

斜交断层作用下露天矿逆倾边坡破坏模式及稳定性

曹兰柱, 郑杰, 王东, 王旭

辽宁工程技术大学矿业学院, 辽宁阜新, 123000

摘要 针对斜交断层对逆倾边坡稳定性的影响, 基于岩体结构控制论, 结合平庄西露天矿工程, 分析了在斜交断层作用下逆倾边坡破坏模式及滑坡机理, 通过 AutoCAD、ANSYS、3Dslope 软件, 建立三维边坡模型, 计算边坡安全系数。计算结果表明: 断层影响区的三维滑坡模式为沿断层面、侧界面和弱层面的楔体滑动, 明确了三维滑体的最危险空间形态; 通过计算不同侧界面位置下的安全系数, 得出了斜交断层对边坡的影响范围; 根据稳定性分析结果, 提出了控制开采方案, 可为露天矿安全生产提供技术指导。

关键词 斜交断层; 破坏模式; 边坡稳定性; 三维滑体

中图分类号 TD824

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.h2.010

Failure Mode and the Stability of Counter-tilt Slope of Open Pit Under Bias Chasm

CAO Lanzhu, ZHENG Jie, WANG Dong, WANG Xu

College of Mines Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning Province, China

Abstract With the stability of a counter-tilt slope under bias chasm in mind, based on the rock mass structure cybematics and combined with the west open-pit mine project of Ping Zhuang, this paper analyzes the failure mode and the landslide mechanism of the counter-tilt slope under bias chasm, using AutoCAD, ANSYS and 3Dslope to model the three-dimensional slope and calculate the slope stability coefficient. The calculation results show that: the three-dimensional landslide modes of the chasm affected zone are: the wedge sliding along the fault plane, the side interface and the weak interface, thus the most dangerous space form of the three-dimensional sliding body is identified; from the stability coefficient under different side interface locations, the influence of the oblique chasm on the slope is revealed. According to the results of the stability analysis, the control scheme of the mining plan is proposed to provide a technical guidance for the open pit mine production safety.

Keywords bias chasm; failure mode; slope stability; 3D landslide

0 引言

边坡稳定性分析是露天开采领域研究的重大问题, 露天矿边坡的稳定性关系到生产设备和人员的生命安全, 一旦发生滑坡将造成重大灾难。大量工程实践表明, 岩质边坡的失稳, 多是由于其内部的节理、裂隙等缺陷及其发展导致的, 对于存在断层的边坡, 其失稳多表现为顺层面滑动或由断裂面和其它破坏结构面在不同空间组合条件下形成楔体破坏^[1-3]。

断层是由于地质构造而形成, 在强烈的构造碾磨和腐蚀变形作用下, 使岩体强烈破坏产生断层泥和角砾, 并伴生有密集节理裂隙发育, 降低岩体强度, 形成天然软弱结构面^[4]。此外, 在断层两边的岩体中存在着残余构造应力, 随着矿坑

的开拓延伸, 在回弹应力作用下, 诱使断层附近的残余应力释放, 加快边坡变形速度。

当边坡的构型及荷载可以等效为平面应变问题时, 通常情况下采用二维模型对边坡进行稳定性分析, 可以满足工程需要。但对于斜交断层边坡, 边坡的稳定性受断层与边坡坡面间距离和边坡内节理裂隙发育状况影响, 传统的二维模型无法考虑断层的空间效应, 而现阶段大多数三维边坡稳定性分析是针对简单土质边坡、均质边坡, 对含有斜交断层的岩质边坡分析较少, 因此, 对于斜交断层作用下的特殊复杂边坡, 建立三维边坡模型, 分析三维破坏模式, 研究斜交断层作用下的边坡稳定性对露天矿的安全生产具有重要意义, 并且对存有类似

收稿日期: 2013-03-22; 修回日期: 2013-06-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(51104084)

作者简介: 曹兰柱, 教授, 研究方向为露天矿开采技术与边坡稳定性分析, 电子信箱: cao1962@126.com



地质状况下的边坡稳定性分析具有一定的参考价值。

目前,应用于边坡三维稳定性分析的主要有在二维分析方法的基础上扩展的三维极限平衡法和采用 ANSYS、FLAC 等大型有限元软件的三维数值模拟。例如,Huger 在忽略所有条柱竖向剪力的基础上,分别通过力矩平衡、静力平衡建立三维简化 Bishop 法、三维简化 Janbu 法。张长亮等在 2007 年提出三维 Spencer 法,三维有限元数值模拟能够很好的模拟边坡应力应变分布及变化情况^[9]。本文中结合平庄西露天矿工程地质实例,采用基于三维极限平衡法的 Jslope3D 软件^[10]计算三维边坡安全系数,研究边坡破坏模式,评价边坡的稳定性。

1 工程实例

所研究区域为平庄西露天矿西北帮 F₃ 断层区,西北帮是指该矿西北方向,在 N4700~5400, E4400~4800(南北走向长度 700m,东西宽 400m)范围内的边坡。目前西北帮顶部边坡已采掘到界,坡顶最大标高 545.3m,坑底最低标高+445.2m,采掘垂深约 100m,共有 10~14 个台阶,边坡角 30°~33°。西北帮 1990 年滑坡之后,在上部采取缓坡减重措施,致使 F₃ 断层带及断层带在局部大面积出露。F₃ 断层平面位置如图 1 所示,工程地质模型如图 2 所示(图 1 中所用网格为全国大地坐标系赤峰市平庄镇坐标网,网格间距 200m。文中同类图同)。

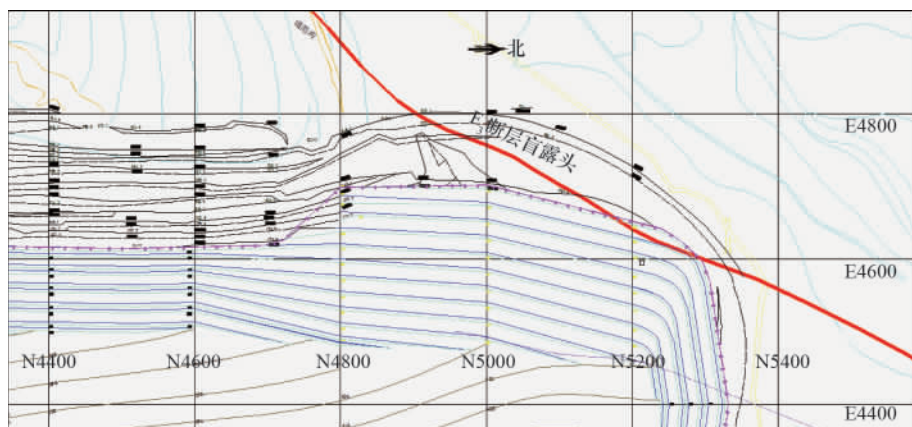


图 1 平庄西露天矿 F₃ 断层平面位置

Fig. 1 Plane position of F₃ chasm of Ping Zhuang west open pit

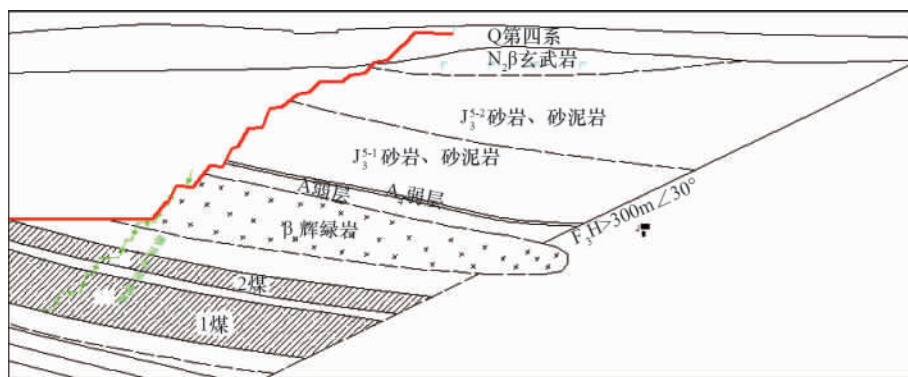


图 2 西北帮工程地质模型

Fig. 2 Engineering geological model of northwest part

西北帮岩体内存在的构造结构面有两种:断层和节理,它们对边坡的岩体强度有着重要的影响。其中,F₃ 断层为一级构造结构面,对边坡稳定造成重大危害,其它均为次一级的构造结构面。F₃ 断层为左旋张扭性断裂,在西北帮水平露头宽度为 7~13m,落差 150~30m,倾向 98°~130°,倾角 22°~31°,次一级的小段层有 3 条,在西北帮受 F₃ 断层的控制,节理裂隙较发育,侏罗系砂岩-泥岩岩组发育有 4 组节理,其产状分别为 116°75'、174°83'、65°75',这些节理、裂隙的存在降

低了边坡的岩石强度,为滑坡提供了良好的边界条件。煤层由下而上分为 1 煤和 2 煤,通过勘探发现煤层顶底板均存在软弱夹层,以往非工作帮滑坡多是沿这组弱层滑动的,它对西北帮边坡稳定性也构成不利条件。

2 边坡破坏机理及稳定性

2.1 研究思路

根据平庄西露天矿西北帮边坡岩体特征,西北帮稳定性

受斜交 F_3 断层控制,在露天开采过程中,曾多次发生变形、位移和滑坡,给露天矿安全生产造成极大影响。 F_3 断层切割西北帮形成三维滑体,当工作帮向北推进过程中,通过控制该三维滑体大小、空间形态来控制边坡稳定性,为实现露天矿安全回采提供技术支持。作者通过 JSlope3D 软件分别计算侧界面与 F_3 断层面不同夹角、侧界面与铅垂面不同夹角时的滑体的安全系数,从而确定三维滑体侧界面产状、三维滑体形态。再通过计算不同位置侧界面(即不同大小三维滑体)时滑体的安全系数,研究安全系数与三维滑体大小之间的关系。从而确定 F_3 断层的影响范围,进而评价边坡的稳定性。

2.2 滑体形态分析

边坡稳定性分析首先要明确边坡岩体的破坏模式,从岩体结构控制论的角度出发,边坡破坏模式主要取决于节理、裂隙的发育情况。边坡失稳主要取决于抗滑力和下滑力之间

的关系,对于西露天煤矿西北帮,滑移模式主要受 F_3 断层及弱层(带)控制,即随着采剥工程的发展,边坡逐渐向 F_3 断层靠近, F_3 断层对边坡影响越来越大,极可能作为滑体的侧边界;此外,采剥工程逐渐将边坡内赋存的弱层揭露于边坡坡面上,被揭露的弱层极可能作为滑体的下部边界,通过以往滑坡历史资料和内排压帮高度,可确定 2 煤顶板弱层为滑体的底滑面。滑体是由多个空间曲面包围、闭合形成的三维空间体,这些空间曲面包括台阶坡面和平盘构成的边坡坡面、地表面、 F_3 断层面、底滑面及侧界面。如图 3 所示。其中, F_3 断层为斜交断层,在断层和边坡间有大量节理裂隙发育,侧界面的形态和位置是不确定因素。

通过对以往滑坡历史资料分析,侧界面基本形态分为向上垂直于边坡坡面的侧界面 1 和与 F_3 断层夹角为 θ 的侧界面 2(图 3)。

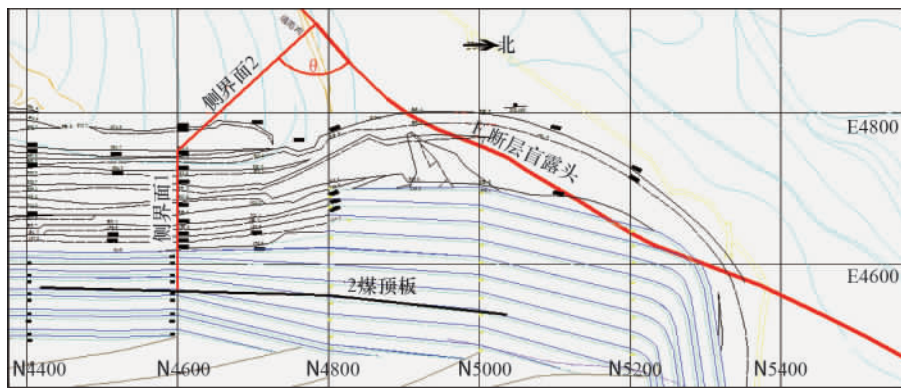


图 3 西北帮 F_3 断层区滑体形态分析图

Fig. 3 Side body morphology analysis of the region of F_3 chasm of northwest part

通过分析各个曲面的形态,描述出滑体的空间形态,进而建立起计算模型。建立边坡三维模型如图 4 所示。

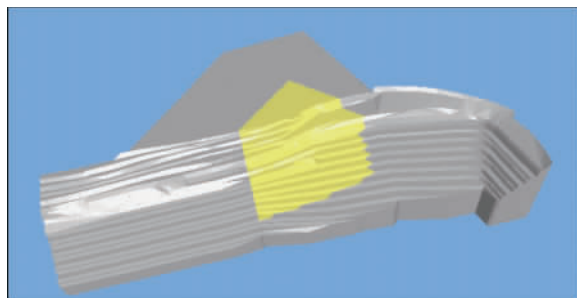


图 4 西北帮 F_3 断层区三维模型

Fig. 4 3D model of the region of F_3 chasm of northwest part

2.3 稳定性计算及结果分析

(1)考虑侧界面 2 与 F_3 断层面夹角 θ 为 80° 、 90° 、 100° 、 110° 时,如图 5 所示,分别计算三维滑体的安全系数 F_s 。计算结果见表 1。

结果显示,当 θ 为 90° ,即侧界面 2 与 F_3 断层面垂直时,安全系数 F_s 最小。

(2)考虑在 θ 为 90° 时,侧界面与铅垂面夹角 α 为 0° 、 5° 、 10° 、 15° 时,如图 6 所示,分别计算三维滑体的安全系数。计算结果见表 1。

结果显示,当 α 为 10° ,即侧界面倾角为 100° 时,安全系数 F_s 最小。

表 1 稳定性计算结果

Table 1 Calculated results of stability

| $\theta/(^\circ)$ | F_s | $\alpha/(^\circ)$ | F_s | s/m | F_s |
|-------------------|-------|-------------------|-------|-----|-------|
| 80 | 1.685 | 0 | 1.612 | 400 | 1.40 |
| 90 | 1.612 | 5 | 1.485 | 360 | 1.24 |
| 100 | 1.742 | 10 | 1.40 | 320 | 1.16 |
| 110 | 1.800 | 15 | 1.503 | 300 | 1.12 |
| | | | | 260 | 1.07 |
| | | | | 220 | 1.03 |

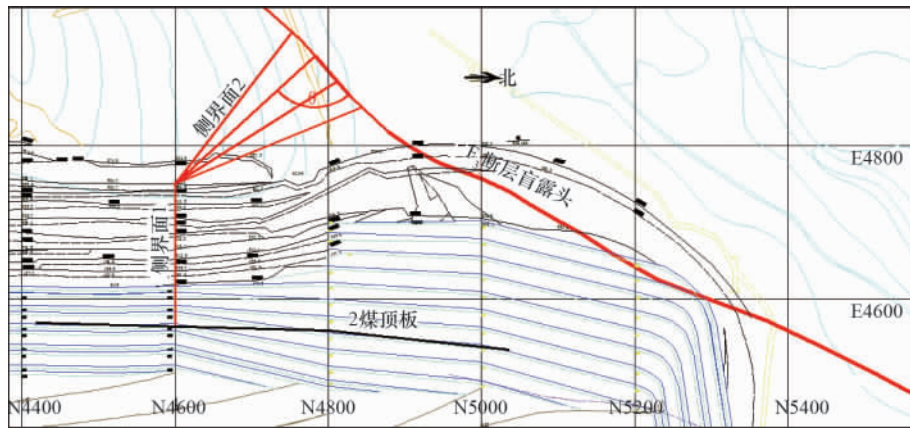


图 5 侧界面 2 与 F_3 断层面夹角 θ 变化

Fig. 5 Change of the angel θ between the side interface 2 and F_3

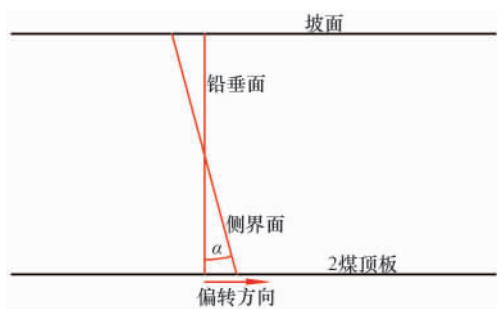


图 6 侧界面与铅垂面夹角 α 变化

Fig. 6 Change of the angel α between the side interface with the vertical plane

通过以上计算,确定了最危险侧界面形态为两个侧界面与铅垂面夹角为 10° , 侧界面 1 走向垂直于边坡走向和侧界面 2 走向垂直于 F_3 断层走向。

(3) 将最危险形态侧界面向北平移 40、80、100、140 和 180m, 考虑侧界面 1 与 N5000 距离 s 为 400、360、320、300、260 和 220m 时 (图 7), 分别计算三维滑体的安全系数。计算结果见表 1。

通过计算可知,随着剥采工程向北发展,边坡逐渐向 F_3 断层靠近, 边坡安全系数逐渐降低, N4700 以北安全系数 F_s 不足 1.1。

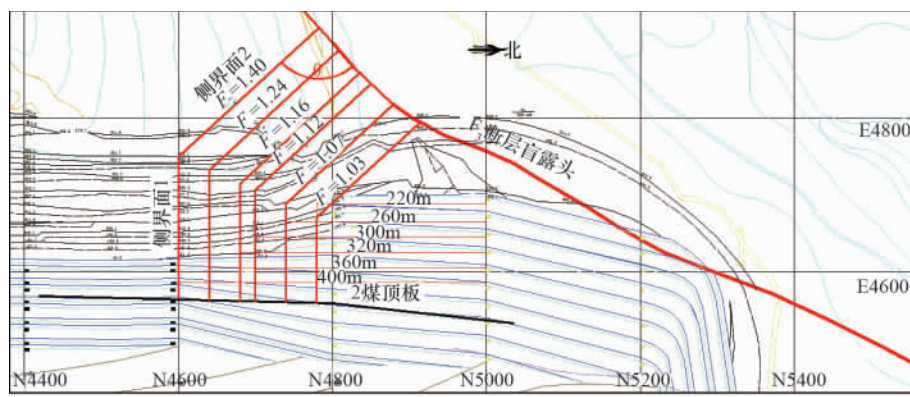


图 7 侧界面 1 与 N5000 距离变化图

Fig. 7 Change of the 5000 cross-sectional distance from the side interface 1

3 控制开采方案

根据对西北帮 F_3 断层区稳定性分析, N4600~4800 边坡稳定性主要受 F_3 断层和底滑面弱层控制; N4800 以北边坡稳定性主要受 F_3 断层控制, N4600 以北进入 F_3 断层影响区, 如图 7 所示。N4700 以北安全系数 F_s 不足 1.1, 需要对原边坡和 F_3 断层之间的潜在滑体进行清理, 按现有开采参数进行扩

帮, 考虑尽量减少扩帮量, 缩小平盘宽度, 每个平盘留挡墙, 防止浮石滚落, 保障安全生产。扩帮后形成 N4600 以北凸边坡, 建立三维计算模型, 如图 8 所示, 对其进行稳定性分析, 计算结果 $F_s=1.59$, 说明清帮后边坡处于稳定状态, 即确定的 F_3 断层区边坡控制开采方案是合理的。

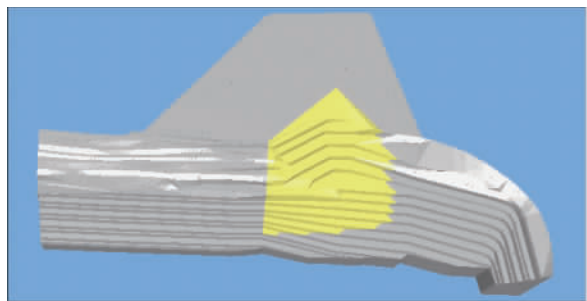


图 8 清帮后凸边坡计算模型 ($F_s=1.59$)
Fig. 8 Calculation model of the convex slope after clear ($F_s=1.59$)

4 结论

由于断层的存在,降低了边坡的整体强度,对边坡的稳定性产生影响。分别对不同滑体形态和不同滑体大小的边坡进行三维极限平衡计算,得到如下结论。

(1)西北帮边坡稳定性主要受 F_3 断层及 2 煤顶板弱层控制, F_3 断层影响区的三维滑坡模式为:沿 F_3 断层面、侧界面和 2 煤顶板弱层面的楔体滑动;

(2)三维极限平衡分析结果表明,三维滑体侧界面由走向分别垂直于边坡走向和 F_3 断层走向的 2 个平面构成,当该 2 个平面与铅直面夹角为 10° 时,滑体的稳定性最差,从而确定了最危险滑体的空间形态;

(3)随着边坡向北推进,从 N4600 开始进入 F_3 断层影响区,越往北发展边坡稳定性逐渐降低,N4600~4800 边坡稳定性受 F_3 断层和 2 煤顶板弱层控制,N4800 以北边坡稳定性主要受 F_3 断层控制,N4700 以北边坡稳定系数不足 1.1,4700 以北边坡有发生滑坡的危险;

(4)根据稳定性计算,建议对 N4700 以北边坡进行扩帮处理,扩帮后稳定性有所提高,但仍需要加强监测,以保证露天矿的安全生产。

参考文献 (References)

[1] 王东,曹兰柱,朴春德,等.露井联采逆倾边坡破坏模式及稳定性评价方法研究[J].中国地质灾害与防治学报,2011,22(3):33-36.

Wang Dong, Cao Lanzhu, Piao Chunde, et al. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2011, 22(3): 33-36

[2] 王永胜,郭静芸,董高峰,等.辽宁抚顺西露天矿北帮边坡稳定性分析及变形分区[J].中国地质灾害与防治学报,2012,23(4):86-91.

Wang Yongsheng, Guo Jingyun, Dong Gaofeng, et al. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2012, 23(4): 86-91.

[3] 漆祖芳,姜清辉,唐志丹,等.锦屏一级水电站左岸坝肩边坡施工工期稳定分析[J].岩土力学,2012,33(2):531-537.

Qi Zufang, Jiang Qinghui, Tang Zhidan, et al. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(2): 531-537.

[4] 江涛,徐卫亚,陈宏,等.受断层切割影响的拱坝坝肩岩体三维稳定性数值分析及加固措施模拟[J].岩石力学与工程学报,2005,24(S2):5840-5844.

Jiang Tao, Xu Weiya, Chen Hong, et al. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(S2): 5840-5844.

[5] 陈祖煜,张宏亮,汪小刚.边坡稳定三维分析的极限平衡方法[J].岩土工程学报,2001,23(5):525-528.

Chen Zuyu, Zhang Hongliang, Wang Xiaogang. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 23(5): 525-528.

[6] 张长亮,李同录,李萍.三维边坡稳定性分析的解析算法[J].中国地质灾害与防治学报,2007,18(1):99-103.

Zhang Changliang, Li Tonglu, Li Ping. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2007, 18(1): 99-103.

[7] 李同录,王艳霞,邓宏科.一种改进的三维边坡稳定性分析方法[J].岩土工程学报,2003,25(5):611-614.

Li Tonglu, Wang Yanxia, Deng Hongke. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(5): 611-614.

[8] 张雷,顾文红,文谦,等.岩堆体边坡稳定性的三维数值模拟分析[J].地下空间与工程学报,2007,3(6):1104-1108.

Zhang Lei, Gu Wenhong, Wen Qian, et al. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(6): 1104-1108.

[9] 程康.三维极限平衡法边坡稳定性分析研究[J].中国地质灾害与防治学报,2001,12(4):18-19.

Cheng Kang. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2001, 12(4): 18-19.

[10] 姜清辉,王笑海,丰定祥,等.三维边坡稳定性极限平衡分析系统软件 SLOPE3D 的设计与应用[J].岩石力学与工程学报,2003,22(7):1121-1125.

Jiang Qinghui, Wang Xiaohai, Feng Dingxiang, et al. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(7): 1121-1125.

(责任编辑 赵业玲)



《科技导报》“卷首语”栏目征稿

“卷首语”栏目每期邀请一位中国科学院院士和中国工程院院士就重大科技现象、事件,以及学科发展趋势、科学研究热点和前沿问题等,撰文发表个人的见解、意见和评论。本栏目欢迎院士投稿,每篇文章约 2000 字,同时请提供作者学术简历、工作照和签名电子文档。投稿信箱:kjdbbjb@cast.org.cn。