

文章编号:1000-582X(2002)04-0015-04

多流传动卷扬机系统的键合图模型及仿真

林超, 李润方

(重庆大学机械传动国家重点实验室, 重庆 400044)

摘要:双驱动卷扬机是在行星减速器基础上发展起来的节能、环保型新一代卷扬机。简述了卷扬机多流传动系统的基本原理,采用键合图理论和方法,建立卷扬机多流传动系统耦合振动键合图模型,推导出传动系统的状态方程,并进行了系统动力学的仿真分析,获得了系统内部各部分状态变量的变化规律及关系,较全面地揭示了系统的传动性能及动态特性。研究结果为进一步深入研究卷扬机多流传动系统提供了动力学分析方法和设计依据。

关键词:键合图;仿真;多流传动;卷扬机

中图分类号:TH132

文献标识码:A

双驱动卷扬机是在行星减速器基础上发展起来的节能、环保型新一代卷扬机。具有传动比大、承载能力强、效率高、噪声低、寿命长、结构紧凑、重量轻、可实现超小型化及变速功能等优点,是一种典型的多流传动系统,具有广泛的用途。被应用于各种建筑机械、塔机、汽车吊、海上平台起重机、港口起重机、甲板起重机及许多其它行业。该传动是由多个子系统(零部件)构成的较复杂系统,它是机、电、液等耦合的系统。目前,工程机械及其它行业对该传动的原理、性能了解和认识不够,故双驱动卷扬机产品在国内目前推广应用较少。为进一步全面认识和了解双驱动卷扬机的性能及特点,为开发该类产品的提供技术依据。因此,笔者主要对电机、差动行星齿轮、封闭行星齿轮、负载及支承等部分组成的系统。在分析键合图法特点的基础上,采用此方法建立卷扬机多流传动系统的键合图模型以及仿真分析,从而反映出系统的传动特性和动态性能。对卷扬机多流传动系统进行系统动力学研究具有重要的理论意义和工程实用价值^[1-6]。

1 双驱动卷扬机的基本原理

双驱动卷扬机是根据行星差动传动原理设计的,它是一个功率汇流式和分流封闭式组成的复合行星齿轮传动系统,其结构简图见图1。既具有差动行星齿轮传动的特点,又具有封闭行星齿轮传动的优势,可实

现系统功率的汇流和分流封闭的过程,进而使得该传动的工作功能增强,调速范围更宽,承载能力更大。

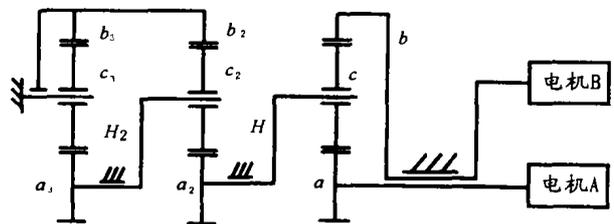


图1 双驱动卷扬机减速系统

2 键合图的基本原理与特点

键合图理论是根据工程系统中的功率传递、转换、贮存和耗散等原理,运用特定的线段及符号所构成的图形、信息流向等,比较方便地建立一个工程系统的动态模型,进行系统的动态特性分析与控制。其特点是能有效地将系统中的多种能量进行耦合,对复杂系统中的诸多物理量,统一地用势、流、变位和动量这4个状态变量表示,按各能量单元实际存在的关系,以一组理想元件(见表1)建立复杂系统的动态综合模型来进行系统分析。

实际系统都是由一些真实元(器)件组成的,比如电阻器,电容器,质量块,弹簧,阻尼器等,要想用图形描述系统,必须首先从元(器)件开始,把真实元(器)件用一些标准符号表示出来。由于图形符号具有通用

• 收稿日期:2002-02-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(59835160)

作者简介:林超(1958-),男,福建林森人,重庆大学副教授。主要从事机械设计及理论研究。

性,因此只需少量的标准图形符号就可为大部分工程系统建立键合图模型,并且每个图形符号都能如实地反映它所描述的元(器)件的物理效应。

根据系统的工作原理,按照一定的步骤,就可以建立系统的键合图模型,推导出系统的状态方程,从而方便地进行系统动态特性分析。

表 1 各类系统的功率变量和能量变量

广义变量	机械平移端口	机械转动端口	液压端口	电端口
势 $e(t)$	力 $F(t)$	转矩 $T(t)$	压力 $P(t)$	电压 $U(t)$
流 $f(t)$	速度 $v(t)$	角速度 $\omega(t)$	体积流量 $Q(t)$	电流 $I(t)$
动量 $p(t)$	动量 $p(t)$	角动量 $L(t)$	压力动量 $\beta(t)$	磁通链变量 $\lambda(t)$
变位 $q(t)$	位移 $X(t)$	角位移 $\theta(t)$	体积 $V(t)$	电荷 $Q(t)$

3 传动系统键合图模型

从系统的角度研究分析卷扬机多流传动。根据功率键合图的理论和方法,对电机、差动行星齿轮、封闭行星齿轮、负载及支承等组成的系统(见图 2),根据系统的传动特点以及主要研究的传动部件,建立相应的系统键合图仿真模型,键合图仿真模型是由组成系统各部件的功能,用表 2 所列的基本元件,依据各部件之间的因果关系建立的。

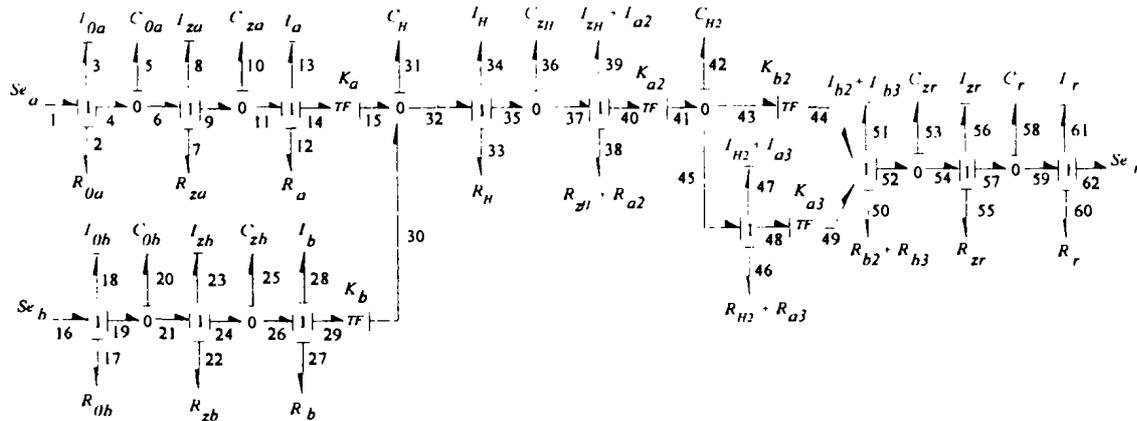


图 2 双驱动卷扬机传动系统简图

表 2 部件的基本元件

部件	基本元件
电机	Se, I, R
差动行星齿轮	I, R, C, TF
封闭行星齿轮	I, R, C, TF
负载	Se, I, R

根据卷扬机多流传动系统的传动特点,分别建立双驱动卷扬机差动部分、封闭行星齿轮部分和多流传动系统等状态条件下的键合图数学模型,当考虑支承时,将支承简化为一个弹簧来处理,从而可以建立较完整地系统耦合的键合图模型。在卷扬机多流传动系统中,当考虑了电机-双输入差动-封闭-支承-负载时,将所考虑的部分组合起来建立系统的键合图,可得到卷扬机多流传动系统的键合图仿真分析模型见图 3。



图中: Se —势元; I —惯性元; R —阻性元; C —容性元; TF —变换元; 1—共流结; 0—共势结; K —传动比系数; 下标: a —太阳轮; b —内齿圈; H —系杆; z —支承; r —负载

图 3 卷扬机多流传动系统键合图模型

4 系统的状态方程

状态方程是借以表征系统内部状态随时间变化的物理变量,系统在输入作用下的运动状态可用一组状

态变量来描述。因惯性效应和容性效应对系统的动态性能起重要的影响作用,故状态变量通常与各储能元件有关。在卷扬机多流传动系统中考虑支承部分时,所得的卷扬机多流传动系统键合图仿真模型见图 3,在

系统键合图中对各键进行统一编号 1 ~ 62, 其中变量 p 、 q 、 e 和 f 的下标代表所在键的编号。设整个系统的状态变量为:

$$X = \{ p_3, p_8, p_{13}, p_{23}, p_{28}, p_{34}, p_{39}, p_{47}, p_{51}, p_{56}, p_{61}, q_5, q_{10}, q_{20}, q_{25}, q_{31}, q_{36}, q_{42}, q_{53}, q_{58} \} \quad (1)$$

根据因果关系和功率流方向得到系统状态变量之间的关系:

$$\begin{aligned} \dot{p}_3 &= Se_a - e_2 - e_5 & \dot{p}_8 &= e_5 - e_7 - e_{10} \\ \dot{p}_{13} &= e_{10} - e_{12} - K_a e_{31} & \dot{p}_{18} &= Se_b - e_{17} - e_{20} \\ \dot{p}_{23} &= e_{20} - e_{22} - e_{25} & \dot{p}_{28} &= e_{25} - e_{27} - K_b e_{31} \\ \dot{p}_{34} &= e_{31} - e_{33} - e_{36} & \dot{p}_{39} &= e_{36} - e_{38} - K_{a2} e_{42} \\ \dot{p}_{47} &= e_{42} - e_{46} - K_{a3} e_{50} & \dot{p}_{51} &= e_{42} - K_{b2} e_{50} - e_{53} \\ \dot{p}_{56} &= e_{53} - e_{55} - e_{58} & \dot{p}_{61} &= e_{58} - e_{60} - Se_r \end{aligned} \quad (2)$$

对于线性键元有:

$$\begin{aligned} e_2 &= R_{0a} f_3 & e_7 &= R_{za} f_8 \\ e_{12} &= R_a f_{13} & e_{17} &= R_{0b} f_{18} \\ e_{22} &= R_{2b} f_{23} & e_{27} &= R_b f_{28} \\ e_{33} &= R_H f_{34} & e_{38} &= (R_{H1} + R_{a2}) f_{39} \\ e_{46} &= (R_{H2} + R_{a3}) f_{47} & e_{50} &= (R_{b2} + R_{b3}) f_{51} \\ e_{55} &= R_r f_{56} & e_{60} &= R f_{61} \\ e_5 &= \frac{1}{C_{0a}} q_5 & e_{10} &= \frac{1}{C_{0b}} q_{10} \\ e_{20} &= \frac{1}{C_{0b}} q_{20} & e_{25} &= \frac{1}{C_b} q_{25} \\ e_{31} &= \frac{1}{C_H} q_{31} & e_{36} &= \frac{1}{C_H} q_{36} \\ e_{42} &= \frac{1}{C_{H2}} q_{42} & e_{53} &= \frac{1}{C_r} q_{53} \\ e_{58} &= \frac{1}{C_r} q_{58} & f_3 &= \frac{1}{I_{0a}} p_3 \\ f_8 &= \frac{1}{I_{za}} p_8 & f_{13} &= \frac{1}{I_a} p_{13} \\ f_{18} &= \frac{1}{I_{0b}} p_{18} & f_{23} &= \frac{1}{I_{2b}} p_{23} \\ f_{28} &= \frac{1}{I_b} p_{28} & f_{34} &= \frac{1}{I_H} p_{34} \\ f_{39} &= \frac{1}{I_{H1} + I_{a2}} p_{39} & f_{47} &= \frac{1}{I_{H2} + I_{a3}} p_{47} \\ f_{51} &= \frac{1}{I_{b2} + I_{b3}} p_{51} & f_{56} &= \frac{1}{I_r} p_{56} \\ f_{61} &= \frac{1}{I_r} p_{61} \end{aligned} \quad (3)$$

将式(3)代入式(2)得到卷扬机多流传动系统键合图仿真模型的状态空间方程:

$$\dot{p}_3 = -\frac{R_{0a}}{I_{0a}} p_3 - \frac{1}{C_{0a}} q_5 + Se_a$$

$$\begin{aligned} \dot{p}_8 &= \frac{1}{C_{0a}} q_5 - \frac{R_{za}}{I_{za}} p_8 - \frac{1}{C_{za}} q_{10} \\ \dot{p}_{13} &= \frac{1}{C_{za}} q_{10} - \frac{R_a}{I_a} p_{13} - \frac{K_a}{C_H} q_{31} \\ \dot{p}_{18} &= -\frac{R_{0b}}{I_{0b}} p_{18} - \frac{1}{C_{0b}} q_{20} + Se_b \\ \dot{p}_{23} &= \frac{1}{C_{0b}} q_{20} - \frac{R_b}{I_b} p_{23} - \frac{1}{C_b} q_{25} \\ \dot{p}_{28} &= \frac{1}{C_b} q_{25} - \frac{R_b}{I_b} p_{28} - \frac{K_b}{C_H} q_{31} \\ \dot{p}_{34} &= \frac{1}{C_H} q_{31} - \frac{R_H}{I_H} p_{34} - \frac{1}{C_{H1}} q_{36} \\ \dot{p}_{39} &= \frac{1}{C_{H1}} q_{36} - \frac{R_{H1} + R_{a2}}{I_{H1} + I_{a2}} p_{39} - \frac{K_{a2}}{C_{H2}} q_{42} \\ \dot{p}_{47} &= \frac{K_{a2}}{C_{H2}} q_{42} - \frac{R_{H2} + R_{a3}}{I_{H2} + I_{a3}} p_{47} - \frac{K_{a2}(R_{b2} + R_{b3})}{I_{b2} + I_{b3}} q_{51} - \frac{1}{C_r} q_{53} \\ \dot{p}_{51} &= \frac{K_{a2}}{C_{H2}} q_{42} - \frac{K_{b2}(R_{b2} + R_{b3})}{I_{b2} + I_{b3}} q_{51} - \frac{1}{C_r} q_{53} \\ \dot{p}_{56} &= \frac{1}{C_r} q_{53} - \frac{R_r}{I_r} p_{56} - \frac{1}{C_r} q_{58} \\ \dot{p}_{61} &= \frac{1}{C_r} q_{58} - \frac{R_r}{I_r} p_{61} - Se_r \\ \dot{q}_5 &= \frac{1}{I_{0a}} p_3 - \frac{1}{I_{za}} p_8 & \dot{q}_{10} &= \frac{1}{I_{za}} p_8 - \frac{1}{I_a} p_{13} \\ \dot{q}_{20} &= \frac{1}{I_{0b}} p_{18} - \frac{1}{I_{2b}} p_{23} & \dot{q}_{25} &= \frac{1}{I_{2b}} p_{23} - \frac{1}{I_b} p_{28} \\ \dot{q}_{31} &= \frac{K_a}{I_a} p_{13} + \frac{K_b}{I_b} p_{28} - \frac{1}{I_H} p_{34} \\ \dot{q}_{36} &= \frac{1}{I_H} p_{34} - \frac{1}{I_{H1} + I_{a2}} p_{39} \\ \dot{q}_{42} &= \frac{1}{I_{H1} + I_{a2}} p_{39} - \frac{1}{I_{b2} + I_{b3}} p_{51} - \frac{1}{I_{H2} + I_{a3}} p_{47} \\ \dot{q}_{53} &= \frac{1}{I_{b2} + I_{b3}} p_{51} - \frac{1}{I_r} p_{56} & \dot{q}_{58} &= \frac{1}{I_r} p_{56} - \frac{1}{I_r} p_{61} \end{aligned} \quad (4)$$

其中:

$$\begin{aligned} K_a &= 1 + \frac{Z_b}{Z_a}; K_b = 1 + \frac{Z_a}{Z_b}; K_{a2} = 1 + \frac{Z_{b2}}{Z_{a2}}; \\ K_{b2} &= 1 + \frac{Z_{a2}}{Z_{b2}}; K_{a3} = -\frac{Z_{a3}}{Z_{b3}} \end{aligned}$$

Se_a —输入端 A 的扭矩, Se_b —输入端 B 的扭矩, Se_r —输出端的扭矩

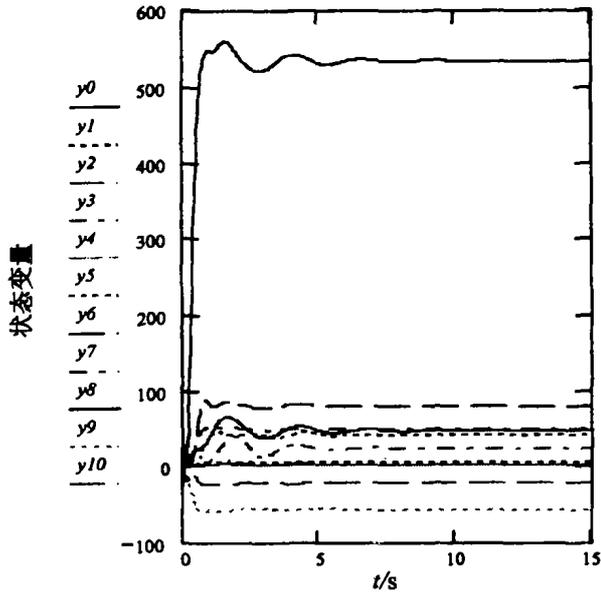
5 系统的动态仿真分析

根据卷扬机多流传动系统参数和材料力学特性等,确定状态方程中惯性元 I 、阻性元 R 、容性元 C 等参数,系统的基本参数见表 3。

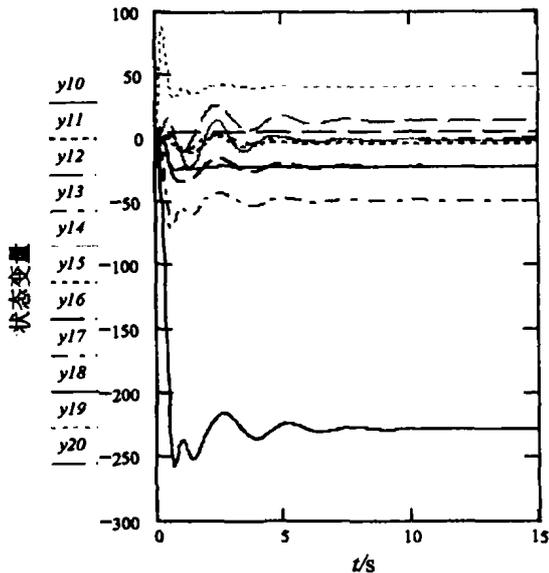
表 3 系统的基本参数

级数	齿轮齿数 Z			模数 m/mm	压力角 $\alpha/(\circ)$	齿宽 B/mm
	太阳轮 a	行星轮 c	内齿圈 b			
1	18	27	72			
2	18	27	72	2	20	30
3	18	27	72			

卷扬机多流传动系统的键合图模型仿真是采用四阶龙格—库塔法对状态方程的微分方程进行求解,可以得到键合图模型仿真中各变量的过渡过程曲线,即该系统内部状态变量随时间变化的无量纲曲线,见图 4。



a) 系统内部前 11 个状态变量随时间变化无量纲曲线



b) 系统内部后 10 个状态变量随时间变化无量纲曲线

图 4 卷扬机多流传动系统仿真

在由键合图理论得到的卷扬机多流传动系统仿真模型中,考虑弹性支承条件下的状态变量共 21 个,对应于系统状态变量的响应曲线有 21 条,见图 4,这些状态变量的响应曲线都是经过短暂的振荡后达到平衡点。系统中的振荡峰值大小可以反映出系统的超调量大小,而振荡达到平衡点的长短,则反映出系统的过渡时间快慢。可以由无量纲曲线定性反映出系统的键合图仿真模型和内部状态变量随时间变化曲线,以及系统的动态特性和性能。

6 结 论

首次建立了多流传动卷扬机系统的耦合振动键合图模型,推导出传动系统的状态方程,并进行了仿真分析,获得了该系统内部各部分状态变量的变化过程,从而较全面地揭示了该系统的传动性能及动态特性。多流传动卷扬机系统键合图模型的建立,为进一步深入研究该传动系统奠定了基础。

参考文献:

- [1] KARNOPP D C, MARGOLIS D L, ROSERBERG R C. System Dynamics[M]. New York: John Wiley, 1990.
- [2] GRANDA J J. Computer aided modeling of multiport elements and large bond graph models with CAMP - G[C]. ICBCGM'93: 185 - 187.
- [3] 李润方,王建军. 齿轮系统动力学[M]. 北京:科学出版社, 1997.
- [4] 孙冬野,秦大同,王玉兴. 金属带行星齿轮无级变速系统动力学仿真[J]. 农业机械学报, 2000, 31(3): 67 - 70.
- [5] 张尚才. 工程系统的键图模拟和仿真[M]. 北京:机械工业出版社, 1993.
- [6] 饶振纲. 行星传动机构设计[M]. 北京:国防工业出版社, 1994.

(下转第 25 页)

- [5] 王照林. 现代控制理论基础[M]. 北京:国防工业出版社, 1983.
- [6] 杨志, 郭兵, 李太福, 等. 一类基于仿人智能的高炉出铁水

冲渣自动跟踪系统[C]. 自动化科学技术及应用学术会议论文集. 北京:电子工业出版社, 2001.

Analysis on Stability for Uncertainty Complex Control System Based on Knowledge

*LI Tai-fu*¹, *YANG Zhi*², *SHENG Chao-qiang*², *XIE Zhao-li*²

(1. Electronic Engineering Department, Chongqing Institute of Technology, Chongqing 400050, China;

2. College of Automation, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Concept of stability is vague, but it is basic characteristic of dynamic system, and precondition that make all kinds of control system run normally. Today it is still a challenge to analyze stability for uncertainty complex control system, whose mathematic modeling is impossible or very difficult, so it is very hard to judge whether a system running is stable or not by mathematic stability criterion. A kind of analyzing method is presented, which combine absolute stability with self-locked concept of heuristic search, it may analyze system stability in more range through adjusting self-collected loop parameters for uncertain control system based on knowledge control model. It is shown that stability analyzing method is effective and suitable for practical physical system in the engineering project.

Key words: knowledge model; uncertainty complexity control system; stability analysis

(责任编辑 成孝义)

(上接第 18 页)

Power Model of Bond Graph and Dynamic Simulation of Hoist System for Multi-Flow Transmission

LIN Chao, LI Run-fang

(State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing, 400044, China)

Abstract: The double drive hoist reducer developed in the planetary gear is a new generation of energy saving and environment protecting hoist product. The multi-flow transmission system theory of hoist is analyzed. With the theory and method of bond graph, a bond graph model with coupled vibration is established for hoist multi-flow transmission system for the first time. The state equation of the system is developed and dynamic simulation analysis is also carried out. The internal changing law and relationship of the system for the state variable are got. Therefore, the dynamic properties and gearing features of this system are revealed comprehensively. The research results can provide the dynamic analysis method and design basis for multi-flow transmission system of hoist.

Key word: bond graph; simulation; multi-flow transmission; hoist machine

(责任编辑 张小强)