

目录

摘 要	1
引 言	3
1 自走式除草机器人介绍	4
1.1 课题研究的目的及意义	4
1.1.1 课题研究的目的	4
1.1.2 课题研究的意义	4
1.2 自走式除草机器人国内外的现状	4
1.2.1 国内的研究现状	4
1.2.2 国外研究现状	5
1.3 课题设计思路	5
1.4 课题设计结构	5
2 自走式除草机器人的总体设计方案	6
2.1 自走式除草机器人的组成及各部分关系概述	6
2.2 自走式除草机器人驱动方案的确认	6
2.2.1 电动机驱动	6
2.2.2 液压驱动	7
2.2.3 气压驱动	7
2.2.4 驱动方案的确认	8
2.3 总体方案拟定	8
3 自走式除草机器人整体结构的设计	10

3.1 机器人行走驱动方案的选择.....	10
3.2 驱动电机的选择.....	10
3.3 机器人底盘的设计.....	13
3.4 机器人车轮的设计.....	14
3.5 除草刀片的设计.....	15
3.6 辅助轮阶梯轴的有限元分析.....	16
3.6.1 阶梯轴零件的三维建模.....	16
3.6.2 确定材料.....	16
3.6.3 添加夹具.....	17
3.6.4 施加载荷.....	18
3.6.5 生成网格.....	18
3.6.6 运算求解.....	19
3.6.7 分析结果输出.....	20
3.7 除草机械臂传动装置计算.....	22
3.7.1 除草机械臂机构传动轴的校核计算.....	22
3.7.2 除草机械臂机构传动齿轮的校核计算.....	23
4 自走式除草机器人三维造型的设计.....	27
4.1 Solidworks 软件简介.....	27
4.2 零件建模.....	27
4.2.1 阶梯轴三维建模的形成.....	27
4.2.2 底盘的三维建模形成.....	27
4.2.3 其他零件的三维模型造型.....	28

4.3 零件装配.....	29
4.4 三维向二维的转换.....	30
结 论	32
致 谢	33
参考文献	34

摘 要

由于农业生产的快速发展，农业生产技术同时也急需发展，各种仅仅依靠人工的生产早已不能满足需求。对于自走式除草机器人的研究，其中机器人机械臂的运动学分析和机器人机械臂的设计是更加关键的技术。由于机器人的出现，除草方法不断改进，效率显著提升。随着我国对农业机械机器人的重视程度地提高，我国农业除草机器人的研究一定会取得重大突破，会使我国农业产能大大提高。

本文设计的自走式除草机器人，总体由机器人行走机构、电源模块、切割杂草的机械手臂、视觉模块、无线功能模块等组成。该自走式除草机器人利用它的视觉处理模块自动移动到整体自动识别杂草处，有目的在进行除草作业的同时，还可以利用其无线功能模块实现遥控除草作业，我的起草机构可以进行作业适应不同的操作情况。该自走式除草机器人在正常工作状态下尺寸： $600\text{ mm} \times 240\text{ mm} \times 240\text{ mm}$ ，行走速度： 4 km/h ，最长往返距离： 100 m ，最大单次活动面积： 2000 m^2 。本文可以先确认一个机器人方案，完成核心部件的设计和计算，然后利用三维 SOLIDWORKS 完成自走式除草机机器人的三维模型，并导出二维工程图。

关键词：自走式除草机器人，行走机构，视觉模块，运动仿真，三维建模

Abstract

Due to the rapid development of agricultural production, agricultural production technology is also in urgent need of development, all kinds of production only rely on human can not meet the demand. The research of weeding robots, among which the kinematics analysis of robotic robot arms and the design of robotic arms are the key technologies, and the continuous improvement of weeding methods has greatly improved the efficiency. It is believed that as China attaches great importance to agricultural robots, China will achieve a major breakthrough in the field of agricultural weeding robot research. China's agricultural production capacity has greatly improved.

The self-propelled weeding robot designed in this paper includes robot walking mechanism, weed cutting robot arm, wireless function module, power module, vision module and so on. This automatic weeding robot uses its vision processing module to automatically move to the whole body to automatically identify weeds. While weeding, it can also use its wireless function module to realize remote control weeding. My drafting organization can work to adapt to different operating conditions. The size of the self-propelled weeding robot is 600 mm×240 mm×240 mm under normal working conditions, the walking speed is 4 km / h, the longest round-trip distance is 100 m, and the maximum single activity area is 2000 m². In this article, we can confirm a robot scheme, complete the design and calculation of the core components, then use 3D SolidWorks to complete the three-dimensional model of the self-propelled lawn mower robot, and derive the two-dimensional flow chart.

Keywords: self-propelled weeding robot, walking mechanism, vision module, motion simulation, 3D modeling

引 言

在我国工业科技不断发展的过程中，工业科技对农业科技的发展同时也产生了巨大的影响，而农业机器人作为公共农业发展的共同产物而受到重视，2019 年我国粮食总产量达到 66384 吨，同时由于我国人口基数大，中国的粮食消耗量也相当大。

而在农业生产活动中，杂草不仅是不可避免的，也是影响粮食产量的主要问题之一，杂草可以说是谷物的天敌。首先，杂草具有很强的生命力，在田地里争夺作物和多种生长所需的养分，降低农业生产效率。其次，杂草会产生多种病虫害，影响农作物的生长。我国受杂草灾害困扰的农地约为 4300 万公顷，每年减少我国粮食产量 100 亿千克。

到现在为止中国主要除草方式主要是人工除草和化学除草两种。人工除草主要通过使用简单的农具或直接使用人力拔草，效率极低，工作量大，大大消耗了农业生产中的劳动力，而化学除草是通过化学药物改变土质除草，农民在除草过程中大量的喷射方式除草。节约时间容易，但容易造成环境污染和化学渣滓，危害人们的身体健康。另外，由于面积大的除草对杂草没有目标性，除草效率不高，需要反复进行。近几年来，中国第一产业劳动力大幅下降。中国的人口基数虽大，但劳动力更多地分布在其他产业，中国人口老龄化问题使得农业生产成本不断提高，研究自走式除草机器人具有重要意义。

农业机械化、智能化也是国家农业发展的必然趋势。特别是在 2013 年中央下发的文件中，现代化农业科技的发展乃是中国新农村建设中不可缺少的重要部分，提出了对农业的新概念。而农业最重要的是利用现代先进的技术条件对自然进行减少，环境污染的破坏，其中除草机器人的研究不仅大大降低了劳动的成本，而且对环境污染和人类健康的危害云的影响也会避免。另外农业机械化的水平也会从不同层次上代表一个国家的农业水平，农业机械化水平越高，农业生产效率就会越高。因此，农业机械人的研究不仅是对国利民的研究，而且非常同时也是对广阔市场的研究。

1 自走式除草机器人介绍

1.1 课题研究的目的及意义

1.1.1 课题研究的目的

当今时代，农业生产随之快速发展，农业生产技术也急需提高需求，各种人工生产所获得的收益和成就早已不能满足，在对除草机器人的研究中，机器人的运动学分析，机械结构设计和图像认识是关键技术。不断改进除草方法，除草效率显著提高，中国农业生产才能力大大提高。

1.1.2 课题研究的意义

通过使用自走式除草机器人这种方式，除草农田的工作主要由机器人完成，高效，自动作业减少人们的麻烦。并且选择土地，正确使用除草剂，避免损伤农作物。与传统的喷雾剂试药方法相比，大幅减少除草剂的容量，保护环境。

农业机械人的发展，特别是除草机器人的发展，是从我国农业的高效产业化向更多的领域发展。展望未来的经济效果是不可估量的，农田的除草作业可以以自动机器为主，节约时间，自觉地减少人们过重的劳动。使用精准高效的除草剂可避免农作物受损。与旧的喷射方式相比，大大减少了除草剂等化学药品的使用，对环境也有积极的影响，从各个方面来看，我们拥有巨大的力量和发展空间，实现了农业现代化时代发展的目标，并使除草机器人更加科学。

同时通过本课题，综合利用学生在毕业设计过程中所学的基础课程和专业课程，整合知识和技能会使我们的能力具现化。

1.2 自走式除草机器人国内外的现状

1.2.1 国内的研究现状

东北林业大学开发出了采果球机器人。解决了产能低、时间长、危险度高、对树木资源造成巨大危害的问题，中国农业大学研究了蔬菜自主嫁接机器人，完善了机器人蔬菜苗木的准确作业、迅速地捕捉和优质的嫁接对象，解决了蔬菜苗的柔软、脆弱、改善了生产不平衡等问题，机器人使用独特的嫁接方法，自行折叠，最高时速 600 株/小时，合格率 95%以上，目前农业机器人研究的重点主要涉及几个方面。主要分为，机器人的自动导航、有效目标的选择和定位、作业机械结构的设计，电子的重点主要集中在图像信息的获取、作业计划和自主控制等方面，也可以笼统的称之为行走串联机器人，例如

野外培养、野外信息采集机器人等；后者的研究主要集中在实际操作模式区别和具体操作结构的设计与控制等，或是机械臂串联机器人，如果蔬摘取、成熟度检测、植物嫁接机器人等，它们互相配合，互相交融。根据农业活动的不同，他们有自己的侧重点。

1.2.2 国外研究现状

伊利诺大学农业与生物工程系对机器感应视觉系统对某些植物的普遍特征的采集和计算中的应用进行了深入研究，该装置为 3.7m 和 0.43m 范围内各种各样的植物、石头、土壤等，且在 0.24 秒内喷洒，因此喷射函数以 14km/h 的速度出现，准确度高达 91%。澳大利亚的科研机构开发了智能型的耕地应用机器，在田里作业期间，利用特别的传感器进行喷洒。所以可以区分作物和杂草，发现非作物植物时，会释放相应的喷雾，这种方式只适用于非作物植物，为一般药物成本的 1/10，甚至还会是一个更小的比例。不仅节约了生产成本，而且减少了环境污染，通过机械视觉发现了非作物植物，再利用手臂进行物理作业，大大减少了化学除草剂的使用，有效地减少了环境污染。

1.3 课题设计思路

- (1) 参照目前市面上大部分与自走式除草机器人产品相关数据，了解整个自走式除草机器人的整机系统的组成。
- (2) 自走式除草机器人整机方案的确认。
- (3) 自走式除草机器人整机的设计与计算，并对其主要零部件进行设计和校核。
- (4) 自走式除草机器人整机的 Solidworks 三维建模。

1.4 课题设计结构

本文以自走式除草机器人项目作为应用背景，对其机械结构进行了研究。全文共分为四章，每个章节的简介如下：

第一章前言部分，主要介绍自走式除草机器人的研究现状和课题研究的目的及意义；

第二章对整个自走式除草机器人的整机方案进行确认，包括传动系统，驱动系统等确认。

第三章完成整个自走式除草机器人的设计与计算；

第四章对于自走式除草机器人进行 Solidworks 三维建模；

总结全文的研究与设计工作，归纳出存在的问题并以便更深入地研究。

2 自走式除草机器人的总体设计方案

2.1 自走式除草机器人的组成及各部分关系概述

自走式除草机器人主要由视觉系统组成、控制系统和、驱动系统、执行系统。

视觉系统：通过机器人视觉完成机器人的智能控制，包括前方障碍的识别、杂草的识别等。

控制系统：通过对驱动系统地控制，让执行系统按照规定的要求工作，出错或发生故障时发出报警信号。

驱动系统：为系统各部件提供动力，驱动其动力的装置，常用的是机械传动、液压传动、气压传动和传动。

执行系统：运行系统是自动除草机机器人完成作业的部件。

2.2 确认自走式除草机器人驱的动方案

设备的驱动方式分别有和电动式、气动式和液压式气动式。下面分析和比较三种驱动方式。

2.2.1 电动机驱动

电动机驱动一般可分为：

- (1) 步进电动机驱动。
- (2) 交、直流电动机驱动，
- (3) 交、直流伺服电动机驱动

一般步进电动机则主要用于开环控制系统，一般用于速度和位置精度要求不高。伺服电动机与步进输出力矩相对小，控制好，可实现速度和位置控制更精确，适合中、小型设备。交、直伺服电动机一般在闭环控制系统中常见，步进电动机主要用于开环控制系统，一般用于速度与位置精度要求不高。交、直流电动机驱动需要加减速装置，输出力矩较大，但控制性能差，惯性较大，适用于大、中型或重型设备。

2.2.2 液压驱动

该设计之中的驱动系统使用液压驱动，有以下几个优点：

- (1) 油压系统介质压缩性小，作业稳定，获得较高位置的精度。
- (2) 油压系统以油为媒介，具有防锈和自身润滑性，提高机械效率，使用寿命长。
- (3) 油压容易达到较高压力（普通油压 2.6~6.2mpa）。体积小，可以得到较大的推力或转矩。

(4) 液压传动中力量、速度和方向容易实现自动控制。

液压传动系统的不足点是：

(1) 油液黏度随着温度变化而变化，影响工作性能，容易在高温下引发爆炸等危险。

(2) 油液泄漏难以克服，需要油压部件的精密度和质量是很严格的，制造的成本相交其他形势而言较高。

(3) 相应的油供给系统，特别是电液伺服系统，要求严格的油过滤装置，否则会发生故障。

油压驱动方式地输出力和功率非常之大，通常可以在更大的伺服机构上工作，多用于大型设备的驱动。

2.2.3 气压驱动

与其他的驱动进行比较，气压驱动的特点是：

(1) 空气介质对环境没有污染，相对安全，可直接用于高温作业。

(2) 压缩空气黏度低，容易达到高速。

(3) 气动元件工由于作压力低，制造要求也低于液压元件。

(4) 利用工厂集中的压缩站供给空气，无须添加动力设备。

其不足之处是：

(1) 其结构相对更大，因为压缩空气一般压力要 $40000\sim 60000\text{ Pa}$ ，该方式需要获得较大的力。

(2) 空气的压缩性较其他介质大，作业稳定性低，难以调速，难以达到准确位置，难以控制。

(3) 去除空气压缩水的问题是非常重要的问题，如果处理不好的话，钢铁零件会生锈，设备的功能会下降，而排气会引起噪音污染。

空气驱动主要用于点控制、捕捉、开关控制和顺序控制的设备。

2.2.4 驱动方案的确认

经研究上述三种驱动方案后，本次设计的自走式除草机器人属于高精度要求的设备，所以本次设计选用电机驱动。

2.3 总体方案拟定

因为本自走式除草机器人的要求是功能完备，所以本次设计的自走式除草机器人采用如图 2.1 所示的结构形式：

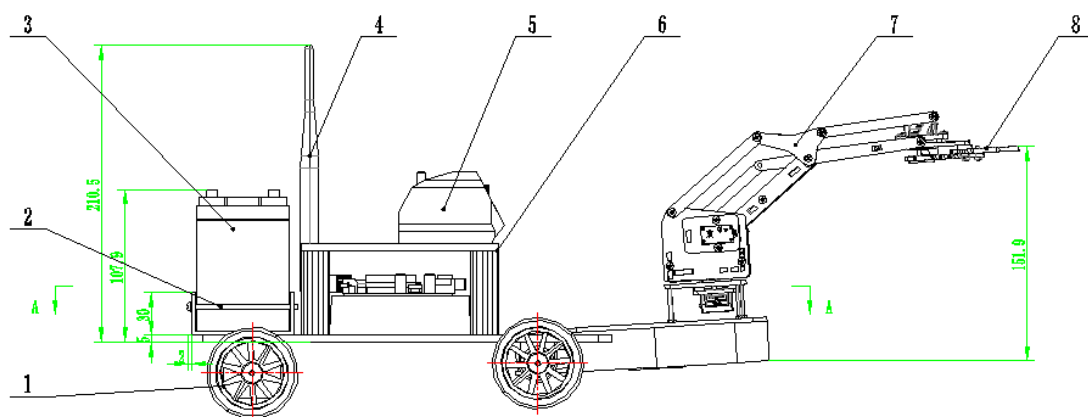


图 2.1 自走式除草机器人原理图

本次自走式除草机器人的结构原理图如图 2.1 所示，从图中可以看出，本机器人为后轮驱动，前轮为辅助轮；蓄电池为不同机构供电；天线接受外部遥控控制型号；齿轮齿条摆动的机构对于实现自走式除草机器人机构的上下摆动有至关重要的作用，可适应不同工况下的除草作业；除草机构是执行除草任务的关键部件，其包括驱动电机、除草刀片等组成；机器视觉对于路面状况、杂草、植物等检测的工作控制板；用于独立工作拔草的四自由度机械臂；为实现每个动作的核心控制原件，其核心的组件被称之为单片机，通过程序实现各个动作。

3 自走式除草机器人整体结构的设计

3.1 机器人行走驱动方案的选择

轮式机器人的机械结构如图 3.1，图 3.2，图 3.3。

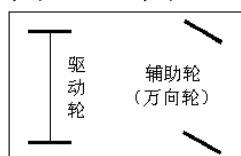


图 3.1 两轮独立驱动结构

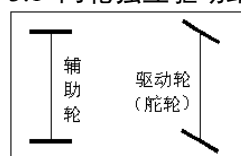


图 3.2 前轮驱动兼转向结构



图 3.3 后轮驱动，前轮转向结构

如图 3.1，使用分别独立的驱动结构，不同直流伺服系统驱动带动不同的驱动轮，旋转速度或力矩被供给。我们将前轮选取为万向轮，可保证不同角度移动，这种结构优势：简单、轻便、控制好，运动灵活、旋转半径小。

图 3.2 中的机器人是前轮驱动轮型的机器人。后轮仅作为辅助轮胎，方向并不会改变。前轮包含了驱动和转向两项工作，两轮拥有一致的驱动速度，转向速度。这种轮组结构的优势在于运动时平滑，整体结构具有稳定性；不足之处是结构相对更复杂，控制难度高。

图 3.3 中，后轮为驱动轮，前轮为转向轮，前后各电机结构相对复杂。

综合上述三种驱动方案，我们选择第一种驱动方案。但我们把前辅助轮采用固定轮结构，通过驱动轮两个电机的差动实现方向转化工作。

3.2 驱动电机的选择

在现代机器人行业的发展中，机器人的运动控制中通常使用的电机有步进电机、交流伺服电机和直流伺服电机，对其基本性能、作业方式和操控进行分类介绍。以下简称表 3.1。

通常状况下机器人使用发动机的基本要求：

- (1) 反转与正转时的特性相同，有良好的响应特性。

(2) 启动、停止和反向均能连续有效地进行，运行特性稳定。

(3) 良好的阻力在出口上体积小, 重量轻。

(4) 修理容易, 不用维护。

驱动轮是两个后轮, 稳定性好, 具有一定的过载能力, 能量消耗低, 控制好, 精密度高, 能量消耗低, 输出转矩大。通过对上述电机的传动机构特征、自身重量、特性、控制方式和移动机器人的移动性能要求、作业原理等因素的比较, 我们将直流电器作为驱动电机。

直流电动机由于高效、优秀的动态特性, 简单的控制性能, 良好的线性调速特性, 占据了调节和控制速度的绝对地位。

表 3.1 不同电机的特性、工作原理与控制方式

电机类型	主要特点	构造与工作原理	控制方式
步进电机	直接用数字信号控制, 与计算机接口简单, 没有电刷, 维修方便, 寿命长。缺点是能量转换效率低, 易失步, 过载能力弱。	按产生转矩的方式可分为: 永磁式, 反应式和混合式。混合式能产生较大转矩, 应用广泛。	永磁式是单向励磁, 精度高, 但易失步, 反应式是双向励磁, 输出转矩大, 转子过冲小, 但效率低; 混合式是单-双向励磁, 分辨率高, 运转平稳。
直流伺服电机	接通直流电即可工作, 控制简单; 启动转矩大, 转速和转矩容易控制, 效率高; 需要定时维护和更换电刷, 使用寿命短, 噪声大。	由永磁体定子, 线圈转子, 电刷和换向器构成。通过电刷和换向器使电流方向随转子的转动角度而变化, 实现连续转动。	转动控制采用电压控制方式, 两者成正比。转矩控制采用电流控制方式, 两者也成正比。
交流伺服电机	没有电刷和换向器, 无须维修; 驱动电路复杂, 价格高。	按结构分为同步和异步。无刷直流电机结构与同步电机相同, 特性与支流电机相同。	分为电压控制和频率控制两种方式。异步电机常采用电压控制。

尽管受到其他电动机(如交流变频电动机、步进电动机等)的地位上的威胁, 许多调速控制电动机的最佳拍档仍是直流电动机, 用途广泛。

所需电机的电力计算:

机器人小型车的力量强度与图 3.4 相同。

机器人所需的牵引力

$$F_a = F_f + F_w \tag{3-1}$$

式中 F_a —— 机器人移动需要的牵引力

$$F_w = mg \sin \theta \tag{3-2}$$

式中 F_w —— 自身重力而产生的阻力

$$F_f = \mu mg \cos \theta \tag{3-3}$$

式中 F_f —— 机器人移动所受摩擦力

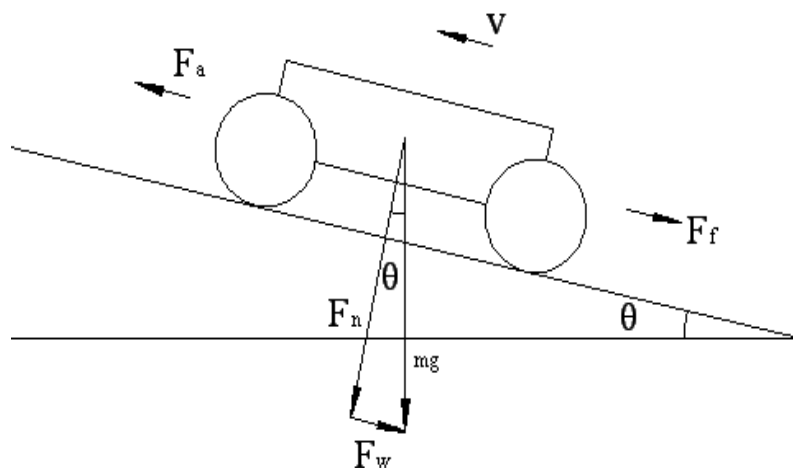


图 3.4 机器人小车的受力简图

则有：

$$F_a = mg \sin \theta + \mu mg \cos \theta \quad (3-4)$$

式中 μ ——摩擦系数

式中 θ ——最大爬坡角度（据课题要求 θ 可以按 0 计算）

这里我们估算机器人的总重为 10kg，运行速度为 0.6m/s，静摩擦因数为 0.15

则机器人在水平面上运动的功率为：

$$P = F_a \cdot V = 0.15 \times 10 \times 9.8 \times 0.6 = 8.82W \quad (3-5)$$

传动装置的总效率：

$$\eta = \eta_G^2 \cdot \eta_B^2 \quad (3-6)$$

按照表 3.2 确定的个部分效率有：直接传动效率： $\eta_G = 0.97$ ；滑动轴承效率： $\eta_B = 0.97$

代入得到：

$$\eta = 0.97^2 \times 0.97^2 = 0.89$$

所需直流电机的最小功率：

$$P = \frac{P_w}{\eta} = \frac{8.82}{0.89} = 9.91W \quad (3-7)$$

即一台电机的功率是 4.05W。

经过严密的计算与选择，最终我们认为广东德昌微型电机公司的 SRC-5555-3250 型直流电动机是最符合要求的。

技术变量如表 3.2。

表 3.2 直流电机技术参数表

号	型	额 定 电压	空载		最大效率下			制动		
			转 速	电 流	转 速	电 流	力 矩	功 率	力 矩	功 率
			r/ min	A	r/ min	A	g· cm	W	g· cm	W
SR C-555- 3250		12v CON STANT	610 0	0.24	530 0	0.79	229	6.2	165 0	9.20

3.3 机器人底盘的设计

在设计底盘时，我们必须考虑的底盘的结构强度和各部件的配置关系，底盘设计不能太大，同时各部件的布置要合理，考虑底盘的强度，本次设计的底盘如图 3.5 所示。

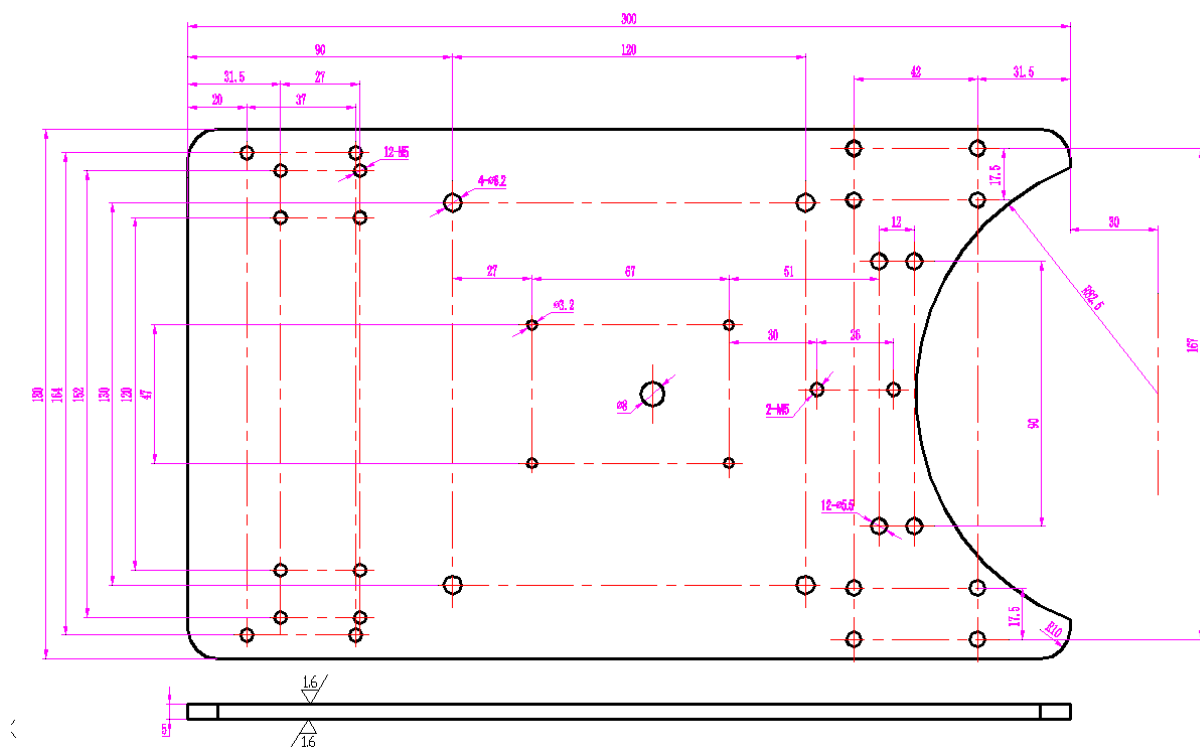


图 3.5 底盘设计图

3.4 机器人车轮的设计

在该设计中，可以通过机器人的运动方式选择轮胎，车轮方式提供了多种排列方式，满足不同的情况需求。改变方向的简单化，就可以实现运动的正确控制，机械结构简单。我们考虑到设计好的机器人的工作环境和控制要求，选择了四车轮方式。

选择车轮将不同的因素咕噜进来。例如机器人的电机功率、地形情况、重量、尺寸等。车辆重量和负载重量约为 10kg，使用易于加工、质量坚硬的聚苯乙烯为轮毂，不充气的中空橡胶为轮胎。橡胶和地面附着系数大，具有足够的驱动能力，整体轻便是我们选择它的原因。参考由 SOLIDWORKS 绘制的图 3.6 如下。

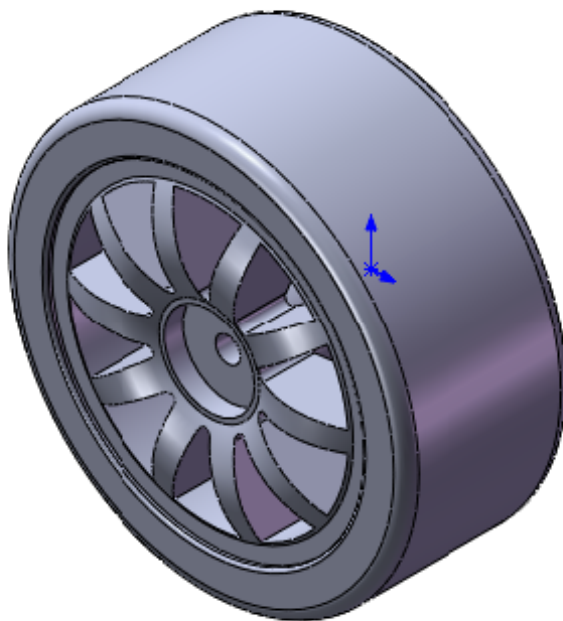


图 3.6 车轮三维设计图

3.5 除草刀片的设计

本次设计的除草机构，采用了直接用直流电机通过联轴器接割草的圆盘。结构更简单，拆装刀具更方便，为我们的自走式除草机器人提供更多功能的延展性。刀片的三维结构图如图 3.7。

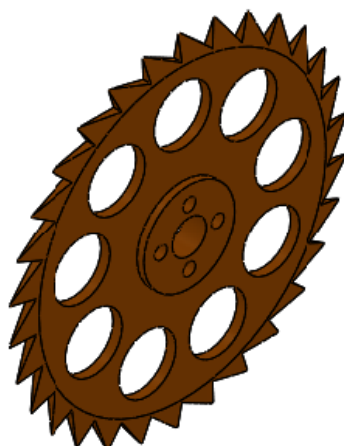


图 3.7 除草刀片

3.6 辅助轮阶梯轴的有限元分析

首先，阶梯轴的主体结构进行三维建模.完成三维建模后，对该部分进行有限元分析，阶梯轴的轴承、螺栓等部件可以不必单独受力分析。对阶梯轴整体结构进行静态分析，会引发大量数据可以生产，系统的计算时间会持续几天或几天以上。所以为了缩短计算时间，更准确、更系统地分析阶梯轴主体。即直接将阶梯轴主体分离出来单独进行静态分析，以确保系统的强度和稳定性，具体步骤如下：

3.6.1 阶梯轴零件的三维建模

利用 SOLIDWORKS 软件对阶梯轴零件进行三维模型，全部绘制过程无法逐一详细描述，我们将部分非标零件进行简单的说明。得到的三维模型如图 3.8 所示。

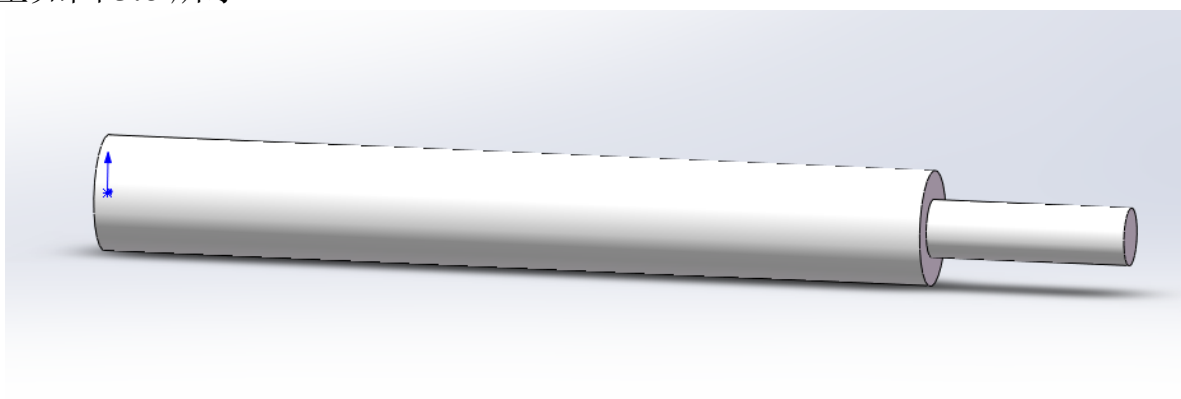


图 3.8 阶梯轴模型

3.6.2 确定材料

组成的材料是决定零件反应的关键，我们根据材料的弹性属性回馈给程序，可在材料库中选择材料分派给零件，阶梯轴受到了很大的压力和拉力，阶梯轴材料一般选择碳素钢，使用 Solid works 中 Simlition 模块在分析阶梯轴应力选择了碳素钢，如图 3.9 所示。

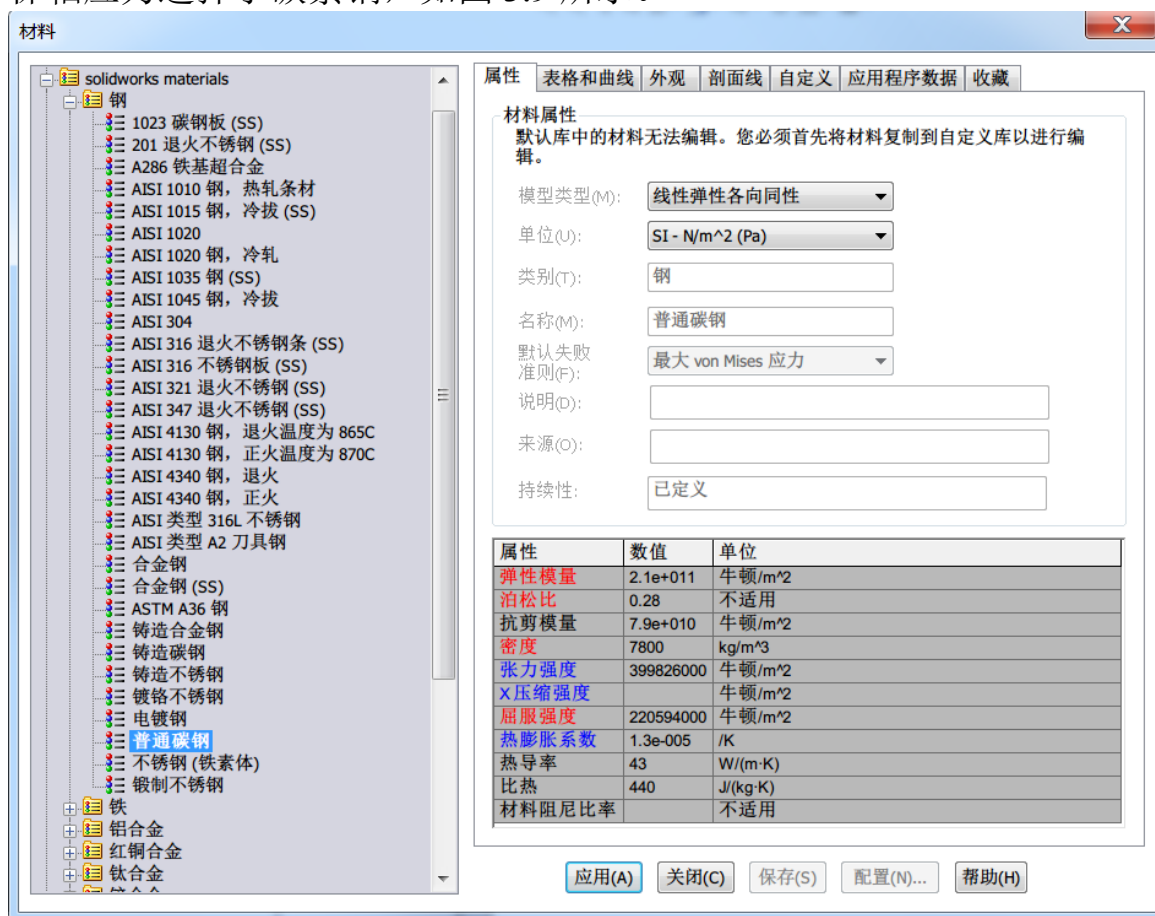


图 3-9 材料选取

3.6.3 添加夹具

在夹具选项卡上，固定其约束。各个约束都可以包含多面，被约束的面会受到所有方向的限制。为了由于刚性实体运动而导致分析失败，必须对零件的其中一面进行约束。分析前，要先确认夹具，如图 3.10 所见，阶梯轴的两端端是固定端，即模拟软件中夹具夹住阶梯轴轴承固定端的部分。

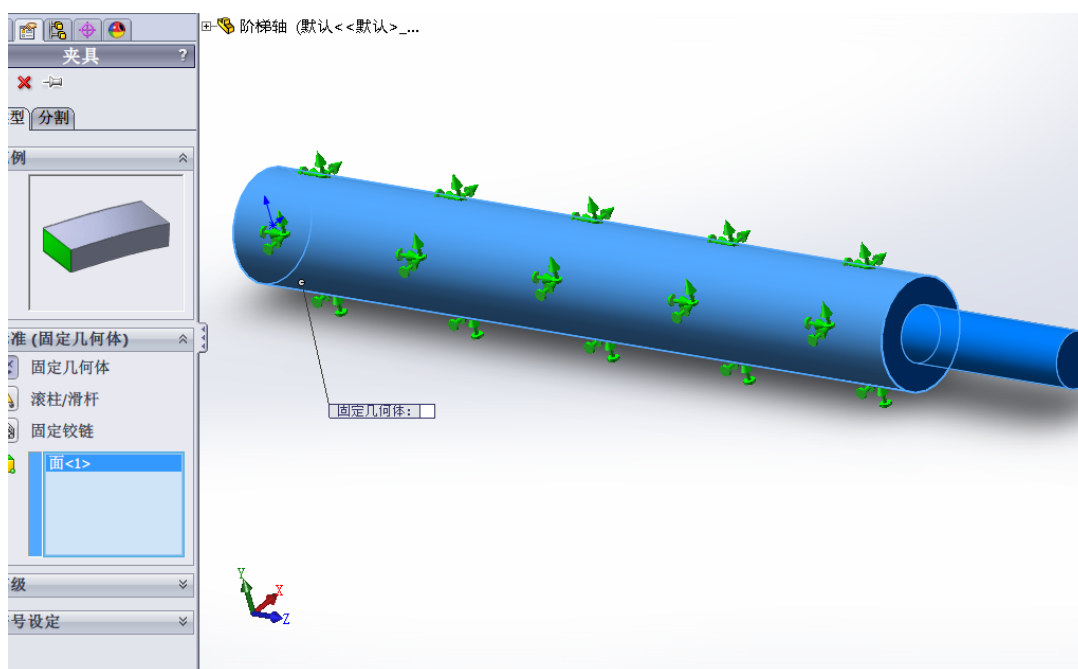


图 3.10 添加夹具

3.6.4 施加载荷

我们将阶梯轴的载荷设定为 1200N。载荷选项中，应用力和压力载荷至我们设计的轴体的面，不同的力可以使用一个面上，在阶梯轴实际工况得出的受力情况如图 3.11。

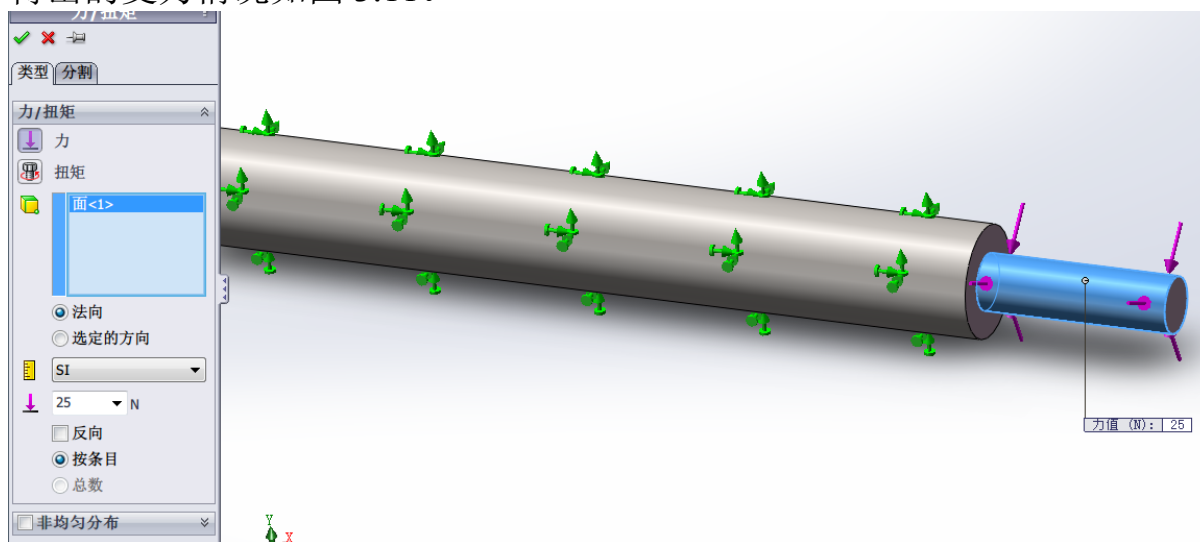


图 3.11 阶梯轴垂直方向施加载荷

3.6.5 生成网格

下一阶段，阶梯轴应按网格划分。首先我们要进行曲面网格化，将段网格器将节放置于边界上。再把在内部生成节，用四面单元填充体积，并将中侧节放置于边界上。我们通常优先选择网格参数，如图 3.

12. 设置网格密度良好，对阶梯轴生成定义的网格。

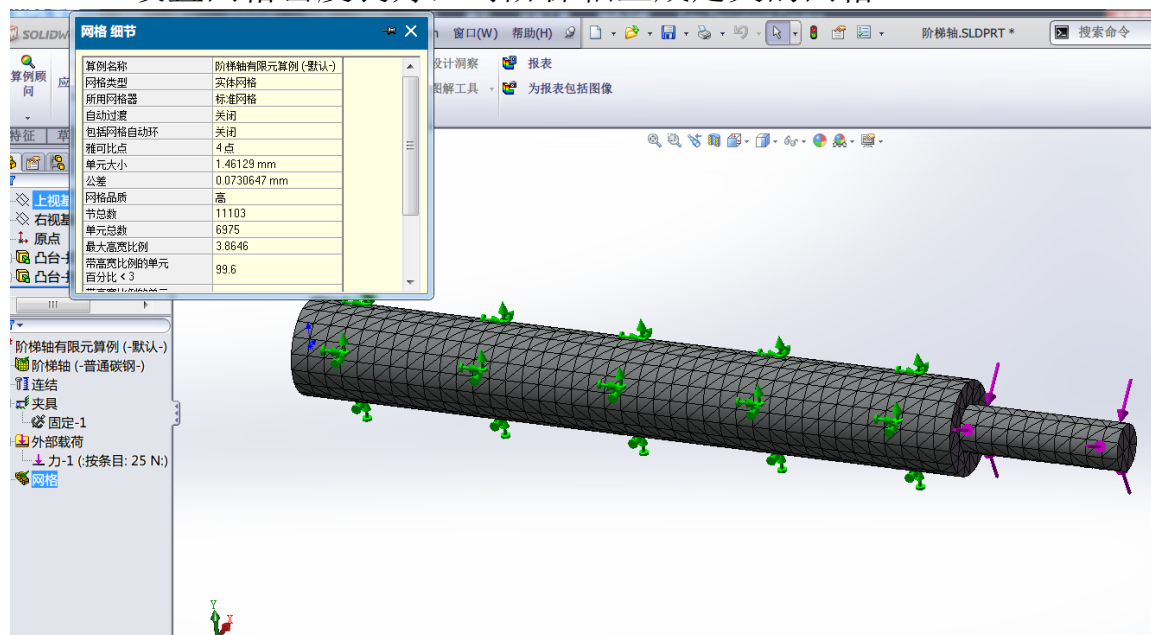


图 3.12 阶梯轴网格化

3.6.6 运算求解

完成上述操作后点击运行，Solidworks 开始对算例自行进行分析与计算，求解过程如下图 3.13 所示。

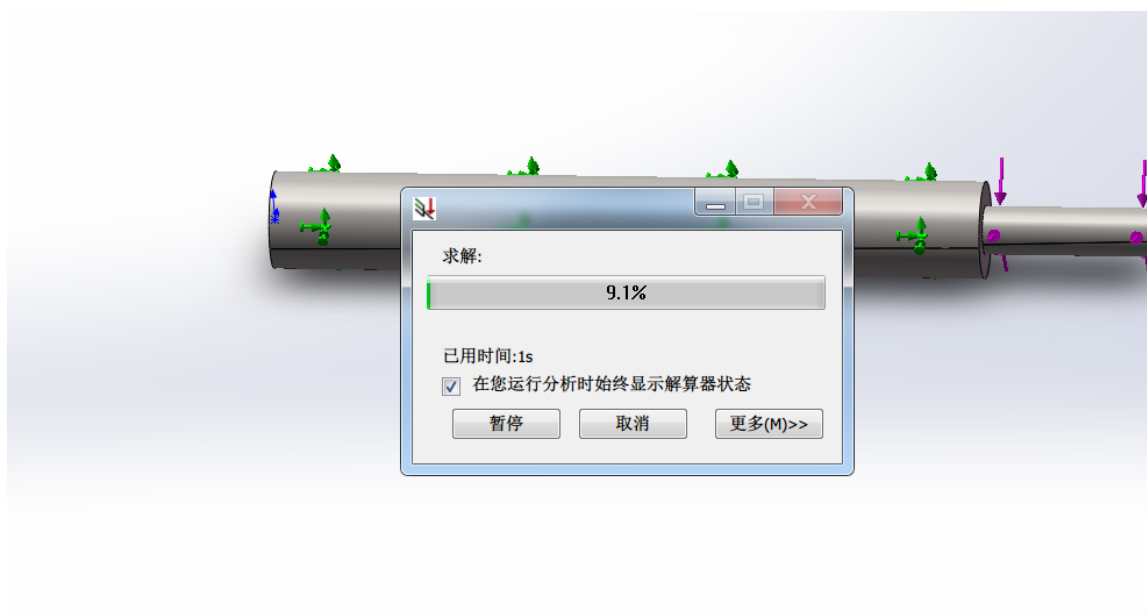


图 3.13 运行算例分析

当运行结束后，就可以得到阶梯轴模型安全系数、位移、应变、应力等各项参数的有限元分析结果。

3.6.7 分析结果输出

Simulation 模块的结果标签中生成的图形可以生动地表现阶梯轴各部位的应力—应变的情况、位移的情况和安全系数的情况。如图 3.14 所示，结果第一个窗口显示的是阶梯轴所有位置的最低安全系数，标准工序规则一般要求安全系数高出 1.5 或更大，对给定的最低安全系数。软件按照可能的安全性和非安全性，安全区域与非安全区域分别绘制不同颜色，阶梯轴主体部分应力、位移、应变及安全系数分布图 3.14 至 3.18。

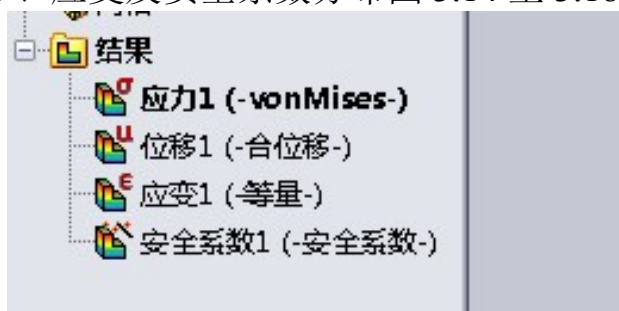


图 3.14 输出结果

模型名称: 阶梯轴
 算例名称: 阶梯轴有限元算例
 图例类型: 安全系数 安全系数1
 准则: 自动
 安全系数分布: 最小安全系数 = 1.4e+003

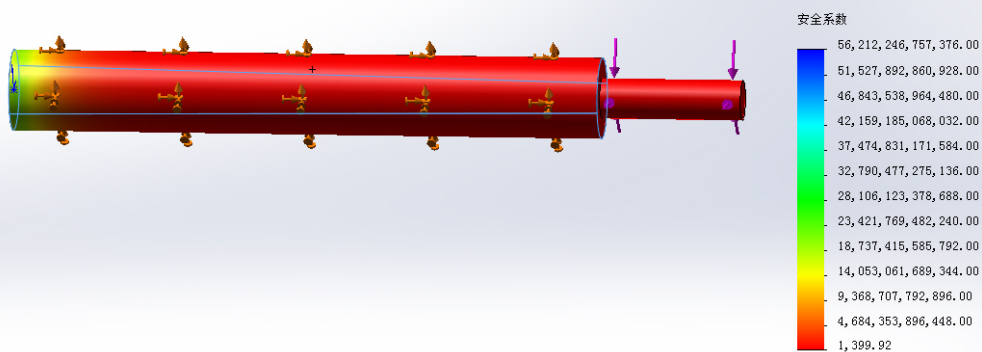


图 3.15 安全系数

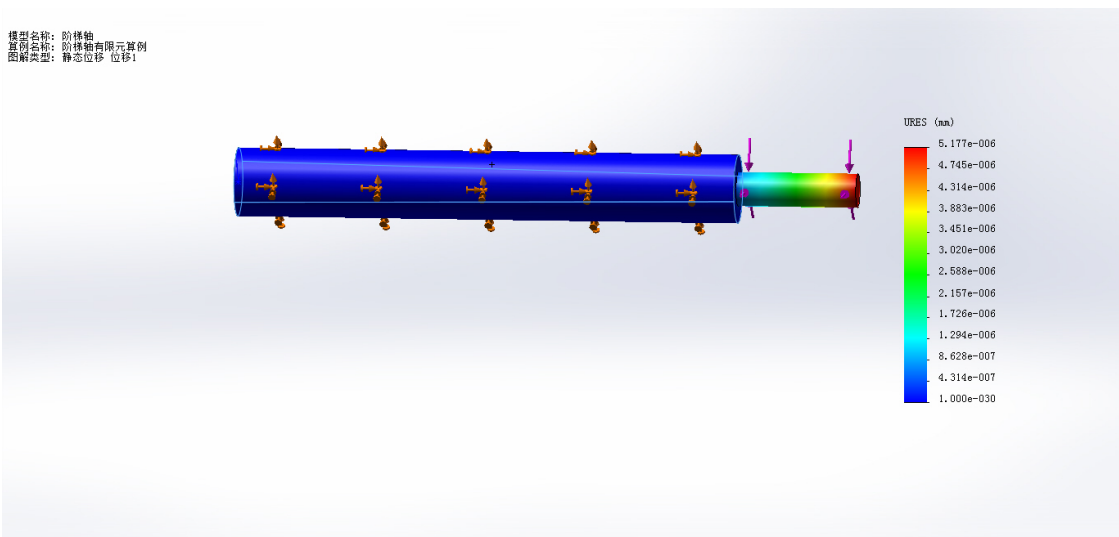


图 3.16 位移分布图

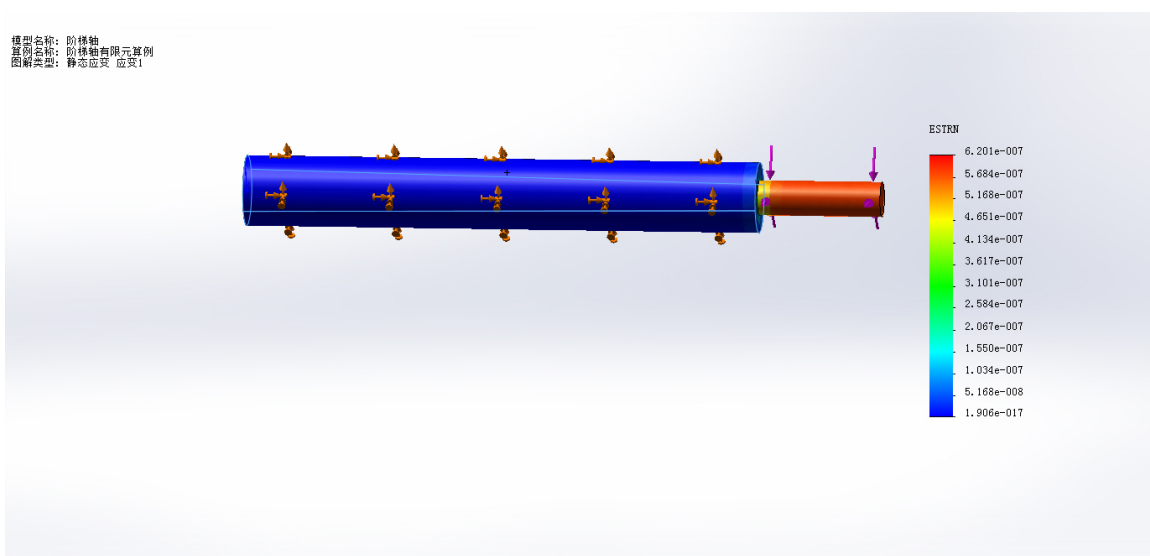


图 3.17 应变分布图

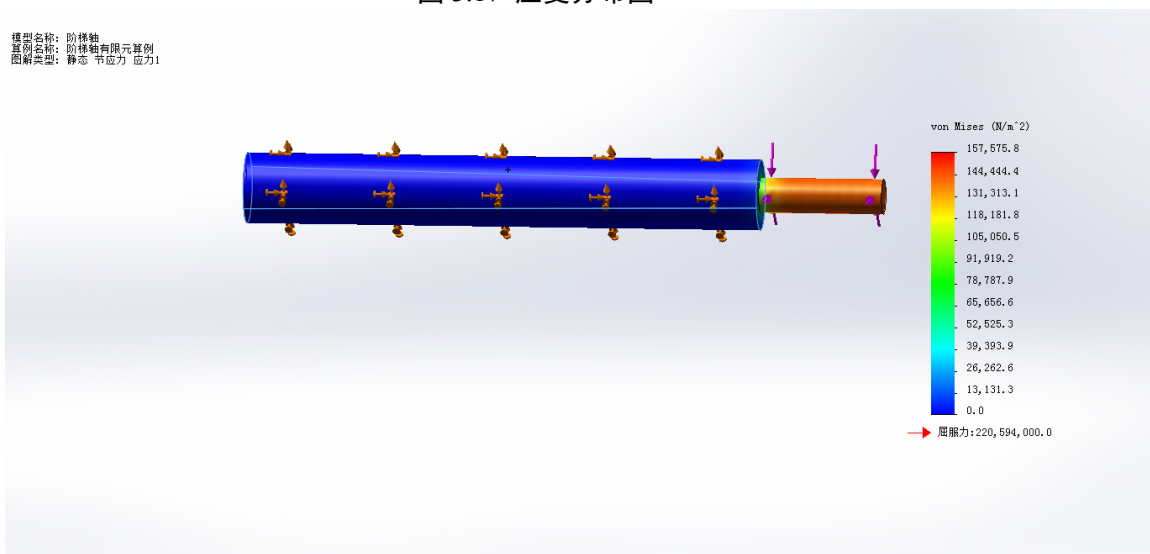


图 3.18 应力分布图

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要
下载或阅读全文，请访问：

<https://d.book118.com/087165056116006056>