

RP1 白皮书

RP1 人形机器人平台的系统设计与工程实现



RP1 在影棚拍摄中运动状态的抓拍。

摘要

RP1.3 是一款面向运动控制与操作研究的模块化人形机器人平台。其工程贡献包括：基于执行器、可维护的本体设计，髋关节轴线分离、踝关节采用并联结构；采用分段式 CAN-FD 通信并配备统一的关节指令接口；以及从模型准备到运动学习与部署的一体化工作流。模块级记录包括：在第 6 节所述条件下，累计 120 小时无负载上肢运动，以及单臂携带 5.5 kg 负载进行 10 分钟动态作业。这些记录并不构成对整机寿命或持续负载额定值的认定。PartyOS 仍在开发中。模型、接口与工程源文件等参考资料可支持进一步研究；每项结果仅在其所述配置下成立。

关键词：人形机器人；模块化驱动；运动重定向；仿真到现实（sim-to-real）；遥操作；耐久性测试。

目录

引言 4

1 机械结构 4

 1.1 概述与设计原则 4

 1.2 平台定位 5

 1.3 人体对应关系与运动映射 6

 1.4 关节模组选型 8

 1.5 关节轴线布局与任务空间 12

 1.6 制造、装配与维护 19

 1.7 从机械装配到 URDF 22

2 电气系统 26

 2.1 系统架构 26

 2.2 板卡职能与硬件实现 26

 2.3 总线分段与通信分层 28

 2.4 热插拔保护与异常响应 29

3 嵌入式软件 30

 3.1 架构与通信 30

 3.2 硬件抽象与系统支持 32

 3.3 日志记录与压力测试 33

 3.4 交互与远程控制 34

4 算法 34

 4.1 hhtools 运动重定向 35

 4.2 训练框架 37

 4.3 部署框架 39

 4.4 全身智能 42

5 PartyOS 43

6 系统测试 44

 6.1 系统配置与验证范围 44

 6.2 上下肢互补耐久试验 45

 6.3 单臂动态负载验证 46

 6.4 测试软件与证据管理 48

7 局限性与未来工作 49

8 结论 49

附录 A 测试方法与计划条件 50

附录 B 配置检查 50

附录 C RP 灵巧手 50

C.1 配置与规格	50
C.2 尺寸与电气接口	51
C.3 软件与开发者接口	51
附录 D 参考文献	52
附录 E 人形机器人平台索引	54
附录 F 图表索引	57
附录 G 工程证据索引	59

引言

本白皮书介绍 RP1.3——RP1 平台相对稳定第三个迭代版本，面向对人形机器人感兴趣的研究人员与开发者等读者。具体配置与历史图示保留其各自的独立编号。

评估采用任务相关的物理量，包括关节力矩、运动范围与作业时长，并附带相应的负载与测试条件。除非有相应的测量支持，多功能性、效率与可靠性仅为设计目标。

机械与电气文档、软件接口、模型和测试记录将平台设计与评估联系起来。Mini Cheetah 与 ToddlerBot 为该工程 workflow 提供了背景参考 [4, 5]。

本文按以下顺序展开：机械设计（第 1 节）、电气架构（第 2 节）、嵌入式软件（第 3 节）、控制与部署（第 4 节）、PartyOS 集成（第 5 节）以及测试（第 6 节）。全文始终区分设计值、计算值、仿真结果、RP1 实测数据、上游结果与计划功能。

1 机械结构

1.1 概述与设计原则

RP1.3（内部代号 ROBOTO 01）将执行器、计算、电源与传感器集成在一个可配置的研究型本体中。已公布的比例、关节布局与接口支持模块更换。CNC 加工件与标准件适合小批量生产；可独立拆卸的舱段为磨损件提供了可达性。

机械平台为软件与控制的变化提供了稳定的参照。开放的接口与可独立更换的模块，使不同研究方向能够在算法演进过程中复用同一物理平台。

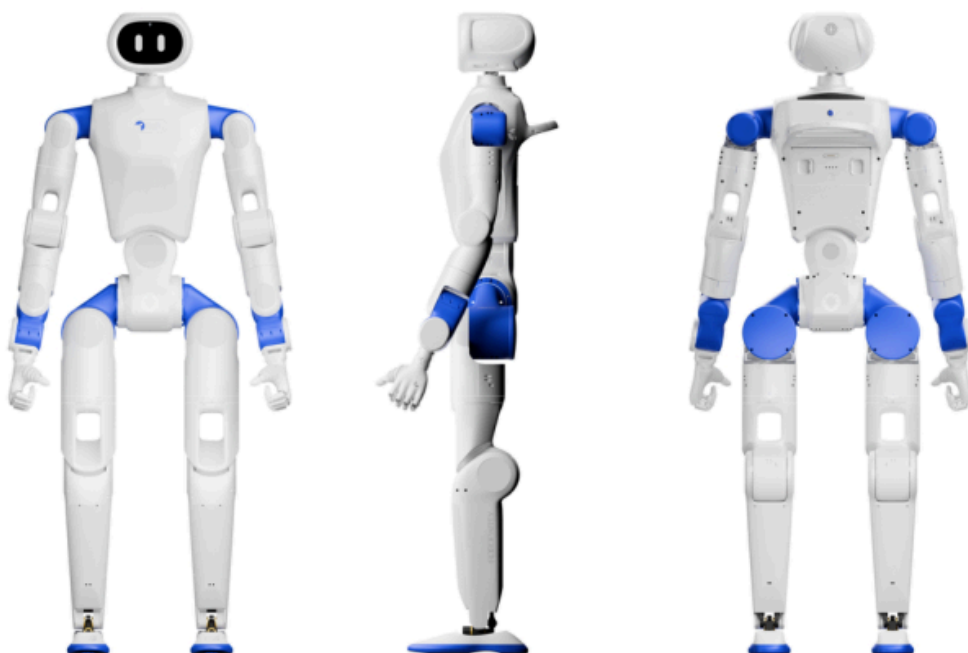


图 1.1. 蓝白配色方案下 RP1 的三视图。来源：RoboParty [21]。

24 自由度与 28 自由度本体共用两条 6 自由度腿和一个 2 自由度腰部（横滚与偏航）。手臂分别为 5 自由度或 7 自由度。2 自由度头部使 28 自由度本体达到 30 个主动自由度；两只 6 轴灵巧手使总数达到 42 个。被动手指运动不计入。头部与手部模块单独计数；RP 灵巧手的规格见附录 C。

表 1.1. RP1 本体配置。

项目	24 自由度本体	28 自由度本体	备注
单腿主动自由度	6	6	髋 3；膝 1；踝 2
腰部主动自由度	2	2	横滚与偏航
单臂主动自由度	5	7	额外的腕部姿态调整
URDF 质量总和（kg）	39.1093	40.7264	URDF 值基于实物称重；包括结构件、执行器模组、电气元件与线缆

1.2 平台定位

RP1 是一台身高 135 cm 的人形机器人，面向科研、开发与教育场景，在图 1.2 中处于中小尺寸区间。

操作。上肢设计目标是在有限踮脚或弯腰的情况下够到桌面及常见工作台面。

运动。下身质量与腿部惯量支持更快的步态。在可比条件下，更低的质心减小了平衡力矩，跌倒能量也低于 1.6 m 以上的平台。

交互。更低的质量与末端惯量降低了碰撞能量。但所需的安全间距与防护措施仍取决于任务、速度、工装与风险评估；仅凭尺寸并不能认定可安全协作。

成本。在几何相似缩放假设下，关节力矩需求约随体型呈四次方增长。1.35 m 的本体降低了对执行器与减速器的要求。设计目标包括单人搬动、短维护周期，以及可在普通实验室与教学空间使用。

力矩近似的四次方缩放规律来自几何相似性：质量随特征长度的三次方缩放，而重力力臂随长度线性缩放，二者之积给出静态力矩对长度的四次方依赖。对于线加速度可比的运动，转动惯量随长度的五次方缩放、角加速度随长度反比缩放，得到相同的力矩标度。这是在上述假设下的缩放估计，而不是针对材料、比例或轨迹不同机器人的尺寸设计定律。

该设计在可达性、运动性、交互性与制造成本之间取得平衡，而不复制人体的每一个解剖学关节。

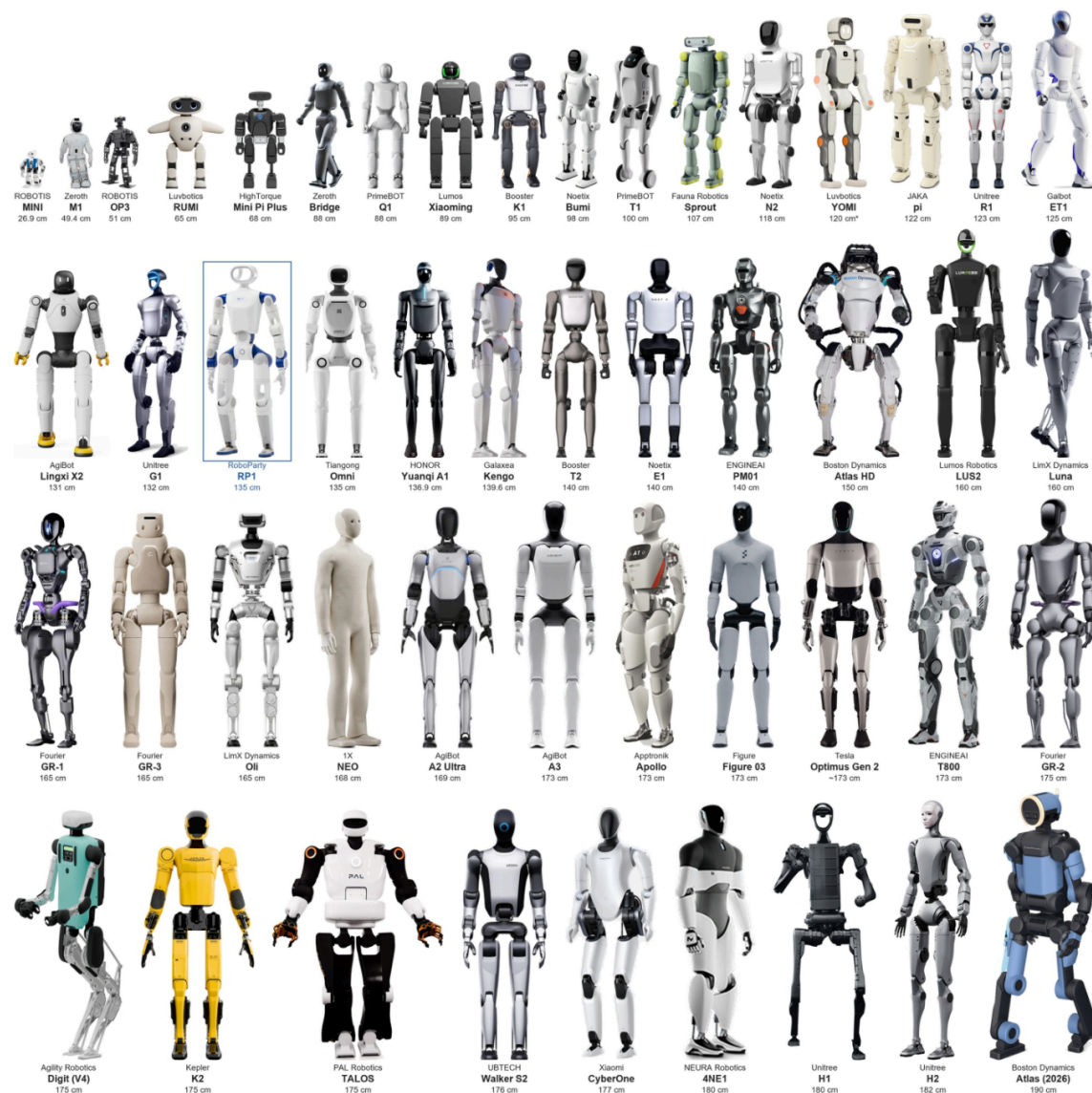


图 1.2. 按标称身高排列的人形机器人（26.9–190 cm；RP1 以蓝色显示）。版本与来源见附录 E。各身高数据不共用统一的测量规程。

1.3 人体对应关系与运动映射

1.3.1 任务空间对应关系

RP1 以人体工作空间与任务作为形态学参照。肢体工作空间覆盖常见操作区域，而无需为每个人体解剖自由度设置一个对应的机器人轴线。

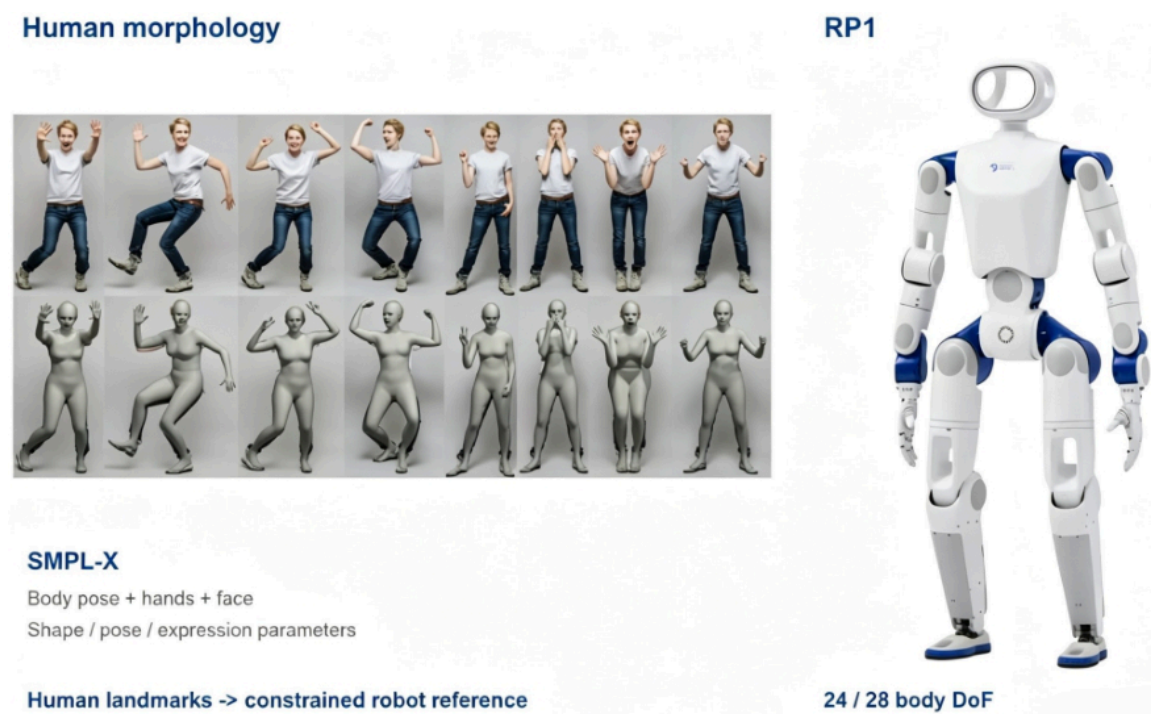


图 1.3. 人体姿态、SMPL-X 网格与 RP1 形态。来源：SMPL-X [6] 与 RoboParty [21]。

这种任务空间对应关系使同一本体能够服务不同任务，并复用人体运动数据。

正运动学将关节角映射为末端位姿；关节限位与碰撞约束了可达性。雅可比矩阵将关节速度映射为末端速度，并识别方向性约束与奇异位形。

1.3.2 从人体运动到机器人轨迹

两阶段映射。解剖学映射利用肢体比例、骨骼标志点与末端位姿，将人体的髋、膝、踝、肩、肘、腕与机器人关节关联起来。约束修正随后使轨迹适配机器人的关节限位、地面接触与自碰撞约束。运动捕捉、仿真与生成轨迹共用同一套解剖学映射，之后进行平台相关的修正。硬件变更无需重建人体侧的工作流。

以 SMPL-X 作为人体参照。SMPL-X (SMPL eXpressive) [6] 在一个参数化网格中表达身体、手部与面部。形态、姿态与表情参数为将运动数据映射到 RP1 提供了标志点、肢体方向与根部位姿。源规范定义了 54 个 SMPL-X 关节，而 RP1 本体主动自由度为 24 或 28 个。人体模型参数与机器人自由度并不是等价的计数。

执行器组与人体关节。图 1.4 以示意方式给出了 14 组共 30 个 RP1 执行器模组与所选 SMPL-X 标志点及解剖区域之间的功能对应关系，附表给出各区域的模组与分组数量。图示的 30 自由度配置由 28 自由度本体加 2 自由度头部构成。将每个腕部由三个模组减为一个，即得到 24 自由度本体配置。人体脊柱的三段共用一组含两个模组的躯干组。手指关节被略去，属于独立的灵巧手模块。

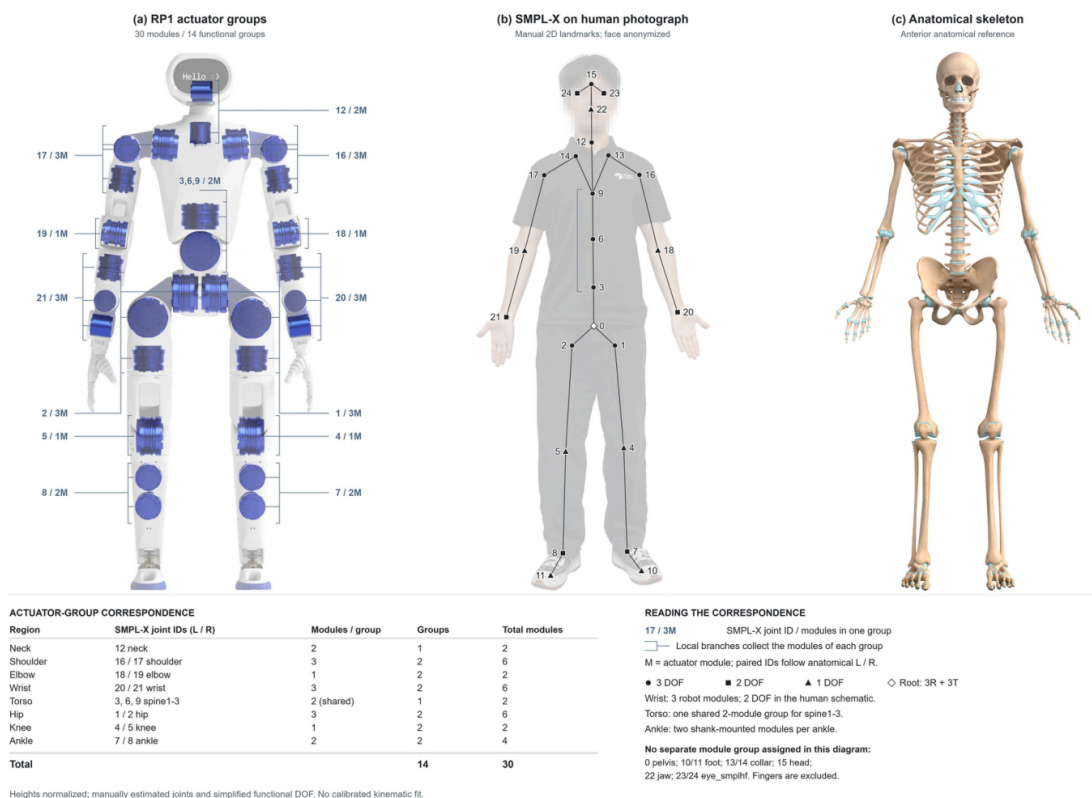


图 1.4. RP1 执行器组与 SMPL-X 人体关节的对应关系。来源：SMPL-X [6] 与 RoboParty [21]。解剖示意图来源：Anatomia，<https://anatomia.com.mx/anatomia/lineaOsteo/MicroSitio/Esqueleto/index.html>。

1.3.3 基础自由度与扩展模块

运动与操作对自由度的分配要求不同。RP1 将通用基础、可选上肢以及独立的头部与手部模块分开，以避免不必要的硬件，同时保留任务所需的运动能力。

配置分配。通用基础：两条 6 自由度腿加 2 自由度腰部，共 14 个自由度。上肢：24 自由度本体为每臂 5 自由度；28 自由度本体为每臂 7 自由度，以提供额外的操作冗余。扩展：2 自由度头部与两只 6 轴灵巧手将 28 自由度配置提升到 42 个主动自由度。

1.4 关节模组选型

四种尺寸的一体化旋转式 ROMOMO 模组满足各关节对力矩、速度与封装的要求。抱箍式安装与空心过线孔在容纳散热与布线的同时，提供了装配与维护通道。

1.4.1 执行器拓扑

传动类型。RP1 全身采用旋转关节。曾考虑的替代方案是通过丝杠与连杆实现直线驱动。旋转模组直接输出角度，具有紧凑型法兰安装、高带宽和潜在连续旋转能力；带载保持会消耗功率并产生热量。直线执行器先将电机旋转转换为推力，再转换为关节力矩。源设计对比报告称，所考虑丝杠类型的推力为同规格滚珠丝杠的 3–6 倍。自锁与预紧能否改善保持能力与回程间隙，取决于机构设计。所引用的 35–70 mm 行程限制了运动范围，力矩遵循 $\tau = F \cdot r \cdot \sin\theta$ 。高减速比、自锁与连杆动力学可能降低响应速度并造成被动退让。旋转关节适合大行程与快速响应；直线执行器可适合有限行程、高负载与长时间保持。RP1 基于可复现性、成本与维护可达性选择旋转模组。以下各表保留源设计记录中的定性对比；它们并非受控的、同条件基准测试。

在旋转模组中，减速器直接将电机转速转换为关节力矩。丝杠执行器则先将旋转转换为轴向力，再利用连杆力臂产生关节力矩。行星滚柱丝杠通过多个螺纹滚柱接触分担载荷，这与滚珠丝杠的局部接触形成对比。行程与连杆几何约束了可实现的运动，并使力—力矩关系依赖于具体构型。这些因素必须与冲击载荷、保持工况、可反驱性与远端惯量一起评估；自锁并非每种滚柱丝杠设计的固有属性。

表 1.2. 传动特性。来源：RP1 原始设计对比 [21]；定性结论，且依赖于具体构型。

特性	旋转关节模组	源设计中考虑的直线执行器
输出	角度 / 力矩	位移 / 推力，再经连杆转换
行程范围	最高可达连续 360° 旋转	所引行程 35–70 mm；角度范围取决于连杆
静态保持	通电保持；无制动器时产生热量与能耗	自锁能力取决于丝杠设计
抗冲击	行星传动耐过载；谐波柔轮可能较脆弱	所考虑丝杠类型报告具有高抗冲击能力；源文本被截断
回程间隙	谐波：标称零间隙；行星：源对比中为 10–15 弧分	预紧可减小回程间隙；源规格其余部分被截断
动态带宽	高；低惯量响应	高减速比与附加连杆使其降低
控制	直接角度输出	非线性力矩： $\tau = F \cdot r \cdot \sin\theta$
成本	源对比中较低	该源对比中较低；下文另一集成对比报告为高成本

表 1.3. 执行器集成对比。来源：RP1 原始设计对比 [21]；定性结论，且依赖于具体构型。

特性	旋转关节	直线执行器
驱动布置	电机与行星减速器一体化	电机加丝杠及运动转换机构
复杂度	较简单	较复杂
成本	较低	较高
质量	较轻	较重
传动效率	较高	额外的丝杠传动损耗
维护	在所提供的裁剪截图中不可见	在所提供的裁剪截图中不可见

减速器选型。 RP1 采用行星减速器，以满足刚度、抗过载、适中成本的要求，且源对比报告其单级效率高于 0.97。接近 20 的传动比在响应与振荡之间取得平衡。在所对比的方案中，RV 减速器更重、更昂贵；谐波减速器柔度更大，并存在柔轮疲劳问题。

RV 减速器将摆线减速级与额外齿轮级组合，在源对比中以更大的质量与包络为代价提供可观的力矩容量与精度。谐波减速器利用柔轮与刚轮的齿数差实现大传动比；传动比超过 100 是可行的。轻载高速工况下的柔轮柔度与损耗，必须与其精度、紧凑性和力矩密度权衡。RP1 基于本平台对刚度、效率与成本的优先级选择行星减速；该对比并不意味着某种减速器类型适用于所有人形关节。

表 1.4. 减速器对比。来源：RP1 原始设计对比 [21]；定性结论，且依赖于具体构型。

特性	行星	谐波	RV
啮合方式	多点接触	弹性柔轮变形	摆线啮合
抗冲击 / 过载	高	低	高
刚度	高	低	高
效率	单级 > 0.97	低	中等
成本	适中	较高	较高
同尺寸质量	相对较低	低	高
使用寿命	源对比中长	受柔轮变形影响	源对比中长

所选的 NGW 布置采用共用行星轮、内外啮合。典型单级传动比为 3-10；两级可达 40 以上。备选 NW 布置轴向可更短，但加工更复杂、径向包络更大，限制了在堆叠式组件中的复用。

表 1.5. 行星机构布置形式。来源：RP1 原始设计对比 [21]；定性结论，且依赖于具体构型。

特性	NGW	NW
布置	共用行星轮，内/外啮合	双排行星轮，内/外啮合
复杂度	简单	加工更难
轴向尺寸	紧凑	更紧凑
径向尺寸	较小	较大
效率	高	略低
堆叠组件中的复用性	好	受限

转子布置。每个模组将内转子电机与 NGW 行星减速器组合。低转子惯量支持快速响应；靠近机壳的定子绕组将热量向外传导。所对比的外转子设计惯量更高、响应更慢。

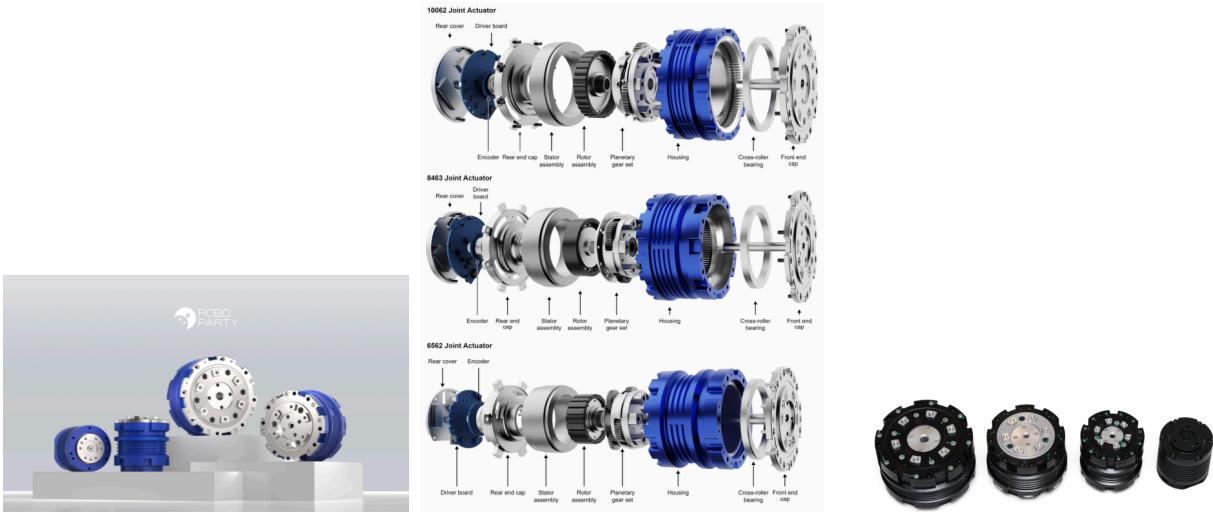


图 1.5. ROMOMO 关节模组系列。来源：RoboParty [21]。

表 1.6. RP1.3 所用 ROMOMO 模块化执行器系列的标称规格。

参数	5757	6562	8462	10062
传动比	19.05:1	17.4:1	20.5:1	20.7:1
额定力矩 / N · m	8	9.5	14	44
峰值力矩 / N · m	25	28.5	42	140
额定转速 / rpm	130	157.9	60	80
最大空载转速 / rpm	156	200	155	130
外径 × 高度 / mm	57 × 57	65 × 62	84 × 62	100 × 62
空心孔径 / mm	4.5	4.5	8	10
质量 / kg	0.406	0.491	0.648	1.188

1.4.2 参数与尺寸确定

执行器尺寸确定考虑力矩、转速与转子惯量。近端关节主要按支撑力矩选型；远端关节还优先考虑尺寸与摆动态惯量。两种方法共同定义选型包络。

仿真从近似物理模型出发，将几何与质量参数导出到仿真环境。在代表性运动与负载下采样关节力矩与转速，随后与相应模组的力矩—转速曲线对比（图 1.6–1.8）。由此得到的工作点分布指导整个所需运动包络内的模组选型。

1.3–1.4 m 级别的行业参考范围（包括源设计对比中的 G1 与 PM01 示例）提供了初步包络：髌/膝峰值力矩约 $120\text{--}140\text{ N}\cdot\text{m}$ ，输出转速一般低于 200 rpm 。这些范围是初步设计参考，并非 RP1 的实测值。最终模组选型将其与仿真的关节工作点结合确定。

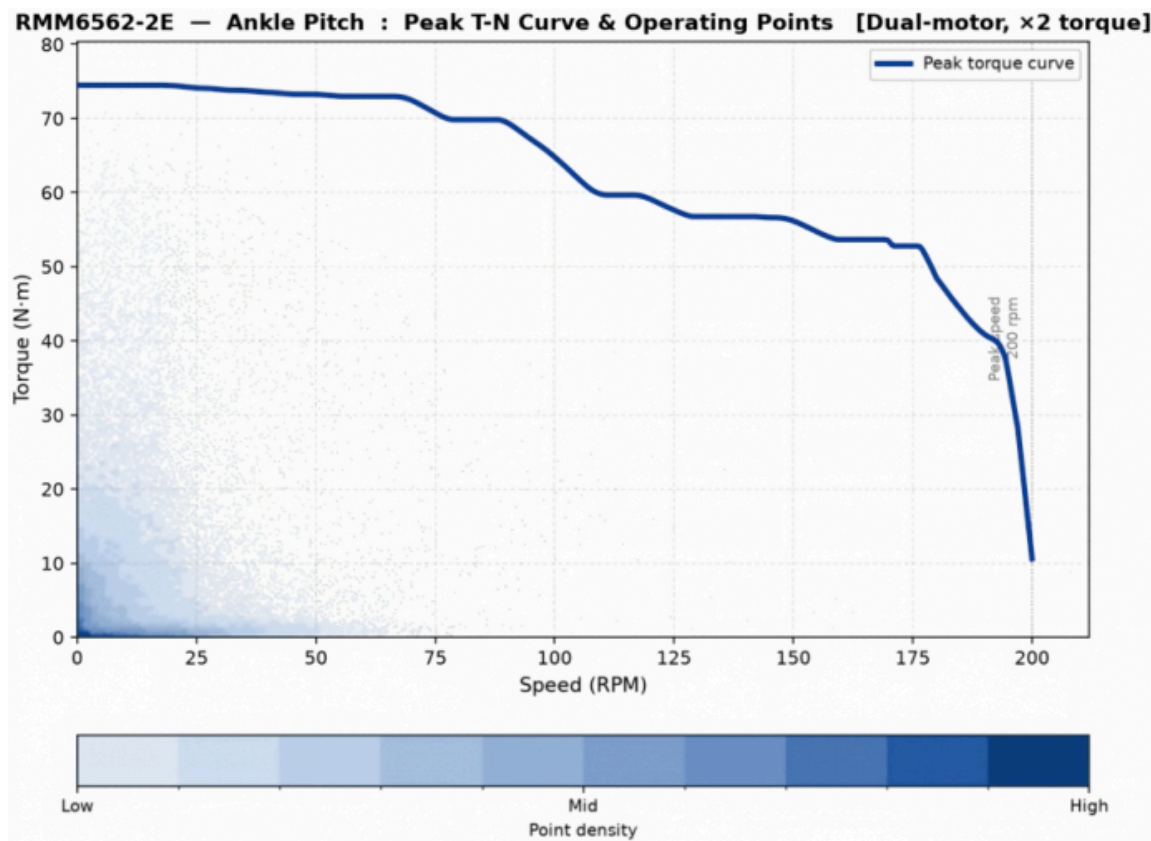


图 1.6. 五种代表性运动工况下 RMM6562-2E 的工作点。来源：RoboParty [21]。

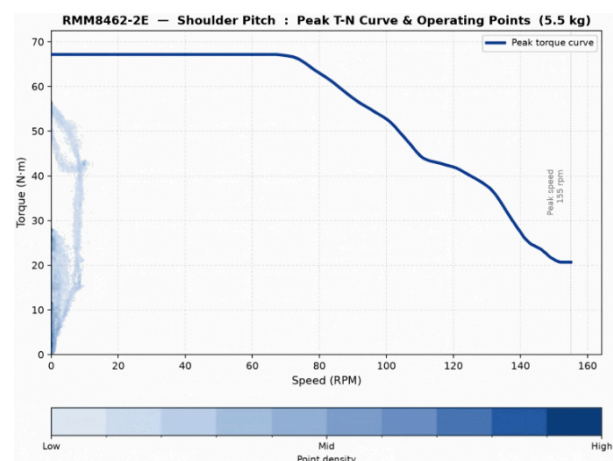


图 1.7. 组合侧平举与肘部屈伸（5.5 kg 末端负载）下 RMM8462-2E 的工作点。来源：RoboParty [21]。

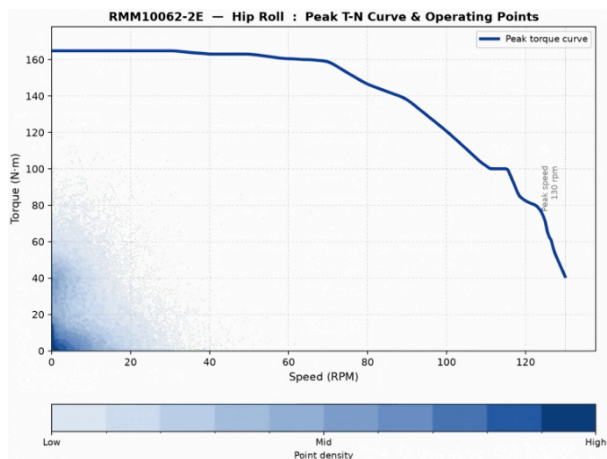


图 1.8. 五种代表性运动工况下 RMM10062-2E 的工作点。来源：RoboParty [21]。

1.4.3 机械集成

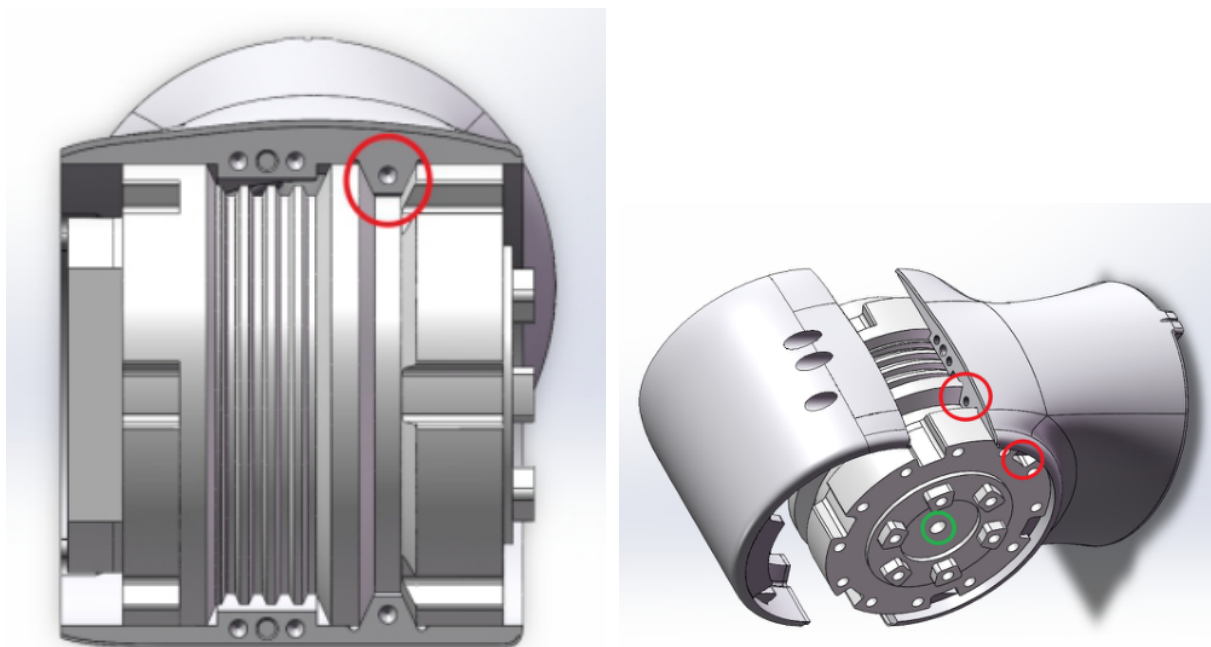


图 1.9. 抱箍接口与分体抱箍拆卸。来源：RoboParty [21]。

抱箍式安装与定位槽约束轴向与径向运动。它们提供紧凑的定位方式，并允许在不拆卸相邻法兰的情况下拆下模组。空心电机通道将线缆从内部走线，以减少摆动、缠绕、磨损与关节干扰。制造人员报告了五分钟更换目标；现有证据中不包含实测的操作规程或验收记录。

1.5 关节轴线布局与任务空间

可达性取决于手部姿态、肘部位置与整条手臂的间隙。步态与深蹲同样需要可行的腿部运动路径与接地方式。关节轴线布局决定了机构构型；任务空间规定了所需的手部或足部位姿；工作空间描述可达位姿 [1]。行程与碰撞检查必须覆盖整条轨迹。RP1 组合了 5 轴或 7 轴手臂、分离的腰部与髋关节以及并联踝关节。外壳间隙为运动留出空间；抱箍与工具接口提供局部维护通道。

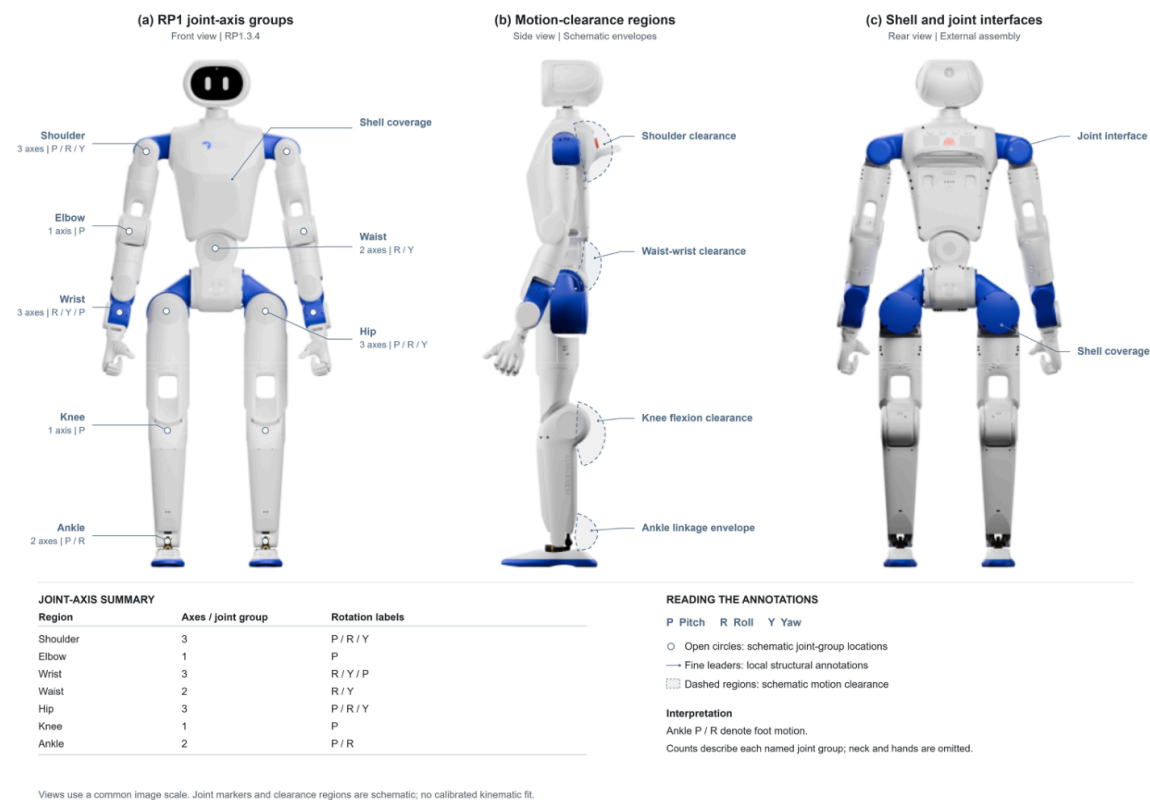


图 1.10. RP1.3.4 的关节轴组、外壳布局与运动间隙区域。P：俯仰；R：横滚；Y：偏航。轴线位置与间隙区域为示意。来源：RoboParty [21]。

表 1.7. RP1 关节限位与人体参考范围。机器人的零位与正负号约定不同于解剖学惯例；人体数据来源在下文以表内局部标签 [ROM-1]、[ROM-2] 标明。

区域	RP1 关节	RP1 正限位 (°)	RP1 负限位 (°)	RP1 总行程 (°)	人体正常活动范围 (°) [ROM-1, ROM-2]	人体总行程 (°)
头 / 颈	俯仰 (Pitch)	+45	-30	75	后伸 0-45；前屈 0-45	90
	偏航 (Yaw)	+30	-30	60	旋转：左 0-60；右 0-60	120
腰	偏航 (Yaw)	TBD	TBD	TBD	旋转：左 0-35；右 0-35	70
	横滚 (Roll)	TBD	TBD	TBD	侧屈：左 0-45；右 0-45	90
上肢	J1 肩俯仰	+135	-195	330	前屈 0-180；后伸 0-60	240
	J2 肩横滚	+171	-27	198	外展 0-180；内收回到中立位 0*	180*
	J3 肩偏航	+165	-165	330	内旋 0-70；外旋 0-90	160
	J4 肘	+71	-91	162	屈曲 0-150；伸直至 0	150
	J5 腕横滚	+147	-147	294	旋前 0-80；旋后 0-80	160
	J6 腕偏航	+85	-85	170	桡偏 0-20；尺偏 0-30	50
	J7 腕俯仰	+70	-70	140	屈曲 0-80；背伸 0-70	150

下肢	髋俯仰 (hip_pitch)	+164	-164	328	前屈 0-120; 后伸 0-30	150
	髋横滚 (hip_roll)	+149	-42.5	191.5	外展 0-45; 内收 0-30	75
	髋偏航 (hip_yaw)	+158.5	-158.5	317	内旋 0-45; 外旋 0-45	90
	膝 (knee)	+4	-162.5	166.5	屈曲 0-150; 伸直至 0	150
	踝俯仰 (ankle_pitch)	+35	-45	80	背屈 0-20; 跖屈 0-50	70
	踝横滚 (ankle_roll)	+15	-15	30	内翻 0-35; 外翻 0-15	50

依据：RP1 数值为给定限位；TBD = 待定。人体数值为 AAOS 临床参考值 [ROM-1, ROM-2]，而非人群区间或个人最大值；此处不区分年龄、性别及主动/被动测试。**对比：**机器人的正负号/零位不同于解剖学中中立位。总行程跨越单一运动轴的端点。J1-J7 沿用现有 RP1 模型顺序；J5 功能上对应前臂旋转。**解剖学说明：**肩部抬升包括肩胛带；腰部数值覆盖胸腰段；内翻/外翻覆盖踝—足复合体。肘/膝伸直为 0 度；不讨论个体过伸。* J2 总行程仅覆盖外展至中立位；所引 AAOS 表格在此约定下未规定额外的交叉内收；0 表示中立位，而非没有内收。

[ROM-1] Skinner SB, McVey C. Pocket Notes for the Physical Therapist Assistant. 2nd ed. Jones & Bartlett Learning; 2013:11,13 (表 1.4 与 1.6, AAOS 数值)。出版商来源。

[ROM-2] Norkin & White's Measurement of Joint Motion: A Guide to Goniometry. 6th ed. Appendix A, Table A.1 (AAOS 列)。出版商来源。

1.5.1 上肢

按手部位置与姿态选型。在同一手部位置下，侧向抓握与掌心向下的接近方式可能需要不同的腕、肘构型。因此手臂选型取决于目标位姿。7 轴手臂具有肩、肘、腕各三个（其中肘一个）轴线；5 轴手臂的腕部调整较少，可行的末端姿态取决于目标位置以及肩、肘与躯干的协调运动。肩轴确定上臂方向，肘屈曲调整可达范围与前臂路径，腕轴确定末端姿态。这些角色在任务中是耦合的：期望的手部位姿可能需要整条手臂的协调运动，而 7 轴配置的冗余轴允许备选的肘、腕构型。

完整手臂路径检查。检查项包括：接近过程中掌心朝向与肘部位置、屈曲时前臂与躯干的间隙、静止时手部与腕部的间隙。双臂检查还包括所持物体。间隙必须在接近、抓握与收回全过程中保持，而不仅在最终位姿处。



图 1.11. 人体与 RP1 的肘屈曲对比。人体参考：[42]；RP1 限位与照片：[21]。

RP1 肘屈曲 162 度，伸直为零位。本图及后续对比中的人体范围均为文献参考值，并非对被拍摄者的测量；图内引用仅局部适用。

RP1 left arm geometry and joint spacing

Flexed elbow | XZ sagittal projection

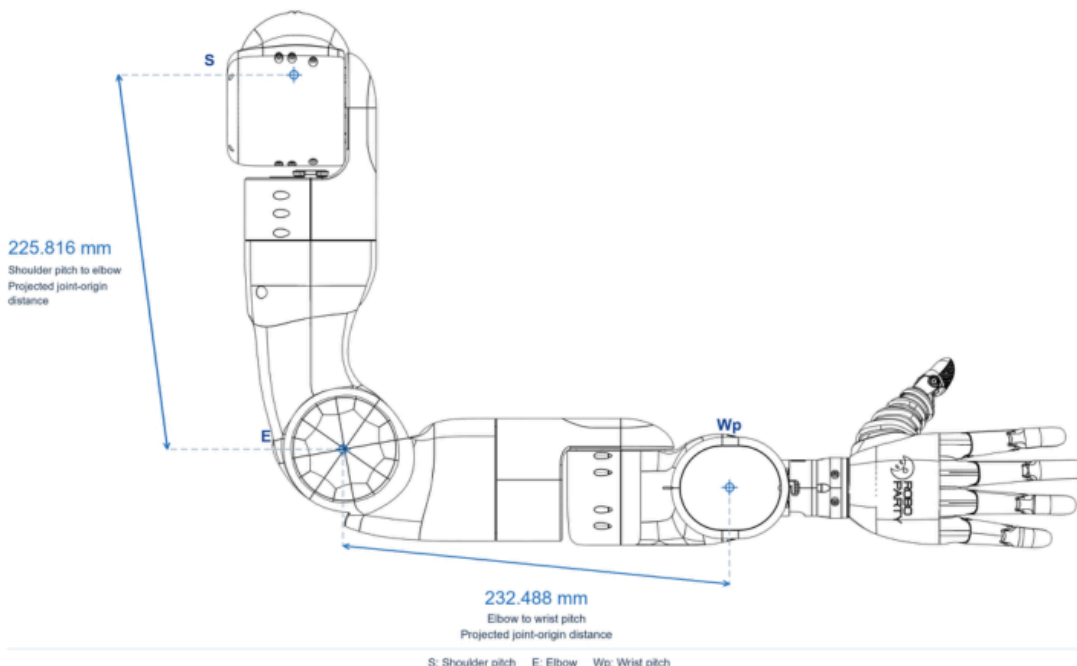


图 1.12. 左臂几何与关节原点投影间距。S：肩俯仰；E：肘；Wp：腕俯仰。尺寸依据所提供的 CAD 图纸与图示姿态。来源：RoboParty [21]。

所提供的左臂图纸给出肩俯仰至肘 225.816 mm、肘至腕俯仰 232.488 mm 的关节原点投影距离。图 1.12 记录了屈肘姿态下的 XZ 矢状面投影；这些数值描述图示几何，不应替代特定配置下的三维 URDF 变换。

1.5.2 腰部与髋部

将人体运动适配到机器人关节。 RP1 具有腰部横滚与偏航，但没有独立的腰部俯仰。重定向必须将人体的前屈动作分配到髋、膝与全身姿态上，并考虑轴线位置与肢体比例 [2]。图 1.13 对比了一轴、两轴与三轴腰部配置。RP1 的横滚与偏航支持躯干侧倾与朝向调整；前屈需要下半身协调。G1 EDU 示例表示可选的三轴配置。仅凭轴线数量并不能确定运动范围、力矩容量或任务性能。

Waist kinematics: reference architectures and RP1

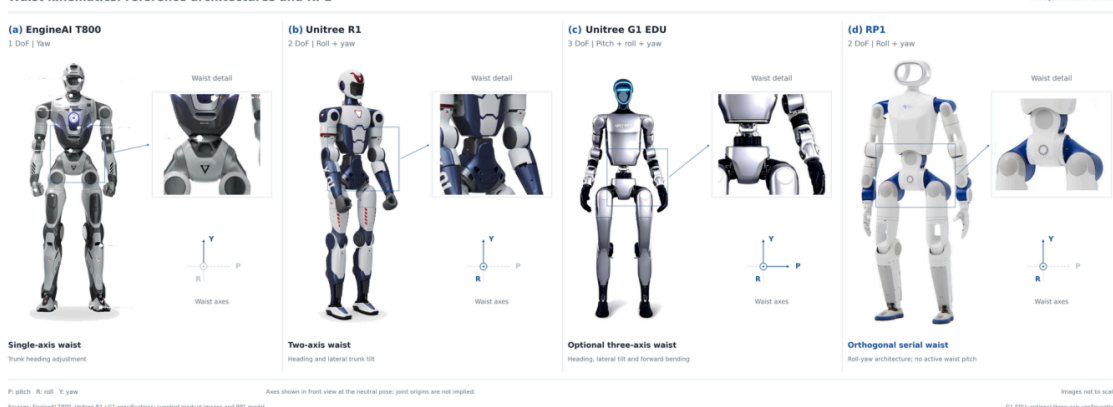


图 1.13. 腰部架构：EngineAI T800、宇树 R1、宇树 G1 EDU 与 RP1。P：俯仰；R：横滚；Y：偏航。型号变体按标注；图片不按比例。来源：所提供的对比图；制造商来源见附录 E；RP1 [7, 21]。

串联腕部驱动。 人体腕关节以球窝关节组合屈曲、外展与轴向旋转。RP1 使用三个原点分离的串联关节，产生不同的运动路径。

FAR 顺序与 RP1 布局。 FAR 表示屈曲—外展—旋转（即俯仰—横滚—偏航），从骨盆到大腿。这里的 R 指轴向旋转（偏航），而非横滚。该顺序描述连接关系，而非运行时的孤立运动。FAR 与 ARF 驱动不同的下游结构。对比时保持骨盆与其他关节角固定，只动一个关节。

表 1.8. 髋部串联顺序。

对比项	FAR：屈曲—外展—旋转	ARF：外展—旋转—屈曲
骨盆至大腿顺序	俯仰 → 横滚 → 偏航	横滚 → 偏航 → 俯仰
仅动俯仰	驱动下游横滚/偏航结构与腿	最后一个髋关节；驱动下游腿部。横滚与偏航在其上游
仅动横滚	驱动下游偏航结构与腿	驱动下游偏航/俯仰结构与腿

选型取决于模组质量、尺寸、轴距、间隙与目标运动。步长、能耗与稳定性无法仅凭轴线顺序推断。所审查的 RP1 URDF 采用俯仰—横滚—偏航（FAR）顺序。关节原点分离，零位姿态下横滚低于俯仰。共轴度、倾角与间距需要以实际模型为准。下移横滚模组可腾出髋部上方与垂臂侧方的空间。大腿路径的改变需要对正前方与侧向迈步、内收与深蹲进行间隙检查。图 1.14 对比了解剖与机器人髋部架构。下移 RP1 横滚轴线改变了大腿间隙与扫掠体积。图示的 61 mm 偏移量适用于所提供的 CAD 配置；其他修订版本需要核实。这些几何差异要求进行碰撞与运动检查，而不是给出性能排序。

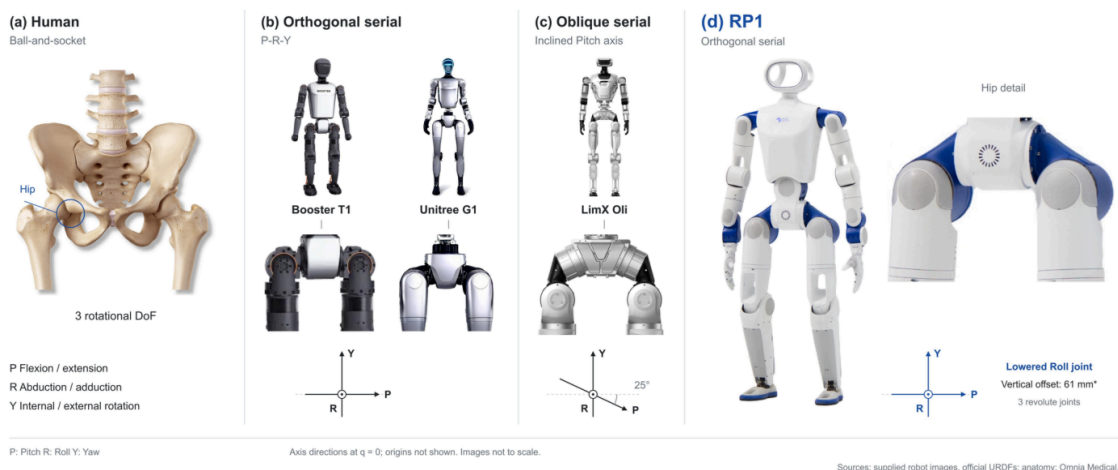


图 1.14. 髋部参考架构与 RP1 关节布局。轴草图表示零位姿态方向，而非重合的原点。来源：所提供的对比图与标注的机器人来源；解剖学图片署名 Omnia Medical；RP1 [7, 21]。



图 1.15. 人体与 RP1 的髋内收对比。人体参考：[43]；RP1 限位与照片：[21]。

RP1 髋内收：相对骨盆固定的中立姿态为 42.5 度。人体参考：[43]。

1.5.3 下肢

髌、膝、踝协调运动。每条腿具有髌部三轴、膝一轴、踝两轴。髌、膝、踝的协调运动控制大腿姿态、腿部伸展、足高与落点。

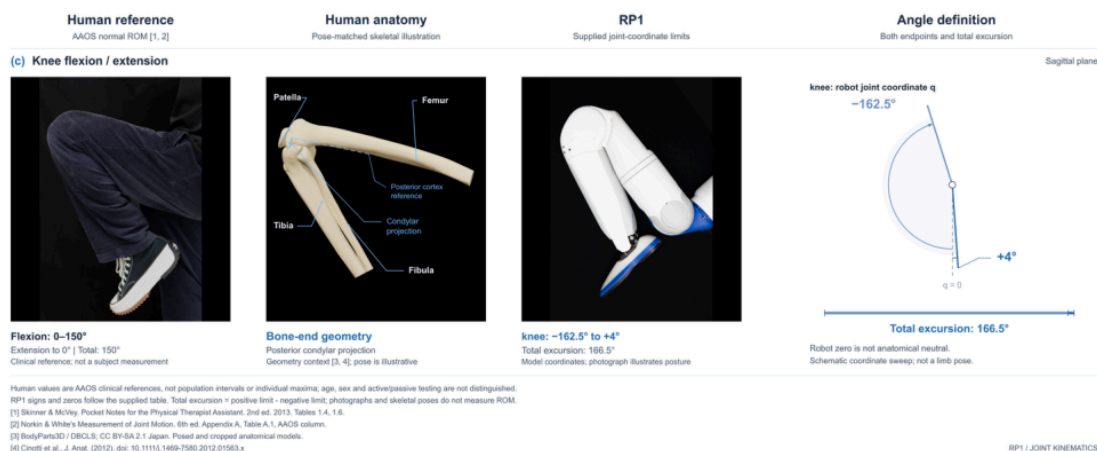


图 1.16. 人体与 RP1 的膝屈曲对比。人体参考：[42]；RP1 限位与照片：[21]。

RP1 膝屈曲 166.5 度，完全伸直为零位。人体参考：[42]。

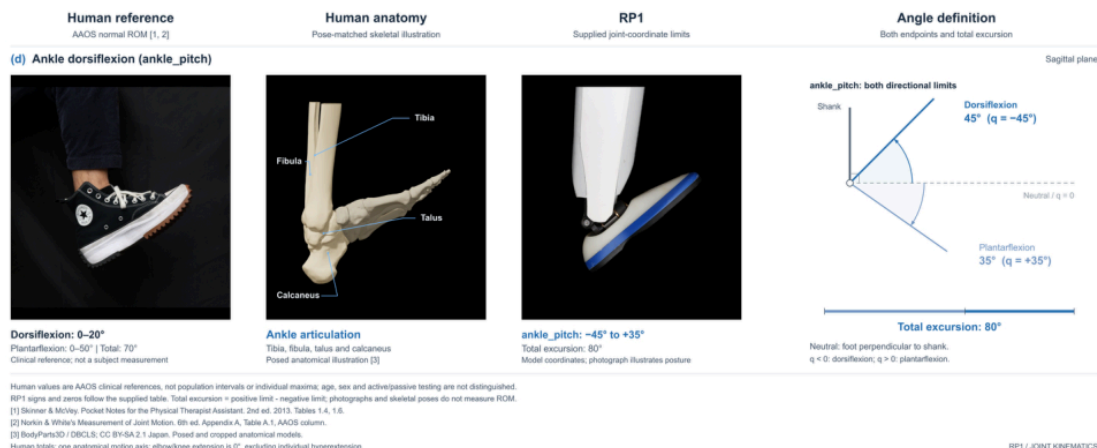


图 1.18. 人体与 RP1 的踝背屈对比。人体参考：[42]；RP1 限位与照片：[21]。

RP1 踝背屈：相对小腿垂直的足部姿态为 +45 度。人体参考：[42]。



图 1.19. 人体与 RP1 的踝跖屈对比。人体参考：[42]；RP1 限位与照片：[21]。

RP1 踝跖屈：相对同一中立姿态为 -35 度。人体参考：[42]。

运动间隙与维护通道。间隙检查覆盖：迈步时的脚趾、深蹲时的膝后与踝连杆、侧向运动时的腿部与髌部外壳。局部紧固件必须保持可达。抱箍拔出路径需检查是否有盖板与相邻零件阻挡。

1.5.4 足部

支撑面积与摆动间隙。更大的足板扩大几何支撑区域，但增加碰撞与刮蹭风险。RP1 采用 AL7075 足板，其尺寸与踝关节位置和足部落点路径共同确定。平面与侧面视图检查整个摆动过程中足缘间距与脚尖/脚跟高度。踝部位置会改变这些轨迹。实际接触面积取决于表面形状、足部姿态与地面条件，不一定是足板的投影面积。图 1.20 将足/踝俯仰组件的侧视图与单独足部的正视图分开。地面反力分量作用于 C；等效截面反力与力矩作用于踝部参考点。图示参考高度：踝俯仰 63.92 mm，踝横滚 45.00 mm。水平力臂取决于接触位置与运行工况，因此该图仅定义载荷几何，不指定通用的踝部载荷。

RP1 foot and ankle free-body diagrams

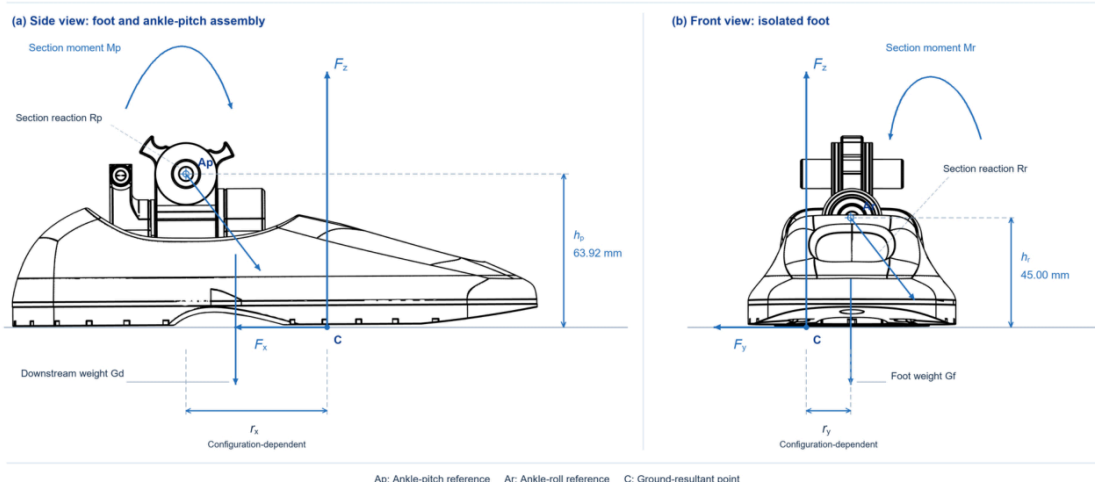


图 1.20. 足部与踝关节自由体受力图。(a) 足与踝俯仰组件侧视图。(b) 单独足部正视图。重力项遵循相应的自由体边界；力臂取决于运行工况。来源：RoboParty [21]。

1.6 制造、装配与维护

密集的关节、线缆与混合元件使装配与维护对尺寸误差和接口不一致非常敏感。通道不畅会增加调试时间与故障定位难度。RP1 结合面向制造的设计（DFM）、面向装配的设计（DFA）与面向可维护性的设计（DFS），采用材料分级、执行器系列化、标准化接口与计划拆卸路径。DFM 处理成本与加工；DFA 处理装配与连接；DFS 处理可达性、拆卸与诊断。这些决策共同支持多功能性、效率与可靠性的共享目标。

DFM / DFA / DFS Framework in RP1 Mechanical Design

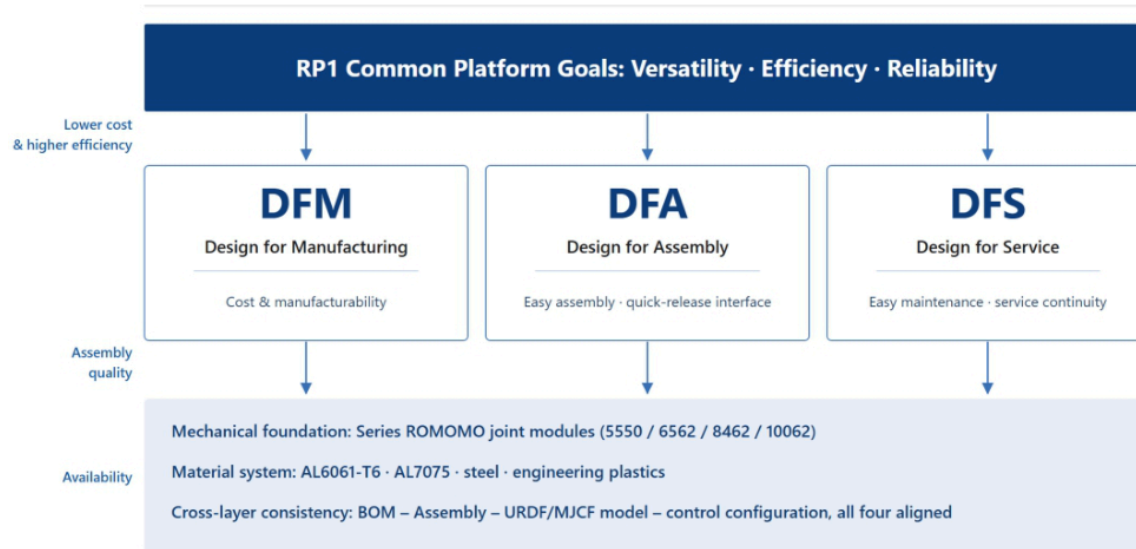


图 1.21. DFM、DFA 与 DFS 框架。来源：RoboParty [21]。

1.6.1 面向制造的设计

DFM 在装配之前定义材料、加工基准、关键公差与标准件。结构寿命要求约束了成本与加工复杂度的降低幅度。

表 1.9. 材料选择。

材料	建议用途	工程控制要点	RP1 应用
----	------	--------	--------

AL6061-T6	主要结构件与常规支架	检查薄壁变形、热处理状态与关键孔公差；平衡加工性、成本与强度。	躯干与肢体框架
AL7075	受高载荷、高强度或质量约束的零件	按载荷、疲劳与环境选型；审查供货状态、表面处理、连接与加工成本。	足板
钢材	支座、挡块、销轴与承受磨损的界面	检查接触应力、磨损、腐蚀以及与铝的电位兼容性。	关节挡块与万向节零件
工程聚合物	盖板、线束支撑、绝缘与隔离	按温度、绝缘性、阻燃性、蠕变、磨损与紧固方式选型。	外壳与电气防护

每类零件都有默认材料。升级需要计算、仿真或测试证据，并考虑加工、表面处理、紧固与供应。ROMOMO 的 5757、6562、8462 与 10062 四种尺寸覆盖 25–140 N·m 峰值力矩。全部采用 48 V 供电与 CAN-FD；尺寸随关节位置与载荷确定。从所提供电机 T-n 测试曲线读取的 75、67 与 165 N·m 三点解读如下：75 N·m 是双电机 6562 踝并联机构的两倍等效峰值力矩，而 67 N·m 与 165 N·m 分别是 8462 与 10062 的单电机/等效点数值。

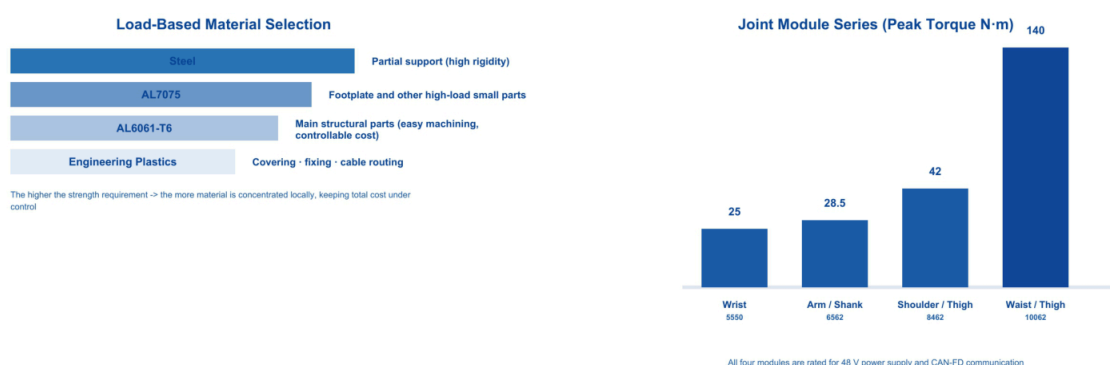


图 1.22. 材料分级与关节模组系列。来源：RoboParty [21]。

材料分级与模组系列化减少了过度规格化与重复设计。成本收益需要当前的加工、材料、零件数量与采购数据支持。

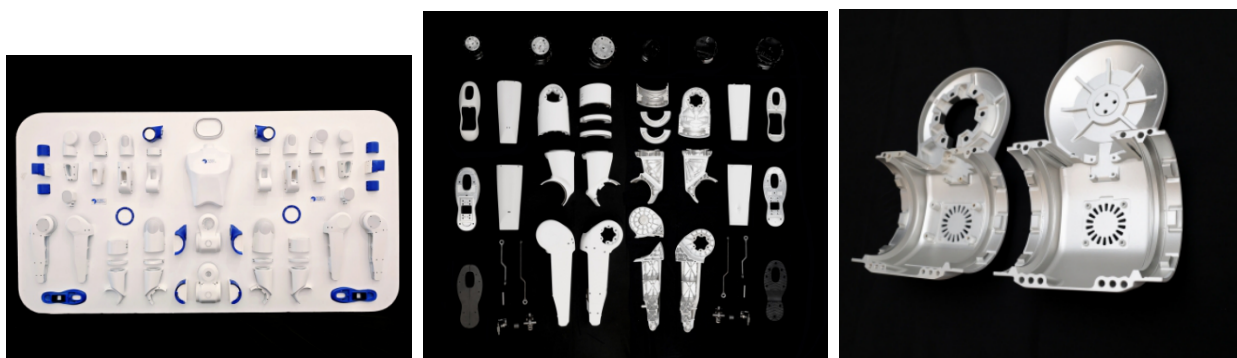


图 1.23. RP1 本体零件（左）。来源：RoboParty [21]。

图 1.24. RP1 核心结构件（中）。来源：RoboParty [21]。

图 1.25. 核心零件细节（右）。来源：RoboParty [21]。

1.6.2 面向装配的设计

机械装配。肩部与大腿横滚接口由承载主体与紧固分体抱箍组合而成。定义明确的支撑、抱箍与紧固件界面使安装与拆卸路径清晰。

线束集成。内部空心通道与分立的肢体线束分区限制了外露走线。定义明确的路径、连接器与固定点减少了干扰，并建立了维护边界。线束规划支持一致的装配、线缆保护与故障隔离。减少不必要的零件与连接、定义模

块安装接口、标准化线束接口，可降低对临时调整和操作者经验的依赖。因此装配规划将结构模块化与线缆布线视为相互关联的设计决策。DFA 评估准则包括零件数与步骤数、装配时间、连接错误与返工；本文未报告这些准则的 RP1 量化结果。

1.6.3 面向可维护性的设计

维护边界沿末端执行器、头部与肢体接口划分，以限制拆卸范围。腕部可更换工具（图 1.26）。更换工具还需要更新质量属性与控制参数。



图 1.26. RP1 腕部接口与三种可互换末端执行器。来源：RoboParty [21]。

可拆卸的头部与感知模块支持替代配置（图 1.27–1.28）。定制头部需要机械、电气、通信与控制方面的兼容性。肩部与腿部横滚抱箍允许在松开紧固件并断开接口后拆卸肢体（图 1.29）。



图 1.27. 拆卸 RP1 头部感知模块。来源：RoboParty [21]。



图 1.28. 感知、数据采集与运动控制头部配置。来源：RoboParty [21]。

RP1 modular leg interfaces

RP1.3.2 | CAD-derived exploded views

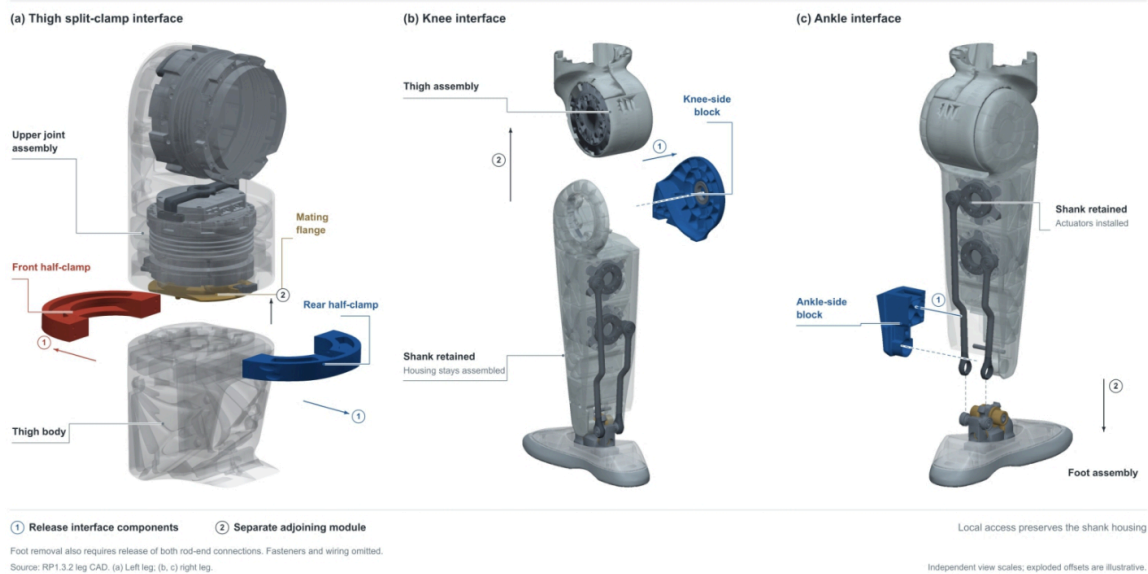
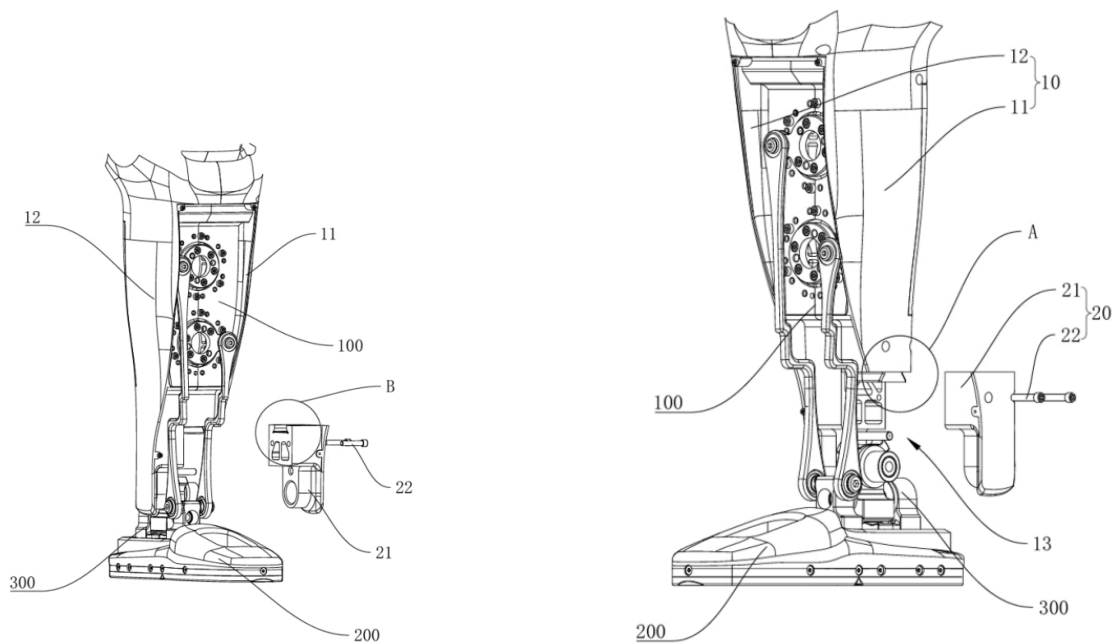


图 1.29. RP1 腿部模组中的部分快拆接口。来源：RoboParty [21]。



题为《一种人形机器人小腿与踝部的可分离固定方法》的机械技术交底书中的专利附图。

1.7 从机械装配到 URDF

1.7.1 模型概述

RP1_description 包含用于运动学、动力学、仿真与控制的 URDF、MJCF 与网格 [7]。URDF 记录连杆、关节、坐标系、几何、质量与惯量。连杆、关节轴、正负号、限位与零位姿态遵循物理机构。统一的基准使 CAD、URDF 与硬件定义保持一致。

1.7.2 运动学结构与关节配置

连杆对刚性连接的零件分组；关节定义相对位置、运动方向与范围。腰—髋基座分支出躯干、头部、手臂与腿。固定接口使用 fixed 关节；运动接口使用物理轴线与限位。配置尽可能复用名称与层级，仅修改受影响的模

组。一个有用的仿真模型既需要物理一致性，也需要可管理的几何细节水平。CAD 描述零件、加工特征与装配；URDF 面向软件组织刚体运动、关节约束与惯性属性。因此转换前必须做出明确的建模决策。

1.7.3 从 SolidWorks 到 URDF

导出前，按刚体运动对 SolidWorks 零件分组。外壳、电池与紧固件若相对位置固定，可共享一个连杆。图 1.30 给出头—躯干示例。参考坐标系定义位姿，基准轴定义旋转。左右侧参考必须遵循安装方向，以保证镜像后关节正负号不变。父子树定义每个关节的类型、轴线与限位（图 1.31）。固定零件保留固定连接。SolidWorks URDF Exporter [8, 19] 将连杆组、坐标系、轴线与质量属性转换为 URDF，并导出视觉与碰撞网格。导出流程为：整理 SolidWorks 装配体；定义刚体连杆、关节坐标系与轴线；运行 SolidWorks URDF Exporter；生成 URDF 及配套网格；然后在可视化、仿真与控制工具中检查模型。未做准备工作的完整 CAD 装配体不会自动成为有效的机器人模型 [8, 19]。

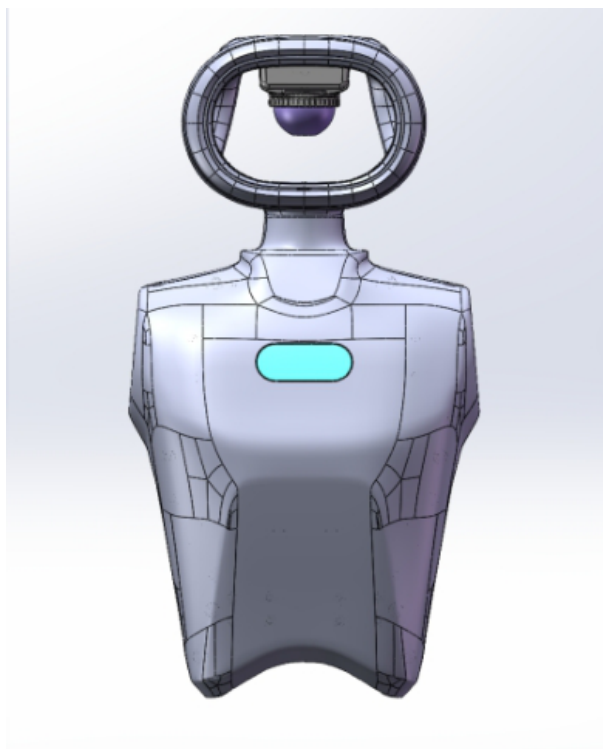


图 1.30. 头—躯干连杆。来源：RoboParty [21]。

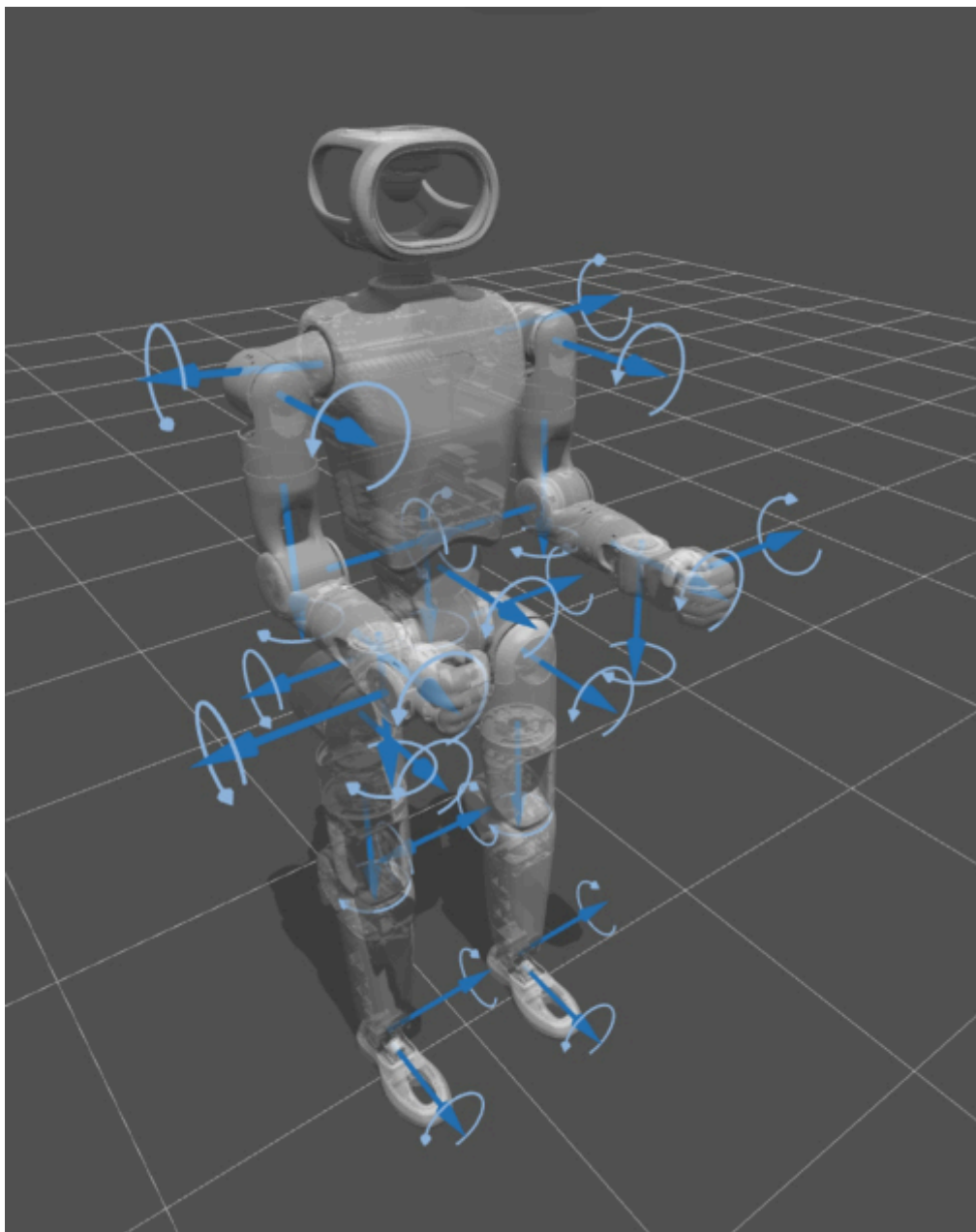


图 1.32. 主要关节轴与旋转方向。红色箭头表示轴线方向；绿色箭头表示对应的旋转。该图用于对照机械装配检查关节约定。来源：RoboParty [21]。

对于具有固定法兰与旋转壳体的关节，关节正方向必须描述壳体相对法兰的运动。在源工作流下，据此选择局部关节 Z 轴，而不是照搬电机输出轴的约定。左右关节需要针对实际安装、零位与期望的正向运动分别检查。图 1.32 可视化了这些轴线与旋转方向。

1.7.4 模型保真度与 CAD 准备

为关节中心、轴线与接口使用稳定的参考几何，使局部 CAD 编辑不会破坏坐标系。对刚性零件分组，同时保留每个相对运动接口。RP1 URDF 的质量数值基于实物称重。应在模型旁记录所称重的配置、包含的元件、测量方法与不确定度。布线、连接器与其他已安装元件必须一致地计入。连杆质量、质心与惯量必须描述同一配置；仅有质量测量并不能确定质心或惯量张量。视觉网格可以保留细节。碰撞网格应在保留接触边界的同时，省略内部零件、紧固件、孔洞与会增加仿真成本的小特征。

1.7.5 碰撞网格简化

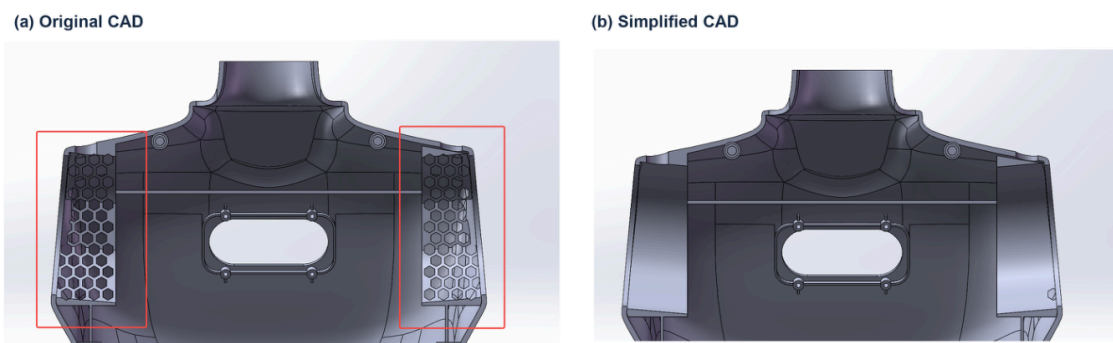


图 1.33. CAD 简化前后的胸壳几何。(a) 原始模型，高亮详细区域。(b) 用于导出的简化模型。来源：RoboParty [21]。

网格导出后抽减。对于已有 URDF，可在不改变原始 CAD 的情况下简化 STL 或 OBJ 网格。抽减可按三角形数量比例、目标面数或几何误差指定。边坍塌方法与二次误差度量（QEM）在逼近原表面的同时减少顶点与面；凸包或简单基元可能适合几何规则的零件。当无法编辑 CAD 时，网格级处理很方便，但统一抽减比例无法区分关键接触区域与不重要的细节。足缘、关节间隙与相邻连杆边界需要局部保护。应按几何复杂度与碰撞相关性为每个连杆分别设定目标面数或误差限。过度抽减会导致表面塌陷、边缘变形、孔洞、开放或非流形几何以及法线不一致。图 1.34 显示了激进抽减后头—躯干区域的可见表面损伤。在使用网格进行碰撞计算前，应检查这些缺陷与保留的接触包络。简化应去除不必要的细节，同时保留主要尺寸与运动关系。

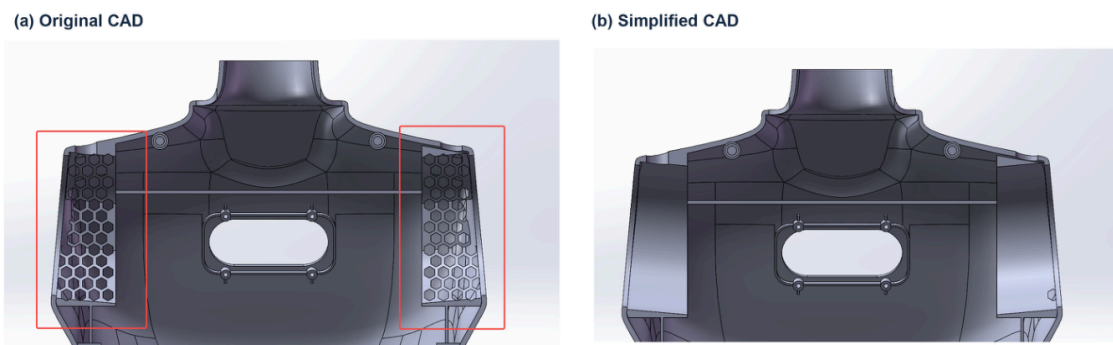


图 1.34. 激进网格抽减后的表面损伤示例。高亮显示的头—躯干区域说明了为何需要目视检查与接触边界检查。来源：RoboParty [21]。

1.7.6 CAD 与 URDF 的同步维护

CAD 与 URDF 必须指向同一机械配置。连杆尺寸变更需要重新检查关节原点、坐标系与碰撞边界；材料、壁厚或内部元件变更需要更新连杆质量、质心与惯量。安装方向变更也需要检查关节正负号、零位与限位。更换头部、手部与计算模块即使安装座不变，也会改变质量与包络。应同时更新视觉与碰撞网格、惯性属性、受影响的连杆与关节、设备配置与控制接口。当模块增加或减少一个自由度时，相应修改运动树与控制映射。

1.7.7 模块化配置

两种本体配置都保留两条 6 自由度腿与 2 自由度腰部。手臂为 5 或 7 自由度；手部自由度保持独立。增减模块需要同步连杆、关节、网格与动力学，使模型与硬件保持一致。跨配置时，在硬件未变之处尽量复用连杆与关节名称及父子关系。由此得到的 URDF 与网格既保留与 CAD 及物理机器人的结构对应关系，又支持模型可视化、运动学计算与碰撞检查 [7]。

2 电气系统

RP1 将电力与通信分配到执行器、计算与传感模块。保护与备份路径定义了电池更换与异常条件下的行为。

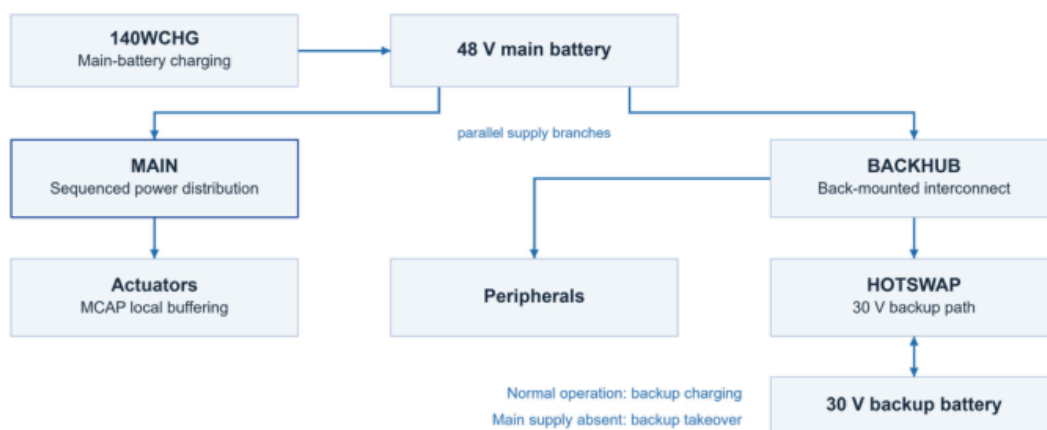
2.1 系统架构

电源路径连接电池、保护、配电、计算机与执行器；信号路径连接主机、桥接器、传感器与驱动器。电源与信号路径分离，限制了通过共地耦合与电源瞬态的相互干扰，并支持独立的电流、热、阻抗与时序检查。两条路径仍必须在相同的任务负载下评估。电池馈入并联的 MAIN 与 BACKHUB 支路。MAIN 分配执行器与外围电源；BACKHUB 连接背部模块与 HOTSWAP 备份。四路 USB 转 CAN-FD 分段服务执行器。USB/FPC 与以太网连接控制器与背板；摄像头、灵巧手与扩展计算机随配置变化。图 2.1 区分了电源、通信与急停路径。

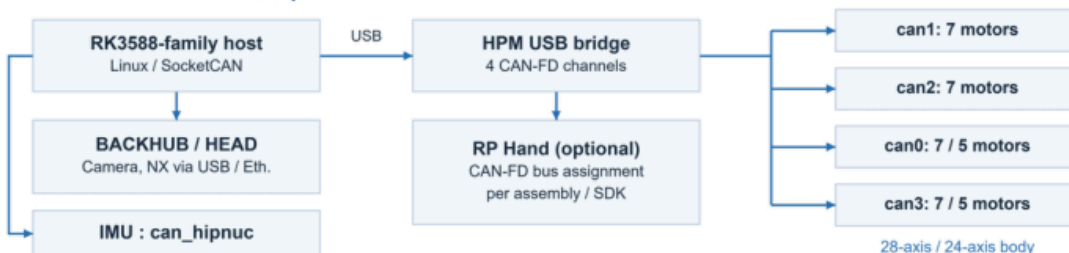
RP1 electrical topology

System connections reconstructed from hardware documents and deployment configuration

A Power distribution and backup supply



B Control and information paths



C Stop request path



图 2.1. RP1 电气拓扑：电源、通信与急停路径。来源：RoboParty [21]。

2.2 板卡职能与硬件实现

电源与通信分布在可独立制造、可更换的板卡上（表 2.1）。分离的板卡简化了大电流与信号布线、制造、验证、更换以及 24/28 轴配置。

表 2.1. 主要板卡职能。

模块	系统职能
----	------

FAN	风扇供电与控制
IMU / HEAD	姿态感知与头部外设
HANDPlusPro / FPC	手部连接与控制器—背板互连
433TX / 指示灯	操作者输入与状态显示
MINGMEI-BC / 140WCHG	电池连接与充电

图 2.2–2.3 给出 MAIN、BACKHUB、HOTSWAP、HANDPlusPro 与 MCAP 的布局。底视图为镜像；颜色表示加工层。

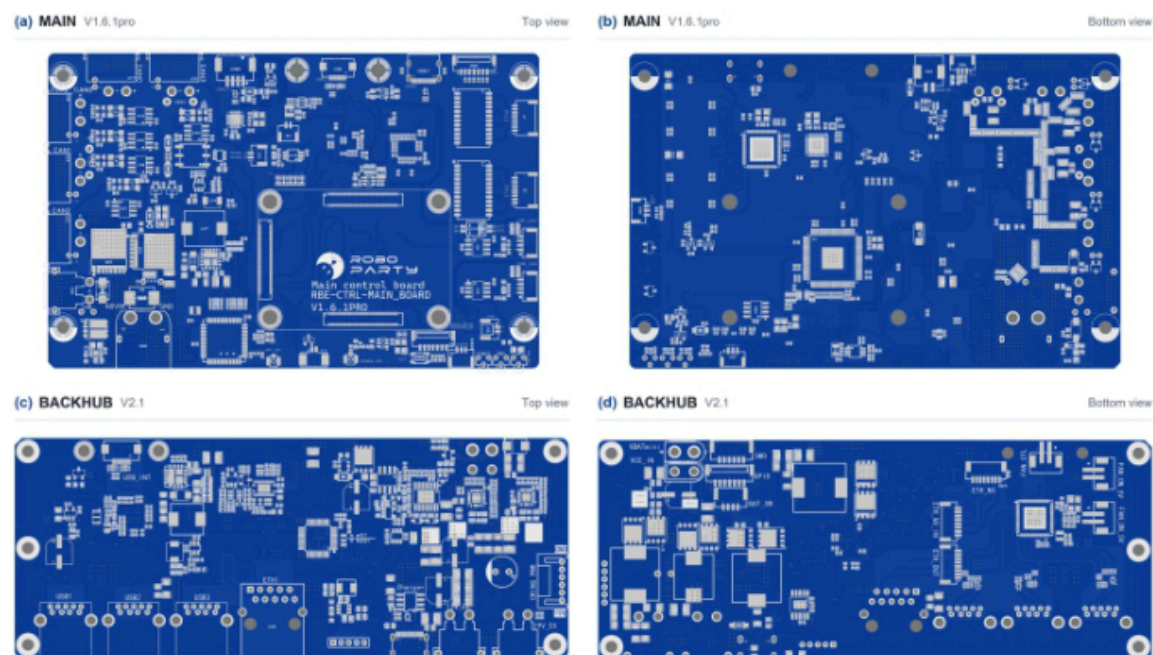


图 2.2. MAIN 与 BACKHUB 的顶视与底视 Gerber 渲染图，不按统一比例。来源：RoboParty [21]。

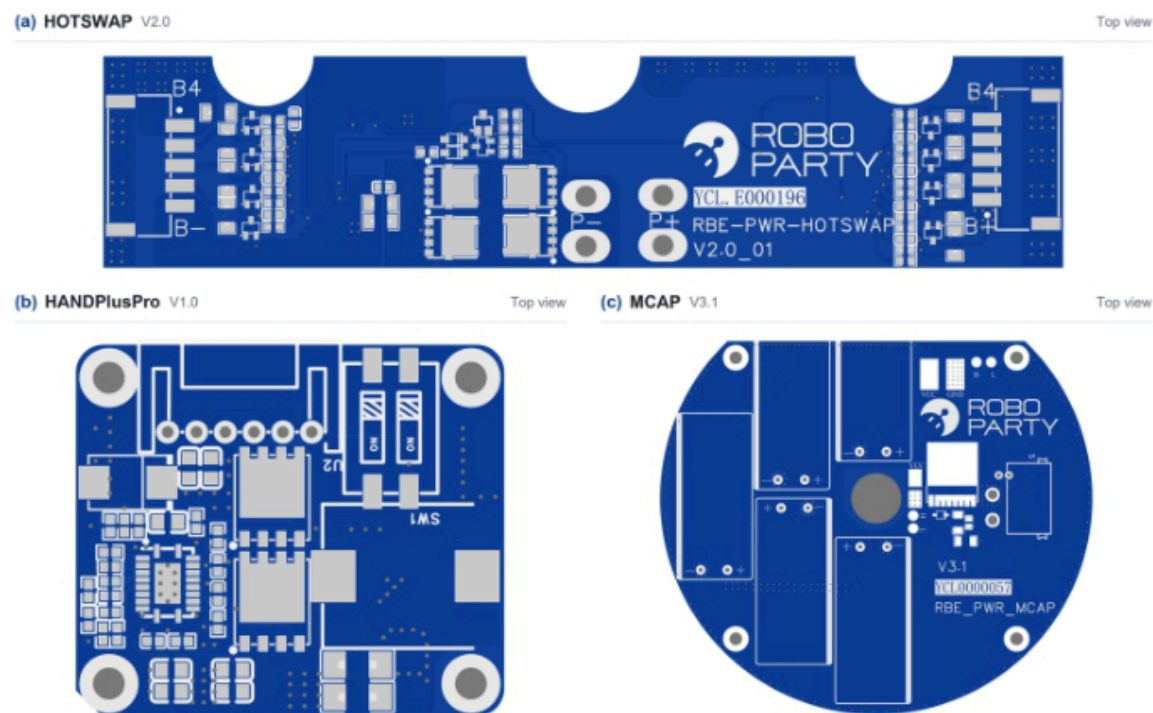


图 2.3. HOTSWAP、HANDPlusPro 与 MCAP 的顶层 Gerber 渲染图。来源：RoboParty [21]。

2.2.1 PCB 电源层与信号层

MAIN 与 BACKHUB 采用六层板，HOTSWAP 与 HANDPlusPro 四层，MCAP 两层。电源层承载电流并散热；信号层满足阻抗目标。对于标称 50 欧姆单端走线，设计计算采用 FR4 介电常数约 4.2、介质厚度 0.2 mm、线宽 0.3 mm、铜厚 0.035 mm，得到约 54 欧姆。与 50 欧姆目标约 8% 的偏差来自微带线近似；最终符合性仍以仿真与阻抗测试为准。电流容量与信号质量在设计阶段估计。采用 IPC-2221 计算 [18]，允许温升 10 摄氏度时，20 mil 外层走线估计约 1.46 A，55 mil 走线在外层为 3.05 A、内层为 1.52 A。这些估计用于识别需要更宽走线或额外铜箔的电源轨。微带近似下，FR4 上标称 50 欧姆单端走线约为 54 欧姆。针对高速接口调整叠层、线宽与间距，然后通过仿真与阻抗测试验证。目标值：CAN-FD 差分 120 欧姆，USB 90 欧姆，以太网 100 欧姆，关键单端信号 50 欧姆。这些是控制反射与串扰的设计目标，不能替代测量。

表 2.2. 目标阻抗。

接口	目标阻抗	应用
CAN-FD 差分对	差分 120 欧姆	执行器分段，含端接
USB 2.0/3.0 对	差分 90 欧姆	主机—桥接与扩展
千兆以太网对	差分 100 欧姆	ETH1/ETH2, 1000BASE-T
关键单端信号	50 欧姆	时钟与调试信号

2.2.2 计算与感知

MAIN 上的 RK3588 系列主机（8 GB 内存、32 GB eMMC）提供基础运行时。它对齐 24/28 轴反馈、IMU 与相机数据，运行执行器中间件，发送分段指令，并支持网络调试与日志记录。主机负责运动控制；扩展计算机处理高负载的视觉与点云任务。升级必须满足安装、供电与气流约束。机身 IMU 与相机 IMU 具有独立的外参与时间源。高频率的姿态角与角速度支持平衡；随配置变化的相机支持环境感知与操作任务。带宽、功率与数据时延与执行器流量一起进行预算。

2.2.3 不同工况下的储能

跑步、空翻与带载操作具有不同的功率需求。时间分辨的整机电流样本形成功率分布，从中得到的峰值功率、持续时间与能量缺口指导本地储能与保护设计。每条腿具有 5,000 微法的 MCAP 电容，合计 10,000 微法。在 48 V 下储能约 11.5 J；允许母线降至 40 V 时可用能量约 3.5 J。这对应 500 W 瞬态缺口约 7 ms。本小节中的 MCAP 保持时间、浪涌与软启动数值均为计算值；现有证据中不包含实测波形或测试条件。本地电容缓冲执行器的短时峰值，并减少上游瞬态。实际母线电压裕量需要在规定的负载与电压条件下测量确定。浪涌是第二个问题。初始放电的电容器与 50 毫欧回路电阻下，简化的 48 V 计算给出 960 A。因此软启动电路通过 MOSFET 栅极 RC 网络控制电压上升。约 198 千欧的等效电阻与 100 nF 电容给出约 20 ms 的时间常数，将上升过程展宽到数十毫秒，从而限制浪涌电流。

2.3 总线分段与通信分层

四路 CAN-FD 分段服务执行器。CAN-FD 定义链路传输 [16]，厂商协议定义指令与反馈，SocketCAN 提供 Linux 访问。中间件将这些层映射为统一的关节语义。28 轴配置将七个电机分别连接到 can1、can2、can0 与 can3；24 轴配置使用 7/7/5/5 的电机分布。在 1 kHz 下，以示例性的每电机 8 字节指令加 8 字节反馈计算，七个电机约产生 0.9 Mbit/s，28 个电机约 3.6 Mbit/s。这些是净载荷速率，不是链路完整占用率。仲裁段速率为 1 Mbit/s，数据段为 5 Mbit/s；还必须计入帧结构与相位时序。分段减少了流量并局部化故障，但全身运动仍需要协同的故障处理。实际裕量取决于调度与抓取的流量。表 2.3 列出标称接口速率、数据与约束。标称带宽不是实测利用率。

表 2.3. 接口与标称速率。

接口	协议	标称速率	流量 / 用途
CAN-FD, can0-can3	ISO 11898-1 CAN-FD	当前配置仲裁 1 Mbit/s; 数据 5 Mbit/s (CAN-FD 最高 8 Mbit/s)	执行器指令与反馈, 24/28 轴
USB 主机—桥接/外设	USB 2.0 / 3.0	480 Mbit/s / 5 Gbit/s	桥接上联、相机与调试
ETH1/ETH2	1000BASE-T	1 Gbit/s	远程调试、计算扩展与数据
Type-C 充电/调试	USB 2.0 / PD	按协议; 140 W 充电器额定	充电与 SoC 调试
控制器—背板	FPC/USB	并行信号 / USB	板卡互连与背部扩展
433 MHz 急停路径	433 MHz 射频	kbit/s 量级	急停请求与远程确认
Wi-Fi	802.11ax, AP6275S	标称 1,200 Mbit/s, 2T2R	无线调试与数据
蓝牙	BT 5.3	约 2 Mbit/s, LE	外设连接

图 2.4 标出外部电源、Type-C 充电口、两个以太网口与三个 USB 口。

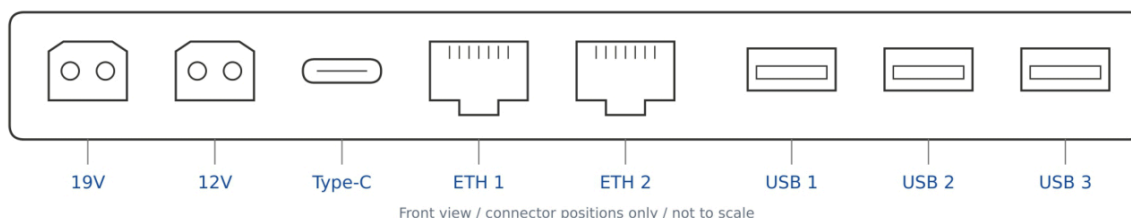


图 2.4. RP1 外部接口正视线框图。来源：RoboParty [21]。

2.4 热插拔保护与异常响应

2.4.1 热插拔逻辑

主电池为 13S2P 三元锂电池组，标称电压 46.8 V，充电上限 54.6 V，放电截止 39 V，典型容量 10 Ah（最低 9.8 Ah），额定能量约 500 Wh。25 摄氏度下持续放电 30 A；峰值放电 80 A 不超过 1 s，过流阈值为 50 A/3 s、80 A/1 s 与 140 A/250 ms。30 V 备份电池为 8S1P 软包电池组，预期长期电压 30.4 V，容量约 450 mAh（约 15 Wh）。电池更换期间，HOTSWAP 与 BACKHUB 维持关键电路，并提供备份路径。重新连接的设计目标是在不重新软启动、不产生负载可见中断的情况下恢复主供电。这需要在适用负载下验证。机器人站立时可释放、取出、插入并重新装入背部电池（图 2.5）；背部提手提供支撑。

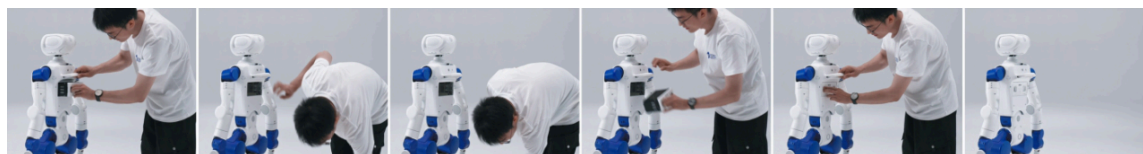


图 2.5. RP1 主电池拆卸与更换。来源：RoboParty [21]。

正常运行时，主电池向 MAIN 与 BACKHUB 供电，HOTSWAP 监测母线电压。当电池移除后母线电压在 t_{debounce} 时间内保持低于阈值时，30 V 备份通过 BACKHUB 接通，维持临时整机供电。新电池插入并确认后，系统返回主电池并为备份充电。理想二极管结构防止反灌；实测观察显示插入大电池时几乎没有反向电流。120 s 数值是设计目标与预算值；现有测试记录报告大于 120 s。按估计 100 W 关键站立负载，120 s 需要 12,000 J 可用备份能量，相当于 30 V 下约 0.111 Ah（折算转换损耗前）。设计裕量、实际负载与可用备份容量通过整机测量确定。

2.4.2 急停输入与状态反馈

急停功能通过三条路径实现：有线和 433 MHz 路径由 MCU 处理，以及在远程控制界面的软件急停确认。三条路径最终都触发 Drive Disable（驱动使能切除），切断电机驱动使能；触发、传输与恢复行为分别评估。软件、433 MHz 与有线路径分别应对正常运行、远程操作以及主机/通信故障。冗余需要故障测试。分别记录请求接收、驱动使能变化与机械停止，以识别延迟或丢失。图 2.6 显示机身按钮、遥控器与软件界面。示例面板显示来自设备反馈的急停/复位状态与电机温度。



图 2.6. RP1 急停输入与示例软件界面。来源：RoboParty [21]。

2.4.3 停止距离与制动预算

停止距离由响应延迟期间的行程与制动距离组成。以初速 1.0 m/s、响应时间 0.1 s、减速度 2.0 m/s^2 计算，示例距离为 0.35 m；响应时间 0.3 s 时为 0.55 m。响应预算分为：信号传输、433 MHz 模块处理与使能切除、驱动/制动响应以及机械间隙。无线路径包含射频传输与模块处理，按较长路径估计；有线响应预计更短。实际停止取决于摩擦、支撑状态与可用力矩。这些示例计算不是实测停止性能，也不构成经确认的安全间距。

3 嵌入式软件

嵌入式软件通过协议层、设备抽象与运行记录，将分布式设备映射为统一的运动接口。

3.1 架构与通信

3.1.1 执行架构

四层结构连接策略与硬件：应用生成关节目标；驱动编码协议；Linux 使用 SocketCAN；USB 桥接器转发 CAN-FD 流量。映射后的反馈作为策略观测返回。打包配置采用 250 Hz 控制与 50 Hz 策略更新。实时调度与 CPU 隔离减少干扰。这些配置速率不同于下文示例性的 500 Hz 通信预算和第 2.3 节的 1 kHz 净载荷计算；带宽与延迟需要单独评估。

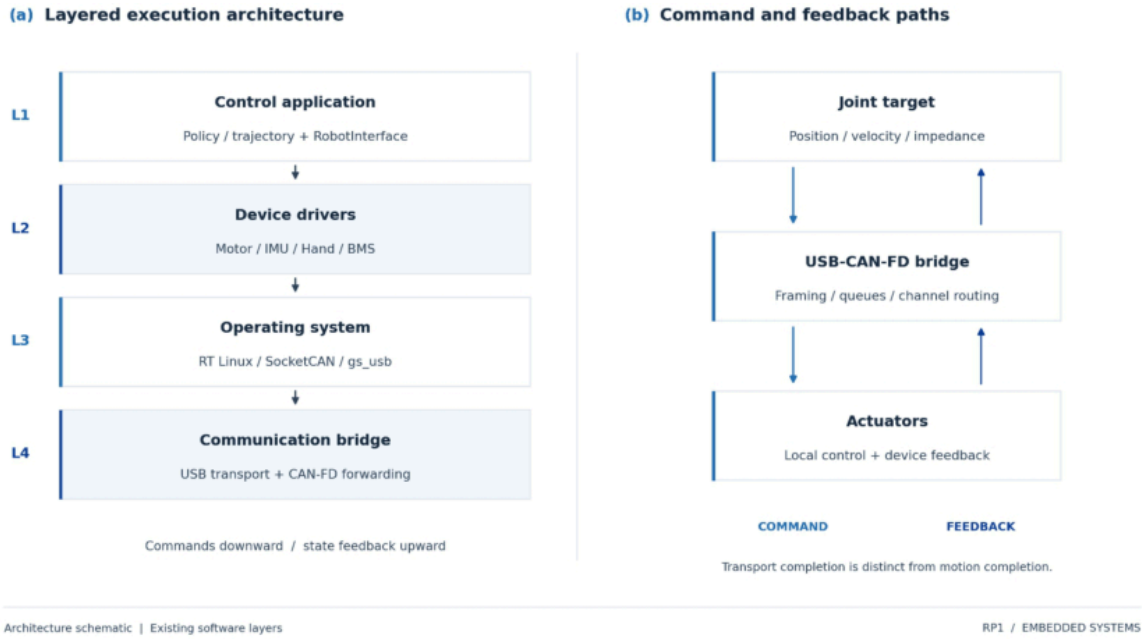


图 3.1. 嵌入式执行架构。(a) 控制、驱动、操作系统与桥接层。(b) 关节指令与执行器反馈路径。来源：RoboParty [21]。

3.1.2 通信预算

通信预算分别针对控制周期、CAN 总线与 USB 传输进行。考虑一条总线上的七个电机、500 Hz 频率，即 2 ms 周期。批量指令每周期占一个 64 字节帧，每个电机返回一个 12 字节反馈帧。即每秒 500 个指令帧与 3,500 个反馈帧，应用净载荷速率为

$$R_{\text{app}} = (64 + 7 \times 12) \times 500 = 74,000 \text{ B/s} = 74 \text{ kB/s}$$

该速率仅含应用数据。CAN-FD 区分仲裁段与数据段，此处配置为 1 与 5 Mbit/s。在 5 Mbit/s 下，64 字节指令的净载荷位耗时 102.4 微秒，12 字节反馈帧耗时 19.2 微秒。因此每周期净载荷占用为

$$T_{\text{payload}} = 102.4 + 7 \times 19.2 = 236.8 \mu\text{s}, \quad U_{\text{payload}} = 236.8/2,000 = 11.84\%$$

11.84% 仅为净载荷下界。完整占用还包括仲裁、控制位、校验、位填充、间隔、其他设备与重传，且各自速率不同。验收需要实际帧格式与抓包数据。USB 计量使用封装传输帧。当前实现为每个 CAN-FD 帧分配 12 字节头部与 64 字节数据区，因此即使 12 字节反馈也占用 76 字节。每个周期包含一条指令、七个反馈帧与一条指令回显，即

$$R_{\text{USB}} = (1 + 7 + 1) \times 76 \times 500 = 342,000 \text{ B/s} = 342 \text{ kB/s}$$

USB 净载荷速率为 2.736 Mbit/s，约占标称 480 Mbit/s USB High-Speed [17] 的 0.57%（事务开销之前）。USB 流量按总线求和；CAN 占用按每条总线评估。回显释放传输上下文，但不确认运动完成。带宽之外，控制周期还约束调度、排队、转发与设备响应。对于串行处理阶段，时间预算为

$$t_{\text{sched}} + t_{\text{queue}} + t_{\text{tx}} + t_{\text{bridge}} + t_{\text{rx}} + t_{\text{device}} + t_{\text{ret}} \leq T$$

预算项遵循实际的指令—反馈路径。缓冲指令还会老化：500 Hz 下的 100 条指令代表 200 ms 的历史。应测量周期分布、积压与反馈时延，而不是把队列容量当作裕量。

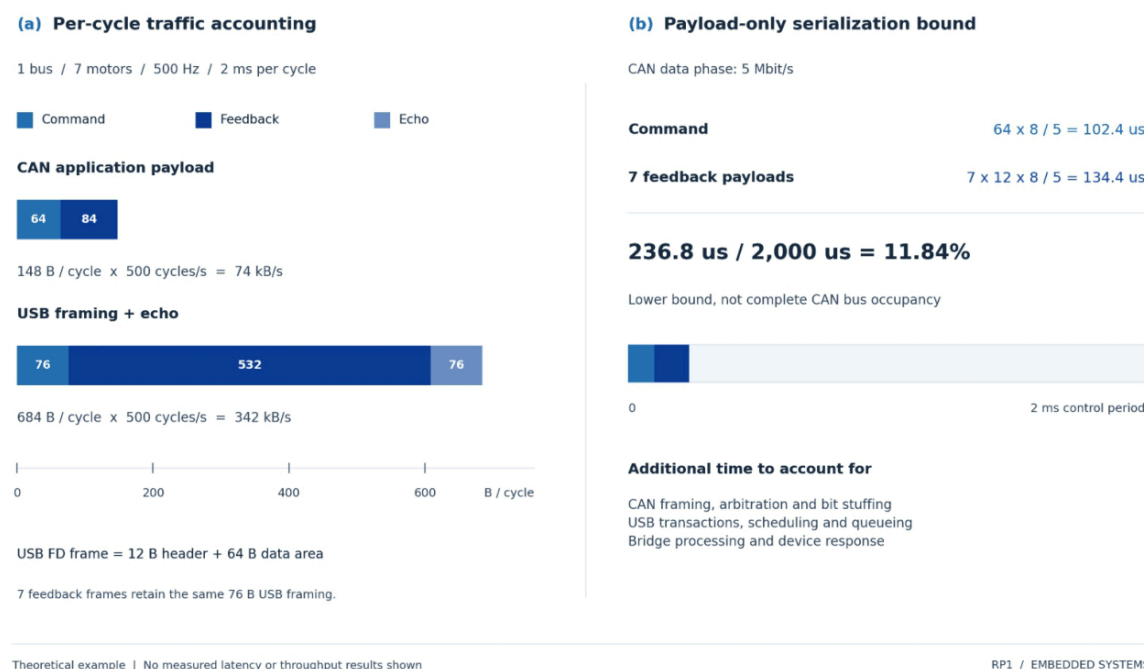


图 3.2. 理论 CAN/USB 流量与净载荷时序。11.84% 的值不含帧结构与其他延迟；未使用区域不是经过验证的裕量。来源：RoboParty [21]。

3.2 硬件抽象与系统支持

3.2.1 硬件抽象层

统一接口与工厂类选择电机、IMU、BMS 设备与灵巧手。传输、设备协议与机器人映射保持分离。

表 3.1. 硬件抽象。

层	实现	提供的能力
设备	MotorDriver、IMUDriver、BmsDriver、HandDriver	电机指令/反馈、惯性测量、电池状态与手部
通信	CAN / CAN-FD 传输抽象	帧发送、接收回调与后端选择
机构	解耦的、机构相关的实现	并联机构位置、速度与力矩的正逆映射
机器人	RobotInterface	关节顺序、方向、零偏、IMU 外参与机构组合

IMU 工厂支持 HIPNUC 与 MCT7123；BMS 工厂支持多种协议。并联机构使用统一接口与机构相关的求解器。设备变化影响后端与设置；本体变化还影响关节集合、模型与策略。

3.2.2 机器人板级支持包

基于 Armbian 的 BSP 配置实时内核、CPU 隔离、中断亲和性与调度权限，以及驱动、设备树与启动服务。BSP 补丁包括：可恢复错误后 gs_usb 接收请求的重新提交，以及暴露错误计数器。驱动与内核变更共享系统镜像构建。板卡系列包括 RoboPi2、RDK X5、Orange Pi、Radxa 与 NanoPi。配置、SoC 规则与补丁记录板卡差异；服务与软件包共享交付基础设施。

3.2.3 开放构建与 OTA 交付

GitHub Actions 执行版本检查与 Debian 软件包构建。构建产物经 Releases 与仓库接入进入 APT 交付；robopi-config 提供操作界面。驱动、工具与应用可分别更新。公开的源码、构建脚本、日志与产物支持版本对比与重建。镜像、固件、软件包与机器人配置版本一并记录。

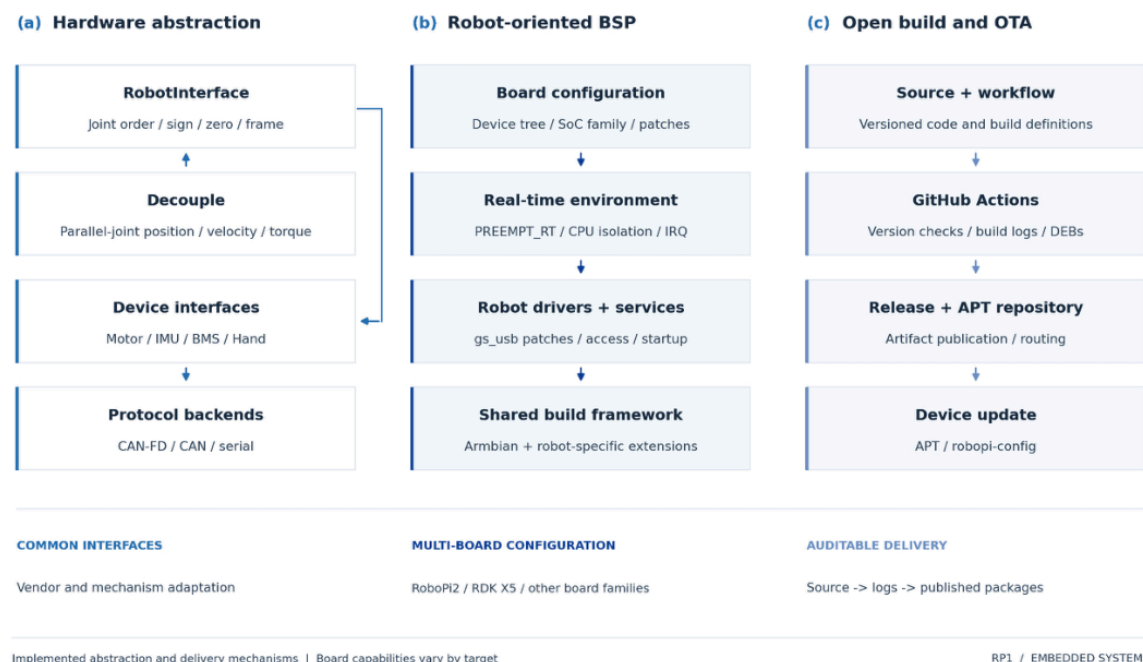


图 3.3. 硬件接口与并关节变换；机器人 BSP 配置；GitHub Actions 与 APT 交付。来源：RoboParty [21]。

3.3 日志记录与压力测试

3.3.1 多维日志与故障隔离

robopi-analyze 收集八类记录：电源与 BMS、CAN 接口状态、内核日志、桥接固件日志、原始 USB 流量、CAN 帧、推理输出以及温度/热状态。轮转与快照保留运行窗口。离线工具生成时间线，并分析 CAN 周期、USB 完成、回显配对与错误间隔。CAN 状态定位总线错误；USB 抓取定位停滞；固件日志记录队列与丢帧；电源与热日志解释重启与性能变化。按时间关联这些记录。会话导出将原始数据、元数据与分析打包，并附带文件与归档的 SHA-256 校验和，用于离线复现与文件完整性验证；这些校验和本身并不验证测量精度。CAN 记录保留原始格式与 ASC 格式。ASC 工具按通道与消息 ID 汇总周期、抖动与间隔；兼容 DBC 的工具解码信号，将时序与指令和错误关联。

3.3.2 现有检查与测试范围

robopi-config 提供通信压力测试与硬件检查，覆盖总线流量、电机指令、USB 重新枚举与外设。目标与判据见下表。

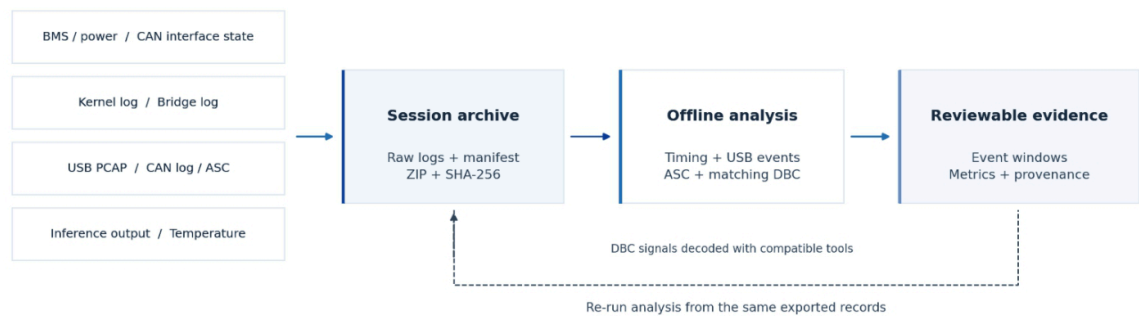
表 3.2. 测试与检查。

测试	方法	记录与检查项
CAN 通信压力	成对台架上持续 CAN/CAN-FD 传输；默认 4 h	发送成功/失败、接收计数、接口错误、bus-off 与恢复；负载上升时的反馈间隙与积压
电机通信压力	重复批量 MIT 指令；默认 4 h	提交、反馈、错误与接口状态；持续通信，而非机械耐久性
电机链与带载运行	固定台架上按规定负载顺序或连续批量指令	实际帧率、通信与带载行为；分别记录负载、姿态与持续时间
USB 恢复	重复集线器复位；默认 100 次循环；观察重新枚举	设备计数、枚举与内核错误；通过设备通信验证服务恢复
BMS 通信	服务重启后检查软件包、设置、端口与状态	启动、成功读取与超时；不包含电池控制或参数写入指令

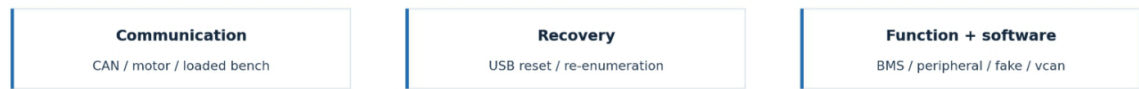
外设	头部查询、扩展指示灯、GPIO/SIG 检查	响应、输出与接线；功能检查不能替代压力测试
驱动与虚拟总线	模拟传输与 vcan，测试过滤、回调、关闭与错误	接收所有权、资源释放、错误处理与并发；非物理带宽

默认时长与循环次数是脚本设置，不是已完成的测试结果。当前 CAN 接收计数不证明消息完整性。电机脚本包含零点校准；错误聚合与关闭清理需要改进；它们尚不是常规验收程序。统一测试需要顺序/内容检查、分离的校准步骤以及定义明确的最终设备状态。

(a) Capture and reproducible analysis



(b) Test coverage and evaluation



Evaluation: period / feedback gap / errors / recovery / record completeness

Test and evidence workflow | Coverage does not imply tests have passed

RP1 / EMBEDDED SYSTEMS

图 3.4. 会话归档、校验和与离线分析；通信、恢复与功能检查。虚线路径表示重新分析。覆盖不等于验收。来源：RoboParty [21]。

3.3.3 并发负载与指标

系统压力测试组合推理、相机、日志与存储，比较空闲与并发负载下的控制周期、反馈时延、CPU 占用与温度。调度测试测量线程唤醒延迟；端到端测试跟踪指令提交、总线传输与反馈。这些是相互独立的评估。故障场景包括反馈缺失、USB 断开与重新枚举、总线错误以及服务重启。检测、停止与通信恢复时间分别记录，连同设备映射与重新使能条件。仅恢复通信并不能证明可以恢复运动。记录设备、接线、负载、频率、软件版本、实际周期数、99 分位延迟、最长停滞、超时错过次数以及错误/丢帧计数。记录不完整不予通过。仅有日志工具不能确立并发负载或故障验收。

3.4 交互与远程控制

遥控器、机器人服务与配置工具提交指令、查询状态并执行维护。接收与执行结果分别报告，并附带设备状态与错误。

4 算法

第 4.1 节介绍 human-humanoid-tools 工作流 [9]；第 4.2–4.4 节讨论训练、部署与全身集成。默认设置为实现相关；RP1 调参示例来自以该实现记录的开发实验。

4.1 hhtools 运动重定向

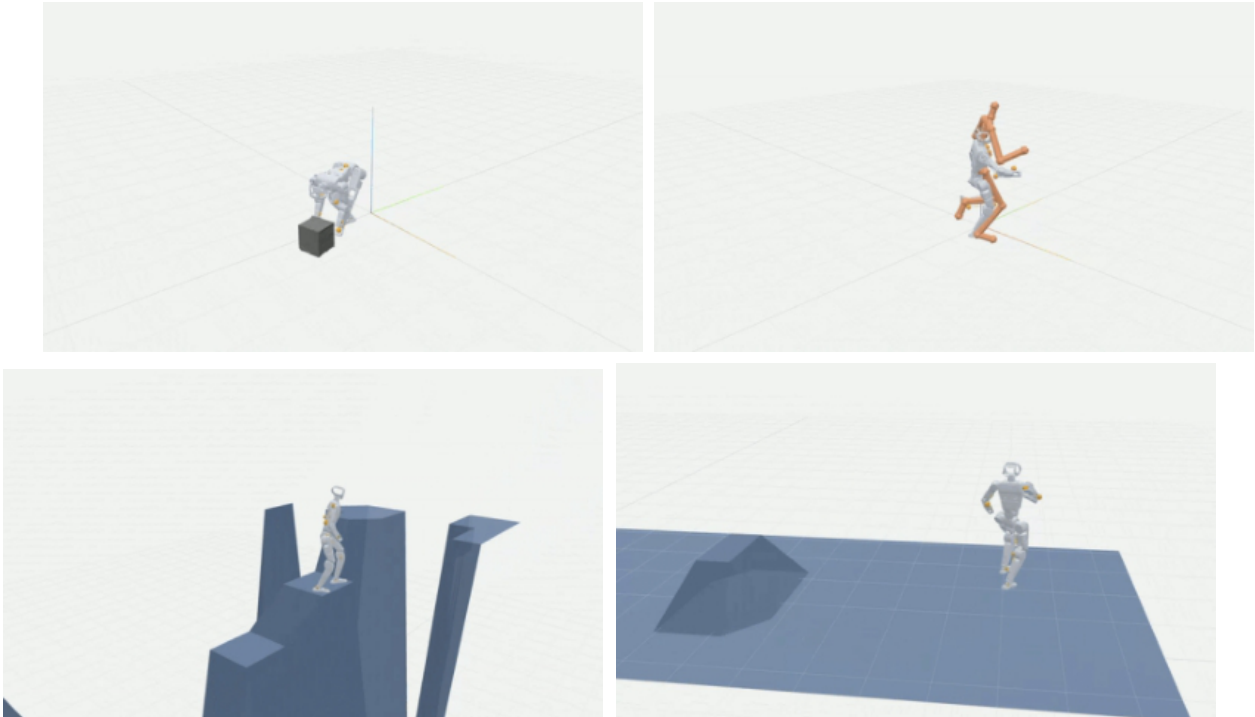


图 4.1. hhtools 重定向：搬运、舞蹈、台阶与障碍。来源：hhtools [9, 38]。

重定向将人体运动适配到 RP1 的比例、腰部横滚/偏航、分离腕轴与并联踝上。基础 24 轴配置不含灵巧手。这些差异决定了可用于学习的参考。新机器人需要映射与权重；新数据集需要帧与零位姿态转换。交互任务通常需要单独的工具，质量由人工评估。hhtools [9] 将机器人准备、源姿态校准、重定向与审查集成在一个工作流中。设置与求解时间取决于机器人、片段、后端与硬件。

4.1.1 范围

hhtools 集成了基于 NVIDIA SOMA-Retargeter 与 Amazon holosoma 的求解器 [22, 23]。与 GMR [2] 一样，它们使用约束逆运动学与轨迹优化。其贡献在于跨机器人、跨数据集的通用数据生产工作流。该工作流导入运动与目标机器人，对齐参考姿态，选择求解器，预览结果并导出轨迹。物体与地形几何随交互序列保留。本节描述 commit 6e6588c 处的实现；项目页面与安装指南提供相应入口 [9]。

表 4.1. 重定向工作流对比。

能力	常见重定向工作流	hhtools
新机器人	手动编写映射与权重	由 URDF 与网格生成初始配置
零位对齐	硬编码源姿态假设	每个机器人/源组合一次交互式校准
场景	平地 IK 或交互网格	按运动类型选择两个集成求解器
输入	一两种格式或数据集	十余种来源、视频到运动以及机器人迁移
质量	用户自行编写检查	合理性评分、行为标签与子集推荐
接口	以脚本为主	CLI、WebUI、桌面端与 Agent 接口

4.1.2 机器人 URDF 集成

用户通过 WebUI 导入机器人 URDF 与网格。导入工作流生成预设；生成的映射与关节限位仍需对照实际 RP1 配置审查。**URDF 修复**。检查并修正网格路径、不必要的世界或 base_footprint 根节点以及无效的惯性属性。

关节映射。先以关键词与编辑距离将 17 个标准人体关节与机器人连杆关联：骨盆、脊柱、胸、颈、头以及双侧肩、肘、腕、髌、膝、踝；再以父子拓扑修正命名不一致导致的错配。**验证。**检查骨盆、髌、膝、踝与腕的必需映射、左右指派以及驱动关节顺序。处理数据集前使用预设校验器并做短时预览；仅名称匹配并不能保证解剖学正确性。**几何估计。**由网格计算机器人身高与关节尺度基线。导入与确认生成可编辑的 robot.yaml，包含关节顺序、连杆映射、跟踪权重与足部。修改在下次运行时生效。RP1 使用 RP1_description [7]；其 24 轴与 28 轴变体需要各自的预设。见 URDF 导入演示与预设生成实现 [9, 38]。

4.1.3 交互式校准与自动对齐

SMPL 使用 T 姿态；RP1 零位角对应双臂下垂站立。用户在 WebUI 中将机器人与参考骨架匹配并保存校准，以消除这些偏移。**一次性校准。**八种参考约定覆盖 SMPL、SMPL-X、GVHMR、SOMA BVH、LAFAN BVH、动捕 BVH、Xsens 与 GLB。保存的校准绑定机器人标识、参考名称与校准关节角。GLB 使用所加载片段的参考骨架；机器人或参考变化时必须重新评估校准。**自动对齐。**在校准姿态下的正运动学提供闭式的逐连杆缩放、旋转与平移偏移。这些在运行时由保存的姿态推导；实现中"亚毫秒级计算"的说明指此推导，而非完整的导入、校准或重定向工作流。**归一化。**人体身高归一化到 1.65 m，同时保留个体肢体比例。参考相关文件使用 retarget_calibration_<reference>.yaml，需要时叠加用户配置。复用校准前预览肢体方向、对称性、躯干姿态与足部。见首次校准演示与校准实现 [9, 38]。

4.1.4 运动与交互求解器

不同求解器分别处理平地运动与物体/地形交互。**模仿运动。**Newton 与 NVIDIA Warp [24, 25] 为仅骨骼片段提供逆运动学。在支持的 NVIDIA GPU 上，CUDA Graph 回放减少迭代开销；无法 GPU 执行时使用 CPU 路径。位置与姿态目标跟踪已映射的身体连杆；关节限位与软关节滤波为正则项，约束条件不足的肩、髌轴。必须针对运动类型配置地面接触稳定，尤其是对翻滚与空翻。**交互运动。**Interaction-Mesh 后端使用身体目标、场景锚点与可选的拉普拉斯形状正则化处理物体与地形。MuJoCo 提供正运动学、雅可比与碰撞距离；序列二次规划（SQP）求解局部 QP 子问题，OSQP 执行线性化的碰撞与接触约束。所检查的配置使用 2 mm 穿透容差与一帧的 MPC horizon；两者均可调。该修订版中拉普拉斯权重默认为零。这些数值设置不是硬件间隙的保证。后端选择取决于输入仅含运动、物体交互还是地形交互。快速重定向演示展示了该工作流；方法概述与交互配置说明了实现及其可选稳定设置 [9, 38]。

4.1.5 运动数据与输入来源

适配器将输入转换为米制单位、Z 轴向上与 +X 向前，四元数顺序在交换时显式声明。用户在上游许可下获取数据与所需的人体模型权重。表 4.2 中的条目链接到源页面；所引论文列于附录 D。

表 4.2. 运动数据与输入来源。

类别	数据集 / 来源	workflow 角色
光学运动捕捉	AMASS [26]、LAFAN1 [27]、100STYLE [28]、SOMA/SEED [29]	全身、步态与风格化运动
精选运动	Motion-X [30]、PHUMA [31]	动态、武术与物理滤波运动
单目视频	GVHMR [32]	视频派生参考
人—物交互	OMOMO [33]、OmniContact [34]	搬运、推挤与接触任务
人—地形交互	holosoma [23, 35]、PARC MS [36]	跑酷、攀爬与障碍
机器人轨迹	MotionDecode [37]	G1 到 RP1 迁移

BVH、GLB 与统一 NPZ 支持文件输入。GVHMR [32] 通过单独安装的 CUDA 环境与模型权重从视频推导运动。机器人到机器人迁移先通过正运动学重建源连杆运动，再拟合目标机器人，使用源一目标校准。对于无时间元数据的 MotionDecode G1 文件，文档记录的源速率为 120 Hz，必须显式提供。见运动输入预览与机器人到机

机器人迁移 [9, 38]。分析面板按满分 100 评分物理合理性，惩罚项包括腾空、穿透、滑移、抖动与自碰撞。复杂度标签与聚类建议多样化的训练子集。序列被标记而非删除，因为腾空阶段可能代表有效的动态运动。接受训练子集前检查接触一致性与关节连续性。质量评分支持筛选，但不证明动态可行性。见数据集分析演示 [38]。

4.1.6 人机与 Agent 接口

一个求解器核心服务 WebUI、桌面包、CLI 与 JSON CLI/MCP 适配器。WebUI 提供单片段与排队导出；CLI 脚本支持可续跑、隔离的批量运行。当前 Agent 契约覆盖人到机器人重定向、无场景机器人到机器人迁移、成对校准与有序批量。视频到运动、数据集分析、带场景的机器人到机器人迁移与部署不在 Agent 接口范围内。见 Agent 接口文档与批量重定向演示 [9, 38]。

导出契约。 机器人 CSV 输出包含时间；root_x、root_y、root_z；root_qx、root_qy、root_qz、root_qw；以及命名的 dof_* 列。头部元数据标明机器人、采样率与自由度数量。场景包还保留物体轨迹与地形资产。CSV 使用 xyzw 四元数，而 PKL 包声明 wxyz：使用方必须遵守各格式的模式。CSV 规范与包导出器定义了这些契约 [9]。

RP1 集成。 将导出的关节名称、顺序、单位、采样率与根坐标系约定与 BeyondMimic、MimicLite 或 UFO 的训练加载器匹配 [11, 12, 13]。表 4.2 描述支持的输入与项目来源；它并不断言每个列出的数据集都用于训练了策略。24 轴与 28 轴版本需要以各自的 URDF 分别校准与导出。为每个接受的序列保留源片段标识、机器人资产、校准、求解器设置、软件 commit 与审查结论，以便复现。数据集发布前针对同一机器人模型重放导出。几何参考在第 4.2 节与第 4.3 节的训练与部署中仍需要滑移、接触力、执行器限位与跟踪稳定性评估。

4.2 训练框架

Isaac Lab 3.0 [10] 提供任务配置、并行训练、回放与导出。任务目标、机器人资产与物理后端分开配置。**注册任务**连接环境与算法设置。基于管理器的环境组合观测、动作、奖励、事件与课程；Direct 环境在一个类中实现状态更新与批量计算。两者使用相同的训练接口。PhysX 与 Newton/MJWarp 预设与环境类型无关。适配的资产可通过配置切换后端，而不改变任务目标或算法设置。训练可无头运行；检查与回放使用可视化。无 Kit 依赖的 Newton 任务支持免 Kit 执行。**实验与并行执行。** 注册设置服务训练、回放与导出。环境数量与设备设置将任务从小规模检查扩展到 GPU 训练，而无需重写其逻辑。每次运行保存解析后的环境/算法设置与检查点，供恢复与审查。

在 RP1 速度跟踪中，策略网络与价值网络使用不同的观测。策略接收三帧本体感知状态、速度指令与先前动作，训练时对所选本体感知输入加噪声。价值网络额外接收接触与动力学信息，在复杂地形上还包括地形扫描。历史描述近期状态，而特权仿真信息仅限训练时的价值估计。将两个输入记为 H_t^π 与 H_t^V ，确定性策略与价值估计为

$$a_t = f_\theta(N_\pi(H_t^\pi)), \quad V_t = V_\phi(N_V(H_t^V)), \quad N(x) = \frac{x - \mu}{\sigma + \epsilon}. \quad (1)$$

ONNX 导出包含策略与观测归一化，不含价值网络与特权输入。部署必须复现训练的观测定义。

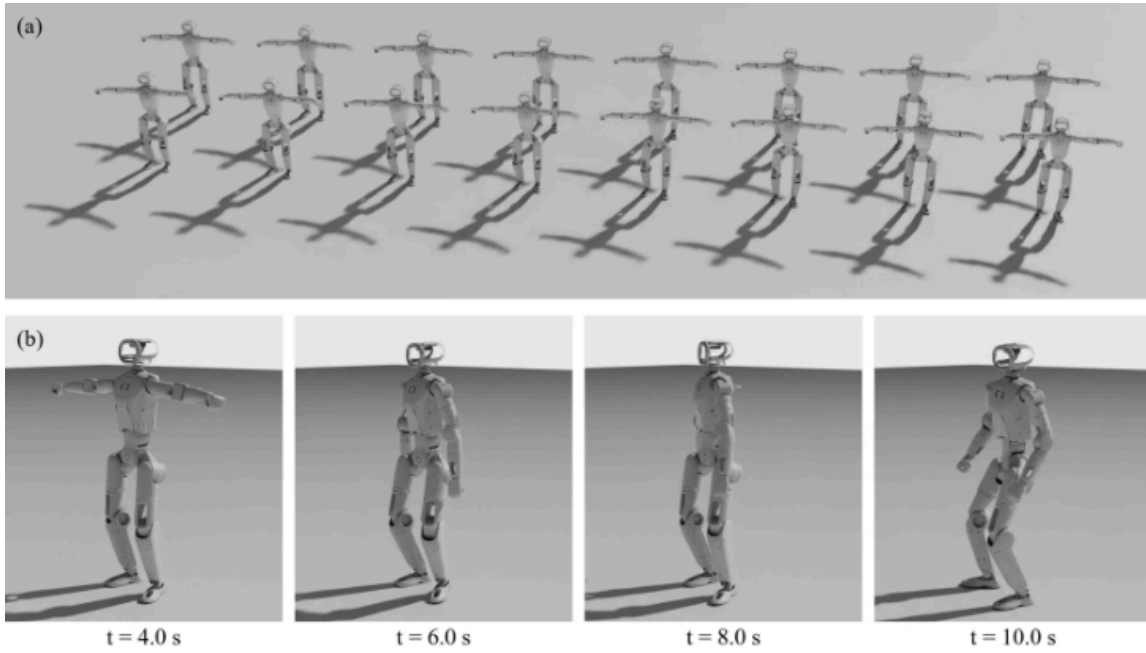


图 4.2. RP1 参考运动跟踪。(a) 十六个并行环境。(b) 单环境策略回放。来源：RoboParty [21]。

GPU 仿真采样数千个环境。多 GPU 训练同步优势统计量、平均 KL 散度与梯度，用于归一化、学习率调整与更新。并行训练与单环境回放共享观测、动作与机器人定义（图 4.2）。已发布的 Isaac Lab 3.0-EA 人形基准在 8,192 个环境下报告，Newton/MJWarp 的平均训练吞吐量为 Direct 任务的约 2.24 倍、Manager 任务的约 2.08 倍（图 4.3a）[10]。这些是上游结果，不是 RP1 的实测数据。在 4,096 个 Newton 环境下，Warp 相对 Torch 将 Direct 任务的步进时间减少 22.63%，Manager 任务减少 29.16%（图 4.3b）[10]。与吞吐量基准不同，该测试测量不含策略更新的环境步进。

Humanoid locomotion benchmarks

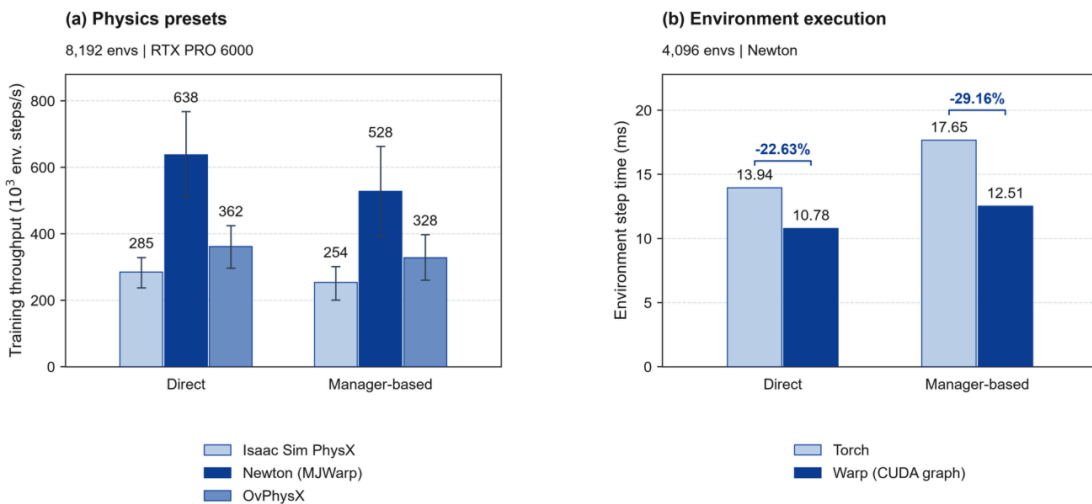


图 4.3. 已发布的上游人形基准，非 RP1 硬件实测 [10]。(a) 按物理预设划分的训练吞吐量。(b) Torch 与 Warp 的环境步进时间。

4.2.3 动力学与参数辨识

训练除刚体与接触动力学外，还需要执行器输出限值。RP1 用随速度变化的四象限力矩包络约束 PD 输出，表示峰值力矩、高速降额与制动限值（图 4.4）。设峰值力矩为 τ_p 、空载转速为 ω_0 、峰值力矩对应的最大速度为

ω_k 。定义 $\tau_s = \tau_p / (1 - \omega_k / \omega_0)$ 与 $\omega_c = \omega_0 (1 + \tau_p / \tau_s)$ ，并将当前速度裁剪到 $\tilde{\omega} = \text{clip}(\omega, -\omega_c, \omega_c)$ 。上、下力矩限值为

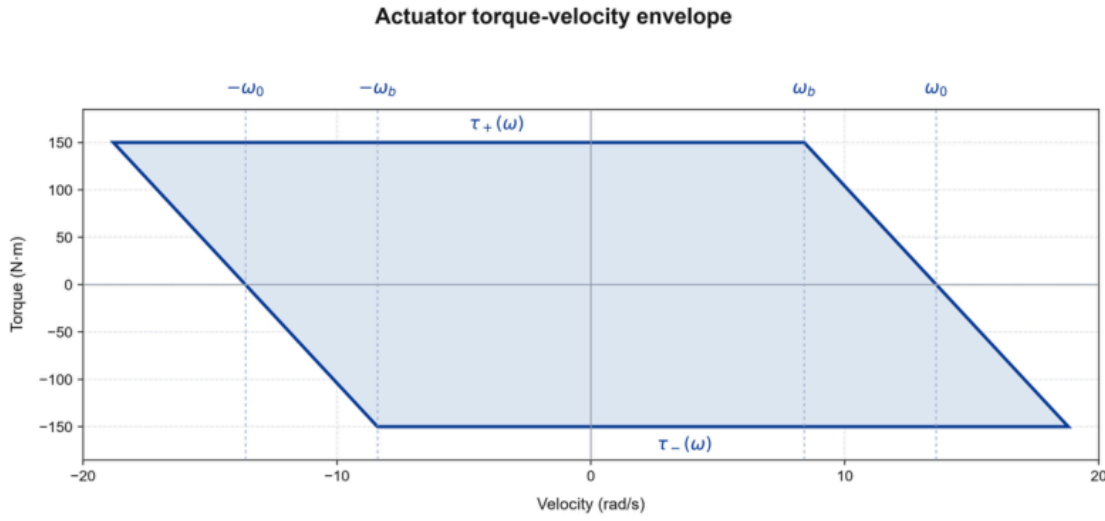
$$\tau_+(\omega) = \min\{\tau_s(1 - \tilde{\omega}/\omega_0), \tau_p\}, \quad \tau_-(\omega) = \max\{\tau_s(-1 - \tilde{\omega}/\omega_0), -\tau_p\}. \quad (2)$$


图 4.4. RP1 腰、髋、膝执行器的力矩—转速包络。来源：RoboParty [21]。

动力学模型还包括指令延迟。任务共享执行器参数；复杂地形任务随机化接触与机器人动力学，并用行进距离与速度指令调整地形难度。PACE 通过并行仿真辨识执行器参数。它在固定基座、禁用接触的条件下重放指令，每个环境评估一个参数候选。CMA-ES 根据整条轨迹上的关节位置误差更新分布。对于 n 个关节， ζ 包含逐关节的附加惯量、黏性摩擦、摩擦系数与编码器偏移，外加共享的离散延迟，共 $4n + 1$ 个参数。目标为

$$\zeta^* = \arg \min_{\zeta \in \mathcal{B}} \frac{1}{T} \sum_{t=0}^{T-1} \sum_{j=1}^n (q_{t,j}^{\text{sim}}(\zeta) - b_j - q_{t,j}^{\text{enc}})^2. \quad (3)$$

其中 b_j 是相对编码器读数的真实角度偏移， $\mathcal{B}$ 是搜索域。辨识模型在 PD 计算与力矩裁剪之后施加延迟，以拟合响应时序。部署期间记录的指令与反馈可直接作为 PACE 拟合数据。

4.3 部署框架

配置将策略与 Python SDK 连接到统一的关节状态与指令接口。机器人接口处理通信与坐标变换。

4.3.1 配置驱动的策略适配

本体设置定义设备、映射、机构与闭链索引。控制设置定义增益、标称姿态与周期。策略设置定义模型、观测与动作转换。这些设置可分别编辑，但必须与所选机器人模型和策略相互兼容。对于 24 自由度的 RP1，速度跟踪使用速度指令与观测历史；参考跟踪额外加入参考关节位置与速度（表 4.3）。尽管输入与历史不同，两者都输出 24 维动作，由同一推理程序转换为关目标。

表 4.3. 两个 RP1 策略的示例配置。

策略任务	观测	模型接口
速度跟踪	每帧 81 个值；3 帧 obs-major 历史	243 输入；24 输出
参考跟踪	单帧，含 48 个参考关节值	126 输入；24 输出

观测设置指定字段顺序、缩放、裁剪、历史长度与帧偏移。新观测类型需要模块实现。动作设置定义关节顺序、缩放与标称姿态。每个输入分量都需要明确的物理含义、顺序与采样时间。设 $x_t^{(j)}$ 表示观测向量 j ， $h_0 > \dots > h_{K-1} = 0$ 为从旧到新排序的偏移。当字段共享偏移时，两种常见布局为

$$o_t^{\text{obs}} = \text{concat}_{j=1}^M \text{concat}_{k=0}^{K-1} x_{t-h_k}^{(j)}, \quad o_t^{\text{frame}} = \text{concat}_{k=0}^{K-1} \text{concat}_{j=1}^M x_{t-h_k}^{(j)}. \quad (4)$$

obs-major 将每个字段的历史分组；frame-major 按时间组成完整观测（图 4.5）。部署顺序必须与训练一致。

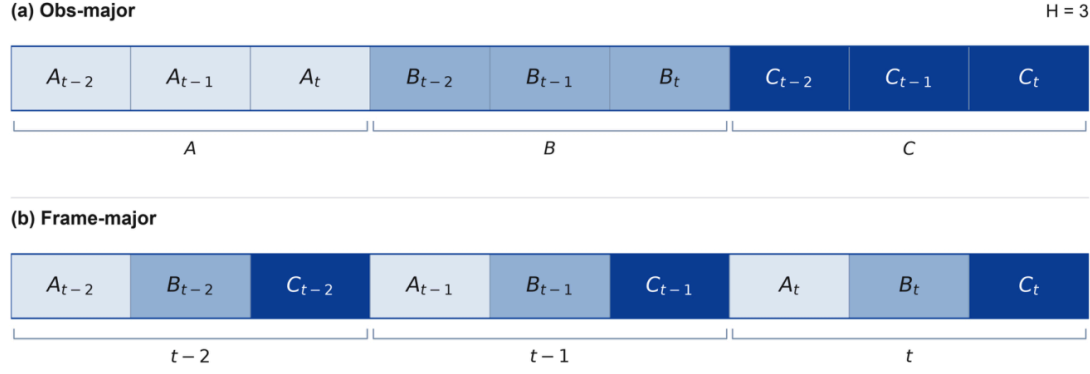


图 4.5. 三帧观测历史：(a) obs-major 顺序；(b) frame-major 顺序。来源：RoboParty [21]。

4.3.2 Python SDK 与机器人集成

Python 绑定暴露 C++ 状态与指令接口。SDK 设置参考值、增益与实验参数；机器人接口处理电机映射、传感器与踝变换。位置、速度、增益与前馈力矩共享同一关节顺序。现有设备使用参数与映射配置；新类型需要模块扩展。关节接口支持控制；电机与 IMU 接口支持设备测试。响应记录器记录目标、反馈、时间戳、采样率、扫描范围与幅值，用于 PACE 辨识。测试与部署共享关节定义与变换。

$$\tau_m = J_{m \rightarrow q}^T \tau_q, \quad \tau_q = J_{q \rightarrow m}^T \tau_m. \quad (9)$$

状态读取使用数值正运动学恢复等效关节角，并用解析雅可比变换速度。从上次成功解出发，正运动学校正电机角残差：

$$q^{(n+1)} = q^{(n)} + \eta J_{m \rightarrow q}(\vartheta^{(n)}) \left[\vartheta_{\text{meas}} - \vartheta(q^{(n)}) \right], \quad \eta = 0.5. \quad (10)$$

每次迭代评估解析逆解，构成电机角残差，并用雅可比进行关节角修正。双踝共享求解形式，但连接几何与电机零偏各自独立。控制器先在关节空间计算 PD 力矩，再用实测构型处的雅可比映射到电机空间：

$$\tau_q^* = K_p(q_d - q) + K_d(\dot{q}_d - \dot{q}) + \tau_{\text{ff}}, \quad \tau_m^* = J_{m \rightarrow q}^T \tau_q^*. \quad (11)$$

所得 τ_m^* 包含两个电机力矩目标。高层策略定义关节空间目标；机器人接口执行电机变换。反馈与指令使用相同的机构模型与坐标。

4.4 全身智能

RP1 结合 VR 或惯性遥操作、全身控制（WBC）、RP 灵巧手映射与同步记录，用于 WBI 演示。

4.4.1 全身控制与操作

WBC 跟随人体参考，使用 VR 或 Noitom Pnlink-FB-G 惯性捕捉。惯性捕捉比五点式 VR 跟踪提供更完整的身体参考。

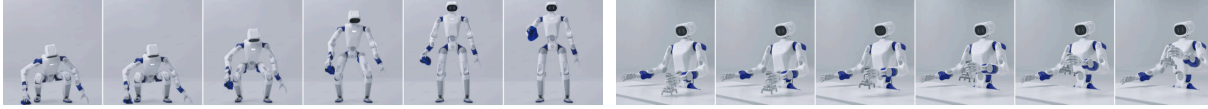


图 4.7. 全身姿态跟踪与操作演示。来源：RoboParty [21]。

视觉识别将 VR 手部姿态映射为 RP 灵巧手目标。手部指令与身体状态共享记录与回放。图 4.8 显示带抓握的 5 kg 水桶弯举；负载不含工装。运动由 VR 或惯性遥操作产生，延迟取决于用户网络条件，而不是单一固定值。手部接口与工具见附录 C。

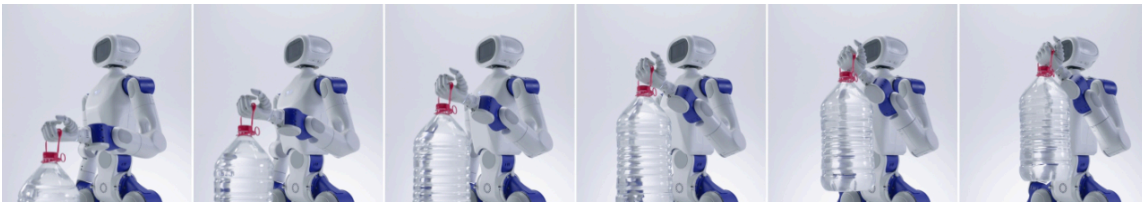


图 4.8. 带载上肢操作。来源：RoboParty [21]。

4.4.2 数据采集与转换

遥操作记录立体第一视角视频、关节状态、IMU 数据、全身参考与手部指令，用于转换与 WBI 开发（表 4.4）。

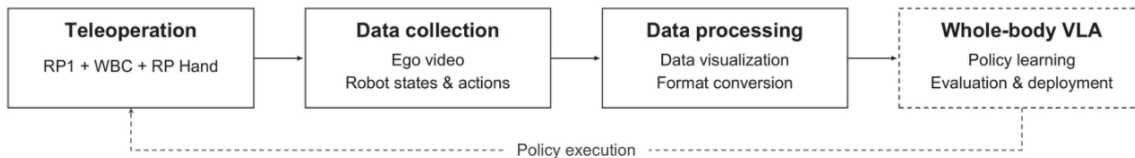


图 4.9. WBI 开发工作流。来源：RoboParty [21]。

独立的 HTML 查看器同步立体视频、信号曲线与数值。支持时间线导航、逐帧步进、播放速度、信号选择与缩放（图 4.10）。

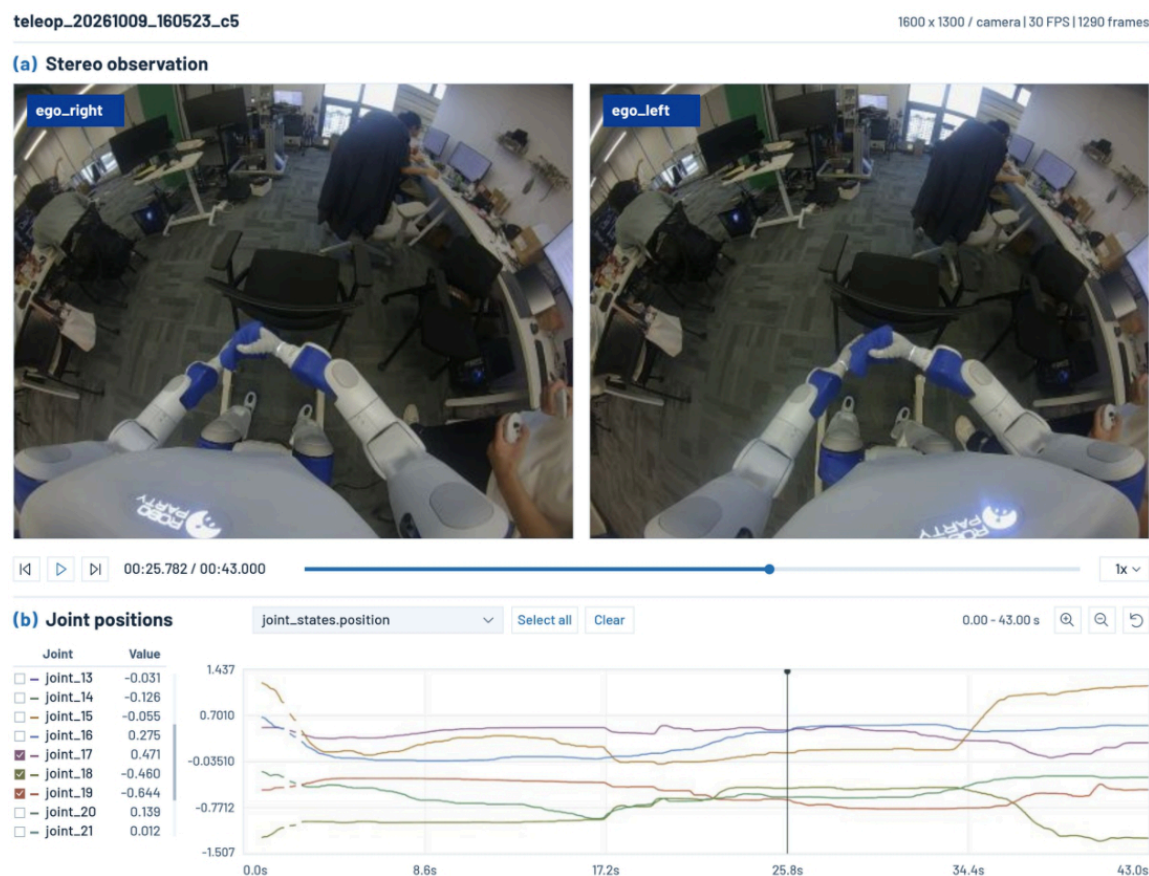


图 4.10. 同步视频与关节状态回放。来源：RoboParty [21]。

表 4.4. 示例记录中的数据。

数据	记录内容	维度
第一视角视频	任务场景与手部操作	左右各 1600 × 1300 像素
关节状态	位置、速度、力矩	每个量 28 个值
运动参考	关节目标与全身跟踪	28 个关节目标；35 个全身数值
惯性数据	机身姿态角/角速度/线加速度；第一视角角速度/线加速度	机身姿态：4；每个角速度与加速度流：3
手部数据	左右手状态与动作	每只手 6 个值

转换使坐标、时间与关节语义同下游数据格式与策略接口对齐。

5 PartyOS

PartyOS 仍在开发中；完整的方法与评估计划在单独的报告中给出。PartyOS 结合重定向、BFM 运动控制、部署与自动化评估。计划的扩展覆盖场景/物体交互、基于 VLA 的操作与智能体人形机器人。三个算法层共享以下基础设施。**System0**：从参考运动、目标位姿、奖励或遥操作出发的通用全身控制。**System1**：一种规划中的、非坍塌的意图表示，与动作语义对齐，并组合可复用的运动基元。**System2**：大模型对运动控制与 VLA 的编排，形成可复用技能。**基础设施**：重定向、场景生成、自动化数据采集、评估与研究工作台。System0 与基础设施已部分开源。System1 与 System2 仍是研究课题。

已发布组件。hhtools [9] 将人体运动重定向到支持的人形机器人，所引 workflow 报告约 30 s。它包含 RP1 并支持 G1 运动数据的迁移。MimicLite [12] 提供高效的通用运动跟踪，报告的训练配置为 8 张 RTX 4090 GPU、约 3 h。UFO [13] 是用于扰动恢复与跌倒后站起的无监督 BFM 框架，共享代码支持六款人形机器人，包括 RP1。gpt-6-astra-real2sim-workflow [39] 从单张照片生成可编辑、可交互的仿真场景。LabWeft [40] 记录实验谱系与证据，并支持智能体辅助的算法迭代。

阶段性结果。运动控制。源稿报告称 MimicLite v1.1 在第三方 G1 跟踪排行榜的 15 个策略中排名第一 [41]，训练成本约为 SONIC 的 1/420。具体时间与对比条件记录于公开的 MimicLite 技术报告。该报告还指出 UFO 将无监督 BFM 的训练从 45 h 降至 6 h，并支持强扰动下的遥操作或自主恢复。这些特定于时间与基准的声明需要相应的评估快照与配置才能复现 [12, 13, 21]。**交互。**源稿报告了一种基于 UFO 的交互 BFM，用一个策略完成搬运、推挤与踢箱子，跌倒后搬箱成功率为 89.3%，而所引规划方法为 1.3%。其底层评估记录为内部资料，未作为公开论文提供 [14, 21]。**真一仿一真。**所报告的工作流约 2 min 生成高保真多房间场景，而所引开放替代方案约需 3 h。自动化专家数据采集已在 RPW 与 G1 上演示；评估平台支持 RP1 与 RP1-WBC。这些数字描述源项目所报告的配置 [21, 39-41]。

计划中的工作将在 RP1 上复现感知与交互 BFM，并连通场景/任务生成、采集、微调与评估。

6 系统测试

RP1 的持续运行验证针对执行器、结构连接与线缆线束。因此测试设计将运动特性、加载方式与故障检查统一考虑。模块化台架与分层的测试软件为评估循环运动、持续加载以及振动下的连接完整性提供了互补条件，同时将物理记录与其执行配置关联。本节介绍测试系统与代表性验证结果 [21]。

6.1 系统配置与验证范围

表 6.1. 测试条件与代表性物理记录。来源：RoboParty [21]。

验证项	测试条件	记录的测试结果
周期性上肢摆动	无负载；姿态取自 3 m/s 仿真跑步；每次 8 h	累计运行 120 h 无记录故障
重复腿部深蹲	60 kg 负载；约为上身质量的三倍	连续稳定运行 8 h；累计测试超过 100 h
单臂持续加载	2.5、3.5 与 5.5 kg；按各负载执行 1.5 倍参考速度的任务轨迹	2.5 kg: 125.7 min; 3.5 kg: 120.0 min; 5.5 kg: 10 min 短时动态加载

验证覆盖单臂、上身、单腿与下身四类模块。这四类模块的记录运行时间合计约 900 h：分别约为 205、251、230 与 217 h。该合计数不是整机连续运行记录，也不包含并行运行、暂停、冷却、维护与样机更换。记录包括无负载循环、带载运动与冲击测试。本报告展示的是代表性工程验证，而非跨样机或跨版本的统计对比；试验标识、版本清单与完整原始记录属于可追溯性材料。表 6.1 列出条件明确定义的代表性物理记录。重复的更换与检查要求台架将通用承载结构与产品专用工装分离。快拆与定位接口适配不同部件（图 6.1）。下肢导向架与防跌倒结构约束带载运动，拖链整理线缆布线。电源架构将执行器电源与控制电源分离：四个支路独立开关、保护与计量，共享电压设定与总电流限制。24 V 控制电源接在主接触器 KM0 上游，在执行器电源断开后仍保留 PLC 供电与状态采集。

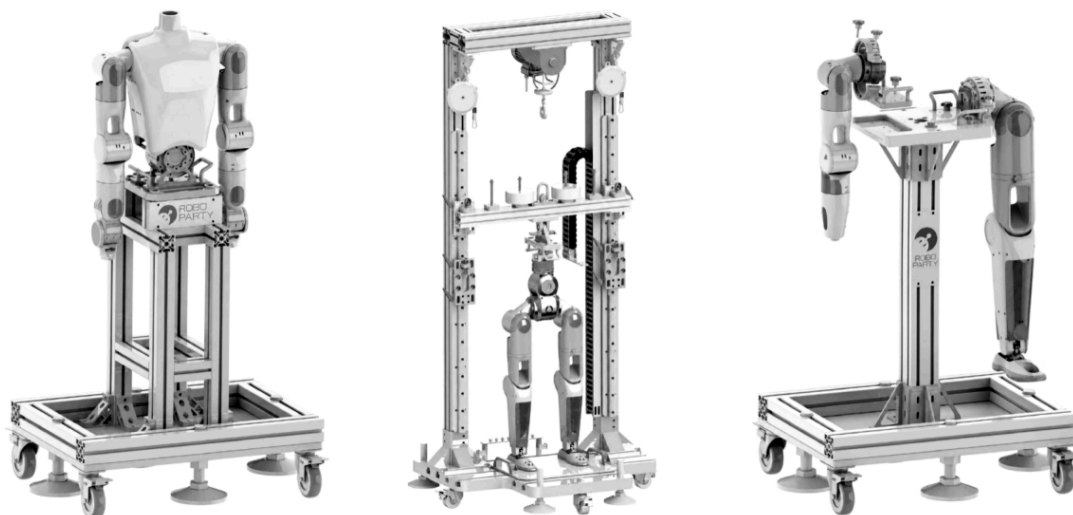


图 6.1. 模块化测试台架与快拆工装。从左至右：上身台架、带载下肢台架与带夹具的单臂台架。设计渲染图。来源：RoboParty [21]。

每次试验将样机配置、负载、轨迹与软件版本同其执行记录和计划内检查关联。电池更换、冷却与检查周期单独记录；累计时长只计有效执行时间。

6.2 上下肢互补耐久试验

上肢耐久试验在重复运动下考察机构与线缆线束。周期性摆臂轨迹取自 3 m/s 仿真跑步姿态；协调的关节运动与反复换向构成连续循环。无负载运行保持运动范围与线缆弯曲特性，用于检查结构干涉、布线间隙与循环磨损。带载运行额外评估执行器负载能力与温升。下肢加载与机械连接经历不同的应力条件，分别通过深蹲与踏步评估（图 6.2）。负载下的重复屈伸评估关节支撑、执行器温升与持续运行能力。交替踏步产生重复振动，扰动结构连接与紧固件；随后检查松动、紧固失效与局部损伤。这些互补条件为执行器性能与连接完整性分别提供证据。

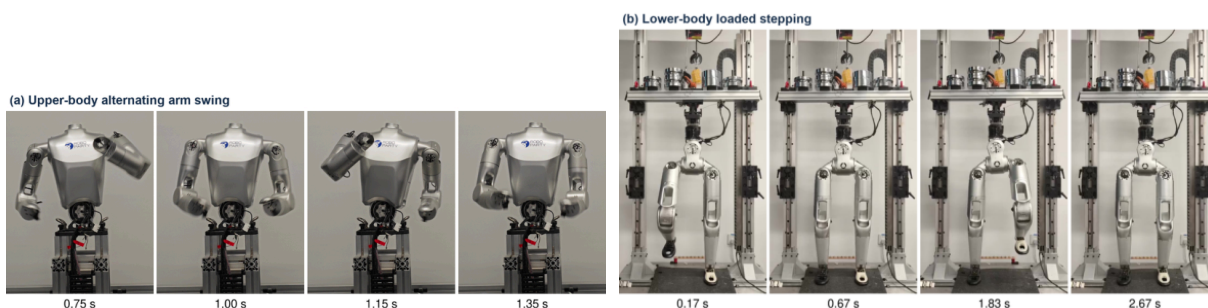


图 6.2. 实物耐久运动。(a) 上身交替摆臂。(b) 带载下肢踏步。每个面板包含四个带时间戳的帧，时间戳相对于各自源视频；两个面板不共享同一时间基准。来源：RoboParty [21]。

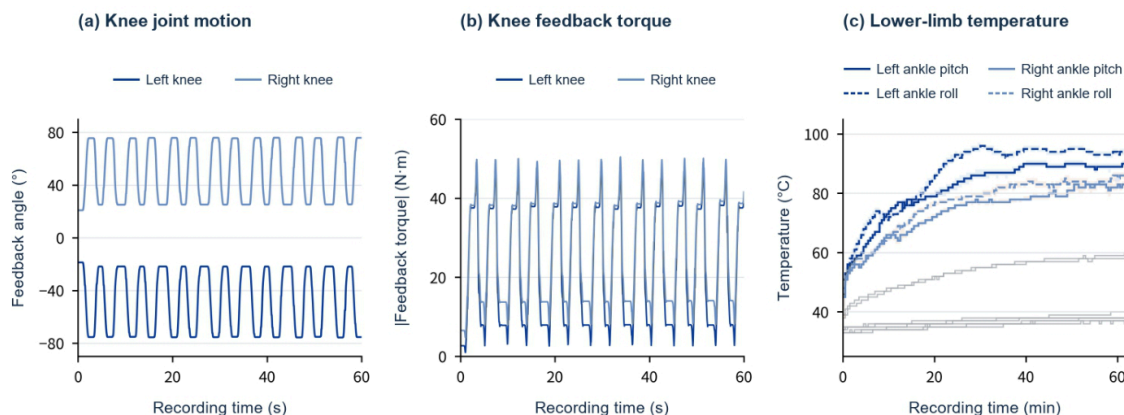


图 6.3. 双腿共担 50 kg 外载深蹲期间的关节运动、力矩与温度。(a,b) 前 60 s 的双膝反馈角度与反馈力矩绝对值；角度遵循各关节坐标约定。(c) 完整 61.94 min 记录中全部 12 个下肢轴的温度，按 30 s 窗口中位数汇总并保留最后一个窗口。四个踝关节以彩色显示；浅色带表示其窗口内范围，灰色曲线为其余八个轴。记录包含运动与保持阶段。这条 50 kg、61.94 min 的记录与表 6.1 中的 60 kg 耐久摘要要是分开的，后者报告连续 8 h、累计超过 100 h 的测试。来源：RoboParty [21]。

6.3 单臂动态负载验证

单臂带载轨迹围绕代表性任务动作设计，每个负载选择相应的任务覆盖。2.5 kg 条件覆盖八类任务：工位间转运、阵列取放、高/中/低货架操作、机床上下料、约 90 度翻转、多面检查、水平转运以及仪器插拔。3.5 kg 与 5.5 kg 条件各覆盖四类：工位间转运、阵列取放、低/中货架操作与机床上下料（图 6.4）。轨迹融合不同高度与方向的转运、姿态变化与插拔动作。肩、肘、腕连续协调并反复换向，构成动态加载。仿真检查关节范围、速度、加速度与运动过渡；台架测量记录温度、反馈力矩与关节运动。将任务类别、负载与运行响应关联，即可评估所覆盖任务运动下的持续负载性能。

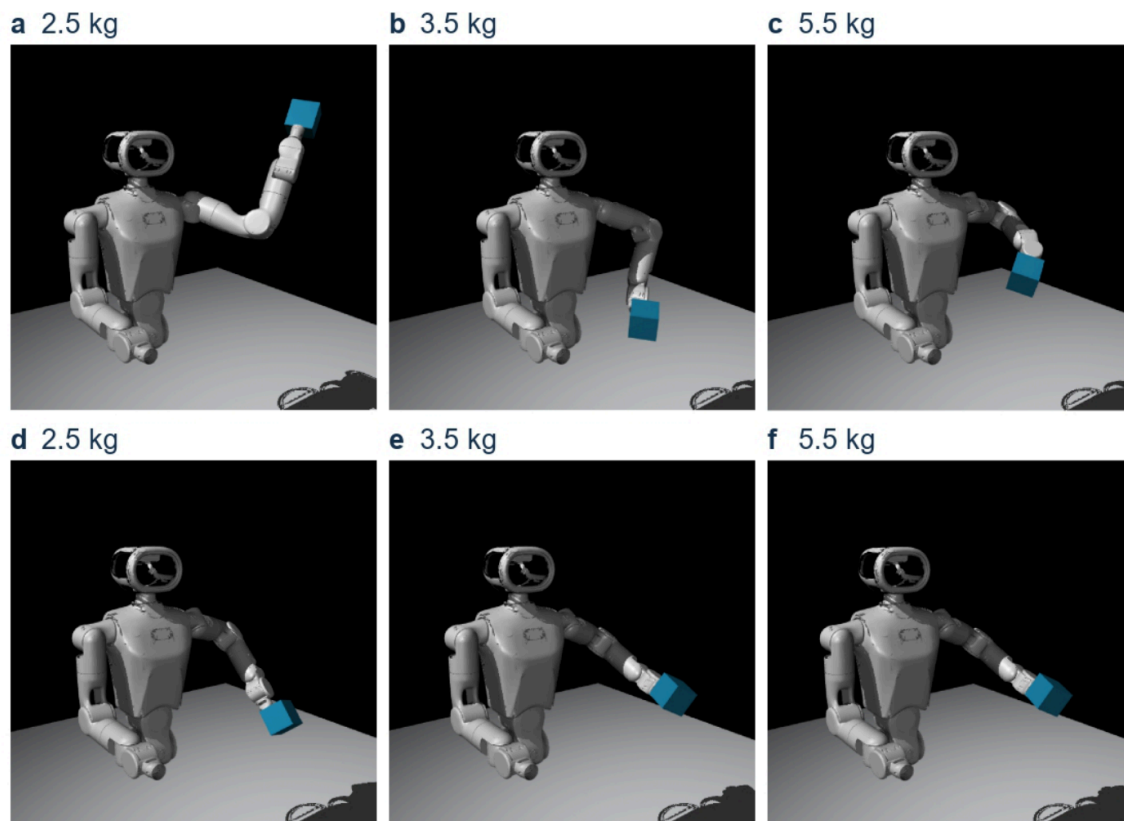


图 6.4. 连续单臂带载运动的仿真设计。每列显示一个负载下的两个姿态：(a,d) 2.5 kg；(b,e) 3.5 kg；(c,f) 5.5 kg。左臂有七个自由度；上身与右臂固定。负载质心距关节 7 输出轴 11 cm。来源：RoboParty [21]。

6.3.1 实物带载运动

台架将负载固定在臂端，并执行对应该负载的任务轨迹。图 6.5 显示三种负载下的代表性实物姿态，展示肩、肘、腕协调运动过程中负载位置与姿态的变化。

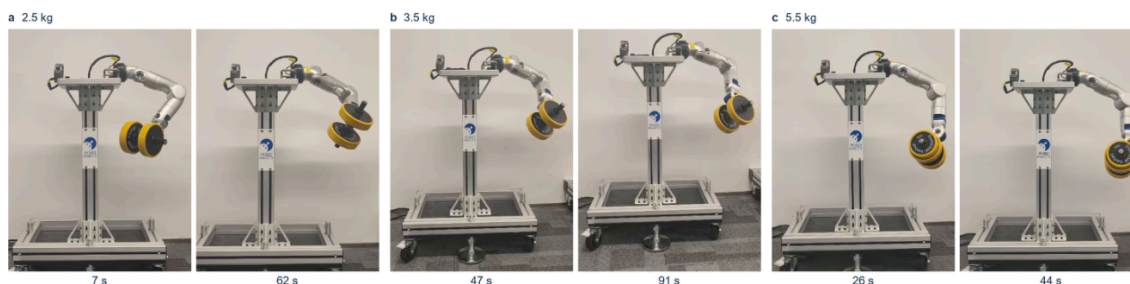


图 6.5. 三种负载下的实物单臂运动。从左至右，三组相邻帧对 (a-c) 分别对应 2.5、3.5 与 5.5 kg。每组内帧按时间顺序从左至右取自相应测试视频。时间戳相对于各自视频。来源：RoboParty [21]。

负载轨迹以 1.5 倍参考速度运行；角度幅值不变，理想速度与加速度分别放大 1.5 与 2.25 倍。连续记录时长为 2.5 kg 时 125.7 min、3.5 kg 时 120.0 min。5.5 kg 测试为 10 min 短时验证，不是额定持续负载。所分析的七个关节未报告故障码；失败的记录进入内部统计，但不在展开。

6.3.2 关节响应与记录性能

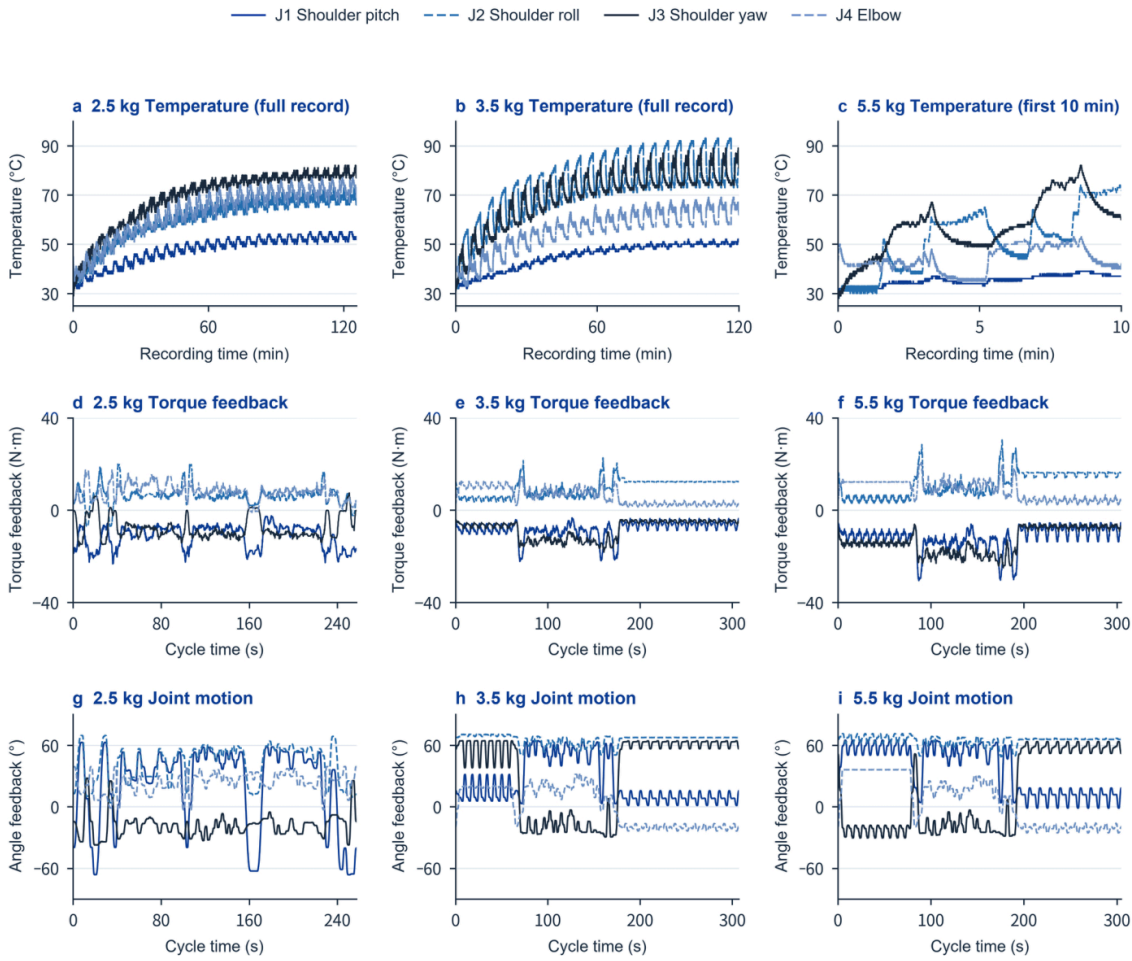


图 6.6. 连续单臂加载期间的关键关节响应。列对应 2.5、3.5 与 5.5 kg，每个负载一次试验。三个肩关节与肘关节记为 J1–J4。(a–c) 设备反馈温度：2.5 与 3.5 kg 为完整记录，5.5 kg 为前 10 min。(d–f) 首个完整工作周期内的反馈力矩，(g–i) 关节角，时间从周期起点计。曲线保留所示区间内的全部采样；力矩为执行器通道的驱动反馈力矩。来源：RoboParty [21]。

在所测任务轨迹下，单臂在 2.5 kg 与 3.5 kg 下完成持续动态作业。10 min 的动态加载记录证明了 5.5 kg 任务负载下的短时作业能力；它不构成持续工作负载额定值。

6.4 测试软件与证据管理

现有记录中不包括关于温升限值、告警、松动、磨损或线束检查的单独完整报告；部分温升较小，保留在图中可辨识的通道里。连续测试要求设备执行保持独立，而归档与查询必须适应网络中断与大型时间序列数据集。因此软件将运动控制、本地采集与集中式证据管理分离（图 6.7）。桌面客户端通过本地网关访问设备服务。网关与共享服务协调对 PLC 与 CAN 资源的访问；上传、文件处理与曲线查询分开调度。原始证据的保存不依赖网络可用性。各工作站首先保留原始 CSV 文件与执行配置。操作者确认测试条件并显式提交记录后，专用的 reliability_v1 接口归档证据。SQLite 持久化验证快照与上传状态。可续传的分块传输与回执对账支持中断后的恢复，使远程归档可从现有本地记录继续。

Workstation Execution and Evidence Archiving Architecture

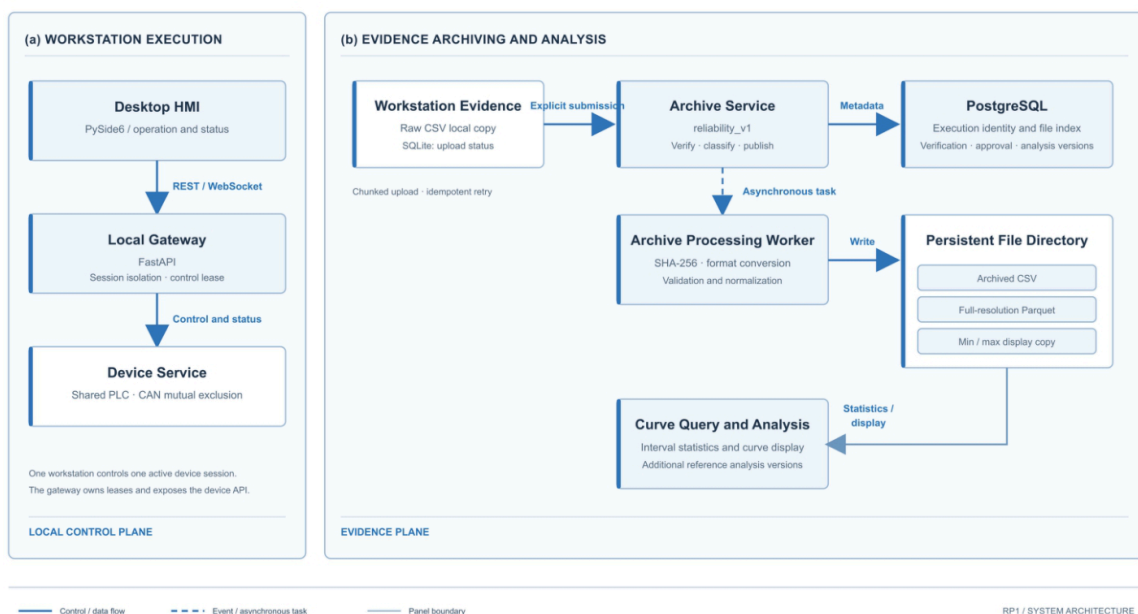


图 6.7. 测试软件与证据数据架构。工作站管理设备执行与本地证据；平台管理文件归档、版本关联、审查与查询。实线箭头表示控制或数据流，虚线箭头表示异步任务。来源：RoboParty [21]。

测试条件验证与分析可在试验后更新，而实测事实必须保持可追溯。因此数据层将原始文件与解释版本分离。PostgreSQL 存储执行标识、文件索引、证据哈希以及验证、审批与分析版本。原始 CSV 文件与派生查询文件位于独立的持久化目录。原始测量保持只读；修正与重新分析追加版本。审查冻结相关快照，审批则一并发布执行、结果与审查记录。长记录的显示效率与统计精度分开处理。后台处理生成用于视口浏览的 Min/Max 显示副本，而区间统计、采样查询与导出读取全分辨率数据。官方统计只包含已批准的测试结果。待审、被拒记录以及正式背景不完整的“其他”测试保留其原始证据。因此曲线查看、结果审查与正式发布各有明确的数据基础。

7 局限性与未来工作

本证据体系结合了 CAD 与 URDF 数值、配置的软件速率、计算值、仿真记录与物理测试。完整的故障注入与验收矩阵不在本报告范围内；其缺失并不改变对所测负载曲线的解读。标称通信预算不能确立端到端延迟，台架小时数也不能单独确立现场可靠性或 MTBF。结果仍以所述硬件、负载、控制器与环境为条件。未来的工作应保留受版本控制的试验记录，并扩展对组合关节运动、热耐久、电源切换与急停响应的可重复检查。感知与交互策略同样需要 RP1 专属的评估。这些是计划中的扩展，而不是额外已完成的测试。

8 结论

RP1 将模块化机械、配电、设备抽象与运动学习 workflow 集成到一个人形研究平台中。其 24 与 28 自由度本体配置共享下肢架构，并支持替代手臂与感知模块。所记录的流程将这些配置连接到模型准备、运动学习、部署与特定条件下的模块测试。可复现的使用要求交付配置与模型一致，且每项结果都保留其设置与证据。所报告的记录并不构成无限制的负载能力或现场可靠性。

附录 A 测试方法与计划条件

本规程概要总结第 6 节，并标明需要为后续评估保留的条件。它不是完整的可复现测试规程，也不引入新结果。

耐久性：固定模块、工装、负载、轨迹、控制器与时长。记录温度、反馈力矩、跟踪误差、故障与测试后检查；冷却与电池更换同有效运行时间分开记录。

电源与急停：明确供电配置、初始状态、触发方式与恢复顺序。以同步时间戳捕获电气与运动响应，并在测试前定义验收限值。

任务评估：将物理试验与仿真会话分开。保留初始条件、负载、策略版本、成功标准与独立试验次数。同一会话内的重复循环不是独立实验。

附录 B 配置检查

将本体自由度、手臂选项、末端执行器与感知模块同 CAD/BOM 以及 URDF 或 MJCF 的修订版本对应。核对关节名称、顺序、方向、零位、限位以及并联踝变换。记录固件、主机镜像、总线分配、控制速率、策略检查点与保护设置。日志必须标明实际配置；按适用的测试规程检查急停与恢复路径。

附录 C RP 灵巧手

C.1 配置与规格

RP 灵巧手具有 11 个机械自由度：6 个主动、5 个联动。拇指具有主动外展与屈曲；其余手指各具有主动屈曲。专有的无刷无槽核心模组、连杆、微型编码器与多轴驱动器集成在手掌内。它安装于 RP1 腕部；规格见表 C.1 [20]。

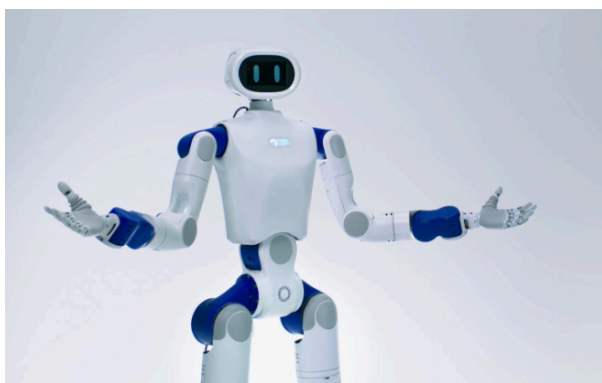


图 C.1. RP 灵巧手与 RP1 的集成。来源：RP Hand [20]。

表 C.1. RP 灵巧手结构与电气规格。

参数	规格
尺寸	147.54 × 73.53 × 26.35 mm
质量	379 ± 10 g
机械自由度与主动轴	11 个机械自由度；6 个主动轴与 5 个被动/联动自由度

传动	蜗轮
拇指范围	外展 0–87.5 度；屈曲 0–65 度
其余手指屈曲	0–72 度
角度分辨率	1 度
供电输入	12 V (-10%) 至 48 V (+10%)
静态 / 最大电流	$\leq 0.1 \text{ A}$ / $\leq 2.5 \text{ A}$
最短开/合时间	$\leq 0.7 \text{ s}$

C.2 尺寸与电气接口

RP 灵巧手通过 CAN-FD 连接，内部走线穿过机器人。六针腕部连接器中，引脚 1、2 为 VDC，引脚 5、6 为 GND，引脚 3、4 为 CANH 与 CANL。图 C.2 给出尺寸与引脚定义。

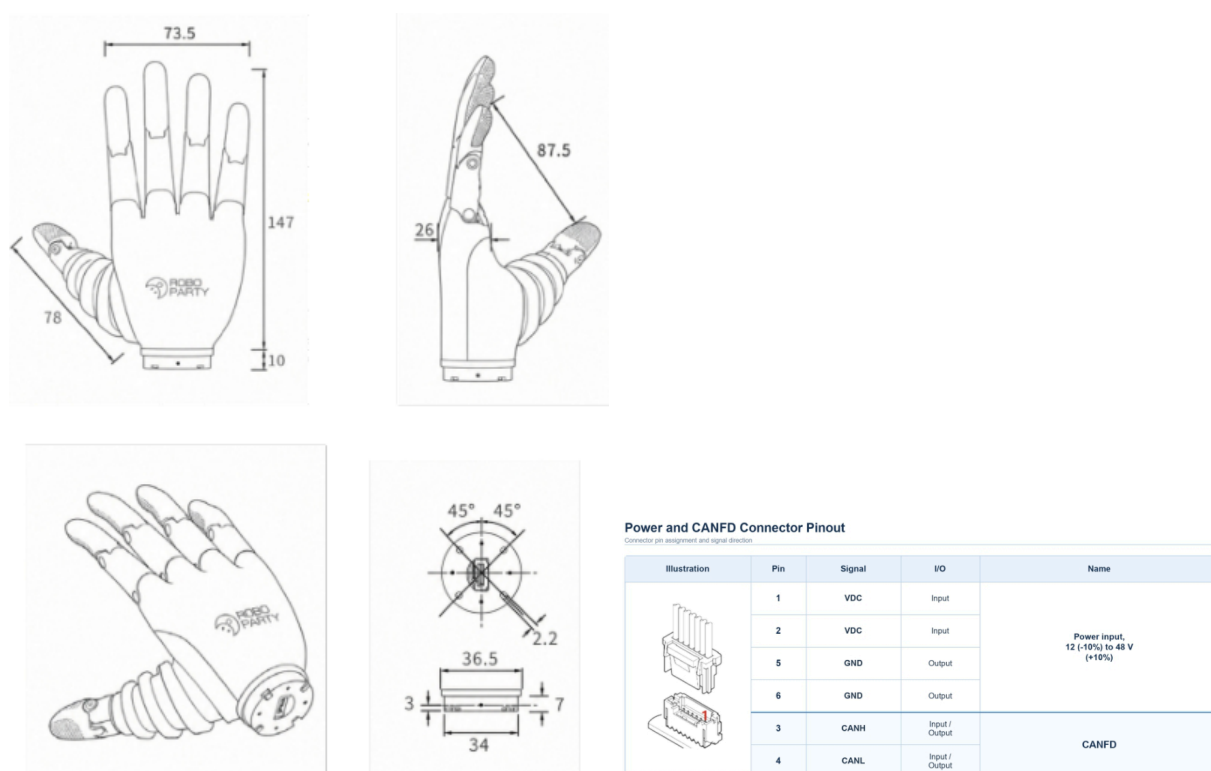


图 C.2. RP 灵巧手尺寸与连接器引脚定义。来源：RP Hand [20]。

C.3 软件与开发者接口

主机调试软件、基于视觉的手势演示以及 C++/Python SDK 支持调试与集成。主机应用显示关节状态、配置参数，并以数值或滑条方式指令各轴。三维模型随关节位置联动。示教队列可记录、导入、导出与回放。基于视觉的手势演示提供 Windows 与 Linux x86-64 应用。roboparty_dexhand 提供六轴位置/角度、速度与电流限值的 C++/Python 指令，并反馈位置、电流、状态与告警。它在 Linux x86-64 与 ARM64 上处理 CAN-FD，并随 RoboParty 镜像发布。ROS 2 节点支持双手控制。左右手 CAD、URDF 与 MJCF 支持装配检查与模型集成（表 C.2）。

表 C.2. RP 灵巧手软件与模型。

软件 / 模型	功能	平台 / 格式
主机调试工具	通信、关节控制、参数与状态	Windows

URDF / MJCF	机器人模型加载	URDF / MJCF
-------------	---------	-------------

源稿以文字描述连杆传动、以规格表描述蜗轮传动。两种描述均予保留，待与交付的 RP 灵巧手修订版本核实。

附录 D 参考文献

编号参考文献涵盖出版物、标准、软件与工程记录。已核实在线来源的默认记录访问日期为 2026 年 10 月 17 日，单条另有注明者除外。未出版或无法获得的来源已标注；来源归属本身不构成对所报告性能的独立验证。

- [1] K. M. Lynch and F. C. Park, *Modern Robotics: Mechanics, Planning, and Control*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2017. modernrobotics.northwestern.edu/nu-gm-book-resource/.
- [2] J. P. Araujo, Y. Ze, P. Xu, J. Wu, C. K. Liu, "Retargeting Matters: General Motion Retargeting for Humanoid Motion Tracking," *arXiv:2510.02252*, 2025. doi: 10.48550/arXiv.2510.02252. arxiv.org/abs/2510.02252.
- [3] RoboParty, "RP1 hardware: mechanical source files, drawings, and configuration bills of materials," engineering repository, 2026. Revision not pinned in the supplied manuscript. github.com/Roboparty/rp1_hardware.
- [4] B. Katz, J. Di Carlo, and S. Kim, "Mini Cheetah: A platform for pushing the limits of dynamic quadruped control," in *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation (ICRA)*, 2019, pp. 6295-6301. doi: 10.1109/ICRA.2019.8793865. doi.org/10.1109/ICRA.2019.8793865.
- [5] H. Shi, W. Wang, S. Song, C. K. Liu, "ToddlerBot: Open-Source ML-Compatible Humanoid Platform for Loco-Manipulation," *arXiv:2502.00893*, 2025. doi: 10.48550/arXiv.2502.00893. arxiv.org/abs/2502.00893.
- [6] G. Pavlakos, V. Choutas, N. Ghorbani, T. Bolkart, A. A. Osman, D. Tzionas, and M. J. Black, "Expressive body capture: 3D hands, face, and body from a single image," in *Proc. IEEE/CVF Conf. Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2019, pp. 10975-10985. smpl-x.is.tue.mpg.de/.
- [7] RoboParty, "RP1_description: URDF, MJCF, and mesh models," software repository, 2026. Commit not pinned in the source draft. github.com/Roboparty/RP1_description.
- [8] Y. Zhao, "Detailed workflow for exporting URDF from SolidWorks," ver. 1.0, RoboParty internal workflow document, 2026. Unpublished; internal access required.
- [9] RoboParty, "human-humanoid-tools (hhtools)," software and project documentation, 2026. Implementation inspected at commit 6e6588c (16 Oct. 2026); accessed 19 Oct. 2026. Repository and README | Project page | Agent interfaces. Parameters and performance are version-specific.
- [10] Isaac Lab contributors, "Isaac Lab 3.0.0-EA documentation: environment and humanoid benchmarks; Warp environment performance," online technical documentation, 2026. Upstream benchmark evidence; not an RP1 hardware benchmark. isaac-sim.github.io/IsaacLab/v3.0.0-EA/source/setup/environments.html#benchmarks | isaac-sim.github.io/IsaacLab/v3.0.0-EA/source/concepts/warp_environments.html#performance-comparison.
- [11] Q. Liao, T. E. Truong, X. Huang, Y. Gao, G. Tevet, K. Sreenath, C. K. Liu, "BeyondMimic: From Motion Tracking to Versatile Humanoid Control via Guided Diffusion," *arXiv:2508.08241*, 2025. doi: 10.48550/arXiv.2508.08241. arxiv.org/abs/2508.08241.
- [12] RoboParty, "MimicLite," motion-tracking software repository, 2026. The source report cites v1.1; benchmark settings and cost denominators require the corresponding release records. github.com/Roboparty/MimicLite.
- [13] RoboParty, "UFO," unsupervised body foundation model software repository, 2026. Reported RP1 results refer to project configurations; commit and full trial records were not supplied. github.com/Roboparty/UFO.
- [14] RoboParty, "P-BFM and I-BFM perception and interaction development materials," unpublished project records, 2026. Title supplied by the working manuscript; authors, version, and public publication identifier are not available.
- [15] RoboParty, "INTACT intent and task-organization materials," unpublished project records, 2026. Title supplied by the working manuscript; authors, version, and public publication identifier are not available.

- [16] International Organization for Standardization, ISO 11898-1:2015, Road Vehicles - Controller Area Network (CAN) - Part 1: Data Link Layer and Physical Signalling, 2015. This is the edition cited by the engineering source, not a claim that it is the latest edition. www.iso.org/standard/63648.html.
- [17] USB Implementers Forum, Universal Serial Bus Specification, Revision 2.0, 2000; and Universal Serial Bus 3.0 Specification, Revision 1.0, 2008. Protocol nominal rates are distinguished from measured application throughput. www.usb.org/document-library/usb-20-specification | www.usb.org/document-library/usb-30-specification.
- [18] IPC, IPC-2221, Generic Standard on Printed Board Design. The engineering manuscript does not identify the edition used for its current-capacity calculation; edition confirmation remains required. www.ipc.org/ipc-design-standards.
- [19] ROS contributors, "URDF XML documentation" and "SolidWorks to URDF exporter," software documentation. wiki.ros.org/urdf/XML | github.com/ros/solidworks_urdf_exporter.
- [20] RoboParty, "RP Hand product specifications, mechanical models, URDF/MJCF, and SDK materials," internal product documentation, 2026. Dimensions and ratings in Appendix C are supplier specifications; no external test certificate or document revision was supplied.
- [21] RoboParty engineering teams, "RP1 electrical, embedded, algorithm, and reliability evidence package," unpublished engineering records, 2026. Includes RP1.3.2/RP1.3.4 CAD, BOMs, PCB/Gerber data, simulation configurations, October 12, 2026 arm-test records, and reliability_v1 workspace state dated October 17, 2026. Internal access required; evidence classes are indexed in Appendix G.
- [22] NVIDIA, "SOMA-Retargeter," software repository. github.com/NVIDIA/SOMA-Retargeter.
- [23] Amazon FAR, "holosoma," humanoid learning and retargeting software repository. github.com/amazon-far/holosoma.
- [24] Newton contributors, "Newton," physics-simulation software repository. github.com/newton-physics/newton.
- [25] NVIDIA, "Warp," GPU simulation and computation framework. github.com/NVIDIA/warp.
- [26] N. Mahmood, N. Ghorbani, N. F. Troje, G. Pons-Moll, M. J. Black, "AMASS: Archive of Motion Capture as Surface Shapes," arXiv:1904.03278, 2019. doi: 10.48550/arXiv.1904.03278. arxiv.org/abs/1904.03278 | amass.is.tue.mpg.de/.
- [27] F. G. Harvey, M. Yurick, D. Nowrouzezahrai, C. Pal, "Robust Motion In-betweening," arXiv:2102.04942, 2021. doi: 10.48550/arXiv.2102.04942. arxiv.org/abs/2102.04942 | doi.org/10.1145/3386569.3392480 | github.com/ubisoft/ubisoft-laforge-animation-dataset.
- [28] I. Mason, S. Starke, and T. Komura, "Real-time style modelling of human locomotion via feature-wise transformations and local motion phases," ACM Transactions on Graphics, vol. 41, no. 3, 2022. doi: 10.1145/3522618. Associated resource: 100STYLE. doi.org/10.1145/3522618 | www.ianxmason.com/100style/.
- [29] J. Saito, J. Li, M. de Ruyter, et al., "SOMA: Unifying Parametric Human Body Models," arXiv:2603.16858, 2026. doi: 10.48550/arXiv.2603.16858. arxiv.org/abs/2603.16858 | huggingface.co/datasets/bones-studio/seed.
- [30] J. Lin, A. Zeng, S. Lu, Y. Cai, R. Zhang, H. Wang, L. Zhang, "Motion-X: A Large-scale 3D Expressive Whole-body Human Motion Dataset," arXiv:2307.00818, 2023. doi: 10.48550/arXiv.2307.00818. arxiv.org/abs/2307.00818 | github.com/IDEA-Research/Motion-X.
- [31] K. Lee, S. Kim, Y. Lee, et al., "PHUMA: Physically Reliable Humanoid Locomotion Dataset," arXiv:2510.26236, 2025. doi: 10.48550/arXiv.2510.26236. arxiv.org/abs/2510.26236 | github.com/DAVIAN-Robotics/PHUMA.
- [32] Z. Shen, H. Pi, Y. Xia, et al., "World-Grounded Human Motion Recovery via Gravity-View Coordinates," arXiv:2409.06662, 2024. doi: 10.48550/arXiv.2409.06662. arxiv.org/abs/2409.06662 | doi.org/10.1145/3680528.3687565 | github.com/zju3dv/GVHMR.
- [33] J. Li, J. Wu, C. K. Liu, "Object Motion Guided Human Motion Synthesis," arXiv:2309.16237, 2023. doi: 10.48550/arXiv.2309.16237. arxiv.org/abs/2309.16237 | huggingface.co/datasets/YaojieShen/hhtools_omomo.
- [34] R. Yu, X. Lin, J. Ma, et al., "OmniContact: Chaining Meta-Skills via Contact Flow for Generalizable Humanoid Locomotion Manipulation," arXiv:2606.26201, 2026. doi: 10.48550/arXiv.2606.26201. arxiv.org/abs/2606.26201 |

huggingface.co/datasets/lightcone02/OmniContact-Dataset.

- [35] L. Yang, X. Huang, Z. Wu, et al., "OmniRetarget: Interaction-Preserving Data Generation for Humanoid Whole-Body Loco-Manipulation and Scene Interaction," arXiv:2509.26633, 2025. doi: 10.48550/arXiv.2509.26633. arxiv.org/abs/2509.26633.
- [36] M. Xu, Y. Shi, K. Yin, X. B. Peng, "PARC: Physics-based Augmentation with Reinforcement Learning for Character Controllers," arXiv:2505.04002, 2025. doi: 10.48550/arXiv.2505.04002. arxiv.org/abs/2505.04002 | doi.org/10.1145/3721238.3730616 | huggingface.co/datasets/YaojieShen/hhtools_parcs_ms.
- [37] MotionDecode contributors, "MotionDecode," motion-data project and dataset. Version and release date are not specified in the source manuscript. chingmudata.github.io/MotionDecode/ | huggingface.co/datasets/CMRobot/MotionDecode.
- [38] RoboParty, "hhtools demonstration assets," project videos and animated examples, 2026. Figure frames are extracted from the original project assets. Demonstration gallery | URDF import | Calibration | Batch export. Accessed 19 Oct. 2026.
- [39] RoboParty, "gpt-6-astra-real2sim-workflow," software repository, 2026. Performance claims in Section 5 follow the project report; exact run settings were not included in the manuscript. github.com/Roboparty/gpt-6-astra-real2sim-workflow.
- [40] RoboParty, "LabWeft," research-workbench software repository, 2026. github.com/Roboparty/LabWeft.
- [41] Sim2Real Benchmark, "Humanoid motion-tracking leaderboard," online benchmark. Rankings are time-dependent; the manuscript does not retain an immutable leaderboard snapshot. egalahad.github.io/sim2real/leaderboard/.
- [42] J. M. Soucie et al., "Range of motion measurements: Reference values and a database for comparison studies," Haemophilia, vol. 17, no. 3, pp. 500-507, 2011. doi: 10.1111/j.1365-2516.2010.02399.x. doi.org/10.1111/j.1365-2516.2010.02399.x | archive.cdc.gov/www_cdc_gov/ncbddd/jointrom/index_1715172647.html.
- [43] A. Roaas and G. B. J. Andersson, "Normal range of motion of the hip, knee and ankle joints in male subjects, 30-40 years of age," Acta Orthopaedica Scandinavica, vol. 53, no. 2, pp. 205-208, 1982. doi: 10.3109/17453678208992202. doi.org/10.3109/17453678208992202.

附录 E 人形机器人平台索引

49 个条目对应图 1.2。身高为图中的标称值，并非标准化测量。来源栏标明型号版本与未决条目；星号含义随图说明。* YOMI: 120 cm 为作者提供的暂定图值。其他存在不同代际公开数据的条目在来源栏中注明。来源链接取自图制作记录；它们不构成统一测量条件。

ID	平台	身高	规格与图片来源
E01	ROBOTIS MINI	26.9 cm	经销商托管的制造商手册；人形套件配置。规格： www.consulta.cz 图片： emanual.robotis.com
E02	Zeroth M1	49.4 cm	规格 494 mm；设计媒体提供的产品图。规格： www.zeroth0.com 图片： www.yankodesign.com
E03	ROBOTIS OP3	51 cm	规格 510 mm；经销商图片。规格： en.robotis.com 图片： api.robomercato.com
E04	Luvbotics RUMI	65 cm	制造商尺寸图标注 65 cm。规格： www.luvbotics.com 图片： luvbotics.com
E05	HighTorque Mini Pi Plus	68 cm	产品页 680 mm；门店资料亦报 65 cm。随版本而异。规格： www.hightorque.cn 图片： store.hightorque.cn
E06	Zeroth Bridge	88 cm	规格 88 cm；公共产品报道图片。规格： zeroth-openbridge.com 图片： n.sinaimg.cn
E07	PrimeBOT Q1	88 cm	规格 88 cm；低分辨率官方图片。规格： www.primebot.com 图片： t-vcsh-www-tos-01.tos-cn-shanghai.volces.com

E08	Lumos 小明	89 cm	新闻报道 89 cm；官方品牌图。规格：www.dutenews.com 图片：www.lumosbot.tech
E09	Booster K1	95 cm	产品页约 95 cm。规格：www.booster.tech 图片：www.booster.tech
E10	Noetix Bumi	98 cm	规格 98 cm；经销商图片。规格：www.noetixrobotics.com 图片：sonnyrobotics.com
E11	PrimeBOT T1	100 cm	规格 100 cm；制造商序列图中的站立框架。规格：www.primebot.com 图片：www.primebot.com
E12	Fauna Robotics Sprout	107 cm	制造商论文约 107 cm；经销商图片。规格：arxiv.org 图片：valumech.com
E13	Noetix N2	118 cm	保留 118 cm；部分资料取整为 120 cm。经销商图片。规格：www.noetixrobotics.com 图片：sonnyrobotics.com
E14	Luvbotics YOMI	120 cm*	120 cm 为作者提供的暂定排版值，并非经核实的制造商身高。规格：luvbotics.com 图片：cdn.luvbotics.com
E15	JAKA pi	122 cm	规格 1220 mm。规格：www.jaka.com 图片：www.jaka.com
E16	Unitree R1	123 cm	所保留产品页 1230 mm；配置各异。规格：www.unitree.com 图片：gmo-humanoid.shop
E17	Galbot ET1	125 cm	规格 1250 mm。规格：www.galbot.com 图片：oss-cn-beijing.galbot.com
E18	Agibot 灵犀 X2	131 cm	规格 1310 mm。规格：www.agibot.com.cn 图片：agibot.com
E19	Unitree G1	132 cm	所保留现行页面 1320 mm；早期资料不同。规格：www.unitree.com 图片：unitree.ru
E20	天工 Omni	135 cm	规格 135 cm。规格：www.x-humanoid.com 图片：www.x-humanoid.com
E21	RoboParty RP1	135 cm	作者提供的平台身高与渲染图 [21]。
E22	HONOR 元启 A1	136.9 cm	新闻媒体引用制造商报道 136.9 cm；官方品牌图。规格：www.bjnews.com.cn 图片：www-file.honor.com
E23	Galaxea Kengo	139.6 cm	规格 1396 mm；产品发布图。规格：galaxea-dynamics.com 图片：file.aibangbots.com
E24	Booster T2	140 cm	产品页约 140 cm。规格：www.booster.tech 图片：www.booster.tech
E25	Noetix E1	140 cm	现行保留文档：1400 mm；早期资料：1360 mm。图片与版本需匹配。规格：web.noetixrobotics.com 图片：sonnyrobotics.com
E26	ENGINEAI PM01	140 cm	现行保留文档：约 1400 mm；早期：1388 mm。规格：engineai.com.cn 图片：cn-engineai-1304599088.cos.ap-guangzhou.myqcloud.com
E27	Boston Dynamics Atlas HD	150 cm	已退役的 2024 年液压 Atlas HD。身高与署名 Boston Dynamics 的照片：IEEE ROBOTS 指南。不同于 190 cm 的 2026 量产 Atlas。规格：robotsguide.com 图片：cdn.sanity.io
E28	Lumos Robotics LUS2	160 cm	现行 LUS2 官方产品页渲染图，标有 LUS II 2+；官方页面身高 160 cm。规格：www.lumosbot.tech 图片：www.lumosbot.tech
E29	LimX Dynamics Luna	160 cm	官方规格 160 cm。官方 Luna 页面的原始全身产品渲染图；仅去背景。规格：www.limxdynamics.com 图片：limx-video-oss.limxdynamics.com
E30	Fourier GR-1	165 cm	GR-1 官方尺寸：1650 × 524 × 325 mm。经销商产品渲染图。规格：support-old.fftai.com 图片：sonnyrobotics.com
E31	Fourier GR-3	165 cm	型号专属来源保留于图制作清单。规格：support.fftai.com 图片：sonnyrobotics.com

E32	LimX Dynamics Oli	165 cm	型号专属来源保留于图制作清单。规格：www.limxdynamics.com 图片：aifitlab.com
E33	1X NEO	168 cm	官方身高 5 ft 6 in = 167.64 cm；取整为 168 cm。规格：www.1x.tech 图片：newatlas.com
E34	AgiBot A2 Ultra	169 cm	型号专属来源保留于图制作清单。规格：agibot.com 图片：agibot.com
E35	AgiBot A3	173 cm	型号专属来源保留于图制作清单。规格：agibot.com 图片：agibot.com
E36	Apptronik Apollo	173 cm	初代 Apollo，非 Apollo 2。身高 5 ft 8 in = 172.72 cm，取整。规格：apptronik.com 图片：assets.website-files.com
E37	Figure Figure 03	173 cm	官方现行页面：5 ft 8 in = 172.72 cm；取整为 173 cm。照片为 Figure 03 发布图。规格：www.figure.ai 图片：ixbt.online
E38	Tesla Optimus Gen 2	约 173 cm	公布的近似身高；IEEE ROBOTS 指南，制造商署名照片。规格：robotsguide.com 图片：cdn.sanity.io
E39	ENGINEAI T800	173 cm	型号专属来源保留于图制作清单。规格：www.engineai.com.cn 图片：cn-engineai-1304599088.cos.ap-guangzhou.myqcloud.com
E40	Fourier GR-2	175 cm	GR-2 官方身高 1.75 m；RBTX 商城产品渲染图。规格：support-old.fftai.com 图片：images.cdn.europe-west1.gcp.commercetools.com
E41	Agility Robotics Digit (V4)	175 cm	2023 商用 Digit（带头与手），非 2026 V5。部署伙伴 GXO 报告 5 ft 9 in（175.26 cm），取整为 175 cm。经销商产品抠图。规格：gxo.com 图片：api.robgen.com
E42	Kepler K2	175 cm	双足 K2；现行官方规格 175 cm。规格：www.gotokepler.com 图片：images.cdn.europe-west1.gcp.commercetools.com
E43	PAL Robotics TALOS	175 cm	型号专属来源保留于图制作清单。规格：pal-robotics.com 图片：pal-robotics.com
E44	UBTECH Walker S2	176 cm	型号专属来源保留于图制作清单。规格：docs.ubtrobot.com 图片：images.cdn.europe-west1.gcp.commercetools.com
E45	小米 CyberOne	177 cm	2022 年 CyberOne，小米发布稿 177 cm。iF Design 项目 615888 的小米原始参赛渲染图。规格：new.c.mi.com 图片：ifdalivestorage.blob.core.windows.net
E46	NEURA Robotics 4NE1	180 cm	型号专属来源保留于图制作清单。规格：neura-robotics.com 图片：neura-robotics.com
E47	Unitree H1	180 cm	初代 H1；官方身高约 180 cm。非 H1-2（178 cm）。规格：www.unitree.com 图片：robostore.com
E48	Unitree H2	182 cm	官方技术表：1820 mm。人脸版 H2，非 H2 PLUS。规格：www.unitree.com 图片：www.unitree.com
E49	Boston Dynamics Atlas (2026)	190 cm	2026 量产设计与规格；非 2024 电动原型。规格：bostondynamics.com 图片：bostondynamics.com

下列附加的软件支持平台未提供可比的身高数据。

组织	型号	身高	位置 / 来源
RoboParty	RPO	未注明	hhtools 集成列表 [9]
RoboParty	ROBOTO_ORIGIN	未注明	hhtools 集成列表 [9]
Asimov	Asimov 1	未注明	hhtools 集成列表 [9]
Berkeley	Humanoid Lite	未注明	hhtools 集成列表 [9]

附录 F 图表索引

按章节编号的图与表，注明来源归属。内部工程记录与外部基准及产品/解剖学参考相区分。

编号	标题与来源
图 1.1	蓝白配色方案下 RP1 的三视图。来源：RoboParty [21]。
图 1.2	按标称身高排列的人形机器人（26.9–190 cm；RP1 为蓝色）。版本与来源见附录 E。身高数据不共用测量规程。
图 1.3	人体姿态、SMPL-X 网格与 RP1 形态。来源：SMPL-X [6] 与 RoboParty [21]。
图 1.4	RP1 执行器组与 SMPL-X 人体关节的对应关系。来源：SMPL-X [6] 与 RoboParty [21]。解剖示意图来源：Anatomia, https://anatomia.com.mx/anatomia/lineaOsteo/MicroSitio/Esqueleto/index.html 。
图 1.5	ROMOMO 关节模组系列。来源：RoboParty [21]。
图 1.6	五种代表性运动工况下 RMM6562-2E 的工作点。来源：RoboParty [21]。
图 1.7	组合侧平举与肘部屈伸（5.5 kg 末端负载）下 RMM8462-2E 的工作点。来源：RoboParty [21]。
图 1.8	五种代表性运动工况下 RMM10062-2E 的工作点。来源：RoboParty [21]。
图 1.9	抱箍接口与分体抱箍拆卸。来源：RoboParty [21]。
图 1.10	RP1.3.4 关节轴组、外壳布局与运动间隙区域。P：俯仰；R：横滚；Y：偏航。轴线位置与间隙区域为示意。来源：RoboParty [21]。
图 1.11	人体与 RP1 的肘屈曲对比。人体参考：[42]；RP1 限位与照片：[21]。
图 1.12	左臂几何与关节原点投影间距。S：肩俯仰；E：肘；Wp：腕俯仰。尺寸依据所提供的 CAD 图纸与图示姿态。来源：RoboParty [21]。
图 1.13	腰部架构：EngineAI T800、宇树 R1、宇树 G1 EDU 与 RP1。P：俯仰；R：横滚；Y：偏航。型号变体按标注；图片不按比例。来源：所提供的对比图；制造商来源见附录 E；RP1 [7, 21]。
图 1.14	髋部参考架构与 RP1 关节布局。轴草图表示零位姿态方向，而非重合原点。来源：所提供的对比图与标注的机器人来源；解剖学图片署名 Omnia Medical；RP1 [7, 21]。
图 1.15	人体与 RP1 的髋内收对比。人体参考：[43]；RP1 限位与照片：[21]。
图 1.16	人体与 RP1 的膝屈曲对比。人体参考：[42]；RP1 限位与照片：[21]。
图 1.17	URDF 零位姿态下左腿几何与矢状面轴线间距。H：髋俯仰；K：膝；Ap：功能性踝俯仰参考。来源：RoboParty [21]。
图 1.18	人体与 RP1 的踝背屈对比。人体参考：[42]；RP1 限位与照片：[21]。
图 1.19	人体与 RP1 的踝跖屈对比。人体参考：[42]；RP1 限位与照片：[21]。
图 1.20	足部与踝关节自由体受力图。(a) 足与踝俯仰组件侧视图。(b) 单独足部正视图。重力项遵循相应自由体边界；力臂取决于运行工况。来源：RoboParty [21]。
图 1.21	DFM、DFA 与 DFS 框架。来源：RoboParty [21]。

图 1.22	材料分级与关节模组系列。来源：RoboParty [21]。
图 1.23	RP1 本体零件。来源：RoboParty [21]。
图 1.24	RP1 核心结构件。来源：RoboParty [21]。
图 1.25	核心零件细节。来源：RoboParty [21]。
图 1.26	RP1 腕部接口与三种可互换末端执行器。来源：RoboParty [21]。
图 1.27	拆卸 RP1 头部感知模块。来源：RoboParty [21]。
图 1.28	感知、数据采集与运动控制头部配置。来源：RoboParty [21]。
图 1.29	RP1 腿部模组中的部分快拆接口。来源：RoboParty [21]。
图 1.30	头—躯干连杆。来源：RoboParty [21]。
图 1.31	连杆层级。来源：RoboParty [21]。
图 1.32	主要关节轴与旋转方向。红色箭头表示轴线方向；绿色箭头表示对应旋转。该图用于对照机械装配检查关节约定。来源：RoboParty [21]。
图 1.33	CAD 简化前后的胸壳几何。(a) 原始模型，高亮详细区域。(b) 用于导出的简化模型。来源：RoboParty [21]。
图 1.34	激进网格抽减后的表面损伤示例。高亮显示的头—躯干区域说明为何需要目视检查与接触边界检查。来源：RoboParty [21]。
图 2.1	RP1 电气拓扑：电源、通信与急停路径。来源：RoboParty [21]。
图 2.2	MAIN 与 BACKHUB 的顶视与底视 Gerber 渲染图，不按统一比例。来源：RoboParty [21]。
图 2.3	HOTSWAP、HANDPlusPro 与 MCAP 的顶层 Gerber 渲染图。来源：RoboParty [21]。
图 2.4	RP1 外部接口正视线框图。来源：RoboParty [21]。
图 2.5	RP1 主电池拆卸与更换。来源：RoboParty [21]。
图 2.6	RP1 急停输入与示例软件界面。来源：RoboParty [21]。
图 3.1	嵌入式执行架构。(a) 控制、驱动、操作系统与桥接层。(b) 关节指令与执行器反馈路径。来源：RoboParty [21]。
图 3.2	理论 CAN/USB 流量与净载荷时序。11.84% 的值不含帧结构与其他延迟；未使用区域不是经过验证的裕量。来源：RoboParty [21]。
图 3.3	硬件接口与并联关节变换；机器人 BSP 配置；GitHub Actions 与 APT 交付。来源：RoboParty [21]。
图 3.4	会话归档、校验和与离线分析；通信、恢复与功能检查。虚线路径表示重新分析。覆盖不等于验收。来源：RoboParty [21]。
图 4.1	hhtools 重定向：搬运、舞蹈、台阶与障碍。来源：hhtools [9, 38]。
图 4.2	RP1 参考运动跟踪。(a) 十六个并行环境。(b) 单环境策略回放。来源：RoboParty [21]。
图 4.3	已发布的人形基准 [10]。(a) 按物理预设划分的训练吞吐量。(b) Torch 与 Warp 的环境步进时间。来源：Isaac Lab 公开基准 [10]。
图 4.4	RP1 腰、髋、膝执行器的力矩—转速包络。来源：RoboParty [21]。
图 4.5	三帧观测历史：(a) obs-major 顺序；(b) frame-major 顺序。来源：RoboParty [21]。
图 4.6	左踝解析几何。(a) 零位姿态。(b) 组合俯仰与横滚。来源：RoboParty [21]。

图 4.7	全身姿态跟踪与操作演示。来源：RoboParty [21]。
图 4.8	带载上肢操作。来源：RoboParty [21]。
图 4.9	WBI 开发工作流。来源：RoboParty [21]。
图 4.10	同步视频与关节状态回放。来源：RoboParty [21]。
图 6.1	模块化测试台架与快拆工装。设计渲染图。来源：RoboParty [21]。
图 6.2	实物耐久运动：上身摆臂与带载下肢踏步。来源：RoboParty [21]。
图 6.3	50 kg 外载深蹲期间的关节运动、力矩与 12 轴温度。来源：RoboParty [21]。
图 6.4	2.5、3.5 与 5.5 kg 下连续单臂带载运动的仿真设计。来源：RoboParty [21]。
图 6.5	2.5、3.5 与 5.5 kg 下的实物单臂运动。来源：RoboParty [21]。
图 6.6	连续单臂加载期间的关键关节响应。来源：RoboParty [21]。
图 6.7	测试软件与证据数据架构。来源：RoboParty [21]。
图 C.1	RP 灵巧手与 RP1 的集成。来源：RP Hand 资料 [20]。
图 C.2	RP 灵巧手尺寸与连接器引脚定义。来源：RP Hand 资料 [20]。
表 1.1	RP1 本体配置。
表 1.2	传动特性。来源：RP1 原始设计对比 [21]；定性且依赖于构型。
表 1.3	执行器集成对比。来源：RP1 原始设计对比 [21]；定性且依赖于构型。
表 1.4	减速器对比。来源：RP1 原始设计对比 [21]；定性且依赖于构型。
表 1.5	行星机构布置形式。来源：RP1 原始设计对比 [21]；定性且依赖于构型。
表 1.6	RP1 关节限位与人体参考范围。机器人零位与正负号不同于解剖学惯例；人体来源在表下以局部标签标明。
表 1.7	髌部串联顺序。
表 1.8	材料选择。
表 2.1	板卡职能。来源：RoboParty 工程记录 [21]。
表 2.2	目标阻抗。来源：PCB 设计参考 [18] 与工程目标 [21]。
表 2.3	接口与标称速率。来源：协议规范 [16, 17] 与接口配置 [21]。
表 3.1	硬件抽象。来源：RoboParty 工程记录 [21]。
表 3.2	测试与检查。来源：RoboParty 工程记录 [21]。
表 4.1	重定向工作流对比。来源：重定向方法与软件 [2, 9, 22, 23]。
表 4.2	数据集输入。来源：数据集与项目记录 [9, 26-37]。
表 4.3	策略配置。来源：机器人模型 [7] 与策略配置 [21]。
表 4.4	记录数据。来源：RoboParty 工程记录 [21]。
表 6.1	测试条件与代表性物理记录。来源：RoboParty [21]。
表 C.1	RP 灵巧手规格。来源：RP 灵巧手产品规格 [20]。
表 C.2	RP 灵巧手软件与模型。来源：RP 灵巧手 SDK 与模型记录 [20]。

附录 G 工程证据索引

ID	工程记录	内容	报告位置	来源
G1	CAD / STEP	整机、腿部、左臂与关节零件	第 1.4–1.7 节	RoboParty 内部工程文件；版本如图注所示
G2	BOM 与图纸	零件、材料、规格与配置	第 1.6 节	RoboParty 内部记录 [3, 21]
G3	RP1_description	URDF、MJCF、网格与配置	第 1.7 节与第 4 节	公开仓库 [7]；源稿未固定 commit

G4	hhtools	重定向、校准、适配器与质量分析	第 4.1 节	公开仓库 [9]；实现描述基于 commit 6e6588c。实验运行版本需单独记录。
G5	Isaac Lab / Newton / PhysX	训练、动力学与回放	第 4.2 节	公开工具 [10, 24, 25] 与项目配置
G6	BeyondMimic / MimicLite / UFO	训练、推理与部署	第 4.2–4.3 节与第 5 节	研究与代码仓库 [11-13]
G7	原理图 / PCB / Gerber	电源、CAN-FD、USB、板卡与接口	第 2 节	RoboParty 内部制造记录 [21]
G8	测试视频与日志	运动、温度、力矩与故障记录	第 6 节	内部物理与仿真记录 [21]；负载与日期见正文
G9	reliability_v1 源码	执行、归档、审查与查询	第 6.4 节	工作区状态日期为 2026 年 10 月 17 日 [21]
G10	人形机器人对比	49 款型号与标称身高	第 1.2 节；附录 E	所保留的规格与图片来源清单
G11	RP Hand 资料	结构、接口、模型与 SDK	附录 C	RoboParty 产品与工程资料 [20]