

具低成本、高速電動車馬達系統之電流式磁感測器設計

A Low Cost, High Speed EV Motor Current Mode Magnetic Sensor Design

張元泰 莊凱翔
Tiger Chang, Kai-Cheung Juang

中文摘要

本文提出適用於馬達系統之低成本、高速磁感測器。此磁感測器，包含訊號調節放大器，霍爾元件，霍爾偏壓電路皆整合於單晶之積體電路。霍爾元件設計採用標準CMOS製程組成，為一單積體電路平版，相較傳統特殊製程多組平版，本設計具高成本效益。訊號調節放大器設計採用chopping技術以重整雜訊並濾除偏移誤差，設計採用電流式回授提升操作速度。霍爾偏壓電路設計導入改良式spin current技術，具傳統之spin current效能並同時結合訊號調變效果，簡化前饋路徑設計並移除訊號路徑之低頻極點。提出之磁感測器具有極微小之偏移電壓(<11 nT)，感測速度可操作大於400 kHz頻寬之應用，相較優於現有商用產品速度5倍以上，面積節省220%以上。

Abstract

A low cost, high speed Hall sensor for motor application is presented. The Hall sensor, its signal conditioning amplifier, Hall plate and Hall biasing circuit are fully integrated in a single chip. The Hall device is a single plate configuration made by only standard mask process for low cost feature. The signal conditioning amplifier applied the noise shaping and offset filtering by chopping technique, also designed by current-feedback approach to broaden its operational speed. The Hall biasing circuit designed by proposed signal-chopped spinning current method (sc-spinning current) to combine spinning current and chopping signal into Hall biasing circuit, which ease feed-forward path design and decrease the poles in signal path. The Hall sensor has typical offset of 11 nT. The sensing speed can operate more than 400 kHz operation bandwidth. Compare to commercial products, the sensing speed of this design is improved at least five times faster and reduce chip area at least 220%.

關鍵詞(Key Words)

霍爾元件 (Hall)

電流旋轉 (spin current)

電流式回授 (current feedback)

1. 前言

磁感測於車用及工業應用趨勢，日益成長，例如於車體中偵測馬達轉子位置，角度，轉速及馬達電流感測等。其中，轉速快慢，設計上對應磁感測器操作頻寬大小。在此應用下，感測方法需具備高轉速偵測、需求大寬頻設計、低偏移誤差、低雜訊、抗干擾及非接觸、無損式感測之特色，更重要的是還能具低成本的设计。目前，商用產品之感測速度一般為數十KHz左右[1]，未來逐漸的越來越無法滿足上百KHz之感測需求，舉凡高轉速電動車馬達應用、電流感測，系統頻寬需求動輒上百KHz，現有產品實難以滿足，勢必造成應用上之缺口，感測器在此扮演關鍵零組件之角色，故提升感測器操作頻寬，對系統優化助益最大。

非接觸式之感測，具有無損(lossless)之優點，目前被大量採用之非接觸式感測方案以磁感測為主流，其中又以霍爾元件(Hall element)為最大宗。然而，為提升霍爾元件感測靈敏度，常採用特殊光罩，甚至導入昂貴的後製程，暨望改善其感測能力，但卻降低元件成本效益，並且，為減低元件不匹配性，layout時，常以多組相同的霍爾元件相互交叉排列，犧牲寶貴的晶片面積。

此外，經由霍爾元件輸出的電壓仍甚為微弱(~uV to mV)，容易受雜訊和偏移誤差干擾，因此，為免除此干擾，一般在偏壓電路導入spin current技術及在訊號調節放大器採用chopping技術，並於後端置入filter濾除漣波雜訊，如此的設計使系統相對複雜，造成成本效益低，同時，也侷限操作頻寬[2]

本文提出具高成本效益設計方案，並達成高速感測之應用。提出之感測器，其組成由霍爾元件，偏壓電路、電流編碼電路及電流式回授訊號調節放大器(圖一)。其中，霍爾元件僅由單一元件組成，且採用傳統標準CMOS製程，無任何額外特殊光罩，提升元件成本效益，訊號調節放大電路導入電流式回授，提升操作速度，並且採用改良式spin current，其效益為移除系統偏移誤差，減輕相位補償，提升暫態響應，且無置入filter需求，其中電流編碼波形載明於圖二，相較於傳統spin current，改良式

spin current結合chopping 技術，且無需對偏移誤差做平均消除，也免除低通積分電路之需求。

本文接下來各段編排如下，第二段，摘要感測器系統架構。接續第三段，驗證結果並結論於第四段。

2. 感測器系統架構

2.1 Hall Plate

Hall元件發展基礎建立於Hall效應，其現象為勞倫茲力(Lorentz Force)之一特例，原理

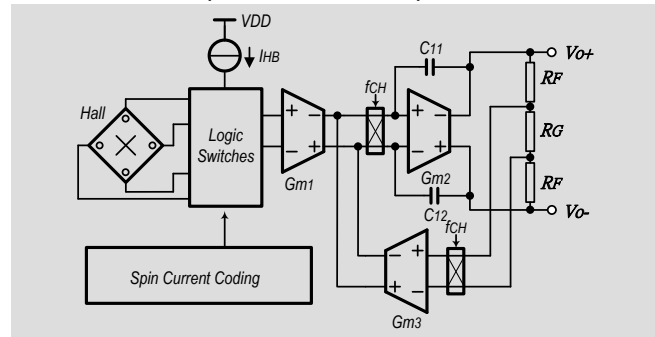


圖 1 磁感測系統方塊圖

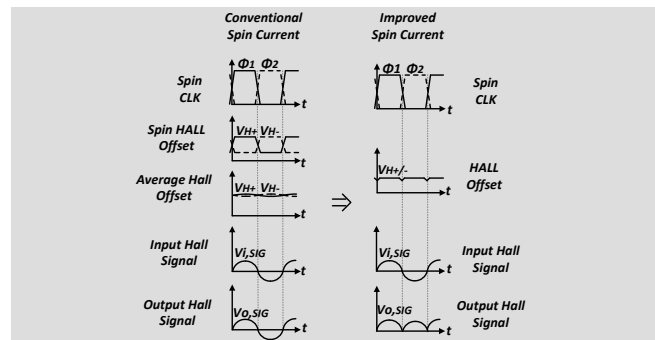


圖 2 Spin Current 電流編碼波形

為兩物理力的加乘，一是電場力(electric force)，另一則是磁場力(magnetic force)，當磁力施加於一載有電流之導體，於導體邊緣兩側將產生一差動電壓，其方向與磁力互為正交，此差動電壓即名為Hall 電壓。勞倫茲力之關係式闡明於(1)。

$$\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B} \quad (1)$$

其中F是合力，E是電場力，V是導體內載子移動速度，B是磁力，q是電荷量(1.6*e-19C)。載

子移動之速度關係式載明於(2)。

$$v = \frac{I}{qNA} \quad (2)$$

其中，I是電流，其單位為安培，N是每單位立方體積之電流密度，A為導體截面積，其單位為平方公分。藉由物理現象與各式連結，經分析可得Hall電壓並載明於(3)。

$$V_H = \frac{IB}{qNd} \quad (3)$$

其中V_H為Hall電壓，方向與導體電流方向正交，d是導體厚度，其單位為公分。綜合以上各式，設計上重要考量為越低摻雜或越薄的材料，可提升磁場對Hall電壓之轉換效率。本設計採用標準CMOS製程及單組Hall元件，具高成本效益，並藉由電路設計技巧，克服元件之不理想性。

2.2 偏壓電路與控制電路

傳統上，於偏壓電路採用spin current 技術，藉由電流旋轉機制及置入filter以濾除偏誤差，於訊號路徑造成極大的延遲。Filter於系統中亦消耗大量功耗及可觀的晶片面積。並且，若filter以離散時間架構實現，因開關的非理想特性，造成訊號突波。另外，若filter以連續時間架構實現，其被動元件佔用可觀的晶片面積，降低成本效益。本節闡述改良式spin current技術，改善傳統技術上問題。改良式spin current技術結合訊號調變與電流旋轉機制，藉由頻域分離，將訊選調變至高頻而偏移誤差則於電流旋轉機制中還原為DC，並於後級回授放大電路濾除，因此無置入Filter需求，詳細的控制波形載明於圖二，相較於傳統spin current技術僅處理偏移誤差，並於後級加入低通積分電路濾除，改良式spin current技術對系統優化考量助益甚大。另外，改良式spin current訊號路徑無置入filter需求因而改善延遲。Hall元件偏移誤差與訊號放大器偏移誤差一併由後級回授放大器濾除。藉由導入改良式spin current技術，達成減少整體晶片面積、提升系統頻寬，並節省電路功耗。

2.3 訊號調節放大器

相較於一般類比訊號，Hall電壓相對上是非常微弱，其大小一般約為10uV/G，其中G為磁場單位高斯，並且極易受雜訊干擾，包含熱雜訊，電路雜訊等。在此環境條件下，微弱的Hall電壓，相對十分重要。所以，將輸入電壓解析出Hall電壓並放大，即為訊號節放大器最主要的工作。因此，訊號調節放大器需具備高增益，高共模拒斥比(CMRR)，低偏移電壓及低雜訊。傳統上，採用3組運算放大器(3-op)之電壓回授式儀表放大器。其高增益及高CMRR成為此架構被選用之最主要因素，然而，其CMRR效能對其回授電阻匹配性，及運算放大器對稱性具有強相關因性，受限於製程技術，此架構實際之CMRR甚難滿足要求，因此，實際上，常於製造過程，導入trimming機制，針對每一個die做修改。並且，為滿足CMRR需求，必需採用高精度trimming方法，十分不符成本效益。3-op架構操作頻寬受限於電壓回授之增益頻寬乘積(GB)，且其架構之輸入級藉由2組op達成，欲增加頻寬則同時需增加2倍op功耗。另一方面，電流式回授放大器僅需一輸入級，架構上與後級電路具隔離效果，減輕CMRR與電阻、元件不匹配性之間的相關性，使得符合CMRR需求，無需導入trimming機制，提升成本效益。於圖一，表示其系統架構，其中，GM1、GM2、GM3為轉導級，RF、RG為回授電阻。轉導級GM1隔離CMRR干擾。轉導級GM2、GM3及電阻RF、RG形成負回授。藉由理論推導，轉導級GM1輸出電流與轉導級GM3回授之誤差電流相互抵消，其整體閉回路增益如式(4)。

$$A_v = \frac{Gm1}{Gm3} \cdot \left(1 + \frac{2R_F}{R_G} \right) \quad (4)$$

其中，電容C11、C12為補償電容。另外，為符合低雜訊設計，採用chopping技術，其中，調變解調電路以switched mixer架構實現。據上所述，相較於電壓回授式，採用電流回授式架構具有寬頻，高CMRR優點，適合應用在高速度系統。

3 · 量測結果

感測電路以0.5um 2P3M標準CMOS製程實現，其晶片面積1.3mm*1.0mm。圖三所示

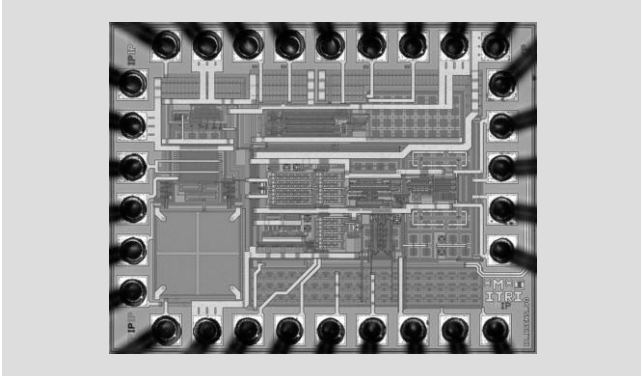


圖 3 磁感測微影像圖

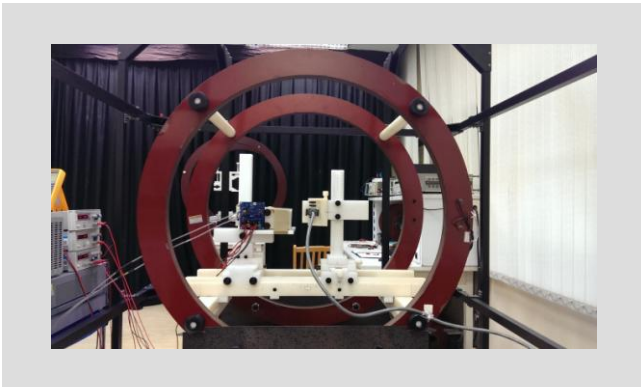


圖 4 Helmholtz coil量測環境設定

為系統微影像圖。

量測上採用亥姆霍茲線圈(Helmholtz coil)完成，於線圈中心製造接均勻磁場。亥姆霍茲線圈及測試平台如圖四所示。其組成具有兩組相互平行之環形線圈。當電流通過，將產生環繞磁場，圍繞圖中前後兩組線圈。待測感測晶片則置於亥姆霍茲線圈中心。測得低頻1 kHz及高頻400 kHz響應，其結果如圖五、圖六所示。測試頻寬400 kHz，受限於線圈訊號產生器輸出之最大頻寬。另外，量測到的頻率響應載明於表1。測得系統靈敏度為5.5 mV/G，線性度<2%，規格符合工業規範，並載明於圖七。本設計達成偏移誤差<11 nT，3.48 mA工作電流及於負載電容CL=50 pF，測得頻寬>400 kHz。

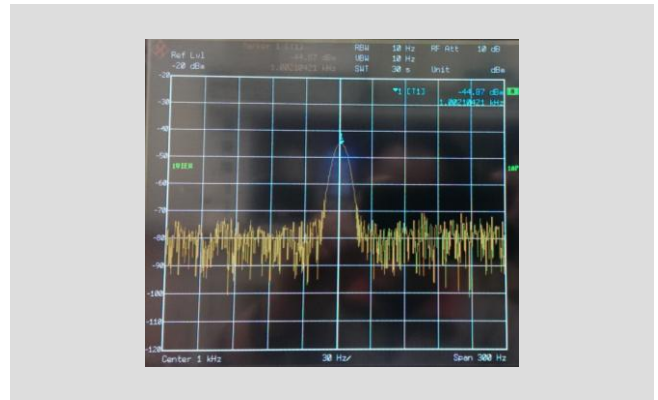


圖 5 測得100kHz頻率響應

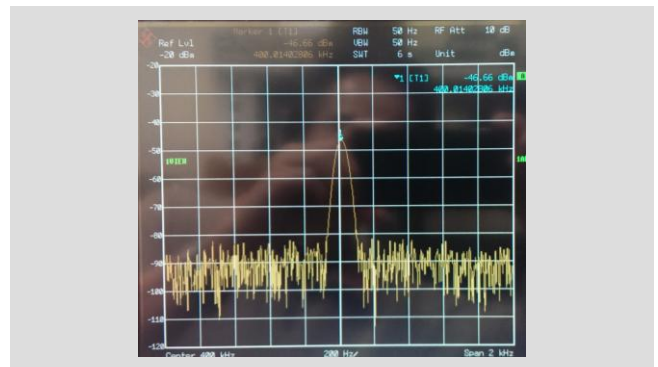


圖 6 測得400kHz頻率響應

表 1 測得頻率響應

Parameter		
Input		Output (dBm)
Frequency	Magnitude	
1kHz	400mG	-44.8
70kHz	50mG	-47.7
120kHz	50mG	-50.6
400kHz*	50mG	-46.6

(*Limited by Helmholtz coil and signal source generator)

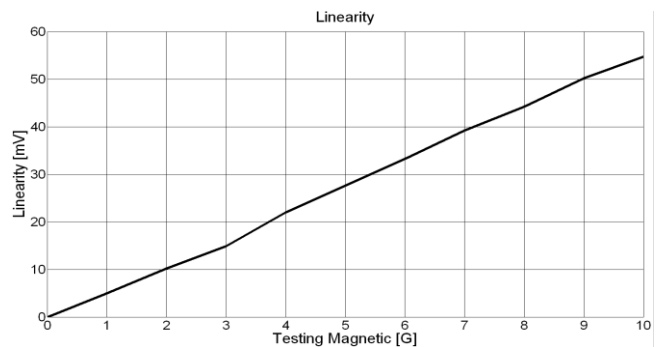


圖 7 線性度量測結果圖

表 2 規格比較表

Parameter	This work	2006 [3]	2012 [4]
Technology	0.5um	0.6um BiCMOS	0.35um
Power supply	5V	5V	3.3V
Current consumption	3.48mA	7.5mA	N/A
Input-referred offset	<11nT	<50uT	N/A
Unity-gain bandwidth	>400kHz, CL=50pF *	3.2kHz	500kHz
Chip area	1.3mm ²	6mm ²	11.6mm ²
Normalized area	1	3.2	18.2

(*Limited by Helmholtz coil and signal source generator)

4 · 結論

本設計提出符合高速且低成本磁感測器並實現於0.5um標準CMOS製程，工作電流<3.5 mA，工作電壓5 V，並達成偏移電壓<11 nT，導入改良式spin current技術及電流式回授技術，於負載電容CL=50 pF下，測得頻寬>400 kHz，相較現有產品的速度5倍以上，Hall元件設計以相容標準CMOS製程實現，並無導入特殊光罩需求，且僅以單組Hall元件取代傳統多組Hall元件，節省晶片面積，提升感本效益。另外，改良式spin current及電流式回授技術，相較於傳統spin current電壓式回授，本設計免除filter電路，節省可觀面積，相較於現有商用產品，提升操作頻寬達5倍以上。規格與文獻比較表列於表2，本設計面積節省約至少220%以上，製程成本最低，操作頻寬大於400 kHz。

綜觀本設計之磁感測器適用於高速，低成本系統。特別適用於車用電子及工業電子領域。

參考文獻

[1] Allegro Microsystems, LLC, "A1388 and A1389 data sheet," 2009.

[2] C. C. Enz and G. C. Temes, "Circuits techniques for reducing the effects of op-amp imperfections: Autozeroing, correlated double sampling, and chopper stabilization," Proc. IEEE, vol. 84, no. 11, pp. 1584-1614, 1996.

[3] Mario Motz, Udo Ausserlechner, and Wolfgang Scher, "An Integrated Hall sensor

Platform Design for Position, Angle and Current Sensing," IEEE SENSORS, pp. 1008-1011, 2006.

[4] Andrea Ajbl, Marc Pastre, and Maher Kayal, "A fully Integrated Hall Sensor Microsystem for Contactless Current Measurement," IEEE SENSORS, pp. 1-4, 2012.

[5] B. J. van den Dool and J. H. Huijsing, "Indirect current feedback instrumentation amplifier with a common-mode input range that includes the negative rail," IEEE J. Solid-State Circuits, vol. 28, no. 7, pp. 743-749, 1993.

[6] A. Bilotti, G. Monreal, and R. Vig, "Monolithic magnetic Hall sensor using dynamic quadrature offset cancellation," IEEE J. Solid-State Circuits, vol. 32, no. 6, pp. 829-836, 1997.

[7] Zoran B. Randjelovic, Maher Kayal, Radevoje Popic, and Hubert Blanchard, "Highly Sensitive Hall Magnetic Sensor Microsystem in CMOS Technology," IEEE J. Solid-State Circuits, vol. 37, no. 2, pp. 151-159, 2002.

[8] P. Munter, "A low-offset spinning-current Hall Plate," Sensors and Actuator, vol. A21-A23, pp. 743-746, 1990.

[9] Jeroen C. van der Meer, Frank R. Riedijk, Edward van Kampen, Kofi A. A. Makinwa, and Johan H. Huijsing, "A fully integrated CMOS Hall sensor with a 3.65uT 3-sigma offset for compass applications," IEEE ISSCC Dig. Tech. Papers, vol. 1, pp. 246-247, 2005.

[10] Analog Devices, Inc. "A designer's Guide to Instrumentation Amplifiers 3rd Edition data sheet," 2006.

[11] Rober Racz, Christian Schott, Samuel Huber, "Electronic Compass Sensors," IEEE SENSORS, pp. 1446-1449, 2004.

[12] Christian Schott, Rober Racz, Angelo

Manco, and Nicolas Simonne, "CMOS Single-Chip Electronic Compass With Microcontroller," IEEE J. Solid-State Circuits, vol. 42, no. 12, 2007.

- [13] P. M. Drljaca, M. Demierre, C. Schott, and R. S. Popvic, "Nonlinear Effects In Magnetic Angular Position Sensor With Integrated Flux Concentrator," IEEE MIEL 23rd, pp. 223-223, 2002
- [14] P. D. Dimitropoulos, P. M. Drljaca, and R. S. Popvic, "A 0.35um-CMOS, Wide-Band, Low-Noise Hall Magnetometer for Current Sensing Applications," IEEE SENSORS, pp. 884-887, 2007.

作者簡介

張元泰



工研院資通所綠能電子設計與應用部工程師。

[E-mail: Tiger@itri.org.tw](mailto:Tiger@itri.org.tw)

莊凱翔



交大電信所碩士
現任工研院資通所綠能電子設計與應用部經理

專長為類比積體電路設計

[E-mail: KC_Juang@itri.org.tw](mailto:KC_Juang@itri.org.tw)