对比:

工艺对比	3D 打印	优劣	CNC 数控加工	优劣
①结构强度	强度较低, 填充度不高的情况下易发生弯折或变形, 即便不出现此情况, 在长时间的运动下也会发生蠕变导致误差。	↓	金属强度高, 能够承受极大的应力, 且不易产生形变, 寿命长。	↑
②精度	由于打印后的冷缩, 无法达到图纸中的要求, 精度仅能达到 1mm 级。	↓	精度极高, 是现有加工工艺中最高的几种之一。同时可以根据应用场景和需求来控制精度等级, 如本项目中我对气缸和活塞的要求为 H8/g7, 精度可达到丝级别, 即 0.01mm 级。	↑
③热稳定性	由于 3D 打印材质的限制, 绝大部分 3D 打印件都无法承受斯特林发动机工作时的温度。	↓	金属在高温的条件下稳定性非常高, 且热胀冷缩系数可计算。	↑
④设计自由度	3D 打印能够满足各种形状的设计, 自由度极高, 因此能够很大程度上实现使用者的想法。	↑	由于 CNC 工艺本身加工方法的限制, 对于零件的外型存在约束, 因此在设计时就需要考虑这些因素。	↓
⑤成本	3D 打印件不论在时间或金钱方面的成本都远低于 CNC。其可以在短时间内将使用者的想法变现, 因此非常适合对方案的可行性进行验证,	↑	CNC 工艺在时间金钱方面的成本都很高, 在有限的预算下不适合进行多次迭代和方案验证。	↓

	从而规避明显的错误。		
--	------------	--	--

综上所述，我们在验证方案可行性时使用 3D 打印件，而在正式迭代时选择 CNC 工艺。

3.2.3 关键零部件选型设计：



高精度铝棒
表面光滑



Y型连接件, 衔接
连杆与轴



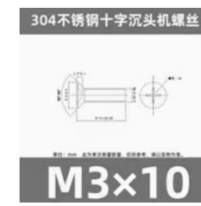
法兰轴承, 用于
支承飞轮



金属衬套, 用做
耐高温通气口



嵌石墨铜套, 摩
擦系数极小



沉头螺丝, 可将
头部嵌入底座中

图 3.2.3.1 零件采购

第二代斯特林发动机的部分核心零件如上图所示。

首先，在轴系方面，我选用了自带两侧限位的 Y 型连接件来连接轴和连杆，从而优化了斯特林一代中的连杆机构链接复杂和装配难度大的问题。

其次，嵌石墨铜套的选择可以说是本代斯特林发动机的一大亮点，嵌石墨铜套不仅自带公差（可在商品详情页根据具体型号查询），满足公差密封的要求。同时，由于石墨粉的润滑功能，嵌石墨铜套的表面粗糙系数极低，可达到 0.01 级别，非常适合用于热缸和轴之间的联接。

最后，斯特林二代唯一一处没有使用 CNC 工艺或零部件的部分就是底座，由于底座不需要很高的热稳定性和公差控制，同时又是平板状结构，因此碳纤维工艺就非常适合此处。碳纤维材质不仅有非常大的结构强度，同时耐高温，不易发生形变，且工艺成本低于 CNC，非常适合当做底座。

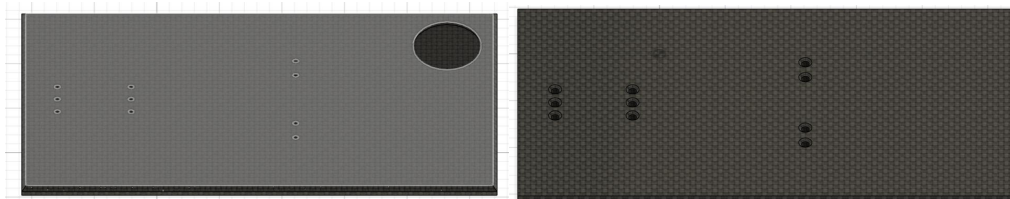


图 3.3.3.2 碳板正反面（倒角及沉头孔处理）

这里我对碳板底部打了沉头孔，边缘做了倒角处理，能够将沉头螺丝的螺丝头嵌入其中，同时防止边缘部分过于锋利而划伤人，可以说既满足了设计的要求，又有人性化和美观性上的思考。

3.2.4 反思与总结：

第二代斯特林发动机的各项指标相对于第一代都有了很大提升，不仅结构上更加稳定，同时在气密性、接触上的处理更加严格。

但尽管如此，我们的斯特林二代仍然无法在酒精灯的驱动下保持持续转动。在对斯特林二代进行了多方面检查，以及与老师同学交流之后，我们一致认为这一版的结构和设计思路并不存在问题，甚至一些设计得到了老师同学的夸赞。

因此，错误只能出在原理（参数）和一些细节上。经过验证，我们开启了斯特林三代的设计。

3.3 第三代斯特林发动机：

3.3.1 三维设计：

斯特林三代和二代最大的区别在于配气活塞和动力活塞的尺寸和外形，飞轮的设计，飞轮和连杆的联接，气缸连接件的重做。做出此变动的的原因是，在斯特林二代的基础上，我们对其仍然无法运转的原因做了深入分析和思考，其中包括向老师、向其他组请教和讨论，以及通过多次试验来排除可能存在的问题（具体迭代过程和实验过程见下文 6.1, 6.2）。

由于气密性，结构设计、冷热循环等方面均不存在问题，我们重新对比了各项参数和市面上现有斯特林发动机的差别，并重新进行了仿真计算，最终得出结论——死容积过大。

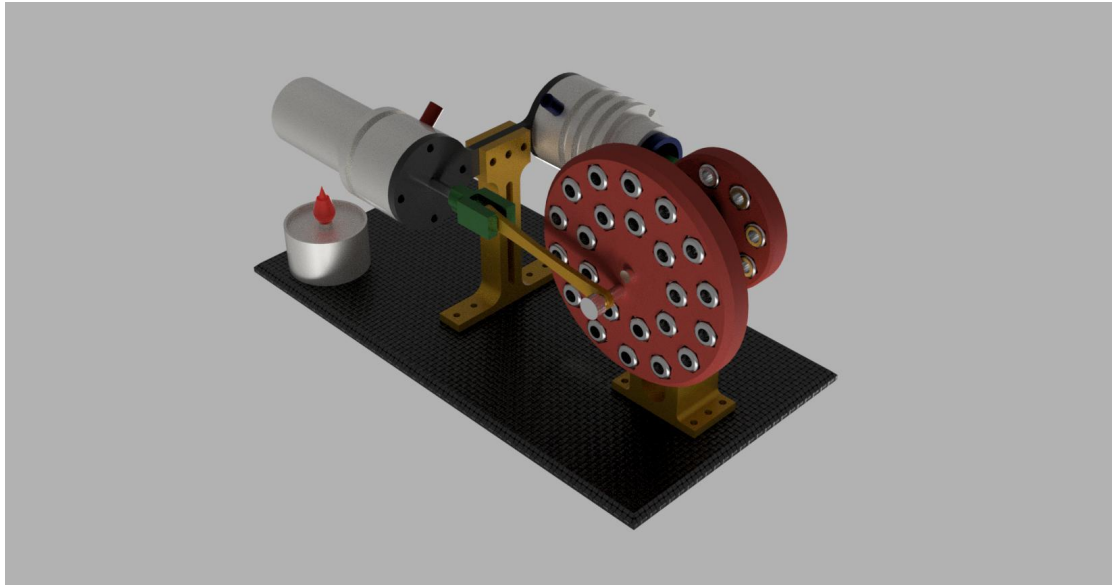


图 3.3.1.1 斯特林三代爆炸图

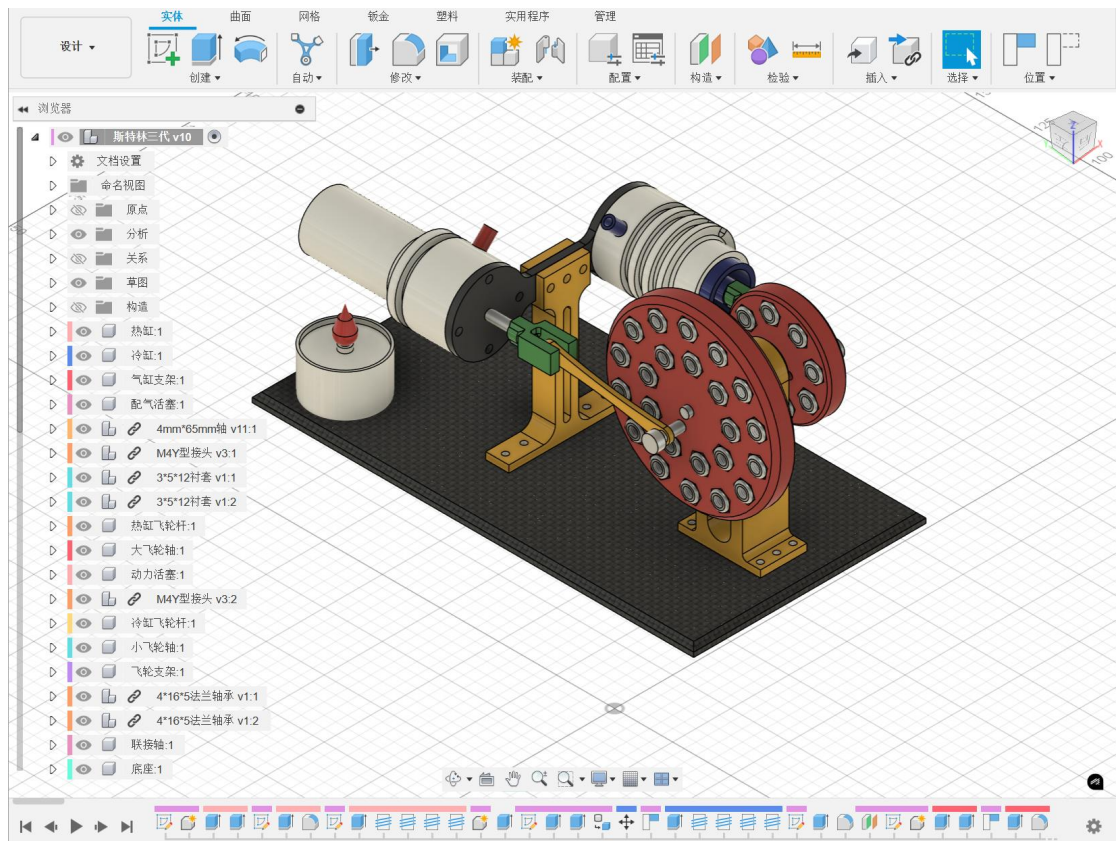


图 3.3.1.2 斯特林三代建模

3.3.2 气缸设计与加工工艺：

气缸部分仍然沿用了斯特林二代的成品，因此此处不再进行赘述，我将对活塞进行讲解。

配气活塞和动力活塞的参数和外形做了如下变动（红色为配气活塞，蓝色为动力活塞），以此来占据更多气缸内的位置，并减小死容积。此外，我将配气活塞部分的镂空填补起来。



图 3.3.2.1 活塞的迭代

具体原因如下图所示，第二代斯特林发动机死容积过大将会导致气体的交换不足，同时由于配气活塞存在一个较深的镂空（最初目的是为了减小惯量），因此当活塞向前推的时候，回热腔的工质有很多会进入这个镂空槽中，而非热腔中。这样导致的结果就是气体没有得到充分交换，同时进入镂空槽的气体阻碍了活塞的前进，使得发动机无法持续运转。

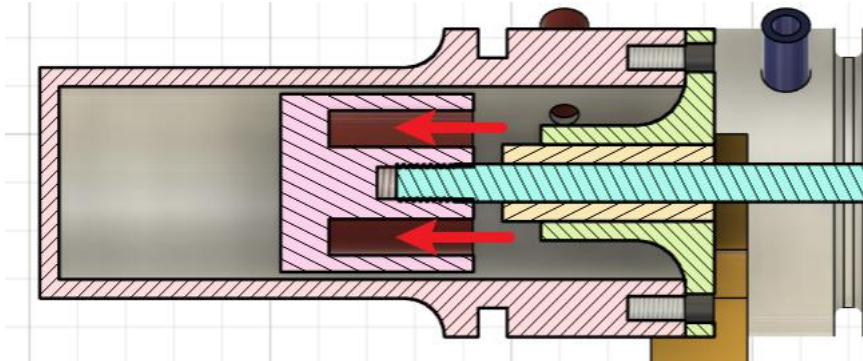


图 3.3.2.2 气体流动分析

3.3.3 关键零部件选型设计：

关于斯特林三代的零部件，我购买了 M5 防松螺母，用于调整飞轮重量。在这里，为了能够灵活调整飞轮质量，找到一个最合适标准，我在飞轮上设计了多个螺丝槽位，以便能够根据实验情况进行调整。



M5螺母
(配重使用)



塞打螺丝
(联接飞轮和连杆)

图 3.3.3.1 零件采购

而塞打螺丝则是因为飞轮变为打印件后，可以将螺纹通过紧固的方式攻进其中，并利用塞打螺丝的光杆部分作为和连杆联接的销轴。

3.3.4 反思与总结：

斯特林三代给我带来的很大一点收获就是——不要忽视或想当然地判断任何一个细节。比如在上一代的设计中，我仅仅考虑到了要把配气活塞尽量镂空，而没有考虑到从空气动力学的角度来看，这样的镂空将会大大减小冷热缸之间的气体交换。

尽管做出了无数的尝试和努力，我们的斯特林三代最终还是没能达到理想效果。最终的效果是：在酒精灯的驱动下能够保持比在无酒精灯驱动条件下更持久的转动。

但在这个过程中，我收获到了很多远比让发动机动起来更有意义的东西。

4. 热力学循环计算分析

4.1 热力学循环计算

4.1.1 扫气容积计算

根据上述模型给出的参数和结构，首先计算出活塞（视为圆柱体）的基本体积。

$$\text{配气活塞（冷缸）： } V_{\text{sw-g}} = \pi \left(\frac{18.5}{2} \right)^2 \times 16 \approx 4.30 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

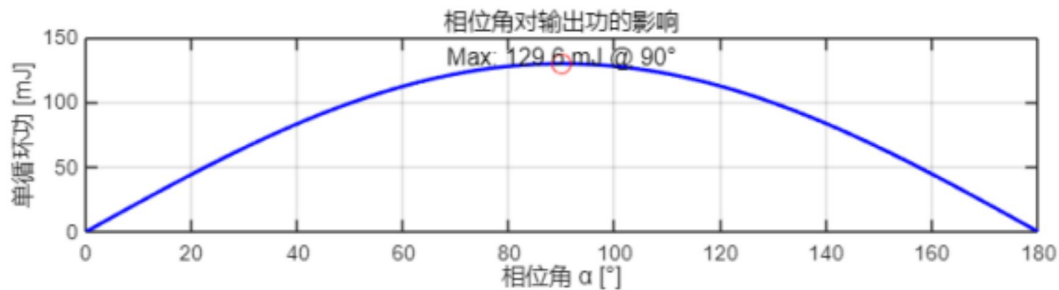
$$\text{动力活塞 (热缸): } V_{sw_g} = \pi \left(\frac{20}{2}\right)^2 \times 10 \approx 3.14 \times 10^{-6} m^3$$

4.1.2 施密特模型循环功公式

由于氢气、氮气等气体对气缸的气密性要求严格，我们暂时不使用，因此假设气缸内的工质为空气，热端温度 $T_h = 800 \text{ K}$ ，冷端 $T_c = 300 \text{ K}$ ，平均压力 $P_{\text{mean}} = 10^5 \text{ Pa}$ ，那么根据施密特模型循环公式，斯特林发动机的循环功近似为：

$$W \approx \frac{\pi}{2} P_{\text{mean}} \cdot \frac{V_{sw_g} V_{sw_p}}{V_{sw_g} + V_{sw_p}} \cdot \frac{T_h - T_c}{T_h + T_c} \cdot \sin \alpha$$

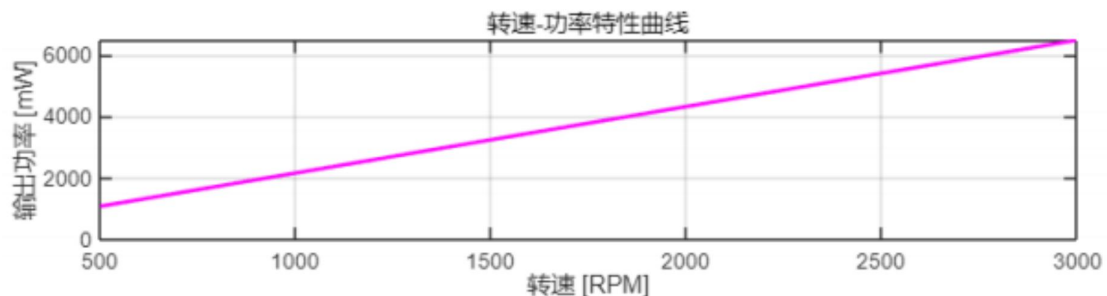
代入参数后， W 随相位角 α 的变化如下图所示。当 $\alpha = 90^\circ$ 时， $\sin \alpha = 1$ ，循环功达到最大值。



4.1.3 功率计算：

为了计算功率，我引入了转速参数的输入，默认为 500 RPM，计算公式如下：
功率计算： **Power = 循环功 × 转速频率**

代入参数后，绘制转速-功率关系曲线，如下图所示：



4.1.4 效率分析:

卡诺效率: 理论最大效率 $\eta = 1 - T_c/T_h$

实际效率: 基于以下公式计算:

$$Q_{in} = mc_v(T_h - T_c) + P_{mean}V_{sw_p}$$
$$\eta = \frac{W_{cycle}}{Q_{in}}$$

4.2 参数优化建议

4.2.1 相位角优化

最佳相位角: $\alpha = 90^\circ$, 此时热缸膨胀与冷缸压缩的相位差最大, 压力-容积曲线包围的面积最大。

验证结果: 当 $\alpha = 90^\circ$ 时, 循环功计算值为 **0.082 J/cycle**; 若相位角偏离至 70° 或 110° , 功减少约 15%。

4.2.2 传动机构匹配

曲柄半径匹配:

配气活塞行程 $S_g = 16 \text{ mm}$ \rightarrow 曲柄半径 $r_g = S_g/2 = 8 \text{ mm}$ 。

动力活塞行程 $S_p = 10 \text{ mm}$ \rightarrow 曲柄半径 $r_p = S_p/2 = 5 \text{ mm}$ 。

飞轮惯性匹配:

配气活塞飞轮 (直径 50 mm, 厚度 2 mm): 转动惯量

动力活塞飞轮 (直径 25 mm, 厚度 2 mm): 转动惯量

改进方案: 增大动力活塞飞轮惯性 (厚度增至 3 mm), 以平滑扭矩波动。

4.2.3. 活塞行程优化

当前配气活塞扫气容积比动力活塞大 37%, 可能导致冷缸工质滞留。

改进方案:

方案 1: 增加动力活塞行程至 12 mm, 平衡扫气比。

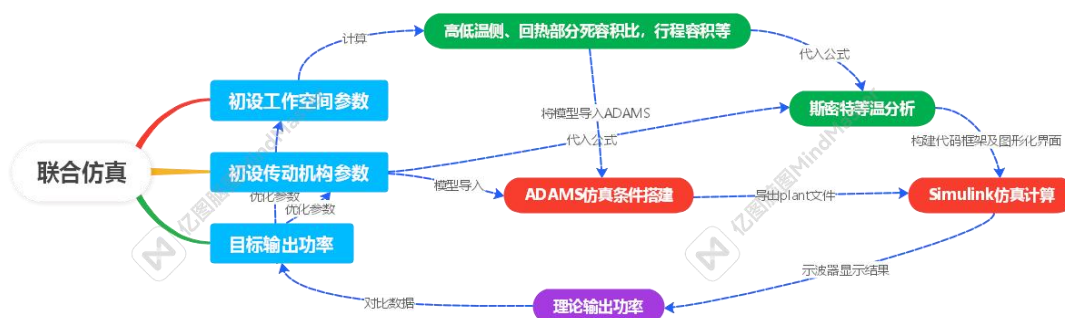
方案 2: 减小配气活塞直径至 17 mm, 降低扫气容积。

4.3 关键数据总结

参数	值
最佳相位角 α	90°
单循环理论功 W	0.82J/cycle
配气活塞扫气容积	$4.30 \times 10^{-6} \text{m}^3$
动力活塞扫气容积	$3.14 \times 10^{-6} \text{m}^3$
飞轮优化建议	动力活塞飞轮加厚至 3mm

5. ADAMS 与 Matlab 联合仿真

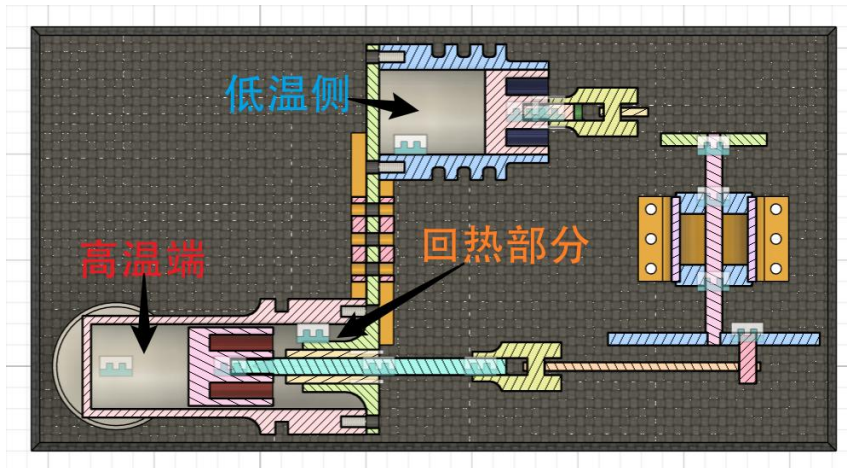
5.1 流程图:



以下为第二代斯特林发动机的初设参数:

物理参数	数值 (单位)
配气活塞行程	16mm
动力活塞行程	10mm
配气活塞直径	18.5mm
动力活塞直径	20mm
热缸直径	20mm
冷缸直径	20mm
热缸深度	65mm
冷缸深度	40mm
相位角	90°

根据上述参数, 我们可以计算出初始容积和死容积比等数据, 为接下来的第三代斯特林发动机的容积、压力变化模型铺垫:



高温侧死容积： $V_a = 7 * \pi * 10^2 = 700 \pi \text{ mm}^3$

低温侧死容积： $V_c = 15 * \pi * 10^2 = 1500 \pi \text{ mm}^3$

回热部分死容积： $V_b = 22 * \pi * 10^2 - 19 * \pi * 4^2 = 1896 \pi \text{ mm}^3$

行程容积： $V_s = (23 - 7) * \pi * (18.5/2)^2 = 1369 \pi \text{ mm}^3$

高温侧死容积比： $X_1 = V_a / V_s \approx 0.5$

低温侧死容积比： $X_3 = V_c / V_s \approx 1.1$

回热部分死容积比： $X_2 = V_b / V_s \approx 1.4$

全死容积比： $X = X_1 + X_2 + X_3 = 3$

下图分别为达到两侧死容积的状态横截面，为数据的计算提供示意：

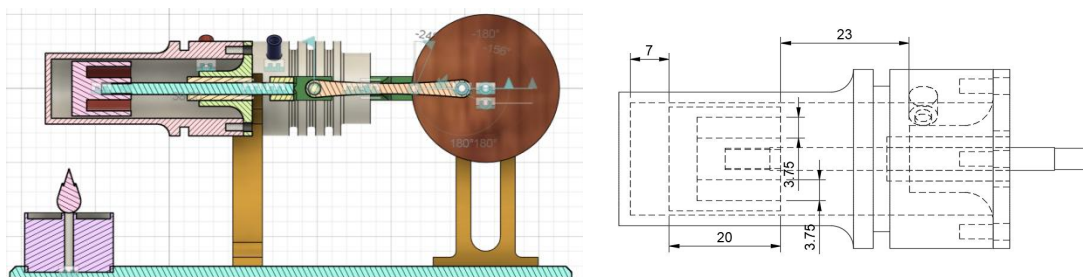


图 5.1.1 状态 1

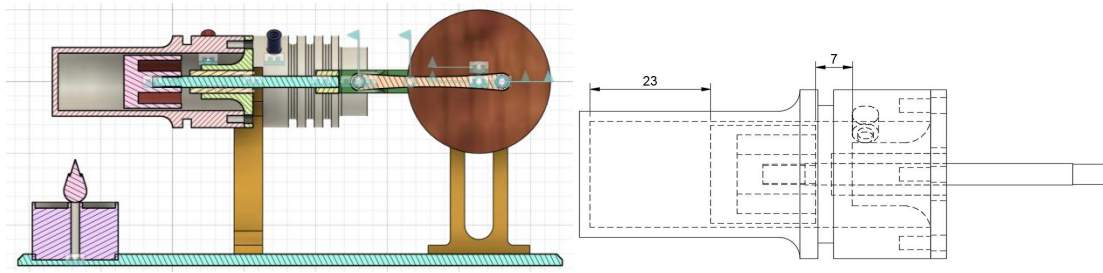


图 5.1.2 状态 2

5.2 理想假设条件:

模型基于以下简化假设:

1. 理想气体行为

模型假设工质（空气）严格遵循理想气体定律 $PV=nRT$ ，忽略分子间作用力和气体分子自身体积的影响。

2. 等温过程近似

模型假设热缸和冷缸内不考虑温度梯度影响，且工质在回热器中瞬时完成热交换。

5.3 初设参数预处理:

根据上述模型简介部分计算出的参数和假设条件，我们可以先对气缸平均气压、转动惯量等进行预处理，用于后续与联合仿真进行对照：

5.3.1 气缸内的平均气压

假设高温端温度 $T_h = 600$ K，低温端温度 $T_c = 300$ K，初始充气压力为大气压 $P_0 = 101325$ Pa。总容积为：

$$V_{\text{total}} = (700 + 1500 + 1896 + 1369)\pi \text{ mm}^3 \approx 0.00001716 \text{ m}^3$$

基于理想气体定律和平均温度 $T_{\text{avg}} = (T_h + T_c)/2 = 450$ K，估算平均气压：

$$P_{\text{avg}} = P_0 \cdot \frac{T_{\text{avg}}}{T_c} = 101325 \cdot \frac{450}{300} \approx 152,000 \text{ Pa (约 1.52 bar)}$$

5.3.2 配气活塞的转动惯量

飞轮参数：直径 50mm，厚度 2mm，材料密度 $\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$ 。

体积： $V = \pi \cdot (0.025)^2 \cdot 0.002 \approx 3.927 \times 10^{-6} \text{ m}^3$

质量： $m = \rho \cdot V = 2700 \cdot 3.927 \times 10^{-6} \approx 0.0106 \text{ kg}$

转动惯量： $I = \frac{1}{2} m r^2 = 0.5 \cdot 0.0106 \cdot (0.025)^2 \approx 3.3125 \times 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

5.3.3 配气活塞的力

平均气压作用在活塞面积上：

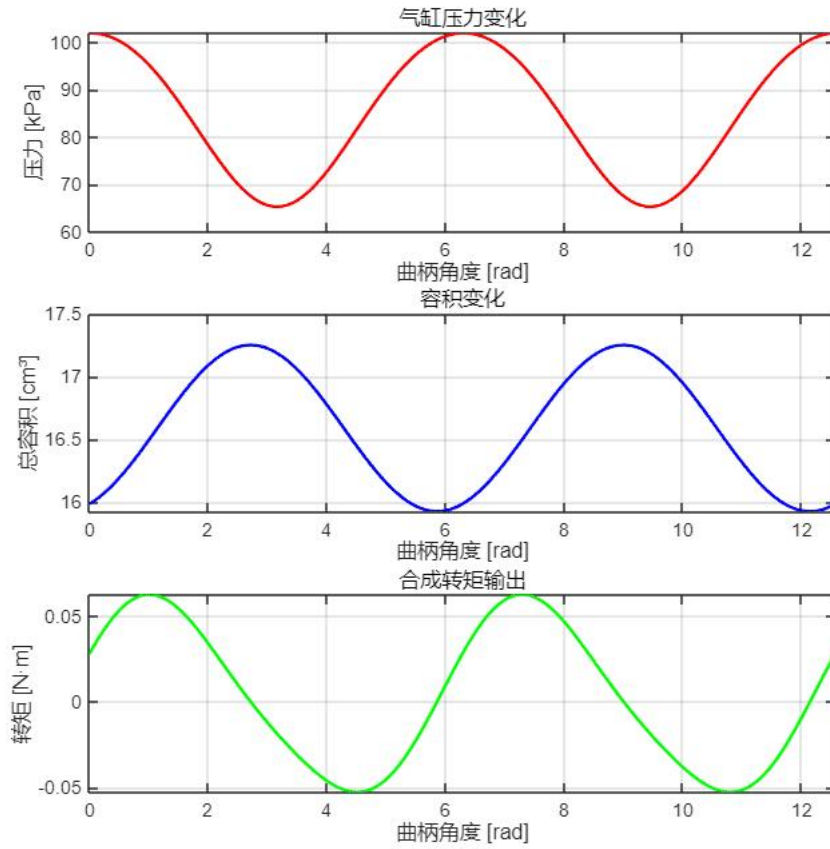
- 活塞直径 18.5mm，面积 $A = \pi \cdot (0.00925)^2 = 0.0002687 \text{ m}^2$
- 力： $F = P_{\text{avg}} \cdot A = 152,000 \cdot 0.0002687 = 4.08 \text{ N}$

5.3.4 预估结果

1. 气缸平均气压：约 152kPa
2. 配气活塞转动惯量： $3.3125 \times 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
3. 配气活塞所受平均力：约 4.08 N

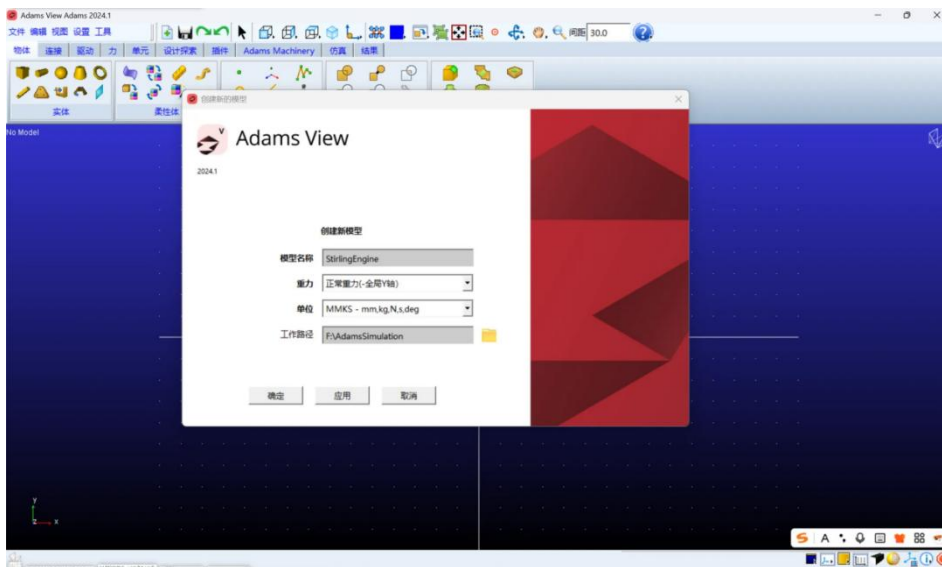
注：以上计算基于假设的高低温温度值（ $T_h = 600 \text{ K}$ ， $T_c = 300 \text{ K}$ ）。实际数值需根据斯特林发动机的实测温度进行调整与验证。

以下为 MATLAB 生成的压力、转矩、总容积和压力变化的可视化图像，以及计算得出的相关性能参数，作为第二代斯特林发动机的初始模型框架。



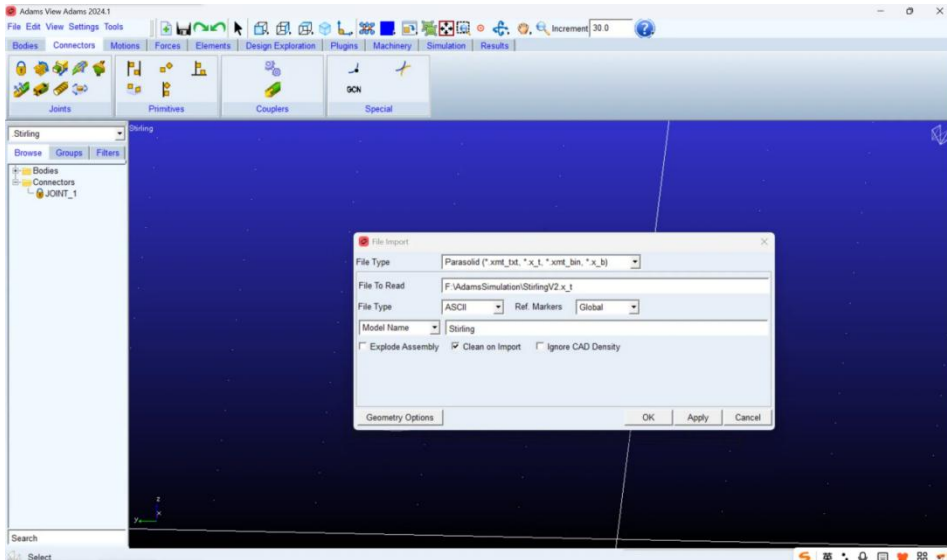
5.4 ADAMS 仿真：

第一步：设置环境（正常重力场）



第二步：从 Solidworks 中导入模型 (xt 格式)

提前在建模软件中将每个零部件重命名为英文名(中文会在 ADAMS 中出现乱码)。所有文件路径必须是英文，否则导致报错。



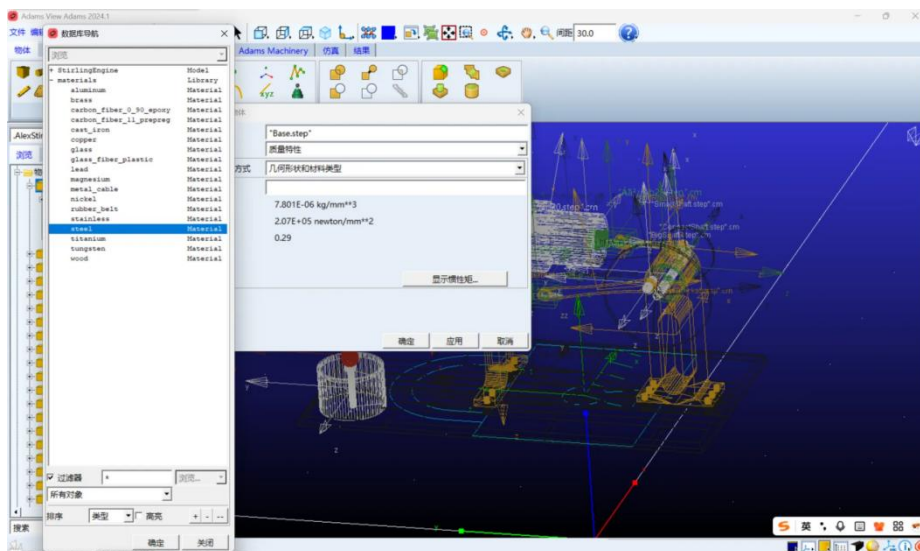
第三步：设置零部件材料属性

材料设置均为金属铝

密度：2740.0kg/meter**3

杨氏模数：7.1705E+10N/meter**2

泊松比：0.33



第四步：设置零件副（固定副+旋转副*5+平移副*2）

旋转副：

大小飞轮与连杆间*2

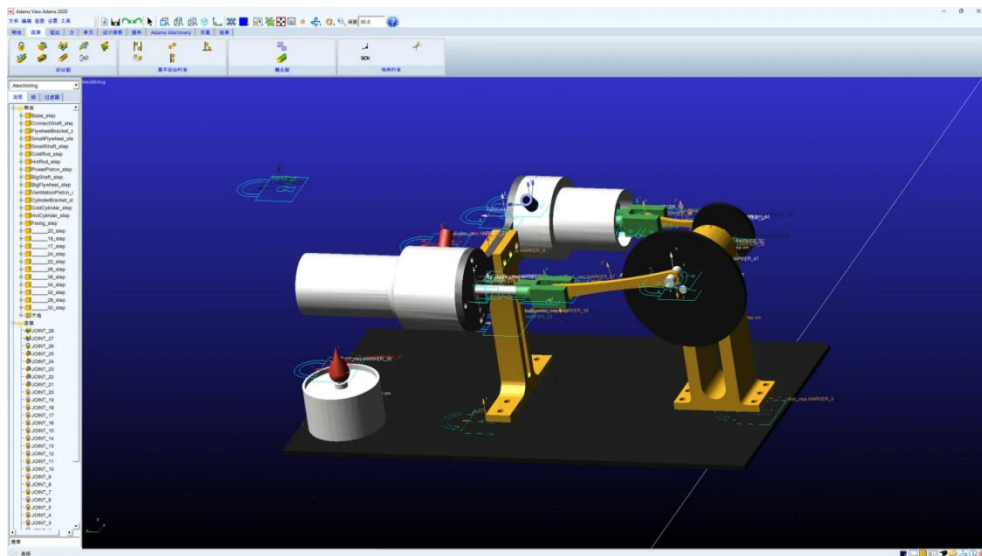
连杆与Y型件之间*2

飞轮与轴承之间*1

平移副：

配气活塞与热缸之间*1

动力活塞与冷缸之间*1



第五步：设置重力和接触面（生成摩擦力）

动摩擦系数：

石墨-表面抛光的铝：0.35

表面抛光的铝-铝：1.0

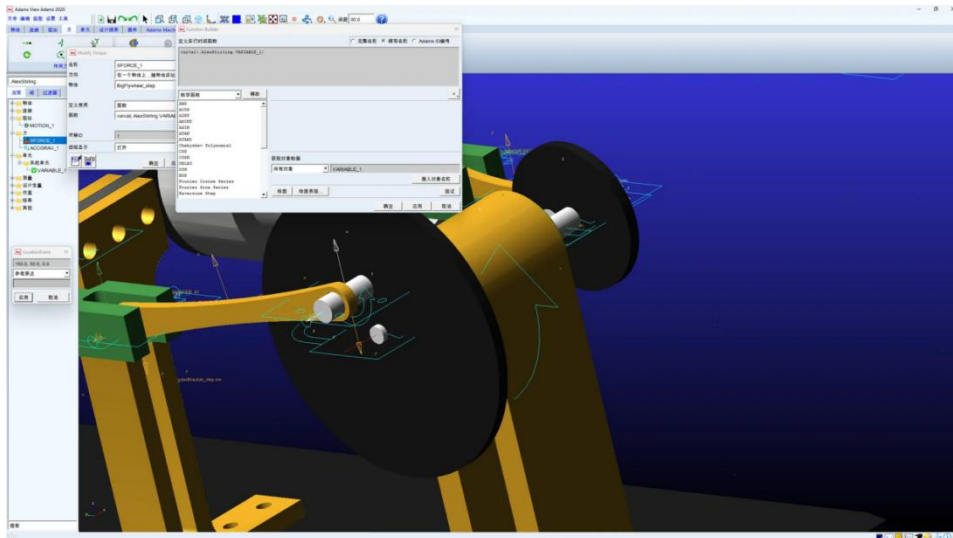
注：CNC 件表面工艺为喷砂，粗糙度 Ra1.6



第六步：设置变量

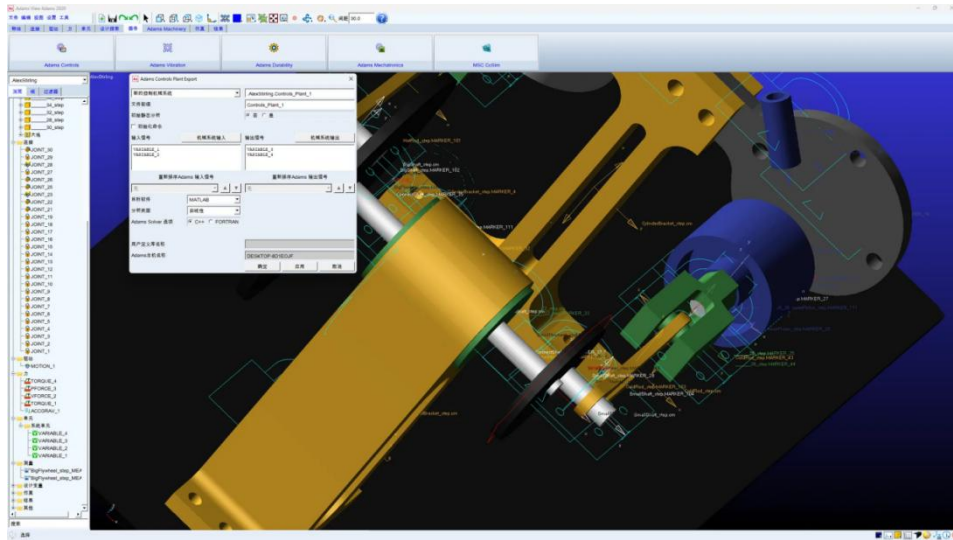
输入：力和转矩

输出：转速和角度



第七步：在 ADAMS 中预搭建 Simulink 平台

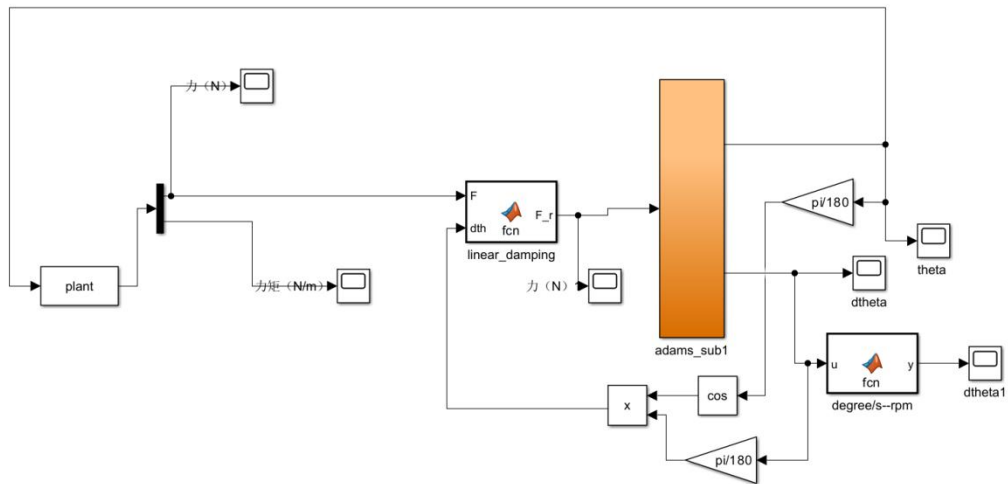
在 ADAMS 系统中设置输入输出变量，最后导出 plant.m 文件

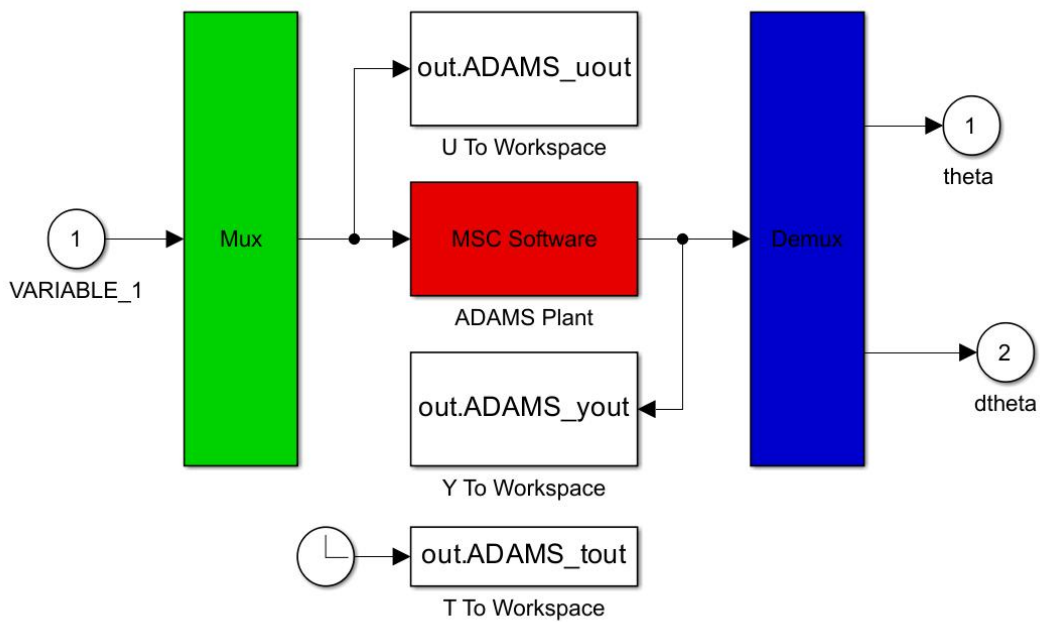


5.5 Simulink 联合仿真

5.5.1 平台搭建

在 adams 设置对动力活塞的力为输入量，飞轮的角度和转速为输出量，并将该机械系统导出至 matlab，搭建 simulink 仿真条件。





在 plant.m 文件中根据斯密特等温分析法进行热力学计算，实现热力学-力矩的交互。

5.5.2 斯密特等温分析

1. 求出斯特林发动机各空间的瞬时容积（E-膨胀，R-回热，C-压缩）

$$V = V_{\text{膨胀腔}} + V_{\text{压缩腔}} + V_{\text{回热器腔}} \quad (\text{A})$$

2. 应用理想气体状态方程，获得如下表达式：

$$m = \frac{pV_E}{R_g T_g} + \frac{pV_R}{R_g T_g} + \frac{pV_C}{R_g T_g}$$

3. 将回热器的温度用膨胀腔和压缩腔的算术平均代替，获得发动机机瞬时压强（使用上式求解 p）

$$p = \frac{mR_g}{\frac{V_E}{T_E} + \frac{2V_R}{T_E + T_C} + \frac{V_C}{T_C}} \quad (\text{B})$$

4. 根据启动状态，求解工质气体质量（假设无泄漏）

$$m = \frac{P_0 V}{R_g T_0} \quad (\text{C})$$

5. 结合(B) (C)，求解发动机内工质瞬时压强为：

$$p = \frac{P_0 V}{\left(\frac{V_E}{T_E} + \frac{2V_R}{T_E + T_C} + \frac{V_C}{T_C} \right) T_0} \quad (\text{D})$$

6. 结合(A) (D)，可作出热机的 p-v 图，进而，通过图像可计算出发动机一次循环所输出的机械功 w；

7. 根据设计功率，可计算出热机需要在 1s 内的循环次数为 $f = \frac{P}{W_i}$ 。

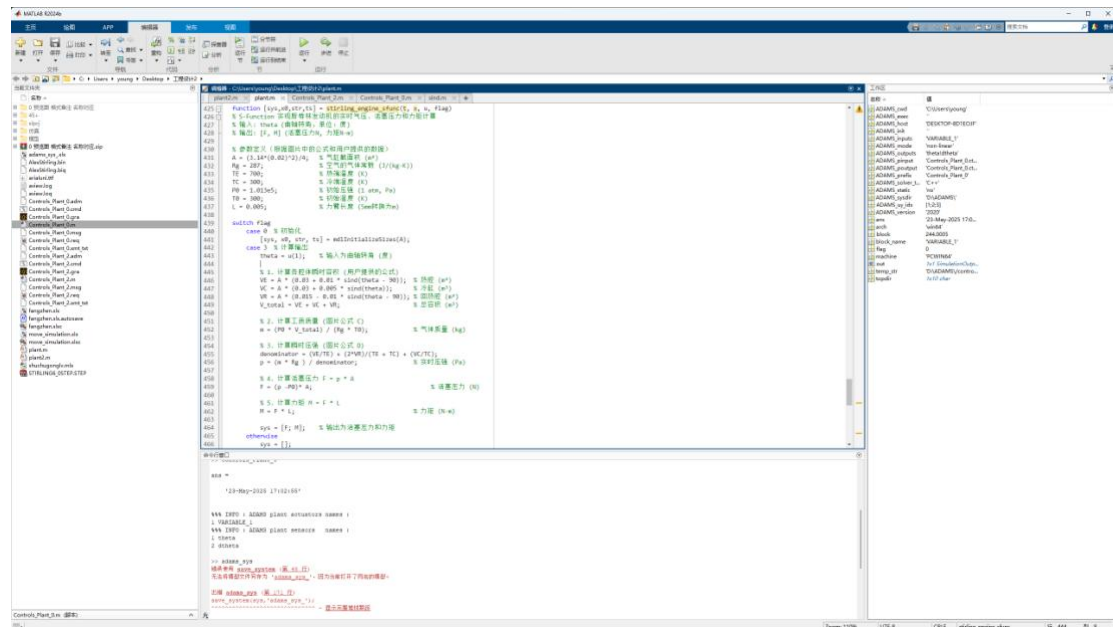
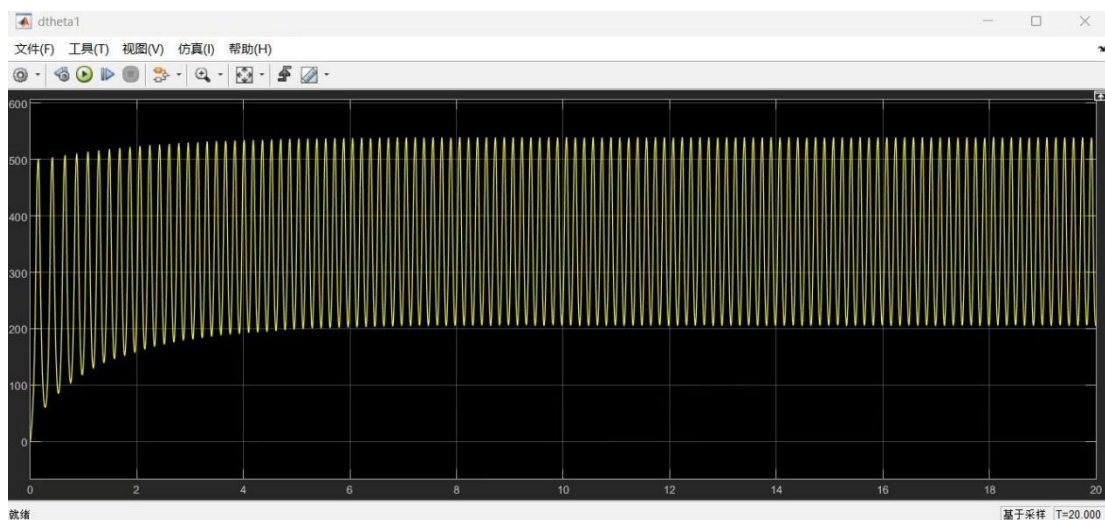


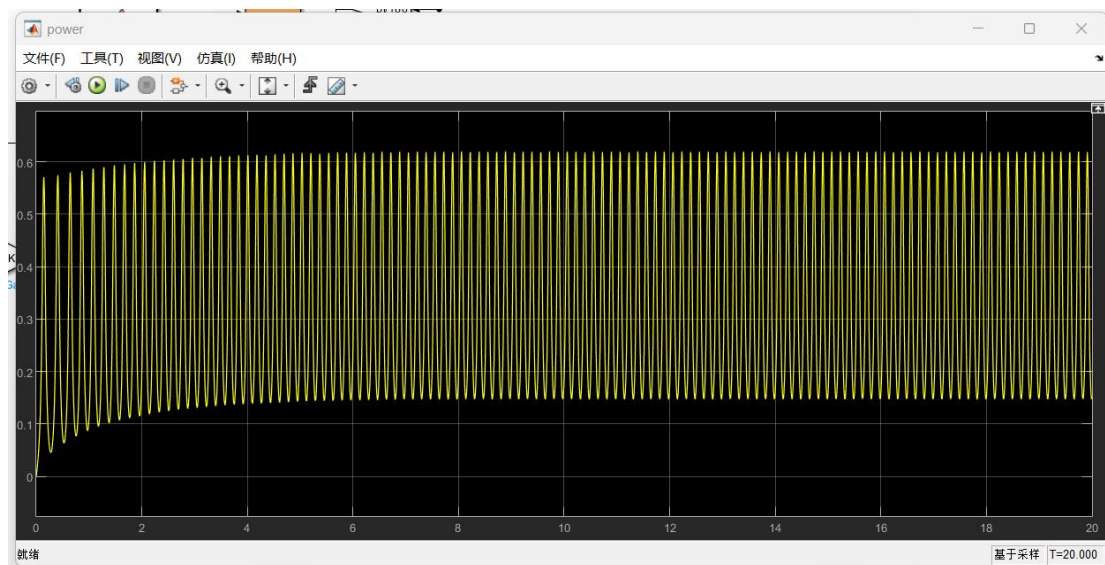
图 5.5.2.1 matlab 平台搭建

5.5.3 Simulink 仿真结果

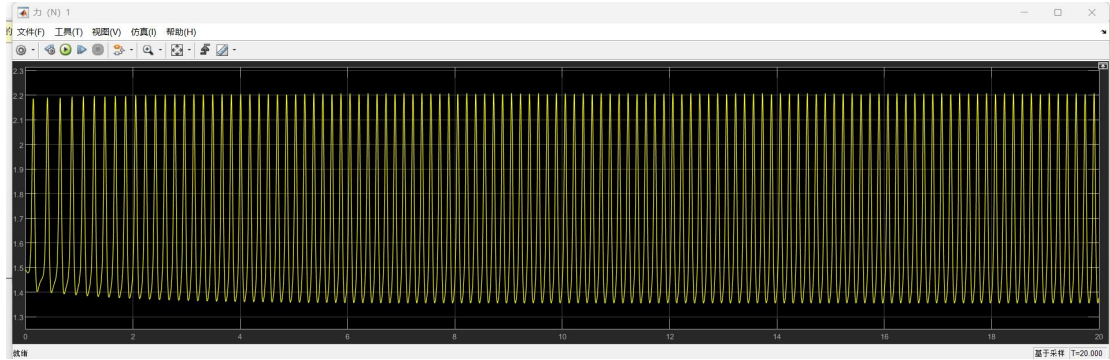
通过仿真将力给到机械系统，不断调节气缸和连杆参数，直到找到优秀的转速曲线，最后得到飞轮的理想转速，在稳定状态下，飞轮的转速大约为 360rpm，即 6 圈/s。飞轮转速-时间曲线如下图所示：



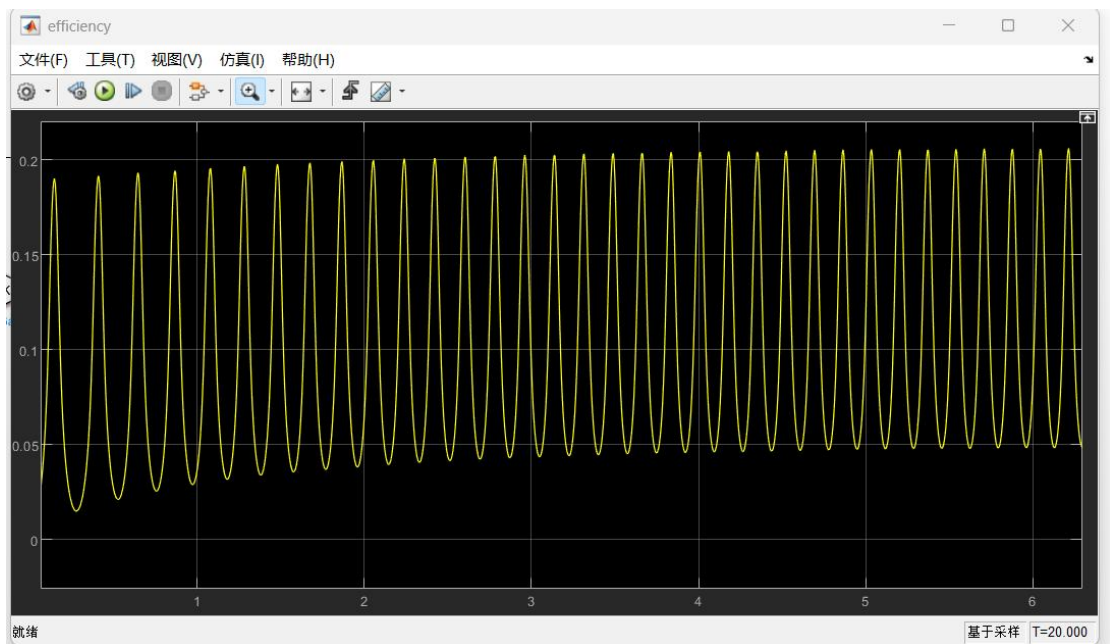
由仿真结果可知，发动机转速大约在 6r/s，结合计算所得的一个热力学循环的做功约为 0.066J，可知功率约为 $0.066 \times 6 = 0.396\text{w}$ 。发动机输出功率-时间曲线如下图所示。可以看到，平均功率约为 0.4w，满足功率不超过 0.5w 的要求，是非常优秀的数值。



同时，结合上述 matlab 中的斯密特分析，可以计算出缸内的气压变化函数，再结合活塞底面积，从而计算出活塞的受力情况。活塞受力-时间曲线如下图所示，我们可以看出均值在 1.8N 左右。



最后，根据循环功和酒精灯输入功率，我们可以估算出第二代斯特林发动机的热效率，其随时间的变化曲线如下图所示，均值约为 14%。为了提升其热效率，我们计划在后续迭代过程中减小活塞与气缸间的线性阻尼，并通过隔热棉等材料减缓热缸的传热和散热，使用水冷循环系统加快冷缸的散热，从而最大化斯特林发动机的热效率。

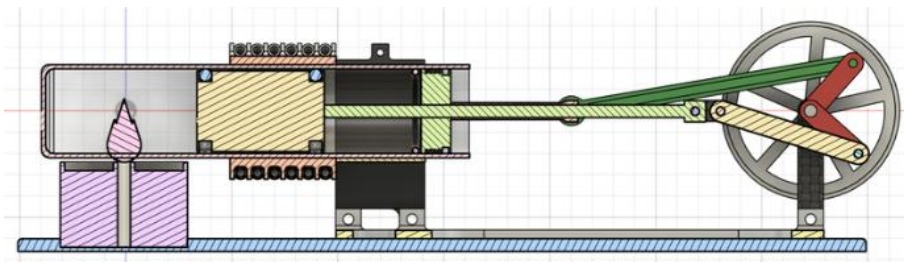


至此，我们便根据 adams 和 simuink 的联合仿真，通过对气缸的参数优化，对斯特林发动机的转速进行了调整，使其达到较好的理想功率效果。

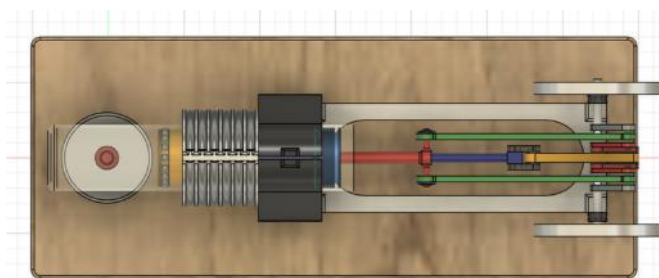
6. 迭代过程与实验记录

6.1 迭代过程:

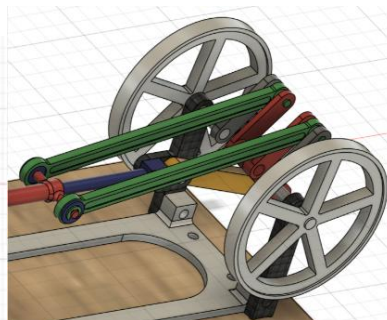
第一版-无实物



缸体截面分析



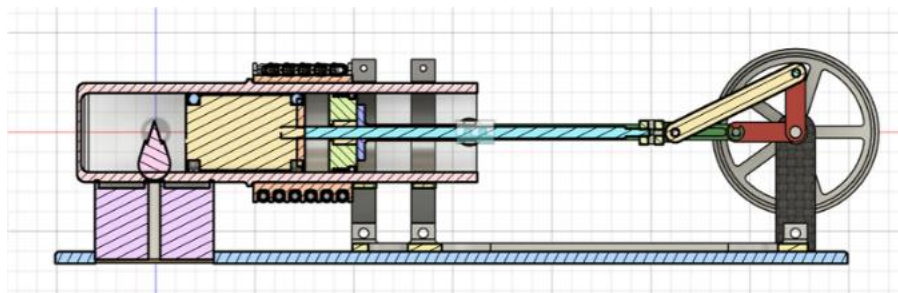
主视图



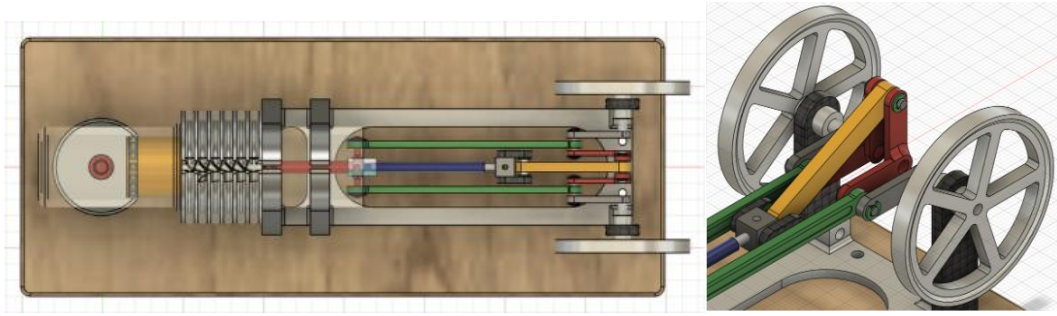
轴系

修改部分	优势	问题
——	单缸，结构简单，体积更小	缸体过长，不易加工
——	密封点少，减小泄露风险	轴系复杂，容错率低
——	预留沟槽，水冷循环	部分零件不符合 CNC 工艺

第二版-实物（斯特林一代）



缸体截面分析

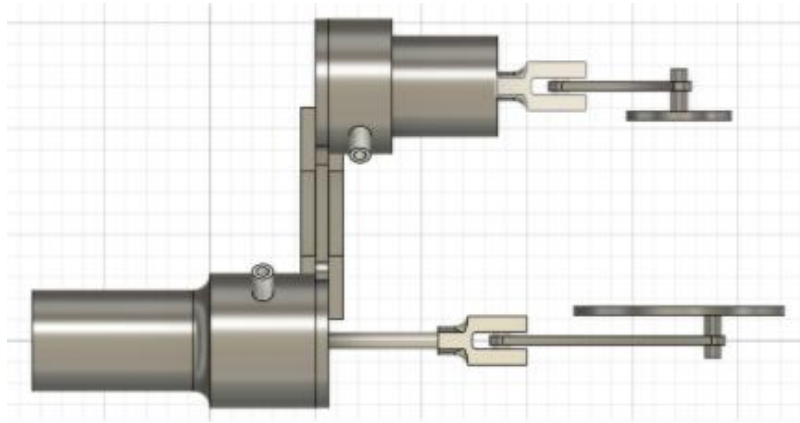


主视图

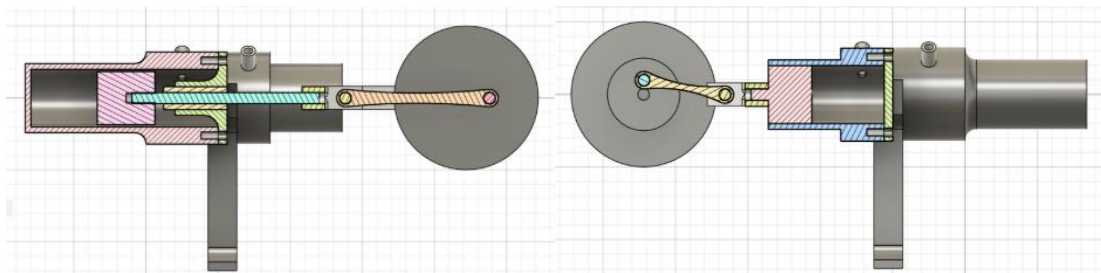
轴系

修改部分	优势	问题
缸体缩短，减小长径比，降低加工难度，从而更好控制公差	使用铜套降低摩擦	3D 打印件熔点低易融化
支架优化，改良为双端支撑	密封点少，减小泄露风险	轴系过于复杂，加工精度要求过高
轴系连接优化，通过卡簧和螺纹实现限位	预留沟槽，水冷循环	发动机整体体积小，不易装配

第三版-无实物 (γ型)



主视图



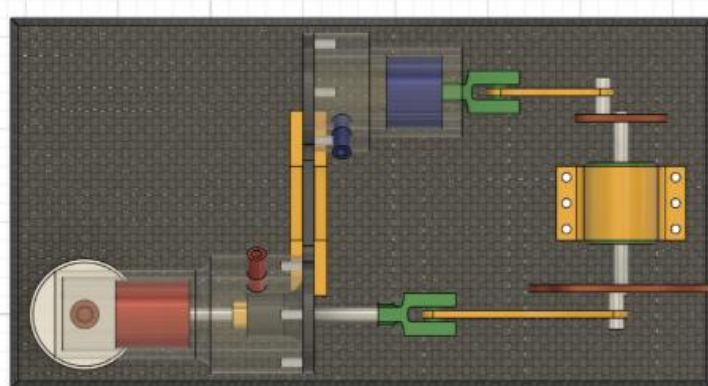
热缸截面分析

冷缸截面分析

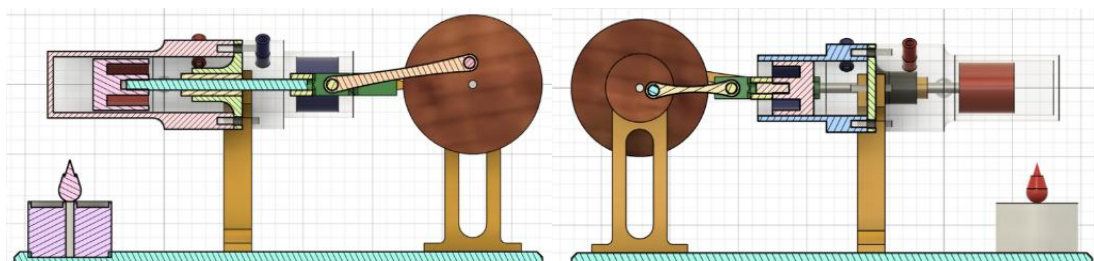
修改部分	优势	问题
------	----	----

β 型 \rightarrow γ 型	轴系简单，加工可行性更高	需要考虑更多气密性问题
轴系简化为曲柄-Y型件-螺栓	轴系丝滑	高温下热缸温度易传导到冷缸
主体部分全部使用CNC加工	保证加工精度，在高温工作条件下保持稳定	——
采用嵌石墨铜套	铜套自带公差，轴孔阻力小的同时密封性好	——

第四版-实物（斯特林二代）



主视图

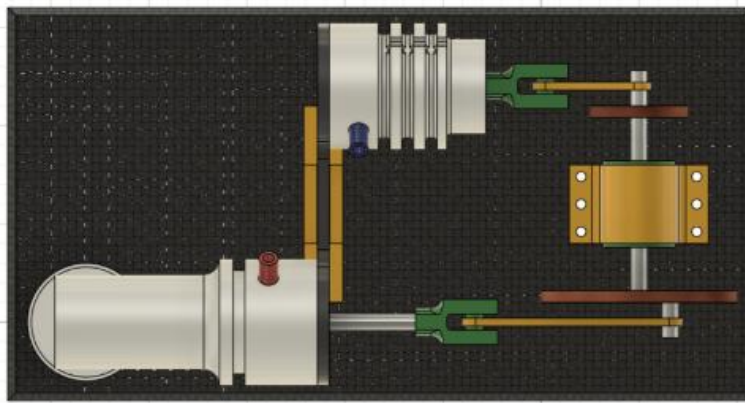


热缸截面分析

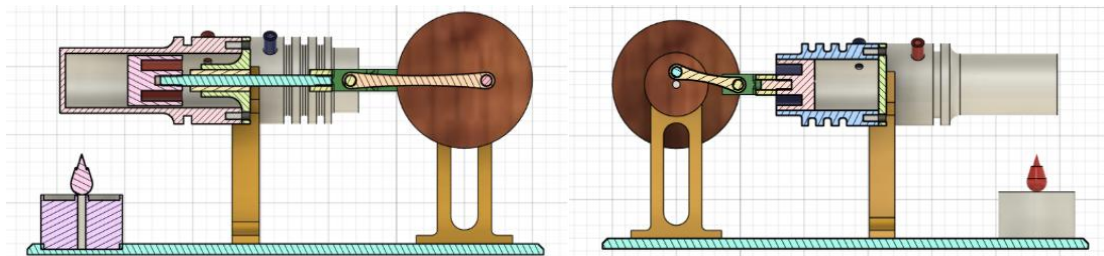
冷缸截面分析

修改部分	优势	问题
活塞适当镂空	减小高速转动条件下活塞的惯性	热缸温度传到冷缸
打印件底座 \rightarrow 碳板底座	稳定性高，防止高温下融化与长时间工作发生的蠕变	——
——	冷缸气密性良好	——
——	——	——

第五版-实物（斯特林二代）



主视图

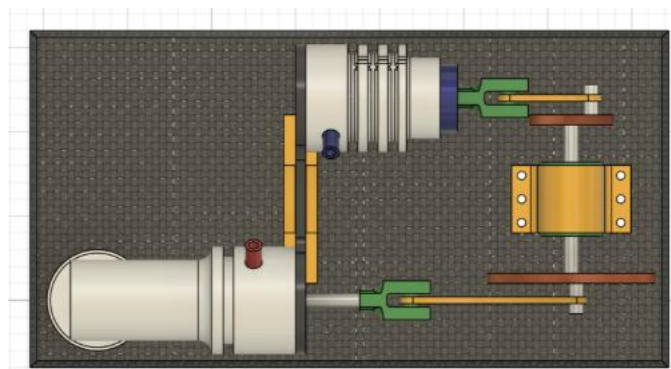


热缸截面分析

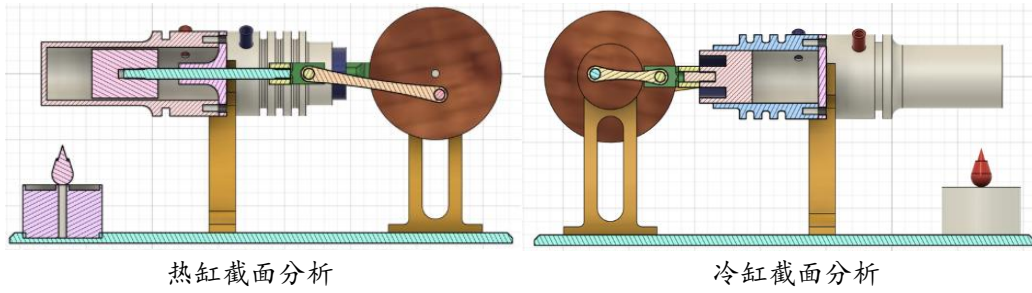
冷缸截面分析

修改部分	优势	问题
在冷缸上添加槽位，用于安装水冷循环系统	水冷循环散热效果好	参数可能存在问题
采用O型密封圈	保证气缸与连接件间的气密性	——

第六版-实物（斯特林二代）

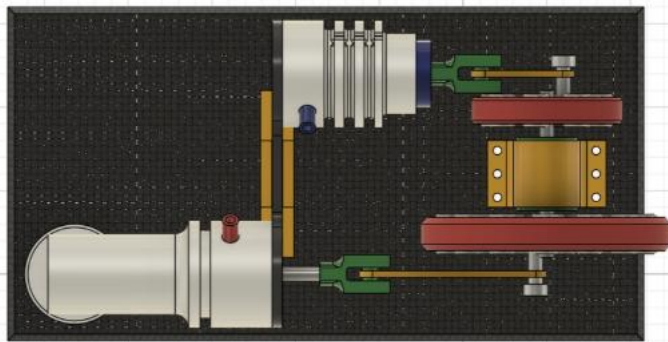


主视图

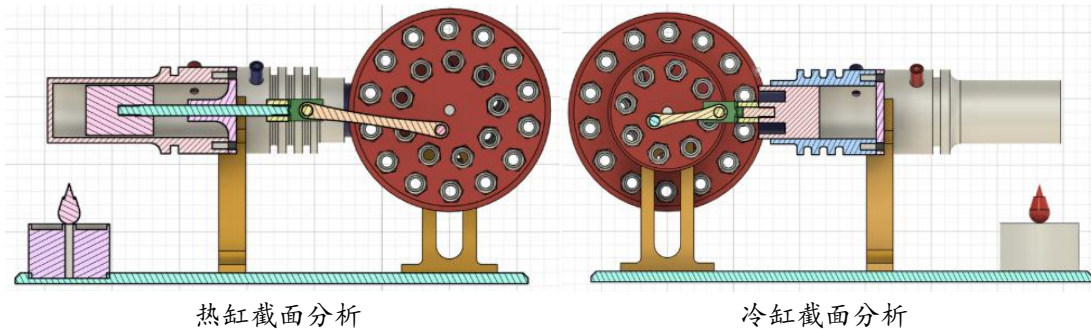


修改部分	优势	问题
配气活塞： 20mm→25mm	气密性良好	转动惯量不足
动力活塞： 15mm→23mm	重心在支撑部分范围内	——
将配气活塞部分的镂空填充	——	——

第七版-实物（斯特林三代）



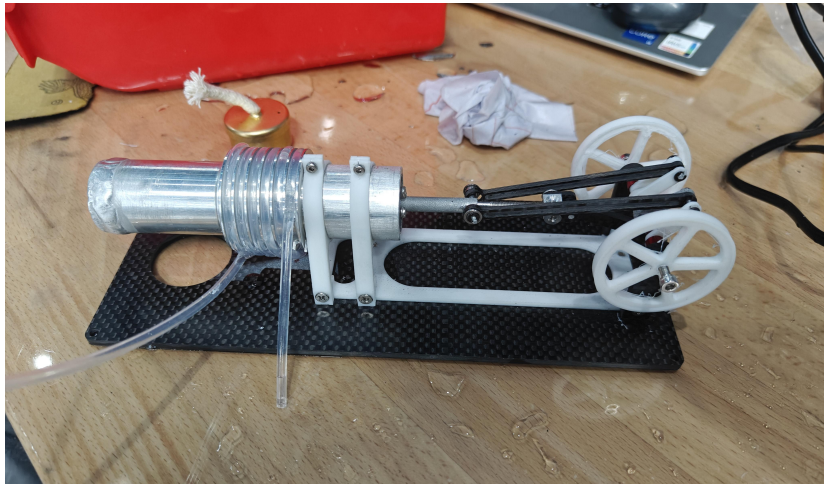
主视图



修改部分	优势	问题
飞轮改为 3D 打印件预留螺母孔位，增重飞轮	3D 打印件可以灵活改变飞轮转动惯量	死容积可能仍然较大
增加碳粉润滑活塞	气密性良好	加热时间不足

6.2 实验记录:

第一次实验报告



器材:

3d 打印支架, 气缸

实验过程:

- i. 使用 3d 打印件作为气缸支架
- ii. 点燃酒精灯灼烧气缸热端

现象:

3d 打印件发生形变, 局部还有融化的现象

反思:

由于铝良好的导热性, 3d 打印件温度升高明显

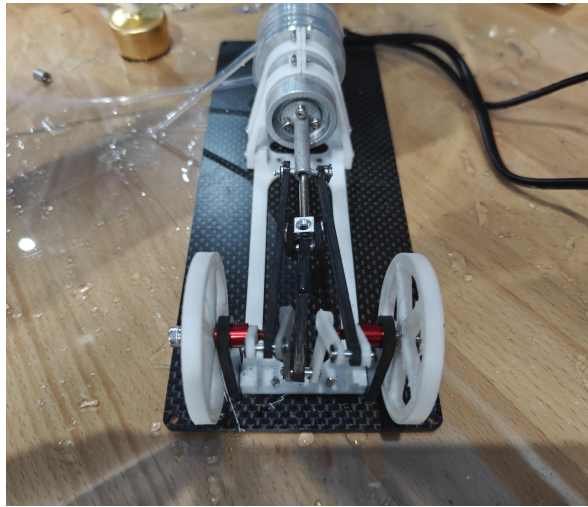
问题推测:

3d 打印件熔点低, 且易发生蠕变现象

迭代:

使用 CNC 加工件作为气缸支架

第二次实验报告



器材:

卡簧，微型法兰轴承，3d 打印件以及碳板加工的轴系组件等

实验过程:

- i. 组装轴系
- ii. 对轴系增加曲柄限位
- iii. 用手转动飞轮以检验转动惯量

现象:

轴系较为松垮，晃动明显，且出现“卡壳”现象，甚至干涉

反思:

轴系机构复杂，在一般的加工工艺条件下难以实现紧固或耦合。连杆使用 3D 打印材料，强度不够，易发生形变

问题推测:

- i. 轴系设计较为复杂，实际加工误差难以满足理想轴系联动
- ii. 碳板和 3d 打印件加工误差较大，难以紧固轴系

迭代:

- ① 简化轴系
- ② 更换为 CNC 加工件加强轴系紧固

第三次实验报告

器材:

轴系、气缸、活塞等组件

实验过程:

对轴系、气缸和活塞等组件进行组装，搭建完整版的第一代斯特林发动机，并拨动飞轮转动

现象:

阻力较大，且整体同轴度较差，更加容易“卡壳”

反思:

阻力来源主要是轴孔之间，而同轴度主要受活塞与轴系的受力平衡影响

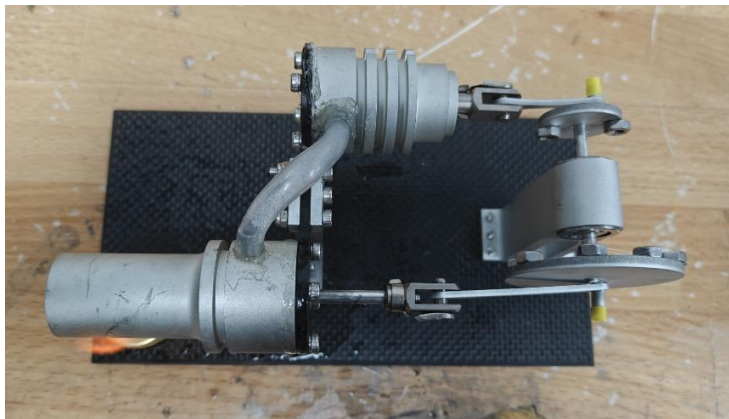
问题推测:

- i. 轴孔之间摩擦较大
- ii. 活塞较重导致重心偏移，影响同轴度

迭代:

- ① 活塞与轴系之间的轴孔使用嵌石墨铜套
- ② 飞轮中心的轴孔之间采用轴承，以减小阻力
- ③ 在不影响气体流动（但在后续的实验中，发现镂空活塞对换气其实是有一定影响的）和气密性的情况下，适当镂空活塞，防止活塞过重导致重心偏移影响同轴度

第四次实验报告



器材:

细软管，水泵，配重螺母

实验过程：

i. 使用细软管、水泵、水槽组成水循环系统，安装在回热腔与冷缸的冷却槽中

现象：仍然无法转动，且推动时的阻力几乎不变

ii. 将配重螺母安装在飞轮外侧，增大其转动惯量

iii. 向嵌石墨铜套和轴之间喷水，观察是否有小气泡冒出

现象：

冷缸和回热舱部分温度显著低于热缸部分，用手拨动飞轮时的转动圈数增加，但活塞仍未出现明显回弹现象。在加热一段时间后，连接冷热缸的塑料气管发生干裂。

反思：

在水冷循环和喷雾器的作用下，排除了温差过小导致无法转动的可能。因此经过排除，我们决定继续加强气密性。此外，飞轮的转动惯量仍然不足。

问题推测：

i. 温度差并非导致发动机无法转动的核心原因，而是气密性或飞轮转动惯量

ii. 飞轮转动惯量过小

迭代：

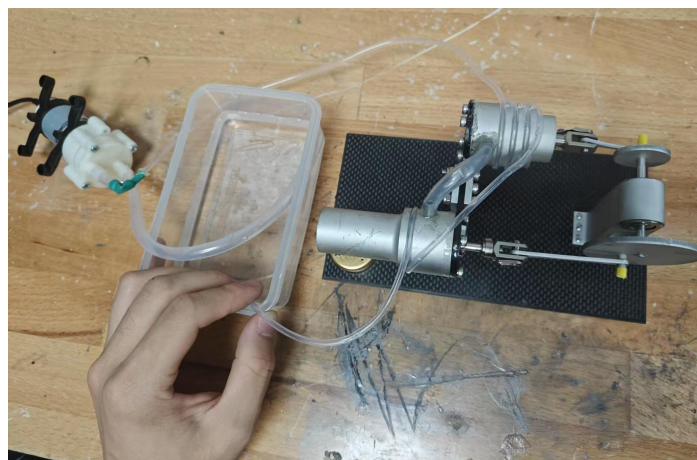
①加重飞轮，以增加其转动惯量

②增长配气活塞

③更换耐高温的气管

④使用密封圈对热缸进行密封

第五次实验报告



器材：

配重螺母、喷雾瓶，水冷循环系统

实验过程：

- i. 使用喷雾瓶给冷缸降温（以排除温度差导致问题的可能）
- ii. 将配重螺母安装在飞轮外侧，增大其转动惯量
- iii. 向嵌石墨铜套和轴之间喷水，观察是否有小气泡冒出



现象：

冷缸和回热舱部分温度显著低于热缸部分，用手拨动飞轮时的转动圈数增加，但活塞仍未出现明显回弹现象。在加热一段时间后，连接冷热缸的塑料气管发生干裂。

反思：

在水冷循环和喷雾器的作用下，排除了温差过小导致无法转动的可能。因此经过排除，我们决定继续加强气密性。此外，飞轮的转动惯量仍然不足。

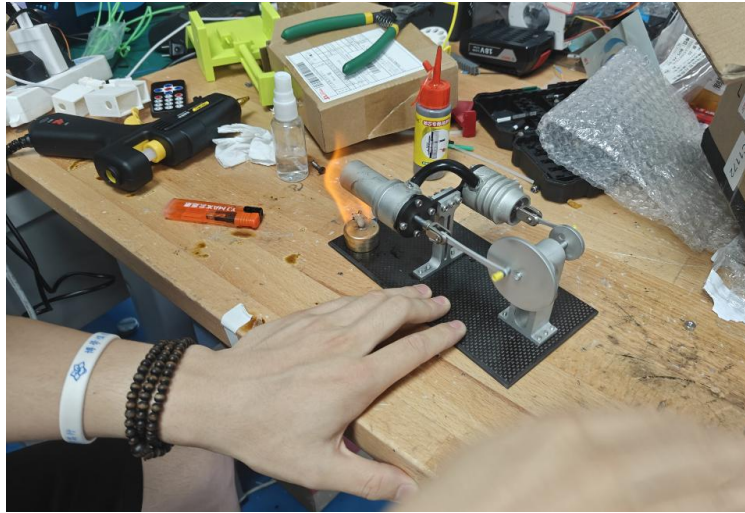
问题推测：

- i. 气密性不足
- ii. 飞轮转动惯量过小

迭代：

- ①重新设计连接件
- ②增长配气活塞
- ③更换耐高温的气管
- ④使用密封圈对热缸进行密封

第六次实验报告



器材:

第二代斯特林发动机, 改良 CNC 连接件、O 形橡胶密封圈、耐高温硅胶软管

实验过程:

- i. 使用改良 CNC 连接件代替铜套, 形成严格的公差密封以提高热缸气密性
- ii. 在连接时热缸和冷缸时加上 O 形密封圈, 再用螺丝紧固
- iii. 使用耐高温硅胶软管代替塑料软管

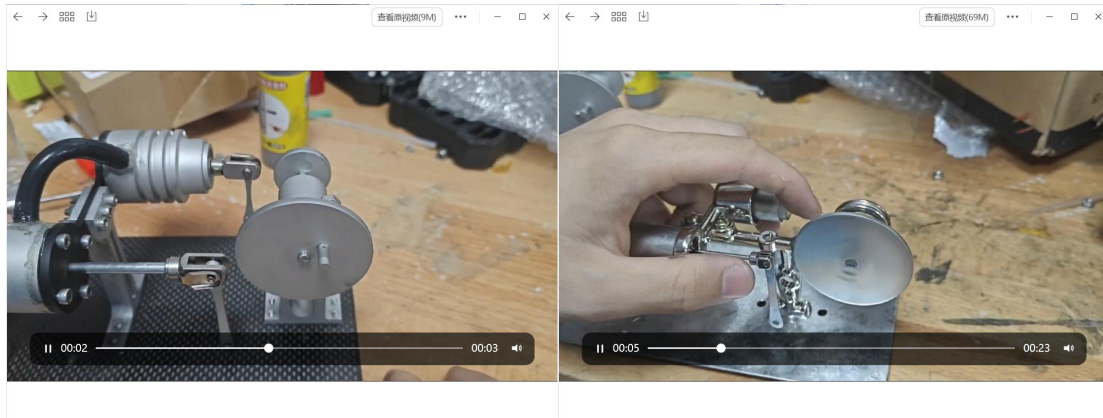
现象:

在公差密封、O 形密封圈、耐高温硅胶软管的作用下, 气缸的气密性得到了大幅提升。用手转动飞轮时能感受到明显的气体压缩感(卡顿点), 但用酒精灯加热仍然无法转动。



反思:

在气密性得到保证的情况下, 发动机仍无法转动, 但对比能转动的小组的斯特林, 我们发现在飞轮在不连接曲柄的情况下, 我们的飞轮拨一下只能转两秒左右, 而能转二十秒以上。且我们的活塞体积较小, 气缸死容积较大。



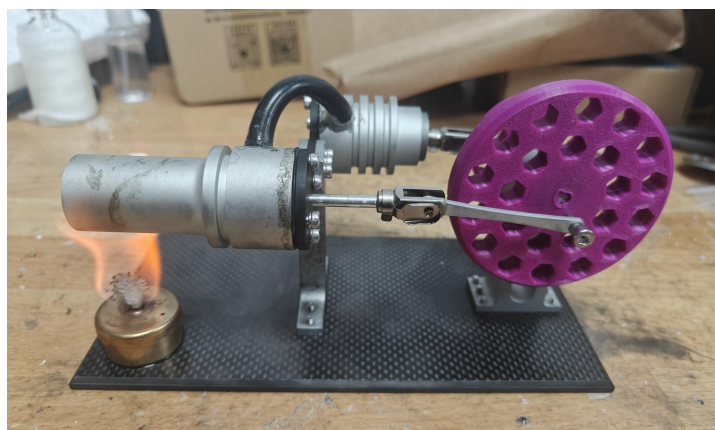
问题推测：

- i. 飞轮转动惯量过小
- ii. 死容积过大
- iii. 轴承阻力较大

迭代：

- ①减小回热腔死容积
- ②增长配气活塞
- ③增长动力活塞
- ④扩大动力活塞行程
- ⑤将法兰深沟球轴承更换为更精密的滚珠轴承
- ⑥使用更大的飞轮

第七次实验报告



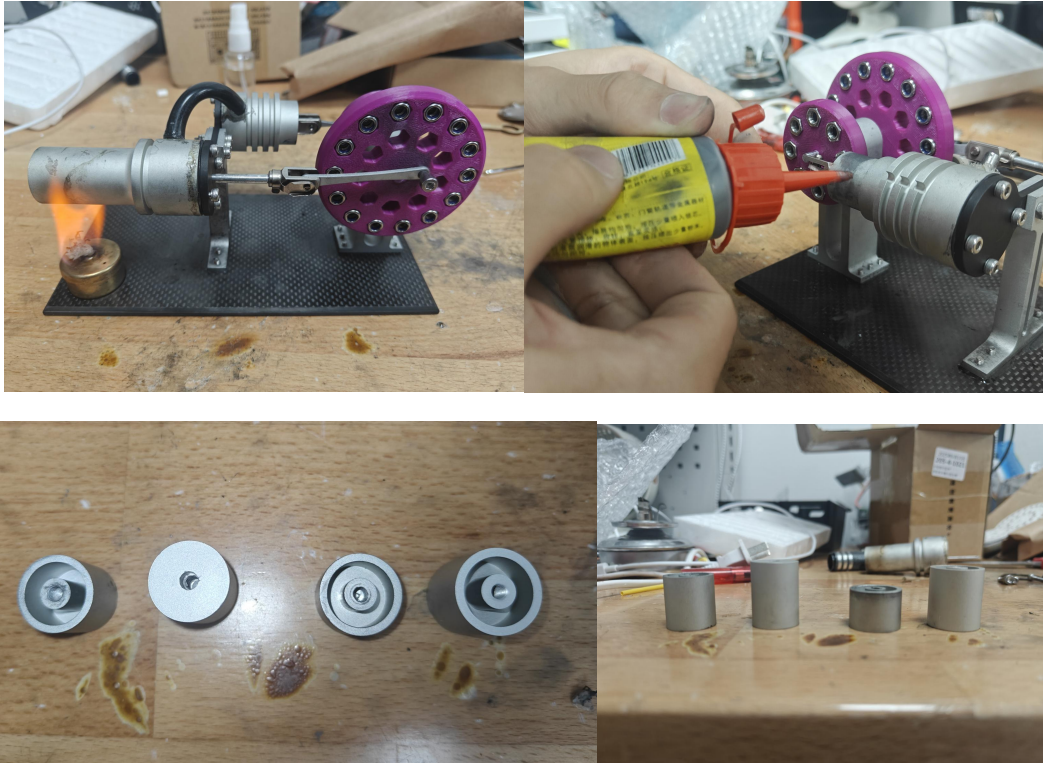
器材：3D 打印飞轮（且动力活塞行程由 10mm 改为 12mm）

实验过程：直接酒精灯加热

现象：手拨动能感受到转动惯量增大，但是斯特林依然无法转动

问题推测：转动惯量依然不够

第八次实验报告



器材：

飞轮上增加螺母，增长版的动力活塞（由 15mm 到 23mm）和配气活塞（由 20mm 到 25mm，镂空补上）

实验结果：

依然没有转动

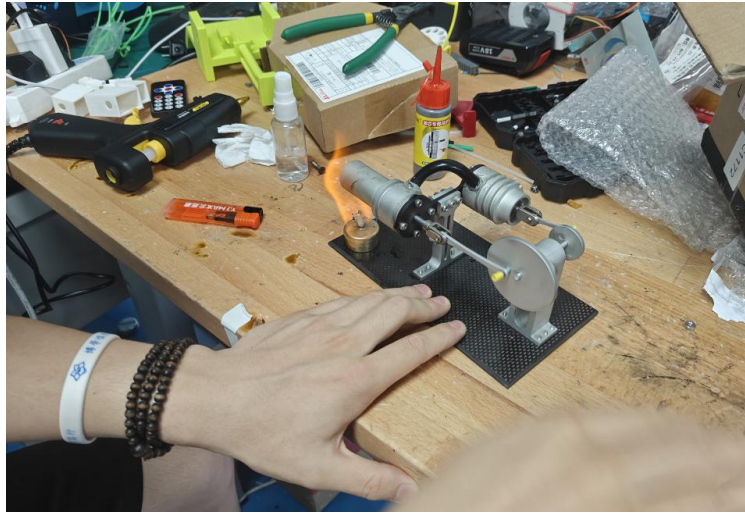
问题推测：

死容积仍然过大

迭代方向：

填充气缸底部

第九次实验报告



器材:

第三代斯特林发动机, 木片

实验过程:

- i. 将木片切削成和气缸内径一样的圆片后塞入其中
- ii. 多次尝试是否会导致干涉, 若无干涉则继续添加木片, 若干涉则停止, 最大化的减小死容积

现象:

添加木片后, 斯特林发动机运转效果未发生显著变化

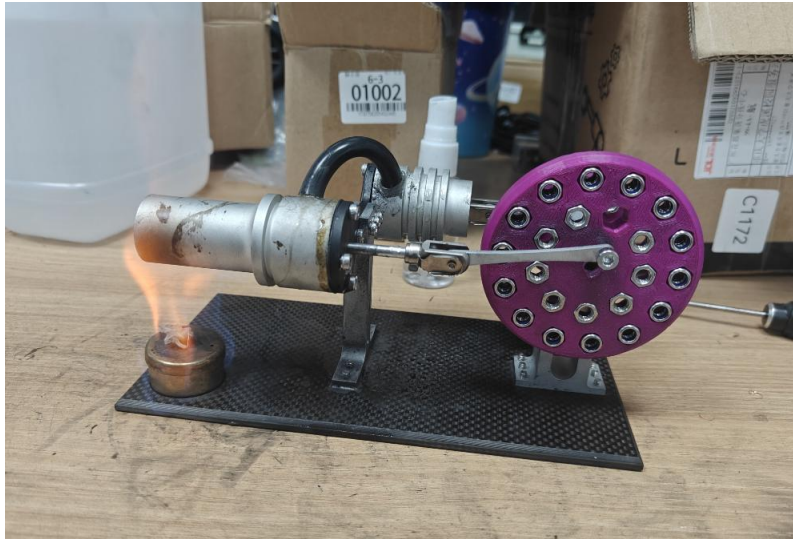
反思:

在老师的提示下, 我们发现木片并非合适的填充物, 尽管其燃点高于气缸内温度, 但由于其不断吸热, 导致气缸内的工质无法被充分加热, 因此需换用更合适的填充物。

迭代:

在老师的建议下, 使用耐高温的钢丝球作为填充物

第十次实验报告



器材:

第三代斯特林发动机，钢丝球

实验过程:

- i. 将钢丝球砸扁后塞入其中
- ii. 多次尝试是否会导致干涉，若无干涉则继续添加钢丝球，若干涉则停止，最大化的减小死容积



现象:

添加钢丝球后，斯特林发动机运转效果变好

反思:

钢丝球作为金属，具有良好的热稳定性，适合用来填充。而斯特林发动机的死容积减小后动力得到增加，因此运转效果变好。

7. 项目心得体会

从本学期的工程设计课程中，我得到许多了知识、技术、能力上的宝贵成长。

这其中包括了机械结构的设计，工程热力学的分析，发加工的方法，不同加工工艺间的区别和利弊，热循环分析的过程，如何使用 ADAMS 和 simulink 进行联合仿真，热能与机械能之间的转换规律及方法，如何从原理上分析提高热能转化效率的途径，以及通过对一个项目不断试错、迭代所带来的工程能力的锻炼等。

不得不承认的是，尽管做出了无数的尝试和努力，我们的斯特林三代最终还是没能达到理想效果。最终的效果是：在酒精灯的驱动下能够保持比在无酒精灯驱动条件下更持久的转动。

但我想，这并不代表我是失败的。

从一次次的改图、发加工、实验的迭代过程，从一节节老师所讲过的热循环计算、传动机构设计、力矩分析的课堂，从一个个典型墙体受热分析、气缸设计、adams 联合仿真的项目作业。我所付出的一切都让我的知识储备和项目能力变得更强。对于这门课，我可以这样说：我尽了全部心力，我问心无愧了。

正如老师所说的，发动机能否转起来的结果本身并不重要，重要的是在这个过程中我是否学到了什么，如果这门课程的每项任务我都有认真完成，电脑上的每个模型都是我自己设计的，发动机上的每个零件都是我发加工而非直接使用成品件，那么我所得到的收获已经远远大于能否转起来本身了。

我认为，我确实做到了。

8. 附：

改图记录：

斯特林一代























Fusion 设计





















[查看 Web 上的详细信息](#)



























上次更新时间 2025/5/2 12:58
























按博文 郝

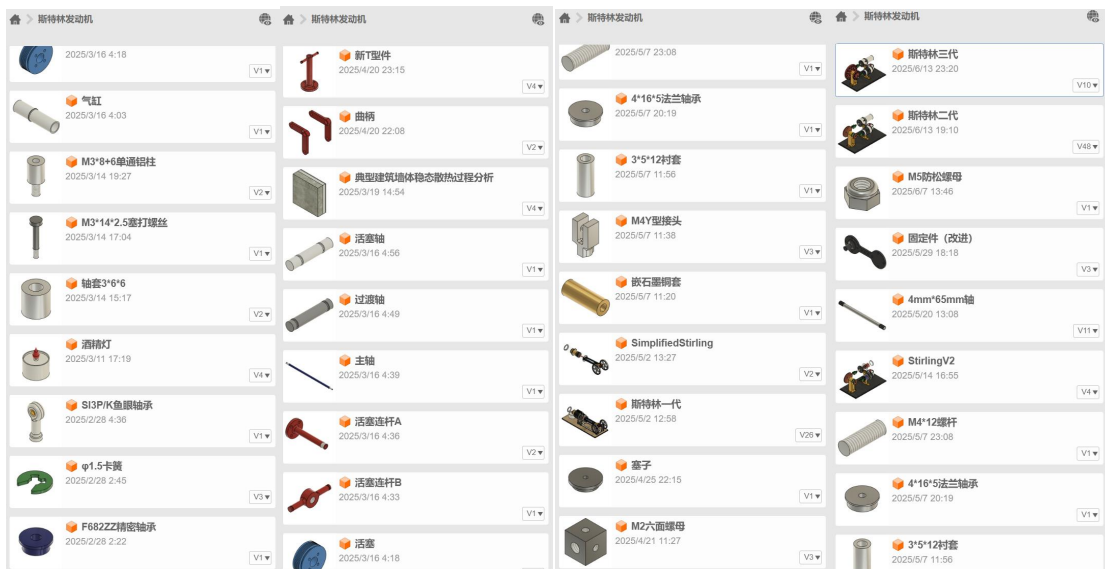
历史记录 使用 用于 工程图

26		2025/5/2 12:58	按博文 郝	:
25		2025/4/20 22:12	按博文 郝	:
24		2025/4/18 20:30	按博文 郝	:
23		2025/3/26 20:35	按博文 郝	:
22		2025/3/26 20:30	按博文 郝	:
21		2025/3/16 5:12	按博文 郝	:
20		2025/3/16 5:02	按博文 郝	:
19		2025/3/16 4:03	按博文 郝	:
18		2025/3/16 4:00	按博文 郝	:
17		2025/3/16 3:59	按博文 郝	:
16		2025/3/16 3:49	按博文 郝	:
15		2025/3/16 3:49	按博文 郝	:
14		2025/3/14 20:52	按博文 郝	:
13		2025/3/14 20:30	按博文 郝	:
12		2025/3/14 20:19	按博文 郝	:
11		2025/3/14 19:20	按博文 郝	:
10		2025/3/14 16:56	按博文 郝	:
9		2025/3/12 22:29 已从脱机模式更新	按博文 郝	:
8		2025/3/12 14:38	按博文 郝	:
7		2025/3/11 18:17	按博文 郝	:
6		2025/3/11 12:05	按博文 郝	:
5		2025/3/7 20:16	按博文 郝	:

11		2025/3/14 19:20	按博文 郝	斯特林二代 Fusion 设计 查看 Web 上的详细信息
10		2025/3/14 16:56	按博文 郝	
9		2025/3/12 22:29 已从脱机模式更新	按博文 郝	历史记录 使用 用于 工程图
8		2025/3/12 14:38	按博文 郝	48  2025/6/13 19:09 按博文 郝
7		2025/3/11 18:17	按博文 郝	47  2025/6/6 17:48 按博文 郝
6		2025/3/11 12:05	按博文 郝	46  2025/5/20 13:12 按博文 郝
5		2025/3/7 20:16	按博文 郝	45  2025/5/20 13:09 按博文 郝
4		2025/3/7 20:14	按博文 郝	44  2025/5/16 20:34 按博文 郝
3		2025/2/28 19:49	按博文 郝	43  2025/5/15 3:04 按博文 郝
2		2025/2/28 12:20	按博文 郝	42  2025/5/14 17:30 按博文 郝
1		2025/2/28 5:37 项目已创建	按博文 郝	41  2025/5/14 17:27 按博文 郝
				40  2025/5/14 17:21 按博文 郝

39		2025/5/14 16:00	按博文 郝	:	:	26		2025/5/12 17:46	按博文 郝	:	:
38		2025/5/14 15:55	按博文 郝	:	:	25		2025/5/12 17:44	按博文 郝	:	:
37		2025/5/14 15:23	按博文 郝	:	:	24		2025/5/12 17:33	按博文 郝	:	:
36		2025/5/13 22:07	按博文 郝	:	:	23		2025/5/12 17:17	按博文 郝	:	:
35		2025/5/13 22:06	按博文 郝	:	:	22		2025/5/12 17:13	按博文 郝	:	:
34		2025/5/13 22:05	按博文 郝	:	:	21		2025/5/12 17:09	按博文 郝	:	:
33		2025/5/13 17:30	按博文 郝	:	:	20		2025/5/12 15:25	按博文 郝	:	:
32		2025/5/13 17:17	按博文 郝	:	:	19		2025/5/10 12:10	按博文 郝	:	:
31		2025/5/13 17:00	按博文 郝	:	:	18		2025/5/9 17:42	按博文 郝	:	:
30		2025/5/13 16:53	按博文 郝	:	:	17		2025/5/9 3:00	按博文 郝	:	:
29		2025/5/12 17:55	按博文 郝	:	:	16		2025/5/8 17:59	按博文 郝	:	:
28		2025/5/12 17:52	按博文 郝	:	:	15		2025/5/8 17:56	按博文 郝	:	:
27		2025/5/12 17:49	按博文 郝	:	:	14		2025/5/8 17:56	按博文 郝	:	:

13		2025/5/8 1:26	按博文 郝	:	斯特林三代 Fusion 设计	查看 Web 上的详细信息
12		2025/5/7 23:20	按博文 郝	:	上次更新时间 2025/6/13 23:20 按博文 郝	
11		2025/5/7 23:15	按博文 郝	:	历史记录 使用 用于 工程图	
10		2025/5/7 22:44	按博文 郝	:	10  2025/6/13 23:20	按博文 郝
9		2025/5/7 22:32	按博文 郝	:	9  2025/6/7 15:18	按博文 郝
8		2025/5/7 22:29	按博文 郝	:	8  2025/6/7 15:05	按博文 郝
7		2025/5/7 22:14	按博文 郝	:	7  2025/6/7 15:05	按博文 郝
6		2025/5/7 22:12	按博文 郝	:	6  2025/6/7 14:42	按博文 郝
5		2025/5/7 21:53	按博文 郝	:	5  2025/6/7 14:30	按博文 郝
4		2025/5/7 20:19	按博文 郝	:	4  2025/6/7 14:24	按博文 郝
3		2025/5/7 12:44	按博文 郝	:	3  2025/6/7 1:57	按博文 郝
2		2025/5/7 0:38	按博文 郝	:	2  2025/6/6 18:23	按博文 郝
1		2025/5/7 0:37 项目已创建	按博文 郝	:	1  2025/6/6 17:46 项目已创建	按博文 郝



The screenshot displays a CAD software interface with a parts list for a Stirling engine project. The list is organized into columns, showing component names, dates, and version numbers. Key components include:

- 气缸 (Cylinder): 2025/3/16 4:03, V1
- M3*8+6单道铝柱 (M3*8+6 Single Groove Aluminum Column): 2025/3/14 19:27, V2
- M3*14*2.5塞打螺丝 (M3*14*2.5 Plug Screws): 2025/3/14 17:04, V1
- 轴套3*6*6 (Bushing 3*6*6): 2025/3/14 15:17, V2
- 酒精灯 (Alcohol Lamp): 2025/3/11 17:19, V4
- SI3PK鱼眼轴承 (SI3PK Ball Bearing): 2025/2/28 4:36, V1
- φ1.5卡簧 (φ1.5 Spring): 2025/2/28 2:45, V3
- F88222精密轴承 (F88222 Precision Bearing): 2025/2/28 2:22, V1
- 新T型件 (New T-shaped Part): 2025/4/20 23:15, V1
- 曲柄 (Crank): 2025/4/20 22:08, V2
- 典型建筑墙体稳态散热过程分析 (Typical Building Wall Steady-state Heat Dissipation Process Analysis): 2025/3/19 14:54, V1
- 活塞轴 (Piston Shaft): 2025/3/16 4:56, V1
- 过渡轴 (Transition Shaft): 2025/3/16 4:49, V1
- 主轴 (Main Shaft): 2025/3/16 4:39, V1
- 活塞连杆A (Piston Connecting Rod A): 2025/3/16 4:36, V2
- 活塞连杆B (Piston Connecting Rod B): 2025/3/16 4:33, V1
- 活塞 (Piston): 2025/3/16 4:18, V1
- 4*16*5法兰轴承 (4*16*5 Flange Bearing): 2025/5/7 23:08, V1
- 3*5*12衬套 (3*5*12 Sleeve): 2025/5/7 11:56, V1
- M4Y型接头 (M4Y Type Connector): 2025/5/7 11:38, V3
- 嵌石墨铜套 (Graphite-lined Copper Sleeve): 2025/5/7 11:20, V1
- SimplifiedStirling: 2025/5/2 13:27, V2
- 斯特林一代 (Stirling Engine Generation 1): 2025/5/2 12:58, V28
- 盖子 (Cover): 2025/4/25 22:15, V1
- M2六面螺母 (M2 Hex Nut): 2025/4/21 11:27, V3
- 斯特林三代 (Stirling Engine Generation 3): 2025/6/13 23:20, V10
- 斯特林二代 (Stirling Engine Generation 2): 2025/6/13 19:10, V48
- M5防松螺母 (M5 Locking Nut): 2025/6/7 13:46, V1
- 固定件 (改进) (Fixed Part (Improved)): 2025/5/29 18:18, V3
- 4mm*65mm轴 (4mm*65mm Shaft): 2025/5/20 13:06, V11
- StirlingV2: 2025/5/14 16:55, V4
- M4*12螺杆 (M4*12 Screw): 2025/5/7 23:08, V1
- 4*16*5法兰轴承 (4*16*5 Flange Bearing): 2025/5/7 20:19, V1
- 3*5*12衬套 (3*5*12 Sleeve): 2025/5/7 11:56, V1

采购记录:

https://member.jk.com/center/cnc/#/mainPage/orderListCNC

鑫立创产业服务站群

查看 7211545A 企业认证 注册账号 切换

专属客服

全部订单 回收站

所有订单 | 待审核 | 待付款 | 生产中 | 已发货 | 已取消 | 有问题待处理

文件名称/订单编号 下单日期 2025-03-22 2025-06-22 查询

订单信息	价格	订单状态	文件单据下载	订单操作
动力活塞 铝合金-6061 GB/T 1804-2000 m 级 Ra1.6 喷砂+普通阳极氧化-本色-哑光 有螺紋	¥484.63 运费: ¥10.99 <CNC15元运费抵扣券>	"已发货" 订单详情 进度跟踪	下载合同 下载送货单/收据	再次购买 评价订单 删除订单
配气活塞 铝合金-6061 GB/T 1804-2000 m 级 Ra3.2 喷砂+普通阳极氧化-本色-哑光 有螺紋	¥263.27 运费: ¥5.65 <CNC30元无门槛券>	"已发货" 订单详情 进度跟踪	下载合同 下载送货单/收据	再次购买 评价订单 删除订单
固定件 (改) 铝合金-6061 GB/T 1804-2000 m 级 Ra1.6 喷砂+普通阳极氧化-本色-哑光 无螺紋 查看模拟加工结果	¥1559 运费: ¥5.65 已退款: ¥212.72 <CNC满100减50元券>	"已发货" 订单详情 进度跟踪 在线客服沟通	下载合同 下载送货单/收据	再次购买 评价订单 删除订单

https://member.jk.com/center/cnc/#/mainPage/orderListCNC

鑫立创产业服务站群

查看 7211545A 企业认证 注册账号 切换

专属客服

全部订单 回收站

所有订单 | 待审核 | 待付款 | 生产中 | 已发货 | 已取消 | 有问题待处理

文件名称/订单编号 下单日期 2025-03-22 2025-06-22 查询









动力活塞 铝合金-6061 ±0.05mm Ra1.6 喷砂+普通阳极氧化-本色-哑光 有螺紋				
大飞轮轴 铝合金-6061 GB/T 1804-2000 m 级 Ra3.2 喷砂+普通阳极氧化-本色-哑光 无螺紋				
查看更多				
冰缸飞轮轴 铝合金-6061 GB/T 1804-2000 m 级 Ra3.2 喷砂+普通阳极氧化-本色-哑光 无螺紋	¥1623.14 运费: ¥5.65	"已取消" 订单详情		再次购买 删除订单
动力活塞 铝合金-6061 ±0.05mm Ra3.2 喷砂+普通阳极氧化-本色-哑光 有螺紋				
大飞轮轴 铝合金-6061 GB/T 1804-2000 m 级 Ra3.2 喷砂+普通阳极氧化-本色-哑光 无螺紋				
4mm_65mm轴 铝合金-6061 ±0.05mm Ra3.2 喷砂+普通阳极氧化-本色-哑光 无螺紋				
大飞轮 铝合金-6061 ±0.05mm Ra3.2 喷砂+普通阳极氧化-本色-哑光 无螺紋				

嘉立创产业服务社群

https://member.jc.com/center/cnc/#/mainPage/orderListCNC

点此搜索

下载下单助手 立即商城 第三方服务 平台消息 技术问答







 <p>阳极+普通阳极氧化-本色-哑光 无螺纹</p>									
 <p>铝缸 铝合金-6061 ±0.05mm Ra3.2 阳极+普通阳极氧化-本色-哑光 无螺纹</p>									
 <p>飞龙支架 铝合金-6061 ±0.05mm Ra3.2 阳极+普通阳极氧化-本色-哑光 有螺纹</p>									
 <p>小飞龙 铝合金-6061 GB/T 1804-2000 m 级 Ra3.2 阳极+普通阳极氧化-本色-哑光 无螺纹</p>									
 <p>固定件 铝合金-6061 GB/T 1804-2000 m 级 Ra3.2 阳极+普通阳极氧化-本色-哑光 无螺纹</p>									
 <p>铝缸 铝合金-6061 GB/T 1804-2000 m 级 Ra3.2 阳极+普通阳极氧化-本色-哑光 有螺纹</p>									
 <p>铝接轴 铝合金-6061 GB/T 1804-2000 m 级 Ra3.2 阳极+普通阳极氧化-本色-哑光 无螺纹</p>									
 <p>气缸支架 铝合金-6061 GB/T 1804-2000 m</p>									

嘉立创产业服务社群

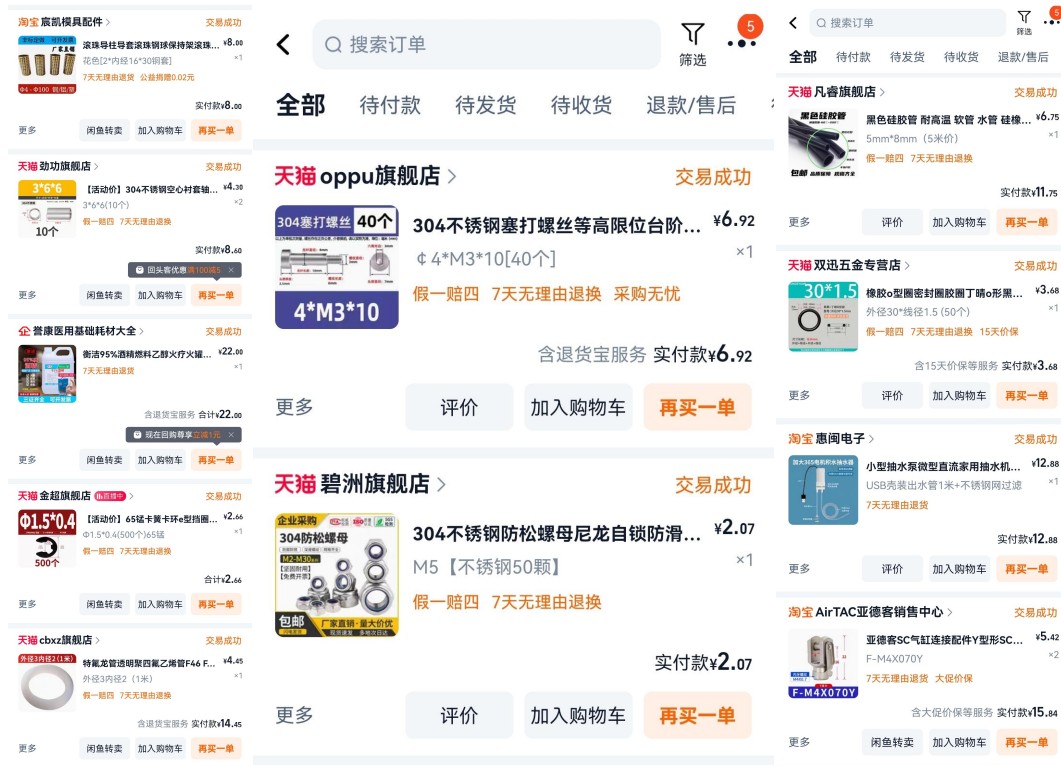
https://member.jc.com/center/cnc/#/mainPage/orderListCNC

点此搜索

下载下单助手 立即商城 第三方服务 平台消息 技术问答

<p>无螺纹</p>									
 <p>铝缸 铝合金-6061 GB/T 1804-2000 m 级 Ra3.2 阳极+普通阳极氧化-本色-哑光 有螺纹</p>									
 <p>铝接轴 铝合金-6061 GB/T 1804-2000 m 级 Ra3.2 阳极+普通阳极氧化-本色-哑光 无螺纹</p>									
 <p>气缸支架 铝合金-6061 GB/T 1804-2000 m 级 Ra3.2 阳极+普通阳极氧化-本色-哑光 有螺纹</p>									
 <p>小飞龙轴 铝合金-6061 GB/T 1804-2000 m 级 Ra3.2 阳极+普通阳极氧化-本色-哑光 无螺纹</p>									
 <p>铝缸飞龙杆 铝合金-6061 GB/T 1804-2000 m 级 Ra3.2 阳极+普通阳极氧化-本色-哑光 无螺纹</p>									
 <p>配气活塞 铝合金-6061 GB/T 1804-2000 m 级 Ra3.2 阳极+普通阳极氧化-本色-哑光 有螺纹</p>									

收起



代码:

Controls_Plant_0.m

```

% Adams / MATLAB Interface - Release 2020.0.0
global ADAMS_sysdir; % used by setup_rtw_for_adams.m
global ADAMS_host; % used by start_adams_daemon.m
machine=computer;
datestr(now)
if strcmp(machine, 'GLNXA64')
arch = 'linux64';
elseif strcmp(machine, 'PCWIN64')
arch = 'win64';
else
disp( '%% Error : Platform unknown or unsupported by Adams Controls.' );
arch = 'unknown_or_unsupported';
return
end
[flag, topdir]=system('adams2020 -top');
if flag == 0
temp_str=strcat(topdir, '/controls/', arch);
addpath(temp_str)

```

```

temp_str=strcat(topdir, '/controls/', 'matlab');
addpath(temp_str)
temp_str=strcat(topdir, '/controls/', 'utils');
addpath(temp_str)
ADAMS_sysdir = strcat(topdir, '');
else
addpath( 'D:\ADAMS\controls/win64' ) ;
addpath( 'D:\ADAMS\controls/matlab' ) ;
addpath( 'D:\ADAMS\controls/utils' ) ;
ADAMS_sysdir = 'D:\ADAMS\';
end
ADAMS_exec = '' ;
ADAMS_host = 'DESKTOP-8D1E0JF' ;
ADAMS_cwd = 'C:\Users\young' ;
ADAMS_prefix = 'Controls_Plant_0' ;
ADAMS_static = 'no' ;
ADAMS_solver_type = 'C++' ;
ADAMS_version = '2020' ;
if exist([ADAMS_prefix, '.adm']) == 0
disp( ' ' ) ;
disp( '%% Warning : missing Adams plant model file(.adm) for Co-simulation or Function Evaluation.' ) ;
disp( '%% If necessary, please re-export model files or copy the exported plant model files into the' ) ;
disp( '%% working directory. You may disregard this warning if the Co-simulation/Function Evaluation' ) ;
disp( '%% is TCP/IP-based (running Adams on another machine), or if setting up MATLAB/Real-Time Workshop' ) ;
disp( '%% for generation of an External System Library.' ) ;
disp( ' ' ) ;
end
ADAMS_init = '' ;
ADAMS_inputs = 'VARIABLE_1' ;
ADAMS_outputs = 'thetaIdtheta' ;
ADAMS_pininput = 'Controls_Plant_0.ctrl_pininput' ;
ADAMS_poutput = 'Controls_Plant_0.ctrl_poutput' ;
ADAMS_uy_ids = [
1
2
3
] ;
ADAMS_mode = 'non-linear' ;
tmp_in = decode( ADAMS_inputs ) ;
tmp_out = decode( ADAMS_outputs ) ;
disp( ' ' ) ;
disp( '%% INFO : ADAMS plant actuators names :' ) ;
disp( [int2str([1:size(tmp_in,1)]), blanks(size(tmp_in,1))', tmp_in] ) ;
disp( '%% INFO : ADAMS plant sensors names :' ) ;

```

```

disp( [int2str([1:size(tmp_out,1)]'), blanks(size(tmp_out,1))', tmp_out] );
disp(' ');
clear tmp_in tmp_out ;
% Adams / MATLAB Interface - Release 2020.0.0

```

Plant.m

```

function [sys,x0,str,ts] = stirling_engine_sfunc(t, x, u, flag)
% S-Function 实现斯特林发动机的实时气压、活塞压力和力矩计算
% 输入: theta (曲轴转角, 单位: 度)
% 输出: [F, M] (活塞压力 N, 力矩 N·m)

% 参数定义 (根据图片中的公式和用户提供的数据)
A = (3.14*(0.02)^2)/4; % 气缸截面积 (m²)
Rg = 287; % 空气的气体常数 (J/(kg·K))
TE = 500; % 热端温度 (K)
TC = 300; % 冷端温度 (K)
P0 = 1.013e5; % 初始压强 (1 atm, Pa)
T0 = 300; % 初始温度 (K)
L = 0.005; % 力臂长度 (5mm 转换为 m)

switch flag
case 0 % 初始化
[sys, x0, str, ts] = mdlInitializeSizes(A);
case 3 % 计算输出
theta = u(1); % 输入为曲轴转角 (度)
% 1. 计算各腔体瞬时容积 (用户提供的公式)
VE = A * (0.03 + 0.01 * sind(theta - 90)); % 热腔 (m³)
VC = A * (0.03 + 0.005 * sind(theta)); % 冷缸 (m³)
VR = A * (0.015 - 0.01 * sind(theta - 90)); % 回热腔 (m³)
V_total = VE + VC + VR; % 总容积 (m³)
% 2. 计算工质质量 (图片公式 C)
m = (P0 * V_total) / (Rg * T0); % 气体质量 (kg)
% 3. 计算瞬时压强 (图片公式 D)
denominator = (VE/TE) + (2*VR)/(TE + TC) + (VC/TC);
p = (m * Rg) / denominator; % 实时压强 (Pa)
% 4. 计算活塞压力 F = p * A
F = (p - P0) * A * 0.2; % 活塞压力 (N)
% 5. 计算力矩 M = F * L
M = F * L; % 力矩 (N·m)
% sys = [2*sind(theta); M]; % 输出为活塞压力和力矩
sys = [F; M];
otherwise

```

```

sys = [];
end

% --- 初始化函数 ---
function [sys, x0, str, ts] = mdlInitializeSizes(A)
sizes = simsizes;
sizes.NumContStates = 0; % 无连续状态
sizes.NumDiscStates = 0; % 无离散状态
sizes.NumOutputs = 2; % 输出: [F, M] (活塞压力, 力矩)
sizes.NumInputs = 1; % 输入: theta (曲轴转角)
sizes.DirFeedthrough = 1; % 输入直接影响输出
sizes.NumSampleTimes = 1; % 单采样时间
sys = simsizes(sizes);
x0 = []; % 无初始状态
str = ''; % 修复: 显式赋值为空字符串
ts = [0 0]; % 继承仿真时间步长

```

ADAMS_CoSimulation.mlx (修正前)

```

%% γ 型斯特林发动机热力学仿真
clc; clear; close all;

% ===== 发动机几何参数 =====
% 配气活塞参数
displacer.dia = 18.5e-3; % 直径[m]
displacer.stroke = 16e-3; % 行程[m]
displacer.crank = displacer.stroke/2; % 曲柄半径[m]
displacer.area = pi*(displacer.dia/2)^2; % 面积[m²]

% 动力活塞参数
power.dia = 20e-3; % 直径[m]
power.stroke = 10e-3; % 行程[m]
power.crank = power.stroke/2;
power.area = pi*(power.dia/2)^2;

% 死容积配置[m³]
V.hot_dead = 700e-9 * pi; % 热端
V.cold_dead = 1500e-9 * pi; % 冷端
V.regenerator = 1896e-9 * pi;

% 扫气容积计算

```

```

V.swept_displacer = displacer.area * displacer.stroke;
V.swept_power = power.area * power.stroke;

% ===== 热力学参数 =====
T.h = 600; % 热端温度[K]
T.c = 300; % 冷端温度[K]
P.initial = 101325; % 初始压力[Pa]
R = 287; % 空气气体常数[J/(kg * K)]

% 相位差配置
phase_shift = deg2rad(80); % 最佳相位差(80度)

% ===== 主计算循环 =====
theta = linspace(0, 4*pi, 1000); % 两圈周期采样

% 容积变化计算 (考虑相位差)
V.hot = V.hot_dead + 0.5*V.swept_displacer*(1 - cos(theta));
V.cold = V.cold_dead + 0.5*V.swept_power*(1 + sin(theta + phase_shift));
V.total = V.hot + V.cold + V.regenerator;

% 动态温度场建模
T.hot = T.h - (T.h - T.c)*0.5*(1 - cos(theta)); % 热腔温度变化
T.cold = T.c + (T.h - T.c)*0.5*(1 + sin(theta + phase_shift)); % 冷腔温度变化

% 质量守恒计算
m_air = P.initial*mean(V.total)/(R*mean([T.hot T.cold])); % 工质质量[kg]

% 压力场计算 (修正公式)
term_hot = V.hot ./ T.hot;
term_cold = V.cold ./ T.cold;
term_reg = V.regenerator / T.c; % 回热器温度假设
P = m_air * R ./ (term_hot + term_cold + term_reg);

% 力学参数计算
F_displacer = P .* displacer.area;
F_power = P .* power.area;

% 转矩合成
tau_displacer = F_displacer .* displacer.crank .* sin(theta);
tau_power = F_power .* power.crank .* cos(theta + phase_shift);

```

```

tau_total = tau_displacer + tau_power;

% ===== 结果可视化 =====
figure('Position', [100 100 900 1200])

% 压力-角度曲线
subplot(4,1,1)
plot(theta, P/1e3, 'r', 'LineWidth', 1.5)
xlabel('曲柄角度 [rad]'), ylabel('压力 [kPa]')
title('气缸压力变化'), grid on
xlim([0 4*pi])

% 容积-角度曲线
subplot(4,1,2)
plot(theta, V.total*1e6, 'b', 'LineWidth', 1.5)
xlabel('曲柄角度 [rad]'), ylabel('总容积 [cm³]')
title('容积变化'), grid on
xlim([0 4*pi])

% 转矩-角度曲线
subplot(4,1,3)
plot(theta, tau_total, 'g', 'LineWidth', 1.5)
xlabel('曲柄角度 [rad]'), ylabel('转矩 [N·m]')
title('合成转矩输出'), grid on
xlim([0 4*pi])

% PV 图
subplot(4,1,4)
plot(V.total*1e6, P/1e3, 'LineWidth', 1.5)
xlabel('容积 [cm³]'), ylabel('压力 [kPa]')
title('PV 图'), grid on
hold on
scatter(V.total(1)*1e6, P(1)/1e3, 100, 'r', 'filled') % 标记循环起点
text(V.total(1)*1e6+0.2, P(1)/1e3, '起点→', 'FontSize', 10)
hold off

% 计算循环功
W = trapz(V.total, P);

% 热效率估算
[~, idx] = max(T.hot); % 找到高温阶段起始点

```

```

Q_phase = theta >= theta(idx) & theta <= theta(idx) + pi; % 选取半周期膨胀过程

Q_in = trapz(theta(Q_phase), P(Q_phase).*gradient(V.total(Q_phase), theta(Q_phase)));
eta = W / Q_in;

% ===== 性能分析 =====
fprintf('===== 性能指标 =====\n')
fprintf('循环功: %.4f J/周期\n', W)
fprintf('压力范围: %.1f - %.1f kPa\n', min(P)/1e3, max(P)/1e3)
fprintf('平均转矩: %.4f N·m\n', mean(tau_total))
fprintf('PV图面积: %.4f J\n', W)
fprintf('理论热效率: %.1f%%\n', eta*100)

```