



Annual Report
Institute of Space and Plasma Sciences National
Cheng Kung University

2024 年度報告

專題生：林耕宇

指導教授：張博宇 博士

日期 2025/4/1

摘要

此專題的目標為製作可量測托克馬克裝置內部磁場的感測器「3D B-dot probe」，將用於台灣正在研製的首台托克馬克反應裝置 Formosa Integrated Research Spherical Tokamak(FIRST)，此裝置利用磁場來控制系統內之電漿，屬於磁約束核融合的一種，所以監測系統內部磁場分布是至關重要的課題。3D B-dot probe 由多匝線圈所構成，利用電磁感應的方式，藉由分析感應電壓來分析 3D B-dot probe 所處位置的磁場大小。透過在托克馬克系統內放置多個 3D B-dot probe，我們可以獲得整體磁場的分布及大小。我們開發的 3D B-dot probe 是利用 3D 印表機製作骨架，於三個正交的方向上分別繞上導線，完成 3D B-dot probe 的製作。為了校正 3D B-dot probe 對變化磁場所產生的感應電壓，我們製作了一個螺線管，來提供一個隨時間變化的磁場。此螺線管同樣需要先校正，透過量測驅動螺線管之電流，及使用高斯計量測其所產生的磁場，可以得到螺線管內磁場與驅動電流之關係。因此透過量測驅動螺線管隨時間變化之電流，便能得到螺線管提供的隨時間變化之磁場，進而校正我們製作的 3D B-dot probe，此結果將提供初步的 3D B-dot probe 之校正結果。

Overview

1. 前言
 - 1-1 磁場控制核融合-Tokamak
 - 1-2 3D B-dot probe
2. 3D B-dot probe 製作
 - 2-1 理論
 - 2-2 設計
 - 2-3 製作流程
3. 3D B-dot probe 校正實驗
 - 3-1 實驗概念
 - 3-2 實驗設計
 - 3-3 螺線管校正實驗架設
 - 3-4 3D B-dot probe 校正實驗
 - 3-5 實驗結果
4. 未來工作
5. 結論
6. 資料來源
7. 附錄
 - 7-1 工程圖
 - 7-2 原始數據

1. 前言

1-1 磁場控制核融合-Tokamak

核融合是一種藉由較輕的原子核融合產生出較重的原子核，同時過程中損耗的質量，通過質能方程轉換成能量的方式。常用的原料有氘的同位素氘(D)及氚(T)、氦的同位素³氦 (³He)^{[1][2]}，透過如下反應產生能量。

- $D+T \rightarrow {}^4\text{He}+n$: 所需的反應溫度最低。
- $D+{}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He}+p$: 其優點在於不會產生中子。因為中子不帶電，所以無法被磁力控制，可能會損毀反應爐及周邊材料。
- $D+D \rightarrow T+p$ or $n+{}^3\text{He}$: 氘-氘反應優點在於氘是最好取得的，可至海洋中提煉。

對比核分裂，核融合這種產生能源的方式有以下優點。

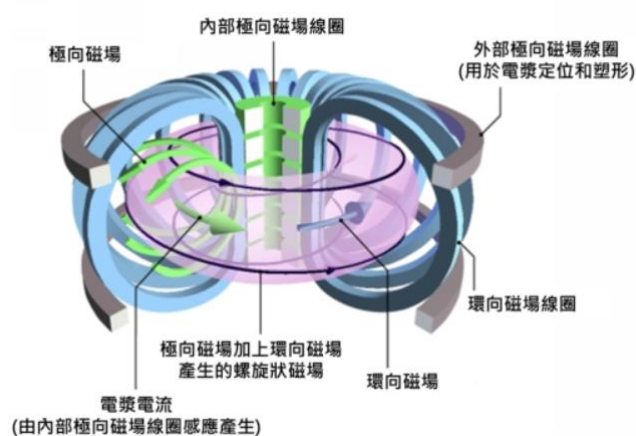
- 原料充足: 相較於核分裂需要過重元素，核融合的原料氘取得相對容易。
- 無污染: 與火力發電相比，核融合不會有空氣污染及其他有毒的化學產物。
- 安全: 目前的核能發電廠，必須以精密的控制才能安全運作，容易因天災人禍引發更大災害，如果是核融合發電廠，當核融合的反應環境消失時，反應就會自動停止，不會因為天災而引起更大災

害。

- 低輻射:產物主要為低階核廢料。

如圖一，使用磁場將電漿侷限在一個腔體中並持續加熱以達到核融合反應稱為磁約束核融合(Magnetic confinement fusion)，但是極度高溫的電漿往往會造成反應爐周圍材料的受損，所以必須要讓電漿跟腔體內壁隔離，因為電漿是大量帶電粒子組成的，會受磁力影響，所以我們利用線圈產生磁場來約束電漿。

如圖一所示，利用環形的磁場，便能夠將電漿侷限在一個如甜甜圈的腔體中，是稱為「托克馬克」的一種裝置。托克馬克內部有由環向磁場線圈所產生的環向磁場，另外電漿電流所產生的極向磁場，兩者相加後形成螺旋狀磁場，才能有效的將電漿侷限在腔體中，除此之外，還需要以外部極向磁場線圈產生外部的磁場，用於電漿定位和塑形。可以看到托克馬克內部的磁場為三維結構且非常複雜，因此量測磁場非常重要。

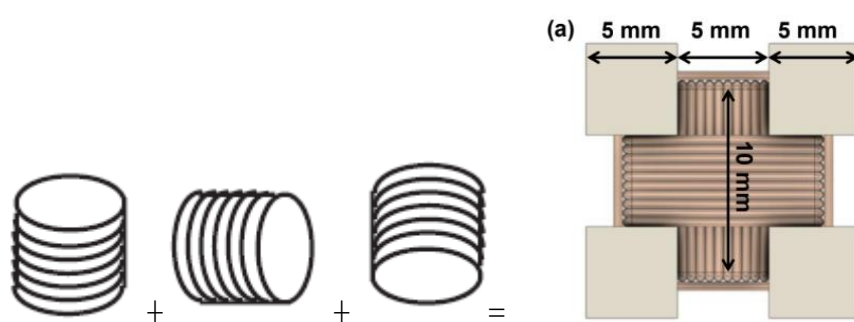


圖一 托克馬克結構圖^[2]。

台灣目前有建置一個托克馬克裝置的計畫，此系統稱為 Formosa Integrated Research Spherical Tokamak (FIRST)計畫^[3]，初期目標會將電漿加熱至 100 萬度(100 eV)進行約束電漿的研究。這個計畫著重於如何在高溫下進行電漿的約束，所以磁場的測量就顯得格外重要。

1-2 3D B-dot probe

本計畫之目的是量測托克馬克內部的磁場，考量系統高溫及輻射的真空環境，我們將使用線圈感應的方式來量測磁場。如圖二所示，若將三個正交的線圈組合時，就可以同時得到磁場的三個分量，稱為 3D B-dot probe。



圖二 3D B-dot probe 的組成來自線圈。

2. 3D B-dot probe 製作

2-1 理論

3D B-dot probe 的基本組成為一導電線圈，當時變的磁場通過線圈時，會產生感應電動勢，透過量測感應電動勢回推磁場。

$$V_{\text{ind}} = -\frac{d\Phi}{dt} = -N \frac{d}{dt} \int B dA, \dots (1) \quad [4]$$

其中 Φ 為穿過線圈的磁通量， N 為線圈圈數， A 為線圈面積。如果面積非常小且大小跟時間無關，則

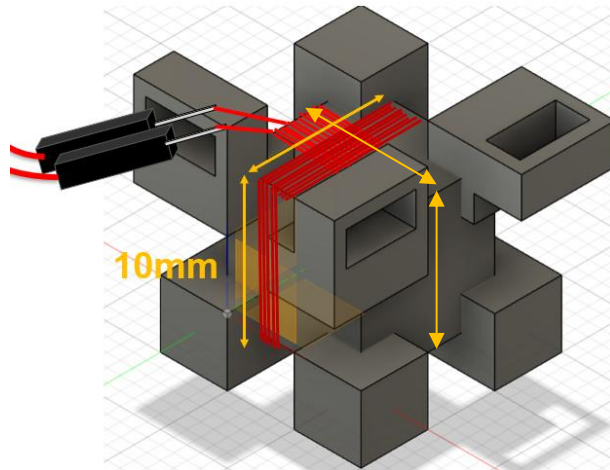
$$B \approx \bar{B} = \frac{1}{A} \int B dA = -\frac{1}{NA} \int V_{\text{ind}} dt. \dots (2)$$

須注意，此方法量測之磁場的方向垂直線圈的平面。

2-2 設計

3D B-dot probe 的設計上需要考量托克馬克的磁場所產生的信號強度及電線是否能承受電流，上述條件將會影響 3D B-dot probe 的外型大小及線圈纏繞數量等參數，以下會介紹 3D B-dot probe 的設計參數及製作流程。

3D B-dot probe 組成零件有杜邦公頭、直徑 0.13(mm) 的銅導線及 3D 印製的 PLA 骨架，在骨架上纏繞銅導線 31 圈，讓磁場通過線圈截面時可以獲得感應電壓，線圈截面為正方形面積約 10^{-4}m^2 。

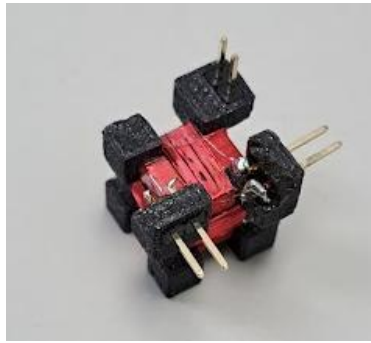


圖三 3D B-dot probe 模型

2-3 製作流程

- (1). 3D 建模:使用 Fusion 360 軟體進行建模，圖三即為建模時的 3D 圖。
- (2). 3D 列印:使用 prusalicer 接收建模完的 stl 檔案後，上傳至實驗室的 3D 印表機(Prusa Mk4s)中，印出的骨架如圖三灰色部分。
- (3). 訊號輸出源:我們使用杜邦線及杜邦頭做為訊號輸出端，我們必須將 0.13mm 導線上的漆包線磨除，將導線與杜邦頭焊接上，再將杜邦頭使用白膠固定在骨架上。
- (4). 導線纏繞:導線均勻纏繞在 3D B-dot probe 的骨架凹槽上，單層，總共 31 圈。

(5). 結果成品:如圖四所示



圖四:實際成品圖。

3. 3D B-dot probe 校正實驗

3-1 實驗概念

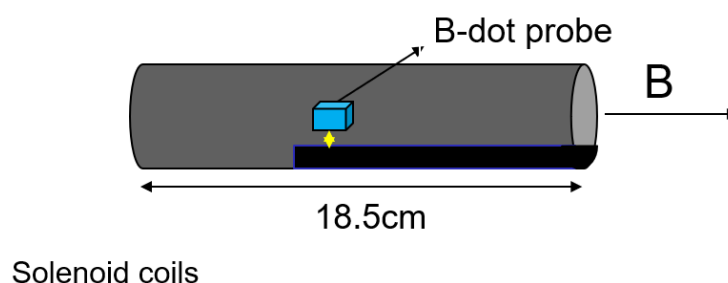
我們設計完成 3D B-dot probe 後，需要進行校正實驗，目的是確認其是否能正常運作並符合理論預期，進而得出校正常數。我們首先製作螺線管作為校正磁場的來源，並利用高斯計校正螺線管所提供的磁場，建立通入螺線管的電流與螺線管產生的磁場間的對應關係。

接著，將高頻的震盪電流通入螺線管，使其產生隨時間變化的磁場，再以我們設計的 3D B-dot probe 進行量測，以反推出 3D B-dot probe 的校正常數，確認 3D B-dot probe 是否成功運行。

3-2 實驗設計

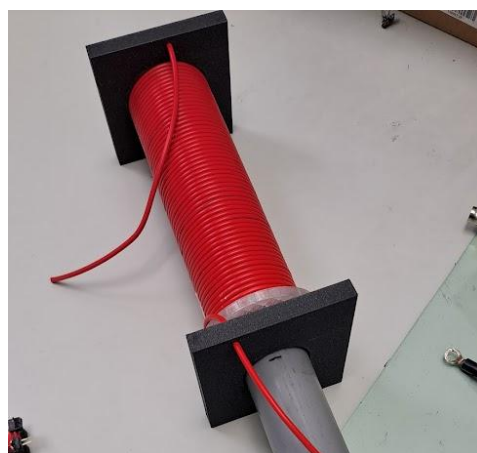
在圖五中利用螺線管產生磁場進行 3D B-dot probe 校正，但在這之

前我們必須先由實驗得出螺線管磁場與推動螺線管之電流間的關係，在透過量測之電流推算出磁場後再帶入回公式(1)中求取感應電壓。



圖五 校正實驗中螺線管與 3D B-dot probe 的相對位置圖。

螺線管由電線纏繞水管組成，水管的選用上配合 3D B-dot probe 大小去挑選，目前選用 1 吋水管，3D B-dot probe 能勉強塞入其中，水管外，電線纏繞三層，分別為 60、59、59 圈，實際外觀如圖六。

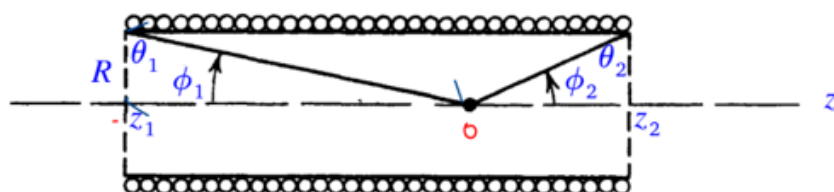


圖六 實際螺線管。

因為螺線管並非無限長，如圖七，考量有限長度之螺線管後，螺線管的理論計算公式為公式(3)，紅色的 o 點為量測磁場的位置，即 3D B-dot

probe 的位置，我們令其在螺線管中央以方便計算， ϕ_1 及 ϕ_2 是磁場量測點與螺線管邊緣和螺線管中心軸的夾角因為我令 O 點在中央所以 ϕ_1 等於 ϕ_2 ， n 為單位長度內的線圈匝數。

$$B_z = \frac{\mu_0 n I}{2} (\cos\phi_1 + \cos\phi_2) \cdots (3)$$

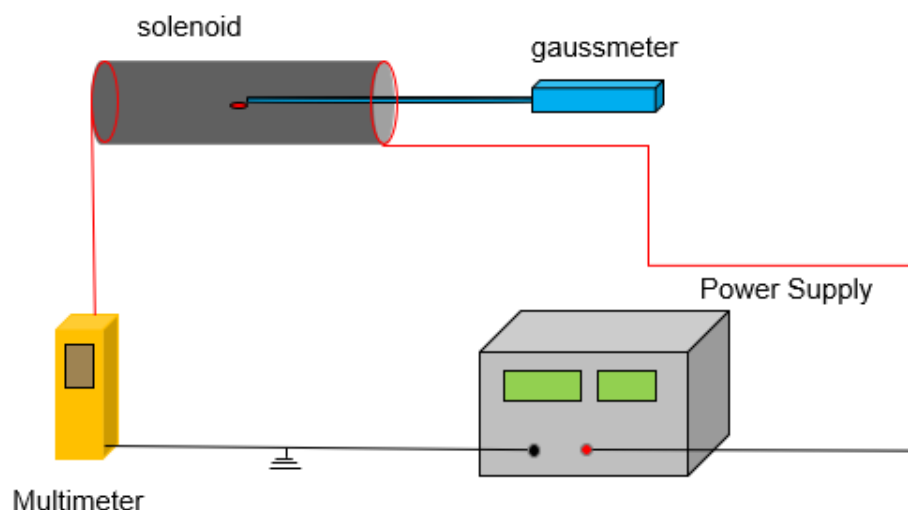


圖七 螺線管示意圖^[5]。

我們製作的螺線管有三層，計算理論值時可以更精確的考量每層的厚度及有限長螺線管的修正。公式中可以將公式(3)的常數合併得出公式(4):

$$B = \alpha I \cdots (4)$$

校正實驗線路如圖八，利用高斯計測量不同電流通入螺線管時所產生的磁場，做線性擬合求得 α (G/A)。

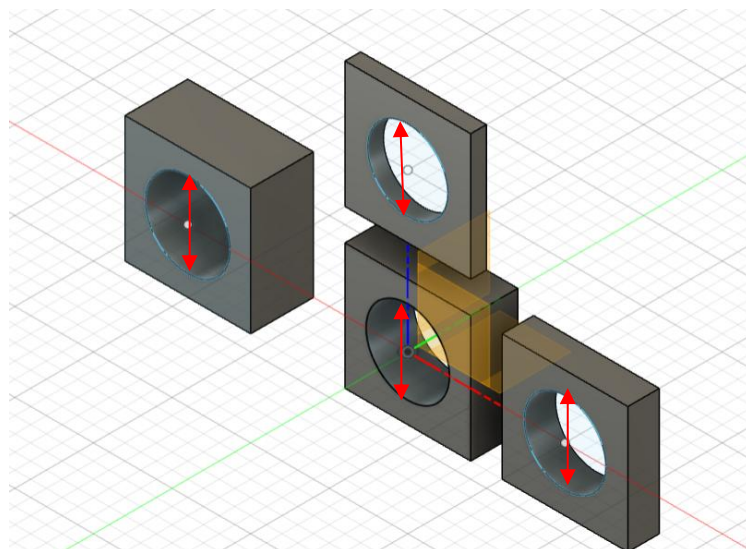


圖八 線路示意圖。

3-3 螺線管校正實驗架設

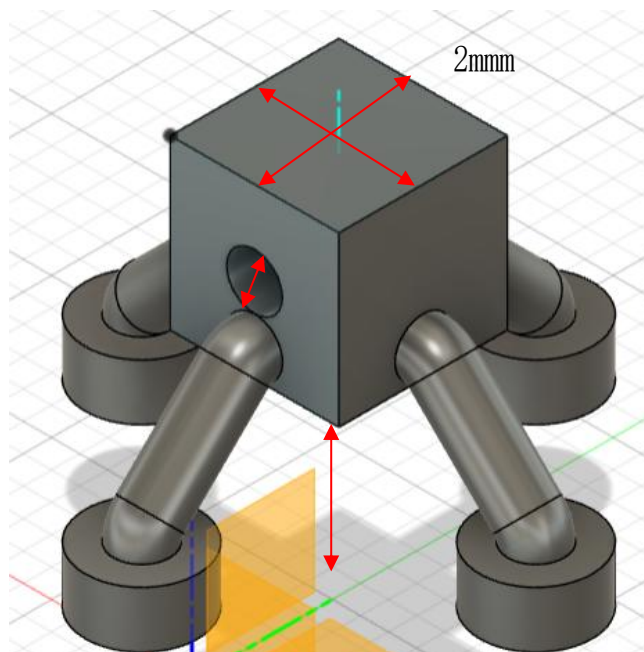
量測磁場的方式是使用高斯計(F. W. Bell 5180)。高斯計探針有兩種，分成圓頭及扁頭，分別可以量測平行探棒及垂直磁棒的磁場，我們選擇用圓頭探針去做校正，因為可以減少工程上的誤差，而扁頭探針要確認磁場與觀測點磁場夾角較困難。為了減少誤差，我設計並用 3D 印表機製作幾個輔助用工具，將高斯計探針位置固定在螺線管中間，並維持測量的結構穩定性。首先我們必須要知道高斯計探針的大小，在 3D 列印之前，我們必須先確認大約的大小才能繪製設計，但有一點很重要，實際列印的大小跟印表機性能相關，所以實物與模型會有誤差。印表機的最小刻度為 0.4mm，為了節省材料我們只印出幾個圓環如圖九他們的直徑分別是 5.1、5.2、5.3 及 5.4 mm，確認高斯計是否能塞入圓環，最後直徑 5.2 mm 的洞能貼合高斯計的探針，但我們選用直徑 6 mm 為最終方案，因為探針前端脆弱，過

於貼合可能會使探針有所損傷。

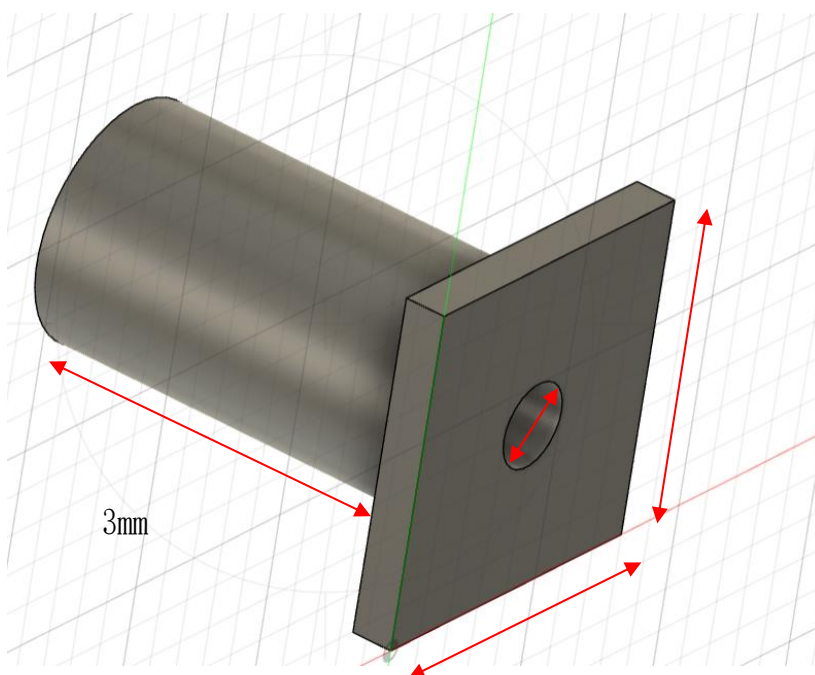


圖九 測試洞的大小

另外，我們列印一個支架，使高斯計能夠插入，並且以支架如圖十形成支撐維持高斯計結構穩定性，再將高斯計探針插入一有孔的圓柱如圖十一，圓柱會插入螺線管的水管中貼合，此步驟是為了使探針位置確定在螺線管正中心，工程圖如附錄。



圖十 高斯計支架。



圖十一 高斯計探針架。

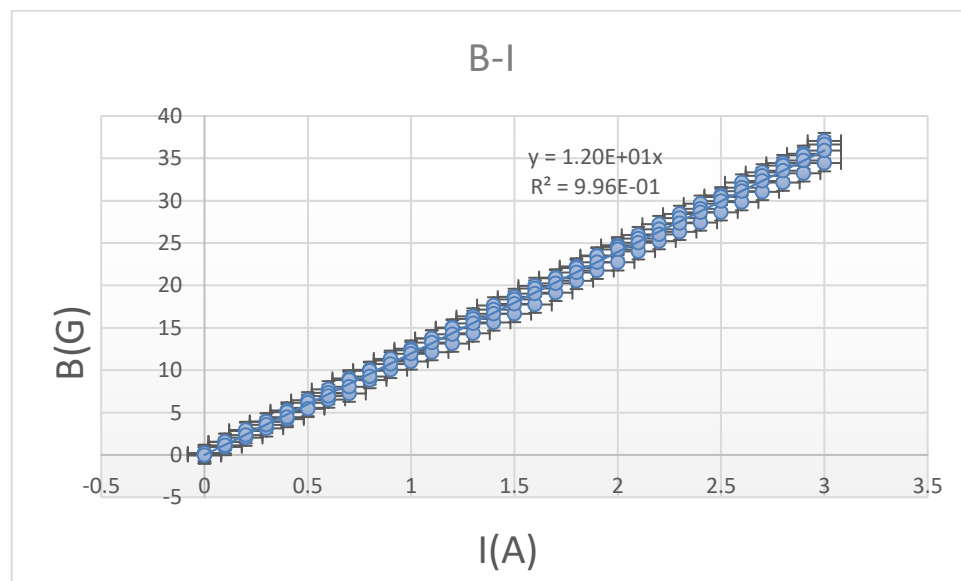
實驗擺放位置要考慮地磁的方位如圖十二，螺線管產生的磁場必須垂直地磁場，才能確保高斯計探針量測到的是螺線管產生的磁場，最後執行

四次實驗，每隔 0.1 安培測量一次磁場，測至 3 安培為止，原先有先做一
次實驗，用的是舊線圈，舊線圈是來自學長的傳承，新線圈的特點在於纏
繞層數較多，產生更強的磁場，降低外在磁場的干擾。



圖十二 實際線路圖

原始數據將放置附錄中，以 124 個數據點繪製成圖十三



圖十三 B-I 擬合圖。

分析方式有分兩種，表一是將四組數據進行擬合後得出四組關係後，再將其取平均。表二是將四組數據一次擬合出一個關係圖，可以得知此處擬合方式不同也不會有過大影響，數值在有效位數內是相等的，表一中新線圈代表是我們新繞的三層螺線管而舊線圈是以前製作的螺線管，可以知道新的螺線管的誤差較小。

表一 斜率平均電流磁場關係

新線圈	理論	11.8
	誤差	1.74%
	實驗	12.0
	舊線圈誤差	2.42%

表二 全部擬合電流磁場關係

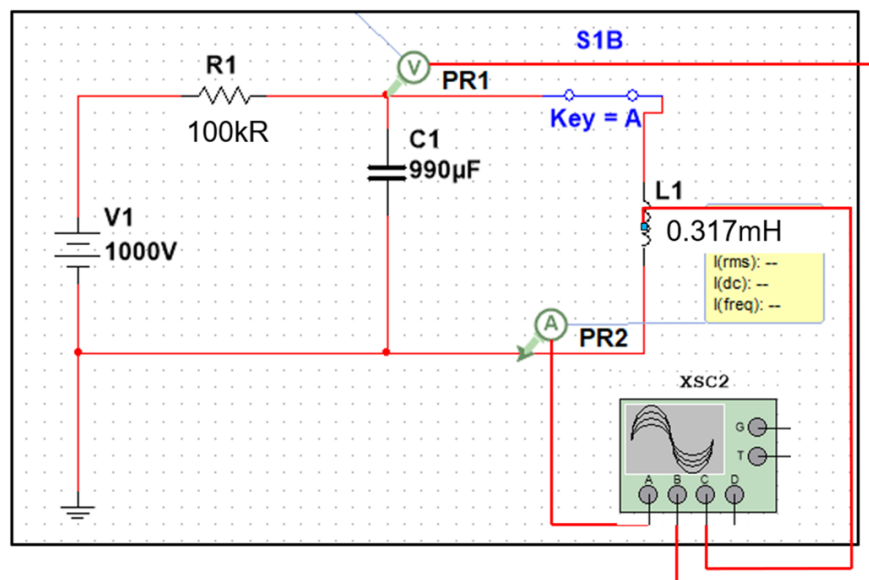
新線圈	理論	11.8
	誤差	1.74%
	實驗	12.0
	舊線圈誤差	2.42%。

在實驗進行中，尚未通入電流的螺線管磁場應為零，實驗卻不為零，而且此時方向固定下量測的磁場大小皆大於零，代表說磁場應該是另外的干擾源，而且此初始磁場不屬於隨機亂數，其平均值大於零，所以我將其視為一個常數磁場扣掉，相當於把整條斜直線平移到零的位置，重新擬合得圖十三。

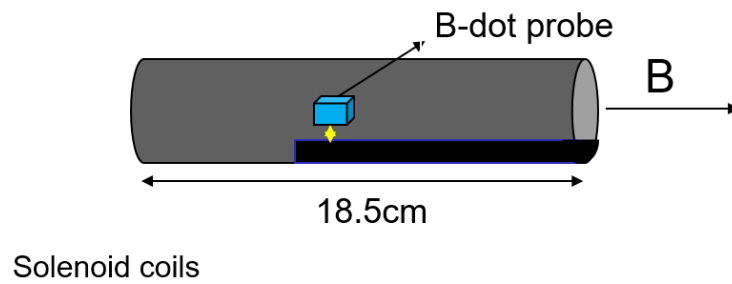
3-4 3D B-dot probe 校正實驗

為了產生隨時間變化之電流，我們利用電容放電產生高頻震盪電流來螺線管，選擇較高頻率的電流是為了增加 3D B-dot probe 所量測之感應電壓。實驗中會同時量測通入螺線管之電流及 3D B-dot probe 的感應電壓，藉此推算 3D B-dot probe 感應電壓與磁場的關係。

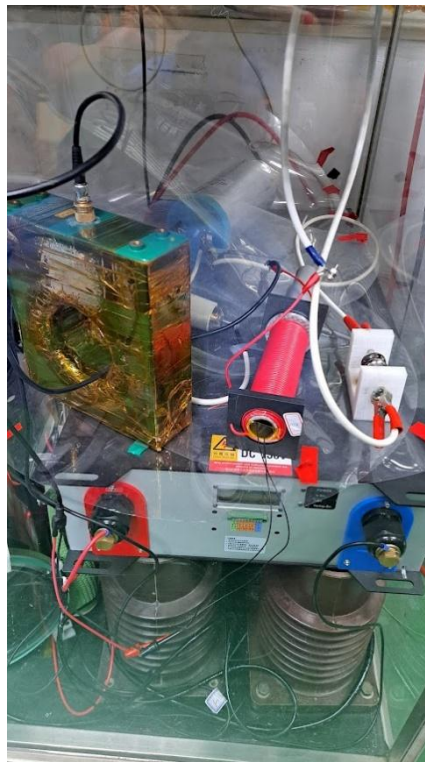
測試線路如圖十四所示，其中 PR1 是量測電壓、PR2 是量測電流、C1 是 990 μF 的電容、L1 是螺線管的電感、R1 是保護電阻、V1 是電源供應器、S1B 是 spark gap switch。圖十四左側為充電電路，右側為 RLC 放電電路，將 3D B-dot probe 放置於螺線管中如圖十五，因為實驗進行必須在合乎安全的高壓實驗區如圖十六。



圖十四 實驗校正圖。



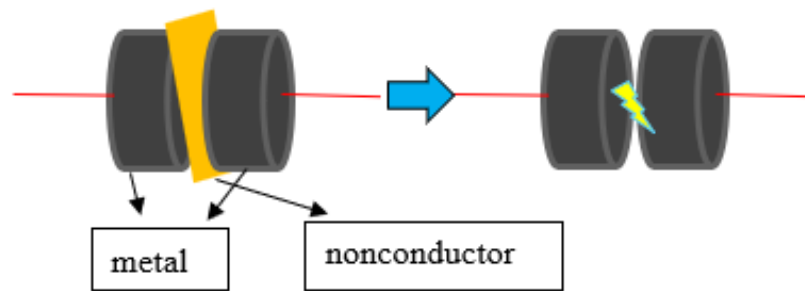
圖十五 校正實驗中螺線管與 3D B-dot probe 的相對位置圖。



圖十六 高壓實驗區。

3D B-dot probe 校正實驗線路(圖十四)中的 S1B 為 ，是利用兩個極度貼近的導體(metal)中間放置一個絕緣片(nonconductor)來完成，如圖十七，當尚未抽出絕緣片的時候電路尚未導通，當抽出絕緣片的時候就會因為兩極間足夠高的電壓，擊穿空氣，產生電弧(arc)使兩極之間導通，

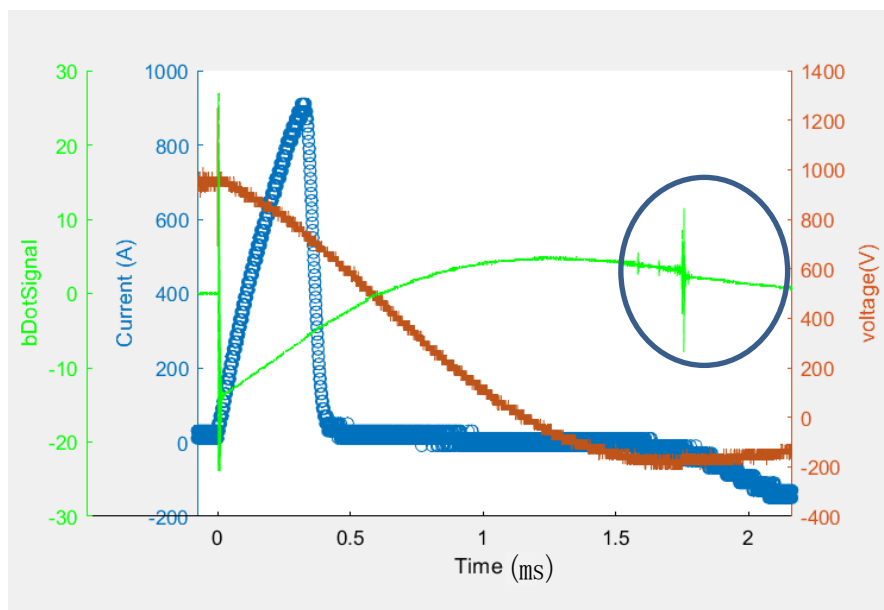
產生震盪電流。



圖十七 電路開關示意圖。

3-5 3D B-dot probe 校正實驗結果

圖十八為實驗結果，綠色為 3D B-dot probe，藍色為使用 Pearson Current Monitor 301X 電流計量測到的電流(current)，棕色為電容的電壓。我們將電容充電至 1000 V，當開關導通後電容電壓下降到 750V 的時候作為觸發開始擷取數據。理論上 3D B-dot probe 的感應電壓會和電流微分成正比，時間小於 0.3 ms 時數據皆正常。但後段電流訊號發生異常快速歸零，但感應電壓的訊號趨勢大致正確，只是在時間後段有高頻雜訊出現如圖十八圓圈處。



圖十八 校正實驗示波器截圖。

4. 未來工作

單軸的校正實驗做完後發現有電流突然歸零及感應電壓中的高頻雜訊，未來必須找出原因。除此之外一維的 B-dot probe 校正完後便可開始進行三維的 B-dot probe 校正。為了進行三維的校正，我們將製作一個三維的亥姆霍茲線圈提供任意方向的磁場來進行，三維的亥姆霍茲線圈如圖十九所示。



圖十九 三軸的亥姆霍茲線圈^[6]。

5. 結論

本年度完成 3D B-dot probe 的設計、製作並校正為了校正 3D B-dot probe 所需的螺線管，並用於輔助我完成了一維 3D B-dot probe 的校正，確定儀器 3D B-dot probe 是確實可以被應用的，只是仍有些問題要解決，像是來自 3D B-dot probe 感應電壓的高頻雜訊及電流感測器在一段時間後歸零。明年我將完成各個維度的校正，確保各個維度的磁場都能被測量到，並實際應用於托克馬克中。

6. 資料來源

[1]科學月刊 https://www.scimonth.com.tw/archives/6379#google_vignette

[2]物理雙月刊-核融合

<https://pb.ps-taiwan.org/modules/news/article.php?storyid=879>

[3]FIRST 計畫新聞

https://www.ocac.gov.tw/OCAC_OLD/Pages/Detail.aspx?nodeid=3214&pid=64703444

[4]Sayak Bose *et al* 2019 *Eur. J. Phys.* 40 015803 “Understanding the working of a 3D B-dot probe”

[5] 成功大學物理系游教授授課講義

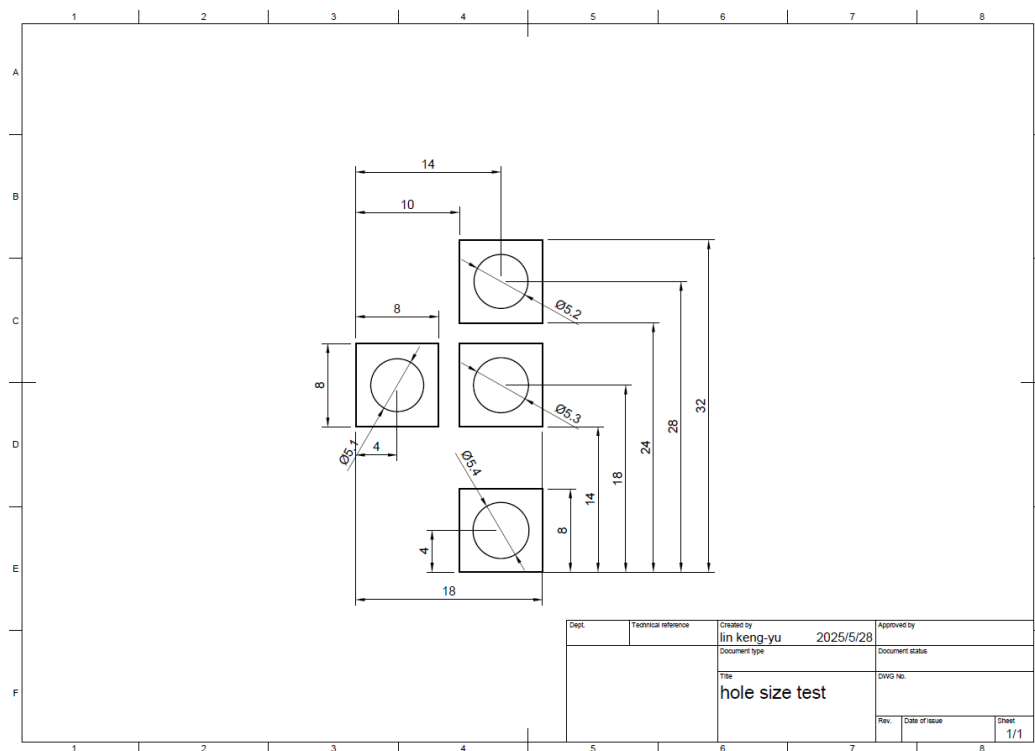
[6] 儀器 <https://mobilsens.com/tw/html/product/show.php?pid=355&cid=79>

7. 附件

7-1 工程圖

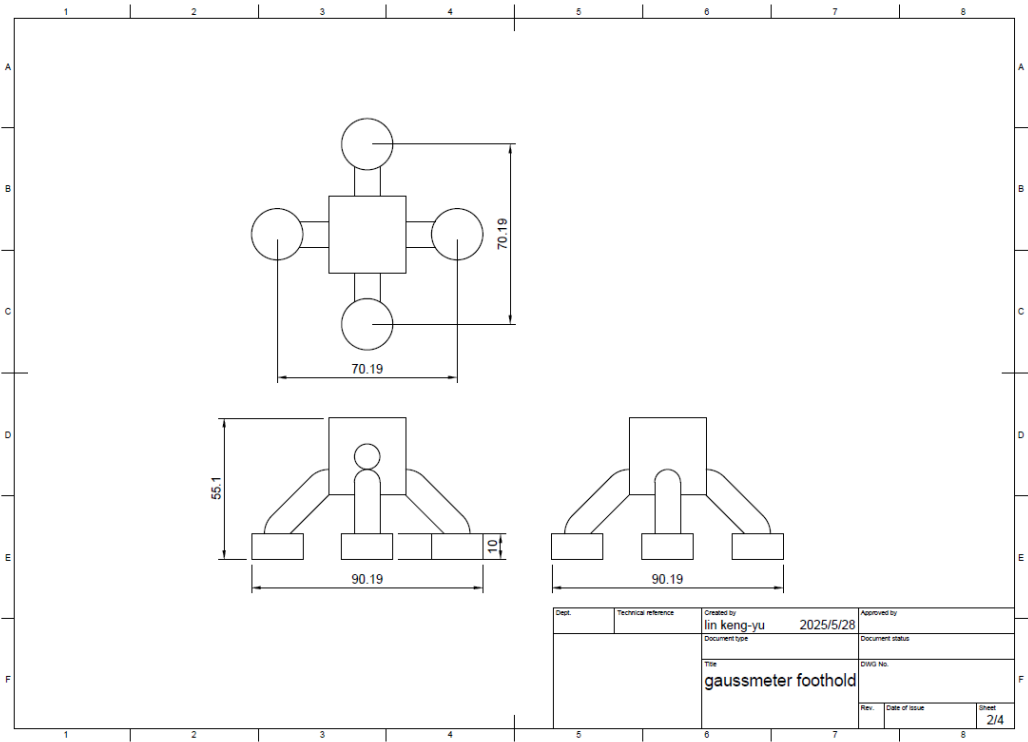
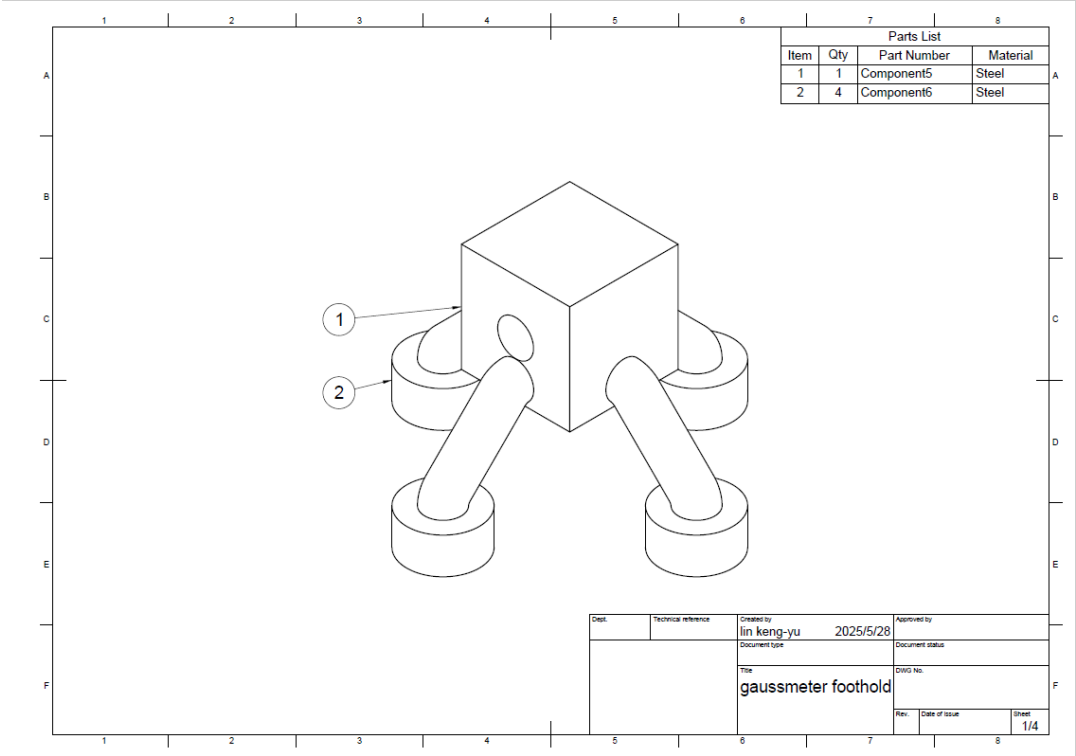
此為測試探針寬度的工程圖，位於網站中，

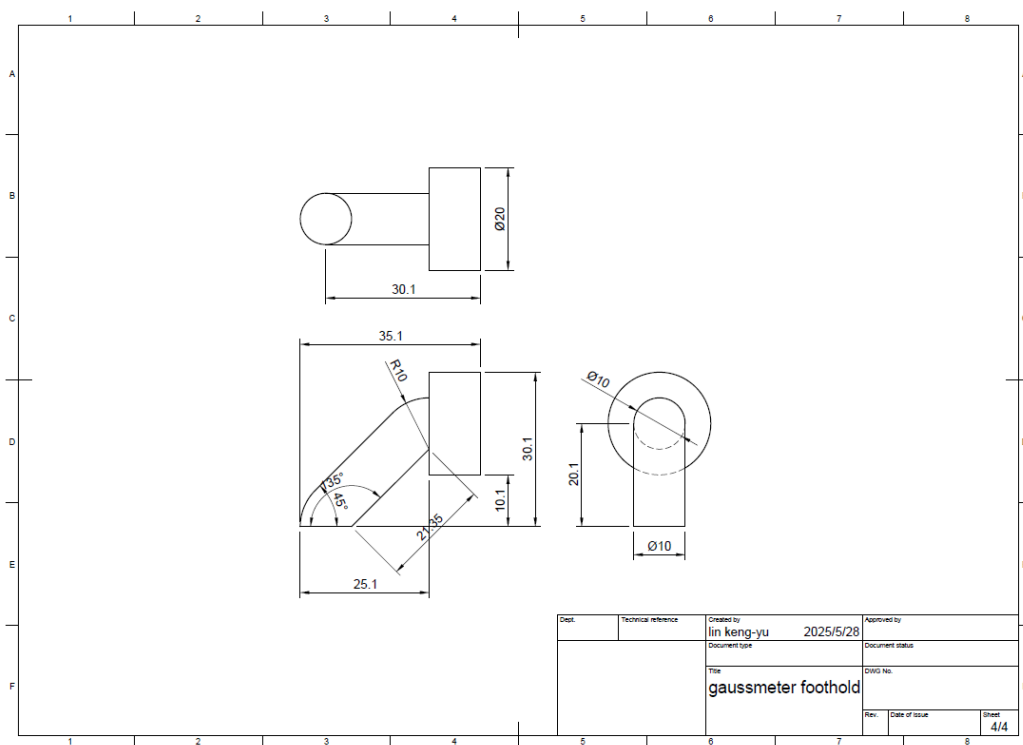
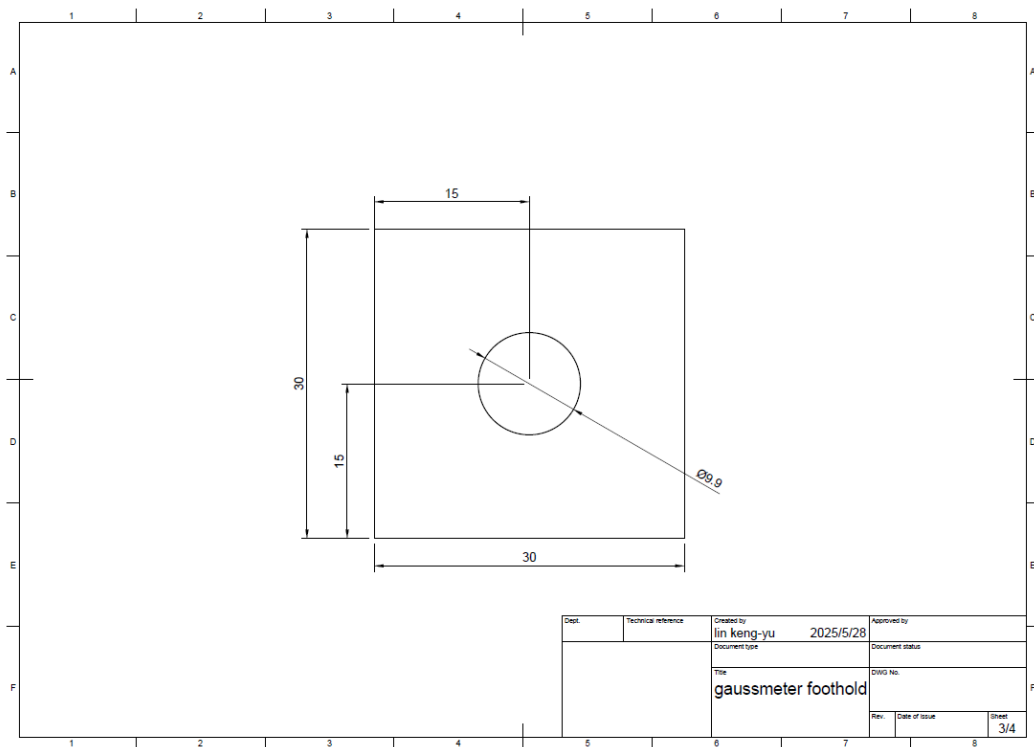
drawing\klin\2024annual\hole size test Drawing v1.pdf



高斯計架工程圖位於 drawing\klin\2024annual\gaussmeter

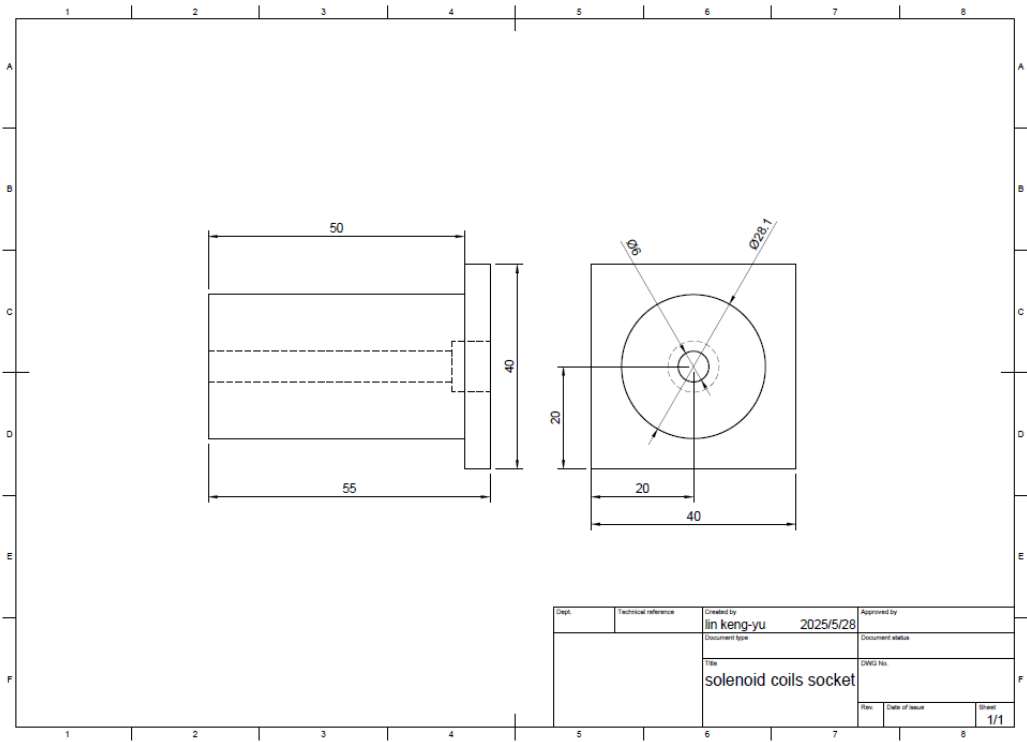
foothold Drawing v1.pdf





探針架工程圖位於drawing\klin\2024annual\solenoid coils socket

Drawing v1.pdf"



7-2 原始數據

此為螺線管校正所得的原始數據。

	第一次	第二次	第三次	第四次	平均
I (A)	B(G)	B(G)	B(G)	B(G)	B(G)
0.0	0.0	0.2	0.3	0.0	0.1
0.1	1.0	1.6	1.6	1.2	1.4
0.2	2.1	2.9	3.0	2.4	2.6
0.3	3.2	4.0	4.0	3.6	3.7
0.4	4.3	5.3	5.1	4.5	4.8
0.5	5.6	6.5	6.2	5.5	6.0
0.6	6.6	7.8	7.4	7.0	7.2
0.7	7.3	9.1	8.9	8.1	8.4
0.8	8.9	10.1	10.0	9.3	9.6
0.9	10.1	11.2	11.4	10.8	10.9
1.0	11.1	12.6	12.4	12.0	12.0
1.1	12.2	13.8	13.8	13.3	13.3
1.2	13.2	15.1	15.0	14.3	14.4
1.3	14.4	16.4	16.1	15.6	15.6
1.4	15.7	17.7	17.2	16.7	16.8
1.5	16.7	18.7	18.4	17.9	17.9
1.6	17.8	20.0	19.7	19.1	19.2
1.7	19.2	21.0	20.9	20.3	20.4
1.8	20.6	22.3	22.1	21.6	21.7
1.9	21.8	23.6	23.5	22.8	22.9
2.0	22.8	24.8	24.6	24.3	24.1
2.1	24.1	26.0	25.6	25.1	25.2
2.2	25.3	27.3	26.7	26.1	26.4
2.3	26.4	28.5	28.0	27.4	27.6
2.4	27.5	29.7	29.1	28.7	28.8
2.5	28.7	30.7	30.5	30.0	30.0
2.6	29.9	32.2	31.6	31.2	31.2
2.7	31.1	33.4	33.0	32.4	32.5
2.8	32.2	34.5	34.2	33.6	33.6
2.9	33.3	35.6	35.4	34.8	34.8
3.0	34.5	37.1	36.7	36.0	36.1

