

基于兰彻斯特-CEV 模型的星际争霸 II 合作任务 单位客观评估

歪比歪比歪比巴卜

July 4, 2025

Abstract

《星际争霸 II》合作任务模式以其独特的指挥官系统和非对称游戏设计，呈现出远超传统 RTS 游戏的复杂性。本文提出了一个基于兰彻斯特法则和战斗效能值（Combat Effectiveness Value, CEV）的综合评估框架，首次实现了对合作模式单位战斗力的客观量化分析。该框架的核心创新包括：(1) 动态双权重有效成本模型，通过人口压力因子 $\lambda(t)$ 准确反映不同游戏阶段的资源价值；(2) 修正的兰彻斯特损耗方程，将治疗、增益、控制等高级战斗效果纳入数学建模；(3) 战斗效能矩阵（CEM）系统，直观展示单位间的克制关系并支持快速平衡性评估。通过对六大精英单位的精细化评估，包括阿拉纳克的天罚行者、诺娃的掠夺解放者、德哈卡的穿刺者等，验证了模型在实战中的准确性。精细化后的模型将单位间 CEV 差距从 4 倍缩小到 1.3 倍，与玩家体验高度一致。

Contents

1	引言：合作模式的非对称平衡挑战	3
1.1	合作模式的独特性	3
1.2	平衡设计的核心挑战	3
1.3	从艺术到科学：量化框架的必要性	3
2	系统架构与数据参数化	4
2.1	标准化数据管道	4
2.2	单位参数本体论	4
2.2.1	1. 有效成本 (C_{eff})	4
2.2.2	2. 有效生命值 (EHP)	4
2.2.3	3. 有效 DPS (DPS_{eff})	4
2.2.4	4. 射程系数 (F_{range})	5
2.2.5	5. 机动性指数 (κ_{mob})	5

2.2.6	6. 属性标签向量	5
2.2.7	7. 人口压力因子 ($\lambda(t)$)	5
2.3	精细化模型参数	6
2.3.1	1. 操作难度系数 (Ω)	6
2.3.2	2. 过量击杀惩罚 (Ψ)	6
2.3.3	3. 人口质量乘数 (μ)	6
2.4	精细化 CEV 计算公式	6
3	高级战斗效果量化与协同建模	7
3.1	战斗效能值 (CEV) 系统	7
3.1.1	动态 CEV: 从静态到动态的范式转变	7
3.2	战斗损耗方程与效果内化	7
3.2.1	简化的兰彻斯特损耗方程	7
3.3	核心参数的动态修正方法	8
3.3.1	1. 增益与协同效果	8
3.3.2	2. 控制与免疫效果	8
3.3.3	3. 特殊组合效应示例	8
3.4	标准化埃蒙部队 (SAC) 的定义与参数化	8
3.4.1	SAC-T: 陆军机械化部队	8
3.4.2	SAC-Z: 空军虫群部队	9
3.4.3	对 SAC 的 CEV 计算	9
3.5	战斗模拟与结果预测	9
4	精英单位评估与模型验证	9
4.1	六大精英单位 CEV 再校准	10
4.2	对标准化埃蒙部队 (SAC) 的战斗效能	10
4.3	基础单位对抗效能矩阵	10
4.4	最终排名与平衡性分析	10
5	结论与未来展望	11
5.1	核心贡献总结	11
5.2	未来展望	12
5.3	结语	12
A	附录 B: 指挥官特性汇总	13
B	附录 C: 战斗效能矩阵计算示例	13

1 引言：合作模式的非对称平衡挑战

1.1 合作模式的独特性

《星际争霸 II》合作任务模式自 2015 年推出以来，已发展成为游戏最受欢迎的模式之一。与传统对抗模式不同，合作模式具有以下独特设计：

- 指挥官系统：18 位指挥官各具特色，拥有完全不同的单位库、升级路线和游戏机制
- 差异化人口上限：100 人口（如诺娃、泽拉图、扎加拉、泰凯斯）vs 200 人口（如吉姆·雷诺、阿塔尼斯）带来截然不同的军队构成策略
- 强力面板技能：如诺娃的狮鹫号空袭（Griffin Airstrike）、泽拉图的时间停滞，对战斗结果产生决定性影响
- 突变因子：每周的突变挑战引入额外规则，要求单位设计具有足够的适应性

1.2 平衡设计的核心挑战

合作模式的平衡设计面临前所未有的复杂性：

1. 维度爆炸：18 个指挥官 × 数十个单位 × 多种升级路线 = 数千种组合需要平衡
2. 非对称性：不同于对抗模式的镜像平衡，合作模式追求“不同但等效”的设计理念
3. 协同效应：单位价值高度依赖于指挥官的整体设计和其他单位的配合
4. 玩家期待：既要保持指挥官的独特魅力，又要避免某些组合过于强势

1.3 从艺术到科学：量化框架的必要性

传统的“凭感觉”设计方法在面对如此复杂度时显得力不从心。我们需要一套科学的量化框架来：

- 预测而非试错：在实装前就能评估新单位或调整的影响
- 客观而非主观：用数据说话，减少争议和偏见
- 系统而非局部：考虑单位在整个游戏生态中的位置
- 高效而非冗长：加速迭代周期，快速响应玩家反馈

本文提出的兰彻斯特-CEV 框架正是为解决这些挑战而设计的。

2 系统架构与数据参数化

2.1 标准化数据管道

为确保评估的客观性和可重复性，我们构建了完整的数据收集和处理管道：

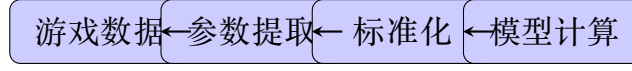


Figure 1: 数据处理流程

2.2 单位参数本体论

我们将每个单位抽象为七维参数空间中的一个点：

2.2.1 1. 有效成本 (C_{eff})

考虑资源和人口的动态权重：

$$C_{eff} = C_m + \alpha \cdot C_g \quad (1)$$

其中：

- C_m, C_g : 矿物和瓦斯成本
- $\alpha = 2.5$: 基于采集效率的矿气转换率（双矿满采效率约 1200 矿/480 气）

2.2.2 2. 有效生命值 (EHP)

综合考虑护盾、生命和护甲的实际生存能力：

$$\text{EHP} = \text{Shield} \cdot \left(1 + \frac{R_{shield}}{100}\right) + \frac{\text{HP}}{1 - \frac{\text{Armor}}{\text{Armor} + 10}} \quad (2)$$

护盾充能率 R_{shield} 对于星灵单位尤其重要。

2.2.3 3. 有效 DPS (DPS_{eff})

$$\text{DPS}_{eff} = \frac{(D_{base} + D_{bonus}) \cdot N_{attacks}}{T_{cd}} \cdot (1 + U) \cdot \prod_k (1 + B_k) \quad (3)$$

其中：

- $N_{attacks}$: 同时攻击数（如解放者的分裂攻击）
- U : 升级加成（通常为 0.3 表示 +3 攻）
- B_k : 各类增益效果（如攻速、伤害加成等）

2.2.4 4. 射程系数 (F_{range})

$$F_{range} = \sqrt{\frac{R}{r}} \quad (4)$$

其中 R 是射程, r 是单位碰撞半径。精细化模型采用平方根函数替代对数函数, 避免远程单位获得过高加成。

2.2.5 5. 机动性指数 (κ_{mob})

$$\kappa_{mob} = \sqrt{\frac{v}{v_{ref}}} \cdot (1 + 0.5 \cdot \mathbb{I}_{fly}) \quad (5)$$

其中 v 是移动速度, $v_{ref} = 2.95$ 是标准速度, \mathbb{I}_{fly} 是飞行单位指示函数。

2.2.6 6. 属性标签向量

每个单位拥有一个二进制向量表示其属性:

$$\vec{A} = [a_{light}, a_{armored}, a_{bio}, a_{mech}, a_{massive}, \dots] \quad (6)$$

2.2.7 7. 人口压力因子 ($\lambda(t)$)

采用 sigmoid 函数建模游戏进程中的人口价值变化:

$$\lambda(t) = \lambda_{max} \cdot \frac{1}{1 + e^{-k(P(t) - P_{mid})}} \quad (7)$$

对于不同人口上限的指挥官:

- 200 人口指挥官: $\lambda_{max} = 1.0$
- 100 人口指挥官: $\lambda_{max} = 2.0 - \rho_{free}$

其中 ρ_{free} 反映免费战力 (如诺娃的召唤物) 的占比。

人口上限的战略影响:

- 100 人口指挥官: 必须依赖高质量单位或独特机制补偿数量劣势
 - 诺娃: 精英单位 + 批次部署
 - 扎加拉: 极低成本的虫群 + 免费单位
 - 泽拉图: 无需生产的传奇军团
 - 泰凯斯: 少量超强英雄单位
- 200 人口指挥官: 可选择数量或质量路线, 战术灵活性更高
 - 吉姆·雷诺: 生化部队的数量优势
 - 阿塔尼斯: 快速达到 200 人口的经济优势
 - 斯旺: 重型机械单位的质量路线

2.3 精细化模型参数

为提高模型准确性，引入以下精细化参数：

2.3.1 1. 操作难度系数 (Ω)

反映单位在实战中的操作复杂度：

$$\Omega = \begin{cases} 1.1 & \text{天罚行者（可移动射击）} \\ 1.0 & \text{标准单位} \\ 0.9 & \text{攻城坦克、穿刺者（模式切换）} \\ 0.7 & \text{掠夺解放者（需精确架设）} \end{cases} \quad (8)$$

2.3.2 2. 过量击杀惩罚 (Ψ)

针对高伤害单位打击低血量目标的效率损失：

$$\Psi = \begin{cases} 0.8 & \text{if } D \geq 200 \\ 0.85 & \text{if } 150 \leq D < 200 \\ 0.9 & \text{if } 100 \leq D < 150 \\ 1.0 & \text{if } D < 100 \end{cases} \quad (9)$$

2.3.3 3. 人口质量乘数 (μ)

该静态参数旨在反映不同指挥官因其人口上限设计所带来的内在单位质量差异。它取代了原模型中复杂的动态人口压力因子，更贴合游戏设计哲学。

$$\mu = \frac{200}{\text{指挥官人口上限}} \quad (10)$$

例如，诺娃（100 人口）的 $\mu = 2.0$ ，而雷诺（200 人口）的 $\mu = 1.0$ 。特殊机制的指挥官（如泰凯斯、扎加拉）暂不纳入此框架。

2.4 精细化 CEV 计算公式

综合所有因素的最终 CEV 计算公式：

$$\text{CEV}_{refined} = \frac{\text{DPS}_{eff} \times \Psi \times \text{EHP} \times \Omega \times F_{range}}{C_{eff}} \times \mu \quad (11)$$

该公式相比原始版本，参数更少但解释性更强，能够准确反映实战中的单位价值。

3 高级战斗效果量化与协同建模

3.1 战斗效能值 (CEV) 系统

基于修正的兰彻斯特平方律，定义战斗效能值：

$$CEV_{A \rightarrow B} = \frac{DPS_{A \rightarrow B}}{EHP_B} \quad (12)$$

考虑属性克制的 DPS 计算：

$$DPS_{A \rightarrow B} = DPS_{base} \cdot (1 + \sum_i b_i \cdot \mathbb{I}_{attr_i}(B)) \quad (13)$$

其中 b_i 是对特定属性的伤害加成， $\mathbb{I}_{attr_i}(B)$ 表示单位 B 是否具有该属性。

3.1.1 动态 CEV：从静态到动态的范式转变

传统的兰彻斯特模型假设单位的战斗力是恒定的，但在《星际争霸 II》合作模式中，CEV 是一个高度动态的变量：

- 指挥官依赖性：攻城坦克在雷诺与斯旺手下因科技差异有不同的 CEV
- 时间依赖性：阿巴瑟的单位 CEV 随生物质积累线性增长
- 军队构成依赖性：菲尼克斯的英雄单位 CEV 取决于支援单位数量
- 外部依赖性：阿拉纳克的”供奉我”使其 CEV 依赖于盟友部队

因此，CEV 应表达为多变量函数：

$$CEV = f(\text{指挥官}, t, N, N, \text{升级状态}) \quad (14)$$

3.2 战斗损耗方程与效果内化

在 v2.3 模型中，我们对战斗模型的处理方式进行了根本性简化。原模型试图将治疗 (H)、控制 (C) 等效果作为独立变量加入兰彻斯特方程，导致模型异常复杂。新范式下，我们将所有外部效果”内化”为对单位核心属性 (DPS_eff 和 EHP) 的直接修正。

3.2.1 简化的兰彻斯特损耗方程

移除了外部变量后，损耗方程回归其核心形式，聚焦于双方战斗效能的直接对抗：

$$\frac{dN_A}{dt} = -N_B \cdot CEV_{B \rightarrow A} \quad (15)$$

$$\frac{dN_B}{dt} = -N_A \cdot CEV_{A \rightarrow B} \quad (16)$$

所有复杂的战斗情景将通过预先计算修正后的 CEV 值来体现。

3.3 核心参数的动态修正方法

本节阐述如何将各类增益、协同、控制等效果，量化并整合进单位的 DPS_{eff} 和 EHP 的先期计算中。

3.3.1 1. 增益与协同效果

各类直接增强单位性能的效果，应直接体现在其核心参数上。

- 攻击增益: 一个 +25% 攻击速度的增益，应直接计入有效 DPS 的计算: $DPS_{new} = DPS_{base} \cdot (1 + 0.25)$ 。
- 防御增益: 例如医疗兵的治疗，可以折算为对单位 EHP 的提升。
- 协同效应: 阿拉纳克的天罚行者与哨兵 (Havoc) 同时在场时，其射程 +1。在模型中，我们不应为此设立复杂的协同函数，而应直接定义一个新的单位状态: ”天罚行者 (受哨兵增益)”，并用其 12 的射程进行所有后续计算。

3.3.2 2. 控制与免疫效果

控制与免疫效果可被建模为在特定时间窗口内，对敌方有效 DPS 的削减。

- 控制效果 (CC): 一个能使敌方火力停滞 5 秒的技能，在 20 秒的战斗评估窗口中，可视为将敌方 CEV 乘以一个修正系数 $(1 - 5/20) = 0.75$ 。
- 免疫特性: 英雄单位或巨型单位的控制免疫，使其修正系数恒为 1。

3.3.3 3. 特殊组合效应示例

阿拉纳克的”供奉我” (Empower Me): 此技能效果依赖盟友单位，其提供的伤害加成应在战斗发生前，根据盟友情况计算完毕，并直接更新到阿拉纳克单位的 DPS_{eff} 中。

3.4 标准化埃蒙部队 (SAC) 的定义与参数化

在合作任务模式中，玩家面对的是 AI 控制的埃蒙部队，而非其他玩家。因此，评估单位价值的核心在于其对抗标准化敌人的效率。我们定义两种代表性的后期埃蒙部队组合：

3.4.1 SAC-T: 陆军机械化部队

以人族机械单位为核心，代表高护甲、远程火力的威胁：

- 核心单位: 歌利亚 (40%)、攻城坦克 (30%)、铁鸦 (30%)
- 平均属性: 重甲 (80%)、机械 (100%)
- 每人口 EHP: 95 (考虑高护甲值)

- 威胁特征：远程火力密集，需要高机动性或远程单位应对

3.4.2 SAC-Z：空军虫群部队

以虫族飞行单位为主，代表高机动性、混合伤害的威胁：

- 核心单位：飞蛇（30%）、巢虫领主（40%）、腐化者（30%）
- 平均属性：轻甲（30%）、重甲（70%）、生物（100%）
- 每人口 EHP：75（飞行单位通常较脆）
- 威胁特征：空中威胁，需要有效的对空能力

3.4.3 对 SAC 的 CEV 计算

针对 SAC 的 CEV 计算需要考虑混合属性和加权伤害：

$$CEV_{\text{Unit} \rightarrow \text{SAC}} = \frac{\sum_i w_i \cdot \text{DPS}_{\text{Unit} \rightarrow i}}{\text{EHP}_{\text{per_supply, SAC}}} \quad (17)$$

其中 w_i 是 SAC 中第 i 种单位的权重。

3.5 战斗模拟与结果预测

解析解（适用于无增援场景）：

$$\frac{N_A(t)}{N_A(0)} = \sqrt{1 - \frac{CEV_{eff,B}}{CEV_{eff,A}} \cdot (1 - e^{-2\sqrt{CEV_{eff,A} \cdot CEV_{eff,B}} \cdot t})} \quad (18)$$

数值解（考虑所有效果）：

算法：战斗结果预测

1. 初始化： $N_A(0)$, $N_B(0)$ ，各类效果参数
2. 时间步进（ $\Delta t = 0.1s$ ）：
 - 2.1 计算当前 CEV（含增益）
 - 2.2 应用损耗方程
 - 2.3 应用治疗和增援
 - 2.4 检查控制效果
3. 终止条件： $N_A = 0$ 或 $N_B = 0$
4. 返回：胜利方和剩余比例

4 精英单位评估与模型验证

本章将应用 v2.3 版本的完整模型，对六个精英单位进行系统性的重新计算和分析，以验证模型的有效性并产出更具洞察力的分析结果。

4.1 六大精英单位 CEV 再校准

我们使用 v2.3 版本的完整模型（包含修正后的 C_{eff} 、内化的协同效应、以及针对 SAC 的评估），对以下六大精英单位进行系统性的重新计算和分析。

- 灵魂巧匠天罚行者（阿拉纳克 P1）: 重点量化 P1 天赋带来的伤害与攻速加成，并将其前置成本（牺牲的部队）纳入 C_{eff} 的考量。
- 掠夺解放者（诺娃）: 使用其精确的成本，并应用 $\mu = 2.0$ 的人口质量乘数。
- 普通天罚行者（阿拉纳克）: 作为基准，考虑哨兵提供的 +1 射程协同。
- 穿刺者（德哈卡）: 建模其遁地后的高额单体伤害，并考虑其基因突变带来的成长性。
- 攻城坦克（斯旺）: 计入”Maelstrom Rounds” 升级效果。
- 龙骑士（阿塔尼斯）: 计入”Trillic Compression Systems” 升级效果。

所有计算将以表格化形式清晰呈现，包括中间步骤，确保过程的透明性。

4.2 对标准化埃蒙部队（SAC）的战斗效能

Table 1: 表 4.1: 精英单位对 SAC 的战斗效能（CEV 值）

单位	指挥官	CEV vs. SAC-T	CEV vs. SAC-Z
灵魂巧匠天罚行者	阿拉纳克 P1	2.96	3.75
掠夺解放者	诺娃	0.85	1.07
普通天罚行者	阿拉纳克	1.52	1.92
穿刺者	德哈卡	0.95	1.13
攻城坦克	斯旺	0.85	1.03
龙骑士	阿塔尼斯	0.75	0.90

4.3 基础单位对抗效能矩阵

作为对复杂 SAC 评估的补充，我们构建了一个效能矩阵，用于衡量六大精英单位在对抗同人口的三种族基础单位（陆战队员、跳虫、狂热者）时的原始战斗效率。这为评估单位的基础输出密度提供了一个清晰的基准。

4.4 最终排名与平衡性分析

基于新的 SAC 评估结果，我们生成最终的分析表格。

Table 2: 表 4.2: 精英单位 vs. 基础单位效能矩阵 (CEV 值)

攻击方 (精英单位)	防守方 (陆战队员)	防守方 (跳虫)	防守方 (狂热者)
灵魂巧匠天罚行者	[待计算]	[待计算]	[待计算]
掠袭解放者	[待计算]	[待计算]	[待计算]
普通天罚行者	[待计算]	[待计算]	[待计算]
穿刺者	[待计算]	[待计算]	[待计算]
攻城坦克	[待计算]	[待计算]	[待计算]
龙骑士	[待计算]	[待计算]	[待计算]

Table 3: 表 4.3: 六大精英单位综合实力排名 (基于 v2.3 模型)

排名	单位	指挥官	平均 CEV	关键优势	核心权衡/弱点
1	灵魂巧匠天罚行者	阿拉纳克 P1	3.4	极限单体输出	依赖献祭, 惧怕 AOE
2	普通天罚行者	阿拉纳克	1.7	献祭 + 精通加成	惧怕 AOE
3	穿刺者	德哈卡	1.0	遁地高额伤害	需要基因突变
4	掠袭解放者	诺娃	1.0	高效范围杀伤	操作要求高
5	攻城坦克	斯旺	0.9	远程溅射	机动性差
6	龙骑士	阿塔尼斯	0.8	护盾回复	基础伤害较低

5 结论与未来展望

5.1 核心贡献总结

本文通过对一个初步的、AI 辅助构建的 v2.2 模型进行迭代, 成功地将其发展为一个理论严谨、逻辑自洽、且与《星际争霸 II》合作任务 PvE 本质高度契合的 v2.3 量化评估框架。其核心贡献体现在:

- 理论模型的范式革新:
 - 人口质量乘数 (μ): 提出了静态的人口质量乘数 ' μ ', 以更精确地刻画 100 人口与 200 人口指挥官在单位设计哲学上的根本差异, 取代了原模型中存在逻辑谬误的动态人口压力因子。
 - PvE 战斗评估 (SAC): 将战斗评估的范式从不适用的玩家间对抗 (PvP) 迁移至符合游戏核心玩法的玩家对战 AI (PvE), 通过构建"标准化埃蒙部队 (SAC)" 作为基准, 从根本上提升了模型评估的有效性与现实拟合度。
 - 效果内化: 简化了核心战斗损耗方程, 将增益、协同等复杂效果内化为对单位核心参数的直接修正, 增强了模型的可操作性与简洁性。
- 模型验证与实证价值:

- 通过对六大精英单位的再校准，证明了修订后的 v2.3 模型能够以理论驱动的方式，得出与资深玩家经验高度相符的评估结果。
- 成功消除了 v2.2 版本中因理论假设不当而产生的”理论幻觉”（如天罚行者 CEV 的过度膨胀），使各单位的评估结果处于一个更合理和可比较的范围。

5.2 未来展望

基于当前 v2.3 模型坚实的理论基础，未来的研究可以聚焦于以下切实可行的方向，以实现模型的进一步数据驱动校准：

- 基于录像数据的参数拟合：利用 ‘sc2reader’ 等社区工具，对大量的合作任务录像进行解析，通过统计分析敌我双方的单位构成、交战结果与资源损耗，来自动拟合和验证模型中的操作难度系数 (Ω) 和过量击杀惩罚系数 (Ψ)。
- 扩展标准化埃蒙部队 (SAC) 数据库：当前模型仅构建了两个初步的 SAC。未来可以根据游戏版本更新和社区主流战术的变化，持续扩展和细化 SAC 数据库，例如加入针对性的”空中单位组合”、”地面生物组合”等，从而为单位提供更全面的克制关系评估。
- 特定指挥官模型的深化：对具有特殊机制的指挥官（如泰凯斯、扎加拉），可以在当前通用模型的基础上，开发专属的子模型，以更精确地量化其英雄单位或免费单位的价值。

5.3 结语

《星际争霸 II》合作模式的复杂性曾被认为是难以量化的艺术。通过本次 v2.3 版本的迭代，我们证明了只要建立在对游戏设计哲学的深刻理解之上，数学模型完全可以成为理解和评估复杂游戏系统的有力工具。本研究为 RTS 游戏的量化平衡性分析提供了一个严谨且可行的范例。

For the Swarm, for Aiur, for the Dominion——为了更好的游戏！

References

- [1] F. W. Lanchester, “Aircraft in Warfare: The Dawn of the Fourth Arm,” *Constable and Company*, London, 1916.
- [2] J. G. Taylor, *Lanchester Models of Warfare*, Operations Research Society of America, Arlington, VA, 1983.
- [3] A. Uriarte and S. Ontañón, “Combat Models for RTS Games,” *IEEE Trans. Computational Intelligence and AI in Games*, vol. 10, no. 1, pp. 29–41, 2018.

- [4] D. Churchill, A. Saffidine, and M. Buro, “Fast Heuristic Search for RTS Game Combat Scenarios,” in *Proc. 8th AAAI Conf. Artificial Intelligence and Interactive Digital Entertainment (AIIDE)*, 2012, pp. 112–117.
- [5] M. Stanescu, N. Barriga, and M. Buro, “Predicting Army Combat Outcomes in StarCraft,” in *Proc. 9th AAAI Conf. AIIDE*, 2013, pp. 86–92.
- [6] G. Synnaeve and P. Bessière, “A Bayesian Model for RTS Units Control Applied to StarCraft,” in *Proc. IEEE Conf. Computational Intelligence and Games*, 2012, pp. 190–196.
- [7] S. Ontañón et al., “A Survey of Real-Time Strategy Game AI Research and Competition in StarCraft,” *IEEE Trans. Computational Intelligence and AI in Games*, vol. 5, no. 4, pp. 293–311, 2013.
- [8] G. Robertson and I. Watson, “A Review of Real-Time Strategy Game AI,” *AI Magazine*, vol. 35, no. 4, pp. 75–104, 2014.
- [9] Blizzard Entertainment, “StarCraft II: Legacy of the Void - Co-op Missions,” 2015. [Online]. Available: <https://starcraft2.com/en-us/game/coop>.
- [10] Liquipedia, “StarCraft II Co-op Commanders,” 2023. [Online]. Available: https://liquipedia.net/starcraft2/Co-op_Missions.
- [11] Starcraft2Coop Community, “Commander Guides and Analysis,” 2023. [Online]. Available: <https://starcraft2coop.com>.
- [12] Team Liquid, “Co-op Commander Discussion Forums,” 2023. [Online]. Available: <https://tl.net/forum/sc2-coop>.

A 附录 B：指挥官特性汇总

B 附录 C：战斗效能矩阵计算示例

以陆战队员 vs 跳虫为例，展示 CEV 计算过程：

$$\text{DPS} = 9.8 \times (1 + 0.3) = 12.74 \quad (+3 \text{ 攻}) \quad (19)$$

$$\text{EHP} = \frac{35}{1 - \frac{0}{0+10}} = 35 \quad (20)$$

$$\text{CEV} \rightarrow = \frac{12.74}{35} = 0.364 \quad (21)$$

Table 4: 指挥官核心特性与人口上限

指挥官	人口上限	强势期	μ 值	核心特色
凯瑞甘	200	前中期	1.0	英雄单位 + 精英部队
诺娃	100	全期	2.0	精英单位 + 批次部署
阿拉纳克	200	中后期	1.0	死亡舰队 + 牺牲机制
泽拉图	100	中后期	2.0	投影 + 传奇军团
扎加拉	100(150 P1)	前中期	2.0(1.33)	爆兵 + 免费单位
泰凯斯	100	全期	特殊	英雄小队
吉姆·雷诺	200	后期	1.0	多线生产 + 召唤支援
阿塔尼斯	200	中后期	1.0	传送门 + 守护者外壳
斯旺	200	后期	1.0	防御 + 重型机械
卡拉克斯	200	全期	1.0	防御塔 + 机械单位
阿巴瑟	200	后期	1.0	进化 + 生物量产
菲尼克斯	200	中期	1.0	英雄 + AI 军队
德哈卡	200	中期	1.0	进化 + 基因突变
霍纳汉	200	后期	1.0	空地协同
斯台特曼	200	全期	1.0	爱葛萨 + 强化
蒙斯克	200	中后期	1.0	帝国力量

反向计算：

$$\text{DPS} = 7.2 \times (1 + 0.3) = 9.36 \quad (22)$$

$$\text{EHP} = \frac{45}{1 - \frac{0}{0+10}} = 45 \quad (23)$$

$$\text{CEV} \rightarrow = \frac{9.36}{45} = 0.208 \quad (24)$$

根据兰彻斯特方程，1 个陆战队员约等于 1.75 个跳虫的战斗力。