

最新RFID射頻識別/感測技術應用發展概論

◎明新科大電機系 廖建興博士 李智新博士 編譯

摘要

射頻識別(RFID)感測器係整合無線資訊及功率傳送(WIPT)、物件識別,及節能感測能力的特點,被認為是未來資訊系統新的感測及通信典型。RFID感測器標籤(Tags)具有非接觸式感測、無線資訊傳送、無線供電、輕量、非視線傳送、彈性及可粘貼等特性係一個實現未來物聯網(IoT)應用的關鍵技術,例如製造業、物流業、醫療保健業、農業及食品業。由於在各個應用領域的創新潛力,它們已經吸引大量的研究工作及努力。然而,由於實驗室研究及實際的物聯網應用場景兩者之間仍存在著落差,因此開啟本次研究審視工作,目的便是識別出有前景及致能技術及仍潛存的挑戰性問題。本研究主要從系統實現觀點提供對最先進的RFID感測器技術的詳盡回顧,並聚焦於基本的射頻能量採集理論、最近的技術進步及商業解決方案、創新應用及一些基於IoT物聯網RFID感測器解決方案、指明當前潛在的技術挑戰,以及在即將到來的物聯網時代的眾多感測應用中,提出未來的研究趨勢及有前瞻性的應用領域。

(本文主要係翻譯自2019年Sensors期刊Radio Frequency Identification and Sensing Techniques and Their Applications—A Review of the State-of-the-Art.)

關鍵詞:射頻能量採集(Radio Frequency Energy Harvesting);射頻識別感測器(RFID Sensors);物聯網(IoT);電感耦合(Inductive Coupling);反向散射(Backscattering);訊答器(Interrogator);標籤(Tag);讀取器(Reader)

1. 緒論

射頻識別(RFID)技術可做為物聯網(IoT)的關鍵感測層致能技術,現在已經可以在廣泛的領域中找到各種應用,以使用於資料整合及管理,包括如人員識別、物流及零售、存取控制、停車管理,及室內定位等。與其他條形碼及二維QR碼替代品相比,射頻供電的識別方法,具有非接觸式、無線供電、非視線、可讀寫、重量輕、多標籤同時讀取等特性,讓允許連接的“物件”可資識別,以便進行進一步的資料通信及整合。RFID功能是透過其天線從訊答器(Interrogator)採集射頻能量,無論是超高頻(UHF)或高頻(HF),激能標籤中的RFID晶片,並將ID碼發送回訊答器,其中ID代碼是一個固定數位,用作“物件”的唯一標識符碼。特點是可以將與其身份對應的“物件”存入資料庫;並即時更新用於資料管理,以滿足不同應用程序的需求。

然而,由於RFID晶片是一個由射頻能量供電的積體電路(IC),具有感測能力的元件也可以潛在地整合到RFID標籤中以進行同時識別及感測目的。RFID標籤與感測組件的整合最終可以提供以無線供電、非接觸式及非視距方式之識別及感測能力。不同於傳統的有線或電池供電的感測,同步無線資訊及功率傳送(SWIPT)已成為感測及通信的新範例,其可能會重塑未來豐盛的感測物聯網世界。一方面而言,由於RFID訊答器覆蓋範圍廣,移動性強,RFID感測器標記“物件”的測量已不再局限於特定地點。另一方面而言,由於RFID感測器可以是完全被動的,無需像傳統無線感測器那樣頻繁更換RFID感測器節點的電池。因此,RFID感測器的資訊感測過程變得更加



彈性及方便，其應用並可以擴展到更廣泛的領域。

由於RFID感測技術的便利性，近年來其已吸引許多研究工作，在文獻中可以找到許多範例性的新穎應用。首先，它們已廣泛應用於工業中的溫度及濕度感測、應變、壓力、鋼腐蝕及裂縫、混凝土結構、管道完整性監測等。其次，它們在醫療保健領域也很受歡迎，例如一些可穿戴及可植入裝置以用於血糖監測、血壓、眼內壓、及呼吸異常的皮膚監測判別等。以上例子是一些研究的典型案例，但研究及應用不僅限於它們。RFID感測技術的主要研究可以分為四類：(1)射頻頻率能量採集效率；(2)RFID與感測技術的整合；(3)無晶片型RFID技術；(4)RFID感測器網路技術。

雖然RFID感測的研究及應用已取得重大的技術進展，但實驗室研究及實際應用之間仍存有落差。此外，RFID技術與感測組件的整合仍存在許多技術問題尚未充分解決。文獻回顧當中發現仍缺乏一份當今最新技術進展及挑戰的總結性綜合性報告。基於上述原因，本研究工作動機係在即將到來的物聯網時代的眾多感測應用中，報告說明RFID感測器的最新技術方案、近期技術進展、技術挑戰，以及預測未來的研究方向

本文的組織結構如下：首先，第2部分介紹基礎知識射頻能量採集、RFID及RFID感測；其次，第3部分提出最近的技術RFID感測技術的進展，包括射頻能量採集效率、RFID的整合感測器、商業解決方案

及學術界及工業界的創新應用。然後，第4部分指明該特定領域的潛在挑戰，然後是第5部分介紹新型RFID應用的未來前景。最後，第6部分總結這項研究的工作。

2.射頻能量採集及RFID感測器技術的基本原理

能量採集的原始功率來源可以是不同的形式，例如機械移動動及振動、太陽能、熱能、電磁能等。自20世紀90年代初以來，當Tesla及Hertz提出無線能量採集的概念後，無線能量採集研究在科學界變得越來越廣泛。根據RFID的基本原理，射頻能量採集可分為電感耦合(Inductive Coupling)及反向散射(Backscattering)。工作在13.56MHz載波頻率的HF RFID係透過近場電感耦合發射及接收功率；並且工作在840-960 MHz載波上的UHF RFID頻率處理具有遠場反向散射的功率傳送及接收。此外，使用移位諧振頻率進行測量之無晶片型RFID也成為研究熱點。本次研究的重點是HF及UHF RFID感測器技術，為此，最近幾年新的研究及新的技術解決方案已被廣泛報導。

2.1. HF電感耦合及HF RFID感測器技術

HF RFID感測器裝置透過電感耦合傳送或接收能量及資料，這是透過訊答器及標籤線圈天線之間的交變磁場實現的。交變磁場由電感電容(LC)諧振腔產生，其結構及等效電路如圖1所示。

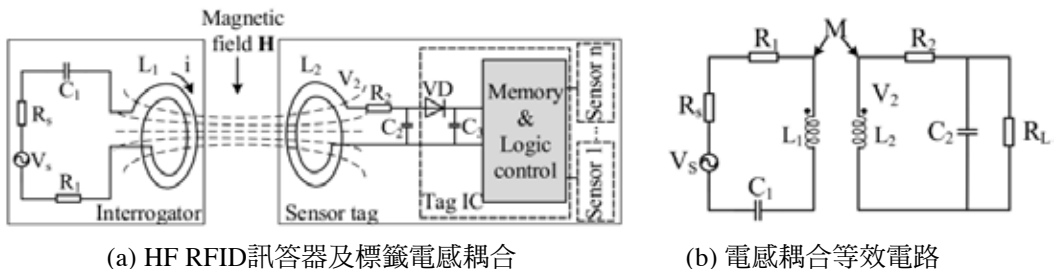


圖 1. HFRFID感測器的基本原理。

如圖1所示， V_s 為訊答器中的無線功率， L_1 及 C_1 構成諧振腔迴路（諧振頻率 V_s ）用於功率傳送，諧振頻率為 f_0 ，通常為

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1C_1}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2C_2}} \quad (1)$$

標籤天線上的感應電壓 v_2 與磁場的變化率成正比。透過線圈的通量 Ψ ，可以表示為：

$$v_2 = -\frac{d\psi}{dt} = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} = -N_2 \frac{d}{dt} \int B \cdot dS = -N_2 \frac{d}{dt} \left(\int_2 \frac{\mu_0 i_1 a^2 N_1}{a^2 + r^2} \cos \alpha \cdot dS \right) \quad (2)$$

其中 N_2 及 N_1 是標籤及訊答器天線線圈的繞組數， Φ 是每個繞組線圈的磁通量， B 及 S 是磁感應強度及線圈面積， i_1 是訊答器線圈的電流， a 是訊答器線圈的半徑， r 是距離兩線圈之間， α 為 B 及 S 夾角。(1)中，

其中 M 是互感應係數，可以用下式計算 $M = \frac{\mu_0 N_1 N_2 a^2 S}{2(a^2 + r^2)^{3/2}}$

方程式(2)及(3)提供接收功率及兩個天線主要參數及其關係之間的明確關係。電壓 V_2 可以整流器及穩壓器電路處理，以提

供RFID晶片及感測器模組功率，用於資料採集及訊息傳送。

當 B 及 S 夾角為0時 v_2 可以透過以下表示式計算：

$$v_2 = - \left[\frac{\mu_0 N_1 N_2 a^2 S}{2(a^2 + r^2)^{3/2}} \right] \frac{di}{dt} = -M \frac{di}{dt} \quad (3)$$

供RFID晶片及感測器模組功率，用於資料採集及訊息傳送。

2.2. UHF 反向散射及UHF感測器技術

有別於HF RFID系統，UHF RFID感測器裝置的工作模式是雷達反向散射，由UHF訊答器、RF傳送路徑、RFID標籤及感測器模組組成，其結構如圖2所示。功率傳送的性能為由主要元件的參數決定，包括輻射功率及發射天線及接收天線增益、載波信號的波長，及發射天線及接收天線之間距離。

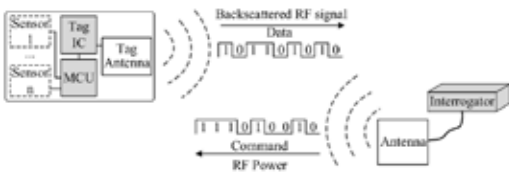


圖2. UHF RFID感測器的基本原理

2.2.1. 訊答器-標籤RF功率傳送

做為被動裝置，RFID感測器標籤接收訊答器的功率來完成感測及資料傳送程序。根據射頻傳送的數學關係由Friis方程提出，距訊答器天線 S 距離為 R 處的射頻能量的功率密度可以表示為：

$$S = \frac{P_T G_T}{4\pi R^2} \quad (4)$$

其中 P_T 及 G_T 是發射天線的功率及增益。假設標籤接收天線的有效維度 A_E 定義為 $A_E = G_{Tag} \lambda^2 / 4\pi$ ，接收天線的增益為 G_{Tag} ，射頻載波信號的波長為 λ ，則接收功率 P_{Tag} 可表示為：

$$P_{Tag} = S \cdot A_E = \frac{P_T G_T}{4\pi R^2} \cdot \frac{G_{Tag} \lambda^2}{4\pi} = P_T \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 G_T G_{Tag} \quad (5)$$

2.2.2. UHF RFID功率反射

標籤反射的射頻功率與標籤的雷達截面(RCS) σ 成正比。RFID標籤 P_{Back} 反射的功率可以用方程式(6)表示之，其中 S 是功率密度，功率密度 S_{Back} 可以用方程式(7)表示， P_T 及 G_T 是傳送標籤天線的功率及增益。假設 G_R 是訊答器天線的增益，有效接收天線的尺寸 $A_o = G_R \lambda^2 / 4\pi$ ，訊答器接收功率 P_R 可由方程式(8)表示之：

$$P_{Back} = S \cdot \sigma = \frac{P_T G_T}{4\pi R^2} \cdot \sigma \quad (6)$$

$$S_{Back} = \frac{P_T G_T \sigma}{(4\pi R^2)^2} \quad (7)$$

$$P_R = S_{Back} \cdot A_o = \frac{P_T G_T G_R \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4} \quad (8)$$

標籤的資訊，包括標籤ID及感測器資訊，透過調變反射的載波射頻波被傳送到訊答器。顯然地，天線的增益、天線之間的距離，及標籤的RCS是決定RFID感測器測量結果讀取距離及效率的關鍵參數。

2.3. 無晶片型RFID感測器

無晶片型RFID感測器只需更改RFID標籤的雷達輪廓即可傳送感測器資料而無需複雜的積體電路，其結構如圖3a所示。當標籤的接收天線接收訊答器發射的信號，諧振電路選擇不同頻率的信號來產生特定的諧振頻率及不同的諧振頻率振幅，然後透過標籤的發射天線將資料返回給訊答器。然後訊答器解析其特定頻率信號的振幅及相位變化。最後，資料處理後根據不同的頻譜特徵對信號ID進行編碼。當無晶片型標籤放置在被測材料(MUT)上時，當感測器資料發生變化時諧振頻率將隨應漂移變化，如圖3b所示。

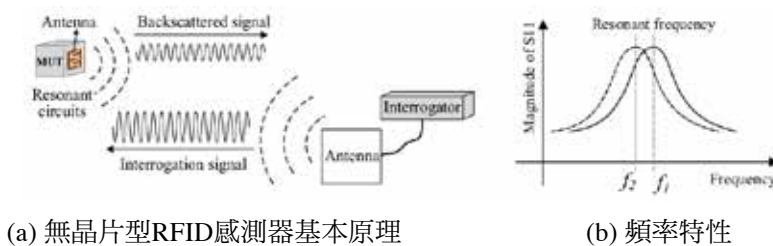


圖 3. 無晶片型RFID感測器—基本原理及頻率特性

無晶片型RFID的功能是由天線決定的，而天線通常是為一些特殊應用。無晶片型RFID的ID由標籤的特徵頻率以一系列特定值定義之。因為被測材料的某些物理特性可以由諧振電路以電容及電感的形式反映。無晶片型RFID的資料儲存容量遠低於晶片型的RFID容量。然而，由於矽晶

片，無晶片型RFID成本明顯低於晶片型的RFID。因此，無晶片型RFID已成為低成本感測及識別應用的競爭選擇。

除HF、UHF及無晶片型RFID感測器之外，一些應用還利用商業標籤測量物件距離及定位，可用於機器人定位導航以及大型倉儲物流產品定位及物流等應用。

3. RFID感測器技術—技術進展及創新應用

與其他環境能量採集方法相比，射頻相對是一種可以在低能量環境中獲得更多可用功率的有效方法。此外，射頻能量採集與資訊傳送相結合，稱為無線功率通訊(WPC)及SWIPT，其已使許多創新應用可藉由無線供電、識別及通信成為可能。尤其是近年來，隨著IoT應用技術的進展以及低功耗感測及微控制器裝置的增加，感測器技術與RFID的整合引起很多研究興趣並促使顯著進步。本部分旨在及時總結近期的技術進展及創新應用。

3.1. RFID整合感測技術進展

3.1.1. 新型天線設計：RFID感測技術的前端 (Front End)

射頻能量採集電路主要由天線、整流器，以及倍壓器組成，如圖4所示的能量儲存裝置，其中天線捕獲電磁場射頻能量，然後整流器透過整流器將射頻能量轉換成直流電壓，最後將倍壓器增加的電壓儲存在能量儲存裝置中。

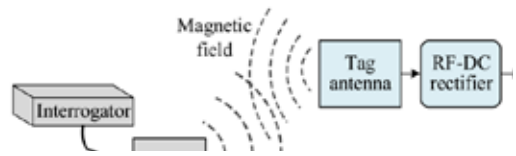


圖 4. RF能量採集電路圖

常用的RFID天線如圖5所示。圖5a中的天線通常是應用於HF系統，圖5b-d中的天線通常應用於UHF系統。高增益天線可以提高轉換效率，獲得更多的功率，所以高增益天線為首選。天線的性能可以透過許多參數進行評估，包括增益、頻段、輻射圖、極化、物理尺寸或應用領域。

天線位於RFID感測裝置的前端，是確定RFID感測器的性能的主要元件，包括其讀取距離、操作速度及感測器模組大小。因此，新穎的天線設計可以提高感測器裝置的性能並為不同的應用場景成為熱點。主要貢獻集中在小型化尺寸、可折疊天線、3D天線、金屬表面貼裝天線、多頻段天線，以及全向及定向天線等，其中一些代表性天線總結在表1。

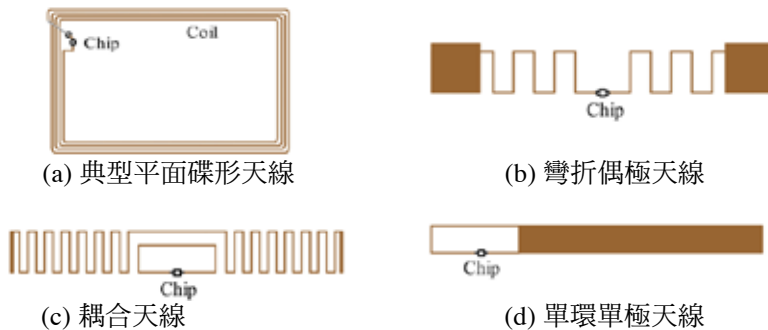


圖 5. 常用的RFID天線

表 1.RFID 天線

Novel Antenna	Carrier Frequency	Size	Reading Range	Investigators
metallic surface mountable antennas	UHF	30 × 18 × 3.2mm ³	1.5 m	Chen [39]
	UHF	106 × 44 × 5mm ³	N/A	Xu et al. [40]
	UHF	104 × 31 × 7.6mm ³	14.6m	Hamani et al. [41]
	UHF	41.5 × 55 × 3 mm ³	Metal: 6.1m Dielectrics: 14.1m	Li et al. [42]
3D antennas	UHF	3 × 3 × 3 cm ³	N/A	Kruesi et al. [43]
	UHF	50 × 50 × 50 mm ³	N/A	Jin et al. [44]
	UHF	2 × 2 × 1.2 cm ³	N/A	Galehdar et al. [45]
multi-band antennas	UHF-HF	85 × 54 × 0.8 mm ³	N/A	Ma et al. [46]
	UHF-MW	L: 19 cm	N/A	Keyrouz et al. [47]
	UHF-MW	30 × 30 mm ²	N/A	Li et al. [48]
omnidirectional and directional antennas	UHF	866 MHz: 98.7 × 14.2 mm ²	N/A	Tang et al. [49]
		915 MHz: 88 × 14.2 mm ²		
	UHF	953 MHz: 84 × 14.2 mm ²	9.5 m	Liu et al. [50]
	UHF Near-Field	43 × 43 mm ² R: 80 mm	120 mm	Zeng et al. [51]

關於金屬表面貼裝天線，Chen提出一種微型UHF RFID用於金屬物件應用的天線設計，由兩個電性矩形貼片組成，透過通孔連接到地及以一個未連接的間導電層以形成一個RFID 標籤天線。微型設計是透過在天線中插入導電層來實現的結構以增加天線的容抗。整體尺寸為32×18×3.2(mm)放置在金屬物件上的RFID標籤的最大讀取範圍約為1.5m。為追求全向場型與方向無關的RFID應用，3D天線也儼然已成為一種興趣，有許多新設計被提出。Kruesi等人設計一種小型化用於無線感測器網路(WSN)及3D尺寸約為3×3×3cm折疊曲折線3D立方天線在環境感測RFID應用中，其可能會在透過將其整合到立方體的中空內部來實現智慧包裝。此外，多頻段天線及全向及定向天線對於不同的RFID應用也是很有吸引力的話題。經由增加天線的工作頻段以採集多個頻段的能量，射頻能量採集器的輸出電壓可以增加。Keyrouz等人設計一種三

頻天線(900 MHz、1800 MHz 及 2.45 GHz)採集射頻能量，能量採集效率顯著增加。然而，由於天線數量的增加，電路面積擴大。Liu等人提出一種容性負載、感性耦合的饋電迴路用於UHF RFID標籤的全向輻射模式天線，尺寸小至43×43mm，原型樣機測得的最大讀數範圍為9.5m，總發射功率為有效全向同性輻射功率(EIRP)4.0W。水平方向的全向輻射場型圖可使提出的標籤當其安裝在不同目標的物件上時較不敏感。

由於RFID感測裝置在不同的周圍環境領域有不同的用途及應用場景，天線的設計應依特殊應用要求客製化設計之。

然而，對於RFID感測器，典型RFID標籤的天線設計是多樣性的，並且需要最大讀取範圍的阻抗匹配。但是，由於感測器及各種裝置，能源消耗顯著增加。為獲得穩定的RFID感測器資料，RFID感測器天線也可配置為多埠採集自然能量，以增強自供電無線感測器的能量採集，如圖6所示。

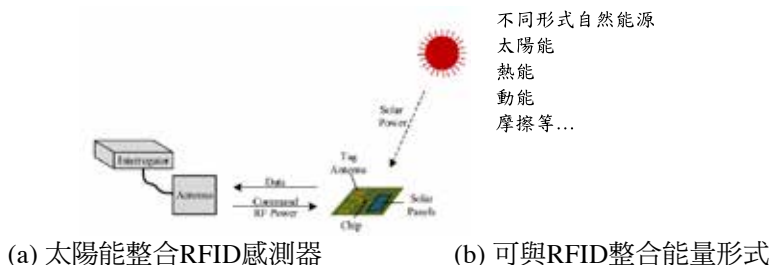


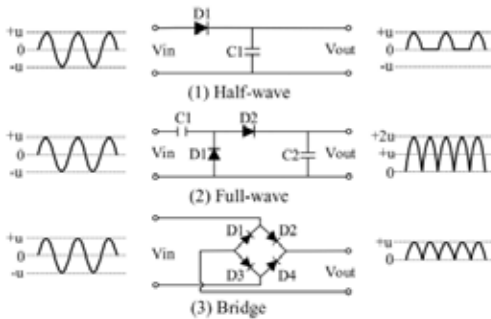
圖 6. 具有多埠能量採集的RFID感測器

3.1.2. RF-DC 轉換及功率管理

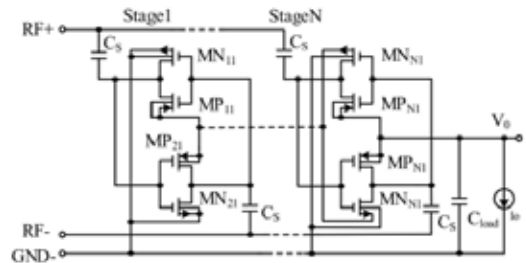
由於RFID晶片及感測模組需要直流功率進行資料採集及傳送，射頻功率需要轉換為直流電來提供功率。射頻能量採集通常使用多級電壓整流器來獲得高輸出電壓，以及各種整流器設計用以執行轉換及提高能量採集效率。半波、全波、橋式及差分整流方法，是最常用的解決方案，如圖7所示。Bakhtiar等人提出一種高靈敏度CMOS整流器採用標準閾值電壓裝置設計。整流器係按照 $0.13\mu\text{m}$ CMOS製程標準設計及佈局，即使在輸入射頻功率較弱的情況下也能正常工作。Ye及Fan描述一可用於被動UHF RFID應用的高效整流器電路。模擬及測量結果顯示，在低輸入功率水平下的效率分別為30.7%及15%。整流器採用 $0.18\mu\text{m}$ CMOS製程標準製造，其核心電路佔用 $0.169\times 0.137\text{mm}^2$ 矽面積。Ouda等人提出一種交叉整流器，可以擴展射頻功率的動態範圍。整流器可以實現不同距離的無線供電，減少反向洩漏而不降低其靈敏度。此設計可用於UHF RFID應用。上晶片測量顯示，當負載為 $100\text{k}\Omega$ 時，1V電壓下的靈敏度為 -18dBm ，射頻功率到直流功率的峰值轉換效率為65%。Yi等人採用CMOS製程在多級整流器的設計中，

為用於能量轉換，其使用具有極低閾值電壓的二極體連接MOS晶體。然而，由於使用MOS晶體，由於體積效應造成閾值電壓增加。Liu等人使用一種新型二極體連接的MOS晶體，並在此基礎上設計具有更高轉換效率及輸出電壓的N階電流整流電路，高於以傳統二極體及MOS晶體組成的整流器。然而，MOS晶體的閾值電壓隨著使用時間的增加而增加。Raben等人開發出一個具有閾值的二極體連接的MOS晶體的理論模型，具有臨界消除技術；同時導出的設計方程式範例壓降及二極體反向洩漏之間的擇優。整流器設計係以 $0.35\text{-}\mu\text{m}$ CMOS製程實現，PCE的cadence模擬結果及電壓轉換效率顯示與模型一致。

除UHF外，還有一些工作在13.56MHz的RF-DC轉換器可以在文獻中發現。例如高效RF-DC轉換器分別展示具有 -4dBm 及 1.2dBm 的靈敏度。即使DC-DC升壓轉換器靈敏度限制，一個HF RF-DC的整流器可使用反向損耗降低來確保高輸出電流。Colella等人提出一種用於HF RFID的四級RF-DC轉換器，完全整合於350nm CMOS技術。Pelliconi的兩級電荷泵用於增加電壓。實驗驗證顯示其可以在正常工作下射頻輸入功率約 -19dBm 。



(a) 半波、全波及橋式整流器



(b) N級差動整流

圖 7. 半波、全波及橋式整流器

由於採集到的射頻能量為整個RFID的功率感測模組運行提供電源，電壓倍增器可望增加電壓值並減少能量儲存時間。然而，倍壓器的輸出電壓隨製程變化及溫度波動而變化(工作時間過長或環境影響)。Yuan等人研究閾值電壓補償方案改善倍壓器溫度影響及製程變異性。Chouhan等人設計一種新的電壓乘法電路，其可使得整流器在較低的射頻功率下具有更好的功率轉換效率。

3.1.3.用於感測器製造的可印刷及彈性的RFID技術

彈性是RFID標籤及RFID感測器的一個重要優勢，它允許感測器標籤能夠粘貼到被測物件上。噴墨印刷製程介紹RFID感測器的製造。印刷電子是一種新技術，它結合傳統印刷技術與電子技術，應用傳統印刷技術到電子製造。與傳統電子元件製造相比方法，印刷技術在氧化環境中更穩定，並具有成本效益、彈性及環保友善性優點。其中，接觸類型主要包括柔版印刷、膠版印刷及絲網凹版印刷，非接觸式主要是噴墨打印。原理如圖8所示。

柔性RFID印刷主要用於製造基於晶片的RFID天線及無晶片型RFID，將石墨烯、銀或銅等奈米顆粒打印在相紙、塑料或紡織品。近十年來，資源稀缺，產品更新換代快速，日益惡化的生態環境使市場提出低成本、彈性、綠色現代技術的要求。做為電子基板，紙基板具有低成本及大規模生產優點，這引起廣泛的關注[27]。同時，雖然奈米粒子導電油墨由多種材料製成(例如銅(Cu)、金(Au)、石墨烯、碳奈米管(CNT))，但銀奈米粒子墨水是印刷紙的電子傳導跡線的主要選擇。

先驅研究人員已經在RFID應用方面取得重大進展，新的研究可以在文獻中找到。紙基材噴墨印刷RFID感測器已成為製造柔性感測器的普遍方法。例如，Kim等人提出基於紙基銀奈米顆粒的印刷感測器製造解決方案，並提供兩種具有評估功能的概念驗證的感測器設計：(1)無晶片型CNT氣體感測器，及(2)UHF雙標籤電容式觸覺感測器(見圖9a)。Sharif等人提出一種低成本的導電油墨印刷與用做電感性負載的曲折偶極整合的小迴路，其也與用於智慧冰箱系統中之金屬罐測量的RFID晶片連

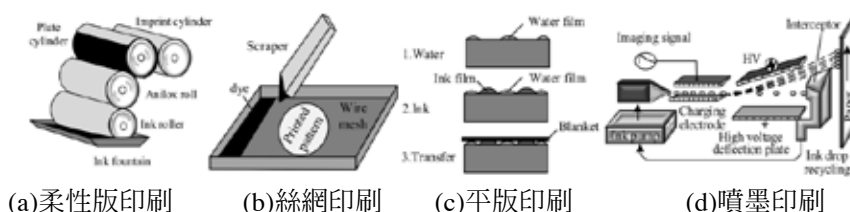
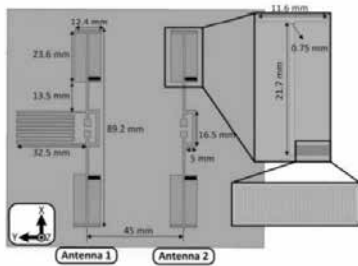


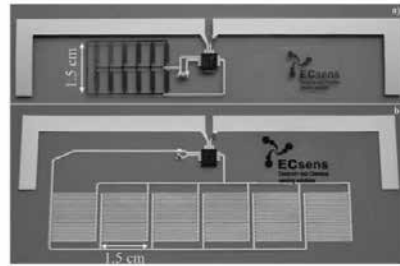
圖 8. 四種典型的印刷技術

結。Borgese等人引介一種基於有限人工阻抗表面(AIS)噴墨印刷技術的無晶片型RFID濕度感測器，將一張薄薄的商業塗料紙，由三個同心環組成，從而讓三個標籤電磁響應獲得深及高Q值零點。Salmeron等人報導兩個能夠測量溫度及濕度的印刷UHF

RFID標籤，如圖9b所示，使用在聚酰亞胺上製造的SL900A IC片上溫度感測器及電容式濕度感測器基板：(1)噴墨印刷的電容式濕度感測器陣列，及(2)絲網印刷交錯電容式感測器。



(a) 雙標籤印刷容性觸感感測器：
1) 感測器標籤 2) 參考標籤



(b) 容性感測器陣列：
1) 噴墨列印 2) 絲網列印

圖 9. 噴墨打印的RFID感測器

在上述應用中，印刷天線連接到RFID晶片並感應組件以實現射頻供電的感測功能。印刷RFID電子產品的優點是：(1) 透過選擇柔性基板，可以使感測器具有柔性；(2) RFID感測器製造成本可以有效減少；(3) 感測元件可以設計成可印刷的結構。這些優點使RFID感測器可以方便地製造，以用於不同的研究及以合理的低成本應用。

然而，RFID感測器的尺寸仍然是許多實際應用的限制。由於RFID感測器晶片面積小，整個RFID感測器的尺寸由晶片的尺寸決定天線。為研究小尺寸的RFID感測器，可利用紡織技術編織RFID感測器。整合紡織之RFID具有成本低、經久耐用，及分離紡織品及RFID晶片製造的優點，使批量生產快速。Kalhnayer等人研究紡織轉發器系統，為實現長讀/寫距離，天線使用基於紡織品的設計，但耐洗性需要提高。Vieroth等人在耦合模組封裝使用彈性的基板以獲得封裝的彈性。測試結果顯示具有銀色表面處理的包裝可以承受即使在60°C下的所有測試條件。Alonso-Gonzalez等人設計一種三層編織結構，將

RFID標籤天線轉換變成為編織型式。標籤可直接加工成服裝，使其廣泛使用於服裝行業。RFID與紡織品的整合是獲得RFID感測器裝置彈性的有效手段，與剛性RFID感測器裝置相比，其因此擴展應用的領域。

3.2. 商業解決方案

由於未來物聯網時代RFID感測技術的巨大商機，包括TI、STMicroelectronics、ASM、Farsen、Axzon及Impinj在內的一些工業先驅也已致力於這一特定領域的研究及開發。一些新穎的RF-to-DC轉換器模組、RFID收發器及RFID IC已被發明出來及可在市場上找到。市場上還可以找到一些適用於不同應用的新穎示範性技術解決方案。

3.2.1. 用於感測器開發的有前途的RFID IC

在RFID應用中許多RFID IC被發明及用於RFID轉發器，包括UHF EPC Class-1 G2及NFC ISO/IEC14443及ISO/IEC15693，其中一些代表性產品總結在表2中。大多數這些IC都整合射頻能量採集電路、內部邏輯控制及記憶體，以及一個串列埠口，允許

外部MCU的讀/寫能力以更新感測器資料。一些RFID中包含類比/數位轉換器(ADC)用於連接感測器組件的IC，例如MLX90129及SL13A。該模型來自TI的RF430FRL152H整合低功耗微控制器MSP430及14位元數位信號A/D介面，可進一步有效地促進發展。SL900A及Magnus-S3及M3D IC分別透過整合溫度及電容感測器，及整合溫度及

濕度感測器，以及近接感應感測器等而獲得更進一步進展。內置感測模組的整合則允許更方便地開發不同的應用程序。RFID感測器開發的最方便選擇是Rocky100、RF430CL330H及RF430FRL152H，它們具有RF-to-DC轉換器及功率輸出，以便為外部感測器及MCU供電。它們並可被用於開發無電池式RFID感測器裝置。

表 2.RFIDIC

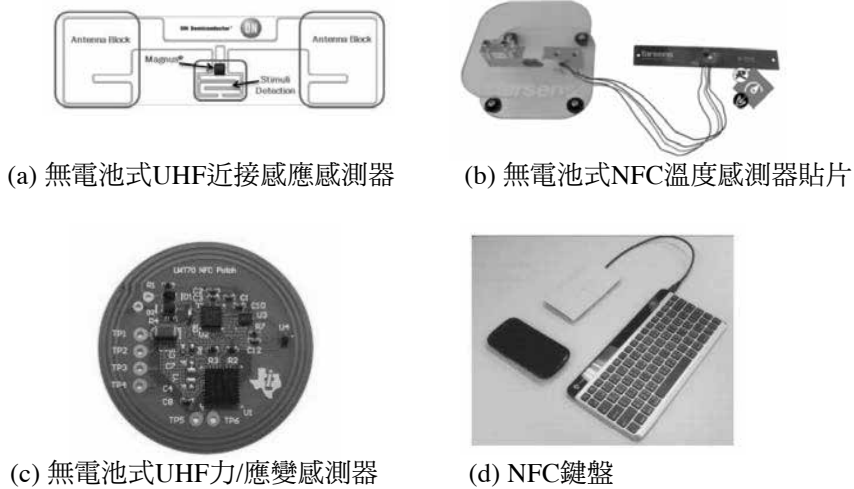
Manufacturer	IC Model	RF Band/ Protocols	RF Sensitivity	Digital Interfaces	Power Output	Packaging
Farsens	Rocky100	UHF/EPC Class-1 G2	-13 dBm	SPI	1.2 V~3.0 V	QFN-16: 4 × 4 mm
Ramtron	WM72016	UHF/EPC Class-1 G2	< -6 dBm	DSPI	N/A	UDFN-8: 3 × 3 mm
AMS	SL900A	UHF/EPC Class-3	-7 dBm	SPI	N/A	QFN-16: 5 × 5 mm
Axzon (formerly RFMicron)	Magnus-S3 M3D IC	UHF EPC Class 1 G2 and ISO/IEC18000	N/A	N/A	N/A	QFN
Impinj	Monza X-2K/X-8K	UHF/EPC Class-1 G2	-17 dBm	I2C	N/A	XQFN-8L:1.65 × 1.65 mm
AMS	AS3953A	HF NFC/ISO14443A-4	N/A	SPI	N/A	WLCSF-10: 3 × 3 mm
AMS	SL13A	HF NFC/ISO 15693	N/A	SPI	N/A	QFN-16LD: 5 × 5 mm
TI	RF430CL330H	HF NFC/ISO14443B	N/A	SPI/I2C	N/A	TSSOP-14 VQFN-16
TI	RF430FRL152H	HF NFC/ISO/IEC 15693	N/A	SPI/I2C	N/A	VQFN-24: 4 × 4 mm
Melexis	MLX90129	HF NFC/ISO/IEC 15693	N/A	SPI	2.8 V~3.2 V	TSSOP-20
Silicon Craft	5IC4310/ 4340/4341	ISO 14443A	N/A	UART	N/A	QFN-16: 3 × 3 mm
NXP	NT3H1101/1201	ISO 14443-3	N/A	I2C	N/A	SOT902-3: 1.6 × 1.6 × 0.6 mm
NXP	SL3KCS1002/1202	UHF/EPC Class-1 G2	N/A	/	N/A	TSSOP-8: 4.9 × 3 mm SO8N: 4.9 × 6 mm
ST	M24LR0xE-R/ST25DV-12C	HF NFC/ISO15693	N/A	I2C	N/A	TSSOP-8: 3 × 6.4 mm mmUFDN8: 2 × 3 mm
On Semiconductor	N24RF64	HF NFC/ISO15693	N/A	I2C	N/A	SOIC-8: 6 × 5 mm TSSOP-8: 6.4 × 3 mm

3.2.2. 商業RFID感測器應用

基於RFID IC有一應用模組範例。Farsens製作一系列用於工業、農業及物流應用的UHF RFID解決方案，包括無電池式感測器模組，包括溫度感測器、環境光感測器、壓力感測器、磁場感測器、濕度/水分感測器(圖10a)、力/應變感測器(圖10b)及RF場感測器。同樣地，基於MagnusS2@Sensor IC的解決方案，包括濕度/接近及溫度/接近感測器，On半導體公司提供UHF RFID無電池式無線感測器。此外，TI還提供一些基於其

RFID IC產品的NFC的感應模組，例如NFC溫度感測器貼片，以為NFC致能之智慧手機提供溫度讀數(圖10c)，及NFC鍵盤，以為NFC致能之智慧手機及平板電腦之觸控螢幕鍵盤替代品(圖10d)。最新的發展不限於上述例子。由於無線電源資料傳送、無電池式、輕量、非接觸式感測特點，RFID感測技術將在未來物聯網市場中發揮重要作用，其中包括消費電子、製造、農業、醫療器械及物流等。





(a) 無電池式UHF近接感應感測器

(b) 無電池式NFC溫度感測器貼片

(c) 無電池式UHF力/應變感測器

(d) NFC鍵盤

圖 10. 商用RFID感測器解決方案範例

3.3.創新應用

利用無線功率及資料傳送及物件識別，RFID感測器技術一直是一種新的感測及通信方式，現在可以在以下領域找到廣泛的應用領域。一方面而言，無線功率及資料傳送提供一個介面，用於在沒有導線及電池的情況下從被測物件傳送感測資料，從而導致感測器裝置的顯著小型化。另一方面而言，唯一識別碼可區分被測對象並直接將資料與其ID進行整合。在許多

方面，這兩大優勢使得RFID感測裝置比傳統需要攜帶電池及無線模組的無線感測器節點更具競爭力。因此，隨著RFID的新穎整合及輕量級感測器技術，一些過去在技術上具有挑戰性的測量任務變得方便許多。應用領域包括消費電子、醫療保健、食品及農業、化學工程、製造及物流、土木工程、汽車、機械等，典型應用例子總結如圖11所示。

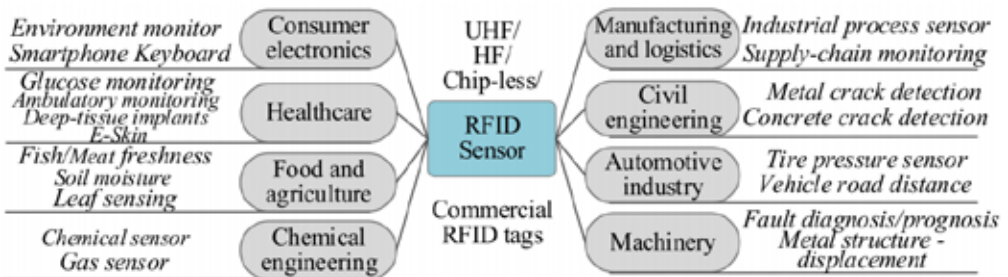


圖 11. RFID感測器技術的應用領域及範例

RFID感測器的一些嶄新應用技術文獻中有關介面協定、感測技術、製造製程及尺寸總結在表3及圖12中。從圖12很容易發現：

(1)不同類型的RFID感測器，包括HF、UHF及無晶片型RFID裝置近年來已經被廣泛使用，並與不同領域的尖端技術相結合。以此些無電池式、無線、及被動設計方式已成為有效及經濟實惠的資料接取方式，這在RFID發明之前可仍是重大的技

術挑戰；

(2)做為感測器解決方案中的功率及通信介面，RFID技術易於與其他不同製程的感測模組整合，包括噴墨打印、CMOS、柔性PCB等。因此，功能很容易擴展到不同的目的及應用場景中；

(3)感測器技術以不同方式與RFID整合：a)具RFID IC的數位感測器；b)與RFID天線整合的敏感材料；c)商用RFID標籤；d)無晶片型RFID天線做為感測器。

表 3.RFID 感測器的新應用

Functions	Interface Protocols	Sensing Techniques	Fabrication Process	Size	Investigators
Handshy monitoring	Chip-less RFID	Artificial impedance surface	Inkjet Printed	77 × 58 × 43.1mm ³	Bogoso et al., 2017 [71]
Glucose monitoring	HF NFC ISO15693	Potentiostat	0.13 μm CMOS	1.2 × 2 mm	Xiao et al., 2015 [52]
Arbitrarily monitoring	UHF RFID	Accelerometer	PCB circuit	N/A	Wickramasinghe et al., 2015 [94]
Implanted sensors	RFID (100MHz)	Pressure sensor	Copper tape made	mm-sized	Monali et al., 2017 [95]
E-Skin sensor	HF	Co/Laminates	Flexible PCB circuit	134.4 × 18.2 mm	Boak et al., 2018 [96]
Fish freshness	HF NFC	Resistive sensor and humidity sensors	Flexible PCB circuit	N/A	Seo, et al., 2012 [97]
Meat freshness	UHF	Temperature, humidity, gas	Assembled with modules	N/A	Jain et al., 2014 [98]
Soil moisture	UHF (5.19GHz)	Capacitive sensor	PCB circuit	100 × 100 mm	Pichon et al., 2018 [99]
Chemical sensor	UHF	Sensitive coating materials	Flexible PCB circuit	55 × 45 mm	Manzari et al., 2014 [100]
Industrial process parameters	UHF RFID	Vibration, light, temperature, humidity	PCB circuit	80 × 120 mm	Petrov et al., 2019 [101]
Supply chain monitoring	HF NFC ISO15693	Critical temperature indicator (CTI)	PCB circuit	35 × 10 × 2 mm Tag not given	Louis et al., 2017 [102]
Strain	UHF	Resistive strain gauge	PCB circuit	150 × 120 mm	DGumpsook et al., 2017 [103]
Metal crack detection	Chip-less RFID	Microstrip patch antenna resonator	PCB antenna	35 × 15 mm	Manindra et al., 2018 [104]
Concrete crack	UHF RFID	Coupler of RFID tags	RFID tag designed	N/A	Calzavara and DGLampsook, 2015 [105]
Corrosion in concrete	HF NFC ISO15693	Three-electrode potentiostat	PCB circuit	11.8 × 4 × 5.6 cm	Lazo-Salas and Halme, 2016 [106]
Bicycle tire pressure measurement	HF NFC ISO14443	Capacitive sensor	130 nm CMOS	3.76 mm ²	Kollegger et al., 2017 [107]
Vehicle road distance measurement	UHF RFID	Distance	Commercial tags	N/A	Huo et al., 2014 [108]
Fault diagnosis & prognosis	UHF (Motor X-8K)	Accelerometer	PCB circuit	Long 12 mm	Wang et al., 2017 [109]
Metal structure displacement	UHF RFID	Deformation sensor	Custom designed	72 × 37 mm	Kuhn et al., 2018 [110]

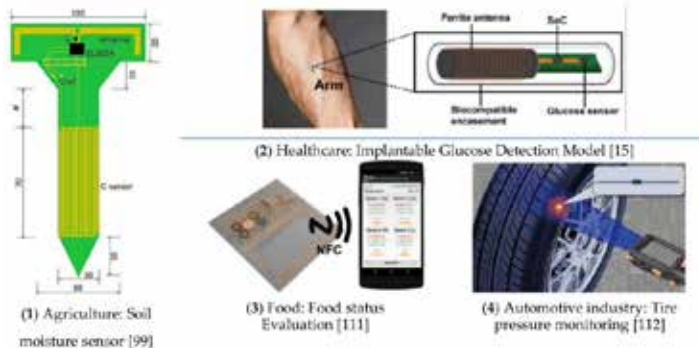


圖12. RFID感測器的典型應用

4. 技術挑戰

雖然在文獻中可以找到許多連續不斷的技術進展及許多基於RFID的感測器技術的創新應用，但目前的大部分所展現之工作仍處於概念驗證範例及實驗室內測試及評估階段。除一些商業解決方案外，很難找到RFID感測器在市場上的應用。研究及實際應用兩者之間仍存有很大落差。總之，關鍵的技術挑戰將說明及列舉如下：

4.1. 射頻前端能量採集及功率轉換的效率

對於RFID標籤，天線及IC只接收射頻功率、儲存能量，及為標籤控制器供電及回應讀/寫命令。所有的功率轉換及邏輯操作都是在RFID IC中完成，這使得能量採集效率高，因此讀取距離通常可達10m。然而，對於RFID感測器，RF能量採集前端模組需要為RFID IC、MCU及感測模組供電。雖然所有組件都是有效功率，但感測器的操作邏輯更加複雜及耗時。因此，如僅透過RF能量採集為所有組件供電並涵蓋邏輯操作則仍然是一挑戰。特別是當感測器被植入被測材料時，射頻信號會被周圍材料衰減，使接收到的射頻能量幾乎不能為所有操作提供功率，這將嚴重影響RFID感測器的讀/寫範圍。

4.2. 致能技術的異質性

RFID感測器在天線、IC功能、感測組件及資料協定等潛在技術顯示很大的異質性。異質性阻礙來自跨平台整合及標準化技術的發展。研究中的大多數設計都是專為特定的感測場景而客製化設計的，包括天線、IC、控制邏輯及資料傳播。一方面而言，為獲得高能量採集效率，阻抗天線及RFID IC埠應滿足共軛匹配條件。由於RFID IC埠中的阻抗變化，天線需要針對不同的IC進行客製化設計。例如，Impinj Monza 4在915MHz的埠阻抗為 $(11+j143)\Omega$ ，AMS AG SL900A及Farsens Rocky100在

915 MHz時的埠阻抗分別為 $(123-j303)\Omega$ 及 $(52-j479)\Omega$ ，這導致需要客製化設計的天線。另一方面而言，感測器資料傳送協定對不同應用是可變的。UHF感測器解決方案可以利用用戶ID部分以容納感測器資料。但是尚無被廣泛接受的編碼協定以供不同的感測器類別及測量精度運用。

4.3. 可靠性

RFID感測器主要貼在被測物件上以進行識別及參數感測。然而，它們在實際應用中也受到某些環境因素的影響。這不僅需要高性能的RFID感測器，還要求RFID感測器需具備應對高溫、高壓、潮濕等惡劣環境特徵影響的能力。金屬包裝也阻隔RFID感測器傳送的資訊，導致RFID感測器發生故障。因此，為獲得穩定的RFID感測器資訊，在惡劣條件下RFID感測器裝置及天線的可靠性仍然面臨巨大挑戰。

上述技術問題一直是RFID感測器發展面臨的主要障礙。然而，TI、AMS AG、Impinj、Farsens、Axzon，及一些創新應用已為構建RFID感測器技術的模組鋪陳出道路。透過克服能量採集效率及異質性方面的技術問題，RFID感測技術將在未來眾多的感測物聯網世界中發揮重要作用。

5. 未來展望

RFID感測器技術將繼續吸引工業界及學術界兩個行業之各個領域的興趣。本部分指明RFID感測器研究的重點研究領域，聚焦於提高感測器性能的技術及未來有前途的應用。RFID感測技術在物聯網應用受到特別的關注，其被認為是一種未來資訊系統的革命性技術。

5.1. 研究重點

提升RFID感測器技術性能的手段，例如整合一些新材料、新製程將成為重點研



究領域。擴展RFID感測器讀取範圍目的RFID中繼技術也將令人感到興趣。此外，可用於廣域及多目標監測的RFID感測器網路，其利用無電池及輕量性能可在學術研究領域中找到其角色地位。

5.1.1. 新材料與新製程的整合

與傳統方式相比，將新材料及新製程引入RFID感測技術可以改善性能，例如紙基UHF上的石墨烯偶極天線RFID，用於UHF RFID紙基石墨烯奈米薄片印刷柔性曲折線偶極天線，及整合碳奈米管的RFID被動氣體感測器。

在可接受的性能下，應用新材料可以有效降低成本。例如CMOS製程、噴墨打印及3D打印等新處理也正被引入RFID感測器技術。新材料及新製程的整合將為RFID感測技術創造新機會，其將成為一個重要的研究方向。

5.1.2. 用於延長RFID讀取距離的中繼諧振器

在某些應用中，功率傳送一直是損失性材料的限制，例如人類組織植入式感測器及土木結構內置感測器。感測器系統的功率中繼器將有效地增強功率並擴展感測裝置的可用性。例如，Cao及Chung為HF RFID食品監測設計一中繼諧振器，有效地將讀取距離延長至5cm。很明顯地，有效技術解決方案以擴展RFID工作距離對某些應用攸關重大。

5.1.3. 基於RFID感測器的無線感測器網路 (WSN)

透過探究這兩種技術的各自優勢，RFID及WSN的整合可以增加它們在其他科學及工程領域的效用。但是，這兩種技術各有研究及開發領域。做為兩者的整合，系統架構、通信協定及資料呈現仍在研究及實踐中。RFID感測器技術的無線功

率及感測器資料傳送的優勢整合將創造新的WSN應用機會。

5.1.4. 基於RFID感測器的物聯網應用

由於物聯網技術已經擴展到各個領域，包括製造、供應鏈、養老、農業、畜牧管理等，大部分相關應用可能包括RFID標籤，以用於識別產品項目、人員、位置或動物等。通常，識別的項目可能會用不同的感測方法記錄它們的資料。感測器介面與RFID的整合將顯著提高這些物聯網應用的資料存取效率。

5.2. 有前景的物聯網應用

物聯網感測器技術在感測及通信方面的優勢已應許未來物聯網世界一個非常巨大的市場。尤其是在物聯網應用中，RFID感測器技術將革命性地改變傳統的基於非感測RFID的應用。

5.2.1. 製造業中的產品生命週期管理 (PLM)

RFID標籤可應用於製造業及供應鏈，便於在生產的不同階段之產品識別。透過將感測器技術與RFID整合，可以觀察到這些階段產品的關鍵參數，並且可以將各個階段的產品資訊用於進一步分析，以優化產品設計及生產過程。RFID感測器有可能革命性地改變製造及供應鏈的效率及管理。

5.2.2. 持續監測人體生理特徵

對於醫療及養老面向，RFID感測器是一種有效的感測及資料傳送介面，其已是一個有趣的研究課題。用於監控人體特徵的RFID感測器網路將是資料採集及傳送的有效方式，尤其是對於一些慢性疾病的生命特徵。

5.2.3. 智慧物流中的RFID感測器

當前的物流應用可能包括RFID標籤，



以便在產品的關鍵節點來跟踪其資訊。感測器致能的RFID可以監控貫穿整個物流過程的產品品質，其可以將監控的產品從傳統的東西到新鮮的食物及活的植物等。

5.2.4.智慧農業中的RFID感測器

未來的農業可能會高度自動化及資訊化。感測技術及RFID整合已成為監測一些關鍵參數的解決方案，例如使用攜帶RFID的無人機讀取器檢測不同可識別位置的溫度、濕度，及光照強度。採集到的資料可用於預測植物的健康狀況及成熟度。利用RFID在不同領域的感測用途，RFID感測器技術在上述領域特別讓人感到興趣。與傳統的基於RFID的應用相比，具有無線功率及資料傳送、即時及連續資料採集功能的RFID感測器有可能革命性地改變傳統應用。由於其獨特的優勢，RFID感測器將成為各種測量應用的競爭優勢選擇。

6. 總結

RFID感測技術的快速進步及廣泛應用已經在不同的應用領域產生許多新的解決方案，其對未來物聯網眾多的感測應用具有非常廣闊的前景。這項研究指明實驗室研究及實際應用，並提供對基礎理論、技術進步，以及涵蓋不同應用場景的真實應用範例。

根據對最新技術研究發現：(1)以無電池式、無線及被動方式運作之RFID感測器是一種存取感測資料的有效及經濟實惠的方法，雖在RFID發明之前皆是技術挑戰，但它們將在未來發揮重要作用；(2)RFID感測器技術將感測技術及RFID與其它許多尖端技術融為一體，包括CMOS、柔版PCB、噴墨印刷電子等。關鍵的技術挑戰在於：(1)RF前端能量採集及功率轉換的效率對一些微型感測器應用而言仍是一個限制；(2)天線、RFID IC、應用方式，及感測

器資料讀取協定的異質性。RFID感測技術之工業級標準化或指南有望簡化各種應用問題。

當感測及通信成為物聯網資訊基礎設施的基礎時，在即將到來的物聯網時代，RFID感測技術將不斷吸引工業界及學界的研究努力。RFID感測器技術可在生物醫學中找到更多應用，以便進行人體的移植；在土木工程中整合到土木結構中用於結構健康監測；在食品工程中用於低成本品質監測。由於製造業相關技術的迅速發展，如智慧機器人及智慧控制器，RFID感測技術應許產品生命週期管理(PLM)的機會，其便會在產品的每個生命階段之間建立一個全面的資訊鏈接，包括原材料、生產過程、物流、使用及處置等。產品的關鍵參數可以在某些生命階段觀察到；並可以採集資料以進行進一步分析。基於相關研究，在製造業等戰略領域，如醫療保健、汽車工業及運輸以及節能，我們可以得出此結論：由於在物聯網應用中的無線資料傳送、無電池式、功率及成本效益，及極端功率限制正在驅動新裝置及創新解決方案的出現，RFID感測器技術將扮演至關重要的角色。

主要翻譯參考文獻

Cui, L.; Zhang, Z.; Gao, N.; Meng, Z.; Li, Z. Radio Frequency Identification and Sensing Techniques and Their Applications—A Review of the State-of-the-Art. *Sensors* 2019, 19, 4012. <https://doi.org/10.3390/s19184012>

