

基于顺序优化的液压集成块孔道连通设计

田树军*, 贾春强, 王丹虹, 刘万辉

(大连理工大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 在全面分析液压集成块内部孔道结构特征和设计规律的基础上, 提出了一种基于顺序优化的液压集成块孔道连通优化设计方法, 并给出了该问题的数学优化模型; 通过对两端线网的连通顺序及其连通算法的研究给出了单线网孔道连通设计方法, 研究了多条线网的连通优化策略, 实现了液压集成块内部多线网孔道网络连通优化设计, 为提高集成块设计水平和自动化程度提供了必要的技术支持, 最后的实例验证了方法的可行性和有效性。

关键词: 液压集成块; 顺序优化; 连通设计; 模拟退火算法

中图分类号: TH122; TP391.7 **文献标志码:** A

0 引言

液压集成块是安装各类板式阀和插装阀及其他附件的承装载体, 由于液压系统组成的非标准性和所承装阀体及其相互连通关系的多样性, 集成块内部通油孔道常常构成立体交叉、密集复杂的孔系网络, 使其设计工作颇为费时费力且极易出错。

集成块的孔道连通设计, 是根据系统原理图中各油口间的连通关系及集成块装配关系设计方案, 确定连通孔道的位置和深度, 以及必要时增加的工艺孔的位置和深度。目前国内外对集成块孔道连通设计的研究主要是以工艺孔数目最少及连通路程最短为优化目标^[1~3]来进行的。该方法只能实现单线网(借鉴集成电路布图^[4]中的线网概念)连通最优, 很难保证整个孔系网络的连通结果最优。本文在全面分析集成块内部孔道空间关系及孔道连通设计规律的基础上, 提出一种基于顺序优化的集成块孔道连通设计方法, 即在实时孔道干涉校核下, 对单条线网内部多个两端线网的连通顺序和多条线网之间的布线顺序进行优化, 在保证所有孔道百分之百连通下完成所有孔道的最优化设计。

1 液压集成块孔道连通设计的数学优化模型

集成块一般由多条线网组成, 每条线网的连通优化设计是在实时孔道干涉校核下, 以两端线网连通设计算法为基础, 结合线网内多个两端线网的连通优化顺序实现单条线网内所有孔道的连通优化。所有线网的连通则以单线网孔道连通优化设计为支撑, 利用多条线网之间的布线优化顺序逐条完成每条线网的连通设计, 最后实现所有线网的连通优化设计。图1所示为液压集成块孔道连通设计规划。

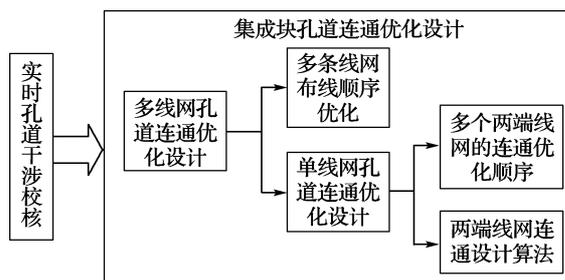


图1 液压集成块孔道连通设计规划

Fig. 1 Design layout of hole connection in HMB

收稿日期: 2006-07-11; 修回日期: 2008-02-09.
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50375023).
作者简介: 田树军*(1951-), 男, 教授, 博士生导师。

1.1 设计变量

在全面分析集成块的结构特征、内部孔道空

间关系和孔道连通设计规律的基础上,给出液压集成块孔道网络优化设计的参数:

$$\begin{cases} \mathbf{H} = \mathbf{H}_i^T = (F_i \ X_i \ Y_i \ Z_i \ R_i \ L_i)^T; \quad i = 0, 1, \dots, M, \quad M \geq 2 \\ \mathbf{h} = \mathbf{h}_j^T = (f_j \ x_j \ y_j \ z_j \ r_j \ l_j)^T; \quad j = 0, 1, \dots, N \\ \mathbf{O} = (a_1 \ a_2 \ \dots \ a_\alpha \ \dots \ a_\beta \ \dots \ a_p)^T; \quad 1 \leq \alpha \neq \beta \leq P \\ \mathbf{S}_k = F(H_u \ H_v); \quad 1 \leq u, v \leq M \\ \mathbf{S} = (S_1 \ S_2 \ \dots \ S_k)^T; \quad k = C_M^2 \end{cases} \quad (1)$$

式中: \mathbf{H} 为单线网中需连通的孔道; M 为单线网中需连通的孔道个数, $M=2$ 表示两端线网, $M>2$ 表示多端线网; \mathbf{h} 为设计的工艺孔; N 为工艺孔数目,当 $N=0$ 时,表示孔道可直接连通,不需工艺孔; F_i 和 f_j 分别为连通孔道和工艺孔所在的构造基面; X_i, Y_i, Z_i 和 x_j, y_j, z_j 分别为连通孔道和工艺孔在集成块体上的位置坐标; R_i, L_i 和 r_j, l_j 分别为连通孔道和工艺孔的半径和深度; \mathbf{O} 为所有线网的布线顺序; a_α, a_β 分别表示第 α, β 条线网; P 为需连线网的个数; \mathbf{S}_k 为某一线网中任一两端线网; u, v 为该线网中任意两端孔; \mathbf{S} 为 \mathbf{S}_k 的排列顺序, k 为所有端孔 M 中任意两孔的组合数。

在上述参数中,端孔 \mathbf{H} 参数 F, X, Y, Z, R 可通过元件在集成块上的布局结果及其标准数据直接得出,是已知常量.需要确定的未知变量是:工艺孔数目 N 、工艺孔参数 \mathbf{h} 以及端孔的深度 L .为尽可能避免孔道之间的相互干涉,本文采用工艺孔直径尽量小的原则,一般取 $r_j = \min(R_1, \dots, R_M)$.

1.2 确定目标函数

从液压集成块加工工艺性及液压系统性能两方面综合考虑,孔道连通优化设计应同时满足集成块内孔道路径总长最短和工艺孔数目最少两个目标.本文从集成块孔道网络特性出发,将孔道网络连通优化设计分为两个层次:底层是基于两端线网连通顺序优化的单线网连通设计,上层是基于多条线网布线顺序优化的多线网网络总体设计.

(1) 单线网连通设计的优化目标是线网路径最短和工艺孔个数最少,该目标函数与单线网内所有两端线网的连通顺序 \mathbf{S} 有关,即

$$\begin{cases} \min F(\mathbf{H}, \mathbf{h}, \mathbf{S}) = \sum_{i=0}^M L_i + \sum_{j=0}^N l_j \\ \min N \end{cases} \quad (2)$$

(2) 液压集成块多线网孔道网络设计的优化目标是所有连通线网的总路径最短、工艺孔总数

最少,此目标函数与线网布线顺序 \mathbf{O} 有关,即

$$\begin{cases} \min G(\mathbf{H}, \mathbf{h}, \mathbf{O}) = \sum_{k=1}^P F_k \\ \min Q(\mathbf{H}, \mathbf{h}, \mathbf{O}) = \sum_{k=1}^P N_k \end{cases} \quad (3)$$

1.3 确定约束条件

集成块孔道连通优化设计的最终结果必须满足由系统原理图确定的连通关系要求和孔道加工工艺要求,由此可以确定孔道连通优化设计的约束条件,具体描述如下.

(1) 孔道之间满足通断品质要求,即所有孔道及其相贯部分的通流面积必须大于最小通流截面积,即 $A_t \geq A_{\min} (1 \leq t \leq m)$,其中 A_t 为孔道网络中任一孔道或孔道相贯部分的通流面积, m 为集成块内所有孔道数, $m = M + N$, A_{\min} 为集成块中孔道需满足的最小面积,其值可由系统工作参数计算得出.

(2) 孔道与孔道之间及孔道与集成块的各面之间满足安全壁厚要求: $W_{ij} \geq W_{\min}$ 且 $W_{if} \geq W_{\min} (1 \leq i \neq j \leq m)$,其中 W_{ij} 和 W_{if} 分别为任意两孔道之间及孔道与集成块各面之间的壁厚, W_{\min} 为最小安全壁厚,其值与集成块材料有关.

(3) 所有孔道深度及其半径均在可加工范围之内,即对于某一直径的孔道都有其最大的加工深度要求: $D_i/L_i \geq C_d (1 \leq i \leq m)$,不同的孔道直径 C_d 值也不同.

由上述分析可知,集成块孔道连通优化设计是在实时孔道校核下的单线网连通和多线网连通的总体优化设计;是一个带约束的多目标函数优化问题.本文采用线性加权法构造相应的评价函数,然后求解该评价函数的最优解.

2 单线网孔道连通优化设计

2.1 实时孔道校核

液压集成块的孔道校核是检查孔道是否满足

上述约束条件的过程,其算法已比较成熟,目前主要有孔道表面网格化、布尔运算、逻辑判断等多种方法。但本文的孔道校核需在孔道连通过程中亦即在优化过程中实时反复多次进行,故要求其必须具备快速、简便的特点。为此,本文采用基于规则的逻辑判断方法^[5],将孔道简化为一个包括圆锥顶角深度的包络圆柱体(对于阶梯孔则采用分段包络法),然后根据它们之间的空间关系进行逻辑判断。本文还在其中增加了对约束条件(1)、(2)、(3)的判别,此处不作详细叙述。

2.2 两端线网孔道连通设计

两端线网的孔道连通是整个集成块孔道连通设计的基础。本文采用基于规则的启发式算法^[5],根据需连通两端孔的相互空间位置关系,制定一组指导算法搜索方向的规则集,在实时孔道校核下计算机在解空间中自动寻找一个满足约束条件的最好解。该算法可避免过多的工艺孔,且可以满足单线网内连通路程最短和工艺孔数最少的设计要求。

2.3 基于连通顺序优化的单线网孔道连通优化设计

对于多孔道的单线网连通问题,本文借鉴集成电路布线理论中的多端线网布线策略^[4],将多端线网分解成一系列两端子线网,分别对其实施连通。

最后完成整个多端线网的设计。这样,多端线网的连通问题就转化成一系列两端线网的连通问题。

为达到孔道连通的最优化设计,还必须对所有两端线网的连通顺序进行优化,本文采用启发式策略对单线网内的两端线网进行排序,优先连通工艺孔最少和连通路程最短的两端线网,最终实现多端线网的孔道连通优化设计。具体策略如下:

(1)首先将所有端孔两两配对,构成由所有M个端孔组成的连通示意图,如图2(a)所示。按照上述研究的两端线网孔道连通设计方法,根据两端孔的坐标位置确定连通两端孔所需要的工艺孔数目和最短路径,并以此作为以这两端孔为顶点的边的权值(其权值为本文为说明问题而作的假设,权值第1项为工艺孔数,第2项为连通路程长度)。逐项比较权值,选择权值最小的边(比如 $H_1 H_3$)作为第1条两端线网进行连通。

(2)将线网中已经连通的端孔(H_1 、 H_3)和新增的工艺孔(h_1)组成一个子集A,剩下的端孔(H_2 、 H_4)组成另一个子集B,构成一个完全2部分图, $\{A, B\}$ 为它的2部划分,如图2(b)所示。仍然采用前述算法,判断该图中各边的权值,选择其中权值最小的边作为待连通的两端线网进行连通。重复步骤(2),直至子集B为空。

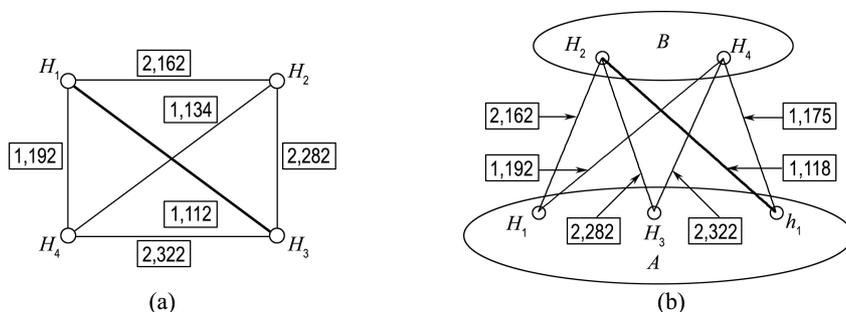


图2 多端线网处理策略

Fig. 2 The strategy for connection design of networks

根据上述策略,总是优先连通工艺孔最少和连通路程最短的两个端孔,以此确定单条线网内多个两端线网的连通优化顺序,可以实现单条线网的最优化连通。

3 多线网孔道网络连通优化设计

3.1 多线网孔道网络连通设计问题

前文所述算法可以实现满足连通约束和加工约束的单线网最优连通设计。但当有多条线网需

要连通时,若按照某一既定的顺序对一条条线网进行连通,很有可能因为已经连通的线网对后来需连通的线网产生干涉,导致后者无法布通,或即使布通但不是最短路径。如图3所示实例,在图3(b)中,先布线网a后布b,则路径总长度为12;而按图3(c)所示,先布b后布a,则路径总长度减为8。由此可知布线顺序是集成块孔道网络设计的一个重要因素。

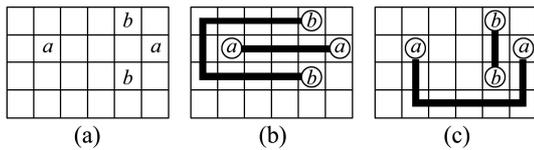


图 3 布线顺序对连通结果的影响实例
Fig. 3 Connection example affected by order of connecting

而要构造多线网孔道网络连通问题的全局最优解,必将导致对解空间的完全枚举.具有 P 条线网的布孔问题的规模数为 P ,完全枚举的计算量则为 $P!$,随着 P 的增大,会出现“组合爆炸”现象,这在计算空间和时间上都是不允许的,所以这是一个 NP 组合优化问题.

3.2 基于布线顺序优化的多线网孔道网络优化设计

模拟退火算法 (simulated annealing algorithm, SA) 和遗传算法 (genetic algorithm, GA) 等智能优化算法的发展,为解决 NP-C 类组合优化问题提供了新的思路 and 手段.其中 GA 通过概率意义下的基于“优胜劣汰”思想的群体遗传操作来实现优化,但它存在“过早收敛”的缺陷,容易陷入局部最优解,而 SA 采用 Metropolis 接受准则,并用冷却进度表控制算法进程,具有跳出局部极小区域的能力,能寻找到全局最优或近似全局最优而与初始点的选择无关^[6].

鉴于布线顺序优化问题与 TSP 问题的相似性及 SA 在 TSP 求解的成功经验^[6],本文采用模拟退火算法来解决集成块布线顺序问题,其基本思想是:以实时干涉校核下的单线网孔道连通算法为基础,以短线序策略^[4](按覆盖线网所有端点的最小长方体周长顺序,小的先布)来构造初始解;在 $P \leq 5$ 时用完全枚举算法, $P > 5$ 时用 SA 算法,最终得到一个布孔优化方案.

(1) 数学模型

针对式(3)所示的多线网孔道网络优化设计目标及约束条件,本文采用线性加权法构造如式(4)所示的评价函数,式中 λ_1 和 λ_2 分别是路径总长和工艺孔总数的权值.

$$\begin{cases} \min W(\mathbf{H}, \mathbf{h}, \mathbf{O}) = \lambda_1 \times G + \lambda_2 \times Q \\ \text{s. t. } A_t \geq A_{\min}; 1 \leq t \leq m \\ W_{ij} \geq W_{\min} \text{ 且 } W_{if} \geq W_{\min}; 1 \leq i \neq j \leq m \\ D_i/L_i \geq C_d; 1 \leq i \leq m \end{cases} \quad (4)$$

其中约束条件通过实时孔道校核算法得以保证,具体实现可见文献[5].

(2) 新解的产生和接受机制

本问题的解是 P 个自然数的一个排列,与 TSP 中路径的描述类似,因此采用 2 变换和 3 变换随机交替使用的方法来构造新解.判断新解是否被接受的依据是 Metropolis 接受准则,除接受优化解外,还在一个限定范围内接受恶化解.

(3) 冷却进度表

冷却进度表是用于控制算法进程的一组参数的集合,包括控制参数的初值 T 及其衰减因子 ΔT 、对应的 Markov 链的长度 L 和停止准则 S 等,文献[7]给出了这些参数的选取原则.

4 应用实例

基于上述研究,本文采用 VC++6.0 开发了集成块孔道网络优化设计系统的相应关键部分软件原型,同时基于 ObjectARX 在 MDT 上开发了集成块三维装配环境^[8],用于显示设计结果.

以下以某插装阀液压系统为例进行孔道连通优化设计.该系统包括 4 个控制盖板、3 个控制元件、4 个管接头,共 7 条线网,系统原理如图 4 所示.选取控制参数 $T=0.5, \Delta T=0.9, L=300, \lambda_1=1, \lambda_2=100$ (使路径总长和工艺孔总数成为相同数量级的变量), W 在连续 2 个 Markov 链中对解无任何变动时停止算法运行.当 t 降到 0.295 245 时得到如下的优化结果:共有 46 条孔道,其中 12 条为工艺孔,线网总长度为 2 569 mm.集成块的各边长分别为 200、220、128 mm,设计结果的孔道网络桁架结构图和立体装配图如图 5 所示.

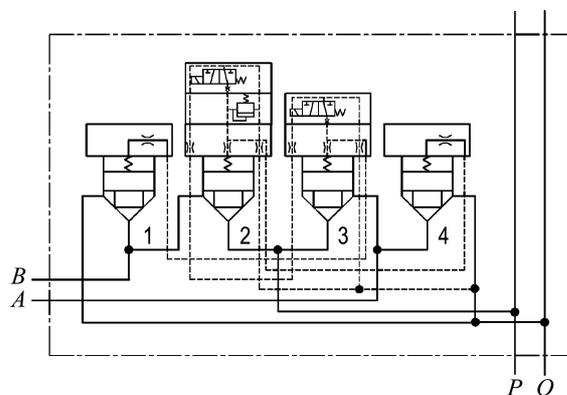


图 4 插装阀液压系统原理图

Fig. 4 Principle of hydraulic system of cartridge valves

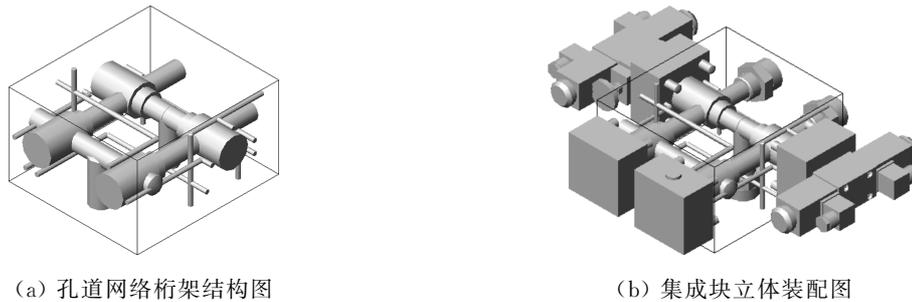


图5 液压集成块设计实例

Fig. 5 Design example of HMB

5 结 语

研究表明,对单线网内多个两端线网之间的连通顺序优化和多条线网之间的布线顺序优化,不仅可以实现单线网连通的优化设计,还可保证整个孔系网络的连通结果最优.同时,作为集成块总体布局布孔优化设计的底层核心算法,为提高集成块设计水平和质量及其自动化程度提供了有力的技术保障.该问题的进一步研究应根据实际问题的具体情况适当选择控制参数和冷却进度表,以尽量提高算法的效率和解的质量.同时,可以将孔道网络的结构优化设计与网络流场动态性能仿真分析结合为一体,实现在产品设计开发阶段预知其动态性能并进行有针对性的改进和提高,达到更高性能品质的结构优化设计.

参 考 文 献:

[1] 周惠友,钟廷修. 液压集成块路径优化设计[J]. 上海

交通大学学报,2001,35(12):1842-1845

- [2] WONG P K, CHUEN C W, LEUNG T P. Cad of hydraulic manifold blocks using an object-oriented approach [J]. *ASME, Fluid Power Systems and Technology*, 1997, 4:183-189
- [3] Leandro Soares Indrusiak. 3D integrated circuit layout visualization using VRML[J]. *Future Generation Computer Systems*, 2001, 17(5):503-511
- [4] 洪先龙,严晓浪,乔长阁. 超大规模集成电路布图理论与算法[M]. 北京:科学出版社,1998
- [5] 冯毅,田树军,高艳明,等. 液压集成系统智能化虚拟设计中的核心算法研究[J]. 系统仿真学报,2006, 18(3):607-612
- [6] 高海昌,冯博琴,朱利,等. 智能优化算法求解 TSP 问题[J]. 控制与决策,2006, 21(3):241-248
- [7] 王凌. 智能优化算法及其应用[M]. 北京:清华大学出版社,2001
- [8] 李利,冯毅,田树军,等. 基于 AutoCAD 的液压集成块参数化装配环境[J]. 机床与液压,2002(4): 114-117

Connecting design based on sequence-optimization of hydraulic manifold blocks

TIAN Shu-jun*, JIA Chun-qiang, WANG Dan-hong, LIU Wan-hui

(School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: A new method of holes connection based on sequential optimization is introduced by analyzing the structure features and design rules of hydraulic manifold blocks, and the mathematical optimizing model is given accordingly. The connection algorithm of single network is put forward by studying optimal connecting order among the two-hole networks and the connection algorithm of two-hole network, and the optimal strategies of connecting sequence for all networks are researched. And all networks of hydraulic manifold blocks are optimum connected, which is a technical aid for improving manifold blocks design level and automatic extents. An example validates the feasibility of the sequence-optimal method of holes connection.

Key words: hydraulic manifold blocks; sequential optimization; connecting design; simulated annealing algorithm