**文章编号:**1000-8608(2010)01-0070-05

# 以 CFD 方法研究液压集成块设计策略

张 宏\*, 王永安, 田树军, 曹宇宁

(大连理工大学精密与特种加工教育部重点实验室,辽宁大连 116024)

摘要:为使设计的液压集成块具有良好的通流品质,运用计算流体动力学(CFD)方法研究 了其流道内部的流动特性.研究结果表明,孔道的布局及连通关系设计对块体性能优劣产生 重要影响.在布局上具有相似性的孔道连通结构,应优先选择同面或邻面的布局方式;为提高 孔道通流品质,根据工艺孔道结构与流道压降之间的关系,提出满足结构需求前提下缩短工 艺孔道长度、增大孔径的优化设计方向,并通过计算低雷诺数局部阻力系数对直角转向的性 能品质影响进行直角转向优化设计.从性能角度确立了集成块结构优化设计策略,为液压集 成块性能约束与结构约束相结合进行全局性寻优设计奠定了基础.

关键词:液压集成块; CFD;性能约束;结构约束;设计策略 中图分类号: TP391.9 文献标志码: A

#### 0 引 言

液压集成块作为液压阀及其他附件的承装载体,其设计过程可以分为外部元件的布局设计和内部孔道的连通设计<sup>[1]</sup>.目前,国内外所见的各种集成块 CAD 研究,主要围绕结构设计进行.文献 [2、3]运用人工智能和 CAD 技术相结合解决集成块的元件布局和孔道设计问题;文献[4]将集成块的设计过程分为液压阀布局、油路概念设计、油路详细设计和集成块校核 4 个阶段,借助虚拟装配技术进行集成块的快速设计;文献[5、6]应用遗传算法、模拟退火算法及人机结合的智能虚拟设计模式进行集成块的优化设计,实现了外部布局和内部布孔集成方案的自动优化.

评价一个布局方案的优劣,不仅要依据块体 体积、工艺孔数目及孔道长度等结构指标,还要分 析该布局方案下的连通孔道是否具有好的通流品 质.在孔道连通设计阶段,尽管构成的流道在结构 上皆可实现连通,但其通流性能往往有明显差别. 因此,在液压集成块的设计过程中,只有将通流性 能指标纳入以布局设计及孔道连通设计为核心的 结构设计当中,获得的设计结果才对工程实际更 具现实意义.基于此,本文用计算流体动力学 (CFD)方法对流道的流动特性进行研究,分析以 优良通流品质为目标的性能约束条件,将其纳入 结构设计约束并进行综合寻优,确立结构与性能 兼优的集成块设计策略.

### 1 液压集成块流道模型

如图 1(a) 所示,集成块模型的进、出流孔道 与外部的两个液压阀相连,在内部通过一条工艺 孔道实现连通,并由此构成两个局部阻碍结构(直 角转向). 当液压阀在块体表面进行同面、邻面及 对面布局时,随之可构成在结构上具有相似性,并 且皆可满足连通要求的三类流道,如图 1(b) 所 示. 为方便说明,假设入流孔道通径 d<sub>1</sub> 大于出流 孔道通径 d<sub>2</sub>.



基金项目:国家自然科学基金资助项目(50375023).

作者简介:张 宏\*(1977-),女,讲师,E-mail:jxzh@dlut.edu.cn.

# 2 数值计算方法

数值计算采用 FLUENT 作为 CFD 求解器<sup>[7]</sup>,本文是研究流道的稳态流动特性,可假设流体是粘性不可压流体,则流体运动的控制方程为

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \tag{1}$$

$$(\boldsymbol{v} \cdot \nabla)\boldsymbol{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \boldsymbol{v}$$
(2)

式中:v是速度矢量,p是压力, $\rho$ 是密度, $\nu$ 是运动 黏度.

方程雷诺应力项的平均是基于 Boussinesq 假设,求解过程采用标准 k-ε 紊流模型.控制方程 的离散方法是有限体积法,为避免数值振荡现象 和提高计算精度,对流项采用二阶迎风格式进行 离散,而扩散项的离散则采用中心差分格式.边界 条件是采用速度入口及出口自由出流的搭配方 式,其他约束条件皆是固定无滑移壁面,速度的大 小根据下文所要研究的问题而定.以非结构化网 格对计算域进行网格划分,为提高数值计算结果 的准确度,保证划分的网格数目与计算结果不相 关.在贴体坐标系下,采用 SIMPLE 算法迭代求 解各变量的离散方程.

# 3 计算结果及规律分析

### 3.1 布局设计对通流品质的影响

图 2 所示曲线表明了 3 类组合流道的阻力特 性,尽管 3 类流道的结构具有相似性,但三者的阻 力特性却有明显的差别,而且三者的差别随着流 量的上升表现得越发明显.由图中曲线可知:Ⅰ类 流道的阻力特性最弱,Ⅲ类流道的阻力特性最强, 即Ⅰ类流道的通流品质最优,而Ⅲ类流道的通流 品质最差.这也表明,尽管液压阀的3种布局在结 构设计中不存在优先级,但在三者都满足结构设 计要求的前提下,为提高流道的通流品质,可优先 将两液压阀进行同面或邻面布局.



图 2 流道压降与布局方式的关系 Fig. 2 Pressure-drop of channel versus layout mode

为了解释布局方式与流道压降的内在关系, 分别在3类流道上选取如下截面:截面①位于上 游直角转向的上游,截面②位于两直角转向的中 间,截面③位于下游直角转向的下游.如图3所 示,3类流道在截面①上的速度分布均匀并且相 同,而截面②上的速度分布也近似相同,故三者在 截面①②之间区域上的压降几乎相等.



图 3 组合流道的速度分布(L=4D) Fig. 3 Velocity distribution of combined channel (L=4D)

然而,截面②③间的压降却因流道的组合方 式而异.从图3不难发现,I类流道上截面②的流 核(截面上的高速度区域)偏向于下游直角转向的 外侧壁,而截面③的流核也偏向于它的外侧壁,表 明流核在经过下游直角转向后几乎未产生相位转 变;对于II类流道,受组合方式的影响,截面②的 流核偏向于下游直角转向的旁侧壁面,而截面③ 的流核偏向于该转向的外侧壁,说明流核产生了 90°的转变;而对于Ⅲ类流道,截面②的流核偏向 于下游直角转向的内侧壁,而截面③的流核靠近 它的外侧壁,即流核实现了180°反相.流核发生 角度转换的根源在于流体质点间的动量交换,动 量交换越剧烈,则流体损失的能量就越多.这即为 I类流道压降最小,Ⅲ类流道压降最大的原因.

## 3.2 孔道连通设计对通流品质的影响

孔道连通设计包括工艺孔道、进出流孔道及

局部阻碍(直角转向),它们都对流道的通流品质 产生影响,现将分别讨论之.

(1)工艺孔道长度

在液压阀规格尺寸、安装空间及孔道安全壁 厚许可的前提下,减小工艺孔道长度 L 有助于提 高液压集成块的结构紧凑性及体积缩减.图 4 表 明了流道压降  $\Delta p$  与工艺孔长度 L 的关系,其中 D表示工艺孔的通径.本文将以 I 类流道为例揭示其 压降随工艺孔长度变化的原因.如图 5 所示,当 L< 1.5D 时,截面 ① 上的流核全部位于截面中央, 而截面 ② 上的流核随着 L 增加从直角转向的内侧 移向截面中央,表明流核在前、后两截面上的位置 变化呈现减小的趋势;如 3.1 中所述,流核的位置 变化越小,则 ①② 截面间的能量损失越少.当流 体通过截面 ②③ 时,在两截面上流核的位置变化 量亦随 L 增加而趋于减小,使得 ②③ 截面间的损 失也趋于降低.纵观全程,在L < 1.5D时 $\Delta p$ 随L的增加而降低.而当L > 1.5D时,经直角转向扰 动的流速在工艺孔道上进行调整,局部损失得以 部分表现,并随 L的增加而表现得越充分,故此时  $\Delta p$ 又随着 L 增大而呈现上升趋势.限于篇幅,L> 1.5D 时截面的速度分布图不再单独给出.









I 类流道的两个液压阀布置于同面,受液压 阀安装底面的尺寸限制,工艺孔长度 L 在 0 ~ 4D 的情况不可能出现;当L>4D时,Δp随着L增加 而升高,因此减小L 有利于集成块体积的缩减及 通流品质的提高.而 II、II 类流道的液压阀是异 面布置,L可以在 0 ~ 4D 取值,此时流道的通流 品质随着L的增加而提高;另一方面,L增加必然 增大了集成块体积.分析图 4(c)中  $Q_3$  流量下的 曲线可知,当L从1.7D增大到5D时,液压集成块 的体积增大很明显,但Δp 仅降低了 0.04 MPa.这 表明为进一步提高通流品质而加长工艺孔道的方 法并不可取.此时,应优先满足结构设计的要求, 即适当缩短工艺孔以求紧凑结构和缩减块体体积.

#### (2)工艺孔道通径

进、出流孔道的通径 d<sub>1</sub> 和 d<sub>2</sub> 由液压阀的规格 决定,但工艺孔通径 D 却不唯一确定.为减小孔 道干涉的可能性及增强结构紧凑性,设计集成块 时应该选择小通径的工艺孔道.另一方面,流道的 通流品质却对工艺孔通径提出不同要求:如图 6 所示,随着工艺孔通径 D 的增大,阻力特性曲线 斜率减小,流道的通流品质随之提高;当 D 从 d<sub>1</sub> 增大到 d<sub>2</sub> 时,流道的阻力特性明显降低,但从 d<sub>2</sub> 增加到 d<sub>3</sub> 时,尽管 D 的增幅高达 40%,但流道的 阻力特性并未明显减弱,这表明当 $D > \max(d_1, d_2)$ 时,采用增大工艺孔通径的方法不能显著提升流道的通流品质.综合考虑结构设计与通流品质双方面的设计要求,工艺孔道通径D取 $\max(d_1, d_2)$ 为最佳.







#### (3) 直角转向结构

直角转向是工艺孔道与进、出流孔道正交产 生的,工艺孔道的通径 D 一经确定,其长度和位 置就决定了直角转向的结构.现以 O(0,0) 为原 点建立如图 7 所示的坐标系,则顶点 P(x,y) 对 应确定了直角转向的结构.常见的直角转向有如 下 3 类:

a: 
$$\begin{cases} x = 0 \\ y = 0 \end{cases}$$
  
b: 
$$\begin{cases} x = 0.5(d_1 + d_1 \cot 59^\circ + \delta \cdot d_1) \\ y = -0.5d_1 \cot 59^\circ \end{cases}$$
  
c: 
$$\begin{cases} x = 0.5d_1 \cot 59^\circ \\ y = -0.5(d_1 + d_1 \cot 59^\circ + \delta \cdot d_1) \end{cases}$$

式中:d1 表示入流孔道直径,δ 是加工余量系数.



Fig. 7 Right-angled diversion

局部阻力系数是评价局部阻碍通流品质的常 用方法,本文计算出雷诺数为1720时直角转向 的局部阻力系数,以此量化评价三者的通流品质. 计算方法如下:

$$\zeta = \frac{\Delta(\Delta H)}{\max(v_1^2, v_2^2)/2g} \tag{3}$$

式中: $\Delta(\Delta H)$ 表示局部阻碍引起的机械能损失,  $v_1$ 和 $v_2$ 分别是局部阻碍上、下游的平均速度,g是 重力加速度.计算结果见表 1.

表1 直角转向的局部阻力系数

Tab. 1 Local resistance coefficient of right-angled diversion

类型	δ	ζ
a	_	5.45
b	0.1	1.10
	0.3	1.28
	0.6	1.36
	0.1	0.82
с	0.3	0.84
	0.6	0.87

可以看出,b、c两类结构的计算数据与文献 [8]提供的数据(0.9~1.2)较为接近.但表中的数 据不仅考虑了因δ产生的结构差异,而且给出了 相应的雷诺数,即它的适用条件更加明确,故本文 结果具有较高的可信度.表1中的数据表明,a类 直角转向的性能最差,c类直角转向的性能品质 最优,设计流道时应优先选择 c类直角转向;b、c 两类直角转向的局部阻力系数都随δ的增大而增 大,表明减小δ有利于提高流道的性能品质,而 且,减小δ可缩减工艺孔道冗余腔,对缩减集成块 体积也极为有利.

(4)进、出流孔道长度

由于入流孔道的孔道长度正比于沿程损失, 缩短入流孔道可提高流道的通流品质.出流孔道 上的损失是局部损失与沿程损失的掺杂,缩短其 长度亦可减少能量损失;然而当孔道出口处于压 力恢复区时,又会造成流道通流品质的下降.考虑 到集成块的结构紧凑性及通流品质要求,模型中 进、出流孔道的长度可以适当缩减.

#### 4 结 论

(1)对于结构上具有一定的相似性,但布局方 式不同的3类流道而言,其通流品质存在明显的 差异,以Ⅰ类流道的通流品质最优,Ⅱ类流道次 之,Ⅲ类流道最差.在实施元件布局设计时,应优 先选择同面或邻面的布局方式. (2)孔道连通设计与集成块流道的通流品质 关系密切,综合集成块结构与通流品质两方面的 设计要求,(a)进行流道设计时应该适当缩短工艺 孔道的长度;(b)工艺孔道通径以取进、出流孔道 中的较大者为宜;(c)计算得出的直角转向的局部 阻力系数表明,孔道连通设计中以采用 c 类结构 为最佳,而且应该选择小的加工余量系数;(d)适 度缩短进、出流孔道不仅有助于提高流道的通流 品质,而且有利于集成块的体积缩减.

## 参考文献:

- [1]田树军,李利,冯毅.基于计算智能的液压集成块优化设计[J].中国机械工程,2003,14(17): 1492-1495
- [2] CHAMBON R, TOLLENAERE M. Automated AI-based mechanical design of hydraulic manifold blocks [J]. Computer-Aided Design, 1991, 23(3): 213-222

- [3] TOLLENAERE M. Benefits of an object based approach for the development of an intelligent CAD system [C] // Proceedings of AIENG'92 Applications of Artificial Intelligence in Engineering. New York: Elsevier, 1992
- [4] 高卫国,徐燕申,牛文铁. 基于广义装配的液压集成 块设计过程建模[J]. 天津大学学报,2006,**39**(4): 443-448
- [5]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,35(12):1842-1845
- [6] FENG Yi, LI Li, TIAN Shu-jun. Optimization design of hydraulic manifold blocks based on human-computer cooperative genetic algorithm [J].
  Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition), 2003, 16(3):317-320
- [7] FLUENT INC. Fluent 6.1 USERS Manual [M]. New Hampshire: Fluent Inc., 2001
- [8] 林建忠,阮晓东,陈邦国,等. 流体力学 [M]. 北京: 清华大学出版社,2005:239-244

#### Study of design strategy for hydraulic manifold block by CFD method

ZHANG Hong\*, WANG Yong-an, TIAN Shu-jun, CAO Yu-ning

(Key Laboratory for Precision & Non-traditional Machining Technology of Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract**: To design hydraulic manifold block (HMB) with high through-flow quality, calculated fluid dynamic (CFD) method is utilized to study the flow characteristics for internal channel. The study results show that the layout and connection relationship of the channel has great influence on the performance of HMB. In the layout way which has a similar structure of channel connectivity, priority should be given to the same surface or neighborhood surfaces. To improve the quality of channel flow, according to the relationship of craft pore structure and pressure drop, the optimal design direction is put forward, which includes reducing the length of craft pore, increasing the craft pore diameter and so on. And then, by calculating the local resistance coefficient with low Reynolds number on the performance of right-angle turn, the design of right-angle turn is optimized. HMB structural optimization design strategy is established from a performance point, which makes foundation for the overall optimization design of HMB combined with performance constraints and structural constraints.

Key words: hydraulic manifold block;CFD;performance constraint;structural constraint;design strategy