

中国工程院咨询研究项目

运煤输电比较研究 理论与方法

傅志寰 胡思继 周渝慧 等著



科学出版社

中国工程院咨询研究项目

运煤输电比较研究理论与方法

傅志寰 胡思继 周渝慧 等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书在运煤输电生产流程分析的基础上,研究提出了运煤输电度电成本的通用性计算模型。依据我国运煤、输电现状,在我国能源资源分布和经济布局的背景下,分别从经济性、环境影响和可靠性等方面,对运煤方案与输电方案进行定性和定量的比较分析,论证运煤和输电的适用距离,对我国能源输送方式选择提供理论支撑和实例论证。

本书对煤炭能源外送选择运煤或输电方式决策工作有重大的参考价值,可为电力系统决策者提供理论依据,也可供从事输电工程科研、规划、设计等技术人员、铁路相关专业人员以及节能管理人员使用和参考。

图书在版编目(CIP)数据

运煤输电比较研究理论与方法/傅志寰等著. —北京:科学出版社,2015.6
(中国工程院咨询研究项目)

ISBN 978-7-03-044552-0

I. ①运… II. ①傅… III. ①煤矿运输-铁路运输-运输经济-研究-中国
②输电-电力工业-工业经济-研究-中国 IV. ①F532②F426.61

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 122014 号

责任编辑:耿建业 金 蓉 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张 倩 / 封面设计:华路天然设计

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 5 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2015 年 5 月第一次印刷 印张:8 1/4

字数:112 000

定价:60.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

我国是煤炭生产大国,其中一半以上用来发电。

煤炭作为一种能源,既可以选择铁路等运输方式运到消费地燃煤电厂,发电后再通过电网输送到终端用户;也可以选择^①在煤炭基地建设坑口电站就地发电,然后通过电网将电能远距离输送到终端用户。

由于运煤、输电的技术经济特征不同,各自有其相应的适用范围。多年来,运煤输电的比较研究大都基于实际工程项目。由于不同项目背景条件各异,导致比选结论的普适性不强。因此相关研究方法^②与理论有待进一步深化。

针对这一问题,笔者以中国工程院咨询研究项目(运煤输电比较研究)为依托,组织了有电力专家和运输管理专家参加的课题组,就运煤、输电两种方式的优缺点作了较深入的研究,取得了一些有价值的研究成果。本书就是根据这一研究成果编写的,是课题组全体成员辛劳的结晶。

受作者学术水平和实践经验的限制,书中难免有不妥之处,敬请读者指正。

作 者

2015 年 4 月 5 日

目 录

前言

摘要	1
对比方案的界定	1
运煤输电度电成本计算模型	1
运煤、输电比较组合方案的设计	2
运煤输电临界距离	3
运煤输电共用距离与可用范围	3
环境影响与可靠性分析	4
结论	4
第一章 概述	5
一、研究背景	5
二、我国运煤输电现状	6
(一) 运煤现状	6
(二) 输电现状	7
三、研究现状	8
四、相关概念	10
五、运煤输电方案流程	11
(一) 运煤方案	11
(二) 输电方案	13
六、研究内容	14
第二章 运煤输电度电成本计算模型	15
一、运煤输电方案比较的核心指标	15
二、铁路运煤方案度电成本	16
(一) 运煤方案度电成本构成	16
(二) 运煤方案度电成本分项计算模型	16
(三) 运煤方案度电成本计算模型	20

三、输电方案度电成本	21
(一) 输电方案度电成本构成	21
(二) 输电方案度电成本分项计算模型	21
(三) 输电方案度电成本计算模型	25
第三章 运煤输电比较组合方案及其度电成本计算	26
一、运煤、输电比较组合方案	26
二、比较数据	29
(一) 工程投资数据	29
(二) 运煤能力比数	30
(三) 运煤专线的有关参数	32
(四) 基础数据	36
三、度电成本分析计算	40
第四章 运煤输电临界距离	44
一、临界距离的内涵	44
二、运煤输电临界距离的计算	46
三、临界距离计算因素敏感性分析	52
(一) 敏感性分析	52
(二) 临界距离的因素影响分析	53
(三) 临界距离的敏感度系数分析法	58
四、临界距离取值范围及运煤、输电有利距离范围	59
(一) 临界距离取值范围	59
(二) 运煤、输电有利范围	63
第五章 运煤输电共用距离与可用范围	69
一、“共用距离”的内涵及其取值范围	69
二、运煤输电可用范围	75
第六章 运煤输电的节能、环保及社会影响分析	80
一、运煤输电能源消耗比较	80
二、运煤输电线路建设期及运营期对环境的影响	82
(一) 运煤线路建设期间对环境的影响	82
(二) 输电线路建设期间对环境的影响	83
(三) 运煤线路运营期间对环境的影响	83

(四) 输电线路运营期间对环境的影响	84
三、电厂及线路占地面积比较分析	85
四、碳排放与 $PM_{2.5}$ 的环境治理成本	85
五、水资源的约束	87
六、运煤输电对社会经济的影响	88
第七章 运煤输电的可靠性分析	89
一、抵御自然灾害能力分析	89
(一) 运煤抵御自然灾害能力分析	89
(二) 输电抵御自然灾害能力分析	90
二、安全性分析	91
(一) 煤炭运输安全性分析	91
(二) 高压输电安全性分析	91
第八章 结论	92
参考文献	94
附录 A 既有有线运煤与输电情景组合方案分析计算	95
A1 既有有线运煤与输电情景组合方案度电成本计算	95
A1.1 既有有线运煤与输电情景组合方案基础数据	95
A1.2 度电成本分析计算	97
A2 既有有线运煤与输电临界距离	99
A2.1 临界距离影响因素分析	99
A2.2 临界距离计算因素敏感性分析	101
A3 既有有线运煤与输电有利范围、可用范围分析	106
A3.1 运煤输电临界距离及有利取值范围	106
A3.2 既有有线运煤、输电可接受共用距离	112
A4 既有有线运煤与输电临界距离和有利范围、共用距离和 可用范围	120
附录 B 课题组成员名单	121

摘 要

本研究依据我国运煤、输电现状,在我国能源资源分布和经济布局的背景下,分别从经济性、环境影响和可靠性等方面,对运煤方案与输电方案进行定性和定量的比较分析,论证运煤和输电的适用距离,对我国能源输送方式选择提供理论支撑和实例论证。

对比方案的界定

运煤方案是指将煤炭通过不同运输方式从煤炭基地运输至负荷中心,并在负荷中心建设发电厂,以满足受端地区电力需求的方案。本课题只将铁路作为煤炭能源的运输方式,包括既有线运煤、新建普通双线运煤和运煤专线三种。

输电方案是指煤炭经煤炭生产地产出,经过坑口电站发电,将煤炭立即转化为电力,根据实际情况,选择不同的电力输送方案,采取超高压输电、特高压输电等方式,将电力输送至用户。

运煤输电度电成本计算模型

本研究分别从购煤成本、发电及运煤或输电过程的营业支出、环境成本和可靠性成本 5 部分,对新建双线运煤方案、既有线运煤方案和输电方案的成本进行全面分析,进而分别建立不同方案度电成本计算模型。通过分析研究,得出的计算模型如下:

1) 新建线路运煤方案度电成本计算模型

$$C_1 = \frac{\gamma_{\text{电}}^{\text{运煤}}}{1 - \beta_1} \left\{ e_{11} + \frac{F_{\text{标}}}{F_i} \left[e_{121} \cdot L_{\text{运煤}} + e_{121\text{固}} + \frac{(e_{122} \cdot L_{\text{运煤}} \cdot \lambda_{\text{铁}} + E_{\text{铁固}}) \cdot \alpha}{Q_{\text{运煤}}} \right. \right. \\ \left. \left. \cdot \left(\frac{1}{n_1} + (1 - q_1) \cdot i_1 \right) \right] \right\} + e_{131} + \frac{e_{132}}{t_{\text{电}} \cdot n_2} + e_{14} + e_{15}$$

2) 既有线路运煤方案度电成本计算模型

$$C_1 = \frac{\gamma_{\text{电}}^{\text{运煤}}}{1 - \beta_1} \left[e_{11} + \frac{F_{\text{标}}}{F_i} (e_{12\text{固}} + e_{12\text{变}} \cdot L_{\text{运煤}}) \right] + e_{131} + \frac{e_{132}}{t_{\text{电}} \cdot n_2} + e_{14} + e_{15}$$

3) 输电方案度电成本计算模型

$$C_2 = \frac{(e_{222} \cdot L_{\text{输电}} + E_{\text{变流}}) \cdot \gamma_{\text{电}}^{\text{输电}} \cdot F_{\text{标}}}{Q_{\text{耗煤}} \cdot F_i [1 - (\beta_3 + \beta_4 \cdot L_{\text{输电}})]} \left(\frac{1}{n_2} + \lambda_{\text{运}} \right) \\ + \frac{1}{1 - (\beta_3 + \beta_4 \cdot L_{\text{输电}})} \left(e_{21} \cdot \gamma_{\text{电}}^{\text{输电}} + e_{231} + \frac{e_{232}}{t_{\text{电}} \cdot n_2} + e_{24} + e_{25} \right)$$

运煤、输电比较组合方案的设计

本研究在度电成本计算模型的基础上,根据运煤方式、输电工程电压等级和输电容量等的不同,设计 11 个运煤输电对比组合方案(6 个主方案和 5 个补充方案)。

主方案有:

方案 1-1:电压 500kV,容量 500 万 kW 交流输电与新建双线铁路运煤对比;

方案 2-1:电压 500kV,容量 900 万 kW 交流输电与新建双线铁路运煤对比;

方案 3-1:电压 1000kV,容量 500 万 kW 交流输电与新建双线铁路运煤对比;

方案 4-1:电压 1000kV,容量 900 万 kW 交流输电与新建双线铁路运煤对比;

方案 5-1:电压 ±800kV,容量 800 万 kW 直流输电与新建双线铁路

运煤对比;

方案 5-2:电压 $\pm 800\text{kV}$,容量 800 万 kW 直流输电与运煤专线运煤对比。

通过分析输电工程投资数据、运煤能力比数和运煤专线有关参数等,对不同组合方案的度电成本进行分析计算,可得到不同方案的度电成本,及度电成本与运煤输电距离的关系。

运煤输电临界距离

研究提出临界距离,是指运煤和输电两种方式的度电成本的平衡点所对应的距离。小于这一距离对运煤(输电)有利,大于这一距离对输电(运煤)有利。基于运煤方案和输电方案的度电成本的计算模型,运用函数分析法和图解法,通过变化煤种发热量、输电线造价、输电运维费用、铁路造价、铁路运营成本等影响因素的取值,可分析计算运煤输电的临界距离。

通过研究发现,相关因素的不确定性构成了临界距离的不确定性,临界距离所具有的不确定特征,决定了它不可能是一个确定的数值,只能是一个取值范围,从而最终确定不同组合方案的临界距离取值范围。

根据临界距离取值范围可确定运煤、输电有利范围。在某一距离范围内,若输电方案的度电成本较运煤方案的度电成本低,该距离范围可称为输电的有利范围,相反,若运煤度电成本较输电度电成本低,则称为运煤的有利范围。

运煤输电共用距离与可用范围

分析计算表明,在一定距离条件下,运煤、输电方案的度电成本的比较差,数值上一般都不大,在 $0.01\sim 0.02$ 元/度的数量级。因此,研究提出了运煤、输电共用距离和可用范围的概念。认为在度电成本差可接受的情况下,若工程实际距离在共用距离的范围以内,则运煤方案

和输电方案都可采用。共用距离的基本思想是以可接受的运营成本增加量为代价,将运煤、输电有利范围加以扩展,据以提高运煤、输电方案在电力工程中的兼容性和互补性。

运煤输电可接受共用距离,简称“共用距离”,是指因运煤、输电度电成本差对运煤、输电方案决策的影响在可接受范围内,而对运煤、输电方案都可采用的距离范围。

运煤、输电可用范围是指运煤、输电实际可使用的距离范围。

计算结果表明,共用距离的引入,使得运煤方案和输电方案的可用范围较有利范围均有所增大,但输电方案由于经济距离的限制,运煤方案的适用性要明显强于输电方案,凡输电可用范围以外的运输需求都可以选用运煤方案。

环境影响与可靠性分析

本研究从能源消耗、线路建设及运营期、占地面积、碳排放与 $\text{PM}_{2.5}$ 环境治理成本、水资源和对社会经济的影响等方面对运煤方案和输电方案进行分析,二者各有利弊,应根据具体工程情况具体分析。

本研究从抵御自然灾害能力和安全性等方面对运煤方案与输电方案的可靠性进行比较分析。认为运煤方案抵御自然灾害能力优于输电方案;运煤输电两种能源输送方式的安全性都是可以接受的,但运煤方案的安全性较输电方案更高一些。

结 论

就总体而言,运煤与输电缺一不可,应协同发展;就每个项目而言,要具体问题具体分析,即应运用本研究提供的方法,对运煤方案和输电方案各自优势进行比较,在此基础上,因地制宜选取合适的方案。

第一章 概 述

一、研究背景

2012 年课题组向工程院申请“运煤输电对比研究”项目,并获得了批准(项目编号:2012-XY-1)。

我国是煤炭生产大国,2013 年我国能源产量中,煤炭占 76.6%。我国煤炭消费的一半以上用来发电,沿海地区和南方地区集中了三分之二以上的电力需求,而煤炭资源又集中分布在山西、陕西和内蒙古西部(即“三西”地区)、新疆等地,因此煤炭能源输送是个突出问题。

随着我国经济的发展,经济发达地区能源需求大幅增加,决定了煤炭能源大规模跨区域长途调配难以避免,到底采用怎样的输送方式更为合理呢?

从技术上分析,西部的煤炭能源从煤矿到东部终端电力用户之间的运输,既可以选择通过铁路、公路、水路等运输方式运到东部地区的燃煤电厂,发电后再通过电网输送到终端电力用户的方式;也可以选择煤炭基地建设坑口电站就地发电,然后通过电网将电能远距离输送到东部地区的方式。从这个意义上说,输电也是能源运输的一种方式。因此煤炭能源输送途径主要有以下两种:

第一,通过铁路、公路、水路运煤,保障电力需求地区的燃煤电厂稳定发电的用煤量,即运煤方案;

第二,建设坑口电站,通过电网向大负荷地区输电,即输电方案。

运煤或输电方式选择的基本出发点是综合考虑成本、安全、环境等各方面因素。

二、我国运煤输电现状

(一) 运煤现状

目前,我国煤炭生产与消费分布不平衡的状况,决定了西煤东运、北煤南运的煤炭运输总体格局,以及以“三西”地区(含宁夏东部)等煤炭基地为核心,向东、向南呈扇形分布的运输网络结构。我国煤炭运输总体格局如图 1-1 所示。

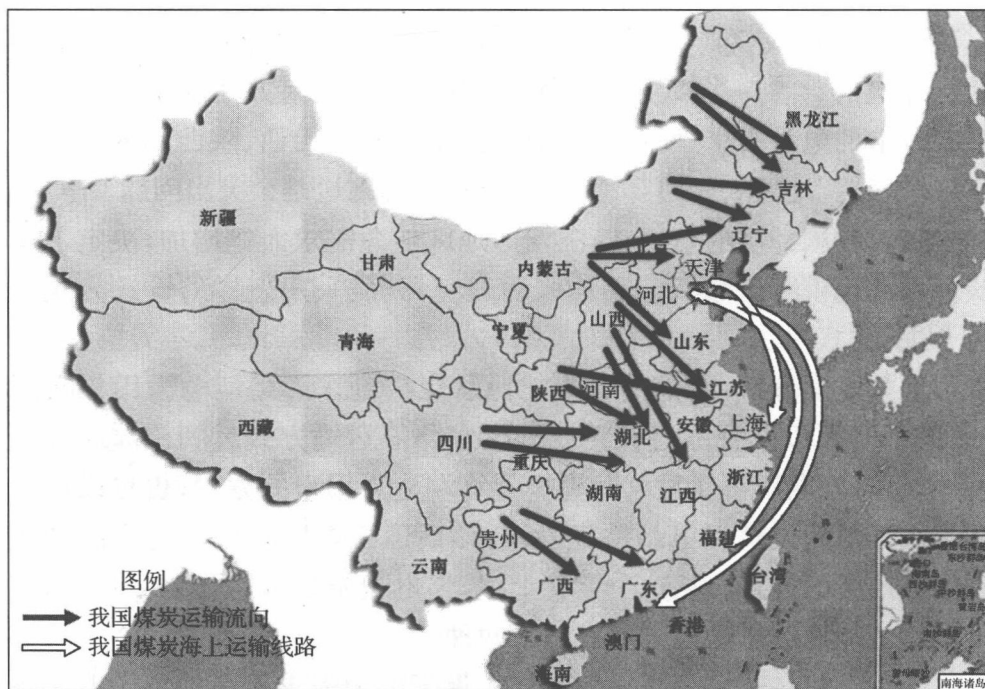


图 1-1 我国煤炭运输总体格局

我国煤炭运输以铁路为主,以水路和公路为辅,还采用几种方式联合运输。

铁路是我国最主要的煤炭运输方式,煤炭也一直是铁路运输的最主要的货种。据统计,2004 年以来,全国铁路煤炭运量年均增长 13.5%,2013 年达到 22.56 亿 t。铁路煤炭运输量占铁路货运总量的比

例从 2000 年的 43.6% 上升到 2012 年的 55%。从“三西”地区出发已形成了全国规模最大、最密集的铁路煤炭外运大通道,由大秦线等 12 条铁路组成,根据线路地理位置分为北、中、南三大通道。其中,北通路包括集通、大秦、丰沙大、京原和朔黄 5 条铁路;中通路包括石太和邯长 2 条铁路;南通路包括侯月、陇海、太焦、宁西和西康 5 条铁路。据统计,2012 年通过“三西”煤炭外运通道调运的煤炭占全国铁路煤炭发送量的 46%。由于多年来铁路建设快速推进,运能增加,未来铁路运煤能力是有保障的。

沿海水路运输是我国东南沿海地区煤炭运输的重要方式。内河水路运输,即长江、京杭运河、淮河、珠江等内河流域煤炭运输,也是重要的运输方式。

公路运输可以为铁路、水路煤运提供集疏运服务,是省际煤炭调运的重要补充。前几年,在铁路运力紧张的状况下,公路不得已承担了大量省际煤炭运输需求。但是,随着铁路建设的加快和煤炭需求增长的放缓,公路运煤量明显下降。

(二) 输电现状

随着我国电网建设步伐的不断加快,电网技术不断取得突破,电网规模持续快速扩大,输电电压等级不断提高。输电电压一般分为高压、超高压和特高压。目前,对我国绝大多数电网来说,超高压电网一般指的是 330kV、500kV 和 750kV 电网;特高压输电一般指的是 1000kV 交流和 $\pm 800\text{kV}$ 、 $\pm 1100\text{kV}$ 直流输电工程和技术。

目前我国电网形成了 220kV、330kV、500kV、750kV、1000kV 交流和 $\pm 500\text{kV}$ 、 $\pm 660\text{kV}$ 、 $\pm 800\text{kV}$ 直流标准输电电压序列,正在研究 $\pm 1100\text{kV}$ 直流输电电压等级。

我国电网主要由华北、东北、西北、华东、华中和南方六大区域电网组成,除西北电网以 750kV、330kV 为骨干主网架外,其他 5 大区域电网均以 500kV 电网为骨干网架。区域电网之间除华北和华中电网通过晋东南—荆门 1000kV 特高压交流工程连接组成同步电网外,其余主要

通过直流线路和直流背靠背工程连接组成异步电网。由于我国能源资源和用电需求呈逆向分布,电力输送主要呈现西电东送的整体格局。

近几年,跨区输电量大幅增加,电网在更大范围内优化资源配置的作用越来越显著,但要采取输电方式解决煤炭能源输送问题,就必须建设长距离大容量输电工程。早期我国电力输送一般采用 220kV、330kV 或 500kV 输电方案,当前,500kV 以下电压等级的输电方式在传输长度、传输容量等方面,都难以胜任我国长距离输电要求,特高压输电是长距离能源输送方式的可行选择^[1]。

经过多年研究和实践,我国电网技术水平大大提高。相继建成 1000kV 特高压交流试验示范工程及扩建工程,±800kV 特高压直流示范工程,掌握了特高压交直流输变电及其装备制造的核心技术,具备了开展大规模应用的条件。特高压输电技术的发展为能源的大规模远距离输送提供了一种安全、稳定、经济、清洁的全新途径。采用特高压输电技术将“三西”地区的煤炭就地转化成电力后输送到东中部地区,有利于实现能源在全国范围内的优化配置。

三、研究现状

能源输送方案的对比分析是制定能源产业政策的基本问题之一。世界上主要富煤国家在制定能源产业政策与规划时,均开展了相关研究工作^[2,3]。新中国成立后,我国多次进行能源输送方案的对比分析的研究工作。由于不同时期经济体制不同,相应的技术水平、外部条件也有差异,所以,在研究方法与结论上也存在差异。

20 世纪 50 年代,我国就已着手论证在大同建设电厂送电到北京等项目。到七八十年代,为编制华北煤炭基地的电厂规划开展了准格尔建电厂送电到辽宁等多项输煤与输电经济性的比较工作^[4]。这些工作主要采用年费用比较法进行输煤与输电的经济性分析,其基本思路是:在假设输送相同能源(电量)的前提下,分别计算铁路运煤方案与新建输变电工程方案年费用,并进行比较,年费用低者经济性好。根据当时

的技术、经济条件,有关研究工作认为在距离较远时采用 220kV 或 500kV 输电方案代替铁路运煤是不经济的。

1994 年,原电力工业部在《关于加快坑口电厂建设的汇报提纲》中指出,由于中国地域辽阔,在电力布局规划中必须坚持“输电和输煤并举的方针”,任何单打一的做法都是难以适应我国国情的,因此在加快坑口电厂建设的同时,对于沿海及其他负荷中心,受端电厂建设也应予以充分重视。结合坑口电厂的规划工作,我国开展了从山西、内蒙古等地向京津冀地区输煤与输电的经济性等研究工作。

近年来,随着我国西部大开发战略的实施以及局部地区用电紧张情况的出现,提出了在更大范围内进行资源优化配置的需求,我国有关部门积极组织开展了相关研究工作。

2003 年,在国家电网公司组织的“全国联网补充研究”工作中,国电力经济研究中心(现更名为经济技术研究院)采用了 500kV 交流输电价与铁路运煤综合运价进行比较的方法。其基本思路是:编制输电方案,测算输电价;参照铁路部门颁布的运输费用标准,计算与输电等价的运煤折算价格;对比输电价与输煤折算价格,确定不同煤质条件下输电与运煤等价输送距离。其研究结论是:对于发热量为 5000kcal^①/kg 的煤炭,800km 以内输电更经济,如从蒙中、蒙西、陕北、山西到京津冀,从山西到华中;800km 以上运煤更经济,如陕北到华中、华东。

2005 年,国务院发展研究中心在《我国能源输送方式》研究报告中,采用基于地区煤价差的比较方法对我国煤炭输送方式的经济性问题进行了研究,其基本思路是:依据当地煤炭价格,测算煤电基地和电力负荷中心新建燃煤机组的上网电价,计算送受端上网电价差;测算不同输电距离下新建输电工程的输电价格;通过对比测算的上网电价差和输电价,确定不同煤价差下的输电经济距离^[5-7]。

随着特高压输电技术的成熟,2012 年,中国工程院在“先进输电技术及对煤炭清洁高效利用的影响研究”课题子课题三“输煤输电比较研究”的报告中提出,通过输煤、输电实现跨区域、大规模、远距离能源输

① 1kcal=4185.85J。

送的格局将长期存在。课题采用比较成本加基准收益的方法,测算输煤输电单位兆瓦时的受端成本电价,以新疆、宁东煤炭外运的实际工程项目为研究对象,得出在一定条件下,直流特高压输电和输煤方式存在一个临界距离 1808km。当输电距离小于 1808km 时,输电方式每度电的成本较低;当输电距离大于 1808km 时,输煤方式每度电的成本较低^[8]。

尽管不同时期开展了关于运煤与输电技术经济比较的研究,但仍必要作进一步的深化研究,其原因是:

(1) 既有研究的理论与方法有待进一步深化。

(2) 既有研究使用的基础数据无法避免要依托实际工程项目,而不同项目背景条件各有不同。近年来,由于运价与电价水平及相关费用不断调整,运煤与输电技术经济比较相关外界条件已发生了变化,导致比选结论的普适性不强。

(3) 运煤、输电技术升级较快。早期研究中,一般采用 220kV 或 500kV 输电方案,近期我国特高压交流试验示范工程、特高压直流示范工程均已投运。随着电网技术升级,输电经济性提高,输电经济距离大大延长。与此同时,由于发展重载技术,铁路运煤专线输送能力也有很大提高。

(4) 随着经济的发展,全社会对能源的需求不断增加,人们的环保意识不断增强,运煤和输电比较的约束条件也发生了变化。

四、相关概念

运煤:通过某种运输方式或几种运输方式的联合运输将煤炭从煤炭基地运输至负荷中心,建设燃煤电厂,提供受端地区电力需求的整个系统。

输电:在煤炭基地建设坑口电厂,所产电能通过输电工程输送到负荷中心,提供受端地区电力需要的整个系统。

度电成本:是指发电项目单位上网电量所发生的成本,包括固定资产折旧、项目运行成本、维护成本、财务费用、税金等。