

纯电动汽车设计

3.1 工作模式和控制策略

纯电动汽车驱动系统中主要有电机驱动装置、传动系统、动力电池等。必须有一个性能优越、安全可靠的整车控制策略,从各个环节上合理控制车辆的运行状态和能量分配,以充分协调和发挥各部分的优势,使汽车整体获得最佳运行状态。

在制定纯电动汽车控制策略时,首先要明确控制目标,即在保证汽车基本性能的前提下降低汽车的能量消耗,提高车辆的续驶里程。同时,还要兼顾电池的寿命问题、实现条件的制约,并要充分考虑到驾驶员的驾驶意图、汽车的平顺性以及安全性。因此,需考虑的原则和约束条件如下:

(1) 在系统性能限制条件和司机驾驶扭矩需求的条件下,计算和调整实际输出的驱动扭矩;

(2) 保证车辆运行以及各个部件的安全性;

(3) 确保良好的驾驶感受。

基于以上原则,可制定以下基本控制策略:

(1) 限定电动机的工作区域和 SOC 值的范围,确保电动机和动力电池能够长时间保持高效的状态。若出现问题,系统提醒,再根据预先设定的规则对纯电动车辆系统的工作模式进行判断和选择,制定相应的控制策略。

(2) 实时考虑各个影响因素,如行驶工况,电池的 SOC 值等,根据规则,将转矩合理地分配给电动机。在整车控制器与电动机控制器中形成一个实时控制的闭环系统。这样既能保证驾驶员驾驶意图及时更新,同时也能够对车辆状态进行控制,保证安全性和舒适性。

根据以上原则和基本控制策略,从纯电动汽车的主要工作模式(起步模式、行车模式、制动能量回收模式)考虑,制定出相应的控制策略。

(1) 起步模式:当车辆完成上电过程后,整车控制器通过采集车辆状态、电机和电池以及加速踏板等信号,车辆随时准备起步。只要驾驶员踩踏加速踏板并且电池 SOC 值高于一定值,整车控制器就计算电机所需转矩,并将此信息发送给电机,电机开始启动并驱动纯电动车起步。如果电池 SOC 值过低,则要进行报警,以保证车辆的安全。

(2) 行车模式:起步完成后,车辆进入行车模式。整车控制器实时接收和

采集各种数据,实时计算电机所需的转矩并定时发送这些数据给电机控制器,保证汽车的正常运行。当电池 SOC 值过低时,车辆进行报警,充电提示灯亮。

(3) 制动能量回收模式: 根据制动踏板行程的大小以及在不改变原车的制动性能情况下对能量进行有效回收。纯电动汽车的制动主要由两部分组成, 即电动机再生制动部分和传统液压摩擦制动部分。在采用电动机再生制动的同时, 使用传统的液压摩擦制动作为辅助, 从而达到既保证汽车的制动安全性, 又可回收能量的目的。

在以上 3 种工作模式中, 对于驾驶员意图快速和准确的把握是非常重要的。驾驶员意图主要是根据驾驶员的操作信息(加速踏板和制动踏板信号), 计算出驱动电机/发电机的转矩需求命令, 通过电机控制器发出指令, 从而实现驾驶员的需求。

3.2 设计目标和要求

纯电动汽车一般采用高效率充电蓄电池为动力源, 无须再用内燃机, 因此纯电动汽车的电动机相当于传统汽车的发动机, 蓄电池相当于原来的油箱。由于对环境影响相对传统汽车较小, 其前景被广泛看好, 但当前技术尚不成熟。

设计目标如下:

(1) 无污染, 噪声低。与内燃机汽车相比, 电动汽车不产生排气污染, 有益于环境保护, 且电动机在运行中的噪声和振动水平都远远小于内燃机。但是电动汽车并非绝对无污染, 使用铅酸电池作为动力源, 制造、使用中要接触到铅, 充电时会产生酸性气体, 造成一定的污染; 蓄电池充电所用的电力, 在用煤炭做燃料时会产生 CO 、 SO_2 、粉尘等。随着技术的发展, 可以采用其他电池作为电动汽车的动力源, 实现真正的零污染, 噪声低。

(2) 结构简单, 使用维修方便。

(3) 提高传动系统动力性。

(4) 提高蓄电池续驶里程。

(5) 整车轻量化。

纯电动汽车主要由电力驱动系统、电源系统和辅助系统 3 部分组成。

电动汽车的驱动系统是电动汽车的核心部分, 其性能决定着电动汽车运行性能的好坏。电动汽车的驱动电动机属于特种电动机, 是电动汽车的关键部件。电动汽车在行驶过程中, 经常频繁地起动/停车、加速/减速等, 这就要求电动机比一般工业应用的电动机性能更高, 基本要求如下:

(1) 电动机的运行特性要满足电动汽车的要求, 在恒转矩区, 要求低速运行时具有大转矩, 以满足电动汽车起动和爬坡的要求; 在恒功率区, 要求低转矩时具有高的速度, 以满足电动汽车在平坦的路面能够高速行驶的要求。

(2) 电动机应具有瞬时功率大、带负载起动性能好、过载能力强、加速性能好、使用寿命长等特点。

(3) 电动机应在整个运行范围内, 具有很高的效率, 以提高一次充电的续驶里程。

(4) 电动机应能够在汽车减速时实现再生制动, 将能量回收并反馈给蓄电池, 使得电动汽车具有最佳能量的利用率。

(5) 电动机应可靠性好, 能够在恶劣的环境下长期工作。

(6) 电动机应体积小, 质量轻, 一般为工业用电机的 $1/3 \sim 1/2$ 。

(7) 电动机的结构要简单坚固,适合批量生产,便于使用和维护。

(8) 价格便宜,从而能够减小整体电动汽车的价格,提高性价比。

(9) 运行时噪声低,减少污染。

电池是电动汽车的动力源泉,电池组性能直接影响整车的加速性能、续航里程及制动能量回收的效率等。电池的成本和循环寿命直接影响车辆的成本和可靠性,所有影响电池性能的参数必须得到优化。电动汽车对动力电池的要求主要有:

(1) 比能量高。为了提高电动汽车的续航里程,要求电动汽车上的动力电池尽可能储存较多的能量,但电动汽车又不能太重,其安装电池的空间也有限,这就要求电池具有较高的比能量。

(2) 比功率大。为了使电动汽车在加速行驶、爬坡能力和负载行驶等方面能与燃油汽车相竞争,要求电池具有较高的比功率。

(3) 循环寿命长。循环寿命越长,则电池在正常使用周期内支撑电动汽车行驶的里程数就越多,有助于降低车辆使用周期内的运行成本。

(4) 均匀一致性好。对于电动汽车,电池组的工作电压大多应达到数百伏,这就要求至少有几十到上百节电池的串联。为达到设计容量要求,有时候甚至需要更多的单体并联。由于电池组的使用性能会受到性能最差的某些单节电池的制约,因此设计上要求各电池单体在容量、内阻、功率特性和循环特性等方面具有高度的均匀一致性。

(5) 高低温性能好、环境适应性强。电动汽车作为一种交通工具,要求电池既要在北方冬天极冷的气温下,又要在南方夏天炎热环境中长期稳定地工作。在最恶劣的气候条件下,电池的工作温度可能要从 -40°C 变到 60°C ,甚至 80°C 。因此,要求电池应具有良好的高低温特性。

(6) 安全性好。能够有效避免应泄漏、短路、撞击、颠簸等引起的起火或爆炸等危险事故发生,确保汽车在正常行驶或非正常行驶过程中的安全。

(7) 价格低廉。材料来源应丰富,电池制造成本低,以降低整车价格,提高电动汽车的市场竞争力。

(8) 绿色、环保。要求制作电池的材料与环境友好、无二次污染,并可再生利用。

纯电动汽车由于布置了电池组,整车质量增加较多,轻量化问题更加突出。通过对整车实际使用工况和使用要求的分析,对电池的电压、容量、驱动电动机功率、转速和转矩、整车性能等车辆参数的整体优化,合理选择电池和电动机参数;积极采用轻质材料,如电池箱的结构框架、形体封皮、轮毂等采用轻质合金材料。

3.3 参数设计

3.3.1 电动机参数设计

驱动电动机在电动汽车低速或者爬坡时输出较大转矩,在高速工况下输出较大的功率。因此,电动汽车的动力性需求决定了驱动电动机的性能参数匹配情况,即应该满足电动汽车的最高车速性能、爬坡性能以及加速性能等指标。驱动电动机需要确定的主要参数有额定

功率、峰值功率、峰值扭矩和最高转速等。

1. 电动机的额定功率和峰值功率

电动机是电动汽车行驶的动力源,对整车性能有直接的影响。所选的电动机功率越大,整车的动力性越好。但功率过大,电动机的质量和体积会增大,且电动机的工作效率不高,导致不能充分利用有限的车载能源,从而续驶里程减少。因此,电动机额定功率应满足电动汽车对最高车速的要求,峰值功率应能同时满足参考汽车的最高车速、最大爬坡度和加速度的要求。

纯电动汽车以最高车速行驶消耗的功率 P_a 为

$$P_a = \frac{u_{\max}}{3600\eta_t} \left(mgf + \frac{C_d A u_{\max}^2}{21.15} \right) \quad (3.1)$$

式中 m ——整车质量(kg);

f ——滚动阻力系数;

C_d ——空气阻力系数;

A ——迎风正面面积(m^2);

u_{\max} ——最高行驶车速(km/h);

η_t ——机械传动系统效率。

纯电动汽车以某一车速爬上最大坡度消耗的功率 P_b 为

$$P_b = \frac{u_{\max}}{3600\eta_t} \left(mgf \cos\alpha_{\max} + mg \sin\alpha_{\max} + \frac{C_d A u_p^2}{21.15} \right) \quad (3.2)$$

式中 u_p ——电动汽车爬坡时的行驶速度(km/h);

α_{\max} ——最大坡度角。

纯电动汽车在水平路面上加速行驶消耗的功率 P_c 为

$$P_c = \frac{u_f}{3600\eta_t} \left(mgf + \frac{C_d A}{21.15} u_f^2 + \delta m \frac{du}{dt} \right) \quad (3.3)$$

式中 δ ——汽车旋转质量换算系数;

u_f ——电动汽车加速后达到的速度(km/h);

du/dt ——加速度。

因此,纯电动汽车电动机的额定功率 P_e 和峰值功率 P_{\max} 应满足

$$P_e \geq P_a \quad (3.4)$$

$$P_{\max} \geq \max\{P_a \quad P_b \quad P_c\} \quad (3.5)$$

电动机的峰值功率与额定功率之间的关系为

$$P_{\max} = \lambda P_e \quad (3.6)$$

式中 λ ——电动机的过载系数。

2. 电动机的最高转速和额定转速

根据电动机转动速度快慢可分为高、中、低转速电动机。转速高于 10 000r/min 的电动机称为高速电动机;转速在 6000~10 000r/min 的电动机称为中速电动机;转速在 3000~

6000r/min 的电动机称为低速电动机。电动机转速并非越快越好,转速越快电动机结构尺寸和重量会越大,制造精度要求和生产成本都会随之增加。

纯电动汽车最高行驶速度与电动机最高转速之间的关系为

$$n_{\max} = \frac{u_{\max} \sum i}{0.377r} \quad (3.7)$$

式中 n_{\max} ——电动机的最高转速(r/min);

u_{\max} ——纯电动汽车的最高行驶速度(km/h);

$\sum i$ ——传动系统传动比,一般包括变速器传动比和主减速器传动比;

r ——车轮半径(m)。

电动机额定转速 n_e 为

$$n_e = \frac{n_{\max}}{\beta} \quad (3.8)$$

式中 β ——电动机扩大恒功率区系数。

β 值越大,转速越低,转矩越大,有利于提高车辆的加速和爬坡性能,稳定运行性能越好,但同时功率转换器尺寸也会增大,因此 β 值不宜过高。通常 β 取值为 2~4。

3. 电动机最大转矩和额定转矩

电动机最大转矩的选择需要满足汽车起动转矩和爬坡角的要求,同时结合传动系统最大传动比来确定。

$$T_{\max} \geq \frac{mg(f\cos\alpha_{\max} + \sin\alpha_{\max})r}{\eta_i i_{\max}} \quad (3.9)$$

式中 i_{\max} ——传动系统最大传动比。

额定转矩可由式(3.10)计算:

$$T_e \geq \frac{60 \times 1000 P_e}{2\pi n_e} \quad (3.10)$$

4. 电动机额定电压

额定电压是电动机的重要性能参数,它的选择由电动机的参数决定。电动机额定电压与额定功率成正比,额定功率越大,额定电压也就越大。此外,电动机额定电压选择与纯电动汽车电池组的电压有密切关系。因此,要选择合适的电池组的电压和电流以满足整车能源需要。通常情况下,微型电动汽车选择电动机额定电压的范围为 48~288V,普通电动汽车电动机额定电压一般为 300V,电动大客车的额定电压选择范围为 400~600V。

3.3.2 传动系统传动比

在电动机输出特性一定时,传动系统传动比的选择依赖于整车的动力性能指标要求,即传动比的选择应满足汽车最高期望车速、最大爬坡度以及对加速时间的要求。

1. 传动比的上限

传动系统传动比的上限由电动机最高转速和最高行驶速度确定。

$$\sum_{\min} i \leq \frac{0.377n_{\max}r}{u_{\max}} \quad (3.11)$$

2. 传动比的下限

传动系统传动比下限由下述两种方法确定。

由电动机最高转速对应的输出转矩和最高行驶车速对应的行驶阻力确定传动比下限为

$$\sum_{\max} i \leq \frac{r}{\eta_t T_{\max}} \left(mgf + \frac{C_d A u_{\max}^2}{21.15} \right) \quad (3.12)$$

式中 T_{\max} ——电动机最高转速对应的输出转矩(N·m)。

由电动机的最大输出转矩和最大爬坡度对应的行驶阻力确定传动比下限为

$$\sum_{\max} i \leq \frac{r}{\eta_t T_{\max}} \left(mgf \cos \alpha_{\max} + mg \sin \alpha_{\max} + \frac{C_d A u_{\max}^2}{21.15} \right) \quad (3.13)$$

式中 T_{\max} ——电动机最大输出转矩(N·m)。

3.3.3 电池组参数匹配

1. 电池组类型选择

目前可用于电动汽车的动力电池有铅酸电池、镍氢电池、锂离子电池和燃料电池。相比于其他蓄电池,锂离子电池拥有更高的比能量和更长的循环寿命。除此之外,它非常轻而且带正电,无毒且广泛使用。这一基本优势使得锂离子电池具有更高的储能潜力。

2. 电池组数目的确定

电池组数目必须满足电动汽车行驶时所需的最大功率和续驶里程的要求。

满足电动汽车行驶时所需的最大功率要求的电池组数目为

$$n_p = \frac{P_{\max}}{P_{\text{bmax}} \eta_e \eta_{ec} N} \quad (3.14)$$

式中 P_{\max} ——电动机的峰值功率(kW);

η_e ——电动机的工作效率;

η_{ec} ——电动机控制器的工作效率;

P_{bmax} ——电池最大输出功率(kW);

N ——单电池组所包含的电池的数目。

满足电动汽车续驶里程要求的电池组数目为

$$n_x = \frac{1000SW}{C_s V_s N} \quad (3.15)$$

式中 S ——续驶里程(km);

W ——电动汽车行驶 1km 所消耗的能量(kW);

C_s ——单节电池的容量(A·h)；

V_s ——单节电池的电压(V)。

3. 电池容量

电池组能量为

$$E_B = \frac{U_m C_E}{1000} \quad (3.16)$$

式中 E_B 为电池组能量(kW·h)；

U_m ——电池组电压(V)；

C_E ——电池组容量(A·h)。

蓄电池能量应满足以下条件：

$$E_B \geq \frac{mgf + C_d Au_a^2 / 21.15}{3600 \times \text{DOD} \eta_t \eta_{mc} \eta_{dis} (1 - \eta_a)} \times S \quad (3.17)$$

式中 η_{mc} ——电动机效率；

η_{dis} ——蓄电池放电效率；

η_a ——汽车附件能量消耗比例系数；

DOD——蓄电池放电深度。

或蓄电池容量 C_E 应满足以下条件：

$$C_E \geq \frac{mgf + C_d Au_a^2 / 21.15}{3600 \times \text{DOD} \eta_t \eta_{mc} \eta_{dis} (1 - \eta_a) U_m} \times S \quad (3.18)$$

3.3.4 续驶里程

1. 等速行驶续驶里程的计算

等速行驶的续驶里程指汽车在良好的路面上一次充电后等速行驶直至消耗掉携带的全部电能为止所行驶的里程。它是电动汽车的经济性能指标之一。

汽车以速度 u_a 等速行驶时所需的电动机功率 P 为

$$P = \frac{u_a}{3600 \eta_t} \left(mgf + \frac{C_d Au_a^2}{21.15} \right) \quad (3.19)$$

电池携带的额定总能量 W_0 为

$$W_0 = Q_m U_e = G_e q \quad (3.20)$$

式中 Q_m ——电池的额定容量(A·h)；

U_e ——电池的端电压(V)；

G_e ——电动汽车携带的电池总质量(kg)；

q ——电池比能量(W·h/kg)。

等速行驶续驶里程为

$$S = \frac{W_0 u_a}{P} \eta_e \quad (3.21)$$

式中 η_e ——电池放电效率。

2. 多工况行驶续驶里程的计算

多工况续驶里程为

$$S = \sum_{i=1}^k S_i \quad (3.22)$$

式中 S_i ——每个状态行驶距离(km)；

k ——车辆能够完成的状态总数。

3.4 设计实例和仿真分析

已知纯电动汽车整车质量为 1350kg,滚动阻力系数为 0.0144,迎风面积为 1.9m²,迎风阻力系数为 0.3,轮胎滚动半径为 0.28m,最高车速为 100km/h,最大爬坡度为 20%,续驶里程为 150km。根据式(3-1)~式(3-20),可以对纯电动汽车动力传动系统参数进行匹配。计算结果如下:

(1) 电动机参数。电动机类型选取交流感应电动机,额定功率 $P_e = 30\text{kW}$; 峰值功率 $P_{e\max} = 72\text{kW}$; 过载系数 $\lambda = 2.4$; 最高转速 $n_{\max} = 9000\text{r/min}$ 。

(2) 传动系统传动比。主减速传动比为 4.3245。

采用 3 挡变速器,1 挡传动比为 2.0898,2 挡传动比为 1.4456,3 挡传动比为 1。

(3) 蓄电池参数。电池类型选择镍氢电池,其容量为 250A·h,比能量为 80W·h/kg,比功率为 230W/kg,电池组数目为 22。

纯电动汽车传动系统主要参数都是从汽车行驶时所消耗的能量出发推导计算得到的,理论上,它的动力性和续驶里程能够满足设计要求。

电动汽车的设计是否满足要求,需要对电动汽车的性能进行仿真分析。

基于 ADVISOR 建立电动汽车主要部件及整车仿真模型,其组成示意图如图 3.1 所示。

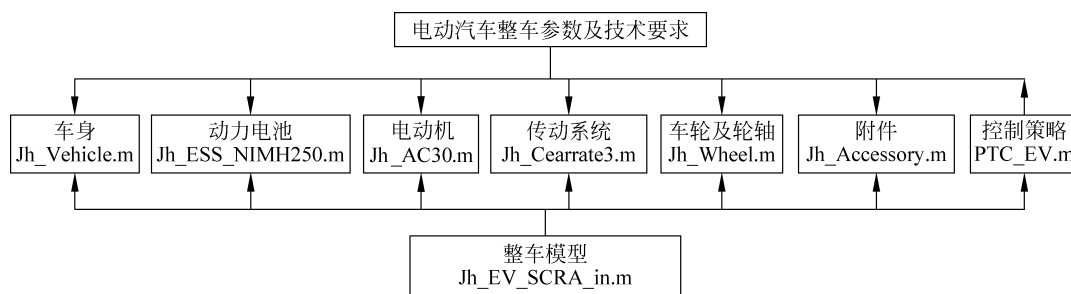


图 3.1 整车仿真模型组成示意图

1. 电动机仿真模型

电动汽车用的交流电动机/控制器仿真模型总成如图 3.2 所示,包括转动惯量影响子模块、转速评价器、转矩限制子模块及温度子模块等。电动机/控制器仿真模型能够把需求的转速、转矩转化为电能需求并把电能转化成转矩和转速输出。

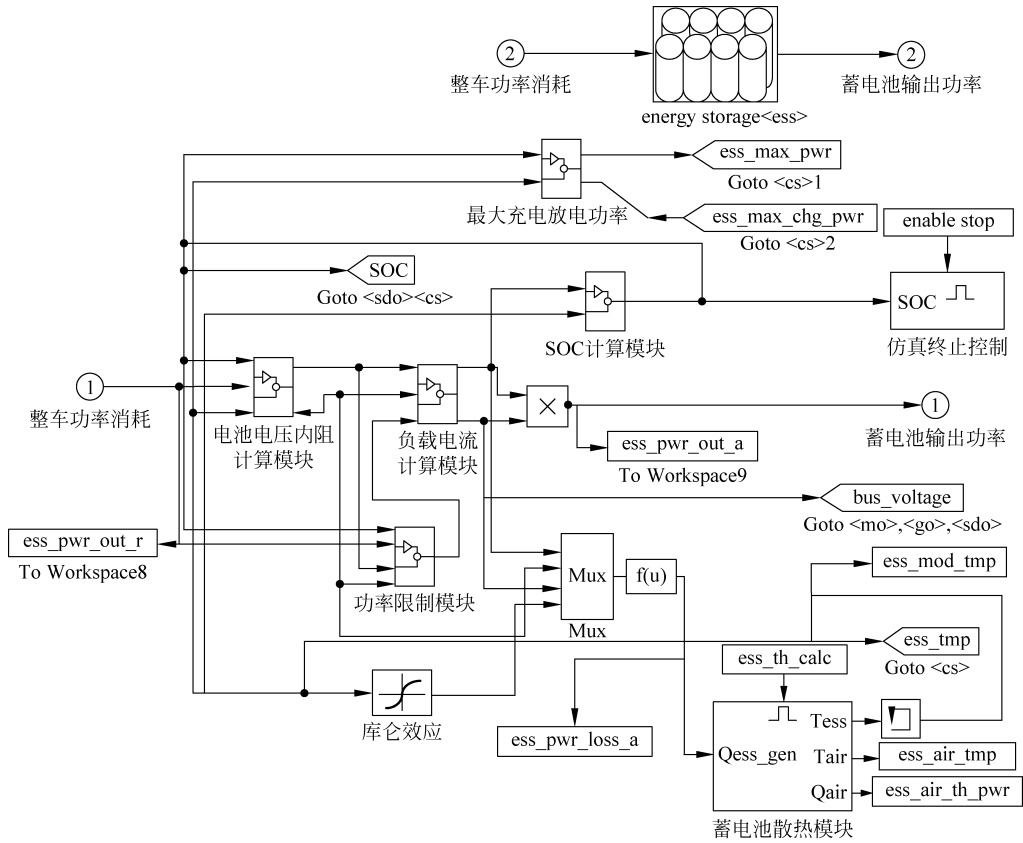


图 3.3 蓄电池仿真模型总成

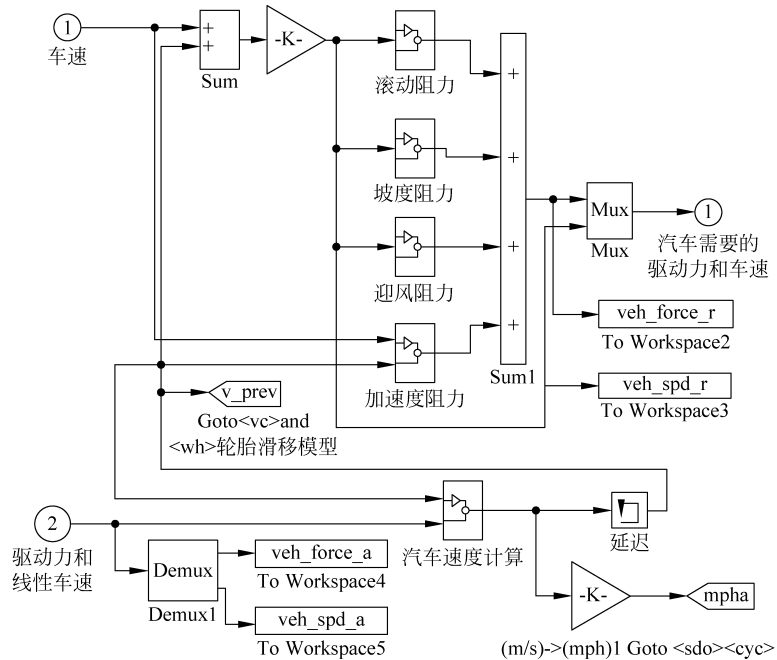


图 3.4 车身仿真模型