

# 矿用变频器谐波测试系统设计

苏珂嘉

(煤炭科学技术研究院有限公司, 北京 100013)

**摘要:** 矿用电气设备尤其是矿用变频器对井下电网电能质量污染的问题, 越来越受研发厂家、安全准入、各工矿企业的重视; 简述了矿用变频器的结构、原理, 研究其谐波产生机理, 阐述了其谐波的危害; 设计了一套基于 FLUKE1760 的带负载性能测试系统, 该系统主要由测试样机、陪试变频器、对拖电机、电能质量分析仪、上位机等单元组成; 使用该系统对变频器进行了谐波加载性能测试, 并对采集到的电压电流数据进行了谐波分析; 实测结果证明: 被测变频器的电压电流中均含有较大的 5 次 7 次谐波及高次谐波。

**关键词:** 变频器; 电能质量; 谐波

## Design of Harmonic Testing System of Mine Frequency Converter

Su Kejia

(China Coal Research Institute, Beijing 100013, China)

**Abstract:** The problem of mine electrical equipment, especially mine frequency converters, which pollutes the power quality of underground power grids is getting more and more attention from research and development manufacturers, safety access, and various industrial and mining enterprises. The harmonic generation mechanism of mine inverter is briefly described, a set of load performance test system based on FLUKE1760 is designed. The system is mainly composed of test prototype, accompany test inverter, tow motor, power quality analyzer, host computer and other units. Using this system, the frequency converter was tested for harmonic loading performance, the voltage and current data were analyzed for harmonics. The actual measurement result proves that, the voltage and current of the tested inverter all contain larger 5th harmonic and higher harmonic.

**Keywords:** frequency converter; power quality; harmonics

## 0 引言

近年来电力电子技术快速发展, 变频器的性能得到了极大的提升, 其节能效果明显、调节方便、维护简单等特性保证了在工矿企业的应用日益广泛, 取代了很多旧式传动控制方式。煤矿中, 变频器主要应用于提升机<sup>[1]</sup>、通风系统、排水系统、采煤机、刮板输送机、皮带机、架空人车等处, 用于设备的软起动、软停车及运行过程控制等。额定电压 AC380~1140 V 的 BPJ (B)、ZJ (B) T、ZLJ (B)、NJ (B)、NKJ 型, 额定电压 AC3300 V 的 BPJ (B) V、BPJ (B) A 型等矿用变频器、变频调速装置目前已大量在生产现场铺开使用。随着井下用电设备功率密度增大、电压等级上升, 额定电压 6 kV、10 kV 的更高电压变频器也在研发与推广当中。由于变频器的主要组成部分整流电路和逆变电路由半导体器件工作在非线性的开关状态, 运行中引起正弦波的畸变, 结果导致大量的谐波产生于其供电回路和电机驱动端, 对负载及临近设备产生干扰, 带来了谐波干扰问题<sup>[2]</sup>。在变频器得到广泛应用的同时, 这一干扰对井下电网、人员定位、监控系统、电机等周围设备的

影响正受到矿企、安标准入机构、设备厂家等的高度重视。

由于工矿井下电网容量小, 用电设备集中、电磁环境复杂, 谐波对于井下电网的危害要大于地面电网<sup>[3]</sup>, 这些危害主要有:

1) 谐波损耗, 谐波会降低井下电气设备的使用效率, 增加井下变压器的磁滞损耗、涡流损耗, 谐波电流增加铜损、谐波电压增加铁损, 谐波流经电缆线路时增加发热, 严重时甚至引发电气火灾;

2) 电气故障, 谐波会造成机电设备故障频发, 谐波对机电设备的影响主要有过电流、机械振动偏大、机电设备元件过热、电力电缆绝缘老化等<sup>[4]</sup>;

3) 引起串并联谐振, 造成谐波放大, 增加谐波对机电设备的危害程度; 造成继电保护设备、自动控制设备误动作、拒动, 令回路中馈电开关、电磁启动器等保护装置的短路保护、过载保护、断相保护等误动, 使井下电气保护失效<sup>[5]</sup>;

4) 对通讯系统产生干扰, 谐波会对监控系统分站、传感器的数据通信产生影响, 造成数据失真、冒大数, 影响

收稿日期: 2020-05-17; 修回日期: 2020-07-06。

基金项目: 天地科技股份有限公司科技创新创业资金专项项目(2020-TD-QN004)。

作者简介: 苏珂嘉(1985-), 男, 内蒙古呼伦贝尔人, 硕士, 助理研究员, 主要从事煤矿井下供电安全、安全监控系统、电磁兼容测试技术等方向的研究。

引用格式: 苏珂嘉. 矿用变频器谐波测试系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(2): 44-48.

煤矿井下人员定位系统，造成井下人员定位系统的人员数量以及人员定位的识别卡信息错误，干扰通讯信号质量等。

因此，需要对矿用变频器的谐波产生情况进行检验评估，以掌握其谐波污染情况。同时，需要针对变频器谐波开发一套检测系统，能够真实反映矿用变频器工作时的对外干扰强度。

## 1 矿用变频器的谐波产生机理

### 1.1 矿用变频器结构

矿用变频器或变频调速装置多数为交直交结构。与其他矿用电气设备类似，由隔爆壳体及电气回路两大部分组成。电气主回路原理如图 1 所示。主回路由整流单元、中间直流环节和逆变单元及电抗器等单元模块构成；控制回路则由单片机、DSP（或可编程控制器）、驱动模块以及光电隔离电路等构成。整流单元由电力二极管或 IGBT 模块构成；逆变单元可由不同器件做成，如高频变频器用大功率 MOS 晶体管，大容量变频器用 GTO 晶体管，中小型变频器用 IGBT 模块等。

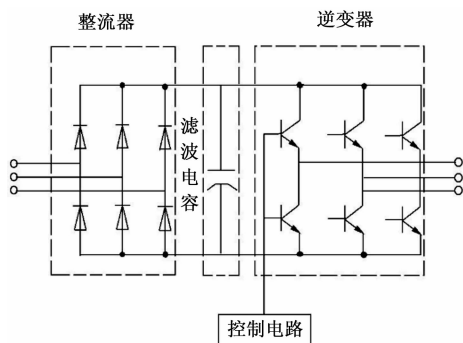


图 1 矿用变频器主回路组成图

矿用变频器的核心变频方式为 PWM（pulse width modulation，脉冲宽度调制）方式。在逆变环节中，通过控制晶体管器件的通断时间，在输出波形的一个周期中产生多个可变占空比的脉冲波，其单位时间内的冲量等值电压为正弦波，通过改变这一脉冲波的占空比，改变对应等效波形的电压和频率。使用自关断器件的 IGBT、GTO 等逆变器，因其开关频率高，一般采用 PWM 方式，载波频率可达数 kHz。二象限变频器其整流单元用二极管桥式整流即可，简化了一个功率级可控环节<sup>[6]</sup>。四象限变频器一般采用 IGBT 作为整流单元的晶体管，一般有六脉波<sup>[7]</sup>、十二脉波、单元级联等结构。

### 1.2 矿用变频器的谐波产生机理

图 1 所示典型的矿用交一直一交型变频器或变频调速装置，以三相桥式整流电路为例，交流电网输入电压为正弦波，交流输出电压波形为前文所述占空比可调的脉冲波，其本质并不是正弦波；对于这个波形，按傅氏级数可分解为基波和各次基波频率的整数倍分量，通常为  $n=6k \pm 1$  ( $k=1, 2, \dots$ ) 次谐波，通过共模和差模传导至电网。在矿用变频器逆变输出回路中，IGBT 开关元件的 PWM 载波频

率从数 k 赫兹最高可达 20 kHz，当逆变电路以此工作状态向负载提供脉冲波时，开关器件的导通瞬间，输出电压具有很陡峭的  $du/dt$ ，属于明显的非线性负荷。同样，输入回路电流信号为不规则的矩形波，也可分解为只含正弦波的基波和其他各次谐波，而脉冲电流也有很高的  $di/dt$ ，直接污染井下电网。此外，高次谐波还通过电缆、隔爆间隙、观察窗等向空间辐射发射骚扰，对邻近电气设备产生 EMI 干扰<sup>[8]</sup>。

## 2 测试系统设计

本矿用变频器谐波测试系统的硬件部分主要由待测被试样品、陪试四象限变频电源、电能质量分析仪、陪试对拖机组及配套控制元件等构成，如图 2 所示。待测被试样品是指待测的变频器样品（EUT），陪试四象限变频电源用于控制负载电机，使用一组电压型变频器，同时利用四象限工作特性回馈加载电能。电能质量分析仪用来实时采集并通过通信链路实时上传被试样品输入及输出的电压、电流参数。陪试对拖机组包括通过膜片联轴器同轴反向连接的一台加载三相异步电动机和另一台相同转速、功率的负载电机，用于为待测样品提供测试所需的可调负载。

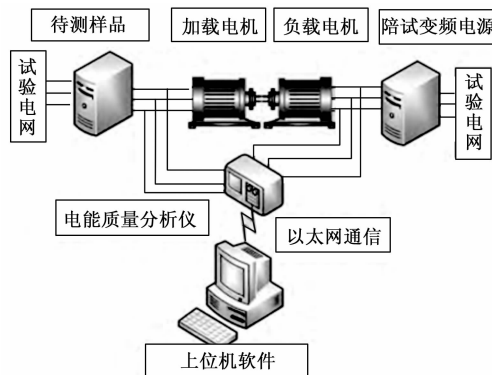


图 2 变频器谐波测试系统拓扑图

系统可为待测样品提供谐波测试时所需的测试电源、测试负载、陪试电源及参数采集仪表。通过上述构成部件的有机结合，组成一套矿用变频器谐波测试系统，用于检测采集矿用变频器样品对外发射谐波的情况，同时可以调节被试样品负载的大小，考察不同工况下发射谐波的不同强度，以达到符合不同测试标准的目的。并通过电—机—电回路形成闭环，将测试所需功率进行有效回收，达到精准控制、节能环保的目的。

### 2.1 陪试变频电源

陪试变频电源用于为测试系统提供主回路陪试电源，控制对拖机组中的负载电机，产生出适合待测样品产生特定电流所需的电机扭矩。ACS-880 低压变频电源是采用具有精确转矩控制 DTC 功能的闭环矢量控制变频器，整流部分利用 AFE 有源前端，具备四象限工作特性。电源由试验电网获得三相电压电流，频率改变后输出给负载电机，DTC 控制模式直接给定负载电机的转矩值，完全可以满足

需求。

负载电机工作在正转速负扭矩状态，通过陪试变频器将机械能转换为电能，通过四象限功能将电能回馈回试验电网，经过实际测算，加载至 1.1 MW 时，功耗为 400 kW 左右，可见其具有 60% 以上的节能效果，测试被试样品时的电能损耗仅为机械磨损、风机散热等功耗，不到总被试功率的 40%。

## 2.2 对拖机组

对拖机组由多个同轴连接的电机组成。由于在测试中，需要对被试样品进行加载，变频器最直接的加载设备即为电机，为获得将被试样品工作在满载的工作状态所需的工作电流，最好根据样品配置同电压、同功率的电机作为加载电机。同时，加载电机也需要工作在对应的满载工作状态，因此需要为加载电机的机械功率找到消耗途径。故为加载电机同轴连接一台同规格、提供反向扭矩的负载电机，作为电能—机械能—电能循环的路径。两台电机对拖，同转速、扭矩互为反向，通过调节负载电机的扭矩将被试变频器样品输出电流拉至所需的大小，如图 3 所示。

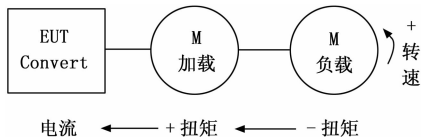


图 3 对拖机组示意图

因此，被试样品拖动加载电机形成被试电气传动系统 (PDS, power drives systems)，陪试变频器拖动负载电机形成陪试 PDS，两套 PDS 在同一试验电网下、通过联轴器进行机械连接，被试 PDS 工作于用电状态，陪试 PDS 工作于发电状态，构成了一条封闭功率循环路径，形成交流回流系统，达到前文所述之节能目的，实现测试所需的工作状态。

联轴器使用膜片联轴器，具有一定的偏移量承载能力，传递扭矩能力强，尤其不需要润滑维护。联轴器间设置转矩转速传感器，通过光纤总线连接至服务器和上位机，用于实时上传发电机组的转矩转速参数。

## 2.3 电能质量分析仪

电能质量分析仪作为本系统核心数据处理单元，通过电压探头、柔性罗氏线圈等高频带采样设备，将被试品的电流、电压的基础参数采集，通过表头将一次原始电参数进行傅里叶变换，以频域型式将高次谐波从基波信号中分离出来，并通过链路将数据实时传输至上位机中。

系统使用 FLUKE 1760 电能质量记录分析仪作为核心器件，测量精度可达  $\pm 0.1\%$ 。测量需要分别对输入、输出回路进行测试，测试需要电流、电压各最少四通道，因此共需 8 通道进行检测。由于被试样品可能处于长期工作状态，因此需要该设备还可工作于实时记录状态，通过 SD 卡存储数据，以便后期复盘查看。

## 2.4 宽频带电流采样设备

作为电信号的采样采集设备，宽频带电流采样设备负

责实现待测样品输入输出回路电流信号变换至电能质量分析仪的测量功能。根据待测样品端子线径不同，尤其矿用变频器特有的引入装置及绝缘套管，需要采用柔性采样设备，以便连接。采用柔性 Rogowski 线圈，其本质是空心电流互感器即一种均匀缠绕在截面均匀细小的非磁性骨架上的空心线圈。通过被测导线所产生的磁通的变化，感应出电压信号。进而将二次信号直接输出至电能质量分析仪上。具有不含铁芯、无磁饱和、频带宽的优点，并且基本不受外磁场的影响、与被测导线相对位置变化的影响较小。所以适合测量矿用非工频的电气设备。

## 3 软件设计

测试系统的控制部分以工业控制计算机与服务器为核心，以及通过总线光纤连接的 PLC 与受控部分，构成分布—集中控制系统。受控部分包括 PLC、EUT 和交流回馈系统、电能质量分析仪以及其它设备等。控制系统的信号传输采用光纤传输，降低了 EUT 和陪试设备互相干扰的影响，其拓扑如图 4 所示。工控机对采集到的一次电流、电压等数据进行谐波记录、分析，使用配套的 PQanalyze 软件进行数据报表生成。总线采用光纤以太网通信方式，信号采集速率快，数据不易丢失、抗干扰能力强，尤其适合干扰较强的变频器测试电磁环境，能满足工控机对电能质量分析仪采集到的信号的实时读取。

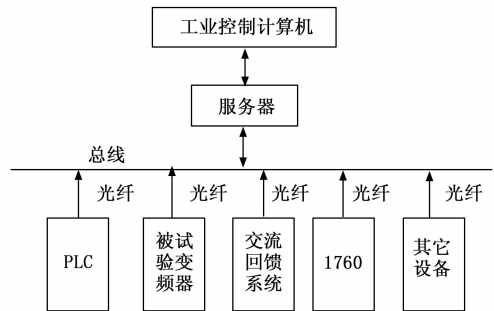


图 4 控制系统结构图

系统测控软件由主程序、监控程序构成，工业控制计算机上电后，首先开始系统自检，包括系统总线扫描，各功能模块初始化等流程，模块成功上传地址并初始化后，进行参数初始化配置，接受预设电压等级、电压电流传感器变比等信息，并通过通讯总线写各个从站模块的保持寄存器，设置相应参数。完成以后系统进入运行主循环。反复采集电参数，通过 PQanalyze 进行参数分析，进行 FFT 计算并更新报表。工作流程如 5 所示。

## 4 实际测试结果分析

被试样品选用一台 380 V、93 kW，额定频率 50 Hz 通用变频器，通过前文所述系统施加额定电压、拖动电机加载至额定功率，待 1 h 内温升变化不大于  $\pm 1$  K 的热稳定后，分别对其输入、输出侧回路进行测试采样。测试结果如图 6 和图 7 所示。

其中，图 6 为输入侧电压电流波形，图 7 为输出侧电压

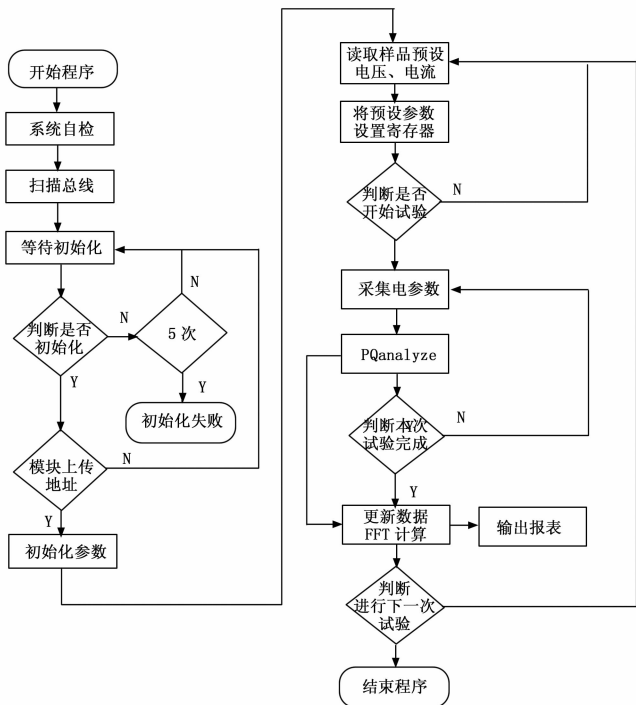


图 5 软件实现流程图

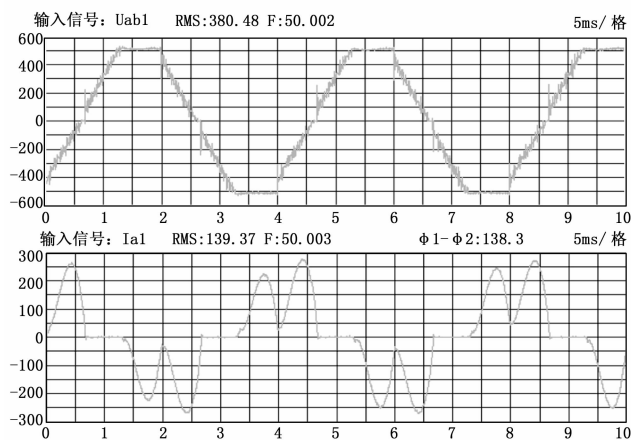


图 6 通用变频器输入电压及电流波形

电流波形。测试在被试样品满载的条件下进行，可以看到，输入侧电流畸变较大。测试结果如表 1 所示。

波形的畸变程度以正弦波总谐波失真度  $THD_u$  和  $THD_i$  表示，见式 (1)、(2)：

$$THD_u = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} (U_h)^2}}{U_1} \times 100\% \quad (1)$$

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} (I_h)^2}}{I_1} \times 100\% \quad (2)$$

其中： $U_h$  为第  $h$  次谐波电压， $I_h$  为第  $h$  次谐波电流，谐波电压含有率  $HRU_h = \frac{U_h}{U_1} \times 100\%$ ，谐波电流含有率。

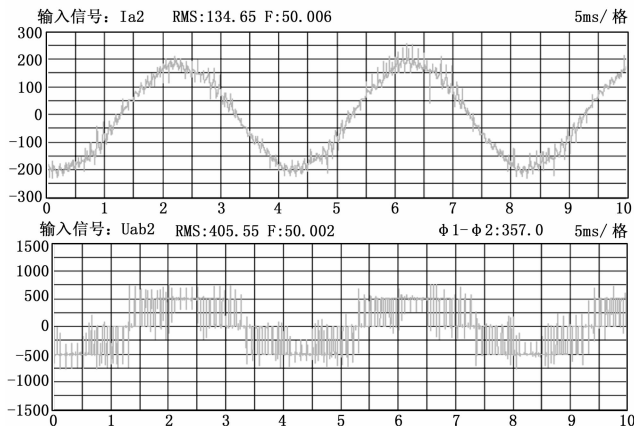


图 7 通用变频器输出电压及电流波形

表 1 380 V 低压变频器谐波电流、电压测试结果表

基波	电流值/A				电压值/(V%)			
	最大值	平均值	最小值	95%值	最大值	平均值	最小值	95%值
	145.50	140.80	140.26	141.23	384.52	380.92	380.58	381.38
2	5.69	2.47	2.45	2.48	0.79	0.54	0.53	0.55
3	11.98	3.35	2.94	3.67	1.05	0.54	0.47	0.59
4	4.26	2.19	2.06	2.25	0.56	0.39	0.38	0.40
5	68.69	66.33	65.99	66.65	5.06	4.89	4.89	4.90
6	1.93	1.19	1.18	1.21	0.52	0.46	0.46	0.46
7	31.20	29.19	29.05	29.32	3.41	3.22	3.21	3.22
8	1.54	0.71	0.69	0.73	0.42	0.28	0.28	0.29
9	2.83	1.04	0.78	1.25	0.38	0.21	0.19	0.21
10	1.25	0.56	0.56	0.57	0.24	0.16	0.16	0.16
11	11.10	10.12	10.01	10.21	1.74	1.63	1.61	1.63
12	1.09	0.58	0.57	0.60	0.15	0.08	0.08	0.08
13	6.76	6.28	6.27	6.29	1.23	1.11	1.10	1.12
14	1.11	0.45	0.44	0.45	0.24	0.09	0.09	0.10
15	1.59	0.53	0.45	0.60	0.26	0.09	0.07	0.10
16	0.79	0.38	0.37	0.39	0.16	0.07	0.07	0.07
17	5.24	4.71	4.67	4.75	1.07	0.95	0.94	0.96
18	0.81	0.38	0.37	0.40	0.09	0.04	0.04	0.04
19	3.34	2.86	2.83	2.90	0.76	0.66	0.65	0.68
20	0.96	0.42	0.40	0.43	0.14	0.07	0.06	0.07
21	1.16	0.43	0.37	0.47	0.30	0.12	0.09	0.14
22	0.71	0.30	0.30	0.31	0.18	0.08	0.07	0.08
23	3.39	3.02	3.00	3.04	0.89	0.77	0.76	0.78
24	0.63	0.29	0.29	0.30	0.12	0.05	0.05	0.05
25	2.17	1.71	1.68	1.74	0.64	0.51	0.49	0.53

则，5次谐波电流含有率 47.19%，7次谐波电流含有率 20.8%，9次谐波电流含有率 0.89%，11次谐波电流含有率 7.23%，13次谐波电流含有率 4.45%。5次谐波电压含有率 4.90%，7次谐波电压含有率 3.22%，9次谐波电压含有率 0.21%，11次谐波电压含有率 1.63%，13次谐波电压含有率 1.12%。9次谐波较小，符合前文所述之  $n=6k \pm 1$  ( $k=1, 2, \dots$ ) 次谐波较大的原则。

并且，随着谐波次数的升高，谐波含量整体呈减弱变化。该型号变频器的谐波电流含量  $THD_i$  达到 51.88% 之多，五次谐波电流含有率超过 GB/T 14549-93 规定的 62A

的限值。而  $THD_u = 1.66\%$ ，总畸变率未超过 5% 的限值，但五次谐波电压含有率仍然超过 4% 的限值。

可见，前文所述测试系统能实现对被试样品的供电、加载，且可实现在额定功率加载状态下的电参数采集、谐波计算，并给出谐波测试结果，实验结果合理。

## 5 结束语

本文分析了矿用变频器的基本结构，阐述了其谐波发生的机理；设计一套可以对被试变频器进行额定加载、内部电能回馈的电能质量测试系统，可对工作在额定状态下的样品进行谐波测试；经过试验，被试低压变频器的五次、七次谐波畸变率较大。由于被试样品为 6 脉波整流单元，这与文中谐波机理分析结果一致。

### 参考文献：

- [1] 张盼盼, 吴凤彪, 张子英. 矿井提升机变频调速控制系统设计 [J]. 煤矿机械, 2020 (3): 9-11.
- [2] 马伟明, 张磊, 孟进. 独立电力系统及其电力电子装置的

电磁兼容 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.

- [3] 张峰, 刘述喜, 李山等. 基于 ACS-800 变频器负载性能测试系统的设计与谐波分析 [J]. 重庆理工大学学报 (自然科学), 2016 (12): 95-101.
  - [4] 梁金. 矿井提升机变频器谐波检测及抑制策略研究 [J]. 煤炭技术, 2018 (1): 276-278.
  - [5] 黄松. 煤矿在用机电设备变频器谐波分析及抑制对策 [J]. 机电信息, 2016 (21): 80-81.
  - [6] 张东方, 汝长青. 大功率无谐波变频器主电路的研究 [J]. 煤矿机电, 2008 (1): 11-13.
  - [7] 刘斌, 冯高明. 六脉波双变量交-交变频器控制方法的优化 [J]. 煤矿机电, 2009 (4): 1-5.
  - [8] 邵阿红, 叶永卫, 田二明. 调速变频器的谐波产生机理及治理措施研究 [J]. 重庆三峡学院学报, 2012 (3): 77-80.
  - [9] 王兆安, 杨君, 刘进军, 等. 谐波抑制和无功功率补偿 [M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2006.
  - [10] 陈伯时. 交流调速系统 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- (上接第 43 页)
- 据携带的水汽信息精准, 而基于 GPS 遥感的大气水汽监测系统应用的技术不成熟, 所以其监测准确率较低。基于气象卫星的大气水汽监测系统的设备易出故障, 应用技术较少, 造成其误差较大, 准确率较低。
- 综上所述, 本文设计的基于拉曼激光雷达的大气水汽监测系统的数据处理时间较短, 监测准确率较高, 更适用于大气水汽的监测和研究。
- ## 5 结束语
- 为提高当前大气水汽监测系统监测准确率, 缩短数据处理时间, 设计了基于拉曼激光雷达的大气水汽监测系统, 对其激光发射器、光电接收器和信号处理器等三种物理硬件进行的详细介绍, 阐述了其系统软件的工作流程和算法, 通过激光发射器发射波长为 1 036 nm 的激光射线, 计算经过水汽分子散射后的回波信号携带的大气水汽分子信息, 可以判断当前环境下, 水汽在大气中的含量, 推测其对生产作物和人类活动的影响, 使人们能够预测大气水汽的变化规律, 将其应用到实践生产中, 从而借助自然资源获得更多的经济效益。
- ### 参考文献：
- [1] 王玉峰, 曹小明, 张晶, 等. 基于小波去噪算法的全天时大气水汽拉曼激光雷达探测与分析 [J]. 光学学报, 2018, 38 (2): 1-10.
  - [2] 石冬晨, 华灯鑫, 雷宁, 等. 日盲紫外域拉曼激光雷达探测大气水汽技术研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38 (5): 108-114.
  - [3] 高飞, 华灯鑫, 雷宁, 等. 全天时喇曼激光雷达探测大气水汽的技术实现及分光系统设计 [J]. 光子学报, 2018, 47 (4): 204-212.
  - [4] 王玉峰, 张晶, 汤柳, 等. 基于拉曼激光雷达的大气三相态水同步精细探测分光系统的设计与仿真分析 [J]. 物理学报, 2018, 67 (22): 259-270.
  - [5] 石冬晨, 华灯鑫, 黄波, 等. 紫外域波长选择对全天时水汽拉曼激光雷达探测性能的影响 [J]. 光学学报, 2019, 38 (12): 362-370.
  - [6] 谭敏, 王邦新, 庄鹏, 等. 基于拉曼激光雷达的大气温度和水汽反演分析 [J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40 (5): 1397-1401.
  - [7] 李启蒙, 李仕春, 秦宇丽, 等. 绝对测温转动拉曼激光雷达分光系统设计及性能 [J]. 物理学报, 2018, 67 (1): 132-141.
  - [8] 方海涛, 王敏, 张世国. 拉曼激光雷达在边界层气象探空观测中的应用分析 [J]. 现代科学仪器, 2018 (2): 68-72.
  - [9] 贾政方, 贾宏俊. 离散布谷鸟算法的建筑能耗数据智能监测系统 [J]. 西安工程大学学报, 2020, 34 (2): 110-116.
  - [10] 洪光烈, 李嘉唐, 孔伟, 等. 国外差分吸收激光雷达探测大气水汽廓线的研究进展 [J]. 光谱学与光谱分析, 2019, 39 (2): 14-22.
  - [11] 张尚露, 黄印博, 卢兴吉, 等. 激光外差光谱仪的水汽柱浓度反演研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2019, 39 (4): 327-332.
  - [12] 陈思颖, 田依杉, 陈和, 等. 粒子退偏比测量拉曼-米偏振激光雷达系统设计与仿真 [J]. 北京理工大学学报, 2018, 38 (10): 105-109.
  - [13] 刘玉丽. 探测边界层大气温度的转动喇曼激光雷达 [J]. 激光技术, 2018, 42 (4): 541-544.
  - [14] 杨茹. 浅谈低温甲醛蒸汽灭菌的原理及环保要求 [J]. 饮食保健, 2018, 5 (51): 127.
  - [15] 刘洋, 张天舒, 赵雪松, 等. 一种高线色散率测温激光雷达双光栅光谱仪 [J]. 中国激光, 2018, 45 (9): 154-158.