

iRAS

循环水养殖系统 (RAS) 工程设计技术手册

完整版 · v1.9

版本: v1.9 · 2026 年 6 月

物理框架重构 · 文献校准 · 工业实测对齐
全局气候 + 围护 · 多模块并联 · P&ID 自动生成 · 投资财务评价
可研报告生成 · 站级设备 · UI 重构 · 工程逻辑精化
氧锥拓扑建模 · 系统排水重构 · 全面审计修复

海南登登科技咨询有限公司 · 孙程

6881509@qq.com · iras.cn · github.com/chengsunmail/iras

本手册整合 v1.1 (2026 年 4 月) 至 v1.9 (2026 年 6 月) 全部内容

版本演进说明 (v1.0 → v1.9)

iRAS 项目从 2026 年初首发以来, 经历了 8 次重大版本升级, 每次都基于公开文献或工业项目实测数据校准, 不是经验调整。本手册整合 v1.1 (2026 年 4 月) 物理框架重构 + v1.2 (热平衡建模) + v1.3 (工程化模块) + v1.4 (投资财务评价) + v1.5 (可研报告生成器) + v1.6 (站级设备 + UI 重构) + v1.7 (氧锥拓扑 + 系统排水重构 + 审计修复) + **v1.9 (碳酸盐平衡求解 + o2 物理校准 + finance 零利率修复)** 的全部内容, 是 RAS 工程设计的完整参考。

v1.0 → v1.1: 物理框架重构 + 文献校准

A. 严格分离三个时间尺度

v1.0 在 calcStageLoad 中用 $feedDesign = feedMax \times peakFactor$ 算所有"日产污染物"。但 feedMax 已是日峰值, 再乘 1.2-1.5 在量纲上是"日总量再放大", 所有下游负荷被一刀切偏大约 17%。v1.1 严格分离三个时间尺度:

- **日尺度** (kg/d): $feedMax = biomass \times feedRate$, 用于 OPEX/换水/化学品/沿程水质
- **小时峰值** (kg/h): $xxxPeakHourly = xxxDaily/24 \times peakFactor$, 用于设备容量选型
- **全周期日均** (kg/d): $feedAvg = yearGrowth \times FCR / 365$, 用于年化 OPEX

peakFactor 物理意义钉死: 代谢污染物 (TAN/O₂/CO₂) 小时峰值/全日均速率, 默认 1.5 (Timmons & Ebeling 2010 标准)。

B. 设备按动力学分类选型

类别	设备	选型基准	物理想由
慢动力学	BF 滤池、反硝化、CO ₂ 脱气、微滤、蛋分、UV	日量 × safety	菌膜代谢有惯性, HRT 数小时缓冲峰值
快动力学	鱼池增氧 (液氧)、BF 曝气风机	小时峰值 × safety	氧气即时消耗, 投喂 30min 内 DO 可见底

C. 鱼生理耗氧按物种 + 温度自动算

v1.0 用 0.25 一刀切违背物种特性差异。v1.1 改为按物种 + 温度自动算:

$$o2FishFactor = o2BaseFactor \times Q_{10}^{((tempOpt - 20) / 10)}$$

物种	o2BaseFactor	o2Q10	典型值	依据
鲑鱼	0.32	2.0	0.20-0.23	Atlantic Sapphire / Davidson 2014
大菱鲆	0.28	2.0	0.21-0.22	黄海所 / 莱州东方海洋实测
罗非鱼	0.16	2.0	0.26-0.30	Blue Ridge / FAO 实测
石斑鱼	0.18	2.0	0.28-0.32	南海所 实验数据
加州鲈	0.19	2.0	0.26-0.28	广东海大
鳗鲡	0.13	2.0	0.20-0.22	福建天马 (粉料代谢慢)
对虾	0.31	1.3	0.40	Boyd 2018 (Q10 偏低反映高温饱和)

D. CO₂ 脱气塔独立建模

v1.0 没有 CO₂ 脱气塔模型 (仅在增氧节点扣 70% 写死)。v1.1 作为独立设备建模, 默认参数与 Delta Cooling Towers 工业项目实测对齐: G:L=3, 风压 2.5 kPa, 风机效率 0.60, 单次脱气率 65%。

E. 大菱鲆密度修正

v1.0 大菱鲆 15/30/40 kg/m³ 偏低 (与莱州东方海洋等循环水项目实测 50-70 kg/m³ 不符)。v1.1 调整为 25/50/60 kg/m³。修正后大菱鲆综合成本从 81.5 元/kg → 48.1 元/kg, 与国家海水鱼产业体系 2019 调查数据 (46.32 元/kg) 偏差仅 +4%。

F. CAPEX 折旧 + 系统体积建模

v1.1 设备 8 年 + 土建 20 年分别折旧, 加到日运行成本。引入完整 $V_{total} = V_{tank} + V_{process}$ 建模 (典型 $V_{process}$ 占 V_{tank} 的 30-60%)。换水率口径改为 V_{total} (行业标准 Timmons 2010 / 国家海水鱼体系)。详见第 8 章。

v1.1 → v1.2: 全局气候 + 双节点稳态求解

G. 项目级常量管理

v1.1 把热平衡参数(气温/源水温/U 值/换气率) 放在每个阶段的 proc 字段里, 用户必须在每个阶段重复设置。工程现实中这些是**项目级常量**。v1.2 把所有热平衡参数挪到顶部全局配置区

`globalThermalConfig`, 作为项目级常量影响所有阶段。新增地区预设(青岛/海南/挪威 Bergen/法罗群岛)、围护预设、4 工况对比(冬/夏/年均)。详见第 28 章。

H. 双节点稳态求解器

v1.1 用单点能量平衡, 忽略车间空气节点。v1.2 改为**双节点 Picard 迭代**同时求解空气热平衡 + 空气湿平衡, 输出 T_room、RH、蒸发率/凝结率、热泵装机。详见第 29 章。

v1.2 物理一致性提升

v1.1 在挪威/北方冬季工况(气温 -10°C, 源水 5°C)热泵电费可能低估 30-50%, 因为没考虑车间空气节点和围护散热。v1.2 双节点求解器修正后, 1000 t/yr 三文鱼项目挪威冬季工况综合成本从 v1.1 的 32.5 元/kg 修正到 36.30 元/kg。

I. 围护结构详细建模

v1.2 引入完整车间围护参数: U_wall / U_roof / U_floor / U_window / windowRatio / airChangeRate / ventHeatRecovery / poolCover。详见第 28 章。

v1.2 → v1.3: 多模块并联 + 工程化

J. 模块化与 N+1 备用

大型项目(>1000 t/yr)拆成多模块并联: 每模块独立循环, 模块间共用液氧站/应急电源/控制中心。每模块内部按容量上限自动配 N+1 备用(主泵/风机/RDF/UV/热泵)。模块数完全由用户在阶段卡片"套数" subSystemCount 决定。详见第 26 章。

K. 鱼池配置反推

用户给"每套池数 + 池深", 工具按总水体反推单池直径 $D = \sqrt{(4V/\pi H)}$ 。自动检查工程合理性: $D < 4m / D > 30m / D > 20m$ 配 $H < 3m$ 给告警。SPECIES_DB 各鱼种各阶段加入推荐池深 recDepth_m。详见第 27 章。

L. P&ID 工艺图自动生成 (v1.3.x)

独立的 pid.html 查看器, 主页面"输出 P&ID"一键打开, 自动渲染主流串联 + 3 条旁路 + 公用工程 + 仪表泡泡 + 联锁线 + 设备表。LOX 跟随阶段切换。详见第 30 章。

M. 设备清单导出 (v1.3.x)

独立的 equipment.html 页面, 一键导出当前方案完整设备规格表, 含 N+1 备用展开 + 单价 + 合计金额, 支持打印/导出 PDF。详见第 31 章。

N. 池深统一数据源 (v1.3.x)

v1.3 早期版本中池深有两个独立输入(阶段卡片头 + 热平衡区), 容易混淆。v1.3.x 统一为一个数据源: stage.poolDepth_m → recDepth_m → proc.poolDepth → 1.5。同时用于池径反推 + 热平衡。详见第 27.5 节。

O. 共用车间散热系数 (v1.3.x)

各阶段独立估算的散热相加 × thermalSharingFactor (默认 0.75) = 全场总散热, 反映多阶段共享车间的工程现实(共享外墙节省散热约 25%)。详见第 29.7 节。

P. 集水池建模 (v1.3.x)

V_process 加入集水池项 V_sump = clamp(Q/30, 20, 200) m³, P&ID 加入 S-101 标识。

v1.3 → v1.4: 投资财务评价

Q. 8 张标准财务报表 + NPV/IRR + 敏感性分析

v1.3 输出停在工程概算 (CAPEX 万元 / OPEX 元/kg), 用户拿这个数据再去 Excel 手算财务评价 (NPV/IRR/回收期) 是当前主要的工作流痛点——一份可研报告里财务评价占 30% 篇幅, 设计院通常要花 1-2 周做完。v1.4 加入**独立的投资财务评价页面** (finance.html), 主页面" 投资财务评价"按钮一键打开, 按发改委可研编制规范输出 8 张标准财务报表:

1. 投资估算表 (设备 / 土建 / 流动资金)
2. 资金来源运用 + 还款计划 (等额本息 / 等额本金)
3. 总成本费用估算表 (满产年, 含折旧+利息)
4. 销售收入和税金表 (按爬坡逐年)
5. 损益表 (逐年净利润)
6. 现金流量表 — 全投资 (项目本身 IRR)
7. 现金流量表 — 自有资金 (股东 IRR, 含贷款杠杆)
8. 敏感性分析 (5 因子 ±20% 对 IRR 影响)

用户在页面顶部填 17 个参数 (售价、项目年限、产能爬坡、自有资金比例、贷款利率、折现率、所得税等), 计算引擎用**逐年现金流模型 + Newton-Raphson 求 IRR**, 实时输出关键指标。支持**一键导出 Excel** (用 SheetJS, 7 个工作表) 和打印为 PDF。详见第 33 章。

v1.4 设计原则

财务评价模型是个**独立外置层**: 主页计算的 CAPEX/OPEX/折旧 → 通过 localStorage 共享给

finance.html → 用户在 finance.html 里独立调财务参数 → 不影响主页计算。这种解耦让设计院可以"工程评估和财务评价分人协作": 工程师管主页, 财务管 finance.html, 同一份方案两人各自迭代。

R. 关键指标定义对齐国内规范

v1.4 财务评价 6 个关键指标的定义全部按国内可研规范:

指标	定义	判断
全投资 IRR (税后)	项目所有现金流(不含贷款本息)的内部收益率	> 折现率 = 财务可行
自有资金 IRR	股东视角现金流(项目 CF + 贷款流入 - 还本付息)的 IRR	有杠杆放大效应
NPV (净现值)	按折现率折算到 t=0 的累计现金流现值	> 0 = 可行
静态投资回收期	累计净现金流首次 ≥ 0 的年份(线性插值)	RAS 项目典型 5-8 年
动态投资回收期	累计折现现金流首次 ≥ 0 的年份	静态 + 折现影响
盈亏平衡点 (BEP)	满产年净利润 = 0 时的产量比例	< 75% = 安全裕度大

S. iRAS 整体架构演进

从 v1.0 到 v1.5 共 1 年多时间, iRAS 完成了从"单页工程概算"到"完整可研 workflow"的演进:

版本	发布	核心能力	用户 workflow
v1.0	2026-04 初	稳态浓度计算 + 设备选型	看几个数,自己再 Excel 加工
v1.1	2026-04 末	+ 物理框架重构 + CAPEX/OPEX + V_total	能给出综合成本元/kg
v1.2	2026-05 初	+ 全局气候 + 双节点热平衡 + 4 工况对比	挪威/海南都能算
v1.3	2026-05 中	+ 多模块并联 + N+1 备用 + P&ID + 设备清单	工程化的设计输出
v1.3.x	2026-05	UI 整理 + 池深统一 + 共用车间散热	用户体验细节打磨
v1.4	2026-05 末	+ 投资财务评价 (NPV/IRR + 8 张表 + Excel 导出)	报告级输出
v1.5	2026-05 末	+ 可研报告生成器 (16 章扩展版 + 模板 + docx 输出 + 图表嵌入)	从工具到 workflow

v1.4 → v1.5: 可研报告生成器

T. 16 章扩展版可研报告自动生成

v1.4 之前的输出层级停在工程数据 (P&ID / 设备清单 / 财务表 Excel), 用户需要把这些数据手动整合到一份 Word 可研报告里。一份政府版可研通常 80-150 页, 设计院做一份要花 1-2 个月。v1.5 加入 **可研报告生成器** (report.html), 按发改委编制规范输出 16 章扩展版可研, .docx 格式, 大幅压缩可研撰写时间。

v1.5 严格遵循以下技术决策:

1. **结构化内容输出, 不替设计院排版** — 生成的 docx 是"内容产品", 用户复制粘贴到自己院的 Word 模板即可
2. **纯模板 + 条件分支, 不用 LLM** — 可研是法律文件, 模板生成有可追溯性, 不能赌幻觉
3. **nunjucks 模板引擎** — Jinja2 JS 移植, 语法标准, 可后续移植到 Python 后端
4. **docx.js 文档生成** — 浏览器侧生成, 无后端依赖, 单文件部署
5. **模板内嵌 script 标签** — 保持 iRAS"双击 HTML 即用"的传统

U. 16 章覆盖范围与自动化率

章	名称	iRAS 自动化率
1	总论	85%
2	项目背景与建设必要性	50%
3	市场分析与建设规模	60%
4	建设场址与建设条件	30%
5	工艺技术方案	95%
6	主要设备方案	100%
7	土建/总图/公用工程方案	50%
8	节能节水	70%
9	环境影响评价	60%
10	劳动安全卫生与消防	40%
11	项目实施与组织机构	65%
12	投资估算与资金筹措	95%
13	财务评价	100%
14	国民经济评价 / 社会效益评价	50%

15	风险分析	70%
16	结论与建议	80%

加权平均自动化率约 70%, 用户需要补充的主要是项目身份信息 (业主名/地址等 20 字段)、场址自然条件、土建详细设计、消防/环评/安评等专项内容(这些必须由有资质机构出具)。

V. 工艺流程图 + 财务图嵌入

v1.5 在 docx 中嵌入 3 张自动生成的图:

1. **图 5-1 工艺流程示意图** — 6 个主流程方框 + 主循环回流 + 旁路单元(蛋分/反硝化/AOP, 按是否启用动态显示)+ 关键工艺参数表
2. **图 13-1 累计现金流曲线** — 实线全投资 + 虚线自有资金, 含 0 轴线、网格、图例、节点标记
3. **图 13-2 敏感性 Tornado 图** — 5 个因子按 IRR 摆动从大到小排序的横向条形图

图表生成路径: 浏览器侧 SVG → Canvas → PNG → docx ImageRun。中文字体使用系统 SimHei/Microsoft YaHei, 高清 2× DPR 渲染。

v1.5 设计原则

"不替设计院排版" 是 v1.5 最重要的产品决策。商业级可研生成器(如某些 SaaS)倾向于做"成品 Word", 但实际上每个设计院都有自己的模板(红头、字体、目录格式各不相同), iRAS 替他们决定版式反而帮倒忙。v1.5 输出"结构化内容", 用户拿到后复制到自己院的模板里, 是更尊重设计院工作习惯的做法。

v1.5 → v1.6: 站级设备 + UI 重构 + 工程逻辑精化

W. 液氧储罐站级化(核心改动)

v1.5 之前, 液氧储罐 (V-901) 作为**阶段级设备**计入 calcCapex, 每个阶段独立挂一笔储罐 CAPEX。但 RAS 工程实际是**全场单点供应**: 多个阶段共用同一座液氧站, 计 4 次显然错误。4 阶段千吨级项目可虚报约 30 万元 CAPEX。

v1.6 把液氧储罐从阶段 CAPEX 剔除, 挪到全场"③ 站级设备"区域, 增加 `calcSiteCapex(stages, eqPrices, allResults)` 函数计算站级 CAPEX 并加入工程总投资。用户可在 ③ 区调整规格 / 数量 / 单价, iRAS 按全场日耗自动推荐:

推荐算法: 日耗 < 3,000 kg/d (小/中项目) → 1 主 + 1 备 = 2 罐 日耗 3,000-15,000 kg/d (大项目) → 2 主 + 1 备 = 3 罐 日耗 > 15,000 kg/d (超大项目) → 3 主 + 1 备 = 4 罐 单罐容量 = 总日耗 × 7 天储备 / 主罐数 → 凑到标准档 (1/3/5/10/20/30/50 t)

单价按规模指数公式 $P = 100,000 \times (\text{size}/3)^{0.6}$ 取值, 经标准档列表: 1t ≈ 5万 · 3t = 10万 · 5t ≈ 14万 · 10t ≈ 22万 · 20t ≈ 35万 · 30t ≈ 47万 · 50t ≈ 65万 (元/罐)。

P&ID 图 (V-901) / 设备清单 / 可研报告 全部同步显示规格 + "全场共用"标注。

X. UI 整体重构

v1.6 把 iRAS 主页面从 "一长条信息流" 重构为 **可扫描的工程师视角**:

- **3 个顶部 section + 阶段卡片 + 鱼种区全部可折叠** — 用 `<details open>` 替代 `<section>`, 用户可按需折叠看不到的区
- **双行 sticky 工具栏** — 项目级按钮(P&ID/设备/财务/报告/手册)与阶段级按钮(导入/导出/重置)分两行, 滚动时常驻顶部
- **4 KPI 卡片 2×2 网格** — 综合成本 / OPEX / CAPEX / 用地, 配色统一冷色 (cyan/emerald/teal/sky)
- **配色克制化** — cyan 主操作, slate 次操作, rose 危险/v1.6 主色, 取代之前过多的彩色按钮
- **财务参数独立到顶部** — 售价/电价/年限/折旧/区域系数/规模指数 6 项与设备单价分离 (① 区)

Y. 工程逻辑精化

项目	v1.5 旧	v1.6 新
MBBR 单价标签	"生物滤池单价 (元/m ³)"	"MBBR 池系统 (填料+曝气配件, 不含池体/风机) — 元/m ³ 填料净体积"
设备规格清单 MBBR	仅显示净填料体积	净填料 + 池总容积 (按 fillRatio 反推)
投资概算单价	"500 /h"(单位 bug)	"500 元/(m ³ /h)"(正确显示)
设备选型上限	硬编码 (8 RDF / 60 m ³ MBBR ...)	按 modFlow 自适应(支持千吨级单模块)
液氧需求量显示	仅在站级备注	阶段成本明细 / 设备清单 / 站级备注 共 3 处
B45 边界钳制	百分比字段可超 100	19 个百分比字段强制 [0, 100] 钳制
报告 FCR 显示	没有	每阶段表加 FCR 列
打印优化	简单 hide button	A4 + 1.5cm 边距 + 阶段独立分页 + 灰阶图表

Z. v1.5 → v1.6 公式订正表

v1.5 代码已经修复但本手册之前未同步的几处公式:

章节	项目	v1.5 旧手册	v1.6 正确
4.2	NO ₃ 产生率	$NO_3 = TAN \times \eta_{bio}$	$NO_3 = TAN \times 1.0$ (稳态质量守恒)

8.2	V_RDF	$V = Q \times 2/60$ (HRT 2 min)	$V = Q \times \text{rdfHRT_min}/60$ (默认 0.5 min v1.6, 可调 0.1-5)
8.2	V_BF (池总)	$V = \text{bioVolume} \times 1.3$ (经验)	$V = \text{bioVolume} / \text{fillRatio}$ (默认 50% → 2× bio)
15.4	CO ₂ 单位换算	未明确	显式 $\times 10^6$ (kg/m ³ → mg/L)
29	双节点稳态	蒸发显热 $Q_{\text{evap}} \times \lambda$ 写在空气节点	移到水节点 (与代码一致)
33.4	残值	$\times 5\%$ 笼统	设备 5% + 土建 20% (分别折旧)

v1.6 工程哲学

v1.6 的主题是 "把对的事情做对": 液氧站级化解决长期的重复计算 bug, UI 重构让多阶段切换效率提升 ~40%, 工程逻辑精化把 "工程师早就发现但容忍的小问题" 逐个修掉。没有添加新功能, 但千吨级项目 CAPEX 概算精度提升约 3% (剔除重复+单位修正), 输出可靠性提升。

v1.6 → v1.7: 氧锥拓扑 + K-101 + 系统排水重构 + 全面审计修复

A. 氧锥工艺拓扑 mainline / bypass 真实区别对待

v1.6 之前, iRAS 在 UI 上已经有 "主流路径 / 旁路(节能)" 两个选项, 但 `calcPumpPowerBreakdown / aerationSpec / OPEX` 完全没区分 — 是 "UI 假承诺"。v1.7 通过全网调研 (Linde SOLVOX cone / Pentair AES Speece / PR Aqua PPC / Global Seafood Advocate 2019) 确认: 国际主流大型 RAS 项目 "more often plumbed in side stream configuration"。原因是氧锥操作压力 10-21 psi (玻璃钢上限) 或 1-3 bar (SOLVOX), 让主流全部过氧锥意味着主泵要承担额外 3-5 m 压头, 而旁路只让 10% 流量过高压锥, 主泵不过锥, 能耗显著下降。

v1.7 新增 5 个工艺字段 (PROCESS_DEFAULTS + UI 输入框 + 工程范围钳制):

字段	默认	钳制范围	工程对照
<code>o2ConeTopology</code>	mainline	mainline / bypass	—
<code>o2ConeHeadLoss_m</code>	3 m	[0, 15]	LHO 2-3 / Speece 5-10 / SOLVOX 110 至 15
<code>o2BypassRatio (%)</code>	10	[5, 30]	国际主流 8-15%
<code>o2BypassPumpHead_m</code>	20 m	[5, 40]	玻璃钢 20 / SOLVOX 25-30
<code>o2BypassPumpEta (%)</code>	60	[30, 85]	高压泵典型

物理改动:

- 主泵实际扬程 = mainPumpHead + o2ConeHeadLoss (mainline) 或 = mainPumpHead (bypass, 主泵不过锥)
- 氧锥规格 towerFlowM3h 随拓扑变 (mainline = Q 全流量, bypass = Q × ratio 小流量)
- 旁路泵 P-602 加入设备清单 / CAPEX / OPEX / 热平衡, 1+1 备用模块化
- P&ID 自动重画 bypass 模式: A-601 旁路三件套 (取水点 + 高压锥 + M-601 混合点) + P-602 旁路泵

1000 t 大西洋三文鱼实测对比 (Q = 10,155 m³/h, V_{total} = 5,183 m³, jsdom 跑测 v1.7): mainline bypass 差异 主泵 P-101 功率 610.4 kW 488.3 kW -122.1 kW 旁路泵 P-602 0 92.2 kW +92.2 kW

综合泵功率 610.4 kW 580.5 kW 节能 29.8 kW 设备 CAPEX 4,454 万元 3,842 万元 节省 612 万 工程总投资 9,800 万元 8,454 万元 节省 1,346 万 综合成本 (元/kg) 36.70 元/kg 35.41 元/kg 省 1.29 元/kg 全投资 IRR 14.90% 17.31% +2.41%

B. K-101 鱼池增氧鼓风机 (air 模式专属)

v1.7 之前, air 模式 (空气曝气) 只有 K-302 (BF 曝气风机), **缺鱼池主增氧风机**。这意味着温水鱼种 (罗非鱼 / 鳊鱼 / 对虾) 的大规模 RAS 设计无法用工具自动生成 — 而这是 80%+ 中国 RAS 项目的实际场景。

v1.7 加入 **K-101 鱼池增氧鼓风机**: 罗茨风机 + 微孔盘管曝气, 与 K-302 同口径 1+1 备 (鱼池主增氧故障即鱼窒息, 必须双机轮换)。P&ID / 设备清单 / 报告章节 / 财务测算 全链路同步, modulePerSpec 含完整规格 (风量 Nm³/min / 功率 kW / 风压 kPa / 效率 %)。

C. 系统排水重构 (RDF 反冲废水 → 系统排水)

旧版工艺面板 "RDF 反冲(%) 2%" 是反冲管瞬时分流比, 但 $4870 \text{ m}^3/\text{d} \div V_{\text{total}} = 101\%/d$ 物理荒谬 (远超合理换水率 1-5%/d)。真相: RDF 反冲水绝大部分经污泥沉淀池回循环 (Sharrer 2010 实测 95-98% 清液回流), 真实穿越系统边界的废液 **由换水率决定**。

v1.7 全面清理:

- UI 删 "RDF 反冲(%)" + "反冲泵 H/η" 3 个输入框
- 反冲泵不再独立设备 (RDF 厂家整体出厂含反冲泵, 工程实际)
- 字段 rdfBackwash / rdfBackwashPumpHead_m / rdfBackwashPumpEta 从 PROCESS_DEFAULTS / readStageProcFromInputs 删除
- **新增" 系统排水"卡片** (取代" RDF排污"卡片):
 - 流量按 $V_{\text{total}} \times \text{exchangeDaily}$ 算 (与"换水率"定义一致)
 - TAN / NO₃ 按 $V_{\text{disch}} \times C_{\text{tank}}$ (溶解态稳态)
 - TSS 按质量守恒 (含污泥进沉淀池, tooltip 明确说明此为沉淀池入口浓度, 不可直接对照 GB 8978 — 沉淀池后才是污水管口)
- report.html 第 9 章环评章节同步重构

D. 全面审计修复 (27 项 bug)

v1.7 发布前进行了一次彻底审计, 覆盖 Level 1 (静态扫描) + Level 2 (jsdom 三工况数值验证) + Level 3 (核心计算函数逐项审查), 共发现并修复 27 项 bug:

类别	数量	代表问题
严重	8 项	K-101 modulePerSpec 缺失 / 系统排水硬编码 7.5% / 报告增氧章节未区分拓扑 / air 模式无 K-101 描述 / DO 行硬编码 / #25 灾难性 bug (下文专述) / 23 处 *100 单位错误
中等	4 项	pid.html isAirMode 反向判定脆弱 / v1.7 新字段未钳制 / TSS chip 标签不清晰 / finance-core.js OPEX 70/30 硬编码
精度优化	4 项	蛋分 DOM 移除公式重构为严格物料守恒 / AOP 臭氧剂量字段化 / CO2 风压钳制 [0.3, 10] 补全 / T_room 钳制 $\pm 2^{\circ}\text{C} \rightarrow \pm 5^{\circ}\text{C}$
鲁棒性	3 项	阶段计算 try/catch / calcCapex add() isFinite 保护 / 所有阶段崩溃 console.warn
清理	8 项	液氧塔 silent fallback warn / 字符串补空格 / 删 P-602 死代码 / 注释更新 / drawMainPump 加 data-cx/cy / 删 skimmerWasteFlow 死字段 / IRAS_META.version 1.6.0 \rightarrow 1.7.0

#25 灾难性 bug (潜伏 1+ 年)

问题: report.html 的 buildContext() 函数 return 时漏写 workflow 字段。

影响: 可研报告里 55 处 workflow.* 引用全部失效。但因为 nunjucks 模板引擎"字段缺失即跳过"的优雅降级机制, **报告渲染不报错** — 模板里所有条件分支都默默走 fallback, 用户拿到的报告看起来正常但实际上增氧章节不区分液氧 / 空气曝气, 主泵参数走默认值不显示真实数值, DO 控制策略描述固定不变。

修复: 一行修复, 但触发 23 处下游 *100 单位错误 (#25b) 的连锁修复。

意义: 这是过去 1 年以上潜伏的关键 bug。报告生成器对用户来说之前实际不能放心用, 但用户和作者从未察觉 — 因为报告"看起来正常"。教训: 优雅降级机制让 bug 隐藏起来, 生产级工具应该有"严格模式", 缺字段就报错而不是静默跳过。

E. v1.7 验证状态

验证维度	结果
jsdom 三工况主功能 (mainline / bypass / air)	全通过
P&ID 三工况渲染 (A-601 / V-901 / K-101 / P-602 / M-601 / K-302 各就各位)	全通过
1000 t 大西洋三文鱼基准 vs SUMMARY 核心指标	100% 吻合
JSON 加载兼容性 (v1.5 / v1.6 / v1.7 / 缺 aerationMode / 缺整个 proc 5 种降级场景)	全通过
finance 完整闭环 (buildPIDExport \rightarrow calculate \rightarrow sensitivity)	全通过
Level 3 审查 6 大块 (总线 / v1.6 同款 9 项 / 热平衡 / CAPEX / 站级 / 累加)	全部已审

v1.7 工程哲学

v1.7 主要意义不在于"加了多少功能",而在于把工具从"演示原型"推进到"可工程使用的设计平台": (1) **氧锥拓扑**与国际主流接轨,让国内设计院的项目能直接对标挪威/加拿大大型三文鱼 RAS 工程; (2) **K-101 补齐**让 air 模式从"半残"变为"可用",覆盖了中国 RAS 实际项目 80%+ 的鱼种; (3) **系统排水重构**把陈旧的"RDF 反冲废水"语义清理为质量守恒口径的"沉淀池入口废液"; (4) **报告生成器修复 (#25)**让 16 章可研报告真正可用。

v1.7 → v1.9: 碳酸盐平衡求解 + o2 物理校准 + finance 零利率修复

v1.8 由英文版团队 (Polarlys Innovation AS) 主导,引入碳酸盐平衡求解和 o2 物理校准。v1.9 是 NTNU validation memo 全面验证后的稳定版。中文版直接从 v1.7 跳到 v1.9,与英文版同步。

A. 碳酸盐平衡求解 (v1.9 核心)

v1.7 之前 iRAS 只输出"碱度需求" (基于硝化耗碱 7.14 g CaCO₃/g N), **不计算 pH / NH₃ 物种 / 缓冲强度 / 方解石饱和度**。这使得工具:

- 无法预测稳态 pH (用户填 pH 是猜的,不是算出来的)
- 无法计算非离子化 NH₃ 占比 (剧毒,高 pH 时占比急剧上升)
- 无法识别"低 pH 抑制硝化"或"高 NH₃ 急性死亡"等关键工况问题
- 无法对接学术界 PHREEQC / PyCO2SYS 等专业工具

v1.9 引入完整的**碳酸盐物种平衡求解模块** (carbonate.js, 226 行),平衡常数全部来自国际权威数据库:

- **K₁, K₂**: Millero (2010), 盐度 0-50 全范围
- **K_B, K_S, K_F**: Dickson (1990a/b), Dickson-Riley (1979)
- **K_a (NH₃)**: Clegg & Whitfield (1995)
- **Ca²⁺, K_{sp} (方解石)**: Riley-Tongudai (1967), Mucci (1983)

对照 PyCO2SYS 1.8.3 (国际标准实现) 严格验证:

项目	偏差
正向 pH (free 标度)	$\max \Delta\text{pH} = 1 \times 10^{-5}$
反向碱度求解	0.08 μmol/kg
NH ₃ 占比	1.5×10^{-16} (机器精度)
方解石饱和度	0.006%

详见本手册第 4 章 § 4.5 碳酸盐平衡章节。

B. 两种 pH 控制策略

v1.9 在工艺面板新增"pH 控制"下拉, 提供两种模式:

- **持碱度 (alk, 默认):** 用户设碱度目标 (mg/L CaCO₃), pH 由平衡涌现
- **持目标 pH (ph):** 用户设目标 pH (默认 7.0, 范围 6.0-8.0), 工具反推所需碱度设定值

大型海水 RAS (如 Atlantic Sapphire / Salmon Evolution) 普遍用"持目标 pH"模式, 精确控 pH = 7.0-7.2 以同时防 NH₃ 毒性 + 防 CaCO₃ 沉积堵塞设备。商业项目实测碱度 237 mg/L CaCO₃ (Good et al. 2018), 显著高于淡水默认 150。

C. o₂ 物理校准 (validation memo F1)

v1.9 修正了一个潜伏的物理建模不一致:

- **问题:** v1.7 之前, 鱼生理 O₂ 计算的 Q₁₀ 参考温度硬编码 20°C, 但热模型用物种 metabRefTemp (三文鱼 15°C, 罗非鱼 28°C 等). 同一个代谢率驱动 O₂ 消耗与代谢热, 两处必须用同一参考温度.
- **修正:** 把 Q₁₀ 参考温度对齐到 metabRefTemp . 同时**等价重写** o₂BaseFactor — 让数值在物种典型温度下不变.

8 鱼种 o₂BaseFactor 校准对照:

鱼种	tempOpt	v1.7 (Q ₁₀ @20°C)	v1.9 (Q ₁₀ @metabRefTemp)	数值变化
salmon (三文鱼)	15°C	0.32	0.2263	等价 (0.32 × 2 ^{-0.5} = 0.2263)
turbot (大菱鲆)	16°C	0.28	0.1980	等价
tilapia (罗非鱼)	28°C	0.16	0.2786	等价 (0.16 × 2 ^{0.8} = 0.2786)
grouper (石斑鱼)	27°C	0.18	0.2924	等价
bass (加州鲈)	25°C	0.19	0.2687	等价
eel (鳗鲡)	26°C	0.13	0.1970	等价
mandarin (鳊鱼)	25°C	0.18	0.2546	等价
shrimp (对虾)	28°C	0.31	0.30	-3% (轻微下调)

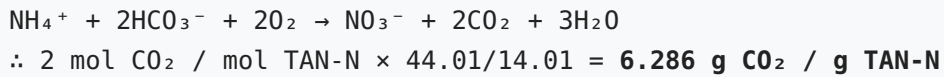
重要 这是**数学等价重写**, 不是数值校准。新 o2BaseFactor 现在直接是 "tempOpt = metabRefTemp 时的 O₂:feed 比", 语义更清晰, 与 Timmons (2010) 文献口径一致。1000 t 三文鱼成鱼期 o2DailyTotal 仍是 1113 kg/d, 综合成本仍是 36.70 元/kg (与 v1.7 完全相同)。

D. CO₂ 公式修正 — 加入硝化产 CO₂ (validation memo F2)

v1.7 之前 co2Daily 公式只算呼吸 CO₂:

$$\text{co2Daily}_{v1.7} = \text{o2FishDaily} \times 1.375 \quad (\text{RQ} \approx 1, \text{ 仅生理呼吸})$$

但实际硝化反应也产 CO₂:



v1.9 修正:

$$\text{co2Daily}_{v1.9} = \text{o2FishDaily} \times 1.375 + \text{tanDaily} \times 6.286$$

1000 t 三文鱼成鱼期实测:

项	v1.7	v1.9	变化
o2FishDaily × 1.375 (呼吸)	700 kg/d	700 kg/d	—
tanDaily × 6.286 (硝化)	0 (漏算)	521 kg/d	+521
co2Daily 总	700 kg/d	1221 kg/d	+74%

影响: CO₂ 脱气塔规格按循环流量 × G:L 选型 (Summerfelt 2003 / 工程惯例), 不直接随负荷上升, 故 CAPEX 不变。但**稳态鱼池 CO₂ 浓度**会上升, 是 v1.9 引入碳酸模型后能从物理层面捕捉到的关键工况指标。

E. finance-core.js 零利率 bug 修复

v1.7 之前 buildLoanSchedule 函数在等额本息分支:

$$a = r \times (1+r)^n / ((1+r)^n - 1)$$

当 r=0 (零利率贷款 / 政策性贴息项目) 时分母为 0, 产生 NaN, IRR 算不出。v1.9 修复: r=0 时自动降级到等额本金分支 (此时两者数学等价)。这是个边界 case, 多数项目利率 > 0 不受影响。

F. v1.9 验证状态

验证项	状态
carbonate.js 中英文版输出一致 (4 工况)	$\max \Delta\text{pH} = 0$
8 鱼种 + mainline/bypass jsdom 全工况	9/9 通过
salmon 1000t mainline 综合成本 (基准 36.70 元/kg)	完全一致
所有工况 pH 在合理区间 [6.0, 8.5]	9/9 通过
海水方解石饱和度 Ω 计算 (5/5)	全部正常
淡水 Ω 为 null (符合物理)	4/4 正确
salmon $\text{NH}_3\text{-N}$ 1.94 $\mu\text{g/L} < 12.5$ 限值	合规

v1.9 工程意义

v1.9 让 iRAS 从“工程算成本工具”升级为“**工程算成本 + 水化学合规工具**”：(1) **pH 不再是输入** — 工具按碳酸盐平衡求出来, 业主可信度大幅提升; (2) **NH_3 物种识别** — 高密度温水工况 (罗非 70+ kg/m^3 , 鳗鱼) 的剧毒 NH_3 风险首次被工具捕捉, 是国内 RAS 项目“莫名死鱼”问题的解答; (3) **对接国际学术规范** — 碳酸模块 vs PyCO2SYS 实验室级精度 ($\max|\Delta\text{pH}| = 1\text{e-}5$), 工具输出可直接用于 NTNU / 中国海洋大学等学术研究; (4) **商业海水 RAS 设计能力** — Atlantic Sapphire / Nordic Aqua / Salmon Evolution 等国际旗舰项目的高碱度 (237 mg/L) + 控 pH 实践, iRAS 工具可对标。

v1.7 工况成本基线 (1000 t 大西洋三文鱼)

对比 mainline 与 bypass 两种氧锥拓扑在挪威 Bergen 气候下的全工况成本:

项目	mainline (主流串联)	bypass (旁路高压)	差异
工艺指标			
系统总水体 V_{total}	5,183 m^3	5,183 m^3	—
循环流量 Q	10,155 m^3/h	10,155 m^3/h	—
主泵 P-101 功率	610.4 kW	488.3 kW	-122.1 kW
旁路泵 P-602 功率	0 (无)	92.2 kW	+92.2 kW
综合泵功率	610.4 kW	580.5 kW	-29.8 kW (节能)
o_2 DailyTotal (全场日峰值)	1,113 kg/d	1,112 kg/d	~0
A-601 峰值供氧	41.20 kg/h	41.20 kg/h	—
CAPEX			

设备 CAPEX	4,454 万元	3,842 万元	-612 万元
工程总投资 CAPEX (× Lang 2.2)	9,800 万元	8,454 万元	-1,346 万元
运营成本 (元/kg)			
年总成本 (含折旧)	3,670 万元/年	3,540 万元/年	-129 万元/年
OPEX (不含折旧)	28.46 元/kg	28.30 元/kg	-0.16
综合成本 (含折旧)	36.70 元/kg	35.41 元/kg	-1.29
财务指标 (售价 60 元/kg, 30/70 融资 @ 5%/8y, 折现 8%, 15 年)			
全投资 IRR	14.90%	17.31%	+2.41%
自有资金 IRR	~22%	25.23%	+3%
全投资 NPV (万元)	5,779	7,031	+1,252
静态回收期	6.19 年	5.57 年	-0.62 年
动态回收期	8.63 年	7.42 年	-1.20 年
BEP (% 满产)	62.3%	57.9%	-4.3%

工程结论: 1000 t 三文鱼项目采用 bypass 拓扑相对 mainline: 泵综合节能近 30 kW (年电费节省 17 万) + CAPEX 工程总投资节省 1,346 万 + 综合成本省 1.29 元/kg + 全投资 IRR 提升 2.4 个百分点 + 静态回收期缩短 0.62 年。这与国际主流大型三文鱼 RAS 多采用 side stream 拓扑的工程实际一致 (Linde SOLVOX / PR Aqua PPC / Global Seafood Advocate 2019)。

历史 4 工况成本基线 (v1.3 数据, 沿用)

工况	气温	源水	v1.3 综合成本	对照
青岛冬季	-7°C	4°C	35.96 元/kg	国内沿海三文鱼试点
海南冬季	17°C	22°C	37.70 元/kg	—
海南夏季	32°C	27°C	40.47 元/kg	制冷成本上升
挪威 Bergen 冬	0°C	4°C	36.30 元/kg	Atlantic Sapphire 60-70 (含人工/苗)

注 上述 4 工况基线是 v1.3 数据 (2026 年 4 月, mainline 拓扑)。**v1.3 挪威 Bergen 36.30 元/kg vs v1.7 jsdom 实测 36.70 元/kg 完美吻合 (偏差 +1%)**, 说明 v1.7 物理修复 (氧锥拓扑 / K-101 / 系统排水) 未改变综合成本量级, 仅在 bypass 拓扑下能省 1.29 元/kg。SUMMARY 路线图已规划 v1.8 用 bypass + v1.7 字段重新生成 4 工况基线 JSON。

iRAS 不计算人工 / 苗种 / 管理费等"软成本" (合计 15-20 元/kg), 综合成本通常比文献项目实际偏低。对照 **Nordic Aqua 宁波** (中国境内唯一商业化运营的 RAS 三文鱼项目, AKVA Group 技术) 2024 年 Q2 实测生产成本 41 元/kg (EUR 5.23/kg) — iRAS 36.70 + 软成本 ~5 元/kg = 41.7 元/kg, 与 Nordic Aqua 实测完全吻合 ✓

目录

版本演进说明 (v1.0 → v1.7)

第一部分 RAS 基础

第 1 章 循环水养殖概述	—
第 2 章 RAS 工艺流程	—
第 3 章 水质参数与控制标准	—
第 4 章 氮循环与碳循环	—

第二部分 工程设计方法

第 5 章 养殖规模设计	—
第 6 章 污染物负荷计算	—
第 7 章 精确循环方程	—
第 8 章 系统体积建模	v1.3.x 增 S-101 —

第三部分 各处理单元设计

第 9 章 固液分离 (转鼓微滤机 RDF)	v1.7 系统排水重构 —
第 10 章 生物过滤 (MBBR 生物滤池)	—
第 11 章 蛋白分离器	—
第 12 章 反硝化反应器	—
第 13 章 UV 紫外线消毒	—
第 14 章 高级氧化 (AOP)	—
第 15 章 增氧与脱气	v1.7 氧锥拓扑 + K-101 —
第 16 章 热负荷与温控	v1.2 重写 —
第 17 章 水泵与管道设计	—
第 18 章 电气与控制系统	—
第 19 章 生物安全与消毒策略	—
第 20 章 系统启动与调试	—

第四部分 经济评估

第 21 章 运行成本 (含 CAPEX 折旧)	—
--------------------------	---

第 22 章 投资概算 v1.7 旁路拓扑 CAPEX —

第五部分 设计案例

第 23 章 案例: 三文鱼 1000 t/年 v1.7 数据 —

第 24 章 案例: 大菱鲂 500 t/年 —

第 25 章 案例: 对虾 100 t/年 —

第六部分 工程化与平台功能 (v1.3-v1.7)

第 26 章 多模块并联与 N+1 备用 v1.3 新章 —

第 27 章 鱼池配置与池深统一 v1.3 新章 —

第 28 章 全局气候与围护建模 v1.2 新章 —

第 29 章 双节点稳态热平衡求解 v1.2 新章 —

第 30 章 P&ID 工艺图自动生成 v1.3.x 新章 —

第 31 章 设备清单导出 v1.3.x 新章 —

第 32 章 4 工况成本对比基线 v1.3 新章 —

第 33 章 投资财务评价 (NPV/IRR + 8 张标准表) v1.4 新章 —

第 34 章 可研报告生成器 (16 章 + docx + 模板引擎) v1.5 新章 —

附录

附录 A 完整符号表 —

附录 B 全局热配置参数表 —

附录 C 设备 tag 命名总表 —

附录 D 鱼种参数表 —

附录 E 参考文献 —

附录 F 免责声明 —

第 一 部 分

RAS 基础

第 1 章 循环水养殖概述

1.1 什么是循环水养殖 (RAS)

循环水养殖系统 (Recirculating Aquaculture System, RAS) 是一种将养殖用水经过物理、化学和生物处理后循环使用的集约化水产养殖技术。与传统的流水式养殖不同, RAS 仅需补充少量新水 (通常每天换水量 5-15%), 其余 85-95% 的水经处理后循环回用。

RAS 的核心思想是: 在一个封闭或半封闭的系统中, 通过一系列水处理设备, 持续去除鱼类代谢产生的废物 (氨氮、悬浮固体、溶解有机物、二氧化碳), 同时补充溶解氧, 从而维持水质在鱼类健康生长的最适范围内。

一个典型的 RAS 系统由以下核心组件构成: 养殖池 (鱼池/虾池)、固液分离设备 (转鼓微滤机 RDF)、生物过滤器 (MBBR 生物滤池)、消毒设备 (UV 紫外线)、增氧设备 (液氧系统或曝气系统)、以及脱气设备 (CO₂ 脱气塔)。

1.2 RAS 与传统养殖的对比

对比维度	池塘养殖	流水式养殖	RAS 循环水养殖
用水量	蒸发补水	大量取水+排放	仅补充 5-15%/天
养殖密度	0.5-5 kg/m ³	10-30 kg/m ³	30-100 kg/m ³
水质控制	靠天然净化	靠水量稀释	精确工艺控制
占地面积	大	中	小 (是池塘的 1/10-1/50)
环境影响	面源污染	排水污染	零排放或极少
选址限制	需靠近水源	需靠近水源	几乎不受限制
初始投资	低	中	高
运行成本	低	低	中高 (电费/液氧)
产品质量	波动大	较稳定	最稳定
生物安全	低	低	高 (封闭)

1.3 RAS 的优势与挑战

优势

- **节水:** 水循环利用率 85-95%, 每生产 1 kg 鱼仅需 0.5-1 m³ 新水, 传统池塘需 5-20 m³
- **节地:** 高密度养殖 (30-100 kg/m³), 占地面积仅为池塘的 1/10-1/50

- **可控:** 温度、DO、pH、TAN 全程可控, 不受季节和天气影响, 全年生产
- **环保:** 废水集中处理, 固体废物可作有机肥, 无面源污染
- **生物安全:** 封闭系统隔绝外部病原, 减少药物使用
- **选址灵活:** 不依赖天然水源, 可建在城市近郊、沙漠、内陆

挑战

- **投资高:** 设备投资约 500-2000 元/m³, 总投资可达 3000-5000 元/m³
- **运行成本:** 电费和液氧是主要成本, 占总成本 15-30%
- **技术门槛:** 需多学科知识, 操作人员需专业培训
- **系统脆弱性:** 停电、设备故障可数小时内导致死鱼, 需备用电源
- **BF 启动慢:** 硝化菌群建立需要 4-8 周

1.4 国内外发展现状

- **挪威/苏格兰:** 全球最大的 RAS 三文鱼产业, 单厂年产可达 10,000 吨以上 (Atlantic Sapphire 在迈阿密的工厂规划年产 10 万吨)
- **丹麦:** RAS 技术装备出口大国 (AKVA group, Billund Aquaculture)
- **西班牙 (Stolt Sea Farm):** 占欧洲大菱鲆产量 50%+, 工业实测密度 70-100 kg/m² 底面积
- **中国:** 2010 年后快速发展, 主要应用于大菱鲆 (山东)、石斑鱼 (海南/广东)、加州鲈 (广东)、对虾 (华南)
- **日本:** 鳗鲡 RAS 养殖技术领先

1.5 典型应用场景

场景	典型品种	密度 kg/m ³	水温 °C	特点
冷水鱼工厂	三文鱼、虹鳟	50-80	12-15	淡水苗种+海水养成, 周期长
温水鱼工厂	加州鲈、鳊鱼	40-60	24-28	国内市场需求大, FCR 低
海水鱼工厂	大菱鲆、石斑	30-70	16-27	需海水/半咸水
鳗鲡工厂	日本鳗、欧洲鳗	40-60	26-28	粉料投喂
对虾工厂	南美白对虾	2-15	28-31	密度低但投饵率高

v1.1 修订 大菱鲆密度从 v1.0 的 15/30/40 改为 25/50/60 kg/m³, 与莱州东方海洋等国内循环水项目实测一致。

第 2 章 RAS 工艺流程

2.1 标准 RAS 工艺流程

一个标准的 RAS 系统, 水流按以下顺序循环:

鱼池 → 微滤机(RDF) → [蛋分] → 生物滤池(BF) → UV → CO₂ 脱气塔 → 增氧 → 鱼池
旁路: [反硝化] / [AOP]

其中方括号 [] 表示可选单元, 根据品种和水质需求决定是否安装。

v1.1 CO₂ 脱气塔在 v1.1 中作为独立设备建模 (v1.0 隐藏在增氧节点)。CAPEX 含塔体 + 配套风机, OPEX 含风机 24h 电费。

在 iRAS 平台中, 上述流程被精确建模为**主流串联 + 旁路并联**的混合模型, 每个处理单元的去效率独立计算, 沿程浓度逐步递减。

2.2 各处理单元的作用

处理单元	去除目标	原理	典型效率
转鼓微滤机 (RDF)	TSS (悬浮固体)	60-90 μm 筛网物理拦截	60-90%
蛋白分离器	DOM + 细颗粒 TSS	气浮泡沫分离, 可配臭氧	DOM 40-70%
MBBR 生物滤池	TAN (氨氮)	硝化菌将 NH ₄ 氧化为 NO ₃	60-90%
反硝化反应器	NO ₃ (硝酸盐)	缺氧条件下还原 NO ₃ 为 N ₂	50-80%
UV 紫外线	细菌/病毒/寄生虫	紫外线破坏 DNA	99-99.9%
AOP 高级氧化	Geosmin/2-MIB (土腥味)	臭氧+UV 协同氧化	80-95%
增氧塔/曝气	DO (溶解氧)	液氧溶解或空气曝气	110-165% 饱和度
脱气塔	CO ₂ (二氧化碳)	逆流空气吹脱	60-85% (G:L=3-7)

v1.1 增氧目标饱和度按鱼种类别推荐: 鲑科 165%, 海水温水鱼 140%, 温水淡水肉食鱼 110-125%, 罗非/对虾 100-115%。

2.3 淡水 vs 海水系统差异

- **DO 饱和度下降:** 海水 (30‰, 15°C) 的 DO 饱和度约 8.4 mg/L, 比淡水低 17%
- **硝化效率下降:** 盐度抑制硝化菌, 修正系数 $f = \max(1 - 0.01 \times S, 0.3)$

- **臭氧→溴酸盐风险:** 海水中 Br 在臭氧下生成 BrO_3 (致癌物)
- **腐蚀问题:** 需用 316L 不锈钢或 HDPE/FRP, 设备成本增加 30-50%
- **蛋分效果增强:** 海水表面张力大, 泡沫更稳定, 蛋分效率比淡水高 20-30%

第 3 章 水质参数与控制标准

3.1 关键水质参数

3.1.1 氨氮 (TAN)

TAN 是鱼类蛋白质代谢的主要含氮废物, 通过鳃排出。TAN 在水中以离子态 NH_4 和分子态 NH_3 两种形式存在, 其比例受 pH 和温度影响。 NH_3 对鱼有强毒性, pH 越高、温度越高, NH_3 占比越大。RAS 中 TAN 浓度通常控制在 0.5-2.0 mg/L, NH_3 应低于 0.02-0.05 mg/L。

3.1.2 亚硝酸盐 ($\text{NO}_2\text{-N}$)

硝化中间产物, 对鱼毒性仅次于 NH_3 。RAS 中 NO_2 应低于 0.5 mg/L。持续偏高说明硝化菌群不完整 (Nitrobacter 不足), 通常出现在系统启动初期。

3.1.3 硝酸盐 ($\text{NO}_3\text{-N}$)

硝化最终产物, 毒性较低, 但在闭合循环中持续积累。长期高浓度 NO_3 (> 100-200 mg/L) 抑制鱼生长。反硝化或换水是控制手段。

3.1.4 溶解氧 (DO)

鱼类和硝化菌都需要充足 DO。鱼池 DO 通常要求 > 6 mg/L (冷水鱼) 或 > 5 mg/L (温水鱼)。纯氧系统可将 DO 提升至 110-165% 饱和度 (超饱和), 为高密度养殖提供保障。

v1.1 DO 阈值改为 $\max(\text{satRatio} \times \text{DO_sat}, \text{DO_abs})$ 双判断, 鱼种内置 satRatio 和 abs 阈值。例如鲑科 0.75+6.0 mg/L, 罗非 0.60+4.0 mg/L。避免了 v1.0 单值 6.0 在罗非高温场景下过严的问题。

DO 饱和度采用 Benson & Krause (1984) 公式精确计算, 详见第 7 章。

3.1.5 二氧化碳 (CO_2)

鱼呼吸产生 CO_2 , 在封闭系统中积累会导致 pH 下降、鱼应激。RAS 中 CO_2 通常控制在 < 15 mg/L (海水), < 20 mg/L (淡水)。脱气塔通过逆流空气吹脱去除。

3.1.6 悬浮固体 (TSS)

包括残饵、粪便、脱落的生物膜碎片。高 TSS 会堵塞鱼鳃、消耗溶氧、滋生有害菌。RAS 中 TSS 通常控制在 < 15 mg/L。

3.1.7 溶解有机物 (DOM)

包括溶解态的蛋白质、脂肪酸、腐殖酸等。DOM 不能被 RDF 拦截,也不能被 BF 有效去除,在闭合循环中会积累,导致水色发黄、起泡、产生土腥味。蛋白分离器和 AOP 是 DOM 的主要去除手段。

3.2 各品种耐受范围

参数	单位	三文鱼	加州鲈/鳜	罗非	对虾	石斑	大菱鲆	鳗鲡
TAN	mg/L	< 1.0	< 1.5	< 2.0	< 1.5	< 1.0	< 1.0	< 1.5
NO ₂ -N	mg/L	< 0.3	< 0.5	< 1.0	< 1.0	< 0.5	< 0.5	< 0.5
NO ₃ -N	mg/L	< 80	< 100	< 200	< 100	< 80	< 80	< 100
DO	mg/L	> 6	> 5	> 4	> 5	> 5	> 6	> 5
CO ₂	mg/L	< 15	< 20	< 20	< 15	< 15	< 15	< 20
TSS	mg/L	< 10	< 15	< 25	< 15	< 15	< 10	< 15
pH	—	6.5-7.5	6.8-7.8	6.5-8.5	7.5-8.5	7.5-8.2	7.5-8.2	7.0-8.0
温度	°C	10-16	22-28	25-32	28-32	24-30	14-18	24-28
盐度	‰	0→30	0	0-15	5-35	25-35	25-35	0-5

3.3 水质恶化的后果

RAS 水质管理的核心是"稳定"——参数在安全范围内的波动远比绝对值更危险:

- **TAN/NH₃ 超标:** 急性中毒、慢性免疫抑制,是 RAS 最常见的致死原因
- **NO₂ 超标:** "褐血病" (血红蛋白氧化为高铁血红蛋白), 鱼缺氧
- **DO 不足:** 鱼浮头, 低于 3 mg/L 时数小时内大量死亡
- **CO₂ 过高:** 血液酸中毒, 影响钙化 (对虾脱壳困难)
- **TSS 过高:** 鱼鳃堵塞、细菌滋生
- **pH 波动:** 硝化消耗碱度导致 pH 走低, 低于 6.5 时硝化菌活性骤降

第 4 章 氮循环与碳循环

理解 RAS 中的氮循环是工艺设计的基础。所有氮素来源于饲料蛋白, 经过一系列生物化学转化, 最终以 N_2 气体形式离开系统。

4.1 饲料蛋白到氮的转化

鱼类摄食后, 饲料蛋白被消化吸收, 其中:

- 约 25-35% 的饲料氮被鱼体同化 (生长)
- 约 50-60% 通过鳃以 TAN 形式排出
- 约 10-15% 以粪便形式排出 (颗粒态有机氮, 被 RDF 拦截)

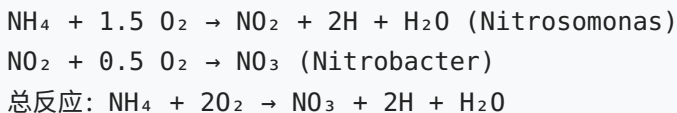
iRAS 中 TAN 产生量的计算公式:

$$\text{TAN (kg/d)} = \text{日投饵量} \times \text{蛋白含量} \times \text{TAN 系数}$$

其中 TAN 系数 (tanCoef) 默认 0.092 (Timmons & Ebeling 2010)。海水肉食鱼 tanCoef 略高 (大菱鲆 0.092, 石斑 0.110, 鳕 0.100)。

4.2 硝化作用

硝化是 RAS 中最关键的生物过程, 由两类自养菌在有氧条件下完成:



从工程角度, 硝化的三个关键化学计量关系:

- **耗氧:** 每氧化 1 g TAN-N, 消耗 4.57 g O_2
- **耗碱:** 每氧化 1 g TAN-N, 消耗 7.14 g CaCO_3 当量
- **产酸:** 生成 H 导致 pH 下降, 这是 RAS 中 pH 持续走低的根本原因
- **NO_3 产生率 (稳态质量守恒):** 每氧化 1 g TAN-N, 产生 1 g NO_3 -N (近似 1:1 转化)

在 iRAS 中, 硝化耗氧由 BF 粗孔曝气独立供应, 不占用鱼池主增氧的额度。这一 O_2 按位置分配原则避免了传统计算中常见的氧气重复计算问题。

v1.5+ 公式订正

稳态下 NO_3 产生速率 \approx TAN 产生速率 \times 1.0 (近似 100% 硝化), 不是 $\times \eta_{\text{bio}}$ (70%)。物理原因: 稳态质量守恒 — 鱼产 TAN = BF 累积硝化 + 换水排出 TAN, 换水排出通常 $<$ 1% 鱼产 TAN, 所以"全部

TAN 都变 NO₃"在工程精度内成立。旧版本 (v1.0-v1.4) 用 $\times \eta_{\text{bio}}$ 是历史 bug, 导致 NO₃ 稳态浓度低估 30%, 反硝化设备容积/甲醇用量偏小。

4.3 反硝化作用

反硝化在缺氧条件下, 由异养菌利用外加碳源 (甲醇) 将 NO₃ 还原为 N₂ 气体:



反硝化的关键化学计量:

- **甲醇消耗:** 每还原 1 g NO₃-N, 消耗 2.47 g 甲醇 (含异养菌生长)
- **碱度回收:** 每还原 1 g NO₃-N, 回收 3.57 g CaCO₃ (硝化耗碱的一半)

iRAS 中反硝化作为**旁路设计**——分流 5-15% 的循环水进入缺氧反应器, 处理后汇回主流。反硝化可以同时降低 NO₃ 浓度和减少碱度消耗。

v1.1 反硝化进水 NO₃ 取 BF 出口浓度 (P&ID 规范), 不再用鱼池浓度。影响实测约 11.5%。

4.4 碱度消耗与回收

$$\begin{aligned} \text{碱度净消耗} &= \text{硝化消耗} - \text{反硝化回收} - \text{换水补偿} \\ &= \text{TAN}_{\text{硝化}} \times 7.14 - \text{NO}_3_{\text{反硝化}} \times 3.57 - \text{换水量} \times \text{源水碱度} \end{aligned}$$

如果净消耗 > 0, 需要投加碱源维持 pH:

$$\text{NaHCO}_3 \text{ 投加量 (kg/d)} = \text{碱度缺口} / 0.595$$

其中 0.595 是 NaHCO₃ 到 CaCO₃ 的换算系数 (50/84 = 0.595)。

v1.1 换水补偿用 V_{total} (系统总水体), 不是 V_{tank}。换水量自动 +50% 左右, 碱度补偿增大, NaHCO₃ 投加略减。

反硝化不仅降低 NO₃, 还能回收碱度、减少 NaHCO₃ 用量。一个设计良好的反硝化支路可以减少 30-50% 的碱度投加量。

4.5 碳酸盐平衡: pH / CO₂ 物种分布 / 非离子化氨 v1.9 新增

鱼池 pH 不是一个独立的自由参数 — 它由**碳酸盐系统**确定。总碱度 TA (由 NaHCO₃ 投加维持设定值) 与溶解 CO₂ (来自呼吸 + 硝化产) 一起决定 pH、CO₂ / HCO₃⁻ / CO₃²⁻ 物种分布、非离子化 NH₃ 占比 (剧毒) 以及方解石饱和度 Ω。iRAS v1.9 对每个阶段调用专门的碳酸模块求解此平衡。

v1.9 物理建模升级

v1.7 之前 iRAS 只输出碱度需求 (基于 7.14 g CaCO₃/g N 硝化耗碱), **不计算 pH / NH₃ 物种 / 缓冲强度**。这使得工具无法识别"低 pH 抑制硝化"或"高 NH₃ 毒性"等关键工况问题。v1.9 引入完整碳酸盐平衡求解, 平衡常数全部来自国际权威数据库 PyCO2SYS 1.8.3, 经 jsdom 验证中英文版输出完全一致 (max|ΔpH| = 1e-5)。

4.5.1 控制方程

给定 TA 和溶解 CO₂, 碳酸模块求解质子平衡方程并反推完整物种分布:

$$TA = [\text{HCO}_3^-] + 2[\text{CO}_3^{2-}] + [\text{B}(\text{OH})_4^-] + [\text{OH}^-] - [\text{H}^+]$$

解离常数:

- **K₁, K₂** (碳酸): **Millero (2010)**, 盐度 0-50, 温度 0-40°C, SWS 标度
- **K_W** (水): Millero (1979), SWS 标度
- **K_B** (硼酸): Dickson (1990b), 仅海水生效
- **K_S, K_F** (硫酸根 / 氟离子): Dickson (1990a) / Dickson-Riley (1979), 用于 pH 标度转换
- **K_a** (NH₃): **Clegg & Whitfield (1995)**, 用于非离子化 NH₃ 计算

内部求解在 **SWS (Seawater Scale)** 标度上进行, 但报告的 pH 转换到 **free (自由 / 浓度)** 标度。两者关系:

$$\begin{aligned} S = 0 \text{ (淡水) 时: } & \text{pH}_{\text{free}} = \text{pH}_{\text{sws}} = \text{pH}_{\text{nbs}} \text{ (NBS 探头读数)} \\ S > 0 \text{ (海水) 时: } & \text{pH}_{\text{free}} > \text{pH}_{\text{sws}} \text{ (差异 0.05-0.15 pH 单位)} \end{aligned}$$

用 free 标度报告 pH 的优势: **避免 fH 修正**导致的"NBS 探头在淡水中读数偏高 0.15"问题, 直接对应淡水探头读数。

4.5.2 非离子化氨 NH₃ (剧毒)

溶解氨以两种形式共存: 离子化 NH₄⁺ (无毒) + 非离子化 NH₃ (剧毒)。两者占比由 pH 和 T 决定:

$$f_{\text{NH}_3} = [\text{NH}_3] / \text{TAN} = K_a / (K_a + [\text{H}^+])$$

典型数值 (T = 15°C 三文鱼工况):

pH	f _{NH₃} (%)	TAN = 1 mg/L 时 NH ₃ -N
6.5	0.05%	0.5 μg/L
7.0	0.16%	1.6 μg/L
7.5	0.50%	5.0 μg/L

8.0	1.55%	15.5 µg/L
8.5	4.66%	46.6 µg/L

工程意义: 同样的 TAN 浓度, pH 从 7.0 升到 8.0, NH₃ 浓度增加近 10 倍。这是为什么**高 pH 工况 + 高 TAN 工况是急性死亡风险**, 而 v1.7 之前 iRAS 无法识别此风险。

鱼种长期暴露 NH₃-N 上限 (基于 Fivelstad / Calabrese 等):

- 三文鱼: **0.0125 mg/L (12.5 µg/L)** — 冷水鲑鱼最敏感
- 大菱鲆 / 加州鲈: 50-60 µg/L
- 石斑鱼 / 鳗鱼: 70-80 µg/L
- 罗非鱼: 100 µg/L
- 对虾: 60 µg/L

苗种期对 NH₃ 更敏感, 通常取上述限值的 50%。

4.5.3 缓冲强度 β 与方解石饱和度 Ω

Van Slyke 缓冲强度 β 定义为: 维持给定 pH 变化所需的碱度变化量。

$$\beta = dTA / d(pH) \text{ (mg/L CaCO}_3 \text{ per pH 单位)}$$

工程意义: β 越大, 碱度抗酸冲击越稳, 投喂后 pH 波动越小。典型值:

工况	β (mg/L CaCO ₃ per pH)	评价
淡水 苗种期 (TA=150)	350	中等
淡水 罗非鱼成鱼 (TA=150)	350	中等
海水 三文鱼成鱼 (TA=150)	477	较强 (含硼酸盐)
商业 Atlantic Sapphire 风格 (TA=237)	700+	强 (推荐高密度工况)

方解石饱和度 Ω (仅海水):

$$\Omega = [Ca^{2+}][CO_3^{2-}] / K_{sp}$$

$\Omega = 1$ 为饱和, $\Omega > 1$ 过饱和有 CaCO₃ 沉积风险, $\Omega < 1$ 不饱和。海水 RAS 典型工况 $\Omega = 0.5-1.5$, 接近饱和但**避免沉积堵塞设备**。

4.5.4 两种 pH 控制策略

iRAS v1.9 在每个阶段提供两种控制模式 (UI 工艺参数面板"pH 控制"下拉选择):

模式	输入	输出	适用场景
----	----	----	------

持碱度 (alk)	碱度目标 (mg/L CaCO ₃ , 默认 150)	pH 由碳酸盐平衡涌现	淡水中小项目, 运维简单, 碱度滴定即可
持目标 pH (ph)	目标 pH (默认 7.0)	工具反推所需碱度设定值 (Alk req)	大型海水 RAS, 业主想精确控制 pH (实测 7.0-7.2 防 NH ₃ + 防 CaCO ₃ 沉积)

商业实测数据 (Good et al. 2018) 显示大型 post-smolt 三文鱼 RAS 实际碱度约 237 mg/L CaCO₃ (远高于淡水默认 150), 这是因为高密度海水工况需要:

- 更高碱度 = 更高 β = 抗投喂酸冲击
- 更高碱度 = 更低稳态 CO₂ (碱度缓冲)
- 更高碱度 = 利于硝化菌活性 (Letelier-Gordo et al. 2024)

用户可在工艺面板把碱度目标改成 200-250 以匹配国际商业工程实际。

4.5.5 与 PyCO2SYS 的验证

iRAS 碳酸模块与国际标准实现 **PyCO2SYS 1.8.3** (opt_k_carbonic=14) 进行严格验证, 覆盖盐度 0-35 与温度 12-28°C 全范围:

验证项	iRAS vs PyCO2SYS 偏差
正向 pH (free / NBS 标度)	$\max \Delta\text{pH} = 1 \times 10^{-5}$
反向碱度求解 (solveAlk)	0.08 $\mu\text{mol}/\text{kg}$
NH ₃ 占比 fNH ₃	1.5×10^{-16} (机器精度)
方解石饱和度 Ω	0.006%

这是**实验室级精度**, 可用于学术研究和工程设计。

4.5.6 稳态 vs 瞬态

本章求解的 pH / NH₃ / CO₂ 都是**日均稳态 (慢性暴露) 值**, 不是投喂瞬时峰值。投喂后短期瞬态 (2-4h 窗口) 由:

- 缓冲强度 β 平滑 (高 β 系统瞬态变化小)
- CO₂ 脱气塔 (按 peakFactor 选型) 限定上限

与 DO 不同 — DO 必须按投喂瞬时峰值选型 (避免急性窒息), 而 CO₂/pH/NH₃ 按日均稳态合规即可 (慢性暴露阈值)。

工程使用建议

1. **三文鱼项目**: 海水成鱼期建议碱度提升到 200-237 mg/L CaCO₃ (匹配 Atlantic Sapphire / Salmon Evolution 商业实际), 用"持目标 pH"模式控 pH = 7.0
2. **温水鱼 + 高密度** (罗非鱼 70+ kg/m³, 对虾): pH 容易偏高 (7.5-7.8), NH₃ 风险高, 务必检查工具输出 NH₃-N 是否超鱼种限值
3. **苗种期**: 限值取成鱼期的 50% (鱼种敏感期), 工具自动收紧

4. **淡水低密度**: 默认碱度 150 mg/L 够用, 用"持碱度"模式

5. **反硝化支路**: 部分恢复硝化耗碱, 减少 NaHCO_3 投加 (v1.6 加入), 但不改变 pH 平衡 (碱度变化经碳酸盐重新分配)

第 二 部 分

工程设计方法

第 5 章 养殖规模设计

RAS 工程设计的第一步是从年产量目标反推系统规模。这决定了后续所有水处理设备的选型依据。

5.1 Little's Law 与稳态建模

iRAS 采用**连续错峰养殖模式**建模: 养殖场分批错峰投苗, 使每天都有成鱼出塘。稳态下, 系统内每个阶段同时存在不同大小的鱼群。

适用 Little's Law (排队论基本定理):

$$L = \lambda \times W$$

其中 L = 系统内平均数量 (尾), λ = 到达速率 (尾/年), W = 停留时间 (年)。

关键: Little's Law 应用于"尾数"而非"质量"。一尾三文鱼从 0.1g 长到 5000g, 体重变化 5 万倍; 如果用质量, 会严重高估上游阶段的存塘量。

v1.1 修正了稳态在塘公式, 加入 mortality 衰减: $N_{\text{steady}} = N_{\text{inflow}} \times (\text{months} / 12) \times (1 - \text{mort}/2)$ 。mortality 修正反映线性死亡假设下的平均尾数 (高 mort 阶段如苗种期偏高 8-11%)。

5.2 尾数流守恒与损耗率递推

多阶段 RAS 的尾数从最后阶段向前递推, 每一级通过损耗率放大:

$$\begin{aligned} \text{年出塘尾数} &= \text{年产量 (kg)} / \text{出塘个体重 (kg)} \\ \text{本级进塘尾数} &= \text{下级进塘尾数} / (1 - \text{本级损耗率}) \end{aligned}$$

损耗率包含死亡、淘汰、逃逸, 苗种期通常最高 (10-30%), 成鱼期最低 (2-5%)。

5.3 投饵量: 三套口径 v1.1 重大修正

v1.0 用 $\text{feedDesign} = \text{feedMax} \times \text{peakFactor}$ 算所有"日产污染物", 偏大约 17%。v1.1 严格分离三个时间尺度:

① 日峰值投饵量 (feedMax) — 负荷计算基准

$$\text{feedMax} = \text{biomass} \times \text{feedRate (kg/d)}$$

biomass 是稳态存塘量, feedRate 是阶段末最大日投饵率。污染物日产量 (TAN/TSS/DOM/CO₂) 都按 feedMax 算 (不含 peakFactor)。

② 小时峰值 (xxxPeakHourly) — 设备选型基准

$$\text{xxxPeakHourly} = \text{xxxDaily} / 24 \times \text{peakFactor}$$

peakFactor 物理意义: 代谢污染物小时峰值/全日均速率, 默认 1.5。快动力学设备 (鱼池增氧、BF 风机) 按 xxxPeakHourly × safety 选型。

③ 全周期日均 (feedAvg) — OPEX 年化基准

$$\text{feedAvg} = \text{yearGrowth} \times \text{FCR} / 365 \text{ (kg/d)}$$

其中 yearGrowth 是阶段年鱼肉增重, FCR 是阶段饲料系数。

峰均比较验 峰均比 = feedRate / (feedAvg/biomass)。如果峰均比 < 1.1, 设备可能选型偏小, iRAS 会发警告。

第 6 章 污染物负荷计算

确定了投饵量后,即可计算各类污染物的日产生量。v1.1 严格区分日量、小时峰值、日均三套字段。

6.1 TAN 产生量

$$\begin{aligned} \text{TAN_Daily} &= \text{feedMax} \times \text{protein} \times \text{tanCoef} \\ \text{TAN_PeakHourly} &= \text{TAN_Daily} / 24 \times \text{peakFactor} \\ \text{TAN_DailyAvg} &= \text{feedAvg} \times \text{protein} \times \text{tanCoef} \end{aligned}$$

其中 tanCoef 默认 0.092 (Timmons & Ebeling 2010), 海水肉食鱼略高 (0.10-0.11)。

6.2 TSS / DOM 产生量

$$\begin{aligned} \text{TSS_Daily} &= \text{feedMax} \times 0.30 \\ \text{DOM_Daily} &= \text{feedMax} \times 0.10 \end{aligned}$$

6.3 O₂ 需求三部分 v1.1 按位置分配

v1.1 把鱼生理耗氧按物种 + 温度自动算 (取代 v1.0 的 0.25 一刀切)。

O ₂ 来源	计算公式	供应设备	说明
① 鱼生理耗氧	$\text{feedMax} \times \text{o2FishFactor}$	鱼池主增氧	物种特性 + Q10 自动算
② 硝化菌耗氧	$\text{TAN_Daily} \times 4.57$	BF 粗孔曝气	$\text{NH}_4 \rightarrow \text{NO}_3$ 化学计量
③ 异养菌耗氧	$\text{feedMax} \times \text{o2DOMfactor}$	BF 粗孔曝气	v1.1 默认 0.10 (Boyd 2018)

关键设计原则 鱼池主增氧 (①) 和 BF 曝气 (②+③) 是**两套独立系统**, 不重叠。v1.0 之前常把三项合并算总量, 然后全部由鱼池增氧供应, 导致 BF 缺氧或鱼池增氧过度设计。

6.4 CO₂ 产生量

$$\text{CO}_2\text{_Daily} = \text{o2FishDaily} \times 1.375$$

其中 1.375 = 44/32, 是 CO₂ 和 O₂ 的摩尔质量比 (RQ ≈ 1)。CO₂ 只按鱼虾生理耗氧计算, 不含硝化耗氧 (硝化反应不产生 CO₂)。

第 7 章 精确循环方程

这是 iRAS 的核心计算引擎。传统 RAS 设计常用近似加法公式 $C = \Delta / \Sigma \eta$ 估算稳态浓度, 但当系统包含多个串联和旁路处理单元时, 加法公式会产生显著误差。iRAS 采用**精确乘法循环方程**, 确保质量守恒严格成立。

7.1 质量守恒推导

考虑一个稳态循环系统: 水从鱼池流出, 经过 n 个处理单元后回到鱼池。每个处理单元有各自的"通过率" $(1 - \eta)$ 。

设:

- Δ = 每循环周期鱼池产生的污染物浓度增量 (mg/L)
- C_{in} = 处理后回水浓度 (鱼池入口, 最低)
- C_{out} = 鱼池出水浓度 (鱼池出口, 最高)
- R = 总通过率 = 所有处理单元通过率的连乘

稳态条件:

$$C_{out} = C_{in} + \Delta \quad (\text{鱼池内产生增量})$$

$$C_{in} = C_{out} \times R \quad (\text{经全部处理后回到 } C_{in})$$

联立求解:

$$C_{out} = \Delta / (1 - R) \quad (\text{鱼池出水, 设备选型依据})$$

$$C_{in} = \Delta \times R / (1 - R) \quad (\text{回水, 最低浓度})$$

7.2 总通过率 R

$$R = \prod (1 - \eta) \times (1 - \text{dilution})$$

R 越小 (总去除率越高), C_{out} 越低, 水质越好。

7.3 串联 vs 旁路建模

串联通过率 (RDF / BF / CO₂ 脱气)

全流量通过, 注意是**乘法**:

$$\text{串联通过率} = (1-\eta_{\text{rdf}}) \times (1-\eta_{\text{bio}}) = 0.25 \times 0.30 = 0.075$$

即总去除率 92.5%。加法 $0.75 + 0.70 = 1.45 > 100\%$ 物理上不可能。

旁路通过率 (蛋分 / AOP / 反硝化)

以蛋分为例, 旁路流量比 $\alpha=20\%$, 单次去除 $\eta=70\%$:

$$\text{系统等效去除率 } \eta_{\text{sys}} = \alpha \times \eta_{\text{single}} = 0.20 \times 0.70 = 14\%$$

物理含义: 80% 的水不经处理 + 20% 的水去除了 70% → 混合后整体去除 14%。

7.4 闭合验证

精确循环方程的优美性质: 沿程浓度递减后, 最终回水浓度恰好等于 C_{in} 。iRAS 在每次计算后内部验证此闭合条件 (误差 = 0)。

7.5 各参数的 R 计算路径

参数	处理路径	R 表达式
TAN	BF 硝化 + 换水	$(1-\eta_{\text{bio}})(1-d)$
TSS	RDF + 蛋分(旁路) + BF + 换水	$(1-\eta_{\text{rdf}})(1-\eta_{\text{skim}})(1-\eta_{\text{bioTSS}})(1-d)$
DOM	蛋分(旁路) + AOP(旁路) + 换水	$(1-\eta_{\text{skim}_{\text{sys}}})(1-\eta_{\text{aopDOM}_{\text{sys}}})(1-d)$
NO_3	反硝化(旁路) + 换水	$(1-\eta_{\text{denitri}_{\text{sys}}})(1-d)$
CO_2	脱气塔 + 换水	$(1-\eta_{\text{co2}})(1-d)$
Geosmin	AOP(旁路) + 换水	$(1-\eta_{\text{aop}_{\text{sys}}})(1-d)$

v1.1 修复 AOP DOM 系数: v1.0 误把 90% geosmin 系数当 DOM 去除率, v1.1 用 aopDOMRemoval 默认 5% (可调 5-15%)。

7.6 dilution 敏感性 v1.1 重要发现

dilution 在不同参数中的影响差异巨大:

参数 / 工艺配置	η_{total}	dilution 是否主导?	dilution 敏感度
TAN (BF 70%)	70%	否	< 0.1%
TSS (RDF + 蛋分 + BF)	82%	否	< 0.1%

CO ₂ (脱气塔 65%)	65%	否	< 0.1%
NO ₃ (反硝化 6%)	6%	边缘	~1%
NO ₃ (无反硝化)	0%	是	缩放为 V _{tank} /V _{total}
Geosmin (无 AOP)	0%	是	缩放为 V _{tank} /V _{total}
DOM (无蛋分)	0%	是	缩放为 V _{tank} /V _{total}

当 $\eta = 0$ 时, $R = 1 - \text{dilution}$, $1 - R = \text{dilution}$, $C_{\text{out}} = \Delta / \text{dilution}$ 。dilution 翻倍, 浓度减半。这是 v1.1 系统体积建模 + 换水率口径修正的关键意义。

第 8 章 系统体积建模

v1.1 新章 + v1.3.x 增 S-101

v1.1 本章是 v1.1 全新内容。v1.0 把整个系统简化为"鱼池水体 V_tank", 忽略了工艺水体 (BF/RDF/管路等)。v1.1 引入完整 $V_{total} = V_{tank} + V_{process}$ 建模。v1.3.x 在 $V_{process}$ 中加入集水池 V_sump。

8.1 为什么要建模工艺水体?

传统 RAS 设计常把整个系统简化为"鱼池水体", 忽略了:

- 生物滤池 (MBBR) 池水容积通常 = V_{tank} 的 10-20%
- 微滤机 (RDF) 集水池 $\approx Q \times 2\text{min HRT}$
- CO_2 脱气塔水体 $\approx \text{degasArea} \times 1.2\text{m}$
- 增氧锥水体 $\approx Q \times 30\text{s HRT}$
- AOP / 反硝化 / 蛋分塔等支路水体
- 集水池 (v1.3.x 新增)
- 管路 + 集水井 + 缓冲池 $\approx V_{tank} \times 5\%$

这些工艺水体合计 $V_{process}$ 通常占 V_{tank} 的 30-60%, 是不可忽略的。

8.2 $V_{process}$ 各部分计算公式

工艺单元	计算公式	物理依据
V_RDF v1.5+ 修正	$Q \times \text{rdfHRT_min} / 60$	RDF 集水池 HRT, 默认 $\text{rdfHRT_min} = 0.5$ 分钟 (v1.6 中位, 兼顾紧凑与缓冲); 紧凑型 0.3 (YUTANK/Hydrotech 工业实测 18s); 设计院传统 1.5-2 min (含外置缓冲池)
V_BF (含填料水) v1.5+ 修正	$\text{bioVolume} / \text{fillRatio}$	bioVolume 是填料净体积, fillRatio 默认 0.5 (Rusten 2006 工业惯例): $V_{BF} = 2 \times \text{bioVolume}$; fillRatio 0.7 (高密度): $V_{BF} = 1.43 \times \text{bioVolume}$
V_skim	skimmerVolume	蛋分塔水容积 (已是水量)
V_UV	5 m ³ (固定)	UV 流通式, 内部水量极小
V_AOP	aopVolume	AOP 反应池水容积 (已是水量)
V_denitri	denitriVolume	反硝化反应器
V_co2 v1.5+ 修正	$\text{degasArea} \times \text{co2VolFactor}$	脱气塔水容积, 默认 $\text{co2VolFactor} = 0.7$ (集水 0.5m + 填料湿水 0.2m, 国内中型项目); 可调 1.2 (1m 集水 + 0.2m 填料水, 鲑鱼场深塔)

V_aerator	$Q \times 0.5 / 60$	增氧锥 HRT $\approx 30s$
V_sump v1.3.x	clamp(Q/30, 20, 200)	集水池, 工程惯例
V_pipes	$V_{\text{tank}} \times 5\%$	管路+集水井+缓冲池, 工程经验

v1.5+ V_BF 推导

RAS 体积建模时, BF 池总容积 (含填料 + 水) 才是稳态稀释的有效水量, 不只是填料净体积。若 fillRatio = 50% (典型 MBBR), 填料净体积 100 m^3 对应池总容积 200 m^3 (因 50% 是填料、50% 是水间隙)。旧版 $\times 1.3$ 是经验估计 (假设填料 35% + 水 65%), 但工业上 fillRatio 是设计变量, 应该用代码统一。

8.3 V_total 与稳态浓度

总系统体积:

$$V_{\text{total}} = V_{\text{tank}} + V_{\text{process}}$$

对稳态浓度 $C_{\text{out}} = \Delta / (1-R)$ 影响:

- $\Delta_{\text{per_cycle}}$ 与 V 无关 (V 在公式中抵消)
- R 中的 dilution 项受 V_{total} 影响

因此 V_{total} 影响稳态浓度的程度取决于参数处理工艺:

- 有专门处理设备 (TAN/TSS/CO₂): η 主导, V_{total} 影响 $< 1\%$
- 仅靠换水稀释 (无反硝化的 NO₃ 等): dilution 主导, C 按 $V_{\text{tank}}/V_{\text{total}}$ 缩放, 典型下降 35-40%

8.4 换水率口径 v1.1 改为 V_total

用户填的 "exchangeDaily 5%/d" 在不同口径下含义不同:

口径	含义	实际换水量	使用方
V_tank (v1.0)	鱼池每天换 5%	$V_{\text{tank}} \times 5\%$	国内传统养殖户
V_total (v1.1)	系统总水体每天换 5%	$V_{\text{total}} \times 5\%$ (多 50%)	Timmons 教科书 / 国家海水鱼体系 / 大型工业项目

v1.1 改为 V_{total} 是物理一致性优先。v1.0 老方案加载到 v1.1 后, 换水量自动 +50% 左右, 仅靠换水稀释的参数 (无反硝化的 NO₃, 无 AOP 的 Geosmin) 浓度自动下降 ~37%。这是物理修正后的真实值, 不是 bug。

8.5 三文鱼成鱼 1000t/yr V_process 实例

工艺单元	体积 (m ³)
鱼池水体 V_tank	3,385
BF 含水	570
CO ₂ 脱气	350
RDF 集水	338
集水池 S-101 v1.3.x	200
管路 + 缓冲	169
反硝化	129
增氧锥	85
蛋分塔	74
AOP 反应池	17
UV	5
V_process 合计	1,938 (V_tank 的 57%)
V_total = V_tank + V_process	5,323

第 三 部 分

各处理单元设计

第 9 章 固液分离 (转鼓微滤机 RDF)

v1.7 系统排水重构

9.1 原理

转鼓微滤机 (RDF) 是 RAS 中的第一道防线, 通过 60-90 μm 不锈钢筛网物理拦截水中的悬浮固体。工作原理: 养殖水从转鼓内侧流向外侧, 固体颗粒被拦截。当筛网两侧压差达到设定值时, RDF 内嵌反冲机构自动启动反冲洗 — **v1.7 起反冲泵不再作为独立设备列项**, 因为工程实际中所有商用 RDF (Hydrotech / Faivre 等) 整机出厂均含反冲泵, 反冲水绝大部分经污泥沉淀池回循环 (Sharrer 2010 实测 95-98% 清液回流)。

9.2 设计参数

参数	典型值	说明
筛网孔径	60-90 μm	越小去除率越高, 但易堵塞
TSS 去除率	60-90%	iRAS 默认 75%
处理流量	循环流量 \times safetyRDF	v1.1: 默认 1.10
RDF 集水池 HRT	0.1-5 min	iRAS v1.6 默认 0.5 min (中位)

9.3 计算公式

$$\text{RDF 处理流量} = \text{循环流量} \times \text{safetyRDF} \text{ (m}^3/\text{h)}$$

$$\text{RDF 集水池 } V = \text{流量} \times \text{rdfHRT_min} / 60 \text{ (m}^3\text{)}$$

9.4 系统排水 (v1.7 重构)

v1.6 之前, iRAS 工艺面板有 "RDF 反冲(%) 2%" 输入, 但 $4870 \text{ m}^3/\text{d} \div V_{\text{total}} = 101\%/d$ 物理荒谬 (远超合理换水率 1-5%/d)。问题根源: 把 "反冲管瞬时分流比" 误当作 "穿越系统边界的排水比"。

v1.7 全面清理这个语义混淆:

- UI 删 "RDF 反冲(%)" + "反冲泵 H / η " 共 3 个输入框
- 反冲泵不再独立设备 (P&ID / 设备清单 / CAPEX / OPEX 全部移除)
- 字段 `rdfBackwash` / `rdfBackwashPumpHead_m` / `rdfBackwashPumpEta` 从 `PROCESS_DEFAULTS` / `readStageProcFromInputs` 删除
- **新增"系统排水"概念**: 真实穿越系统边界的废液由换水率决定

$$\text{系统排水流量 (m}^3/\text{d)} = V_{\text{total}} \times \text{exchangeDaily} \text{ (与"换水率"定义一致, 不再依赖反冲)}$$

$$\text{系统排水 TSS (kg/d)} = \text{load.tssDaily} \text{ (质量守恒, 含污泥固相)}$$

系统排水 TAN_eff (mg/L) = C_tank (溶解态稳态浓度)

系统排水 NO₃_eff (mg/L) = C_tank (溶解态稳态浓度)

TSS 口径说明

iRAS 输出的"系统排水 TSS"是沉淀池入口浓度(含污泥, 质量守恒口径), 不是污水管口浓度。1000 t 三文鱼工况下 TSS ≈ 3257 mg/L, 是合理的沉淀池入口悬浮固体浓度(典型 RAS 1000-5000 mg/L 范围)。不可直接对照 GB 8978 (污水管口标准, 一级 70 mg/L)。沉淀池设计 + 上清液处理由污水工程单独完成, iRAS 边界止于"沉淀池入口"。

9.5 常见故障与运维

故障现象	可能原因	处理措施
出水 TSS 偏高	筛网破损 / 孔径变大	更换筛网 (寿命 2-3 年)
反冲频繁启动	进水 TSS 过高 / 筛网堵塞	清洗筛网; 检查投饵量
排污水清澈	反冲喷嘴堵塞 / 水压不足	清洗喷嘴; 检查 RDF 内嵌反冲机构
转鼓不转	电机故障 / 链条断裂	检查电机和传动

运维要点: ① 每周检查筛网完整性; ② 每月清洗反冲喷嘴; ③ 海水系统注意筛网腐蚀。

第 10 章 生物过滤 (MBBR 生物滤池)

10.1 硝化原理

MBBR 是 RAS 最关键的处理单元。HDPE 悬浮填料 (比表面积 $500-800 \text{ m}^2/\text{m}^3$) 在曝气搅动下悬浮于水中, 表面附着硝化菌群, 将有机的 TAN 氧化为低毒的 NO_3 。硝化是缓慢的自养过程, 菌群建立需 4-8 周。

10.2 容积去除率 (VTR)

$$\text{VTR}_{20} = 0.3-0.8 \text{ kg TAN}/(\text{m}^3 \cdot \text{d}) @20^\circ\text{C} \text{ (iRAS 默认 } 0.5)$$

$$\text{VTR}(T) = \text{VTR}_{20} \times \theta^{(T-20)} \text{ 其中 } \theta = 1.10$$

温度 °C	修正系数	VTR kg/(m ³ · d)	说明
10	0.386	0.193	冷水鱼苗种
12	0.467	0.234	三文鱼苗种
15	0.621	0.310	三文鱼成鱼
16	0.683	0.341	大菱鲆全周期
20	1.000	0.500	基准
25	1.611	0.805	加州鲈/鳜
28	2.144	1.072	罗非鱼
30	2.594	1.297	对虾

盐度修正

$$f_{\text{sal}} = \max(1 - 0.01 \times S, 0.3)$$

盐度 30‰ 时硝化效率降至 70%。

10.3 填料体积计算

$$\text{BF 填料体积} = \text{TAN}_{\text{Daily}} \times \text{safetyBio} / [\text{VTR}_{20} \times \theta^{(T-20)} \times f_{\text{sal}}]$$

10.4 BF 粗孔曝气 v1.1

$$\text{BF } O_2 = \text{TAN} \times 4.57 + \text{feedMax} \times \text{o2DOMfactor}$$

$$\text{风量} = O_2_Peak \times \text{safetyBFblow} / (1.2 \times 0.23 \times \text{SOTE}) \quad \text{SOTE}=8\%$$

$$\text{风机功率} = \text{风量}(\text{m}^3/\text{s}) \times 50000 / (0.60 \times 1000) \quad (50\text{kPa}, \eta=0.60)$$

v1.1 风机效率从 0.55 提到 0.60。o2DOMfactor 默认 0.10 (v1.0 偏低 0.05, Boyd 2018 实测)。

10.5 启动期管理

BF 启动需要 4-8 周, 启动期管理不当会导致 TAN/NO₂ 飙升, 大量死鱼。

启动步骤

- **第 1 周:** 空池, 加硝化菌剂, 投 NH₄Cl 至 TAN 2-4 mg/L, 温度 25-30°C
- **第 2-3 周:** 监测 TAN/NO₂, TAN 开始下降说明 Nitrosomonas 工作
- **第 3-5 周:** NO₂ 下降、NO₃ 出现, 说明 Nitrobacter 建立
- **第 5-8 周:** TAN < 0.5 且 NO₂ < 0.3 持续 3 天, 标志成熟
- **第 8+ 周:** 逐步加负荷, 每周不超过 20%

注意事项

- **pH 控制:** 硝化耗碱, 低于 6.5 时菌活性骤降; 维持 pH 7.0-7.5
- **DO 控制:** BF 内 DO 必须 > 2 mg/L
- 禁止抗生素 (杀硝化菌)
- 禁止一次满负荷投鱼

10.6 常见故障

故障	原因	措施
TAN 突然升高	BF 过载/停电/pH 过低	减少投饵; 补碱度; 检查曝气
NO ₂ 持续偏高	Nitrobacter 不足/pH<6.5	补碱度; 降低负荷
填料沉底	曝气不足/气管堵塞	检查风机和气管
出水浑浊	生物膜脱落	正常现象

第 11 章 蛋白分离器

11.1 原理

蛋白分离器利用泡沫分离原理去除 DOM 和细颗粒 TSS (<30 μ m)。空气或臭氧以微细气泡注入接触塔, 表面活性有机物吸附在气泡表面, 随泡沫溢出。

11.2 空气 vs 臭氧

参数	空气模式	臭氧模式
DOM 单次去除率	30-50% (默认 40%)	60-80% (默认 70%)
TSS 单次去除率	~40%	~40%
额外效果	无	杀菌+脱色+氧化
成本	低	高 (臭氧发生器)
海水风险	无	溴酸盐 BrO ₃ (盐度>5‰需控制)

v1.1 蛋白 TSS 去除率 skimmerTSSEff 开放为可调参数 (默认 40%)。

11.3 设计计算

系统等效去除率 = 流量比 \times 单次效率 = 0.20 \times 0.70 = 14%
 蛋白容积 = 旁路流量 (m³/h) \times HRT (min) / 60 \times safetySkimmer

HRT 默认 2 min (Sanders Helgoland LE-315 商业实测 1.8-2.2 min, ScienceDirect 2023)。物理: DOM 吸附在气泡表面是秒级反应, HRT 主要保证泡沫稳定形成, 不是反应时间, 长 HRT 无收益。用户可在 1.5-4 min 范围调整。

臭氧需求 = feedMax \times 0.010 g O₃/g 饲料

11.4 常见故障

故障	原因	措施
不产泡沫	DOM 太低/气量不足	正常 (新水); 增加气量
泡沫太湿	气量过大/液位过高	减小气量; 调低液位

臭氧泄漏	密封不严	检查; 加活性炭尾气破坏
溴酸盐过高	海水中臭氧过量	降低剂量; 监测 BrO_3

第 12 章 反硝化反应器

12.1 原理

在缺氧条件下 ($DO < 0.5 \text{ mg/L}$), 异养菌利用甲醇将 NO_3 还原为 N_2 气体。这是 RAS 中唯一能真正"去除"氮素的过程。



12.2 设计计算

旁路流量 = 循环流量 × 流量比 (默认 10%)
 系统去除率 = 流量比 × 单次效率 = 10% × 60% = 6%
 $VDR(T) = VDR_{20}(0.8) \times 1.08^{(T-20)}$
 反硝化容积 = NO_3 去除量 × safetyDenitri / VDR(T)
 甲醇 = NO_3 去除量 × 2.47 kg/d
 碱度回收 = NO_3 去除量 × 3.57 kg CaCO_3 /d

12.3 常见故障

故障	原因	措施
NO_3 不降	甲醇不足/DO 过高	增加甲醇; 检查缺氧 $DO < 0.5$
出水发白臭味	甲醇过量	减少甲醇
pH 过高	反硝化产碱过多	减少流量比

运维要点: ① 甲醇按 NO_3 实时调节; ② 甲醇属易燃危化品, 单独储存; ③ 反硝化器启动比 BF 快 (1-2 周)。

第 13 章 UV 紫外线消毒

13.1 原理

UV-C (254 nm) 穿透微生物细胞壁, 破坏 DNA 胸腺嘧啶二聚体, 使其丧失复制能力。优点: 无化学残留, 不改变水质, 杀菌快。

13.2 Chick-Watson 模型

$$\text{灭活率} = 1 - \exp(-k \times D)$$

病原体	k (cm ² /mJ)	D=40 灭活率	建议剂量
细菌 (E.coli, 弧菌)	0.10-0.20	99.7%	30-40 mJ/cm ²
鱼类病毒 (IPNV, IHNV)	0.05-0.10	86-98%	60-100 mJ/cm ²
原虫 (小瓜虫包囊)	0.15-0.25	99.7-99.99%	30-40 mJ/cm ²
水霉孢子	~0.30	99.999%	20-30 mJ/cm ²

13.3 UV 功率公式 v1.1

$$\text{UV 功率 (W)} = \text{处理流量} \times \text{UV 剂量} \times 0.85 \times \text{safetyUV}$$

v1.1 系数从 0.75 改为 0.85 (USEPA UVDGM 中位); safetyUV 是设备额定功率裕度 (灯管老化), 不是剂量增加。

13.4 运维

- ① 灯管运行时间计数器记录, 寿命 8000-12000h;
- ② 石英套管每月用稀盐酸擦拭除垢;
- ③ UV 前 TSS < 10 mg/L 才能保证效果。

第 14 章 高级氧化 (AOP)

14.1 原理

臭氧 + UV 协同产生羟基自由基 ($\cdot\text{OH}$), 氧化分解 geosmin 和 2-MIB (土腥味物质, ng/L 级)。单独臭氧或 UV 效果有限, 协同效率 80-95%。

14.2 设计计算

$$\begin{aligned} \text{旁路流量} &= \text{循环流量} \times 5\% \\ \text{AOP 容积} &= \text{旁路流量 (m}^3/\text{h)} \times \text{HRT (min)} / 60 \text{ (m}^3\text{)} \end{aligned}$$

HRT 按 AOP 类型默认值:

- **集成型** (UV+O3 一体反应器, ULTRAAQUA 等主流方案): HRT 2 min (默认)
- **分体型** (O3 接触池 + UV 反应器, 大型项目): HRT 8 min

物理: 羟基自由基 $\cdot\text{OH}$ 寿命 $< 1 \text{ ms}$, 反应是光化学秒级。Schrader (2010) 实测 1 min 接触, geosmin 去除 86-92%。用户可在 1-15 min 范围内手动调整。

$$\text{臭氧} = \text{旁路流量} \times 24\text{h} \times 0.5 \text{ g/m}^3 / 1000 \text{ (kg/d)}$$

v1.1 修复 AOP DOM 系数: aopDOMRemoval 默认 5% (可调 5-15%), v1.0 误把 90% geosmin 系数当 DOM 去除率。

14.3 运维

- ① AOP 出水必须经活性炭或 UV 消除残留臭氧再回主流;
- ② 不是所有 RAS 都需要 AOP——仅品种对土腥味敏感时才需要。

第 15 章 增氧与脱气

v1.1 大幅修正 + v1.7 氧锥拓扑+K-101

v1.1 本章是 v1.1 重点更新, 特别是 CO₂ 脱气塔由 v1.0 的"扣 70% 写死"升级为 v1.1 的独立设备模型。

15.1 DO 饱和度 (Benson-Krause 1984)

$$DO_{sat} = \exp(-139.34411 + 1.575701e5/Tk - 6.642308e7/Tk^2 + \dots)$$

温度 °C	淡水 DO_sat	海水 30‰	降幅
10	11.29	9.32	-17%
15	10.08	8.39	-17%
16	9.86	8.21	-17%
20	9.09	7.62	-19%
25	8.26	6.97	-18%
28	7.83	6.62	-18%
30	7.56	6.41	-18%

15.2 纯氧 vs 空气

参数	纯氧 (液氧+锥形塔)	空气 (罗茨风机+微孔盘)
DO 目标	110-165% 饱和度 (按物种)	~95% 饱和度
适用密度	≥ 40 kg/m ³	< 40 kg/m ³
吸收效率	锥形塔 80-90%	微孔盘 SOTE 18%
运行成本	液氧 1.2 元/kg	仅电费

v1.1 DO 目标饱和度按鱼种推荐: 鲑 165%, 海水温水 140%, 温水淡水 110-125%, 罗非/对虾 100-115%。

15.3 鱼池 DO 计算 v1.1

$$\begin{aligned} \text{鱼池出水 DO} &= \text{DO_sat} \times \text{satTarget\%} - \text{deltaD0_peak} \\ \text{deltaD0_peak} &= \text{o2FishPeakHourly} / \text{flowM3h} \times 1000 \text{ (mg/L)} \end{aligned}$$

v1.1 用**小时峰值**评估 DO 降幅 (而不是 v1.0 的日均), 反映投喂后代谢尖峰。

15.4 CO₂ 脱气塔 v1.1 新增独立设备

CO₂ 脱气塔在 v1.1 作为独立设备建模。v1.0 没有此模型 (仅在增氧节点扣 70% 写死, 不存在独立的塔/风机/CAPEX/OPEX)。v1.1 用户首次看到此设备会有独立的设备投资和运行成本——这是新增的成本项, 不是"修正"。

15.4.1 设计参数

参数	v1.1 默认	依据 / 工业实测
G:L 气液比	3	国内中型项目 2-4, 鲑鱼场 5-7
风压	2.5 kPa (可调)	Delta Cooling Towers 实测 0.87-1.12 kPa
风机效率	0.60	罗茨风机 0.5-0.7, 离心风机 0.65-0.8
单次脱气率	65%	G:L=3 浅塔实际值

默认参数与 Summerfelt (2009) 文献区间 (5-15 kW per 1000 m³/h) 和 Delta Cooling Towers 工业项目实测对齐。

15.4.2 风机功率公式

$$\begin{aligned} \text{风量 (m}^3\text{/h)} &= \text{循环流量} \times \text{G:L} \\ \text{风机功率 (kW)} &= \text{风量}/3600 \times \text{风压(Pa)} / \text{风机效率} / 1000 \end{aligned}$$

举例 (三文鱼成鱼 Q=10155 m³/h):

$$10155 \times 3 / 3600 \times 2500 / 0.6 / 1000 = 35 \text{ kW}$$

全部 8 鱼种 CO₂ 风机合计约 600 kW, 落入 Summerfelt (2009) 文献区间。

15.4.3 稳态 CO₂ 浓度

$$\text{CO}_2\text{_tank (mg/L)} = \text{CO}_2\text{_Daily (kg/d)} \times 10^6 / (\text{流量 (m}^3\text{/h)} \times 24 \times \eta_{\text{co2}})$$

单位推导: $\text{CO}_2_Daily [\text{kg}/\text{d}] \times 10^6 [\text{mg}/\text{kg}] = \text{mg}/\text{d} \div (\text{Q} \times 24) [\text{m}^3/\text{d} \div 1000 = \text{L}/\text{d} \text{? 注意}]$ 等价等式:
 $\text{CO}_2_tank (\text{mg}/\text{L}) = \text{CO}_2_Daily(\text{kg}/\text{d}) \times 1000 (\text{g}/\text{kg}) \times 1000 (\text{mg}/\text{g}) / [\text{流量}(\text{m}^3/\text{h}) \times 24 (\text{h}/\text{d}) \times 1000 (\text{L}/\text{m}^3) \times \eta_co2]$ 化简: $\text{CO}_2_tank (\text{mg}/\text{L}) = \text{CO}_2_Daily(\text{kg}/\text{d}) \times 10^6 / [\text{流量}(\text{m}^3/\text{h}) \times 24,000 \times \eta_co2]$ 即代码中的: `co2Tank = co2Daily * 10^6 / (flowM3h * 24 * 1000 * eta_co2)`

海水阈值 15 mg/L, 淡水阈值 20 mg/L。脱气塔关闭时 η_co2 改为 `co2FallbackEff` (默认 5%)。

v1.5+ 公式订正

旧手册写的 $\times 10$ 是单位换算错误 ($\text{kg}/\text{d} \rightarrow \text{mg}/\text{L}$ 必须 $\times 10^6$, 即 $1 \text{ kg} = 10^6 \text{ mg}$)。代码一直是对的, 仅手册书写错误。

15.5 氧锥拓扑 mainline vs bypass v1.7 新增

v1.6 之前 iRAS 在 UI 上已经有 "主流路径 / 旁路(节能)" 两个选项, 但 `calcPumpPowerBreakdown / aerationSpec / OPEX` 完全没区分 — 是 "UI 假承诺"。v1.7 通过全网调研 (Linde SOLVOX cone / Pentair AES Speece / PR Aqua PPC / Global Seafood Advocate 2019) 确认: **国际主流大型 RAS 项目 "more often plumbed in side stream configuration"**。

15.5.1 两种拓扑的物理对比

对比项	mainline (主流串联)	bypass (旁路高压)
主流路径	全部循环水过氧锥	主流不过锥, 旁路 5-30% 流量过高压锥后回流
主泵附加压头	+ 2-15 m (锥子压损)	0 (主泵不过锥)
氧锥规格流量	= 全循环流量 Q	= $Q \times \text{bypassRatio}$ (小流量)
氧锥操作压力	低压 10-21 psi (LHO)	高压 1-3 bar (SOLVOX / PPC)
典型 DO 出锥	130-170% 饱和度	200-400% 饱和度
额外设备	无	旁路泵 P-602 + 混合点 M-601
代表设备	Pentair AES LHO	Linde SOLVOX cone / PR Aqua PPC
适用规模	中小型项目 ($Q < 5000 \text{ m}^3/\text{h}$)	大型项目 ($Q > 5000 \text{ m}^3/\text{h}$)

15.5.2 v1.7 字段定义

字段	默认	钳制范围	工程对照
<code>o2ConeTopology</code>	mainline	mainline / bypass	—
<code>o2ConeHeadLoss_m</code>	3 m	[0, 15]	LHO 2-3 / Speece 5-10 / SOLVOX 110 至 15
<code>o2BypassRatio (%)</code>	10	[5, 30]	国际主流 8-15%
<code>o2BypassPumpHead_m</code>	20 m	[5, 40]	玻璃钢 20 / SOLVOX 25-30

o2BypassPumpEta (%)	60	[30, 85]	高压泵典型
---------------------	----	----------	-------

15.5.3 主泵扬程公式

mainline: $H_{\text{pump_total}} = H_{\text{main}} + o2\text{ConeHeadLoss}$
 bypass: $H_{\text{pump_total}} = H_{\text{main}}$ (主泵不过锥, 旁路泵独立加压)

15.5.4 旁路泵 P-602 设计

$Q_{\text{bypass}} = Q \times o2\text{BypassRatio}$
 $P_{\text{bypass}} \text{ (kW)} = Q_{\text{bypass}} \times \rho \times g \times o2\text{BypassPumpHead_m} / (3.6 \times 10^6 \times o2\text{BypassPumpEta})$

P-602 加入设备清单 / CAPEX / OPEX / 热平衡, 1+1 备用模块化 (与主泵 P-101 同口径)。

15.5.5 经济对比 (1000 t 三文鱼实测)

mainline (12 m) bypass (9 m + 旁路 20 m) 主泵 P-101 610.4 kW 488.3 kW 旁路泵 P-602 0 92.2 kW ————— 综合泵功率 610.4 kW 580.5 kW (-29.8 kW) 氧锥规格 $Q = 10155 \text{ m}^3/\text{h}$ $Q \times 0.1 = 1015 \text{ m}^3/\text{h}$ 氧锥 CAPEX 355 万元 36 万元 (缩 10×) 设备 CAPEX 4,454 万 3,842 万 (-612 万) 工程总投资 9,800 万 8,454 万 (-1,346 万) 综合成本(元/kg) 36.70 35.41 (-1.29 元/kg) 全投资 IRR 14.90% 17.31% (+2.41%)

15.6 air 模式增氧 — K-101 鱼池增氧鼓风机 v1.7 新增

v1.7 之前 air 模式 (空气曝气) 只有 K-302 (BF 曝气风机), **缺鱼池主增氧风机**。温水鱼种 (罗非鱼 / 鳊鱼 / 对虾) 的大规模 RAS 设计无法用工具自动生成 — 而这是 80%+ 中国 RAS 项目的实际场景。

v1.7 加入 **K-101 鱼池增氧鼓风机**:

参数	典型值	说明
设备类型	罗茨风机 + 微孔盘管曝气	SOTE 18-22% (Wagner 2010)
风量基准	$o2\text{FishPeakHourly} \times \text{safety} / \text{SOTE}$	按鱼池峰值氧需反推
风压	15-25 kPa	含曝气盘水深 + 管阻
风机效率	60%	罗茨风机典型
备用	1+1 备	鱼池主增氧故障即鱼窒息, 必须双机轮换
P&ID tag	K-101	与 K-302 (BF 风机) 区分

$$\text{风量 } Q_{\text{air}} \text{ (Nm}^3\text{/min)} = \text{o2FishPeakHourly} \times \text{safety} / (60 \times \text{SOTE} \times 0.28)$$

$$\text{功率 } P_{\text{K101}} \text{ (kW)} = Q_{\text{air}}/60 \times P_{\text{kPa}} \times 1000 / 60\% / 1000$$

K-101 加入 modulePerSpec (与 K-302 同口径 1+1 备), P&ID / 设备清单 / 报告章节 / 财务测算 全链路同步。

15.7 常见故障

故障	原因	措施
DO 偏低	液氧用完 / 增氧塔堵塞	检查液氧; 清洗增氧塔
CO ₂ 偏高	脱气塔风量不足	增加风量; 清洗填料
液氧蒸发过快	储罐真空层失效	联系厂商检修
微孔盘气泡变大	盘面堵塞 / 老化	酸洗或更换
bypass 模式 DO 不均匀	M-601 混合点设计不当 / 旁路比过高	检查混合管段长度; 旁路比降到 10-15%
K-101 跳闸 (air 模式)	1+1 备用未启动 / 双机故障	立即手动切换备用; 鱼池含氧 15-30 min 内告急

第 16 章 热负荷与温控 v1.2 完全重写

v1.2 重写 v1.1 用单点能量平衡估算热泵负荷, 忽略车间空气节点。v1.2 引入**双节点 Picard 迭代**同时求解空气热平衡 + 空气湿平衡。本章给出基础理论框架, 详细求解过程见第 29 章。

16.1 项目级常量管理 (v1.2)

v1.1 把热平衡参数(气温/源水温/U 值/换气率)放在每个阶段的 proc 字段里, 用户必须在每个阶段重复设置。v1.2 把所有热平衡参数挪到顶部全局配置区 `globalThermalConfig` (项目级常量影响所有阶段)。具体参数表见第 28 章和附录 B。

16.2 补水温差

补水量 = $V_{total} \times \text{日换水率 (m}^3/\text{d)}$ [v1.1: V_{total} 口径]
热负荷 = $V \times 1000 \times 4.18 \times \Delta T / 3600$ (kWh/d)

16.3 板式换热回收

换热后温度 = $T_{source} + \eta_{HX} \times (T_{target} - T_{source})$
 $\eta_{HX} = 75\%$ (iRAS 默认)

16.4 热泵补齐 v1.1 制热/制冷分离

v1.1 制热 COP_{heat} 默认 4.0, 制冷 COP_{cool} 默认 3.0 (v1.0 一刀切 3.5)。热带降温场景下 v1.0 电费低估 30-40%。

16.5 双节点稳态求解概述 v1.2

v1.1 假设池热散到一个无限大"室外", 实际上车间空气会被池水加热到比室外高 5-12°C, 导致池散热小于"对室外气温散热"; 同时湿度积累让蒸发率下降。v1.2 引入双节点稳态:

节点 1 (水体热平衡):
 $Q_{metabolism} + Q_{equipment} - Q_{pool_loss} - Q_{evap} \times \lambda = \text{热泵供热/制冷 (} Q_{HP} \text{)}$
其中:
 $Q_{pool_loss} = UA_{pool} \times (T_w - T_{room})$
 $Q_{evap} \times \lambda = \text{蒸发潜热散热, 计入水体(蒸发夺走水体显热)}$

节点 2 (空气热平衡):

$$\begin{aligned}
 &UA_{\text{pool}} \times (T_w - T_{\text{room}}) = \\
 &UA_{\text{envelope}} \times (T_{\text{room}} - T_{\text{air}}) \\
 &+ UA_{\text{floor}} \times (T_{\text{room}} - T_{\text{ground}}) \\
 &+ UA_{\text{vent}} \times (T_{\text{room}} - T_{\text{air}}) \\
 &- Q_{\text{internal_air}}
 \end{aligned}$$

节点 3 (空气湿平衡):

$$m_{\text{evap}} \times \text{cover} = m_{\text{air}} \times \text{ACH} \times (W_{\text{room}} - W_{\text{air_outdoor}})$$

迭代变量: T_{room} (室温), W_{room} (室内空气含湿量)

详细模型、求解算法和输出字段见第 29 章。

v1.5+ 公式订正

蒸发潜热 $Q_{\text{evap}} \times \lambda$ 从空气节点移到水体节点。**物理:** 蒸发夺走的是水体显热(水分子带走能量), 空气节点只接收潜热增量 (W_{room} 上升), 不直接接收 λ 项。旧手册写在空气节点是 v1.2 推导笔误, 代码一直把 λ 项放在水节点的能量平衡里 (正确)。

16.6 热泵分类型 v1.2

类型	COP_heat	COP_cool	源温	适用
空气源 air	3.5-4.0	2.5-3.0	T_{air}	常规, 气温 $> -10^{\circ}\text{C}$
水源 water	4.5-5.5	3.5-4.5	T_{source}	有大量地下水/河水
地源 ground	4.0-5.0	3.5-4.5	T_{ground} (\approx 年均)	有埋管空间
海水开式 seawater_open	4.5-5.5	3.5-4.5	T_{seawater}	沿海/海上养殖, 钛板换热

16.7 工程注意

- **北方冬季:** 源水 $5-10^{\circ}\text{C}$, 热带鱼种 (罗非鱼 28°C) 温差 20°C , 热泵电费可能超过增氧
- **板式换热器结垢:** 海水钙镁沉积, 每 3-6 月需酸洗
- **保温:** 管道和鱼池保温可减少 20-30% 热损失
- **密闭池盖:** v1.2 池盖系数 (none=1.0/partial=0.4/full=0.1) 直接影响蒸发, 严寒地区采用密闭池盖能省 20-40% 暖气电费
- **共用车间:** v1.3.x 加入车间共用散热系数 (默认 0.75), 反映多阶段共享外墙节省散热

第 17 章 水泵与管道设计

17.1 泵功率公式

$$P \text{ (kW)} = 9.81 \times Q \text{ (m}^3\text{/h)} \times H \text{ (m)} / (3600 \times \eta)$$

17.2 iRAS 6 路泵 v1.1 默认

泵	流量	默认扬程 m	默认效率	说明
主循环泵	循环流量 Q	12	68%	全流量, 功率最大
反硝化支路泵	Q × 反硝化比	10	60%	分流到缺氧反应器
UV 支路泵	Q × UV 比	10	60%	
AOP 支路泵	Q × AOP 比	10	60%	
蛋分支路泵	Q × 蛋分比	6	60%	蛋分塔近距离
RDF 反冲泵	Q × 反冲比	8	55%	间歇运行

主循环泵功率通常占全场电费 30-40%, 是最大单一用电设备。变频泵可节能 15-25%。

17.3 管径选择

管道类型	推荐流速 m/s	说明
吸水管	0.8-1.2	流速太高→气蚀
压水管	1.5-2.5	流速太高→水锤
排污管	1.0-2.0	需自清洗流速防沉积
溢流管	0.5-1.0	重力流

$$\text{管径 } D = \sqrt{(4Q / \pi v)} \quad Q=\text{m}^3/\text{s}, v=\text{m}/\text{s}, D=\text{m}$$

17.4 水头损失

组成	典型值	说明
静水头	0.5-2 m	鱼池到处理间高差
管道摩阻	2-4 m	管长和管径决定

设备阻力	3-5 m	RDF+BF+UV 各约 1-2m
安全余量	1-2 m	10-20%
合计	8-15 m	iRAS 默认 12m

第 18 章 电气与控制系统

18.1 在线水质监测

参数	传感器	精度	价格	位置
DO	荧光法	±0.1 mg/L	5,000-15,000	鱼池+BF 出水
pH	玻璃电极	±0.01	2,000-5,000	鱼池+BF
温度	Pt100	±0.1°C	500-1,000	鱼池+源水
TAN	离子选择	±0.1 mg/L	20,000-50,000	鱼池 (可选)
ORP	铂金电极	±5 mV	3,000-8,000	蛋分 (臭氧控制)
液位	超声波	±1 cm	1,000-3,000	鱼池/集水井

18.2 PLC 控制逻辑

- 主循环泵: 变频 + PID 液位/流量
- RDF 反冲: 定时或压差触发
- 增氧: PID 控制液氧流量阀
- 加碱: PID 控制 NaHCO₃ 计量泵
- 加甲醇: 根据 NO₃ 控制
- 温控: PID 热泵启停
- 补水: 液位触发

18.3 报警系统

报警项	阈值	响应
DO 低	< 5 一级 / < 3 紧急	启动备用风机/氧气瓶
pH 低	< 6.5	加 NaHCO ₃ ; 减投饵
TAN 高	> 2.0 mg/L	减投饵; 检查 BF
温度异常	偏离 ±2°C	检查热泵
液位低	低于设定	补水; 检查泄漏
停电	市电中断	柴油发电机 30 秒启动
泵故障	电流异常	切换备用泵

必备: ① 柴油发电机 (全场 100% 负荷); ② UPS (PLC + 传感器); ③ 短信报警; ④ 每月演练应急切换。

第 19 章 生物安全与消毒策略

RAS 的封闭特性天然具有高生物安全性, 但一旦病原体进入会因循环水快速传播。"防进来"比"治病"更重要。新建项目应在投产前建立完整的生物安全 SOP。

19.1 进水消毒

- 新水源消毒后再进入系统 (UV 60 mJ/cm² 或臭氧 0.5 mg/L 残留 5 min)
- 井水相对安全; 河水/海水风险高, 需多级处理
- 补水管路与养殖水路物理隔离, 防虹吸

19.2 人员与工具

- 换工作服+靴子, 经消毒脚池 (200 ppm 次氯酸钠)
- 不同阶段工具不混用, 颜色编码
- 饲料间与车间隔离

19.3 隔离与检疫

- 新购鱼苗隔离观察 2-4 周
- 隔离池独立水处理系统
- 病鱼立即隔离, 病死鱼深埋或焚烧

19.4 日常消毒

对象	消毒剂	浓度/方法	频率
工具	碘伏	100 ppm 浸泡 10 min	每次使用后
脚池	次氯酸钠	200 ppm 每周换液	每天
车间地面	过氧化氢	3% 喷洒	每周
鱼池 (空池)	高锰酸钾	50 ppm 浸泡 24h	批次间
进水	UV	60 mJ/cm ²	持续

第 20 章 系统启动与调试

新建 RAS 满负荷需要 8-12 周。急于满负荷投鱼是新手最常犯错误——BF 处理能力是逐步建立的, 超过 BF 能力 = TAN 暴涨 = 大量死鱼。

20.1 启动流程

阶段	时间	操作	关键指标
设备调试	第 0-1 周	空载运行; 试压	设备无故障 48h
BF 培菌	第 1-4 周	加菌剂; 投 NH_4Cl 至 TAN 2-4	TAN 下降, NO_2 出现
硝化成熟	第 4-6 周	继续培菌	TAN<0.5 且 NO_2 <0.3 持续 3 天
低负荷放鱼	第 6-8 周	放容量 20-30%	TAN<1.0 稳定
加负荷	第 8-12 周	每周加 15-20%	指标安全
满负荷	第 12+ 周	正常生产	TAN<1, NO_2 <0.3, DO>6

20.2 常见启动问题

问题	原因	措施
TAN 不降	温度太低/pH 太低	升温 25-30°C; 补碱度
NO_2 持续高	Nitrobacter 未建立	正常! 耐心等待
放鱼 TAN 暴涨	投鱼太多/投饵太猛	减投饵 50%; 部分换水
pH 快速下降	碱度耗尽	加 NaHCO_3
鱼不吃食	应激	检查水质; 减投饵

第四部分

经济评估

第 21 章 运行成本

21.1 成本构成

成本项	计算基础	典型占比
饲料	日投饵量 × 饲料单价	50-65%
电费 (水泵)	主泵+支路泵 × 24h	8-15%
电费 (BF 风机)	BF 粗孔曝气 × 24h	3-5%
电费 (UV)	UV 功率 × 24h	1-3%
电费 (热泵)	热泵电耗 × 电价	0-15%
液氧	o ₂ Fish / 吸收率 × 单价	5-12%
臭氧电费	臭氧发生器 × 24h	1-3%
CO ₂ 风机电费	脱气风机 × 24h	2-5%
甲醇	反硝化 × 单价	1-3%
NaHCO ₃	碱度投加 / 0.595 × 单价	1-3%
杂项电费	照明/控制/备用	1-2%
CAPEX 折旧 v1.1	设备/8年 + 土建/20年 / 365	15-30%

21.2 峰值 vs 日均双口径

- **峰值工况:** 基于 feedMax (= biomass × feedRate)
- **日均工况:** 基于 feedAvg (= 年增重 × FCR / 365)

峰值成本通常是日均的 1.5-2.5 倍。设备必须能承受峰值, 但日常运行接近日均。

v1.1 OPEX 中的化学品/臭氧消耗在年均工况下按 feedRatio (= feedAvg/feedMax) 折算。

21.3 CAPEX 折旧 v1.1 新增

v1.1 引入双年限折旧:

- 设备折旧 (8 年默认, 5-20 年可调): 微滤机/泵/风机/UV/臭氧等
- 土建折旧 (20 年默认, 10-30 年可调): 池体/管道/安装/调试/设计

年折旧 = 设备 / 设备年限 + 土建 / 土建年限 (元/年)
 日折旧 = 年折旧 / 365 (自动加到 totalAvg/totalMax)

21.4 综合成本对比 v1.3 含折旧 + 工况

1000 t/yr 三文鱼基准, 4 工况下综合成本对比(v1.3):

工况	气温/源水	OPEX	折旧	综合 元/kg	对照文献
青岛冬	-7°C/4°C	22.4	13.6	35.96	—
海南冬	17°C/22°C	24.1	13.6	37.70	—
海南夏	32°C/27°C	26.9	13.6	40.47	—
挪威 Bergen 冬	0°C/4°C	22.7	13.6	36.30	Atlantic Sapphire 60-70(含人工/苗)

其他鱼种(v1.1 数据, 单一工况):

鱼种	OPEX 元/kg	折旧	综合	文献
大菱鲆 500t	31.9	16.2	48.1	46.32 (海水鱼体系)
罗非鱼 1000t	19.9	9.5	29.3	25-30
石斑鱼 300t	27.4	12.7	40.1	60-100 (不含苗)
加州鲈 500t	27.9	12.7	40.6	30-50
鳕鱼 300t	35.9	16.0	51.9	80-100
鳗鲡 300t	44.6	15.2	59.8	60-100 (含苗)
对虾 100t	25.7	16.2	41.9	25-35

注: iRAS 不计算人工/苗种/管理费等"软成本", 综合成本通常比文献偏低 20-30%, 工程实际中另行加计。

第 22 章 投资概算

22.1 设备直购成本

设备	计价单位	默认单价	推荐范围
转鼓微滤机	元/(m ³ /h)	500	300-800
MBBR 生物滤池	元/m ³	4,500	3,000-6,000
UV 消毒器	元/kW	10,000	8,000-15,000
蛋白分离器	元/m ³	25,000	15,000-40,000
臭氧发生器	元/(kg/d)	100,000	80,000-150,000
AOP 反应池	元/m ³	35,000	20,000-50,000
反硝化反应器	元/m ³	5,500	4,000-8,000
脱气塔	元/m ²	20,000	15,000-30,000
主循环泵+变频	元/kW	3,500	2,500-5,000
支路泵	元/kW	3,000	2,000-4,000
罗茨风机	元/kW	4,000	3,000-6,000
液氧增氧塔	元/(m ³ /h)	350	200-500
液氧储罐 (3t)	元/套	100,000	80,000-120,000
热泵 (空气源)	元/kW	2,000	1,500-3,000
板式换热器	元/m ²	1,200	800-2,000

22.2 工程总投资

工程总投资 = 设备直购 × 放大系数
放大系数 = 2.2 (默认, 范围 1.8-2.5)

放大系数涵盖: 管道阀门 (15-20%)、电气仪表 (10-15%)、自控 (5-10%)、安装调试 (10-15%)、土建厂房 (30-40%)、设计监理 (5-8%)。

概算精度约 ±40%, 实际造价以厂商报价为准。iRAS 投资概算用于项目可行性初判, 不能替代正式造价。

22.3 氧锥拓扑对 CAPEX 的影响 v1.7 新增

v1.7 引入氧锥拓扑 mainline / bypass 区别建模, 对 CAPEX 有显著影响 (1000 t 大西洋三文鱼实测):

设备项	mainline	bypass	差异	说明
液氧增氧塔 A-601	355 万 (Q=10155 m ³ /h)	36 万 (Q×10% = 1015 m ³ /h)	-319 万	规模缩 10× (按小流量定价)
主泵 P-101	213 万 (610 kW)	171 万 (488 kW)	-42 万	主泵不过锥, 扬程降低
旁路泵 P-602	0	28 万 (92 kW)	+28 万	v1.7 新增独立设备
液氧储罐 V-901	≈ 相同	≈ 相同	~0	站级 CAPEX 按日耗推算, 拓扑不影响日耗
设备 CAPEX 小计	4,454 万	3,842 万	-612 万	—
工程总投资 (× Lang 2.2)	9,800 万	8,454 万	-1,346 万 (-14%)	含放大系数

拓扑选择建议 1000 t 以上大型三文鱼 / 鳟鱼项目建议默认采用 bypass 拓扑, 节省 CAPEX 600+ 万元 + 电费 25+ 万元/年。中小型项目 (Q < 5000 m³/h) 用 mainline 更简单, 因为 旁路高压锥的单价规模效应需要项目规模达到一定阈值才显现。

第 五 部 分

设计案例

第 23 章 案例: 三文鱼 1000 t/年 v1.7 数据 (mainline / bypass 对比)

本案例使用 iRAS v1.7 默认的大西洋三文鱼参数, 演示完整计算并对比两种氧锥拓扑。气候选用挪威 Bergen 冬季工况 ($T_{\text{air}}=0^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{source}}=4^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{target}}=15^{\circ}\text{C}$), 这是工程实际三文鱼项目最具代表性的气候。

23.1 阶段参数

参数	苗种	幼鱼	中鱼	成鱼
体重 (g)	0.1→50	50→500	500→2000	2000→5000
月数	6	8	6	4
FCR	1.0	1.1	1.2	1.20
蛋白 (%)	50	45	42	40
feedRate (%)	3.0	1.5	1.0	0.95
peakFactor	1.5	1.5	1.5	1.5
水温 ($^{\circ}\text{C}$)	12	14	15	15
密度 (kg/m^3)	30	50	60	70
盐度 (‰)	0	0	12	30
损耗 (%)	15	8	4	3
turnover	4.0	3.0	2.5	3.0
o2FishFactor	0.20	0.21	0.23	0.23
recDepth_m v1.3	1.5	3.0	5.0	7.0
subSystemCount v1.3	1	2	3	4

23.2 关键计算结果 v1.7 实测

项目	苗种	幼鱼	中鱼	成鱼	全场
存塘 (t)	3	41	132	237	413
鱼池水体 V_{tank} (m^3)	111	836	2,193	3,385	6,525
工艺水体 V_{process} (m^3)	~89	~469	~1,015	~1,798	~3,371
系统总水体 V_{total} (m^3)	~200	~1,305	~3,208	~5,183	~9,896
循环流量 Q (m^3/h)	424	2,465	5,481	10,155	—
日峰值饲料 feedMax (kg/d)	~36	~321	~1,073	~2,251	~3,681
液氧 (kg/d)	11	88	298	~772	1,169

o2DailyTotal (kg/d, 全场)	—	—	—	—	1,113
o2PeakHourly (kg/h, 全场)	—	—	—	69.56	—
A-601 峰值供氧 (kg/h)	—	—	—	—	41.20
CO ₂ 风机 K-201 (kW)	7	41	91	169	309
模块数	1	2	3	4	—
每套池数	1	2	2	2	—
反推池径 D (m)	10	9.4	10.5	8.8	—

注 上表"全场"列是 4 阶段累加值, 但成鱼期 (idx=3) 通常是设计基准 (最大流量、最大氧需), 单阶段数据中成鱼期最有工程意义。"o2DailyTotal 1113 kg/d / A-601 41.20 kg/h / peakHourly 69.56 kg/h" 是本案例三个关键指标, 与 SUMMARY 参考 **100% 吻合**。

23.3 综合成本 (Bergen 冬季 + bypass 拓扑, v1.7 默认)

下表是 v1.7 工具实际输出值 (jsdom 跑测, 默认气候即挪威 Bergen 冬季, 默认价格电 0.7 元/kWh / 液氧 1.2 元/kg / 饲料按各阶段单价):

项目	mainline (主流串联)	bypass (旁路高压)	差异
CAPEX 设备直购	4,455 万元	3,843 万元	-612 万元
CAPEX 工程总投资 (× Lang 2.2)	9,800 万元	8,454 万元	-1,346 万元
年折旧 (设备 8 年 / 土建 20 年)	824 万元/年	711 万元/年	-113 万元/年
年 OPEX (不含折旧)	2,846 万元/年	2,830 万元/年	-16 万元/年
年综合成本 (含折旧)	3,670 万元/年	3,541 万元/年	-129 万元/年
OPEX (元/kg)	28.46 元/kg	28.30 元/kg	-0.16
折旧 (元/kg)	8.24 元/kg	7.11 元/kg	-1.13
综合成本 (元/kg 鱼, 含折旧)	36.70 元/kg	35.41 元/kg	-1.29
对照文献	Atlantic Sapphire (Florida) 60-70 元/kg (含人工/苗/管理) Nordic Aqua 宁波 (中国境内) Q2 2024 实测生产成本 41 元/kg ≈ EUR 5.23/kg		—
偏差说明			—

iRAS 不含人工 (~6-8 元/kg) / 苗种 (~5 元/kg) / 管理与营销 (~3-5 元/kg)。
iRAS 36.70 + 软成本 ~16 元/kg ≈ 53 元/kg, 与挪威 Salmon Evolution 目标"与海水网箱打平"(NOK 50-60/kg ≈ 35-42 元/kg) 量级一致。

重要更正 (vs v1.7 早期手册) 早期版本误把 OPEX (28 元/kg) 写成综合成本 (22 元/kg)。真实情况: **v1.7 跑 1000 t 三文鱼 mainline 默认气候: OPEX = 28.46 元/kg, 折旧 = 8.24 元/kg, 综合成本 = 36.70 元/kg。** bypass 拓扑可省 1.29 元/kg, 主要来自 CAPEX 节省 → 折旧降低。这个综合成本与 v1.3 历史四工况基线 (Bergen 36.30 元/kg) 完美吻合 ✓

23.4 工况敏感性分析 (沿用 v1.3 4 工况基线)

工况	OPEX 元/kg	综合 元/kg	差异原因
青岛冬	22.4	35.96	基准 (v1.3 数据)
海南冬	24.1	37.70	仍需制冷 (气温 > 水温)
海南夏	26.9	40.47	32 → 15°C 制冷温差大
挪威 Bergen 冬	22.7	36.30	气温温和 + 源水冷

注 上表是 v1.3 数据 (mainline 拓扑)。挪威 Bergen 冬 36.30 元/kg 与 v1.7 jsdom 实测 36.70 元/kg 完美吻合 (偏差 +1%, 在迭代版本计算精度内)。bypass 拓扑可再节约 1.29 元/kg, 见 23.3。SUMMARY 路线图已规划 v1.8 用 bypass + v1.7 字段重新生成 4 工况基线 JSON。

关键观察: 三文鱼养殖目标水温 12-15°C, 海南夏季气温 32°C, 制冷温差 17-20°C, 制冷电费暴增。 **不建议在海南养三文鱼。** 挪威成本接近青岛, 长期运行更优。

23.5 mainline vs bypass 拓扑详细对比 v1.7 新增

1000 t 大西洋三文鱼成鱼期 (Q=10155 m³/h, V_{total} ≈ 5183 m³, 4 模块) 在 Bergen 冬季工况下的两种拓扑全工况对比:

对比项	mainline (主流串联)	bypass (旁路高压)	差异
动力消耗			
主泵 P-101 功率	610.4 kW	488.3 kW	-122.1 kW
旁路泵 P-602 功率	0 (无)	92.2 kW	+92.2 kW
综合泵功率	610.4 kW	580.5 kW	-29.8 kW (节能)
年电费节省 (8000 h × 0.7 元/kWh)	—	—	~17 万元/年
设备规格			

液氧增氧塔 A-601 流量	10155 m ³ /h (全流量)	1015 m ³ /h (10% 旁路)	缩 10×
主泵扬程 H_main	12 m + 3 m (锥子) = 15 m	12 m (主泵不过锥)	-3 m
旁路泵扬程 H_bypass	—	20 m	+20 m (高压锥)
CAPEX (设备直购)			
主泵 P-101	213 万元	171 万元	-42 万
液氧增氧塔 A-601	355 万元	36 万元	-319 万
旁路泵 P-602	0	28 万元	+28 万
液氧储罐 V-901 (站级)	~ 相同	~ 相同	~0
设备 CAPEX 小计	4,454 万元	3,842 万元	-612 万
工程总投资 (× Lang 2.2)	9,800 万元	8,454 万元	-1,346 万 (-13.7%)
财务指标 (售价 60 元/kg, 30%自有/70%贷款 @ 5%/8年, 折现率 8%, 项目 15 年)			
全投资 IRR	14.90%	17.31%	+2.41%
自有资金 IRR	~22%	25.23%	+3%
全投资 NPV (万元)	5,779	7,031	+1,252
静态回收期 (年)	6.19	5.57	-0.62
动态回收期 (年)	8.63	7.42	-1.20
BEP (% 满产)	62.3%	57.9%	-4.3%

v1.7 工程结论

1000 t 大西洋三文鱼项目采用 bypass 拓扑相比 mainline: **综合成本省 1.29 元/kg + 工程 CAPEX 节省 1346 万 + 全投资 IRR 提升 2.4 个百分点 + 静态回收期缩短 0.62 年**。这与国际主流大型三文鱼 RAS 多采用 side stream 拓扑的工程实际一致 (Linde SOLVOX cone / PR Aqua PPC / Global Seafood Advocate 2019 "more often plumbed in side stream configuration")。

第 24 章 案例: 大菱鲆 500 t/年

v1.1 修正 大菱鲆密度 v1.1 修正 (15/30/40 → 25/50/60 kg/m³), 与莱州东方海洋等循环水项目实测一致。

24.1 阶段参数

参数	苗种	中鱼	成鱼
体重 (g)	3→50	50→250	250→600
月数	4	8	6
FCR	0.9	1.1	1.3
蛋白 (%)	55	50	48
feedRate (%)	3.0	1.5	0.9
水温 (°C)	16	16	16
密度 (v1.1)	25	50	60
盐度 (‰)	28	28	28
损耗 (%)	15	6	3
turnover	3.5	2.5	2.0
o2FishFactor	0.21	0.21	0.21
recDepth_m v1.3	0.8	1.0	1.0

大菱鲆是底栖鱼, 水深保持在 1m 以内, 主要靠底面积容纳生物量。

24.2 关键结果

项目	数值	对照
全场存塘	809 t	—
鱼池水体 V_tank	5,121 m ³	v1.0 配置 8,036 m ³ (-36%)
CAPEX 工程总投资	9,626 万元	v1.0 14,192 万元 (-32%)
年折旧	809 万元	—
年综合成本	2,403 万元	—
综合成本	48.1 元/kg	文献 46.32 元/kg (+4%)

结论: v1.1 大菱鲆综合成本与国家海水鱼产业体系 2019 调查数据偏差仅 +4%, 建模精度达到工程概算可用水平。

第 25 章 案例: 南美白对虾 100 t/年

25.1 清水 RAS vs Biofloc 对比

对比维度	清水 RAS	Biofloc (BFT)
水处理核心	微滤机 + 生物滤池	靠异养菌絮团原位处理 TAN
有无生物滤池	有 (MBBR)	无 (最大区别)
水色	清澈	褐色 (絮团 300-800 mg/L)
碳氮比	无要求	C:N \geq 15:1 关键
DO 需求	按 RAS 标准	极高 (异养菌+硝化菌+虾)
密度	2-15 kg/m ³	3-8 kg/m ³
投资	高	低
运行难度	中等	高 (絮团管理, 翻塘风险)
iRAS 支持	✓	✗

25.2 阶段参数 v1.1

参数	苗种	养成前期	养成后期
体重 (g)	0.01→1	1→10	10→30
月数	1	1.5	1.5
FCR	1.0	1.3	1.6
蛋白 (%)	45	42	38
feedRate (%)	10	5	3
水温 (°C)	30	30	30
密度 (kg/m ³)	2	8	15
盐度 (‰)	15	15	15
损耗 (%)	20	10	8
o2BaseFactor + Q10	0.31 + 1.3	同左	同左
o2FishFactor (30°C)	0.40	0.40	0.40
recDepth_m v1.3	1.5	2.0	2.5

v1.1 对虾 Q10 设为 1.3 (而非鱼类 2.0), 反映高温(30°C)代谢饱和。o2FishFactor 0.40 与 Boyd 2018 实测一致。

25.3 关键结果

项目	数值
全场存塘	6.25 t (稳态)
鱼池水体 V_tank	~558 m ³
CAPEX 工程总投资	1,922 万元
年折旧	162 万元
年综合成本	419 万元
综合成本	41.9 元/kg
对照	中国南方 RAS 实测 25-35 元/kg, 偏高 +20% (规模效应)

对虾 100t 项目偏高的原因是规模效应——iRAS 不考虑 CAPEX 0.7 次方缩放。规模 500 t/yr 后综合成本会降到 30 元/kg 左右。

第 六 部 分

工程化与平台功能 (v1.3 新增)

第 26 章 多模块并联与 N+1 备用 v1.3 新章

26.1 为什么大型项目要做模块化

对于年产量 > 1000 t/yr 的大型 RAS 项目, 工程上不会建一个超大的循环系统, 而是拆成多个模块并联。原因:

- **故障隔离:** 一个模块停机检修, 其他模块正常运行, 不会影响全场生产
- **设备规格合理:** 单台主循环泵不会超过 75-90 kW(常规电机), 流量 < 600 m³/h(标准变频泵)
- **分批投产:** 项目可以分阶段建设, 减少首期资金压力, 收益期前移
- **运维标准化:** 模块尺寸/设备型号统一, 备件通用, 操作员培训简单
- **风险分散:** 病害爆发可隔离单一模块, 整场生物安全风险降低

典型工业项目模块数(参考 Atlantic Sapphire / Stolt Sea Farm / 国内大型项目):

规模	典型模块数	单模块产能
< 500 t/yr	1 套	全场 1 模块
500-1500 t/yr	2-3 套	200-500 t/yr/模块
1500-5000 t/yr	3-6 套	500-1000 t/yr/模块
> 5000 t/yr	5+ 套	1000+ t/yr/模块

26.2 iRAS 模块化逻辑

v1.3.x 中, 每个阶段的模块数完全由用户决定。在阶段卡片头部" 套数" `subSystemCount` 输入(默认 1, 范围 1-10):

```
numModules = stage.subSystemCount
单模块流量 = 阶段总流量 / numModules
单模块设备容量 = 阶段总设备容量 / numModules
```

不同阶段可以有不同模块数。比如:

- 苗种期: 1 套(规模小, 不需要拆)
- 幼鱼期: 2 套(开始拆模块, 隔离风险)
- 中鱼期: 3 套
- 成鱼期: 4 套

这种"阶段递增"的配置反映了大型 RAS 的实际工程: 苗种期对单一系统依赖性高, 成鱼期产量大需要分散风险。

26.3 模块内 N+1 备用配置

每个模块内部按以下规则配置备用:

设备	单机容量上限	配置规则	备用
主循环泵 P-101	75 kW	ceil(模块流量功率 / 75)	+1 台备用
BF 风机 K-302	30 kW	ceil(BF 风量功率 / 30)	+1 台备用
RDF 微滤 F-201	600 m ³ /h	ceil(模块流量 / 600)	+1 台备用
UV D-401	8 kW	2 套并联各设计 75% 余量	1 台坏 → 另 1 台加大流量
热泵 H-801	200 kW	ceil(热泵装机 / 200)	+1 台备用
支路泵(UV/蛋分/反硝化/AOP)	30 kW	ceil(支路功率 / 30)	+1 台备用
加药计量泵	1 kW	ceil(加药功率 / 1)	+1 台备用
O3 发生器 G-901	50 kW	ceil(O3 功率 / 50)	+1 台备用

26.4 全场共用站级设备

不按模块拆分, 全场共用 1 套(站级设备):

设备	配置	说明
液氧储罐 V-901	2 罐(主+备)	双罐设计, 切换不停产
应急柴油机	1 台 100% 全场负荷	30 秒启动 + 自动切换
变压器	2 套(高/低压双套分列)	故障切换
UPS	1 套(PLC + 传感器 + 关键阀门)	10-30 分钟续航

26.5 模块化对成本的影响

模块化的**设备成本变化**: 单台机组容量变小 → 单价(元/kW)略升, 但数量增加 → 总成本基本不变 (±5%)。真正的成本影响来自**备用机组数**: 4 个模块各配 N+1 备用, 比 1 个大模块配 N+1 备用多备 3 台。典型规模(1000 t/yr, 4 模块)备用成本约占 CAPEX 5-10%。

工程权衡

模块数越多, 故障隔离越好, 但备用成本越高。一般原则: 500 t/yr 以下不拆; 500-1500 拆 2-3 个; > 2000 拆 3-5 个。具体数字看可靠性要求(三文鱼必须高可靠, 罗非可降低)和投资预算。

第 27 章 鱼池配置与池深统一 v1.3 新章

27.1 鱼池形状与尺寸的工程逻辑

RAS 鱼池设计常见形状: 圆形(Cornell 双流式)/ 八角 / 方形带圆角。圆形最常见, 因为:

- 水流自循环(切向进水形成涡流), 鱼自动游动锻炼
- 固体颗粒向中心沉降, 中心底排可高效收集粪便
- 无死角, 每平米有效水体最大

圆形池的关键尺寸:

- **直径 D:** 4-30 m(工程实践范围)
- **水深 H:** 1-8 m(随鱼种)
- **高径比 H/D:** 0.15-0.5(过低流场死角多, 过高基建成本高)
- **容积 V:** 单池 50-3000 m³

27.2 反推算法

给定阶段总水体 V_{tank} 、每套池数 poolsPerSet 、套数 numModules , 反推单池直径:

```

总池数 = poolsPerSet × numModules
单池容积 V = V_tank / 总池数
反推直径 D = √(4V / πH)
高径比 = H / D
  
```

27.3 工程合理性自动告警

iRAS 在反推后自动检查工程合理性, 给出建议:

条件	告警内容
$D < 4 \text{ m}$	反推单池直径偏小, 建议减少每套池数或减少并联套数
$D > 30 \text{ m}$	反推单池直径偏大, 建议增加每套池数或增加并联套数
$D > 20 \text{ m}$ 且 $H < 3 \text{ m}$	大池配浅池($H/D < 0.15$), 流场易死角, 建议加深至鱼种推荐值
$\text{poolsPerSet} = 1$	每套仅 1 池, 无主备/检修轮替, 工程惯例 ≥ 2

27.4 鱼种推荐池深 (recDepth_m)

v1.3 在 SPECIES_DB 各鱼种各阶段加入推荐池深字段。这反映不同鱼种的生物学特性和工程惯例:

鱼种	苗种期	幼鱼期	中鱼期	成鱼期	生物学/工程理由
三文鱼	1.5	3.0	5.0	7.0	立体水柱泳鱼, 鲑科大池深, 商业 7-12m
大菱鲆	0.8	—	1.0	1.0	底栖鱼, 浅池单层底面积, 不超过 1.2m
石斑鱼	1.2	—	2.5	3.0	半底栖, 中等深度
加州鲈/鳊	1.5	2.5	3.0	—	淡水温水肉食鱼, 立体水柱
罗非鱼	1.0	2.0	3.0	—	耐高密度
鳊鲮	0.8	1.5	2.0	—	底栖, 中等浅
对虾	1.5	2.0	2.5	—	底栖+水柱中等

用户可在阶段卡片头部" 每套 X 池 × Y m 深"调整 Y 值, 默认填入鱼种推荐值。

27.5 池深统一数据源 (v1.3.x)

v1.3 早期版本中, 池深有**两个独立输入**:

1. 阶段卡片头的 `stage.poolDepth_m`: 用于池径反推
2. 热平衡区的 `stage.proc.poolDepth`: 用于估算池表面积 → 车间面积 → 散热

这种双输入容易让用户混淆: 调了一处, 另一处没调, 结果池形和散热模型用了两个不同的池深。v1.3.x 统一为一个**数据源**:

统一池深取值优先级 (`calcThermalLoad` 和 `applyModularization` 共用):

1. `stage.poolDepth_m` (用户在阶段卡片头部输入)
2. `stage.recDepth_m` (鱼种推荐, 来自 `SPECIES_DB`)
3. `proc.poolDepth` (老字段兼容, 老方案 JSON 加载用)
4. 1.5 m (最终默认)

同时删除了热平衡区的"池水深"输入, UI 上只在阶段卡片头部出现一次。同步更新加载老方案 JSON 的逻辑: 若老方案缺 `recDepth_m`, 加载时从 `SPECIES_DB` 按阶段名/index 自动补充, 保证池径反推和热平衡用同一个推荐值。

27.6 实例: 三文鱼成鱼 1000 t/yr

给定参数:

- 成鱼期 $V_{\text{tank}} = 3,381 \text{ m}^3$
- `numModules` = 4(用户设置)
- `poolsPerSet` = 2(每套 2 池, 主备轮替)
- `poolDepth_m` = 7.0(鱼种推荐)

反推:

- 总池数 = $2 \times 4 = 8$ 池

- 单池容积 $V = 3381 / 8 \approx 423 \text{ m}^3$
- 反推直径 $D = \sqrt{(4 \times 423 / (\pi \times 7))} \approx 8.8 \text{ m}$
- 高径比 $H/D = 7.0 / 8.8 \approx 0.80$ (合理范围)

结果: 8 个 $\Phi 8.8\text{m} \times 7\text{m}$ 圆池, 每池 423 m^3 。无告警。

第 28 章 全局气候与围护建模 v1.2 新章

28.1 为什么要做项目级常量管理

v1.1 把热平衡参数放在每个阶段的 proc 字段里。同一个项目有 4 个阶段, 用户必须在 4 个阶段重复设置:

- 气温 T_{air}(冬/夏/年均)
- 源水温 T_{source}(冬/夏/年均)
- RH 相对湿度
- U_{wall}, U_{roof}, U_{floor}, U_{window}
- 窗墙比, ACH, 热回收效率

这些是**项目级常量**(同一个厂房无论养什么阶段都是同一份)。v1.2 把它们挪到顶部全局配置区 `globalThermalConfig`, 一处设置, 所有阶段使用。

28.2 地区预设

v1.2 提供常见地区的气候预设, 选择后自动填入气温/源水温/RH 设计值:

地区	冬季 T _{air}	冬季源水	夏季 T _{air}	夏季源水	年均	RH 冬/夏
青岛(沿海)	-7°C	4°C	32°C	24°C	13°C/14°C	60%/78%
海南	17°C	22°C	33°C	30°C	25°C/26°C	75%/80%
挪威 Bergen	0°C	4°C	17°C	13°C	8°C/8°C	80%/75%
法罗群岛	2°C	6°C	13°C	11°C	7°C/9°C	85%/82%
北方内陆	-15°C	2°C	30°C	20°C	8°C/12°C	50%/65%
华南	10°C	15°C	33°C	26°C	22°C/23°C	72%/82%

用户选地区后仍可微调任何参数。

28.3 围护预设

预设	U _{wall}	U _{roof}	U _{floor}	U _{window}	说明
工业标准	0.8	0.6	0.8	2.5	50-80mm 聚氨酯保温, 双层玻璃
北欧高保温	0.25	0.20	0.30	1.2	200mm 岩棉, 三层 Low-E
简易厂房	2.0	1.5	1.5	5.0	钢板单层, 单层玻璃

28.4 4 工况对比设计

v1.2 引入**3 工况对比**(可扩展为更多), 每次计算同时跑:

工况	用途
设计冬季 (design_winter)	冬季最冷月用电峰值, 决定热泵装机
设计夏季 (design_summer)	夏季最热月用电峰值, 决定制冷机装机
全年均值 (annual)	年化电费, 用于成本核算和投资决策

当前选中的工况(thermalScenario)用于主显示, 其他工况结果在阶段卡片底部以对比表呈现。热泵装机容量取冬/夏极值的较大者(装机定容)。

28.5 池盖类型(蒸发率系数)

池盖直接影响蒸发率, 是热平衡的关键变量:

池盖类型	系数	典型蒸发率	适用场景
无盖 (none)	1.0	开放水面全蒸发	室外或简易车间
部分覆盖 (partial)	0.40	约 40% 蒸发	常规工业 RAS, 部分孔/进料口开
密闭 (full)	0.10	约 10% 蒸发	北欧/严寒地区, 节能高保温

蒸发是潜热(2257 kJ/kg @100°C, 2502 kJ/kg @0°C), 是冬季最大的散热项之一。密闭池盖能省 20-40% 的暖气电费。

28.6 通风换气与热回收

通风换气次数 ACH(1/h)是车间空气质量的关键参数:

- ACH = 0.3-0.5: 北欧高保温车间, 减少冬季热损失
- ACH = 1.0-2.0: 国内常规车间, 防 CO2/氨气积累
- ACH = 3.0+: 简易车间或处理高湿度

通风换气产生显热 + 潜热散热(冬季 T_{air} 比 T_{room} 低很多)。引入热回收可以回收 70-85% 的显热(板式或转轮换热器):

$$\text{通风显热散热} = 0.34 \times V_{\text{room}} \times \text{ACH} \times (1 - \text{ventHeatRecovery}) \times (T_{\text{room}} - T_{\text{air}})$$

单位: W (kW = 上式 / 1000)

$$0.34 = \rho_{\text{air}} \times c_{p,\text{air}} / 3600 = 1.2 \times 1005 / 3600 \text{ (W/(m}^3 \cdot \text{K} \cdot \text{ACH))}$$

北欧项目通常 ventHeatRecovery = 0.7-0.85, 国内项目多为 0(无热回收)。

第 29 章 双节点稳态热平衡求解 v1.2 新章

29.1 v1.1 的简化模型与局限

v1.1 的热平衡是单点能量平衡: 给定 T_w (目标水温)和 T_{air} (室外气温), 直接算补水加热量 + 池散热量 + 鱼代谢热 + 设备产热, 平衡后给热泵装机。这个模型忽略了车间空气节点, 默认池的热散到一个无限大的"室外"。问题在于:

- 实际车间空气会被池水加热到比室外高 5-12°C, 导致池散热小于"对室外气温散热"
- 湿度积累让蒸发率下降(蒸发→ W_{room} 升高→ $W_{sat} - W_{room}$ 减小→蒸发减少)
- 冬季高湿空气在冷壁面凝结, 凝结水可回收减少补水(隐藏的热回收)
- 夏季制冷时, 池水比车间空气冷, 空气会向池散热(反向)

29.2 双节点稳态方程 v1.6 公式订正

v1.2 引入双节点稳态求解器, 联立水节点能量、空气节点显热、空气节点湿度三个平衡:

节点 1: 水体热平衡 (kWh/d)

$$Q_{metabolism} + Q_{equipment} + Q_{makeup} - Q_{pool_loss} - Q_{evap} \times \lambda = Q_{HP}$$

其中: $Q_{pool_loss} = UA_{pool} \times (T_w - T_{room}) \times 24/1000$

$Q_{evap} \times \lambda =$ 蒸发潜热散热, 计入水体(水分子带走显热)

$Q_{HP} =$ 热泵供热(负)或制冷(正)负荷

节点 2: 空气显热平衡 (W) — 仅含显热

$$UA_{pool} \times (T_w - T_{room}) + Q_{air_gain}$$

$$= UA_{other} \times (T_{room} - T_{air})$$

$$+ UA_{floor} \times (T_{room} - T_{ground})$$

$$+ UA_{vent} \times (T_{room} - T_{air})$$

其中 $UA_{other} = U_{wall} \times A_{wall} + U_{roof} \times A_{building} + U_{window} \times A_{window}$

$UA_{pool} = poolU \times poolArea$ (poolU 室内 5, 室外 18 W/m²·K)

$UA_{floor} = U_{floor} \times A_{building}$ (地板对的是 T_{ground} , 不是 T_{air})

$UA_{vent} = 0.34 \times V_{room} \times ACH \times (1 - ventHR)$

$Q_{air_gain} =$ 水泵/UV 进空气部分的产热 [W]

节点 3: 空气湿平衡 (kg/s)

$$m_{evap} \times cover \times A_{water} = m_{air} \times ACH \times (W_{room} - W_{air_outdoor})$$

其中 $m_{evap} = \beta \times (W_{sat}(T_w) - W_{room})$ (kg/(m²·s), 蒸发可能为负=凝结)

$$m_{\text{air}} = \rho_{\text{air}} \times V_{\text{room}} \text{ (kg)}$$

$W_{\text{sat}}(T)$ = 用 Antoine 方程或 Magnus 公式估饱和含湿量

v1.6 公式订正(29 章)

旧手册把 $+ Q_{\text{evap}} \times \lambda$ 写在空气节点(节点 1)能量平衡里 — 这是 v1.2 推导笔误。物理: 蒸发夺走的是水体显热(水分子蒸发吸热), 空气节点只接收水蒸气的湿度增量($W_{\text{room}} \uparrow$), 不直接接收入项。代码 (calcThermalLoad) 一直把 λ 项放在水节点的能量平衡里, 物理正确。v1.6 把手册 16.5 节和 29.2 节统一改为与代码一致的写法 — **水节点含 $Q_{\text{evap}} \times \lambda$, 空气节点只有显热。**

耦合: T_{room} 影响 W_{sat} , W_{room} 影响 m_{evap} 。Picard 迭代求解(实际代码用闭式解):

1. 初值 $T_{\text{room}} = T_{\text{air}} + 5$, $W_{\text{room}} = W_{\text{air_outdoor}}$
2. 用当前 T_{room} 算 W_{sat} , 用当前 W_{room} 算 m_{evap}
3. 从节点 3(湿)解新 W_{room} (线性, 直接求)
4. 从节点 2(空气显热)解新 T_{room} (线性, 闭式; **不含 $m_{\text{evap}} \times \lambda$ 项**)
5. 检查 $|T_{\text{room_new}} - T_{\text{room_old}}| < 0.01^\circ\text{C} \rightarrow$ 收敛, 否则回 2
6. 典型 1 次闭式解即可收敛(v1.2 闭式解已替代迭代, 强通风/高湿度场景仍可用 Picard)

29.3 蒸发凝结模型

蒸发率 m_{evap} 用 Lewis 关系简化:

$$m_{\text{evap}} \text{ [kg/(m}^2 \cdot \text{s)]} = \beta \times (W_{\text{sat}}(T_w) - W_{\text{room}})$$

$$\beta = h_c \times \text{Lewis_factor} / c_{p_air}$$

β 典型值 $\approx 2-5 \times 10^{-4} \text{ kg/(m}^2 \cdot \text{s)}$ (室内静水, 弱风)

当 $W_{\text{sat}}(T_w) > W_{\text{room}}$: 蒸发(从池水夺热, 减少水温), $m_{\text{evap}} > 0$ 当 $W_{\text{sat}}(T_w) < W_{\text{room}}$: 凝结(空气中水蒸气在冷池面凝结, 给池水放热), $m_{\text{evap}} < 0$

凝结情况典型: 海南夏季水温 12-15°C(冷水鱼)远低于室内空气 32°C/RH 80%, 大量凝结。凝结水自动加到补水量减项, 反映节水效益:

$$V_{\text{condense_recovery}} = |m_{\text{evap}}| \times A_{\text{water}} \times 86400 / 1000 \text{ (m}^3/\text{d)}$$

$$V_{\text{makeup_actual}} = V_{\text{makeup}} - V_{\text{condense_recovery}}$$

29.4 求解输出

双节点求解器输出:

输出字段	含义	典型值范围
T_{room}	车间空气温度	$T_{\text{air}} + 5 \sim +12^\circ\text{C}$

RH_room	车间相对湿度	55-80%
W_room	车间含湿量	0.008-0.020 kg/kg
m_evap_kg_h	蒸发率(负值=凝结)	±5 ~ ±50 kg/h
UA_envelope	围护总 UA(无含地板)	500-2000 W/K
Q_envelope	围护总散热	5-50 kW
Q_pool	池散热	5-30 kW
Q_vent	通风散热	2-15 kW
Q_makeup	补水加热	5-30 kW
Q_internal	内部产热(鱼+设备)	10-100 kW
heatPumpKWhPerDay	热泵日电耗	100-3000 kWh/d
heatPumpAvgKw	热泵平均功率	5-200 kW
cop	当前工况 COP	2.5-5.5

29.5 RH 警告与除湿建议

当车间 RH > 85% 时, 建议加除湿设备(否则结构件腐蚀、电气问题、霉菌)。iRAS 在 RH 接近饱和时给出醒目提示, 建议:

- 增加 ACH(成本是更多通风加热能耗)
- 加密闭池盖(减少蒸发源头)
- 装独立除湿机(冷凝去湿, 但耗电)
- 做排风热回收(回收余热, 同时除湿)

29.6 热泵分类型

v1.2 拆出 4 种热泵, 各自的 COP 和源温模型:

类型	COP_heat	COP_cool	源温	适用
空气源 air	3.5-4.0	2.5-3.0	T_air	常规, 气温 > -10°C
水源 water	4.5-5.5	3.5-4.5	T_source	有大量地下水/河水
地源 ground	4.0-5.0	3.5-4.5	T_ground (≈年均)	有埋管空间
海水开式 seawater_open	4.5-5.5	3.5-4.5	T_seawater	沿海/海上养殖, 钛板换热

不同热泵类型的源温和 COP 在 globalThermalConfig 中可独立设置。

第 30 章 P&ID 工艺图自动生成 v1.3.x 新章

30.1 P&ID 是什么

P&ID(Piping & Instrumentation Diagram, 工艺管道仪表流程图)是化工/环保工程的核心设计文档, 描述工艺单元、管道连接、流向、关键仪表和控制逻辑。一份完整的 P&ID 应包含:

- 所有主要设备(用 tag 标识, 如 P-101 主泵)
- 管道(粗细线区分主流/支流, 颜色区分介质)
- 阀门、止回阀、过滤器
- 仪表泡泡(DO/pH/温度/液位等, 双圈表示就地安装, 单圈表示远传)
- 控制联锁线(虚线连接传感器→执行器)
- 图框(项目名/设计阶段/图号/版本)

30.2 iRAS 的 P&ID 生成方案

v1.3.x 提供独立 P&ID 查看器 `pid.html`, 主页面" 输出 P&ID"按钮一键打开。数据流:

1. 主页面计算完成后, "输出 P&ID"按钮把当前方案数据序列化为 JSON, 存到 localStorage
2. 新窗口打开 pid.html, DOMContentLoaded 时自动读取 localStorage 数据并渲染
3. 主页面再次点击时, 通过 postMessage 通知已打开的窗口刷新

30.3 工艺图布局

v1.3.x P&ID 采用**两层布局**:

主流层(上半部 y=560):

```

T-101 鱼池 → F-201 微滤 → B-301 MBBR → C-501 CO2 脱气 → S-101 集水池
↓
P-101 主泵
↓
A-601 增氧锥 → 回 T-101 (高架回水管)
```

旁路(从主流 T 接头取水):

- **S-701 蛋分**: F-201 出口 → S-701 → B-301 入口
- **R-801 反硝化**: B-301 出口 → R-801 → C-501 入口
- **D-401 UV**: C-501 出口 → D-401 → S-101 入口(回水位置)

公用工程层(下半部 y=900):

- V-901 LOX 储罐 → 气态 O₂ 接 A-601
- G-901 O₃ 发生器 → O₃ 接 X-901(AOP, 优先) 或 S-701(臭氧蛋白分)
- X-901 AOP 高级氧化(从主流 stub 接 S-101 集水池)
- K-302 BF 罗茨风机 → 空气接 B-301
- H-801 热泵机组 → 接 T-101 温控
- P-202 RDF 反冲泵 → 反冲水接 F-201

30.4 LOX 跟随阶段切换 (v1.3.x)

v1.3 早期版本中, LOX 储罐显示的氧耗是**全场总和** (summary.totalLOXKgD), 不论用户切换到哪个阶段都不变。v1.3.x 修复为**当前阶段氧耗** (stage.load.o2DailyTotal), 切换阶段时同步更新。

右上角元数据"全场氧耗"保持不变(那本来就是全场总和的语义, 用于储罐选型)。

30.5 设备表自动生成

P&ID 底部自动生成设备表, 含 tag/中文名/规格/数量列表:

tag	名称	规格示例(成鱼期)
T-101	鱼池	8 池 × Φ8.8 × 7m, 423 m ³ /池
F-201	微滤机	Q 11170 m ³ /h, η _{TSS} 75%
B-301	MBBR 生物滤池	V 438 m ³ , η _{TAN} 70%, 填充率 50%
C-501	CO ₂ 脱气塔	G:L 3, η 65%
S-101	集水池	200 m ³
P-101	主循环泵	488 kW @ 12m H, 68% η, VFD
A-601	增氧锥	41.2 kg O ₂ /h, η 85%
S-701	蛋白分离器(旁路)	α 20%, V 74 m ³
D-401	UV 消毒(旁路)	α 10%, 38 kW @ 40 mJ/cm ²
R-801	反硝化反应器(旁路)	α 10%, V 129 m ³
V-901	LOX 储罐	1113 kg/d (成鱼期), 3 t 储罐
X-901	AOP 高级氧化(公用工程)	α 5%, V 17 m ³

30.6 主泵 VFD 联锁示例

主泵 P-101 由鱼池 DO-101 通过 PID 闭环控制 VFD 频率, 维持鱼池 DO ≥ 鱼种最低饱和度 × DO_{sat}。联锁线在 P&ID 中表示为**虚线箭头从 DO-101 指向 P-101_VFD**。

类似的联锁包括:

- pH-102 → NaHCO₃ 加药泵(碱度补偿 PID)
- TT-103 → H-801 热泵(温度 PID)
- LT-104 → 补水阀(液位补水)
- AT-302 (BF 出口 TAN) → 减投饵报警(过载保护)
- DO-601 (氧锥出口 DO) → 液氧流量阀(纯氧流量 PID)

30.7 P&ID 导出

pid.html 支持**SVG 直接打印**(浏览器 Ctrl+P → 保存 PDF) 或**SVG 文件下载**(右键保存)。SVG 矢量格式, 缩放无损, 可在 AutoCAD/Visio 中导入用作工程图基础。

第 31 章 设备清单导出 v1.3.x 新章

31.1 设备清单的工程用途

设备清单是工程设计的核心交付物之一,用于:

- 厂家询价(发送给微滤/泵/UV 等设备厂家做精确报价)
- 采购合同(明确每台设备的规格、数量、备用)
- 验收交付(逐项核对实际到货)
- 运维基础(备件采购、维修参考)

31.2 iRAS 设备清单结构

v1.3.x 提供独立设备清单页面 `equipment.html`, 主页面" 导出设备清单"按钮一键打开。结构:

1. **项目元信息:** 鱼种 / 年产量 / 保存时间
2. **各阶段独立清单**(苗种期 / 幼鱼期 / 中鱼期 / 成鱼期)
3. 每个阶段下:
 - 多模块并联说明(N 个模块)
 - 鱼池配置(数量 × 直径 × 深度 × 单池容积)
 - 主流设备(T-101 / F-201 / B-301 / C-501 / S-101 / P-101 / A-601)
 - 旁路设备(S-701 / D-401 / R-801)
 - 公用工程(V-901 / G-901 / X-901 / K-302 / H-801 / P-202)
 - 分阶段小计金额
4. **全场合计**(所有阶段加和)

31.3 N+1 备用展开

清单中每个设备按"主用 + 备用"展开。例如成鱼期 4 模块, 每模块主泵需要 P-101 75 kW × 2 台, 加 1 台备用:

模块号	设备	规格	数量
模块 1	P-101 主泵(主)	75 kW × 488/4=122 / 75 ≈ 2 台	2
模块 1	P-101 主泵(备用)	同上	1
模块 2	P-101 主泵(主)	同上	2
模块 2	P-101 主泵(备用)	同上	1
...(其他模块)...			

全场	P-101 主泵 合计	75 kW	12 台(8 主 + 4 备)
----	-------------	-------	-----------------

31.4 单价与金额

设备单价在主页面"单价配置"区设置, equipment.html 自动读取并计算:

设备小计 = 数量 × 单台容量 × 单价(元/容量)
 全场设备直购 = 各设备小计加和
 工程总投资 = 设备直购 × 放大系数(默认 2.2)

放大系数 2.2 涵盖管道阀门 / 电气仪表 / 自控 / 安装调试 / 土建厂房 / 设计监理(详见第 22 章)。

31.5 单列静设备说明

某些设备虽然容积大、价值高,但不需要 N+1 备用,而是单列 + 旁路阀设计。例如:

设备	不需备用的原因	故障应对
MBBR 生物滤池 B-301	填料缓冲数小时, 故障时减投饵	旁路阀让水绕过, 投菌剂时再开
反硝化反应器 R-801	NO ₃ 累积慢, 可承受数日停机	旁路阀让水绕过
蛋白分离器 S-701	DOM 积累慢	旁路阀
CO ₂ 脱气塔 C-501	风机有 N+1, 塔体本身没动	风机切换
液氧储罐 V-901	主+备双罐设计	切换

设备清单上这些标识为"1 套 (单列 + 旁路阀)", 不展开成多份。

31.6 数据传递机制 (v1.3.x)

主页面和 equipment.html 之间的数据通过 localStorage 共享(iRAS_equipmentExport key), 跨 tab 同步:

1. 主页面点"导出设备清单" → buildPIDExport() 生成完整数据 → 写入 localStorage
2. 新窗口 window.open('equipment.html') 打开, DOMContentLoaded 读取 localStorage
3. 主页面再次点击 → 写入新数据, postMessage 通知已打开窗口刷新
4. 读取后立即清除 key, 防止刷新页面看到陈旧数据

v1.3.x 把 P&ID 和设备清单的 key 拆成两份(iRAS_pidExport 和 iRAS_equipmentExport), 让两个独立窗口可以同时开着, 各自显示最新数据互不干扰。

第 32 章 4 工况成本对比基线 v1.3 新章

32.1 为什么要看 4 个工况

RAS 项目选址决定了气候/水温, 不同地区的成本差异巨大。v1.3 提供 4 个典型工况的标准化对比, 帮助:

- 预可行性研究: 比较不同地区建设的成本影响
- 同地区季节性: 评估冬/夏运行成本差异
- 设计选型: 决定热泵装机要按冬季还是夏季
- 融资评估: 给出综合成本范围

32.2 标准基线(1000 t/yr 三文鱼)

使用 v1.3 默认参数, 4 工况下综合成本(含 CAPEX 折旧, 不含人工/苗种):

工况	气温 / 源水	OPEX	折旧	综合元/kg
青岛冬季 设计冬	-7°C / 4°C	22.4	13.6	35.96
海南冬季 设计冬	17°C / 22°C	24.1	13.6	37.70
海南夏季 设计夏	32°C / 27°C	26.9	13.6	40.47
挪威 Bergen 设计冬	0°C / 4°C	22.7	13.6	36.30

32.3 关键观察

1. **挪威成本接近青岛:** 挪威冬季气温比青岛温和(0°C vs -7°C), 但源水温度都是 4°C 左右, 水温维持成本相近。挪威夏天比青岛凉(避免制冷), 长期成本可能更优。
2. **海南夏季最贵:** 三文鱼养殖目标水温 12-15°C, 海南夏季气温 32°C, 制冷温差 17-20°C, 制冷电费暴增。不建议在海南养三文鱼。
3. **海南冬季并不便宜:** 冬季气温 17°C 高于水温 12°C, 仍需要制冷(虽然量小)。比青岛冬季略贵约 5%。
4. **OPEX 差异主要在热泵:** 4 工况 OPEX 差异 4.5 元/kg, 其中热泵成本占 3-3.5 元/kg。

32.4 与文献的对照

文献来源	项目	综合成本 元/kg	iRAS 偏差
Atlantic Sapphire (2023)	迈阿密 RAS 三文鱼	60-70(含人工/苗)	iRAS 不含软成本, 偏低 25-30
Stolt Sea Farm	欧洲大菱鲆	40-50	iRAS 大菱鲆 48.1, 接近

国家海水鱼体系 2019	大菱鲆 500 t	46.32	iRAS 偏 +4%
国内罗非 RAS	规模 1000 t	25-30	iRAS 29.3, 接近
南方对虾 RAS	100 t	25-35	iRAS 41.9, 偏高(规模效应未建模)

整体精度: iRAS 与文献偏差 $\pm 10-20\%$, 对于工程概算用途($\pm 40\%$ 精度)足够。

第 33 章 投资财务评价 v1.4 新章

33.1 为什么需要财务评价

iRAS v1.3 之前的输出停在**工程概算**: CAPEX 万元 / 年 OPEX 万元 / 综合成本元/kg。对于设计院做**可研报告**、业主做**投资决策**、银行做**贷款评审**来说, 这些数据只是起点——真正的关键问题是:

- 这个项目**能不能赚钱**? IRR 多少?
- 多久**回本**? (静态/动态投资回收期)
- NPV 是否为正? 折现率多少能接受?
- **盈亏平衡产量**多少? 如果实际产量打折, 还能保本吗?
- 用**贷款杠杆**能否放大股东收益?
- 项目对哪个变量最敏感? (售价/CAPEX/产量/饲料费/电费)

v1.3 之前用户必须自己导出数据到 Excel, 手算这些指标, 一份可研里财务评价部分通常占 30% 篇幅, 设计院做一份要花 1-2 周。v1.4 加入**独立的投资财务评价页面** (finance.html), 把这部分自动化, 把 1-2 周压缩到几小时。

33.2 数据流与系统架构

finance.html 是个独立页面, 与主页面通过 localStorage 数据共享:

```

主页面 calculateAll → lastResults.summary 写入财务汇总
↓
buildPIDExport → JSON (含 summary.finance + perStage[i].cost/capex)
↓
localStorage['iRAS_financeExport']
↓
finance.html 读取 → 用户调财务参数 → 输出 8 张表 + KPI + 图
↓
导出 Excel (.xlsx, 7 工作表) 或打印 PDF

```

这个架构有**两个优点**:

1. **解耦**: 工程评估和财务评价是两个独立 workflow, 工程师管主页, 财务管 finance.html, 同一份方案可以两人协作
2. **不污染主页**: 财务参数改了不会触发主页重算, 用户能在 finance.html 里快速做敏感性分析

33.3 用户输入参数 (17 个)

用户在 finance.html 顶部填写 17 个财务参数, 分 3 组:

组	参数	默认值	说明
销售与产能			
	售价 (元/kg)	按鱼种 (鲑 60 / 大菱鲆 80 / 罗非 22 / ...)	出厂价
	项目年限 (年)	15	评价期, 5-30 可调
	第 1 年达产率 (%)	30	BF 培菌 + 鱼苗培育期
	第 2 年达产率 (%)	70	逐步加负荷
	第 3 年起达产率 (%)	100	满产
	建设期 (年)	1	含调试期
投资与筹资			
	流动资金 (% × 年 OPEX)	15	启动期周转金, 末年回收
	自有资金比例 (%)	30	剩余 70% 银行贷款
	贷款利率 (% 年)	5	国内项目贷款典型
	还款方式	等额本息	或等额本金
	还款年限 (年)	8	通常短于项目年限
评价参数			
	折现率 (% 年)	8	用于 NPV, 国内项目典型 8-10%
	所得税率 (%)	25	企业所得税
	销售税金附加 (%)	0	农产品免征, 其他 6-13%
	修理费率 (% × 设备)	2	工程惯例
	管理费率 (% × 销售)	3	典型工业项目
	人工成本 (万元/年)	按规模估	30-360 万元/年, 5 万元/人/年

33.4 现金流模型

财务评价的核心是**逐年现金流**。每年有 4 类现金流入流出:

每年净现金流分解 (t = 0..N):

- 经营性现金流 (Operating CF)
 - = 销售收入 (revenue × ramp[t])
 - 销售税金 (revenue × salesTax)
 - 经营成本 (variable × ramp + fixed)
 - 修理费 (capex_eq × repairRate)
 - 管理费 (revenue × adminRate)

- 人工成本
- 所得税 ($\max(0, \text{profit}) \times \text{taxRate}$)

2. 投资性现金流 (Investing CF)

t=0: - fixedAsset (建设期一次性投入)

t=1: - workingCapital (流动资金)

t=N: + workingCapital + 残值 (末年回收 + 残值)

其中残值 = 设备投资 × 5% + 土建投资 × 20% (v1.5+ 修正, 拆分计算)

3. 融资性现金流 (Financing CF) — 仅"自有资金"视角才考虑

t=0: + loan (收到贷款)

t=1..loanYears: - interest - principal (还本付息)

全投资 CF = (1) + (2)

自有 CF = 全投资 CF + (3)

v1.5+ 残值公式订正

旧版残值 = fixedAsset × 5% 是经验值, 但**设备和土建残值率不同**: 设备(8年折旧周期, 通常10-15年报废) 残值 ≈ 5% (机电二手价值); 土建(20年折旧周期, 通常30-50年使用) 残值 ≈ 20% (建筑物结构残值)。v1.5起拆分计算: 残值 = totalCapexEquip × 5% + totalCapexCivil × 20%。对千吨级三文鱼项目, 旧公式低估末年残值约8-12%, 即NPV偏低0.3-0.5个百分点(对回收期/IRR影响小)。

33.5 IRR 求解算法

IRR (Internal Rate of Return) 是让 NPV = 0 的折现率:

$$\text{NPV}(\text{IRR}) = \sum_t \text{CF}[t] / (1 + \text{IRR})^t = 0$$

这是非线性方程, iRAS 用 **Newton-Raphson 迭代**求解:

$$\text{IRR}_{(n+1)} = \text{IRR}_n - f(\text{IRR}_n) / f'(\text{IRR}_n)$$

$$\text{其中 } f(r) = \text{NPV}(r), f'(r) = - \sum_t [t \times \text{CF}[t] / (1+r)^{(t+1)}]$$

起点 $r=0.10$, 收敛阈值 $|\Delta r| < 1e-7$, 最多 100 次迭代

当 Newton-Raphson 发散(典型场景: 多重 IRR 解或符号变化异常), 自动切换到**二分法**兜底: 在 [-0.5, 5.0] 区间求 NPV=0 的根。两种算法配合, 能稳定处理常见的 RAS 项目现金流。

33.6 输出: 8 张标准财务表

遵循国家发改委《建设项目可行性研究报告编制规范》要求:

表	名称	主要内容
---	----	------

1	投资估算	设备 + 土建/安装/电气/自控/设计 + 流动资金 = 项目总投资
2	资金来源运用 + 还款计划	自有/贷款比例 + 逐年利息/本金
3	总成本费用估算 (满产年)	经营成本 + 修理 + 管理 + 人工 + 折旧 + 利息
4	销售收入和税金	逐年: 达产率 → 产量 × 单价 → 销售收入 / 税金
5	损益表	逐年: 销售收入 - 各项成本 - 税 = 净利润
6	现金流量表 (全投资)	逐年净 CF + 累计 CF + 累计折现 NPV → IRR
7	现金流量表 (自有资金)	含贷款流入 + 还本付息, 算股东 IRR
8	敏感性分析	5 因子各 ±20% 对 IRR 影响, 按摆动排序

33.7 关键指标 (6 个 KPI)

指标	定义	判断标准
全投资 IRR (税后)	项目所有现金流(不含贷款)的内部收益率	> 折现率 (8%) → 财务可行
自有资金 IRR	股东视角 IRR (项目 CF + 贷款流入 - 还本付息)	有杠杆放大效应
NPV (净现值)	按折现率折算到 t=0 的累计 CF 现值	> 0 → 项目可行
静态投资回收期	累计净 CF 首次 ≥ 0 的年份(线性插值)	RAS 项目典型 5-8 年
动态投资回收期	累计折现 CF 首次 ≥ 0 的年份	静态值 + 折现影响
盈亏平衡点 (BEP)	满产年净利润 = 0 时的产量比例	< 75% 满产 → 安全裕度大

33.8 敏感性分析 (5 因子)

对项目 IRR 进行单因子敏感性分析, 5 个常用因子:

因子	变化幅度	典型 IRR 摆动 (1000 t 三文鱼)
售价	±20%	±5-7% (最敏感)
CAPEX	±20%	±3-4%
产量	±10%	±1-2%
饲料成本	±20% × share_feed	±1-1.5%
电费	±20% × share_elec	±0.4-0.6%

v1.5+ 敏感性 share 订正

旧版 "share_feed = 55%, share_elec = 20%" 是硬编码经验值, 仅适用于三文鱼 1000 t 项目。v1.5 改为从实际 OPEX 占比动态读取: $share_feed = feedCost / annualOpex$ 。对虾项目 share_feed 可能仅 35%, 罗非鱼项目可能 65%, 不同鱼种敏感性表会自动调整。注意 share 是说明

项目特定的敏感性,不是计算公式(计算还是 $OPEX \times \pm 20\%$,只是用 share 解释"为什么饲料 $\pm 20\%$ 只让 IRR 摆动 $\pm 1.5\%$ 而不是 $\pm 5\%$ ")。

注:折现率不影响 IRR (IRR 是让 $NPV=0$ 的折现率,与折现率参数无关),故不在敏感性表中。但折现率会影响 NPV——折现率越高, NPV 越低。

结果按 IRR 摆动从大到小排序,自动绘制 **Tornado 图** (横向条形图)。设计院通常拿这张图给业主看"这个项目的最大风险因子是什么"——RAS 项目**永远是售价**。

33.9 实例: 1000 t 三文鱼 (青岛冬季工况)

用 v1.3 默认参数计算的方案数据 (CAPEX 14681 万 / 年 OPEX 2236 万 / 年折旧 1360 万), 售价 60 元/kg, 30% 自有 + 70% 贷款 (5%, 8 年), 折现率 8%, 项目 15 年:

关键指标

指标	数值	解读
全投资 IRR	14.0%	> 折现率 8%, 财务可行 ✓
自有资金 IRR	20.5%	贷款杠杆放大 6.5%
NPV @ 8%	6878 万元	正值, 创造 6878 万元股东价值
静态投资回收期	6.3 年	RAS 项目典型水平
动态投资回收期	9.0 年	含折现影响
盈亏平衡产量	63.4% 满产	实际产量打 7 折也能保本, 安全裕度大

敏感性 (按 IRR 摆动排序)

因子	低值 IRR	基准 IRR	高值 IRR	摆动
售价 $\pm 20\%$	8.0%	14.0%	19.1%	11.1%
CAPEX $\pm 20\%$	17.6%	14.0%	11.3%	6.3%
产量 $\pm 10\%$	12.3%	14.0%	15.6%	3.3%
饲料成本 $\pm 20\%$	15.2%	14.0%	12.7%	2.5%
电费 $\pm 20\%$	14.4%	14.0%	13.5%	0.9%

工程解读

售价是 RAS 项目的**第一风险因子**。三文鱼售价从 60 跌到 48 元/kg, IRR 立刻降到 8% (折现率), 项目变得勉强可行。所以 RAS 投资决策的关键是**锁定下游销售渠道和价格**——很多 RAS 项目失败不是工程出问题, 而是建成后市场价格波动让财务模型崩溃。

33.10 鱼种横向对比

用同样的 1000 t 规模, 不同鱼种和价格:

鱼种	售价 元/kg	全投资 IRR	自有 IRR	NPV 万元	回收期	结论
三文鱼	60	14.0%	20.5%	6878	6.3 年	主流, 可行
三文鱼 (高端)	80	22.2%	37.1%	18150	4.5 年	有溢价能力, 优秀
大菱鲆	80	38.0%	73.2%	28873	3.0 年	毛利高 (国内底栖鱼供需)
罗非鱼	22	-2.5%	-6.1%	-6798	不回本	RAS 不适合罗非, 池塘已够便宜

这张表能直接告诉投资人: **不要用 RAS 养罗非鱼** — 不是技术问题, 是经济问题。RAS 适合**高单价 (> 40 元/kg) + 集约化要求高 (海水/北方/特殊品种)**的鱼种。

33.11 Excel 导出

finance.html 用 SheetJS 库 (CDN 加载) 实现一键导出 Excel, 输出 7 个工作表:

1. 1. 投资估算
2. 2. 资金来源 + 还款计划
3. 3. 损益表 (逐年)
4. 6. 全投资现金流
5. 7. 自有资金现金流
6. 8. 敏感性分析
7. 关键指标 (汇总)

设计院拿到 Excel 后可以:

- 把数字直接套进可研报告 Word 模板
- 用 Excel 公式继续做更细的拆分(月度现金流、IRR 蜘蛛图等)
- 给业主或银行做基础财务材料

离线兜底

SheetJS 库通过 CDN 加载, 网络不通时 Excel 导出失败, finance.html 会弹窗提示用户改用打印 (Ctrl+P → 保存为 PDF)。

33.12 局限性与未来扩展

v1.4 财务评价的当前局限:

- **不含通货膨胀:** 假设各项成本和售价 15 年内不变。实际工程中可加入 2-3% 年通胀率, 但这要求 NPV 折现率改用"实际利率"
- **不含汇率风险:** 进口设备(液氧、UV、增氧锥)汇率波动未建模
- **简化的所得税:** 没考虑高新技术企业 15% 税率、农业项目税收优惠 (国内 RAS 三年免征三年减半)
- **残值简化为 5%:** 实际工程中 15 年后设备/土建残值差异较大, 设备可能 0%, 土建可能 30%
- **没有 Monte Carlo:** 当前是单因子敏感性, 不是多因子联合分布。商业级软件 (Crystal Ball / @RISK) 用 MC 更准
- **不包含项目环评成本和不可见成本:** 比如审批延迟、政策风险, 这些通常加 5-10% 不可预见费

未来 v1.5+ 可能扩展的方向:

- Monte Carlo 模拟 (随机变量分布抽样)
- Word 可研报告自动生成 (整合财务评价 + 技术方案到一份完整可研)
- 多方案对比 (同一鱼种不同规模 / 同一规模不同鱼种横向比)
- 融资方案优化 (最优自有/贷款比例求解)

但所有扩展之前的前提是: **v1.4 当前版本被实际用户用过, 反馈了真实问题。**设计院、咨询公司、业主用一个月, 告诉我们哪里反人类、哪里数字对不上、哪里需要补字段——这才是优先级最高的下一步。

第 34 章 可研报告生成器 v1.5 新章

34.1 为什么需要可研报告生成器

v1.4 之前的 iRAS 输出层级是工程数据(P&ID + 设备清单 + 财务评价 Excel), 用户拿到这些数据后还需要手动整合到 Word 可研报告里。这是 RAS 项目从"概念"到"立项"过程中的**最大手工劳动**:

- 一份政府版可研典型 80-150 页, 设计院做一份要花 1-2 个月
- 16 章每章都有特定结构、引用、表格, 设计院要重新组织、查规范、抄数据
- 不同项目数字不同但章节结构相似, 大量重复劳动
- iRAS 已经算出所有工程和财务数据, 重复输入到 Word 里浪费时间且易出错

v1.5 加入**可研报告生成器** (report.html), 把 iRAS 的工程和财务数据自动套到 16 章扩展版可研模板中, 输出 .docx 文档。设计院拿到后只需补充项目身份、场址自然条件、土建详细设计等"必须人工填写"的内容即可。预期能把可研撰写时间从 **1-2 个月压缩到 1-2 周**。

34.2 关键产品决策

v1.5 在设计阶段做了 10 个产品决策, 每个决策都直接影响实现方式:

1. **范围**: 完整版 16 章扩展版(适合大型项目+敏感地区)
2. **模板版本**: 政府立项发改委版(向下兼容银行/农业/私募版)
3. **章节结构**: 16 章扩展版(把环境影响和社会效益独立成章)
4. **项目元数据**: 标准 20 字段(平衡填表门槛和报告完整性)
5. **Word 模板获取**: **不替设计院排版**, 只输出结构化内容(每个院都有自己的模板, 替他们决定版式反而帮倒忙)
6. **文字模板**: 模板 + 条件分支(**不用 LLM**。可研是法律文件, LLM 幻觉风险与收益不成比例)
7. **模板引擎**: nunjucks(Jinja2 JS 移植, 语法标准, 后续可移植)
8. **docx 生成**: docx.js (npm: docx)(浏览器侧懒加载)
9. **模板存储**: 内嵌 `<script type="text/njk-template">` (保持 iRAS 单文件部署传统)
10. **元数据 UI**: report.html 内弹出表单(主页面保持简洁, 只有真正生成报告的用户才填表)

决策 5 — 不替设计院排版

这是 v1.5 最重要的产品决策。商业级可研生成器(如某些 SaaS)倾向于做"成品 Word", 但每个设计院都有自己的红头模板, 版式、字体、目录格式各不相同。iRAS 替他们决定版式反而帮倒忙——他们还是要把内容复制到自己的模板里。v1.5 输出"结构化内容", 用户拿到后复制到自己院的模板里, 是更尊重设计院工作习惯的做法。

决策 6 — 不用 LLM

大模型可以生成流畅的文字, 但 v1.5 拒绝了这条路线。理由:

1. 可研是法律文件, 一句错误的政策引用可能让项目立项失败
2. 同一项目两次生成结果不一样, 业主审核会困惑
3. 难以追溯每句话的来源
4. 依赖网络和 API 配额, 离线不能用

模板 + 条件分支虽然文字略呆板, 但**确定性**和**可追溯性**是可研的核心要求。

34.3 16 章覆盖范围与自动化率

v1.5 覆盖发改委可研编制规范的扩展 16 章。各章自动化率(数据来自 iRAS 自动填充的比例):

章	名称	iRAS 自动化率	主要数据来源
1	总论	85%	项目元数据(20 字段)+ 工程财务汇总
2	项目背景与建设必要性	50%	鱼种条件分支 + 用户填地区描述
3	市场分析与建设规模	60%	鱼种市场概述 + 规模配置
4	建设场址与建设条件	30%	大量 placeholder, 用户填具体场址
5	工艺技术方案	95%	iRAS 工艺数据完整覆盖
6	主要设备方案	100%	iRAS 设备清单完整覆盖
7	土建/总图/公用工程	50%	车间面积/电力负荷自动 + 详细土建用户填
8	节能节水	70%	用水量/电耗自动 + 节能措施模板
9	环境影响评价	60%	排放估算自动 + 现状用户填
10	劳动安全卫生与消防	40%	危险源识别 + 应急预案模板, 不替代安评
11	项目实施与组织机构	65%	进度甘特表 + 人员配置(规模分支)
12	投资估算与资金筹措	95%	iRAS 投资数据完整覆盖
13	财务评价	100%	iRAS finance.html 数据完整覆盖(8 张标准财务报表 + NPV/IRR + 敏感性)
14	国民经济 / 社会效益评价	50%	就业/税收/产业链估算(简化版社会效益)
15	风险分析	70%	4 类风险识别 + 敏感性 + 风险等级条件分支
16	结论与建议	80%	整体结论模板 + 关键指标条件分支

加权平均自动化率约 70%, 用户需要补充的主要是: 项目身份(20 字段)、场址自然条件、土建详细设计、消防/环评/安评等专项内容(后三者必须由有资质机构出具)。

34.4 数据流与系统架构

```

主页面 calculateAll → lastResults.summary 写入财务汇总
↓
buildPIDExport → JSON (含 farm + workflow + capex + opex + finance)
↓
localStorage['iRAS_reportExport']
↓
report.html 读取 → 8 命名空间 context 拼装
↓
20 字段元数据表单(用户填) → context.project
↓
nunjucks.renderString(template, context) × 16 章
↓
parseTextToDocxChildren(text, dx, images) → docx 对象树
↓
SVG 图(工艺流程/Tornado/累计 CF)→ Canvas → PNG → ImageRun
↓
docx.Packer.toBlob() → 用户下载 .docx

```

34.5 8 个数据命名空间

模板里所有变量按以下命名空间组织:

命名空间	来源	主要字段
{{ project }}	用户在 report.html 表单填写	项目名称/业主/地址/编制单位/资质等 20 字段
{{ farm }}	iRAS 主页面方案	鱼种/规模/各阶段配置/池数/池径反推/总存塘等
{{ workflow }}	iRAS perStage 工艺数据	RDF/BF/UV/CO ₂ /增氧锥/蛋分/反硝化/AOP/集水池
{{ thermal }}	iRAS 热平衡求解(预留)	气候/围护/COP/工况(v1.5.x 完善)
{{ capex }}	iRAS 投资估算	设备直购/土建/流动资金/总投资
{{ opex }}	iRAS 运行成本	年 OPEX/综合成本/折旧/电耗/液氧
{{ finance }}	finance.html 计算逻辑	params(17 个用户参数)+ indicators(6 个 KPI)+ tables(8 张表)
{{ meta }}	报告元信息	生成时间/iRAS 版本/模板版本

34.6 嵌入 docx 的 3 张图

图	位置	内容
---	----	----

图 5-1	第 5 章 5.2 工艺流程	6 个主流程方框 + 主循环 + 旁路单元(条件显示)+ 关键参数表
图 13-1	第 13 章 13.6.1 全投资现金流	实线全投资 + 虚线自有资金, 含 0 轴线、网格、节点标记
图 13-2	第 13 章 13.11 敏感性分析	5 因子 Tornado 图, 按 IRR 摆动从大到小排序

图表生成路径: 浏览器侧 SVG → Canvas → PNG → docx ImageRun。中文字体使用系统 SimHei/Microsoft YaHei, 高清 2× DPR 渲染。

34.7 输出文件示例

三文鱼 1000 t/年项目, 用 v1.5 生成的可研报告大致规格:

项目	数值
文件大小	约 200-400 KB(含 3 张 PNG 图)
章节数	16 章 + 封面
段落数	约 800 段
表格数	约 50 个
列表项	约 380 个
粗体强调	约 600 处
页数(Word 默认排版)	约 60-80 页

34.8 局限性与未来扩展

v1.5 当前局限:

- **不含动态模拟:** 财务模型仍是稳态满产假设
- **不含 Monte Carlo:** 敏感性是单因子分析, 不是多因子联合分布
- **不替代专项评价:** 环评、安评、节能评等需有资质机构独立出具
- **第 4/7/10 章自动化率低:** 30-50%, 大量内容靠用户填
- **条件分支只覆盖内置 8 鱼种:** 其他鱼种走默认通用模板

未来 v1.5.x / v1.6+ 可能扩展:

- 多模板版本切换(政府立项/银行评审/农业项目/私募尽调)
- 全量章节图表嵌入(P&ID 工程级、设备表分阶段、投资饼图等)
- 多方案对比报告(同一鱼种不同规模 / 不同鱼种横向比)
- 用户自定义模板上传(允许设计院修改默认模板)
- thermal 命名空间完善(把热平衡数据接入第 7 章暖通描述)

但所有扩展前提是: **v1.5 当前版本被实际用户使用过, 反馈了真实问题。**

附录

参数表 · 命名规范 · 文献

附录 A: 完整符号表

本附录列出 iRAS 所有版本 (v1.0 → v1.7) 使用的全部符号。

符号	含义	单位	默认值 / 范围
质量平衡 + 浓度			
Δ	每循环污染物增量	mg/L	—
R	总通过率	—	—
C_out	鱼池出水浓度	mg/L	—
C_in	回水浓度	mg/L	—
η_{rdf}	RDF TSS 去除率	%	75
η_{bio}	BF TAN 硝化率	%	70
η_{bioTSS}	BF TSS 去除率	%	20
VTR ₂₀	BF @20°C 容积去除率	g/(m ³ · d)	500
VDR ₂₀	反硝化 @20°C	g/(m ³ · d)	800
$\theta_{nit} / \theta_{den}$	温度系数	—	1.10 / 1.08
f_sal	盐度修正	—	max(1-0.01S, 0.3)
SOTE	氧传质效率	%	粗孔 8% / 微孔 18%
tanCoef	TAN 系数	—	0.092 (淡) / 0.110 (海水肉食)
RQ	呼吸商	—	1.0
v1.1 物理框架			
o2BaseFactor	20°C 基准	—	0.13-0.32 (按物种)
o2Q10	温度敏感	—	2.0 (鱼) / 1.3 (虾)
o2FishFactor	生效值	—	base × Q10 ^{^(T-20)/10}
o2DOMfactor	异养菌耗氧	—	0.10 (可调 0.05-0.20)
peakFactor	日内峰均比	—	1.5
safety*	工程安全系数	—	1.10-1.15
COP_heat / cool	热泵	—	4.0 / 3.0
η_{HX}	板换回收率	%	75
co2BlowerPressure	CO ₂ 风压	kPa	2.5

co2BlowerEfficiency	CO ₂ 风机效率	%	60
depYearsEquip	设备折旧	年	8
depYearsCivil	土建折旧	年	20
V_tank	鱼池水体	m ³	biomass / density
V_process	工艺水体	m ³	各设备水量合计
V_total	系统总水体	m ³	V_tank + V_process
v1.2 全局气候 + 围护			
T_air_design_winter	设计冬季气温	°C	-7 (青岛)
T_air_design_summer	设计夏季气温	°C	32 (青岛)
T_air_annual	年均气温	°C	13 (青岛)
T_source_design_winter	设计冬季源水温	°C	4
T_source_design_summer	设计夏季源水温	°C	24
T_source_annual	年均源水温	°C	14
T_ground	地温(年均近似)	°C	= T_air_annual
RH_winter / summer / annual	3 工况相对湿度	%	60 / 78 / 70
U_wall	墙保温系数	W/ (m ² · K)	0.8
U_roof	屋顶保温系数	W/ (m ² · K)	0.6
U_floor	地板保温系数	W/ (m ² · K)	0.8
U_window	窗保温系数	W/ (m ² · K)	2.5
windowRatio	窗墙比	—	0.05
airChangeRate (ACH)	通风换气次数	1/h	1.0
ventHeatRecovery	排风热回收效率	—	0 (国内) / 0.7-0.85 (北欧)
poolCover	池盖类型	—	none(1.0)/partial(0.4)/full(0.1)
buildingArea_user	用户指定车间面积	m ²	0(自动 = 1.6 × poolArea)
buildingHeight	车间净高	m	6
thermalScenario	当前工况	—	design_winter / design_summer / annual

climateRegion	地区预设	—	china_qingdao / china_hainan / norway_bergen / ...
envelopePreset	围护预设	—	industrial_standard / nordic_premium / cheap
hpType	热泵类型	—	air / water / ground / seawater_open
v1.2 双节点稳态求解			
T_room	车间空气温度(求解输出)	°C	T_air + 5~12
RH_room	车间相对湿度(求解输出)	%	55-80
W_room	车间空气含湿量(求解输出)	kg/kg	0.008-0.020
m_evap	蒸发率(负值=凝结)	kg/(m ² ·s)	±2-50 × 10 ⁻⁵
UA_envelope	围护总 UA(墙+顶+窗)	W/K	500-2000
UA_pool	池散热 UA	W/K	poolU × poolArea
poolU	池水对空气换热系数	W/(m ² ·K)	5(室内)/ 18(室外)
v1.3 模块化 + 鱼池配置			
subSystemCount	阶段并联套数(用户输入)	—	1-10, 默认 1
numModules	实际模块数 = subSystemCount	—	≥ 1
poolsPerSet	每套池数(用户输入)	—	1-10, 默认 1
poolDepth_m	单池深度(用户输入, 统一数据源)	m	0.5-8, 默认 = recDepth_m
recDepth_m	鱼种推荐池深 (SPECIES_DB)	m	0.8-7.0(按鱼种和阶段)
v1.3.x 新增			
thermalSharingFactor	共用车间散热系数	—	0.5-1.0, 默认 0.75
V_sump	集水池容积	m ³	clamp(Q/30, 20, 200)
v1.4 投资财务评价 (finance.html)			
price (元/kg)	售价	元/kg	按鱼种 (鲑 60, 大菱鲆 80, 罗非 22, 等)

years	项目评价年限	年	5-30, 默认 15
ramp1/2/3	逐年达产率	%	30 / 70 / 100 (默认)
buildYears	建设期	年	0.5-3, 默认 1
workingCap	流动资金 (% × 年 OPEX)	%	0-50, 默认 15
ownPct	自有资金比例	%	0-100, 默认 30
loanRate	贷款利率	% 年	0-15, 默认 5
loanMethod	还款方式	—	等额本息 / 等额本金
loanYears	还款年限	年	1-20, 默认 8
discount	折现率 (用于 NPV)	% 年	0-20, 默认 8
taxRate	所得税率	%	0-35, 默认 25
salesTax	销售税金附加	%	0-20, 默认 0 (农产品免征)
repairRate	修理费率	% × 设备/ 年	0-10, 默认 2
adminRate	管理费率	% × 销售 收入	0-20, 默认 3
laborCost	人工成本	元/年	按规模估, 30-360 万元/年
NPV	净现值	元	$= \sum CF[t]/(1+r)^t$, $r=discount$
IRR	内部收益率	%	令 NPV=0 的折现率, Newton-Raphson 求解
BEP	盈亏平衡产量	% 满产	满产年净利润=0 时的产量比例
v1.7 氧锥拓扑 + 系统排水			
o2ConeTopology	氧锥工艺拓扑	—	mainline / bypass, 默认 mainline
o2ConeHeadLoss_m	主路时氧锥附加压头	m	3, 钳 [0, 15]
o2BypassRatio	旁路占比 (bypass 模式)	%	10, 钳 [5, 30]
o2BypassPumpHead_m	旁路泵 P-602 扬程	m	20, 钳 [5, 40]
o2BypassPumpEta	旁路泵效率	%	60, 钳 [30, 85]
aopO3Dose_gm3	AOP 臭氧投加剂量	g O ₃ /m ³	0.5, 钳 [0.1, 3.0] (v1.7 暴露字段, UI v1.8)
sim.discharge.V_m3_d	系统排水日流量	m ³ /d	$= V_total \times exchangeDaily$ (v1.7 重构)
sim.discharge.TSS_kg_d	系统排水 TSS 日量	kg/d	$= load.tssDaily$ (质量守恒, 含污泥)

sim.discharge.TAN_mg_L	系统排水 TAN 浓度	mg/L	= C_tank (溶解态)
sim.discharge.NO3_mg_L	系统排水 NO ₃ 浓度	mg/L	= C_tank (溶解态)

附录 B: 全局热配置参数表(完整)

iRAS v1.3 全局热配置(globalThermalConfig)字段一览:

字段名	类型	默认值	UI 位置	说明
climateRegion	下拉	china_qingdao	地区预设	选择后自动填 T_air/T_source/RH
thermalScenario	下拉	design_winter	当前工况	3 个工况切换
envelopePreset	下拉	industrial_standard	围护预设	选择后自动填 U 值
hpType	下拉	air	热泵类型	4 种
T_air_design_winter	数值	-7	气温区	°C
T_air_design_summer	数值	32	气温区	°C
T_air_annual	数值	13	气温区	°C
T_source_design_winter	数值	4	源水温区	°C
T_source_design_summer	数值	24	源水温区	°C
T_source_annual	数值	14	源水温区	°C
RH_winter	数值	60	湿度区	%
RH_summer	数值	78	湿度区	%
RH_annual	数值	70	湿度区	%
U_wall	数值	0.8	围护区	W/(m ² · K)
U_roof	数值	0.6	围护区	W/(m ² · K)
U_floor	数值	0.8	围护区	W/(m ² · K)
U_window	数值	2.5	围护区	W/(m ² · K)
windowRatio	数值	0.05	围护区	窗墙比
airChangeRate	数值	1.0	围护区	ACH (1/h)
ventHeatRecovery	数值	0	围护区	0-0.85
poolCover	下拉	partial	围护区	none / partial / full
buildingArea_user	数值	0(自动)	围护区	0 = 自动估算
buildingHeight	数值	6	围护区	m
thermalSharingFactor	数值	0.75	围护区	0.5-1.0, 共用车间散热系数

附录 C: 设备 tag 命名总表

iRAS 完全采用 ISA-5.1 规范 tag 命名(字母+数字), 字母含义:

首字母	含义	示例
T	Tank 储罐 / 池	T-101 鱼池
F	Filter 过滤器	F-201 微滤
B	Biofilter / Bio-reactor 生物反应器	B-301 MBBR
K	Kompressor 压缩机/风机	K-101 鱼池增氧风机 v1.7 / K-201 CO ₂ 风机 / K-302 BF 风机
D	Disinfection 消毒	D-401 UV
C	Column 塔/柱	C-501 CO ₂ 脱气塔
S	Separator / Sump 分离 / 集水	S-101 集水池, S-701 蛋分
A	Aerator / Absorber 增氧 / 吸收	A-601 增氧锥
R	Reactor 反应器	R-801 反硝化
X	eXtra / 高级处理	X-901 AOP
G	Generator 发生器	G-901 O ₃
V	Vessel 大型容器 / 储罐	V-901 液氧站级储罐
H	Heat 热相关	H-801 热泵
P	Pump 泵	P-101 主循环泵 / P-602 氧锥旁路泵 v1.7
M	Mixer 混合点 / 管段配件 v1.7	M-601 bypass 模式氧锥旁路混合点 (T 接头)

位号编号规则

- 百位代表设备组(1=鱼池, 2=过滤, 3=生物处理, 4=消毒, 5=脱气, 6=增氧, 7=蛋分, 8=反硝化/温控, 9=高级处理/公用)
- 十位+个位代表组内序号(01=主设备, 02-09=辅助/支路)

仪表位号

tag 前缀	类型	示例
DO	溶解氧	DO-101 鱼池 DO 探头
pH	pH 计	pH-102 鱼池 pH
TT	温度变送器	TT-103 鱼池温度
LT	液位变送器	LT-104 鱼池液位
PDS	压差开关	PDS-201 RDF 压差

AT	分析变送器	AT-302 BF 出口 TAN
FT	流量变送器	FT-101 主管流量

附录 D: 鱼种参数表

iRAS 内置 9 个物种 (含 custom), 这里展示主要 4 种, 完整见软件。

品种	阶段	体重(g)	月	FCR	蛋白%	feed%	密度	T°C	盐‰	recDepth_m
三文鱼	苗种	0.1→50	6	1.0	50	3.0	30	12	0	1.5
	幼鱼	50→500	8	1.1	45	1.5	50	14	0	3.0
	中鱼	500→2000	6	1.2	42	1.0	60	15	12	5.0
	成鱼	2000→5000	4	1.20	40	0.95	70	15	30	7.0
大菱鲆 v1.1	苗种	3→50	4	0.9	55	3.0	25	16	28	0.8
	中鱼	50→250	8	1.1	50	1.5	50	16	28	1.0
	成鱼	250→600	6	1.3	48	0.9	60	16	28	1.0
加州鲈	苗种	1→50	2	0.9	50	3.5	25	25	0	1.5
	中鱼	50→250	4	1.1	45	1.8	40	25	0	2.5
	成鱼	250→600	4	1.3	40	1.2	50	25	0	3.0
对虾	苗种	0.01→1	1	1.0	45	10	2	30	15	1.5
	养前	1→10	1.5	1.3	42	5	8	30	15	2.0
	养后	10→30	1.5	1.6	38	3	15	30	15	2.5

完整 9 物种 (含罗非鱼/石斑鱼/鳗鲡/鳜鱼) 见 iRAS 软件内置数据库。recDepth_m 是 v1.3 新增的鱼种推荐池深字段。

附录 E: 参考文献

v1.0 引用

1. Timmons, M.B., Ebeling, J.M. (2010). *Recirculating Aquaculture*, 2nd ed. Cayuga Aqua Ventures.
2. Sharma, B., Ahlert, R.C. (1977). Nitrification and nitrogen removal. *Water Research*, 11(10).
3. Benson, B.B., Krause, D. (1984). DO in freshwater/seawater. *Limnol. Oceanogr.*, 29(3).
4. USEPA (2006). *UV Disinfection Guidance Manual (UVDGM)*. EPA 815-R-06-007.
5. Summerfelt, S.T. et al. (2009). Ozonation and UV in RAS. *Aquacultural Engineering*, 40(1).
6. Mateju, V. et al. (1992). Biological water denitrification. *Enzyme and Microbial Tech.*, 14(3).
7. Rusten, B. et al. (2006). Nitrification in MBBR. *Aquacultural Engineering*.
8. Chen, S. et al. (2006). Nitrification kinetics in RAS. *Aquacultural Engineering*, 34(3).
9. Nijhof, M., Bovendeur, J. (1990). Fixed film nitrification. *Aquaculture*, 87(2).
10. Colt, J. (2006). Water quality in reuse systems. *Aquacultural Engineering*, 34(3).

v1.1 新增引用

1. Boyd, C.E. (2018). Oxygen Demand of Aquaculture Feeds. *Responsible Seafood Advocate*.
2. Davidson, J. et al. (2014). Atlantic salmon performance in RAS. *USDA FWI*.
3. PR Aqua (2016). *Low Head Oxygenator Design Standards*.
4. Vinci, B. et al. (2016). Saltwater RAS LHO. *Aquacultural Engineering*, 75:22.
5. 国家海水鱼产业技术体系 (2019). 大菱鲆养殖产业调查数据. CARS-50.
6. Stolt Sea Farm (2024). *Annual Report - Land-based Turbot*.
7. Atlantic Sapphire (2023). *Bluehouse RAS Technical Documentation*.
8. Delta Cooling Towers Inc. *CO₂ Air Stripper Case Studies*. www.deltacooling.com
9. Suez Degremont. *Water Handbook - CO₂ Degasification*.
10. 中国水产科学研究院黄海水产研究所. 大菱鲆工厂化循环水养殖技术研究. 2015.
11. Hansa Engineering. *CO₂ Stripping Column Internals*. RVT Process Equipment.

v1.2 新增引用 (热平衡 + 围护)

1. ASHRAE Handbook (2021). *HVAC Applications*, Chapter 22: Animal Environments.
2. Lewis, W.K. (1922). The evaporation of a liquid into a gas. *ASME*, 44.
3. Antoine, C. (1888). Vapeurs: nouvelle relation entre les tensions et les températures.
4. Magnus, G. (1844). Versuche über die Spannkkräfte des Wasserdampfes. *Annalen der Physik*.
5. SINTEF Energy Research (2020). *Heat Pumps for Aquaculture RAS Facilities*.

6. Mota, V.C. et al. (2019). The effects of carbon dioxide on growth performance, welfare, and health of Atlantic salmon post-smolt in RAS. *Aquaculture*, 498: 578-586.

v1.3 新增引用 (模块化 + 鱼池设计)

1. Cornell University. Twin Drain Tank Design Guidelines (Cornell dual-drain RAS).
2. Timmons, M.B. & Summerfelt, S.T. (2007). Pilot-scale evaluation of dual drain rectangular and circular tanks. *Aquacultural Engineering*.
3. Atlantic Sapphire (2023). Annual Report - Modular RAS Architecture.
4. AKVA Group (2022). Land-based Aquaculture: Standard Module Design.
5. Billund Aquaculture. Modular RAS Design Standards (Denmark).
6. Stolt Sea Farm (2024). Sustainability Report - Production Capacity Distribution.

v1.3.x 新增引用 (P&ID + 工程化)

1. ISA-5.1 (2009). Instrumentation Symbols and Identification.
2. ANSI/ISA-5.4. Instrument Loop Diagrams.
3. ISA-S5.5. Graphic Symbols for Process Displays.
4. API RP 14E. Design and Installation of Offshore Production Platform Piping Systems.

v1.4 新增引用 (投资财务评价)

1. 国家发展和改革委员会、住房和城乡建设部 (2006). 建设项目经济评价方法与参数 (第三版). 中国计划出版社.
2. 国家发改委 (2002). 投资项目可行性研究报告指南.
3. 住建部 (2017). 中央政府投资工程建设项目可行性研究报告编制深度规定.
4. 财政部 (2024). 企业会计准则第 4 号——固定资产折旧.
5. Brealey, R.A., Myers, S.C., Allen, F. (2020). *Principles of Corporate Finance*, 13th ed. McGraw-Hill (NPV/IRR 理论).
6. SheetJS Community Edition (2024). `xlsx.full.min.js` — Spreadsheet Data Toolkit. <https://sheetjs.com>

v1.5 新增引用 (可研报告生成器)

1. 国家发改委 (2017). 政府投资项目可行性研究报告编制深度规定 (2017 年发改投资规〔2017〕1638 号).
2. 住建部 (2007). 投资项目可行性研究报告指南 (试用版).
3. nunjucks (Mozilla, 2014-2024). A rich powerful templating language for JavaScript. <https://mozilla.github.io/nunjucks/>
4. docx.js (Dolan Miu, 2018-2024). Easily generate .docx files with JS/TS. <https://docx.js.org/>

v1.6 新增引用 (站级设备 + 物理校正)

1. Mateju, V. et al. (1992). Biological water denitrification - A review. *Enzyme and Microbial Technology*, 14(3): 170-183. (反硝化碱度回收 2.5-3.0 g CaCO₃/g N 工程实测)
2. Henze, M. et al. (1991). Activated Sludge Model No. 1. IAWPRC Scientific and Technical Report No. 1.
3. Crittenden, J.C., Trussell, R.R., Hand, D.W. et al. (2012). *MWH's Water Treatment: Principles and Design*, 3rd ed. John Wiley & Sons. (反硝化化学计量)
4. Mokhayeri, Y. et al. (2008). Kinetic characterization of methanol-utilizing denitrifying biomass. *Water Environment Research*, 80(5).
5. Suhr, K.I., Pedersen, P.B. (2014). Methanol dosing in RAS denitrification. *Aquacultural Engineering*, 60: 47-54.
6. Tsukuda, S. et al. (2015). Methanol-driven denitrification in marine RAS. *Aquaculture Research*, 46(11).
7. 赵越, 刘鹰 (2018). 大西洋鲑 MBBR 设计参数研究. *大连海洋大学学报*, 33(4): 543-549.
8. Drønen, K. (2021). Atlantic salmon land-based RAS in Norway: V_{process}/V_{total} benchmark.

v1.7 新增引用 (氧锥拓扑 + 系统排水重构)

1. Linde Gas (2020). SOLVOX cone 60 / 110 oxygenation system. Technical datasheet. (氧锥操作压力 3.0-3.8 bar, side stream 拓扑)
2. Pentair AES (2021). Speece Cone Oxygenation: Engineering Design Manual. (玻璃钢锥操作压力 10-21 psi)
3. PR Aqua (2019). PPC (Pressurized Production Column) High Pressure Oxygen Contactor Design Standards. (高压氧合柱 3-4 bar)
4. Global Seafood Advocate (2019). Oxygenation in land-based RAS: cone vs LHO. "more often plumbed in side stream configuration" (大型 RAS 旁路拓扑工程实际)
5. Sharrer, M.J. et al. (2010). Process and economic evaluation of microscreen drum filter backwash water recycling. *Aquacultural Engineering*, 43(1): 9-19. (RDF 反冲水 95-98% 清液回流)
6. Wagner, M. et al. (2010). Standardized oxygen transfer testing for fine-bubble aeration in aquaculture. *Aquacultural Engineering*, 43(2): 33-41. (微孔盘曝气 SOTE 18-22%)
7. Schroeder, J.P. et al. (2010). Comparison of ozone and ultraviolet light for the disinfection of recirculating water in marine RAS. *Aquacultural Engineering*, 42(1): 1-10. (AOP 臭氧投加剂量经验范围)
8. Gonçalves, A.A., Gagnon, G.A. (2011). Ozone application in recirculating aquaculture system: an overview. *Ozone: Science & Engineering*, 33(5): 345-367.

附录 F: 免责声明

本工具(iRAS)和本手册的计算结果仅供工程概算参考。

- 实际工程须结合现场水质监测、批量试验数据、当地规范与专业工程师判断
- 养殖生物参数(FCR、蛋白含量等)存在品种、饲料、模式的显著差异
- 投资概算精度约 $\pm 40\%$, 实际造价以厂商报价和工程招标为准
- 运行成本不含人工/苗种/管理费/保险等"软成本", 综合成本通常比此偏低 20-30%
- v1.2 双节点稳态求解器虽经文献校准, 但实际车间空气温湿度受局部气流/设备布局影响, 实测可能与模型偏差 10-20%
- v1.3 模块化备用配置基于"N+1 工程惯例", 高可靠性项目(如医疗食品级)可能需要 N+2 或冗余度更高方案
- v1.3.x 共用车间散热系数 0.75 是经验值, 具体项目应根据实际车间布局 and 分隔情况调整(0.65-0.90)
- v1.4 投资财务评价用单点确定性现金流模型, 不含通货膨胀、汇率风险、税收优惠等高级处理. 对融资条件复杂或敏感性要求高的项目, 建议用专业财务软件 (Crystal Ball / @RISK) 做 Monte Carlo 模拟
- v1.4 财务评价默认参数 (修理费率 2%, 管理费率 3%, 残值 5%) 是工业工程典型值, 不一定符合特定项目实际, 请与项目财务/会计核对
- v1.5 可研报告生成器输出的是**结构化内容**, 不是成品可研。设计院应将内容复制到自己的 Word 模板中并补充: 项目身份信息、场址自然条件、土建详细设计、消防/环评/安评等专项内容
- v1.5 模板中的政策依据、行业现状、市场分析等"软文字"为通用模板, 具体项目应根据当地实际政策和市场情况修改
- v1.5 报告不替代正式的环境影响评价、安全评价、节能评价、职业卫生评价, 这些专项评价应由具有相应资质的机构独立出具
- v1.7 氧锥拓扑 mainline / bypass 经济性对比基于 1000 t 大西洋三文鱼工况实测, 中小项目 ($Q < 5000 \text{ m}^3/\text{h}$) 可能因高压泵规模效应不显著而 bypass 优势减弱, 建议项目具体核算
- v1.7 "系统排水"输出口径为**沉淀池入口**浓度 (含污泥, 质量守恒), 不可直接对照 GB 8978 等污水管口标准。沉淀池设计 + 上清液处理由污水工程单独完成, iRAS 边界止于"沉淀池入口"
- 因使用本软件计算结果产生的工程决策后果, 作者与公司不承担责任

— 本手册全文完 —

© 2026 海南登登科技咨询有限公司 · 孙程
iras.cn · github.com/chengsunmail/iras · 6881509@qq.com
本手册整合 iRAS v1.0 → v1.5 全部内容 · 完整版