

# 完美平衡重力补偿：使用零原长弹簧优雅平衡云台 pitch 轴的机械结构

廖洽源

张楚杰

梁伟聪

liaoqiayuan@gmail.com

zhangchujie00@gmail.com

1223106253@qq.com

广东工业大学 DynamicX 机器人队

日期：2021 年 8 月 31 日

## 摘 要

这篇文章介绍了一种重力补偿机构：它可以抵消由一个刚体连杆（等质量且质心与转轴距离保持不变）在任意转轴角度作用在 1DOF 转轴的重力矩；将它应用到 RoboMaster 机器人中可以优雅地解决云台 pitch 轴电机发热、惯量过大和控制效果差的问题；它纯机械的工作方式，结构简洁，零件多为标准件，设计限制少，免维护，陪伴英雄机器人参加了 2021 年广东省 RMUL、2021 年 RMUC 南部分区赛和全国技术交流，性能稳定。

**关键词：**RoboMaster，重力补偿，云台，机械设计

## 1 分析

### 1.1 问题简述

上述“pitch 轴”只是对机器人做云台俯仰运动的机构的统称，与电控组讨论后约定的命名和详细定义如下：

**定义 1.1.** `pitch_joint`：云台俯仰运动的旋转关节（转轴），在 RoboMaster 中通常由一个 6020 无刷电机作为执行器驱动。

**定义 1.2.** `pitch_link`：连接在 `pitch_joint` 上的由发射机构、图传、摄像头等零件简化成的刚体，它的质量不变且质心与 `pitch_joint` 的距离不变。

与平衡相关的定义如下：

**定义 1.3.** 平衡：通过某种方式抵消 `pitch_link` 带来的重力矩。

**定义 1.4.** 完美平衡 (Perfect Balance)：无论 `pitch_joint` 在什么位置角度，`pitch_link` 带来的重力矩都能被抵消。对于非 RoboMaster 的 Perfect Balance 准确定义和应用见 [1]。

如图 1 所示，我们队伍的英雄机器人 `pitch_link` 的质量为 1.701 kg，质心与 `pitch_joint` 的距离为 0.103 m。如果没有重力补偿，使用一个 6020 电机驱动 `pitch_joint` 保持 `pitch_link` 水平，电机将在两分钟内过热甚至烧毁，电控程序上使用简单的 PID 进行控制的效果不好，不满足上场比赛的性能要求。这种问题集中出现在下供弹英雄机器人和哨兵下云台上。



图 1: 英雄机器人云台的 pitch\_link 参数测量, 红框中为测量结果

## 1.2 前人工作

在 RoboMaster 比赛中, 如何解决云台 pitch 轴平衡一直为一个开放性的问题, 各个队伍尝试了许多方案。

### 1.2.1 重物配平

使用机载高性能计算设备 (mini PC) 和电机等大质量的零件进行配平是最常见的方法。该方法实现简单, 但是会带来较大的转动惯量从而使云台响应变慢, 还有可能会导致重心偏高、云台体积过大等的问题。随着视觉算法的更新, 越来越多队伍选用 Jeston AGX 或 Intel NUC 等相比 DJi 妙算 2 的体积和重量巨大的 mini PC; 还有三摩擦轮和四摩擦轮帮助远程抛射的设计; 都让单纯用配平的方式解决 pitch 轴配平问题变得越来越勉强。

### 1.2.2 重力矩前馈

在 PID 控制器上再加上根据当前 pitch\_link 与水平面的角度计算得出的重力矩作为力矩前馈能较好改善 pitch 轴控制效果。该方法实现简单, 但是无法解决电机发热问题, 而且电机一部分力矩被用于平衡重力矩, 也会导致响应变慢, 常与 1.2.1 一起使用。

### 1.2.3 拉皮筋

哈尔滨工业大学冯宸在私人交流中提出一种通过皮筋拉力来平衡重力矩的方式。该方案实现难度适中, 也以做到完美平衡, 但是该机构只能工作在 pitch\_link 与水平面的角度为负, 即俯视的情况, 只适用于哨兵下云台, 且要求皮筋原长和 pitch\_link 质心到 pitch\_joint 转轴的长度相同, 带来一些设计上的限制。

### 1.2.4 空间四连杆供弹链路

东北大学在 2019 年的英雄机器人开源 [2] 中通过将供弹链路设计为一个“空间四连杆”，令供弹链路不经过 pitch\_joint 转轴，从而可以将 pitch\_joint 转轴调整到 pitch\_link 的质心附近。可以认为该方法也可以做到完美平衡，但是其结构较复杂，且弹链较长。

### 1.2.5 电机加装散热片

通过为电机加装散热片加快散热速度可以做为上述做法的辅助，21 赛季许多队伍都一起加工了 6020 电机的散热片 [3]。

### 1.2.6 多电机或换电机

使用多 6020 电机共同驱动 pitch\_joint 和更换更大力矩的电机的方法较“暴力”，此处不做讨论。

## 1.3 理论

我们在阅读 [4] 时发现其中部分理论可以用于解决上述问题，本小节公式均直接或间接来自 [1]。

### 1.3.1 机构简图

根据上述描述，有图 2 中除了弹簧的部分：pitch\_link 的质量为  $M$ ，与 pitch\_joint 的距离为  $L$ ，重力加速度为  $g$ ，pitch\_link 与竖直面的角度为  $\theta$ 。

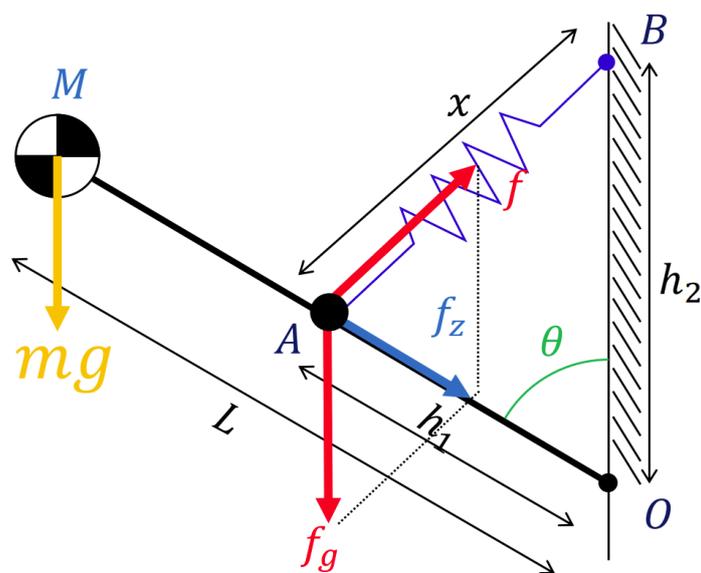


图 2: 机构的简图和受力分析，图源 [4]

图 2 中还有一拉簧，此拉簧为零原长弹簧，它是本文的关键，它的一段固定在 pitch\_link 上的 A 点，与 pitch\_joint 的距离为  $h_1$ ，另一端固定在 pitch\_joint 的父级 link 上（通常为 yaw\_link），与 pitch\_joint 的距离为  $h_2$ 。

**定义 1.5.** 零原长弹簧：弹簧的两个固定端距离为 0 时拉力/推力大小为 0，且拉力/推力大小与两个固定端的长度成正比。

### 1.3.2 受力分析

pitch\_link 所受重力作用在 pitch\_joint 上的重力矩如下：

$$\tau = mgl \sin \theta \quad (1)$$

重力矩在 A 点的作用等价于  $f_g$ ，如下：

$$f_g = mg \frac{L}{h_1} \quad (2)$$

其中  $k$  为弹簧的劲度系数。

图 2 结合静力学可知，显然  $f$ 、 $f_z$ 、 $f_g$  构成的力三角形与  $\Delta AOB$  相似。则有

$$\frac{f_g}{f} = \frac{h_2}{x} \quad (3)$$

将 (2) 代入 (3) 消去  $f_g$  得：

$$\frac{mgL}{fh_1} = \frac{h_2}{x} \quad (4)$$

将弹簧拉力  $f = kx$  代入 (4) 消去  $f$  得：

$$\frac{mgL}{kxh_1} = \frac{h_2}{x} \quad (5)$$

注意到 (5) 左右分母均有  $x$ ，约去得：

$$\frac{mgL}{kh_1} = h_2 \quad (6)$$

### 1.3.3 结论

注意到 (6) 中各符号均代表**常数**，与  $\theta$  无关，换言之：当拉簧的  $k$  满足 (7) 时，图 2 中的机构（系统）将会处于静力平衡状态。即：无论  $\theta$  的值是多少，拉簧产生的拉力作用在 pitch\_joint 上的力矩与 pitch\_link 作用在 pitch\_joint 上的重力矩抵消，也就是实现了**完美平衡**。

$$k = \frac{mgL}{h_1 h_2} \quad (7)$$

图 2 中 A 点和 B 点可以同时绕 pitch\_joint 旋转同个角角度，从而得到上述机构的等价形式，为设计带来一定自由度，可以避免和其他结构干涉。图 3 展示了其他两种形式。

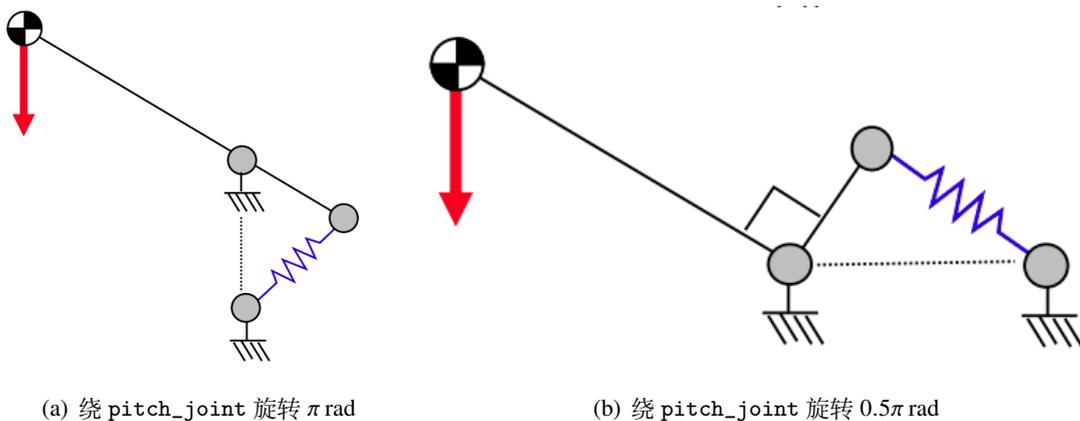


图 3: 其他形式，图源 [4]

## 2 实现

### 2.1 零原长拉簧

上述原理中已经强调，关键机构是**零原长弹簧**，但零原长弹簧如何实现呢--我们使用压簧和数个零件制作了零原长**拉簧**。如图4中所示：当连接点A与B间没有力的作用时，压簧完全伸展，A与B重合距离为零，整个系统等价于一根完全放松时的零原长的拉簧；当连接点A与B间受力分开时，当压簧压缩，A与B的拉力等比于它们之间的距离，整个系统等价于一根拉伸时的零原长的拉簧。

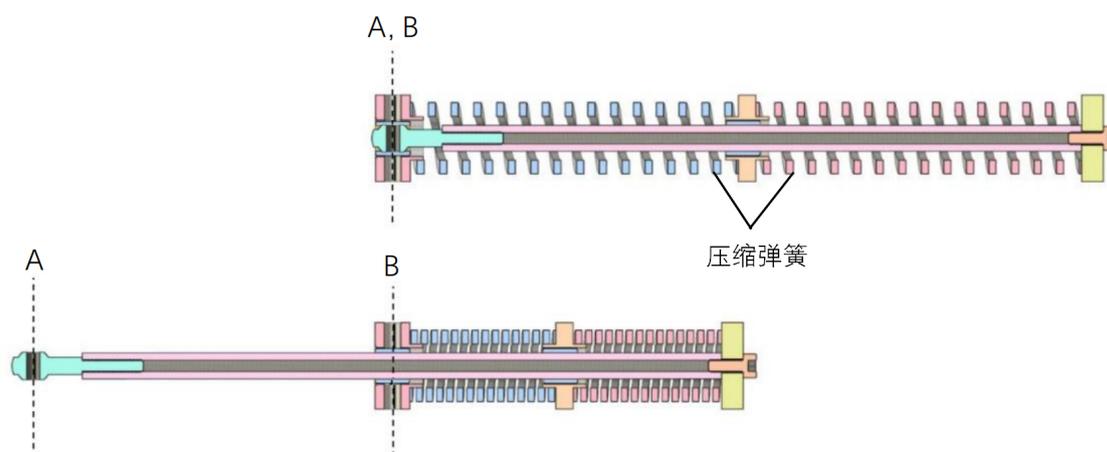


图4：零原长拉簧的放松（上），拉伸（下）两个状态

值得注意的是：图4中放松状态时，A与B两个连接点重合，由于结构干涉实际上不可能出现，但这并不影响它零原长的属性；商家能提供模具弹簧的准确k值，因此我们使用模具弹簧作为该机构的压簧，由于可购买到的标准模具弹簧在合适的压缩量和k值时没有足够的长度，因此选择将两根弹簧串联。

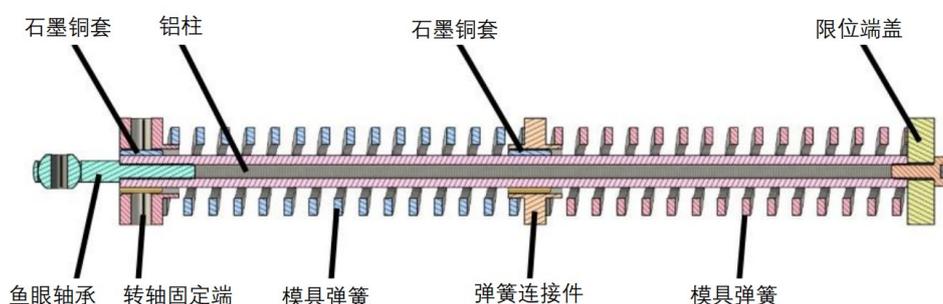
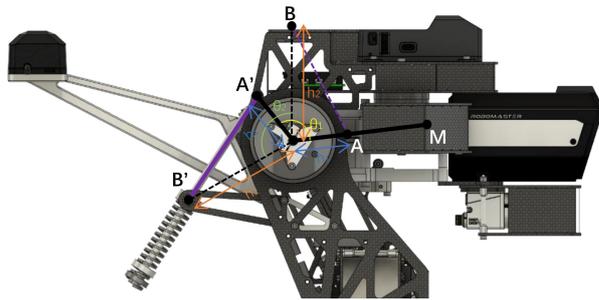


图5：零原长弹簧剖面图

如图5所示，我们选用了石墨铜套来降低中轴运动时的阻力，两个石墨铜套分别与固定端转轴和弹簧连接件紧配。固定端转轴，弹簧连接件，限位端盖均可采用3D打印件；中轴应节约成本采用外6内2.5的铝管在两侧攻丝制成。



(a) 云台重力补偿设计展示



(b) 云台重力补偿实际物展示

图 6: 重力补偿在云台上的应用

图 6 中可以看到, 为了使整个机构不发生干涉, 我们将 A 点和 B 点同时绕 `pitch_joint` 旋转同一角度  $\theta_1 = \theta_2$ , 从而得到 A' B', 他等价于图 2 中的等价形式。

## 2.2 致谢

感谢 [4] 为我们提供了上述结构, 值得一提的是, [4] 中还提到了可以改变重心位置的完美平衡机构, [1] 介绍了更多完美平衡结构和近似完美平衡结构, 值得阅读。

感谢机械组成员李钦鹏、谢浩<sup>[1]</sup>和黄瀚的雕刻机加工。由于实际机构实现者张楚杰在另外一个校区, 特别感谢帮忙取快递和协助装配的李钦鹏和谢浩<sup>[1]</sup>。

## 3 总结

该结构由简单而又实用的理论支撑, 易于实现且通用性强, 在 RoboMaster 中可以被称为一种优雅的机械机构及解决方案。

## 参考文献

- [1] HERDER J L. Energy-free systems. theory, conception and design of statically: volume 2[M]. [S.l.: s.n.], 2001.
- [2] 东北大学 TDT. 【东北大学】东北大学 T-DT 战队 RM2019 英雄机器人开源【RoboMaster 论坛-科技宅天堂】[EB/OL]. 2019. <https://bbs.robomaster.com/forum.php?mod=viewthread&tid=11032>.
- [3] 金子旭. 6020 散热片组队加工统计[EB/OL]. 2021. <https://docs.qq.com/sheet/DWnRzSUxSdWhDUEdy?tab=BB08J2>.
- [4] YUN S H, SEO J, YOON J, et al. 3-dof gravity compensation mechanism for robot waists with the variations of center of mass[C]//2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). [S.l.]: IEEE, 2019: 3565-3570.