

文章编号:1006-2106(2008)08-0067-04

# 青藏铁路电缆贯通线并联电抗器补偿方式研究\*

王 颢<sup>1</sup> 易 东<sup>2\*\*</sup>

(1. 中铁第一勘察设计院集团有限公司, 西安 710043; 2. 西南交通大学, 成都 610031)

**摘要:**研究目的:为确保青藏铁路无人区供电安全和铁路运行安全,除在青藏铁路全线架设1条35 kV电力贯通线为沿线负荷供电外,还在沱沱河—那曲段敷设一条35 kV电缆贯通线。由于电缆贯通线三相存在较大的相间及相对地电容,会增加线路正常运行和单相接地情况下的电流,采用何种方式补偿电缆线路中的电容电流,对此进行研究,合理确定补偿方式和电缆线路两端的接地方式,达到补偿的目的。

**研究结论:**通过对青藏铁路电缆贯通线2种电容估算方法的研究,确定该电缆贯通线路每千米电容在0.124 0~0.133 1  $\mu\text{F}$ 范围。并分析了电缆贯通线的3种补偿方式,对欠补偿、过补偿和综合补偿方式,通过仿真计算,验证各种送电方式下电缆贯通线路的暂态、稳态参数均能满足运行要求。为避免补偿跌入谐振区,导致电网谐振的概率增加,电缆贯通线路应采用欠补偿方式。同时仿真计算了架空电力线路和电缆贯通线路同时投入运行的情况下,对电缆贯通线运行影响不大,对架空电力贯通线有一定影响,但满足使用要求。另外通过对系统过电压的分析,在不改变系统接地方式的情况下,电缆采用两端接地,电抗器中性点接地,可以满足系统运行及过电压的要求。出现单相接地时,非故障相电压升高至线电压,与通常的小电流系统运行情况相似。

**关键词:**青藏铁路;电缆线路;补偿方式;接地

**中图分类号:**TM472 **文献标识码:**A

## Research on the Compensation Modes of Parallel Reactor for Qinghai - Tibet Railway Continuous Power Cable Lines

WANG HAO<sup>1</sup>, YI Dong<sup>2</sup>

(1. China Railway First Survey and Design Institute Group Ltd., Xi'an, Shanxi 710043, China; 2. Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

**Abstract; Research purposes:** In order to guarantee the safety of power supply and train operation in Qinghai - Tibet Railway uninhabited zone, a continuous power cable lines were built from Tuotuohe to Naqu in addition to one 35 kV overhead line. The normal and fault current would be increased because of large phase - to - ground and phase - to - phase capacitor on power cable line. It becomes a prime question to minis the capacitance current, decides the compensation method and ensures the cable ends grounding mode.

**Research conclusions:** Through studying of two estimating method, it is fixed that capacitor per km of Qinghai - Tibet railway continuous power cable lines is between 0.124 0 ~ 0.133 1  $\mu\text{F}$ . Then three compensation modes, namely, undercompensation, overcompensation and synthesized compensation are discussed through simulating and calculating to confirm whether it can satisfy the operating demands in all kinds of power transmission. A decision to adopt undercompensation was made to avoid resonance and lead to more fault. When overhead lines and cable lines run together, it has a little impact to the cable when overhead lines cast in, on the contrary, it has much more impact to the

\* 收稿日期:2008-06-20

\*\* 作者简介:王颢,1972年出生,男,高级工程师;易东,1971年出生,男,讲师。

overhead lines when cable lines cast in, but it would be sustainable. After analyzed the over voltage, the conclusion of it would satisfy the system operational reliability and overvoltage needs if it adopted the undercompensation, both cable line end grounding method and reactor neutrality point grounding method. When one phase has a grounded fault, the other two phase voltage would turn into line voltage, just like the usual little current grounding system.

**Key words:** Qinghai - Tibet railway; power cable; compensation; grounding

青藏铁路全线架设1条35 kV电力贯通线为沿线负荷供电。为确保青藏线无人区供电安全和铁路运行安全,特在沱沱河—那曲段敷设一条35 kV电缆贯通线,电缆型号为YJV43-26/35kV-3\*70,分3个供电臂,3个供电臂的电缆线路长度分别为:那曲—安多131 km;安多—布强格159 km;沱沱河—布强格146 km。

电缆贯通线由于三相存在较大的相间及相对地电容,故在正常运行和单相接地时都有电容电流流过线路,而且电缆线路的相间及相对地电容远大于架空线路,是架空线路的几十倍。电缆比例的提高,显著加大了供电系统的电容电流,因此如何补偿电缆线路的电容电流,成为需要研究的关键技术难题。

## 1 电缆线路电容参数的确定

由于电缆电容值受制造工艺的影响而有所不同,各个厂家给出的每千米电容参数有较大差异,最小的0.128 6  $\mu\text{F}/\text{km}$ ,最大的超过0.2  $\mu\text{F}/\text{km}$ ,这样就有必要进行现场测试,对电容参数予以确认。

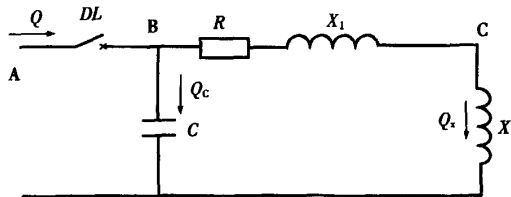


图1 测试电缆线路电容原理图

如图1所示,由于电缆线路BC段较短,用集中电容C、电阻R、电抗 $X_1$ 表示,对末端并联的电抗器X,可以忽略线路及电抗器电阻。断路器DL投入后,线路向电源端A端输送的无功功率为Q,电抗器消耗无功为 $Q_x$ ,由于电缆线路电感很小,将线路电感上消耗的无功忽略,则电容无功为:

$$Q_c = Q + Q_x = \omega CU^2 \quad (1)$$

式中  $U$ ——线路电压。

假设电缆线路长度为 $l$ ,每千米的电容为 $C_0$ ,则:

$$C = lC_0 \quad (2)$$

由式(1)、式(2)可得每千米电容为:

$$C_0 = \frac{Q_c}{\omega CU^2} = \frac{Q_c}{2\pi f l U^2} \quad (3)$$

为确定电缆的电容参数在安托变电站进行了测试。安多—托居电缆长度25.88 km,托居电抗器容量1 000 kvar,投入安多—托居电缆时,首端无功功率为0.316 Mvar(容性),故该段电缆线路电容C发出容性功率为1.316 Mvar,由式(3)计算得:

$$C_0 = \frac{1.316}{100\pi \cdot 25.88 \cdot 35^2} = 0.132 \text{ 1 } \mu\text{F}/\text{km} \quad (4)$$

托居—扎家藏布电缆长度41.06 km,扎家藏布电抗器容量1 000 kvar,投入托居—扎家藏布电缆时,首端无功功率为1.053 Mvar(容性),故该段电缆线路电容C发出容性功率为2.053 Mvar,由式(3)计算得:

$$C_0 = \frac{2.053}{100\pi \cdot 41.06 \cdot 35^2} = 0.129 \text{ 9 } \mu\text{F}/\text{km} \quad (5)$$

安多—扎家藏布电缆长度66.94 km,托居、扎家藏布电抗器容量均为1 000 kvar,投入安多—扎家藏布电缆时,首端无功功率为1.436 Mvar(容性),故该段电缆线路电容C发出容性功率为3.436 Mvar,由式(3)计算得:

$$C_0 = \frac{3.369}{100\pi \cdot 66.94 \cdot 35^2} = 0.130 \text{ 8 } \mu\text{F}/\text{km} \quad (6)$$

式(3)可以作为测试电缆线路电容参数的一种方法,下面介绍另一种方法。设并联电抗器电感为L,当断路器DL断开时,电流将在C、R、 $X_1$ 、X之间振荡衰减,振荡周期为T。由于电缆线路电感很小,将其忽略,则振荡周期为:

$$T = 2\pi \sqrt{LC} \quad (7)$$

而:

$$L = \frac{U^2}{2\pi f Q_x} \quad (8)$$

式中  $f$ ——电网频率,50 Hz。

由式(7)、式(8)可得:

$$C = \frac{T^2}{4\pi^2 L} = \frac{f Q_x T^2}{2\pi U^2} \quad (9)$$

每千米电容:

$$C_0 = \frac{C}{l} = \frac{f Q_x T^2}{2\pi l U^2} \quad (10)$$

图2表示分断托居断路器后,扎家藏布电压波形图。从图2中可以看出,扎家藏布电压在托居断路器分闸时振荡衰减,振荡周期 $0.028 \sim 0.029$  s。电缆线路长度为 $41.06$  km时,根据振荡周期可用式(10)计算出每千米的电缆电容为 $0.124 0 \sim 0.133 1 \mu\text{F}$ ,与采用式(4)、式(5)、式(6)计算出的结果相近。

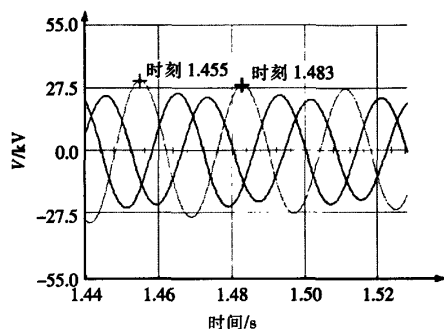


图2 分断托居断路器后扎家藏布电压波形图

## 2 电抗器补偿

采用并联电抗器补偿电缆的电容电流时,应以电缆发生单相金属接地故障时电弧能可靠自熄为根本目标,在满足此条件下,可兼顾线路残流小的目标。对于交联电缆,系统对地电容电流不大于 $20$  A时, $0.75$ 是最佳补偿度。工程应用时,由于电抗器的容量不可连续选择,因而不一定能实现最佳补偿度,选择电抗器容量时,优先保证电弧自熄条件。

由于电缆线路较长,故采用在各车站分别设置并联电抗器的分散补偿方式。

主要考虑了3种电抗器分散补偿方式:

### 2.1 欠补偿方式

以供电臂为补偿单元,补偿度 $70\% \sim 80\%$ 。

(1) 安多—布强格。电缆线路分布电容总量为 $7\,297$  kvar,电抗器总补偿容量为 $5\,500$  kvar,补偿度 $75\%$ 。

从仿真计算看,电缆线路采用逐段投入方式,各种送电方式下的暂态、稳态参数均能够达到运行要求。安多—布强格电缆贯通线正常运行时,首端无功电流为 $33.36$  A;线路电压将升高至 $36.99$  kV(以首端 $35$  kV为基准)。

(2) 那曲—安多。电缆线路分布电容总量为 $6\,270$  kvar,电抗器总补偿容量为 $4\,500$  kvar,补偿度 $72\%$ 。

从仿真计算看,电缆线路采用逐段投入方式,各种送电方式下的暂态、稳态参数均能够达到运行要求。那曲—安多电缆贯通线正常运行时,首端无功电流为 $29.62$  A;线路电压将升高至 $36.84$  kV(以首端 $35$  kV

为基准)。

仿真计算同时对上述区段架空、电缆贯通线同时运行进行了仿真,架空贯通线投入运行时对电缆贯通线运行影响不大;电缆贯通线投入运行时对架空贯通线有一定影响,但满足使用要求。

### 2.2 过补偿方式

以供电臂为补偿单元,补偿度约为 $130\%$ 。

(1) 安多—布强格。电缆线路分布电容总量为 $7\,297$  kvar,电抗器总补偿容量为 $9\,500$  kvar,补偿度 $130\%$ 。

从仿真计算看,电缆线路即使采用逐段投入方式,各种送电方式下的暂态、稳态参数均能够达到运行要求。安多—布强格电缆贯通线正常运行时,首端无功电流为 $28.8$  A;线路电压值为 $33.37$  kV(以首端 $35$  kV为基准)。

(2) 那曲—安多。电缆线路分布电容总量为 $6\,270$  kvar,电抗器总补偿容量为 $8\,250$  kvar,补偿度 $132\%$ 。

从仿真计算看,电缆线路即使采用逐段投入方式,各种送电方式下的暂态、稳态参数均能够达到运行要求。那曲—安多电缆贯通线正常运行时,无功电流为 $24.4$  A;电压值为 $33.8$  kV(以首端 $35$  kV为基准)。

仿真计算同时对该区段架空、电缆贯通线同时运行进行了仿真,架空贯通线投入运行时对电缆贯通线运行影响不大;电缆贯通线投入运行时对架空贯通线有一定影响,但满足使用要求。

### 2.3 综合方式

按欠补偿方式布置电抗器,在首端加装大容量电抗器。正常运行时可以欠补偿,必要时也可以投入首端大容量电抗器使之变成过补偿。

(1) 安多—布强格。在安多配电所加装 $2\,500$  kvar电抗器。

该电抗器不投入运行时,同上述欠补偿状态。

投入该电抗器时,总补偿容量为 $8\,000$  kvar,补偿度 $110\%$ 。正常运行时无功电流为 $9.39$  A;电压值为 $34.83$  kV(以首端 $35$  kV为基准)。

(2) 那曲—安多。在那曲配电所加装 $2\,500$  kvar电抗器。

该电抗器不投入运行时,同上述欠补偿状态。

投入该电抗器时,总补偿容量为 $7\,000$  kvar,补偿度 $112\%$ 。正常运行时无功电流为 $12.67$  A;电压值 $34.67$  kV(以首端 $35$  kV为基准)。

### 2.4 设计推荐的补偿方式

鉴于铁路贯通线比较特殊(尤其较多的分段送电方式)的运行方式,经过多次的技术经济综合比较后

一致认为:应采用欠补偿方式。

主要原因是考虑运行安全,按照电抗器与对应线路同时切除的原则,欠补偿的电抗器配置在各种运行方式下都不会升高至谐振区;过补偿时,可能由于送电距离的改变等原因使补偿度降低,跌入谐振区(补偿度在 80%~130% 间),导致电网谐振的概率增加。

### 3 电缆接地方式

采用单芯电缆时,芯线通过单相电流,其磁力线匝链金属外皮,使电缆金属外皮两端出现感应过电压,电缆很长时,护套上的感应电压叠加起来可达到危及人身安全的程度,此时,如果将铝包或金属屏蔽层两端三相互联接地,则铝包或金属屏蔽层将会出现很大的环流,其值可达线芯电流的 50%~95%,形成损耗,使铝包或金属屏蔽层发热,这不仅浪费了大量电能,而且降低了电缆的载流量,并加速了电缆绝缘老化。

然而,当铝包或金属屏蔽层一端不接地时,则会带来下列问题:当雷电流或过电压波沿线芯流动时,电缆铝包或金属屏蔽层不接地端会出现很高的冲击电压;在系统发生短路时,短路电流流经线芯时,电缆铝包或金属屏蔽层不接地端也会出现较高的工频感应电压,在电缆外护层绝缘不能承受这种过电压的作用而损坏时,将导致出现多点接地,形成环流。因此,在采用一端互联接地时,心须采取措施限制护层上的过电压,根据线路的不同情况,在铝包或金属屏蔽层的一定位置采用特殊的连接和接地方式,装设护层保护器,以防止电缆护层绝缘被击穿。

青藏铁路电缆贯通线采用的是 3 芯电力电缆。正常运行中,流过 3 个线芯的电流总和为零,在铝包或金属屏蔽层外基本上没有磁链,这样,在铝包或金属屏蔽层两端就基本上没有感应电压,所以两端接地后不会有感应电流流过铝包或金属屏蔽层。

对并联电抗器的中性点要求也必须接地,否则当发生单相接地故障(如图 3 所示)时,电抗器中性点  $X_N$  电位升高,使电抗器三相补偿产生不平衡,使非接地相线路电压升高到无法接受的程度。表 1 为电缆贯通线路安多—布强格段带电抗器运行时出现单相接地情况下安多的相电压、相电流仿真结果。

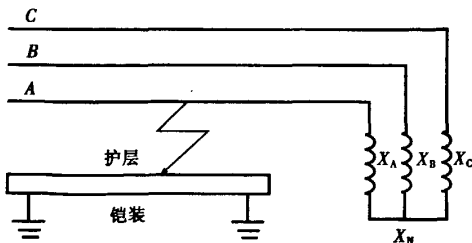


图3 电缆线路单相接地示意图

表1 单相短路接地时线路相电压(电缆的铝包或金属屏蔽层都接地)

短路位置	相别	变压器中性点不接地, 电缆采用两端接地方式, 电抗器中性点接地	变压器中性点不接地, 电缆采用两端接地方式, 电抗器中性点不接地
		安多相电压 /kV	安多相电压 /kV
安多 A 相对地短路	A	0.001 864	0.025
	B	36.8	43.3
	C	36.95	50.9
托居 A 相对地短路	A	0.342	3.902
	B	36.68	42.23
	C	37.28	52.9
扎家藏布 A 相对地短路	A	1.012	11.7
	B	36.69	38.8
	C	37.66	56.3
唐古拉南 A 相对地短路	A	6.401	18.67
	B	36.24	35.55
	C	37.48	55.95
唐古拉 A 相对地短路	A	5.924	21.05
	B	36.3	29.13
	C	38.1	54.29
唐古拉北 A 相对地短路	A	1.868	21.41
	B	35.57	24.01
	C	38.33	51.47
布强格 A 相对地短路	A	2.176	23.03
	B	36.31	18.14
	C	38.48	46.86

从表 1 可以看出,安多 110 kV 变电所 35 kV 侧变压器中性点不接地,线路中电抗器中性点接地,电缆采用两端接地方式,出现单相接地时,非故障相电压升高至线电压,与通常的小电流系统运行情况相似。

需要特别说明的是上述方式没有改变系统的接地方式,因为每一段电缆线路与电抗器构成一个整体,外在表现为一个小电容负载(欠补时)。

随着系统越来越多地采用电缆线路,系统电容电流也越来越大,在发生单相接地时,强大的电容电流足以引起弧光将邻近的其他相或其他回路电缆线路烧坏,引起相间短路扩大事故范围。有鉴于此,建议在较大容量系统发生单相接地故障时,直接切除故障线路,避免产生弧光危及邻近电缆,并抑制系统过电压,保护系统绝缘。

### 4 结论

通过对青藏铁路电缆贯通线 2 种电容参数估算方  
(下转第 74 页)

(3) 在侧面无斜撑的竖向梁上设置腕臂支持装置,并加设防风支撑;  
(4) 承力索在三角形钢构件中穿过,结构高度约为 1.4 m。为了防止雨天或其它恶劣状态下钢桥出现带电情况采取绝缘防护措施,用绝缘材料包住承力索

和接触线之间的桁梁;  
(5) 特大桥上下行分别增设架空地线,两端双接地,接地电阻不小于 10 Ω;  
(6) 接触悬挂跨距的确定,其计算值如表 1 所示。

表 1 接触网悬挂跨距计算表

项目名称/m	方案 1	方案 2	方案 3
	跨距:16 m 配置:THJ-95+CTHA-120 张力:15 kN+15 kN	跨距:32 m 配置:THJ-95+CTHA-120 张力:15 kN+15 kN	跨距:32 m 配置:THJ-120+CTHA-120 张力:20 kN+15 kN
覆冰时接触线驰度	0.009	0.035	0.030
吊弦间接触线驰度	0.007	0.007	0.005
合计	0.016	0.042	0.035
悬挂点最低高度	6.216	6.242	6.235
接触线厚度	0.013	0.013	0.013
接触线上沿高度	6.229	6.255	6.248
接触线距桥下沿间隙	0.321	0.295	0.302
对接触线绝缘距离	满足 0.3	不满足 0.3	满足 0.3
承力索驰度	0.070	0.237	0.180
对承力索绝缘距离	满足	满足	满足

注:节点间距为 8 m,每隔一个节点有一处门型架,腕臂安装在没有门型架的节点上,故跨距只能选择 16 m 或 32 m。

由表 1 看出,方案 1 和方案 3 均满足最小间隙 300 mm 的要求,但方案 1 安全系数更大一些,故推荐方案 1,且悬挂参数保持不变。

3 结 论

(1) 双箱改造应不降低既有线路主要技术标准,有条件时,首先考虑接触网采取特殊的结构处理方案。  
(2) 既有线路有条件时(道床厚度在 0.50 m 以上),可采取利用既有道床适当落道的方案及措施,落道后的道床厚度不应低于 0.35 m,必要时采取适宜的路基表层加固处理措施。

(3) 在采取接触网特殊处理及线路道床适当落道无法满足的条件下,可考虑上跨建筑物抬高改建或拆除重建。既有线改建困难时,可考虑便线及过渡措施。

参 考 文 献:

[1] 铁科技函[2004]157 号,关于发布《铁路双层集装箱运输装载限界(暂行)》和《200km/h 客货共线铁路双层集装箱运输建筑限界(暂行)》的通知[S].  
[2] TB 10009—2005,铁路电力牵引供电设计规范[S].  
[3] 铁鉴函[2005]408 号,关于京沪铁路电气化工程初步设计的批复[S].  
(编辑 曹淑荣)

(上接第 70 页)

法的研究,确定该电缆贯通线路每千米电容在 0.124 0~0.133 1 uF 范围。进而分析了电缆贯通线路的 3 种补偿方式,对欠补偿、过补偿和综合补偿方式,通过仿真计算,验证各种送电方式下电缆贯通线路的暂态、稳态参数均能满足运行要求。为避免补偿跌入谐振区,导致电网谐振的概率增加,确定了青藏铁路电缆贯通线路采用欠补偿方式。同时仿真计算了架空电力线路和电缆贯通线路同时投入运行的情况下,架空电力贯通线路投入运行时对电缆贯通线路运行影响不大;电缆贯通线路投入运行时对架空电力贯通线路有一定影响,但满足使用要求。另外通过对系统过电压的分析,在不改变系统接地方式的情况下,电缆采用两端接地,

电抗器中性点接地,可以满足系统运行及过电压的要求。出现单相接地时,非故障相电压升高至线电压,与通常的小电流系统运行情况相似。

参 考 文 献:

[1] 陈姝敏,杨兰均,等. 110 kV 电缆护层连接方式对护层过电压的影响[J]. 高压技术,2006,32(3):37-39.  
[2] 魏书荣,马宏忠,王东海. 电缆线路改造引起的护层感应电压变化及其补偿[J]. 电线电缆,2004(4):26-28.  
[3] 王治平,卜福寿. 论电力电缆的接地方式[J]. 西北电力技术,2006(1):53-54.  
(编辑 吕 洁)

作者: 王颢, 易东, WANG HAO, YI Dong  
作者单位: 王颢, WANG HAO(中铁第一勘察设计院集团有限公司, 西安, 710043), 易东, YI Dong(西南交通大学, 成都, 610031)  
刊名: 铁道工程学报   
英文刊名: JOURNAL OF RAILWAY ENGINEERING SOCIETY  
年, 卷(期): 2008(8)  
被引用次数: 5次

## 参考文献(3条)

1. 陈妹敏; 杨兰均 110 kV电缆护层连接方式对护层过电压的影响[期刊论文]-[高电压技术](#) 2006(03)
2. 魏书荣; 马宏忠; 王东海 电缆线路改造引起的护层感应电压变化及其补偿[期刊论文]-[电线电缆](#) 2004(04)
3. 王治平; 卜福寿 论电力电缆的接地方式[期刊论文]-[西北电力技术](#) 2006(01)

## 本文读者也读过(10条)

1. 张凤安 交流电源质量问题对通信系统的危害[期刊论文]-[管理观察](#)2009(31)
2. 王久增. Wang Jiuzeng 控制室电气采用的防谐波措施[期刊论文]-[石油化工自动化](#)2008, 44(1)
3. 高静敏 铁路信号电源屏的数据监测[期刊论文]-[希望月报\(上半月\)](#) 2007(9)
4. 金志毅. JIN Zhi-yi 谐波与电源质量新概念[期刊论文]-[安庆师范学院学报\(自然科学版\)](#) 2001, 7(3)
5. 杜立兵. 殷伟 智能电源屏入口电源动态监测装置研制[期刊论文]-[铁道通信信号](#)2008, 44(3)
6. 武启燕. Wu Qiyan 系统电源不稳造成运行中的主变压器在过负荷时跳闸原因分析与探讨[期刊论文]-[铁道技术监督](#)2006, 34(9)
7. 史耀政 10kV电力贯通线(自闭线)运动技术的应用[期刊论文]-[铁道标准设计](#)2000, 20(12)
8. 王发勤. Wang Faqin 电力变压器一次侧断相对电源屏正常工作的影响及解决方法[期刊论文]-[铁路通信信号工程技术](#)2008, 5(5)
9. 陈西虎 电源质量问题初探[期刊论文]-[电气化铁道](#)2006(z1)
10. 陶银. 尤一鸣. 汤文杨. TAO Yin. YOU Yi-ming. TANG Wen-yang 基于现场总线CAN的电源监测系统设计与实现[期刊论文]-[仪器仪表用户](#)2009, 16(2)

## 引证文献(5条)

1. 孙建明. 易东 柴油发电机带10kV贯通线电缆线路运行可行性研究[期刊论文]-[铁道标准设计](#) 2011(4)
2. 廖芳芳 郑西客运专线全电缆贯通线路的研究与设计[期刊论文]-[铁道工程学报](#) 2010(4)
3. 王颢 一种长大距离电缆线路电压工程算法[期刊论文]-[水电能源科学](#) 2010(3)
4. 陈世民. 牛大鹏. 马峰超. 梁孔渝 客运专线10kV贯通线路接地方式及补偿方案的研究[期刊论文]-[铁道标准设计](#) 2011(8)
5. 李文豪. 崔校玉. 陈维荣. 林德福 客运专线10 kV单芯电缆接地方式的研究[期刊论文]-[铁道工程学报](#) 2009(4)

引用本文格式: 王颢. 易东. WANG HAO. YI Dong 青藏铁路电缆贯通线并联电抗器补偿方式研究[期刊论文]-[铁道工程学报](#) 2008(8)