



牵引变电所及其自动化

田付强 副教授

牵引供电研究所

Email: fqtian@bjtu.edu.cn

办公室：电气楼808

办公电话：010-51685212-604



◆ 教材：

- 《轨道交通牵引供电技术》，贺威俊、高仕斌等，2015
- 《高速铁路牵引变电所技术》，中国铁路总公司，2014
- 《交流电气化铁道牵引供电系统》，谭秀炳，西南交通大学出版社，2007

◆ 考核形式和成绩评定：笔试占成绩 60%。作业与讨论占成绩 40%。

◆ QQ学习交流群：309392300



《轨道交通牵引供电技术》，贺威俊、高仕斌等，2015



群名称：牵引变电所自动化学习
群 号：309392300



第七章 牵引变电所设计

第一节 概述

轨道交通牵引的交流与直流牵引变电所设计是电力牵引供电系统设计的重要组成部分。其内容包括：电气设备选择、电气主接线和配电装置设计、控制保护系统的技术方案与接线方式、谐波抑制和无功补偿、接地装置设计，等等。它们对整个供电系统的技术经济指标、运行方式都有重大影响。

牵引变电所与供变电系统其他供电装置的设计，不仅要满足正常运行方式下的各种工作状态及运行条件的要求，而且应考虑在故障条件下如何缩小或限制故障的范围及影响，并保证电气设备在故障状态下安全可靠地工作。

在短路情况下，故障电流通过母线和电气设备，将造成大量发热；同时由于电磁作用，在带电导体之间产生很大电动力，使设备与母线承受巨大的机械应力；短路功率的增大将使断路器等断流设备在断开故障电路时造成困难，必须进一步认识、掌握这些规律，并据此选择电气设备，有效地进行电气主接线和配电装置设计，以期达到安全、经济和高效运行的目的。



变电所设计步骤

1. 选择供变电工程的主结线
2. 根据设备工作的正常条件对设备进行初步选择
3. 根据设备工作的异常条件对设备进行校验
4. 在完成高压设备的选择设计后，进行配电装置的设计，绘出平面布置图和断面图
5. 完成配电装置的设计后，进行防雷系统的设计
6. 在完成一次系统的设计后，分别对二次系统的控制、测量和保护部分进行设计，完成对二次设备的选择和校验，绘出二次系统展开图
7. 对交流电源、直流电源系统进行设计
8. 上述步骤仅仅是一个一般性流程，在实际设计中，可能存在某些步骤的反复。



对于具体的高压设备来说，设计可归纳为：**选择、校验**；

- 如果校验通过，则选择合格，否则重新选择，再校验。
- 对于设备的选择依据通常是设备工作的正常条件；
- 对于设备的校验依据通常是设备工作的异常条件。
- 针对设备校验，主要从发热和受力两个方面考虑



第二节 电器与载流导体的发热和负载能力

一. 电器与载流导体正常工作下的发热容许温度

1. 热量的产生

当电器与载流导体长期通过电流时，铁磁体的涡流损耗、导体中电阻功率消耗，以及绝缘材料中的介质损耗等都将转变为热量。其中一部分热量使导体本身发热、温度升高，另一部分则散发到周围介质中去。

- ◆ 导体电阻和接触电阻的存在电阻损耗；
- ◆ 交变磁场作用下铁磁体内存在涡流、磁滞损耗；
- ◆ 绝缘体内存在介质损耗。



2. 电器与导体(电缆和母线等)的发热温度超限的危害

- (1) 导体在高温下因遭受退火而使机械强度下降。长时间发热下，铜超过 150°C ，铝超过 100°C ；或短时发热铜超过 300°C ，铝超过 200°C ，其机械强度将剧烈下降，致使在短路的电动力作用下，金属导体变形或损坏。
- (2) 对于电接触连接处接触电阻增大。因高温发热引起机械强度下降，使两导体接触处压力减小，接触电阻增大，导致发热愈加严重。同时，由于发热将使接触表面强烈氧化，产生电阻比导体本身大得多(几十倍甚至更大)的氧化铜或氧化铝等金属氧化膜，最后使接触电阻大大增加，引起接触处发热剧增，其结果使接触连接松动、变形甚至熔化。
- (3) 绝缘寿命减少。高温下绝缘材料的介质损耗增加，介质强度降低，老化加速，造成工作寿命下降。例如，瓷绝缘子(或绝缘套管)在温度超过 85°C 时，电气强度迅速降低，温度达 100°C 时只有原来介质强度的 $3/4$ 。

所谓容许温度，是指使导体和电器能保持正常的连接工作所允许的最高发热温度。容许温度实际上确定了电器与导体在连续(或短时)发热情况下容许的电流值。



二. 电器和载流导体在正常工作容许发热下的过载能力

1. 容许发热的限定

电气设备和电器一般由导体、绝缘材料和铁磁体组成，在交流电通过时其发热过程极其复杂，很难精确计算，一般按设备实验提供的容许电流数据作为其工作电流引起发热的限制条件，即使容许电流(或额定电流)大于长期工作电流。而对于母线等载流导体，可看成主要由本身电阻引起发热，其计算较简单。

- ◆ 电气设备的长期发热允许温度主要由绝缘材料的允许温度和接触部分的允许温度确定。
- ◆ 短时发热允许温度主要取决于导体的机械强度和绝缘材料的性能。
- ◆ 容许温度（允许温度）：指使电气设备能保持正常的连续工作所允许的最高发热温度。
- ◆ 限制条件：容许电流 $>$ 长期工作电流



二. 电器和载流导体在正常工作容许发热下的过载能力

2. 热计算

导体中没有通过电流时，其温度与周围温度相等。导体内通过电流时，其内部产生的热量一部分使导体本身温度升高，另一部分散失到周围介质中去，它们之间呈动态分配，直至导体发热过渡到稳态时，导体发热温度达到稳态温升。这一变化过程可以用热平衡方程描述：

$$Q_{\Sigma} \cdot dt = mcd\tau + KS\tau dt$$



$$\tau = \tau_s(1 - e^{-\frac{t}{T}}) + \tau_0 \cdot e^{-\frac{t}{T}}$$

$$\tau_s(\text{稳定温升}) = \frac{Q_{\Sigma}}{KS} \quad (^{\circ}\text{C})$$

$$\tau = \tau_s e^{-\frac{t}{T}} \quad \text{降温冷却}$$

$$\tau_{al} = \frac{I_{al}^2 \cdot R}{KS}$$

$$I_{al} = \sqrt{\frac{KS\tau_{al}}{R}} \quad \text{对母线等导体}$$

I_a 为母线长期容许电流值；
 τ_a 为母线容许温升， R 为母线电阻



二. 电器和载流导体在正常工作容许发热下的过载能力

2. 热计算

导体中没有通过电流时，其温度与周围温度相等。导体内通过电流时，其内部产生的热量一部分使导体本身温度升高，另一部分散失到周围介质中去，它们之间呈动态分配，直至导体发热过渡到稳态时，导体发热温度达到稳态温升。这一变化过程可以用热平衡方程描述：

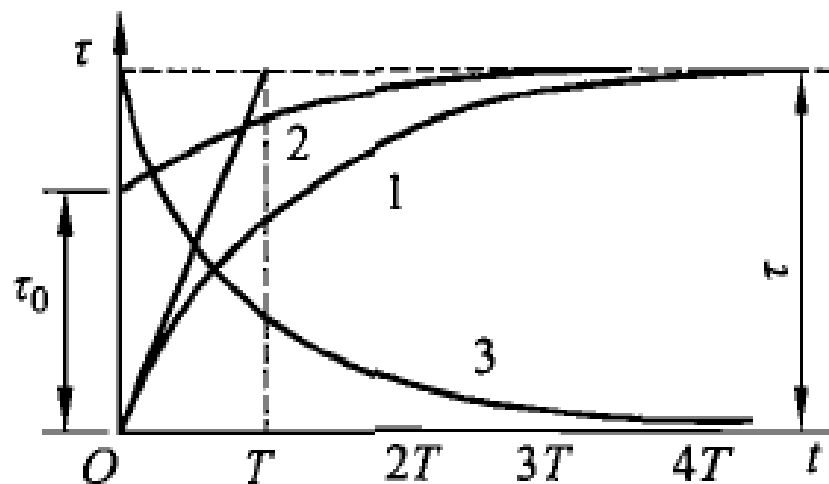


图 8.1 发热曲线与冷却曲线图

1、2—发热曲线；3—散热曲线

工程中常采用查表的方式求母线和导体的容许电流(载流量)，它是按环境温度为 25°C 时由 I_{XU} 计算式得到的，当实际环境温度变化时，需按采用的环境温度乘以校正系数 K_t 。



二. 电器和载流导体在正常工作容许发热下的过载能力

2. 热计算

附表 1 LGJ 钢芯铝绞线载流量

标称截面 铝/钢/mm ²	长期允许载流量/A		标称截面 铝/钢/mm ²	长期允许载流量/A		标称截面 铝/钢/mm ²	长期允许载流量/A	
	+ 70 °C	+ 80 °C		+ 70 °C	+ 80 °C		+ 70 °C	+ 80 °C
16/3	115	121	120/7	408	417	240/30	655	662
25/4	154	160	120/25	425	433	300/15	735	742
35/6	189	195	120/70	440	447	300/40	746	754
50/8	234	240	150/8	463	472	300/70	766	770
50/30	250	257	150/25	478	487	400/25	879	882
70/10	289	297	185/10	539	548	400/65	900	902
70/40	307	314	185/25	552	560	500/35	1 025	1 024
95/15	357	365	210/10	577	586	630/55	1 211	1 204
95/55	378	385	210/35	599	607	800/70	1 410	1 396

注：本表载流量系按基准环境温度 25 °C、风速 0.5 m/s、辐射系数及吸热系数为 0.5、海拔高度为 1 000 m 的条件计算的。最高允许温度 + 70 °C 未考虑日照影响，最高允许温度 + 80 °C，考虑 0.1 W/cm² 日照的影响。



二. 电器和载流导体在正常工作容许发热下的过载能力

2. 热计算

附表 2 裸铜、铝及铝管线的允许载流量
(按环境温度 + 25 °C, 最高允许温度 + 70 °C)

铜 线			铝 线			铝 管	
导线型号 (数字为截面)	载流量/A		导线型号 (数字为截面)	载流量/A		内径/外径 /mm	载流量 /A
	屋 外	屋 内		屋 外	屋 内		
TJ-10	95	60	LJ-16	105	80	13/16	295
TJ-16	130	100	LJ-25	135	110	17/20	345
TJ-25	180	140	LJ-35	170	135	27/30	500
TJ-35	220	175	LJ-50	215	170	26/30	575
TJ-50	270	220	LJ-70	265	215	36/40	765
TJ-60	315	250	LJ-95	325	260	36/40	850
TJ-70	340	280	LJ-120	375	310	40/45	935
TJ-95	415	340	LJ-150	440	370	45/50	1 040
TJ-120	485	405	LJ-185	500	425	50/55	1 145
TJ-150	570	480	LJ-240	610	—	54/60	1 340
TJ-185	645	550	LJ-300	680	—		
TJ-240	770	650	LJ-400	830	—		

2. 热计算

电牵引负荷由于列车运行状况、线路坡道、列车数量等的变化，将形成周期性的重复出现延续最大负荷(持续几分钟以上)，使牵引供电系统库引侧电器(隔离开关、断路器等)、母线和导体的发热及其负荷能力具有不同特点。显然，在单位时间热损耗及散热条件、容许发热温度不变的情况下，后者应具有大于1的过载能力。

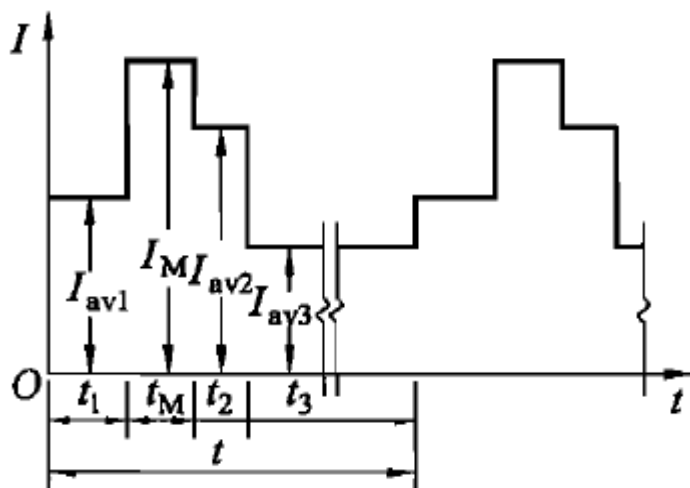


图 8.2 电牵引系统周期性重复出现
延续最大负荷的情况

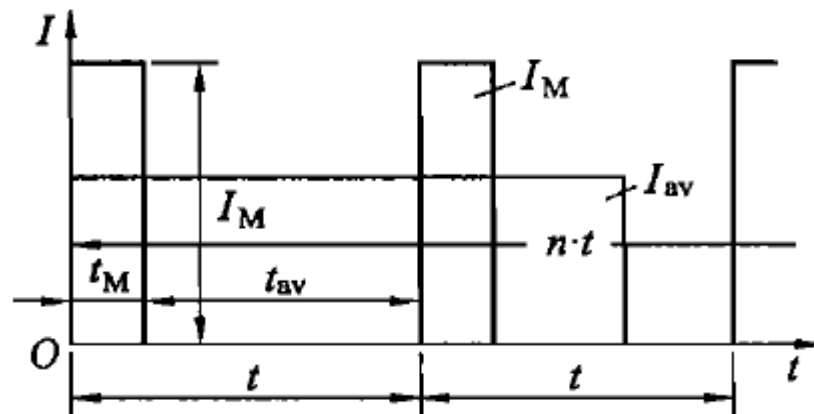


图 8.3 周期性重复出现
最大负荷的负荷叠加

2. 热计算

周期性重复出现最大负荷产生的温升，在每周期中由发热(Oa)和散热(ab)两阶段组成，如图8.4曲线2所示。下一周期开始时，再重复这一过程。

$$\tau_1 = \tau_M (1 - e^{-\frac{t_M}{T}}) = \frac{Q_{\Sigma M}}{K \cdot S} (1 - e^{-\frac{t_M}{T}})$$

$$\tau'_1 = \tau_1 e^{-\frac{t-t_M}{T}} = \tau_M (1 - e^{-\frac{t_M}{T}}) \cdot e^{-\frac{t-t_M}{T}}$$

$$\tau_n = \tau_M (1 - e^{-\frac{t_M}{T}}) \cdot (1 + e^{-\frac{t}{T}} + e^{-\frac{2t}{T}} + \dots + e^{-\frac{(n-1)t}{T}})$$

$$= \tau_M (1 - e^{-\frac{t_M}{T}}) \cdot \frac{1 - e^{-\frac{nt}{T}}}{1 - e^{-\frac{t}{T}}}$$

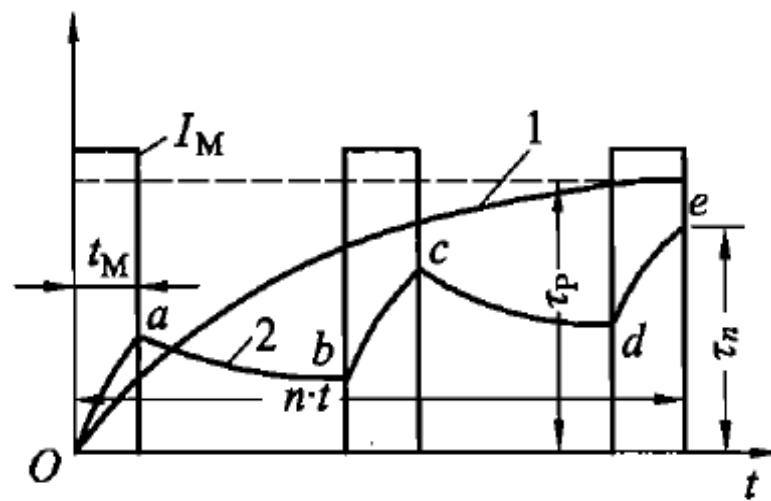


图 8.4 周期性重复出现最大负荷的发热与冷却曲线



2. 热计算

$$\begin{aligned}\tau_{\Sigma} &= \tau_{av} + \tau_n = \frac{Q_{\Sigma av}}{K \cdot S} + \frac{Q_{\Sigma M}}{K \cdot S} (1 - e^{-\frac{t_M}{T}}) \cdot \frac{1}{1 - e^{-\frac{t}{T}}} \\ &= \frac{Q_{\Sigma M}}{K \cdot S} \left[\left(\frac{I_{av}}{I_M} \right)^2 + \frac{1 - e^{-\frac{t_M}{T}}}{1 - e^{-\frac{t}{T}}} \right] = \frac{Q_{\Sigma M}}{K \cdot S} \left(k_{av}^2 + \frac{t_M}{T} \right)\end{aligned}$$

式中， k_{av} 为相对于最大负荷的负荷系数：

$$k_{av} = \frac{I_{av}}{I_M}$$



2. 热计算

【例 8.1】 某电气化铁路区段牵引列车上坡运行，其运行周期的典型负荷曲线如图 8.5 所示，一周周期时间 $t=36 \text{ min}$ ，最大负荷 $I_M=810 \text{ A}$ ， $t_M=5 \text{ min}$ ，如开关电器的额定电流 $I_N=600 \text{ A}$ （最大），一周期内其他持续负荷的数值和时间均示于图内，这种周期负荷每天持续时间为 3~4 h，求开关电器（隔离开关、断路器）的允许过载系数。

解 由 (8.7) 式求得平均持续负荷电流为

$$I_{av} = \sqrt{\frac{(0.9I_N)^2 \times 4 + (0.5I_N)^2 \times 27}{36}}$$

$$= 0.525I_N = 315 \text{ (A)}$$

$$k_{av} = \frac{I_{av}}{I_M} = \frac{315}{810} = 0.39$$

对开关电器，取发热时间常数 $T=20 \text{ min}$ ，则由 (8.13) 式，有

$$K_M = \sqrt{\frac{t}{k_{av}^2 \cdot t + t_M}} = \sqrt{\frac{36}{(0.39)^2 \times 36 + 5}} = \sqrt{\frac{36}{10.48}} = 1.85$$

$$K_M \cdot I_N = 1.85 \times 600 = 1110 \text{ (A)} > 810 \text{ (A)}$$

说明采用 $I_N=600 \text{ A}$ 的开关电器，通过上述具有重复最大负荷为 810 A 的持续牵引负荷时，不会引起过热。

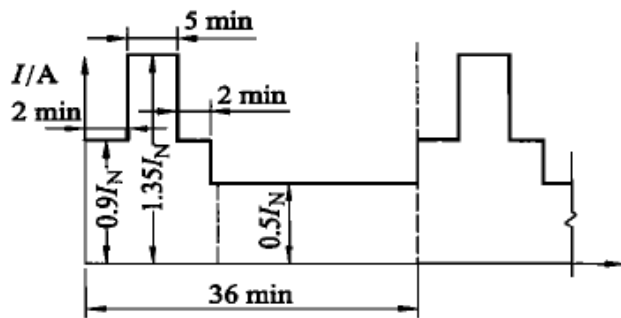


图 8.5 例题 8.1 用图



第三节 短路电流通过导体时的发热和电动力计算

一. 载流导体短路时的发热计算

在短路情况下，载流导体中通过的电流超过正常负荷许多倍，使导体温度迅速升高，且短路电流通过的时间不超过几秒钟，因此可不考虑散入周围空气中的热量，而认为短路电流在导体内产生的热量全部使导体温度升高。短路时发热计算的目的是，在于找出这时的发热温度 θ_h ，以便与导体规定的短时发热容许温度 θ_{al} (见表8.1)相比较。

表 8.1 导体和电缆短路时发热最高允许温度

导体种类和材料	最高允许温度/ $^{\circ}\text{C}$
母线：铜、钢（和电器直接连接）	300
铝、铜（有锡覆盖层接触面）	200
油浸纸绝缘电缆、交联聚乙烯电缆 { 铜芯 35 kV及以下 铝芯 35 kV及以下	250
橡皮绝缘电缆/聚氯乙烯电缆	150/120



导体短路时，热平衡方程为：

$$I_d^2 \cdot R_\theta \cdot dt = G \cdot C_\theta \cdot d\theta$$

任一时刻的
短路电流
有效值

温度为 θ
时的导体电阻

温度为 θ
时的导体比热

$$R_\theta = \rho_0 \frac{l}{S} (1 + \alpha \theta) \quad C_\theta = C_0 (1 + \beta \theta) \quad G = \gamma \cdot S \cdot l$$



整理后：

$$\frac{1}{S^2} I_d^2 dt = \frac{C_0 \gamma}{\rho_0} \left(\frac{1 + \beta \theta}{1 + \alpha \theta} \right) d\theta$$

要求短路最高发热温度，对上式两边积分：

$$\frac{1}{S^2} \boxed{\int_0^{t_d} I_d^2 dt} = \frac{C_0 \gamma}{\rho_0} \int_{\theta_s}^{\theta_z} \left(\frac{1 + \beta \theta}{1 + \alpha \theta} \right) d\theta$$


与短路存在过程中产生的热量成比例，因而称为短路电流的热效应



右边的积分结果为：

$$\frac{C_0 \gamma}{\rho_0} \left[\frac{\alpha - \beta}{\alpha^2} \ln(1 + \alpha \theta) + \frac{\beta}{\alpha} \theta \right] \Big|_{\theta_s}^{\theta_z}$$

则原积分式变为：

$$\frac{1}{S^2} Q_d = A_z - A_s$$

$$A_z = \frac{C_0 \gamma}{\rho_0} \left[\frac{\alpha - \beta}{\alpha^2} \ln(1 + \alpha \theta_z) + \frac{\beta}{\alpha} \theta_z \right]$$

$$A_s = \frac{C_0 \gamma}{\rho_0} \left[\frac{\alpha - \beta}{\alpha^2} \ln(1 + \alpha \theta_s) + \frac{\beta}{\alpha} \theta_s \right]$$



变量A的数值与导体材料和导体实际温度有关。实际应用中，往往将A与导体温度的关系按各种材料的平均参数值代入上式，计算后制成相应曲线。

将短路全电流 i_d 分解为周期分量电流 i_{zt} 与非周期分量电流 i_{ft} 两部分，则代入后并化简得到：

$$i_k^2 = \int_0^{t_k} i_k^2 dt = \int_0^{t_k} (\sqrt{2}I_{pt} \cos \omega t + i_{npt} e^{-t/T_{np}})^2 dt \quad (8.17)$$

$$\begin{aligned} Q_k &= \int_0^{t_k} I_{pt}^2 dt + \int_0^{t_k} i_{np0}^2 \cdot e^{-2t/T_{np}} dt \\ &\approx \int_0^{t_k} I_{pt}^2 + i_{np0}^2 \times \frac{1}{2} T_{np} (1 - e^{-2t/T_{np}}) = Q_p + Q_{np} \end{aligned} \quad (8.18)$$

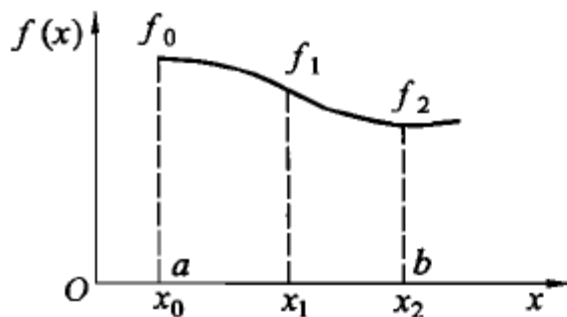
式中， T_{np} 为非周期分量衰减时间常数； Q_p 、 Q_{np} 分别为短路周期分量电流和非周期分量电流的发热效应； i_{np0} 为短路电流起始（ $t=0$ ）非周期分量值。

(8.18) 式为短路热效应的基本方程式，可知最终归结为分别计算短路电流周期分量热效应 Q_p 和非周期分量热效应 Q_{np} 的问题。

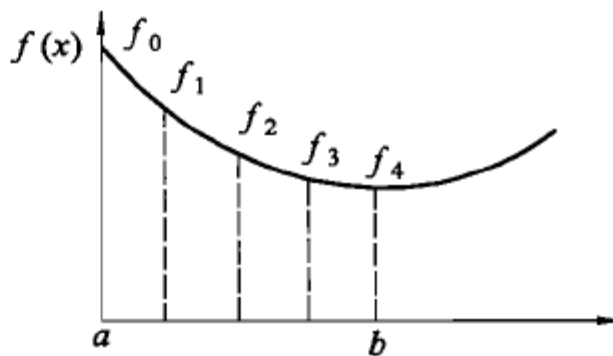


二. 短路电流周期分量和非周期分量热效应的计算

(一) 用数值积分法计算 Q_p



(a) 一般公式



(b) 复化公式

图 8.7 辛普生公式求积

$$\begin{aligned}\int_{x_0}^{x_2} f(x)dx &= \frac{x_2 - x_0}{3 \cdot n} (f_0 + 4f_1 + f_2) \\ &= \frac{x_2 - x_0}{6} (f_0 + 4f_1 + f_2)\end{aligned}$$

$$\int_a^b f(x)dx = \frac{b-a}{12} [f_0 + f_4 + 4(f_1 + f_3) + 2f_2]$$

$$\int_a^b f(x)dx \approx \frac{b-a}{12} [f_0 + 10f_2 + f_4]$$

$$Q_p = \frac{I_p'^2 + 10(I_{kt/2})^2 + (I_{kt})^2}{12} \times t_k \quad (\text{A}^2 \cdot \text{s})$$



二. 短路电流周期分量和非周期分量热效应的计算

(二) 非周期分量电流热效应 Q_{np} 的计算

$$Q_{np} = \int_0^{t_k} i_{np0} \cdot e^{-2t/T_{np}} dt = i_{np0}^2 \cdot \frac{1}{2} T_{np} (1 - e^{-2t/T_{np}})$$

$$\text{当 } t_d < 0.1s \quad Q_{fi} = I_z''^2 \cdot T_{fi} \left(1 - e^{-2t_d/T_{fi}} \right)$$

$$\text{当 } t_d \geq 0.1s \quad Q_{fi} = I_z''^2 \cdot T_{fi}$$

三. 短路电流作用下母线电动力计算

当短路电流通过母线和电气设备载流导体时，特别是在短路冲击电流作用下，将产生很大的电动力。例如，某系统在10 kV电压母线产生三相短路时，中间相峰值电流达53 kA, 10 kV开关柜两支持绝缘子间的电动力实测值为370 kg，结果使中间相瓷瓶碎裂，母线受到折损，其他两相也相应遭受损坏。因此，电气设备和载流导体必须具有承受短路时产生电动力的稳定性，以保证在正常和故障情况下可靠地工作。

电动力的实质是载流导体所受磁场力，可用毕奥-沙伐定律计算

$$\begin{aligned} F &= \int_0^l dF = \int_0^l i_2 \cdot B_1 dl = \frac{\mu_0 \cdot i_1}{2\pi} \cdot \frac{i_2}{a} \cdot l \\ &= 2 \cdot i_1 \cdot i_2 \cdot \frac{l}{a} \times 10^{-7} \quad (\text{N}) \end{aligned}$$

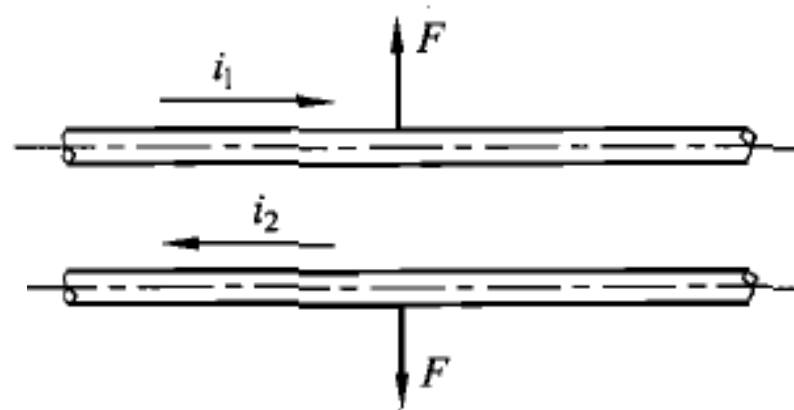


图 8.9 两平行导体间的电动力



- ◆ 三相导体短路时的电动力B相受的力最大，应以中间B相电动力值为标准；
- ◆ 同一地点发生短路时，以三相短路时最大电动力为大，因此应以三相短路来计算最大电动力。

$$F_{B\max}^{(3)} = 1.73 \times 10^{-7} \frac{l}{a} [i_{ch}^{(3)}]^2 K_x$$



第四节 选择电气设备时短路计算点的确定

在进行电气设备选择、按短路条件校验电气设备和载流母线的电动力和热稳定性时，必须计算可能通过各种电气设备和母线的最大短路电流值。

而最大短路电流出现的条件，一方面要考虑电力系统远景规划系统容量增加的可能性，以及系统运行方式的变化使系统参数改变而导致短路电流增大。

另一方面，对于所设计的牵引变电所或其他供电装置，其本身的主接线和运行方式对短路电流的数值也有很大的影响。必须在初步确定的主接线和主变压器运行方式情况下，选择电气设备可能处于最严重短路电流状态的短路点，作为短路计算点，以确定在系统最大运行方式下，通过各种电气设备和载流母线的最大短路电流。

- ◆ 对于图8.12所示牵引变电所，当选择110-220kV侧的开关电器如断路器QF1和母线时，K2点与K2点的短路电流相同，故一般以高压母线短路点K1作为110-220kV高压侧电气设备的短路计算点。
- ◆ 对主变压器二次侧电气设备和母线的选择，统一按K4点母线短路计算最大三相短路电流。
- ◆ 对于牵引馈线断路器等设备如QF5的选择，按三相或两相短路的最大电流进行，K5点与K4点的短路电流值相同。
- ◆ 单相变压器接线方式的牵引变电所，牵引侧的所有设备(包括馈线断路器)的选择，统一按牵引母线上的短路(如K4点)点计算最大两相短路电流(指纯单相)。

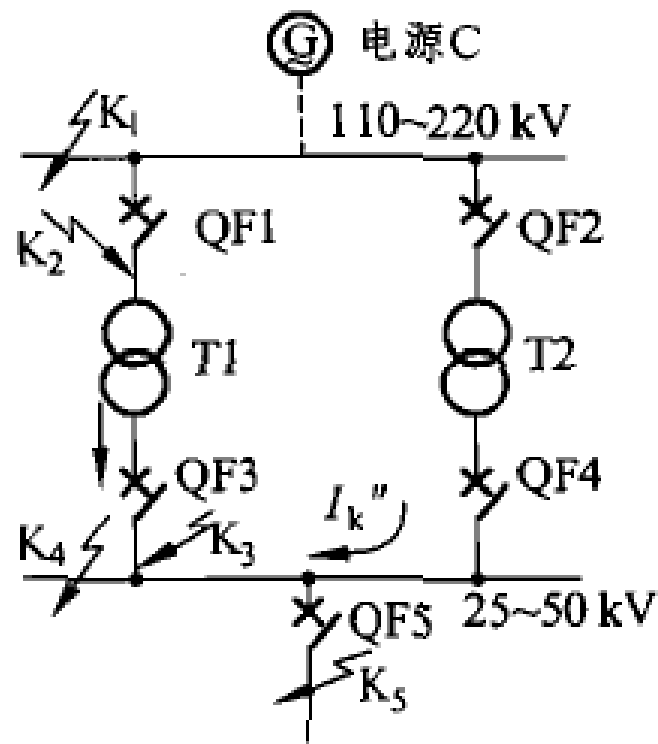


图 8.12 选择牵引变电所
短路点的接线图



第五节 母线、电缆与支持绝缘子的选择

- ◆ 各种母线和电缆都要求有良好的导电性能，以减少电能损耗。
- ◆ 铜、铝或钢：铜导线的导电性能、机械强度和耐腐蚀性最好，铝导线次之，钢导体导电性差，只在小电流或短期通过电流的接地装置中使用。
- ◆ 根据我国资源情况和技术政策，应尽量以铝代铜，主要采用铝制、铝合金及钢铝导线材料。
- ◆ 地铁牵引变配电系统中，由于工作环境特殊和安全可靠等多方面因素，较多采用铜芯电缆。
- ◆ 屋外配电装置一般采用圆形铝绞线或钢芯铝绞线的软母线，铝管或铝合金管形导线只应用于硬母线情况下。
- ◆ 屋内配电装置则普通采用矩形截面的硬铝母线，因这种截面的母线在交流电下集肤效应较小，散热较好，施工安装方便。

母线和电缆的选择就是按不同工作条件确定其截面、结构形式与材料。同时按短路条件校验短时发热的热稳定性和机械稳定性。



一. 母线的选择

◆设计内容：母线的导电截面积，结构形式和材料

选择计算项目		校验	
长期最大工作电流	经济电流密度	动稳定校验	热稳定校验

◆硬母线多用于屋内配电装置

室内采用矩形母线便于施工、安装、运行。矩形母线比圆形母线的周长小，因而矩形母线的散热面大。

◆软母线多用于屋外配电装置

室外母线可以允许较大线间距离，采用多股胶线便于施工、安装。

◆实际上，按经济电流密度选择导线截面积的方法多用于输电线而不是母线，母线通常按照最大长期工作电流来选择其截面积。

◆**母线涂色**：可以增加辐射能力，有利于母线散热；防腐蚀；便于识别：A相---黄色 B相---绿色 C相---红色



◆ 母线放置:

- 母线在正常运行中，因通过电流而发热，如果母线本身的发热量等于向周围空气散出热量时，母线温度不变，所以母线温度与散热条件有很大关系。在温升一定的条件下，如果散热条件不同，则即使是同一规格的母线，其允许的额定电流也不相同。
- 对于矩形母线来说，竖装进散热条件较好，平装时散热条件稍差。一般在保持同等温升的条件下，竖装母线要比平装母线的额定电流大5%-8%，但竖装母线的动稳定性要比平装母线差。由于平装母线便于布线，故在实际应用中，仍以平装母线较为常见。



第五节 母线、电缆与支持绝缘子的选择

一. 母线的选择

1. 按最大长期工作电流选择截面： $I_{XU} \geq I_{gmax}$

I_{XU} 为相应于母线工作的环境温度和其放置方式下，母线长期容许电流值(查附录二表1-3)。 I_{gmax} 为母线在电路中的最大长期工作电流。对于牵引变压器一般取 $I_{gmax}=1.3I_e$ 。当环境温度不为 25°C 时，需乘以修正系数 K_{θ}

$$K_{\theta} = \sqrt{\frac{\theta_{XU} - t}{\theta_{XU} - 25}}$$

2. 按经济电流密度选择母线截面： $S=I_g/j_n$

S 为导体的经济截面， j_n 为经济电流密度，使导体年计算费用为最低的电流密度。

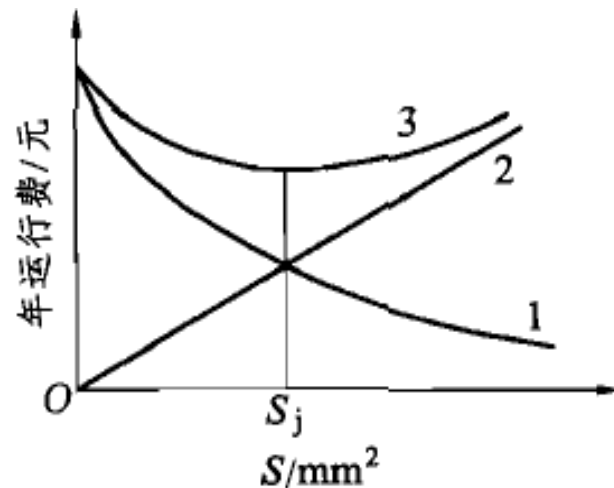


图 8.13 年运行费与导线截面的关系曲线



一. 母线的选择

3 按短路条件校验母线的热稳定性

校验短路热稳定可以根据短路电流热效应计算方法，确定出短路最终温度 θ_z ，应使其与所选母线短路容许温度满足关系： $\theta_z \leq \theta_{\max}$ ；

若校验结果不满足热稳定要求，则应先求出起始温度 θ_s ，根据 θ_s ，利用曲线 $A(\theta)=f(\theta)$ ，找出对应的 A_s 值。再由 $\frac{1}{S^2} Q_d = A_z - A_s$ 求出 A_z 值。

可得到母线的最小容许截面 $S_{\min}$ ，即

$$S_{\min} = \sqrt{\frac{Q_d}{A_z - A_s}} = \frac{1}{C} \sqrt{Q_d}$$

$$\theta_s = \theta_0 + \left(\frac{I_{g\max}}{I_{xu}} \right)^2 (\theta_{xu} - \theta_0)$$



一. 母线的选择

4 按短路条件校验母线的机械稳定性

短路冲击电流通过母线时，使其承受较大的机械应力可能使固定和支持绝缘子上的母线产生弯曲变形甚至折断，因而必须按这时加在母线上的弯矩进行应力计算。

当跨距数大于2时，母线的最大弯矩为：
$$M = \frac{F \cdot l}{10}$$

当跨距数等于2时，
$$M = \frac{F \cdot l}{8}$$
 母线的最大应力为：
$$\sigma = \frac{M}{W}$$
 W为截面系数，或称抗弯模量

母线的最大应力应小于材料的容许应力 $\sigma \leq \sigma_{xu}$

则认为母线的机械稳定性可以满足要求。因开关柜尺寸固定不变，l、a不能再增大，需增大母线截面以增大W。



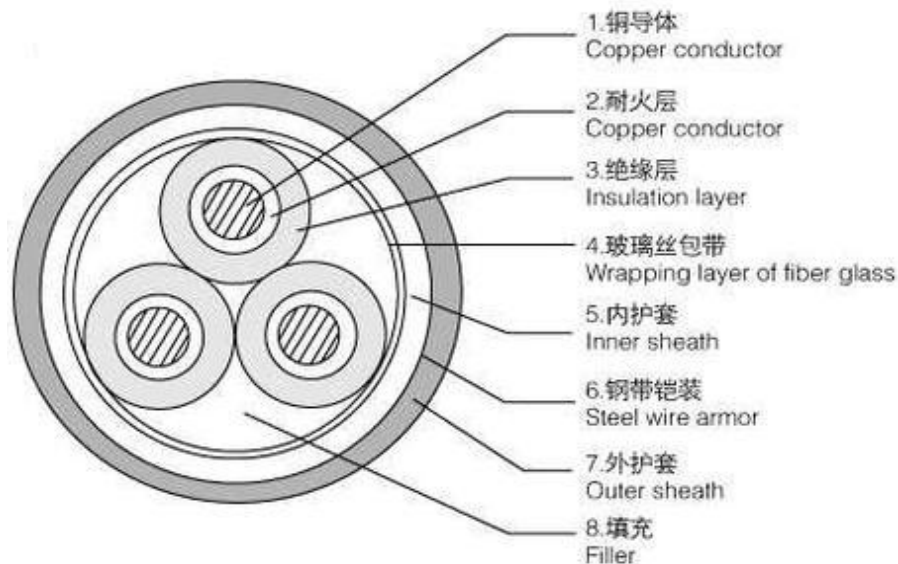
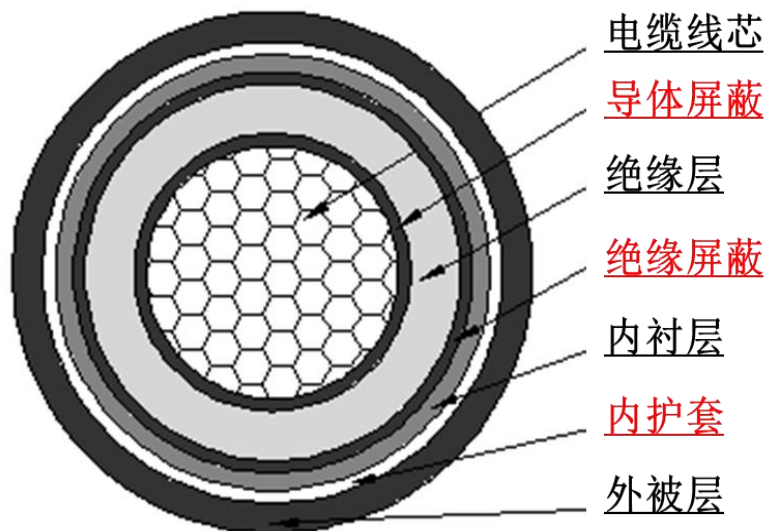
第五节 母线、电缆与支持绝缘子的选择

二. 电力电缆的构造及其选择

在高压配电装置和其他电力装置中，因进出线数量多，用架空线路馈电难以实现，或某些地点不宜于敷设架空电线，如地下变电所、地铁牵引变电所、降压变电所和地下建筑等场所，常采用电力电缆输送电力。

1 电力电缆的构造

电力电缆都由**导电芯线**、**绝缘层**和**保护层**三部分组成。





第五节 母线、电缆与支持绝缘子的选择

2 电力电缆的选择

选择电力电缆，首先应按电缆敷设的场所、用途、结构要求等条件确定电缆的类型与型号，然后校验电压等级，选择电缆截面，校验在正常和故障情况下电缆的电压损失以及短路时的热稳定性。对于电缆一般不需进行短路时机械稳定性的校验。

- (1) **电缆类型、型号和芯线导电材料选择：**单相/三相、耐热、阻燃、钢带铠装、塑料护套；铜、铝导体，轨道交通供电系统电缆普遍采用铜芯电缆。
- (2) **电压选择与校检：** U_N 应 $\geq U_w$ ；直流耐压采用工频的2.4倍；
- (3) **电缆截面选择：**经济电流密度、最大工作电流小于容许载流量；

- (4) **容许电压降落校验：**
$$\Delta U(\%) = \frac{173}{U_L} I_{\max} L (r \cos \varphi + x \sin \varphi) \%$$

- (5) **热稳定性校验：**
$$S_{\min} \approx \frac{\sqrt{Q_k}}{C} \times 10^3 \quad (\text{mm}^2) \quad C = \frac{1}{\eta} \sqrt{\frac{4.2Q}{K_f \rho_{20} \alpha} \ln \frac{1 + \alpha(\theta_h - 20)}{1 + \alpha(\theta_w - 20)}} \times 10^{-2}$$



第五节 母线、电缆与支持绝缘子的选择

三. 支持绝缘子和穿墙套管的选择

- ◆ **作用：**支持绝缘子与穿墙套管在配电装置中用来固定母线和导体，并使导体与地或与处在其他电位下的设备绝缘。
- ◆ **要求：**具有足够的电绝缘强度和机械强度，并能耐热。屋外用的支持绝缘子和穿墙套管应具有防潮和湿闪耐压的能力，以及在污秽区应符合防尘和加强绝缘泄漏比距(每千伏线电压的泄漏距离)的要求。
- ◆ **选择：**首先根据使用地点、电压等级、污秽等级确定它们的类型(户内型或户外型)和型号。对于穿墙套管，由于导体在其中贯穿，应按最大长期工作电流选择导体截面，并与选择母线的方式相同进行短路时热稳定和机械稳定性校验，而支持绝缘子只需校验短路的机械稳定性。
 - **按电压条件选择：**应使 $U_g \leq U_{max}$ ；其中 U_g 、 U_{max} 分别为支持绝缘子与穿墙套管的工作电压和最大工作电压。
 - **按最大长期工作电流选择绝缘套管：**应满足 $I_g \leq I_e$ ； I_g 其中为绝缘套管的额定电流， I_e 为安装绝缘套管的电路中最大长期工作电流。



第六节 开关设备的选择

开关设备包括断路器、熔断器、隔离开关和负荷开关等电器，因其各自的技术特性和功能不同，虽然在选择时所根据的条件有些不同，但也各有其特点和不同要求，现分别讨论如下。

一. 高压断路器的选择

1. 断路器种类、形式的选择：

对于开断电路中负荷电流和短路电流的高压断路器，首先应按使用地点环境、负荷种类及使用技术条件选择断路器的类型与型号，即户内或户外式，以及灭弧介质的种类。对10KV~220KV三相系统，广泛采用少油式或SF6断路器（当前者不能满足要求时），交流牵引由于故障跳闸频繁，从减少运行维修工作量考虑，较普遍采用真空断路器或SF6断路器，地铁与轻轨交通牵引（降压）变电所交流系统，从安全防火和减少维修考虑广泛采用真空断路器。

2. 断路器额定电压 U_e 、额定电流的选择 I_e ：应满足 $U_e \geq U_g$ ； $I_e \geq I_g$ ；其中： U_g 、 I_g 分别为网络工作电压和断路器最大长期负荷电流。



3. 按开断路器断流容量选择

高压断路器的额定开断电流 I_{ek} 或额定断流容量 S_{ed} 应满足以下关系

$$I_{ek} \geq I_{dt} \quad S_{ed} = \sqrt{3}U_e \cdot I_{ek} \geq S_{dt}$$

式中： I_{dt} 为短路后 t 秒短路电流有效值，对快速断路器，取 $I_{dt}=I'' \ t \leq 0.1$ ”； S_{dt} 为短路后 t 秒短路，对快速断路器 $S_{dt}=S_d$ ”。

为了求得短路电流有效值 I_{dt} ，必须确定切断短路的计算时间 t_{js} ，即从短路发生到灭弧触头分开为止的全部时间，它等于继电保护动作时间 t_b 和断路器固有动作时间 t_g 之和，故 $t_{js}=t_b+t_g$ 。在设计牵引变电所和电气设备选择中，由实际选择的保护装置与断路器型号，可得到 t_b 和 t_g 的实际值，但如无此数据时，一般可按下述情况选取。对快速动作的断路器，取 $t_g=0.05s$ ，而对非快速动作的断路器，取 $t_g=0.1\sim 0.15s$ 。对于继电保护，应按具有最小动作时间的速断主保护作为动作时间，即 $t_b=0.03s\sim 0.05s$ 。因此，对于快速动作的断路器，切断短路的计算时间 $t_{js}=0.05\sim 0.1s$ ，对于非快速动作的断路器， $t_{js}=0.15\sim 0.2s$ 。



4. 短路关合电流的校验

在断路器合闸之前，若线路上已存在短路故障，则在断路器合闸过程中，触头间在未接触时即有巨大的短路电流通过（预击穿），更易发生触头熔焊和遭受电动力的损坏。且断路器在关合短路电流时，不可避免地在接通后又自动跳闸，此时要求能切断短路电流，因此额定关合电流是断路器的重要参数之一。为了保证断路器在关合短路时的安全，断路器的额定关合电流 i_{eg} 不应小于短路电流最大冲击值 i_{cj} 。

5. 校验短路时的热稳定性

短路电流通过时断路器的热稳定性，由制造厂给出的在 t 秒（ t 分别为4s、5s或10s）内允许通过的热稳定电流 I_{rt} 来表征，即在给定时间 t 内，通过断路器时，其各部分的发热温度不超过规定的短时最大容许发热温度。因此，以短路电流 I_d 通过断路器时，其热稳定条件为： $I_{rt}^2 \cdot t \geq Q_d$
式中： Q_d 为短路电流发热效应。 $Q_d = Q_z + Q_{fi}$