

電阻之熱計算與選擇

沈越昭譯

電世界出版社

目 錄

引 言

I. 電阻之熱計算	2
1. 發熱理論基礎	2
2. 電阻等效連續電流之計算	7
電阻內電流之特性	7
等效連續電流之計算	10
間斷工作制	10
重複短時工作制	13
短時制	18
連續制	22
電阻等效連續電流之計算與實驗數據	23
II. 電阻之技術數據與電阻線路圖之編製	28
3. 電阻材料	28
4. 鑄鐵片電阻箱	30
結構與尺寸	30
電氣數據	32
安裝	35
5. 高電阻合金元件電阻箱	37
結構與尺寸	38

電氣數據.....	39
6. 繞綫(圓綫與扁綫)電阻元件電阻箱.....	41
結構與尺寸.....	41
電氣數據.....	42
7. 管形電阻.....	44
結構與尺寸.....	44
安裝.....	45
電氣數據.....	45
8. 電阻接綫圖之編制.....	46
分段電阻值.....	47
分段容許電流.....	48
附錄.....	56
一、電阻之用途分類.....	56
二、電阻熱計算原理與時間常數.....	57

引 言

這一本小冊子是譯者學習電動機控制綫路中，有關電阻計算問題時，隨學隨譯的譯稿中之一部分。其內容主要是蘇聯 С. П. Вешеневский 所著“電動機的電阻與特性曲綫之計算”一書第五章電阻之譯文全部。因內容係接着前四章講述各種交直流電動機的起動、制動、調速、放電電阻計算確定之後，在本章內介紹了電阻的發熱理論，電阻在各種運行情況下之熱計算，以及電阻之經濟的選擇與電阻綫路圖之編製法；故改今名。在譯者所看到的一部分資料範圍之內，原書是講控制綫路電阻計算理論蘇聯書籍中比較完整的書。可惜譯者的俄中文水平與技術水平都很低，雖然於付印前曾又譯校了一遍，但譯文仍覺生硬，且很可能因體會不夠仍有誤植之處，希望讀者不吝指正，以便有機會時予以修正。

爲使讀者易於瞭解本文起見，茲又摘譯 В. А. Булгаков 所著“控制電器”一書，有關電阻分類與引伸熱計算基本公式，與說明時間常數各節，作爲附錄之一部分。

沈越昭 1955. 8.

I. 電阻之熱計算

1. 發熱理論基礎

電流通過物體時就產生熱能。此熱能之一部分積聚在物體內，並引起物體溫度之上升；其另一部分則發散至周圍媒質內。如果在單位時間內，熱是均勻地產生的話，則在某一溫度時，產生的熱與發散的熱量之間會得到平衡，那時候溫度的增長就停止了。

首先讓我們來研究理想物體在各種不同的條件下溫度變化的特性。我們認為理想物體將具備下列條件：

i) 導熱率無限的大，因此在容積的所有各點內，其溫度是一樣的；（物體的內部與表面以及任何一點間都沒有溫度差——譯者）；

ii) 熱從所有的表面上均勻的散發出來；

iii) 物體的熱容量與散發出來的熱（散熱率）不變；

iv) 散發出來的熱與物體及周圍媒質間的溫度差的一次方成正比；

v) 周圍媒質的溫度不變，並不因物體溫度的增高而發生變化。

由此可見，上列各項條件不但要求物體本身要達到理想境界，而且還要求周圍媒質亦要臻於完善的境地。

因為發生的熱等於積聚起來的熱加上放出的熱，由此很容易引出在均勻地發熱的情形下，如大家所知的理想物體發熱狀態的方程式如下：

$$\tau = \tau_y (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) + \tau_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \dots \dots \dots (1)$$

式中： τ 、 τ_0 、 τ_y ——相當於物體發熱開始後經過 t 秒，發熱開始

時與穩定時的溫升；即物體超過周圍媒質的溫度，以 $^{\circ}\text{C}$ 計

T ——時間常數，秒；

e ——那不列安數。

求 τ_y 值可用下式：

$$\tau_y = \frac{Q}{A} \dots\dots\dots (2)$$

式中 Q ——一秒鐘內在物體中所產生的熱量，以大卡計；

A ——散熱率即物體與周圍媒質間的溫度差為 1°C 時，一秒鐘內從物體表面所散發出來的熱量。

由此可見，物體超過周圍媒質之穩定的溫升與熱容量無關，與單位時間內所產生的熱量成正比，而與物體的散熱率成反比。

T 值可由下式求得：

$$T = \frac{c}{A} \dots\dots\dots (3)$$

式中 c ——物體熱容量，即改變物體之溫度 1°C 所需之熱量，以大卡計。

在研究電阻發熱問題時，時間常數有很大的實用價值。讓我們來說明它的物理意義。

如將等式(3)的分子與分母各乘以 τ_y ，則在分子上我們得到 $c\tau_y$ ——代表積聚在物體裏面的自 0 加熱至 τ_y 之熱量；在分母上的 $A\tau_y$ ——代表在穩定溫升的條件下，物體在一秒鐘內散發至周圍媒質的熱量；其值為 Q ——物體在一秒鐘內所產生的熱。因此，這就很明顯，時間常數是指：假定熱在物體內均勻的產生，並且所產生的熱不向外部散發，物體從周圍媒質溫度加熱至實在穩定溫度為止(由 $\tau_y = \frac{Q}{A}$ 求得)所需的時間。

由等式(3)可見，時間常數與單位時間內物體所產生的熱量無關，與熱容量成正比，而與散熱率成反比。

故，物體之時間常數，由物體及周圍媒質之性能以及物體之形狀與尺寸所決定。

物體之幾何尺寸增加時，其熱容量與體積成比例的增長，而散熱率——則與其表面面積成比例的增長。故時間常數與物體的直線尺寸之一成正比。換句話說，兩件幾何形狀相似而物理性質相同的物體中，其尺寸大者時間常數亦大。

已知 τ_0 、 T 並求得 $\tau_y = \frac{Q}{A}$ 後，假定不同的時間 t ，可以求出相應的溫升 τ ，通過此各點可作成曲綫。

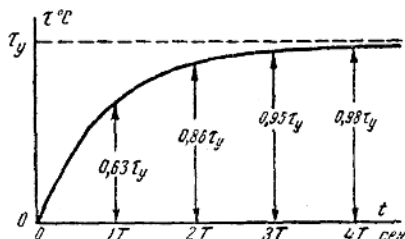


圖 1. 從冷態開始的物體散熱曲綫
(即 $\tau_0 = 0$)

圖 1 引列根據公式 (1) 所計算出來的、常見的情形 $\tau_0 = 0$ ，即在發熱開始時物體與媒質的溫度相同時的發熱曲綫。開始時，物體溫度增加得很快，後來溫升漸緩，並且溫度逐漸接近

穩定後的溫升 τ_y 。理論的穩定溫度將在經過無限長的時間後到達。物體自冷卻狀態開始，經過發熱時間 $4T$ 後，其溫度將祇較穩定值小 2%。實際計算時正確度有 2% 即已足夠，故可假定物體在經過 “ $t = 4T$ ” 的時間後達到其穩定溫度。

根據式(2)：單位時間內物體內所產生之熱量愈多，則該物體之穩

定溫度愈高。圖 2-a 引證同一物體在兩種不同的發熱條件下的發熱曲綫。

讓我們現在來設想，各種不同的物體其散熱率 A 相同，其在單位時間內所產生之熱量亦相同，而其時間常數不同。此等物體之穩定溫升將是一樣的；但是他們的溫度的增長率將不同，如圖 2-6 所示，時間常數小的物體的增長速度將較高。

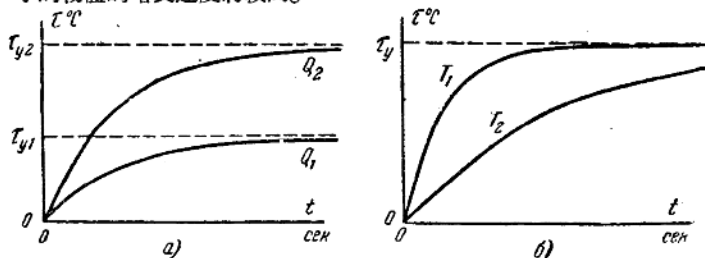


圖 2. 從冷態開始的物體發熱曲綫

a——一個物體，單位時間內所產生之熱量不同時之發熱曲綫

6——二個物體，一樣的 Q 與 A 不同的時間常數之發熱曲綫

圖 2 所引之各發熱曲綫，在物體加熱前已有溫升 τ_0 時，也是同樣正確的。此時，應以此溫升值 τ_0 作為起點，來進行曲綫研究，時間的零點則應相應的向右移動。

發熱狀態的方程式(1)通用於發熱與冷却。如單位時間內所產生之熱量使 $\tau_y > \tau_0$ ，則為加熱；如 $\tau_y < \tau_0$ 則為冷却。不難指出，如果把起始條件與終結條件互換，則冷却曲綫實為發熱曲綫之影射。

電阻內通過電流時，其實在的發熱條件跟研究中的理想物體的發熱條件多少有些不同。其不同點如下：

i) 電阻材料之導熱率並不是無限大，並且因為熱的形成大約均勻

的沿着全部體積發生；而冷卻却祇從表面發生。表面的溫度比體積內部各點的溫度低。在開始發熱時，此項差別很小，但隨着物體溫度的增加，其溫度差亦增加。其結果是，其散發出來的熱跟理想物體所散發出來的要比較低。

ii) 由於周圍媒質的性質不全相同，從電阻各個表面散發出來的熱是不均勻的；電阻各別部分不是同樣的為空氣所洗刷；電阻元件輻射出熱能時又影響着相隣元件。

iii) 電阻的熱容量不是不變的，有一些電阻的熱容量因溫度的增加而增加。

iv) 大家知道，祇有由熱傳導的方法所散出的熱是與溫度差的一次方成正比的；由於對流所散出的熱約與溫度差的 1.25 方成正比；由於輻射所散出的熱則與溫度差的四方成正比。因此，實際散發出來的熱量其因溫度的增加而增長的速度，應當比在研究理想物體發熱時所採用的要快。

v) 由於周圍空氣的溫度，多少終要因為電阻溫度的增加而增大，跟上面研究理想物體的情況比較起來，散熱量就要減少一些。

上列諸因素中就其重要性論，(iv) 與 (v) 是主要的。同時由於周圍媒質溫度增加而引起的散熱情形的變壞，多少可由熱能的輻射與對流所得到的散熱的改進而獲得補償。

由於現象的複雜性，要估計到所有上列影響電阻發熱及在研究理想物體發熱時所省略之諸因素，似乎是不可能的。

實際條件下所發生的誤差是不大的，故理想物體的發熱法則可以用於實在電阻的計算中。

2. 電阻等效連續電流之計算

電阻內電流之特性

電阻的熱計算歸結到，替電阻求得一數值不變的連續電流，此不變的連續電流引起跟實際上變化着的電流一樣的超過周圍媒質的溫升。

讓我們設想一複激電動機，此電動機按附圖 1 所示之二級加速與一級能耗制動的綫路所控制。類似的綫路應用於屬諸循環工作制的曲柄驅動中。

電動機起動時，曲柄開始轉動，並進行工作。曲柄旋轉 360 度後，驅動機構回復至原有位置，並且用能耗制動法來使驅動機構停止工作。經過若干受工藝過程所限制的休息時間之後，循環重複。

已有以曲柄旋轉角度為函數的靜負載轉矩曲綫及電動機特性曲綫（附圖 1），即可按公式附 1 算出並作成以時間為函數的電動機轉矩變化圖。圖 3a 代表曲柄工作一次循環的示例圖解。

公式附（1）

$$t_{xy} = \frac{GD^2}{163} \frac{(n_y - n_x)}{(M_{\partial Hx} - M_{\partial Hy})} \lg \frac{M_{\partial Hx}}{M_{\partial Hy}}$$

此圖可由計算電動機功率得知。

由附圖 1 之綫路可知，在驅動機構工作循環的期間，電阻的各分段內所流過的電流並不完全一樣。圖解 6, B 與 r 表示電阻各段以時間為函數的電流變化特性曲綫。

在起動時電流祇通過電阻 r_1 及 r_2 。電阻內的電流值，利用電動機的自然特性 $M=f(I)$ 把轉矩換成電流後，可以很容易的根據轉矩圖解來求出。

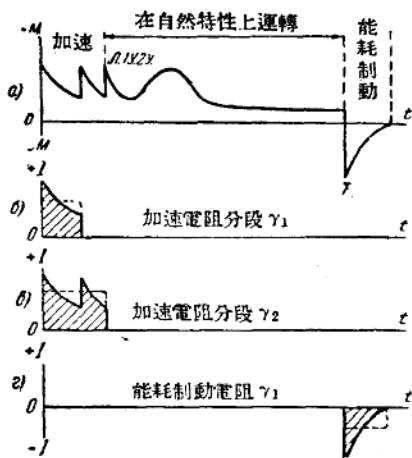
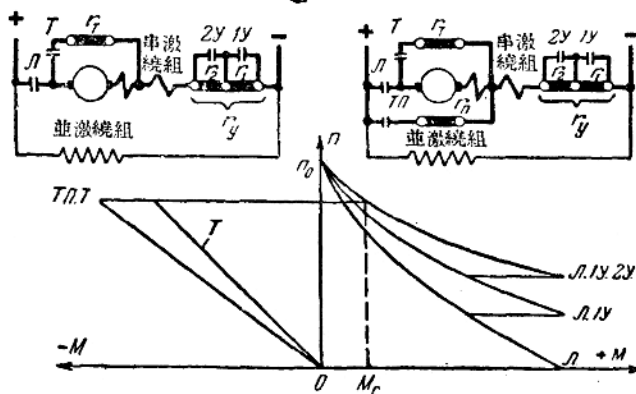


圖3. 符合於附圖1的綫路之電阻內
電流與電動機轉矩圖

在能耗制動時電流
祇流過電阻 r_T 。

首先讓我們把跟時
間變化着的電流，化成
在同樣的工作周期的一
段時間內的不變的過熱
等效電流。通常的情形，
當電流通過電阻各分段
的時間跟他們的时间常
數比較起來很小時，如
果兩種情形都發生同量
的熱，則把變化電流情
形下在工作週期時間內



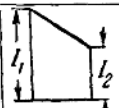
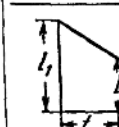
附圖1 複激電動機起動與能耗制動之接綫圖與特性曲綫

的最終溫升，當作與不變電流情形下所達到的最終溫度一樣，在實際計算上是有足夠的精確度的。換句話說，如變化電流的工作週期與時間常數的比例值小，可以把工作週期的一段時間內的過熱等效（即溫度超過周圍媒質）電流 $I_{s,n}$ ，當作大約等於熱等效電流 $I_{s,m}$ 。

在工作週期一段時間內的熱等效電流，可由作成電流平方曲綫，測量曲綫所形成的面積，與把在一個工作週期時間內的面積細分來求得。等效電流亦可根據所給電流時間變化曲綫求得，電流曲綫的各分段可當作直綫。

表 1 介紹給我們把電流曲綫分成一段或二段後，很簡便的引伸出來的求熱等效電流的公式。

表 1 發熱等效電流值

$I_{sm} = \sqrt{\frac{I_1^2 + I_2^2 + I_1 I_2}{3}}$	
$I_{sm} = \sqrt{\frac{(I_1^2 + I_2^2 + I_1 I_2)t_1 + (I_2^2 + I_3^2 + I_2 I_3)t_2}{3(t_1 + t_2)}}$	

根據上列表內易見的規律性，很容易寫出任何段數的熱等效電流的公式。

利用這些公式可把圖 36、B 及 Γ 上之圖解改成虛綫所示之等效長方形。

再，電阻每段之電流可如下述，化成數值不變之等效連續電流。

電阻內電流的規律性的工作制可分類如下：

連續制——是電阻的一種電流工作制。在此工作制下工作週期很長，電阻溫升實際上可達到它的穩定值。

短時制——是電阻的又一種電流工作制。在此工作制下工作週期是短的。電阻溫升實際上不可能達到穩定值，中間休歇的時間又是那樣的長，在它恢復負載以前，溫升實際上又已等於零。

重複-短時制——是電阻的第三種電流工作制。在此工作制下工作週期與休歇時間互相交替，沒有任何一個工作週期或休歇時間內，其電阻之溫升實際上達到穩定值。

間斷工作制——是電阻的第四種電流工作制。在此工作制下電阻連續負荷，但其負荷值週期性的變換着，同時電阻的溫升在任一負荷條件下實際上都不會達到穩定值。

等效連續電流之計算

上引各種工作制中間斷工作制最為適用。故我們將先研究這種工作制，以便將所得結論應用於其他的工作制中，將其他工作制作為間斷工作制的個別情形來處理。

間 斷 工 作 制

圖 4 表明間斷工作制的電流圖解，與所得到的相應的溫升特性曲綫。為便於現象的判斷，溫升的比例尺選擇得使穩定溫升 τ_{y1} 與 τ_{y2} 在數值上跟工作週期的相應電流 I_{p1} 與 I_{p2} 相合。在負荷的間斷工作制的條件下，發熱曲綫與冷卻曲綫按次替換。在若干時間後，在鄰接的各循環內，最高溫升 τ_{max} 也像最低溫升 τ_{min} 一樣開始互等——這將是在間斷工作制下的穩定發熱狀態。

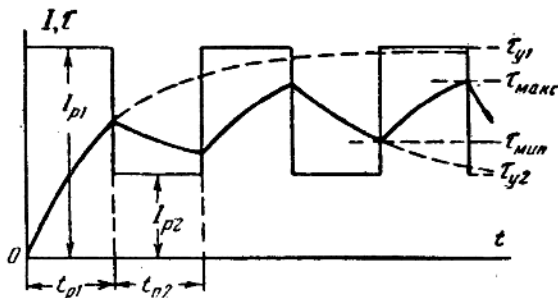


圖 4. 間斷負荷制下之電阻溫升曲線

溫升 τ_{max} 不應超過已知電阻之容許溫升，但不應過小，因為這樣表示沒有經濟的使用電阻與過度開支。由此可知，最經濟的選用電阻是使電阻最高溫升等於容許溫升。

下面讓我們求出最高溫升與穩定溫升間的關係。

在 t_{p1} 的時間內，溫升自 τ_{min} 升至 τ_{max} ，此可由公式 (1) 求出：

$$\tau_{max} = \tau_{y1} (1 - e^{-\frac{t_{p1}}{T}}) + \tau_{min} e^{-\frac{t_{p1}}{T}} \dots\dots\dots (4)$$

在 t_{p2} 的時間內，溫升自 τ_{max} 降至 τ_{min} ，這也同樣可由公式 (1) 求出：

$$\tau_{min} = \tau_{y2} (1 - e^{-\frac{t_{p2}}{T}}) + \tau_{max} e^{-\frac{t_{p2}}{T}} \dots\dots\dots (5)$$

把公式 (5) 內的 τ_{min} 代入公式 (4)，並以突現的形式來表示出 τ_{max} ，我們得到所求的公式如下：

$$\tau_{max} = \frac{\tau_{y1} (1 - e^{-\frac{t_{p1}}{T}}) + \tau_{y2} (e^{-\frac{t_{p1}}{T}} - e^{-\frac{t_{p1} + t_{p2}}{T}})}{1 - e^{-\frac{t_{p1} + t_{p2}}{T}}} \quad (6)$$

爲要根據發熱條件選擇電阻，讓我們求出數值不變之等效連續電流 $I_{s,n}$ ，此電流引起與所給間斷工作制一樣的最高溫升。根據方程式

(2)我們有：

$$\tau_{max} = \frac{I_s^2 r}{A}$$

$$\tau_{y1} = \frac{I_{p1}^2 r}{A}$$

$$\tau_{y2} = \frac{I_{p2}^2 r}{A}$$

把這些數值代入式(6)，簡化並在等式兩旁各加方根，我們就得到在計算上很重要的公式如下：

$$I_{s,n} = \sqrt{\frac{I_{p1}^2 (1 - e^{-\frac{t_{p1}}{T}}) + I_{p2}^2 (e^{-\frac{t_{p1}}{T}} - e^{-\frac{t_{p1}+t_{p2}}{T}})}{1 - e^{-\frac{t_{p1}+t_{p2}}{T}}}} \quad (7)$$

已知時間常數爲 T 的該電阻的 I_{p1} 、 I_{p2} 與 t_{p1} 、 t_{p2} 各值，可按公式(7)求出在間斷工作制下的過熱等效連續電流。

合理的選擇電阻，在於使此電流儘可能的接近電阻容許連續電流。

式(7)給我們足夠精確的計算結果，但是它是比較複雜的，因爲它須要初步選出電阻型式與號數，以期得出時間常數 T 。

在很多的實際情形下，如果循環時間與時間常數之比值甚小時，像求熱等效電流一樣的去求過熱等效電流，可以得到同樣滿意的結果，即

$$I_{s,m} = \sqrt{\frac{I_{p1}^2 t_{p1} + I_{p2}^2 t_{p2}}{t_{p1} + t_{p2}}} \dots\dots\dots (8)$$

按此式計算所得之誤差屬於低估的一面。爲幫助理解起見，讓我們指出，在應用其時間常數爲 T 之鑄鐵電阻片的電阻箱時，在 $t_{p1}=40$

秒, $t_{p2}=160$ 秒, $I_{p2}=0.2 I_{p1}$ 的工作制下, 根據公式 (7) 我們求得 $I_{s,n}=0.505 I_{p1}$; 根據公式 (8) 求得 $I_{s,m}=0.48 I_{p1}$ 。

在實踐中, 間斷工作制發生在電動機上的負荷作週期性的變化時、電動機電力綫路內的常接電阻中, 例如有調速飛輪的剪刀車、壓力機、軋軋機等等的常接電阻段。

重複短時工作制

圖 5 表示重複短時工作制的電流圖解與其相應的溫升曲綫。上引情形的一個循環的時間, 包括一個工作週期 t_p 及一個休歇時間 t_n ; 工作週期與循環時間的比例叫作相對的通電連續時間; 並且用下式來表明:

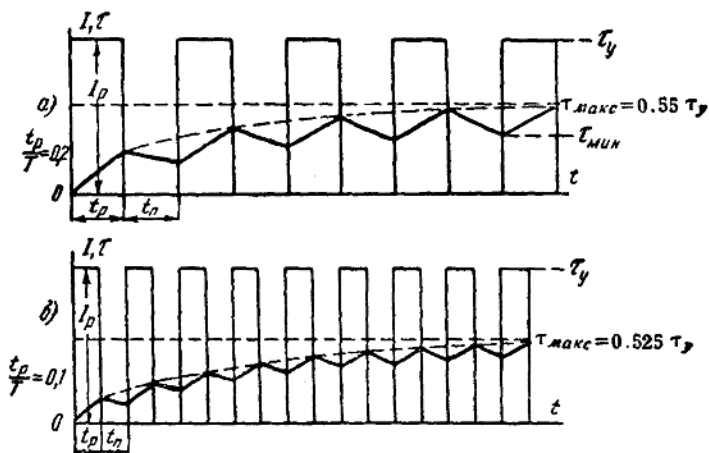


圖 5. 兩個重複短時工作制下的電阻溫升曲綫
兩種工作制有一樣的 I_p 和 $\Pi B=50\%$, 有不同的 $\frac{t_p}{T}$

$$\Pi B = \frac{t_p}{t_p + t_n} \text{ 或 } \Pi B \% = \frac{t_p}{t_p + t_n} 100 \dots\dots\dots (9)$$

由此得出循環時間的表式如下：

$$t_p + t_n = \frac{t_p}{\Pi B}$$

如把工作電流之最小值降至零，則重複短時工作制可當作間斷工作制之個別情形來研究。假定公式(6)內之 $\tau_{y2}=0$ ，用 $t_p + t_n = \frac{t_p}{\Pi B}$ 來替代 $t_{p1} + t_{p2}$ ，並且把 t_{p1} 的數字符號 1 略去，可得在重複短時制下之穩定發熱狀態的最高溫升如下：

$$\tau_{max} = \tau_y \frac{1 - e^{-\frac{t_p}{T}}}{1 - e^{-\frac{t_p}{T \cdot \Pi B}}} \dots\dots\dots (10)$$

由此可知，有某一時間常數 T 之已知電阻的最高溫升，不僅與電流值 I_p 及相對通電連續時間 ΠB 有關，且與工作週期之持續時間 t_p 有涉，此由圖 5 之曲線可明白例解說明之。此項曲線係代表一種電阻，其 I_p 及 ΠB 相同而 t_p 不同的兩種工作制。a 代表 $\frac{t_p}{T} = 0.2$ 的情形；b 代表 $\frac{t_p}{T} = 0.1$ 的情形。

由此等曲線可知，溫度變動大與最高溫升值大則工作週期亦相應的大。

當我們研究 I_p 及 ΠB 為已知的情形下的各種不同的電阻時，我們應當對 $\frac{t_p}{T}$ 的比值發生興趣，因為溫度變動與 t_p 和 T 有關。

溫度變動隨着 $\frac{t_p}{T}$ 的減少而減少，並且溫升趨向某一值。如在式(10)內取在 ΠB 不變及 $\frac{t_p}{T}$ 趨於零的條件下的 τ_{max} 作為界限值，則得