

# 小型断路器手柄锁定机构力学特性分析与结构参数优化

黄小秋 郑天豪

川力电气有限公司 浙江西屋电气股份有限公司 浙江 乐清 325600

**【摘要】**小型断路器作为电力系统中保障用电安全的关键元件，其手柄锁定机构的可靠性直接决定了断路器在异常工况下能否有效切断电路，避免电气事故的发生。本文以小型断路器手柄锁定机构为研究对象，聚焦其力学特性与结构参数优化展开理论研究。通过建立锁定机构的力学模型，分析关键部件在受力过程中的应力分布、位移变化及传力路径，明确影响机构锁定可靠性的核心力学因素；在此基础上，结合机构的工作原理与性能要求，对影响锁定效果的结构参数进行理论推导与优化分析，提出合理的参数调整方向。研究结果表明，手柄锁定机构的传力效率、关键部件的刚度及接触应力分布是决定其力学性能的主要因素，通过优化锁舌长度、弹簧刚度及手柄转动支点位置等参数，可显著提升机构的锁定可靠性与操作稳定性。本文的研究为小型断路器手柄锁定机构的设计与改进提供了理论依据，对提高小型断路器整体安全性能具有重要意义。

**【关键词】**小型断路器；手柄锁定机构；力学特性；结构参数优化；传力路径；应力分布

DOI:10.12417/2705-0998.25.20.027

## 1 引言

在现代电力系统中，小型断路器广泛应用于家庭、工业场所等各类用电场景，承担着电路过载、短路保护的重要职责，是保障用电安全的第一道防线。手柄锁定机构作为小型断路器的核心功能部件之一，其主要作用是在断路器触发保护动作后，将手柄锁定在分闸位置，防止误操作导致电路意外合闸，进而避免设备损坏或人员触电事故的发生。随着电力设备向小型化、高可靠性方向发展，小型断路器的整体结构不断精简，手柄锁定机构的尺寸也随之减小，这对其力学性能提出了更高要求。若锁定机构在受力过程中出现应力集中、传力不畅或结构变形等问题，将直接导致锁定失效，严重威胁用电安全。因此，深入分析小型断路器手柄锁定机构的力学特性，明确影响其性能的关键因素，并通过结构参数优化提升机构的可靠性与稳定性，已成为小型断路器设计与研发过程中的重要课题。本文围绕这一主题展开理论研究，旨在为小型断路器手柄锁定机构的优化设计提供科学的理论支撑。

## 2 小型断路器手柄锁定机构的工作原理与结构组成

### 2.1 工作原理

小型断路器手柄锁定机构的工作过程与断路器的分闸动作紧密关联，其核心功能是在断路器因过载、短路等故障触发保护机制后，实现手柄的可靠锁定，阻止手柄意外复位。当电路正常运行时，断路器手柄处于合闸位置，此时锁定机构中的锁舌在弹簧的预紧力作用下处于初始位置，与手柄上的锁定槽保持分离状态，不影响手柄的正常操作；当电路出现故障时，断路器内部的脱扣机构动作，带动手柄向分闸位置转动，在手柄转动至设定的分闸位置时，手柄上的锁定槽与锁舌的位置对齐，此时锁舌在弹簧预紧力的作用下迅速嵌入锁定槽内，形成机械锁定，限制手柄的反向转动；当需要解除锁定时，操作人员需通过特定的解锁动作（如按压解锁按钮）克服弹簧的预紧

力，使锁舌从锁定槽中脱出，方可将手柄扳回合闸位置。整个工作过程中，锁定机构需在瞬间完成锁舌的嵌入动作，且在锁定状态下能够承受手柄可能受到的意外外力，确保锁定状态的稳定。

### 2.2 结构组成

小型断路器手柄锁定机构的结构虽因断路器型号与设计方案的不同存在一定差异，但核心组成部件具有共性，主要包括手柄、锁舌、弹簧、解锁部件及固定支架。手柄是机构的操作端与锁定对象，其表面加工有与锁舌配合的锁定槽，锁定槽的形状、深度及位置精度直接影响锁舌的嵌入效果与锁定可靠性；锁舌是实现锁定功能的关键执行部件，通常采用耐磨性能较好的金属材料制成，其头部形状需与锁定槽相匹配，以保证嵌入后的贴合度与稳定性，锁舌的尾部与弹簧连接，在弹簧力的作用下实现往复运动；弹簧为锁舌的运动提供动力，其刚度与预紧力大小决定了锁舌嵌入锁定槽的速度与锁定后的保持力，若弹簧刚度不足或预紧力过小，可能导致锁舌嵌入速度缓慢，无法及时锁定，若刚度过大或预紧力过大，则会增加解锁操作的难度，同时可能导致锁舌与锁定槽接触时产生较大冲击；解锁部件用于实现锁定状态的解除，常见的结构形式包括解锁按钮、解锁拉杆等，其通过机械传动结构与锁舌连接，在操作人员施加外力时带动锁舌运动；固定支架用于固定锁舌、弹簧及解锁部件等组件，保证各部件之间的相对位置精度，支架的刚度与强度需满足机构工作过程中的受力要求，避免因支架变形导致部件位置偏移，影响机构正常工作。

## 3 小型断路器手柄锁定机构力学特性分析

### 3.1 力学模型建立

为深入分析手柄锁定机构的力学特性，需基于机构的结构组成与工作原理建立合理的力学模型。在建立模型过程中，需忽略次要因素的影响，聚焦核心部件的受力与运动关系。以机

构处于锁定状态与锁舌嵌入过程两个关键工况为研究重点，分别建立力学模型。

锁定状态下，以手柄、锁舌与弹簧为受力主体。手柄受意外外力并传递至锁舌，锁舌同时受弹簧预紧力、固定支架约束反力及手柄作用力，处于平衡状态。依据力的平衡条件，建立水平与垂直方向力平衡方程，水平方向弹簧预紧力需不小于手柄作用力的水平分力以防锁舌脱出，垂直方向约束反力与手柄作用力的垂直分力平衡。

锁舌嵌入过程中，以锁舌为运动主体，动力源于弹簧弹性势能释放。弹簧伸展推动锁舌向锁定槽运动，其速度与加速度随弹簧形变量变化。需考虑弹簧弹力特性、锁舌与支架摩擦力及锁舌与锁定槽接触冲击力，建立动力学方程分析锁舌运动规律与受力变化。

### 3.2 应力分布分析

应力分布是评估手柄锁定机构力学性能的重要指标，应力集中可能导致部件疲劳损坏，影响机构寿命与可靠性，机构中锁舌头部、手柄锁定槽边缘及弹簧与锁舌连接部位易产生应力集中。

锁舌头部嵌入锁定槽时，与槽边缘呈点或线接触，接触面积小致应力大；若头部形状不合理或槽边缘有加工缺陷，会加剧应力集中。依据接触应力理论，接触应力与接触力成正比、与接触面积成反比，故二者接触形状应采用圆弧过渡，增大接触面积以降低应力。手柄锁定槽边缘承受锁舌作用力时，因槽口截面突变易生应力集中。塑料手柄长期受应力集中可能变形或开裂，金属手柄也可能产生疲劳裂纹，因此槽边缘需倒角或圆弧处理，减小截面突变，优化应力分布。弹簧与锁舌连接部位受弹簧力时局部应力大，若连接部位尺寸不当，会增大应力集中系数，长期使用可能断裂，需合理设计其结构尺寸，保证强度以避免应力集中。

### 3.3 传力路径分析

传力路径合理性对手柄锁定机构传力效率与受力稳定性至关重要，清晰简洁的传力路径可减少力损耗、避免局部应力过大，其主要包含锁舌嵌入与锁定保持两个阶段。

锁舌嵌入阶段，传力路径为弹簧弹力→锁舌→锁舌头部与锁定槽接触→手柄。弹簧弹力经锁舌传递至接触部位，推动手柄完成分闸定位。若锁舌与支架配合间隙大，锁舌易偏移致传力方向改变，部分弹力转化为侧向力，降低效率且加重支架负担；若弹簧与锁舌运动轴线不同轴，会产生附加力矩使锁舌扭转，影响传力。故需保证二者轴线同轴度，控制配合间隙以确保传力顺畅。

锁定保持阶段，传力路径为手柄意外外力→锁定槽→锁舌→弹簧→固定支架。意外外力经锁定槽、锁舌传递给弹簧，弹簧受压产生反作用力平衡外力，固定支架为弹簧提供支撑形成

传力闭环。若弹簧刚度不足，压缩量大、锁舌位移大，易脱出锁定槽；若固定支架刚度不足，受弹簧压力变形，改变弹簧受力状态影响平衡。因此，合理设计弹簧刚度与支架强度是此阶段传力稳定的关键。

## 4 小型断路器手柄锁定机构结构参数优化

### 4.1 关键结构参数识别

通过对手柄锁定机构力学特性的分析，明确影响机构性能的关键结构参数，主要包括锁舌相关参数（锁舌长度、头部圆弧半径）、弹簧相关参数（弹簧刚度、预紧力）及手柄相关参数（锁定槽深度、锁定槽边缘圆弧半径、手柄转动支点位置）。这些参数不仅直接决定了机构的结构尺寸，还对机构的力学性能（如接触应力、传力效率、锁定可靠性）产生显著影响，因此成为结构参数优化的核心对象。

### 4.2 各关键参数的优化分析

#### (1) 锁舌参数优化

锁舌长度对嵌入深度与锁定稳定性影响显著。过短会使嵌入锁定槽深度不足，受意外外力易脱出，降低可靠性；过长虽能增加嵌入深度，但会加大锁舌与支架配合长度，导致摩擦力上升、运动速度受影响，还可能增大机构尺寸，不符合小型断路器小型化要求。故锁舌长度优化需在保证足够嵌入深度基础上尽量缩短，以减小摩擦力与机构尺寸。依据力学模型，嵌入深度需确保受最大意外外力时锁舌不脱离锁定槽，结合尺寸限制，可通过理论计算确定合理长度范围。

锁舌头部圆弧半径关乎接触应力分布。半径过小，锁舌与锁定槽接触面积减小，接触应力增大，易生应力集中；半径过大，虽能增大接触面积、降低应力，但会降低二者贴合度，可能导致锁舌晃动，影响锁定稳定性。因此需结合接触应力理论与锁定槽形状优化该半径。理论推导表明，当锁舌头部圆弧半径与锁定槽圆弧半径匹配时，接触面积最大、贴合度最佳、接触应力最小、锁定稳定性最高，故该半径应按锁定槽圆弧半径适配设计。

#### (2) 弹簧参数优化

弹簧刚度是决定锁舌嵌入速度与锁定保持力的关键参数。弹簧刚度过小，会导致弹簧的弹力不足，锁舌嵌入锁定槽的速度缓慢，可能无法在手柄到达分闸位置时及时完成锁定，影响机构的响应速度；同时，刚度过小还会导致锁定保持力不足，在受到意外外力时易出现锁舌位移过大的情况。弹簧刚度过大，会使锁舌嵌入速度过快，与锁定槽接触时产生较大的冲击力，加剧应力集中，同时会增加解锁操作的力度，降低操作便捷性。因此，弹簧刚度的优化需综合考虑机构的响应速度、锁定保持力与操作便捷性。通过建立弹簧刚度与锁舌嵌入速度、锁定保持力及解锁力的理论关系，结合机构的性能要求（如嵌入时间、最大解锁力限制），可确定弹簧刚度的最优值范围。

弹簧预紧力是保证锁舌在初始位置与嵌入过程中受力稳定的重要参数。预紧力过小，会导致锁舌在初始位置时与支架之间的间隙无法消除，可能出现晃动，影响锁舌与锁定槽的对齐精度；预紧力过大，会导致弹簧在初始状态下的压缩量过大，缩短弹簧的使用寿命，同时会增加锁舌与支架之间的初始摩擦力，影响锁舌的运动灵活性。因此，弹簧预紧力的优化需以消除锁舌初始晃动、保证锁舌运动灵活为目标。根据锁舌的初始位置与支架的配合间隙，通过理论计算确定最小预紧力，在此基础上适当增加预紧力，以保证锁舌的稳定，但需控制在弹簧的疲劳寿命允许范围内。

### (3) 手柄参数优化

锁定槽深度与锁舌嵌入深度关联紧密，直接影响锁定可靠性。过浅会使锁舌嵌入不足易脱出，过深则增大手柄尺寸且延长锁舌嵌入行程、影响速度。故锁定槽深度需与锁舌嵌入深度匹配，依据锁舌优化长度与嵌入要求确定，通常略大于锁舌嵌入深度，以保障锁舌完全嵌入，规避深度不当问题。

锁定槽边缘圆弧半径对优化手柄应力分布至关重要。半径过小会加剧应力集中，过大则影响与锁舌配合精度，可能导致锁舌位移。需结合手柄材料力学性能与应力要求优化，塑料手柄强度低，需较大圆弧半径减应力集中；金属手柄可适当减小半径，但需保证应力集中系数在允许范围。

手柄转动支点位置影响手柄受力、操作便捷性及锁舌对齐精度。支点过近端部，力臂长，意外外力下产生大扭矩，加重锁舌与锁定槽负担；过近锁定槽，操作力臂短，增加操作力度。且支点偏移会影响锁定槽与锁舌对齐，偏差大则锁舌无法嵌入。优化需综合多因素，通过建立力矩平衡与运动轨迹方程，确定最优位置，满足操作力要求并保证精准对齐。

### 4.3 参数优化的约束条件

在进行结构参数优化过程中，需考虑多方面的约束条件，以确保优化后的参数满足机构的整体性能要求与实际应用场景限制。首先是尺寸约束，小型断路器的整体尺寸有限，手柄锁定机构作为其内部部件，各结构参数的优化需在断路器的尺寸限制范围内进行，避免因参数优化导致机构尺寸过大，无法安装；其次是材料性能约束，各部件所采用材料的强度、刚度、疲劳寿命等性能参数对优化结果具有限制作用，如弹簧的刚度与预紧力需控制在材料的弹性极限范围内，避免弹簧出现塑性变形，锁舌与手柄的参数优化需考虑材料的耐磨性能与抗疲劳性能，确保部件的使用寿命；最后是操作性能约束，优化后的机构需保证操作便捷性，如解锁力需控制在操作人员可轻松施加的范围内，手柄的操作力需符合相关标准要求，避免因参数优化导致操作难度增加。

## 5 结论

本文围绕小型断路器手柄锁定机构力学特性与结构参数优化展开理论研究，得出主要结论：其一，机构力学性能取决于应力分布、传力路径及关键部件受力平衡，锁舌头部、手柄锁定槽边缘等为应力集中关键部位，需优化结构减小应力；传力路径顺畅性影响传力效率，需保证弹簧与锁舌轴线同轴度，控制配合间隙。其二，锁舌长度、弹簧刚度、锁定槽深度等为核心结构参数，各参数相互关联制约，需协同优化，如锁舌长度与锁定槽深度匹配，弹簧刚度兼顾嵌入速度与操作力，单一参数优化无法提升整体性能。其三，参数优化需受尺寸、材料性能、操作性能约束，小型化需求限制尺寸，材料特性决定参数范围，操作性能约束保障实用性，三者构成优化边界条件。其四，本文建立的力学模型与优化方法，为机构设计提供理论框架，可定量分析受力与运动特性，指导确定参数方案，缩短研发周期。

## 参考文献：

- [1] 潘庆元.小型断路器操作机构的运动及静力分析[J].电器与能效管理技术,2018(14):7-12.
- [2] 黄佳,史克少,赵明,等.小型断路器操作机构优化设计[J].电器与能效管理技术.2022,(10).
- [3] 牛哲.断路器操作机构的设计与实现研究[J].电子世界.2016,(24).
- [4] 谢振华,王铮,何普全,等.小型断路器合分闸操作试验系统的设计及试验分析[J].电器与能效管理技术,2024(10):53-58.
- [5] 唐庭,陈柏霖,汪泰宇.小型断路器操作机构与受力分析[J].电器与能效管理技术,2019(3):35-39,44.