

浅议 GCB/GIS 传动轴可靠性设计

刘景博¹, 武胜斌¹, 成勇¹, 魏永¹, 陈志彬¹, 张文兵¹, 吕黎²

(1. 西安高压电器研究院有限责任公司, 西安 710077; 2. 西安西电开关电气有限公司, 西安 710077)

摘要: 现阶段 GCB/GIS 可靠性设计相对薄弱, 断路器传动轴是 GCB/GIS 连接操动机构驱动机械与灭弧室的关键零部件, 笔者建立传动轴强度-应力 (SSI) 设计模型, 以强度、应力基本数据处理方法探讨传动轴可靠性设计, 为 GCB/GIS 结构进行可靠性设计尝试新思路。

关键词: 传动轴; 强度; 应力; 正态分布; 可靠度

中图分类号: TM85 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1609(2012)07-0093-06

Discussion on the Reliability Design of Transmission Shaft for GCB/GIS

LIU Jing-bo¹, WU Sheng-bin¹, CHENG Yong¹, WEI Yong¹, CHEN Zhi-bin¹,
ZHANG Wen-bing¹, LÜ Li²

(1. Xi'an High Voltage Apparatus Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710077, China;

2. Xi'an XD Switchgear Electric Co., Ltd., Xi'an 710077, China)

Abstract: At present, the reliability design of GCB/GIS is relatively weak. The transmission shaft of circuit breaker is the key component which connects the drive part of operation mechanism to the interrupter. The authors established the strength-stress interference (SSI) model of the transmission shaft, and discussed the reliability design of transmission shaft with the basic data processing methods of strength and stress. It is the attempt to the reliability design for the structures of GCB/GIS.

Key words: transmission shaft; strength; stress; normal distribution; reliability

0 引言

随着国内开关行业产品研发和生产要素的完善, 整体技术水平和生产能力明显提升, 具有或接近国际先进水平的开关设备新品不断涌现^[1]。在为技术进步而欢欣鼓舞的同时, 也应聆听使用者的呼声^[2], 追求 GCB/GIS 具有更可靠的稳定运行和更先进的技术性能^[3-4]是共同的责任。产品可靠性取决于产品的设计品质、制造质量和维护水平。从多年工厂出厂调试和电网故障统计分类, 主要故障的多半与传动及操作装置有关^[5-6], 没有可靠的设计, 造出的产品不可能可靠, 更不可能期盼产品可靠地运行^[7]。开发阶段是保证产品固有可靠性的关键^[8-9]。

GIS/GCB 中, 断路器传动机构的关键零件传动轴是连接操动机构驱动机械与灭弧室升降部件的桥梁^[10-12]。传动机构属于中间环节, 往往驱动机械和升

降部件由于布置方式造成运动方向不一致, 大多数情况下是不可缺少的。断路器的使命, 归根到底是体现在触头的分、合动作上, 而分、合动作又是通过操动机构实现的, 中间环节传动轴的质量优劣和性能稳定对断路器的工作能力和持续可靠起着极为重要的作用。笔者就以传动轴设计过程中使用方法试图阐述 GCB/GIS 可靠性设计的基本思想。

1 GCB/GIS 机械传动模型和参数归算

1.1 GCB/GIS 机械传动模型

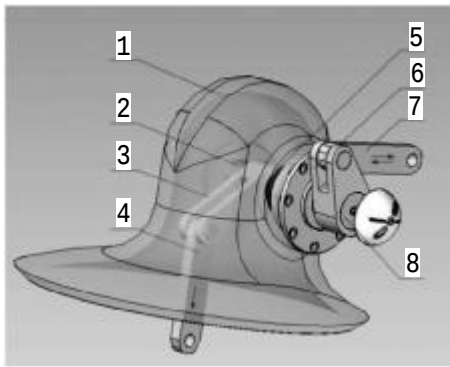
GCB/GIS 机械传动模型见图 1。

1.2 GCB/GIS 机械传动归算

运动系统内各部件运动形式不同, 不同时刻具有各自的特性^[13-16], 为了比较方便需要归化, 归算前后元件具有的动能应相等或做功相当。

1.2.1 GCB/GIS 传动质量归化

1) 作直线运动的零部件。设零部件的实际质量



1—壳体;2—支撑轴承;3—内拐臂;4—灭弧室连板;5—密封;6—外拐臂;7—外连板;8—转轴。

图 1 GCB/GIS 机械传动模型

Fig. 1 Mechanical transmission model of GCB/GIS

为 m_i , 其运动速度为 v_i , 元件具有的动能为 $m_i v_i^2 / 2$, 如设定归算点的速度为 v_c , 则相应部件归化质量 $m_{ci} = m_i (v_i / v_c)^2$ 。

2) 作旋转运动的零部件。设零部件的转动惯量为 J_k , 其运动角速度为 ω_k , 元件具有的动能为 $J_k \omega_k^2 / 2$, 如设定归算点的速度为 v_c , 则相应部件归化质量 $m_{ck} = J_k (\omega_k / v_c)^2$ 。

3) 作平移运动的零部件。它既有直线运动又有旋转运动, 可分解计算再合成。

1.2.2 GCB/GIS 操作力功归算

1) 设施加力 F_a 在 a 处运动距离为 Δl_a 使得归算处运动距离为 Δl_c , 考虑传动效率 η , 则归算处作用力 F_c 应满足: $F_c = \eta \cdot F_a \cdot \Delta l_a / \Delta l_c$ 。

2) 合力做功: $W_\Sigma = \sum m_i \cdot v_i \cdot \Delta v_i$ 。

笔者结合实际设计, 对某型号 GCB/GIS 机械传动系统进行计算, 传动系统归化质量 $\mu_m = 34.7$ kg; 分闸初期传动轴短时间内须加速至分闸速度要求, 最大扭矩均值 $M = 2\ 587$ N·m。

2 常用材料数据的可靠性处理方法

一般地讲, 从机械设计手册或专有材料手册查得的强度可能是平均值或区间值, 产品整机及其零部件的寿命则是随机变量^[7]。描述随机变量及进行可靠性参数的估计, 最常用的是随机变量的均值及均方差。均值是定量描述产品平均能正常工作多长时间, 均方差是随机变量离散性量度。对于不同的统计分析对象, 其离散性的原因是极其复杂的。在可靠性工程中作为表示产品整机或零部件寿命的随机变量, 引起其离散性的原因有: ①使用原材料化学成分不同, 导致零部件物理性能的波动; ②同一零部件在外形尺寸上差异, 机械零件会引起应力集中; ③相同

零件组成的部件, 其配合性能不同, 会使相连接的零部件之间相互作用不同, 导致机械载荷的重新分配; ④工作环境条件的差异, 如工作温度、压力、电压、速度、振动冲击度等等条件的差异, 会有不同的环境应力。

事实上, 仅从标准差上看, 随机变量的离散程序是不完整的。对这两类数据采用不同处理方法。

2.1 平均值采用变异系数计算

断路器拐臂盒传动轴材料常采用 40Cr, 其强度为均值 $\mu = [\sigma] = 980$ MPa, 则按统计学强度变异系数 $c = \delta / \mu = 0.1$, 偏差为 $\delta = c \mu = 0.1 \times 980 = 98$ MPa。

2.2 区间值采用 3σ 法则计算

断路器拐臂盒传动轴, 亦隔离接地或快速接地开关传动轴, 有时也用 1Cr13 或 45 号钢。其中 45 号钢调质处理, 其材料的强度区间为: $[\sigma] = [\sigma_1 \sim \sigma_2] = [650 \sim 800]$ MPa, 则强度平均值为: $\mu_\sigma = \frac{1}{2} (\sigma_1 + \sigma_2) = \frac{1}{2} (650 + 800) = 725$ MPa, 标准差为 $\sigma_\sigma = \frac{1}{3} \delta = \frac{1}{3} \times \frac{1}{2} (\sigma_2 - \sigma_1) = \frac{1}{6} (800 - 650) \approx 25$ MPa。

2.3 两者的联系

金属材料性能属于正态分布规律, 假如变异系数为 0.1 之内强度材料和 3σ 法强度材料涵盖该种材料 99.7% 的性能, 则有变异偏差 $\delta = k\sigma = 0.1 \times 980 = 98 = 3\sigma$ 时, 方差 $\sigma = 98/3 = 32.7$ MPa; 同样, 3σ 法偏差 $\delta = 3\sigma = 75$ MPa 时, 变异系数 $c = \delta / \mu = 75/725 \approx 0.10$, 两者基本等价。笔者更倾向使用变异系数, 因为 σ 反应随机变量离散程度是一个绝对值, 只能与平均寿命相近情况下比较离散程度, 而不能比较不同平均寿命情况下的离散程度。变异系数则是一个相对值, 是一个无量纲的绝对值, 说明随机变量在其均值周围的离散情况。所以变异系数更便于实际应用。需要说明的是: 对同一种零部件同一种失效模式给出的变异系数, 也存在一定的差别, 说明变异系数的影响因素是复杂的, 与使用环境、制造工艺、工作条件、负载性质及大小存在密切关系, 但也有一些规律性。

2.4 强度分布参数的近似计算

缺乏试验数据时, 可以利用材料拉伸试验的强度极限 σ_s 或屈服极限 σ_b 。静强度的分布参数按式(1)处理。

$$\mu_c = k_1 \mu_{c0} \quad \sigma_c = k_1 \sigma_{c0} \quad (1)$$

式(1)中: $\mu_{c0} = \sigma_s$, $\sigma_{c0} = 0.10 \mu_{c0}$ (塑性材料); $\mu_{c0} = \sigma_b$, $\sigma_{c0} = 0.10 \mu_{c0}$ (脆性材料); 系数 $k_1 = \varepsilon_1 / \varepsilon_2$, 考虑到载荷特性和制造方法的修正系数, 见表 1。

表 1 载荷特性和制造方法的修正系数

Tab. 1 Correction factors of load characteristics and manufacturing methods

载荷特性	ε_1	制造方法	ε_2
弯曲(圆或矩形横截面)	1.2	锻件	1.1
弯曲(非圆非矩横截面)	1.0	轧制	1.1
扭转(圆形横截面)	1.6	铸件	1.3

3 应力—强度干涉模型(SSI)可靠性分析

可靠性是指产品在规定条件下和规定的时间内,完成规定功能的能力。这里所谓的产品可以是单一零部件,或单元,甚至复杂系统,而这种在规定环境和使用条件、指定预期服役时间完成明确功能的能力通常归结于一个概率值 R 表示可靠度,当然还有更多指标在相应场合表征产品相应运行状态。可靠性的定量表示有其自身的特点:①某类产品整体性评价,大量产品数理统计的结果,可靠度量值愈大,表示该批(期或类)产品完成规定功能的产品愈多,该品牌愈可靠;②特定产品随机性程度,对于指定产品,在规定时间内完成功能能力就是随机事件,只能是正常或故障,可靠度量值愈大,预期某一时刻该个体不发生故障程度愈高,该实体愈可靠。

应力和强度都是服从一定规律的随机函数,分别用 $f(S)$ 、 $g(S)$ 表示零部件应力、强度概率密度函数。图 2 为应力—强度概率密度函数分布(stress strength interference model, SSI)^[18-19]。相对从工作开始之初到寿命终止时刻性能指标均无明显变化而突发失效而言,大多情况是与寿命和可靠性直接相关的性能指标从始到终呈现出具有一定趋势的变化规律^[20],并且该性能指标本身可以测量。退化失效大致见图 3。

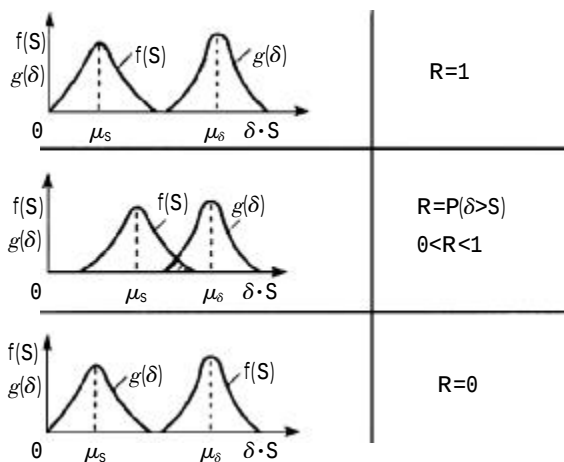


图 2 应力、强度概率密度函数分布

Fig. 2 The probability density function of stress & strength

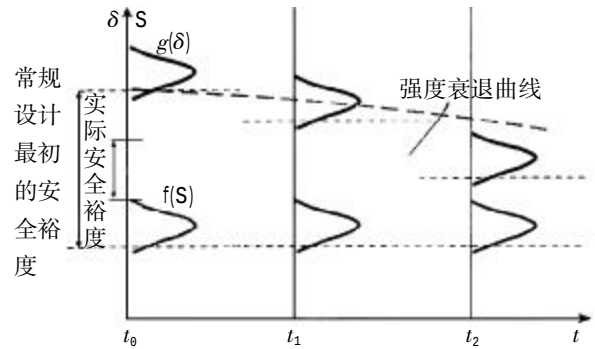


图 3 应力、强度安全配合

Fig. 3 The safety cooperation between stress & strength

从概率论知识角度出发^[21],设定概率密度联合积分法表述。

事件 A: 给定工作应力 S_1 落在小区间 dS 内。

$$P(A) = P(\alpha: S_1 - \frac{dS}{2} \leq S_1 \leq \beta: S_1 + \frac{dS}{2}) =$$

$$\int_{\alpha}^{\beta} f(S) dS \approx f(S_1) dS \quad (2)$$

事件 B: 强度始终大于应力的概率为

$$P(\delta > S_1) = \int_{S_1}^{+\infty} g(\delta) d\delta \quad (3)$$

事件 C: 假如事件 A 与事件 B 为两个独立的随机事件,此两独立事件 A、B 同时发生的概率为

$$P(C) = P(A \cdot B) = P(A)P(B) = f(S_1) dS \int_{S_1}^{+\infty} g(\delta) d\delta \quad (4)$$

式(2)-(4)中, S_1 为应力区间的任意值,先考虑整个应力区间内的情况,有强度大于应力的概率(或称为可靠度)为

$$R = P(\delta > S) = \int_{-\infty}^{+\infty} \left\{ f(S) \cdot \left[\int_S^{+\infty} g(\delta) d\delta \right] \right\} dS \quad (5)$$

4 可靠性分析和实际应用

4.1 传动轴花键强度校核

传动轴使用 45 号钢,调质处理,力学满足性能 $\sigma_b=650$ MPa、 $\sigma_s=355$ MPa。结合零件材质和热处理状态^[22-23],传动轴与拐臂采用花键连接。基本参数依设计经验确定,压力角为 30° 圆齿根渐开线花键,模数 m 为 1,结合长度 l 名义为 35 mm。花键承载能力据国家标准计算、校核。

1) 齿面压应力

$$\sigma_H = 2000 k_0 T / (Z l d_m \cos \alpha_0) = 2000 \times 2587 \times 1.1 / (44 \times 35 \times 1 \times 44 \times \cos 30^\circ) = 97 \text{ MPa} \quad (6)$$

2) 齿面许用压应力

$$[\sigma_H] = \sigma_{0.2} / (S_H K_1 K_2 K_3 K_4) = 650 / (1.25 \times 1.25 \times 1.1 \times 1.1 \times 1.5) = 229 \text{ MPa} \quad (7)$$

3) 齿面磨损许用压应力

$$\text{查表调质处理 } 28 \sim 32 \text{ HRC}, [\sigma_{H1}] = 110 \text{ MPa} \quad (8)$$

花键副操作远低于在 10^8 次数, 齿面压应力低于齿面许用压应力、齿面耐磨损许用压应力, 满足安全条件, 其余不再一一校核。

4.2 传动轴扭转强度校核

传动轴的最小直径属于花键退刀槽, 花键退刀槽直径极大值应小于外花键小径极小值。花键小径基本尺寸为 $D_k = m(Z-1.8) = 42.2 \text{ mm}$ 。

考虑加工经济性, 未注公差采用中等极值偏差; 线性尺寸 $(30 \sim 120) \pm 0.3$; 花键退刀槽直径为 $(41.5 \pm 0.3) \text{ mm}$ 。

4.2.1 实心圆截面抗扭系数

$$W = (\pi/16)D^3 \quad (9)$$

一阶和二阶导数: $W' = (3\pi/16)D^2$; $W'' = (3\pi/8)D$
均值

$$E(W) \approx f(\mu) + \frac{1}{2}f''(\mu) \cdot \text{Var}(D) =$$

$$(\pi/16) \cdot \bar{D}^3 + (3\pi/16) \cdot \bar{D} \sigma_D^2 \quad (10)$$

方差

$$\text{Var}(W) \approx [f'(\bar{D})]^2 \cdot \text{Var}(D) = [(3\pi/16) \cdot \bar{D}^2]^2 \cdot \sigma_D^2 \quad (11)$$

按式(10), 实心圆截面形状抗扭截面系数均值 $\bar{W} = 14\ 026.85 \text{ mm}^3$; 按式(11), 实心圆截面形状抗扭截面系数标准差 $\sigma_w = 101.39 \text{ mm}^3$ 。

4.2.2 传动轴所受扭转力矩

传动轴所受扭转力矩均值 $\bar{M} = 2\ 587 \text{ N} \cdot \text{m}$; 传动轴所受扭转力矩标准差 $\sigma_M = 86.2 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

4.2.3 传动轴所受切应力

$$\tau = M/W \quad (12)$$

$$\text{均值 } E(\tau) = \bar{M}/\bar{W} \quad (13)$$

方差 $\text{Var}(\tau) =$

$$\left[\left(\frac{\partial \tau}{\partial M} \right)^2 \cdot \text{Var}(M) + \left(\frac{\partial \tau}{\partial W} \right)^2 \cdot \text{Var}(W) \right] \bigg|_{\substack{M=\bar{M} \\ W=\bar{W}}} \quad (14)$$

按式(13), 传动轴所受切应力均值 $\bar{\tau} = 184.43 \text{ MPa}$; 按式(14), 传动轴所受切应力标准差 $\sigma_\tau = 1.333 \text{ MPa}$ 。

4.3 可靠性计算

基于退化数据的可靠性分析, 考虑到产品工作持续性, 连续监测产品性能的退化过程是非常困难的, 通常在试验过程中定时测试产品的性能特征变化, 由此测量的离散性能退化数据拟合得到有用信息; 仅在一个应力水平下进行性能退化试验可以得到退化数据, 亦可在多个应力水平下进行加速退化试验, 从累积损伤原理来衡量产品的性能退化时, 产品性能退化数据应服从随时间单调变化规律。

相关资料^[24]所进行的研究表明钢轴扭转、弯曲退化轨迹符合对数正态分布, 常用的退化分布模型为: $\ln \mu = \beta_1 + \beta_2 \cdot \ln N$; $\beta_1 > 0$; $\beta_2 < 0$; σ 近似常数。

依照设计手册和开关设计经验, 扭转 10^8 次许用强度 400 MPa , 扭转 10^4 次许用强度 600 MPa ; 机械设计手册给出脉动应力疲劳极限计算方法。这一工作刚着手, 数据缺失, 其余姑且插值处理。45 号调质钢强度退化关系见表 2。

表 2 45 号调质钢强度退化关系

Tab. 2 Strength degradation relationship of quenched and tempered No. 45 steel

次数 $\ln N/\text{次}$	9.21	18.42
强度 $\ln \mu/\text{MPa}$	5.41	5.01

由表 2 有 $\ln \mu = 5.81 - 0.043\ 3 \ln N$, 则钢轴强度和应力均值和标准差分别为: $\mu_0 = 243.75 \text{ MPa}$, $\sigma_0 = 8.13 \text{ MPa}$; $\mu_s = 184.43 \text{ MPa}$, $\sigma_s = 1.33 \text{ MPa}$ 。强度对数方差 $\sigma_{\ln s}^2 = \ln[(\sigma_0/\mu_0)^2 + 1] = 1.11 \times 10^{-3}$; 强度对数均值 $\mu_{\ln s} = \ln \mu_0 - \sigma_{\ln s}^2/2 = 5.50$; 应力对数方差 $\sigma_{\ln s}^2 = \ln[(\sigma_s/\mu_s)^2 + 1] = 5.2 \times 10^{-5}$; 应力对数均值 $\mu_{\ln s} = \ln \mu_s - \sigma_{\ln s}^2/2 = 5.22$; 初始可靠度 $R = \Phi(-t_p) = \Phi\left(\frac{\mu_{\ln s} - \mu_{\ln s}}{\sqrt{\sigma_{\ln s}^2 + \sigma_{\ln s}^2}}\right) = \Phi(5.8) = 1$ 。

4.4 试验验证

产品的可靠性是靠设计纳入的, 因此提高产品可靠性的关键首先是充分利用各种可靠性设计和分析技术对产品进行精心设计。但是即使是充分考虑各种影响因素的产品也不可能没有缺陷, 而这些设计缺陷仅靠图面检查或原理演示甚至仿真试验是不可能都一一找出来的。经验表明, 大约有 70% 左右的设计缺陷要靠对样件进行试验来找出, 可见产品进行可靠性设计后存在的设计缺陷, 还要用可靠性试验来加以发现和证实^[25]。机械操作试验后传动轴系统见图 4。



图 4 机械操作试验后传动轴系统

Fig. 4 Transmission shaft system after mechanical operation test

在循环载荷作用下, 当机械操作达到 $10\ 000$ 次时, 传动性能正常。传动轴多次往复运动, 产生疲劳使内部晶体结构损伤不断增加, 导致传动轴抵抗扭转等能力下降, 实现结构轻量化设计过程中特别要

在强度的退化量保持合理程度, 此时强度均值 $\mu_{\sigma 1}=223.5 \text{ MPa}$, 标准差 $\sigma_{\sigma 1}=9.5 \text{ MPa}$, 同样可以计算此时传动轴可靠度为 $R=\Phi(3.5)=0.9998$ 。设计是相对合理的, 将再为下次设计提供有用信息。

4.5 设计改进

传统设计过于保守, 应当适当降低裕度。例如, 传动轴仍使用 45 号钢, 调质处理同上; 花键连接基本参数: 压力角为 30° 圆齿根渐开线花键, 模数 m 为 1, 齿数 Z 为 40, 结合长度 l 名义为 40 mm。传动轴最小直径为 38 mm。花键承载能力仍满足负载要求。设计可靠度为 $R=\Phi(4.2)=1$, 预计寿命可靠度为 $R=\Phi(1.8)=0.9641$ 。或者换用高强度合金钢, 可靠度会进一步提高, 轻量化更为明显。设计改进待试验验证, 积累数据修正、完善表 2。

整个产品设计完善的过程实际上是设计 (再设计) 与试验—分析—改进过程 (即 TAAF 过程) 相结合的反复叠代的过程。因此国外许多文献和著作都把可靠性研制试验看作产品设计的组成部分, 或者看作强化设计的一种有效手段。

5 结语

电器机械传统意义机械设计有相对系统的理论和比较成熟的方法, GCB/GIS 设计以可靠性为中心进行质量设计、分析和控制工作相对薄弱。笔者以传动轴为例建立强度-应力 SSI 模型, 结合现有阶段基本数据, 进行讨论、假设处理强度、应力均值和方差, 进行传动轴可靠度计算, 通过机械操作验证设计是可行的。

这项工作尚处在起步阶段, 文中是 GCB/GIS 设计试制过程中一点体会, 只言片语旨在起抛砖引玉之用, 产品固有可靠性起决定作用的是设计过程, 制造过程主要是固化设计所形成的固有可靠性, 使用和维护过程是保持获得的固有可靠性, 愿与开关同仁一道为 GCB/GIS 结构可靠度设计进行积极探索。

参考文献:

- [1] 李鹏, 梁维宏. 高压开关设备国内外产品水平 (第五版) [R]. 西安: 西安高压电器研究院, 2010.
LI Peng, LIANG Wei-hong. High voltage switchgear development worldwide (the fifth edition) [R]. Xi'an: Xi'an High Voltage Apparatus Research Institute, 2010.
- [2] 崔景春, 宋杲. 应用 110~550 kV 变电站高压开关设备典型规范时应注意的问题 [J]. 高压开关, 2007, 42(3): 1-5.
CUI Jing-chun, SONG Gao. Description of application on typical specification of 110~500 kV substation [J]. HV Switchgear, 2007, 42(3): 1-5.
- [3] 黎斌. 论 GCB/GIS 的可靠性设计 (上)—对用户期盼的回应 [J]. 高压电器, 2011, 47(6): 98-106.
LI Bin. Discussion about the reliability design of GCB/GIS (I)—A response to the customer demand [J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(6): 98-106.
- [4] 武星, 殷晓刚, 魏泉, 等. 电力产品可靠性研究的本质动因和前景展望 [J]. 高压电器, 2011, 47(10): 75-80.
WU Xing, YIN Xiao-gang, WEI Quan, et al. Motivation and prospect of research on electrical equipment reliability [J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(10): 75-80.
- [5] 宋杲, 李炜, 和彦森, 等. 国网公司系统高压开关设备运行状况分析及产品设计中存在的问题 [J]. 高压电器技术信息, 2008, 4(3): 5-10.
SONG Gao, LI Wei, HE Yan-sen, et al. Operation analysis of high-voltage switchgear and product design problems in state grid corporation system [J]. Technical Review on High Voltage Apparatus, 2008, 4(3): 5-10.
- [6] 陈丽娟. 2010 年 220 kV 及以上电压等级断路器可靠性分析 [J]. 高压电器技术信息, 2011, 7(2): 1-5.
CHEN Li-juan. National circuit breaker reliability report over 220 kV voltage level in 2010 [J]. Technical Review on High Voltage Apparatus, 2011, 7(2): 1-5.
- [7] 黎斌. 论 GCB/GIS 的可靠性设计 (下)—对用户期盼的回应 [J]. 高压电器, 2011, 47(6): 98-106.
LI Bin. Discussion about the reliability design of GCB/GIS (II)—A response to the customer demand [J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(7): 99-106.
- [8] 张文兵. 开发阶段是保证产品固有可靠性的关键 [Z]. 西安: 西安高压电器研究院有限责任公司, 2009.
ZHENG Wen-bing. Key phase ensuring intrinsic reliability of the apparatus in the design [Z]. Xi'an: Xi'an High Voltage Apparatus Research Institute Co., Ltd., 2009.
- [9] 曾声奎. 可靠性设计和分析 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
ZENG Sheng-kui. Reliability design and analysis [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2011.
- [10] 徐国政, 张节容, 钱家骊, 等. 高压断路器原理和应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
XU Guo-zheng, ZHANG Jie-rong, QIAN Jia-li, et al. High voltage circuit breaker principles and applications [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000.
- [11] 朴吉兴, 徐国政, 黄瑜珑. ZN12-12 型断路器动力学仿真与分析 [J]. 高压电器, 2007, 43(3): 169-175.
PIAO Ji-xing, XU Guo-zheng, HUANG Yu-long. Dynamic simulation and analysis of type ZN12-12 circuit breaker [J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(3): 169-175.
- [12] 赵鸿飞, 马志瀛, 王小华, 等. 压气式 SF_6 器灭弧室内与操作机构行程特性真方法研究 [J]. 高压电器, 2011, 47(11): 45-49.

- ZHAO Hong-fei, MA Zhi-ying, WANG Xiao-hua, et al. Simulation method for arc quenching chamber and operation mechanism displacement characteristics of SF₆ puffer circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(11): 45-49.
- [13] 陈刚, 孙波, 王尔智. 真空断路器弹簧操动机构中连杆机构的容差优化[J]. 高压电器, 2007, 42(4): 241-247.
- CHEN Gang, SUN Bo, WANG Er-zhi. Tolerances optimization for linking member of spring mechanism in vacuum circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(4): 241-247.
- [14] 虞宇飞, 胡秋江, 施文耀. 配用弹簧液压机构的 SF₆ 断路器刚分(合)速度的计算与分析[J]. 高压电器, 2007, 43(5): 329-332.
- YU Yu-fei, HU Qiu-jiang, SHI Wen-yao. Calculation and analysis for instantaneous opening (closing) speed in SF₆ HV GCB with hydraulic-spring mechanism[J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(5): 329-332.
- [15] 陈保伦, 文亚宁. 断路器弹簧操作机构介绍[J]. 高压电器, 2011, 46(10): 75-80.
- CHEN Bao-lun, WEN Ya-ning. Introduction of spring operating mechanism for CB [J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(10): 75-80.
- [16] 舒服华. 高压断路器弹簧操动机构合闸弹簧可靠性分析[J]. 高压电器, 2007, 43(5): 368-373.
- SHU Fu-hua. Closing switch spring reliability analysis & improvement of high voltage circuit breaker operating mechanisms [J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(5): 368-373.
- [17] 高连华, 孙伟. 变异系数在可靠性中的应用[J]. 装甲兵工程学院学报, 2004, 18(4): 5-7.
- GAO Lian-hua, SUN Wei. Application of variation factor in reliability engineering [J]. Journal of Academy Force Engineering, 2004, 18(4): 5-7.
- [18] 王新刚, 张义民, 王宝艳. 载荷作用次数和强度退化对 SSI 模型的影响[J]. 机械设计与制造, 2008(12): 205-207.
- WANG Xin-gang, ZHANG Yi-min, WANG Bao-yan. The influence of the frequency of loading and stress degradation on SSI model [J]. Machinery Design & Manufacture, 2008(12): 205-207.
- [19] 郑松林, 褚超美, 卢曦. 疲劳载荷下衰减的数学模型[J]. 机械强度, 2005, 27(4): 549-553.
- ZHENG Song-lin, ZHU Chao-mei, LU Xi. Mathematical model of strength degradation under fatigue loading [J]. Journal of Mechanical Strength, 2005, 27(4): 549-553.
- [20] 张增照. 以可靠性为中心的质量设计、分析控制[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010.
- [21] 张福渊, 郭绍建, 萧亮壮, 等. 概率统计及随机过程[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2000.
- [22] 陈振, 王庆武. 材料力学[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2011.
- [23] 叶卫平, 张覃轶. 热处理实用数据速查手册[K]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [24] 张然治. 主译. 疲劳试验测试分析理论与实践[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
- [25] 赵宇. 可靠性数据分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
- 刘景博(1966—), 男, 高级工程师, 从事高压开关开发和工程应用。

(上接第 92 页)

- SPARROW E M, CESS R D. Radiant heat transfer [M]. Beijing: Higher Education Press, 1982.
- [20] 奥齐西克 M N, OZISIK M N, 俞唱铭. 热传导[M]. 北京: 高等教育出版社, 1984.
- AOQIXIKE M N, OZISIK M N, YU Chang-ming. Thermal conductivity [M]. Beijing: Higher Education Press, 1984.
- [21] 张洪麟, 唐军, 陈伟根, 等. 基于有限元法的地下电缆群温度场及载流量的仿真计算[J]. 高压电器, 2010, 46(2): 42-45.
- ZHANG Hong-lin, TANG Jun, CHEN Wei-gen, et al. Simulation of temperature field and ampacity of underground cable system based on finite element method [J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(2): 42-45.
- [22] 路义萍, 李伟力, 马贤好, 等. 大型空冷汽轮发电机转子温度场数值模拟[J]. 中国电机工程学报, 2006, 27(12): 7-13.
- LU Yi-ping, LI Wei-li, MA Xian-hao, et al. Numerical simulation of temperature field in rotor of large turbo generator with air-coolant [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(12): 7-13.
- [23] 路义萍, 邓海燕, 陈朋飞, 等. 空冷汽轮发电机转子端部风口布置对温度场的影响[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(23): 96-102.
- LU Yi-ping, DENG Hai-yan, CHEN Peng-fei, et al. Effect of end air-inlet arrangement method on temperature field for air-cooled turbo-generator rotor [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(23): 96-102.
- [24] 陈伟根, 赵涛, 江淘莎, 等. 改进的变压器绕组热点温度估算方法[J]. 高压电器, 2009, 45(1): 53-56.
- CHEN Wei-gen, ZHAO Tao, JIANG Tao-sha, et al. Improved method for calculation of hot-spot temperature in power transformer [J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(1): 53-56.
- 李玲(1974—), 女, 博士, 工程师, 主要研究方向为电气设备在线监测和故障诊断。