

摩擦轮发射机构设计

侯朝中

中国石油大学（北京）SPR 机器人队 北京 102200;

摘要: 分析了摩擦轮发射机构相对其他发射机构在机器人比赛中的优点, 指出了摩擦轮设计中的设计要求及难点, 同时给出了聚氨酯摩擦轮发射机构设计计算过程, 并通过实验效果验证设计。结果发现聚氨酯摩擦轮发射机构能够在比赛中达到一个很用的使用要求, 显著改变发射系统的威力。

关键词: 发射机构 摩擦轮 聚氨酯

0 设计背景及要求

RoboMasters 是一项全新的机器人超级对抗赛。机器人通过发射弹珠的发射去攻击对方, 弹珠为直径 17mm, 重量为 4.15g 的塑料球。机器人通过车外壳上的加速度传感器来检测被弹珠打击的力度。在比赛战场上不管是远程打击还是近距离打击, 子弹的速度是影响威力的非常重要的方面。

要使子弹获得一个比较高的速度, 方法有好多种, 无非是提供给子弹一个非常大的初始速度即可。这些方法包括爆炸发射、弹性体蓄能发射、摩擦发射。爆炸发射是通过引爆火药粉、易爆性气体, 或者释放高压气体或电能(电磁炮)来产生巨大的推力, 此种方法威力巨大, 但是控制难度较高, 工况比较复杂。弹性体蓄能发射是弹性体积蓄的能量释放出来, 转化为子弹的能量, 虽然能够提供较大的加速度, 但是存在弹性体释放能量过程中产生不好解决的巨大的振动问题。摩擦发射的方式也有好多种, 包括摩擦轮发射以及摩擦带发射, 高速运行的摩擦轮或者摩擦带通过摩擦使子弹达到一个比较高的速度。

摩擦轮发射机构由于提供的能源比较方便, 占用空间较小, 而且制作简便, 在 RoboMasters 比赛中得到了广泛的应用。本文就摩擦轮发射机构的设计问题做了一些研究。

1 摩擦轮发射机构模型

1.1 设计要求

RoboMasters 比赛场地为长 28m 宽 15m 区域, 理想设计速度能让机器人站在中场攻打对方基地, 即理想设计水平攻打距离为 14m, 根据平抛运动简单计算一下子弹的速度, 射出口高度为 400mm, 子弹水平射出, $v_1 = 50m/s$ 。

在保证枪管直径及其摩擦因数合适的情况下, 实际气流及质量力的作用会使弹道变成弧线, 这是不可避免的。

1.2 摩擦轮发球速度分析

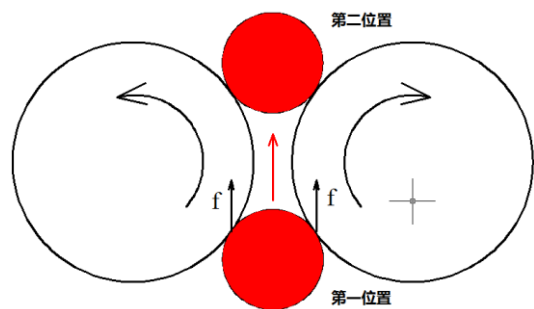


图 1 摩擦轮发球机构原理图

发球机构的原理如图所示, 由送球机构送上来的子弹经过一对旋转方向相反的摩擦轮的作用, 高速射出。从子弹进入开始与摩擦轮接触(图中的排球位置 1)到与摩擦轮分开(图中的排球位置 2), 在此期间, 排球将受到摩擦轮的摩擦力和压力的作用, 以此来完成加速过程, 最终射出,

由动量定理的计算公式:

$$f\Delta t = m\Delta v = m(v_1 - v_0)$$

v_0 为子弹的初速度，即进入摩擦轮时的速度；

v_1 为子弹从摩擦轮中射出的速度。

$$\Delta v = \frac{f\Delta t}{m} = v_1 - v_0$$

设 $v_0 = 0$ ，则 $v_1 = \Delta v$ ， Δv 与 f 和 Δt 有关， m 是子弹的质量，在这里是常数。实际上，增大摩擦轮的转速和摩擦力，到了一定程度时，子弹的最终速度将不会增大，也就是 Δv 达到了最大值，但是小于摩擦轮边缘的线速度。要想增大子弹的最终速度，可以从下面两个方面来做

增大接触时间 Δt ，其实就是增大摩擦力对子弹的接触时间，最好的方法就是利用摩擦带去实现，但是由于带传动中途存在效率转换的问题，在高速情况下不是太好实现。退一步，带传动不好做，可以用多级加速来实现，同时改变 Δv 和 Δt ，从而使最终的速度增大。

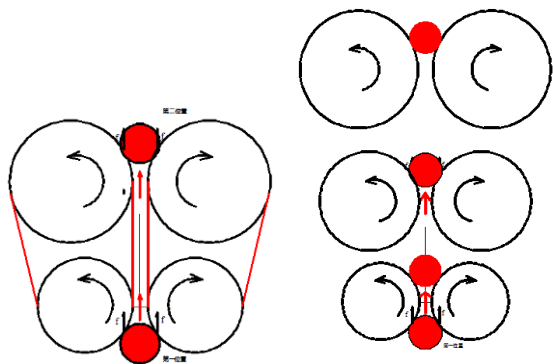


图 2 摩擦带发射原理图

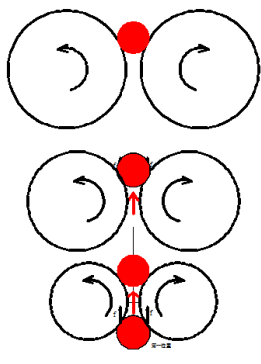


图 3 摩擦轮多级加速发射原理图

通过了大量的实验，我校机器人队最终选择的是单级摩擦轮发射机构，其实单级摩擦轮做好了威力已远远能够满足比赛的需要。

1.3 摩擦轮发球速度的影响因素

大量的实验表明，以下几个因素制约着摩擦轮的出弹速度。

(1). 电机的选择

我们的机器人电池使用的是锂电池，电机选择直流无刷电机。直流无刷电机相对于直流有刷电机而言无电刷、低干扰、噪音低、运转流畅，适用于转速比较高的设备上。直流无刷电机又分为内转子无刷电机和外转子无刷电机，这里使用的是外转子无刷电机，型号选择为深圳市大疆创新的一款无刷

电机，型号为 2312，KV 值为 960KV，工作电压 11.1V，电调 20A 则电机运行转速为

$$n = 960 \times 11.1 = 10656 \text{rpm}$$

(2). 摩擦轮工艺及材料的选择

高速状态下，对摩擦轮接触部分的材料要求比较高，选择不好的话可能由于离心力的作用而膨胀，继而造成剧烈的振动，导致发射出的子弹无论是从速度还是稳定性来说都不好。官方给出的摩擦轮材料为硅胶，硬度大概为邵氏 50~60 度左右。实际上就是比较好加工的硅胶垫圈，然后再固定在装有内衬的无刷电机上作为摩擦轮，但是效果不理想。图 4 为硅胶材质的摩擦轮，图 5 为加大版的硅胶摩擦轮，相同转速下会出现膨胀现象，如果不加钢线周向固定，硅胶圈会脱落。



图 3 硅胶摩擦轮

对硅胶圈进行受力分析

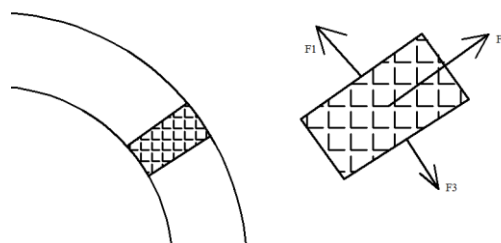


图 4 硅胶圈变形示意图

图中 F_2 为径向离心力，由于对称性，在高速状态下硅胶圈的直径会变大， F_2 越大直径就会变得越大，宏观表现为膨胀现象。

$$(F_1 + F_3) \cos \theta > F_2 = ma_n$$

$$2Eds \cos \theta > ma_n$$

发生膨胀现象的原因是因为硅胶的弹性模量 E 太小，抗扩张性较差，与摩擦轮轮芯不能很好的结合在一起，而且耐磨性不好，满足不了高速摩擦轮的要求。当然也可以通过细致的径向绕线使硅胶不扩张，比赛中也不乏有队伍这么做，但是实际效果却不是理想。

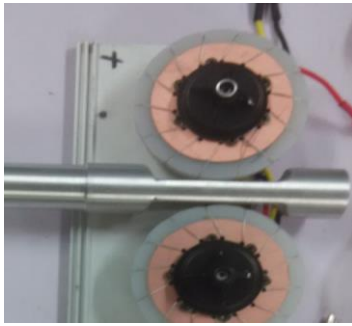


图 5 装有钢线的硅胶摩擦轮

在制造行业中，有一种很重要的工艺叫胶辊工艺，其主要就是以金属和其他材料为芯，外覆橡胶而制成的一种辊状物。由于这种工艺能够很好的将橡胶和金属结合在一起，所以很适合 RoboMasters 比赛中摩擦轮的制造。外覆橡胶应该满足耐磨、耐撕裂、耐老化等优点，而聚氨酯橡胶就能够很好的满足这些要求，其由聚酯(或聚醚)与二异氰酸脂类化合物聚合而成，广泛应用于石油管道的清管器中，应用在比赛摩擦轮上非常合适。

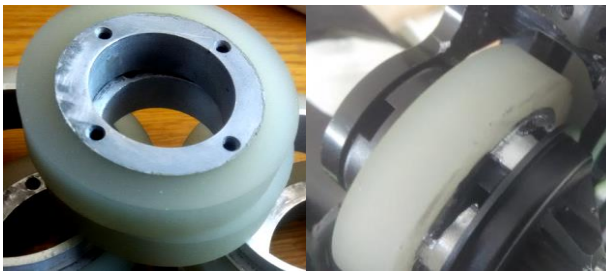


图 6 聚氨酯摩擦轮

(3). 摩擦轮机构的振动问题

如果摩擦轮的质心不在转动轴上或者离转动轴很远，此时的摩擦轮实际上是一个偏心轮。高速情况下会产生剧烈的振动，摩擦轮对称精度必须要高！另外，任何机构都有一个本身的振动频率，当整个发射机构的振动频率和摩擦轮的振动频率一致的时候，整个发射系统将会发射强烈的振动，如果频率与下落到发射管中的子弹本身的频率又一致的话，就会发生连环共振，这就能解释为什么有时候子弹从弹夹出来之后从 A 到 B 的过程中速度 v 不能太小的原因，宏观上子弹好像受到了一个与 v 相反方向的阻力，子弹很难被发射出去。而从能量的角度分析，振动消耗了子弹本应该获取的能量。当然，具体的振动频率的详细数据需要通过实验去确定，本文只是就振动问题作出简单的分析，总之摩擦轮的转速是和所设计的发射机构相匹配的，而不是越快

越好。

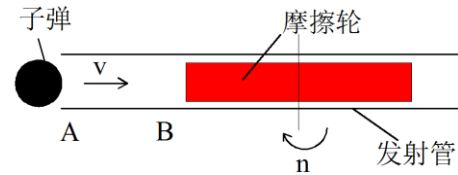


图 7 摩擦轮发射示意

(4). 摩擦轮之间的距离

摩擦轮之间距离的确定要与摩擦轮聚氨酯材料的硬度有关，保持其他情况不变的情况下，对硬度不同的四种种摩擦轮装置做了大量的实验，实验数据如下图表所示。

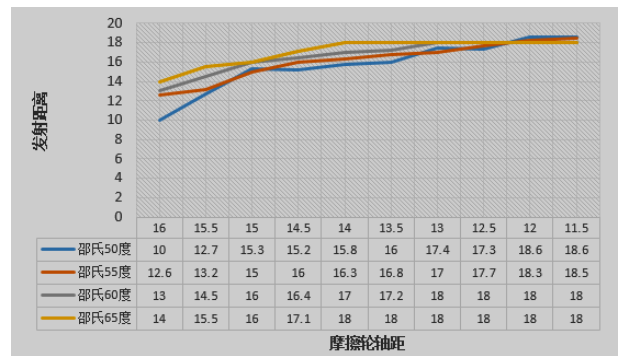


图 8 不同硬度下发射距离与摩擦轮轴距的关系

最终我校机器人队选择的聚氨酯为邵氏硬度 65，两摩擦轮之间距离为 12mm。

(5). 摩擦轮的转动惯量

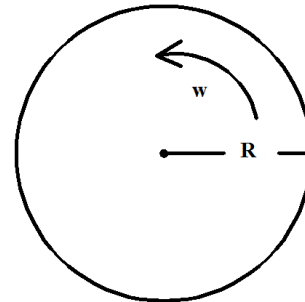


图 9 摩擦轮示意图

前面说到，子弹被摩擦轮发射出去，其能量是来自于摩擦轮。设摩擦轮能量为 E ，子弹获得的能量为 ΔE ，只有 $\Delta E \ll E$ 时，摩擦轮的能量才不会造成大的波动，摩擦轮转速也更加平稳。

将摩擦轮简化成如图所示的质量为 m 的圆柱，横截面半径为 R ，高度 L ，其转动惯量为 $J_{\text{轮}} = \frac{1}{2} m_{\text{轮}} R_{\text{轮}}^2$ ，当角速度为 ω ，其动能为 $E = \frac{1}{2} J_{\text{轮}} \omega^2$ 。

$$\text{摩擦轮动能 } E_{\text{轮}} = \frac{1}{2} J_{\text{轮}} \omega^2 = \frac{1}{4} m_{\text{轮}} R_{\text{轮}}^2 \omega^2$$

$$子弹动能 E_{弹} = \frac{1}{2} m_{弹} v^2 = \frac{1}{2} m_{弹} R_{轮}^2 \omega^2$$

因为 $m_{轮} \gg m_{弹}$

也就是说摩擦轮的转动惯量要足够大才行，但是不是说越大越好，太大可能电机启动不了，要和所选的电机相匹配才行。我校机器人摩擦轮的参数为：

$$m=50g$$

$$R=35mm$$

$$L=12mm$$

$$J_{轮} = \frac{1}{2} \times 50 \times 10^{-3} \times 35^2 \times 10^{-6} = 3.0625 \times 10^{-5} kg \cdot m^2$$

由于大疆 2312 无刷电机是 Phantom3 上面的驱动用，适用于 9450 自锁桨，桨的转动惯量为

$$J_{桨} = \frac{1}{12} \times 13 \times 10^{-3} \times 24^2 \times 10^{-4} = 6.24 \times 10^{-5} kg \cdot m^2$$

因为 $J_{桨} > J_{轮}$ ，所以所选择的无刷电机能够满足要求，且摩擦轮转动尺寸合适。

(6). 发射管的影响

发射管的作用是导向加速作用，发射管可以不是传统意义上的管子，它实际上是具有导向作用的通道。子弹与发射管之间的阻力主要是摩擦阻力，按照对象又可以细分为两种，一种是子弹与管子内壁之间的摩擦，另外一种子弹与空气中的摩擦。

下面分析一下两种经典的发射管。

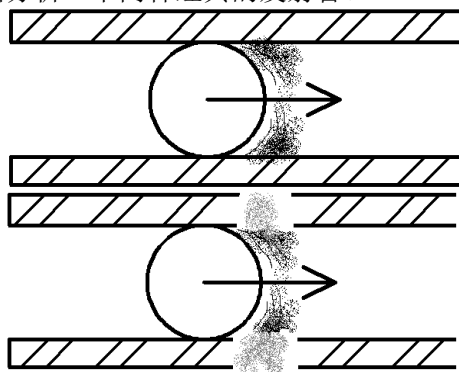


图 10 普通发射管

第一种是用的比较多的发射管，这种是真正意义上的管子，优点是管材是标准件，加工制造都很简单。缺点是内壁摩擦因数难以保证，而且空气所带来的阻力也是比较大的，会减小子弹的速度。

第二种是如下图所示的这样，假如在图示位置相对上图开两个口，使气流能够从两个侧向通道中排出，这样大大的减小了空气阻力。同时又考虑到减少内壁摩擦，可以将发射管设计成板材式。但这种方式对安装要求非常高。

这两种方法各有优缺点，实际实验中发现，气流阻力影响很小完全可以忽略，板材式安装比较麻

烦且容易变形，最后采用了标准铝管材作为发射管。管材内部光滑处理，氧化发黑。

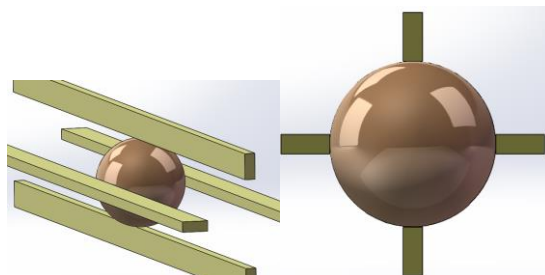


图 11 改进的发射管

2 结论

(1) 本文列举并分析了影响比赛子弹发射的六个影响因素，分别是电机的选择、摩擦轮工艺及材料的选择、摩擦轮机构的振动问题、摩擦轮之间的距离、摩擦轮的转动惯量、发射管的影响等。

(2) 影响摩擦轮发射的因素还有很多，比如高速流动下在摩擦轮周围会形成涡旋等作用等，本文只是对比赛过程中的一些设计的重要问题进行了总结，理论计算和实验数据依然很少，后期可以继续多计算多实践，不断优化。

(3) 中国石油大学（北京）代表队在摩擦轮设计过程中做了大量的计算与实验，设计出了威力巨大的摩擦轮发射机构，在 2015 RoboMasters 大学生机器人比赛中有着突出的表现。

参 考 文 献

- [1] 严济宽. 机械振动隔离技术[M]. 上海：上海科学技术文献出版社, 1986.
- [2] 谷腰欣司. 直流电动机实用技巧[M]. 北京：科学出版社, 2006.
- [3] 欧特尔等. 普朗特流体力学基础[M]. 北京：科学出版社, 2008

作者简介：侯朝中，男，中国石油大学（北京）机械工程研 2014 级，2014 届 robocon 队长，2015 届 robomasters 队长。

E-mail: robohou@163.com