冰雪表面原地轮胎摩擦试验设备设计方案

版本：v0.35 | 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。

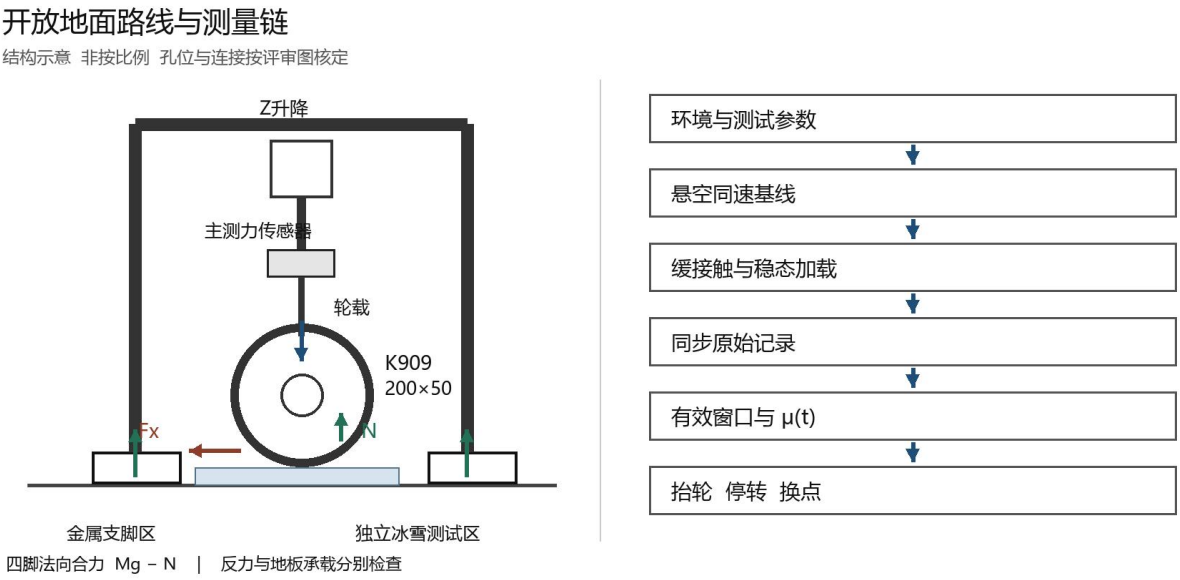


图 1 开放地面支架与直接测力路径

4 结构与参数组织

设备分为固定底座、手动位置调节模块、Z 升降与保持模块、测量轮组、旋转驱动、传感采集、保护罩与外置控制柜。底座承担对地反力；测量轮组内的受力通过主传感器回到升降机构；电机、轴承、传动和轮胎之间必须保持可说明的力路径。

新轮架按 K909 的名义Ø200×50 建立评审几何，并设置Ø220×70 的胎体留空比较包络。该留空值是本轮布置假设，不是原厂尺寸，也不覆盖全部轮毂、气门嘴、皮带轮和工具空间。实际安装仍需匹配轮辋和实物轮胎尺寸。

本轮总装尺寸、桥梁净距、轮轴坐标、支脚位置、调节行程和材料截面统一从 parameters.json 读取；图纸尺寸和模型应与同一参数文件对应。图中外形占位件用于核查空间，不作为采购件的加工图。设计、校核和审核栏在相应责任人完成审查后签署。

新布局项目	v0.35 评审参数	定义和状态
正常总装包络	750×900×940 mm	本轮模型的外包络，尚不含全部护罩与线缆
四脚中心	X=±300 mm，Y=±375 mm	Z=0 为金属地面；每块脚板 150×150 mm
框架顶与截面	顶面 Z=900 mm；50×50×3 mm	截面为当前建模候选，连接与材料需详细设计
正常轮轴	Z=180 mm	名义Ø200 轮对应 Z=80 mm 试样面，未计轮胎和雪层变形
邻近换点	Y=−150…+150 mm	手动调节，停机后操作，测试时锁紧
Z 布置比较	−40…+80 mm 位移	用于空间检查；实际有效行程尚未验收

新布局项目	v0.35 评审参数	定义和状态
轮架	两侧内面 Y=±76 mm；桥梁 Z=335…355 mm	放宽轴向净空间，并将旧低桥梁上移
轴与轴承	Ø20 mm 轴；轴承中心 Y=±65 mm	轴承配合、精度、冷态型号和轮辋传动接口待核定
传动	电机带轮 30T，轮端 45T，5 mm 节距	i=1.5 评审候选；带长、张紧和低温系列未冻结
电机轴	X=−160 mm，Z=350 mm	参考 143 mm 法兰电机的布置位置

新 v0.35 模型列入 63 个结构或器件包络，参考质量合计 85.11 kg，参考重心约[X=5.66，Y=−28.64，Z=467.95] mm；移动总成约 24.71 kg，测量侧约 22.04 kg。此合计缺全部紧固件和连接板、完整包容/皮带护罩、线缆接头、准确执行器/传感器/制动器版本以及可选配重和分载板。它只能用于本轮布局比较，不能据此认定实机重量或减重已经完成。模块拆分还需独立承托与拆装顺序。本轮质量与布置

旧 v0.31 的参考总装包络为 750×900×957 mm，模型质量约 100.15 kg，测量轮组约 29.10 kg，Z 与轮组的移动质量约 43.69 kg。这些是旧实心轮模型比较值；新轮、轮辋、转接件、线缆和现场配重会改变质量和重心。最终加工、承载和搬运验收使用实际称重结果。

旧Ø125 轮的共同支承梁与名义Ø200×50 轮胎包络已经发生重叠，新方案必须调整局部桥梁、轴承和测量轮组。不能只在旧总装图片上放大轮胎后交给厂家。

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 v0.35 所列移动模型 24.71 kg，对应约 192、142 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 环境箱地板与安装条件

环境箱名义尺寸 6×4×2.5 m，用户提供承载 500 kg/m²，对应均布压力约 4.90 kPa。该值不能直接替代单脚点载荷、薄面层跨距或抗拔能力。需要知道箱底面板厚度、下方承力结构与支承间距、允许局部力、允许接触压强和对地固定规则。

旧参考质量 100.15 kg、四块 150×150 mm 脚板的总面积只有 0.09 m²。轮胎悬空时脚底平均压力约 10.9 kPa；旧极限位置比较中单脚法向力约 384 N，对名义脚面积的平均压力约 17.1 kPa。它们高于 4.90 kPa 这一均布值，但两种承载定义不同，当前不能据此判定地板必然不合格，也不能判定可直接放置。地板载荷比较

新 v0.35 总成须按当前质量、重心和新增缺项重新计算。旧 384 N 是旧几何极限姿态的比较结果，不是新总装单脚设计限值。旧轮架局部有限元也不适用于本轮上移加宽的桥梁和轴承布置。

本轮新布局的 54 个静态参考情景得到最小脚法向力约 120.7 N、最大约 264.1 N；按 150×150 mm 名义面积计算最大脚底平均压力约 11.74 kPa。计入偏心作用的充分脚底摩擦分配情景，采用 1.5 比较系数后的最大所需μ约 0.266。结果基于尚不完整的 85.11 kg 参考质量与规定点支承模型，不能直接放行地板或脚垫；增加缺项、配重、改变重心或脚板后重新核算。本轮新布局核算

分载板是可行的改进方向，设计需同时检查板的自重、弯曲、实际接触、箱底支承和搬运空间。若只用 384 N 除以 4.90 kPa，等效方板边长约 280 mm；这个算术值不包含板弯曲和地板结构，不能直接发布为支脚最终尺寸。

总地板荷载还包括冰雪、分载板、配重、推车、制雪/压实设备和进入箱内的人。以 24 m²、雪密度 500 kg/m³为量级例，5 cm 和 8 cm 雪分别约 600、960 kg；密度尚未作为实验因素冻结。减小轮载会让更多设备重量回到支脚上，不会降低设备与试样对箱底的总重力。

运行布置还需确认门净宽、门槛、搬入路线、穿线孔、排水、空气循环和风口位置。电缆通过合规穿线接口，不能依赖把门夹住留缝。现阶段穿线接口和厂家允许的地板条件都列为待核实项。

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 v0.35 布局在|Fx|=100 N 比较中得到|My|约 56.39 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 故障退出与防护

箱外电脑负责参数设定、曲线显示、测试记录和数据导出；本地控制器执行升降、轮速和轮载控制。旋转驱动、升降驱动和独立保护有明确硬件边界，上位机通信中断不能让设备继续执行未知指令。

阶段	动作	本地许可条件与数据
静止准备	保持垂向总成、检查状态	防护关闭、传感正常、位置锁紧、配重/固定配置确认
轮胎抬离	升降驱动接管载荷，再释放保持机构	按实际制动器时序确认载荷已被接管
悬空加速	采用限定斜率建立轮速	不接触试样，保存同温度同速基线
缓慢接触	限速下降、识别接触、切入加载控制	接触力有效、无饱和、Z 限位和转矩保护有效
有效测量	维持轮载与轮速、保存原始数据	稳定条件满足才标记有效区间
正常结束	卸载并抬轮，随后减速停转	卸载能力正常、继续保存结束数据
垂向保持	保持机构接管，再撤升降驱动许可	保持状态确认，防止移动总成下落

阶段	动作	本地许可条件与数据
故障退出	执行规定的驱动禁能和保持动作	锁定故障；保持防护关闭，不自动复位或重启

故障状态不能假设还有能力自动抬轮，也不能假设撤销电机转矩后轮胎立即静止。STO 的作用是避免驱动继续施加转矩，惯性和重力需由其他结构和过程处理；检修还需要实际的电源隔离和消能措施。
Synapticon STO 官方说明

重点保护项目包括轮速超限、接触力超限、垂向位置超限、传感饱和/断线、力和转矩不一致、通信失联、保持机构异常、意外复位、配重松动和防护打开。正常轮载 50—100 N 不是自动保护阈值；最大执行器能力和停止过冲仍需核实后设置独立上限。

护罩覆盖旋转轮胎、带轮、皮带和接头；观察窗与开口布局应避免让飞散冰粒、轮胎碎片或松脱件直接射向人员。低温、电缆弯曲、凝露、轴承润滑和皮带冷态性能按准确器件型号评价。SKF 技术文章说明低温润滑会影响启动和摩擦，但不为本机指定润滑脂牌号。SKF 低温轴承润滑说明

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 搬运 拆装与外场使用

当前便携目标定义为模块拆分运输，而非整机单人提起。旧模型约 100 kg，29 kg 轮组和 44 kg 垂向移动总成说明仍需规划拆分顺序和辅助搬运。模块质量只是 CAD 参考值，搬运把手、吊点、重心、抓握空间和人员能力需实物验证。

新布局的参考模块质量为底座 11.95 kg、立柱 13.19 kg、顶部 10.80 kg、手动调节 7.34 kg、Z 模块 14.15 kg、驱动 11.61 kg、轮架 7.86 kg、转子 1.57 kg、支脚 5.63 kg，另有传感器和局部防护件。模块分组不等于已经具备独立可提的机械连接；拆装要先支承移动总成，再逐项解除连接，实际打包以复装定位和搬运方式为准。本轮模块质量

运输时轮组停转并隔离供电，垂向总成有机械支承；先拆配重，后按明确顺序拆轮组和支架。保护传感器安装面、气门嘴、轴和线缆接头，紧固件及定位件成套标识。重复装配后复核定位、锁紧、跳动、空转基线和测力零点，不能以“装上了”代替复校。

箱内裸金属支脚条件不能直接移植到海拉尔或公路院。外场硬地面、冰雪厚度、地基承载、供电/接地、环境温度、风、交通路线、保温与干燥空间以及现场固定方式需要另列现场条件表。设备完成箱内验收后，再按实际场地和配置建立可用范围。

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 图纸与文件组织

统一图册采用 ISF-000 总装、ISF-010 布置、ISF-100 轮架、ISF-110 旋转接口、ISF-120 升降、ISF-200 传感控制、ISF-300 拆装运输的图号组织，包含总装视图、地面/支脚布局、轮组与轮胎留空、升降/反力

路径、关键接口、控制/采集与状态机、拆装/运输以及图纸待核定项。机械视图用尺寸线说明几何；原理图说明力路和信号，不伪装成精确加工视图。

图册采用统一 A3 横向图幅、图框、图号和版本字段，标题栏包含图名、单位、比例、页码与交付状态。这一组织方式参考 ISO 7200 和 ISO 5457 公开摘要；本轮未依据付费标准全文进行逐条符合性检查。ISO 7200、ISO 5457

所有文件有交付索引和校验记录。STEP 用于通用三维交换；二维图册用于审阅；参数、生成脚本、计算输入和结果用于复算。加工图待办重点为实际轮毂、传感器安装面、轴承配合、焊接件工艺、公差链、紧固预紧、低温配合和防护强度。厂家不得在多个历史版本中自行拼接“最新总装”。

14 检查 样机验收和推进顺序

14.1 本轮交付检查

本轮对文件、几何、计算、资料和展示分别记录结果；实际完成状态由交付检查记录汇总。网页能打开只对应展示检查，结构静力计算只对应所用边界，既有局部有限元仍属于旧实心轮轮架证据。

检查类别	本轮内容	证据形式
文件一致性	当前图号、版本、参数、来源与索引对应	交付清单、哈希、链接检查
几何	新轮名义及留空包络、局部桥梁、极限位置	STEP 读取、净距/干涉结果、尺寸校验
解析计算	胎面速度、驱动转矩、反力、脚底压力和动力情景	计算脚本、输入与 JSON 结果
器件资料	轮胎规格、参考电机与传感器限制	原厂直接链接、适用性说明
文档	图号、单位、表格、图片及分页可读	Word/PDF 渲染与人工检查记录
网站	原网址、当前版本、历史入口及下载可用	部署结果、真实页面检查
样机与研究	等待制造、标定与实测	本轮不填写“通过”

14.2 样机验收矩阵

验收矩阵采用需求编号与方法、结果证据相对应的组织方式；验收输入和允许结果在测试前确认。NASA 要求验证矩阵

编号	输入与布置	方法与允许结果	记录/未完成项
V01	完整器件及加工件到货	核对型号、版本、关键尺寸、材料和整轮配套	实际 BOM、到货照片、尺寸记录
V02	断电，轮组手动转动与全行程	无非设计接触；限位、工具与线缆空间有效	间隙、行程、锁紧及拆装记录
V03	实际装配、各运输模块	称重与重心估计；搬运、把手、落地及复装演示	实际质量、人员/工具配置、复装耗时
V04	拟用脚垫/地板/分载板，含湿冷状态	核验地板局部承载；在规定力/力矩下无滑移或抬脚	地板确认、脚底数据、配置限制

编号	输入与布置	方法与允许结果	记录/未完成项
V05	室温静态及已知参考载荷	纵向力、轮载及力矩耦合校准；误差满足预定预算	原始校准、矩阵、残差及有效范围
V06	轮胎悬空、低速到逐级提高速度	检查跳动、平衡、温升、驱动损耗及机架运动	轮速、振动、空转转矩、紧固检查
V07	低速短时接触，从低轮载建立工况	验证接触识别、载荷稳定、过冲、结束和抬离	Fx/N/Z/状态全过程、最大过冲
V08	规定低能量故障注入布置	测试失联、超限、掉电保持、复位/重启；按预定状态退出	停止时间、保持/下落、故障日志
V09	−20 ℃、−30 ℃冷态，充分恒温	重复静态/空转/短接触；零漂与性能满足冷态预算	温度、胎压、冷态校准与损耗
V10	轮载、轮速、表面、温度的目标组合	在已验证配置下确认有效窗口、温升、稳定与防护	可用工况表；60 km/h 按阶段争取
V11	新点重复、拆装后重复、基准表面对照	重复性与最小可辨差异满足实验用途	原始重复数据、不确定度与对照报告

样机顺序为到货与断电检查 → 静态标定 → 悬空低速 → 低速接触 → 受控故障与保持 → 冷态适配 → 目标组合 → 研究重复性。保护试验先在低能量、可控布置下进行；只有前级证据满足后才扩大工况。NASA 验收计划大纲

14.3 下一阶段的六项工作

第一，冻结所需最小抗滑差异，完成主测力链和有效窗口定义。第二，核实箱底局部承载、穿线接口和可用固定方式，并做脚底湿冷抗滑的小规模验证。第三，取得匹配充气轮辋与实物，完成轮毂转接、旋转件惯量、平衡和新轮架详细接口。第四，闭合升降、低温保持、传感器冷态性能与故障参数。第五，实现本地控制和原始数据记录，验证时序与异常退出。第六，完成厂家加工图、样机逐级验收和运输复校。

本轮系统问题清单包含 124 项，按首版构型、样机运行、正式研究数据与未来拓展分级。方案中的待核定接口和上述六项工作对应其中的主要依赖；评审后按阻碍制造或有效测量的程度关闭问题。系统复核清单

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

提出的问题	当前方案能回答到哪里	还需取得的证据
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。