

太阳风暴

侵袭电网及损伤设备的本质

◆ 华北电力大学 刘连光

1 太阳风暴的概念及其影响

“2012年地球将会遭遇强烈的超级太阳风暴，其破坏力会远远超过‘卡特里娜’飓风，地球上几乎所有的人都难逃其灾难的影响。”这是2009年3月，国内外很多网站转载英国《新科学家》网站登载的、有些“耸人听闻”的一段话。尤其是将中国列为了会遭受严重影响的警告国家之列，引发了人们对太阳风暴灾害的很多忧虑和猜想。保障电网安全是《国家科技发展纲要》的优先主题，因此，无论是从解惑，还是从安全出发，探明太阳风暴对我国未来电网的可能影响都是需要研究的重要课题。配合中国电机工程学会会刊《动力与电气工程》2008年第4期发表的《空间天气与大规模电网的安全》一文，本文主要对电力系统太阳风暴灾害的本质作出解释。

太阳风暴的本质是太阳磁场的剧烈变化，是难以抗拒的自然灾害。太阳活动的磁场变化和物质抛射以及粒子加速等构成了一系列复杂物理过程，包括太阳表面、日冕、太阳风以及磁层、电离层、热层在内的空间状态和物理条件的专业术语叫空间天气^[1]。太阳风暴是俗称。目前还没有关于太阳风暴的正式定义和强度的分级。在2010年3月召开的“空间天气保障体系建设计划”研讨会上，空间物理领域的科学家建议用灾害空间天气

的地面效应（即磁暴的强度（Dst指数））对太阳风暴进行分级， $-100 \geq \text{Dst} > -500$ 为强太阳风暴， $-500 \geq \text{Dst} > -1500$ 为超强太阳风暴， -1500 为Dst超级太阳风暴，以此来评价太阳风暴的影响及危害。

太阳剧烈活动所抛出的磁场和物质运动到地球附近时，不仅会引起地球磁场的剧烈变化，而且将直接和间接地干扰或损伤卫星、航天器和电网、导航通信等人类高技术系统的电力设备或电子装置，从而引发这些高技术系统的严重事故^[2]，比如这些设备或装置失去控制。对于卫星、航天器来说，主要是空间高能电子的电磁效应损伤装置的电子器件。灾害防治的根本在于提高电子装置的抗干扰能力。随着设计水平和对电脉冲干扰防护技术的提高，事故率将不断地降低。对导航通信的影响主要是信号短时中断，卫星、航天器暂时失去控制；电网空间天气灾害的特征是经济损失巨大、且灾害损失无法挽回，而且经济越发达、电网规模越大，越容易受到攻击。

在太阳风暴情况下，会使靠近地球两极的地磁场变化很大，对同样条件技术系统的影响、危害更大。在第22太阳周中，1989年3月13日的超强太阳风暴，造成加拿大魁北克地区大面积停电，北欧、北美60多条输电线路（变压器）保护跳闸^[3]。在第23太阳周中，2003年10月30日的强太阳风暴，

基金项目：国家自然科学基金项目（50677020）和国家“863计划”项目（2007AA04Z425）

造成了瑞典马尔默的大停电,美国、南非等国20余台变压器永久性损坏^[4,5],以及我国江苏、广东等地电网变压器的严重振动及强烈噪声等事故^[6,7]。华北电力大学的大量研究工作,以及江苏、广东两地不同电网、相同太阳风暴影响监测数据表明,地理位置是太阳风暴的影响因素之一,而电网规模、大地电性构造是非常重要的决定性条件,因此研究太阳风暴对我国未来电网影响的意义重大。

2 太阳风暴的直接和间接影响

太阳风暴对天基、地基设施或系统的影响本质上是太阳活动引起的磁场、电场变化对电力、电子装备形成的干扰,属于电磁兼容问题。从影响性质和响应划分,太阳风暴的影响可分为直接影响和间接影响。例如,太阳耀斑以辐射形式存在时,通过电离层对无线通信(手机)造成影响的响应时间为2~3min,我们可将其看作是直接影响;日冕物质抛射(CME)抛出的磁场和物质运动到地球附近,对电网造成干扰或损伤的响应时间为2~3天,危害在于地磁感应电流(GIC,频率为0.0001~0.01Hz)导致变压器的铁心和构件温度过高,直接损伤或烧毁变压器,以及变压器半波饱和产生的谐波、无功波动造成保护误动,由此引发大面积电网停电事故,就对电网影响而言也属于直接影响。

太阳风暴对电网设备的损伤程度取决于GIC的水平以及变压器的饱和程度,或者说变压器铁心和构件的温升以及产生的谐波。地磁场变化剧烈、东西向输电线路两端接地变压器的距离远、大地深层电阻率高的输电系统GIC大;在这些条件相同时,三相五柱式变压器比三相三柱式变压器容易饱和,单相变压器组变压器比三相变压器抗直流偏磁的能力更差^[8]。造成魁北克事故时的GIC没有实测数据,后来的仿真计算表明,个别变电站的GIC接近200A;芬兰曾在电网实测到达200A的GIC。魁北克事故扩大的原因是7台静止无功补偿装置(SVC)保护短时间误动跳闸,电网失去无功支撑以致连锁反应。第22和第23太阳周中,美国、南非等国家的20余台大型变压器被损毁的根本原因是GIC导致的铁心和构件温度过高。因此,GIC水平、变压器饱和以及温升是导致电网灾害、设备损伤的主要因素。

由于磁层、电力层的保护作用,太阳喷射的带电粒子不能到达地面,因此高能粒子(中子除外)

很少直接损伤地面的电子装置。因此,太阳风暴对国民经济的影响主要是电网的影响以及电网大面积停电造成的影响。由于现代人类社会发展和人们生活对电力的过分依赖,大面积的停电无疑会造成社会生产和人们生活秩序的严重混乱,导致“交通瘫痪、通信中断、金融业崩溃和公共设施破坏;水泵停转造成饮用水供应中断;缺乏制冷设备,食品和药物都难以有效保存”^[9]。因为现在人类生存的地球上布满了复杂的电网,人们的生产、生活等社会活动都离不开电力,这是美国科学院特别报告中将太阳风暴对电网(国民经济)的影响列为第一位的原因所在^[9]。

太阳风暴虽然对空间的卫星、航天器和地面的输油管线、通信等设施都存在很大的影响,但造成的危害与电网影响问题不同。例如,太阳风暴对输油、输气管线的影响,其损伤在于GIC的累积效应,加速输油、输气管线的腐蚀,降低了管线的使用年限(寿命);对无线通信(手机)干扰、影响为短时行为,很快可以恢复,不会造成灾难性事故或非常重大的经济损失。而电网的问题则不同,美国科学院的特别研究报告认为,如果现在发生类似于1989年加拿大魁北克大停电事故,则其直接经济损失可达几十亿加元,间接损失可高达上百亿加元^[9];2003年10月,南非烧毁的15台400 kV大型变压器,每台变压器的价值近1000万美元。因此,从价值上来说,电网灾害影响的经济损失比卫星事故大得多。

3 中国为什么被列为警告国家

美国科学院的研究报告称^[9]:“太阳风暴灾害与其它灾害相反,经济越发达的地区,太阳风暴灾害的影响越大”,并将中国列为遭受严重影响的警告国家,其原因也是电力问题,因为经济发达地区的电网规模大,更容易受到强太阳风暴的攻击。由于我国经济的飞速发展,2001年以来,在第23太阳周的高峰期,我国江苏、浙江、广东等经济发达地区的电网都发现了大量的GIC侵袭事件,造成过被误认为是变压器故障,因而停电检修变压器等造成经济损失。表1是第23太阳周峰年期、广东岭澳核电站变压器的GIC实测数据^[7]。其中,2004年11月7日和11月9日两次磁暴引发的GIC为最大,峰值分别达47.2A和75.5A。其影响的直观现象是导致变压器的强烈振动和严重噪声,由于一开始不了

表1 2004~2005年磁暴发生时广东岭澳核电站变压器中性点的GIC (实测值)

| Kp指数 | 磁暴类型 | 起止时间 | GIC 峰值/A | I _{min} 最大值/A |
|------|------|-----------------------------|----------|------------------------|
| 8 | 急始 | 04/11/07 10:30~11/08 12:30 | 47.2 | 41.4 |
| 8 | 急始 | 04/11/09 18:30~ 11/10 22:30 | 75.5 | 50.5 |
| 8 | 急始 | 05/01/21 17:00 ~ 1/23 00:30 | 17.9 | 15.5 |
| 9 | 急始 | 05/05/15 02:30~05/16 19:30 | 27.9 | 23.9 |
| 7 | 缓始 | 05/05/29 20:30~05/31 00:30 | 5.6 | 4.7 |
| 9 | 急始 | 05/08/24 06:00~08/25 21:30 | 19.1 | 11.3 |
| 7 | 缓始 | 05/08/31 06:30~09/01 18:30 | 5.7 | 5.3 |

解变压器振动、噪声产生的原因，曾误认为是广东电网直流输电调试造成的，引发了广东核电集团与广东电网集团之间的纠纷。

与表1中岭澳核电站500kV电网相比，我国2007年起大规模开工建设的西北750kV电网导线的单位长度电阻是500kV电网的2/3。课题组提出了根据磁暴数据和大地电性参数的地面感应电场(ESP)和电网GIC算法，建立了2010年西北陕甘青宁750kV规划电网(电网地理位置图略，规模与魁北克事故电网相当)和大地电阻率模型，完成了电网46段输电线路和20座变电站变压器GIC最大值的计算。

对表1中2004年11月的磁暴数据进行分析表明^[11]，11月9日22:00~23:59时段的地磁变化最为剧烈。计算中采用了嘉峪关、格尔木、乌鲁木齐和喀什4个台站在11月9日22:00~23:59(UT)时段的地磁数据，得到2010年西北电网20座750kV变电站变压器GIC计算结果如表2所示。从表2可看出，与岭澳核电站相比，750kV电网GIC数值增大很多。其中，750kV渭南变电站GIC值为最大，达101.538A。按750kV线路导线单位电阻最大是500kV线路2/3的条件计算，750kV电网的GIC应该是500kV电网的3/2倍。而目前渭南变电站的GIC小于岭澳核电站75.5A的3/2倍，原因与西北、广东电网的结构以及大地电性构造不同有关。

500kV和750kV电网尚且如此，如果我国未来电网遭遇1859年的超级太阳风暴(卡林顿事件)时的GIC是什么水平?影响会是什么情况?虽然缺少地磁、电网及大地的相关数据，无法给出准确的计算结果，但可进行如下初步评估。

从西南水电基地向东部沿海送

电的特高压电网架呈明显的东西走向，容易引发更大的GIC。因为与500kV电网相比，1000kV特高压线路至少

要采用八分裂导线，导线的单位电阻最多是500kV电网的1/2。按2004年11月广东岭澳的GIC值推算，特高压变电站的GIC可达150A以上，考虑“拐点效应”等因素的影响，个别变电站完全可能达到200A；与西北750kV电网相同，特高压变压器全部采用三相变压器组、自耦变压器结构，变压器更容易饱和，电网的GIC经自耦变压器可直接进入到低电压系统^[8]。因此，特高压电网耐受GIC的能力比750kV电网还要差。

另外，2004年11月磁暴事件不属于超强太阳风暴，而1859年磁暴Dst指数极小值为-1760nT，是2004年11月10日磁暴Dst指数极小值-282nT的6.24倍。据此可以推算，未来的特高压电网如果遭遇类似于1859年太阳风暴的侵袭，电网的GIC可达上千安水平。几十安的GIC已经对变压器造成了很大影响，超级太阳风暴的侵害无疑是灾难性的。电网规模巨大、地质构造又是世界上最复杂的等原因可能是美国科学家将我国列为警告国家的原因。

4 超强太阳风暴的应对措施

发生于1859年9月的超级太阳风暴是小概率事件。因此，超级太阳风暴对我国未来电网的影响也属于“小概率、高风险”灾害事件。由于人们采用Dst指数来表示磁暴强度的历史较短，无法对历

表2 2010年西北750kV电网变压器中性点GIC (计算值)

| 变电站名称 | 中性点GIC值/A | 变电站名称 | 中性点GIC值/A |
|-------|-----------|--------|-----------|
| 哈密 | 50.154 | 贺兰山 | 53.457 |
| 安西 | 18.240 | 拉西瓦水电站 | 37.476 |
| 酒泉 | 46.917 | 官亭 | 31.101 |
| 金昌 | 71.535 | 兰州东 | 6.767 |
| 永登 | 93.495 | 乾县 | 53.985 |
| 格尔木 | 12.630 | 天水 | 80.724 |
| 银川东 | 49.446 | 宝鸡 | 47.967 |
| 西宁 | 32.511 | 渭南 | 101.538 |
| 白银 | 51.618 | 延安 | 49.908 |
| 黄河 | 41.484 | 榆横 | 88.311 |

史上的强和超强太阳风暴的次数都做出统计,但笔者利用中国地震局地球物理研究所《磁暴报告》的资料[11],对2001~2005年5年间(第23太阳周峰年期)的磁暴次数做了统计,在5年中,共发生过中强及以上磁暴($K_p=6、7$ 以上)76次,其中强磁暴($K_p=8、9$)22次。初步的统计表明,在以11年为1个周期的太阳周内,可能发生几十次超过2004年11月强度的磁暴。因此,未来电网如何应对太阳风暴灾害的研究需要足够重视。

太阳风暴对卫星、航天器等空间设施的影响全球相同,一视同仁、不分是哪个国家的,但太阳风暴对电力系统的影响与纬度(磁纬)、大地的构造,输电线路的结构、规模、走向,以及变压器结构、保护自动装置原理和系统负荷大小等很多因素都有关,问题非常复杂。另外,由于电网遍布地球经济发达地区的每个角落,以及变压器类型、数量众多,按目前对太阳活动及其影响问题的了解,我们很难知道哪条线路、哪台变压器是磁暴发生时的薄弱点或薄弱环节,或者哪个元件的保护装置会出现问题,而系统中的任何一个(台)保护装置误动作或变压器损坏,都可能引起整个电网保护装置的快速连锁反应,从而引发大面积的电网停电事故,并造成巨额经济损失和严重社会影响。问题复杂、随机性和高风险是电网与其它技术系统灾害影响的区别。

1989年加拿大魁北克发生大停电事故后,加拿大、美国等国家纷纷对电网设备保护、电网结构进行了大量的改造,安装了电网GIC削弱、隔离和补偿等技术治理设备和建设了GIC监测系统防治工作,事故后的几年中,仅魁北克水电局投入的防治、改造费用高达8.34亿加元,可见事故后再进行治理或改造的费用是巨大的。2009年底,我国电网装机规模为8.5亿kW,为1989年加拿大魁北克事故电网(当时不足2000万kW)42.5倍,如果采用魁北克水电局的方法治理则需要350多亿加元。另外,由于电网每年都在发展、变化,电网“拐点效应”的地点也不断变化,今年选择的治理点,对明年电网可能毫无意义;另外,在变压器中性点安装治理设备也会带来一些新的电网安全问题。因此,魁北克水电局的治理对今后的太阳风暴而言不一定都是有效的,或者说有些治理、设备的安装有盲目性。

因此,虽然太阳风暴对电网、输油管线和卫

星、通信等技术系统都存在很大的影响,但导致灾害的风险或可能造成的损失,以及产生的社会影响等都因自身技术系统特点的差异而有所不同。例如,对高能电子的电磁效应损伤卫星或通信电子装置器件的灾害防治,我们可以从提高电子装置的抗干扰能力(电脉冲干扰防护技术),改进、提高设计水平,以降低事故概率或防治事故,这样安装、增加数量有限设备的费用也容易承受。由于电网规模巨大,且变压器、电抗器等设备的价格昂贵,采用改进设计多消耗的有色金属材料,或者安装治理装置等方法的投入是巨大的。因此,由于电力系统与其它技术系统的不同,人类迄今尚未找到经济、有效应对太阳风暴对大规模电网影响的有效方法。在措施上,如果能预知(预报或预测)太阳风暴的强度、速度和时间等参数或指标,以及大规模电网的危险点(即GIC较大点),那么采用负荷调控、保障重要用户电力或闭锁保护等方法,是应对这种“小概率、高风险”灾害的有效途径。

5 太阳风暴研究行为及问题

由于太阳活动及其影响的复杂性,以及目前对太阳活动构成的复杂过程所知甚少,人类迄今没有有效应对太阳风暴灾害的办法。在紧迫的社会需求和重大的国家利益面前,美国1995年率先制定了空间天气研究计划,将航天、通信、导航、电网、资源考察、生命与健康等7个重要领域列入计划。随之英法德和俄罗斯、加拿大、日本等国也相继制定了本国研究计划。空间研究委员会(COSPAR)的空间天气委员会、国际科学理事会的日地空间物理委员会(SCOSTEP)等国际组织,也组织制订了日地空间气候和天气(CAWSES)国际计划,并设立空间天气科学与应用委员会等机构。十几年来,由于众多国家和国际组织将空间天气及其影响作为国家行为、国际行为付诸研究和实施,使其迅速成为当代科技的热点之一^[12,13]。

国内研究起步与国外差距不大,科技部和国家自然科学基金委对国际科技活动的热点非常关注和重视,在基础设施和基础理论研究上的投入也很大。在基础科学工程方面,我国成功地实施了“地球双星计划^[14]”,2008年1月“子午工程^[13]”开工建设,“夸父计划”等正在向工程立项推动。在基础理论研究方面,国家自然科学基金委从20世纪80年代开始,持续支持了“八五”直至“十一五”期间的重大自

然科学基金项目,确立“空间环境与空间天气”为优先发展的领域;而科技部在“十五”和“十一五”计划中,相继支持了“太阳剧烈活动与空间灾害天气”和“日地空间灾害性天气的发生、发展和预报研究”两项“973计划”的重点项目^[1]。这些项目的实施,有力地推动了空间天气创新学科的形成和发展,但从目前已开展的研究工作看,国内科学界科学家的目标主要集中在空间天气学基本理论的研究上,但面向工程技术空间天气影响的研究还不够。

与科学界如火如荼的研究热潮相比,工程技术界的研究工作显得有些冷清。在航空、航天领域,由于人们对创新科学、技术的关注,以及卫星、“奔月”等航天科技活动的国际影响,科学界与工程技术界联合,在太阳风暴对卫星、导航及通信等天基技术系统的影响上开展了大量的研究工作,但针对电网、输油气管线等地基技术系统的研究工作不够。华北电力大学自国家开始实施“西电东送、全国联网”战略起,就提出并研究了“空间天气对我国电网影响”。在国家自然科学基金和“863计划”等项目的资助下,虽然研究工作取得了一些成果并且形成了一定的影响,但由于课题组人员专业、领域的局限性,以及空间天气及其影响科学问题的复杂性,太阳风暴对电网影响的理论和应用研究还有待突破。

空间天气对电网的影响涉及电力系统、空间物理、地球物理等学科和工程、材料、设备制造等领域,科学问题的研究必须依赖学科大跨越和行业广泛的交叉合作。由于电网、通信和输油气管线等是国民经济发展的重中之重产业,美国制订国家研究计划和参加编写2009年3月研究报告的都是工程技术界专家,而我国的情况恰好相反。太阳风暴的影响随着是人类发展、技术系统规模增大到一定程度才遇到的新问题,国内研究工作的起步并不晚,差距主要在观念和认识上。虽然工程技术界中的一些观点和说法,如“没听说过”、“不是还没发生大事故嘛”和科学界“那是你们工程技术界的事”和“有没有影响太阳问题都可以研究”等,都没有错,但这些观念制约了本应广泛开展的交流与合作,造成了与国外的差距。

在基础科学问题的研究上,由于空间物理科学家对灾害影响、损伤技术系统的本质和机理缺乏了解,因此针对太阳风暴影响的基础应用研究不

够,尤其是针对与地基技术系统影响相关的空间物理问题的研究很少。在地基工程技术领域,人们对太阳风暴的了解、认识更少,“没听说过”的人不在少数,“还没发生大事故”的说法也是事实,但以后的影响、危害恐怕会与“全球变暖”问题有相似之处。因为,电网在遭遇侵袭时,是否会导致灾难性的事故,还要看电网的具体条件。芬兰距离地球极区最近,但没有发生过大大停电,甚至没有发生过线路、变压器跳闸事故,原因是芬兰电网采用不接地或经小电阻接地系统。我国与加拿大、美国一样,超高压电网采用中性点直接接地方式,加上我国电网东西走向的输电线路长和大型变电站变压器采用单相的自耦变结构,容易产生更大的GIC,且变压器更容易饱和。目前我们对太阳风暴及其影响了解很少,如果能把不会发生的事故说清楚也可说是一种贡献。

6 结束语

太阳风暴及其影响是人类社会科技发展中遭遇的新问题,对电网安全的影响是其中的重大课题之一。关于太阳风暴的国际科技动态已经得到国家相关部门和机构的高度重视,正在制订一系列的研究计划,电网公司作为国民经济稳定发展的重要保障单位,理应了解、掌握与电网安全相关的国外研究动态,并在问题研究和技术保障上做出相应的贡献。

与电力系统相关的科研院所、高校,应密切关注与重大电网工程建设、安全运行相关的交叉学科新问题,联合空间物理、地球物理学科的科学家,争取在太阳活动对电网安全影响的应用基础研究上,尤其是在太阳风暴及其灾害的预测、预报理论和方法研究上取得突破,引领中低纬电网太阳风暴影响及防治的科学研究。

2009年3月英国《新科学家》网站的报道虽然有些“耸人听闻”,但美国科学院的研究报告对灾害的分析是有科学依据的;另外,虽然2012年遭遇侵害是小概率事件,但我国广东、江苏、浙江等地已经发生了很多的案例,电力系统生产、运行部门,尤其是发生过事故的变电站应加强运行监视,发现异常及时处理,以避免灾害性事件的发生。

太阳风暴及其影响是新概念、新问题,包括电力系统、变电站工程技术人员对其问题的了解、认识还不够,建议《电网技术》等刊物给予更多报道

或进行专题研讨,中国电机工程学会和地方学会等学术社团也应开展更多的宣传和研讨,增进人们对太阳风暴灾害的了解和认识。☑

参考文献

- [1] 汪景琇.太阳剧烈活动与空间灾害天气[J].紫金山天文台台刊,2003,22(1):48~56
Wang Jing-xiu. Explosive solar activity and disastrous space weather. Publications of Purple Mountain Observatory, 2003, 22(1): 48~56
- [2] 汤克云,焦维新,彭丰林等.空间天气对技术系统和现代战争的影响[J].中国科学(A),2000,(30):35~38
Tang Ke-yun, Jjiao wei-xin, Peng feng-lin. Influence of space weather on technology system and modern war. Science in china(Series A), 2000, (30): 35~38
- [3] Kappaenman J G, Albertson V D. Bracing for the geomagnetic storms[J]. IEEE Spectrum, 1990, 27(3): 27~33
- [4] Wik M A, Viljanen R, Pirjola, et al. Calculation of geomagnetically induced currents in the 400 kV power grid in southern Sweden[J]. Space Weather, 2008, 6(7), S07005, doi: 10.1029/2007SW000343, 11 pp.
- [5] Gaun C T, Coetzee G. Transformer failures in regions incorrectly considered to have low GIC risk. Power Tech, 2007 IEEE Lausanne, 807~812
- [6] 刘林玉,谢学武.500kV主变压器异常声音分析[J].高电压技术,2005,31(4):85~87
- [7] 刘连光,刘春明,张冰,等.我国广东电网几次强磁暴影响事件[J].地球物理学报,2008,51(4):976~981
Liu LG, Liu CM, Zhang B, et al. Strong magnetic storm's influence on China's Guangdong power grid. Chinese J. Geophysics, 2008, 51(4): 976~981
- [8] 刘连光,刘春明,张冰.磁暴对我国特高压电网

参考文献

- 影响问题的研究[J].电网技术,2009,33(11):1~6, LIU Lian-Guang, LIU Chun-Ming, ZHANG Bing. Effects of Geomagnetic Storm on UHV Power Grids of China. Power System Technology, 2009, 33(11): 1~6
- [9] National Research Council of the National Academies, Severe space weather events—Understanding societal and economic impacts[M]. National Academies Press, 2009, 3
- [10] Boreler D H. Geomagnetic hazards to conducting networks. Natural Hazards, 2003, 28: 537~561
- [11] 中国地震局地球物理研究所.磁暴报告[M]. 2001, 23(1)~2005, 27(4)
- [12] 魏奉思.空间天气学[J].地球物理学进展, 1999,14(增刊):1~7
Wei Feng-si. Space Weather [J]. Progress in geophysics, 1999,14(Supplement):1~7
- [13] 魏奉思.空间天气学的基本问题[J].中国基础科学.科学前沿,2000.7:9~13
Wei Feng-si. Basic problems in space weather. China Basic Science, 2000.7: 9~13
- [14] 刘振兴.中国空间风暴探测计划和国际与日共存计划[J].地球物理学报,2005,49(3):724~730
Liu Zhen-xing. Space wind and storms exploration program and international living with a star initiative. Chinese J. Geophysics, 2005, 49(3): 724~730



作者简介:

刘连光(1954-),男,教授,博士生导师,河北省省管优秀专家、享受国务院特殊津贴,中国电机工程学会高级会员;主要从事电网安全运行与灾害防治等研究工作。

Email: llguang@cj.net.cn; 联系电话: 13901259607