

设计计算

集肤电流加热法的理论分析 及其电路参数的计算

钱存普 林茂钦 邹玉民

集肤电流加热法 (SECT法) 出现在60年代中期, 是一种先进的电加热技术。具有结构简单、安全可靠、热能利用率高及易于自动控制等优点, 在石油储运系统及其他行业得到广泛应用。

世界各国应用 SECT法的有: 60年代日本用于燃料油管道的加热; 70年代美、加、英、苏等国用于加热保温的输油管道及粘油罐; 80年代印尼、法、西德、意等国在输油管道和粘油罐上的加热保温。我国自70年代中期起才引起有关单位的重视, 上海宝钢总厂应用此法加热保温重油管线; 大庆、辽河油田也进行了研究试验, 均取得了一定成果。但有关 SECT法的理论分析及设计所需参数的计算公式, 国内外尚未见系统报道。本文着重对 SECT法原理进行理论分析, 并推导出设计所需参数的定量计算公式, 以供设计计算应用。

一、集肤电流加热法的理论分析

当工频交流电流过铁磁性材料钢管时, 在集肤效应、邻近效应及屏蔽效应的共同作用下, 产生两个重要的现象: 一是电流不是均匀地流过钢管的横截面而只是流经其中的一部分, 相应地钢管的有效截面积减少, 交流阻抗显著地增大; 二是电流集中在钢管的内表面, 而钢管的外表面几乎没有电流流过, 钢管自身形成很好的电绝缘结构。因而可以把加热管 (即钢管) 直接焊接在油罐和管道上, 为需要加热的油罐及管道提供既安全又便利的加热装置。下面利用电磁场的理论对上述两个现象加以分析。

1. 基本形式

SECT法就导线和加热管布局方式来讲, 有两种不同形式: 一是电源 e_1 通过导线1、2连接在加热管的外部, 这时电流集中在加热管的外表面, 即外集肤电流加热法 (也称直接电加热法); 另一种是导线3、4从加热管的内部穿过连接在电源 e_2 上, 这时电流集中在加热管的内表面, 即内集肤电流加热法 (简称 SECT法), 如图1所示。

2. 加热管的电流密度分布规律

在图1中假设: a. 导线1、2离加热管无穷远; b. 导线3、4处于加热管的中心

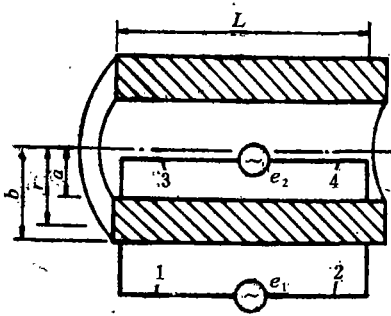


图1 加热管横截面图

处； c 。加热管的长度足以消除连接端部的影响，且满足以下关系：

$$b - a > 2S, \quad b \gg S$$

式中 c ——电流透入深度；
 b ——加热管的外半径；
 a ——加热管的内半径。

加热管的电源是工频交流电，是正弦量，可用时间的复数表示，其电磁波也是正弦电磁波。因此，加热管中所建立电磁场中的电场和磁场的空间向量可用向量复数表示，且忽略徙动电流，则Maxwell第一、二旋度方程可表示为：

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \times \dot{\mathbf{E}} = -\frac{\partial \dot{\mathbf{B}}}{\partial t} \\ \nabla \times \dot{\mathbf{H}} = g\dot{\mathbf{E}} + \frac{\partial \dot{\mathbf{D}}}{\partial t} \end{array} \right. \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \times \dot{\mathbf{E}} = -\frac{\partial \dot{\mathbf{B}}}{\partial t} \\ \nabla \times \dot{\mathbf{H}} = g\dot{\mathbf{E}} + \frac{\partial \dot{\mathbf{D}}}{\partial t} \end{array} \right. \quad (2)$$

式中 $\dot{\mathbf{E}}$ ——电场强度向量的复量，V/m；
 $\nabla \times \dot{\mathbf{E}}$ ——电场强度向量的旋度，V/m²；
 $\dot{\mathbf{B}}$ ——磁感应强度向量的复量，T；
 t ——时间，s；
 $\dot{\mathbf{H}}$ ——磁场强度向量的复量，A/m；
 $\nabla \times \dot{\mathbf{H}}$ ——磁场强度向量的旋度，A/m²；
 g ——媒质电导率，1/Ω·m；
 $\dot{\mathbf{D}}$ ——电通量密度向量的复量，c/m²。

将 $\dot{\mathbf{D}} = \epsilon \dot{\mathbf{E}}$ ， $\dot{\mathbf{B}} = \mu \dot{\mathbf{H}}$ 代入式(1)，(2)整理得：

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \times \dot{\mathbf{E}} = -j\mu\omega \dot{\mathbf{H}} \\ \nabla \times \dot{\mathbf{H}} = (1 + j\omega\epsilon/g) g\dot{\mathbf{E}} \end{array} \right. \quad (3)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \times \dot{\mathbf{E}} = -j\mu\omega \dot{\mathbf{H}} \\ \nabla \times \dot{\mathbf{H}} = (1 + j\omega\epsilon/g) g\dot{\mathbf{E}} \end{array} \right. \quad (4)$$

式中 ω ——电源角频率，1/s；
 μ ——媒质磁导率，H/m；
 ϵ ——媒质介电系数，F/m；
 j ——虚单位。

在良导体中， $\omega\epsilon/g \ll 1$ ，则式(4)可简化为：

$$\nabla \times \dot{\mathbf{H}} = g\dot{\mathbf{E}} \quad (5)$$

对式(3)两端取旋度得：

$$\nabla \times (\nabla \times \dot{\mathbf{E}}) = -j\mu\omega (\nabla \times \dot{\mathbf{H}}) \quad (6)$$

把式(5)代入式(6)得：

$$\nabla \times (\nabla \times \dot{\mathbf{E}}) = -j\mu\omega g\dot{\mathbf{E}} \quad (7)$$

式(7)是Maxwell第一旋度方程的最终表达式,它表示出集肤加热管所建立的电磁场中某点电场强度的两次旋度向量与该点电场强度的关系。

由旋度的定义得:

$$\nabla \times (\nabla \times \dot{\mathbf{E}}) = \nabla(\nabla \cdot \dot{\mathbf{E}}) - \nabla^2 \dot{\mathbf{E}} \quad (8A)$$

因为电场强度 $\dot{\mathbf{E}}$ 没有散度,则式(8A)可简化为:

$$\nabla \times (\nabla \times \dot{\mathbf{E}}) = -\nabla^2 \dot{\mathbf{E}} \quad (8B)$$

如图2所示采用柱面坐标系,因加热管具有轴对称性,所以电场强度 $\dot{\mathbf{E}}$ 只有z轴分量,则在柱面坐标下可表示为:

$$\begin{aligned} \nabla \times (\nabla \times \dot{\mathbf{E}}) &= -\nabla^2 \dot{\mathbf{E}} \\ &= -\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial}{\partial r} \dot{E}_z \right) - \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \dot{\mathbf{E}}}{\partial \varphi^2} - \frac{\partial^2 \dot{\mathbf{E}}}{\partial z^2} \\ &= -\frac{d^2 \dot{\mathbf{E}}}{dr^2} - \frac{1}{r} \frac{d\dot{\mathbf{E}}}{dr} \end{aligned} \quad (8C)$$

将式(8C)代入式(7)整理之,

$$\text{得} \quad \frac{d^2 \dot{\mathbf{E}}}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\dot{\mathbf{E}}}{dr} - j\mu g \omega \dot{\mathbf{E}} = 0 \quad (9)$$

$$\text{令} \quad K = \sqrt{-j\mu g \omega} = \sqrt{\frac{2}{j}} \cdot \frac{1}{S} \quad (10)$$

式中 S ——电流透入深度, $S = \sqrt{2/\mu g \omega}$;

r ——加热管任意一点的半径。

将式(10)及 $\dot{\mathbf{E}} = \mathbf{j}/\epsilon$ 代入式(9)整理,

$$\text{得} \quad r^2 \frac{d^2 \mathbf{j}}{dr^2} + r \frac{d\mathbf{j}}{dr} + (Kr)^2 \mathbf{j} = 0 \quad (11)$$

式中 \mathbf{j} ——电流密度向量的复量, A/m^2 。

式(11)是零阶Bessel方程,它的通解为:

$$\mathbf{j}(r) = C_1 J_0(Kr) + C_2 N_0(Kr) \quad (12)$$

式中 J_0 和 N_0 分别为第一、二类零阶Bessel函数, C_1 、 C_2 为未知数。

(1) 外集肤加热管 根据图1知,其边界条件为;

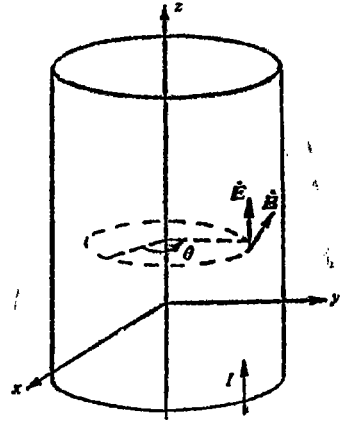


图2 柱面坐标系

$$\begin{cases} \frac{\partial \mathbf{j}}{\partial r} \Big|_{r=a} = 0 \\ \mathbf{j}_{r=b} = \dot{J}_b e^{j\omega t} \end{cases} \quad (13)$$

式中 \dot{J}_b ——加热管外半径处电流密度的模, A/m^2 。

在式(12)中, 根据第二类Bessel函数的性质, 当 $r=0$ 时, $N_0(Kr) \rightarrow \infty$ 。由于 $\mathbf{j}(r)$ 的有界性, 故 $C_2 = 0$ 则式(12)简化为:

$$\mathbf{j}(r) = C_1 J_0(Kr) \quad (14)$$

由假设条件知, $\sqrt{2} \frac{r}{S} \gg 10$, 故由Bessel函数的渐近公式

$$\begin{aligned} \text{得} \quad J_0(Kr) &= J_0\left(\sqrt{\frac{2}{j}} \cdot \frac{r}{S}\right) \\ &= \frac{1}{2} \left(\frac{\sqrt{2}S}{\pi r}\right)^{1/2} \cdot e^{r/S} \cdot e^{j(\pi/4 - r/S)} \end{aligned} \quad (15)$$

将式(15)及(13)代入式(14)整理之,

$$\text{得} \quad \mathbf{j}(r) = \dot{J}_b \sqrt{\frac{b}{r}} \cdot e^{-(b-r)/S} \cdot e^{j[\omega t - (b-r)/S]} \quad (16)$$

式(16)为外集肤加热管的电流密度分布规律。

(2) 内集肤加热管 根据图1知, 其边界条件为:

$$\begin{cases} \mathbf{j}_{r=a} = \dot{J}_a \cdot e^{j\omega t} \\ \frac{\partial \mathbf{j}}{\partial r} \Big|_{r=b} = 0 \end{cases} \quad (17)$$

式中 \dot{J}_a ——加热管在内半径处电流密度的模, A/m^2 。

同理将式(17)代入方程(12)解,

$$\text{得} \quad \mathbf{j}(r) = \dot{J}_a \sqrt{\frac{a}{r}} \cdot e^{-(r-a)/S} \cdot e^{j[\omega t - (r-a)/S]} \quad (18)$$

式(18)为内集肤加热管的电流密度分布规律。

由式(16)知, 对于外集肤电流加热法, 加热管的电流密度 J 随 r 的增大而增大, 在外径处, 电流密度达到最大值。故电流集中在加热管的外表面, 且流经加热管的有效截面积减小, 相应地交流阻抗显著地增大。

由式(18)知, 对于内集肤电流加热法, 电流在加热管横截面上不是均匀分布的, 而是愈接近加热管的内表面, 电流密度愈大, 在内表面处, 电流密度达到最大值, 如图3所示。因此, 电流流经加热管的有效截面积减小, 交流电阻显著地增大, 且电流集中在加热管的内表面, 而外表电流几乎为零, 自身构成很好的电绝缘结构。

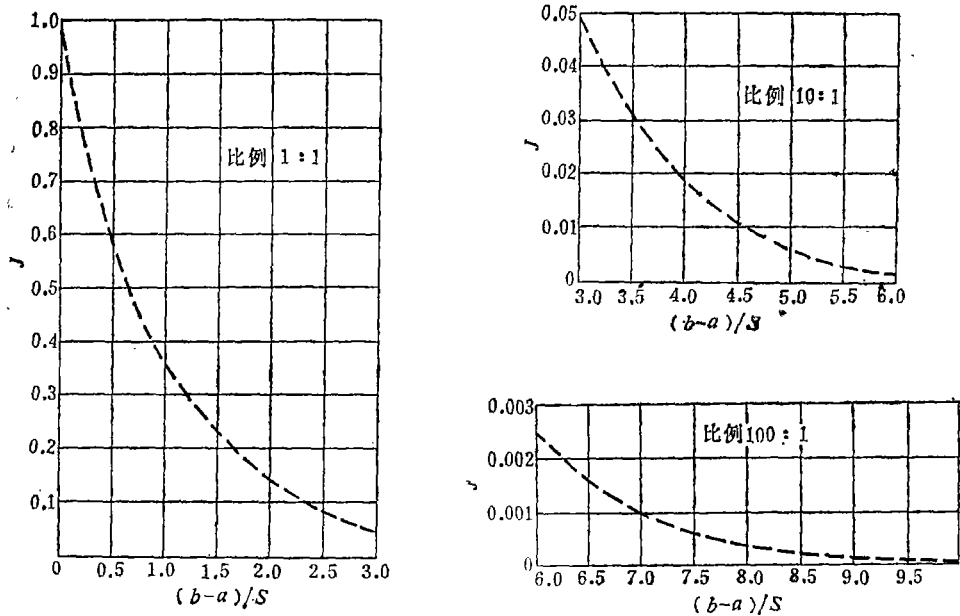


图3 加热管横截面上的电流分布

二、SECT法电路参数的计算

在设计中，首先会遇到电加热电路各参数的计算问题，下面根据加热管的电流密度分布规律对各参数的定量计算公式作进一步探讨。

1. 电流透入深度

集肤效应的强弱，一般用电流透入深度 S 表示。工程上通常把电流密度的幅值衰减到极值的 $1/e$ 倍时离电流集中表面的深度称为电流透入深度。

对于外集肤加热管，由式(16)知，当 $r=b$ 时， $J=J_b$ ，对应电流透入深度 x_c 时的

J 为 J_c ，则 $J_c = J_b \sqrt{\frac{b}{b-x_c}} \cdot e^{-x_c/S}$ ，由假设条件知， $x_c \ll b$ ，上式可简化为 $J_c = J_b \cdot e^{-x_c/S}$ ，则： $J_c/J = e^{-x_c/S} = 1/e$

$$\text{得} \quad x_c = S = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu g}} \quad (19)$$

同理得内集肤加热管的电流透入深度仍为：

$$S = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu g}}$$

在式(19)中各参数可取任意的同一单位制量纲，若采用工程单位制量纲，电流透入深度的数学表达式为：

$$S = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu g}} = \sqrt{\frac{2}{22f \times 4\pi \times 10^{-9} \times \mu_r \times 1/\rho}}$$

$$= 5033 \sqrt{\frac{\rho}{f\mu_r}} \quad (20)$$

式中 S ——电流透入深度, cm;
 ρ ——媒质电阻率, $\Omega \cdot \text{cm}$;
 f ——电源频率, 1/s;
 μ_r ——媒质相对磁导率。

由式(20)知, S 值与加热管的电阻率 ρ 、相对磁导率 μ_r 、电源的频率 f 有关。当 μ_r 、 f 越大时, 相应 S 就越小, 集肤效应就越强。因为加热管是铁磁性材料, 它的磁导率要比铜高1 000倍。因此, 尽管在工频下, S 值还是很小(约1 mm), 表示出很强的集肤效应, 相当于铜质材料在5 000Hz时的集肤效应。由图3可以看出, 如加热管的壁厚为2S时, 加热管外表面上的电流密度是内表面上的13.5%; 为3S时, 是4%。一般钢管的壁厚为3~4S, 是以保证外壁具有很好的绝缘性。

2. 交流阻抗

由上述可知, 电流在加热管横截面上不是均匀分布的, 而是集中在透入深度 S 内。相应地有效过流面积减少, 与其直流电阻相比, 交流电阻显著增加。

对于外集肤加热管, 设通过加热管的电流为 I , 由式(16)得 $I = \int_b^a J(r) 2\pi r dr =$

$\pi D S g E_b / (1 + j)$, 则 $Z = E_b / I = (1 + j) / \pi D S g$ 。

得 $R = x_L = 1 / \pi D S g = \sqrt{f \rho \mu_r} / 5033 \pi D$ (21)

式中 E_b ——加热管外半径处的电场强度, V/m;

R ——单位长度加热管的电阻, Ω/m ;

x_L ——单位长度加热管的感抗, Ω/m ;

Z ——单位长度加热管的阻抗, Ω/m ;

D ——加热管的外径, m。

同理得内集肤加热管的电阻和感抗为:

$$R = x_L = \sqrt{f \rho \mu_r} / 5033 \pi d \quad (22)$$

式中 d ——加热管的内径, m。

由式(21)和(22)知, 加热的交流阻抗与加热管的电阻率 ρ 、相对磁导率 μ_r 及管径有关。对于同种管材的加热管, 管径愈小, 阻抗愈大。对相同管径加热管, 内集肤加热管的阻抗比外集肤加热管大, 两者的比值为 D/d 。

相对磁导率 μ_r 对加热管阻抗的影响比较复杂。因为 μ_r 随电流的变化而变化, 其变化规律如图4所示。



图4 μ_r 与 I 的关系曲线

μ , 开始较小, 然后迅速增加, 增加到某一值后, 又缓慢地减小。由式(21)和(22)知, 加热管阻抗随 μ 的变化而变化, 其变化的规律与 μ 的变化规律相同。

3. 集肤加热管的功率

单位体积内, 电流密度产生的功率为 $d\rho = J \cdot J^* / g$, 则单位长度加热管的功率为:

$$P = \frac{2x}{g} \int_b^a J^* \cdot J \cdot r dr \quad (23)$$

式中 J^* —— J 的共轭矢量。

对于内集肤加热管, 由式(16)

$$P = \frac{I^2}{5033\pi d} \sqrt{\rho \mu_r f} \quad (24)$$

同理得外集肤加热管的功率为:

$$P = \frac{I^2}{5033\pi d} \sqrt{\rho \mu_r f} \quad (25A)$$

在内集肤加热系统中, 穿管导线消耗的功率也同时用于加热,

$$P = I^2 \left[R_c + \frac{\sqrt{\rho \mu_r f}}{5033\pi d} \right] \quad (25B)$$

式中 R_c ——单位长度穿管导线的电阻, Ω/m 。

4. 功率因数

功率因数是进行电加热设计时的重要参数。对于外集肤加热管, 由式(21)知, 其功率因数为70.7%。而在内集肤电加热系统中, 穿管导线发出的热量也用于加热, 且导线与加热管之间有电感产生, 其电加热系统的等效电路如图5所示。由图5知, 电路中单位长度的总阻抗可表示为:

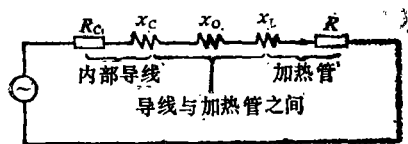


图5 电加热系统的等效电路

$$|Z| = [(R_c + R)^2 + (x_0 + x_c + x_L)^2]^{1/2} \quad (26)$$

式中 x_c ——单位长度导线的感抗, $x_c = f\mu_0 / 4$, Ω/m ;

x_0 ——单位长度导线与加热管间的感抗, $x_0 = f\mu_0 \rho_n a / r_c$, Ω/m ;

r_0 ——导线的截面半径, m ;

其余符号同前。

则电加热系统的功率因数为:

$$\cos\varphi = (R_c + R) / |Z| \quad (27)$$

5. 内集肤加热管的漏电压

由上面分析知, 电流流经内集肤加热管时, 集中在加热管的内表面。但是全部电流并不是均匀地流经管壁的某一深度内, 只是愈接近加热管的外壁, 电流密度愈小, 如图

6所示。在加热管的外壁上依然有电流流过，这个电流在加热外壁电阻上产生电位降，就是所谓的漏电压。

单位长度加热管外壁上的漏电压为：

$$V_{漏} = \frac{I\rho}{2\sqrt{2ab\pi S}} e^{-(b-a)/S} \quad (28)$$

由式可知，漏电压与电流及加热管壁的厚有关，它随管壁厚的增加按指数的规律递减。

实验中（实验装置见图7），对长20m、 $\phi 3/4$ 英寸、 $\phi 1$ 英寸钢管的漏电压进行测量，测量数据与计算数相比较，见表1。

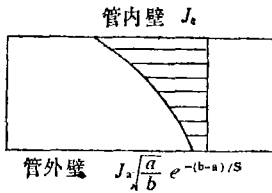


图6 电流密度曲线

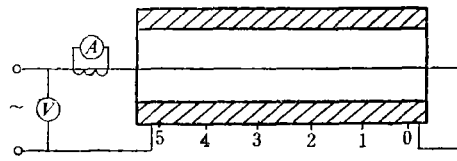


图7 实验装置

I = 200A 测、计数比较

表1

测 试 点	0~1	0~2	0~3	0~4	0~5	
3/4 英寸	V测漏 (mV)	83	156	245	334	426
	V测漏 (mV)	86	173	260	347	434
1 英寸	V测漏 (mV)	38.5	75	118	157	201
	V测漏 (mV)	41.8	83.5	125	167	209

由表1知，计算值与实验值基本相符。同时可看出，当加热管通200A的电流时，管外壁上只有mV级的漏电压。因此，从实验的角度上证明了集肤加热管具有很好的绝缘性。由上分析知，一定长度的加热管有漏电压存在，当它的两端用电阻无穷小的导体（不考虑这种导体是否存在）连接起来时，或直接焊在电阻很小的导体上时，通过导体中的电流会不会变得无穷大的情况出现，因为加热管外壁上的漏电压是漏电流引起的，是漏电流在加热管外壁电阻上产生的电压降。由图6知，加热管外壁上的漏电流可表示为 $J_s \cdot \sqrt{a/b} \cdot e^{-(b-a)/S}$ ，它与管外壁上是否并联导体无关，只与管自身结构有关。当管外壁上并联一根电阻很小的导体时，不但不会出现上述情况，而且总的阻抗 $[Z = (Z_1 \times Z_2) / (Z_1 + Z_2)]$ 变得很小，相应地漏电压变得很小。

实验中，将 $\phi 1$ 英寸加热管焊接在输液管上，测得结果与未焊接的管相比较见表2。从表中看出，加热管焊接在输液管上后，其漏电压显著地下降，这是因为输液管的阻抗比加热管的阻抗小得多，相当于在加热管外壁上并联一根电阻很小的导体，使漏电压明显地减小。因此为了减小漏电压及施工的方便，把加热管直接焊接在需加热的输液管线或油罐上。

I = 200A 实验比较

表 2

至 0 米处的距离 (m)	0 ~ 1	0 ~ 2	0 ~ 3
焊接在输液管上的漏电压 (mV)	6	14	21
未焊接在输液管上的漏电压 (mV)	33	58	89

三、结束语

近20年来,集肤电流加热法得到广泛地应用,取得了显著的经济效益。尽管我国对集肤电流加热法研究较晚,其发展的前景也是广阔的。可以预见,随着我国“四化”建设的进行,集肤电流加热法将会得到广泛地应用和推广。

参 考 文 献

- [1] 孙元:管道集肤电流加热法理论、试验及应用,《油气管道技术》,1980,3、4合刊, P60
- [2] M.Ando,: Principle and Applicaton of the SECT System, W.E.L.C, 1977, 6, No. 4 A.75
- [3] 林茂钦:油库沾油电加热方法探讨,《教学与科研》,1985, No. 4, P25

《原油、天然气长输管道与铁路 相互关系的若干规定》施行

为了适应我国石油工业与铁路建设事业的迅速发展,合理地处理好原油、天然气长输管道与铁路之间的关系,石油工业部、铁道部共同制订了《原油、天然气长输管道与铁路相互关系的若干规定》,定于1987年10月1日施行(该规定即将内部发行)。

该规定是两部共同遵守的准则。它适用于原油、天然气长输管道与铁路之间的相互交叉;对于油、气田的集输管道与铁路相互交叉也可参照办理。

该规定的主要内容有:油、气管道与铁路相互交叉的技术问题;维护管道与铁路的安全问题;产权与责任划分问题;日常管理问题以及计费原则等。

该规定是由石油工业部管道勘察设计院和铁道部专业设计院联合编写。于1985年起着手开展工作,于1986年8月及1987年3月两次的审查会议,经有关专家、工程技术人员的研究和评审,形成正式文件。现经两部批准,正式下达施行。