

目录

两轮自平衡小车设计制作全攻略	0
前言	1
初级篇	2
JLINK-OB驱动安装与MDK环境搭建	2.1
如何编译和下载程序	2.2
编译程序	2.2.1
下载程序	2.2.2
JLINK-OB下载	2.2.2.1
串口下载	2.2.2.2
基本原理	3
电机及电机选型	4
直流电机原理与TB6612FNG	5
电路设计篇	6
整体电路框架	6.1
STM32F1介绍和单片机最小系统	6.2
惯性测量单元和MPU-6050	6.3
电机驱动电路	6.4
电源稳压电路	6.5
电池电量检测	6.6
底板电路设计	6.7
机械设计篇	7
机体结构	7.1
数据融合算法与互补滤波器	8
互补滤波器	8.1
两轮自平衡小车的PID控制	9
直立平衡控制	9.1
运动速度控制	9.2
差动系统与航向的控制	9.3
运动平衡的矛盾与统一	9.4
平衡控制的负反馈特征及其稳定性	9.5
正反馈与负反馈的统一	9.6

两轮自平衡小车设计制作全攻略

《两轮自平衡小车设计制作全攻略》是一本基于“小霸王Lite”项目的两轮自平衡小车设计、制作文档。

“小霸王Lite”是一个持续更新的两轮自平衡小车项目。“小霸王Lite”项目对外公开局部设计文档，包含但不限于控制代码、硬件原理图、设计原理、配套书籍。

在我的期望中，“小霸王Lite”项目将会是一个经典的、优秀的两轮自平衡小车项目。

第一，它应该是一个小白都能复制的项目。

《墨客挥犀》记载，白居易每作一首诗，都要给不识字的老太太念念。老太太能听懂的，就要；听不大懂的，就改；改后也听不懂的，就不取了。于是，白居易诗妇孺皆知。我非常认同这种理念和做法。虽然这是一本定位小众的技术书籍，我希望我写下来的文字尽管不必“妇孺皆知”，但也尽量要“老少咸宜”。我会持续去提升我的文字功力。

我认为要做到小白都能复制，起码要做到以下几点：

- 设计理念清晰
- 配套合适硬件
- 代码注释详细
- 完善文字资料

我将尽我所能，努力把项目带到期望的轨道上来。

第二，它应该是一个经得起时间考验的项目。

运用“第一原理思维”而不是“比较思维”去思考问题是非常重要的。

大部分人在生活中总是倾向于比较——别人这样做这件事情，那我也就这样去做好了，甚至不加思考。

所以人以鱼不如授人以渔。我希望本书中，没有无法复制的炫耀式的成功经验。一如既往地，我更喜欢说的是，这是什么、为什么，剩下的让读者自己去判断。

读者可以在[喵呜实验室MiaowLabs](#)查阅更多文档。

Copyright © 喵呜实验室MiaowLabs 2014-2018 all right reserved, powered by Gitbook该文件修订时间： 2018-11-26 20:42:23

前言

“小霸王Lite”是一款入门级两轮自平衡小车，同时也是一个持续更新的两轮自平衡小车项目。

《两轮自平衡小车设计制作全攻略》是一本基于“小霸王Lite”项目的两轮自平衡小车设计、制作文档。

“小霸王Lite”项目对外公开局部设计文档，包含但不限于控制代码、硬件原理图、设计原理、配套书籍。

读者可以在[喵呜实验室MiaowLabs](#)网站查阅更多的最新文档。

在我的期望中，“小霸王Lite”项目是一个经典的、优秀的两轮自平衡小车项目。

第一，它应该是一个小白都能复制的项目。

《墨客挥犀》记载，白居易每作一首诗，都要给不识字的老太太念念。老太太能听懂的，就要；听不大懂的，就改；改后也听不懂的，就不取了。于是，白居易诗妇孺皆知。我非常认同这种理念和做法。虽然这是一本定位小众的技术书籍，我希望我写下来的文字尽管不必“妇孺皆知”，但也尽量要“老少咸宜”。我会持续去提升我的文字功力。

我认为，必须做到以下几点：

- 设计理念清晰
- 配套合适硬件
- 代码注释详细
- 完善文字资料

第二，它应该是一个经得起时间考验的项目。

运用“第一原理思维”而不是“比较思维”去思考问题是非常重要的。大部分人在设计中总是倾向于比较——别人这样做这件事情，我也就这样去做，甚至不加思考。

我希望本书中，没有无法复制的炫耀式的成功经验。一如既往地，我更喜欢说的是，这是什么、为什么，剩下的让读者自己去判断。

我希望多年以后，你依然能想起来，就是这本书的引领下设计出第一辆智能小车。

Copyright © 喵呜实验室MiaowLabs 2014-2018 all right reserved, powered by Gitbook该文件修订时间： 2018-11-17 11:31:35

1、如何编译和下载程序

当朋友们在拿到 小霸王Lite 两轮自平衡小车之后，很多朋友都想先尝尝鲜，想自己烧写个程序、编个代码烧写到小车上，看看效果。

下面我将演示一遍如何将 小霸王Lite 光盘里面自带的程序烧写到小车上。

完成烧录步骤的前提，需要是你的电脑已经安装好 MDK 开发环境，并且安装好 JLINK-OB 或 USB-TTL 串口模块的驱动（这两个模块需要自备）。

如果这一步没有完成，请参考《2、JLINK-OB驱动安装与MDK环境搭建》。

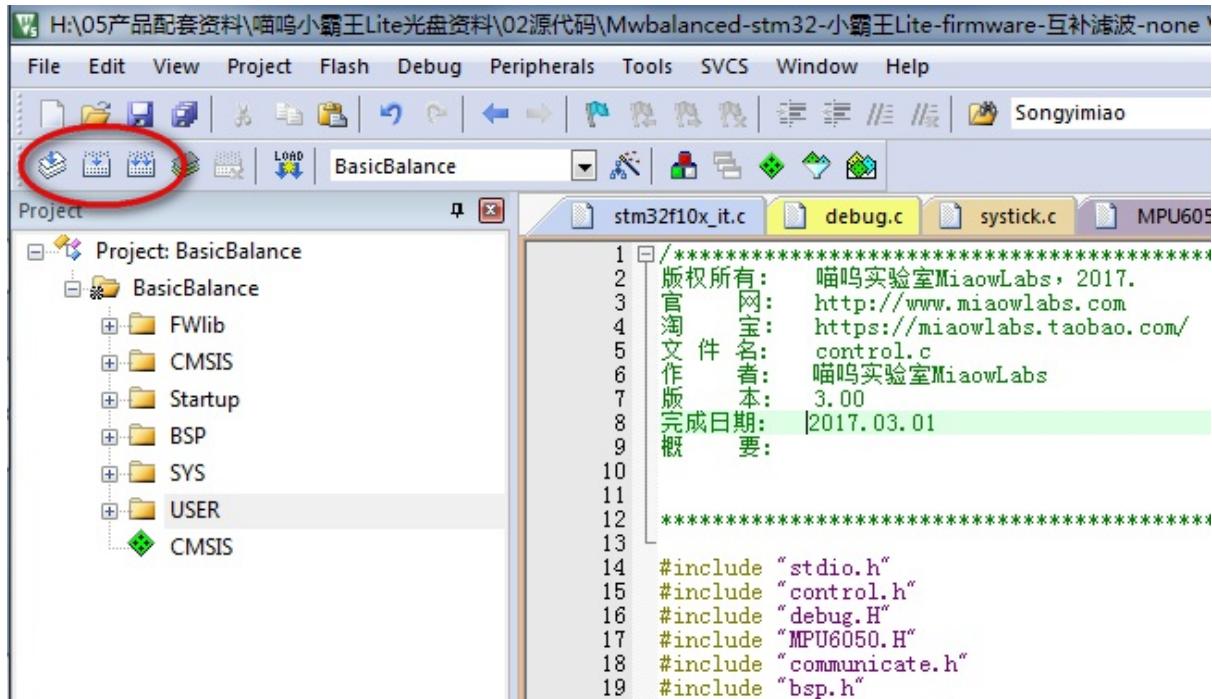
小霸王Lite 光盘上提供的代码都是已经编译好的，可以直接下载。

Copyright © 喵鸣实验室MiaowLabs 2014-2018 all right reserved, powered by Gitbook该文件修订时间： 2018-09-23 23:12:27

编译程序

想编译代码，就得先打开代码工程。在小霸王Lite光盘目录下 2-源代码 文件夹，双击工程文件 **Mwbalanced.uvproj**。前提是需要你已经安装好MDK-ARM编程软件。

在MDK界面中，可以看到左上方的工具栏中有三个按钮（如下图红圈位置所示）。



现在，从左往右依次介绍这三个按钮的功能。

- 第一个按钮：**Translate** 就是翻译当下修改过的文件，说明白点就是检查下有没有语法错误，并不会去链接库文件，也不会生成可执行文件。
- 第二个按钮：**Build** 就是编译当下修改过的文件，它包含了语法检查，链接动态库文件，生成可执行文件。
- 第三个按钮：**Rebuild** 重新编译整个工程，跟 Build 这个按钮实现的功能是一样的，但有所不同的是它编译的是整个工程的所有文件，耗时巨大。

俗话说，时间就是金钱，时间就是生命。在我们编写程序的过程中，使用得比较多的是 **Build** 按钮，只编译当下修改过的文件，比使用 **Rebuild** 按钮重新编译一次能节省很多时间，而且能生成可执行文件。

Copyright © 喵呜实验室MiaowLabs 2014-2018 all right reserved, powered by Gitbook该文件修订时间： 2018-09-25 00:13:55

下载程序

小霸王**Lite**两轮自平衡小车开发套件有两种下载程序的方式：

- 1、JLINK-OB下载
- 2、串口下载

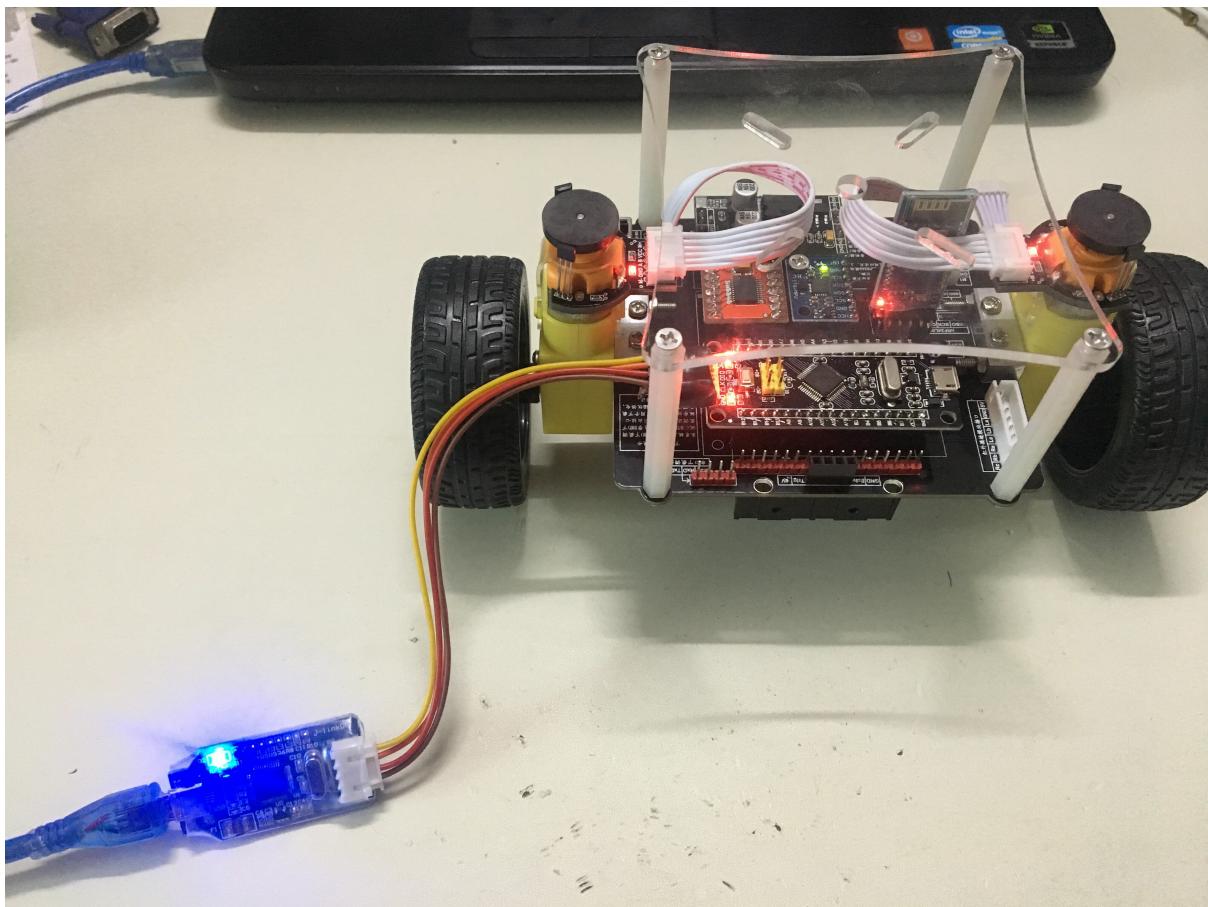
下载程序过程中，有两个地方需要注意：

- 1、在使用JLINK-OB下载的时候，STM32核心板上的跳帽BOOT0跳到VCC端或者GND端都无所谓，但在使用JLINK-OB下载完程序后，必须将BOOT0跳到GND端，好让程序从内部的存储器开始运行程序。为此，在使用JLINK-OB下载时，最保险的方法就是将BOOT0跳到GND端，即保持出厂默认状态就可以了。
- 2、在使用串口下载的时候，必须先将BOOT0跳帽跳到VCC端，然后，在程序下载完再必须将BOOT0跳帽跳到GND端。

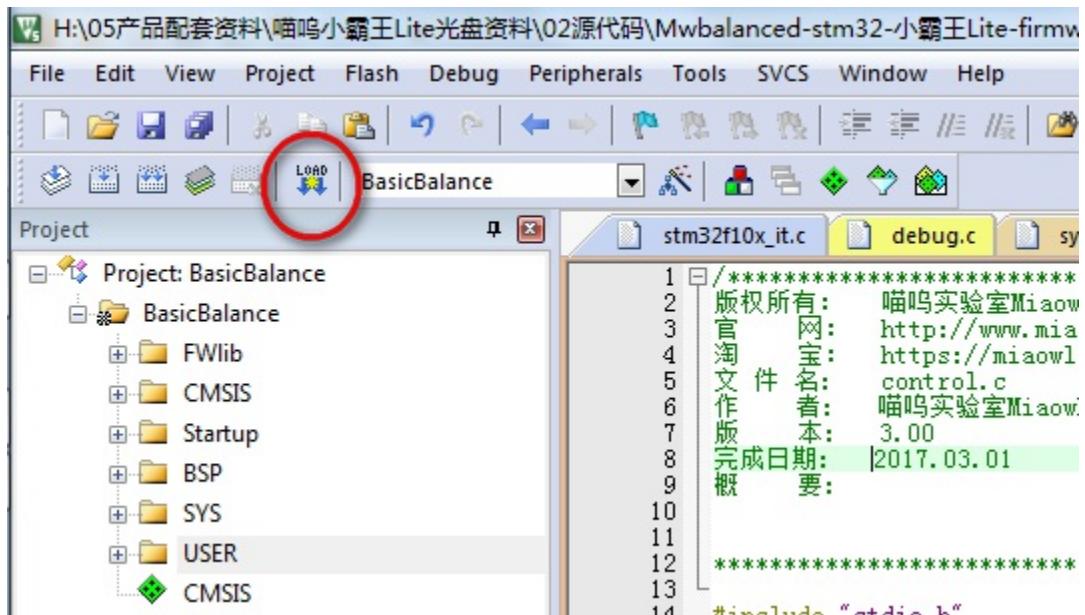
Copyright © 喵呜实验室MiaowLabs 2014-2018 all right reserved, powered by Gitbook该文件修订时间： 2018-09-24 23:48:43

JLINK-OB下载

在使用JLINK-OB下载时，小霸王Lite两轮自平衡小车上的电源开关无须打开，只需对应连接好JLINK-OB与核心板的SWD引脚。



然后，点击MDK-ARM左上角快捷工具栏中的 Load 按钮，或者选项中选择 Flash-Download，都可以把编译好的程序下载到核心板中。



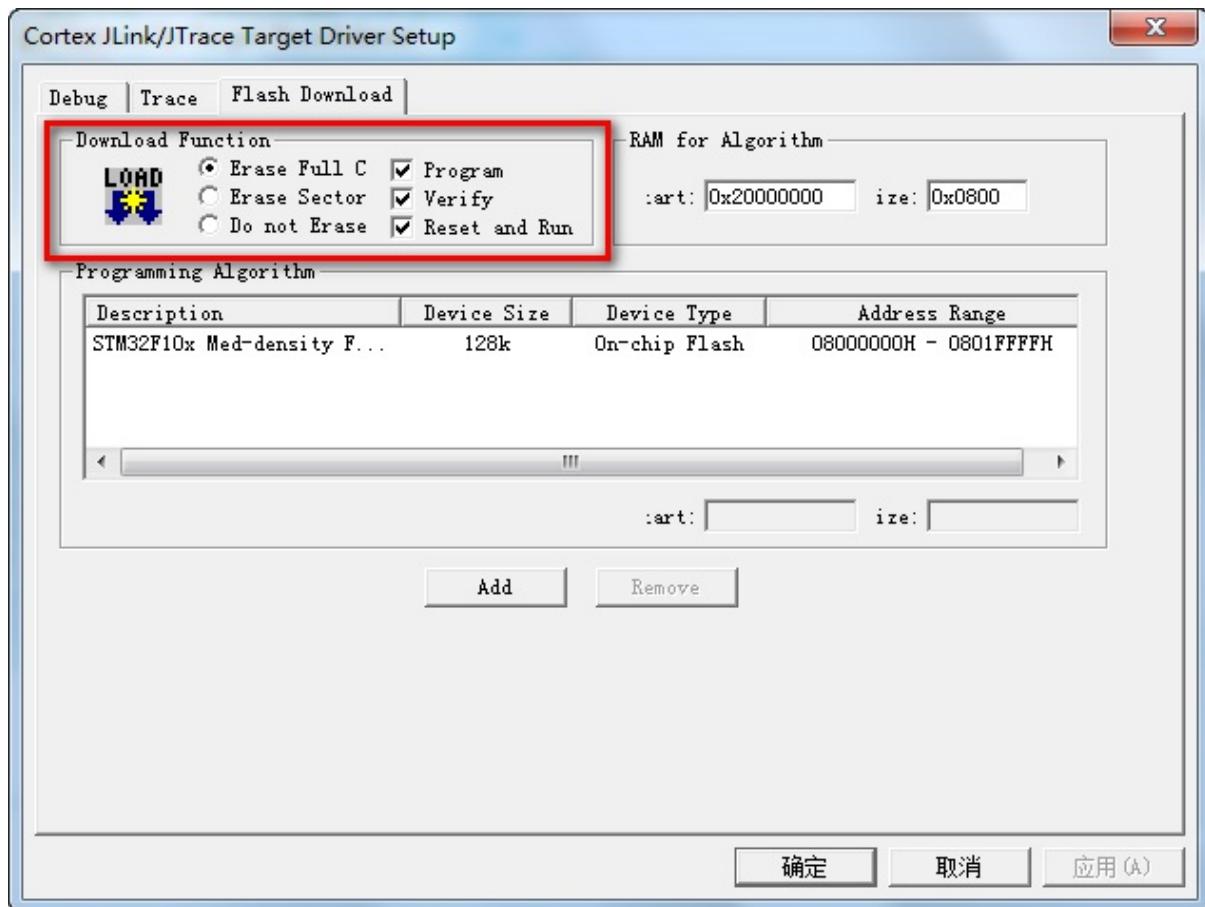
下载成功之后，会在MDK-ARM下方的 Build Output 框中出现一段提示。

```
Build Output
-----
Device: STM32F103C8
VTarget = 3.300V
State of Pins:
TCK: 0, TDI: 0, TDO: 1, TMS: 0, TRES: 1, TRST: 1
Hardware-Breakpoints: 6
Software-Breakpoints: 8192
Watchpoints: 4
JTAG speed: 4000 kHz

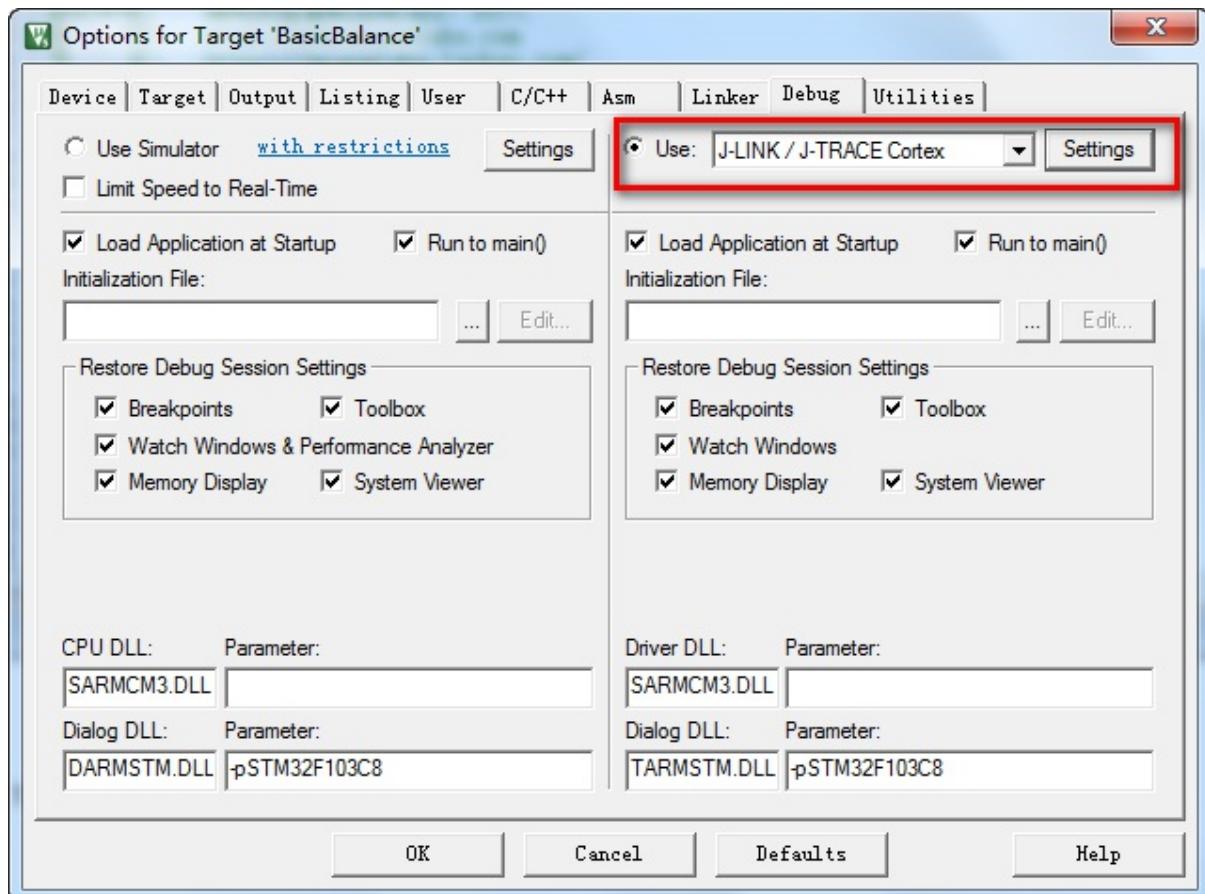
Erase Done.
Programming Done.
Verify OK.
Flash Load finished at 10:13:18
```

下载完成之后，程序就会自动运行。如果下载的是我们喵呜实验室的出厂代码，那么STM32核心板上的LED会闪烁。

如果发现程序没有运行，那是很大可能是因为我们在设置中没有选上自动运行，这时需要手动复位——按一下核心板上的复位按键，或者重新上电复位，程序就会重新运行。如果觉得手动复位太麻烦，我们可以设置下载完自动复位，在MDK-ARM开发环境中点击 Target Options...->Debug->Setting->Flash DownLoad，把 Reset and Run 选项打勾选上。



如果在下载时出错，提示检测不到JTAG，那是因为JLINK-OB使用的是SWD，这时要依次点击 **Target Options...->Debug->Setting->J-Link/J-Trace Adapter**，在“Ort”选择栏将默认的“JTAG”更改选择“SW”。



在下载完程序后，如果想要看看程序在小霸王Lite上运行的效果，要装好电池，把电源开关打开——拨到ON端，电机才能有足够的电流运转起来。

Copyright © 喵呜实验室MiaowLabs 2014-2018 all right reserved, powered by Gitbook 该文件修订时间： 2018-09-25 19:30:27

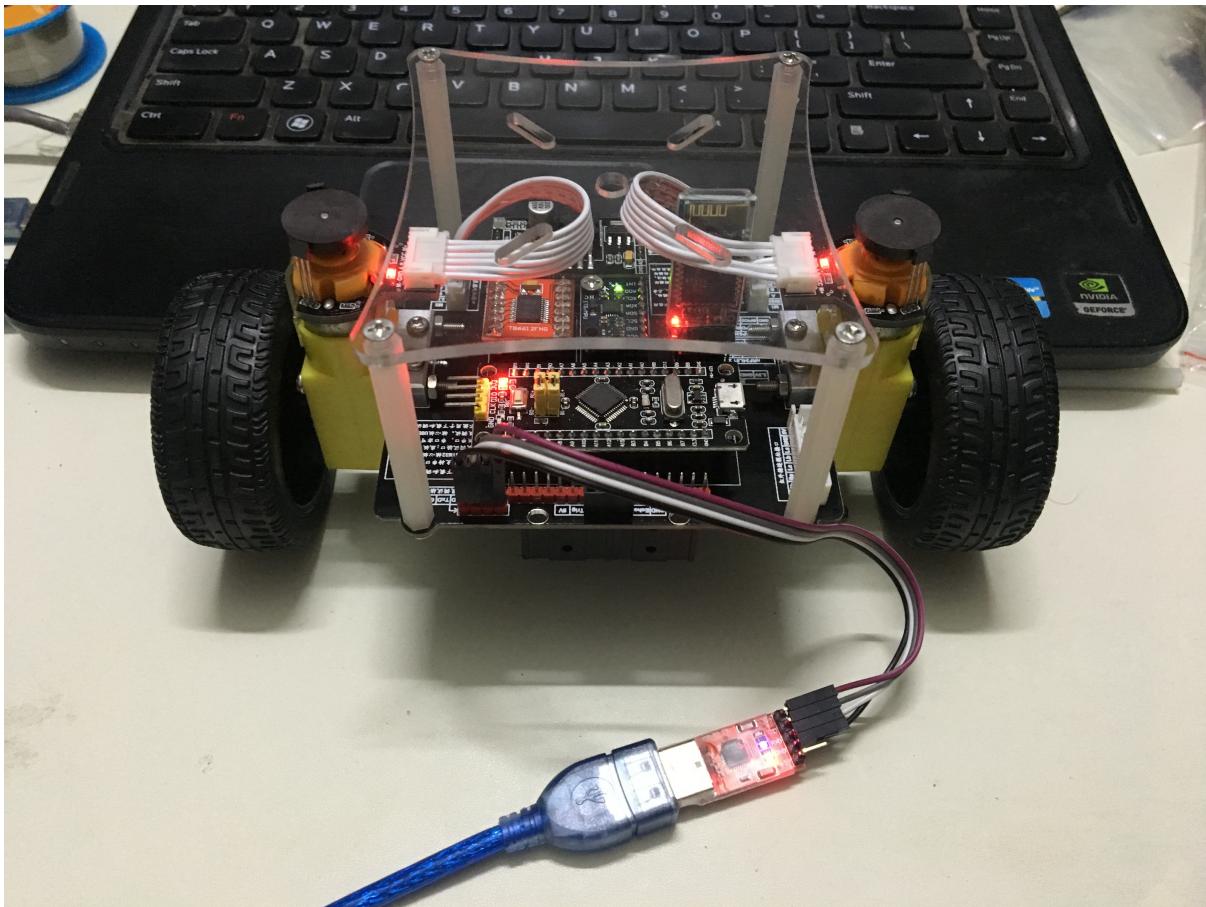
串口下载

小霸王Lite两轮自平衡小车的底板已经把STM32的USART1（串口1）接口预留出来，丝印标注为“串口下载调试接口”。所以，我们同样可以很方便地利用串口进行下载调试。

进行串口下载的前提，需要我们手上准备一个串口模块，其中USB-TLL芯片不限制。如果没有串口模块，请购买一个，在购买的同时，请大家咨询店家获取串口模块的驱动，并且进行安装。

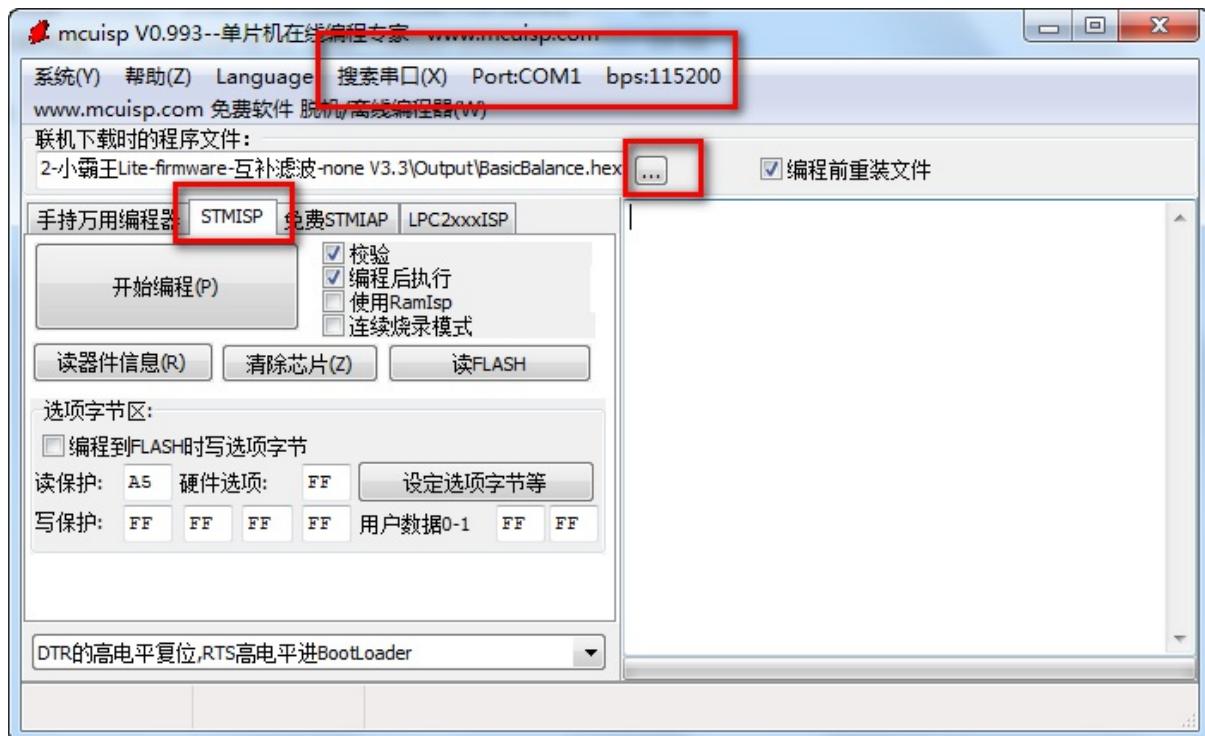
进行串口下载，按以下几个步骤进行即可。

插上自带的串口模块，并且将串口线连接好（注意交叉接线，比如串口模块的RxD对接底板的TxD）。



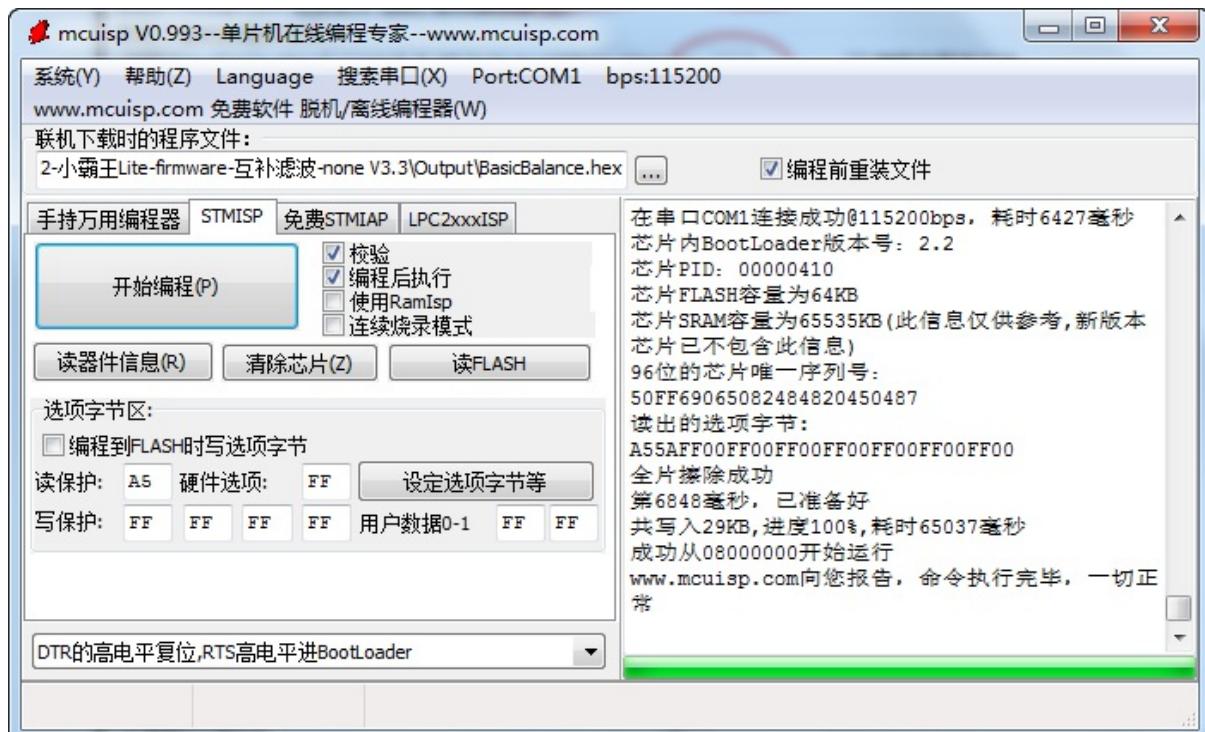
将核心板上的BOOT0跳帽跳到VCC端（丝印标注为B0+）。

我们使用的串口下载工具是mcuisp.exe。这是一个绿色软件，可从网上自由下载，或 小霸王Lite光盘目录下：3- 安装软件 \3-串口下载软件 中找到。双击mcuisp.exe，打开mcuisp界面， mcuisp是比较智能的，只要串口模块插上了电脑，它就会自动搜索可以使用串口端号。因为我在这里演示用的是笔记本的USB端口，插上串口模块后被识别为“串口3”。假如你要修改串口号数，可以到 我的电脑-管理-设备管理器-端口 中查找，然后再修改。



在mcuisp界面bps选项中设置波特率为115200，选择要下载的程序——在小霸王Lite自带的例程中为Output文件夹的可执行文件(hex文件)。

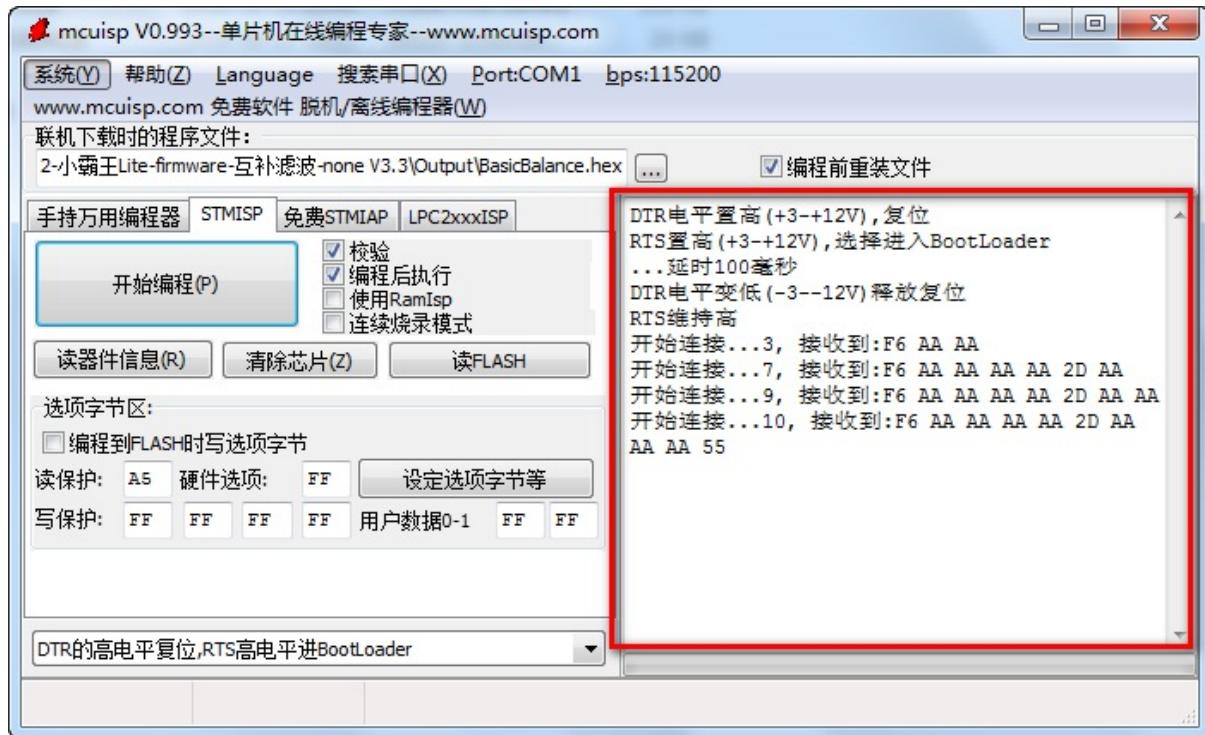
然后点击 开始编程 按钮，开始下载。如果下载成功，则会打印出下面框中的信息。



程序下载成功了，可是在小霸王Lite上看不到程序运行的实验现象呀，是不是哪里出了问题呢？

我们是通过串口下载，是将我们的程序烧写到STM32的Flash中去了，而我们想要从Flash里面执行我们的程序的话，则需要将核心板上BOOT0跳帽重新跳到GND端（标注为B0-），再手动复位——按一下复位按键就能看到实验现象了。

在我们点击“开始编程”按钮时，还可能会出现mcuisp一直处于连接的状态，导致程序下载不了，如下截图所示。解决的方法也很简单：只需按一下核心板板上的复位按键。



Copyright © 喵呜实验室MiaowLabs 2014-2018 all right reserved, powered by Gitbook该文件修订时间： 2018-09-25 20:27:31

基本原理

在大部分书籍、论文中，两轮自平衡机器人通常被定义成这样：

一种两轮共轴、独立驱动，车身重心倒置于车轮轴上方，通过运动保持平衡的机器人。

要数最广为人知的两轮自平衡机器人，莫过于“[Segway¹](#)”——由美国发明家Dean L. Kamen与他的DEKA团队（DEKA Research and Development Corp.）发明设计，自2001年12月起商业化量产销售的电动平衡车。2015年，Segway被小米生态链成员Ninebot公司收购。

正所谓“麻雀虽小，五脏俱全”。两轮自平衡小车，虽然对机械机构进行了简化，但同样继承了两轮自平衡机器人的特殊结构——只能通过运动保持平衡，属于两轮自平衡机器人中的“轻量级选手”，是验证各种控制理论的理想平台。



乘着自己发明的Segway的Dean kamen²

1. 由于众所周知的原因，中国大陆地区可能无法打开这个链接。 ↵

2. 由Photograph taken by Jared C. Benedict on 03 May 2002.Redjar on en.wikipedia - 本文件提取自另一个文件: Dean Kamen with Segway and iBot (113100422).jpg, CC BY-SA
3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=818446> ↵

电机及电机选型

“电机”一词，在维基百科中有如下定义：

电机（Electric Machine），是机械能与电能之间转换装置的通称。转换是双向的，大部分应用的是电磁感应原理。由机械能转换成电能的电机，通常称做“发电机”；把电能转换成机械能的电机，被称做“电动机”。¹

在两轮自平衡小车中，通常使用的是“电动机”。在本书中，默认将“电机”等同于“电动机”。

整体考量

在进行电机选型前，我们要充分考虑一些问题，比如：

- 规定的运动是单方向运动还是来回运动？将采用什么样的驱动来实现期望的运动？是否直接驱动？
- 将要调节哪些变量（电流、速度、位置）？精度要求如何？控制变量如何测量？开环控制系统是否足够满足要求？
- 在所有的工作条件下是否有足够的电功率来驱动负载？最大可用的电流和电压是多少？
- 尺寸大小有无限制？规定的使用寿命是什么？成本是否在可以承受范围？

成本也是一个重要的需要考虑的关键事项。如何才能设计得尽可能的经济，并且还能满足性能和使用寿命的要求。

充分考虑上述问题，对我们后续选择电机驱动电路、控制算法等都有帮助。

应用场合的定义

假设维持两轮自平衡小车直立、运行的动力都来自于两个轮子，轮子的转动是由电机带动的。在我们的设计期望中，两轮自平衡小车要能够实现原地直立平衡功能。因此，除了产生所需的力量和速度的要求外，驱动系统（电机、编码器）必须能达到1mm的定位精度，还要有非常长的使用寿命。

估算负载参数

我们的设计目标是一款小巧的轻量级的两轮自平衡小车，要求这款两轮自平衡小车在电量充足时能一直保持直立平衡状态。

于是，可以根据设计目标进行倒推，预先估算小车的部分关键参数：

- 负载质量 $m=0.4\text{kg}$
- 最大速度 $v=0.2\text{m/s}$
- 定位精度 1mm
- 总效率 $\eta \approx 0.9$
- 原地平衡状态时位移 $p=1\text{mm}$
- 电池电压 $u=7.4\text{v}$
- 最大电流 $i=3\text{a}$

功率近似估计

在功率分析时，注意到重力 F_G 总是存在的，重力为

$$F_G = m \cdot g = 0.4 \cdot 9.81 \approx 3.93N$$

与重力相比，加速度惯性力可以忽略，毕竟小车在原地平衡时，加速度惯性力只在短时间内出现。因此在估计所需的转矩时只考虑不变的作用力，则所需转矩为：

$$M_G = F_G \cdot r / \eta \approx 62 \text{mN.m} \approx 0.7 \text{kgf.cm}$$

$$M_{\text{左电机}} = M_{\text{右电机}} \approx M_G / 2 \approx 0.35 \text{kgf.cm}$$

评估：

这就意味着驱动系统必须能连续输出大约 0.78kgf.cm 的转矩，还要有加速过程中的转矩余量储备。又因为两轮自平衡小车有两个电机，均摊开来，每个电机只需提供约 0.39kgf.cm 的扭矩。

采用一个带有标准编码器（例如，500线分辨率）的电机可以容易地实现 1mm 定位精度。减速箱的背隙大小估计为 2° ，不会对所要求的精度产生严重影响。

电机选型

经过上面的近似估计，我们能知道自己要找的是什么参数的电机——一款扭矩至少要有 0.35kgf.cm 、工作电压 $6\sim 9V$ 、最大电流 $3A$ 以内、速度至少 0.2m/s 、带有起码500线编码器的直流减速电机。

市面上的电机，要么价格过于昂贵，要么无法完全满足上述的性能要求。迫于找不到合适电机的无奈，小霸王Lite项目最终只能选择自主设计、改进一款合适的电机——TTM1直流减速电机。

TTM1直流减速电机的参数如下：

- 额定电压6v
- 最大电流2a
- 最大转速196rpm（在6v电压时）
- 额定扭矩0.5kgf.cm
- 带有单相线数为1920线的AB相编码器
- 带有电磁干扰（EMI）滤波器

TTM1直流减速电机的减速箱材质为塑料（ABS），在牢固可靠的前提下，制造成本大大降低，价格只是其它同参数电机的一半，而且带有高精度编码器，足够满足我们的定位精度，堪称经济实惠、性价比之最，符合小霸王Lite项目中“物美价廉”的设计理念。

1. 摘自维基百科<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E7%94%B5%E6%9C%BA> ↩

直流电机与电机驱动**TB6612FNG**

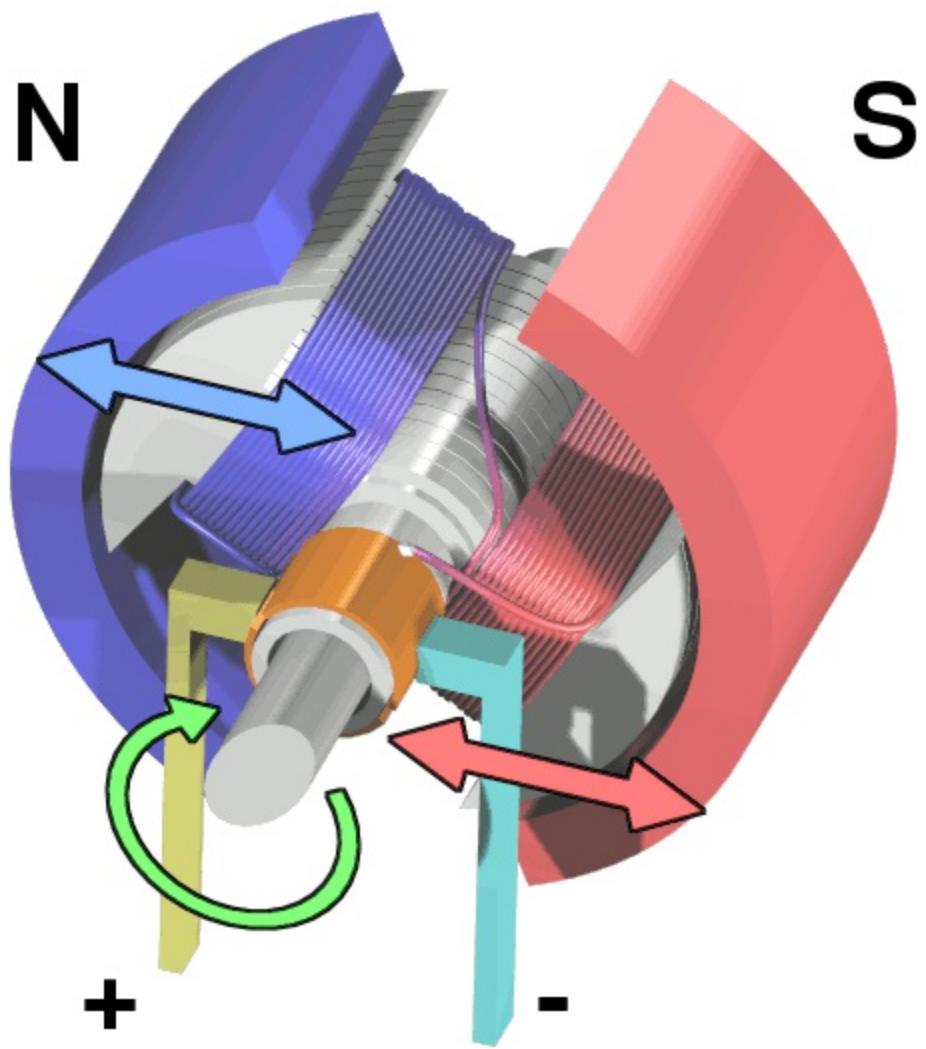
本节讲解直流电机的结构、原理、实物接线方法，以及减速器的作用，并在最后说明了使用直流电机驱动芯片**TB6612FNG**控制直流电机的方法。

(一) 直流电机的结构

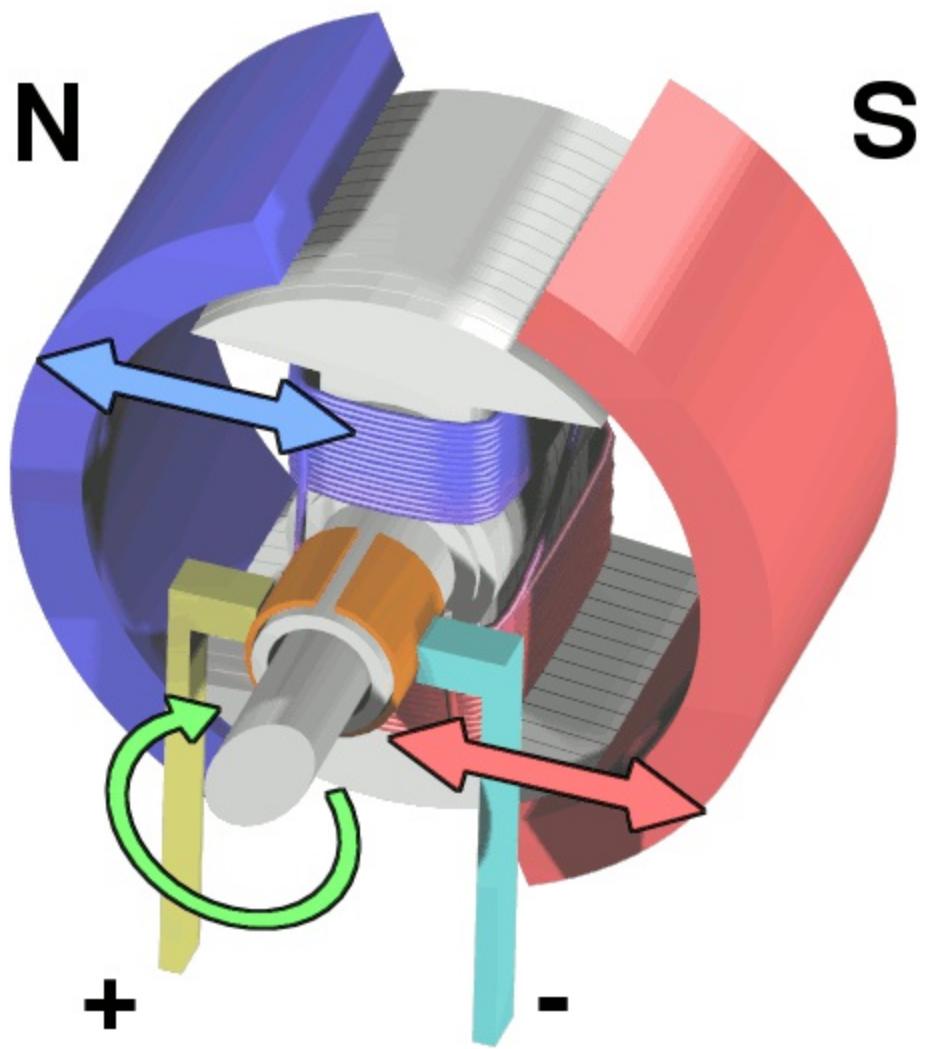
直流电动机的基本构造包括“电枢”、“场磁铁”、“集电环”、“电刷”。

1. 电枢：可以绕轴心转动的软铁芯缠绕多圈线圈。
2. 场磁铁：产生磁场的强力永久磁铁或电磁铁。
3. 集电环：线圈约两端接至两片半圆形的集电环，随线圈转动，可供改变电流方向的变向器。每转动半圈（180度），线圈上的电流方向就改变一次。
4. 电刷：通常使用碳制成，集电环接触固定位置的电刷，用以接至电源。

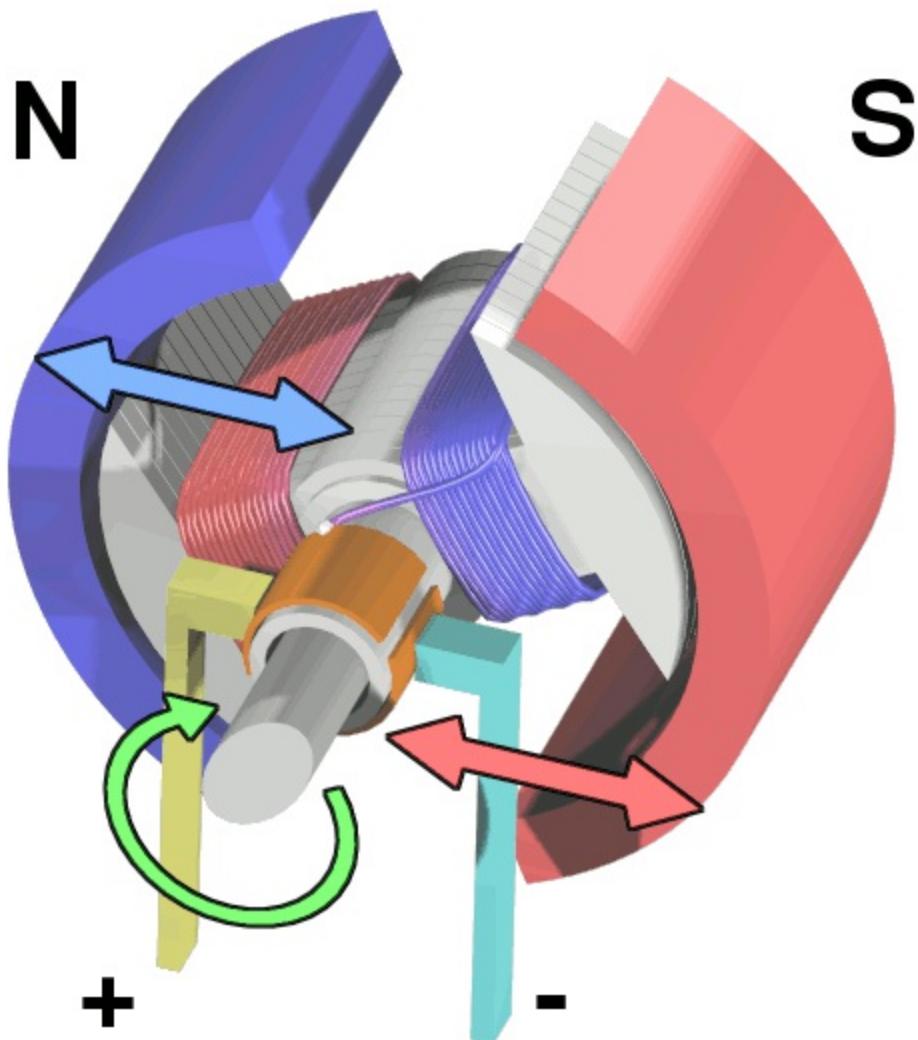
(二) 直流电机的原理



此为一个简单的直流电（D.C.）电动机。当线圈通电后，转子周围产生磁场，转子的左侧被推离左侧的磁铁，并被吸引到右侧，从而产生转动。[1](#)



转子依靠惯性继续转动。



当转子运行至水平位置时电流变换器将线圈的电流方向逆转，线圈所产生的磁场亦同时逆转，使这一过程得以重复。

(三) 减速器

减速器，又称减速箱，通常应用在低转速大扭矩的传动设备，把原电机高速运转的动力（每分钟几千上万转），通过减速器输入轴上的齿数少的齿轮啮合输出轴上齿轮大的齿轮，来达到减速的目的。大小齿轮的齿数之比就是传动比。减速器在执行机构之间起匹配转速和传递转矩的作用，是一种相对精密的机械，使用它的目的是降低转速和增加转矩。

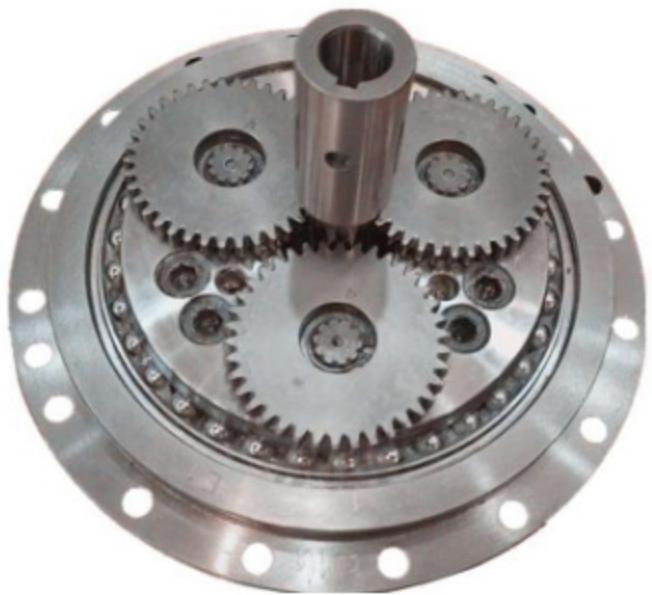
减速器种类繁多，按传动和结构特点划分，减速器种类有齿轮减速器（Gear reducer）、蜗杆减速器（Worm wheel reducer）、蜗杆齿轮减速器及齿轮-蜗杆减速器、行星齿轮减速器(Planetary gears)、摆线针轮减速器（Cycloid reducer）和諧波齿轮减速器(Harmonic drive)等。



齿轮减速器体积较小，传递扭矩大，但是有一定的回程间隙。

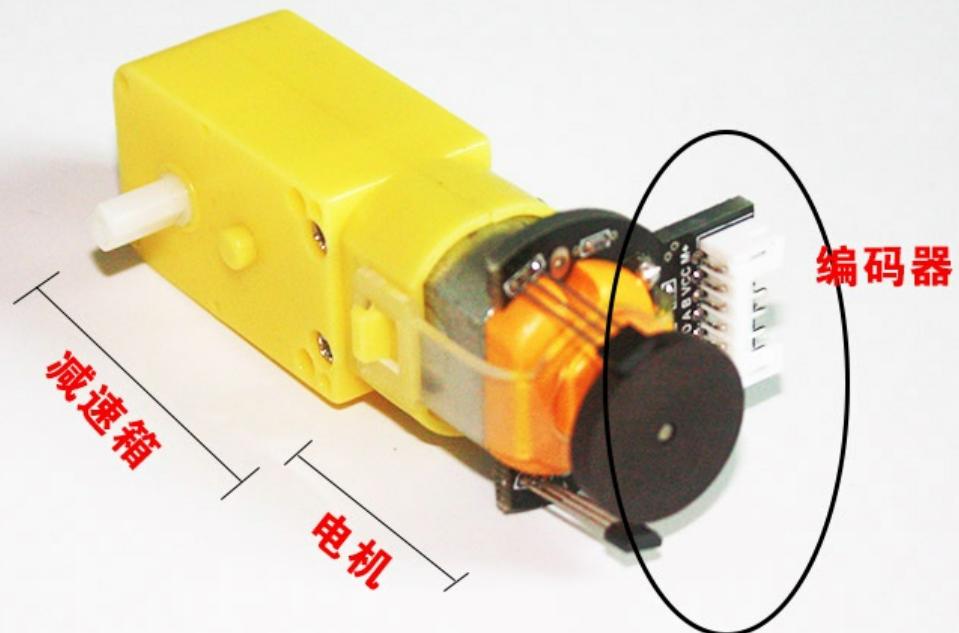


蜗杆减速器的主要特点是具有反向自锁功能，可以有较大的减速比，但是一般体积较大，传动效率不高，精度不高。



行星减速器的主要特点是结构紧凑，回程间隙小、精度较高，使用寿命很长，额定输出扭矩可以做得很大，但价格昂贵。

下面是TTM1直流减速电机——一款搭配齿轮减速器的电机。

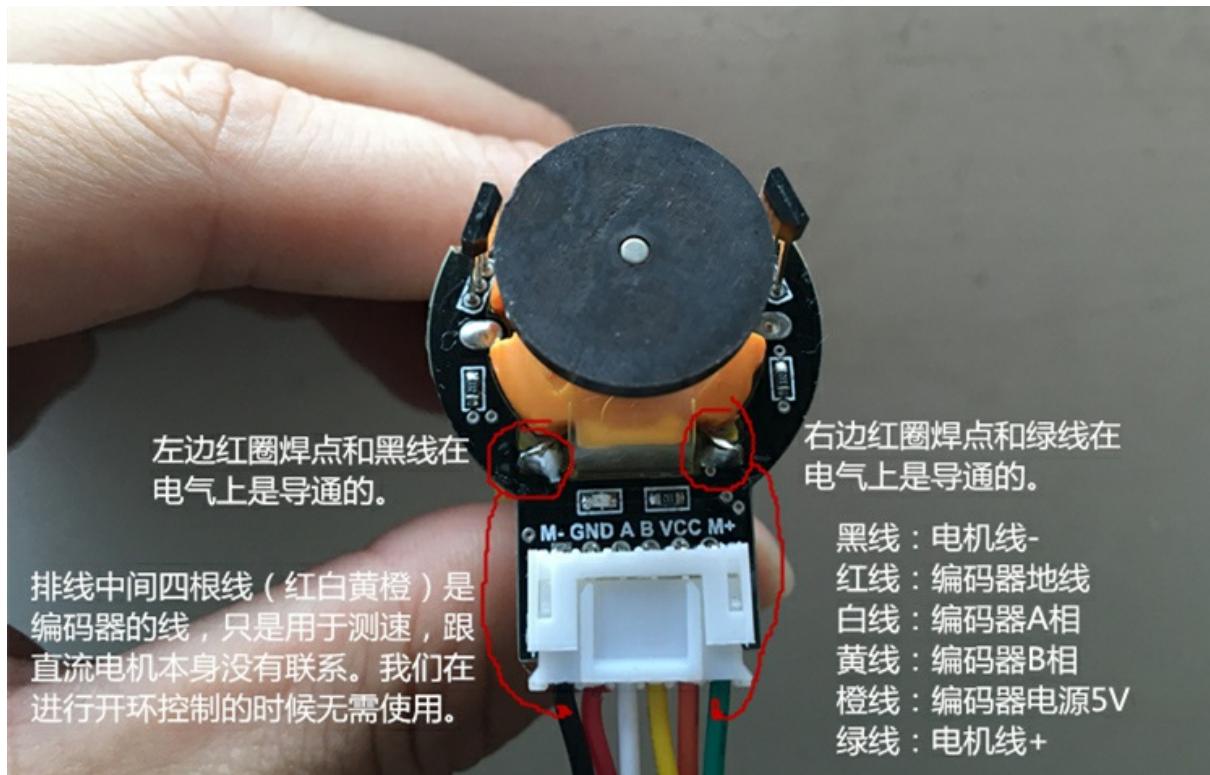


集成编码器的小功率直流减速电机

黄色部分为减速箱，减速箱与电机直接联接，电机上的电路板为编码器。

(四) 电机实物接线图

具体到我们的电机，我们可以看看电机后面的图解。



你可以会产生疑问——直流电机不是只引出两根电机线吗？怎么这个电机有6根线？而且还有两个大焊点？其实，根据上面的图解也知道，那两个大焊点分别与两边的两根线是连接在一起的。也就是说这6根线，中间的4根线是编码器的线，只是用于测速，和直流电机本身没有联系。我们在进行开环控制的时候无需使用。

综上所述，我们只需要控制施加在电机线两端的直流电压大小和极性即可实现控制转速和方向。

(五) TB6612FNG的使用方法

单片机的IO引脚的输出电流小，负载能力弱，我们无法直接通过单片机控制直流电机的转速和换向。直流电机是大电流感性负载，通常在单片机和电机之间添加一个功率放大器件来驱动直流电机。

在这里，我们使用电机驱动芯片——TB6612FNG来进行讲解。

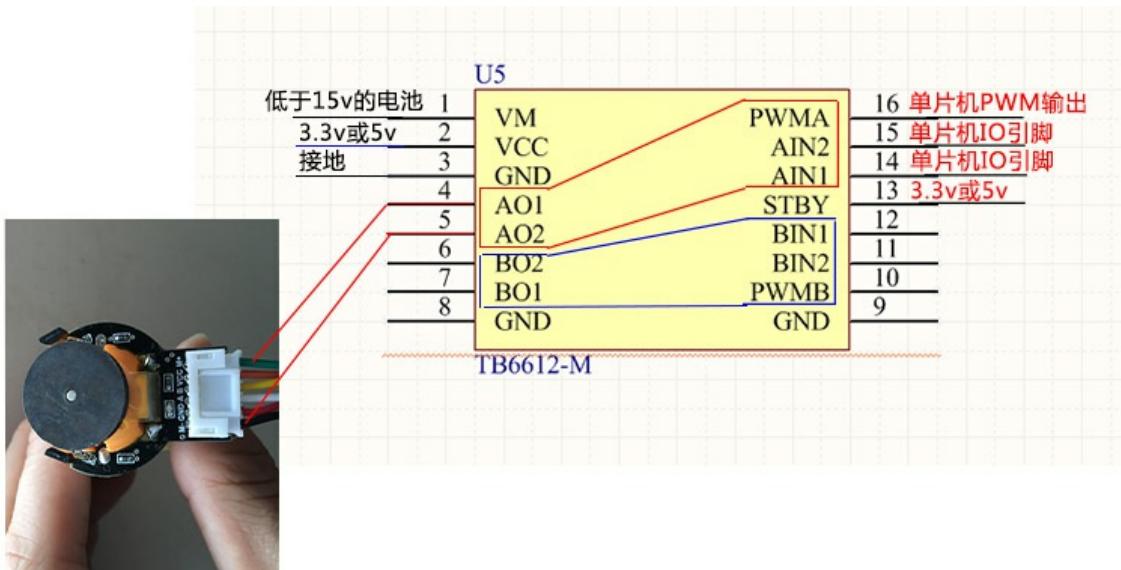
TB6612FNG是东芝半导体公司生产的一款直流电机驱动器件，具有大电流MOSFET-H桥结构，双通道电流输出，可以同时驱动两个电机。也许大家更熟悉的是L298N，其实这两者的使用基本一致。相比L298N的热耗性和外围二极管续流电流，TB6612FNG不用外加散热片，外围电路简单，只需外接电源滤波电容就可以直接驱动电机，有利于减小电路板尺寸。对于PWM信号输入频率范围，高达100kHz的频率更是足以满足我们大部分的需求了。

以下是TB6612FNG的主要参数

TB6612FNG电机驱动芯片的主要特性如下： a) 驱动电压：最大支持15V b) 输出电流：1.2A（连续）/ 3.2A（峰值） c) 工作模式：支持正转/反转/刹车/停止四种模式 d) 封装尺寸：SSOP24, 0.65mm引脚间距

TB6612FNG内部集成两组H桥驱动电路，能直接驱动两个直流电机。TB6612FNG内部框图如下图所示。

以下是TB6612FNG模块测试一个电机的接线图



VM直接接电池即可，VCC是内部的逻辑供电，给3.3或5V都行，模块的3个GND接任意一个即可，因为内部都是导通的，STBY置高模块才能正常工作。

完成上面的接线之后，我们就可以开始控制电机了，上图中红色部分的5个引脚控制一路电机，蓝色部分的控制另外一路电机，这里讲其中的A路，B路的使用的一样的。AO1和AO2分别别到电机的+和-，然后通过PWMA、AIN1、AIN2控制电机。其中PWMA接到单片机的PWM引脚，一般10Khz的PWM即可，并通过改变占空比来调节电机的速度。下面是真值表：

AIN1	0	1	0
AIN2	0	0	1
	停止	正转	反转

(六) TB6612FNG驱动电机的方法

下面介绍一种最简单直接的用TB6612FNG测试电机转动的方法：

按照以下方式接线：

VM直接接电池正极（注意电压不能超过15V）；

当AIN1接3.3~5V、AIN2接GND、PWMA接3.3~5V，这样相当于控制电机满占空比正转；

当AIN1接GND、AIN2接3.3V~5V、PWMA接3.3~5V，这样相当于控制电机满占空比反转。

1. 由Wapcaplet - Created by Wapcaplet in
Blender.http://en.wikipedia.org/wiki/Image:Electric_motor_cycle_1.png, CC BY-SA
3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=671789> ↵

电路设计篇

你想过吗？做任何事都应该有一套方法论。

方法论：关于认识和实践的根本方法的理论。包括哲学方法论、一般科学方法论和具体科学方法论。

做设计不例外，做电子设计更不例外。

在做电子设计的过程中，我逐渐发展处一套完整的方法论。其中，涉及到电路设计的有两条准则：

- 要学会使用英文阅读
- 要以官网规格书为准

为什么在这里强调英文的重要性？其实上面两条方法论紧密相连。要知道，大部分芯片厂商的规格书**Datasheet**都是英文文档。在我身边，不少小白总是嫌看原文看英文耗时间，喜欢走捷径——看一些不知来历的译文，殊不知译文的质量全靠译者的道行。译文质量参差不齐，参考译文来设计容易被坑，被坑后又要重新设计，这样的案例层出不穷。为此，一定要学会用英文阅读，要学会查阅规格书。

另外，这里强调要以官网规格书为准。规格书必须要从对应芯片厂商官网下载最新版本。有时候，旧版本可能存在错漏，新版本会修正。当你使用非官网修正的最新规格书时，可能分分钟被旧版本的**BUG**坑一把。

Copyright © 喵呜实验室MiaowLabs 2014-2018 all right reserved, powered by Gitbook该文件修订时间： 2018-09-29 13:07:31

整体电路框架

设计电路存在一定的“套路”，同样适用于设计两轮自平衡小车的电路，用“首先-然后-最后”步骤法描述出来：

首先分析整个系统的输入、输出信号，然后选择合适的MCU（单片机），最后围绕MCU逐步设计出合适的子模块，形成完整的控制电路。

我们根据上述通用步骤，照葫芦画瓢，进行“小霸王Lite”两轮自平衡小车的电路设计。

首先，对两轮自平衡小车系统的输入输出信号进行分析，可以得到输入输出信号至少包括：

1. PWM接口（2路）

控制两个电机正反转。由于打算使用双极性PWM驱动，这里预计只需要用到2路PWM。如果采用单极性PWM驱动，则需要用到4路PWM。

2. 定时器接口（2路）

捕捉编码器脉冲。定时器有正交编码器模式最好。因为两个编码器，这里预计需要两个定时器脉冲输入端口。

3. ADC接口（1路）

用于电池电压检测，至少1路。

4. 通讯接口（UART 2路、I2C 1路）

- UART：2路，分别用于下载调试接口、与蓝牙模块通信。
- I2C：如果选择数字传感器，可以通过I2C接口读取加速度与陀螺仪数据。

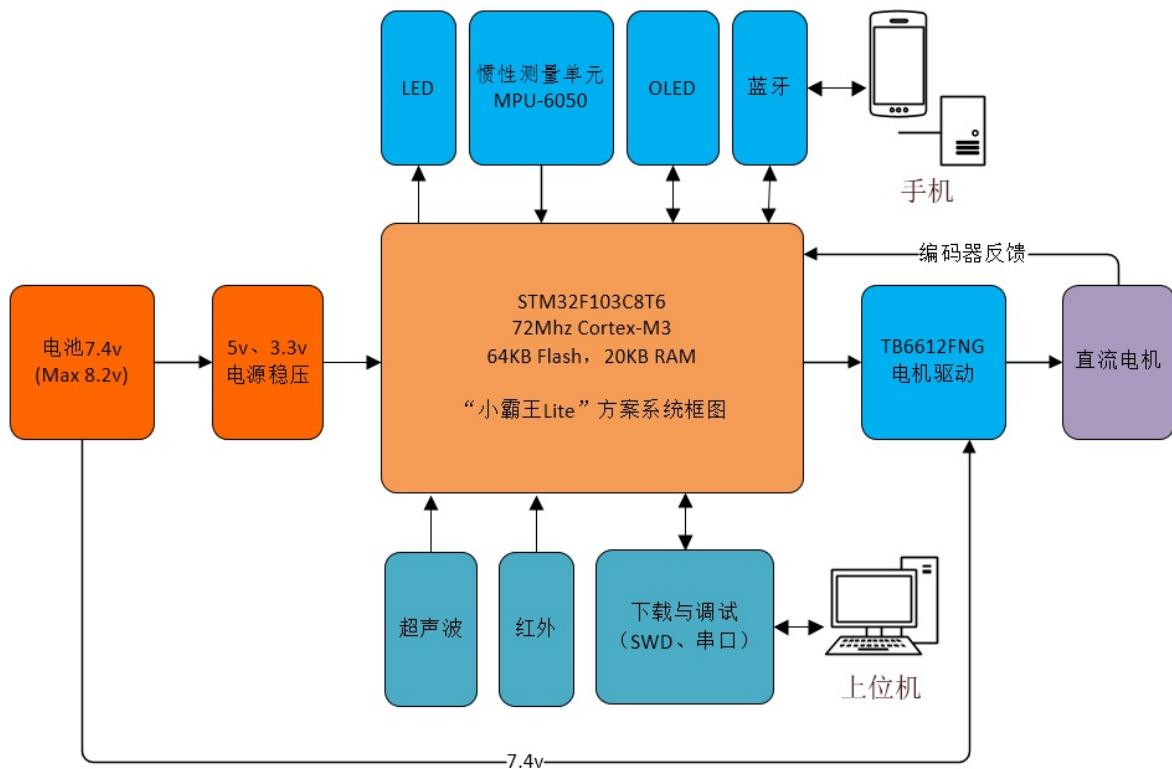
5. GPIO口（4路）

用作电机变向驱动。至少预留4路。其它GPIO口，可应用在运行状态显示，功能扩展等地方上。

通过简单的分析，我们就可以知道要选用至少包含哪些功能的单片机——在外设方面，至少包含2路PWM接口、2个定时器接口、1路ADC接口、2路UART接口、1路I2C接口、4路GPIO接口。

然后，我们直接“按图索骥”，可以在市场上找到很多合适的单片机。但是，小霸王Lite项目最终选择使用意法半导体的单片机STM32F103C8T6。一是因为STM32的性能、功能都能满足两轮自平衡小车的设计要求；二是因为STM32的出货量大，教程文档、开发板都多如牛毛，生态系统非常丰富。

最后，围绕着单片机进行设计其它的功能子模块，整体电路框架自然而然就出来了。



在整体电路框图中，除了单片机最小系统，还有以下必需的子模块：

- 下载调试电路：这部分电路简单，可以与单片机最小系统设计成一块电路板，方便调试；
- 惯性测量单元：加速度传感器、陀螺仪，这里选择使用六轴传感器MPU-6050；
- 电机驱动电路：驱动两个电机运行的功率电路，这里选择使用驱动芯片TB6612FNG；
- 电源稳压电路：电压转换、稳压、滤波电路；

另外，我们还考虑到DIYer心中期待的两个高频需求：

- 各模块是否模块化设计。项目完成后DIYer对模块进行重复使用。
- 单片机引脚是否全部引出来。DIYer要天马行空，再次二次开发。

基于这两个高频需求，在小霸王Lite的电路设计中，使用了“模块+底板”的拼接方式，利用排针排母等接插件，将各模块与底板进行电气连接。

STM32F1介绍和单片机最小系统

单片机相当于人或动物的大脑，接收并处理各传感器（包括陀螺仪和加速度传感器的信号），完成计算和规划后，向各执行机构（比如电机）发出控制命令。

在“小霸王Lite”项目中，单片机选择意法半导体的STM32F103C8T6，它体积小（LQFP48，7x7mm），功耗低（3.3V工作电压），运算速度快（10.25MIPS，ARM 32-bit Cortex™-M3 CPU），具有丰富的外设模块。

它的主要外设包括但不限于：

- PWM: 8通道；
- AD转换器：10通道，12位；
- 定时器：3通道16位通用定时器（TIM2/TIM3/TIM4），1通道高级控制定时器（TIM1）；
- 丰富的外部串行接口：SCI, I2C, SPI；
- IO口：最多可以提供32路，可以与5V器件直接相连。
- 内部存储器资源包括：64k程序Flash，20k数据RAM。

下图显示该单片机的内部资源情况。

经典的最小系统由单片机、供电电路、时钟电路、复位电路、启动配置电路和程序下载电路构成，该单片机的最小系统电路。

- 供电电路：STM32F103系列微控制器的工作电压为2.0V~3.6V。
- 时钟电路：时钟通常由晶体振荡器（简称晶振）产生，电路加入了两个时钟源，Y1是32.768KHz晶振，为RTC提供时钟；Y2是8MHz晶振，为整个系统提供时钟。
- 复位电路：采用按键和保护电阻电容构成复位电路，按下按键将触发系统复位。
- 启动模式：启动模式由BOOT0和BOOT1选择。在“小霸王Lite”设计方案中，BOOT1默认接低电平，BOOT1通过排针引出，通过跳帽可以配置不同的启动模式。
- 下载调试：预留SWD接口和USB接口。SWD是串行调试（Serial Wire Debug），与JTAG的20个引脚相比，SWD只需要4个引脚，结构更简单。另外，配备USB-TTL电路和Micro-USB接口，可以使用数据线，通过串口完成下载与调试。

“小霸王Lite”项目中，STM32F103C8T6单片机必须使用的的资源包括：

- I2C通讯接口：读取MPU-6050数据
 - I2C1_SDA (PB8, PIN45)；
 - I2C1_SCL (PB9, PIN46)；
- 电机转速脉冲接口
 - TIM2_CH1 (PA0) 和 TIM2_CH2 (PA1)：TIM2定时器增量编码器输入；
 - TIM4_CH1 (PB6) 和 TIM4_CH2 (PB7)：TIM4定时器增量编码器输入；
- 电机PWM驱动接口
 - TIM3_CH1 (PA6) 和 TIM3_CH2 (PA7)：电机驱动；
- 程序下载调试 SWD 接口
 - SWDIO (PIN34)；
 - SWCLK (PIN37)；
- 串口调试 UART 接口：
 - TXD (PIN6)；
 - RXD (PIN7)；
- 蓝牙通讯 UART 接口：
 - TXD (PIN33)；

- RXD (PIN34) ;

除了上面其他确定使用的引脚，其它的没有占用的引脚全部预留出来，可以用作状态显示、辅助调试、扩展功能。

STM32最小单片机系统，实物图如下图所示。

如实物图所示， STM32F103C8T6单片机所有引脚通过排针方式预留出来。

- STM32核心板有用户指示灯和电源指示灯各一个，其中用户指示灯可以通过编程修改用途。
- STM32核心板有用户按键和复位按键各一个，其中用户按键可以通过编程修改用途。
- STM32核心板预留有SWD接口，能使用仿真调试器（比如JLINK-OB、ST-Link等）进行下载和调试。
- STM32核心板预留有USB-TTL电路和Micro-USB接口，只需要一根数据线，就能通过单片机内部的Bootloader程序，完成程序的开发和调试，无需使用额外的调试器。

Copyright © 喵呜实验室MiaowLabs 2014-2018 all right reserved, powered by Gitbook该文件修订时间： 2018-10-03 14:32:40

惯性测量单元和MPU-6050

惯性测量单元

两轮自平衡小车运动控制任务可以分解成以下三个基本控制任务：

- 直立控制
- 速度控制
- 方向控制

其中，直立控制是关键。进行直立控制的前提是要获取准确的姿态数据，而获取姿态数据则要依靠惯性测量单元。

惯性测量单元，包括多种传感器，比如倾角仪、加速度传感器、陀螺仪、罗盘等传感器。表X给出了各惯性测量单元性能的对比分析。

	测量值	优点	缺点
倾角仪	角度	静态性能好，精度高，无累积误差	动态响应速度慢
加速度传感器	加速度	静态性能好，精度高，更新频率快	存在累积漂移误差，动态响应慢
陀螺仪	角速度	动态响应好，频带宽，更新频率快	存在温漂和零漂
罗盘	角度	静态性能好，精度高，无漂移误差	动态响应速度慢，受环境磁场影响大

倾角仪测量与重力方向相关的姿态角，输出频率低，实时性较差，而且输出信号容易受噪声污染。对相频特性进行分析显示，倾角仪相位存在滞后。

加速度传感器测量与惯性有关的加速度，包括旋转、重力和线性加速度，对测量数据进行积分可以得到线性速度，二次积分可以得到线位移，但积分产生的漂移误差将随时间累积而无限制地增长导致积分后得到的数据不准确。加速度传感器通过三角函数运算可获得倾角值，但是输出信号容易受噪声污染。当加速度传感器垂直于俯仰角安装时，通过反正切函数运算可以作为倾角仪使用进行360°的全方位测量，并且不会产生线性化误差。

陀螺仪测量瞬时旋转角速度，由于温度变化、摩擦力、不稳定力矩等因素，会产生漂移误差。对陀螺仪测量数据进行积分可以得到与垂直方向相关的倾角信息，动态响应快，但漂移误差将随时间累积而无限增长。陀螺仪具有足够的带宽，动态性能好，静态输出受漂移误差影响较大。

罗盘通过测量相对于地磁场的方向，提供绝对姿态角信息。由于室内存在电源线和钢结构导致磁场产生畸变，罗盘一般不适于室内工作。

“小霸王Lite”设计方案采用加速度传感器与陀螺仪组合的惯性测量单元，对加速度值和陀螺仪值进行数据融合，测量精度高，能克服温度漂移和误差积分现象。

MPU-6050

我一直强调，做电子设计要看规格书，要以官网规格书为准。

通常，可以通过认真阅读规格书，了解一款芯片的功能和性能。

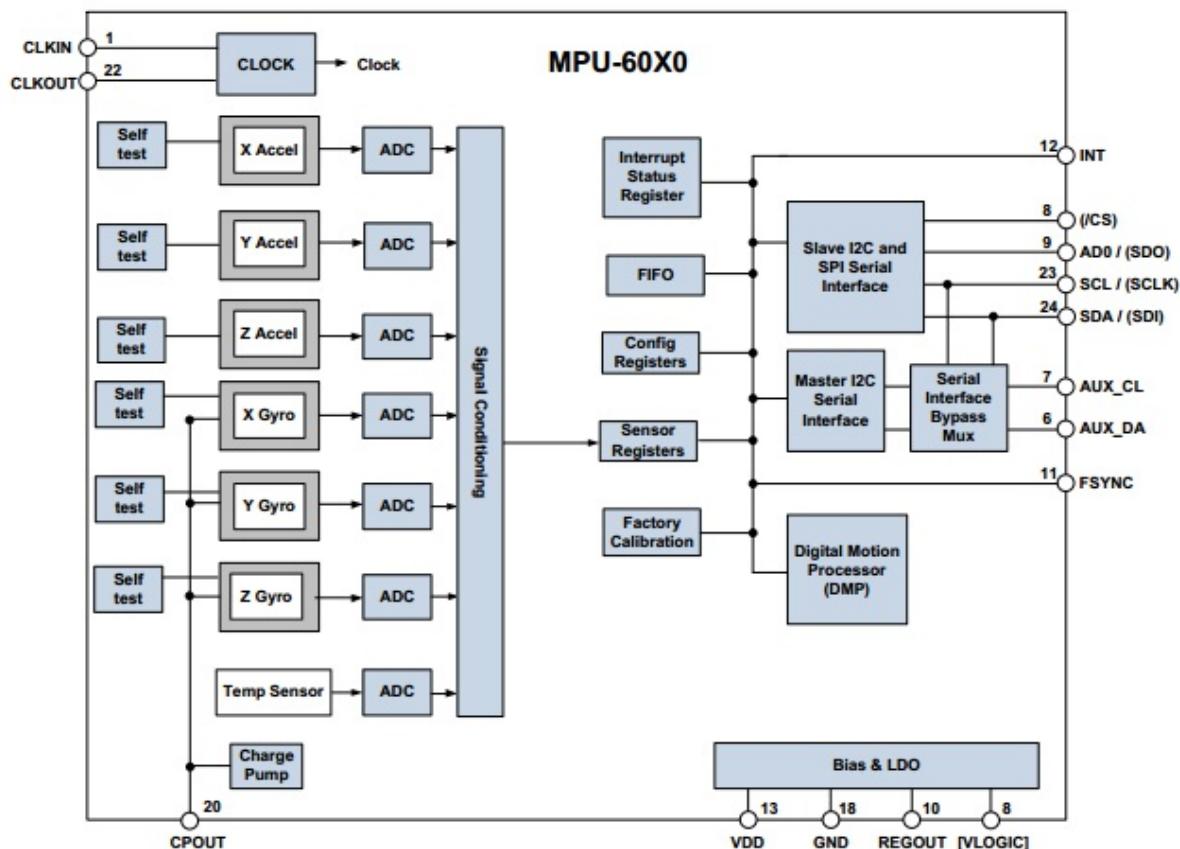
从InvenSense《MPU-6000-Register-Map》中可以摘取以下信息：

The MPU devices provide the world's first integrated 6-axis motion processor solution that eliminates the package-level gyroscope and accelerometer cross-axis misalignment associated with discrete solutions. The devices combine a 3-axis gyroscope and a 3-axis accelerometer on the same silicon die together with an onboard Digital Motion Processor™ (DMP™) capable of processing complex 9-axis sensor fusion algorithms using the field-proven and proprietary MotionFusion™ engine.

翻译成中文，大意就是：

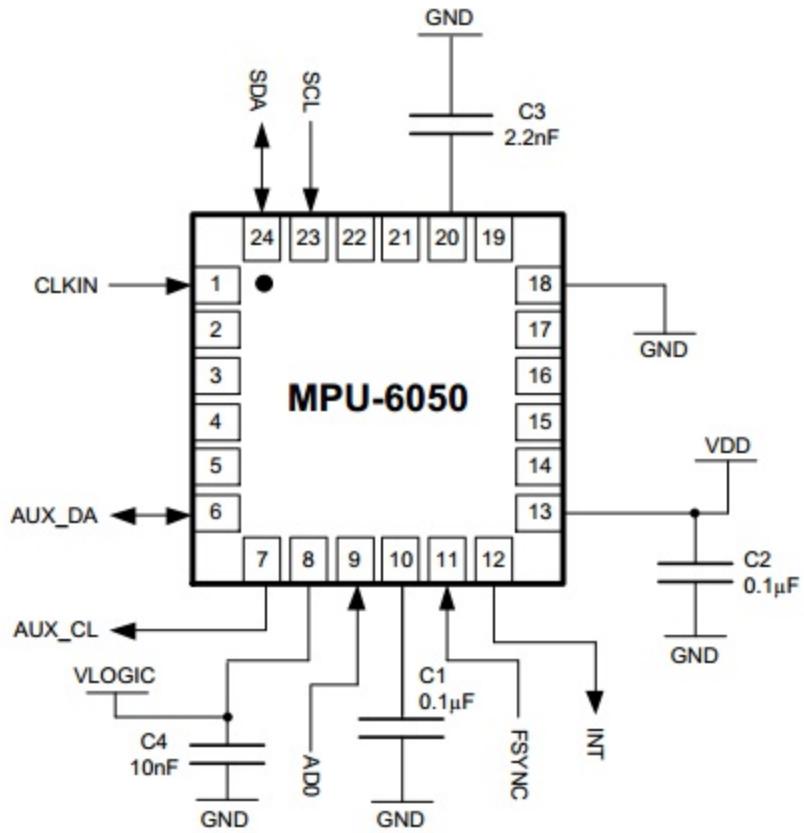
MPU芯片是全球第一个整合了六轴运动处理器的解决方案，相对于传统分立封装的多芯片方案，MPU芯片消除了组合陀螺仪与加速器交叉轴未对准的问题。MPU芯片内部集成了三轴陀螺仪和三轴加速度传感器，以及板载数字运动处理器™（DMP™），可以直接使用DMP™中经过验证的融合算法引擎（最多九轴）。

文字描述有时候远不如一张图、一张表格直观。通过内部框图，更能一目了然地了解MPU-6050的内部组成。



Note: Pin names in round brackets () apply only to MPU-6000
Pin names in square brackets [] apply only to MPU-6050

在MPU-6050的经典工作电路（Typical Operating Circuit）中，MPU-6050芯片的外围电路只需要几颗阻容器件，就能正常工作了，非常简洁。



参考、借鉴经典工作电路，设计出MPU-6050模块的电路。

将上述电路单独制作成小的电路板，可以比较方便放置在小车的最稳定的地方。实际的电路板下图所示。

Copyright © 喵呜实验室MiaowLabs 2014-2018 all right reserved, powered by Gitbook该文件修订时间： 2018-10-26 21:38:50

电机驱动电路

在设计电机驱动电路前，要考虑一些问题：

功能方面

- 电机是单向转动还是双向转动?
 - 对于单向的电机驱动，通常用一个大功率三极管或场效应管直接带动电机。当电机需要双向转动时，可以使用由四个功率元件组成的H桥电路。
- 需不需要调速?
 - 如果需要调速，可以使用三极管，场效应管等开关元件实现脉冲宽度调制（PWM）调速。

性能方面

- 输出电流和电压范围。
 - 这两个参数决定着驱动电路能驱动多大功率的电机。
- 效率。
 - 高的效率不仅意味着节省电源，也会减少驱动电路的发热。
- 对电源的影响。
 - 大的电流可能导致地线电位浮动。
- 可靠性。
 - 电机驱动电路应该尽可能做到，无论加上何种控制信号，何种无源负载，电路都是安全的。

在《电机及电机选型》一节中，我着重讲解了如何估算关键参数，进行电机选型的过程。迫于市面没有合适的电机的无奈，我只有对现有电机进行改良设计。最终，我设计出一款适合带动小负载的带编码器直流减速电机——TTM1，并应用在小霸王Lite两轮自平衡小车项目中。

在《电机及电机选型》一节中，确定了项目使用的电机型号为TTM1。我们可以根据电机型号和参数来设计合适的电机驱动电路。

TTM1直流减速电机的主要参数如下：

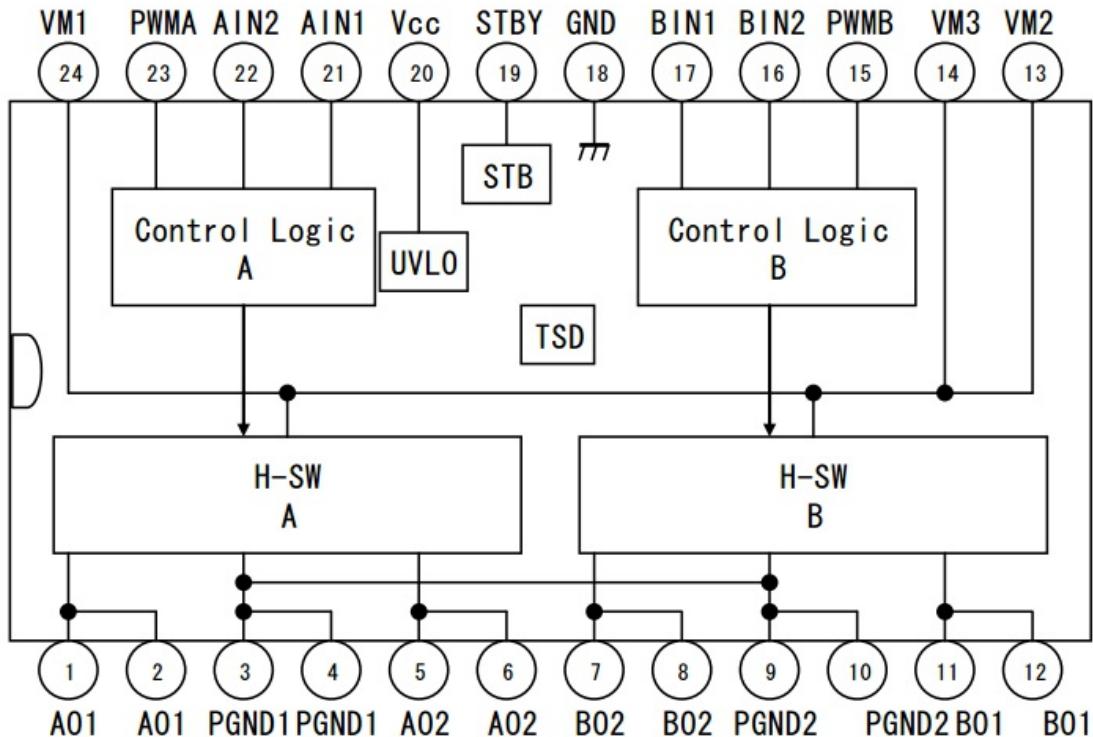
- 额定电压6v
- 最大电流2a
- 最大转速196rpm（在6v电压时）
- 额定扭矩0.5kgf.cm
- 带有单相线数为1920线的AB相编码器
- 带有电磁干扰（EMI）滤波器

另外，因为两轮自平衡小车是一种“两轮共轴、独立驱动”的机器人，需要使用两个独立工作的电机，在运行过程中通过电机的正反转来维持车体的平衡和控速。所以，在小霸王Lite项目中，需要使用两组H桥电机驱动电路。

考虑到使用分离元件搭建电机驱动电路，过程比较复杂，难度比较大。而电机驱动芯片是将电机驱动电路封装起来的芯片，使用简单，安全可靠，利用它可以与主处理器、电机和增量型编码器构成一个完整的运动控制系统。在综合对比市面上常见的电机驱动芯片后，小霸王Lite项目最终确定使用东芝半导体的电机驱动芯片——TB6612FNG。

TB6612FNG是一款双直流电机驱动芯片（Driver IC for Dual DC motor）。关键特性：

- 驱动电压: $\leq 15V$
- 输出电流: 1.2A (连续) / 3.2A (峰值)
- 工作模式: 支持正转/反转/刹车/停止四种模式
- 封装尺寸: SSOP24, 0.65mm引脚间距



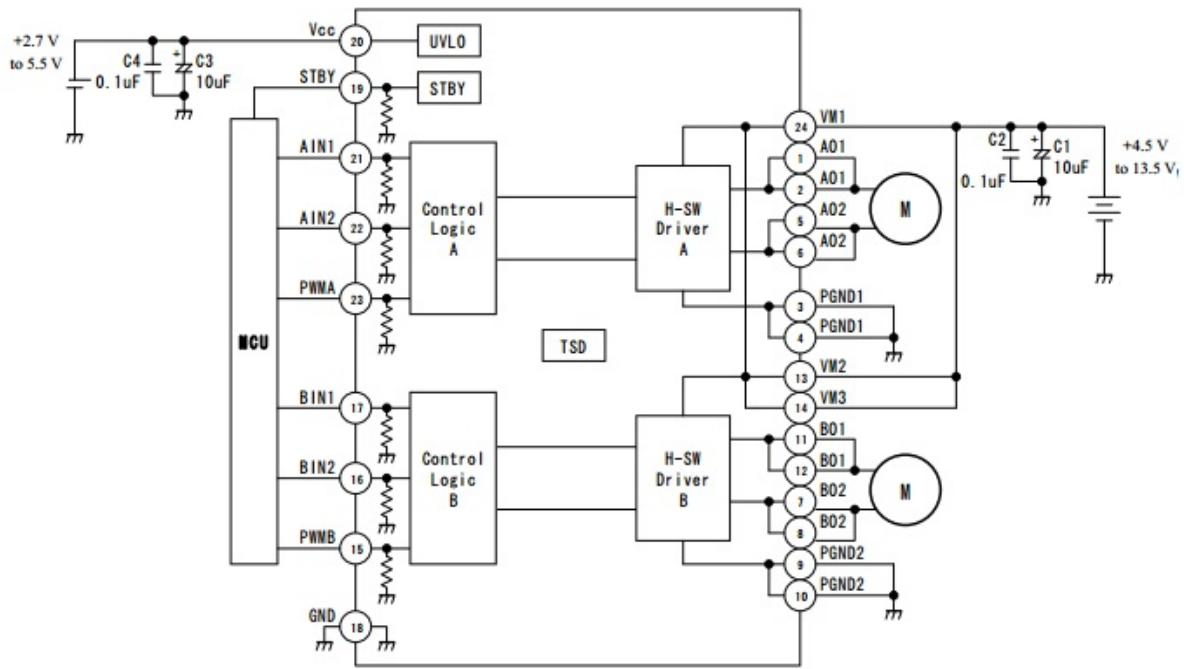
TB6612FNG 内部框图

从内部框图中看到芯片内部集成了两个H桥电路，每个H桥都有一个独立的控制逻辑单元，每个控制逻辑单元由一个PWM信号和两个输入信号（IN1和IN2）控制。

Input				Output			Mode
IN1	IN2	PWM	STBY	OUT1	OUT2		
H	H	H/L	H	L	L		Short brake
L	H	H	H	L	H	CCW	
		L	H	L	L	Short brake	
H	L	H	H	H	L	CW	
		L	H	L	L	Short brake	
L	L	H	H	OFF (High impedance)		Stop	
H/L	H/L	H/L	L	OFF (High impedance)		Standby	

控制逻辑真值表

从规格书中可以找到典型应用电路图。



典型应用电路图

参考典型应用电路图，设计出电机驱动模块电路图。

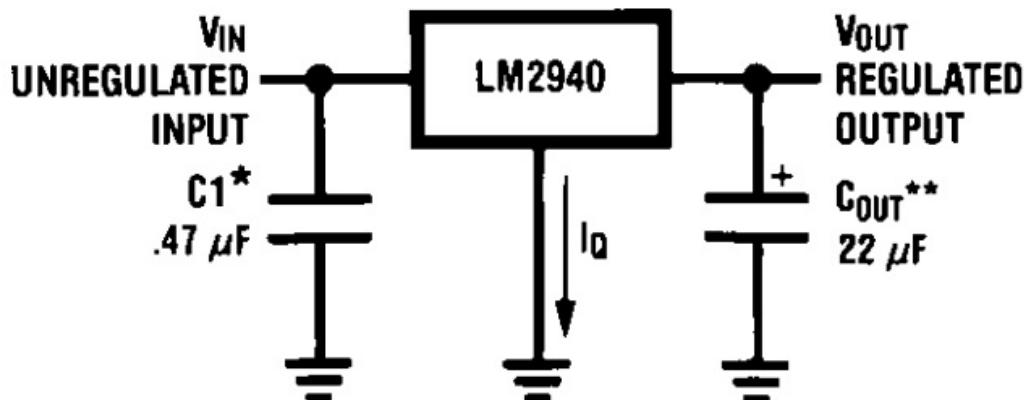
Copyright © 喵呜实验室MiaowLabs 2014-2018 all right reserved, powered by Gitbook 该文件修订时间： 2018-10-04 17:36:32

电源稳压电路

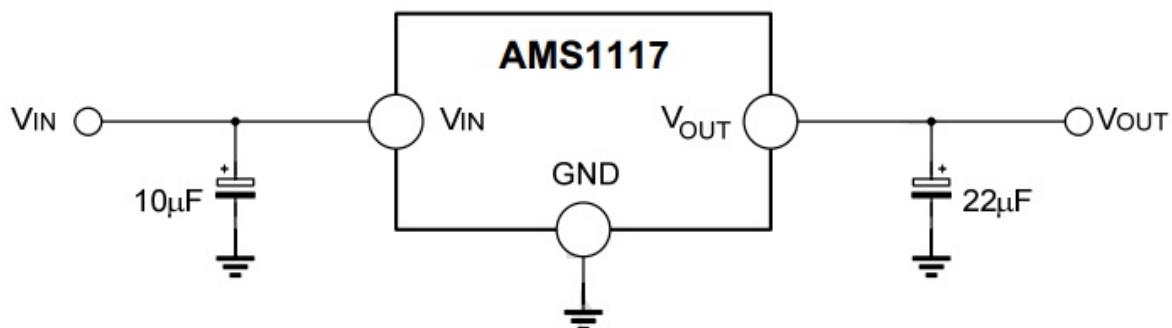
在“小霸王Lite”项目中，动力来源为两节18650动力锂电池，两节电池串联得到的7.4v（额定7.4v，充满8.2v）。但是，电路中常用的电压为5v、3.3v，所以需要对7.4v进一步处理，分别降压至5v、3.3v，以供整个电路系统使用。

综合考虑效率、发热、价格等方面因素，方案最终选用LM2940-5.0、LM1117-3.3两款低压差线性稳压器（LDO芯片），最大输出电流分别为1000mA、800mA，LDO芯片工作效率高、输出电压纹波小，完全满足小霸王Lite项目的电路电压要求。

分别从LM2940-5.0和LM1117-3.3的规格书中找到典型应用电路图。



LM2940-5.0典型应用电路图



LM1117-3.3典型应用电路图

参考典型应用电路图，设计出电源稳压模块电路图。

电池电量检测

为了在两轮自平衡小车运行过程中，能实时监测电池电量情况，需要设计一个简单的电阻分压检测电路。

使用单片机对分压电阻的电压值进行采集、计算，可以得到实时电量状况。

由于电阻分压电路非常简单，将其整合到电源稳压模块上。

Copyright © 喵呜实验室MiaowLabs 2014-2018 all right reserved, powered by Gitbook该文件修订时间： 2018-10-04 17:52:08

底板电路设计

两轮自平衡小车控制电路中包含有数字电路与模拟电路，小信号电路与大功率电路。设计电路板时，可以将全部电路分解成若干块电路分别制作。在小霸王Lite项目中，按功能将电路分解成独立模块：

- 单片机模块
- 传感器模块
- 驱动器模块
- 稳压模块
- 蓝牙模块

底板电路的主要作用是将各模块进行电气连接。在进行底板电路设计时，从电路原理图到设计电路板，不仅需要注意电路板引线的逻辑功能，还需要考虑到电路板的布线，防止电路各部分之间相互干扰，从而保证电路的稳定可靠。

Copyright © 喵呜实验室MiaowLabs 2014-2018 all right reserved, powered by Gitbook该文件修订时间： 2018-10-05 00:36:08

机械设计篇

良好的机械设计与制作，对于两轮自平衡小车的稳定运行、安全调试都非常重要。

由于两轮自平衡小车是直立运行，在制作电路板的时候尽可能减少电路板的尺寸，一方面便于摆放固定，另一方面可以减少小车的惯量。

两轮自平衡小车，是一种结构上模拟人的直立姿态，在原理上模拟人的运动平衡机能的机器人，因此，其机体结构必定要能反映出直立平衡姿态及其控制的特征。

Copyright © 喵呜实验室MiaowLabs 2014-2018 all right reserved, powered by Gitbook该文件修订时间： 2018-10-05 01:02:09

机体结构

小霸王Lite两轮自平衡小车的机体结构包括机体、底盘、轮系三大部分。

- 机体
 - 置于底盘之上，可装载各种电路模块，如单片机模块、传感器模块，驱动器模块等。
- 底盘
 - 主要用于安装或连接机体与轮系，携带和固定驱动系统，包括电机和电机固定部件等。
- 轮系
 - 由左轮、右轮、传动机构组成。左轮和右轮通过电机轴或传动机构安装在底盘的左右两侧，分别由左电机和右电机驱动。两轮自平衡小车的重心位于轮系轴线之上，因而形成了内在固有的不稳定动力学特性。

小霸王Lite两轮自平衡小车由两个直流减速电机驱动，即系统有两个控制量。宏观地看，在水平的二维空间运动时，“小霸王Lite”的机身共有3个自由度，即车体的俯仰自由度、前行运动自由度和航向自由度。“小霸王Lite”两轮自平衡小车的控制量少于自由度，为欠驱动系统。

“小霸王Lite”两轮自平衡小车的机体结构采用层叠式结构，便于承载内部的各种电子设备。各个部分均保持重心对称，这样能使得两轮自平衡小车的质心尽量处于竖直的几何中心线上，有利于两轮自平衡小车的平衡控制。同样，电子设备的排布要尽量保证两轮自平衡小车的重心处于竖直的几何中心上。

“小霸王Lite”两轮自平衡小车的两个直流减速电机通过支架固定在底板上，同轴并行安装。

Copyright © 喵呜实验室MiaowLabs 2014-2018 all right reserved, powered by Gitbook该文件修订时间： 2018-10-05 16:20:21

数据融合算法与互补滤波

由于自身特性，惯性测量元件往往存在噪声和误差。惯性测量元件获得的原始数据常常不能直接使用，需要进行变换和处理，如加速度传感器的测量数据需要变换才能获得关于倾角的信息，陀螺仪的测量数据因为温漂和零漂而存在噪声或误差，需要进行滤波和去噪处理。因此，在运动系统的姿态检测问题中，除惯性测量单元外，数据融合算法也扮演着重要角色。

运动系统的姿态测量机构可以由单个传感器构成，也可以由多个传感器组成。例如，单个陀螺仪，既可以检测姿态角速度，又可以通过对数据的一阶微分获得角加速度，还可以通过对数据的积分获得姿态角或倾角值。然而，由于惯性测量元件本身的局限性，单传感器的姿态检测机构往往存在较大的测量误差。对于单个陀螺仪，微分运算倾向于放大噪声，通过微分获得的角加速度因而存在较大的误差；积分运算倾向于形成漂移，产生噪声叠加和误差积累。因此，为了获得高精度的姿态检测结果，运动系统的姿态测量机构可由多传感器组合而成。将陀螺仪、加速度传感器、倾角仪等惯性测量元件进行组合，能显著提高运动系统的姿态检测精度。将低成本的惯性测量元件组合起来，也能获得高精度的测量结果。

值得注意的是，多传感器组合的姿态检测方案，需要各种有效的数据融合算法。通过数据融合，对多传感器冗余的测量数据进行变换或处理，才能得到运动系统准确的姿态信息。

在数据融合算法中，滤波算法占据着重要地位，如均值滤波、Wiener滤波、Kalman滤波、互补滤波等。其中，互补滤波因其运算简单、效果显著，被广泛使用在两轮自平衡小车与微型四轴飞行器上。

Copyright © 喵呜实验室MiaowLabs 2014-2018 all right reserved, powered by Gitbook该文件修订时间： 2018-10-05 16:25:25

互补滤波器

2007年，Shane Colton发表了一篇经典白皮书《The Balance Filter》，里面提出了一种对加速度传感器与陀螺仪进行数据融合的有效方法——互补滤波器。互补滤波器包括低通滤波器（滤除或衰减短期加速度传感器波动），以及高通滤波器（消除漂移对陀螺仪的影响）。

在开始讲解前，我们有必要先了解两个概念：

- 低通滤波器（英语：Low-pass filter）容许低频信号通过，但减弱（或减少）频率高于截止频率的信号的通过。对于不同滤波器而言，每个频率的信号的减弱程度不同。
- 高通滤波器（英语：High-pass filter）则相反。

这两个概念接下来将会反复提起，所以务必先牢记。

加速度传感器可以测量由地球引力作用或者物体运动所产生的加速度。理论上，通过加速度传感器就可以获得小车的倾角，再对此信号进行微分便可以获得倾角速度。但在实际小车运行过程中，由于小车本身的摆动所产生的加速度会产生很大的干扰信号，它叠加在上述测量信号上使得输出信号无法准确反映小车的倾角。下图是实际测量安装在小车上MPU-6050的Y轴信号。小车倾角在两个角度位置过渡，看到除了角度变化信号之外，还存在由于运动引起的加速度噪声等，这个噪声波动随着小车运动速度增加会变得很大。因此，对于加速度传感器，需要低通滤波器进行校正。

陀螺仪可以用来测量物体的旋转角速度。理论上，在小车上安装陀螺仪，可以测量小车倾斜角速度，对角速度信号进行积分便可以得到小车的倾角。实际上，由于从陀螺仪角速度获得角度信息，需要经过积分运算。如果角速度信号存在微小的偏差和漂移（实际上存在偏差和漂移），经过积分运算之后，变化形成积累误差。这个误差会随着时间延长逐步增加，最终导致信号失真，无法形成正确的角度信号。因此陀螺仪数据需要高通滤波器校正。

在惯性测量单元（IMU）中，加速度传感器与陀螺仪两者常常组合在一起使用，通过合适的滤波算法，对二者“取长补短”，以期获得精确数据。相对卡尔曼滤波器的复杂运算，互补滤波器由低通和高通滤波器组成，在代码上更容易实现。

互补滤波器用公式表述出来是这样的：

$$\begin{aligned} \text{陀螺仪积分角度} &+= \text{陀螺仪角速度} * dt; \\ \text{融合角度} &= \text{加权系数} * \text{陀螺仪积分角度} + (1 - \text{加权系数}) * \text{加速度角度}; \end{aligned}$$

在互补滤波公式中，像陀螺仪角速度、加速度角度这些数据可以直接从陀螺仪、加速度传感器中读取得到。可是，加权系数是怎么得来的呢？

在《The Balance Filter》中提到关于加权系数的求解公式。在这里，先设滤波器的加权系数为 a ，时间常数为 τ ，运行周期为 dt ，那么公式为：

$$a = \tau / (\tau + dt)$$

运行周期 dt 通常都是能提前计算出来的。比如在小霸王Lite的程序里，互补滤波器在 $1\text{s} (=1000\text{ms})$ 中运行200次，那么 $dt = 1000\text{ms} / 200\text{hz} = 5\text{ms}$ 。

时间常数 τ 的取值是由我们根据系统的实际滤波需求调整的。时间常数 τ 是“信任”陀螺仪和“信任”加速度传感器之间的边界值。若时间常数 τ 取值越大，则更加“信任”陀螺仪积分，但跟随加速度传感器的速度会变慢。若时间常数 τ 取值越小，则更加“信任”加速度传感器，但同时引入加速度传感器中更多的噪声。通常，互补滤波器是为了得到更“纯”的融合角度，必须要“信任”陀螺仪积分多些，以削弱加速度传感器中噪声的影响。

为了方便理解，这里举个例子进行说明：

若互补滤波器放在 $10\text{ms} (=0.01\text{s})$ 周期中循环运行，时间常数 $\tau=0.49$ ，那么此时加权系数为：

$$a = \tau / (\tau + dt) = 0.49 / (0.49 + 0.01) = 0.98$$

使用C语言将互补滤波器封装起来是这样：

```
// a=tau / (tau + dt)
// acc = 加速度传感器数据
// gyro = 陀螺仪数据
// dt = 运行周期
float tau=0.49;
float a=0.0;
float ComplementaryFilter(float acc, float gyro,int dt) {
a=tau/(tau+dt);
angle= a* (angle + gyro * dt) + (1-a) * (acc);
return angle;
}
```

函数的入口参数是加速度传感器数据、陀螺仪数据和运行周期。经过计算后，函数返回融合角度。

为了更进一步了解加权系数的作用，这里留意两个极端情况：

- 若 $a=1$ 时，那么滤波器变成 $\text{angle}=\text{angle}+\text{gyro}\times\text{dt}$ ，失去了加速度传感器的修正效果，变成了一个纯粹的陀螺仪积分器，此时互补滤波器“完全信任”陀螺仪。
- 若 $a=0$ 时，那么互补滤波器变成 $\text{angle}=\text{acc}$ ，此时陀螺仪完全失去了作用，融合角度直接等于加速度传感器数值，此时互补滤波器“完全信任”加速度传感器。

由此可见，加权系数 a 值的大小决定了互补滤波器是“信任”陀螺仪还是加速度传感器，直接决定了互补滤波器的效果。

当然，互补滤波器也存在缺陷，其中有两点需要特别注意：

- 初始化时不能及时跟随实际角度。这种情况，跟融合角度变量没有正确初始化和互补滤波器的时间常数取值有关。时间常数约大，陀螺仪积分比重越大，跟随加速度传感器的速度约慢，这意味着初始化时融合角度可能是不精准的。
- 陀螺仪的零漂问题。理论上，陀螺仪在静止的时候，读出来的数值应该为0，但实际上往往不为0，那么这个值被称为零漂值。陀螺仪每次上电的零漂值是随机的。互补滤波器并不能有效地过滤掉陀螺仪的零漂。

两轮自平衡小车的PID控制

PID控制是经典的自动控制理论和普适性的自动控制方法。

PID控制器可以追溯到1890年代的调速器设计。PID控制器是在船舶自动操作系统中渐渐发展。1911年Elmer Sperry开发的控制器是最早期PID型控制器的其中之一，而第一个发表PID控制器理论分析论文的是俄裔美国工程师尼古拉斯·米诺斯基（Minorsky 1922）。之后，PID控制成为自动控制理论中最为经典的自动控制方法，被广泛应用于各种自动控制系统。

PID控制，即“比例-积分-微分”控制策略，具体描述如下。

P (proportion)：比例控制，控制量 $u(t)$ 与误差 $e(t)$ 成正比。即 $u_p(t)=k_p \cdot e(t)$ ，其中 k_p 为比例系数，其作用在于以最直接的方式消除误差，误差 $e(t)$ 越大，则用于消除误差的比例控制量 $u_p(t)$ 也就越大。

I (integral)：积分控制，控制量 $u(t)$ 与误差 $e(t)$ 的积分成正比，即 $u_i(t)=k_i \int e(t) dt$ ，其中， k_i 为积分系数，其作用在于消除静态误差，一旦系统出现静态误差，即使微小的静差，都将导致积分项 $\int e(t) dt$ 随时间增长，进而导致积分控制量 $u_i(t)$ 的出现并随时间增大。

D (differential)：微分控制，控制量 $u(t)$ 与误差 $e(t)$ 的微分成正比，即 $u_d(t)=(k_d \frac{de(t)}{dt})$ ，其中 k_d 为微分系数，其作用在于通过误差变化率 $(de(t))/dt$ 预测误差的变化。当误差 $e(t)$ 倾向于增大时，微分控制量 $u_d(t)$ 倾向于增大时，微分控制量 $u_d(t)>0$ ，即倾向于增大控制量以消除可能增大的误差；反之，当误差 $e(t)$ 倾向于减小时，微分控制量 $u_d(t)<0$ ，即倾向于减小控制量以应对误差随惯性减小的可能。PID控制的思想源于人的操纵行为，可谓古老的仿人的智能控制。PID控制算法可表述为：

$$u(t)=K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int e(t) dt + K_d \cdot (de(t)/dt)$$

简单有效的PID控制算法自然地被应用到了两轮自平衡小车的运动平衡控制中。1997年，日本的Hiraoka和Noritsugu研究出一种由步进电机驱动的两轮自平衡小车，采用PID算法控制小车的速度和位置。实际上，几乎所有的两轮自平衡小车（机器人）都在其运动平衡控制研究的最初阶段选用PID控制策略，之后再进一步研究其他的控制策略，包括各种变形的PID控制策略。

Copyright © 喵呜实验室MiaowLabs 2014-2018 all right reserved, powered by Gitbook该文件修订时间： 2018-10-05 16:52:48

直立平衡控制

直立平衡控制问题，是两轮自平衡小车系统的首要问题。直立平衡控制的目标是使小车保持直立平衡状态，即使小车的俯仰角 θ 维持在期望值 θ_D 附近。通常情况下，两轮自平衡小车机体质心位于两个轮子之上，期望俯仰角 $\theta_D=0$ ，于是，采用PD控制算法：

$$u_{angle}(t) = PD(\theta) = k_p * \theta(t) + k_d * (d\theta(t))/dt$$

式中， k_p 为直立控制环节的比例系数， k_d 为直立控制环节的微分系数。将上面式子用更通俗易懂的公式表达出来：

$$\text{电机输出} = k_p * \text{角度} + k_d * \text{角速度}$$

《The balance filter》中提到，在两轮自平衡小车中，PD控制的效果就跟添加可调节弹簧和阻尼器一样。如下图所示。

需要说明的是，在两轮自平衡小车的直立平衡控制环节中，选择PD控制而非PID控制的原因在于：

1. 两轮自平衡小车的姿态检测信号中不可避免地存在噪声信号，这些噪声信号经过积分I环节会随着时间不断地累积，从而导致积分器失去消除静差的调节功能并产生控制误差；
2. 两轮自平衡小车的轮胎与地面的摩擦会产生阻尼作用，这种阻尼可以克服小车姿态倾角静差的持续增加。

Copyright © 喵鸣实验室MiaowLabs 2014-2018 all right reserved, powered by Gitbook该文件修订时间： 2018-10-29 22:11:32

运动速度控制

两轮自平衡小车的运动速度控制采用PID控制：

$$u_{speed}(t) = PID(e_v) = k_p e_v + k_i \int e_v dt + k_d (de_v)/dt$$

其中， $e_v = v_\phi - v_D$ 是实际行进速度 v_ϕ 与期望行进速度 v_D 的差。

值得注意的是，行进速度的控制器PID(e_v)是一个正反馈回路。

上式中，各项的特征与作用在于：

1、比例项 $k_p > 0$ ，正反馈项，调节两轮自平衡小车的行进速度。

2、积分项 $k_i \geq 0$ ，正反馈项，累积位移差形成的位移势能，这种位移势能不仅能消除速度静差，还可以保障小车在复杂路面（包含坡度）行进时行进速度的平稳，另外，使小车具备突破障碍的能力。

3、微分项 $k_d \leq 0$ ，负反馈项，消除系统的自激和振荡。

在两轮自平衡小车速度环控制器中，起主导作用的是比例项，其次是积分项，因此速度环是一个正反馈回路。在实际应用中，大部分两轮自平衡小车不使用微分项，只使用比例项和积分项，即PI(e_v)。

设计制作两轮自平衡小车，其中的一个难点就在速度环中：是否理解两轮自平衡小车在内含正反馈回路的情形下如何保持稳定并实现运动平衡。

Copyright © 喵鸣实验室MiaowLabs 2014-2018 all right reserved, powered by Gitbook该文件修订时间： 2018-10-30 13:25:01

差动系统与航向的控制

两轮自平衡小车的前进方向依靠左轮和右轮的差动实现。

在实际的运动过程中，由于系统本身、路面等多种因素的影响，两轮自平衡小车会偏离期望的航向和轨迹。为此，同样引入PID控制。

Copyright © 喵鸣实验室MiaowLabs 2014-2018 all right reserved, powered by Gitbook该文件修订时间： 2018-10-30 21:30:38

运动平衡的矛盾与统一

在两轮自平衡小车的“运动”与“平衡”之间存在矛盾：速度控制与方向控制、各种机动或轨迹控制可能干扰两轮自平衡小车的直立平衡控制，而对直立平衡控制的追求又将妨碍两轮自平衡小车的运动。这种矛盾导致两轮自平衡小车控制系统出现奇异的控制结构：其中既有负反馈又有正反馈，负反馈与正反馈交融在一起，系统整体上稳定的负反馈结构建立在局部正反馈的基础之上。

Copyright © 喵呜实验室MiaowLabs 2014-2018 all right reserved, powered by Gitbook该文件修订时间： 2018-10-30 21:31:17

平衡控制的负反馈特征及其稳定性

两轮自平衡小车直立平衡控制最简单的策略是线性PD控制。

当直立平衡控制量 $u_{angle}(t)>0$ 时，两轮自平衡小车的姿态角 θ 和姿态角速度 ω_θ 倾向于负增长；反之，当直立平衡控制量 $u_{angle}(t)<0$ 时，两轮直立姿态角 θ 和姿态角速度 ω_θ 反向的关系，形成了两轮自平衡小车姿态平衡控制的负反馈回路结构。

Copyright © 喵鸣实验室MiaowLabs 2014-2018 all right reserved, powered by Gitbook该文件修订时间： 2018-10-30 22:37:29

正反馈与负反馈的统一

假设PID正反馈控制下，被控制对象不是两轮自平衡小车，而是一个四轮小车，那么会有什么样的情形发生呢？

对于一个无姿态平衡控制的四轮小车，如果其PID速度控制策略为正反馈，其正反馈的特性必将导致灾难性的后果：若控制量 u 使速度 v 增长，则控制量 u 必将随速度 v 的增长而增长，速度 v 又将因控制量 u 的增长而继续增长；反之，若控制量 u 使速度 v 负增长，则控制量 u 必将随速度 v 的负增长而负增长，速度 v 又将因控制量 u 的负增长而继续负增长。

如果没有抑制措施，四轮小车的推进力、速度和位移，都将无限制地增长至无穷大。

两轮自平衡小车是欠驱动系统，其平衡控制需要电机不断地变换电枢的转向和转速，这势必与运动控制所期望的速度和方向发生矛盾，正是这种矛盾导致了两轮自平衡小车特殊的控制结构。

两轮自平衡小车系统将“平衡”与“运动”这对矛盾体统一在其运动平衡控制结构中。这种统一体现在直立平衡控制 $u_{angle}(t)$ 与行进速度控制 $u_{speed}(t)$ 的叠加与融合：

$$u_{motor}(t) = u_{angle}(t) + u_{speed}(t) = PD_{angle}(\theta) + PI_{speed}(e_v)$$

其中， $u_{motor}(t)$ 是直立平衡控制量 $u_{angle}(t)$ 与速度控制量 $u_{speed}(t)$ 叠加后的电机输出量，需要通过差动系统分配给左电机和右电机。

综上所述，如果电机输出量 u_{motor} 中未融入PD直立控制器 $PD_{angle}(\theta)$ 生成的平衡控制量 u_{angle} ，PI速度控制器 $PI_{speed}(e_v)$ 的正反馈特性必将导致系统的不稳定。然而，当两者共同作用于两轮自平衡小车时，情形却完全不同，行进速度控制信号 u_{speed} 不仅不会导致系统雪崩式地加速，反而会移植系统的运动速度，并且行进速度控制量 u_{speed} 越大，这种抑制作用就越大。

在两轮自平衡小车系统的运动平衡控制问题中，“平衡”与“运动”是一对矛盾的两个方面，既矛盾又统一，其中平衡是矛盾的主要方面。因此在运动平衡控制系统中，直立平衡控制器 PD_{angle} 占据着主导作用，而速度环占据着次要地位。

自由平衡实验显示（设置期望速度 $v=0$, $K_{ispeed}=0$ ）：两轮自平衡小车在静止平衡的状态下受到外力作用后以一定的速度 v 运动，根据正反馈控制算法 PI_{speed} ，两轮自平衡小车将产生与外力同向的控制量 u_{speed} ，运动加速。然而，实际的情形是，两轮自平衡小车表现出对外力的抵制和对速度 v 的抑制，并且当外力撤销后，两轮自平衡小车又自动回复到静止平衡的状态。

定点平衡实验显示：两轮自平衡小车在静止平衡的状态下受到外力作用后以一定速度 v 运动，并且发送了位移 x ，根据正反馈控制算法 PI_{speed} ，两轮自平衡小车将产生与外力同向的控制量 u_{speed} ，运动加速。然而，实际的情形是，两轮自平衡小车表现出对外力的抵制和对速度 v 的抑制。用手推两轮自平衡小车，小车会以顶牛的方式通过姿态倾斜形成反推力，力图回归位移零点；外力撤销后，两轮自平衡小车不仅恢复了静止平衡状态，并且回到了扰动前所在的位移零点位置。

两轮自平衡小车的行进速度控制是通过其姿态平衡控制实现的。正反馈的行进速度控制器 PI_{speed} ，实施的是“欲擒故纵”策略：为了控制速度，先放纵速度，导致小车姿态失衡，从而引发起主导作用的直立控制 $PD_{angle}(\theta)$ ，使原来可能矛盾的速度 v 控制与姿态 θ 控制转变为一致的控制问题，即两轮自平衡小车统一（叠加）后的控制量 $u_{angle}(t)+u_{speed}(t)$ 能在控制姿态平衡的同时控制行进速度稳定地跟踪期望速度。