



## 目 录

1 绪论.....	1
1.1 背景与意义.....	1
1.2 本报告章节安排.....	1
2 任务介绍.....	2
2.1 建模对象描述.....	2
2.1.1 集合性.....	2
2.1.2 相关性.....	2
2.1.3 环境适应性.....	3
2.2 建模问题提取.....	3
2.3 模型假设与标记.....	3
2.3.1 模型假设.....	3
2.3.2 参数及其数学标记.....	3
3 手推轮椅主体建模.....	4
3.1 运动学分析.....	4
3.2 手推轮椅主体各部分键合图.....	6
3.3 手推轮椅主体部分键合图.....	8
4 电驱动模块建模.....	9
4.1 电驱动电机模块键合图.....	10
4.2 电驱动模块其余部分键合图.....	13
4.3 机电驱动模块键合图.....	15
5 系统总体键合图.....	18
参考文献.....	19



## 1 绪论

### 1.1 背景与意义

近十年来，中国乃至全世界的老龄化愈发严重，促进了人们对行动不便的人士伤病护理的重视程度的提高。与此同时，机电设备的发展也到达了新的高度，科技人员将机电技术应用在一些日常生活用品，如本文的建模对象，也即机电模块驱动轮椅，从而实现智能化，机电一体化的在生活护理方面的应用。

患有运动/感觉障碍的人，可以依靠电动轮椅来满足他们的行动需求。由于一些残疾人无法使用传统的操纵杆导航他们的轮椅，替代控制系统如手动操纵式，视觉操纵式（图 1.1 逐渐被投入使用。在许多情况下，轮椅使用者在日常操纵任务方面存在困难，因此将受益于电驱动系统和自动导航系统等新技术的发展。



图 1.1 近几年电动轮椅案例。

因此本文建模对象为电动轮椅中的机械与电驱动部分，如图 1.2 所示。首先，我们以两轮机器人系统理论应用与手动轮椅主体部分的分析，在此基础上，结合包括了电源，电机与驱动轮的便携式机电驱动模块（MDM, *mechatronic drive modules*）。该模块可以在必要时与大规模的手动轮椅系统耦合，以提高推进效率，从而给整体系统带来了很好的优势，因为模块的重量被施加在模块本身上，从而防止了结构的变形。考虑到复杂程度和所学知识，我们进行合理假设与简化模型，取整体系统的机械主体和附加机电模块，进行运动学仿真与键合图建模。

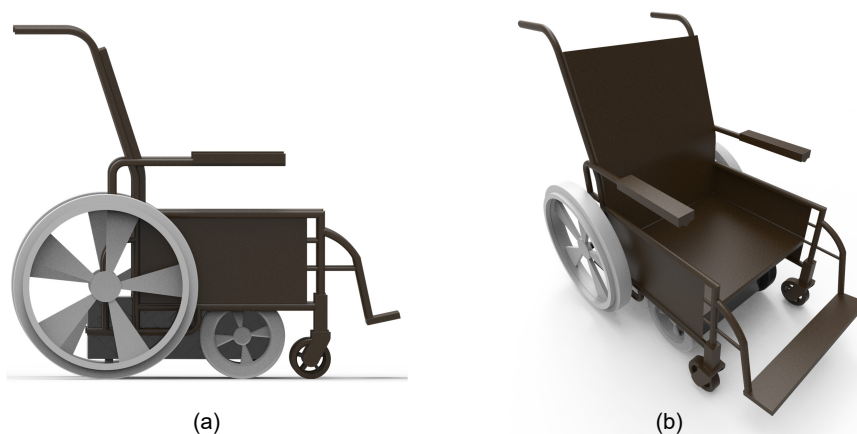


图 1.2 选取电动轮椅示意。(a) 和 (b) 分别表示建模对象的侧视图和立体视图。

### 1.2 本报告章节安排

本报告从建模对象出发，从手推轮椅主体和机电驱动模块两部分出发进行分析建模，然后两部分结合进行系统整体分析总结，最后给出参考文献，报告主体内容包括以下几个部分：



第二章是对建模对象进行描述和问题提取，并给出相关模型合理假设以及参数标记；  
第三章是对手推轮椅主体运动学分析和键合图建模；  
第四章是对机电驱动模块的分析与键合图建模；  
第五章是整体键合图的给出，并给出总结和分析；  
最后部分为本文参考文献。

## 2 任务介绍

### 2.1 建模对象描述

所选定建模对象的系统特性将从集合性、相关性、环境适应性三个方面来分析。

#### 2.1.1 集合性

该系统由机械主体模块和电驱动模块组成，二者缺一不可。在创建物理设备建模仿真时，主要任务是实现集成控制驱动系统和执行器动态的模型，以便将仿真软件工具集成到模过程中。

所谓执行机构在这里指的是机械主体模块，主要是由底盘与轮系。所谓控制驱动系统是指为机械系统提供动力的部分，这里主要指电驱动模块（如图 2.1）。电驱动模块由电源，电机，齿轮等部分组成，电源供应整体电机及驱动的能量，电机转动先经过齿轮减速器减速增扭，最终传递到驱动轮轮系上，从而实现整体电动轮椅的功能。

#### 2.1.2 相关性

就整体电动轮椅系统而言，子系统相互依存、相互制约、相互作用形成了相互关联的整体。

机械主体模块和电驱动模块间的联系是通过电机输出轴和驱动轮具有共同的位置和速度借助联轴器来实现的。通过电机轴的运动，实现驱动轮的转动。研究对象的机械主体和电驱动模块之间相互关联的变量是轴系转动的角速度。通过两者相互固定实现，势和流的传递。

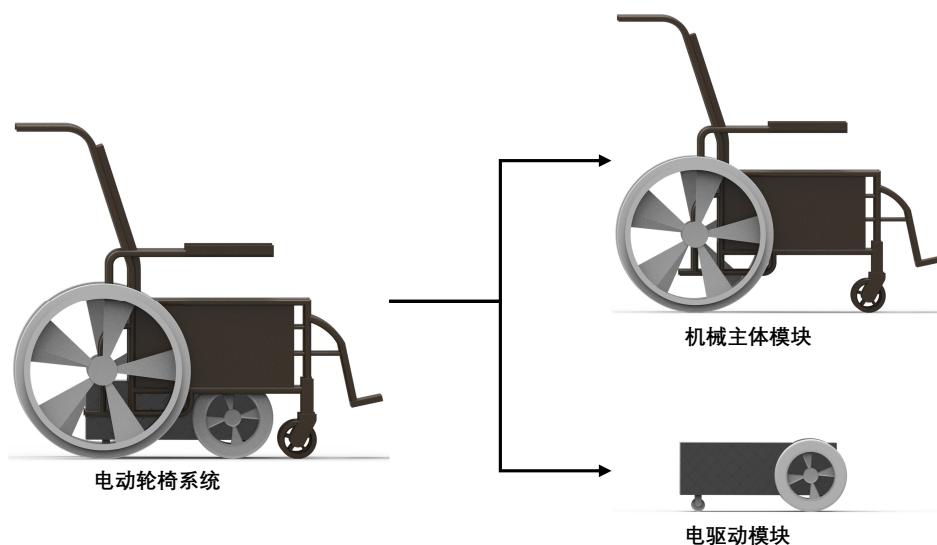


图 2.1 选取电动轮椅组成部分。



### 2.1.3 环境适应性

传动的手推轮椅，结构简单，给行动不便人士以更大活动空间。但是在日常生活使用中，一般还是需要额外的人力用于前后左右前进与旋转运动。而机电模块的加入，将有效提高该设备的智能化程度，我们同时可以将相关移动机器人的控制分析理论应用其中。

在移动机器人中，主要分为轮式，履带式，足式等系统，通过机械与机电模块相结合，能够非常有效地处理平坦且结构良好的固体表面，从而满足行动不便人士的需求。

## 2.2 建模问题提取

可以将对象的工况分为两种情况：

1. 在平坦路面上条件下，由人产生推力使轮椅向前运动。在该条件下，系统底部受到的速度输入较小且较不稳定。主要考虑以下几个参数：
  - 车轮转动惯量，转动惯量；
  - 车轮辐条刚度：存在于从车轮中心到地面由于充气轮胎所带来的弹簧/阻尼；
  - 摩擦损失：存在于后充气轮和前脚轮与地面之间的阻力；
  - 质量：包括椅子的重量和使用者的假定质量。该点位于重心处，获得系统平均质量。在降低模型的复杂性时，假设重心与后轮轴线中心重合。
2. 在平坦路面上条件下，由机电驱动模块产生使轮椅向前运动的动力。在该条件下，系统底部受到的速度输入较大且较稳定。主要考虑以下几个参数：
  - 直流电动机的基本原理（包括电感，输出扭矩等）和基本性质（包括质量，电压等）。
  - 传动部件的刚度，质量以及机械损失。
  - 电动轮的转动惯量。

## 2.3 模型假设与标记

### 2.3.1 模型假设

针对上述工况，结合简化模型的角度出发，做出如下假设：

- 假设机械各部分零件为刚体；
- 假设刚体质心位于几何中心；
- 忽略铰接点连接处的摩擦；
- 忽略电驱动系统工作产热带来的参数变化。

### 2.3.2 参数及其数学标记

表 2.1 列出本模型的相关参数及其数学标记。本报告中表示左右参数则分别以  $L$  和  $R$  表示。参数表主要分为分为整体系统参数，手推轮椅主体，机电驱动模块以及手推控制输入部分的参数四个部分。如下所示（见下页）：



表 2.1 系统主要参数及其数学标记

数学标记	系统参数
系统整体参数	
$M$	总体质量
$J$	总体转动惯量
$V_{CG}$	质心速度
$w_{CG}$	质心转速
$P_{CG}$	系统动量变化率
$P_{\theta}$	系统角动量变化率
手推轮椅主体	
SE: $\tau$	后轮推进扭矩
$J_w$	后轮转动惯量
$M_t$	系统质量
$J_t$	系统转动惯量
$R_g$	轮胎与地面摩擦系数
$C_w$	轮辐弹性系数
$R_w$	轮辐阻尼
$r$	后轮半径
$L_w$	轮椅宽度
$R_{wC}$	联轴器阻尼系数
$C_{wC}$	联轴器弹性系数
机电驱动模块	
$I_e$	电机电感
$R_e$	电机内阻
$J_r$	转子转动惯量
$R_b$	电机轴承阻尼
$M_d$	机电驱动模块质量
$J_d$	机电驱动模块转动惯量
$L_d$	模块宽度
$C_s$	电机输出转矩
$R_s$	电机输出轴阻尼
$k_1$	电机扭矩系数
$k_2$	齿轮系数比
$k_3$	电动车轮半径
Se:L	输入控制电压
手推控制输入部分	
$J$	手动轮转动惯量
$k_4$	手动轮半径

### 3 手推轮椅主体建模

#### 3.1 运动学分析

医院和老年机构需要手推轮椅来运送行动不便的人。使用者可以通过转动连接在后轮上的手推轮来操纵椅子前进。在该建模中选取对象的机械主体示意如图 3.1 所示。它基本上由两个脚轮和手动后轮组成。在这种建模中已经应用了两轮驱动机器人系统的方法，其中脚轮集中在一起并且假设对系统流施力。 $V_{CG}$  和  $w_{CG}$  代表质心速度和沿质心转速， $w_l$  和  $w_r$  分别表示左右车轮的角速度，后手动车轮半径和轮椅宽度由  $r$  和  $L_w$  表示）。下面的矩阵 3.1 显示了系统的运动学数学模型，其中  $\theta$  是方位角， $x$  和  $y$  分别表示系统的几何位置：

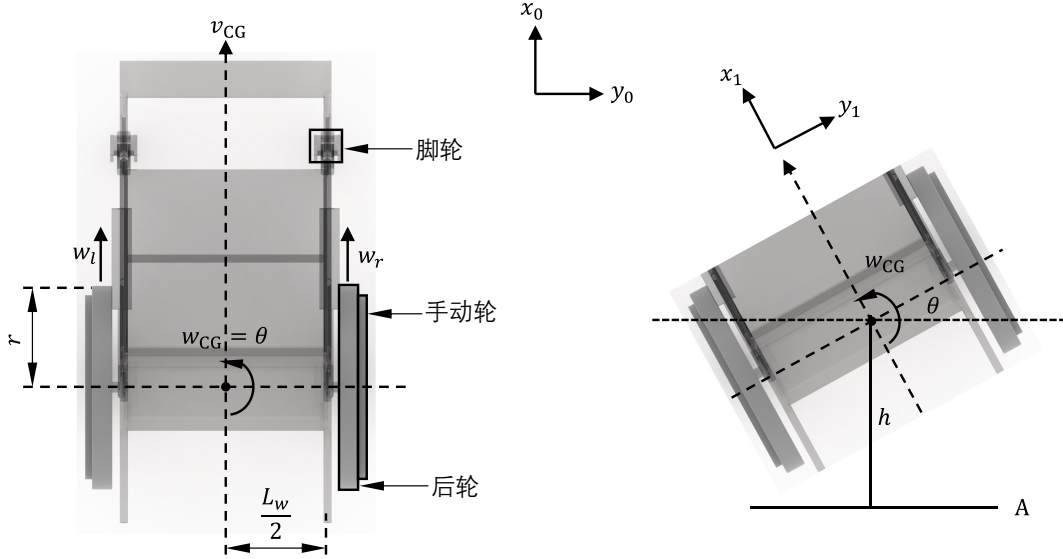


图 3.1 电动轮椅主体俯视示意图。

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix} = r \begin{bmatrix} \frac{\cos \theta}{2} & \frac{\cos \theta}{2} \\ \frac{2}{L} & \frac{\sin \theta}{2} \\ \frac{2}{L_w} & -\frac{2}{L_w} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_r \\ \omega_l \end{bmatrix}. \quad (3.1)$$

以 A 作为参考点，左右轮的位移课以得到：

$$S_l = h - \frac{L_w}{2} \sin \theta, \quad (3.2)$$

$$S_r = h + \frac{L_w}{2} \sin \theta. \quad (3.3)$$

从键合图出发，广义位移变量定义为流变量的时间积分。因此根据上述方程 3.2 和 3.3，可以获得了所需的流变量方程，将可以通过方程 3.2 和 3.3 用于构建轮椅主体结构的键合图模型。

$$v_l = \dot{S}_l = \dot{h} - \dot{\theta} \frac{L_w}{2} \cos \theta, \quad (3.4)$$

$$v_r = \dot{S}_r = \dot{h} + \dot{\theta} \frac{L_w}{2} \cos \theta. \quad (3.5)$$

根据图 3.1，我们用  $V_{CG}$  和  $w_{CG}$  分别表示质心速度和角速度。

轮椅上的平均受力等于通过系统总质量与  $V_{CG}$  相关的线性动量的变化率之比，可以得到：

$$V_{CG} = \frac{P_{CG}}{M_t}. \quad (3.6)$$

质心处的平均扭矩等于通过系统惯性矩与  $w_{CG}$  相关的角动量的变化率之比，可以得到：

$$w_{CG} = \frac{P_\theta}{J}. \quad (3.7)$$



### 3.2 手推轮椅主体各部分键合图

以下为具体建模过程：

1. 对于每一个确定的速度，标注速度 1-结。本装置一共有 8 个确定的（角）速度，即左/右后轮角速度，左/右后轮辐角速度，左/右后轮辐线速度，轮椅旋转角速度，轮椅质心角速度。如下图所示：

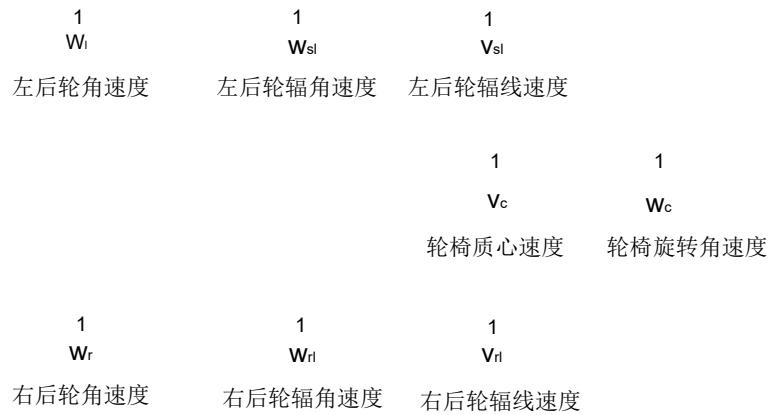


图 3.2 手推轮椅主体键合图——标注速度节点。

2. 链接所有 R,C,I 元件，并且增加相应变换器与输入源（假设输入为推理作用产生的扭矩  $\tau_L$  和  $\tau_R$ ）。同时根据功率方向画出半箭头。

由于回转器上从势到流的关系，考虑加入调制回转器 MTF 插入在  $V_s$  与  $W_c$  的 1-结之间  
如下图所示：

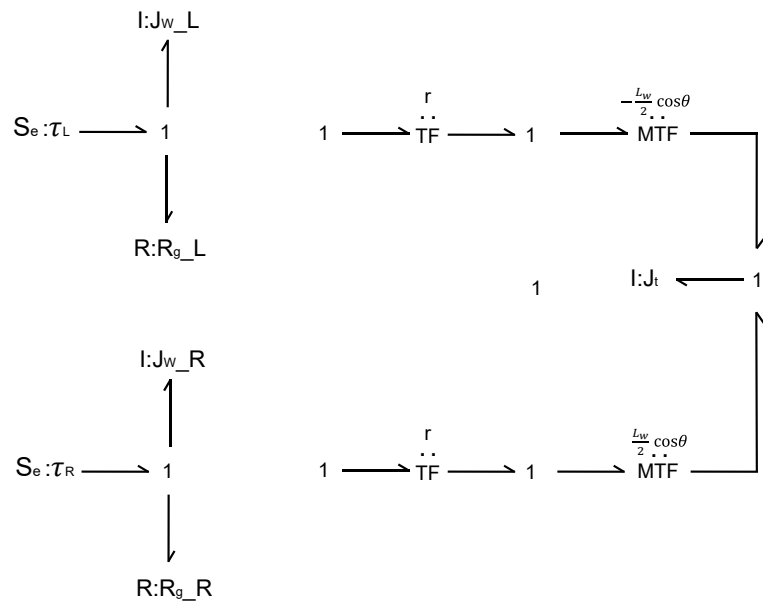


图 3.3 手推轮椅主体键合图——连接所有的 RCI 和源, 并增加变换器。

3. 在 1-结之间添加 0 结与 RC 元件。同时根据功率方向画出半箭头。如下图所示:

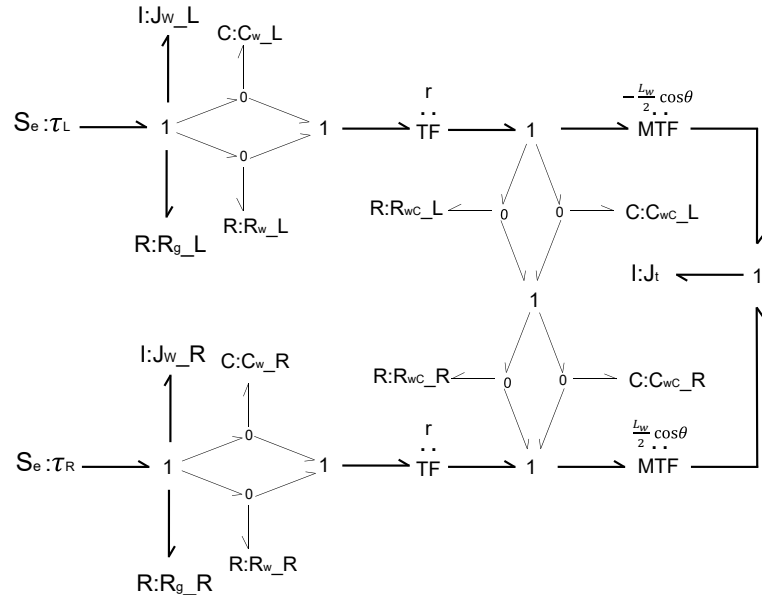


图 3.4 手推轮椅主体键合图——在 1-结之间添加 0-结与 RC 元件。

4. 简化总体键合图。可以简化功率环，即四处 0-结。如下图所示：

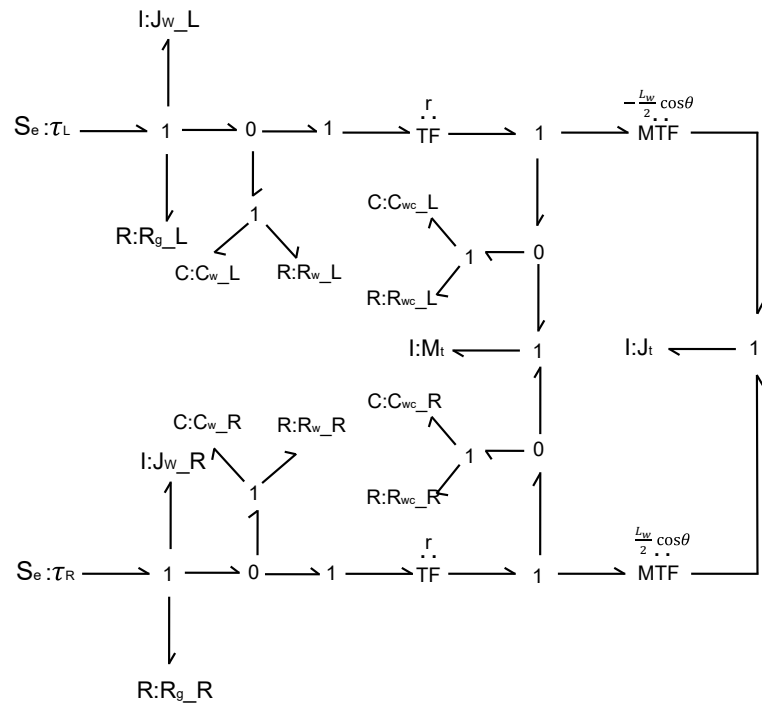


图 3.5 手推轮椅主体键合图——简化总体键合图。

5. 标注因果关系。





### 3.3 手推轮椅主体部分键合图

在该部分中，我们假设手推动力作为输入源。轮椅机械主体的因果关系根据主体系统的约束进行调整。由后轮上的手推动扭矩产生的能量传递到系统结构。所有外部扭矩和转动惯量都连接到 1 结，L 和 R 代表系统的左侧和右侧。最终的手推轮椅部分键合图，如下图 3.6 所示：

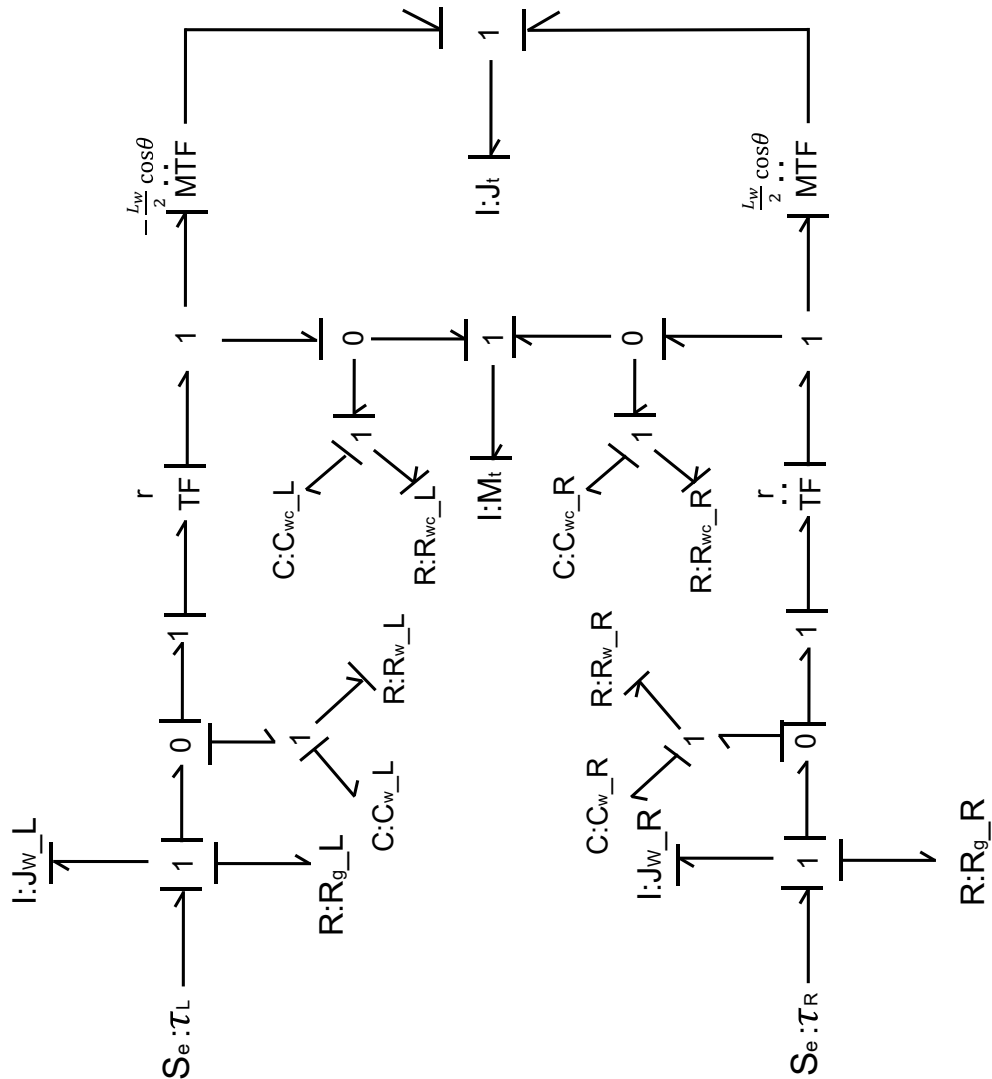


图 3.6 手推轮椅主体键合图——简化总体键合图。



## 4 电驱动模块建模

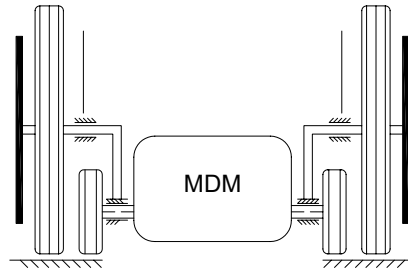


图 4.1 机电驱动模块 (MDM, *mechatronic drive module*) 简图。

为了研究有助于系统动态行为的不同组件，机电驱动模块与主体结构分离，基本布局如图 4.1 所示。它包括使用速度减小的机械齿轮以及电动轮连接到系统的方式。轴上的旋转阻尼器和扭转弹簧的小值已经集中在一起并分别由  $R_s$  和  $C_s$  表示。

由此我们构建了相关的键图模型，它仅代表从电动推进轮椅中提取的机电一体化驱动模块系统如图 4.2 所示的动态特性的组件。

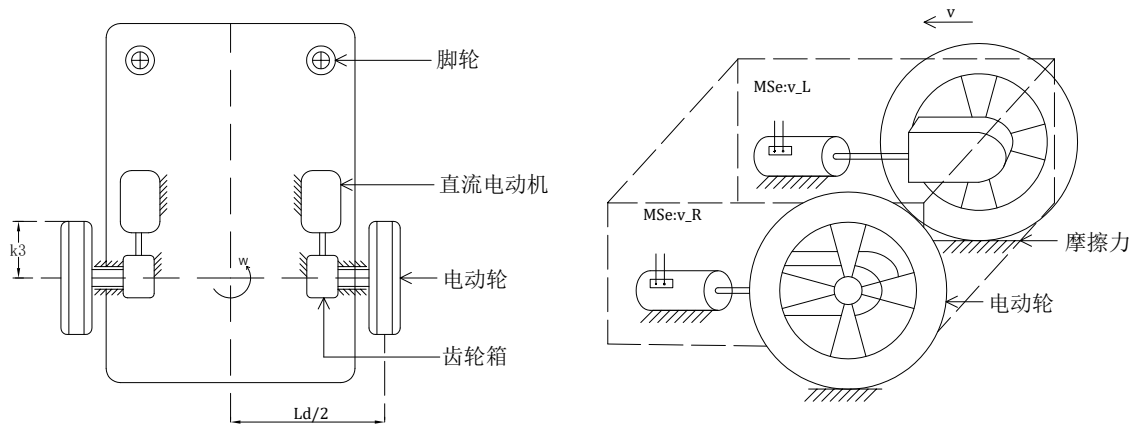


图 4.2 机电驱动模块主要结构示意。



#### 4.1 电驱动电机模块键合图

首先对他励直流电机进行分析建模。作为机电驱动模块的核心，该部分我们既考虑了电路结构（包括主电路以及他励电路），也考虑了在输出扭矩时的机械损失。

我们用  $MSe:L$ ,  $I_e$ ,  $R_e$  来分别表示输入控制电压，电机电感和内阻；用  $J_r$ ,  $R_b$ ,  $C_s$ ,  $R_s$ ,  $k_1$  来分别表示转子转动惯量，电机轴承阻尼，电机输出转矩，电机输出轴阻尼和电机扭矩系数。如下图所示 4.3 可见。根据电系统特点，我们标出相关共势点，为后续分析做准备。

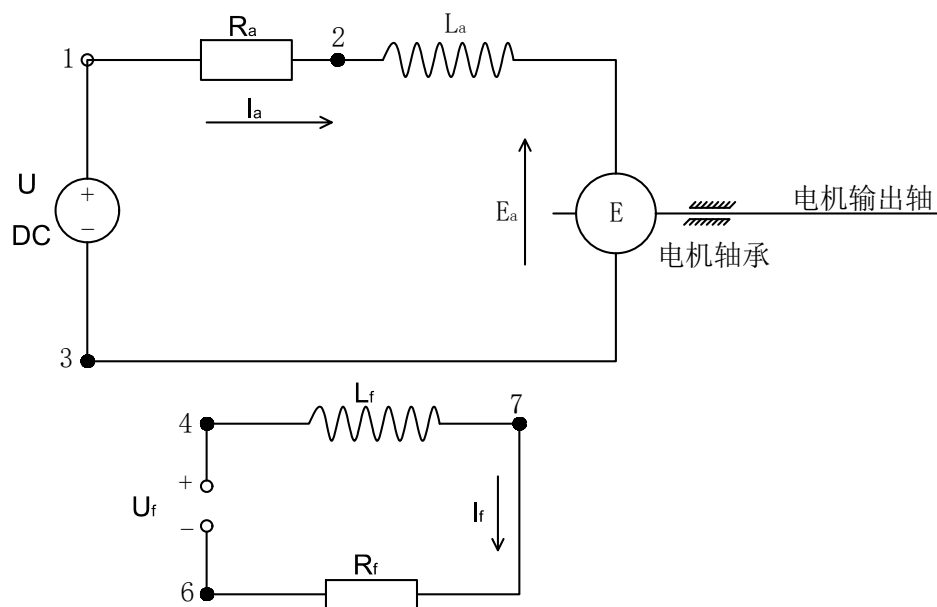


图 4.3 他励直流电机原理简图。

以下为具体建模过程：

1. 定义电流的正方向以及电机输出轴的转速正方向如图 4.3 所示。
2. 电路主回路和励磁回路分别有 3 个共势点，电机轴包括 2 个速度结点。如下图所示：

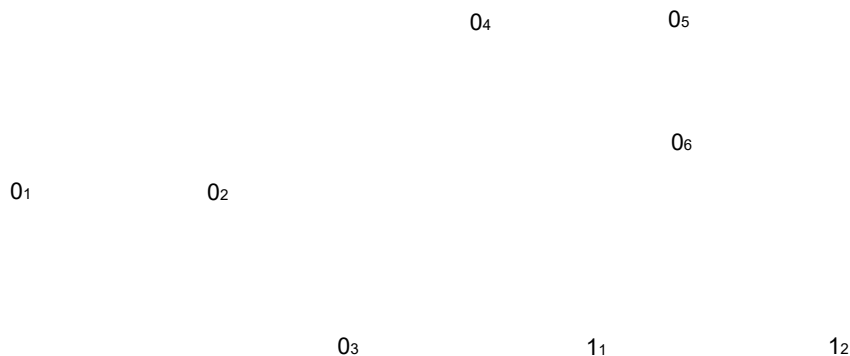


图 4.4 电驱动模块电机模型键合图——标注 0-结与 1-结。



3. 添加源和 RCI 元件。同时根据功率方向画出半箭头。如下图所示：

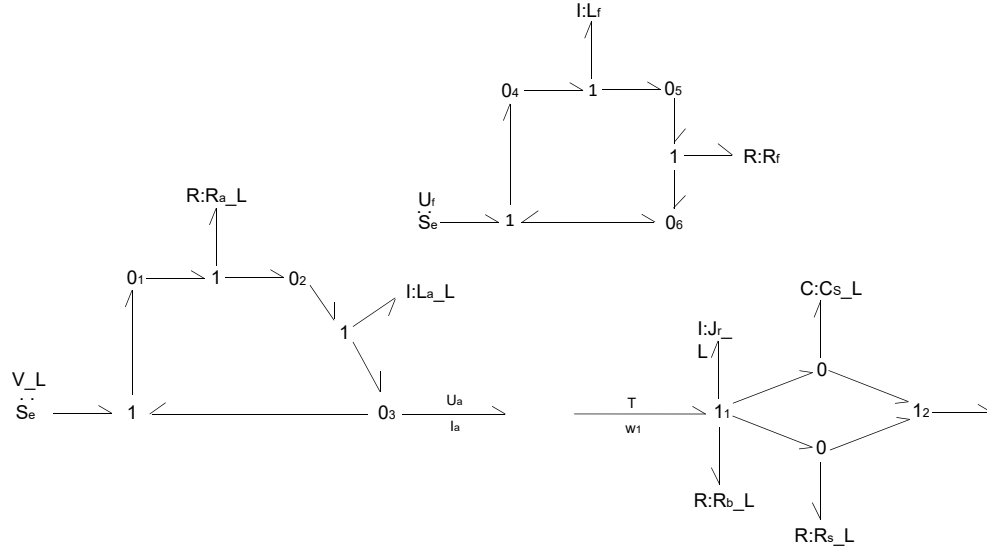


图 4.5 电驱动模块电机模型键合图——添加源和 RCI 元件。

4. 在电系统和机械系统之间添加回转器。根据对应数学关系：

$$U_a = \left( C_e \Phi_e \frac{60}{2\pi} \right) * w_1, \quad (4.1)$$

$$T = (C_t \Phi_e) * I_a. \quad (4.2)$$

同时根据功率方向画出半箭头。如下图所示：

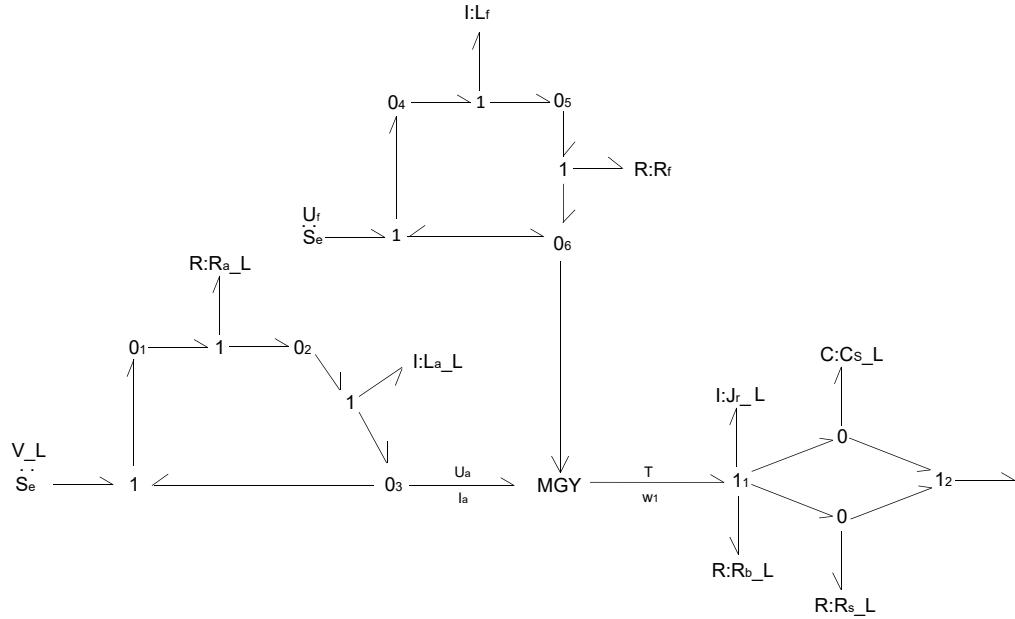


图 4.6 电驱动模块电机模型键合图——添加回转器。



5. 电机模型电系统部分化简。根据电路图可知，03 和 06 接地，因此可以对上面键合图进行化简。如下图所示：

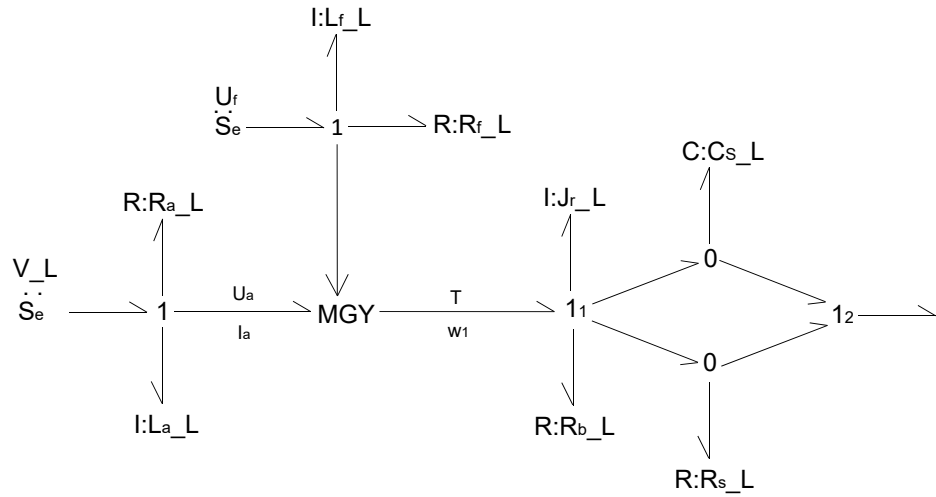


图 4.7 电机模型电系统键合图部分化简。

6. 电机模型功率环化简。如下图所示：

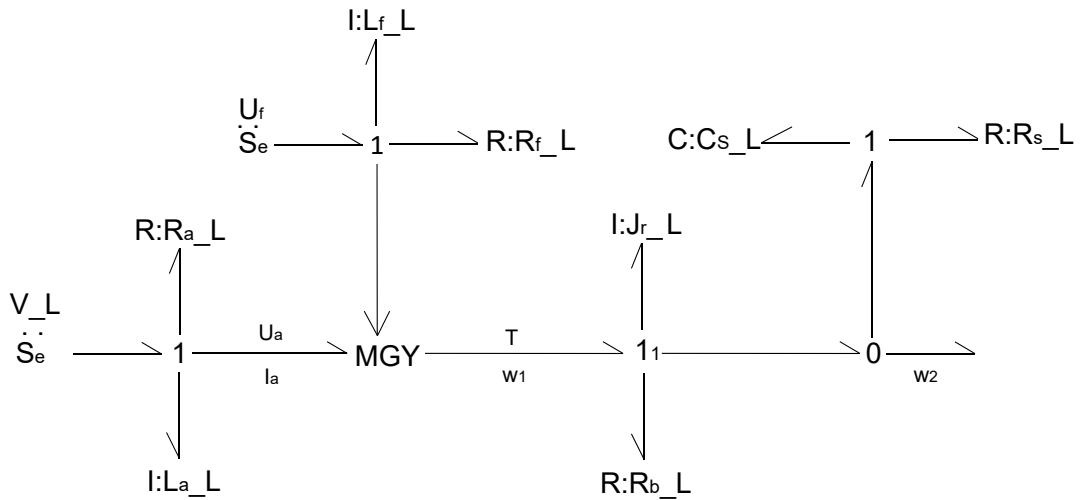


图 4.8 电机模型键合图功率环化简。



## 4.2 电驱动模块其余部分键合图

以下为具体建模过程：

1. 对于每一个确定的速度，标注速度 1-结。本装置一共有 6 个确定的（角）速度，即左/右后轮角速度，左/右后轮线速度，电驱动模块质心速度和电驱动模块质心角速度。如下图所示：

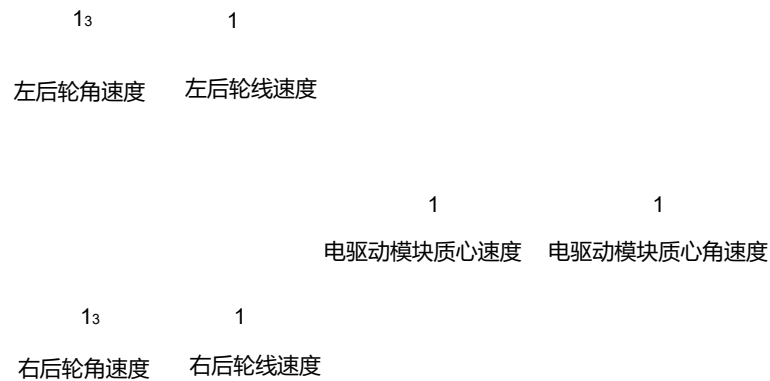


图 4.9 电驱动模块其余部分键合图——标注速度 1-结。

2. 添加 RCI 元件。同时根据功率方向画出半箭头。如下图所示：

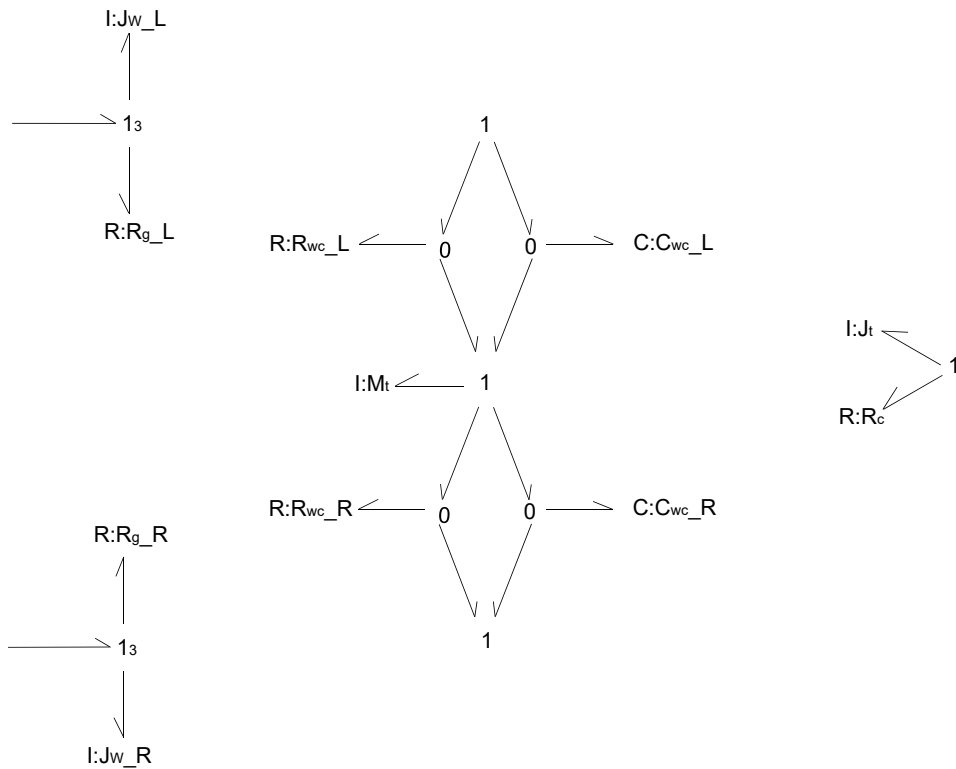


图 4.10 电驱动模块其余部分键合图——添加 RCI 元件。



3. 添加变换器。其中，电驱动模块左右后轮的线速度和整个的质心角速度之间存在下面的关系，所以所添加的变换器为可变换器。

$$V_L = V_{CG} - W_{CG} \times \frac{L_d}{2} \times \cos \theta, \quad (4.3)$$

$$V_R = V_{CG} + W_{CG} \times \frac{L_d}{2} \times \cos \theta, \quad (4.4)$$

同时根据功率方向画出半箭头。如下图所示：

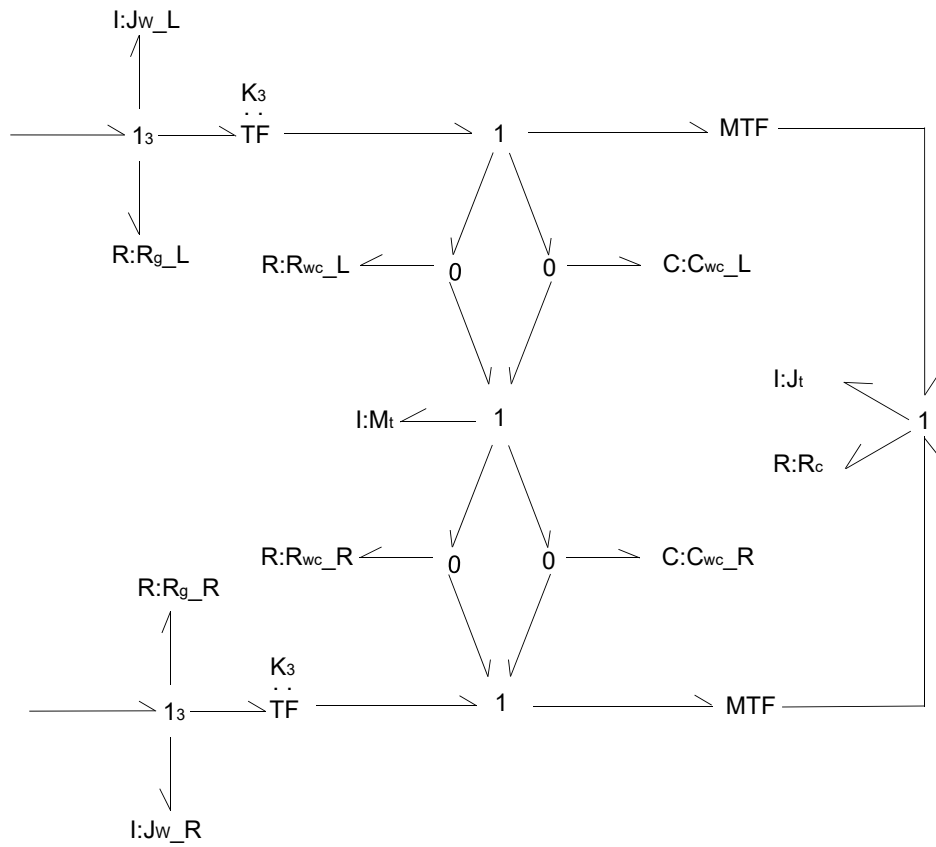


图 4.11 电驱动模块其余部分键合图——添加变换器。



4. 模型功率环化简。如下图所示：

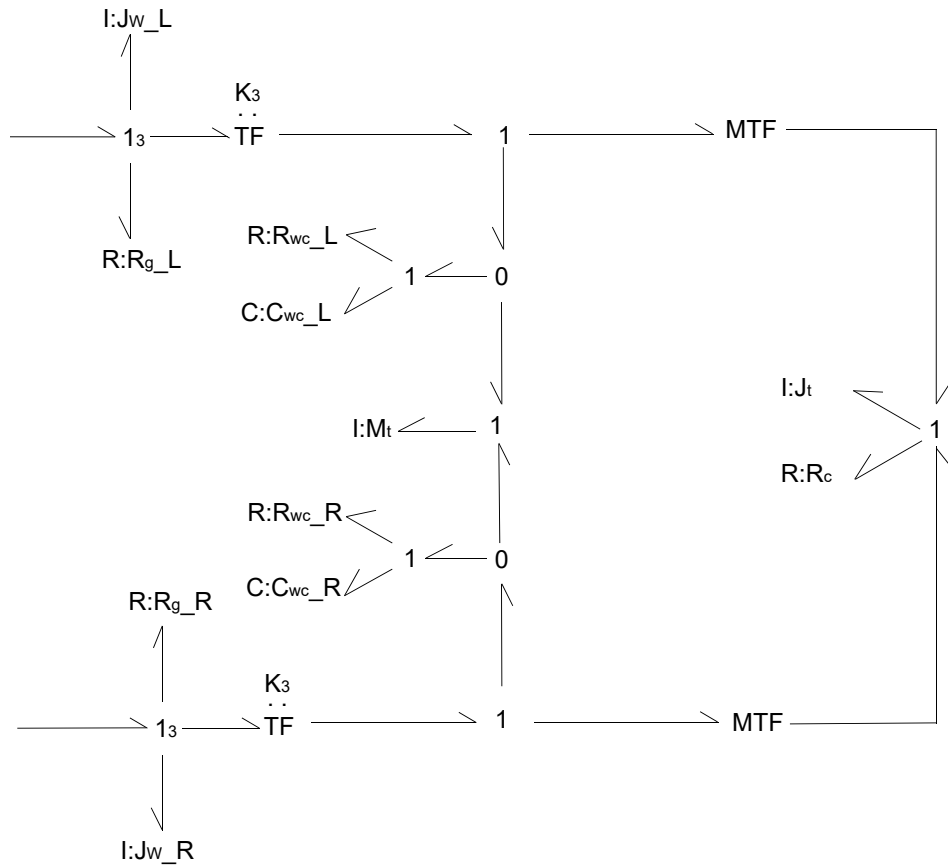


图 4.12 电驱动模块其余部分键合图功率环化简。

### 4.3 机电驱动模块键合图

相比于图 4.8 和图 4.12，他励直流电动机与电动小车机械部分结合，它们之间通过一个减速齿轮箱连接，所以键合图连接的地方需要添加一个变换器，得到图 4.13（见下页）。



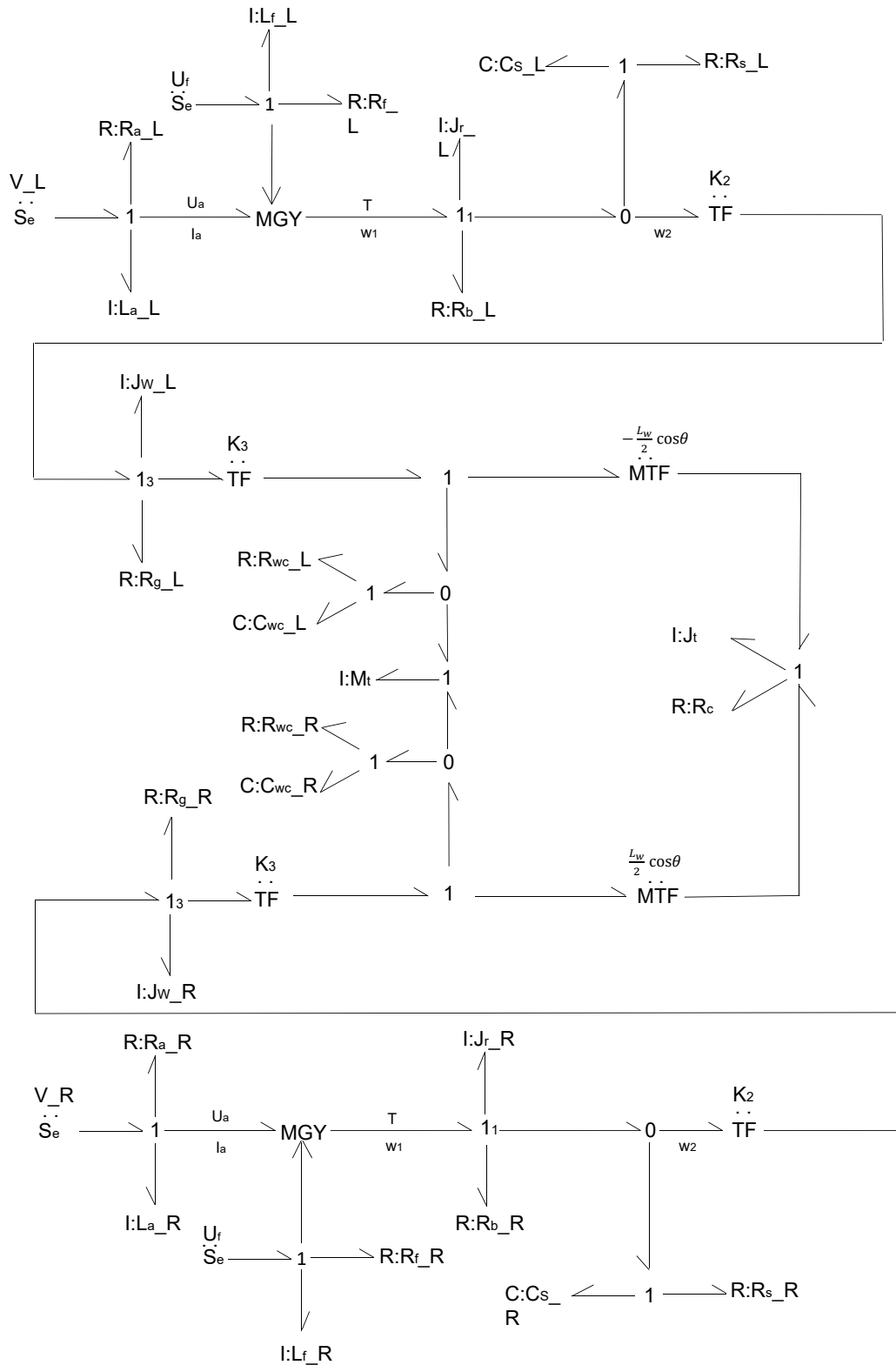


图 4.13 机电驱动模块键合图——两部分键合图拼接。



添加因果关系后，最终得到构成机电驱动模块的各个部件组件的键合图，如图 4.14 示。

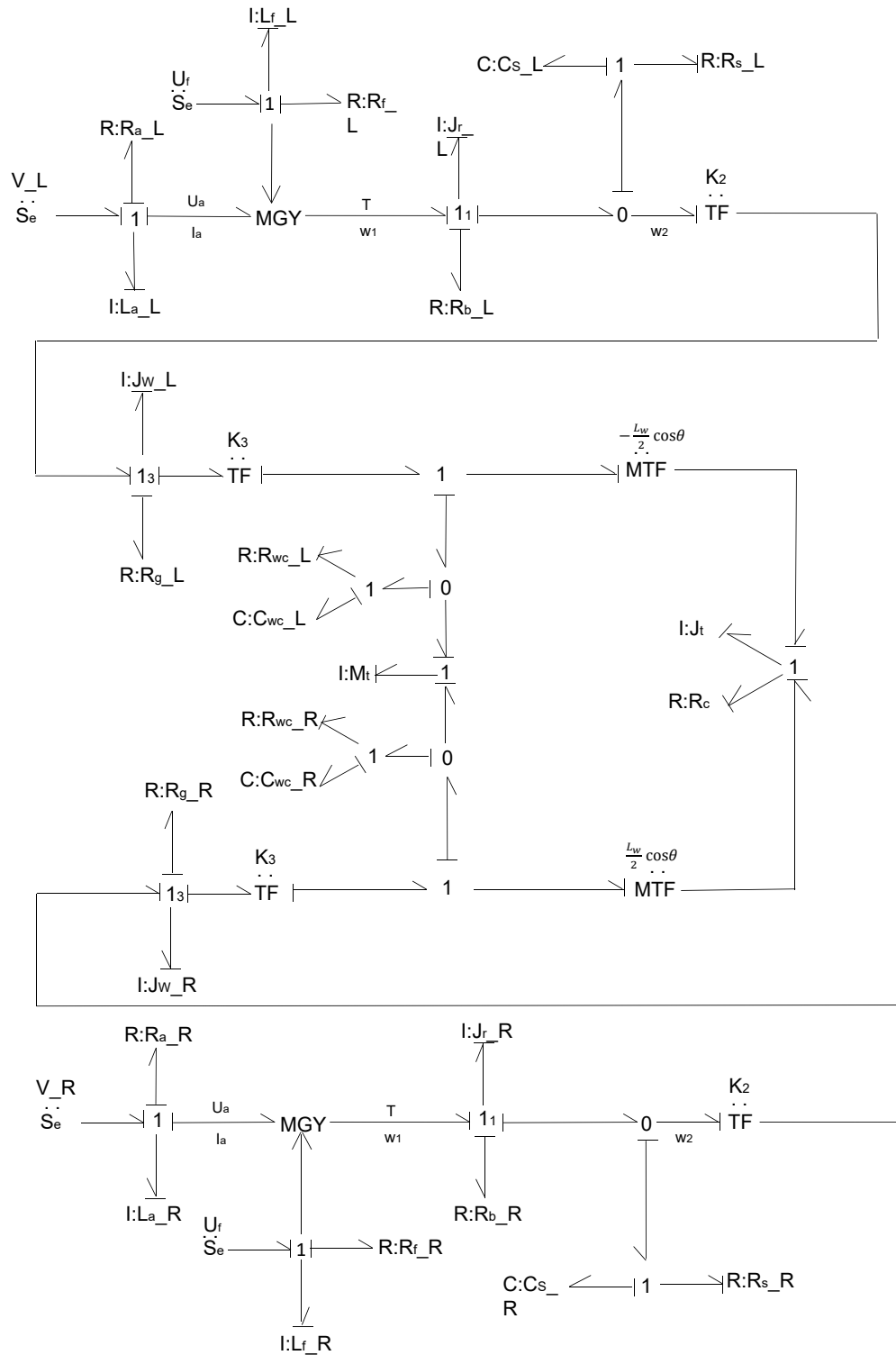


图 4.14 机电驱动模块键合图——总体键合图。



## 5 系统总体键合图

在本文中，在将原有的机械主体部分和电驱动模块连接在一起，我们便得到了总体的键合图，从而验证最初的系统分析的合理性，如图 5.1 所示。

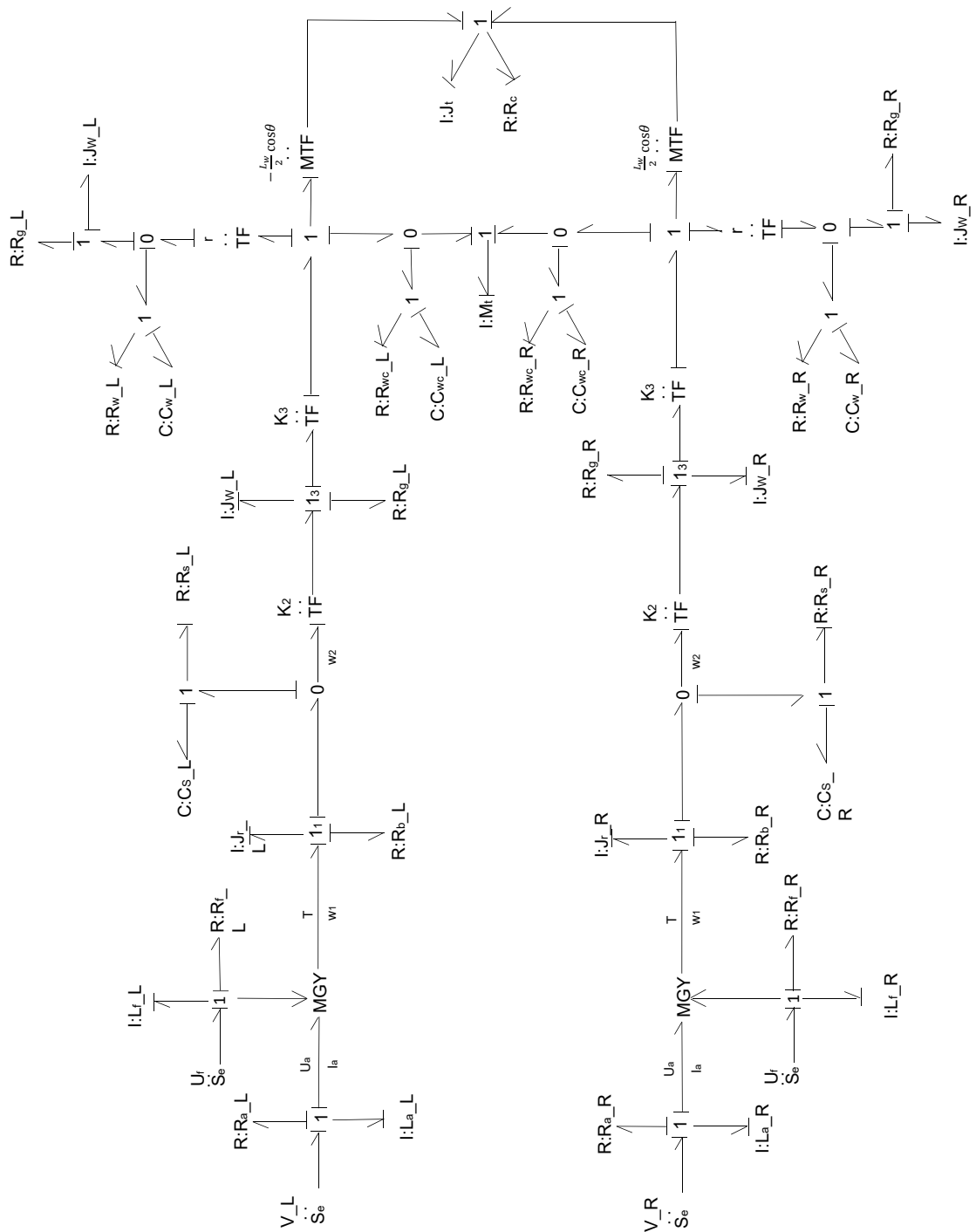


图 5.1 总体系统键合图。



## 参考文献

- [1] D. C. Karnopp, D. L. Margolis, and R. C. Rosenberg, System Dynamics Modeling and Simulation of Mechatronic Systems (Fourth Edition) [M]. New York: Wiley, 2012.
- [2] D. C. Karnopp, D. L. Margolis, and R. C. Rosenberg, 黎明安（译），系统动力学——机电系统的建模与仿真 [M]. 国防工业出版社, 2012.
- [3] Leaman, Jesse, and Hung Manh La. A comprehensive review of smart wheelchairs: past, present, and future [J]. IEEE Transactions on Human-Machine Systems 47.4 2017: 486-499.
- [4] Borutzky, W. Bond graph methodology, development and analysis of multidisciplinary dynamic system models (1st ed.) [M]. Berlin: Springer. 2010
- [5] Borutzky, Wolfgang. Bond graph modelling of engineering systems [M]. Vol. 103. New York: Springer, 2011.
- [6] Ayala, Gerardo, Rui Loureiro, and Rochdi Merzouki. Multi-domain model of steering system for an omnidirectional mobile robot [C]. 2015 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). IEEE, 2015.
- [7] Sahoo, Saumya Ranjan, and Shital S. Chiddarwar. Dynamic modelling of four wheel skid mobile robot by unified bond graph approach [C]. 2016 International Conference on Robotics: Current Trends and Future Challenges (RCTFC). IEEE, 2016.
- [8] Jahanbin, Zahra, et al. Multi-body simulation of a flapping-wing robot using an efficient dynamical model [J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering 38.1 (2016): 133-149.
- [9] Fakri, A., Vilakazi, J. P. Modular driven wheelchair bond graph modelling [C]. The European Modeling & Simulation Symposium, I3M2010 MultiConference, 2010, Fes, Morocco.
- [10] Fakri, A., Vilakazi, J. P. Wheelchair and electric drive add-on a whole bond graph modelling [C]. Proceedings of the 2014 11th International Conference on Bond graph Modeling and Simulation (ICBGM'14). SummerSim 2014 Multiconference July 6 - 10 2014, Monterey, CA, USA. ISBN: 978-1-63266-700-7, Vol. 46 #8, Collection:Simulation Series, 206-210, 222 pp. 113.
- [11] Vilakazi, J. P. A study of a mechatronic drive module to be coupled on to an ordinary manual propelled wheelchair [C]. French South African Technical Institute in Electronics (F' SATIE), 2010, Tshwane University of Technologie.