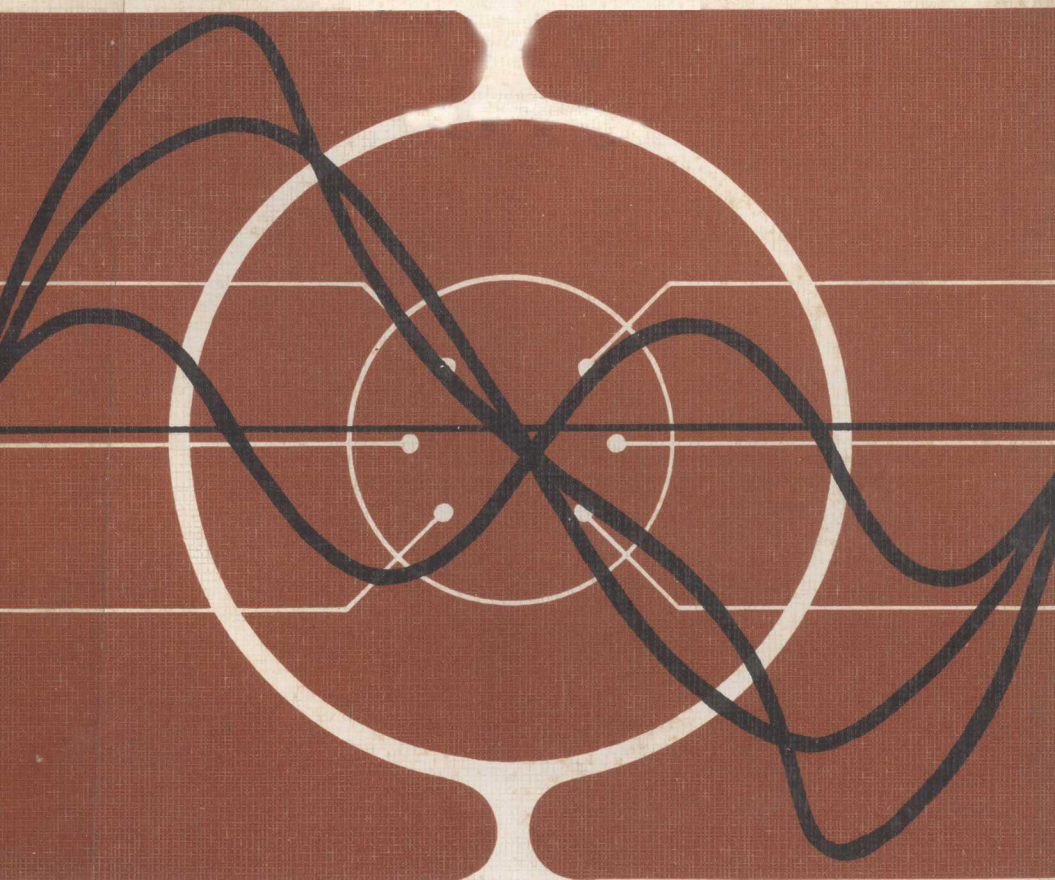


最新部訂專科課程標準

電機設計(上)

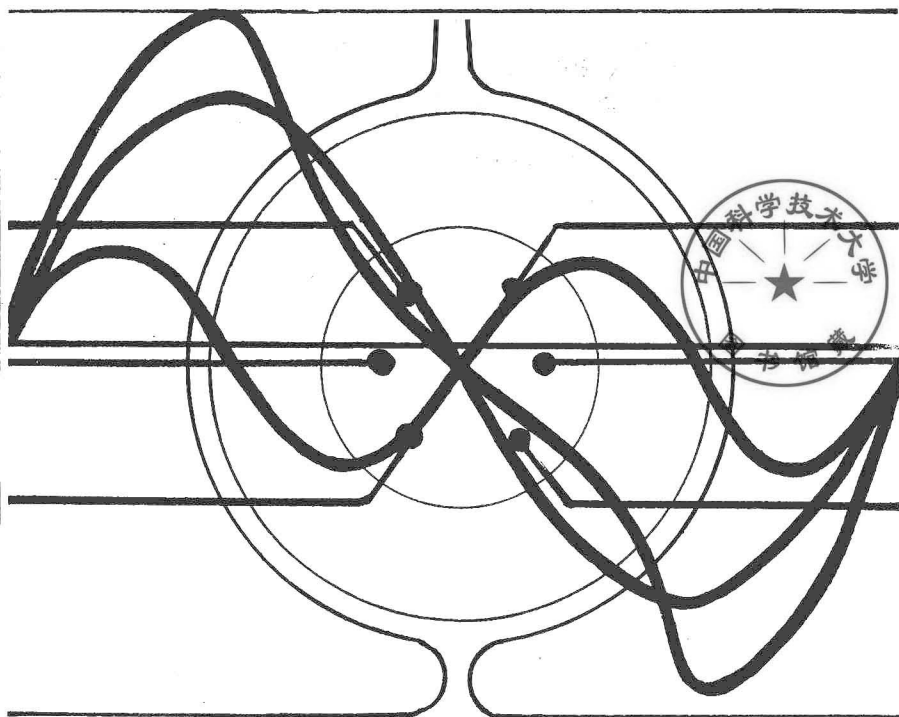
呂理雄 何文德 編著



全華科技圖書公司印行

電機設計(上)

呂理雄 何文德 編著



全華科技圖書公司印行



全華圖書 版權所有 翻印必究
局版台業字第0223號 法律顧問：陳培豪律師

電機設計(上)

呂理雄 何文德 編著

出版者 全華科技圖書股份有限公司
北市龍江路76巷20-2號
電話：581-1300 • 564-1819
581-1362 • 581-1347
郵撥帳號：1 0 0 8 3 6
發行者 蕭 而 鄭
印刷者 欣瑜彩色印刷廠
定價 新臺幣 180 元
再版 中華民國71年6月

感謝您

感謝您選購全華圖書！

希望本書能滿足您求知的慾望！

圖書之可貴 在其量也在其質

量指圖書內容充實、質指資料新穎够水
準，我們就是本著這個原則，竭心
盡力 地為國家科學中文化努力
，貢獻給您這一本全是精
華的全華圖書。

編輯大意

1. 本書根據教育部六十五年修訂公布之專科學校課程標準而編著，可作為大專院校電機設計課程教材，並可作為電機從業人員進修或參考之用。
2. 本書分上、下兩冊，上册包含電機材料，變壓器設計，多相感應電動機設計；下冊包含單相感應電動機設計，直流機設計及同步機設計。
3. 本書度量衡單位，原則上使用M.K.S.實用單位，但習慣上常用C.G.S.單位或使用C.G.S.單位較為方便時，則使用C.G.S.單位。又本書多數設計資料取自工業先進國家專家名著，並依據我國CNS標準加以校訂，使能符合我國標準。
4. 學習電機設計，必須瞭解電機的原理，而從事設計工作更有助於原理的瞭解。惟電機設計不僅是學理的討論，且為實用的技巧，並需隨材料及製作技術之進步而隨時修訂設計資料。設計計算常用許多理論與經驗公式，初學者往往無法瞭解此等公式之來源與意義，以致不能活用，因此本書對於重要的應用式儘可能加以導引，並作應用上之說明，期能靈活運用。作者學識淺薄，經驗有限，錯誤欠週之處，敬請各專家學者及讀者諸君惠予指正。

編者識 民國六十五年九月

目 錄

第一章 緒 論

1-1	電機設計概說	1-1
1-2	電機材料之分類	1-5
1-3	導電材料	1-5
1-4	導磁材料	1-36
1-5	絕緣材料	1-51
1-6	介質係數及介質損失	1-91
1-7	絕緣耐力	1-95
1-8	電機絕緣安全係數之近似計算	1-97

第二章 變壓器設計

2-1	概 說	2-1
2-2	鐵 心	2-2
2-3	繞 組	2-11
2-4	鐵心與繞組之設計	2-27
2-5	套 管	2-34
2-6	冷却方式	2-37
2-7	變壓器油	2-39
2-8	電壓變動率	2-40
2-9	損失與效率	2-41
2-10	漏磁電抗	2-47

2-11 激磁電流·····	2-51
2-12 溫升與油箱之設計·····	2-57
2-13 油量計算·····	2-76
設計實例·····	2-80

第三章 感應電動機設計

3-1 感應電動機分類·····	3-1
3-2 感應電動機構造材料·····	3-3
3-3 輸出與轉速之標準化·····	3-6
3-4 框架之標準·····	3-7
3-5 主要尺寸之決定·····	3-8
3-6 每相串聯導體數·····	3-14
3-7 空氣隙長度之選定·····	3-15
3-8 磁路各部磁通密度·····	3-17
3-9 槽數之決定與槽之尺寸·····	3-19
3-10 繞線型轉子設計·····	3-20
3-11 鼠籠型轉子設計·····	3-22
3-12 鼠籠型轉子之槽數·····	3-24
3-13 等效電路·····	3-28
3-14 繞組及漏磁電抗·····	3-30
3-15 槽漏磁電抗·····	3-31
3-16 繞線型轉子槽漏磁電抗·····	3-38
3-17 籠型轉子槽漏磁電抗·····	3-39
3-18 曲折漏磁電抗·····	3-43
3-19 斜槽漏磁電抗·····	3-45
3-20 相帶漏磁電抗·····	3-47
3-21 線圈端部漏磁電抗·····	3-47

3-22 運轉中總漏磁電抗.....	3- 50
3-23 繞組電阻.....	3- 51
3-24 深槽之影響.....	3- 55
3-25 起動時漏磁磁路飽和對漏抗之影響.....	3- 58
3-26 磁化電流.....	3- 63
3-27 各種損失.....	3- 73
3-28 溫 升.....	3- 74
3-29 起動電阻器.....	3- 79
3-30 利用等效電路計算特性.....	3- 80
設計實例.....	3- 90

第一章 緒 論

1-1 電機設計概說

1. 定 義

電機設計，乃根據電機原理，依照所需性能選擇適當形式、材料及尺寸，憑藉經驗假設與理論計算，以實現其理想機構。依照上述定義，藉知從事電機設計之際，須熟知三事：

- (1) 電機原理。
- (2) 客戶對電機性能之要求。
- (3) 最確實簡便而經濟的構造形式，材料及尺寸之標準等。

2. 電機原理

電機設計所根據的原理，可大別為兩部份：

- (1) 計算電機定數及基本作用者。
- (2) 計算電機性能者。

前者如感應電勢、阻抗電壓、磁場分佈因數、激磁安匝、線圈應力、

絕緣安全因數及溫升算式等，大半由基本原理導出或再補以一部份經驗係數，而可歸納為電磁感應、激磁、機械力、絕緣及散熱五類；後者如變壓器或發電機之電壓變動率、電動機之轉速、轉矩、功率因數等，大致由相量圖及等值電路導出之。

3. 性能要求

電機發展之初，其性能並無一定之標準，以後由於市場競爭，客戶需要及材料與製造技術之進步，各項電機性能乃逐漸向上，然有一定限制，例如將一般效率為 98 % 的變壓器之鐵損、銅損減少一半，對效率而言僅增加百分之一，但必須浪費大量工料，失去工程設計之正確路線，蓋設計不但講求特性效能，抑且講求工料經濟。

為避免如此浪費材料式的效率競賽，又為限制不顧性能之廉價競爭，各國學術團體，廠商彼此間，乃約定一合理標準或改由政府以法令規定之。例如中國國家標準 CNS (Chinese National Standard)、國際電工標準會議規格 I. E. C. (International Electro-technical Commission)、美國電機製造協會標準 N. E. M. A. (National Electrical Manufacturer's Association)、美國標準協會標準 A. S. A (American Standards Association)、A. N. S. I. (United States of America Standards Institute)、日本工業規格 J. I. S. (Japanese Industrial Standards)、日本電氣工業協會標準規格 J. E. M. (Japan Electric Machine Industry Association)，日本電氣學會電氣規格調查會標準規格 JEC (Japanese Electrotechnical Committee Standards)、德國電機協會規格 VDE (Verband Deutscher Elektrotechniker)、德國工業規格 D. I. N. (Deutsche Industrie-Normung)、英國國家標準 B. S. (British Standards) 等等皆從事此項工作。

各國及各團體標準，對於“溫升”與“絕緣”兩項皆作硬性規定，但

對“效率”、“電壓變動率”等則甚少作硬性規定，或作較有彈性之規定，因後者常隨年代而變遷。

目前各種電機之效率大致如下：

直 流 機	KW	1	1	5	10	10	25	50	100	100	300	1000	1000
	r.p.m.	3000	1000	1750	1300	1000	900	1150	500	1000	750	500	300
	效率%	75.5	72	82.3	84	83	86.6	89	89	90.5	91	94	92
變 壓 器	KVA	1	10	100	100	1000	1000	3000	10000	15000			
	KV	配 電	配 電	3.3	2.2	11	66	66	66	169			
	效率%	95	97.2	98	97.5	98.5	98.6	98.7	99	99			
* 感 應 電 動 機	KW	0.4	0.75	1.5	2.2	5.5	7.5	30	37	45	55		
	H.P. 參考值	1/2	1	2	3	7.5	10	40	50	60	75		
	極 數	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4		
	效率%	77.3	81	84.7	86.5	85	88.2	91.6	91.7	91.3	91.8		
	KW	75	95	110	190	* 本省實例，根據52年抽樣試驗報告。							
	H.P. 參考值	100	125	150	250								
	極 數	8	8	8	8								
	效率%	92.7	92.8	92.7	95.2								

初期之發電機及變壓器，對電壓變動率皆儘力求小，後因自動調壓裝置（automatic voltage regulator）之發達，不但不重視此類限制，反而希望電機具有相當的漏磁電抗，以限制送電線路突然短路時所發生之異常電流，凡此皆由於時勢之變遷所致。

4. 型式、材料及尺寸

電機型式並非一成不變，且隨時代而進步，例如機殼（frame）昔年皆鑄鋼或鑄鐵，今皆電焊。又如變壓器鐵心以往皆“平疊”（stacked core 積鐵心），但二十年前已有“捲疊”者（wound core 捲鐵心），現今配電用中型以下變壓器多改用捲鐵心。至於其他小機件構造型式之改進，更不勝枚舉。

材料之進步更是日新月異，在銅料缺乏之時期，亦有以鋁、鐵、鋅等做導體者。又因高度含鎳鐵之導磁係數特別高，已大量替代鋼、鐵，他如第二次大戰期間發展之矽質清漆〔silicon varnish, 以矽（si）代替碳（C）之有機物〕，或合成樹脂（synthetic resin）配合玻璃纖維使用，能使電機耐溫提高至 180°C ，有使電機由以前的冷電機（cold machine）變為今後的熱電機（hot machine）的趨勢，一如現今出品之F種電動機，H種變壓器等。故電機設計人員應隨時注意新電工材料之出品與其應用，修正設計資料數據，以作適應時代潮流之設計。

電機尺寸必須標準化，尤以主要尺寸為然。標準化能以少數種類應付多種需要，檢驗工具得以簡單，製造技術容易熟練。若儲備零件不變，種類減少之後每種存量得以增加，即可應付更多的客戶需要。標準化使一切零件間彼此容易配合，每種零件可隨時換新，大量生產（mass production）之計劃得以順利完成。

目前新式工廠，皆採用公制尺寸，對於下列十種及二十種標準數字常

優先採用。

十級：1.0，1.25，1.6，2，2.5，3.2，4，5，6.4，
8，10 ………

二十級：除上列數字外尚有 1.12，1.4，1.8，2.25，2.8，
3.6，4.5，5.6，7.2，9。

5. 設計課題

一切工程設計，均須兼顧理論與實際，設計課題一方面須盡量精密計算，理論所未能計測者則輔以經驗公式。另一方面須面對現實，對於製造設備、材料、人工、技術等均須加以考慮。一般工程須經設計、製造與裝設三階段，而設計最為重要，若設計欠週密妥善，必致浪費工料，而難達到預期目的，故設計工程師之責任極為重大。

“不惜工本而僅能達到目標”，並不足以言工程，“徒具空言而缺乏實現可能性”更不足論，一切必須腳踏實地。研究電機設計者，應充份瞭解此項意義，此實為電機理論更深一層之探討，而非其普通延長。明乎此，方能明瞭電機每一極小部份之性能特質，自另一方面觀之，此又為自電工理論達到實際應用之主要橋樑，藉此方能貫通“學以致用”之大道。

1-2 電機材料之分類

構成電機之材料可分為：(1)導電材料，(2)導磁材料，(3)絕緣材料及(4)構造材料等四種。又，導電材料、導磁材料或絕緣材料亦常有兼作構造材料用者。材料之良否對電機特性及設計影響極大，可謂今後電機機械之發展，端賴材料之改良。

1-3 導電材料

導電材料中最主要者為銅，銅之導電率高且富延展性，電機繞組及其他導電部份常使用圓銅線，扁銅線及銅帶等作成，有時亦有採用銅棒、銅網者，又作成特殊形狀應用於直流機換向片等。銅之合金如黃銅、磷青銅等則常兼作構造材料用如電刷握持器、螺栓、螺母、彈簧等，電機滑環亦常用銅合金製成。

鋁常用於發電機激磁線圈及感應電動機籠型轉子導體，鋁合金則常兼作構造材料用。目下變壓器繞組亦有使用鋁線繞製者。

線圈多用直徑 3.2mm 以下之圓銅線或厚度 3.2mm 以下（寬度較大）之扁銅線繞成。國際標準軟銅之電阻係數在 20°C 時為 $1.7241 \mu \Omega \cdot \text{cm}$ ，密度為 8.89 gm/cm^3 ，銅線之電阻隨溫度而變化，其關係可用下式表之。

$$R_t = R_{t_0} \{ 1 + \alpha (t - t_0) \} \quad (1-1)$$

R_t 為 $t^\circ \text{C}$ 時之電阻， R_{t_0} 為 $t_0^\circ \text{C}$ 時之電阻， α 為在 $t_0^\circ \text{C}$ 時之電阻溫度係數，銅在 0°C 時之 α 為 $1/234.5 = 0.00427/^\circ \text{C}$ ，在 20°C 時為 $1/(234.5 + 20) = 0.00393/^\circ \text{C}$ 。

表 1-1 為各種金屬及合金之電的性質，表 1-2 為各種導線之物理性質，電機機器繞組用軟銅線之特性則如表 1-3 所示。

1. 圓銅線

- (1) 紗包線 (cotton covered wire) 係於軟銅線上以棉紗線緊密繞着導體作單方向一層 (S.C.C.) 或順、逆兩方向雙層 (D.C.C.) 之纏包而成，其中以雙紗包線用途最廣。規格如表 1-4。
- (2) 絲包線 (silk covered wire) 分單層、雙層乃至三層，以雙絲包線 (D.S.C.) 用途較廣。規格如表 1-5。

(3) 油質漆包線 (oleoresinous enamelled wire) 爲最早使用於電機之漆包線，具有優良之電氣性能，價格低廉，至今仍被廣泛應用於小型電機機械、電氣儀錶、低壓小容量通信機械等。規格如表 1-6 及表 1-7。

(4) 合成樹脂漆包線 (synthetic enamelled wire) 合成樹脂漆包線爲近年來漆包線之一大進步。具有皮膜堅固耐磨、耐熱及耐化學性等特性，且導體佔積率 (space factor) 大，運用溫度得以提高，可使電機輸出提高，或使其體積縮小。

① PVF 漆包線 (聚乙烯醇縮甲醛漆包線) (polyvinyl formal enamelled wire) 呈金黃色，耐磨性、耐油性及附着力性能特佳。極適宜於成型繞組 (form winding work) 之電動機、小型變壓器線圈及使用高速自動繞線機工作之處。屬於 E 種絕緣 (耐溫 120°C)。

② P.U. 漆包線 (聚胺基甲酸酯漆包線) (Polyurethane enamelled wire) P.U. 漆包線爲西德 Bayer 公司初創，因其主要原料爲 Decmodur 及 Dosmophen，故又稱 D.D. 漆包線，或稱 UEW。呈金黃色，現亦可製成其他各種美觀顏色，其電氣性能不受潮濕氣之影響，在高頻率時之介質常數較他種漆包線爲低。其另一特殊優點爲可以直焊，不用剝皮加焊油等麻煩 ($340 \sim 360^{\circ}\text{C}$ 下即可直接加焊)，省工省料，且可免除因多餘焊油所引起之機械故障，實爲理想之線圈用線。適於小型電機機械及通信機線圈用。屬於 E 種絕緣 (120°C)。

③ P.E. 漆包線 (聚酯瓷漆包線) (polyester enamelled wire) P.E. 漆包線之耐熱性、耐化學性及耐熱劣化性均較 PVF 漆包線爲優。適用於耐溫較高的電動機、變壓器繞組，可縮小電動機或變壓器之體積以降低成本 (機器小型化爲現今製造電機之一般傾向)。絕緣屬於 B 種 (130°C) 亦有認爲屬於 F 種 (155°C)。現已被廣泛應用於各種電機繞組而有取代 PVF 漆包線之傾向。

- ④ 耐冷媒 (PVFR) 漆包線 (hermetic formvar) 具有優良的耐化學品性，尤其在耐冷媒劑方面。適用於全封閉式冷凍、空調壓縮機馬達線圈。
- ⑤ 自熔着 (PVB) 漆包線 (self bonding enamelled wire) 係在 PVF、PU 或 PE 漆包線外被覆一層 polyvinyl butryal 樹脂。此樹脂具有熱塑性 (thermoplastic)，當電流通過繞好的線圈時所產生的熱可使線圈各匝自行熔着，該表層樹脂亦可為某些熔劑活化，再經繞成線圈亦可自行固着。常用於電子工業界如電視機之偏向線圈，馳返變壓器、中頻變壓器及揚聲器之移動線圈等。
- ⑥ H級 (PEW-H) 漆包線 (polyester- amide-imide enamelled wire) H級漆包線為近幾年來的新產品，皮膜具備優良的伸屈性及耐磨性，可適用於高速繞線作業。對熱之安定性更佳，適用於H類線圈之繞製。耐溫高達 180°C 。
- ⑦ P.U. 尼龍 (P.U. - N.Y.) 漆包線 (nylon coated polyurethane enamelled wire) 於P.U. 漆包線外再被覆一層尼龍樹脂。尼龍層具有良好的圈繞性、耐磨性及耐化學性，並仍保有原P.U. 漆包線的直焊性。適用於高速自動繞線作業。
- ⑧ 尼龍被覆P.E. 線 簡稱PEN 耐水線，適用於深水馬達繞組等。
- ⑨ Epoxy (環氧樹脂) enamelled wire，適用於深水，高濕度處所使用馬達繞組。屬於E種絕緣。
- ⑩ Silicone (矽) enamelled wire，適用於深水，高濕H級馬達的繞組。
- ⑪ Teflon 漆包線，以 Polytetrafluoroethylene 簡稱PTFE 為外層被覆。屬於H種絕緣。
- ⑫ Poly- imide (聚酰亞胺) enamelled wire，屬於H或C種絕緣，可使用到 220°C 。
- ⑬ Ceramic Silicone (磁矽) enamelled wire，屬於H種絕緣。
- ⑭ Acryl-nitrile (丙烯腈) enamelled wire，耐冷媒性佳。屬於

B 種絕緣。

漆包線之皮膜厚度有 0 種、1 種及 2 種之別，其中以 0 種最厚，2 種最薄。上述各種漆包線由於經濟觀點、成本、特質等各種因素，顯然各有其適用場所及使用價值，設計人員應處處不離“現實”“經濟”之原則下適宜選用，並時時注意市場新產品之推出，以客觀及主觀的立場隨時準備作以往設計常數之修正，並隨時代潮流而遷進，方不致落伍。

- (5) 玻璃纖維包銅線 (glass covered wire) 係於軟銅線上以玻璃纖維緊密繞着導體作單方向一層 (SGC) 或順、逆兩方向雙層 (DGC) 之纏包，然後經 B 類或 H 類耐熱性絕緣清漆均勻含浸，再經過烤漆爐而烤成。分別稱為 B. SGC, B. DGC, H. SGC, H. DGC 等。
- (6) 紗包漆包線 於 EW、PVF、PE 漆包線上纏包一層或二層紗包者。
- (7) 絲包漆包線 於 EW、PVF、PE 漆包線上纏包一層或二層絲包者。

2. 扁銅線

常用於大型電機，絕緣需另用紙、棉紗、絲、石棉、雲母、玻璃纖維等纏包，且均須纏包二層或二層以上。漆包扁銅線之最小漆膜厚度需有 0.03 mm 以上，作為繞組用時，其上常再包以上述絕緣物。

3. 換向片

為特殊楔形銅帶，以硬抽銅為材料，取其機械强度高、耐磨。長且大的換向片常加 0.03 ~ 0.1% 之銀，其機械強度更高，耐磨性更佳。

4. 鋁 線

鋁在 20° C 時之容積 (體積) 導電率為銅之 61 %，但其密度僅有 2.7 gm/cm³ 為銅之 31 %。其質量導電率較銅大 (約為 200 %)，且價格低廉，產量豐富，在許多情形中常可用以代替銅。籠型感應電動機轉部導體若用鋁製則可用壓鑄法鑄成，構造簡單，堅固而省時。目下變壓