

混压同塔四回输电线路对管道的电磁影响

王添盟¹ 赵红东¹ 卢海燕¹ 林江¹ 耿立新¹ 刘赫²

¹(河北工业大学电子信息工程学院 天津 300401)

²(天津金沃能源科技股份有限公司 天津 300380)

摘要 利用电力系统电磁干扰仿真计算软件包CDEGS搭建特高压交流输电线路模型,分别仿真交流1 000 kV单回酒杯塔、1 000 kV双回伞形塔和1 000 kV/500 kV(220 kV)混压同塔四回输电线路对管道电磁干扰的分布情况,并针对1 000 kV/500 kV(220 kV)混压同塔四回混压输电线路不同导线相序布置、不同运行工况以及不同呼称高进行了系统的研究。计算结果表明:1 000 kV/500 kV混压同塔四回输电线路对管道的电磁干扰程度远小于1 000 kV单酒杯输电线路和1 000 kV双回伞形输电线路;1 000 kV/500 kV(220 kV)混压同塔四回输电线路的不同运行工况下,相比于输电线路距埋地管道的距离,电压级别对管道的电磁影响更大;1 000 kV正、逆相序布置排列较500 kV(220 kV)相序布置更为关键,其中1 000 kV逆相序、500 kV/220 kV同相序排列时,管道沿线的感应电压幅值最小。该研究成果对特高压输电工程和油气管道的安全运行具有重要的实际工程价值,并可为相关工程设计提供一定参考。

关键词 特高压,电磁影响,同塔四回,埋地油气管道,感应电压

中图分类号 TM726

DOI: 10.11889/j.1000-3436.2020.rj.38.060601

Electromagnetic influence of mixed voltage four-circuit transmission lines on the same tower to pipelines

WANG Tianmeng¹ ZHAO Hongdong¹ LU Haiyan¹ LIN Jiang¹ GENG Lixin¹ LIU He²

¹(School of Electronics and Information Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

²(Tianjin Jinwo Energy Technology Co., Ltd., Tianjin 300380, China)

ABSTRACT The Power system electromagnetic interference simulation calculation software package CDEGS was used to build Ultra high voltage (UHV) AC transmission line models to simulate AC 1 000 kV single-circuit wine glass tower, 1 000 kV double-circuit umbrella-shaped tower, and 1 000 kV/500 kV (the distribution of electromagnetic interference of 220 kV) mixed voltage transmission lines on the same tower to the pipeline. A systematic study was conducted on the different conductor phase sequence arrangement with different operating conditions and different nominal heights of 1 000 kV/500 kV (220 kV) four-circuit mixed voltage transmission line

基金资助: 光电信息控制和安全技术重点实验室基金项目(614210701041705)资助

第一作者: 王添盟,男,1995年8月出生,2018年于沈阳化工大学获得本科学位,现为河北工业大学在读硕士研究生,主要研究方向为通信信号与信息处理

通信作者: 赵红东,博士,教授,博士生导师, E-mail: zhaohd@hebut.edu.cn

收稿日期: 初稿 2020-05-09; 修回 2020-07-25

Supported by the Foundation Project of the Science and Technology on Electro-Optical Information Security Control Laboratory, China (614210701041705)

First author: WANG Tianmeng (male) was born in August 1995, and obtained his bachelor's degree from Shenyang University of Chemical Technology in 2018. Now he is a graduate student at Hebei University of Technology, focusing on communication signals and information processing

Corresponding author: ZHAO Hongdong, doctoral degree, professor, doctoral supervisor, E-mail: zhaohd@hebut.edu.cn

Received 09 May 2020; accepted 25 July 2020

on the same tower. The results showed that the electromagnetic interference of the 1 000 kV/500 kV mixed voltage four-circuit transmission line on the same tower to the pipeline was much smaller than both the 1 000 kV single wine glass transmission line and 1 000 kV double-circuit umbrella-shaped transmission line. Under different operating conditions, the voltage level was more susceptible to the electromagnetic influence of the pipeline compared to the distance of the transmission line from the buried pipeline. A 1 000 kV positive and reverse phase sequence arrangement was more critical than 500 kV (200 kV) phase sequence arrangement. When 1000 kV reverse phase sequence and 500 kV/200 kV in-phase sequence were arranged, the amplitude of induced voltage along the pipeline was found to be the smallest. The results have important practical engineering significance for the UHV transmission project and for the safe operation of oil and gas pipelines. Moreover, the results can provide a certain reference for related engineering designs.

KEYWORDS Ultra High Voltage, Electromagnetic influence, Four circuits on the same tower, Buried oil and gas pipelines, Induced voltage

CLC TM726

随着我国经济的快速发展,近年来对石油、天然气以及用电量的需求不断增加^[1]。由于输送油气管道建设和输电线路的架设对传输路径的选择原则极为相近,导致输电线路与输送油气管道长距离平行或交叉跨越的情况时有发生,交流输电线路对输送油气管道的电磁干扰问题日益突出。

针对交流输电线路对输送油气管道的电磁干扰问题,近年来国外已进行了大量研究^[2-4],尤其是加拿大学者Dawalibi^[5-6]从Sunde模型出发,简化了电磁场方程,通过求解线性代数方程组得到了地下导体系统感应电流分布情况,奠定了工程实际应用的理论基础。SES公司开发的CDEGS仿真软件包,开创性地将仿真模拟技术应用到解决电磁干扰的实际问题上,取得了成效。国内的相关研究起步较晚,随着西北750 kV骨干网架的建设,各大高校、研究院等相继展开探索交流500 kV、750 kV和1 000 kV输电线路对输送油气管道电磁影响的研究^[7-10]。齐磊等^[11]依据管道-大地回路传输线模型,求得了交流输电线路正常运行状态下,油气管道上产生的感性耦合电压的解析表达式;杨丝琪等^[12]建立了1 000 kV交流输电线路与埋地油气管道交叉和平行的仿真模型,针对输电线路单回运行和双回运行,仿真研究了平行交叉段管道干扰电压及交流电流密度分布,并给出了应用固态去耦合器的裸铜带敷设的防护措施,降低管道交流干扰电压。

架设同塔四回输电线路可增大单位线路的输电容量,从而有效地缓解输电线路走廊紧张的问题,以节省电力建设投资。黄学良等^[13]针对1 000 kV/500 kV混压同塔四回输电线路的电磁环

境问题,采用有限元法分析了线路下工频电场的特征及主要影响因素,研究了电场环境的优化方案以及屏蔽线位置与屏蔽效果的关系;郭天伟等^[14]采用模拟电荷法计算同塔四回混压输电线路导线下的工频电场,采用毕奥-萨瓦定律计算磁场数值,并采用激发函数法进行了无线电干扰的计算,同时运用BPA公式进行了可听噪声的计算。目前,针对特高压同塔混压四回输电线路的相关研究以输电线下电磁环境为主^[15-17],而此类输电线路对埋地管道的电磁影响研究基本处于空白。我国中东部地区用电量较大,土地资源稀缺,为缓解输电线路走廊拥挤,节省电力建设和运行成本,亟须解决架设同塔混压多回输电线路对油气管道电磁干扰的问题。

输电线路正常运行时,对附近埋地油气管道产生的交流干扰电压可能会威胁到人员的安全,本研究使用CDEGS仿真软件包,首先对比分析了1 000 kV单回、双回输电线路和1 000 kV/500 kV (220 kV)混压同塔四回输电线路对管道产生的感应电压分布情况,然后针对1 000 kV/500 kV (220 kV)混压同塔四回输电线路,采用管道与输电线路交叉的模型依次进行了如下的研究分析:(1)计算了三种特殊的运行状态(1 000 kV与500 kV/220 kV共同运行、1 000 kV单独运行、500 kV/220 kV单独运行)下,输电线路下方的管道沿线感应电压分布;(2)分别计算了9种不同相序下的管道感应电压峰值,并将结果绘制成柱状图;(3)以1 m为单位等间隔采样,计算了在杆塔下相导线最低高度从30 m提升至40 m的过程中,1 000 kV双回输电线路和1 000 kV/500 kV (220 kV)混压同塔四回输电

线路对管道产生感应电压的峰值，并绘制了峰值的变化情况；(4) 将计算结果与 GB/T 3805—2008 标准^[18] 规定的 33 V 人身安全电压的限值进行对比，并评估输电线路对管道的电磁干扰。

1 计算原理与限值

1.1 计算原理

交流输电线路在正常运行时，线路中的交变电流会在线路周围空间产生交变磁场，使附近的管道产生感应电压。该交变磁场存在于空气和大地中，当油气管道与输电线路并行或者交越时，会在管道两侧产生纵向电动势，该纵向电动势作用于油气管道与大地形成的回路，从而产生纵向电流和泄漏电流，并在管道防腐层的两侧产生电位差^[19]。这种耦合作用，被称为感性耦合作用，在交流输电线路正常运行对临近油气管道的电磁影响中起主要作用。

感性耦合电压的计算方法基于管道-大地回路传输模型。将大地视为参考导体，等值电路如图 1 所示。对每个微分单元管段，相应的频域电报方程见式 (1) 和式 (2)。

$$\frac{dU(x)}{dx} + ZI(x) - E(x) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{dI(x)}{dx} + YU(x) = 0 \quad (2)$$

式中： U 和 I 分别为管道沿线电压、电流； Z 和 Y 分别为管道-大地回路传输线模型的单位长度串联阻抗和并联导纳； E 为输电线路在单位长度管道上产生的感应电动势。

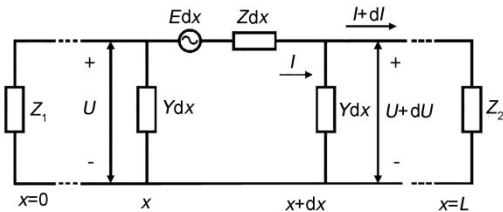


图1 管道-大地回路等值电路
Fig.1 Pipe-earth loop equivalent circuit

假设在该微元上感应电动势一定，可以得到其通解的指数形式如式 (3) 和式 (4)。

$$U(x) = Ae^{\gamma x} + Be^{-\gamma x} \quad (3)$$

$$I(x) = \frac{E}{Z} - \frac{1}{Z_c} (Ae^{\gamma x} - Be^{-\gamma x}) \quad (4)$$

式中： γ 为传播常数， $\gamma = \sqrt{ZY}$ ； Z_c 为特性阻抗， $Z_c = \sqrt{Z/Y}$ ， A 、 B 为待定系数。

根据终端约束条件 $U(L) = Z_2 I(L)$ 和 $U(0) = -Z_1 I(0)$ ，其中 Z_1 为首端阻抗， Z_2 为末端阻抗，代入整理后可得 (5) ~ (8) 式。

$$A = \frac{E[(1 + \rho_1)\rho_2 - (1 + \rho_2)e^{\gamma L}]}{2\gamma(\rho_1\rho_2 - e^{2\gamma L})} \quad (5)$$

$$B = \frac{E[(1 + \rho_1)e^{2\gamma L} - \rho_1(1 + \rho_2)e^{\gamma L}]}{2\gamma(\rho_1\rho_2 - e^{2\gamma L})} \quad (6)$$

$$\rho_1 = \frac{Z_1 - Z_c}{Z_1 + Z_c} \quad (7)$$

$$\rho_2 = \frac{Z_2 - Z_c}{Z_2 + Z_c} \quad (8)$$

1.2 人体安全电压限值

输电线路正常运行时，对附近埋地油气管道产生电磁影响为交流干扰，管道上产生的交流干扰电压可能会威胁到人员的安全，甚至对管道造成交流腐蚀。各类标准及规定的长时间作用下人体安全电压相关标准见表 1。

表1 人体安全电压标准及限值
Table 1 Some standards and limit values about human safety voltage

标准名称 Standard name	电压限值/V Voltage limit
GB/T 3805—2008	33
美国 NACE RP 0177—95	15
United States NACE RP 0177—95	
德国 AFK 第 3 号 German AFK No. 3	65
GB 6830—1986	60
TB/T 2832—1997	

从表 1 可以看出，人体安全电压标准限值有较严格的 15 V、较宽松的 60 V 以及适中的 33 V。由于油气管道埋于地下，一般只有在维修和测量时才有可能被专业操作人员接触，本文采用 GB/T 3805—2008 标准^[18] 规定的 33 V 作为人身安全电压

的限值。

2 计算模型与过程

2.1 计算模型

本文建立两个管道与输电线路相对位置模型：平行和交越模型，模型的位置关系见图2。

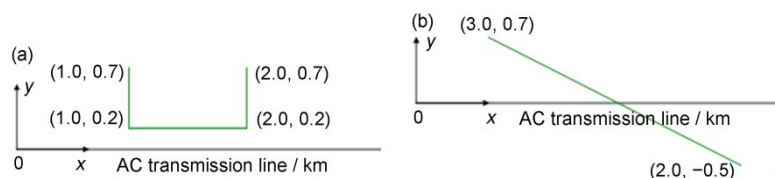


图2 管道与高压输电线路模型:(a)平行模型;(b)交越模型
Fig.2 Models of pipeline and high-voltage line: (a) parallel model; (b) crossing model

输电线路结构^[20-22]包括: 1 000 kV单回酒杯塔、1 000 kV双回伞形塔和1 000 kV/500 kV (220 kV)混压同塔四回输电线路, 如图3~4所示。其中, 1 000 kV导线型号为8×LJG-400/50, 500 kV导线型号为4×LJG-400/50, 220 kV导线型号为2×LJG-400/50, 架空地线的导线型号为LJG-99/55和OPGW-97/48, 计算的相线和中性线参数见表2。

模型中: 考虑1 000 kV线路运行时, 单相导线线电流为4 000 A; 500 kV线路运行时, 单相导线线电流为1 000 A; 220 kV线路运行时, 单相导线线电流为500 A。其中1 000 kV双回相序排列为ABC-CBA, 500 kV/220 kV双回相序排列BAC-CBA。

表2 高压输电线路相线、中性线参数
Table 2 Electrical parameters of high-voltage transmission line phase line and neutral line

	型号 Model	外径 / cm Outer diameter	相对电阻率 Relative resistivity	相对磁导率 Relative permeability
相线 Phase line	LJG-400/50	2.68	1	1
中性线 Neutral line	LJG-99/55	1.6	4	1
	OPGW-97/48	1.6	4	1

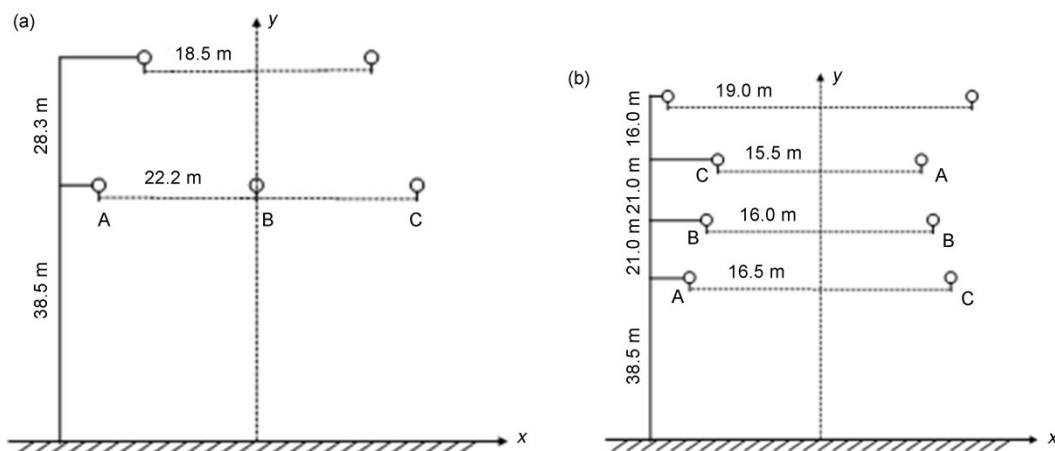


图3 1 000 kV输电结构:(a)单回酒杯塔;(b)双回伞形塔
Fig.3 1 000 kV transmission structure: (a) single-circuit wine glass tower; (b) double-circuit umbrella-shaped tower

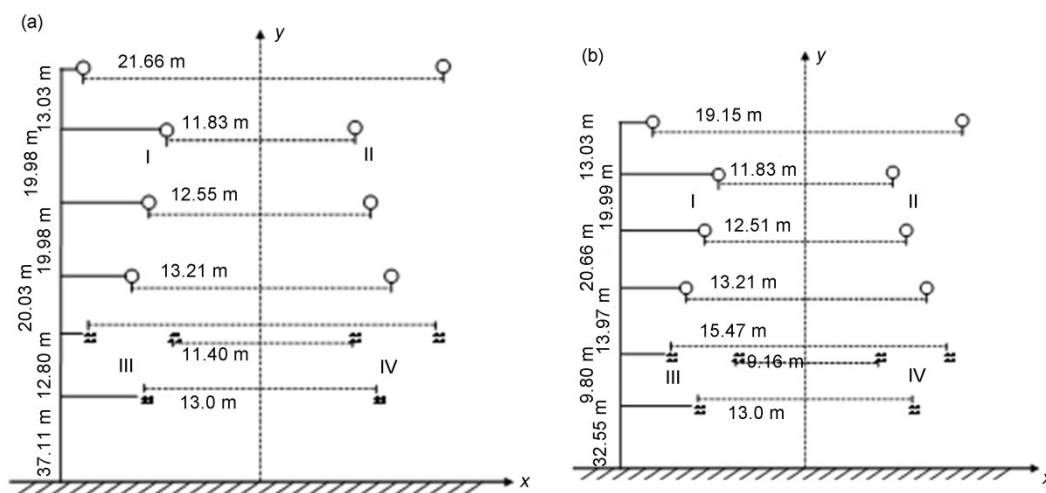


图4 混压同塔四回输电线路:(a) 1 000 kV/500 kV;(b) 1 000 kV/220 kV
Fig.4 Four-circuit mixed pressure transmission line on the same tower: (a) 1 000 kV / 500 kV; (b) 1 000 kV/220 kV

2.2 计算过程

电力系统电磁干扰仿真计算软件包CDEGS(电流分布、电磁场、接地和土壤结构分析)是基于矩量法开发的,以电磁理论为基础编写分析程序,不受频率限制,分析结果极为精确。其核心主要是计算由地上或地下任意形状导体所构成的网络在稳态、故障和雷击等暂态条件下周围电磁场分布及感应电位分布。该仿真计算软件包在分析交流输电线路对油气管道的电磁影响方面具有权威性,被国际大电网会议推荐使用,在国际上解决了大量的工程问题^[23]。

SESTLC子软件快速易用,可以解决任意导向的地上和埋设导体网络,可由任意数量的电流和电压源进行激励,首先输入系统模型的相关参数,计算出系统模型中各相线及地线的自、互感系数,最终计算管道上感应电压和管道涂层感应电压的分布数值,计算过程中需注意以下几点:(1)电力系统工频为50 Hz,系统单位采用公制;(2)管道模型1为“平行被干扰线路”,管道模型2为“弯曲被干扰线路”;(3)左侧接地阻抗和右侧接地阻抗分别是管道在左边终端和右边终端的接地阻抗值。本系统中,管道两端是悬空的,接地阻抗设为无穷大;(4)输电线路每段跨长为300 m,管道中每档距长度的分割数选为3;(5)本系统为埋地管道,电容耦合是可以忽略的,在稳态情况下,仅需要相电流值作为激励。

3 计算结果

3.1 不同输电结构

计算得到1 000 kV单回酒杯线路、1 000 kV双回伞形输电线路和1 000 kV/500 kV混压同塔四回输电线路对管道产生的感应电压分布情况,如图5所示。

由图5(a)可知,管道与输电线路并行时,管道沿线的感应电压成对称折线“V”形分布,管道与输电线路平行端点处的感应电压最高,其中1 000 kV单回、双回输电线路、1 000 kV/500 kV混压同塔四回输电线路对管道的感应电压峰值分别为14.00 V、6.17 V、4.25 V,1 000 kV/500 kV混压同塔四回输电线路的感应电压峰值相较于1 000 kV单回、双回输电线路的减幅分别为69.6%和31.1%。计算出的感应电压峰值均小于GB/T 3805—2008标准规定的33 V人身安全电压限值,分别为限值的42.0%、18.7%和12.9%。

由图5(b)可知,管道与输电线路交越时,感应电压成“W”形分布,管道感应电压的最大值出现在交叉点处,沿着交叉点向两侧递减,1 000 kV单回、双回输电线路、1 000 kV/500 kV混压同塔四回输电线路对管道的感应电压峰值分别为46.75 V、26.18 V和13.60 V,1 000 kV/500 kV混压同塔四回输电线路的感应电压峰值相较于1 000 kV单回、双回输电线路的减幅分别为70.9%和48.1%。其中,单回输电线路对管道的电压干扰峰值为安全限值的1.42倍,双回、四回输电线路的

感应电压峰值分别为安全限值的79.3%和41.2%。

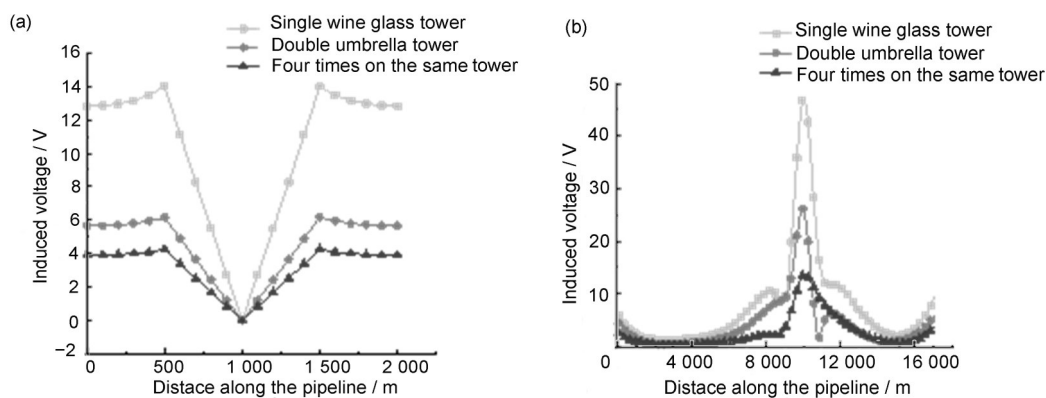


图5 不同输电结构对管道的感应电压分布对比:(a)并行情况;(b)交越情况

Fig.5 Comparison of induced voltages of different transmission structures on pipelines: (a) parallel situation; (b) crossover situation

综上所述,1000 kV/500 kV混压同塔四回输电线路对管道的电磁干扰程度小于1000 kV单酒杯输电线路和1000 kV双回伞形输电线路,因为多回输电线路中,线路之间的电磁干扰会相互抵消。同塔多回线路回路间的耦合作用强,除了本回路的电磁感应外,还有来自另一电压等级回路

的影响。

3.2 不同运行工况

三种不同的运行方式下的管道沿线感应电压分布情况如图6所示。

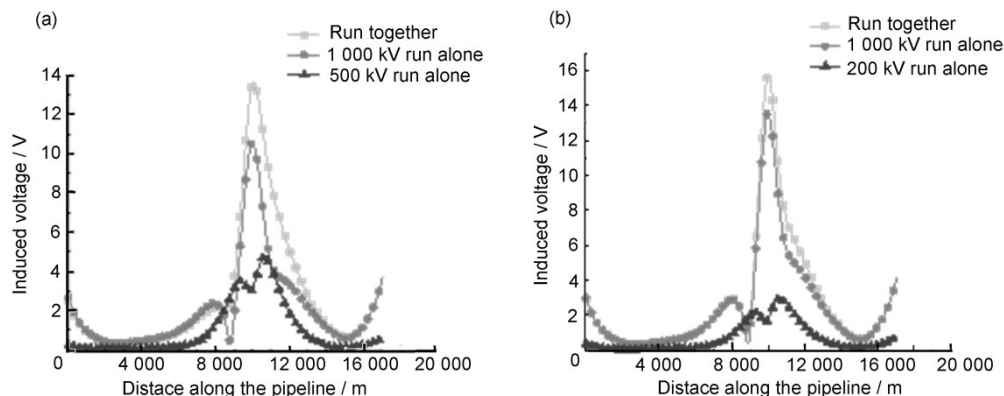


图6 不同运行工况感应电压分布对比:(a)1000 kV/500 kV;(b)1000 kV/220 kV

Fig.6 Induced voltages in different operating states: (a) 1000 kV/500 kV; (b) 1000 kV/220 kV

如图6(a)所示,在1000 kV与500 kV共同运行状态下,管道沿线的感应电压峰值为13.60 V,出现在管道与输电线路交越处,管道沿线感应电压整体呈现“W”型分布;1000 kV单独运行时,管道沿线感应电压峰值为10.46 V,与共同运行时相比降低很多,占共同运行时的76.9%;500 kV单独运行状态下,在管道与输电线路交越附近,感应电压变化趋势大致呈“V”型分布,感应电压整体上呈现“M”形分布,感应电压峰值为4.69 V,是共同运行时的34.4%。计算得到的管道沿线感应

电压峰值分别为人体电压限值的41.2%、31.7%和14.2%。

如图6(b)所示,在1000 kV与220 kV共同运行状态下,管道沿线的感应电压峰值为15.64 V,出现在管道与输电线路交越处,管道沿线感应电压整体呈现“W”型分布;1000 kV单独运行时,管道感应电压峰值为13.48 V,占共同运行时的86.2%;220 kV单独运行状态下,在管道与输电线路交越附近,感应电压变化趋势大致呈“V”型分布,感应电压整体上呈现“M”形分布,感应电压

峰值为2.91 V，是共同运行时的18.6%。计算得到的管道沿线感应电压峰值分别为人体电压限值的47.3%、40.8%和8.8%。

综上所述，虽500 kV/220 kV输电线路较1 000 kV距埋地管道距离更近，但1 000 kV电压等级较500 kV/220 kV高，此因素对埋地管道的电磁干扰影响更为显著，500 kV/220 kV单独运行时，均低于1 000 kV单独运行状态，且500 kV/220 kV单独

运行时，管道沿线感应电压分布呈现不同的变化趋势。

3.3 不同相序布置

计算得到9种不同相序布置排列下管道沿线感应电压的幅值，并绘制成柱状图。1 000 kV、500 kV（220 kV）输电线路的相序布置情况见表3，计算结果见图7。

表3 不同相序布置排列方式
Table 3 Different phase sequence layout

电压等级 Voltage level	相序排列 Phase sequence arrangement								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1 000 kV	A C	A C	A C	A A	A A	A A	A C	A C	A C
	B B	B B	B B	B B	B B	B B	B A	B A	B A
	C A	C A	C A	C C	C C	C C	C B	C B	C B
500 kV(220 kV)	BA CB	AB BA	AB AB	BA CB	AB BA	AB AB	BA CB	AB BA	AB AB
	C A	C C	C C	C A	C C	C C	C A	C C	C C

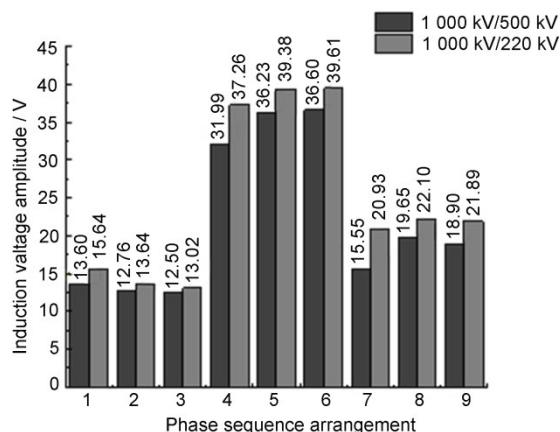


图7 不同相序管道感应电压幅值
Fig.7 Induced voltages in different phase sequence

由图7可知，第6种相序布置，即1 000 kV同相序、500 kV/220 kV同相序排列时，管道沿线的感应电压幅值最大，为36.60 V和39.61 V；第3种相序布置，即1 000 kV逆相序、500 kV/220 kV同相序排列时，管道沿线的感应电压幅值最小，为12.5 V和13.02 V。在这9种典型的相序排列下，1 000 kV/500 kV（220 kV）混压同塔四回输电线路对管道的感应电压峰值最大时分别为最小值的2.93和3.04倍。计算结果显示，在1 000 kV/200 kV混压同塔输电结构中，1 000 kV同相序布置的三种相序时，管道感应电压峰值均超过了安全限值，其余相序都没有超过安全限值；1 000 kV/500 kV混压同塔输电结构中，1 000 kV同相序布置的三种相

序时，两种相序的管道感应电压峰值超过了安全限值，其余相序都没有超过安全限值。

通过对比1、4、7或2、5、8或3、6、9三种相序布置，即控制220 kV/500 kV相序固定的情况下，观察1 000 kV相序对管道的电磁影响，可以看出，1 000 kV同相序排列对管道沿线的电磁干扰程度最强，而1 000 kV逆相序排列时最弱。通过观察1、2、3或4、5、6或7、8、9三种相序布置，可以看出1 000 kV相序布置比220 kV/500 kV相序布置更为关键。

3.4 不同呼称高

导线最小对地距离的取值是特高压输电线路需要考虑的关键因素之一。杆塔呼称高度决定了输电导线对地高度，计算中导线对地高度对管道干扰程度有一定的影响。在不同相序排列的实验中，第3种相序布置最为理想，因此本实验中相序布置采用相序排列3，即1 000 kV逆相序、500 kV/220 kV同相序排列。不同呼称高度下，计算得到的管道感应电压峰值如图8所示。

由图8可知，随着杆塔下相导线最低高度从30 m提升至40 m的过程中，管道沿线的感应电压峰值基本上成线性下降的变化趋势。因此，当杆塔下相导线为30 m时，管道沿线感应电压峰值最大，其中1 000 kV双回输电线路的感应电压峰值最大值为33.63 V，1 000 kV/500 kV（220 kV）混

压同塔四回输电线路的感应电压峰值最大值分别为14.65 V和14.23 V,减幅分别为56.4%和57.7%。计算结果显示,只有双回输电线路,下相导线为30 m时,管道感应电压超过了人体电压安全限值。

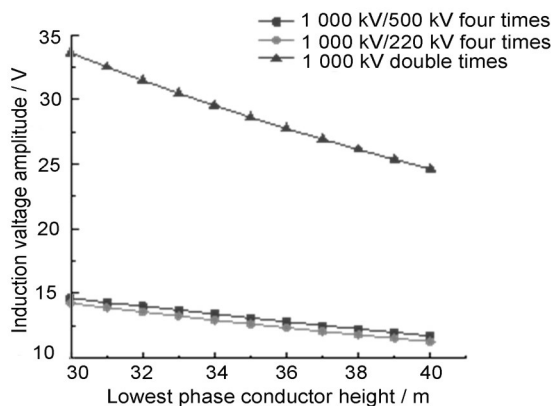


图8 不同呼称高度下感应电压幅值
Fig.8 Induced voltages in different nominal heights

相比于1 000 kV双回伞形输电线路,1 000 kV/500 kV(220 kV)混压同塔四回输电线路对管道的感应电压峰值变化较为平缓。因此,可通过适当地调整杆塔的呼称高度来降低1 000 kV/500 kV(220 kV)输电导线对地高度对管道的干扰程度。

4 结论

分别建立了交流1 000 kV单回酒杯塔、交流1 000 kV双回伞形塔和交流1 000 kV/500 kV(220 kV)混压同塔四回输电线路,对比分析了三种不同的输电线路结构对管道电磁干扰的分布情况,并针对1 000 kV/500 kV(220 kV)混压同塔四回输电线路的不同导线相序布置、不同运行工况以及不同呼称高度的情况进行了系统的研究分析,将计算结果与GB/T 3805—2008标准规定的33 V人身安全电压的限值进行比较和评估。

(1)管道与输电线路交越时,1 000 kV/500 kV混压同塔四回输电线路对管道的电磁干扰幅值相较于1 000 kV单回酒杯输电线路和1 000 kV双回伞形输电线路,减幅分别为70.9%和48.1%。单回输电线路对管道的感应电压峰值为人体安全限值的1.42倍,而双、四回输电线路的管道干扰电压均小于人体安全限值。这是因为同塔多回路回路间的耦合作用强,除了本回路的电磁感应外,还有来自另一电压等级回路的影响,多回输电线路中,

线路之间的电磁干扰会相互抵消。

(2)1 000 kV/500 kV(220 kV)混压同塔四回输电线路的三种特殊运行状态下,管道沿线感应电压均小于人体安全电压限值,1 000 kV与500 kV(220 kV)共同运行时对管道的电磁干扰程度最强;500 kV/220 kV单独运行时,感应电压均低于1 000 kV单独运行的状态;虽500 kV/220 kV输电线路较1 000 kV距埋地管道距离更近,但1 000 kV电压等级较500 kV/220 kV高,此因素对埋地管道的电磁干扰影响更为显著;500 kV/220 kV单独运行状态与1 000 kV/500 kV(220 kV)四回共同运行状态相比,管道沿线感应电压分布趋势发生了明显的变化,由W型分布变化为M型分布。

(3)在9种典型的相序布置下,1 000 kV同相序、500 kV/220 kV同相序排列时,管道沿线的感应电压幅值最大;1 000 kV逆相序、500 kV/220 kV同相序排列时,管道沿线的感应电压幅值最小;1 000 kV同相序排列对管道沿线的电磁干扰程度最强,而1 000 kV逆相序排列布置时最弱;1 000 kV正、逆相序布置排列较500 kV(220 kV)相序布置排列方式更为关键。计算结果表明,1 000 kV同相序布置时,管道沿线感应电压均超过了人体安全限值。实际工程中,导线的相序要结合电磁环境,尽量采用使感应电压和电流小的相序方式,比如本系统中1 000 kV应尽量避免使用同相序,建议使用逆相序布置。

(4)在固定的相序布置下,随着杆塔下相导线逐渐提升,1 000 kV双回输电线路和1 000 kV/500 kV(220 kV)混压同塔四回输电线路对管道的电磁干扰峰值均呈线性下降的变化趋势;相比于1 000 kV双回输电线路,1 000 kV/500 kV(220 kV)混压同塔四回输电线路对管道的感应电压峰值变化较为平缓。在双回输电线路结构中,最低下相导线高度为30 m时,管道感应电压峰值超过了人体安全限值,可通过适当调整呼称高度来降低1 000 kV/500 kV(220 kV)输电导线对地高度对管道的干扰。

参考文献

- 杜至刚,牛林,赵建国,等.发展特高压交流输电,建设坚强的国家电网[J].电力自动化设备,2007,27(5):1-5. DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2007.05.001.
DU Zhigang, NIU Lin, ZHAO Jianguo, et al. Develop UHV AC transmission and build a strong national grid[J].

- Electric Power Automation Equipment, 2007, **27**(5): 1-5. DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2007.05.001.
- 2 Lucca G. Different approaches in calculating AC inductive interference from power lines on pipelines[J]. IET Science, Measurement & Technology, 2018, **12**(6): 802-806. DOI: 10.1049/iet-smt.2018.0086.
- 3 Wang C, Liang X, Radons R. Minimum separation distance between transmission lines and underground pipelines for inductive interference mitigation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, **35**(3): 1299-1309. DOI: 10.1109/TPWRD.2019.2941928.
- 4 Tao Q, Suna B, Bingran S, *et al.* Analysis of electromagnetic influence between high-voltage AC transmission lines and buried oil and gas pipelines (May 2018)[C]//Chinese National Committee of CIREN. 2018 China International Conference on Electricity Distribution (CICED), IEEE, 2018: 1099-1104. DOI: 10.1109/CICED.2018.8592579.
- 5 Dawalibi F P, Southey R D. Analysis of electrical interference from power lines to gas pipelines. I. Computation methods[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, **4**(3): 1840-1846. DOI: 10.1109/61.32680.
- 6 Dawalibi F P, Southey R D. Analysis of electrical interference from power lines to gas pipelines. II. Parametric analysis[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1990, **5**(1): 415-421. DOI: 10.1109/61.107306.
- 7 蒋俊. 交流线路正常运行时对平行敷设油气管道的电磁影响[J]. 电网技术, 2008(2): 82-84. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2008.02.012.
JIANG Jun. Electromagnetic influence on parallel laying of oil and gas pipelines during normal operation of AC lines[J]. Power System Technology, 2008(2): 82-84. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2008.02.012.
- 8 王沛. 高压交流输电线路对穿越下方油气管道的电磁影响及防护措施研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
WANG Pei. Research on electromagnetic influence and protective measures of high-voltage AC transmission lines crossing the oil and gas pipelines[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- 9 王爱玲. 750 kV 高压交流输电线路对埋地管道的干扰规律研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2013.
WANG Ailing. Research on the interference rule of 750 kV high voltage AC transmission line to buried pipelines[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2013.
- 10 董根生, 蒋剑, 相生荣, 等. 750 kV 交流线路对多条油气管道的电磁影响研究[J]. 中国电机工程学报, 2015(10): 16-22. DOI: 10.3969/j.issn.1002-1140.2015.10.007.
DONG Gensheng, JIANG Jian, XIANG Shengrong, *et al.* Study on the electromagnetic influence of 750 kV AC lines on multiple oil and gas pipelines[J]. China Electric Power (Technology Edition), 2015(10): 16-22. DOI: 10.3969/j.issn.1002-1140.2015.10.007.
- 11 齐磊, 崔翔. 特高压交流输电线路正常运行时对输油输气管道的感性耦合计算模型[J]. 中国电机工程学报, 2010, **30**(11): 121-126. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.2010.21.001.
QI Lei, CUI Xiang. Inductive coupling modelling of normally operating UHV AC transmission line to adjacent oil/gas pipeline[J]. Proceedings of the Chinese Electrical Engineering, 2010, **30**(11): 121-126. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.2010.21.001.
- 12 杨丝琪, 陈维, 郭天伟, 等. 特高压交流输电线路正常运行对埋地油气管道电磁影响及防护措施研究[J]. 高压电器, 2019, **55**(6): 205-211. DOI: 10.13296/j.1001-1609.hva.2019-06-030.
YANG Siqi, CHEN Wei, GUO Tianwei, *et al.* Study on the electromagnetic influence of the normal operation of UHV AC transmission lines on buried oil and gas pipelines and protective measures[J]. High Voltage Apparatus, 2019, **55**(6): 205-211. DOI: 10.13296/j.1001-1609.hva.2019-06-030.
- 13 黄学良, 王瑜, 闻枫. 1 000 kV/500 kV 同杆混压四回输电线路电磁环境影响因素及优化措施分析[J]. 高电压技术, 2015, **41**(11): 3642-3650. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.2015.11.017.
HUANG Xueliang, WANG Yu, WEN Feng. Electromagnetic environment influencing factors and optimization measures for a 1 000 kV/500 kV mixed-voltage four-circuit transmission line on the same tower [J]. High Voltage Engineering, 2015, **41**(11): 3642-3650. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.2015.11.017.
- 14 郭天伟, 罗日成, 杨雅倩, 等. 750 kV/330 kV 混压同塔四回输电线路电磁环境研究[J]. 高压电器, 2019, **55**(1): 157-164. DOI: 10.13296/j.1001-1609.hva.2019.01.024.
GUO Tianwei, LUO Richeng, YANG Yaqian, *et al.* Study on electromagnetic environment of 750 kV/330 kV mixed voltage four-circuit transmission line on the same tower[J]. High Voltage Apparatus, 2019, **55**(1): 157-164. DOI: 10.13296/j.1001-1609.hva.2019.01.024.
- 15 李振强, 刘传铨, 戴敏. 交流 1 000 kV 与 500 kV/200 kV 同塔四回线路的感应电压和电流[J]. 高电压技术, 2010, **36**(11): 121-126. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.2010.21.001.

- 2013, **39**(12): 3022-3028. DOI: 10.3969/j. issn. 1003-6520.2013.12.026.
- LI Zhenqiang, LIU Chuanquan, DAI Min. Induced voltage and current of AC 1000 kV and 500 kV/200 kV 4-circuit lines on the same tower[J]. High Voltage Engineering, 2013, **39**(12): 3022-3028. DOI: 10.3969/j. issn.1003-6520.2013.12.026.
- 16 杜庆中, 逯迈. 1 000 kV/500 kV 同塔混压四回交流输电线路电磁暴露安全评估[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2020, **38**(2): 020602. DOI: 10.11889/j. 1000-3436.2020. rrj.38.020602.
 - DU Qingzhong, LU Mai. Safety assessment of electromagnetic exposure to 1000 kV/500 kV mixed voltage four-circuit AC transmission lines on the same tower[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2020, **38**(2): 020602. DOI: 10.11889/j. 1000-3436.2020.rrj.38.020602.
 - 17 童涛, 顾丹珍, 崔勇, 等. 交流1 000 kV与500 kV/200 kV 同塔四回线路的潜供电流问题研究[J]. 高压电器, 2017, **53**(11): 191-196. DOI: 10.13296/j1001-1609. hva.2017.11.031.
 - TONG Tao, GU Danzhen, CUI Yong, *et al.* Research on the submerged current supply of AC 1000 kV and 500 kV/ 200 kV four-circuit lines on the same tower[J]. High Voltage Apparatus, 2017, **53**(11): 191-196. DOI: 10.13296/j1001-1609.hva.2017.11.031.
 - 18 刘江, 曾雁鸿, 方晓燕, 等. 特低电压(ELV)限值: GB/T 3805—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
 - LIU Jiang, ZENG Yanhong, FANG Xiaoyan, *et al.* Extra low voltage (ELV) limit: GB/T 3805—2008[S]. Beijing: China Standard Press, 2008.
 - 19 祝贺, 胡艺阳. 高压输电线路对管道稳态电磁干扰的仿真研究[J]. 东北电力大学学报, 2017, **37**(3): 83-89. DOI: 10.3969/j.issn.1005-2992.2017.03.014.
 - ZHU He, HU Yiyang. Simulation research on steady-state electromagnetic interference of high-voltage transmission lines on pipelines[J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2017, **37**(3): 83-89. DOI: 10.3969/j.issn.1005-2992.2017.03.014.
 - 20 李国辉, 钟国森, 黄宵宁. 输电线路基础[M]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
 - LI Guohui, ZHONG Guosen, HUANG Xiaoning. Transmission line foundation[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2011.
 - 21 孙志远, 孟絮絮, 马竞, 等. 特高压交流输电线路对管道的电磁干扰研究[J]. 安徽电力, 2018, **35**(4): 41-44.
 - SUN Zhiyuan, MENG Xuxu, MA Jing, *et al.* Electromagnetic interference of UHV AC transmission lines to pipelines[J]. Anhui Electric Power, 2018, **35**(4): 41-44.
 - 22 杨庆, 司马文霞, 孙义豪, 等. 1 000 kV/500 kV 同塔混压四回输电线路反击耐雷性能[J]. 高电压技术, 2012, **38**(1): 132-139. DOI: 10.3969/j. issn. 1003-6520.2012.01.019.
 - YANG Qing, SIMA Wenxia, SUN Yihao, *et al.* 1 000 kV/ 500 kV mixed voltage four-circuit transmission line on the same tower lightning protection performance[J]. High Voltage Engineering, 2012, **38**(1): 132-139. DOI: 10.3969/j.issn.1003-6520.2012.01.019.
 - 23 牛晓民. 电力系统接地分析软件CDEGS简介[J]. 华北电力技术, 2004(12): 29-31. DOI: 10.3969/j. issn. 1003-9171.2004.12.009.
 - NIU Xiaomin. Introduction to power system grounding analysis software CDEGS[J]. North China Electric Power, 2004(12): 29-31. DOI: 10.3969/j. issn. 1003-9171.2004.12.009.