

National Cheng Kung University

Institute of Space and Plasma Sciences

107 Annual Report

研究生:鄭名城 Ming-Cheng Jheng

指導教授:張博宇 Po-Yu Chang

目錄

● 脈衝功率系統

Ch.1 脈衝功率系統

- 1-1 脈衝功率系統的組成與規格
- 1-2 使用單翼(Wing)電容器組的脈衝功率系統
- 1-3 各狀態下的簡易電路圖與電阻規格需求
- 1-4 放電電阻的電阻值

Ch.2 壓縮空氣系統與操作

- 2-1. 氣動式高壓繼電器的設計與製作
- 2-2. 空氣壓縮機使用於繼電氣之動力來源與乾燥氣體之供應源
- 2-3. 壓縮乾燥氣體鋼瓶使用於軌道間隙開關的流動氣體

Ch.3 使用火星塞觸發的間隙開關(Trigatron)

- 3-1. 設計方法

Ch.4 使用一級電容器放電的軌道間隙開關

- 4-1. 軌道間隙開關與崩潰電壓(Self-breakdown voltage)量測
- 4-2. 多重觸發設備與 Marx generation 的脈衝訊號之電壓上升速度(Falling speed of voltage)
- 4-3. 使用一級電容器放電的實驗結果

Ch.5 機構變更與修改

- 5-1. 系統支撐柱
- 5-2. 電容架的支撐檯
- 5-3. 電容架壓克力上板
- 5-4. 高壓設備架
- 5-5. 系統電網
- 5-6. 放電電阻製作規格
- 5-7. $1\text{ M}\Omega$ 放電電阻棒製作

Ch.6 未來進度

Ch.7 參考資料

附錄一. 碩一下學期海報展

附錄二. 光電年會海報

附錄三. 物理年會海報

附錄四. 繼電器工程圖(NO)

附錄五. 繼電器工程圖(NC)

附錄六. 繼電器氣流大小計算

附錄七. 軌道間隙開關內部氣體使用的流速計算

附錄八. Trigatron 工程圖

附錄九. 3D 列印 PVC 管製具工程圖

摘要

本實驗室正在建造台灣首座大型脈衝功率系統，使用緊湊並聯的電容器組($5\ \mu\text{F}$)儲存能量，經軌道建系開關(Rail gap switch)快速放電，產生脈衝輸出。當電容器充電到 50 kV，系統輸出能量和最大輸出電流分別預估為 6.25 kJ 和~500 kA，若上升時間(Rise time)為 1us，可輸出 6.25 GW 的功率。

軌道間隙開關的啟動方式是由 Marx generator 的脈衝觸發訊號(5kV/ns 的升降速度)來驅動[1]，其 Marx generator 是由實驗室學姊自作的 Trigger-pulse generator 觸發所驅動的[3]。嘗試不同的幾何形狀的電極使 Marx generator 可觸發 Rail-gap switch，其輸出有 5.5kV/ns 的升降速度。

在系統的放電過程中，系統的電感大小將會影響系統的放電速度，而系統中的平行板傳輸線、同軸傳輸線，電容組連接器的電感值已經用電磁學理論計算[4]。而包含在系統中的軌道間隙開關和電容器必須由放電結果得知，我們測試了一個軌道間隙開關串聯多級電容組的放電曲線，使用電流計(Rogroski coil)量測電流大小和使用 RLC 響應頻率可得知此放電迴路的電感，當我們逐步增加電容組後，即可分析其電容器軌道間隙開關的電感值。

實驗結果得出，我們估計電容器的電感值為 $127 \pm 4\text{nF}$ 、軌道間隙開關的電感值 $176 \pm 7\text{nF}$ 。目前實驗的載具是放置在 1 平方公尺大且接地的壓克力箱內，當電容組的數量增加到 3 組時，載具將會移動到外面，因此需架設電網以確保實驗室人員與儀器的安全，在本年度報告中將有詳細說明。

而系統也包含許多次系統，其一，為了保護電源供應器且安全地實驗，設計了可在高電壓環境下運作的繼電器(常開與常關)，為了避免系統放電時產生的電磁脈衝波造成電器故障，使用壓縮空氣當作繼電器的動力來源是，所以使用了空壓機來提供繼電器的動力來源與保持電容器環境乾燥的乾燥器體機的氣體供應源。其二，使用高壓氮氣鋼瓶保持開關內部氣體純淨。

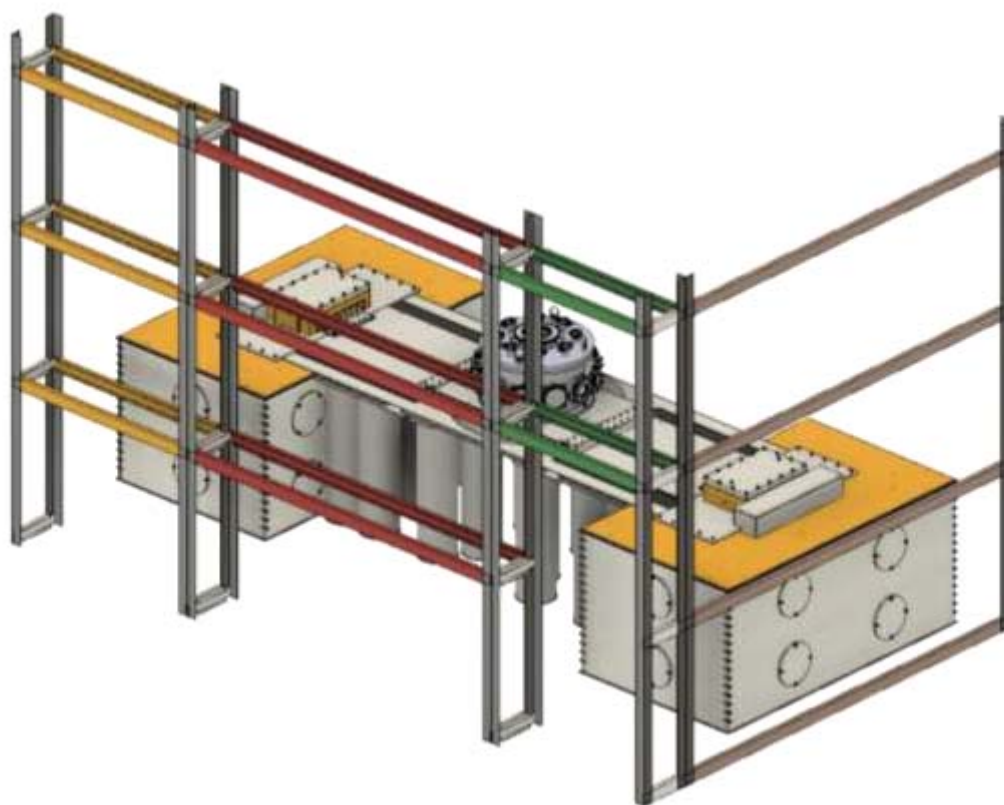
在脈衝功率系統的建置時，遇到的問題包含機構更改與材料變更都紀錄在此報告中。

CH.1 脈衝功率系統

引言

Parallel pleat capacitor bank(PPCB)形式的脈衝功率系統(Pulsed-power system)是一種使用緊密堆積多個電容器，經開關使儲存在電容器內的能量在極短的時間內輸出高功率脈衝。

此章節會介紹實驗室建置的脈衝功率系統的組成與規格，以及討論如何安全地操作實驗，使用單翼電容器組的脈衝功率系統作為例子，說明使用繼電器的時機與如何決定繼電器應該使用常開型還是常關型。在每一個操作的步驟中，利用系統的簡易電路圖去討論各狀態下的電子元件條件，特別是放電電阻電阻值的選擇。需選擇恰當的電阻讓系統的電容器組於適當的時間被放電電阻消耗能量至安全電壓值(其中我們定義電容器的存電電壓低於十伏特為安全的狀態)後，實驗人員才可靠近系統。最後會提供電阻設計的參數。



1-1 脈衝功率系統的組成與規格

本系統共使用 20 顆 $1\ \mu\text{F}$ 的電容器，如圖 1，將 2 個 $1\ \mu\text{F}$ 電容器串聯成一級(one-brick)電容器組，作為基本單位。這 10 組會分成而兩群，每一群由 5 組一級電容器並聯而成，放置於真空腔的左右兩側稱為北翼(North wing)與南翼(South wing)，左右兩群再並聯成總電容值為 $5\ \mu\text{F}$ 的電容器組，作為系統所使用。開關的部分使用低電感的軌道間隙開關(Rail gap switch)作為系統的主要開關，經由馬克斯機(Marx generator)輸出的脈衝訊號觸發，使軌道間隙開關導通後，將兩側電容器的電導入真空腔中的負載。若電容器組充電至 $50\ \text{kV}$ ，估計瞬間功率與電流峰值約 $6.25\ \text{GW}$ 、 $500\ \text{kA}$ ，上升時間(rise time)為 $1\ \mu\text{s}$ ，系統參數如表 1。

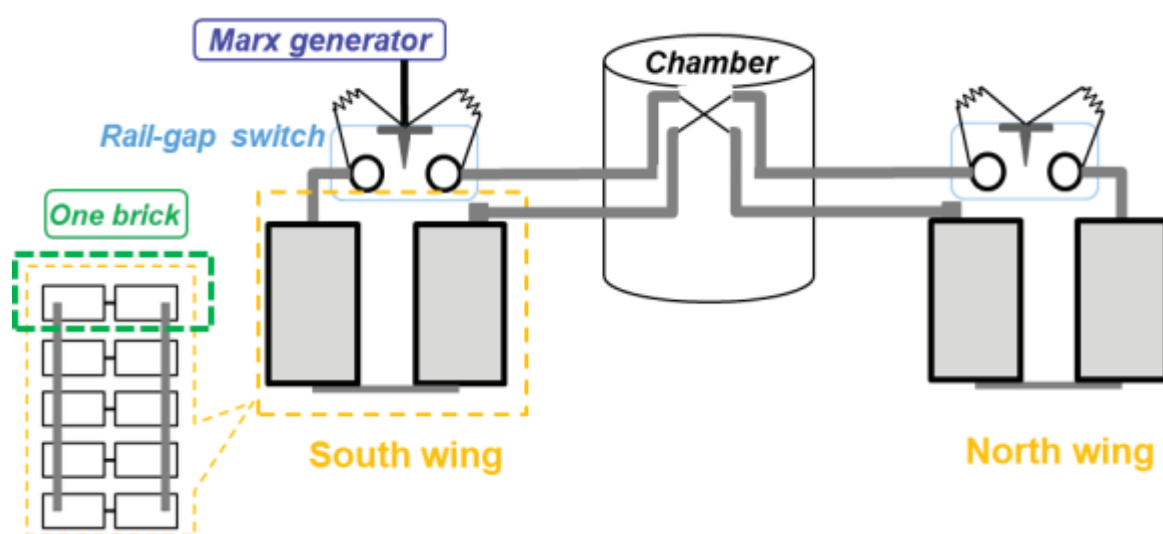


圖 1. 脈衝功率系統的前視圖。

Capacitance	$1\ \mu\text{F}$ /each
# of capacitor	20
Total capacitance	$5\ \mu\text{F}$
Voltage	$50\ \text{kV}$
Total energy	$6.25\ \text{kJ}$
Estimated peak current	$\sim 500\ \text{kA}$
Estimated rise time	$\sim 1\ \mu\text{s}$
Estimated rising speed	$0.5\ \text{kA/ns}$
Estimated Power	$6.25\ \text{GW}$

表 1. 脈衝功率系統的參數表

1-2 使用單翼(Wing)電容器組的脈衝功率系統

為了了解系統特性，如圖二，我們先架設使用單翼電容器組放電的脈衝功率系統。為了避

免系統放電時對電源供應器過載，在電源供應器與電容器之間放置一個氣動式常開型繼電器 (P_1)，其繼電器會在系統充電時短路(啟動)，準備放電實驗時先轉換為斷路(不啟動)。電阻 R_2 、 R_3 是放電電阻，電阻 R_2 是一組大電阻將系統接地，此電阻能使充滿電的系統在 15 分鐘後消耗能量至安全的電壓值，10 伏特。而 R_3 電阻會與氣動式常關型繼電器(P_2)串連在一起接地，當系統需要充放電實驗時短路(不啟動)，實驗結束時斷路(啟動)。另外，電阻 R_{1A} 與電阻 R_{1B} 是分壓電阻，系統放電瞬間可由此分壓電阻量測。電阻大小與繼電器的設計將分別在章節 1-4 與章節 2-1 介紹。

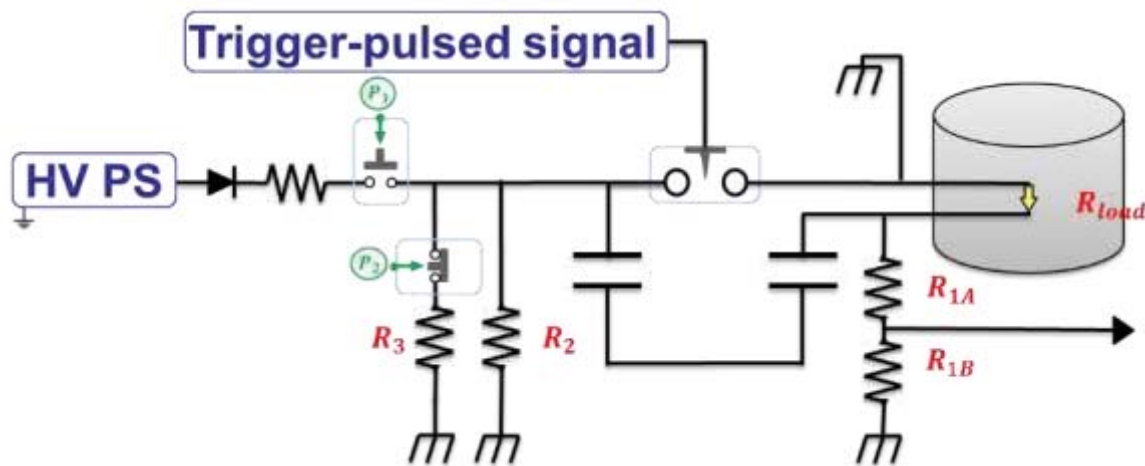


圖 2. 使用一級電容器(One-brick capacitor)的脈衝功率系統，加上繼電器用以保護電源供應器與連接放電電阻。

實驗的四種操作狀態：

- (1)閒置狀態(Initial state)： P_1 繼電器使電源供應器和系統之間斷路(Open)，而 P_2 繼電器(Closed)將 R_3 電阻接地，使電容器對 R_3 電阻放電。因此， P_1 為 open， P_2 為 closed。
- (2)充電狀態(Charing)，當電源供應器對電容器充電時， P_1 繼電器需連接(Closed)系統電源供應器， P_2 繼電器斷開(Open) R_3 放電電阻。因此， P_1 為 closed， P_2 為 open。
- (3)電容器充飽電後，準備放電實驗前：將 P_1 繼電器區斷開(Open)系統與電源供應器， P_2 繼電器保持斷路(Open)，這時候為實驗中的狀態(In experiment)。因此， P_1 為 open， P_2 為 open。
- (4)放電結束後(End)：使用 P_2 繼電器接上(Colsed) R_3 電阻接地，使剩餘在電容器中的電能釋放至安全電壓。這時候的狀態回到閒置狀態(Initial state)時的情況， P_1 為 open， P_2 為 closed。設定閒置狀態下不需要對繼電器施力，故 P_1 使用常開型繼電器， P_2 使用常關型繼電器。各狀態總結於表 2 中。

Opportunity / Switch	S_1	S_2
閒置狀態 (Initial state)	Open	Closed

充電狀態 (Charging)	Closed	Open
實驗中 (In experiment)	Open	Open
放電結束 (End)	Open	Closed
Switch type	NO	NC

表 2，各時狀態，繼電器位置的開路與斷路。

1-3 各狀態下的簡易電路圖與電阻規格需求

1-2 節中的表 2，其 4 種狀態的電路圖分別對應到圖 3 中的(a)到(d)。

(1) 圖 3(a)，充電狀態： R_2 電阻在充電時會持續放電，故須考慮電源供應器提供的充電電流是否足夠，以及 R_2 電阻的功率是否超出最大承受功率。

(2) 圖 3(b)，充電完畢狀態：充電完畢後段開電源供應器準備放電，需要注意在此迴路中經過負載 R_{load} 的電流大小，避免在還沒完成實驗前負載就已經被燒熔。其電路中的總電流可以由串聯的等校電阻公式：

$$R_{eq(b)} = R_2 + \frac{R_1 R_{load}}{R_1 + R_{load}} \cong R_2$$

用來估算迴路中的總電流，因為 R_2 在這迴路中有限電流的功能，故 R_2 電阻值需夠大使經過 R_{load} 的電流夠小。放電電阻 R_2 可使系統經由此電阻在 15 分鐘內放電至安全的電壓值(10 伏特)，是預防系統故障的安全措施。

(3) 圖 3(c)狀態，軌道間隙開關導通：大部分的電能是經過負載(R_{load})的。故 R_1 和 R_2 必須遠大於負載電阻。

(4) 圖 3(d)閒置狀態：讓電容器組儲存的電能經由放電電阻 R_3 在數秒內消耗至電壓低於 10 伏特。原因是負載(R_{load})在實驗中可會因為放電而燒毀而消失，無法將電容完全放電。

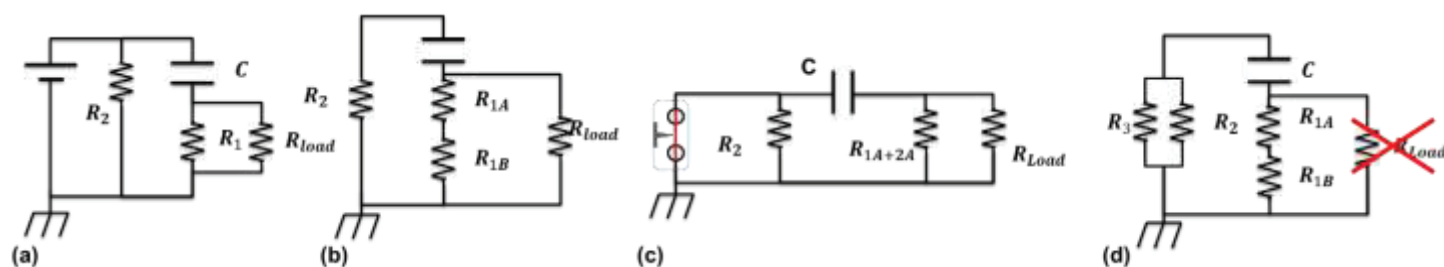


圖 3. (a)充電時。 (b)充電完畢，且使用繼電器斷開電源供應器與電容器。 (c)使用脈衝訊號產生器觸發軌道間隙開關後，將電流導入負載。 (d) 使用繼電器接上放電電阻接地。

1-4 放電電阻的電阻值

估算電容器放電所需時間與電阻值使用到了 RC 放電公式：

$$V(t) = V_0 e^{-\frac{t}{RC}}$$

，我們定義 10V 為安全電壓， V_0 為電容器充電電壓，而目前測試階段的電容器充電電壓為 20 kV，未來電容器充電電壓將會提升到 50 kV。將 $V(t)=10$ 代入此放電公式，由電壓比例取 $\ln$ 後得到方程式

$$\Delta t = RC * \ln\left(\frac{V_0}{10}\right) [s]$$

，由此再分別代入 $V_0=20k$ (或 50k)，電容值 C 由使用的電容器組數決定，由規定的放電時間推估需要的電阻值，再做調整至適當時間與電阻值。圖 3 中各狀態用此方式分析各電阻之功率與電流，分析如表 3 至表 5 所呈現。

表 3 給出在圖 3(b)中的狀態，而表 4 給出圖 3(d)中的狀態之各電阻的功率與電流大小。其中我們假設負載電阻為 1 歐姆、而 R_1 使用 100M 歐姆、 R_2 使用 100M 歐姆。

其中表 3 計算方式如下：

$$R_2 : I_2 = \frac{V_0 * \frac{R_2}{R_2 + R_{load}}}{R_2} = \frac{V_0}{R_2}$$

$$P_2 = I_2 * (V_0 * \frac{R_2}{R_2 + R_{load}})$$

$$R_1 : I_1 = \frac{V_0 * (\frac{R_{load}}{R_2 + R_{load}} * \frac{R_1 * R_{load}}{R_1 + R_{load}})}{R_1} = \frac{V_0}{R_2 R_1}$$

$$P_1 = I_1 * (V_0 * \frac{R_{load}}{R_2 + R_{load}})$$

$$R_{load} : I_{load} = V_0 * \frac{\frac{R_{load}}{R_2 + R_{load}} * \frac{R_{load}}{R_1 + R_{load}}}{R_1}$$

$$P_{load} = I_{load} * (V_0 * \frac{R_{load}}{R_2 + R_{load}} * \frac{R_{load}}{R_1 + R_{load}})$$

圖 3(b)電阻分析	電阻值	電阻電流 (I_{20kV}/I_{50kV})	電阻功率 (P_{20kV}/P_{50kV})
R_2	100 M (10M*10)	~0.2mA / ~0.5 mA	4 W / 25 W
R_1	100 M (10M*10)	~ 0 A / ~ 0 A	~0 W / ~ 0 W
R_{load}	$\cong 1$	~0.2mA / ~0.5 mA	~0 W / ~ 0 W

表 3，圖三(b)狀態各電阻之電流和功率。

表 4 計算方式如下：

$$R_1 : I_1 = \frac{V_0}{\frac{R_3 * R_2}{R_3 + R_2} + R_1}$$

$$P_1 = I_1 * (V_0 * \frac{R_1}{\frac{R_3 * R_2}{R_3 + R_2} + R_1})$$

$$R_2 : I_2 = \frac{V_0}{\frac{R_3 * R_2}{R_3 + R_2} + R_1} * \frac{R_2}{R_3 + R_2}$$

$$P_2 = I_2 * (V_0 * \frac{\frac{R_3 * R_2}{R_3 + R_2}}{\frac{R_3 * R_2}{R_3 + R_2} + R_1})$$

$$R_3 : I_3 = \frac{V_0}{\frac{R_3 * R_2}{R_3 + R_2} + R_1} * \frac{R_3}{R_3 + R_2}$$

$$P_3 = I_3 * (V_0 * \frac{R_1}{\frac{R_3 * R_2}{R_3 + R_2} + R_1})$$

圖 3(d)狀態	電阻≒大小	電阻電流 (I_{20kV}/I_{50kV})	電阻功率 (P_{20kV}/P_{50kV})
R_2	100 M (10M*10)	~0.2mA /~0.5mA	~ 4 W / ~ 10 W
R_1	100 M (10M*10)	~0.2mA /~0.5 mA	~4 W / ~ 10 W
R_3	1k	~0 mA /~0 mA	~0 W / ~ 0 W

表 4，圖三(d)狀態各電阻之電流和功率。

表 5 中顯示系統的電容器由一級電容器增加至五級電容器和 10 組一級電容器時，在狀態 (b)和(d)時，各電壓下降至安全電壓需要的時間。其電阻 R_3 和 R_2 分別使用為 1 kΩ 和 100 MΩ 所估算的結果，由於兩個狀態下的等校電阻值近似 100MΩ，所以所需時間相同。

電容值[μF]	20kV 放電至 10V 時間		50 kV 放電至 10V 時間	
	狀態(b)	狀態(d)	狀態(b)	狀態(d)
0.5	380 s	380 s	426 s	426 s
1	760 s	760 s	852 s	852 s
1.5	1140 s	1140 s	1278 s	1278 s
2	1520 s	1520 s	1703 s	1703 s
2.5	1900 s	1900 s	2129 s	2129 s
5	3800 s	3800 s	4258 s	4258 s
方程式	$t = 100M * C * \ln(\frac{V_0}{10})$			

表 5，圖三中(b)和(d)狀態下，不同電容值放電至安全電壓的所需時間。

CH.2 壓縮空氣系統

我們所建置的系統需使用到壓縮空氣機與壓縮空氣瓶所提供的乾燥空氣，前者是未來提供氣動式繼電器的動力來源亦提供乾燥器體機的空气來源；後者，則是用來提供軌道間隙開關與 Marx generator 的内部氣體。

2-1 氣動式高壓繼電器的設計與製作

電力式的繼電器在系統放電時可能受到脈衝電磁波影響而故障，為了避免此情況發生，我們使用壓縮空氣當作繼電器的動力來源。

在圖 4 中的(a)為常關繼電器(Normally closed relay)，當無外力時，兩電極將被導板所連接，為短路(關)，當外力推動導版後形成斷路(開)。圖 4(b)為常開繼電器(Normally open relay)，當無外力時，兩電極與導板並無連接，為斷路(開)，當外力推動導版後才變成短路(關)。

這些繼電器的設計需可以在高電壓的環境下運作，在開關的部分由兩個電極和一個鉛板當作導板，這些元件的距離參考 NORTH STAR 公司的經驗公式：

$$\frac{V}{d} = E = 24.5P + 6.7\left(\frac{P}{R_{eff}}\right)^{1/2} \text{ kV/cm}$$

所設計，其中 $R_{eff} = 0.23R$ 、 R 為電極圓柱之半徑，單位為公分、 P 單位為大氣壓力 atm、 d 單位為公分、 V 單位為千伏特。系統的電容器未來將會使用 50 kV，我們將繼電器的安全係數提高 1.6 倍，假設充電電壓為 80 kV，代入公式計算得出 d 的長度為 2.23 公分。在圖 4(f)中，兩個電極之間間距為 120 mm，遠大於 80 kV 估計所需之 2.23 公分的距離，設計的距離可以耐 50 kV 以上。圖 4(f)中紅色圈起來的區塊，我們刻意在繼電器的元件上設計許多凹槽，目的為增加路徑以避免表面電流流過造成漏電。在圖 4(g)中的導版支撐座，使用具有輕微搖擺的設計，而製造出些許的接觸自由度，使電極與金屬導板有良好的接觸。繼電器工程圖請參考附錄四與五。

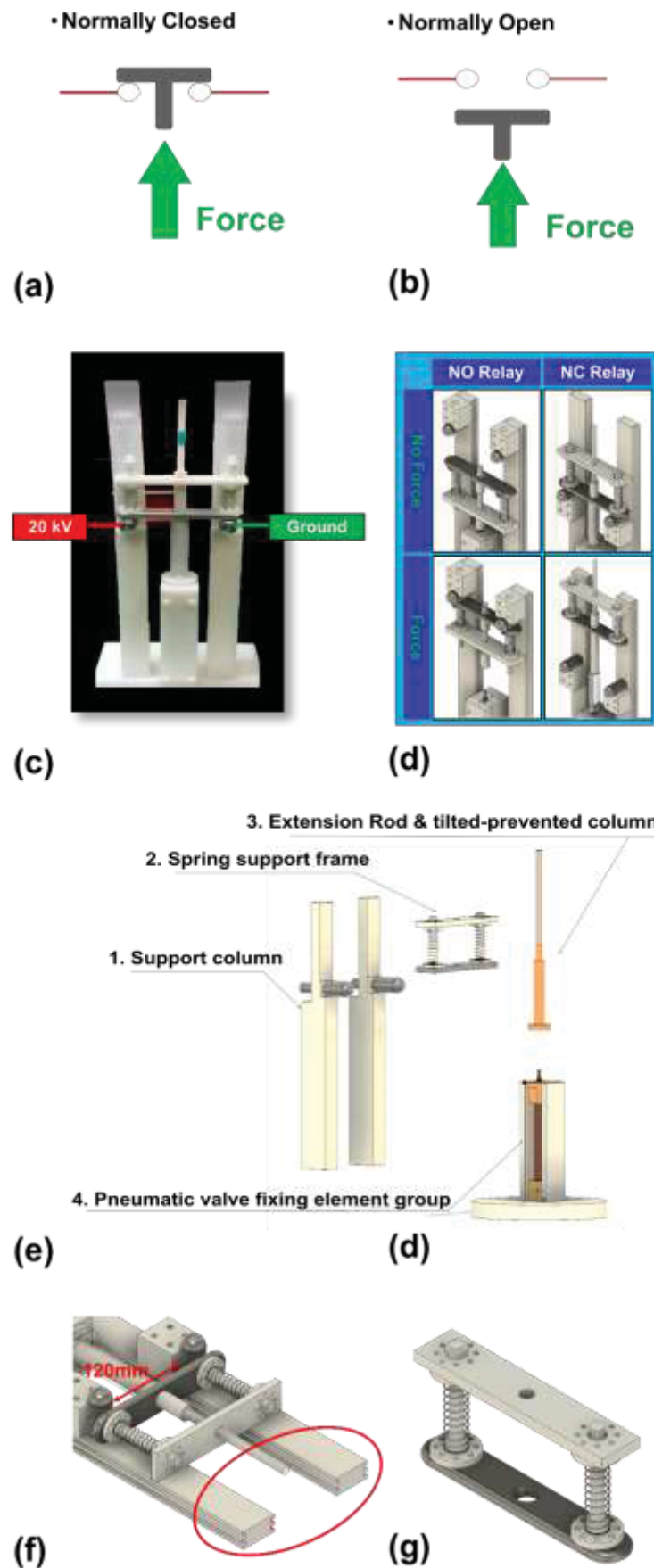


圖 4，(a)常關繼電器運作方式。(b)常開繼電器運作方式。(c)常開繼電器的原型設計，一端接高壓一端接地。(d)第二代常開與常關繼電器，施力的前後圖。(e)高電壓氣動式繼電器的結構圖。(f)電極間的距離，與特別設計的凹槽。(g)運用彈簧設計的導板支撐架。

2-2 空氣壓縮機使用於繼電氣之動力來源與乾燥氣體之供應源

本系統使用壓縮空氣機當作乾燥氣體機的空氣來源和推動氣動式繼電器的動力來源，在這章節會說明用到的空壓元件與組合方式，以及繼電器規格設計。空氣壓縮機也提供壓縮氣體使氣體乾燥機製造乾燥氣體。其乾燥氣體將傳輸至包覆電容器組的壓克力箱中保持環境的濕度。

圖 5 是簡易的接線圖，第一個壓力調整器壓器(Pressure control valves No.1)與空氣流量控制氣(Flow control valves No.1)的配合需要符合繼電器中氣動閥(型號:NCMKB075-0400S)的工作範圍，要求為 30.1psi(2.11 大氣壓力)和伸縮速度 50 至 500 mm/s。由此兩個條件與氣動閥內的體積得出，我們使用 3 大氣壓的壓縮空氣當作動力來源，其氣體流速約控制在 1.9~19 L/min(計算方式在附錄六中)。在圖 6 中，拍照記錄實際接線的的情況也顯示其空壓設備的規格與使用的零件，在此感謝台南順鴻空油壓五金行的協助與建議。

圖 5 中，壓縮空氣機本機有一個的快速接頭(1-to-3 quick No.1)，其中一個接頭接至氣壓調整器(Pressure control valves No.1)，將其壓力調整為 3 大氣壓，再接上一個快速接頭(1-to-3 quick No.2)。此快速接頭(No.2)中的一個接頭先接至空氣流量控制氣(Flow control valves)調整至適當流量(1.9~19 L/min)，之後分別接上開關，用於南翼(Sorth-wing acrylin box)與北翼(North-wing acrylin box)的氣動式繼電器使之開關啟動與關閉；另一頭接至氣壓調整器(Pressure control valves No.2)分一個常壓給乾燥氣體機(Air dryer)使用，產生之乾燥氣體由快速接頭(1-to-3 quick No.3)分流氣體至南翼與北翼的壓克力箱中，使其電容器的環境保持乾燥。

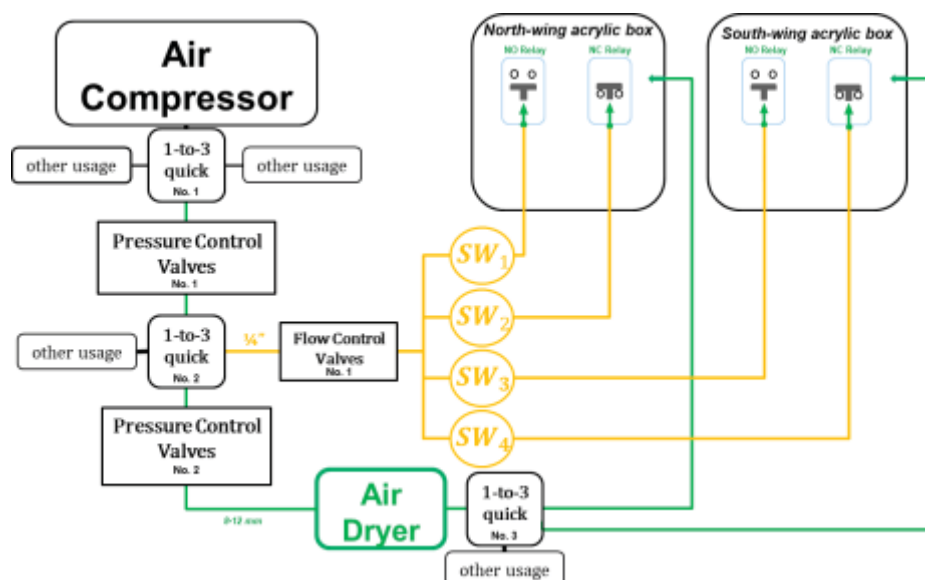


圖 5 ，使用乾燥氣體機的簡易圖。

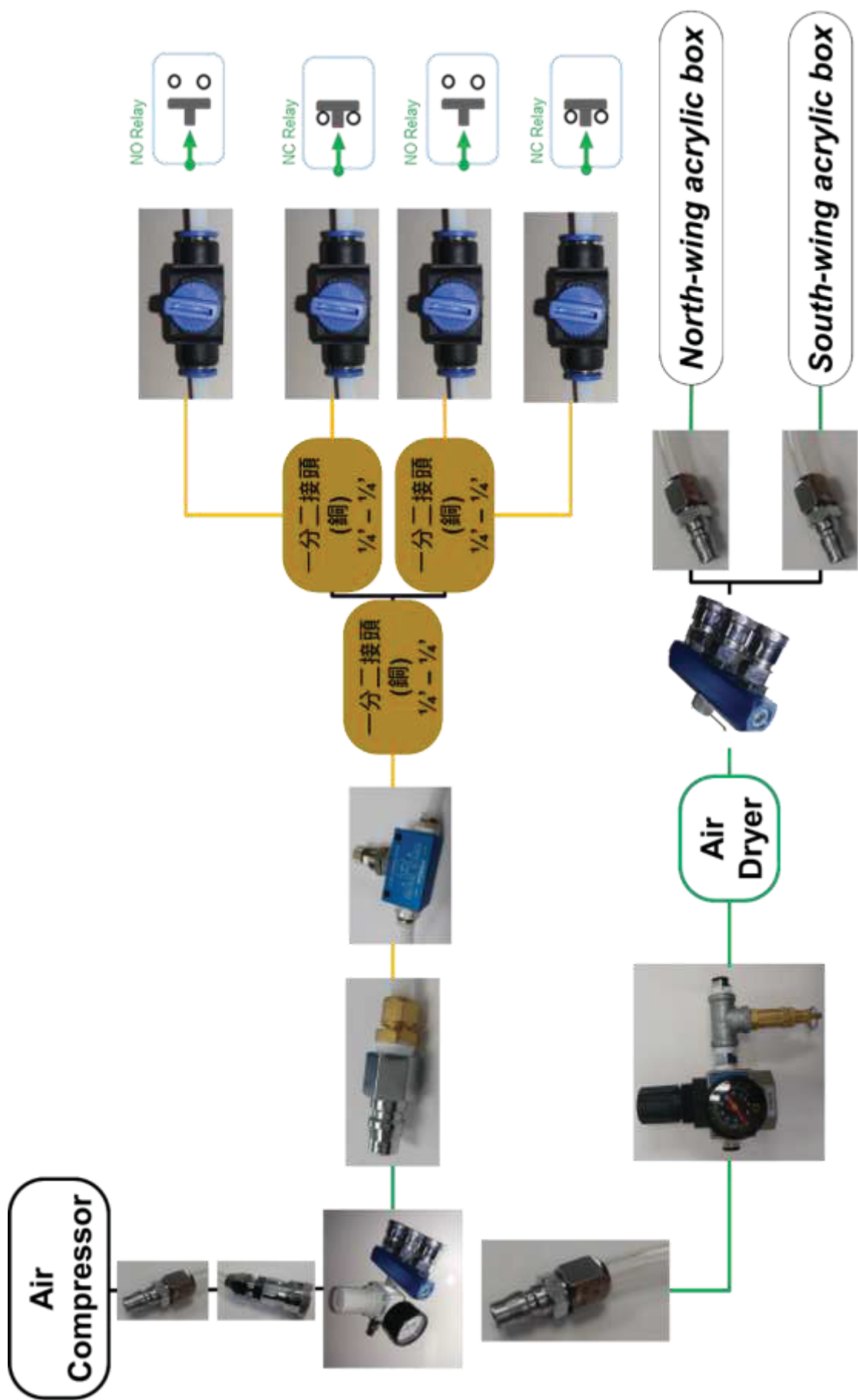


圖 6. 組裝方式。其中橘黃色的線表示 2 分管，綠色的線條代表規格為內外徑 8-12mm 的塑膠管。

2-3 壓縮乾燥氣體鋼瓶使用於軌道間隙開關的流動氣體

本系統的軌道間隙開關與 Marx generator 的內部氣體需要保持一定的純度，使用壓縮氣瓶(乾燥空氣)提供流動的乾燥氣體使內部保持乾燥以及氣體的純度。

原本預計要在軌道間隙開關中使用 1~3atm 的氮氣，由於塑膠螺絲無法承受這樣的壓力，所以改成常壓流動的氮氣，而此方式可以使開關在放電後的產物排出與稀釋，使內部的氣體有穩定的性質。

圖 7 所示，壓縮鋼瓶與軌道間隙開關依續串接著鋼瓶主閥(Main valve)、分壓閥(Control valve)、球閥(Switch)、氣體流量控制器(Flow control valve)、流量計(Flowmeter)。且軌道間隙開關的出氣口不封住。氣體流量控制器(Flow control valve)的流量可以參考使用 3~9 L/min 的參數，每 2~3 分鐘可以保持軌道間隙開關內部的氣體純度在 80%以上。詳細的使用參數請參考附錄七之計算結果。

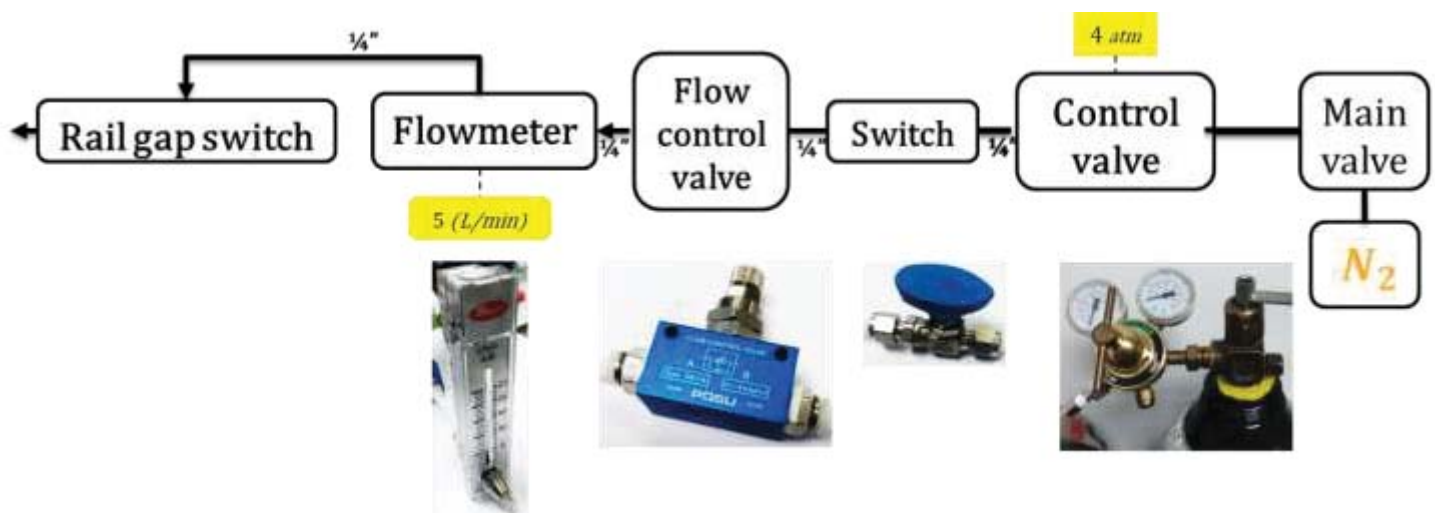


圖 7，使用壓縮氣體鋼瓶來提供穩定流量的氣流之元件連接方式。

壓縮鋼瓶啟動操作步驟如下：

步驟順序	動作	備註
步驟 1	將球閥關閉。且在一次確認球閥為關閉狀態。	如果球閥沒有關閉，則無法得知鋼瓶上的分壓閥壓力設定為多少。
步驟 2	壓縮鋼瓶上有主閥與分壓閥，逆時針轉動開啟主閥。	主閥：順為關，逆為開。 分壓閥：順為開，逆為關。
步驟 3	讀取壓縮鋼瓶的氣壓值。	
步驟 4	緩慢地順時針旋轉分壓閥，直到所需壓力(1~3 atm)。	主閥：順為關，逆為開。 分壓閥：順為開，逆為關。
步驟 5	開啟球閥使壓縮氣體流過。 (若分壓過大：執行“ 壓縮鋼瓶關閉操作步驟 ”)。	
步驟 6	流量計開啟，使用流量控制器調正流量，直到流量計的值為需求流量。	軌道間隙開關流動量: 3~5 L/min

壓縮鋼瓶關閉操作步驟如下：

步驟順序	動作	備註
步驟 1	順時針關閉壓縮鋼瓶上的主閥。	主閥：順為關，逆為開。 分壓閥：順為開，逆為關。
步驟 2	確認球閥是開啟的。等待殘餘在分壓閥的氣體洩漏完畢，直到分壓閥上的讀值為零。	
步驟 3	逆時針關閉分壓閥。	主閥：順為關，逆為開。 分壓閥：順為開，逆為關。
步驟 4	球閥關閉。	
步驟 5	確認主閥與分壓閥是關閉的、壓力錶皆為零、球閥是關閉的。	

CH.3 使用火星塞觸發的間隙開關(Trigatron)

3-1 設計方式

如圖 8，設計一種使用上下兩蓋和中間一篇隔板，只要更換隔板即可以改變間隙開關的間距大小。下蓋的部分有連接火星塞的螺紋(M10-1.0)，上蓋和下蓋與電極中間隔著 O 型環。也新增更多的凹槽避免電流流過表面造成漏電。

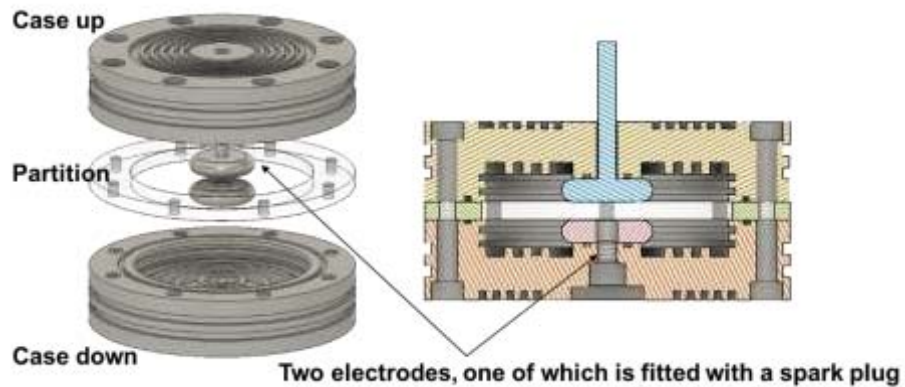


圖 8. 使用不同厚度更改崩潰電壓的 Trigatron。(工程圖於附錄八)

崩潰電壓尚未完全測試完， 目前已知 8mm 間距時可以穩定耐壓 20 kV 15 分鐘，而使用 10 mm 間距時，30 kV 還不會導通。

CH.4 使用一級電容器放電的軌道間隙開關

本系統所使用的主要開關為軌道間隙開關，其開關須由放電的震盪間接得出電感值。本系統使用的一級電容器是由 2 個 1 uF 而成(one-brick)，其電容的電感值也需要由放電的震盪得出。將軌道間隙開關與電容器串聯成一個迴路，使用 Marx generator 產生負高壓的脈衝訊號觸發軌道間隙開關使其導通。在放電時實驗中，使用高壓碳棒與電流計量測電壓與電流數據。分析電流的 RLC 震盪求出實驗系統的電感值。

此章節將在 4-1 節介紹軌道間隙開關與量測軌道間隙開關的崩潰電壓。在 4-2 節中介紹觸發訊號設備以及給出 Marx generator 的觸發訊號量測結果。在 4-3 節中給出實驗得到的開關與一級電容器估計電感值與量測數據。

4-1 軌道間隙開關與崩潰電壓(Self-breakdown voltage)量測

軌道間隙開關是一種低電感的開關，如圖 9 的(a)，使用兩根長圓柱金屬當作電極(E1 和 E2 的部分)、一個刀鋒電極(T)，藉由跟改間隙距離(X 和 Y)與內部氣體種類與壓力來決定開關的運作電壓值(崩潰電壓)。

運作原理如圖 9(b)，充飽電的電容 C_s 使電極(E1)與電極(E2)有個跨壓，使用出發訊號產生器觸發電極(T)使電極(E1)與電極(E2)跨壓超過崩潰電壓產生電弧放電，其電容 C_s 中的電荷將被導入至負載。

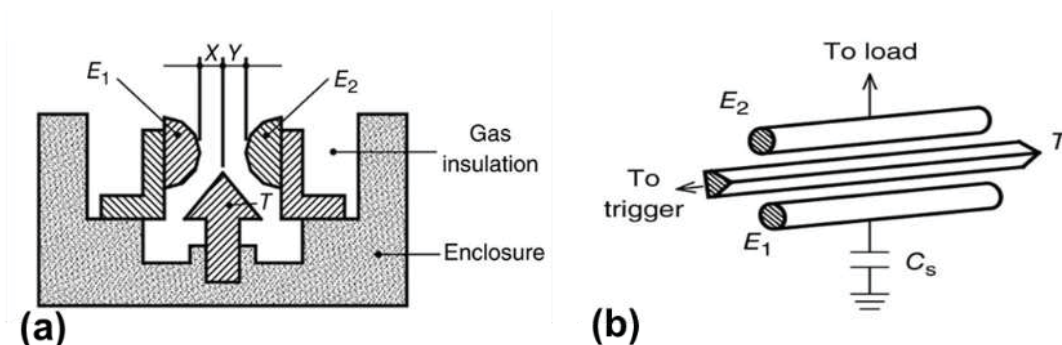


圖 9. (a)軌道間隙開關側面圖。(b)軌道間隙開關運作原理。[Ref.2]

圖 10 中(a)是實驗架設圖，將軌道間隙開關的兩端與電容器並聯，以及接上分壓電阻 (200M:100M [歐姆])，使兩電極與觸發電極的電壓比例保持在 2 比 1(高壓:低壓)。

實驗流程：使用電源供應器對電容充電。設定輸出電壓為 35 kV，當電容器被充電至開關的崩潰電壓時，電極將產生電弧放電。記錄電源供應器充電時的電壓最大值即為崩潰電壓值。

實驗結果如圖 10(b)，使用 9mm(6:3)的間距時，開關可以穩定在定電壓 20 kV 至少 15 分鐘。發生崩潰電壓的電壓值約在 29.4 ± 0.9 kV。

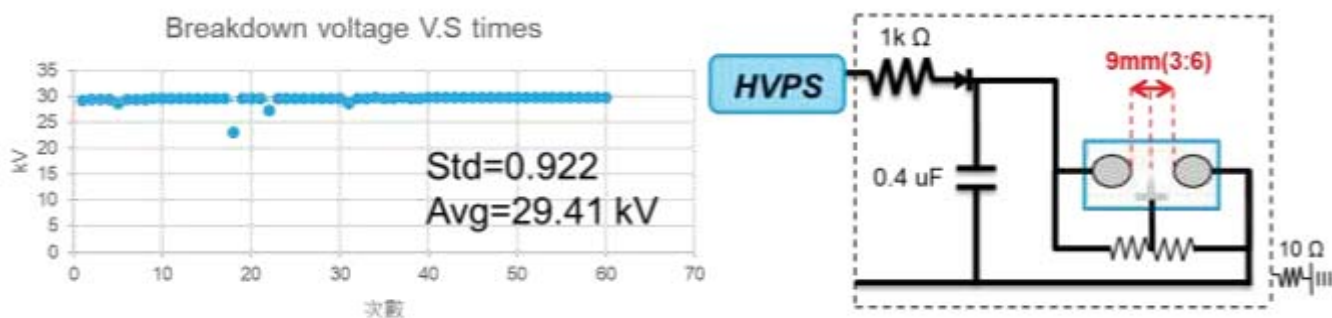


圖 10. 測試電路圖與測試結果。Data: 20190107_rail_gap_switch_selfBD

4-2 多重觸發設備與 Marx generation 的脈衝訊號之電壓上升速度(Falling speed of voltage)

實驗室製作了一個小型脈衝觸發產生器(Small trigger-pulsed generator)來觸發 Marx generator 再使之觸發軌道間隙開關。觸發訊號過程如圖 11，訊號產生器經同軸電纜傳送電訊號至光電轉換器，轉換成光訊號傳送至小型脈衝觸發產生器中的光電轉換器觸發小型脈衝觸發產生器產生負壓高的訊號輸出。在觸發 Marx generator，接著在觸發軌道間隙開關。

在之前放電實驗中發現，實驗時有電流回流至訊號產生器與示波器，造成故障。故學長設計了使用光纖傳送訊號給小型脈衝觸發產生器的設備，避免小型脈衝觸發產生器的電訊號回傳給訊號產生器。而在之後的實驗中發現接地問題，其供電給小型脈衝產生器的變壓器中的地線 G_2 接在電力線的地，與放電系統的地 G_3 有連接在一起而造成示波器故障，故需要將地分離。

我們將供電設備改成電池供電，所以接地並沒有與電力的地線相連，且我們將 G_2 與系統的地線 G_3 連接至同一個地。

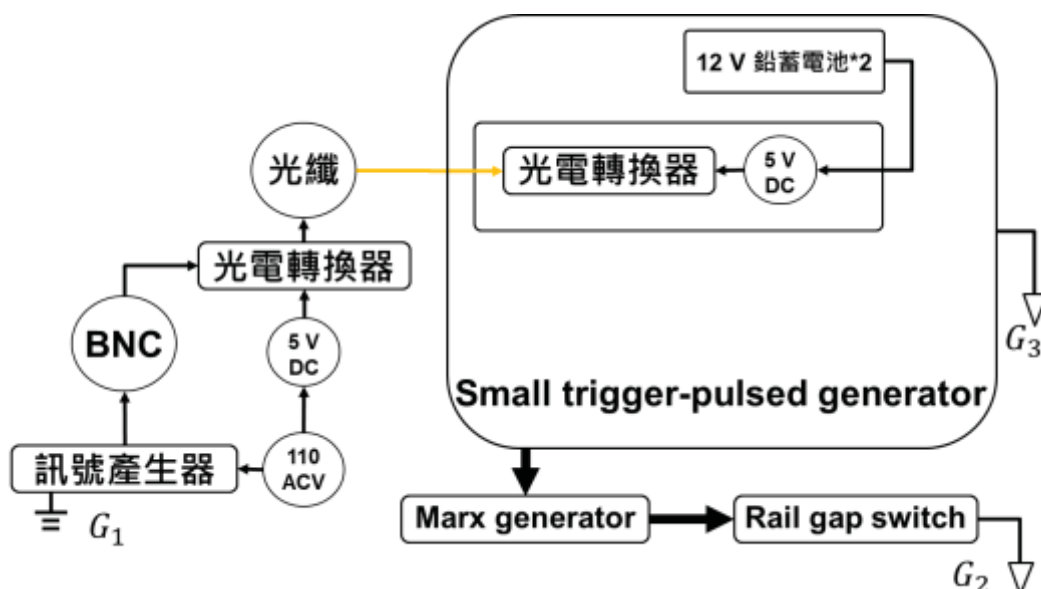


圖 11. 使用電池供電的小型脈衝觸發產生器(Small trigger-pulsed generator)訊號流程圖。

圖 12 中(a)為量測的電路圖，在量測點 1(Test point 1)量測 Marxgenerator 的電壓訊號。最後一級加上一個 100 歐姆的電阻來確保此點在充電的最後一級開關未導通時電壓為零。若沒有此電阻接地，則這端與接上軌道間隙開關的刀鋒電極之電壓將會是浮動，將可能無法觸發開關。

圖 12(b)中為量測 Marx 的電壓訊號，其電壓上升速度有 -5.5 ± 0.1 [kV/ns]。

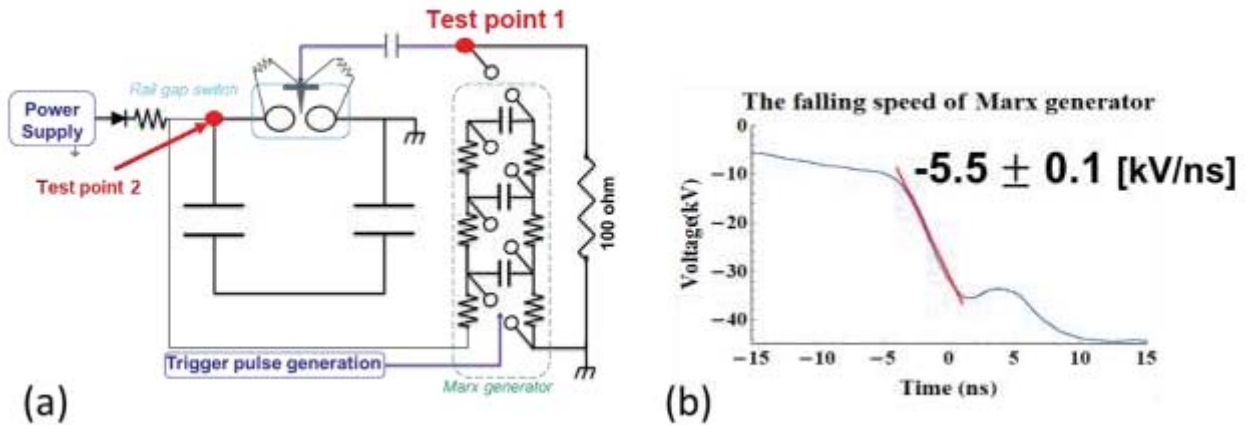


圖 12. (a)量測的電路圖。(b)使用高壓探棒量測的輸出電壓。Data: 20181129_Marx_OUTPUT

4-3 使用一級電容器放電的實驗結果

電感大小是系統很重要的參數，需藉由放電實驗中的 RLC 震盪，間接找出軌道間隙開關和電容器的電感值。

在圖 13(a)為放電實驗的電路圖，電感值來源只有開關與電容兩個未知的電感。如圖 13(b)中的方法，藉由增加並聯一級電容器的數量而使電容器組的電感值逐漸降低，由方程式 $L_{total,N} = L_R + \frac{L_c}{N}$ 表示系統的電感值，假設所有的電容皆相同的情況下，利用量測 $L_{total,N}$ 與 N 之間的關係，即可間接找出開關與電容器的電感值。

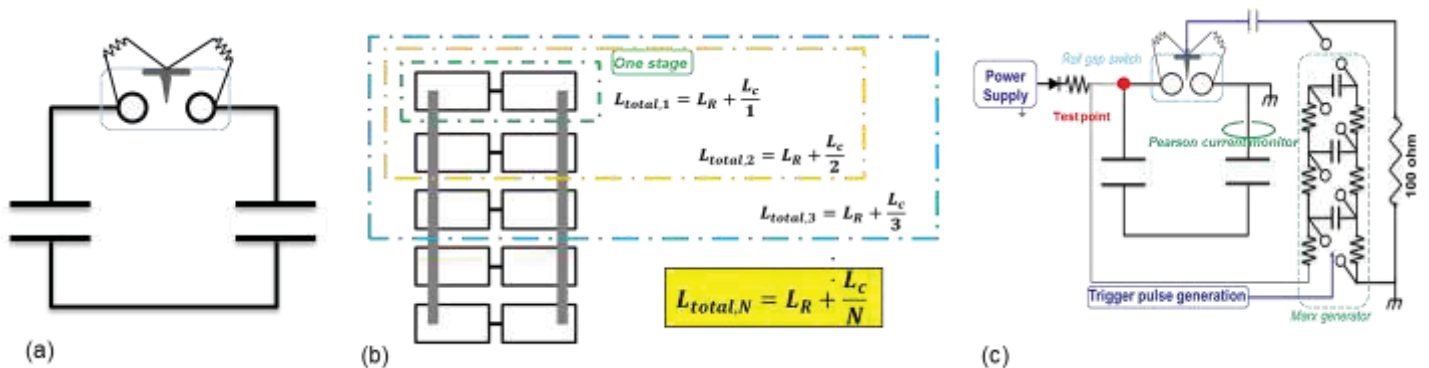


圖 13. 量測的電路圖與使用高壓探棒量測的輸出電壓。

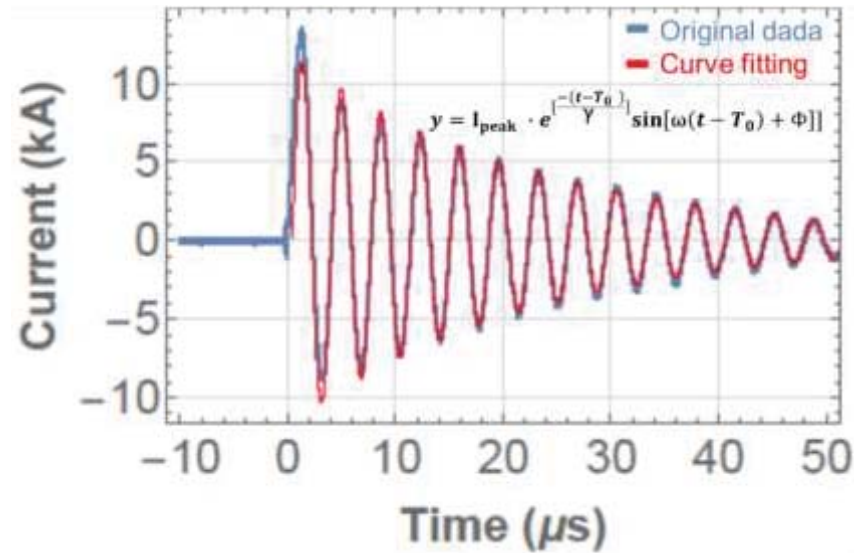


圖 14. 二級電容器(Two-stage)放電實驗結果，用 Rogoski 量測電流和曲線擬合。

圖 13(c)是放電實驗的電路圖，使用 Pearson current monitor 在電容器的低壓端量測放電電流，電容器的高壓端使用串聯一個 $100 \text{ M}\Omega$ 的電阻的高電壓探測棒(灰)量測電容器的電壓。電壓的量測結果不是很理想，雖然在量測充電的直流電時可以達到預期的分壓比例，但放電時無法在 0 V 震盪，可能是探棒內的電容器造成的。圖 14 中，藍色是原始資料，使用曲線擬合方程式：

$$y = I_{\text{peak}} \cdot e^{\left[\frac{-(t-T_0)}{\gamma}\right]} \sin[\omega(t - T_0) + \Phi] \text{。}$$

表 6，顯示了一級電容器及二級電容器的放電實驗之曲線擬合參數，一級電容器的尖峰電流有 5.2 kA 而上升時間(rise time)為 0.7 us ，二級電容器放電的尖峰電流為 11.7 kA 而上升時間為 0.9 us 。兩個實驗得到的電感值經由方程式：

$$L_{\text{total},N} = L_R + \frac{L_c}{N} + 100 \text{ [nH]} \text{，}$$

得到一級電容器的電感值為 $127 \pm 4 \text{ nH}$ ，軌道間隙開關的電感值 $176 \pm 7 \text{ nF}$ 。這樣的結果，粗略的預估未來系統的在 1.6 us 的上升時間有 250 kA 的尖峰電流，其電流上升速度為 0.16 kA/ns 。

	$I_{\text{peak}} \text{ [kA]}$	$\gamma = \frac{R}{2L} \text{ [sec}^{-1}\text{]}$	$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2} \text{ [MHz]}$	$L \text{ [nH]}$	$R \text{ [m}\Omega\text{]}$	$T_{\text{rise}} = \frac{\pi}{2\omega} \text{ [us]}$
One-stage	5.20 ± 0.02	$(5.7 \pm 0.05) \cdot 10^4$	$2.23 \pm (4 \cdot 10^{-4})$	403 ± 3	46 ± 1	0.7
Two-stage	11.71 ± 0.01	$(4.41 \pm 0.07) \cdot 10^4$	$1.72 \pm (7 \cdot 10^{-4})$	339.5 ± 0.6	29.9 ± 0.2	0.9
5-stage (20/50 kV)	$\sim 56 / 144$		~ 1.2	~ 301		1.3
10-stage (20/50 kV)	$\sim 100 / 250$		~ 1	~ 200		1.6

表 6. 一級和二級電容器曲線擬合參數與推估結果。

CH.5 系統的架設

5-1 系統支撐柱

玻璃纖維柱子的製造成本每根近乎 4 萬元台幣，與 PVC 管差異甚大，PVC 管價錢便宜且容易取得。因此委託景頤科技有限公司代購與代工，裁切成適當長度。設計成 6 吋管置於 8 吋管內，並且在中間灌入泡棉膠增強支撐能力。泡棉膠則是欣陸興業有限公司贊助，負責提供。

製作過程：

(1)設計 3D 列印的固定塊(附錄九)，將此放置在 6 吋管與 8 吋管中間的間隙，使兩管的間距均勻。

(2)注入泡棉膠，每次劑量約總重三百克(A 劑與 B 劑總重)，兩劑迅速攪拌混合且混和時間不超過二十秒，馬上注入管中且均勻繞一圈，並避免碰到管壁。

(3)在步驟(1)後，馬上對兩管向下施力固定 3 分鐘以上，否則兩管會有高低若差。

每組管子需要重複上步驟灌注三次，前兩次為三百克，最後一次約一百克。分次灌注的原因有二點：第一點為此泡棉膠為放熱反應，若 PVC 管過熱可能會彎曲。第二是因為泡棉膠的反應速度很快，量大的時候可能會因為手動攪拌不夠快而不均勻。

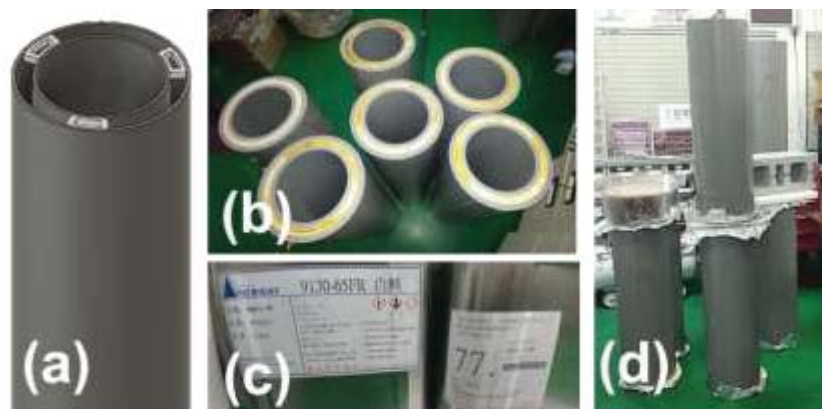


圖 15. (a)灌注泡棉膠前，使用製具固定。(b)PVC 管俯瞰圖，可以看到灌注後的表面。(c)內部使用的泡棉膠規格紀錄，在此特別感謝欣陸興業有限公司贊助泡棉膠。(d)壓住膨脹的泡棉膠，使用鋁箔紙防止沾黏。

5-2 電容架的支撐檯

原本要放置在電容下方的玻璃纖維箱(143.5*19*40 cm)，威正塑膠有限公司的一體成形代工製作最大邊長僅 120 公分，且製作價錢特別昂貴。市面上的水泥空心磚高度恰好為 19 公分，高度與原本規格一樣且價格便宜，挑選鄰近的商家購賣水泥磚頭(台南-大億水泥製品行)。如圖 16 中所示，水泥空心磚上下鋪橡膠(共 3*2 mm)，疊上一層電木板(厚 6.5 mm)作為支撐架。

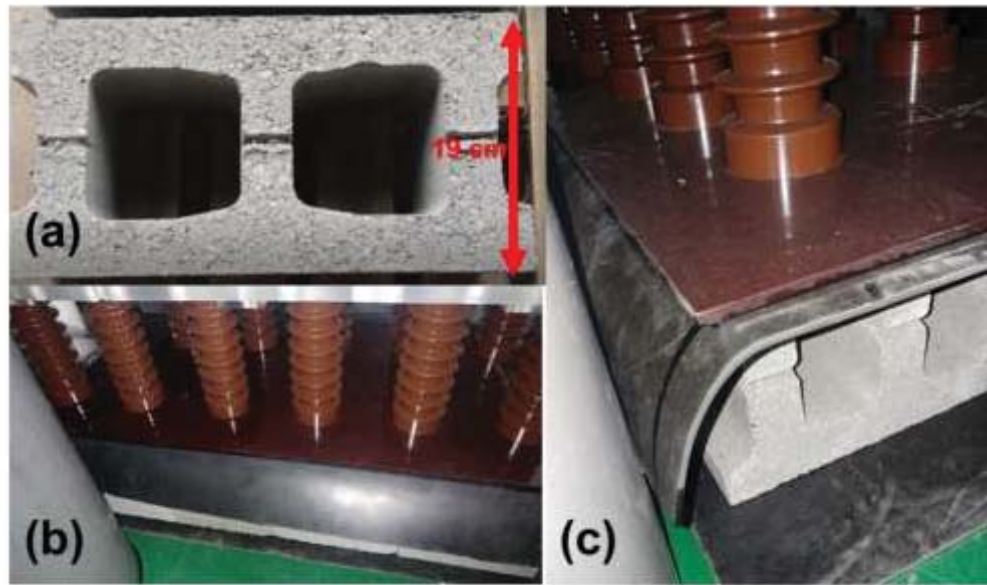


圖 16. (a)水泥空心磚。(b)側面照電容架的支撐檯。(c)側照電容架的支撐檯。

5-3 電容架壓克力上板

系統試組裝時，放置 7 片麥拉片後發現壓克力上板所預留的孔洞不夠寬，且原設計為 20 片麥拉片，故需要修改向內挖深 20 mm。由威正塑膠有限公司代工，費用為一片 500 元，共 1000 元。圖 17 中為修改後的規格，板子上左邊的方框寬度原本為 30mm 更改為 50mm。



圖 17. 修改後局部工程圖，單位為 mm。

5-4 高壓設備架(鋁擠型)

高電壓的設備與普通的電子儀器需要特別分開在不同的櫃子以方便管理。設備架的部分零件來自原放置真空腔的架子，由這些零件的規格設計新的高壓電設備架，表 7 中，是由金全通鋁材有線公司購買的鋁擠型材料之規格與數量，圖 18 為設計的樣式。第一層放置變壓器與整流器，第二層放置 2.5 kW 的電源供應器。第三層放置三十瓦的電源供應器。預留第四層，為設計空壓設備的操作工作區。

配件規格價目一覽表					
規格	規格)(mm)	數量	估算單價	單品小結	
4040	750	2	265.25	530.5	
4040	600	14	214.46	3002.5	
4040	520	0	187.37	0	
配件	規格	單價	數量		
連接座	TAL4040	11	82	902	
螺絲	SM816	2.5	250	625	
方形螺帽組合	P4M8	1.5	300	450	
方形螺帽組合	THL4	0.8	300	240	
鎖板-連接座	TSB4575M8-6		16		
封板器	TMB356	10	50	500	
螺絲	SM620		50		
端蓋	TC4040	7	12	84	
					估價 6335

表 7. 材料規格與數量。



圖 18. 設計圖樣。

5-5 系統電網

接地的電網可將系統與實驗人員隔絕，避免高壓放電的危險。角鋼是便宜且容易取得的材料。有分傳統角鋼與新式角鋼，傳統角鋼的規格之長度自由度高，但自行裁切會耗費大量工時，組裝時必須使用螺絲一一固定。相對的，新型角鋼組裝快速且簡單，將橫梁的卡榫放入角鋼柱的孔洞再向下敲緊即可，橫樑的規格最短為 1 尺，每增加半尺為一個規格，最長 8 尺，故設計時的自由度較低。圖 19 中，有三個櫃子的組合橫梁長度分別 4 尺、7 尺、3.5 尺，櫃子和櫃子間使用螺絲螺帽固定在一起，在鎖上一片 8 尺的側牆，此側牆的腳將會鎖上 3 角形的條仔腳加強支撐性。最後再將導電的金屬網鎖至角鋼架的內部且接地，即完成可以保護實驗室人員安全的接地電網。

角鋼規格	長度(cm)	數量
角鋼柱	270 cm	14
橫樑_1 吋(側_短)	31.5 cm	24
橫樑_4 吋 (黃)	123 cm	6
橫樑_7 吋 (紅)	213 cm	6
橫樑_3.5 吋 (綠)	107 cm	1
橫樑_8 吋(灰)	245.2 cm	4
加強結構	< 30 cm	6
角鋼柱	30 cm	2

表 8.(左)材料規格與數量。

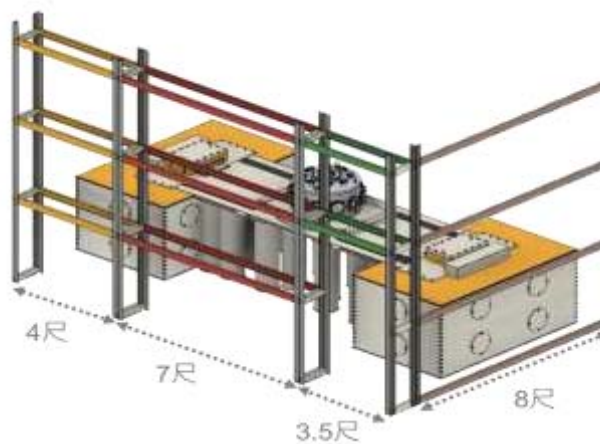


圖 19. 設計圖，脈衝功率系統被角鋼包覆在內部。

5-6 放電電阻製作規格

1-4 中討論 R_1 、 R_2 電阻製作方式是將十個 $100\text{ M}\Omega$ 串連在一起在灌入環氧樹脂封裝住，並置於台南 UCI 電子商場購買的透明工具箱(大: $164*120*57\text{ mm}$ ；小: $145*86*34\text{ mm}$)，來避免高電壓洩漏。製作方式為將電阻串聯銲接並且彎成合適大小，再將電阻放入透明工具箱中，注入環氧樹脂。隨後放置於真空腔中抽真空，環氧樹脂中的泡泡會緩慢變大浮出表面，若出現泡泡過多快溢出容器，必須關閉關閉真空幫浦，使真空腔回壓，經過一段時間再重新開啟真空幫浦。重複幾次，直到不再有泡泡釋出。若表面還有泡泡未破可以用噴燈快速掃過，可迅速去除表面泡泡。

5-7 $1\text{ M}\Omega$ 放電電阻棒製作

放電電阻棒是一種專門用於殘餘電荷放電的專用接地線。在實驗室的高電壓實驗中，為了確保電容器的殘餘電荷釋放完畢，會將電容器做接地處理。放電電阻有限制電流的功能，可防止放電過程中產生強烈的火花對設備造成表面的損傷，接地處理的順序會先使用放電電阻棒將電容器的電壓放電至十伏特以內，再將接地線接在電容器的高壓端(電容器兩端都是接地，即短路電容器)。

製作：可在水族館購買到透明塑膠四分管(內徑 18 mm 外徑 20 長 90 cm)，切開此管，放置串聯好的電阻，灌入環氧樹脂等待硬化。購買大小是可放入剛剛製作的物件的南亞 PVC 塑膠水管(1 吋長約 120 cm)，將 PVC 管預留一個孔用於拉電線出來接地。電線由預留的孔拉出，焊接在電阻上，慢慢拉出電線且使電阻安全地進入 PVC 管中。完成後接上接觸放電端的金屬頭，即完成。設計圖樣如圖 21 所示。可再次注入環氧樹脂於管中確保不易斷裂，或是注入泡棉膠。

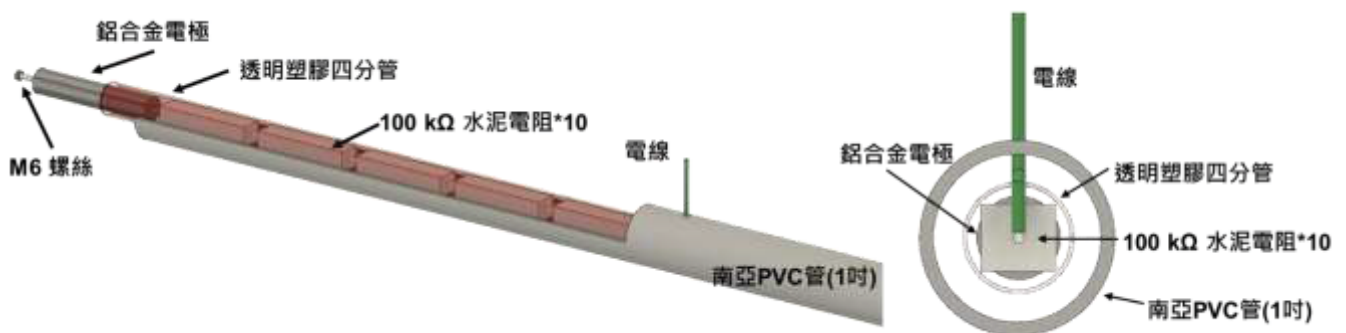


圖 21. 左圖，放電電阻棒設計俯視圖。右圖，放電電阻棒前視圖。

CH.6 未來進度

- 架設接地角鋼，將 4-3 節中的實驗方法於接地角鋼中測試

- 組裝脈衝功率系統，使用 4-3 節中的方法量測整個系統的電感值
 - 使用一級電容器於系統中放電
 - 使用 3 級電容器於系統中放電
 - 使用單翼的電容器組於系統中放電

CH.7 參考資料

- [1] Physics of Plasmas 20, 042704 (2013)
- [2] Foundation of Pulsed Power Technology
- [3] Mei-Feng Huang, Master Thesis, National Cheng Kung University (2017)
- [4] Sheng-Hua Yang, Master Thesis, National Cheng Kung University (2018)

Development of a High Voltage Relay Using Pneumatic Cylinder For Pulsed-Power System Using a Parallel-Plate Capacitor Bank

Ming-Cheng Jheng (鄭名城), Sheng-Hua Yang (楊昇輝), Mei-Feng Huang (黃梅鳳), Po-Yu Chang (張博宇)
Institute of Space and Plasma Sciences (太空與電漿科學所),
National Cheng Kung University (國立成功大學)

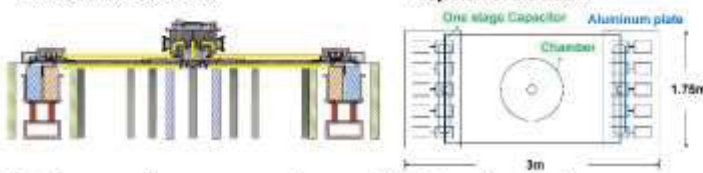


Abstract

We have developed a high voltage relay that will be used in pulsed power systems. The pulsed power systems designed. The expected peak output voltage and current are ~80 kV and up to ~800 kA, respectively, with a rise time of ~1 μ s. Those conditions for generating EUV light sources are available. Considering laboratory safety, it is necessary to connect a relay in series between the power supply and the capacitor. And a relay in series with the resistor in parallel with the capacitor is necessary too. In the system, relays in the type of normally closed and normally open are used. In order to avoid the influence of electromagnetic pulses, the power source of the relay is a high-pressure cylinder. Relays are using the pneumatic cylinder. The relay is designed with reference to the empirical formula of the paschen curve. Pneumatic NC relay functions properly under 20 kV operation.

Parallel plate capacitor bank (PPCB)

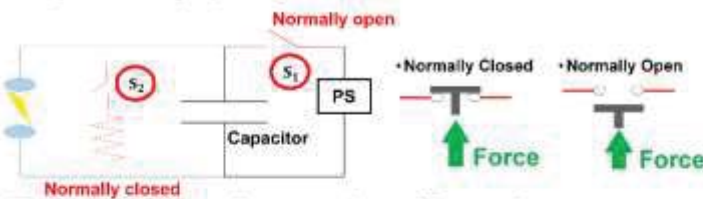
- Twenty 1 μ F capacitors are used.
- Two capacitors are connected in series forming a stage. Ten stages are connected in parallel and charged up to 80 kV storing 16 kJ of energy in the future.
- Rail gap switches are used.
- Currents are delivered to the chamber through the parallel plate transmission line made by aluminum plate.
- Side view of the BBCP.
- Top view of the BBCP.



Capacitance	1 μ F / each
# of capacitor	20
Total capacitance	5 μ F
Voltage	80 kV
Total energy	16 kJ
Peak current	~800 kA
Rise time	~1 μ s
Power	16 GW

Both normally open and normally closed switches are used

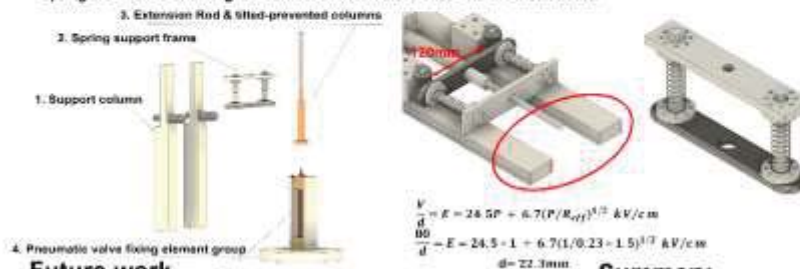
- S_1 relay is connected in series with the power supply and the capacitor to protect the power supply.
- S_2 relay is connected in series with a damped resistor in parallel with the capacitor. The resistor is to consume excess energy in the capacitor.
- The system is safe if S_1 is open and S_2 is closed.



Operation / Switch	S_1	S_2
Initial state	Open	Closed
Charging	Closed	Open
In experiment	Open	Open
End	Open	Closed
Switch type	NO	NC

The high voltage relays consists of four main components

- Support column not only supports electrodes but also to prevent flashover between electrodes
- The empirical formula of the paschen curve from north star research corporation. The spacing between two electrodes is 120mm which is larger the estimate safe spacing is 22.3mm for 80kV.
- Spring are used to ensure good contact between electrodes and the metal board



Future work

- Develop compressed air system and control this system by LabVIEW
- New version of drawing is being charted
- Develop EUV light source

Reference

- North Star Research Corporation

Summary

- Pneumatic NC relay functions properly under 20kV operation.
- This design relay can be used between the power supply and the capacitor, and it also can be used in connected in series with the resistor.



A soft x-ray laser in 46.9 nm using a capillary z-pinch

Ming-Cheng Jheng¹, Chih-Ruei Hsieh¹, Mei-Feng Huang¹, Po-Wei Lai², Sheng-Hua Yang¹, Po-Yu Chang¹

1. Institute of Space and Plasma Science, National Cheng Kung University

2. Department of Physics, National Cheng Kung University

No.1, University Road, East District, Tainan

lahoppoper@gmail.com

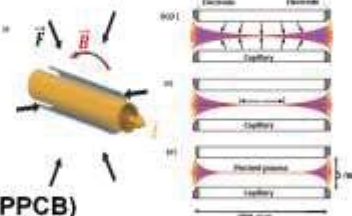


Abstract

A pulsed-power system with an expected output peak current of ~500 kA will be used to drive a capillary z-pinch filled with argon gas. The plasma in the capillary heated by the pinch acts as a pumped media. Soft x-ray lasing can occur from the hot plasma.

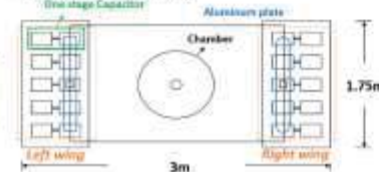
Introduction of a soft x-ray laser using a capillary z-pinch

When a high current flows through preionized gas, magnetic fields in the azimuth direction are generated as shown in Fig. (a). The plasma is pinched, compressed, and heated due to the Lorentz force in the radial direction. It is called a z-pinch. As shown in Fig. (b)-(d), the plasma which acts as a pumped gain media can be compressed uniformly along the capillary reaching a high temperature in the order 100s keV using a pulsed current of 23 kA [1]. If argon gas is used, Ne-like Ar lasing at 46.9 nm [1], which is in the range of soft x ray, can be generated in the hot plasma. Therefore, a soft x-ray laser in both ends of the capillary is implemented.



Pulsed power system using parallel plate capacitor bank (PPCB)

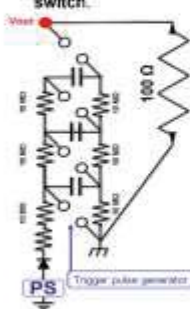
- Two capacitors are connected in series forming a stage. Ten stages will be connected in parallel and charged up to 50 kV storing 6.25 kJ of energy in the future.
- Rail gap switches and Marx generators as the high voltage trigger pulse are used.
- Currents are delivered to the chamber through the parallel plate transmission line which was made by aluminum plate.
- Side view of the PPCB
- Top view of the PPCB



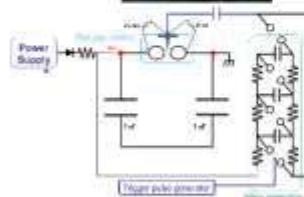
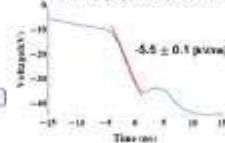
Capacitance	1 μF /each
# of capacitor	20
Total capacitance	5 μF
Voltage	50 kV
Total energy	6.25 kJ
Estimated peak current	~500 kA
Estimated rise time	~1 μs
Estimated Power	6.25 GW

Test results

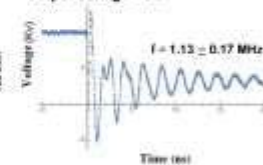
- The falling speed of Marx generator**
 - Three 40 nF capacitor charged to 20 kV are used, the output of ~60 kV is expected.
 - The Marx generator is triggered by a -20 kV trigger pulse generator with a falling time of 55 μs .
 - The falling speed of Marx generator output is 5.5 ± 0.1 kV around -17 kV initiating breakdown of the rail gap switch.
- The output current of one stage**
 - One stage is two 1 μF capacitors connected in series and is charged to 20 kV.
 - The Rail gap switch is triggered by the Marx generator.
 - Rough estimated peak output current of ten stages be charged to 50 kV is 1.4 MA.
 - Further investigations will be conducted.



The falling speed of Marx generator.



Output voltage Volt



Summary

- Output of Marx generator has 5.5 kV/ns falling speed.
- Peak current of one stage is 56.6 kA when it is charged to 20 kV.
- Rough estimated peak output current of ten stages be charged to 50 kV is 1.4 MA.
- Capillary z-pinch can be driven by PPCB.

$$I_{\text{one stage}} = \frac{1}{4\pi^2 C V^2} = 62.5 \pm 17.5 \text{ nA}$$

$$I_{\text{peak}} = \frac{V}{\sqrt{L/C}} = 56.6 \text{ kA}$$

Acknowledgment

This work was supported by Ministry of Science and Technology (MOST), Taiwan, under Award Number 105-2112-M-006-014-MY3.

References

- [1] Yasushi Hayashi, Plasma Sources Sci. Technol. 13 675 (2004)
- [2] Sheng-Hua Yang, Master Thesis, National Cheng Kung University (2018)

Development of a hard x-ray source using an x pinch driven by a pulsed-power system

Ming-Cheng Jheng¹(鄭名誠), Chih-Ruei Hsieh¹(謝知叡), Mei-Feng Huang¹(黃梅鳳),
Po-Wei Lai²(賴柏維), Sheng-Hua Yang¹(楊昇樺), Po-Yu Chang¹(張博宇)

¹ Institute of Space and Plasma Sciences, National Cheng Kung University, Tainan City, Taiwan

² Department of physics, National Cheng Kung University, Tainan City, Taiwan

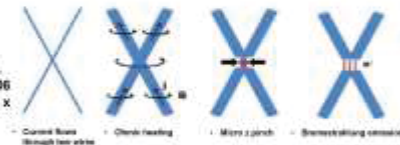


Abstract

A high current generated by a pulsed-power system is used to drive an x pinch that can emit hard x-ray. The x pinch is basically two wires that cross and twist with each other at a single point. When high currents flow through each wire, the wire temperature increases due to ohmic heating. The temperature is high enough to melt and ionize the metal wire, i.e., forming a plasma. At the crossing point of those wires, plasma is compressed in the radial direction. As a result, high temperature and high-density plasma is formed and emits hard x-ray. To drive an x pinch, we built the pulsed-power system. The system stores a total energy up to 5 kJ and delivers the peak current of ~250 kA with a rise time of $\leq 1 \mu s$. X-ray emission is measured using an x-ray diode. Currents are measured and x-ray yields will be measured in the near future.

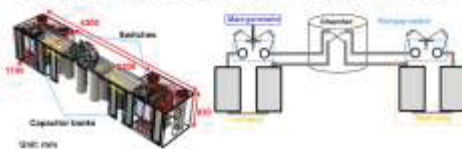
X pinches

- X-pinches can generate point hard x-ray source.
- The generally accepted current rise-rate required to create intense, soft X-ray emission is 1 kA/ns^[1].
- Experiments have shown that low current and long-rise time (25 kA, 400 ns rise time, i.e., 0.06 kA/ns^[1]) which has the current significantly lower than general x-pinch experiments can drive x pinches.



A pulsed power system using parallel plate capacitor bank (PPCB)

- Two capacitors are connected in series forming a stage. Ten stages will be connected in parallel and charged up to 50 kV storing 6.25 kJ of energy in the future.
- Rail gap switches and a Marx generators as the high voltage trigger pulse are used.
- Currents are delivered to the chamber through the parallel plate transmission line which is made by aluminum plates.



Capacitance	1 μF each
# of capacitor	20
Total capacitance	4 μF
Voltage	50 kV
Total energy	6.25 kJ
Estimated peak current	~250 kA
Estimated rise time	~1 μs
Estimated rising speed	0.5 kA/ns
Estimated Power	6.25 GW

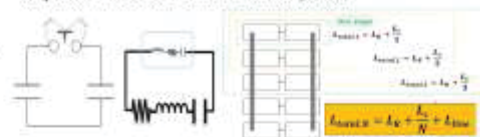
Top view and side view of the Rail-gap switch

- The switch is pressurized with nitrogen gas (1-3 atm).
- Multi-channel discharges between two rail-like electrodes will be triggered by a fast trigger pulse generator (rising speed > 5 kV/ns is needed^[2]).

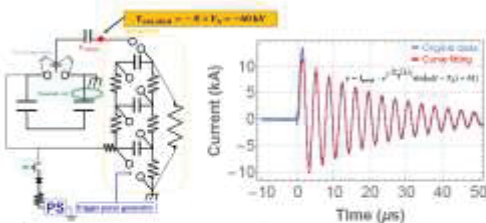
Experimental setup of measuring inductance

- N-stage capacitors and the rail gap switch connected in series is a RLC circuit.
- The inductance of capacitors and the rail-gap switch can be measured using the discharge test.
- By increasing the number of capacitors and fitting the curve of the RLC oscillation, the inductance of capacitors and the switch can be obtained using the equation $L_{total} = L_k + \frac{1}{N} + L_{line}$.

- Method for measuring the inductance of N-stage capacitors and a rail-gap switch. The only uncertain inductance is from the switch and capacitors.



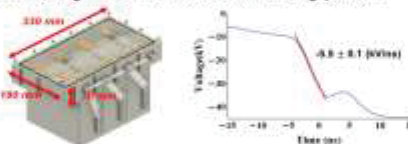
Results of discharge test



Discharge circuit diagram

Discharge currents: the blue line is data and the red line is the curve-fitting line.

- A Marx generator as fast trigger pulse generator is used.
- Three 40 nF capacitors charged to 20 kV are used. The output of ~60 kV is expected.
- The Marx generator is triggered by a -20 kV trigger pulse generator with a falling time of 55 μs .
- The falling speed of Marx generator output is 5.5 ± 0.1 kV around -17 kV which is capable of initiating multichannel breakdown in the rail gap switch.



Curve-fitting results and the expected system output

	I_{peak} [kA]	$\tau = \frac{L}{R}$ [sec]	$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ [MHz]	L [nH]	R [m Ω]	$T_{rise} = \frac{1}{\omega}$ [ns]
One-stage	5.20 ± 0.02	$(5.7 \pm 0.05) \cdot 10^{-7}$	$8.23 \pm (4 \cdot 10^{-2})$	693 ± 3	46 ± 1	0.7
Two-stage	8.17 ± 0.01	$(4.41 \pm 0.07) \cdot 10^{-7}$	$1.72 \pm (7 \cdot 10^{-2})$	359.5 ± 0.6	29.9 ± 0.3	0.9
Estage (20/50 kV)	-96/144	-	-1.2	-300	-	1.3
10-stage (20/50 kV)	-180/250	-	-3	-200	-	1.6

- The inductance of wire $L_{wire} = 100$ nH is used. $L_k = 176 \pm 7$ nH and $L_s = 127 \pm 4$ nH are obtained by the equation $L_{total} = L_k + \frac{1}{N} + L_{line}$.
- The estimated peak output current of ten-stage capacitors charged to 50 kV is 250 kA. The current rise-rate is 0.16 kA/ns.
- X-pinches will be driven when the system is built in this summer.

Summary

- The rail-gap switch was triggered by the Marx generators which had an output with 5.5 kV/ns falling speed.
- The inductance of the rail gap switch and capacitors are 176 ± 7 nH and 127 ± 4 nH, respectively, from one-stage and two-stage discharge test.
- The estimated peak output current of ten-stage capacitors charged to 50 kV is 250 kA.
- The current rise-rate is 0.1 kA/ns, which is fast enough to drive an x pinch.
- X-pinches will be driven by PPCB in this summer.

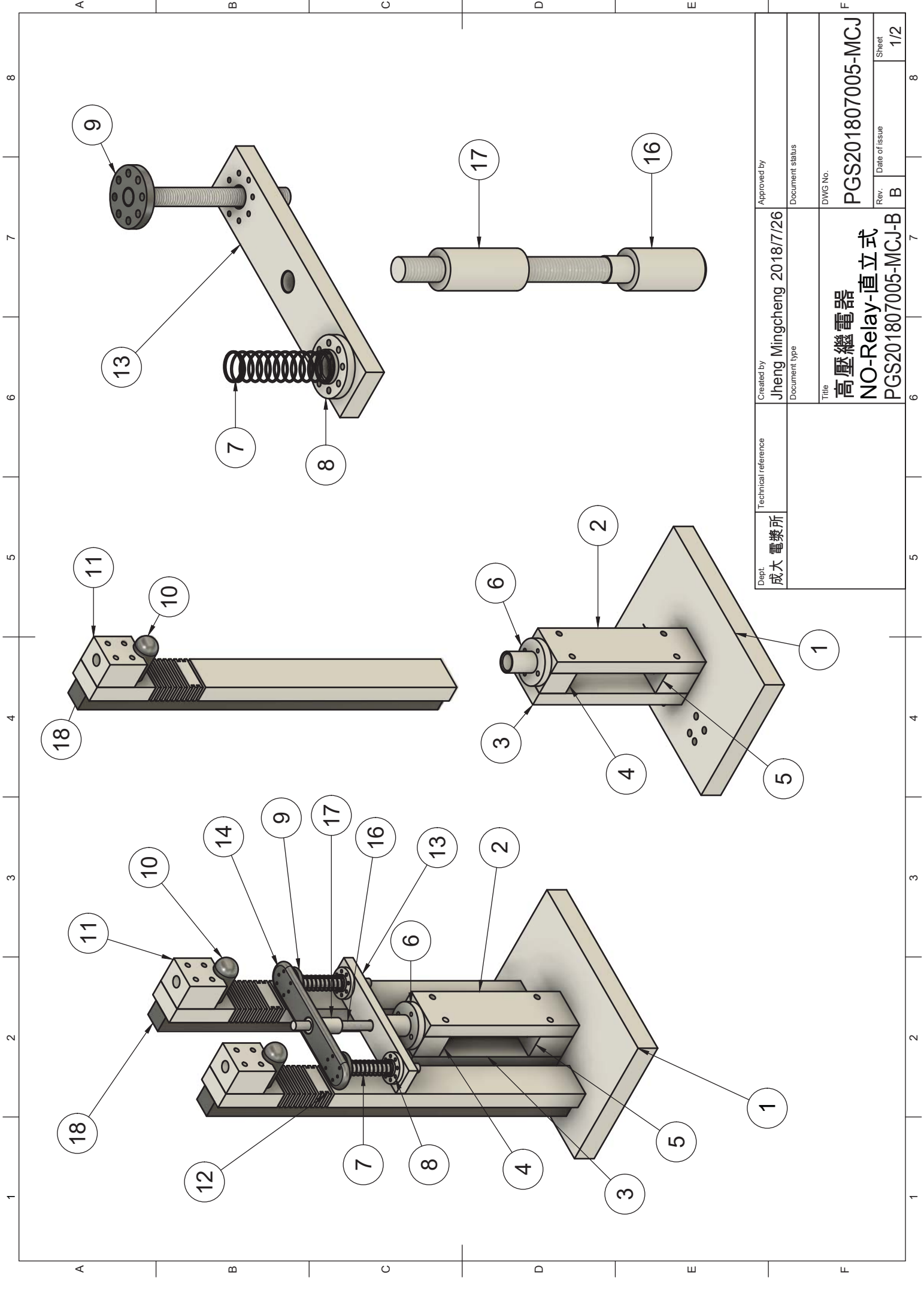
Acknowledgment

This work was supported by Ministry of Science and Technology (MOST), Taiwan, under Award Number 105-2112-M-005-014-MY3.

References

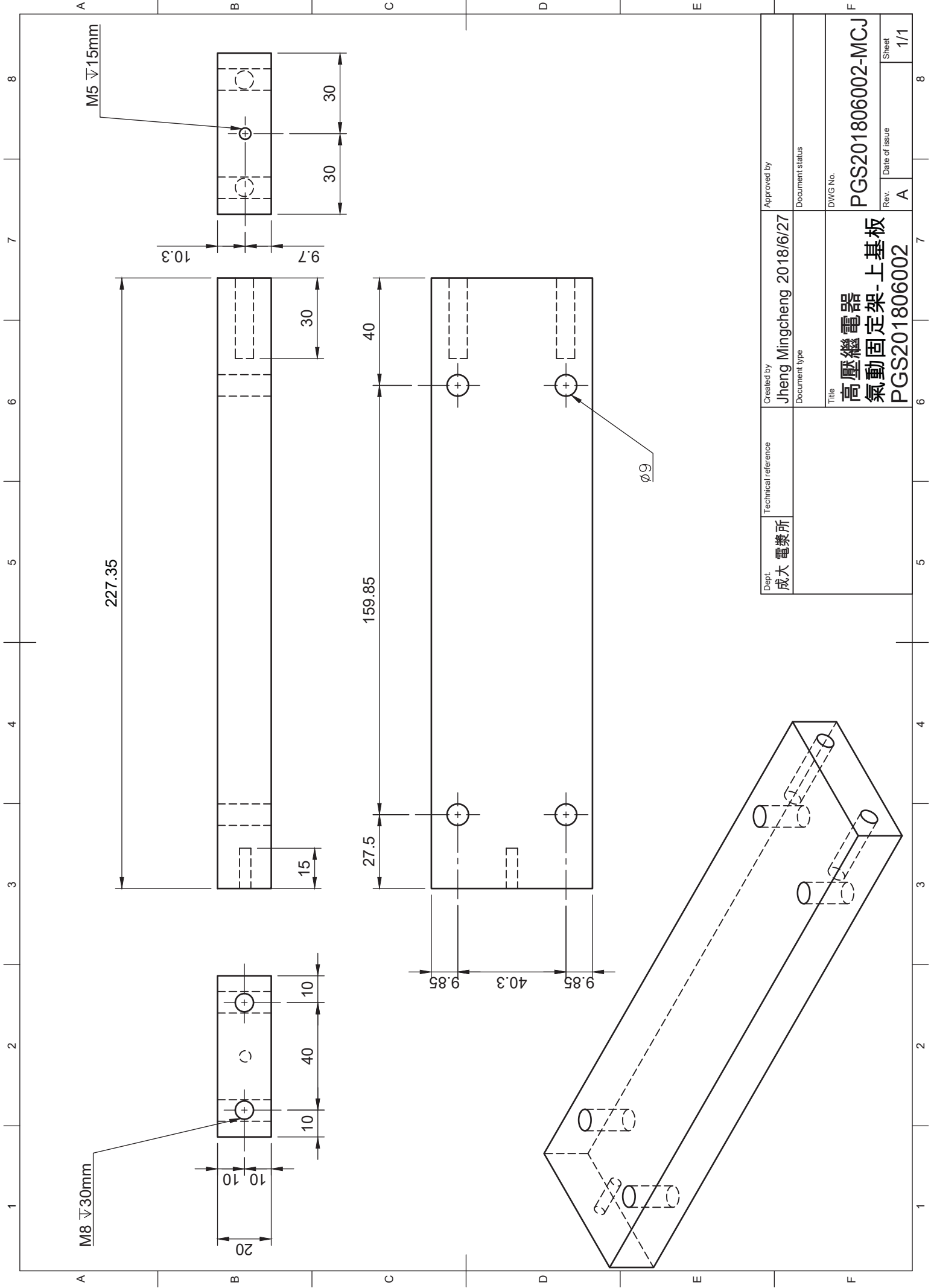
- [1] Physics of Plasmas 20, 042704 (2013)
- [2] Review of Scientific Instruments 86, 033607 (2015)
- [3] Sheng-Hua Yang, Master Thesis, National Cheng Kung University (2018)

附錄四.繼電器工程圖(NO)

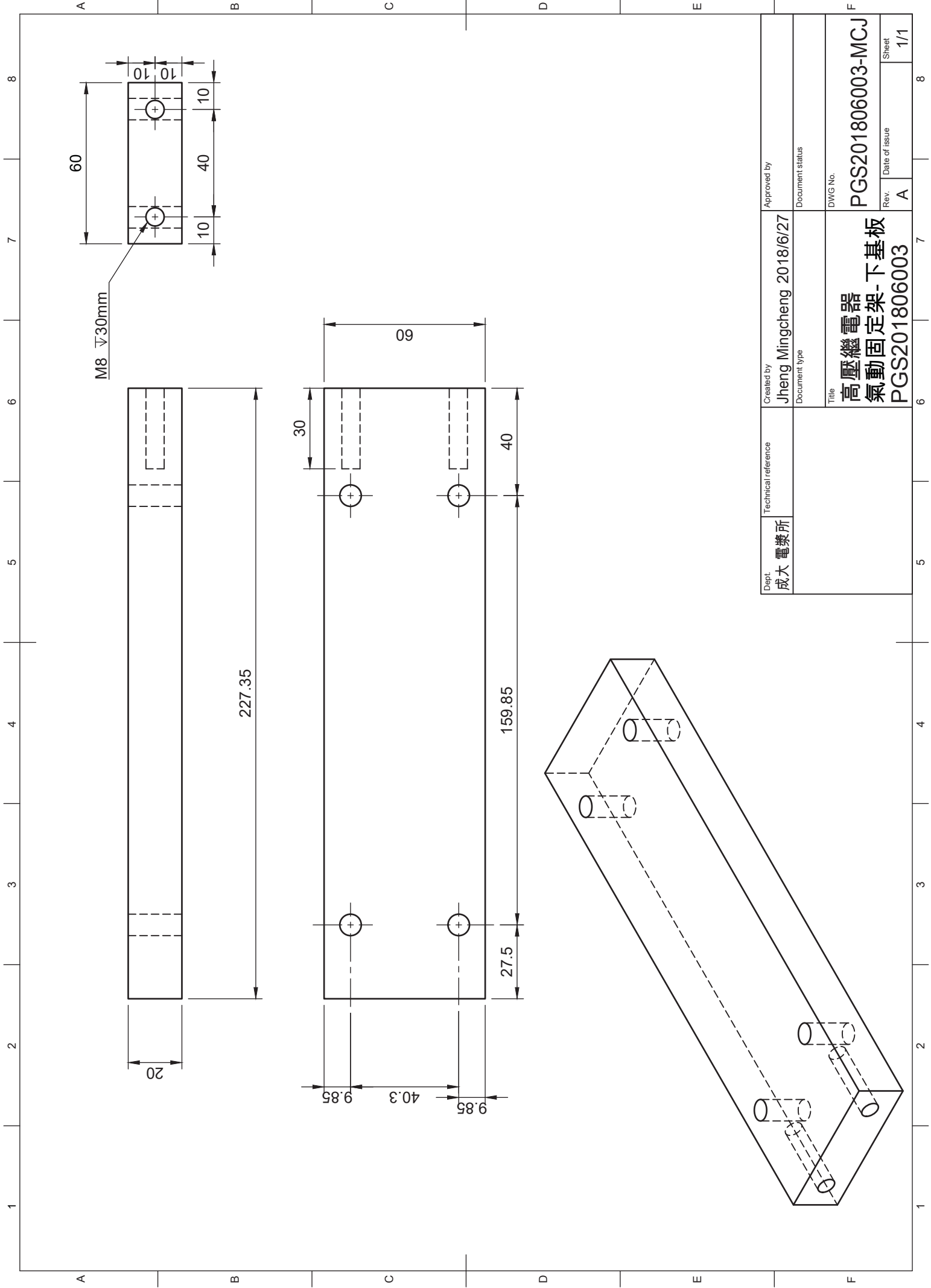


Dept. 成大 電漿所	Technical reference	Created by Jheng Mingcheng 2018/7/26	Approved by
		Document type	Document status
		Title 高壓繼電器 NO-Relay-直立式 PGS201807005-MCJ-B	DWG No. PGS201807005-MCJ
			Rev. B
			Date of issue
			Sheet 1/2

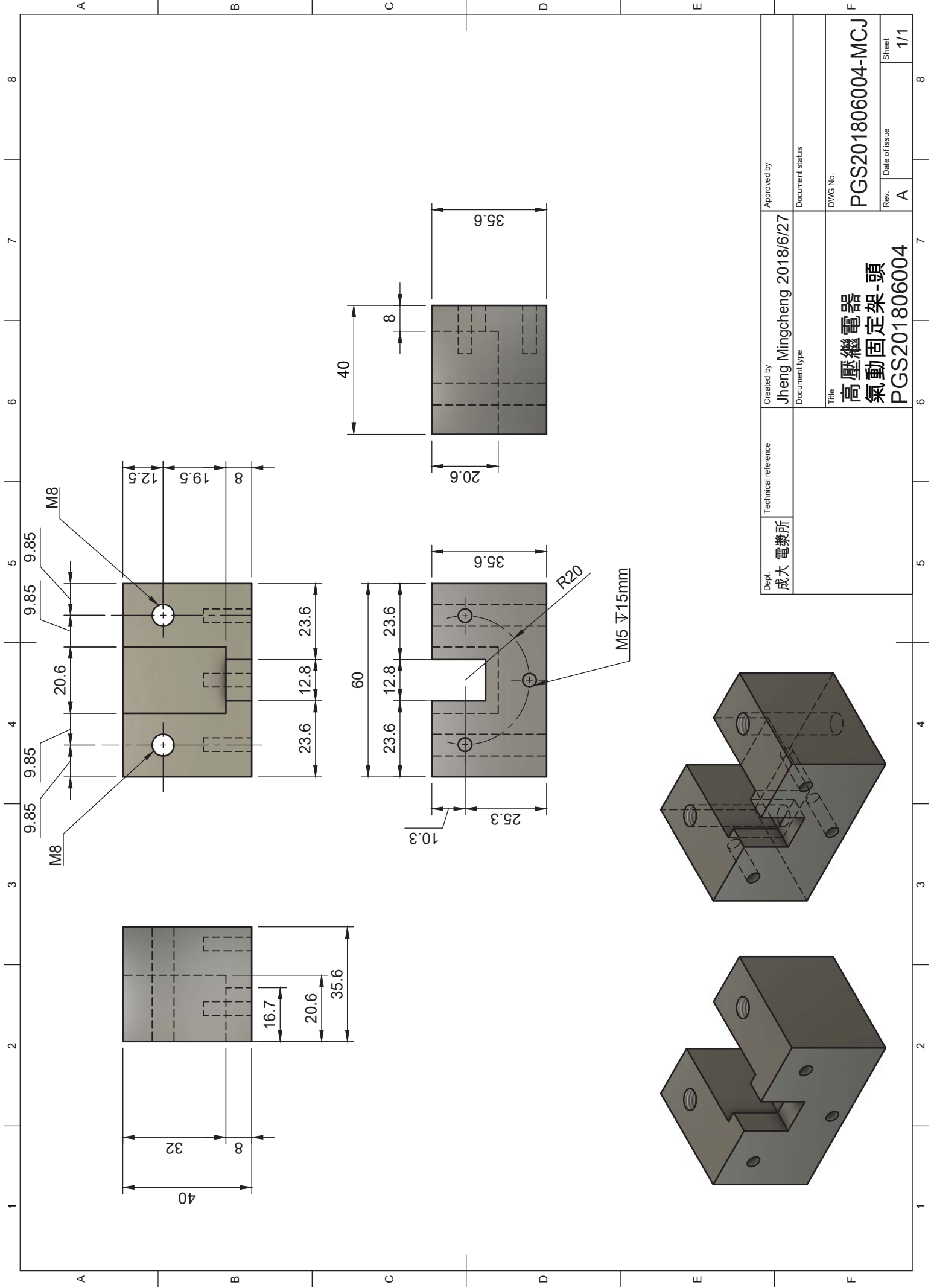
1	2	3	4	5	6	7	8
A	明細表						
A	項目	數量	零件名稱	零件工程圖號	Rev	材料	說明
	0	1組	NO-Relay 總圖	PGS201807005-MCJ	B		
	1	1	底板	PGS201806001-MCJ	B	PE	
	2	1	氣動閥固定架-上基板	PGS201806002-MCJ	A	PE	
	3	1	氣動閥固定架-下基板	PGS201806003-MCJ	A	PE	
	4	1	氣動閥固定架-頭	PGS201806004-MCJ	A	PE	
	5	1	氣動閥固定架-後	PGS201806005-MCJ	A	PE	
	6	1	NCM KB 075-0400S	無			
	7	2	彈簧-85-13-19.5*17.5-1	無			
	8	2	彈簧固定架-下	PGS201806008-MCJ	A	PE	
	9	2	彈簧固定架-上	PGS201806009-MCJ	A	PE	
	10	2	NO電極	PGS201806006-MCJ	A	鋁合金5	
	11	2	電擊架配件	PGS201806007-MCJ	A	PE	
	12	2	NO電極架	PGS201807001-MCJ	B	PE	
	13	1	NO-彈簧架-板	PGS201806014-MCJ	A	PE	
	14	1	NO-電擊板	PGS201806015-MCJ	A	鋁合金5	
	15	1	NO-延長-支撐架	PGS201806016-MCJ	A	PE	
	16	1	延長桿1號	PGS201806017-MCJ	A	PE	
E	17	1	延長管2號	PGS201806018-MCJ	A	PE	
	18	2	NO直立式加強柱	PGS201807003-MCJ	B	PE	
							F
				Dept. 成大 電漿所	Technical reference	Created by Jheng Mingcheng 2018/7/26	Approved by
						Document status	
						DWG No.	
						Title	PGS201807005-MCJ
						NO-Relay-直立式	
				Rev.	Date of issue	Sheet	
				B		2/2	
1	2	3	4	5	6	7	8



Dept. 成大 電漿所		Technical reference	Created by Jheng Mingcheng 2018/6/27	Approved by
			Document type	Document status
			DWG No.	
			PGS201806002-MCJ	
			Rev.	Date of issue
			A	1/1
			Sheet	
			1/1	

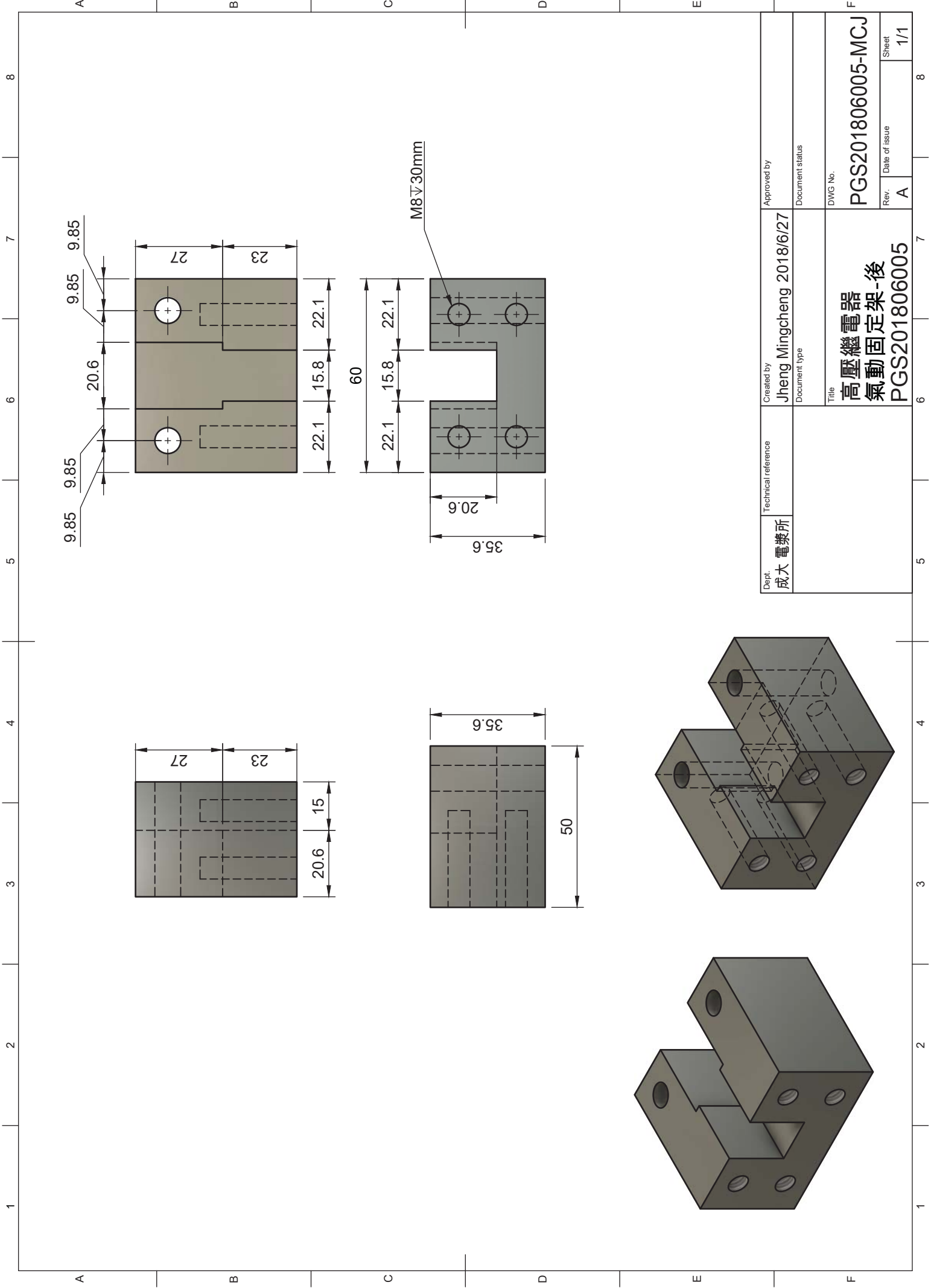


Dept. 成大 電漿所	Technical reference	Created by Jheng Mingcheng 2018/6/27	Approved by
		Document type	Document status
Title 高壓繼電器 氣動固定架-下基板		DWG No. PGS201806003-MCJ	
		Rev. A	Date of issue 1/1
		Sheet 1/1	

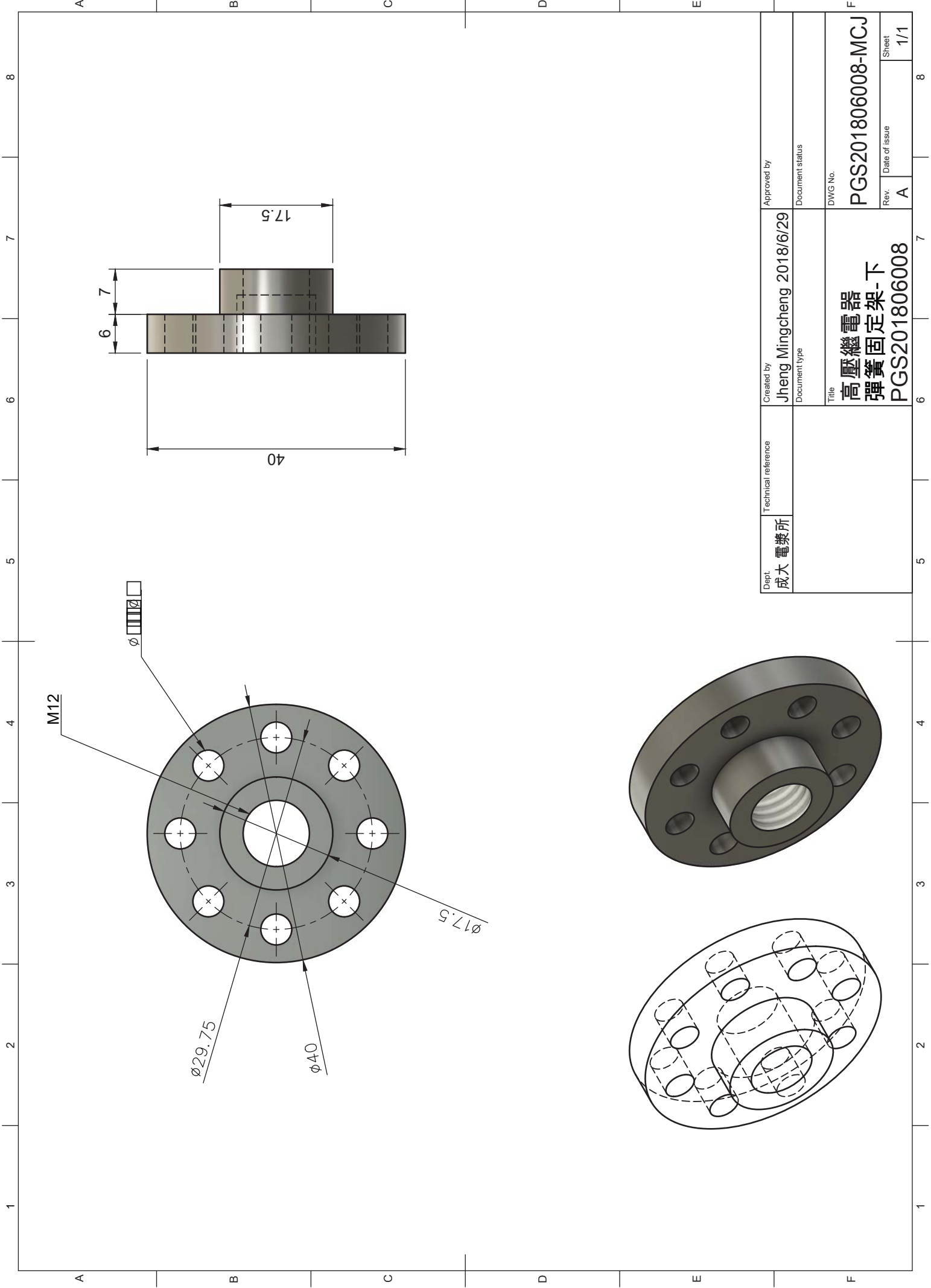


Dept. 成大 電漿所		Technical reference	Created by Jheng Mingcheng 2018/6/27	Approved by
			Document type	Document status
			DWG No.	
			PGS201806004-MCJ	
			Rev. A	
			Date of issue	
			Sheet 1/1	

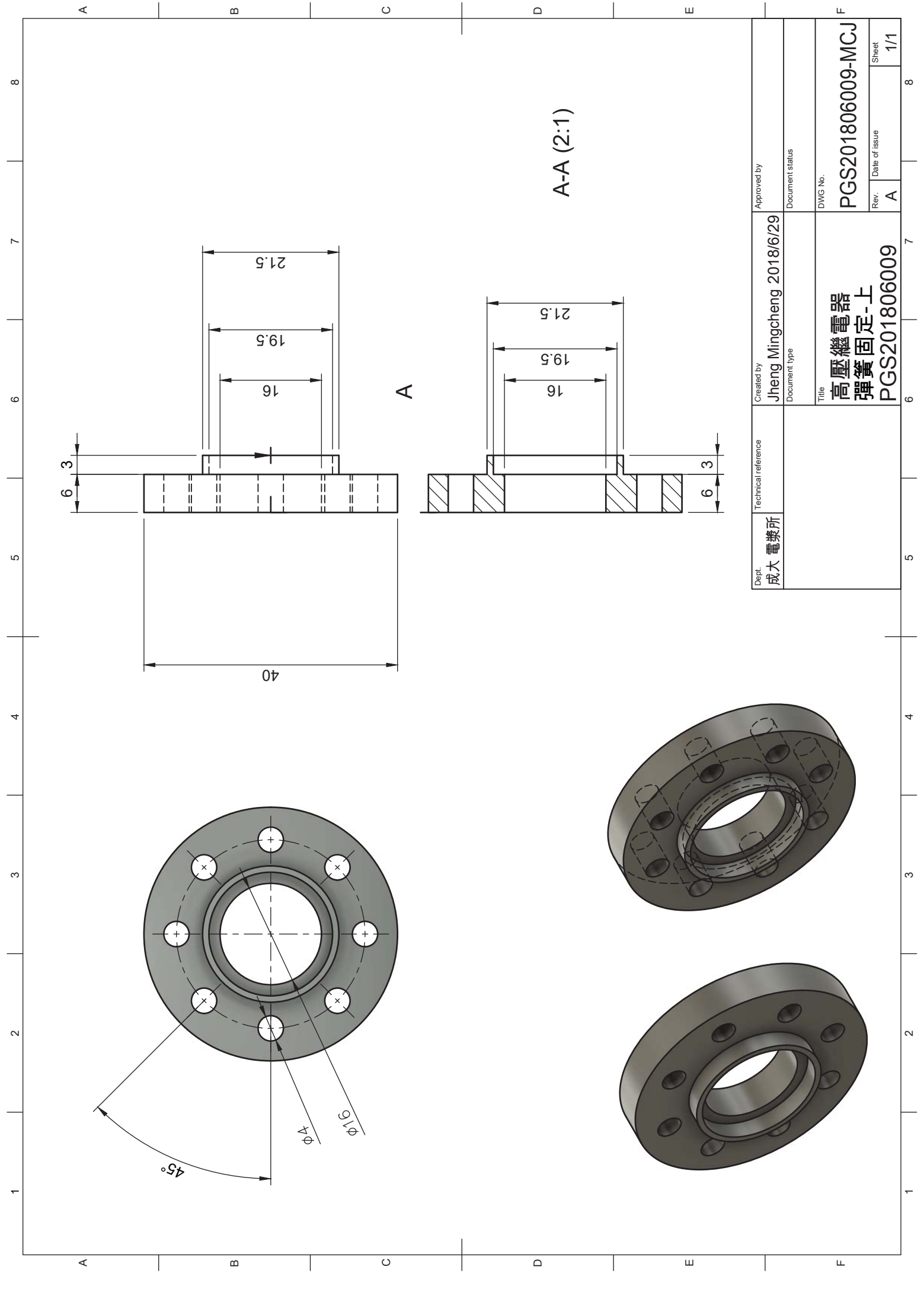
高壓繼電器
氣動固定架-頭
PGS201806004



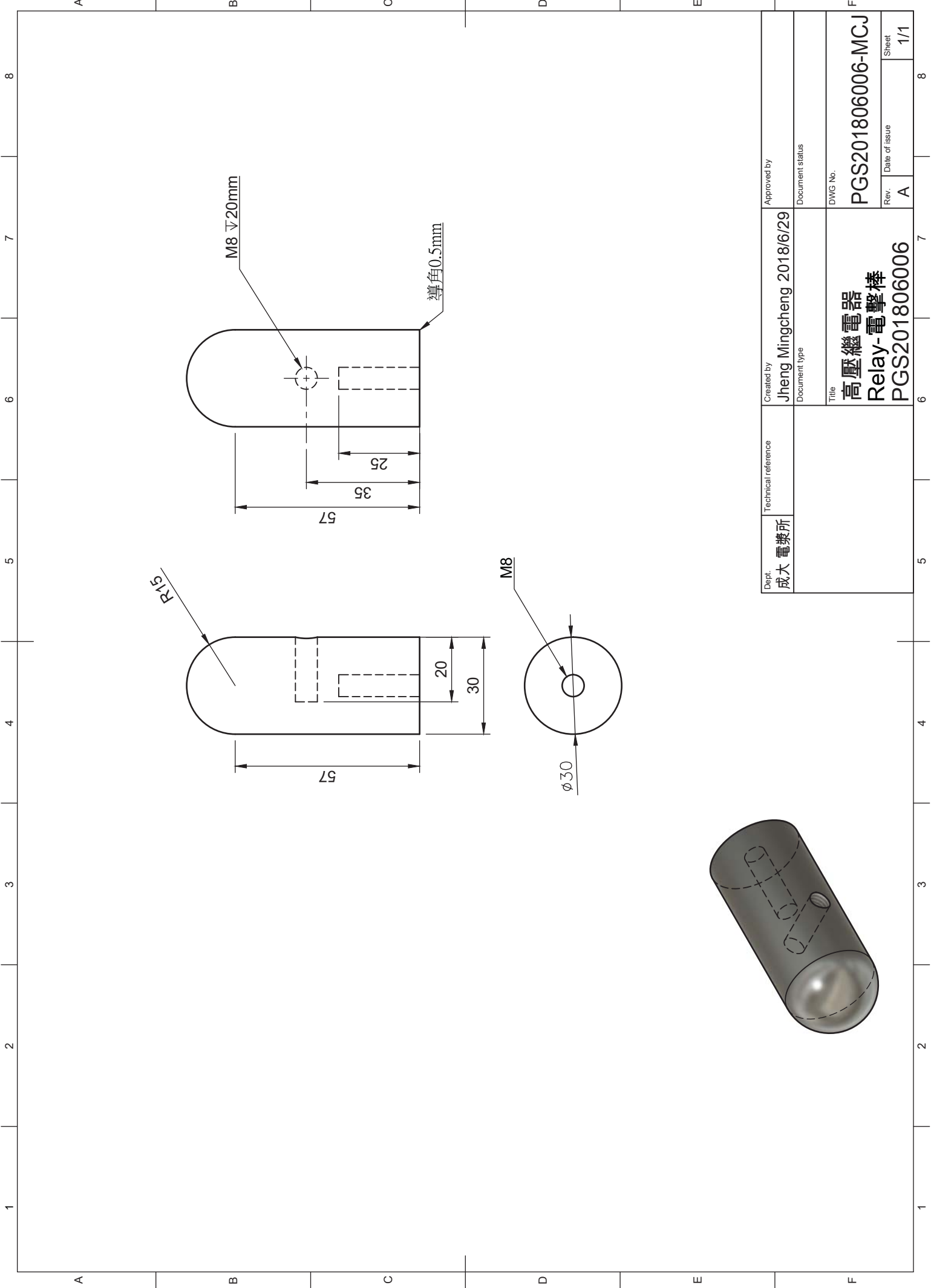
Dept. 成大電機所	Technical reference	Created by	Approved by		
		Document status			
		Document type			
		Title	DWG No.		
		高壓繼電器 氣動固定架-後 PGS201806005	PGS201806005-MCJ		
			Rev.	Date of issue	Sheet
			A		1/1



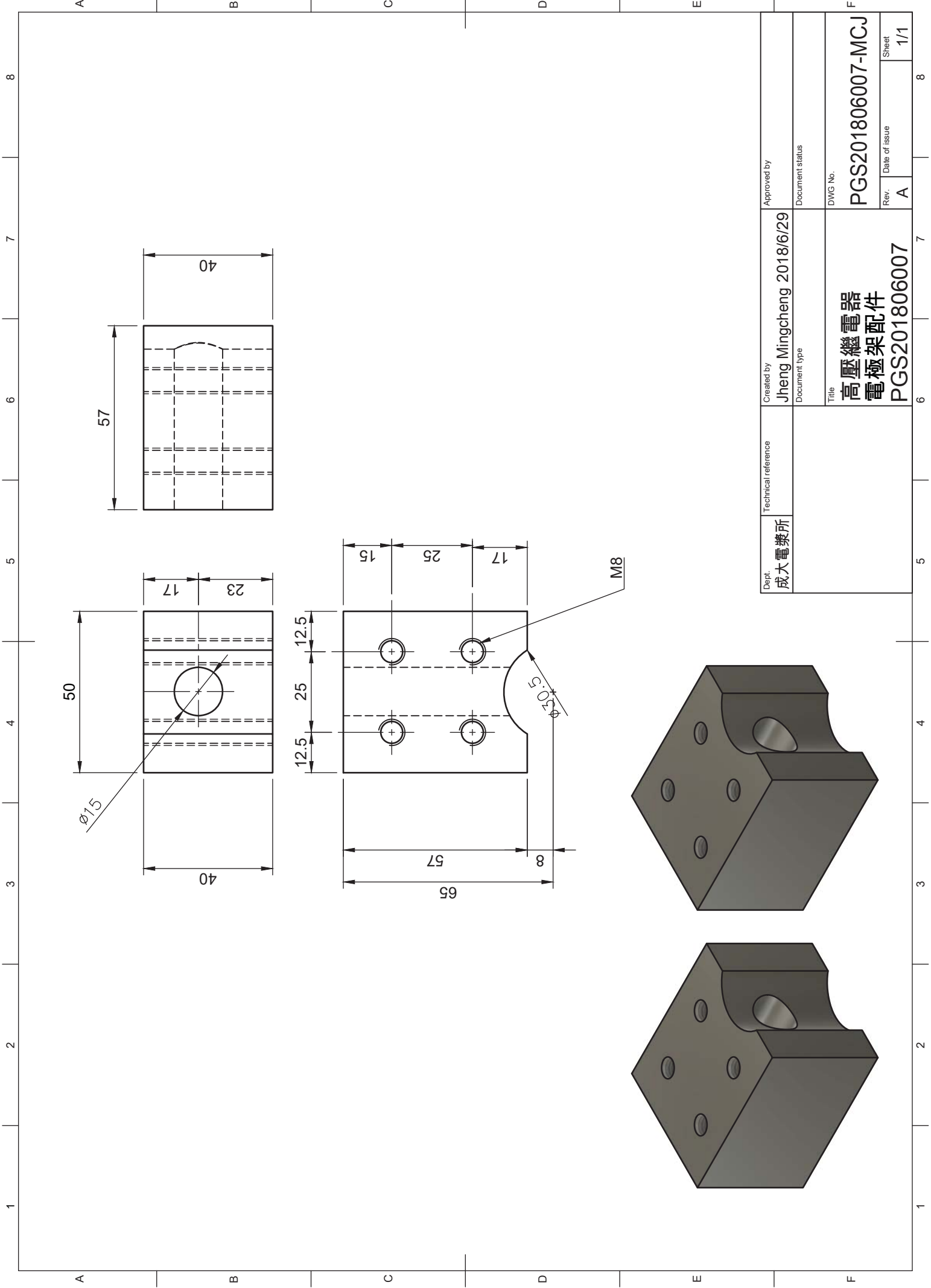
Dept. 成大 電機所	Technical reference	Created by Jheng Mingcheng 2018/6/29	Approved by					
			Document status					
			DWG No.					
			Title					
			PGS201806008-MCJ					
			Rev.		Date of issue		Sheet	
			A				1/1	
			PGS201806008					
			高壓繼電器 彈簧固定架-下					



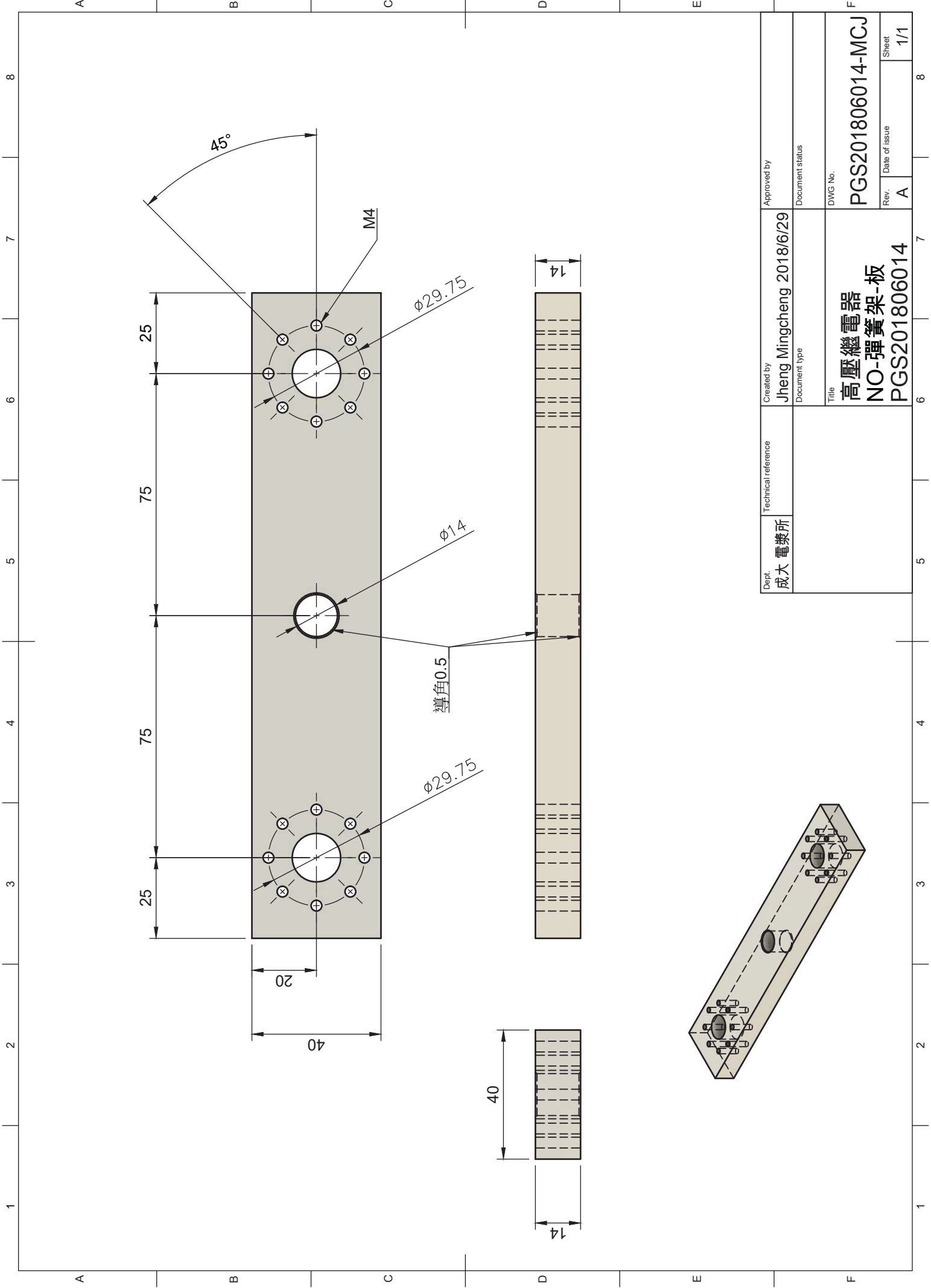
Dept. 成大電機所	Technical reference	Created by Jheng Mingcheng 2018/6/29	Approved by
		Document type	Document status
		Title 高壓繼電器 彈簧固定-上 PGS201806009	DWG No. PGS201806009-MCJ
			Rev. A Date of issue Sheet 1/1



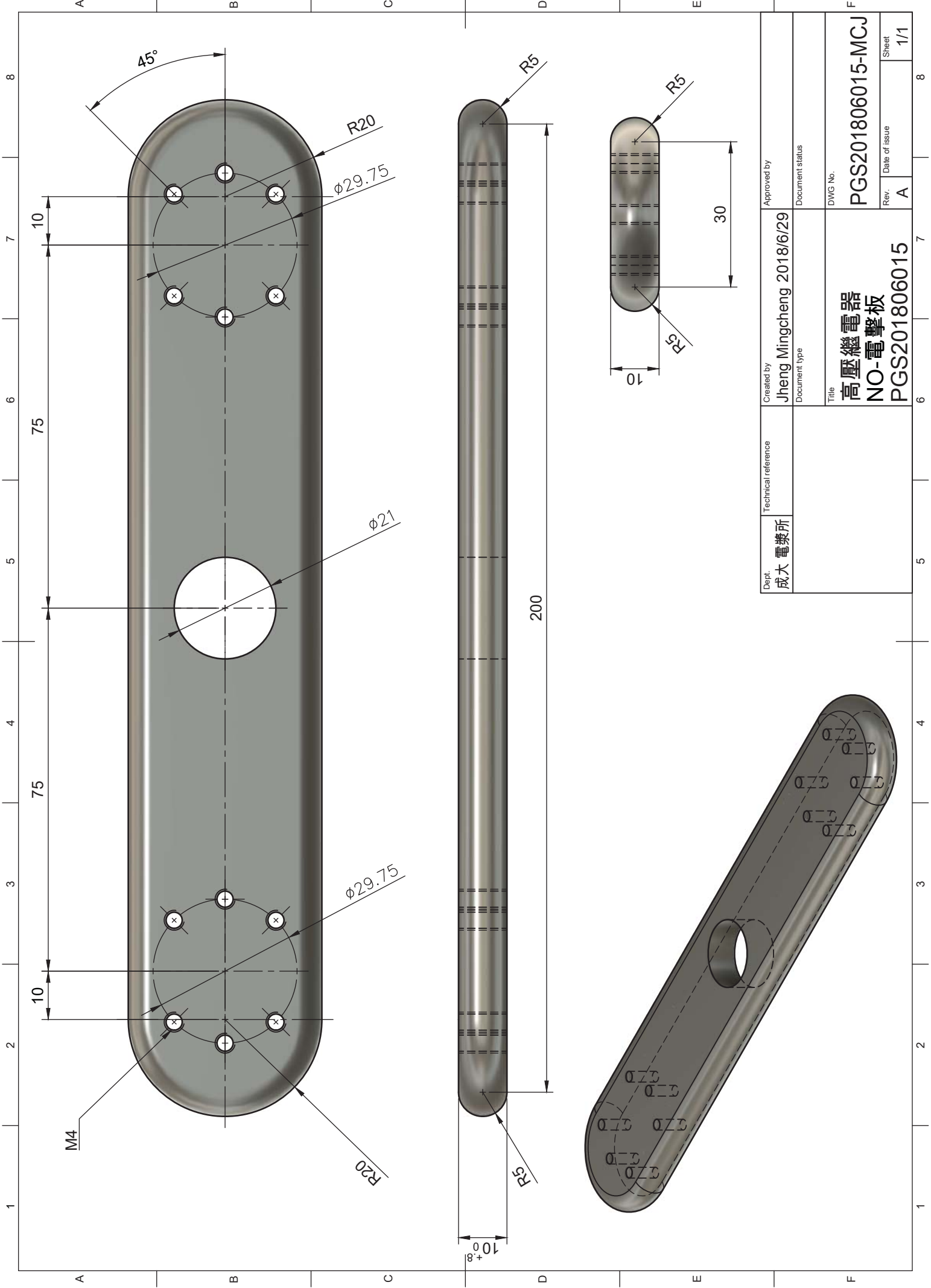
Dept. 成大 電機所	Technical reference	Created by Jheng Mingcheng 2018/6/29	Approved by
		Document type	Document status
		DWG No.	
		PGS201806006-MCJ	
		Rev. A	
		Date of issue	
		Sheet 1/1	



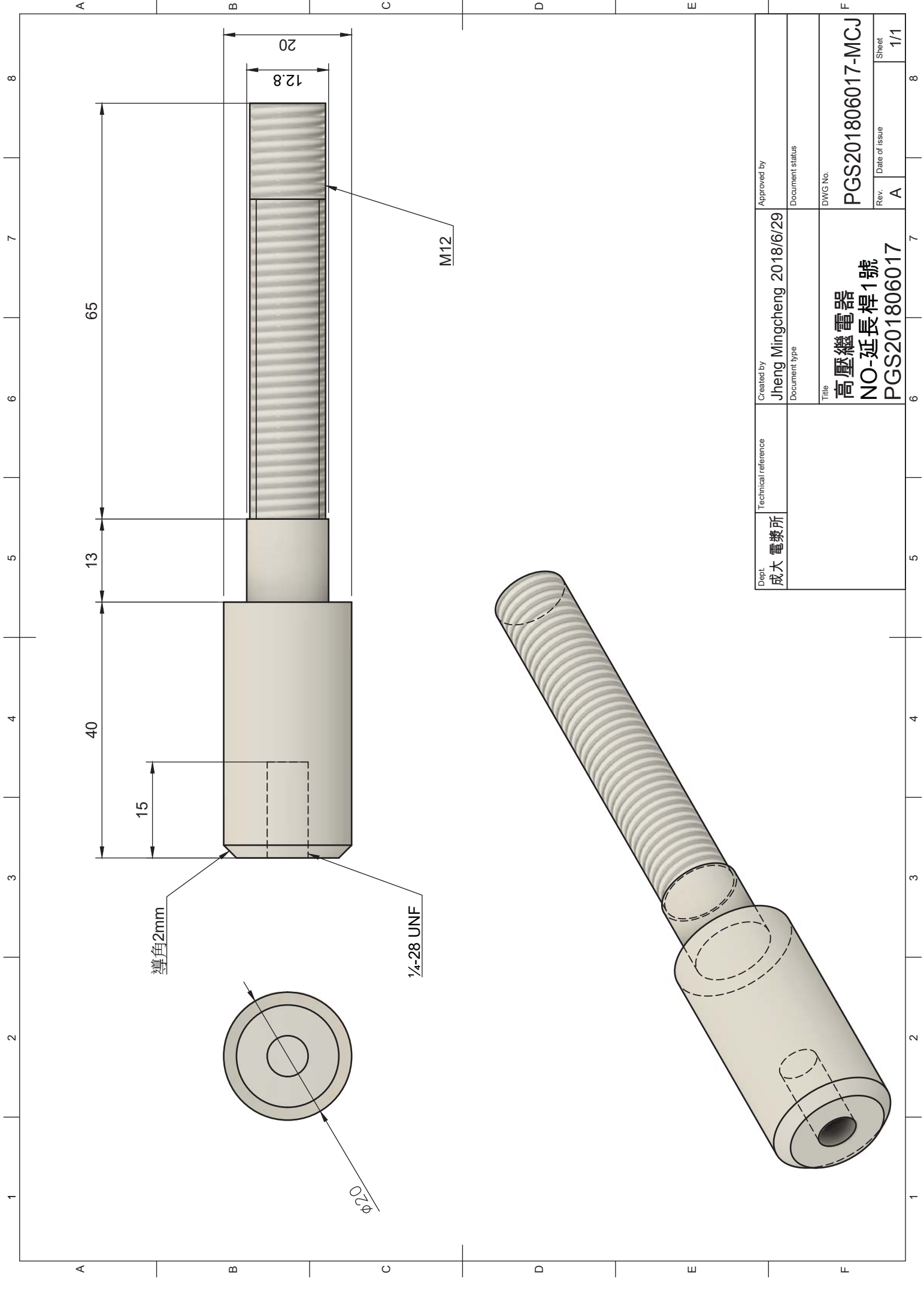
Dept. 成大電漿所	Technical reference	Created by Jheng Mingcheng 2018/6/29	Approved by
		Document type	Document status
			DWG No.
			PGS201806007-MCJ
			Rev. A
			Date of issue
			Sheet 1/1



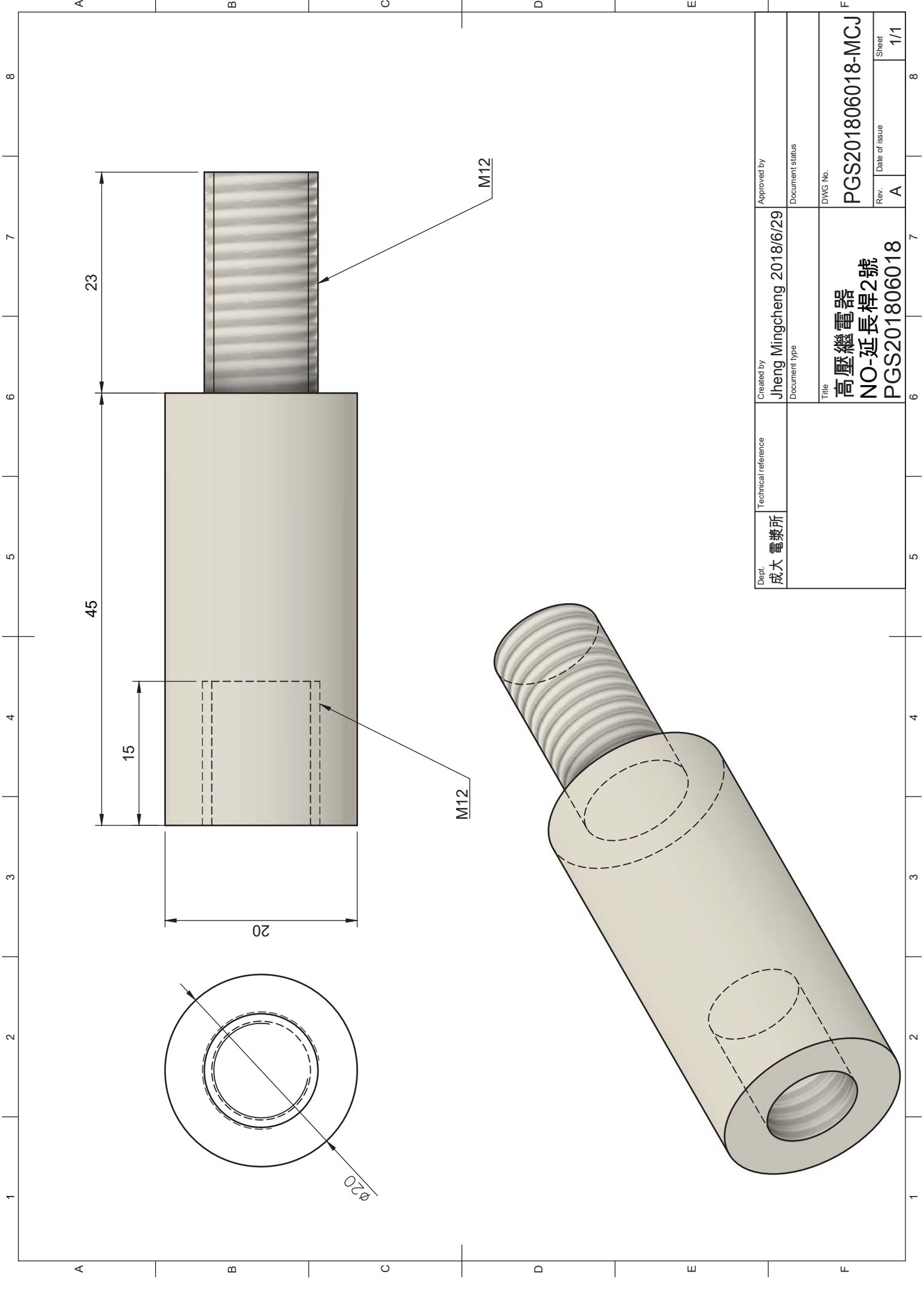
Dept. 成大 電漿所	Technical reference	Created by Jheng Mingcheng 2018/6/29		Approved by	
		Document type		Document status	
		Title 高壓繼電器 NO-彈簧架-板 PGS201806014		DWG No. PGS201806014-MCJ	
				Rev. A	Date of issue



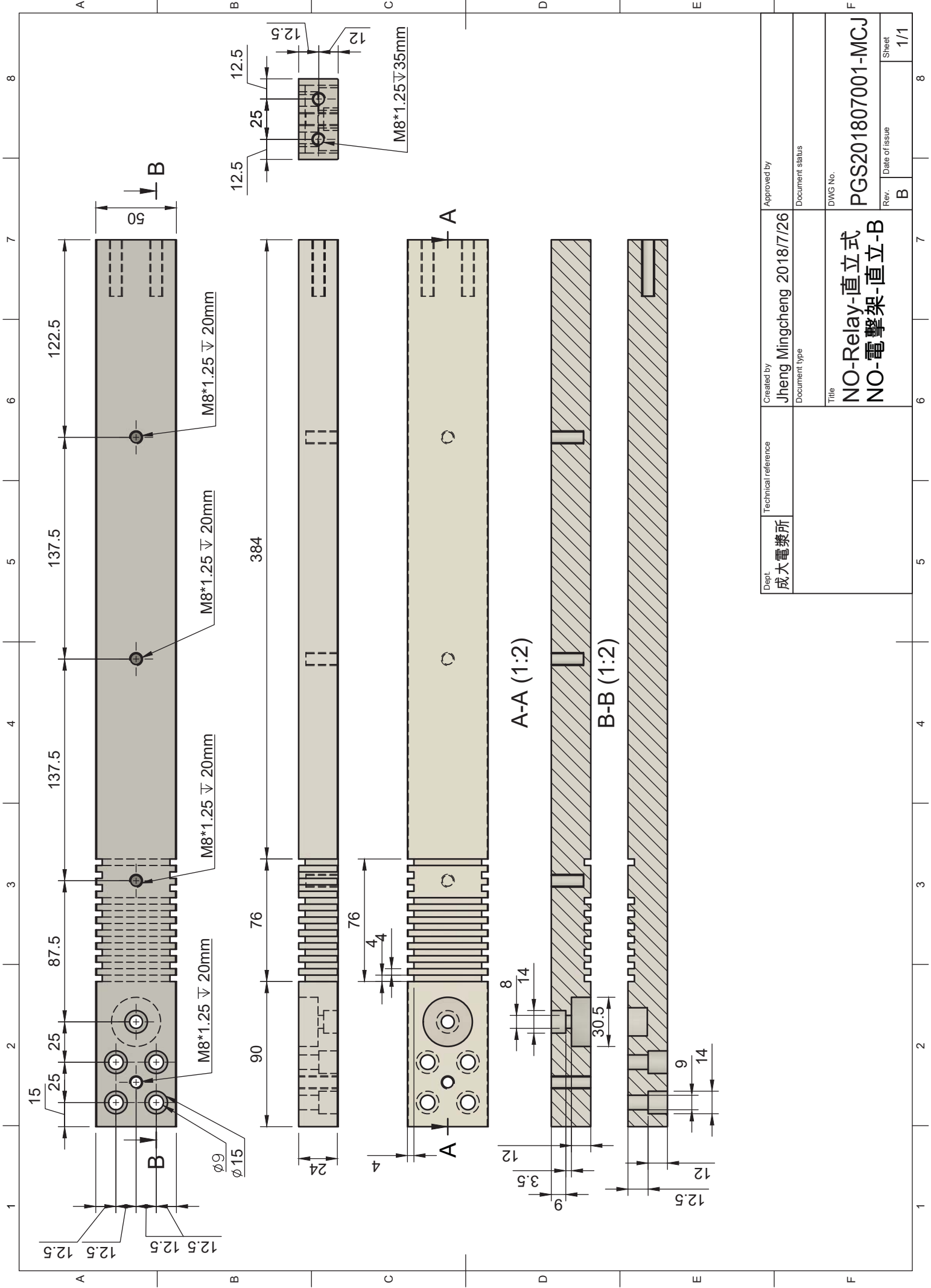
Dept. 成大 電機所	Technical reference	Created by Jheng Mingcheng 2018/6/29	Approved by	
		Document type	Document status	
		Title 高壓繼電器 NO-電擊板 PGS201806015	DWG No. PGS201806015-MCJ	
		Rev. A	Date of issue	Sheet 1/1



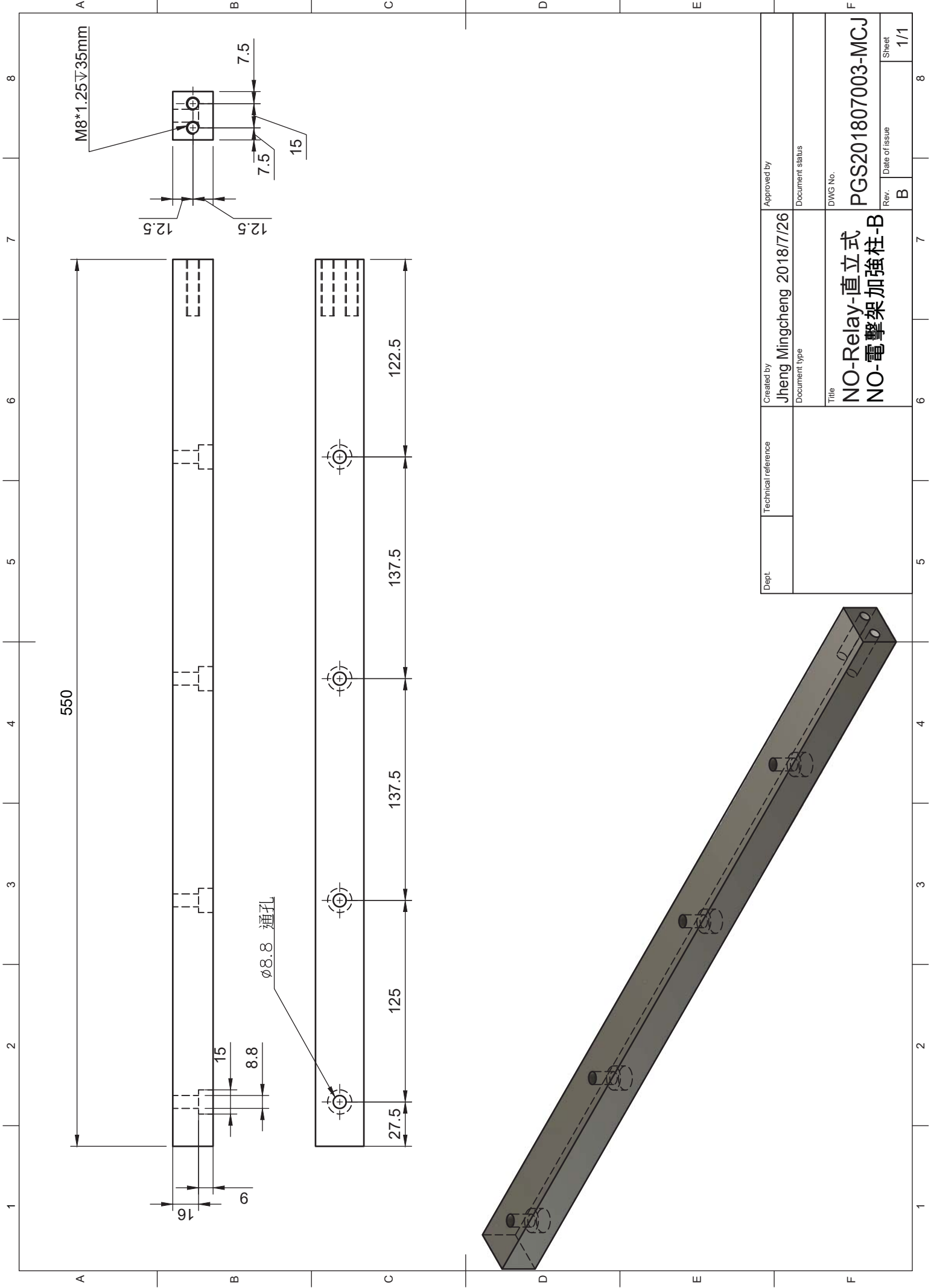
Dept. 成大 電漿所	Technical reference	Created by Jheng Mingcheng 2018/6/29	Approved by
		Document type	Document status
Title 高壓繼電器 NO-延長桿1號 PGS201806017		DWG No.	PGS201806017-MCJ
		Rev.	Date of issue
		A	1/1
		Sheet	1/1



Dept. 成大 電機所	Technical reference	Created by Jheng Mingscheng 2018/6/29	Approved by
		Document type	Document status
		Title 高壓繼電器 NO-延長桿2號 PGS201806018	DWG No. PGS201806018-MCJ
		Rev. A	Date of issue 1/1
		Sheet 1/1	

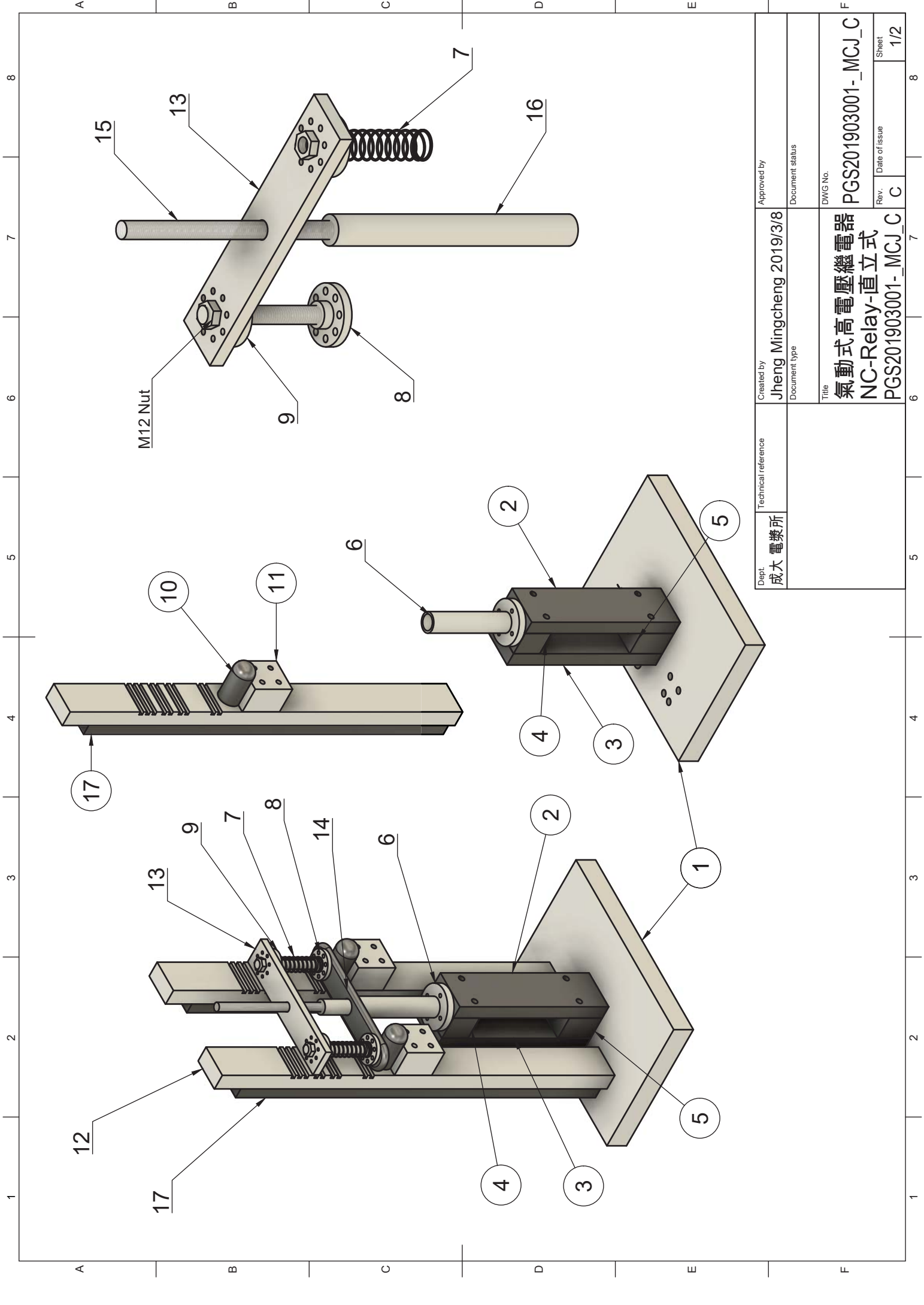


Dept. 成大電漿所	Technical reference	Created by	Approved by				
		Jheng Mingcheng 2018/7/26					
		Document type	Document status				
		Title	DWG No.				
		NO-Relay-直立式			PGS201807001-MCJ		
		NO-電擊架-直立-B					
			Rev.	Date of issue	Sheet		
			B		1/1		



Dept.	Technical reference	Created by Jheng Mingcheng 2018/7/26	Approved by		
		Document type	Document status		
		Title	DWG No.		
		NO-Relay-直立式 NO-電擊架加強柱-B	PGS201807003-MCJ		
			Rev.	Date of issue	Sheet
			B		1/1

附錄五. 繼電器工程圖(NC)

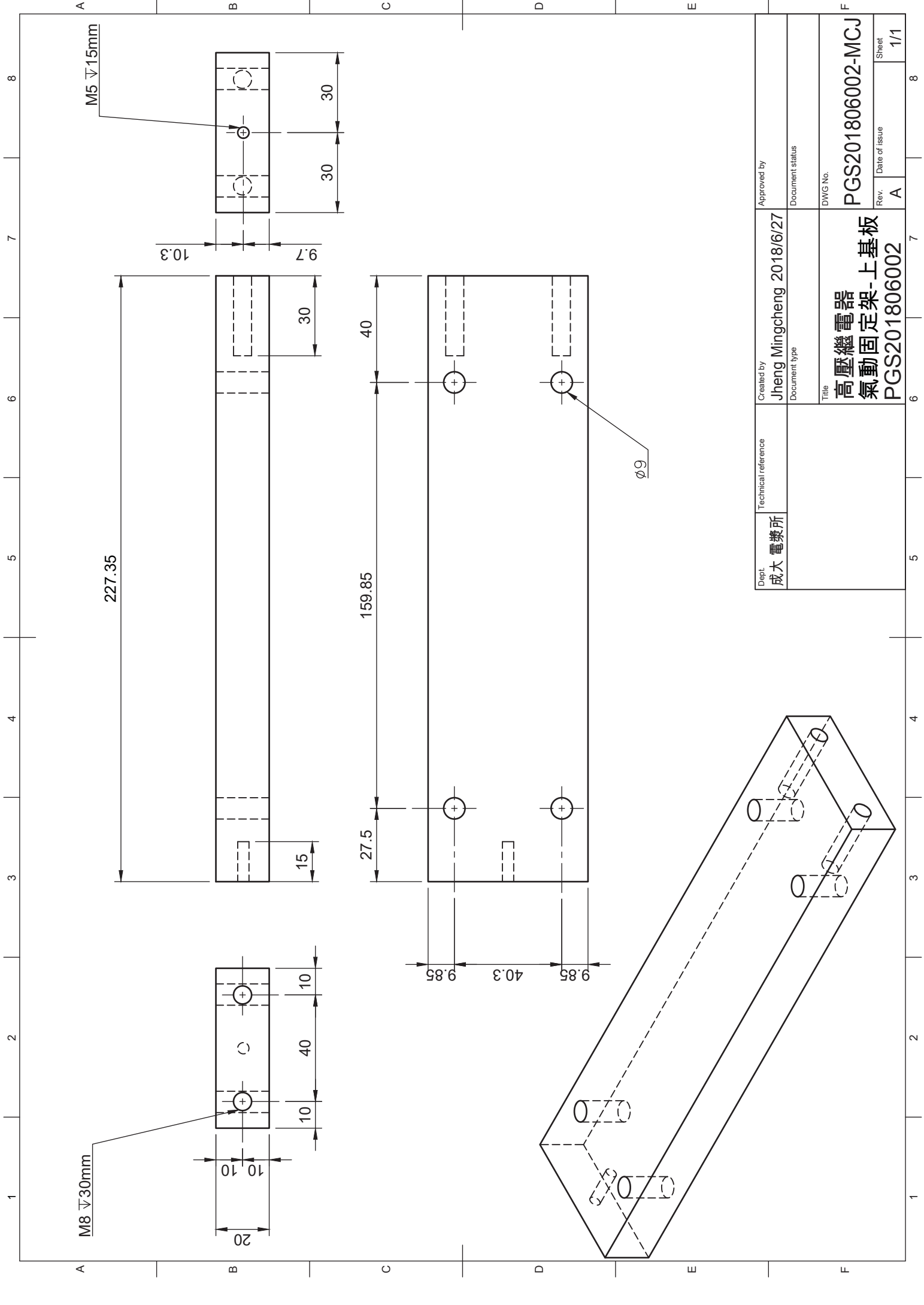


Dept. 成大 電漿所	Technical reference	Created by Jheng Mingcheng 2019/3/8	Approved by	
		Document type	Document status	
		Title	DWG No.	
		氣動式高電壓繼電器 NC-Relay-直立式 PGS201903001- MCJ_C	PGS201903001- MCJ_C	
			Rev. C	Date of issue Sheet 1/2

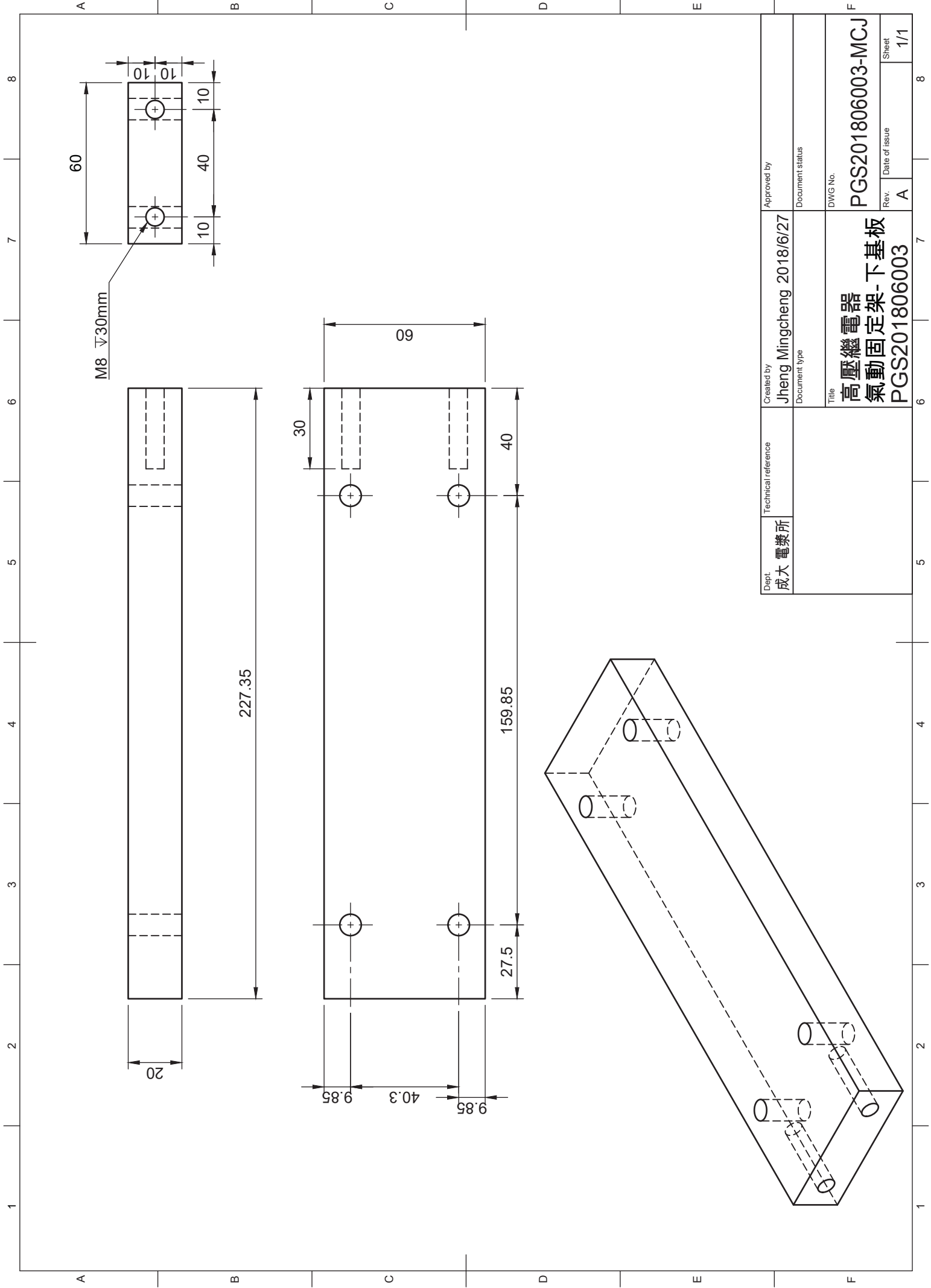
明細表

項目	數量	零件名稱	工程圖號	Rev	材料	備註
0	1組	NC-Relay總圖	PGS201903001-_MCJ_C	C		
1	1	底板	PGS201806001-MCJ		PE	
2	1	氣動閥固定架-上基板	PGS201806002-MCJ		PE	
3	1	氣動閥固定架-下基板	PGS201806003-MCJ		PE	
4	1	氣動閥固定架-頭	PGS201806004-MCJ		PE	
5	1	氣動閥固定架-後	PGS201806005-MCJ			
6	1	NCM KB 075-0400S	無			
7	2	彈簧-85-13-19.5*17.5-1	無			
8	1	彈簧固定座-下	PGS201806008-MCJ		PE	
9	1	彈簧固定座-上	PGS201806009-MCJ		PE	
10	2	NC電極	PGS201806006-MCJ		PE	與NO共用
11	2	電極架配件	PGS201806007-MCJ		PE	
12	2	NC-電擊架	PGS201807002-B-MCJ		PE	
13	1	彈簧支撐架-板	PGS201806013		PE	
14	1	NO-電擊板	PGS201806015-MCJ		PE	
15	1	NC延長桿	PGS201806010-A-MCJ			
16	1	NC-延長桿支撐架	PGS201806011-A-MCJ-			
17	2	NC直立式加強柱	PGS201807004-A-MCJ		PE	

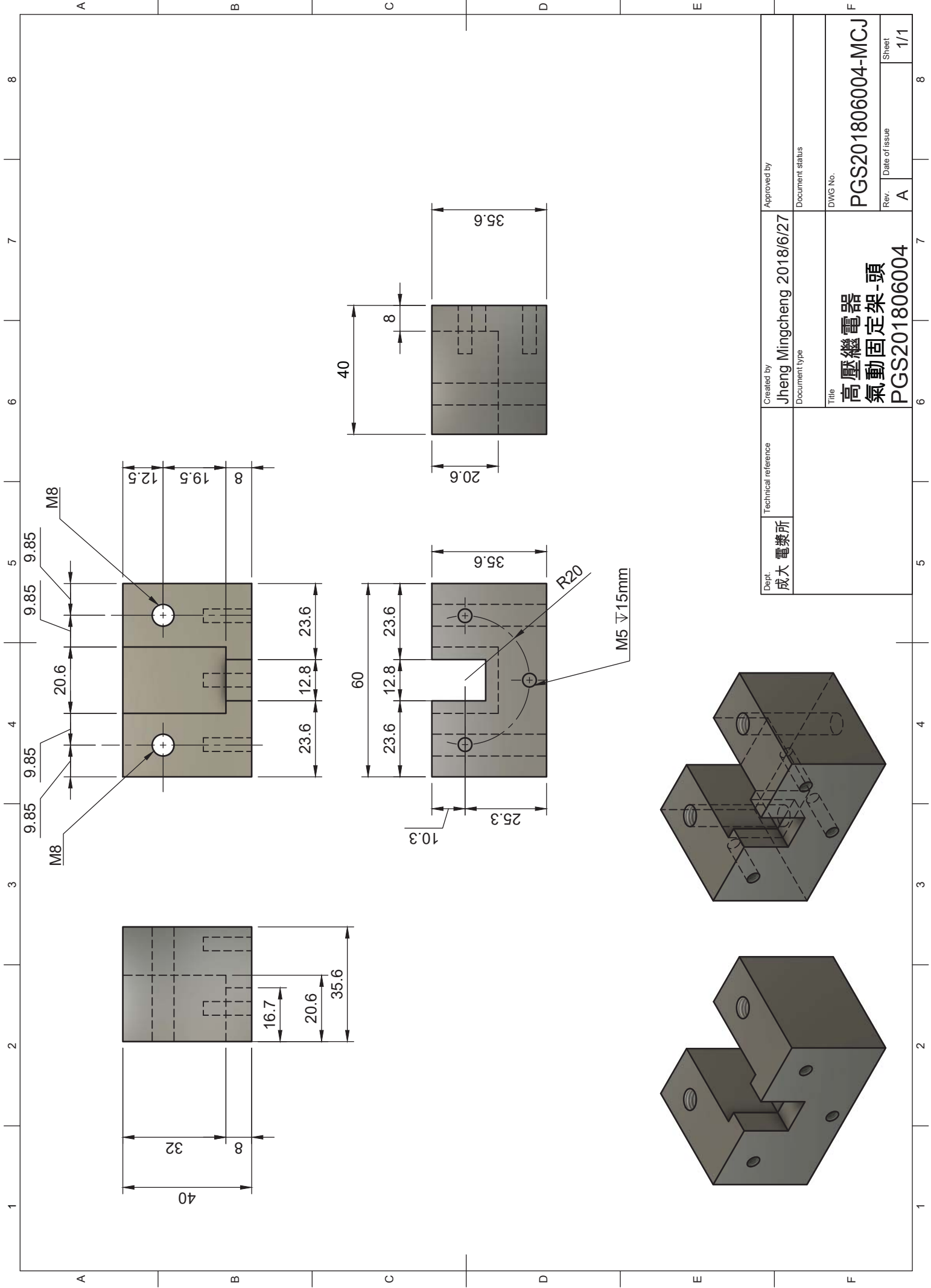
Dept.	Technical reference	Created by Jheng Mingcheng 2019/3/8	Approved by
		Document type	Document status
		DWG No.	
		Title	
		氣動式高電壓繼電器	
		NC-Relay-直立式	
PGS201903001-_MCJ		Rev. C	Date of issue
6	5	7	8
1	2	3	Sheet 2/2



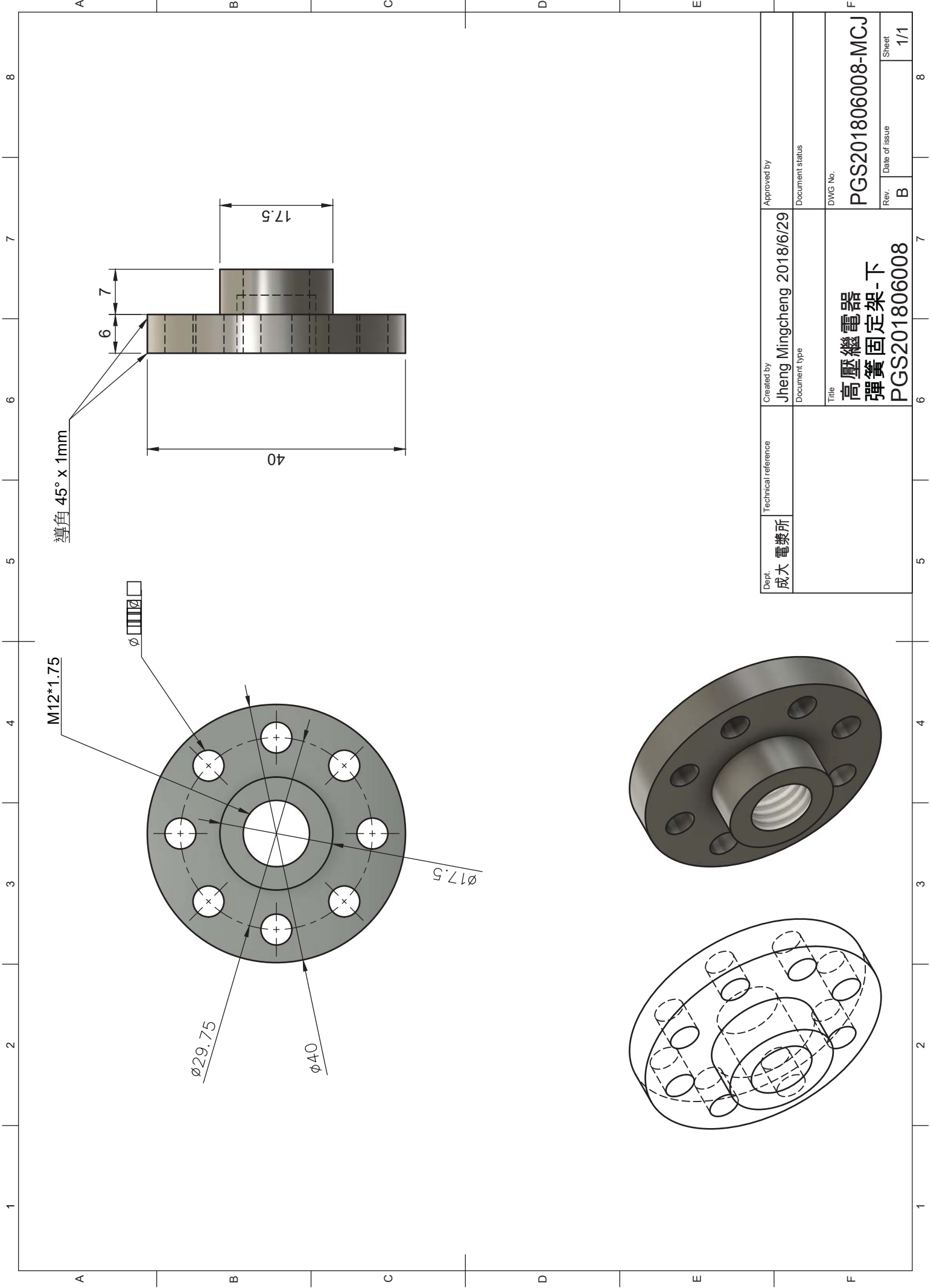
Dept. 成大 電漿所	Technical reference	Created by Jheng Mingcheng 2018/6/27	Approved by
		Document type	Document status
			DWG No.
Title 高壓繼電器 氣動固定架-上基板 PGS201806002		PGS201806002-MCJ	
		Rev.	Date of issue
		A	1/1
		Sheet	
		1/1	



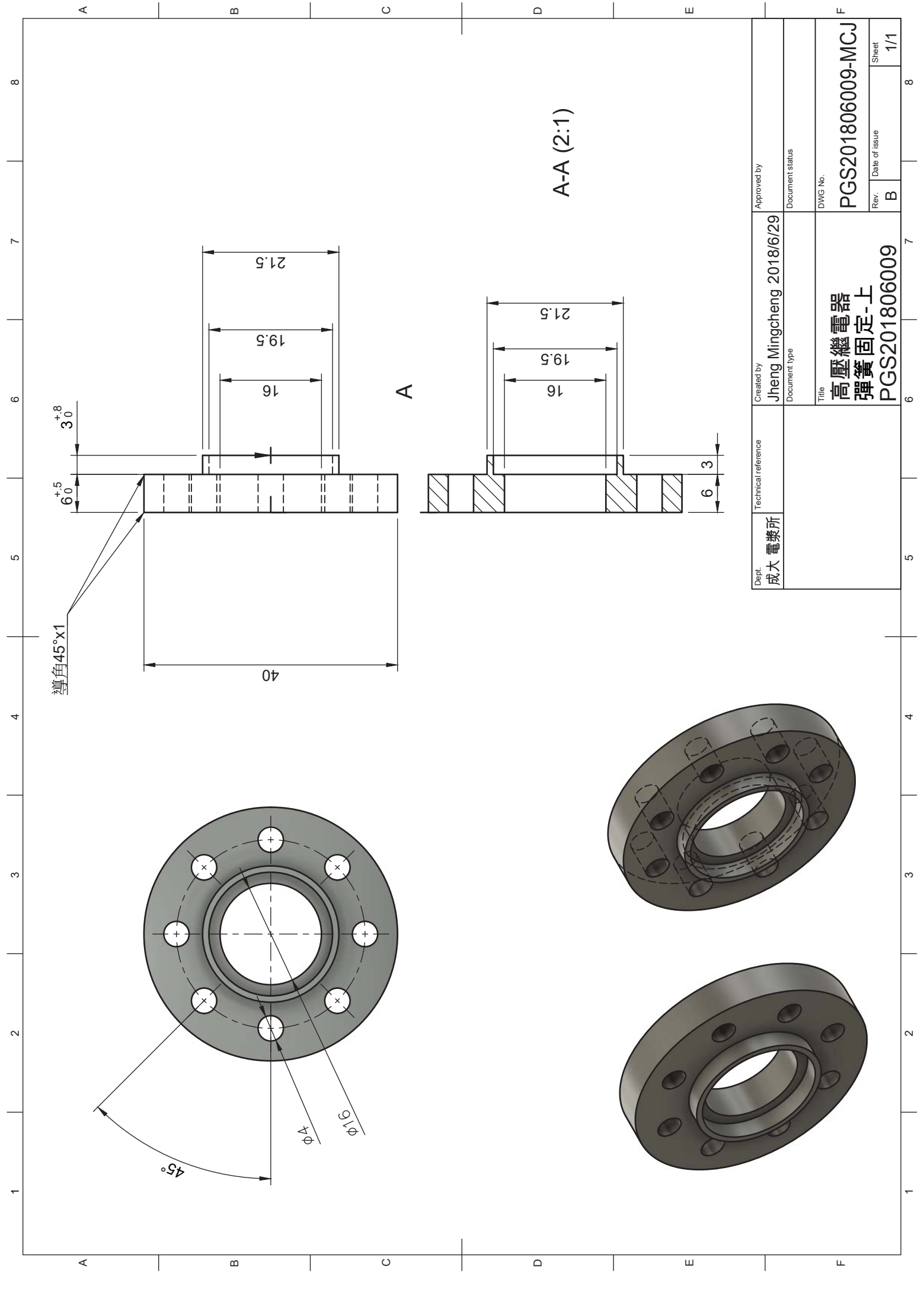
Dept. 成大 電漿所	Technical reference	Created by Jheng Mingcheng 2018/6/27	Approved by
		Document type	Document status
Title 高壓繼電器 氣動固定架-下基板		DWG No. PGS201806003-MCJ	
		Rev. A	Date of issue 1/1



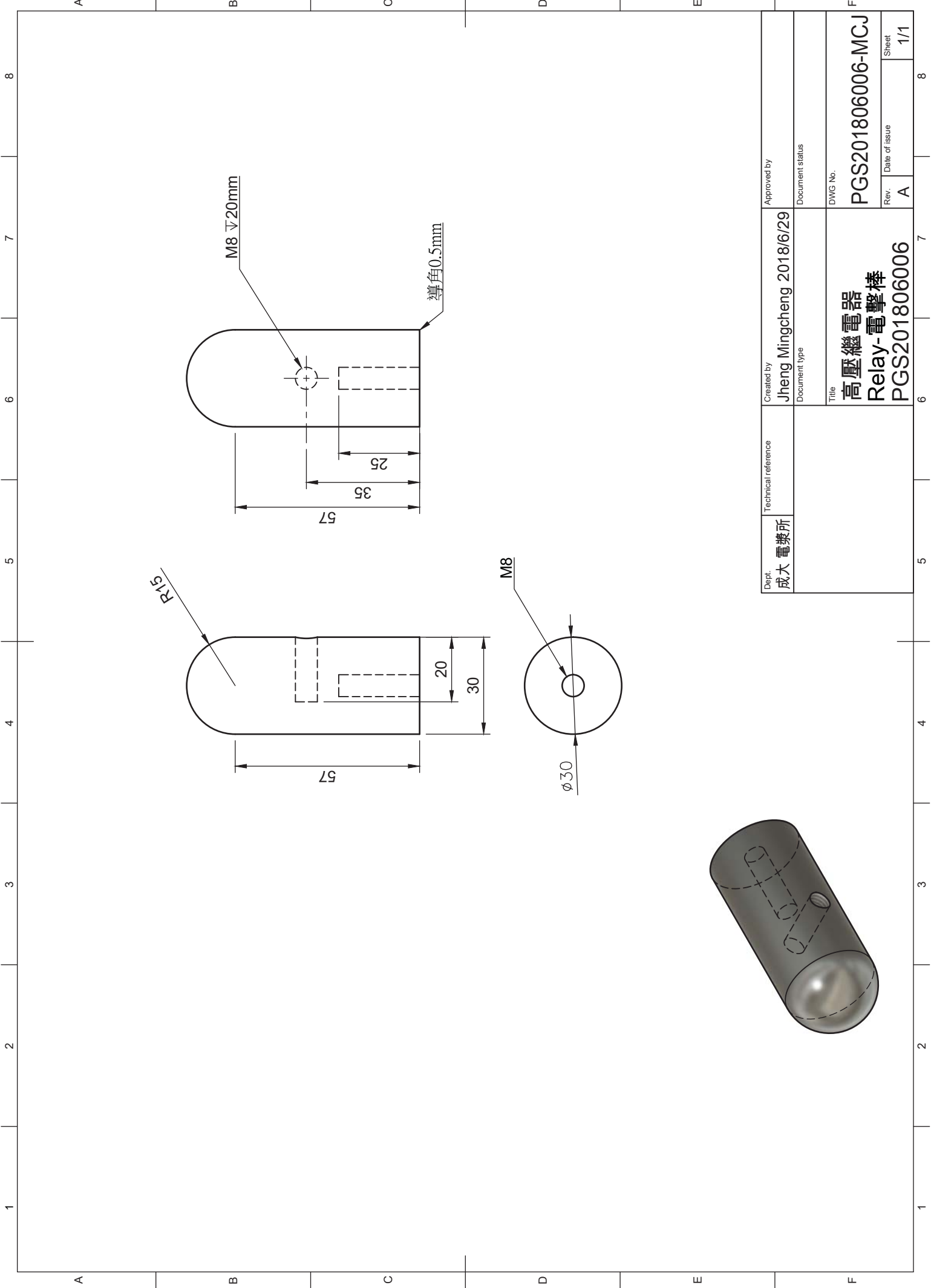
Dept. 成大 電漿所	Technical reference	Created by Jheng Mingcheng 2018/6/27	Approved by
		Document type	Document status
Title 高壓繼電器 氣動固定架-頭		DWG No. PGS201806004-MCJ	
Rev.	Date of issue	Rev.	Sheet
A		A	1/1



Dept. 成大 電機所	Technical reference	Created by Jheng Mingcheng 2018/6/29	Approved by	
		Document type	Document status	
Title		DWG No.		
高壓繼電器 彈簧固定架-下 PGS201806008		PGS201806008-MCJ		
		Rev.	Date of issue	Sheet
		B		1/1

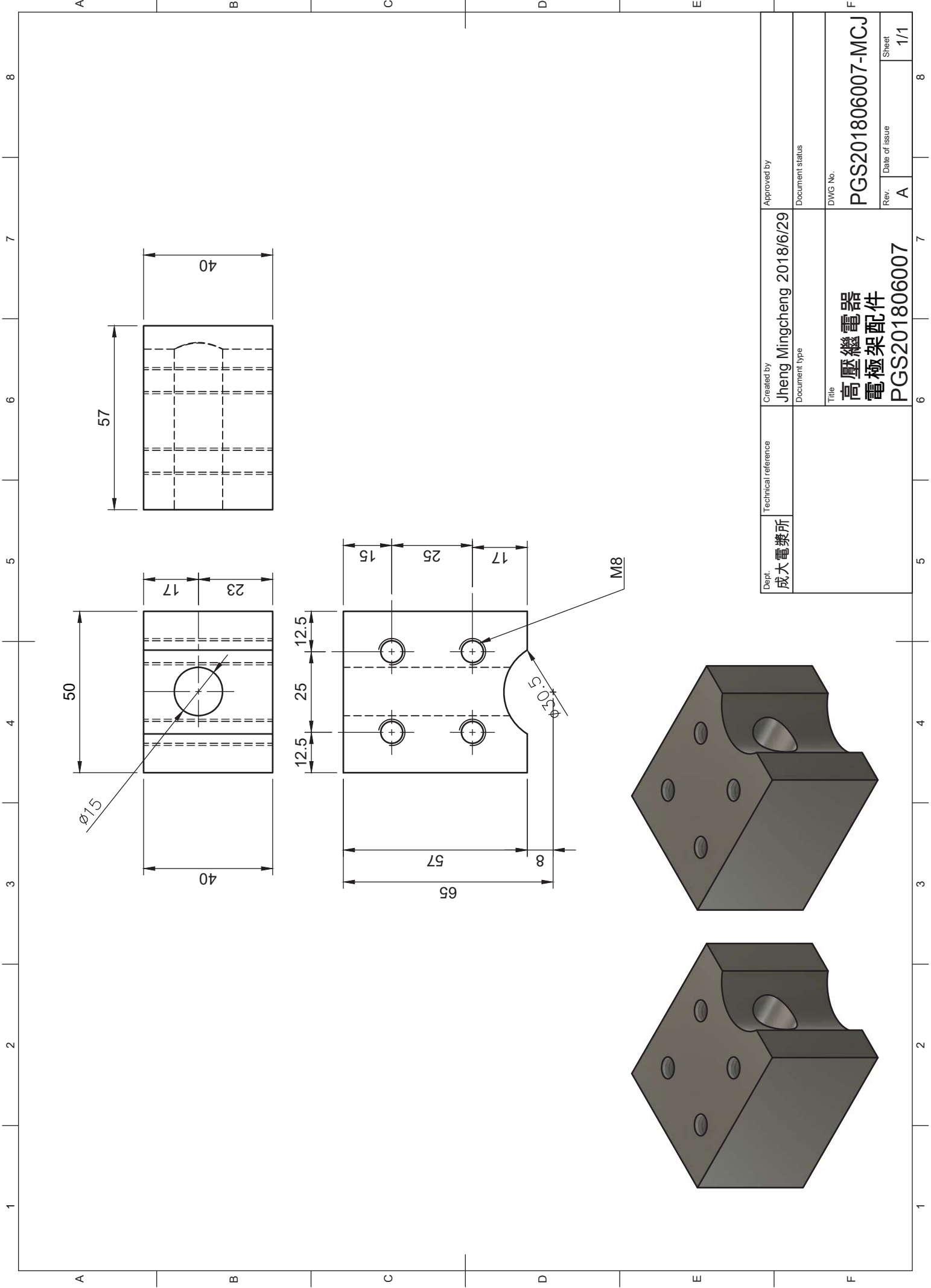


Dept. 成大電漿所	Technical reference	Created by	Jheng Mingcheng 2018/6/29	Approved by		
		Document type		Document status		
		Title	DWG No.			PGS201806009-MCJ
		高壓繼電器 彈簧固定-上 PGS201806009			Rev.	Date of issue
				B		1/1

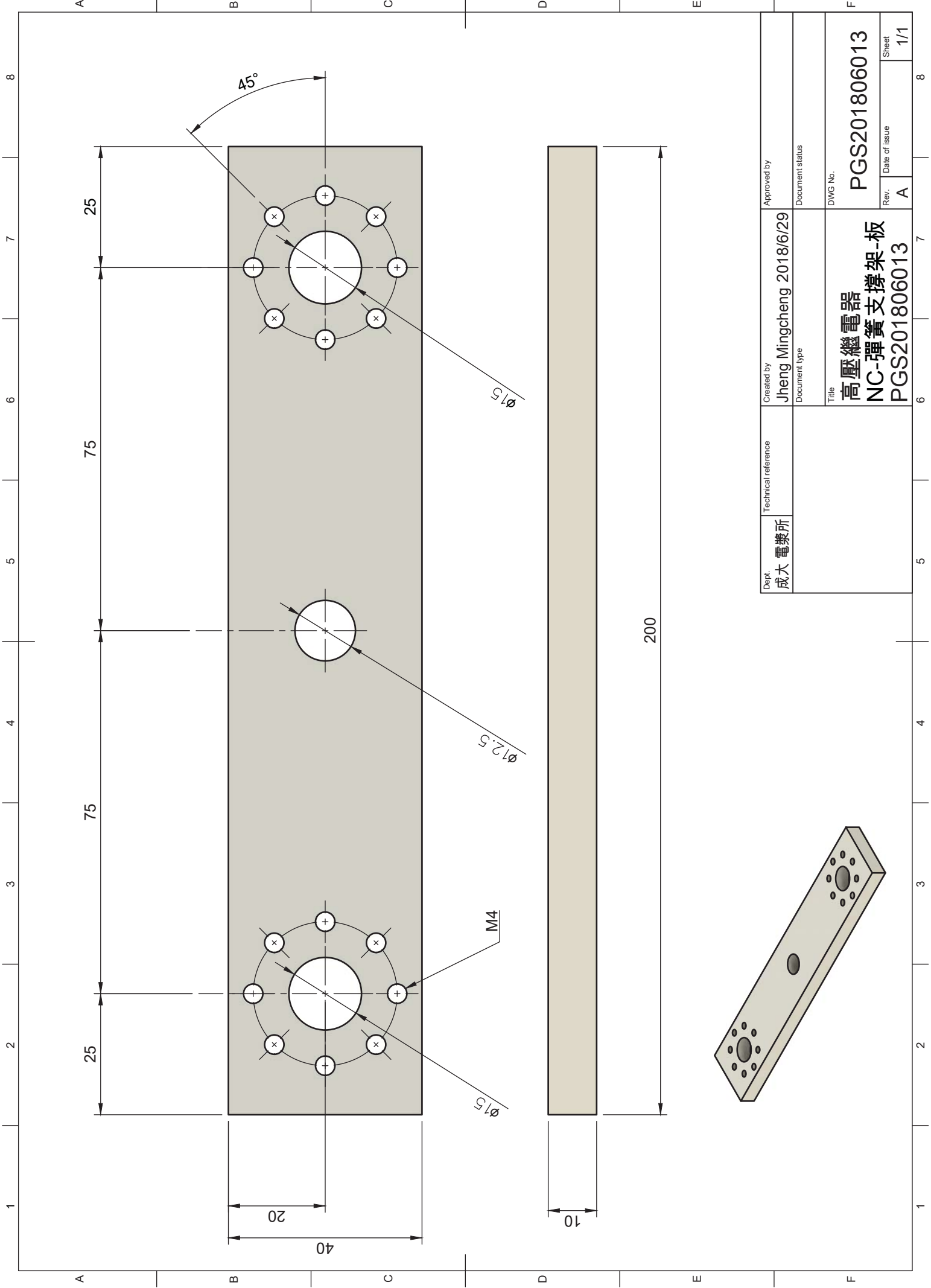


Dept. 成大 電機所	Technical reference	Created by Jheng Mingcheng 2018/6/29	Approved by
		Document type	Document status
		DWG No.	
		PGS201806006-MCJ	
		Rev.	Date of issue
		A	1/1
		Sheet	
		1/1	

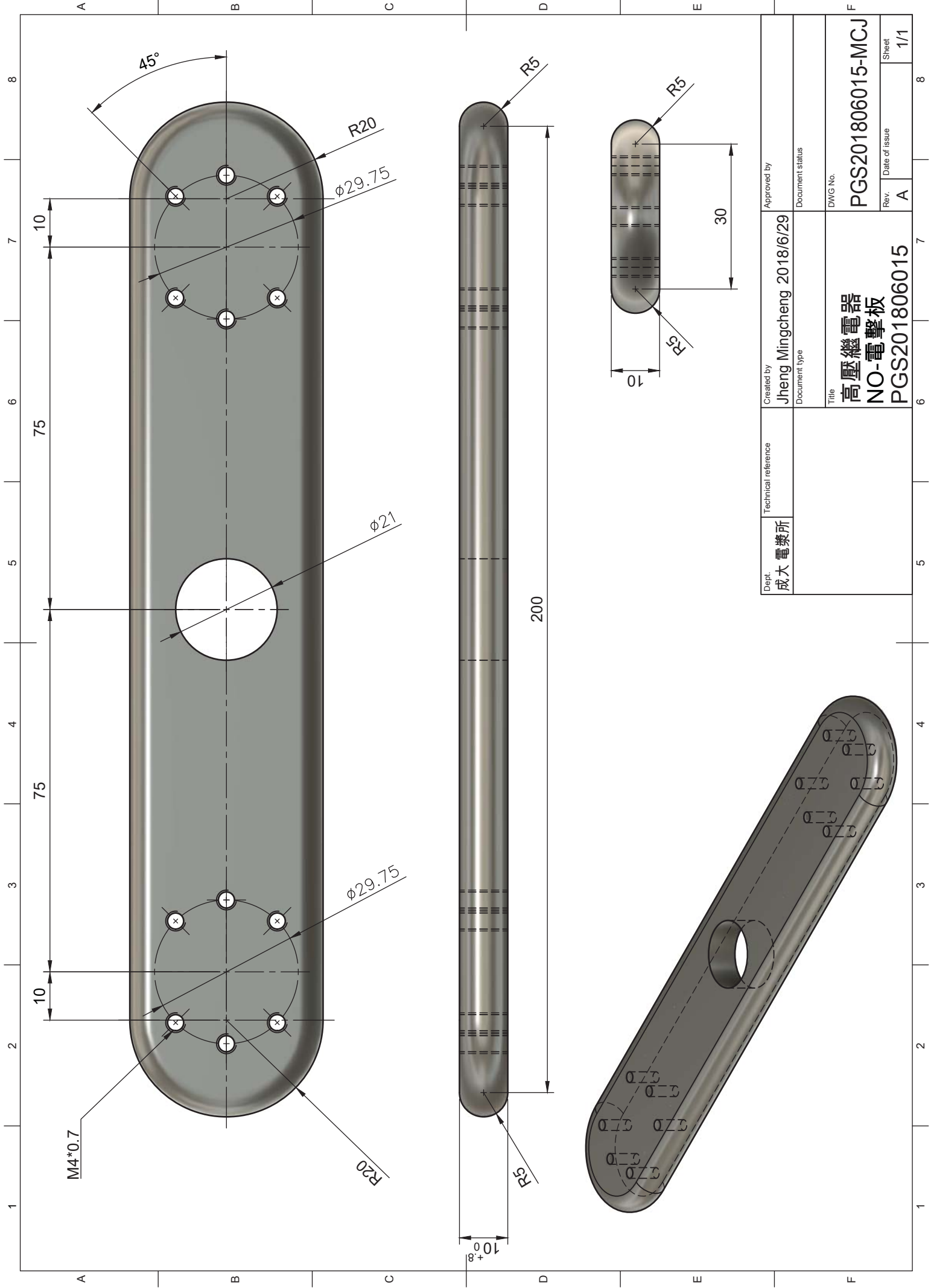
高壓繼電器
Relay-電擊棒
PGS201806006



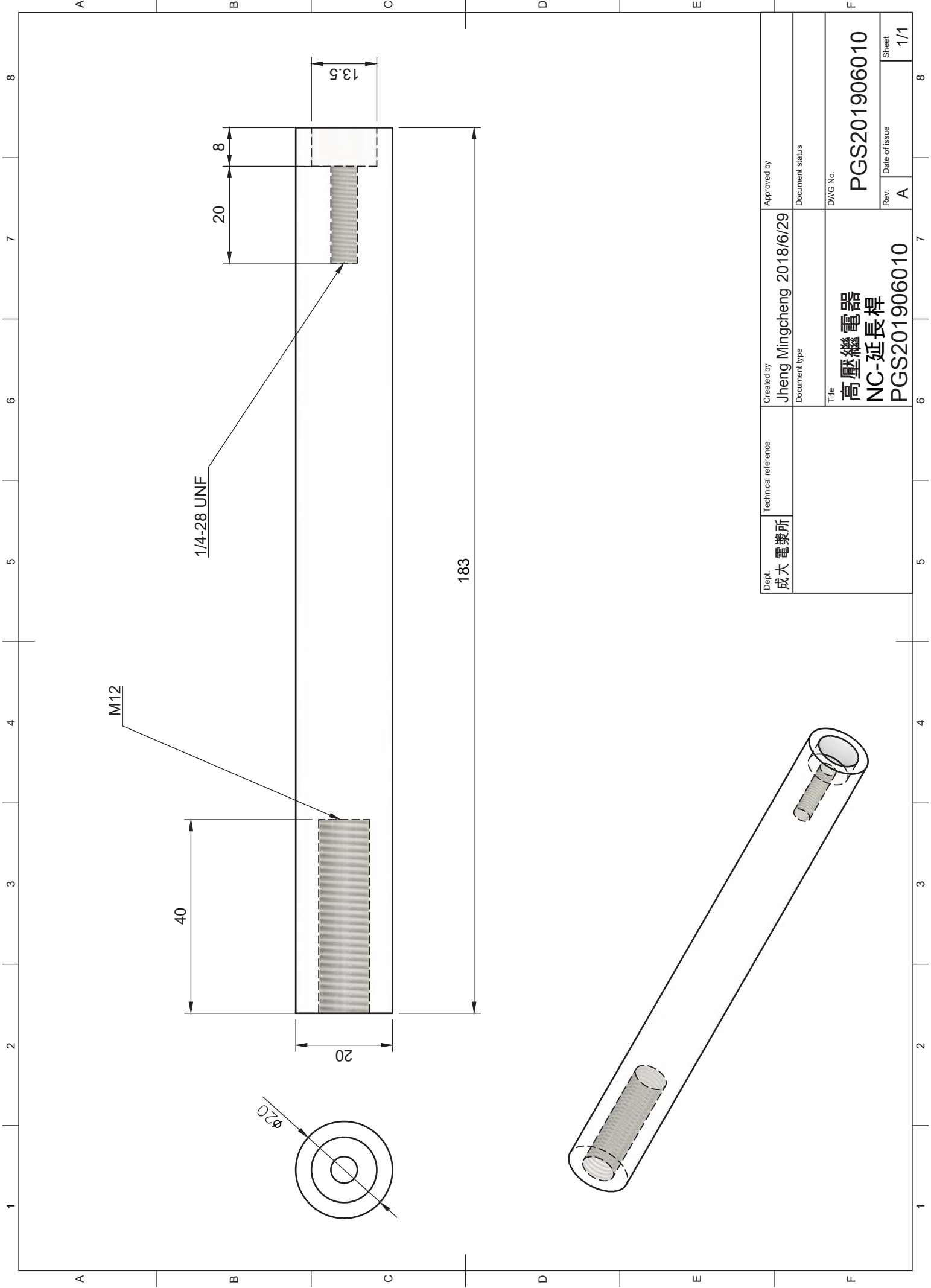
Dept. 成大電漿所	Technical reference	Created by Jheng Mingcheng 2018/6/29	Approved by
		Document type	Document status
			DWG No.
		Title 高壓繼電器 電極架配件	PGS201806007-MCJ
		Rev.	Date of issue
		A	1/1



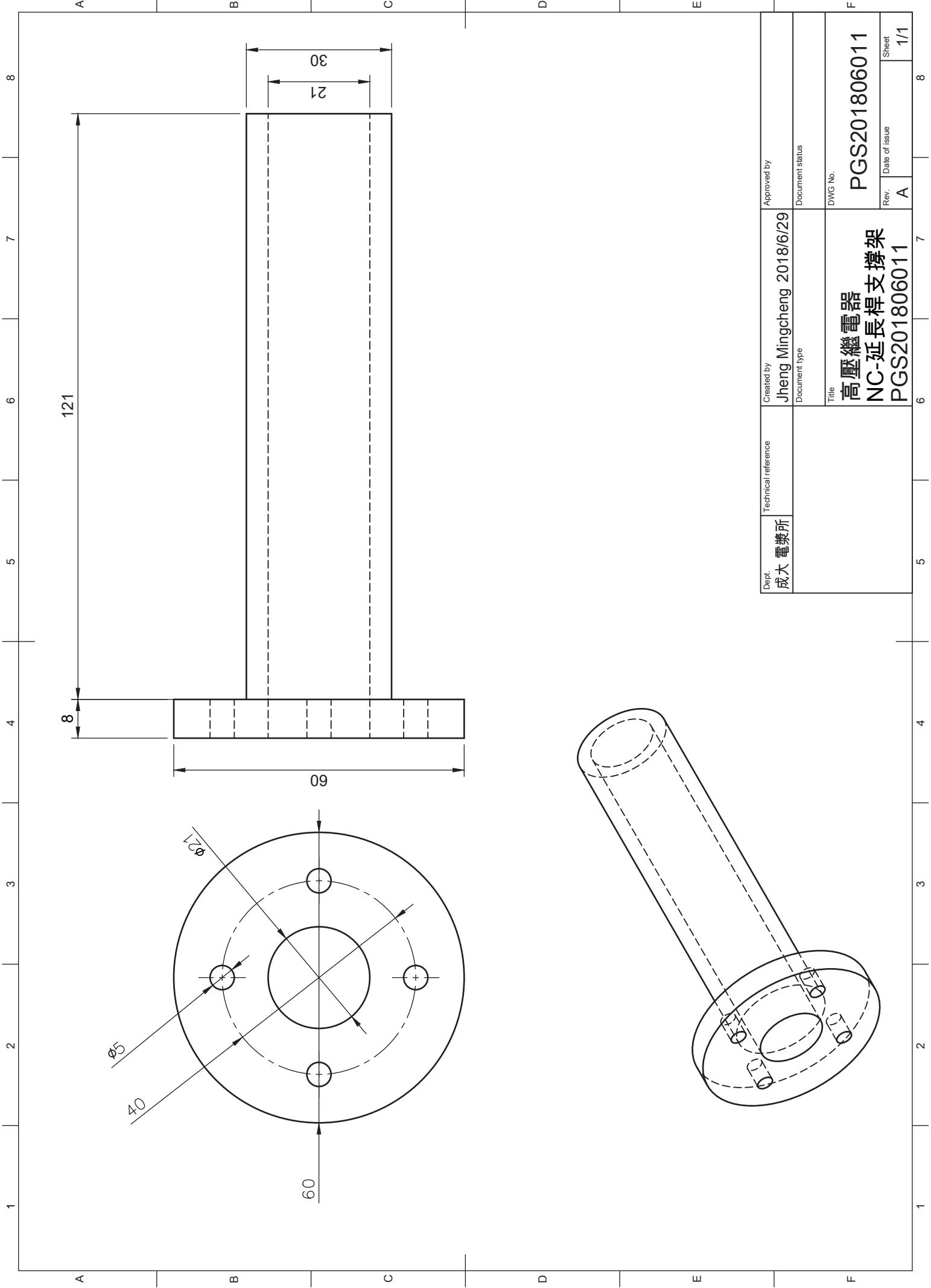
Dept. 成大 電機所	Technical reference	Created by	Approved by		
		Document status			
		Document type	DWG No.		
		Title	PGS201806013		
		高壓繼電器 NC-彈簧支撐架-板 PGS201806013			
			Rev.	Date of issue	Sheet
			A		1/1



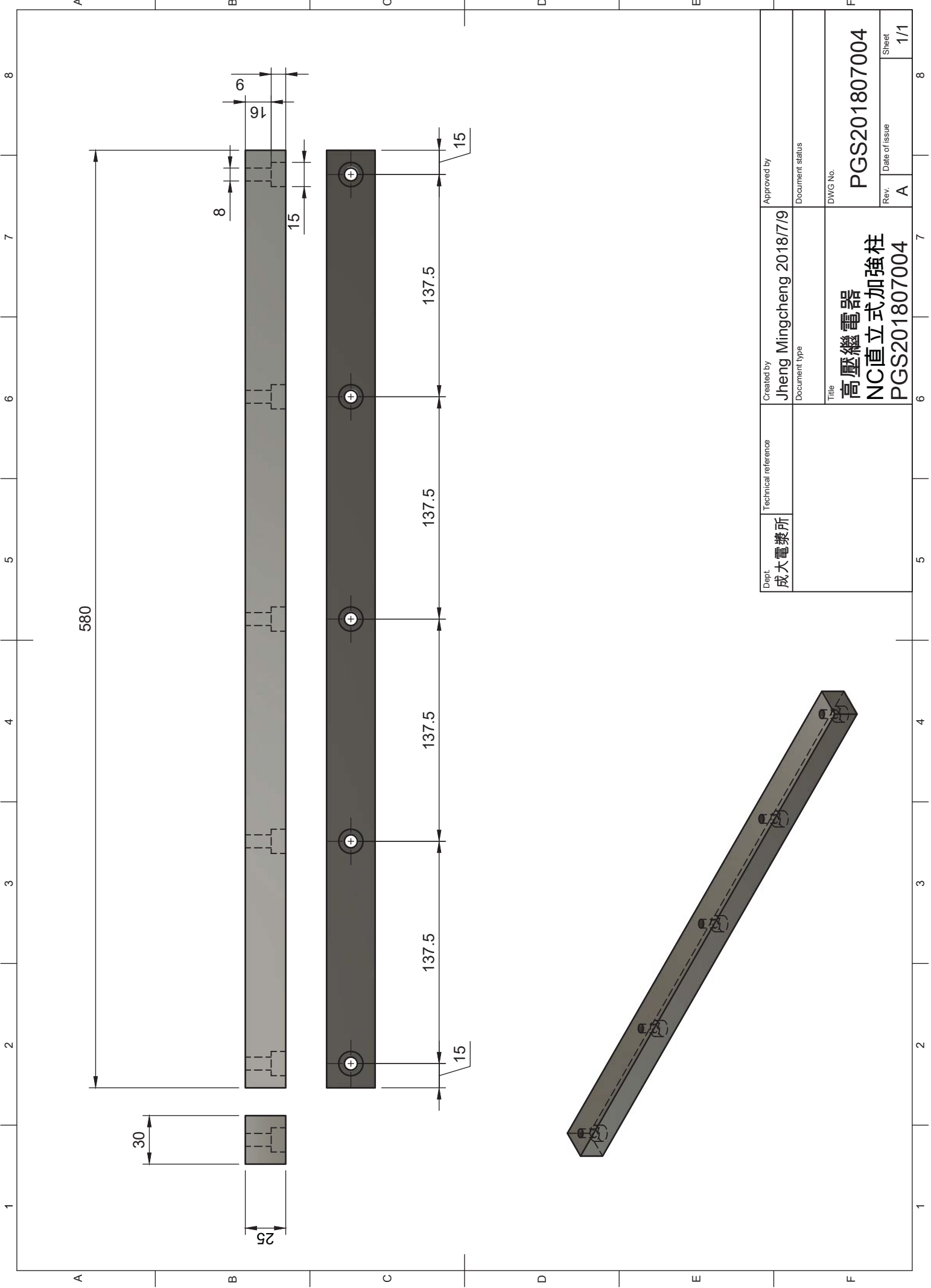
Dept. 成大電漿所		Technical reference	Created by Jheng Mingcheng 2018/6/29	Approved by
			Document type	Document status
			DWG No.	
		Title 高壓繼電器 NO-電擊板 PGS201806015		PGS201806015-MCJ
			Rev. A	Date of issue
			Sheet 1/1	



Dept. 成大電機所		Technical reference		Created by Jheng Mingcheng 2018/6/29		Approved by			
				Document type		Document status			
				Title 高壓繼電器 NC-延長桿 PGS201906010			DWG No.		PGS201906010
							Rev. A		
				Date of issue		Sheet 1/1			



Dept. 成大 電機所	Technical reference	Created by Jheng Mingcheng 2018/6/29	Approved by	
		Document type	Document status	
		Title	DWG No.	
		高壓繼電器	PGS201806011	
		NC-延長桿支撐架		
		PGS201806011		
		Rev.	Date of issue	Sheet
		A		1/1



Dept. 成大電漿所	Technical reference	Created by Jheng Mingcheng 2018/7/9	Approved by
		Document type	Document status
		DWG No.	
		PGS201807004	
		Rev. A	
		Date of issue	
		Sheet 1/1	

高壓繼電器
NC直立式加強柱
PGS201807004

附錄六. 繼電器氣流大小計算

型號:NCMKB075-0400S 的工作範圍有做動最低氣壓值：30.1psi (2.11 kgf/cm²)、伸縮速度

v：5~50 cm/s。而此氣動閥的腔體積面積 A：0.442 sq.inch (6.452cm²)。

假設流量為 Q= x [L/min] (= $x * \frac{1000}{60} [\frac{cm^3}{s}]$)，氣動閥伸縮速度 v 介於 5 到 50 cm/s，使用流量

等式：

$$\frac{Q}{A} = v$$

將 $Q=x * \frac{1000}{60}$ 、A = 6.452代入流量等式，得到

$$\frac{1000}{60}x = 6.452v$$

將 v = 50 和 v = 5 分別代入得到流量 Q 的極大值為 19.35 [L/min] 與極小值 1.93 [L/min]。

附錄七. 軌道間隙開關內部氣體使用的流速計算

假設 A 氣體以流速 v 流入體積 V 盒子中，流入口與流出口口徑一樣且有一樣的流速。其中流速 v 為 $v = x \left[\frac{L}{\min} \right] = x * \frac{1000}{60} \left[\frac{cm^2}{s} \right]$ ，流入體積 V 為 $40*24*7.5 \text{ cm}^3$ 。

令 A 氣體在箱子內有 $y(t) \text{ cm}^3$ ，經過 dt 的時間其變化為 dy ，有以下的等式：

$$dy = v * dt - \frac{y}{V} * v * dt$$

計算步驟如下：

整理得到：

$$\frac{dt}{1 - \frac{y}{V}} = v * dt = -\frac{V dy'}{y'} \quad (y' = 1 - \frac{y}{V})$$

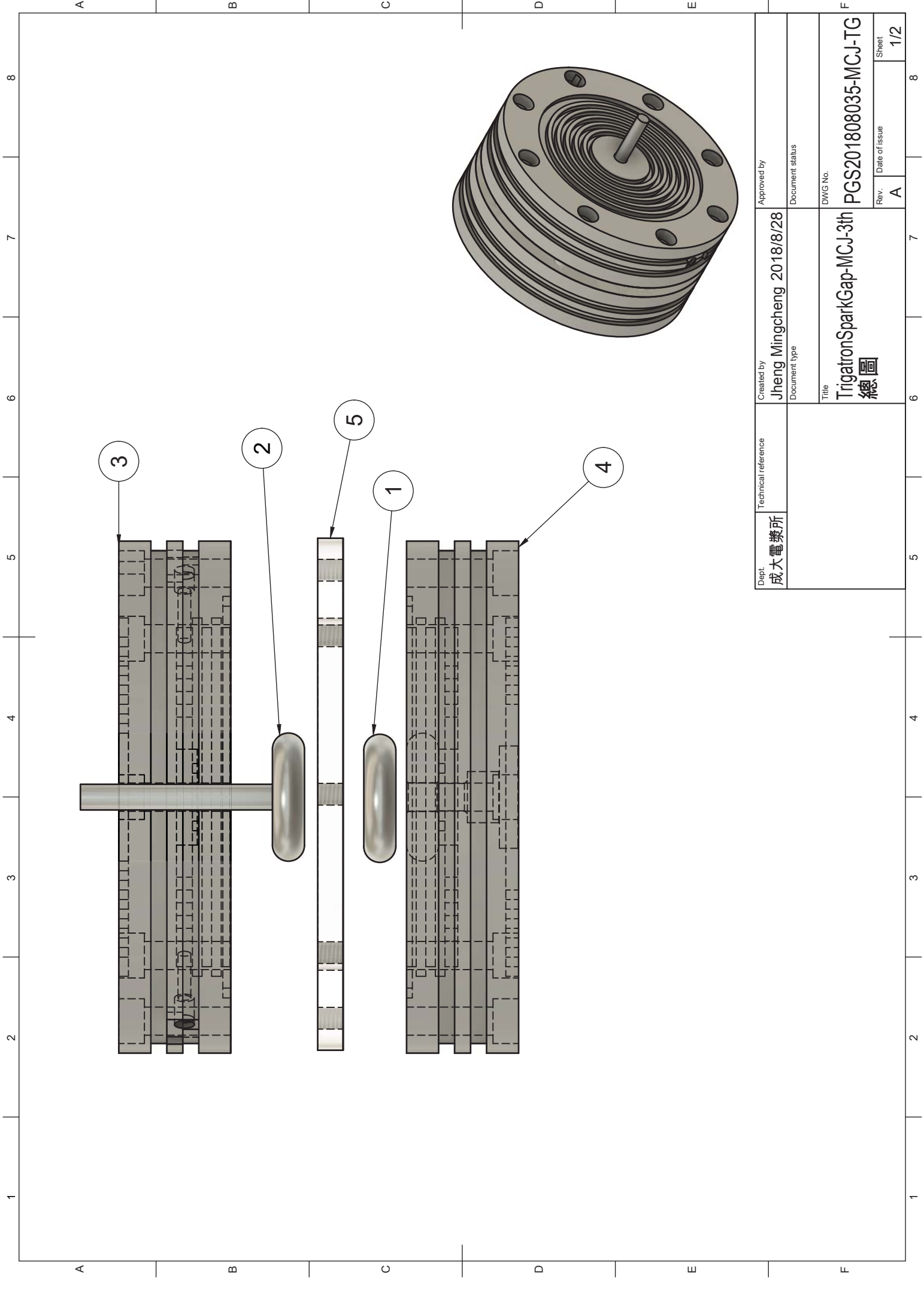
解微分方程式得到氣體 A 濃度方程式為

$$\frac{y}{V} = 1 - e^{-\frac{t}{V}}$$

由於盒子的體積內部還有其他元件，我使用體積的一半當作一個比較實際的參考值，氣體流量使用參數 $x = 3、6、9$ 。流動時間參數使用 $t = 120、180 \text{ [s]}$ 。得到使用流速為 $x \text{ [L/min]}$ 的氣體 A，經過時間 t 秒後，體積為 V 之盒子內部氣體 A 濃度[%]。將這些參數排列組合得到的 12 結果如下表。此表供未來系統規劃之參考。

參數組	V	t	x	%
1	432	120	3	56.5
2	432	120	6	81.1
3	432	120	9	91.8
4	432	180	3	71.3
5	432	180	6	91.8
6	432	180	9	97.6
7	216	120	3	81.1
8	216	120	6	96.4
9	216	120	9	99.3
10	216	180	3	91.8
11	216	180	6	99.3
12	216	180	9	99.9

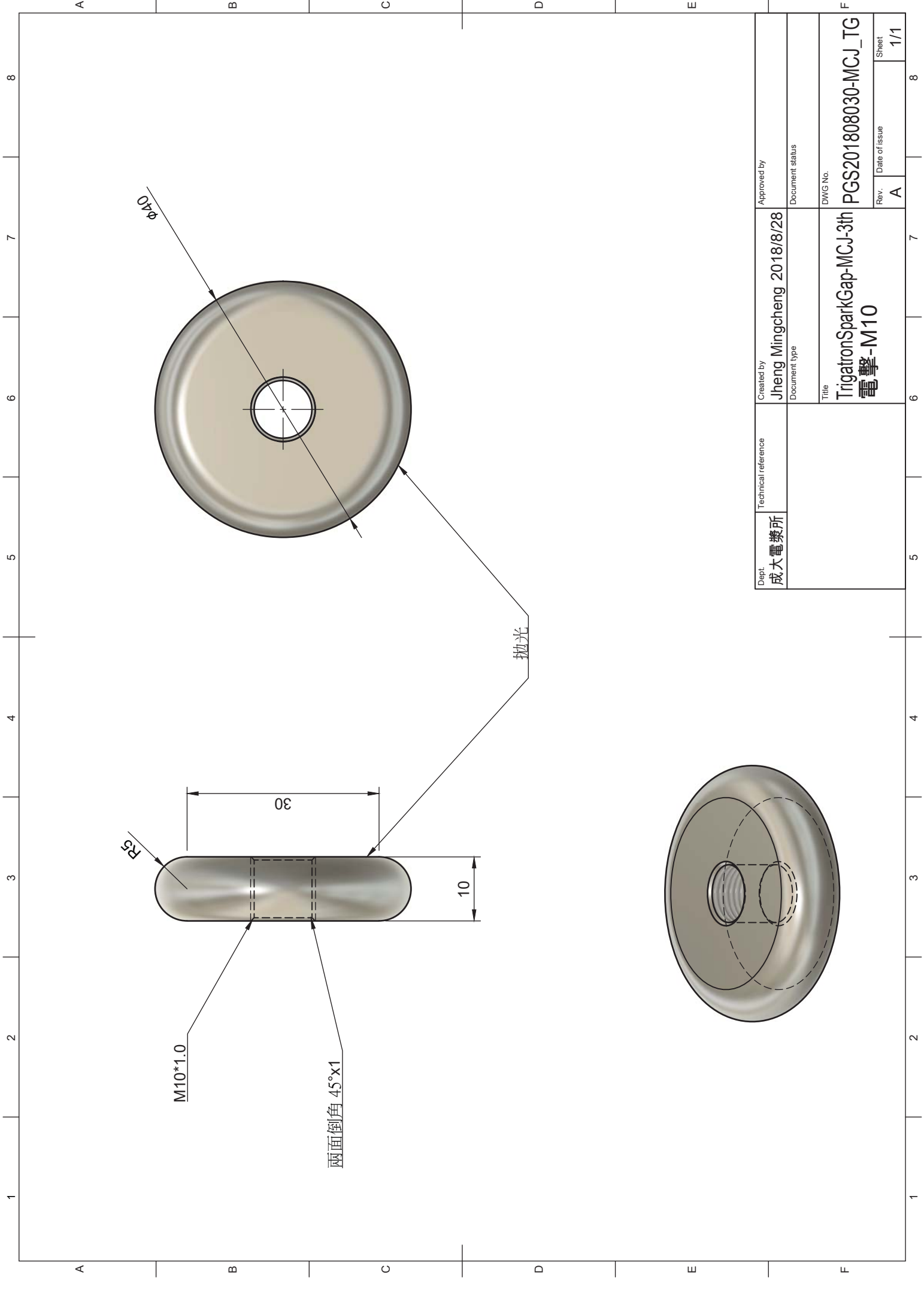
附錄八. Trigatron 工程圖



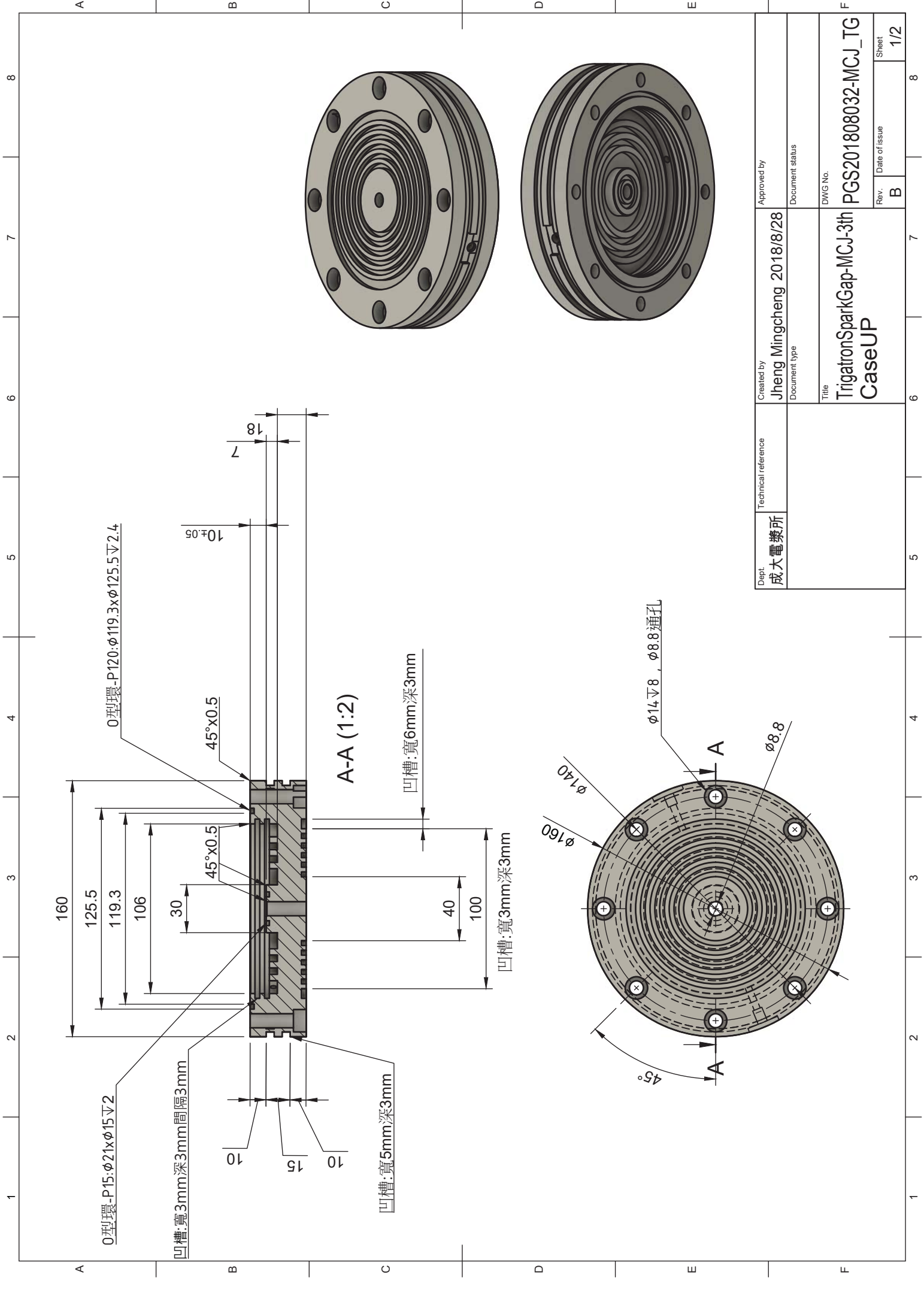
Dept. 成大電漿所	Technical reference	Created by		Approved by	
		Jheng Mingcheng 2018/8/28			
		Document type		Document status	
		Title		DWG No.	
		TrigatronSparkGap-MCJ-3th 總圖		PGS201808035-MCJ-TG	
		Rev.		Date of issue	
		A		Sheet 1/2	

明細表					
項目	數量	工程圖圖號	中文名稱	英文名稱	材質
1	1	PGS201808030-MCJ-TG	電極M10	Electrode-M10	不鏽鋼
2	1	PGS201808031-MCJ-TG	電極M8	Electrode-M8	不鏽鋼
3	1	PGS201808032-MCJ-TG	上蓋	CaseUp	POM
4	1	PGS201808033-MCJ-TG	下蓋	CaseDown	POM
5	1	PGS201808034-MCJ-TG	隔板	Gasket-8mm	POM

Dept 成大電漿所	Technical reference	Created by Jheng Mingcheng 2018/8/28	Approved by	
		Document type	Document status	
		Title TrigatronSparkGap-MCJ-3th 總圖	DWG No.	
		Rev. A	Date of issue	Sheet 2/2

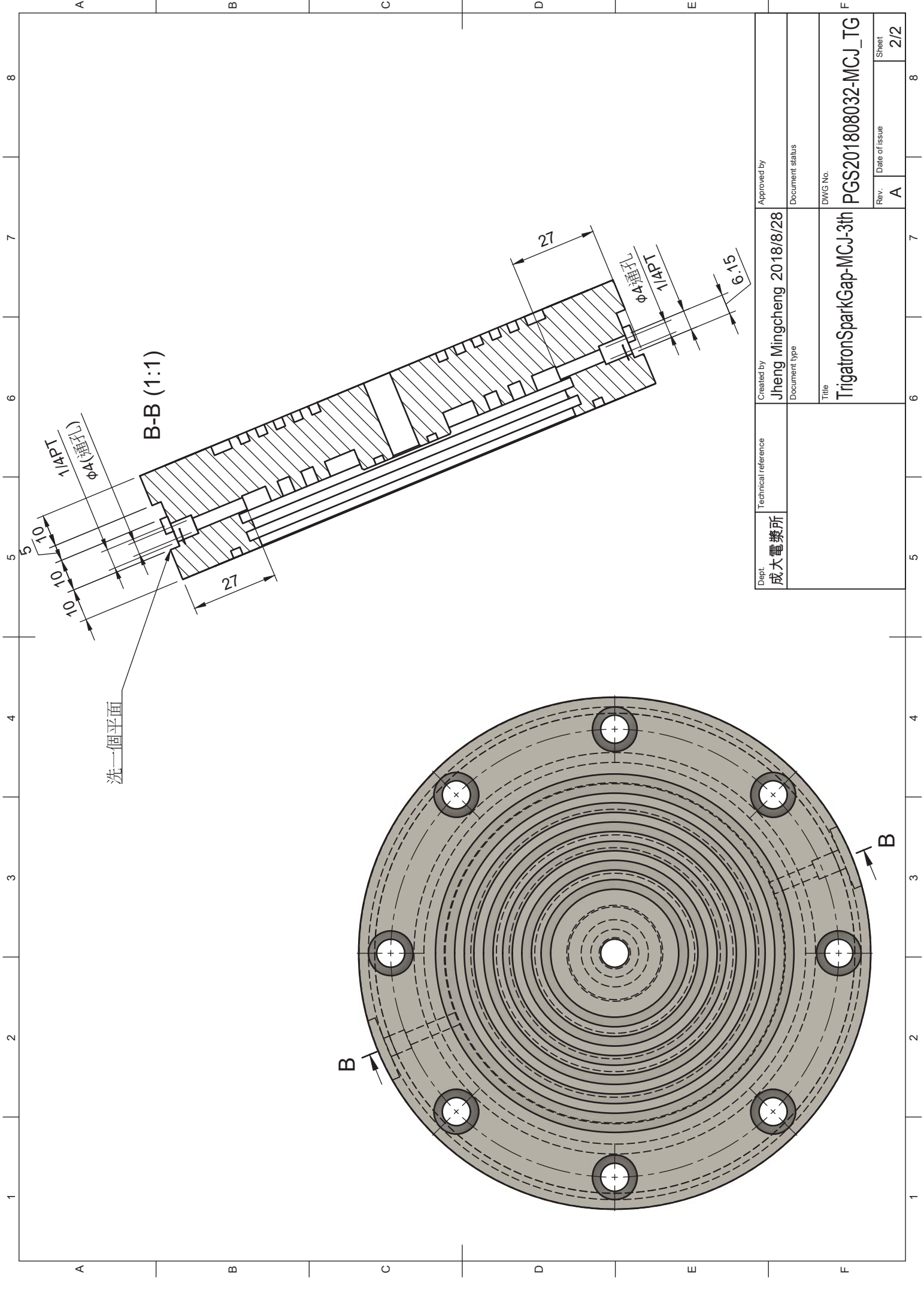


Dept. 成大電漿所	Technical reference	Created by Jheng Mingcheng 2018/8/28	Approved by	
		Document type	Document status	
		Title TrigatronSparkGap-MCJ-3th 電擊-M10	DWG No. PGS201808030-MCJ_TG	
		<table><tr><td>Rev. A</td><td>Date of issue</td><td>Sheet 1/1</td></tr></table>		Rev. A
Rev. A	Date of issue	Sheet 1/1		

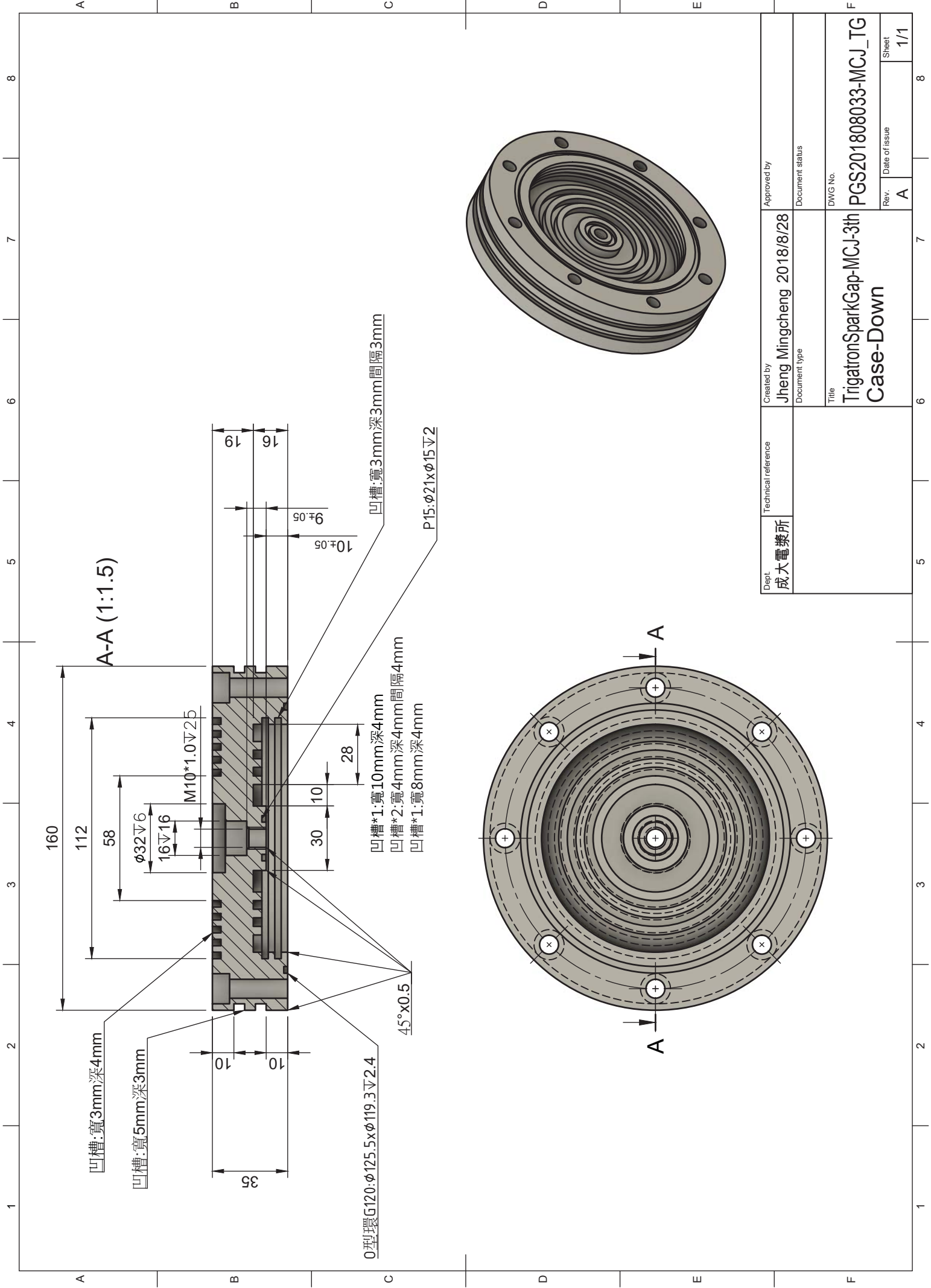


Dept. 成大電漿所	Technical reference	Created by Jheng Mingcheng 2018/8/28	Approved by
		Document type	Document status
		DWG No.	
		Title TrigatronSparkGap-MCJ-3th CaseUP	
		Rev.	Date of issue
		B	
		Sheet	1/2

F



Dept. 成大電漿所	Technical reference	Created by Jheng Mingcheng 2018/8/28	Approved by	
		Document type	Document status	
		Title	DWG No.	
			PGS201808032-MCJ_TG	
			Rev.	Date of issue
			A	
			Sheet	2/2



Dept. 成大電漿所		Technical reference	Created by Jheng Mingcheng	2018/8/28	Approved by
			Document type		Document status
			DWG No.		
			Title		
			TrigatronSparkGap-MCJ-3th		
			Case-Down		
			Rev.	Date of issue	Sheet
			A		1/1

PGS201808033-MCJ_TG

附錄九. 3D 列印 PVC 管製具工程圖

