

低時閃脈衝偏踢磁鐵電源系統

范棋翔、邱吉平、許森元、劉國賓（光源組）

前言

儲存環脈衝偏踢磁鐵電源系統位於注射段^[1]，從1993年設計製造試機完成至今（2004年），注射系統特性的好壞與否，直接關係著注射效率高與低，系統的時間閃（Jitter）特性一直是關鍵參數，就在今年（2004）初，時間閃特性改善又有重大的突破，成功的將時間閃降至1~3 ns，已達一定水準以上。1993年系統運轉至今期間也對系統做了局部的更動，紀事如下：

- 1992年 原型機設計製造完成（油絕緣&油冷卻）。
- 1993年 五套（備份一套）同型系統試機完成運轉。
- 1995年 現有系統特性改善時間~30 ns降至10~20 ns。
- 1999年 完成2套備份系統製造加入運轉。
- 2002年 規劃設計工程(氣冷及空氣絕緣)及特性改善（Jitter 1~5 ns）以因應top-up injection mode。
- 2003年 工程（氣冷散熱及空氣絕緣）及特性改善原型機製造。
12月試機成功，工程改善後在系統維修方便（無絕緣油）且重量減輕（650公斤降至300公斤），時間閃特性降至1~3 ns。
- 2004年 以每年2套的進度逐年更換現有系統。

上述紀事可看出中心對系統特性的要求是一年比一年嚴苛，2003年在本系統特性時間閃有了重大改善，期待在2005年能全面改裝完成，改善注射環境的條件，減少能量損失進而能提高注射效率。

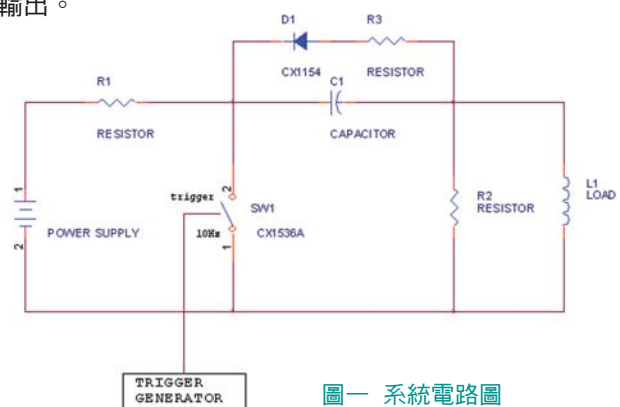
對於本次系統更新，分絕緣冷卻工程改善及特性功能改善兩大部分。在絕緣工程改善上是將高壓絕緣方式由絕緣油絕緣改成空氣絕緣方式，而如何克服高壓絕緣的問題是一個不小的挑戰。因此在機構設計的技巧上盡可能增加絕緣距離、利用絕緣材料選擇以及

搭配工程組合技巧而成功的將系統耐壓推至30 KV。冷卻工程方面提高散熱效率及增加整體系統熱交換能力進而達到降低箱體環境溫度，使得系統必須能長時間運轉而不會因過熱造成系統的不穩定及損壞。

在特性功能改善方面，在系統中之主開關-閘流管（Thyratron Tube）觸發方式改為預觸發式（Pre-Trigger），成功的將系統時間閃由10~20 ns降至1~3 ns（P-P），已達一定的水準^[2]，應可滿足恆定電流累加注射（Top-Up Mode）注射需求。

脈衝偏踢磁鐵系統工作原理^[3]

脈衝系統其基本工作原理是將能量儲存於電容器C₁（如圖一所示），此能量是由一高壓電源供應器所提供，而能量經由一高壓開關（CX-1536A）放電經負載L₁產生一瞬間大電流而獲得磁場，開關頻率是以中心所需求為考量-10 Hz，提供一個動態的脈衝磁場輸出。



圖一 系統電路圖

輸出脈衝電流能力評估是由峰值磁通密度（peak magnetic flux density） B_k 估算，由射束動力小組依據中心需求所計算之參數，其偏轉角度11.9 mrad、電子束能量1.5 GeV估算，峰值磁通密度（peak magnetic flux density） B_k ：

$$B_k I_k (KG-m) = \frac{\theta_k \times E}{0.03} (rad-GeV)$$

$$B_k = \frac{11.9 \times 10^{-3} \times 1.5}{0.03 \times 0.4} = 1.488(KG) (\sim 1.5 KG)$$

流過電感線圈 (coil) 之峰值 (peak current) 電流 I_p :

$$NI_p = \frac{B_k g}{U_0} (MKS)$$

$$I_p = \frac{0.1488 \times 0.056}{1.256 \times 10^{-6}}$$

$$= 6.6 \text{ KA}$$

$$N : 1$$

$$g : 0.056 \text{ m}$$

$$U_0 : 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$$

$$B : 0.1448 \text{ T}$$

輸出電流脈寬 T 在 1.2 us ，負載電感值 L_1 在 1.2 uH ，依據這些下列簡單的數學公式及實際工程考量決定電路中電容 C_1 及充電電壓 V_c 大小，使得輸出電流須達 6 KA 以上，以 10 Hz 的頻率週而復始做一衝放電得到所需的脈衝磁場。

$$T = \pi \sqrt{L_1 \times C_1}$$

$$1.2 = 1.34 \sqrt{1.2 \times C_1}$$

$$C_1 \cong 0.12 \mu F \text{ ---- (1)}$$

$$V_c = I_p \sqrt{\frac{L_1}{C_1}}$$

$$V_c = 6.6 \text{ A} \sqrt{\frac{1.2}{0.12}} \cong 21 \text{ KV} \text{ --- (2)}$$

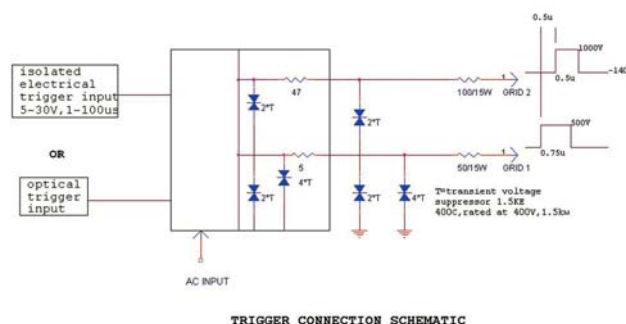
預觸發式 (Pre-Trigger) 之觸發電路

採用預觸發的方式來觸發閘流管，有其幾項優點：

- 1、很好的觸發特性有效的降低開關的時間
- 2、增加閘流管的壽命2~5倍
- 3、電路元件架構單純，易於維修等

閘流管一般是由多柵極所組成的，閘流管 CX-1536A 有 grid 1 及 grid 2 觸發點，傳統的觸發方式是在 grid 1 加一較低的直流偏壓做為前級電子加速，grid 2 則是加一高壓 (500 V) 脈衝觸發信號，組成一完整的導通 (turn-on) 機制^[4]，新的觸發方式是所謂的預觸發之觸發 (Pre-Trigger) 方式，是在閘流管的陰極與柵極間加一脈衝 (pre-pulse) 預先游離此一區域，待主脈衝信號導通陰極與陽極，由於預先游離 (pre-ionisation) 使得閘流管開關速度更快特性更佳。如圖二所示是一簡單電路示意圖，在觸發信號來時，先是在 grid 1 有一高達 500 V 的脈衝電壓，在 0.5 us 後 grid 2 是達 1000 V 脈衝觸發電壓信號，組成一完整預觸發之觸發 (Pre-Trigger) 方式機制，此方式 turn-on 速度更

快使得閘流管 turn-on 特性更佳，進而降低 turn-on 時所產生時間值。



圖二 觸發電路

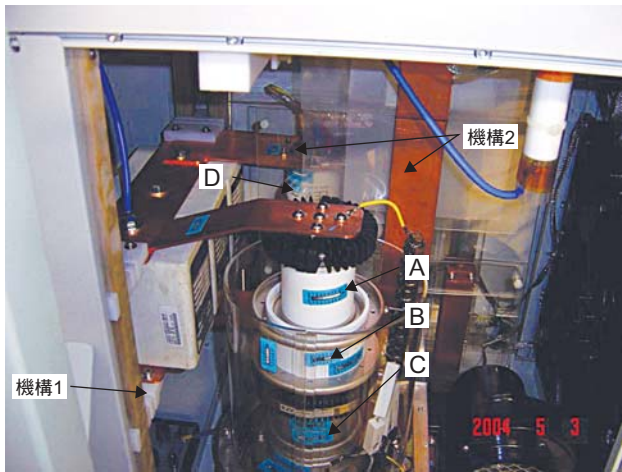
氣冷式散熱機構工程

目前所使用之注射段脈衝偏踢磁鐵系統，是1993年使用至今（如上章節中所述），期間陸續也做了系統上的改善，本次將冷卻系統由過去的油冷改成氣冷的方式，同時系統特性時間也由 $10 \sim 20 \text{ ns}$ (P-P) 降至 $1 \sim 3 \text{ ns}$ (P-P)。油冷散熱系統與氣能散熱系統功能相較上，油冷散熱系統高壓絕緣較佳、重量重、元件浸泡於絕緣油中易產生變質維修成本高、維修不易等特點，缺點部分在工程上將給予克服，對整體對系統的維護及長期穩定性有所助益。

冷卻能力估算依據本系統所產生的熱量來源為電源供應器、閘流管、觸發電路、熱損失等，瓦特數高達1200瓦，用風扇將所產生的熱量排出保持一定的環境溫度，所裝之風扇流量估算在 $3000 \text{ ft}^3/\text{min}$ ，環境溫度應可保持在比室溫高 $1 \sim 3^\circ\text{C}$ ，在這冷卻條件下針對系統各重要元件及室溫做一實際量測，以確保元件的安全以達到系統正常穩定的運轉。經實際一小時的運轉後所做的量測，系統周圍空氣溫度由 23.5°C 升至 26.9°C 趨於穩定，溫度變化在 3°C 左右，在閘流管陰極的溫度最高約為 100°C ，閘流管規格要求低於 120°C ，初步的測試滿足規格需求。

高壓絕緣處理上，在這有限的空間下是一挑戰，舊的系統是採用絕緣油來解決高壓的問題，而在大氣環境下解決耐壓問題，是以如何增加可能放電距離、隔絕、高壓尖點的表面處理（避免高電場產生）等為處理原則下，整體內部機構如圖三所示，高壓衝放電路徑，設計上完全獨立隔絕，如圖三機構1所示；支撐架採用絕緣材料，為了更有效的阻絕高壓放電，支撐

架上加了溝槽增加放電距離。在圖三機構2銅板夾層處是輸出端，距離貼近所以採用壓克力做高壓阻絕。

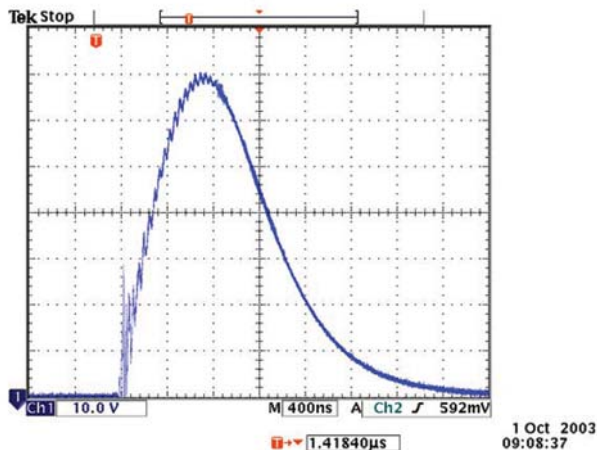


圖三 新系統內部照片

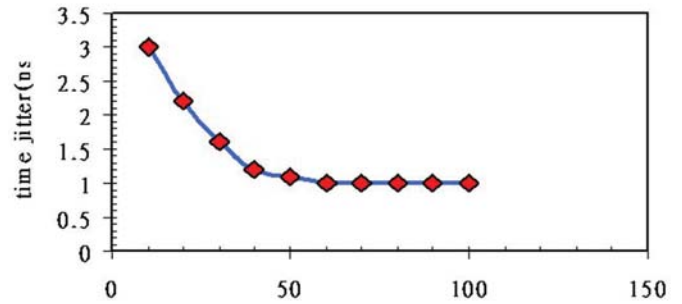
量測結果

新系統原型機完成後之脈衝系統量測有功能耐壓測試、時閃特性測試等。功能耐壓測試將充電電壓逐漸增加到30 KV，耐壓正常系統無異狀，此時系統輸出的電流約近7 KA（如圖四所示），現有之系統現場工作電壓在22 KV（系統輸出的電流約5.5 KA），已達中心達需求。

系統時閃特性測試可以發現，系統溫機約一小時之後，特性趨於穩定（如圖五所示），時閃大小從剛熱機的3~4 ns到開機近一小時後時閃降至1~2 ns（如圖五所示），亦可滿足中心Top-Up Mode需求外。



圖四 負載輸出電流波形



圖五 時閃特性量測

參考文獻

- 【1】C. S. Fann, K. B. Liu, J. P. Chiou and J. T. Sheu, EPAC2002.
- 【2】H. Hahn, W. Fischer and Y. K. Semertzidis, "Improvement to the RHIC Injection Kicker System" Collider-Accelerator Department Brookhaven National Laboratory, 2002.
- 【3】范棋翔，“儲存環脈衝偏踢磁鐵系統技術手冊”，國家同步輻射研究中心電源組技術報告(2003).
- 【4】E2V Technologies
"http://e2vtechnologies.com/" (2004).

科學小天地

- 光束線（beamline）：光束線是一真空管道、它主要的功能是将同步輻射光源引至實驗站。
- 「龍」光束線（Dragon beamline）：由陳建德主任於1987年在當時美國貝爾實驗室與同事Francesco Sette研發成功的高解析柱分光儀光束線，能量介於8 eV - 1.5 keV，於1998年在本中心重建。
- 插件磁鐵（insertion device）：一系列極性交錯排列的多極磁鐵，使電子束經過時，會產生多次偏轉，可分為增頻磁鐵與聚頻磁鐵。
- 增頻磁鐵（wiggler）：插件磁鐵之一，藉增強交替磁場強度來增高輻射光頻率，提升輻射光至更高能量。
- 聚頻磁鐵（undulator）：插件磁鐵之一，藉縮短磁場交替的空間週期，使電子束偏轉幅度變小以聚集輻射光，而增加輻射光亮度。
- 超導增頻磁鐵（superconducting wiggler）：利用超導特性提供高電流密度以產生超高磁場強度之多極增頻磁鐵。
- 超導移頻磁鐵（superconducting wavelength shifter）：利用超導特性提供高電流密度以產生超高磁場強度之單極磁鐵，可提高輻射光之臨界能量，進而提供更高能量的同步輻射光。
- 軟X光（soft X-rays）：能量介於數百eV到約5000 eV的X光。
- 硬X光（hard X-rays）：能量大於約5000 eV以上的X光。