

DOI: 10.3901/JME.2008.11.197

# 新型续流增磁直流电动机驱动控制系统\*

李军求 张承宁 邵桂欣

(北京理工大学机械与车辆工程学院 北京 100081)

**摘要:** 为消除传统型直流电动机驱动控制系统在电动汽车应用时存在的缺陷,依据弱磁调速的控制思想,研制出新型的续流增磁电动机及其驱动控制系统。依据该电动机控制系统原理图和试验数据,分析系统弱磁调速原理和工作特性。与传统型串励直流电动机相比,该系统在控制思想、控制结构和再生制动性能方面均具有极大的优越性。热量考核试验表明高频工作中的 IGBT 开关损耗对控制系统温升影响显著。试验结果和装车试验显示,该系统抗干扰能力强、调节速度快、平稳性好,低速增磁增扭和高速弱磁增速的特性能很好地满足电动公交大客车的动力特性要求。

**关键词:** 电动公交大客车 续流增磁电动机 开关损耗 尖峰电压

**中图分类号:** U469

## New Enhanced Magnetism Motor Drive Control System

LI Junqiu ZHANG Chengning SHAO Guixin

(School of Mechanical and Vehicular Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081)

**Abstract:** To eliminate the deficiencies of the conventional drive control system of direct current (DC) motor for electric transit bus, a new permanent magnetic direct current (PMDC) motor with the enhanced exciting windings is designed, namely, enhanced magnetism motor and its drive control system on the basis of the control idea of speed adjusting with field weakening. On the basis of the schematic diagram of motor control system and the test data, the principle of system speed adjusting with field weakening and the working characteristics are analyzed. Compared to the conventional series excitation DC motor, the enhanced magnetism motor has great advantages in respect of control idea, control structure and regenerative braking performance. Heat verification test shows that the IGBT switching loss in high frequency operation has significant influence on the temperature rise of control system. The test result and service test show that the system has strong anti-jamming ability, fast regulating speed and good stability, and the characteristics of enhanced torque with enhancing magnetism at low speed and enhanced speed with weakening magnetism at high speed can meet the electric transit bus's demand of power characteristics very well.

**Key words:** Electric transit bus Enhanced magnetism motor Switching loss Peak voltage

## 0 前言

电动机驱动系统作为电动汽车的关键系统,其性能直接决定了电动汽车的运行性能。电动汽车所使用的直流电动机有三种<sup>[1-2]</sup>:他励直流电动机(包括永磁直流电动机)、串励直流电动机、复合励磁直流电动机。他励直流电动机的优点是线路无需切换即可实现牵引与制动的转换,防空转性能好,缺点是大多采用一个磁场斩波器致使体积大;永磁直流电动机的优点是体积相对较小、重量轻且效率高,但由于磁场固定缺乏可控性,不能同时满足电动汽

车低速大转矩和高速大功率的要求。串励直流电动机虽无上述缺陷,只用一个斩波器,但存在线路要增加接触器切换励磁绕组才能实现牵引与制动的转换缺陷,控制电路结构复杂,可靠性和效率都较低。根据德国电动大客车的试验,采用串励直流电动机比采用他励直流电动机的再生制动作用低 5%,能量消耗高 19%。

他励加增磁绕组的复合励磁的直流电动机兼顾上述两种直流电动机的优点,是电动汽车在使用直流电动机做为牵引电动机时最好的选择。国内某单位在电动大客车上采用了永磁和增磁绕组结合的复合励磁的直流电动机做为牵引电动机,但所设计的控制器对增磁绕组的控制,只是采用了在车辆需要大转矩驱动时把增磁绕组通过接触器闭合通电的

\* 国家高技术研究发展计划(863 计划, 2002AA501821)资助项目。  
20071123 收到初稿, 20080910 收到修改稿

简单增磁方法,其实质是把增磁绕组当做并励绕组使用,这样无法实现电动汽车由低速到高速启动过程中的自动弱磁,控制起来十分不便,而且,由于使用了接触器这类的有触点开关,可靠性也降低了。

针对传统直流电动机驱动系统的不足,并充分发挥其优势,基于永磁加增磁复合励磁的机理,研制出一种具有自动弱磁调速功能的新型电动机调速系统——续流增磁直流电动机驱动系统。该系统把增磁绕组接在电动机续流回路中,利用续流回路内的电流进行增磁,从而使永磁直流电动机产生复合磁场,产生了全新的自动弱磁调速理念。该系统很好地满足了电动汽车低速增磁增扭、高速弱磁增速的特性需求;而且能在双象限范围内运行,实现电动汽车再生制动;采用高频脉冲调宽(Pulse width modulation, PWM)斩波控制,运行时噪音低。

## 1 自动弱磁调速原理

该续流增磁直流电动机驱动控制系统弱磁调速原理如图 1 所示<sup>[3]</sup>。

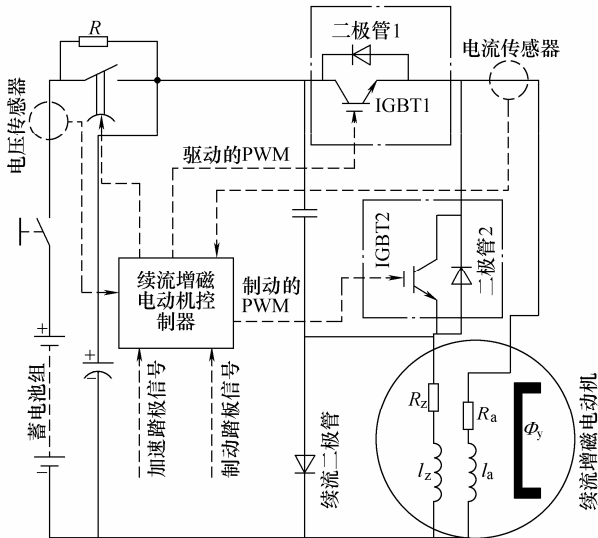


图 1 续流增磁直流电动机驱动控制系统弱磁调速原理图

电动机控制器的主要功能是接收驾驶员发出的加速踏板/制动踏板信号和功率电路中电动机电枢电流传感器的反馈信号,实现电动机调速时的驱动转矩和再生转矩的闭环控制。依据该电动机系统原理及控制思想,推出数学模型

$$T_e = C_m (\Phi_y + \Phi_z) \times i_a \quad (1)$$

$$n = (U_b \times D + R_a \times i_a) / [C_e (\Phi_y + \Phi_z)] \quad (2)$$

$$\Phi_z = L_f \times i_f \quad (3)$$

$$i_f = i_a \times (1 - D) \quad (4)$$

$$U_e = C_e \times (\Phi_y + \Phi_z) \times n \quad (5)$$

式中  $C_m$ ——电动机转矩常数  
 $C_e$ ——电动机电动势常数  
 $\Phi_y$ ——永磁磁通  
 $\Phi_z$ ——增磁磁通  
 $R_a$ ——电动机电枢电阻  
 $i_a$ ——电动机电枢电流  
 $L_f$ ——增磁绕组电感  
 $i_f$ ——增磁绕组电流  
 $U_b$ ——电池组电压  
 $n$ ——电动机转速  
 $U_e$ ——电动机电枢反电动势  
 $D$ ——PWM 信号占空比

当电动汽车启动、加速和高速行驶时,控制器锁定制动踏板信号使制动回路内的功率模块(IGBT2)始终处于断开状态。控制器接收加速踏板的驱动信号,并向驱动回路中的功率模块(IGBT1)发出高频 PWM 信号,控制 IGBT1 工作在高频开关状态。当 IGBT1 闭合时,工作回路为蓄电池组→IGBT1→续流增磁电动机的电枢绕组→蓄电池组,续流绕组无电流通过,电动机等效为永磁直流电动机。当 IGBT1 断开时,工作回路为续流增磁电动机的电枢绕组→续流绕组→IGBT2 反向并联二极管→续流增磁电动机的电枢绕组。续流绕组有电流通过,此时续流绕组不仅具有续流保护的作用而且还有增强磁通调速的功能。

当电动汽车制动时,控制器锁定加速踏板信号使 IGBT1 始终处于断开状态。控制器接收制动踏板的信号,并向功率电路中的 IGBT2 发出高频 PWM 信号,控制 IGBT2 工作在高频状态。增磁续流绕组通过一个反并联的二极管使在整个制动过程中,增磁续流绕组中始终没有电流流过,不会产生增磁,电动机产生的反电动势电压比较稳定。续流增磁电动机反电动势产生泵升超过电池组端电压给蓄电池组充电,完成再生制动。

## 2 续流增磁直流电动机稳态特性

电动机运行在低速区时, PWM 占空比很小,电枢电流即可达到驱动信号的设定值。由式(1)、(3)、(4)推出:电流通过续流增磁绕组的时间长,增磁效果显著,电动机具有很大转矩,当电动汽车运行在启动、爬坡等低速区时,由式(5)可知,电动机电枢的反电动势小。随着电动机转速的增高,电动机电

枢反电动势逐渐增大，PWM 占空比逐步增大才能满足驱动踏板信号所设定的电枢电流。电流通过续流增磁绕组的时间则相应减小，绕组增磁作用逐步减弱，实现了电动机弱磁增速恒功率的特性，很好地满足电动汽车行驶对动力性的需求。整个弱磁过程中永磁部分的磁通始终保持恒定，与传统型直流电动机比较，本系统在调速特性、转矩特性、峰值功率和系统效率等方面具有很大的优越性。

### 2.1 续流增磁电动机工作特性

电动机系统的工作特性是分析电动汽车动力性能的基础。为了正确分析电动汽车动力性，必须获得该续流增磁电动机的工作特性。在台架试验中调节驱动踏板信号设定电枢电流，在保证电枢电流一定(限流)的情况下，获得转矩与转速的相互关系，试验结果如图 2 所示：当电动机转速恒定时，转矩随着电枢电流的增加而减小；当电枢电流恒定时，转矩随着电动机转速的增高而增大；转矩随着转速的上升和电枢电流的降低而平滑减小。系统稳定性原理表明当  $dn/dt < 0$  时，系统机械特性稳定，图 2 显示了该系统具有大范围的稳定调速区，同时试验结果验证了电动机的数学模型的正确性。

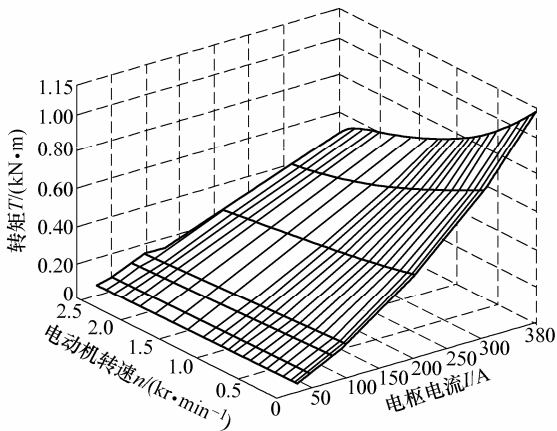


图 2 续流增磁电动机转矩、转速、电枢电流关系图

图 3 显示了续流增磁直流电动机系统效率图，保持电动机转速恒定，效率随着电枢电流降低而增大；保持电枢电流恒定，效率随着电动机转速升高而增大；系统效率随着电动机转速的增高和电枢电流的降低而增高。系统有广泛的高效区域，有 88.2% 的区域系统效率高于 0.85。

### 2.2 电动机续流回路中有无增磁绕组性能比较

当续流回路中接有增磁绕组时，该新型电动机随着转速的变化具有自动弱磁调速的特性。当续流回路不接有增磁绕组时，该电动机与传统的他励直

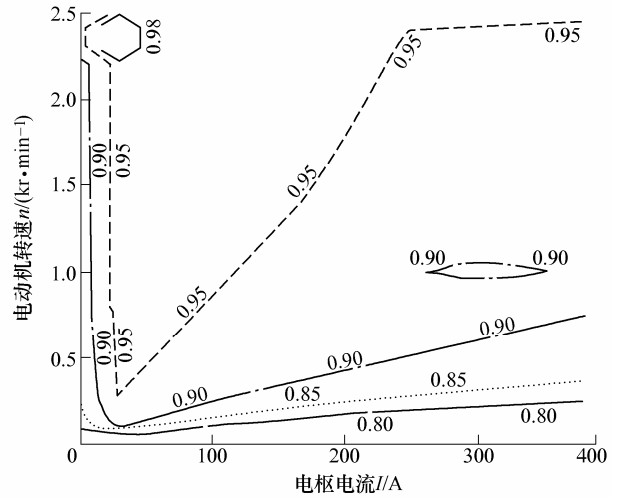


图 3 续流增磁直流电动机系统效率图

流电动机等效。图 4 显示了两种情况下不同电枢电流时电动机转矩与转速关系对比结果(同一曲线上电枢电流恒定)。

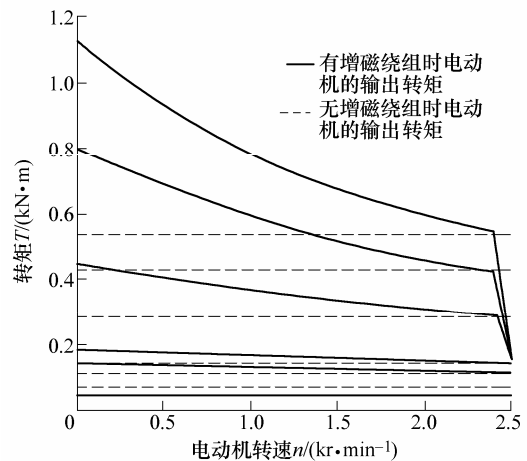


图 4 续流回路中有无增磁绕组电动机转矩对比图

增磁绕组接在电动机续流回路中时，电动机低速转矩显著增大，极大地提高了汽车的加速性能；随着电动机转速的增高，增磁绕组增磁作用减弱，电动机转矩平滑减小。在整个弱磁调速过程中，永磁部分的磁通保持恒定，使系统在高速时仍能保持与负载相平衡的转矩，系统具有大范围的高功率区。

借鉴发动机的外特性图<sup>[4]</sup>，两种状况下的峰值扭矩和峰值功率外特性对比情况在图 5 和表 1 中显示；续流回路中接有增磁绕组时，电动机外特性类似于发动机的外特性，且具有更广泛的稳定调速区域，能很好地满足电动汽车对转矩和功率的需求规律；转速相同时，续流增磁电动机具有更大的转矩和更高的效率。

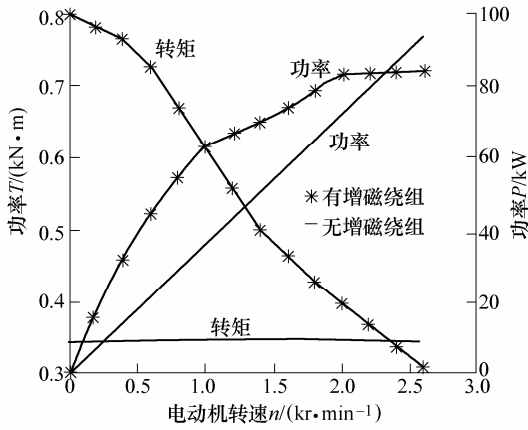


图 5 续流回路中有无增磁绕组时外特性对比图

表 1 续流回路有无增磁绕组性能对比(电枢电流为 300 A)

转速 $n/(r \cdot \text{min}^{-1})$	续流回路无增磁绕组			续流回路有增磁绕组		
	转矩 $T/(\text{N} \cdot \text{m})$	输出 功率 $P/\text{kW}$	效率 $\eta$	转矩 $T/(\text{N} \cdot \text{m})$	输出 功率 $P/\text{kW}$	效率 $\eta$
0	345	0	0	796.5	0	0
487	346	17.515	0.576	755.0	38.54	0.778
980	344	35.240	0.684	617.0	63.58	0.877
1 472	348	53.770	0.843	480.0	69.73	0.886
1 976	347	71.850	0.856	400.0	82.88	0.891
2 624	344	94.290	0.893	306.8	83.77	0.915

### 2.3 续流增磁电动机与传统串励直流电动机的比较

由弱磁调速系统工作原理可知，续流增磁电动机的弱磁过程是随着车速的改变由 PWM 信号占空比自动控制完成的，无须另加斩波器或者接触器等器件来控制励磁电流，整个系统具有简洁，可靠等优点。并且，永磁磁场部分在调速过程中保持恒定，与传统型串励电动机相比，该系统在高速区具有更高的输出转矩来确保电动车驱动转矩与负载转矩平衡，且系统运行效率更高，解决了传统串励电动机必须牺牲转矩来满足电动机转速升高而不能满足电动汽车高速大转矩的缺陷。

电动汽车再生制动过程中，增磁绕组无电流通过，电动机等效为传统型他励的永磁电动机。永磁部分提供稳定、方向一致、高效的励磁磁场。而传统串励驱动电动机控制系统在实现电动汽车再生制动时，必须变换串励绕组中励磁电流方向；并且为了保证励磁磁场稳定需要加入由接触器或者功率二极管等构成的辅助控制电路。

综上所述，该续流增磁直流电动机驱动控制系统与传统的串励电动机驱动控制系统相比，克服了转矩随转速急剧下降的缺陷，具有更好的可靠性、稳定性、经济性。

### 3 控制器功率损耗及热量考核试验

续流增磁电动机系统工作时，功率器件 IGBT 工作在高频开关状态，且其集电极 C 和发射极 E 承受蓄电池组 400 V 高压，主回路电流高达 300 A，功率密度大，其功率损耗而释放出的热量对系统的性能影响不容忽视。有研究表明<sup>[5]</sup>，开关损耗在占空比一定时与开关频率成线性增长趋势，且工作频率低于 5 kHz 时，导通损耗是主要的，但当工作频率较高时开关损耗则变为主要的。具体如图 6 所示。

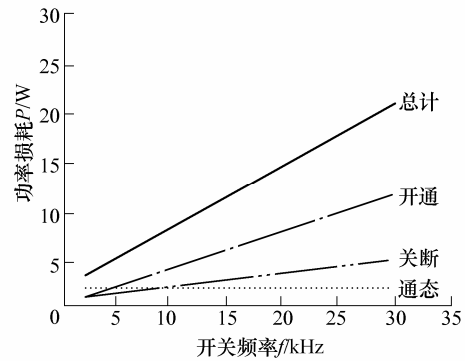


图 6 IGBT 功率损耗与工作频率的关系

当系统功率容量确定时，IGBT 导通时的饱和压降和电流也确定，导通损耗与 PWM 信号的占空比呈正比，不受 PWM 信号频率的影响。IGBT 的开关损耗为开关瞬间的电压电流状态的乘积的时间积分。虽然 IGBT 开通、关断可在几纳秒内完成，但是因为瞬间存在的高压大电流使其功率损耗严重增加。本电动机驱动控制系统工作频率为 16 kHz，有必要考核开关损耗对系统的影响。

为了验证系统的可靠性，考核开关损耗对系统的影响，进行了开关损耗考核试验。当电动机功率、电动机转速、电枢电流和 PWM 信号的占空比保持恒定时，IGBT 导通损耗也是恒定的。试验内容设计如下：在电动机状态相同时，分别将电动机调节至相同的转速、相同的输入输出功率和相同的电枢电流，然后将 IGBT 工作频率分别设置为 16 kHz 和 8 kHz，考察控制系统达到热平衡时的时间和热平衡时的温度。电动机控制系统热量考核试验结果见表 2。

表 2 电动机控制系统热量考核试验结果

频率 $f/\text{kHz}$	转速 $n/(r \cdot \text{min}^{-1})$	输入功率 $P_{in}/\text{kW}$	输出 功率 $P_{out}/\text{kW}$	电枢 电流 $I/\text{A}$	热平衡 温度 $\theta/^\circ\text{C}$	达到 热平衡 时间 $t/\text{s}$
16	1 975	93.1	82.88	300	79.0	480
8	1 978	92.3	81.73	300	65.9	1800

注：环境温度：24.5 °C，环境湿度：26%，出风口温度：42.7 °C。

由表 2 的试验数据知道，当工作频率为 16 kHz 时，电动机控制器的温度 8 min 内即上升到 79 °C 且热量平衡，满足电动公交车 5 min 工作制度；当工作频率降为 8 kHz 时，温度则会在 30 min 后保持在 65.9 °C 的平衡状态，由此可以得出结论，此时开关功率损耗比 16 kHz 时显著减少。可以采取降低系统工作频率或并联功率模块的措施来改善控制器温升。

按照实车运行要求，改变控制频率和功率模块并联数量，电动机驱动控制系统运行 60 min，同时记录功率模块外壳温度  $\theta_{case}$ 。试验环境和电动机驱动控制系统工作参数如表 3 所示。

表 3 试验环境与电动机驱动系统工作参数

环境 温度 $\theta/^\circ\text{C}$	湿度 $\Phi/\%$	电源 电流 $i_b/\text{A}$	电源 电压 $U_b/\text{V}$	电枢电流 $i_a/\text{A}$	电动机 转速 $n/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	电动机 转矩 $T_e/(\text{N}\cdot\text{m})$
27.5	66	164	389	300	750	760

计算功率模块峰值结温和平均结温<sup>[6]</sup>，结果显示在表 4 和图 7 中。

表 4 不同控制频率和模块容量时的电动机控制器温升试验参数

工作 频率 $f/\text{kHz}$	功率模 块并联 数量	工作 功率 $P/\text{kW}$	功率模块峰 值结温 $\theta_{j,max}/^\circ\text{C}$	功率模块平 均结温 $\theta_{j,avr}/^\circ\text{C}$	功率模块 外壳温度 $\theta_{case}/^\circ\text{C}$
5.85	1	2.072 3	79.020	76.04	58.4
7.80	1	2.590 0	85.330	82.44	60.4
5.85	2	2.278 0	72.694	70.35	51.4
7.80	2	2.935 0	81.330	79.10	54.7

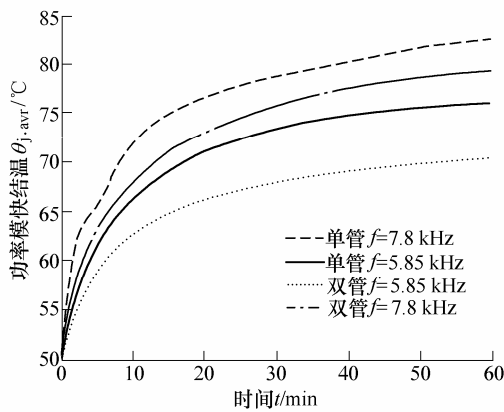


图 7 续流增磁电动机驱动控制器内功率模块结温曲线

试验结果表明，功率模块的结温成指数形式上升并稳定在恒值。降低控制频率或增大功率模块容量都可以降低结温。当工作频率从 7.8 kHz 降低至 5.85 kHz 时，功率模块峰值结温降低 6.31 °C，平均结温降低 6.4 °C。当增大模块容量(并联模块)时，功率模块峰值结温降低 4 °C，平均结温降低 3.34 °C。降低控制频率对降低温升效果更显著，原因在于功

率模块工作在高频，开关损耗为功率损耗的主要部分。

装车运行效果表明，降低工作频率后控制器温升显著下降，系统无过温保护，运行良好；而且系统噪声上升甚微，乘客感觉舒适。

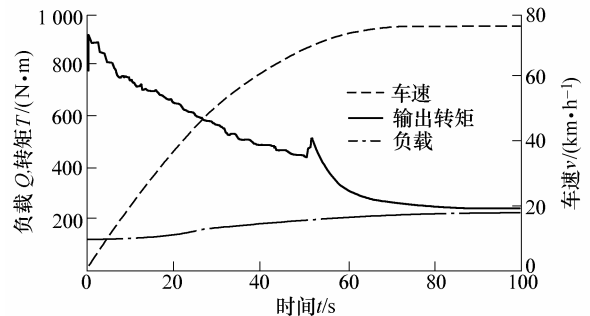
#### 4 系统整车加速及再生制动性能

装配该续流增磁电动机系统的电动公交车长 11m，动力铅酸电池组的总电压标称值为 384 V，电池组的 3C 率放电总能量为 9 100 W·h。整车空载质量为 12.1 t，车上不装配变速器，装配减速比为 6.3 的减速器。

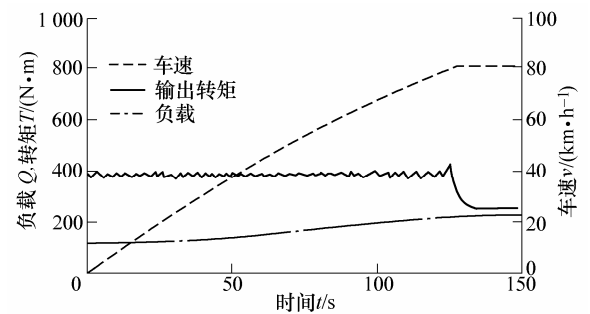
电动客车整车空载低速档加速过程结果如表 5、图 8 所示。

表 5 装配续流增磁电动机系统的整车加速性能

是否含增 磁绕组	最大转矩 $T_{max}/(\text{N}\cdot\text{m})$	平均转矩 $T/(\text{N}\cdot\text{m})$	最高车速 $v_{max}/(\text{km}\cdot\text{h}^{-1})$	0~60 km·h <sup>-1</sup> 的加速 时间 t/s
是	932.8	449.180 0	76.8	47.8
否	429.4	363.504 1	79.2	86.3



(a) 含增磁绕组



(b) 不含增磁绕组

图 8 装配续流增磁电动机系统的整车加速试验

装配该续流增磁电动机系统的电动客车的加速性能远好于装配等效的传动电动机系统的性能。

电动客车整车空载制动过程结果如图 9 和表 6 所示，制动过程电动汽车只受电动机系统电刹和道路滚动阻力及风度阻力。

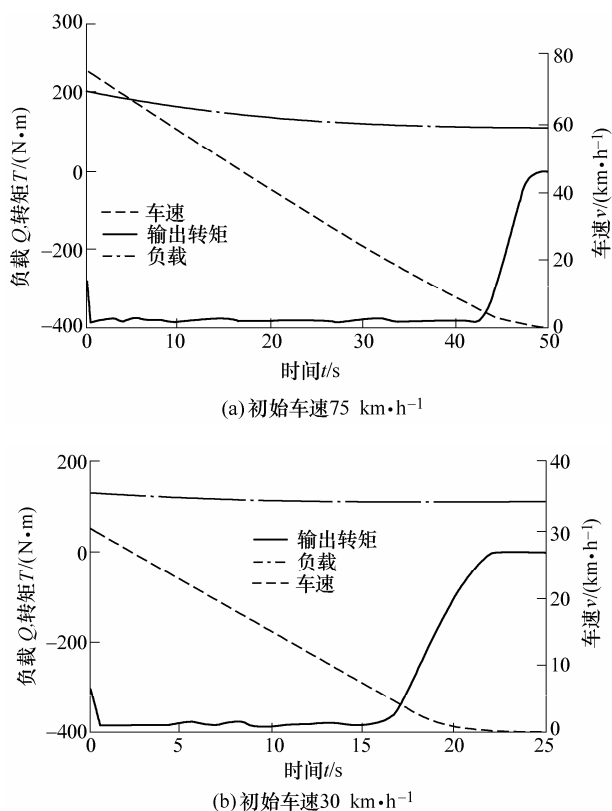


图 9 装配续流增磁电动机系统的整车制动

表 6 装配续流增磁电动机系统的整车制动性能

初始车速 $v_0/(km \cdot h^{-1})$	平均制 动转矩 $T_{mean}/(N \cdot m)$	制动 时间 $t/s$	制动 总能量 $E_1/(W \cdot h)$	再生制 动能 $E_2/(W \cdot h)$	再生制 动效率 $\eta/\%$
75	346.38	48.55	2.723 7	1.940 8	71.255
60	345.31	40.25	1.995 3	1.448 5	72.594
30	251.99	21.85	1.169 6	0.802 0	68.573

整车制动结果显示,随着制动初始车速的增大,电动机制动转矩和再生制动能量都呈上升趋势,再生制动效率也提高。

装配该电动机系统的电动公交车由天津汽车技术检测中心在北京汽车试验场进行测试得到的动力性能指标为最高车速  $75 km \cdot h^{-1}$ ,低速挡最大爬坡坡度大于 20%,低速挡起步换挡至  $60 km \cdot h^{-1}$  的时间为 45.6 s,且车辆再生制动(电刹)效果明显。

## 5 结论

(1) 永磁加增磁绕组复合励磁的新型直流牵引电动机——续流增磁电动机及其驱动控制系统避免了传统直流电动机驱动系统的缺陷,具有结构简洁、稳定调速范围广和效率高等优点。

(2) 弱磁调速过程随着电动机转速变化自动完成,系统的输出转矩与电动大客车的动力特性需求自动配合。永磁磁场在调速过程中保持恒定,电动

机高速运转时仍能满足电动机输出转矩与负载转矩平衡。

(3) 与传统等效永磁电动机系统相比,该系统在转矩、功率特性和系统效率都有很大的优势;与传统串励直流电动机系统相比,控制器结构简洁,可靠性高,解决了传统串励直流电动机需要牺牲转矩来增速的缺陷;再生制动时无须增加额外的辅助控制电路。

(4) 热量考核试验显示 IGBT 高频工作时,功率损耗是影响温升的主要因素,在电动机驱动控制系统工作条件已定的情况下,降低功率模块工作频率或增大器件容量都可以降低器件功率损耗,从而降低控制器温升。由于控制系统工作在高频状态,开关损耗是功率损耗的主要部分,工作频率的降低对温升的降低效果更显著,而且控制器结构更简单,可靠性更强。

(5) 热量考核试验结果和装车试验表明,该电动机弱磁调速系统抗干扰能力强、调节特性快速、平稳,低速增磁增扭和高速弱磁增速的特性很好地满足电动公交大客车的动力特性要求。目前这种电动机及控制系统已经装车服务于北京公交 121 线,车辆的加速起步性能优于同功率的异步电动机,其不足就是电动机控制系统在再生制动大电流的作用下可靠性较差,同时因该系统采用转矩控制无转速传感器,在降低系统硬件复杂度从而提高系统可靠性的同时缺失功率控制环节。目前正在提高大电流再生制动控制的可靠性及无转速传感器下转速辨识等方面的研究,相信这种电动机在电动公交大客车上会得到较好的应用。

## 参 考 文 献

- [1] 孙逢春,张承宁,祝嘉光. 电动汽车[M]. 北京:北京理工大学出版社,1997.  
SUN Fengchun, ZHANG Chengning, ZHU Jiaguang. Electric vehicles[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Publishing House, 1997.
- [2] 孙逢春,杨为琛,张承宁. BJD6100-EV 型电动公交车直流驱动系统研究[J]. 北京理工大学学报, 2002, 22(1): 45-48.  
SUN Fengchun, YANG Weichen, ZHANG Chengning. DC drive system for BJD6100-EV electric bus[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2002, 22(1): 45-48.
- [3] 孙逢春,张承宁,李学勇,等. 具有自动弱磁调速功能的电动汽车牵引电动机: 中国, 99107924.8 [P]. 1999-01-24.

(下转第 208 页)