

利用油中溶解气体含量分析套管漏气的方法

鲁力铭

(西安交通大学电气工程学院,陕西 西安 710049)

摘要:目前尚无利用油中溶解气体含量分析变压器套管漏气的规程和文献。文中通过实际案例,说明如何利用油中溶解气体含量分析变压器套管是否存在漏气、是否存在过热故障或放电故障以及故障的严重程度。从而可以弥补相关的技术空白,为生产一线对变压器套管状态的判断提供有力的技术参考。

关键词:变压器套管;油中溶解气体;泄漏;过热;放电

中图分类号:TM 406 **文献标志码:**B **文章编号:**1003-6954(2022)05-0089-06

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20220517

Gas Leakage Analysis Method for Bushing by Using Gas Content Dissolved in Oil

LU Liming

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi, China)

Abstract: At present, there is no regulations and literatures for analyzing gas leakage of transformer bushing by using gas content dissolved in oil. Through practical cases, how to use the gas content dissolved in oil is explained to analyze whether there is gas leakage in transformer bushing and whether there is overheating fault or discharge fault and the severity of the fault. Therefore, it can fill the gaps of related technology and provide a powerful technical reference for the production line to judge the condition of transformer bushing.

Key words: transformer bushing; dissolved gas in oil; leakage; overheating; discharge

0 引言

油浸电容式套管是一种少油设备,密封较好,油面空间不直接向大气呼吸,所以气体损失较小^[1];而过热或放电故障会导致油中溶解气体含量明显增加,根据油中溶解气体含量可以判断故障的类型及严重程度。自20世纪80年代至2002年年底的不完全统计,中国500 kV变压器先后发生因套管(及相关部位)引起的事故23台次,存在故障25台次,占同期总的变压器事故和故障数量的36%和12.4%^[2]。套管的典型故障之一便是渗漏问题,会对套管内部绝缘产生危害^[3]。当套管在运行过程中存在渗漏(漏气)的情况,即使存在较为明显的故障,由于油中溶解气体会逸散,特别是溶解系数较小的 H_2 、 CH_4 、 CO 等气体会大量逸散:一方面导致油

中气体总含量不高;另一方面也导致油中溶解气体各组分的含量既不符合发热的产气特征,也不符合放电的产气特征。这对判断套管是否有故障以及故障的类型增加了难度,也对变压器及套管的安全运行构成了风险。

目前利用油中溶解气体含量判断套管缺陷的标准DL/T 722—2014《变压器油中溶解气体分析和判断导则》^[4]以及GB/T 24624—2009《绝缘套管 油为主绝缘(通常为纸)浸渍介质套管中溶解气体分析(DGA)的判断导则》^[5],都未涉及利用油中溶解气体含量去判断套管是否存在漏气的缺陷以及存在漏气时如何判断故障类型的内容。

针对上述问题,下面以实际案例提出了一种利用套管油中溶解气体含量去判断套管是否存在漏气缺陷以及存在漏气时如何判断故障类型及严重程度的方法。

1 基本原理

油浸电容式套管,是由电缆纸和铝箔共同卷制而成的电容芯子经油浸渍后形成油纸绝缘的密封结构。其油量相对较少,内部一般属于微正压,在头部有供绝缘油随温度变化导致体积变化的膨胀器或油枕。根据文献[4—5]:当设备正常时,绝缘油、绝缘纸随运行时间的延长会正常老化,产生少量的 H_2 、 CH_4 、 C_2H_6 、 C_2H_4 、 CO 、 CO_2 等气体,但不会产生 C_2H_2 ;当内部发生低温过热时,油中 H_2 、 C_2H_4 、 CH_4 含量会增加,其中 CH_4 的含量大于 C_2H_4 的含量;当内部发生高温过热时,油中 H_2 、 C_2H_4 、 CH_4 含量会增加,其中 C_2H_4 的含量大于 CH_4 的含量,同时可能含有少量的 C_2H_2 ;当内部发生放电时,油中 H_2 、 C_2H_2 、 C_2H_4 、 CH_4 含量会增加,随着放电能量的增加 C_2H_2 含量会明显增加;如果过热或放电故障部位涉及到绝缘纸,油中还会产生较多的 CO 、 CO_2 。也就是说无论是过热还是放电,油中 C_2H_4 含量都会增加,对密封良好的套管,理论上油中各种故障气体的含量要么同时增加,要么某些增加、某些不变或由于实验误差小幅度减小。

根据文献[6],对油中气体而言,气体组分在一定温度下的密闭系统内的气液相达到分配平衡,气体在液相中的浓度等于该气体溶解系数与该气体在气相中浓度的乘积。那么,由于故障产生的气体不会全部溶解于油中,一部分气体在油面上方的空腔(气相)中,另一部分溶解于油(液相)中,套管中气体处于动态平衡。如果套管存在密封不良缺陷,气相中的气体会漏气而减小,液相中的气体便会释放到气相中从而浓度减小。同时由于各种故障气体在油中溶解系数 S 存在差异^[7],导致逸散速率存在差异,溶解系数小的逸散速率大,溶解系数大的逸散速率小。如果套管不存在过热或放电故障,那么油中各种故障气体的含量要么同时减小,要么某些不变

或由于实验误差小幅度波动;如果套管存在过热或放电故障,当某种气体的产气速率小于逸散速率时,该气体的含量就会呈现减小趋势,当某种气体的产气速率大于逸散速率时,该气体的含量就会呈现增加的趋势。由于各种故障气体逸散速率的差异,导致油中剩余故障气体的含量表现出既不符合过热特征,也不符合放电特征。如果油中部分故障气体含量呈先减小后又增加的趋势,说明故障的产气速率变大了(大于气体的逸散速率),故障有变严重的趋势。

2 案例一

2.1 油中溶解气体含量历史数据

110 kV 某变电站主变套管 B 于 1997 年 7 月出厂,1999 年 2 月投运,由于历史原因,少油设备投运前后未要求开展绝缘油分析。2009 年 2 月 24 日第一次进行绝缘油分析,其中油中溶解气体含量如表 1 所示。该套管从 1999 年 2 月投运后,未更换过绝缘油。

2.2 数据分析

1)从表 1 看主变压器套管 B 在 2022 年 3 月 14 日的油化数据: C_2H_2 、 H_2 、 CH_4 、 C_2H_6 对运行 23 年的设备来说,其油中含量未见异常;但 CO_2 的含量(7 313.10 $\mu\text{L/L}$),特别是 C_2H_4 含量(167.82 $\mu\text{L/L}$),远大于文献[5]中 C_2H_4 正常含量为 30 $\mu\text{L/L}$ 的规定,表明设备可能异常。 C_2H_4 在大约 500 $^{\circ}\text{C}$ 下生成^[7],对密封良好的充油设备,无 C_2H_2 、单 C_2H_4 高表明设备存在高温过热。但综合所有故障气体的含量既不符合过热特征(低温过热, H_2 、 CH_4 、 C_2H_4 含量高,其中 CH_4 的含量大于 C_2H_4 的含量;高温过热, H_2 、 C_2H_4 、 CH_4 含量高,其中 C_2H_4 的含量大于 CH_4 的含量),也不符合放电特征(含有 H_2 、 C_2H_2 、 C_2H_4 、 CH_4 ,随着放电能量的增加 C_2H_2 含量会明显增加)。

2)2009 年 2 月 24 日至 2012 年 7 月 6 日, H_2 含量从 34.95 $\mu\text{L/L}$ 变为 68.93 $\mu\text{L/L}$,其余气体

表 1 110 kV 某变电站主变套管 B 油中溶解气体含量

| 时间 | 溶解气体含量/($\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$) | | | | | | | |
|------------|--|--------|----------|--------|----------|----------|----------|--------|
| | H_2 | CO | CO_2 | CH_4 | C_2H_4 | C_2H_6 | C_2H_2 | 总烃 |
| 2009-02-24 | 34.95 | 711.26 | 3 331.19 | 18.23 | 9.87 | 10.13 | 0 | 38.23 |
| 2012-07-06 | 68.93 | 833.01 | 3 579.59 | 21.35 | 12.77 | 13.95 | 0 | 48.07 |
| 2015-11-20 | 5.54 | 203.29 | 5 374.29 | 4.46 | 72.54 | 4.94 | 0 | 81.94 |
| 2022-03-14 | 6.04 | 729.83 | 7 313.10 | 10.32 | 167.82 | 5.88 | 0 | 184.02 |

(CO、CO₂、CH₄、C₂H₄、C₂H₆)有少量增加,属于单 H₂ 增高,设备未见明显异常(若仅 H₂ 含量超过注意值,但无明显增长趋势,也可判断为正常^[4])。

3)2012年7月6日至2015年11月20日,气体含量变化情况如表2所示。

从表2看出:油中气体变化率 H₂ 减小 91.96%, CO 减小 75.60%, CH₄ 减小 79.11%, C₂H₆ 减小 64.59%,但 C₂H₄ 增加 468.05%, CO₂ 增加 50.14%。由于该套管从1999年2月投运以来,未更换过绝缘油,如果套管密封良好,油中故障特征气体的含量要么同时增加,要么某些增加、某些不变或由于实验误差小幅度减小,不会出现 C₂H₄、CO₂ 大幅增加而 H₂、CO、CH₄ 大幅减小的现象。同时由于充油设备过热或放电都会产生 C₂H₄,推测设备可能异常。

由于油中溶解气体各组分在油中溶解系数(50℃时) $S_{H_2}(0.06) < S_{CO}(0.12) < S_{CH_4}(0.39) < S_{CO_2}(0.92) < S_{C_2H_2}(1.02) < S_{C_2H_4}(1.46) < S_{C_2H_6}(2.30)$ ^[7],如果以 CO₂ 为分界线,比 CO₂ 溶解系数小的 H₂、CO、CH₄ 3种气体都呈明显的减小趋势,而比 CO₂ 溶解系数大的 C₂H₂ 始终为 0、C₂H₄ 呈明显增加趋势、C₂H₆ 呈明显减小趋势。初步推测套管 B 在 2012 年 7 月 6 日至 2015 年 11 月 20 日期间存在密封不良即漏气的缺陷,使得溶解系数较小的 H₂、CO、CH₄ 由于逸散速率大于故障的产气速率而呈现明显的减小趋势;而 C₂H₆ 虽溶解系数大,但由于其含量基数不大同时故障未导致油分解产生大量的 C₂H₆,同样因逸散速率大于故障的产气速率也呈现明显的减小趋势。CO₂、C₂H₄ 一方面由于溶解系数大,同时由于故障又产生了大量的这两种气体,造成其逸散速率小

于故障的产气速率使其含量呈现明显的增加趋势。

由于 CO₂ 含量呈增加趋势,理论上推断比 CO₂ 溶解系数大的烃类气体如果有产生且产气速率大于逸散速率,则其含量应该呈增加趋势。而实际情况是 C₂H₄ 含量特别高(而且呈增大趋势)、C₂H₂ 含量一直为 0,由此可以判断故障没有产生或极少量产生 C₂H₂,套管并未出现明显的放电故障。

综上推测,2012年7月6日至2015年11月20日期间该套管存在较高温度的过热故障。该故障产生了较多的 H₂、CO、CO₂、CH₄、C₂H₄,但由于套管存在密封不良即漏气的缺陷,其中:溶解系数较小的 H₂、CO、CH₄ 3种气体以及溶解系数较大 C₂H₆,由于产气速率小于逸散速率而大量逸散,呈现出明显的减小趋势;而溶解系数较大的 CO₂、C₂H₄,由于产气速率大于逸散速率,呈现出明显的增大趋势。

4)2015年11月20日至2022年3月14日,气体含量变化情况如表3所示。

从表3看:除 C₂H₂ 一直为 0 外,其余故障特征气体的含量都呈增加趋势。由于在 2015 年 11 月 20 日至 2022 年 3 月 14 日期间未进行过检修、未更换过油,漏气缺陷并未消除,说明在 2015 年 11 月 20 日至 2022 年 3 月 14 日产气速率变大了(产气速率大于逸散速率),故障有变严重的趋势,因此建议套管退出运行。

2.3 漏气验证

为了确认套管是否漏气,采用了以下两种方法进行验证。

1)查看压力监测系统压力变化情况

通过查看该主变压器 A、B、C 3 支套管压力监测系统数据,发现 3 支套管压力变化趋势并不一致,

表2 2012年7月6日至2015年11月20日气体含量变化情况

| 时间 | 溶解气体含量/($\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$) | | | | | | | 总烃 |
|------------|--|--------|-----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------|
| | H ₂ | CO | CO ₂ | CH ₄ | C ₂ H ₄ | C ₂ H ₆ | C ₂ H ₂ | |
| 2012-07-06 | 68.93 | 833.01 | 3 579.59 | 21.35 | 12.77 | 13.95 | 0 | 48.07 |
| 2015-11-20 | 5.54 | 203.29 | 5 374.29 | 4.46 | 72.54 | 4.94 | 0 | 81.94 |
| 变化率/% | -91.96 | -75.60 | 50.14 | -79.11 | 468.05 | -64.59 | 0 | 70.46 |

表3 2015年11月20日至2022年3月14日气体含量变化情况

| 时间 | 溶解气体含量/($\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$) | | | | | | | 总烃 |
|------------|--|--------|-----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------|
| | H ₂ | CO | CO ₂ | CH ₄ | C ₂ H ₄ | C ₂ H ₆ | C ₂ H ₂ | |
| 2015-11-20 | 5.54 | 203.29 | 5 374.29 | 4.46 | 72.54 | 4.94 | 0 | 81.94 |
| 2022-03-14 | 6.04 | 729.83 | 7 313.10 | 10.32 | 167.82 | 5.88 | 0 | 184.02 |
| 变化率/% | 9.03 | 259.01 | 36.08 | 131.39 | 131.35 | 19.03 | 0 | 124.58 |

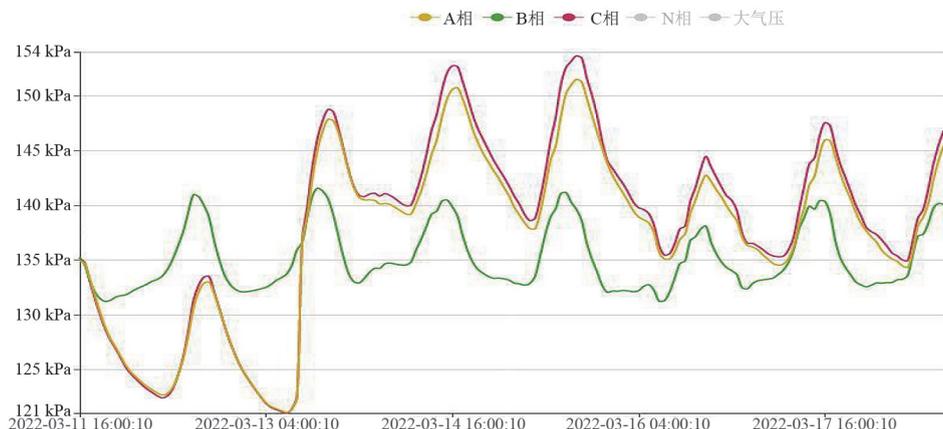


图 1 A、B、C 3 支套管压力监测情况

选取 2022 年 3 月 11 日至 2022 年 3 月 16 日压力变化趋势图进行说明,如图 1 所示。

套管在正常运行过程中如果没有特征气体产生的情况下,其内部压力主要由注油的高度和上部空腔的气体决定,内部压力的变化主要是由空腔内气压的变化决定^[4]。由于压力监测的探头在套管下部,套管底部的总压($P_{总}$)为绝缘油的压强($P_{油}$)和顶部气体压强($P_{气}$)的总和,即 $P_{总} = P_{气} + P_{油}$ 。如果存在漏气则 $P_{气}$ 减小,该少油设备的压力变化将主要由套管里绝缘油油位变化引起,将小于密封良好的套管的压力变化(既有绝缘油油位压力的变化引起,还有所有气体压力的变化引起)。绝缘油油位的变化主要由套管内油温变化引起,而油温主要由环境温度及负荷的变化引起。环境温度及负荷的变化总体呈现出周期性变化的规律,以 24 h 为一个周期。少油设备内部压强随着温度的改变,也呈现出周期性变化的规律,一般在下午压力达到峰值,在凌晨为谷值。

从图 1 可以看出:A 相(黄色)的压力变化范围约为 122~152 kPa;B 相(绿色)的压力变化范围约为 131~141 kPa;C 相(紫色)的压力变化范围约为 121~154 kPa;B 相压力明显小于 A、C 两相,同时 A、C 两相的变化趋势基本一致。由此可以判断套管 B 存在漏气的缺陷^[8]。

2)往套管里注入 SF_6 气体,用 SF_6 检漏仪进行检漏。

套管退出运行,将套管从变压器里吊出,在平地上用木方将套管垫高,将套管里的油从套管取样口放出一部分(自然状态下油流不出来);然后,往套管里充入 SF_6 气体至 0.2 MPa 左右,用检漏仪进行

检漏,发现在油枕上方螺帽下密封圈位置处漏气(见图 2),均压阀一端未见漏气。



图 2 利用 SF_6 检漏仪检查套管漏气情况

3 案例二

3.1 油中溶解气体含量历史数据

110 kV 某站主变压器套管 C 于 1998 年 5 月出厂,1999 年 7 月投运,投运后该套管未更换过绝缘油。2010 年 3 月 25 日以来绝缘油中溶解气体含量如表 4 所示。

3.2 数据分析

1)从表 4 看 2022 年 4 月 11 日的油化数据: C_2H_2 、 H_2 、 CH_4 、 C_2H_6 气体含量对运行近 23 年的设备来说未见异常。但 CO_2 的含量,特别是 C_2H_4 含量远大于文献[5]的规定,表明设备可能异常。综合所有故障气体的含量既不符合过热特征(过热 H_2 、 CH_4 、 C_2H_4 高),也不符合放电特征(至少有 C_2H_2)。

2)1999 年 7 月 2 日至 2010 年 3 月 25 日,除 C_2H_2 外,各种气体均呈增加趋势,但对运行近 11 年的设备故障气体含量未见明显异常。

表 4 110 kV 某变电站主变压器套管 C 油中溶解气体含量

| 时间 | 溶解气体含量/($\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$) | | | | | | | 总烃 |
|------------|--|---------|-----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------|
| | H ₂ | CO | CO ₂ | CH ₄ | C ₂ H ₄ | C ₂ H ₆ | C ₂ H ₂ | |
| 1999-07-22 | 10.6 | 86.5 | 392.7 | 2.2 | 0.8 | 1.5 | 0 | 4.5 |
| 2010-03-25 | 87.5 | 1 362.7 | 4 253.4 | 19.3 | 3.5 | 7.3 | 0 | 30.1 |
| 2012-12-20 | 20.3 | 757.1 | 5 267.9 | 13.4 | 4.3 | 7.6 | 0 | 25.3 |
| 2014-04-29 | 5.7 | 550.5 | 4 985.0 | 9.0 | 24.0 | 6.0 | 0 | 39.0 |
| 2022-04-11 | 2.4 | 392.3 | 5 849.6 | 10.2 | 161.2 | 5.4 | 0 | 176.8 |

从 2010 年 3 月 25 日至 2022 年 4 月 11 日,不难看出,溶解系数较小的 H₂、CO、CH₄ 呈明显的减小趋势,溶解系数较大的 CO₂、C₂H₄ 呈明显增加的趋势。

从 1999 年 7 月 2 日至 2010 年 3 月 25 日再到 2022 年 4 月 11 日,总的来看:溶解系数较小的 H₂、CO、CH₄ 含量先增加后减小;溶解系数较大的 CO₂、C₂H₄ 呈明显增加的趋势。由于该套管从 1999 年 7 月投运以来,未更换过绝缘油,如果套管密封良好,油中故障特征气体的含量要么同时增加,要么某些增加、某些不变或由于实验误差小幅度波动,不会出现 C₂H₄、CO₂ 大幅增加而 H₂、CO、CH₄ 大幅减小的现象,推测设备在 2010 年 3 月 25 日之后可能存在密封不良漏气缺陷。

3)与案例一相同,通过各组分气体在油中溶解系数分析,以及 C₂H₄ 含量特别高(且呈增加趋势)、C₂H₂ 含量一直为 0 的实际情况,可以判断故障没有产生或极少量产生 C₂H₂,套管并未出现明显的放电故障。

综上推测该套管同样存在较高温度的过热故障,故障产生了较多的 H₂、CO、CO₂、CH₄、C₂H₄,但由于套管存在密封不良即漏气的缺陷,溶解系数较小的 H₂、CO、CH₄ 3 种气体以及溶解系数较大的 C₂H₆ 由于产气速率小于逸散速率大量逸散,呈现出明显的减小趋势;而溶解系数较大的 CO₂、C₂H₄ 由于产气速率大于逸散速率,呈现出明显的变大趋势。目前该套管已退出运行,经放油、充入 SF₆ 气体进行检漏,在将军帽处发现了漏点,同时对套管进行解体,发现将军帽处导体螺纹熔化痕迹(见图 3),验证了套管确实存在过热故障。该故障与文献[9]有一定的相似性,将军帽与绕组引线间接触电阻过大直接导致套管运行时顶部发生过热问题,进而促使接触电阻进一步增大,形成恶性循环,最终破坏密封件的密封性能。



图 3 C 相套管将军帽处导体螺纹熔化痕迹

4 共性分析

对以上两个主变压器套管故障案例进行共性分析,有以下特点:

- 1) 多年的跟踪数据, H₂、CO 含量明显减小, CO₂、C₂H₄ 含量却明显增加。
- 2) 长时间漏气后, H₂ 含量都小于 10 $\mu\text{L}/\text{L}$ 。
- 3) 表 1 中 2015 年 11 月 20 日数据, CH₄ 与 C₂H₄ 含量比值为 $4.46/72.54 = 0.06$; 表 1 中 2022 年 3 月 4 日数据, CH₄ 与 C₂H₄ 含量比值为 $10.32/167.82 = 0.06$; 表 2 中 2022 年 4 月 11 日数据, CH₄ 与 C₂H₄ 含量比值为 $10.2/161.2 = 0.06$ 。在这两个案例中,套管在长时间漏气后油中 CH₄ 与 C₂H₄ 含量比值差不多都为 0.06,但 CH₄ 与 C₂H₄ 在 20 $^{\circ}\text{C}$ 时溶解系数的比值为 0.27。下一步还需对这一现象进行试验研究,是否与现场温度的变化导致溶解系数变化有关。

5 结论

通过上述案例可以总结出利用套管油中溶解气体含量分析套管是否存在漏气的方法:

- 1) 利用油中溶解气体含量分析套管缺陷时,当套管投运后未更换过绝缘油首先判断套管是否漏气;在有历史数据的情况下,将套管油中溶解气体各

组分含量进行纵向比较,查看变化趋势,如果 H_2 、 CO 含量明显减小, CO_2 、 C_2H_4 含量却明显增加,则可以推断套管存在漏气缺陷;在没有历史数据的情况下,与该变电站同类设备横向比较(同类设备使用相同的绝缘油),如果烃类气体中仅 C_2H_4 含量明显偏高,同时 H_2 含量明显偏小($<10 \mu L/L$), CO 含量也明显偏小,既不符合过热特征,也不符合放电特征,则可以判断套管存在漏气缺陷;在既没有历史数据,也没有同类设备的数据进行比较时,如果油中 H_2 、 CO 含量明显偏小, CO_2 、 C_2H_4 含量却明显较高,既不符合过热特征,也不符合放电特征,则可以判断套管存在泄漏缺陷。

2) 当判断套管存在漏气缺陷时,再判断套管故障类型及故障严重程度:如果油中没有 C_2H_2 ,有 CH_4 且 C_2H_4 含量高,则套管存在过热故障;如果油中有较高含量的 C_2H_2 ,则套管存在放电或高温过热故障,当气体的产气速率大于逸散速率(即 H_2 、 CO 、 CH_4 、 C_2H_6 都是先增加、后减小然后又增加, CO_2 、 C_2H_4 一直处于增加的趋势)时,设备存在较为严重的故障,建议退出运行。

参考文献

- [1] 操敦奎. 变压器油中溶解气体分析诊断与故障检查[M]. 北京:中国电力出版社,2005.
- [2] UJLINGS J R R, VAN DE SANDE K E A, GEVERS T, et al. Selective search for object recognition[J]. International Conference on Computer Vision, 2013, 104(2):154-171.
- [3] GIRSHICK R. Fast R-CNN[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision, 2015: 1440-1448.
- [4] REN S Q, HE K M, GIRSHICK R, et al. Faster R-CNN: Towards real-time object detection with region proposal networks[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2017, 39(6):1137-1149.
- [5] LIU W, ANGUELOV D, ERHAN D, et al. SSD: Single shot multibox detector[C]//European Conference on Computer Vision, Springer, Cham, 2016: 21-37.
- [6] REDMON J, DIVVALA S, GIRSHICK R, et al. You only look once: Unified, real-time object detection[C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2016: 779-788.
- [7] HARIHARAN B, HE Kaiming, DOLLAR Piotr, et al. Feature pyramid networks for object detection[C]//

- [2] 张淑珍. 500 kV 变压器、电抗器的套管事故及障碍分析[J]. 电力设备, 2003, 4(6): 24-28.
- [3] 凌愨. 变压器油中溶解气体分析诊断与故障检查[M]. 北京:中国电力出版社,2005.
- [4] 电力行业电力变压器标准化技术委员会. 变压器油中溶解气体分析和判断导则: DL/T 722—2014[S]. 北京:中国电力出版社,2015.
- [5] 全国绝缘子标准化技术委员会. 绝缘套管 油为主绝缘(通常为纸)浸渍介质套管中溶解气体分析(DGA)的判断导则: GB/T 24624—2009[S]. 北京:中国标准出版社,2010.
- [6] 孟玉单,李萌才,贾瑞君,等. 油中溶解气体分析及变压器故障诊断[M]. 北京:中国电力出版社,2012.
- [7] 中国电力科学研究院. 变压器油中溶解气体分析和判断导则: GB/T 7252—2001[S]. 北京:中国标准出版社,2002.
- [8] 全国高电压试验技术和绝缘配合文件化技术委员会. 高电压试验文件化分技术委员会. 高电压测试设备通用技术条件 第 16 部分: 电力少油设备压力检测装置: DL/T 846.16—2021[S]. 北京:中国电力出版社,2022.
- [9] 黄晓峰. 变压器套管将军帽过热缺陷典型特征分析[J]. 电工电气, 2019(9): 54-57.

作者简介:

鲁力铭(2003),男,研究方向为电力设备状态检测与诊断。

(收稿日期:2022-06-04)

Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2017: 2117-2125.

- [9] REDMON J, FARHADI A. YOLO9000: Better, faster, stronger[C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2017: 7263-7271.
- [10] REDMON J, FARHADI A. Yolov3: An incremental improvement[EB/OL]. [2021-03-25]. <https://arxiv.org/pdf/1804.02767.pdf>.
- [11] BOCHKOVSKIY A, WANG C Y, LIAO H Y M. Yolov4: Optimal speed and accuracy of object detection [EB/OL]. [2021-04-15]. <https://arxiv.org/abs/2004.10934>.

作者简介:

鹿博(1994),男,硕士,助理工程师,研究方向为人工智能图像识别;

鲍志远(1997),男,博士研究生,研究方向为电动汽车;
杨明坤(1994),男,助理工程师,研究方向为缺陷识别;
张凌浩(1985),男,博士,高级工程师,研究方向为电力人工智能技术。
(收稿日期:2022-07-07)