

电动汽车驱动系统键合图模型建模过程分析

王诺言¹, 陈晴晴^{1*}

(¹ 江苏师范大学科文学院 电气与智能制造学院, 江苏 徐州 221132)

摘要: 电动汽车驱动系统具有机电双向耦合、再生制动能量流向反转的特点, 传统分域微分方程建模存在跨域统一描述困难、驱动与制动工况需分立建模的问题。本文基于功率键合图理论, 建立一套标准化建模流程, 依次完成动力电池、逆变器、永磁同步电机、减速齿轮、整车负载模块化建模, 推导变速约束、转子转角取模公式与双工况统一电磁转矩方程。模型采用统一势、流变量描述多能量域, 依靠功率流正负自动切换工作模式, 可直观表征制动能量回馈路径。该建模流程模块化、通用性强, 可为电驱系统多物理场仿真提供规范、可复用的建模方案。

关键词: 电动汽车驱动系统; 键合图; 多能域建模

DOI: <https://doi.org/10.71411/jyyjx.2026.v1i7.1726>

Analysis of Bond Graph Modeling Process for Electric Vehicle Drive Systems

Wang Nuoyan¹, Chen Qingqing^{1*}

(¹ Jiangsu Normal University KeWen College, School of Electrical and Intelligent Manufacturing, Xuzhou, Jiangsu, 221132, China)

Abstract: Aiming at bidirectional coupling and energy flow reversal in electric vehicle drive systems, traditional modeling faces cross-domain description difficulties and requires separate models for driving and braking conditions. Based on power bond graph theory, this paper establishes a standardized process for modular modeling of the battery, inverter, PMSM, gears, and vehicle load. The variable-speed constraints, rotor angle modulo formula, and a unified electromagnetic torque equation are derived. By utilizing unified effort and flow variables, the model automatically switches operating modes based on power flow direction to character regenerative braking paths. The modeling process is modular and universal, which can provide a standardized and reusable modeling scheme for multi-physical field simulation of electric drive system.

Keywords: Electric Vehicle Drive Systems; Bond graph; Multi-domain modeling

引言

在国内低碳交通政策推动下, 纯电动汽车因能通过再生制动回收惯性动能来提升续航而受到了广泛关注。其驱动系统涵盖电气与机械两类能量域^{[1][2][3]}: 驱动时电池电能转为车轮机械能, 制动时车轮惯性反向拖动电机发电, 能量回馈至电池, 流向完全相反。传统建模常分别建立电路微

基金项目: 大学生创新创业训练计划项目《基于键合图的电动汽车驱动系统机电耦合特性优化设计》(项目编号: S202613988005)

作者简介: 王诺言 (2004-), 男, 江苏宿迁, 本科, 研究方向: 机电耦合动力学

通讯作者: 陈晴晴, 通讯邮箱: cqsumming@163.com

分方程和刚体动力学方程，两域变量独立，导致驱动与制动需两套方程组，整体推导过程复杂。

键合图理论采用统一的势、流变量描述全部能量域的功率传递关系，仅需单套模型即可适配系统的双向能量流动，是电驱系统多物理场建模的有效方法^{[4][5][6][7]}。然而，当前多数研究缺少统一规范、可复用的标准化建模流程体系。国外自 20 世纪 70 年代便将键合图理论应用于机电耦合系统，逐步完善了基础机电键合图元库。文献^[4]中搭建了永磁同步电机基础键合图模型，但该研究仅针对电机本体开展电动工况仿真，但未考虑发电工况，其成果无法完整表征整车动力系统的实际运行特性。国内近几年围绕电动汽车键合图建模开展了多维度研究。文献^[5]搭建了整车传动系统键合图模型，证明其精度优于传统建模方法，但该研究简化了齿轮机构，且未对转子转角设置取模运算，长时仿真易产生相位误差。针对发电工况，文献^[7]搭建了风力发电机的键合图建模，但忽略了部分减速齿轮与负载影响，且用于风力发电场景，不适用于电动汽车再生制动工况的仿真。

现有文献多聚焦于单一零部件建模或纯理论推导。文献^[8]针对减速齿轮机构推导了齿轮副的精确键合图模型。文献^[9]中建立多电平逆变器的键合图模型，并设计了相应的控制器。这两项研究虽分别解决了传动与逆变单元的建模问题，但并未将电池、逆变器、电机、减速器及负载整合为完整系统。同时，在理论与工程实操的结合上，刘浩在文献^[2]中依托 Modelica 软件机械法兰模块搭建了仿真模型，但该研究仅调用内置封装模块，未从底层能量逻辑分步推导，且驱动与制动工况需要切换两套程序。赵强^[3]等深入推导了多场耦合键合图数学关系，对汽车列队进行系统性分析，但对车辆个体内部模型进行了许多简化。王中双^[10]系统讲解功率键合图基础理论与通用规则，但书中同样未结合电动汽车再生制动、减速传动的具体实车场景开展分析。

现有的许多研究简化或忽略了减速齿轮机构的变比功率约束^[11]，且普遍将驱动与制动工况分开建模，无法通过单组方程自动切换能量流向。此外，机械转角纯积分运算易导致长时间仿真计算失真，尚未形成完整的标准化建模体系。针对上述问题，本文基于功率键合图理论开展一体化建模研究，构建包含动力电池、逆变器、电机、减速器及整车负载的完整模型。该模型可通过单套方程组统一描述驱动与制动工况，并引入转子转角相位取模约束以提高长时仿真精度。本文严格按照元件拆分、子模块建模、系统拼接、因果标注及状态方程推导的流程完成建模，完善减速机构非线性阻力与机电耦合约束方程，为电驱系统多能域耦合仿真提供规范、通用的建模参考。

1 键合图基础理论

1.1 广义功率变量定义

键合图理论基于能量守恒，将所有物理领域的能量传递统一为势变量 e 与流变量 f ，二者乘积为瞬时功率 P 。功率键合图以功率为核心基础，任意功率键的瞬时功率满足 $P(t)=e(t) \cdot f(t)$ ，其中 $e(t)$ 为势变量， $f(t)$ 为流变量。基于势、流变量可积分得到两类储能状态变量：对势变量积分得到广义动量 $p(t)=\int_0^t e(\tau) d\tau$ ，对流变量积分得到广义位移 $q(t)=\int_0^t f(\tau) d\tau$ 。不同物理能量域对应的势、流物理量存在明确对应关系，各能量域匹配的势变量与流变量如表 1 所示。

表 1 机电系统广义势、流变量对应关系

物理域	势变量 e	流变量 f	功率公式
机械（电机 / 车轮）	转矩 T ($N \cdot m$)	角速度 ω (rad/s)	$P=T\omega$
电气（电池 / 绕组）	电压 U (V)	电流 i (A)	$P=Ui$

1.2 基础键合图元与能量特性

功率键合图依靠多种标准化基础元件实现多能量域耦合建模，各类元件是构建电动汽车驱动

系统模型的基本单元。其中阻性元件 R 为耗散能量，满足本构关系 $e=R \cdot f$ ；容性元件 C 以势能形式存储能量，满足广义位移与努力量的积分本构关系 $q=\int f dt$ ；惯性元件 I 用于储存能量，满足广义动量与流量的积分本构关系 $p=\int e dt$ 。势源 Se 、流源 Sf 为系统外部能量输入单元，0 结点为共势结点，所有连接支路势变量相等（ $e_1=e_2=...=e_n$ ），各支路流变量代数和为零（ $\sum f=0$ ），对应电路并联结构；1 结点为共流结点，各支路流变量保持一致（ $f_1=f_2=...=f_n$ ），支路势变量代数和等于零（ $\sum e=0$ ）。机电耦合系统常用键合图基础元件如表 2 所示。

表 2 机电系统常用键合图基础元件特性

元件类型	物理作用	电驱系统对应实物
阻性元件 R	耗散能量，无储能	绕组电阻、路面摩擦阻尼
容性元件 C	储存势能	动力电池等效单元、电路电容
惯性元件 I	储存动能	电机转子惯量 J 、定子电感 L
势源 Se / 流源 Sf	外部能量输入	动力电池直流电压源
0 共势结	多路功率键共势	三相绕组并联支路
1 共流结	多路功率键共流	同轴机械传动、串联电路

2 电动汽车驱动系统与能量流动

2.1 驱动系统组成与双工况功率流向

如图 1 所示，本文研究单电机前置前驱电动汽车驱动系统。整车在结构上主要由动力电池组、逆变器、永磁同步电机、减速齿轮机构及整车机械负载五大子模块构成。正常驱动工况下，动力电池输出直流电能经逆变器变换为三相交流电驱动电机运转，将电能转化为旋转机械能，再经减速齿轮放大转矩后驱动车轮前进；而在车辆减速或下坡的再生制动工况下，车轮大惯性反向拖动电机转子进入发电机模式，定子侧产生的感应交流电经逆变器整流为直流电回馈至电池组。通过单套系统内母线电流与机械转矩的自然反向，实现了驱动与发电双工况下全系统能量的双向流动。

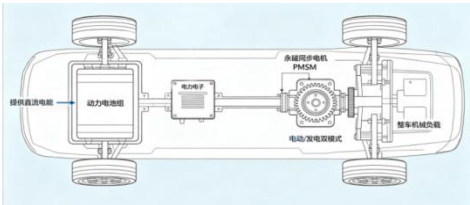


图 1 单电机前置前驱电动汽车驱动系统

2.2 传动机构功率守恒与变比约束关系

传动机构可视为理想的功率变换部件，其输入端与输出端的功率保持严格守恒。定义电机侧高速和低速轴的转矩与角速度分别为 $T_2, \omega_2, T_1, \omega_1$ ，齿轮机构的传动比定义为 $i = \omega_2/\omega_1$ 。此时，系统的功率平衡关系满足 $T_1\omega_1=T_2\omega_2$ 。将角速度变换关系 $\omega_2 = i \cdot \omega_1$ 代入该功率守恒公式中，即可平实地推导出两端的转矩约束满足 $T_1 = i \cdot T_2$ 。上述角速度与转矩的代数约束关系式，构成了在键合图网格中构建齿轮传动变压器元件（TF）的最核心理论依据。

3 分模块键合图建模全过程

3.1 标准化建模总体流程

本文提出的电驱动系统键合图建模流程如图 2 所示。流程包含系统物理结构简化、分模块键

合图网络搭建、整机模型集成与因果关系判定、系统状态方程推导、元件参数赋值以及动态特性校验等核心环节。若模型动态响应与实际工况存在偏差，优先修正元件的物理参数并重新开展仿真校验；若参数调整后偏差仍然存在，则回至前期的模型简化与子模块建模阶段，对键合图的结构进行修正与优化；直至仿真特性较为平实地贴合实际工况。

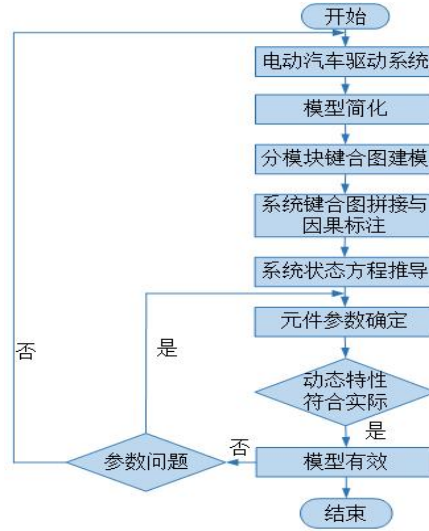


图 2 键合图建模流程图

3.2 电源与逆变模块键合图建模

电池采用一阶 RC 等效电路建模，将直流电压势源 S_e 、内阻 R_{bat} 和等效容性元件 C_{bat} 串联，得到如下方程，由于为串联回路，在键合图中可采用 1-共流结点连接。

$$U_{bat} = S_e - R_{bat} i_{bat} - \frac{q_{bat}}{C_{bat}} \quad (1)$$

其中累积电荷量 $q_{bat} = \int i_{bat} dt$ 。 U_{bat} 为实际端电压， i_{bat} 为回路电流。

忽略开关损耗，逆变器视为理想功率变换单元，基于能量守恒原理，逆变器交直流两侧功率保持平衡。其直流连接电池，交流侧接永磁同步电机的三相定子绕组。电机每相绕组由阻性元件 R 与惯性元件 I 组成，可通过 0-共势结并联连接。

$$u_{dc} i_{dc} = u_a i_a + u_b i_b + u_c i_c \quad (2)$$

其中： u_{dc} 、 i_{dc} 分别为逆变器直流侧电压与侧电流； u_a 、 u_b 、 u_c 为相电压， i_a 、 i_b 、 i_c 为相电流。

3.3 永磁同步电机机电耦合键合图建模

永磁同步电机通过电磁耦合实现电能与机械能的双向转换。其电气侧每相绕组的电阻与电感在键合图中对应阻性 R 和惯性元件 I ；机械侧转子转动惯量 J 设为惯性元件 I ，并采用 1-共流结完成连接。为简化建模与精确推导，本文在 d - q 旋转坐标系下对电机实施解耦，考虑电机极对数 p ，永磁体磁链 ψ_f ，电机交轴电流 i_q 。可得其电磁转矩公式。

$$T_e = \frac{3}{2} p \psi_f i_q \quad (3)$$

3.4 减速齿轮传动机构键合图建模

齿轮传动机构本质为比例变换式功率器件，在键合图里选用 TF 变换器元件进行建模，设定传动比为 r 。TF 元件的 p2 端口接电机转子侧的机械 1- 共流结点，p1 端口和车轮侧机械 1- 共流结点相连。TF 元件的势、流约束关系和前文公式相对应：

$$\begin{cases} e_1 = r \cdot e_2 & (\omega_1 = r \omega_2) \\ f_2 = r \cdot f_1 & (T_2 = r T_1) \end{cases} \quad (4)$$

其中： e_1 、 e_2 分别为车轮侧、电机侧的势变量（转矩）； f_1 、 f_2 对应两侧流变量（角速度）； ω_1 、 ω_2 、 T_1 、 T_2 分别代表车轮端与电机端角速度和转矩。将低速侧角速度当作流变量，即 $f_1 = \omega_1$ ，对其积分可以得到机械转角 θ ，再对计算结果取 2π 取模运算，把转角约束在单圈范围之内：

$$\theta = \left(\int_0^t \omega_1(\tau) d\tau + \theta_0 \right) (\text{mod } 2\pi) \quad (5)$$

3.5 整车机械负载键合图建模

将车轮和整车车身等效得到总转动惯量 J_{veh} ，在键合图中将其设置为惯性 I 元件；把路面滚动阻力与行驶过程中的空气阻力综合等效为机械阻尼 R_{fric} ，对应阻性 R 元件。上述两个元件借助 1- 共流结点和齿轮机构低速轴连接。把路面滚动阻力与行驶过程中的非线性空气阻力综合等效为行驶阻力，对应阻性 R 元件与外界受控负载源。根据平衡条件列出机械动力学方程：

$$T_1 = J_{veh} \frac{d\omega_1}{dt} + R_{fric} \omega_1 + C_w \omega_1^2 + T_{load} \quad (6)$$

其中： T_1 为齿轮低速端输入转矩， ω_1 代表车轮侧角速度， C_w 为空气阻力系数， T_{load} 表征车辆在实际行驶中所遭遇的外界突变环境阻力。在键合图中，它通常被抽象为一个受控的阻力源 Se 。

4 总结

本文完整梳理了电动汽车驱动系统功率键合图的标准化建模流程，依次完成了动力电池、逆变器、电机、变速齿轮及整车负载的模块化建模与整机一阶状态微分方程组的推导。相较于传统分域微分方程建模，该方法基于能量守恒，采用统一的势、流变量直观展现了驱动与再生制动工况下的全域双向功率流，有效规避了传统多域仿真中因因果标注错乱而导致的代数环求解难题，并通过引入转子转角相位取模约束。该建模流程清晰、通用性强，能为电驱传动系统的多能域耦合仿真与参数匹配优化提供规范、可复用的数学底层模型，后续还可进一步引入电机热场、液压制动系统，并结合智能算法与硬件在环测试，拓展其在车辆综合性能优化层面的工程实用价值。

参考文献：

- [1] Chen Q, Xu R, Wang Z, et al. Analysis of electromechanical coupling vibration characteristics of motor-gear system based on bond graph theory[J]. AIP Advances, 2024, 14(1):015315.
- [2] 刘浩. 电动汽车高速齿轮箱动态特性分析[D]. 重庆: 重庆大学, 2021.
- [3] 赵强, 牛学思, 任博飞. 基于键合图的混合动力汽车队列虚拟非线性弹簧阻尼编队控制[J]. 自动化与仪表, 2026, 41(3): 19-24.
- [4] Chen Q, Xu R, Shen J, et al. Dynamic modeling and analysis of electric drive system based on bond

graph theory[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering.

- [5] 王涛, 王青, 李勇. 基于键合图的电动汽车驱动系统建模与仿真[J]. 农业工程学报, 2011, 27(12): 64-68.
- [6] 王军年, 倪健士, 杨斌, 等. 电动汽车转矩定向分配变速器建模与动态仿真[J]. 汽车工程, 2020, 42(4): 491-497+521.
- [7] 贺峰. 风力发电机的键合图建模及故障诊断[D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2023.
- [8] Chen Q, Xu R, Wang Z, et al. Modeling and simulation of nonlinear dynamics for coupled motor-reducer systems based on bond graph[C]. ICMD: International Conference on Mechanical Design. Singapore: Springer Nature Singapore, 2023: 2629-2646.
- [9] Zheng X, Hu J, Liu X, et al. Topology Construction, Modeling, and Control of Multilevel Inverters Without Shoot-Through Problem[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2025, 40(5): 6787-6800.
- [10] 王中双. 键合图理论及其在系统动力学中的应用[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2000.
- [11] Teng L, Yanjie L, Lining S. Bond graph model of permanent magnet linear synchronous motor[C]//2010 2nd international conference on industrial and information systems. IEEE, 2010, 2: 128-131.