

增程式电动汽车驱动电机选型研究

王立维¹ 孙家振¹ 张振生¹ 王二朋¹ 王建¹ 王瑞平^{1,2,3}

1. 宁波吉利罗佑发动机零部件有限公司 2. 浙江吉利动力总成有限公司 3. 宁波上中下自动变速器有限公司

摘要：增程式电动汽车具有构型简单、燃油消耗量低以及极限续航里程远等优点，被广大用户青睐，同时各大汽车主机厂也将增程式电动汽车的开发视为主流研究方向之一。本文以增程式电动汽车的变速器驱动电机选型为研究对象，通过 MATLAB 软件仿真分析，初步确定了满足整车最高车速，爬坡以及加速要求的增程电机参数，并简单举例说明了增程式电动汽车串联工况下基于 CS（Charging Sustain）规则的能量管理控制策略。

关键词：增程汽车；动力性；驱动电机；控制策略

0 引言

整车属性目标中，动力性指标尤为重要，它主要包括最高车速、加速能力和最大爬坡度。增程式电动汽车驱动电机的选型对于动力性指标的达成起到关键作用，其中驱动电机的最高工作转速选取和整车满电最高车速强相关，驱动电机的扭矩功率选取和整车加速能力、爬坡能力相关。增程式电动汽车的动力源主要来自于驱动电机，发动机不参与直接驱动，主要作为充电宝给电池充电。高速驱动电机配合主减速器固定齿轮速比传动实现整车加减速和倒档。

通过公式计算对众多细分动力性指标做属性分解并得出电机参数比较繁琐复杂，通过运用 MATLAB 一维仿真对驱动电机的主要参数做初步选取，如电机最高工作转速、额定转速、峰值功率、额定功率、峰值扭矩和额定扭矩等更为快捷。以下内容对变速器驱动电机承接整车动力性能指标参数匹配步骤进行示例说明，并简单介绍了增程式电动汽车电量维持阶段的能量管理策略。

1 动力性需求及仿真计算边界确定

首先，增程式电动汽车的主要动力源来自于驱动电机，因此要求驱动电机具有调速性能好、控制稳定、结构简单和扭矩平稳等特点。永磁同步电机符合以上要求，受到大多数汽车公司的青睐。增程式电动汽车驱动电机选型永磁同步电机开发，需要确定的主要参数包括电机最高工作转速、峰值功率、峰值扭矩、额

定转速、额定扭矩以及额定功率。表 1 列出了仿真计算所需整车基本参数。整车动力性设计目标如表 2。

表 1 整车基本参数

整车整备质量	1620 kg	轮胎滚动半径 r	0.335 m
最大总质量	2188 kg	混动架构	P1+P3 增程
滚动阻力系数	0.0062	旋转质量换算系数	1.2
空气阻力系数	0.3	系统效率	89%
迎风面积	2.73	主减速器传动比 i_0	13

表 2 整车动力性目标

最高车速	0 ~ 100 km/h 加速时间	最大爬坡度	亏电最高车速
168 km/h	12.5 s	30%	150 km/h

2 变速器驱动电机基本参数选型步骤

电动汽车满电最高车速和电机最高工作转速之间的关系，公式如下：

$$N_{\max} = \frac{U_{\max} \cdot i}{0.377r} \quad (1)$$

式中， $N_{\max}$ 为电机最高工作转速，单位是 r/min； $U_{\max}$ 为电动汽车满电最高车速，单位是 km/h； i 为传动比； r 为轮胎半径，单位是 m。

代入最高车速 $U_{\max} = 168$ km/h，主减速比选择 $i = 13$ ，轮胎半径 $r = 0.335$ m；计算得出驱动电机最高转速 17279 r/min。基于软件控制及诊断需求考虑，选择电机最高转速适当增加，初步按 18000 r/min 选取。

电机的最高转速与额定转速之比称为扩大恒功率区系数，一般用 β 来表示，公式如下：

$$\beta = \frac{N_{\max}}{N_e} \quad (2)$$

式中， β 为电机扩大恒功率区系数； N_e 为电机额定转速，

单位是 r/min。

按 $\beta = 2.5$ 选取电机扩大恒功率区系数, 计算电机额定转速为 7200 r/min, 因此电机最高工作转速和额定转速初选定义为 18000 r/min 和 7200 r/min

基于 MATLAB 软件编写程序仿真的电机功率的选取, 整车的动力性指标分解的转速扭矩要求主要由驱动电机进行承接, 驱动电机功率越大, 整车加速和爬坡能力越强。一般基于整车需求的最高车速确定电机额定功率。基于整车最高满电车速, 加速时间以及爬坡性能各自对应的最大功率求出最大值作为驱动电机的峰值功率。仿真图形如图 1 ~ 3。

基于仿真一维图形确定同时满足最高车速所需电机功率 $P_{m1}=73.92$ kW, 满足最大爬坡度所需电机功率 $P_{m2}=58.72$ kW, 满足加速时间所需电机功率 $P_{m3}=152.93$ kW。

设计考虑驱动电机额定功率按最高车速决定, 同时考虑过载系数按 1.2, 故额定功率选择 $P_e=90$ kW; 峰值功率取 $P_{max}=148.75$ kW。

电机扭矩的确定基于公式:

$$T_e = \frac{9550 \cdot P_e}{N_e} \quad (3)$$

$$T_{emax} = \frac{9550 \cdot P_{max}}{N_e} \quad (4)$$

式中, T_e ——电机额定扭矩, 单位是 $N \cdot m$; P_e ——电

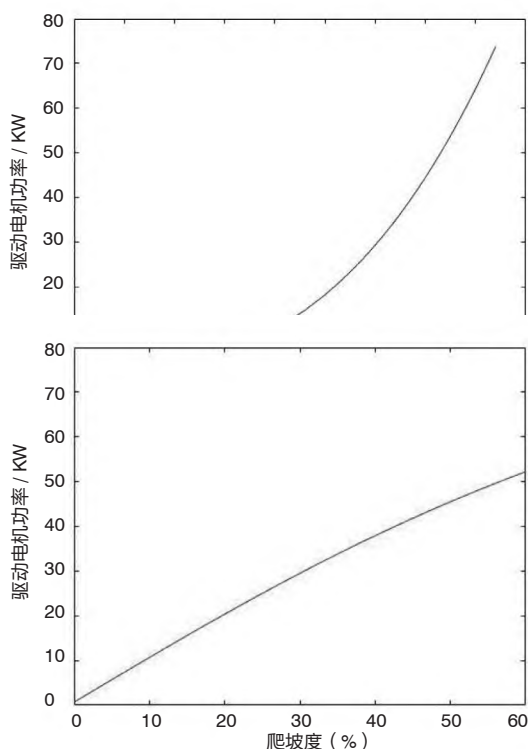


图2 爬坡度和驱动电机功率对应关系

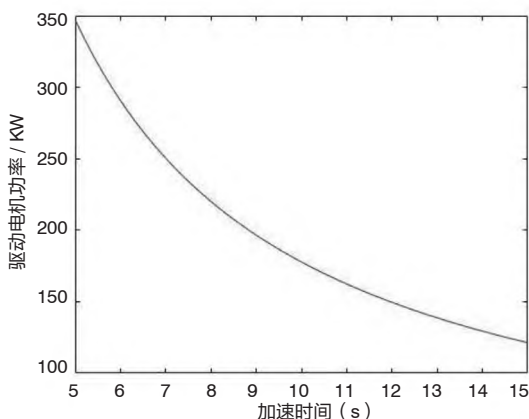


图3 加速时间和驱动电机功率对应关系

机额定功率, 单位是 kW; N_e ——电机额定转速, 单位是 r/min; T_{emax} 为电机峰值扭矩, 单位是 $N \cdot m$; P_{max} 为电机峰值功率, 单位是 kW。

计算电机额定扭矩 $T_e=120 N \cdot m$, 峰值扭矩 $T_{emax}=197 N \cdot m$ 。

数据的校核, 使用一定车速下最大爬坡度和汽车行驶满电最高车速要求, 对计算确定的电机参数进行校验, 公式如下:

$$\frac{mg}{T_{emax} \cdot a_t} * (f \cos \alpha_{max} + \sin \alpha_{max} + \frac{C_d \cdot A \cdot u^2}{21.15mg}) < \frac{i_0}{r} < \frac{0.377 N_{max}}{u_{max}} \quad (5)$$

式中, m 为整车满载质量, 单位是 kg; g 为重力加速度, 单位是 m/s^2 ; T_{emax} 为电机峰值扭矩, 单位是 $N \cdot m$; a_t 为系统效率; f 为滚动阻力系数; α_{max} 为最大爬坡度, 单位是 %; C_d 为空气阻力系数; A 为迎风面积, 单位是 m^2 ; u 为汽车爬坡速度, 单位是 km/h; i_0 为主减传动速比; r 为轮胎半径, 单位是 m; N_{max} 为电机最高工作转速, 单位是 r/min; u_{max} 为最高车速, 单位是 r/min。

通过计算确认: $11.96 < i_0 < 13.5$, 满足要求。

综上, 电机参数初步选型匹配参数汇总如表 3。

表3 初选电机参数

参数名称	参数值
额定功率	90 kW
峰值功率	150 kW
额定扭矩	120 $N \cdot m$
峰值扭矩	197 $N \cdot m$
额定转速	7200 r/min
最高转速	18000 r/min

3 增程器(发动机和发电机)参数匹配

在亏电模式下, 发动机作为动力源, 需要保证整

车亏电动力性，需要对发动机和发电机的参数进行匹配。

发动机输出功率满足条件公式如下：

$$P_{re} = \frac{1}{3600 \cdot a_t} (mgf \cdot \mu_{max} + \frac{C_d \cdot A \cdot u_{max}^3}{21.5}) \quad (6)$$
 式中， P_{re} 为发动机最大功率，单位是 kW； a_t 为系统效率； m 为满载质量，单位是 kg； f 为滚动阻力系数； μ_{max} 为馈电最高车速，单位是 km/h； C_d 为空气阻力系数； A 为迎风面积，单位是 m^2 。

基于 MATLAB 仿真获得满足最高亏电车速下发动机的最大功率： $P_{re}=53.81$ kW。

需要考虑空调、娱乐及灯光等负载，发动机功率按 1.3 倍系数选取，取 70 kW。发电机功率 P_{ge} 按发动机满足最高亏电车速下发动机的最大功率进行匹配取整 $P_{ge}=55$ kW，如图 4 所示。

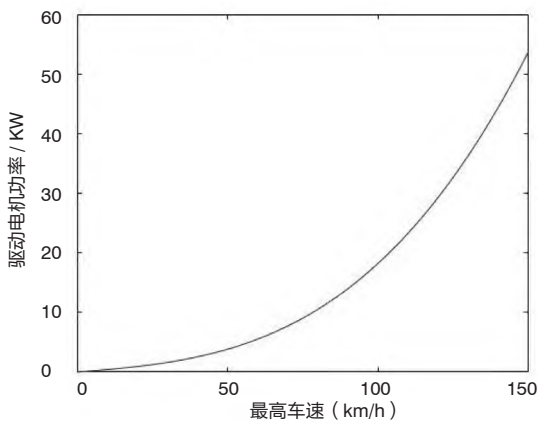


图 4 最高车速和发动机功率对应关系

4 增程式电动汽车变速器主要工作模式及串联控制策略

表 4 所示为增程汽车变速器主要工作模式。
 基于双电机电控增程变速器工作模式，即发动机与 P1 直连，发动机作为充电宝，只发电不参与驱动；只有 P3 与驱动车轮连接，作为主驱；动力源为发动机

表 4 增程式电动汽车变速器驱动模式汇总

工作模式	功能实现
纯电驱动	1. P3 驱动整车起步； 2. P3 提供倒车动力； 3. 仅使用 P3 电机输出动力给整车，能量源为电池。
串联驱动	1. 仅使用 P3 电机输出动力给整车，发动机带动 P1 发电供 P3 使用及维持电池 SOC； 2. 该模式下可提供倒车动力
能量回收	车辆滑行时，P3 作为发电机，辅助制动的同时将回收的能量转化为电能存入电池
怠速充电	发动机的动力仅输出给 P1，转化为电能存入电池

和整车电池；其串联模式下能量管理控制策略围绕 CS（Charging Sustain）规则展开设计，基于电池 SOC 和车速以及 NVH 表现确定。控制策略流程，如图 5 所示。

因为电池过度放电会对电池的寿命产生不可逆的影响，首先会设置一个电池电量维持基准 SOC1 和电池电量极限基准 SOC2，当 SOC 降低到 SOC1 ~ SOC2 之间，能量管理进入电量保持 CS 阶段，此时会根据加速踏板、制动踏板信号和车速信号查表计算串联额外充电功率，同时累加整车用电负载和 P3 电机轮端功率需求，计算出需求发动机功率，如果计算结果为发动机最优工作曲线发出功率大于整车需求最低功率要求，发动机按最优工作曲线工作，多余能量支持电池行车充电。当计算结果出现发动机最优工作曲线发出功率小于整车需求最低功率，一方面会通过电池放电功率补充，另一方面会通过拉升发动机转速提高发动机功率实现整车动力性功率需求。当 SOC 降低到 SOC2 以下，电池不在补充功率，此时基于油门开度和车速，在保证车辆行驶需求功率外和满足 NVH 限值要求下，会维持电池充电直到 SOC 恢复到 SOC1 以上。
 基于以上能量管理策略，需要注意电池放电功率和发动机、发电机功率选型时匹配好 P3 驱动电机的功率，保证在馈电情况下仍可以发挥 P3 驱动电机的性能。

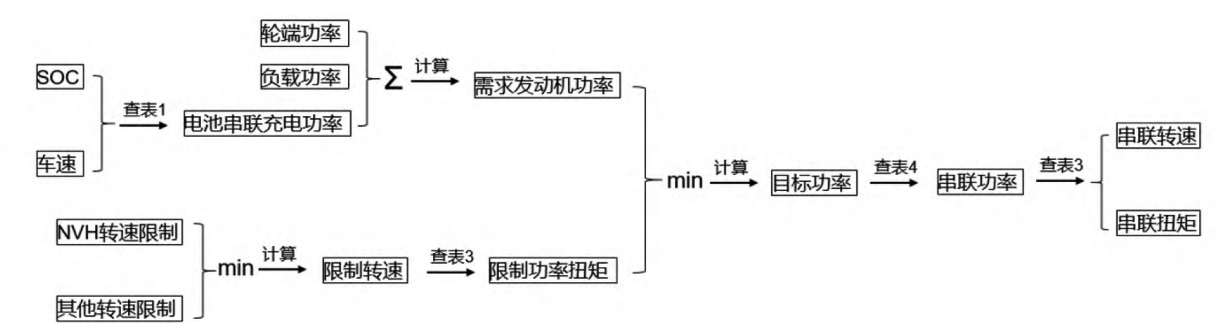


图 5 控制策略逻辑示意

5 结语

综上，增程式变速器电机选型所需基本参数初步确认完成，需要基于初版参数同电机厂商交流电机电磁开发方案，输出电机详细参数特性，同时收集确认用于 Cruise 和 Simulink 仿真的其他系统相关零部件具体参数，共同搭建动力总成系统零部件数学模型和整车动力学模型验证零部件设计，寻优整车控制策略，指导整车能量管理标定。同步需要考虑最高持续车速、亏电最高持续车速以及高速爬坡等工况下整车热管理的散热性能边界是否达标。

总之，增程式变速器的开发，不仅要通过一系列整车动力性边界计算确定电机参数，还需要考虑满足电机硬件设计边界下的控制策略、能量管理策略以及热管理边界，通过多轮仿真寻求最优解，最终确认增

程式电动汽车驱动电机的选型。

参考文献

- [1] . 基于 MATLAB 的新能源汽车仿真实例. 北京: 化学工业出版社, 2020.4
- [2] 赵航, 史广奎. 混合动力电动汽车技术. 北京: 机械工业出版社, 2012.5
- [3] 宋柯, 章桐. 增程式纯电驱动汽车动力系统研究 [J]. 汽车技术, 2011 (7): 14-19.
- [4] 焦磊. 增程式电动汽车动力总成参数匹配及控制策略研究 [D]. 西安: 长安大学, 2013.
- [5] Li Z H, Khajepour A, Song J H. A comprehensive review of the key technologies for pure electric vehicles [J]. Energy, 2019, 182: 824-839.

(上接第 19 页)

3 结语

随机森林模型通过组合多个决策树的预测结果，可以得到较高的准确性。由于每个决策树都是基于不同的随机样本和随机特征子集构建的，随机森林可以减少过拟合风险，提高模型的泛化能力。由于其随机性，模型对样本数据的处理要求低，可不进行特征归一化和缺失值处理。每个决策树的特征维度不同，可以根据决策树的结果分析得到样本的各个特征维度对决策结果的贡献度，这样有助于进行对特征维度的选择。

随机森林模型是由多个决策树构成的，训练时间长且占用资源多，这就导致随机森林模型受资源影响较大。资源越充足，训练样本数量 N 和决策树个数 k 就可以越大，模型预测结果就更加准确。在随机森林模型的基础上，还可以采用树提升算法，如 Adaboost、

GBDT 和 xgboost 等，通过分析集成的随机森林模型对训练样本的判错情况，优化随机森林模型。

参考文献

- [1] 方匡南, 吴见彬, 朱建平, 等. 随机森林方法研究综述 [J]. 统计与信息论坛, 2011, 26(3): 7. DOI: 10.3969/j.issn.1007-3116.2011.03.006.
- [2] 叶玲, 张永军. 一种基于随机森林回归预测算法的路灯智能节能方法: CN201610922265.6 [P]. CN107979900A [2023-07-21].
- [3] 袁博, 刘石, 姜连勋, 等. 基于随机森林回归算法的住房租金预测模型 [J]. 电脑编程技巧与维护, 2020(1): 3. DOI: CNKI: SUN: DNBC.0.2020-01-009.
- [4] 王仁超, 朱品光. 基于随机森林回归方法的爆破块度预测模型研究 [J]. 水力发电学报, 2020(1): 13. DOI: 10.11660/slfdx.20200110.