

新電氣叢書(三)

工廠動力與電動機選定與運轉技術

■ 平野喜市著 □ 林子銘譯



序 言

在學校，雖有實習課程，但一般以理論為中心之學課為主，學業完成，進入社會之後，即以實際工作為主，此為學校與企業（社會環境）之相異所致，在學校所學習之理論與在企業所遭遇之實際工作，猶如車輛之兩輪，關聯密切，無法分開，若過分偏重理論而無實際具體事象之結合，其理論不能活用，又實際工作之結果，如無理論考證，則應用範圍受到限制，無法有效活用。

理論與實際之兩個車輪，互相配合，平衡轉動，方可使車子行駛，因此，技術人員進入社會之後，仍然需要學習，繼續進修，俾能結合理論與實際，相輔而行，始能領會真正實用之技術。

本叢書之企劃目的為提供科技知識獻給擔任現場工作之技術人員並冀求能做為良益之助言者。本書基此原則編輯，首先在第1篇說明力學之基本事項以可計算工廠動力之負載側所要馬力，在第2篇解述負載與電動機之主要特性及其適用，第3篇就實際負載之所要動力，則電動機輸出之決定加以研討，第4篇就電動機之控制性能與對各負載之適用加以說明，第5篇解說實際運轉，各篇、各節為遵循企劃宗旨，力求精簡，或因篇幅所限，或因筆者能力所限，遺漏錯誤在所難免，尚祈讀者不吝賜教斧正。

目 次

I 基本篇

1. 展望工廠動力之最近傾向·····	2
2. 對於電動機，何謂負荷·····	4
3. 各種負荷與運轉力學·····	8
4. 摩擦負荷與重力負荷之機械動力·····	18
5. 流體負荷與其機械動力·····	22

II 各種負荷之特性與電動機之特性

6. 半調查負荷特性 I (恒定轉矩特性之負荷) ·····	26
7. 調查負荷特性 II (遞減轉矩特性之負荷) ·····	28
8. 調查負荷特性 III (恒定輸出特性之負荷) ·····	30
9. 負荷之迴轉速度與所要動力·····	32
10. 恒定轉矩特性之電動機與其通用·····	36
11. 恒定輸出特性之電動機與其適用·····	41
12. 電動機之速度特性與其種類·····	44
13. 電動機之並聯特性與串聯特性·····	46
14. 負荷之要求轉矩與電動機之發生轉矩·····	49
因何選定此種電動機 I (種類之選定) ·····	52

III 適應負荷之電動機容量選定

16. 電動機之熱特性與熱時常數·····	57
-----------------------	----

17. 電動機額定之種類與負荷使用之種類	61
18. 以不同時間額定使用時之輸出求算方法	65
19. 何謂電動機之負荷時間率 (% ED)	69
20. 電動機之溫度上升與其容許值及壽命	73
21. 負荷之尖峯轉矩與電動機之最大轉矩及飛輪效果	75
22. 從負荷轉矩求出電動機輸出之方法	78
23. 從溫度上升求出電動機等值連續輸出之方法	82
24. 負荷驅動之實容量與電動機之設備容量	85
25. 因何選定此種電動機 II (容量之決定)	88

IV 電動機之控制與其適用

26. 機械裝置之選定方法	92
27. 調查直流電動機之控制性能	94
28. 調查交流可變速電動機之控制特性	100
29. 送風機之起動特性與電動機之起動	111
30. 如何實施送風機之速度控制	116
31. 送風機用電動機與其選定方法	118
32. 抽水機用電動機與其選定方法	120
33. 起重機用電動機與其選定方法	122
34. 大容量壓縮機驅動用之感應電動機與同步電動機之適用領域	127
35. 依使用環境之電動機型式選定方法 I	130
36. 依使用環境之電動機型式選定方法 II	132
37. 電動機絕緣種別之選定方法	139
38. 各種動力傳導方法	143
39. 效率・力率下降之要因與其對策	147
40. 適應負荷之電動機規格	151

V 運轉・保養之實際作業

41. 電動機起動電流被限制時之起動方法與其選定	159
42. 任何場合限制全電壓起動	162
43. 電動機穩定運轉狀態之必要條件	167
44. 電動機最終溫度上升之推定	169
45. 電動機空間加熱器之功用與其容量	171
46. 電動機之停止制動與運轉制動	174
47. 重慣性負荷之起動法與電動機之溫度上升	176
48. 要求負轉矩時之控制方法	181
49. 故障與對策 I (電動機在低速度領域之控制不良)	184
50. 故障與對策 II (關於軸承之故障)	189
51. 故障與對策 III (氧體溫度，壓力變化與送風機用電動機之過熱)	193

I 基本篇

1. 展望工廠動力之最近傾向

產業尙未近代化以前，電動機祇以供給動力爲目的，但現在不僅如此，隨着產業構造之近代化，爲應付製造設備之品質提高，高精度，高速化等設備之高度化，電動機之應用技術有長足進步，則(1)關於電動機本身，因材料進步，技術解析等之性能，信賴性提高，對於同一容量之小型化，採用閘流體之新機種開發（例如閘流體馬達），大容量機之製造等，對於各種產業生產設備之近代化，確立可充分配合之態勢，(2)使用矽整流器，閘流體，無接點電驛，合理電路等之半導體應用技術，使可實施運轉控制之自動化與中央集中管理，(3)因閘流體應用技術之進步，從來在一定頻率之下，以電壓，電流之變化控制電動機，已漸轉變爲可變頻率之控制，(4)計算機控制技術適用於工作機械之數值控制，又在製鐵工業之軋壓作業導入自動厚度控制等，電動力與控制技術爲一體之所謂動力原子技術，日新月異，令人刮目相看。

電動機在礦業，鐵鋼業，石油工業，石油化學工業，化學肥料工業，纖維工業，造紙工業，印刷工業，窯業，機械工業，自來水，瓦斯工業，冷凍工業，船舶，橡膠工業，木材工業，食品工業爲負荷機械設備，直接參與製造，又爲間接作業動力用之抽水機，送風機，壓縮機，裝卸機械等動力源使用，此外，非爲工廠動力者尙有高樓大廈之動力設備，農漁業之動力化，以及使用小型電動機之家用電器類，電動機之應用技術涉及範圍極爲廣泛，電動機以外，尙有油壓裝置，

1. 展望工廠動力之最近傾向 3

柴油機，渦輪等利用爲電力源，但其用途有限，工廠動力殆由電動機驅動，今後產業之近代化，將更朝向動力電子技術化邁進。

2. 對於電動機，何謂負荷

不需要動力可生產者料應絕無，又為生產物品所需周邊之作業機械，例如搬運，裝卸機械，抽水機，送風機，空氣壓縮機等之輔助動力設備，均為電動機之負荷，此等負荷所要求之特性，依其種類不一，則需要一定速度者，被要求可變速度者，運轉中時常被要求負之轉矩者，需要一定力矩者，被要求比例迴轉速度 2 乘值之轉矩者等，如此負荷之特性繁多，在各種工業應用之負荷設備甚多，茲就供給動力能量之電動機負荷設備，廣泛研討以了解全般知識。

(1) 礦業在煤礦使用之負荷設備種類依礦山規模有多種多樣，主要負荷設備有坑內外之搬運機械（輸送機，斗式提升機，捲揚機，起重機，電車等），抽水泵及通風設備等，捲揚機使用繞線型感應電動機，其他負荷者使用籠型感應電動機。

(2) 鐵鋼業鐵鋼業為電力消耗最多之產業，為電動機之負荷以軋軋設備最多，尚有氧氣之壓送設備，各種抽水泵，送風機，原料饋送用輸送機，裝卸輸送用起重機等，此中以軋軋設備為主要電動機負荷設備，其負荷特性為尖峯負荷大，最大轉矩被要求額定轉矩之 200~300%，使用感應電動機時，設有飛輪與滑動調整器。

(3) 石油工業使用電動機之部門，主要為工作輔機之驅動用，有如下種類。

(a) 工作抽水機用多使用數百 kW 以下之防爆型籠型感應電動機。

(b) 裝料抽水機用 因起動頻度高，須充分考慮使用條件。

(c) 工作壓縮機用 數百 kW 程度者使用籠型感應電動機，500 kW 以上者多使用同步電動機，氬氣壓縮機之驅動用為內壓防爆型。

(d) 給水設備用 工作用冷却抽送排放之抽水機或回收冷却水之冷水塔送風等，使用中小容量之電動機。

(4) 石油化學工業 此為利用石油或天然氣為原料之化學工業，主要為各種空氣壓縮機，抽水機，混合機等之動力，容量從數千 kW 之高速機或低速機（往復動壓縮機）以及小容量之低壓電動機，設有化學工業機器之處所，原則上有爆炸性瓦斯存在，必須考慮電動機之防爆構造，又因為屋外設置，對於電動機噪音之限制亦須十分注意。

(5) 化學肥料工業 氮、氨肥料之製造及氧氣工廠使用之電動力，主要為大型低速之往復動壓縮機（16~24 極）及高速渦輪壓縮機（2 機或 4 極）驅動用之電動機，氨肥料製造設備時須用加強防爆構造，又液氮工業，製碱工業以數百 kW 以下之中小容量電動機為主體，氯乙烯之製造過程要求防爆構造，又在製碱工業有時需要防蝕處理構造。

(6) 纖維工業 在紡織工廠之精紡及梳板（card）之使用台數多，因佔有紡織工廠消耗電力之 40~50%，電動機之效率，力率須佳，在化纖工廠使用台數最多者為電位馬達（pot-motor），容量小為 50~150W，在 1 個工廠內有數千~數萬台，因迴轉數高達 7000~10000 rpm（頻率為 100~170Hz），須堅牢且效率，力率佳，此外，在織布及染色整理備有多數紡織機用電動機，又印花機，壓光滾輪用電動機須可控制迴轉速度。

(7) 造紙工業 從剝皮機（drum barker），切屑機（chipper），磨碎機（grainder），以至抄紙機之所有工程，均依電動機之動力及控制，其中抄紙機有單一電動機式及多數電動機式，均以特殊方式控制速度。

6 工廠動力與電動機之選定運轉技術

(8) 印刷工業 印刷機由給紙部，印刷部，摺疊部形成，一般在版胴迴轉數500rpm之印刷機，印刷部之所要馬力為20kW，摺疊部需要15kW，印刷部與摺疊部之組合依出版頁數及出版冊數而定，使用繞線型感應電動機或直流電動機，此外尚有絡車迴轉用，調整滾輪用之電動機及輸送帶等。

(9) 窯業 水泥製造設備所用之電動機負荷設備，有粗碎用碎石機及細碎用原料磨碎機所成之原料粉碎系統，依旋轉窯燒成原料製成熟料（clinker）之燒成系統，微粉碎製成水泥之加工磨碎機系統，磨碎機使用1000kW以上之大容量交流電動機，旋轉窯使用可控制速度之直流電動機或繞線型感應電動機，此外尚有排風機，熟料冷卻機，運搬輸送用之饋送機，輸送帶等，使用電動機之台數將達500台。

(10) 機械工業 刀具之推送，工件之饋送，供給潤滑油，驅動油壓泵等之動力，使用數台電動機，此等電動機須為小型輕量且與機械配合，震動，噪音少，可耐高頻度之起動，緊急停止，倒轉，機械壓床為大容量時使用附裝飛輪之繞線型感應電動機，如為小容量則用籠型電動機。

(11) 自來水 抽水，送水，加壓以及過濾層之洗滌等所用抽水機者多為籠型感應電動機，但有時亦使用繞線型電動機。

(12) 瓦斯工業 在瓦斯工廠之電動力主要為壓送機關係，以感應電動機為主體，大容量低速機時使用同步電動機，又在送風機，排風機等為控制風量，風壓，被要求廣範圍之速度控制時，使用Leonard控制或依感應電動機二次激磁之Kraemer方式或Scherbius方式。

(13) 冷凍工業 冷凍方法廣泛採用壓縮式，有小容量之往復冷凍機與適合大容量之渦輪冷凍機，在電冰箱，製冰，空氣調節等各種產業廣泛使用，主要為籠型電動機，大容量時使用繞線型電動機。

(14) 船舶 使用於船舶之負荷設備，在機關室關係為驅動推進器（螺旋槳）之主機（蒸汽渦輪或柴油機）所需輔機類，渦輪時有給水

泵，循環水泵，冷凝水泵，潤滑油泵及操舵機等之輔機，其次在航海關係有裝卸用絞車，揚錨機，繫船機，起重機，升降機等，多需要速度控制。

此外尚有橡膠工業，製材工業，食品工業，橡膠工業之壓光滾輪用者被要求速度控制，採用Leonard方式，製材用者使用時間額定之電動機，如需要緊急停止時，使用附有制動器之電動機，製糖工廠使用之電動機須為耐吸濕性，使用全密閉型。

3. 各種負荷與運轉力學

一般由電動機傳達之動力，如線性馬達給予直線運動之特殊動力發生方式除外，均依迴轉運動供給動力。

例如捲揚機，起重機，升降機，輸送帶，其最終目的之機械側驅動方式雖為依賴直線運動，但從電動機傳至負荷之動力，均為迴轉運動，則利用索輪或其他變換為直線運動。現在之電化鐵路，電動機之迴轉動力傳到車輪，車輪使電車循沿軌道為直線運動，抽水機，送風機或其他迴轉機械，係將電動機之迴轉驅動力直接利用為迴轉動力，此時之動力傳達裝置可利用齒輪，皮帶等增減速度簡易傳達動力。

如此，依負荷種類分別將電動機之迴轉動力變換為直線運動或往復運動或仍然以迴轉運動使為工作，又此等機械係依其工作性質不同，機械裝置之種類相異。

如前述，機械驅動動力之給予方法及移動或加工對象之形態，負荷之種類亦各色各樣，為了解負荷側之所要動力或特性，必須就此運動力學加以計算，茲研討如次：

〔1〕 直線運動之速度與加速度，力，工作與動力。

（a）速度與加速度 直線運動之物體速度 v [m/s] 係為移動距離 S [m] 以移動所需時間 t [s] 相除者。

$$v = \frac{S}{t} \text{ [m/s]}, \quad \text{一般爲} \quad v = \frac{dS}{dt} \quad (3 \cdot 1)$$

表示，又加速度 a [m/s²] 為速度 v 對於時間之變化，故為

$$a = \frac{v}{t} \text{ [m/s}^2\text{]}, \text{ 而一般爲 } a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2S}{dt^2} \quad (3 \cdot 2)$$

(b) 力 物體(質量 m [kg]) 加上力 F [N]，則在其物體發生加力方向之加速度 a [m/s²]，此加速度之大小與加力之大小成比例，而與物體之質量成反比例(運動之第二定律)，如以公式表示，則為

$$F = Ma, \quad a = F/M \quad (3 \cdot 3)$$

以一定加速度 a 使物體為直線運動時，質量 M 愈大，所加之力須愈大，則此質量與物體慣性之大小有關。

(c) 工作與動力 物體加上力 F ，物體往其方向移動 S [m]，則此時加上之力 F 完成 FS 之工作，此工作為 W ，則

$$W = FS \text{ [Nm]} = FS \text{ [J]} \quad \text{〔註〕 } 1 \text{ Nm} = 1 \text{ J}$$

其次，動力為每單位時間之工作，此為 P 則

$$P = \frac{W}{t} = \frac{FS}{t} = Fv \text{ [Nm/s]} (= \text{J/s} = \text{W}) \quad (3 \cdot 4)$$

〔2〕迴轉運動之角速度與角加速度，轉矩，工作與動力。

(a) 角速度與角加速度 迴轉運動時之迴轉速度以角速度 ω [rad/s] 表示，此相當於直線運動時之速度 $v = S/t$ ，迴轉運動時使用對於單位時間之迴轉角 θ [rad] 以次式表示。

$$\omega = \frac{\theta}{t} \text{ [rad/s]}, \text{ 而一般爲 } \omega = \frac{d\theta}{dt}$$

10 工廠動力與電動機之選定運轉技術

又表示迴轉速度增加比率之角加速度 a_{ω} $[\text{rad/s}^2]$ ，係以角速度對於時間之變化表示

$$a_{\omega} = \frac{\omega}{t} [\text{rad/s}^2] \quad \text{而一般爲} \quad a_{\omega} = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\theta}{dt^2}$$

〔b〕轉矩 如圖 3.1 表示，電動機軸裝上長度 V $[\text{m}]$ 之臂，其尖端鉤掛彈簧秤，電壓加上電動機，則發生往箭頭方向迴轉之力，可以彈簧秤測定其力量，表示電動機之迴轉動力，可以彈簧秤測定之力 F $[\text{N}]$ 與臂之長度 r $[\text{m}]$ 之乘積（ $\text{N} \cdot \text{m}$ 或 $\text{kg} \cdot \text{m}$ ）表示，此稱為轉矩（torque）。

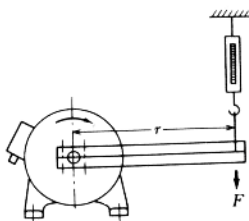


圖 3.1 轉矩之測定

$$T = Fr [\text{N} \cdot \text{m}] = \frac{1}{9.8} Fr [\text{kg} \cdot \text{m}]$$

（c）工作與動力 電動機發生轉矩 T $[\text{Nm}]$ 為迴轉角 θ $[\text{rad}]$ 迴轉，則此時之工作 W 為 $W = T\theta$ $[\text{J}]$ ，又此時之動力 P 為單位時間完成之工作，故為

$$P = \frac{T\theta}{t} = T\omega \text{ (W)} \quad (3.5)$$

電動機 1 分鐘之迴轉速度為 N ，因 $\omega = 2\pi N/60$ ，故為

$$P = \frac{2\pi}{60} NT \text{ (W)}$$

轉矩 T 以 $\text{kg} \cdot \text{m}$ 表示，則為 $1 \text{ Nm} = 1/9.8 \text{ kg} \cdot \text{m}$

$$P = \frac{1}{9.8} \frac{2\pi}{60} NT = 1.027 NT \text{ (W)} \quad (3.6)$$

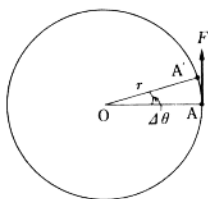
〔3〕 轉矩與慣性力矩

圖 3.2 為電動機之轉子，力 F 作用於 A 點之線圈為微小角度 $\Delta\theta$ 之迴轉，移動至 A' 點，則完成之工作 W 為

$$W = F \cdot \overline{AA'} = F \widehat{AA'} = F \cdot r \cdot \Delta\theta = T \Delta\theta$$

因為此為角度 θ 迴轉之角度為

$$W = T \theta$$



其次，轉子以角速度 ω_0 迴轉時，加上轉矩 T ，祇為角度 θ 之迴轉為角速度 ω 圖 3.2 作用於轉子之轉矩，則此時之工作為轉子所得運動之能量增加，慣性力矩為 I 。

$$T\theta = \frac{1}{2} I (\omega^2 - \omega_0^2)$$

角加速度為 a_ω ，則為 $(\omega^2 - \omega_0^2) = 2 a_\omega \theta$ (參照〔註〕)

$$T\theta = \frac{1}{2} I \cdot 2 a_\omega \theta = I a_\omega \theta, \quad \therefore T = I a_\omega = I \frac{d\omega}{dt} \text{ (Nm)} \quad (3.7)$$

〔註〕 最初以 ω_0 角速度迴轉，因角加速度 a_ω 在 t 秒後為角速度 ω ，則為 $\omega = \omega_0 + a_\omega t$ ，又在某時間中迴轉之角度 θ 可以平均角速度與時間之相乘積表示，利用 ω_0 ， ω ， a_ω ，與時間 t 之間之迴轉角為 θ ，則

12 工廠動力與電動機之選定運轉技術

$$\theta = \{ \omega_0 + (\omega_0 + a_\omega t) \} \times t / 2 = \omega_0 t + a_\omega t^2 / 2$$

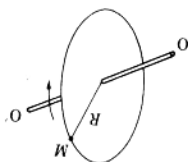
由上面 2 式 $t = (\omega - \omega_0) / a_\omega$

$$\begin{aligned} \theta &= \omega_0 \times \{ (\omega - \omega_0) / a_\omega \} + a_\omega \times \{ (\omega - \omega_0) / a_\omega \}^2 \times 1 / 2 \\ &= (\omega^2 - \omega_0^2) \times / 2 a_\omega, \quad \therefore \omega^2 - \omega_0^2 = 2 a_\omega \theta, \end{aligned}$$

〔4〕 慣性力矩與飛輪效果

如圖 3·3 所示，從軸 OO' 距離 R [m] 處有質量 M [kg] 之質點，在軸之周邊以角速度 ω [rad/s] 迴轉時，此質點具有之運動能量 W [J] 為

$$W = \frac{1}{2} MR^2 \cdot \omega^2 \text{ [J]} \quad (3.8)$$



設質量 M [kg] 之物體重量為 G [kg]，則為 $M = G$ ，又迴轉半徑 R 以直徑 D 表示，則 $D = 2R$ ，故 (3.8) 式可如次。

圖 3·3 慣性力矩

$$W = \frac{1}{2} G \cdot \left(\frac{D}{2} \right)^2 \cdot \omega^2 = GD^2 \cdot \frac{\omega^2}{8} \text{ [J]} \quad (3.9)$$

又迴轉速度為 N [rpm]，則為 $\omega = 2\pi N / 60$ ，將此代入 (3.9) 式

$$W = GD^2 \cdot \frac{1}{8} \cdot \left(\frac{2\pi N}{60} \right)^2 = \frac{GD^2 N^2}{720} \text{ [J]} \quad (3.10)$$

(3.8) 式之 MR^2 為慣性力矩， GD^2 為飛輪效果，其單位為