

EDA 平台的设计及实现

薛长青¹ 胡广建¹ 李发春¹

XUE Changqing HU Guangjian LI Fachun

摘要

电子设计自动化（EDA）平台旨在集成器件参数动态调整、自动布线、版图 DRC 检查及集成仿真工具，以支持电路设计、验证与优化。平台通过实现器件参数的动态调整功能，结合自动布线算法，并利用版图设计规则检查（DRC）及集成仿真工具，对电路设计进行全面支持。研究采用了先进的算法和技术手段，实现了上述功能。实验结果表明，EDA 平台在电路设计中表现出有效性和优越性。

关键词

EDA；器件；仿真；版图设计；DRC 规则检查

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2024.12.036

0 引言

随着信息技术的飞速发展，芯片设计与制造面临着越来越高的要求，包括更高的集成度、更低的功耗、更快的运行速度以及更好的可靠性等。为满足这些要求，EDA 平台应运而生，并逐渐成为电路设计领域不可或缺的重要工具之一^[1-3]。

EDA 平台集成多项关键技术，旨在提高设计效率、确保设计正确性和可靠性。其中，器件参数动态调整功能允许设计者在设计过程中根据实际需求调整器件参数，从而优化电路性能；器件自动布线功能则能够自动完成器件之间的布线工作，提高布线效率和准确性；版图设计规则检查（DRC）功能则通过预设的设计规则对电路版图进行全面检查，确保版图满足物理约束和工艺要求；集成仿真工具则能够对电路进行精确的仿真分析，为设计者提供强大的验证和优化手段。本文重点介绍 EDA 平台中的器件参数动态调整、器件自动布线、版图 DRC 检查以及集成仿真工具等关键技术。

1 EDA 平台关键技术

1.1 器件参数动态调整

EDA 平台允许设计者在设计过程中，动态调整器件的参数。这一功能通过提供直观的参数调整界面和实时仿真反馈机制实现，帮助设计者快速找到最优的器件参数配置。动态调整参数不仅有助于优化电路性能，还能适应不同硬件的特性需求。

1.2 器件自动布线

EDA 平台集成了高效的自动布线算法，能够根据设计者的布局要求和器件约束条件自动完成器件之间的布线工作。自动布线算法不仅提高了布线效率，还减少了人为错误，确

保了布线的准确性和可靠性。此外，平台还支持布线结果的实时预览和修改，使设计者能够灵活调整布线方案以满足特定需求。

1.3 版图 DRC 检查

设计规则检查（DRC）是 EDA 平台中的关键功能之一。版图 DRC 规则检查利用预设的设计规则对电路版图进行全面检查，确保版图满足物理约束和工艺要求。DRC 检查涵盖了器件重叠、器件连接不充分、导线宽度、安全距离、元件间距、过孔类型等多个方面，能够及时发现并纠正潜在的设计问题。通过集成 DRC 规则检查工具，EDA 平台提高了设计质量，降低了制造成本。

1.4 集成仿真工具

EDA 平台集成了先进的仿真工具，能够对电路进行精确的仿真分析。仿真工具支持多种仿真模式和参数设置，能够模拟电路在不同条件下的运行过程，并输出详细的仿真结果和性能参数。通过集成仿真工具，EDA 平台为设计者提供了强大的验证和优化手段，有助于提高电路的性能和可靠性。

2 EDA 平台的实现

2.1 平台架构设计

EDA 平台采用模块化设计思想，将复杂的功能分解为多个独立的模块进行实现。平台包括器件库、图形化编辑界面、自动布线引擎、DRC 检查工具、集成仿真工具等多个模块。各模块之间通过统一的接口进行通信和数据交换，确保了平台的可扩展性和可维护性^[4-6]。

2.2 关键技术实现

2.2.1 器件参数动态调整

在器件库体系中，涵盖了焊盘器件、谐振腔器件等多种关键元件类别，这些丰富多样的器件资源为其提供了基础支撑。与此同时，创新性地提出一种基于坐标节点关系结构图

1. 山东云海国创云计算装备产业创新中心有限公司
山东济南 250101

的参数调整方法, 主要实施步骤详述如下:

(1) 初始坐标结构序列获取

通过高精度测量设备获取器件的初始坐标结构序列, 该序列详细记录了器件内部各节点的位置信息, 为后续参数调整提供基准数据。获取器件初始坐标结构序列方法有多种, 可以通过已有器件知识库、其它芯片设计工具。

(2) 坐标节点关系结构图生成

利用获取的节点及节点坐标信息, 构建器件的坐标节点关系结构图。该图直观展示了器件内部各节点之间的空间关系, 为参数偏移的监测与定位提供了可视化工具。以焊盘器件为例, 如图1所示。

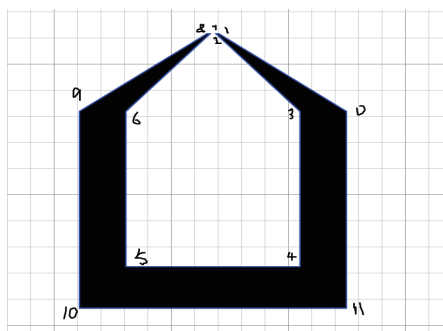


图1 焊盘器件坐标结构图

(3) 参数偏移监测与定位

实时监测器件的运行状态, 一旦发现参数偏移, 立即利用坐标节点关系结构图和预先定义的器件参数进行对比分析, 快速确定偏移器件参数及其关联的目标节点坐标。

(4) 偏移量计算与调整策略生成

通过计算偏移器件参数的绝对偏移量, 并基于该偏移量生成相应的调整策略。调整策略包括横坐标和纵坐标两个维度的调整方案, 旨在将偏移参数恢复至初始状态。

(5) 参数调整执行

根据生成的调整策略, 对偏移器件参数进行精确调整, 直至其当前坐标结构序列与初始坐标结构序列一致。这一过程通过自动化控制系统实现, 确保了调整的准确性和高效性。

(6) 参数调整入口

设置焊盘器件、谐振腔等器件的参数调整页面, 执行上述方法, 进行期间的动态调整。以焊盘器件为例, 如图2所示。

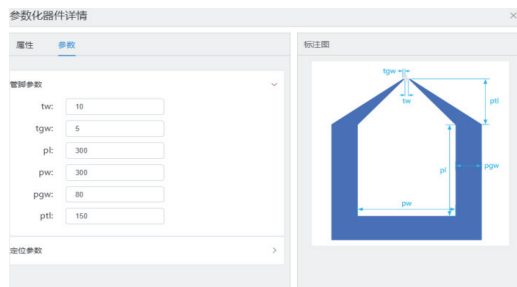


图2 焊盘器件参数化器件详情图

2.2.2 器件自动布线

针对现有手工布线方式效率低的问题, 提出了一种基于坐标变换和自动连线算法的自动布线方法。该方法显著提高了布线效率, 并实现了连线的精确绘制与修正。下面以谐振腔器件和焊盘器件为例重点介绍自动布线实现过程, 自动布线效果^[7-10]如图3所示。



图3 谐振腔器件自动布线效果图

(1) 读取关键坐标点、坐标变换

首先, 从谐振腔读取线上的关键坐标点 p_1 和 p_2 。如果元器件发生了移动、旋转或缩放, 需使用以下公式计算变换后的坐标点位置:

$$\begin{aligned} x_1 &= ((x - t_x - r_x) \times X_{scale} \times \cos(\text{angle})) - ((y - t_y - r_y) \times Y_{scale} \times \sin(\text{angle})) + r_x \\ y_1 &= ((x - t_x - r_x) \times X_{scale} \times \sin(\text{angle})) + ((y - t_y - r_y) \times Y_{scale} \times \cos(\text{angle})) + r_y \end{aligned}$$

式中: (x, y) 是原坐标; (r_x, r_y) 是图形中心点坐标; (t_x, t_y) 是移动距离; X_{scale} 和 Y_{scale} 是缩放系数; angle 是旋转角度 (弧度)。

(2) 计算中点坐标

使用变换后的坐标点 p_1' 和 p_2' , 计算连线开始点的中点坐标:

$$\begin{aligned} x &= 2p_1' \cdot x + p_2' \cdot x, \\ y &= 2p_1' \cdot y + p_2' \cdot y \end{aligned}$$

(3) 连线开始关键点方向判断

根据 p_1' 和 p_2' 的坐标差 d_x 和 d_y , 判断连线方向并确定坐标单位向量: 如果 $d_x > 0$ 且 $|d_y| < 10$, 方向向上, 单位向量 $[0, 1]$ 。如果 $d_x < 0$ 且 $|d_y| < 10$, 方向向下, 单位向量 $[0, -1]$ 。如果 $d_x < 0$ 且 $d_y > 0$, 方向向右, 单位向量 $[1, 0]$ 。如果 $d_x > 0$ 且 $d_y < 0$, 方向向左, 单位向量 $[-1, 0]$ 。

(4) 连线结束关键点坐标计算

焊盘器件连接, 如果连线结束点为焊盘器件, 使用与步骤(1)(2)相同的坐标变换方法计算焊盘的关键点坐标, 并取中点作为结束点。谐振腔连接, 如果连线结束点为另一个谐振腔的右引脚, 同样使用坐标变换方法计算该谐振腔引脚的关键点坐标, 并取中点作为结束点。

2.2.3 器件 DRC 检查

基于多边形和复合多边形器件的数据结构, 涵盖了孤岛器件检查、器件连接不充分检查、器件重叠检查、自定义空气桥器件异常检查以及传输线角度和距离检查等多个方面。通过定义具体的检查规则和算法, 该方法能有效提升版图设计的准确性和可靠性。

（1）孤岛器件检查

孤岛器件定义为布局器件 Marker 范围之外的器件。通过计算 Marker 器件的边界框，并检查其他器件的坐标点是否完全位于该边界框内，来识别孤岛器件。具体过程如下：

① 解析版图数据：通过序列化解析版图数据文件（如 GDSII、JSON 等格式），提取出所有器件的信息，包括位置、类型等。

② 识别 Marker 器件：根据器件类型或特定标识（如特定的名称前缀或属性）筛选出 4 个 Marker 器件。

③ 获取 Marker 坐标：对每个 Marker 器件，提取其所有相关坐标点（对于复合类型，可能是多个子部件的坐标）。将这些坐标点转换或合并为一维数组，以便后续处理。

④ 应用矩形范围算法：使用最小边界矩形（minimum bounding rectangle, MBR）算法计算 4 个 Marker 器件坐标点的总体边界框。这个边界框将包含所有 Marker 器件的坐标点。

⑤ 筛选非 Marker 器件：从解析得到的器件集合中，去除已识别的 Marker 器件，得到所有非 Marker 器件的集合。

⑥ 分类器件：将非 Marker 器件分为多边形器件集合和复合多边形器件集合。

⑦ 判断孤岛器件：遍历每个非 Marker 器件，对于多边形器件，检查其所有坐标点是否都位于 Marker 边界框内。对于复合多边形器件，可能需要对每个子多边形分别进行判断，或者先合并为一个整体多边形再判断。如果存在至少一个坐标点不在 Marker 边界框内，则将此器件标记为孤岛器件。

⑧ 封装孤岛器件对象：将识别出的孤岛器件封装成对象或数据结构，包含器件的标识、类型、坐标、是否为孤岛器件等信息。

（2）器件连接不充分检查

焊盘器件连接不充分：通过比对焊盘器件的关键坐标点与所有连线的坐标集合，判断焊盘器件是否充分连接。在焊盘器件连接充分性检查中，首先获取焊盘器件的所有坐标点，并基于这些坐标点绘制焊盘器件的坐标结构图。根据焊盘器件的特性和常见连接方式（如开口朝上、下、左、右），同时关注坐标点中的 1、2、7、8，这些点通常代表焊盘器件与连接线的主要接触位置。通过比对每个焊盘对象的这些关键坐标是否存在于所有连线坐标集合中（该集合由所有连线器件的二维坐标融合而成的一维数组表示），可以判断焊盘器件的连接是否充分。考虑到实际制造中的容差，通过设定合理范围（如 y 值相等， x 值相差 0.01 微米视为连接充分；或 x 值相等， y 值相差 0.01 微米视为连接充分），以确保检查的准确性和实用性。

谐振腔连接不充分：检查谐振腔器件的融合坐标点是否存在于所有连线的坐标集合中。谐振腔器件作为版图中的另一关键部件，其连接的充分性同样需要严格检查。提取谐振腔器件的所有坐标点，并绘制其坐标结构图。由于谐振腔器件的复杂性，其关键坐标点可能分散在多个一维数组中（如

0 和 1 两个一维数组）。通过将这些数组融合并比对融合后的关键坐标是否存在于所有连线坐标集合中，并评估谐振腔器件的连接充分性。此外，定义谐振腔连接关键点和连线点的比对标准（如 x 值相等， y 绝对值相差 0.01 微米视为连接充分），以确保检查的准确性。

（3）器件重叠检查

在版图设计中，器件之间的重叠是一个常见问题，可能导致电路功能失效或性能下降。为避免这种情况，本文提出了一种基于坐标矩形区域范围比对的器件重叠检查方法。该方法首先根据器件类型和标识获取非 Marker 器件、非传输线器件对象集合，然后遍历这些器件对象，通过比较坐标矩形区域范围来判断是否存在重叠。一旦发现重叠，即封装并输出相应的异常信息。

（4）自定义空气桥器件异常检查

空气桥器件是版图设计中用于解决布线冲突的重要结构。然而，如果空气桥的桥墩和桥面位于同一图层，则可能导致制造过程中的问题。为了检测这种异常，我们提出了一种基于矩形多边形对象集合的自定义空气桥异常检查方法。该方法首先识别版图中的空气桥结构，然后遍历所有矩形对以检查它们是否相交。对于相交的矩形对，进一步判断是否存在第三个矩形与它们同时相交以形成空气桥结构。最后，通过比较桥墩和桥面的层级数据来判断是否存在异常，并封装输出相应的异常信息。

（5）传输线角度检查

传输线作为版图中的重要组成部分，其角度的合理性直接影响电路的性能。为了检查传输线的角度是否存在锐角情况，本文提出了一种基于向量运算的角度检查方法。该方法首先获取传输线器件的所有坐标点，并根据坐标点绘制传输线器件的坐标结构图。然后，分别定义两组坐标集合（line1 和 line2）以表示传输线的不同部分。通过遍历这两组坐标集合中的相邻 3 个坐标点，并使用向量运算计算它们之间的角度来判断是否存在锐角情况。一旦发现锐角即封装并输出相应的异常信息。

（6）传输线距离检查

传输线之间的距离也是版图设计中需要关注的重要参数之一。为了确保传输线之间的距离符合设计要求，本文提出了一种基于坐标结构图的传输线距离检查方法。该方法首先获取传输线器件的所有坐标点并绘制其坐标结构图。然后，根据坐标结构图找出传输线距离的计算公式（即一组坐标的下标为 0 的坐标值与另一组坐标的下标为 1 的坐标值之间的差的绝对值）。最后，根据传输线在版图中的具体位置（如焊盘器件、谐振腔器件等）确定距离的横坐标或纵坐标绝对值，并检查其是否符合设计要求。如果不符合则封装并输出相应的异常信息。

(7) DRC 检查封装展示

版图设计规则检查旨在识别并纠正设计过程中的潜在问题,确保芯片制造的顺利进行。为了高效、准确地传递违规信息,设计了 MessageDrc 异常输出对象模型,该模型通过标准化的数据结构,实现了违规信息的统一描述和封装。效果如图 4 所示。

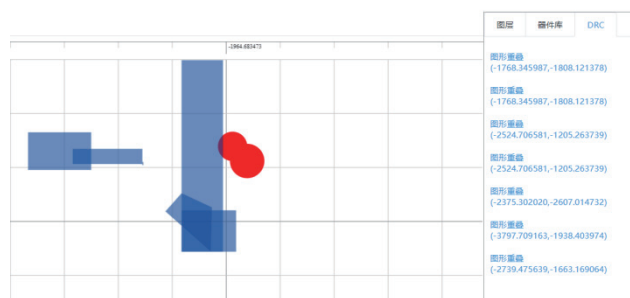


图 4 DRC 检查异常封装效果

MessageDrc 模型包含两个主要字段: drcMsg (提示信息) 和 data (坐标数据列表)。drcMsg 字段用于存储违规的详细描述信息,如“桥面和桥墩在同一层或者两个桥墩不在同一层异常”等。data 字段则是一个列表,包含了多个 DataDrc 对象,每个 DataDrc 对象又包含 points (坐标点列表) 和 name (器件名称) 两个字段。其中,points 字段用于存储标识违规器件的坐标集合,而 name 字段则用于指定器件的类型,如“figure”“pad”“resonator”等。

2.2.4 集成仿真工具

版图设计工具中集成了仿真工具。具体通过构建了一个基于 Web 或客户端操作的多用户多任务仿真软件平台,支持大规模仿真任务的批量处理、有序执行及结果验证。

(1) 自动化脚本开发

采用 Python 编程语言结合 pyautogui 库,开发了针对 Sonnet 软件的自动化脚本。该脚本能够模拟用户操作,自动加载设计版图数据、设置仿真参数、执行仿真任务,并解析仿真结果。通过编程方式实现仿真流程的自动化,不仅提高了工作效率,还确保了仿真过程的一致性和准确性。

(2) 仿真任务调度系统

设计并实现了后台调度系统,用于管理仿真任务的提交、执行和结果验证。该系统支持多用户同时提交仿真任务,通过优先级排序和负载均衡算法,确保任务的有序执行和高效完成。同时,系统还具备结果验证功能,能够自动检查仿真结果是否符合预期标准。

(3) 多用户多任务仿真平台

基于 Web 或客户端技术,构建了支持多用户多任务操作的仿真软件平台。用户可以通过 Web 界面或客户端软件提交仿真任务、查询任务进度和结果,并下载所需数据。该平台还提供了历史数据查询和对比功能,方便用户进行数据分析和决策支持。

3 结语

EDA 平台作为支撑芯片设计与优化的关键技术,其重要性日益凸显。本文围绕 EDA 平台中的关键技术进行了深入探讨,包括器件参数的动态调整、器件的自动布线、版图 DRC 检查以及集成仿真工具等方面。这些技术不仅提高了电路设计的效率和质量,还为芯片的制造和应用提供了有力保障。

在器件参数动态调整方面,本文提出了一种基于坐标节点关系结构图的参数调整方法,通过实时监测和精确调整器件的参数,实现了对电路性能的优化。器件自动布线技术的引入,则显著提高了布线效率,减少了人为错误,确保了布线的准确性和可靠性。版图 DRC 检查功能通过全面检查电路版图,确保了设计满足物理约束和工艺要求,进一步提升了设计质量。而集成仿真工具则为设计者提供了强大的验证和优化手段,有助于提升电路的性能和可靠性。

参考文献:

- [1] 杨素行. 模拟电子技术基础简明教程 [M]. 3 版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [2] 王利丹. 提高可编程增益放大器准确度的一种简单方法 [J]. 电力电子, 2008(2):29-31.
- [3] 郭光明, 王秀华. 模拟数据采集系统误差的自动纠正 [J]. 科技创业, 2000(5):11-13+56.
- [4] 郑君里, 应启珩, 杨为理. 信号与系统: 上册 [M]. 3 版. 北京: 高等教育出版社, 2011:41-100.
- [5] 张晓威, 苏淑靖. 基于 FPGA 的高速高精度数据采集系统的设计 [J]. 仪表技术与传感器, 2016(1):70-72+75.
- [6] 陈兴尧. 备品备件管理系统在变电站二次缺陷管理中的应用 [J]. 机电信息, 2018(12):49-50.
- [7] 王朝凯, 范永璞, 印海洋, 等. 一种基于 Git 的智能变电站二次回路信息模型的版本管理系统 [J]. 电工文摘, 2019(6): 41-43.
- [8] 林利祥, 陈创, 王幸, 等. 基于物联网 RFID 和 IC 卡技术的变电站图纸管理系统研究 [J]. 电气技术, 2020(5): 61-65.
- [9] 周二彪, 李忠政, 赵军, 等. 基于三维引擎的变电站二次系统三维模型库设计和管理系统 [J]. 电气技术, 2020, 21(8): 58-65.
- [10] 许磊, 郑超, 孟洋洋, 等. 智能变电站二次装置一键式隔离系统研究 [J]. 电测与仪表, 2024, 61(6):141-147.

【作者简介】

薛长青 (1983—), 男, 山东济南人, 本科, 中级工程师, 研究方向: 云平台、EDA 平台、物联网平台相关工程技术研究、开发。

胡广建 (1989—), 男, 山东济南人, 本科, 中级工程师, 研究方向: 测控系统级和硬件设计。

(收稿日期: 2024-09-20)