

输电线路巡检机器人越障机构设计与运动性能分析

宋珈庚

山东海恩德智能科技有限公司 山东 济南 250014

【摘要】：输电线路环境中存在悬垂线夹、防振锤、绝缘子串等多类障碍，巡检机器人的越障能力直接决定运行连续性与任务完成度。为提升在复杂杆塔区段的通过效率，引入针对导线结构特征的越障机构，通过构型优化与尺寸匹配提升抓取稳定性与跨越灵活性。基于运动学与动力学分析对跨越过程的姿态变化、受力分布以及稳定区间进行量化评估，揭示结构参数与运动性能之间的关系，并为提升跨越时的平稳性和抗扰性提供理论依据。所得结果能够为输电线路智能巡检装备的发展提供可参考的设计思路。

【关键词】：输电线路巡检机器人；越障机构；运动性能分析；导线障碍跨越

DOI:10.12417/2705-0998.26.10.073

引言

高空输电线路沿程分布着多种结构件，构成连续巡检中的关键阻断点。随着智能化巡检装备逐步应用，具备稳定越障能力的机器人逐渐成为提升线路可视化、精细化巡检水平的重要载体。越障机构的构型设计不仅影响跨越动作的连贯性，还关系到导线贴合程度与载体姿态的稳定性。为使机器人在不同杆塔区段保持可靠运行，有必要从结构特性、驱动方式与运动规律等方面展开深入分析。对越障过程中的姿态变化、力学响应与运动边界进行系统探讨，能够揭示结构参数对跨越行为的影响机理，为后续提升巡检装备的适应性和安全性打下扎实基础。

1 输电线路障碍特征与越障需求分析

1.1 导线典型障碍的结构属性

输电线路分布着防振锤、悬垂线夹、耐张线夹、均压环等多类结构件，这些构件在功能布局上具有重量集中、外形复杂、安装位置固定等特征，与导线形成多点接触或局部突出区域，构成巡检机器人运动路径中的重要阻挡因素。这些障碍的几何尺寸、表面曲率、夹持构造以及相邻构件之间的距离差异明显，导致机器人沿线移动时需在有限空间内完成姿态调整与支撑转换^[1]。部分结构件的表面材料较硬或存在角度突变，对越障机构的压紧能力与接触稳定性提出严格要求。受风荷、导线摆动、温度变化产生的弛度变化影响，障碍位置相对于空间坐标会产生一定浮动，使越障过程更加复杂。对这些结构属性进行系统分析，有助于构建越障机构必要的兼容范围与结构尺度基础。

1.2 巡检路径受阻机理分析

沿导线行进的巡检机器人在通过障碍位置时需完成抓取点切换、支撑方式转换以及载体姿态调整等多个动作环节，而这些动作在障碍处的可操作空间受到显著限制。障碍物外形可能导致机器人支撑臂无法保持正常夹持角度，产生偏载或局部滑移风险；障碍底部的凸起结构容易干扰移动单元的前进路

径，使行进轨迹出现偏移。在风力、导线微振动以及重力耦合作用下，机器人与导线之间的相对运动加剧，使跨越动作的控制难度提升。随着机器人进入障碍区域，惯性力与支撑力会发生再分配，若越障机构的构型无法快速适应外界变化，便会导致姿态失衡。由此形成的受阻机理，既包含结构干涉，也关联动力耦合，是决定越障稳定性的关键影响来源。

1.3 越障能力需求的核心矛盾

巡检机器人越障能力的评价往往受到结构紧凑度、夹持力稳定性、姿态可调范围以及运动连续性等多重因素共同制约，在设计与应用过程中形成显著矛盾。一方面，越障机构需要具备足够的包络范围以适应不同类型及尺寸的障碍物，另一方面又必须保持整体质量轻、尺寸可控，以避免对导线造成附加载荷。跨越动作要求机构实现较大幅度的姿态调节，但过大的自由度会削弱结构刚度，降低跨越过程中对不稳定因素的抵抗能力。运动过程中需要兼顾柔顺度与支撑力输出，而这二者往往难以在同一构型中取得平衡。越障轨迹的连续性要求机构在动态干扰下保持稳定，但导线环境的不确定性又使动作规划面临挑战。由这些矛盾构成的设计取舍，决定越障性能提升的关键方向。

2 越障机构构型设计与关键参数确定

2.1 构型选择依据与力学适配原则

越障机构构型的确定需要兼顾导线形态、障碍分布位置和机器人自体重量分配，使结构在受力状态复杂的环境下仍能保持稳定贴合。构型的设计往往取决于机器人在障碍前后需要完成的支撑切换方式，同时还需确保驱动单元在有限空间内具备足够的输出能力。支撑臂、夹持单元与连杆结构之间的力传递路径必须清晰可靠，在导线摆动、惯性冲击和不规则接触条件下仍能维持受力均衡^[2]。夹持结构与导线的接触曲率匹配度直接影响稳定性，因此构型设计往往依赖对导线直径、障碍外形以及跨越路径的综合评估。

2.2 关键尺寸参数的关联影响

越障机构的尺寸参数决定动作空间、接触稳定性与跨越能力之间的平衡关系，各参数之间呈现明显耦合效应。支撑臂长度影响夹持范围与力臂大小，尺寸过大可能造成重心偏移，尺寸过小则限制跨越跨度。夹持单元的开合角度决定与导线的贴合程度，其范围若不足，会削弱在障碍处的稳定接触，导致滑移风险。连杆长度与铰接点位置决定机构在跨越期间的姿态变化轨迹，若几何比例不协调，越障动作会出现卡滞或空间干涉。驱动装置的行程及输出特性也与尺寸相关，若行程不足，将无法完成支撑切换。这些参数之间存在相互影响的关系，任何一项调整都可能改变受力分布和运动轨迹，使尺寸匹配成为决定机构可行性的关键环节。

2.3 抓取与跨越转换过程的结构优化

抓取阶段与跨越阶段的结构需求存在明显差异，越障机构需要在保持夹持稳定的同时实现姿态灵活调整，因此在结构优化过程中需重点关注转换过程的连续性与抗干扰能力。夹持部位在抓取导线时需要提供足够的包络范围，而在跨越障碍时又必须具备快速释放与重新定位能力，使力传递路径能够顺畅切换。结构优化通常围绕支撑臂几何形状、铰链布置方式以及驱动单元的响应速度展开，通过调整力传递顺序提高跨越动作的稳定性。为减少转换瞬间的姿态漂移，可在关键节点设置缓冲结构或柔性辅助部件，提升在风振与导线微动环境下的动作可靠度。越障机构在此过程中逐步形成兼具稳定性与灵活性的结构体系，为后续运动性能提升奠定基础。

3 越障运动学模型构建与姿态变化规律

3.1 越障运动链的运动学约束

越障运动链由支撑臂、夹持单元、连杆机构与驱动关节共同构成，各部件的运动范围受限于空间布局、铰接角度及导线位置，使运动学约束呈现多维度特点。在越障过程中，运动链需在有限的导线空间内完成轨迹切换，任何一个关节的转角或伸缩量超出允许范围，都可能导致机构产生干涉。导线本身的弧垂变化也会改变相对位置，使运动链需要具备一定的冗余自由度以适应不同高度偏差^[3]。为避免跨越动作中出现突发姿态跳变，运动链的约束条件必须确保关节之间的角速度和加速度变化保持平滑。驱动力矩的传递路径也受运动学关系限制，一旦出现不合理的关节组合，将降低越障动作的可控性。

3.2 姿态变化路径与稳定区间识别

越障动作的顺利完成依赖于姿态变化路径的合理规划，机器人在跨越前后需要经历抓取、脱离、绕行与重新定位等多个姿态转换阶段，每一阶段都对应特定的稳定区间。姿态变化路径若过于陡峭或存在多余摆动，会导致支撑力失衡，使机器人在导线上产生晃动，因此路径规划往往基于几何约束、质量分布以及障碍形状进行综合判断。稳定区间的识别需要考虑重心

相对导线的位置、夹持部位的贴合程度以及惯性力作用方向，当姿态变化使重心越过稳定边界时，跨越动作将面临翻覆风险。通过分析姿态轨迹曲线，可确定动作中最易受到扰动的环节，并判断稳定裕度大小，为后续的控制调节与结构优化提供依据。

3.3 运动连续性与可达性分析

越障机构在跨越过程中必须保持运动连续性，使各关节之间的转动、伸缩与力传递保持不间断状态，从而避免中途卡滞或姿态僵死。运动连续性受到关节布局、驱动策略以及跨越轨迹形状影响，若某关节活动区间不足，将造成动作中断，进而影响整体稳定。可达性分析涉及机构是否能够在给定障碍尺寸和导线高度变化下完成既定动作目标，包括抓取点转移、空间跨越位置的覆盖范围以及姿态调整能力。当机构的可达区域无法覆盖障碍关键位置时，即便具备足够驱动力，也难以实现有效跨越。通过建立可达性模型，可判断不同尺寸、不同构型下的极限能力范围，并识别导致越障失败的关键参数。运动连续性与可达性的综合评估，为构型优化与控制策略制定提供可靠依据。

4 动力学响应评估与跨越稳定性验证

4.1 越障过程中的受力分布特征

越障动作中，机构的受力状态会随着抓取、抬升、绕行与重新贴合等环节不断变化。支撑臂在抓取导线时承受较大的夹持力与摩擦力，夹持结构需在不损伤导线的前提下提供足够支撑。当机构进入障碍附近，受力重心开始偏移，部分关节需承担附加扭矩以维持姿态平衡。导线的弧垂与振动会引入周期性扰动力，使支撑单元受到不稳定载荷影响^[4]。跨越期间，机构临时脱离导线部分区域，受力系统从静态贴合转为动态过渡，惯性力与重力共同作用，使受力分布呈现明显波动。受力路径若不均匀，会导致关节产生峰值负荷，使动作产生抖动。以抬升环节为例，建立支撑臂的扭矩平衡方程 $M = F \times L \times \sin \theta$ ，其中 θ 为支撑臂与竖直方向的夹角（取 30° ）， $F = 825.6\text{N}$ ， $L = 150\text{mm}$ ，可计算出关节所需承受的扭矩 $M = 825.6 \times 0.15 \times \sin 30^\circ \approx 61.9\text{N} \cdot \text{m}$ ，结合驱动电机的额定扭矩（取 $80\text{N} \cdot \text{m}$ ），验证电机输出能力满足要求，同时计算关节应力 $\sigma = M/W$ （ W 为抗扭截面系数，取 $1.2 \times 10^{-4} \text{m}^3$ ），得 $\sigma \approx 515.8\text{MPa}$ ，需选用高强度铝合金材质（许用应力 $\geq 600\text{MPa}$ ），确保关节强度。

4.2 动态载荷对机构的影响规律

动态载荷来源包括机构自身的加速度变化、导线振动、风扰动以及跨越动作产生的惯性冲击，这些载荷在短时间内可能呈现脉冲式波动，对结构性能影响显著。关节在姿态切换阶段承受的瞬时载荷会因运动速度变化而迅速叠加，若结构刚度不足，可能引发位移放大效应，使轨迹偏离预设路径。导线在风

荷与温度变化下出现的弹性振动会叠加到机构上,使支撑单元需要频繁调整接触位置以维持稳定贴合。当动态载荷与结构特征频率接近时,还可能诱发局部共振,使振幅显著提升。采用模态分析方法计算机构的特征频率,建立机构的动力学模型,通过有限元分析得到前3阶特征频率分别为 $f=15\text{Hz}$ 、 $f=32\text{Hz}$ 、 $f=58\text{Hz}$ 。结合导线振动频率(10Hz)与风扰动频率(1~5Hz),计算频率比 $r=f/f$,其中风扰动频率 $r=0.07\sim 0.33$,导线振动频率 $r=0.67$,均远离共振区间($r=1\pm 0.1$),因此机构不会发生共振,动态稳定性良好。

4.3 跨越稳定性的综合评估方法

跨越稳定性需综合考虑姿态变化特征、受力均衡程度、可达性范围以及对外界扰动的敏感度,通过多变量联合评估构建完整的稳定性判断体系。稳定性评估常基于关键参数,如重心轨迹、接触点压紧力、关节峰值扭矩与姿态偏移量等指标,利用这些参数可描绘跨越动作中潜在的失稳趋势。为识别越障过程中的关键风险点,可将运动学模型与动力学响应结果结合,分析结构在不同阶段的稳定裕度。外界干扰因素如导线晃动或瞬时风力也需纳入评估,以检验结构在扰动环境中的姿态保持能力。建立稳定性评估指标体系,采用加权求和法计算综合稳定系数 $K=\omega_1\lambda+\omega_2(F/F)+\omega_3(1-M/M)$,其中 ω_1 、 ω_2 、 ω_3 分别为稳定裕度、夹持力、关节扭矩的权重(均取1/3), $F=1000\text{N}$, $M=80\text{N}\cdot\text{m}$ 。计算得跨越悬垂线夹时 $K=0.82$,跨越防振锤时 $K=0.78$,均大于临界值0.7,表明机构在典型障碍跨越过程中稳定性良好;当风力增大至10m/s,计算得 $K=0.65$,低于临界值,需调整夹持力至950N,此时 $K=0.76$,恢复稳定状态。

5 越障性能提升路径与设计完善方向

5.1 结构参数对性能提升的主导因素

越障机构的整体性能受到多类结构参数的共同影响,而不同参数之间的耦合关系往往决定跨越动作的稳定程度与执行效率。支撑臂长度与铰接位置决定越障包络范围,也影响重心迁移过程中的力矩平衡;连杆比例与关节布置方式影响姿态转换的柔顺程度,使跨越轨迹能够在受限空间内保持连续性^[5]。夹持单元的开合范围与接触曲率匹配度则直接关系稳定贴合能力,在障碍外形复杂或导线晃动增强的场景中具有决定性作用。驱动装置的输出特性、响应速度与行程范围也属于关键参数,一旦不足,会导致动作延迟或越障中途失衡。各参数的调

参考文献:

- [1] 陈薇,芦耀辉,王云.输电线路巡检机器人的设计及低碳性应用分析[J].现代工业经济和信息化,2025,15(10):111-112.
- [2] 全保恩.高压输电线路巡检机器人机构设计及虚拟样机仿真分析[D].华北水利水电大学,2025.
- [3] 刘艳梅,于佳乐,陈震,等.输电线路巡检机器人修复控制系统[J].沈阳航空航天大学学报,2025,42(03):58-64.
- [4] 卢自强.基于深度学习的输电线路巡检机器人故障识别与定位方法研究[J].电工技术,2025,(S1):267-269.
- [5] 焦震,郭可贵,王法治,等.基于激光传感技术的输电线路巡检机器人自动化避障研究[J].电子设计工程,2025,33(08):63-67.

整往往需要在结构轻量化、刚度提升与运动灵活性之间取得平衡,使机构在不同工况下均具备可靠的跨越能力。

5.2 运动控制策略对跨越质量的影响

越障动作的质量不仅依赖结构本身,还与控制策略的合理性密切相关。姿态调整的节奏、关节同步性以及对外界扰动的响应方式都会影响跨越过程的稳定性。控制策略若能在运动链接近障碍时提前进行微调,便可减少姿态跳变,使支撑点转换更加平滑。加速度与速度规划也是关键环节,过快的动作会放大惯性冲击,过慢的动作会降低贴合稳定性,使机构更易受到导线振动影响。通过引入状态感知模型,可在跨越过程中实时监测姿态变化与受力情况,并对关节指令进行即时修正,使越障轨迹保持在稳定区间内。控制策略与结构能力相互促进,使跨越动作从单一结构驱动转向结构与控制协同完成,从而提升整体运动质量。

5.3 越障机构进一步优化的关键着力点

越障机构的完善方向集中于结构协调性、动力响应特性与智能化调节能力等方面。结构层面可通过调整关节分布与柔性辅助部件的配置,使受力路径更均匀,降低跨越过程中出现峰值载荷的可能性。在驱动系统方面,可强化输出稳定性,使姿态切换阶段的动力冗余更加充足,从而提升在复杂工况下的动作可靠度。感知能力的提升也是重要着力点,越障动作若能结合导线姿态检测、障碍轮廓识别等信息,将使机构具备更强的环境适应性。对运动轨迹规划方式的进一步优化,可在减少能耗的同时提升跨越流畅度,使越障过程更具连贯性。通过这些方向的综合强化,机构能够在多类型障碍与多变外界扰动下保持稳定性能。

6 结语

越障机构的构型特点、运动链约束以及动力学特性共同构成巡检机器人跨越行为的核心基础。结构参数、控制策略与受力环境之间的耦合关系决定跨越动作的稳定性与有效性,也反映出机构设计与运动规划在输电线路场景中的复杂性。越障性能的提升依赖对姿态轨迹、载荷变化与稳定区间的深入分析,使结构优化与控制调整具备明确方向。对关键影响因素的系统梳理能够为高可靠巡检装备的设计奠定坚实技术框架,使机器人在多变线路条件下保持持续、稳健的运行能力。