

礦井電氣提昇設備的 物理機械原理

蘇聯 弗·恩·什卡雅爾斯基著

白 振 譽譯

燃料工業出版社

礦井電氣提昇設備的 物理機械原理

蘇聯 弗·恩·什卡雅爾斯基教授著

白 振 譽譯

蘇聯高等教育部審定作為高等學校礦山機電專業教材

燃料工業出版社

內 容 提 要

本書共分兩篇，第一篇敘述提昇及降落的運動學和動力學；第二篇闡明了在各種不同方式提昇中的物理現象。

書內舉例說明了下列各項的計算方法：提昇運動學和動力學的因素，完成提昇的電能消耗量，提昇設備的效率，感應提昇電動機的起動轉子電阻及起動階段自動化的加速繼電器的整定，「發電機-電動機」式傳動裝置中組成變流機組的各機器的功率。

本書可作為採礦大學礦山機電系的教材，並可供礦山機電工程師和設計工程師等參考。

* * *

礦井電氣提昇設備的物理機械原理

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РУДНИЧНОГО ПОДЪЕМА

根據蘇聯國立煤礦技術書籍出版社(УГЛЕТЕХИЗДАТ)
1952年列寧格勒俄文第二版翻譯

蘇聯 Ф. Н. ШКЛЯРСКИЙ 著

白 振 譽 譯

燃料工業出版社出版

廠址：北京東長安街燃料工業部

北京市書刊出版業營業許可證出字第112號

北京市印刷一廠排印 新華書店發行

編輯：梁祖佑 校對：劉露溪 何忠

書號314 * 煤125 * 810 × 1092 1/4 開本 * 11 1/2 印張 * 253 千字 * 定價20,600元

一九五五年一月北京第一版第一次印刷(1—3,000冊)

原 序

本書是分析礦山電氣提昇設備的物理機械性質的。

關於直接工作的機械方面，我們研究了在蘇聯廣泛使用的等半徑纏繩機器。本書除了研究普通罐籠提昇的運動學和動力學以外，對於翻轉盛器提昇及底部卸貨箕斗提昇也用了相當的篇幅加以敘述。於此必須指出，在研究各種工作制時，有時不僅僅把某些公式直接介紹出來，而且把那些在相同的條件下求力和功率所需用的公式重複了幾次，但是還保持着它的一致性。這樣的敘述方法，有可能使相應的提昇制的計算簡單，而可不必於書中各處去尋找需要的公式。

於單獨一章內，研究了普通罐籠於三階段速度圖時降落的運動學和動力學。

關於提昇機的傳動裝置和操縱方面，在提昇的運動學和動力學與兩種提昇電動機的機械特性曲線相符合的基礎上，研究了於各種提昇工作制時提昇過程的物理學。這裏所說的兩種提昇電動機，是指交流的感應電動機和直流的「發電機-電動機」方式的傳動裝置而言。

本書所列數字例題中的計算，是為求得下列各事項的：提昇的運動學和動力學的因素，完成提昇的電能消耗量，提昇設備的效率，感應提昇電動機的起動轉子電阻和起動階段自動化的加速繼電器的整定，以及在「發電機-電動機」式直流傳動裝置中組成變流機組的各機器的功率。

最後應當指出，本書所敘述的問題，係著者在礦山電氣提昇方面多年研究的成果，這些問題主要是根據著者獨創的見解敘述的。

弗·什卡雅爾斯基

目 錄

原 序

第一篇 等纏繩半徑的礦山提昇動力學

第一章 提昇的動力學	4
I. 動力平衡的一般方程式	4
II. 等重鋼絲繩的平衡系統	6
1. 三階段速度圖	6
2. 四階段速度圖	20
A. 底部卸貨箕斗的情形	24
B. 翻轉式提昇盛器的情形	27
3. 在階段 t_0 內有定加速度的五階段速度圖	32
A. 底部卸貨箕斗的情形	35
B. 翻轉式提昇盛器的情形	38
4. 在階段 t_0 內加速度增長的五階段速度圖	47
III. 重平衡鋼絲繩系統	52
1. 兩側為直線的速度圖	53
2. 兩側為凸形的速度圖	61
3. 一側為直線形另側為凸形的速度圖	72
IV. 不平衡系統	79
1. 兩側為直線的速度圖	79
A. 三階段速度圖	79
B. 四階段速度圖	88
B. 階段 t_0 內為定加速度的五階段速度圖	97
2. 兩側為凹形的速度圖	107
A. 三階段速度圖	107
B. 二階段速度圖	120
B. 五階段速度圖	127
3. 一側為直線另側為凹形的速度圖	138
A. 三階段速度圖	138
B. 四階段速度圖	142
B. 五階段速度圖	151

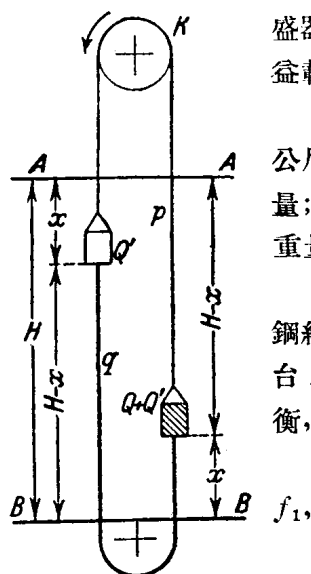
第二章 降落的動力學	156
I. 等重鋼絲繩的平衡系統	157
II. 不平衡系統	160
1. 兩側爲凹形的速度圖	160
2. 一側爲直線他側爲凹形的速度圖	169
第二篇 礦山提昇的電力傳動裝置	
第一章 感應提昇電動機	175
I. 傳動的物理學	175
1. 於電動機制時的提昇能的消耗	175
2. 電氣制動	202
A. 逆電流制動	202
B. 發電機制動	208
B. 動力制動	212
Γ. 電氣制動的使用範圍及完成的方法	212
3. 提昇電動機的複雜的操縱情形	223
II. 起動電阻及時間繼電器整定的計算	239
III. 提昇電動機功率的求法	258
第二章 發電機-電動機方式的直流電傳動裝置	267
I. 傳動裝置的物理學	268
1. 提昇制	268
A. 兩側爲直線的三階段梯形速度圖	269
B. 起動階段爲拋物線的三階段速度圖	284
2. 降落制	286
A. 兩側爲直線的梯形三階段速度圖	287
B. 起動階段爲拋物線的三階段速度圖	297
II. 發電機-電動機方式傳動裝置的機器功率的求法	305
III. 能的消耗	320
第三章 各種傳動裝置的使用範圍和條件	322
I. 感應提昇電動機	322
II. 發電機-電動機方式的直流電傳動裝置 (Γ-Π)	326
III. 帶飛輪的發電機-電動機方式的傳動裝置 (Γ-Π-M)	328
IV. 帶可操縱的水銀整流器的傳動裝置	329
中俄文名詞對照表	331

第一篇 等纏繩半徑的礦山提昇動力學

第一章 提昇的動力學

I. 動力平衡的一般方程式

在第1圖中，表明了簡單的礦山提昇系統。圖中各文字代表的事項如下： K ——主動導輪（繩筒）； H ——裝貨卸貨平台間的全提昇高度； $A-A$ ——上平台（卸貨平台）及 $B-B$ ——下平台（裝貨平台）； x ——從提昇開始至規定的某段時間終了時罐籠（提昇盛器）所經過的距離； Q ——每次提昇的有益載重量； Q' ——每個罐籠的自重。



第1圖 簡單的礦山提昇系統圖

其次， q ——平衡鋼絲繩的單位重量（每公尺的重量）， p ——頭部鋼絲繩的單位重量；根據這樣的表示方法，則得上述二單位重量之差 $\delta = q - p$ 。

假定，卸貨平台 $A-A$ 以上的兩段頭部鋼絲繩（左邊的和右邊的）互相平衡，裝貨平台 $B-B$ 以下的兩段平衡鋼絲繩也互相平衡，則得出提昇系統中的作用力之值如下：

載重罐籠方面（右罐籠）的靜力（張力）

f_1 ,

$$f_1 = Q + Q' + p(H - x) + qx;$$

空罐籠（左邊的）方面的靜力 f_2 ,

$$f_2 = Q' + q(H - x) + px.$$

由上式減去下式，則得載重罐籠方面和空罐籠方面方向相反的靜力之差：

$$f' = f_1 - f_2 = Q - (q - p)(H - 2x)$$

或

$$f' = Q - \delta(H - 2x).$$

在最後一式中，尚未顧及到有害阻力。有害阻力係因鋼絲繩的硬性、軸承摩擦力、在井筒中罐耳對於罐道的摩擦力、以及罐籠運動時的空氣阻力等而形成。此等阻力一般以係數 $k > 1$ 來表示，就是用這個係數來乘有益載重量 Q 。若實行這樣的運算，則得出靜力 F_s 的全值：

$$F_s = kQ - \delta(H - 2x).$$

因在不穩定運動階段中，施作用的還有相應的動力 F_d ，所以為求得電動機所發揮的全力 F ，必須把動力 $F_d = ma$ 加在上面已求得的靜力 F_s 上。在 $F_d = ma$ 式中， m 為提昇設備的所有運動部分對於繩筒圓周的變位質量， a 為加速度（正的或負的）。最後得：

$$F = F_s + F_d$$

或

$$F = kQ - \delta(H - 2x) + ma. \quad (1)$$

因加速度

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2},$$

式中 v ——繩筒的圓速度，等於罐籠運動的速度；

x ——由提昇開始至時間 t 終了時，每個罐籠所經過的途程，

所以，方程式(1)還可以用下列各式的形式表示出來：

$$F = kQ - \delta(H - 2x) + m \frac{dv}{dt}; \quad (1a)$$

$$F = kQ - \delta(H - 2x) + m \frac{d^2x}{dt^2}. \quad (16)$$

式(1a)及式(16)為等纏繩半徑的提昇機動力平衡的一般方程式^①。

① 方程式(1a)和(16)係莫·莫·費道洛夫院士提出，在他的學位論文[礦山調和提昇的理論和計算] (1914) 中，正確地證明了這兩個方程式。我們在上面所引證的，是這些方程式的簡要證明。我們認為對於我們的目的來說，以後以利用提昇機動力平衡方程式的解析法來研究為合理，因為它是表明主動力變化的大小和性質的直接關係的。這種主動力是提昇電動機在不同的系統中，由於提昇的其他因素變化而發揮的。

II. 等重鋼絲繩的平衡系統

1. 三階段速度圖

在我們所研究的系統中， $q=p$ ，所以， $\delta=q-p=0$ 。

此時方程式(1a)的形狀為：

$$F = kQ + m \frac{dv}{dt}. \quad (2)$$

(a) 對於起動階段，於電動機的恆定力 $F_1 > kQ$ 時，由(2)式得出加速度：

$$a_1 = \frac{dv}{dt} = \frac{F_1 - kQ}{m} = \text{const (常數)}. \quad (3)$$

由最後一方程式求 v ，得：

$$v = \frac{F_1 - kQ}{m} t + C.$$

求不定常數 C 的條件，為在提昇開始時，即 $t=0$ 時， $v=0$ ；因此， $C=0$ 。

如是，得：

$$v = \frac{F_1 - kQ}{m} t = a_1 t. \quad (4)$$

速度於 t_1 階段終了時達最大值，設以 V 代表之，則其值如下：

$$V = \frac{F_1 - kQ}{m} t_1 = a_1 t_1. \quad (4a)$$

(4) 式表明，當電動機在起動階段 t_1 內所產生的力 F_1 一定時，提昇盛器運動的速度按直線定律變化，此直線通過座標原點。

對於繩筒軸計算的電動機的功率 P ，在起動階段 t_1 內，可由下式求得：

$$P = F_1 \cdot v$$

或

$$P = F_1 \cdot \frac{F_1 - kQ}{m} t = F_1 \cdot a_1 t. \quad (5)$$

根據最後一式得知，功率 P 按直線定律變化（通過座標原點

的直線), 於 $t=t_1$ 時達最大值:

$$P_1 = F_1 \cdot \frac{F_1 - kQ}{m} t_1 = F_1 \cdot V. \quad (5a)$$

在起動階段內, 消耗於克服靜阻力 (由於有益載重及有害阻力形成的靜阻力) 的功率 P_s , 由下式求得:

$$P_s = kQ \cdot v$$

或
$$P_s = kQ \cdot \frac{F_1 - kQ}{m} t = kQ \cdot a_1 t. \quad (6)$$

(6) 式為代表直線的方程式, 此直線的縱座標小於方程式(5)所表示的直線的各對應的縱座標, 其原因為 $kQ < F_1$ 。於 $t=t_1$ 時, 可得上述功率的最大值 P_{s2} :

$$P_{s2} = kQ \cdot \frac{F_1 - kQ}{m} t_1 = kQ \cdot a_1 t_1. \quad (6a)$$

(6) 對於等速行程階段 t_2 , 速度 $v=V=\text{const}$; 所以加速度 $\frac{dv}{dt}=0$ 。

此時式(2)的形狀為:

$$F_2 = kQ = \text{const}, \quad (7)$$

式中 F_2 為在所研究的階段內, 電動機所發揮的定力。

對於繩筒軸計算的電動機的功率 (此功率等於克服靜阻力所消耗的功率), 其值如下:

$$P_2 = P_{s2} = F_2 \cdot V. \quad (8)$$

(B) 在減速階段內, 假定定力 $F_3 < kQ$ (電動機的減速)。

方程式(2)於此情形下的形狀為:

$$F_3 = kQ + m \frac{dv}{dt}. \quad (9)$$

由最後一式可得減速度之值:

$$a_{m3} = \frac{dv}{dt} = - \frac{kQ - F_3}{m} = \text{const}. \quad (10)$$

(10) 式表明, 減速度 a_{m3} 為負常數。

解方程式(9)以求 v , 得:

$$v = \frac{F_3 - kQ}{m}t + C.$$

假定在減速階段內，運動的方向為由階段 t_3 的終端向其始端，即由 $t=0$ 到 $t=-t_3$ ，此時，最後一式中的不定常數 C ，可根據下一條件求得；即於運動終了時，亦即於 $t=0$ 時， $v=0$ 。所以， $C=0$ 。

則
$$v = \frac{F_3 - kQ}{m}t = -\frac{kQ - F_3}{m}t = a_{m3} \cdot t. \quad (11)$$

根據最後一式，在減速階段內，於恆定的主動力 $F_3 < kQ$ 時，速度按直線定律變化；因上面曾假定，對於階段 t_3 的時間 t 為負，所以所得的速度之值為正。於減速階段開始時，即於 $t=-t_3$ 時，速度 v 之值最大。此最大值以 V 表示之：

$$V = \frac{kQ - F_3}{m}t_3 = -a_{m3}t_3. \quad (11a)$$

由(4a)式和(11a)式所求得的最大速度 V 之值，應彼此相等。

對於繩筒軸計算的電動機功率，在減速階段內按 $P = F_3 \cdot v$ 所代表的直線變化，或

$$P = -F_3 \cdot \frac{kQ - F_3}{m}t = -F_3 \cdot a_{m3}t. \quad (12)$$

於 $t=0$ 時， $P=0$ 。當 $t=-t_3$ 時，功率 P 在我們所研究的這一階段內達到其最大值 P_3 ：

$$P_3 = F_3 \cdot \frac{kQ - F_3}{m}t_3 = F_3 \cdot V. \quad (12a)$$

在減速階段內消耗於克服靜阻力的功率 P_s ，可由下式求得：

$$P_s = kQ \cdot v$$

或

$$P_s = -kQ \cdot \frac{kQ - F_3}{m}t = kQ \cdot a_{m3}t. \quad (13)$$

根據最後一式，正功率 P_s 自 $t=0$ 時的 $P_s=0$ 起，至 $t=-t_3$ 時的 P_{s2} 最大值，按直線變化。而功率 P_{s2} 決定於下式：

$$P_{s2} = kQ \cdot \frac{kQ - F_3}{m}t_3 = -kQ \cdot a_{m3}t_3. \quad (13a)$$

由(6a)及(13a)二式所求得的功率 P_{s2} 之值，應彼此相等。

以上所列各式，表明在全提昇時間 $T = t_1 + t_2 + t_3$ 內，速度、力及功率的變化。第 2 圖就是上列各式的作圖表示法。

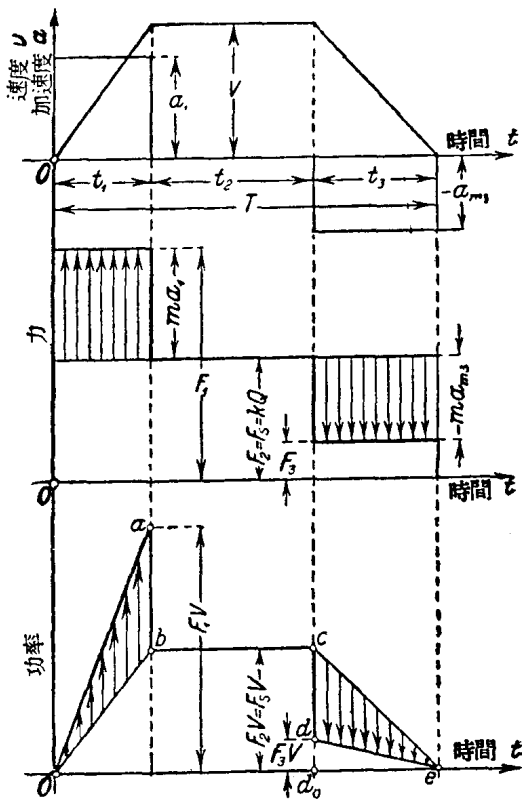
第 2 圖中各文字所代表的事項，與上列各式中之文字所代表的事項相同。慣性力的作用範圍，繪有代表方向的箭頭陰影線。在

功率圖上，面積 $ObceO$ 代表於全部時間 T 內提昇有益重物及克服有害阻力所消耗之功；面積 $OabO$ 代表於起動階段 t_1 內克服慣性力所消耗之能；這種能是在提昇設備的各運動部分中以活力形態積蓄起來的，在減速階段 t_3 內又以功的形態歸還提昇系統，這部分功是用面積 $cdec$ 表示的，如是，面積 $OabO$ 應等於面積 $cdec$ 。慣性力之功在階段 t_3 內幫助電動機完成提昇工作。電動機發揮以面積 d_0de 所表示之能。完成提昇工作所消耗之功，以面積 cd_0ec 表示出來，這個面積等於 $cdec$ 及 d_0de

d_0 二面積之和。曲線 $Oabcde$ 代表對於繩筒軸計算的電動機功率的變化定律。

必須指出，不但在這裏（第 2 圖），而且以下的地方也將採取如下所述的表示各種不同提昇方式的圖示法。

運動的速度除在同一圖形中有方向相反的提昇速度和降落速



第 2 圖 三階段速度圖及與之相對應的加速度圖、力圖和功率圖。用於有普通罐籠且於階段 t_3 內為電動機減速的靜力平衡系統的提昇

度的情形外，從橫座標軸（表示時間的軸）向上截取，此時提昇速度向上截取，降落速度由橫座標軸向下截取。與提昇系統運動方向相反的阻力，例如，在提昇有益重物時的正靜荷重，由橫座標軸向上截取；與運動方向相同的阻力（例如，重物降落時的負靜荷重），由橫座標軸向下截取。與運動方向相同的主動力，例如，電動機於提昇或降落重物時所發揮之力（力矩），從代表時間之軸向上截取；與運動方向相反的主動力。例如，制動器所發揮之力，從橫座標軸

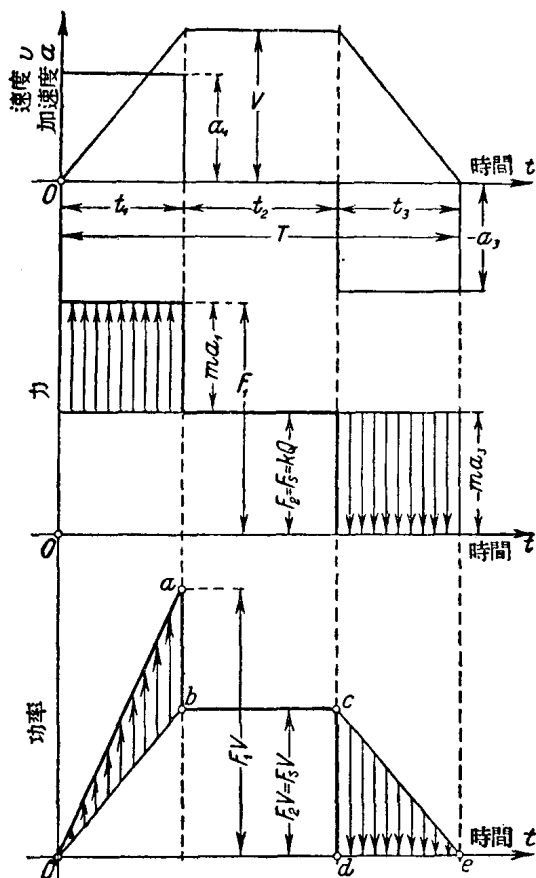
向下截取。使用機械制動器以增加正靜荷重的情形例外，此時制動力亦須與正靜荷重按同一方向，從時間軸向上截取。

設在 (9), (10), (11), (11a), (12), (12a), (13), (13a) 各式中 $F_3=0$ ，則可得所謂「自由運動」情形各因素的相應值。自由運動是以無主動力為特徵的（第3圖）。其中(10)式於此情形時的形狀為：

$$a_3 = -\frac{kQ}{m}, \quad (10a)$$

式中 a_3 為自由運動時的減速度。

必須注意，在此種情形下，隨着階段 t_3 內減速度之變化



第3圖 三階段速度圖及與之相對應的加速度圖、力圖和功率圖。用於有普通繩籠且於階段 t_2 內為自由運動制的靜力平衡提昇系統

(增大), 且運動的全部時間 T 及最大速度 V 之值不變, 如與前面敘述過的電動機減速情形比較, 則得階段 t_3 相對應地減小及階段 t_1 相對應地增大; 因此起動的加速度減小, 所以階段 t_1 終了時的最大功率也隨之減小^①。

在起動階段積蓄起來的並且在功率圖上是以面積 $OabO$ (第3圖) 所表示的活力, 完全與在階段 t_3 內完成提昇所必需之能相等 (這部分能是用面積 $cdcc$ 表示的), 如是, 面積 $OabO$ 與面積 $cdcc$ 相等。

對於繩筒軸計算的電動機功率, 在全提昇時間內按曲線 $Oabcd$ 變化。

第3圖所示, 為代表在減速階段內自由運動的提昇的各圖形。

最後, 假定在 (9), (10), (11), (11a), (12), (12a), (13), (13a) 各式中 $F_3 = -F_{b3}$ (F_{b3} 為在階段 t_3 內的恆定的制動力), 則得制動制各相應因素之值。制動制的特點是無電動機所發揮之力, 而有制動力。其中 (10) 式於此情形下的形狀為:

$$a_{b3} = - \frac{kQ + F_{b3}}{m}, \quad (106)$$

式中 a_{b3} ——制動制的減速度^②。

在減速階段內, 有使減速度的絕對值增加的制動力的作用時, 如與自由運動的情形比較, 在全部時間 T 及最大速度 V 之值不變的條件下階段 t_3 減小而階段 t_1 增大; 因之起動加速度及階段 t_1 終了時的最大功率減小。

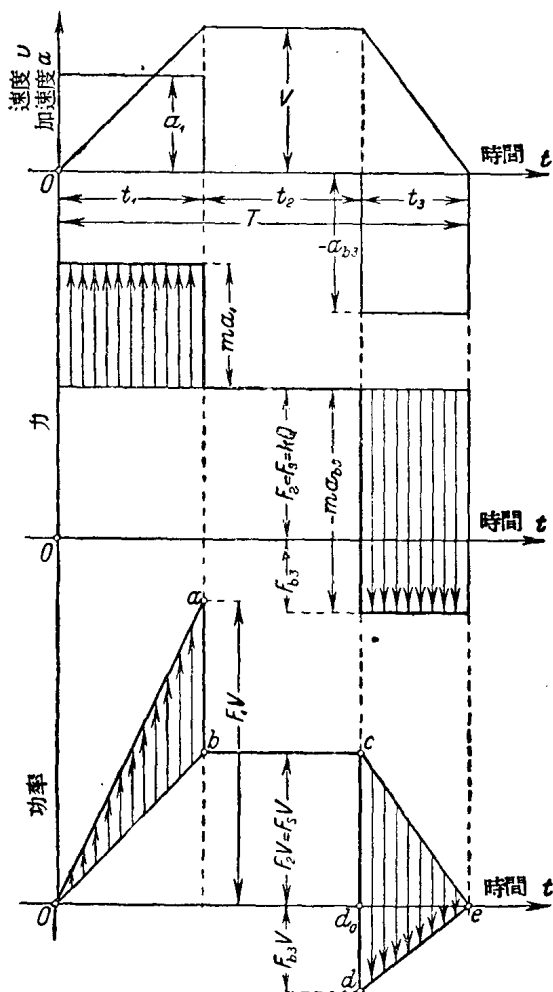
第4圖所示, 為在減速階段內有恆定的制動力 F_{b3} 作用時提昇的各圖形。

必須指出, 於此情形時, 在起動階段 t_1 內所積蓄的及在功率圖上以面積 $OabO$ 所代表的活力, 大於在階段 t_3 內完成提昇所必需的、以面積 d_0ced_0 所代表之能。二者之差等於在制動器內所損失的、

① 關於運動的各階段的確定, 以及由於減速度之變化提昇運動學上的其他各因素的求法, 可參考本書著者的著作 [礦山提昇速度及加速度的選擇問題], 1922。

② 以後, 不論停車階段的情形如何, 減速度全用 a_3 來表示。

以面積 $d_0 d e d_0$ 所表示的一部分能。代表慣性力之功的面積 $O a b O$ 及 $c d e c$ (繪有細陰影線者)相等。



第4圖 三階段速度圖及與之相對應的加速度圖、力圖和功率圖。用於有普通繩籠且於階段 t_3 內為制動減速的靜力平衡提昇系統

由以上所述可知，當電動機及制動器在提昇的各相應階段內發揮一定之力時，與減速階段自由運動情形相同，對於靜力平衡系

統（等重的頭部鋼絲繩及平衡鋼絲繩）而言，速度的變化是嚴格地遵守着梯形定律的。

爲求得三階段速度圖（第 2、3、4 圖）的各因素，必須已知下列各項的值：提昇高度 H ，提昇全部時間 T ，全速度 V 及加速度 a_1 （或減速度 a_3 ）。

現在所研究的梯形速度圖的全面積代表提昇的全高度 H ；同樣，速度圖中 t_1 、 t_2 、 t_3 各階段的面積，相對應地代表於運動的各階段中所通過的提昇高度 h_1 、 h_2 、 h_3 。

對於第 2、第 3、第 4 圖中之速度圖加以研究後，不難獲得速度圖中各項之間的關係。

$$\text{起動階段} \quad t_1 = \frac{V}{a_1}. \quad (14)$$

在階段 t_1 內所經過的途程

$$h_1 = \frac{1}{2} V t_1. \quad (15)$$

根據上面的敘述，提昇高度 H 等於梯形的面積，所以可以寫出下列的等式：

$$H = \frac{T + t_3}{2} \cdot V;$$

由是得：

$$t_2 = \frac{2H}{V} - T. \quad (16)$$

在階段 t_2 內所經過的途程 h_2 ，

$$h_2 = V t_2, \quad (17)$$

$$t_3 = T - (t_1 + t_2). \quad (18)$$

在階段 t_3 內所經過的途程 h_3 ，

$$h_3 = \frac{1}{2} V t_3. \quad (19)$$

減速度

$$a_3 = \frac{V}{t_3}. \quad (20)$$

校對錯誤，可用下式：

$$H = h_1 + h_2 + h_3. \quad (21)$$

例題 1.

根據下列各已知事項，計算普通罐籠提昇的要素：每次提昇的有益重量 $Q = 2200$ 公斤；提昇高度 $H = 300$ 公尺^①，各運動部分的變位質量 $m = 2500$ 公斤·公尺⁻¹·秒²；提昇的全速度 $V = 8$ 公尺/秒；提昇的全部時間 $T = 50$ 秒；係數 $k = 1.2$ 。

設起動加速度 $a_1 = 0.8$ 公尺/秒²。

根據(14)式

$$t_1 = \frac{8}{0.8} = 10 \text{ 秒}.$$

根據(15)式

$$h_1 = \frac{1}{2} \times 8 \times 10 = 40 \text{ 公尺}.$$

根據(16)式

$$t_2 = \frac{2 \times 300}{8} - 50 = 25 \text{ 秒}.$$

根據(17)式

$$h_2 = 8 \times 25 = 200 \text{ 公尺}.$$

根據(18)式

$$t_3 = 50 - (10 + 25) = 15 \text{ 秒}.$$

根據(19)式

① 應當指出，當深度小於 400 公尺時，廣泛採用不平衡系統之提昇，但個別情形，亦有使用靜力平衡系統者。例如，當想要使用比在不平衡系統容量更小的電動機，而欲提昇設備的效率更大時，則可採用靜力平衡系統。在這裏和在以下的地方，於不同的題中採取相同的設定事項，就有可能在同一條件下，就這些因素對於提昇的經濟方面的影響（如對提昇電動機容量、能的消耗量、設備的效率等的影響），比較不同的提昇系統，並比較因完成方法各異而獲得的不同的速度圖。對於不同的提昇系統和不同的速度圖，採用不同的設定事項，會得到難於比較的結果。井筒深度和額及到提昇盛器型別的實際不同的提昇時間，對於提昇系統的關係問題，詳細地在格·莫·葉蘭奇科教授的學位論文「礦山提昇設備的平衡原理」（第二冊，1951）中說明了。