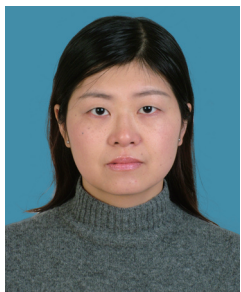


跨海大桥超高压电力电缆对铁路信号线路影响研究

随着跨海铁路和高速公路的建设发展,跨海大桥上需要将超高压电力电缆线路和电气化铁路信号电缆线路沿桥梁平行敷设,势必会在信号电缆的芯线中感应出电势。因此,通过ATP-EMTP软件仿真计算和实验室模拟试验,分析研究了信号电缆在不同的接地方式、电缆类型、电缆敷设沟槽介质以及电力电缆的短路电流下,铁路信号电缆芯线上的感应电动势变化规律。

徐鸿燕/中铁第四勘察设计院集团有限公司



徐鸿燕/高级工程师

随着我国国民经济的快速发展,客运专线铁路大规模建设,为适应福建平潭发展需要建设跨海大桥,大桥需附设1个500 kV电力通道2回线路和1个220 kV电力通道2回线路。由于桥上电力电缆线路和电气化铁路信号电缆线路是沿桥梁平行敷设的,电力电缆在正常或故障运行中,产生的电磁场影响处于同一电磁环境中的信号电缆,在信号电缆的芯线中会感应出电势。该感应电势可能危及信号系统的正常运行、危及信号系统设备的绝缘,危及检修工作人员的人身安全。因此,为减小处于同一电磁环境中的电力电缆对通信信号电缆产生的电磁影响,如何选择电力电缆与通信信号电缆的平行间距是需要解决的问题^[1-5]。

关键词/Keywords

电力电缆·
信号电缆·
感应电压·
短路故障·

本文依据大桥工程规划的实际资料,通过理论分析、计算机仿真计算和实验室模拟试验,研究分析跨海大桥上架设的超高压电力电缆、高压电力电缆对电气化铁路信号线路安全运行的影响,为超高压电力线路与铁路信号电缆平行敷设的安全、可靠运行提供科学依据。

超高压电力电缆和铁路牵引供电系统与信号电缆的基本情况

1. 铁路牵引供电系统

电气化铁路供电系统包括经高压输电、牵引变电所降压、变相及换流等环节,向电气化铁道运行的电力机车输送电力的全部供电系统。直接供电方式下,交流电气化铁路采用工频50 Hz单相交流供电,接触网对地电压一般为27 kV,供电电流在机车正常运行时为数百安培,当接触网发生故障短路时,短路电流可达上千安培,因此会对信号电缆产生电磁场干扰^[6-10]。

2. 电气化铁路信号电缆

电气化铁路采用的信号电缆分两大类:一类是综合护套信号电缆;另一类是铝护套信号电缆。普通信号电缆仅为层绞,综合扭绞电缆其芯线中有两芯对绞、四芯对绞和填充线合后再层绞,这样工作电容小,电容耦合小,差模电压小,有利于抗干扰和信号传输。综合护套内以不小于0.2 mm厚的铝带缠绕,理想屏蔽系数不小于0.8,铝护套的厚度为1.3 mm,理想屏蔽系数不大于0.3。

3. 电力电缆和机车牵引线与通信信号电缆的相对几何关系

本项目研究的铁路、公路两用跨海大桥全长12 102.24 m,跨海大桥两侧各敷设两回220 kV和两回500 kV的高压电力电缆。电力电缆与信号电缆平行铺设距离为8 376.6 m,电力电缆铺设在公路桥下,距铁路轨道距离为11.246 m。大桥上

两铁路中心线距离为4.6 m，信号电缆沿铁轨边沿铺设。

信号电缆电磁干扰的仿真分析

根据电力电缆与信号电缆的相对几何尺寸，建立超高压电力电缆和高压电力电缆故障运行时仿真计算模型，其中接地电阻 $R=1\ \Omega$ ，电缆长度为1 000 m。

1. 不同故障工况对信号电缆的电磁影响

当超高压和高压电力电缆发生短路故障，且故障电流沿着电力电缆敷设的沟槽流动时，产生的电磁场将影响电气化铁路信号电缆，而在信号电缆的芯线上产生纵向感应电势。在实际系统运行中，还可能遇到电力电缆发生故障的同时有电力机车通过大桥的情况，这时还需考虑电力电缆故障电流流经大桥电力电缆沟槽与电力机车牵引电流共同作用于信号电缆芯线，引起信号电缆芯线上的感应电压。其中包括电力电缆故障电流与电力机车牵引电流同向和反向的两种情况。计算结果如表1所示。

表1 不同故障工况下短路电流与信号电缆芯线感应电压

短路 电流 /kA	500 kV电缆 短路时，感 应电压/V	500 kV电缆短路与机 车牵引电流同向共同 作用时，感应电压/V	500 kV电缆短路与机 车牵引电流反向共同 作用时，感应电压/V
20	8.100	7.910	8.290
25	10.13	9.940	10.32
30	12.16	11.97	12.35
31.6	12.80	12.62	12.99
35	14.18	13.99	14.37
40	16.21	16.02	16.39
41.5	16.81	16.63	17.01
42.1	17.06	16.87	17.25
45	18.23	18.04	18.42
50	20.26	20.07	20.45

短路 电流 /kA	220 kV电缆 短路时，感 应电压/V	220 kV电缆短路与机 车牵引电流同向共同 作用时，感应电压/V	220 kV电缆短路与机 车牵引电流反向共同 作用时，感应电压/V
20	4.08	3.89	4.28
25	5.10	4.91	5.29
30	6.12	5.93	6.32
30.1	6.14	5.96	6.34
32.8	6.69	6.51	6.89

(续)

短路 电流 /kA	220 kV电缆 短路时，感 应电压/V	220 kV电缆短路与机 车牵引电流同向共同 作用时，感应电压/V	220 kV电缆短路与机 车牵引电流反向共同 作用时，感应电压/V
35	7.14	6.96	7.34
40	8.17	7.98	8.36

因此，当信号电缆敷设在钢介质电缆沟槽，且采用铝护套电缆，电缆屏蔽层采用两端接地时，仿真计算500 kV电力电缆发生短路故障、220 kV电力电缆发生短路故障，以及电力电缆故障电流与电力机车牵引电流同向和反向，这四种情况对信号电缆的电磁影响。其中，电力机车牵引电流为1 000 A。

计算结果表明：

1) 在同一电压等级短路故障下，电力电缆故障电流与电力机车牵引电流反向共同作用时，信号电缆芯线上感应电压最大；电力电缆故障电流单独作用时，信号电缆芯线上感应电压次之；电力电缆故障电流与电力机车牵引电流同向共同作用时，信号电缆芯线上感应电压最小。这是因为机车牵引的回流电流方向引起的，但总的影响不大。

2) 同时考虑电力电缆故障电流与机车牵引电流共同作用时，跨海大桥电气化铁路信号电缆芯线上的感应电压，主要取决于电力电缆的短路故障电流，信号电缆芯线的感应电压随着电力电缆的短路电流水平增大而逐渐增大。

2. 不同接地方式对信号电缆的电磁影响

通信信号电缆屏蔽层接地方式分为一端通过接地装置接地（一端接地）和两端通过接地装置接地（两端接地）。因此，当信号电缆敷设在钢介质电缆沟槽，且采用铝护套电缆时，仿真计算500 kV电力电缆发生短路故障，以及电力电缆故障电流与电力机车牵引电流同向和反向，这三种较严重短路情况下不同接地方式对信号电缆的电磁影响。计算结果如表2所示。

计算结果表明：信号电缆屏蔽层两端接地时，信号电缆芯线上的感应电压，明显小于信号电缆屏蔽层一端接地。随着电力电缆的短路电流水平的逐渐增大，信号电缆屏蔽层两端接地的屏

表2 不同接地方式下短路电流与信号电缆芯线感应电压

短路电流/kA	500 kV电缆短路时，感应电压/V		500 kV电缆短路与机车牵引电流同向共同作用时，感应电压/V		500 kV电缆短路与机车牵引电流反向共同作用时，感应电压/V	
	一端接地	两端接地	一端接地	两端接地	一端接地	两端接地
20	19.34	8.100	18.89	7.91	19.79	8.29
25	24.17	10.13	23.72	9.94	24.63	10.32
30	29.00	12.16	28.56	11.97	29.46	12.35
31.6	30.55	12.80	30.10	12.62	31.01	12.99
35	33.84	14.18	33.39	13.99	34.29	14.37
40	38.67	16.21	38.22	16.02	39.13	16.39
41.5	40.12	16.81	39.68	16.63	40.58	17.01
42.1	40.71	17.06	40.26	16.87	41.16	17.25
45	43.51	18.23	43.06	18.04	43.96	18.42
50	48.34	20.26	47.89	20.07	48.80	20.45

蔽效果明显优于信号电缆屏蔽层一端接地。

3. 不同类型电缆对信号电缆的电磁影响

电气化铁路信号电缆采用的电缆有综合护套电缆和铝护套电缆两种型号，而且其抗电磁干扰的性能有一定差别。因此，当信号电缆敷设在钢

介质电缆沟槽，电缆屏蔽层采用两端接地时，仿真计算500 kV电力电缆发生短路故障，以及电力电缆故障电流与电力机车牵引电流同向和反向，这三种较严重短路情况下综合护套电缆和铝护套电缆的电磁影响。计算结果如表3所示。

表3 不同类型电缆下短路电流与信号电缆芯线感应电压

短路电流/kA	500 kV电缆短路		500 kV电缆短路与机车牵引电流同向共同作用		500 kV电缆短路与机车牵引电流反向共同作用	
	综合护套感应电压/V	铝护套感应电压/V	综合护套感应电压/V	铝护套感应电压/V	综合护套感应电压/V	铝护套感应电压/V
20	10.86	8.100	10.61	7.910	11.11	8.290
25	13.57	10.13	13.32	9.940	13.83	10.32
30	16.29	12.16	16.04	11.97	16.54	12.35
31.6	17.16	12.80	16.90	12.62	17.41	12.99
35	19.00	14.18	18.75	13.99	19.26	14.37
40	21.72	16.21	21.47	16.02	21.97	16.39
41.5	22.53	16.81	22.28	16.63	22.79	17.01
42.1	22.86	17.06	22.61	16.87	23.11	17.25
45	24.43	18.23	24.18	18.04	24.69	18.42
50	27.15	20.26	26.89	20.07	27.40	20.45

计算结果表明：铝护套信号电缆的屏蔽效果，明显优于综合护套信号电缆的屏蔽效果。这是由于两种护套的结构不同，铝护套电缆的护套采用1.2 mm厚的铝护套，而综合护套电缆的护套采用铝塑复合带，其中铝带厚度一般为0.2 mm。采用综合护套结构的信号电缆，其理想屏蔽系数一般不小于0.8，而采用铝护套结构的信号电缆，其理想屏蔽系数一般不大于0.3。

4. 不同介质电缆沟槽对信号电缆的电磁影响

当信号电缆采用铝护套电缆，电缆屏蔽层采用两端接地时，仿真计算500 kV电力电缆发生短路故障以及电力电缆故障电流与电力机车牵引电流同向和反向，这三种较严重短路情况下信号电缆敷设在钢介质电缆沟槽和混凝土介质电缆沟槽对信号电缆的电磁影响。当信号电缆敷设在钢介质电缆沟槽内时，电阻率取 $3 \times 10^{-5} \Omega \cdot m$ ；当信号

电缆敷设在混凝土介质电缆沟槽内时，电阻率取 20 Ω·m。计算结果如表4所示。

表4 不同介质电缆沟槽下短路电流与信号电缆芯线感应电压

短路电流/kA	500 kV电缆短路		500 kV电缆短路与机车牵引电流 同向共同作用		500 kV电缆短路与机车牵引电流 反向共同作用	
	钢介质感应电压/V	混凝土介质感应电压/V	钢介质感应电压/V	混凝土介质感应电压/V	钢介质感应电压/V	混凝土介质感应电压/V
20	8.100	788.400	7.910	781.88	8.290	794.94
25	10.13	985.510	9.940	978.98	10.32	992.04
30	12.16	1 182.61	11.97	1 176.08	12.35	1 189.14
31.6	12.80	1 245.68	12.62	1 239.15	12.99	1 252.22
35	14.18	1 379.71	13.99	1 373.18	14.37	1 386.24
40	16.21	1 576.81	16.02	1 570.28	16.39	1 583.34
41.5	16.81	1 635.95	16.63	1 629.42	17.01	1 642.48
42.1	17.06	1 659.59	16.87	1 653.07	17.25	1 666.13
45	18.23	1 773.92	18.04	1 767.39	18.42	1 780.45
50	20.26	1 971.02	20.07	1 964.49	20.45	1 977.55

计算结果表明：信号电缆敷设在钢介质电缆沟槽内时，在信号电缆芯线上产生的纵向感应电势，小于信号电缆敷设在混凝土介质电缆沟槽内时所产生的纵向感应电势。这是由于，当有电流流过信号电缆屏蔽层时，会在信号电缆敷设介质中产生感应电势，进而产生感应电流，电阻率不同，产生的感应电流大小也不同。电阻率大的介质感应电流小，电阻率小的介质感应电流大，且此感应电流的方向和屏蔽层中的电流方向相反。二者对信号电缆芯线的影响作用会相互抵消，所以会在信号电缆芯线上产生不同大小的感应电势。

5. 电气化铁路信号电缆的安全运行分析

依据GB 6830—1986和TB/T 3100.1～.5—2004标准，当大桥上敷设的超高压和高压电力电缆正常运行时，信号电缆芯线上感应的纵向电动势容许值取60 V，而当大桥上铺设的超高压和高压电力电缆发生短路故障时，信号电缆芯线上的纵向电动势容许值为1 700 V。

将仿真计算结果与GB6 830—1986和TB/T 3100.1～.5—2004标准相比较得到，当500 kV超高压电力电缆或220 kV高压电力电缆发生短路故障时，无论信号电缆敷设在钢介质电缆沟槽内，还是混凝土介质电缆沟槽内，在信号电缆芯线上产生的感应电压数值小于标准的容许值。因此，

电气化铁路的信号电缆可以在这种故障条件下安全、可靠运行。

当500 kV超高压电力电缆或220 kV高压电力电缆发生短路故障，同时考虑电气化铁路机车牵引工作电流为1 000 A时，信号电缆敷设在钢介质电缆沟槽内，在信号电缆芯线上产生的感应电压数值小于标准的容许值。因此，电气化铁路的信号电缆可以在这种故障条件下安全、可靠运行。而信号电缆敷设在混凝土介质电缆沟槽内，在信号电缆芯线上产生的感应电压数值均大于标准的容许值，信号电缆不可以安全、可靠运行。

强电线路对信号电缆电磁影响的模拟试验

模拟试验示意图如下图所示，信号电缆敷设的长度为37.5 m，与模拟铁轨的导线距离为2.2 m。模拟试验的电流源由电焊机产生，可以提供0～630 A的工频电流。信号电缆缆芯的一端、信号电缆的屏蔽层和钢铠与实验室变电站的接地网相连接而接地。毫伏表测量的是信号电缆缆芯与屏蔽层之间的电压。试验中信号电缆共采用了5种型号，分别是PTYL23、SPTYWPL23、PTYA23、SPTYWPA23和SPTYWPA23。通过高内阻抗的毫伏表测量信号电缆的屏蔽层与缆芯之间的感应电压之差以减小测量误差。试验结果如表5和表6所示。

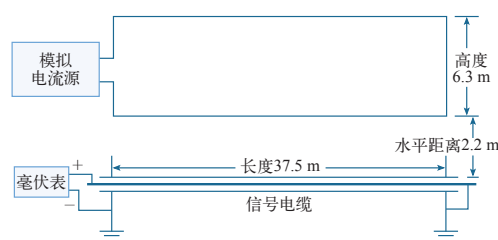


图 试验原理示意图

表5 模拟试验条件下铝护套信号电缆芯线的感应电压

PTYL23		SPTYWPL23	
试验电流/A	测量电压/mV	试验电流/A	测量电压/mV
94.9	3.85	90.9	3.47
118.9	4.65	120.3	4.53
136.2	5.30	133.3	4.94
154.6	5.98	152.5	5.51
165.3	6.45	166.7	6.02

表6 模拟试验条件下综合护套信号电缆芯线的感应电压

PTYA23		SPTYWPA23		SPTYWPA23	
试验电流 /A	测量电压 /mV	试验电流 /A	测量电压 /mV	试验电流 /A	测量电压 /mV
90.6	10.84	87.9	7.15	93	6.98
109.2	12.62	105.3	7.77	114	8.23
125.5	14.11	125	9.03	127.7	9.37
146.9	16.52	146.4	10.58	146.5	10.58
163.8	18.42	168.4	12.08	163	12.02

试验结果表明：信号电缆芯线的纵向感应电势与模拟强电路中的工作电流成正比关系；综合护套信号电缆芯线的感应电势，较铝护套信号电缆芯线的感应电势要大，即屏蔽层在这种接地条件下，铝护套信号电缆的屏蔽效果优于综合护套信号电缆。

结束语

本项目通过对跨海大桥上敷设的500 kV超高压和220 kV高压电力电缆对电气化铁路信号电缆影响的理论分析、数字仿真计算以及模拟试验得出了下列主要结论：

1) 无论电力电缆故障电流单独作用还是电力电缆故障电流与机车牵引电流共同作用，信号电缆芯线的感应电压，随着电力电缆的短路电流水平增大而逐渐增大。

2) 当电力电缆故障电流与机车牵引电流共同作用时，跨海大桥电气化铁路信号电缆芯线上的感应电压，主要取决于电力电缆的短路故障电流。

3) 信号电缆敷设在钢介质电缆沟槽内时，信号电缆芯线上的感应电压，小于信号电缆敷设在混凝土介质电缆沟槽内的感应电压。信号电缆屏蔽层两端接地时，信号电缆芯线上的感应电压小于信号电缆屏蔽层一端接地的情况。

4) 当信号电缆敷设在钢介质沟槽内时，即使发生500 kV超高压电力电缆短路故障，且当信号电缆屏蔽层一端接地，再考虑电气化铁路机车牵引工作电流为1 000 A时，在信号电缆芯线上产生的感应电压数值，小于标准要求的容许值。在这种信号电缆敷设条件下，电气化铁路的信号电缆可以安全、可靠运行。

5) 平潭上岛跨海大桥上的信号电缆敷设在混凝土介质电缆沟槽中，500 kV超高压电力电缆短路故障时，同时考虑电气化铁路机车牵引工作电流为1 000 A，在信号电缆芯线上产生的感应电压数值大于标准的容许值。电气化铁路的信号电缆在这种敷设条件下，不能安全、可靠运行。

参考文献

[1] 王建国，刘洋，鲁铁成，等．铁路10 kV三相电力电缆接地短路电流对通信信号电缆的电磁影响[J]．中国铁道科学，2008，29(4)：109-114．

[2] 杨世武，张旭，梁伊模，等．铁路信号电缆接地方式研究和纵向电动势测试[J]．仪器仪表学报，2013，34(2)：254-259．

[3] Andrea Mariscotti, Paolo Pozzobon, Maurizio Vanti. Distribution of the traction return current in AT electric railway systems[J]．IEEE Transactions on Power Delivery, 2005，20(3)：2119-2128．

[4] Mariscotti A, Pozzobon P, Vanti M. Simplified modeling of 2×25 kV AT railway system for the solution of low frequency and large-scale problems[J]．IEEE Transactions on Power Delivery, 2007，22(1)：296-301．

(收稿日期：2015-03-09) EA