DOI：10.13890/j.issn.1000-128X.2023.01.015　　文章编号：1000-128X(2023)01-0113-09

宁波地铁4号线车辆永磁同步牵引系统能耗性能研究

苏晗翀，李义国，裘文超，黎少东，沃　野，张豪杰
（宁波市轨道交通集团有限公司 运营分公司，浙江 宁波　315101）

摘　要：文章采用试验为主、仿真为辅的方法，分析地铁车辆不同工况下的能耗数据，对永磁同步牵引系统与感应异步牵引系统的牵引吸收、再生反馈、惰行能耗、再生率等能耗性能进行了解耦分析，通过解耦的方法，尽可能令边界固定和变量单一，以保证计算精度。根据不同边界条件，对宁波地铁4号线永磁同步牵引系统与感应异步牵引系统的能耗表现进行数据统计。根据相同目标速度、惰行工况、巡航工况下的能耗具体表现，对其规律进行归纳，分析永磁同步牵引系统在能耗方面的优势。通过惰行实测试验数据，对永磁同步牵引系统和感应异步牵引系统数据进行修正与拟合，结合辅助系统的能耗数据分析，经数据统计和规律归纳，验证理论分析的正确性，并将定性推断转化为定量描述。在理论结合数据的基础上，提出了永磁牵引系统冷却风扇运行优化、牵引特性曲线优化、惰行励磁弱磁优化等牵引系统能耗优化的观点。

关键词：地铁车辆；钕铁硼；永磁；感应；牵引系统；能耗；城市轨道交通；仿真
中图分类号：U231　　**文献标识码：**A

Study on energy consumption performance of permanent magnet synchronous traction system for trains on Ningbo metro line 4

SU Hanchong, LI Yiguo, QIU Wenchao, LI Shaodong, WO Ye, ZHANG Haojie

(Operating Branch, Ningbo Rail Transit Group Co., Ltd., Ningbo, Zhejiang 315101, China)

Abstract: This paper was intended to analyze the energy consumption data of metro trains under different working conditions primarily relying on experiments and applying simulation as the supplement. The energy consumption performance of the permanent magnet synchronous traction system and induction asynchronous traction system were first analyzed by the decoupling method, including traction absorption, regeneration feedback, coasting energy consumption, regeneration rate, to ensure the calculation accuracy thanks to the fixed boundaries and simple variables as much as possible. Based on the data statistics on the energy consumption performance of the permanent magnet synchronous traction system and induction asynchronous traction system on the trains running on Ningbo metro line 4 under different boundary conditions, laws were summarized from the specific energy consumption performance under the same target speed, coasting condition and cruising condition, to reveal the advantages of the permanent magnet synchronous traction system in energy consumption. The data of the permanent magnet synchronous traction system and induction asynchronous traction system were corrected and fitted by the measured coasting data in the experiments. Combined with the energy consumption data analysis of the auxiliary system, the correctness of the theoretical analysis was verified through data statistics and induction on laws, and the qualitative inferences were transformed into quantitative descriptions. Integrating the theoretical analysis with data, the points of view are raised for energy consumption optimization of the permanent magnet traction system, including the cooling fan operation, traction characteristics curve, field weakening for coasting.

Keywords: metro train; Nd-Fe-B; permanent magnet; induction; traction system; energy consumption; urban rail transit; simulation

通信作者：苏晗翀(1987—)，男，高级工程师，从事城市轨道交通车辆的应用技术管理及研究工作；E-mail: 443569236@qq.com
引用格式：苏晗翀, 李义国, 裘文超, 等. 宁波地铁4号线车辆永磁同步牵引系统能耗性能研究[J]. 机车电传动, 2023(1): 113-121.
Citation：SU Hanchong, LI Yiguo, QIU Wenchao, et al. Study on energy consumption performance of permanent magnet synchronous traction system for trains on Ningbo metro line 4[J]. Electric Drive for Locomotives, 2023(1): 113-121.

0 引言

宁波地铁4号线（以下简称4号线）项目配属车辆36列，其中4列采用了以钕铁硼为电机转子材料的交流永磁同步牵引系统（以下简称永磁系统）。本文将通过一系列试验的设计与仿真，分析本项目永磁系统与感应异步牵引系统（以下简称感应系统）的各项能耗性能，研究其一般规律与适用范围，并尝试进行定性解释与定量描述。在此基础上，综合运行条件，提出对永磁电机的应用和牵引能耗优化的观点与建议。仿真计算中的母线电压条件均以牵引工况为DC 1 500 V，制动工况为DC 1 650 V。另外，钐钴与钕铁硼永磁系统的性能差异本文不做探讨。

1 性能评估

4号线整车与牵引系统分别由中车株洲电力机车有限公司和株洲中车时代电气股份有限公司提供。车辆制式为B2，4M2T编组、顶部受流、专用轨回流，以过压吸收电阻替代制动电阻，正线的再生制动能量由牵引变电所的双向能馈装置逆变至整流机组AC 1 180 V侧。绘制车辆牵引、电制动及阻力曲线如图1。

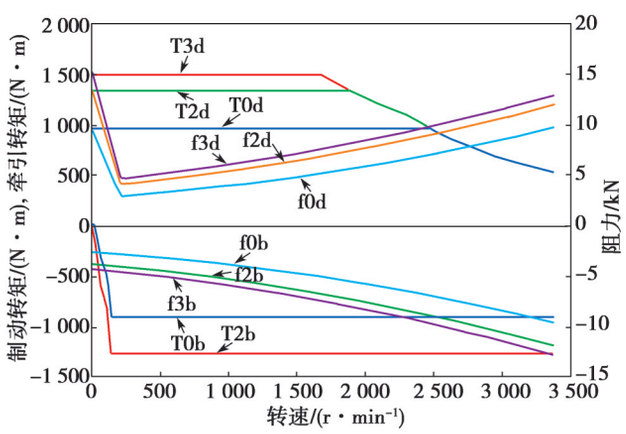


图1 AW0/2/3工况下永磁/感应系统输出特性与阻力曲线

Fig. 1 Output characteristics and resistance curve of permanent magnet / induction system under AW 0/2/3 working condition

图1中横轴上方为牵引区、下方为制动区，阻力采用右侧纵坐标表示；T为转矩、f为阻力，d为牵引、b为制动，0/2/3分别对应AW0/AW2/AW3。电机过载能力支持AW2的全电制动，因此曲线T2b与T3b重合，图中不再标注T3b；牵引考虑了附加的启动阻力；停车制动采用电制动到零（EB0）算法。

1.1 理论分析

相比感应电机，永磁电机转子自带剩磁磁通，无需为定子提供无功励磁分量，降低了定子和转子电流损耗，提升了功率因数与效率，在启动阶段尤为明显，具备广域高效的特征[1-4]。

对于4号线采用的永磁电机，其永磁体以内置径向排布，电机属凸极机，除永磁体提供的转矩外，还存在由于交直轴电感不均导致的磁阻转矩，其计算公式见式(1)。

$$T=p[\phi_s i_q+(L_d-L_q)i_d i_q] \tag{1}$$

式中：T为电机电磁转矩，N·m；p为电机极对数；ϕ_s为转子（永磁体）磁链，Wb；i_d为定子直轴电流分量，A；i_q为定子电流交轴分量，A；L_d为直轴电感，H；L_q为交轴电感，H；$\phi_s i_q$为永磁转矩；$(L_d-L_q)i_d i_q$为磁阻转矩。

根据交直轴电压、电流方程，忽略电阻，可得到定子电压与电流约束轨迹，即电压极限椭圆与电流极限圆，电机工作点需落在其包络范围内，表达式见式(2)、式(3)。

$$\frac{\left(i_d+\dfrac{\phi_s}{L_d}\right)^2}{\left(\dfrac{U_{\lim}}{X_d}\right)^2}+\frac{\left(i_q\right)^2}{\left(\dfrac{U_{\lim}}{X_q}\right)^2}\leqslant 1 \tag{2}$$

$$i_d{}^2+i_q{}^2\leqslant i_{\lim}{}^2 \tag{3}$$

式中：$U_{\lim}$为对应转速下的电压极限值，V；$i_{\lim}$为电流极限值，A；X_d为直轴电抗，Ω；X_q为交轴电抗，Ω。

如图2所示，弱磁前，电机采用最大转矩电流比控制（MTPA），以最小的定子电流获取最大的电磁转矩。凸极机的MTPA轨迹上的i_d、i_q选取适当的位置，令其永磁与磁阻转矩之和取得极值，此时永磁体工作于第二象限，i_d、i_q均不为0，电磁转矩对矩角（定子电流与i_q的夹角）一阶微商为0。理论上，上述永磁体工作区间是永磁电机相比感应电机优势最大的区段。当转速上升后，为保证与反电势合成后的定子端电压模不超过逆变器同步调制的最高电压，需对永磁电机进行弱磁处理。在该区段，i_d升高，i_q降低，无功成分升高，而感应电机的弱磁与常规控制无异，仅需降低定

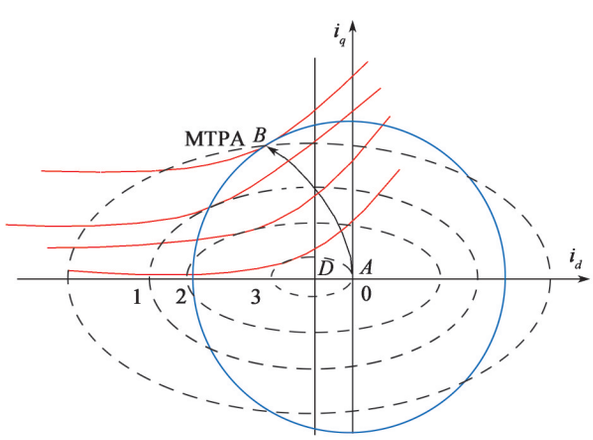


图2 凸极永磁电机d-q坐标系下电压极限椭圆、电流极限圆与MTPA轨迹

Fig. 2 Voltage limit ellipse, current limit circle and MTPA trajectory of salient pole permanent magnet motor in d-q coordinate system

子电流，其效率维持在相对较高水平，因此永磁的优势相应降低，如永磁体剩磁过高，凸极率小，反电势过大，并不排除高速末段永磁电机效率低于感应电机的情况。该情况也同样存在于高速惰行阶段，此时电机无转矩需求，永磁体因固有磁通的存在产生反向的转矩。

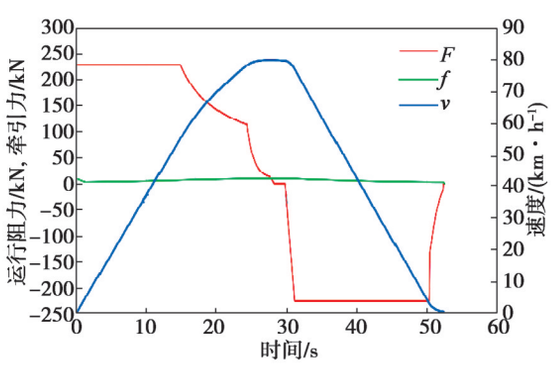
基于以上理论分析，将行车过程分为牵引、制动和惰行 3 种彼此独立的工况，结合宁波地铁 4 号线现场的实际情况，通过以试验为主和仿真为辅的方法，对永磁电机系统和感应电机系统的能耗开展比对。经数据统计和规律归纳，验证理论分析的正确性，并将定性推断转化为定量描述。下文的各项工作，将通过解耦的方法，尽可能令边界固定和变量单一，以保证计算精度。

1.2　牵引与电制动的试验与仿真计算

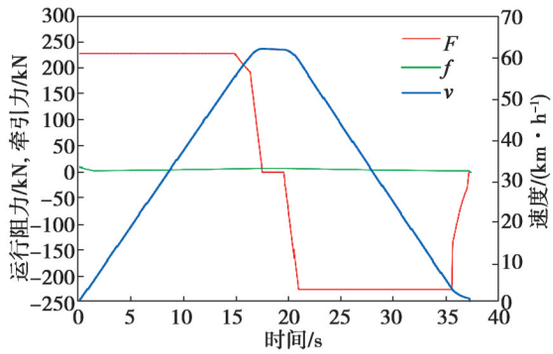
基于AW0工况，采用永磁电机车辆与感应电机车辆各1列，以中车基地试车线为试验场所，采用URM模式（非限制人工）运行。试车线有效长度近900 m，近似直道，无限速曲线，再生制动能量由地面电阻100%吸收。

设计4种工况：工况I，100%级位牵引从0加速到80 km/h，100%级位常用制动停车；工况II，100%级位牵引从0加速到60 km/h，100%级位常用制动停车；工况III，100%级位牵引从0加速到60 km/h，60%级位常用制动停车；工况IV，100%级位牵引从0加速到40 km/h，60%级位常用制动停车。牵引工况与制动工况之间的切换，采用2 s的惰行以保证制动指令施加时，电制动可即时响应。

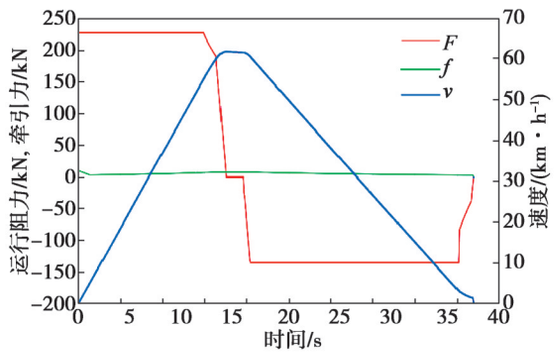
其设计运行特性见图3，F为牵引力或制动力，“+”区域为牵引工况，“−”区域为制动工况；f为运行阻力，不区分正负；v为运行速度。



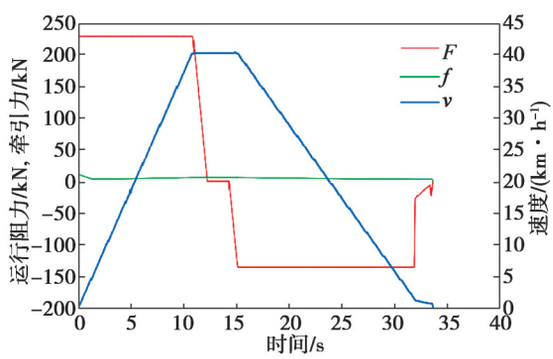
(a)工况I



(b)工况II



(c)工况III



(d)工况IV

图3　I/II/III/IV工况设计运行特性

Fig. 3　Operating characteristics under I / II / III / IV working conditions

试验于2020年4月10—15日完成，各工况运行里程均为60 km。考虑到不同目标速度、不同级位对应的走行距离不同、时长不同，并且试验工况无巡航、v-t曲线的惰行区域过窄，每公里能耗（kW·h/km）的常规运营计量方式并不适用。因此，本次试验以各工况的单次运行能耗做统计分析。滤除无效走行数据，形成单次均值能耗，如表1所示。

在表1基础上，将永磁车辆相对于感应车辆的各项

表1　单次均值能耗对比

Table 1　Comparison of single mean energy consumption

工况	总能耗/(kW·h)		牵引吸收/(kW·h)		再生反馈/(kW·h)		辅助系统/(kW·h)		再生率/%	
	永磁	感应	永磁	感应	永磁	感应	永磁	感应	永磁	感应
I	3.92	5.77	16.33	17.92	12.67	12.22	0.27	0.07	77.6	68.2
II	1.85	3.09	9.33	10.29	7.66	7.33	0.18	0.05	82.1	71.2
III	2.13	3.35	9.27	10.22	7.42	6.79	0.28	0.07	80.0	66.4
IV	0.88	2.06	4.08	4.68	3.40	2.68	0.20	0.06	83.3	57.3

能耗指标进行比较，具体表2所示。

表2 永磁车辆相对于感应车辆单次能耗均值数据比较

Table 2 Data comparison of single mean data of energy consumption between permanent magnet train and induction train %

工况	总能耗	牵引吸收	再生反馈	辅助系统	再生率
I	−32.1	−8.9	3.7	285.7	13.8
II	−40.1	−9.3	4.5	260.0	15.3
III	−36.4	−9.3	9.3	300.0	20.5
IV	−57.3	−12.8	26.9	233.3	45.4

分析表1和表2数据，可归纳规律如下：

① 在相同牵引级位下，永磁车辆相对感应车辆的牵引吸收节能率反比于目标速度；在相同制动级位下，永磁车辆相对感应车辆的再生反馈节能率（即反馈能量升幅，下同）反比于目标速度（即制动初速度，下同）。

该现象是永磁电机与感应电机效率的边际变化率的外部呈现。转矩、转速和效率的三维特性可查阅电机效率图获悉[5-7]，本次试验对转矩做了限定，因此可通过绘制“转速−效率”曲线进行分析。如图4所示，正、负纵轴分别表征牵引与制动，η为效率，D为牵引工况，B为制动工况，p为永磁系统，i为感应系统。p/i-D为牵引工况下的永磁系统与感应系统电机的效率比，p/i-B为制动工况下的永磁系统与感应系统电机的效率比，p/i-D和p/i-B采用右侧纵坐标表示。

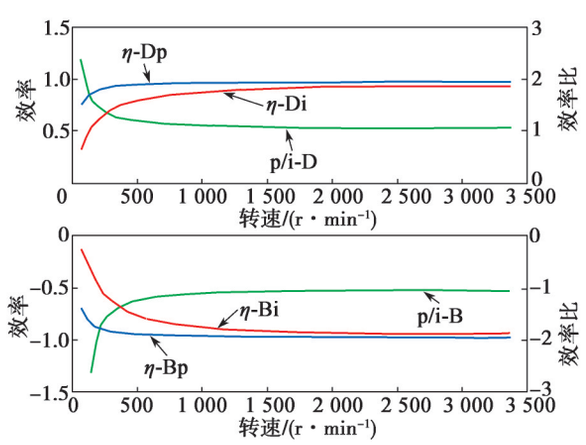


图4 AW0载荷1 500 V/1 650 V电压下电机牵引/制动效率

Fig. 4 Motor traction/braking efficiency at 1 500 V/1 650 V under AW0 load

分析图4可以看出，永磁电机牵引吸收、再生反馈的效率均高于感应电机；感应电机额定转速以下$\mathrm{d}\eta/\mathrm{d}n$大，与永磁效率相差大，在额定转速以上两者差值趋于稳定，且相对接近。以均值计，额定转速以上，p/i-D为1.05，p/i-B为1.04；额定转速以下，p/i-D为1.22，p/i-B为1.24。永磁与感应效率宏观上正比于转速（严格而论，η-Bi在67 km/h左右达到峰值），永磁电机相对感应电机的效率增益反比于转速。等级位下，感应电机低效区所对应的转速区间的运行时长占比愈大，永磁电机的优势愈明显。

② 在40~80 km/h范围内，永磁电机再生率反比于目标速度，永磁电机相对感应电机的再生率增益反比于目标速度，感应电机再生率随着目标速度的降低，呈现先增加后减小的趋势。再生率反比于牵引与制动级位大小。

通过定义概念“能速比”，即每单位速度变化所需吸收/反馈的能量，对其做定性解释。当目标速度相等，即牵引末速度与制动初速度相同时，将再生率定义如式(4)。

$$\text{再生率}=\frac{\left|\int_{t_0}^{t_1}U(-I)\,\mathrm{d}t\right|}{\int_{t_0}^{t_1}UI\mathrm{d}t}=\frac{\text{再生反馈做功}}{\text{牵引吸收做功}}=\frac{\text{再生反馈平均能速比}}{\text{牵引吸收平均能速比}} \tag{4}$$

式中：U为牵引直流母线电压；I为牵引直流母线电流。

通常，牵引工况在恒转矩区具有恒定的最大加速度，加速度在恒功区随转速增加而递减、在自然特性区随转速的平方增加而递减，因加速度逐步减小，即单位时间内提高速度的耗时逐步增加，阻力做功的时间、做功量亦随之增长，牵引吸收的能速比升高；而电制动除EB0基于速度闭环的停车阶段，全过程维持恒减速度，阻力做功时长正比于目标速度，能速比恒定。因此，随目标速度增加，式(4)中的分母边际增长率高于分子，再生率下降。

利用能速比的定义、牵引/制动特性以及阻力做功量的变化可以从宏观上对再生率的变化进行判断，但未计入“转换效率”的作用。从能量的宏观角度，将式(4)变化为式(5)。

$$\text{再生率}=\frac{\text{再生反馈做功}}{\text{牵引吸收做功}}=\frac{(\text{动能}-\text{阻力做功})\times\text{再生反馈效率}}{(\text{动能}+\text{阻力做功})\over\text{牵引吸收效率}} \tag{5}$$

由式(5)可知，转换效率与牵引吸收效率同再生反馈效率的乘积成正比，动能由车重、目标速度决定，阻力做功是阻力、车速的乘积对时间的积分。从图4可知，效率升至0.9，永磁电机转速对应的新轮车速为5 km/h，而感应电机对应为28 km/h。这说明永磁高效区广，低效区占比小，再生率对通过能速比方法得到的宏观规律影响有限。对于感应电机，低效区所对应的转速区间的运行占比愈大，其转换效率对再生率的分布规律产生的影响愈明显，且其制动效率在67 km/h左右达到峰值，宏观上有一定概率出现无单调性甚至单调递减的特征。

基于该不确定性，且试验资源有限、数据样本有限，因此以工况AW0、给定100%为边界做仿真计算，

见图5（图5中ab为牵引吸收能量，kW·h；re为再生反馈能量，kW·h；p为永磁系统；i为感应系统；r/a为再生率，r/a-p/i为永磁系统超出感应系统再生率比例；r/a-p、r/a-i、r/a-p/i采用右侧纵坐标表示）。

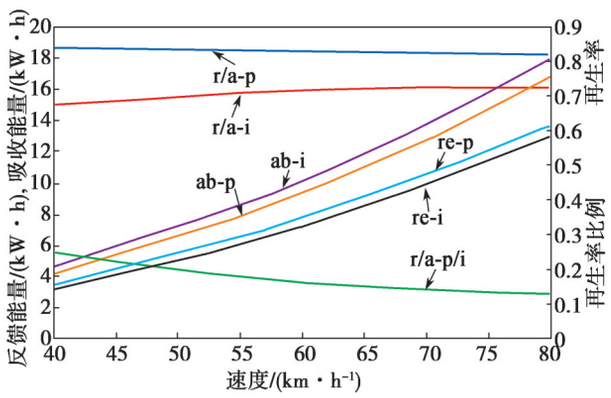


图5　AW0载重及100%级位不同目标速度下的牵引吸收和制动反馈能量以及再生率

Fig. 5　Traction absorption, braking feedback energy and regeneration rate under AW0 load and 100% level at different target speeds

如图5所示，永磁再生率严格反比于目标速度，速度从80 km/h变化至40 km/h再生率由81.6%升至84.1%。感应再生率由80 km/h的70%升至70 km/h的72.4%后，再降至40 km/h时的67.0%。永磁相对感应的再生率增益反比于目标速度。永磁相对感应，牵引吸收的能量少、反馈的能量多，且随着目标速度升高，两者吸收能量以及反馈能量的差值逐步放大。以上仿真计算结果与已有的4组试验数据吻合度极高，且对试验未覆盖的部分进行了有效补充与验证。针对降低级位时再生率降低的现象，也同样可采用能速比的观点进行解释，其中降低牵引级位增加了能速比，降低制动级位降低了能速比，此处不再赘述及罗列计算。

③ 空调不投入使用的前提下，永磁车辆的辅助能耗是感应车辆的3~4倍。

永磁车辆与感应车辆的整车交直辅助负载差异仅在牵引系统散热方式上，永磁车辆的牵引逆变器采用强迫风冷，感应车辆的牵引逆变器采用走行风冷。永磁车辆单台冷却风扇额定功率2.5 kW，逆变器及风扇综合效率0.75，永磁车辆整车冷却系统能耗较感应车辆增加13.52 kW。通过对各工况单次时间的计算，将风扇能耗从总量中拆分，具体见表3。

表3　辅助能耗拆分比较

Table 3　Split comparison of auxiliary energy consumption

工况	行驶时间/s	风扇能耗/(kW·h)	永磁辅助能耗/(kW·h)	永磁除风扇外辅助能耗/(kW·h)	感应辅助能耗/(kW·h)	辅助/牵引能耗比	
						永磁	感应
I	50.65	0.19	0.27	0.08	0.07	7.4%	1.2%
II	37.69	0.14	0.18	0.04	0.05	10.8%	1.7%
III	49.67	0.19	0.28	0.09	0.07	15.1%	2.0%
IV	34.11	0.13	0.20	0.07	0.06	29.4%	3.0%

剥离逆变器的风扇能耗后，永磁车辆与感应车辆的辅助能耗基本一致。另外，风扇为固定负载，其能耗仅与功率、工作时间相关，如以kW·h/km计量则受运行速度影响，并不能准确反映辅助能耗情况。因此，低旅行速度的运行方式将放大绝大部分地铁运营公司所计量的辅助能耗。可以预见，随着运营载客后其他辅助负载的投入，永磁车辆整车的节能率将进一步降低。

1.3　惰行试验与仿真计算

通常在非全加速模式下，车辆在运营中存在一定比例的惰行工况，列车在运行阻力的单独作用下加速或减速。惰行时，感应车辆将保持一定的励磁电流i_m以待重投，永磁系统将根据反电势的幅值，采用弱磁技术以规避再生制动。不计漏磁与谐波磁通，感应电机通过调节定子电流与转差频率进行惰行控制，根据磁动势与电流平衡可知，惰行时其负载电流分量为0，定子电流近似于励磁电流分量；永磁电机通过施加反向i_d，维持升速时的电压平衡。同时i_q为0，定子电流近似于直轴分量。通过对比两者的惰行电流及焦耳效应进行能耗评估。限于篇幅，以下将简述工作方法并直接给出结果。

永磁系统的数学模型相对简单[8-9]，永磁电机因反电势为动生电势，据此可求得等效磁链（含斜槽、绕组、气隙磁通波等系数）。通过电压极限椭圆圆心坐标，结合电机三相稳态短路电流，求得对应磁场强度下的L_d。结合直流电阻，采用向量法，解方程可求得i_d的2个解，容易排除1个无效解。考虑到d、q轴的饱和程度未知，由惰行实测数据对直轴电感计算值略做修正，遂得到实际的i_d曲线。

感应系统的数学模型相对复杂，通过空载试验与堵转试验获取励磁参数和定子转子漏抗。惰行时不计转子铜损、铁损，结合定子直流电阻，由向量法计算出理论的i_m。在此基础上，通过惰行实测数据对数据进行修正与拟合，得到实际的i_m曲线。

i_m与i_d曲线见图6。图6中P_p/P_i为永磁焦耳功率同感应焦耳功率的比值，采用右侧纵坐标表示。

由图6可见，车辆速度在65 km/h以下永磁体的反电势幅值无需弱磁，焦耳功率为0。感应的焦耳功率远高于永磁。i_d投入后的极值（80 km/h）亦略小于i_m，且永磁直流电阻约为感应的1/2，利于降低电流损耗。

车辆速度在75 km/h以上，i_d与i_m接近，若感应车辆适当降低励磁，其焦耳功率可低于永磁。经过计算，80 km/h时感应车辆i_m降低31%，则损耗量即等同于永磁车辆。

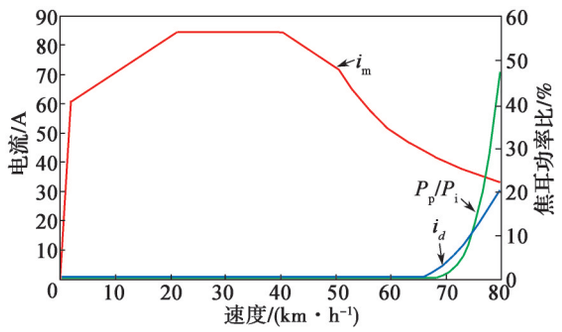


图6 惰行时永磁/感应电流与焦耳功率比

Fig. 6 Ratio of permanent magnet / induction current to Joule power during coasting

分别在AW0/AW2/AW3载荷下，在平直道上列车以80 km/h的速度惰行40 s的阻力等效减速度及列车速度仿真计算见图7（0/2/3分别对应AW0/AW2/AW3载荷，v为列车速度，a为阻力等效减速度并采用右侧纵坐标表示）。

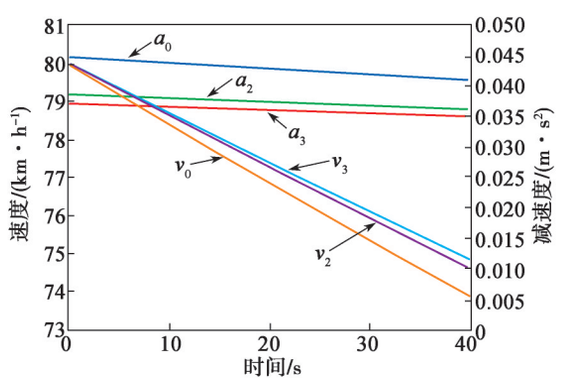


图7 AW0/AW2/AW3载荷下80 km/h初速惰行40 s的减速度与速度曲线

Fig. 7 Deceleration and speed curve of coasting at 80 km/h initial speed for 40 s under AW0/AW2/AW3 load

80 km/h至75 km/h，运行基本阻力折算后对应AW0、AW2、AW3载荷的平均加速度分别−0.043 1 m/s²、−0.037 4 m/s²、−0.035 9 m/s²，运行时长分别需32.1 s、37.0 s、38.5 s，其时长可观，具备节能的价值，且从感应系统自身优化的角度出发，节能收益不言而喻。

1.4 巡航的仿真计算

本文定义的巡航是牵引制动的一种特殊形式，指车辆达到目标速度后，克服阻力而保持恒速的运行方式，具有高转速、低级位特征，因此通过基地试车线试验得到的牵引吸收、再生反馈的规律同样适用。但因其合外力为零，故将其与牵引加速与制动停车过程区分讨论。考虑到理想巡航的实现条件苛刻、数据获取难度高，因此采用仿真计算的方法进行探讨。平直道、AW0载荷列车的牵引巡航能耗计算如图8所示（p为永磁能耗，i为感应能耗，p/i为永磁相对感应的巡航相对节能率）。

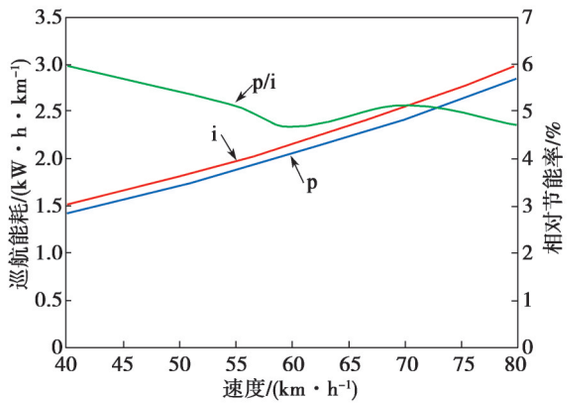


图8 AW0载荷平直道巡航能耗及永磁相对节能率

Fig. 8 Energy consumption of cruise on straight level track and energy saving rate of permanent magnet under AW0 load

在该边界条件下，巡航曲线形态、变化规律同牵引吸收类似。级位低，节能率相应较低，节能率反比于目标速度。基本阻力是车辆静态质量（含载重质量）与速度的函数，坡道阻力是车辆静态质量与重力加速度及坡道千分数值的乘积，两者均可等价为附加转矩。因此，当在恒定下坡，坡道阻力分量高于基本阻力时，巡航以小级位制动维持恒速，此时相应能耗曲线形态及变化规律同再生反馈，不再展开讨论。

1.5 小结

根据以上的分析，可以看到，本项目永磁系统的各项能耗表现均优于感应系统，具体如下：

① 同目标速度下，永磁系统的牵引吸收量低于感应系统，再生反馈量高于感应系统。其牵引吸收、再生反馈及其派生系数再生率在低转速区的优势均尤为明显，随着电机转速的升高优势相对收缩。

② 惰行工况下，相比全速度范围下均需保持励磁电流的感应系统，低转速阶段永磁系统理论上无电流损耗，仅在高速时存在弱磁电流，且在高速区时其焦耳功率极值仍低于感应系统。

③ 巡航工况下，永磁系统相比感应系统能耗的增幅呈现了局部的非单调性，但宏观上仍与牵引、制动的相关能耗变化规律相同。由于需求转矩较小，永磁的优势相对级位较大时的表现略有降低。

④ 辅助能耗由于逆变器冷却方式的变动，永磁系统辅助能耗将高于感应系统。相同运行环境下，该差值将作为以运行时间为自变量的一次函数，对整车的节能率与牵/辅能耗分配产生影响。

2 正线试验

2.1 试验说明

在上文研究的基础上，选取4号线已经完成弓网热

滑试验区段 11.2 km 进行正线试验，将以上各工况耦合后观察其综合表现。试验选取永磁、感应车辆各 1 列，分别以 AW0 载荷、AW3 载荷、停站 5 s、上下行不折返往复的方式运行。因试验实施时 ATO 运行功能尚未具备，故试验沿用 URM 操作模式。

在考虑曲线平衡速度、欠超高 61 mm 下通过速度、司机操作一致性的基础上，制定了 8 站 7 区间的运作规则。区间纵断面特征（右线除平道外的坡度及长度）、区间限速值、站间距见表 4。

车辆出站采取 100% 级位牵引至区间限速，之后保持巡航（恒速），进站时以 80% 给定进行常用制动，忽略平纵断面信息的理想运行模型见图 9。为展现巡航区的牵引特性，阻力采用右侧纵轴坐标表示。该运行模型同载客运营模型基本框架相同，故下文将采用 kW·h/km 的常规计量方式对数据进行处理。

2.2　试验数据分析

试验于 2020 年 7 月上旬完成，总能耗数据记录如表 5。

表 4　线路及限速信息（单向/右线）

Table 4　Line and speed limit information (one-way / right track)

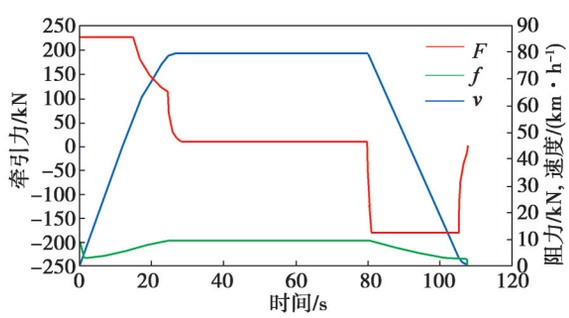
序号	区间	站间距/m	限速/(km·h^{-1})	坡道千分值/坡道长度			
				①段	②段	③段	④段
1	官山河→长兴路	1 526	70	3/867	−5.7/315		
2	长兴路→金山路	1 360	70	−10.9/599	12/536		
3	金山路→奥体中心	2 028	70	−27/280	7/400	−5.8/350	20/370
4	奥体中心→洪塘中路	1 377	70	−18/340	2/300	−5.8/295	28/230
5	洪塘中路→洪大路	2 014	70	−27/255	7/785	−5.8/775	
6	洪大路→庄桥火车	1 221	55	−27.4/250	−28/310	−28.4/375	
7	庄桥火车→丽江路	1 675	55	28/205	−5.2/315	10/300	18/320

注：坡道千分值为 i‰；坡道长度单位为 m。

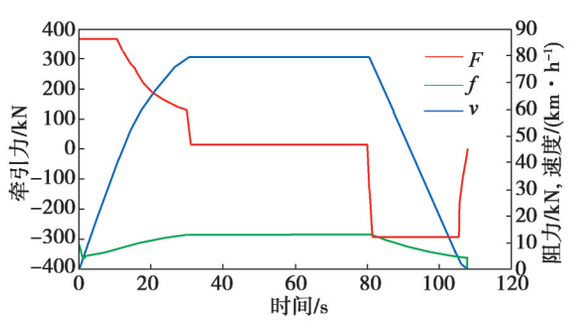
表 5　正线试验记录数据

Table 5　Record data of tests on main line

载荷	试验里程/km		牵引吸收/(kW·h)		再生反馈/(kW·h)		辅助系统能耗/(kW·h)		总能耗/(kW·h)	
	永磁	感应	永磁	感应	永磁	感应	永磁	感应	永磁	感应
AW0	502.4	501.7	4 866	5 397	3 168	2 881	281	76	1 979	2 592
AW3	89.6	89.4	1 218	1 322	825	734	133	48	526	636



（a）AW0 载荷



（b）AW3 载荷

图 9　AW0/AW3 载荷及 100% 牵引−巡航−80% 制动正线区间运行模型

Fig. 9　Operation model under AW0 / AW3 loads and 100% traction-cruising-80% braking in main line section

统一将量纲转换为 kW·h/km，并对其各项指标进行比较，见表 6

可见相近旅行速度下，AW0 工况每公里总能耗永磁为 3.94 kW·h/km，感应为 5.17 kW·h/km，永磁相对感应节能 23.8%，如滤除辅助部分后（即表 6 中的牵引能耗），节能比例达 32.5%。AW3 工况每公里总能耗永磁为 5.87 kWh/km，感应为 7.11 kWh/km，永磁相对感应节能 17.4%，滤去辅助部分后节能比例达 33.3%。牵引节能率稳定，整车节能率受辅助系统能耗影响大。

工况 AW3 相对 AW0 的能耗增幅见表 7，数据呈近线性。就测试数据而言，相对节能率对载荷不敏感。

2.3　永磁能耗的跨线路评估

本文写就时 4 号线尚未试运行及试运营，暂无法获取运营的实际数据。因此，本节基于上文的成果，并结合既有线已有能耗统计数据，对永磁车辆在 4 号线以及假定运用至既有线后的能耗进行估算作为预期与参考。以下简述计算前提、假定与方法：

① 能耗对线路依赖性强，宁波已运营线路 3 条，株洲中车时代电气股份有限公司供货 1 号线二期、2 号线一期、3 号线牵引系统，线路覆盖完整，且各线路车

表6　正线试验每公里能耗数据

Table 6　Data energy consumption per kilometer in tests on main line

工况	分项	旅行速度/(km·h^{-1})	牵引吸收/(kW·h·km^{-1})	再生反馈/(kW·h·km^{-1})	辅助系统能耗/(kW·h·km^{-1})	总能耗/(kW·h·km^{-1})	牵引能耗/(kW·h·km^{-1})	再生率
AW0	永磁	50.63	9.69	6.31	0.56	3.94	3.38	65.10%
	感应	50.92	10.76	5.74	0.15	5.17	5.01	53.35%
	永磁相对感应增幅	–	−9.9%	9.9%	273.3%	−23.8%	−32.5%	22.02%
AW3	永磁	50.01	13.59	9.21	1.48	5.87	4.39	67.77%
	感应	50.75	14.79	8.21	0.54	7.11	6.58	55.51%
	永磁相对感应增幅	–	−8.1%	12.2%	174.1%	−17.4%	−33.3%	22.01%

表7　AW3载荷下相对AW0载荷的能耗增幅对比

Table 7　Comparison of energy consumption increase under AW3 load/AW0 load　%

分项	牵引吸收	再生反馈	总能耗	再生率
永磁	40.4	46.0	29.8	4.0
感应	37.5	43.0	31.2	4.0

辆牵引系统主要部件与性能无差异，故具备跨线折算条件。以既有线实际能耗为标准，将4号线永磁AW0能耗按比例折算。

② 既有线仅3号线设中压能馈装置，计算中假定各线路均可实现100%再生。将既有线统计的再生能馈统一按除以0.8折算。

③ 为排除辅助能耗的干扰，据既有线2019年8月的辅助能耗均值作为感应系统的基值，永磁在此基础上增加牵引逆变器强迫风冷的功耗，其数值等于冷却功率除以旅行速度。

因涉及计算量大，直接将折算结果罗列如表8。

表8　100%回馈永磁车辆运行于既有线的能耗估算

Table 8　Energy consumption estimation for permanent magnet trains with 100% feedback running on existing lines

线路	站间距/km	旅行速度/(km·h^{-1})	类别	牵引吸收/(kW·h·km^{-1})	再生反馈/(kW·h·km^{-1})	辅助系统能耗/(kW·h·km^{-1})	总能耗/(kW·h·km^{-1})	牵引能耗/(kW·h·km^{-1})	再生率
L1	1.62	40.74	感应	10.62	6.09	3.41	7.94	4.53	57.34%
			永磁	9.56	6.69	3.74	6.61	2.87	69.98%
			永磁相对感应增幅	−9.98%	9.85%	–	−16.75%	−36.64%	22.03%
L2	1.33	35.37	感应	11.26	6.26	3.41	8.41	5.00	55.60%
			永磁	10.14	6.88	3.79	7.05	3.26	67.85%
			永磁相对感应增幅	−9.95%	9.90%	–	−16.17%	−34.80%	22.03%
L3	1.15	33.56	感应	11.35	5.97	3.41	8.79	5.38	52.60%
			永磁	10.22	6.56	3.81	7.47	3.66	64.19%
			永磁相对感应增幅	−9.96%	9.88%	–	−15.02%	−31.97%	22.03%

可见，折算后永磁系统在既有线运行，牵引能耗与感应系统相比节能率超32%左右。如计入8月高温下的空调高功耗负载对冲，则永磁系统整车能耗节能率约为15%。因试验区间的平均站间距为1.6 km, 以每站停车30 s、折返3 min计，其平均旅行速度38 km/h。因此推断表8中的节能率1号线相比实际值偏高，2、3号线相比实际值偏低。

4号线全线开通后，其平均站间距1.49 km，假定旅行速度38 km/h，依上文推算牵引节能率预期可超33%，整车节能率20%，运行1 km节电超1.5 kW·h，全年节约电费逾600万元。

3　结语

本文通过试验与仿真，对永磁车辆与感应车辆的牵引吸收、再生反馈、惰行能耗、再生率等能耗性能进行了解耦分析。结合正线试验、既有线统计数据与折算对运营后的能耗表现做了预期。根据上述工作，文章提出以下观点：

① 永磁系统在短站间距、低旅行速度的应用场景下的优势明显，在长区间、高旅行速度的场景中，优势将相对收窄。因此，永磁系统尤为适用于站点密集的城市轨道交通项目。

② 永磁系统的能量利用率优势明显，但受限于邻车吸收容量。通常在无能馈项目中，感应再生率维持在45%~50%。如以永磁车辆低吸收高反馈的特点，估算将有近35%的再生能量无法得到吸收而导致浪费，如采用制动电阻，反而需要提升制动电阻的功率。因此，永磁系统尤为适用于牵引变电所搭配能馈装置的线路，并以系统性的方案进行部署。

③ 永磁系统在加速明显的牵引、制动过程中优势明显。因此，永磁系统尤为适用于运输压力大、行车密度高、配车数相对紧张的线路，采用信号的全加速模式等高运行等级，可兼顾效率与经济性。

④ 统计上，以 kW·h/km 为单位的计量方式，将原仅与时间相关的辅助能耗与旅行速度产生了关联，在统计中应予以辨识。

另外，有 3 条优化建议供参考：

① 永磁牵引逆变器风扇启停优化。目前为牵引、辅助上电即工作。可利用置位优先（SR）模块，综合考虑牵引、制动命令、参考速度、零速信号、紧急制动状态等设计置、复位逻辑，对风扇启停做细化控制，降低散热能耗。

② 牵引外特性曲线优化。常规牵引外特性根据 AW3 载荷下描绘恒转矩、恒功率、自然特性的包络线，该载荷以下根据给定转矩与包络线的交点动态地决定转折速度。4 号线一期采用与载重不相关的固定 40 km/h、55 km/h 的转折点，运营计量中其相对常规外特性感应系统的节能率为 11%。调整外特性后，整车达到 80 km/h 与 40 km/h 的加速度均可满足行业标准要求，无论是永磁系统还是感应系统，均具有应用的价值。

③ 感应系统惰行励磁弱磁优化。在保证牵引制动命令响应速度及重励磁可靠的前提下，保持尽可能低的励磁电流，降低定子铁损、铜损，缩小与中低速区间永磁的惰行能耗差值。在高转速时，具备以更低损耗运行的可能性，提升感应系统的节能率。

限于本人水平，以及试验、仿真、计算等客观条件上的诸多限制，文章必有疏漏与不足之处。望能够抛砖引玉，给业内同仁提供一些思路与借鉴，并恳请交流指正。

参考文献：

[1] 郭淑英. 永磁同步传动系统现状及应用[J]. 机车电传动, 2014(3): 1-5.
GUO Shuying. Current situation and application of PMSM driver system[J]. Electric Drive for Locomotives, 2014(3): 1-5.

[2] 冯江华. 轨道交通永磁电机牵引系统关键技术及发展趋势[J]. 机车电传动, 2018(6): 9-17.
FENG Jianghua. Key technology and development trend of permanent magnet motor traction system for rail transit[J]. Electric Drive for Locomotives, 2018(6): 9-17.

[3] 许峻峰, 李耘笼, 许建平. 永磁同步电机作为机车牵引电机的应用现状及前景[J]. 铁道学报, 2005(2): 130-132.
XU Junfeng, LI Yunlong, XU Jianping. Present situation and perspect of applying permanent magnet synchronous motors to railway locomotives[J]. Journal of the China Railway Society, 2005(2): 130-132.

[4] 冯江华, 桂卫华, 符敏利, 等. 铁道车辆牵引系统用永磁同步电机比较[J]. 铁道学报, 2007(5): 111-116.
FENG Jianghua, GUI Weihua, FU Minli, et al. Comparison of permanent magnet synchronous motors applied to railway vehicle traction system[J]. Journal of the China Railway Society, 2007(5): 111-116.

[5] 刘良杰, 陈文光, 刘雄, 等. 地铁永磁同步牵引系统节能技术研究[J]. 机车电传动, 2018(6): 23-25.
LIU Liangjie, CHEN Wenguang, LIU Xiong, et al. Research on energy saving technology of metro permanent magnet synchronous traction system[J]. Electric Drive for Locomotives, 2018(6): 23-25.

[6] 王淼, 张豪. 永磁牵引电机在下一代地铁上的应用[J]. 机电工程技术, 2020, 49(4): 174-176.
WANG Miao, ZHANG Hao. Application of permanent magnet traction motor in the next generation metro[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2020, 49(4): 174-176.

[7] 郭晓燕, 张黎. 永磁同步电机在铁道牵引领域中的应用[J]. 铁道机车车辆, 2005, 25(增刊 1): 61-65.
GUO Xiaoyan, ZHANG Li. Application of permanent magnet synchronous motor to driving railway vehicle[J]. Railway Locomotive & Car, 2005, 25(Suppl 1): 61-65.

[8] 何亚屏, 文宇良, 许峻峰, 等. 基于多模式 SVPWM 算法的永磁同步牵引电机弱磁控制策略[J]. 电工技术学报, 2012, 27(3): 92-99.
HE Yaping, WEN Yuliang, XU Junfeng, et al. High-power permanent magnet fiux-weakening strategy based on multimode SVPWM[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(3): 92-99.

[9] 刘可安, 许峻峰, 文宇良, 等. 地铁车辆用永磁同步牵引电动机地面试验研究[J]. 大功率变流技术, 2012(3): 20-24.
LIU Kean, XU Junfeng, WEN Yuliang, et al. Experimental research of permanent magnet synchronous traction motor for metro vehicle[J]. High Power Converter Technology, 2012(3): 20-24.

收稿日期：2022-02-17
修回日期：2022-11-30