

长沙市轨道交通永磁牵引系统能耗分析

王烟平

(长沙市轨道交通运营有限公司, 湖南 长沙 410133)

摘要: 文章简要介绍了长沙市轨道交通5号线列车永磁同步电机的特点和应用现状, 并选取长沙市轨道交通1号线1列采用永磁同步牵引系统的试验列车, 进行牵引系统能耗的线路仿真及现场节能测试, 并结合长沙市轨道交通1~4号线采用异步牵引系统的列车和5号线采用永磁同步牵引系统的列车空载能耗分析情况, 针对效率和能耗与采用异步牵引系统的列车进行了详细的对比与分析, 得出正线接触网安装有再生电能吸收利用装置的线路, 排除列车载客影响, 5号线空载列车能耗相比1号线、3号线、4号线空载列车平均能耗节能率达到29.56%, 相比正线接触网未安装再生电能吸收利用装置的2号线, 空载列车能耗节能率达到39.21%。列车能耗作为运营成本的重要组成部分, 永磁牵引系统节能效果明显, 与国家要求的节能低碳经济发展要求相吻合, 永磁牵引系统的应用有利于降低地铁列车运营成本, 并有助于实现快速绿色交通的目标。

关键词: 地铁; 永磁牵引系统; 永磁同步电机; 空载列车能耗; 能耗分析; 节能; 仿真

中图分类号: U231; TM351

文献标识码: A

Energy consumption analysis of permanent magnet traction system in Changsha rail transit

WANG Yanping

(Changsha Metro Operation Co., Ltd., Changsha, Hunan 410133, China)

Abstract: The paper provided a brief introduction to the characteristics and current applications of permanent magnet synchronous motors in the trains of Changsha metro line 5. It selected an experimental train that used a permanent magnet synchronous traction system on Changsha metro line 1 to conduct line simulation and on-site energy-saving tests for the traction system's energy consumption. Based on the analysis of the no-load energy consumption of trains using asynchronous traction systems on lines 1 - 4 and trains using permanent magnet synchronous traction systems on line 5 of Changsha metro, the efficiency and energy consumption with trains using asynchronous traction systems were compared and analyzed in detail. It was found that for the lines with regenerative energy absorption and utilization devices installed on the overhead contact network of the main track, excluding the impact of passenger capacity, the average energy saving rate of no-load trains on line 5 was 29.56% compared to line 1, line 3, and line 4, and 39.21% compared to line 2 without the regenerative energy absorption and utilization devices installed on the overhead contact network of the main track. Energy consumption of the train is an important part of the operation cost. The permanent magnet traction system has obvious energy-saving effect, which is consistent with the national requirements for the development of energy-saving, low-carbon economy. The application of permanent magnet traction system is helpful to reduce the operating cost of metro trains and realize the goal of rapid green transportation.

Keywords: metro; permanent magnet traction system; permanent magnet synchronous motor; energy consumption of no-load trains; energy consumption analysis, energy-saving; simulation

通信作者: 王烟平 (1983—), 男, 高级工程师, 主要从事城市轨道交通车辆技术管理工作; E-mail: 147865918@qq.com

引用格式: 王烟平. 长沙市轨道交通永磁牵引系统能耗分析[J]. 机车电传动, 2023(4): 77-82.

Citation: WANG Yanping. Energy consumption analysis of permanent magnet traction system in Changsha rail transit[J]. Electric drive for locomotives, 2023(4): 77-82.

0 引言

从20世纪末开始,国外多个轨道交通装备制造发达国家开展永磁同步牵引系统的相关研究并取得了进展^[1-2]。德国西门子为城市轨道交通列车研发了抱轴直驱式永磁同步电机,日本东芝公司为机车研发了大功率355 kW永磁同步电机^[3]。

永磁同步电机因为具有高功率密度、强过载能力和高效率等诸多优点,所以受到电机研发人员的高度重视。日本、法国、德国等国外轨道交通装备制造国家均开展了永磁同步牵引电机的研制,大部分样机经过了线路考核验证,现正逐步进入到工程化和商业化的推广应用阶段^[4]。

长沙市轨道交通5号线列车采用6辆(4动2拖)编组B型车,DC 1 500 V架空接触网供电,设计最高速度80 km/h,初期配属车辆24列/144辆,是全国首次全线采用永磁牵引系统的地铁线路,永磁牵引系统由株洲中车时代电气股份有限公司自主研发^[5]。长沙市轨道交通5号线于2019年12月30日试运行,2020年6月28日开通初期运营,截至2023年6月30日,列车总运行里程数为7 372 593 km。

为便于各地铁运营公司了解永磁列车牵引系统能耗情况,本文将针对采用永磁牵引系统的列车能耗进行统计和分析。

1 永磁同步电机的特点

永磁同步电机与异步牵引电机相比,主要特点是采用永磁体励磁和具有同步电机带来的特点,其优势为效率高,功率因数高;电机重量轻,体积小;运行噪声低,可靠性高;过载能力强,转速平稳;结构多样化,应用范围广^[6]。永磁电机在工作时无需电流励磁,转子不产生损耗^[7]。

永磁同步牵引电机与异步牵引电机都属于交流电机,它们在工作原理、结构、生产制造等方面具有高度的相似性,但同时也各有独特性。采用永磁同步牵引电机的轨道列车比采用异步牵引电机的轨道列车节能10%以上^[8]。

永磁同步电动机的应用也存在其局限性和潜在问题:

- ① 对于稀土材料具有很强的依赖性;
- ② 因为同步转速的关系,主电路必须采用独立供电模式(轴控);
- ③ 永磁体励磁不可关断,空转时存在反电势,匝间短路时将会造成电机烧损;
- ④ 永磁体材料失磁将导致电机失效;
- ⑤ 电机解体时因存在一定漏磁场,需采取特殊防护措施。

永磁同步牵引电机除了采用永磁体励磁外,作为同步电机,在其控制算法中还需要电机转子位置信号及转速信号,因此在永磁同步牵引电机内部还安装有旋转变压器用于转子位置和转速的测量^[9]。当列车永磁牵引系统在故障工况失控时,为防止永磁同步牵引电机发电产生的反电势对牵引系统产生不利影响,需要在永磁同步牵引电机和牵引逆变器之间设置隔离接触器,起到故障工况时有效隔断永磁同步牵引电机,发挥保护作用^[10]。

2 采用永磁牵引系统的列车与采用异步牵引系统的列车能耗对比

列车总能耗=牵引能耗+辅助能耗-再生能量,列车平均每公里能耗=(牵引能耗+辅助能耗-再生能量)/走行公里数。

列车能耗主要由牵引能耗、辅助能耗和再生能量组成,牵引能耗主要用于牵引逆变器、牵引电机等设备,辅助能耗主要用于空调、照明、乘客信息系统、空压机、控制电路等设备,再生能量为列车电制动时反馈电网的能量。

长沙市轨道交通1号线初期配置车辆23列/138辆,其中1列列车采用永磁同步电机,22列列车采用异步牵引电机。长沙市轨道交通5号线共配置24列采用永磁牵引系统的列车。采用永磁牵引系统的列车自投入运营以来运行可靠、稳定,能耗低于采用异步牵引系统的列车。为更好地了解采用永磁牵引系统的列车节能情况,特对正常运营使用异步牵引系统的列车和使用永磁牵引系统的列车能耗情况进行跟踪统计对比,并请第三方测试机构进行能耗测量。

2.1 永磁牵引系统能耗节能原因分析

永磁同步电机相比异步电机节能主要有以下几个方面的原因:

① 永磁同步电机额定效率高于异步电机,尤其是高效区范围远宽于异步电机。由于地铁站间距离相对较短,因此地铁列车运行时频繁启停,牵引电机工况复杂多变,经常会工作于低转速区对应的低效区域,永磁牵引电机的高效区相对较宽,低效区相对较窄,节能优势更加明显^[11],具体见图1和表1。

② 永磁同步电机采用永磁体励磁,工作时无涡流损耗和发热。

③ 因永磁同步电机效率高于异步电机,在地铁列车进行再生制动时其再生能量也同样高于异步电机。

2.2 永磁牵引系统与异步牵引系统能耗仿真计算分析

首先,利用城轨车辆牵引系统线路仿真计算平台,针对长沙市轨道交通1号线的实际线路情况,仿真计算

不同载荷下永磁牵引系统与异步牵引系统的能耗。表2是AW0载荷工况下，采用异步牵引系统和永磁牵引系统的列车的能耗数据及节能率，表3是AW2载荷工况下，采用异步牵引系统和永磁牵引系统的列车的能耗数据及节能率。

根据计算得出在有能量回馈装置条件下采用永磁牵引系统的列车节能率在26%~30%。

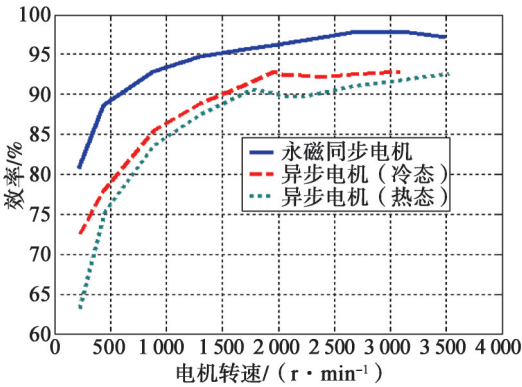


图1 永磁同步电机与异步电机效率曲线对比

Fig. 1 Comparison of efficiency curve between permanent magnet synchronous motors and asynchronous motors

表1 永磁同步电机与异步电机工作效率对比

Table 1 Comparison of efficiency between permanent magnet synchronous motors and asynchronous motors

电机类型	额定效率	高效区范围（效率≥90%）
永磁同步电机	97%	85%
异步电机	92%	60%

表2 AW0工况下采用永磁牵引系统的列车与采用异步牵引系统的列车能耗仿真计算对比

Table 2 Comparison of energy consumption simulation calculations between permanent magnet traction system trains and asynchronous traction system trains under AW0 working conditions

有无能量回馈	旅行速度/ (km·h ⁻¹)	采用异步牵引系统的列车能耗/ (kW·h·km ⁻¹)	采用永磁牵引系统的列车能耗/ (kW·h·km ⁻¹)	采用永磁牵引系统的列车节能率
无能量回馈	39.65	17.45	16.50	5.44%
100%能量回馈	39.65	5.70	4.02	29.47%

表3 AW2工况下采用永磁牵引系统的列车与采用异步牵引系统的列车能耗仿真计算对比

Table 3 Comparison of energy consumption simulation calculations between permanent magnet traction system and asynchronous traction system under AW2 working conditions

有无能量回馈	旅行速度/ (km·h ⁻¹)	采用异步牵引系统的列车能耗/ (kW·h·km ⁻¹)	采用永磁牵引系统的列车能耗/ (kW·h·km ⁻¹)	采用永磁牵引系统的列车节能率
无能量回馈	39.63	22.70	21.24	6.43%
100%能量回馈	39.63	7.64	5.59	26.83%

2.3 第三方能耗测试

为了反映采用永磁牵引系统的列车与采用异步牵引系统的列车能耗真实情况，2017年10月份委托国家铁路产品质量监督检验中心（具有权威资质）对长沙市轨道交通1号线23-24、07-08采用异步牵引系统的列车和45-46采用永磁牵引系统的列车进行能耗测量。具体测量数据如表4、表5所示。

表4 采用永磁牵引系统的列车较采用异步牵引系统的列车平均节能率

Table 4 Average energy-saving rate of permanent magnet traction system trains compared to asynchronous traction system trains

日期	关闭地面能馈装置		日期	开启地面能馈装置	
	正常运营	AW0工况		正常运营	AW0工况
10月11日	18.41%	13.96%	10月12日	35.11%	29.60%
10月17日	22.73%	15.26%	10月16日	35.93%	38.20%
平均值	20.57%	14.61%	平均值	35.52%	33.90%

注：数据来源于国家铁路产品质量监督检验中心〔2017〕GTJ(JL)字第W1213号《长沙地铁1号线永磁同步牵引系统列车能耗测试报告》。

表5 非工作日正常运营能耗分析（地面能馈装置开启）

Table 5 Energy consumption analysis for normal operation on non working days (with ground energy feedback device activated)

日期	车辆类型	牵引能耗/ (kW·h·km ⁻¹)	辅助能耗/ (kW·h·km ⁻¹)	总能耗/ (kW·h·km ⁻¹)
10月15日	永磁牵引	5.40	1.59	6.99
	异步牵引	8.49	1.96	10.45
	差值	-3.09	-0.37	-3.46
	永磁节能率	36.40%	18.88%	33.11%

注：采用永磁牵引系统的列车节能率=（采用异步牵引系统的列车能耗-采用永磁牵引系统的列车能耗）/采用异步牵引系统的列车能耗。

根据该检测报告可以看出，采用永磁牵引系统的列车正常运营节能率在18%~35%，在1号线正常运营工况下，地面能馈装置关闭时的平均节能率为20.57%，地面能馈装置开启时的平均节能率为35.52%^{〔12〕}，非工作日地面能馈装置开启时的平均节能率为33.11%。

2.4 运营能耗跟踪统计

从2016年8月至2017年8月期间，选取4列正常运营的采用异步牵引系统的列车（35-36、15-16、01-02、25-26车）和采用永磁牵引系统的列车（45-46车）进行能耗数据的跟踪统计，每天记录列车的能耗及列车运营里程，并对能耗数据进行对比分析。

在地铁列车能耗统计期间，采用异步牵引系统的列车和采用永磁牵引系统的列车均按同一正常运行图运行，列车运营条件及地面能馈装置模式、列车控制模式、环境因素等均保持一致。

通过对能耗数据统计分析，得出统计结果如表6所示。

表 6 采用永磁牵引系统的列车与采用异步牵引系统的列车运营能耗统计

Table 6 Energy consumption statistics of permanent magnet traction system trains and asynchronous traction system trains during operation

项点	运行总公 里数/km	HMI 牵引能耗/ (kW·h)	HMI 再生能量/ (kW·h)	HMI 辅助能 耗/ (kW·h)	HMI 总能耗/ (kW·h)	能耗记录仪记录总 能耗/ (kW·h)
采用异步牵引系统的列车数据总和	359 525	5 989 969	2 768 343	1 060 599	4 281 943	4 037 466
采用异步牵引系统的列车每 km 能耗平均值		16.66	7.70	2.95	11.91	11.23
采用永磁牵引系统的列车数据总和	90 540	1 218 934	775 525	238 366	681 766	712 550
采用永磁牵引系统的列车每 km 能耗平均值		13.46	8.57	2.63	7.53	7.87
采用永磁牵引系统的列车节能率		19.2%				29.9%

注：总能耗=牵引能耗-再生能量+辅助能耗；
牵引节能率=(采用异步牵引系统的列车牵引能耗-采用永磁牵引系统的列车牵引能耗)/采用异步牵引系统的列车牵引能耗；
总能耗节能率=(采用异步牵引系统的列车总能耗-采用永磁牵引系统的列车总能耗)/采用异步牵引系统的列车总能耗。

牵引能耗是在列车运行过程中，通过监控牵引系统主电路上的电压传感器和电流传感器信号计算而来的。辅助能耗指辅助逆变器根据直流输入侧电流、电压计算的辅助电源系统能耗^[13]。再生能量是指地铁车辆制动过程中回馈的能量，其中的一部分可用于车辆辅助能耗，另一部分将回馈至接触网或第三轨，但回馈能量的多少受制于接触网网压的高低，而接触网网压的高低又受到线路上地铁车辆数量、地铁车辆运行状态和线路吸能装置的影响^[14]。

根据表 6 统计数据可以得出，与采用异步牵引系统的列车相比，采用永磁牵引系统的列车牵引能耗相对较低，而反馈的再生能量相对较高，因此列车总能耗

相对较低。正常运营的永磁牵引系统列车牵引节能率为 19.2%，总能耗节能率为 29.9%。

经比对，实际第三方测试能耗与理论计算分析、日常运营跟踪统计数据基本相符。

3 1~5 号线各线路列车运行能耗统计分析

统计分析地铁车辆 HMI 屏上的能耗数据，可知地铁列车在载客工况下的能耗，统计长沙市轨道交通 1~5 号线列车 2023 年 6 月份能耗及列车载重情况，具体如表 7 所示。

表 7 长沙市轨道交通 2023 年 6 月份各线路能耗及载重情况

Table 7 Energy consumption and load of Changsha rail transit lines in June 2023

线路	平均每列车 载客量/人	平均每列车载重 (按 60 kg/人计算) /t	列车自重/t	平均每列次 总重量/t	平均每列车总能耗/ (kW·h·km ⁻¹)	每列车空载能耗/ (kW·h·km ⁻¹)
1 号线	1 233	74.0	201	275.0	11.03	8.06
2 号线	1 351	81.0	202	283.0	11.76	8.39
3 号线	1 087	65.0	194	259.0	9.02	6.76
4 号线	1 298	78.0	195	273.0	9.66	6.90
5 号线	874	52.4	189	241.4	6.51	5.10

注：列车空载能耗=(列车自重/平均每列次总重量)×平均总能耗。

从表 7 可以看出，2 号线列车能耗最高，平均每列车总能耗 11.76 kW·h/km，排除载客量影响后，为 8.39 kW·h/km；5 号线列车能耗最低，平均每列车总能耗 6.51 kW·h/km，排除载客量影响后，为 5.10 kW·h/km。

4 长沙市轨道交通 1~5 号线能耗差异分析

4.1 正线接触网再生电能吸收利用装置对能耗的影响

为研究地铁列车正线接触网再生电能吸收利用装置对能耗的影响，梳理长沙市轨道交通 1~5 号线列车能耗与有关设备配置情况，具体如表 8 所示。长沙市轨道交通 2 号线正线接触网未安装再生电能吸收利用装置，当列车处于再生制动工况时，产生的再生制动能量

不能完全被其他列车和本车的用电设备吸收时，会导致接触网网压升高^[15]。当反馈给接触网的电能使接触网网压达到 1 850 V 以上时，列车启动制动电阻将电能转化为热能。对于安装有再生电能吸收利用装置的线路，当接触网网压过高时，接触网的再生电能吸收装置会将电能进行存储和利用，避免列车制动电阻或过压吸收电阻启动，故长沙市轨道交通 2 号线列车平均能耗较其他线路高。

4.2 5 号线列车节能情况分析

通过统计分析 2023 年 6 月份长沙市轨道交通能耗数据（表 7），排除载客影响，5 号线每列车空载能耗最低，为 5.10 kW·h/km，相比长沙市轨道交通 1、3、4 号线空载列车平均能耗节能率达到 29.56%（1、3、4 号线

表8 与列车能耗有关设备配置情况

Table 8 Equipment configuration related to train energy consumption

线路	正线是否安装再生电能吸收利用装置	电机类型	列车制动电阻或过压吸收电阻配置情况
1号线	是	异步电机（45-46车为永磁电机）	制动电阻
2号线	否	异步电机	制动电阻
3号线	是	异步电机	制动电阻
4号线	是	异步电机	过压吸收电阻
5号线	是	永磁电机	过压吸收电阻

列车采用异步牵引系统，正线接触网安装再生电能吸收利用装置，每列车空载平均能耗为7.24 kW·h/km，相比长沙市轨道交通2号线列车节能率达到39.21%（长沙市轨道交通2号线列车采用异步牵引系统，正线接触网未安装再生电能吸收利用装置，每列车空载平均能耗为8.39 kW·h/km）。

5 结束语

长沙市轨道交通5号线列车全部采用永磁牵引系统，且正线接触网安装再生电能吸收利用装置，通过对2023年6月份能耗数据进行分析，5号线空载列车能耗相比1号线、3号线、4号线空载列车平均能耗节能率达到29.56%，相比正线接触网未安装再生电能吸收利用装置的2号线，空载列车能耗节能率达到39.21%。

地铁列车能耗作为运营成本的重要组成部分，采用永磁牵引系统的列车节能效果明显，与国家要求的节能低碳经济发展要求相吻合，永磁牵引系统在地铁车辆上的应用对降低地铁列车运营成本具有重要示范意义。

实践证明长沙市轨道交通5号线列车采用永磁同步牵引系统，技术方案成熟、性能可靠、故障率低，为永磁同步牵引系统在轨道交通领域进一步批量推广应用提供了良好示范，并将产生深远影响。

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.
FENG Jianghua. Study on the permanent magnet synchronous motor drive system of rolling stock[J]. Electric drive for locomotives, 2010(5): 15-21.

[2] 许峻峰, 冯江华. 永磁同步传动系统的应用概况[J]. 大功率变流技术, 2010(1): 38-43.
XU Junfeng, FENG Jianghua. Application status of permanent magnet synchronous drive system[J]. High power converter technology, 2010(1): 38-43.

[3] 陈萍, 罗情平. 国外永磁同步牵引系统的发展与应用[J].

国外铁道车辆, 2017, 54(5): 14-18.

CHEN Ping, LUO Qingping. Analysis of the development and application of the permanent magnet synchronous traction system at abroad[J]. Foreign rolling stock, 2017, 54(5): 14-18.

[4] 吴庆波. 城市轨道交通技术装备发展现状及发展趋势分析[J]. 现代城市轨道交通, 2020(9): 26-29.
WU Qingbo. Analysis of current situation and development trend of transit technology equipment[J]. Modern urban transit, 2020(9): 26-29.

[5] 王烟平. 长沙地铁5号线永磁牵引电机应用分析[J]. 电机技术, 2022(5): 40-43.
WANG Yanping. Application analysis on the permanent magnet traction motor in Changsha metro line 5[J]. Electrical machinery technology, 2022(5): 40-43.

[6] 刘可安. 城市轨道交通永磁同步牵引系统[J]. 铁路技术创新, 2011(5): 11-15.
LIU Kean. Permanent magnet synchronous traction system for urban rail transit[J]. Railway technical innovation, 2011(5): 11-15.

[7] 邓浩衡, 钟碧羿. 长沙地铁1号线永磁同步牵引列车能耗分析[J]. 现代城市轨道交通, 2017(9): 10-13.
DENG Haoheng, ZHONG Biyi. Train energy consumption analysis of permanent magnet synchronous traction system for Changsha metro line 1[J]. Modern urban transit, 2017(9): 10-13.

[8] 李程, 王烟平. 长沙地铁永磁牵引系统的特点与应用[J]. 电机技术, 2021(6): 50-51.
LI Cheng, WANG Yanping. Characteristics and application of PM traction system of Changsha metro[J]. Electrical machinery technology, 2021(6): 50-51.

[9] 于映琳. 地铁列车永磁牵引系统改造分析[J]. 交通世界, 2021(12): 10-12.
YU Yilin. Analysis of the transformation of permanent magnet traction system for subway trains[J]. TranspoWorld, 2021(12): 10-12.

[10] 吴桂林, 王丹梅. 长沙5号线永磁同步牵引系统集成设计[J]. 现代制造技术与装备, 2021, 57(4): 13-17.
WU Guilin, WANG Danmei. Integration design of permanent synchronous motor traction system in Changsha line 5 metro train[J]. Modern manufacturing technology and equipment, 2021, 57(4): 13-17.

[11] 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.

[12] 田春春. 城市轨道交通车辆永磁牵引系统应用研究[J]. 交通世界, 2021(增刊2): 23-24.
TIAN Chunchun. Research on the application of permanent

magnet traction system for urban rail transit vehicles[J]. TranspoWorld, 2021(Suppl 2): 23-24.

[13] 伍星, 许平洋, 王小明, 等. 长沙市轨道交通 2 号线列车能耗分析[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(3): 113-116.

WU Xing, XU Pingyang, WANG Xiaoming, et al. Energy consumption analysis of Changsha rail transit line 2 train[J]. Urban mass transit, 2020, 23(3): 113-116.

[14] 唐飞龙, 韩庆军. 地铁车辆能耗分析及节能措施研究[J]. 机车电传动, 2020(4): 138-141.

TANG Feilong, HAN Qingjun. Research on energy consumption and energy saving measures of metro vehicles[J]. Electric drive for locomotives, 2020(4): 138-141.

[15] 黄舰, 李廷勇, 徐长勤. 1 500 V 城轨系统再生制动能量的储存利用[J]. 都市快轨交通, 2010, 23(3): 98-101.

HUANG Jian, LI Tingyong, XU Changqin. Storage and utilization of 1 500 V regenerative braking energy for urban rail system[J]. Urban rapid rail transit, 2010, 23(3): 98-101.

收稿日期: 2021-08-24
修回日期: 2023-07-01