

# 基于键合图理论的桥门式起重机起升机构能耗模型

赵 华<sup>1</sup>, 陈 昆<sup>2</sup>, 李屹东<sup>1</sup>, 戴 伟<sup>2</sup>, 徐浩吉<sup>1</sup>, 史利鹏<sup>1</sup>

<sup>1</sup>舟山市特种设备检测研究院, 浙江 舟山

<sup>2</sup>武汉理工大学物流工程学院, 湖北 武汉

Email: 18574016390@163.com

收稿日期: 2020年11月2日; 录用日期: 2020年11月16日; 发布日期: 2020年11月23日

## 摘 要

本文以桥门式起重机起升机构的能耗分析为研究对象, 依据键合图理论建立了一种适用性广泛的键合图模型。归纳出相关零部件建模所需的键合图元, 不同型号起重机机构进行参数替换后直接进行分析。同时本文还提出了一种对各阻性元件阻尼参数进行估算的方法, 并经仿真实验证实了该方法的有效性。提出了桥门式起重机各零部件能效对整体能效的影响因数计算公式, 得到起升机构各零部件对整体能效具体影响因数。

## 关键词

键合图, 桥门式起重机, 能耗, 阻尼估算

# Energy Consumption Model of Hoisting Mechanism of Bridge and Gantry Crane Based on Bond Graph Theory

Hua Zhao<sup>1</sup>, Kun Chen<sup>2</sup>, Yidong Li<sup>1</sup>, Wei Dai<sup>2</sup>, Haoji Xu<sup>1</sup>, Lipeng Shi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Zhoushan Special Equipment Testing Institute, Zhoushan Zhejiang

<sup>2</sup>School of Logistics Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan Hubei

Email: 18574016390@163.com

Received: Nov. 2<sup>nd</sup>, 2020; accepted: Nov. 16<sup>th</sup>, 2020; published: Nov. 23<sup>rd</sup>, 2020

## Abstract

The hoisting mechanism of bridge and gantry crane is taken as the research target in this paper. According to the bond graph theory, a bond graph model with wide applicability was established

文章引用: 赵华, 陈昆, 李屹东, 戴伟, 徐浩吉, 史利鹏. 基于键合图理论的桥门式起重机起升机构能耗模型[J]. 建模与仿真, 2020, 9(4): 542-552. DOI: 10.12677/mos.2020.94053

for researching the energy consumption in the hoisting mechanism. In this paper, the bonding primitives for modeling of various components were summarized, which can make different types of cranes directly simulate after parameter replacement. At the same time, this paper also proposes a method to estimate the damping parameters of each resistive element, and the simulation results show that the method is effective. Finally, the paper puts forward the calculation formula of the influence factor of the energy efficiency of each part of the bridge and gantry crane on the overall energy efficiency, and obtains the specific influence factors of the components of the hoisting mechanism on the overall energy efficiency.

## Keywords

Bond Graph, Bridge and Gantry Crane, Energy Consumption, Damping Estimation

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

起重机械作为一种高能耗特种设备,在港口、船厂、堆场及仓库等场所被广泛应用,涉及的工业领域包括能源、电力、交通、造船、冶金以及石化等。其中桥门式起重机具有自重大、作业频次高等特点,其油耗和电耗较高,存在的能源浪费的问题比较严重,而起升机构是桥门式起重机使用最频繁的工作机构也是能耗最大的工作机构。因此舟山市特种设备检测研究院联合武汉理工大学对舟山地区起重设备进行测试调研,深入研究桥门式起重机能耗变化规律,找出起升机构各部件对整体能效的影响因数,有利于有针对性而高效地提升起重机能源利用效率。

针对起重机能效问题,叶伟提出“灰箱理论”的桥式起重机能耗检测方法,直接对三大机构的输入功率与输出功率进行测量,从而计算得出各机构的效率,并作为各部件的能效影响因数[1],但该方法严重依赖于对功率的实测不具有普遍性的参考价值。陈瑞峰以桥式起重机作为研究对象,通过对起重机的机械机构进行理论分析,利用多元回归分析的方法完成了对桥式起重机能耗的评价和分级[2],但该方法较为简易,准确性难以保障。

也许多研究人员根据键合图理论建模,并在诸多领域解决了机械的动力学、能耗问题。Lee 等以液压挖掘机为研究对象,依据键合图理论对液压起重机进行建模[3],文中提出了通过其它数据间接计算未知参数,并通过大量的实验数据进行参数拟合的方法,该方法过于依赖数据的数量与准确性。Luo 等依据键合图理论,以啮合刚度和扭转刚度为主要指标建立了谐波齿轮、行星、太阳轮子动力模型,并通过仿真实验解决了行星齿轮组的扭转运动状态问题[4]。王艾伦等提出以键合图理论对多种能量耦合的机电系统进行建模,解决了部分机电系统建模复杂且精度无法保障的问题[5]。任福深等运用键合图理论建立了水龙头旋扣和轨道钳系统的键合图模型,通过 20-Sim 软件进行动态仿真,并通过实验数据与仿真数据的对比验证了键合图模型的准确性[6]。刘升等以重型车为研究对象,探究复杂工况下的传动系统能量损耗,建立了各种类型的数学模型,然后基于键合图理论对整个系统进行了能量流分析后,建立了整个传动系统的能耗模型[7]。除此之外,近年来还有许多研究也在机电系统的键合图理论建模领域中展开[8]-[12]。

由于桥门式起重机起升机构中涉及电能、机械能等多种形式的能量传递、转化过程,一般的建模方

法很难针对这样的系统建立一个统一的能耗模型，而键合图理论可以很好地解决这个问题。因此，本文根据键合图理论对桥门式起重机起升机构进行建模求解，并探究其中各部件的能效影响因数大小，模型参数来源于舟山市特种设备检测研究院在舟山地区的调研测试。

## 2. 键合图理论概述

### 2.1. 键合图理论基本概念

系统键合图遵循能量守恒原则，采用键合图理论中所约定的元件符号并按一定规则对系统能量流进行完整地描述，该理论对系统能量流具有较高的还原程度。键合图理论中所约定的基本元件符号称为“键合图元”。键合图元进行能量流动的窗口称为“通口”，通口的数量等于该键合图元处能量流动方向的数量，通口可表示为键合图元旁的一根线段。相邻的两个通口连接起来则称为“键”，键代表两个键合图元之间存在着能量的流动，这种传递功率的键又称为“功率键”，键表示为连接两通口的半箭头，箭头方向为能量的流动方向。图 2 所示的电机键合图模型就包含了键合图元(Se、I、R、GY、1、0)、通口和键三种元素。

键合图理论中将各种物理量归类为四种广义变量：势变量  $e(t)$ 、流变量  $f(t)$ 、广义动量  $p(t)$  和广义位移  $q(t)$ 。势变量和流变量被合称为功率变量，它们的标量积等于功率  $P(t)$ ，即：

$$P(t) = e(t)f(t) \quad (1)$$

其积分形式表示一条键内流过的能量  $E(t)$ ，即：

$$E(t) = \int_0^t e(t)f(t)dt \quad (2)$$

广义动力  $p(t)$  定义为势变量的时间积分，即：

$$p(t) = p_0 + \int_{t_0}^t e(t)dt \quad (3)$$

广义位移  $q(t)$  定义为流变量的时间积分，即

$$q(t) = q_0 + \int_{t_0}^t f(t)dt \quad (4)$$

表 1 列出了几种功率交换范畴中的势变量和流变量。

**Table 1.** Potential variables and rheological variables in several power conversion categories

**表 1.** 几种功率变换范畴中的势变量和流变量

范畴	势 $e(t)$	流 $f(t)$
机械平移	力分量 $F(t)$	速度分量 $v(t)$
机械转动	力矩分量 $T(t)$	角速度 $w(t)$
液压系统	压力分量 $p(t)$	流量 $Q(t)$
电系统	电压 $E(t)$	电流 $I(t)$

### 2.2. 基本键合图元

基本键合图元分为一通口、二通口和多通口三类。一通口元件具体分为五种：阻性元件 R、容性元件 C、惯性元件 I、势源 Se、流源 Sf。阻性元件 R 消耗能量，反映元件势变量和流变量之间的线性关系；容性元件 C 储存能量，反映元件势变量和广义位移之间的线性关系；惯性元件 I 储存能量，反映元件势变量和广义动量之间的线性关系；势源和流源用来描述外部与系统的能量关系，当势、流源的势变量与流变量

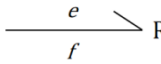
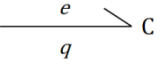
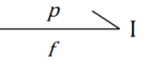
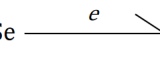
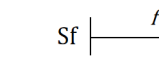
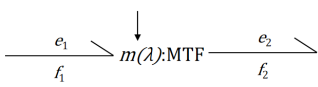
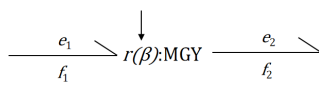
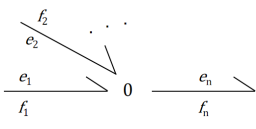
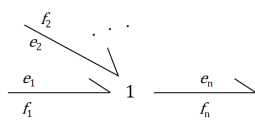
的标量积为正, 元件表示能量源, 反之表示负载, 其中势源包含确定的势变量, 流源包含确定的流变量。

二端口元件的作用是在系统内部进行能量的转换, 其输入与输出可以具有不同的能量形式, 如电动机作为二端口元件将电能转化为机械能, 而减速器作为二端口元件输入输出均为机械能。二端口元件又可分为变换器与回转器两种, 变换器按既定规则将势变量变换为势变量、流变量变换为流变量; 回转器按既定规则将势变量回转为流变量、流变量回转为势变量。二端口元件在输入与输出两个端口处势、流标量积相等。

多端口元件用来表示系统某一物理效应中能量形式相同、数值相等的势变量或流变量, 分为共势结(0-结)与共流结(1-结)两种。与共势结连接的每根键上势变量相等, 流变量代数和为 0; 与共流结连接的每根键上流变量相等, 势变量代数和为 0。将各类键合图元的名称、符号与特性方程整理为表 2。

**Table 2.** The names, symbols and characteristic equations of various bonding primitives

**表 2.** 各类键合图元的名称、符号与特性方程

名称	阻性元件 R	容性元件 C	惯性元件 I	势源 Se	流源 Sf
一 通 口 元 件	符号 	符号 	符号 	Se 	Sf 
特性方程	$e(t) = R_0 f(t)$	$e(t) = \frac{1}{C_0} q(t)$	$f(t) = \frac{1}{I_0} p(t)$	$e(t) = e$	$f(t) = f$
名称	变换器 MTF			回转器 MGY	
二 通 口 元 件	符号 			符号 	
特性方程	$\begin{cases} e_2 = m e_1 \\ m f_2 = f_1 \end{cases}$			$\begin{cases} e_2 = r f_1 \\ r f_2 = e_1 \end{cases}$	
名称	共势结(0-结)			共流结(1-结)	
三 通 口 元 件	符号 			符号 	
特性方程	$\begin{cases} e_1 = e_2 = e_3 = \dots = e_n \\ \sum_{i=1}^n a_i f_i = 0 \end{cases}$			$\begin{cases} f_1 = f_2 = f_3 = \dots = f_n \\ \sum_{i=1}^n a_i e_i = 0 \end{cases}$	

### 3. 起升机构的键合图模型与参数分析

#### 3.1. 起升机构建模

桥门式起重机中起升机构消耗的能量是整体能量消耗中最大的一部分, 起升机构主要包括电动机、联轴器、制动盘、减速器和卷筒等零部件, 其结构简图如图 1 所示。首先依据键合图理论将起升机构各零部件(电机、联轴器、制动器、减速器等)的物理特性转化为适当的键合图元, 并根据其中相同的流、势变量结合为各零部件的键合图模型, 最终再将各部件之间连接起来成为整体键合图模型, 各零部件连接端口处功率相等。

##### D) 电动机的键合图模型

对于三相异步电机, 以可变势源 Mse 表示电机的三相输入电压  $U_a$ 、 $U_b$ 、 $U_c$ , 以恒势源 Se 表示输出

端负载；绕组电阻  $R_a$ 、 $R_b$ 、 $R_c$ ，转子的摩擦阻尼用阻性元件  $R$  表示；电路电感  $L$ 、转子转动惯量用感性元件  $I$  表示；电机内电能向机械能的转换用回转器  $GY$  表示。由于定子单相电路中电流相等，故每相电源的势源  $Mse$ 、电阻  $R$ 、电感  $I$  和回转器  $GY$  用共流结(1-结)连接；三相电源用共势结(0-结)连接，向转子输出流变量，由共势结特性方程可知输出流变量为三相电源输出流变量之和；转子转速只与同步速及转差有关，视其为确定函数，可将转子负载转矩  $Se$ 、转动惯量  $I$  和摩擦阻尼  $R$  用共流结(1-结)连接起来。最终建立的主轴电机键合图模型如图 2 所示。

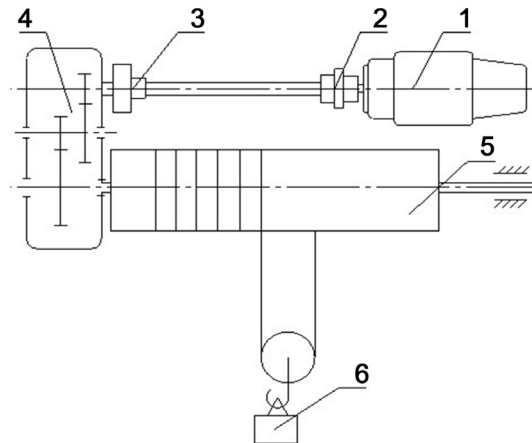


Figure 1. Schematic diagram of hoisting mechanism  
图 1. 起升机构示意图

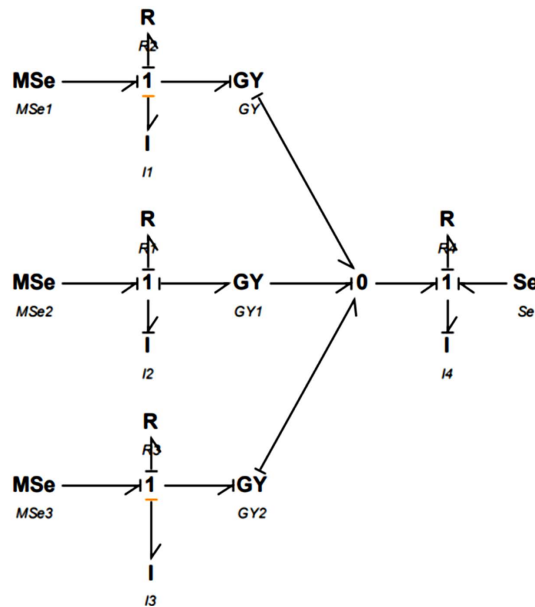


Figure 2. Bond graph model of motor  
图 2. 电动机键合图模型

## II) 联轴器的键合图模型

对联轴器建模时，联轴器的摩擦阻尼用阻性元件  $R$  表示，转动惯量用惯性元件  $I$  表示，工作时产生扭转变形的刚度用容性元件  $C$  表示。阻尼和转动惯量与转速有关，以共流结连接；扭转刚度与转矩有关，以共势结连接。

### III) 制动器的键合图模型

制动装置属于典型的开关类元件，需要采用非连续键合图建模的方法进行建模。当制动盘与轴无接触时，摩擦力为零，可以用值为零的势源来表示；当制动盘与轴接触时，摩擦力与作用在轴上的正压力有关，可以通过调节阻性元件MR来表示，建立其键合图模型如图3所示。通过信号键来控制布尔变量 $u_1$ 、 $u_2$ 是否生效，当布尔变量 $u_1$ 生效时， $u_2$ 为零，接入系统的为调节阻性元件MR， $N$ 为作用在轴上的正压力，设制动盘与轴之间的摩擦因素为 $\mu$ ，则MR的组成关系式可表示为：

$$F_R = \mu \cdot N \tag{5}$$

当布尔变量 $u_2$ 生效时， $u_1$ 为零，接入系统的为势源Se。根据功率结型结构的特点，图3的状态方程可表示为：

$$e = u_1 F_R + u_2 Se \tag{6}$$

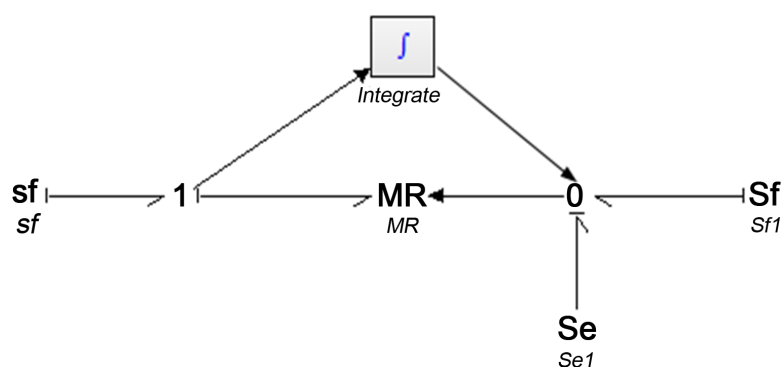


Figure 3. Brake disc-axle bond graph model  
图3. 制动盘 - 轴键合图模型

### IV) 减速器的键合图模型

减速器各级轴、齿轮的转动惯量用惯性元件I表示，齿轮与轴承的阻尼用阻性元件R表示，轴的弹性形变用容性元件C表示，以共流结连接惯性元件与阻性元件，以共势结连接容性元件，TF转换器来表示齿轮传动比。

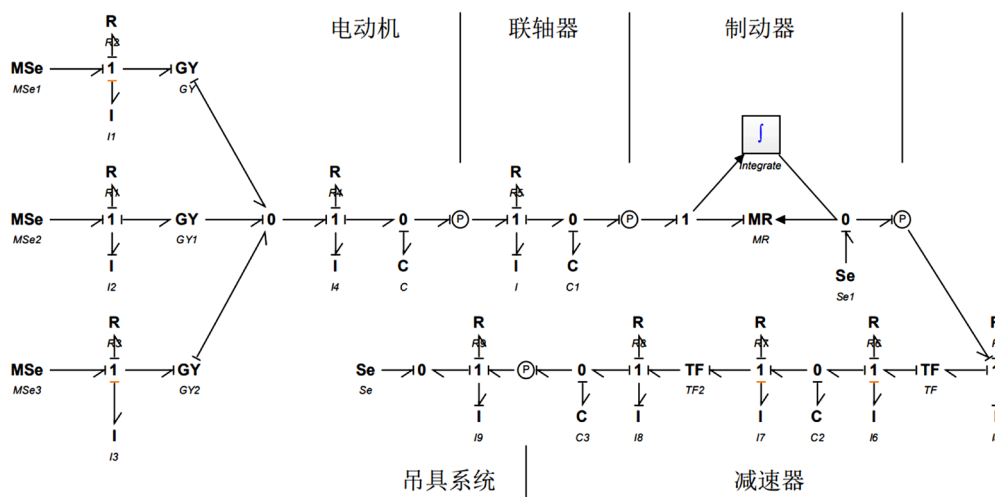


Figure 4. Bond graph model of hoisting mechanism  
图4. 起升机构键合图模型



最终, 将电动机、联轴器、制动器、减速器的键合图模型连接起来, 加上主要由卷筒组成的吊具系统, 成为起升机构整体键合图模型, 如图 4 所示。吊具系统结构较简单, 由一个阻性元件和惯性元件经共流结连接即可, 用势源 SE 表示负载。

### 3.2. 键合图元参数分析

#### I) 阻性元件 R

整体键合图模型中的阻性元件包括电机定子电阻以及电机转子、联轴器、制动器、减速器、吊具系统的摩擦阻尼。电路部分的电阻可以查阅电动机表获取, 对于机械部分的摩擦阻尼, 本文基于键合图理论, 采用一种估算摩擦阻尼系数的方法。根据阻性元件定义, 阻性元件 R 反映势变量和流变量之间的函数关系, 这种关系可以用式(7)描述:

$$e = R \cdot f \quad (7)$$

功率键合图基于能量守恒定律, 各功率键可用式(8)表示:

$$P = e \cdot f \quad (8)$$

由式(7)、(8)可得:

$$P = R \cdot f \cdot f = R \cdot f^2 \quad (9)$$

则阻尼计算公式可表示为:

$$R = \frac{P}{f^2} \quad (10)$$

其中  $P$  为各部件的摩擦损失功率,  $f$  等于各部件的转速。

本文在桥门式起重机标准工况进行研究, 因此高速轴转速取额定转速, 低速轴转速取高速轴转速除以传动比, 损失功率由各零部件的传动效率计算得出, 传动效率可根据起重机设计手册选取。

#### II) 惯性元件 I

整体键合图模型中的惯性元件包括电机定子电感以及电机转子、联轴器、制动器、减速器、吊具系统的转动惯量。转动惯量可根据厂家提供产品样本查寻获取, 也可根据公式计算得出。电机转子、联轴器、制动器、减速器可视为实心圆柱, 转动惯量计算公式取:

$$J = \rho \pi d^4 L / 32 \quad (11)$$

其中  $\rho$  为材料密度, 取  $\rho_{\text{钢}} = 7.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ;  $d$  为旋转体直径(m);  $L$  为旋转体长度(m)。

卷筒可视为两端开通的薄壁圆柱, 转动惯量计算公式取:

$$J = \rho \pi d^4 L / 16 \quad (12)$$

#### III) 容性元件 C

起升机构中通过轴来连接的部件, 应添加容性元件 C 并以共势结相连, 系数可取轴的扭转刚度。

#### IV) 电源 Mse

电源以可调势源 Mse 表示, 取其数值等同于我国工业用电电压形式, 电压表达式为:  $U = 311 \sin 100\pi t$ 。

## 4. 仿真实例分析

### 4.1. 键合图模型验证

为验证键合图模型的精度与准确性, 本文选取一台桥门式起重机为样机, 针对其起升机构进行能耗

实测，并将样机参数输入图 4 所示键合图模型进行仿真。样机设备型号如下：电动机类型为 JZR<sub>2</sub> 型绕线式三相异步电动机；联轴器为 CL 型齿轮联轴器；制动器为 YDWZ 200~800 液压电磁制动器；减速器为 ZQ 型标准卧式减速器。样机各参数如表 3 所示。

**Table 3.** Bond graph model parameters of hoisting mechanism

**表 3.** 起升机构键合图模型参数

名称	键合图元	参考值	单位
定子电阻	R	3.1e-01	$\Omega$
电机电感	I	1.5e-02	H
电磁转矩	GY	6.8e-02	$\text{Vsrad}^{-1}$
转子阻尼	R	2.4e-01	$\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}/\text{rad}$
转子转动惯量	I	1.717	$\text{kg}\cdot\text{m}^2$
联轴器阻尼	R	1.0e-02	$\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}/\text{rad}$
联轴器转动惯量	I	2.4e-02	$\text{kg}\cdot\text{m}^2$
制动器阻尼	R	8.5e-01	$\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}/\text{rad}$
减速器阻尼	R	5.6e-01	$\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}/\text{rad}$
减速器转动惯量	I	1.25e-01	$\text{kg}\cdot\text{m}^2$
吊具系统转动惯量	I	0.68	$\text{kg}\cdot\text{m}^2$
吊具系统阻尼	R	3.5e-01	$\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}/\text{rad}$
轴的扭转刚度	C	1.0e-05	$\text{mN}^{-1}$

将键合图模型输出能耗值与实测能耗值进行对比，得到键合图模型相对误差，如表 4 所示。

**Table 4.** Model validation results

**表 4.** 模型验证结果

	负载重量(t)	仿真结果值(kW)	实测值(kW)	相对误差
1	1.0	1.32	1.49	11.4%
2	4.5	2.59	2.84	8.9%
3	8.5	5.68	5.96	5%
4	9.5	6.23	6.68	6.7%

分析模型验证结果中误差来源如下：

1) 测试实验的机型都是港口在用机型，部分机型使用时间较长，导致零部件的效率降低，因此能耗较大；

2) 仿真分析中是标准工况下进行的计算，例如运行速度，仿真模型中一直按额定速度设定，而在实际工况并非标准工况，运行过程并非匀速，平均速度一般会比额定速度低；



3) 实例分析中还存在另一个现象, 随着负载的增大, 仿真结果和实测值相对误差反而降低。这里就涉及到一个机器的最佳使用状态, 并不是负载越低, 设备的效率就越高, 而是达到设备的最佳使用工况时, 设备才处于最高的使用效率。

#### 4.2. 起升机构零部件能效影响分析

本文所建键合图模型可以通过控制阻性元件参数变量(对于各零部件耗能部分), 来探究起升机构各零部件能效对整体能效的影响。具体方法为单独控制某一零部件(如电机)的阻尼参数不断增加, 记录该零部件的能源利用效率与起升机构整体能源利用效率, 以两种效率之比来表示该零部件对起升机构能效的影响程度。

初始状态下, 电机输入功率为 16.76 kW, 电机输出功率为 13.74 kW, 联轴器输出功率为 13.74 kW, 减速器输出功率为 8 kW, 吊具输出功率为 6.51 kW。该模型中能量的损耗集中出现在各零部件内部, 能量在零部件间传递无损耗, 易得各零部件的损耗功率等于上一个部件输出功率与该部件输出功率之差, 各零部件的能源利用效率等于上一个部件输出功率与该部件输出功率之比。

电机输入功率不变, 不断增加电机阻尼, 记录电动机输出功率及起升机构输出功率, 结果见表 5。根据仿真结果计算电机能效与起升机构整体能效, 绘制反映两者关系的影响关系图像, 如图 5 所示。

Table 5. Result table of motor control experiment

表 5. 电动机对照实验结果表

序号	电动机输出功率(kW)	起升机构输出功率(kW)
1	13.74	6.51
2	10.03	5.27
3	7.00	4.11
4	3.96	3.09

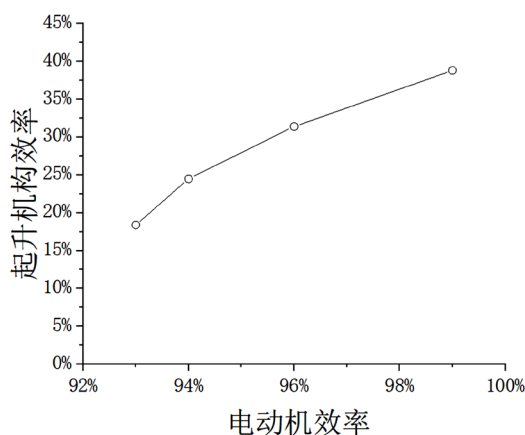
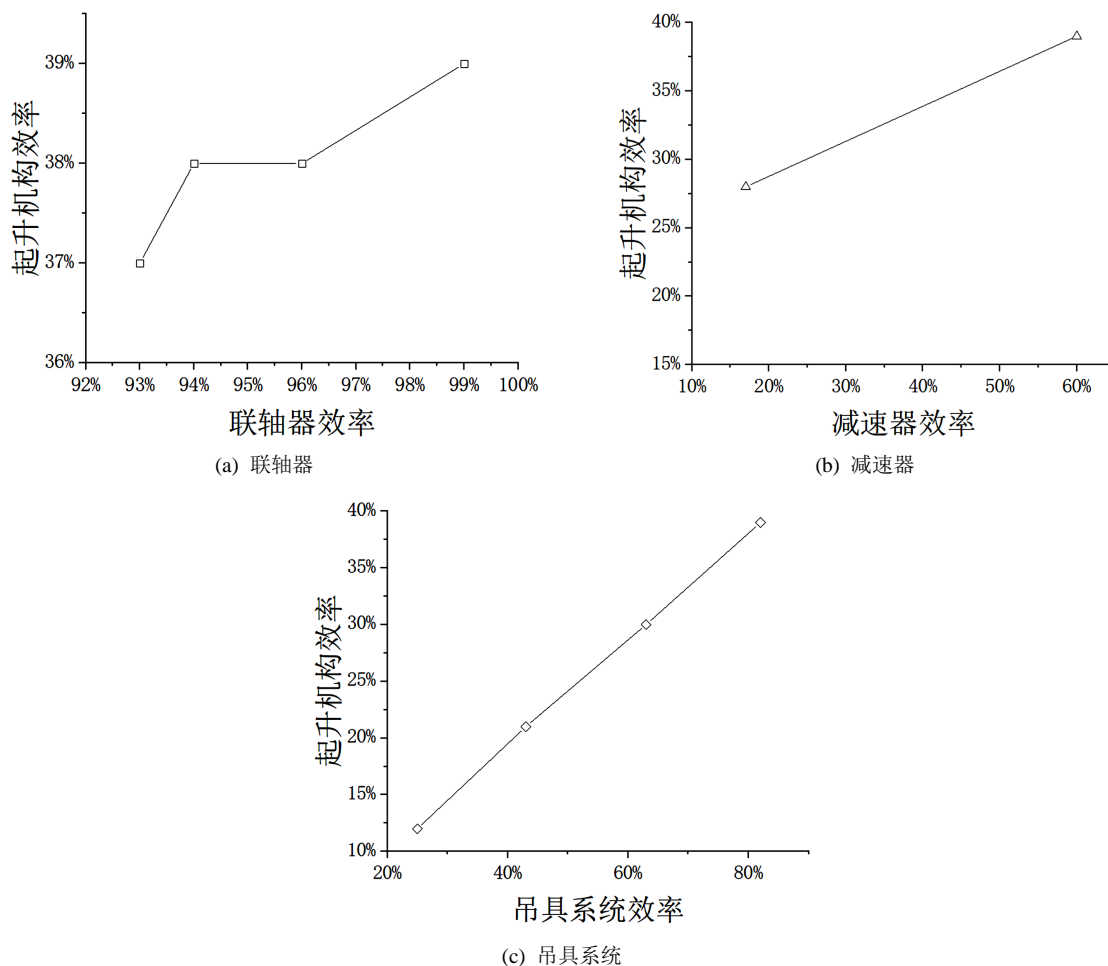


Figure 5. Energy efficiency influence relationship between motor and hoisting mechanism

图 5. 电动机 - 起升机构能效影响关系

依据同样办法对联轴器、减速器、吊具系统的阻尼进行控制, 记录各零部件在不同阻尼下的输出功率与整体输出功率, 计算各零部件能效与整体能效, 最终整理出联轴器、减速器、吊具系统能效与整体能效关系如图 6 所示。



**Figure 6.** Energy efficiency influence relationship among components and hoisting mechanism  
**图 6.** 各零部件 - 起升机构能效影响关系

为了进一步量化各零部件对起升机构的影响，提出各机构对整体能效影响系数  $b$  的计算公式：

$$b = \left( \frac{B_3 - B_1}{A_3 - A_1} + \frac{B_4 - B_2}{A_4 - A_2} \right) / 2 = \frac{(B_3 - B_1)(A_4 - A_2) + (B_4 - B_2)(A_3 - A_1)}{2(A_3 - A_1)(A_4 - A_2)} \quad (13)$$

式中  $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$ 、 $B_4$  分别为第一、二、三、四次对照实验中的起升机构效率值； $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$ 、 $A_4$  分别为第一、二、三、四次对照实验中相应的零部件效率值。

计算出  $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$ 、 $B_4$  并对其进行归一化处理，得到能耗影响系数如表 6 所示。

**Table 6.** Influence coefficient of components on energy consumption of hoisting mechanism  
**表 6.** 各零部件对起升机构能耗影响系数

名称	电动机	联轴器	减速器	吊具系统
影响值	0.252	0.149	0.262	0.337

由此可知对起升机构而言，各零部件对起升机构整体能效影响大小依次为吊具系统效率、减速器效率、电动机效率和联轴器效率。

## 5. 结论与总结

- 1) 本文建立了一种可以适用各种型号桥门式起重机的起升机构键合图模型, 对于不同型号的桥门式起重机只需将各键合图元参数替换为样机真实参数即可进行仿真实验。
- 2) 本文提出了一种对各阻性元件阻尼参数进行估算的方法, 并在分析过程中证实了该方法的有效性。
- 3) 本文提出了桥门式起重机各零部件能效对整体能效的影响因数计算公式。
- 4) 本文经本模型计算得出了桥门式起重机起升机构中各零部件对整体能效影响系数, 由大致小依次为: 吊具系统效率 0.337、减速器效率 0.262、电动机效率 0.252 和联轴器效率 0.149。

## 基金项目

文章依托舟山市科技局公益类科技项目“舟山市在用起重机械能耗现状调研以及能效评价方法研究”。

## 参考文献

- [1] 叶伟. 桥式起重机节能评价技术研究及系统开发[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京理工大学, 2014.
- [2] 陈瑞峰. 桥式起重机运行能耗等级分类方法研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 东华大学, 2015.
- [3] Lee, S.J. and Chang, P.H. (2012) Modeling of a Hydraulic Excavator Based on Bond Graph Method and Its Parameter Estimation. *Journal of Mechanical Science and Technology*, **26**, 195-204. <https://doi.org/10.1007/s12206-011-0938-2>
- [4] Luo, Y. and Tan, D. (2011) Dynamics Modeling of Planetary Gear Set Considering Meshing Stiffness Based on Bond Graph. *Procedia Engineering*, **24**, 850-855. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.2749>
- [5] 王艾伦, 钟掘. 复杂机电系统的全局耦合建模方法及仿真研究[J]. 机械工程学报, 2003, 39(4): 1-5.
- [6] 任福深, 陈素丽, 王威. 基于键合图理论的斜直井管柱上扣/卸扣系统设计与仿真[J]. 中国机械工程, 2014, 25(3): 404-409.
- [7] 刘升, 孙冬野, 秦大同. 重型车湿式桥非线性传动能量流耗分析[J]. 机械工程学报, 2015, 51(9): 10-17.
- [8] 王中双, 高梦琦, 尹久政. 双曲柄串联曲柄滑块压力机机构计算机仿真向量键合图法[J]. 振动与冲击, 2020, 39(5): 208-213.
- [9] 王中双, 韦静. 肘杆式压力机机构动力学建模与分析向量键合图法[J]. 振动与冲击, 2019, 38(11): 140-145.
- [10] 梁全, 郑鹏, 赵文辉. 基于键合图理论的 RV 减速器动态特性研究[J]. 机械传动, 2020, 44(6): 32-36.
- [11] 梁岗, 程天聪, 王桂昇. 小车 - 吊重 - 桥机主梁耦合系统键合图建模及动力学分析[J]. 上海海事大学学报, 2020, 41(2): 110-116.
- [12] 刘恒丽, 王勇. 基于功率键合图的数控切削系统动态模型及特性研究[J]. 机床与液压, 2019, 47(22): 47-53.