

大型复杂露天矿山境界优化方法

王李管^{1,2,3}, 彭平安¹, 裴安磊¹

1. 中南大学资源与安全工程学院, 长沙 410083
2. 中南大学数字矿山研究中心, 长沙 410083
3. 长沙迪迈数码科技股份有限公司, 长沙 410083

摘要 为提高露天矿山的设计效率和经济效益, 针对传统手工方法圈定露天境界时存在的准确度低、工作量大等缺点, 提出在价值块段模型(Economic Block Value Model, EBVM)基础上运用 Lerchs-Grossmann 算法求解大型复杂露天矿山境界优化问题的方法。详细阐述了 EBVM 的构建途径, 构造了求解境界优化问题的线性规划数学模型, 并从图论学的角度介绍了 Lerchs-Grossmann 算法的求解步骤。该方法已在 DIMINE 数字采矿三维平台中得到实现, 并应用于实际露天矿山的境界优化和设计中。结果表明, 该方法能够快速准确地求解出不同参数条件下的最优开采方案, 克服了传统手工方法的弊端, 为矿山的设计生产和资源的优化利用提供了依据和保证。

关键词 露天矿; 境界优化; 价值块段模型; 数字矿山

中图分类号 TD804

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.17.002

Boundary Optimization of Large and Complex Open-pit Mine

WANG Liguan^{1,2,3}, PENG Ping'an¹, PEI Anlei¹

1. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China
2. Research Center of Digital Mine, Central South University, Changsha 410083, China
3. Changsha Digital Mine Infotech Co., Ltd., Changsha 410083, China

Abstract In view of the problems existed in delineating the open-pit boundary by traditional manual work such as low accuracy and heavy workload, a new method is presented on the basis of Economic Block Value Model (EBVM) with applying Lerchs-Grossmann algorithm to solve boundary optimization problems in large and complex open-pit mine, in order to improve the design efficiency and economic benefits. Not only a means of structuring EBVM is elaborated, but also a mathematical model of linear programming is constructed to solving optimization problems. Moreover, steps of Lerchs-Grossmann algorithm are described from the point of view of the set theory. The method has been realized in DIMINE software, and applied to the actual boundary optimization and design of open-pit mines. Results show that the method is able to overcome the shortcomings of traditional manual methods and solve the optimal exploitation scenarios quickly and accurately under different parameters. It provides basis and assurance for mining company with the optimal use of resources.

Keywords open-pit mine; boundary optimization; economic block value model; digital mine

0 引言

在露天采矿作业中, 剥离上部覆盖岩石, 采出下伏有价值的矿石后形成的三维几何空间即为露天境界^[1]。确定最优开采境界既是露天矿山设计和规划的基础, 也是矿山生产经营决策的重要依据, 其结果的准确程度直接影响企业的生产和经济效益^[2]。

现有圈定露天开采境界的方法可以分为传统手工法^[3]和

计算机优化法^[4,5]两大类。在中国, 目前大多数设计院所仍然沿用第一类方法^[6,7], 该方法的实质是在二维地质剖面图上通过逐渐增大境界尺寸来计算平均剥采比和境界剥采比, 当境界剥采比等于经济合理剥采比且平均剥采比小于经济合理剥采比时, 即认为该境界为最优境界。可以看出, 这种方法实际上是一种试错法^[8], 仅完成一个剖面上的圈定即需要重复多次, 工作量大, 耗时费力; 此外利用二维剖面来代替实际三维空

收稿日期: 2013-02-25; 修回日期: 2013-03-04

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2011AA060407)

作者简介: 王李管, 教授, 研究方向为数字矿山与矿山安全, 电子邮箱: liguan_wang@163.com

间,往往会造成一定误差,因此这种方法在结果上并不能达到经济最优,且具有一定随机性。基于此,本文提出利用计算机构建 EBVM 模型并在此基础上运用 Lerchs-Grossmann 算法求解最佳方案,以达到圈定露天开采境界经济最优化的目的。

1 境界优化原理

露天矿山经营过程中,最终产出的矿产品能够给企业带来经济效益(记为 I),伴随整个过程中的剥离废石、采出矿石、矿石加工等环节都会产生资金消耗(记为 O),从理论上讲,一定存在一个使净现值(net present value, $Q_{NPV}=I-O$)达到最大的采剥方案。境界优化的实质即是求解在给定约束条件下使总利润达到最大的露天壳方案^[9]。

1.1 EBVM 模型的构建

图 1 为一简单 EBVM 模型的示意图,其基本思想是利用空间上连续的立方小块拟合表面模型,各单元块以块质心点的空间坐标和块的尺寸唯一标识,这样这些块即可用于承载空间中该处的特征信息。为精确表征矿体的边界形态,采用八叉树结构存储 EBVM 模型——若单元块完全位于表面模型内,则块不再分解,否则将分成 8 个大小相等的立方块,直至不再有块需要分解或达到约束条件^[10,11]。EBVM 模型内单元块的特征值主要为假设将其开采后将获得的净现值,对于矿石块,该值为正;对于废石块,该值为负。

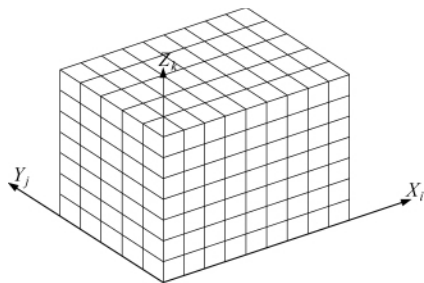


图 1 简单 EBVM 模型示意图
Fig. 1 Scheme of simple EBVM model

EBVM 模型的总净现值计算公式为

$$Q_{NPV} = \sum [t_i abc m_o (S - C_o) - (1 - t_i) abc m_w C_w] \quad (1)$$

式中, Q_{NPV} 为 EBVM 模型的总净现值(元); a, b, c 分别为模型中单元块 x, y, z 方向上的尺寸 (m); m_o 为矿石体重 (t/m^3); m_w 为废石体重 (t/m^3); S 为单位质量矿石销售价格 (元/t); C_o 为单位质量矿石剥离、运输、选矿、销售等成本 (元/t); C_w 为单位质量废石剥离成本 (元/t); t_i 为 0~1 变量,计算时遍历 EBVM 模型内所有单元块,若 i 为矿石块,则 $t_i=1$,若 i 为废石块,则 $t_i=0$ 。

1.2 境界优化问题的线性规划模型

为便于阐述问题,将 EBVM 模型简化为图 2 所示平面模型,图中每个块上部数字代表该块开采后将获得的净现值,下部数字代表块的编号。边坡角是露天开采中极为重要的参数之一^[12]。在计算机解答中,边坡角约束也是考虑开采某个块

时覆盖其上部的哪些块需要开采的主要因素。如图 2 所示,假定安全边坡角是 45° ,那么在开采块 8 前,块 1、2 和 3 首先需要被开采。

生产中,只关心有价值块的开采。在边坡角为 45° 的情况下,开采块集 $Z_1=\{2, 3, 4, 5, 6, 9, 10, 11, 16\}$ Q_{NPV} 值最大,为 10。很显然,开采块 15 是不经济的,因为其前提是块 1 和块 8 先被开采, Q_{NPV} 值为 -1。由于开采块 6、11 和 16 其 Q_{NPV} 值为 0,因此块集 $Z_2=\{2, 3, 4, 5, 9, 10\}$ 是另一种较小的境界方案。

-1	+1	+2	-1	+1	-1
1	2	3	4	5	6
-2	-1	+3	+4	-1	-2
7	8	9	10	11	12
-3	-2	+1	+2	-1	-2
13	14	15	16	17	18

图 2 简化的平面 EBVM 模型
Fig. 2 Simplified model of plane EBVM

从图论学角度看,境界优化问题可以简化为有向图 $G=(V, A)$ 的问题,其中 V 代表节点集, A 代表弧集^[13]。将 EBVM 模型中的单元块抽象为一个节点表示,并赋予一定的权重,即 NPV 值。若块 i 能被开采的前提是块 j 已被采出,那么节点 i 到节点 j 之间由一条弧连接。这样该问题即等价于求权重和最大的节点集,也即是求图 G 中的最大闭包。

定义如下变量: V 为节点集; A 为弧集 (i, j) , 其中块 i 能被开采的前提是块 j 已被采出; c_i 为采选块 i 的总成本; r_i 为采选块 i 获得的收益; p_i 为采选块 i 获得的净现值, $p_i=r_i-c_i$; x_i 为 0-1 变量,若块 i 被开采,则 $x_i=1$,否则 $x_i=0$;

得境界优化的线性规划数学模型:

$$\begin{aligned} \max \quad & \sum_{i \in V} p_i x_i \\ \text{st} \quad & x_i \leq x_j, (i, j) \in A \\ & x_i \in \{0, 1\}, i \in V \end{aligned}$$

约束条件 $x_i \leq x_j$ 表示块 j 必须先于块 i 开采。以图 2 模型为例,代入式(2),得:

$$\begin{aligned} \max \quad & -x_1 + x_2 + 2x_3 + \dots + 3x_9 + 4x_{10} + \dots - x_{17} - 2x_{18} \\ \text{st} \quad & x_7 \leq x_1 \\ & x_7 \leq x_2 \\ & x_8 \leq x_1 \\ & x_8 \leq x_2 \\ & x_8 \leq x_3 \\ & \dots \\ & x_{18} \leq x_{11} \\ & x_{18} \leq x_{12} \\ & x_i \in \{0, 1\}, i=1, 2, \dots, 18 \end{aligned} \quad (3)$$

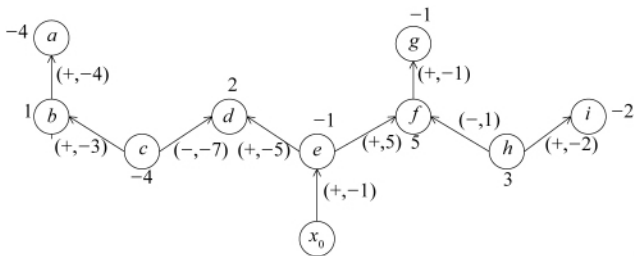
求解式 (3), 得到露天境界优化结果, 块集 $Z_1 = \{2, 3, 4, 5, 6, 9, 10, 11, 16\}$ 即为最终需要开采的矿体。

2 Lerchs-Grossmann 算法实现

Lerchs-Grossmann 算法通过 EBVM 模型构造有向图 G, 将境界优化问题转化为求解图 G 中的最大闭包问题。算法实现过程如下: 在图 G 中构造虚根 x_0 和虚弧 (x_0, x_i) , 同时赋予 x_0 负的权值, 以防止 x_0 进入最大闭包。无闭合圈的图称为树, 包含虚根 x_0 的树称为有根树, 用 T 表示。随后在图 G 中建立树 T_0 , 并在给定规则下变换为继承树 T_1, T_2, \dots, T_n , 直至不能变换, 算法停止, 最终树中最大闭包所构成节点的集合即为最佳开采境界^[14]。

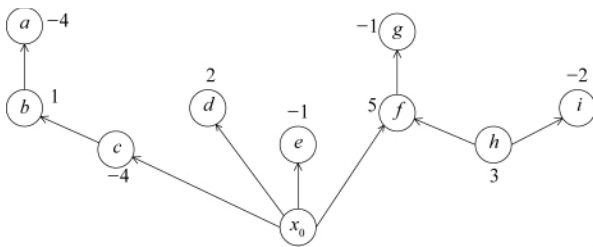
假设将树中的一条弧 a_i 删去, 树变成两部分, 其中不包含根的那部分称为树的一个分支, 用 T_i 表示, 称 a_i 支撑 T_i 。分支的权值 q_i 等于该支中各节点的权值之和。在有根树 T 中, 树中方向背离根的弧, 即从弧的终端沿弧的指向追溯不到根的弧, 称为 P 弧, 反之, 树中方向指向根的弧则称为 M 弧。权值大于 0 的 P 弧或权值不大于 0 的 M 弧统称为强弧, 强弧所支撑的分支称为强支, 反之即为弱弧、弱支。如果 T 中连接 x_i 和 x_0 的所有弧中至少存在一条强弧, 则称 x_i 为强节点。当 T 中所有强弧都与根节点 x_0 直接相连, 这样的树称为正则树, 最大闭包即由正则树中所有强节点的集合构成。

为解释这些概念, 如图 3(a) 所示, 图中各节点的权值标记在节点旁边, (\pm, q_i) 用来描述节点的状态, 其中“+”和“-”分别代表 P 弧和 M 弧, q_i 代表该弧所支撑分支的权值。从图中可以看出, (c, d) 和 (e, f) 是强弧, 其余为弱弧。节点 a, b, c, f, g, h 和 i 是强节点, d, e 是弱节点。图 3(b) 为正则化后的树。



(a) 具有各种弧的树

(a) Tree with a variety of arcs



(b) 正则化后的树

(b) Tree obtained after normalization

图 3 算法演示

Fig. 3 Algorithm demonstration

算法的实现步骤简述如下:

步骤 1: 首先构造正则树 T_0 , 其弧集为 $\{(x_0, x_i) : x_i \in V\}$ 。令 Y_0 为树 T_0 中强节点的集合。初始化 $i=0$, 执行步骤 2。

步骤 2: 搜索图 G 中满足条件 $x_k \in Y_i, x_l \notin Y_i$ 的弧 (x_k, x_l) , 其中 $x_k \in V, x_l \in V$, 然后执行步骤 3; 若没有满足条件的弧, 则停止, Y_i 即是图 G 的最大闭包。

步骤 3: 在 T_i 中找出 x_0 到 x_k 的强 P 分支, 该分支是唯一的。若 x_0 与另一节点 $x_m \in V$ 相连, 则用弧 (x_k, x_l) 代替弧 (x_0, x_m) , 形成树 T'_i , 执行下一步。

步骤 4: 正则化树 T'_i , 其中 $T'_i = T_i + (x_k, x_l) - (x_0, x_m)$, 正则化后产生树 T_{i+1} 。找出 T_{i+1} 的强点集合 Y_{i+1} 。令 $i+1=i$, 转至步骤 2。

3 工程实例

基于 EBVM 模型的 Lerchs-Grossmann 算法已应用于 DIMINE 数字采矿三维平台中。以澳大利亚西部某大型铁矿为例, 该矿矿区地形平坦, 矿床呈陡倾条带状, 长达 18km, 宽 200~300m, 厚度最大可达 150m, 倾角较陡, 矿岩稳固性好, 总资源储量约 8.9 亿 t。设计年产矿石 1500 万 t, 最终产品 TFe65% 的铁精粉 450 万 t/a。根据设计要求, 首采区拟先开采 25 至 44 线号勘探线之间品位较高部分矿体。

3.1 EBVM 模型的建立

首先根据地质详查提供的原始资料, 利用 DIMINE 软件建立首采区 DTM (Digital Terrain Model) 数字地表模型、钻孔地质数据库以及矿体模型^[15], 这些都是 EBVM 模型构建的基础, 如图 4 所示。本次工作共收集有钻孔 100 个, 测斜数据 446 条, 样品化验数据 4539 条, 岩性数据 199 条, 保证了最终结果的可靠性。通过原始数据所揭示的样品空间的各向异性分布, 运用普通克里格插值方法并结合式 (1) 建立该矿 EBVM 模型, 如图 5 所示。

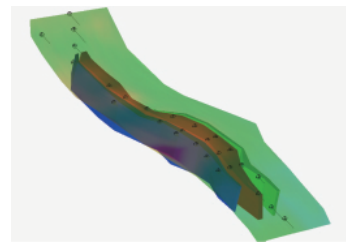


图 4 DTM、地质数据库与矿体模型复合

Fig. 4 DTM, Geological database, and orebody model

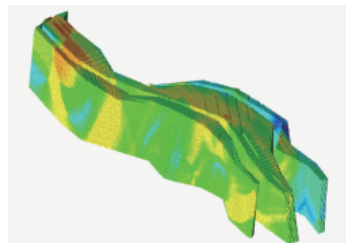


图 5 首采区 EBVM 模型

Fig. 5 EBVM model of first mining area

3.2 参数设置

包括境界优化参数和露天坑设计参数两部分,参数主要来源于采矿设计手册规范、地质详查报告、现场工业实验等。

境界优化参数中边坡角为 45° ,采矿成本 18 元/t,废石成本 14.5 元/t,选矿成本 72 元/t,其他成本 20 元/t,回采率 96%,贫化率 4%,选矿回收率 80%,矿石比重 3.2t/m^3 ,废石比重 2.88t/m^3 ,边界品位 20%,铁精粉销售价格 1040 元/t;露天坑设计参数中台阶高度为 12m,并段高度 24m,安全平台宽度大于等于 8m,清扫平台宽度 16m,运输平台宽度 26m,台阶坡面角

60° ,道路坡度 8%,缓冲段距离 50m,最小底宽 30m,最高台阶标高 370m,最低台阶标高根据设计方案的不同有所变化。

3.3 优化结果与分析

将上述参数输入 DIMINE 露天境界优化模块进行计算,得最佳开采境界,结果如图 6(a)所示;在优化境界基础上,继续对露天开采坑进行设计,根据道路运输方式、最低台阶水平等的不同,综合考虑 3 套不同方案,方案间的经济参数对比见表 1。经比较,最终推荐方案 2 作为最佳开采设计方案,并可快速出具 AutoCAD 图纸提交业主,见图 6(b)和图 6(c)。

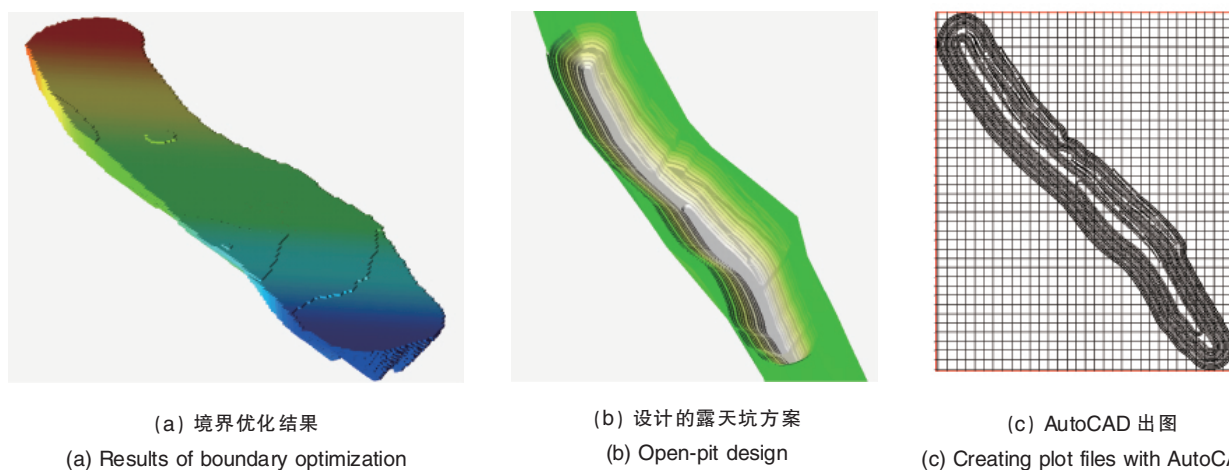


图 6 最佳开采境界
Fig. 6 Best boundary of open-pit mining

表 1 设计方案经济对比

Table 1 Economic comparison between different design schemes

名称	方式	可采矿量/ 10^4t	平均品位/%	平均剥采比	
				体积比	质量比
方案 1	最低台阶标高 128m, 两条折返式道路	44249	26.28	2.26	1.99
方案 2	南部最低台阶标高扩展至 104m, 两条折返式道路	43728	26.35	1.82	1.61
方案 3	南部最低台阶标高扩展至 104m, 新设计两条道路	43955	26.34	1.93	1.70

4 结论

露天矿境界优化是露天矿设计和生产管理的重要环节。针对露天境界圈定的复杂性和传统手工方法的诸多缺点,提出了在 EBVM 模型基础上运用 Lerchs-Grossmann 算法求解大型复杂露天矿山境界优化问题的方法,并应用于工程实践。主要结论如下:

(1) 采用八叉树结构构建 EBVM 模型,运用图论学方法将 EBVM 抽象为节点与有向边的集合,从而将境界优化问题简化为求解图中最大闭包问题,简单方便,快捷有效。

(2) 该方法能够快速准确地求解出不同参数条件下的最优开采方案,克服了传统手工方法的弊端,为矿山的设计生

产和资源的优化利用提供了依据和保证。

(3) 不足之处在于在矿山服务年限较长的情况下,统一以静态平均指标代替动荡变化的市场价格并不能最准确地反映真实情况。基于时间变化下的动态优化方法是未来露天矿境界优化技术的难点与发展方向。

参考文献 (References)

[1] 谭锐, 陈爱明, 瞿金志. 矿业软件在露天境界优化中的运用[J]. 有色金属设计, 2010, 37(2): 1-8.
Tan Rui, Chen Aiming, Zhai Jinzhi. Nonferrous Metals Design, 2010, 37(2): 1-8.

[2] Kennedy B A. Surface mining[M]. Society for Mining Metallurgy, 1990.

- [3] 王青, 王智静. 露天开采整体优化-理论、模型与算法[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2000.
Wang Qing, Wang Zhijing. The theory, model and arithmetic in open mines whole optimization[M]. Beijing: Metallurgy Industry Book Concern, 2000.
- [4] Armstrong M, Galli A. New approach to flexible open pit optimisation and scheduling[J]. Mining Technology, 2012, 121(3): 132-138.
- [5] Van Eldert J. Stochastic open pit design with a Network flow algorithm-application at escondida norte chile [D]. Delft: Delft University of Technology, 2011.
- [6] 石忠民, 冯仲仁. 确定露天开采境界的原则和手工法 [J]. 金属矿山, 1991, 186(12): 21-25.
Shi Zhongmin, Feng Zhongren. Metal Mine, 1991, 186(12): 21-25.
- [7] 赵文斌, 李小武. 谈谈用传统方法确定露天境界 [J]. 有色金属设计, 2009, 36(4): 37-41.
Zhao Wenbin, Li Xiaowu. Nonferrous Metals Design, 2009, 36(4): 37-41.
- [8] 王青, 史维祥. 采矿学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2001.
Wang Qing, Shi Weixiang. Mining [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2001.
- [9] Dimitrakopoulos R, Farrelly C T, Godoy M. Moving forward from traditional optimization: grade uncertainty and risk effects in open-pit design[J]. Mining Technology, 2002, 111(1): 82-88.
- [10] Askari-Nasab H, Awuah-Offei K. Open pit optimisation using discounted economic block values[J]. Mining Technology, 2009, 118(1): 1-12.
- [11] 荆永滨, 王李管, 毕林, 等. 复杂矿体的块段模型建模算法[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2010, 38(02): 97-100.
Jing Yongbin, Wang Liguan, Bi Lin, et al. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Nature Science Edition, 2010, 38(02): 97-100.
- [12] 李全明, 付士根, 王云海. 露天开采边坡稳定性分析方法及灾害防治措施研究[J]. 中国安全科学学报, 2007, 17(2): 55-60.
Li Quanming, Fu Shigen, Wang Yunhai. China Safety Science Journal, 2007, 17(2): 55-60.
- [13] Amankwah H. Mathematical optimization models and methods for open-pit mining[D]. Linköping: Linköping University, 2011.
- [14] Hochbaum D S, Chen A. Performance analysis and best implementations of old and new algorithms for the open-pit mining problem [J]. Operations Research, 2000, 48(6): 894-914.
- [15] 王李管, 曾庆田, 贾明涛, 等. 复杂地质构造矿床三维可视化实体建模技术[J]. 金属矿山, 2006, 366(12): 46-49.
Wang Liguan, Zeng Qingtian, Jia Mingtao, et al. Metal Mine, 2006, 366(12): 46-49.

(责任编辑 赵业玲)

· 学术动态 ·



中国科协与捷克科技联续签合作协议

应中国科学技术协会邀请,捷克科学技术学会联合会主席丹尼尔·汉纳斯(Daniel Hahus)、捷克科学技术学会联合会国际部部长卓拉·维多凡科娃(Zora Vidovencova)2013年5月18~27日来华访问,出席第十五届中国科协年会,并续签《中国科学技术协会与捷克科学技术学会联合会合作协议》。

2013年5月27日,中国科协书记处书记张勤、捷克科技联主席丹尼尔·汉纳斯代表双方签署新协议。

协议约定:相互及时通报各自举行的国际会议和其他重要进展;互派学者进行学术交流和考察活动;共同组织学术会议、研讨会以及其它活动;在咨询活动方面进行合作;共同组织两国青年之间的科技交流活动;在双方共同参加的国际组织和多边活动中就重要问题保持磋商和协调立场。

1994年,中国科协与捷克科技联建立合作关系并签署了合作协议。2008年4月,时任中国科协副主席、书记处书记齐让率团访问捷克,与捷克科技联签署双边合作协议。2010年3月,时任中国科协常务副主席、书记处第一书记邓楠获颁捷克科技联首次设立的最高荣誉奖威伦伯格奖(Christian Willenberg Award)。

详情见中国科协网 <http://www.cast.org.cn/n35081/n35473/n35518/14757926.html>。