

# 特高压换流变压器套管电连接结构 地震累积效应评估方法研究

庄一豪,毛宝俊,谢强

(同济大学土木工程学院,上海 200092)

**摘要:**地震作用下换流变压器套管会产生位移响应,响应剧烈时其尾端电连接结构可能产生损伤。为了研究地震作用下换流变压器阀侧套管电连接结构的损伤累积效应,文中以换流变压器套管表带触指型电连接结构作为研究对象,建立了精细化的有限元模型。通过有限元计算,可以得到重力和地震作用下表带页片和连接母头内壁的接触压强和位移响应。基于 Archard 磨损模型,提出了一种在地震作用下表带触指磨损深度的计算方法。以磨损深度作为地震损伤累积的指标,对不同地震强度下表带触指页片磨损的程度进行了对比分析,计算了多次地震作用下的累积磨损深度。发现随着地震强度提高,表带触指的接触压强变化不大,但摩擦行程有较程度的增大,使得磨损深度也会进一步加深。在不同强度的地震作用下,磨损的分布呈现不均匀但规律的特点,磨损深度的最大值总是出现在最远离连接公头根部的表带的上方页片。重力作用对电连接结构不同部件的磨损差异影响很大。尽管单次地震作用下磨损深度总体较小,仍旧存在局部磨损破坏的可能,应当重视地震作用下的损伤累积效应。

**关键词:**表带触指;套管电连接结构;有限元;磨损;地震响应

中图分类号:TM 41 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2022)06-0007-09

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20220602

## Research on Evaluation Method of Seismic Cumulative Effect of Electrical Connection Structure of Valve-side Bushing in Converter Transformer

ZHUANG Yihao, MAO Baojun, XIE Qiang

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** The electrical connection structure of converter transformer bushing produces strong stress-displacement response under seismic action, which leads to damage inside it. In order to investigate the cumulative damage of electrical connection structure of valve-side bushing in converter transformer under different seismic effects, the corresponding finite element model is established by taking the electrical connection structure with strap contact of converter transformer bushing as the research object. The contact pressure and displacement response of inner wall of strap page and strap female head under gravity and seismic action are obtained by finite element calculation. Based on Archard wear model, a calculation method is introduced for the wear depth of strap contact under seismic action. Taking the wear depth as an index of cumulative seismic damage, the degrees of wear of different components under different earthquake intensities are compared and analyzed, and finally the cumulative wear depth under several seismic actions is calculated. It is found that as the earthquake intensity increases, the contact pressure of strap contact does not change much, but there is a great increase in friction stroke, which makes the friction depth deepen further. Under the seismic action of different intensities, the distribution of wear shows uneven but regular characteristics, and the maximum value of wear depth always appears in the upper page of strap furthest from the root of male head. Therefore, it is concluded that gravity has a great influence on the wear difference of different parts of electrical connection structure. At the same time, although the overall wear depth under a seismic action does not seem to be large, there is still the possibility of local wear damage under multiple earthquakes, so it should pay attention to the cumulative damage under seismic action.

**Key words:** strap contact; electrical connection structure; finite element; wear; seismic response

## 0 引言

中国是地震多发国家。地震灾难发生时,生命线系统是人民群众的安全以及抢险救灾过程顺利及时的重要保证。众多地震事故表明,作为生命线系统的重要组成部分,电力系统在地震中的损坏将波及整个基础设施系统<sup>[1]</sup>。当前中国大量采用直流输电方案。作为直流输电的关键设备,大型变压器系统由于其大质量、高重心、低材料强度的特点,尤其容易受到破坏<sup>[2-3]</sup>。因此,需要保证换流变压器在不利工况下依旧保持稳定运行。

变压器套管是换流变压器上最有可能发生故障的一次部件<sup>[4]</sup>。套管内部的电连接结构更是变压器载流的重要构件,位置如图 1 所示。近两年,国内发生了多起套管电连接结构故障导致的特高压换流变压器事故<sup>[5-8]</sup>,一旦套管电连接结构出现故障,可能影响整个套管结构的安全运行。



图 1 变压器套管电连接结构

电连接结构种类繁多,样式丰富,包括拉杆型、螺栓型、螺纹型、表带触指型以及弹簧触指型等类型。众多研究表明,表带触指型电连接结构有着优越的电连接性能,能更好地满足工程的需要<sup>[7,9-10]</sup>。然而,表带触指型电连接结构载流性能易因结构内部的损伤而劣化<sup>[10-12]</sup>。

地震发生时,变压器将受到剧烈的震动,电连接结构的内部容易因此而产生磨损,为表带触指结构的继续运行埋下隐患,在后续运行中使整个表带触指电连接结构性能劣化,影响整个套管结构的正常运行。目前,国内对套管的抗震性能研究主要聚焦于地震作用下的结构破坏<sup>[13-16]</sup>,而对地震下的损伤累积效应缺乏关注。因此,有必要深入研究套管电连接结构在不同工况作用下的累积磨损效应。

下面将以表带触指型电连接结构的套管有限元

模型作为实验对象,研究其内部电连接结构在重力作用后和地震作用下的响应。并根据 Archard 提出的磨损模型,计算电连接结构内部在经历连续多次地震后的损伤情况,以此探究地震条件下套管电连接结构的损伤累积效应。

## 1 换流变压器套管电连接结构有限元模型

### 1.1 建模

根据厂家提供的设备图纸和详细规格参数,利用 Abaqus 软件进行阀侧套管及其尾部电连接结构的建模,如图 2 所示。

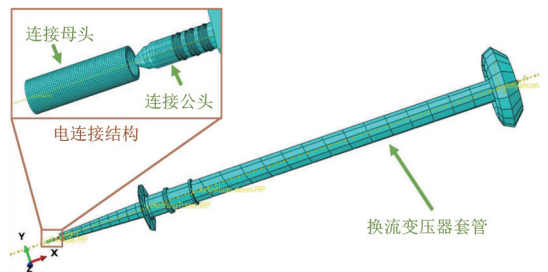


图 2 带有表带触指型电连接结构的阀侧套管有限元模型

根据 HSP 公司生产的 GSETF 型阀侧套管参数进行建模,总长 16.10 m。该套管与竖直方向呈  $53^\circ$  夹角。均压环部分为 S4R 壳单元,套管其余部分为 C3D8R 实体单元。套管电容芯体刚度较大,与法兰固接,按照电气行业相关规定,设定其弹性模量为  $24 \text{ GPa}$ <sup>[17]</sup>。

电连接结构位于阀侧套管尾端,由连接母头、连接公头以及公头上的表带触指组成,其有限元模型如图 3 所示。每圈表带触指由 47 片表带组成。表带触指和连接母头的相互作用类型为面-面接触,其中接触压力与穿透的关系以线性公式定义,接触刚度为  $8.0 \times 10^8$ 。摩擦关系设置为罚函数,摩擦系数取  $0.1$ <sup>[18]</sup>。有限元模型阻尼取  $2\%$ <sup>[19-20]</sup>。具体参数如表 1 所示。

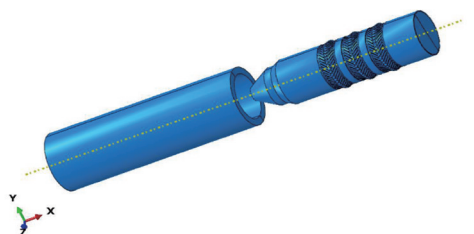


图 3 表带触指型电连接结构模型有限元模型

表 1 电连接结构各部件材料属性和尺寸

| 部件       | 材料       | 密度/<br>( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) | 弹性模量<br>/GPa | 尺寸/mm           | 其他数据                 |
|----------|----------|--|--------------|-----------------|----------------------|
| 表带<br>触指 | 铜基<br>镀银 | 8900                                       | 119.0        | 12×25<br>(每片表带) | 触指页片<br>顶端呈<br>15°夹角 |
| 连接<br>母头 | 紫铜       | 8900                                       | 119.0        | 90              | 壁厚 15.5 mm           |
| 连接<br>公头 | 紫铜       | 8900                                       | 119.0        | 64              | —                    |

1.2 表带命名及页片编号

该型号电连接结构每圈表带由 47 片触指页片组成,三圈表带共有 141 片触指页片。对于表带,按照离套管尾部的距离由近及远分别命名为 A、B、C,如图 4 所示。对于单圈表带上的触指,以从连接母头向连接公头的视角方向进行编号,以最上端页片为 1 号页片开始顺时针方向进行命名,并定义 12 点、3 点、6 点、9 点 4 个代表性方位,如图 5 所示。

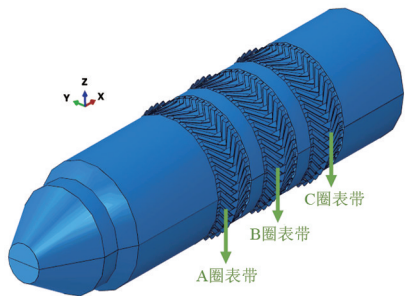


图 4 A 圈表带、B 圈表带和 C 圈表带的位置

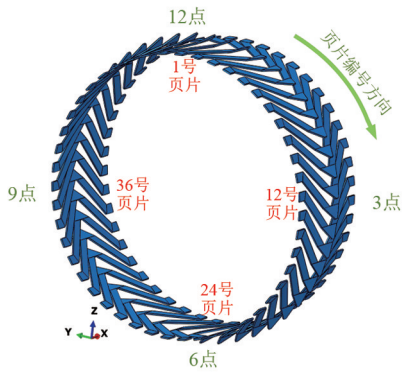


图 5 表带页片编号规律

1.3 模态分析

采用 Lanczos 方法对该套管的动力特征进行分析,得到其前 10 阶振型,如表 2 所示。由于模型关于 X 轴旋转对称,因此 Z、Y 轴的响应一致,奇数和偶数阶的频率彼此相似。

所选取变电站地区为 II 类场地类别、第 III 组设计地震分组,场地特征周期取 0.5 s。GB 50260—2013《电力设施抗震设计规范》<sup>[19]</sup> 规定的地震反应谱

中,平台段的覆盖频率为 2~10 Hz。对于所研究的阀侧套管,其 1 到 8 阶振型的频率与场地卓越周期接近,易发生共振效应,破坏风险大。

表 2 套管-电连接结构前 10 阶主要振型与频率

| 阶数 | 频率/Hz  | 振型                                  |
|----|--------|-------------------------------------|
| 1  | 1.933  | 电容芯体 Y 向一阶弯曲、套管 Y 向一阶弯曲             |
| 2  | 1.944  | 电容芯体 Z 向一阶弯曲、套管 Z 向一阶弯曲             |
| 3  | 2.257  | 电容芯体 Z 向一阶弯曲、套管 Z 向一阶弯曲、导电杆 Z 向一阶弯曲 |
| 4  | 2.261  | 电容芯体 Y 向一阶弯曲、套管 Y 向一阶弯曲、导电杆 Y 向一阶弯曲 |
| 5  | 4.785  | 导电杆 Z 向二阶弯曲                         |
| 6  | 4.797  | 导电杆 Y 向二阶弯曲                         |
| 7  | 11.709 | 电容芯体 Y 向二阶弯曲、套管 Y 向二阶弯曲、导电杆 Y 向三阶弯曲 |
| 8  | 11.748 | 电容芯体 Z 向二阶弯曲、套管 Z 向二阶弯曲、导电杆 Z 向三阶弯曲 |
| 9  | 13.020 | 电容芯体 Y 向二阶弯曲、导电杆 Y 向高阶弯曲            |
| 10 | 13.023 | 电容芯体 Z 向二阶弯曲、导电杆 Z 向高阶弯曲            |

2 电连接结构正常工作状况下受力情况

电连接结构装配之后,连接公头上的触指与连接母头内壁接触,并产生压强。重力会改变该压强大小。在有限元计算中,重力沿 Z-X 平面施加。

正常工作状况下套管仅受到重力。对比重力荷载施加前后的接触压强,结果如图 6 所示。可以发现,在重力作用下,12 点方位页片的接触压强明显上升,6 点方位页片的接触压强明显下降。

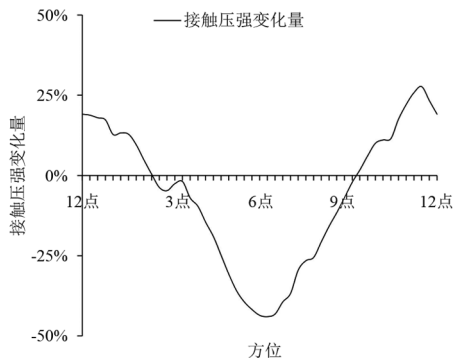


图 6 表带在重力影响下的接触压强变化 (以 A 圈表带为例)

该现象可以从结构特点解释,套管由升高座顶板固定。在重力作用下,套管呈现杠杆效应,连接公头出现上翘的趋势。这使得表带 12 点方位压力增大,6 点方位的压力降低。

图 7 展示了不同表带页片的接触压强。C 圈表

带的 46 号页片出现了数据的突变,应是计算错误导致,对分析影响不大,因此忽略该数据。三圈表带的接触压强在 3 点和 9 点两个水平方位类似,而在 6 点和 12 点两个垂直方位却出现差异。结合前面提到的“杠杆”效应,可以认为,连接公头抬起的作用力随着表带与升高座支撑处的距离远近而变化,A 圈表带距离最远,受到抬起作用最大,因此 12 点方位 A 圈表带的压强最大。

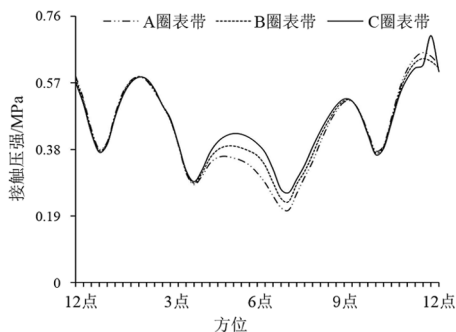


图 7 表带在重力影响下的接触压强情况

### 3 变压器套管电连接结构地震响应

#### 3.1 输入地震动选择

所选取的换流变压器所在变电站地区抗震设防烈度为 7 度。根据 T/CSEE 0010—2016《1000 kV 变电站抗震设计规范》<sup>[20]</sup>与 GB 50260—2013《电力设施抗震设计规范》<sup>[19]</sup>,重要电气设施应提高一度设防,取  $0.2g$  为设计基本峰值地面加速度。本次研究采用 Landers 波进行地震时程分析,图 8 为  $0.2g$  Landers 波绘制而成的三向加速度反应谱和场地需求谱,所取地震反应谱能较好包络住场地需求反应谱。这里采用地面峰值加速度表征地震强度。为了探究地震强度对套管电连接结构损伤累积的影响,还计算了  $0.4g$ 、 $0.6g$ 、 $0.8g$  Landers 波作用下的响应。

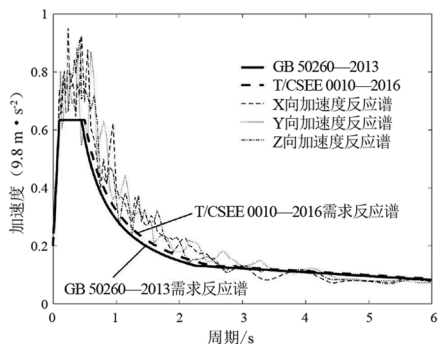
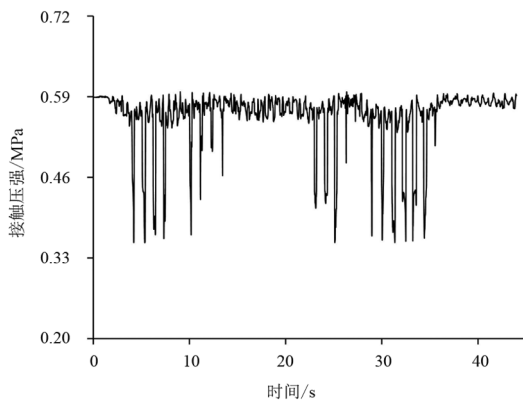


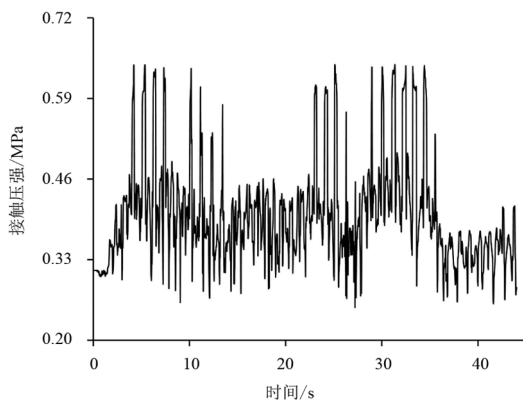
图 8 三向加速度反应谱与场地需求谱 (以  $0.2g$  Landers 波为例)

#### 3.2 电连接结构地震作用下接触压强响应分析

地震会导致表带触指与连接母头内壁间接触压强变化。由于触指页片众多,仅对 1 号、24 号两处代表性的表带页片进行分析。由于不同地震强度下不同表带接触压强时程相似,仅绘制 A 圈表带在  $0.2g$  Landers 波作用下的接触压强时程曲线,如图 9 所示。



(a) A圈表带1号触指(12点方位)



(b) A圈表带24号触指(6点方位)

图 9  $0.2g$  Landers 波作用下触指页片接触压强时程曲线(12点、6点方位)

如图 9 所示,12 点方位表带的接触压强水平大多数时候均更高。此外,两个方位的接触压强存在明显的突变对应关系。计算表明,3 点和 9 点方位的页片同样呈现突变对应的特点,这与表带触指电连接结构的插接特征吻合。表带接触压强计算结果如表 3 所示。

由表 3 可知,页片接触压强的大小随着地震强度的提高而增大,但幅度不明显。从图 10 所示触指结构解释,触指页片的根部处于连接公头的凹槽内,当某页片受到较大压力时,其会被压入凹槽内部,这限制了其接触压强的进一步增大。因此,表带触指页片在不同强度地震作用下的接触压强不应当是影响累积磨损损伤深度的主要因素。



表 3 不同强度地震作用下表带接触压强

| 地震峰值<br>加速度 | 表带<br>圈号 | 地震作用下表带平均接触压强/MPa |       |       |       |       |
|-------------|----------|-------------------|-------|-------|-------|-------|
|             |          | 12 点              | 3 点   | 6 点   | 9 点   | 所有页片  |
| 0.2g        | A        | 0.559             | 0.503 | 0.401 | 0.504 | 0.447 |
|             | B        | 0.548             | 0.508 | 0.438 | 0.508 |       |
|             | C        | 0.534             | 0.516 | 0.472 | 0.510 |       |
| 0.4g        | A        | 0.549             | 0.507 | 0.430 | 0.502 | 0.450 |
|             | B        | 0.538             | 0.514 | 0.464 | 0.507 |       |
|             | C        | 0.523             | 0.523 | 0.494 | 0.509 |       |
| 0.6g        | A        | 0.539             | 0.506 | 0.454 | 0.510 | 0.452 |
|             | B        | 0.529             | 0.513 | 0.484 | 0.515 |       |
|             | C        | 0.515             | 0.521 | 0.507 | 0.514 |       |
| 0.8g        | A        | 0.535             | 0.506 | 0.463 | 0.515 | 0.453 |
|             | B        | 0.527             | 0.514 | 0.489 | 0.518 |       |
|             | C        | 0.513             | 0.521 | 0.506 | 0.515 |       |

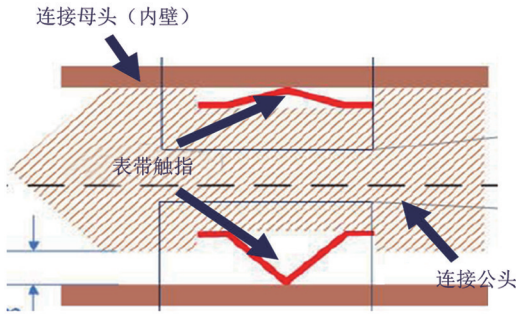


图 10 表带触指结构

### 3.3 电连接结构地震作用下位移响应分析

根据研究,机械磨损和氟化硫气体腐蚀是表带触指劣化的主要因素<sup>[12]</sup>。地震作用下,不仅仅电连接结构内部的接触压强会变化。连接公头和连接母头也将发生位移,导致磨损。因此,有必要分析电连接结构地震作用下位移响应以分析磨损情况。

以 0.2g Landers 波为例,将连接公头和连接母头的轴向位移相减,可得地震作用下两者的相对位移,如图 11 所示。由图 11 可见连接公头和连接母头的相对位移幅值不大但位移频繁。

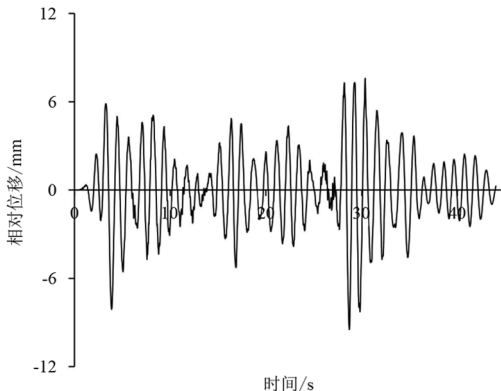


图 11 0.2g Landers 波作用下连接公头、连接母头相对位移时程曲线

将相对位移按时间进行累加,可得到相对行程。该行程伴随着始终的摩擦作用,称其为摩擦行程。摩擦行程的累积如图 12 所示,可见摩擦行程始终呈现稳定增长的趋势。

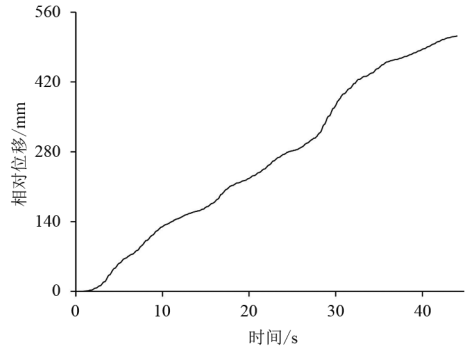


图 12 0.2g Landers 波作用下连接公头母头摩擦行程累积

不同地震作用下的相对位移响应如表 4 所示。以 0.2g Landers 波作用为例,地震结束时,摩擦行程高达 512.06 mm。相对位移幅值可由最大相对正负位移相减得到。可以发现摩擦行程远大于相对位移幅值。可见,在地震作用下,连接公头与连接母头内壁一直处于小幅高频的相互摩擦。此外,相对位移与地震强度呈现强正相关关系。因此地震强度对于磨损损伤深度应当至关重要。由于连接公头的触指页片为银镀层和铜基的多层结构,磨损容易带来性能下降,后面将对不同强度地震作用下,触指页片的磨损损伤进行研究。

表 4 不同地震作用下的相对位移响应

| 地震峰值<br>加速度 | 最大相对<br>正位移/mm | 最大相对<br>负位移/mm | 相对位移<br>幅值/mm | 最大累积<br>摩擦行程/mm |
|-------------|----------------|----------------|---------------|-----------------|
| 0.2g        | 6.97           | -10.10         | 17.06         | 512.06          |
| 0.4g        | 12.58          | -15.32         | 27.89         | 1 017.75        |
| 0.6g        | 19.15          | -22.71         | 41.86         | 1 525.89        |
| 0.8g        | 25.77          | -30.04         | 55.80         | 2 033.83        |

## 4 变压器套管电连接结构地震累积效应

### 4.1 磨损损伤模型

#### 4.1.1 Archard 磨损损伤计算模型

当物体表面相互接触,在外部荷载下,接触面表面的许多微凸起顶端会相互挤压变形,形成多个小接触区域。基于此思路,Archard<sup>[21]</sup>提出了黏着磨损的代表性模型,如式(1)所示。

$$W = K_1 N / 3a \quad (1)$$

式中:  $W$  为单位摩擦行程下的磨损量;  $N$  为接触面压力;  $a$  为圆形磨损区域的半径;  $K_1$  为表征磨损效率的比例常数, 取决于参与摩擦的材料类别、接触面的润滑等级以及其他相关因素。

对式(1)进行重新的梳理和简化, 可得到目前工程界常用的 Archard 磨损模型<sup>[22]</sup>, 如式(2)所示。

$$V = K \frac{LN}{N} \quad (2)$$

式中:  $V$  为本次摩擦磨损量的总体积;  $N$  为接触面压力;  $H$  为摩擦中较弱材料的布氏硬度;  $L$  为滑动磨损持续的行程;  $K$  含义同  $K_1$ , 也是表征磨损效率的比例常数, 称作磨损系数, 其值等于  $K_1/3$ 。

工程上更重视磨损的深度, 因此将式(2)左右同时除以实际接触面积  $A$ , 可得:

$$\frac{V}{A} = K \frac{L}{H} \times \frac{N}{A} \quad (3)$$

$$h = K \frac{Lp}{H} \quad (4)$$

式中:  $h$  为磨损深度;  $p$  为磨损点的接触压强。

#### 4.1.2 参数选择

磨损系数  $K$  与两个摩擦接触面的材质、粗糙度以及润滑情况等多种因素密切相关。一般采用实际实验的方法进行总结和确定。

1980年, Rabinowic 以其 1958 年的实验为基础, 摸索出了一套较全面的摩擦磨损系数实验值<sup>[22]</sup>。所研究的表带触指上的银镀层与紫铜制连接母头内壁产生频繁的摩擦, 可以认为铜和银的金属性质较为相近, 为相似金属摩擦。鉴于实际运行中润滑效果不佳, 认为该接触面的润滑状况为“洁净表面”。综上所述, 磨损系数  $K$  取  $1.7 \times 10^{-3}$ , 且在摩擦过程中为常数。

材料硬度  $H$  应采用布氏硬度。表带触指上银镀层的硬度小于母头内壁紫铜的硬度, 因此取金属银的硬度参与计算。这里, 材料硬度  $H$  取 200 MPa, 并认为在银镀层被磨穿前, 材料硬度并不会随着摩擦的进行而改变。

## 4.2 变压器套管电连接结构累积磨损分析

电连接结构表带触指上镀有银镀层, 能够有效抵抗结构的机械和化学劣化, 提高使用寿命。因此, 有必要研究地震作用下, 表带触指结构连接公头页片银镀层的磨损程度。取银镀层厚度为  $15 \mu\text{m}$ <sup>[23]</sup>。

这里以地震作用后磨损深度为地震累积效应指标, 以是否磨穿银镀层(磨损深度达到  $15 \mu\text{m}$ ) 为破坏指标。

### 4.2.1 不同触指页片的磨损累积

根据上述分析, 利用式(4), 可以得到不同强度地震下表带触指页片的磨损深度。

数据表明, 不同地震强度下磨损情况的分布具有相同的规律。以  $0.2g$  Landers 波作用下磨损为例, 将不同页片的磨损情况绘制成图, 可形象地表现三圈表带的磨损差异, 如图 13 所示。

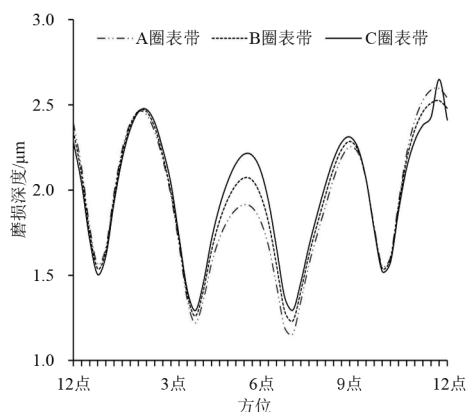


图 13  $0.2g$  Landers 波作用下连接公头触指页片银镀层磨损深度分布情况

由图 13 可知, 在 6 点方位磨损深度呈现  $A < B < C$  的情况, 而在 12 点方位情况则相反。与此同时, 3 点和 9 点方位三圈表带的磨损情况差异不大。此外, 该分布曲线与前文图 7 所示的重力作用后的接触压强分布曲线类似, 可以判断套管自重产生的接触压强对于表带触指页片的磨损深度分布有着极大的影响。

表 5 为三圈表带在地震作用下的银镀层磨损数据。C 圈表带第 46 号页片的数据出现异常突变, 由于不影响对整体的分析而忽略。

表 5 连接公头触指页片银镀层磨损情况  
(C 圈表带的 46 号页片数据被舍去)

| 地震峰值<br>加速度 | 最大磨损<br>深度/ $\mu\text{m}$ |      |      | 最小磨损<br>深度/ $\mu\text{m}$ |      |      | 表带磨损<br>平均值/ $\mu\text{m}$ |      |      |
|-------------|---------------------------|------|------|---------------------------|------|------|----------------------------|------|------|
|             | A                         | B    | C    | A                         | B    | C    | A                          | B    | C    |
| $0.2g$      | 2.60                      | 2.53 | 2.47 | 1.16                      | 1.23 | 1.29 | 1.92                       | 1.95 | 1.96 |
| $0.4g$      | 5.04                      | 4.92 | 4.94 | 2.44                      | 2.55 | 2.62 | 3.86                       | 3.91 | 3.92 |
| $0.6g$      | 7.44                      | 7.36 | 7.37 | 3.76                      | 3.87 | 3.91 | 5.83                       | 5.90 | 5.88 |
| $0.8g$      | 9.86                      | 9.83 | 9.82 | 5.04                      | 5.16 | 5.17 | 7.80                       | 7.88 | 7.81 |

由表 5 可以发现, 在不同强度的地震作用下, 磨损深度最深和最浅的触指页片均在 A 圈表带上, 表

明 A 圈表带的磨损分布最不均匀。在地震作用下, A 圈表带的银镀层最有可能被磨穿。

此外,总体来讲, B 圈表带的平均磨损深度是最大的,这表明其整体受到的磨损较严重。对于单一表带,如果其上有多个页片的银镀层磨损过大,可能会导致该圈表带载流性能加速劣化。因此,工程上也应当关注 B 圈表带的磨损情况。

从图 13 还可以发现,触指页片磨损的极大值和极小值普遍出现在八分之一方位,每个极值间隔  $45^\circ$ 。因此,触指页片磨损分布还与其所在方位有关。由于在 4 个不同强度地震波作用下的磨损随着方位的分布情况较为相似,此处仅对  $0.2g$  Landers 波的银镀层磨损程度进行分析,以研究沿圆周银镀层磨损程度分布。

图 14 为  $0.2g$  Landers 波作用下 A 圈表带的银镀层磨损程度绕圆周的分布情况。可以发现磨损曲线呈现不均匀圆形, 2 点、5 点、8 点和 11 点方位的磨损程度相对较大。

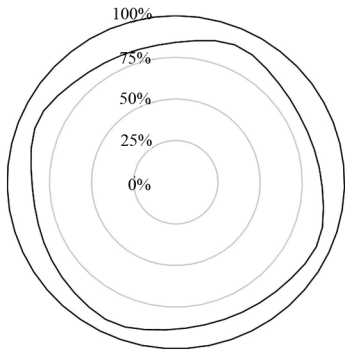


图 14  $0.2g$  Landers 波作用下 A 圈表带银镀层磨损程度(页片方位同图 5)

#### 4.2.2 不同强度地震作用下累积磨损

将不同强度地震作用下的磨损情况进行数据整理,如表 6 所示。

表 6 不同强度地震下连接公头页片磨损情况  
(C 圈表带的 46 号页片数据被舍去)

| 地震峰值<br>加速度 | 最大磨损<br>深度/mm | 最小磨损<br>深度/mm | 磨损深度平均<br>值/mm |
|-------------|---------------|---------------|----------------|
| $0.2g$      | 2.60          | 1.16          | 1.94           |
| $0.4g$      | 5.04          | 2.44          | 3.90           |
| $0.6g$      | 7.44          | 3.76          | 5.87           |
| $0.8g$      | 9.86          | 5.04          | 7.83           |

从表 6 可知,单次地震导致的磨损量均未达到  $15 \mu\text{m}$ ,未达到破坏指标。但磨损的各项统计值均随着地震强度的加强而增大。磨损平均值和地震峰

值加速度的相关性如图 15 所示。

从图 15 可见,页片磨损平均磨损程度和地面峰值加速度呈现明显的线性关系。由式(4)可知,当磨损系数  $K$  以及材料硬度  $H$  不变时,磨损程度仅由摩擦点的接触压强以及摩擦行程决定。由前述可知,触指页片与连接母头内壁的接触压强和摩擦行程均会随着地震峰值加速度的增大而增大,其中接触压强的增大幅度很小。由于加速度和行程两个物理量本就为线性关系,地面峰值加速度的增大必然导致摩擦行程的线性增大。摩擦行程的增大幅度远大于接触压强的增长幅度。因此,当地震强度提高时,表带触指页片磨损应当随着摩擦行程的线性增加而同样以近似线性的关系增加。

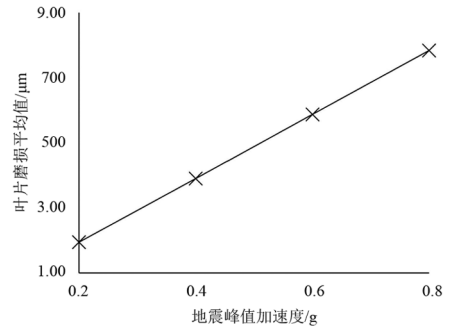


图 15 不同地震峰值加速度下的页片磨损平均值

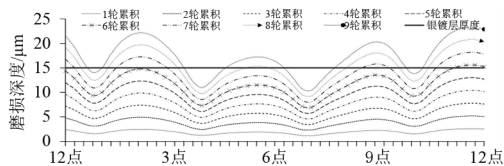
#### 4.3 多次地震的磨损累积

为了探究多轮地震作用下的累积效应,假设该结构经历多轮地震,出于计算的简便性考虑,假设该变压器连续受到多次相同强度的 Landers 波地震作用。为了凸显累积效应,将每次地震后的累积磨损深度均绘制成曲线,并在  $15 \mu\text{m}$  处绘制粗直线代表银镀层厚度,同时用叉号表明该轮地震中银镀层损坏,如图 16 所示。鉴于磨损最严重的触指页片总是出现在 A 圈表带,此处以 A 圈表带为例进行模拟。

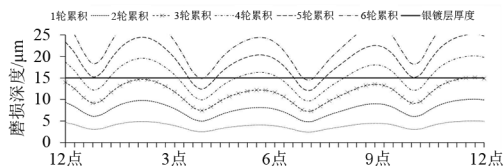
从图 16 可见,在峰值加速度为  $0.2g$ 、 $0.4g$ 、 $0.6g$  和  $0.8g$  的地震作用下,套管电连接结构损坏轮次分别为第 6、3、3、2 轮。整体来看磨损极其不均匀,磨损集中于前面所述 12 点、3 点、6 点和 9 点方位。当上述位置镀层完全磨损时,其余位置磨损程度仍然较轻。磨损区域的不均匀和高磨损区域的集中容易使得磨损快速积累,个别页片过早破坏,不利于充分发挥银镀层的抗劣化性能,造成套管电连接结构过早因为局部的失效影响整体的性能甚至提前引发电连接失效,降低了使用寿命。

因此,可考虑采用合适的方法定期将表带结构沿

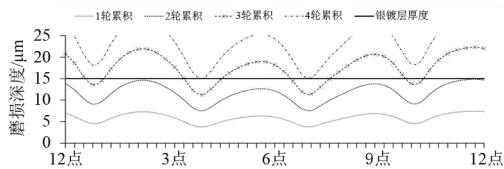




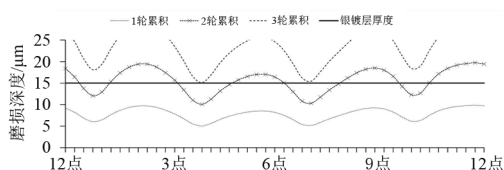
(a) 0.2g Landers波



(b) 0.4g Landers波



(c) 0.6g Landers波



(d) 0.8g Landers波

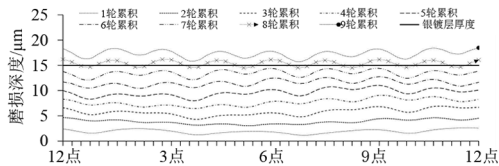
图 16 变压器套管电连接结构多次地震累积磨损

轴进行一定角度的旋转,以错开磨损峰顶,防止峰值叠加。假设每次地震后对套管沿着其中心轴逆时针旋转 $45^\circ$ ,将该变压器经历多次 Landers 波作用后的累积磨损以同样的绘图规则进行绘制,如图 17 所示。

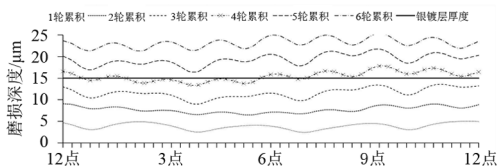
图 17 展示了旋转方案对于磨损累积效应的影响。可以发现,采用旋转表带的办法时,在峰值加速度分别为 $0.2g$ 、 $0.4g$ 、 $0.6g$ 和 $0.8g$ 的地震作用下,套管电连接结构银镀层分别在第 8 轮、第 4 轮、第 3 轮、第 2 轮损伤累积后被破坏,且整体磨穿程度不大,整体上看磨损均匀。可以发现与正常叠加的累积磨损进行对比,旋转方案在变压器套管电连接结构抗磨能力上有显著提升,对提高表带触指型电连接结构使用寿命有明显作用。

## 5 结论

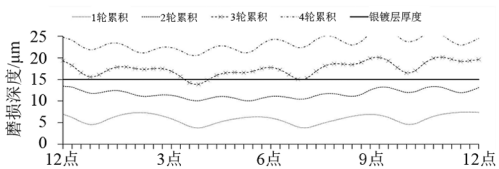
上面以表带触指型电连接结构作为研究对象,利用 Abaqus 有限元计算软件,建立了含有表带触指型电连接结构的套管有限元模型,并施加重力荷载



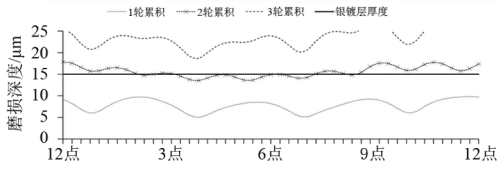
(a) 0.2g Landers波



(b) 0.4g Landers波



(c) 0.6g Landers波



(d) 0.8g Landers波

图 17 变压器套管电连接结构  
多次地震累积磨损( $45^\circ$ 旋转)

和符合要求的地震波,计算得到响应的接触压强和位移数据,并利用 Archard 模型进行连接车头表带触指页片磨损深度分析,得到如下结论:

1) 重力影响会使得表带上方页片的接触压强增加,下方页片的接触压强减少。该效应对靠近套管尾部的表带影响最大,并对磨损分布有极大的影响。

2) 利用 Archard 的磨损模型,提出了一种计算地震作用下变压器套管电连接结构磨损深度的方法。可以以此估计一次或多次地震作用下该设备的累积磨损深度,并作为损伤累积的评估指标。

3) 页片平均磨损程度和地震峰值加速度呈现明显的线性关系,其原因与磨损计算模型有关。接触压强的变化仅为影响不同强度地震作用下累积磨损损伤差异的次要因素。摩擦行程会随着地震强度的提高而明显增大,是累积磨损损伤差异的主要因素。地震作用下的磨损并不足以银镀层发生破坏。靠近套管尾部的表带的磨损分布最不均匀,且最有可能先出现银镀层磨穿的情况。位于中间的表带的



整体磨损程度最高,工程上应当重视靠近套管尾部的表带和位于中间的表带的磨损情况。

4)表带触指磨损分布呈现明显的集中规律。分析表明,采用定期沿轴旋转套管的方案,表带触指整体的磨损分布会更加均匀,不会出现某方位页片银镀层过早破坏的情况。

#### 参考文献

[1] 谢强.电力系统的地震灾害研究现状与应急响应[J].电力建设,2008(8):1-6.

[2] XIE Q,ZHU R.Damage to electric power grid infrastructure caused by natural disasters in China [J].IEEE Power and Energy Magazine,2011,9(2):28-36.

[3] 刘如山,刘金龙,颜冬启,等.芦山7.0级地震电力设施震害调查分析[J].自然灾害学报,2013,22(5):83-90.

[4] 王生杰,包正红,林万德,等.高海拔条件下换流变压器阀侧套管温升仿真研究[J].变压器,2021,58(2):47-51.

[5] 乔小冬,贾鸿益.伊敏换流站换流变阀侧套管故障分析及处理[J].电工技术,2014(10):64-65.

[6] 周安春,高理迎,冀肖彤,等.干式SF<sub>6</sub>气体绝缘换流变压器阀侧套管电流致热型放电故障分析及现场修复[J].电网技术,2018,42(5):1401-1409.

[7] 王典浪,曹鸿,李国良,等.换流变阀侧干式套管内部插接结构过热隐患分析及整治[J].电瓷避雷器,2021(2):100-106.

[8] 邓集瀚,邓军,张晋寅,等.RIP充气套管电接触劣化分析及处理[J].变压器,2021,58(12):68-71.

[9] 陈云龙.地震作用下变压器套管的电连接结构失效机理分析及试验研究[D].上海:同济大学,2022.

[10] 靳守锋,田汇冬,王浩然,等.特高压GIL电接触结构选型及磨损特性研究[J/OL].电网技术:1-9.[2022-08-11]. DOI:10.13335/j.1000-3673.pst.2021.2012.

[11] 刘鹏,任汀,谢韬,等.换流变阀侧套管表带触指接触电阻数值计算[J/OL].高电压技术:1-10.[2022-08-11]. DOI:10.13336/j.1003-6520.hve.20211981.

[12] 田汇冬,靳守锋,龚傲,等.换流变阀侧干式套管表带触指失效过程分析[J].中国电机工程学报,2021,41(3):1146-1156.

[13] 陈云龙,谢强,李晓璇.换流变网侧套管电连接结构的地震响应分析[J].高电压技术,2022,48(6):2283-2291.

[14] YANG Z, HE C, XIE Q.Seismic performance and stiffening strategy of transformer bushings on sidewall cover plates[J].Journal of Constructional Steel Research,2020,174:106268.

[15] KOLIOU M, FILIATRAULT A, REINHORN A M. Seismic response of high-voltage transformer-bushing systems Incorporating flexural stiffeners I: numerical study[J].Earthquake Spectra,2013,29(4):1335-1352.

[16] KOLIOU M, FILIATRAULT A, REINHORN A M. Seismic response of high-voltage transformer-bushing systems Incorporating flexural stiffeners II: experimental study[J].Earthquake Spectra,2013,29(4):1353-1367.

[17] 全国绝缘材料标准化技术委员会.电气用热固性树脂工业硬质层压板 第4部分:环氧树脂硬质层压板:GB/T 1303.4—2009[S].北京:中国标准出版社,2009.

[18] 陈俊寰,夏延秋,曹正锋.铜基银镀层的导电性及摩擦磨损性能[J].材料保护,2016,49(10):1-4.

[19] 中华人民共和国住房和城乡建设部.电力设施抗震设计规范:GB 50260—2013[S].北京:中国计划出版社,2013.

[20] 中国电机工程学会.1000 kV变电站抗震设计规范:T/CSEE 0010—2016[S].北京:中国电力出版社,2017.

[21] ARCHARD J F.Contact and Rubbing of Flat Surfaces [J].Journal of Applied Physics,1953,24:981-988.

[22] 桂长林.Archard的磨损设计计算模型及其应用方法[J].润滑与密封,1990(1):12-21.

[23] 信息产业部电子第四研究所.电子设备的金属镀覆与化学处理:SJ 20818—2002[S].北京:中国电子技术标准化研究所,2002.

#### 作者简介:

庄一豪(1999),男,硕士研究生,研究方向为电力设备抗震;

毛宝俊(1998),男,博士研究生,研究方向为电力设备抗震;

谢强(1971),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为电网基础设施防灾减灾。

(收稿日期:2022-07-27)