

# 行星传动系统计算机辅助分析技术<sup>\*</sup>

唐正华<sup>1,2</sup> 闫清东<sup>1</sup> 冷韶华<sup>3</sup>

(1. 北京理工大学机械与车辆学院, 北京 100081; 2. 装甲兵学院车辆运用教研室, 蚌埠 233050;

3. 山东经贸职业学院院长办公室, 潍坊 261011)

**【摘要】** 为提高行星传动系统的设计水平与性能分析效率,研究了行星传动系统计算机辅助分析技术。通过对行星传动结构型式分析,构建了行星排、离合器和制动器等基本模块,基于模块间的连接关系,建立转速、转矩分析的通用数学模型,并自动构造出转速、转矩平衡方程组。编制了计算机辅助分析软件,实现了行星传动系统的快速建模、方程组的自动列写并求解以及性能分析等功能。

**关键词:** 车辆工程 行星传动 计算机辅助分析

**中图分类号:** TP319.77; TH132.425 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)10-0014-05

## CAA Technology for Planetary Transmission

Tang Zhenghua<sup>1,2</sup> Yan Qingdong<sup>1</sup> Leng Shaohua<sup>3</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

2. Department of Vehicle Using, Academy of Armored Forces, Bengbu 233050, China

3. President's Office, Shandong Vocational College of Economics and Business, Weifang 261011, China)

### Abstract

To improve the efficiency of the design and analysis, a computer-aided analysis technology for the planetary transmission was conducted. According to the analysis of planetary transmission and the connection of its module, the general mathematical models of the revolution and torque, which based on the model library for the planetary, clutch and brake, were constructed, and the kinetic equations of planetary transmission were automatic listed. A corresponding computer-aided analysis (CAA) software was programmed which realized the rapid modeling, automatic listing and equations solving, and performance analysis for the planetary transmission system.

**Key words** Vehicle engineering, Planetary transmission, Computer-aided analysis

### 引言

行星变速机构具有结构紧凑、载荷容量大、传动平稳、效率高、便于实现动力换挡和自动换挡等特点,因而在车辆传动系统中得以广泛应用。行星变速箱一般由行星排、离合器、制动器等构件组成,其中行星排由太阳轮、齿圈、行星架等基本构件构成,按行星轮特点和啮合方式不同可分为7种基本行星排<sup>[1]</sup>,由此构成的各种用途的行星变速箱,结构多

样、分析复杂。目前行星变速机构的分析大多使用的分析计算方法主要是通过人工分析各种行星变速箱的组成构件之间的连接关系,逐条列写转速、转矩方程,再通过科学计算软件等手段求解得出分析结果,它存在计算量大、效率低、易出错等问题。

本文基于模块化设计思想,构建行星变速机构组成构件的模型库,包括行星排、离合器、制动器等模型,并通过分析构件间的连接关系,实现数学模型的自动生成。设计并建立行星传动系统自动分析程

序框架,行星传动系统组成构件的模型库,编制车辆行星传动系统性能辅助分析软件,实现行星传动系统的自动分析。

### 1 行星传动数学模型

对由数量分别为  $p$ 、 $c$ 、 $b$  的行星排(P)、离合器(C)和制动器(B)构成的自由度为  $n$  的  $x(x=1,2)$  个输入(I)的行星变速机构(图 1)进行分析,建立其转速转矩平衡方程。

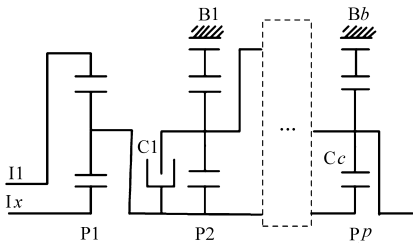


图 1 行星变速机构  
Fig. 1 Planetary transmission

#### 1.1 转速分析模型

以行星排的太阳轮、齿圈、行星架,离合器的主被动边,制动器的转速为变量(变量数为  $3p+2c+b$ ),行星排三构件之间的制约关系,离合器、制动器的工作状态,以及系统输入为约束条件,构建转速平衡方程组,它是由构件的特征方程以及构件间的连接方程构成。

行星排转速关系式为

$$\begin{cases} n_{i1} + k_1 n_{q1} - (1 + k_1) n_{j1} = 0 \\ n_{i2} + k_2 n_{q2} - (1 + k_2) n_{j2} = 0 \\ \vdots \\ n_{ip} + k_p n_{qp} - (1 + k_p) n_{jp} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

共  $p$  个特征方程。

制动器转速关系式为

$$\begin{cases} n_{B1} = 0 \\ \vdots \\ n_{Bb} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

共  $b$  个特征方程。

对处于结合状态的离合器,有

$$\begin{cases} n_{C1z} = n_{C1b} \\ \vdots \\ n_{Ciz} = n_{Cib} \end{cases} \quad (3)$$

共  $i$  个特征方程,其中下标  $z$ 、 $b$  表示离合器的主、被动端; $i$  表示处于结合状态的离合器数量,  $i \leq c$ 。

同时,由行星变速机构各组成构件间的连接关系可以得到相应的连接方程。当处于制动状态的制动器数量为  $n-x-i$  时,即可实现一个挡位,此时制动器贡献  $n-x-i$  个连接方程;各个行星排以及离

合器之间的连接,共贡献  $(2p+2c-n+x)$  个连接方程。结合式(1)~(3),即可构成维数是  $3p+2c+b$  的转速方程组。与变量数相同,方程完备,可解。

行星轮转速可由  $n_x = -\frac{2}{k-2}(n_i - n_j)$  求得。

#### 1.2 转矩分析模型

类似转速分析的思路,共有转矩分析变量数为  $3p+2c+b$ ;转矩特征方程数为  $2p+2c+b-i-j$ ,其中  $i$  为处于结合状态的离合器数, $j$  为处于制动状态的制动器数,转矩连接方程数为  $p+n-x$ 。共构成维数是  $3p+2c+b$  的转矩方程为

$$\begin{cases} T_{i1} : T_{q1} : T_{j1} = 1 : k_1 : -(1 + k_1) \\ \vdots \\ T_{ip} : T_{qp} : T_{jp} = 1 : k_p : -(1 + k_p) \\ T_{C1z} + T_{C1b} = 0 \\ \vdots \\ T_{Ciz} + T_{Cib} = 0 \\ T_{C(i+1)z} = T_{C(i+1)b} = 0 \\ T_{Ccz} = T_{Ccb} = 0 \\ T_{B(j+1)} = 0 \\ \vdots \\ T_{Bb} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

与变量相同,方程完备,可解。

#### 1.3 效率计算模型

行星传动效率计算采用相对功率法<sup>[2]</sup>,它只计算齿圈、太阳轮相对于行星架而动的相对运动啮合损失,而暂认为齿圈和太阳轮随行星架运动的牵连运动部分不影响效率,该方法原理简单,易于程序实现,且有足够精度。

多排行星传动功率损失等于各排相对功率损失之和,其效率  $\eta$  计算公式为

$$\eta = \frac{P_0 - (P_{s1} + P_{s2} + \cdots)}{P_0} = 1 - [(1 - \eta_{x1})\beta_1 + (1 - \eta_{x2})\beta_2 + \cdots] \quad (5)$$

式中  $P_0$ ——输入构件功率

$P_{s1}$ 、 $P_{s2}$ ——各行星排损失功率

$\eta_{x1}$ 、 $\eta_{x2}$ ——各行星排的相对运动效率,普通行星排取 0.95,双星行星排取 0.92

$\beta_1$ 、 $\beta_2$ ——各行星排的相对功率系数

$$\beta = \left| \frac{T_i(n_i - n_j)}{T_o n_o} \right| \quad (6)$$

通过转速、转矩分析模型所求解得的各构件的转速和转矩,根据式(5)、(6)即可求出各工况的传动效率  $\eta$ 。

1.4 传动比计算及功率流分析

在计算出各基本运动件转速和转矩的基础上,输入、输出构件转速之比即传动比;各组成构件转速、转矩与相对功率法求得的效率的乘积除以 9 549 即该构件传递的功率,也即得到了动力在行星变速系统中的传递路线。对功率的方向规定如下:如果某一基本构件在某一端口上所受力矩方向和它的转速方向相同,则功率为正,即该构件从这个受力端口上吸收功率,或功率由此处输入;反之,力矩方向若与旋转方向相反,则功率为负,即该构件从这一点上放出功率,或功率由此输出。

2 程序设计

2.1 程序框架及总体设计

程序基于 Microsoft Windows XP,使用 VC 2005 开发而成,采用了 MVC(模型-视图-控制器)设计模式<sup>[3]</sup>。模型层,实现对传动系统各模块的构建,模块数据的处理,以及模块之间的关联性分析;视图层,负责生成用户界面,输入、输出提示等信息;控制器层,响应用户键盘和鼠标的操作,驱动模型层进行仿真计算,控制视图的更新和重绘等,如图 2 所示。

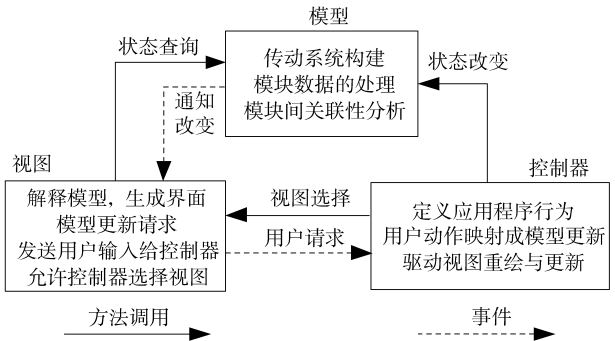


图 2 MVC 组件体系结构

Fig.2 MVC architecture scheme

模型层中,行星传动系统中行星排、离合器、制动器等构件的模块化,继承于实现能量转换或传送的物理系统的基本模块(图 3),通过代码封装,实现模块的端口访问、参数设置以及数学表达式的更新等功能,从而实现对模块数据的处理和分析。

通过对视图层搭建的传动简图的分析,自动列写模块内及模块间转速、转矩平衡关系式,已知系统输入时,即可得到完备的方程组,并进行数值计算,求出各模块各端口的转速、转矩,流程如图 4 所示。运用相对功率法求得传动系统的效率,并分析出系统的功率流向。

2.2 转速转矩方程组的自动构建

由模块内各端口之间的转速、转矩关系,以及模块间连接关系生成的转速、转矩方程,在传动系统结

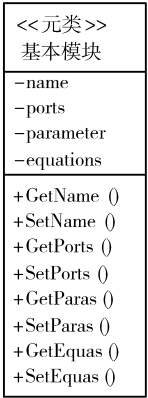


图 3 基本模块的 UML 描述

Fig.3 UML description of base model

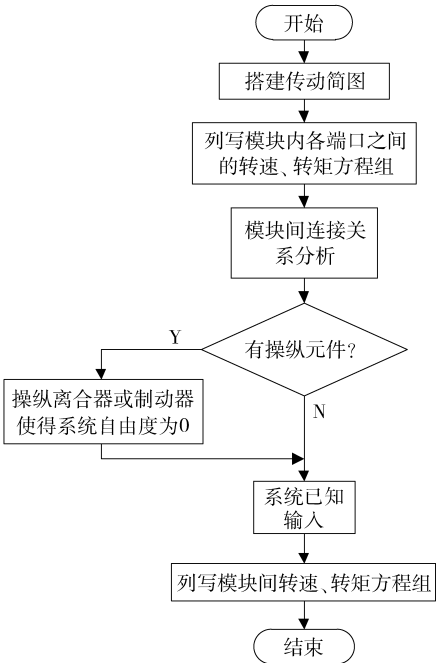


图 4 传动系统自动分析软件流程图

Fig.4 Flow diagram of transmission automatic analysis software

构或参数发生变化时,会有相应改变。自动构建转速、转矩方程组,生成求解矩阵,是行星传动计算机辅助分析研究的关键。

为便于转速、转矩方程组的自动构建和求解,需要建立对应的计算机模型,通过数学表达式的演算<sup>[4]</sup>,实现对转速、转矩方程的表示、添加、修改与删除,并通过表达式动态构建出矩阵方程,图 5 是转速、转矩求解矩阵生成的算法流程图。通过对矩阵方程的求解即可得行星传动系统各构件的转速、转矩。

3 实例应用

以某 3 自由度行星变速机构(图 6)为例进行分析。它由 4 个行星排、4 个制动器和 2 个离合器构成,其中行星排 1 为内外啮合双星排,行星排 2、3、4 为普通排,特性参数分别为  $k_1 = 2.22$ 、 $k_2 = 2$ 、 $k_3 =$

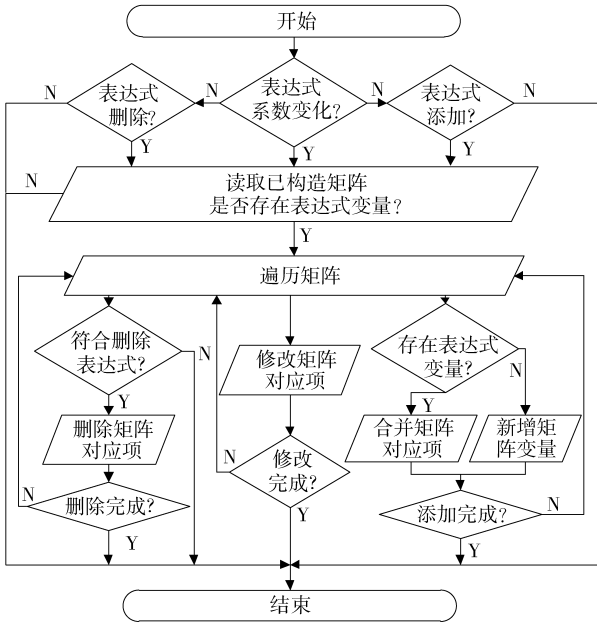


图 5 转速、转矩求解矩阵生成的算法流程图  
Fig. 5 Flow diagram of revolution and torque matrices generation

4. 57 和  $k_4 = 2. 143$ 。通过控制其中 2 个操纵构件，就可以得到某一挡位的传动工况。

图 7 是该行星变速系统辅助分析软件截图，在模型搭建区搭建传动简图，属性面板设置行星变速系统组成构件的特征参数，如行星排的特性参数、操纵构件的工作状态、输入转速、转矩初始值（为方便

计算，一般设为单位 1），点击计算，即可得该传动系统各个构件的转速转矩。

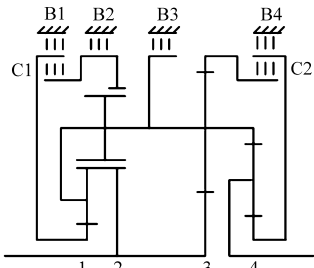


图 6 某行星变速机构  
Fig. 6 Planetary transmission

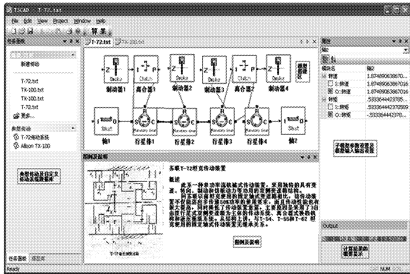


图 7 某行星变速机构辅助分析软件截图  
Fig. 7 Screen shot for CAA software

软件计算结果如表 1、2 所示。表 1 为离合器 2 结合、制动器 4 制动（记为 C2B4）时行星排的太阳轮、齿圈与行星架的转速、转矩；表 2 为该行星变速机构各挡位信息，包括该挡位下操纵构件的操纵情况、传动比以及效率。

表 1 操纵 C2B4 时行星排太阳轮、齿圈、行星架转速、转矩相对值

Tab. 1 Revolution and torque values of sun wheel, ring gear and planetary carrier using C2B4

| 行星排 | $n_t$     | $n_q$     | $n_j$    | $n_x$     | $T_t$    | $T_q$ | $T_j$     |
|-----|-----------|-----------|----------|-----------|----------|-------|-----------|
| 1   | -0. 731 2 | -0. 230 7 | 0. 179 5 | 1. 493 0  | 0        | 0     | 0         |
| 2   | 1         | 0. 230 7  | 0. 179 5 | -1. 641 0 | 0        | 0     | 0         |
| 3   | 1         | 0         | 0. 179 5 | -0. 459 7 | 1        | 4. 57 | -4. 570 0 |
| 4   | 0         | 0. 179 5  | 0. 122 4 | 0. 214 2  | 2. 599 2 | 5. 57 | -8. 169 2 |

表 2 各挡位操纵情况、传动比及效率

Tab. 2 Manipulation, ratio and efficiency for each shift

|     | 挡位       |          |          |          |          |          |          |            |
|-----|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|------------|
|     | 1        | 2        | 3        | 4        | 5        | 6        | 7        | 倒          |
| 操纵  | C2B4     | B2B4     | C2B2     | B1B4     | C2B1     | C1B4     | C1C2     | C2B3       |
| 传动比 | 8. 169 9 | 4. 399 5 | 3. 485 5 | 2. 787 8 | 2. 028 0 | 1. 466 7 | 1. 000 0 | -14. 368 7 |
| 效率  | 0. 943 1 | 0. 950 8 | 0. 945 0 | 0. 922 5 | 0. 924 1 | 0. 984 1 | 1        |            |

软件计算得到的结果与通过其他计算方式得到的相一致，说明了该方法是正确可行的。

4 结论

(1)通过对车辆行星传动特点的分析，建立了行星传动计算分析通用模型，开发了行星传动系统

计算机辅助分析程序，能够自动列写并求解行星变速系统转速、转矩平衡方程组，实现了行星传动系统的挡位分析、传动比和效率计算，以及行星传动系统各组成构件的转速、转矩计算，有效提高了行星传动系统的设计分析效率。

(2)基于数学表达式的计算机演算，开发了转

速、转矩方程自动构建程序子模块,能够动态地构造 强的通用性和实用性。  
出行星传动系统的转速、转矩平衡矩阵方程,具有较

### 参 考 文 献

- 1 闫清东,张连第,赵毓芹. 坦克构造与设计:下册[M]. 北京:北京理工大学出版社,2007:176~190.
- 2 刘修骥. 车辆传动系统分析[M]. 北京:国防工业出版社,1998:49~72.
- 3 Elisabeth Freeman, Eric Freeman, Bert Bates, et al. Head first design patterns[M]. Sebastopol, CA: O'Reilly Media,2005.
- 4 王国平. 多体系统动力学数值解法[J]. 计算机仿真,2006,23(12):86~89.  
Wang Guoping. Numerical algorithms of multi-body system dynamics[J]. Computer Simulation,2006,23(12):86~89. (in Chinese)
- 5 唐正华,闫清东,刘树成. 通用液力传动系统匹配方法[J]. 农业机械学报,2012,43(2):26~30.  
Tang Zhenghua, Yan Qingdong, Liu Shucheng. General matching method for hydraulic transmission system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2012,43(2):26~30. (in Chinese)
- 6 鲍培德,谢俊,马履中,等. 泵站用行星齿轮变速传动装置的设计[J]. 排灌机械工程学报,2010,28(3):238~241.  
Bao Peide, Xie Jun, Ma Lüzhong, et al. Design on planetary gear transmission device for pumping stations[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering,2010,28(3):238~241. (in Chinese)
- 7 汪震隆,王应,胡俊生. 功率分流式行星传动运动学和静力学矩阵分析方法研究[J]. 合肥工业大学学报:自然科学版,2011,34(8):1 142~1 145.  
Wang Zhenlong, Wang Ying, Hu Junsheng. Research on matrix analysis method of kinematics and statics for power-split planet transmission[J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science,2011,34(8):1 142~1 145. (in Chinese)
- 8 徐小军,陈循,尚建忠,等. 波浪补偿差动行星传动机构的动力学建模与分析[J]. 机械科学与技术,2011,30(2):185~190.  
Xu Xiaojun, Chen Xun, Shang Jianzhong, et al. Dynamic analysis of differential planet transmission mechanism for heave compensation[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering,2011,30(2):185~190. (in Chinese)
- 9 卜忠红,刘更,吴立言. 行星齿轮传动动力学研究进展[J]. 振动与冲击,2010,29(9):161~166.  
Bu Zhonghong, Liu Geng, Wu Liyan. Research advances in planetary gear trains dynamics[J]. Journal of Vibration and Shock,2010,29(9):161~166. (in Chinese)
- 10 李宏才,闫清东,李慎龙. 行星传动方案结构几何矛盾图论判别方法[J]. 北京理工大学学报,2010,30(9):1 047~1 050.  
Li Hongcai, Yan Qingdong, Li Shenlong. Differentiation of structural geometry contradiction in planetary transmission program using graph theory[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology,2010,30(9):1 047~1 050. (in Chinese)

(上接第 30 页)

- 9 王同建. 装载机线控转向技术研究[D]. 长春:吉林大学,2006.  
Wang Tongjian. Research of steer-by-wire technology on wheel loader[D]. Changchun: Jilin University, 2006. (in Chinese)
- 10 周原. 装载机线控转向智能控制方法研究[D]. 长春:吉林大学,2010.  
Zhou Yuan. Research on intelligent control method of steer-by-wire for wheel loader[D]. Changchun: Jilin University, 2010. (in Chinese)
- 11 侯明亮. 拖挂式激光平地机液压控制系统研究[D]. 北京:中国农业大学,2005.  
Hou Mingliang. Research on hydraulic control system in laser land-leveling machine of drag type[D]. Beijing: China Agricultural University, 2005. (in Chinese)
- 12 庄继德. 汽车轮胎学[M]. 北京:北京理工大学出版社,1997:156~269.
- 13 洪嘉振. 计算多体系统动力学[M]. 北京:高等教育出版社,1999:289~319.
- 14 孔向东,钟万勰. 非线性系统动力学微分代数方程约束违约的自动修正[J]. 大连理工大学学报,1999,39(1):22~25.  
Kong Xiangdong, Zhong Wanxie. Self correction algorithm of constraint errors of differential algebraic equations for nonlinear system dynamics[J]. Journal of Dalian University of Technology, 1999, 39(1):22~25. (in Chinese)