

实现两自由度控制的球平衡机器人

陆梅东 / 上海市徐汇区青少年活动中心

◎ 设计背景与思路

机器人是控制论、机械、电子、计算机、材料、仿生学等诸多学科高度整合后的产物。目前，机器人作为中学生科技实践项目已经在校内外科技创新教育中得到广泛推广。随着科技创新教育内涵的不断深入，科技教育工作者应当不断创新教育载体，不仅让中学生掌握机器人技术的一般原理，更要让中学生在实践过程中掌握科学研究方法和培养科学精神。

控制系统是机器人的大脑，而PID控制是很多高级控制的基础。从中学生能在实践活动中接触到的基础控制知识入手，让他们初识PID控制理论，延伸控制系统基本知识框架，自主了解经典控制理论在实际的运用原理，可以在机器人项目实践过程中培养中学生的科学怀疑精神、认证精神和公正精神。

在设计此教具之前，我已经利用PID算法制作了一个一自由度的两轮自平衡机器人（图1）。只要结构做得比较得恰当，从理论上两自由度控制应该也能实现。经过再三考虑，我决定尝试制作一个能控制两个自由度的球平衡机器人。简单分析，如果机器人能够同时控制

两个自由度的平衡，那么这个机器人就能实现独轮平衡。

◎ 结构设计

球平衡机器人主要是由1个NXT控制器，2个陀螺仪传感器，2个伺服电机，1块7.4V的锂电池以及若干导线和3层圆板组成。对于整个作品首先要设计出一个合理的机器人结构，我设计的结构有3层（图2），底下2层用于固定传感器和电机以及摆放电池，上面1层嵌入NXT控制器以及1个简单的控制面板和显示器。这样的好处在于：整体结构为全开放式的，便于学习、维修和硬件调整；由于电池安装在最下层的板上，电机又在最下2层，这样重心降低，有利于平衡控制。整体结构牢固，对实现作品平衡功能的稳定性有很大帮助。

为了让学生能够更容易理解作品原理，我采用了两自由度独立采集信号和独立输出控制，也就是说用一个陀螺仪传感器采集一个自由度的信号，经过NXT处理后对应的一个电机进行输出控制。2个陀螺仪传感器分别采集两个自由度的信号，2个电机分别做出各自的修正动作，2个面成直角关系，这样对应的陀螺仪传感器和电机之间也成直角关系。机器人骑在球上，通

过电机上的轮胎对球面摩擦带动球的转动，达到修正纠偏的目的，从而维持机器人在球上保持平衡的效果。

◎ 理论依据

在工程实际中，应用最为广泛的调节器控制方法为比例、积分、微分控制，简称PID控制，又称PID调节。当被控对象的结构和参数不能完全掌握，或得不到精确的数学模型时，应用PID控制技术最为方便。即当我们不完全了解一个系统和被控对象，或不能通过有效的测量手段获得系统参数时，最适合采用PID控制技术。

➤ 比例（P）控制

比例控制是一种最简单的控制方式。其控制器的输出与输入误差信号成比例关系。当仅有比例控制时系统输出存在稳态误差（steady-state error）。

➤ 积分（I）控制

在积分控制中，控制器的输出与输入误差信号的对时间的积分成正比关系。为了消除稳态误差，在控制器中必须引入“积分项”。积分项的误差取决于对时间的积分，随着时间的增加，积分项会增大。这样，即便误差很小，积分项也会随着时间的增加而加大，它推动控

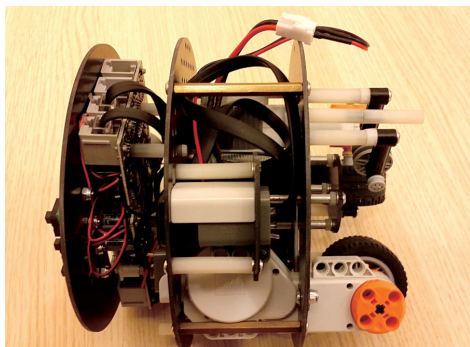


图1 一自由度两轮自平衡机器人



图2 球平衡机器人结构

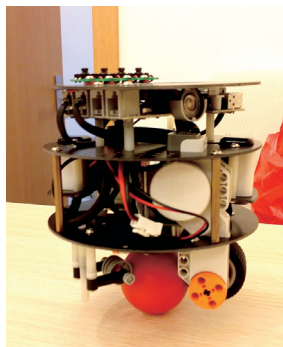


图3 球平衡机器人成品

制器的输出增大使稳态误差进一步减小，直到等于零。因此，比例 + 积分 (PI) 控制器，可以使系统在进入稳态后无稳态误差。

② 微分 (D) 控制

在微分控制中，控制器的输出与输入误差信号的微分（即误差的变化率）成正比关系。自动控制系统在克服误差的调节过程中可能会出现振荡甚至失稳。其原因是某些组件（环节）或存在有较大惯性，或有滞后 (delay)，具有抑制误差的作用，所以其变化总是落后于误差的变化。解决的办法是使抑制误差作用的变化“超前”，即在误差接近零时，抑制误差的作用就应该是零。具有比例 + 微分的控制器，能够提前使抑制误差的控制作用等于零，甚至为负值，从而避免了被控量的严重超调。所以对有较大惯性或滞后的被控对象，比例 + 微分 (PD) 控制器能改善系统在调节过程中的动态特性。

③ 实际参数调整

在实际调试中最需要调整的就是 PID 的 3 个系数 (K_p 、 K_i 和 K_d)。PID 控制器参数的工程整定方法，主要有临界比例法、反应曲线法和衰减法。3 种方法各有其特点，其共同点都是通过实验，然后按照工程经验公式对控制器参数进

行整定。但无论采用哪一种方法得到的控制器参数，都需要在实际运行中进行最后调整与完善。现在一般采用的是临界比例法。利用该方法进行 PID 控制器参数的整定步骤如下：首先预选择一个足够短的采样周期让系统工作；仅加入比例控制环节，直到系统对输入的阶跃响应出现临界振荡，记下这时的比例放大系数和临界振荡周期；在一定的控制度下通过公式计算得到 PID 控制器的参数。通过实验，我用以上方法确定的参数是：

$$K_p = 0.75$$

$$K_i = 0.0006$$

$$K_d = 15$$

◎ 作品特点与使用效果

球平衡机器人成品见图 3。它具备独立控制功能，具备模仿人体平衡功能特征。它应用的 PID 算法能够直观地在其身上体现，且具有较强的趣味性。机器人主体支架结构用 CAD 软件进行建模，再用雕刻机制作出来，材料成本很低，非常便于推广，还能让学生学习一些简单的平面设计加工知识。球平衡机器人可以让学生了解有关机器人的知识，学到自动控制中的 PID 理论知识，激发学生的学习兴趣，兴趣引导学生培养学生的动手能力、

创新意识和科学素养。学生在体会现代科技知识无穷乐趣的同时，也享受着机器人带来的魅力，体会技术对人类社会发展的影响。球平衡机器人已经在我区开展机器人项目的学校中推广学习，机器人的编程环境——C 语言已经编入我区机器人校外科技教育的校本教材。球平衡机器人在我区各类科技活动中进行了展示表演，参加了创新基地作品展示与交流。

该项目获得第 29 届全国青少年科技创新大赛科技辅导员创新成果科技发明类一等奖。

专家评语

本项目利用 PID 控制理论，设计制作了两自由度的球上机器人，通过对 2 个相互平衡的陀螺传感器采集信号和反馈，实现了机器人在球上的动态平衡。本项目对培养学生科学探索的兴趣、直观理解经典的控制理论、拓展机器人教学范围都有积极的示范作用。■