

中华人民共和国机械行业标准

电缆载流量计算 第2部分:热阻 第1节:热阻的计算

JB/T 10181.3—2000
idt IEC 60287-2-1:1994

Calculation of the current rating of electric cables— Part 2: Thermal resistance— Section 1: Calculation of thermal resistance

1 一般规定

1.1 范围

本标准适用于敷设在空气或土壤中的所有交流电压等级和5 kV及以下直流电压电缆稳态运行状况。土壤中包括无论是否发生局部土壤干燥的直接埋地、管道、电缆沟或钢管中敷设的电缆。术语“稳态”系指在周围环境假定不变的条件下,连续恒定电流(100%负荷因数)正好足以渐近地达到导体的最高温度。

这一节提供了额定载流量和各种损耗的计算公式。

这些公式基本上是严密的,有意对某些重要参数取值未作规定,可分为三组:

——与电缆结构有关的参数(例如绝缘材料热阻系数),选于公开出版物中代表性数值;

——与环境条件有关的参数,其值可能变化范围较大,取决于使用电缆或即将使用电缆的敷设现场状况;

——来自于制造厂和用户之间协商的参数,包括运行的安全裕度(例如最高导体温度)。

1.2 符号

本标准所用的符号及其代表的参量由下列给出:

D_0'	铠装外径	mm
D_0	管道内径	mm
D_c	电缆外径或钢管电缆内线芯组等效外径	mm
D_c^*	电缆外径(2.2.1中使用)	m
D_o	管道外径	mm
D_s	金属套平均外径	mm
D_{oc}	正好与皱纹金属套波峰相切的假想同心圆柱体的直径	mm
D_{ot}	正好与皱纹金属套波谷外表面相切的假想同心圆柱体的直径 $= D_o + 2t_s$	mm
D_{oc}	正好与皱纹金属套波峰内表面相切的假想同心圆柱体的直径 $= D_o - 2t_s$	mm
D_{oi}	正好与皱纹金属套波谷内表面相切的假想同心圆柱体的直径	mm
E	2.2.1.1中使用的常数	
F_1	2.1.1.2.2中对带绝缘电缆所定义的系数	
F_2	2.1.1.2.5中对带绝缘电缆所定义的系数	
G	带绝缘电缆的几何因数	
\bar{G}	SL和SA型电缆的几何因数	

H	日光辐射照度(见 2.2.1.2)	W/m^2
K	屏蔽电缆热阻屏蔽系数	
K_A	在 2.2.1 中所用的系数	
L	相对于电缆轴线或三角形中心的敷设深度	mm
L_G	从土壤表面到排管混凝土预制件中心的距离	mm
N	排管中有负荷的电缆根数(见 2.2.7.3)	
T_1	导体和金属套之间每根线芯热阻	$K \cdot m/W$
T_2	金属套和铠装之间热阻	$K \cdot m/W$
T_3	外护层热阻	$K \cdot m/W$
T_4	周围介质热阻 (高于周围环境温度的电缆表面温升与单位长度损耗之比)	$K \cdot m/W$
T_4^*	阳光照射下自由空气中电缆修正的外部热阻	$K \cdot m/W$
T_4'	电缆和排管(或管道)之间热阻	$K \cdot m/W$
T_4''	排管(或管道)的热阻	$K \cdot m/W$
T_4'''	排管(或管道)周围介质热阻	$K \cdot m/W$
U, V	2.2.7.1 中常数	
W_d	每相单位长度电缆介质损耗	W/m
W_k	第 k 根电缆的散热量	W/m
W_{TOT}	单位长度电缆沟总散热量	W/m
Y	2.2.7.1 中使用的系数	
Z	2.2.1.1 中使用的系数	
d_a	带绝缘的外径	mm
d_c	导体的外径	mm
d_{cm}	椭圆形导体短轴直径	mm
d_{cM}	椭圆形导体长轴直径	mm
d_M	椭圆形导体的屏蔽或金属套长轴直径	mm
d_m	椭圆形导体的屏蔽或金属套短轴直径	mm
d_x	与型导体横截面和紧压程度相等的等效圆导体的直径	mm
g	2.2.1.1 中所用系数	
h	散热系数	$W/m^2K^{5/4}$
\ln	自然对数(以 e 为底)	
n	电缆中导体数	
p	有效散热的电缆沟的参数(见 2.2.6.2)	m
r_3	外切于两或三扇形导体的外接圆半径	mm
s_1	在平面排列的三个不接触电缆中,两个相邻电缆之间的距离	mm
t	导体之间绝缘厚度	mm
t_1	导体和金属套之间绝缘厚度	mm
t_2	衬层厚度	mm
t_3	外护层厚度	mm
t_4	线芯绝缘厚度,包括各相屏蔽带加上包在缆芯外的非金属带厚度的一半	mm
t_s	金属套厚度	mm

u	2.2.2 中 $u = \frac{2L}{D_c}$	
u	2.2.7.3 中 $u = \frac{L_c}{r_b}$	
x, y	排管混凝土预制件两边尺寸 ($y > x$) (见 2.2.7.3)	mm
θ_m	电缆和排管(或管道)之间介质平均温度	°C
$\Delta\theta$	高于环境温度的导体允许温升	K
$\Delta\theta_a$	自由空气中计算 T_4 时考虑介质损耗时的因数	K
$\Delta\theta_{ds}$	采用图 8 计及自由空气中日光直接照射和介质损耗计算 T_4 时所用的因数	K
$\Delta\theta_{dwr}$	管道中空气平均温度和周围环境温度之间温差	K
$\Delta\theta_s$	空气中电缆表面温度和环境温度之间温差	K
$\Delta\theta_{tr}$	电缆沟中空气的温升	K
λ_1	金属套总损耗相对于导体总损耗的比率(或一个金属套中的损耗相对于导体损耗之比率)	
λ_2	铠装总损耗相对于导体总损耗的比率(或一个铠装的损耗相对于导体损耗之比率)	
λ'_{1m}	三根单芯电缆平面排列,不换位,金属套两端互连时中间电缆的损耗因数	
λ'_{11}	三根单芯电缆平面排列,不换位,金属套两端互连时具有最大损耗的外侧电缆的损耗因数	
λ'_{12}	三根单芯电缆平面排列,不换位,金属套两端互连时具有最小损耗的外侧电缆的损耗因数	
ρ_c	排管混凝土预制件周围土壤热阻系数	K·m/W
ρ_c	排管混凝土预制件的混凝土的热阻系数	K·m/W
ρ_m	多芯电缆金属屏蔽的热阻系数	K·m/W
ρ_T	材料热阻系数	K·m/W
σ	电缆表面对日光照射的吸收系数	

2 热阻计算

2.1 电缆各部分的热阻 T_1 、 T_2 和 T_3

本条给出构成电缆各部分单位长度热阻 T_1 、 T_2 和 T_3 (见 JB/T 10181.1—2000 中 1.4) 的计算公式。表 1 给出绝缘和护层材料的热阻系数。

对于热计算,有屏蔽层的情况下,金属带作为导体或金属套的一部分,而半导体层(包括金属碳化纸带)作为绝缘的一部分。相关组成部分的尺寸需作相应修改。

2.1.1 单根导体和金属套之间热阻 T_1

2.1.1.1 单芯电缆

一根导体和金属套之间热阻 T_1 由下式给出:

$$T_1 = \frac{\rho_T}{2\pi} \ln\left(1 + \frac{2t_1}{d_c}\right)$$

式中: ρ_T ——绝缘材料热阻系数, K·m/W;

d_c ——导体直径, mm;

t_1 ——导体和金属套之间的绝缘厚度, mm。

注:对于皱纹金属套, t_1 按金属套平均内径计算;

$$\frac{D_{in} + D_{oc}}{2} - t_s$$

2.1.1.2 带绝缘电缆

一根导体和金属套之间热阻 T_1 由下式给出:

$$T_1 = \frac{\rho_r}{2\pi} G$$

式中: G —— 几何因数。

注: 对于皱纹金属套, t_s 按金属套平均内径计算:

$$\frac{D_{in} + D_{oc}}{2} - t_s$$

2.1.1.2.1 两芯圆形导体带绝缘电缆

几何因数由图 2 给出。

2.1.1.2.2 两芯扇形导体带绝缘电缆

几何因数由下式给出:

$$G = 2F_1 \ln\left(\frac{d_s}{2r_1}\right)$$

式中: $F_1 = 1 + \frac{2 \cdot 2t}{2\pi(d_s + t) - t}$

d_s —— 带绝缘外径, mm;

r_1 —— 各导体的外接圆半径, mm;

d_s —— 与扇形导体的截面和紧压度均相同的圆导体的直径, mm;

t —— 导体之间的绝缘厚度, mm。

2.1.1.2.3 三芯圆形导体带绝缘电缆

几何因数由图 3 给出。

2.1.1.2.4 三芯椭圆形导体带绝缘电缆

该电缆作为等效直径 $d_c = \sqrt{d_{cm} \cdot d_{cm}}$ (mm) 的等效圆导体电缆来处理。

式中: d_{cm} —— 椭圆导体的长轴直径, mm;

d_{cm} —— 椭圆导体的短轴直径, mm。

2.1.1.2.5 三芯扇形导体带绝缘电缆

该电缆几何因数 G 取决于扇形的形状, 各制造厂不同, 适合的公式为:

$$G = 3F_2 \ln\left(\frac{d_s}{2r_1}\right)$$

式中: $F_2 = 1 + \frac{3t}{2\pi(d_s + t) - t}$

d_s —— 带绝缘外径, mm;

r_1 —— 各导体的外接圆半径, mm;

d_s —— 与扇形导体的截面和紧压度均相同的圆导体的直径, mm;

t —— 导体之间的绝缘厚度, mm。

2.1.1.3 金属带屏蔽型三芯电缆

2.1.1.3.1 圆形导体屏蔽型电缆

这种类型电缆可首先作为以 $t_1/t = 0.5$ 的带绝缘电缆考虑, 然后再计及金属屏蔽的导热效应, 结果再乘以屏蔽因数 K 。对于不同 t_1/d_c 值和不同的电缆由图 4 给出 K 值。

因此:

$$T_1 = K \frac{\rho_r}{2\pi} G$$

2.1.1.3.2 椭圆形导体屏蔽电缆

这类电缆作为等效直径 $d_e = \sqrt{d_{cm} \cdot d_{em}}$ (mm) 的等效圆导体电缆来处理。

2.1.1.3.3 扇形导体屏蔽电缆

这类电缆按扇形导体带绝缘电缆相同的方法计算 T_1 , 但 d_e 取作缆芯的外接圆直径, 结果再乘以图 5 所给的屏蔽因数。

2.1.1.4 充油电缆

2.1.1.4.1 具有圆形导体及金属化纸绝缘屏蔽和线芯之间有圆形油道的三芯电缆

一个导体和金属套之间的热阻由下式给出:

$$T_1 = 0.358 \rho_T \left(\frac{2t_i}{d_c + 2t_i} \right)$$

式中: d_c —— 导体直径, mm;

t_i —— 绝缘厚度, 其中包括碳黑和金属化纸带再加上绕包在三个线芯成缆芯上的任何非金属带厚度的一半, mm;

ρ_T —— 绝缘热阻系数, K·m/W。

公式假设被金属油道和油道中的油占有空间与绝缘相比具有很高的热导, 因此, 与所用构成油道的金属及其厚度无关。

2.1.1.4.2 具有圆形导体、金属带线芯屏蔽和线芯之间有圆形油道的三芯电缆

导体和金属套之间的热阻 T_1 由下式给出:

$$T_1 = 0.35 \rho_T \left(0.923 - \frac{d_c}{d_c + 2t_i} \right)$$

式中: t_i —— 线芯绝缘厚度, 包括金属屏蔽带及三个线芯成缆芯上的任何非金属带厚度的一半, mm。

注: 该公式与屏蔽和油道所用的金属无关。

2.1.1.4.3 具有圆形导体金属带绝缘屏蔽、无填充材料、无油道, 采用铜编织带捆扎线芯的皱纹铝套三芯电缆

导体与金属套之间热阻 T_1 由下式给出:

$$T_1 = \frac{475}{D_c^{0.74}} \left(\frac{t_g}{D_c} \right)^{0.82} + \frac{\rho_T}{2\pi} \ln \left(\frac{D_c - 2\delta_1}{d_c} \right)$$

式中: $t_g = 0.5 \times \left(\frac{D_{it} + D_{ic}}{2} - 2.16 D_c \right)$

D_c —— 线芯金属屏蔽带的直径, mm;

t_g —— 线芯金属屏蔽带和金属套平均内直径之间平均标称间隙, mm;

δ_1 —— 金属带线芯屏蔽厚度, mm。

注: 该公式与屏蔽带所用的金属无关。

2.1.1.5 SL 和 SA 型电缆

热阻 T_1 的计算与单芯电缆计算方法相同。

2.1.2 金属套和铠装之间热阻 T_2

2.1.2.1 具有统包金属套的单芯、两芯和三芯电缆

金属套和铠装之间热阻 T_2 由下式给出:

$$T_2 = \frac{\rho_T}{2\pi} \ln \left(1 + \frac{2t_2}{D_c} \right)$$

式中: t_2 —— 衬垫厚度, mm;

D_c —— 金属套外径, mm。

2.1.2.2 SA 和 SL 型电缆

铠装下内衬层和填充层的热阻由下式给出：

$$T_2 = \frac{\rho_T}{6\pi} G$$

式中：G——图6给出的几何因数。

2.1.3 外护层热阻 T_3

外护层一般是同心圆结构，外护层热阻 T_3 由下式给出：

$$T_3 = \frac{\rho_T}{2\pi} \ln\left(1 + \frac{2t_3}{D_a'}\right)$$

式中： t_3 ——外护层厚度，mm；

D_a' ——铠装外径，mm。

注：对非铠装电缆， D_a' 值取为按直接处于其下的组成部分的外径，即金属套、屏蔽或衬垫层外径作为 D_a' 。
皱纹金属套：

$$T_3 = \frac{\rho_T}{2\pi} \ln\left[\frac{D_{oc} + 2t_3}{(D_{oc} + D_{it})/2 + t_3}\right]$$

2.1.4 钢管电缆

对于三芯电缆提出如下方法：

a) 导体和屏蔽之间每一线芯的绝缘热阻 T_1 按 2.1.1 单芯电缆方法计算。

b) 热阻 T_2 由两部分组成：

1) 每个线芯屏蔽或金属套上面外护层热阻，其值取代 JB/T 10181.1—2000 中 1.4 载流量公式中 T_2 的值为每根电缆的值，即对三芯电缆其值是单芯电缆数值的 1/3。

每个线芯的值按 2.1.2 给出的单芯电缆内衬层的方法计算。对椭圆形线芯，应以长轴直径和短轴直径的几何平均值 $\sqrt{d_M \cdot d_m}$ 取代圆形线芯直径。

2) 线芯表面和钢管之间气体或油的热阻，这部分热阻计算方法与 2.2.7.1 所给的电缆与管道内表面之间的热阻 T_2 计算方法相同。

计算值为每根电缆的数值，在取代 JB/T 10181.1—2000 中 1.4 载流量公式中 T_2 前应将此值加上 1) 项所计算的数值。

c) 钢管外包覆层热阻 T_3 按 2.1.3 计算，金属管本身热阻忽略不计。

2.2 外部热阻 T_4

2.2.1 自由空气中敷设的电缆

2.2.1.1 不受日光直接照射的电缆

不受日光直接照射情况下，空气中敷设的电缆周围热阻由下式给出：

$$T_4 = \frac{1}{\pi D_c^* \cdot h \cdot (\Delta\theta_s)^{1/4}}$$

式中： $h = \frac{Z}{(D_c^*)^2} + E$

D_c^* ——电缆外径，m；

对于皱纹金属套 $D_c^* = (D_{oc} + 2t_3) \times 10^{-3}$ (m)；

注：2.2.1 中 D_c^* 全部以 m 为单位。

h ——散热系数采用表 2 中所给出合适的 Z 、 E 和 g 常数值由上式计算得出，或为了方便从曲线 7a、7b 和 7c 查取，(W/m²K^{5/4})。

有外护层的电缆和有非金属表面的电缆应视为黑色表面。无外护层的电缆，裸铅包或铠装电缆 h 值应为黑色表面 h 值的 88%。

$\Delta\theta_s$ ——电缆表面相对环境的温度的温升(见下文计算方法)，K。

对于没有填充物的电缆沟中敷设的电缆见 2.2.6。

计算 $(\Delta\theta_s)^{1/4}$;

下面给出计算 $(\Delta\theta_s)^{1/4}$ 的简单迭代法,相应的图示法在3.2条中给出。

$$K_A = \frac{\pi D_c^* h}{1 + \lambda_1 + \lambda_2} \times \left[\frac{T_1}{n} + T_2(1 + \lambda_1) + T_3(1 + \lambda_1 + \lambda_2) \right]$$

则:

$$(\Delta\theta_s)_{n+1}^{1/4} = \left(\frac{\Delta\theta + \Delta\theta_d}{1 - K_A (\Delta\theta_s)_n^{1/4}} \right)^{1/4}$$

令 $(\Delta\theta_s)_n^{1/4}$ 的初值=2并反复迭代直到:

$$(\Delta\theta_s)_{n+1}^{1/4} - (\Delta\theta_s)_n^{1/4} \leq 0.001$$

式中: $\Delta\theta_d = W_d \left[\left(\frac{1}{1 + \lambda_1 + \lambda_2} - \frac{1}{2} \right) T_1 - \frac{n\lambda_2 T_2}{1 + \lambda_1 + \lambda_2} \right]$

这是计及介质损耗的因数,具有温差的量纲,当介质损耗忽略时 $\Delta\theta_d = 0$ 。

$\Delta\theta$ ——导体对周围环境的允许温升,K。

2.2.1.2 直接受日光照射的电缆

外部热阻 T_4^{*1}

直接受日光照射的场合下, T_4^{*1} 采用与2.2.1.1相同的方法计算,除迭代方法 $(\Delta\theta_s)^{1/4}$ 由下式计算:

$$(\Delta\theta_s)_{n+1}^{1/4} = \left(\frac{\Delta\theta + \Delta\theta_d + \Delta\theta_{ds}}{1 + K_A (\Delta\theta_s)_n^{1/4}} \right)^{0.25}$$

式中: $\Delta\theta_{ds} = \frac{\sigma D_c^* h}{1 + \lambda_1 + \lambda_2} \left[\frac{T_1}{n} + T_2(1 + \lambda_1) + T_3(1 + \lambda_1 + \lambda_2) \right]$

这是计及太阳直接照射,具有温差量纲的因数。

式中: σ ——日光照射下电缆表面的吸收系数(见表3);

H ——日光辐射照度,对于大多数纬度地区取 10^5 (W/m²),如果可能则推荐采用当地量值;

D_c^* ——电缆外径,m。

对于皱纹金属套 $D_c^* = (D_{oc} + 2t_3) \cdot 10^{-3}$ (m)

另外替代的图解法见图8。

2.2.2 单根分离埋地电缆

外部热阻计算如下:

$$T_4 = \frac{1}{2\pi} \rho_T \ln(u + \sqrt{u^2 - 1})$$

式中: ρ_T ——土壤热阻系数,K·m/W;

$$u = \frac{2L}{D_c}$$

L ——电缆轴线至地表面的距离,mm;

D_c ——电缆外径,mm。

对于皱纹金属套 $D_c^* = D_{oc} - 2t_3$ (mm)

当 $u > 10$ 时,最佳近似值(接近1/1000)为:

$$T_4 = \frac{1}{2\pi} \rho_T \ln(2u)$$

2.2.3 埋地电缆组(相互不接触)

假设每根电缆作为线性热源而且不受其他电缆引起的热场畸变的影响,成组埋地电缆的外部热阻可采用叠加法计算。

采用说明:

1) IEC 原文有编号,本标准为了与GB/T 1.1统一,删去了该编号。

多根电缆敷设有两种主要类型：第一种为最普通类型，是结构不同，负荷不等的电缆组，对此问题仅能给出一般方法；第二种为较特殊类型，是负荷相等的同一种电缆的组合，对此问题能导出一些相对简单的求解公式。

2.2.3.1 不等负荷的多根电缆

对于负荷不等，不同结构的电缆组的建议方法是计算该组其他电缆对所要考虑的那根电缆引起的表面温升，并由JB/T 10181.1—2000中1.4载流量公式的 $\Delta\theta$ 值减去此温升。必须预先估算单位长度每根电缆的散热功率，如需要还应随后对计算结果进行修正。

因此，要确定第 p 根电缆的载流量，由该组其他 $(q-1)$ 根电缆的散热引起对第 p 根电缆的表面相对环境温度的温升 $\Delta\theta_p$ 由下式给出：

$$\Delta\theta_p = \Delta\theta_{1p} + \Delta\theta_{2p} + \dots + \Delta\theta_{kp} + \dots + \Delta\theta_{qp}$$

(总和中除去 $\Delta\theta_{pp}$ 项)

式中： $\Delta\theta_{kp}$ ——第 k 根电缆单位长度的散热量 W_k (瓦特)对第 p 根电缆所引起的表面温升。

$$\Delta\theta_{kp} = \frac{1}{2\pi} \rho_T W_k \ln \left[\frac{d'_{pk}}{d_{pk}} \right]$$

d_{pk} 和 d'_{pk} 分别为第 p 根电缆的轴心至第 k 根电缆轴心距离和第 p 根电缆的轴心至第 k 根电缆相对大地—空气表面的镜象轴心距离(见图1)。

将JB/T 10181.1—2000中1.4载流量公式中的 $\Delta\theta$ 值减去 $\Delta\theta_p$ 并采用对应位置 p 的分离敷设的电缆 T_A 值计算第 p 根电缆的载流量。

如果要避免任何一根电缆可能过热，应逐一对每根电缆进行计算。

2.2.3.2 负荷相等、结构相同的多根电缆

第二种类型是以最热电缆的额定电流来确定负荷相等、结构相同的电缆组的载流量。通常从排列形状就能判断哪个电缆最热并对该电缆进行载流量计算。在难以确定的情况下，可以进一步对其他电缆计算。该方法是计及到一组电缆各电缆之间相互热影响计算修正的外部热阻 T_A ，而JB/T 10181.1—2000中1.4载流量公式 $\Delta\theta$ 值不变。

第 p 根电缆修正的外部热阻 T_A 由下式给出：

$$T_A = \frac{1}{2\pi} \rho_T \ln \left\{ (u + \sqrt{u^2 - 1}) \left[\left(\frac{d'_{p1}}{d_{p1}} \right) \left(\frac{d'_{p2}}{d_{p2}} \right) \dots \left(\frac{d'_{pk}}{d_{pk}} \right) \dots \left(\frac{d'_{pq}}{d_{pq}} \right) \right] \right\}$$

共有 $(q-1)$ 项， $\frac{d'_{pp}}{d_{pp}}$ 项除外

距离 d_{pk} 等与第一种方法所用图1相同。

如果适合的话(见2.2.2)，可用较简单形式 $2u$ 代替 $u + \sqrt{u^2 - 1}$ 。

简单的电缆排列，上述公式可大为简化。下面的公式是采用叠加的例子。

2.2.3.2.1 有间距分开水平面排列相等损耗的两根电缆：

$$T_A = \frac{1}{2\pi} \rho_T \left\{ \ln(u + \sqrt{u^2 - 1}) + \frac{1}{2} \ln \left[1 + \left(\frac{2L}{s_1} \right)^2 \right] \right\}$$

式中： $u = \frac{2L}{D_c}$

L ——地表面到电缆轴线之间距离，mm；

D_c ——电缆外径，mm；

s_1 ——相邻电缆之间轴线间距，mm。

当 u 值超过10时，则可用 $(2u)$ 代替 $u + \sqrt{u^2 - 1}$ 。

2.2.3.2.2 等间距水平面排列损耗大致相等的三根电缆：

$$T_A = \frac{1}{2\pi} \rho_T \left\{ \ln(u + \sqrt{u^2 - 1}) + \ln \left[1 + \left(\frac{2L}{s_1} \right)^2 \right] \right\}$$

式中 T_1 值是该组中间电缆的热阻且直接用于 JB/T 10181.1—2000 中 1.4.1 公式。

2.2.3.2.3 等间距水平面排列金属套损耗不等的三根电缆

当多根单芯电缆水平面排列金属套中损耗较大,且金属套不换位和(或)金属套各接点互连时,金属套损耗不等将影响最热电缆外部热阻。在这种情况下,JB/T 10181.1—2000 中 1.4.1 载流量公式的分子项所用的 T_1 值按 2.2.3.2.2 中所给的值,但分母项必须用修正的 T_1 ,如下所示:

$$T_1 = \frac{1}{2\pi} \rho_T \left\{ \ln(u + \sqrt{u^2 - 1}) + \left[\frac{1 + 0.5(\lambda'_{11} + \lambda'_{12})}{1 + \lambda'_{1m}} \right] \ln \left[1 + \left(\frac{2L}{s_1} \right)^2 \right] \right\}$$

这是假设中间一根电缆最热,JB/T 10181.1—2000 中 1.4.1 载流量公式中 λ_1 值为中间那根电缆的金属套损耗。

式中: $u = \frac{2L}{D_c}$

L ——地表面到电缆轴线之间距离,mm;

D_c ——电缆外径,mm;

s_1 ——相邻电缆之间轴线间距,mm;

λ'_{11} ——该组外侧电缆金属套损耗因数;

λ'_{12} ——该组另一外侧电缆金属套损耗因数;

λ'_{1m} ——该组中间电缆金属套损耗因数。

当 u 值超过 10 时,则可用 $(2u)$ 代替 $u + \sqrt{u^2 - 1}$ 。

2.2.4 等负荷埋地电缆组(相互接触)

2.2.4.1 平面排列的两根单芯电缆

$$T_1 = \frac{\rho_T}{\pi} [\ln(2u) - 0.451] \quad (u \geq 5)$$

2.2.4.2 平面排列三根单芯电缆

$$T_1 = \rho_T (0.475 \ln(2u) - 0.346) \quad (u \geq 5)$$

2.2.4.3 三角形排列的三根单芯电缆

这种排列 L 为地面至三角形组的中心的距离, D_c 为电缆外径。 T_1 是任一根电缆的外部热阻,这种排列的顶点可在该组的上端,也可在底部。

对于皱纹金属套, $D_c = D_{oc} + 2t_s$

2.2.4.3.1 金属套电缆

$$T_1 = \frac{1.5\rho_T}{\pi} [\ln(2u) - 0.630]$$

此时金属套或铠装外面的护层热阻 T_3 当用 2.1.3 中方法计算时应乘以 1.6。

2.2.4.3.2 分开金属套电缆(螺旋绕包铠装或屏蔽线覆盖 20%~50% 电缆表面)

此公式按照直径 0.7 mm 单根铜线长节距(金属丝屏蔽下直径的 15 倍)绕包,总截面积 15 mm²~35 mm² 的情况得出。

$$T_1 = \frac{1.5\rho_T}{\pi} [\ln(2u) - 0.630]$$

此时,以 2.1.1.1 中方法计算的绝缘层热阻 T_1 和以 2.1.3 中方法计算的外护层热阻 T_3 应乘以下列因数:

T_1 : 35kV 以下电缆 1.07

35kV~110kV 电缆 1.16

T_3 : 1.6

注: 此计算问题在考虑之中。

2.2.4.3.3 非金属套电缆

$$T_4 = \frac{\rho_T}{2\pi} [\ln(2u) + 2\ln(u)]$$

注：此公式 IEC 在考虑之中。

2.2.5 埋地钢管电缆

对钢管型电缆埋地钢管的外部热阻按 2.2.2 中公式与普通电缆一样计算。在这种情况下，埋地深度 L 测量到钢管中心，而 D_c 是包括防腐层在内的钢管外径。

2.2.6 埋于电缆沟中的电缆

2.2.6.1 充沙的电缆沟

电缆直接埋于填满沙的电缆沟内，无论沟道完全埋地还是盖板与地面齐平，存在沙干燥及长期保持干燥状态的危险。那时电缆外部热阻可能非常高，并且电缆可能达到不允许的高温。计算载流量时填充沙的热阻系数取 $2.5(\text{K} \cdot \text{m}/\text{W})$ 是适合的，除非选择特殊的填充土，其干燥后的热阻系数是已知的。

2.2.6.2 没有充沙的任何类型的电缆沟，盖板顶部与地表面齐平且置于自由空气中

电缆沟中空气相对周围空气环境温度的温升用经验公式表示：

$$\Delta\theta_{\text{a}} = \frac{W_{\text{tot}}}{3\rho}$$

式中： W_{tot} ——电缆沟每米总散热量， W/m ；

ρ ——电缆沟的有效散热周长， m 。

注：此公式的有效性在考虑之中。

因此，暴露在阳光下周围的任何部分不包括在 ρ 值内，电缆沟内特定电缆载流量按电缆在自由空气中计算（见 2.2.1），但对周围环境温度的温升为 $\Delta\theta_{\text{a}}$ 。

2.2.7 在排管（或管道）中的电缆

管道中电缆的外部热阻由三部分组成：

- a) 电缆表面和管道内表面之间空间热阻 T_4' 。
- b) 管道本身热阻 T_4'' 。金属管道热阻忽略不计。
- c) 管道外部热阻 T_4''' 。

代入 JB/T 10181.1—2000 中 1.4 载流量公式的 T_4 值是各部分的总和，即：

$$T_4 = T_4' + T_4'' + T_4'''$$

注：管道内完全充满热阻系数不超过周围土壤，用泵挤入材料时，无论处于干燥状态还是用密封保持填充材料潮湿，管道内电缆均可作为直埋电缆对待。

2.2.7.1 排管（或管道）和电缆之间的热阻 T_4'

管道中敷设的电缆，其直径在 $25 \sim 100 \text{ mm}$ 范围内应采用下面公式。对于钢管型电缆（见 2.1.1），当管内三根线芯的等效直径在 $75 \sim 125 \text{ mm}$ 范围内，其线芯与钢管表面之间空隙热阻也可使用该式计算。等效直径定义如下。

$$T_4' = \frac{U}{1 + 0.1(V + Y\theta_{\text{m}})D_c}$$

式中： U 、 V 和 Y 与敷设条件有关的常数，其值列于表 4；

D_c ——电缆外径， mm 。

当该式用于钢管型电缆（见 2.1.4b）时， D_c 成为如下一组线芯的等效直径：

- 两芯： $D_c = 1.65 \times$ 线芯外径， mm ；
- 三芯： $D_c = 2.15 \times$ 线芯外径， mm ；
- 四芯： $D_c = 2.50 \times$ 线芯外径， mm 。

θ_{m} ——电缆与管道之间填充空隙的介质平均温度，先假定初值，必要时，则用修正值反复计算， $^{\circ}\text{C}$ 。

2.2.7.2 排管（或管道）本身热阻 T_4''

管道壁热阻由下式给出:

$$T_{1''} = \frac{\rho_T}{2\pi} \ln \left(\frac{D_o}{D_d} \right)$$

式中: D_o ——管道外径, mm;

D_d ——管道内径, mm;

ρ_T ——管道材料热阻系数, K·m/W。

对于金属管道 ρ_T 取零, 其他材料见表 1。

2.2.7.3 排管(或管道)外部热阻 $T_{1''}$

对于不嵌入混凝土的单向管道, 采用 2.2.1, 2.2.2, 2.2.3, 或 2.2.4 中适合的公式与电缆相同的方法计算, 并以管道(包括在管道上面的任何外护层)的外半径取代电缆的外半径。当排管嵌入混凝土时, 计算管道外部热阻, 首先假定排管外部有与混凝土相等的热阻系数的均一介质, 然后计及混凝土和排管混凝土外部热路部分的土壤之间热阻系数的差异(若有), 加上(代数和)校正项, 其值由下式给出:

$$\frac{N}{2\pi} (\rho_c - \rho_s) \ln(u + \sqrt{u^2 - 1})$$

式中: N ——排管混凝土预制件内有负荷的电缆数

ρ_c ——排管混凝土预制件周围土壤热阻系数, K·m/W;

ρ_s ——混凝土热阻系数, K·m/W;

$u = L_G / r_b$;

L_G ——至排管混凝土预制件中心的埋设深度, mm;

r_b ——排管混凝土预制件等效半径, mm。

由下式给出:

$$\ln r_b = \frac{1}{2} \frac{x}{y} \left(\frac{4}{\pi} - \frac{x}{y} \right) \ln \left(1 + \frac{y^2}{x^2} \right) - \ln \left(\frac{x}{2} \right)$$

式中 x 和 y 数值分别是排管混凝土预制件长边和短边, 与它的位置无关, 以 mm 为单位。

该公式仅对 $\frac{y}{x} < 3$ 有效。

3 图解求值的数字计算

3.1 一般说明

给出的公式和方法适用于图 2 至图 6 的数字计算和用图 8 求 $\Delta\theta_s$ 的方法。所用的方法用代数式近似表示, 随后在必要时作一次或二次插值。对每个情况给出插值前最大百分比误差。

3.1.1 圆导体两芯带绝缘电缆几何因数 G (图 2)

设: $X = t_1 / d_c$

$Y = (2t_1 / t) - 1$

则: $G = MG_s$

式中: $M = \ln \left\{ \frac{1 - \alpha\beta + [(1 - \alpha^2)(1 - \beta^2)]^{1/2}}{\alpha - \beta} \right\}$

$$\alpha = \frac{1}{\left[1 + \frac{X}{1 + X/(1+Y)} \right]^2}$$

$$\frac{\beta}{\alpha} = \frac{\frac{X}{1+Y} - \frac{1}{2}}{\frac{X}{1+Y} + \frac{3}{2}}$$

$G_s = G_s(X, Y)$ 即: X 和 Y 二者的函数。

计算 $G_s(X, 0)$, $G_s(X, 0.5)$ 和 $G_s(X, 1)$ 的数值。

式中： $G_s(X,0)=1.060\ 19-0.067\ 177\ 8X+0.017\ 952\ 1X^2$

$$G_s(X,0.5)=1.067\ 98-0.065\ 164\ 8X+0.015\ 812\ 5X^2$$

$$G_s(X,1)=1.067\ 00-0.055\ 715\ 6X+0.012\ 321\ 2X^2$$

用下面公式二次插值可求得 $G_s(X,Y)$ ：

$$G_s(X,Y)=G_s(X,0)+Y[-3G_s(X,0)+4G_s(X,0.5)-G_s(X,1)] \\ +Y^2[2G_s(X,0)-4G_s(X,0.5)+2G_s(X,1)]$$

$G_s(X,0)$ 、 $G_s(X,0.5)$ 和 $G_s(X,1)$ 的计算值与相应图解求值相比最大误差小于0.5%。

3.1.2 圆导体三芯带绝缘电缆几何因数 G (图3)

设： $X=t_1/d_c$

$$Y=(2t_2/t)-1$$

则： $G=MG_s$

式中： $M=\ln\left\{\frac{1-\alpha\beta+[(1-\alpha^2)(1-\beta^2)]^{1/2}}{\alpha-\beta}\right\}$

$$\alpha=\frac{1}{\left[1+\frac{2}{\sqrt{3}}\left(1+\frac{2X}{1+Y}\right)\right]^3}$$

$$\frac{\beta}{\alpha}=\frac{\frac{2}{\sqrt{3}}\left(1+\frac{2X}{1+Y}\right)-3}{\frac{2}{\sqrt{3}}\left(1+\frac{2X}{1+Y}\right)+3}$$

$G_s=G_s(X,Y)$ 即： X 和 Y 二者的函数。

$G_s(X,0)$ 、 $G_s(X,0.5)$ 和 $G_s(X,1)$ 的数值

式中： $G_s(X,0)=1.094\ 14-0.094\ 404\ 5X+0.023\ 446\ 4X^2$

$$G_s(X,0.5)=1.096\ 05-0.080\ 185\ 7X+0.017\ 691\ 7X^2$$

$$G_s(X,1)=1.098\ 31-0.072\ 063\ 1X-0.014\ 590\ 9X^2$$

使用三个计算值的二次插值可求得 $G_s(X,Y)$ 值。

用下面的公式可以替代 $G_s(X,0)$ 、 $G_s(X,0.5)$ 和 $G_s(X,1)$ ：

$$G_s(X,Y)=G_s(X,0)+Y[-3G_s(X,0)+4G_s(X,0.5)-G_s(X,1)] \\ +Y^2[2G_s(X,0)-4G_s(X,0.5)+2G_s(X,1)]$$

$G_s(X,0)$ 、 $G_s(X,0.5)$ 和 $G_s(X,1)$ 的计算值与相应图解求值相比最大误差小于0.5%。

3.1.3 圆导体三芯屏蔽相对于非屏蔽电缆热阻比值(图4)

设 $X=(\delta_1\rho_T)/(d_c\rho_m)$

$$Y=t_2/d_c$$

屏蔽因数 K 是 X 和 Y 的函数。从下面的公式按照 $0<X\leq 6$ 或 $6<X\leq 25$ 条件计算 $K(X,0.2)$ 、 $K(X,0.6)$ 和 $K(X,1)$ 三个数值。

$$0<X\leq 6$$

$$K(X,0.2)=0.998\ 095-0.123\ 369\ 0X+0.020\ 262\ 0X^2-0.001\ 416\ 67X^3$$

$$K(X,0.6)=0.999\ 452-0.089\ 658\ 9X+0.012\ 023\ 9X^2-0.000\ 722\ 228X^3$$

$$K(X,1)=0.997\ 976-0.052\ 857\ 1X+0.003\ 452\ 38X^2$$

$$6<X\leq 25^{1)}$$

采用说明：

1) IEC 原文中为 $0<X\leq 25$ ，系编辑性错误，本标准中作了修正。

$$K(X, 0.2) = 0.824\ 160 - 0.028\ 872\ 1X + 0.000\ 928\ 511X^2 - 0.000\ 013\ 712\ 1X^3$$

$$K(X, 0.6) = 0.853\ 348 - 0.024\ 687\ 4X + 0.000\ 966\ 967X^2 - 0.000\ 015\ 996\ 7X^3$$

$$K(X, 1) = 0.883\ 287 - 0.015\ 378\ 2X + 0.000\ 260\ 292X^2$$

则 $K(X, Y)$ 从这三个计算值的二次插值求得, 可用下面公式取代:

$$K(X, Y) = K(X, 0.2) + Z[-3K(X, 0.2) + 4K(X, 0.6) - K(X, 1)] \\ + Z^2[2K(X, 0.2) - 4K(X, 0.6) + 2K(X, 1)]$$

式中: $Z = 1.25Y - 0.25$

对各区段的修正因数计算值与图解法求值相比最大百分比误差小于 0.5%。

3.1.4 扇形导体三芯屏蔽与非屏蔽电缆热阻比值

设 $X = (\delta_1 \rho_r) / (d_x \rho_m)$

$$Y = t_1 / d_x$$

屏蔽因数 K 是 X 和 Y 的函数。从下面的公式按照 $0 < X \leq 3$, $3 < X \leq 6$ 或 $6 < X \leq 25$ 条件计算 $K(X, 0.2)$, $K(X, 0.6)$ 和 $K(X, 1)$ 三个数值。

$$0 < X \leq 3$$

$$K(X, 0.2) = 1.001\ 69 - 0.094\ 5X + 0.007\ 523\ 81X^2$$

$$K(X, 0.6) = 1.001\ 71 - 0.076\ 928\ 6X + 0.005\ 357X^2$$

$$K(X, 1) = K(X, 0.6)$$

$$3 < X \leq 6$$

$K(X, 0.2)$ 和 $K(X, 0.6)$ 如 $0 < X \leq 3$ 用同一公式给出

$$K(X, 1) = 1.001\ 17 - 0.075\ 214\ 3X + 0.005\ 333\ 34X^2$$

$$6 < X \leq 25$$

$$K(X, 0.2) = 0.811\ 646 - 0.023\ 841\ 3X + 0.000\ 994\ 933X^2 - 0.000\ 015\ 515\ 2X^3$$

$$K(X, 0.6) = 0.883\ 598 - 0.022\ 315\ 5X + 0.000\ 978\ 956X^2 - 0.000\ 015\ 831\ 1X^3$$

$$K(X, 1) = 0.842\ 875 - 0.022\ 725\ 5X + 0.001\ 058\ 25X^2 - 0.000\ 017\ 742\ 7X^3$$

对于 $0 < X \leq 3$ 和 $0.2 < Y \leq 0.6$ 通过 $K(X, 0.2)$ 和 $K(X, 0.6)$ 之间线性插值求得 $K(X, Y)$, 如下:

$$K(X, Y) = K(X, 0.2) + 2.5(Y - 0.2)[K(X, 0.6) - K(X, 0.2)]$$

对于 $3 < X \leq 25$, 通过三个数值之间二次插值求得 $K(X, Y)$, 相应公式如下:

$$K(X, Y) = K(X, 0.2) + Z[-3K(X, 0.2) + 4K(X, 0.6) - K(X, 1)] \\ + Z^2[2K(X, 0.2) - 4K(X, 0.6) + 2K(X, 1)]$$

式中: $Z = 1.25Y - 0.25$

对各区段的修正因数计算值与图解法求值相比最大百分比误差小于 1%。

3.1.5 求取 SL 型和 SA 型电缆金属套和铠装之间填充材料热阻的曲线 \bar{G} (图 6)

设 X 为金属套和铠装之间材料厚度, 表示为与金属套外径的相对值。

下面的曲线由下式给出:

$$0 < X \leq 0.03 \quad \bar{G} = 2\pi(0.000\ 202\ 380 + 2.032\ 14X - 21.666\ 7X^2)$$

$$0.03 < X \leq 0.15 \quad \bar{G} = 2\pi(0.012\ 652\ 9 + 1.101X - 4.561\ 04X^2 + 11.509\ 3X^3)$$

计算 \bar{G} 的最大百分比误差小于 1%。

上面的曲线由下式给出:

$$0 < X \leq 0.03 \quad \bar{G} = 2\pi(0.000\ 226\ 19 + 2.114\ 29X - 20.476\ 2X^2)$$

$$0.03 < X \leq 0.15 \quad \bar{G} = 2\pi(0.014\ 210\ 8 + 1.175\ 33X - 4.497\ 37X^2 + 10.635\ 2X^3)$$

计算 \bar{G} 的最大百分比误差小于 1%。

3.2 借助于曲线图计算 $\Delta\theta$ (图 8)

程序如下:

a) K_A 值用下式计算:

$$K_A = \frac{\pi D_c^* h}{1 + \lambda_1 + \lambda_2} \times \left[\frac{T_1}{n} + T_2(1 + \lambda_1) + T_3(1 + \lambda_1 + \lambda_2) \right]$$

b) 图 8 中以上述 a) 值作为纵坐标, 然后将该点定位于以下相应数值的曲线上。

$$\Delta\theta + \Delta\theta_d + \Delta\theta_{ds} = \text{常数}$$

读取横坐标求得:

$$(\Delta\theta_c)^{1.4}$$

1) 电缆不受日光直接照射:

$$\Delta\theta_d = W_d \left[\left(\frac{1}{1 + \lambda_1 + \lambda_2} - \frac{1}{2} \right) T_1 - \frac{n\lambda_2 T_2}{1 + \lambda_1 + \lambda_2} \right]$$

如果介质损耗忽略不计, $\Delta\theta_d = 0$

$$\Delta\theta_{ds} = 0$$

2) 电缆受到日光直接照射:

$$\Delta\theta_d = W_d \left[\left(\frac{1}{1 + \lambda_1 + \lambda_2} - \frac{1}{2} \right) T_1 - \frac{n\lambda_2 T_2}{1 + \lambda_1 + \lambda_2} \right]$$

如果介质损耗忽略不计, $\Delta\theta_d = 0$

$$\Delta\theta_{ds} = \sigma D_c^* H \frac{T_1 + n(1 + \lambda_1)T_2 + n(1 + \lambda_1 + \lambda_2)T_3}{n(1 + \lambda_1 + \lambda_2)}$$

表 1 材料热阻系数

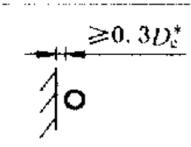
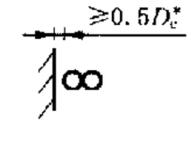
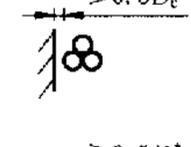
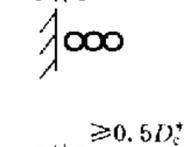
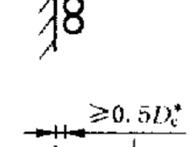
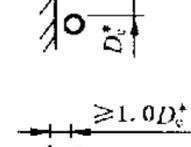
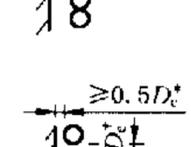
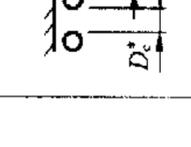
材 料	热阻系数 ρ_r K · m/W
绝缘材料¹⁾	
粘性浸渍纸绝缘	6.0
充油电缆纸绝缘	5.0
外部压气电缆纸绝缘	5.5
内部压气电缆纸绝缘:	
a) 预浸渍纸绝缘	5.5
b) 整体浸渍纸绝缘	6.0
聚乙烯	3.5
交联聚乙烯	3.5
聚氯乙烯:	
3kV 及以下电缆	5.0
3kV 以上电缆	6.0
乙丙橡胶电缆:	
3kV 及以下电缆	3.5
3kV 以上电缆	5.0
丁基橡胶	5.0
橡皮	5.0
护层材料	
浸渍麻和纤维	6.0
橡胶	6.0
氯丁橡胶	5.5
PVC:	
35kV 及以下电缆	5.0
35kV 以上电缆	6.0
皱纹铅套上的 PVC/沥青	6.0
聚乙烯 (PE)	3.5

表 1(完)

材 料	热阻系数 ρ_r K·m/W
管道敷设用材料	
水泥混凝土	1.0
纤维	4.8
石棉	2.0
陶土	1.2
PVC	6.0
PE	3.5

1) 为计算载流量,假设半导电屏蔽材料与邻近的介质材料具有相同的热性能。
外护层材料所用的塑料或弹性材料,其热阻系数按表取与绝缘级材料相同的热阻系数。

表 2 自由空气中电缆黑色表面时的 Z 、 E 和 g 的常数值

序号	敷 设	Z	E	g	敷 设 方 式
a) 电缆敷设在非连续的托架上,梯形支撑物或夹板间, $D_c^* \leq 0.15$ m。					
1	单芯电缆 ¹⁾	0.21	3.94	0.60	
2	相互接触两根电缆水平敷设	0.29	2.35	0.5	
3	三角形排列的三根电缆	0.96	1.25	0.2	
4	相互接触三根电缆水平敷设	0.62	1.95	0.25	
5	相互接触垂直排列两根电缆	1.42	0.86	0.25	
6	间距 D_c^* 的垂直排列两根电缆	0.75	2.86	0.30	
7	相互接触垂直排列三根电缆	1.61	0.42	0.20	
8	间距 D_c^* 的垂直排列三根电缆	1.31	2.00	0.20	
2b) 用夹具直接固定在垂直的壁上 (D_c^* 不大于 0.08 m)。					
9	单根电缆	1.69	0.63	0.25	
10	三角形排列的三根电缆	0.94	0.79	0.20	

1) “单根电缆”数据也适用于一组电缆,水平面排列,间距不小于 $0.75 D_c^*$ 。

表 3 太阳照射下电缆表面的吸收系数

材 料	σ
沥青/黄麻护层	0.8
氯丁橡胶	0.8
聚氯乙烯(PVC)	0.6
聚乙烯(PE)	0.4
铅	0.6

表 4 U, V 和 Y 常数值

敷 设 条 件	U	V	Y
在金属管道中	5.2	1.4	0.011
空气中敷设的纤维管中	5.2	0.83	0.006
混凝土中敷设的纤维管中	5.2	0.91	0.010
石棉水泥管中			
空气中	5.2	1.2	0.006
混凝土中	5.2	1.1	0.011
钢管中充气电缆	0.95	0.46	0.0021
钢管中充油电缆	0.28	0.0	0.0026
塑料管道		在考虑中	
陶土管道	1.87	0.28	0.0036

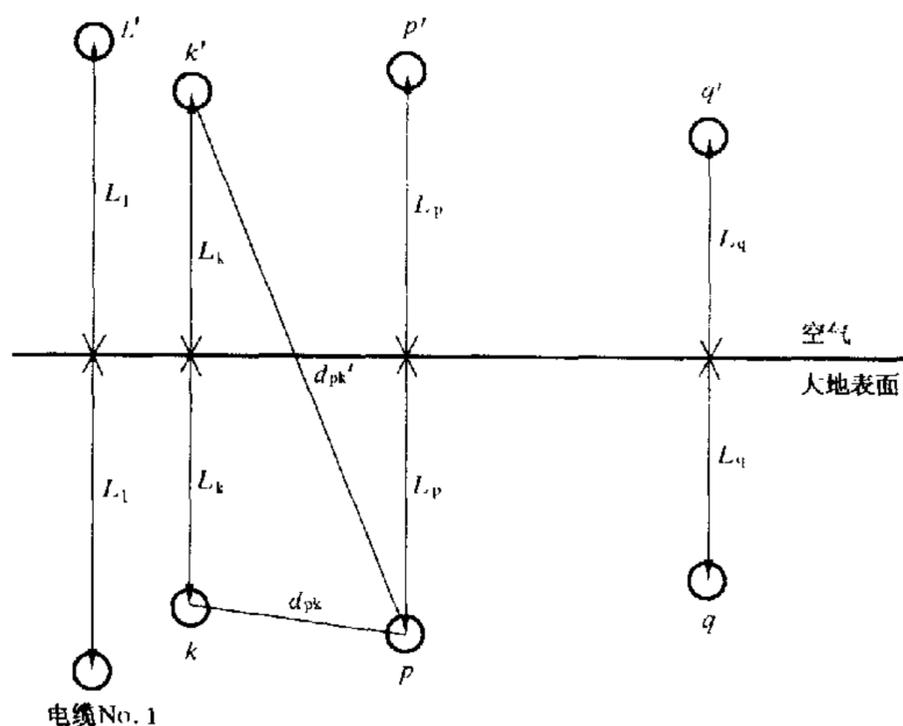


图 1 q 根电缆群相对于地-空气表面的镜像图

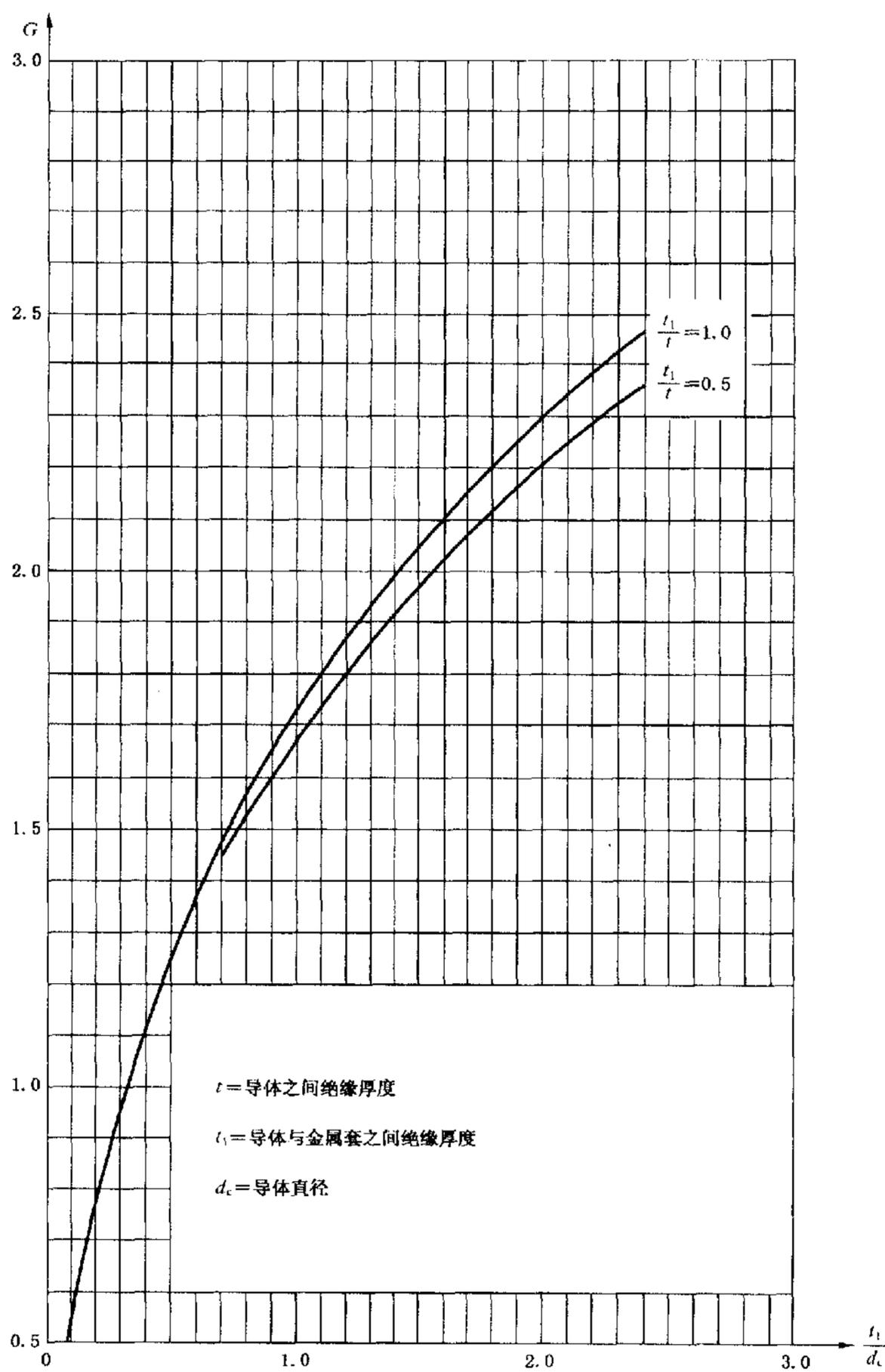


图2 两芯圆导体带绝缘电缆几何因数 G (见2.1.2.1)

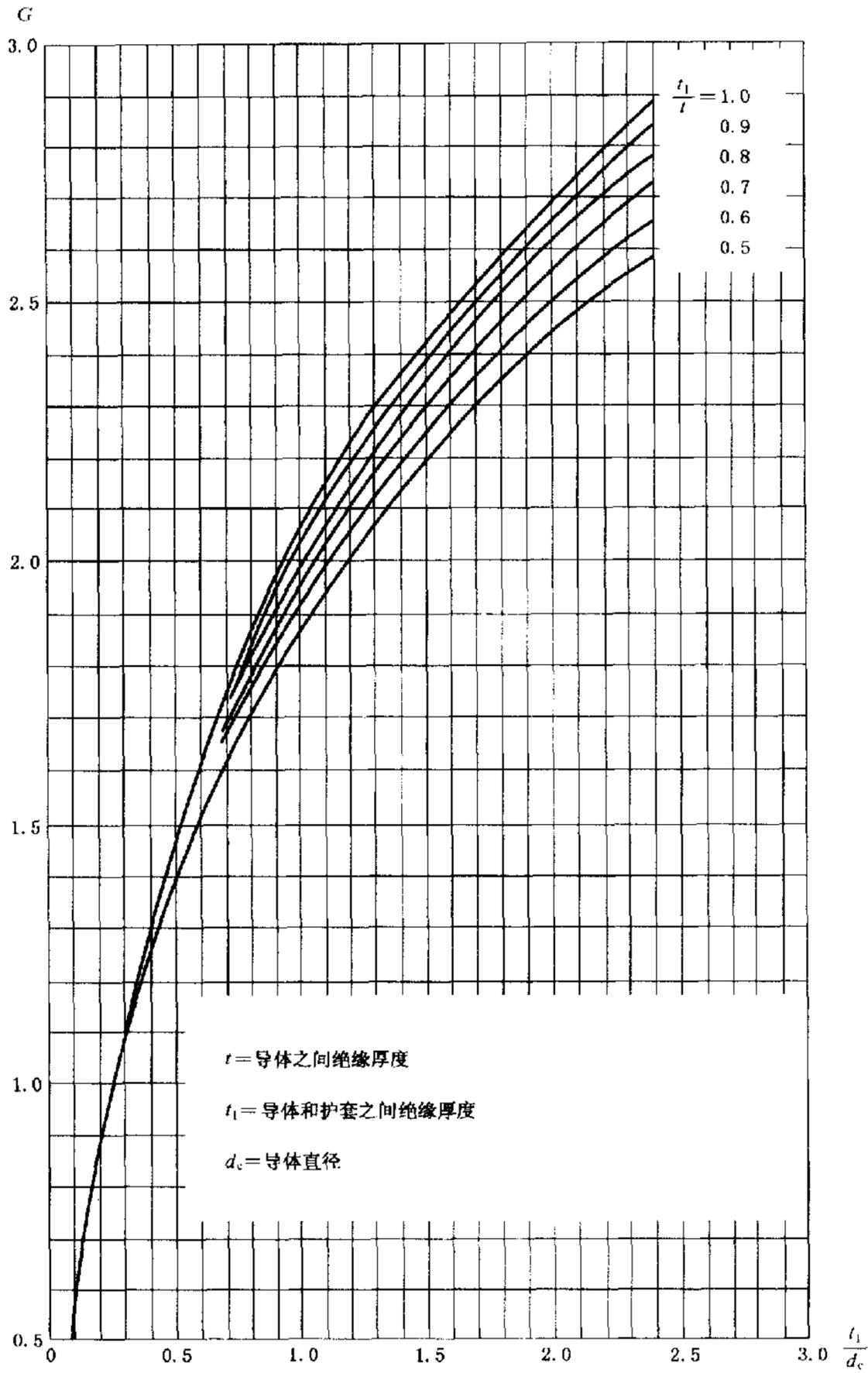


图3 三芯圆导体带绝缘电缆几何因数 G (见2.1.2.3)

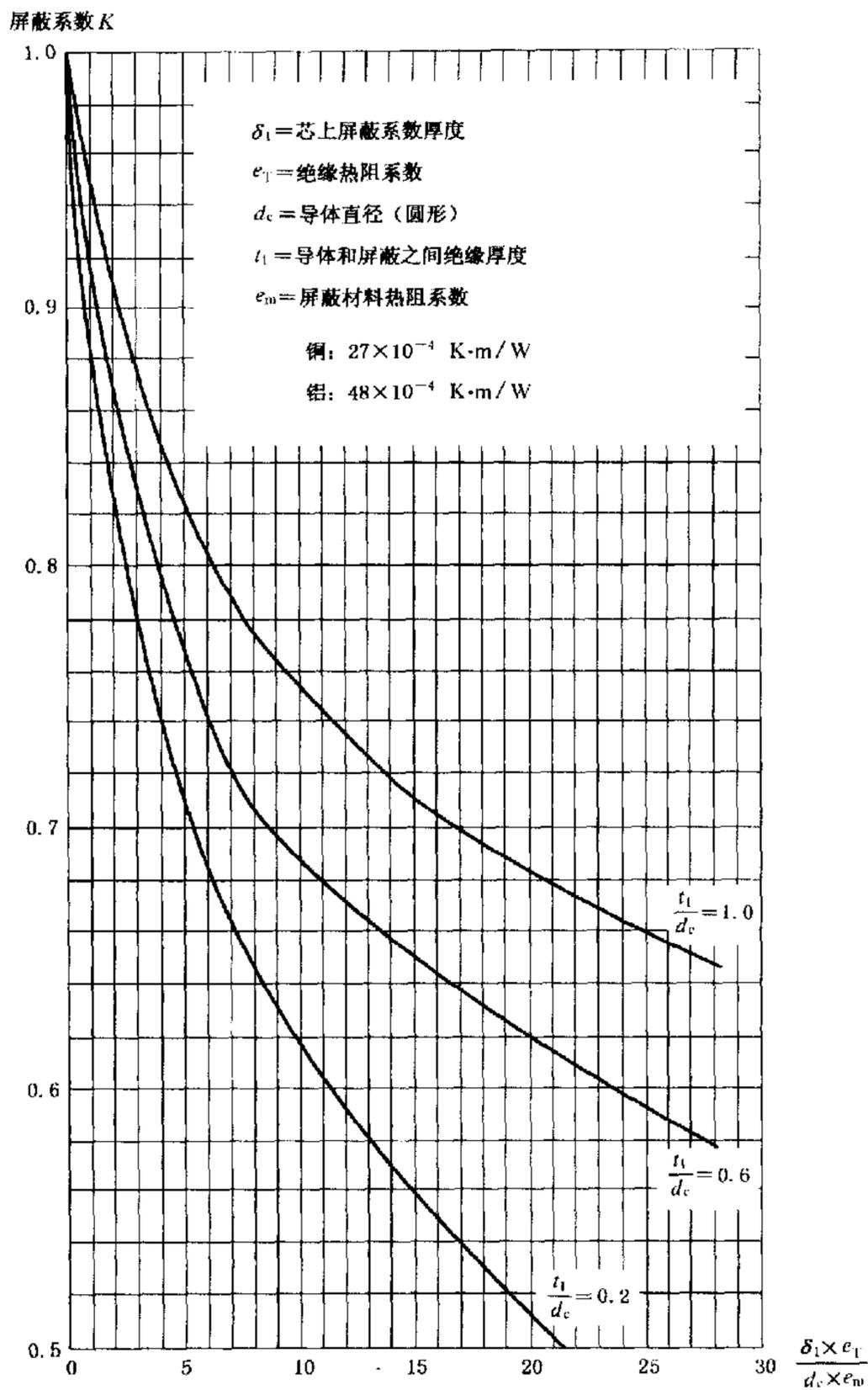


图4 圆形三芯屏蔽电缆热阻系数与相应的无屏蔽电缆热阻之比(见2.1.1.3.1)

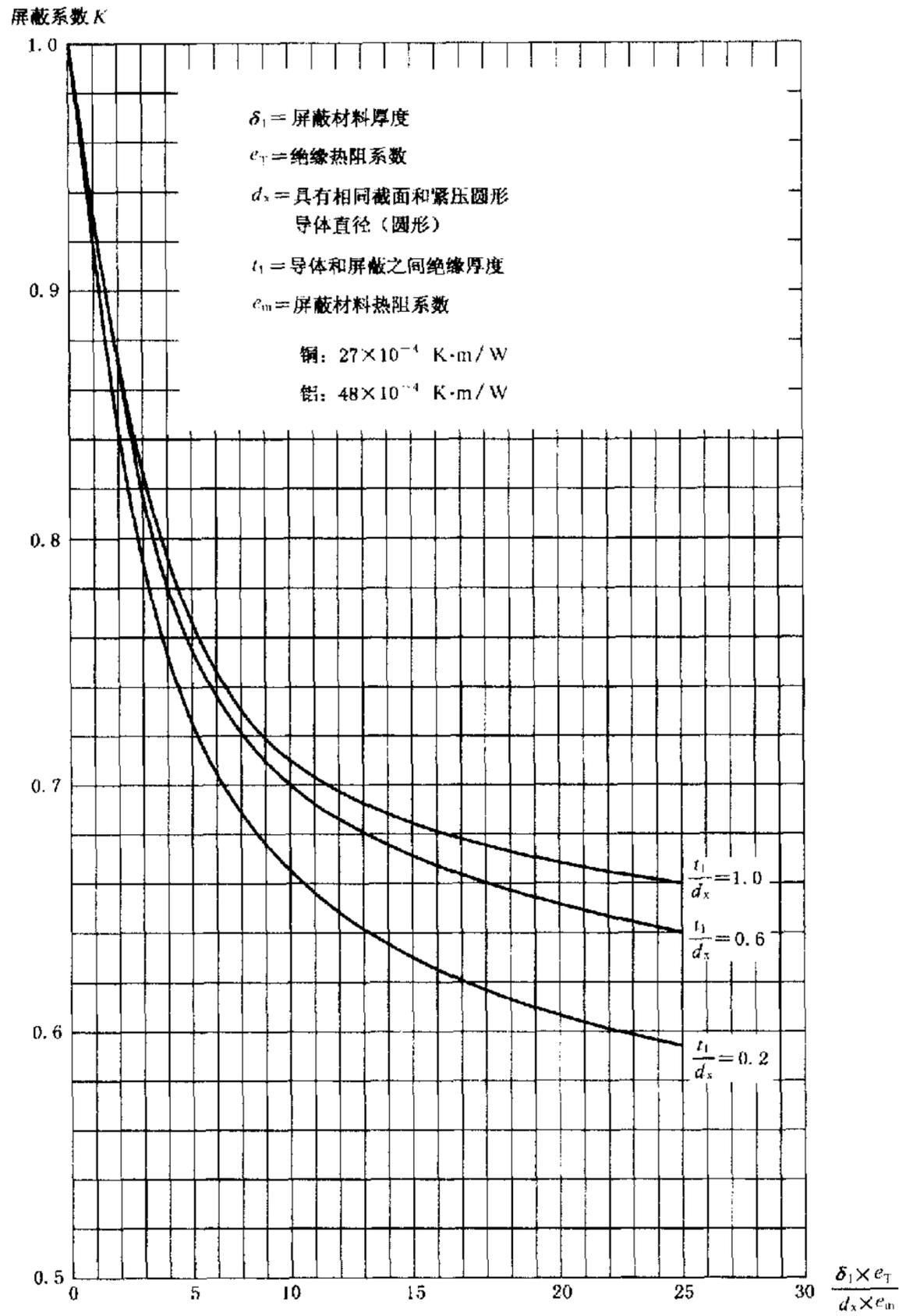


图5 扇形导体三芯屏蔽电缆与无屏蔽电缆热阻之比(见2.1.1.3.3)

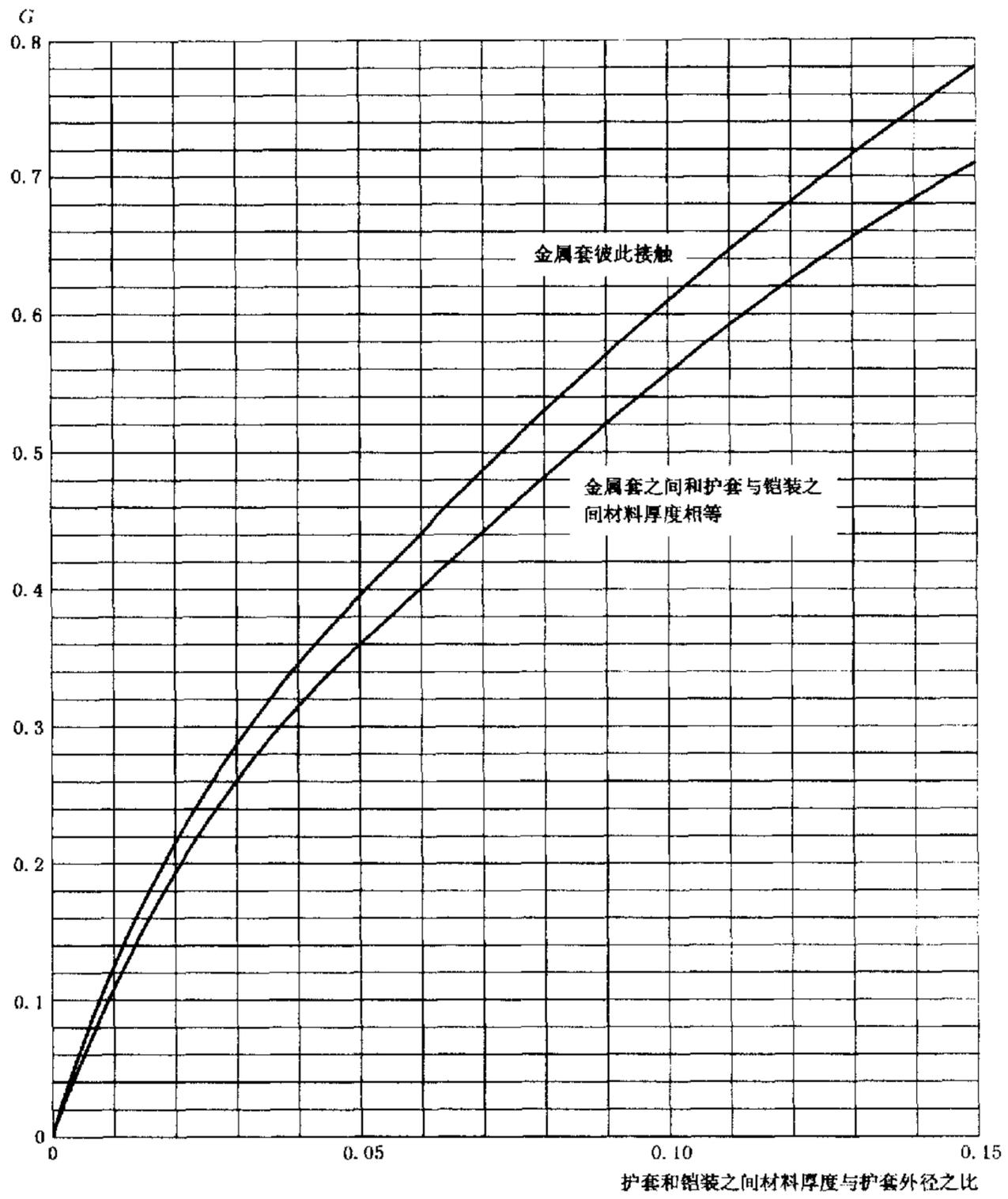


图6 SL和SA形电缆金属套和铠装之间填充材料热阻的几何因数 G (见2.1.22)

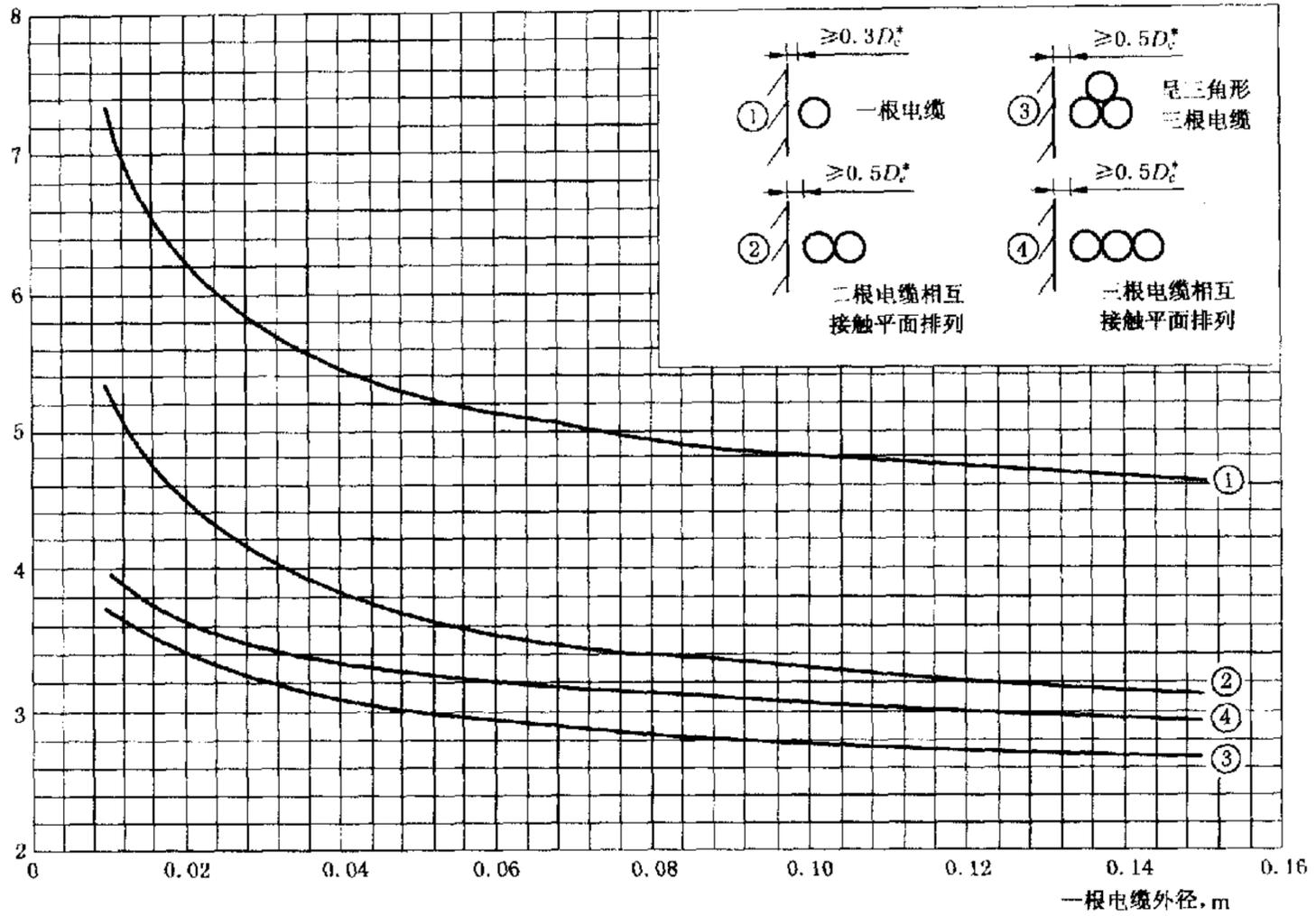


图 7a 自由空气中电缆黑色表面散热系数

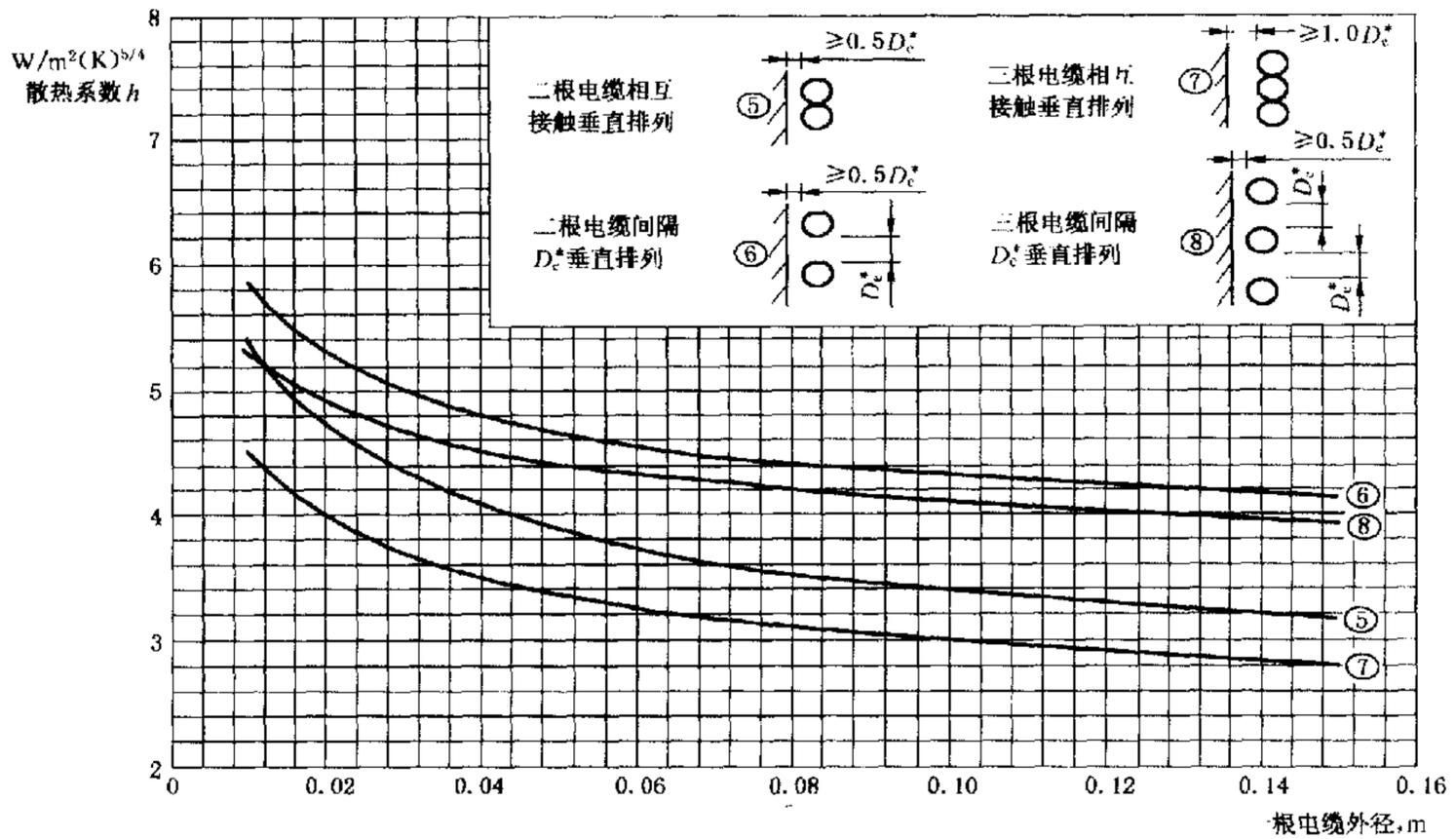


图 7b 自由空气中电缆黑色表面散热系数

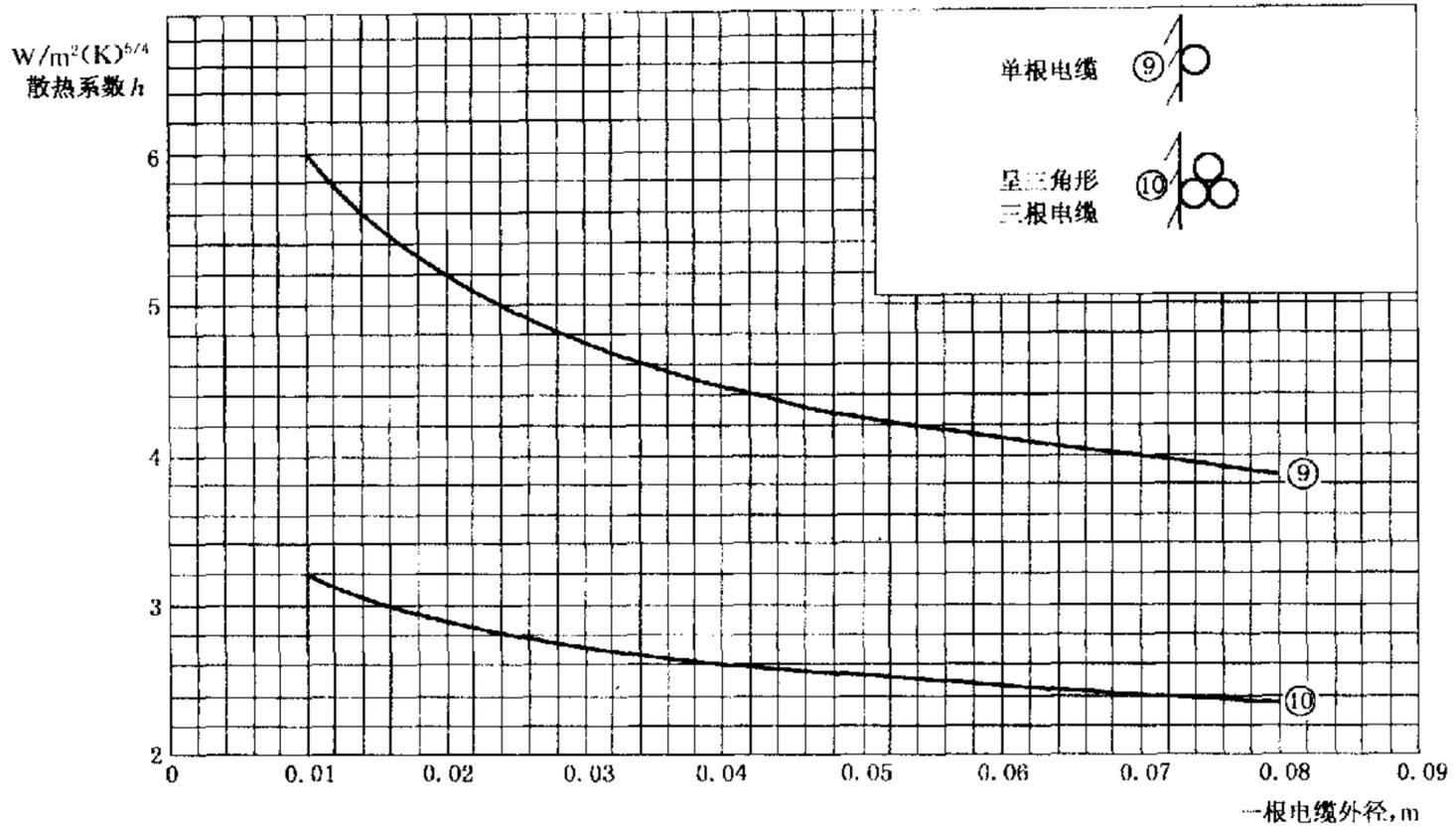


图 7c 自由空气中电缆黑色表面散热系数

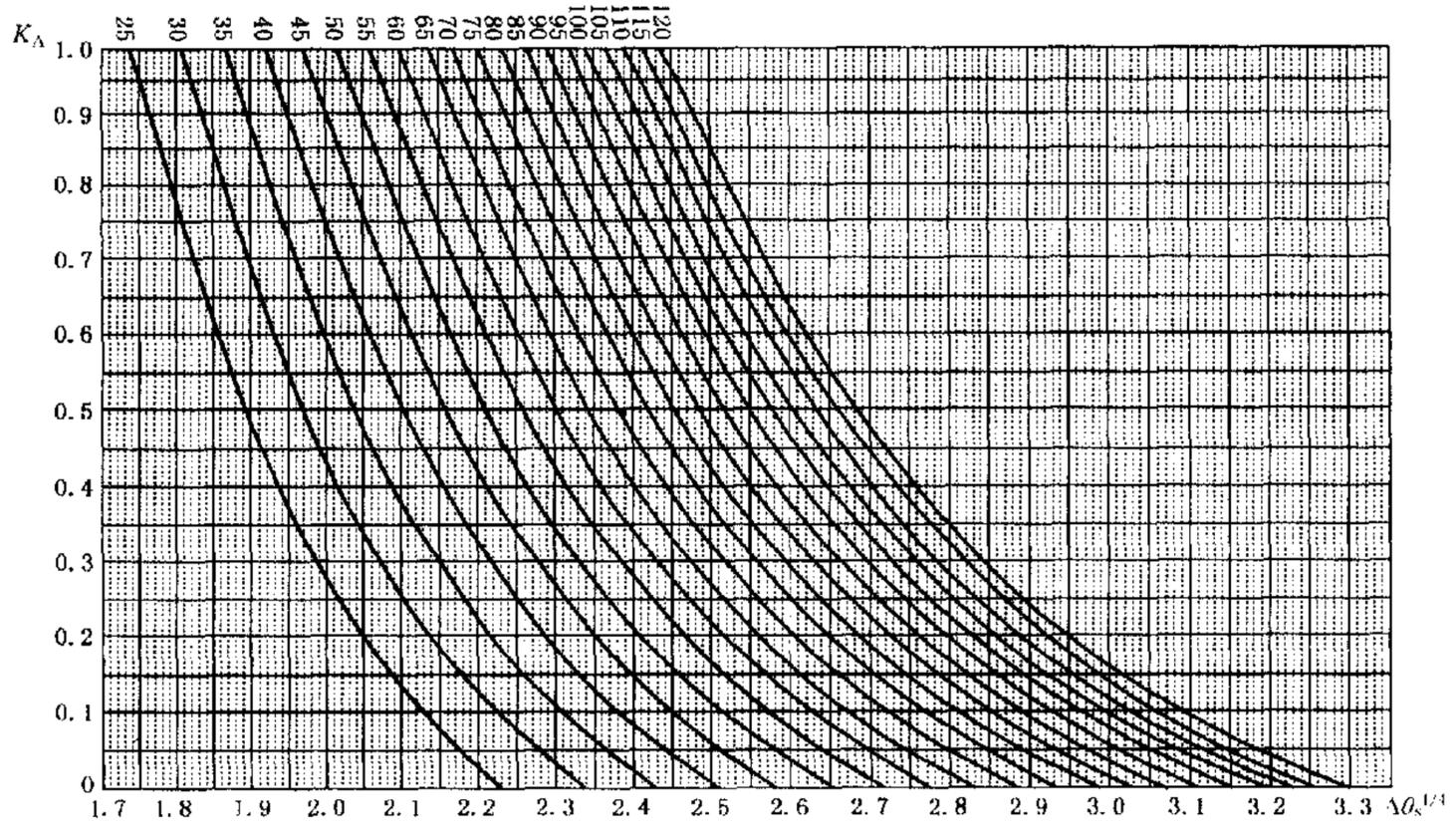


图 8 对空气中外部热阻的计算图