

110kV 及以上电压等级交联 电缆在线监测技术

江秀臣¹, 蔡 军², 董小兵¹, 曾 奕¹

(1. 上海交通大学 电气工程系, 上海 200030;

2. 上海电缆输配电公司, 上海 200072)

摘要: 110 kV 及以上交联聚乙烯电缆在线监测技术的发展为建立可靠、有效的电力电缆在线监测系统提供了有力保证。回顾了国内外 110 kV 及以上电网的交联聚乙烯电力电缆在线监测的状况及方法, 总结了其在线监测技术, 包括局部放电的在线监测、电缆绝缘外护套接地电阻及化学电势在线精确测量、电缆金属护层接地线电流监测, 以及电缆本体和接头温度测量。探讨了交联聚乙烯电力电缆绝缘在线监测技术的发展方向。

关键词: 交联聚乙烯; 电力电缆; 绝缘; 在线监测

中图分类号: TM 247

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2005)08-0013-05

0 引言

交联聚乙烯 XLPE 电缆自问世以来, 其所具有的绝缘性能好、供电安全可靠、易于制造和安装方便等特点使得其在配电网中已逐步取代油纸绝缘电缆, 并被广泛应用于电力系统各个电压等级的输电线路中。同时, 随着 XLPE 电力电缆的广泛使用, 特别是在长期运行过程中, 电缆受到电场、热效应、机械应力、化学腐蚀以及环境条件等因素的影响, 其绝缘品质将逐渐劣化, 极可能导致绝缘系统的破坏。由 XLPE 材料树枝状老化造成的电缆绝缘击穿事故与日俱增, 而电力电缆是电力输变电中非常重要的设备, 它对电力负荷安全、稳定传输有着瓶颈式的制约作用。

随着城市电网改造和升级步伐的进一步加快, 电力电缆的利用比重也越来越高。超大型城市如上海市的电力负荷逐年加大, 预计在 2020 年负荷将达到 32 GW 以上, 外部输入的电力将达到 30 % 左右; 同时, 为了受电的需要, 500 kV 变电站将建设到 15 座, 220 kV 变电站将建设到 140 座, 上海城市 110 kV 及以上地下电网也将有新的发展, 将出现新型地下电网通道, 如长距离地下电网专用隧道、长距离跨海大桥上敷设电缆等。另外根据上海电网规划, 上海城市电网将实现 500 kV 双环网, 预计不久还会出现 500 kV 站进城和由 500 kV 电缆线路输电, 在充分发挥通道资源的前提下, 有可能需要超大截面及容量的 110 kV 及以上电缆线路, 这些电缆的安全运行和管理问题更为迫切。这就需要开展对 110 kV 及以上电力电缆的在线监测和状态评估。

1 在线监测状况及方法

近十几年来, 随着 XLPE 电力电缆的广泛使用, 针对 XLPE 电力电缆安全运行和管理, 电力电缆绝缘在线监测技术获得了快速发展。国外早在 20 世纪 60 年代就开始了关于 XLPE 电缆绝缘弱点检出和老化监测技术的研究, 至今仍在不断深入发展, 特别是在欧美和日本等发达国家积累了一些经验^[1~5]。国外投入的在线运行监测系统为 XLPE 电缆的老化发展过程提供了大量的监测结果, 丰富了对电缆缺陷和老化的判据; 并且针对交联电缆系统劣化发展趋势, 结合监测结果的综合分析, 尝试开展了对 XLPE 电力电缆本体绝缘及其附件老化的残余寿命评估。

就日本 XLPE 电缆绝缘缺陷老化检测技术实践而言, 对于 10 kV 及以下电缆检测技术有非在线式和在线式。非在线式包括: 残留电压、反吸收电流、直流泄漏电流、电位衰减法(直流); 残留电荷、直流电压叠加法(直流与工频); 交流损耗电流法(工频); 介损法(超低频)。在线式包括: 直流成分、脉动法(工频); 直流电压叠加法(直流与工频)等。对于更高电压等级, 则尚无在线式, 仅采用非在线式, 并不再用反吸收电流、直流成分、脉动法等, 增加了如直流偏压、局部放电、耐压法等。

其他国家也有以局部放电检测法用于高压 XLPE 电缆及其附件, 如荷兰、瑞士、英国等。

目前国内对低耐压电缆依据 GB9330-1988, 采用逐级升压法, 控制电缆进行热老化实验并作为测试依据和计算方法。同时有不少学者和研究单位对国外的监测技术和方法进行跟踪研究, 积累了一些关于电缆缺陷检出和老化判据, 但是在 110 kV 及以上

XLPE 电缆方面没有进行系统的研究和工程化应用。虽然中低电压等级电缆绝缘缺陷老化检测方法多样化得到发展,积累有相当测试数据,利于实现有效检测判断;而高压电缆的老化检测方法则有所不同,部分方法得到电力部门的确认。

迄今就 XLPE 电缆绝缘老化诊断技术发展看,110 kV 及以上高压级远不及中压级的实践丰富,有待深入研究,但趋向于实施局部放电检测和电缆在线温度监测则已成为共识。XLPE 电缆线路上实施局部放电检测方式主要问题是:在测定现场的环境存在较多干扰源的情况下,如何提高局部放电检测灵敏度。为此,国外开发出高频局放(HFPD)或甚高频局放(VHFPD)新型检测仪。上海交通大学高电压研究室也开发出了高频局放测量系统,可对电缆本体、接头和端部的局放进行现场检测,满足局放信号的实时采样分析、放电信号识别和放电量大小判定。

目前另一种对 XLPE 电力电缆的保护性监测措施就是全电缆实时温度监测和接头处温度监控评估技术。当电缆局部由于不明原因过热,或者在用电峰值时期,满负荷运行的 XLPE 电力电缆的导体温升已达到最高允许工作温度时,电缆绝缘将耐受超过其正常工作条件。因此为确保电缆的安全运行,需要同时监视多个电缆接头温度变化,并采用数学物理模型对电缆接头导体的温度进行计算分析,确保电缆安全运行。

2 XLPE 110 kV 及以上电力电缆在线监测

2.1 局部放电的在线监测

目前国内外研究的电缆局部放电在线监测方法比较有效的主要有:高频电流传感器法(RFCT)和超声波/声发射检测法。

2.1.1 高频电流传感器法

耦合器从局部放电信号产生的磁场中获取能量,可以利用线圈技术耦合放电信号。对带有屏蔽铠装的电缆,由于屏蔽铠装层使得放电脉冲电流的切向分量产生轴向附加磁场,可通过线圈中净磁通的大小判断局部放电量。采用这种方法测量对电缆的传输性能无影响,能测到不失真的脉冲信号;传感器可以绕着电缆沿任意方向放置;传感器对低频分量不灵敏,远处干扰源的高频干扰信号沿着电缆传输时,被衰减掉,灵敏度较高。但它只能用于绕包铠装电缆,且受高频信号衰减特性的限制,有效测量距离在 10 m 左右,只能用于短电缆或电缆附件。

图 1 为宽频带电流耦合器局放测量现场装置。其作用是检测电缆外壳接地线上的高频电流,将高频电流传感器套在电缆外壳的接地线上,由于局部放电电流会流经该接地线,可以从中检测到高频放电信

号。这种方法传感器安装简单,可用于在线监测和便携式带电监测。

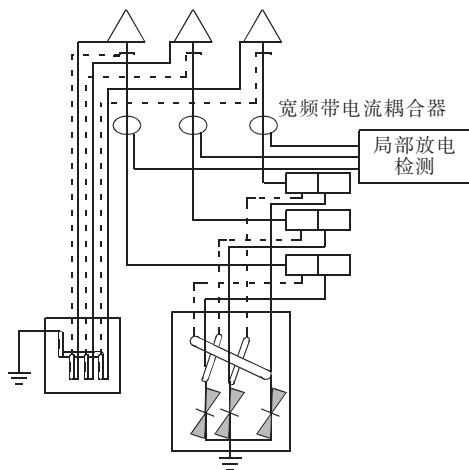


图 1 宽频带电流耦合器局放测量现场装置

Fig.1 Partial discharge detection of wide-band current coupler

2.1.2 超声波/声发射检测法^[6]

超声波/声发射技术是在现场条件下较早应用成功的技术之一。电缆中局放激发的声信号有较宽的频带,可在电缆外部用加速度或声发射传感器检测到。声学方法是非侵入式的且受外部电磁噪声影响较小,是比较理想的现场检测方法。声信号在电缆中的传输速率不高,还可用来对局放源的定位。由于电缆的绝缘材料对声波的吸收随着声波频率的增加而增加,因此声信号中的高频部分衰减很快,一般可以采用 20~300 kHz 的声信号检测电缆中的局放信号。考虑到声信号本身沿电缆传播时衰减较快,该技术主要用于电缆接头及附近的局放检测,可以采用传感器固定安装的在线监测方法,也可以采用移动传感器进行便携式检测,该技术在国外已经有不少应用实例。

可靠、灵敏度高和抗干扰能力强的传感器单元是准确获取局部放电信号的重要环节,在电缆局放在线检测方法中,电容传感器灵敏度较高,但同时也容易受各种电磁干扰的影响,有时往往干扰远大于微弱的局放信号。采用高频/超高频段检测能够降低干扰的影响,提高信噪比,但系统实现复杂、代价高,同时电容传感法安装要求切开电缆金属护套等也影响了该技术的推广应用。高频电流传感器可以监测到局放产生的高频电流,但是由于各种电磁干扰都会通过高频电流耦合过来,往往局放信号被淹没在强大的背景噪声中,需要用复杂的数字信号抗干扰算法提取微弱的局放信号,目前单独应用此法检测局放信号效果尚不理想。超声波/声发射检测法是目前现场应用比较有效的方法,采用在线监测或便携式带电检测都非常灵活,由于声传播随距离的增加衰减较快,多应

用于电缆接头附近的检测,对长电缆的检测效果不佳。

2.2 绝缘外护套接地电阻及化学电势在线测量^[7~9]

外护套位于电缆最外层,多采用聚氯乙烯(PVC)或聚乙烯(PE)两种材料。外护套在高压电缆结构中保护金属护套(如波纹铝护套)或者在没有金属护套的情况下直接对主绝缘起到保护和密封作用,同时避免感应电压在高压电缆金属护层上形成环流,降低电缆的载流量,其良好的绝缘性能,使金属护层对地绝缘。

对电缆外护套绝缘状态的评价是电缆运行状态评估的重要依据。单芯高压电缆外护套绝缘的优劣不仅对电缆长期运行寿命有重大影响,而且直接关系到电缆的短期运行安全,其原因有:一是护套破损导致电缆金属套(或金属屏蔽层)出现多点接地,金属屏蔽层产生环流造成损耗发热,导致绝缘局部过热并加速绝缘老化,严重影响主绝缘寿命;二是护层绝缘损伤导致水分侵入,主绝缘产生水树老化的概率增加,对电缆寿命产生严重影响;三是主绝缘在金属护层被腐蚀处产生电场集中,易于产生局部放电和引发电树枝,对电缆的短期运行安全造成威胁。国内已有学者提出采用两次测量法测量绝缘护套对地电阻和化学电势,原理图见图 2。其优点是可以利用较低电压的直流标准电势同时精确地在线测量护套绝缘电阻和金属套的接地化学电势,主要适用于运行若干年的电缆护套在线测量。

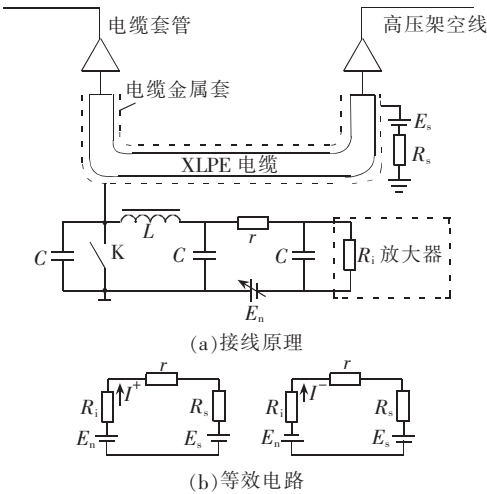


图 2 在线测量绝缘护套对地电阻和化学电势
Fig.2 On-line monitoring of grounding resistance and chemical potential of insulating sheath

2.3 电缆金属护层接地线电流监测^[10]

当交联聚乙烯里的水树枝发展时,不但 $\tan \delta$ 增大、击穿电压 U_{BD} 下降,而且电容增量 ΔC 增大。因此老化前后的电容量有变化,从而使接地线电流 ΔI_g 也会发生变化。因此,通过在线监测电缆接地线电容电流的增量 ΔI_g 的方法就可以掌握电缆绝缘老化的状况。该方法简便易行,通常在接地线上套以电流互感器即可实现。如图 3 所示为接地电流法在线监测原理图。

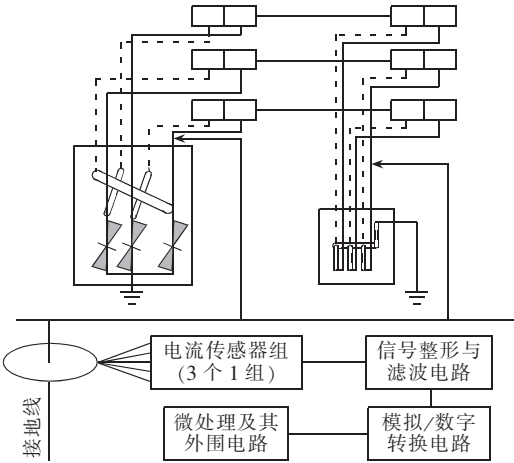


图 3 金属屏蔽层接地电流在线监测接线示意图
Fig.3 On-line grounding current monitoring of cable metal shroud

在加速老化试验中验证了交流击穿电压与接地线电流增量 ΔI_g 有较好的相关性($n=0.76$),因此可作为判定绝缘老化的依据。此外,由于可以连续、实时地监测运行状态下的电容电流,则在线监测的数据结果具有连续性,可视为一时间序列。对时间序列建立自回归滑动平均模型,进行统计分析,可以判断出其发展趋势,并判断新得到的监测值是否有显著变化(变差)。

相比较而言,接地线电流法是一种比较合适的方法。在线监测通过接地线的电容电流易于实现,只要在接地线上套以电流互感器即可。且由于 110 kV XLPE 电缆线路的金属屏蔽层采用单点接地方式,无需改变接地线的连接。通过采集得到各相接地线电流(电容电流),对之进行数据处理和趋势分析,从接地线电流得到其包含的反映电缆绝缘的信息,并据此作出诊断。

110 kV 及以上电压等级电缆多采用单芯电缆敷设方式。由于三相电缆很难对称敷设,多采用金属套交叉换位互联,然后一点或两点接地的方式,以保证各电缆感应电势相位对称和幅值相等。因此,一旦电缆护套绝缘破损,在电缆金属层上的感应电势即会出现不平衡,导致环流和局部过热,中性点接地处的电流将不能互相平衡。分别检测各相电缆金属护层的接地电流,可以反映出电缆绝缘外护套的非正常状态。图 4 所示为中性点不平衡电流监测接线图。

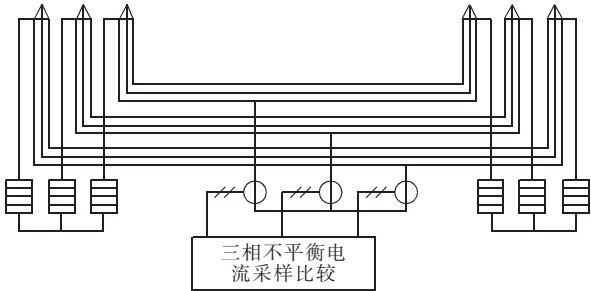


图 4 中性点不平衡电流监测
Fig.4 Monitoring of neutral point unbalanced current

2.4 电缆本体和接头温度测量^[11,12]

电缆故障往往是绝缘水平下降,泄露电流增大,损耗增加,导致温度升高;温度升高又进一步使绝缘老化,泄露电流增大,温度再升高,最终导致绝缘击穿。温度升高是引起电缆事故的一个因素,因此也可作为反映电缆运行情况的参量。相对而言,由于温度是一个非电气物理量,防电磁干扰和电气隔离措施较易实现,可靠性较高。图5给出了可用于电缆绝缘表面在线温度测量的方法。

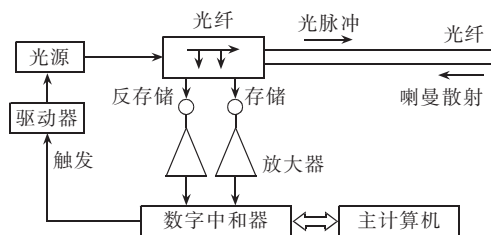


图5 分布式光纤温度传感器

Fig.5 The distributed optical temperature sensor

这种可测量电缆纵向温度的分布式温度传感器,使用单根光纤就可同时测量电缆多点故障时的温度。光纤本身可作为传感器,即使被加入电缆也不受分布电流的影响,而且还不需要维护。传感器的测温原理是电缆线路温度随着由激光脉冲送入光纤产生的喇曼散射光的亮度而变化。另外,采用成本较低的测温电缆柔性线形热偶温度探测器(FTLD)、连续热电偶温度变送电缆(CTTC)“连续”热电偶或“寻热”热电偶形式,是线状温度感测器技术发展取得的主要成果。该技术利用热电效应,能够连续产生与其长度所及范围内最高温度点温度相对应的毫伏信号,不仅能测定温度异变的幅度,而且能确定温度异变的地点。

实践证明接头温度是反映接头质量的主要参数,当接头接触电阻增加时,其接头温度也必然升高。而长时间较高的温度,又会导致接头处绝缘老化。对接头温度进行连续监测和优化处理,可及时分析和掌握接头质量的变化,发现可能的故障隐患。

3 结论

a. 目前对110 kV及以上XLPE电力电缆绝缘弱点检出和老化检测技术研究的发展,促进了电缆寿命评估和故障预警的工程实现,但是国内在此领域的发展仍需要大量的基础性研究和技术开发,特别是监测结果与实验室试验结果的配合。

b. 局部放电监测作为110 kV及以上电缆在线监测技术已经为国内外电力用户所广泛接受;电缆外护套绝缘状态的评价是电缆运行状态评估的重要依据;电缆金属护层接地线电流监测提供了电缆绝缘本体长期老化趋势的统计评估以及电缆绝缘外护套

的非正常状态预警;电缆本体和接头的温度监测则可以提供电缆运行状态下的异常情况预警,并可间接提供电缆输送容量变动的指导性数据。

c. 绝缘状态与其特性参数间的统计分散性,仅用一种方法诊断绝缘,会有漏判或错判的可能。因此,需要研究XLPE电缆绝缘缺陷监测的现场有效监测方法和技术,对不同缺陷的监测可靠性和灵敏度,以及抗干扰措施;并对选择的监测方法组合性使用,综合判定电缆绝缘的缺陷和老化。

参考文献:

- [1] OONISHI H, URANO F, MOCHIZUKI T, et al. Development of new diagnostic method for hot-line XLPE cables with water trees[J]. *IEEE Trans. on Power Delivery*, 1987, 2(1): 1-7.
- [2] NAKAJIMA A. Development of a hot-line diagnostic method for XLPE cables and the measurement results[J]. *IEEE Trans. on Power Delivery*, 1989, 4(2): 857-862.
- [3] AHMED N H, SRINIVAS N N. On-line partial discharge detection in cables[J]. *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation*, 1998, 5(2): 181-188.
- [4] TIAN Y, LEWIN P L, WILKINSON J S, et al. Continuous on-line monitoring of partial discharges in high voltage cables[A]. *Conference Record of the 2004 IEEE International Symposium on Electrical Insulation* [C]. Indianapolis, USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2004. 454-457.
- [5] HENNINGSEN C G, POLSTER K, FRUTH B A, et al. Experience with an online monitoring system for 400 kV XLPE cables[A]. *Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Transmission and Distribution* [C]. Los Angeles, USA: IEEE, 1996. 515-520.
- [6] TIAN Y, LEWIN P L. PD characterization using wavelet decomposition of acoustic emission signals[A]. *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Solid Dielectrics ICSD* [C]. [s.l.]: IEEE, 2004. 699-702.
- [7] 郑晓泉, 屠德民. 采用直流法对XLPE电缆进行在线检测的抗干扰技术研究[J]. *电线电缆*, 1998, (4): 33-35.
- [8] 郑晓泉, 屠德民. 补偿电势法用于在线检测XLPE电缆[J]. *高电压技术*, 1998, 24(3): 28-30.
- [9] 郑晓泉. 直流法XLPE电缆绝缘在线诊断中的几个影响因素及其对策[J]. *电线电缆*, 2000, (5): 28-32.

ZHENG Xiao-quan. Factors influencing the results of the

- on-line diagnosis of XLPE cable insulation by DC measurement and solutions[J]. **Electric Wire & Cable**,2000,(5):28-32.
- [10] 段建东,陈天翔,张保会. 用接地线电流法进行电力电缆绝缘在线监测的仿真计算[J]. 高压电器,2005,41(1):29-31,35.
- DUAN Jian-dong, CHEN Tian-xiang, ZHANG Bao-hui. Simulation of online monitoring of power cable insulation using grounding current method[J]. **High Voltage Apparatus**,2005,41(1):29-31,35.
- [11] 张晓虹,蒋雄伟,王振华,等. 分布式光纤温度传感器在交联聚乙烯绝缘地下电缆故障检测中的应用[J]. 电网技术,1999,23(12):36-38,42.
- ZHANG Xiao-hong, JIANG Xiong-wei, WANG Zhen-hua, et al. Application of fiber optic distributed temperature sensor to fault detection of XLPE insulated underground cable [J]. **Power System Technology**,1999,23(12):36-38,42.

- [12] 李艳秋,曹钟中,靳 涛. 电力电缆火灾监测及防火预警系统的研制[J]. 华北电力技术,2001,(2):23-24.
- LI Yan-qi, CAO Zhong-zhong, JIN Tao. Monitoring for power cable fire and development of early fire warning system[J]. **North China Electric Power**,2001,(2):23-24.

(责任编辑:李育燕)

作者简介:

江秀臣(1965-),男,山东鄄城人,教授,博士研究生导师,主要从事高电压绝缘技术及绝缘在线监测、自动化设备方面的研究工作(E-mail:xcjiang@sjtu.edu.cn);

蔡 军(1970-),女,上海人,高级工程师,从事电缆运行管理工作;

董小兵(1973-),男,陕西咸阳人,博士后,从事聚合物绝缘材料和技术、高电压工程和电力系统在线监测方面的研究工作。

On-line monitoring techniques for 110 kV and above XLPE cable

JIANG Xiu-chen¹, CAI Jun², DONG Xiao-bing¹, ZENG Yi¹

(1. Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China;

2. Shanghai Power Transmission & Distribution Co., Ltd., Shanghai 200072, China)

Abstract: The development of on-line monitoring techniques for 110 kV and above XLPE power cable gives a powerful support to power cable on-line monitoring system. The on-line monitoring status and methods of XLPE power cable in 110 kV and above network all over the world are reviewed. Its techniques are summarized, including on-line monitoring of partial discharge, on-line measuring of the grounding resistance and chemical potential of cable insulating sheath, grounding current monitoring of cable metal shroud and temperature detection of cable and its connectors. The development trend of on-line monitoring technique of XLPE power cables is discussed.

Key words: XLPE; power cable; insulation; on-line monitoring

国家电网公司科技期刊第一审读组

审读工作会议在长沙召开

国家电网公司科技期刊第一审读组审读工作会议于2005年4月25~27日在长沙召开。来自第一审读组及其他单位的14种期刊共25位审读员和代表参加了会议。会议主题是总结2004年第一审读组的审读工作,讨论审读工作中的问题,提出改进措施;部分期刊介绍办刊经验;探讨审读工作的发展方向。

《中国电力》杂志社副社长叶雷代表第一审读组的组长单位作了审读工作总结报告,全面、客观地评价和分析了2004年的审读工作,在全面肯定取得成绩的同时,指出了存在的问题,提出了努力方向。在改进措施中提出,要在审读工作中加强领导和管理;加大编辑出版标准化和规范化执行力度;加强年轻编辑的业务培训。

《电力系统自动化》、《电网技术》、《电力安全技术》及《高电压技术》4种期刊的代表介绍了办刊经验。《高电压技术》杂志社副社长彭纯正介绍了“科技类杂志社员工价值评价方法初探”研究成果,引起了与会代表的极大兴趣。在讨论中,代表们对审读方式和办法提出很好的建设性意见。对于审读工作的发展方向,代表们一致认为:(1)要认真负责地对待审读工作,继续加强交流和学习,不断提高审读水平;(2)要正确理解审读工作的意义,把审读工作与提高刊物质量紧密结合在一起;(3)充分发挥审读组的优势,做好优秀期刊的评选工作,为国家评刊打下良好的基础。

(叶雷)