

电线电缆载流量

马国栋 编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

中国电力出版社

电线电缆载流量

马国栋 编著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 简 介

电缆载流量是电缆运行中受环境条件和负荷影响的重要动态运行参数,其重要性涉及输电线路的安全可靠、经济合理的运行以及电缆寿命等问题。本书分两部分介绍有关电缆载流量内容。

第 I 部分介绍高压输电线路用的钢芯铝绞线和铝绞线等载流量计算和试验。对电力电缆额定载流量计算参照 IEC-60287 标准进行了详细论述。为了加深对计算公式的理解列举了电缆计算示例、编程计算和载流量试验。

对于电缆暂态运行(包括短时和断续运行、周期性负荷、应急负荷和短路电流等)也进行了详细论述。

如何从经济价值概念选择电缆(载流量)是近代国际上十分重视的问题。从技术经济角度选择最佳电缆截面(载流量)是国际电工委员会倡导方法之一。为此对电缆截面的优化选择——经济截面(经济电流)计算方法也作了详细介绍。

第 II 部分针对现有的电线电缆标准产品,按 IEC-601597(1955)和 IEC-60287(1994~2002)标准进行额定载流量计算。

图书在版编目(CIP)数据

*电线电缆载流量/马国栋编著. -北京:中国电力出版社, 2003

ISBN 7-5083-1272-4

I. 电… II. 马… III. 电缆-研究 IV. TM246

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 086706 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京密云红光印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2003 年 10 月第一版 2003 年 10 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 21.5 印张 485 千字

印数 0001—3000 册 定价 35.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

序言

电线电缆载流量是电线电缆产品的主要基本参数，世界各国长期以来均在不断地进行试验研究。上海电缆研究所建所后不久也建立试验研究基地，从事相应的试验研究工作，并于上世纪 60 年代中期，根据试验研究工作成果，首先提出有关油浸纸绝缘电力电缆和布电线载流量的计算方法以及相应的载流量数据。此后，由于种种原因，此项工作未能进一步全面、系统地继续深入进行。编著者凭籍执着的精神，历经挫折，坚持不懈地从事有关载流量试验研究工作，广泛收集大量国内外有关文献，终于编就本书。敬佩之感油然而生，欣然从命，代写序言。深信该书之出版，必将取得显著的社会效益。

编著者详尽地介绍了电线电缆载流量的基本计算方法、相应的计算软件和有关试验验证方法，并在此基础上结合电线电缆国家标准，在给定的基准条件下提出目前通用类型电线电缆产品的载流量数据，对电线电缆生产企业和使用部门均有较大的指导和现实意义。

正确的选择电线电缆产品的截面积，除了参照基准条件的载流量外，还应考虑结合实际敷设条件和运行方式。为此，编著者详细论述了不同环境和敷设条件下的修正方式并提出短时负荷、周期负荷以及短路电流和短路温度的计算方法。此外，有关直接埋地电缆的土壤周围发生水分迁移而形成土壤干燥区域以及引用“经济截面”新概念选择电缆等方面也均有论述，可谓是有有关电线电缆载流量的大全。可供电线电缆制造企业、电线电缆使用部门、设计研究院所和大专院校等有关人员参考使用。

杨文才

于上海 2003.6

国际电工委员会 (IEC) 于 1982 年根据国际大电网会议 (ICGRE) 1964 年 233 号报告提出了电缆额定载流量 (100% 负荷因数) 计算标准 IEC 60287, 以后逐年进行了修正补充对于电缆通常敷设方式下载流量计算已趋于完善。特殊结构电缆或特殊敷设条件下仍提倡试验解决。一些未解决的问题正在进一步考虑之中。

发达国家都有统一的基准载流量数据。现在, 各国电缆产品及其额定载流量计算逐渐向 IEC 靠拢。国际上发达国家以及国际贸易都以 IEC 60287 标准作为制订电缆产品额定载流量依据。

我国电缆载流量方面的研究始于 20 世纪 60 年代中期。随着国家电工产品向 IEC 靠拢, 电线电缆产品国家标准已基本等同 IEC 相应的标准。电缆载流量计算标准亦等同 IEC 的相应计算标准。到目前为止, 我国尚无一本完整的结合我国地理和气象条件而制订的基准载流量数据资料。为了促使我国电线电缆载流量早日走上规范化, 对电线电缆载流量等运行参数的研究提供一些具体资料是本书的编写目的。

本书由两部分构成, 简介如下。

第 I 部分主要以 IEC 标准出版物为主介绍电线电缆载流量计算方法并结合多年来积累的经验, 论述确定电线电缆载流量的试验方法。具体内容如下。

(1) 关于架空裸导线载流量的计算和试验问题。介绍 IEC 标准出版物和国际上学者关于钢芯铝绞线载流量的计算方法和有关参数。同时结合以往的研究成果提出对钢芯铝绞线等载流量采用测算方法来确定实际环境条件下的载流量。按照 IEC 标准载流量计算公式和 Morgan 公式编成计算软件, 可对各种结构的导线载流量进行计算。

(2) 电力电缆与架空裸导线相比除结构不同外, 其传输容量受电缆本体 (材料和结构) 制约、敷设方式 (诸如有空气中、土壤中、管道中等) 和环境条件有直接关系, 也不能忽视个别品种进行载流量试验。根据这个原则依据 IEC—60287 系列标准详细介绍电缆载流量计算基本公式。

(3) 在载流量计算中为了加深各参数值所起作用的理解, 列举了计算示例和软件的编程。对特殊结构电缆和特定敷设方式进行了载流量计算与试验的比较。

(4) 主要介绍电缆运行条件方面的问题。选择电缆规格通常所用的方法是以趋向于可采纳的最小截面, 也就是电缆初始投资最小。它并不考虑电缆使用寿命期间将发生的能量损耗费用。实际上对于架空导线早有经济电流密度选择导线截面概念。对于电缆而言, 这是近代国际上发达国家提出的问题, IEC 已将其制订成载流量标准中的一部分。电缆经济截面 (经济电流) 的优化选择是考虑为了使电缆经济合理地运行, 选择电缆的截面 (载流

量), 电缆整个使用期投资费用最小为宗旨。

(5) 对于诸如电气机车车辆用电缆、铁道电气化接触网用导线以及电焊机电缆等在稳态运行中时常出现暂态负荷(短时负荷、断续负荷)特殊运行情况。本部分给出相应负荷下载流量计算方法。

(6) 主要介绍 35kV 及以下电缆周期性负荷载流量计算问题。一条干线电缆在一天内并非都是处于恒定负荷状态下运行, 它是以一天为周期的时间段内电流以阶跃函数而变化。在这种情况下, 一天的负荷曲线作为计算周期性载流量因数的依据。该因数乘以电缆额定电流就可获得日周期性载流量最大值。这是为了充分发挥电缆传输能力而考虑的问题。

(7) 介绍 35kV 以上电缆周期性负荷及应急负荷载流量计算。周期性负荷系指以一天为周期的负荷, 一天内周期波形基本相同。电缆热容不能忽略。通过电缆的表达式和电缆外部介质表达式求得完整的暂态温度响应后根据负荷持续时间长短确定周期性负荷因数计算公式。要获得以一天为周期内的电流峰值, 则用该因数乘以电缆额定载流量。电缆的应急负荷也是很有实际意义的, 本部分给出计算公式。对周期性负荷和应急负荷进行示例计算。

(8) 关于电缆短路方面的问题。提供了在给定的时间内电缆能承受的短路电流或在给定短路电流和短路时间内电缆温升的计算方法。电缆短路温度是在规定的短路时间内根据邻接载流体材料耐热性能确定的。不同材料有不同的短路温度允许值。根据需要可选择绝热法或非绝热法计算短路电流。依据短路电流可以计算载流体温度。

第 II 部分主要是对于我国电线电缆产品标准和 IEC 标准的载流量计算方法, 结合我国一般情况下的地理和气象状况作为基准环境条件, 然后对各种类型电线电缆系列规格进行载流量计算, 并根据以往部分试验验证, 最后制订成载流量表。

实际敷设条件不同于基准条件下时载流量表中的数据应进行修正。本部分提供了各种修正系数。载流量表包括以下各种类型电线电缆。

(1) 铝绞线和钢芯铝绞线: 根据 GB 1179—1083 标准确定。

(2) 架空绝缘电缆: 根据 GB 12527—1990, GB 14049—1993 标准确定。

(3) 低压电线电缆: 根据 GB 5013.1—1997 ~ 5015.7—1997, GB 5023.1—1997 ~ GB 5023.7—1997 标准确定。

(4) 聚氯乙烯绝缘电力电缆: 根据 GB 12706.1—1991 ~ 12706.2—1991, GB/T 12706.1—2002 ~ GB/T 12706.2 标准确定。

(5) 交联聚乙烯绝缘电力电缆: 根据 GB 12706.1—1991, GB 12706.3—1991, GB/T 12706.1 ~ GB/T 12706.4—2002 标准确定。

(6) 阻燃电缆—阻燃电缆载流量与相应一般电缆的载流量相同, 但在电缆绝缘与外护套之间填充氢氧化铝构成阻燃电缆。其载流能力要比一般电缆载流能力大。这是因为填充无机材料的热阻系数小于原来纤维材料的热阻系数, 并且电缆外径略大于一般性电缆, 散热较好。

(7) 64/110kV 交联聚乙烯绝缘电缆: 根据 GB 11017—1989, GB/T 11017.1 ~ 11017.3 标

准确定。

(8) 自容式充油电缆：根据 GB 9326.1—1988 ~ GB 9326.2—1988 标准确定。

此外，对于各种电力电缆在特殊敷设下的载流量计算提供了计算软件。如多根电缆直埋地并列敷设、混凝土排管敷设、江河湖海水底敷设等都有相应的计算软件。电缆载流量计算标准化、数据规范化之后，进而将是电缆负荷和环境条件变化的主要参数值（如载流量、温度等）的视窗化以便于随时监控和调整。

愿该出版物对于我国电线电缆载流量计算标准化、数据规范化、计算软件实用化起到促进作用。

本书问世受到有关部门的领导和人士的关注、支持和激励，特别是在编写过程中，得到上海电缆研究所相关领导和技术人员的指教，特此表示感谢。

作者水平有限，错误难免，敬请读者多多指教。

编著者

于上海电缆研究所

2003.6

目录

序言

前言

第 I 部分

— 电线电缆载流量计算

1 架空裸导线等载流量测算	3
1.1 一般情况	3
1.2 载流量计算方法	4
1.2.1 基本公式	4
1.2.2 交流电阻 R_T 计算	4
1.2.3 β 、 R_d 和 I 之间关系测量	7
1.3 接触网用导线载流量的测算	12
1.3.1 概述	12
1.3.2 暂态运行时载流量计算方法	13
1.4 母线排载流量计算	16
1.4.1 概述	16
1.4.2 一相单条母线的载流量计算	16
1.4.3 一相多条并列的母线载流量计算	18
1.4.4 计算示例	19
1.5 架空裸导线载流量计算应用软件	20
附录 1 架空裸导线电性参数值	23
2 电缆额定载流量计算 (100% 负荷因数)	31
2.1 一般情况	31
2.2 电缆额定载流量计算公式	31
2.2.1 空气中不受日光照射的交流电缆	31
2.2.2 空气中不受日光照射的 5kV 及以下的直流电缆	32
2.2.3 空气中直接受日光照射的交流电缆	32
2.2.4 空气中直接受日光照射时的 5kV 及以下直流电缆	33
2.2.5 土壤发生局部干燥场合下的直接埋地交流电缆	33
2.2.6 土壤发生局部干燥场合下 5kV 及以下直流电缆	34
2.2.7 土壤避免发生局部干燥场合下的交流电缆	34
2.2.8 土壤避免干燥场合下的 5kV 及以下直流电缆	34
2.3 导体交流电阻计算	34

2.3.1	导体直流电阻	34
2.3.2	集肤效应因数 Y_s	35
2.3.3	对于二芯或二根单芯电缆的邻近效应因数 Y_p	36
2.3.4	对于三芯或三根单芯电缆的邻近效应因数 Y_p	36
2.3.5	钢管电缆中集肤和邻近效应	36
2.4	绝缘损耗 (仅适用于交流电缆)	37
2.5	金属套和屏蔽的损耗 (仅适用于交流电缆)	38
2.5.1	两根单芯电缆和三根单芯电缆 (三角形排列) 带电段金属套两端互连	38
2.5.2	正常换位带电段金属套两端互连且平面排列的三根单芯电缆	39
2.5.3	平面排列不换位且带电段金属套两端互连的三根单芯电缆	39
2.5.4	金属套各互连点之间单芯电缆的间距不等	40
2.5.5	大截面分割导体效应	40
2.5.6	金属套单点互连或交叉互连的单芯电缆	41
2.5.7	二芯统包金属套非铠装电缆	42
2.5.8	三芯统包金属套非铠装电缆	43
2.5.9	二芯和三芯钢带铠装电缆	43
2.5.10	分相铅包 (SL 型) 铠装电缆	44
2.5.11	钢管电缆屏蔽和金属套中损耗	44
2.6	对于铠装、加强带和钢管的损耗因数 (仅适用于工频交流电缆)	44
2.6.1	非磁性铠装或加强层	44
2.6.2	磁性铠装和加强层	45
2.6.3	钢管损耗	48
2.7	双回路平面排列金属套涡流损耗因数计算	48
2.7.1	双回路平面排列金属套涡流损耗计算方法	48
2.7.2	单回路高电阻金属套损耗因数 λ_0 的公式	55
2.7.3	系数 H 、 N 和 J 的计算	55
2.7.4	关于电缆换位时注意事项	59
2.7.5	涡流损耗的计算示例	60
2.8	单芯电缆并列之间电流分配和环流损耗的计算	64
2.8.1	计算方法概述	64
2.8.2	矩阵解	67
2.8.3	计算示例	67
2.9	电缆本体热阻计算	73
2.9.1	电缆绝缘的热阻 T_1	73
2.9.2	金属套和铠装之间热阻 T_2	78
2.9.3	外护层热阻 T_3	79
2.9.4	钢管电缆	80
2.10	自由空气中电缆外部热阻 T_4	80
2.10.1	不受日光直接照射的电缆	80
2.10.2	直接受日光照射下的电缆	83
2.11	埋地电缆的外部热阻 T_4	84
2.11.1	单根孤立埋地电缆	84
2.11.2	埋地电缆群 (相互不接触)	84

2.11.3	等负荷埋地电缆群（相互接触）	87
2.11.4	埋地钢管电缆	87
2.11.5	埋于电缆沟中的电缆	88
2.11.6	管道（或钢管）中的电缆	88
2.12	架空敷设的电缆群载流量降低因数的计算	90
2.12.1	适用范围	90
2.12.2	载流量降低因数计算	90
2.12.3	避免载流量降低的间隙值	93
2.12.4	电缆群降低因数措施	93
附 2.1	国家标准规定电缆所用导体的标准电阻值	93
附 2.2	国家标准电缆用圆导体直径	94
3	载流量计算示例及软件和试验	96
3.1	交联聚乙烯绝缘电缆—单芯电缆	96
3.1.1	电缆和运行资料	96
3.1.2	交流电阻的计算	97
3.1.3	金属屏蔽损耗的计算	97
3.1.4	介质损耗 W_d	100
3.1.5	热阻的计算	101
3.1.6	载流量计算	102
3.2	电缆载流量计算应用软件	103
3.2.1	概述	103
3.2.2	XLPE 电缆载流量计算软件（VB 编程）	104
3.3	电缆载流量试验设施及程序	108
3.3.1	试验设施	108
3.3.2	载流量试验程序	110
3.4	电缆载流量试验	110
4	电缆运行及其经济截面的优化选择	113
4.1	电缆运行条件	113
4.1.1	选择电缆应具备的资料	113
4.1.2	电缆运行条件的各参数值的选择	114
4.1.3	电缆截面选择导则	115
4.2	按经济电流密度选择架空导线截面	116
4.2.1	计算方法	116
4.2.2	我国现行的经济电流密度	117
4.3	电力电缆最佳经济截面的选择	117
4.3.1	一般情况	117
4.3.2	总费用的计算	118
4.3.3	导体经济截面的计算	120
4.3.4	导体经济截面计算示例	121
4.3.5	导体平均温度和电阻	128
附录 4	各国家相应运行条件的各参数值	131

5 电线电缆短时负载流量计算	132
5.1 一般情况	132
5.2 电线电缆暂态温度响应	133
5.2.1 绝缘的表示式	133
5.2.2 电线电缆表达式	133
5.2.3 电线电缆的暂态计算	134
5.3 载流量计算方法	135
5.3.1 短时负载流量计算	135
5.3.2 周期性断续负载流量计算	136
5.3.3 短时过负荷电缆载流量的计算	136
6 35kV 及以下电缆周期性负载流量	138
6.1 一般情况	138
6.2 周期性负载流量因数计算	138
6.2.1 单根孤立的电缆线路	138
6.2.2 等负荷非邻接的电缆或管道组成的电缆组	141
6.2.3 三根相同的、等负荷、相互邻接和等损耗的电缆或管道组成的线路群	143
6.3 周期性负载流量计算示例	143
6.3.1 三芯电缆构成孤立线路	143
6.3.2 三根单芯电缆构成一组线路	144
附录 6 周期负荷曲线及指数积分比例计算等	146
附 6.1 日周期负荷曲线	146
附 6.2 指数积分数字计算	146
7 18/30 (36) kV 以上电缆周期性负载流量	148
7.1 概述	148
7.1.1 适用范围	148
7.1.2 关于电缆热容	148
7.1.3 电缆暂态温度响应	149
7.2 持续时间长且为周期负荷下的暂态计算	149
7.2.1 绝缘层的表达式	149
7.2.2 电缆的表达式	150
7.2.3 电缆本体部分的暂态温升计算	153
7.2.4 电缆表面至周围介质的暂态温升计算	153
7.2.5 完整的暂态温升计算	154
7.3 持续时间短的暂态温升计算	155
7.3.1 绝缘层的表达式	155
7.3.2 电缆的表达式	155
7.3.3 土壤中电缆暂态温升计算	157
7.3.4 空气中电缆暂态温升计算	158
7.4 某些参数变化对暂态温升的校正	159
7.4.1 导体损耗随温度变化时的暂态温升的校正	159

7.4.2	突然施加电压引起的暂态温升	160
7.5	周期性负荷因数 M 的计算	160
7.5.1	概述	160
7.5.2	周期性负荷因数的计算 (包括电缆热容)	161
7.6	损耗 - 负荷因数 μ 的计算	162
7.7	$\theta_R(i) / \theta_R(\infty)$ 的计算	163
7.7.1	孤立敷设的单根三芯电缆	163
7.7.2	孤立线路	164
7.7.3	等损耗“N”的电缆群、非邻接的电缆或管道	164
7.7.4	“N”线路群	165
7.8	周期性负荷载流量计算示例	166
7.8.1	基本条件和资料	166
7.8.2	求解电缆热路	167
7.8.3	电缆暂态温升计算	167
7.8.4	周期性负荷因数计算	169
7.9	对于埋地电缆邻接土壤干燥下的周期负荷因数计算	171
7.9.1	概述	171
7.9.2	土壤变干时周期负荷因数计算	172
7.10	土壤变干时周期负荷因数计算示例	173
7.10.1	技术资料	173
7.10.2	计算周期负荷因数相关的基本数据	174
7.11	所有电压级电缆应急情况下载流量计算	175
7.11.1	孤立线路和线路群	175
7.11.2	应急负荷计算示例	176
附录 7	计算电缆周期性负荷因数时所用参数	177
8	电缆短路电流和短路温度的计算	178
8.1	一般情况	178
8.1.1	影响短路温度的因素	178
8.1.2	允许短路电流	178
8.2	1.8/3 (3.6) ~ 18/30 (36) kV 电缆允许最高短路温度	179
8.3	允许短路电流的计算	180
8.3.1	绝热法计算短路电流	180
8.3.2	非绝热法计算短路电流	180
8.4	短路温度的计算	184
8.5	载流导体热稳定性计算简化式	184

第 II 部分

— 电线电缆参考载流量

1	铝绞线和钢芯铝绞线	189
1.1	适用范围	189
1.2	计算依据	189

1.3	使用说明	189
1.4	铝绞线和钢芯铝绞线载流量	189
2	架空绝缘电缆	201
2.1	适用范围	201
2.2	环境条件	201
2.3	使用载流量时应注意事项	201
2.4	架空绝缘电缆载流量	202
3	低压电线电缆	207
3.1	适用范围	207
3.2	环境条件	207
3.3	载流量索引表	209
4	聚氯乙烯绝缘电力电缆	214
4.1	适用范围	214
4.2	基准环境参数	214
4.3	使用说明	215
4.4	载流量索引表	217
5	交联聚乙烯绝缘电力电缆	242
5.1	适用范围	242
5.2	基准环境条件	242
5.3	使用说明	243
5.4	载流量索引表	245
6	阻燃电缆—隔氧层电缆	294
6.1	一般情况	294
6.2	使用说明	294
6.3	隔氧层阻燃电缆载流量	297
7	110kV 交联聚乙烯绝缘电力电缆	300
7.1	一般情况	300
7.2	基准环境条件	300
7.3	使用说明	301
7.4	载流量索引表	302
8	自容式充油电缆	320
8.1	一般情况	320
8.2	基准环境条件	320
8.3	使用说明	320
8.4	载流量索引表	320
	参考文献	332

第 I 部分

电线电缆载流量计算



架空裸导线等载流量测算

1.1 一般情况

高压架空导线大多数采用铝绞线特别是大量应用钢芯铝（或铝合金）绞线等复合材料的导体，其钢芯主要承受机械拉力，而由一层或多层铝线绞合的部分则承受导电作用。由于铝单丝表面的氧化膜相对铝来说导电率较低，故铝单丝之间有明显的接触电阻，致使部分电流将与导线轴向呈螺旋形流动，引起轴向磁场。虽然各层绞合节矩方向相反、节矩大小不等，但残存的磁场强度通常由于钢芯磁滞和涡流足以引起显著的功率损耗，这些损耗将导致交流电阻的增加。这些损耗相对于邻近效应和趋肤效应有明显的不同。钢芯截面占整个导线比例越大，传输负荷电流越大，则交流电阻越大，它们之间呈非线性关系。交流电阻或者交直流电阻比（同一导线在相同条件下交流电阻和直流电阻之比）除取决于导线材质、结构外，还与输电系统有关。因此，交流电阻是受多种因素制约的综合性参数，很难用一个公式将其准确的表示出来。许多学者进行了大量的研究，至今还没有一个广为公认的计算公式。国际电工委员会（IEC）仍在考虑之中，力争提供一个较为准确而满意的计算方法。目前 IEC—1597 出版物仅给出了载流量基本计算公式和 IEC 产品标准的交直流电阻等参考数据。

本部分提出载流量测算（试验与计算相结合）方法经过多年实践证明确实很好的满足了实际工程的需要。采用该方法确定的实际敷设条件下架空裸导线的载流量是安全可靠的，同时又能充分发挥导线的传输能力，国内许多重大工程均已采用该方法选择导线截面。

另外，对高压架空线路导线截面的选择在满足其他条件的前提下总是以经济电流来考虑的。经济电流密度是与市场价格（材料、设备、施工和能源等）相对应的参数，在一定的时间内有一个相对的稳定值。我国目前采用的经济电流密度是 20 世纪 50 年代前苏联计划经济时期的数值，该数值是否符合目前市场经济情况很有研究的必要。本章也进行了初步探讨。

参考 IEC—1597 出版物中相关部分给出载流量计算基本公式。关于钢芯铝绞线交直流电阻值可适当地参考本章附录中相应数据。另外，对国际上常用的钢芯铝绞线交、直流电阻计算方法作了介绍，可供参考。

关于架空导线或电气化铁道用接触网导线载流量测算是确定载流量最好的方法，本章作了详细地介绍，尤其是大截面复合导体架空导线载流量确定应该以测算为基础。

1.2 载流量计算方法

1.2.1 基本公式

对已知环境温度和给定的导体工作温度下的最大稳态电流即是导体的载流量。载流量取决于导体类型、电阻、允许最高工作温度和环境参数（如环境温度等）。导体稳态运行达到允许温升时可得到稳态电流（载流量）计算公式^[1]：

$$I = \sqrt{\frac{p_r + p_c - p_s}{R_T}} \quad (\text{A}) \quad (1-2-1)$$

式中 p_r ——辐射热损耗，W/m；

p_c ——对流散热损耗，W/m；

p_s ——太阳辐射热，W/m；

R_T ——工作温度下的导体单位长度交流电阻， Ω/m ，见 1.2.2 节。

导体表面向周围空间辐射热损耗由下式计算：

$$p_r = s \times \pi \times D \times k_e (T_c^4 - T_0^4) \quad (\text{W/m}) \quad (1-2-2)$$

s ——斯蒂芬-波尔茨曼常数 (5.67×10^{-8})， $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ ；

D ——导体直径，m；

T_0 ——环境温度，K；

T_c ——导体稳态温度，K；

k_e ——黑体辐射系数。

由于自然风的存在，强迫对流散发出的热损耗由下式计算：

$$p_c = \lambda \times N_u \times \pi (T_c - T_0) \quad (\text{W/m}) \quad (1-2-3)$$

λ ——与导体相接触的空气膜导热系数假定不变并等于 $0.02585 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

N_u ——欧拉数，由下式给出：

$$N_u = 0.65 R_e^{0.2} + 0.23 R_e^{0.61} \quad (1-2-4)$$

R_e ——雷诺数，由下式给出：

$$R_e = 1.644 \times 10^9 \cdot v \cdot D \cdot [T_0 + 0.5 \cdot (T_c - T_0)]^{1.78} \quad (1-2-5)$$

v ——风速，m/s。

导体吸收的太阳辐射热由下式计算：

$$p_s = \gamma \cdot D \cdot S_i \quad (\text{W/m}) \quad (1-2-6)$$

γ ——导体吸收系数；

S_i ——日照强度， W/m^2 。

1.2.2 交流电阻 R_T 计算

通常交流电阻 R_T 总是以直流电阻 R_d 乘以交直流电阻比 β 表示，即：