

# 核电站DCS机柜门锁传动机构接地问题的研究

Research on Grounding Problems of Door Lock Mechanisms of DCS Cabinets in Nuclear Power Plants

★北京广利核系统工程有限公司 张伟

**摘要:** 针对DCS机柜门锁系统在机械接地连续性测试过程中发现接地导通不可靠的问题, 本文对门锁传动机构进行了研究, 发现传动机构外壳与转轴及锁杆之间存在缝隙, 导致二者接触不可靠, 因此使得接地导通电阻不符合标准要求。本研究通过在传动机构与转轴之间安装导通弹簧, 在传动机构外壳与锁杆之间安装导通弹簧片, 使得二者可靠接触且满足导通电阻小于 $0.1\Omega$ 的要求。

**关键词:** 机柜; 门锁系统; 传动机构; 接地

**Abstract:** In response to the issue of unreliable grounding continuity discovered during the mechanical grounding test of the DCS cabinet door lock system, this paper conducts a study on the gearing mechanism of the door lock system. Because there are gaps between the gearing mechanism's shell and the shaft and bolts, the grounding resistance is too high to meet the standard requirements. This research addresses the problem by installing conductive springs between the shell and the shaft and a spring piece between the shell and the bolts, which can ensure reliable contact between them and meet the requirement of grounding resistance less than  $0.1\Omega$ .

**Key words:** Cabinet; Door lock system; Gearing; Grounding

“安全第一”是我国核电发展的基本方针。DCS机柜是核电站重要设备之一, 其安全性直接关系到核电站的安全、稳定和可靠运行。DCS机柜的机械接地连续性是其用电安全的重要保证, RCC-E《核岛电气设备设计和建造规则》MC3330要求门把手须与保护地导通, MC3340要求导通电阻小于 $0.1\Omega$ , 其目的正是为了保证相关操作人员的人身安全。

## 1 技术现状

核电站DCS机柜常用门锁系统如图1所示, 包括门锁、传动机构、上锁杆、下锁杆及导向块。其中: 门锁(包含门把手)为外购标准产品, 一般为塑料材质或金属材质(表面喷漆); 传动机构为外购标准产品, 与门锁配套使用, 为金属材质(表面镀锌); 锁杆一般根据机柜高度尺寸自行设计加工, 为金属材质(表面镀锌); 导向块为外购标准产品, 与锁杆配

套使用, 一般为塑料材质或铸铝材质(表面喷漆)。

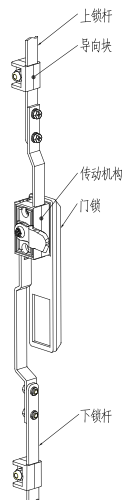


图1 门锁系统示意

机柜产品在结构设计过程中, 通过在传动机构安装孔周围喷涂保护(如图2所示)实现门锁系统与机柜保护地的接地导通。在喷涂保护区域, 传动机构外壳可直接与门板金属材料接触, 从而实现传动机构与门板的接地导通; 传动机构外壳与门把手通过转轴连接, 因为传动机构外壳与转轴均为镀锌材质, 因此也可以保证二者接地导通; 传动机构外壳与锁杆均为镀锌材质, 在转轴带动传动齿轮推动上下锁杆运动过程中可实现传动机构外壳与锁杆的接地导通。

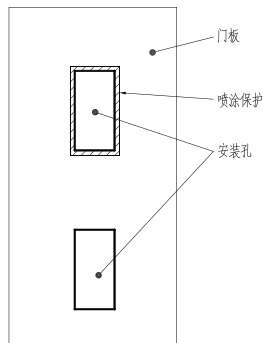


图2 门锁及传动机构安装孔示意

RCC-E《核岛电气设备设计和建造规则》要求机柜门把手须与保护地导通，且导电电阻小于 $0.1\Omega$ 。项目机柜外购门锁材质有两种：塑料材质和金属材质（表面喷漆）。塑料材质满足绝缘要求，不存在操作人员触电风险；金属材质（表面喷漆）虽然也满足绝缘要求，但一旦表面涂层破损仍存在操作人员触电风险。如果机柜内部意外漏电，与门锁系统接触部位有可能为锁杆、传动结构外壳或转轴。只要保证这些部位可靠接地导通即可保证门把手无带电风险。

## 2 现有技术存在的问题

在对项目4台DCS机柜门锁系统执行机械接地连续性测试时，我们发现2台机柜门锁接地导通不符合标准要求：导电电阻大于 $0.1\Omega$ 且测试数值不稳定。为确定问题原因，我们分别执行了四种测试方案，具体如表1所示。

表1 门锁系统接地导通测试方案

测试方案	A表笔测点	B表笔测点	测试结果	备注
方案1	传动机构转轴螺钉	机柜保护地铜排	不通过	标准方案
方案2	锁杆	机柜保护地铜排	不通过	变更方案
方案3	传动机构转轴螺钉	传动机构外壳	不通过	变更方案
方案4	锁杆	传动机构外壳	不通过	变更方案

注：传动机构自身相关测点如图3所示。

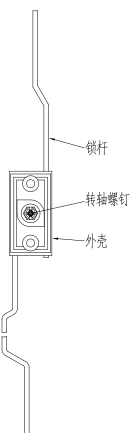


图3 传动机构测试点示意

我们按上述四种测试方案对机柜门锁系统执行机械接地连续性测试时，发现它们均存在导电电阻大于 $0.1\Omega$ 的情况，且电阻值不稳定，在 $30\text{m}\Omega$ 到 $200\text{m}\Omega$ 的范围内跳动。因此我们判定该机柜门锁系统机械接地连续性不符合要求。

## 3 针对问题的研究

在上述机柜门锁系统机械接地连续性测试过程中，当测得

电阻值过大或不稳定时我们随意转动一下门锁把手，偶尔可以得到较低且稳定的满足要求的电阻值。因此我们初步推断：传动机构自身问题是导致门锁系统机械接地连续性测试不满足要求的根本原因。

### 3.1 传动机构研究

为查明具体原因，我们对传动机构的结构进行了研究。

如图4所示，传动机构主要包括8部分：（1）外壳；（2）上锁杆；（3）下锁杆；（4）转轴螺钉；（5）限位垫片；（6）转轴；（7）齿轮；（8）橡胶垫圈。其中：（1）外壳用于固定承载其他7种零部件，并用于与门锁及柜门安装连接；（2）上锁杆和（3）下锁杆用于与门锁系统上下锁杆连接；（4）转轴螺钉用于安装锁舌和固定（5）限位垫片；（5）限位垫片用于控制门锁把手的旋转角度；（6）转轴贯穿（1）外壳，一端与门锁把手连接配合，一端与（4）转轴螺钉及（5）限位垫片连接，中间与（7）齿轮连接配合；（7）齿轮与（6）转轴连接配合，同时与（2）上锁杆和（3）下锁杆啮合；（8）橡胶垫圈安装在（1）外壳与（6）转轴之间。

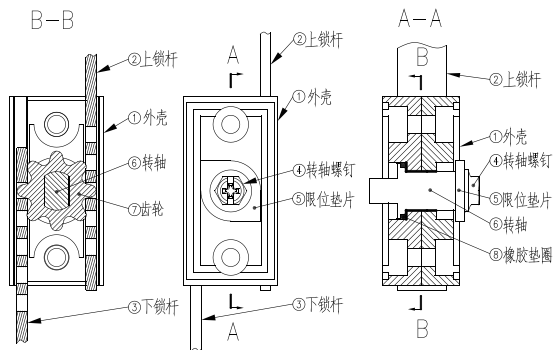


图4 传动机构结构

当操作人员开启门锁旋转门把手时，门把手会带动（6）转轴转动，从而带动（7）齿轮、（5）限位垫片及（4）转轴螺钉转动，从而带动（2）上锁杆和（3）下锁杆移动，从而实现柜门的开启与闭合。在传动机构整个工作过程中，可以发现只有（1）外壳是固定不动的，（6）转轴、（7）齿轮、（5）限位垫片、（4）转轴螺钉、（2）上锁杆和（3）下锁杆均为活动零部件，相对活动便存在缝隙：（6）转轴与（1）外壳之间、（7）齿轮与（2）上锁杆和（3）下锁杆之间、（2）上锁杆和（3）下锁杆与（1）外壳之间、（5）限位垫片与（1）外壳之间，均存在缝隙。

### 3.2 问题原因的确定

通过上述分析，我们发现传动机构零部件之间的缝隙可能是导致门锁系统机械接地连续性测试不满足要求的根本原因。

为验证该推断，我们按表1所示方案重新进行门锁系统接地导通测试，测试结果如表2所示。

表2 验证推断测试

测试方案	A表笔测点	B表笔测点	测试结果	备注
方案1	传动机构 转轴螺钉	机柜保护地 铜排	通过	注(1)
方案2	锁杆	机柜保护地 铜排	通过	注(2)
方案3	传动机构 转轴螺钉	传动机构 外壳	通过	
方案4	锁杆	传动机构 外壳	通过	

注：(1) 按方案1测试时，A表笔与转轴螺钉的接触角度与初次测试不同，如图5所示，且施加较大推力。

(2) 按方案2测试时，A表笔与锁杆的接触角度与初次测试相同，但施加较大推力，如图6所示。

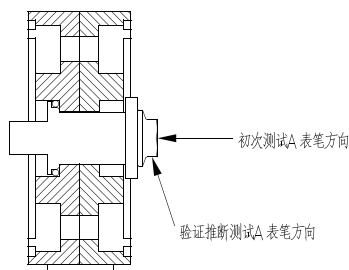


图5 转轴螺钉A表笔测试方向

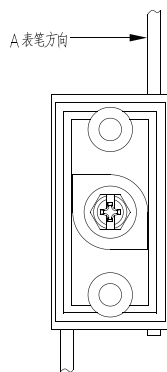


图6 锁杆A表笔测试方向

如图5所示，验证测试时A表笔与转轴螺钉成一定角度并施加较大推力，目的是在推力的作用下使转轴发生倾斜，从而使转轴与传动机构外壳接触。如图6所示，验证测试时A表笔与锁杆垂直并施加较大推力，目的是在推力的作用下使锁杆发生倾斜，从而使锁杆与传动机构外壳接触。测试结果：每种方案导电电阻均小于 $0.1\Omega$ 且数值稳定，符合要求。因此我们可以确定：传动机构零部件之间的缝隙是导致门锁系统机械接地连续性测试不满足要求的根本原因。

## 4 技术改进

消除传动机构零部件之间的缝隙使其可靠接触，是解决门

锁系统机械接地连续性测试不通过问题的关键所在。消除相对活动物体之间的缝隙在现实中不可实现，而在相对活动物体之间安装弹性元件可使其有效接触。

### 4.1 转轴与外壳导通

如图7所示，在限位垫片与外壳凹槽中安装一个压缩弹簧可实现转轴与外壳的导通。

(1) 材质选择：压缩弹簧选用304不锈钢材质。

(2) 尺寸估算：根据外壳凹槽及转轴尺寸，初步确定压缩弹簧的尺寸：外径 $D_1 < 16\text{mm}$ ；内径 $D_2 > 11\text{mm}$ ；簧丝直径 $d < 2.5\text{mm}$ ；自由高度 $H = 10\text{mm}$ 为宜。根据上述条件初步设计压缩弹簧的相关尺寸为：中径 $D = 13\text{mm}$ ；簧丝直径 $d = 1.5\text{mm}$ ；有效圈数 $n = 3$ ；自由高度 $H = 10\text{mm}$ 。则压缩弹簧簧丝截面积 $S \approx 1.76\text{mm}^2$ ；簧丝有效长度 $l \approx 123\text{mm}$ 。

(3) 电阻计算：根据公式 $R = \frac{\rho l}{S}$ 计算压缩弹簧电阻。式中： $R$ 为弹簧电阻， $\Omega$ ； $\rho$ 为弹簧电阻率， $0.73 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$ ； $l$ 为簧丝有效长度， $\text{m}$ ； $S$ 为簧丝截面积， $\text{m}^2$ 。则 $R = \frac{\rho l}{S} = \frac{0.73 \times 10^{-6} \times 123}{1.76} \approx 0.051 \Omega$ 。

(4) 尺寸确定：如图8所示，确定压缩弹簧相关尺寸为：中径 $D = 13\text{mm}$ ；簧丝直径 $d = 1.5\text{mm}$ ；自由高度 $H = 10\text{mm}$ ；有效圈数 $n = 3$ 。两端不并紧磨平 $1/4$ 圈。

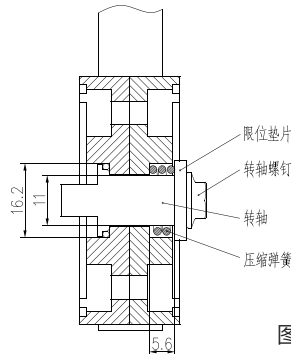


图7 压缩弹簧安装位置

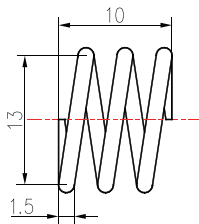


图8 压缩弹簧尺寸

### 4.2 锁杆与外壳导通

如图9所示，在锁杆与外壳之间安装一个弹簧片可实现锁杆与外壳的导通。

(1) 材质选择：弹簧片选用QBe2铍青铜材质。

(2) 尺寸估算：根据外壳轮廓尺寸、锁杆位置及弹簧片安装位置，初步确定压缩弹簧的尺寸：长 $L = 56\text{mm}$ ；宽

W=29mm; 厚度t=0.2mm; 弹片宽度W'=8mm; 弹片自然高度H=7mm。则弹簧片与导通电阻相关截面积S=1.6mm<sup>2</sup>; 弹簧片与导通电阻相关长度l≈11mm。

(3) 电阻计算: 根据公式 $R=\frac{\rho l}{S}$ 计算弹簧片导通电阻。式中: R为弹簧片导通电阻, Ω; ρ为弹簧片电阻率, 0.038X10<sup>-6</sup>Ω·m; l为弹簧片相关长度, m; S为弹簧片相关截面积, m<sup>2</sup>。则 $R=\frac{\rho l}{S}=\frac{0.038 \times 0.011}{1.6} \approx 2.6 \times 10^{-4} \Omega$ 。

(4) 尺寸确定: 如图10所示, 确定弹簧片相关尺寸为: 长L=56mm; 宽W=1.5mm; 弹片宽度W'=8mm; 弹片自由高度H=7mm; 厚度t=0.2。中间开孔为工艺孔, 可避免与传动机构相关结构干涉, 同时也起到定位作用。

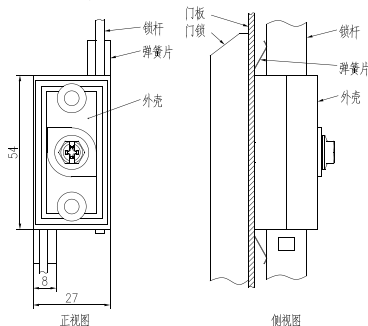


图9 弹簧片安装位置

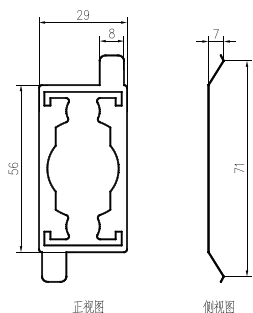


图10 弹簧片尺寸

#### 4.3 验证

在项目12台DCS机柜(24套门锁系统)安装改进的门锁系统按表1中方案1和方案2进行测试, 以验证改进方案的可行性。它们的测试结果均为通过, 导通电阻值基本在20mΩ~50mΩ之间, 且数值稳定。按表1方案1测试结果如表3所示。

表3 验证改进方案测试

机柜编号	前门锁电阻Ω	后门锁电阻Ω	测试结果
1.	0.023	0.027	通过
2.	0.034	0.036	通过
3.	0.027	0.031	通过
4.	0.030	0.024	通过
5.	0.026	0.044	通过
6.	0.033	0.032	通过
7.	0.040	0.051	通过
8.	0.054	0.027	通过
9.	0.032	0.032	通过
10.	0.054	0.040	通过
11.	0.026	0.032	通过
12.	0.055	0.049	通过

由表3可见, 该改进方案可以有效消除传动机构零部件之间的缝隙而使其可靠接触, 从而保证门锁系统机械接地连续性。

## 5 结束语

从技术角度考虑, 解决传动机构外壳与转轴及外壳与锁杆的导通问题可能有更多方案, 如从传动机构内部进行改善效果会更好, 但需要更长的时间和更高的成本。而从项目角度考虑, 在不改变原产品的情况下, 通过增加安装压缩弹簧和弹簧片解决问题, 既有效缩短了项目周期又节约了项目成本, 无疑是最佳方案。

核电无小事, 凡与安全相关的技术方案均不能单凭经验确定其可靠性, 而须有充分的理论支撑, 并通过实践验证。机柜门锁系统机械接地连续性在整个仪控系统中, 甚至在单个机柜系统中微不足道, 但该问题的提出及问题的解决却具有里程碑意义, 既对外购门锁及其传动机构提出了新的更高要求, 也为核电行业及其他行业相关门锁系统的接地导通问题提供了重要的技术参考。AP

#### 作者简介:

张伟(1979-), 男, 北京人, 高级工程师, 学士, 现就职于北京广利核系统工程有限公司, 主要从事核电厂非安全级仪控系统设计方面的研究。

#### 参考文献:

- [1] RCC-E-2005, 核岛电气设备设计和建造规则[S].
- [2] GB/T 20878-2007, 不锈钢和耐热钢牌号和化学成分[S].
- [3] YS/T 323-2019, 铍青铜板材、带材和箔材[S].
- [4] 成大先. 机械设计手册(第3卷)[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.