# 3.2.4 效能評估指標定義

為客觀、量化地評估不同交通控制策略的優劣，本研究建立了一套綜合性關鍵績效指標（KPIs）。為清楚定義，我們首先約定以下數學符號： - \( R \): 倉儲中所有機器人的集合。 - \( O\_{completed} \): 在模擬期間內所有已完成訂單的集合。 - \( P \): 所有機器人通過路口的事件（passing event）的集合。 - \( T\_{sim} \): 總模擬時長（ticks）。

### 1. 效率指標 (Efficiency Metrics)

**總能量消耗 (Total Energy Consumption)** 此指標衡量系統整體的能源使用效率，是本研究的核心優化目標之一。其計算方式為模擬期間所有機器人活動所消耗的能量總和。 \[ E\_{total} = \_{r R} E\_r \] 其中 \( E\_r \) 代表單一機器人 \( r \) 在整個模擬過程中的總能耗。

**平均機器人利用率 (Average Robot Utilization)** 此指標反映了機器人族群的整體繁忙程度。其定義為所有機器人處於非閒置狀態的時間佔總模擬時間的平均百分比。 \[ U\_{avg} = \_{r R} \] 其中 \( |R| \) 是機器人總數，\( t\_{active}(r) \) 是機器人 \( r \) 的總活動時間。

### 2. 流量指標 (Throughput Metrics)

**訂單完成總數 (Completed Orders Count)** 此指標直接衡量系統在固定時間內的總產出，反映了整體的運作效率。 \[ N\_{orders} = |O\_{completed}| \]

**平均訂單處理時間 (Average Order Processing Time)** 此指標衡量系統處理單一訂單的響應速度，其定義為所有已完成訂單從開始處理到結束的平均耗時。 \[ T\_{avg\_order} = *{o O*{completed}} (t\_{complete}(o) - t\_{start}(o)) \] 其中 \( t\_{complete}(o) \) 和 \( t\_{start}(o) \) 分別是訂單 \( o \) 的完成時間與開始時間。

**平均交叉口等待時間 (Average Intersection Waiting Time)** 此指標直接反映交通控制策略的協調效率。它計算的是每一次機器人通過路口事件中，等待時間的平均值。 \[ W\_{avg} = *{p P} t*{wait}(p) \] 其中 \( |P| \) 是機器人通過路口的總次數，\( t\_{wait}(p) \) 是單次通過事件 \( p \) 的等待時間。

### 3. 穩定性指標 (Stability Metrics)

**總停止-啟動次數 (Total Stop-and-Go)** 此指標反映了交通流的平順程度。頻繁的啟停不僅消耗額外能量，也代表交通流不穩定。 \[ S\_{total} = *{r R} N*{s-g}(r) \] 其中 \( N\_{s-g}(r) \) 是機器人 \( r \) 在路口因等待而啟停的總次數。