

DOI: 10.19344/j. cnki. issn1671-5276.2023.02.058

# 基于分布式光纤的矿用带式输送机温度监测系统设计与应用

张克亮

(国家能源神东煤炭集团 大柳塔煤矿, 陕西 榆林 719315)

**摘要:**为提升井下矿用带式输送机生产运行安全性,基于分布式光纤测温原理,构建大柳塔矿主斜井带式输送机温度监测系统。利用拉曼散射光原理和 DTS 技术实现温度监测和定位监测,温度监测精度可控制在 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内,定位精度小于 0.3 m;通过设置不同区域的预警温度,可实现带式输送机在不同位置处的分布式火灾预警功能,对电机、滚筒和 CST 等重点位置进行重点监测;根据用户需求的不同,系统可提供温升斜率、绝对温度以及相对温度等多种报警方式,从而提高监测预警的可靠性,实现整个运输巷的分布式、连续无盲区监测,具有较高的应用价值。

**关键词:**分布式光纤;带式输送机;测温系统;拉曼散射光;DTS;精度;预警

**中图分类号:**TD528;TP277 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2023)02-0228-05

## Design and Application of Temperature Monitoring System for Mining Belt Conveyor Based on Distributed Optical Fiber

ZHANG Keliang

(Daliuta Coal Mine, National Energy Shendong Coal Group, Yulin 719315, China)

**Abstract:** In order to enhance the production and operation safety of underground mining belt conveyor, the temperature monitoring system of main inclined shaft belt conveyor in Daliuta mine is constructed based on the principle of distributed optical fiber temperature measurement. Raman scattering light principle and DTS technology are applied to realize temperature monitoring and positioning monitoring with the temperature monitoring accuracy being controlled within  $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$  and the positioning accuracy less than 0.3 m. The early warning temperature is set in different areas to realize the distributed fire early warning function at different positions of belt conveyor, and intensively monitor the key positions such as motor, drum and CST. According to the different needs of users, the system can provide a variety of alarm modes such as temperature rise slope, absolute temperature and relative temperature, so as to improve the reliability of monitoring and early warning and realize the distributed and continuous non-blind area monitoring of the whole transportation roadway, which has high application value.

**Keywords:** distributed optical fiber; belt conveyor; temperature measurement system; Raman scattering light; DTS; accuracy; early warning

## 0 引言

带式输送机因其运输能力强、运输距离长、机电事故率低、能耗小等优点在煤矿等生产场所广泛应用。随着生产逐步向高产高效集约化发展,加之带式输送机运输生产任务重、检修维护时间短,其火灾发生的严重性和危害性也随之升级。因此,对带式输送机进行火灾监测已成为迫切需求<sup>[1-2]</sup>。

目前应用于带式输送机温度监测比较常用的技术有点式温度传感器(含记忆合金温度传感器)、感温电缆技术和光纤测温技术,其中主要以点式温度检测为主,可实现对带式输送机机头、机尾、轴承等关键部位的温度检测,但是现有检测技术存在着很大局限性,均不能实现整个运输巷的分布式、连续无盲区监测<sup>[3-5]</sup>。近年来,分布式光纤测温系统以及光纤光栅温度传感器越来越广泛,光纤测

温具有良好的防水性能和温度响应特性,广泛应用于各种结构的表面温度测量。目前对带式输送机沿线的温度检测主要采用感温电缆技术,感温电缆检测是线性感温探测器一种,应用技术较为成熟,但存在很多固有缺陷,如测温精度低( $\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ )、只能判断火警区域、报警方式单一、分区不灵活、性价比低、维护使用成本高等缺点,实际使用中有很多用了两三年后性能就不可靠了,经常发生误报。分布式光纤测温技术进行火灾早期预警,与感温监测方式相比具有以下优势:针对性强、可靠性高、系统安装简便、测温精度高( $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ )、多种报警模式、使用寿命长、性价比高、维护成本低等诸多优点,近些年来已逐渐发展成为各类监测的新型技术<sup>[6-10]</sup>。

神东煤炭集团大柳塔煤矿目前在用皮带机数量多,不同功能皮带机交错分布,应用分布式光纤测温技术进行长距离、多皮带集中检测早期火灾成为最佳选择。本文对大

**作者简介:**张克亮(1983—),男,江苏宿迁人,工程师,本科,研究方向为矿井机电。

柳塔带式输送机温度监测系统进行了设计和试验分析,以期为提高煤矿生产安全性提供借鉴。

# 1 监测系统设计

## 1.1 系统结构

系统主要由分布式光纤测温主机、声光报警器、感温

光缆、光纤接线盒、终端接线盒、工控机、显示器、尾纤、网络附件、井下监控分站、阀门控制器、电动阀门、洒水喷头、加(减)压装置、水管等组成。测温主机安装在主运变电所,中心站设备(监控主机、声光报警器监控系统软件)主要安装在调度中心机房,分布式光纤测温系统主机通过以太网光口或者电口接入现有井下光纤环网平台,也可通过以太网光口进行远距离传输接入地面环网平台。系统结构示意图如图 1。

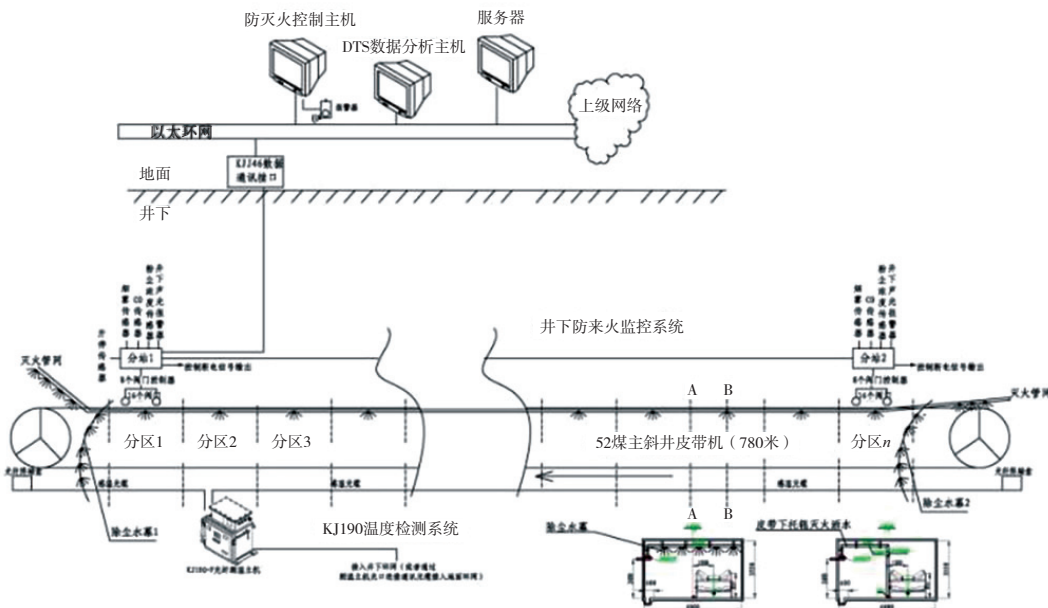


图 1 温度监测系统结构示意图

## 1.2 工作原理

光纤分布式测温主机控制单元沿整条光缆提供连续线型温度监测,合计测温应用光缆长度为 1.5 km,井下沿线温度监测点布置情况见表 1。光纤分布式测温主机控制单元连接相应的光缆组成了一个智能探测器,对报警区域长度及报警点进行整体编程。根据不同的实际应用,既可以为固定的温度报警点,也可以为温度增长率或两种方式的综合,报警点及区域长度可调整到符合实际需求。一

旦发现所测量环境温度值超过标准设定报警温度时,光纤分布式测温主机直接通过通信的方式把实时报警信号送到自动洒水降温监控系统,控制系统得到确认后进行相关的联动显示异常报警部位,并自动洒水降温。而且光纤分布式测温主机控制单元接至  $N$  个通道继电器模块的接口,使得用户可直接通过接口由外部监控系统判定区域报警信号( $N$  个通道继电器模块根据客户要求或消防工程的需要设定)。

表 1 主斜井胶带机沿线温度监测设备

序号	监测位置	数量	铺设方式	测量光缆长度/m	备注
1	沿线	780	V型下托辊支架底部	850	
2	预留光缆	20%	安装于光缆收纳盒内	170	
3	主驱动滚筒	若干	测温夹具贴装于滚筒轴承端盖	480	测温夹具数量根据实际需求
4	其他滚筒	若干	测温夹具贴装于滚筒轴承端盖		

## 1.3 分布式光纤测温原理

光在不均匀介质中传播会导致光偏离原方向而产生散射现象,根据入射光和散射光的频率关系,可将散射分为布里渊散射、拉曼散射以及瑞利散射,在 3 种散射光中只有拉曼散射只受温度的影响,而且相对更容易被捕捉和

解析。也就是说,当光纤沿线某处出现温度异常之后,必然会导致拉曼散射现象。因此本系统利用拉曼(Raman)散射光的强度对监测点的温度进行监测。

拉曼散射光分为斯托克斯(Stokes)和反斯托克斯(Anti-Stokes)两种,当光纤受外部环境温度影响时,光纤中散射的斯托克斯和反斯托克斯的光强会发生变化,利用

Anti-Stokes 和 Stokes 的光强比值,可解算出环境温度,从而达到温度测量的目的。由于光源功率具有不稳定性,同时光纤在长距离条件下受到弯曲和压力作用,导致 Anti-Stokes 光强会受到许多因素的影响,因此,将 Stokes 光作为初始参考信道,那么就可以得到距离光纤始端  $L$  处的环境温度信息

$$F(T) = K_{as}/K_s (\nu_{as}/\nu_s)^4 \exp(-h\Delta\gamma/KT) \times \exp[-(\alpha_{as}-\alpha_s)L] \quad (1)$$

当监测系统处于参考温度  $T_0$  时,此时的环境温度信息

$$F(T_0) = K_{as}/K_s (\nu_{as}/\nu_s)^4 \exp(-h\Delta\gamma/KT_0) \times \exp[-(\alpha_{as}-\alpha_s)L] \quad (2)$$

式中: $K_{as}$ 、 $K_s$  表示与光纤孔径相关的散射系数; $\nu_{as}$ 、 $\nu_s$  表示反斯托克斯和斯托克斯的反射频率; $\alpha_{as}$ 、 $\alpha_s$  表示光在光纤中的传输损耗系数; $K$  表示波尔兹曼常数; $h$  表示普朗克常数; $L$  表示距离光纤始端的测温位置; $\Delta\gamma$  表示拉曼频移波数。将式(1)和式(2)相除,可以得到  $L$  位置处的温度  $T$

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_0} - \frac{K}{h\Delta\gamma} \ln \frac{F(T)}{F(T_0)} \quad (3)$$

确定环境温度之后,再利用 DTS 定位技术对火灾或者温度异常位置进行定位,其原理见图 2。DTS 定位的原理是利用光时域反射原理进行定位分析,假设距离激光源长度为  $Z$  处的光纤,当光源发射一个很窄的高强度激光脉冲并注入光纤,此时在光纤传播时会产生后向散射光,经过一段时间后,后向散射光返回并被检测到,通过后向散射光在光纤中的传播速度和传播时间,可以计算得到距离  $Z$

$$Z = \frac{1}{2}vt = \frac{1}{2} \cdot \frac{c}{n} \cdot t \quad (4)$$

式中: $v$  表示光纤中的光速; $t$  表示光脉冲从注入到返回光发射点的时间; $c$  表示真空中的光速; $n$  表示光纤的折射率。

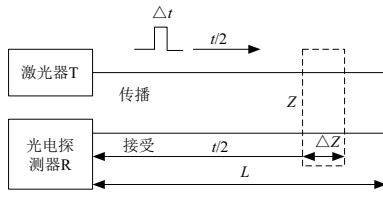


图2 DTS 工作原理

## 1.4 系统技术指标及设备选型

系统主要技术指标要求为:系统容量为 1 台分布式光纤测温主机,温度测量精度为  $\pm 1^\circ\text{C}$ ,温度测量范围为  $-40^\circ\text{C} \sim +200^\circ\text{C}$ ,分辨率为  $0.1^\circ\text{C}$ ,定位精度小于  $0.3\text{m}$ ,温度测量响应时间为  $4\text{s}/\text{km}$ 。

光纤测温主机选型:选用 KJ190-F 矿用隔爆兼本质安全型光纤测温主机,温度测量范围  $-40^\circ\text{C} \sim +200^\circ\text{C}$ ,分辨率  $0.01^\circ\text{C}$ ,误差为  $\pm 1^\circ\text{C}$ ,响应时间不大于  $120\text{s}$ ,2 个测温通道,单通道最大测量距离为  $4\text{km}$ ,定位误差为  $\pm 1\text{m}$ ,最小采样间距为  $1\text{m}$ 。

感温光缆选型:由于现场应用环境较复杂,要求长期工作在潮湿、粉尘、可能存在挤压或冲击等恶劣环境中,本

项目选择金属护套感温光缆,每根光缆尾部均与尾纤和 E2000 接头连接,这样能够避免在现场进行熔接,并且能够节约时间和成本。为了保证在安装过程中安全运作,尾纤和接头需要用塑料管进行保护。该型号光缆的结构型式为 FRNC(低烟无卤阻燃化合物)外护套、芳纶纱线、无凝胶不锈钢松套管、一次涂覆光纤,光纤直径为  $4.5\text{mm}$ ,正常工作温度为  $-40^\circ\text{C} \sim +120^\circ\text{C}$ ,短时间能承受的温度为  $-50^\circ\text{C} \sim +200^\circ\text{C}$ ,最大抗压力为  $960\text{N}/\text{cm}$ ,最大抗拉力为  $1\ 100\text{N}$ (长时间)、 $1\ 500\text{N}$ (短时间),防护等级为 IP66,纤芯:MM 50(62.5)/125  $\mu\text{m}$ ,渐变折射率多模光纤:600 等级,衰减:小于  $0.7\text{dB}/\text{km}$ @  $1\ 300\text{nm}$ ;小于  $2.4\text{dB}/\text{km}$ @  $850\text{nm}$ ,传输带宽:大于  $600\text{MHz}$ @  $850\text{nm}$ &  $1\ 300\text{nm}$ 。

通信光缆:煤矿用阻燃 MGT5V 型单模通信光缆,光纤衰减系数不大于  $0.4\text{dB}/\text{km}$ 。

## 2 监测系统安装

### 2.1 安装概况

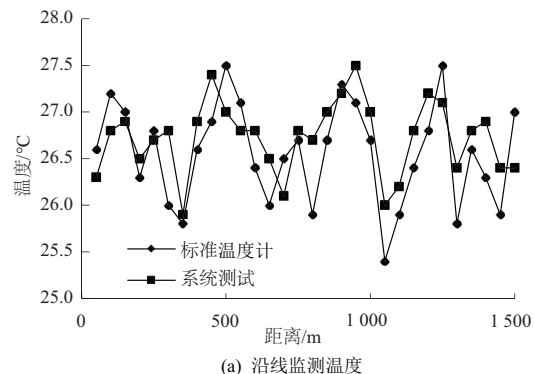
对主斜井胶带机沿线温度开展了温度现场监测,利用热传导原理对皮带的异常温度进行监测,并重点对带式输送机电机、滚筒和 CST 等关键位置处的温度进行监测。将光缆固定在带式输送机的两侧支架上,对于电机、滚筒和 CST 等位置,采用特殊支架或者紧贴方式,对于需要穿越胶带运输机位置,采用穿管方式对光缆进行保护。现场安装情况见图 3。



图3 现场光缆安装情况

### 2.2 系统调试

系统安装好之后,对正常工作下带式输送机的各个位置温度进行了监测。为了验证系统的检测精度,每隔  $50\text{m}$  使用温度计进行温度监测并与系统监测值进行对比,结果见图 4。从图 4 中可以看到:带式输送机沿线温度呈动态波动的变化特征,但均在  $25^\circ\text{C} \sim 27^\circ\text{C}$  之间,属于正常现象,标准温度计与系统监测的走势基本一致,两者的误差控制在  $\pm 1^\circ\text{C}$  以内,满足系统指标的温度检测精度要求。



(a) 沿线监测温度

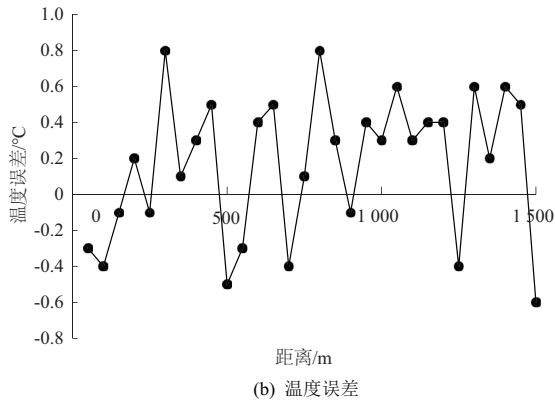
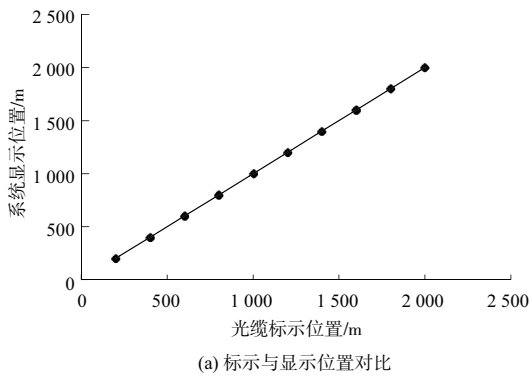
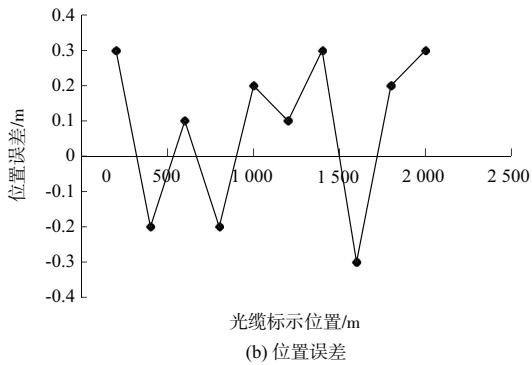


图4 温度监测精度

对井下测温光缆进行弯曲,通过增加损耗的方法来测试系统的定位精度,结果见图5。从图5中可以看到:井下光缆表示位置与系统显示位置基本保持一致,两者呈线性相关,沿线定位误差控制在±0.3 m以内,满足系统指标的定位精度要求。



(a) 标示与显示位置对比



(b) 位置误差

图5 定位精度

电机、滚筒和 CST 等重点位置的温度监测结果见图6。从图6中可知:由于机电设备运转释放大量热量,电机位置的温度最高,CST位置的温度次之,改向滚筒处的温度最低。相同设备位置处的温度比较接近,通过与热电阻的温度监测结果进行比较,系统温度监测结果与热电阻监测结果基本一致。由此可见,系统不仅可以对温度进行精确监测,还可以通过温度监测结果区分运输机不同位置处温度变化情况。

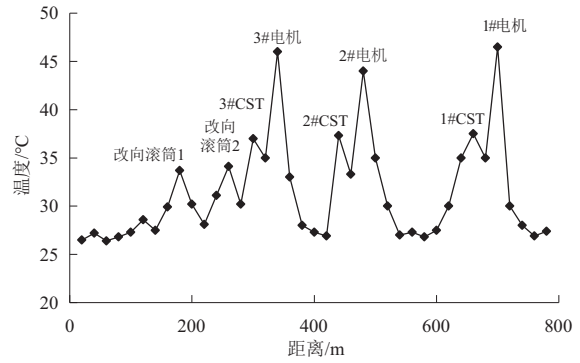


图6 皮带机机头温度监测结果

### 3 现场试验分析

为了进一步验证系统性能的优越性,在现场进行了温度异常试验,具体试验过程为:将测温光缆 99~100 m、389~390 m 以及 568~569 m 这 3 个位置处的光缆放入水槽中,然后向水槽中同时加入不同温度的水(99~100 m 处为 60℃,389~390 m 处为 55℃,568~569 m 处为 60℃,预警温度统一设置为 50℃),系统温度监测结果见图7。从图7中可以看到:在 3 个试验位置处,系统均检测到了温度异常,在第 1 个位置处,系统检测到温度最高点出现在 100 m,最高温度为 59.6℃,在第 2 个位置处,系统检测到温度最高点出现在 390 m 处,最高温度为 54.5℃,在第 3 个位置处,系统检测到温度最高点出现在 570 m 处,最高温度为 60.6℃,系统定位数据满足精度要求,且温度误差均在±1℃以内。系统探测到温度异常之后,在显示屏上向工作人员发出了预警信号,同时系统的自动洒水功能开始在 3 个位置处实行洒水降温。

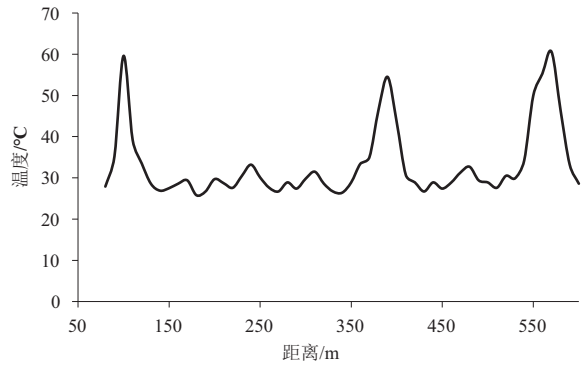


图7 现场试验结果

通过现场试验分析可知,本系统具有准确检测现场环境、皮带长廊温度场变化趋势,检测带式输送机关键点,实现对带式输送机火灾预警功能。在实际使用过程中,可根据用户要求设置预警和报警温度,可对被监控的空间设置不同分区,每个分区可以任意设置报警值,对不同部位进行不同标准的监控;当某个分区内某点温度高于该分区设定报警值时,报警并指出报警分区及热点具体位置。本文试验是在绝对温度下进行报警,系统后期可根据用户要求,实现温升斜率报警、绝对温度报警以及相对温度报警



等多种方式报警,从而全面提升矿用带式输送机运行安全性。

## 4 结语

以大柳塔煤矿带式输送机为例,基于分布式光纤监测原理,构建井下胶带机温度监测系统,得出如下结论:

1)系统分别利用拉曼散射光原理和 DTS 技术实现温度监测和定位监测,温度监测精度可控制在 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内,定位精度可控制在 $\pm 0.3\text{ m}$ 以内;

2)系统可以实现对电机、滚筒和 CST 等重点位置的温度监测,发现电机温度>CST 温度>改向滚筒温度,根据温度监测结果可以区分运输机设备类型;

3)现场试验表明,系统不仅具备很高的定位精度和监测精度,而且还可以实现对带式输送机火灾预警功能;

4)系统可根据用户要求,分区设置预警和报警温度,还可以通过温升斜率、绝对温度以及相对温度等多种方式进行报警,可全面提升井下作业的安全性。

### 参考文献:

[1] 李军. KJ190 型带式输送机温度监测系统在煤矿的应用[J].

煤矿机电,2014(3):107-110.

[2] 李军. 大柳塔矿井下带式输送机防火监控系统实现与应用[J]. 煤矿机械,2013,34(12):177-179.

[3] 王腾飞. 矿用带式输送机智能化控制系统设计与应用[J]. 煤矿机械,2020,41(12):183-186.

[4] 刘栋. 一种基于 ZigBee 技术的矿用胶带输送机温度监测系统设计与应用[J]. 煤炭与化工,2020,43(6):75-76,79.

[5] 肖雅静,孟国营,杨睿. 带式输送机温度无线实时监测系统的研究与设计[J]. 中国煤炭,2015,41(9):80-82.

[6] 王玓睿,邓霄,张均,等. 面向冰盖剖面的高空间分辨率分布式光纤测温系统设计[J]. 应用光学,2021,42(5):941-948.

[7] 吴晓峰. 带式输送机沿线光纤测温装置及安装方式[J]. 机械工程与自动化,2021(4):206-207,210.

[8] 冯新,刘洪飞,王子豪. 管道泄漏分布式光纤监测时空大数据分析[J]. 油气储运,2019,38(9):988-995.

[9] 郭强,郝义,王双,等. 500 kV 充油海底电缆导体温度分布式光纤传感监测及应用[J]. 智慧电力,2021,49(1):77-82.

[10] 傅振云. 基于光纤测温的井下带式输送机火灾优化报警设计[J]. 能源技术与管理,2020,45(4):171-172,177.

收稿日期:2021-10-08

(上接第 227 页)

分析图 2 和图 3 可看出,所提方法对实验高压变频器进行涡流补偿后,高压变频器的输出电压与电流波形状况更为稳定,而其他两种方法均出现不同程度的偏差。其他方法对涡流误差补偿时,未对电磁散射进行迭代求解,得到优化结果,而是采用统一补偿的方式,但本文方法考虑到电磁涡流的电磁散射特性,采用分段迭代的方式对高压变频器进行了增强运算,实现了多分段的误差补偿。由此可见,所提方法的补偿效果更优越,具有更高的实际应用效果。

## 3 结语

为控制高压变频器输出电流电压的稳定性,避免对电机的影响,提出一种基于动力学模型的高压变频器暂态电磁涡流补偿方法,通过动力学模型分析高压变频器暂态电磁涡流的电磁散射特征,并以分段迭代方式实现高压变频器暂态电磁涡流补偿。仿真实验结果表明:所提方法具有较低运算误差与较高的补偿效率,性能稳定优越,实际应用性较强。

### 参考文献:

[1] 周少泽,李彬彬,王景坤,等. 改进型模块化多电平高压变频器及

其控制方法[J]. 电工技术学报,2018,33(16):3772-3781.

[2] 张震宇,李兴鹤,金辛海. 基于级联式变频器的全阶磁链观测器转速估算[J]. 电力电子技术,2018,52(10):105-108,118.

[3] 王丽华,方旭东,韩素敏,等. 基于 BP 神经网络的三电平逆变器开路故障诊断研究[J]. 机床与液压,2020,48(9):187-191.

[4] 程国栋,王华平,夏晶晶. 高压绕线电动机转子变频调速技术研究[J]. 工矿自动化,2018,44(8):81-86.

[5] 刘韵,高长璧. 基于混合模块化多电平变换器的中压变频器设计[J]. 电力电容器与无功补偿,2018,39(2):137-143,149.

[6] 罗小丽,陈意军,刘万太,等. 用于故障穿越的飞轮储能双三相异步电机驱动控制研究[J]. 电机与控制应用,2017,44(8):88-94.

[7] 俞建军. 高速电机中频变频器的电路设计[J]. 微特电机,2019,47(5):59-63,67.

[8] 苏运,卜凡鹏,郭乃网,等. 基于低秩表示的多任务短期电力负荷预测的研究[J]. 现代电力,2019,36(3):58-65.

[9] 蒋卫良,杨生华,芮丰. 高压变频器在煤矿带式输送机上的应用[J]. 煤炭工程,2018,50(11):67-70.

[10] 朱二夯,黄浩,边旭,等. 大型同步调相机定子压圈涡流损耗计算及降损方法[J]. 电机与控制学报,2019,23(10):33-40.

收稿日期:2021-10-14