

混联液压系统通断特征知识表达模型及其分解规则

向明^{1,2}, 王德伦^{*1}, 吴南星²

(1. 大连理工大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116024;

2. 景德镇陶瓷大学 机械电子工程学院, 江西 景德镇 333001)

摘要:用通断特征矩阵表达混联液压系统初始设计要求进而形成阀体单元的知识表达模型,通过通断特征矩阵的分解与匹配操作来完成方向控制阀的概念设计.方向控制阀是混联液压系统液流控制的基本单元,通过实际模型中方向控制阀的通断特征建立基本单元库,并制定出特征矩阵串、并、混联运算规则.遵循特征矩阵的串、并、混联运算规则,初始矩阵被分为一系列子矩阵,通过子矩阵与单元库基本元素匹配完成液压系统方向控制阀的选型,将所有阀体组合可完成液压系统设计.整个特征矩阵分解与匹配过程便于编程实现,为混联液压系统计算机辅助设计提供了一种知识表达模型与运算方法,并通过实例验证了该方法的有效性和可行性.

关键词:概念设计;选型设计;知识表达;特征单元;液压系统

中图分类号:TN911.7 **文献标识码:**A **doi:**10.7511/dllgxb201806003

0 引言

液压系统概念设计是液压产品设计的重要环节,通常依靠设计者的经验来完成,不利于液压系统概念构型的性能对比与优选.

Zeng等^[1-2]将概念设计方法的实现分为两部分:知识的表达和分解规则的制定,并且指出知识的表达模型是概念创新设计的基础.Zou等^[3-4]运用邻接矩阵和关联矩阵作为机构概念设计运算和表达模型.为了进行折叠机构创新设计,白国超等^[5]提出了运用扩展矩阵形式进行设计过程的表达.综上所述,矩阵形式常用于概念设计模型的表达.

对于液压系统概念设计的研究一直是个热点,智能专家系统在液压概念设计中得到应用,Lin等^[6]开发了基于基本学习机制的专家系统,应用于液压系统的设计.Vong等^[7]使用产品的规则作为知识的来源,系统可以从以往的产品里不断提取有用信息,开发了用于液压系统设计的专家系统.Wong等^[8]采用面向对象方法开发了智能CAD系统,用于液压系统设计的软件系统.

李泽蓉等^[9]以液压系统的BOM结构为核心进行液压系统配置设计.上述文献提出液压系统设计方法或者软件系统最终得到液压系统构型的唯一解.

采用特征矩阵形式进行基本单元的匹配设计方法,已经在机械系统概念设计中得到了广泛的应用^[10-13].为了得到液压系统的设计,Kulak等^[14-15]提出一个通用框架去描述液压系统,定义了一系列基本单元模块,将模块的属性表示为矩阵形式,这个矩阵可以被分解为子任务,新的创新系统就可以得到.Ma等^[16-18]提出液压单回路串联系统的矩阵表达和综合策略,但仅给出了液压系统能量控制阀的选型以及单回路的求解过程,并没有涉及液压系统多动作混联系统设计以及方向控制阀的选型求解.

对于混联液压系统来说,方向控制阀阀体是组成系统、实现混联油路控制功能的基本单元,阀体之间的串、并、混联连接形成了混联的液压系统油路.本文提出一种通过特征矩阵分解与匹配完成方向控制阀选型以及混联液压系统概念设计方

法,并通过该方法得到多套液压系统概念设计方案,以供后续性能分析使用.

1 液压系统的特征与特征矩阵

混联液压系统是指能完成多个工艺动作的液压系统,多个工艺动作液压回路可视为多个单动作回路的组合.多个单动作回路的设计需求组合形成混联液压系统初始设计需求,并采用特征矩阵来表达.

1.1 单动作液压端口定义与有向图

液压系统需要完成油缸的进、退等工艺动作.完成一个工艺动作的回路称为单动作回路,如图1所示,液压系统由4个端口组成,分别为液压缸(B1、B2)、泵(P)、油缸(T).为简便叙述方向控制阀设计过程,油缸端口T用数字1表示,泵的输出端口P用数字2表示,液压缸B1、B2端口分别用数字3、4表示.图1所示为单动作回路液流由端口2流向端口3,回油由端口4流向端口1.将液流抽象表示为系统端口间方向矢量.

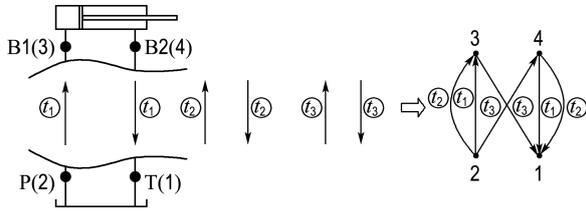


图1 单动作液压回路

Fig. 1 The single hydraulic circuit

图中 t_1, t_2, t_3 为3个单动作回路,根据上述定义端口编号,混联液压系统的3个单动作设计要求可用有向图表示,所有单动作要求表达在一个有向图内,作为混联液压系统的初始设计要求.

1.2 通断特征矩阵的表达

上述有向图表达了混联系统的初始设计要求,本文采用邻接矩阵形式对混联系统初始设计要求进行描述.邻接矩阵的表示形式为

$$A = (a_{ij})_{n \times n} \quad (1)$$

邻接矩阵可以表达点和点之间的关系.如图2所示,图2(b)为图2(a)的邻接矩阵.

邻接矩阵元素 a_{ij} 表示端口 j 流向端口 i ,采用特征符号 E 表示连通特征.矩阵元素 $a_{32} = E$ 表示两个端口之间在 t 时刻的通断,通常简化表示为 $a_{32} = E$,时间作为通断特征的属性存储,0表示无通断.那么,矩阵 A 称为混联液压系统通断

特征矩阵.液压系统的设计过程可通过初始矩阵分解为子矩阵的过程来表示.

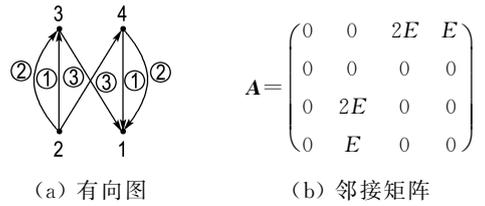


图2 有向通断图与邻接矩阵

Fig. 2 Directed switch graph and adjacency matrix

1.3 初始特征矩阵的分解

通断特征矩阵 A 有多种分解方案,不同的分解方案对应不同的系统设计方案.如图3所示,为多种分解方案中的3种.

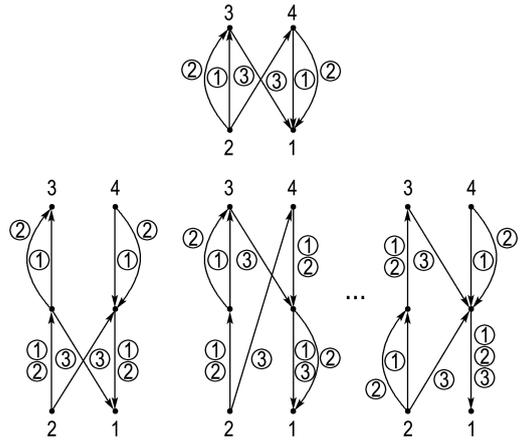


图3 混联液压系统的分解

Fig. 3 The decomposition of hybrid hydraulic system

2 阀体基本单元

液压方向控制阀基本单元通常有二通阀、三通阀、四通阀、单向阀,是组成液压系统方向控制的最小基本单元.

2.1 二通阀基本单元模型

一个二通阀有一个输入和一个输出端口,控制一个支路的通断.对于一个液压系统一个支路的通断由4种方案实现,如图4所示.

根据图4中4个通断图可列出二通阀的邻接矩阵表达:

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & E & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & E & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & E & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & E \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

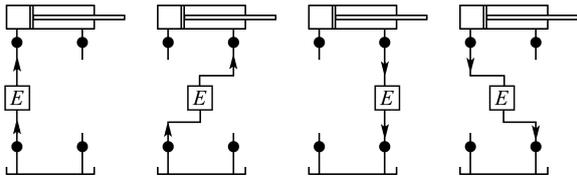


图 4 二通阀通断图

Fig. 4 The switch chart of two way valve

2.2 三通阀基本单元模型

一个三通阀的基本单元共连接 3 个输出输入端口,可以实现两个端口液流的切换.三通阀所连接端口情况可分列出如图 5 所示的 8 种.

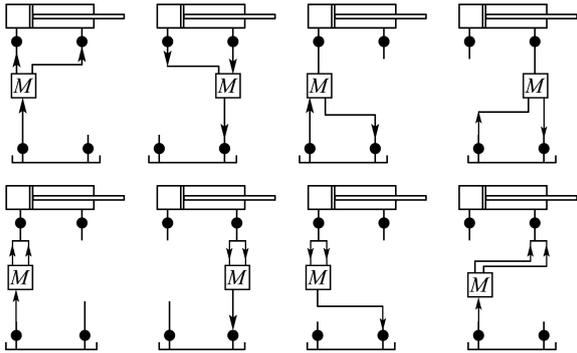


图 5 三通阀通断图

Fig. 5 The switch chart of three way valve

与二通阀基本单元定义方式一致,图 5 中第 1 个通断特征矩阵可表示为

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & E & 0 & 0 \\ 0 & E & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

那么,可以写出所有 8 种三通阀基本单元通断特征矩阵形式.

2.3 基本单元库建立

分析常用方向控制阀,如二通阀、三通阀、四通阀等,根据阀体方向控制特性将阀体的特征矩阵列出,得到 17 种方向控制阀单元组成的基本单元库.这些通断特征基本单元可以完成多动作混联液压系统方向控制阀的匹配设计.

3 阀体串、并、混联特征运算规则

特征元素 E 是通断特征的最小单位,给出单

个特征元素之间的串联和并联的计算规则.每个阀体的特征矩阵 A 包括一个或者多个特征元素 E ,两个阀体之间的串联、并联、混联的特征可以根据两个阀体包含所有特征元素之间的计算规则推断并表达出来.

3.1 特征元素串联组合

如图 6 所示,当两个特征元素 E_1 、 E_2 串联时,通断特征符号运算规则如下所示:

$$E' = \begin{cases} 0; & E_1=0, E_2=0 \\ 0; & E_1=E, E_2=0 \\ 0; & E_1=0, E_2=E \\ E; & E_1=E, E_2=E \end{cases} \quad (2)$$

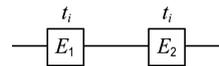


图 6 特征元素串联模型

Fig. 6 The serial model of characteristic element

要使得图 6 所示支路在 t_i 时刻为连通,即特征为 E 时, E_1 和 E_2 两个特征元素的通断特征值必须相同且等于 E . 即 $E_1^i = E_2^i = E$, 简化表示为 $E_1 = E_2 = E$. 如果两个元素之间的串联关系用 \otimes 运算符号表示,那么可写出 $E^i = E_1^i \otimes E_2^i$.

如图 7 所示,如果 $E_2 = E^i$, $E_3 = E^j$, 那么, E_1 的通断特征可表示为 $E_1 = E^{i+j}$.

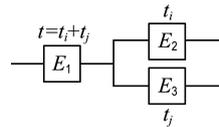


图 7 阀体串联模型

Fig. 7 The serial model of valve

采用运算符号可表示为 $E^i = E_1^{i+j} \otimes E_2^i$ 或者 $E^j = E_1^{i+j} \otimes E_3^j$, 式子的物理意义为,当一段支路在 t_i 和 t_j 时刻为连通,另一段在 t_i 时刻连通,那么它们串联时,可保证整个支路在 t_i 时刻连通,同理,在 t_j 时刻连通.

3.2 特征元素并联组合

如图 8 所示,两个通断特征元素并联,则并联通断特征符号运算规则如下所示:

$$E' = \begin{cases} 0; & E_1=0, E_2=0 \\ E; & E_1=E, E_2=0 \\ E; & E_1=0, E_2=E \end{cases} \quad (3)$$

在 t_i 、 t_j 时刻,两个通断特征元素并联,那么

特征元素符号运算规则表示为 $E^{t_i} \oplus E^{t_j} = 2E^{t_i+t_j}$.

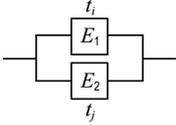


图8 特征元素并联模型

Fig. 8 The parallel model of characteristic element

3.3 阀体的串、并、混联组合

如图9(a)所示,当两个阀体 A_1 和 A_2 为二通阀,形成串联支路,端口特征为由端口2流向端口3,那么两个阀体串联表示为

$$A = A_1 \otimes A_2 =$$

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & E & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & E & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & E \otimes E & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

如图9(b)所示,当两个阀体 A_1 和 A_2 为二通阀,形成并联支路,端口特征为由端口2流向端口3,那么两个阀体并联表示为

$$A = A_1 \oplus A_2 =$$

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & E & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \oplus \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & E & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & E \oplus E & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

阀体混联与阀体串联、并联的区别在于,两个混联阀体所包含的特征元素只有一个特征元素是两个阀体共有的,即两个阀体串联了一个特征元素,其他的特征元素是并联的.如图9(c)所示,两个阀体混联表示为

$$A = A_1 \oplus A_2 =$$

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & E & 0 & 0 \\ 0 & E & 0 & 0 \end{pmatrix} \oplus \begin{pmatrix} 0 & 0 & E & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & E & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} =$$

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & E & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2E & 0 & 0 \\ 0 & E & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$A = A_1 \otimes A_2 =$$

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & E & 0 & 0 \\ 0 & E & 0 & 0 \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} 0 & 0 & E & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & E & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & E & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

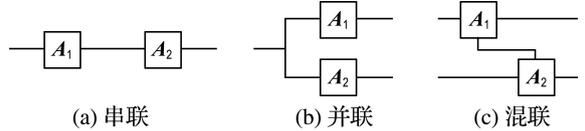


图9 阀体串、并、混联模型

Fig. 9 The serial, parallel and hybrid model of valves

4 通断特征矩阵分解规则与流程

通断特征矩阵 A 分解是矩阵组合的逆过程. 一个通断特征矩阵 A 每次分解得到两个子矩阵 A_1 和 A_2 . 一个特征矩阵每次经过3类分解方式进行分解,3类分解方式分别是串联、并联和混联分解. 总结3类6种分解规则.

4.1 通断特征矩阵分解规则

串联阀体的分解可表示为 $A \rightarrow A_1 \otimes A_2$, 并联阀体的分解可表示为 $A \rightarrow A_1 \oplus A_2$, 混联阀体分解包括并联和串联阀体分解.

串联阀体分解是特征矩阵中元素按串联分解规则进行的,根据不同端口信息写出串联形式的3种分解方式如图10所示.

总结3类串联分解规则1、2、3,分别对应图10(a)、(b)、(c).

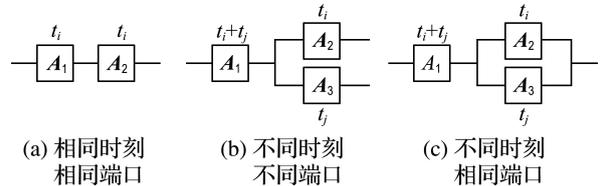


图10 阀体串联图

Fig. 10 The chart of serial valves

规则1:

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & E^{t_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & E^{t_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & E^{t_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

规则 2:

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & E^{t_1+t_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & E^{t_1+t_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & E^{t_1} & 0 & 0 \\ 0 & E^{t_2} & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & E^{t_1+t_2} & 0 & 0 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & E^{t_1+t_2} & 0 & 0 \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & E^{t_1} & 0 & 0 \\ 0 & E^{t_2} & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

规则 3:

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & E^{t_1+t_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & E^{t_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & E^{t_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

并联阀体的元素分解是 $2E \rightarrow E \oplus E, E \rightarrow 0 \oplus E, E \rightarrow E \oplus 0$. 特征矩阵中元素可按并联分解规则进行分解.

图 11(a)为两个阀体不同输出端口,图 11(b)为两个阀体相同输出端口,对应图 11(a)、(b)总结两类并联分解规则 1、2:

规则 1:

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & E^{t_1} & 0 & 0 \\ 0 & E^{t_2} & 0 & 0 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & E^{t_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \oplus \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & E^{t_2} & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

规则 2:

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2E^{t_1+t_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & E^{t_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \oplus \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & E^{t_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

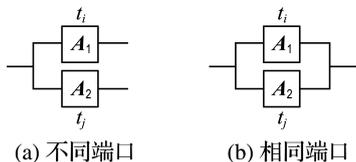


图 11 阀体并联图

Fig. 11 The chart of parallel valves

混联分解与串联、并联不同的是,两个阀体的混联,两个阀体的特征元素中仅有一个特征元素是串联,其余的特征元素是并联,如图 12 所示.

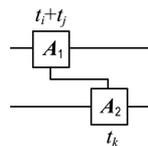


图 12 阀体混联图

Fig. 12 The chart of hybrid valves

总结一类混联分解规则如下所示:

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & E^{t_2} & E^{t_1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & E^{t_1} & 0 & 0 \\ 0 & E^{t_2} & 0 & 0 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & E^{t_1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & E^{t_1} & 0 & 0 \\ 0 & E^{t_2} & 0 & 0 \end{pmatrix} \oplus \begin{pmatrix} 0 & 0 & E^{t_2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & E^{t_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

4.2 特征矩阵分解流程

特征矩阵串、并、混联的分解可由程序自动完成. 运算规则指导着特征矩阵分解,每次一个矩阵分解出两个子矩阵. 每次分解完成后都需要进行子矩阵与单元库基本元素的匹配,如果没有匹配成功继续分解,直至分解的所有子矩阵仅含一个特征元素.

步骤 1 读取初始设计矩阵,提取特征元素端口信息、元素个数(c)等信息.

步骤 2 进行串联、并联、混联特征元素分解.

2.1 如果有相同端口的特征元素 $c \geq 3$ 则进行串联分解.

2.2 如果有相同端口的特征元素 $c \geq 2$ 则进行并联分解.

2.3 如果特征元素个数 $c \geq 3$,并且特征元素端口总数大于 3,则进行混联分解.

步骤 3 得到子矩阵 A_1, A_2 .

步骤 4 判断子矩阵是否与单元库基本元素相匹配,记录下相匹配的元素.

步骤 5 判断子矩阵元素个数 $c = 1$,不相等返回至步骤 2,进行进一步分解.

步骤 6 如果矩阵元素个数 $c = 1$,程序结束.

经过矩阵分解得到所有分解方案,经过整理可画出混联液压系统方案图.

5 设计算例

算例 1 混联液压系统初始设计要求有 3 个工艺动作:快进、工进、快退,系统由 3 个单动作子回路组合. 在回油路时两个时序回路可以合并. 那么,算例的液压系统初始设计要求有向图和特征矩阵形式如图 13(a)、(b)所示.

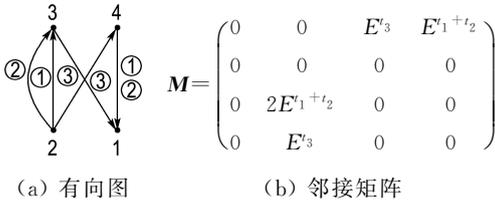


图 13 算例初始设计要求

Fig. 13 The initial design requirement of example

第 1 次分解需要将特征矩阵按 3 类 6 种分解规则进行分解. 表 1 列举串联分解方案, 表 2 列举并联分解方案, 表 3 列举混联分解方案.

表 1 串联阀体分解

Tab. 1 The decomposition of serial valves

方案	有向图	矩阵分解
1		$\begin{pmatrix} 0 & 0 & E^3 & E^{1+t_2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2E^{1+t_2} & 0 & 0 \\ 0 & E^3 & 0 & 0 \end{pmatrix} \rightarrow$ $\begin{pmatrix} 0 & 0 & E^3 & E^{1+t_2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & E^{1+t_2} & 0 & 0 \\ 0 & E^3 & 0 & 0 \end{pmatrix} \otimes$ $\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2E^{1+t_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$
2		$\begin{pmatrix} 0 & 0 & E^3 & E^{1+t_2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2E^{1+t_2} & 0 & 0 \\ 0 & E^3 & 0 & 0 \end{pmatrix} \rightarrow$ $\begin{pmatrix} 0 & 0 & E^3 & E^{1+t_2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & E^{2+(t_1+t_3)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \otimes$ $\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & E^1 & 0 & 0 \\ 0 & E^3 & 0 & 0 \end{pmatrix}$
3		$\begin{pmatrix} 0 & 0 & E^3 & E^{1+t_2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2E^{1+t_2} & 0 & 0 \\ 0 & E^3 & 0 & 0 \end{pmatrix} \rightarrow$ $\begin{pmatrix} 0 & 0 & E^3 & E^{1+t_2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & E^2 & 0 & 0 \\ 0 & E^3+t_1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \otimes$ $\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & E^1 & 0 & 0 \\ 0 & E^3 & 0 & 0 \end{pmatrix}$

表 2 并联阀体分解

Tab. 2 The decomposition of parallel valves

方案	有向图	矩阵分解
1		$\begin{pmatrix} 0 & 0 & E^3 & E^{1+t_2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2E^{1+t_2} & 0 & 0 \\ 0 & E^3 & 0 & 0 \end{pmatrix} \rightarrow$ $\begin{pmatrix} 0 & 0 & E^3 & E^{1+t_2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & E^3 & 0 & 0 \end{pmatrix} \oplus$ $\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2E^{1+t_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$
2		$\begin{pmatrix} 0 & 0 & E^3 & E^{1+t_2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2E^{1+t_2} & 0 & 0 \\ 0 & E^3 & 0 & 0 \end{pmatrix} \rightarrow$ $\begin{pmatrix} 0 & 0 & E^3 & E^{1+t_2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \oplus$ $\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2E^{1+t_2} & 0 & 0 \\ 0 & E^3 & 0 & 0 \end{pmatrix}$
3		$\begin{pmatrix} 0 & 0 & E^3 & E^{1+t_2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2E^{1+t_2} & 0 & 0 \\ 0 & E^3 & 0 & 0 \end{pmatrix} \rightarrow$ $\begin{pmatrix} 0 & 0 & E^3 & E^{1+t_2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2E^{1+t_2} & 0 & 0 \\ 0 & E^3 & 0 & 0 \end{pmatrix} \oplus$ $\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & E^1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$ $\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & E^2 & 0 & 0 \\ 0 & E^3 & 0 & 0 \end{pmatrix}$

得到第 1 次分解所有矩阵形式进行匹配, 如果一次分解的两个矩阵同时与基本单元库矩阵相同, 可记录为一次求解答案. 然后进行第 2 次分解, 依次类推直至分解完成.

为得到一种设计方案, 通常需要进行多次矩阵分解, 其中一个方案需要经过两次分解, 其分解过程如图 14 所示.

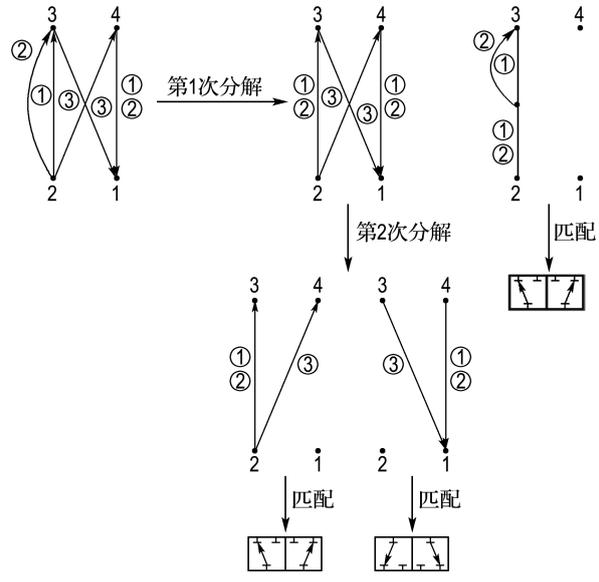
表 3 混联阀体分解

Tab. 3 The decomposition of hybrid valves

方案	有向图	矩阵分解
1		$\begin{pmatrix} 0 & 0 & E'_3 & E'_{1+t_2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2E'_{1+t_2} & 0 & 0 \\ 0 & E'_3 & 0 & 0 \end{pmatrix} \rightarrow$ $\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & E'_{1+t_2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & E'_1 & 0 & 0 \\ 0 & E'_3 & 0 & 0 \end{pmatrix} \oplus$ $\begin{pmatrix} 0 & 0 & E'_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & E'_2 & 0 & 0 \\ 0 & E'_3 & 0 & 0 \end{pmatrix}$
2		$\begin{pmatrix} 0 & 0 & E'_3 & E'_{1+t_2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2E'_{1+t_2} & 0 & 0 \\ 0 & E'_3 & 0 & 0 \end{pmatrix} \rightarrow$ $\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & E'_{1+t_2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & E'_2 & 0 & 0 \\ 0 & E'_3 & 0 & 0 \end{pmatrix} \oplus$ $\begin{pmatrix} 0 & 0 & E'_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & E'_1 & 0 & 0 \\ 0 & E'_3 & 0 & 0 \end{pmatrix}$
3		$\begin{pmatrix} 0 & 0 & E'_3 & E'_{1+t_2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2E'_{1+t_2} & 0 & 0 \\ 0 & E'_3 & 0 & 0 \end{pmatrix} \rightarrow$ $\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & E'_{1+t_2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & E'_2 & 0 & 0 \\ 0 & E'_3 & 0 & 0 \end{pmatrix} \oplus$ $\begin{pmatrix} 0 & 0 & E'_3 & E'_{1+t_2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & E'_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$

经过多次分解,整理出混联液压系统设计方
案共有 86 种.

在所有设计方案中选择一种方案,得到方向
控制阀选型设计和阀体混联装配形式.按照文献
[16-18]方法,得到单回路液压能量控制阀的选
型.将能量控制阀和方向控制阀装配在一起,形成
混联液压系统设计,如图 15 所示.



(a) 有向图

第 1 次分解:

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & E'_3 & E'_{1+t_2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2E'_{1+t_2} & 0 & 0 \\ 0 & E'_3 & 0 & 0 \end{pmatrix} \rightarrow$$

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & E'_3 & E'_{1+t_2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & E'_{1+t_2} & 0 & 0 \\ 0 & E'_3 & 0 & 0 \end{pmatrix} \otimes$$

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2E'_{1+t_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

第 2 次分解:

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & E'_3 & E'_{1+t_2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & E'_{1+t_2} & 0 & 0 \\ 0 & E'_3 & 0 & 0 \end{pmatrix} \rightarrow$$

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & E'_{1+t_2} & 0 & 0 \\ 0 & E'_3 & 0 & 0 \end{pmatrix} \oplus$$

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & E'_3 & E'_{1+t_2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

(b) 矩阵分解

图 14 方案两次分解过程

Fig. 14 Two decomposition process of scheme

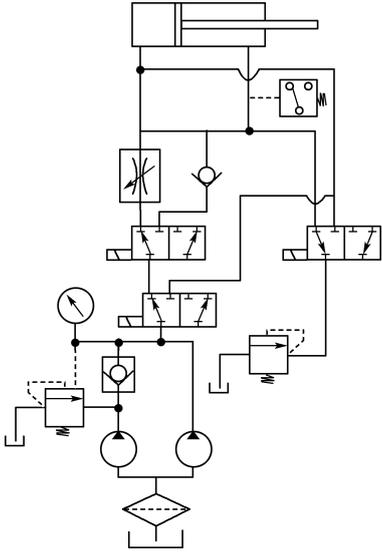


图 15 混联液压系统装配图

Fig. 15 The assembly drawing of hybrid hydraulic system

6 结 语

本文建立了一种通过特征矩阵的分解与匹配来完成方向控制阀选型的设计方法,根据方向控制阀体的特征建立基本单元库,采用通断物理模型,制定出特征矩阵的串、并、混联分解规则,为混联液压系统概念设计提供了易于编程实现的设计方法。

该方法也可适用于其他控制系统,如气动、电气控制系统等,为相关控制系统的概念设计方法提供了设计参考。

参 考 文 献:

- [1] ZENG Y, GU P. A science-based approach to product design theory - Part I: Formulation and formalization of design process [J]. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, 1999, 15(4): 331-339.
- [2] ZENG Y, GU P. A science-based approach to product design theory - Part II: Formulation of design requirements and products [J]. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, 1999, 15(4): 341-352.
- [3] ZOU Yanhuo, HE Peng, PEI Yongle. Automatic topological structural synthesis algorithm of planar simple joint kinematic chains [J]. **Advances in Mechanical Engineering**, 2016, 8(3):1-12.
- [4] CHU Jinkui, ZOU Yanhuo. An algorithm for structural synthesis of planar simple and multiple

joint kinematic chains [J]. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C-Journal of Mechanical Engineering Science**, 2014, 228(12): 2178-2192.

- [5] 白国超,李端玲,魏世民,等. 基于邻接图的变胞机构的矩阵描述及演算[J]. 北京邮电大学学报, 2014, 37(4):1-5.
BAI Guochao, LI Duanling, WEI Shimin, et al. Adjacency graph based matrix representations and operations of metamorphic mechanisms [J]. **Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications**, 2014, 37(4): 1-5. (in Chinese)
- [6] LIN Z C, SHEN C C. An investigation of an expert system for hydraulic circuit design with learning [J]. **Artificial Intelligence in Engineering**, 1995, 9(3):153-165.
- [7] VONG C M, LEUNG T P, WONG P K. Case-based reasoning and adaptation in hydraulic production machine design [J]. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, 2002, 15(6): 567-585.
- [8] WONG P K, LEUNG T P, CHUEN C W. Object-oriented CAD for practical hydraulic system design [J]. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, 1996, 9(5):499-514.
- [9] 李泽蓉,曾富洪,周兰花. 基于知识工程的液压系统配置设计[J]. 现代制造工程, 2012(7):126-133.
LI Zerong, ZENG Fuhong, ZHOU Lanhua. Hydraulic system configuration design based on knowledge engineering [J]. **Modern Manufacturing Engineering**, 2012(7):126-133. (in Chinese)
- [10] 王德伦,张德珍,马雅丽. 机械运动方案设计的状态空间方法[J]. 机械工程学报, 2003, 39(3):22-27.
WANG Delun, ZHANG Dezhen, MA Yali. New approach to automated conceptual design of mechanical system by means of state-space [J]. **Chinese Journal of Mechanical Engineering**, 2003, 39(3):22-27. (in Chinese)
- [11] 张利萍,王德伦. 混联机械系统组合方式广义特征状态方程[J]. 大连理工大学学报, 2007, 47(3): 372-377.
ZHANG Liping, WANG Delun. Generalized characteristic state equations for combination patterns of hybrid mechanism system [J]. **Journal of Dalian University of Technology**, 2007, 47(3): 372-377. (in Chinese)
- [12] 张利萍,王德伦. 混联机械系统方案设计特征状态

- 空间理论与方法[J]. 机械工程学报, 2006, **42**(12):26-35.
- ZHANG Liping, WANG Delun. New approach to automated conceptual design of hybrid mechanical system by means of characteristic state space [J]. **Chinese Journal of Mechanical Engineering**, 2006, **42**(12):26-35. (in Chinese)
- [13] ZHANG Liping, WANG Delun, DAI J S. Automated conceptual design for hybrid mechanisms based on characteristic state space theory [C] // **ASME 2008 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, IDETC/CIE2008**. New York: ASME, 2008:697-706.
- [14] KULAK O, DURMUSOGLU M B, TUFEKCI S. A complete cellular manufacturing system design methodology based on axiomatic design principles [J]. **Computers & Industrial Engineering**, 2005, **48**(4):765-787.
- [15] KOTA S, CHIOU S J. Conceptual design of mechanisms based on computational synthesis and simulation of kinematic building blocks [J]. **Journal of Research in Engineering Design**, 1992, **4**(2):75-87.
- [16] MA Wenyong, WANG Delun, TING K L. Characteristic matrices and conceptual design of hydraulic systems [J]. **Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME**, 2010, **132**(3):0310051-03100513.
- [17] 马文勇,王德伦. 液压系统方案设计的能量特征状态模型[J]. 机械工程学报, 2010, **46**(4):129-135.
MA Wenyong, WANG Delun. Energy characteristic state model of hydraulic system conceptual design [J]. **Journal of Mechanical Engineering**, 2010, **46**(4):129-135. (in Chinese)
- [18] 马文勇,王德伦. 液压元件功能知识表达的能量特征状态模型及其应用[J]. 大连理工大学学报, 2009, **49**(6):858-864.
MA Wenyong, WANG Delun. Energy characteristic state model for functional knowledge representation of hydraulic valves and its application [J]. **Journal of Dalian University of Technology**, 2009, **49**(6):858-864. (in Chinese)

Knowledge representation model of hybrid hydraulic system based on switch characterization and rule of decomposition

XIANG Ming^{1,2}, WANG Delun^{*1}, WU Nanxing²

(1. School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Jingdezhen Ceramic Institute, Jingdezhen 333001, China)

Abstract: The switch characterization matrix is used to express the initial design requirements of hybrid hydraulic system and develop the knowledge representation model of units of valves, then the conceptual design of the directional control valves is deduced by the decomposition and matching of the switch characterization matrix. The directional control valves are the minimum unit for flow control of hybrid hydraulic system. The basic unit library is obtained by switch characterization of directional control valves in practical model, then the serial, parallel and hybrid rules of characterization matrices are defined. According to these rules, the initial matrix can be decomposed into a serial of sub-matrices, and the type selection design of the directional control valves is obtained by matching the sub-matrices with the element in unit library. Therefore, the design of hydraulic system can be achieved by assembling those valves. The decomposition and matching of characterization matrix can be programmed. It provides a knowledge representation model and operation method for computer aided design of hybrid hydraulic system. The feasibility and availability of the proposed method are testified by example.

Key words: conceptual design; type selection design; knowledge representation; characteristic-units; hydraulic system