

混合动力车制动工况分析与储能装置参数匹配

王伟达, 王言子, 项昌乐, 刘 辉

(北京理工大学 车辆传动国家重点实验室, 100081 北京)

摘 要: 为提高混合动力系统整体性能, 实现高效能量回收, 分析某重型越野车辆驾驶循环工况中制动过程的功率与能量分布, 从制动能量回收率与电机参数出发讨论对储能装置的性能要求. 提出电池组-超级电容复合储能装置的参数匹配方法, 针对 21 t 级试验样车混合动力系统进行实例计算, 论证锂离子电池组与超级电容组成的复合储能装置的性能. 实例计算与道路试验结果表明: 匹配的复合储能装置符合车辆整体性能与制动能量回收的要求, 体积、重量满足总体设计约束; 匹配超级电容后, 储能装置的瞬时功率能力大幅提升, 可显著提高车辆的制动能力和制动能量回收率.

关键词: 机电联合制动; 制动工况分析; 复合储能装置; 参数匹配; 超级电容

中图分类号: U469.72

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2014)09-0074-06

Analysis of brake condition and parameter matching of hybrid energy storage system for hybrid electric vehicles

WANG Weida, WANG Yanzi, XIANG Changle, LIU Hui

(National Key Laboratory of Vehicle Transmission, Beijing Institute of Technology, 100081 Beijing, China)

Abstract: According to the driving cycle of heavy off-road vehicles, the brake power and energy permutation is analyzed, and the performance requirement for the hybrid energy storage system(HESS) is achieved based on the brake energy recovery rate and motor parameters. The parameter matching method for the HESS is proposed and by which the instance calculation for the hybrid propulsion system of 21 tons class vehicles is carried out, and the performance of the HESS with Li-ion cells and ultra capacitors is discussed too. The instance calculation and the test results indicate that the designed HESS can meet the requirement of the total performance of the HEV and the brake energy recovery, the volume and weight answer for the restriction of the top design of the HEV. The designed HESS with ultra capacitors can increase the transient power volume greatly and the brake performance and the brake energy recovery rate are enhanced remarkably.

Keywords: electro-mechanical brake; analysis of brake condition; hybrid energy storage system; parameter matching; ultra capacitors

混合动力车辆中的机电联合制动功能可提高制动能力与响应速度, 而且制动电机发电与储能装置配合可进行制动能量回收, 这对于提高混合动力系统的燃油经济性具有重要意义. 混联式混合动力系统可综合串联式与并联式的优点, 但结构与控制复杂, 功率分配策略需要储能装置的密切配合, 并且进行“削峰填谷”才能实现最优的控

制性能, 所以从功率、能量与体积、重量的角度出发对储能装置合理设计与匹配尤为重要. 由于目前普遍使用的锂离子电池组功率密度相对较低, 所以电池组配合其它储能设备如超级电容、超高速飞轮等组成复合储能装置得到了广泛的研究, 尤其是电池组和超级电容在能量密度和功率密度方面具有互补性, 是一种比较理想的组合^[1-5]. 吉林大学、上海交通大学、清华大学等都对此进行了研究论证^[6-9]. 由于车辆质量大, 制动要求高, 重型混合动力车辆的制动功率非常大, 匹配重型混合动力车辆的机电联合制动系统及储能装置时, 不

收稿日期: 2013-09-12.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51005017); 新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-12-0043).

作者简介: 王伟达(1980—), 男, 博士, 副教授.

通信作者: 王伟达, wangwd0430@163.com.

可能按照最大的制动功率与能量进行相关的参数匹配.为满足车辆的动力与制动需求及总体设计约束,必须依据一定的车辆驾驶循环工况才能达到合理匹配系统参数,发挥系统最优性能的目的.目前,国际上有 UDDS 和 NEDC 等驾驶循环,国内针对北京、上海、武汉、长春等城市路况也总结出了城市驾驶循环工况^[10].重型越野车辆相对来讲比较特殊,多在市郊公路甚至非道路路面行驶,与城市路况有显著的不同,应用于此类车辆的混合动力系统与储能装置匹配应与其行驶工况相适应.

本文依据某重型越野车辆的道路试验数据,利用相关性统计分析方法提取重型越野车辆的驾驶循环工况.根据驾驶循环工况分析其中的制动过程的功率与能量分布,针对机电联合制动与制动能量回收进行储能装置的参数匹配与实例计算,通过实车道路试验对复合储能装置进行试验验证.

1 制动工况分析

由于车辆的行驶工况复杂多变,所以研究制动工况的能量分布规律需要依据具有统计特征的综合驾驶循环工况.制定某种车辆驾驶循环工况的一般做法为:首先,利用各种测试系统针对不同车辆进行道路试验,采集能够反映车辆行驶特征的参数,如车速,发动机转速等;然后,依据道路拥挤程度或流量大小,分类定义不同道路区域如市区、郊区和高速公路,同时定义用于描述车辆运行状况的特征参数,如平均速度,加速度等;最后,利用各种统计理论(或商用软件),从试验数据中提取一定长度的样本数据(测试行驶距离)作为车辆行驶工况.

以 21 t 的某重型越野车辆试验路面行驶里程

试验结果为准,通过数据相关性处理,合成了重型越野车辆驾驶循环工况,如图 1 所示.

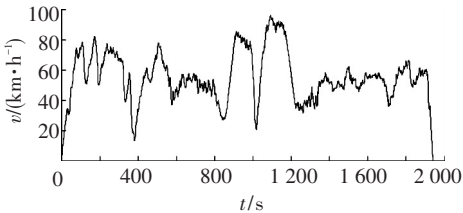


图 1 某重型越野车辆驾驶循环工况

由图 1 可知,由于是重型越野车辆,且多在市郊公路或土路等路面上行驶,与城市车辆的行驶工况特点有较大区别,所以本文针对此循环工况进行制动工况分析与储能装置参数匹配.

混合动力系统中连接在齿圈上的电动机可被控制作为发电机运行,从而将车辆的动能或位能变换为电能,并存储在电能存储装置中,得以再次利用.通常,车辆制动需求的制动转矩比电动机所能产生的转矩大得多,所以在混合驱动车辆中,机械摩擦制动系统与电机再生制动系统同时存在.

分析制动工况中的能量损耗、起始车速、制动功率、制动减速度等是匹配电机和电池组参数,进行机电联合制动力控制的主要依据.

制动期间消耗能量很大.将 21 t 的试验样车从 90 km/h 车速制动到零,在几秒钟内约消耗 6.56 MJ 的动能 ($0.5Mv^2$).重型混合动力车辆匹配的电池组容量较大,达到 100 A·h,额定母线电压为 550 V,相当于 198 MJ 的能量.试验样车一次最大制动能量占电池组最大存储能量的 3.3%,可见回收能量的空间和前景是非常可观的.

重型越野车辆驾驶循环工况的加减速速度、制动车速和制动功率等基本特征数据如表 1 所示.

该驾驶循环工况下的制动功率分布如表 2 所示.功率低于 100 kW 的减速认为是车辆滑行阻力导致的,不作为制动工况.

表 1 轮式车辆驾驶循环工况基本特征参数

最大车速/ (km·h ⁻¹)	平均车速/ (km·h ⁻¹)	最大减速度/ (m·s ⁻²)	平均减速度/ (m·s ⁻²)	最大制动功率/ kW	平均制动功率/ kW	最大制动能量/ MJ	平均制动能量/ MJ
96.0	55.2	3.61	1.14	877.18	461.74	4.78	0.76

表 2 制动功率分布比例统计

制动功率/kW	分布比例/%	制动功率/kW	分布比例/%	制动功率/kW	分布比例/%
100 < X ≤ 200	3.5	400 < X ≤ 500	23.0	700 < X ≤ 800	2.0
200 < X ≤ 300	13.5	500 < X ≤ 600	23.0	800 < X ≤ 900	3.5
300 < X ≤ 400	19.5	600 < X ≤ 700	11.0	X > 900	1.0

制动功率低于 500 kW 的制动次数占到总制动次数的 59.5%,低于 600 kW 的制动次数占总制动次数的 82.5%,低于 700 kW 的制动次数占

总制动次数的 93.5%,超过 700 kW 的制动次数占总制动次数的 6.5%.混合动力系统匹配的电动机(可用作再生制动电机)的峰值功率为 230 kW,

这意味着在超过 90% 的情况下联合制动系统具有回收制动能量接近 30% 的能力(电机发电与储能装置存储效率假定为 85%, 能量回收率计算为 $230 \times 0.85 / 700 = 28.1\%$)。

综合分析制动功率和制动强度可知,在一般驾驶工况中,绝大多数制动属于中低强度的制动,并且以偏低的制动强度居多.这为利用制动转矩较小的电机进行再生制动提供了有利条件.

混合动力辆常用的制动强度和制动功率并不大.但受限于电机制动功率和电池组可充电功率,混联式混合动力车辆制动能量回收率并不高.这是因为:一方面,混联式混合动力系统一般包括两个电机,匹配时单个电机功率需求降低,有利于降低电机体积重量和提高系统功率密度,但因为只有齿圈上的电动机可以用于制动,发电功率有限;另一方面,动力电池组安全充电电流小,在没有快速充电装置的情况下再生电流易引起母线电压急剧升高,影响系统安全.从再生制动功率的角度出发,串联式混合动力方案具有一定优势.串联方案中,只有电机进行驱动,电机额定功率较大,且双侧电机都能进行再生制动,所以再生制动功率很高.当然,在再生制动功率提高的情况下,必须有相应的快速充电装置(如超级电容)才能较大幅度提高制动能量回收率.

2 复合储能装置参数匹配方法

在机械功率和电功率共同驱动的混联式混合动力车辆中,其电储能装置主要对整车电功率起“削峰填谷”作用,因此在车辆由机械功率和电功率共同驱动的工况下,对电能和电功率的需求不大.车辆在静音行驶(纯电驱动)的工况中,能量全部来源于储能装置,因此需要对静音行驶工况下的电功率和电能的需求进行计算.混合动力车辆另一重要的特点是,可以将车辆制动过程中的动能转化为电能储存起来,同时产生一定的负荷阻力使车辆减速制动;当车辆再次需要电能驱动时,复合储能系统释放在制动过程中回收的电能及其功率的大小也需要进行计算.

2.1 静音行驶需要的电能和电功率计算方法

车辆静音行驶的需求功率为

$$P_{jy} = \frac{V_s}{1\,000\eta_{hs}} \left(Mgf_r + \frac{1}{2} \rho_a C_D A_f V_s^2 \right) + P_{aux} / \eta_{batt}.$$

式中: V_s 为静音行驶要求速度, P_{aux} 为静音行驶时辅助系统消耗功率, f_r 为滚动阻力系数, ρ_a 为空气密度, C_D 为风阻系数, A_f 为迎风面积, η_{batt} 为电池

放电效率, η_{hs} 为储能装置到地面的传动效率.

车辆静音行驶时消耗的能量为

$$E_{jy} = P_{jy} S / V_s.$$

式中: E_{jy} 为需要的能量, P_{jy} 为静音行驶工况功率, S 为静音行驶历程, V_s 为静音行驶要求速度.

根据再生制动电机功率,可计算得到最大制动回收能量.

与制动工况相比,加速工况对复合储能装置的功率及能量的要求较小,所以主要从制动工况出发匹配储能装置参数.

2.2 电池组参数匹配方法

由于锂离子电池技术的限制,电池组所能提供的电功率的大小受到很大限制,电池组的功率很难满足在短时间内全部回收制动能量的要求.在静音行驶工况,整车的能量全部来自于电池组,因此电池组的功率下限是静音行驶工况下车辆需求的功率,电池组的能量下限是静音行驶工况下需求的电能.锂离子电池组储能方案参数匹配流程如图 2 所示.

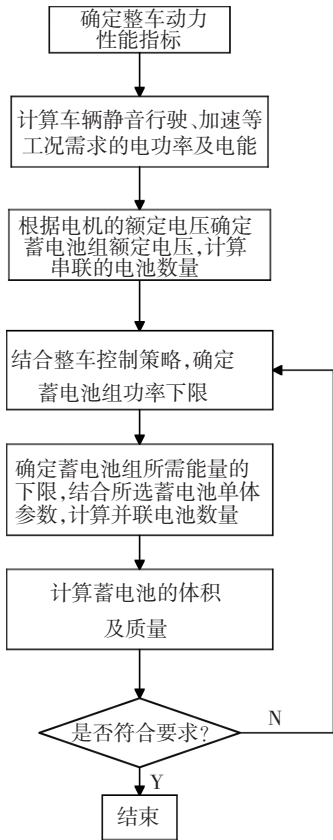


图 2 锂离子电池储能装置方案参数匹配流程

2.3 超级电容参数匹配方法

因为电池具有比能量高、比功率相对较低的特点,所以当车辆需要电能的功率较低能量较大时,应由电池组提供.超级电容具有很高的比功率,但其比能量很低,当车辆需要大功率充放电

时,由超级电容提供.根据已计算的车辆不同工况的电功率和能量需求的特点,分别确定其在复合储能装置中的来源:

a) 静音行驶需很大的电能,功率相对较低,电池组可以满足,因此静音行驶工况下的电能应来自于电池组.匹配电池组参数时要满足车辆静音行驶的要求.

b) 制动工况时,车辆需要大功率充电,充电时间短,电池组不能满足其全部的功率要求,并且超级电容在大功率充放电时效率高,速度快,则制动能量回收时优先向超级电容充电,其余能量在不超过电池充电功率的情况下,向电池组充电.对超级电容进行参数匹配时,要满足车辆制动工况的要求.

复合储能装置参数匹配需解决的问题是:分别从能量和功率的角度计算电池和超级电容的参数,同时考虑工程化约束和成本问题,来满足复合储能装置的设计目标.复合电源的参数匹配主要包括对电池功率、容量、标称电压和串环节数的计算,以及对电容单体容量和串环节数的计算.复合储能装置参数匹配的主要步骤如图 3 所示.

3 参数匹配计算与实例

3.1 电池组参数匹配计算

3.1.1 电池串环节数计算

电池组与电机通过直流母线(功率总线)直接相连,则电池组的额定电压应与电机额定电压相同,即 $U_{\text{batt}} = 550 \text{ V}$,则串联电池数目 n 由下式确定:

$$n = U_{\text{batt}} / U_{\text{bs}}$$

式中: U_{bs} 为锂离子电池单体额定电压,根据选用的锂离子电池参数,其额定电压 3.7 V ,所以需 149 节电池单体串联在一起.

3.1.2 电池功率计算

电池组的功率要满足车辆静音行驶全部的功率需求,假定静音行驶的平均车速为 30 km/h ,则电池功率 $P_{\text{batt}} \geq 70 \text{ kW}$.

3.1.3 电池容量及电池并联数量的计算

电池容量主要由车辆静音行驶的续驶里程确定:

$$C_{\text{batt}} \geq E_{\text{ij}} / (U_{\text{m}} \delta_{\text{SOC}}).$$

式中: C_{batt} 为电池组容量; U_{m} 为电池组电压; δ_{SOC} 为电池组的有效荷电状态, $\delta_{\text{SOC}} = 0.8$; 计算得电池容量为 $1\,472 \text{ kJ}$,即 $C_{\text{batt}} \geq 139.2 \text{ Ah}$.

若选用的电池单体的额定容量为 C_{batt} ,则电池并联数量 m 为

$$m \geq C_{\text{batt}} / C_{\text{bs}}$$

根据单体电池数据信息,若选用单体额定容

量 $35 \text{ A} \cdot \text{h}$ 的功率能量型锂离子动力电池,并考虑电池随循环次数的增加其容量减小,选取 $m = 4$ 节电池单体并联组成电池组,则电池组容量为 $35 \times 4 = 140 \text{ A} \cdot \text{h}$.选取 $140 \text{ A} \cdot \text{h}$ 的电池,其 1 C 的额定放电功率为 $550 \text{ V} \times 140 \text{ A} = 77 \text{ kW}$,满足静音行驶的额定功率需求.则整体电池组的单体数为 $N = m \times n = 4 \times 149 = 596$.

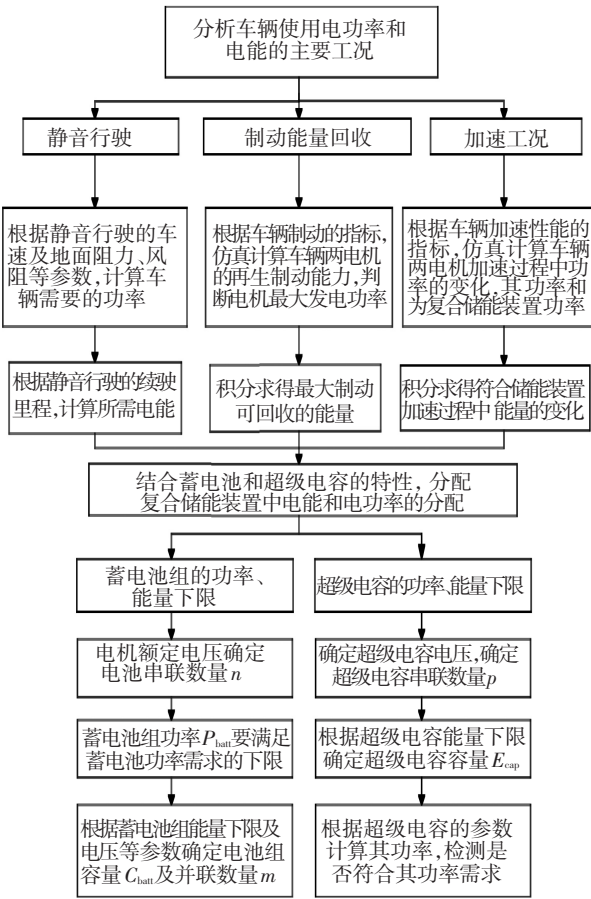


图 3 复合储能装置参数匹配步骤

3.1.4 电池质量和体积计算

由电池单体的规格参数,可计算由 596 节电池单体组成的电池组的质量为 665.2 kg ,体积为 0.405 m^3 .由于电池组需要散热等其他辅助系统,考虑辅助系统体积(初步估计占 10%),则电池组总体积为 0.45 m^3 .

3.2 超级电容参数匹配计算

3.2.1 串联单体数量计算

超级电容通过 DC/DC 与母线连接,当 DC/DC 输入输出电压越接近时其效率越高.因此为保证复合储能装置以较高的效率工作,选择超级电容的电压接近电池组最低工作电压 U_{n} .选用的超级电容的标称电压为 U_{cs} ,则串联的超级电容数量 p 为

$$p \geq U_{\text{n}} / U_{\text{cs}}$$

电池组的最低工作电压 $U_{\text{n}} = n U_{\text{bsn}}$,其中 U_{bsn} 为电池单体的最低工作电压.

本文选用的电池单体最低工作电压为3.2 V, 则 $U_n = 149 \times 3.2 = 477$ V. 选用单体标称电压为2.7 V 超级电容,需 177 节电容单体串联在一起.

3.2.2 超级电容单体容量计算

超级电容的主要作用是对制动能量进行回收,则超级电容的最大存储能量 E_{cap} 满足下式:

$$E_{cap} + P_{batt}t_b \geq E_b.$$

式中: E_b 为一次制动可回收的最大能量, P_{batt} 为电池 1 C 充电功率, t_b 为制动时间.

超级电容单体容量可由下式确定:

$$E_{cap} \geq 0.5pC(V_{max}^2 - V_{min}^2).$$

式中: p 为超级电容数量, C 为超级电容单体容量, V_{max} 为超级电容单体最大电压, V_{min} 为超级电容单体最小电压.

选取的超级电容标称电压为 2.7 V, 最小电压为 1.2 V. 电池持续充电功率按照 1 C 充电计算为 $140 \times 550 / 1\,000 = 77$ kW, 计算得超级电容容量需要 544 F, 根据超级电容规格选取单体容量为 600 F 的超级电容.

3.2.3 超级电容功率的计算

超级电容的峰值功率为

$$P_{cap} = I_{cap} U_{cap}.$$

式中: I_{cap} 为超级电容的峰值电流, U_{cap} 为超级电容总电压. 若计算的超级电容功率满足其最大功率需求, 则匹配的超级电容参数可行, 否则需调整超级电容的参数. 适当增加超级电容串联的数量可使超级电容组合功率增大.

选用的超级电容的峰值电流为 700 A, 前文计算超级电容电压为 477 V, 则其峰值功率为 334 kW, 满足车辆制动时最大再生功率 230 kW (电动机再生制动的峰值功率), 所匹配的超级电容参数可行.

3.2.4 超级电容体积计算

超级电容单体体积约为 0.074 L ($\phi 26$ mm $\times$ 140 mm), 可计算由 177 节电容单体组成的超级电容的体积为 0.013 m³. 考虑安装体积和单体间的间隙(初步估计占 10%), 则超级电容总体积为 0.014 m³.

4 制动工况试验验证

将匹配的复合储能系统应用于某型混合动力试验样车. 试验样车与复合储能装置参数如表 3 所示.

表 3 试验样车和复合储能装置参数

车辆整备质量/ kg	轮胎滚动半径/ m	发动机功率/ kW	发动机最高转速/ (r·min ⁻¹)	发电机额定功率/ kW	电动机额定功率/ kW	电动机额定转矩/ (N·m)	
21 000	0.59	300	2 100	150	165	450	
电池容量/ (A·h)	电池单体数量	电容容量/ F	电容单体数量	传动比			
				1 挡	2 挡传	3 挡传	后传动
140	596	600	177	8.054	2.971	1.000	9.052

联合制动采用优先进行电机制动的控制策略, 在计算电机制动功时要考虑储能装置及电机本身的性能约束. 储能装置的荷电状态决定了其可吸收的最大电功率; 电机功率受电机转速影响最大, 当电机转速低于额定转速时电机将不能达到额定功率, 高于额定转速时可以认为电机可恒功率工作. 电机转速取决于混合动力系统功率耦合机构及后部的自动变速器挡位. 如表 4 中数据, 第 1 次制动时, 车速处于 2 挡换 3 挡的换挡车速之前的临界点, 电机转速最高, 制动功率最大. 第 6 次和第 13 次制动也处于 3 挡的高转速段, 电机制动功率也较大. 对于复合储能装置的控制, 为简化控制逻辑, 采用直流母线系统优先从电池系统用电的控制策略, 当电池功率不能满足要求时, 由超级电容进行补充.

对试验样车在某公路驾驶工况下进行了测试, 提取了其中的制动过程数据. 在驾驶循环工况

下提取制动数据和前面的制动工况分析更具有对比意义. 公路驾驶工况的测试结果如图 4 所示.

表 4 实车驾驶工况制动信息统计

次数	起始速度/ (km · h ⁻¹)	终止速度/ (km · h ⁻¹)	平均减速度/ (m · s ⁻²)	平均制动 功率/kW	平均电机 功率/kW
1	29.2	23.2	0.65	100	100
2	25.8	24.9	0.29	43	43
3	21.7	12.7	0.68	69	54
4	48.2	29.4	1.03	234	65
5	28.5	6.8	0.86	89	35
6	52.5	49.7	0.43	128	89
7	46.2	33.6	2.11	492	71
8	58.5	9.5	1.51	301	69
9	44.7	8.5	1.42	222	32
10	24.8	22.2	0.64	89	51
11	23.3	18.2	0.47	58	37
12	44.5	43.8	0.38	99	35
13	44.6	27.0	0.63	133	73
14	33.0	4.8	0.70	78	28

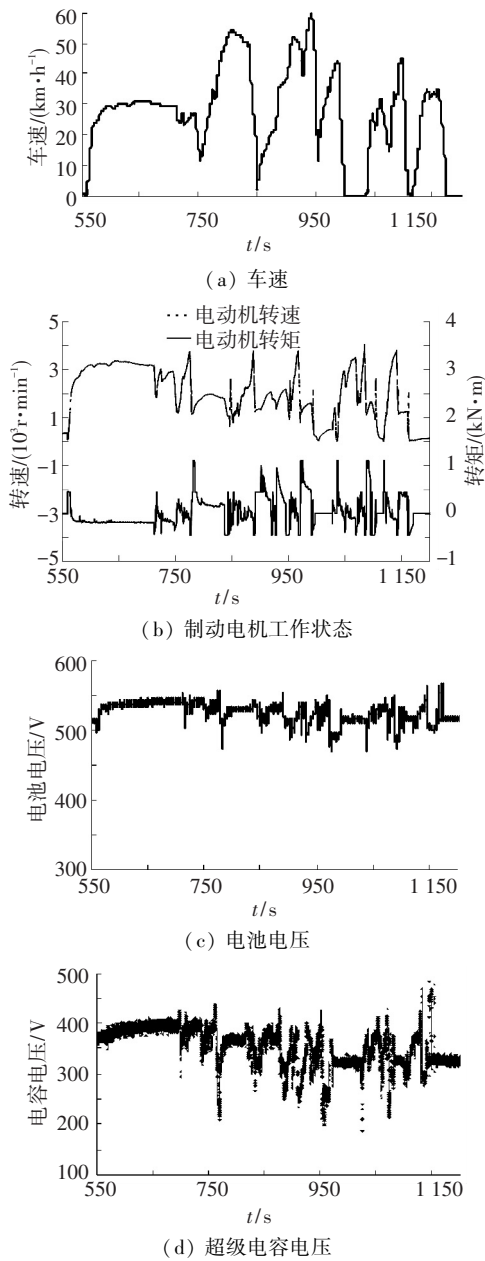


图 4 试验样车某公路驾驶工况测试结果

对图 4 所示的驾驶工况进行了统计分析,较为明显的制动有 14 次,相关信息如表 4 所示.其中平均制动功率的计算方法为车辆的全部减速功率减去车辆滑行阻力产生的减速功率,考虑驱动系统机械损失和滚动阻力、风阻等,滑行阻力系数按照 0.05 计算.

在表 4 所示的实车驾驶工况制动信息中,车辆平均制动功率为 152 kW,电机再生制动功率平均为 56 kW,考虑储能系统平均充电效率(90%)后,制动回收功率占总制动功率的能量回收率为 $56 \times 0.90 / 152 = 33.2\%$.从整体驾驶工况来看,能量回收还是非常可观的.

5 结 论

1)通过对某重型混合动力车辆驾驶循环工况

的提取与分析,得到了机电联合制动工况的制动功率、制动强度等及其分布的数据信息,为联合制动系统控制策略及储能装置参数匹配提供依据.

2)提出了重型混合动力车辆的储能装置参数匹配方法,分别针对以锂离子电池为主的单一介质储能装置及锂离子电池和超级电容组合使用的复合储能装置进行参数匹配计算.

3)针对 21 t 的某重型混联式混合动力样车进行了储能装置参数匹配计算,匹配的电池组与超级电容参数符合车辆性能要求,体积重量满足总体设计约束.通过匹配超级电容,储能装置的瞬时功率能力大幅提升,可显著提高车辆的制动能力和制动能量回收率.通过驾驶工况的试验结果统计分析,验证了复合储能装置的制动能量回收效果.

参考文献

[1] 逯仁贵,王铁成,朱春波,等. 基于飞渡电容的超级电容组动态均衡控制算法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2008, 40(9): 1421-1425.

[2] ORTUZAR M, MORENO J, DIXON J. Ultracapacitor-based auxiliary energy system for an electric vehicle: Implementation and evaluation[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(4): 2147-2156.

[3] LUKIC S M, WIRASINGHA S G, RODRIGUEZ F, et al. Energy storage systems for automotive applications[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2008, 55(3): 2258-2267.

[4] 张彤,朱磊,袁银南,等. 并联混合动力轿车多能源管理系统标定试验[J]. 机械工程学报, 2009, 45(2): 12-17.

[5] GAO W. Performance comparison of a fuel cell-battery hybrid power train and a fuel cell-ultra capacitor hybrid power train[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2005, 54(3): 846-855.

[6] 闵海涛,刘杰,于远彬,等. 混合动力汽车复合电源参数优化与试验研究[J]. 汽车工程, 2011, 33(12): 1078-1083.

[7] 于远彬,王庆年,王加雪,等. 混合动力汽车车载复合电源参数匹配及其优化[J]. 吉林大学学报:工学版, 2008, 38(4): 764-768.

[8] 田德文,谢大纲,崔淑梅. 军用汽车混合电力驱动系统复合能源控制策略[J]. 机械工程学报, 2009, 45(2): 41-47.

[9] 吴志伟,张建龙,殷承良. 混合动力汽车用混合能量存储系统的设计[J]. 汽车工程, 2012, 34(3): 190-196.

[10] 陈全世,朱家琰,田光宇. 先进电动汽车技术[M]. 北京:化学工业出版社, 2007.

(编辑 杨 波)