

---

# 车震沙地脱困技术的迁移应用 研究

高中组 个人项目

2023.07.14

## 摘 要

日常车辆驾驶依赖于人工铺设道路，但是生活中不可避免会遇到一些特殊路况，如沙地行驶。由于沙子的物理属性明显不同于常规路面，在遇到车辆沙地被困时常常难以脱困，如无法及时寻找外援，情况将非常危险。既往主流的脱困方法虽然可行，但是对环境依赖较强，无法实现车辆的自动化脱困。

本课题对奔驰 GLE 越野车型采用的车震脱困技术进行迁移应用分析，先建立理论模型简单计算速度以及车架振动带来的额外压力对脱困带来的影响。其次使用 Arduino 配合推进电机在沙地上进行建模仿真实验，记录速度以及车架振动带来的额外压力对沙地凹陷程度，脱困时间以及脱困成功率的影响。通过这些步骤得出结论：增大车速以及通过车架施加额外压力是帮助车辆脱困的有效措施。

**关键词：**车震模式 沙地脱困 地面车辆力学 颗粒力学

## 目录

摘    要.....	I
第 1 章 引言.....	1
1.1 车辆沙地被困 .....	1
1.2 车震脱困技术 .....	1
1.3 国内外研究现状 .....	3
1.4 研究意义与主要内容 .....	3
第 2 章 理论分析.....	4
2.1 沙地被困的简单力学模型分析 .....	4
2.2 车震脱困可行性分析 .....	5
第 3 章 Arduino 工程验证 .....	7
3.1 实验准备 .....	7
3.2 遥控车模型搭建 .....	7
3.3 电机的推力模拟实验 .....	10
3.4 建立沙地车被困的模拟模型 .....	11
3.5 车震脱困可行性分析 .....	12
3.5.1 车速对脱困的影响 .....	12
3.5.2 压力对脱困的影响 .....	13
第 4 章 结论与展望.....	14
4.1 结论 .....	14
4.2 展望 .....	14
参 考 文 献.....	15

## 第1章 引言

### 1.1 课题背景

如果行驶在沙漠、沙滩等路段，车辆被困在沙子中的情况常常发生。如果周边也无人居住，一时找不到何时的工具进行施救，人员和车辆都可能遭受严重损失。由于沙地的物理特性明显不同于普通地面，车辆处于沙地脱困需要更大的驱动力，且单纯地踩油门也不是万能的脱困办法。经验的司机会根据地软硬程度选择轮胎压力，放胎压可以减少沙地被困的发生。如果得不到帮助的情况下，如何实现车辆自我脱困这一问题尚需解决。此外，随着人类探索星际之旅，面对的地面情况将更加复杂，无人机在月球等表面的行驶无法避免会遇到车辆自我脱困的问题，因此本研究的延伸探索具有潜在的应用前景。

### 1.2 车震脱困技术

车震脱困技术是一种利用车辆的空气悬挂系统，通过不断地充气放气，让车身上下跳动，从而帮助车辆摆脱沙地或碎石路面的陷困的技术。这种技术也被称为“陷车脱困模式”或“自由驾驶模式”，因为它可以让驾驶员不用下车就能完成脱困操作。

车震脱困技术的研究起源于对沙漠环境的探索和应对。沙漠是一种极端的自然环境，对车辆的性能和安全提出了很高的要求。在沙漠中行驶，车辆很容易因为沙地的松软和不稳定而陷入困境，如果不能及时脱困，可能会造成严重的后果。

为了解决这个问题，一些汽车厂商和研究机构开始开发和测试各种脱困技术和装置。例如，有些车辆配备了沙地模式或越野模式，可以调节悬挂高度、动力输出、刹车力度等参数，以适应不同的路况。有些车辆安装了特殊的轮胎或轮毂，可以增加抓地力或减少沉降深度。有些车辆使用了机械或液压的千斤顶或绞盘，可以利用外部的支撑点或牵引力来帮助车辆移动。

然而，这些传统的脱困技术和装置都有一些局限性和缺点。例如，可能需要驾驶员下车检查路况或操作设备，增加了风险和时间成本；或可能需要额外的空间或重量来存放或安装设备，影响了车辆的性能和效率；再或可能需要依赖外部的条件或资源，如其他车辆、树木、岩石等，而这些在沙漠中并不常见。

因此，一种更加智能、便捷、高效、自主的脱困技术就显得十分必要和有价值。车震脱困技术就是在这样的背景下诞生和发展的一种创新性的解决方案。它利用了现代汽车普遍具备的空气悬挂系统，通过电子控制单元（ECU）控制空气弹簧的充气放气频率和幅度，让车身产生周期性的上下运动，从而改变轮胎与地面之间的接触面积和压力分布，增加轮胎与地面之间的摩擦力和牵引力，帮助车辆摆脱被困状态。<sup>[1]</sup>



图1 空气悬架构造（图片来自知乎）

车震脱困技术的应用前景是非常广阔的。它不仅可以用于沙漠环境，也可以用于其他松软或不平整的路面，如泥地、雪地、草地等。它不仅可以用于越野车或 SUV 等专业的车型，也可以用于普通的轿车或商务车等普及的车型。它不仅可以用于民用或商用的领域，也可以用于军事或救援的领域。甚至是在太空探险领域，月球车或者火星探测器都需要在类似沙地的行星表面行驶，更需要做好独立脱困的技术准备。

目前，已经有一些汽车厂商开始研发和测试这种技术，并将其应用于部分车型上。例如，奔驰在其 GLS、GLE、G 级等车型上推出了自由驾驶模式(Free Driving Mode)，就是基于这种技术实现的<sup>[2]</sup>。预计未来会有更多的汽车厂商和车型采用这种技术，为驾驶员提供更加安全、便捷、舒适的驾驶体验。

### 1.3 国内外研究现状

国内外对这种技术的研究主要集中在以下几个方面：

1. 沉陷机理与判别方法：分析车辆在不同路况下的沉陷原因和影响因素，提出基于滑转率、电流、沉陷深度等指标的沉陷判别方法，制定不同条件下的沉陷判别准则和预警机制。<sup>[3]</sup>

2. 脱困策略与控制算法：设计合理有效的脱困策略和控制算法，利用空气悬挂系统的充气放气频率和幅度来调节车身的上下运动，实现最佳的脱困效果。<sup>[3]</sup>

3. 仿真试验与实地验证：建立车辆-地面耦合动力学模型，进行仿真试验，分析不同参数对脱困性能的影响，优化脱困参数。同时，在实际路况下进行实地验证，评估脱困技术的可靠性和适应性。

目前国内已有少量相关科研人员对此进行研究并实现了在火星车上的应用结果<sup>[4][5]</sup>，但并没有在商业汽车方面的成熟应用；国外虽然已经有奔驰 GLE 等应用该技术的车型，但是并没有公开的研究数据。

可见，对于车震脱困技术的现有研究并不多，自动化实现车辆沙地脱困的问题尚未完全解决，而无人驾驶以及太空探索的技术突破对此方面的研究甚是依赖，因此我们提出了通过车震技术探索沙地自动化脱困的可能性。

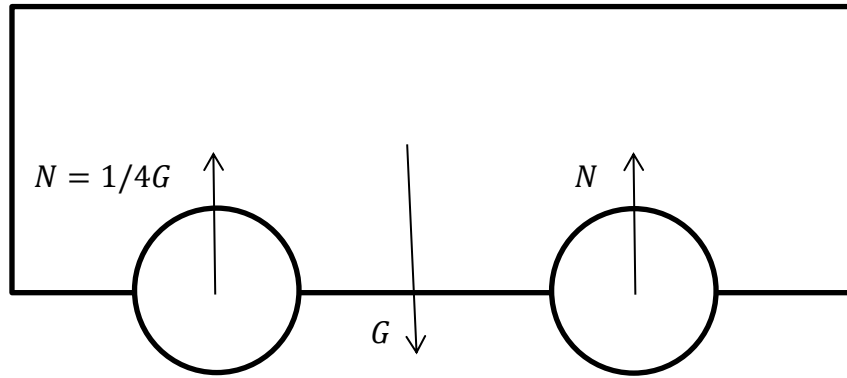
### 1.4 研究意义与主要内容

本课题研究的目的是构建一个简单的理论模型分析车辆在沙地中沉陷的以及车震脱困的基本机理与影响因素，然后搭建一个简单的汽车模型来加以验证。过程中以车速、车轮对地面压力变化作为自变量，沙地凹陷深度、脱困时间以及成功率作为因变量，分析车速的调整以及车架上下振动带来的额外压力对于脱困的辅助。这一研究能够对未来该技术在商用车辆方面的应用提供一些新思路。

## 第2章 理论分析

### 2.1 沙地被困的简单力学模型分析

先将车辆简化为一个由四个轮子组成的简单力学模型，其中每个轮子受到的支持力均为车子重力的  $1/4$ 。



再对车轮进行受力分析：



当车辆在行驶时，沙子会发生凹陷，凹陷深度可用以下公式估算<sup>[6]</sup>：

$$d = (N / A) / (k + c * v)$$

其中  $d$  是凹陷深度， $N$  是物体对沙子的压力， $A$  是物体与沙子接触的面积， $k$  是沙子的静态压缩系数， $c$  是沙子的动态压缩系数， $v$  是物体的速度。

当轮子运动时，一部分沙子会粘附在胎面上，这部分沙子会随着车轮一起运动，这样使得车轮向前运动的摩擦力变为了沙子“薄层”和底部沙子间的剪映作用力。由于沙子“薄层”的粗糙程度远不及原来带有花纹的轮胎台面，摩擦力会大打折扣。

同时，依然由于沙子的流体特性，车轮右边的沙子会形成一个斜着的包络面，设轮胎和这个面的切线与水平面夹角为  $\theta$ 。

则由几何关系大概可知

$$\cos\theta = 1 - d/R$$

对于整辆车，由牛顿第二定律有

$$4f = Ma$$

其中  $f$  为沙子对车轮作用的向前的摩擦力， $M$  为车的质量， $a$  为车子沿着斜坡向前的加速度。

这时由于支持面变得倾斜，垂直斜面方向受力分析需要改写，为

$$4N = Mg\cos\theta$$

对于  $f$  与  $N$  的关系，近似地认为

$$f = \mu N$$

其中  $\mu$  为沙子的阻力系数，且近似有  $\mu = bv$ ， $b$  为常数

对轮胎运用转动定律有

$$\tau - fR = I\beta$$

其中  $\tau$  为车轴的驱动力矩， $R$  为车轮半径， $I = MR^2$  为车轮的转动惯量， $\beta$  为车轮的角加速度

根据以上式子可以估算出车辆运动所需的驱动力矩

$$\tau = I\beta + \frac{1}{4}MgRcv\left(1 - \frac{Mg}{4AR(k + cv)}\right)$$

考虑车辆的打滑率

$$\eta = \frac{rw - v}{rw} \approx 1 - \frac{a}{\beta R}$$

$$\text{有 } \tau = \frac{MgRbv \frac{4AR(k + cv)}{Mg + 4AR(k + cv)}}{4(1 - \eta)} + \frac{1}{4}MgRbv \frac{4AR(k + cv)}{Mg + 4AR(k + cv)}$$

当车辆被困在沙子中刚启动时，虽然角加速度  $\beta$  可以很大，但是实际速度和加速度都由于较高的打滑率（有时可达 70%）大大削减，同时摩擦系数也很小，使得脱困需要异常大的驱动力矩。虽然加速的确能获得较大的驱动力矩从而脱困，但只通过轮胎加速脱困会异常困难，消耗大量的油量，并不是理想的脱困办法。

## 2.2 车震脱困可行性分析

因需要验证车架振动的确能辅助脱困，我们将运用牛顿第二定律计算小车在车架振动带来的质心简谐运动下的压力以及摩擦力的改变。

将车架的上下运动近似为  $y = A\cos(wx)$  的简谐振动，则车架在向上经过平衡位点时车体质心加速度可以近似为  $a_y = Aw^2$



这时运用牛顿第二定律，有

$$4N - Mg = MAw^2$$

$$\text{解出 } N = \frac{M}{4}(Aw^2 + g)$$

这样  $N$  能够增大，从而摩擦力增大，车辆重新获取抓地力以正常倒退行驶。这里并不需要考虑车轮进一步下陷的问题（虽然前面公式下陷深度是和压强成正比的），因为沙子在车辆的压力下已经从疏松分布坍塌为了致密分布，再改变压强时形变程度较小，且奔驰的 GLE 车型中振动幅度不过 10cm，频率仅在 1/2Hz 左右，并不会附加太多的压强。

## 第3章 工程实验

工程验证实验的目的是探究沙地被困的影响因素以及搭建迷你车震脱困模型来验证其可行性。实验中将小车速度作为唯一参数进行调整，测量车辆下陷深度。

### 3.1 实验准备

需要准备的物件包：

- (1) 小车，采用了七星虫工程 KM 智能小车 S3 套件，来搭建可遥控调速的小车；
- (2) 微型推进电机，设置固定 64N 推力，用以模拟车架上下振动对轮胎压力的变化。
- (3) 沙子，来源于淘宝上的河沙，质地较疏散，颗粒半径在 1mm 左右，可以较真实地模拟实际沙漠中沙子的力学特性；

### 3.2 遥控车模型搭建

七星虫工程 KM 智能小车 S3 套件包括 Arduino 基本套件，智能小车套件，遥控套件，智能语音识别套件，超声波发射套件，摄像套件等，按照本实验需要选用智能小车套件、遥控套件进行组合。

- (1) 安装 KM 智能小车模拟车辆行驶状态；
- (2) 安装遥控器红外感应模块和速度液晶显示器模块，进行车辆操控；
- (3) 利用 Scratch 软件制作遥控调速程序并设置车速参数。

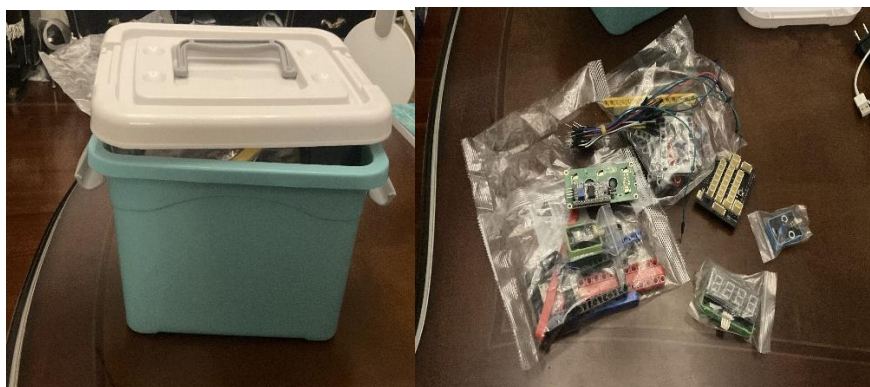


图4 七星虫工程 KM 智能小车 S3 套件

具体实验操作过程如下：

首先，根据官方给的教程视频搭出车辆的基本模型：

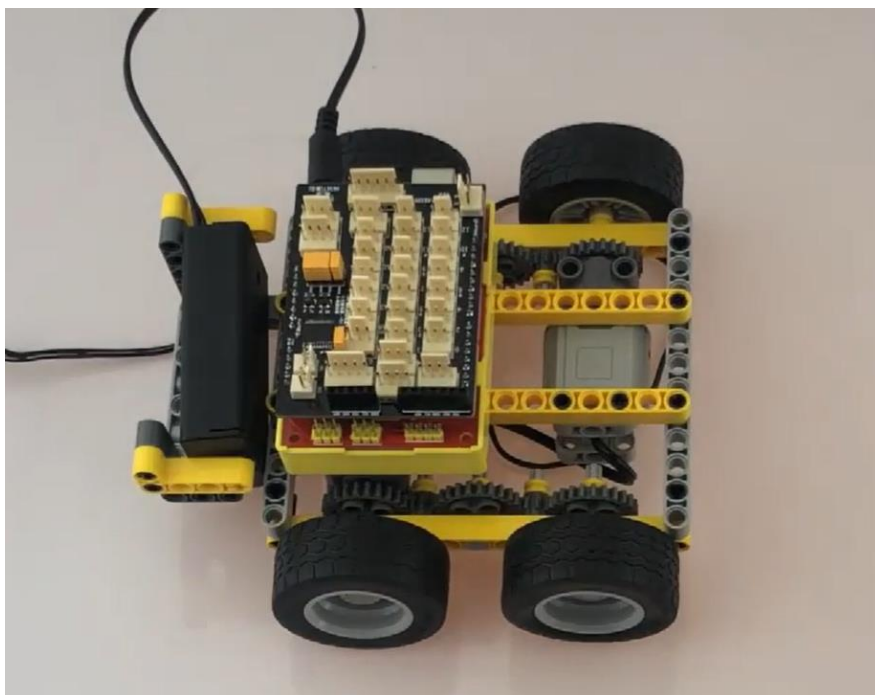


图 9 KM 小车基本模型

其次，车辆加上遥控器红外感应模块和速度液晶显示器模块：

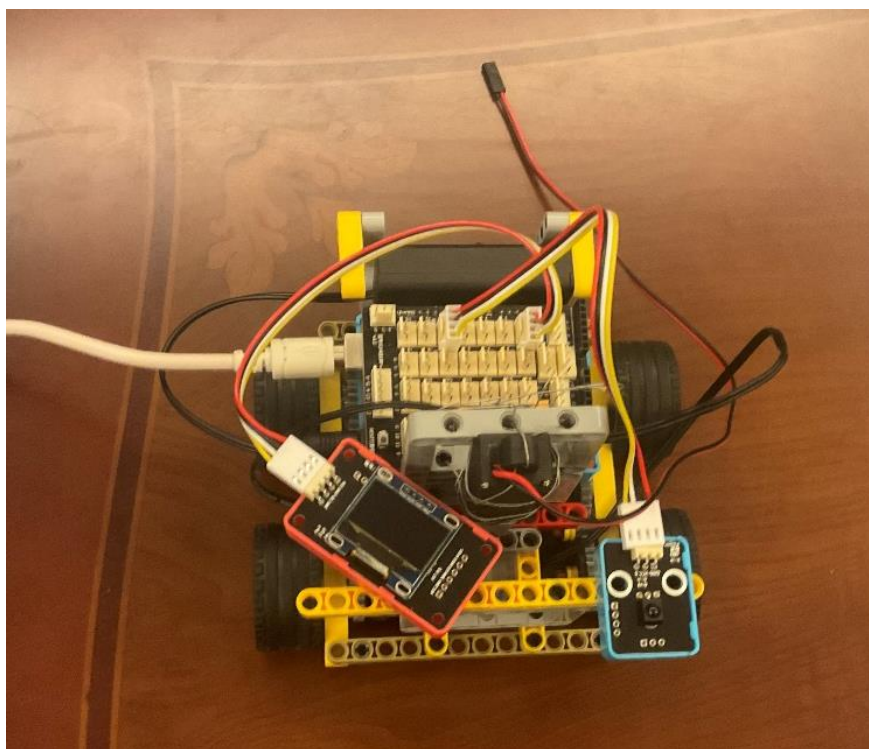


图 10 左边为 OLED 速度显示器，右边为红外线接收模块

然后，在七星虫 Scratch 软件中制作遥控调速程序并编译：



图 5 Scratch 软件程序初始化



图 6 Scratch 软件输入对应的控制

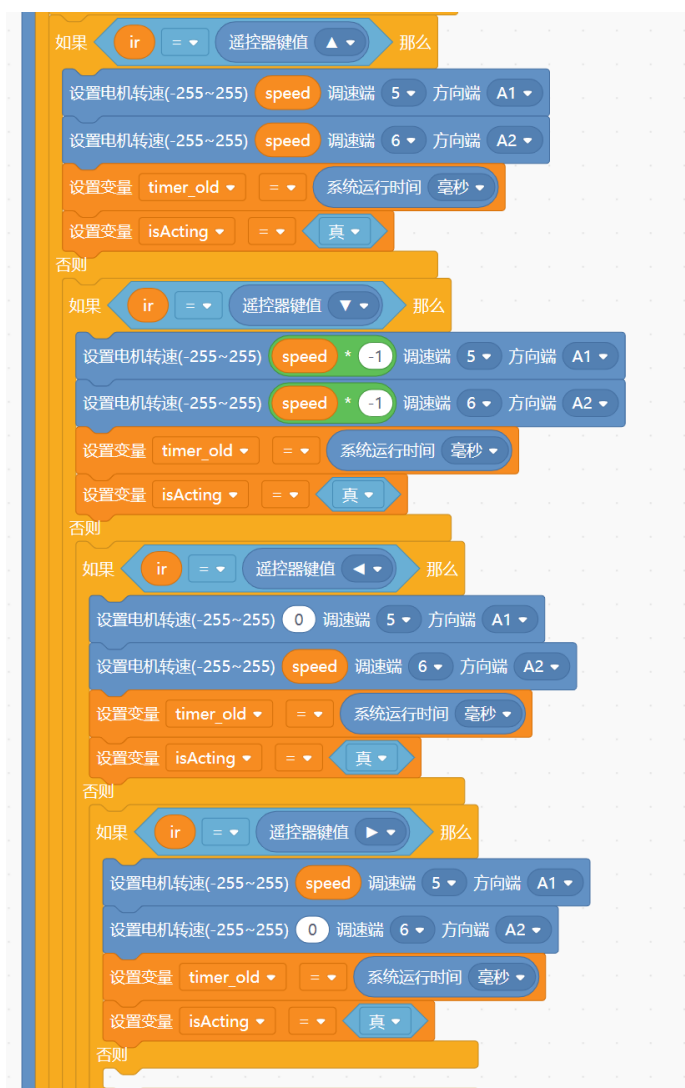


图 11 Scratch 软件设置方向键的调速

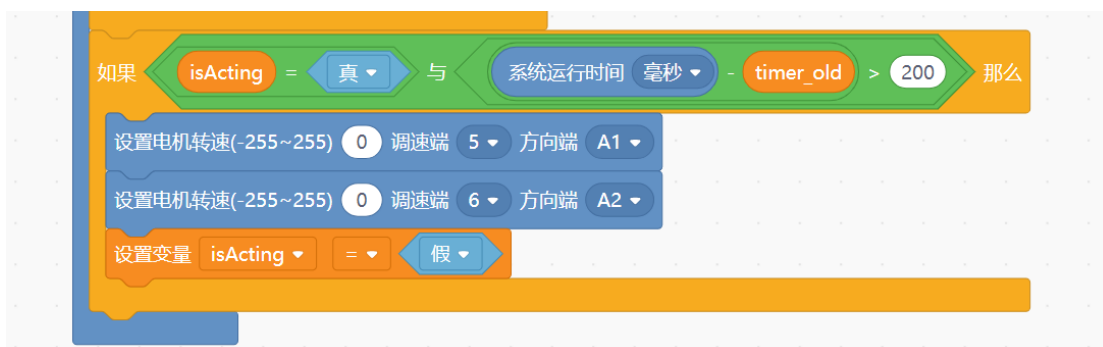


图 12 释放遥控器将所有功能关闭

### 3.3 瞬间压力控制

实验设计模拟车架上下振动，此处器材受限，只能用电机的推力模拟沙子接触面压力变化。



图 2 微型电机示意图



图 3 推进电机两种伸长模式示意图

用积木搭好中心受力平面后将电机放在平面中央合适位置并用铁丝固定，最



后成品如下：

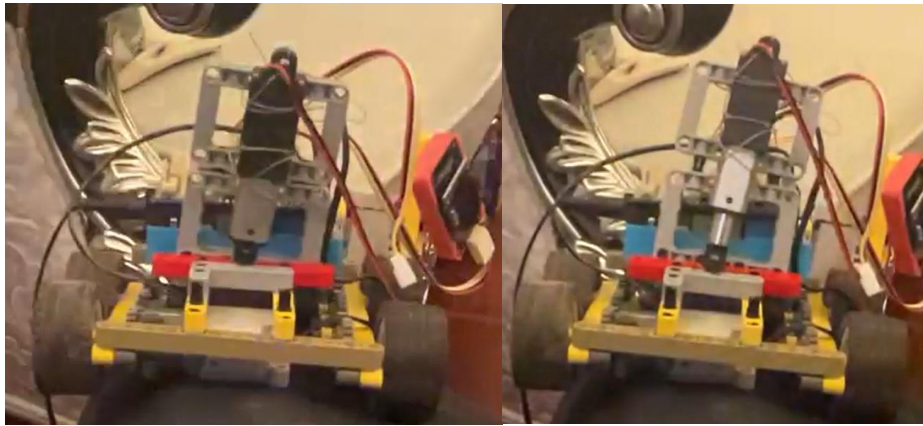


图8 电机装载示意图

### 3.4 建立沙地车被困的模拟模型

制作车辆行驶的沙地环境，为了防止车辆在沙子上完全无法驾驶，将沙的厚度调小。



图7 沙地模拟

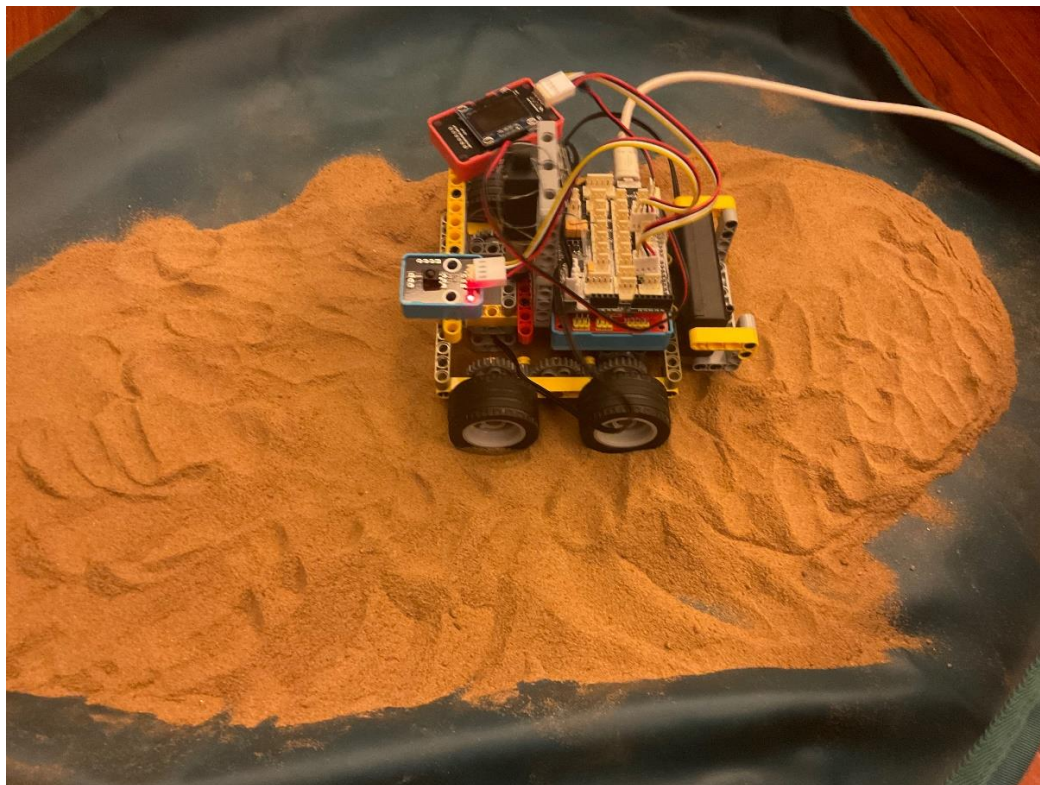


图 12 小车被困在沙地中示意图



图 13 小车在沙地中凹陷示意图

### 3.5 车震脱困可行性分析

#### 3.5.1 车速对脱困的影响

从理论分析看，加快速速可以增大摩擦系数，有助于小车获取抓地力。同时，在 Arduino 工程实验中，我们观察到车速增大时，脱困时间有所缩短，成功率变

大（表 1）。这些发现证实了加速可辅助脱困的结论。然而，就算是最大的速度下，脱困成功率也只有 60%。因此，在实际沙地环境中，可以通过高速行驶实现车辆脱困或是防止车辆被困，但是这种方法的效果并非最佳。

表 1 速度与凹陷深度、脱困时间与脱困成功率记录

车的速度	凹陷深度 (mm)	脱困时间 (s)	脱困成功率 (x/10)
1.0	4.5	无穷大	0/10
1.2	4.1	6.4	1/10
1.5	3.9	5.8	3/10
1.8	3.7	4.3	4/10
2.3	3.0	2.7	6/10

### 3.5.2 压力对脱困的影响

理论模型应用简谐振动估计提出了对车辆增加压力可以增大摩擦力，帮助车辆获取抓地力。在 Arduino 小车模型实验中，我们采用推进电机施加压力后观察到小车脱困时间明显变短，脱困几率大幅增加，证实了车震脱困的可能性（表 2）。虽然本实验无法实现不同压力下小车摩擦力和的检测，但是结合理论和实验，我们依然可以观察压力对小车的影响。未来实验平台提升，可以进一步研究不同压力下小车的脱困时间和成功率，进一步探索最佳的振动频率和振幅组合

表 2 压力与凹陷深度、脱困时间与脱困成功率记录

压力 (N)	速度 (m/s)	凹陷深度 (mm)	脱困时间 (s)	脱困成功率 (x/10)
0	1.0	4.5	无穷大	0/10
64	1.0	4.7	4.5	10/10
64	1.5	4.1	3.2	10/10



## 第4章 结论与展望

### 4.1 结论

通过本次建模与工程实验，可获得以下结论：

1. 从理论的计算可以初步判断，增加车轮转速可增大轮胎与沙面摩擦力从而增加脱困几率，但是不能达到较好的脱困成功率。

2. 运用车震进行沙地脱困的方案具有一定可操作性，车辆的速度越大越容易脱困，同样发现车辆在压力条件下也更易沙地脱困。

### 4.2 展望

1. 由于实验条件的限制，无法完整地复原主动悬架来真实地模拟车震过程，后续需要在更专业的实验室和器材辅助下获取详细和可信的实验数据。

2. 在理论模型中为了计算方便，将摩擦力近似为与压力成正比，这一近似是极其粗糙的，沙子的摩擦特性需要运用专业知识进行更为精确的计算，或者使用专门的仿真软件进行模拟。

3. 本实验只研究了车震脱困在沙地平面上的可行性。其理念拓展至月球表面探险和无人区探索的任务时，更多地会面对斜坡甚至是类沼泽地的脱困问题，这时车震脱困的可行性值得进一步研究。

## 参 考 文 献

- [1] [德国人居然想出用车震来帮助 SUV 脱困的方法？奔驰奥迪都已经用上了！  
搜狐汽车 搜狐网 \(sohu.com\) https://www.sohu.com/a/246096148\\_128609](https://www.sohu.com/a/246096148_128609)
- [2] [2020 Mercedes-Benz GLS Free Driving Assist demonstration - YouTube  
https://www.youtube.com/watch?v=a4HDQ\\_vfUxQ](https://www.youtube.com/watch?v=a4HDQ_vfUxQ)
- [3]潘冬, 陈朕, 袁宝峰, 王瑞, 陈百超, 邹猛. 火星车沉陷机理与脱困策略研究[J]. 机器人, 2022, 44(1): 2-8
- [4]邹猛, 袁宝峰, 潘冬, 陈朕, 陈百超, 王瑞. 基于空气悬挂系统的火星车脱困控制算法研究[J]. 机器人, 2022, 44(1): 9-16
- [5]张晓峰, 李晓东, 李晓峰. 基于空气悬挂系统的汽车脱困技术研究[J]. 汽车工程师, 2019, (3): 18-21.
- [6]车辆沙地系统边界运动学条件试验研究 硕士学位论文 张元胤  
<https://www.docin.com/p-906887878.html>