

南台科技大學

九十八年度實務專題製作成果報告

專題
名稱

BLDC 輪圈馬達控制器及在電動輪椅之應用

補助
經費
來源

教學卓越計畫

學校年度預算

經費核

13

定序號

系 所： 電機系

指導老師： 龔應時

專題學生： M9720206

(學號)

M9820107

謝男暉

(姓名)

楊政達

中 華 民 國 九 十 八 年 十 二 月

**南台科技大學 98 年度實務專題製作
參與國際/全國性競賽成果**

指導老師	龔應時		
參賽學生	謝男暉、楊政達、楊智淵、黃秉宏		
專題名稱	以 FPGA 為基礎電動輪椅控制器之研製		
	競賽名稱	競賽結果	
	1. 九十八年度全國微電腦應用系統設計製作 競賽	<input type="checkbox"/> 獲獎，名次：____ <input type="checkbox"/> 入圍 <input checked="" type="checkbox"/> 未獲獎 <input type="checkbox"/> 已參加但進行中 <input type="checkbox"/> 尚未參賽，預計比賽日期：_____	
	2.	<input type="checkbox"/> 獲獎，名次：_____ <input type="checkbox"/> 入圍 <input type="checkbox"/> 未獲獎 <input type="checkbox"/> 已參加但進行中 <input type="checkbox"/> 尚未參賽，預計比賽日期：_____	
	3.	<input type="checkbox"/> 獲獎，名次：_____ <input type="checkbox"/> 入圍 <input type="checkbox"/> 未獲獎 <input type="checkbox"/> 已參加但進行中 <input type="checkbox"/> 尚未參賽，預計比賽日期：_____	
	4.	<input type="checkbox"/> 獲獎，名次：_____ <input type="checkbox"/> 入圍 <input type="checkbox"/> 未獲獎 <input type="checkbox"/> 已參加但進行中 <input type="checkbox"/> 尚未參賽，預計比賽日期：_____	
檢附競賽 成果資料	<input type="checkbox"/> 作品照片 <input type="checkbox"/> 頒獎照片 <input type="checkbox"/> 獎狀影本(以一位同學獎狀影本為代表) <input type="checkbox"/> 獎牌、獎盃照片 <input type="checkbox"/> 獲獎新聞剪報 <input type="checkbox"/> 其他：		

指導老師簽章： 龔應時

九十八年度
全國微電腦應用系統設計製作競賽

實地測試手冊

主辦單位：教育部
承辦單位：國立臺灣科技大學
協辦單位：國立成功大學

中華民國九十八年十月

實地測試時間表

台南區 測試場地:國立成功大學成功校區 資訊大樓地下室格致廳

嵌入式系統類

10月16日

編號/評審時間	作品名稱	隊員姓名	學校科系 / 指導老師
嵌-研-01 09:40	具備防災及居家安全照護的最適性建築	黃士庭 詹勳賢 黃琮勝 林怡伶	國立高雄海洋科技大學 電訊工程系 楊正輝
嵌-大-02 10:00	具有故障回報功能的無人搬運車	黃榮斌 林柏志 王昱凱 張智傑	南台科技大學 電機工程系 陳文耀
嵌-大-03 10:20	智慧型家電控制	張嵩程 蘇少迪 吳博翔 張育維	南開科技大學 電腦與通訊工程 林正敏 系
嵌-研-04 10:40	無線嵌入式 Google Talk	邱政誠 張瑋誠	南台科技大學 電子系 薛雲太
嵌-大-05 11:00	火車行駛安全監控	陳建國	國立雲林科技大學 電子工程系 許明華
嵌-大-06 11:20	以嵌入式平台為基礎的車輛定位管理系統	潘聖唯 林哲偉 楊膺蒼 詹易霖	東方技術學院 電機工程系 林明宏
嵌-大-07 11:40	以嵌入式系統為基礎之自製式地理圖資校園導航系統	邱唯展 望克綱 黃仁毅 陳君耀	東方技術學院 電機工程系 胡勝耀
嵌-研-08 13:00	複合式電動車之電能系統控制設計	洪嘉璋 周柏志 游木燦 李鎧洋	國立虎尾科技大學 電機工程系 劉煥彩
嵌-大-09 13:20	完全掌握	鄭旭明 陳瑋育 洪義峰	南台科技大學 電機系機電控制 許毅然 組
嵌-研-10 13:40	異質多核心平台多核心作業系統之設計與開發	陳彥彰 劉建佑 柯仲遠 黃冠穎	國立成功大學 資訊工程所 張大緯
嵌-研-11 14:00	資訊家電控制系統	劉季泓	崑山科技大學 資工系所 黃慶祥
嵌-研-12 14:20	以FPGA為基礎電動輪椅控制器之研製	謝男暉 楊智淵 黃秉宏 楊政達	南台科技大學 電機工程系 龔應時

BLDC 輪圈馬達控制器及在電動輪椅之應用

BLDC Rim motor controller and its application in Electric Wheelchair

龔應時,謝男暉,楊政達

南台科技大學電機工程系

Department of Electrical Engineering, Southern Taiwan University

Tainan County, TAIWAN

kung@mail.stut.edu.tw

摘要

本專題主要使用可程式邏輯陣列元件(Field Programmable Gate Array, FPGA)晶片及嵌入一顆 NiosII 軟核心處理器為基礎來研製兩軸 BLDC(直流無刷)輪圈馬達控制器,並進一步應用在電動輪椅上。BLDC 輪圈馬達控制中,在電流迴路採用 PWM 六步方波控制器,而速度迴路採用 PI 控制器。此 BLDC 輪圈馬達將作為電動輪椅之致動器,而驅動控制晶片內以數位硬體電路實現,其功能主要執行電動輪椅之兩顆 BLDC 馬達速度控制,包含一組兩軸 PI 控制器電路、六組 Hall sensor 號偵測電路及兩組 PWM 六步方波訊號輸出等。最後,本專題完成一套實驗系統-包括以 FPGA 為基礎之實習板 DE2、兩組換流器、一組由兩顆 BLDC 馬達驅動之電動輪椅平台等。

關鍵詞: FPGA 晶片, 電動輪椅, BLDC 輪圈馬達

Abstract

This work mainly uses an FPGA (Field Programmable Gate Array) chip, which is produced by ALTERA Corporation, and an embedded Nios II soft core processor to construct the environment of system on chip (System on a Programmable Chip, SoPC) and further to develop a motion control chip for electric wheelchair driven by two BLDC rim motors. In controller design of BLDC motor, the current loop uses six-step square wave with PWM controller and the speed loop adopts PI controller. A proposed control chip based on FPGA technology is used to realize the function of two PI controllers, two PWM (Pulse Width Modulation) generation circuits, two QEP (Quadrature Encoder Pulse) circuits and one motion trajectory loop computation for electric wheelchair. Finally, an experimental system including an DE2 experimental board with Altera FPGA CycloneII EP2C35, two inverters and an electrically operated wheelchair platform is set up.

Keywords: FPGA, Electric wheelchair, BLDC rim motor

I. 前言

輪椅為一般肢障者、肌肉病變與無法自主行動者之日常生活輔具,而電動輪椅則可以讓更多嚴重患者來使用,也可以增進使用者的方便性。電動輪椅的使用已相當廣泛,已成為目前醫療復健用品中不可缺少的產品之一。隨著電動輪椅製造技術之進步,電動輪椅的方便性及功能不斷之增強,對肢障者而言,使用上則越來越便

利,進而普遍被接受程度也越來越高,即使是對沒碰觸過電動輪椅的肢障者來使用,也可以快速的上手。而目前在國內、外市面上的電動輪椅必須依賴國外廠商所研發的控制器,有成本高、不易修改、微調及僅適合於直流馬達等缺點,例如:英國的PG Drives Technology、紐西蘭的Dynamic controller...等之控制器,價格都相當昂貴,造成製造輪椅的成本大幅提高,對想使用卻無力購買的人來說則望之卻步。目前國內外學者對電動車的研研究逐漸興起,其中直流馬達常用來當作電動車的致動器。但是會有重量重、體積大及碳刷要維修的缺點,也有將輪椅旁之輔助輪結合無刷馬達之特性,使之更輕巧以及方便攜帶,但是在差速時有可能造成偏心之問題。

近年來VLSI的發展技術之成熟,導致可程式場邏輯元件(FPGA)在實現數位系統具有可程式規劃的硬體、快速的市場上市時間、較短的設計時程、以數位化的方式實現嵌入式處理器、較低的消耗功率與較高的密度,所以帶來許多的優勢,也因此許多交流馬達的技術已應用FPGA晶片來實現。

因此為改善上述問題,本專題在電動輪椅致動器部份使用BLDC(直流無刷)輪圈馬達,此相較於傳統馬達,有著體積小、重量輕與扭力大的優點;而在控制器部份,本專題所採用新型FPGA技術--SoPC來設計電動輪椅之運動控制器。此技術中運動軌跡計算在NiosII處理器以軟體方式實現,而兩軸BLDC輪圈馬達之速度控制器電路與電流閉迴路電路在FPGA內以硬體數位電路來實現。軟硬體共同設計與平行運算,不僅提高系統性能,更增加系統設計上之彈性,並且可使電動輪椅運動控制器系統以一顆FPGA 晶片來達成。本專題FPGA採用 Altera Cyclone II EP2C35晶片,具有33,216LEs (相當於332,160邏輯閘元件)、最多約475個可用I/O腳位、483,840位元之RAM、35個嵌入式乘法器。

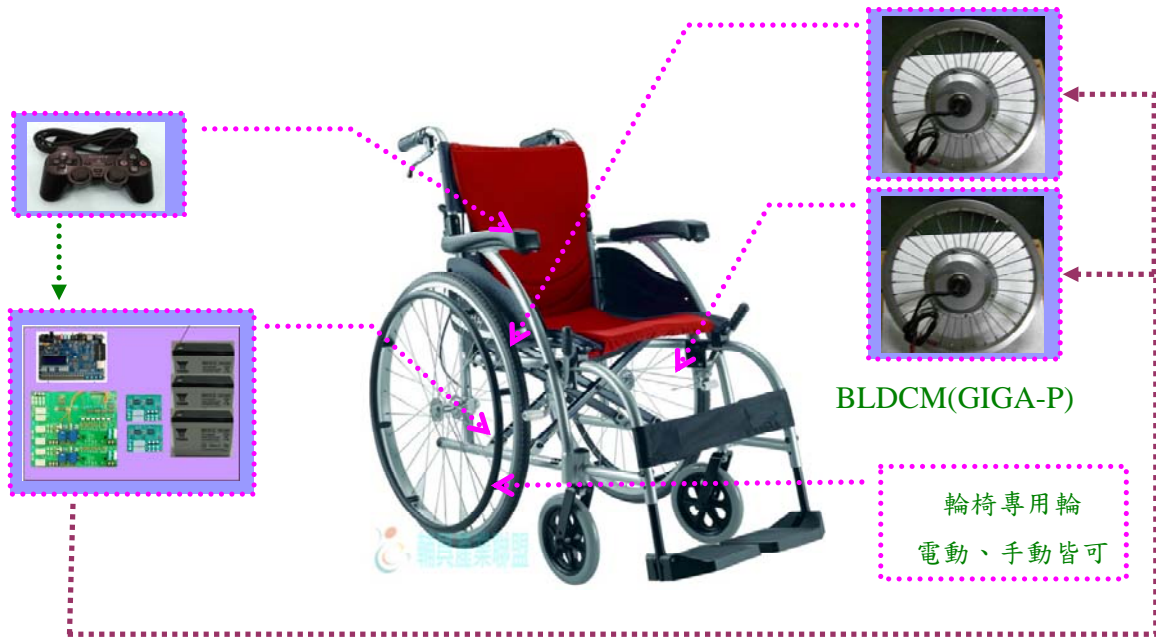


圖1. 以BLDC輪圈馬達為主之電動輪椅控制平台

II. 系統設計及規劃

本章節主要討論BLDC直流輪圈馬達數學模式、輪椅控制器結構、整體流程設計及規劃，並說明在一顆FPGA晶片中來實現整個運動控制系統。本專題所提之電動輪椅伺服控制平台軟硬體架構如圖1所示。

2.1 BLDC輪圈馬達與其數學模型

本專題所使用的BLDC輪圈馬達如圖2所示，用來驅動電動輪椅的左右軸，此馬達相較於傳統的馬達使用於電動輪椅上，左右輪還必須各配置一個變速箱來增加扭力，輪圈馬達則是將馬達、減速齒輪與電磁煞車皆設置於輪內，大幅減少體積的優點，以及輪胎與馬達在同一平面與傳統馬達以延伸的軸心與輪子連結，在使用時會使輪軸必須承受剪力，勢必影響電動輪椅的壽命。



圖2. BLDC輪圈馬達

典型BLDC數學模式以同步旋轉參考座標為主可表示如下式

$$\frac{di_d}{dt} = -\frac{R_s}{L_d}i_d + \omega_e \frac{L_q}{L_d}i_q + \frac{1}{L_d}v_d \quad (1)$$

$$\frac{di_q}{dt} = -\omega_e \frac{L_d}{L_q}i_d - \frac{R_s}{L_q}i_q - \omega_e \frac{\lambda_f}{L_q} + \frac{1}{L_q}v_q \quad (2)$$

其中 v_d 、 v_q 為 d 軸及 q 軸電壓； i_d 、 i_q 為 d 軸及 q 軸電流； R_s 為相電阻； L_d 、 L_q 為 d 軸及 q 軸電感； ω_e 為電氣角速度； λ_f 為磁通鏈。電磁性所產生的轉矩如下

$$T_e = \frac{3P}{4}(\lambda_d i_q + \lambda_q i_d) \quad (3)$$

為提高BLDC的性能，在電流迴路之正常模式時採用趨近向量控制，也就是將d軸電流控制為零， $i_d^* = 0$ ，即可使耦合非線性之永磁式同步馬達成解耦(Decouple)的功能，使得控制q軸電流即可達到控制馬達轉矩 T_e 。因此(3)式可簡化如下

$$T_e = \frac{3P}{4}\lambda_f i_q \triangleq K_t i_q \quad (4)$$

其中

$$K_t = \frac{3P}{4}\lambda_f \quad (5)$$

加上機械負載，永磁同步馬達之動態方程式形成如下

$$J_m \frac{d}{dt}\omega_r + B_m \omega_r = T_e - T_L \quad (6)$$

其中 T_e 、 K_t 、 J_m 、 B_m 及 T_L 分別表示馬達轉矩、轉矩常數、慣量值、阻尼值及負載轉矩。

2.2 具PWM之六步方波控制

BLDC 輪圈馬達驅動器之電流迴路採用 PWM 之六

步方波控制，其中馬達磁極之相位將決定功率晶體開關之順序，而 PWM 工作週期值(Duty cycle)將決定轉動之速度。以圖 3 為例，霍爾元件偵測到馬達磁極相位之順序如圖 3(a)所示，依序為 S_5 、 S_1 、 S_3 、 S_2 、 S_6 、 S_4 ，此信號將直接送到 FPGA 晶片內；而依此相位順序，本專題設計由 FPGA 晶片送出之 PWM 訊號來驅動圖 1 中換流器的功率晶體組以激發馬達的各相線圈之策略如圖 3(b)所示。

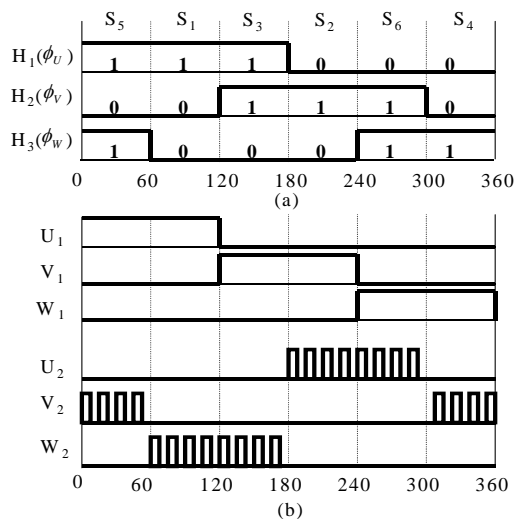


圖 3.(a)霍爾元件偵測馬達磁極之相位
(b)相對於磁極各相位 PWM 之開關策略

2.3. PI 控制器

一般而言馬達的速度響應是越快越好，但是在電動輪椅上整體的平穩性及使用者的感覺更加重要。為使電動輪椅在啟動時更平穩，本專題之 BLDC 馬達驅動器之電流迴路採用 PWM 之六步方波控制，而速度迴路皆採用閉迴路 PI 控制器，而數位 PI 控制器之計算公式如下：

$$v_p(n) = k_p e(n) \quad (7)$$

$$v_i(n) = u_i(n-1) + k_i e(n-1) \quad (8)$$

$$v(n) = v_p(n) + v_i(n) \quad (9)$$

其中 k_p ， k_i 分別為 P 控制器與 I 控制器之參數值。 $v(n)$ 為 PI 控制器的輸出。

2.4. 驅動電路板設計

以 FPGA 為基礎之 BLDC 驅動控制器如圖 4 所示。此架構包括一組整流器、一組智慧型功率晶體模組(IPM)電路、一組保護及隔離電路、一組電流濾波及調整電

路、一組比較電路、兩顆電流感測器(Current Sensor，CS)、兩顆 ADC、一顆永磁同步馬達及一個 FPGA 控制器。對於電流量測而言，FPGA 內實現了空間向量寬度調變(SVPWM)電路、座標轉換電路(Park、Clark、Park⁻¹及 Clark⁻¹)、光學編碼器信號偵測電路(QEP)及電流命令。驅動電路板之設計說明如下：

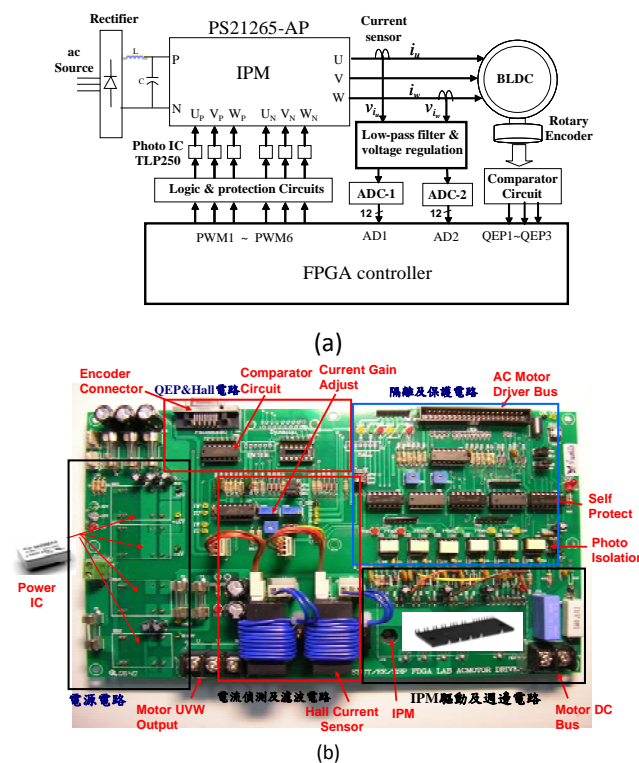


圖 4. 以 FPGA 為基礎之單軸 BLDC 驅動控制器(a)電路方塊圖(b)實驗板

A. 智慧型功率晶體模組(IPM)電路

此電路之輸入為隔離後之 PWM1~PWM6 訊號及整流器後產生之直流電壓(DC bus)，輸出為 U、V、W 訊號以驅動 BLDC。其中 U 相及 W 相訊號將先經過電流感測器(CS)元件(LEM HAS50-S)，然後連結至 BLDC。電流感測器之物理轉換特性為，將 -50A~50A 之電流值轉換至 -4V~4V 輸出。智慧型功率晶體模組使用三菱所生產的 IPM 21265-AP，此晶片內之 IGBT 電晶體集射極之額定電壓為 600V，開射極額定電壓為 ±200V，集極 DC 額定電流為 20A，短時間(1ms) 額定電流為 40A。

B. 保護及隔離電路

此電路之輸入為 FPGA 晶片輸出之 PWM1~PWM6 訊號，而輸出為隔離後之 PWM1~PWM6 訊號，此訊號將輸出至 IPM 模組電路。為了防止 IPM 同一臂導通，

FPGA 輸出之各組 PWM 訊號設計具有互斥的功能。光耦合隔離 IC 型號為 Toshiba TLP250，其輸出具有推挽放大器功能，相當適合作為 IPM、IGBT 或 MOSFET 晶體閘極之驅動電路。另外一提，光耦合隔離 IC 前後級電路之必須使用不同接地。

C. 電流濾波與電壓準位調整電路

圖 4 中電流濾波與電壓準位調整電路如圖 5 所示。此電路之輸入訊號為從電流感測器(CS)元件量測馬達 U 相與 W 相之電流訊號。以 U 相電流為例，雖然馬達電流值為安培(A)，但是經由 CS 元件量測後為電壓值(V)，以使用 LEM HAS50-S 為例，兩者間的轉換公式如下：

$$v_{i_u} = i_u \times N \times \frac{4V}{50A} \quad (10)$$

其中 i_u 為馬達 U 相之電流值、 N 為繞過 CS 元件上之圈數、 v_{i_u} 為 CS 元件輸出之電壓值而 $\frac{4V}{50A}$ 為物理量轉換值。因此若 $N=10$ 時，CS 元件輸入 $i_u = \pm 5A$ 時，其輸出之電壓值為 $v_{i_u} = \pm 4V$ 。

在圖 5 電路設計主要包括濾波電路及電壓準位調整電路。在馬達電流量測值，主要受 PWM 切換之訊號干擾，其頻率一般為 12kHz 或 16kHz。因此此處濾波器主要需濾掉因 PWM 所引起之干擾訊號。一般濾波器設計採用一階或二階低通濾波器，而截止頻率(cut-off frequency)之設計宜採約 2~10 倍的馬達最高之電流頻率。此值與馬達極數與最高轉數有關，其公式如下：

$$f_{co} = (2 \sim 10) \times f_{c_{max}} = (2 \sim 10) \times \frac{r_{max} \times P}{120} \quad (11)$$

其中 f_{co} 為濾波器設計之截止頻率、 $f_{c_{max}}$ 為量測到馬達電流之最高頻率、 r_{max} 為馬達最高轉速(rpm)而 P 為馬達之極數。以 8 極永磁同步馬達為例，若最高轉速 r_{max} 為 2000rpm，則量測馬達電流之最高頻率 $f_{c_{max}}$ 為 133.3Hz，而濾波器設計之截止頻率 f_{co} 宜為 266.6Hz~1.333kHz。而圖 4 中以 U 相電路為例，其濾波器設計為一階低通濾波器電路，高頻截止頻率約為

$$f_{co} = \frac{1}{2\pi R_{52} C_{28}} \quad (12)$$

除了濾波器電路以外，圖 5 中還包括有放大器電路、反相加法器電路及反相器電路。我們設定了幾個量測點，以 U 相電路為例，其各量測點電壓之轉換公式如

下：

(a) 放大器電路：

不考慮電容濾波功能，其輸出入電壓公式為

$$v_2 = \frac{VR_2 + R_{56}}{R_{56}} \frac{R_{54}}{R_{52} + R_{54}} v_1 \quad (13)$$

輸入電壓 v_1 可能來自電流感測器量測到之電壓值 v_{i_u} 或測試用之電壓值 v_T ，而 VR_2 為可變電阻。因為圖 5 中設計上選擇 $R_{52} \ll R_{54}$ ，因此(13)式可簡化為

$$v_2 = \frac{VR_2 + R_{56}}{R_{56}} v_1 \quad (14)$$

其中 $\frac{VR_2 + R_{56}}{R_{56}}$ 為直流偏壓放大值。

(b) 反相加法器電路：

為了使圖 5 中輸出至 ADC 的電壓控制到 0~5V 間，設計一個反相加法器電路以提升輸入電壓之準位，此值為 2.5V。圖 5 中反相加法器電路，其輸出入電壓公式為

$$v_4 = -R_{11} \left(\frac{v_3}{R_7} + \frac{v_2}{R_8} \right) \quad (15)$$

其中 v_3 為外加之電壓，由一顆可變電阻 VR_4 調整其電壓值，電壓可調範圍為 0V~12V 間。

(c) 反相器電路：

由於 v_4 之電壓值經過反相電路，因此需再設計一個反相器電路讓它轉為原相值，其輸出入電壓公式為

$$v_5 = -\frac{R_{15}}{R_{13}} v_4 \quad (16)$$

因為圖 4 中設計上選擇 $R_{15} = R_{13}$ ，因此(7)式成為

$$v_5 = -v_4 \quad (17)$$

故圖 5 中整體電路 U 相之輸出電壓 $v_{uo} = v_5$ 。

圖 5 電流濾波與電壓準位調整電路功能歸納如下：

(1) 具有一階濾波器功能，其高頻截止頻率

$$\text{U 相：} f_{co} = \frac{1}{2\pi R_{52} C_{28}} \quad (18)$$

$$\text{W 相：} f_{co} = \frac{1}{2\pi R_{53} C_{29}} \quad (19)$$

(2) 輸出入直流偏壓值為：

$$\text{U 相：} v_{uo} = \frac{R_{11}}{R_7} v_3 + \frac{R_{11}}{R_8} \frac{(VR_2 + R_{56})}{R_{56}} v_{i_u} \quad (20)$$

$$\text{W 相：} v_{wo} = \frac{R_{12}}{R_9} v_3 + \frac{R_{12}}{R_{10}} \frac{(VR_3 + R_{57})}{R_{57}} v_{i_w} \quad (21)$$

