1.

（1）什么是“符合”测试?

符合测试建立在符合测量技术的基础之上。符合测量是指用一个或三个以上不同的探测器来记录两个或两个以上同时发生的、相互关联的原子核事件。若这些粒子来自同一个核事件，彼此之间具有内在的因果关系，则这种符合输出称为真符合；反之，若两个在时间上没有规律性联系的粒子偶然在符合分辨时间τ内同时被记录，则称为偶然符合（或称随机符合）。

符合测量装置一般由多个探测器与符合电路（或反符合电路）组合构成，能够通过电子学方法在不同探测器的输出脉冲中筛选出具有时间关联的真实事件，同时抑制那些无物理关联的随机本底噪声。符合电路具有一个确定的符合分辨时间τ，即其能够区分两个脉冲的最小时间间隔，当两个脉冲的时间差小于τ时，符合电路便会输出一个符合脉冲。

基于上述原理，“符合测试”就是利用符合测量技术，对探测器系统或电子学系统的时间关联性能进行测试和标定，以评估系统甄别关联事件的能力和时间测量精度。

（2）为什么要进行符合测试

① 有效甄别真实关联事件，抑制本底

探测器记录到的信号包含来自宇宙射线、环境放射性等多种本底来源。符合测量技术通过要求多个探测器同时记录到信号才予以记录，这样能够天然地屏蔽那些只被单个探测器误触发的事件。例如，在符合测量中，两个探测器分别接收到的粒子信号只有在时间间隔小于符合分辨时间τ时才会形成符合计数，否则即被视为背景噪声并予以舍弃。通过合理设置符合时间差窗口，可以将探测器双端读出的信号进行逻辑关联，有效提取真事件，并明显抑制本底干扰。

② 为放射性活度测量、级联辐射研究和粒子鉴别等提供基本方法

在核反应研究中,符合测试可以用来确定反应产物的能量和角分布；在核衰变测量中可用于研究核衰变机制、级联辐射之间的角关联以及短寿命放射性核素的半衰期；在宇宙射线研究中，按一定方向放置多个计数管的符合测量可以测量宇宙线在各个方向上的强度分布和观测簇射现象。此外，符合测量还为放射性活度测量、低本底辐射环境测量、宇宙射线粒子甄别、暗物质探测和先进核医学诊断（如 PET-CT）等提供了必不可少的测量手段。

③ 评估和提高探测器的时间测量精度

符合测试是评估探测器时间分辨率的重要手段之一。通过多探测器符合测量，可以确定探测器系统的时间分辨本领，从而判断其是否满足特定实验对时间精度的要求。例如，通过调整符合系统参量、观察各级输出信号的波形及其时间关系，可以测量符合

装置的分辨时间（包括电子学分辨时间和物理分辨时间）。这种测试能够帮助实验者优化系统参数，提升时间测量的可靠性。

（3）为什么时间分辨率的测量要用符合信号来测量

时间分辨率本质上反映了探测器甄别两个事件时间先后能力的极限，而符合信号正是对这种甄别能力的直接表征。

具体来说，符合装置的分辨时间τ本身就是系统时间分辨率的一种体现——它定义了符合装置能够区分两个事件的最小时间间隔。当两个脉冲的起始时间差小于τ时，符合装置无法区分它们的时间差别，会将它们当作同时事件记录。因此，通过测量符合信号在不同时间延迟条件下的计数率变化，可以反推出系统的分辨时间，进而得到时间分辨率。

此外，在测量时间分辨率时，通常需要两个探测器来记录具有严格时间关联的同源事件，而符合信号恰好能够精准地筛选出这类具有内在因果关系的事件，排除那些偶然符合的无关事件。例如，在 PET 成像中，通过测量符合通道的时钟信号，可以找出固有的时间偏差，并根据偏差值调整时钟线长度进行时间校正，从而得到理想的符合时间谱。又如，在粒子物理实验中，通过符合约束条件对事例作时间差谱分析，可以得到探测器的时间分辨性能。这些实例充分说明，符合信号是测量时间分辨率的核心手段。

2.

（1）什么是朗道效应

当高能带电粒子（如质子、π介子、μ子等）穿过薄介质层（如硅探测器、闪烁体等）时，它并不是连续均匀地损失能量，而是通过与介质原子的离散相互作用（电离和激发）逐步消耗能量。由于这种相互作用的随机性，每一次粒子在相同厚度介质中沉积的能量都存在统计涨落，这种涨落被称为朗道涨落。对于最小电离粒子，由于能量沉积方式的不均匀性，这一效应尤为显著。

在薄硅传感器中，电离能损涨落会显著偏离朗道分布，因此需要引入更精确的能量损失分布模型（如 Bichsel 分布）来描述。而在较厚传感器中，能量涨落一般可用朗道—瓦维洛夫分布较好地描述。在实际应用中，朗道效应导致的能量沉积不均匀性会引入额外的时间测量误差，这一贡献有时被称为“朗道噪声”。

（2）怎么消除信号幅度不一致带来的误差

在两层上下排列的探测器中对同一粒子进行符合测量以统计时间分辨率时，朗道效应导致每层探测器中沉积的能量各不相同，进而使得探测器输出信号的幅度产生差异。这种幅度差异会通过电子学系统引入“时间行走”（time walk）误差，显著影响时间分辨率的测量精度。

时间行走是指固定阈值的甄别器在面对不同幅度的信号时，触发时间随着信号幅度变化而发生系统性移动的现象：幅度大的信号上升速度快，较早越过触发阈值；幅度小的信号上升速度慢，较晚越过触发阈值。即便粒子到达探测器的时间完全相同，如果两个探测器输出的信号幅度不同，固定阈值甄别器给出的触发时间也会不同，从而产生虚假的时间差。因此，消除幅度不一致带来的误差，本质上就是消除时间行走效应对符合测量中时间差谱的影响。

① 恒比定时法

恒比定时法:不采用固定阈值，而是创建一个随信号幅度变化的可变阈值，始终在信号的某个恒定的百分比高度处触发甄别器，从而给出一个与信号幅度无关的时间标记点。在电路中，CFD 通常通过将原始信号分成两路来实现：一路进行延迟，另一路进行衰减和反相，然后将两路信号叠加，产生一个双极性信号。该双极性信号的零点穿越时刻仅与 CFD 自身的参数有关，而与原始信号的幅度无关，因此可以用这个零点穿越时刻作为精准的到达时间标记。

CFD 特别适用于两层探测器符合测量场景：当两个探测器的输出信号幅度因朗道效应而显著不同时，CFD 能够确保两个信号的时间标记点都对应于各自波形的相同分数高度处，从而消除幅度差异引入的时间行走误差。

② 时间过阈法

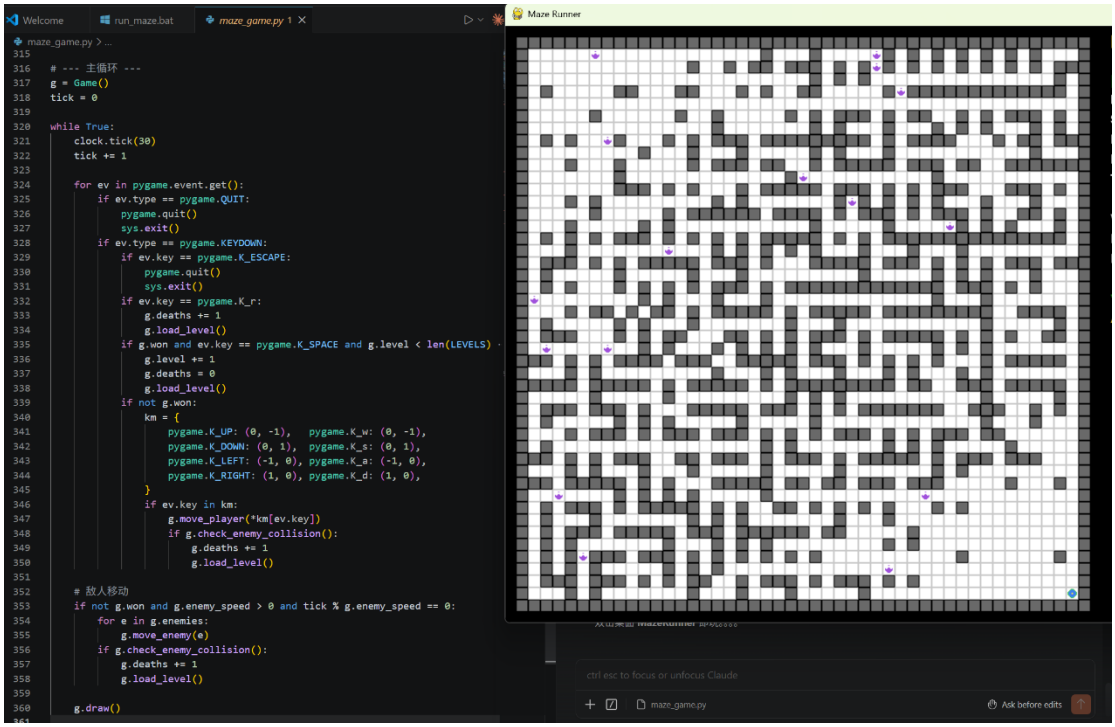
在数字化数据采集系统中，除了 CFD 方法外，时间过阈法（Time-over-Threshold，简称 ToT）也是一种常用且有效的修正手段。其基本思路是在甄别器产生触发信号的同时，同步记录信号在阈值以上的持续时间（即 ToT 宽度），而 ToT 宽度与信号幅度存在确定的正相关关系。因此，当后期进行离线数据分析时，可以利用预先标定好的 ToT 值→幅度关系或 ToT 值→时间偏移量关系，对每个事例的测量时间进行逐一的修正和校准。这种方法原理简单、易于数字化实现，在当代的像素探测器读出芯片（如 Timepix 系列）和大型探测器阵列中获得了广泛应用。

③ 最佳滤波法

从更为基础的层面来看，电子学噪声是影响时间分辨率的另一重要因素。最优滤波技术通过对探测器的输出信号进行滤波处理，最大化信号上升斜率与噪声均方根的比值，从而减小抖动（jitter）对时间测量的影响。在实际应用中，最优滤波器可以通过整形放大器、CR-RC 滤波网络等方式近似实现，与 CFD 等技术结合使用可以进一步提升时间分辨率。

综合来看，对于两层上下排列的探测器在朗道效应影响下的符合时间分辨率测量，最核心的消除手段是采用恒比定时法。硬件上优先选择 CFD 作为定时甄别器，从物理层面直接消除幅度对触发时间的影响；同时可辅以 ToT 法进行离线后修正，并对探测器进行能量沉积的精细标定，通过多层次的修正策略实现对朗道效应不均匀性的全面抑制，确保时间分辨率测量的准确性和可靠性。

3.


Welcome
run_maze.bat
maze_game.py 1
maze_game.py > ...
# --- 主循环 ---
g = Game()
tick = 0
while True:
clock.tick(30)
tick += 1
for ev in pygame.event.get():
if ev.type == pygame.QUIT:
pygame.quit()
sys.exit()
if ev.type == pygame.KEYDOWN:
if ev.key == pygame.K_ESCAPE:
pygame.quit()
sys.exit()
if ev.key == pygame.K_r:
g.deaths += 1
g.load_level()
if g.won and ev.key == pygame.K_SPACE and g.level < len(LEVELS) -
g.level += 1
g.deaths = 0
g.load_level()
if not g.won:
km = {
pygame.K_UP: (0, -1), pygame.K_w: (0, -1),
pygame.K_DOWN: (0, 1), pygame.K_s: (0, 1),
pygame.K_LEFT: (-1, 0), pygame.K_a: (-1, 0),
pygame.K_RIGHT: (1, 0), pygame.K_d: (1, 0),
}
if ev.key in km:
g.move_player(*km[ev.key])
if g.check_enemy_collision():
g.deaths += 1
g.load_level()
# 敌人移动
if not g.won and g.enemy_speed > 0 and tick % g.enemy_speed == 0:
for e in g.enemies:
g.move_enemy(e)
if g.check_enemy_collision():
g.deaths += 1
g.load_level()
g.draw()
Maze Runner
ctrl esc to focus or unfocus Claude
maze_game.py
Ask before edits