

Analysis of Replacement for Copper by Common Conductive Materials in Cable Grounding Wire

Chang Liu, Ze Xiang, Guo Ma, Haoxia Lei, Fengren Yang, Yang Gou, Xiaojing Huo, Yijun Liu, Yanchi Li

State Grid Chengdu Power Supply Company, Chengdu Sichuan
Email: xiangze1987@163.com

Received: Nov. 30th, 2018; accepted: Dec. 20th, 2018; published: Dec. 27th, 2018

Abstract

In this research, several kinds of common conductive materials were compared with copper on material properties, including conductivity, heat stability, corrosion resistance and mechanical properties. These results were used to analyze the possibility of replacement for copper by common conductive materials in actual environmental conditions of cable grounding wire. The results showed that aluminum was the suitable substitute for copper in cable grounding wire. Next to copper, aluminum performed best on most of the material properties and cost performance among the samples. Due to the lower secondary value of aluminum, it had contributed to decrease the stolen rate of cable grounding wire if the copper was replaced by aluminum. It also could relieve the pressure of transmission line operation department on protection against burglars and reduce the safe hidden danger indirectly. It had certain research value and social benefits for the application of this result.

Keywords

Conductive Material, Cable Grounding Wire, Material Properties, Replacement, Possibility Analysis

高压电缆铜质接地线常规材料替代研究分析

刘畅, 向泽, 马果, 雷浩辖, 杨丰任, 苟杨, 霍小晶, 刘怡君, 李雁池

国网成都供电公司, 四川 成都
Email: xiangze1987@163.com

收稿日期: 2018年11月30日; 录用日期: 2018年12月20日; 发布日期: 2018年12月27日

摘要

通过对比几种常见导电材料和铜材料的导电性能、热稳定性、耐腐蚀性和机械性能优劣,并结合铜质接地线实际使用环境对各种常见导电材料替代铜质接地线的可能性进行理论验证,结果显示:各种常见的导电材料中,采用铝代替铜作为接地线是较为合适的,铝的多项材料性能和性价比仅次于铜,而二次价值较低的铝若应用于电缆接地线中将有助于降低接地线被盗的概率,降低线路运维单位防盗工作的压力并间接减少线路运行隐患,具有一定的研究价值和社会效益。

关键词

导电材料, 接地线, 材料性能, 替代, 可能性分析

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着社会经济的快速发展和城市化进程加快,城市输电电缆敷设长度、数量和电压等级逐年递增,正逐步取代架空线路成为城市输配电的主干网络[1] [2]。国内 110 kV 及以上单芯电缆的金属护层一般采用交叉互联双端接地或单端接地的运行方式。其中,高压电缆系统接地线、交叉互联线大多采用铜材质。当前市场中,回收电缆线铜的价格约为 5 万元/吨。每组交叉互联线及接地线长十数米,重数十千克,二次价值高达数千万元,因此经常出现接地线、交叉互联线被不法分子盗割偷卖的情况。

正常情况下电缆金属护层对地只有几十伏的感应电压,一旦发生接地线被盗使接地系统遭到破坏,金属护层对地电压会上升至较高的数值[3] [4]。感应电压过高不仅会危害人身安全,还会造成绝缘层击穿,进而降低电缆的载流量,严重时甚至会击穿外护套绝缘或引发电缆线路运行事故,威胁电网运行安全。

为从根本上解决此类问题,有必要研究采用二次价值更低的线材替代接地铜线。目前国内已有类似产品研制成功[5],但能否可以应用于电缆接地线中则有待研究。本文结合成都供电公司管理区段内 110 kV 和 220 kV 高压输电电缆的实际运行情况,从材料性能和性价比等方面对多种线材进行比较和考核,筛选出适合作为铜质接地线的替代材料。

2. 分析方法

目前国内 110 kV 和 220 kV 高压输电电缆主要采用隧道、沟道、排管和直埋方式进行敷设,由于施工条件的限制和电缆运行环境的影响,要求电缆接地线材质必须具备一定的机械强度和抗腐蚀性以防止施工和线路长期运行过程中发生破损断裂;同时也要求接地线材质需具备一定的导电性和热稳定性以确保电缆外护套有效接地,并在承受短时冲击电流的作用下不发生熔化。

故本文结合成都供电公司电缆通道实际运行情况,从材料的导电性、热稳定性、耐腐蚀性和机械性能方面对各种常规导电材料与铜材料进行对比分析。查询《机械设计手册》可以直接获知几种常规导电材料的电学和机械性能参数,进行导电性和机械性能的对比分析;热稳定性分析则是通过查询《机械设计手册》获知不同材料的热学参数,结合电缆实际运行条件,带入相关标准公式进行计算,得出一定运行条件下保证接地线材料不发生熔化的最小截面尺寸,截面尺寸约小,材料的热稳定性越好,同时制作

接地线时使用的线材数量越少,经济效益更好;耐腐蚀性分析中,由于接地线主要腐蚀问题为自身氧化和电化学腐蚀,故主要依据金属活动性顺序、材料自然氧化原理和原电池反应原理进行判断分析。最后结合性价比和二次价值等因素对各种导电材料进行综合评价。

3. 分析内容和综合评价

3.1. 材料导电性能对比分析

根据使用工况的不同,所采用的接地线材料有所不同,常用接地线材质的电阻率及平均电阻温度系数如表 1 所示。数据显示,铜的电导率最高($1.75 \times 10^{-8} \Omega/\text{m}$),远远高于其他常用接地材料(钢、铝、石墨等)。材料导电性排序为:石墨 < 钢 < 铝 < 铜。

而本文研究对象是交叉互联线和直接接电线,根据国家标准 GB50057-1994(2000 版)《建筑物防雷设计规范》中的规定,其接地电阻在欧姆量级(不大于 1Ω)。交叉互联线及直接接地线的长度在数米内,与隧道接地电阻相比可以忽略,故不会在交叉互联线及直接接地线上产生明显电压降。因此,单纯从导电性考虑,不能给出实用效果区别明显的选择。

Table 1. Resistivity and mean tempera of common electrical materials

表 1. 常用电工材料的电阻率及平均电阻温度系数

材料	电阻率 $\rho(20^\circ\text{C})/\Omega\cdot\text{m}$	平均电阻温度系数 $\alpha(0^\circ\text{C}\sim 100^\circ\text{C})/1/^\circ\text{C}$
铜	1.75×10^{-8}	4.1×10^{-3}
铝	2.85×10^{-8}	4.2×10^{-3}
黄铜(铜锌合金)	$(2\sim 6) \times 10^{-8}$	2.0×10^{-3}
铁(铸铁)	5×10^{-7}	1.0×10^{-3}
钨	5.48×10^{-8}	5.2×10^{-3}
铂	2.66×10^{-8}	2.47×10^{-3}
钢	1.3×10^{-7}	5.77×10^{-3}
汞	4.8×10^{-8}	5.7×10^{-4}
康铜	4.4×10^{-7}	5.0×10^{-6}
锰铜	4.2×10^{-7}	5.0×10^{-6}
镍铬合金	1.08×10^{-6}	1.3×10^{-6}
铁铬铝合金	1.2×10^{-6}	8.0×10^{-5}
石墨	8.0×10^{-6}	-5.0×10^{-4}

3.2. 材料热稳定性对比分析

事实上,不同材料导电性的差异会影响接地线的热稳定性。当材料中通过相同电流时,在接地线上沉积的能量与其材料的电阻成正比,其主要受到接地线截面、电阻率、熔点等因素的影响。

查询 IEEE Std 80-2000 标准中给出了相应公式,通过公式计算可以得到接地导体的短时温升或作为电流函数所要求的导体尺寸。由于短路接地的时间非常短暂($<1 \text{ s}$),导体向外传递的热量极为有限,故假设该过程中所有热量都留在导体中(绝热过程),在材料常数已知或可算出时,可以通过公式计算确定导体的载流量。常用接地材料的材料参数见表 2。对于对称电流(无直流偏置)可推算出公式(1)~(3)。

$$I = A_{mm^2} \sqrt{\left(\frac{TCAP \cdot 10^{-4}}{t_c \alpha_r \rho_r}\right) \ln\left(\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a}\right)} \quad (1)$$

式中： I 是电流有效值，单位：kA； A_{mm^2} 是导体截面积，单位： mm^2 ； T_m 是最大许可温度，单位： $^{\circ}C$ ； T_a 是环境温度，单位： $^{\circ}C$ ； T_r 是材料常数的参考温度，单位： $^{\circ}C$ ； α_0 是 $0^{\circ}C$ 时电阻率的温度系数，单位： $1/^{\circ}C$ ； α_r 是参考温度 T_r 时电阻率的温度系数，单位： $1/^{\circ}C$ ； ρ_r 是参考温度为 T_r 时接地导体的电阻率，单位： $\mu\Omega\cdot cm$ ； K_0 是 $1/\alpha_0$ 或 $(1/\alpha_r) \cdot T_r$ ，单位： $^{\circ}C$ ； t_c 是电流的持续时间，单位： s ； $TCAP$ ：每单位体积的热容量(表 1)，单位： $J/(cm^3 \cdot ^{\circ}C)$ ；应注意在同一参考温度 T_r 下，能同时找到 α_r 和 ρ_r 。

式(1)整理后可用来确定作为电流函数的导体尺寸。

$$A_{mm^2} = I \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{TCAP \cdot 10^{-4}}{t_c \alpha_r \rho_r}\right) \ln\left(\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a}\right)}} \quad (2)$$

用英制单位，公式可简化如下：

$$A_{kcmil} = I \cdot K_f \sqrt{t_c} \quad (3)$$

式中： A_{kcmil} 是导体的截面积，单位：kcmil，且 $1 \text{ kcmil} = 0.507 \text{ mm}^2$ ； I 是故障电流有效值，单位：kA； t_c 是电流持续时间，单位： s ； K_f 是材料在不同 T_m (熔化温度或导体限制温度)值和环境温度(T_a)为 $40^{\circ}C$ 时的常数。

Table 2. Performance parameter of common electrical materials

表 2. 常用电工材料性能参数

材料种类	材料电导率(%)	20 $^{\circ}C$ 系数 $\alpha_r(1/^{\circ}C)$	0 $^{\circ}C$ 时 $K_0(0^{\circ}C)$	熔化温度 $T_m(^{\circ}C)$	20 $^{\circ}C$ 时 $\rho_r(\mu\Omega cm)$	$TCAP$ 热容量 $[J/(cm^3 \cdot ^{\circ}C)]$	K_f
退火铜(软扎)	100.0	0.00393	234	1083	1.72	3.42	7.00
商用铜(硬扎)	97.0	0.00381	242	1084	1.78	3.42	7.06
铜包钢线	40.0	0.00378	245	1084	4.40	3.85	11.78
铜包钢棒 b	20.0	0.00378	245	1084	8.62	3.85	12.06
铝(EC 级)	61.0	0.00403	228	657	2.86	2.56	14.64
铝(5005 合金)	53.5	0.00353	263	652	3.22	2.60	12.12
铝(6201 合金)	52.5	0.00347	268	654	3.28	2.60	12.41
铝包钢线	20.3	0.00360	258	657	8.48	3.58	12.47
钢(1020)	10.8	0.00160	605	1510	15.90	3.28	17.20
不锈包钢棒	9.8	0.00160	605	1400	17.50	4.44	15.95
镀锌钢棒	8.6	0.00320	293	419	20.10	3.93	14.72
不锈钢(304)	2.4	0.00130	749	1400	72.00	4.03	28.96
石墨	28.2	-0.00050	—	3652	6.10	1.60	—

因为如下因素的影响，实际选择的导体尺寸往往大于根据熔化条件求得的尺寸，如：

a) 在接地装置的设计寿命期内，导体的强度应能经受得住任何预期的机械作用或腐蚀引起的机械损伤。

b) 在接地装置的使用寿命期内，导体应有足够高的电导，以防止故障期间在接地线上产生任何可能

的危险电压降。

c) 限制导体温度的需要。

d) 和对待其它的电子部件一样，对接地系统也应有安全系数。

e) 传导雷电流的接地导体无需作更多的考虑。根据故障电流要求而选定的导体尺寸，通常也足以通过雷电引起的短时浪涌。

针对成都电缆工区 110 kV 及 220 kV 电力电缆的实际工况，当主保护可以正常动作情况下，短路接地故障的持续时间不大于 0.1 s，当主保护失效，后备保护切除故障的时间不大于 0.6 s；110 kV 电缆线路系统最大短路电流为 30 kA，220 kV 电缆线路系统最大短路电流为 50 kA。

此处取极端短路情况为 $t_c = 0.6$ s， $I = 50$ kA；即 220 kV 短路故障且主保护失效，可计算得到极端短路情况下不同材料接地线的最小截面积，如表 3 所示。

Table 3. Minimum section area of cable grounding wire made of different electrical materials in extremely short-circuit condition ($t_c = 0.6$ s, $I = 50$ kA) of cable

表 3. 极端短路情况($t_c = 0.6$ s, $I = 50$ kA)下不同材料接地线(裸线)最小截面积

工况	$t_c = 0.6$ s, $I = 50$ kA				
	材料	退火铜(软扎)	铝(EC 级)	铝包钢线	不锈钢(304)
最小截面/mm ²		97.1	237.6	337.3	568.7

上述均为金属材料，均具有正的电阻率温度系数。石墨材料为非金属材料，具有高熔点、高电导率及低密度等优点，并具有负的电阻率温度系数，有助于降低大电流下的发热问题，通过计算得到极端短路情况下($t_c = 0.6$ s, $I = 50$ kA)石墨与退火铜接地线的最小截面积和主要参数的对比，如表 4 所示。

Table 4. Main performance parameters of cable grounding wire made of graphite and copper in extremely short-circuit condition ($t_c = 0.6$ s, $I = 50$ kA) of cable

表 4. 极端短路情况($t_c = 0.6$ s, $I = 50$ kA)下石墨与退火铜主要参数对比

	熔化温度 T_m (°C)	20°C 时电阻率 ρ ($\mu\Omega\text{cm}$)	热容量 $TACPI$ ($\text{cm}^3 \cdot \text{C}$)	最小截面(mm^2)
退火铜	1083	1.72	3.42	97.1
石墨	3652	6.1	1.6	-310

上述计算结果表明，常用接地材料的最小截面积的排序为：退火铜 < 铝(EC 级) < 石墨 < 铝包钢线 < 不锈钢。最小截面积越小，热稳定越好，故材料热稳定性排序为：不锈钢 < 铝包钢线 < 石墨 < 铝(EC 级) < 退火铜。但此处的最小截面是在“短路接地时间极大($t_c = 0.6$ s)，短路电流极大($I = 50$ kA)，仅通过一根接地线泄放电流”的非常极端的情况下得到的。实际工况中，沿线路往往每隔数百米便进行直接接地和交叉互联间接接地，即使在多处接地线被盗的情况下，此处的核算仍具有较大安全裕量。

3.3. 材料耐腐蚀性对比分析

由于电缆接地线大多为间接接地，与接地网没有直接的电联系，其对接地网及不锈钢构架的腐蚀可以忽略；而电缆的金属护套与线芯一致，大多采用铜材质，若采用非铜金属做接地线，会造成电化学腐蚀现象。同时，成都供电公司湿度较大的电缆通道环境会加剧电化学腐蚀过程。因此，针对成都供电公司的情况，考虑的接地线腐蚀问题应为：接地线本身被腐蚀，接地线对其与金属护套接触点腐蚀的影响。

实践证明[6] [7] [8]在金属的接触面上除去氧化层后，镀一层锡可以使接触电阻稳定。原因在于：首先，铝导体由于在极短的时间内就氧化，无法手工搪锡；其次，锡的标准电极电位为-0.14 V。在铜端搪

锡后，铜铝导体的搭接处主要是铝和锡接触，这两者间的电位差比铜与铝连接时的电位差小得多，有效地防止了连接处铝导体的电化腐蚀问题。但特别潮湿、高温或有腐蚀性气体存在的地方，大量的水分容易进入接触面，会加速电化腐蚀作用。因此，在特别潮湿的室内，铜铝连接时应采用铜铝过渡板或铜铝端子。如图 1 所示。

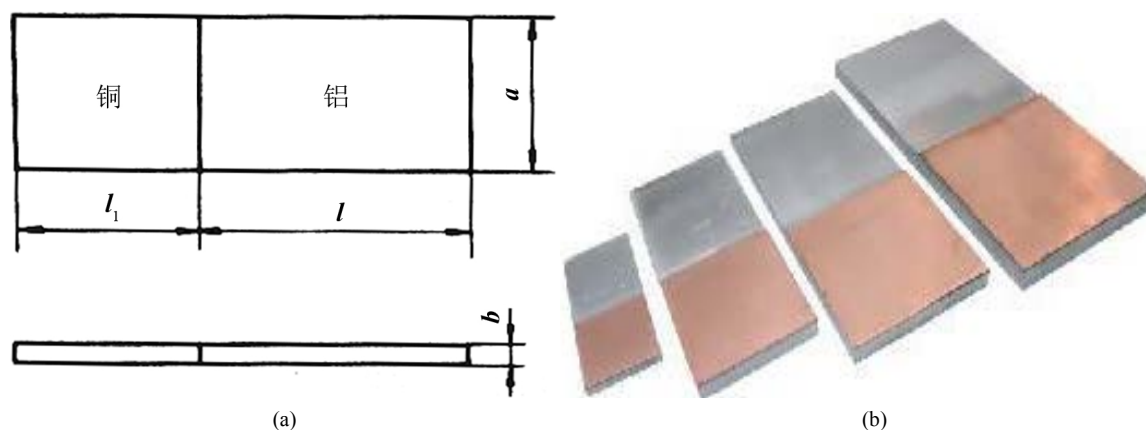


Figure 1. Transition plate between copper and aluminum; (a) Sketch map, (b) Physical map
图 1. 铜铝过渡板；(a)示意图，(b)实物图

采用铝质接地线后，其本身的氧化层非常致密，能够保护内部不会继续腐蚀，因此不需添加额外的保护。

不锈钢内部富含铬元素，在大气中不锈钢表面生成了一层钝化的、致密的富铬氧化物保护表面，防止进一步再氧化，且如果铬薄膜一旦破坏，钢中的铬与大气中的氧发生化学反应可迅速地重新形成钝化膜[9]，继续起保护作用，抗氧化腐蚀性很强；相比于纯铝材料，不锈钢材料在电化学腐蚀过程中的稳定性更好[10]。

对于石墨等非金属材料，若用于制作接地线则可完全避免腐蚀问题[11][12]。从这个角度看，石墨等非金属材料无疑最为理想。

3.4. 材料机械性能对比分析

除上述导电性、热稳定性、耐腐蚀性因素外，在选用接地线时，还应考虑材料的机械性能。几种常用接地材料的机械性能如表 5 所示。

Table 5. Mechanical properties of common electrical grounding materials

表 5. 常用接地材料的机械性能

材料	密度 g/cm^3	抗拉强度 MPa	屈服强度 MPa	弹性模量 GPa	切变模量 GPa	泊松比
铜	8.9	394	259	110	40	0.32
不锈钢	7.9	580	138	210	81	0.28
铝	2.7	125	117	69	30	0.34
石墨	1.6	34	—	12	59	—

弹性模量反映材料产生弹性变形的难易程度，即材料刚度，其值越大，在一定应力作用下材料发生的弹性变形越小。切变模量指材料抵抗切应变的能力，数值越大则表示材料的刚性越强。泊松比指材料在单向受拉或受压时，横向正应变与轴向正应变的绝对值的比值，也叫横向变形系数，反映材料横向变

形的弹性常数。抗拉强度指试样拉断前承受的最大标称拉应力，表征金属在静拉伸条件下的最大承载能力。

通过表 5 中的数据对比可知，不锈钢的机械强度最大，但当线材截面较大时，难以进行弯折和塑形；铜和铝的机械强度弱于不锈钢，石墨机械性能最差。考虑到电缆隧道中，空间狭窄、环境复杂，接地线应具有适中的机械性能，既保证安全可靠，又方便施工和安装，故铜和铝较为合适。同时，铝的密度仅为铜的三分之一左右，作为接地线其安装和使用都更加方便。

3.5. 材料性价比对比和性能综合评价

在性价比方面，从造价来看，铜 > 铝 > 不锈钢 > 石墨；从二次价值来看，铜 > 铝 > 不锈钢 > 石墨；二者相一致。而二次价值高恰恰是造成电缆接地线被盗的直接原因，选用二次造价较低的材料，有助于降低接地线被盗的概率，因此单从性价比方面考虑，选择铝、不锈钢和石墨均可作为铜质接地线的替代材料。

通过各项材料性能和性价比对比分析，总结出常用接地材料的主要指标对比如表 6 所示。综合来看，铝的多项材料性能仅次于铜，且在材料密度和性价比等方面相比于铜更有优势，故选择铝作为铜制接地线的替代材料是较为合适的。

Table 6. Main indices of common electrical grounding materials

表 6. 常用接地材料的主要指标对比

性能	导电性	热稳定性	耐腐蚀性	机械性能	性价比	二次价值
材料	铜 > 铝 > 不锈钢 > 石墨	铜 > 铝 > 石墨 > 不锈钢	石墨 > 铜 > 不锈钢 > 铝	铜 > 铝 > 不锈钢 > 石墨	铜 > 铝 > 不锈钢 > 石墨	铜 > 铝 > 不锈钢 > 石墨

4. 结论

1) 本文从导电性、热稳定性、耐腐蚀性、机械性能和性价比等方面，对比了几种常规金属及非金属材料在电缆接地线方面的应用价值，综合来看，采用铝代替铜作为接地线线材是较为合适的。

2) 铝的多项材料性能均领先于其他电工材料，目前已广泛应用于高压架空输电线路相关线材的制作中，在自然界中储量较大，易进行开采和回收利用，对于实现装备制造业的可持续发展具有一定的现实意义。

3) 铝的二次价值较低，相比于铜材料能更好的预防或避免接地线被盗的情况，可以减轻线路运维单位在接地线防盗方面的工作压力，同时间接降低线路安全运行隐患。但在电缆接地线中的应用效果则有待后续研究的开展和长期实际应用证明。

参考文献

- [1] 曹晓珑, 刘英. 我国电力电缆及其敷设技术现状[J]. 电力设备, 2007, 8(4): 110-112.
- [2] 杜伯学, 马宗乐, 霍振星, 王立, 李华春. 电力电缆技术的发展与研究动向[J]. 高压电器, 2010, 46(7): 100-104.
- [3] 于平澜. 电缆金属护套感应电压及保护接地的研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2013.
- [4] 丛光, 韩晓鹏, 周作春, 张文新, 李华春, 陈平. 高压单芯电缆接地系统破坏后的悬浮电压分析[J]. 供用电, 2009, 26(5): 61-64.
- [5] 蒙广军. 非金属复合碳纤维镀铜接地材料[P]. 中国专利, CN203535973U, 2014-04-09.
- [6] 高云. 镀锡薄钢板/涂层在不同温度和形变下的腐蚀行为研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2016.
- [7] 姚远, 王广军. 金属材料防腐能力改进路径探析[J]. 决策探索(中), 2018(2): 83-84.

-
- [8] 黎敏, 鞠新华, 杨志强. 镀锡板的电化学剥离及其耐蚀性研究[J]. 冶金分析, 2016, 36(11): 17-23.
- [9] 赵艳, 管建军, 刘峰, 梁平, 赵杰. 不锈钢表面氧化膜层对 Zn 与不锈钢交互作用的影响[J]. 材料科学与工程学报, 2018, 36(4): 626-630.
- [10] 徐松, 冯兵, 何铁祥, 胡波涛, 吴欣强. 几种合金涂层在变电站土壤中的腐蚀行为研究[J]. 装备环境工程, 2015, 12(4): 54-59.
- [11] 许海海, 何平, 高梅鹃, 赵董飞. 柔性石墨复合接地材料在电力接地网应用中存在的问题及对策[J]. 电世界, 2018, 59(7): 1-5.
- [12] 黄道春, 陈家宏, 谷山强, 赵淳, 阮江军, 崔振兴. 石墨基柔性接地材料特性及其在防雷接地中的应用[J]. 高压技术, 2018, 44(6): 1766-1773.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2325-1565, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: tdet@hanspub.org