

永磁同步电机牵引系统在成都地铁上的应用优化方案研究

唐 林

(成都地铁运营有限公司 车辆一中心, 四川 成都 610031)

摘 要: 介绍了城市轨道交通行业的节能需求和成都地铁的发展概况, 以成都地铁 10 号线为例阐述了永磁同步电机牵引系统在地铁领域应用的优化设计方案, 并分析了永磁同步电机牵引系统在成都地铁的节能经济效益预期。根据仿真计算得出: 再生能量充分回馈条件下, 永磁牵引列车节能率可达 25%~28%。

关键词: 永磁同步电机; 牵引系统; 成都地铁; 优化方案; 节能

中图分类号: TM351; U231

文献标识码: A

doi: 10.13890/j.issn.1000-128x.2019.01.009

Study on Application and Optimizing Scheme of Permanent Magnet Synchronous Motor Traction System in Chengdu Metro

TANG Lin

(First Vehicle Center, Chengdu Metro Operation Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: The energy-saving demand of urban rail transit industry and the development of Chengdu metro was introduced. Taking Chengdu metro line 10 as an example, the optimal design scheme of the application of permanent magnet synchronous motor traction system in metro field was expounded, and the energy-saving and economic benefit expectation of the permanent magnet synchronous motor traction system was analyzed in Chengdu metro. According to the simulation calculation, the energy saving rate of permanent magnet traction train can reach 25% - 28% under the condition of full regeneration energy feedback.

Keywords: permanent magnet synchronous motor; traction system; Chengdu metro; optimization scheme; energy saving

0 引言

永磁同步电机牵引系统具有效率高、功率密度高、维护量低等显著的技术优势, 被业界视为下一代轨道交通牵引系统的发展方向。永磁同步牵引系统在我国城市轨道交通领域已经通过现场试验考核, 技术性能得到实践验证, 节能效益凸显, 目前正处于大批量推广应用阶段。

截至 2017 年 12 月 31 日, 中国内地累计有 34 个城市共建成投运城市轨道交通线路 5 021.7 km, 其中地

铁 3 881.8 km, 占线路总长的 77.3%, 同时列车电气牵引系统能耗占城市轨道交通系统总能耗的 40%~60%, 而永磁牵引列车节能率可达 15%~30%。因此推广应用高效节能的永磁同步牵引系统技术, 对于我国城市轨道交通而言具有非常现实的意义。

本文以成都地铁 10 号线为例, 介绍永磁同步电机牵引系统的优化设计要点以及与异步电机牵引系统的差异。通过节能仿真计算, 分析推广应用永磁同步电机牵引系统对于成都地铁潜在的巨大经济效益。

1 成都地铁概况

成都地铁 1 号线于 2010 年 9 月 27 日正式开通,

这是中国中西部首条地下铁路线。成都成为中国内地第 10 个拥有轨道交通（地铁）的城市。

成都地铁 2016 年度发送乘客 5.61 亿人次，日均客流达到 153.21 万人次，列车正点率 99.99%，公共交通分担率达 35% 左右。

成都市已经规划了 46 条线路和超过 2 450 km 的轨道交通网络。截至 2017 年 12 月，成都地铁共开通 6 条线路（1 号线、2 号线、3 号线、4 号线、7 号线、10 号线），线路总长约 179 km，共计 120 多座车站投入运营（换乘站不重复计算）。截至 2018 年 1 月，成都地铁在建线达到 11 条（15 个项目，里程 335.96 km），预计 2020 年底前全部通车，届时开通里程将达到 515.72 km。

2 永磁同步电机牵引系统优化设计

成都地铁 10 号线列车为 100 km/h 速度等级的 A 型车，采用 4 动 2 拖编组方式：+Tc1-Mp1-M1-M2-Mp2-Tc2+，其中 Tc1 车、Tc2 车为带司机室的拖车，Mp1 车、Mp2 车为配有受电弓的动车，M1 车、M2 车为无受电弓的动车。列车采用 DC 1 500 V 架空接触网受电方式，Mp1 车、Mp2 车、M1 车、M2 车上各配置 1 套牵引系统。

2.1 牵引 / 电制动特性优化设计

永磁同步电机牵引系统在长沙等地的应用考核中，为了尽量匹配信号系统，其仍然采用异步牵引系统的牵引 / 电制动特性。但该牵引 / 电制动特性是匹配异步电机的技术特点而设计的，永磁同步电机的高速过载能力强，仍沿用该特性不利于发挥永磁同步电机的技术优势。因此，这里根据永磁同步电机高速过载能力强的特点对成都地铁 10 号线异步牵引系统列车的牵引 / 电制动特性进行了优化设计，如图 1 所示。

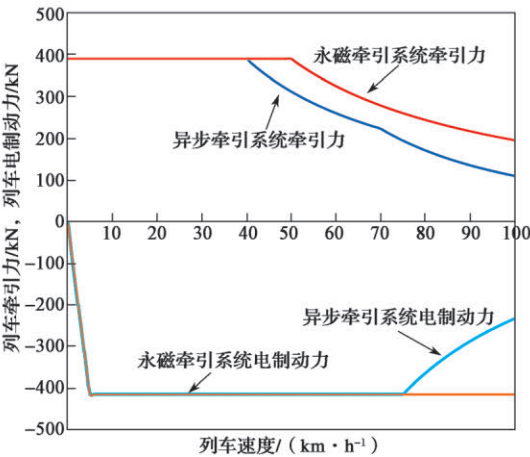


图 1 牵引 / 电制动特性优化

牵引特性中，将恒牵引力区转折点由 40 km/h 处后移至 50km/h，并取消自然特性区，50~100 km/h 采用恒功率特性。电制动特性中，取消 76 km/h 之后的自然特性区，全速度范围内采用恒电制动力特性。

将优化前与优化后的 2 组牵引 / 电制动特性分别代入线路仿真系统中，得出列车各主要性能指标如表 1 所示。

表 1 牵引 / 电制动特性优化对比分析

性能指标	优化前数值	优化后数值
0~100 km/h 平均加速度 / (m·s ⁻²)	0.671	0.872
100~0 km/h 平均电制动减速度 / (m·s ⁻²)	-0.986	-1.074
平均运营速度 / (km·h ⁻¹)	57.1	57.6

由表 1 可知，根据永磁同步电机技术特点对列车的牵引 / 电制动特性进行优化后，列车的平均加速度和平均电制动减速度均得到了明显提升，平均运营速度也得到了有效提高。因此，优化后的牵引 / 电制动特性具有技术优势，更能体现永磁同步牵引系统的技术特点。

2.2 主电路优化设计

根据成都地铁 10 号线列车应用需求设计的永磁同步牵引系统的主电路如图 2 所示。

永磁同步牵引电机为同步电机，其必须采用轴控（独立）供电方式。轴控方式大幅增加了电力电子开关数量，但也在故障冗余性、黏着利用、轮径容差等方面带来了优势。

永磁同步牵引电机的转子采用永磁体励磁，故障时无法通过封锁牵引逆变器脉冲来关断牵引电机反电势，因此牵引逆变器与永磁同步牵引电机之间设置三相隔离接触器，用来在故障时隔离永磁同步牵引电机反电势，以避免影响系统设备。

2.3 永磁同步电机优化设计

随着地铁永磁同步电机在长沙、北京、天津等城市相继投入应用，在节能减排等方面取得了良好的示范效应。在总结前期地铁永磁同步电机应用经验的基础上，针对成都地铁实际运营工况，优化设计新型地铁永磁同步电机，力求在功率密度、效率、噪声等方面更具技术优势。

2.3.1 更高功率密度的永磁同步电机设计

为进一步提升永磁同步电机功率密度，采用如下优化设计方法：

①优化电机冷却结构，增加散热面积，提升散热效率，减少有效部分体积，降低有效材料重量，实现功率密度提升。图 3 为新型永磁同步电机在额定工况下的流体场分布。

②优化电机结构设计，选取强度更高的材料，降低结构件重量。

针对成都地铁开发的新型地铁永磁同步电机与既有长沙地铁永磁同步电机参数对比如表 2 所示。经过优化设计后的地铁永磁同步电机功率密度提升 13%，与异步电机相比提升 40% 以上，具有明显的轻量化优势。

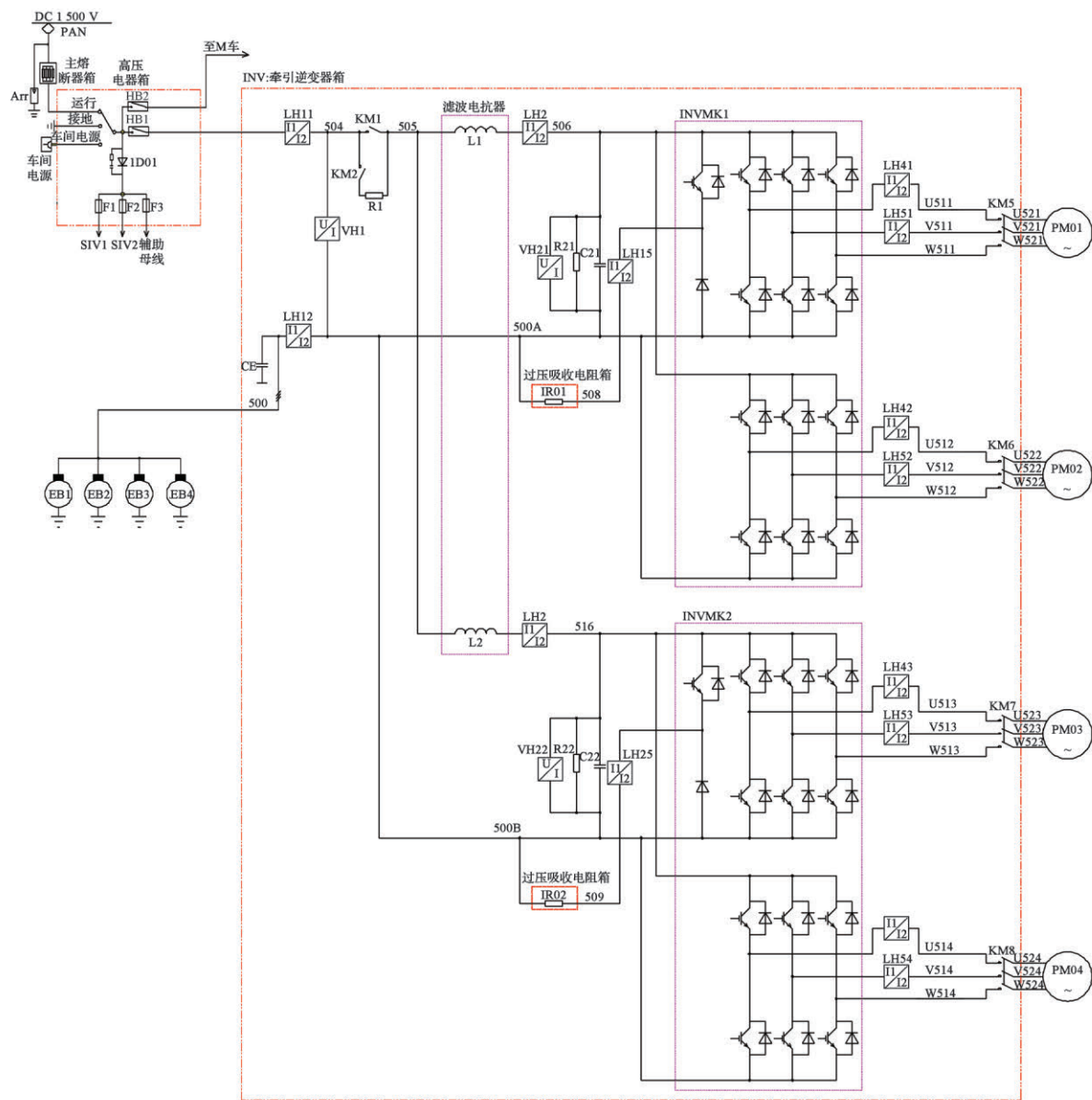


图 2 永磁同步牵引系统主电路

表 2 功率密度对比

项目	异步电机	既有永磁电机	新型永磁电机
功率 /kW	190	230	230
质量 /kg	590	550	485
功率密度 /(kW·kg ⁻¹)	0.322	0.418	0.474

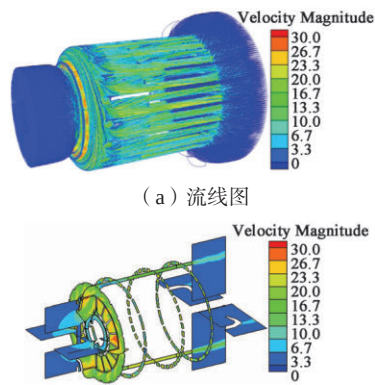


图 3 流体场仿真

2.3.2 更高效率的永磁同步电机设计

为进一步提升地铁永磁同步电机节能效果，针对地铁车辆实际运行线路，开展全路况条件下的节能优化设计，通过以下措施提升电机效率：

- ①针对车辆运营全路况，结合离散空间最优化搜索理论，采用多目标最优化设计，选取合适的电磁负荷，确保在全路况条件下的每个工作点都具有最优效率。
- ②采用低损耗硅钢片，降低全转速范围内的电机铁耗。
- ③通过加大定子绕组截面积，减小定子电阻，降低绕组铜耗。

通过上述优化方法，永磁同步电机额定效率由 97% 提升至 97.6%，降低损耗 1.14 kW，且实现全转速范围内的效率均衡提升，在地铁实际运营中的节能效果将更加显著。

2.3.3 更低噪声的永磁同步电机设计

随着技术的进步，用户对于牵引设备的噪声要求

越来越高。为进一步提升地铁永磁同步电机技术优势，针对电机气动噪声和电磁噪声进行专项研究，通过以下措施进一步降低永磁同步电机噪声：

- ①通过优化风扇形状及风道结构，抑制尾部涡流，减小气流对壁面的冲击作用，平抑通过频率下噪声能量，降低高速下的气动噪声。
- ②通过电机电磁激励力型与结构振型分析，避免电机运行产生共振，并结合与逆变器的匹配优化，降低低速下永磁同步电机的电磁噪声。

625 Hz 下声压级云图如图 4 所示。通过优化设计后，新型地铁永磁同步电机在最高转速下的噪声降低 3 dB(A)，在低速阶段的平均噪声降低 2.83 dB(A)，取得良好的降噪效果。

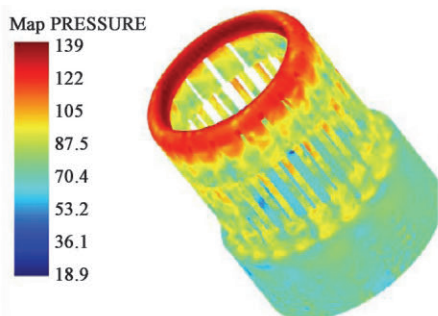


图 4 625 Hz 下声压级云图

2.4 永磁牵引逆变器优化设计

2.4.1 应用问题

永磁牵引逆变器在长沙、北京、天津等地铁进行应用考核，表现出了稳定可靠的性能，但还存在以下问题：

- ①采用分立式布局，设备数量多而分散，包括高压电器箱、线路电抗器、牵引逆变器、隔离接触器箱等 4 种设备 5 个柜体，安装复杂且体积重量较大。
- ②牵引逆变器输出能力不足，无法满足高速度等级地铁列车的应用需求。
- ③走行风冷结构（见图 5），冷却效果受地铁车速制约，且地铁车下各设备的布局可能影响走行时的冷却风速。



图 5 走行风冷永磁牵引逆变器

2.4.2 优化设计方案

针对上述问题，根据成都地铁 10 号线车辆牵引系统高功率需求等应用要求，对永磁牵引逆变器进行了如下优化设计：

- ①将原有的牵引逆变器、高压电器箱、线路电抗器、

隔离接触器箱等设备集成在一个设备箱，通过高集成度牵引逆变器布局设计与铝合金轻量化结构材料的应用，实现了设备体积与重量的降低。

- ②利用电力电子器件代系更迭，采用同封装的 3 300 V/500 A 双管元件替代原有的 3300 V/400 A 双管元件，功率损耗降低 10% 以上，额定输出电流可提高 25%，可满足 100 km/h 以上速度等级地铁列车的高功率需求。

- ③采用强迫风冷结构及优化风道布局，解决了原有走行风冷结构受车速的制约与车下设备布局的不确定性影响等问题，大幅提升了逆变器的冷却效率。

优化设计后的新型永磁牵引逆变器如图 6 所示，采用强迫风冷的一体化集成结构与铝合金轻量化结构材料。

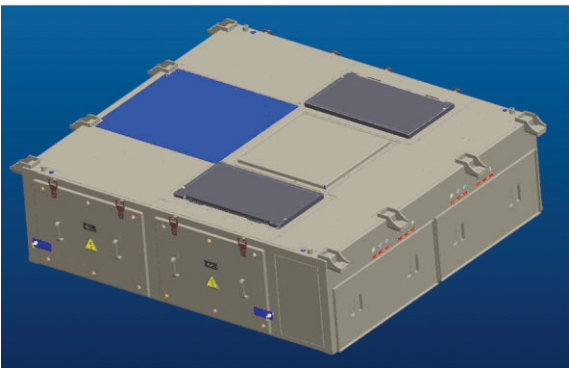


图 6 新型强迫风冷永磁牵引逆变器

2.4.3 优化效果对比

①新型永磁牵引逆变器优化设计后的第一个技术优势是设备数量减少、重量降低，其与在长沙等地应用的原有永磁牵引系统相比，设备质量减少 240 kg，如表 3 所示。

表 3 永磁牵引系统设备质量对比 kg

设备	原有永磁牵引系统	新型永磁牵引系统
牵引逆变器	510	1 100
高压电器箱	240	—
线路电抗器	440	—
隔离接触器箱	2 × 75	—
总质重	1 340	1 100

②提升输出能力与容量密度是新型永磁牵引逆变器的另一个技术优势。与原有永磁牵引逆变器相比，额定输出容量与容量密度对比如表 4 所示，额定容量提升 25%，容量密度提升了 52%，新型永磁牵引逆变器的应用范围可以涵盖当前国内最大功率需求的地铁列车。

表 4 永磁牵引系统设备额定容量与容量密度对比

项目	原有永磁牵引 逆变器	新型永磁牵 引逆变器	指标变化 / %
质量 / kg	1 340	1 100	-18
额定容量 / kVA	4 × 324	4 × 405	25
容量密度 / (kVA · kg ⁻¹)	0.967	1.473	52

2.5 地铁永磁同步牵引系统与异步牵引系统的差异分析

成都地铁 10 号线异步牵引系统的主电路图如图 7 所示。

地铁永磁同步牵引系统与异步牵引系统的主要技术差异点如表 5。

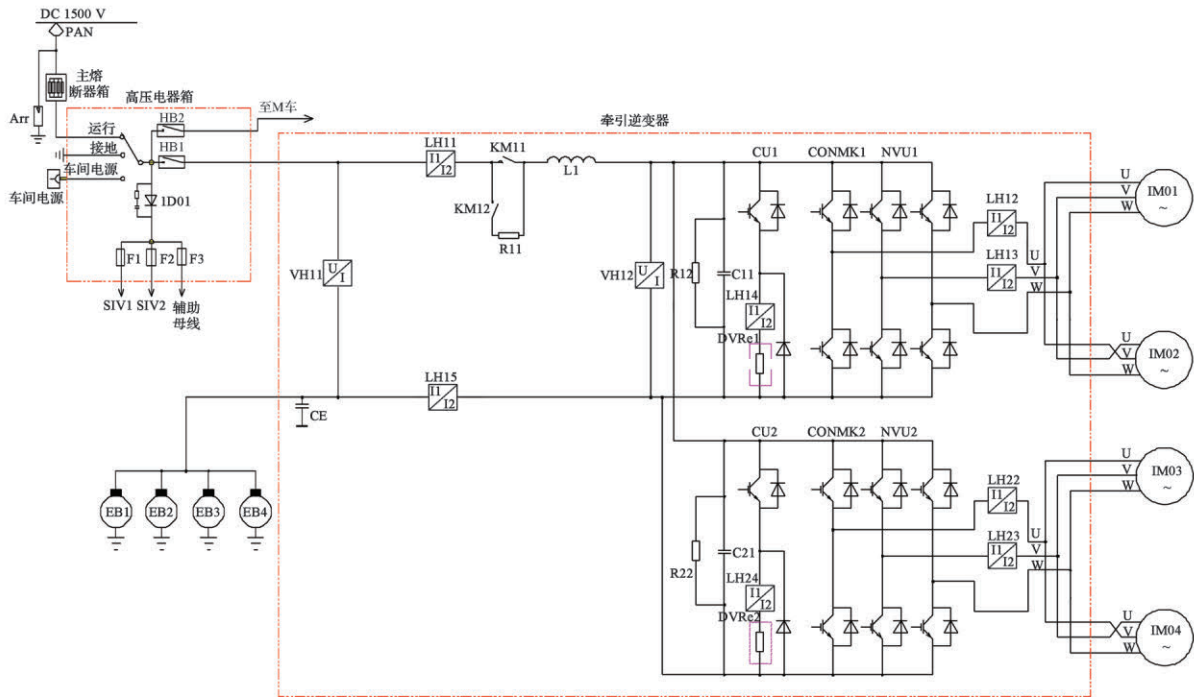


图 7 异步牵引系统主电路原理图

表 5 永磁同步牵引系统与异步牵引系统主要技术差异点

项目	异步牵引系统	永磁同步牵引系统
控制模式	采用并联供电（群控），同车轮径差要求不大于 8 mm	为了保持定转子同步转速，采用独立供电（轴控）方式，对轮径差无要求
IGBT	3 300 V/800 A 单管 IGBT 元件，2 个三相逆变单元	3 300 V/500 A 双管 IGBT 元件，4 个三相逆变单元
滤波电抗器	单线圈结构	双线圈结构，抑制逆变模块间因脉冲不同步而导致的环流
隔离接触器	无	每台电机配置 1 台三相隔离接触器，用以在永磁电机故障时隔离不可关断的反电势
牵引电机	异步牵引电动机，配置速度编码器	永磁同步牵引电动机，配置位置传感器（旋转变压器）

表 6 永磁牵引系统与异步牵引系统列车能耗仿真对比

电制动 能量回 馈率 / %	旅行 速度 / (km·h ⁻¹)	异步牵引 列车能耗 / (kW·h·km ⁻¹)	永磁牵 引列车能耗 / (kW·h·km ⁻¹)	节能率 / %	
					载荷
AW0	0	59.19	15.83	14.42	8.88
AW0	100	59.19	6.21	4.66	24.91
AW2	0	58.61	21.04	19.77	6.04
AW2	100	58.61	8.22	6.14	25.32
AW3	0	57.91	23.05	20.97	9.06
AW3	100	57.91	9.23	6.63	28.19

3 节能效果与经济效益

3.1 能耗仿真分析

成都地铁 10 号线全长 38.2 km，其中地下线 24.3 km，地上线 13.9 km，共设置车站 16 座。

分别将永磁同步牵引系统与异步牵引系统的参数代入仿真系统中，按照成都地铁 10 号线的线路条件进行仿真计算（牵引网压 DC 1 500 V，电制动网压 DC 1 650 V），得到表 6 的能耗数据。

根据仿真计算结果得出：再生能量充分回馈条件下，永磁牵引列车节能率可达 25%~28%。

3.2 经济效益分析

根据每列车年运营里程数约为 12 万 km 进行测算，异步牵引系统列车（6 辆编组）每公里耗电量约 12 kWh，综合电价约 0.7 元 / (kW·h)，一列异步牵引系统列车每年电费花费约为 100 万元。按照永磁同步牵引系统列车综合节能率 20% 进行保守计算，一列车每年可节约电费约 20 万元。

成都市目前已经规划了 46 条线路，有超过 2 450 km 的轨道交通网络，按照每公里 1 列车的业界通用车辆配置，成都市需要新增购城轨车辆 2 000 列以上。如果新增购车辆全部采用永磁同步牵引系统，每年可节约的电费将超过 4 亿元。

4 结语

永磁同步牵引系统的应用积极响应了《国家中长期科学和技术发展规划纲要》中提出的“促进交通运

输向节能、环保和更加安全的方向发展”要求。将永磁同步牵引系统应用于城市轨道交通车辆，具有高效节能、降重降噪等技术优势。积极推动永磁同步牵引系统在成都地铁上的应用，加快轨道交通行业节能增效技术的发展，对于成都市绿色减排、缓解城市交通拥挤和降低地铁运营成本有着非常积极的意义。

参考文献：

[1] 冯江华. 轨道交通永磁同步牵引系统研究[J]. 机车电传动,

2010(5): 15-21.

[2] 刘雄, 陈文光, 许峻峰, 等. 地铁永磁直驱牵引系统优化策略与仿真分析[J]. 机车电传动, 2016(3): 24-27.

[3] 陈致初, 李益丰, 符敏利. 永磁同步牵引电动机的特殊性[J]. 大功率变流技术, 2012(3): 25-30.

作者简介：唐 林（1981—），男，工程师，长期从事城轨车辆电气牵引系统应用研究工作。

（上接第 44 页）

表 2 传统驱动系统全寿命周期材料成本分析

易损易耗件	用量及价格	相关周期更换情况							寿命周期内材料成本 （运营 30 a）/ 元
		C1	C2	C3	C4	C5	C6	寿命周期内维护次数	
齿轮油	51 L/ 台, 180 元 /L			√	√	√	√	≥ 30	约 28 万
轴承润滑脂	补（600±50）g/ 轮对, 170 元 /kg			√	√	√	√	≥ 30	约 2 万
橡胶关节, 传力销	144 个 / 台, 200 元 / 个					√	√	≥ 4	约 11.5 万
空心轴套轴承	25 200 元 / 轮对						√	≥ 2	约 30 万
主、从动齿轮	6 套 / 台, 45 000 元 / 套						√	≥ 2	约 54 万

注：①“√”表示需要维护；②以 1 台 6 轴机车为例，永磁直驱机车相对传统驱动系统在 30 a 运营寿命周期中，不计人力成本及设备成本，仅材料成本可节省约 125.5 万元。

表 3 传统驱动系统全寿命周期维护工作分析

检修内容	检修类别						
	日检	月检	C1	C2	C3	C4	C5
齿轮箱紧固件状态	√	√	√	√	√	√	√
齿轮箱油位	√	√	√	√	√	√	√
齿轮箱外观状态	√	√	√	√	√	√	√
六连杆橡胶关节			√	√	√	√	√
化验齿轮油				√	√	√	√
清理磁性螺堵				√	√	√	√
更换齿轮油		√*			√	√	√
齿轮箱轴承补脂					√	√	√
轮齿探伤检查							√
橡胶关节更换							√

注：①“√”表示需要维护；②*表示新造驱动系统齿轮油首次（磨合期）换油里程为 2.5 万 km，以后每 20 万 km 或 1 a（以先到为准）进行换油。

仅材料成本可节省 125.5 万元，同时更节省了人力资源成本及设备动能成本，永磁电机效率高而更加节能。直驱结构相比齿轮传动，具有较低的全寿命周期成本。

4.3 具备环保性能

由于取消了齿轮箱，避免了由于齿轮油泄漏导致的环境污染，也避免了废齿轮油、废橡胶关节回收处理不当造成的环境污染。

5 结语

中车大同电力机车有限公司自主研发的大功率永

磁直驱客运机车，攻克了多项技术难题，最终顺利完成了项目研制工作。该项目的实施，对于铁路技术领域的节能提效意义重大。大功率永磁直驱客运机车，必将以其效率优势、全寿命周期成本优势、检修维护量优势和环保优势，成为下一代轨道交通装备的主要客运机型。

参考文献：

[1] 原志强, 武学良, 吴景荣. HXn2D 型交流传动快速客运电力机车的研制[J]. 铁道机车与动车, 2017(12): 1-16.

[2] 张效融, 朱喜峰. 电力机车总体及走行部[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2011.

[3] 原志强, 武学良. 轴重 18 t 八轴交流传动客运电力机车的研制[J]. 机车电传动, 2016(4): 23-28.

[4] 连级三. 电传动机车概述[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2001.

[5] 李华德. 交流调速控制系统[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.

[6] 铁路技术管理规程: TG/01—2014[S].

作者简介：原志强（1970—），男，教授级高级工程师，主要从事电力机车与城轨车辆总体研究及设计开发工作。