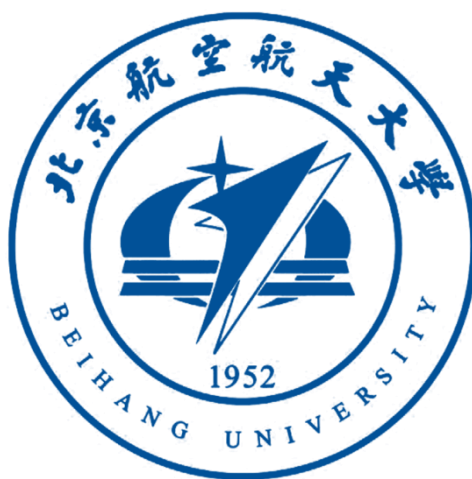


北京航空航天大学
BEIHANG UNIVERSITY



冯如杯创意大赛（论文）

基于姿态控制的自平衡独轮车

基于姿态控制的自平衡独轮车

摘 要

随着机器人对可移动平台的要求越来越高,迫切需要解决运动平台的灵活性和小型化问题。本项目通过对自平衡系统的深入研究,创新性地提出了独轮自平衡小车模型,并通过理论计算详细分析了可行性。自平衡小车融合了动态平衡技术,自然姿态控制技术和环形电磁驱动技术,优化了小车体积,减小了转弯半径,提升了载荷空间。自平衡小车可实现原地转向,倾倒复位,静止平衡等多运动功能。自平衡小车具有良好的可扩展性,可根据不同场合加入相应功能。可广泛运用到如大型购物中心、展览场所等各个领域。

关键词: 自平衡 独轮小车 多功能

ABSTRACT

With the development of the artificial intelligence and robotic technology, there are more and higher demands for a mobile platform with better flexibility and miniaturization. In this study, an attempt was made to develop a model of a unicycle car with self-balance system after a deep research on the self-balance system. The feasibility and validity of this model are also been analyzed in detail in this paper. Combined with the dynamic balance-controlled technology, natural action control technology and electromagnetic actuation technology, this self-balance car has superiority in small volume, turning radius which enlarge the loading space inside the vehicle body. The motion function is implemented including turning at original point, toppling and resetting automatically, being in the static state of equilibrium. The self-balance car has wide application foreground because it can expand other functions in different application situations such as shopping malls and exhibition halls.

Key words: Self-balance Unicycle Multi-function

目 录

1 引言	3
1.1 创意背景	3
1.2 创意来源	3
1.3 研究现状	4
2 作品核心创意	4
2.1 创意作品简单描述	4
2.2 作品特点	5
2.3 作品核心技术	5
3 作品可行性分析	6
3.1 硬件设计	6
3.1.1 总体机械结构	6
3.1.2 细节结构	7
3.1.3 理论分析	8
3.1.4 自平衡小车控制系统硬件组成	10
3.2 软件设计	11
3.2.1 控制方案设计工作流程	11
3.2.2 软件流程设计	11
3.3 余度设计	13
4 创意应用前景	13
4.1 应用场景	13
4.2 发展背景	13
4.3 市场需求	13
4.4 推广模式	13
参考文献	14

1 引言

1.1 创意背景

传统机器人的移动平台，基本上都由三个以上的车轮或履带实现的，在静止状态下，他们有很好的稳定性，但是如果它的重心偏高或重心突然改变，容易摔倒，这严重限制了它的应用领域。另外，传统的多轮车或履带车在转向时，均需要一个合适的转弯半径，无法在狭窄的道路中行走，大大限制其使用范围。

双轮自平衡机器人，亦称为本质不稳定自主移动机器人，是一种特殊的轮式移动机器人。在探测机器人领域，双轮平衡系统相对于四轮系统，在体积和适应性方面已经有了很大的进步，双轮的自平衡平台已经非常成熟。但随着技术的革新和机器人在各个领域的推广，制造机器人过程中对可移动平台的要求越来越高，要求有更小的体积，更灵活的活动方式和更强的环境适应性。

自平衡独轮车以其体积小易储存，节能低碳，转弯半径极小，科技含量高等优点脱颖而出，它代表着未来运动平台的设计方向和设计理念。自平衡独轮车可以克服现有两轮自平衡车笨重，无法适应复杂的地形的缺点，使得有效载荷更大，更加易于控制。作为一种灵活机动运动平台，自平衡独轮小车将广泛地被运用到灾难现场搜救，战场近地侦查，星球登陆车等诸多场合。

1.2 创意来源

受仓鼠球和一些科幻影视作品的启发（如图 1 和图 2），作者想到了利用一个大的外轮作为主动轮，将其它机械结构置于轮内的想法，创新性地采用无轴电磁驱动方式进行驱动，采用共轴双桨的平衡棒实现小车自平衡。



图 1 仓鼠



图 2 影视作品

1.3 研究现状

现有的自平衡车主要由如下几种类型：

(1) 双轮平衡车

如图 3 所示，以内置陀螺仪来判断车身所处的姿势状态，通过中央微处理器计算出适当的指令后，驱动马达来做到平衡的效果。

优：利用身体的移动操控车体的移动，前后自动平衡。

劣：两轮结构，无法适应复杂地形。

(2) 独轮平衡车

如图 4 所示，以内置陀螺仪来判断车身所处的姿势状态，通过中央微处理器计算出适当的指令后，驱动马达来做到平衡的效果。

优：可实现前后左右自动平衡。

劣：重心过高，体型笨重一旦倾倒过度无法复位。

(3) 球形平衡车

如图 5 所示，依靠自身的平衡系统使其在一个球形轮上平稳站立，与地面只有一个接触点。

优：与地面只有一个接触点有更好的灵活性，可以无需转向地在任何方向上移动，同时能够避免传统车辆因重心改变而倒下。

劣：运动速度缓慢，球形底座受地形影响大，无法在狭窄空间中机动。



图 3 双轮平衡车



图.4 独轮平衡车

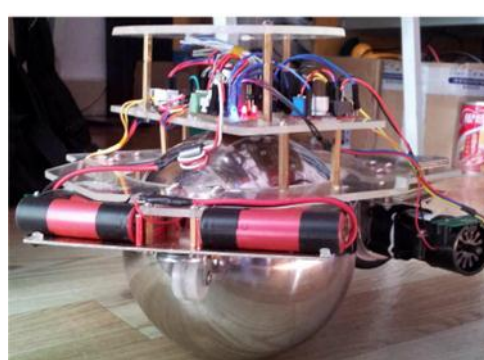


图 5 球形平衡车

2 作品核心创意

2.1 创意作品简单描述

自平衡小车融合了动态平衡技术，自然姿态控制技术和环形电磁驱动技术，

优化了小车体积，减小了转弯半径，提升了载荷空间。自平衡小车可实现原地转向，倾倒复位，静止平衡等多运动功能。自平衡小车具有良好的可扩展性，可根据不同场合加入相应功能。可广泛运用到如大型购物中心、展览场所等各个领域。创意作品概念图如图 6 所示。

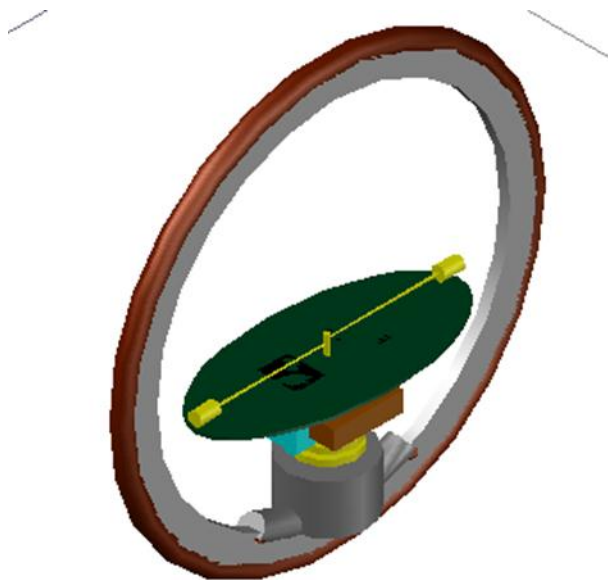


图 6 自平衡独轮车概念图

2.2 作品特点

本作品所述的平衡式小车配制成姿态自动调整方式：

- (1) 前后左右自动平衡，无须人力辅助
- (2) 独轮式结构，且能实现原地自转，机动性强，适应各种环境路况
- (3) 重心低，平衡稳定，且倾倒后能自动复原
- (4) 本独轮小车作为一个多功能兼容平台，留有充足升级空间，可搭载多种设备
- (5) 主轮采用无轴环形电磁驱动，不仅为轮中的部件留出充分布局空间，而且环保高效

2.3 作品核心技术

(1) 动态平衡技术

由人体的平衡反馈得到仿生物学的启发，通过角度位置变化输入，分析计算，相应的平衡棒偏移重心位置，并再输入角度位置关系，形成完整的闭环控制，从

而高精度地实验动态平衡。

通过陀螺仪单元（AHRS）来精确地测量车身的俯仰角度，并以超高频率控制电机旋转带动车轮做出向前向后的移动调整。这样车体保持一种动态的平衡，完全不用担心车身会往前后方向倾倒。

(2) 自然姿态控制技术

由直升机的共轴双桨系统得到启发，将上下桨叶换成一定质量的平衡棒。两个平衡棒分别由两个舵机独立控制，可以自由地 180 度旋转，实现重心的偏移。

陀螺仪单元不仅让车身保持动态平衡，还通过单片机的反馈控制两个独立的平衡棒运动，左右改变小车重心位置，使其完成静止和运动状态的左右平衡、转向和处于倾倒状态下的自动复位。

(3) 环形电磁驱动技术

由直线电磁驱动获得启发，将直线上的电磁推进环形化，使直线上的电磁推进脱离轨道的限制，从而达到使车轮转动的目的。

外轮采用环形电磁驱动，将直线电磁推进的过程循环，以达到使轮转动的目的。从而实现了没有轮轴及轮辐的车轮结构，用轮圈进行动力的输出和输入，动力臂大大增长。而且电磁推动省去了齿轮等很多机械结构，提高了效率，满足了大动力输出的机构，同时使穿过轮心的机构有更大空间。

3 作品可行性分析

3.1 硬件设计

3.1.1 总体机械结构

主要由外轮，环形电磁驱动器，控制单元（包括电路板，共轴平衡杆，陀螺仪）电源模块，以及功能负载组成。三视图如图 7 所示。

本作品所述的平衡式小车配制成姿态自动调整方式。外部形状主要由两个相

互垂直的圆面构成。该小车包括两个部分。第一部分为外部的一个主动轮，与地面接触摩擦产生推动力，轮内侧加工有槽，与底端电磁驱动驱动系统光滑连接。第二部分为小车主主体，由控制单元（包括电路板，共轴平衡杆，陀螺仪）和电源模块，以及功能负载。

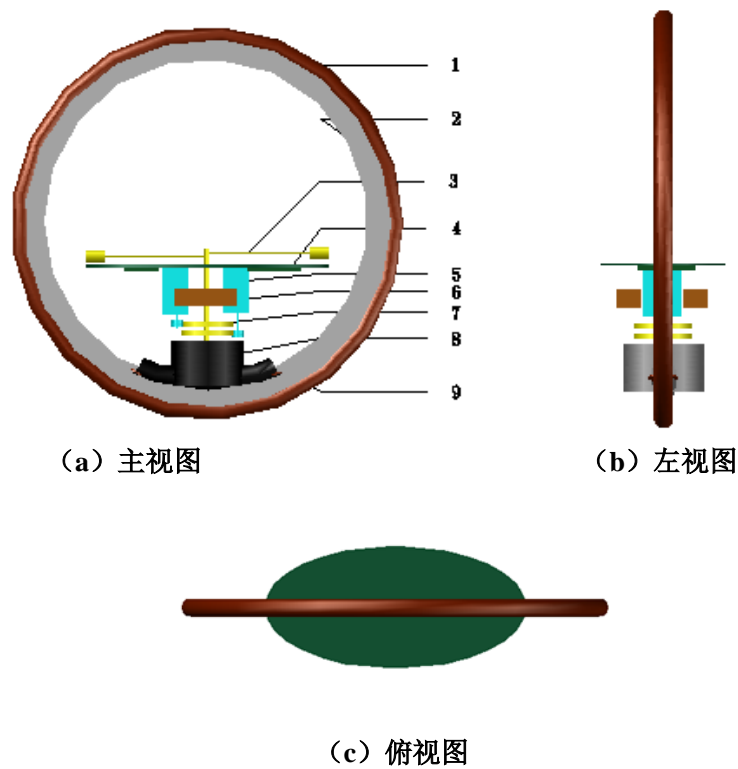


图 7（主视图中各数字代表的结构名称 1 外轮；2 车圈；3 共轴平衡棒；4 主控制电路板；5 舵机；6 电源模块及负载；7 共轴齿轮；8 磁感应线圈及固定装置；9 固定轮）

3.1.2 细节结构

(a) 磁感应线圈的结构

车圈的双侧均有凹槽，电磁驱动轮通过四个小轮卡在外轮上，轮上绕有多个小线圈。大圆为磁感应线圈，相邻的通以相反的电流通过不断改变方向的磁场使外轮转动，平面结构如图 8 所示。

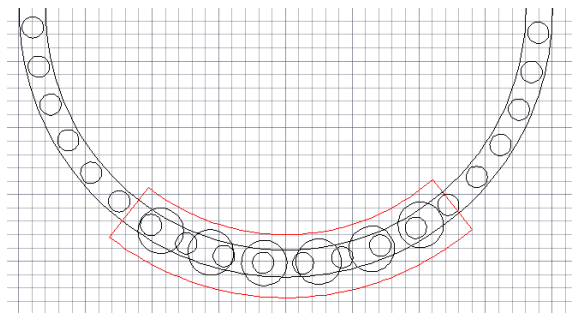


图 8 电磁感应线圈平面示意图

(b) 共轴平衡棒

两个平衡棒分别由两个舵机独立控制，可以自由地 180 度旋转，实现重心的偏移。如图 9 所示。

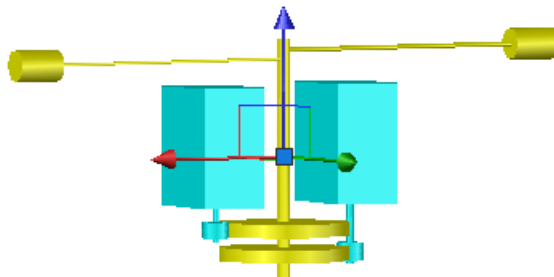


图 9 共轴平衡棒结构示意图

3.1.3 理论分析

根据小车的运动形式不同，小车的各种分运动可简化为原地自转模型、倾倒复位模型和加速运动模型。

(a) 原地自转模型

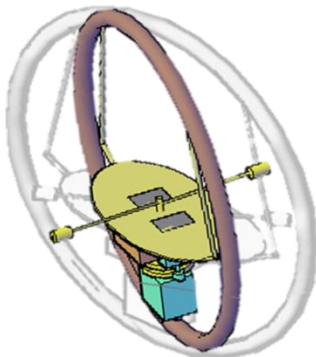


图 10 原地自转模型示意图

如图 10 所示，设单个平衡棒质量为 m_1 ，外轮质量为 m_2 ，负载质量（除了平衡棒和外轮以外的质量）为 m_3 ，外轮半径为 r 。

两个平衡棒绕轴转动的惯量：

$$I_1 = 2m_1r^2 \quad (1)$$

外轮绕直径转动的惯量：

$$I_2' = \frac{1}{2} m_2 r^2 \quad (2)$$

绕通过圆心且垂直圆面的轴转动的惯量：

$$I_2 = m_2 r^2 \quad (3)$$

负载的惯量（将其等效为半径为 R 的均匀圆柱体）：

$$I_3 = \frac{1}{2} m_3 R^2 \quad (4)$$

现在要求平衡棒转 90° 时，外轮和负载反向也可转 90° ，则有：

$$I_1 = I_2' + I_3 \quad (5)$$

取外轮半径 $r=0.2\text{m}$ ，外轮质量 $m_2=0.6\text{kg}$ ， $R=0.05\text{m}$ ，则：

$$m_1 = 0.15 + 0.01 m_3 \quad (6)$$

从而取单个平衡棒质量 $m_1=0.25\text{kg}$ ，负载质量 $m_3=10\text{kg}$ 。

若要求满足在 $t=1\text{s}$ 内转动 π ，则 $\frac{1}{2}\text{s}$ 时 $\omega = \frac{2\pi}{t}$ 。设单个舵机平均功率为 P ，则：

$$\frac{1}{2} (I_1 + I_2 + I_3) \omega^2 = 2P \cdot \frac{1}{2} t \quad (7)$$

综合式 (1) ~ (7)，解得 $P \approx 0.8\text{W}$ ，所以普通的舵机可以满足要求。

(b) 倾倒复位模型

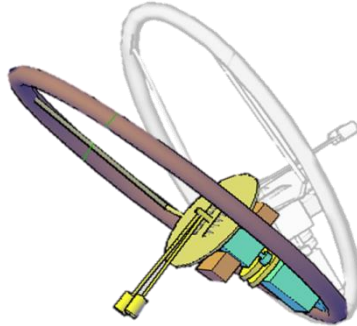


图 11 倾倒复位模型示意图

如图 9 所示，可简化为如下模型：

外轮质量 m_2 集中在轮圆心处，轮与水平角度为 θ ，轮旋转速度为 ω_s ，负载和平衡棒质量 $\approx m_3$ ，集中在距地面接触点 x 处。

用陀螺效应分析该模型：重力矩 $M \approx x \times m_3 g$ 。

则进动角速度：

$$\omega_p = \frac{dL}{L \sin \theta dt} = \frac{x m_3 g \cos \theta}{L \sin \theta} = \frac{x m_3 g \cos \theta}{I_2 \omega_s \sin \theta} \quad (8)$$

取轮的转动与进动角度相同的平衡点，此时：

$$\omega_p = \omega_s \cos \theta \quad (9)$$

联立式(8)和(9)，推出：

$$\omega_s^2 \sin \theta = \frac{x m_3 g}{I_2} \quad (10)$$

取 $\theta = 45^\circ$ ， $t = 1s$ ， $x = \frac{r}{2}$ ，代入式 (10)，得 $\omega_s = 75$ 。

则环形电磁驱动的最小功率 P 满足：

$$Pt = \frac{1}{2} I_2 \omega_s^2 \quad (11)$$

解式 (11) 得 $P \approx 60W$ ，满足本作品电磁马达的功率。

(c) 加速度模型

整体考虑该模型，前进的力矩由重力提供。设前后偏移角度为 θ ，则有：

$$M' \approx m_3 g \sin \theta \frac{r}{2} \quad (12)$$

考虑左右偏移角度 α ，则有：

$$M \approx m_3 g \sin \theta \frac{r}{2} \cos \alpha \quad (13)$$

角加速度为：

$$\beta = \frac{M}{I_2} \quad (14)$$

要求 $\theta \in (-30^\circ, 30^\circ)$ ， $\alpha \in (-50^\circ, 50^\circ)$ ，综合式 (13) 和 (14) 则 $\beta_{\min} \approx 25$ 。

所以在倾倒立起模式时，需要约 3s 达到 ω_s ，满足要求。

3.1.4 自平衡小车控制系统硬件组成

自平衡小车控制系统硬件平台如图 12 所示。由精密陀螺仪，高速单片机等器件组成的自平衡控制系统是本作品的关键。陀螺仪和加速计测量姿态角和加速度，高速单片机运算输入的数据，平衡棒舵机和电磁驱动马达在共轴齿轮传动机

构的传动下执行输出的控制信号，平台上的其他负载功能设备执行相应的功能，通讯模块接收控指令。

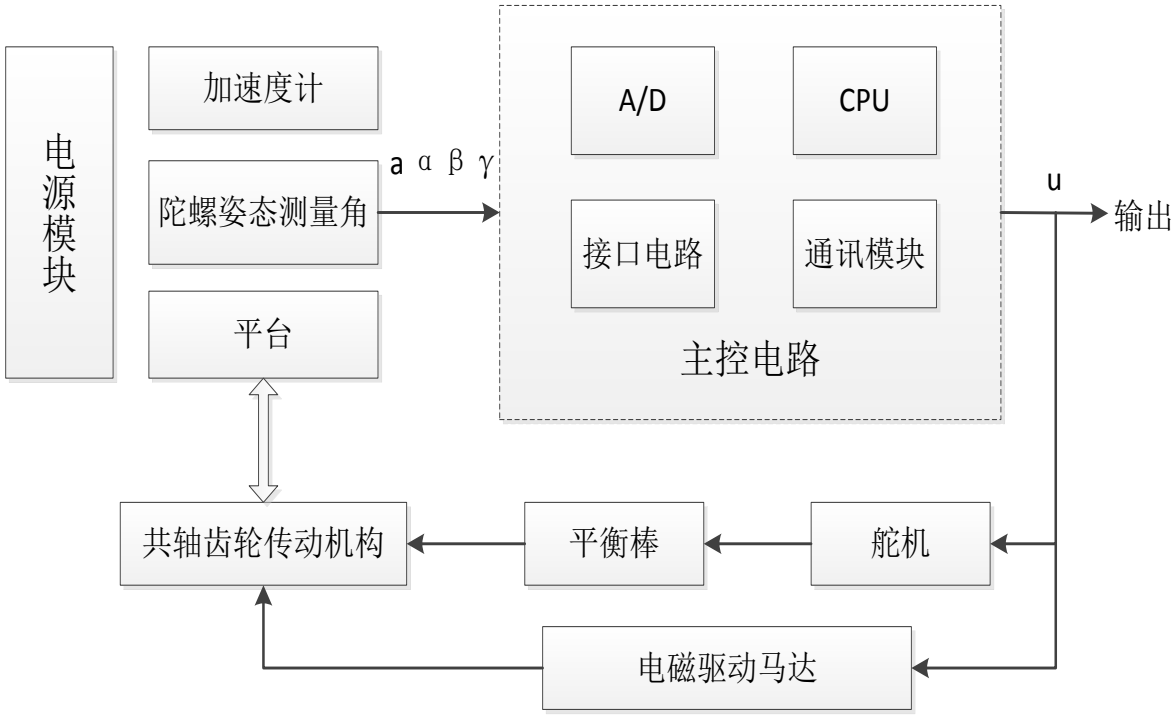


图 12 自平衡小车控制系统硬件平台组成

3.2 软件及控制方案设计

3.2.1 控制方案设计工作流程

- (1) 通过建立空间坐标系对小车进行动力学分析和建模
- (2) 在平衡点附近对系统模型拟采用进行线性控制理论加以控制
- (3) 在大范围内对系统拟采用双回路模糊控制，使控制方法更具智能性
- (4) 设计高效合理的控制算法，编写良好运行的软件

3.2.2 软件流程设计

自平衡小车软件流程图如图 13 所示。

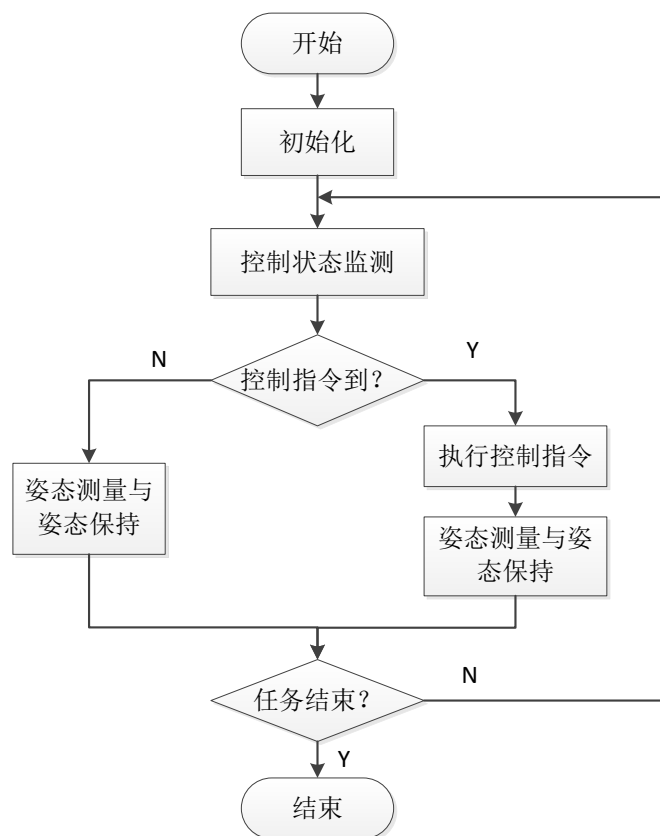


图 13 控制系统软件流程图

自平衡小车有两个工作模式，模式一：维持小车平衡状态；模式二：根据控制指令，完成小车的运动控制，并在运动过程中，保持小车平衡。两个工作模式的控制方框图，如图 14 和图 15 所示。

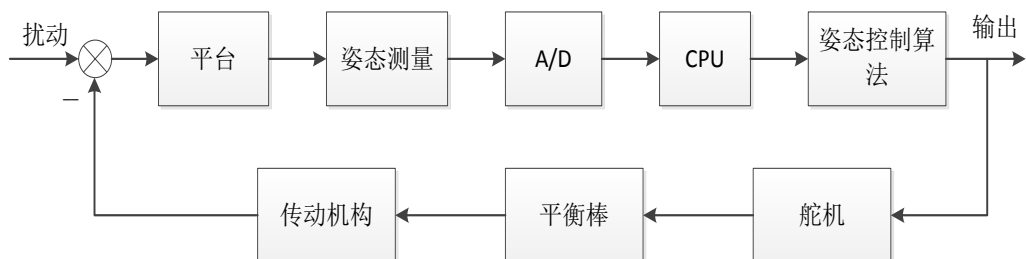


图 14 模式一控制方框图

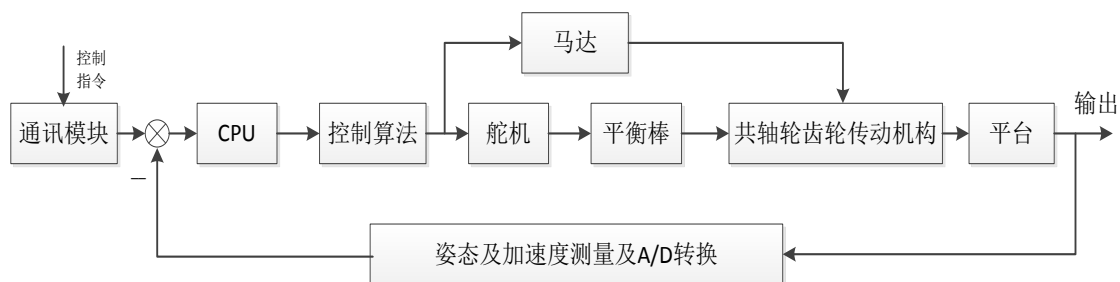


图 15 模式二控制方框图

3.3 余度设计

本产品的平衡完全依赖于高速单片机、精密陀螺仪和电动机的有效工作，如果其中某一部分出现故障，车身就有可能失去平衡。因此它特别具备热备份双余度控制系统，车内的陀螺仪、平衡驱动舵机、平衡棒、平衡电路均有两套，其中任何一个关键模块故障都会有备份系统接替，最大限度地保证驾驶安全。

4 创意应用前景

4.1 应用场景

这个平台可以应用到各个领域，例如大型购物中心、国际会议或展览场所、体育场馆、办公大楼、大型公园及广场、生态旅游风景区、城市中的生活住宅小区等各种室内或室外场合。根据不同的应用场合来加入各类不同功能，例如应用在办公室里，可以加入避障、定位和网络访问控制，实现文件递送的功能。在国际会议或展览场所、体育场馆中可以加入摄像人脸识别系统，进行巡逻安保工作。作为一种灵活机动运动平台，自平衡独轮小车也可被广泛地被运用到灾难现场搜救，战场近地侦查，星球登陆车等诸多场合。

4.2 发展背景

随着我国经济结构转型逐步深入，工业机器人及自动化成套装备市场空间广阔。在机器人及自动化装备业界，中国被公认为是潜力最大的市场，未来 3-5 年中国有望成为全球机器人装机量最大的国家。

4.3 市场需求

目前，我国的工业机器人应用广泛，但服务型机器人却更多地处于技术研发、提高及展示阶段。未来随着城市化进程加速、人口老龄化和人口素质的提高，服务型机器人的商业应用将会加速发展，老百姓对小型服务机器人的需求也会加大。本作品正是顺应了这种趋势，作为一个多功能运动平台，可满足多种需求，实现各种功能。

4.4 推广模式

电视广告：在电视上投入适当的广告，树立品牌形象。

报纸杂志广告：基于目前的资金实力还不够宏厚，利用报纸杂志是最合适的，

而且也在企业的承受范围之内。

媒体广播：利用地方媒体进行宣传。

推广内容主要包括：产品的外形，功能，价格，目标消费群体，与竞争产品相比的优以及保修，升级保障。

参考文献

- [1]. 网络资料《单足自平衡机器人》
- [2]. 网络资料《两轮自平衡小车》
- [3]. 网络资料《环形无轴推进》
- [4]. 网络资料《自动化需求催热机器人市场》