

三挡纯电动客车基本换挡规律制定方法研究*

钟迪 金碧辉 何细鹏

(武汉交通职业学院,湖北 武汉 430065)

摘要:汽车的换挡规律是自动变速箱的挡位随工况变化的规律。基本换挡规律是自动变速器换挡规律的研究基础。文章以配备在三挡纯电动客车上的机械自动式变速器(AMT)为研究对象,提出了一种以双参数法计算纯电动客车基本换挡规律的方法,以电机效率最高为目标,求解了最佳经济性换挡规律;以换挡前后汽车加速度最大为目标,求解了最佳动力性换挡规律,具有较强的实际指导意义。

关键词:纯电动客车;最佳动力性换挡规律;最佳经济性换挡规律

中图分类号: U469.72

DOI: 10.3969/j.issn.1672-9846.2019.04.020

文章编号: 1672-9846(2019)04-0107-05

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



当前新能源汽车发展十分迅猛,其中又以纯电动汽车发展势头最好,国家对纯电动汽车的投入也最多。但是目前纯电动汽车存在的最大问题是续航里程相对燃油车较低,不能很好地满足消费者的使用需求。究其原因,除了电池容量这一主要原因外,还因为电动车大多使用单级减速装置,虽然电机具有低速高扭的天然优势,但是单级减速装置使电机长期工作在低效率区,对能源的利用效率不高,也导致了续航里程不足。因此,为电动车配备多挡变速器也具有重大的实际意义。多挡变速器的使用可以提高电动车的动力性和经济性,而对于多挡变速器来说,挡位的合理选用对汽车性能的影响尤为重要。因此,换挡规律的研究是自动变速器控制系统研究的核心,而基本换挡规律(即最佳动力性换挡规律和最佳经济性换挡规律)又是换挡规律研究的基础,任何复杂的综合换挡规律都是在基本换挡规律的基础上通过优化修正而来。目前,针对传统汽车的基本换挡规律研究较多,这也是各主机厂的核心技术,基本掌握在国外企业手中^[1]。而针对纯电动汽车来说,基本换挡规律的研究还较少,而且多为单参数(车

速)法。本文详细介绍了一种双参数(车速与节气门开度)法计算纯电动客车基本换挡规律的方法,具有很强的实际指导意义。

1 最佳经济性换挡规律

基本换挡规律包括最佳动力性换挡规律和最佳经济性换挡规律^[2]。相对于动力性来说,人们对纯电动客车的经济性要求会更高,也就是对续航里程的要求会比较苛刻。因此,如何正确的设定挡位以保证纯电动客车的续航里程尽量延长不仅具有显著的现实经济效益,也是制定最佳经济性换挡规律的目标。其具体的制定方法为在纯电动客车行驶的过程中,通过合理的挡位设置,使纯电动客车处于最佳效率区间,以提高电池使用效率,增加续航里程。换挡规律一般包含升挡和降挡两个方面,所以在制定最佳经济性换挡规律时要分别研究升挡规律和降挡规律。

1.1 纯电动客车经济性评价指标

与传统汽车不同,不能以百公里油耗来评价纯电动客车的经济性,通常纯电动客车的经济性评价方式有两种,一种是单位能耗行驶的公里数,另一种是在一定的工况条件下的续航里程^[3]。通

* 收稿日期:2019-11-05

作者简介:钟迪(1990-),男,湖北武汉人,武汉交通职业学院汽车学院助教,主要从事汽车检测与维修技术研究。
金碧辉(1984-),女,湖北武汉人,武汉交通职业学院汽车学院讲师,主要从事汽车检测与维修技术研究。
何细鹏(1978-),男,湖北黄冈人,武汉交通职业学院汽车学院副教授,主要从事汽车检及维修技术研究。

常我们选用第二种方法来衡量纯电动客车的经济性,其与纯电动客车的能量利用效率直接相关。因此,本文通过分析影响纯电动客车续航里程的因素,最终得出其经济性评价指标,并以此为优化参数,计算得出最佳经济性换挡规律。

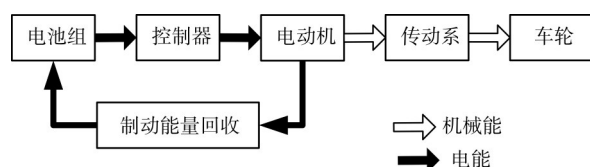


图1 纯电动客车能量传递图

能量传递图如图1所示。通过能量传递图可以看出,纯电动客车能量来源于电池组,电池组的能量提供给电机做功,电机能量通过传动系传递给车轮,带动车辆正常行驶,因此整个车辆的能量利用效率 η_E 等于电池组效率 η_b 、电机效率 η_m 、传动系效率 η_T 和驱动力利用效率 η_w 相乘,即:

$$\eta_E = \eta_b \eta_m \eta_T \eta_w \quad (1)$$

在纯电动客车参数已经确定的前提下,其电池组效率及驱动力利用效率基本不会发生变化,其只跟电池类型和传动系统类型有关,因此在考虑经济性换挡规律时可以认为 η_b 和 η_T 为定值。

驱动力利用效率计算方法为:

$$\eta_w = \frac{E_e}{E_d} = \frac{\int_T G_e f_r V(t) dt \eta_e \eta_b}{E_d} = \frac{f_r G_e}{E_d} \frac{\int_T \phi G_t V(t) dt}{\int_T [G_t \phi + \frac{k C_D - A V(t)^2}{21.15} + \frac{\delta G_t}{g} \frac{dV(t)}{dt}] V(t) dt} \quad (2)$$

G_t 为纯电动客车总重力; ϕ 为道路阻力系数; k 为非匀速工况下空气阻力系数修正值, $k=1+(\Delta v/v_a)^2$; g 为重力加速度^[4]。由计算式可知, η_w 主要与道路条件有关,而计算最佳经济性换挡规律时道路条件是一定的,一般我们选用NEDC循环工况,所以在计算换挡点的工程中我们可以忽略 η_w 的影响。

由电机外特性曲线(图2)及电机效率图(图3)可知,电机效率与负荷相关,负荷不同时电机效率在40%到90%之间变化,且电机效率满足规律:电机在基速附件效率最高,在高负荷和低速时效率较低。因此,为了得到最佳经济性要求,电机尽量工作在基速附近,这也就是最佳经济性换挡规

律的优化目标。

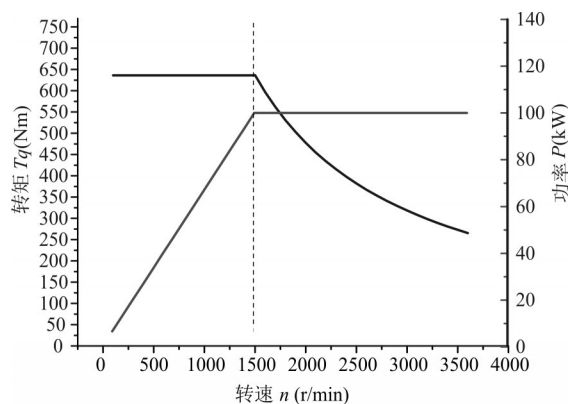


图2 电机外特性曲线

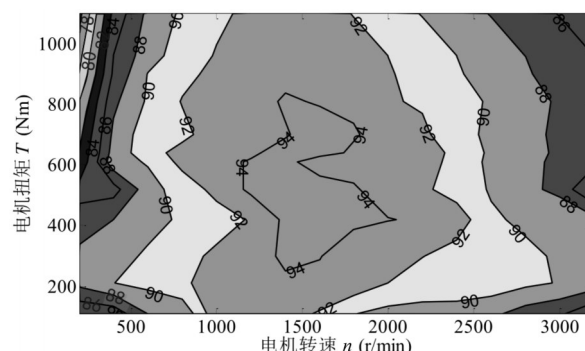


图3 电机效率图

1.2 挡位对纯电动客车经济性的影响

由上述分析可知,电机效率与电机负荷相关,为了使纯电动客车经济性最佳,必须保证电机工作在基速附近。为了研究最佳经济性换挡规律,必须先明确变速器挡位对经济性的影响,即挡位对电机效率的影响。

下面以一挡和二挡的电机效率为例进行分析,一挡的电机效率为:

$$\eta_{g1} = \eta(T_{g1}, n_{g1}) \quad (3)$$

二挡的电机效率为:

$$\eta_{g2} = \eta(T_{g2}, n_{g2}) \quad (4)$$

n_{g1} 、 T_{g1} 为一挡时电机的转速及转矩,
 n_{g2} 、 T_{g2} 为二挡时电机的转速及转矩。

在一挡换二挡的瞬间,由于换挡时间很短,所以认为换挡前后一挡和二挡的转矩及车速不变,即:

$$\begin{cases} T_{g1} = T_{g2} \\ V_{g1} = V_{g2} \end{cases} \quad (5)$$

一挡与二挡的转速之比等于变速器一、二挡速比:

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{i_{g1}}{i_{g2}} \tag{6}$$

由(3) (4) (5) (5)可得:

$$\eta_{g2} = \eta(T_{g2}, n_{g2}) = \eta(T_{g1}, \frac{i_{g1}}{i_{g2}} n_{g1}) \tag{7}$$

式(7)说明,挡位变化会导致电机的效率发生变化,从而影响到纯电动客车的整车经济性,因此为了保证纯电动客车的经济性最佳,必须设定合理的换挡点,即最佳经济性换挡规律。

1.3 最佳经济性升挡规律的制定

为了保证纯电动车的续航里程最长,要求电机尽量运行在高效率区,以此为目标的最佳经济性换挡规律的制定步骤如下。

(1)进行电机台架试验,得到各节气门开度下不同挡位驱动电机效率曲线图。

(2)在某一节气门开度下取各挡位电机效率曲线的交点即为该节气门开度下最佳经济性换挡

点,例如,40%节气门开度下1挡和2挡的电机效率曲线如图4所示。

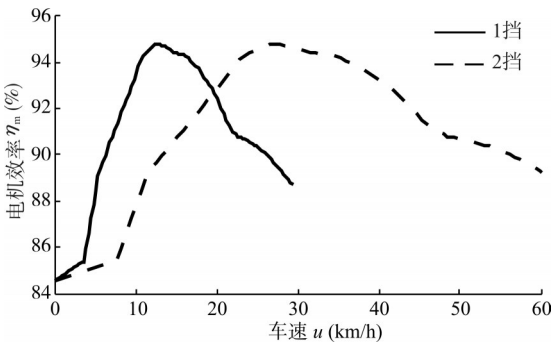


图4 40%节气门开度的电机效率曲线

(3)把所有节气门开度下的换挡点进行拟合,得到最佳经济性换挡点。

由上述步骤,最终求得如表1所示的最佳经济性升挡点。

表1 最佳经济性升挡车速(km/h)

加速踏板开度	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
1挡升2挡	16.52	18.05	21.62	19.39	18.22	17.9	19.16	20.07	20.7	21.37
2挡升3挡	32.73	37	44.35	38.43	37.45	36.95	37.58	41.67	42.76	43.76

1.4 最佳经济性降挡规律的制定

从理论上来说,为了保证经济性最佳,升挡点和降挡点应该保持一致,但是在实际的使用过程中,若保持升挡点和降挡点一致的话,当车速在换挡点附近波动时会产生循环换挡或者非正常换挡现象,所以在实际使用过程中必须设置一定的换挡速差,以保证车辆的正常行驶及舒适性。降挡速差根据经验一般取2-6 km/h,同时也要综合考虑下述因素以保证车辆的正常使用。

(1)换挡后由于转速和转矩的变化引起的换挡冲击不能过大。

(2)节气门开度一致时,降挡速度差随挡位增高而增加。

(3)由于降挡后速比变大,转速增加,因此要保证降挡后电机不超速。

在满足上述三点基本要求的前提下,根据换挡速差经验值,最终得出如图5所示的最佳经济性换挡曲线。

2 最佳动力性换挡规律

以发挥纯电动汽车电机最大的驱动力,使纯

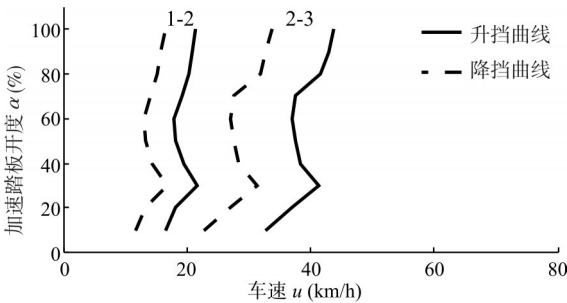


图5 最佳经济性换挡曲线

电动汽车获得最佳的动力性能(最高车速、加速时间及最大爬坡度)的换挡规律即为最佳动力性换挡规律^[5]。其求解思想一般有两种,一种是根据驱动力来求解,即保证纯电动汽车驱动力最大为原则,要求换挡后驱动力不小于换挡前驱动力;第二种求解思想是以汽车的加速度来求解,即保证纯电动汽车的加速度最大为原则,要求换挡后加速度不小于换挡前。加速度的大小可以直接反应汽车的动力性能,因此,本文采用保证加速度最大的思想来求解最佳动力性换挡规律。

2.1 纯电动客车动力性评价指标及挡位对其影响

根据汽车理论知识可知评价纯电动客车动力性能的指标有三个:最高车速、最大爬坡度和加速时间。

最高车速的计算方法为:

$$V_{\max} = \frac{0.377 n_{\max} r}{i_{g, \min} i_0} \quad (8)$$

式中, V_{\max} 为最高车速, n_{\max} 为电机最大转速, $i_{g, \min}$ 为最高挡速比, i_0 为主减速比。从中可以看出最大加速度与变速器的最高挡位有关,与换挡点的选取无关,因此不以最高车速作为最佳动力性换挡规律的计算参数。

最大爬坡度的计算方法为:

$$\frac{(F_t - F_w)}{G} = \psi + \frac{\delta du}{g dt} \quad (9)$$

式中, F_t 是车辆的驱动力, F_w 是车辆的空气阻力, δ 是车辆旋转质量换算系数。求解最大爬坡度时,要求加速度为0,变速器处于一档,因此最大爬坡度只与变速器最低挡位有关,与换挡点的选取无关,因此不以最大爬坡度为最佳动力性换挡规律的计算参数。

加速时间的计算方法为:

$$t = \int_0^t dt = \int_0^{v_1} \frac{1}{a_1} dv + \int_{v_1}^{v_2} \frac{1}{a_2} dv + \dots + \int_{v_n}^{v_{\max}} \frac{1}{a_{\max}} dv \quad (10)$$

由表达式可知,加速时间与各车速下的加速度关系密切,而各车速下的加速度与变速器挡位的选取有关,因此变速器挡位的合理使用直接决定了各车速下加速度的大小,从而决定了加速时间的长短。所以将加速度作为最佳动力性换挡规律的计算参数。

2.2 最佳动力性升挡规律的制定

如上文所述,利用保证加速度最大的思想求解最佳动力性升挡规律,其具体要求为:在某一节气门开度下,以相邻挡位纯电动客车加速度曲线的交点作为升挡点,即 $a_n = a_{n+1}$;若两相邻挡位无交点,则选取低挡位对应的最高车速为换挡点^[6]。而汽车的加速度又与车速和节气门开度相关,即:

$$a = f(u, \alpha) \quad (11)$$

要求解出不同节气门开度下的车速与加速度曲线,必须先得到电机的部分负荷特性,其计算方法为:

$$T_m = \begin{cases} T_N \cdot \alpha & n \leq n_N \\ \frac{9550 P_N}{n} \cdot \alpha & n > n_N \end{cases} \quad (12)$$

式中, P_N 为电机额定功率, n_N 为电机的基速。

根据上式计算出电机的部分负荷特性曲线,如图6所示,即在不同节气门开度下电机的转速与转矩之间的相互关系。

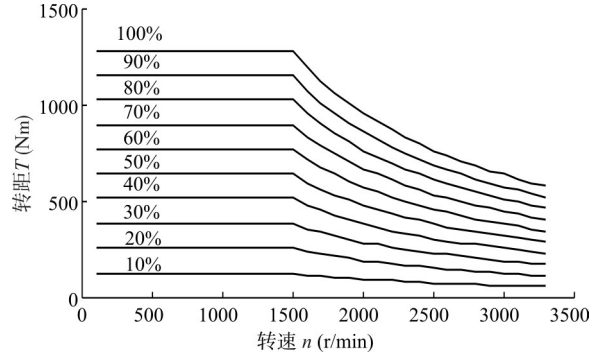


图6 电机部分负荷特性曲线

由汽车行驶时驱动力与阻力的力学关系式,在 n 挡时有:

$$\delta_n m \frac{du_n}{dt} = \frac{T_{qn} i_{gn} i_0 \eta}{r} - (F_f + F_w) \quad (13)$$

δ_n 为旋转质量换算系数,即:

$$\delta_n = 1 + \frac{\sum I_w}{m r^2} + \frac{1}{m} \frac{I_f i_g^2 i_0^2 \eta}{r^2} \quad (14)$$

通过上述方程式算出不同节气门开度下车速与加速度的关系曲线。以30%节气门开度,一档和二挡车速与加速度关系为例,其曲线如图7所示。

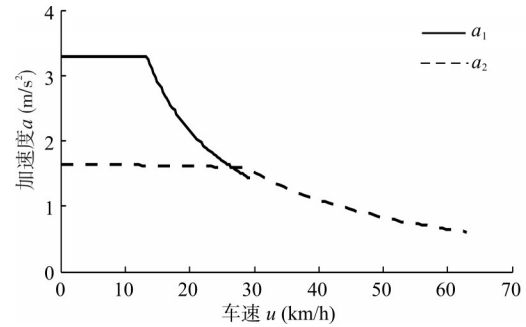


图7 一档和二挡车速-加速度曲线

通过上述计算方法,可以得到不同节气门开度下车速与加速度关系曲线,相邻两挡的曲线交点即为该节气门开度下的最佳动力性升挡点,以此方法可以求出各节气门开度下各挡位的最佳动力性升挡车速,如表2所示。表3为计算过程中涉及到的整车基本参数。

表 2 不同节气门开度下最佳动力性升挡车速(km/h)

加速踏板开度	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
1 挡升 2 挡	26.86	26.65	26.55	26.49	26.45	26.43	26.4	26.4	26.36
2 挡升 3 挡	55.83	53.44	53.32	53.25	53.19	53.15	53.13	53.1	53.1

表 3 纯电动客车整车基本参数

整车参数	参数值	整车参数	参数值
整车质量 m_0	13000(kg)	三挡速比	1
满载质量 m	18000(kg)	电机额定功率 P	100(kW)
整车迎风面积 A	6.5(m ²)	电机额定转速 n	1480(r/min)
空气阻力系数 C_D	0.7	电机额定扭矩 T	636(Nm)
轮胎滚动半径 r	0.465(m)	电机峰值功率 P_{\max}	200(kW)
滚动阻力系数 f	0.018	电机最高转速 n_{\max}	3600(r/min)
主减速比 i_0	4.875	电机峰值扭矩 T_{\max}	12800(Nm)
一挡速比	4.06	电机转子和电机轴转动惯量 I_f	0.9(kg·m ²)
二挡速比	1.89		

2.3 最佳动力性降挡规律的制定

跟经济性换挡规律一样,为保证换挡舒适性及避免循环换挡,在制定最佳动力性降挡规律时要设置一定的换挡速差,最终得到的最佳经济性降挡曲线如图 8 所示。

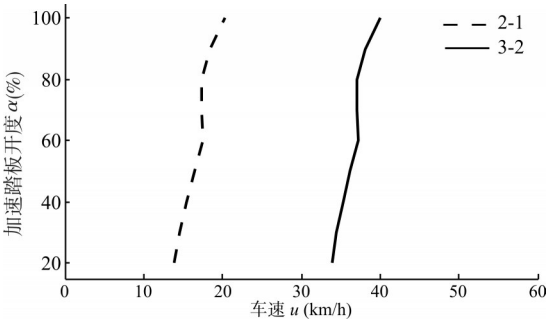


图 8 最佳动力性降挡曲线

3 小结

本文利用双参数(节气门开度和车速)法,以纯电动客车能量利用效率最高为优化目标求解了最佳经济性换挡规律,以纯电动客车加速度最大

为优化目标求解了最佳动力性换挡规律,为纯电动客车多挡变速器基本换挡规律的研究提供了切实可行的计算方法,具有一定的指导意义和参考价值。

参考文献:

[1] 刘洪波. 基于人一车—环境识别的自适应档位决策方法研究[D]. 长春:吉林大学,2012.

[2] 牛炳. AMT换挡规律及其自适应性研究[D]. 上海:上海交通大学,2009.

[3] 肖志曾. 纯电动汽车 AMT 换挡规律研究[D]. 北京:北京理工大学,2006.

[4] 孙少华. 纯电动客车机械式自动变速器换挡综合控制技术[D]. 长春:吉林大学,2014.

[5] 刘拂晓,赵韩,江昊. 纯电动汽车 AMT 换挡规律及仿真研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2013(11):1281-1284,1363

[6] LIU Hongbo , LEI Yulong, LI Zhanjiang, et al. A Multi-Layered and Modular Design Approach for Developing AMT Control System in Battery Electric Vehicles [J]. Sae Technical Papers,2012-01-0963.