


1-1 電工機械之分類與應用

① 依電源性質

- 直流電源
 - 直流發電機: 電樞(AC) → 換向器 → 負載(DC)
 - 直流電動機: 電源(DC) → 換向器 → 電樞(AC)
- 交流電源
 - 變壓器: AC ↔ AC
 - 感應電機: 外加交流電源
 - 同步電機: 外加交流電源, 另需直流激磁(如同步馬達)

 重點應用: 電動汽車趨勢 → 永磁式同步馬達。

② 依運轉形式

- 旋轉電機: 直流電機、感應電機、同步電機
 - 靜止電機: 變壓器
 - 特殊電機: 線性電動機(直線運動)
-

③ 依轉子功能

- 旋轉電樞式(轉電式): 轉子是電樞, 定子為磁場 → 直流電機
 - 旋轉磁場式(轉磁式): 轉子是磁場, 定子為電樞 → 交流電機
 - 感應式: 轉子為感應子, 定子同時有磁場與電樞繞組 → 高頻交流發電機
-

④ 依能量轉換

- 發電機 (Generator): 機械能 → 電能
 - 電動機 (Motor): 電能 → 機械能
 - 變壓器 (Transformer): 電能 → 電能(升壓/降壓)
-

⑤ 依電流性質

- 整流器: AC → DC
- 變頻器: AC → DC → AC
- 變流器: DC → AC(如太陽能逆變器)

等級 允許溫度上限

Y	90°C
A	105°C
E	120°C
B	130°C
F	155°C
H	180°C
C	>180°C

標準環境溫度以 40°C 為基準。⑦ 國家與國際標準

- CNS(台灣)、JIS(日本)、VDE(德國)、BS(英國)、ANSI(美國)、NEMA(美國電器製造協會)、ISO、IEC(國際電工委員會)
-

⑧ 電工機械銘牌資訊

- 直流發電機: 額定電壓、電流、容量(kW)、轉速、絕緣等級、效率
- 直流電動機: 額定電壓、電流、容量(hp/kW)、滿載轉速、效率
- 變壓器: 額定電壓、容量(kVA)、頻率、相數、匝數比、接線方式

- 交流發電機/電動機：電壓、電流、容量(kVA)、轉速、極數、效率、相數
-

1-2 電工機械相關的磁學公式與理論

① 基礎磁學公式

- 磁通量： Φ (單位 Wb)
 - 磁通密度： $B = \Phi / A$ (單位 Tesla = Wb/m²)
 - 磁阻： $R = l / (\mu A)$ (單位 AT/Wb)
 - 磁動勢： $F = N \times I$ (安匝, AT)
-

② 磁路歐姆定律 (類似電路歐姆定律)

- $V = I \times R$ 對應 $F = \Phi \times R_m$
 - 公式： $F = \Phi \times R_m$
 - F: 磁動勢
 - Φ : 磁通量
 - R_m : 磁阻
-

③ 法拉第電磁感應定律

- $e = -N \times (d\Phi/dt)$
 - 重點：電壓大小與磁通變化率成正比，方向遵循楞次定律 (反抗磁通變化)。
-

④ 佛萊明定則

- 右手定則 (發電機)

- 食指:磁場方向 B
 - 拇指:導體運動方向 V
 - 中指:感應電流方向 I
 - 左手定則(電動機)
 - 食指:磁場方向 B
 - 中指:電流方向 I
 - 拇指:受力方向 F
-

⑤ 受力公式(洛倫茲力)

- $F = B \times l \times I \times \sin\theta$
- B:磁通密度 (Tesla)
- l:導體有效長度 (m)
- I:電流 (A)
- θ :與磁場夾角

第二章 直流電機構造與原理(教學整理)

學習目標

1. 認識直流電機的構造與功能。
 2. 瞭解直流發電機與電動機的基本運轉原理。
 3. 掌握電樞繞組(疊繞與波繞)的設計規則與比較。
 4. 熟悉電樞感應電勢、反電勢、轉矩與功率公式的推導與應用。
-

2-1 直流電機的構造

直流發電機(DCG)與直流電動機(DCM)構造相同, 只是功能不同。

① 電路與磁路

- 電路: 電流流經的路徑(電樞繞組)。
- 磁路: 磁力線流經的路徑(N極 → 空氣隙 → 電樞鐵心 → 空氣隙 → S極 → 機殼 → N極)。

② 定子(磁場部分)

- 機殼(場軛): 高導磁鐵或鋼, 支撐、保護並提供磁通路徑。
- 主磁極: 用矽鋼片疊製, 極掌比極心大 → 降低磁阻、均勻磁通。
- 中間極: 改善換向。
- 電刷: 接觸換向器, 導入/導出電流。種類依壓力與應用分為碳質、石墨質、電氣石墨、金屬石墨。
- 握刷器、軸承、托架、末端架: 支撐與固定機構。

③ 轉子(電樞部分)

- 電樞鐵心: 矽鋼片疊製, 減少渦流損與磁滯損。斜形槽可降低噪音。
- 換向器: 實現 AC ↔ DC 轉換。
- 電樞繞組: 分為疊繞(並聯)與波繞(串聯), 決定適用電壓電流特性。

④ 繞組種類比較

繞組類型	特性
串激場繞組	線徑粗、匝數少、與電樞串聯
分激場繞組	線徑細、匝數多、與電樞並聯
中間極繞組	改善換向
補償繞組	抵消電樞反應

2-2 電樞繞組

基本名詞

- 單層繞 / 雙層繞: 每槽放 1 或 2 線圈邊。
- 極距 (YP): 兩磁極中心距離 = 180° 電機角。
- 槽距: 兩槽中心距離。
- 線圈節距: 線圈兩有效邊之槽距。分為 全節距 (=極距) 與 短節距 (<極距)。
- 前節距 (Yf)、後節距 (Yb)、換向器節距 (Yc): 描述線圈在槽與換向器的接線規則。
- 複分數 (m): 單分、雙分、三分繞等。
- 重入數 (D): 繞組形成封閉迴路的數量。
- 並聯路徑數 a: 決定電流路徑多寡。

疊繞與波繞比較

項目	疊繞 (並聯繞組)	波繞 (串聯繞組)
電流路徑數	$a = mP$ (與極數相關)	$a = 2m$ (與極數無關)
適用	低壓大電流	高壓小電流
是否需均壓線	是 (改善換向)	否
是否需虛設線圈	否	有時需要
電刷數	等於極數	最少 2 個

2-3 直流發電機基本原理

感應電壓產生

- 單匝線圈在磁場中旋轉 → 產生交流電壓(正弦波)。
- P 極電機旋轉一圈 → 產生 P/2 個正弦波。

重要公式

- 平均感應電壓 (單線圈) :

$$E_{av} = 2NP\Phi S$$

- 整體電樞感應電勢 :

$$E_g = \frac{PZ}{60a} \times \Phi n = K\Phi n$$

- P : 極數
- Z : 導體總數
- a : 並聯路徑數
- Φ : 每極磁通量
- n : 轉速 (rpm)

👉 結論: 發電機電壓 \propto 磁通量、轉速。

2-4 直流電動機基本原理

載流導體在磁場中受力

- $F = B I l \sin\theta$
- 線圈平面與磁場平行 → 力最大, 轉矩最大。
- 線圈平面與磁場垂直 → 力最大但轉矩 = 0。

電磁轉矩公式

- $T = \frac{PZ}{2\pi a} \times \Phi \times I_a = K\Phi I_a$

反電勢 (Eb)

- 與發電機公式相同：

$$E_b = \frac{PZ}{60a} \times \Phi n$$

內生機械功率

- $P_m = E_b I_a = T\omega$

輸出轉矩

- $T_o = \frac{60}{2\pi} \times \frac{P_o}{n}$ (牛頓·公尺)

教學補充與應用

1. 結構比較：發電機與電動機結構相同，功能相反。
2. 公式類比：發電機公式求電壓，電動機公式求轉矩與反電勢。
3. 實務應用：
 - 疊繞：焊接機、電鍍機 → 大電流。
 - 波繞：高壓輸送電動機。
4. 考試重點：
 - 鐵心疊片 → 降低渦流損。
 - 電樞繞組 → 感應電壓交流，經換向器 → 輸出直流。
 - 繞組設計題 → 常考前/後節距計算。

3-1 電樞反應

(1) 前後極尖效應

- 直流發電機: 前極尖磁通減弱(磁阻大、磁密小), 後極尖磁通增強。
- 直流電動機: 前極尖磁通增強(磁阻小、磁密大), 後極尖磁通減弱。

👉 結論: 電樞反應會 扭曲磁場, 造成磁中性面偏移。

(2) 名詞解釋

- 幾何中性面: 兩主磁極中心的中間面, 不隨負載改變。
- 磁中性面: 線圈感應電壓為零的位置, 會隨負載偏移。
- 刷軸: 兩電刷中心連線, 不隨負載變動。

(3) 電樞反應成分

- 交磁磁動勢 (F_c): 與主磁場垂直 → 扭曲磁場, 換向困難。
- 去磁磁動勢 (F_d): 與主磁場相反 → 減弱磁通。
- 助磁磁動勢 (F_+): 與主磁場同向 → 增強磁通。

(4) 偏移方向

- 發電機: 磁中性面 順轉向 偏移。
- 電動機: 磁中性面 逆轉向 偏移。

3-2 電樞反應磁動勢計算

(1) 總磁動勢

$$F = \frac{Z}{2a} \cdot I_a \quad (\text{安匝, AT})$$

Z: 總導體數

a: 並聯路徑數

la: 電樞電流

去磁與交磁分量

- 去磁磁動勢

$$F_d = F \cdot \frac{2Pa}{360_c} \quad (\text{機械角})$$

$$F_d = F \cdot \frac{2Pa}{180P} \quad (\text{電機角})$$

交磁磁動勢

$$F_c = F \cdot \frac{360_c - 2Pa}{360_c}$$

👉 去磁作用與刷子偏移角度成正比，電樞電流愈大，電樞反應愈嚴重。

3-3 改善電樞反應的方法

1. 削極尖法：削去部分磁極尖，使磁通分布均勻，減少極尖畸變。
 2. 交錯極尖法：磁極片交錯疊放，效果與削極尖類似。
 3. 愣德爾磁極法：在磁極刻槽，增加電樞磁通的磁阻，效果有限。
 4. 移刷法：將電刷移到「新磁中性面」。但需隨負載調整，實務上少用。
 5. 中間極繞組（換向磁極）：小磁極，與電樞串聯，抵銷交磁，改善換向。
 6. 補償繞組：裝在主磁極面，與電樞串聯，抵銷電樞反應（最有效，但成本高）。
-

3-4 換向位置與種類

(1) 理想換向

- 線圈電流在短路瞬間正好反向，無火花。

(2) 換向種類

- 直線換向: 理想情況, 電壓變化均勻, 無火花。
- 過速換向: 電流變化太快 → 前刷邊火花。
- 欠速換向: 電流變化太慢 → 後刷邊火花。
- 正弦換向: 利用中間極磁通補償 → 接近理想。

(3) 換向週期

$$T_C = \frac{60m}{nC}$$

m: 複分數

- n: 轉速 (rpm)
- C: 換向片數

👉 繞組自感量大、轉速快、換向片少 → 容易產生火花。

第四章 直流發電機(教學整理)

學習目標

1. 認識直流發電機的分類與接線方式。
 2. 理解各種直流發電機的特性曲線及應用。
 3. 學會外激式、分激式、串激式、複激式等計算與比較。
 4. 熟悉並聯運轉的條件與優點。
-

4-1 直流發電機之分類與特性曲線

① 按激磁方式

- 外激式(他激式): 激磁電流由外部直流電源供應。
- 自激式: 激磁繞組電流來自本機電樞電壓。
 - 串激式: 激磁繞組與電樞串聯。
 - 分激式: 激磁繞組與電樞並聯。
 - 複激式: 同時具備串激與分激繞組。

② 複激式的接法

- 長並聯: 電樞 → 串激場 → 分激場並聯。
 - 短並聯: 電樞 → 分激場並聯 → 串激場。
 - 積複激: 磁通量相加。
 - 差複激: 磁通量相減。
-

③ 特性曲線

1. 無載飽和特性曲線 (E_g - I_f)

- 測試: 無載、定速。
- 特徵: 因磁滯, 下降曲線高於上升曲線; 剩磁電壓 E_r 存在。
- 飽和點: $I_f \uparrow$, E_g 不再增加。

2. 內部特性曲線 (E_g - I_a)

3. 外部特性曲線 (V_L - I_L)

4. 電樞特性曲線 (I_f - I_a)

5. 場電阻線 (V_f - I_f)

- 斜率 = 場電阻值, 必須小於臨界場電阻。
-

④ 電壓建立條件

- 必須有剩磁。
 - 剩磁方向與主磁場一致。
 - 場電阻 < 臨界場電阻。
 - 原動機轉速 > 臨界轉速。
 - 接線方向與旋轉方向正確。
-

4-2 各種直流發電機的特性與計算

① 外激式

- 特點: 唯一 無剩磁也能建立電壓。
 - 優點: 電壓調整範圍大、極性可反轉。
 - 缺點: 需外部電源, 成本高。
 - 用途: 實驗室直流源、交流發電機激磁機、測力計。
 - 計算:
 - $E_g = V_L + I_a R_a + 2V_b$
 - $VR\% = (V_{NL} - V_{FL})/V_{FL} \times 100\%$
-

② 分激式

- 特點: 具有短路與過載自動保護功能。
- 優點: 定電壓輸出。
- 用途: 一般直流電源、蓄電池充電、交流發電機激磁。
- 計算:

- $I_f = V_L/R_f$
- $I_a = I_L + I_f$
- $E_g = V_L + I_a R_a + 2V_b$

③ 串激式

- 特點: 無載時僅剩磁電壓。
- 外部特性: 輕載升壓, 重載近似定電流。
- 用途: 升壓機、恆流源。
- 電壓調整率: 負值。

④ 複激式

- 長並聯與短並聯接法。
- 分類:
 - 過複激: 電壓調整率 < 0 (隨負載升高電壓)。
 - 平複激: 電壓調整率 $= 0$ (理想定電壓)。
 - 欠複激: 電壓調整率 > 0 (實際不常用)。
 - 差複激: 電壓調整率最大正值 \rightarrow 蓄電池充電、電焊機。

⑤ 各種直流發電機比較

類型	電壓調整率	是否需剩磁	主要用途
外激式	正值(範圍廣)	不需	華德黎系統、實驗室
分激式	正值	需	一般直流電源
串激式	負值	需	升壓、恆流

積複激	視情況	需	電車、直流電源
差複激	最大正值	需	電焊機

4-3 並聯運用

優點

1. 提高效率。
2. 減少預備機容量。
3. 增加系統容量。
4. 提高供電穩定度。
5. 不受單機限制。

並聯條件

- 端電壓極性相同。
- 端電壓大小相等。
- 原動機特性一致。
- 外特性曲線需下垂。
- 負載分配與容量成正比。

分配原則

- 分激機: I_L 比例 \propto 容量 $\propto 1/R_a$ 。

複激機: I_L 比例 \propto 容量 $\propto 1/R_s$ 。

第五章 直流電動機 — 重點整理報告

5-1 直流發電機改接為直流電動機

- 若電機含有 串激場繞組 → 必須反接, 否則積複激、差複激特性會互換。
 - 若電機含有 中間極繞組 → 電刷不可移位, 中間極接線不可改接。
 - 外激式與分激式電動機: 轉向主要取決於電源極性, 通常與發電機相同, 但有些需電刷移位。
 - 串激式電動機: 可以加交流電源使用, 因此又稱 通用電機。
-

5-2 各種直流電動機的特性與應用

(1) 外激式

- 特性: 近似恆速, 速度調整率 $S.R.\% > 0$ 。
 - 轉速特性: 負載增加, 轉速僅小幅下降。
 - 轉矩特性: 隨負載增加而上升。
 - 用途: 壓縮機、升降機、Ward-Leonard 控速系統。
 - 缺點: 需要兩組電源(電樞、磁場), 成本較高
-

(2) 分激式

- 特性: 與外激式相似, 屬於定速電動機。
 - 特殊情況: 若場繞組開路, 可能發生「飛脫 (Runaway)」現象。
 - 用途: 車床、鑽床、印刷機, 多速鼓風機。
 - 優點: 僅需一組電源, 成本低於外激式
-

(3) 串激式

- 特性: 低速高轉矩, 高速低轉矩, 變速範圍大。

- 危險性:不可無載運轉,否則轉速竄升(飛脫)。
 - 轉矩特性:
 - 輕載 $\rightarrow T \propto I_a^2$ (拋物線)。
 - 重載 $\rightarrow T \propto I_a$ (直線)。
 - 用途:果汁機、起動機、升降機、電氣火車(交直流通用)。
 - 限制:必須齒輪傳動,不能用皮帶,否則可能脫落
-

(4) 複激式

- 積複激式:兼具分激與串激優點,重載時轉矩大且安全,常用於吊車、升降機、鑿孔機。
 - 差複激式:隨負載增加,轉速可能上升,甚至起動時反轉 \rightarrow 不穩定,僅供試驗用。
 - 比較:
 - 積複激: $S.R.\% > 0$, 實用。
 - 差複激: $S.R.\% \leq 0$, 少用
-

5-3 直流電動機的控制方法

(1) 起動控制

- 起動瞬間反電勢 $E_b = 0$, 電樞電流過大,需加 起動電阻器 限流。
- 起動電流一般限制為額定電流的 1.5~2 倍。
- 小功率(1/3 HP 以下)可直接起動。

(2) 轉速控制

- 場磁通控速法:改變激磁電流, $n \uparrow \rightarrow \phi \downarrow, T \downarrow \rightarrow$ 屬於 定馬力控制。
- 電樞電壓控速法:改變端電壓 V_i , 屬於 定轉矩控制, 常見於 Ward-Leonard 系統。

- 電樞電阻控速法：串入可變電阻， $n \downarrow$ ，效率低，僅適用於小型機。

(3) 轉向與制動

- 轉向控制：改變磁場或電樞電流方向即可。
 - 制動方式：
 - 動力制動（發電制動）
 - 逆轉制動（插塞制動）
 - 再生制動（廣用於電動車，下坡回生制動）
 - 機械制動（煞車塊/盤）
-

5-4 損失與效率

- 銅損： I^2R （電樞、場繞組、中間極、補償繞組等）。
 - 鐵損：磁滯損 $\propto f \times B^{1.6\sim 2}$ 、渦流損 $\propto f^2 \times B^2 \times t^2$ 。
 - 機械損：摩擦損、風損 \propto 轉速。
 - 效率公式：
 - 發電機： $\eta = P_o / (P_o + P_{loss})$
 - 電動機： $\eta = (P_i - P_{loss}) / P_i$
 - 最大效率條件：固定損 = 變動損
-

綜合比較表（整理）

類型	速度調整率	轉速特性	轉矩特性	用途
外激式	$S.R.\% > 0$	定速	線性上升	精密控速、壓縮機
分激式	$S.R.\% > 0$	定速	線性上升	車床、鼓風機
串激式	$S.R.\% > 0$ (最大)	輕載快、重載慢	輕載拋物線、重載直線	火車、升降機
積複激式	$S.R.\% > 0$	分激與串激中間	分激與串激中間	吊車、起重機
差複激式	$S.R.\% \leq 0$	不穩定	可能反轉	試驗用