

RoboMasters2021 平衡步兵机器人 机械技术综合说明文档

哈尔滨理工大学荣成校区 SPARK 战队

202108



RoboMasters2021 平衡步兵机器人 机械技术综合说明文档.....	1
1. 前言.....	3
2. 设计参数.....	3
2.1 设计目标.....	3
2.2 实际参数.....	3
3. 机构方案及原理.....	4
3.1 机构方案.....	4
3.2 方案对比.....	5
3.3 机构原理及设计方案.....	5
3.4 机构设计简述.....	8
4. 技术难点.....	10
4.1 技术难点.....	10
4.2 机构演化.....	12
5. 未来展望.....	13
附录-Webots 仿真流程.....	14
一、 仿真的目的.....	14
二、 仿真软件.....	14
三、 建模过程.....	14
1、 总述.....	14
2、 形状导入.....	15
3、 含电机关节.....	16
4、 并联四连杆.....	17
5、 其他外设.....	18
四、 控制器框架.....	19
1、 Webots - vscode 项目文件配置.....	19
2、 初始化.....	19
3、 时实参数检测.....	19
4、 运算.....	19
5、 执行器.....	19
五、 控制算法设计-LQR.....	19
六、 控制效果.....	22

1.前言

21 赛季初新增设平衡步兵机器人，此前并无先例设计用于参考。为了结合自身研究兴趣，增设了轮足合一的需求来满足 200mm 台阶跳跃的功能。本文将介绍从 0 到 1 的设计流程，如何在未知达成目标的前提下，运用仿真软件辅助迭代的跨领域综合系统设计。希望带大家将仿真软件赋能机械设计，在设计初期将控制逻辑贯穿到设计流程，以此来反馈优化模型结构，验证机构合理性，形成交叉融合的新设计模式。

目前已经实现除后空翻所有能想到的功能，包括跳跃，抗阻，陀螺，高度自适应，侧抗冲击，缓冲跳跃，转弯补偿等。对比国内外同类型无明显差距。本次进行开源，以此希望为轮足在赛场上能够得到广泛应用。以此将着重介绍设计关键点，以及难点解决方式，对于基础设计在此不多赘述。

致谢：在这里感谢 20 赛季上海交通大学开源一款稳定的上供弹云台方案，此前本队偏向侧供弹方案，在平衡步兵上受限体积限制，因此在此基础开源基础上进行了修改适配，缩短了整体的研发进程。

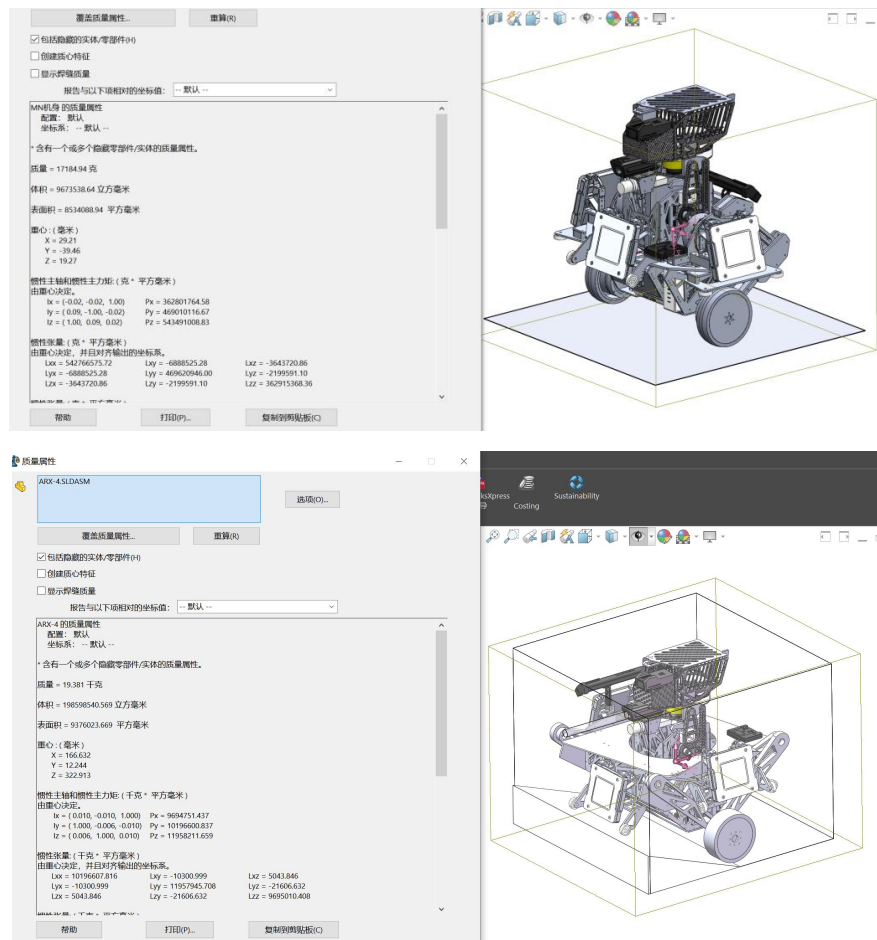
2.设计参数

2.1 设计目标

表 2-1 ARX-3 & ARX-4 需求列表
复活后可站起；
跳跃 200mm 台阶（14KG）
腿部最低状态 18KG 步兵机器人，4.5m/s 正面撞击不倾倒
腿部自适应地面
适应髋关节角度保持平衡
10 阶 200mm 台阶 3m/s 速度冲下结构稳定

2.2 实际参数

型号	重量	尺寸参数长宽高	最大垂直跳跃高度
ARX-3	18KG	390*527*500mm	160mm
ARX-4	19.5KG	490*600*500mm	350mm



3. 机构方案及原理

3.1 机构方案

本设计初有两款方案, 即 ARX-3(三连杆方案), ARX-4(四连杆方案)

方案一 (ARX-3): 如图 3-1, 参考苏黎世理工大学 Ascento 机器人的三连杆设计;

方案二 (ARX-4): 如图 3-2, 参照四连杆四足机器人的腿部设计。

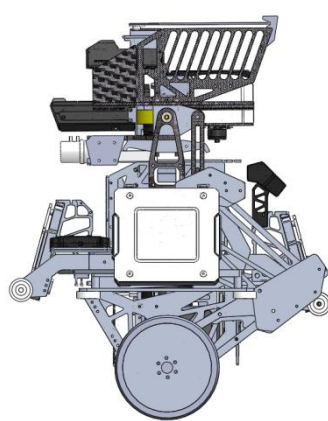


图 3-1 ARX-3 方案设计

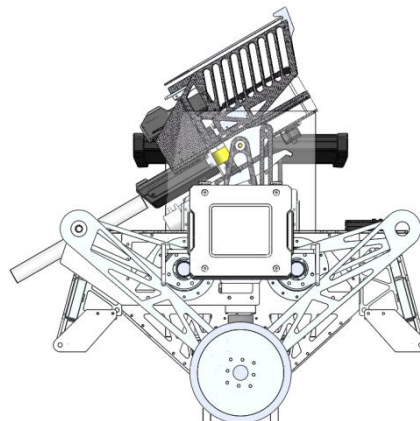


图 3-2 ARX-4 方案设计

3.2 方案对比

表 3-1 设计方案对比		
	ARX-3	ARX-4
优势	双电机即可满足整体跳跃 成本低 重量轻	腿部行程多 跳跃作用时间长 跳跃作用力大
劣势	腿部行程短 跳跃作用时间短 跳跃作用力小	需要四个电机满足整体跳跃 成本翻倍 机体较重

根据表 3-1 可得出，两款方案的优劣势对立。前期出于三连杆方案更有挑战，也出于技术验证目的，选用了三连杆方案。

3.3 机构原理及设计方案



借助 webots，在仿真世界中验证三连杆跳跃是可实现。验证过后，我们需要一个更精确的方法来确定实物机械设计的最优化尺寸。

问题描述：

如果固定身体，三连杆末端的轨迹是一个 S 型曲线，如果三连杆各个长度选取合适的话，轨迹曲线会有一段平直且竖直的部分，在两端点处设计机械限位，即可使得腿部伸缩的全过程中，末端几乎运动在一条直线上。但是由于三连杆系统的连续性和非线性，其末端轨迹并不能保证在一条完美的直线上。于是，我们使用优化方法，将轨迹尽可能地贴近参考直线 $y = x$ 。

模型构建：

构建一个二维模型空间，如图 3-3，将原点定为关节电机的轴心处，**为确定比例，先假定另一个端点坐标为 $(-79.5\text{mm}, 0)$** ，经过几何运算得到末端坐标。 AB 与 x 轴夹角为 θ 。另外，为了方便与实物对比，将下图顺时针转动 135° 即可得到现实情景下的三连杆模型（也就是说现实中水平面在模型空间中为 $y = -x$ 直线）。

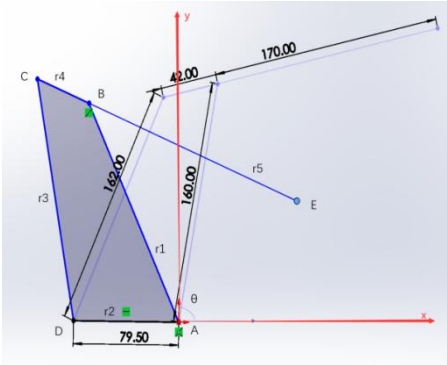


图 3-3 二维比例模拟

添加约束

由三连杆一般规律可得，末端轨迹会与设定参考直线有至多三个交点（或切点）。观察得，当参考直线刚好与轨迹曲线相交三个点时，两端交点中间会平滑且平直。

于是添加约束条件，将始末两端约束在参考曲线 $y = x$ 上，并在 CAD 中构建始末两个状态如图 3-4，并添加等长，共线，点在直线上，点与点重合等约束条件。由于关节电机半径、枪管角度范围等限制，AD 长度 r_2 定为 79.5mm，AD 杆与水平面夹角为 45° ；由于制作规范对步兵尺寸有一定限制，所以将伸展角度设为 100° ；由于缩腿状态身体最低端需要与地面保持一定距离，所以将收缩角度设为 65° 。此时只需给出两个长度尺寸，就能计算出始末状态的所有杆长。我们先给 AB 与 CD 一个相似的杆长（160mm），并留有一定可变裕度（155mm-170mm），在 CAD 中得到另外两个尺寸（45.42mm/172.83mm），同时为其设定一个裕度（40mm-50mm/160mm-180mm）。

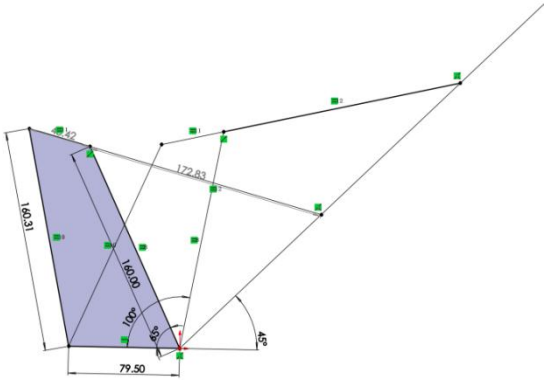


图 3-4 二维比例状态图

计算优化

计算末端轨迹上每一点到参考曲线（ $y = x$ ）的距离(末端轨迹曲线的横向绝对偏差-the Absolute Lateral Deviation of the Terminal Trajectory Curve（ALD-TTC）)并计算最大值（ A_{max} ）与最小值(A_{min})的差，作为一个目标值 A （ $A_{max} - A_{min}$ ）。除了 r_2 ，其他四个长度参数都会影响 A 的大小，即

$A = f(r_1, r_3, r_4, r_5)$

我们构建一个四维参数空间，任意找一个轨迹较平滑的杆长参数组合（160mm，160mm， 45mm， 170mm）作为参考向量

优化目标是找到与设定杆长参数相似的组合，尽可能使得 A 减小，于是我们在原参考向量附近展开，改变 r_1, r_3, r_4, r_5 四个参数，使得 RLD-TTC 取极小。

	R	R	R	R	R	R	R	R	A	A	A
	1	10	3	30	4	40	5	50	max	min	/mm
一次	1	1	1	1	4	4	1	1	0	-	1
	55-170	62.5	55-170	67	0-50	1	60-180	62	.05	1.69	.74
二次	1	1	1	1	4	4	1	1	1	-	1
	60-164	64	60-170	69	0-44	0.4	63-169	63.6	.52	0.16	.68
三次	1	1	1	1	3	4	1	1	0	-	1
	62-166	64.8	68-170	70	9-41	0.2	63-164	63.1	.83	0.68	.51
	1	1	1	1	4	4	1	1	1	-	1

四次	64-166	64.8	69-171	70.2	0-40. 5	0.05	63-164	63.1	.260	0.17 5	.435
五次 收敛)	1 64.5-1 65	1 64.75	1 70-170 .5	1 70.15	4 0-40. 5	4 0.05	1 63-163 .2	1 63.04	1 .246	- 0.18 7	1 .433

表 3-2 连杆尺寸优化列表

裕度设置策略如下：虽然在四维参数空间中 A 值连续可导，但是其是否有很好的梯度性仍难以确定，即映射空间可能具有多个极值点，不适用于梯度下降法；所以我们创新性使用裕度收缩的方法，将每一次的迭代结果作为下一次的中值，同时为了增大精度而减小杆长裕度，进行下一次迭代；循环多次直至收敛。观察最后一列 A 值可知，由于极值点附近较为平滑，所以收敛较快，但是这个结果不排除没有进入到最小极值点的可能性。

运行程序绘制图像，极小值向量为（164.75mm， 170.15mm， 40.05mm， 163.04mm），极小值为 1.43mm.

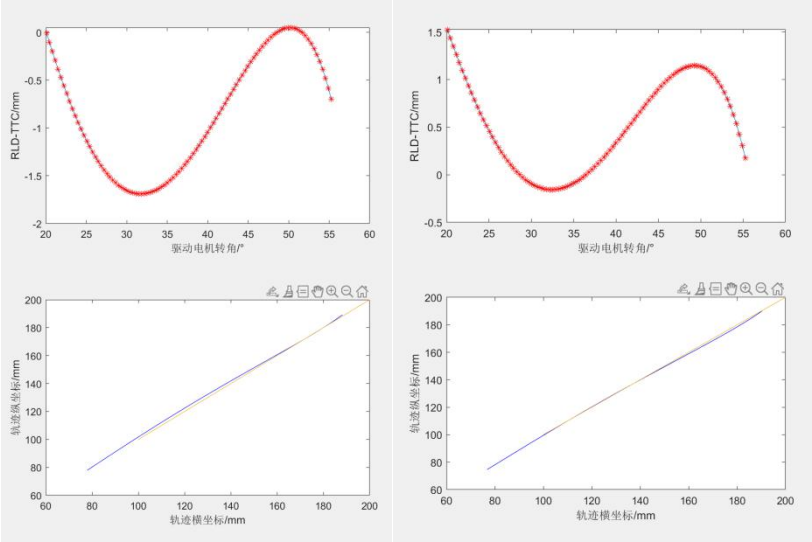


图 3-5 第一次仿真

图 3-6 第二次仿真

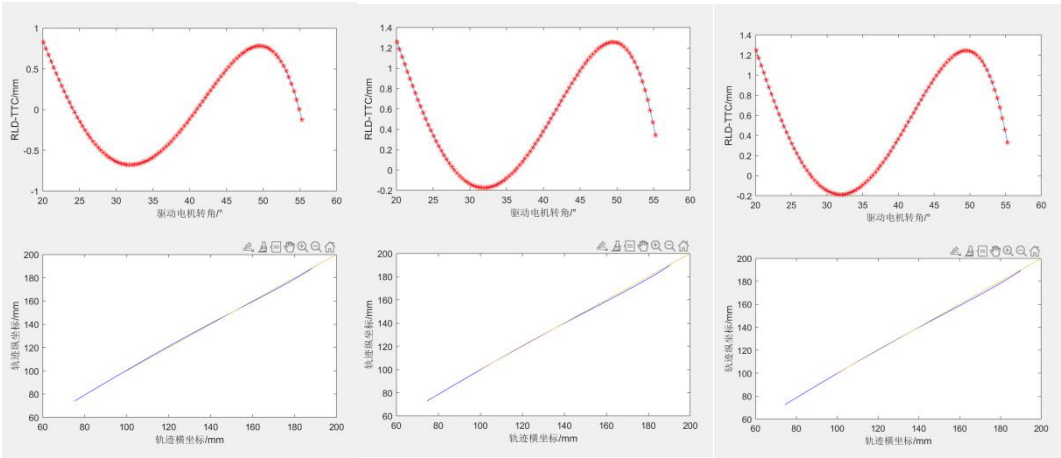


图 3-7 第四次仿真

图 3-8 第五次仿真

图 3-9 第六次仿真

图一为 RLD-TTC 曲线，由图可知，优化过后末端轨迹曲线的横向相对最大偏差可以降低

到 1.433mm，甚至已经可以和机械精度相媲美。

图二展示末端轨迹曲线，不仅平滑，而且与参考曲线高度吻合。

根据仿真结果来确立各连杆长度的比例关系。

随后根据尺寸限制 500mm,以及枪管限制，等比缩放连杆长度，最终形成如图 3-10 所示的高度。

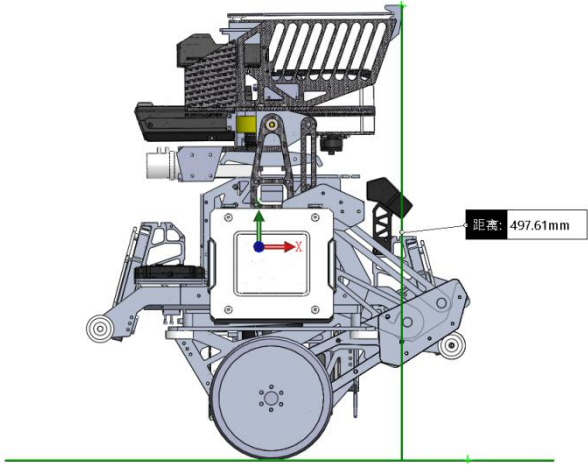


图 3-10 ARX-3 高度示意

同理，ARX-4 采用四连杆结构，形成临边相等的五边形结构，当两电机转动角度相等时会使机体沿着垂直方向抬升，满足重心运动坐标始终垂直地面的需求。在下文 4-2 机构演化时会着重讲解四连杆的尺寸确立。

3.4 机构设计简述

设计语言筵席板材拼接方式，仅用极少的铝制加工件来连接轴系部分。强度保证的同时极大的节省了成本，同时也极大缩短了研发进程。



图 3-11 图纸设计树

3.4.1 机体

机壳一体设计，同时带有支撑以及防护属性，使外壳不单是装饰作用。起初在选用关节电机时依照商品图片并不清楚需要在电机外侧交叉棍子轴承上添加限位块，拿到实物后为最小程度减少更改数量，在外侧增加了如图 3-12 蓝色部分的垫圈，对交叉棍子轴承进行限位来避免电机内部摩擦。

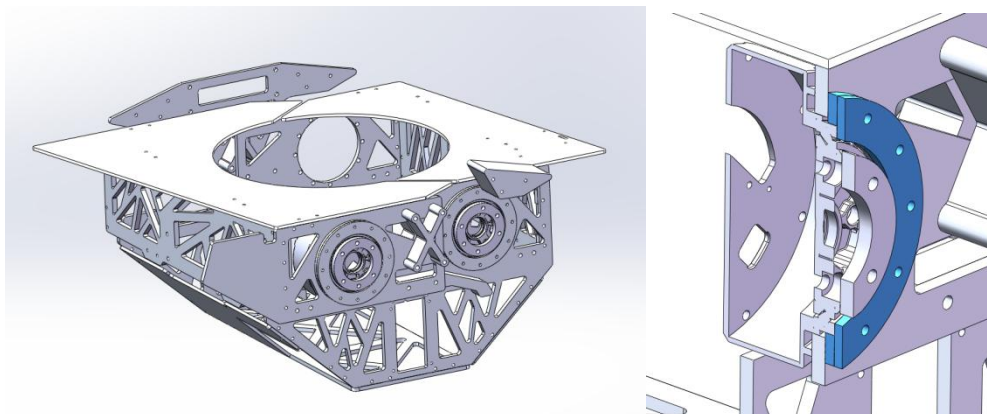


图 3-12 机架设计

如图 3-13，腿部采用 15mm 厚度板材进行组装。利用法兰轴承配合塞打螺栓减小间隙。大厚度板材截面应力大，可抵抗高强度冲击。

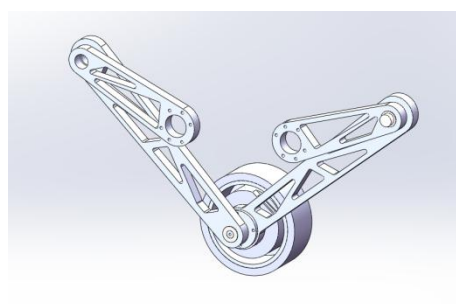


图 3-13 腿部设计

3.4.2 云台

适配 NUC 重新设计了支撑结构，同时新增如图 3-14 图中蓝色部分薄壁铝管，使云台成为一个通用模块，快速适配到 ARX-3 以及 ARX-4 架构

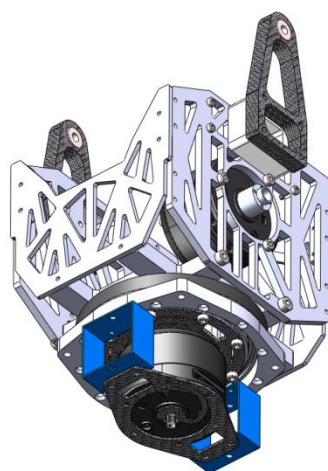


图 3-14 云台设计

4. 技术难点

4.1 技术难点

在无任何资料的参考下，面临着很多未知的问题。例如在规则尺寸限制条件下是否能达到 200mm 台阶，以及选用什么款式电机可满足需求，结构设计存在哪些问题。下文我将着重介绍如何将 Webots 等类似仿真仿真工具引入到设计制造过程中，来实现多元化的设计流程，缩短研发进程，优化迭代方式等。

4-1-1 电机选型与跳跃高度



市面上品类众多的关节电机可供选择，但如何选出最合适的机电系统是一个复杂且困难的过程。而且跳跃时间难以计算，无法通过公式计算出一个高度可信的理论依据。因此我们运用 Webots 仿真工具来实现电机参数的设定，以及跳跃高度的决策。

首先利用 SolidWork 绘制比例模型，导出 wbo 文件后在 Webots 中进行代码编写及仿真运行。[详细仿真过程见附录。](#)

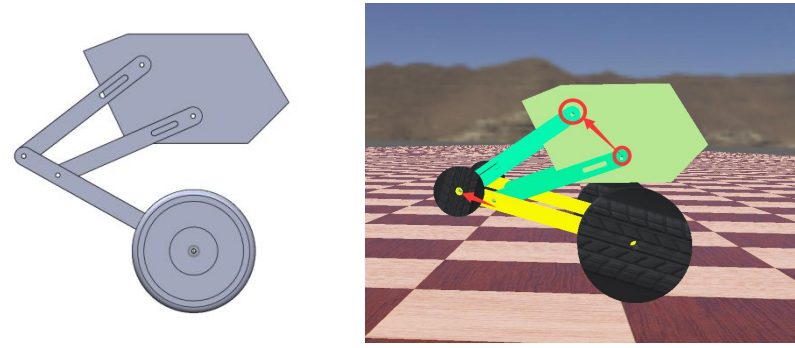


图 4-1 仿真流程示意图

motor	A1	ETH ANYmal	MIT mimi	HT-04
品牌	宇树科技	ETH	MIT	海泰机电
MAX Torque (Nm)	33.5	80	17	35
Rated voltage (V)	24		24	24
Continuous torque	未知	40	6.9	13
Weight (g)	605	1090	440	714
转速 转每秒	3.34			5

表 4-1 电机参数对照表

如表 4-1，当前可供选择的关节电机比较有限，整个行业在 MIT 开源后才逐步衍生出可

最大力 矩/Nm	质心最 大高度 (实验 1)	质心最 大高度 (实验 2)	质心最 大高度 (实验 3)	质心最 大高度 (平均)	实际跳 跃高度
20	0.204	0.204	0.204	0.204	0
25	0.204	0.204	0.204	0.204	0
30	0.204	0.204	0.204	0.204	0
33	0.346	0.354	0.35	0.35	0.01
35	0.361	0.355	0.357	0.358	0.018
40	0.38	0.383	0.388	0.384	0.044
45	0.391	0.385	0.392	0.389	0.049
50	0.41	0.402	0.399	0.404	0.064
55	0.408	0.415	0.408	0.41	0.07
60	0.439	0.427	0.415	0.427	0.087
70	0.432	0.426	0.425	0.428	0.088
80	0.467	0.471	0.467	0.46	0.12

表 4-2 扭矩仿真试验

为了了解实际需要的电机参数，我们在 Webots 中模拟了电机扭矩的参数，如表 4-2 仿真结果得出，在 33NM 可实现跳起功能，但在 33-80NM，其跳跃高度并无明显增加。结合仿真结果与人类关节跳跃分析后得出，在不缩腿的情况下，实际作用时间很短，并且由于推重比的因素，如图 4-2 所示，在跳跃状态 A-B 之间无法在极短时间内将物体弹至一个高速状态且达到较高的高度。为此更改了跳跃策略，增加了 C 收腿的状态，来实现间接增加跳跃高度的功能。

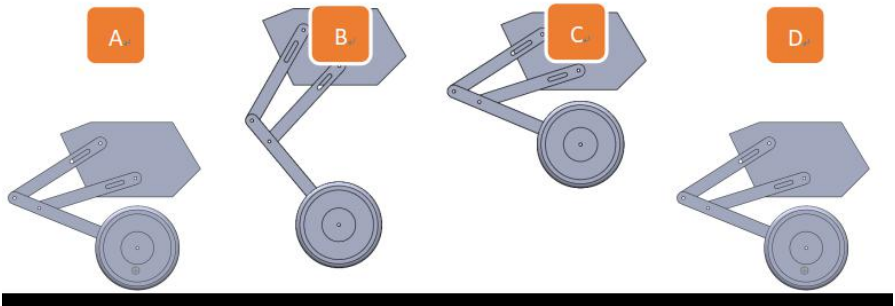


图 4-2 跳跃过程

也就是说跳跃的最大占比因素是，在满足跳跃的扭矩后，腿部伸展距离决定了跳跃高度，在设计时应尽可能提升腿部伸展范围来实现跳跃功能。

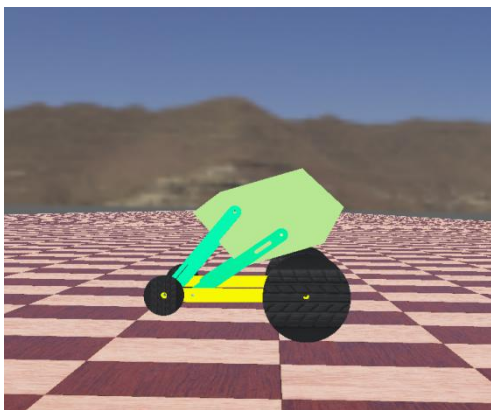


图 4-3 轮组扭矩仿真测试

同理，如图 4-3 运用 Webots 来对轮组电机进行仿真，设定峰值扭矩。测试在初始位置偏差较大时是否能够站立，利用编译好代码后即可判断出适合的电机参数，这样以来再去挑选性价比高的电机很节省研发时间以及研发成本。

类型	关节电机	轮组
ARX-3	宇树 A1*2	t-motor
ARX-4	宇树 A1*4	RMD-L-9015

测试视频中 3.5NM 足以自启动复位，以及抵抗撞击。当然和四个 3508 对峙还是有差距，但仅需选择扭矩更大的电机即可。

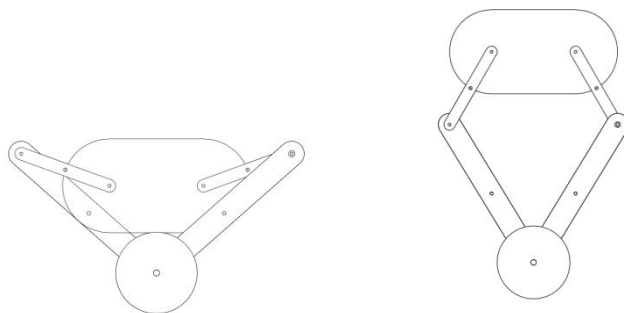
由以上结论最终选用了**髋关节峰值 35NM 的电机，轮组 3.5NM**，来实现短时间高爆发输出来满足跳跃的需求，同时在规则高度限度内尽可能提升腿部伸展距离，即图 3-6 中所展示的整机高度 497mm。腿部伸展 150mm 来最大限度的实现**当前规则下 ARX-3**的跳跃功能。

虽然当前规则下 ARX-3 架构无法满足 200mm 台阶跳跃，但出于对巧妙结构验证，以及验证实物与仿真的差距，最终制作了一台样机，来作为测试平台为之后设计积累宝贵实战经验。

4.2 机构演化

由上文结论可知，机器人的跳跃高度最大的决定性因素是腿部伸展距离，在 500mm 规则的限制下无法满足 200mm 台阶的跳跃功能。因此我们又设计了如图 4-3 的 ARX-4 方案，来实现伸缩距离的翻倍。在同等机器人的高度限制下，可满足静态伸展 300mm 的伸缩量，满足了设计冗余的需求，可是实现轻松跳跃至 200mm 台阶，同时对电机选型进一步放宽，因为一组两个电机共同驱动的因素，每个电机的峰值扭矩满足 20NM 即可实现跳跃需求。对电机的负载也起到了保护作用。

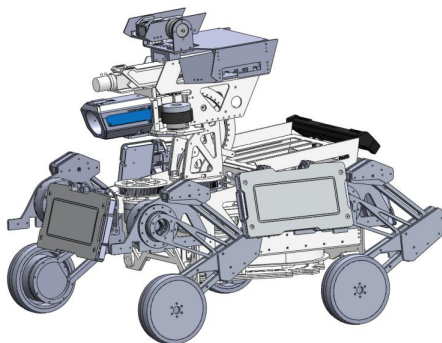
根据 ARX-3 的腿部设计思路，确定比例->仿真->尺寸确立的方法，设计了 ARX-4 架构的双足轮样机。



如图 4-3 四连杆方案

5. 未来展望

1. 结构设计中希望能够想出更巧妙的设计来实现高度上的进一步提升；
2. 可针对 ARX-3 架构施加扭簧，来实现更高的跳跃，同时可减轻电机的负载；
3. 选用 Tof 或其他距离传感器来实现自动跳跃流程；
4. 中心供弹拨盘兴起，可用于下供弹云台设计来进一步提升性能；
5. ARX-3 架构虽然不能满足步兵机器人弹跳的需求，但可用作在英雄机器人上进行跳跃；



最后祝大家早日跳上 200mm 台阶。



ARX 项目交流群

附录-Webots 仿真流程

一、 仿真的目的

在机械设计和硬件选型过程中，我们常常会凭经验设计，凭经验选型。这固然体现了一个工程师的素养，但是当遇见一些难以仅凭经验来设计的定量化指标的情况，仿真就会显得尤为重要。

例如，我们在设计平衡步兵时，提出其需要实现跳跃功能。跳跃的目标有两个层级，第一个是可以跳上 20cm 的台阶；第二个是原地起跳 30cm，在机械设计上给机器人跳跃提供更宽的控制裕度，同时令操作手更好实现。

为此，提出了两种腿部方案。第一种是三连杆结构，单电机驱动，一条杆连接电机，主动输入力矩，一条是被动杆，另外一条是小腿。另一种是四连杆，双电机驱动。

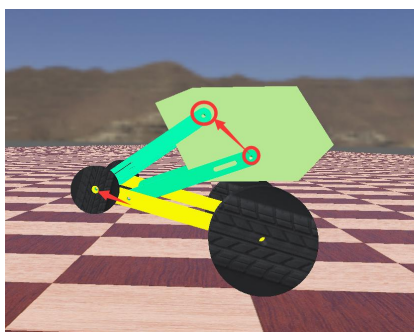


图 1 ARX-3

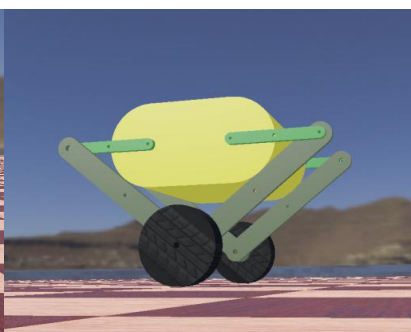


图 2 ARX-4

虽然苏黎士联邦理工学院和腾讯 robotics 实验室都已经有过类似的研究，但是其论文上的数值还是受到参数调节，实验工况等多重因素造成，无法对我们定量化的目标给予一个保证。所以我们采用了“先仿真，再建模”的设计流程。在 webots 中建模并设计控制器，对其平衡和跳跃两个状态进行仿真验证。在其基础上进行机械选型和设计。

二、 仿真软件

如今流行的仿真软件众多，例如 V-REP、gazebo、webots 等等。其中 V-REP 的优势在于可以将模型直接导入，同时具有多种 API，支持多种物理引擎，兼容 ROS 开源等；gazebo 的优势在于其上限较高，可以完成较为复杂的仿真，同时支持深度强化学习等。Webots 是一款商业仿真工具，近两年间开源，可免费使用。他的优势在于可以简化模型，以节点为基本单元迅速构建机器人的仿真体。可以快速运算和迭代；支持多种语言开发，包括嵌入式开发语言 c，算法函数、主任务等代码可以；支持多种传感器，包括球形轴、单自由度轴、双自由度轴、加速度计、摄像头图传、充电器、磁力计、显示屏、测距仪、雷达、定位系统、惯性测量单元、陀螺仪、语音模块等等。适合本项目对机械设计的快速验证的需要。

三、 建模过程

1、总述

由于 ARX-3 和 ARX-4 的建模思路大同小异，所以本文档只重点介绍 ARX-4 的建模过程。

刚打开 webots 界面只有世界环境和视角两个节点，可以使用向导创建新的项目和机器人控制器

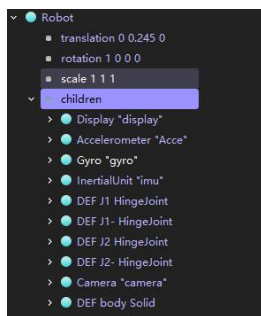


图 3 子节点全览

在 robot 节点上设置显示屏，加速度计，GYRO，IMU，摄像头五个外设子节点，设置四个单自由度关节子节点，一个实物（solid）子节点作为车身。其中车身实物具有形状子节点，为导入节点。

2、形状导入

为了在关键位置做出标识，同时在形状上方便对比实物，我们采用 solidworks 建模并以 VRML-97 格式导出（另存为选择“.wrl”之后一定要检查系统选项中导出格式为 VRML-97 版本）。



图 4 导入文件选项

在 webots 中选择 import 3D Model..并打开另存为的文件即可在这个世界中导入一个 Transform 节点，右键节点选择导出。

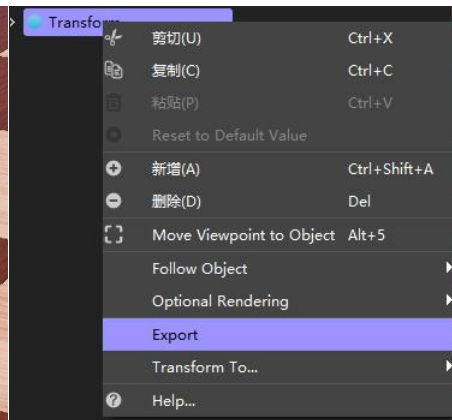


图 5 世界中的 transform 模型

图 6 导出选项

得到一个“.wbo”文件。导出成功之后，这个世界中的 Transform 节点就没有用处了，可以删掉。

在需要这个模型的形状的时候，便可以新增子节点->选择 shape->import 刚才导出的“.wbo”文件。

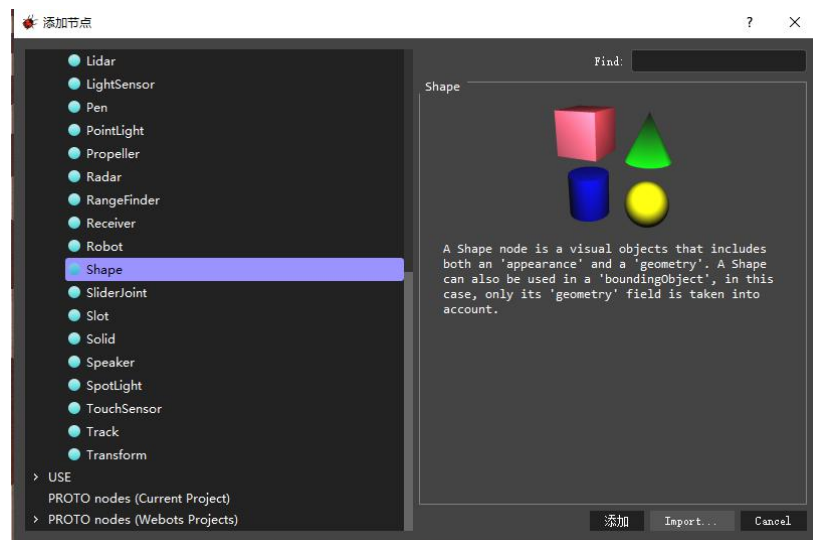


图 7 添加子节点-图形

在这里需要特殊说明一下 solid 节点和 shape 节点的关系：一个节点的子节点都是它的附加物或者属性，solid 代表的是一个实物，它的属性包括形状，边界，质量，位置，名称等等，而 shape 只是 solid 的一个属性，也就是它的一个子节点。而 shape 也有它自身的属性，比如它的外貌，它的几何构型，这些都是它的子节点。我们在 solid 上面建模的时候，只是设定了它的形状中的几何构型，甚至连颜色都没有导入，所以除了几何构型之外的其他属性，还是需要手动加上去的。另外，我们给 shape 定义一个名称之后便可以在它的母节点中直接使用（USE）这个形状了，比如 shape 的母节点 solid 需要设置边界和物理特性，边界就可以直接使用 solid 的子节点 shape 的特性，这样下来我们的物理边界和几何外观就可以完美对应上。

3、含电机关节

每个单轴关节具有三个子节点，分别为轴本身的性质，轴上附带硬件和轴的末端，一般来说，轴的末端是一个 solid 实物，电机的定子连接的是轴的母节点，电机的转子连接的是轴的子节点：末端。

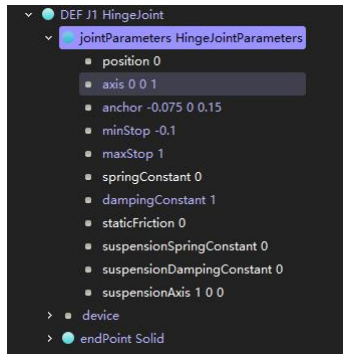


图 8 关节特性节点/字段

对于轴本身性质的配置需要注意设置锚点（**anchor**）和轴的方向，尤其是四连杆这种封闭结构，一旦出现方向错乱，连杆结构就会自锁。

最大最小值（**max Stop** 和 **min Stop**）代表的是机械限位，原则上轴的母节点和末端实物之间的相对转交不会超过机械限位，但是如果转速过快，很有可能会稍稍超过机械限位一点的。

Damping 代表是阻尼，这里为了更逼真得模拟电机，于是在其上加了一点阻尼，阻尼和静摩擦在节点配置上是分开的，阻尼始终与速度成正比，而静摩擦时恒定不变的。弹性系数子节点可以模仿扭簧，但是由于无法定量控制扭簧参数（也就是无法知道 **spring Constant** 参数对应现实世界里面的哪个参数），所以我们宁愿在控制器中加一个虚拟扭簧电机。

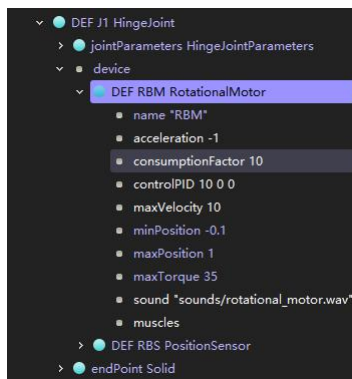


图 9 关节外设字段

在外设中可以添加电机，编码器和刹车片。我们只添加了电机和编码器。由于我们输出的量时扭矩，所以 **control PID** 依旧使用默认值。

相比于 **max Stop** 和 **min Stop** 代表的机械限位，这里的 **min Position** 和 **max Position** 是电控限位，需要在程序里读取节点中配置的电控限位并通过程序来实现，**webots** 环境不会对你的模型做出电控限位。

最后 **endpoint** 选择一个 **solid** 实体，作为大腿（指靠近身体的那跟杆）。

4、并联四连杆

四条大腿具有相似的节点配置，而四条小腿并不相同。

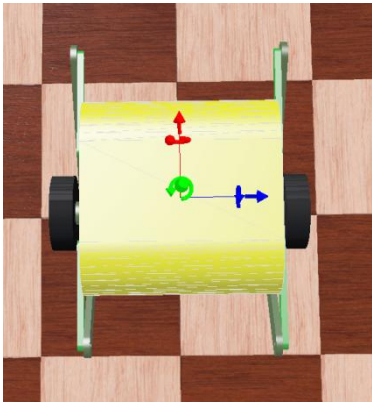


图 10 四连杆模型俯视图

Webots 中常见串联结构，下面一根杆是上一根杆的子节点（轴）的子节点（末端），像 ARX-3 和 ARX-4 这种闭环杆结构，需要找到一个环接点，在这个点上，一端的实物需要设置 name 节点，令一端新增一个单轴子节点，其 endpoint(末端)选择 SolidReference，配合到有 name 节点的一端。

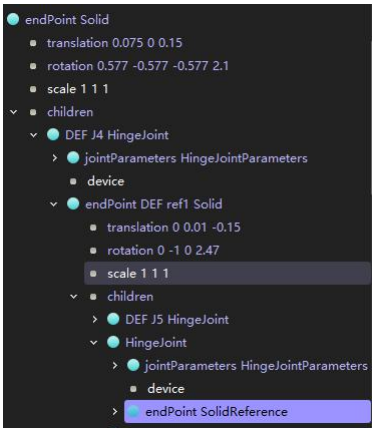


图 11 串联杆

俯视来看，红色 x 轴指的方向是前进的正方向，绿色 y 轴指向天空，蓝色 z 轴指向右侧。由图可见，前面的小腿在大腿的外侧，末端链接轮毂电机。后面的小腿在大腿的里侧，作为前小腿末端的一个参照物。

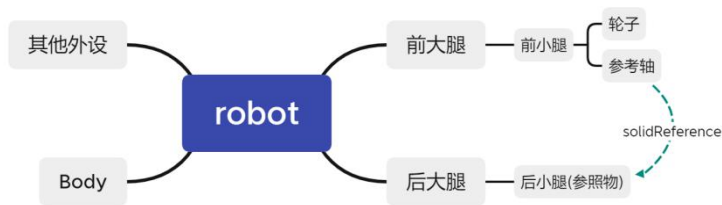


图 12 腿部闭环设计思路

5、其他外设

相机和显示屏可以设置长宽。

函数	功能	备注
wb_camera_enable (WbDeviceTag tag, int sampling_period);	使能	其他外设同理

<code>const double *wb_gyro_get_values (WbDeviceTag tag);</code>	检 测 角 速 度 值	返回的向量是指向由 Accelerometer 节点管理的内 部值的指针，因此释放该指 针是非法的。此外，请注意， * 指向的值仅在下次调用 wb_robot_step 或 Robot::step 函数之前才有效。如果长时 间需要这些值，则必须将其 复制。
<code>const double *wb_inertial_unit_get_roll_pitch_yaw (WbDeviceTag tag);</code>	检 测 角 度	同上
<code>void wb_motor_set_torque (WbDeviceTag tag, double torque);</code>	设 置 力 矩	单位 N*m
<code>double wb_motor_get_min_position (WbDeviceTag tag);</code>	获 取 电 控 限 位	得到的是节点配置中的 device->rotation Motor 中最 小值
<code>double wb_position_sensor_get_value (WbDeviceTag tag);</code>	检 测 编 码 器 绝 对 角 度	Rotation 编码器返回值单位 为 rad

四、 控制器框架

1、Webots - vscode 项目文件配置

下载 webots 后，在..\Webots\include\controller\c\webots 目录下，有各类外设和节点的 API 库，将用到的头文件复制到项目中控制器的文件夹中，在 vscode 中配置.json 文件添加引用路径。

2、初始化

在 webots 中对一个硬件（电机、传感器、摄像头等）初始化需要在世界文件中给该硬件设置 name 字段。并在控制器总调用 **wb_robot_get_device**（）函数，参数为 name 字符串，返回值为硬件 ID，每一次运行程序，都会给控制器重新分配 ID；然后调用使能函数，参数为硬件 ID 和步长。

在框架中给各种外设射程结构体，同时机器人设成结构体，并将机器人特性和外设设为其成员。

3、时实参数检测

在循环中时实调用检测函数得到检测结果。

4、运算

调用 PID 相关函数来计算关节角度和轮毂电机的力矩。

5、执行器

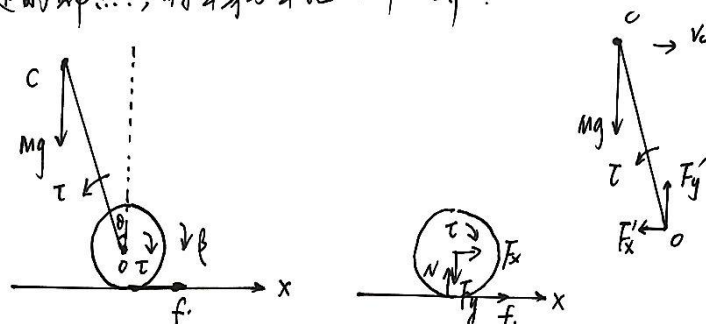
调用 API 将算得参数（本项目中为扭矩）输入进仿真环境。

五、 控制算法设计-LQR

项目采用 simulink-webots 联合仿真首先简化模型，将关节电机伺服，整个车身和腿部作为一个倒立摆整体。在 solidworks 中测得其相对于轮轴的质心位置和转动惯量。

状态空间构建方法 (DYH):

将实物简化为一个二维平面内 (竖直) 的倒立摆。倒立摆质量集中在高处的端点，将车身与车轮分开计算。



设车轮质量为 m ，惯量为 i ，轮轴位移为 x ，速度 $\dot{x} = v$ (m/s)
 车身受到逆时针为正方向的力矩 τ ，轮受到顺时针方向的力矩。
 车轮角加速度为 β ，轮与车身相互作用力为 F_x F_y 。轮半径为 r 。

对车轮:

$$\begin{cases} \sum F_x: f + F_x = m\ddot{x} \\ \sum M_z: \tau - f_r = i\beta \end{cases}$$

$$\text{且 } \ddot{x} = \beta r$$

设车身质量为 M ，以轮轴为转轴，惯量为 I ，倾角 (逆时针) 为 θ ，质心与轴心距离为 L (在 θ 为 0 时有 $\sin\theta \approx \theta$)

对车身: (以 O 为基点)

$$\begin{cases} \sum M_z: MgL\sin\theta + \tau = \frac{dL_p}{dt} \\ \sum F_x: -F_x = M\ddot{x}_c \end{cases}$$

其中 L_p 为车身相对轮轴点的角动量， x_c 为 C 点水平位移。有

$$\begin{cases} L_p = I_c \dot{\theta} + M \cdot v_c L \cos\theta \\ x_c = x - L \sin\theta \end{cases} \quad \begin{cases} v_c = \dot{x} - L\dot{\theta} \\ I_c = I_o + ML^2 \end{cases}$$

此

联立各式，得到:

$$\begin{cases} (rm + rm + \frac{i}{r}) \ddot{x} + (-MrL) \ddot{\theta} = \tau \\ -ML\ddot{x} + I\ddot{\theta} = MgL\theta + \tau \end{cases}$$

另:

$$a = rM + rm + \frac{z}{r} \quad c = -ML$$

$$b = -MrL \quad d = I$$

$$M_{2R} = ad - bc$$

可以简化为:

$$\begin{cases} a\ddot{x} + b\ddot{\theta} = \tau \\ c\ddot{x} + d\ddot{\theta} = MgL\theta + \tau \end{cases}$$

可得:

$$\ddot{x} = \frac{d\tau - b(MgL\theta + \tau)}{ad - bc} \quad \ddot{\theta} = \frac{a(MgL\theta + \tau) - c\tau}{ad - bc}$$

$$= -\frac{MgLb}{M_{2R}} \cdot \theta + \frac{d-b}{M_{2R}} \cdot \tau = \frac{aMgL}{M_{2R}} \theta + \frac{d-c}{M_{2R}} \cdot \tau$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} A_{21} &= \frac{aMgL}{M_{2R}} & B_{21} &= \frac{d-c}{M_{2R}} \\ A_{41} &= -\frac{MgLb}{M_{2R}} & B_{41} &= \frac{d-b}{M_{2R}} \end{aligned}$$

有

$$\ddot{\theta} = A_{21}\theta + B_{21}\tau$$

$$\ddot{x} = A_{41}\theta + B_{41}\tau$$

另

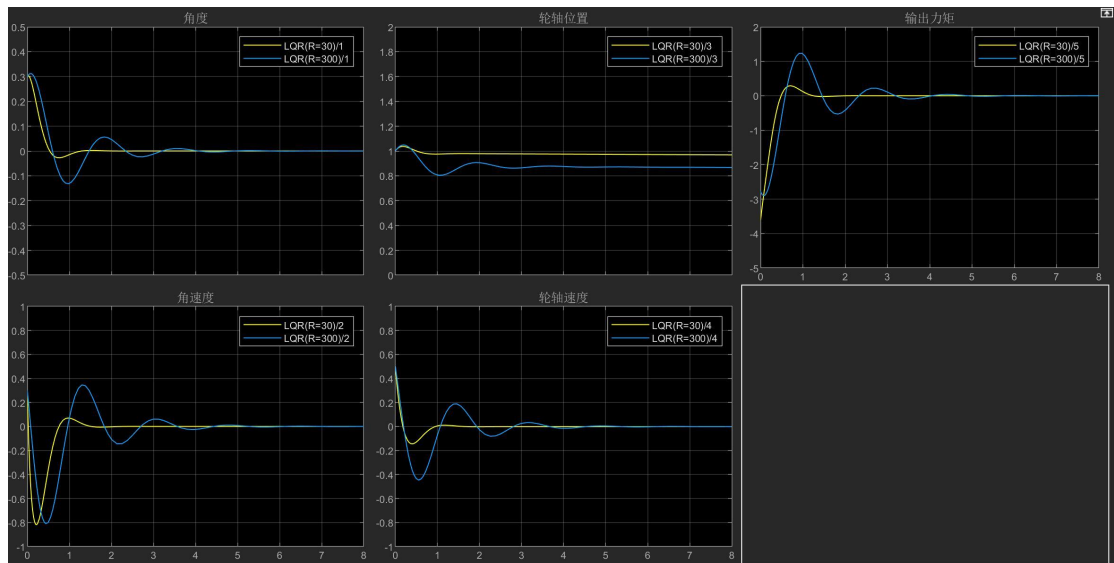
$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ A_{21} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ A_{41} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ B_{21} \\ 0 \\ B_{41} \end{bmatrix}$$

有:

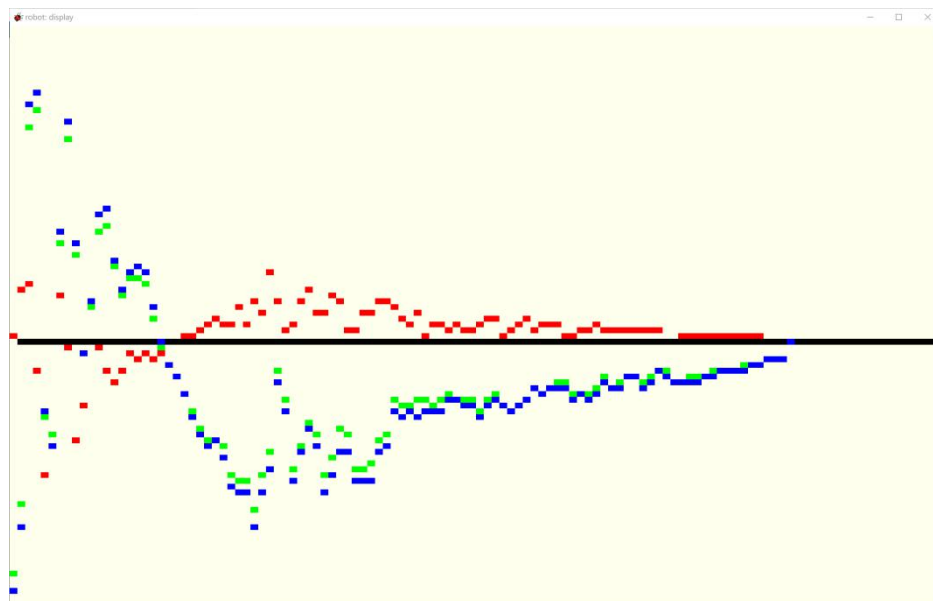
$$\dot{\tilde{q}} = \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \ddot{\theta} \\ \dot{x} \\ \ddot{x} \end{bmatrix} = A\tilde{q} + Bu$$

于是, 在 **simulink** 中列出上述第二行、第四行两个方程(另两个方程的目的是为了微分, 并入检测量中)。其中控制器采用 **LQR** 算法, 通过调节四个参数 **scope** 观测值(角度, 位置, 力矩)收敛于目标值。

六、 控制效果



在 simulink 中将曲线调到收敛并大致稳定之后，将参数移植到 webots 中：
最后，在 webots 中手写一个数据可视化函数并实时打印车身角度等反馈量和计算量：



其中红色代表轮轴移动速度，绿色代表车身倾角，蓝色代表轮毂电机扭矩。