

# 直线驱动铰链机构的键合图因果关系分类整理

李晓田,王安麟

( 同济大学 机械工程学院,上海 201804 )

**摘 要:**采用键合图方法对直线驱动铰链机构进行动力学建模时,传统的虚拟弹性铰接点或拉格朗日乘子法会引入新的动态环节导致出现刚性问题,势流关系混乱难以规范化和模块化。提出了一种针对该机构的键合图因果关系分类整理方法,通过元件接口势流因果分析及元件间连接规则整理两个方面,分类为液压缸、主部件和连杆三种元件,并分别统一各铰接点势流因果关系接口为根点、外力顶点、力输出点和负载点,使得刚体元件接口的因果关系得以延续。在此基础上建立了元件间连接的规范方法以简化建模过程。最后反铲挖掘机的建模及仿真示例证明了本方法对于工程机械的常见工作机构均可适用。

**关 键 词:**直线驱动铰链机构;分类;键合图方法;因果关系;工程机械

中图分类号:F 407.42 文献标志码:A 文章编号:1005-3026(2016)07-1003-05

## Classification of Causality in Bond Graph Model for Linear Actuator Revolute Joint Mechanism

LI Xiao-tian, WANG An-lin

( School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China. Corresponding author: LI Xiao-tian, E-mail: xiaotian3881@hotmail.com )

**Abstract:** Bond graph modeling for linear actuator revolute joint mechanism which uses Lagrange approach or stiff compliance approach with new elements inserted causes stiff equation problems, and causality in bond graph is not classified and modularized. A causality classification method is proposed for modeling with this kind of mechanism. Classifications for elements are classified as main-body, cylinder and lever type by analysis of element bond graphs and connection patterns, and joints are classified as root, pusher, pushed and load type to maintain the original causal link. Causality determination principles are proposed by these definitions to make modeling orderliness. An excavator mechanism modeling and simulation demonstration proved that proposed method is suitable for mechanism cases of earthmoving vehicles.

**Key words:** linear actuator revolute joint mechanism; classification; bond graph method; causality; earthmoving vehicles

当今基础设施建设中对于施工设备的新要求成为了工程机械整机厂商的市场竞争关键,工程机械产品需要更高的挖掘速率、更低的能耗等。系统仿真技术能够在设计阶段对整机动态性能进行预测,这为工程机械开发提供了新的工具<sup>[1-2]</sup>。其中平面机构建模是进行系统动态仿真研究的重要环节。目前最有效的系统动态建模方法是功率键合图法。

键合图法表达机械结构时,由于是多刚体的

多维问题,需要进行全局局部坐标转换,这使得键合图模型变得复杂,因为刚体间存在铰接,通常会产生微积分代数环<sup>[3]</sup>问题。商用仿真软件如AMESim中对于机构的求解是用虚拟弹性铰接点<sup>[4]</sup>或是拉格朗日乘子<sup>[5-7]</sup>来保持铰接点的因果关系链接,这样引入新的动态环节来打破原有的因果链以防止微积分代数环的出现。这会导致整机系统状态方程出现严重的刚性问题,在连接液压、电控整机系统之后的大系统仿真运行变得十

分困难. 要想根本性解决该问题, 需要重新确定因果关系<sup>[8]</sup>. 近年来对于键合图方法的研究主要集中在针对具体工程对象的建模过程<sup>[9]</sup>, 而缺乏对于因果关系确定的研究. 文献 [10] 是采用运动学解析方法针对装载机工作装置的建模实例, 虽然实现了模型的高效仿真, 但模型各个接口点势流关系混乱, 无法规范化和模块化.

可见寻求一种统一的建模思路十分必要. 本文提出了一种针对该机构的键合图因果关系分类整理方法, 通过元件接口势流因果分类及部件间连接规则整理两个方面, 使得刚体间连接键的因果关系得以延续, 并且建立了元件间连接的规范, 该分类整理可使得建模过程高效不易出错. 将能够适用于任何形态结构的工作装置建模.

### 1 直线驱动铰链机构的定义

以典型反铲挖掘机为例, 其工作装置如图 1 所示.

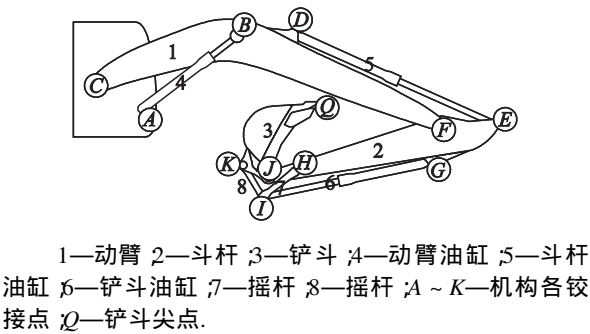


图 1 典型反铲挖掘机工作装置机构  
Fig. 1 Typical mechanism of backhoe excavator

可以看到, 工程机械机构主要由两类元件组成:

1) 转动副连接的刚体部件. 如动臂、摇杆、铲斗等.

2) 直线驱动器. 其特点为 2 个转动副连接其他部分, 自身内包含一个滑动副, 并作为动力输入. 在工程机械中通常为液压缸, 如挖掘机的动臂缸.

这里将由以上两类元件组成的机构称为“直线驱动铰链机构”. 本文针对此类机构进行研究.

### 2 机构键合图模型的元件分类整理

机构键合图模型的建模详细过程可参考文献 [10]. 这里简单介绍建模过程, 并对其进行分类.

对于动臂、斗杆等刚体元件的建模, 为了规范通用表达, 以重心位置为局部坐标系的原点, 则所

有铰接点均有模数  $L$  和角度  $\alpha$  两个参数. 例如动臂 1 的机构如图 2a 所示, 其有 4 个铰接点, 则有 4 个模数  $L$  和 4 个初始角度  $\alpha$ .

设在其运动过程中转过的角度为  $\theta$ , 根据坐标系转换, 以  $C$  点为例, 其速度方程为

$$\left. \begin{aligned} v_{cx} &= v_{ox} + \omega \cdot L_c \cos(\theta - \alpha_c) \\ v_{cy} &= v_{oy} - \omega \cdot L_c \sin(\theta - \alpha_c) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

根据方程可确定键合图变换器 MTF 的系数, 其余铰接点同理计算, 则其键合图模型如图 2b 所示.

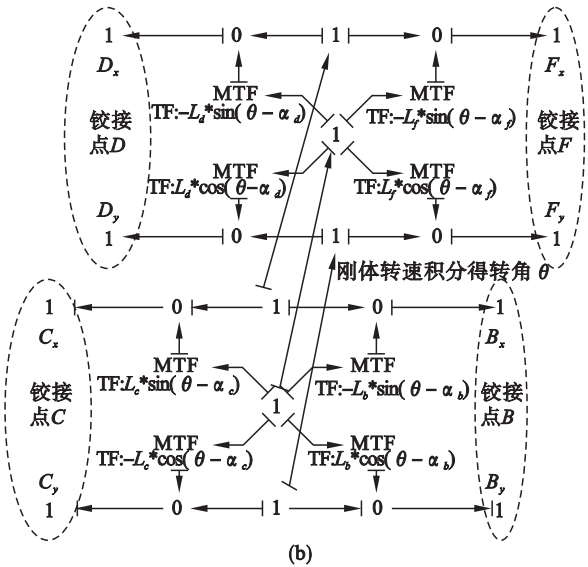
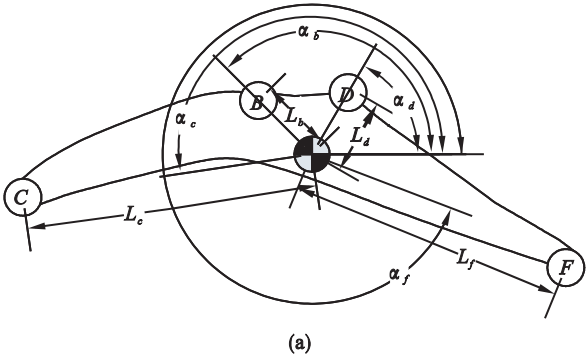


图 2 动臂键合图模型  
Fig. 2 Bond graph model of boom  
(a) — 动臂元件参数定义; (b) — 键合图模型.

对液压缸建模, 以动臂油缸为例, 设其长度为  $m$ , 伸出量为  $n$ , 转过的角度为  $\theta$ , 如图 3a 所示.

根据坐标系转换, 以  $A$  点为例, 其局部坐标速度应满足:

$$\left. \begin{aligned} v_{ax} &= v_{ox} \cos \theta - v_{oy} \sin \theta \\ v_{ay} &= v_{ox} \sin \theta + v_{oy} \cos \theta \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

同样根据方程可确定键合图变换器 MTF 的系数. 则其键合图模型如图 3b 所示.

对于连杆, 其铰接点仅 2 个, 第 2 个与刚体部件相连接. 其规则与液压缸的接口类似, 但模型结构不同. 因此这里省略其推导过程, 键合图如图 4

所示.

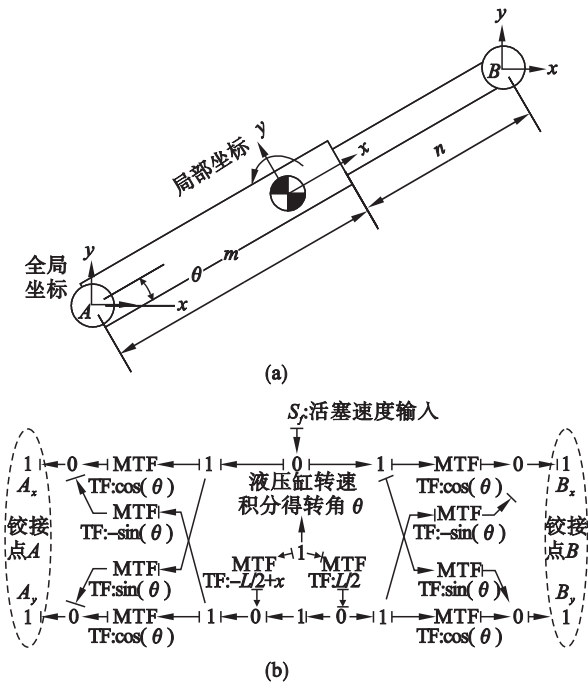


图 3 液压缸键合图模型

Fig. 3 Bond graph model of cylinder

(a)—液压缸参数定义;(b)—键合图模型.

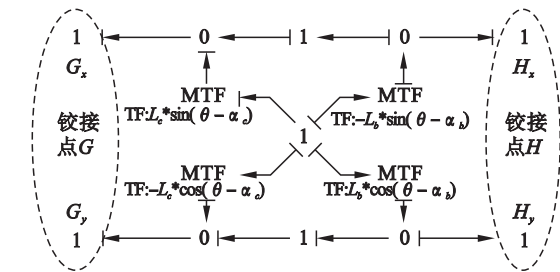


图 4 连杆键合图模型

Fig. 4 Bond graph model of rod

综上,一套工作装置的组成可分为 3 类:液压缸、刚体部件和连杆.这 3 种部件可以组合出工程机械的所有直线驱动铰链机构.

3 元件接口因果关系的分类整理

3.1 接口类型的分类

势流因果关系在本问题上的直接体现,即力和速度谁为输入量,谁为输出量的问题.以下分别针对刚体部件、液压缸和连杆的接口进行分类整理.

从图 4 可以看到,模型对于每一个部件来说,其他变量的速度量均由一个基准点出发求解,其他铰点的平移、转动均在该基准点基础上进行.这个点可理解为工装部件的“根”,故以下称其为根

点,用  $R_i$  表示.以挖掘机动臂为例,其  $R_i$  点为  $C$  点.

刚体部件中,除了根点以外,可以看到模型的其他铰接点中有一个点为  $x, y$  分解的势流源类型不同,其余均为速度输出(势源)点.而且可以看到,势流源类型不同的点为连接液压缸(或连杆)的点.从模型求解过程看,这个点需要获取外模块的力的信息(液压缸给的作用力),也要获取速度信息(两个速度点才能确定当前姿态).以下称其为外力顶点,用  $P_d$  表示.以挖掘机动臂为例,其  $P_d$  点为  $B$  点.

除了  $R_i$  点和  $P_d$  点外,其他铰接点均为速度输出,力输入的点.以下称其为负载点,考虑到其可能有多个点,用  $L_i (i = 1, 2, \dots)$  表示.以挖掘机动臂为例,其负载点为  $D, F$  点.

可以看到,刚体部件的一般特征:一个  $R_i$  点,  $R_i$  点的  $x, y$  端均为速度输入(流源);一个  $P_d$  点,  $P_d$  点的  $x$  端为力输入,  $y$  端为速度输入(  $x$  为势源,  $y$  为流源);若干个  $L_i$  点,  $x, y$  端均为力输入.

对于液压缸来说,其同样具有  $R_i$  点,例如动臂油缸的  $R_i$  点为  $A$  点.而油缸是作为力源输出给工装部件的,因此其另一个点为与工装部件的外力顶点连接的点,由于其  $x, y$  的势流关系与刚体部件相反,为表示区别,以下称其为力输出点,用  $P_r$  表示.同时,油缸能够伸缩,其伸缩的接口为流源接口,与工作机构以外的系统连接(如液压系统),以下用  $I$  表示.

液压缸模型的一般特征:一个  $R_i$  点,点的  $x, y$  端均为速度输入(流源);一个  $P_r$  点,  $x$  端为速度输入,  $y$  端为力输入(  $x$  为流源,  $y$  为势源);一个  $I$  接口,为速度输入(流源).

对于连杆,可看作不能伸缩的液压缸,因此定义与液压缸相同.

势流因果系统一定义后的元件模型如图 5 所示.

3.2 部件间的连接规则定义

当各个部件如此分类后,根据键合图模型的因果关系传导,部件需符合以下规则:一个刚体部件可以有多个  $L_i$  点,但必须有且只能有一个  $R_i$  点,一个  $P_d$  点;液压缸有且只有一个  $R_i$  点,一个  $P_r$  点,一个  $I$  接口;连杆有且只有一个  $R_i$  点,一个  $P_r$  点.

部件间连接可按以下规则进行:连接支架(车体)的点均为  $R_i$  点,  $L_i$  点可以空闲(不连接其他点);未连接支架的  $R_i$  点需连接于  $L_i$  点上,  $P_d$  点必须连接  $P_r$  点上.

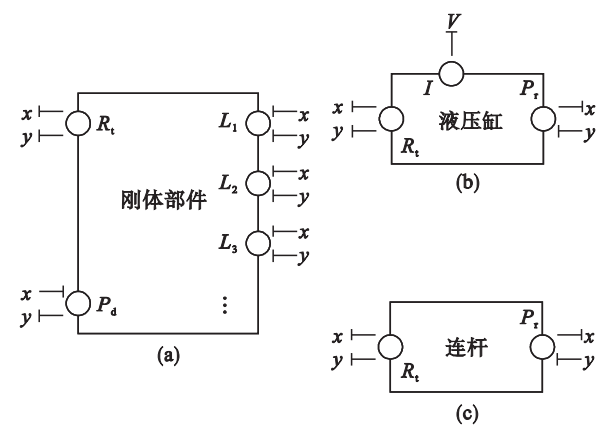


图 5 工作装置元件键合图因果系统一分类  
Fig. 5 Classifications of element bond graph models  
(a)—刚体部件;(b)—液压缸;(c)—连杆.

例如：

1) 如刚体部件 2 连接在刚体部件 1 上,则铰接点对于 1 为  $R_i$  点,对于 2 为  $L_x$  点;

2) 如刚体部件 1 和刚体部件 2 通过液压缸或连杆 3 连接并动作,则 3 连接 2 的铰接点对于 2 为  $P_d$  点,对于 3 为  $P_r$  点,3 连接 1 的铰接点对于 3 为  $L_x$  点,对于 1 为  $R_i$  点.如图 6 所示.

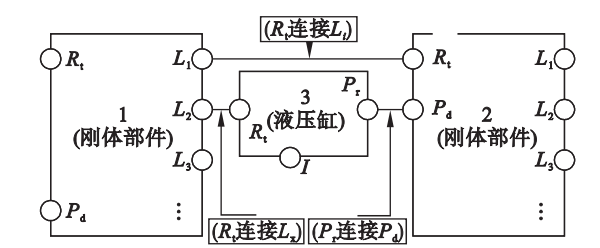


图 6 键合图模型因果系统分类的连接示例  
Fig. 6 Demonstration of classified element connections

按以上规则进行连接,即可实现工程机械中几乎所有形态的工作机构,同时可有效避免模型错误.例如挖掘机模型可表示为图 7 所示.

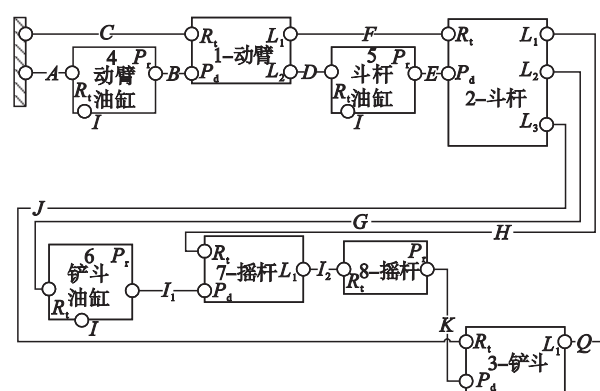


图 7 挖掘机工作装置键合图模型连接规则示例  
Fig. 7 Example of excavator bond graph element model connections

4 仿真对比

本建模方法最大优势在于建模过程带来的便利性.为证明建模方法正确有效,这里用本文提出的方法对一种反铲挖掘机进行建模,同时采用 AMESim 软件进行建模,并用两种仿真模型进行仿真对比分析.

应用本方法对反铲挖掘机建模通过 MATLAB/Simulink 进行,其模型中动臂的主要参数见表 1.

表 1 反铲挖掘机动臂主要参数  
Table 1 Main parameters of backhoe excavator boom

参数	数值	单位
动臂 C 模数 ( $L_c$ )	3 020	mm
动臂 B 模数 ( $L_b$ )	591	mm
动臂 D 模数 ( $L_d$ )	367	mm
动臂 F 模数 ( $L_f$ )	3 020	mm
动臂 C 角 ( $\alpha_c$ )	258	( $^{\circ}$ )
动臂 B 角 ( $\alpha_b$ )	231	( $^{\circ}$ )
动臂 D 角 ( $\alpha_d$ )	91	( $^{\circ}$ )
动臂 F 角 ( $\alpha_f$ )	40	( $^{\circ}$ )

以下是一个典型工况的仿真示例,是对一种工况的仿真结果,其仿真时长为 10 s,工作装置做挖掘—举升—卸料的动作.其初始和结束时的的工作装置机构姿态用 OpenGL 绘图,如图 8 所示.

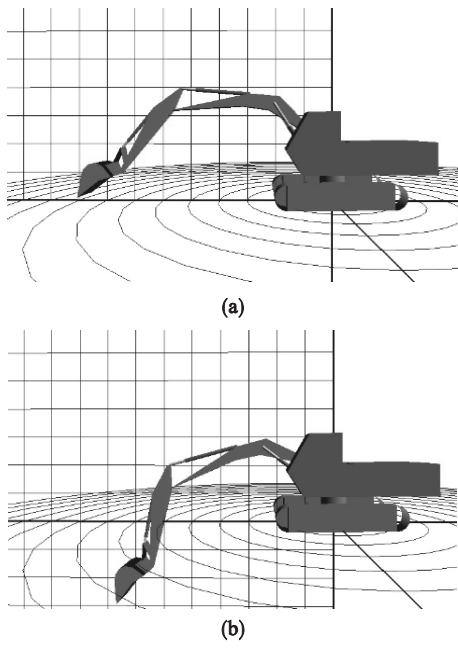


图 8 挖掘机工作装置仿真工况绘图  
Fig. 8 Excavator geometry graph in simulation status  
(a)—初始姿态;(b)—结束姿态.

分别采用本文方法的模型以及 AMESim 软件进行仿真,得出的挖掘机铲斗尖点 Q 的运动轨

迹如图 9 所示。

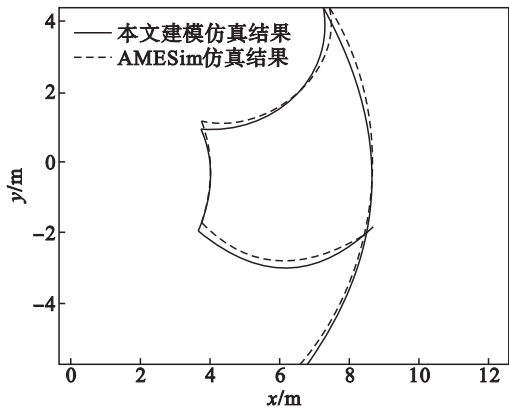


图 9 两种模型得出的仿真关键点空间的运动轨迹  
Fig. 9 Trajectories of key joints in excavator mechanism with different model

可以看到两个仿真模型得出的结果十分吻合,这证明了本文建模方法的有效性. 由于 AMESim 采用虚拟弹性铰接点方法求解刚体间连接关系,其铰接点被设定为通过高刚度弹簧阻尼连接,因此存在微量的位移差异来产生接触力.

### 5 结 论

本文提出了一种针对直线驱动铰链机构的因果关系分类整理,形成了标准化的建模思路. 机构可分为液压缸、主部件和连杆三种元件,并分别分类了统一势流因果关系接口. 按该规则可定义部件间连接规则,使得工作机构的建模中势流关系简单明了,适用于直线驱动铰链机构的系统建模.

参考文献：

[ 1 ] Paolo C ,Alvin A. Gray box modeling of an excavator’s

variable displacement hydraulic pump for fast simulation of excavation cycles[ J ]. *Control Engineering Practice* 2013 21 ( 1 ) :483 – 494.

[ 2 ] Manfred H. Modelling simulation and control design for large and heavy manipulators[ J ]. *Robotics and Autonomous Systems* ,1996 ,19( 1 ) :167 – 177.

[ 3 ] Cachó R ,Felez J ,Vera C. Deriving simulation models from bond graphs with algebraic loops :the extension to multibond graph systems[ J ]. *Journal of the Franklin Institute* ,2000 , 337( 1 ) :579 – 600.

[ 4 ] Karnopp D C ,Margolis D L. Analysis and simulation of planar mechanism systems using bond-graph[ J ]. *Journal of Mechanical Design* ,1993 ,101( 2 ) :187 – 191.

[ 5 ] Gawthrop P J ,Smith L S. Causal augmentation of bond graphs with algebraic loops[ J ]. *Journal of Franklin Institute* , 1992 ,329( 2 ) :291 – 303.

[ 6 ] Wolfgang B ,Cellier F. Tearing in bond graphs with dependent storage elements[ C ]//*Proceedings of the CESA’ 96 Conference*. Lille ,1996 :1113 – 1119.

[ 7 ] Felez J. A bond graph based simulation program[ J ]. *Transaction ASME Journal Dynamic System Measurement Control* ,1990 ,112( 1 ) :717 – 727.

[ 8 ] Saeed B ,Amir K. Causality in vector bond graphs and its application to modeling of multi-body dynamic systems[ J ]. *Simulation Modelling Practice and Theory* ,2006 ,14( 1 ) : 279 – 295.

[ 9 ] Wolfgang B. Bond graph modelling and simulation of multidisciplinary systems :an introduction[ J ]. *Simulation Modelling Practice and Theory* 2009 ,17( 1 ) :3 – 21.

[ 10 ] Romero G ,Felez J ,Maroto J. Efficient simulation of mechanism kinematics using bond graphs[ J ]. *Simulation Modelling Practice and Theory* 2009 ,17( 1 ) :293 – 308.