冰雪表面原地轮胎摩擦试验设备设计方案

版本：v0.36 | 日期：2026 年 10 月 15 日 | 交付阶段：设计评审与厂家询价

1 设备要解决的问题

本设备用于比较冰雪表面处理前后的纵向滑动阻力。试验时，试样和轮轴都保持原位，充气轮胎持续自转；加载机构使轮胎缓慢接触试样，再维持 50—100 N 的目标轮载。同步记录纵向力、法向力、轮速、垂向位置、温度和胎压，得到规定条件下的摩擦系数及其随时间的变化。加减速用于建立和结束工况，首版先研究稳定轮载下的摩擦。

首选构型仍为四脚开放机架：试样位于独立地面，设备站在预留的金属支脚区域，轮组能够升降和停机换点。该构型便于直接测试箱内铺设的冰雪，也保留拆分运输到其他试验地点的能力。其关键限制是反力、脚底抗滑和箱底局部承载；这三项必须与轮载和速度一起确认。

本轮交付把充气轮调整、结构布置、传感控制和样机验收组织成一套评审资料。图纸用于讨论尺寸、核对接口和报价。轮辋、六轴传感器安装面、低温制动器及箱底结构还没有实物或准确厂家图，相关加工接口在图中保留待核定状态。

2 需求与能力边界

需求编号	内容	当前决定或状态	对设计的影响
R01	运动关系	轮轴不平移、试样不平移，轮胎原地自转	首版测固定区域滑动阻力及表面演化
R02	研究阶段	稳态轮载摩擦；加减速建立和结束工况	采用悬空加速、缓接触、短时测量的顺序
R03	首版轮载	50—100 N；150 N 作为后续扩展比较	先闭合 50—100 N 控制和测量能力
R04	轮胎	Kenda K909，200×50，充气、有内胎	新轮架须避开更大的胎面、气门嘴和轮毂包络
R05	胎压	原厂目录 50 psi，约 0.345 MPa 可接受	首版不再沿用 0.5 MPa 作为该轮的目标压力
R06	速度	60 km/h 保留为胎面线速度争取目标	不据目录轮径认定整轮具备低温高速能力
R07	测量时长	5—10 s 或更短	实际有效窗口由载荷稳定、热效应和信噪比决定
R08	方向	只研究沿前进方向的纵向阻力	不增加侧偏或转向执行机构
R09	环境	先适配约−20 ℃、−30 ℃	器件温度范围和冷态测量误差分别确认
R10	运行空间	全部运动在关门后的环境箱内	控制、供电和采集需通过可用穿线接口连接

需求编号	内容	当前决定或状态	对设计的影响
R11	换点	相邻点停机抬轮后手动移位并锁紧；远处拆分搬运	移位时不带着旋转轮组移动，测试时不解锁
R12	地面	四脚小范围允许露出金属面，测试区保留冰雪	支脚不直接压在待测试雪层上
R13	固定条件	无已确认的结构固定点	配重和正向约束属于待比较配置
R14	搬运	可拆卸运输；质量限制可放宽，先完成实验功能	便携性按拆分质量、体积、装配和复校验证
R15	软件	本地控制板/控制器执行，箱外电脑设定和保存数据	USB 可作为上位机连接候选，不承担独立保护
R16	预算	初始 5—10 万元，会议提到 5—8 万元；合理时可调整	报价必须包含机械、电控、采集、低温适配和调试

真实行驶滑移率需要轮心前进速度与轮胎圆周速度。本装置没有前进速度，因此数据不能直接标作自由滚动、制动滑移率曲线或飞机着陆摩擦系数。设备仍可用于同一轮胎、轮载、温度和作用时间下的表面处理比较，但向真实跑道推广需要另设对应试验。

会议中提到的“测量宽度 90 cm”已由用户撤回。总装占地、附近换点行程和轮胎接触宽度是三个不同量，后续图纸分别标注。纯冰、冰基覆雪、压实雪以及早期“蓝冰处理层”的表面名称由实验线统一；设备线提供厚度和空间能力，不冻结实验分组。

3 测量链和输出

测量链为：设定环境与轮速 → 悬空加速并记录无接触基线 → 缓慢接触 → 依据校正后的法向力维持轮载 → 记录短时摩擦 → 卸载离面 → 停转 → 移到新点。

主结果采用直接测力得到的纵向力与法向力：

$$\mu(t) = \frac{|F_x(t)|}{N(t)}$$

计算只在法向力有效、载荷和轮速达到规定稳定条件、传感器未饱和、时间同步有效的区间内进行。每次测试同时保留接触前、接触过渡、有效测量和卸载阶段的原始数据；平均值不能覆盖过冲、跳动或表面快速变化。

六轴传感器记录的是安装位置处的合力和合矩。测量轮组自重、安装方向、质心偏置、转动反力及温度零漂均会进入输出。原始 Fz 不是接触轮载；应先通过传感器标定矩阵、坐标转换和同温度悬空基线换算。若安装结构中有刚性旁路，部分试样力绕过传感器，换算关系便不成立。

电机转矩用于独立一致性检查和功率评估，不能只把驱动器显示值除以轮半径当作主摩擦结果。需要区分：

$$T_{drive} = T_{contact} + J_{eq}\alpha + T_{bearing} + T_{belt} + T_{other}$$

首版优先稳态窗口，使角加速度项尽量小；冷态悬空同速基线仍需记录。接触力对应的有效半径也需要依据轮胎压缩状态确认。

数据输出至少包括测试编号、配置版本、表面编号、时间戳、原始六轴信号、校正后 Fx 与 N、轮速、Z 位置、驱动转矩估算、状态机状态、温度、胎压、保护状态、有效窗口标记、校准文件版本和操作者备注。保存原始记录与处理参数，避免只导出一列平均摩擦系数。

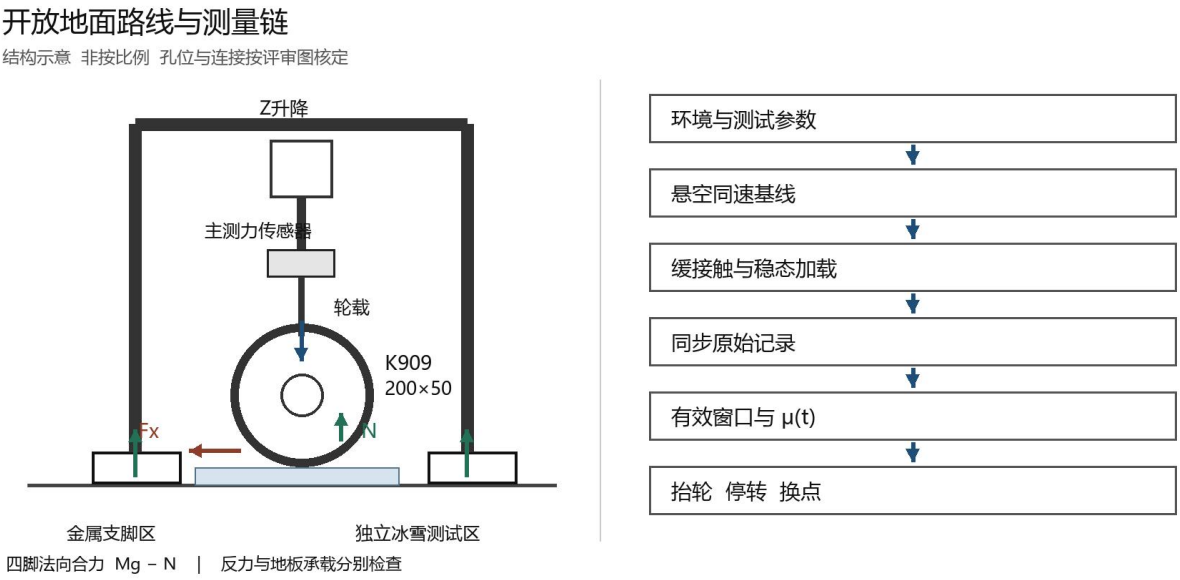


图 1 开放地面支架与直接测力路径

4　结构与连接详细设计

v0.36 把原先的模块包络补成可以讨论装配和详细设计责任的结构。保留四脚开放机架、手动换点、电动升降和同一测量轮组，不增加新的运动轴。底框、顶框和轮架分别做焊接子组件，现场只拆立柱、两根斜撑和功能模块。采用标准公制紧固件；采购件孔系由准确型号驱动，转接板预留为毛坯，避免根据包络猜孔。

项目	本轮名义设计	制造与检验要求
正常总装包络	750×900×957 mm	从当前 STEP 回读；含所画紧固件和护罩，不含线缆弯曲、配重、分载板
四脚中心	X±300、Y±375 mm；脚板 150×150	地面先确认局部承载；脚板不得当成薄板锚固
可拆立柱	X±270、Y±300；50×50×3 方管	焊接端板后修整接触面，整机复装检查垂直及摇摆
立柱端接	104×104×6 端板；4×Ø11 孔，68×68 孔距；每端 4×M10	四柱八端共 32 组；通孔、螺母、垫片及防松成套，不在 3mm 管壁直接攻承载螺纹
机架抗摆	后面、右侧各一根可拆 25×25×2 斜撑	斜撑端耳、销弯曲、板承压和焊缝由厂家复核；不进入测试区域
顶部导向支承	增加 Y±250 横梁和四块加工垫座	导轨安装面连到顶框，装后复查平行度，不悬空承托
手动换点	Y±150 mm；25 mm 分度，共 13 位置	Ø10 定位销进入Ø10.4 孔；两螺杆夹紧；防抬条和端止挡独立保留

项目	本轮名义设计	制造与检验要求
Z 导向	两导轨、四滑块，分开承担横向力矩	列出载荷和力矩选择采购件；执行器输出杆不兼作侧向导轨
Z 行程	本轮布置位移−40…+80 mm	只是布局比较，实际控制/限位/缓冲行程待配套验收
主传感器连接	上下 130×130×10 转接板，各自 4×M8 自制件连接	传感器侧孔系待型号冻结；两侧无贯穿长螺栓、线缆或支撑旁路
轮架	两侧焊接共同桥梁；四块 35×35×12 安装耳	焊后加工轴承座基准和安装面；整体轮架拆下维修，不把桥梁拆成大量小连接
防护	轮胎罩、皮带罩，1.5mm 钢板作为布置候选	拆卸面用防脱紧固件；材料厚度和连接必须经冷态飞散/冲击评价确认

执行器通过柱外连接耳连接移动滑架，避开立柱实体。主测力传感器位于导向和防坠机构之后；轮胎、电机、皮带、轴承和罩壳均在测量侧。所有固定夹持、配重、独立止挡只接机架。六轴传感器的准确接触面、孔系和允许组合力矩仍是接口冻结条件。

防坠接管还会使主传感器、下挂轮架和轴承承受瞬态载荷。首轮 Fx/Fz 及 100N·m 级传感器建议是静态需求比较；厂家必须用真实接合距离和制停减速度核对测量侧过载容量及变形，不能用信号饱和报警代替机械过载保护。

本轮模型包含 237 个实体，其中大量实体是 32 组机架螺栓/螺母等标准件，另有采购包络；它不是 237 种零件。列入模型的参考质量约 121.77 kg，Z 与轮组移动质量约 33.70 kg，测量侧约 28.24 kg。与 v0.35 相比，新增连接板、导向、防坠支承、斜撑和钢罩后参考质量增加；不是实机称重，也不据此宣布达到单人搬运目标。缺项及模块质量见 mass_layout.json，拆分质量和便携性需样机验收。

本轮完成轮胎余量 9 姿态、Z 移动与立柱/防坠/停车件 7 位置、头部与斜撑 5 位置以及防护与旋转体的定向干涉检查。这些检查不覆盖所有零件组合、全连续扫掠、线缆及工具空间。每个自制件尺寸标作名义设计，按连接表审查后才能签发加工。

5 轮胎 轮辋和旋转驱动

5.1 轮胎规格

采用 Kenda K909 作为第一版轮胎依据，准确目录料号为 109090301B0；目录给出 8×2 / 200×50、BLK 4P TT、光面花纹和 50 psi。K909 同名花纹也有其他尺寸，采购时应同时核对料号、胎侧、内胎和轮辋，不以搜索标题中的“K909”作为一致性证据。Kenda K909 原厂规格

胎压、轮载和接触压强分别记录。胎压是轮胎内部气压；轮载是轮胎对试样的法向力；平均接触压强为 N/A，其中 A 是该轮载、胎压、温度和表面条件下的真实接触面积。N=100 N、目标平均压强 0.5 MPa 对应 A=200 mm²，1 MPa 对应 A=100 mm²，只是面积需求量级。不能用胎压代替接触压强，也不能预先用 A=N/胎压认定轮印。

轮胎冷却后气压会变化。以 20 ℃表压 0.345 MPa 为起点，理想恒容比较在−20 ℃、−30 ℃分别约 0.284、0.269 MPa；实际还受轮胎体积和温度梯度影响。每次记录同一状态下的实测胎压与温度。回温过程也应检查压力，冷态补气不能忽略回温后的压力增加。

5.2 轮辋和轴接口

优先比较成熟匹配轮辋加定制传动转接件。公开 200×50 轮辋例 WHL-220F 为分体铝轮辋、10 mm 自由轴和 6200Z 轴承，与现有 20 mm 主动轴不直接兼容。该例用于暴露接口差异，尚未选为本机轮辋。供应商匹配轮辋示例

取得轮辋后需确认胎圈、内胎/气门嘴空间、轴向宽度、法兰或键连接方式、许用转矩、速度/载荷条件、轴向限位及平衡能力。压力轮辋沿用成熟配套结构；传动转接件独立设计。没有实物和准确图时不从“200×50”反推胎圈、螺栓孔或轮辋壁厚。

5.3 速度与动力量级

名义Ø200 mm 轮胎实现 60 km/h 胎面线速度，轮速约 1592 r/min。Fx=100 N 时，名义轮转矩 10 N·m，理想摩擦功率约 1.67 kW。旧 1:1 传动在效率假设 0.90 下需约 11.11 N·m 电机转矩，超过参考电机 9.8 N·m 额定值；首选比较传动比 i=电机转速/轮速=1.5，电机约 2387 r/min，稳态摩擦项约 7.41 N·m。低温损耗、实际峰值和完整驱动限制仍需加入。SENYDA 参考电机厂家页

参考电机 SYD143-0310L30 的厂家页保存资料为 3.1 kW、3000 r/min、9.8 N·m、无制动转子惯量 6.69×10^{-4} kg·m²、质量 10.5 kg。上述规格不等于整轮驱动已配套。轮胎、轮毂、带轮和轴的实际惯量还需由实测或准确几何质量取得。

悬空加减速仍对机架施加反力矩。以整轮惯量 0.01 kg·m²、i=1.5 为情景，60 km/h 对应的轮与电机部分动能约 160 J；0.25 s 加速时该部分反力矩约 7.34 N·m，1 s 时约 1.83 N·m。情景不含独立带轮、皮带及低温损耗，不能作为允许加速时间。1 g 质量偏心于 0.1 m 半径，在此轮速下激振力约 2.78 N，说明轮组同心和平衡会影响低轮载稳定性。本轮动力比较

高速资格逐级建立：先不接触低速空转，检查跳动、紧固、平衡和护罩；再增加轮速；接触测试从低速、短时、低轮载开始。最高允许轮速应由整轮、轮辋、轴承、传动、护罩和样机测试共同确定。

6 下压 反力与稳定

6.1 下压机构的实际作用

电动升降和测力反馈调节轮组垂向位置，实际法向力由自重、升降支承力、动态惯性和接触刚度共同形成。执行器不能凭空产生对地反力。开放机架中，试样对轮胎的向上力 N 减小四脚压力；准静态竖向平衡为：

$$\Sigma R_{zi} = Mg - N$$

因此主机质量、配重、轮载和脚底抗滑彼此相关。即使首版 N 只有 50—100 N，升降机构仍要托举移动总成。旧移动模型 43.69 kg 时，N=50 N、100 N 对应的理想托举力约 378、328 N；新 v0.36 所列移动模型 33.70 kg，对应约 280、230 N，实际会随缺项和配置改变。换成小轮载不能把升降机构、制动器或支承连接只按 50 N 选型。

慢速下放和反馈加载需要接触力、Z 位置、速度与限位配合。以系统等效刚度 200 N/mm、接触速度 1 mm/s、50 ms 延迟为情景，延迟期间就可能增加约 10 N 接触力。该关系用于确定预验证内容；实际峰值还取决于惯性、停止过程和轮胎/雪层变形。

悬挂总成需要掉电保持和机械维修支承。旧 43.69 kg 移动模型下降 10 mm 的重力势能约 4.28 J，落下后接触峰值不能仅由静载计算。防坠机构的冷态保持能力、允许锁紧/释放顺序及试验方法要进入供货验收。

6.2 脚垫 配重与正向约束

脚垫提供摩擦，配重增加脚底法向力；它们都不能消除湿冷金属、霜、冰粒和局部不平带来的变化。配重宜低置、对称、分块并机械保留，搬运前拆除。

仅看净平移时，所需总质量的比较关系为：

$$M \geq \frac{N + \frac{k|F_x|}{\mu_{foot}}}{g}$$

其中 k=1.5 只是本轮比较余量，μfoot 需要实测。N=Fx=100 N 时，μfoot 假设 0.10、0.15、0.20 分别要求总质量约 163、112、87 kg。该表说明“加一点配重”是否足够由实际脚底条件决定，不能由轮载大小单独判断。轮胎与配重比较

附近换点导致偏心，还需检查偏航和倾覆。Y 偏置 150 mm、Fx=100 N 会产生 15 N·m 偏航力矩；旧模型的四脚等刚度情景得到的充分摩擦条件约 0.181，已计入假设 1.5 余量。它不是实测脚垫性能，也未覆盖某一脚悬空或不同脚底摩擦。静力与偏心比较

若采用卡固，应从固定底座连接到独立承力构件，并校核该构件、卡具及力矩路径。薄不锈钢面层不能默认承受拉力或剪力；夹住一块会随设备一起移动的板，仍然只能依靠这块板与地面间的摩擦。任何正向约束都应位于主测量链上游，不能绕过主传感器锁住测量轮组。

6.3 闭合试样底板的比较路线

备选路线把可拆试件底板连接到设备反力框。稳定接触时，轮载和纵向力可在框架内部形成闭合力路，减小依靠地面摩擦和配重的需求；悬空加减速反力矩、整机地面压力与动态稳定仍需处理。

代价是必须在底板上制备或固定试件，不能直接测试任意位置的大面积铺雪。该路线仅作为比较项，当前没有替代开放地面主路线。如后续箱底条件或搬运质量无法满足开放路线，再依据试件代表性、反力闭合和总成本决定是否转向。

7 垂向保持与防坠

升降轴需要托举移动总成，不能只按 50—100 N 试验轮载选推力。本轮参考移动质量 33.70 kg，悬空托举约 330.5 N；试验接触后上托需求减去接触轮载。导轨摩擦、冷态阻力、加速度、实际缺项和执行器故障最大推力另行加入。

本轮划分三种职责。电动执行器负责正常升降和力反馈；独立失能接合的直杆防坠件负责保持及经证明的异常下落制停；完全抬起后的手动停车插销负责断能检修和运输承托。定位销、丝杠自锁或电机保持制动器均不能自动替代经过动态验证的防坠件。

停车插销不穿过精密防坠杆，使用独立 8mm 厚停车条。停车条孔在正常坐标 Z710，抬高 80mm 后与固定叉耳 Z790 孔重合；Ø10 销在图中正常测试姿态保持退出。插销只能在零转速、执行器托住、完全抬起且对孔确认后插入。释放顺序为执行器先接管，再拔销；禁止插销未退时驱动下降。

静态按移动自重计算，Ø10 双剪停车销名义平均剪应力约 2.10 MPa，8mm 条板名义孔承压约 4.13 MPa。这只是需求量级；销弯曲、叉耳间隙、孔边距、焊缝、冲击、材料和低温韧性仍要复核。停车销不是动态接住下落的设计。

防坠件需由供应商给出静态容量、动态捕捉能力、允许下降速度、响应/接合距离、杆件硬度和表面、安装对中、释放顺序、状态检测、寿命和−30℃能力。公开常规 SITEMA 防坠件资料的温度条件不能直接用于本机冷态认证，因此图中仍为采购包络，不冻结型号或虚构安装孔。SITEMA 原厂技术入口

对自由下落间隙 d、制停距离 s，比较式为平均总制停力 Favg = W·(1+d/s)，峰值另定。connection_calculations.json 列出 0.5—10mm 下落及 1—5mm 制停的 15 个情景。厂家须根据真实响应、弹性与减速度复核支架和整条反力链，不能拿静态额定保持力当成动态制停能力。实物防坠件过大或不能在冷态工作时，先调整该模块，不降低这一功能要求。

8 传感 采集与低温计量

主测力方向采用能直接读取纵向力和法向力的多轴测力方案。六轴候选应按同时出现的力和力矩组合选型，并取得安装面、采集器、校准矩阵及冷态性能资料。传感器安装距离会放大重心偏置与接触力产生的力矩。

当前 M3725A 只作为量程比较资料：原厂单页列 Fx/Fy 200 N、Fz 400 N、力矩 50 N·m、非线性 0.5%FS、工作−40…100 ℃、补偿 10…70 ℃。其工作范围覆盖−30 ℃，补偿范围没有覆盖；冷态零点、灵敏度及解耦误差需要实测或另选可提供冷态性能的产品。SRI M3725A 原厂单页

量程也影响低力分辨能力。200 N 量程的 0.5%FS 非线性量级是 1 N。若 N=50 N、μ=0.1，Fx 约 5 N，这一单项量级已占信号 20%；它不是完整误差预算，却说明不能在未校准前承诺±0.2 N 整机精度。旧轮架 Fx=150 N 扩展时计算 My 约 56.3 N·m，也超过候选 50 N·m 标称力矩范围。新轮布局完成后需要重新核对力矩组合。本轮信号量级比较

新 v0.36 布局在|Fx|=100 N 比较中得到|My|约 57.82 N·m，首版 100 N 纵向力情景也超过原 50 N·m 候选。软件调零只改数值基线，不释放真实容量。因此 M3725A 不冻结为本机型号；新询价要求先按 Fx 至少 200 N、Fz 至少 500 N、Mx/My 至少 100 N·m 的量级比较，并核实同时受力的复合容量、冷态校准和误差预算。更大量程是否影响低力识别，需要与传感器结构和标定一同解决。本轮传感器容量比较

采集暂以主力、轮速和 Z 信号 1 kHz 同步记录为设计目标，温度记录较慢。实际传感器输出率、模拟/数字带宽、滤波、抗混叠、通信抖动和时间戳都应单独确认。上位机每秒刷新 1000 次不能代替有效 1 kHz 采样。NI 动态采集原理说明

校准至少覆盖室温与目标冷态、悬空零点、若干纵向力和轮载点、双向受力、载荷组合及重复装配。校准参考器具、砝码或加载装置应有可追溯资料。试样没有接触时做全测量链零点检查，换轮、拆装、碰撞或温度变化后按规定复校。

先由实验线给出需要分辨的最小抗滑变化，再分配误差预算到传感器、零漂、安装、标定、时间同步、力矩耦合和数据处理。额定量程、分辨率和采样率各自满足并不代表设备能分辨目标差异。

9 控制联锁与故障退出

电脑设定和记录，箱外控制器执行实时控制，独立硬接线保护处理急停、罩壳状态、超速和垂向保持。控制器不依赖 USB 在线才能安全退出。此交付包含功能级接线图和端子信号表；供电电压、电流、线径、断路器、实际 STO/制动端子及安全等级由厂家按选定器件完成电气图。

阶段	进入条件	动作和数据
断能装样和换点	零速确认，隔离转动能源，垂向可靠承托	换 Y 位置，定位销完全进入，再夹紧两螺杆；记录位置
接管垂向载荷	传感器、执行器和保护诊断正常	执行器先托住，停车销退出，然后按采购防坠件时序释放
悬空加速	罩壳闭合并锁住，Y 锁定，轮胎离面	限定斜率升速并记录同温度同速基线

阶段	进入条件	动作和数据
缓接触与稳态	Z 位置、限力和传感数据有效	缓降接触，维持 50—100 N；载荷和速度稳定才标记有效窗
正常结束	执行器及传感链正常	先卸载抬轮，再受控减速；持续记录，不以指令零速替代实测零速
保持和断能	真实零速，独立保持已接管	需要检修时进入抬起停车位置、插销确认，再隔离电源
故障或失电	任一保护条件不满足	撤旋转转矩许可，垂向防坠接管；罩壳保持锁住，防止自动重启

独立保护输入包括双通道急停、防护罩闭合/锁定、轮轴真实零速/超速、Y 定位销到位、两夹紧位置确认、停车销退出、Z 上下限位、防坠接合/释放反馈及传感故障。夹紧限位只证明机构位置，夹持力仍要用装配程序和保持力试验确认。故障保持锁定，人工排除、复位并重新使能后才允许运行。

断电不保证自动抬轮，撤转矩也不保证立即停止。旋转仍可能滑行；罩壳解锁采用经验证的零速监视，不能仅延时几秒。正常结束、通信失联、传感断线、超力、超速、Z 限位、防坠异常和全机失电分别执行验收，不把同一停机命令作为所有故障的答案。

两套护罩均连在主传感器下游测量组，避免固定罩壳跨接测力链。轮胎罩下部留测试开口；名义开口底面比名义试样面高 20mm，但雪粒堆积、试样起伏及沉陷可能改变间距。制作前检查飞散方向和开口遮挡，验收中检查罩壳是否碰触试样。观察采用带防护的相机位置；若开观察窗，窗口、连接和低温冲击能力单独验收。

1.5mm 钢板只用于本轮布置和重量估算。压力轮辋失效、轮胎碎片、松脱紧固件、皮带和完整旋转体的能量与轨迹都要用于防护验证；不能用部分转子动能直接给罩壳发放“可承受”结论。DGUV 护罩抗冲击研究

10 重复接触 表面变化与热效应

原地转轮会持续作用于同一小块表面，雪层压实、磨蚀、碎粒堆积、融化/再冻结和轮胎升温会改变结果。有效窗口应同时说明时间、轮载和速度；测试前后记录表面照片、轮印/磨痕、温度、深度变化和材料状态。

Fx=50 N、60 km/h、5 s 的机械摩擦功约 4.17 kJ；Fx=100 N 时约 8.33 kJ。多少热进入雪/冰、轮胎和空气尚未确定，不能把总机械功全部换算成融冰量。本轮摩擦功比较

相邻点的间距由磨痕尺寸、碎粒影响和重复试验结果决定，50 mm 胎面宽度不等于只需 50 mm 换点。测试头移位后重新锁紧、检查垂向零点和偏心稳定；较远点位通过停机、解除配置并搬运实现。轮胎换点和试样制备方案应共同记录，避免同一磨损区域被当作独立重复样本。

11 拆装搬运与现场复装

机架采用焊接底框、焊接顶框、四根可拆立柱和两根可拆斜撑。换附近测点只抬轮、停转、解除 Y 锁定、手动移位并重新锁定；远处测区停机后拆分搬运。配重和允许的外部止挡单独拆装，不连接薄不锈钢面层或测量组。

拆卸前使轮胎停转、隔离能源，并把 Z 移动组落到独立可靠的临时承托上或完全抬起插入检修销。不得先松主传感器或立柱螺栓，再让人手托住轮组。先卸配重和外接约束，断开带编号接头；再拆独立承托

的测量组、Z/Y 模块、斜撑、顶框和立柱。大于实际人员可搬质量的模块使用台车或两人协作，尚不承诺整机或完整头部单人提走。

端板、定位面、轴承和主传感器装配面成套标识。运输保护轮胎、气门嘴、轴端和接头，所有定位销和防松件有防丢措施。到外场后重新检查地基、支脚反力、锁紧、对中、跳动、罩壳、穿线及供电接地，再进行力标定和悬空基线。重复组装后的计量一致性属于验收项。

12 关键接口与供货边界

接口编号	两侧对象	本轮描述	加工/运行前需补齐
IF01	轮胎—内胎—轮辋	K909 200×50 TT、50 psi 规格依据	匹配轮辋图、胎圈/气门嘴、低温及速度/载荷条件
IF02	轮辋—主动轴	成熟轮辋加独立传动转接件的比较方向	实际轴径、法兰/键/夹紧方式、许用转矩与轴向限位
IF03	轴—轴承—桥梁	图纸给出同一坐标系中的装配位置	配合、公差、同轴度、预紧与冷态间隙
IF04	测量轮组—主传感器	力路经过主传感器，无外部旁路	准确型号、两侧安装面、量程组合、解耦矩阵
IF05	Z 驱动—保持机构	电动升降、反馈轮载、掉电保持	冷态制动版本、接管/释放时序、最大推力和限力
IF06	机架—环境箱底	四脚站在局部金属区；可比较分载板	地板局部承载、下部支承、脚垫实测和固定许可
IF07	底座—配重/卡固	低位可拆配重；卡固位于测量链上游	固定点能力、装拆防误、抗滑/抗倾覆检查
IF08	箱内—箱外控制	经穿线孔连接电源、传感和控制	穿线孔、接头、线长、密封、耐温、接地与屏蔽
IF09	本地控制—电脑	设置、监控、原始记录和导出	通信协议、状态、超时处理、时间戳与文件格式
IF10	设备—试样	独立地面试样；轮胎缓接触	厚度、可用 Z 行程、边界、沉陷与新点间距

接口表采用 NASA 公开接口大纲的组织方式，尤其明确坐标、单位、责任及机械、电气、信号、软件和环境条件；本项目只保留与该小型科研设备有关的内容。NASA 接口要求大纲

委托厂家时需要说明：哪些采购件由厂家选型供货，哪些由课题组提供；谁完成轮毂转接详细设计、机架加工图、传感器配套、电气保护和软件；哪些冷态标定及样机测试包含在报价内。交付需包含可编辑设计资料、BOM、接线图、程序/软件及配置、校准文件、验收原始记录、维修与运输说明。

报价分列轮胎/轮辋与驱动、升降/保持、测力/采集、机械加工/装配、电控、软件、低温适配、标定、调试、税运与备件。当前没有完整厂家报价，不把商品搜索卡片最低价作为整套预算已满足的证据。

13 图纸与厂家制作任务

本轮统一 A3 图册 12 页，机械视图由同一参数化 CAD 生成。图号对应：ISF-000 总装，010 支脚/地板，020 立柱端接，100 轮组传动，110 共同轮架，120 轮轴接口，200 测量链，210 换点锁定，220 垂向防坠停车，230 防护及功能接线，300 控制时序，400 搬运验收。8 份 DXF 包含 4 份新增自制件名义孔系/轮廓；轮辋、主传感器、导轨、执行器、防坠件的采购接口不猜孔。STEP 保留整体和分模块，源代码、参数、BOM 和计算可以复建。

交厂家前以 manufacturer_tasks.csv 登记负责人、前置输入、交付物和验收。现有图纸足以说明构型、连接原理和询价工作边界；正式签发加工还需要冻结采购件、完善轴/轮辋传扭和轴向保持尺寸链、结构/焊缝和防护复核、完成电气详图并由设计校核责任人签署。厂家不可直接把采购包络或带待定孔位的图当成成品零件制造。

紧固件表明确数量、孔径和安装位置，但不根据螺纹直径随手给统一扭矩。厂家提供螺栓材料/低温韧性、螺母/垫片、防松方案、润滑表面、目标预紧、实际扭矩工艺、有效啮合和复检周期。机架通孔采用螺母，不用薄壁管攻牙代替；钢铝接触、温差及冷热循环列入复检。

14 验收与下一步发布条件

编号	验收输入和步骤	接受条件或需提交的记录
V01 文件与装配	核 BOM、图号、CAD、孔系、材料和器件证书；手动全行程	同版资料、装配可达、无未解释干涉；厂家具名核对记录
V02 机架及连接	实际称重和 CG、四脚受力，额定/端部姿态及已批准异常载荷	无失稳、不可接受变形和松动；提交实测载荷、位移及复装检查
V03 Y 锁定	13 位置分别插销夹紧，施加经批准的侧向及偏心载荷	无脱销或超过误差预算的滑移；夹紧和位置联锁误用试验记录
V04 Z 与防坠	先低能静态保持，再由厂家受控验证动态捕捉、全机失电与接管	无失控下落；真实接合时间、距离、峰值和损伤满足冻结限值；冷态重复
V05 停车销	完全抬起对孔、插入和独立承托验证	销到位可确认；插销未退不准下降；不得当动态制停件测试
V06 旋转和防护	准确整轮/轮辋确认、低速空转、平衡、逐级升速和防护专项验证	真轮速、振动、温升、紧固和飞散防护在批准范围；开罩不能使能，未零速不能解锁
V07 测量链	追溯力标定、组合载荷、悬空基线、时间同步与丢帧检查	达到实验线确认的误差预算；给原始数据、矩阵及版本，不能只给采样率
V08 冷态和接触	−20/−30℃浸泡，低速低载短窗逐级组合	冷态轮胎/胎压、力控、数据与保护均满足冻结条件，再开放更高速度
V09 参考仪器	同表面和匹配工况与独立仪器比对，区分接触方法差异	建立研究可用范围和重复性；不要求不同原理的数值未经解释完全相同

具体允许误差、位移、振动、过冲和停止距离在相应试验前冻结；未冻结或未实测的项目不得填“通过”。本轮软件验证完成的是文件可读、同源尺寸、STEP 回读、定向空间检查和解析复算。60km/h、150N 扩展、低温整轮高速及动态防坠均保持待验收。

15 回应地板 反力 支撑与搬运问题

提出的问题	当前方案能回答到哪里	还需取得的证据
能否放进环境箱	名义尺寸与布置有余量，可拆分搬入	门净尺寸、门槛、穿线、操作与风口空间
薄不锈钢底板能否承载	已算局部脚底力与压力，不能用 500 kg/m²直接判点载荷	板厚、下部支承和厂家局部承载条件
轮载是否受反力限制	是；开放结构遵循四脚合力 Mg−N	实机质量、脚底状态、固定构件与动态组合
配重能否解决	可改善抗滑和倾覆，但同时增加地板与运输负担	实际脚底摩擦、所需总质量、配重连接
卡住是否可行	独立结构约束可比较，薄面层不能当确认锚点	卡具、承力构件、力矩路径和箱体许可
加减速是否仍需稳固支撑	需要；首版悬空加速，反力矩和不平衡仍存在	整轮惯量、斜率、振动、紧固与实测稳定性
小轮载是否能让设备很轻	有帮助，但不直接消除移动自重、测力灵敏度与低温保护需求	功能满足后的真实模块质量和搬运验证
能否去海拉尔/公路院	结构允许拆分运输的设计方向	现场地面、固定、供电、温度、运输和复校条件

16 参照资料和本轮输入

模板检索与采用方式保存在 template_references.json。本方案采用 ISO 官方公开摘要的图纸组织范围，以及 NASA 公开大纲的需求追溯、接口描述和验收组织；没有复制整套航天项目流程。

工程输入为 v0.31 旧装配与控制合同、v0.32 压力/稳定比较、v0.33 充气轮规格单和 v0.34 系统复核。历史质量与旧局部有限元只作为参考比较；本轮新参数、模型和几何检查在交付索引中单独列出。修改轮径、轮载、传动、接口或结构后，应重算受影响结果并同步图纸和方案版本。