

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):

1. 洛伦兹力 (F_B)：只改变方向，不改变速度大小（不做功）。
2. 电场力 (F_E)：改变速度大小，驱动能量转化（做功）。
3. 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：
 1. 点击 开始。
 2. 观察 主视图：粒子绘制出一个完美的圆形。
 3. 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：
 1. 点击 开始。
 2. 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）。
 3. 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：**
 1. 运行模拟，确认粒子走直线，能量图水平。
 2. 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 → 减速 → 洛伦兹力减弱 → 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 → 加速 → 洛伦兹力增强 → 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：**
 1. 点击 开始。
 2. 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：**
 1. 在模拟器运行几秒后暂停。
 2. 看左侧面板的实时数据 v_x 。
 3. 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：**
 1. **基准：** $m = 1, v = 5, B = 0.1 \Rightarrow R = 50$ 。观察圆的大小。
 2. **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。
 3. **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)。