铁路10 kV电力电缆屏蔽层感应电压计算分析

为了将铁路10 kV电力电缆屏蔽层感应电压控制在合理的范围内，根据电气化铁路供电系统的特点，采用ATPdraw软件仿真和理论分析的方法，仿真计算电气化铁路供电系统（即牵引供电系统和电力电缆供电系统）对电力电缆屏蔽层感应电压的影响，分类讨论在不同输电线路长度下基于屏蔽层感应电压的电力电缆屏蔽层接地方式选择。仿真计算结果表明，通过改变牵引供电电流相位、幅值以及调整电缆间距可以有效地降低电力电缆屏蔽层感应电压。同时给出了在三种接地方式下，当牵引供电电流相位改变时，电力电缆最大敷设长度与电缆间距的关系。

王建军[1] 苏梓铭[2] 吴季浩[1]／1.上海市电力公司 2.中国电力科学研究院

王建军／高级培训师

关键词／Keywords
电力电缆·
感应电压·
屏蔽层·
接地方式·

在电气化铁路供电系统中，强电线路有机车牵引线和10 kV三相供电电缆。机车牵引线与10 kV电力电缆处于同一电磁环境中，牵引供电电流和电缆缆芯工作电流通过电磁耦合在电力电缆屏蔽层中产生感应电动势，可能危及人员、设备的安全。在运行中一般采用电力电缆屏蔽层两端直接接地方式，通过地电位的钳制作用降低屏蔽层感应电压。这种屏蔽层接地方式虽然具有良好的可靠性和可操作性，但是由于屏蔽层存在环流会造成较大损耗，从而造成了很大的浪费。因此，研究电力电缆屏蔽层接地方式的选择以及降低屏蔽层感应电压的方法，具有重要的工程应用价值。

本文提出基于ATPdraw的仿真计算方法，建立了各种屏蔽层接地方式下的电缆输电线路仿真模型，从电气化铁路供电系统和电缆参数两方面研究电力电缆屏蔽层感应电压的影响因素，并对在不同的线路长度下电缆屏蔽层接地方式的选择作出可行性分析。

电气化铁路牵引供电系统对电力电缆屏蔽层感应电压影响的仿真计算

由于电气化铁路供电系统的特殊性，牵引供电系统与电力电缆输电线路处于同一个电磁环境中，所以铁路用10 kV电力电缆屏蔽层感应电压可看作牵引供电电流和电力电缆工作电流在电缆屏蔽层上所产生的感应电压的矢量和。因此，探讨牵引供电电流与电缆工作电流之间的相位关系以及牵引供电电流幅值对电力电缆屏蔽层感应电压的影响，具有现实的工程意义。

在实际运行中，电缆输电线路负载的改变使电缆工作电流频繁变化，电缆屏蔽层感应电压也随电缆工作电流的增大而升高，为研究恶劣条件下的电力电缆屏蔽层感应电压，需改变电力电缆负载，使电力电缆工作电流达到较大的数值。同时，电力电缆工作电流的相位主要取决于电力电缆负载和变压器联结组标号的情况，为了简化计算分析，通过改变负载使其成为纯电阻负载，设置变压器联结组标号为Yy0，使牵引供电电流与电缆工作电流的某一相同相。

根据系统实际接线建立图1所示的仿真模型。变电所供电电源经变压器向电力电缆线路供电，*RLC*是三相电缆输电线路的负载模型，牵引线工作电流通过机车后经钢轨和回流线回流，电缆屏蔽层采用一端直接接地、另一端经保护器接地的方式，电缆和导线的空间位置如图2所示。计算参数如下：10 kV电源变压器

中国知网 https://www.cnki.net

联结组标号Yy0；电缆输电线路负载6.878 2 Ω；单芯电力电缆导体标称截面积400 mm^2；导体直径23.8 mm；绝缘层标称厚度3.4 mm；金属屏蔽层厚度2.2 mm；电缆外径39 mm；电缆线路长度1 000 m；牵引供电电流888.9 A；接地电阻1×10^{-5} Ω，可看作理想接地。

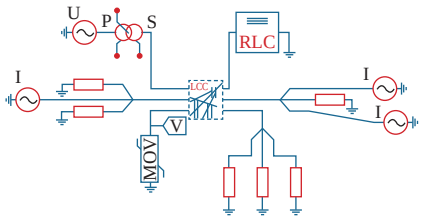


图1　电力电缆屏蔽层单端接地感应电压计算模型

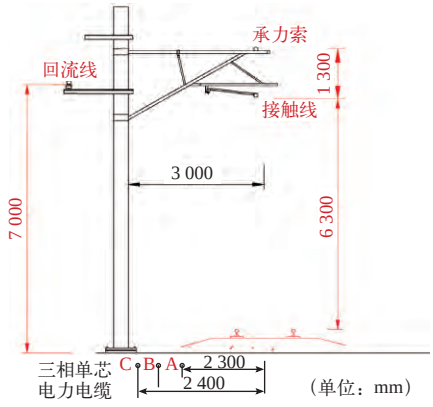


图2　接触网及电力电缆空间结构

在仿真计算中仅改变牵引供电电流的相位，使其分别与A、B和C三相电缆工作电流同相，观察电力电缆屏蔽层感应电压的变化。仿真结果如表1所示。

表1　不同情况下电力电缆屏蔽层感应电压

（单位：V）

电气化铁路供电系统工作情况	电缆屏蔽层感应电压		
	A相	B相	C相
仅有牵引供电电流工作	28.0	27.6	27.2
仅有电缆工作电流工作	106.4	75.2	106.6
牵引供电电流与A相电缆工作电流同相	82.2	93.4	128.2
牵引供电电流与B相电缆工作电流同相	111.7	47.7	115.3
牵引供电电流与C相电缆工作电流同相	130.6	91.0	81.2

注：线路长度1 km，牵引供电电流888.9 A，电缆间距50 mm，电缆屏蔽层一端理想接地，另一端经保护器接地。

由表1可知，当牵引供电电流与A相、C相电缆工作电流同相时，电力电缆屏蔽层感应电压的幅值都较大，达到了130 V；当牵引供电电流与B相电缆工作电流同相时，电力电缆屏蔽层感应电压幅值显著降低，仅为115 V，同时，中间相（B相）电力电缆屏蔽层感应电压很低，仅为47.7 V。

下面使用两组常用公式分别进行理论分析值校验。设B相电缆工作电流$\boldsymbol{I}_B=\boldsymbol{I}=I\angle0°$，当仅有电缆工作电流作用时，各相电缆屏蔽层感应电压为

$$\begin{cases}\boldsymbol{U}_A=I[\dfrac{\sqrt{3}}{2}(X_s+X_m)+\dfrac{1}{2}\mathrm{j}(X_s-X_m)]\\ \boldsymbol{U}_B=-\mathrm{j}IX_s\\ \boldsymbol{U}_C=I[-\dfrac{\sqrt{3}}{2}(X_s+X_m)+\dfrac{1}{2}\mathrm{j}(X_s-X_m)]\end{cases}\quad(1)$$

式中，$X_s=2\omega\ln\dfrac{S}{r_s}\times10^{-4}$ Ω/km；$X_m=2\omega\ln2\times10^{-4}$ Ω/km。

此时负载为6.878 2 Ω，电缆工作电流$I=1\,069$ A，电缆相间距离$S=50$ mm，电缆金属屏蔽层半径$r_s=17.5$ mm，代入式（1）得$U_A=U_C=102.24$ V，$U_B=70.55$ V。

当仅有牵引供电电流作用时，由于各相电缆与牵引供电系统相对位置大致相同，因此其屏蔽层感应电压为

$$\boldsymbol{U}_a\approx\boldsymbol{U}_b\approx\boldsymbol{U}_c=-\mathrm{j}\omega\boldsymbol{I}_{牵引}M\quad(2)$$

式中，$M=(2\ln\dfrac{1}{S_1}-\ln\dfrac{1}{S_2}-\ln\dfrac{1}{S_3})\times10^{-4}$ H/km。

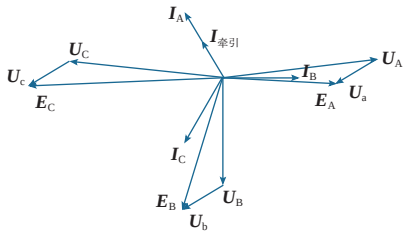
取A相电缆与牵引线距离$S_1=7.18$ m，A相电缆与回流线距离$S_2=7.53$ m，A相电缆与钢轨距离$S_3=2.51$ m。将以上数据代入式（2）得单相电缆和牵引供电系统互感$M=-1.003\times10^{-4}$ H/km，则$U_a\approx U_b\approx U_c=28.00$ V。

由上述理论值校验可以看出，仿真结果与理论计算值吻合，同时，根据理论计算值绘制在牵引供电电流分别与A、B、C三相电缆工作电流同相时电缆屏蔽层感应电压合成矢量图，如图3所示。

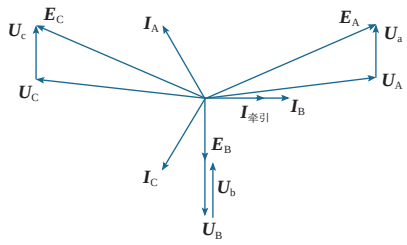
从图中可以看出，当牵引供电电流与B相（中间相）电缆工作电流同相时，电力电缆屏蔽层感应电压幅值最小。

在实际运行中，由于电缆线路负载的改变，

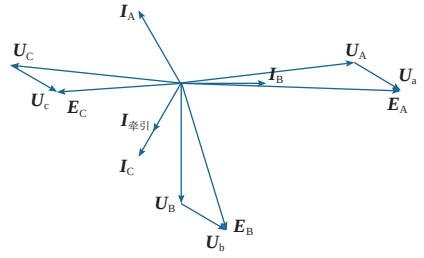
中国知网　https://www.cnki.net



（a）牵引供电电流与A相电缆工作电流同相



（b）牵引供电电流与B相电缆工作电流同相



（c）牵引供电电流与C相电缆工作电流同相

图3　电缆屏蔽层感应电压合成矢量

牵引供电电流与电缆工作电流之间的相位关系也是不断变化的。因此，基于前面的分析作出一般情况下电缆屏蔽层感应电压合成矢量图，如图4所示。

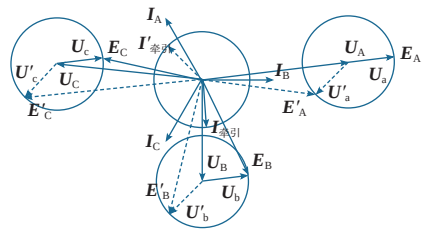


图4　一般情况下电缆屏蔽层感应电压合成矢量

从图中可以看到，随着牵引供电电流$\boldsymbol{I}'$牵引的相位发生变化，由牵引供电电流感应的屏蔽层感应电压$\boldsymbol{U}'_a$、$\boldsymbol{U}'_b$和$\boldsymbol{U}'_c$的相位也发生改变。因此，电力电缆屏蔽层感应电压$\boldsymbol{E}'_A$、$\boldsymbol{E}'_B$和$\boldsymbol{E}'_C$的幅值和相位也发生了改变。当牵引供电电流$\boldsymbol{I}_{牵引}$超前B相电缆工作电流$\boldsymbol{I}_B$83.4°时，$\boldsymbol{U}_a$与$\boldsymbol{U}_A$相位相同，此时A相电缆屏蔽层感应电压合成矢量$\boldsymbol{E}_A$达到最大值。

令牵引供电电流与B相（中间相）电缆工作电流同相，在仿真计算中仅改变牵引供电电流的幅值，观察电缆屏蔽层感应电压的变化。仿真结果如表2所示。

表2　不同牵引供电电流时电缆屏蔽层感应电压

牵引供电电流幅值/A	电缆屏蔽层感应电压/V		
	A相	B相	C相
700	110.0	53.5	113.0
800	111.0	50.5	114.1
888.9	111.7	47.7	115.3
1 000	112.9	44.3	116.7
1 100	114.0	41.2	118.2

注：线路长度1 km，电缆间距50 mm，电缆屏蔽层一端理想接地，另一端经保护器接地。

结合图3b分析可知，当牵引供电电流幅值增大时，其感应的电缆屏蔽层感应电压也增大，因此$\boldsymbol{E}_A$和$\boldsymbol{E}_C$增大，而$\boldsymbol{E}_B$减小。

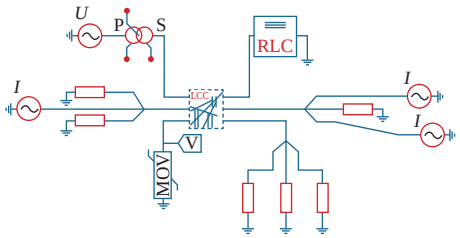
由仿真计算和理论分析可以得出：①当牵引供电电流与B相（中间相）电缆工作电流同相时，电力电缆屏蔽层感应电压幅值最小，同时，随着牵引供电电流幅值的增大，电力电缆边相的屏蔽层感应电压增大，中间相的屏蔽层感应电压减小。②当牵引供电电流超前B相（中间相）电缆工作电流83.4°时，A相电缆屏蔽层感应电压幅值达到最大值。③通过改变电力电缆的空间位置，调整其与牵引线、钢轨和回流线的距离，从而降低单相电缆和牵引供电系统互感M的绝对值，减小牵引供电电流感应的屏蔽层感应电压幅值，达到削减电缆屏蔽层感应电压的目的。

电气化铁路电缆供电系统对电力电缆屏蔽层感应电压影响的仿真计算

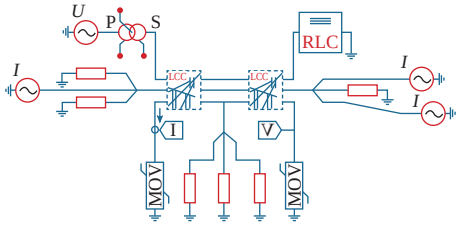
根据系统实际接线，利用ATP－EMTP仿真平台，建立在不同电力电缆屏蔽层接地方式下电气化铁路供电系统模型，从而对影响电缆屏蔽层感应电压的因素进行分析。计算模型如图5所示，计算参数与图1所示模型的计算参数相同。

分别考虑在不同的电力电缆屏蔽层接地方式

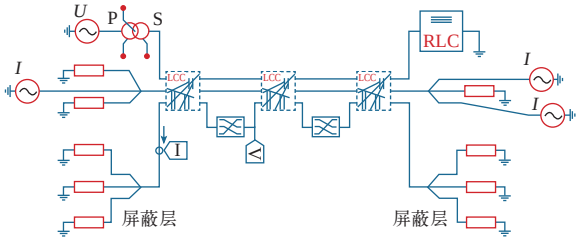
中国知网 https://www.cnki.net



（a）电力电缆屏蔽层单端接地感应电压计算模型



（b）电力电缆屏蔽层中性点接地感应电压计算模型



（c）电力电缆屏蔽层交叉互联接地感应电压计算模型

图5　电力电缆屏蔽层感应电压计算模型

下，电力电缆屏蔽层感应电压与电缆间距、屏蔽层厚度的关系如表3、表4所示。

表3　不同电缆间距时电缆屏蔽层感应电压

电缆间距/mm	电缆屏蔽层感应电压/V		
	单端接地	中性点接地	交叉互联接地
50	116.4	56.4	37.0
100	162.6	79.5	52.0
150	189.6	93.0	60.9
200	208.6	102.5	67.2
250	223.4	110.0	72.1
300	235.3	115.9	76.1

注：线路长度1 km，牵引供电电流888.9 A，接地电阻1 Ω，屏蔽层厚度2.2 mm，牵引供电电流与电缆中间相工作电流同相。

结合式（1）和矢量图进行分析，当增大电缆间距或减小屏蔽层厚度时，由电缆工作电流所感应的电缆屏蔽层感应电压增大，从而使得通过矢量合成后总的电缆屏蔽层感应电压增大。表3、表4的计算结果验证了上述分析。

表4　不同屏蔽层厚度时电缆屏蔽层感应电压

屏蔽层厚度/mm	电缆屏蔽层感应电压/V		
	单端接地	中性点接地	交叉互联接地
2.0	116.9	56.6	37.1
2.1	116.7	56.5	37.0
2.2	116.4	56.4	37.0
2.3	116.2	56.3	36.9
2.4	116.0	56.2	36.8
2.5	115.8	56.1	36.8

注：线路长度1 km，牵引供电电流888.9 A，接地电阻1 Ω，电缆间距50 mm，牵引供电电流与电缆中间相工作电流同相。

由仿真计算和理论分析可以得出：①电缆间距增大时，电力电缆屏蔽层感应电压明显增大，当间距小于150 mm时，感应电压上升较快；当间距大于150 mm时，感应电压趋于饱和，原因在于间距增大的同时也增大了回流线电流等起去磁作用的电流分量对感应电压的影响，从而与电缆工作电流对感应电压所产生的影响相抵消，抑制了屏蔽层感应电压的增加速度。②电力电缆屏蔽层感应电压随着屏蔽层厚度的增大而降低，但其降低的幅度很小。③可以通过减小电缆间距来调整金属屏蔽层厚度，从而降低电缆工作电流感应的屏蔽层感应电压幅值，达到削减电缆屏蔽层感应电压的目的。

铁路用10 kV电力电缆在不同接地方式下的最大敷设长度

根据GB 50217—1994要求：电力电缆线路中非直接接地一端金属屏蔽层中的感应电压不得超过50 V；若采取不能任意接触金属屏蔽层的安全措施，该电压可提高到100 V。根据GB 50207—2007可知，电压等级10 kV，标称截面积400 mm^2，电缆沟中水平敷设的三相铜芯交链聚乙烯绝缘电缆线路在环境温度40 ℃下，其100%负载因数载流量为740 A。

使用图4中三种屏蔽层接地方式下的输电线路模型，基于国家标准讨论在金属屏蔽层感应电压100 V限值下，电力电缆最大敷设长度与电缆间距和牵引供电电流相位的关系如表5～表7所示。

中国知网　https://www.cnki.net

表5 电力电缆屏蔽层单端接地下不同电缆间距、不同牵引供电电流相位时电缆最大敷设长度

（单位：mm）

电气化铁路供电系统工作情况	电缆间距				
	50	100	150	200	250
牵引供电电流与A相电缆工作电流同相	1 029	799	704	648	611
牵引供电电流与B相电缆工作电流同相	1 185	859	740	675	633
牵引供电电流与C相电缆工作电流同相	1 010	783	689	634	596
牵引供电电流超前B相电缆工作电流83.4°	979	758	670	618	585

注：牵引供电电流888.9 A，电缆工作电流1 069 A，接地电阻1 Ω，屏蔽层厚度2.2 mm 。

表6 电力电缆屏蔽层中性点接地下不同电缆间距、不同牵引供电电流相位时电缆最大敷设长度

（单位：mm）

电气化铁路供电系统工作情况	电缆间距				
	50	100	150	200	250
牵引供电电流与A相电缆工作电流同相	2 128	1 644	1 445	1 329	1 251
牵引供电电流与B相电缆工作电流同相	2 481	1 776	1 524	1 390	1 293
牵引供电电流与C相电缆工作电流同相	2 087	1 610	1 412	1 297	1 219
牵引供电电流超前B相电缆工作电流83.4°	2 029	1 560	1 373	1 265	1 197

注：牵引供电电流888.9 A，电缆工作电流1 069 A，接地电阻1 Ω，屏蔽层厚度2.2 mm。

表7 电力电缆屏蔽层交叉互联接地下不同电缆间距、不同牵引供电电流相位时电缆最大敷设长度

（单位：mm）

电气化铁路供电系统工作情况	电缆间距				
	50	100	150	200	250
牵引供电电流与A相电缆工作电流同相	3 460	2 544	2 207	2 016	1 886
牵引供电电流与B相电缆工作电流同相	3 846	2 754	2 358	2 141	1 996
牵引供电电流与C相电缆工作电流同相	3 703	2 638	2 272	2 083	1 904
牵引供电电流超前B相电缆工作电流83.4°	3 612	2 631	2 267	2 066	1 901

注：牵引供电电流888.9 A，电缆工作电流1 069 A，接地电阻1 Ω，屏蔽层厚度2.2 mm，线路采用一个交叉互联单元。

通过对上述仿真计算结果进行分析，可知在金属屏蔽层允许作用的感应电压条件下，当电缆屏蔽层采用交叉互联接地时其允许敷设的长度最大；电缆屏蔽层采用中性点接地方式时次之；而电缆屏蔽层采用单端接地方式时其允许敷设的长度最小。

结束语

1）当牵引供电电流与B相（中间相）电缆工作电流同相时，电力电缆屏蔽层感应电压幅值最小，随着牵引供电电流幅值增大，电力电缆边相的屏蔽层感应电压增大，中间相的屏蔽层感应电压减小；当牵引供电电流超前B相（中间相）电缆工作电流83.4°时，A相电缆屏蔽层感应电压幅值达到最大值；可以通过改变电力电缆的空间位置，调整其与牵引线、钢轨和回流线的距离，从而降低单相电缆和牵引供电系统互感M的绝对值，减小牵引供电电流感应的屏蔽层感应电压幅值，达到削减电缆屏蔽层感应电压的目的。

2）由电气化铁路电缆供电系统对电力电缆屏蔽层感应电压影响的仿真计算可知：电力电缆屏蔽层感应电压随着电缆间距增大而增大，当电缆间距小于150 mm时，感应电压上升显著；当电缆间距大于150 mm时，感应电压的变化趋于饱和；电缆屏蔽层感应电压随着屏蔽层厚度的增大而降低，但其降低的幅度很小，可以忽略。

3）通过仿真计算分别得到在三种接地方式下，当牵引供电电流相位改变时，电力电缆最大敷设长度与电缆间距的关系。电缆排列得越紧凑，牵引供电电流相位的变化对电缆最大敷设长度的影响越大；采用屏蔽层交叉互联接地方式时，牵引供电电流相位的变化对电缆最大敷设长度的影响较小。当电缆间距为150 mm时，对小于670 m的电缆线路可采取屏蔽层一端直接接地，另一端经保护器接地方式；对长度在670～1 373 m的电缆线路，可采取在电缆屏蔽层中性点接地方式；对长度大于1 373 m的电缆线路，应采取电缆屏蔽层交叉互联接地方式。

（收稿日期：2014－10－29）EA

中国知网 https://www.cnki.net