

文章编号: 1000-582x(2000)02-0001-05

①

2000, 23(2)

1-5

金属带式无级变速传动键合图建模及仿真

胡建军, 秦大同, 孙冬野, 杨亚联, 杨为

(重庆大学机械传动国家重点实验室, 重庆 400044)

32
TH132.46
U463.212

摘要: 无级变速传动是汽车理想的传动方式, 金属带式无级变速器是目前最成熟的无级变速器。作者在详细分析金属带式无级变速汽车传动系工作机理和变速特性的基础上, 运用键合图理论, 建立了该传动系统的键合图分析模型, 推导出无级变速传动的状态方程。基于这一动态模型, 仿真分析了汽车在加速及阻力突变时的动态响应过程。结果表明: 键合图模型能够很好地反映无级变速传动的动态特性。本研究结果为进一步研究无级变速传动系统提供了理论分析方法和设计依据。

关键词: 无级变速传动; 键合图; 仿真

中图分类号: TH 132.32

文献标识码: A

金属带式 建模 仿真

汽车工业百余年的发展史, 主要是动力传动系的发展史。无级自动变速传动作为汽车理想的传动系统, 自汽车诞生以来一直是人们追求的目标。

无级变速传动 (Continuously Variable Transmission, 简称为 CVT) 具有普通有级变速传动无法相比的优点, 它可以控制汽车发动机始终运行在最佳目标运行区, 显著提高汽车的经济性, 改善汽车的动力性, 并可通过自动换挡使汽车驾驶操纵变得简单, 既减少了汽车的行驶冲击, 也减少驾驶员的劳动强度。与装配常规有级式机械传动汽车相比, 无级变速传动汽车具有节省燃料、排气污染小、操纵方便、乘坐舒适、变速快捷的优点^[1,2]。

作者在详细分析装配有金属带式无级变速器的无级变速汽车传动系统工作机理和变速特性的基础上, 运用键合图理论, 建立起该传动系统的数学模型, 并对无级变速汽车加速特性进行仿真, 从而为研究金属带式无级变速传动系统动态特性提供理论分析方法和设计依据。

1 无级变速传动原理

1.1 金属带式无级变速器基本结构

金属带式无级变速器是实现汽车无级变速传动的关键部件, 它主要由金属带、主动轮、从动轮、油泵、油

缸、离合器等部件组成。发动机输出的动力经离合器传到无级变速传动装置的主动轮, 通过 V 型金属带将动力传输到从动轮, 之后经一级减速器、主减速器与差速器传递到车轮。在无级变速器中, 带传动装置是其核心部分, 图 1 表示了带传动装置的结构简图, 它主要由主动轮、从动轮以及 V 型金属带组成。其主、从动轮均为组合结构, 一端固定, 另一端可轴向移动, 主动轮的可动部分和不可动部分形成的 V 型槽与 V 型金属带啮合, 实现动力传递。

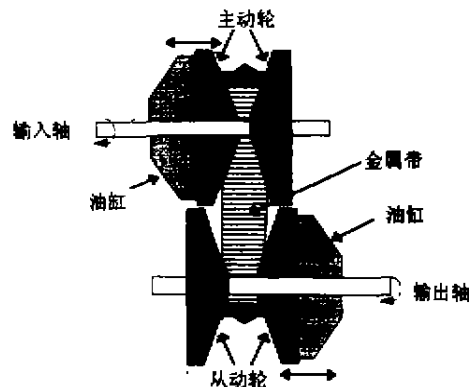


图 1 金属带式无级变速器带传动装置结构简图

1.2 无级变速传动变速原理

金属带式无级变速传动属于摩擦式无级变速传

收稿日期: 1999-07-30

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目 (59835160)

作者简介: 胡建军 (1973-), 男, 四川达川人, 博士生, 主要从事机械传动领域的研究工作。

动。在工作中,当主、从动轮的可动部分沿轴向移动时,可改变金属带在主、从动轮上的工作半径,从而改变无级变速器的传动比。可动带轮的移动量根据汽车变速的要求,通过调节作用在主、从动轮油缸内的液压压力来实现的。由于液压力的调节是连续变化的,所以可实现汽车的无级变速传动。

2 传动系统键合图模型的建立

2.1 键合图基本理论

2.1.1 通口、键、键接

键合图是彼此间用键连接起来的键图元的集合,它是一种线性元,它的节点就是键图元。为建立复杂系统的模型,常将其分成若干个子系统和元件。在系统

中,这些子系统存在着相互作用关系,并以传递功率形式互相联系在一起。这一联系的通道称为通口,并用画在键图元旁边的一根短线段表示,这一联系两个键图元的连线称为键。一根键所关联的两个键图元之间的连接叫键接,当两个键图元键接后,能量从一个键图元传递到另一个键图元,在能量传递过程中,在键上没有能量损失。

2.1.2 广义变量

在键合图模拟中将涉及四种广义变量,即势变量、流变量、广义位移和广义动量。势变量和流变量称为功率变量,广义位移和广义动量称为能量变量。表1列出了以上4种变量在几种学科中的具体含义。

表1 变量在几种学科中的含义

广义变量	一般符号	机 械 学		液 压	电 工 学
		平 移	转 动		
势 变 量	$e(t)$	力 $F(t)$	转矩 $T(t)$	压力 $p(t)$	电压 $u(t)$
流 变 量	$f(t)$	速度 $v(t)$	角速度 $\omega(t)$	流量 $Q(t)$	电流 $I(t)$
广义位移	$q(t)$	位移 $X(t)$	角位移 $\theta(t)$	体积 $V(t)$	电荷 $Q(t)$
广义动量	$p(t)$	动量 $p(t)$	角动量 $h(t)$	压力动量 $\beta(t)$	磁通量 $\varphi(t)$

2.1.3 基本键图元

系统的动态特性可用适当连接的理想元件来描述。不同的能域的物理性质有不同的理想元件,但它们之间存在着几种相同的物理性质。某种键图元就是具有某种物理性质的不同能域理想元件的代表。键图元是构成键图的基本元件。

在键合图理论中,用标准图形符号构造了有限个基本元件来代替系统的真实器件。通常使用的有9种最基本的键图元,这些键图元又可分为一通口、二通口和多通口,根据所描述的键图元的物理性质的不同又可分为源类、能量储蓄类、能量消耗类和结类。以下为键合图中主要的9种基本键图元(表2)。

表2 基本键图元

名称	符号	名称	符号
阻性元	R	二通口 变换器	TF
惯性元	I	回转器	GY
一通口 容性元	C	三通口 共势结	0
势 元	Se	共流结	1
流 元	Sf		

2.2 汽车无级变速传动系统键合图模型

由图2可知,汽车无级变速传动系统主要由发动机、离合器、金属带式无级变速器、车轮等部件组成,它

是一个由多种子系统构成的复杂系统,它包括机械传动部分、金属带调速装置和离合器的液压及电控部分。要研究这些复杂系统的动态特性,采用现有的只涉及单一能域的模拟仿真方法就难以胜任。而键合图与其它分析方法相比,具有独特的优越性,其键图模型结构简明,包含的信息量大,具有很好的拓扑性,数学模化规则化,能预示键图模型数学模化和求解时遇到的困难,易于采取绕过上述困难的措施。因此,键合图方法正是一种用于分析这类复杂系统的通用方法^[3,4]。作者主要分析了由发动机、惯性飞轮、离合器、金属带式无级变速器、一级减速齿轮、差速器、半轴、车轮、车体等部件所组成的汽车机械部分的传动特性,其键合图仿

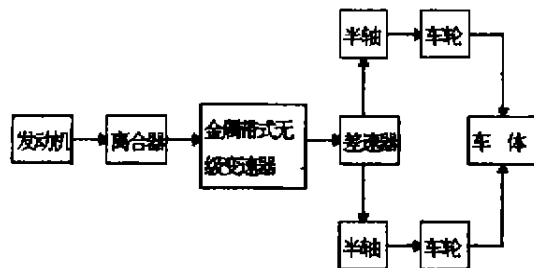


图2 汽车传动系统简图

真模型是根据组成系统各部件的功能,采用表 3 所列的基本元件,并依据各部件的因果关系建立的。无级变速系统键合图模型如图 3 所示。其中: i ——无级变速器带传动速比; i_1 ——一级减速齿轮传动速比; i_2 ——主传动速比。下标:0——发动机;1——惯量飞轮;2——离合器主动件;3——离合器从动件;4——金属带主动轮;5——金属带从动轮;6——一级减速齿轮;7——差速器;8,9——半轴;10,11——车轮;12——车体。

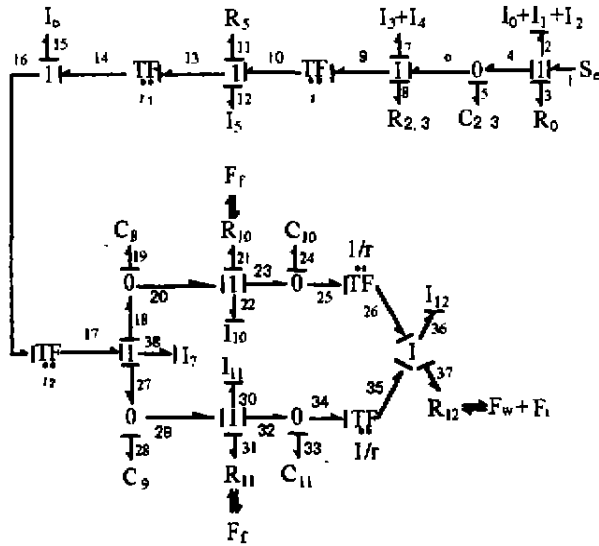


图 3 无级变速汽车传动系统键合图模型

表 3 无级变速汽车传动系基本键图元

部 件	基本键图元	部 件	基本键图元
发动机	Se, J, R	差速器	TF, I
惯量飞轮	I	半 轴	C
离合器	I, C, R	车 轮	TF, J, R, C
无级变速系统	TF, I, R	车 体	I, R
一级减速齿轮	TF, I		

2.3 状态方程

状态变量是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、容性效应对系统的动态性能起着主导的影响作用,故状态变量通常与各储能元件有关。根据图 4 所得的汽车无级变速传动系统键合图仿真模型,以惯性元的广义动量 p 和容性元的广义位移 q 为状态变量,各单元的势和流分别用 e 和 f 表示,并对各键统一编号为 1 ~ 38,其中变量 p, q, e 和 f 的下标代表所在键的编号。由于 p_7, p_{12} 和 p_{15} 为微分因果关系,所以 p_7, p_{12}, p_{15} 不是独立变量,其中:

$$p_7 = i \cdot i_1 \cdot i_2 \frac{(I_3 + I_4) p_{38}}{I_7}$$

$$p_{12} = i_1 \cdot i_2 \cdot I_5 \frac{p_{38}}{I_7} \quad (1)$$

$$p_{15} = i_2 \cdot I_0 \frac{p_{34}}{I_7}$$

设整个系统状态变量为 $X = [p_2, p_{22}, p_{30}, p_{36}, p_{38}, q_5, q_{19}, q_{24}, q_{26}, q_{33}]^T$,根据系统因果关系和功率流方向得状态变量之间的关系:

$$p_2 = e_1 - e_3 - e_5 \quad p_{22} = e_{19} - e_{21} - e_{24}$$

$$p_{30} = e_{28} - e_{31} - e_{33} \quad p_{36} = (e_{24} + e_{31})/r - e_{37}$$

$$\dot{p}_{38} = i_2 (i_1 (i (e_3 - e_7 - e_8) - e_{11} - e_{12}) - e_{15}) - e_{19} - e_{28}$$

$$\dot{q}_5 = f_2 - f_7 \quad \dot{q}_{19} = f_7 / (i \cdot i_1 \cdot i_2) - f_{22}$$

$$q_{24} = f_{22} - f_{36}/r \quad \dot{q}_{26} = f_7 / (i \cdot i_1 \cdot i_2) - f_{30}$$

$$\dot{q}_{33} = f_{30} - f_{36}/r \quad (2)$$

对于线性键图元有:

$$e_3 = R_0 \cdot f_2 \quad e_5 = q_5 / C_{2,3}$$

$$e_7 = \dot{p}_7 \quad e_8 = R_{2,3} \cdot f_7$$

$$e_{11} = f_7 / i \cdot R_5 \quad e_{12} = \dot{p}_{12}$$

$$e_{15} = \dot{p}_{15} \quad e_{19} = q_{19} / C_8$$

$$e_{21} = R_{10} \cdot f_{22} \quad e_{24} = q_{24} / C_{10}$$

$$e_{28} = q_{26} / C_9 \quad e_{31} = R_{11} \cdot f_{30} \quad (3)$$

$$e_{33} = q_{33} / C_{11} \quad e_{37} = R_{12} \cdot f_{36}$$

$$f_2 = p_2 / (I_0 + I_1 + I_2)$$

$$f_7 = p_7 / (I_3 + I_4)$$

$$f_{22} = p_{22} / I_{10} \quad f_{30} = p_{30} / I_{11}$$

$$f_{36} = p_{36} / I_{12}$$

将式(1)、(3)代入式(2)可列写无级变速传动系统键合图仿真状态空间方程:

$$\dot{p}_2 = e_1 - \frac{R_0}{I_0 + I_1 + I_2} p_2 - \frac{q_5}{C_{2,3}}$$

$$p_{22} = \frac{q_{19}}{C_8} - \frac{q_{24}}{C_{10}} - e_{21}$$

$$\dot{p}_{30} = \frac{q_{28}}{C_9} - \frac{q_{33}}{C_{11}} - e_{31}$$

$$\dot{p}_{30} = \left(\frac{q_{24}}{C_{10}} + \frac{q_{33}}{C_{11}} \right) / r - e_{37}$$

$$\dot{p}_{38} = \frac{i \cdot i_1 \cdot i_2 \cdot q_5}{\lambda \cdot C_{2,3}} - \frac{i \cdot i \cdot i_1^2 \cdot i_2^2 \cdot p_{38} \cdot (I_3 + I_4)}{\lambda \cdot I_7}$$

$$\frac{i^2 \cdot i_1^2 \cdot i_2^2 \cdot p_{38} \cdot R_{2,3}}{\lambda \cdot I_7} - \frac{i_1^2 \cdot i_2^2 \cdot p_{38} \cdot R_5}{\lambda \cdot I_7}$$

$$\frac{q_{19}}{\lambda \cdot C_8} - \frac{q_{28}}{\lambda \cdot C_9}$$

$$\begin{aligned} \dot{q}_5 &= \frac{p_2}{I_0 + I_1 + I_2} - \frac{i_1 \cdot i_1' \cdot i_2' \cdot p_{38}}{I_7} \\ \dot{q}_{19} &= \frac{p_{38}}{I_7} - \frac{p_{22}}{I_{10}} \\ \dot{q}_{24} &= \frac{p_{22}}{I_{10}} - \frac{p_{36}}{I_7 \cdot r} \\ \dot{q}_{28} &= \frac{p_{38}}{I_7} - \frac{p_{30}}{I_{11}} \\ \dot{q}_{33} &= \frac{p_{30}}{I_{11}} - \frac{p_{36}}{I_{12} \cdot r} \end{aligned} \quad (4)$$

其中 $\lambda = \frac{i_1^2 \cdot i_2^2 (i_3^2 (I_3 + I_4) + I_5) + i_2^2 \cdot I_6 + I_7}{I_7}$

- e_1 ——发动机输出转矩, $N \cdot m$
- e_{21}, e_{31} ——车轮滚动阻力矩, $N \cdot m$
- e_{37} ——汽车的风阻及坡道阻力, N
- r ——车轮半径, m

系统的输入列向量为 $U = [e_1, e_{21}, e_{31}, e_{37}]^T$, 状态列向量为 $X = [p_2, p_{22}, p_{30}, p_{36}, p_{38}, q_5, q_{19}, q_{24}, q_{28}, q_{33}]^T$, 由公式(4) 可得以下简化状态方程:

$$\dot{X} = A \cdot X + B \cdot U \quad (5)$$

式中 A 为 10×10 维的系数矩阵, B 为 10×4 维的系数控制矩阵。

3 无级变速传动系统仿真

计算机仿真是获取系统有关动态特性信息的有效方法, 它可以在系统构造之前用来预测新系统的特性, 也可在改造现有系统时用来探索方案。作者以获取轿车传动系统设计方法和结构参数为目的, 在忽略金属带式无级变速装置液压控制和离合器控制系统影响的前提下, 对系统进行键合图仿真研究。有关无级变速装置和离合器控制系统对整个车辆传动系统的影响的探索, 将在后续研究中进行。

3.1 系统主要参数

汽车质量 $M = 1420 \text{ kg}$; 主减速比 $i_0 = 5.6922$; 滚动阻力系数 $f = 0.018$; 车轮半径 $r = 0.31 \text{ m}$; 风阻系数 $C_w = 0.32$; 迎风面积 $A_w = 2.623 \text{ m}^2$; 发动机转动惯量 $I_e = 0.032 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$; CVT 转动惯量 $I_c = 0.032 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$; 差速器 + 轮胎转动惯量 $I_t = 3.64 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$; CVT 速比范围 $0.445 \sim 2.6$; 道路坡度 $\theta = 0 \text{ rad}$; 空气密度 $\rho = 1.166 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$; 重力加速度 $g = 9.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。

当离合器完全结合后, 离合器、半轴及车轮的弹性变形对整个传动系的影响非常小, 在本系统仿真中忽略不计。

3.2 无级变速传动系统仿真

应用前面所建立的状态方程进行无级变速传动系统仿真, 在对系统进行合理简化后, 其仿真模型结构框图如图 4 所示。它由发动机、传动装置动力学和速比模糊控制 3 个模型组成。通过控制油门得到某一转速下发动机的输出转矩, 它与汽车滚动阻力矩及风阻和坡道阻力矩作为系统状态方程的输入向量, 求解可得系统的状态向量。由发动机实际转速与目标转速的差值及差值变化率, 通过模糊控制获取无级变速器速比变化率。通过改变无级变速器的传动比, 使发动机的转速稳定在目标工作点(如最佳动力性点)。

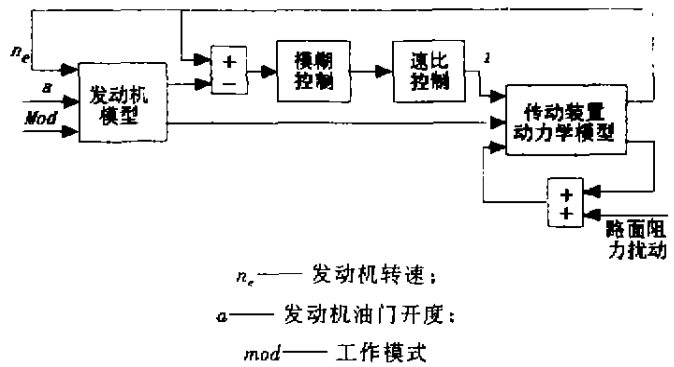


图 4 无级变速传动系统仿真结构框图

假设无级变速器主动轮转速与汽车发动机转速相等, 则发动机在某一稳定转速下突然加速的动态调节特性如图 5 所示, 当汽车行驶遇突变阻力时, 在发动机油门不变的情况下, 通过调节无级变速器速比来保持发动机转速不变的动态响应过程如图 6 所示。

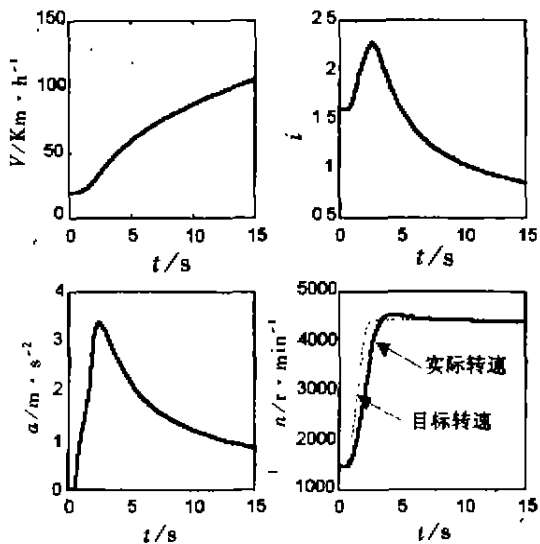


图 5 无级变速传动加速过程

由上图可知,应用键合图理论所推导的传动系统状态方程能够很好地反映无级变速传动的动态特性。由于无级变速器速比的连续变化,可使发动机转速稳定在目标工作点,并实现汽车的平稳加速。当汽车行驶阻力突变时,可通过模糊控制来实现无级变速器速比的自动调节,保证发动机转速稳定在目标值,从而提高汽车的动力性、经济性并减少有害气体的排放。

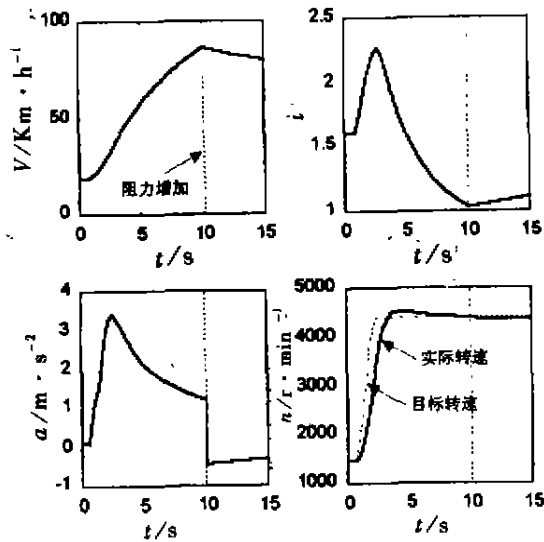


图6 阻力突变时传动系统动态响应

4 结论

1) 建立了金属带式无级变速传动汽车传动系的键合图数学模型,推导了相应的汽车传动系的系统状态方程,为进一步开展汽车无级变速传动的动态特性及系统动态仿真奠定了基础。

2) 应用获得的系统状态方程仿真分析了金属带式无级变速传动汽车加速及行驶阻力突变时的动态响应过程,仿真结果很好地反映了无级变速传动的动态特性。

参 考 文 献

- [1] 葛安林. 车辆自动变速理论与设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1993.
- [2] HENDRIKS E. Qualitative and Quantitative Influence of a Fully Electronically Controlled CVT on Fuel Economy and Vehicle Performance[J]. SAE Paper. 1993, 930668: 1010 ~ 1022.
- [3] 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.
- [4] 裘熙定. 键合图理论在汽车系统分析与控制中的应用[J]. 汽车工程, 1996, 18(5): 277 ~ 284.

Modeling by Bond Graph and Simulation for a Metal Pushing Belt Continuously Variable Transmission System

HU Jian-jun, QIN Da-tong, SUN Dong-ye, YANG Ya-lian, YANG Wei

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

ABSTRACT: Continuously variable transmission is the ideal transmission mode, the Metal Pushing Continuously Variable Transmission (CVT) is the most mature CVT used in vehicle at present. By studying the transmission mechanism and ratio change characteristics of Metal Pushing Continuously Variable Transmission system, and using the bond graph theory, a bond graph model of continuously variable transmission is established in this paper, and the state-space function is derived. Based on the model, The simulation of transmission characteristics of a CVT car is studied, the simulation result shows that the dynamic characteristics of continuously variable transmission could be expressed in this model. The research results can provide the theoretical analysis method and design basis for CVT vehicle.

KEYWORDS: continuously variable transmission; bond graph; simulation

(责任编辑 成孝义)