

实验手册

虚拟实验室指导手册：复合场中的带电粒子动力学

Virtual Laboratory Manual: Dynamics of Charged Particles in Composite Fields

核心公理 (The Axioms):

- 洛伦兹力 (F_B): 只改变方向, 不改变速度大小 (不做功)。
- 电场力 (F_E): 改变速度大小, 驱动能量转化 (做功)。
- 能量守恒: $E_{total} = E_k + E_p$ 。

实验一：力的本质——动能守恒与做功

目标：通过对比纯磁场与纯电场，直观理解“力”的性质差异。

1.1 纯磁场：永动机的假象

- 场景选择：纯磁场 - 匀速圆周 (Cyclotron)
- 参数预设： $v_0 = 5, B = 0.1, E = 0$
- 操作步骤：
 - 点击 开始。
 - 观察 主视图：粒子绘制出一个完美的圆形。
 - 观察 能量视图：图线是一条绝对水平的直线。
- 物理洞察：

为什么能量线是平的？

因为 $\vec{F}_B \perp \vec{v}$ ，洛伦兹力永远与运动方向垂直，它像一个只会在侧面推你的向导，从不给你推背感。磁场不提供能量，只提供几何约束。

1.2 纯电场：能量的注入

- 场景选择：纯电场 - 类平抛 (Parabolic)
- 参数预设： $v_0 = 5, E_y = 0.5, B = 0$
- 操作步骤：
 - 点击 开始。
 - 观察 主视图：粒子向下弯曲，轨迹越来越直（趋向于电场线方向）。
 - 观察 能量视图：能量曲线呈抛物线状急剧上升。
- 物理洞察：

电场力 \vec{F}_E 是恒力。粒子顺着电场线跑，电势能转化为动能。电场是能量的银行。

实验二：速度选择器——力的博弈与平衡

目标：理解复合场中“直线运动”的苛刻条件，以及破坏平衡后的后果。

2.1 寻找平衡点

- 场景选择：速度选择器 (Velocity Selector)
- 参数预设： $v_0 = 5, B = 0.5, E_y = 2.5$
- 理论公式： $qvB = qE \Rightarrow v = E/B$
- 操作步骤：
 - 运行模拟，确认粒子走直线，能量图水平。
 - 计算验证： $E/B = 2.5/0.5 = 5$ ，与 v_0 吻合。

2.2 破坏平衡：快慢粒子的命运

- 操作 A (太快)：保持 E, B 不变，将 v_0 调大至 8。
 - 现象：粒子向上偏转，随后呈波浪状前进。
 - 分析： $F_B > F_E$ (洛伦兹力赢了)。粒子上浮逆电场而行 \rightarrow 减速 \rightarrow 洛伦兹力减弱 \rightarrow 回落。
- 操作 B (太慢)：将 v_0 调小至 3。
 - 现象：粒子向下偏转，随后呈波浪状前进。
 - 分析： $F_E > F_B$ (电场力赢了)。粒子下落顺电场而行 \rightarrow 加速 \rightarrow 洛伦兹力增强 \rightarrow 提拉。
- 物理洞察：

速度选择器本质上是一个负反馈系统。无论初始速度如何，粒子都倾向于围绕 $v = E/B$ 这个“理想状态”震荡。

实验三：摆线运动——能量的呼吸

目标：观测动能与电势能的周期性转化 (Cycloid Motion)。

3.1 零初速释放

- 场景选择：自定义 (Custom)
- 参数设置：
 - $v_0 = 0$ (关键!)
 - $E_y = 2$ (强电场)

- $B = 1$ (强磁场)
- 操作步骤：
 - 点击 开始。
 - 视觉焦点：紧盯 能量视图。
- 观测记录：
 - 轨迹：是一系列尖顶的拱门形状（摆线）。
 - 能量：从 0 开始，上升到峰值，再精准地落回 0，如此循环。
- 物理洞察：

粒子像在一个碗里滑行。电场把它推下去（加速），磁场把它卷上来（变向）。

当它回到起始高度时，电场做的功全部被吐了出来，动能归零。这展示了守恒场（Conservative Field）的完美对称性。

3.2 验证电漂移 (ExB Drift)

- 进阶计算：尽管粒子忽快忽慢，但它整体向右移动。
- 公式预测：漂移速度 $v_{drift} = E/B = 2/1 = 2$ 。
- 操作验证：
 - 在模拟器运行几秒后暂停。
 - 看左侧面板的实时数据 v_x 。
 - 你会发现 v_x 在 0 到 4 之间波动，平均值正是 2。

实验四：回旋加速器原理——半径与周期的秘密

目标：验证洛伦兹力下的几何规律。

4.1 半径公式验证 ($R = mv/qB$)

- 场景选择：纯磁场 (Circle)
- 变量控制：
 - 基准： $m = 1, v = 5, B = 0.1 \Rightarrow R = 50$ 。观察圆的大小。
 - 变奏 A：将质量 m 加倍为 2。
 - 预测：惯性变大，难拐弯，半径翻倍。
 - 结果：圆变得巨大。
 - 变奏 B：将磁场 B 加倍为 0.2。
 - 预测：向心力变强，抓得紧，半径减半。
 - 结果：圆收缩。

4.2 周期公式的诡异 ($T = 2\pi m/qB$)

- **核心悖论：**公式中没有 v ！即**周期与速度无关**。
- **操作验证：**
 1. 设置 $m = 1, q = 1, B = 0.1$ 。
 2. 设置 $v_0 = 5$ ，心中默数粒子画一圈的时间（约 6.28秒）。
 3. **关键步骤：**重置，将 v_0 设为 10（速度快一倍）。
 4. 再次运行。
- **现象：**
 - 虽然圆变大了（半径翻倍），但粒子跑完一圈的时间**完全没变**！
- **物理洞察：**

跑得越快，圈子越大，路程越长。速度增加的比例恰好抵消了路程增加的比例。

这就是回旋加速器能工作的基石——无论粒子被加速到多快，交流电源的频率都不需要调整。

结语：给探索者的建议

这个模拟器是你的显微镜。通过它，你不再是死记硬背 $qvB = mv^2/R$ ，是在操纵粒子宇宙的积木。

下一步挑战：

尝试在 自定义 模式中，同时开启 E_x （水平电场）和 E_y （垂直电场），再加上 B 。

- **思考题：**此时粒子的漂移方向会是哪里？是沿着 E 的合方向吗？还是垂直于 E 的合方向？
- (提示：利用直觉——漂移总是垂直于电场和磁场的平面)。