

输煤输电的技术经济比较研究及其重要战略意义

李立涅¹, 饶宏¹, 张东辉¹, 范新宽², 徐国新³, 曾沅⁴, 荆勇¹

(1. 南方电网科学研究院, 广州 510080; 2. 神华国华电力, 北京 100025; 3. 中国电力工程顾问集团公司, 北京 100120;
4. 天津大学, 天津 300072)

摘要: 煤炭是我国主要的一次能源资源, 由于与区域经济发展程度呈逆向分布, 大规模、远距离的煤炭资源应用将会长期存在。输煤与输电的应用方式是一个各方关注的问题, 也是一个长期争论的问题。本文着重研究通过铁路运输输煤和通过特高压直流技术输电这两种方式, 从煤炭清洁高效利用、综合经济效益、环境土地资源占用、安全性等方面进行输煤输电综合比较模型分析, 提出了定量结论: 在 2012 年的主要指标下, 1 800 km 是输煤输电的指标性距离。即: 1 800 km 以下输电有优势, 大于 1 800 km 输煤有优势。预测了未来输煤输电发展趋势, 指出我国应坚持输煤输电并举战略方针。

关键词: 输煤输电; 特高压直流; 铁路运输; 煤炭的清洁高效利用

中图分类号: F42 **文献标识码:** A

Comparison between Coal Transportation and Power Transmission in Terms of Technology and Cost

Li Licheng¹, Rao Hong¹, Zhang Donghui¹, Fan Xinkuan², Xu Guoxin³, Zeng Yuan⁴, Jing Yong¹

(1. Electric Power Research Institute, CSG., Guangzhou 510080, China; 2. Guohua Electric Power Corporation of the China Shenhua Energy Company Ltd, Beijing 100025, China; 3. China Power Engineering Consulting (Group) Corporation, Beijing 100120, China;
4. Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Coal is China's primary energy source in long time. Since the distribution of coal is reverse with the level of economic development, large-scale and long-distance utilization of coal, in the form of coal transportation or electric transmission, is a long-term task. The comparison between coal transportation and power transmission has drawn much attention and also is a long-term controversial problem. This paper focuses on coal transportation by rail and power transmission by ultra high voltage direct current (UHVDC) technology. The comprehensive analysis between coal transportation and power transmission is made in terms of clean and efficient utilization of coal, comprehensive economic benefits, resources of environment, land and water, and security. The quantitative conclusions are provided: the distance of 1800 km is the indicator of balance point. Namely, within 1800 km the power transmission usually has advantage, and coal transportation has advantage beyond 1800 km. This paper predicts the developing trend of coal transportation and power transmission and suggests both coal transportation and power transmission should be developed at the same time.

Key words: coal transportation and power transmission; UHVDC; coal transportation by rail; clean and efficient utilization of coal

收稿日期: 2015-11-13; 修回日期: 2015-11-24

作者简介: 李立涅, 南方电网科学研究院, 教授级高级工程师, 中国工程院院士, 长期从事电网建设, 电网工程、直流输电和交直流并联电网运行技术研究; E-mail: lilc@csg.cn

本刊网址: www.enginsci.cn

一、前言

煤炭在我国发电消耗一次能源结构中占有绝对优势,即使未来煤电占电力的比例逐渐降低,煤炭仍将是我国未来能源的主要资源,煤电占主导的局面在未来难以改变^[1,2]。我国煤炭主要分布在西部和北部,而主要消费地在东部,煤炭能源资源的分布与区域经济发展程度呈逆向分布。随着我国煤炭开发重心的进一步西移,北煤南运、西煤东调规模在未来十年内将快速增长。因此,我国煤炭能源资源的大规模远距离传输是长期的、必然的任务,实现煤炭资源的高效清洁经济运输是煤炭高效清洁利用的重要组成部分。

目前,我国运煤资源调配手段主要包括运煤和输电两种。早期的输煤输电比较已有结论^[3]:①远输煤、近输电:输送距离800 km以内倾向于输电,1 000 km以上倾向于输煤,800~1 000 km和煤炭的发热量密切相关;②高热值煤倾向于输煤,低热值煤倾向于就地发电外送。但是早期的输煤输电比较是在当时的输煤输电技术下所作的比较,随着以特高压直流为代表的先进输电技术的突破和成熟应用,我国煤炭开发重点西移等关键因素的变化,输煤输电的比较结论也会发生巨大变化。本文就此展开分析,并对我国在先进输电技术下的输煤输电战略给出建议。

二、输煤输电规模发展

由我国能源资源和生产力布局逆向分布特点决定,在今后一段时间内,京津冀鲁、长三角(江浙沪)、两广和华中东部(豫鄂湘赣渝)仍是全国主要一次能源调入(包括送入电力)地区^[4]。

在输煤输电手段上,铁路运煤由于其运力大、成本低、耗能小等优点,仍是最主要的运煤方式,2010年铁路运煤近 2×10^9 t,占煤炭运输总量的60%以上;在煤电跨区输电方式上,目前主要是高压交流输电和 ± 500 kV高压直流输电。根据文献[4]内容预计,2015年全国煤炭调出省区净调出量约 1.51×10^9 t,较2010年增加 2.9×10^8 t,相对于2010年,2015年煤炭铁路运力增长可实现新增 3×10^8 t的调运,基本满足煤炭外运和调入的需求。根据文献[2]内容估计,2020年我国

晋陕蒙宁地区及新甘青藏地区煤炭净调出量为 $1.6 \times 10^9 \sim 1.8 \times 10^9$ t,比2015年极值增长 3×10^8 t左右。

由于煤炭发电利用在2030年前后达到最大值,2020年其值已和2030年基本接近,再考虑到西部、北部煤炭主要产区负荷的快速增长,因此,煤炭能源流预计在2020—2030年达到最大值,随着煤炭清洁高效利用和西北煤炭基地外运通道的发展,基本可以认为,2030—2050年电煤运输不存在全局性运力紧张的问题,主要需解决新疆等偏远煤炭基地煤炭外运的问题。

输煤输电的核心比较年份应该在2020年左右。当前对于我国远景输煤输电的争议主要在输煤输电的比例。根据文献[4]内容估计,主要煤炭基地输煤输电比例由2010年的8.7:1调整至2020年的5:1~4:1。

三、先进输电技术的发展

近年来,我国先进的远距离大容量输电技术发展取得重大突破,特别是 ± 800 kV特高压直流输电技术的成功应用。特高压直流是指 ± 800 kV及以上的直流输电。2009年12月,世界首个 ± 800 kV特高压直流输电工程——云广特高压直流输电示范工程投产,输送容量为 5×10^6 kW,送电距离约1 400 km,满载损耗仅约5.8%,充分发挥了特高压直流输电的优势。

特高压直流输电由于电压高,所以更适合大功率、远距离、低损耗输电^[1,5]。 ± 800 kV特高压直流目前输送容量可达 6.4×10^6 kW,送电距离超过1 500 km,甚至超过2 000 km,输送相同容量的线路损耗相当于 ± 500 kV直流的64%(以相同导线来比); $\pm 1 100$ kV特高压直流输送容量可达 7.5×10^6 kW,送电距离可达2 700 km,适合新疆等偏远煤炭基地电力送出。采用特高压直流输电技术有利于加大输电规模,降低输电损耗,还可以节约大量的输电走廊资源,限制负荷中心短路容量,利于电网分区;与交流输电相比,系统中间无落点,可点对点、大功率、远距离直接将电力送往负荷中心。但是远距离输电的安全问题应该引起足够重视,为了规避风险,单个通道的输送容量不宜过大。

2030 年我国的输电网络建设中, 大容量、远距离输电方式将以特高压交直流输电技术为主。一方面, 采用特高压直流输电方式实现我国西南水电基地与西北火电和新能源基地的大规模电能外送; 另一方面, 可采用特高压交流输电、500 kV 大容量输电技术、柔性输电技术、直流互联等方式实现电网互联。

四、远距离输煤输电比较

早期的输煤输电比较是在当时的输煤输电技术下所作的比较。在新形势下, 我国煤炭开发重点西移, 输煤输电的距离和容量都大大增加; 输送手段上仍主要采用铁路作为输送方式, 输电由于特高压直流等先进的远距离大容量输电技术的突破, 远距离大容量输电距离、容量和经济性都取得了巨大的提升; 环境和水等制约因素也有较大变化。综上所述, 有必要重新从能源输送损耗、经济指标、环境及水资源制约因素、土地占用及运行安全等方面进行输煤输电比较评估^[1]。

下面主要比较路径相近的铁路输煤和输电, 如我国西北至东部地区陆上输煤输电。输煤输电均新建通道, 采用现在较先进的技术, 输煤采用新建以运煤为主的电气化重载复线铁路, 输电采用最先进的远距离大容量输送技术——特高压直流输电技术。

(一) 能源利用效率比较

从长期来看, 提高能源利用效率将带来煤炭等能源需求的降低、碳排放和污染物排放的降低等全方位的好处, 因此提高能源利用效率、节能优先是能源战略的首选, 也是输煤输电比较论证的核心主题之一。

评估输煤输电能源利用效率的方法, 是在煤炭送端地区相同热值煤炭的情况下, 计算比较输煤输电不同方案的受端落地的上网电量。本文输煤输电能源利用效率比较主要考虑两个方面: 一是我国送端地区普遍缺水, 主要采用空冷机组, 导致供电煤耗的差异(空冷机组发电煤耗较湿冷高 15~20 g 标准煤·(kW·h)⁻¹[6]); 二是输煤与输电过程中能源损耗的差异, 本文考虑为输煤输电路径相同。

通过比较, 高热值煤炭一般输煤方式能源利

用效率明显高于输电方式, 以 5 500 kcal·kg⁻¹(1 cal=4.186 8 J) 热值煤炭为例, 我国输煤方式比输电方式煤炭能源利用效率一般高 10% 左右, 其中, 空冷机组供电煤耗较湿冷高是输煤输电效率差异的主要原因, 占等效煤耗差的 55%~63%。以宁东送浙江 1 860 km 的距离为例, 经测算, 输煤方案等效煤耗 306.9 g 标准煤·(kW·h)⁻¹, 输电方案等效煤耗 338.8 g 标准煤·(kW·h)⁻¹。低热值煤炭(如 4 000 kcal·kg⁻¹) 远距离输送一般输煤方式能源利用效率仍高于输电方式, 等效煤耗输煤方式比输电低 5% 左右, 但是采用洗精煤输煤、洗中煤输电能源利用效率可能接近甚至超过输煤方式。

(二) 经济性比较

输煤输电的经济性比较一般是以相同送端的起始点和受端的落地点, 基于受端落地点的成本电价为目标值进行比较。输煤输电是关系到我国能源输送方式的重大问题, 战略性经济比较应该站在国家的角度, 采用基于成本的经济比较方法, 进行一般性的输煤输电经济性比较。

比较采用的典型边界条件和参数如下:

电气化铁路的单位造价取 8×10^7 元·km⁻¹, 铁路年输送量 2×10^8 t 原煤, 综合考虑铁路的运行维护费用、财务成本等, 铁路输煤单位运费成本约 0.08 元·(t·km)⁻¹, 在受端建设水冷发电机组(单机容量 1 000 MW)。输电方式考虑采用 ±800 kV 特高压直流线路, 在送端建设空冷发电机组(单机容量 1 000 MW)。

1 000 MW 的火电机组的单位造价约为: 水冷机组 3 600 元·kW⁻¹, 空冷机组 3 900 元·kW⁻¹, 年运行小时数按 5 500 h 考虑。1 000 MW 水冷火电机组的单位煤耗为 290 gce·(kW·h)⁻¹, 空冷机组为 305 gce·(kW·h)⁻¹。输煤送端原煤成本价 250 元·t⁻¹, 输电送端原煤成本价 150 元·t⁻¹。

其他典型边界条件及参数见参考文献 [1]。

根据以上边界条件, 计算不同输送距离下的特高压输电和输煤方式的单位电量成本, 如图 1 所示。由图可见, 当输送距离小于 1 808 km 时, 输电方式每度电的成本较低; 当输送距离大于 1 808 km 时, 输煤方式每度电的成本较低, 图中输电和输煤方式的平衡点为 1 808 km。需要说明的是, 图中的近距离输电也采用了特高压直流输电计算输电成本, 实

实际上,近距离输电会采用更低成本的高压交流输电,单位电量成本会更低,输电的优势更明显。

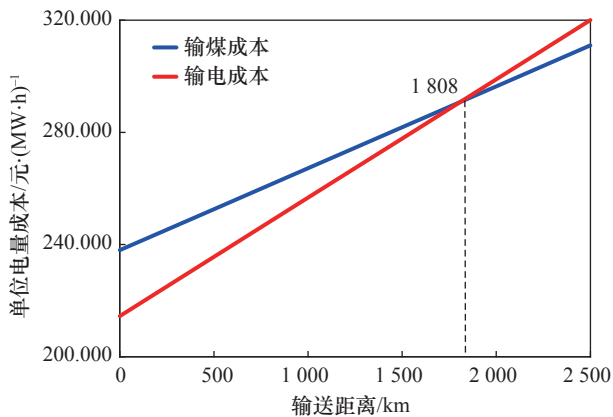


图1 输煤输电经济比较与输送距离关系图

其他重要边界条件的敏感性分析如下所示。

1. 输煤和输电两种方式的送端煤价

上文比较中输煤和输电两种方式的送端煤价差为 $100 \text{ 元} \cdot \text{t}^{-1}$, 这个煤价差是现实存在的, 是输煤输电经济性比较最关键的影响因素之一, 包括从煤矿矿口到编组车站之间的运输成本差异, 以及煤炭装车费、换装费、车皮“点装费”等, 此外还包括销售环节的费用、煤炭输出地区的环保基金等收费, 合计可能达 $50 \sim 120 \text{ 元} \cdot \text{t}^{-1}$ 。

送端煤价输煤一般高于输电, 输煤原煤成本价高于输电 $100 \text{ 元} \cdot \text{t}^{-1}$ 可作为典型值。图2分析了不同送端煤价差与输煤输电经济比较的关系, 可见当送端煤价差分别是 $80 \text{ 元} \cdot \text{t}^{-1}$ 、 $100 \text{ 元} \cdot \text{t}^{-1}$ 、 $120 \text{ 元} \cdot \text{t}^{-1}$ 时, 输煤输电成本曲线的交点分别是 1184 km 、 1808 km 和 2433 km 。

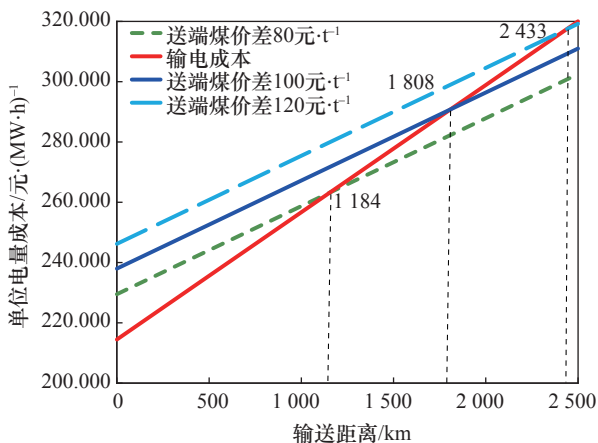


图2 输煤输电经济比较与送端煤价差关系图

2. 输煤和输电的路径

输煤输电一般情况下路径有相当大的区别, 一般情况下, 输煤的运距比输电略长。以铁路运距增加为输电线路的1.2倍计算, 铁路建设部分的成本将增加20%, 输煤成本电价将增高。以输煤运距2000 km为例, 若运距增至2400 km, 输煤成本电价将增加 $10 \text{ 元} \cdot (\text{MW} \cdot \text{h})^{-1}$ 左右。

3. 综合成本分析

以上分析仅考虑了显性的原材料和工程建设维护成本, 实际上, 输煤输电全面成本分析还应该综合考虑隐性环境成本和可靠性成本等方面的差别。另外, 近距离输电(如500 km以下)会采用更低成本的高压交流输电, 单位电量成本会更低。据此, 可以绘制出远距离输煤输电的综合成本比较示意图, 如图3所示。

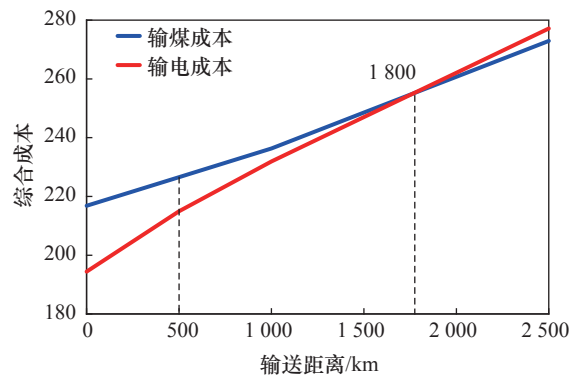


图3 输煤输电综合成本与输送距离关系示意图

由图3可见, 输煤输电的经济比较总体趋势是, 近距离输电有优势, 远距离输煤有优势; 本文根据当前典型边界条件研究提出, 输送距离1800 km左右可以看成是输煤输电趋势上的平衡点; 总体上, 输送距离超过此平衡点时, 输煤有优势, 输送距离小于此平衡点时, 输电有优势, 特别是输送距离500 km以下时输电优势更明显。以上的比较反映了输煤输电总体上经济性的平衡点和趋势, 具体项目随着边界条件的变化可能会有较大的差异, 需要具体问题具体分析。

(三) 环境因素和水资源因素制约比较

在环境因素和水资源因素制约方面, 不管燃煤电站建设在我国东部还是西部, 都将受到环境空间和水资源供应能力因素制约, 需要综合考虑。

环境问题也是煤炭开发的重要制约因素, 无

论东部和西部都存在环境制约问题，东部地区目前环境制约更大。但是我国的《火电厂大气污染物排放标准》(GB 13223—2011)限制标准已达到发达国家要求，电力生产总体上讲是洁净生产。重点为应随着产业结构的调整，加大煤炭利用中电煤的比例，加强电煤之外另外 50% 燃煤排放的控制。

我国西北煤炭基地缺水问题是很严重的，解决富煤地区的节水问题是煤炭开发和就地发电的关键，水资源供应能力实际上是西部地区火电开发规模的最大限制因素。

(四) 节省土地资源比较

从节省土地资源的角度考虑，输煤方式与输电方式比较，需确定相同的起点和终点，再比较可行的路径方案。如果采用铁路运煤，输煤铁路直接占用走廊全部土地；输电方式的占地分为直接占用土地（塔基及变电站直接占用土地）和间接占用土地（使用性质有所限制的土地，包括输电走廊下土地）。总体来说，输煤相对输电节省使用性质有所限制的土地，但直接占用土地面积要大。

(五) 其他因素比较

在运行安全性方面，总体来说，输煤运行风险相对较小。输电在满足电网相关设计规程和稳定导则的情况下，电网的运行风险是可控的，安全是有保障的，但单个特高压直流输送容量应该要考虑到受端电网的承受能力，同时需加强负荷中心地区的清洁煤电建设，提高受端电网的电压支撑能力和紧急情况下的电力供应安全。

在区域协调发展效益方面。单纯输煤的产品附加值较低，对当地经济社会发展的带动作用较小，但是建设铁路可以取得较好的综合利用效益。铁路运输的功能可发挥多重作用，平时可供民用，战时可以军用；既能运货，又能运客，综合利用效果较好，而且能够带动沿线铁路站点地区的经济发展。输电方式延长了能源输出地的煤炭开发利用产业链，产品附加值较高，对于拉动当地经济的发展和产业结构升级具有较强的作用。输电方式通过扩大联网，可取得一定的联网效益。

通过综合比较研究，与以往输煤输电相比，随着特高压直流为代表的先进输电技术的发展，我

国输煤输电平衡距离大幅加大，总体战略上，在 1 800 km 以上输煤综合优势明显，一般可以看成输煤输电的平衡点。具体项目需综合考虑环境水资源制约因素、区域经济协调发展、煤电一体化等，因地制宜采取输煤输电。

五、输煤输电的战略建议

根据文献 [2] 中内容来预计，我国未来科学安全的煤炭产能约 3/4 在晋陕蒙宁以及新疆地区。然而，西北煤炭基地离负荷中心距离远，煤炭外运能力紧张，特别是新疆地区，需通过输煤、输电等多种方式加强西北煤炭基地外送能力。

总体上来说，由于远距离铁路输送煤炭不管是能力还是效率均高于输电方式，加上西北煤炭基地受水资源限制等原因，煤炭基地在满足本地负荷需要后，不管近中期还是长期，煤炭外送主要还是输煤方式，输煤为主的战略格局不会变。

随着我国特高压直流输电技术为代表的先进输电技术的发展，输煤输电平衡距离已经大大增加，输电综合优势距离可达 1 800 km 左右，我国煤炭能源输送方式有条件进一步优化。此外，占约 20% 比重的低热值煤种、洗中煤和煤矸石不适宜运输、需要建设煤电电源就地转化^[7]，就地消纳或远距离电力外送。综合考虑能源输送系统效率、输电输煤经济性、铁路运力制约、东部发展煤电的环境约束、区域经济发展等因素，长期战略上，我国远距离输送煤电的比重将进一步扩大。

从近期解决煤炭能源输送问题来说，输电通道建设周期短，一般 1 条远距离、大容量特高压直流输电通道 2 年左右就可建设完毕投入运行，对解决近中期煤炭外运紧张问题具有现实意义。而铁路建设周期长（一般需要 5 年），建设难度大，甚至受外界条件限制规划多年但最后难以实现，难以满足近期我国部分煤炭基地外运的需求。此外，修建铁路专用线，煤炭运力按每年 $1 \times 10^8 \sim 2 \times 10^8$ t，其中 60% 用于燃煤发电，需要配套建设 $3 \times 10^7 \sim 6 \times 10^7$ kW 的“电站群”，虽然具有规模优势，但灵活性和渐进性较差，而特高压直流输电一个回路输电 $5 \times 10^6 \sim 7.5 \times 10^6$ kW，灵活性较输煤好。因此，近期在输煤通道不畅的情况下积极发展输电是必要的。

综上,输煤输电并举是长期的煤炭输送战略,总体上以输煤为主,但要优化煤炭能源输送方式,适当增加输电比例,对于不同地区应进行科学分析,合理安排输煤输电布局。在输煤通道不畅的情况下积极发展输电是必要的;合理科学的输煤方式实现后,煤炭远距离输送更有优势。

六、结语

我国煤炭主要分布在西部和北部,而主要消费地在东部,能源的大规模远距离传输是长期的、必然的任务。

我国的输电技术已经处于世界先进水平,特高压直流输电技术处于世界领先水平,能够为远距离输电提供技术支撑。

从煤炭清洁高效利用、综合经济效益、环境土地水资源占用、安全性等方面进行铁路运输输煤和通过特高压直流技术输电这两种方式综合比较模型分析,提出定量结论如下:在2012年的主要指标下,

1 800 km 是输煤输电的指标性距离,即 1 800 km 以下输电有优势,大于 1 800 km 输煤有优势。

应结合我国能源流向和各区域的实际情况,综合多种因素进行科学输煤输电比较,我国应坚持输煤输电并举战略,输煤为主的战略格局不变,要优化煤炭能源输送的方式,适当增加输电的比例。

参考文献

- [1] 李立涅. 先进输电技术与煤炭清洁高效利用[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [2] 中国工程院. 中国能源中长期(2030、2050)发展战略研究[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [3] 张运洲. 我国跨区域电力资源配置前景分析[J]. 中国电力, 2004, 37(9): 5-7.
- [4] 国家能源局电力司. 2020年全国电力流规划报告[R]. 北京: 国家能源局电力司, 2011.
- [5] 中国南方电网公司. ± 800 kV 直流输电技术研究[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- [6] 邢茂华. 湿冷与空冷系统技术经济性比较[J]. 内蒙古电力技术, 2006(S3): 15-17.
- [7] 国家能源局. 低热值煤炭综合利用发电研究[R]. 北京: 国家能源局, 2011.