

北京师范大学珠海分校  
本科生毕业论文

论文题目：独球车 Ballbot 的研究和设计

学 院	信息技术学院
专 业	电子信息科学与技术
学 号	0901040078
学 生 姓 名	彭 昆
指导教师姓名	刘 琨
指导教师职称	副教授
指导教师单位	信息技术学院

2013 年 4 月 20 日

## 北京师范大学珠海分校学位论文写作声明和使用授权说明

### 学位论文写作声明

本人郑重声明： 所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品或成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本声明的法律结果由本人承担。

论文作者签名：

日期： 年 月 日

### 学位论文使用授权说明

本人完全了解北京师范大学珠海分校关于收集、保存、使用学位论文的规定，即：按照学校要求提交学位论文的印刷本和电子版；学校有权保存学位论文的印刷本和电子版，并提供目录检索与阅览服务；学校可以采用影印、缩印、数字化或其它复制手段保存论文；在不以赢利为目的的前提下，学校可以将学位论文编入有关数据库，提供网上服务。（保密论文在解密后遵守此规定）

论文作者签名：

导师签名：

日期： 年 月 日

## 独球车的研究和设计

# 优秀毕业论文

### 摘要

Ballbot 球型机器人是一种满足动态自平衡特性运动于球上的一种机器人，和传统的二轮平衡机器人（如赛格威）相比其具有点接触移动不受地形限制等影响。随着旋转倒立摆技术和传感器工艺的成熟，为设计这样的机器人创造了较为成熟的条件，本文将设计这样的一款机器人并且建立运动模型并进行模型仿真。

**关键词：**球上平衡；机器人设计；全向轮

# 样本

## 仅供参考

## 严禁抄袭

# STUDY AND DESIGN A ROBOT BALANCED ON A BALL ABSTRACT

This paper proposes to discover and design a robot which is keeping the balance on a ball using three omnidirectional and construct the control system of model. This robot is an inverted pendulum on a ball. To compare with an inverted pendulum using two wheels, like the Segway Human Transporter, an inverted pendulum with a single ball can move directly in any direction without turn before driving in some direction. The robot is different with classical multi-wheel statically-stable robots, that is the height and width enough of an ideal, having a high gravity, that balances dynamically on a single wheel based on an enable control system.

**Key words: balance standing on the ball, design of robot, omnidirectional wheel**

样本

仅供参考

严禁抄袭

## 目 录

1 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究目的	3
1.3 研究意义	3
1.4 研究方法	3
1.5 研究思路	4
2 独球车的结构设计	5
2.1 结构设计的硬件需求分析	5
2.1.1 底部球	5
2.1.2 电机及其驱动	7
2.1.3 电源供应	8
2.1.4 全向驱动装置	9
2.1.5 MCU	12
2.1.6 IMU	13
2.2 结构设计效果展示	14
2.2.1 总体效果图	14
2.2.2 独球车结构设计的三视图及其尺寸	15
3 独球车的运作机构分析	17
4 独球车的工作原理及运动模型的建立	18
4.1 独球车的总体工作原理及运动模型建立	19
4.2 独球车全向轮控制球姿态	19
5 独球车的运动模型仿真	22
5.1 运动模型的建立	22
5.2 运动模型系统的仿真	23
5.2.1 开环仿真	23
5.2.2 闭环仿真	24
6 结论及展望	26
6.1 结论	26
6.2 展望	26
参考文献	27
致谢	28



## 1 绪论

### 1.1 研究背景

独球车机器人的是基于对于旋转倒立摆技术技术和全向轮的驱动的一种应用，而在今天，随着半导体工艺的日益完善和低成本微机及陀螺仪加速度计性能的进一步强大，为旋转倒立摆技术的实现提供了可行稳定且切实有效的方案，而随着 CNC 和 3D 打印机的普及，在加工工艺上为全向轮的设计提供了可靠的工艺。图 1-1 这是这撰写本文前，作者对于旋转倒立摆控所取得的初步成果，这也是设计该机器人的理论基础。

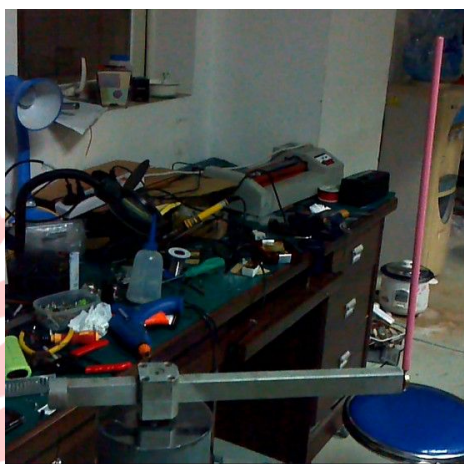


图 1-1 倒立摆实验

第一个成功开发出来的 ballbot 独球车机器人是在 2005 年，是由 Prof. Ralph Hollis 在卡内基梅隆大学完成的。在 2010 年美国匹兹堡申请了专利。Ballbot 的制造是与人类使用大小相匹配，包括其高度和运行轨迹。拉尔夫·霍利斯教授和他的研究小组在卡内基梅隆大学证明了 ballbot 可以经受住强烈的干扰，包括踢并且推搡，也可以应付与家具和墙壁的碰撞。他们的实验表明通过开发 ballbot 可以生成各种人机互动行为，同时他们还给出了规划控制算法以使 ballbot 达到快速、动态和优美的效果。他们还演示了 ballbot 的自主导航能力并通过人来实现其点对点的监视任务。在 2011 年 CMU ballbot 第一次使用一对两个自由度的力臂，它是目前世界上唯一一个拥有力臂的 ballbot。

2005 年，当 CMU ballbot 被提出的同一时间，一群东京大学的研究人员设计了一个可供人坐的独球车，它的平衡是建立在一个篮球上的，名叫 B. B. Rider。然而，他们报告只包含了设计却没有给出实验结果。

自从 2005 年 CMU ballbot 被提出，世界上其他几个组织也相继开发出了独球车。Masaaki Kumagai 教授 2008 年在日本东北大学开发出了 ballP。Kumagai 教授和他的团队展示了独球车承载负荷的能力，独球车被证明了可以用于合作与运输。他们开发了一些较小的独球车，并演示了怎样使用它们进行合作和运输。

一群在瑞士联邦工程学院的学生在 2010 年开发了 Rezero ballbot。Rezero 再次演示了 ballbot 运行时的快捷和优美。

目前世界上公认的较为成功的独球车有以下三款：

CMU ballbot: 第一个成功的独球车, 制造于卡内基梅隆大学 2005 年。由 Ralph Hollis 教授开发。图 1-2 所示

BallP ballbot: 由 Masaaki Kunagai 教授在日本东北大学 2008 年开发成功。图 1-3 所示

Rezero: 2010 年在 ETH, Switzerland 开发成功。图 1-4 所示

CMU ballbot: 包含 2 个 DOF 胳膊, 它是第一个截至到目前为止唯一一个拥有胳膊的独球车。图 1-5 所示



图 1-2 ballbot

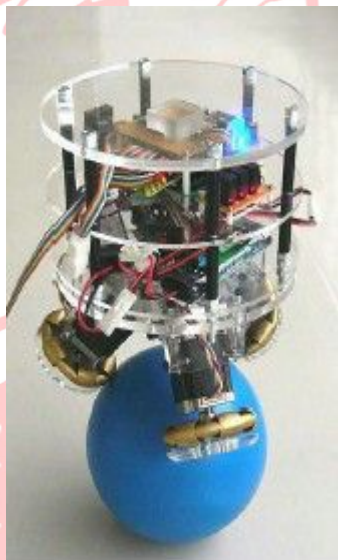


图 1-3 BallP

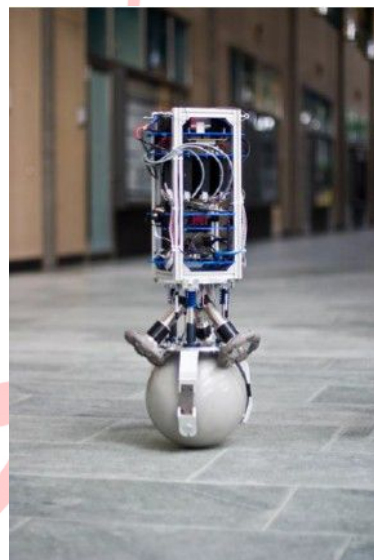


图 1-4 Rezero

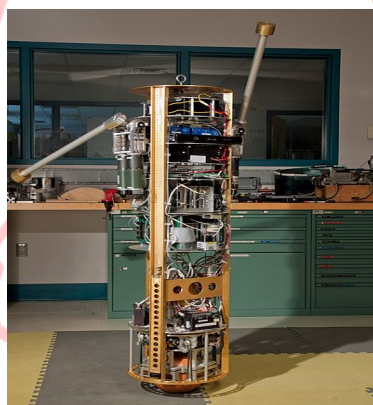


图 1-5 包含包含 2 个 DOF 胳膊的独球车 CMU ballbot

总的来说, 在检索的范围内, 国外对于独球车的研究还处于大学实验室研究状态, 不同的实验室有着自己对于独球车独特的研究成果, 处于不同的研究形势下, 没有一个确定的探讨, 尚未作出统一的制造方案。

而在国内的检索未查询到相关文献，或者说个个大学实验室还处于起始阶段，尚未提出明确研究方案，更具作者的理解，本论文的研究可以作为该领域研究在国内开创性的课题。

## 1.2 研究目的

本篇论文的目的在于研究和设计一种相对以上几款机器人和研究方案进行对比成本比较低廉且稳定使用的独球车机器人。由于时间，经费和专业跨度问题，作者还不具备制造这样机器人的工业条件，所有在其结构上做了设计并且进行仿真。希望通过学习和探讨现有的该类机器人，从中受到启发从而设计出一个对大学本科学生更具有制作和研究意义的机器人方案。并且对其设计结果进行系统的仿真。给国内该领域的研究开创先河。

## 1.3 研究意义

独球车机器人是倒立摆应用的另一种机器人，有别于二轮平衡机器人，在全方位移动，接地单点上有着十分显著的优势，现在独球车的概念已经吸引了大量的媒体关注，同时几个独球车较色出现在好莱坞电影里。因此，独球车有广泛地市场潜力，包括玩具和娱乐行业。研究和设计这款机器人为今后我院对倒立摆技术的应用和动态平衡机器人的研究提供了直接数据和资料。为同学做相关的后续研究打下了基础，为今后独球车机器人应用于地形探测，医疗服务，娱乐等行业做出理论支持。针对国内外背景的理解，本论文研究的内容可以作为国内该领域的开创性课题。

## 1.4 研究方法

本文的研究方法包括：

一、文献研究法。

根据独球车机器人的发展现状，将现有资料进行整理、分析，总结讨论出最佳的设计方案。

二、系统科学法。

本文的研究皆以有独球车这个运动系统展开，通过系统和系统的部分去进行展开和设计。

三、定性分析法

本文将构建独球车的物理运动模型，从定性的角度去分析独球车的运动特性。

四、定量分析法

本文将通过定量分析的办法去设计出符合设计要求和实际需要的独球车模型。

五、模拟法

本文将通过对设计的独球车模型进行模拟仿真，进一步去探究其运动特性。



## 1.5 研究思路

第一章是绪论，提出了本文的研究背景、研究目的、研究意义、研究方法和研究思路。

第二章是独球车的结构设计，首先对独球车设计中硬件进行需求分析选择出所需硬件，之后根据硬件完成独球车的设计

第三章是独球车运动机构的分析，更具上一章的设计去完成独球车运作的系统方框图。

第四章是独球车工作原理和运动模型的建立，通过前面完成的设计去对独球车的工作原理进行定性分析之后去完成运动模型的建立。

第五章是独球车的运动模型仿真，通过 Matlab 的仿真软件对上一章的建立的运动模型进行仿真，并且去探讨仿真结果。

第六章是结语，总结独球车设计的结果和展望。

样本  
仅供参考  
严禁抄袭

## 2 独球车的结构设计

### 2.1 结构设计的硬件需求分析

独球车机器人是一个系统，在设计这个系统之前，本文对这个系统的每一个部分硬件做了设计需求分析和选择，这个系统主要包括：底部球，全向驱动装置，电机及其驱动，MCU，IMU 以及电源供应。当然为了在保证其结构强度的基础上方便制作和降低制作成本，够其机身除了特殊不见外均采用亚克力板材和金属支架制作。

#### 2.1.1 底部球

底部球是独球车的核心元素，和机器人本身是一个有机的系统，它必须传输和承担运行产生的力量，调配机器人重心，同时也要经受住机械磨损而产生的粗糙表面。

球面的高摩擦系数和低惯性是必不可少的。在现有的独球车机器人中 Ballbot 和 Rezero 使用的是一个金属空心球体，它表面上用的是聚亚安酯涂料，一加大机器人和球之间的膜材力。B. B. Rider[5]使用的是一个篮球。而 BallP 使用的是一个保龄球，保龄球表面涂上一层橡胶。

首先底部球应当很好的调配机器人的重心，对于独球车机器人而言，如 2-1 所示，图中有三种球和机体的搭配后独球车重心点的发布：

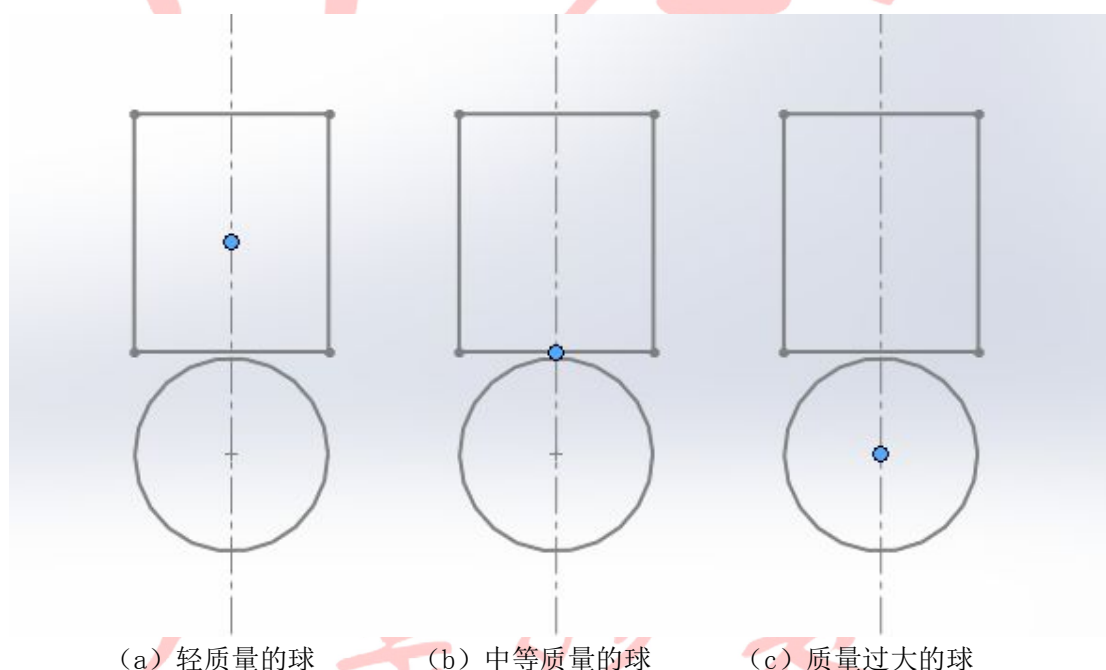


图 2-1 独球车底球机器人的重心分布

从图 2-1 可以看出，当球的质量过轻时（如空心金属球），独球车系统的重

心偏高，位于上部机身出（图 2-1（a）所示），此时，独球车机器人的运动性很较高但是其控制稳定性不足；当球的质量过大时（如保龄球），独球车系统的重心偏低，此时系统的控制稳定性较高，但是由于重心过低如同不倒翁一样，系统的运动性很低；当球的质量中等（实心橡胶球）则其中心发布如图 2-1（b）所示，位于球和上部机体之间，既有较好的稳定性也有较好的运动性。

同样这三种不同机制的球都用着一个共同的特性，那就是球的表面有着足够的摩擦力，耐磨损和坚固的结构。

比较而言，金属空心球体配合聚亚安酯图层的球体由于是空心在受到冲击后会产生回声从而造成系统控制不必要的噪音。而是用篮球虽然获取较为方便但篮球在一定压力下会产生较大的形变和充气漏气其受到冷热影响而产生热胀冷缩的形变明显。而相比之下采用保龄球的橡胶涂层材料的球比较理想。但是保龄球在材质上内层采用的是橡胶和软木的聚合物，在密度方面没有理想的均匀性，于是基于以上考虑，我们所选取球应当是具有以下特性：

- （1）球有着较为粗糙的表面提供足够的摩擦力，以传输机器人给予球体的摩擦力；
- （2）球体有着稳定的结构，以承担起机器人的重量；
- （3）球有着适当的重量，保证其机器人稳定性和运动性；
- （4）球体表面需要经得住机械磨损，以保证表面的摩擦力；
- （5）球体内部材质均匀且在不同环境下形态稳定不易发生形变；
- （6）球体有着很好的抗冲击努力在外力作用下不易产生产生噪音；

基于以上五点的考虑我我们所选取的是实心纯橡胶的健身球，图 2-2，由于是实心纯橡胶结构，它不仅具有稳定的内部结构且不易形变和产生噪音的特性，而且其表面还具备了较高的摩擦系数和耐机械磨损的特性。

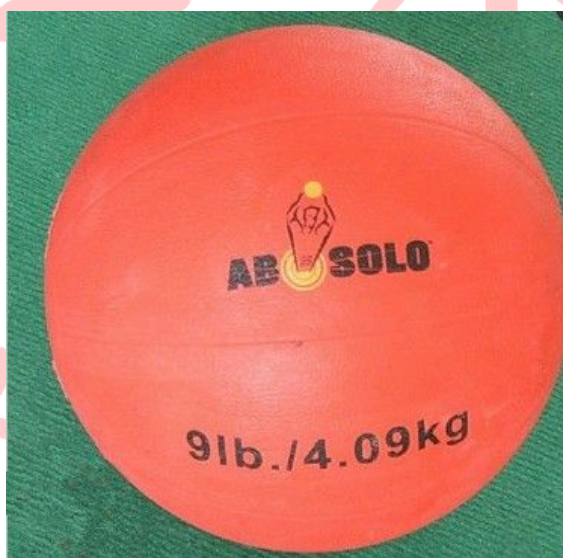


图 2-2 所选底部球

考虑到整体结构，球和本文设计的 90mm 直径全向轮装置的配合问题，本文所选取的球的直径是 220mm 质量为 4.09Kg（关于全向轮和球直接配比的问题下面将会做详细叙述）。

### 2.1.2 电机及其驱动

考虑到独球车的动态平衡特性, 及其需要较为稳定且反应速度快具有良好线性和具有较大的转矩和扭力及其瞬间的加速度, 这里选择使用空心杯电机。由于空心杯电机的性能要求较为突出这里选用的是 FAULHABER 公司的产品, 参考电机供应商及其提供的配置信息, 这里所选取的电机为这里所选择的是 FAULHABER 公司的 3557K018CR 空心杯电机[9]如图 2-3 所示, 其测试的实际响应曲线如如图 2-4 所示, 图中实线为实际测量的响应曲线, 虚线为理想的直线, 可以看出该电机具有良好的线性特征



图 2-3 含减速箱和编码器的 3557K018CR 空心杯电机

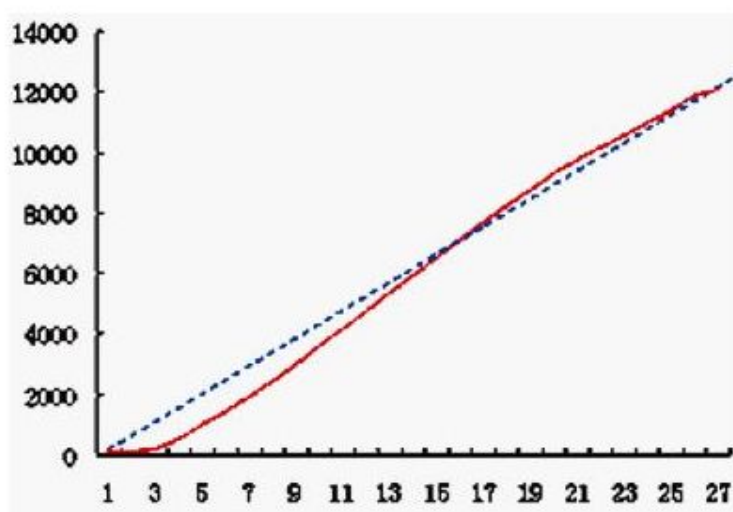


图 2-4 所选电机的响应特性曲线

根据 FAULHABER 公司的 3557K018CR 空心杯电机, 加上独球车的运动特性, 这力所选取的是加上 A38 系类的减速箱 (减速比 5:1, 净重 190g, 续转矩 6Nm, 间歇转矩 9.6Nm) 和以及与之配套的 5500B 的编码器 (2 频道 1024 线) 的电机组三个。其电机参数如下表 2-1 所示:



表 2-1 3557K018CR 电机重要参数

标称电压	18	Volt
端子电阻	1.34	$\Omega$
输出功率	59.4	W
工作效率	83	%
空转速度	5200	rpm
空载电流	0.12	A
摩擦扭矩	3.9	mNm
速率常数	291	rpm/V
逆起电力定数	3.43	mV/rpm
转矩常数	32.8	mNm/A
电流常数	0.031	A/mNm
机械时间常数	7	ms
转动惯量	56	$\text{gcm}^2$
重量	270	g
最高转速	5000	rpm
最高转矩	80	mNm
最大电流	2.38	A

为了让该电机组的效果发挥到最好，所以这里我们选取其生产商所建议该电机组配套使用的电机驱动 MCLM3006[9]，如图 2-5 所示

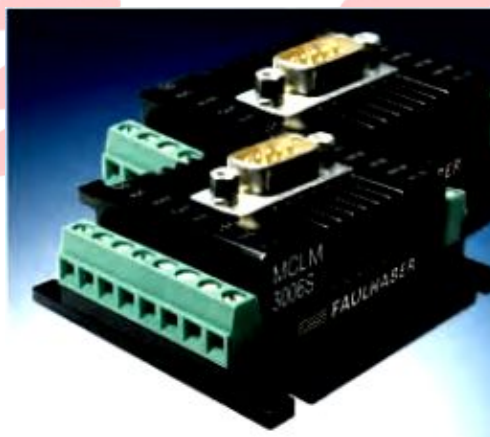


图 2-5 电机驱动 MCLM3006

### 2.1.3 电源供应

独球车是一个动态平衡系统，所以当系统在失去平衡而电机做出瞬间反应（尤其是瞬间反转时）需要电源提供瞬时的大电流，且需要电源提供相对平滑没有杂波的直流电，所以这里需要一块性能可靠，并且可以提供瞬间大电流的电源电池。

所以这里选用“次时代”公司出品的航模锂电池图 2-6





图 2-6 次时代 60C 2200mAh 锂电池

其规格如下表 2-2 所示

表 2-2 电源电池参数

电池容量	电池电压	重量	放电倍率
2200mAh	22.2V	342g	30C

其放电曲线如图 2-7 所示:

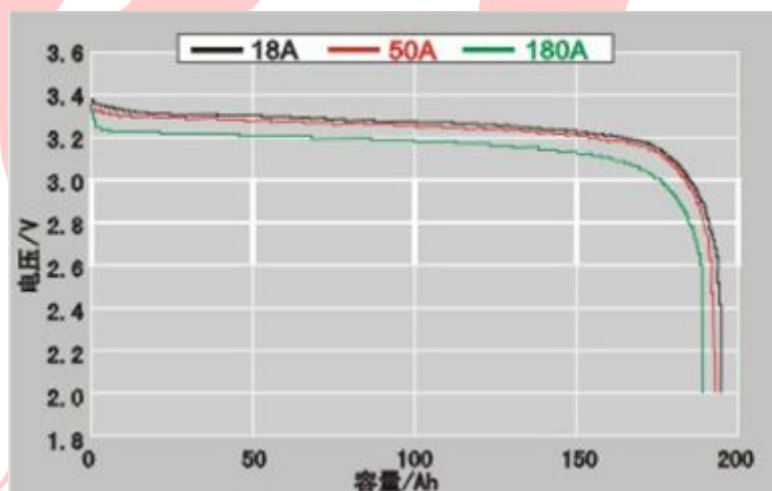


图 2-7 所选电池的放电曲线

为了保证电源可以稳定的向独球车机器人供应稳定的电流，这里还需添加 24V 的开关电路及其相应的稳定转压电路。其中部分需根据实际操作而进行选择，这里不再赘述。

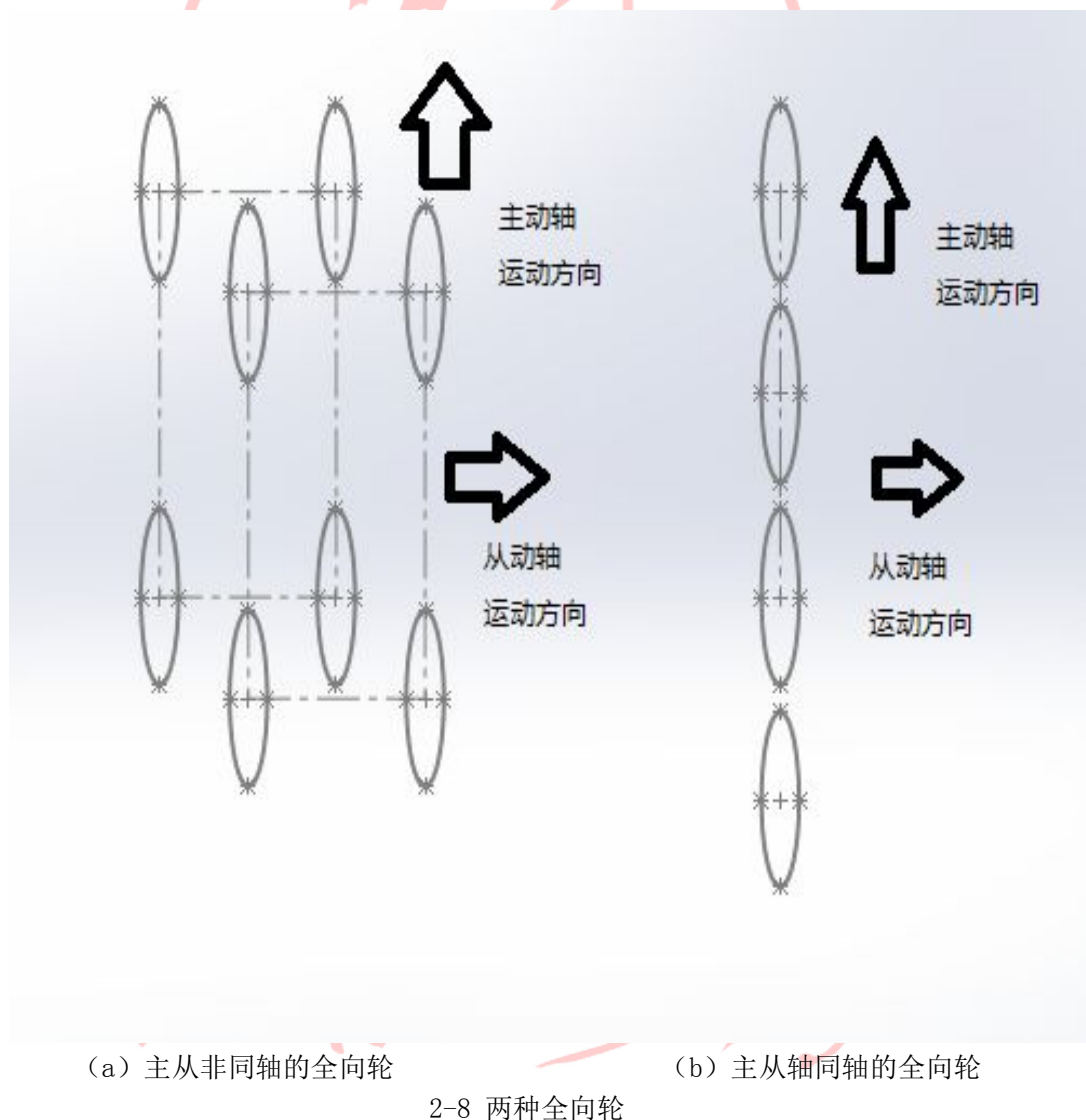
#### 2.1.4 全向驱动装置

全向驱动装置关系到了独球车的运动模式和是否可以自转。基于所有的独球机器人而言，主要有两种全向驱动方式，一种是以 Ballbot 为代表的利用反转鼠标进行的正交驱动，这种驱动模式相对在转化控制量是较为方便，但是由于其没

有自转的功能所以本文不采取这种设计方案了，本文采取的是和 BallP, Rezero 相似的全向轮驱动。

全向轮是一种可以像任何方向移动的特殊轮子，其是由相互正交旋转运动的主动轴和从动轴构成，全向轮的种类很多，但基本归于主动轴和从动轴同轴和非同轴两种，而同轴较为特殊如图 2-8 所示。

一般研究中所采用的主动轴和从动轴不是共轴关系如图 2-8 (a) 全向轮仅仅是适合于平面全向移动的，无法满足这里独球车机器人用过摩擦对于球面点接触的驱动，所以这里所采取的全向轮设计策略必须是一种特殊的主动轴和从动轴为共轴关系的适用于球面运动的全向轮图 2-8 (b) 所示。



这里的万向轮参考了 Asama[6] [7]所设计的万向轮结构（但其细节和数据全由作者自行设计和研究）这用全向轮是以用全曲面为主，主轮和侧轮间没有空隙，完全满足了球权全向驱动的需要图 2-9 是作者参考 Asama 所设计的全向轮及其重要参数。

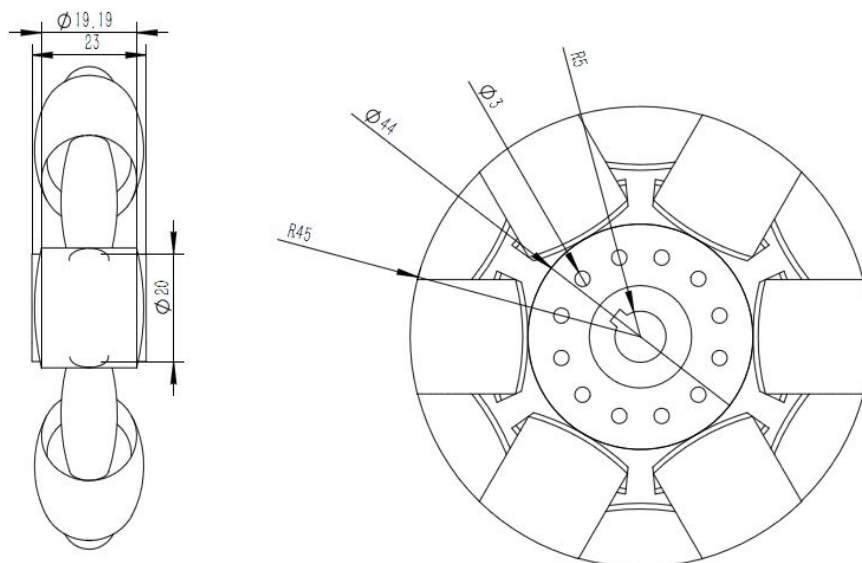


图 2-9 作者参考 Asama 所设计的球面全向轮

全向驱动装置是由全向轮，电机和支持架组成，每个电机都与水平面和竖直面成一定角度的夹角，连接着全向轮，从而可以实现实现了各个角度的行走，由于经过多方参考及其公式推导（下文第 3 节）所以采用全向轮与机器本身竖直向所成的夹角为 45 度，且由三个全向轮驱动其本身水平面的夹角为 120 度。这用的机构设计不仅仅实现独球车在平面上各个方向的移动还可以实现自转转圈等动作加大了其运动姿态的完善性。如图 2-10 和 2-11 所示

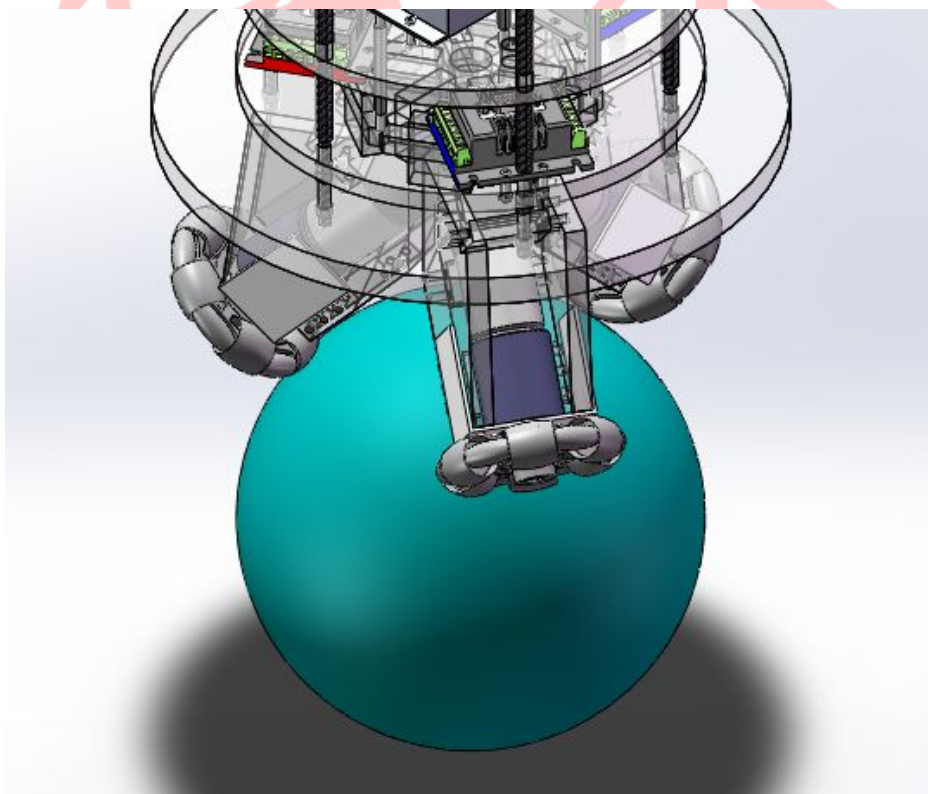


图 2-10 全向驱动装置

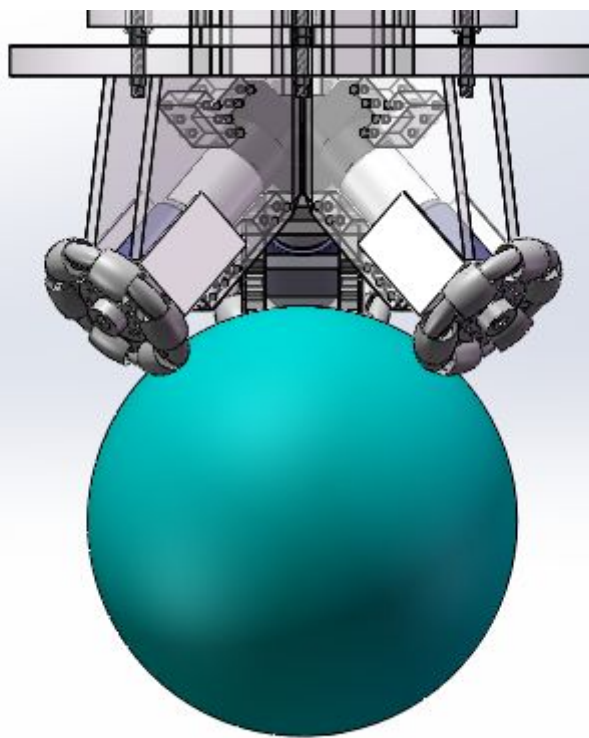


图 2-11 全向驱动装置

### 2.1.5 MCU

考虑到独球车动态平衡的运动特性从而要求 MCU 对数据有着既精确又有效率的处理，以及发展的前景而言，所选择的 MCU 还需要有着较为方便和简介的开发平台以供更多的人去研究和发展。

考虑到以上几点这里所选用的 MCU 为基于 Atmel 公司开发的 ATmega2560 单片机的最小系统 Arduino Mega2560，图 9，它是采用 USB 接口的核心电路板，最大的特点就是具有多达 54 路数字输入输出，特别适合需要大量 I/O 接口的设计。Mega2560 的处理器核心是 ATmega2560，同时具有 54 路数字输入/输出（其中 16 路可作为 PWM 输出），16 路模拟输入，4 路 UART 接口，一个 16MHz 晶体振荡器，一个 USB 口，一个电源插座，一个 ICSP header 和一个复位按钮。当然由于 Arduino 强大的开源性，扩展性和兼容性，使得该系列的最小系统在世界机器人爱好者中取得了广泛的认同，该机器人设计是用 Arduino 将会给独球车机器人带来更多的活力和集体智慧。如图 2-12 所示





图 2-12 arduino Mega2560

## 2.1.6 IMU

惯性检测单元决定了独球车是否能出色的完成球上平衡和运动等动作，由于独球车的运动是在一个三维的空间里建立起两个正交的倒立摆机构，所以其惯性检测单元至少需要 6 个自由度，求希望将所检测到的姿态的数据快速和方便的传输给 MCU 是独球车设计所需要的，这里选用由 sparkfun 公司所设计的基于 ITG-3200 和 ADXL345 芯片和 I2C 协议的 6 自由度传感器模块 6FOD, 图 2-13 是其外观及其原理图。

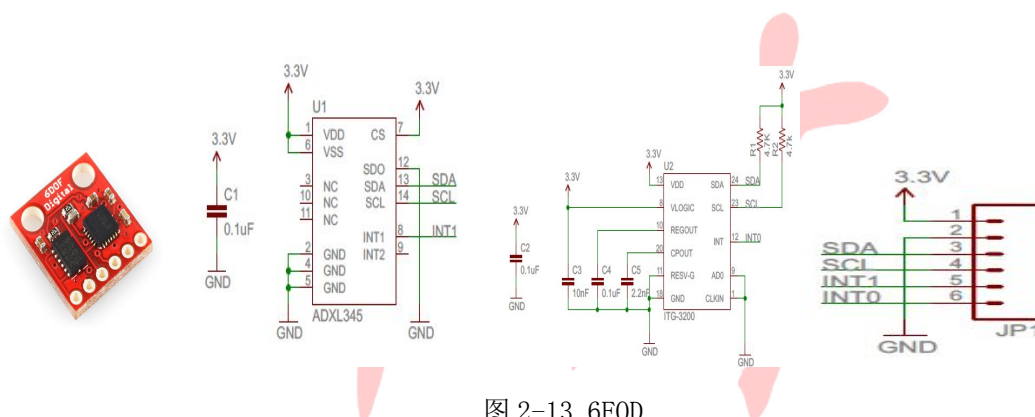


图 2-13 6FOD

图 2-14 是 ITG-3200 工作特性曲线图

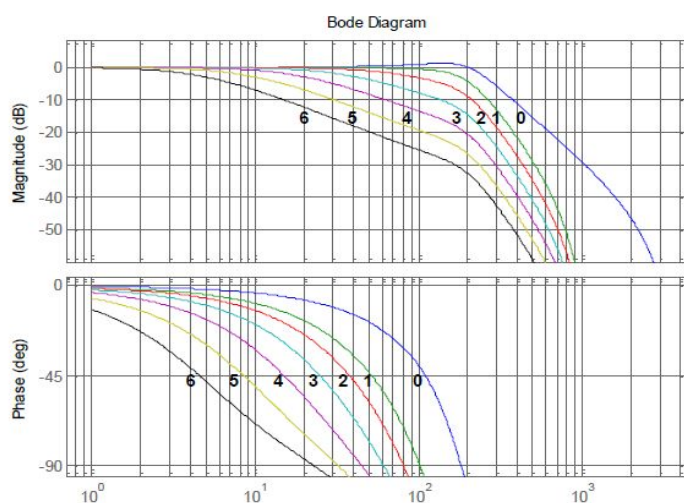


图 2-14 ITG-3200 工作特性曲线图



图 2-15 是 ADXL345 工作特性曲线图

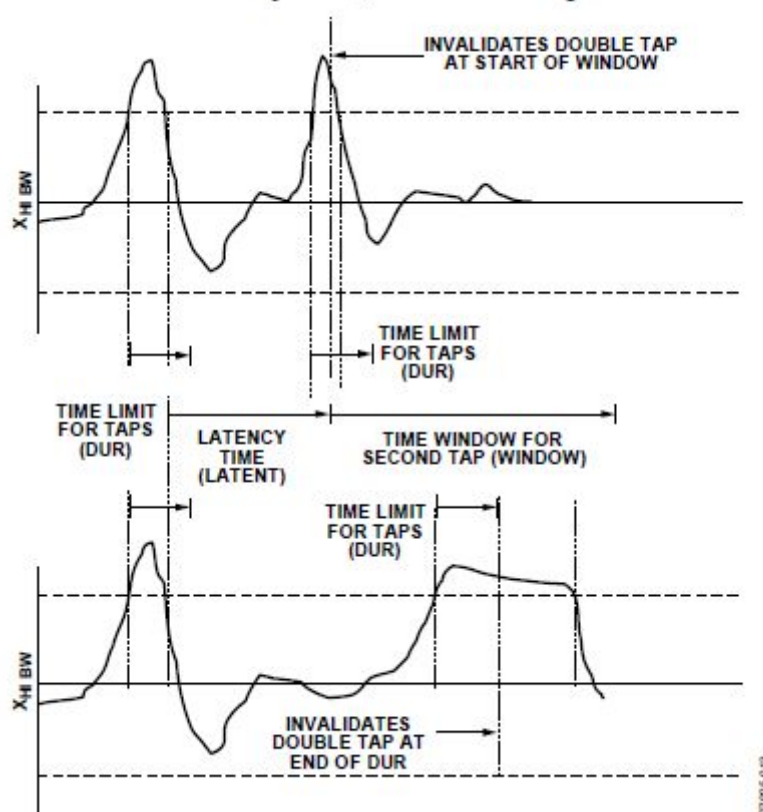


图 2-15 ADXL345 工作特性曲线图

当然在接下来的研究中,为了使该机器人拥有更加的控制效果可以采用更加详尽完善的综合传感器(9 自由度),其中包含了 3 轴加速度计,三轴角速度计及其 3 轴电磁罗盘,在其原本加速度计和陀螺仪的应用上加上 3 轴磁罗盘无疑是对其工作姿态提供了更加稳定的依据。虑到独球车动态平衡的运动特性从而要求 MCU 对数据有着既精确又有效率的处理,以及发展的前景而言,所悬选择的 MCU 还需要有着较为方便和简介的开发平台以供更多的人去研究和发展。

## 2.2 结构设计效果展示

### 2.2.1 总体效果图

更具上述所选取硬件,利用合理适当的工程设计软件,设计出了如图 2-16 所示的独球车机器人,机器人由上下两部分组成,下部分是选取的底部球,而上半部分是包括了电机及其驱动,全向驱动装置,MCU,IMU 和电池等在内的一体结构,其支架和关键大多由亚克力板材和金属支架构成,既保证了其机构的稳定性,有减少了其制造成本。

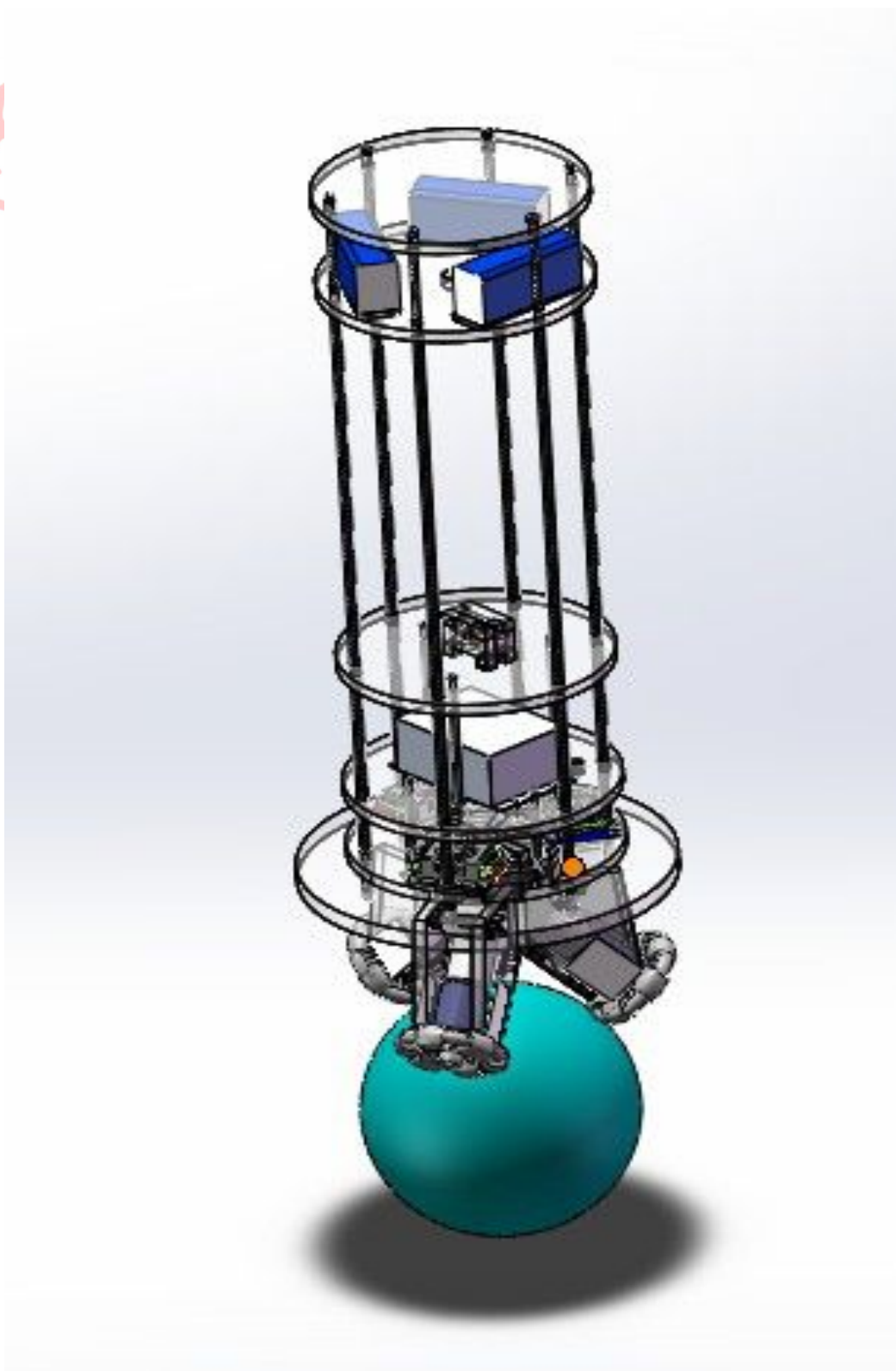


图 2-16 独球车机构设计效果图

### 2.2.2 独球车结构设计的三视图及其尺寸

图 2-17 是设计的独球车机器人结构的三视图及其尺寸

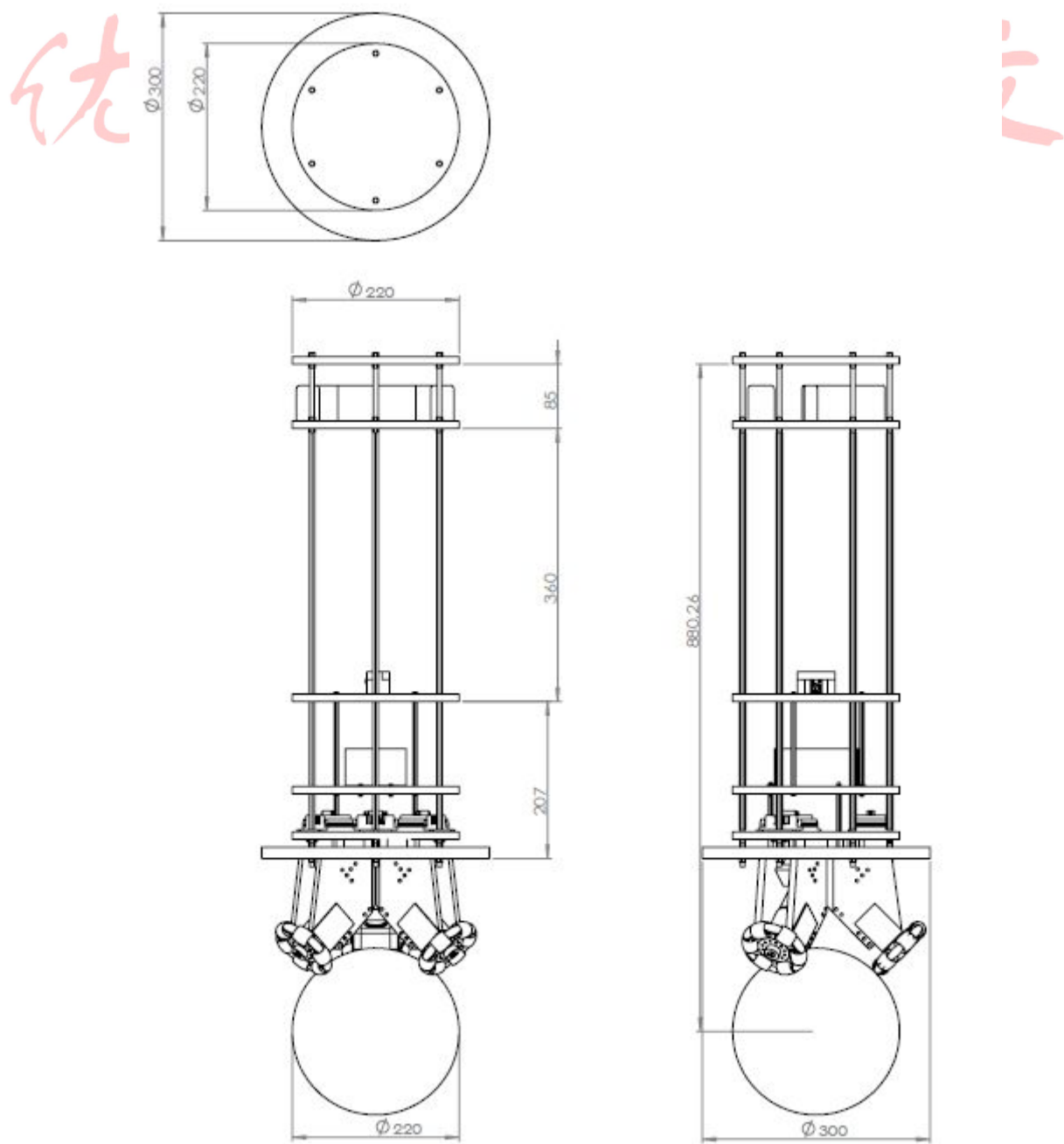


图 2-17 独球车机器人的三视图及其尺寸标注

严禁抄袭

### 3 独球车的运作机构分析

独球车是一个闭环的工作系统，每个硬件间都有着相关的联系，其工作机制如图 3-1 所示：

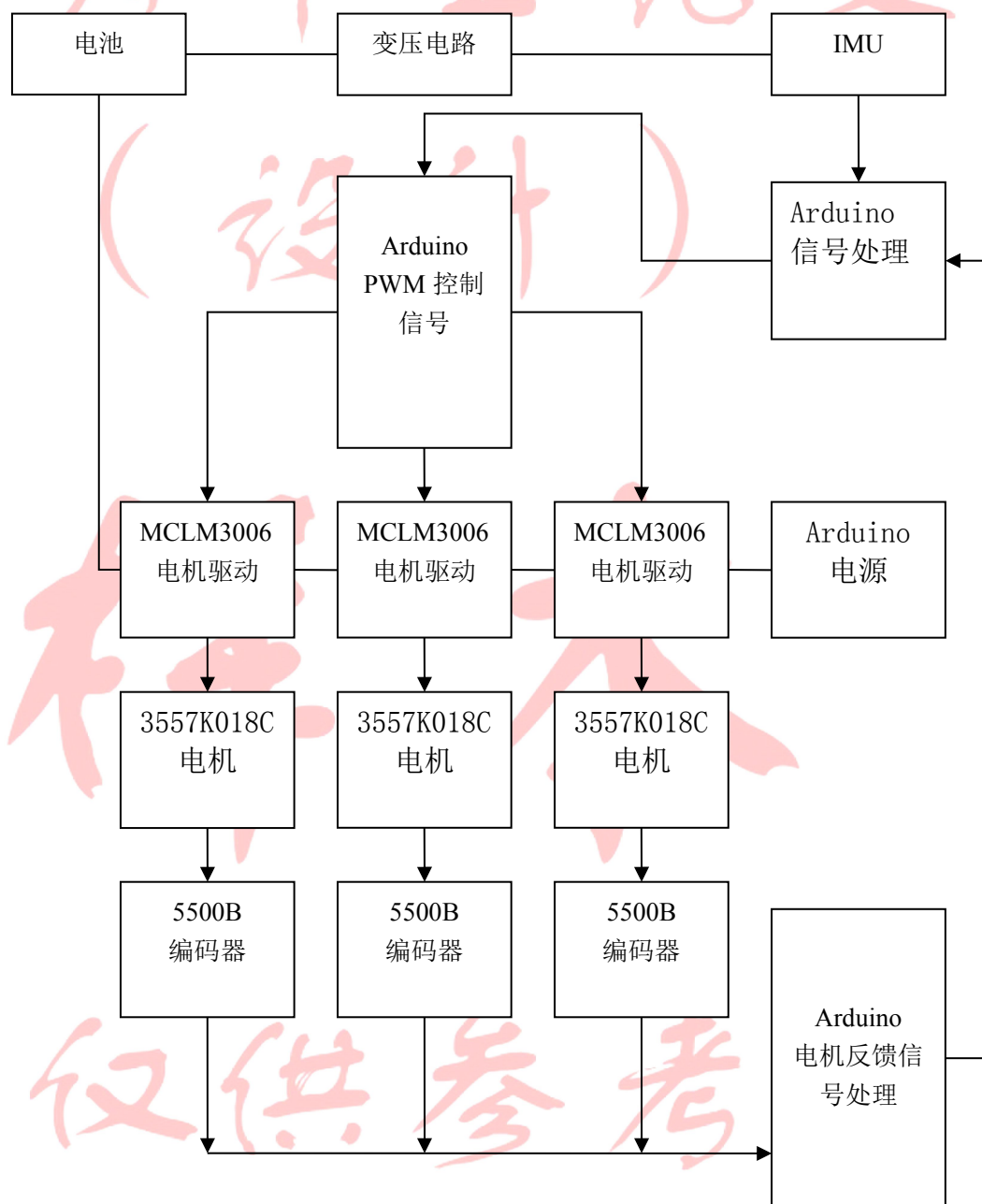


图 3-1 独球车工作的系统框图

## 4 独球车的工作原理及运动模型的建立

在说明工作原理之前，我们根据上文所设计的独球车机器人，球球心处建立如图 4-2 (a) 所示的由  $x$ 、 $y$  和  $z$  轴构成的坐标系，其中  $Z$  轴是贯穿球的中心且与竖直方向相同的而  $X$  轴和  $Y$  轴则是水平方向相互垂直的轴。

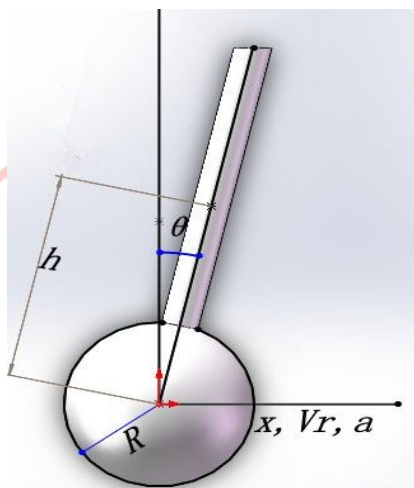
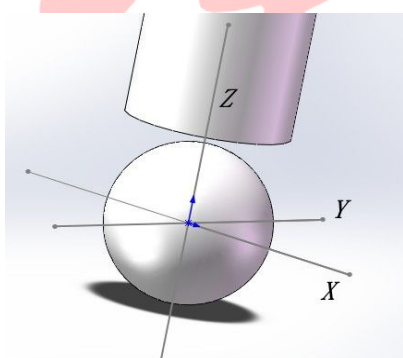
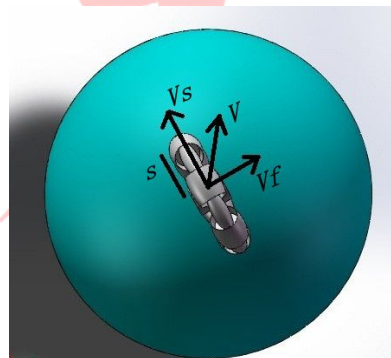


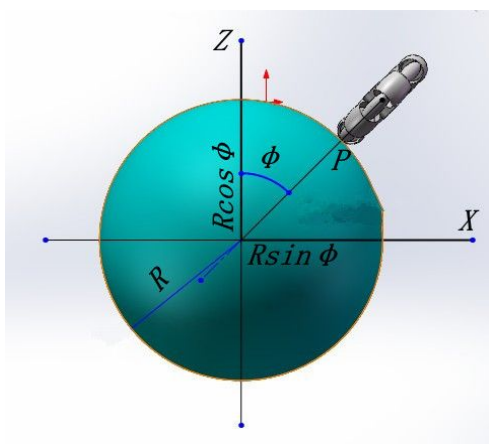
图 4-1  $x$ - $z$  平面的运动示意图



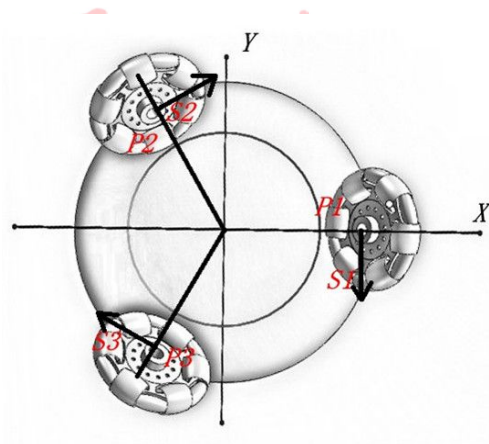
(a) 建立坐标系



(b) 相对速度



(c) 侧视图



(d) 俯视图

图 4-2 工作原理示意图



## 4.1 独球车的总体工作原理及运动模型建立

正如前面所说的倒立摆控制一样，这里对于机器人的控制可以说是分别在 X 轴和 Y 轴建立两个倒立摆控制机制。机器人设置了两个加速度传感器和陀螺仪分别在水平的 X 轴和 Y 轴上，如图 4-2 所示。我们这里通过 6 自由度的陀螺仪和加速度传感器可以直接得到独球车分别在 X—Z 平面和 Y—Z 平面所产生的角度和角加速度，如图 4-1

于是我们建立以下的控制方程：

$$\begin{aligned} a_x &= K_A \ddot{\theta}_x + K_{AV} \dot{\theta}_x + K_T(x - x_0) + K_V v_x \\ a_y &= K_A \ddot{\theta}_y + K_{AV} \dot{\theta}_y + K_T(y - y_0) + K_V v_y \end{aligned} \quad (1)$$

上式中 a 是指在该轴上虚拟轮子（图 16 中虚拟的圆轮，代表该方向所受的合力速度和加速度）应当给予的控制加速度， $\theta$  是与竖直方向相对的倾角，x 和 y 分别代表所运动所在的方向轴平面，v 是计算出虚拟轮子的速度，K 是由实际物体所产生的常数增量。式中的 v，x 和 y 是用过对相应的 a 取积分后所得。作者通过对于倒立摆的研究认为这里用过加速度控制的办法可能会比使用总体转矩的办法控制更为稳健，当然这也是没有理论依据的。

以下是把上文中虚拟 X 和 Y 平面方向速度转换给实际的 3 个全向轮速度的格式如图 17（d）中所示：

$$\begin{aligned} v_{s1} &= K_1 v_x + K_2 v_r \\ v_{s2} &= K_1 \{-(1/2)v_x + (\sqrt{3}/2)v_y\} + K_2 v_r \\ v_{s3} &= K_1 \{-(1/2)v_x + (\sqrt{3}/2)v_y\} + K_2 v_r \end{aligned} \quad (2)$$

其中  $V_s$  是每个全向轮的圆周速率，而  $K_1$  和  $K_2$  是常数增益。 $K_1$  和  $K_2$  将在下面对于球和轮子的转速控制上做详细说明，此外公式中的  $V_r$  这是球体想对于竖直轴 Z 的转速。

## 4.2 独球车全向轮控制球姿态

在对于整体工作原理有了解后我们接下来分析下，机器人是如何用电机通过万向轮控制球的运动和速度。

下面是表述如何通过每个全向轮的速度去得出球的角速度  $\omega$  的：首先如图 4-2（d）所示，设全向轮 i 和球的接触点位为  $P_i$ ，那么每个轮子和球之间产生的位置矢量就是  $P_i$ ，那么每个轮子的在接触点上球对其的相对速度  $V_i$  就可以通过球的角速度  $\omega$  获得：

$$V_i = \omega \times p_i \quad (3)$$

接下来我们我们分析求的圆周速度  $V_i$  和球的分速度  $V_s$  之间的关系。首先如图 4-2（b）中所示，速度 V 可以正交分解为与轮子摆置分析垂直的  $V_f$  和与轮

子运动分向平行  $V_s$ ，其中  $V_f$  是由每个全向轮上子轮产生的自由转动速度，而  $V_s$  则是轮子转动所产生的圆周速度，其中  $V$  与  $V_s$  的关系如下：

$$\begin{aligned} v \cdot s &= v_s \cdot s + v_f \cdot s \\ &= |v_s| |s| + 0 = |v_s| \end{aligned} \quad (4)$$

其中  $S$  是主机械运动方向一致的矢量单元。

接下来我们由单个轮子和球的水平剖面图 4-2 (c) 和三个全两轮和球的俯视图，图 4-2 (d) 可以得到每个轮子和球接触点到球心球心的连线和竖直方  $Z$  轴所成的夹角  $\phi$ ，则其相对触点位置所产生的位置矢量  $P_i$  可以表示为：

$$\begin{aligned} p_1 &= (R \sin \phi, 0, R \cos \phi) \\ p_{2,3} &= \left(-\frac{1}{2} R \sin \phi, \pm \frac{\sqrt{3}}{2} R \sin \phi, R \cos \phi\right) \end{aligned} \quad (5)$$

其中  $R$  是球的半径， $P_2$  和  $P_3$  以  $X$  轴对称所以可以用式 (5) 表示。由于以上的设计，所以根据 (5) 我们可以把每个轮子的主机械运动方向矢量单元  $S$  仅用水平分量表示：

$$\begin{aligned} s_1 &= (0, 1, 0) \\ s_{2,3} &= (\pm(\sqrt{3}/2), (1/2), 0) \end{aligned} \quad (6)$$

通过 (3) (4) (5) 和 (6) 我们可以得到当球仅向着  $X$  轴转动时每个轮子的转速  $|V_i|$ ，即其角速度  $\omega = (\omega, 0, 0)$  时其公式如下：

$$\begin{aligned} v_i &= (\omega, 0, 0) \times (p_{ix}, p_{iy}, p_{iz}) \\ &= (0, -p_{iz}\omega, p_{iy}\omega) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} |v_{s1}| &= v_i \cdot v_s \\ &= (0, -p_{iz}\omega, p_{iy}\omega) \cdot (0, -1, 0) \\ &= p_{iz}\omega = R \cos \phi \omega \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} |v_{s2,3}| &= (0, -p_{iz}\omega, p_{iy}\omega) \cdot (\pm(\sqrt{3}/2), (1/2), 0) \\ &= -(1/2)p_{iz}\omega = -(1/2)R \cos \phi \omega \end{aligned}$$

相似的我们可以得到当球仅向  $Y$  轴转动时每个轮子所产生的速度，即当  $\omega = (0, \omega, 0)$  时，有  $|V_i|$ ：

$$v_i = (p_{iz}\omega, 0, -p_{ix}\omega) \quad (9)$$

$$\begin{aligned} |v_{s1}| &= 0 \\ |v_{s2,3}| &= \pm(\sqrt{3}/2)p_{iz}\omega = \pm(\sqrt{3}/2)R \cos \phi \omega \end{aligned} \quad (10)$$

相似的我们可以得到当球仅向  $Z$  轴（竖直方向，原地转动）转动时每个轮子所产生的速度，即当  $\omega = (0, 0, \omega)$  时，有  $|V_i|$ ：

$$\mathbf{v}_i = (-p_{iy}\omega, p_{ix}\omega, 0) \quad (11)$$

$$\begin{aligned} |v_{s1}| &= -p_{1x}\omega = -R\sin\phi\omega \\ |v_{s2,3}| &= (-p_{iy}\omega, p_{ix}\omega, 0) \cdot (\pm(\sqrt{3}/2), (1/2), 0) \quad (12) \\ &= -R\sin\phi\omega \end{aligned}$$

当仅仅向这竖直方向运动是（原地转动）这个时候每个轮子的转速都是相同的！

这里的每个轮子和球接触点到球心球心的连线和竖直方 Z 轴所成的夹角  $\phi$  对于整个机器人来说是十分重要的，它的度数大小直接决定了机器人的工作和控制，由于当其角度为 45 度时 S 可以完全分解为水平分量，进而很大程度的节省了研究和控制的成本，所以本设计中的  $\phi$  大小为 45 度。

根据上述的运动模型可以得知,在理想状态下,要先使得机器人到达动态平衡状态,就要保证其  $x$ - $z$  和  $x$ - $y$  空间平面上实现独立的动态平衡,这里通过 matlab 的 simulink 对上述设计的独球车模型进行运动模型的建立及其自平衡的动态仿真。

根据上述所设计的独球车结构及其运动模型,通过软件建立了如图 5-1 的运动模型,以便进行仿真。

图 5-1 用 Matlab 所建立的独球车运动模型

如图 5-1 中所示, 对系统模型中包含一些模块, 其中输入的是 Force 这个模块, 输出的是 Body Angle 和 Ball Position 这个模块, 分别代表了外界对赌球车在该空间平面上对赌球车所施加的力和独球车机体与竖直方向的夹角及球所从起始点开始的位置。而其中所创建的物体块对象是 ball 和 bady, 分别代表了独球车的上体和底轮, 其中 Revolute 则是全向驱动结构在该空间平面向量上的简化模型, Prismatic 和 Prismatic1 模块则是代表对于摩擦力和重力及模型外界施加力的整合与对独球车的传递, Ground 模块代表参考的地面相对坐标系, 而通过和 Ground 链接的 Machine Environment 模块中设定了重力加速度等一些环境参数, 而 Body sensor 和 ball Sensor 模块则代表通过 IMU 所测得的在该空间平面上机器人的位移, 速度, 加速度和角速度, 并且给予输出且其中有一个给予增益 b 模块链接所测得摩擦力并进行反馈。

## 5.2 运动模型系统的仿真

### 5.2.1 开环仿真

利用上一节所建立的独球车的模型对其进行开环仿真图 5-2 所示。

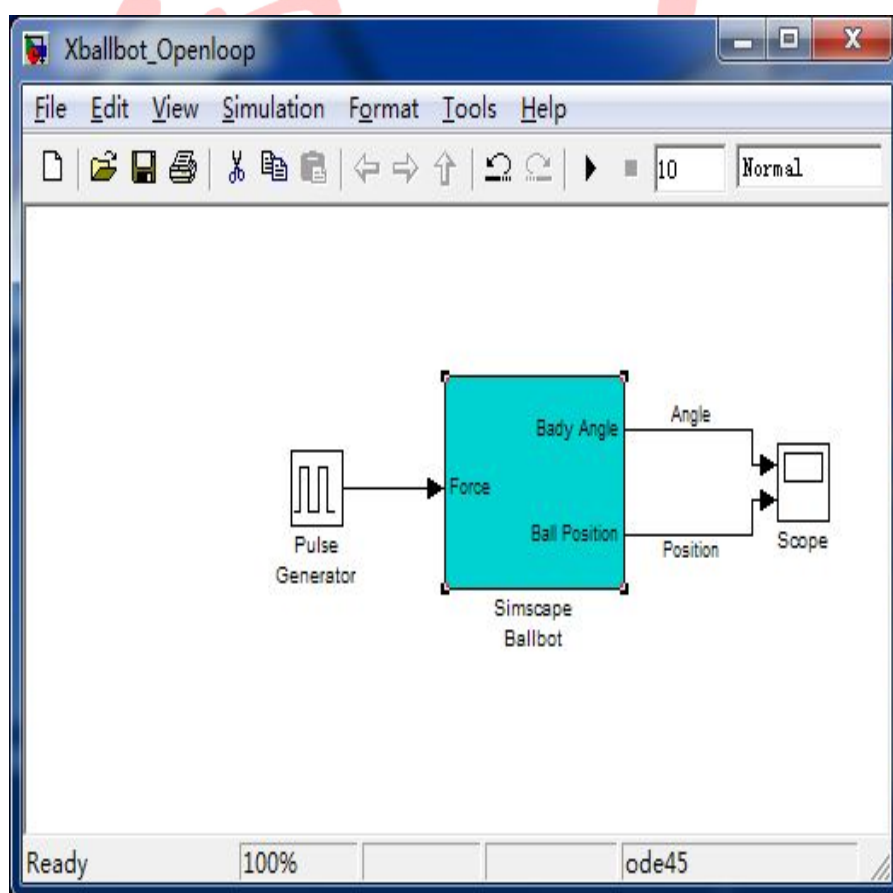


图 5-2 系统开环仿真模型



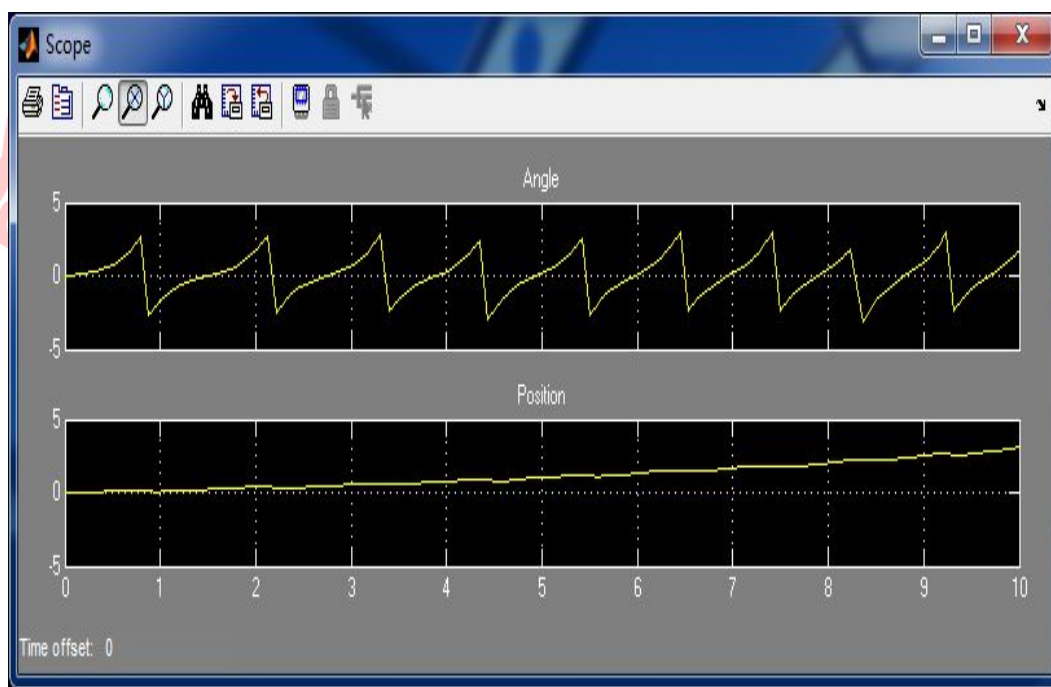


图 5-3 开环仿真的结果

从其仿真结果，图 5-3 可以看出，独球车的模型无法到达稳定状态和平衡状态，因此为了实现独球车的稳定控制。

### 5.2.2 闭环仿真

从开环仿真可以看出，其开环控制无法让独球车所处的系统达到动态平衡。所有这里需要加入反馈环节。进行闭环控制是独球车到达动态平衡状态。

该独球车模型的闭环仿真如图 5-4 所示，它有 PID 控制器，反馈回路等构成。这里采用的是 PID 控制，极大程度上加强了控制的稳定性和可靠性。

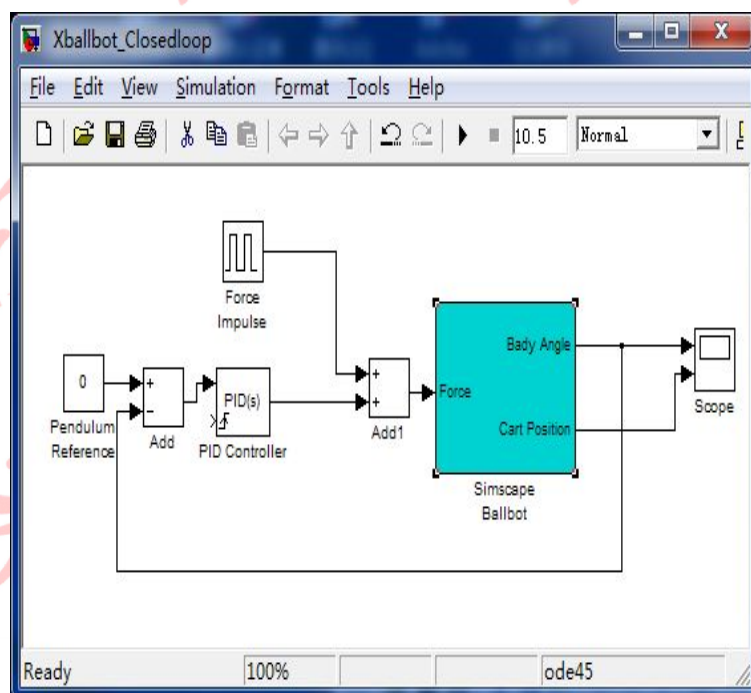


图 5-4 闭环仿真的结果

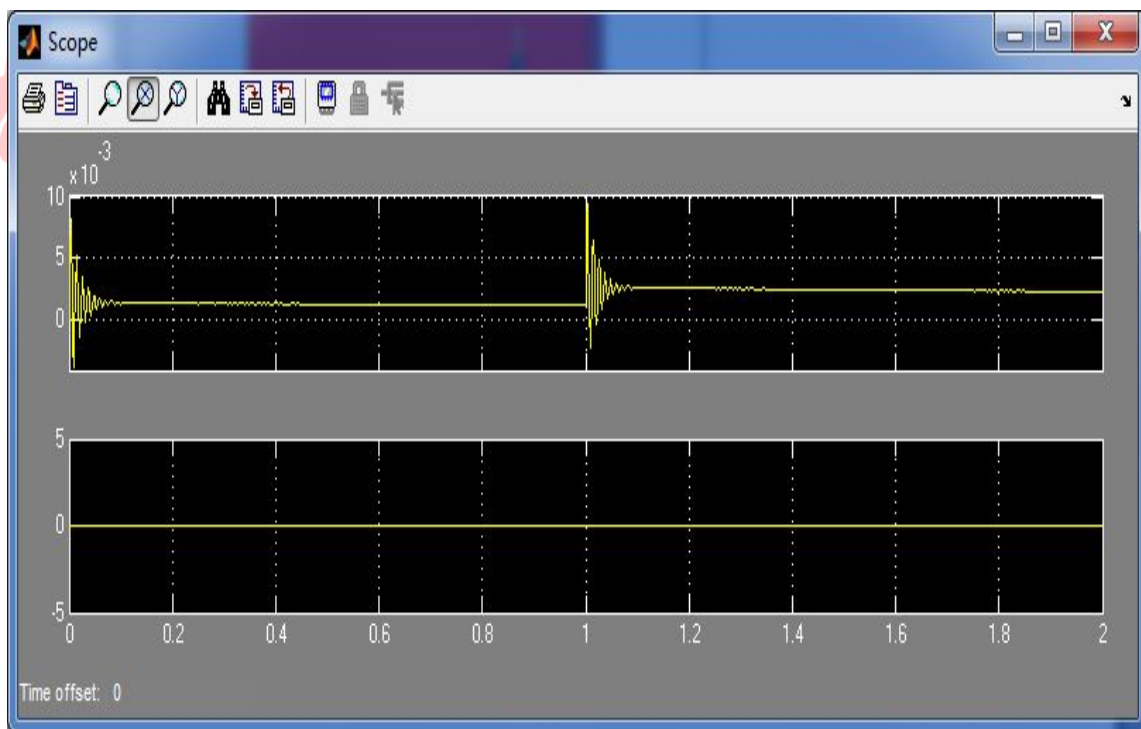


图 5-5 闭环仿真的结果

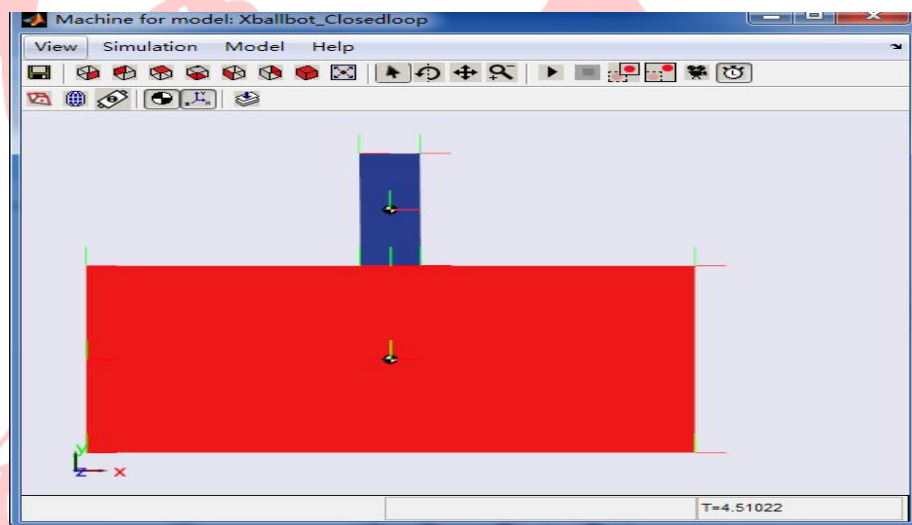


图 5-6 仿真效果图

从图 5-5 的结果可以看出，模型经过 PID 的闭环控制系统后可以较好的保持稳定，处于动态平衡状态，进一步也论证了独球车模型的可行性。

## 6 结论及展望

### 6.1 结论

通过对于独球车机器人的研究和设计，和工作原理模型的建立以及模型的仿真，基本完成了对于独球车机器人的初步探索，为进一步制作机器人提供了重复的理论和设计基础。也为国内该领域的机器人研究提供了一个开创性的研究。

在接下来的研究工作中，可以通过本文的设计数据和理论知识及仿真结果去直接进行机器人的制作，通过实践去完善机器人的结构，在此基础上去完善控制理论，扩展机器人的姿态等。

### 6.2 展望

由于时间财力和人力的限制，加上专业的跨度较大，本文作者还不具备制作的工艺条件，所以该论文完成了改机器人的设计和仿真，且只是完成了初步的动态平衡仿真，还可进行更多的姿态仿真，如原地自转，环绕等。且实际操作中还会有很多误差和问题与理论具有误差。

在进一步的研究和实验中，可以通过 Matlab 去做独球车姿态的进一步仿真，并且根据本文的数据直接制造出由本文设计的独球车机器人并进行试验、修改和误差检定，实现原地自转，环绕等姿态。还可以将其投入自动控制的研究中，通过不同的控制方法去实现独球车机器人的运动等。

## 参考文献

- [1] T.B.Lauwers, G.A.Kantor, R.L.Hollis, "A Dynamically Stable Single-Wheeled Mobile Robot with Inverse Mouse-Ball Drive," Proc. ICRA 2006, pp.2884–2889 (2006)
- [2] International Conference on Control, Automation and Systems 2008  
Oct. 14-17, 2008 in COEX, Seoul, Korea
- [3] 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation Shanghai International Conference Center May 9-13, 2011, Shanghai, China
- [4] <http://www.rezero.ethz.ch/>
- [5] T.Endo, Y.Nakamura, "An Omnidirectional Vehicle on a Basketball," Proc. ICAR'05, pp.573–578 (2005)
- [6] D.Chugo, K.Kawabata, H.Kaetsu, H.Asama, T.Mishima, "Development of Omni-directional Vehicle with Step-Climbing Ability," Proc. ICRA 2003, pp.3849–3854 (2003)
- [7] H. Asama, H.Kaetsu, I.Endo, M.Sato, "Wheel for Omnidirectional Mobile Robot," JP-patent no.3421290 (2003)
- [8] <http://www.arduino.cc/>
- [9] <http://www.faulhaber.com/>
- [10] <http://www.alldatasheet.com/>
- [11] <https://www.sparkfun.com/>

## 致谢

此论文得以完成，首先要感谢刘琨老师的悉心指导，在撰写和研究该论文的过程中，都给予我很大的启发。此外，我还要感谢在论文期间帮助我过的各位老师和同学。由于时间仓促和自身的知识不足，文章错误纰漏之处在所难免，恳请斧正！

(设计)

样本

仅供参考

严禁抄袭



北京师范大学珠海分校本科生毕业论文评定表

信息技术学院(系) 2009级 09电子信息科学与技术专业 姓名 彭昆 学号 0901040078	
题目	独球车 Ballbot 的研究和设计
指导教师意见	<p>(论文评语及给出初步成绩)</p> <p>论文选题有创新性和实用价值，论文结构较为清楚，论述观点正确，叙述层次分明，有较强的逻辑性。行文符合学术规范。作者思路清晰，分析合理。文字通顺、流畅。初步成绩：91 分。</p> <p>指导教师签章 2013 年 4 月 21 日</p>
答辩小组意见	<p>(论文、答辩评语，成绩及是否推荐院级优秀论文)</p> <p>论文有一定理论分析和研究深度，论述较有条理，答辩回答问题清晰准确。成绩优秀，推荐为院级优秀论文。</p> <p>成绩(百分制) 91 (四级分制) _____；推荐申报院级优秀论文投票：赞成 3 人，反对 0 人，弃权 0 人。</p> <p>组长签章 2013 年 4 月 22 日</p>
院级评优意见	<p>(是否同意评为院级优秀论文及推荐校级优秀论文)</p> <p>推荐申报院级优秀论文投票：赞成 _____ 人，反对 _____ 人，弃权 _____ 人。</p> <p>教学院长(主任)签章 院系章 201 年 月 日</p>
校级评优意见	<p>教务处长(签章) 201 年 月 日</p>

注：(1) 此表一式四份，一份存入学校档案，一份装入学生档案、一份装入论文封底，一份学院存档、长期保存。

填写时务必字迹工整，签章俱全。(2) \*如系两位教师合作指导，应同时签名。