

余年,张学健,孔文新,等. 地磁感应电流多学科交叉研究进展. 吉林大学学报(地球科学版), 2024, 54(1): 54-67. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230289.

Yu Nian, Zhang Xuejian, Kong Wenxin, et al. Multidisciplinary Advancements in Geomagnetically Induced Currents Research. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024, 54 (1): 54-67. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230289.

地磁感应电流多学科交叉研究进展

余年¹, 张学健¹, 孔文新², 韦昌¹

1. 重庆大学电气工程学院, 重庆 400044

2. 重庆大学资源与安全学院, 重庆 400044

摘要:地磁感应电流(geomagnetically induced currents, GIC)是指地球变化磁场在地球表面导体中产生的感应电流, 可对电网、油气管道、高铁等人造基础设施造成严重破坏, 包括电力系统失效、通信干扰和电子设备损坏等, 影响其稳定运行和功能。研究 GIC 的意义在于深入理解其产生机理及影响因素, 为制定相应的预防和应对策略提供科学依据。论文在深入总结 GIC 研究进展的基础上, 详细阐述了 GIC 的产生机理及影响因素, 包括宇宙空间、地球环境和电力系统对 GIC 的影响; 概述了 GIC 的研究现状, 分别从空间物理、地球物理和电气工程领域对 GIC 进行了综合评述; 进而详细介绍了 GIC 估算的步骤, 包括地磁场数据与建模、地电场和导体中 GIC 的计算; 并重点分析了不同地球物理参数对 GIC 估算结果的影响以及相互之间的差异; 最后, 对 GIC 研究面临的挑战、地球物理在相关问题解决中的潜在贡献以及研究未来进行展望。

关键词:地磁感应电流; 地球磁场; 大地电磁; 地磁灾害

doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230289

中图分类号: X43

文献标志码: A

Multidisciplinary Advancements in Geomagnetically Induced Currents Research

Yu Nian¹, Zhang Xuejian¹, Kong Wenxin², Wei Chang¹

1. School of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China

2. School of Resources and Safety Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China

Abstract: Geomagnetically induced currents (GIC) are currents induced in conductive materials on the Earth's surface due to Earth's magnetic field variations. GICs have the potential to cause severe damage to manufactured infrastructure, including power grids, oil and gas pipelines, and high-speed railways, resulting in adverse consequences such as power system failures, communication disruptions, and damage to electronic equipment, ultimately affecting the stability and functionality of these systems. The significance of studying GIC lies in understanding their generation mechanisms and influencing factors, thereby providing a scientific foundation for developing effective prevention and mitigation

收稿日期: 2023-10-27

作者简介: 余年(1984—), 男, 教授, 博士, 主要从事地球电磁方法理论与应用研究, E-mail: yunian@126.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(42222404, 42074081, 42204078)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (42222404, 42074081, 42204078)

strategies. Based on an in-depth review of the progress in GIC research, this paper elaborates on the mechanisms of GIC generation and the influencing factors, encompassing the impacts of space weather, Earth's environmental conditions, and the power system on GIC. It provides an overview of the current state of GIC research, offering integrated assessments from space physics, geophysics, and electrical engineering. Furthermore, the paper provides a detailed description of the steps involved in estimating GIC, including using geomagnetic field data and modeling, along with calculating electric fields and GIC within conductors. It emphasizes analyzing how various geophysical parameters affect GIC estimates and their interrelationships. In conclusion, the paper discusses the challenges in GIC research, highlights the potential contributions of geophysics in addressing related issues, and provides a perspective on the future of GIC research.

Key words: geomagnetically induced currents; earth's magnetic field; magnetotellurics; geomagnetic disaster

0 引言

太阳活动会向周围环境释放能量,包括辐射线、高能带电粒子等。这些能量会对周围的空间环境产生影响,其程度取决于太阳活动发生的地点、类型和强度。当太阳活动引发太阳与地球之间空间环境的复杂耦合反应时,会在地球表面导体系统中感应出低频准直流电流(频率在 0.000 1~0.01 Hz 之间),称为地磁感应电流(geomagnetically induced currents, GIC)^[1]。GIC 流经通信电缆或设备时,会导致电压升高,进而引发通信中断。GIC 在油气管道中传播时,会腐蚀管道并损害相关设备。GIC 对电力系统的影响更为严重,它通过电力系统的变压器中性点进入,沿电力传输线流动,与大地形成一条电流回路;流经变压器时可能会导致磁饱和,从而影响电力系统的稳定性,极端情况下可能导致电力中断事故的发生。

1948 年,Barlow 等^[2]发现 GIC 对通信电报设备的影响。随后,Boteler^[3]观察到超强磁暴会导致电报线温度升高,甚至可能引发材料燃烧。此外,Allison 等^[4]的研究发现,GIC 长期作用于油气管道会加速其电解和腐蚀过程。1989 年 3 月,苏联 Gorky 铁路的信号控制系统因受到 GIC 的影响而出现异常^[5]。

GIC 对电力系统损害最为著名的案例出现在 1989 年 3 月加拿大魁北克省。当时,GIC 的影响导致变压器直流偏置,使电网保护系统误动作,导致魁北克省及美国加拿大边境附近大面积停电,造成严重经济损失^[6]。到 21 世纪初,越来越多与地磁暴有关的输电系统故障被报道。例如:2001 年 11 月 6

日的新西兰输电系统故障被证实与 GIC 相关^[7];2003 年 9—10 月,欧洲多个国家的变压器检测到高幅值 GIC^[8];2003 年 10 月 29—31 日瑞典的马尔默南部省遭受到地磁暴袭击,导致一条 130 kV 的线路断开保护,约 5 万人在黑暗中度过 1 h^[9]。

早期的 GIC 事件主要发生在高纬度地区^[10],随着电力系统的发展和监测系统的完善,一些中低纬度国家也受到 GIC 的影响^[11],比如中国、日本、澳大利亚等^[12-14]。

此外,位于地面以上 30 km 或更高处的核爆炸也可能在电力线中诱发大型准直流电流,被称为高空核电磁脉冲^[15]。通过这种爆炸, γ 粒子会以光速向各个方向发射,并与空气的分子发生碰撞,导致大气层电离,产生可能与电力网络相互作用并导致 GIC 的电磁信号。

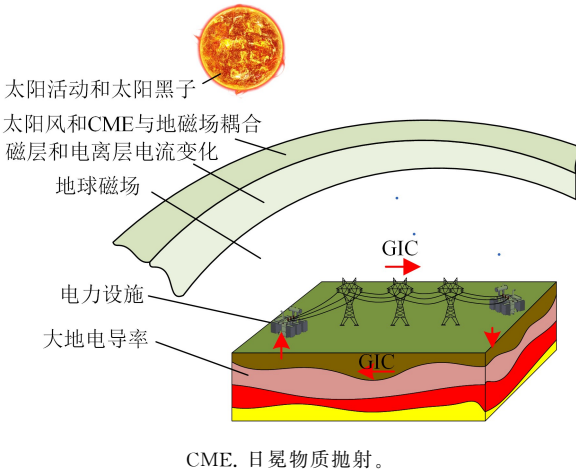
为全面分析 GIC 对电力系统的影响机制,我们对国内外相关文献进行了收集整理,分别从空间物理、地球物理和电气工程 3 个领域,概述国内外 GIC 的研究现状;重点介绍基于观测站或模型拟合的地磁场重现和地球表面地电场以及导体中 GIC 的理论计算;同时对不同地球物理参数对 GIC 估算结果的影响进行详细讨论;并对 GIC 研究面临的挑战、地球物理在相关问题解决中的潜在贡献以及研究未来进行展望。

1 GIC 产生机理及影响因素

1.1 GIC 产生的机理

地球表面导体系统中产生 GIC 的过程涉及空间物理、地球物理和电气工程 3 个交叉学科的理论知识。如图 1 所示,太阳活动产生高能粒子和辐射,

释放能量并影响太阳与地球之间的空间环境,进而影响地球的磁层和电离层,该影响可通过空间电流体系等效表示。根据毕奥-萨伐尔定律^[16],空间电流体系变化引起地磁场产生扰动,并感生出地电场,感应地电场沿地表导体积分,可得导体两端电势差。结合电网输电线路、变压器等效阻抗模型,便可估算 GIC。



CME. 日冕物质抛射。

图 1 GIC 产生原理

Fig.1 Generation principle of GIC

1.2 GIC 的影响因素

电网中 GIC 的产生过程经历了宇宙空间、地球环境和电力系统这 3 个环节,每个环节的特征都能影响 GIC。因此,从以下 3 个方面分析 GIC 的影响因素。

1.2.1 宇宙空间对 GIC 的影响

太阳活动是一个持续进行的过程,在一系列太阳活动中,耀斑和日冕物质抛射(coronal mass ejection, CME)是最剧烈的。CME 是诱发地磁暴的主要源头,主要以太阳风的形式向行星际空间传播。当太阳风传播到地球附近时,与地球大气和地磁场发生相互作用^[17],导致磁暴,其强烈程度与行星际参数,如太阳风的密度、速度、行星际磁场的南向分量等,以及这些参数影响的持续时间有关^[18]。总体来说,行星际参数的数值越大,对地磁场的影响程度越大,但磁暴的强度不是由单一参数决定,而是以上多个参数共同作用的结果。

1.2.2 地球环境对 GIC 的影响

从地球物理的角度来看,影响 GIC 的因素主要为地球的地表阻抗和地区的纬度。地表阻抗取决于

大地电阻率,与土壤成分相关,电阻率参数主要通过地球物理电磁反演等方法获取^[19-20]。根据不同精度需求,可对大地电阻率模型进行不同的维性划分,包括均匀大地模型、一维层状大地模型、二维模型以及复杂的三维电阻率模型(电阻率在空间中呈现三维分布)^[21-22]。三维模型的精度一般高于二维和一维,且能更为真实地反映出地下介质的局部差异,比如海岸效应^[23],当两种介质有较大差异时,GIC 的幅值将会出现明显变化。

另外,同一次磁暴事件对不同地区的影响不同,纬度越高,感应地电场越大。一般高纬度地区 GIC 变化更明显,这与该地区的地磁场更强有关^[24]。刘连光等^[25]指出就方向特征而言,中低纬度地区的地磁场与高纬度地区不同,中低纬度地区东西向的地磁场比南北向的地磁场更强。

1.2.3 电力系统对 GIC 的影响

从电力系统角度看,可采用单一直流模型或基于交流分析的方法来计算 GIC。这些方法需要电力网络参数,如变压器(变压器数量、电压等级、绕组阻抗、中性点接地阻抗等)、输电线路(线路电压等级、线路长度和线路阻抗等)、发电机(发电机数量、电压等级、绕组阻抗等)以及变电站协调和并联装置的数据等^[26]。

电网的导线、变压器、输电线路以及地线系统的布局 and 连接方式将决定 GIC 的传播路径,影响 GIC 在电网中的分布情况。特别是,与地电场方向更接近的传输线能够获得更大的传输线电压,进而增大 GIC 的数值。电压等级越高的电力系统,GIC 的幅值也越大;位于拐点和边缘变电站的 GIC 更高^[27]。在高电压等级中考虑低电压等级会提高估算结果的准确性^[28],考虑真实传输线形状也可以提高精度^[29]。

电气设备的特性对 GIC 的影响非常重要,其中:电阻会对 GIC 产生阻碍作用,限制 GIC 流过设备的能力,从而降低 GIC 的传播和扩散,较高的电阻将导致 GIC 在设备中产生更大的电压降,影响其传播和衰减;电抗也会对 GIC 的传播产生影响,电抗可以是电感或电容,电感会对 GIC 产生阻抗,降低其传播速度,电容则可能导致 GIC 无法流通而在设备中积累,进而会导致电压升高,影响设备的稳定性和正常运行。

2 GIC 多领域研究现状

2.1 空间物理领域

为研究太阳活动对地球的影响,各国陆续发射卫星到地球上空,监测与太阳活动相关的数据,关注太阳风和行星际磁场的影响,为分析太阳活动对地球的影响、建立模型和进行数值模拟奠定了基础。其中,基于太阳和日球层天文台(solar and heliospheric observatory, SOHO)观测数据,发现太阳风的产生与冕洞密切相关^[30]。Burlaga 等^[31]发现磁云的存在,磁云对地效应在后续研究中也得到验证;随后 Wang 等^[32]发现多重磁云的存在,极大地推动了对星际物质的深入研究。Zhang 等^[33]分析了1996—2005年磁暴环电流指数较小的地磁暴事件,深入研究了其空间驱动源,详细列出了各磁暴事件对应的CME参数以及行星际太阳风结构。

太阳活动通过太阳风的形式传播到地球后,激发地球磁层和电离层中的电流体系,这是引起地磁场扰动的重要因素^[34]。随着GIC潜在危害的不断扩大,人们希望降低导体系统中的GIC,特别是减少GIC对电网稳定性的威胁。冯学尚等从多个方面对太阳风暴和日冕行星际数值的模拟工作做了系统总结^[35],并总结了三维数值预报模型算法及其意义^[36]。Lucas 等^[37]介绍了如何利用34个磁场记录站点的历史磁暴事件来预测百年一遇的极端磁暴事件,然后使用球形基本电流系统(spherical elementary current systems, SECS)插值磁场,计算了美国的地电场和传输线电压。Zhang 等^[38]建立了2012年7月23日超级风暴袭击地球时中国广东省的电网响应模型,研究表明此时电网处于极度高风险状态。吴伟丽等^[39]融合了复像法与SECS法的优点,利用我国地磁观测数据反演出磁层、电离层的等效电流体系。Zheng 等^[40]从空间的电流体系考虑,分别分析了适合计算高、低纬度地区的地电场算法模型,结合快速汉克尔分解方法,提出不同纬度地区采用不同形式的电流体系可以提高地电场的计算精度。

2.2 地球物理领域

空间电流体系的变动将会引发地磁暴并产生感应地电场。除了地磁场的大小和频率外,大地电阻率结构也是影响感应地电场大小的重要因素之一。计算地电场的传统方法是平面波法^[41],但该方法只适用于研究区域尺寸相对小或区域与等效源之间的

距离足够远的情况,否则容易产生较大的误差。为解决该问题,学者们又陆续提出了复镜像法^[42]、快速汉克尔函数变换法^[43]和级数展开法等算法^[44]。传统的计算方法中大地电阻率模型通常取一维层状电阻率结构,对横向电阻率变化简化忽略;这与实际复杂的电性结构不符,例如涉及大范围的地电场计算时,这种简化的一维层状结构会引起不可忽视的误差。

为得到更加接近实际的大地电阻率模型,不少学者把适用于复杂介质和复杂模型的数值分析方法(如有限元法、有限差分等)引入进来^[43]。尚康良^[45]采用有限元法计算二维电性模型中地电流场的分布情况。然而,在建模和计算过程中,对大地结构的设置和边界条件进行多项简化和近似处理,可能导致模型丢失实际电性模型中的一些参数。为使模型更加符合复杂变化的真实地质环境,董博^[46]采用有限元法建立了磁暴情况下复杂地质结构的三维地电流场模型,并验证了该方法的可行性。林晨翔^[47]则建立了分块电阻率模型和薄壳电阻率模型,研究电阻率在横向突变的大地模型中E极化和H极化对模型的影响,并提出应考虑海岸效应对电网中GIC计算的影响。

除了有限元法,还常使用有限差分法对电阻率模型进行正演计算以得出地表波阻抗,然后利用传递函数估算地电场。Gannon 等^[48]分别利用一维和三维电阻率模型估算太平洋西北地区的GIC,结果显示一维电阻率模型虽能较为准确地计算GIC,但无法反映电阻率突变的影响,而三维电阻率模型能完全解决该问题。此外,除使用数值分析手段计算地电场,还可以直接使用大地电磁实测阻抗数据计算地电场。Lucas 等^[49]利用大地电磁实测阻抗数据和一维电阻率模型来计算GIC,认为实测数据能更好地反映地下结构的复杂性。Marshall 等^[14]分别使用均匀半空间电阻率模型、层状电阻率模型、三维电阻率模型和大地电磁实测阻抗资料来计算GIC,并通过几个统计学参数估算4种模型的性能,结果表明,三维电阻率模型和大地电磁实测阻抗数据的吻合度更高,模型准确度的顺序为三维模型>复杂一维模型>层状模型>均匀半空间电阻率模型。

2.3 电气工程领域

在电力系统领域,研究GIC的解决方案需要具备深厚的电气工程基础知识。由于地磁暴引起的地电场变化频率极低,可近似为直流分析。事实上,若

采用交流分析来计算 GIC,则问题将变得更加复杂。在直流分析和交流分析中,所采用的电网参数模型也存在差异,需要分别加以考虑。区分直流和交流,并相应选择适当的电网参数模型,是电力系统研究中的重要考量。

一方面,研究者们着力构建完整的参数模型,以尽可能准确地估算 GIC。Pirjola^[50] 将变电站视为一个节点以简化分析,特别针对只有一个电压等级的电网进行估算。为了更精确地分析,美国电科院联合多个科研机构进行研究,并提出“GIC-benchmark”规范算例^[51]。郑宽等^[52] 基于“GIC-benchmark”模型不仅分析变压器结线和编组组合,还考虑到 GIC 阻断装置和多电压等级的影响,提出更加符合实际的“全节点模型”。刘连光等^[53] 利用全节点模型计算多电压等级电网中的 GIC,认为不同电压等级中的 GIC 会相互影响。这些研究为深入理解电网与 GIC 的关系提供了重要的理论分析。

另一方面,研究者们不仅致力于深入探讨电磁暂态与电力系统的相互作用,还积极寻求降低 GIC 危害的有效途径。除分析 GIC 对电力系统的影响外,也积极探索降低 GIC 危害的多种方法。Kappenman 等^[54] 提出采用串联电容器隔断 GIC 的方法,取得显著的效果。Pirjola^[55] 进一步研究通过可调式电流源消除 GIC 产生的磁动势,有效抑制了变压器半波饱和的现象。Pirjola^[56] 也建议在变压器中性点安装串联电阻以抑制 GIC 流通,经实验证明该方法切实可行。这些创新性的方法为降低 GIC 对电力系统造成的潜在危害提供了有益的参考与启示。

3 GIC 估算步骤

如图 2 所示,GIC 的计算主要分为两个部分。首先是地球物理部分,该部分考虑地球表面的地电场对给定地磁扰动数据和地球电阻率结构的响应。这些扰动来自电离层和磁层电流,可以通过地磁观测站和太空中的卫星记录得到;地电场可以通过计算获得。地球物理部分完全独立于人造基础设施。其次是电气工程部分,地电场驱动电力系统中的 GIC,可以通过使用不同的软件和基于网络理论的直流网络模型进行计算。

3.1 地磁场数据获取

要获取图 2 中的地磁场数据,可以采取两种方法。一是利用地球上的地磁观测站直接获取特定地

点的磁场数据。二是利用太阳风参数,结合全球三维磁流体力学(magneto hydrodynamics, MHD)模拟地球磁层及电离层上的等效电流体系,预测地磁场数据。

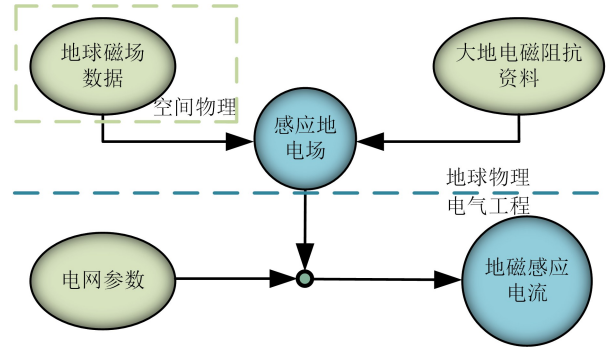


图 2 GIC 计算流程图

Fig.2 Calculation flow chart of GIC

3.1.1 地表直接观测与插值加密

由于地磁观测站分布较为离散且多位于高纬度地区,无法完全还原整个空间的磁场分布情况,因此,人们提出通过数据插值方法来恢复地球上的磁场分布。

经典的插值方法之一是 SECS^[57],它通过利用地球的实测数据反演出空间的等效电流体系,进而确定地磁场。

地磁场强度可用 3 个独立分量表示。通常情况下,地磁台会记录 3 个地磁分量,即磁感应强度水平分量 B_H 、磁偏角 D 和磁感应强度竖直分量 B_z 。可以建立一个空间直角坐标系,以观测点为原点 O ,定义 x 为地理北向, y 为地理东向, z 为铅直方向。在这个坐标系中, Oxy 平面代表水平面。总磁感应强度矢量 B 可以分解为 B_H 和 B_z (图 3)。

用 SECS 法推算空间电流源的表达式如下:

$$TI = B. \quad (1)$$

式中: T 为因子矩阵,与磁测点坐标、元电流系统坐标有关; I 为待求电离层的等效电流体系。

根据 Helmholtz 定理,电离层电流体系 J 可以分解成无散分量 J_{cf} 和无旋分量 J_{df} ^[58]:

$$J(r) = J_{cf}(r) + J_{df}(r). \quad (2)$$

式中, r 为位置向量。无旋分量对感应地电场无影响。由 SECS 的计算原理可以知道,计算的准确性受到地面磁观测站数量的影响。电流体系的无散分量在柱坐标中表示为

$$\mathbf{J}(\mathbf{r}) = \frac{I}{2\pi r} \mathbf{e}_\varphi. \quad (3)$$

式中: I 为任意表面电流密度的振幅; $\mathbf{e}_\varphi$ 为方向 φ 上的单位矢量。

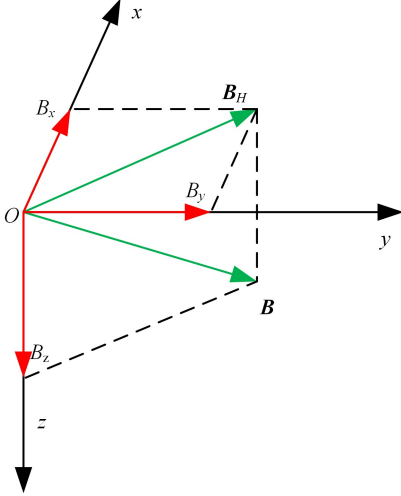


图 3 地磁场强度矢量分解图

Fig.3 Decomposition diagram of geomagnetic field intensity vector

根据毕奥-萨伐尔定律,推导出磁场表达式如下:

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi r} \left[\left(1 - \frac{h}{\sqrt{r^2 + h^2}} \right) \mathbf{e}_r + \frac{r}{\sqrt{r^2 + h^2}} \mathbf{e}_z \right]. \quad (4)$$

式中: h 为圆柱坐标中的高度; μ_0 为地球磁导率; $\mathbf{e}_r$ 、 $\mathbf{e}_z$ 分别为 r 、 z 方向上的单位矢量。

3.1.2 地磁场数值模拟

MHD 是一种集合流体力学方程和麦克斯韦方程的方法,可以用于模拟空间电流体系。常见的 MHD 模型包括: Open Geospace General Circulation Model^[59]、Lyon-Fedder-Mobarry 模型^[60]、Block Adaptive Tree Solarwind Roe Upwind Scheme 模型^[61]、Grand Unified Magnetosphere-Ionosphere Coupling Simulation 模型^[62]。

3.2 地电场计算

获得磁场数据后,可以进一步计算感应地电场。本节重点介绍平面波法。该方法假设磁层-电离层向地面传播的电磁波为平面波,并对问题进行简化处理。依据法拉第电磁感应定律及麦克斯韦方程,地磁场与大地阻抗的时域卷积形式就是地电场的表

达式^[37]。

3.2.1 一维电阻率模型

一维均匀半空间电阻率模型的阻抗函数^[14]如下所示:

$$Z(\omega) = \sqrt{\mu_0 \omega \rho} e^{i\frac{\pi}{4}}. \quad (5)$$

式中: ω 为电磁场角频率; ρ 为电阻率。可以观察到,在一维均匀半空间电阻率模型中,阻抗与大地电阻率正相关,与地磁扰动的角频率正相关。

与一维均匀半空间电阻率模型相比,一维分层电阻率模型更符合地球的结构特征。如图 4 所示,它是对均匀半空间电阻率模型的改进,可以分成 n 个不同电阻率 ($\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$) 和厚度 ($h_1, h_2, \dots, h_{n-1}, h_n = \infty$) 的层次。

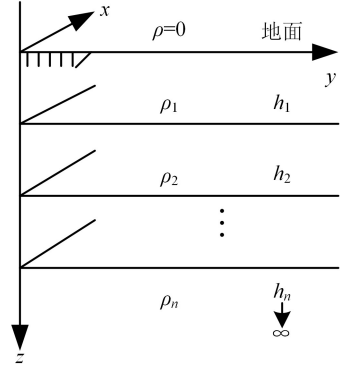


图 4 一维分层大地电阻率模型图

Fig.4 One-dimensional layered geodetic conductivity model map

在平面波的作用下,一维分层电阻率模型任意层的阻抗 Z_m 可以由递归关系算得出:

$$Z_m = i\omega\mu \frac{1 - r_m e^{-2k_m h_m}}{k_m (1 + r_m e^{-2k_m h_m})}. \quad (6)$$

其中,

$$r_m = \frac{1 - k_m \frac{Z_{m+1}}{i\omega\mu}}{1 + k_m \frac{Z_{m+1}}{i\omega\mu}}. \quad (7)$$

式中: μ 为磁导率; $k_m = \sqrt{i\omega\mu \sigma_m}$, 为第 m 层的传播常数 (σ_m 为第 m 层的电导率); h_m 为第 m 层的厚度。第 n 层是均匀半空间层,其阻抗为

$$Z_n = \frac{i\omega\mu}{k_n}. \quad (8)$$

顶层为地面阻抗 Z_0 。以上一维分层模型对应的阻

抗张量可表示为

$$\mathbf{Z}_{1D} = \begin{bmatrix} 0 & Z_0 \\ -Z_0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

最后得到地面感应电场的关系式为:

$$E_x = \frac{1}{\mu_0} B_y Z_0; \quad (10)$$

$$E_y = -\frac{1}{\mu_0} B_x Z_0. \quad (11)$$

式中: E_x 、 E_y 分别为 x 、 y 方向的电场强度; B_x 、 B_y 分别为 x 、 y 方向的磁感应强度。

3.2.2 二/三维电阻率模型

一维模型因其简易性和在特定条件下的准确性而在感应地电场计算中得到广泛应用^[63]。然而,该模型忽略大地电阻率在横向上的变化情况,而这种变化在地质条件下非常常见。在研究电网覆盖范围广大或存在陆地/海洋边界的复杂地质条件时,采用简化的一维电阻率模型进行分析可能会引起不可忽视的误差。在这些情况下,考虑二维和三维大地电阻率模型会更加准确。

二维大地电阻率模型的传递函数为

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \frac{1}{\mu_0} \begin{bmatrix} 0 & Z_{xy} \\ Z_{yx} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \end{bmatrix}. \quad (12)$$

在二维传递函数中,阻抗张量的对角线元素为 0,非对角线元素不相等。

三维电阻率模型的阻抗张量求解方法如下:

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \frac{1}{\mu_0} \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \end{bmatrix}. \quad (13)$$

其中阻抗可以来自三维大地电阻率模型的正演计算,由于三维电阻率模型的复杂性,地下电阻率可以在 3 个空间方向上发生变化,因此每个方向上的电阻率可能不同。这种非均匀的电阻率分布导致阻抗矩阵的 4 个元素不相等。

3.2.3 大地电磁实测阻抗资料

除了使用电阻率模型正演计算地表阻抗数据并应用传递函数计算地表电场,还可直接利用野外采集的大地电磁实测阻抗数据进行地电场计算。这些实测阻抗数据通过大地电磁(magnetotelluric, MT)仪采集得到。MT 方法是一种成熟的地球物理勘探方法,主要用于研究大地构造,寻找油气、矿产和地热资源等。

如图 5 所示,以中国的 SinoProbe-01 项目为例,该项目建立青藏高原、华北平原、东北和西北-华南等地区的大地电磁标准网,采集宽频和长周期

MT 数据,包括电场强度分量(E_x , E_y)和磁场强度分量(H_x , H_y , H_z)。为进行地电场计算,首先将采集的电磁场时间序列数据转换到频域,然后采用 Robust 估计^[65]和远参考^[66]等技术估算地表阻抗张量,并应用式(13)计算地表电场。

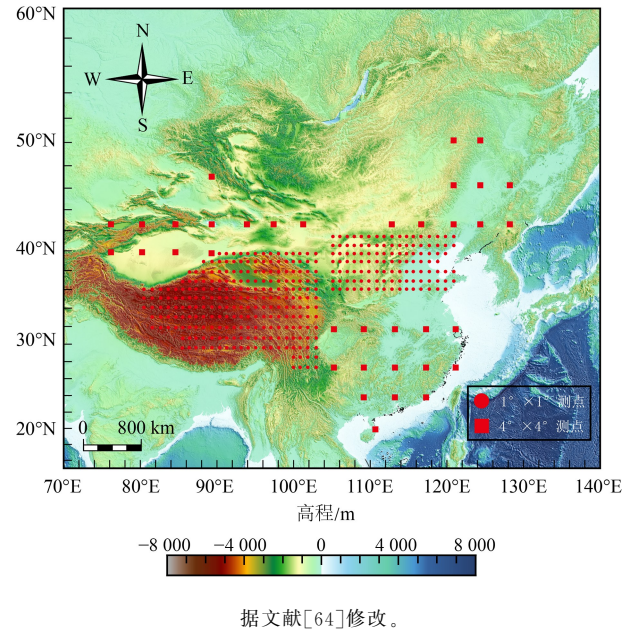


图 5 SinoProbe-01 项目大地电磁标准网
Fig.5 Magnetotelluric standard network of Project SinoProbe-01

在利用大地电磁测点计算地电场时,需注意排除受局部异质性影响的异常测点^[67]。建议尽量使用密集型的大地电磁测点,以获得更高的空间分辨率和减少插值不确定性。

3.2.4 利用实测地电场数据计算 GIC

除了利用传递函数计算地电场,我们还可以直接使用实测地电场数据来计算 GIC。如图 6 所示为通过实测地电场数据计算 GIC 的一般流程。

- 1) 确定地磁暴事件及其起止时间。根据磁暴事件的特征和监测数据,确定地磁暴的发生时间范围。
- 2) 获取地电场监测数据。在地磁暴事件的时间范围内,收集工区内的地电场监测数据;并对收集到的地电场数据进行预处理,包括去噪、滤波、校正等,以确保数据质量。
- 3) 计算变电站间的传输线电压。基于处理后的地电场数据,计算变电站间的传输线电压,这可以通过对电压分布进行数值计算或者模拟获得。

4)计算各变电站的 GIC。基于传输线电压和电网节点模型,计算各变电站的 GIC。这涉及将电压信号转换为 GIC,考虑电网的特定拓扑结构以及变电站相关参数。

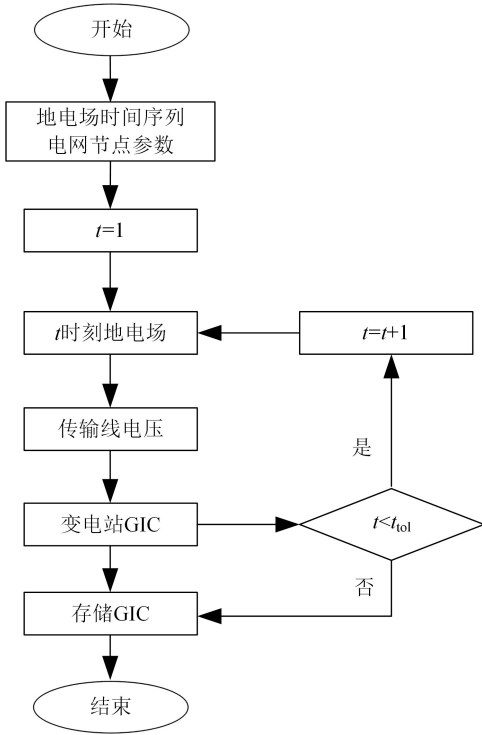


图 6 地电场监测数据 GIC 计算流程图
Fig.6 GIC calculation flow chart of geoelectric field monitoring data

5)保存数据并继续计算。保存计算得到的 GIC 数据,并判断是否继续计算下一时刻的 GIC,直至覆盖整个磁暴事件的时间范围。

6)输出计算结果。将计算得到的 GIC 结果进行整理、分析和展示,以供后续分析和决策使用。

3.3 导体中 GIC 计算

根据上述流程,感应地电场的的数据可以用于计算地球导体中的 GIC。在建模 GIC 时,导体模型主要可以分为两类:离散导体和连续导体。下面简要介绍这两种导体模型的建模过程。

3.3.1 离散导体

GIC 的研究中电网是一个重要的离散导体,因为变压器中性点与大地进行离散连接。如图 7 所示,将电网等效为直流回路模型。GIC 会在输电线

路、变压器(中性点接地)和大地之间形成回路。大地的影响已经体现在电网中的等效电势上,因此主要考虑输电线路和变压器(中性点接地)的建模。

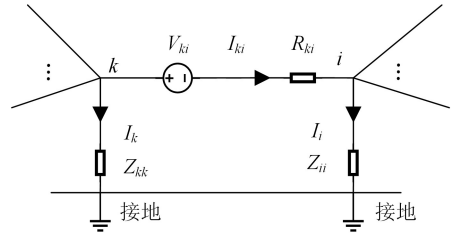


图 7 电网中 GIC 直流等效模型
Fig.7 DC equivalent model of GIC in power grid

假设输电线路为对称的三相线路。只需分析其中一条线路中的 GIC,用一个直流电阻来等效表示输电线路,其电阻取决于输电线路的构成材料、长度和回路数等因素。

对于变压器,考虑到不同电压等级之间的相互影响,可以采用“全节点模型”来进行建模。在该模型中,将变电站中各电压等级的母线和中性点视为独立的节点,同时将输电线路和变压器的各级绕组设定为单独的支路。通常,为简化计算,整个变电站会被视为一个独立节点。

由图 7 可得:

$$V_{ki} = \int_i^k \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l}. \quad (14)$$

式中: $\mathbf{E}$ 为沿传输线方向的电场; $\mathbf{l}$ 为分段传输线。令接地阻抗矩阵为 $\mathbf{Z}$,并设导纳矩阵 $\mathbf{Y}$,其元素为:

$$\begin{cases} Y_{ij} = -\frac{1}{R_{ij}}, i \neq j; \\ Y_{ij} = \sum_{k \neq i} \frac{1}{R_{ik}}, i = j. \end{cases} \quad (15)$$

则可得各节点流入大地的 GIC 表达式如下:

$$\mathbf{I} = (\mathbf{1} + \mathbf{YZ})^{-1} \mathbf{J}. \quad (16)$$

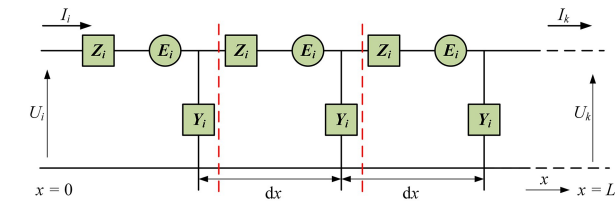
式中: $\mathbf{J}$ 为列向量,其大小等于网络节点数目,其元素为

$$J_m = \sum_{i \neq m} \frac{V_{im}}{R_{im}} = \sum_{i \neq m} \frac{V_{mi}}{R_{im}}. \quad (17)$$

3.3.2 连续导体

除了电网(离散系统)中的 GIC,人们也关注油

气管道(连续系统)中的 GIC。如图 8 所示,与电网的接地方式不同,油气管道埋入大地中且与大地之间隔着绝缘材料。Wang 等^[69]提出一种利用分布源传输线理论来计算管道中 GIC 的方法,该方法将管道等效为多个小段,每段上的电场被视为均匀的。这种方法可以有效描述管道中 GIC 的传播和影响,为研究油气管道系统中的 GIC 提供了有用的建模途径^[70]。



U_i : 分段电压; I_i : 分段电流; Z_i : 分段等效阻抗; Y_i : 分段接地导纳。

图 8 管道系统中 GIC 的等效模型

Fig.8 Equivalent model of GIC in pipeline system

U_i 与 I_i 的关系如下^[71]:

$$\frac{d^2 U_i}{d x^2} - \gamma^2 U_i = \frac{d E}{d x}; \quad (18)$$

$$\frac{d^2 I_i}{d x^2} - \gamma^2 I_i = -Y_i E. \quad (19)$$

式中, $\gamma^2 = Z_i \cdot Y_i$ 。

4 讨论分析

地磁暴引起的 GIC 研究涵盖空间物理学、地球物理学和电气工程等多个学科领域,每个学科对 GIC 估算的精度起着至关重要的作用。具体而言,空间物理学专注于地球磁场的准确建模,地球物理学致力于准确建立地下电性结构模型,而电气工程侧重于精确确定电网参数。

近期的研究表明,在建立地球磁场模型时,通常采用地磁台站监测数据,避免复杂的建模过程及由此可能引入的误差^[72]。因此,地球磁场能够较为真实地反映环境情况。电网中变电站和传输线的参数是已知的,在 GIC 估算中可以视作确定因素。

然而,地下电性结构的复杂性是一个挑战,其建立通常需要在研究区域布置大地电磁测点并进行反演。电性模型的建立也存在较大的不确定性,因此地下电性结构是影响 GIC 估算稳定性最主要的不确定因素。

接下来,深入分析不同地表波阻抗来源对 GIC 的影响。

4.1 不同维度电阻率模型对 GIC 的影响

均匀的一维电阻率模型假设地下介质的电阻率保持恒定,从而简化计算过程并提供基本的定性信息。这种建模方式适用于地质情况相对简单的局部区域,但是 GIC 的研究地区往往地质情况复杂、范围广泛;为更精细地反映电性结构,一维分层电阻率模型被更为广泛采用。该模型考虑地下结构在深度方向上的分层特性,更贴近实际情况,能够提供更精确的电磁响应^[48]。

然而,随着全球电力需求的增加和电网规模的扩大,局部 GIC 估算已经无法满足需求。为适应更复杂的地质情况,学者们提出了一维分区分段电阻率模型,将地下结构划分为多个区域或段,并赋予不同的电阻率。这种模型能够适应更为复杂的地质情况,逐渐成为一维电阻率模型中的主流^[26]。

随着大地电磁勘探技术的成熟,如今已经可以应用三维电阻率模型进行 GIC 估算^[73]。三维电阻率模型考虑地下结构的三维复杂性,能够提供更真实的 GIC 分布。它能够解释非常复杂的地质体结构,提高感应地电场的空间分辨率,同时也能反映出局部地质结构对 GIC 的影响,比如海岸效应^[23]及邻近效应^[74]。这些对 GIC 估算精度产生影响的地质结构是一维电阻率模型无法体现的^[75]。

4.2 不同类型阻抗资料对 GIC 的影响

目前的研究中,许多学者选择直接使用大地电磁实测阻抗进行 GIC 的估算^[49]。这些实测阻抗包含了地下复杂的电性结构,避免了建立大地电磁三维反演模型可能带来的各种误差。然而,大地电磁测点的布设和采集并不容易,而且对测点间距也有一定的要求;受环境等多种因素的影响,这种方法需要投入极高的成本。

另外,基于电阻率模型的正演阻抗方法依赖于构建电阻率模型,模拟地下结构并计算电磁响应^[76]。这种方法能够灵活模拟不同地质情景下的电磁行为,克服了实测数据的局限性。电阻率模型可以覆盖复杂的地下结构,包括不同深度和区域的电阻率变化。然而,模型的准确性高度依赖于所采用电阻率模型的精确性和适用性。电阻率模型的准确性受到诸多因素的影响,如大地电磁测点的质量和稀疏程度,正反演方法的准确性等。

综上所述,在大地电磁测点密集的区域,使用大

地电磁实测阻抗数据能够提供更高的估算准确性;在测点稀疏的区域可以使用大地电磁正反演手段计算地表波阻抗数据后使用传递函数计算 GIC^[67]。

4.3 地电场资料对 GIC 的影响

随着国家对地磁灾害重视程度的不断提高,多地已建立地电观测站。这些地电观测站能直接记录区域产生的地电场,该数据是地磁扰动与大地电性结构的结合。无需对地球磁场和地下结构进行建模分析,实测地电场数据包括了矿物和地下流体间的电化学相互作用、地下温度梯度引起的热电机理、海洋潮汐引起的运动感应产生电场变化等信息。相比利用数值计算方法估算 GIC,直接使用地电场数据能够显著提高 GIC 估算的精度和运算效率^[77]。

然而,地理位置和环境等因素的限制使得地电场监测设备无法广泛而自由地建立,这导致许多地区无法获得实测数据。在远离测量位置的地方,只能通过插值方式计算地电场,不可避免地会引入误差。相比之下,数学算法更具灵活性,能够广泛应用于大范围的 GIC 估算中。因此,在局部估算中使用地电场实测数据能够获得更好的结果,但在研究工区范围较大时建议使用数学算法进行求解。

5 总结与展望

本文全面探讨了 GIC 的生成机制、潜在危害以及交叉学科对其研究的影响,并详细讨论了各学科领域中 GIC 的研究进展。GIC 的形成涉及空间物理、地球物理和电气工程三门交叉学科领域的基础知识。这 3 个领域分别派生出 3 个重要的研究方向,即 GIC 的预测(空间物理领域)、GIC 的精确估算(地球物理领域)以及 GIC 的灾害防控(电气工程领域)。就其对 GIC 的影响程度而言,地球物理学科的贡献最为显著。

目前,在空间物理领域,许多国家已建立了完善的地磁台站网,用于长期记录地磁场数据并监测其变化。与模拟地磁扰动相比,实测数据能够更加真实准确地反映地球磁场,降低对 GIC 估算精确度的影响。电气工程学科主要关注电网参数。一旦电网建设完成,内部参数通常保持不变。因此该领域对 GIC 的影响较为确定。

地球物理学科主要关注地下电性结构及其地表阻抗响应等因素。要获得观测阻抗数据,通常需要投入大量的时间和经济成本。研究人员通常基于公开发表的地下电性结构,采用数值模拟方法计算地

表阻抗理论数据;不过由于该地下电性结构是对真实世界的近似,其模拟结果存在不确定性。大地电性结构复杂多变,无论采用何种方法,都难以完全模拟真实情况,导致地球物理资料在很大程度上影响着 GIC 估算的精度。

因此,本文着重阐述了地球物理学科在 GIC 研究中的作用。该学科领域的参数主要是电阻率模型,不同维度的电阻率模型能够提供不同精度的 GIC 估算值。发展过程从起初的一维电阻率模型到现今的三维电阻率模型,GIC 的估算精度也在不断提高。这得益于该领域的关键技术革新,尤其是大地电磁测深等方法技术,为推动 GIC 研究做出了重要的贡献。

未来,随着电力系统的持续发展,GIC 研究将面临新的挑战 and 机遇。在应对太阳活动的不确定性方面,我们需要强化对极端磁暴的监测和预测,为灾害防治部门提供足够的响应时间。例如:采用机器学习和人工智能技术分析大量地磁数据和太阳活动数据,提前发现地磁暴的迹象并预测可能的影响;使用空间天气预报模型来模拟太阳风和地球磁场之间的相互作用,预测地磁暴的发生;利用太空卫星监测地球磁场的变化,进而监测地磁暴的迹象等。同时,建立更准确的电磁场模型并科学地预测 GIC 的分布和强度有助于改进电力系统的保护和响应策略。此外,鉴于电力系统网络的日益复杂,即使微小的扰动也可能引发严重后果,我们必须考虑更为复杂的大地电性结构,例如地下介质的各向异性。总之,综合考虑各交叉学科的影响与作用将有助于相关人员理解和解决 GIC 可能带来的危害。

参考文献(References):

- [1] Koen J, Gaunt T. Geomagnetically Induced Currents in the Southern African Electricity Transmission Network [C]//2003 IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings.[S.l.]:IEEE,2003:1-7.
- [2] Barlow W H, Barlow P, Culley R S. On the Spontaneous Electrical Currents Observed in the Wires of the Electric Telegraph [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1849, 139:61-72.
- [3] Boteler D H. The Super Storms of August/September 1859 and Their Effects on the Telegraph System[J]. Advances in Space Research, 2006, 38(2):159-172.
- [4] Allison N J, Huddleston W E. Extraneous Currents

- Noted on Large Transmission Pipe Line System[J]. Corrosion, 1952, 8(1): 1.
- [5] Eroshenko E A, Belov A V, Boteler D, et al. Effects of Strong Geomagnetic Storms on Northern Railways in Russia[J]. Advances in Space Research, 2010, 46(9): 1102 - 1110.
- [6] Allen J, Sauer H, Frank L, et al. Effects of the March 1989 Solar Activity[J]. Eos, Transactions American Geophysical Union, 1989, 70(46): 1479 - 1488.
- [7] Béland J, Small K. Space Weather Effects on Power Transmission Systems: The Cases of Hydro-Québec and Transpower New Zealand Ltd[C]//Nato Advanced Research Workshop on Effects of Space Weather on Technology Infrastructure. Miami: [s. n.], 2004: 287 - 299.
- [8] Heyns M J, Lotz S I, Gaunt C T. Geomagnetic Pulsations Driving Geomagnetically Induced Currents [J]. Space Weather, 2021, 19(2): e2020SW002557.
- [9] Pulkkinen A, Lindahl S, Viljanen A, et al. Geomagnetic Storm of 29 - 31 October 2003: Geomagnetically Induced Currents and Their Relation to Problems in the Swedish High-Voltage Power Transmission System[J]. Space Weather, 2005, 3(8): S08C03.
- [10] Zhang S M, Liu L G. A Mitigation Method Based on the Principle of GIC-Even Distribution in Whole Power Grids [J]. IEEE Access, 2020, 8: 65096 - 650103.
- [11] Torta J M, Serrano L, Regué J R, et al. Geomagnetically Induced Currents in a Power Grid of Northeastern Spain[J]. Space Weather, 2012, 10(6): S06002.
- [12] Ning X, Liu Q, Cui X, et al. Research on Optimal Placement for GIC Mitigation with Blocking Device [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 533(1): 012042.
- [13] Watari S. Estimation of Geomagnetically Induced Currents Based on the Measurement Data of a Transformer in a Japanese Power Network and Geoelectric Field Observations[J]. Earth, Planets and Space, 2015, 67(1): 77.
- [14] Marshall R A, Kelly A, Van Der Walt T, et al. Modeling Geomagnetic Induced Currents in Australian Power Networks[J]. Space Weather, 2017, 15(7): 895 - 916.
- [15] Nazir M, Burkes K, Enslin J H R. Converter-Based Power System Protection Against DC in Transmission and Distribution Networks [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(7): 6701 - 6704.
- [16] 呼和满都拉, 冀文慧, 杨洪涛, 等. 毕奥-萨伐尔定律建立的探讨[J]. 物理通报, 2014(11): 18 - 23.
- [17] Huhemandula, Ji Wenhui, Yang Hongtao, et al. Discussion on the Establishment of Biot-Savart Law [J]. Physics Bulletin, 2014(11): 18 - 23.
- [18] Snyder C W, Neugebauer M, Rao U R. The Solar Wind Velocity and Its Correlation with Cosmic-Ray Variations and with Solar and Geomagnetic Activity [J]. Journal of Geophysical Research, 1963, 68(24): 6361 - 6370.
- [19] Fairfield D H, Cahill L J. Transition Region Magnetic Field and Polar Magnetic Disturbances[J]. Journal of Geophysical Research, 1966, 71(1): 155 - 169.
- [20] Shi Y, Xu Y, Yang B, et al. Lithospheric Conductors Shed Light on the Non-Uniform Destruction of North China Craton[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2022, 127(3): e2021JB022587.
- [21] 徐正玉, 付能翼, 周洁, 等. 瞬变电磁法非线性优化反演算法对比[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2022, 52(3): 744 - 753.
- [22] Xu Zhengyu, Fu Nengyi, Zhou Jie, et al. Comparison of Nonlinear Optimization Inversion Algorithms of Transient Electromagnetic Method[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2022, 52(3): 744 - 753.
- [23] Oryński S, Jóźwiak W, Nowożyński K, et al. Comparison of 3D, 2D, and 1D Magnetotelluric Inversion Results on the Example of Data from Fore-Sudetic Monocline [J]. International Journal of Geophysics, 2022, 2022: 1 - 19.
- [24] 罗永超, 李桐林, 张谡哲. 三维重力梯度局部光滑约束反演[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2021, 51(2): 543 - 551.
- [25] Luo Yongchao, Li Tonglin, Zhang Rongzhe. Local Smooth Inversion of 3D Gravity Gradient[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2021, 51(2): 543 - 551.
- [26] Wang X, Liu C M, Boteler D, et al. The Influence of the Coast Effect on Geomagnetically Induced Currents: A Modeling Study[C]//2021 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM). [S.l.]: IEEE, 2021: 1 - 5.
- [27] Wawrzaszek A, Gil A, Modzelewska R, et al. Analysis of Large Geomagnetically Induced Currents During the 7 - 8 September 2017 Storm: Geoelectric Field

- Mapping [J]. Space Weather, 2023, 21 (3): e2022SW003383.
- [25] 刘连光,吴伟丽.电网磁暴灾害风险影响因素研究综述[J].地球物理学报,2014,57(6):1709-1719.
- Liu Lianguang, Wu Weili. Review of the Influential Factors of the Power System Disaster Risk Due to Geomagnetic Storm [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014, 57 (6): 1709 - 1719.
- [26] Marshall R A, Wang L, Paskos G A, et al. Modeling Geomagnetically Induced Currents in Australian Power Networks Using Different Conductivity Models[J]. Space Weather, 2019, 17(5): 727 - 756.
- [27] Gil A, Berendt-Marchel M, Modzelewska R, et al. Evaluating the Relationship Between Strong Geomagnetic Storms and Electric Grid Failures in Poland Using the Geoelectric Field as a GIC Proxy [J]. J Space Weather Space Clim, 2021, 11: 30.
- [28] Liu C M, Liu L G, Pirjola R. Geomagnetically Induced Currents in the High-Voltage Power Grid in China [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24 (4): 2368 - 2374.
- [29] Sun R, Balch C. Comparison Between 1 - D and 3 - D Geoelectric Field Methods to Calculate Geomagnetically Induced Currents: A Case Study[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34 (6): 2163 - 2172.
- [30] Zirker J B. Coronal Holes and High-Speed Wind Streams[J]. Reviews of Geophysics, 1977, 15 (3): 257 - 269.
- [31] Burlaga L, Sittler E, Mariani F, et al. Magnetic Loop Behind an Interplanetary Shock: Voyager, Helios, and IMP 8 Observations [J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 1981, 86(A8): 6673 - 6684.
- [32] Wang Y M, Wang S, Ye P Z. Multiple Magnetic Clouds in Interplanetary Space [J]. Solar Physics, 2002, 211(1): 333 - 344.
- [33] Zhang J, Richardson I G, Webb D F, et al. Solar and Interplanetary Sources of Major Geomagnetic Storms ($Dst \leq -100$ nT) During 1996 - 2005[J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2007, 112 (A10): A10103.
- [34] Maltsev Y P. Points of Controversy in the Study of Magnetic Storms[J]. Space Science Reviews, 2004, 110(3): 227 - 267.
- [35] 冯学尚,向长青,钟鼎坤.太阳风暴的日冕行星际过程三维数值研究进展[J].中国科学:地球科学,2011,41 (1): 1 - 28.
- Feng Xueshang, Xiang Changqing, Zhong Dingkun. The State-of-Art of Three-Dimensional Numerical Study for Corona-Interplanetary Process of Solar Storms[J]. Science China: Earth Sciences, 2011, 41 (1): 1 - 28.
- [36] 冯学尚,向长青,钟鼎坤.行星际太阳风暴的数值模拟研究[J].中国科学:地球科学,2013,43(6):912-933.
- Feng Xueshang, Xiang Changqing, Zhong Dingkun. Numerical Study of Interplanetary Solar Storms [J]. Science China: Earth Sciences, 2013, 43 (6): 912 - 933.
- [37] Lucas G M, Love J J, Kelbert A, et al. A 100 - Year Geoelectric Hazard Analysis for the U S High-Voltage Power Grid[J]. Space Weather, 2020, 18(2): e2019SW002329.
- [38] Zhang J J, Yu Y Q, Chen W Q, et al. Simulation of Geomagnetically Induced Currents in a Low-Latitude 500 kV Power Network During a Solar Superstorm [J]. Space Weather, 2022, 20(4): e2021SW003005.
- [39] 吴伟丽,刘连光.基于稀疏地磁数据的中低纬度磁暴感应地电场的算法研究[J].空间科学学报,2013,33 (6): 617 - 623.
- Wu Weili, Liu Lianguang. Calculation Method for Geoelectric Field in Mid- and Low-Latitude Area Based on Sparse Geomagnetic Data [J]. Chinese Journal of Space Science, 2013, 33 (6): 617 - 623.
- [40] Zheng K, Pirjola R J, Boteler D H, et al. Geoelectric Fields Due to Small-Scale and Large-Scale Source Currents[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(1): 442 - 449.
- [41] Bank R J. Mathematical Methods for Geo-Electromagnetic Induction [J]. Geophysical Journal International, 1994, 119(2): 686.
- [42] Boteler D H, Pirjola R J. The Complex-Image Method for Calculating the Magnetic and Electric Fields Produced at the Surface of the Earth by the Auroral Electrojet[J]. Geophysical Journal International, 1998, 132(1): 31 - 40.
- [43] Viljanen A, Pirjola R, Amm O. Magnetotelluric Source Effect Due to 3D Ionospheric Current Systems Using the Complex Image Method for 1D Conductivity Structures[J]. Earth, Planets and Space, 1999, 51(9): 933 - 945.
- [44] Pirjola R, Viljanen A, Boteler D. Series Expansions for the Electric and Magnetic Fields Produced by a Line or Sheet Current Source Above a Layered Earth[J]. Radio Science, 1999, 34(2): 269 - 280.

- [45] 尚康良.磁暴感应的地电流研究与计算[D].保定:华北电力大学,2012.
Shang Kangliang. Research and Calculation of Telluric Current Induced by Magnetic Storm [D]. Baoding: North China Electric Power University, 2012.
- [46] 董博.磁暴情况下复杂地质结构三维地电流场有限元分析[D].保定:华北电力大学,2015.
Dong Bo. Analysis on Three-Dimensional Geoelectric Field Induced in Complicated Conductivity Structure During Geomagnetic Storm by Finite Element Method [D]. Baoding: North China Electric Power University, 2015.
- [47] 林晨翔.大地电导率横向变化对磁暴感应地电场的影响研究[D].北京:华北电力大学,2016.
Lin Chenxiang. Effect of Conductivity Lateral Change on Induced Geo-Electric Field During Magnetic Storms [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016.
- [48] Gannon J L, Birchfield A B, Shetye K S, et al. A Comparison of Peak Electric Fields and GICs in the Pacific Northwest Using 1-D and 3-D Conductivity [J]. Space Weather, 2017, 15(11): 1535 - 1547.
- [49] Lucas G M, Love J J, Kelbert A. Calculation of Voltages in Electric Power Transmission Lines During Historic Geomagnetic Storms: An Investigation Using Realistic Earth Impedances [J]. Space Weather, 2018, 16(2): 185 - 195.
- [50] Pirjola R. Review on the Calculation of Surface Electric and Magnetic Fields and of Geomagnetically Induced Currents in Ground-Based Technological Systems [J]. Surveys in Geophysics, 2002, 23(1): 71 - 90.
- [51] Horton R, Boteler D H, Overbye T, et al. A Test Case for the Calculation of Geomagnetically Induced Currents [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(4): 2368 - 2373.
- [52] 郑宽, 刘连光, David H Boteler, 等. 多电压等级电网的 GIC-Benchmark 建模方法 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(16): 179 - 186.
Zheng Kuan, Liu Lianguang, Boteler H D, et al. Modelling Geomagnetically Induced Currents in Multiple Voltage Levels of a Power System Illustrated Using the GIC-Benchmark Case [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(16): 179 - 186.
- [53] 刘连光, 郭世晓, 魏恺, 等. 基于全节点模型的三华电网地磁感应电流计算 [J]. 电网技术, 2014, 38(7): 1946 - 1952.
Liu Lianguang, Guo Shixiao, Wei Kai, et al. Calculation of Geomagnetically Induced Currents in Interconnected North China-Central China-East China Power Grid Based on Full-Node GIC Model [J]. Power System Technology, 2014, 38(7): 1946 - 1952.
- [54] Kappenman J G, Radasky W A, Gilbert J L, et al. Advanced Geomagnetic Storm Forecasting: A Risk Management Tool for Electric Power System Operations [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2000, 28(6): 2114 - 2121.
- [55] Pirjola R. Averages of Geomagnetically Induced Currents (GIC) in the Finnish 400 kV Electric Power Transmission System and the Effect of Neutral Point Reactors on GIC [J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2005, 67(7): 701 - 708.
- [56] Pirjola R. Effects of Space Weather on High-Latitude Ground Systems [J]. Advances in Space Research, 2005, 36(12): 2231 - 2240.
- [57] Amm O, Viljanen A. Ionospheric Disturbance Magnetic Field Continuation from the Ground to the Ionosphere Using Spherical Elementary Current Systems [J]. Earth, Planets and Space, 1999, 51(6): 431 - 440.
- [58] Fukushima N. Generalized Theorem for no Ground Magnetic Effect of Vertical Currents Connected with Pedersen Currents in the Uniform-Conductivity Ionosphere [J]. Report of Ionosphere and Space Research in Japan, 1976, 30: 35 - 40.
- [59] Raeder J, Wang Y, Fuller-Rowell T J. Geomagnetic Storm Simulation with a Coupled Magnetosphere-Ionosphere-Thermosphere Model [M]. [S. l.]: Space Weather, 2001: 377 - 384.
- [60] Lyon J G, Fedder J A, Mobarry C M. The Lyon-Fedder-Mobarry (LFM) Global MHD Magnetospheric Simulation Code [J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2004, 66(15): 1333 - 1350.
- [61] Powell K G, Roe P L, Linde T J, et al. A Solution-Adaptive Upwind Scheme for Ideal Magnetohydrodynamics [J]. Journal of Computational Physics, 1999, 154(2): 284 - 309.
- [62] Palmroth M, Pulkkinen T I, Janhunen P, et al. Stormtime Energy Transfer in Global MHD Simulation [J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2003, 108(A1). doi:10.1029/2002JA009446.
- [63] Viljanen A, Pirjola R J, Wik M, et al. Continental Scale Modelling of Geomagnetically Induced Currents [J].

- Journal of Space Weather and Space Climate, 2012, 2 (A17): 11.
- [64] 魏文博, 金胜, 叶高峰, 等. 中国大陆岩石圈导电性结构研究: 大陆电磁参数“标准网”参数实验 (SinoProbe-01)[J]. 地质学报, 2010, 84(6): 788-800.
- Wei Wenbo, Jin Sheng, Ye Gaofeng, et al. On the Conductive Structure of Chinese Continental Lithosphere: Experiment on “Standard Monitoring Network” of Continental EM Parameters (SinoProbe-01)[J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 84(6): 788-800.
- [65] Egbert G D, Booker J R. Robust Estimation of Geomagnetic Transfer-Functions [J]. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 1986, 87 (1): 173-194.
- [66] Gamble T D, Clarke J, Goubau W M. Magnetotellurics with a Remote Magnetic Reference [J]. Geophysics, 1979, 44(1): 53-68.
- [67] Cordell D, Unsworth M J, Lee B, et al. Estimating the Geoelectric Field and Electric Power Transmission Line Voltage During a Geomagnetic Storm in Alberta, Canada Using Measured Magnetotelluric Impedance Data: The Influence of Three-Dimensional Electrical Structures in the Lithosphere [J]. Space Weather, 2021, 19(10): e2021SW002803.
- [68] 刘连光, 王开让, 魏恺, 等. 基于地电场实测数据的广东电网地磁感应电流计算 [J]. 电力建设, 2015, 36 (12): 102-107.
- Liu Lianguang, Wang Kairang, Wei Kai, et al. GIC Calculation of Guangdong Power Grid Based on Geoelectric Field Data [J]. Electric Power Construction, 2015, 36(12): 102-107.
- [69] Wang X, Boteler D H, Pirjola R J. Distributed-Source Transmission Line Theory for Modeling the Coast Effect on Geoelectric Fields [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2023, 38(5): 3541-3550.
- [70] 刘连光, 张鹏飞, 王开让, 等. 基于大地电导率分层模型的油气管网地磁暴干扰评估方法 [J]. 电网技术, 2015, 39(6): 1556-1561.
- Liu Lianguang, Zhang Pengfei, Wang Kairang, et al. Assessment of Geomagnetic Induction in Pipeline Based on Layered-Earth Conductivity Model [J]. Power System Technology, 2015, 39 (6): 1556-1561.
- [71] 步宛烨, 张慧茜, 黄清华. 地磁感应电流研究综述 [J]. 地球与行星物理论评, 2022, 53(1): 53-65.
- Bu Wanye, Zhang Huiqian, Huang Qinghua. Review of Geomagnetically Induced Currents [J]. Reviews of Geophysics and Planetary Physics, 2022, 53 (1): 53-65.
- [72] Murphy B S, Lucas G M, Love J J, et al. Magnetotelluric Sampling and Geoelectric Hazard Estimation: Are National-Scale Surveys Sufficient? [J]. 2021, 19(7): e2020SW002693.
- [73] Rosenqvist L, Fristedt T, Dimmock A P, et al. 3D Modeling of Geomagnetically Induced Currents in Sweden: Validation and Extreme Event Analysis [J]. 2022, 20(3): e2021SW002988.
- [74] Dong B, Wang Z Z, Liu L G, et al. Proximity Effect on the Induced Geoelectric Field at the Lateral Interface of Different Conductivity Structures During Geomagnetic Storms [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(1): 32-40.
- [75] Espinosa K V, Padilha A L, Alves L R, et al. Estimating Geomagnetically Induced Currents in Southern Brazil Using 3-D Earth Resistivity Model [J]. Space Weather, 2023, 21(4): e2022SW003166.
- [76] 谭捍东, 余钦范, John Booker, 等. 大地电磁法三维交错采样有限差分数值模拟 [J]. 地球物理学报, 2003, 46(5): 705-711.
- Tan Handong, Yu Qinfan, Booker J, et al. Magnetotelluric Three-Dimensional Modeling Using the Staggered-Grid Finite Difference Method [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2003, 46 (5): 705-711.
- [77] 王辉, 马方圆, 程久龙, 等. 利用大地电磁站间阻抗估算磁暴引起的大地电场 [J]. 地球物理学报, 2020, 63 (7): 2658-2670.
- Wang Hui, Ma Fangyuan, Cheng Jiulong, et al. Synthesizing Geomagnetic Induction Electric Field (GIE) Using Magnetotelluric Quasi-Impedance and Geomagnetic Field [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2020, 63 (7): 2658-2670.