

高斯加农炮的设计与优化

-----电磁学小论文答辩-----

徐峰源 (PB14203036)
李志鹏 (PB14203254)
魏思远 (PB14203266)


高斯炮

- 1.高斯炮是一种利用强磁场加速炮弹的装置。
- 2.强磁场是静磁场,一般由永磁体产生,而非电磁炮中的电磁场。



图1-高斯枪

高斯炮



最优化情况演示

等质量的钢球队列排在非磁性弹道上,利用磁场加速。序列第一个钢球滚动撞击钢球队列,这样在队列最后方的钢球就会拥有一个巨大的速率。

待解决问题

这个设备是怎么运行的呢?是否完全由磁场支持即可?

磁体放置方式、长度、直径、铸磁强度;钢珠质量、数量、磁化率、射速度;磁体与钢珠的组合方式.....

调整哪项参数才能够获得最大出射速度?

系统中能量主要损失在什么地方?

是不是值得研究磁场和钢球序列系统?

什么是最优系统设置方案?

是否能无限增加加速器个数?




图1-三级加速是否更有效?

主要实验材料

钕磁铁,也称为钕铁硼磁铁,是强力磁铁的统称,其化学式为Nd₂Fe₁₄B,是一种人造的永久磁铁,为至目前为止具有最强磁力的永久磁铁。




图1-钕铁硼磁铁

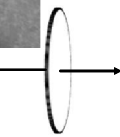


图2-铸磁方向

主要实验材料

轴承钢珠:支撑旋转体,同时减轻摩擦阻力。不同钢珠的磁导率不同。



动画1-“好”钢珠



动画2-“次”钢珠

实验器材——Li&Wei

半圆管1个(长150.0cm, 外径5.5cm, 内径5.1cm), 钕磁铁8个(直径1.9cm, 厚度0.5cm), 小钢珠6个(直径1.5cm), 大钢珠6个(直径1.7cm), 自由落体毫秒计, 光电门。

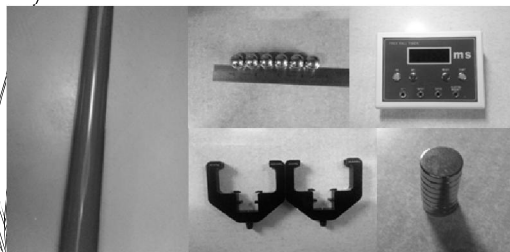


图1-Li&Wei试验中所用的器材

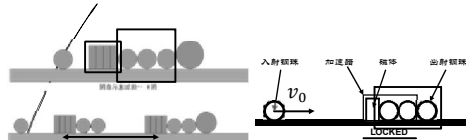
实验器材——Feng

直径为12.700mm, 质量为8.5g的钢珠若干; 高10.000mm, 质量9.0g; 不可磁化的自制导轨一条; 不可磁化的垫片若干; 光电门两个及配套数据连接线两条; 数据采集器两个及配套数据连接线两条; 用于固定装置的透明胶; 装有DISLab 6.0系统的计算机两台; 螺旋测微器一个。



图1-Feng试验中所用的器材

各自实验方案



磁铁个数、小球个数对一级加速器加速效果的影响, 以及磁铁间距对二级加速器加速效果的影响。

确定特定条件下如何使高斯加农炮的加速效应最优化。设置“强磁体的摆放位置”“强磁体是否固定”以及“入射钢珠速度”为三个自变量, 进行对照实验。

实验内容与结果——Li&Wei: 一级加速

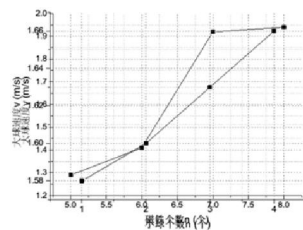


图2-大球速度与磁铁个数的关系曲线

实验内容与结果——Li&Wei: 二级加速

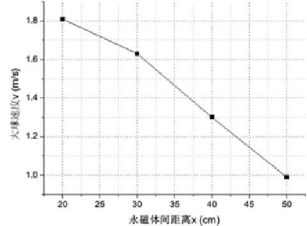


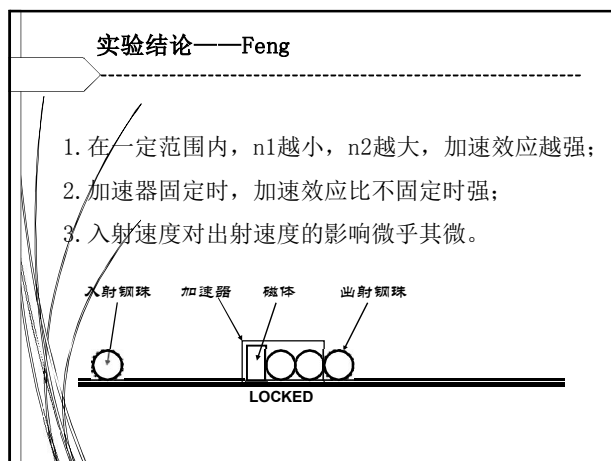
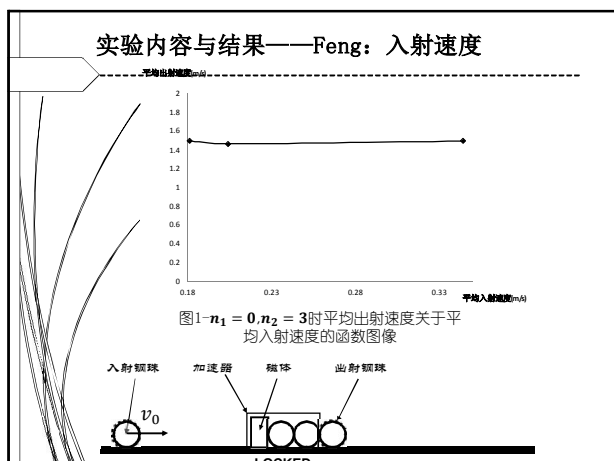
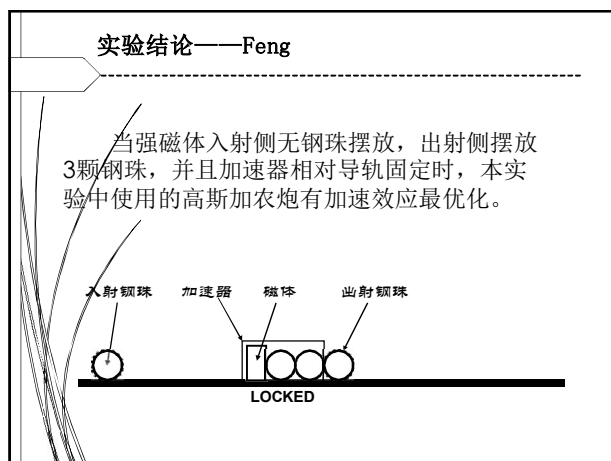
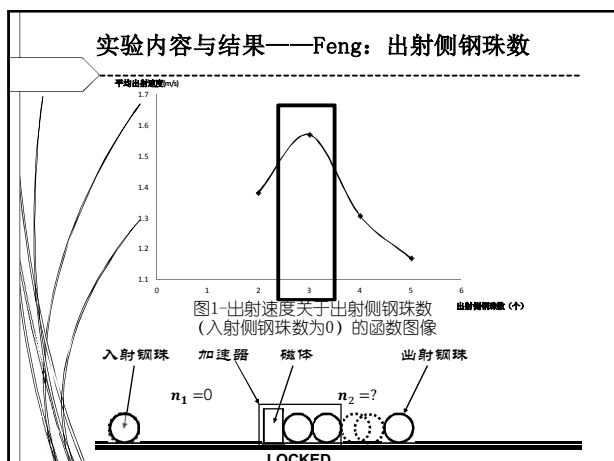
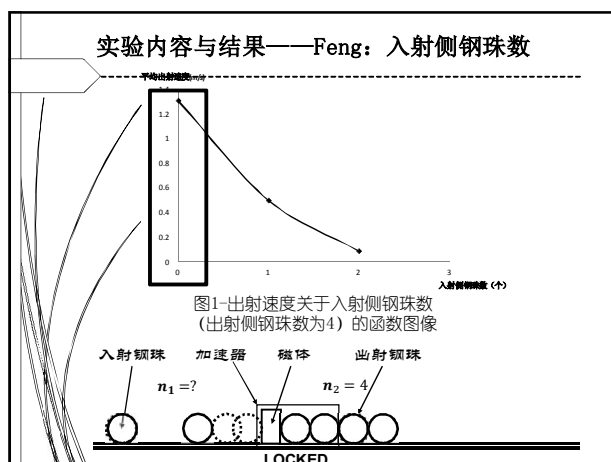
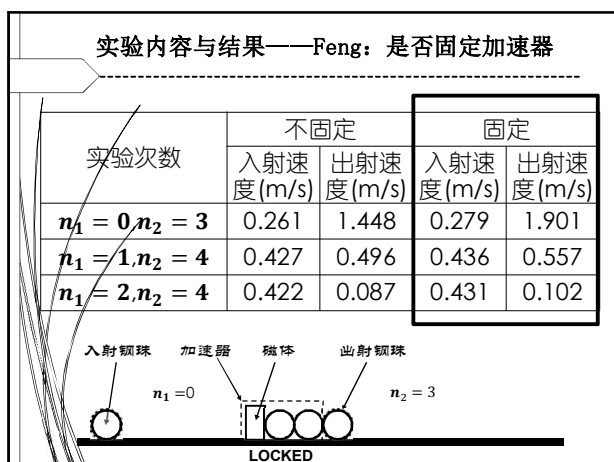
图1-大球速度与永磁体间距的关系曲线

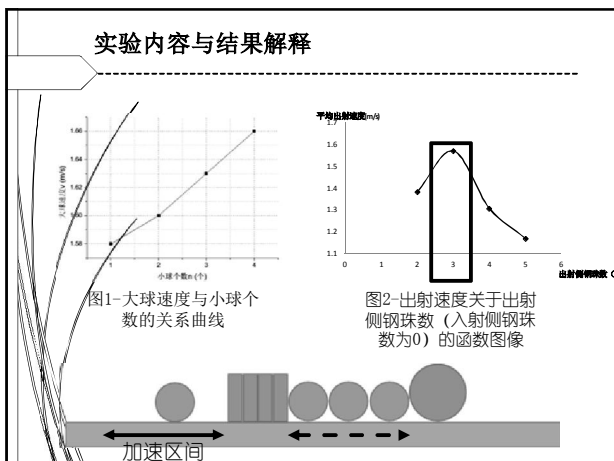


实验结论——Li&Wei

本文旨在探究高斯加速器的工作原理, 有几组对照试验可以得出的粗略结论为: 想要提高高斯加速器效果需要以下几个措施:

1. 尽可能减少导轨与运动物体间的摩擦力;
2. 尽可能使用更为强力的永磁体, 必要时电磁铁也是很好的选择;
3. 适当地增加永磁体与出射物体间的抑磁介质;
4. 适当的使用多级加速装置, 并注意控制各级加速器之间的距离。





受力分析

本实验所选取的轴承钢珠是铁磁性材料，而强顺磁性材料在磁场中会感应出极化电流，再加之由于磁场的不均匀性，这导致闭合极化电流受到的安培力的合力不为零。根据顺磁性材料与磁体相吸的性质，本实验的钢珠必受到指向加速器的安培力。

顺磁性材料

建立模型

建模：

1. 强磁体产生的磁场等效为磁偶极子产生的磁场；
2. 静态钢珠不导磁(或磁导率很低)；
3. 钢珠处的磁感应强度近似为圆心处的磁感应强度；
4. 只考虑钢珠的一级磁化。

设强磁体参数 $\{\vec{j}/D/H/V/\vec{P}/\vec{B}\}$ ，分别为强磁体的{磁极化强度/直径/高/体积/磁矩/产生的磁场}，钢珠的参数 $\{m/d/v/\chi/M/\rho/\vec{i}\}$ ，分别代表钢珠的{质量/直径/体积/磁化率/磁极化强度矢量/磁矩/所受的安培力}。

钢珠在强磁场中的受力

用磁荷法可以算出强磁体的等效磁矩：

$$\vec{V} = \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 H \quad \vec{P} = \frac{V}{\mu_0} \vec{j}$$

则强磁体产生的磁场为：

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi r^3} (3(\vec{P} \cdot \vec{r})\vec{r} - r^2 \vec{P})$$

若以强磁体中心为坐标原点，以磁极化强度为x轴正向，则磁场可以写成直角坐标系下的形式：

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 P}{4\pi(x^2 + y^2 + z^2)^{5/2}} \{2x^2 - y^2 - z^2, 3xy, 3xz\}$$

钢珠在强磁场中的受力

永磁体底面的磁荷密度为：

$$\sigma = j$$

直径为D的圆盘，其上磁荷密度为 σ 对轴线上一点的磁场强度为：

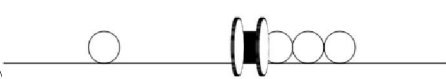
$$H_i = \frac{\sigma x}{2\mu_0} \cdot \left(\frac{1}{x} - \frac{1}{\sqrt{x^2 + \left(\frac{D}{2}\right)^2}} \right)$$

若以强磁体中心为坐标原点，以磁极化强度为x轴正向，则磁场强度在x轴上的大小为：

$$H_i = \frac{\sigma \left(x - \frac{H}{2}\right)}{2\mu_0} \cdot \left(\frac{1}{x - \frac{H}{2}} - \frac{1}{\sqrt{\left(x - \frac{H}{2}\right)^2 + \left(\frac{D}{2}\right)^2}} \right) + \frac{-\sigma \left(x + \frac{H}{2}\right)}{2\mu_0} \cdot \left(\frac{1}{x + \frac{H}{2}} - \frac{1}{\sqrt{\left(x + \frac{H}{2}\right)^2 + \left(\frac{D}{2}\right)^2}} \right)$$


钢珠在强磁场中的受力

对应磁感应强度：
 $B = \mu_0 H_i$
 成立范围： $|x| \geq \frac{H_0}{2\omega}$
 当 $x \gg H$ 时，轴上磁感应强度大小与磁矩法所算的大小相同。
 $\bar{B} = \frac{\mu_0 P}{2\pi x^3}$



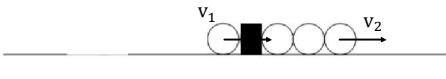
钢珠在强磁场中的受力

小球在磁场中受到梯度力：
 $F = (\bar{p} \cdot \nabla) \bar{B}$
 小球在x轴上运动受力：
 $f_x = -\frac{\pi \chi}{128\mu_0 \chi + 1} \frac{d^3 D^4 H^2 J^2}{x^7} \propto \frac{1}{x^7}$



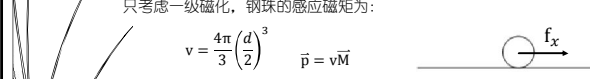
钢珠在强磁场中的运动

小球的动力学方程为：
 $m\ddot{x} = f_x$
 此方程对入射和出射钢珠皆成立。
 设钢珠碰撞加速器的恢复系数为e，则碰后的出射钢珠速度满足：
 $v_2|_{t_0} = e \cdot v_1|_{t_0}$
 t_0 为发生碰撞时刻。此条件即可解决碰撞前后的边界问题。



钢珠在强磁场中的受力

设钢珠受安培力作用沿x轴负向朝加速器加速，其磁化强度矢量为：
 $\bar{M} = \frac{\chi}{\chi + 1} \cdot \frac{\bar{B}}{\mu_0}$
 只考虑一级磁化，钢珠的感应磁矩为：
 $\bar{p} = v\bar{M}$
 $\bar{f} = (\bar{p} \cdot \nabla) \bar{B}$
 由于小球在x轴上运动， $y = 0, z = 0$ 且合力只沿x轴方向，大小为：
 $f_x = -\frac{\pi \chi}{128\mu_0 \chi + 1} \frac{d^3 D^4 H^2 J^2}{x^7}$



动画模拟——一级加速

动画1-一级加速动画演示

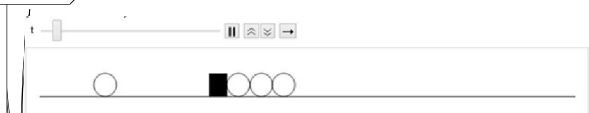
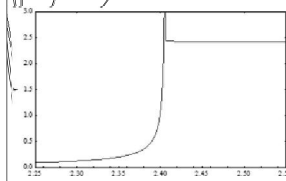
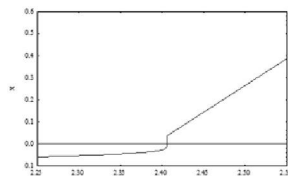




图1-单级加速钢珠v-t图像 图2-单级加速钢珠x-t图像

动画模拟——二级加速

动画1-二级加速动画演示


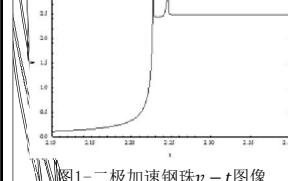
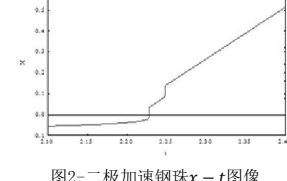
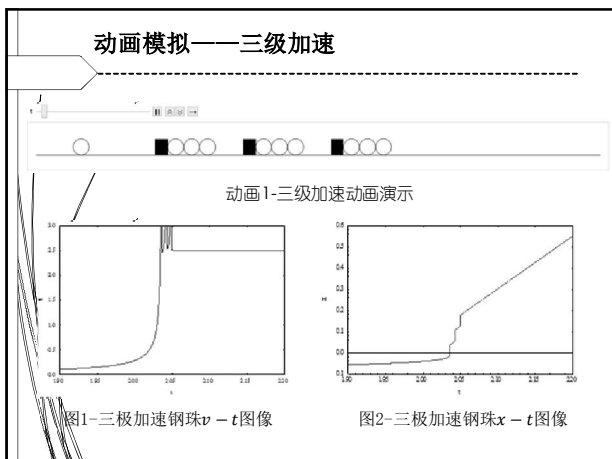




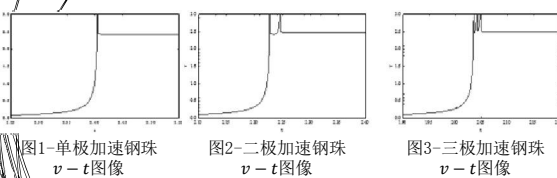
图1-二级加速钢珠v-t图像 图2-二级加速钢珠x-t图像

动画模拟——三级加速



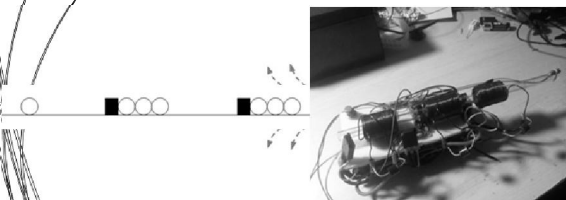
模拟结果

模拟发现，多级加速时仅有第一级加速器对钢珠速率有较大贡献，而后的加速过程对速度的贡献微乎其微。事实上，当入射速率较大时，钢珠通过加速区间所用的时间越短，由动量定理可知，即使安培力有 x^{-7} 的发散趋势，其对钢珠速率的贡献也很小。



如何进一步优化

- 若要获得更高的速率，以下有两条改进方式：
1. 增加磁体的磁极化强度。但对于永磁体磁极化强度有上限，可考虑用电磁铁代替；
 2. 类似带电粒子的加速装置，在低速情况下用2~3永磁体加速器组进行加速，达到永磁体加速器组加速的上限时改用直线螺线管做最后一次加速。



结果展示

