

基于 A* 算法 MID 三维布线的设计与实现

展慧娴, 卓 勇*, 吴 轩, 陈俊发

(厦门大学物理与机电工程学院, 福建 厦门 361005)

摘要: 三维模塑互连器件(molded interconnect device, MID)是一种将电路直接集成在三维基体材料上的创新工艺. 在 MID 数字化设计中实现电路的三维布线是一项很重要的工作, 但现有的 ECAD (electrical computer-aided design) 和 MCAD (mechanical computer-aided design) 系统没有提供三维布线功能. 本文研究了目前存在的三维布线算法, 根据现有算法的优缺点设计出一种基于 A* 算法的无网格自动布线算法. 该算法在布线方向上具有较大的灵活性, 且具有较好的布线成功率. 另外, 为了提高布线的实用性, 又开发了交互式布线的功能. 设计者可直接通过交互式布线完成 MID 产品的布线设计, 或者是在自动布线结果的基础上交互修改进一步优化布线效果. 通过示例验证了三维布线功能及算法的可靠性和实用性, 提高了 MID 数字化设计的效率.

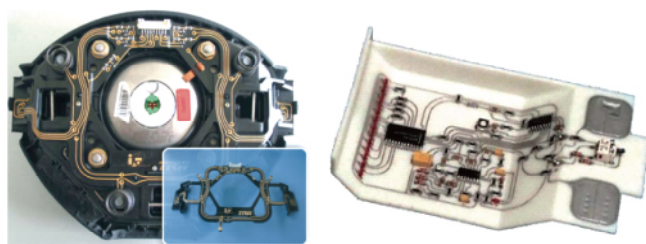
关键词: MID; 数字化设计; 三维自动布线

中图分类号: TP 391

文献标志码: A

文章编号: 0438-0479(2015)06-0888-05

在机电一体化领域, 三维模塑互连器件(molded interconnect device, MID)指的是一种创新性的工艺技术, 它抛弃传统的电路板, 直接在注塑成型的三维基体表面及内部制作有电气功能的导线、图形, 从而将普通的电路板的电气互连功能、支承元器件的功能和基体的支撑、防护等功能通过材料集成实现于一个器件上^[1-2], 如图 1 所示.



(a) 多功能汽车方向盘

(b) 手机天线

图 1 MID 产品

Fig. 1 MID product

MID 的设计中电路在三维基体上的布线设计是一项很重要的工作, 但现有的 MCAD (mechanical computer-aided design) 和 ECAD (electrical computer-

aided design) 系统均没有提供上述功能. 为提高设计效率, 除了实现交互的三维布线功能外, 实现类似 ECAD 中二维自动布线的三维自动布线功能是 MID 数字化设计很重要的部分. 三维自动布线比二维自动布线在维度上增加了一维. 目前三维自动布线算法的实现主要有以下几种: 1) 面展开寻找最短路径^[3], 即将空间内的三维面展开成二维面, 然后利用已经存在的平面布线算法^[4], 寻找最短路径, 但是若三维内的面无法展开, 则该算法无效; 2) Zhuo 等^[1]提出了网格化寻找最短路径, 即将所有能够寻找路径的面进行网格化, 利用 Hadlock 提出的最短绕障碍物的算法寻找最短路径. 但是该算法正方形网格的划分带来很大的局限性, 同时寻找最短路径时耗费大量的时间和存储空间. 3) 同样在 Zhuo 等^[1]提出的无网格自动布线算法中无需三维表面的网格划分, 而是通过结合 A* 算法^[5]和扩展的 Hightower 算法获得. 相对于上述基于网格的自动布线算法存在的缺点, 无网格的自动布线算法的主要优点在于其快速的搜索能力和较大的应用范围. 但是由于使用了 Hightower 算法, 在布线方向上有局限, 只能在 XY(UV: 平面坐标, 水平方向是

收稿日期: 2014-06-13 录用日期: 2015-03-04

基金项目: 国家自然科学基金(50975241)

*通信作者: zhuoyong@xmu.edu.cn

引文格式: 展慧娴, 卓勇, 吴轩, 等. 基于 A* 算法 MID 三维布线的设计与实现[J]. 厦门大学学报: 自然科学版, 2015, 54(6): 888-892.

Citation: Zhan Huixian, Zhuo Yong, Wu Xuan, et al. The realization of 3D routing based on A* algorithm in MID design[J]. Journal of Xiamen University: Natural Science, 2015, 54(6): 888-892. (in Chinese)



<http://jxmu.xmu.edu.cn>

U,垂直方向是 V)方向上进行。

本文基于 OPEN CASCADE^[6] 开发实现了三维交互式布线功能,并研究了基于 A* 算法^[5] 的无网格自动布线算法.该算法继承了 zhuo 等^[1] 算法的优点,同时又抛弃了 Hightower 算法在布线方向上的局限性.无论是交互还是自动布线,均能在布线方向上实现多种方式,提高布线质量,为 MID 数字化设计提供有效的支持.

1 三维交互式布线

三维交互式布线采用鼠标交互,通过鼠标在三维基体表面上移动和点击确定走线的关键点坐标,系统实时显示布线效果.如何获取三维基体表面的邻接关系及鼠标点对应在基体表面上的点位置是实现上述功能的基本要求.

1.1 基体面的关系

系统的交互式布线支持同一平面和相邻面的布线.对于一个三维布线基体,要对各个面的关系进行判断.图 2 展示了 OPEN CASCADE 中两个面的拓扑结构,其中,TF 表示面,TE 表示边,TV 表示顶点.从图中可以看出,对于相邻面,则有一条共用边. TF₁ 与 TF₂ 共用了 TE₄. 因此对于任意给的两个面信息,首先判断是不是同一个平面,如果不是则获取它们的所有边,再判断是否有一条共用边,如果有共用边则为相邻面.

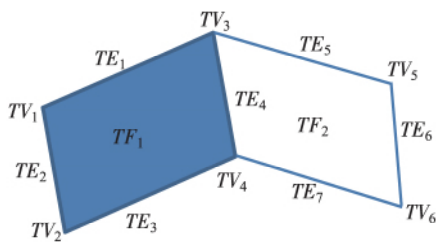


图 2 两个面的拓扑结构^[6]
Fig 2 Topology of two faces^[6]

1.2 鼠标点击获取基体上的点

系统采用鼠标交互式绘制线路,可以根据鼠标点击获取基体上的点,原理如图 3 所示.获取方式如下:1) 获取基体的所有面;2) 通过鼠标点击获取所有表面所在平面上的点;3) 排除在表面外的点;4) 计算剩余点到鼠标当前点的距离,最近点则为基体上获取的点.

如图 3 所示,鼠标点与视角向量组成的直线与长方体 6 个面分别有 6 个交点(一般情况下),而其中只有 P₁,P₂ 在长方体的表面上.再通过计算比较,P₁ 距 P 更

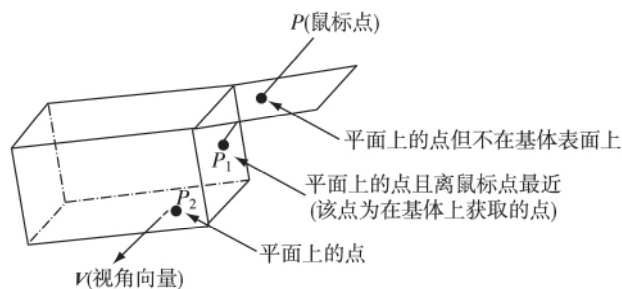


图 3 点获取原理
Fig 3 Principle of getting point

近,因此 P₁ 则为鼠标点击后获取的基体上的点.

1.3 交互式布线

三维交互式布线的线路走向为基本表面的 X (U)、Y(V)与 45°方向,使用橡皮筋技术动态显示布线效果,为实现该布线方向,系统需要计算起始点与鼠标点的方向关系,以确定线的方向.

系统先计算鼠标点相对于起始点的象限位置,然后计算两点的 Y 坐标差值与 X 坐标差值.通过比较两差值的大小来确定绘制的线的方向.系统中用粗线表示点击后所布线路,细线表示预览线路.三维布线可以在同一平面以及相邻面进行.同一平面情况下,先将平面旋转到水平位置,再采用二维平面布线的计算方式计算布线点,线同样走 X(U)、Y(V)与 45°方向,最后再旋转回原始位置.而相邻面处理过程较复杂,首先将两个平面翻折到同一平面,再将这同一平面翻折到水平面,计算结束后再翻折回初始位置,原理见图 4.

如图 4 所示,首先将鼠标点所在的面绕着共用边旋转一定角度使其与起始点所在面处于同一平面(角度可通过面的法向量计算得到);然后将整个平面旋转到水平位置即面的法向量为(0,0,1),计算出与边的交点 P₁ 与拐角的 P₂;再将所有点翻折回原始位置;最后根据这四点显示出预览线路,鼠标点击后则从起始点绘制线段到 P₁,再从 P₁ 绘制线段到 P₂.

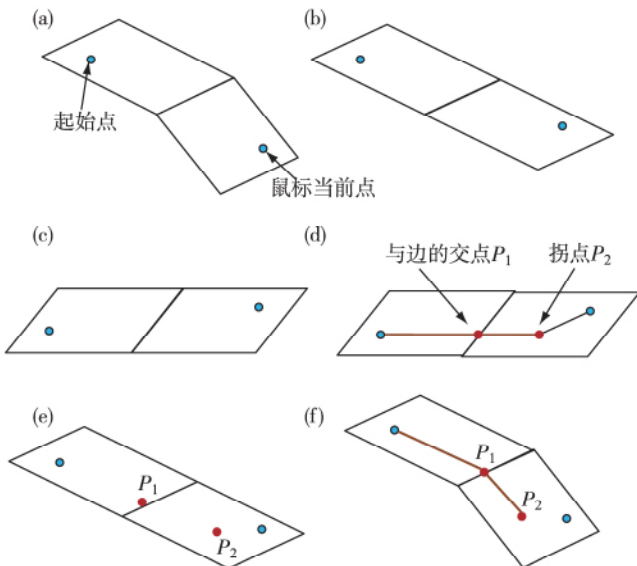
在实际应用中的一个三维交互布线示例过程如图 5 所示.图中将器件左边的布线过程进行展示.点击一个管脚点后移动鼠标,预览线段将实时显示,点击后预览线段的粗线部分将变成实线,将鼠标移至另一管脚点击后则可完成两个点连接,按上述步骤将所有管脚点连接完成.

2 基于 A* 算法的三维自动布线

2.1 三维布线中 A* 估价函数与搜索点的定义

A* (A-star)算法是把启发式算法和 Dijkstra 算

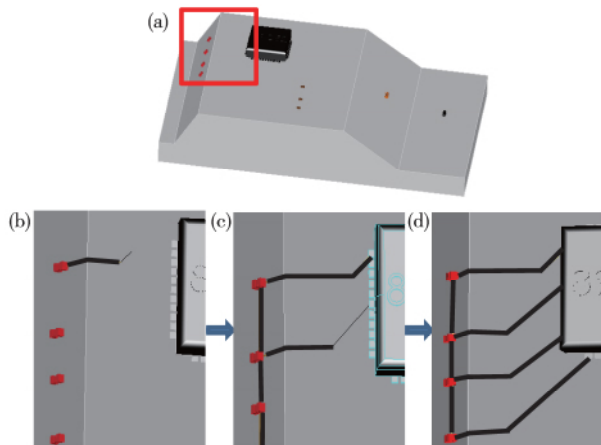
<http://jxmu.xmu.edu.cn>



(a) 两相邻面的初始相对位置;(b) 两平面旋转到同一平面;
 (c) 将(b)中生成的平面旋转到水平面;(d) 在水平面上布线,图中粗实线为已布线路,细实线为预览线路;(e) 计算出所布线路与边界边的交点 P_1 及拐点 P_2 ;(f) 计算线路起始点、鼠标点、 P_1 和 P_2 在初始三维环境中的位置及显示线路。

图 4 相邻面布线原理

Fig. 4 Principle of adjacent face routing



(a) 元件在实体上布局效果;(b) 手工交互布线第一条线路;
 (c) 图中粗实线为已布线路,细实线为预览线路(系统中已布线路显示为黄色线路);(d) 该元器件左边布线效果。

图 5 交互式布线效果

Fig. 5 Effect of interactive routing

法结合一起的算法。启发式搜索指的是利用一个估价函数来评估每次决策的价值,以此来决定先尝试哪一种方案。 A^* 算法是一种最好优先算法,它能在每一步的估价中都把当前的节点和以前的节点的估价值作比较得到一个“最佳节点”,这样可以有效防止“最佳

节点”的丢失。通过在搜索的过程中添加可以使得搜索过程向着目标方向的信息来加速搜索过程。但是它给出的是一个近似解而不是保证最佳解,可用公式描述为:

$$f(n) = g(n) + h(n),$$

这里 $f(n)$ 可以用欧拉距离表示为

$$f(n) = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2},$$

其中 $f(n)$ 是节点 n 从源点到目标点的估价函数, $g(n)$ 是从源点到 n 节点的实际代价, $h(n)$ 是从 n 到目标点最佳路径的估计代价^[7]。

A^* 算法采用 8 个方向探索方式,分别为 $X(U)$ 、 $Y(V)$ 与 45° 方向。系统可以设定探索的步进距离,横纵向的步进距离皆为设置的距离, 45° 方向的步进距离为 $\sqrt{2}$ 倍的设置距离。取 $H = |e_z - s_z| + |e_y - s_y| + |e_x - s_x|$, 其中 e_z 表示终点的 z 坐标, s_z 表示起点的 z 坐标。当探索点距离终点小于一个步进距离时,系统判定探索完毕。与 A^* 算法在平面上搜索相比, A^* 算法在三维形体表面上搜索需要解决如下两个重要问题:

1) 探索点重定位

探索点以中心点向周围 8 个方向进行探索。在三维中,系统需要根据面的方向向量,重新计算探索点的位置,如图 6 所示。系统首先计算出点所在的面,再得到面的向量,从该点向周围探测,最后根据面的向量重新计算出探索点的位置。

2) 跨平面处理

当点跨越出边界后,需要对点的位置及其所在面进行重新计算。系统采用如图 7 所示的处理方式。

在当前点向周围进行探测时,将当前点与探测点构建成线段的拓扑结构,并用该线段与面的所有边界计算距离,如果等于零(相交),则将交点作为探索点,同时根据当前点所在的面与所相交的边界计算出相邻面,作为探索点的所在面。如图 7 所示,当前点所在的面为面 1,由面 1 与相交的边界计算出相邻面 2。面 2 则为探索点所在的面,下一步探索点作为当前点继续探索时,它将在面 2 上探索,实现面的转换。

2.2 布线障碍物判断

在布线设计中,障碍物主要为电子元件的管脚和已布置的且不是同一网络的线路所占据的范围。采用不能跨越障碍物的原理对障碍物进行判断。首先对探测点进行预绘线处理,判断绘制线段与电路中线段的最小距离是否大于预设的线间距,若小于则表示探测点位于障碍物上,不可布置。对于元件管脚点的判断也是采用相似的方式,预绘制的线段与管脚点形成的

焊点的距离是否小于线间距. 原理如图 8 所示.

管脚点障碍物在布线开始时将一次性全部保存到障碍点的链表中,而电路在布线过程中动态添加到电路链表中,同时电路具有网络名,同一网络下的电路不为障碍物.

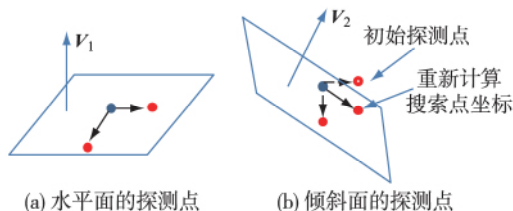


图 6 不同面的探索点

Fig. 6 Explore points on different faces

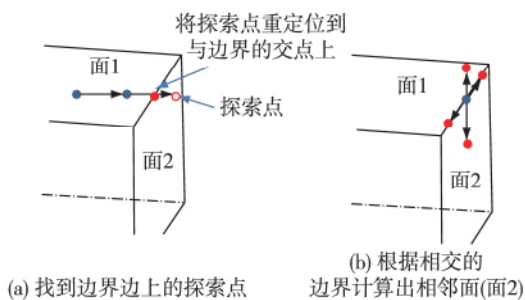


图 7 跨越边界的探索点处理

Fig. 7 Treatment of border-crossing explore points

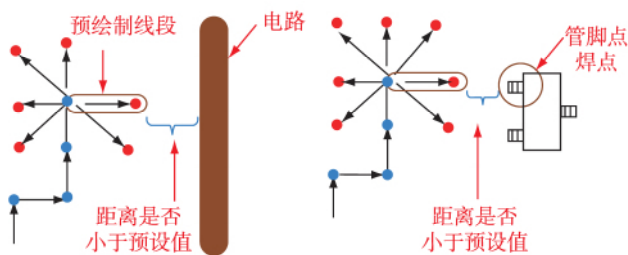


图 8 障碍物判断原理

Fig. 8 Principle of obstacle judgment

2.3 A* 算法实现

系统首先根据电子元件的管脚连接关系,得到相连的管脚点,进行两两布线.采用 A* 算法从起点向终点逼近,分别创建 2 个表:OPEN 表和 CLOSED 表,其中 OPEN 表用于保存所有已生成但未考察的节点,CLOSED 表用于记录已访问过的节点,其求解步骤如下:

- 1) 把初始节点 s 放入 OPEN 表中,计算 $f(s)$.
- 2) LOOP:重复下面的过程.如果 OPEN 表为空,

则问题无解,退出.

3) 把 OPEN 表中第一个节点作为节点 n 移入 CLOSED 表.

4) 考察节点 n 是否为目标节点,若是,则求得问题的解,退出;否则转到第 5)步.

5) 如果节点 n 可扩展,转入第 6)步,否则转入第 2)步 LOOP.

6) 对节点 n 进行扩展,并计算所有后继节点的估价函数 $f(n)$ 的值,为每个后继节点设置指向 n 的指针.

7) 把这些后继节点都送入 OPEN 表,然后对 OPEN 表中的全部节点按照估价函数值从小到大依次排序.

8) 转到第 2)步 LOOP.

当从 OPEN 表中返回的最佳点($f(n)$ 值最小)与终点的距离小于探测距离时,判断路径找到,并返回回路上的点.

系统除了设定步进距离和边距,还可以设置算法的计算次数.以从 OPEN 表中返回最佳节点为一次,如果计算次数大于等于设定值,则显示计算超时;如果成功返回,则将返回的点连接成电路.

3 三维布线实例

图 9 展示了本系统实现自动布线的过程.图 9(a)为在系统二维设计模块中设计逻辑电路的效果,图 9(b)表示在系统三维设计环境下经过三维布局设计电子元件在三维基体表面上的实际位置,同时图 9(b)中电子元件之间的黑色线段代表在图 9(a)中的电路连接关系,后续的在基体表面的三维自动布线则是基于图 9(b)中的逻辑关系进行计算.图 9(c)为用本系统开发的自动布线算法实现的布线结果,线路全部按设计者设计的逻辑关系布置出来,达到预期效果.另外,设计者可手动修改自动布线算法得到的布线结果,以实现进一步优化.

4 结 论

基于三维基体的电子元件三维布局及电路的三维布线是 MID 数字化设计过程中两大核心功能,本文基于 OPEN CASCADE 开发的 MID 三维布线系统不仅提供了三维布局功能,还研究了基于 A* 算法的三维自动布线算法,设计开发了三维交互式布线及三维自动布线功能,并通过示例验证了三维布线功能的实

<http://jxmu.xmu.edu.cn>

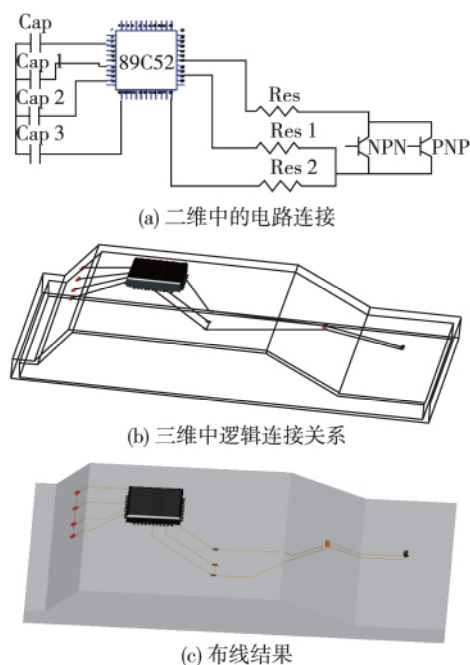


图 9 三维自动布线效果

Fig. 9 Effect of 3D auto-routing

用性,提高了 MID 产品的开发效率. 该系统实现的三维自动布线算法在布线方向上增加了灵活性,存在的缺点是该算法在搜索效率及适应性上仍有较大的局限

性,如目前只局限在三维基体平面上布线还无法在曲面上实现,接下来的工作主要集中在寻求更加有效的算法提高其通用性.

参考文献:

[1] Zhuo Y, Du X L, Zhu J Q. Three-dimensional automatic routing for the design of molded interconnect devices[J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2011, 24(4): 302-311.

[2] 龚永林. 新产品与新技术 [J]. 印制电路信息, 2012 (6): 71.

[3] Cutler A, Krebs T. An MID design system for electronic products [C]// The 3rd International Congress on Molded Interconnect Devices-MID98, Erlangen, Germany: University of Erlangen-Nurnberg (D), 1998: 131-140.

[4] 费艳. PCB 自动布线算法主要策略综述 [J]. 科技风, 2011, 14: 16-24.

[5] 王海梅, 周献中. 直线优化 A* 算法在最短路径问题中的改进与实现 [J]. 工程图学学报, 2009(6): 121-126.

[6] OPEN CASCADE. Open CASCADE technology [EB/OL]. (2014-05-05) [2014-06-01], <http://www.opencascade.org/>.

[7] 贾庆轩, 陈钢, 孙汉旭, 等. 基于 A* 算法的空间机械臂避障路径规划 [J]. 机械工程学报, 2010, 46(13): 109-115.

The Realization of 3D Routing Based on A* Algorithm in MID Design

ZHAN Hui-xian, ZHUO Yong*, WU Xuan, CHEN Jun-fa

(School of Physics and Mechanical & Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: Three-dimensional (3D) molded interconnect device (MID) is an innovative process which integrates the circuit directly into a 3D material. Implementing auto-routing is a very important job in MID digital design, but existing CAD system does not provide these functions. First, this paper studies current 3D auto-routing algorithm. Then a grid-less 3D auto-routing algorithm, based on A* algorithm, is developed according to the merits and demerits of current algorithms. The algorithm developed in this study exhibits high reliability, practicability and flexibility. In addition, the interactive routing function is also developed in this study to improve the efficiency of designing MID products. Designers can directly finish the entire design process of MID products or modify the routes which have been created through auto-routing function using the interactive routing function. Finally, examples were used to validate the reliability and availability of the 3D routing algorithm.

Key words: molded interconnect device (MID); digital design; 3D auto-routing