

高速磁浮列车牵引系统新型测量装置的设计与应用

张潘祺

(上海磁浮交通发展有限公司, 201204, 上海//工程师)

摘要 目的:牵引系统信号的准确测量是整个高速磁浮系统的控制、监测、故障分析与处理的数据源头,也是后续对高速磁浮系统进行深层次分析研究的基础。开展高速磁浮列车牵引系统新型测量装置设计与应用的研究意义重大。方法:介绍了上海高速磁浮列车牵引系统的简要构成。为便于调试和故障分析,需要采集牵引系统的各类输入输出以及控制信号,根据实际测量需求,设计并搭建了一套新型测量装置。结果及结论:相对于传统的电流采集方法,该装置将测量电阻集成在电流模块内部,在提高测量精度的同时减小了体积。通过对采集的信号分析,新型测量装置既可以计算出高速磁浮系统的电压电流、牵引功率、能耗等技术指标,也可以用于故障状态下的数据分析。

关键词 高速磁浮列车;牵引系统;测量装置;故障分析
中图分类号 U237.8

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.07.023

Design and Application of New Measurement Device for High-speed Maglev Train Traction System

ZHANG Panqi

Abstract Objective: Accurate measurement of traction system signals is the data source for controlling, monitoring, fault analysis, and handling of the entire HSM (high-speed maglev) system, and it is also the basis for subsequent in-depth analysis and research on HSM system. It is of great significance to explore the design and application of a new measurement device for HSM train traction system. Method: The basic composition of Shanghai HSM traction system is briefly introduced. To facilitate debugging and fault analysis, various inputs and outputs of the traction system and control signals need to be collected, a new measurement device is designed and built according to the actual measurement requirements. Results & Conclusion: Compared with the conventional current collection method, the device integrates the measurement resistor into the current module, which reduces the volume while improving measurement accuracy. Through analysis of the collected signals, the new measurement device can calculate technical indicators such as voltage, current, traction power, energy consumption of the

HSM system, and it can also be used for data analysis of fault states.

Key words high-speed maglev train; traction system; measurement device; fault analysis

Author's address Shanghai Maglev Transportation Development Co., Ltd., 201204, Shanghai, China

0 引言

高速磁浮列车牵引系统本质上是一个直线电机驱动系统,即由城市电网输入的工频 50 Hz 的交流电,经由供电和牵引系统变换后传输至列车所在定子段(相当于电机的定子),产生行波磁场驱动磁浮列车运行。牵引系统设备众多,包括长定子直线电机、电机控制、变流器控制、输入输出和轨旁开关站等诸多部分^[1]。

牵引系统信号的准确测量是整个高速磁浮系统的控制、监测、故障分析与处理的数据源头,也是后续对高速磁浮系统进行深层次分析研究的基础。

2002 年,上海磁浮列车示范运营线建成之初曾配备了一套美国国家仪器有限公司的测量装置,其在线使用已超过 15 年,各项硬件设备陆续出现故障,备件也难以继续供应,将导致整个测量装置无法继续使用。

测量技术在最近 10 年已经有了快速的发展,各类设备性能有了大幅上升,成本也相对较低。基于上述状况和条件,根据需求,在浦东机场变电站重新设计并搭建了一套高速磁浮列车牵引系统新型测量装置,自投入使用以来起到了很好的效果。

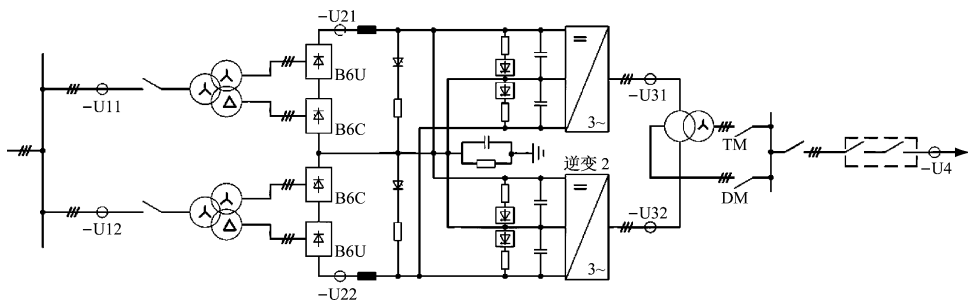
1 上海高速磁浮列车牵引系统及其信号

1.1 牵引系统

上海磁浮列车示范运营线在龙阳路站和维修基地附近各设有一座牵引变电站,牵引系统布置在两座变电站内。其主要设备包括输入变压器、输入

开关柜、大功率变流器、输出变压器、输出开关柜以及辅助的冷却系统等。其中核心的变频器功率部

分包括整流、斩波和逆变等环节。变频器功率部分结构图如图1所示。



注:U11、U12—输入侧电流互感器,U21、U22—直流回路侧电流互感器,U31、U32—逆变器侧电流互感器,U4—输出侧电流互感器;B6C、B6U—整流模块;TM—变压器输出开关;DM—直接输出开关。

图1 变频器功率部分结构图

Fig.1 Diagram of inverter power section structure

为牵引系统配备的测量装置,主要用于测量上述变频器的输入输出电压和电流、直流环节电气量及变频器的相关控制信号,还包括变流器控制信号及电机控制信号等。

1.2 测量信号

需要测量的牵引系统信号分输入输出信号和控制信号。

1.2.1 牵引系统的输入输出信号

牵引系统输入、输出信号原始测量点位于输入、输出开关柜内。输入输出的高电压大电流经互感器转换为弱电二次信号。由于现场测量点距离测量装置所在房间较远,二次信号一般采用电流的形式,经较长距离传输至测量装置所在房间,再输入至测量设备进行信号采集。每一条轨道(上海磁浮列车示范运营线现有A、B两条轨道)包括3套变频器,其输出的电压电流和中间直流环节信号共计63个信号点,均采用标准的20 mA电流信号形式;一般需要再次转换为电压信号之后才可以测量。现场的强电信号,一般为低频信号,从几十Hz至300 Hz不等。

1.2.2 控制信号

控制信号主要是来自MCU(微处理机控制单元)及CCU(中央控制单元),其包括电压、电流、频率、列车实际速度、电机角度及部分控制参数等信号。每1条轨道涉及3个CCU和2个MCU。上述控制信号共计88个,均为电压信号。由于MCU和CCU的控制设备与测量设备同处一个房间,距离较短,可直接将电压信号连接至测量装置。控制信号的电压均为10 V,可直接被测量。此次选取测量的

信号中不含有PWM(脉宽调制),所有控制信号的频率均不超过1 kHz。

2 新型测量装置方案

2.1 测量原理

通常情况下,测量装置主要采集电信号;传感器将现场采集到的物理量按照比例转换成电信号,经过信号调理(滤波、放大)并转换到测量模块可以直接测量的大小范围,再送入测量装置,经采样,再用于显示、存储以及其他后续数据处理^[2]。

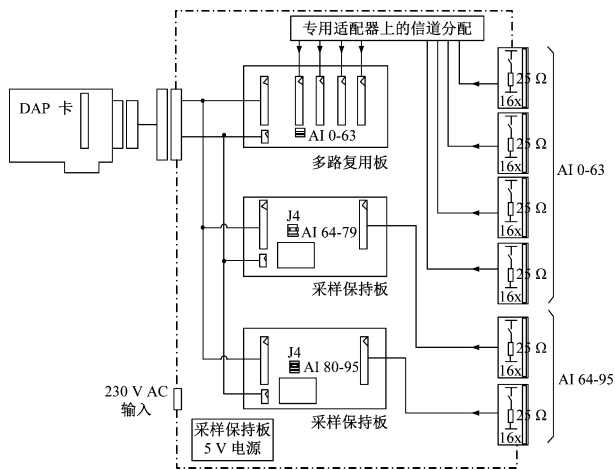
2.2 测量的组成

外部信号经初步的转换调理之后,首先接入测量装置的输入模块,经过A/D(模拟/数字)转换将模拟量转化为相对应的数字量;然后传递给本地处理器,数据经由本地的通信模块经光纤上传至测量上位服务计算机。服务器安装了操作系统及相应的数据测量处理软件,可供操作人员进行相应的数据分析操作。

2.3 方案制定

磁浮牵引测量装置需要测量来自输入输出设备的电流信号,以及来自控制单元的电压信号。对于电流信号,之前的做法是让电流信号通过外接的25 Ω精密电阻转换为电压信号,通过测量电阻两端的压降,从而间接得到电流值的大小。测量装置设计原理见图2。但是,因外接电阻易受外界环境影响,阻值容易变化,故增加了误差,降低了精度,也增加了设备体积。

本设计直接采用电流模块记录电流信号。将外接电阻设备集成在模块内部,测量时可直接将电



注: DAP—总线通信; AI 0-63—64 路电流信号模拟量输入; AI 64-79—16 路电压信号模拟量输入; AI 80-95—16 路电压信号模拟量输入; J4—总线地址开关; 16x—模拟量输入开关。

图 2 测量装置设计原理图

Fig. 2 Diagram of measurement device design principle

流信号转换为电压信号接入模块。这样既节省了设备空间,又简化了操作,同时还提高了测量精度。在设备布局方面,采用了模块化设计,并尽可能保证原有机柜的布线,从而为设备的维修、维护带来便利。新型测量装置设计原理见图3。

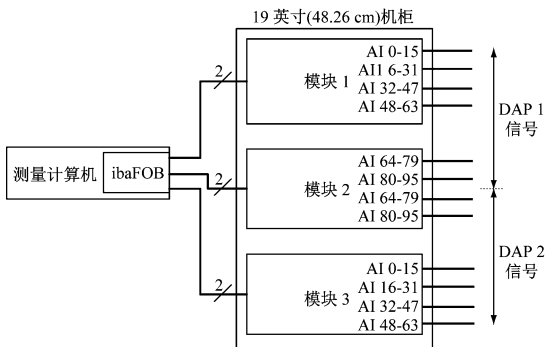


图3 新型测量装置设计原理图

Fig. 3 Diagram of new measurement device design principle

2.4 实施方案

在基础验证的前提下,最终采用了如下实施方案:在浦东机场变电站内安装了 2 套基于比利时的 IBA 公司的测量设备,2 条轨道各配置一套测量装置。每个测量装置含有 1 台上位服务计算机(安装了测量软件)、通信及光纤模块,6 个电压输入模块,4 个电流输入模块。每套测量装置可采集 96 个电压信号和 64 个电流信号。其架构示意如图 4 所示。

1) 信号采集模块。采用 ibaMS16xAI 系列电压电流输入模块,16 位分辨率,40 kHz 可调节采样速

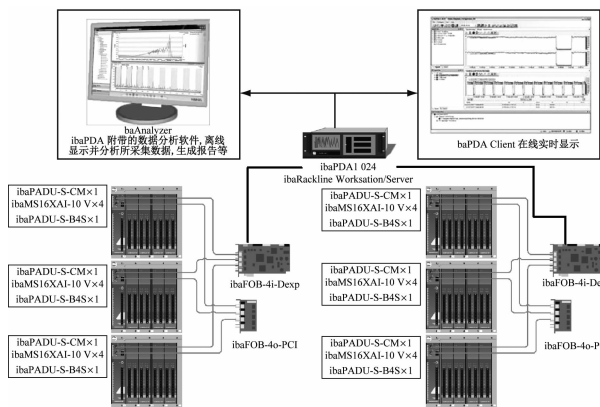


图4 新型测量装置结构示意图截图

Fig. 4 Screenshot of new measurement device structure diagram

率,带有低通以及抗混叠滤波功能;每个模块含有16通道,可采集0~20 kHz的模拟信号。电压信号输入范围为-10~10 V,电流信号输入范围为0~20 mA,误差范围<0.1%。

2) 测量计算机。采用 ibaRacklineWorkstation (机架式工作站), RAID1 (独立磁盘冗余阵列), SAS (赛仕) 软件, XEON (一种英特尔的处理器)。

3)测量软件。采用 ibaPDA-V6-1024 数据记录软件和 IBAanalyser(数据采集分析器),其二者具有信号显示、缩放、滤波、存储、触发、FFT(快速傅里叶变换)、函数、统计等各类分析功能。

4) 通信及光纤模块。采用 ibaFOB 软件模块, 可使用基于 IBA 网络的 2.0 Mbit/s、3.3 Mbit/s、5.0 Mbit/s 和 32.0 Mbit/s 等多个传输速率进行数据传输。在没有中继器的情况下, 其最大传输距离为 2 000 m。

5) 采样频率。采样率一般需选取原始信号频率 10 倍左右的频率,以便得到较为理想的品质。根据现场的信号特征,由于输入、输出的电压电流信号,其基波频率不超过 300 Hz,而 MCU 的控制信号频率不超过 1 Hz,因此采样率设定为 10 kHz。这样的设置既可满足数据分析的要求,又可避免产生过多的数据,消耗太多的硬盘空间。

6) 存储设置。除了服务器内置的硬盘外,另外扩展了一个外置硬盘,可以存贮 7 d 的完整数据量,存满之后滚动覆盖最早的数据。

3 高速磁浮列车牵引系统新型测量装置应用示例

新型测量装置安装完成后,对于上海高速磁浮

线——上海磁浮列车示范运营线的牵引系统进行了若干次测量,取得了很好的效果。

3.1 有功功率以及电能消耗测量记录

图5为新型测量装置测得的牵引系统有功功率消耗截图。

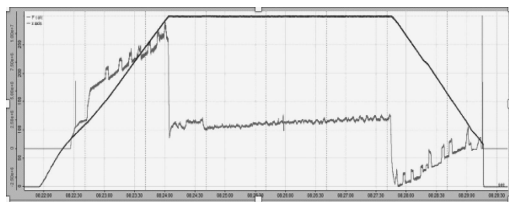


图5 牵引系统有功功率消耗截图

Fig. 5 Screenshot of traction system active power consumption

图5中:横坐标是时间,梯形折线代表速度(单位为 km/h,下同);列车从静止加速至 300 km/h 时,匀速运行一段时间后再减速;曲线是牵引系统输出的有功功率。

由图5可以看出:当列车速度刚达到 300 km/h 时,变频器输出的有功功率(通过测量电压电流经计算得到)达到最大,接近 12 MW;随后 300 km/h 匀速运行,输出的有功功率不足 2 MW;列车制动时,最大回馈功率超过 2.5 MW。

图6为新型测量装置测得的牵引系统电能消耗截图。

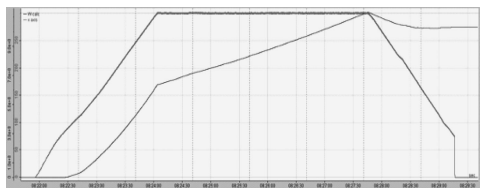


图6 新型测量装置测得的牵引系统电能消耗截图

Fig. 6 Screenshot of traction system power consumption measured by new measurement device

图6中:横坐标是时间;梯形折线同样代表速度;而曲线是牵引系统的电能消耗。由图6可以看到,列车从 300 km/h 开始减速时,变频器输出的牵引能耗 Q 值达到 305 kWh。

由于磁浮列车采用双端供电,则一次列车运行的牵引能耗是其一倍,即 610 kWh。

3.2 故障分析应用

上海高速磁浮列车曾发生过几次变频器过流的故障,新型测量装置记录了故障发生时的相关信号。图7是上海高速磁浮列车由 B 轨从龙阳路站

至浦东机场站方向,在接近车站时所记录下的 1 次变频器过流故障信号。

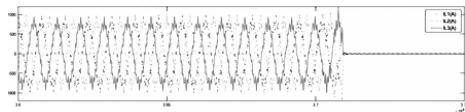


图7 变频器过流故障时的电流信号截图

Fig. 7 Screenshot of current signal in case of inverter overcurrent fault

图8是MCU的PRW(车载转子定位信号)定位和Theta值电压角度等控制信号。由图7可明显看出,在出现故障时牵引电流出现了过流,从而引起跳闸,进而电流输出为零,但图8中相关的控制信号并没有出现明显异常,说明过流是变频器自身原因造成,对控制信号没有影响。

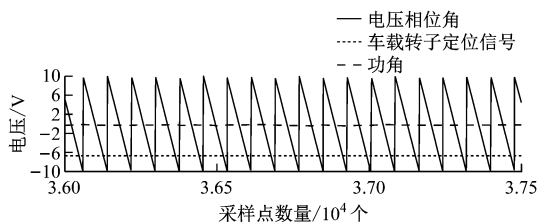


图8 变频器过流故障时的定位信号

Fig. 8 Inverter overcurrent fault positioning signal

根据新型测量装置记录的信号,维护人员可以非常容易、准确地分析出故障发生的原因。

4 结语

根据现场的信号特征,在浦东机场变电站设计并搭建的新型测量装置,能够满足各类测量任务需求,同时可以显示存储采集到的信号,并经计算处理后得到运行中需要的各项数据指标,对于了解牵引系统运行的各种性能以及故障分析提供了很大的帮助。该新型测量装置提供的数据,可大大提高运行人员对于系统的认识。

参考文献

- [1] 吴祥明. 磁浮列车[M]. 上海:上海科学技术出版社,2003.
WU Xiangming. Maglev train[M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 2003.
- [2] 陈立周,陈岚岚. 电气测量[M]. 6版. 北京:机械工业出版社,2016.
CHEN Lizhou, CHEN Lanlan. Electrical measurement[M]. 6th ed. Beijing: China Machine Press, 2016.

(收稿日期:2022-09-01)