

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2016.04.013

不同电源送出 1 000 kV 交流输电线路导线选型研究

龚有军¹, 郭琳霞²

- (1. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663;
2. 广东电网有限责任公司 教育培训评价中心, 广州 510520)

摘要: 导线选型是交流特高压输电的关键技术之一, 对线路建成投产后的安全运行及经济运行有着非常重要的影响。根据拟定的输送容量、电磁环境、运行温度、安全系数等边界条件, 对 16 种导线进行了全面的电气性能及机械性能对比。同时, 根据国内不同性质电源(火电、水电、核电、风电)的特征, 选取与之匹配的单位千瓦补充投资、上网电价、年运行小时数等参数进行了年费用分析, 有针对性地给出了推荐建议, 为工程建设提供参考。

关键词: 特高压; 交流; 导线选型; 火电; 水电; 核电; 风电

中图分类号: TM726

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2016)04-0064-05

Study on the Wire Selection of 1 000 kV AC Transmission Line with Different Power Supply

GONG Youjun¹, GUO Linxia²

- (1. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China;
2. Educational, Training and Evaluation Centre of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510520, China)

Abstract: Conductor selection is one of the key technologies of UHVAC power transmission, which has a very important influence on the safe operation and economic operation of the line. According to the boundary conditions, such as transport capacity, electromagnetic environment, operating temperature, safety factor, the paper makes a comprehensive comparison of the 16 kinds of wires in the electrical and mechanical properties. At the same time, according to the characteristics of different nature of power supply (thermal power, hydropower, nuclear power, wind power), the selection and matching of the units of the supplementary investment, access to electricity, the number of hours per year, and other parameters for the annual cost analysis, the proposed recommendation for the construction of engineering.

Key words: UHV; AC; conductor selection; thermal power; hydro power; nuclear power; wind power

中国幅员辽阔, 资源分布与负荷分布极不均匀。考虑到经济发达地区的环境容量等因素, 采用交直流特高压输电线路进行远距离大容量输电是我国解决上述问题的首选。

导线作为输电线路最主要的部件之一, 它既要满足输送电能的基本要求, 也要安全可靠地运行, 同时对特高压输电线路还要求满足环境保护的要

求。因此, 对导线在电气和机械两方面都提出了严格的要求。同时考虑到架线工程投资对线路的一次投资及运行维护费用均影响很大, 因此对特高压线路的导线进行科学选型, 社会和经济效益显著。

导线选型中的关键技术之一就是经济评价。不同的电源送出线路, 其单位千瓦补充投资、上网电价、运行小时数等参数差异巨大, 对导线选型的结果影响很大。因此, 针对不同性质的电源送出, 对特高压线路的导线选型进行有针对性的分析, 很有必要。

1 参数说明

根据某工程实际情况, 线路同塔双回架设。正

收稿日期: 2016-04-21

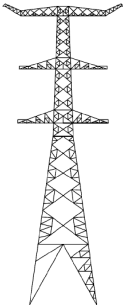
基金项目: 中国能建广东院科技项目: 1 000 kV 特高压交流输电线路导线选型及新型导线应用研究 (EX02311W)

作者简介: 龚有军(1984), 男, 湖南湘乡人, 工程师, 硕士, 主要从事输电线路设计工作 (e-mail) gongyoujun236@163.com。

常时单回输送容量5 000~6 000 MVA,事故时每回极限输送功率8 000~12 000 MVA。线路基本设计风速为30 m/s,设计覆冰为10 mm,海拔1 000 m以下。线路直线塔采用双回自立式伞型铁塔,其单线图见图1。考虑现有特高压线路的运行经验以及电磁环境、不平衡度等指标,线路采用逆相序排列方式。

图1 铁塔单线图及尺寸

Fig. 1 Single line diagram and size of the iron tower

铁塔单线图	位置	导地线坐标/m	
		X	Y
	地线	±21.5	H+57.5
	第一层导线	±15.1	H+40.8
	第二层导线	±15.4	H+20.4
	第三层导线	±15.7	H

注: H 为呼高; X 为横担方向, 原点为横担两侧导线挂点中点; Y 为垂直向上方向, 原点为地面。

2 约束条件

特高压线路由于电压等级高, 因此在同等的导线分裂数及导线截面下, 线路的电晕现象要比超高压线路强烈得多。为了限制导线的电晕, 改善线路的电磁环境, 相关的规程规范对线路的电磁环境指标进行了约束^[1]。主要有: (1) 线下最大电场强度10 kV/m; (2) 海拔500 m及以下地区, 距离线路边相导线地面水平投影外侧20 m处, 频率为0.5 MHz的无线电干扰不应大于58 dB($\mu\text{V}/\text{m}$), 湿导线的可听噪声不应大于55 dB(A)。若海拔高度大于500 m, 则无线电干扰及可听噪声均以500 m为起点, 每300 m增加1 dB。

此外, 导线在机械性能及运行温度方面的限制由: 导线在弧垂最低点的最大安全系数不得小于2.5, 年平均安全系数不得小于4.0, 普通钢芯铝绞线在最大输送容量下的导线运行温度不得高于80℃。

3 导线截面初步选择

对于任意一条输电线路而言, 存在一个经济电流密度, 在此电流密度下, 线路可以在一次投资及

运行费用间取得较好的平衡。经济电流密度的取值与线路建设时期的物价水平、利率水平、建设难度等因素息息相关, 并不容易精确计算。我国目前的经济电流密度还是参考前苏联的相关成果, 已经不能用于决定最优导线截面。然而, 若是作为一个大概的指标以框定优选范围, 该指标仍是有效的。本文取0.9 A/mm²作为经济电流密度进行初步框选。

根据系统提供的线路输送容量为5 000~6 000 MVA, 由此算得的每相电流为2 887~3 464 A, 按照前述的电流密度的参考值0.9 A/mm²并适当放宽至0.7~1.0 A/mm², 算得的导线总截面为2 887~4 948 mm², 该值作为导线总截面选择的参考。以此为基础, 参考国内外特高压线路的导线分裂数取值情况, 组合得到备选的导线参数见表1, 初步选择的导线形式如表2所示。

表1 导线参数表

Tab. 1 Parameters of conductors

导线型号	直径/mm	20℃直流电阻/($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)	额定拉断力/kN
JL/G1A-400/35	26.8	0.073 9	103.67
JL/G1A-500/45	30.00	0.059 1	127.31
JL/G1A-630/45	33.8	0.045 9	150.45
ACSR-720/50	36.2	0.039 8	170.59

表2 初步选择的导线形式

Tab. 2 Parameters of submarine power cable

导线型号	无线电干扰/dB	可听噪声/dB(A)	是否合格
7×JL/G1A-400/35	61.26	59.65	否
8×JL/G1A-400/35	58.16	56.68	否
9×JL/G1A-400/35	55.22	54.05	是
10×JL/G1A-400/35	52.48	51.78	是
6×JL/G1A-500/45	63.96	61.32	否
7×JL/G1A-500/45	60.39	57.87	否
8×JL/G1A-500/45	57.08	54.95	是
9×JL/G1A-500/45	53.95	52.37	是
10×JL/G1A-500/45	51.04	50.14	是
6×JL/G1A-630/45	63.19	59.56	否
7×JL/G1A-630/45	59.4	56.21	否
8×JL/G1A-630/45	55.9	53.37	是
6×ACSR-720/50	62.76	58.7	否
7×ACSR-720/50	58.86	55.42	否
8×ACSR-720/50	55.31	52.68	是
6×JL/G3A-900/40	61.9	57.36	否

注: 无线电干扰为双80%值, 可听噪声为湿导线可听噪声值。

4 电气性能对比

4.1 电磁环境对比

线路的电磁环境指标包括地面电场、地面磁场、无线电干扰和可听噪声。其中,地面电场主要控制导线的对地高度,且线路双回路逆相序时一般不起控制作用;地面磁场仅与线路的输送容量相关,而与采用何种导线结构没有关系,因此也不对导线选型起控制作用。实际上,对导线选型起到控制作用的是与电晕相关的两个指标,即无线电干扰与可听噪声。长期以来,世界各国各个机构对输电线路的无线电干扰及可听噪声均作了大量的研究与实测^[2-5]。结果表明,国际无线电干扰特别委员会(CISPR)方法及邦维尔电力局(BPA)方法的计算结果分别与无线电干扰及可听噪声的实测结果吻合度较好,误差较小^[6]。因此,本文采用 CISPR 方法^[7]及 BPA^[8]方法计算得到线路的电晕电磁环境,如表 2 所示。可知,受到无线电干扰控制, JL/G1A-500/45、JL/G1A-630/45、ACSR-720/50 均需要 8 分裂及以上才能满足要求, JL/G1A-400/35 需 9 分裂以上才能满足要求。

4.2 载流量对比

排除电磁环境不合格的 9 种导线组合,对剩下的 7 种导线组合进行载流量核算。环境温度取最高气温月的平均最高气温 35℃,风速 0.5 m/s,太阳辐射功率密度 1 000 W/m²,计算得到载流量见表 3。可知,7 种导线均满足载流量要求。

5 机械性能对比

参比导线的机械性能对比见表 4。可见,垂直

荷载、纵向荷载、耐张绝缘子吨位基本与导线总截面正相关;水平荷载则稍微复杂一些,不仅与导线总截面有关,还与分裂数有关。各导线的弧垂与其各自的拉重比关系密切,基本呈反比关系。根据计算结果,各型导线在代表档距及档距均分别为 500 m、550 m、600 m 时,最大值与最小值之差分别约为 0.6 m、0.8 m、1.0 m。考虑到交流特高压线路的导线对地高度较高,弧垂较大,因此上述差别实际上并不大。

表 3 载流量对比

Tab. 3 Contrast of Load flow

导线型号	80℃时载流量/kA
9×JL/G1A-400/35	12.252
10×JL/G1A-400/35	13.614
8×JL/G1A-500/45	12.526
9×JL/G1A-500/45	13.918
10×JL/G1A-500/45	15.464
8×JL/G1A-630/45	14.583
8×ACSR-720/50	16.406

6 经济性分析

6.1 一次投资

输电线路的一次投资主要由塔材、导线、绝缘子、金具、接地装置、基础组成。其中,导线的水平荷载、垂直荷载、张力荷载以及特定气象条件下的风偏角度影响杆塔尺寸、杆件强度、基础方量及基础钢筋,导线的拉断力则影响与之匹配的盘型绝缘子的吨位。对于金具及接地装置,不同导线型号的影响很小。需要注意的是,导线选型应当从全社会范围内的资源优化配置统筹考虑,因此与电能损

表 4 参比导线机械性能对比一览表

Tab. 4 Comparison of the mechanical properties of reference wire

导线型号	水平荷载		垂直荷载		纵向荷载		代表档距及档距			耐张串吨位/kN
	数值/(N/m)	比值/%	数值/kN	比值/%	数值/m	比值/%	500m/m	550m/m	600m/m	
9×JL/G1A-400/35	159.0	89.2	211	81	354.6	78	19.4	23.4	27.7	3×420
10×JL/G1A-400/35	176.7	99.1	234	90	393.9	86	19.4	23.4	27.7	3×420
8×JL/G1A-500/45	158.3	88.8	221	85	387.0	84	18.8	22.6	26.7	3×420
9×JL/G1A-500/45	178.0	99.9	249	96	435.4	95	18.8	22.6	26.7	3×550
10×JL/G1A-500/45	197.8	110.9	276	106	483.8	106	18.8	22.6	26.7	3×550
8×JL/G1A-630/45	178.3	100.0	260	100	457.4	100	19.0	22.8	26.9	3×550
8×ACSR-720/50	191.0	107.1	291	112	518.6	113	19.3	23.1	27.3	3×550

耗相关的单位千瓦补充投资也应当列入考虑范畴。一般而言,单位千瓦补充投资越高,则电能损耗较低的导线越有竞争力。

6.2 运行维护费用

输电线路投入运行后产生的费用主要是电阻损失与电晕损失两种。其中,电阻损失是指在导线流过一定电流时,导线由于电阻的热效应而产生的电能损失,与载流量、导线温升、趋肤效应、磁滞效应等有关,在计算过程中需综合考虑。电晕损失则是导线电晕放电而产生的电能损失,其损失值与导线根数、导线直径、导线表面电场强度、起晕电场强度、天气分布等密切相关^[8]。表5计算了不同比选导线的电阻损失及电晕损失。可见,导线截面大的导线方案电阻损失要小一些;而电晕损失则比较复杂,由于不仅与总截面有关,而且与导线分裂数有关。但是,由于电阻损失占的比例较大,总体而言,导线总截面加大有利于降低线路的电能损失。

线路的损耗费用除了与电能损失功率相关以外,还与上网电价、电源的运行小时数有关,相关参数的选值阐述见6.3节。此外,线路的维护也需要一定的费用,取值一般按照线路造价的1.4%。

表5 比选导线的一次投资及运行损耗

Tab. 5 Investment and loss during operation of the selected wire

导线型号	造价/(万元·km ⁻¹)	电阻损失/(kW·km ⁻¹)	电晕损失/(kW·km ⁻¹)
9×JL/G1A-400/35	1 296	582.0	59.89
10×JL/G1A-400/35	1 353	520.8	45.83
8×JL/G1A-500/45	1 285	525.0	60.70
9×JL/G1A-500/45	1 401	464.2	45.62
10×JL/G1A-500/45	1 496	416.0	40.53
8×JL/G1A-630/45	1 439	409.0	46.15
8×ACSR-720/50	1 520	356.2	43.56

注:好天气7 407 h,雪天0 h,雨天1 331 h,雾凇天22 h。

6.3 经济参数选取

受到电源性质(水电、火电、核电、风电、太阳能)、开发规模、建设难度、自然条件、国家政策、地区经济发展程度等的影响,不同电源的建设投资、年运行小时数、上网电价等大有不同。根据相关公开资料,得到各电源的经济参数见表6。可见,核电的单位容量投资最高,受核电技术的影响较大(二代、三代核电技术的造价分别可控制在1.2万元/kW、1.8万元/kW),年运行小时数最高,电

表6 不同电源的经济参数

Tab. 6 Economic Parameters of submarine power cable

电源性质	单位千瓦补充投资/(万元·kW ⁻¹) ^[9]	年运行小时数/h ^[10]	损耗小时数/h	上网电价/(元/kWh)
火电	0.35~0.45	4 706	3 406	0.25~0.45
水电	0.6~1.5	3 653	1 922	0.3~0.36
核电	1.2~1.8	7 489	6 482	0.43
风电	0.8~1.0	1 905	762	0.51~0.61

价也相对较高;水电的单位容量投资适中,但是在局部建设条件特别恶劣的地区则投资陡增(例如西藏雅鲁藏布江流域),年运行小时数受枯水期的影响而较低,由于建成后几乎没有一次能源成本因此电价也相对较低;火电的单位容量投资最小,年运行小时数也较高,上网电价适中,主要受到燃煤价格的影响;风能的单位容量投资较高,受技术的进步近年来有下降的趋势,受风能极不稳定的影响年运行小时数最低,上网电价由于受到国家新能源政策的扶持而最高。

另外,根据相关规定^[11],特高压线路的使用周期为30年,设备运行维护费取为1.4%,联网工程的财务基准收益率取为7.5%。

6.4 年费用分析

根据表5及表6的数据,单位千瓦补充投资分别取为0.4、0.8、1.2、0.9万元/kW,计算得到典型火电、水电、核电、风电特高压送出线路的年费用对比见图2~图5。从计算结果看,对于火电送出线路,以我国主要煤电基地的经济参数来看(上网电价0.30~0.35元/kWh),8×JL/G1A-630/45是最好的选择,局部上网电价低于0.3元/kWh的地区可采用8×JL/G1A-500/45,对于局部上网电价较高的地区(如皖电东送),可采用截面更大的8×ACSR-720/50。对于水电送出线路,由于电价较低且利用小时数较低,因此截面相对较小的8×JL/G1A-500/45经济性最好。对于核电送出线路,由于核电单位千瓦补充投资高,且年利用小时数高、电价相对较高,因此导线截面最大的8×ACSR-720/50经济性最好且具有较大的优势——这意味着可酌情采用更大截面的导线结构。对于风电送出线路,其特点是利用小时数低,但是风电价格及电源的单位千瓦投资均较高,根据计算,10×JL/G1A-400/35及8×JL/G1A-500/45的经济性相对较好,综合考虑设计运行经验以及风电送出容量等因

素,更推荐采用 $8 \times \text{JL}/\text{G1A}-500/45$ 。

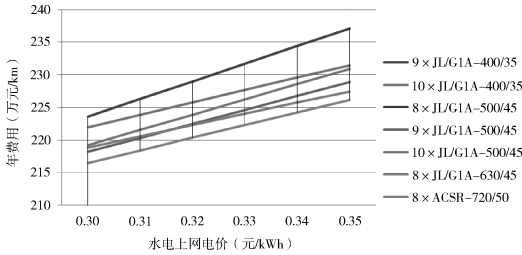


图2 典型火电条件下的年费用对比

Fig. 2 Annual cost comparison of typical thermal power

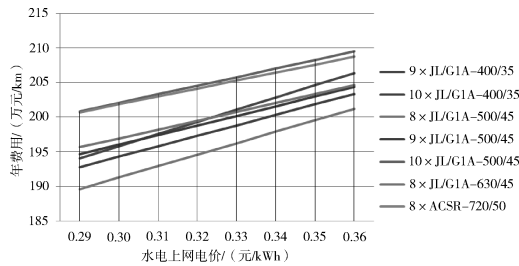


图3 典型水电条件下的年费用对比

Fig. 3 Annual cost comparison of typical hydro power

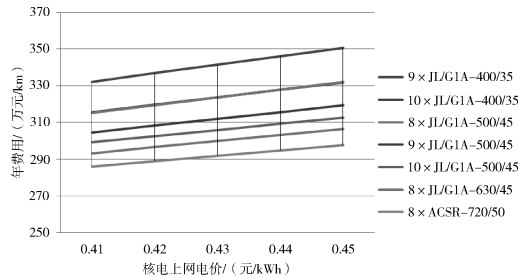


图4 典型核电条件下的年费用对比

Fig. 4 Annual cost comparison of typical nuclear power

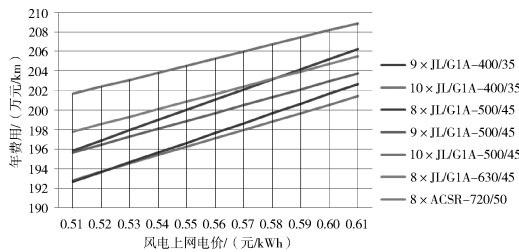


图5 典型风电条件下的年费用对比

Fig. 5 Annual cost comparison of typical wind power

6.5 影响因素

根据6.4节的分析,可得一般结论:上网电价越高、运行小时数越高、单位千瓦补充投资越高,则截面越大的导线越具有优势。同时,这些参数也不是一成不变的。若是国家政策扶持,则一些单位容量造价较高的水电厂、采用三代技术的核电厂等

可以给予更高的上网电价予以扶持。而技术的进步可进一步降低风电等新能源的单位容量造价。因此,上述参数与建设条件、建设规模、技术进步、国家政策等关系非常密切。工程实际情况多种多样,参数千差万别,且电能可能来自不同性质的电源,具体工程应用时需具体分析。

7 结论

在给定的边界条件下,本文对不同电源送出特高压交流输电线路的导线选型进行了分析与研究,得到相关结论如下:

1)受到无线电干扰及可听噪声的控制, $\text{JL}/\text{G1A}-500/45$ 、 $\text{JL}/\text{G1A}-630/45$ 、 $\text{ACSR}-720/50$ 均需要8分裂及以上才能满足要求, $\text{JL}/\text{G1A}-400/35$ 需9分裂以上才能满足要求。

2)根据本文的边界条件,对于我国的大煤电基地送出线路,推荐采用 $8 \times \text{JL}/\text{G1A}-630/45$;对于我国的大水电送出线路及风能基地送出线路,推荐采用 $8 \times \text{JL}/\text{G1A}-500/45$;对于核电送出线路,推荐采用 $8 \times \text{ACSR}-720/50$ 甚至更大规格的导线。

3)相关经济评价参数,如单位容量投资及上网电价往往随着技术进步、国家政策的变化而联动变化。因此,具体工程还需根据当时当地的建设条件进行具体分析。

参考文献:

- [1] 中国电力企业联合会. 1 000 KV 架空输电线路设计规范: GB 50665—2011[S]. 北京: 中国计划出版社, 2011.
- [2] EPRI. Transmission line reference book: 345 kV and above [M]. U. S. A.: Fred Weidner & Son Printers, INC, 1982: 217-248.
- [3] The General Electrotechnical Standards Policy Committee. Radio interference characteristics of overhead power lines and high-voltage equipment-Part1, description of phenomena: TR CISPR 18-1[S]. U. S. A.: [s. n.], 1994.
- [4] The General Electrotechnical Standards Policy Committee. Radio interference characteristics of overhead power lines and high-voltage equipment - Part3, code of practice for minimizing the generation of radio noise: TR CISPR 18-3 [S]. U. S. A.: [s. n.], 2010.
- [5] TRINH N G, MARUVADA P S. A method of predicting the corona performance of conductor bundles based on cage test results [J]. IEEE Trans., 1977(1): 312-325.

- [7] 王千. 龙滩工程地下洞室群围岩稳定和支持参数研究 [D]. 南京: 河海大学, 2005
- [8] PIRQUIER W. The effect of dam foundation conditions upon the design of dams [C]//14th International Congress of Large, 1986(3): 173-208.
- [9] 徐志英. 岩石力学 [M]. 北京: 中国水利水电出版

社, 1993.

- [10] ITO H, KITAHARA Y. The influence of the dispersion of the mechanical properties foundation [C]//Proc. of 6th ICRM, Montreal, 1987: 467-474.

(责任编辑 隋卿毅)

(上接第 68 页 Continued from Page 68)

- [6] 庄池杰, 曾嵘, 龚有军, 等. 交流输电线路的无线电干扰计算方法 [J]. 电网技术, 2008, 32(2): 56-60.
- [7] TRINH N G, MARUVADA P S. A method of predicting the corona performance of conductor bundles based on cage test results [J]. IEEE Trans., 1977(1): 312-325.
- [8] 庄池杰, 曾嵘, 龚有军, 等. 交流输电线路的无线电干扰计算方法 [J]. 电网技术, 2008, 32(2): 56-60.
- [9] 无线电干扰标准化分技术委员会. 高压架空送电线无线电干扰计算方法: DL/T691—1999 [S]. 北京: 中国电力出版社, 1999.
- [10] 张殿生. 电力工程高压送电线路设计手册 [M]. 北京: 中国

电力出版社, 2004.

- [11] 国家能源局. 2011—2012 年投产电力工程项目造价情况 [EB/OL]. [2014-05-29]. <http://www.docin.com/p-1549995373.html>.
- [12] 国家能源局. 全国 6 000 千瓦及以上电厂发电设备平均利用小时情况 [EB/OL]. http://www.nea.gov.cn/2015-01/21/c_133936073.htm.
- [13] 中国电力企业联合会. 输变电工程经济评价导则: DL/T 5438—2009. [S]. 北京: 中国电力出版社, 2009.

(责任编辑 高春萌)

(上接第 77 页 Continued from Page 77)

参考文献:

- [1] 环境保护部科技标准司. 火电厂大气污染物排放标准: GB 13223—2011 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2011.
- [2] 戴铁华, 李彦, 胡昌斌, 等. 大型燃煤电厂大气污染物近零排放技术方案 [J]. 湖南电力, 2014, 34(6): 47-50.

- [3] 方宝龙. 燃煤电厂烟气近“零”排放技术方案浅析 [J]. 科技与创新, 2014(10): 146-150.
- [4] 刘晓威, 王冰, 鞠鑫, 等. 火电厂大气污染物近“零”排放污染控制技术的示范应用 [J]. 电力科技与环保, 2015, 31(6): 25-27.

(责任编辑 黄肇和)

(上接第 81 页 Continued from Page 81)

参考文献:

- [1] 林建中, 张赢. 脱硫废水零排放方案选择 [R]. 广州: 广东省电力设计研究院, 2014.

- [2] 吴海波, 龙国庆, 唐刚. 高硫酸根高氯根高硬度含盐废水处理工艺的选择 [J]. 中国给水排水, 2015, 31(18): 31-33.
- [3] 李培元. 火力发电厂水处理及水质控制(第二版) [M]. 北京: 中国电力出版社, 2008: 238.

(责任编辑 张春文)

(上接第 91 页 Continued from Page 91)

5) 如果考虑将桩建入计算模型, 可以通过本方法得出的四个刚度参数输入到弹簧支座刚度矩阵中, 能够节省桩建模及其内部单元带来的大自由度, 计算模型更容易维护。笔者认为, 这也是一体化建模(上部结构、基础、地基在同一个计算模型中)发展过程中的一个重要里程碑。

参考文献:

- [1] 高大钊. 土力学与基础工程 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998.
- [2] 中华人民共和国建设部. 建筑桩基技术规范: JGJ 94—2008 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.

(责任编辑 张春文)