DOI:10.27055/j.1674-5590.2026.05.002

飞机油箱移动副冗余四足机器人运动学与穿越可行性分析

李双宝[1a],路志强[1b],彭文伶[2],刘国光[1c],寇力英[1d]
(1.中国民航大学 a.科技创新研究院;b.航空工程学院;c.交通科学与工程学院;d.理学院,天津 300300;
2.深圳航空有限责任公司,广东 深圳 518128)

摘 要: 针对传统油箱巡检四足机器人难以穿越检修口的问题,本文首先引入直线导轨并配合髋部翻转重构腿部自由度配置,使摆动腿在有限净空内分阶段完成穿越,而不将检修口边框作为支撑点;其次,开展整体结构设计、腿部机构设计与运动学建模,并在连杆尺寸和关节限位相同的条件下,对引入移动副前后的检修口远侧落足可达性及构型冗余进行分析;最后,在固定阶段顺序下进行穿越轨迹规划,并对候选穿越序列开展逐帧审计。结果表明,引入移动副后,四腿平均离散落足点可达率由50.0%提升至92.9%,检修口远侧落足区面积覆盖率由约26%提升至约96%,构型切换可为同一落足点提供姿态冗余;696帧候选穿越序列的最小检修口边框间隙为26.989 mm,最小静态稳定裕度(SSM,static stability margin)为9.034 mm,自碰撞距离始终为正,说明该分阶段穿越路径在本文数字模型与名义工况下具有数值可行性。研究结果可为飞机油箱巡检机器人以低接触风险穿越舱间检修口提供腿部机构设计与穿越规划依据。

关键词: 飞机油箱;四足机器人;移动副-转动副-转动副-转动副(PRRR)机构;落足可达性
中图分类号: V267;TP242.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-5590(2026)05-0014-10

Kinematics and traversal feasibility of a quadruped robot with prismatic-joint redundancy for aircraft fuel tanks

LI Shuangbao[1a], *LU Zhiqiang*[1b], *PENG Wenling*[2], *LIU Guoguang*[1c], *KOU Liying*[1d]
(1a. *Research Institute of Science and Technology Innovation*; 1b. *College of Aeronautical Engineering*; 1c. *College of Transportation Science and Engineering*; 1d. *College of Science*, *CAUC*, *Tianjin* 300300, *China*; 2. *Shenzhen Airlines Co., Ltd.*, *Shenzhen* 518128, *Guangdong*, *China*)

Abstract: To address the problem that conventional quadruped robots for fuel tank inspection can hardly traverse an inspection opening, this paper firstly introduces a linear guide rail and combines it with hip flipping to reconfigure the leg degree-of-freedom layout. The swing leg can thus complete the traversal in stages within the limited clearance without taking the inspection opening frame as a supporting point. Secondly, the overall structure and the leg mechanism are designed, and a kinematic model is established. Under identical link dimensions and joint limits, the reachability of footholds on the far side of the inspection opening and the configuration redundancy are then analyzed before and after the prismatic joint is introduced. Finally, the traversal trajectory is planned under a fixed stage sequence, and the candidate traversal sequence is audited frame by frame. The results show that, after the prismatic joint is introduced, the average reachability rate of discrete footholds of the four legs increases from 50.0% to 92.9%. The area coverage of the far-side foothold region of the inspection opening increases from about 26% to about 96%. Configuration switching can provide posture redundancy for the same foothold. For the 696-frame candidate traversal sequence, the minimum clearance from the inspection opening frame is 26.989 mm, and the minimum static stability margin (SSM) is 9.034 mm. The self-collision distance remains positive, indicating that the staged traversal path is numerically feasible under the digital model and nominal working conditions adopted in this study. The results can provide a basis for the leg mechanism design and traversal planning of aircraft fuel tank inspection robots that traverse inter-bay inspection openings with low contact risk.

Key words: aircraft fuel tanks; quadruped robot; prismatic-revolute-revolute-revolute (PRRR) mechanism; foothold reachability

收稿日期:2026-08-06; **修回日期:**2026-09-17 **基金项目:**天津市自然科学基金联合基金资助项目(25JCLMJC00630)
作者简介:李双宝(1978—),男,河北承德人,教授,博士,研究方向为飞机地面动力学与安全评估、机械系统非线性动力学.

民航飞机油箱内部桁条、肋板与腹板交错分布，空间狭窄且存在有毒、易燃油气，属于典型的密闭非结构化受限空间。人工进入检修不仅劳动强度大、视野受限，还面临中毒和爆炸风险[1-2]。在现行民航维修管理框架下，大型民航客机运行与维修单位须符合中国民用航空规章（CCAR，China Civil Aviation Regulations）的 CCAR-121-R8 和 CCAR-145-R4 关于维修责任、维修数据及维修实施的相关要求[3-4]。美国联邦航空管理局（FAA，Federal Aviation Administration）咨询通告（AC，advisory circular）25.981-1D 第 7.1.1、7.1.2 节要求充分考虑燃油箱内可燃油气及潜在点火源，第 9.3.4 节将借助线束、燃油探头作支撑所造成的损伤列为可预见的维修损伤[5]；欧盟航空安全局（EASA，European Union Aviation Safety Agency）相关持续适航规则亦强调油箱进出、清洁作业、构型控制及线束保护[6]。据此，油箱巡检机器人通过肋板、腹板检修口时，应避免借助箱内精密结构支撑，并降低与检修口边框刮碰或冲击的风险。

针对航空受限空间检测，现有技术手段主要包括连续体（蛇形臂）机器人、移动式油箱巡检机器人、微型内窥装置和足式机器人。连续体（蛇形臂）机器人具有较好的狭窄空间可达性，但受基座、臂长、负载及稳定性限制[7-9]；移动式油箱巡检机器人可提升舱内检测覆盖能力，但仍受油箱内部非连续结构、狭窄通道和支撑稳定性约束[10]；微型内窥装置可进入狭小通道，但自主移动和检测载荷有限；足式机器人虽提升了箱内移动与遍历能力，仍难通过实际肋板、腹板检修口[11]。近年来，相关研究进一步向感知、规划与检测一体化发展[12-13]，但现有方法仍难以同时兼顾跨舱段移动、有限净空避碰与连续稳定支撑。从足式机器人腿部机构构型来看，除传统多转动副关节腿外，已有研究也采用移动副或可重构机构提高机器人运动性能与环境适应能力。Zhong 等[14]对四足机器人腿部机构的研究进行综述，将其归纳为移动副腿、关节腿和冗余关节腿等类型；Luo 等[15]研制了采用主动移动副驱动的 Kirin 四足机器人，利用直线驱动提高其动态运动中的负载能力；Xu 等[16]设计了一种具有可重构动平台的变胞并联腿机构，以提高足式机器人对非结构环境的适应能力。在受限空间检测机器人方面，张月等[17]面向风电叶片内部变截面、大坡度和多障碍环境设计了履带式内窥机器人；张铁等[18]针对气体绝缘金属封闭开关（GIS，gas insulated switchgear）内部检测设计了四足爬壁机器人，并开展了单腿运动学与轨迹规划研究；裴海珊等[19]针对狭小空间快速介入与准确探测需求，研究了多模块柔性检测机器人的运动规划方法。上述研究表明，受限空间检测机器人的机构形式和运动方式需根据具体作业空间与通行约束进行针对性设计。现有含移动副的腿机构主要面向腿长调节、动态运动、负载或地形适应，而针对狭窄检修口，通过腿根部纵向主动移动副平移完整转动关节腿链，以定向扩展检修口远侧落足工作空间的研究相对较少。

针对上述问题，本文设计了一种面向飞机油箱检修口的可重构四足巡检机器人腿部机构，并提出了相应的低接触风险穿越方法。具体地，在单腿中引入直线导轨移动副以扩展足端纵向工作空间；通过髋部翻转实现肘式与膝式构型切换，以调整膝部指向和腿部包络；在此基础上设计“收腿—翻转—前移—落腿”的单腿动作链及“全肘式—前膝后肘式—全膝式”的整机构型序列。围绕该方案，建立参数化正、逆运动学模型与准静态力学模型，从可达域、候选序列审计与虚拟样机仿真 3 个层面验证了机构及穿越动作的可行性。

1　飞机油箱检修口任务与模型

1.1　参数化作业场景

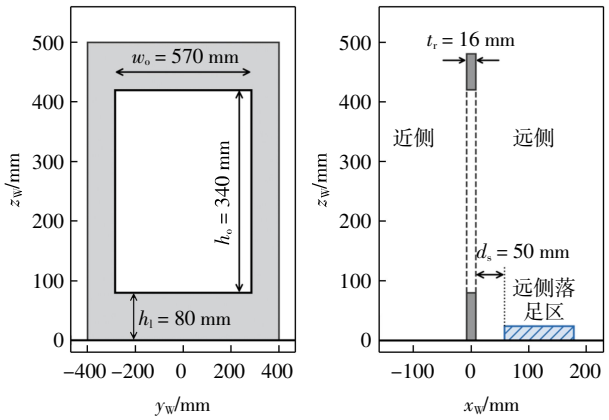
参考文献[2]，本文取检修口净宽 $w_o = 570$ mm、净高 $h_o = 340$ mm。由于目前尚无公开资料同时给出下沿高度和舱间检修口的尺寸，本文参考 B737-200 取上沿高度 $h_u = 420$ mm、下沿高度 $h_l = 80$ mm，净高 $h_o = h_u - h_l = 340$ mm。肋板厚度同样缺少公开数据，本文选取名义肋板厚度 $t_r = 16$ mm 作为仿真假设值。

世界坐标系{W}的 x_W 轴指向前进方向，y_W 轴向左，z_W 轴向上；肋板中面位于 $x_W = 0$ 处。足端球半径 $r_f = 12$ mm，故远侧落足区的足端球心高度取 12 mm。远侧落足区在 x_W 方向上自肋板远表面向外（即远侧安全距离）$d_s = 50$ mm 处开始，长 120 mm；左右两侧落足区的 $|y_W|$ 取值范围均为 100 ~ 220 mm。作业约束为：摆动腿可穿过检修口，但规划中不得将检修口边框作为落足或抓附对象，且至少保留 3 个支撑足。检修口边框间隙的规划阈值取15 mm，该值仅用于本文计算，而非民航维修标准限值。场景几何参数如图 1 所示。

1.2　四足机器人模型

机器人采用“四足移动平台+检测载荷接口”的总体布局。四足机构承担油箱下壁板行走、目标区域抵近及检修口穿越的任务，机身上部预留摄像、照明和轻量机械臂安装接口，以兼顾后续检测任务扩展。

每条腿由机身至足端依次布置直线导轨移动副、



(a)检修口几何参数定义　　(b)远侧落足区定义

图 1　检修口与远侧落足区的参数化定义

Fig.1　Parametric definition of the inspection opening and the far-side foothold region

髋偏航转动副、大腿俯仰转动副和小腿俯仰转动副，构成具有纵向伸缩与姿态重构能力的移动副–转动副–转动副–转动副(PRRR，prismatic–revolute–revolute–revolute)串联链，其结构如图 2 所示。

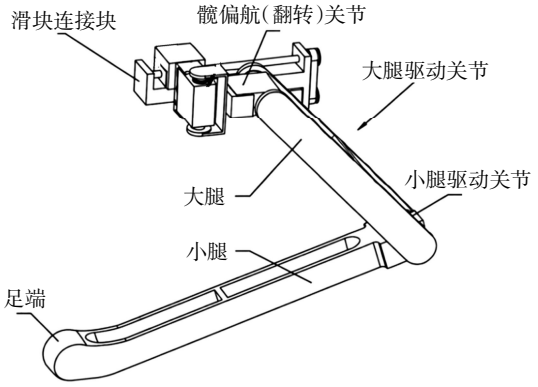


图 2　可重构 PRRR 机械腿结构

Fig.2　Structure of the reconfigurable PRRR leg

机器人各关节运动范围及腿部主要几何参数如表 1 所示。机身坐标系{B}固连于机身，原点取在机身基座参考点(base_link)，x_B 轴指向机身前方，y_B 轴向左，z_B 轴向上。导轨正方向统一定义为 x_B 轴正方向，并根据前、后腿的安装位置分别设置其位移区间。

表 1　PRRR 机械腿与作业环境主要参数

Tab.1　Main parameters of the PRRR leg and the working environment

参数	数值	参数	数值
导轨有效行程 s_{max}/mm	111	足端球半径 r_f/mm	12
髋偏航角 θ_1/(°)	[–165，165]	检修口下沿高度 h_l/mm	80
大腿俯仰关节角 θ_2/(°)	[–120，120]	检修口上沿高度 h_u/mm	420
小腿俯仰关节角 θ_3/(°)	[–120，120]	远侧安全距离 d_s/mm	50
第 i 条腿的大腿投影长度 l_{1i}/mm	200	整机仿真质量 m_b/kg	12.003
第 i 条腿的小腿投影长度 l_{2i}/mm	327	—	—

2　运动学建模

2.1　正运动学与雅可比矩阵

图 3 为按数字样机固定变换重建的 PRRR 腿关节轴向与坐标系。计算所用的固定基座统一机器人描述格式(URDF，unified robot description format)模型含 16 个单自由度关节，腿部几何参数、安装偏置与样机一致。记第 i 条腿的广义坐标为 $\boldsymbol{\gamma}_i=(s,\theta_1,\theta_2,\theta_3)$，其中 s 为导轨位移。将 4 条腿的广义坐标依次排列，得到整机关节构型 $\boldsymbol{q}=(\boldsymbol{\gamma}_1^{\mathrm{T}},\boldsymbol{\gamma}_2^{\mathrm{T}},\boldsymbol{\gamma}_3^{\mathrm{T}},\boldsymbol{\gamma}_4^{\mathrm{T}})^{\mathrm{T}}$。各关节局部坐标系在关节零位时与机身坐标系{B}各轴平行，$\boldsymbol{e}_x$、$\boldsymbol{e}_y$、$\boldsymbol{e}_z$ 分别为沿 x_B、y_B、z_B 轴方向的单位向量；$\boldsymbol{H}_i$ 为导轨零位时髋偏航轴在机身坐标系{B}中的位置，$\boldsymbol{C}_i$、$\boldsymbol{A}_i$ 和 $\boldsymbol{B}_i$ 依次为第 i 条腿的髋偏航轴至大腿轴、大腿轴至膝轴、膝轴至足端球心的固定向量；$\boldsymbol{p}_i$ 为足端球心位置；$\boldsymbol{R}_z(\cdot)$、$\boldsymbol{R}_y(\cdot)$分别为绕 z 轴和 y 轴的基本旋转矩阵。

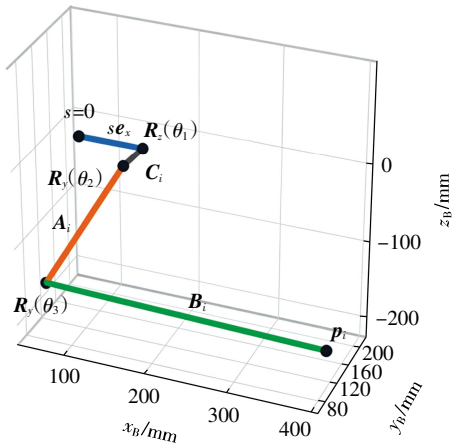


图 3　PRRR 机械腿关节轴向与坐标系

Fig.3　Joint axes and coordinate frames of the PRRR leg

根据图 3，大腿轴至膝轴向量 $\boldsymbol{A}_i$ 位于 x_B-z_B 平面内，即其 y 向分量 $A_{iy}=0$。

在机身坐标系{B}中，足端球心的位置为

$$\boldsymbol{p}_i=\boldsymbol{H}_i+s\boldsymbol{e}_x+\boldsymbol{R}_z(\theta_1)[\boldsymbol{C}_i+\boldsymbol{R}_y(\theta_2)\boldsymbol{A}_i+\boldsymbol{R}_y(\theta_2+\theta_3)\boldsymbol{B}_i] \tag{1}$$

令 $\boldsymbol{u}_i=\boldsymbol{C}_i+\boldsymbol{R}_y(\theta_2)\boldsymbol{A}_i+\boldsymbol{R}_y(\theta_2+\theta_3)\boldsymbol{B}_i$，对式(1)求导，得到与 4 个关节变量对应的位置雅可比矩阵

$$\boldsymbol{J}_i=[\boldsymbol{J}_s,\boldsymbol{J}_1,\boldsymbol{J}_2,\boldsymbol{J}_3] \tag{2}$$

其中

$$\boldsymbol{J}_s=\boldsymbol{e}_x$$

$$\boldsymbol{J}_1=\boldsymbol{R}_z(\theta_1)(\boldsymbol{e}_z\times\boldsymbol{u}_i)$$

$$\boldsymbol{J}_2=\boldsymbol{R}_z(\theta_1)[\boldsymbol{R}_y(\theta_2)(\boldsymbol{e}_y\times\boldsymbol{A}_i)+\boldsymbol{R}_y(\theta_2+\theta_3)(\boldsymbol{e}_y\times\boldsymbol{B}_i)]$$

$$\boldsymbol{J}_3=\boldsymbol{R}_z(\theta_1)\boldsymbol{R}_y(\theta_2+\theta_3)(\boldsymbol{e}_y\times\boldsymbol{B}_i)$$

式(2)给出足端位置对 4 个关节变量的一阶映射,后续准静态广义力计算由 $\boldsymbol{J}_i^{\mathrm{T}}$ 将足端接触力映射为关节力/力矩。其中移动副列 $\boldsymbol{J}_s = \boldsymbol{e}_x$ 与左右腿安装偏置均予以保留,使力映射与式(1)及图 3 机身坐标系一致。

2.2　冗余逆运动学与闭环校验

单腿以 4 个关节变量确定足端三维位置,存在 1 个冗余自由度,逆解不唯一。将 s 作为冗余参数离散遍历,对给定 s 枚举径向正负分支 $k \in \{0,1\}$和平面膝角分支 $\sigma \in \{-1,1\}$。先定义

$$\begin{aligned}&\boldsymbol{v}_i = \boldsymbol{p}_i - \boldsymbol{H}_i - s\boldsymbol{e}_x\\&v_{ix} = \boldsymbol{e}_x^{\mathrm{T}}\boldsymbol{v}_i \quad v_{iy} = \boldsymbol{e}_y^{\mathrm{T}}\boldsymbol{v}_i \quad v_{iz} = \boldsymbol{e}_z^{\mathrm{T}}\boldsymbol{v}_i\\&\delta_i = C_{iy} + B_{iy} \quad \lambda_i = \sqrt{v_{ix}^2 + v_{iy}^2}\\&\rho_k = (1-2k)\sqrt{\lambda_i^2 - \delta_i^2}\end{aligned} \tag{3}$$

式中:$\boldsymbol{v}_i$ 为足端球心相对髋偏航轴的位置向量;v_{ix}、v_{iy}、v_{iz} 为其 3 个方向的分量;δ_i 为腿部横向结构偏置;λ_i 为足端相对髋偏航轴的水平投影距离;ρ_k 为足端在水平面内带正负号的径向距离,k = 0、1 分别对应其正、负两支。

逆解存在实数解的前提是 $\lambda_i^2 \geqslant \delta_i^2$。在该条件下,髋偏航角 θ_1 及足端球心在大腿、小腿俯仰运动平面内相对大腿轴的坐标 ξ_i 和 ζ_i 分别为

$$\begin{aligned}&\theta_1 = \mathrm{wrap}[\mathrm{atan2}(v_{iy}, v_{ix}) - \mathrm{atan2}(\delta_i, \rho_k)]\\&\xi_i = \rho_k - C_{ix} \quad \zeta_i = v_{iz} - C_{iz}\end{aligned} \tag{4}$$

式中,wrap 为角度归一化函数。

令 $l_{1i} = \sqrt{A_{ix}^2 + A_{iz}^2}$、$l_{2i} = \sqrt{B_{ix}^2 + B_{iz}^2}$、$\beta_{1i} = \mathrm{atan2}(A_{iz}, A_{ix})$、$\beta_{2i} = \mathrm{atan2}(B_{iz}, B_{ix})$,则

$$\begin{aligned}&D = \frac{\xi_i^2 + \zeta_i^2 - l_{1i}^2 - l_{2i}^2}{2 l_{1i} l_{2i}}\\&\phi_\sigma = \mathrm{atan2}(\sigma\sqrt{1 - D^2}, D)\end{aligned} \tag{5}$$

式中:β_{1i}、β_{2i} 分别为 $\boldsymbol{A}_i$、$\boldsymbol{B}_i$ 在该平面内的方向角;D 为膝关节平面夹角 ϕ_σ 的余弦;σ 为膝关节逆运动学构型分支参数。

当 $-1 \leqslant D \leqslant 1$ 时,大腿连杆在俯仰运动平面内的方向角及其他两关节角分别为

$$\begin{aligned}&\alpha_\sigma = \mathrm{atan2}(\zeta_i, \xi_i) - \mathrm{atan2}(l_{2i}\sin\phi_\sigma, l_{1i} + l_{2i}\cos\phi_\sigma)\\&\theta_2 = \mathrm{wrap}(\beta_{1i} - \alpha_\sigma)\\&\theta_3 = \mathrm{wrap}(\beta_{2i} - \beta_{1i} - \phi_\sigma)\end{aligned} \tag{6}$$

针对本文设计的 PRRR 腿部构型,建立了与 URDF 一致的正、逆运动学模型,并通过随机位形回代及独立 URDF 运动学计算验证了解析模型与程序实现的一致性。在上述运动学模型基础上,进一步给出单腿穿越检修口时的构型切换过程。如图 4 所示,单腿依次经历收腿、翻转、前移和落腿 4 个阶段,并在运动过程中完成肘式与膝式构型之间的转换。以图 4 中箭头方向为前进方向,姿态 1 中膝部朝后,为肘式构型;姿态 5 中膝部朝前,为膝式构型。单腿收起后通过髋部翻转改变膝部朝向,再前移并落足,以适应检修口的有限净空。

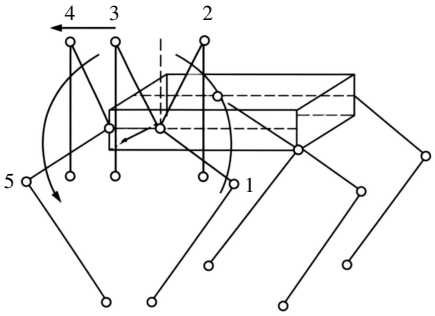


图 4　单腿穿越检修口的构型切换过程

Fig.4　Configuration switching process of a single leg traversing the inspection opening

3　整机穿越序列规划与有效性判据

3.1　支撑足约束与摆动腿规划

候选序列采用固定动作顺序:两前腿依次穿越检修口,随后调整机身与前足落点,再完成两后腿穿越检修口;任一摆动阶段均保持其余 3 足支撑。机身移动阶段通过遍历式(3)—式(6)的有效逆解,并采用动态规划选择关节变化与检修口边框间隙代价较小的连续序列;摆动腿则在归一化四维 PRRR 关节空间内采用双向快速扩展随机树连接(RRT-connect,rapidly-exploring random tree connect)算法[20]规划,扩展步长(step size)为 0.075,目标偏置(goal bias)概率为 0.18,每段最多扩展 12 000 次,并对有效路径插值加密后进行碰撞复核。

路径有效性采用两级检查:首先将关节限位、检修口边框及下壁板约束纳入状态有效性判定,并对完整候选序列进行自碰撞事后审计;随后进一步将自碰撞和后续支撑的连续性直接加入规划约束。

3.2　基于距离约束的穿越几何安全判定

检修口边框、下壁板与自碰撞共同构成整机穿越的几何约束,其中检修口边框间隙为主约束。碰撞查询基于机器人 URDF 实际网格,并将有厚度肋板简化为 4 个长方体检修口边框;在世界坐标系{W}下,由灵活碰撞检测库(FCL,flexible collision library)[21]计算两几何体间的符号距离(signed distance),其值为正表示两几何体分离,为负表示相互穿透。机器人侧将机身、

腿部连杆等 URDF 碰撞网格逐块编号，记第 a 块为 $G_a(\boldsymbol{q})$（$a=1,2,\cdots,N_G$；N_G 为参与距离查询的机器人碰撞块总数）。检修口边框侧将 4 个长方体按块编号，记第 b 块为 $O_b(t_r)$（$b=1,2,3,4$，对应检修口四周的 4 个边框面）。则在构型 $\boldsymbol{q}$ 与名义肋板厚度 t_r 下，机器人任一碰撞块到检修口边框各面的最小符号距离，即最小检修口边框间隙，定义为

$$d_{\mathrm{frm}}(\boldsymbol{q},t_r)=\min_{a,b} d_{\mathrm{signed}}(G_a(\boldsymbol{q}),\ O_b(t_r)) \tag{7}$$

式中，d_{signed} 为两碰撞几何体间的符号距离。

式(7)将“是否刮碰检修口边框”归结为单一标量，便于逐帧审计。名义工况取 $d_{\mathrm{frm}}\geqslant 15$ mm 为规划阈值：该值仅用于本文的规划与审计，不是适航或维修标准限值。此外，补充两项与穿越直接相关的几何检查：非足部网格相对下壁板的间隙按 0.05 mm 数值容差判定（足端球与下壁板理论接触距离为 0，以区分支撑接触与机身/连杆触地）；自碰撞仅排除关节安装面固有重叠的相邻对，保留腿—腿、腿—机身及同腿非相邻连杆等真实干涉组合，并以 1×10^{-3} mm 作为事后审计的数值容差。由此，检修口边框间隙、非足部构件与下壁板间隙和自碰撞距离共同构成分层几何判据，用于对第 3.1 节规划所得的候选序列逐帧审计。

3.3　静态稳定裕度与准静态广义力

用 Pinocchio 刚体算法库[22]计算每帧质心位置。将支撑足在世界坐标系{W}水平面内的凸包顶点记为 $\boldsymbol{P}_j=(x_j,y_j)$，$j=1,2,\cdots,n$，$n$ 为支撑足数，$\boldsymbol{P}_{n+1}=\boldsymbol{P}_1$；质心水平投影记为 $\boldsymbol{c}=(c_x,c_y)$。凸包顶点按逆时针排序，支撑多边形与静态稳定裕度（SSM，static stability margin）的几何关系如图 5 所示。SSM 定义为

$$d_{\mathrm{SSM}}=\min_{j}\frac{[(\boldsymbol{P}_{j+1}-\boldsymbol{P}_j)\times(\boldsymbol{c}-\boldsymbol{P}_j)]_z}{\|\boldsymbol{P}_{j+1}-\boldsymbol{P}_j\|_2} \tag{8}$$

式中，下标 z 表示向量叉积沿 z_{W} 轴的分量。

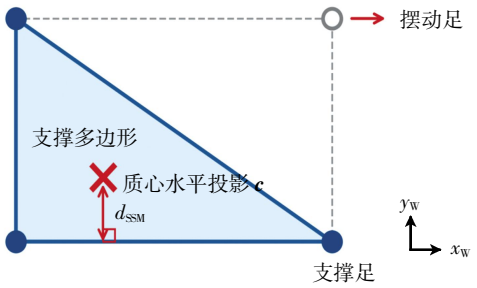


图 5　支撑多边形与静态稳定裕度示意图

Fig.5　Schematic of the support polygon and the static stability margin

d_{SSM} 为正值表示质心投影位于支撑域内。在仅保留竖直接触力的准静态假设下，将各支撑足法向力依次组成向量 $\boldsymbol{f}_z$，并通过枚举活动集求解

$$\begin{bmatrix}1 & 1 & \cdots & 1\\ x_1 & x_2 & \cdots & x_n\\ y_1 & y_2 & \cdots & y_n\end{bmatrix}\boldsymbol{f}_z=m_{\mathrm{b}}g\begin{bmatrix}1\\ c_x\\ c_y\end{bmatrix}\quad f_{z,i}\geqslant 0 \tag{9}$$

式中，g 为重力加速度。

令 $\boldsymbol{\tau}_g(\boldsymbol{q})$ 为机器人重力对应的广义力，$\boldsymbol{J}_{V,i}$ 为第 i 个支撑足的线速度雅可比矩阵，当整机关节速度和加速度均为 0，即 $\dot{\boldsymbol{q}}=\ddot{\boldsymbol{q}}=\boldsymbol{0}$ 时的驱动广义力为

$$\boldsymbol{\tau}_{\mathrm{qs}}=\boldsymbol{\tau}_g(\boldsymbol{q})-\sum_{i\in I}\boldsymbol{J}_{V,i}^{\mathrm{T}}[0\ \ 0\ \ f_{z,i}]^{\mathrm{T}} \tag{10}$$

式中：$\boldsymbol{\tau}_{\mathrm{qs}}$ 为准静态平衡下的关节驱动广义力；I 为当前支撑腿集合；$f_{z,i}$ 为第 i 条腿的法向力，即 $\boldsymbol{f}_z$ 中与该腿对应的分量（$\boldsymbol{f}_z$ 的分量按 I 中支撑腿的顺序排列）。

由式(2)的力映射与式(9)的法向力分配得到式(10)，给出准静态重力平衡下各转动关节的力矩，用于估计候选穿越序列的关节负载量级，并与 SSM 一并进行准静态校核。在准静态校核基础上，进一步对候选穿越序列进行三维接触力分析。在自由基座动力学平衡条件下，对各支撑足施加法向力非负及库仑摩擦锥约束，即 $f_{z,i}\geqslant 0$，且切向接触力满足 $\sqrt{f_{x,i}^2+f_{y,i}^2}\leqslant\mu f_{z,i}$，其中，$\mu$ 为足端与下壁板间的摩擦系数。通过逐帧求解接触力可行域并对摩擦系数进行搜索，得到各运动阶段维持无滑移接触所需的最小共同摩擦系数。

4　计算结果与可行性边界

4.1　远侧落足可达域分析

越过检修口后，支撑足须落在肋板远侧落足区内。为定量比较有无直线导轨及是否启用髋部构型切换对足端到达该区域能力的影响[23]，本文从两个互补指标刻画远侧落足可达性：指标 1 为离散落足点可达率，判断足端能否落到任务给定的具体目标点；指标 2 为远侧落足区面积覆盖率，在决定穿越检修口能力的 x_{B}–z_{B} 平面内度量可达包络对远侧落足区的覆盖，并通过 2×2 消融分析区分移动副与构型切换各自的作用。

指标 1　本文对图 1 的远侧落足区 F_i 建立 2 mm × 2 mm 单元中心网格，每腿共 3 600 个目标点。机身姿态保持水平，机身坐标系{B}原点在世界坐标系{W}中的坐标为（−194.86，0，300），此时机身前端距肋板近表面10 mm。导轨激活时按 2 mm 步长离散，转动关节与其限位之间保留 0.02 rad 余量。记 M_i 为第 i 条腿的目标点中至少存在 1 组满足限位的 (s,k,σ) 逆解的

点数，N_i 为该腿的目标点总数，N_i = 3 600，则第 i 条腿的离散落足点可达率为

$$\eta_i = \frac{M_i}{N_i} \times 100\% \tag{11}$$

指标 1 的对比设置为：无、有移动副分别对应导轨锁定的 RRR 与导轨激活的 PRRR；无构型切换为固定单一逆解分支$(k,\sigma)=(1,1)$，有构型切换为全分支枚举。结果显示，启用移动副与构型切换后，四腿平均离散落足点可达率由 50.0%提高至 92.9%，其中最差单腿的可达率由 0%提高至 85.9%。上述结果反映给定目标落足点的运动学可达性。

指标 2　检修口的主要约束集中于机身坐标系{B}的前进方向 x_B 和竖直方向 z_B，因此，本文采用 x_B–z_B 矢状面可达域评价穿越能力。在相同连杆长度与关节限位下，设置“有/无移动副 × 有/无构型切换”的 2 × 2 消融组：RRR、RRR+构型切换、PRRR 及 PRRR+构型切换。各组对关节变量离散采样，将所得足端点投影至 x_B–z_B 平面并求可达域面积 S_{XZ}，结果如图 6 和表 2 所示。

远侧落足区面积覆盖率定义为

$$\eta_S = S(\Omega_{XZ} \cap F_{XZ}) / S(F_{XZ}) \times 100\% \tag{12}$$

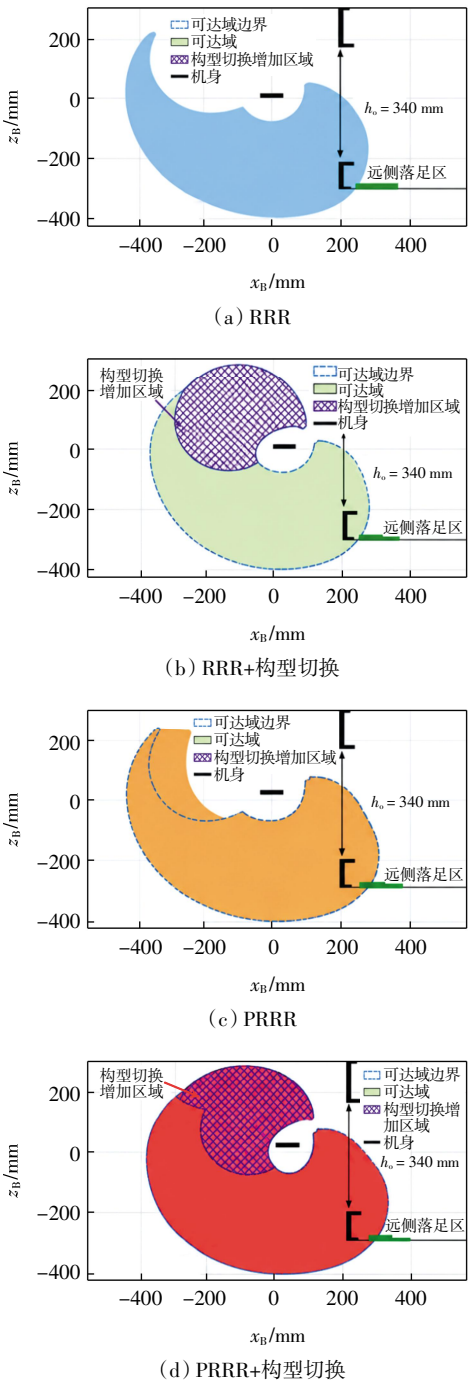
式中：Ω_{XZ} 为矢状面足端可达域；F_{XZ} 为远侧落足区；$S(\cdot)$为区域面积。

由图 6 与表 2 可见：无导轨时仅引入构型切换，S_{XZ} 由 0.257 m² 增至 0.394 m²，但 η_S 仍约为26%；引入 111 mm 导轨后，η_S 提高至约 96%，在此基础上再引入构型切换，η_S 不再提高，S_{XZ} 增至 0.498 m²。可见，移动副使远侧落足区进入可达域。

综上，远侧落足能力的提升主要来自导轨的纵向前伸；构型切换仅提供同一落足点的姿态冗余，不能替代前伸。指标 1 反映“指定落足点能否到达”，指标 2 结合 2 × 2 消融反映“可达包络能否覆盖远侧落足区及其主要影响因素”，两项指标互为补充，不宜换算为同一成功率。

4.2　分阶段穿越的仿真过程与局部响应

机械系统动力学自动分析（ADAMS，automatic dynamic analysis of mechanical systems）虚拟样机按预设分阶段时序完整回放了检修口穿越过程，如图 7 所示，图 7(a)—图 7(j)按时间先后排列：依次完成机身与支撑腿调整、前腿收起穿越检修口、导轨前移并远侧落足、后腿穿越检修口，以及常规支撑构型恢复。回放表明，各驱动副能够按给定时序连续执行上述动作，从而在虚拟样机层面验证了“前腿—导轨—后腿”分阶段穿越编排的可执行性。



(a) RRR

(b) RRR+构型切换

(c) PRRR

(d) PRRR+构型切换

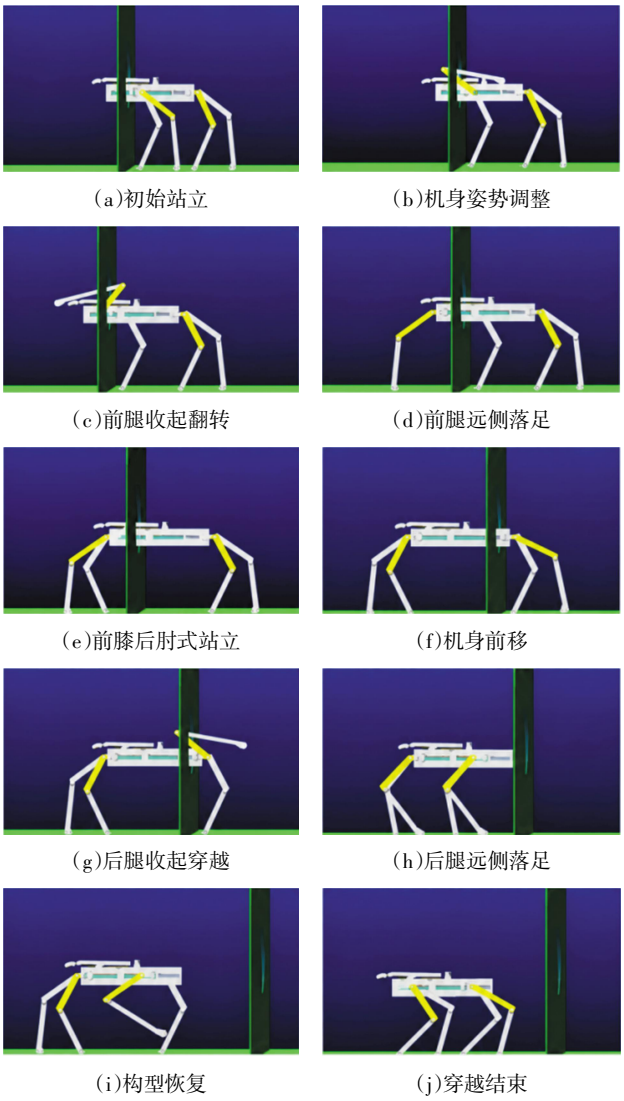
图 6　有无移动副及构型切换下的矢状面可达域消融对比

Fig.6　Ablation comparison of sagittal reachable regions with and without the prismatic joint and the configuration switching

表 2　矢状面可达域面积消融结果

Tab.2　Ablation results of the sagittal reachable-region area

配置	S_{XZ}/m²	η_S/%
RRR	0.257	≈26
RRR+构型切换	0.394	≈26
PRRR	0.347	≈96
PRRR+构型切换	0.498	≈96



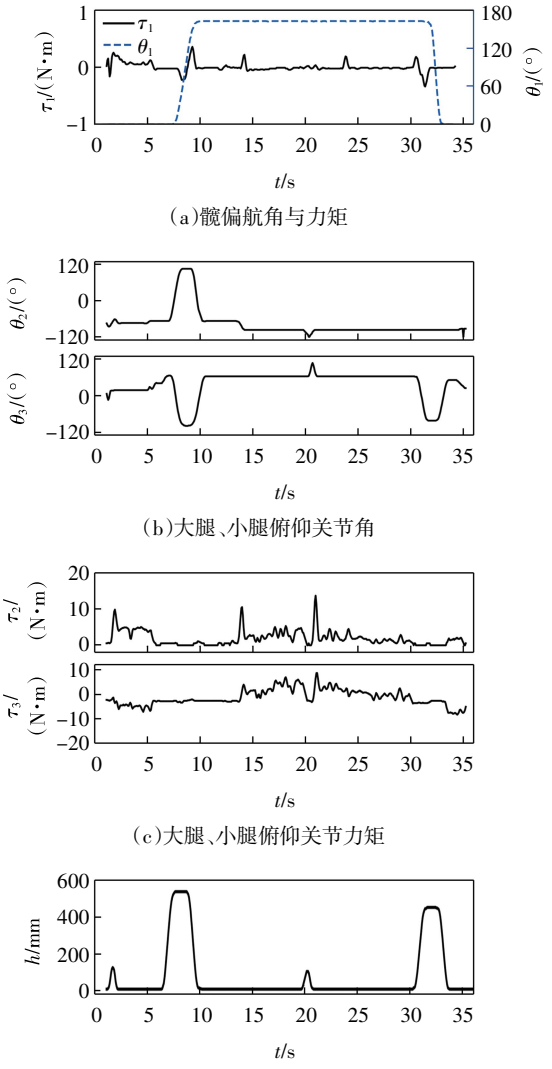
(a)初始站立　(b)机身姿势调整　(c)前腿收起翻转　(d)前腿远侧落足　(e)前膝后肘式站立　(f)机身前移　(g)后腿收起穿越　(h)后腿远侧落足　(i)构型恢复　(j)穿越结束

图 7　ADAMS 虚拟样机穿越过程

Fig.7　Traversal process of the ADAMS virtual prototype

选取左前腿为代表腿，将 ADAMS 输出按本文关节编号整理为图 8。图 8 中 τ_1、τ_2、τ_3 分别为与 θ_1、θ_2、θ_3 对应的关节力矩，h 为左前足端相对下壁板的高度，t 为仿真时间。该腿最先完成收腿、髋部翻转、穿越检修口与重新落足，能够反映构型切换与腿部协调过程；后腿过程类似，不再赘述。图 7 与图 8 对应同一仿真时序，便于对照整机姿态与单腿响应。

结合图 7，穿越分为前腿收起穿越检修口、导轨前移并远侧落足与后腿穿越检修口 3 个阶段，摆动时保持其他 3 足支撑。图 8(a)髋关节约在 8、31 s 两次大幅变化，对应构型切换与恢复，力矩仅短时波动后回落；图 8(b)收腿阶段大腿、小腿快速调整以避开检修口边框，穿越检修口后趋稳，末段再调姿落足；图 8(c)显示大腿、小腿力矩高峰集中在收腿、构型切换与重新落足，稳定支撑阶段的关节力矩较小；图 8(d)足端高度约 8 s 达峰后回落近地，约 20 s 小幅起伏对应中间支撑调整。关节角度、关节力矩和足端高度的变化与图 7 所示动作阶段相对应，表明驱动函数按预定时序完成左前腿穿越，从而在虚拟样机上验证了局部关节响应与分阶段编排的一致性。



(a)髋偏航角与力矩　(b)大腿、小腿俯仰关节角　(c)大腿、小腿俯仰关节力矩　(d)左前足端相对下壁板的高度

图 8　ADAMS 候选动作序列中左前腿的局部运动学与动力学响应

Fig.8　Local kinematic and dynamic responses of the left front leg in the ADAMS candidate motion sequence

为考察 ADAMS 虚拟样机在主要穿越阶段的准静态支撑与机身姿态响应，选取包含收腿、髋部翻转、导轨前移和重新落足动作的 14 s 代表性时段，并将截取时段起点记为 $t = 0$，结果如图 9 所示。图 9 中：d_{SSM} 的正负含义与式(8)一致，d_{SSM} =0 表示质心投影到达支撑域边界；20 mm 和 4°线分别为本文设置的裕量参考线和姿态监测参考线，并非民航标准限值。

图 9(a)显示，所选时段内 d_{SSM} 保持为正，起始过渡后稳定在约 30 mm，说明质心投影位于当前支撑多

边形内；图 9(b)中机身倾角约为 3°，低于本文设置的姿态监测参考线；图 9(c)中机身参考点(机身最高点)高度在短暂波动后稳定于约 524 mm；图 9(d)给出了质心与四足端在水平面内的轨迹，可用于核对质心移动与支撑足分布的对应关系。上述结果表明，所选 14 s 时段内未出现准静态支撑域失效或机身姿态发散。

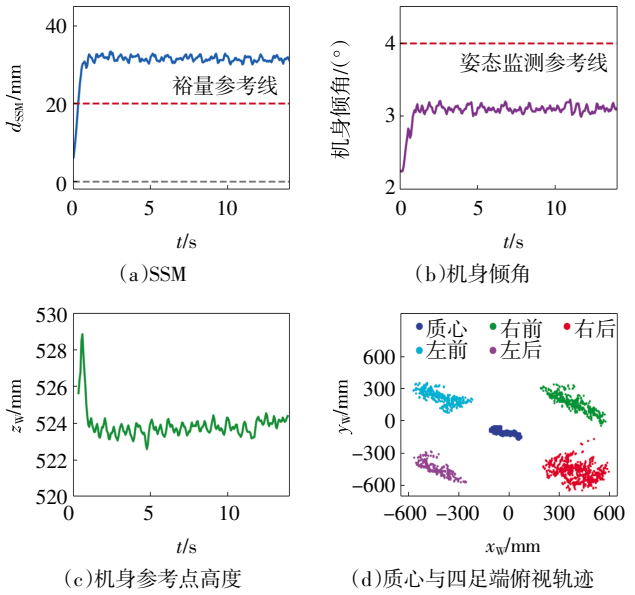


图 9　ADAMS 虚拟样机 14 s 代表性穿越时段的准静态支撑与机身姿态响应

Fig.9　Quasi-static support and fuselage attitude responses of the ADAMS virtual prototype during a representative 14 s traversal segment

4.3　严格审计与路径连通性验证

对 696 帧候选穿越序列进行逐帧安全性验证，图 10 给出了最小检修口边框间隙、自碰撞距离、SSM 及转动关节峰值准静态力矩随候选序列帧的变化，用于检查穿越全过程是否同时满足几何安全与准静态支撑条件。名义肋板厚度 t_r = 16 mm 时，最小检修口边框间隙为 26.989 mm，相对 15 mm 规划阈值仍保留 11.989 mm 裕量，全程未与检修口边框刮碰；自碰撞距离始终为正，未出现非相邻部件穿透；最小 SSM 为 9.034 mm，且全帧均存在满足式(9)的非负法向力分配，表明三足支撑下质心始终位于支撑域内。质心平衡与自由基座广义力残差均在 10^{-13} 量级(力以 N 计、力矩以 N·m计)，仅用于数值闭合检查。由此可见，最小检修口边框间隙、自碰撞距离和准静态稳定 3 项主判据均未越界，固定阶段顺序下的候选序列在本文数字模型中首尾连通。转动关节峰值准静态力矩为 16.459 N·m。

候选序列的主要审计结果如表 3 所示。式(9)、式(10)进一步给出准静态重力平衡下的转动关节负载量级：全序列峰值 16.459 N·m，出现在左前腿(LF，left front)小腿关节；四腿小腿峰值分别为 16.459、15.399、15.745、11.880 N·m，大腿峰值分别为 12.836、5.791、10.986、14.588 N·m。上述力矩与图 10 及表 3 一致，用于诊断分阶段穿越中的重力平衡需求。

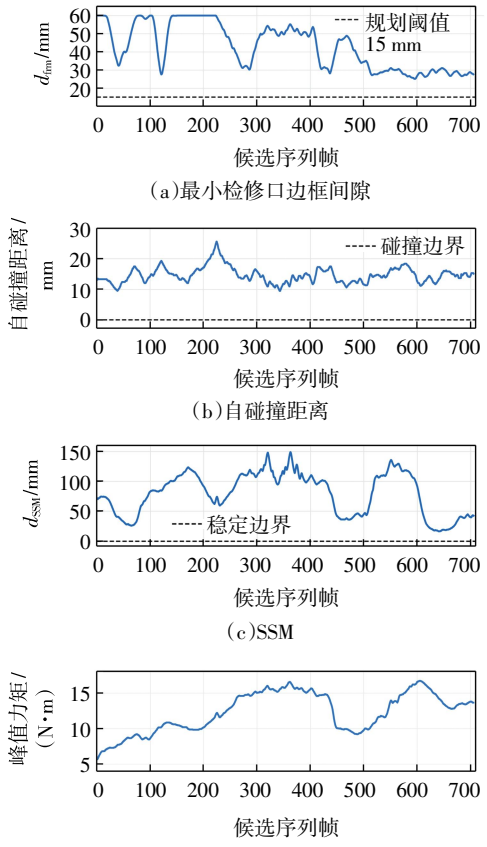


图 10　候选序列的检修口边框、自碰撞、稳定性与力矩审计结果

Fig.10　Audit results of the inspection opening frame, self-collision, stability and torque for the candidate sequence

表 3　候选序列的主要审计结果

Tab.3　Main audit results of the candidate sequence

指标	结果	判定
候选序列帧数	696	完整
最小检修口边框间隙/mm	26.989	通过
自碰撞距离/mm	>8.426	通过
非足部构件与下壁板最小间隙/mm	0.801	未触地
最小 SSM/mm	9.034	通过
转动关节峰值准静态力矩/(N·m)	16.459	量级统计
最大支撑足锁定误差/mm	5.82×10^{-13}	数值闭合误差

本节 696 帧候选穿越序列与第 4.2 节的 ADAMS 仿真采用相同的机器人参数、作业场景、动作阶段顺序及关键构型，但 ADAMS 驱动时序独立构造，二者不存在逐帧对应关系。ADAMS 仿真用于检查分阶段动作的运动连续性与局部响应，696 帧候选穿越序列用于几何与准静态约束审计，二者分别验证同一穿越方

案的不同方面。

4.4 补充可行性分析

对 696 帧候选穿越序列进行逐帧摩擦锥可行性分析。在总时长 35.8 s 的穿越过程中,各阶段所需最小共同摩擦系数均小于 0.170 0,其中最大值约为 0.169 5。当假设足端与下壁板之间可用摩擦系数为 0.200 0 时,696 帧均存在满足动力学平衡和摩擦锥约束的接触力分配。由此表明,在该轨迹及接触模型条件下,避免足端滑移所需的摩擦系数下限约为 0.170 0。需要指出的是,该结果并非油箱下壁板摩擦系数的实测值,尤其在存在燃油膜时仍需通过试验测定实际摩擦性能。

在可用摩擦系数 $\mu = 0.200\ 0$ 的假设下,利用满足摩擦锥约束的接触力进行全模型逆动力学计算,并提取移动副关节原点处的截面载荷。结果表明,移动副轴向力、滑座倾覆力矩和髋偏航力矩峰值分别为 9.379 N、13.777 N·m 和 2.058 N·m。进一步考虑不同可行接触力分配,轴向力和髋偏航力矩的绝对值上界分别为 12.180 N 和 2.967 N·m,滑座倾覆合成力矩的保守上界为 16.948 N·m。上述结果表明,移动副承载校核应同时考虑腿部悬臂结构产生的倾覆力矩。

为评价装配和位姿误差对穿越可行性的影响,对机器人与检修口相对位姿、质心估计、腿部安装位置及检修口尺寸引入随机扰动,并分别开展两档各 500 次蒙特卡洛计算。两档平移及质心估计误差标准差分别取 2 mm 和 5 mm,腿部安装位置误差标准差分别取 1 mm 和 2 mm,相对姿态误差标准差均取 0.5°,检修口尺寸误差取±2 mm。逐次重新计算候选序列的最小检修口边框间隙和 SSM。结果表明,两档误差条件下的联合通过率分别为 93.4%和 82.4%,其中 SSM 单项通过率分别为 100.0%和 95.4%,说明当前方案在误差扰动下的静态稳定性具有一定裕度,检修口碰撞是误差扰动下的主要限制因素。因此,工程应用中仍需根据实际装配精度和位姿估计误差进一步增加几何安全裕度。

4.5 民航应用边界与局限

本文将“飞机油箱”约束落实为不依赖检修口边框支撑、有厚度检修口、远侧落足区和三足支撑。严格审计表明,当前固定序列在给定 URDF 碰撞网格、水平机身、指定落点和动作顺序下形成了完整数值路径,检修口边框间隙、自碰撞和准静态稳定性判据均未越界。该结果仅适用于本文设定的名义几何、碰撞模型与计算条件,不能外推为所有动作顺序均可行。后续仍需开展动态接触与实体样机试验。

要转化为维修装备,还需补充:①依据具体机型的批准维修资料或实测数据重建检修口、翻边、加强筋、密封胶和管线几何;②引入装配误差和位姿估计误差后重新分配间隙;③在实体样机上验证导轨锁止、线缆拖曳、足地摩擦、动态接触和闭环跟踪;④完成材料耐燃油、导静电、危险区电气防护、清洁性与维修程序评估。因此,本文结论仅限于数值可行性验证,尚不能作为工程部署或满足防爆、适航要求的依据。

5 结语

对于飞机油箱检修口穿越问题,本文设计了具有腿根直线移动副的 PRRR 四足机器人腿部构型,建立了与 URDF 模型一致的正、逆运动学模型,并通过数值回代验证了解析模型与程序实现的一致性。

可达域分析表明,引入移动副后,四腿平均离散落足点可达率由 50.0%提升至 92.9%,远侧落足区面积覆盖率由约 26%提升至约 96%;构型切换主要提供同一落足点下的姿态冗余。对 696 帧候选穿越序列,最小检修口边框间隙为 26.989 mm,最小 SSM 为 9.034 mm,自碰撞距离始终为正,表明该方案在本文数字模型与名义工况下具有数值可行性。

本文结果仍限于给定几何模型、碰撞约束及准静态条件。后续需通过实体样机验证导轨承载、闭环跟踪及耐燃油、导静电和危险区电气防护等工程性能。

参考文献:

[1] Dhoot M H, Fan I S, Avdelidis N. Requirements for designing a robotic system for aircraft wing fuel tank inspection[C]//Proceedings of the European Conference of the PHM Society 2021, June 28–July 2, 2021, Virtual Event. PHM Society, 2021: 12.

[2] Heilemann F, Dadashi A, Wicke K. Eeloscope: towards a novel endoscopic system enabling digital aircraft fuel tank maintenance [J]. Aerospace, 2021, 8(5): 136.

[3] CCAR-121-R8 大型飞机公共航空运输承运人运行合格审定规则[S].

[4] CCAR-145-R4 民用航空器维修单位合格审定规定[S].

[5] AC 25. 981-1D Fuel tank ignition source prevention guidelines[S].

[6] (EU)No 1321/2014 Easy access rules for continuing airworthiness[S].

[7] 高庆吉, 王维娟, 牛国臣, 等. 飞机油箱检查机器人的仿生结构及运动学研究[J]. 航空学报, 2013, 34(7): 1748-1756.

[8] Niu Guochen, Wang Li, Gao Qingji, et al. Path-tracking algorithm for aircraft fuel tank inspection robots[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2014, 11(5): 82.

[9] Cao Xiujie, Yu Jingjun, Tang Siqi, et al. Detection and removal of excess materials in aircraft wings using continuum robot end-effectors[J]. Frontiers of Mechanical Engineering, 2024, 19(5): 36.

[10] Dhoot M H, Fan I S. Design and development of a mobile robotic system for aircraft wing fuel tank inspection[J]. SAE International Journal of

Advances and Current Practices in Mobility, 2022, 4(4): 1126–1137.

[11] Olaru A, Gaina M K. Aircraft fuel tank inspection with hexapod mobile robot[J]. International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics, 2022, 1(11): 66–76.

[12] Marquette W, Schultz K, Jonnalagadda V, et al. Semi–autonomous tele–operation using differential flatness of a crane robot for aircraft in–wing inspection[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2025, 10(3): 2742–2749.

[13] Ricárdez Ortigosa A, Bestmann M, Heilemann F, et al. Foundations for teleoperation and motion planning towards robot–assisted aircraft fuel tank inspection[J]. Aerospace, 2025, 12(2): 156.

[14] Zhong Yuhai, Wang Runxiao, Feng Huashan, et al. Analysis and re–search of quadruped robot′s legs: a comprehensive review[J]. Interna–tional Journal of Advanced Robotic Systems, 2019, 16(3): 1729881–419844148.

[15] Luo Jianwen, Ye Shusheng, Su Juntong, et al. Prismatic quasi–direct–drives for dynamic quadruped locomotion with high payload capacity[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2022, 235: 107698.

[16] Xu Yong, Liang Zheng, Liu Jiali. A new metamorphic parallel leg mechanism with reconfigurable moving platform[J]. Mathematical Prob–lems in Engineering, 2020, 2020: 1–11.

[17] 张月, 董雷, 宦荣华, 等. 风电叶片管道内窥履带机器人的设计与运动分析[J]. 中国机械工程, 2021, 32(15): 1884–1889.

[18] 张铁, 吴骄任, 蔡蒂, 等. GIS 内壁检测的四足爬壁机器人运动学分析[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2021(6): 6–10.

[19] 裴海珊, 齐飞, 窦小明, 等. 基于导航路径约束的多模块柔性检测机器人运动规划研究[J]. 机床与液压, 2023, 51(15): 42–49.

[20] Kuffner J J, LaValle S M. RRT–connect: an efficient approach to sin–gle–query path planning[C]//Proceedings of the 2000 IEEE Interna–tional Conference on Robotics and Automation, April 24–28, 2000, San Francisco, CA, USA. IEEE, 2000: 995–1001.

[21] Pan Jia, Chitta S, Manocha D. FCL: a general purpose library for colli–sion and proximity queries[C]//2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation, May 14–18, 2012, Saint Paul, MN, USA. IEEE, 2012: 3859–3866.

[22] Carpentier J, Saurel G, Buondonno G, et al. The Pinocchio C++ library: a fast and flexible implementation of rigid body dynamics algorithms and their analytical derivatives[C]//2019 IEEE/SICE International Sym–posium on System Integration (SII), January 14–16, 2019, Paris, France. IEEE, 2019: 614–619.

[23] Li Huayang, Qi Chenkun, Gao Feng, et al. Mechanism design and workspace analysis of a hexapod robot[J]. Mechanism and Machine Theory, 2022, 174: 104917.

（责任编辑:明　月）

（上接第 13 页）

torque limits[S].

[55] CCAR–33: 1988 航空发动机适航标准[S].

[56] CCAR–33R2: 2011 航空发动机适航规定[S].

[57] CCAR–33R1: 2002 航空发动机适航规定[S].

[58] Amendment 33–10: 1984 Aircraft engine regulatory review program; aircraft engine and related powerplant installation amendments[S].

[59] Amendment 33–18: 1996 Airworthiness standards: aircraft engines new one–engine–inoperative (OEI) ratings, definitions and type certification standards[S].

[60] CAR amendment 13–1: 1956 Aircraft engine airworthiness: miscella–neous amendments resulting from the 1956 annual airworthiness review [S].

[61] Amendment 33–3: 1967 Powerplant design requirements for aircraft engines and propellers[S].

[62] Amendment 33–6: 1974 Aircraft and aircraft engines: Certification pro–cedures and type certification standards[S].

[63] Amendment 33–12 : 1988 Airworthiness standards: aircraft engines[S].

[64] Amendment 33–25: 2008 Airworthiness standards: rotorcraft turbine engines one–engine–inoperative (OEI) ratings, type certification[S].

[65] Amendment 33–32: 2012 Technical amendment; airworthiness stan–dards: aircraft engines[S].

[66] AC–33–AA–2022–01 航空发动机审定[S].

[67] 尹泽勇, 丁水汀, 李果, 等. 航空发动机下一代适航规章制定策略和技术路径[J]. 中国工程科学, 2022, 24(4): 230–239.

（责任编辑:任诗雨）