

印刷電路板之絲印標示設計優化演算法

薛善庭^{*1}、鄭凱方^{*2}、戴仕庭^{*3}、呂翊銓^{*4}

國立中央大學電機工程學系、桃園市、320317、中華民國

{ee110501506sandy0912^{*1}, kevin71xb37^{*2}, taishihting^{*3},
yichuan921030^{*4}}@g.ncu.edu.tw

Abstract

Silkscreen marking design involves drawing silk screen, part number, and specifications around the periphery and leads of a component. This marking is important in the printed circuit board design process as it aids in the installation and maintenance of circuits in the future. To deal with the impact of oversized silk screen marking on component layout and circuit wiring, as well as to ensure that the distance between the silk screen and the copper foil is appropriate to meet restrictions, we have designed an algorithm for drawing silk screen marking that can achieve the highest score. The algorithm first draws the silk screen based on the appearance of the component, and then removes the silk screen that overlaps the copper foil. The remaining segments of the silk screen are classified according to their extreme values, and different combinations of silk screens are then evaluated using our custom scoring system to select the best result and optimize the silk screen marking design process. In the 2022 International Conference on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems (2022 ICCAD) Problem E competition, our algorithm achieved scores of 99.5 or higher in both Case 1 and Case 2, and a score close to 90 in Case 3, ultimately winning the competition with honors.

Keyword: 2022 International Conference on Computer-Aided Design (ICCAD), Electronic Design Automation (EDA), Geometry Graphics, geometrical buffer, Silkscreen, Copper

關鍵字: 2022 積體電路電腦輔助設計軟體製作競賽、電子設計自動化、幾何圖形、圖形擴張、絲印標示、銅箔

摘要

絲印標示設計為在零件外圍及接腳繪製絲印、零件編號與規格，此標示有助於往後電路的安裝及維修，是印刷電路板設計流程中重要的一環。為了改善絲印標示面積過大對零件佈局及電路佈線的影響，以及絲印與銅箔距離是否適當以符合限制，我們設計一套能獲得最高評分的絲印標示繪製演算法，先根據零件外觀繪製絲印，再將絲印與銅箔重疊處去除。將剩餘的絲印片段根據其所含的極值分類，接著將不同絲印組合丟入自製的評分系統進行評估，挑選出評分最高的結果，優化絲印標示設計流程。在 2022 積體電路電腦輔助設計軟體製作競賽（2022 ICCAD）的 Problem E 中，我們的演算法在 Case1 與 Case2 評分中皆取得了 99.5 分以上的成績，在 Case3 評分中取得的結果亦接近 90 分，最後在競賽中榮得特優的佳績。

1 介紹

在印刷電路板設計流程中，可大致分為前期準備、器件佈局、佈線及檢查四大階段，其中，佈線階段包含了絲印的繪製及調整，此階段為將絲印繪製於電路板並調整絲印在電路板上的位置，以避免往後於印刷電路板製程中擺放零件位置時產生錯位，影響產品品質，甚至於造成電路板報廢。另外，根據不同企業的需求，可增加額外文字於電路板上，並且需在此階段確保這些文字在電路板上清晰可見。

儘管絲印標示設計看似簡單，現今此流程仍然面臨許多難題。舉例來說，對於印刷電路板的製程而言，絲印油墨的凸起可能會影響零件的焊接。[1]另一方面，對於絲印標示的設計而言，需在電路板上保留足夠空間標記元件的基本資料及型號，並且，必須嘗試將絲印限制在一側，可將成本降低。[2]

此次設計的演算法主要於處理以下問題——如何減小絲印標示覆蓋的面積以增加電路佈線時可使用的空間、使絲印與銅箔以及零件之間保持適當距離以避免絲印標示不清晰或是影響銅箔上錫，以及使絲印標示與零件外觀相似度愈高愈佳，以增加辨識度並且減少絲印標示覆蓋的面積，最後優化絲印標示繪製的結果。上述問題可以大致區分為以下四項限制，分別為完整覆蓋限制、最短絲印限制、絲印與零件最短距離限制以及絲印與銅箔最短距離限制，將在下一段完整說明關於限制的條件。

論文內容將以下列順序編排：第二部分將介紹絲印繪製演算法所需符合的規範及限制，和對於問題的描述，接著，演算法的架構及解決上述問題的方法將於第三部分詳細陳述。第四部分將展示透過此演算法計算獲得絲印繪製於電路板上

的結果，最後，結論及致謝將分別呈現於第五部

表 1. 專有名詞對照表

英文	中文	名詞解釋
assemblygap	絲印標示與元件之限制距離	
coppergap	絲印標示與銅箔範圍之限制距離	
silkscreenlen	絲印標示最短長度限制	
line	線段	包含起點與終點的直線線段資料
arc	弧線	包含起點、終點、圓心及弧線旋轉方向的弧線線段資料
element	元素	單一線段或弧線的統稱
assembly	元件	由線段與弧線組成的封閉圖形
copper	銅箔	由線段與弧線組成的封閉圖形
silkscreen	絲印標示	由線段與弧線組成的封閉或非封閉圖形

分及第六部分，第七部分為參考文獻來源。

2 前言

此部分將會介紹絲印標示問題的描述，以及進行絲印標示時的限制與優劣衡量標準，內容主要參考 2022 ICCAD 競賽 Problem E 的敘述。在此先定義絲印標示問題中使用的專有名詞，詞彙及其代表的意義整理於表 1。

2.1 絲印標示基本限制與目標

絲印標示的基本限制有以下幾條：

- (1) 完整覆蓋限制：絲印標示所構成矩形範圍需完整覆蓋外觀。
- (2) 最短絲印限制：所有絲印標示中單一連續線段之長度皆大於等於絲印標示最短長度限制。
- (3) 絲印與零件最短距離限制：所有絲印標示與元件之最短距離皆大於等於絲印標示與元件之限制距離。
- (4) 絲印與銅箔最短距離限制：所有絲印標示與銅箔範圍之最短距離皆大於等於絲印標示與銅箔範圍之限制距離。

本問題的目標為在滿足前述限制下，提高絲印標示的總評分，接下來介紹評分的四項標準。

2.2 絲印標示範圍評分 (S1)

絲印標示範圍評分的方程式由絲印標示之座

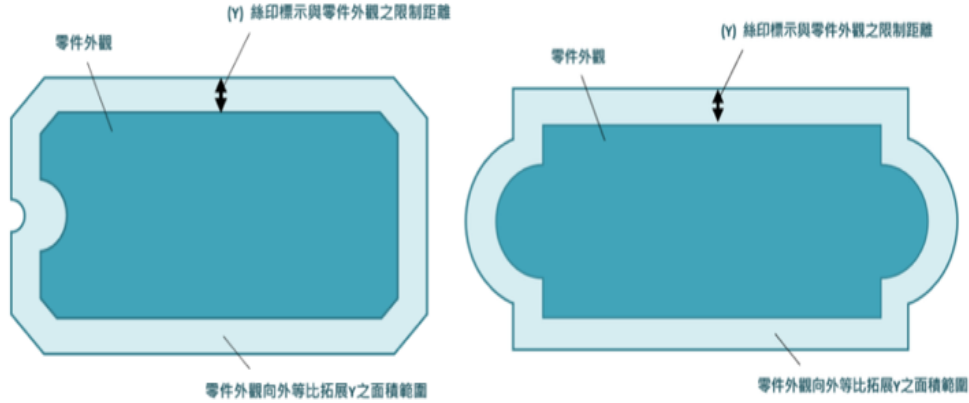


圖 1. 元件向外等比拓展之面積範圍示意圖

標極限值構成的矩形面積 A_{silk} 與元件向外等比拓展 $assemblygap$ 之面積範圍 A_{assbuf} 共同構成。評分計算方式如方程式 1 所示：

$$S_1 = \left(2 - \frac{A_{silk}}{A_{assbuf}} \right) \times 25\% \quad (1)$$

下圖 1 為元件向外等比拓展之面積範圍示意圖，提高此部分評分之重點應為在符合第一項限制下盡量減少 A_{silk} 之大小。

2.3 絲印標示與外觀相似度評分 (S2)

絲印標示與外觀相似度評分分為兩部分，第一部分受到絲印標示總長 L_{silk} 與元件向外等比拓展 $assemblygap$ 之周長 C_{assbuf} 的比例影響，第二部分則受到 Line 數量差 d_{line} 加 Arc 數量差 d_{arc} 與元件元素數量 $N_{element}$ 加銅箔數量 N_{copper} 的比例所影響。評分計算方式如方程式 2~4 所示：

$$S_2 = \left(2 - \frac{L_{silk}}{C_{assbuf}} \right) \times 15\% + \left(1 - \frac{d_{line} + d_{arc}}{N_{element} + N_{copper}} \right) \times 10\% \quad (2)$$

$$d_{line} = |N_{l_{ass}} - N_{l_{silk}}| \quad (3)$$

$$d_{arc} = |N_{a_{ass}} - N_{a_{silk}}| \quad (4)$$

其中數量差分別由元件之 Line 數量 $N_{l_{ass}}$ 與絲印標示之 Line 數量 $N_{l_{silk}}$ 相減，以及元件之 Arc 數量 $N_{a_{ass}}$ 與絲印標示之 Arc 數量 $N_{a_{silk}}$ 相減得出。在此部分的評分中，應減少絲印標示的總長度，並減少絲印標示與元件的線段數量差及弧線數量差，以達到最佳分數。

2.4 絲印標示與銅箔範圍之平均距離評分 (S3)

此部分的目標為在給定絲印標示與銅箔範圍

之限制距離 L_{copper} (coppergap) 之情況下縮短絲印標示與銅箔範圍之平均距離 T_{copper} ，評分計算方式如方程式 5 所示：

$$S_3 = \left(1 - \frac{(T_{copper} - L_{copper}) \times 10}{L_{copper}} \right) \times 25\% \quad (5)$$

2.5 絲印標示與元件之平均距離評分 (S4)

此部分的目標為縮短絲印標示與元件之平均距離，評分計算方式如方程式 6 所示：

$$S_4 = \left(1 - \frac{(T_{outline} - L_{outline}) \times 10}{L_{outline}} \right) \times 25\% \quad (6)$$

3.正文

3.1 流程

我們首先介紹本演算法從初始之元件與銅箔資料到產生出最終之絲印圖形的整體流程，流程圖附於圖 2。

首先我們需要得到符合絲印與元件最短距離限制及絲印與銅箔最短距離限制的絲印，因此在獲得給定的元件與銅箔的位置資料後，會以等比擴張的方式產生出絲印與銅箔擴張範圍（章節 3.2），並将被銅箔擴張範圍覆蓋的絲印刪除以符合限制（章節 3.3）。

接著刪除在過程中產生出長度過短的絲印，以符合最短絲印限制。

在經過上述程序後，有時會遇到絲印所構成的矩形並未完整覆蓋元件的情況，此時要進行極值絲印的繪製，以滿足完整覆蓋元件限制（章節 3.4）。

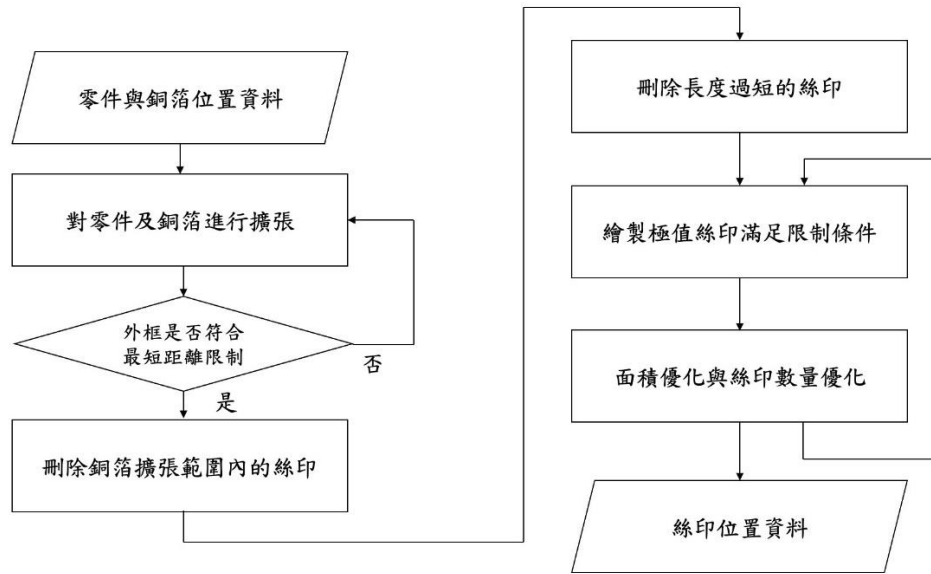


圖 2. 整體流程圖

符合限制的絲印還可以進行面積與絲印數量的優化（章節 3.5、3.6），此過程會產生多組滿足條件的解，因此會在經過比對後挑選出一組最佳解進行輸出（章節 3.7）。

3.2 圖形向外等距離擴張

將元件與銅箔等距擴張的第一步需要進行前置作業、將圖形定義完整；根據題目限制，元件與銅箔皆為簡單封閉圖形，且由一個到無限多個線段或弧線構成。在滿足前置作業的調整後，可確保接下來使用兩元素取交點函式求圖形外擴的有效性，最後將由元件擴張的圖形進行 3.7.3 絲印自動校正，而由銅箔擴張的圖形進行 3.2.4 銅箔圓角函式，以達到分數最大化。

3.2.1 前置作業

- 前置作業共分 4 項，須按照 1 至 4 順序執行。
1. 將元素存取順序轉為順時針；經此步驟可發現相對於圖形而言，弧線本身若為順時針（CW）則該弧向外凸，若為逆時針（CCW）則該弧向內凹。
 2. 將連續的同心弧線合併為一個弧線；可避免擴張後弧線重疊或無交點的問題，也能減少接下來的運算量。
 3. 將內凹小弧用線段代替（內凹小弧定義為 CCW 且半徑小於擴張距離的弧線、取而代之的線段兩端分別為弧線的兩端點）；本程序是因為此類的弧線在圖形擴張取交點時會導致無交點或是反而外凸的情形。
 4. 合併連續且平行的線段；可避免擴張後相鄰線段重疊而無法取交點的問題。

3.2.2 兩元素取交點函式

輸入為任意兩元素，因為交點數量可能有 0 個到 2 個，所以輸出為點的 vector 儲存方式。尋找交點的概念是透過將線段延伸為直線，弧線延伸成圓形，並透過方程式求解；若無解則無交點，若有解則需要再判斷是否位於兩元素之上。

3.2.3 外擴圖形定位

以單一個簡單封閉圖形為單位進行處理；如果圖形只含有一個角度為 360 度的弧線，我們可以將他視為一個圓，並回傳一個半徑加上外擴寬度且角度為 360 度的弧線。若圖形具多個元素，我們會將相鄰兩個元素同時進行外擴：弧線外擴需透過弧線（起點(p.x,p.y),終點(q.x,q.y),圓心(c.x,c.y),方向性（CW or CCW））的方向性判斷其半徑（順時針則其半徑放大外擴距離；逆時針則其半徑縮小外擴距離），並維持相同圓心且延伸為圓即可得外擴圓（詳閱弧線轉換圖形方程式 7）。

$$\begin{aligned} & (x - c.x)^2 + (y - c.y)^2 \\ & = ((c.x - p.x)^2 + (c.y - p.y)^2) \end{aligned} \quad (7)$$

線段（起點(p.x,p.y),終點(q.x,q.y)）外擴方向需透過外積決定，因為在前置作業將元素順序轉為順時針，若我們將原本線段視為一個起點指向終點的向量，外擴方向則為外積為正值的法向量方向，而外擴向量的大小 d 則為圖形擴張距離；得到外擴平移向量 $\vec{t}(t.x, t.y)$ 後（詳閱方程式 8），將原本線段延伸為直線方程式（詳閱方程式 9），並將該直線方程式平移外擴向量得外擴直線。

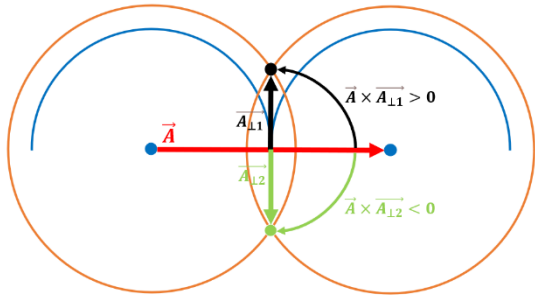


圖 3. 選擇交點特例（兩外凸（CW）相切弧線）

$$t^-(t.x, t.y) = \frac{(p.y - q.y, q.x - p.x)}{|(p.y - q.y, q.x - p.x)| \times d} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} & (q.x - p.x)(y - p.y + t.y) \\ & = (q.y - p.y)(x - p.x + t.x) \end{aligned} \quad (9)$$

使用 3.2.2 兩元素取交點函式找出這兩個元素外擴直線或圓形的交點，若不只一個交點，則選擇與外擴前對應交點距離較近的點作為外擴點，除了一個特例情況，如圖 3 所示。以上述概念完整搜索整個圖形，找出外擴圖形所有的點，並透過外擴前對應的元素，來決定外擴圖形元素的性質（如果原圖形是線段則對應到線段，如果是弧線則對應到同圓心、同旋轉方向的弧線）。

若外擴前為相切外凸弧線（藍線），則依照元素順序，做一個從第一個圓心指向第二個圓心的向量（紅色箭頭），並選擇法向量外積為正的方向（黑色箭頭）為外擴點（黑點）。

3.2.4 銅箔圓角函式

為了等距離擴張的外擴圖形，更加貼合原形，我們在角落處會採用圓角，然而元件因為有圖形相似度的考量，並不會使用圓角功能。圓角進行方法是在兩元素交點處加入一弧線（圓心擴張前交點，半徑為擴張距離，端點為弧線與相鄰兩元素的交點），但有數種情況不需使用圓角，分為 3 種情況討論，如下表 2。

3.3 初步形成絲印資料

為了使絲印標示與銅箔距離符合絲印與銅箔最短距離限制，我們利用 3.2 圖形向外等距離擴張銅箔，得到銅箔擴張外框，以多個封閉組件儲存。對既有的元件擴張外框分段，形成多個元素，接著扣除不滿足上述限制的元素，形成

表 2. 不需要進行圓角的情況

線段&線段	弧線&弧線	線段&弧線
任一擴張後的線段延伸成直線，與原形的另一個線段有交點。	擴張後的兩弧線延伸成圓，皆與原形的另外一個弧線有交點。	擴張後的元素延伸成直線與圓，皆與原形的另一個元素有交點。

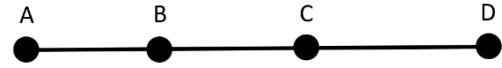


圖 4. 元件擴張外框某元素示意圖

初步的絲印標示。因此區分為兩部分：絲印分段及刪除與否判斷。

3.3.1 絲印分段

首先使用 3.2.2 兩元素取交點函式尋找元件擴張外框與銅箔擴張外框的交點並儲存於 vector 中（下稱交點容器），如圖 4，假設此為元件擴張外框的某元素（下稱為母元素），點 A 及 D 為母元素的起點與終點，點 B、C 為母元素與銅箔擴張外框的交點，儲存於交點容器中。

目標是將母元素分割成 AB、BC、CD 三元素（下稱為子元素）。判別母元素起點 A 與所有交點（B、C）形成的元素長度，形成元素最短的交點則為分割線段的終點；也就是說，在此圖中，點 A、點 B 形成的元素長度最短，則可形成子元素 AB。將 B 點紀錄為下一個子元素的起點，並從交點容器中刪除後，再次從交點容器尋找與母線段起點 A 形成元素最短的交點，形成下個子元素。以此類推直到沒有交點後，此時子元素的起點標註（圖中為點 C）可與母元素終點形成最後一子元素（CD），達成絲印分段。

3.3.2 刪除與否判斷

將原有元件擴張外框分段之後，每段可能被銅箔擴張範圍覆蓋，或是沒有被銅箔擴張範圍覆蓋，不可能兩者皆是。因此，我們取每一分段的中點，對其作一向 X 軸正向的射線，若此射線與銅箔擴張外框的某單一組件有奇數個交點，表示此中點被銅箔擴張範圍覆蓋，此分段亦被此銅箔擴張範圍覆蓋；若此射線與銅箔擴張外框的某單一組件的交點為偶數個，則此分段不被此單一組件覆蓋，但仍須與其他銅箔擴張組件作判斷。

3.4 絲印極值處理

在 3.3 初步形成絲印資料後，剩下的絲印將根據題目對於極值的限制，檢查是否缺少特定極值的絲印，並加以補足，符合題目要求。最後，根據每個組件，也就是各個單一連續絲印，其所含的極值進行初步分類，以便於在 3.7 自我評分系統中進行篩選。

3.4.1 繪製缺少的極值絲印

當絲印經過 3.3 初步形成絲印資料處理後，將所得到的絲印與 3.2 圖形向外等距離擴張所得元件

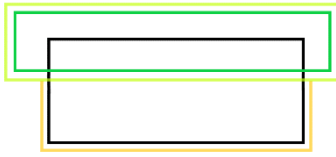


圖 5. 缺少 y 方向最大值之絲印（綠色為銅箔，淺綠色為銅箔擴張外框，黑色為元件，橘色為絲印）

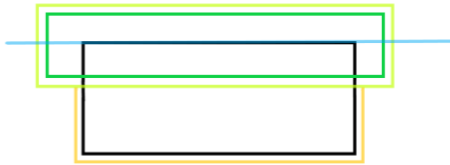


圖 6. 輔助線繪製（淺藍色為輔助線）

等距離向外擴張絲印的四個極值——分別是 x 最大值和最小值以及 y 最大值和最小值比較，若缺少任一極值的絲印，例如：y 方向最大值的絲印，則必定是因為銅箔擴張範圍覆蓋導致絲印於 3.3 初步形成絲印資料中被去除，如圖 5 所示。

為了補足缺少的極值絲印，會先於缺少極值處畫一條輔助線（此處為 y 等於 3.2 圖形向外等距離擴張所產生絲印最大值的水平線），如圖二，找出此輔助線與距離最近銅箔之擴張外框的交點，接著，從上述相交處沿著銅箔擴張外框（淺綠色）向兩側延伸找到與絲印的交點，取距離最短者，即可繪製缺少的極值絲印。

3.4.2 極值絲印分類

在經過 3.3 初步形成絲印資料及 3.4.1 繪製缺少的極值絲印處理後，將得到的絲印根據 3.2 圖形向外等距離擴張所得元件等距離向外擴張絲印，其 x 方向的最大與最小值及 y 方向的最大與最小值進行初步分類，若得到的絲印其極值的絕對值大於 3.2 圖形向外等距離擴張絲印極值之絕對值，則分別歸為四類其中之一。

最後將分類結果分別儲存於以四個極值命名的 vector 中，與 3.6.2 選取必要絲印的結果合併，並在 3.7 自我評分系統會分別從四個 vector 中各取一條關鍵絲印進行排列組合，再做篩選及評分。

3.5 優化絲印資料

3.5.1 調整單一連續絲印長度

經過上述過程後，單一連續絲印之長度可能已不符合最短絲印限制，且以過短為多數。為了



圖 7. 某單一連續絲印示意圖

符合題目所需，我們重複儲存長度最長的元素資料。

例如圖 7：點 A 到點 D 為某單一連續絲印，而 \overline{AB} 、 \overline{CD} 為線段，BC 為弧線（順時針）。若 AD 長度小於最短絲印限制，當前儲存的絲印標示為 $\overline{AB} \rightarrow \text{弧線 BC (順時針)} \rightarrow \overline{CD}$ 。若弧線 BC 的長度為 \overline{AB} 、弧線 BC、 \overline{CD} 中最長的元素，則將儲存的絲印標示更改為 $\overline{AB} \rightarrow \text{弧線 BC (順時針)} \rightarrow \text{弧線 BC (逆時針)} \rightarrow \text{弧線 BC (順時針)} \rightarrow \overline{CD}$ 。

若最長的元素為起始元素或終點元素（圖 7 中為 \overline{AB} 與 \overline{CD} ）則嘗試單純加上一反向最長元素， $\overline{BA} \rightarrow \overline{AB} \rightarrow \text{弧線 BC (順時針)} \rightarrow \overline{CD}$ ，能讓減少過度增加線段數或弧線數，增加 2.3 絲印標示與外觀相似度評分（S2）。逐步使用此方法可符合最短絲印限制。

3.5.2 調整絲印線段數量與弧線數量

此時絲印資料可能會出現線段差與弧線差不為零的情形，為了提高 2.3 絲印標示與外觀相似度評分（S2），我們對既有的絲印資料做切分，使原某一元素以兩個同類型元素標籤標示，分段的方式為取中點，以此類推直到絲印線段數量與弧線數量夠多為止。圖 8 即為線段數量調整的變化圖。

我們設有最短長度限制以防止過度的切分造成浮點數不精確。因為前述過程只取出符合極值條件的絲印資料，絲印資料的線段數與弧線數相較於元件外框較無可能過多，故在此調整中並沒有減少絲印資料線段數與弧線數的部分。

若絲印資料中弧線數為零，而元件外框弧線數不為零，則將一條線段以一條半徑非常大、弧度非常小的弧線取代，再進行上述的切分方法調整弧線數量。反之，若絲印資料中線段數量為零，而元件外框線段數不為零，則會沿著一條弧

Line, 1.0000, 0.0000, 5.0000, 0.0000



線段數量過少

Line, 1.0000, 0.0000, 3.0000, 0.0000

Line, 3.0000, 0.0000, 5.0000, 0.0000

圖 8. 絲印資料線段數量調整變化圖

線做端點的切線，長度為絲印標示最短長度限制，再以進行切分調整線段數量。

3.6 面積優化

絲印標示在符合完整覆蓋元件限制的情況下，可以藉由縮小絲印標示之座標極限值構成的矩形面積來提高絲印標示範圍評分。在討論極限值相關的問題時，我們先將極值定義為圖形的水平極大值（xmax）、水平極小值（xmin）、垂直極大值（ymax）與垂直極小值（ymin），位於極值以內定義為坐標值小於等於極大值或大於等於極小值，位於極值以外則定義為坐標值大於極大值或小於極小值。縮小的方式是藉由去除位於元件之極值以外的絲印，使其仍然滿足完整覆蓋元件限制，但同時減少絲印標示範圍所構成的面積範圍。此部分的流程可分為三個步驟，分別為尋找極值線與絲印交點、分割絲印與選取必要絲印。

3.6.1 尋找極值線與絲印交點、分割絲印

由於完整覆蓋元件限制的滿足條件等價於「絲印標示之座標極值皆位於元件標示之極值上或以外」，因此我們在元件的四個極值繪製極值線，水平極大值（xmax）與水平極小值（xmin）處各繪製一條垂直直線，並在垂直極大值（ymax）與垂直極小值（ymin）處各繪製一條水平直線，並每次以一條極值線作為單位，對絲印標示進行共四次的處理。選定一條極值線後，尋找此極值線與絲印的交點。藉由這些交點可以將絲印分割為數段分別位於極值內與極值外的絲印線段，與極值線沒有任何交點的絲印將不會受到更動。

3.6.2 選取必要絲印

在此步驟中可以將不會影響完整覆蓋元件限制的絲印捨去，只留下必要絲印。首先我們留下原始絲印經過切割後，排序第一與最後一個絲印線段（component），這兩個絲印線段剛好會是距離銅箔最近的絲印，因此這樣的選取方式可以提高絲印標示與銅箔範圍之平均距離評分。保留的絲印將會經過判斷，並儲存於相應的四個容器中，如果該絲印的水平極大值等於元件的水平極大值，便會被儲存到 xmax_box 中，以此類推。利用這樣的儲存方式，在四個容器中各選出一個絲印，並刪除重複選取的絲印，就能組合出一個絲印標示之合法解，後續的自我評分系統即使用窮舉法來找出最高分的絲印組合。

3.7 自我評分系統

找出所有位於極值的絲印後，將開始檢查每一組絲印是否達標前述題目要求並為之評分。透過窮舉所有可能性，一旦評分系統找出錯誤，就會立即回報當次為 0 分，並開始評分下一組絲印；若當次評分為最高分，則會立即印出絲印位置並取代前一次最高分的答案。為了確保絲印位置的數值在四捨五入時不會出現過近的問題，評分系統除了兩元素距離判斷外，也會根據邊界情況自動修正絲印。

3.7.1 絲印位置評分

絲印位置的評分標準共有四項，分成兩個類別討論，第一類：絲印覆蓋面積、絲印與元件的相似度（元素的數量與長度）；第二類：平均距離（絲印與元件、絲印與銅箔）。

第一類評分標準只需存取所有絲印的特徵，如四個極值的位置、連續性與總長、線段與弧線分別的數量即可，可以在一次讀檔中評分完畢。第二類評分標準運算量較大，會以一個絲印的一個元素為單位，與元件和所有銅箔的每個元素進行 3.7.2 兩元素求距離函式；若銅箔與絲印的距離小於規定距離則會啟動 3.7.3 絲印自動校正，以避免因為運算誤差導致距離過近的風險。

3.7.2 兩元素求距離函式

首先套用 3.2.2 兩元素取交點函式，若有交點則代表距離為 0；若無則距離大於 0，可分為三種情況討論最短距離。接下來介紹可以幫助判斷距離的函式 closest_path()。

void closest_path(點 P, 線段 \overline{SG} , 線段 \overline{PO})；本函式用來尋找點 P 到線段 \overline{SG} 的最短路徑，回傳線段 \overline{PO} ，第一個點為點 P，第二個點為點 O，是線段 \overline{SG} 距離點 P 最近的點。

$|\overline{PO}|$ 尋找方法如下：在通過線段 \overline{SG} 之直線上做一通過點 P 的垂線 \overline{PO} ，若點 O 位於線段 \overline{SG} 上，則最短距離為 $|\overline{PO}|$ ；若無，則線段 \overline{PS} 或 \overline{PG} 中長度較短者為最短距離，詳閱圖 9。



圖 9. closest_path()作法

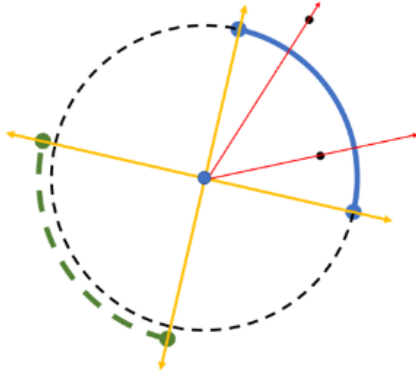


圖 10. 點位置定義輔助解釋圖

1. 線段 \overline{AB} & 線段 \overline{JK}

欲尋找兩線段（線段 \overline{AB} & 線段 \overline{JK} ）的最短距離，可將兩線段的四種組合方式套用 `closest_path()`，分別為：

`void closest_path(點 A, 線段 \overline{JK} , 線段接收值 1)、`
`void closest_path(點 B, 線段 \overline{JK} , 線段接收值 2)、`
`void closest_path(點 J, 線段 \overline{AB} , 線段接收值 3)、`
`void closest_path(點 K, 線段 \overline{AB} , 線段接收值 4)、`
 線段接收值 1-4 中的長度最小值為兩線段最短距離。

2. 弧線 Arc1（起點 P1, 終點 Q1, 圓心 C1, 方向性 dir1）& 弧線 Arc2（起點 P2, 終點 Q2, 圓心 C2, 方向性 dir2）

若兩弧線無交點，則以下數種需要考慮的長度中最短者即為兩弧線的最短距離。為了清楚描述，定義圖 10 如下：

- 藍色實線為 A 弧線
- 藍點為 A 弧線的圓心
- 黑點為測試點

從圓心畫射線去黑點方向，若射線（紅線）與下列左側弧線有交點，則代表該測試點具有其右方的特性：

- 藍色實線：A 弧線角度內
- 黑色虛線：A 弧線角度外
- 綠色虛線：A 弧線對角內

- I. 長度 1 = $|\overline{P1P2}|$ 、長度 2 = $|\overline{P1Q2}|$ 、
長度 3 = $|\overline{Q1P2}|$ 、長度 4 = $|\overline{Q1Q2}|$
- II. 如果點 C2 位於 Arc1 弧線角度內且點 C1 位於 Arc2 弧線角度內，則須考慮長度 5
長度 5 = $|\text{Arc1 的半徑} + \text{Arc2 的半徑} - |\overline{C1C2}||$
- III. 如果點 C2 位於 Arc1 弧線角度內且點 C1 位於 Arc2 弧線對角內，則須考慮長度 6
長度 6 = $|\text{Arc1 的半徑} - \text{Arc2 的半徑} - |\overline{C1C2}||$

- IV. 如果點 C2 位於 Arc1 弧線對角內且點 C1 位於 Arc2 弧線角度內，則須考慮長度
長度 7 = $|\text{Arc2 的半徑} - \text{Arc1 的半徑} - |\overline{C1C2}||$

- V. 如果點 P2 位於 Arc1 弧線角度內，則須考慮長度 8
長度 8 = $|\text{Arc1 的半徑} - |\overline{C1P2}||$

- VI. 如果點 Q2 位於 Arc1 弧線角度內，則須考慮長度 9
長度 9 = $|\text{Arc1 的半徑} - |\overline{C1Q2}||$

- VII. 如果點 P1 位於 Arc2 弧線角度內，則須考慮長度 10
長度 10 = $|\text{Arc2 的半徑} - |\overline{C2P1}||$

- VIII. 如果點 Q1 位於 Arc2 弧線角度內，則須考慮長度 11
長度 11 = $|\text{Arc2 的半徑} - |\overline{C2Q1}||$

3. 線段 \overline{AB} & 弧線 arc（起點 P, 終點 Q, 圓心 C, 旋轉方向性）

若線段與弧線無交點，則以下線段接收值 1-2 與數種可能需要考慮的長度中最短者即為線段與弧線的最短距離。

- I. `void closest_path(點 P, 線段 \overline{AB} , 線段接收值 1)`
- II. `void closest_path(點 Q, 線段 \overline{AB} , 線段接收值 2)`
- III. 如果點 A 位於弧線角度內，則需考慮長度 3
長度 3 = $|\text{線段}\overline{AC}\text{的長度} - \text{arc的半徑}|$
- IV. 如果點 B 位於弧線角度內，則需考慮長度 4
長度 4 = $|\text{線段}\overline{BC}\text{的長度} - \text{arc的半徑}|$
- V. `void closest_path(點 C, 線段 \overline{AB} , 線段接收值 CO)`
如果點 O 位於弧線角度內，則需考慮長度 5
長度 5 = $|\text{線段}\overline{CO}\text{的長度} - \text{arc的半徑}|$

3.7.3 絲印自動校正

由於 C++ 程式變數 `double` 在儲存時為二進制且沒有存取到無限多位數，所以相對於真正的值，存在些微的誤差；經過大量計算後，誤差傳遞會越來越明顯，這個現象在小數後第五位四捨五入可能產生問題，因此自動校正的功能可以避免絲印與零件與銅箔或絲印與銅箔過近而產生的

錯誤，以下分成兩種情況討論處理方法：

1. 絲印與元件邊界校正

應用時機為 3.2.3 外擴圖形定位元件擴張時，若元件與外擴圖形因為四捨五入而太過接近則回報錯誤，立即加大擴張距離 0.00005，再次進行擴張。

2. 絲印與銅箔邊界校正

應用時機為距離評分時，絲印端點與銅箔四捨五入後太過接近；此時會將絲印上位於端點的元素從過近的端點沿元素的另一端點減短 0.00005，並再次取新端點與銅箔的距離，若還是太長則會繼續減短，直到距離足夠或者該元素長度小於 0.00005 為止。

4 結果

4.1 測試結果

除了 3.7 自我評分系統之外，我們也使用 opencv4.6.0 將元件、銅箔及絲印資料視覺化。我們自行製作了幾份測試資料進行評比，在不考慮實際產業上可能的情況下，對此問題進行幾何方面的舉例。以黑線為元件外框、紅線為銅箔外框、綠線為絲印資料作區分，並在每個元素的起終點皆用點標示。下以兩個 TestCase 為例，表 3 為兩 TestCase 部分成績與總成績。圖 11、12 即為 TestCase1、2 的視覺化圖片。

表 3. TestCase 分項成績表

	S1 (%)	S2 (%)	S3 (%)	S4 (%)	總分 (%)	Runtime (secs)
TestCase1	0.110102	0.25	0.249167	0.249494	0.99711	0.085
TestCase2	0.209432	0.216667	0.249513	0.249888	0.925499	0.307

圖 11. TestCase1 視覺化圖片

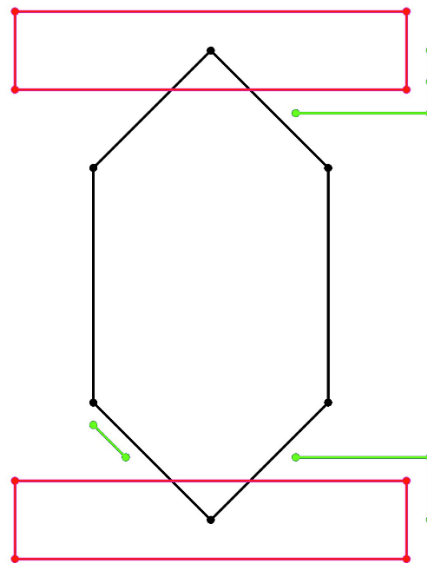
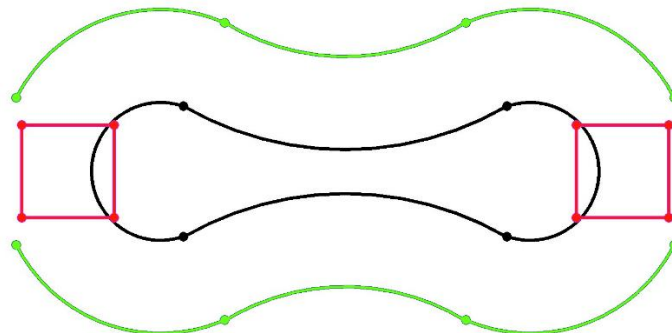


圖 12. TestCase2 視覺化圖片



4.2 CAD22 競賽結果與成績

在 CAD22 競賽中使用圖 12、13、14 (HiddenCase1、2、3) 三個問題進行評比。綠線

所呈現的絲印資料視覺化即為經過我們的演算法後得到的結果。經由 3.7 自我評分系統得到的分數如表 4 所示。

表 4. HiddenCase 分項成績表

	S1 (%)	S2 (%)	S3 (%)	S4 (%)	總分 (%)	Runtime (secs)
HiddenCase1	0.25	0.25	0.247917	0.249199	0.997116	4.749
HiddenCase2	0.25	0.25	0.249344	0.249557	0.998901	21.678
HiddenCase3	0.150647	0.25	0.247504	0.248729	0.89688	1.467

表 5. 面積優化比較表

	A_{silk} (單位面積)	A_{assbuf} (單位面積)
HiddenCase1	11.5015	11.9086
HiddenCase2	111.104	121.788
HiddenCase3	235.482	168.513

圖 12. HiddenCase1 視覺化圖片

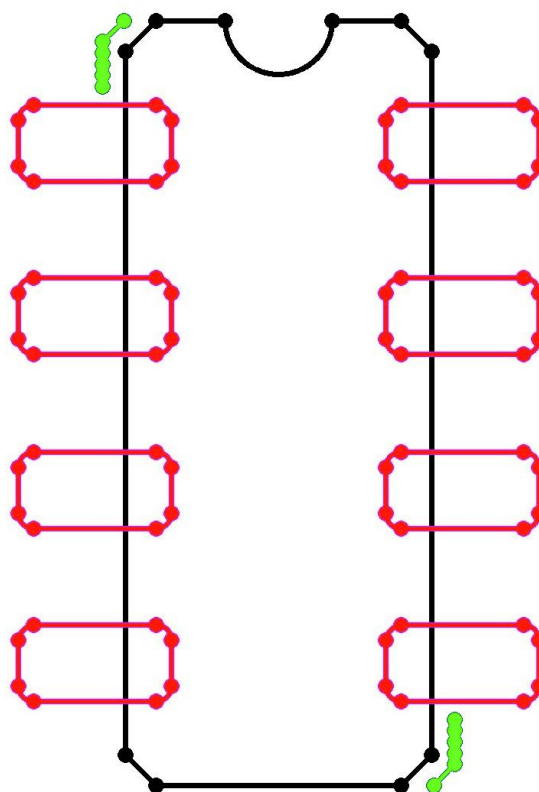


圖 13. HiddenCase2 視覺化圖片

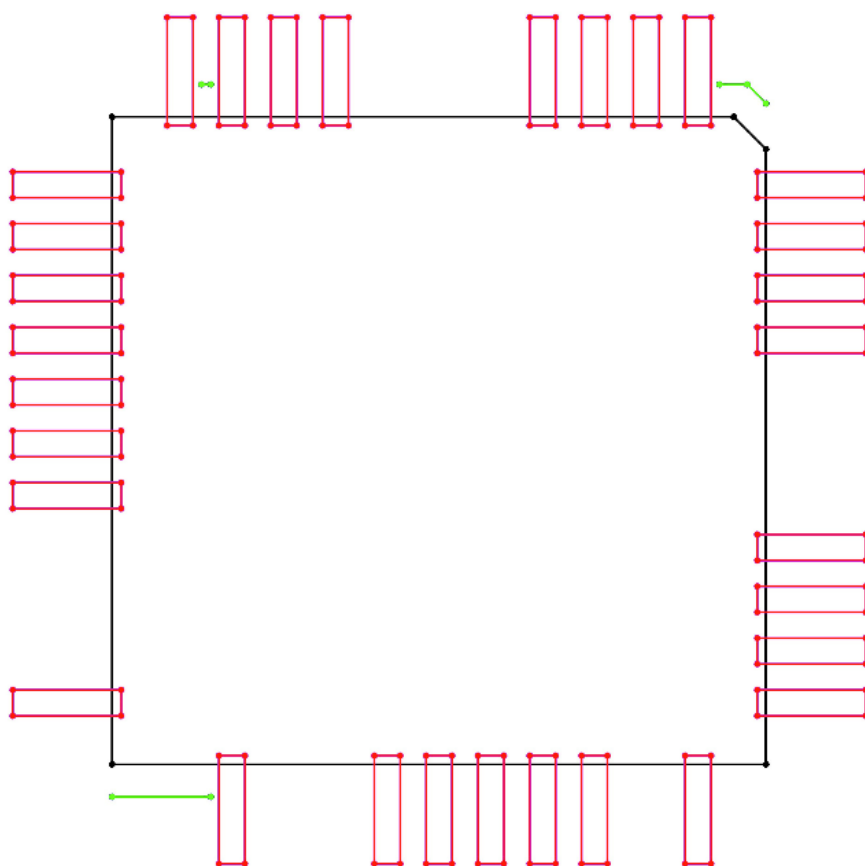
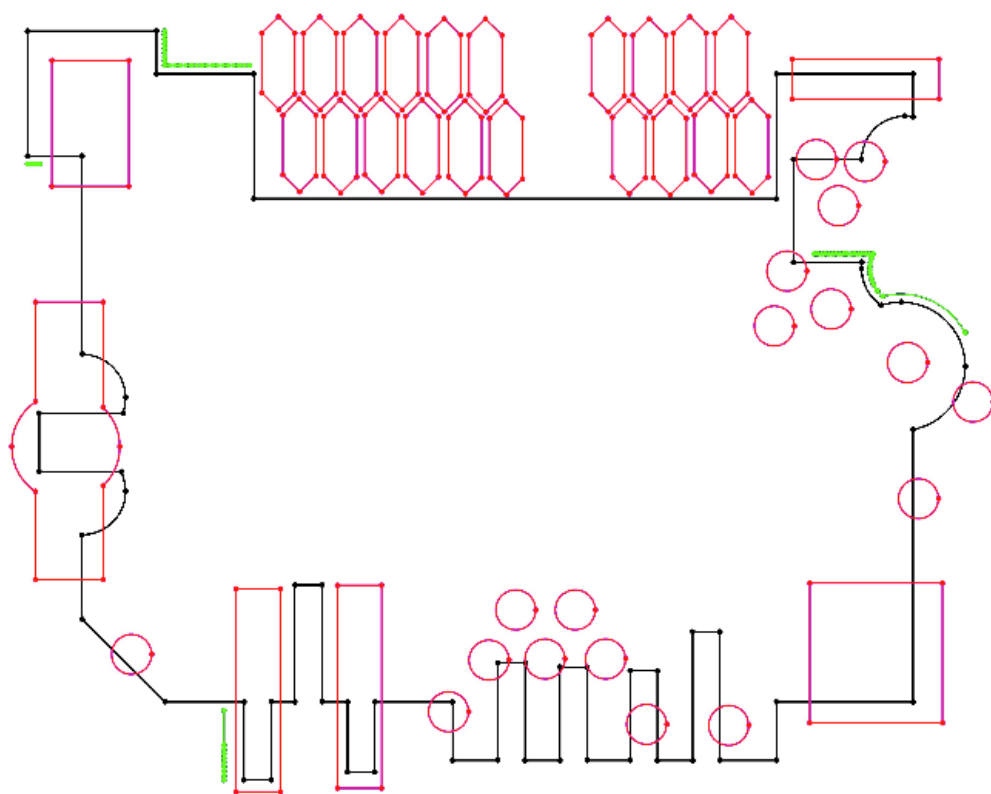


圖 14. HiddenCase3 視覺化圖片



經由 3.4 絲印極值處理及 3.6 面積優化，絲印標示之座標極限值構成的矩形面積 A_{silk} 小於元件向外等比拓展 assemblygap 之面積範圍 A_{assbuf} ，同時符合完整覆蓋限制，使絲印標示範圍評分趨近於滿分，如表 5（HiddenCase3 由於題目元件外框具有許多凹向內的邊界，導致在需滿足完整覆蓋限制情況下，此部分的得分受限）；3.4 絲印極值處理及 3.5.2 調整絲印線段數量與弧線數量可使絲印標示與外觀相似度評分皆得到滿分 0.25；絲印標示與銅箔範圍之平均距離評分與絲印標示與零件外觀之平均距離評分也透過 3.2 圖形向外等距離擴張得到不錯的分數。

綜合多方條件的優化，我們的演算法在時間限制下得到最佳的成績，獲得 2022 積體電路電腦輔助設計軟體製作競賽（2022 ICCAD）中，Problem E 的特優。

5 結論

為了解決在電路板繪製絲印的問題，本論文演示一系列的完整步驟，如：幾何圖形拓張、幾何圖形取差集、極值線段繪製。除了滿足比賽基本的要求外，在減少絲印與電路板占用面積等成本上，同時針對分數最大化的目標，有效率降低絲印繪製的總長與占用的面積。最後進行自我評分、自我修正，在 300 秒時限內盡可能找出合法且最高分的答案。實測證明，本論文提出的作法在 2022 ICCAD 比賽中第 E 題取得特優的成績。

6 致謝

非常感謝陳聿廣教授與其助教金昌明、劉致瑋，在比賽中提供的技術指導，及論文撰寫的專業建議。

7 參考資料

1. Cadence Design Systems, Inc. Essential PCB Silkscreen Guidelines for Layout. Retrieved from <https://resources.pcb.cadence.com/blog/2022-essential-pcb-silkscreen-guidelines-for-layout>
2. Creative-Hi-Tech Ltd. Things You Must Know About Silkscreen Printing of PCBs. Retrieved January 20, 2020, from <https://www.creativehitech.com/blog/things-you-must-know-about-silkscreen-printing-of-pcb/>