



目 录

1 键合图优化.....	2
1.1 键合图因果划添加步骤.....	2
1.2 MPW 系统键合图修改和简化.....	2
1.3 MDM 系统键合图修改和简化.....	2
1.3.1 左轮电机模块简化与因果划添加.....	2
1.3.2 机械部分键合图简化与因果划添加.....	3
1.3.3 MDM 模块的对接.....	5
2 手推轮椅主体（Manual Propelled Wheelchair）框图建模.....	6
2.1 状态空间方程推导.....	6
2.1.1 后轮与地面运动状态变量 \dot{p}_2	6
2.1.2 后轮轮辐结构相关状态变量 \dot{q}_6	7
2.1.3 后轮与整体解耦相关状态变量 \dot{q}_{11}	7
2.1.4 质心处状态分析（质量）状态变量 \dot{p}_{14}	8
2.1.5 质心处状态分析（转动惯量）状态变量 \dot{p}_{17}	9
2.1.6 根据对称性得到剩余状态方程.....	10
2.2 总体状态空间矩阵.....	10
2.2.1 状态空间矩阵导出.....	10
2.2.2 特殊变量分析.....	11
3 电动轮椅（Mmechatronic drive module）框图建模.....	13
3.1 状态空间方程推导.....	13
3.1.1 状态变量 \dot{p}_2	13
3.1.2 状态变量 \dot{p}_6	14
3.1.3 状态变量 \dot{q}_9	14
3.1.4 状态变量 \dot{p}_{13}	15
3.1.5 状态变量 \dot{q}_{19}	15
3.1.6 状态变量 \dot{p}_{22}	16
3.1.7 状态变量 \dot{p}_{25}	17
3.1.8 根据对称性得到剩余状态方程.....	17
3.2 键合图转框图.....	18
3.3 仿真结果.....	18
4 实验阶段.....	19
4.1 实验参数设定.....	19
4.2 Simulink 相关模块运用和操作.....	20
4.3 手推轮椅主体仿真.....	24
4.3.1 MPW 整体框图介绍.....	24
4.3.2 MPW 仿真与分析.....	26
4.4 电驱动模块仿真.....	27
4.4.1 MDM 整体框图介绍.....	27
4.4.2 MDM 仿真与分析.....	27
4.5 仿真条件详细说明.....	28
5 结论.....	29
6 分工说明.....	29
参考文献.....	30



1 键合图优化

1.1 键合图因果划添加步骤

- 势源 S_e 为势流出，所以因果划标在半箭头的外端；
- 势源 S_f 为流流出，所以因果划标在半箭头的内端；
- 储能元件 CI 先确定为积分因果关系，则 C 元件的因果划标在半箭头的外端， I 元件的因果划标在半箭头的内端；
- 0 结为共势结，只能有一个流流出；
- 1 结为共流结，只能有一个势流出；
- 结合 GY TF 回转器和变换器的指定标法进行标注；
- 按照上面的原则对我们的 MDM 的键合图标注因果划：

1.2 MPW 系统键合图修改和简化

1.3 MDM 系统键合图修改和简化

1.3.1 左轮电机模块简化与因果划添加

根据因果划的添加原则，对电机模块的键合图初步添加因果划，如下图所示：

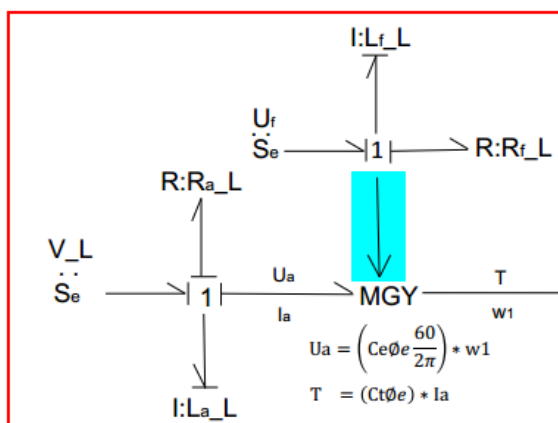


图 1.1 左轮电机模块因果划视图

对于他励直流电动机的驱动原理，电动机回路中电枢电压、电枢电流与电动机输出扭矩、输出角速度之间存在一个回转器的关系，如果励磁回路中的驱动磁场是变化的，则此回转器属于可变回转器 MGY ，励磁磁场直接影响的大小 Φ_e ，所以影响 $U_a = (C_e \Phi_e \frac{60}{2\pi}) * w$ 和 $T = (C_t \Phi_e) * I_a$ 中的比例关系，属于可变回转器，为了简化实验，我们决定采用的是恒励磁磁场的模式，即励磁回路中的磁场恒定，所以此回转器属于定值回转器，并设定其系数为 K_1 ，简化后的电机模块键合图如下图所示：

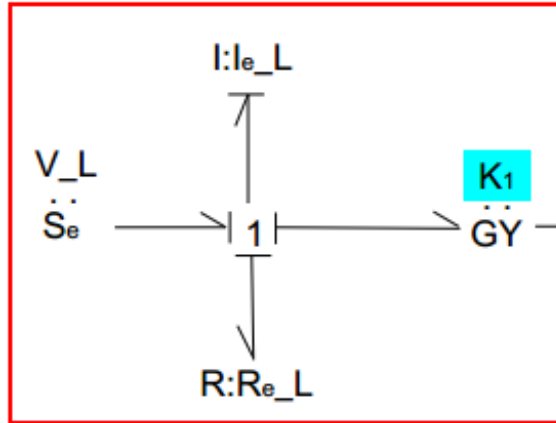


图 1.2 左轮电机模块简化键合图

同理可得右轮电机模块简化键合图。

1.3.2 机械部分键合图简化与因果划添加

根据因果划的添加原则，对 MDM 机械部分的键合图初步添加因果划，如下图所示：

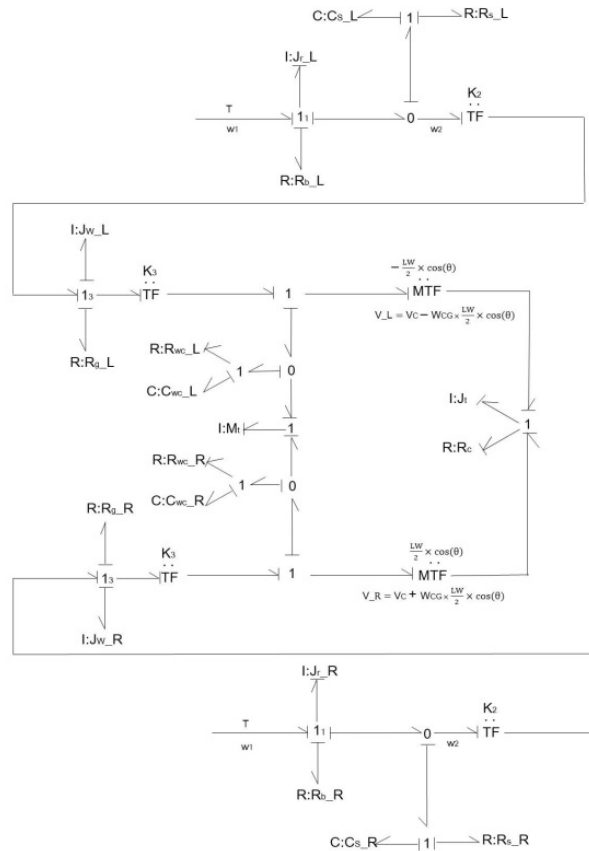


图 1.3 MDM 机械部分因果划视图



为了方便仿真，我们对图进行来部分优化和修改优化，如下所示：

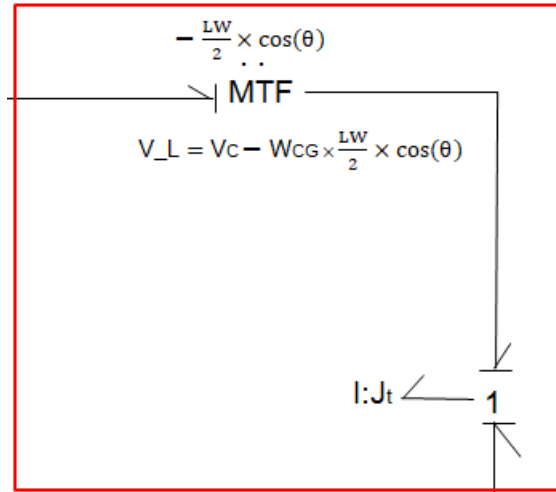


图 1.4 左轮变换器键合图

根据物理模型，左轮的线速度、整体模型的质心线速度、整体模型的质心角速度之间存在如下关系式： $v_L = v_C - w_{CG} \cdot \frac{L_w \cos(\theta)}{2}$ ，整体模型水平偏角 θ 是变化的，所以此处存在一个可变变换器，为了方便仿真，我们决定采用寻找左右轮线速度瞬心的方法来确定变换器的系数，这种方法更加简便，这在后面章节中详细介绍，所以此处我们可以把变换器简化为下图所示，其中系数 K_4 是变量：

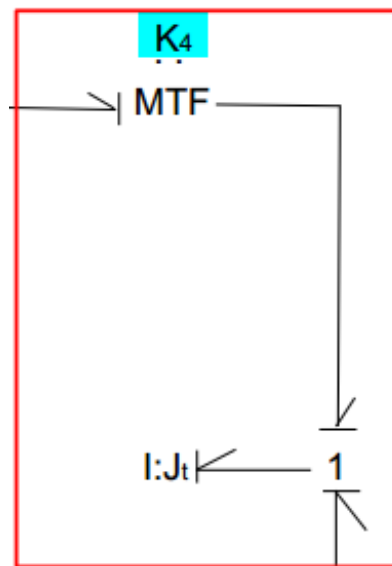


图 1.5 左轮变换器优化键合图

为了方便状态空间方程的建立，我们对报告一中的键合图两处进行了修改，修改后的键合图如下图所示，红色方框中为修改优化后的结果：

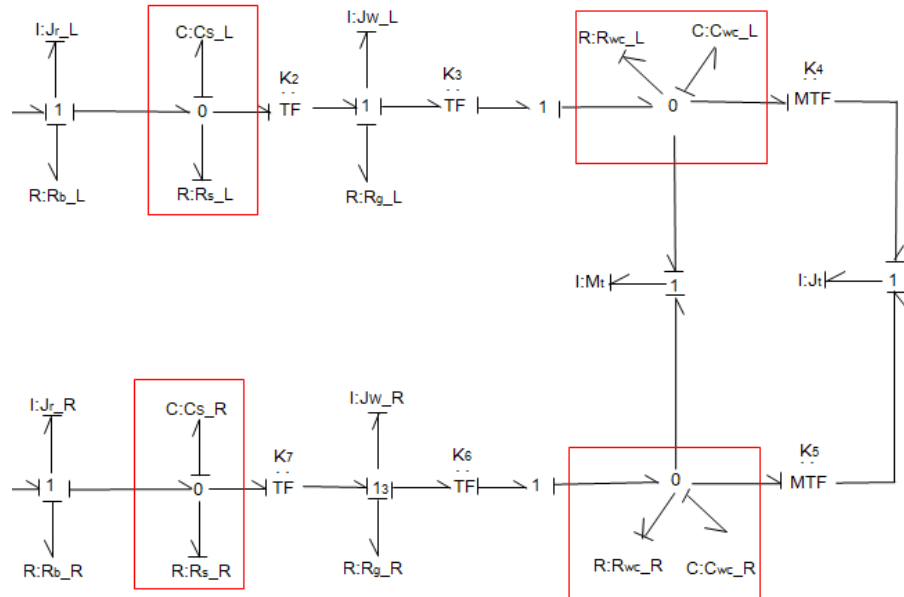


图 1.6 左轮变换器优化键合图

1.3.3 MDM 模块的对接

优化后的 MDM 总体键合图如下所示：

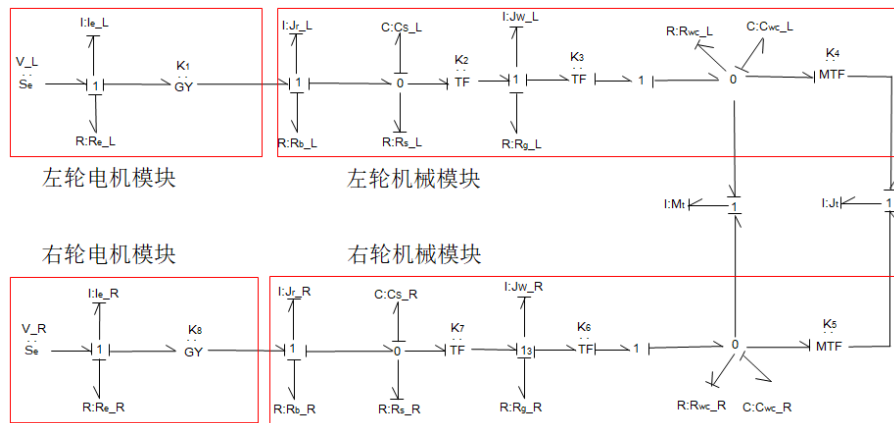


图 1.7 左轮变换器优化键合图



2 手推轮椅主体（Manual Propelled Wheelchair）框图建模

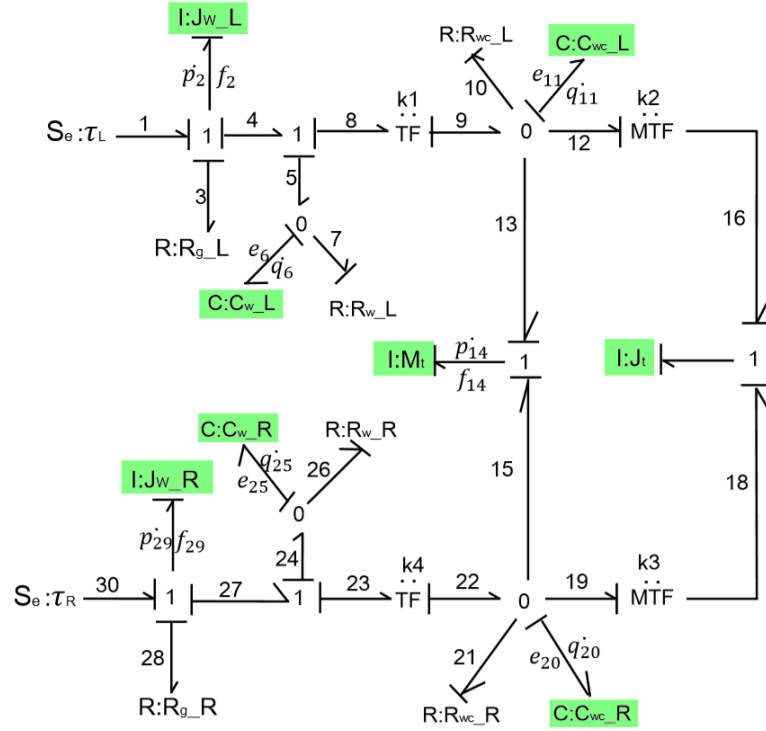


图 2.1 MPW 因果化标注。

2.1 状态空间方程推导

2.1.1 后轮与地面运动状态变量 \dot{p}_2

对于 \dot{p}_2 , 开始列写方程, 利用键合图的因果关系求出 e_2 : 根据功率流方向标注, 势变量 e_2 来自 1 结的输出, 是由 e_1 , e_3 , 和 e_4 产生的, 因此:

$$\dot{p}_2 = e_2 = e_1 - e_3 - e_4 = \tau_L - e_3 - e_4, \quad (2.1)$$

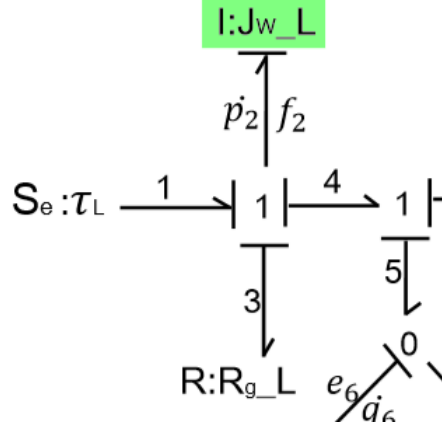
e_1 是输入变量, 一直保留在最终的方程中; e_3 来自阻性元件 R_{gL} 的输出; e_4 直接与状态变量有关, 故有下面三式:

$$e_3 = f_3 \cdot R_{gL} = f_2 \cdot R_{gL} = \frac{p_2}{J_{wL}} R_{gL}, \quad (2.2)$$

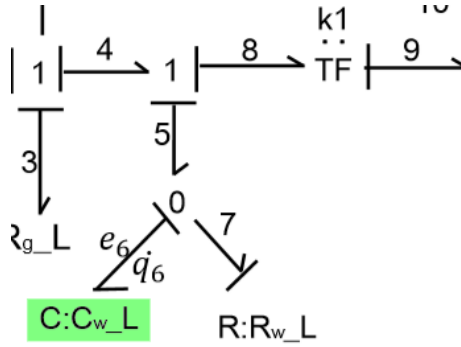
$$e_4 = e_5 + e_8 = e_6 + e_9 \cdot k_1 = \frac{q_6}{C_{wL}} + \frac{q_{11}}{C_{wcL}} k_1, \quad (2.3)$$

由式 (2.1)-(2.3) 得到状态方程 1:

$$\dot{p}_2 = \tau_L - \frac{p_2}{J_{wL}} R_{gL} - \frac{q_{11}}{C_{wcL}} k_1 - \frac{q_6}{C_{wL}}, \quad (2.4)$$



2.1.2 后轮轮辐结构相关状态变量 \dot{q}_6



对于 \dot{q}_6 , 开始列写方程, 利用键合图的因果关系求出 f_6 : 根据功率流方向标注, 流变量 f_6 来自 0 结的输出, 是由 f_5 和 f_7 产生的, 因此:

$$\dot{q}_6 = f_6 = f_5 - f_7, \quad (2.5)$$

f_5 直接与状态变量有关; f_7 同样直接与状态变量有关, 故而有下面两式:

$$f_5 = f_4 = f_2 = \frac{p_2}{J_{wL}}, \quad (2.6)$$

$$f_7 = \frac{e_7}{R_{wL}} = \frac{e_6}{R_{wL}} = \frac{q_6}{C_{wL}R_{wL}}, \quad (2.7)$$

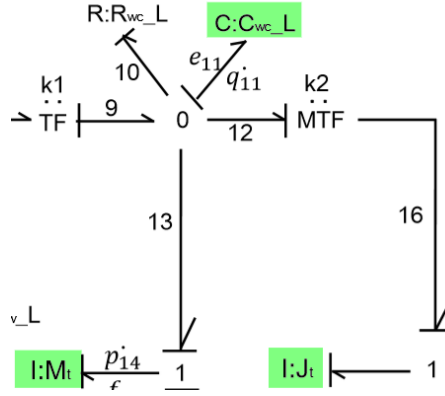
由式 (2.5)-(2.7) 得到状态方程 2:

$$\dot{q}_6 = \frac{p_2}{J_{wL}} - \frac{q_6}{C_{wL}R_{wL}}. \quad (2.8)$$

2.1.3 后轮与整体解耦相关状态变量 \dot{q}_{11}

对于 \dot{q}_{11} , 开始列写方程, 通过使用因果关系对 f_{11} 路径进行跟踪, 流变量 f_{11} 是对 C_{wL} 的输入, 从 0 结出来的输出, 此输出由因果输入 f_9, f_{10}, f_{12} 和 f_{13} 产生, 因此:

$$\dot{q}_{11} = f_{11} = f_9 - f_{10} - f_{12} - f_{13}, \quad (2.9)$$



f_9 来自 TF 元件； f_{10} 来自阻性元件 R_{wcL} 的输出； f_{12} 和 f_{13} 同样直接与状态变量有关，故而有下面四式：

$$f_9 = f_8 \cdot k_1 = f_4 \cdot k_1 = f_2 \cdot k_1 = \frac{p_2}{J_{wL}} k_1, \quad (2.10)$$

$$f_{10} = \frac{e_{10}}{R_{wcL}} = \frac{e_{11}}{R_{wcL}} = \frac{q_{11}}{C_{wcL} R_{wcL}}, \quad (2.11)$$

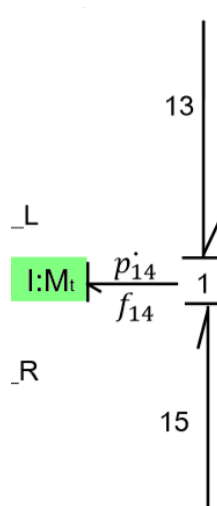
$$f_{12} = \frac{f_{16}}{k_2} = \frac{f_{17}}{k_2} = \frac{p_{17}}{J_t k_2}, \quad (2.12)$$

$$f_{13} = f_{14} = \frac{p_{14}}{M_t}, \quad (2.13)$$

由式 2.9-2.13 得到状态方程 3：

$$\dot{q}_{11} = \frac{p_2}{J_{wL}} k_1 - \frac{q_{11}}{C_{wcL} R_{wcL}} - \frac{p_{17}}{J_t k_2} - \frac{p_{14}}{M_t}. \quad (2.14)$$

2.1.4 质心处状态分析（质量）状态变量 \dot{p}_{14}





对于 \dot{p}_{14} , 开始列写方程, 利用键合图的因果关系求出 e_{14} : 根据功率流方向标注, 势变量 e_{14} 来自 1 结的输出, 是由 e_{13} 和 e_{15} 产生的, 因此:

$$\dot{p}_{14} = e_{14} = e_{13} + e_{15}, \quad (2.15)$$

e_{13} 和 e_{15} 均来自容性元件 C_{wc} 的输出故而有下面两式:

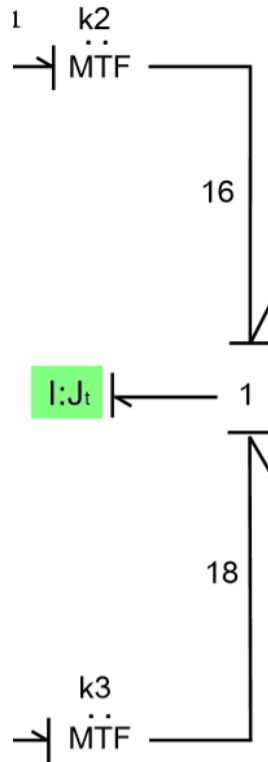
$$e_{13} = e_{11} = \frac{q_{11}}{C_{wcL}}, \quad (2.16)$$

$$e_{15} = e_{20} = \frac{q_{20}}{C_{wcR}}, \quad (2.17)$$

由式 3.16-3.19 得到状态方程 4:

$$\dot{p}_{14} = \frac{q_{11}}{C_{wcL}} + \frac{q_{20}}{C_{wcR}}. \quad (2.18)$$

2.1.5 质心处状态分析（转动惯量）状态变量 \dot{p}_{17}



对于 \dot{p}_{17} , 开始列写方程, 通过使用因果关系对 p_{17} 路径进行跟踪, 从 1 结出来的输出, 此输出由因果输入 e_{16} 和 e_{18} 产生, 因此:

$$\dot{p}_{17} = e_{17} = e_{16} + e_{18}, \quad (2.19)$$

e_{16} 和 e_{18} 来自 MTF 元件的输入, 故而有下面两式:

$$e_{16} = \frac{e_{12}}{k_2} = \frac{e_{11}}{k_2} = \frac{q_{11}}{C_{wL}k_3}, \quad (2.20)$$



$$e_{18} = \frac{e_{19}}{k_3} = \frac{e_{20}}{k_3} = \frac{q_{20}}{C_{wcR}}, \quad (2.21)$$

由式 2.19-2.21 得到状态方程 5:

$$\dot{p}_{17} = \frac{q_{11}}{C_{wL}k_3} + \frac{q_{20}}{k_2C_{wR}}. \quad (2.22)$$

2.1.6 根据对称性得到剩余状态方程

根据对称性，另外三个状态方程可以推出 (2.23)-(2.25):

$$\dot{q}_{20} = \frac{p_{29}}{J_{wR}}k_1 - \frac{p_{14}}{M_t} - \frac{p_{17}}{J_tk_3} - \frac{q_{20}}{R_{wcR}C_{wcR}}, \quad (2.23)$$

$$\dot{q}_{25} = \frac{p_{29}}{J_{w-R}} - \frac{q_{25}}{R_{w-R}C_{w-R}}, \quad (2.24)$$

$$\dot{p}_{29} = \tau_R - \frac{p_{29}}{J_{wR}}R_{gR} - \frac{q_{20}}{C_{wcR}}k_1 - \frac{q_{25}}{C_{wR}}. \quad (2.25)$$

2.2 总体状态空间矩阵

2.2.1 状态空间矩阵导出

下列公式显示了 MPW 的状态空间表示，其中 x_1 , u_1 和 y_1 分别是系统状态，输入和输出:

$$\dot{x}_1 = [A_1]x_1 + [B_1]u_1, \quad (2.26)$$

$$y_1 = [C_1]x_1. \quad (2.27)$$

由上述八个状态空间方程 (2.4) (2.25)，具体表示成:

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_2 \\ \dot{f}_6 \\ \dot{f}_{11} \\ \dot{e}_{14} \\ \dot{e}_{17} \\ \dot{f}_{20} \\ \dot{f}_{25} \\ \dot{e}_{25} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{p}_2 \\ \dot{q}_6 \\ \dot{q}_{11} \\ \dot{p}_{14} \\ \dot{p}_{17} \\ \dot{q}_{20} \\ \dot{q}_{25} \\ \dot{p}_{29} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_{gL}}{J_{wL}} & -\frac{1}{C_{wL}} & -\frac{k_1}{C_{wL}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{J_{wL}} & -\frac{1}{R_{wL}C_{wL}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{J_{wL}}{k_1} & 0 & -\frac{1}{R_{wL}C_{wL}} & -\frac{1}{M_t} & -\frac{1}{k_2J_t} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{C_{wL}} & 0 & 0 & \frac{1}{C_{wR}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{k_3C_{wL}} & 0 & 0 & \frac{1}{k_2C_{wR}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{M_t} & -\frac{1}{k_2J_t} & -\frac{1}{R_{wR}C_{wR}} & 0 & \frac{k_1}{J_{wR}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{R_{wR}C_{wR}} & \frac{1}{J_{wR}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{k_1}{C_{wR}} & -\frac{1}{C_{wR}} & -\frac{R_{gR}}{J_{wR}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_2 \\ q_6 \\ q_{11} \\ p_{14} \\ p_{17} \\ q_{20} \\ q_{25} \\ p_{29} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_L \\ \tau_R \end{bmatrix} \quad (2.28)$$



则输出矩阵则表示为：

$$\begin{bmatrix} \omega_L \\ \omega_R \\ V_{CG} \\ \theta_{CG} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_2 \\ f_{29} \\ f_{14} \\ f_{17} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{J_{wL}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{J_{wR}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{M_t} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{J_t} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_2 \\ p_{29} \\ p_{17} \\ p_{17} \end{bmatrix}. \quad (2.29)$$

2.2.2 特殊变量分析

特别地，其中的 k_2 和 k_3 属于根据速度变化的动态变量，分别代表转动过程中左右轮相对速度瞬心的曲率半径，需要根据两轮机器人模型导出：

在该建模中选取对象的机械主体示意如图 2.2 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 2.30 显示了系统的运动学数学模型，其中 θ 是方位角， x 和 y 分别表示系统的几何位置：

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = r \begin{bmatrix} \frac{\cos \theta}{2} & \frac{\cos \theta}{2} \\ \frac{2}{L} & \frac{\sin \theta}{2} \\ \frac{2}{L_w} & -\frac{2}{L_w} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_r \\ \omega_l \end{bmatrix}. \quad (2.30)$$

以 A 作为参考点，左右轮的位移课以得到：

$$S_l = h - \frac{L_w}{2} \sin \theta, \quad (2.31)$$

$$S_r = h + \frac{L_w}{2} \sin \theta. \quad (2.32)$$

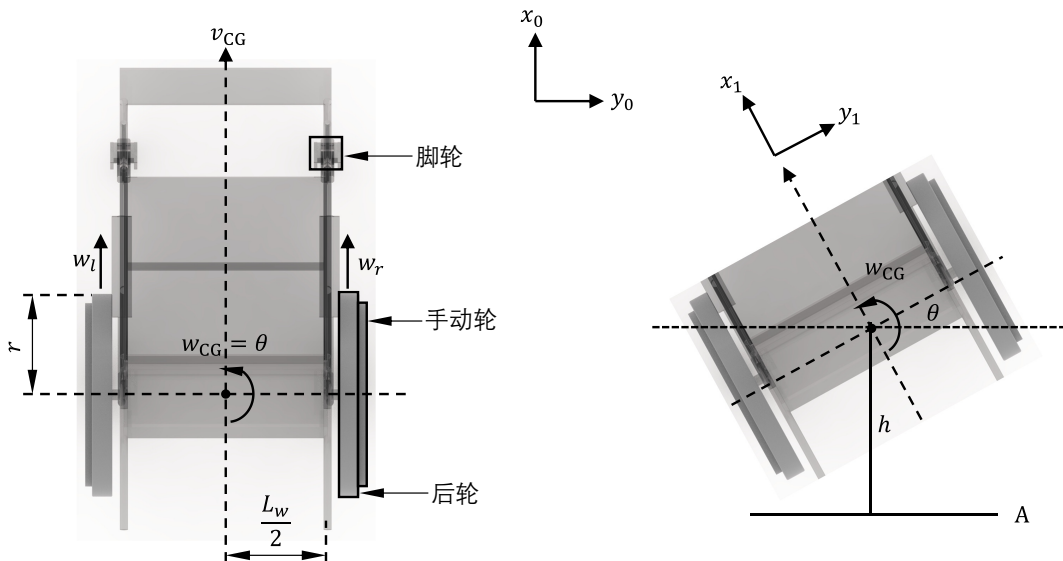


图 2.2 电动轮椅主体俯视示意图。



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 2.31 和 2.32，可以获得所需的流变量方程，将可以通过方程 2.31 和 2.32 用于构建轮椅主体结构的键合图模型。

$$v_l = \dot{S}_l = \dot{h} - \dot{\theta} \frac{L_w}{2} \cos \theta, \quad (2.33)$$

$$v_r = \dot{S}_r = \dot{h} + \dot{\theta} \frac{L_w}{2} \cos \theta. \quad (2.34)$$

进一步，假设此时 $v_r > v_l$ ，则 $k_3 > k_2$ 。根据瞬心的相关几何关系，我们可以得到下列式子：

$$\frac{v_L}{k_2} = \frac{v_R}{k_3}. \quad (2.35)$$

其中，由假设与集合关系可得：

$$k_3 = k_2 + L_w. \quad (2.36)$$

结合上述两式可以导出：

$$k_2 = \frac{v_L \times L_w}{v_R - v_L}. \quad (2.37)$$

为了方便编程与建模，上面方程 2.37 可以写成更一般的形式：

$$\begin{aligned} \min(k_2, k_3) &= \frac{\min(v_L, v_R) \times L_w}{|v_R - v_L|} \\ \max(k_2, k_3) &= \frac{\max(v_L, v_R) \times L_w}{|v_R - v_L|} \end{aligned} \quad (2.38)$$



3 电动轮椅（Mmechatronic drive module）框图建模

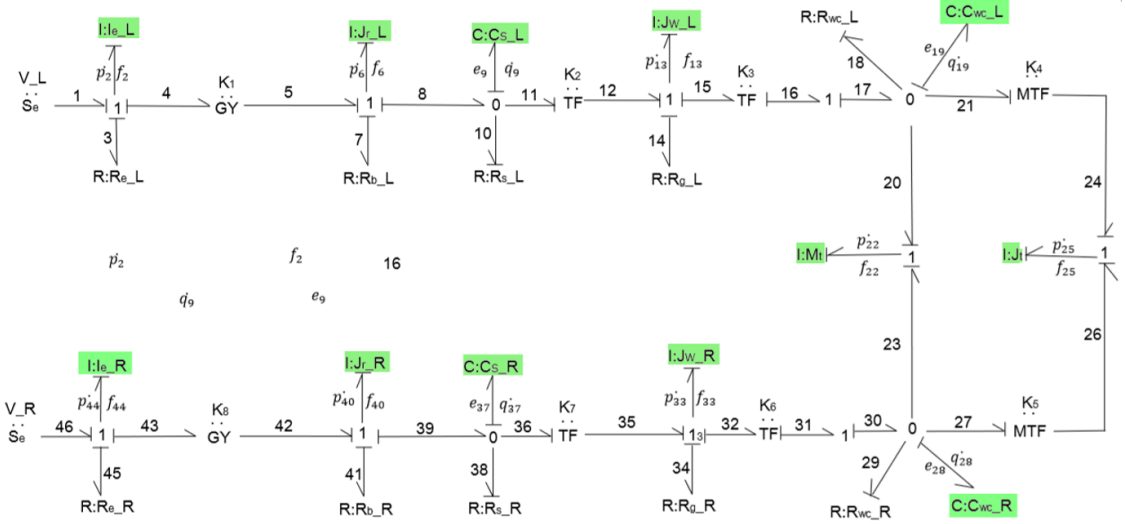


图 3.1 MDM 因果化标注。

3.1 状态空间方程推导

3.1.1 状态变量 \dot{p}_2

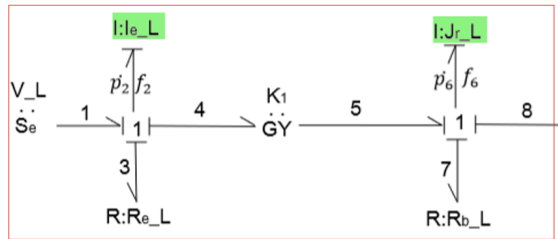


图 3.2

对于 \dot{p}_2 , 开始列写方程, 利用键合图的因果关系求出 e_2 : 根据功率流方向标注, 势变量 e_2 来自 1 结的输出, 是由 e_1 , e_3 , 和 e_4 产生的, 因此:

$$\dot{p}_2 = e_2 = e_1 - e_3 - e_4, \quad (3.1)$$

e_1 是输入变量, 一直保留在最终的方程中; e_3 来自阻性元件 R_{eL} 的输出; e_4 直接与状态变量有关, 故而有下面三式:

$$e_1 = V_L, \quad (3.2)$$

$$e_3 = f_3 R_{eL} = f_2 R_{eL} = \frac{p_2}{I_{eL}} R_{eL}, \quad (3.3)$$

$$e_4 = k_1 f_5 = k_1 f_6 = k_1 \frac{p_6}{J_{rL}}, \quad (3.4)$$

由式 (3.1)-(3.4) 得到状态方程 1:

$$\dot{p}_2 = V_L - \frac{p_2}{I_{eL}} R_{eL} - k_1 \frac{p_6}{J_{rL}}, \quad (3.5)$$



3.1.2 状态变量 \dot{p}_6

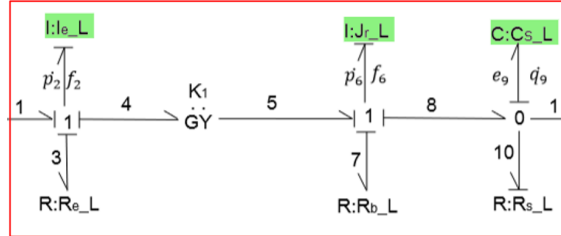


图 3.3

对于 \dot{p}_6 , 开始列写方程, 利用键合图的因果关系求出 e_6 : 根据功率流方向标注, 势变量 e_6 来自 1 结的输出, 是由 e_5 , e_7 , 和 e_8 产生的, 因此:

$$\dot{p}_6 = e_6 = e_5 - e_7 - e_8, \quad (3.6)$$

e_5 直接与状态变量有关; e_7 来自阻性元件 R_{bL} 的输出; e_8 同样直接与状态变量有关, 故而有下面三式:

$$e_5 = k_1 f_4 = k_1 f_2 = k_1 \frac{p_2}{I_{eL}}, \quad (3.7)$$

$$e_7 = f_7 R_{bL} = f_6 R_{bL} = \frac{p_6}{J_{rL}} R_{bL}, \quad (3.8)$$

$$e_8 = e_9 = \frac{q_9}{C_{sL}}, \quad (3.9)$$

由式 3.6-3.9 得到状态方程 2:

$$\dot{p}_6 = k_1 \frac{p_2}{I_{eL}} - \frac{p_6}{J_{rL}} R_{bL} - \frac{q_9}{C_{sL}}. \quad (3.10)$$

3.1.3 状态变量 \dot{q}_9

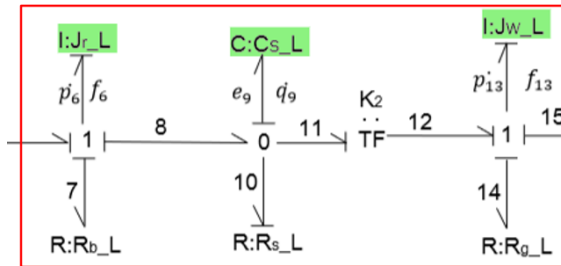


图 3.4

对于 \dot{q}_9 , 开始列写方程, 通过使用因果关系对 f_9 路径进行跟踪, 流变量 f_9 是对 C_{sL} 的输入, 从 0 结出来的输出, 此输出由因果输入 f_8, f_{10}, f_{11} 产生, 因此:

$$\dot{q}_9 = f_9 = f_8 - f_{10} - f_{11}, \quad (3.11)$$

f_8 直接与状态变量有关; f_{10} 来自阻性元件 R_{sL} 的输出; f_{11} 同样直接与状态变量有关, 故而有下面三式:

$$f_8 = f_6 = \frac{p_6}{J_{rL}}, \quad (3.12)$$



$$f_{10} = \frac{e_{10}}{R_{sL}} = \frac{e_9}{R_{sL}} = \frac{q_9}{C_{sL}R_{sL}}, \quad (3.13)$$

$$f_{11} = \frac{f_{12}}{k_2} = \frac{f_{13}}{k_2} = \frac{p_{13}}{J_{wL}k_2}, \quad (3.14)$$

由式 3.11-3.14 得到状态方程 3:

$$\dot{q}_9 = \frac{p_6}{J_{rL}} - \frac{q_9}{C_{sL}R_{sL}} - \frac{p_{13}}{J_{wL}k_2}. \quad (3.15)$$

3.1.4 状态变量 \dot{p}_{13}

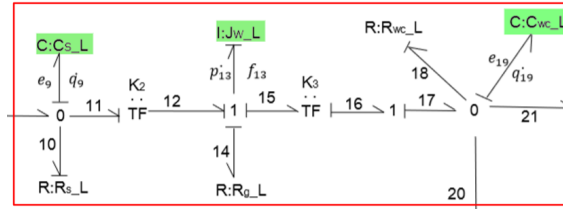


图 3.5

对于 \dot{p}_{13} , 开始列写方程, 利用键合图的因果关系求出 e_{13} : 根据功率流方向标注, 势变量 e_{13} 来自 1 结的输出, 是由 e_{12} , e_{14} , 和 e_{15} 产生的, 因此:

$$\dot{p}_{13} = e_{12} - e_{14} - e_{15}, \quad (3.16)$$

e_{12} 直接与状态变量有关; e_{14} 来自阻性元件 R_{gL} 的输出; e_{15} 同样直接与状态变量有关, 故而有下面三式:

$$e_{12} = \frac{e_{11}}{k_2} = \frac{e_9}{k_2} = \frac{q_9}{C_{sL}k_2}, \quad (3.17)$$

$$e_{14} = f_{14}R_{gL} = f_{13}R_{gL} = \frac{p_{13}}{J_{wL}}R_{gL}, \quad (3.18)$$

$$e_{15} = e_{16}k_3 = e_{17}k_3 = e_{19}k_3 = \frac{q_{19}}{C_{wcL}}k_3, \quad (3.19)$$

由式 3.16-3.19 得到状态方程 4:

$$\dot{p}_{13} = \frac{q_9}{C_{sL}k_2} - \frac{p_{13}}{J_{wL}}R_{gL} - \frac{q_{19}}{C_{wcL}}k_3. \quad (3.20)$$

3.1.5 状态变量 \dot{q}_{19}

对于 \dot{q}_{19} , 开始列写方程, 通过使用因果关系对 f_{19} 路径进行跟踪, 流变量 f_{19} 是对 C_{wcL} 的输入, 从 0 结出来的输出, 此输出由因果输入 f_{17} , f_{18} , f_{20} , f_{21} 产生, 因此:

$$\dot{q}_{19} = f_{17} - f_{18} - f_{20} - f_{21}, \quad (3.21)$$

f_{17} 直接与状态变量有关; f_{18} 来自阻性元件 R_{wcL} 的输出; f_{20} 和 f_{21} 同样直接与状态变量有关, 故而有下面四式:

$$f_{17} = f_{16} = f_{15}k_3 = f_{13}k_3 = \frac{p_{13}}{J_{wL}}k_3, \quad (3.22)$$

$$f_{18} = \frac{e_{18}}{R_{wcL}} = \frac{e_{19}}{R_{wcL}} = \frac{q_{19}}{C_{wcL}R_{wcL}}, \quad (3.23)$$

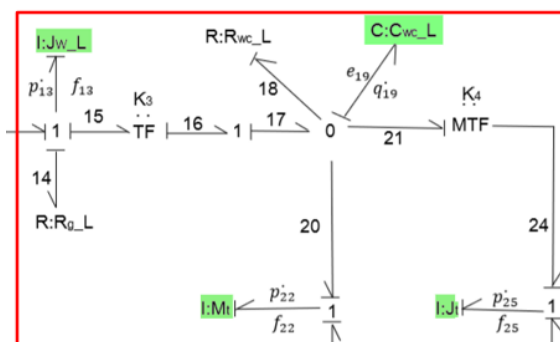


图 3.6

$$f_{20} = f_{22} = \frac{p_{22}}{M_t}, \quad (3.24)$$

$$f_{21} = \frac{f_{24}}{k_4} = \frac{f_{25}}{k_4} = \frac{p_{25}}{J_1 k_4}, \quad (3.25)$$

由式 3.21-3.25 得到状态方程 5:

$$\dot{q}_{19} = \frac{p_{13}}{J_{wL}} k_3 - \frac{q_{19}}{C_{wCL} R_{wCL}} - \frac{p_{22}}{M_t} - \frac{p_{25}}{J_t k_4}. \quad (3.26)$$

3.1.6 状态变量 \dot{p}_{22}

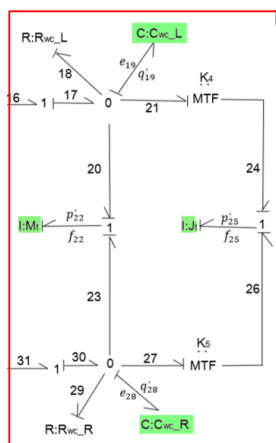


图 3.7

对于 p_{22} , 开始列写方程, 利用键合图的因果关系求出 e_{22} : 根据功率流方向标注, 势变量 e_{22} 来自 1 结的输出, 是由 e_{20} 和 e_{23} 产生的, 因此:

$$\dot{p}_{22} = e_{22} = e_{20} + e_{23}, \quad (3.27)$$

e_{20} 与 e_{23} 均直接与状态变量有关, 故而有下面两式:

$$e_{20} = e_{19} = \frac{q_{19}}{C_{wcl}}, \quad (3.28)$$

$$e_{23} = e_{28} = \frac{q_{28}}{C_{wcR}}, \quad (3.29)$$



由式 3.27-3.29 得到状态方程 6:

$$\dot{p}_{22} = \frac{q_{19}}{C_{wcL}} + \frac{q_{28}}{C_{wcR}}. \quad (3.30)$$

3.1.7 状态变量 \dot{p}_{25}

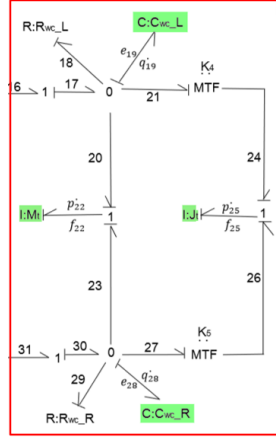


图 3.8

对于 \dot{p}_{25} , 开始列写方程, 利用键合图的因果关系求出 e_{25} : 根据功率流方向标注, 势变量 e_{22} 来自 1 结的输出, 是由 e_{24} 和 e_{26} 产生的, 因此:

$$\dot{p}_{25} = e_{24} + e_{26}, \quad (3.31)$$

e_{24} 与 e_{26} 均直接与状态变量有关, 故而有下面两式:

$$e_{24} = \frac{e_{21}}{k_4} = \frac{e_{19}}{k_4} = \frac{q_{19}}{C_{wcL}k_4}, \quad (3.32)$$

$$e_{26} = \frac{e_{27}}{k_5} = \frac{e_{28}}{k_5} = \frac{q_{28}}{C_{wcL}k_5}, \quad (3.33)$$

由式 3.31-3.33 得到状态方程 7:

$$\dot{p}_{25} = \frac{q_{19}}{C_{wcL}k_4} + \frac{q_{28}}{C_{wcL}k_5}. \quad (3.34)$$

3.1.8 根据对称性得到剩余状态方程

根据对称性, 另外五个状态方程见 3.35-3.39:

$$\dot{q}_{28} = \frac{p_{33}}{J_{wR}}k_6 - \frac{q_{28}}{C_{wCR}R_{wCR}} - \frac{p_{22}}{M_t} - \frac{p_{25}}{J_tk_5}. \quad (3.35)$$

$$\dot{p}_{33} = \frac{q_{37}}{C_{sR}k_7} - \frac{p_{33}}{J_{wR}}R_{sR} - \frac{q_{28}}{C_{wCR}}k_6 \quad (3.36)$$

$$\dot{q}_{37} = \frac{p_{40}}{J_{rR}} - \frac{q_{37}}{C_{sR}R_{sR}} - \frac{p_{33}}{J_{wR}k_7} \quad (3.37)$$

$$\dot{p}_{40} = k_8 \frac{p_{44}}{I_{eR}} - \frac{p_{40}}{J_{rR}}R_{bR} - \frac{q_{37}}{C_{sR}} \quad (3.38)$$

$$\dot{p}_{44} = V_R - \frac{p_{44}}{I_{eR}}R_{eR} - k_8 \frac{p_{40}}{J_{rR}} \quad (3.39)$$



3.2 键合图转框图

3.3 仿真结果

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。

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。



4 实验阶段

4.1 实验参数设定

表 4.1 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：

表 4.1 系统主要参数及其数学标记

数学标记	系统参数	设计值
系统整体参数		
V_{CG}	质心速度	
w_{CG}	质心转速	
P_{CG}	系统动量变化率	
P_{θ}	系统角动量变化率	
手推轮椅主体		
$SE:\tau$	后轮推进扭矩 ($N \cdot m$)	12
J_w	后轮转动惯量 ($kg \cdot m^2$)	0.005
M_t	系统质量	100
J_t	系统转动惯量	64
R_g	轮胎与地面摩擦系数	0.006
C_w	轮辐弹性系数	0.0021
R_w	轮辐阻尼	12
r	后轮半径	0.3
L_w	轮椅宽度	0.8
R_{wc}	联轴器阻尼系数	0.005
C_{wc}	联轴器弹性系数	0.005
机电驱动模块		
I_e	电机电感	0.0033
R_e	电机内阻	0.9
J_r	转子转动惯量	0.078
R_b	电机轴承阻尼	0.008
M_d	机电驱动模块质量	30
J_d	机电驱动模块转动惯量	75
L_d	模块宽度	0.6
C_s	电机输出转矩	0.00237
R_s	电机输出轴阻尼	11
k_1	电机扭矩系数	0.288
k_2	齿轮系数比	0.18
k_3	电动车轮半径	0.127
$Se:L$	输入控制电压	24
手推控制输入部分		
J	手动轮转动惯量	0.005
k_4	手动轮半径	0.3



4.2 Simulink 相关模块运用和操作

在建模过程中，我们运用了 simulink 一些内置的模块和操作进行建模，以下是简要的介绍：

- 生成常量值 Constant



图 4.1 常数模块图例

Constant 模块生成实数或复数常量值。在本次建模中，主要用于常值输入以及一些固定参数的表示。

- 将输入乘以常量 Gain

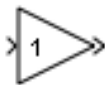


图 4.2 增益模块图例

Gain 模块将输入乘以一个常量值（增益）。输入和增益可以是标量、向量或矩阵。在本次建模中，主要用于表示状态空间方程中，状态变量前面的系数。

- 输入信号的加减运算 Sum



图 4.3 加减运算模块图例

Sum 模块对输入信号执行加减运算。Add、Subtract、Sum of Elements 和 Sum 模块是相同的模块。此模块可对标量、向量或矩阵输入执行加减运算。它还可以缩减信号的元素并执行求和。在本次建模中，主要用于表示状态空间方程中的加减运算。

- 可自定义函数模块 MATLAB Function



图 4.4 可自定义函数模块图例

使用 MATLAB Function 模块可以编写用于 Simulink 模型的 MATLAB 函数。在本次建模中，主要用于表示较为复杂的判断与运算功能，给仿真带来一定便利。

- 饱和模块 Saturation

将输入信号限制在饱和上界和下界值之间

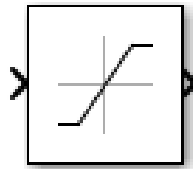


图 4.5 饱和模块图例

Saturation 模块产生输出信号，该信号是在饱和上界和下界值之间的输入信号值。上界和下界由参数 Upper limit 和 Lower limit 指定。在本次建模中，主要用于限制相关变量的最大值，避免 Inf 无穷大值的发生而无法仿真。

- 显示输入常数值模块 Display

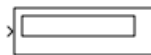


图 4.6 显示输入常数值模块图例

Display 模块显示输入数据的值。您可以指定显示的格式和频率。在本次建模中，主要用于判断输入值是否合理，从而保证仿真的正常进行。

- 示波器 Scope



图 4.7 示波器图例

Simulink Scope 模块显示时域信号。在本次建模中，主要用于输出随时间变化的状态变量，如速度，角速度等等。

- 合并变量模块 Mux

将相同数据类型和数值类型的输入信号合并为虚拟向量



图 4.8 合并变量模块图例

Mux 模块可将其输入合并为单个向量输出。输入可以是标量或向量信号。所有输入都必须具有相同的数据类型和数值类型。在本次建模中，主要用于合并输出结果，后续输出至工作空间。

- 写入工作区模块 To Workspace

将相同数据类型和数值类型的输入信号合并为虚拟向量

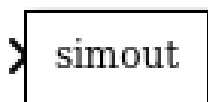


图 4.9 写入工作区模块图例

To Workspace 模块将输入信号数据写入到工作区。在仿真期间，模块将数据写入到内部缓冲区。暂停仿真或仿真完成后，该数据将写入到工作区。在仿真暂停或停止之前，数据不可用。在本次建模中，主要将输出后结果，后续输出至工作空间进行处理作图。

- 创建模块封装 Subsystem mask

为子系统和自定义模块创建自定义外观、创建用户定义的界面、封装逻辑以及隐藏数据。封装是用于模块的一种自定义用户界面。

在对部分元件进行子系统封装后，可以进行 Mask 编辑：

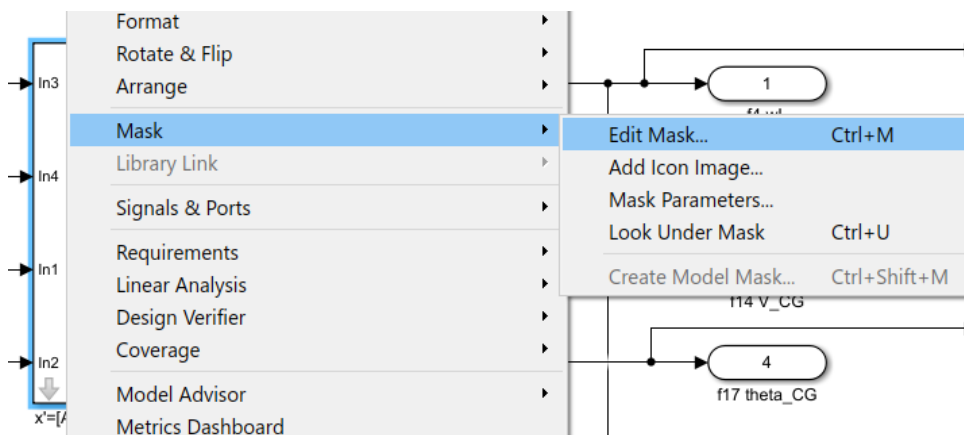


图 4.10 子系统封装操作图例

在具体 Mask 界面中，可以直接添加相关参数编辑模块：

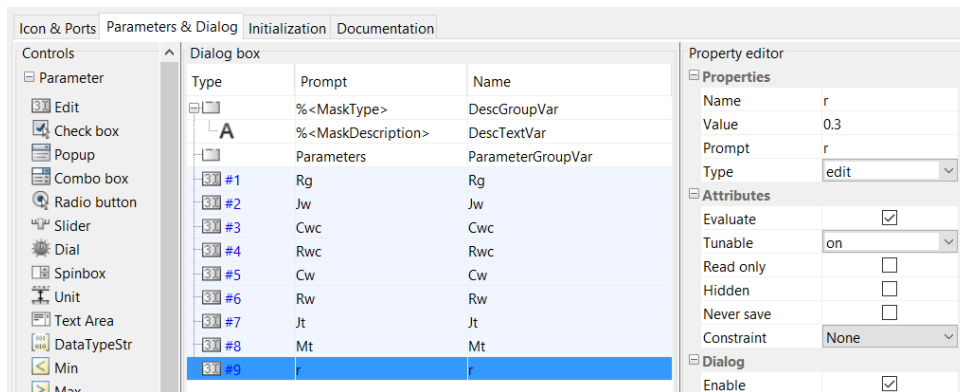


图 4.11 相关参数编辑操作图例

在本次建模中，主要用于封装模型，以及快速参数调整。最终实现效果如下：

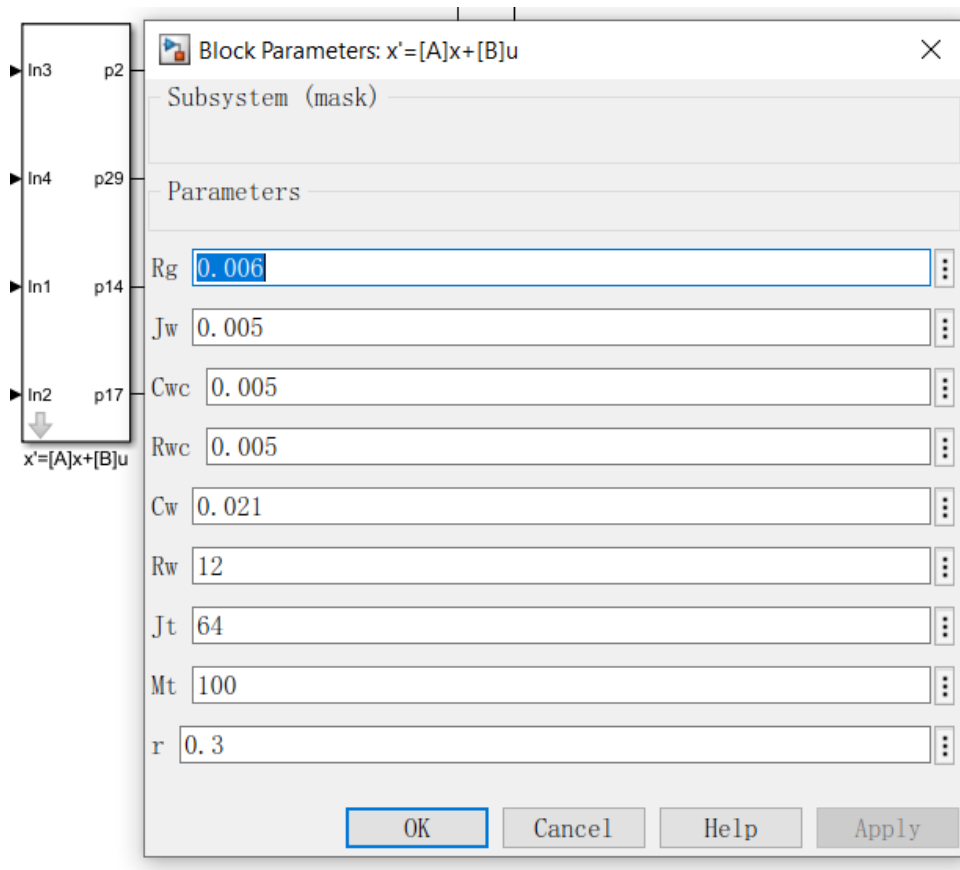


图 4.12 参数调整界面图例



4.3 手推轮椅主体仿真

4.3.1 MPW 整体框图介绍

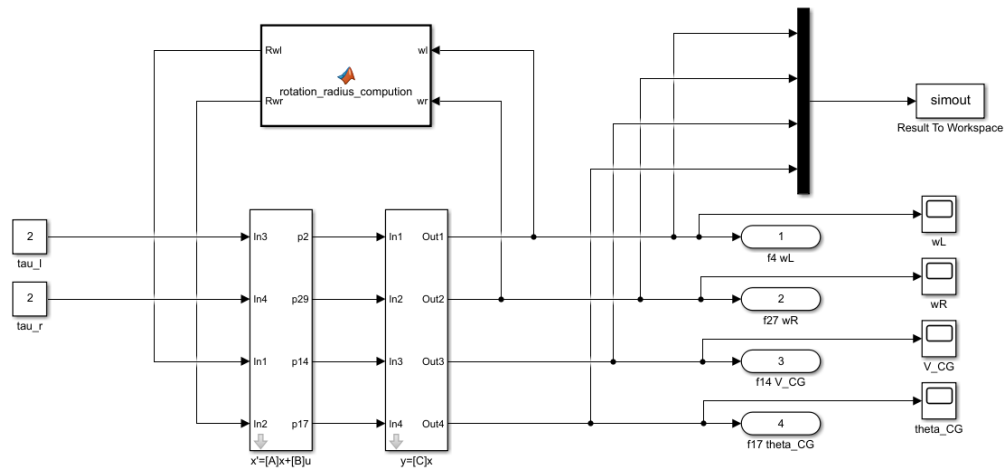


图 4.13 MPW 整体框图

其中输入状态变量子系统主要由八个状态空间方程构成部分组成，输出状态变量子系统由四个增益组成，如下所示：

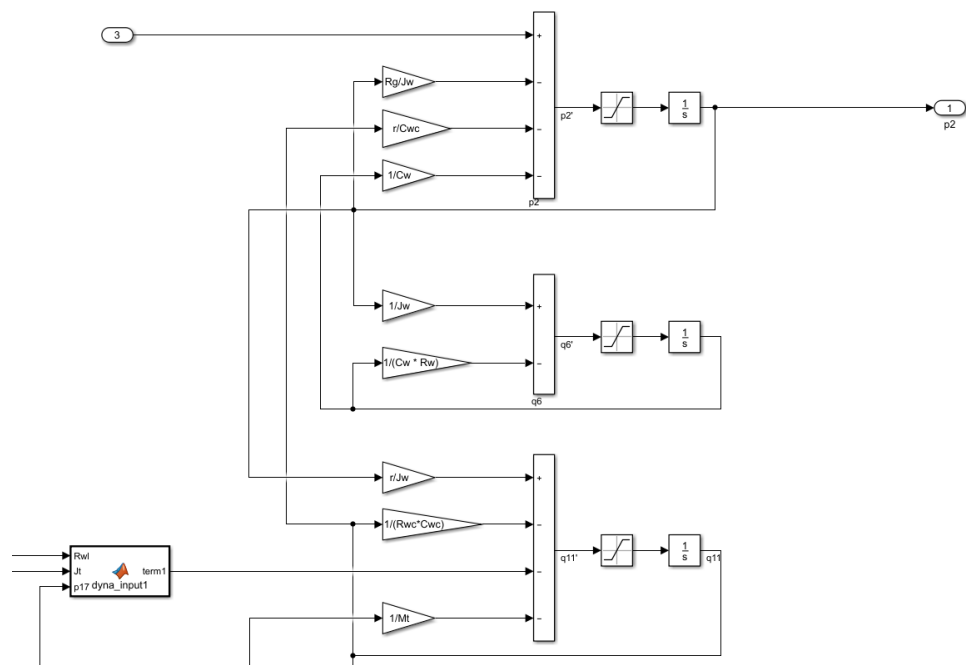


图 4.14 输入状态参量子系统-block1

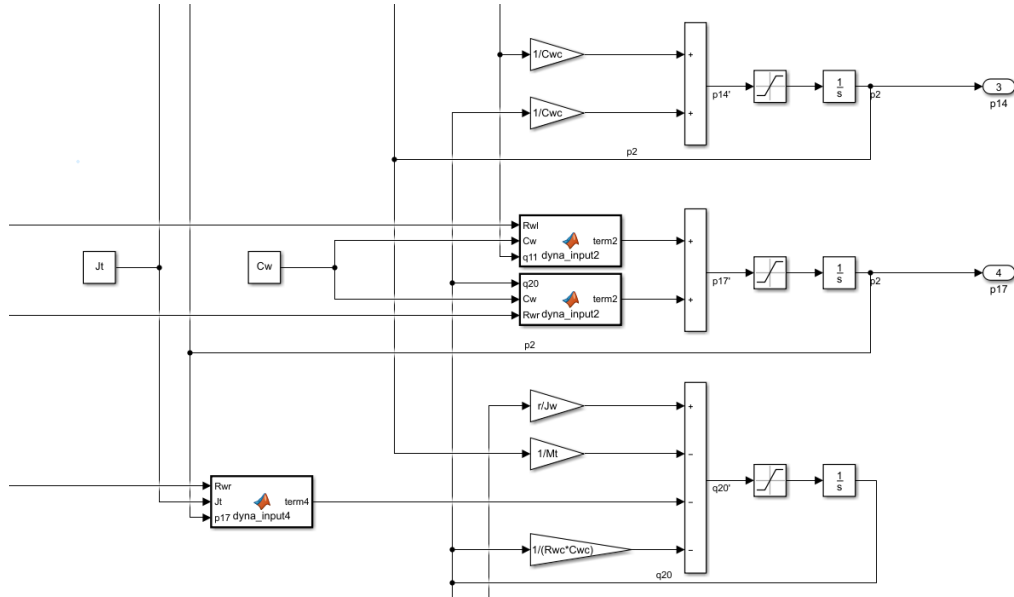


图 4.15 输入状态参量子系统-block2

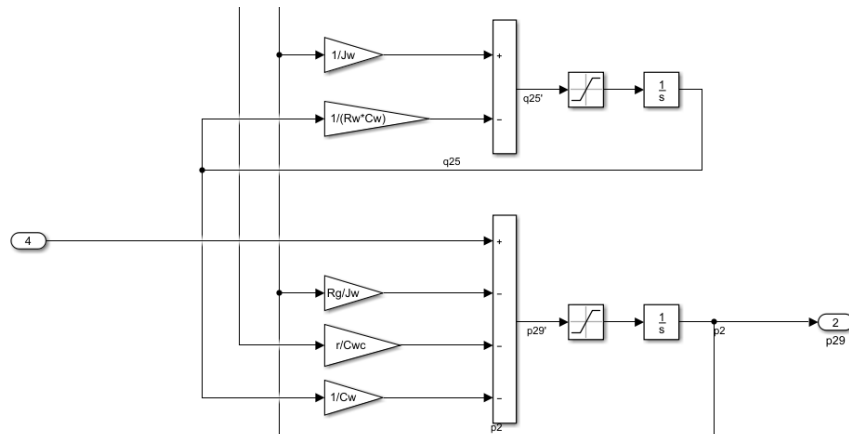


图 4.16 输入状态参量子系统-block3

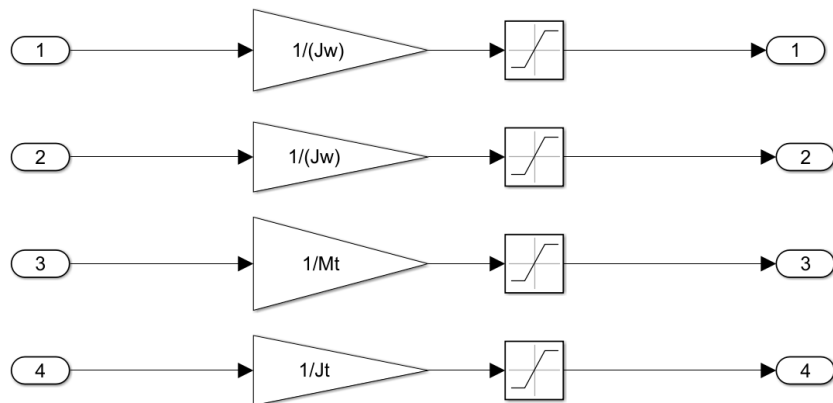


图 4.17 输出状态变量子系统



此外，rotation_radius_computation 函数代码如下所示：

```
function [Rwl, Rwr] = rotation_radius_computation(wl, wr)
% 输入两后轮各自角速度，输出两轮围绕瞬心的曲率半径
Lw = 0.8; % 轮椅左右轮宽度
if wl > wr
    Rwl = (Lw * max(wl, wr))/abs(wl - wr);
    Rwr = (Lw * min(wl, wr))/abs(wl - wr);
elseif wr > wl
    Rwr = (Lw * max(wl, wr))/abs(wl - wr);
    Rwl = (Lw * min(wl, wr))/abs(wl - wr);
else
    Rwl = Inf; % 1e15
    Rwr = Inf; % 1e15
end
end
```

图 4.18 rotation_radius_computation 函数代码

4.3.2 MPW 仿真与分析



4.4 电驱动模块仿真

4.4.1 MDM 整体框图介绍

4.4.2 MDM 仿真与分析

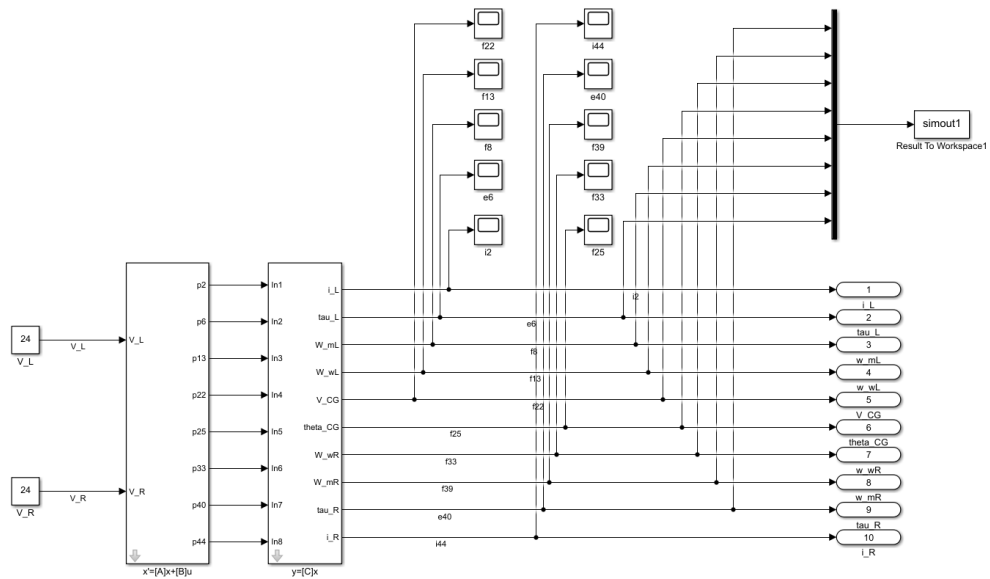


图 4.19 MDM 整体框图



4.5 仿真条件详细说明

我们采用 ode15s 解法器而不采用刚性系统常用的 ode113 解法器。

Ode113 是一种变阶次多步 Adams-Bashforth-Moutlon 算法，此基于用前几个节点的值来计当算法，此基于用前几个节点的值来计当算法，此基于用前几个节点的值来计当前节点的解，因此在相同精读下比 ode45 和 ode23 更快，比较适用于高阶或者需要大量计算的问题更快，比较适用于高阶或者需要大量计算的问题不适合于连续的系统。

MATLAB 推荐，ode45 是大多数情况下的首选解法器。ode45 是基于 Dormand-Prince 4-5runge-kutta 公式，适用于一般非刚性系统的首选解法器。其精度较高，相比于其他解法器为中等水平。我们系统在 ode45 解法器的仿真下，速度较慢且有时会出现无穷大溢出现象，故 ode45 解法器也无法满足我们的系统。

而 ode15s 是基于数值微分公式 (NDF) 的变阶求解器。NDF 与后向差分公式 (BDF，也称为 Gear 方法) 有关，但比后者更高效。ode15s 求解器以数值方式生成 Jacobian 矩阵。在 matlab 建议下，如果怀疑某个问题是刚性问题，或者 ode45 失败或效率极其低下，请尝试 ode15s。经过测试，我们系统在 ode15s 解法器的仿真下，可以正常运行得到结果并且速度不慢故 ode15s 解法器可以满足我们的系统。



5 结论

对于这次大作业，尽管大家都有点忙碌，遇到困难不断，我们还是坚持，认真的去钻研，最终克服了困难。我们相信，做好每项作业，无论难易，我们都可以获得提升与成长。

只有我们都动手算过，动脑想过，对于这种重要的分析问题、解决问题的系统性方法才会有一个更深刻的了解，也为我们看待问题的思路开拓了更多的道路，或许在以后的工作中，这次作业的经历会给我们带来不晓得收获。

6 分工说明

在报告一和报告二中，我们分工合理。在键合图和框图仿真中，每个人都出色完成了任务。但是考虑到在这部分以外的工作量，以及是否对某个部分负责，我们在贡献度上略有出入。但依然要强调我们每个人都出色完成了自己的任务。

成员	完成任务	贡献	本人签字
黎宇恒 1651886	（1）建模对象系统分析（2）键合图建立（3）状态空间方程推导	xx	
李一鸣 1551896	（1）键合图建立（2）状态空间方程推导（3）报告二主要撰写	xx	
何宇杰 1551862	（1）建模对象选取和相关资料收集（2）建模对象系统分析（3）Simulink 建模与仿真（4）报告一、二主要撰写	xx	



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] Klee H, Allen R. Simulation of dynamic systems with MATLAB and Simulink. 2nd ed[M]// Simulation of Dynamic Systems with MATLAB and Simulink. CRC Press, Inc. 2007.
- [4] Wouwer A V. Simulation Of ODE/PDE Models With MATLAB®, OCTAVE And SCILAB[J]. Annals of the Rheumatic Diseases, 2014, 71(Suppl 3):646-646.
- [5] 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.
- [6] Borutzky, W. Bond graph methodology, development and analysis of multidisciplinary dynamic system models (1st ed.) [M]. Berlin: Springer. 2010
- [7] Borutzky, Wolfgang. Bond graph modelling of engineering systems [M]. Vol. 103. New York: Springer, 2011.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Fakri, A., Vilakazi, J. P. Modular driven wheelchair bond graph modelling [C]. The European Modeling & Simulation Symposium, I3M2010 MultiConference, 2010, Fes, Morocco.
- [12] 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.