

# 绳驱动并联线狮机器人

## 1、摘要

宁德霍童线狮是一种传统民俗文化。线狮的头部、尾部、腮部分别挂有若干绳索，通过拉动绳索使表演台上的线狮做出坐立、蹲卧、摆首、戏球等动作。本次竞赛，我们团队设计了“线狮机器人”，通过仿照人工拉绳表演的形式，将传统文化艺术表演融入到机器人当中，从而为家庭娱乐提供更加丰富多彩的娱乐形式。

该机器人是一款两自由度绳驱动并联机器人。主要由机架、电机连接套件、电机轴系、绳索和表演平台组成。本线狮机器人通过铝型材搭建整体框架，在铝型材框架顶部安装定位板，定位板上搭载有两个电机分别用于控制线狮头尾的运动，每个电机和两个带有凹槽的轮相连，每个轮连接两根绳索共同组成两电机四轮八绳索的控制结构。八根绳索下端四根连接线狮头部，四根连接线狮尾部，上段与轮相连，通过电机带动轴，轴带动轮转动，通过轮的组合运动控制绳索的有效长度，使线狮在  $xOz$  平面内做任意方向的移动，从而做出不同的表演动作。

通过数月的努力，本团队成功设计了机械结构，制造了样机模型，并对其进行了调试验证，经过多次迭代升级，实现了预期的表演功能。

## 2、背景

霍童线狮又称“抽狮”，现留存于霍童镇，当地人称之为“打狮”，是一种具有独特风格的乔装动物的杂技节目，被誉为“中华一绝”。线狮的表演形式多样，分为单狮(雄狮)、双狮(一雄一雌狮)、三狮(一母二子狮)、五狮(一母四子狮)等等，线狮艺人需要在乐队的统一指挥下，跟着鼓点的波澜起伏，控制线狮的情绪，当锣鼓打得激烈时线狮闪展生风，当锣鼓逐渐放慢速度时则轻喃细语。舞狮艺人不仅需要有默契的配合，还要有充足的体力。大狮子重则 30 公斤，小狮子轻则 20 公斤，狮子的头部、尾部、腮部分别挂有若干长达 10 米的绳索，大狮需要 5 个艺人操纵，小狮则需两人。随着锣鼓铿锵而起，艺人们根据不同的节奏拉扯绳索，使得大小线狮表演出坐立、蹲卧、苏醒、伸展、呵欠、抓痒、搔首、舔毛、蛰伏、依偎、跳跃、奔窜、上柱、下地、钻穴、出洞、登山、跳涧、越岭、飞腾、回旋、翻滚、喘气、颤栗、怒吼、咆哮等动态，更为复杂的还有狮子戏球，如寻球、追球、得球、踩球、咬球、争球、抢球、抱球、抛球等动作。狮子所有的这些动态表演，全凭艺人们集体的操纵和密切的配合加以实现。随着时代的快速发展，人们的生活节奏也变得更加快速，近距离感受传统艺术表演的机会越来越少，在家庭娱乐当中，人们主要以媒体播放的形式观看传统艺术表演，这大大降低了现场表演所带来的乐趣以及对传统文化的认识。现通过仿照人工表演的形式，构建线狮表演机器人，在线狮四周分别悬挂若干绳索，由电机带动滑轮，滑轮带动绳索，通过滑轮的组合运动来控制绳索的有效长度，使得狮子展现出不同的动作姿态。通过机器人创新的表演形式，以新兴技术为载体，将传统文化艺术表演融入到机器人当中，从而也为家庭娱乐提供了更加丰富多彩的娱乐形式，同时将传统文化融入到每家每户的生活当中，在娱乐的同时感受中国传统艺术文化的魅力，让传统文化焕发新生。



图 1 后台进行表演线狮的艺人



图 2 线狮尚未被拉起



图 3 线狮被拉起进行表演

### 3、机械结构

如图 4、图 5、图 6 所示，本设计的技术方案是：一种绳驱动并联线狮机器人，包括机架 1、铝合金定位板 2、第一卷筒组 L 型固定板 1 3、第一卷筒组 L 型固定板 2 4、第二卷筒组 L 型固定板 1 5、第二卷筒组 L 型固定板 2 6、第一卷筒组碳纤维竖板 7、第二卷筒组碳纤维竖板 8、第一卷筒组主动轮 9、第二卷筒组主动轮 10、第一卷筒组主动轮增高垫 11、第二卷筒组主动轮增高垫 12、第一卷筒组电机 13、第二卷筒组电机 14、第一卷筒组电机底座 15、第二卷筒组电机底座 16、第一卷筒组光轴 17、第二卷筒组光轴 18、第一卷筒组轴承 1 19、第一卷筒组轴承 2 20、第一卷筒组轴承 3 21、第二卷筒组轴承 1 22、第二卷筒组轴承 2 23、第二卷筒组轴承 3 24、第一卷筒组轴套 25、第二卷筒组轴套 26、第一卷筒组从动轮脚垫 27、第二卷筒组从动轮脚垫 28、第一卷筒组从动轮 29、第二卷筒组从动轮 30、第一卷筒组主动轮外侧调紧连接件 31、第一卷筒组主动轮内侧调紧连接件 32、第一卷筒组从动轮外侧调紧连接件 33、第一卷筒组从动轮内侧调紧连接件 34、第二卷筒组主动轮外侧调紧连接件 35、第二卷筒组主动轮内侧调紧连接件 36、第二卷筒组从动轮外侧调紧连接件 37、第二卷筒组从动轮内侧调紧连接件 38、第一卷筒组绳索 1 39、第一卷筒组绳索 2 40、第一卷筒组绳索 3 41、第一卷筒组绳索 4 42、第二卷筒组绳索 1 43、第二卷筒组绳索 2 44、第二卷筒组绳索 3 45、第二卷筒组绳索 4 46、第一卷筒组出绳点连接板 1 47、第一卷筒组出绳点连接板 2 48、第二卷筒组出绳点连接板 1 49、第二卷筒组出绳点连接板 2 50、第一卷筒组单头六角柱 1 51、第一卷筒组单头六角柱 2 52、第一卷筒组单头六角柱 3 53、第一卷筒组单头六角柱 4 54、第二卷筒组单头六角柱 1 55、第二卷筒组单头六角柱 2 56、第二卷筒组单头六角柱 3 57、第二卷筒组单头六角柱 4 58、第一卷筒组陶瓷定滑轮 1 59、第一卷筒组陶瓷定滑轮 2 60、第一卷筒组陶瓷定滑轮 3 61、第一卷筒组陶瓷定滑轮 4 62、第二卷筒组陶瓷定滑轮 1 63、第二卷筒组陶瓷定滑轮 2 64、第二卷筒组陶瓷定滑轮 3 65、第二卷筒组陶瓷定滑轮 4 66、表演平台 67。

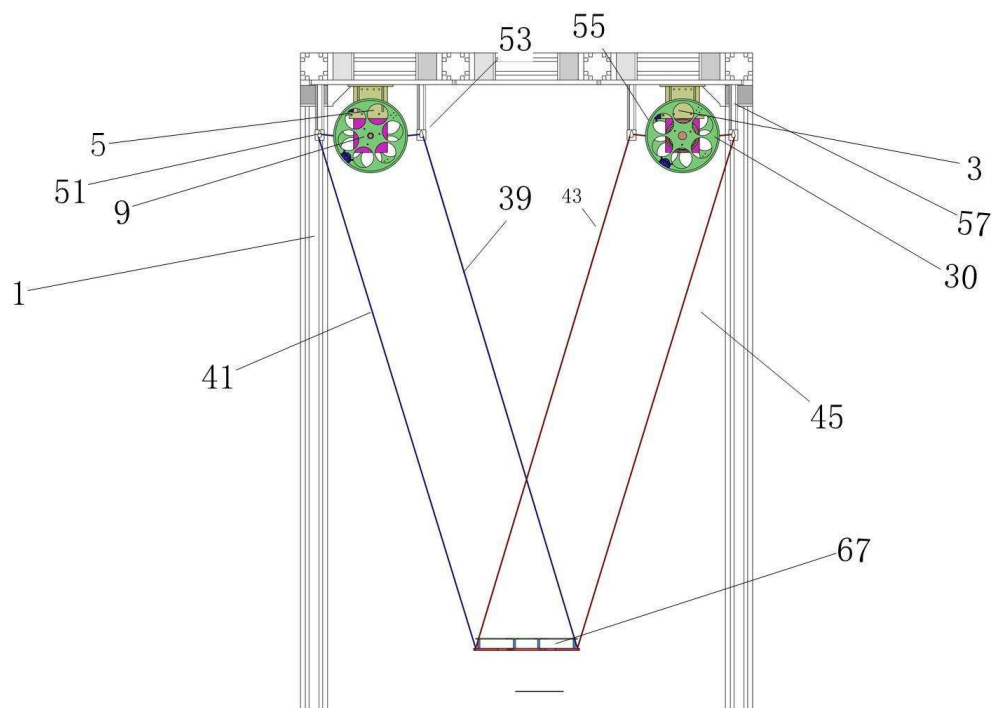


图 4 绳驱动并联线狮机器人主视图

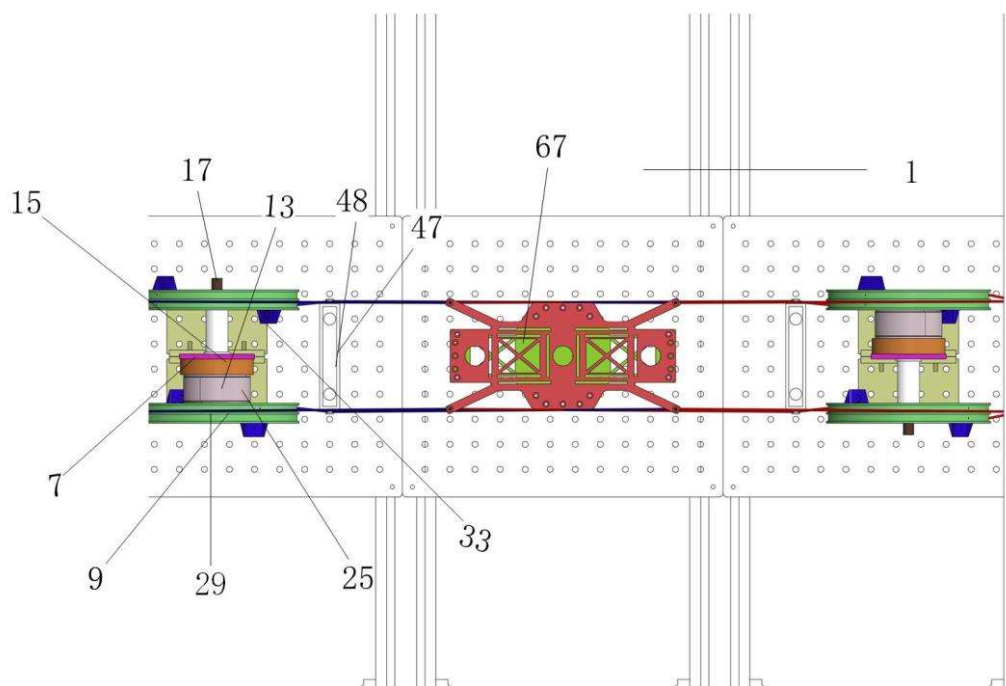


图 5 绳驱动并联线狮机器人仰视图

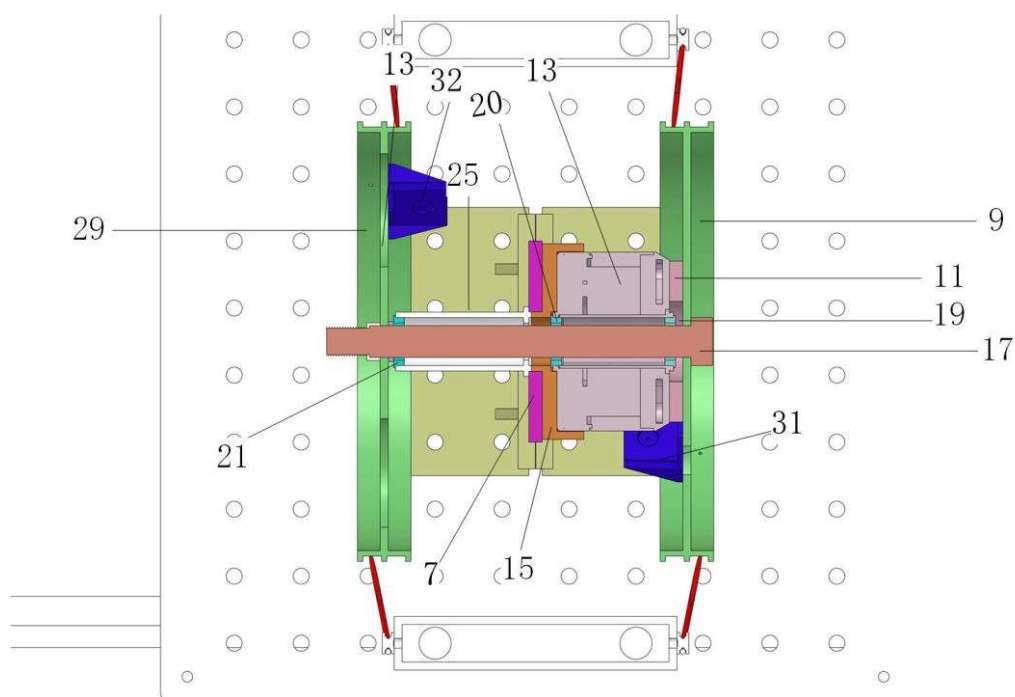


图 6 绳驱动并联线狮机器人电机轴系剖视图

如图 7 所示，所述的机架 1 跨立于表演平台 67 之上，使两卷筒组分别位于表演平台 67 的两端；在铝型材框架顶部安装铝合金定位板 2，并将第一卷筒组 L 型固定板 1、2 和第二卷筒组 L 型固定板 1、2 于之相连，从而将两卷筒组固定于框架之上；所述的第一卷筒组碳纤维竖板 7 和第二卷筒组碳纤维竖板 8 分别位于两卷筒组 L 型固定板之间，通过螺丝将其夹紧；所述的第一卷筒组主动轮 9 和第一卷筒组从动轮 29 与第一卷筒组 DJI GM6020 空心杯电机 13 同轴连接，第二卷筒组主动轮 10 和第二卷筒组从动轮 30 与第二卷筒组 DJI GM6020 空心杯电机 14 同轴连接；第一卷筒组电机底座 15 和第二卷筒组电机底座 16 分别通过三颗螺丝固定于第一卷筒组碳纤维竖板 7 和第二卷筒组碳纤维竖板 8 之上，使电机底座和框架硬连接；两卷筒组电机转子、主动轮增高垫和主动轮分别通过三颗螺丝硬连接，使两卷筒组主动轮能随电机转子一起转动；第一卷筒组光轴 17 和第二卷筒组光轴 18 通过过盈配合的装配方法分别贯穿于两卷筒组主动轮和从动轮之间。



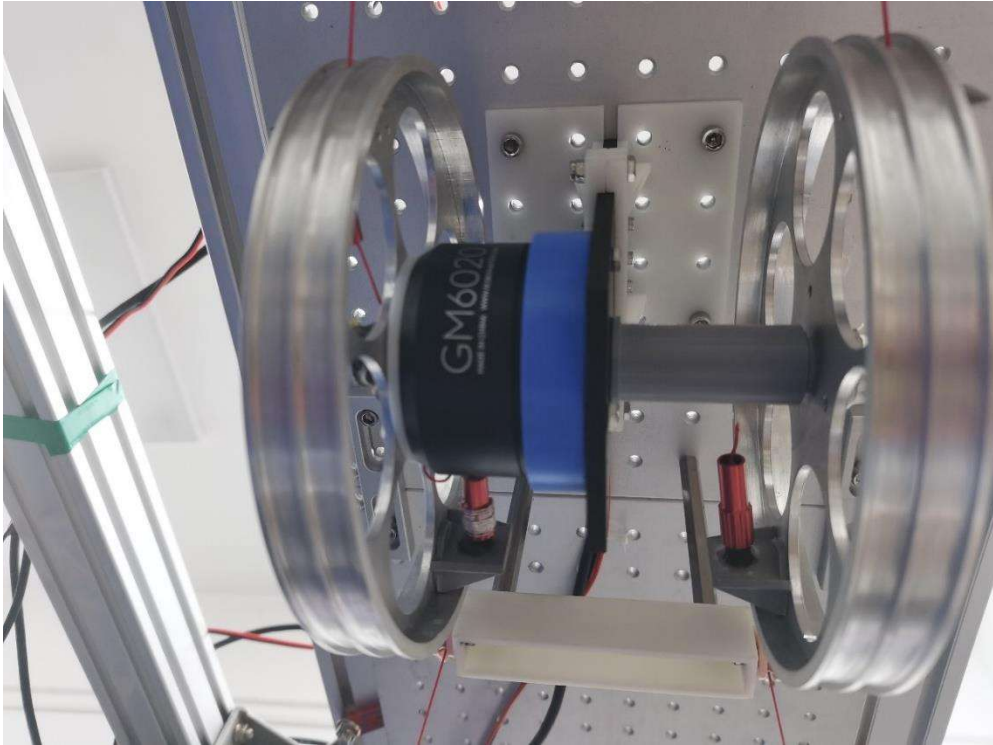


图 7 绳驱动并联线狮机器人电机实物图

如图 8 所示，为了安全起见，我们还对电源安装了急停开关，以应对各种紧急情况。



图 8 电源急停开关

如图 9，所示，定位板与机架的安装使用四个铝合金的支架，使得定位板角度位置有一定的可调余量使得定位板保持水平，以保证平台的运动精度。定位板的设计使得卷筒组

的安装拥有坐标系参考，组件之间安装误差减小，保证了平台运动的平稳性。光轴上分别装有三套深沟球轴承。滚针轴承对心度高，但体积稍大，不适合安装在此狭小空间，故我们采用三套深沟球轴承同轴安装，从而提高其对心度；光轴轴台与主动轮之间装有防滑垫片，两光轴尾部通过螺母加防滑垫片提供轴向压力，从而增大摩擦力使主动轮能随轴转动而不发生相对滑动，同时从动轮也通过轴向压力产生的摩擦力和光轴较好的固定，使得主动轮能和从动轮同步转动；两卷筒组主动轮与从动轮均采用 CNC 铝合金加工，为了节约成本，我们将主动轮与从动轮设计一致，同时将主动轮和从动轮中间的孔与轴设计为过盈配合装配，以增加轮组和轴的摩擦力，防止打滑。为了达到圆盘减重的目的，我们采用圆盘挖孔的设计，使得两卷筒组运行更加稳定，两卷筒组主动轮与从动轮圆盘分别有两个凹槽，使得每个轮上的绳索互不干扰。



图 9 定位板与机架连接细节

所述的第一卷筒组主动轮增高垫 11 和第二卷筒组主动轮增高垫 12 分别安装在两卷筒组主动轮与电机转子之间，第一卷筒组从动轮脚垫 27 和第二卷筒组从动轮脚垫 28 分别安装在两卷筒组从动轮与轴台之间，使得两卷筒组主动轮与从动轮到中轴距离保持一致，且和出绳点宽度大致一致，保证绳子尽量平顺；两卷筒组主动轮与从动轮上分别装有两个调紧连接件，将微调螺丝与调紧连接件相连并以此处作为出绳点，通过改变微调螺丝长度从而调节绳长，在运动过程中通过微调螺丝固定也能够使得有效绳长不变；八条绳索从出绳点穿出通过陶瓷定滑轮与下端表演平台 67 相连，两组绳索分别与表演平台 67 四角相连，组成绳驱动并联结构，使得线狮在  $xOz$  平面内做任意方向的移动，从而做出不同的表演动作。

如图 10 所示，出绳点陶瓷定滑轮设计为单头六角柱上端与定位板拧紧，下端与 3d 打印的开口方盒相连，开口方盒上有两个稍大于螺孔的孔，采用两个非标的一字柱塞螺丝固定，由于柱塞螺丝的高对心度，使得方盒与定位板孔位几乎完全平行，减少上端的误差对

下端的影响，陶瓷定滑轮的高光洁度使得绳子与其摩擦力非常小，对绳子阻塞多用可忽略不计。

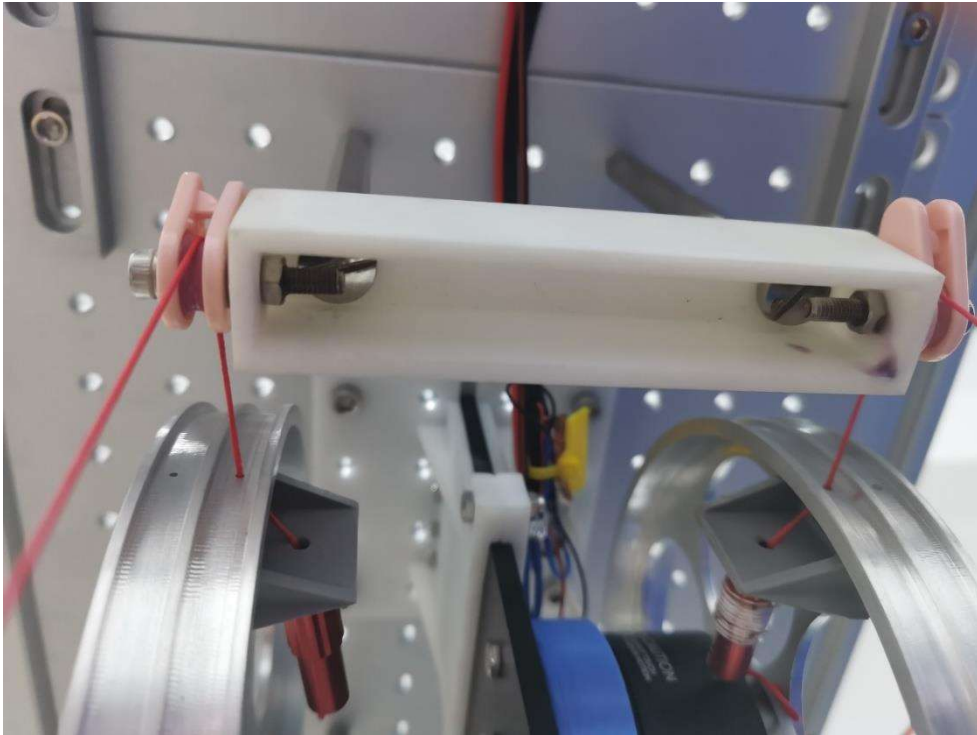


图 10 出绳点实物细节图

微调螺丝为 CNC 加工，分为三个部分，如图 11 所示，黑色部分为微调螺丝底座，其内部为中空设计；中间为弹簧部分以减少螺纹间隙，以提高调节精度；红色部分为微调螺丝螺帽，下部设计为波浪状以增加摩擦力，方便拧螺帽，下部内仅留有一小孔，仅够绳子穿出。如图 12 所示，绳子依次从出绳点、调紧连接件、微调螺丝穿出，在尾端嵌入铝套，是绳子无法回拽。这样便是整个绳子上端的连接机构。





图 11 微调螺丝细节展示

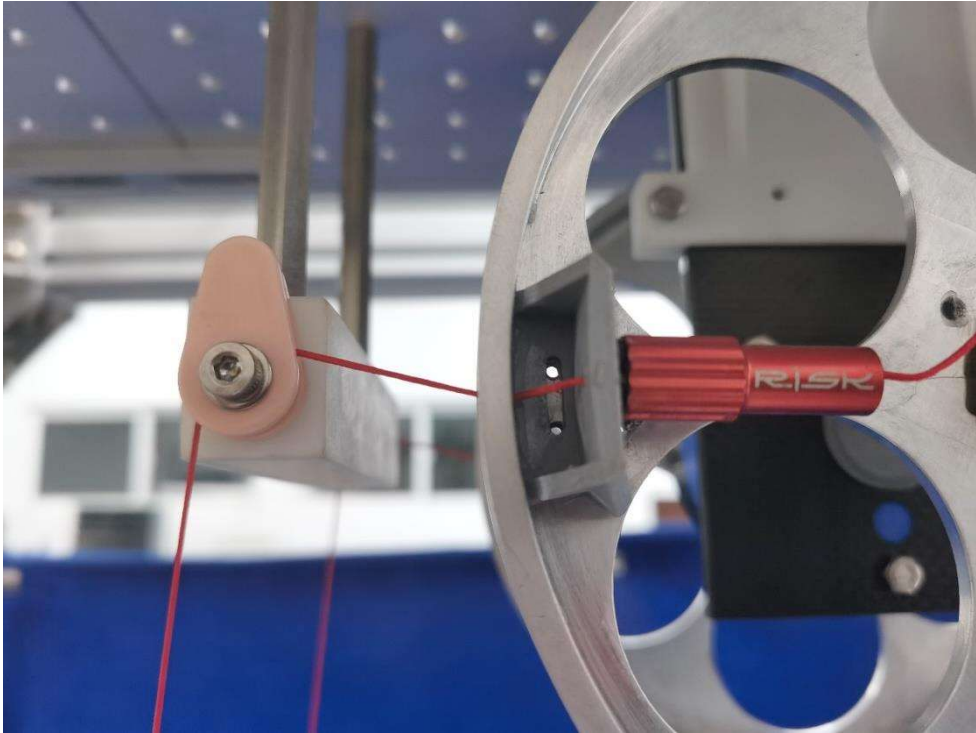


图 12 绳子穿绕方式

表演平台设计为双层结构，采用碳纤维板加工工艺，参考穿越机机架的设计我们为将其分为两大功能，一层为电源及连接模块，负责装载电池和与绳索连接。二层为控制模块搭载两块 BW16 开发板和一块 BMI088 IMU。一层板子主结构为“X”型，X 的每个末端负责与相应的绳索相连，X 中间部分为类蜂窝状结构，中间为中空，不仅提高了结构的承重性减轻了板子自身重量，还为装载电池提供了便利，在板子边缘的槽不仅可作为装载各式各样电池的结构，且可作为走线的结构使整体更加美观。一层板子一头一尾以及中间两边提供了各式各样的螺丝孔，可为后续的升级加装模块提供丰富的接口。

二层板子的轻薄化进一步减轻了整体的质量，且提供了各式各样的槽以及螺丝孔，可加装各类传感器及控制器。极大地丰富了平台的可玩性，可配合底部线狮做出更多动作。同时二层板还留有一些较粗的中空部分可将一层的电源线穿过来为二层控制器和传感器供电。

二层板和一层板采用中空铝合金加螺丝相连，不仅减轻了板子的质量也加强了整体的结构强度，控制部分更为安全。线狮则通过绳固定在平台下部，在平台下方悬吊着，也可以在平台上安装更多的舵机来控制线狮的绳索，使线狮做出更丰富的动作。

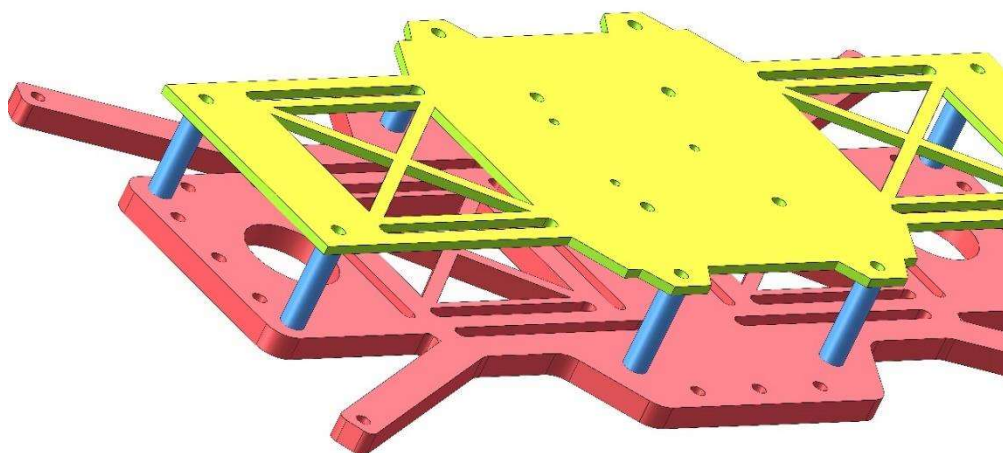


图 13 表演平台模型图

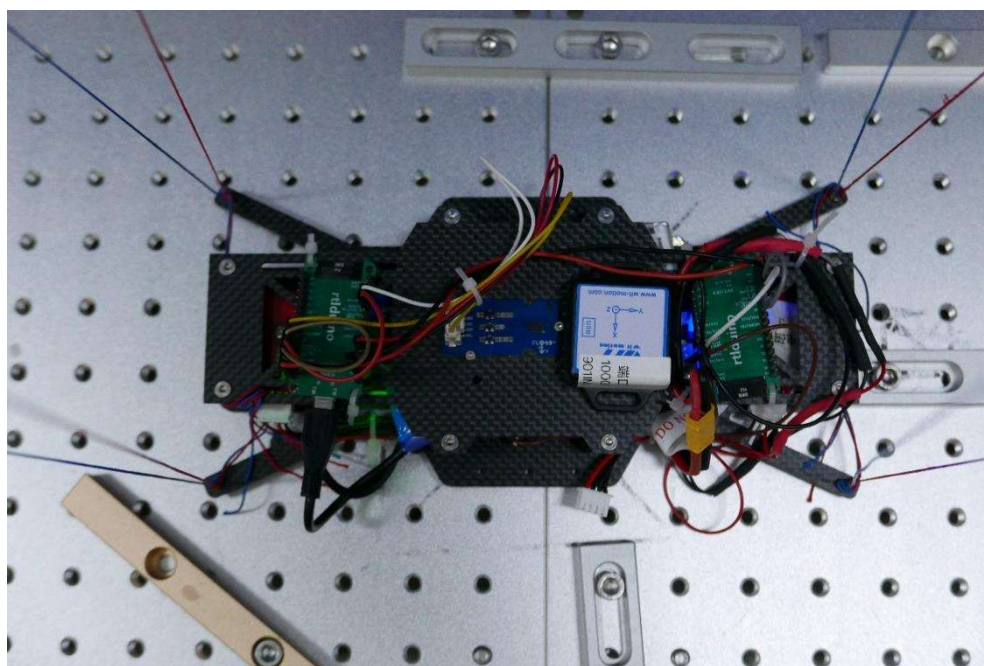


图 14 表演平台实物图



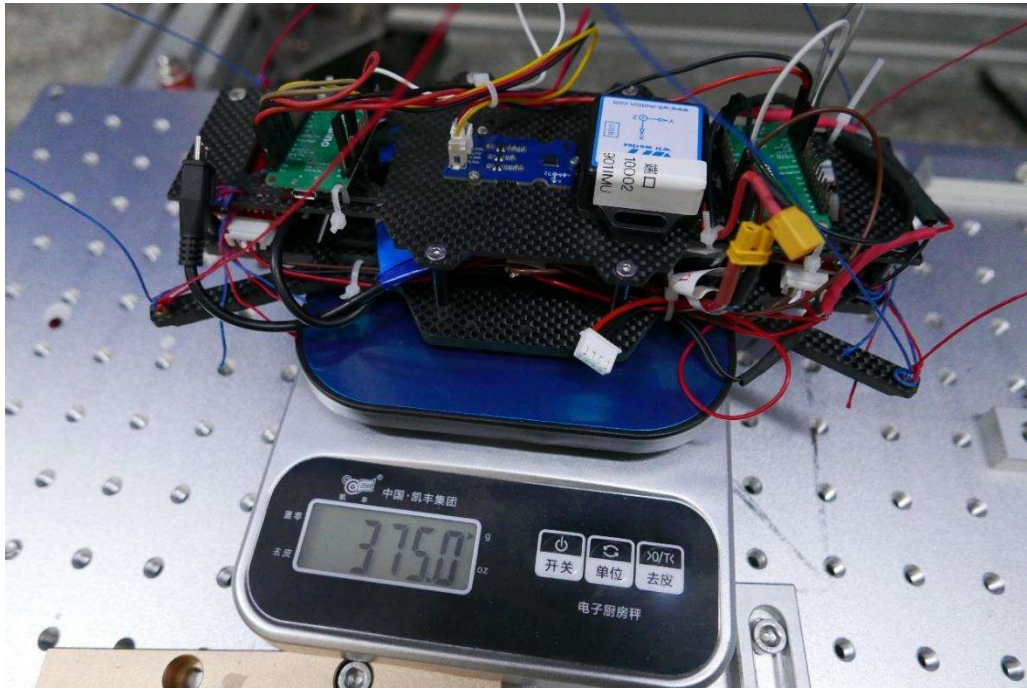


图 15 表演平台质量

#### 4、控制部分

两个电机由 can 总线与上位机 (pc) 相连，上位机由此可获得电机状态，以及控制电机。承重平台上拥有搭载 Realtek RTL8720DN 型号芯片的 BW16 开发板，该开发板通过 spi 与 IMU BMI088 进行通信，获取加速度信息，并进行姿态解算。把解算后的信息通过 WiFi 局域网传输予上位机，上位机获得平台坐标及姿态信息后，通过 PID 算法控制电机，使平台运动趋于稳定，以更好地实现平台运动，表演线狮。由于上位机由 usb 控制两个电机组成的 can 网络，所以我们采用了 Kvaser Leaf Light V2 来组装 can 网络并转换为 usb 进行通信，以达到更低的延迟更高的控制频率，来实现更平稳的运动。





图 16 软硬件结构图

上位机在 MATLAB 中将处理好的数据以帧的形势发送给 can 总线分析仪，每帧可控制四个电机，给定电机高八位和低八位，电机则同样以数据帧的形势将电机机械角度、转速、实际转矩电流和电机温度通过 can 总线以 1k 的频率向上位机发送。

该电机提供了两种控制方式分别为 can 总线和 pwm 控制，之所以采用 can 总线控制是因为 can 对上位机的支持更好，发送和接受的数据以帧的形式，并且频率更高，对上位机处理和发送更加友好，简化了上位机的操作。

标识符: 0x1FF  
帧格式: DATA

帧类型: 标准帧  
DLC: 8 字节

数据域	DATA[0]	DATA[1]	DATA[2]	DATA[3]	DATA[4]	DATA[5]	DATA[6]	DATA[7]
内容	电压给定 值高 8 位	电压给定 值低 8 位	电压给定 值高 8 位	电压给定 值低 8 位	电压给定 值高 8 位	电压给定 值低 8 位	电压给定 值高 8 位	电压给定 值低 8 位
电机 ID	1		2		3		4	

图 18 电机接收数据格式

标识符: 0x204+ 驱动器 ID  
帧格式: DATA

帧类型: 标准帧  
DLC: 8 字节

数据域	DATA[0]	DATA[1]	DATA[2]	DATA[3]	DATA[4]	DATA[5]	DATA[6]	DATA[7]
内容	机械角度 高 8 位	机械角度 低 8 位	转速高 8 位	转速低 8 位	实际转矩电 流高 8 位	实际转矩电 流低 8 位	电机 温度	Null

图 19 电机发送数据格式

上位机与表演平台进行通信则是通过无线局域网。WiFi 采用 5G 标准以 udp 数据包形式进行传输。首先将上位机，两块 BW16 板连接至统一 WiFi 下，分配给他们固定的 IP 地址。一块 BW16 通过 SPI 与 IMU 进行通信，SPI 每次通信可传输八位数据，以三个角速度高八位，低八位三个轴向加速度高八位低八位以及温度依次传输，BW16 将数据整合依照约定的顺序整合为一段 96 字节的 udp 包向上位机发送。上位机接收后以约定的顺序拆解 udp 包，每 16 个字节为一组，进行识别，读取角加速度和轴加速度，并解算平台姿态和坐标。给电机闭环控制提供数据。另一台 BW16 则以同样的方式获取上位机的指令和向上位机发送数据，用以控制其他配件。

整个系统都以低延迟为设计目标，通信所选用的技术标准以延迟低为优先考虑因素，所以整个系统的延迟能稳定在个位 ms，为控制提供了良好的硬件基础，能更迅速的对电机进行控制，尽量原汁原味的还原线狮的表演动态。

在两自由度的运动空间中，由八绳索提供的拉力和吊并联线自身的张力可控制表演平台的平动，并且由拉力抽象而成的二维向量在当前位置具有唯一解。我们将该解通过伺服系统进行处理转换成电机所需要的电流信号，以控制电机的走步，进一步控制表演平台的平动。输入变量后软件将坐标转化为电机的转角，通过两台电机之间的约束关系，以达到控制表演平台的目的。在以底部定位板为基点建立的笛卡尔坐标系中，仅需要控制 2 台电机按照约束关系转动便可实现。同时引入 PID 控制来增强系统的控制效果。

整个系统共划分 3 个模块：

1、电机走步监控

电机走步监控模块的主要功能是采集信号和信号处理，电机通过 USBCAN 工业控制总线向个人计算机传输数据，由电机走步监控模块进行数据接收。

2、电机走步控制

电机走步控制程序主要由输入绳长转化、PID 控制模块两部分组成。绳长转化将用户输入的绳长变量以一定的比例关系转化为电机转角，通过电机转角的变化来改变绳长。PID 控制模块的设计目的主要是减少电机伺服系统的响应时间，减少系统的超调量增加系统的稳定性。

3、可视化展示

软件对系统的期望输出量和实际输出量进行比较，将比较结果展示到用户交互界面以便于用户研究。

3.3 软件算法结构

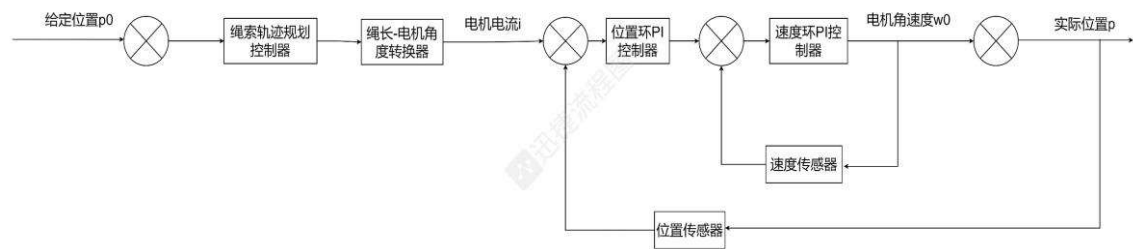


图 20 软件算法结构图

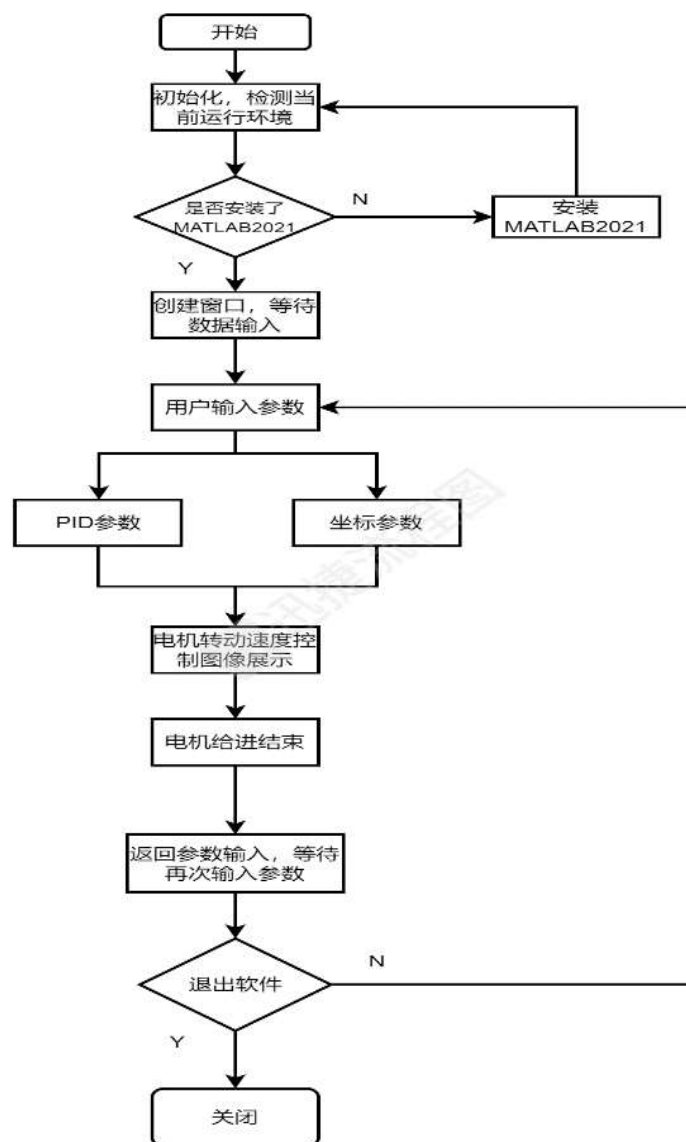


图 21 软件运行流程图

## 5、运动原理

参照图 4、图 5、图 6，一种绳驱动并联线狮机器人，包括机架、连接模块、第一卷筒组、第二卷筒组、导绳滑轮、凯夫拉线、表演平台。

每只卷筒上的两出绳点关于卷筒轴心中心对称，且同轴两卷筒上的两对出绳点连线之间平行，引出的绳 39、40、41、42 经过导绳滑轮连接到承重平台 67 的 4 个连接点，保证同一组卷筒引导出来的 4 根绳两两平行，则承重平台可在空间内进行二自由度的纯平移运动。

本机器的平台的具体移动方法如下：

- 1、通过左右两端的伺服电机 13、14 正反转，可带动各自同轴的两卷筒正反转，绳 39 的一端连接于卷筒的出绳点，则卷筒的正反转对应绳 39 的收放。
- 2、通过第一卷筒组和第二卷筒组的同时收或放绳，可实现表演平台 67 的升或降，即竖直方向的平动。
- 3、通过第一卷筒组收绳，第二卷筒组同时放绳，可实现表演平台 67 向左移动；通过第二卷筒组收绳，第一卷筒组同时放绳，可实现表演平台 67 向右移动。实现了水平方向的平动
- 4、通过第一卷筒或第二卷筒收放绳，可实现平台的左倾右倾。

本机器的具体工作流程如下：

线狮至机架下方，本绳驱动并联平台线狮机器人的表演平台 67 移动至上方，根据预先储存的指令，控制第一二卷筒组进行转动，来移动平台表演线狮。