

基于 c-RIO 的阶次跟踪分析在风力发电中的应用*

张程鹏,冯 坤,江志农*

(北京化工大学 故障诊断与自愈工程研究中心,北京 100029)

摘要: 针对风力发电机组齿轮箱变速过程中振动信号非平稳的特点,将阶次跟踪和信号包络提取技术相结合,提出了一种针对齿轮点蚀故障的诊断方法。首先利用 Compact RIO 对齿轮箱的振动信号进行了时域数据采集,然后对时域信号进行了包络提取,进而对时域包络信号进行等角域重采样得到等角域包络信号,最后对等角域包络信号进行了阶次跟踪分析;通过对比正常齿轮和点蚀故障齿轮的包络阶次谱,进而找到了点蚀故障齿轮的故障频率特征。模拟仿真结果表明,阶次跟踪分析可以解决传统傅里叶变换在处理非平稳信号时的“频谱模糊”现象。通过齿轮点蚀故障试验的分析,结果表明包络阶次谱能够用于有效地分析出点蚀故障齿轮的特征频率,阶次跟踪分析在风力发电机组齿轮箱的故障诊断中具有广阔的应用前景。

关键词: 风力发电机组; 齿轮箱故障; 计算阶次跟踪; 故障诊断; Compact RIO

中图分类号: TM614; TH132

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2012)11-1243-04

Application of order tracking analysis based on c-RIO in wind power

ZHANG Cheng-peng, FENG Kun, JIANG Zhi-nong

(Diagnosis and Self-Recovery Engineering Research Center, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: Aiming at the characteristic of the non-stationary vibration signal from gearboxes of wind power generators, an analysis method on fault diagnosis of gears with pitting corrosion was explored by the combination of order tracking analysis and envelope extraction. Firstly, vibration signal on gearboxes was acquired with Compact RIO(C-RIO). Then the signal was processed by means of envelope extraction and the processed signal was converted to even-angle signal. Order tracking analysis for even-angle signal was achieved in the next step. According to the comparison with frequency characteristics of normal gears, that on gears with pitting corrosion can be found. The results indicate that fuzzy frequency can be solved by order tracking analysis in simulation, and fault frequency characteristics can be analyzed effectively in the experiment about gears with pitting corrosion. Therefore, order tracking analysis has a broad application prospect in the fault diagnosis of gearboxes of the wind power generators.

Key words: wind power generators; fault diagnosis of gearboxes; computed order tracking(COT); fault diagnosis; Compact RIO(C-RIO)

0 引 言

利用化石燃料发电产生的温室效应是造成世界环境日益恶化的一个重要因素。同时,核能发电因面临核废料处理的问题,也不利于环境保护^[1]。

因此,风力发电作为新兴的清洁绿色能源之一,具

有广阔的市场前景。近年来,风力发电技术在世界各国得到迅猛发展,欧洲和美国在国际风电市场中占主导地位。我国风能资源十分丰富,具有大规模商业化风电资源条件。自 2006 年以来,我国在风力发电方面也取得了跨越式发展^[2]。

齿轮变速箱作为风力发电设备的关键部件,其是否正常运转直接关系到企业的效益。由于齿轮运行于

收稿日期:2012-06-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51135001);国家重点基础研究发展计划(“973”计划)资助项目(2012CB026000)

作者简介:张程鹏(1987-),男,山西阳城人,主要从事设备故障诊断与信号处理方面的研究. E-mail:chengpeng.zhang123@gmail.com

通信联系人:江志农,男,研究员,博士生导师. E-mail:jiangzn@mail.buct.edu.cn

高速、重载、强冲击环境下,容易产生轮齿折断、磨损、胶合等多种故障^[3],当故障达到一定程度时可以导致整个风力发电系统瘫痪。齿轮变速箱在变速过程中的振动信号属于非平稳信号,对非平稳信号进行传统的傅里叶变换时会产生“频谱模糊”现象,而阶次跟踪分析能够很好地解决这一现象,因而其对齿轮变速箱的故障诊断具有重要的现实意义。

基于上述分析,本研究提出一种针对风力发电机组齿轮箱齿轮点蚀故障的诊断方法。

1 风力发电机组齿轮箱故障特点

齿轮箱中的轴、齿轮和轴承在工作时会产生振动,若发生故障,其振动信号的能量分布就会发生变化,振动信号是齿轮箱故障特征的载体。

常见的齿轮箱故障有:①齿形误差,②齿轮均匀磨损、胶合、点蚀,③箱体共振、轴轻度弯曲,④断齿,⑤轴不平衡,⑥轴严重弯曲,⑦轴向窜动,⑧轴承疲劳剥落和点蚀^[4-5],等等。

常见齿轮的故障发生比例:划痕为 10%,磨损为 10%,点蚀为 31%,断齿为 41%,其他为 8%^[6]。

在齿轮箱的故障中,轴承和齿轮的故障特征频率和转速密切相关,因此,阶次跟踪分析为其在变速转动过程中故障特征的提取提供了有效的方法,突破了传统傅里叶变换的局限性。

2 阶次跟踪分析法

计算阶次跟踪方法^[7-12](COT)首先使用传统的硬件采集等时间间隔的数据,然后基于键相信号,通过重采样获得等角度数据。

通常,为了确定重采样的时间点,本研究假设转轴处于匀角加速度的状态。根据这个假设,转角 θ 可由下面的一元二次方程来描述:

$$\theta(t) = b_0 + b_1t + b_2t^2 \quad (1)$$

在知道键相脉冲对应的轴转角增量 $\Delta\varphi$ 的情况下,待定系数 b_0, b_1, b_2 可以通过拟合 3 个连续的键相脉冲到达时间 t_1, t_2, t_3 得到,这会产生以下 3 个条件:

$$\theta(t_1) = 0 \quad (2)$$

$$\theta(t_2) = \Delta\varphi \quad (3)$$

$$\theta(t_3) = 2\Delta\varphi \quad (4)$$

本研究从键相脉冲信号的采样中可以得到时间点 $t_1 \sim t_3$ 。把式(2~4)代入下列公式中,然后以矩阵的形式给出:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ \Delta\varphi \\ 2\Delta\varphi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & t_1 & t_1^2 \\ 1 & t_2 & t_2^2 \\ 1 & t_3 & t_3^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

由上式求出 b_i 后,将其代入式(1)中可得:

$$t = \frac{1}{2b_2} [\sqrt{4b_2(\theta - b_0) + b_1^2} - b_1] \quad (6)$$

从式(6)中可以得出从 $0 \sim 2\Delta\varphi$ 之间任意角度的值及其对应的时间,这构成了重采样算法的基础。当每一个键相脉冲到达时,本研究对数据进行重采样。最近的键相脉冲确定时间 t_3 ,前两个键相脉冲确定时间点 t_1 和 t_2 。为了避免采样重叠,本研究只计算重采样时间为大于时间间隔的中间值所对应的值。这个条件限制了公式中 θ 的取值范围为:

$$\frac{\Delta\varphi}{2} \leq \theta \leq \frac{3\Delta\varphi}{2} \quad (7)$$

通常,转角的重采样可以表示为:

$$\theta = k\Delta\theta \quad (8)$$

式中: $\Delta\theta$ 一所要求的重采样的角度间隔。

把式(8)代入式(7)中,可得到下面 k 的值(k 为正整数):

$$\frac{\Delta\varphi}{2\Delta\theta} \leq k \leq \frac{3\Delta\varphi}{2\Delta\theta} \quad (9)$$

因此,公式(6)变为:

$$t = \frac{1}{2b_2} [\sqrt{4b_2(k\Delta\theta - b_0) + b_1^2} - b_1] \quad (10)$$

一旦计算得到重采样的时间,相应的信号的幅值也能通过对采样数据进行插值计算。当幅值确定以后,本研究可以通过 FFT 把重采样数据由角域变换到阶次域。

3 模拟仿真研究

模拟齿轮啮合振动的信号,转动频率 f_c ,则振动信号为:

$$5\sin(2\pi f_z t + b(1)\cos(2\pi f_c t)) + 3\sin(4\pi f_z t + b(2)\cos(2\pi f_c t)) + \sin(8\pi f_z t + b(3)\cos(2\pi f_c t)) \quad (11)$$

其中:

$$f_z = (300 + 900t)/60$$

$$f_c = f_z/a \quad (12)$$

式中: f_z 一齿轮啮合频率; f_c 一齿轮转动频率; a 一齿轮齿数; b 一调制系数,是长度为 3 的一维数组。

在这个信号中包含了齿轮的 1 阶、2 阶和 4 阶啮合频率。

在此,本研究取 $a = 30, b = [1 \ 0.5 \ 0.8]$,采样频率

$f_s = 5\ 120$, 采样点数 $N = 102\ 400$, 即齿轮从 $10\ \text{r/min}$ 升速到 $600\ \text{r/min}$, 用时 $20\ \text{s}$ 。

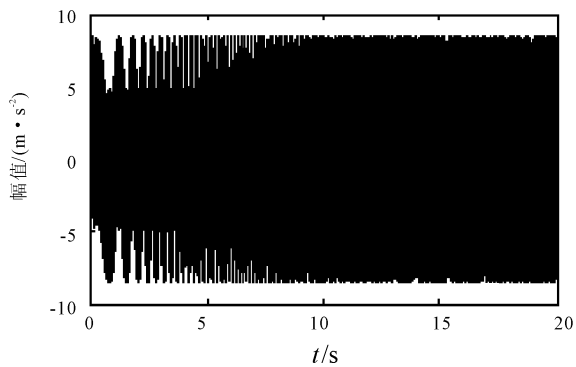


图 1 时域波形

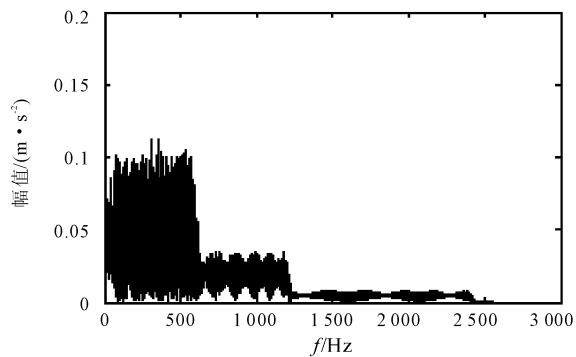


图 2 常规频谱分析

时域波形如图 1 所示。

由齿轮的振动信号可以清晰地看出, 波形中振动的频率是逐渐增加的, 该信号属于非平稳信号。而研究者采用傅里叶变换时, 总是假设窗内的信号是稳定的, 得到的谱线反映的是窗内信号所有的频率成分, 于是窗中信号的频率变化造成了“频谱模糊”。

常规频谱分析如图 2 所示。

上述现象体现了傅里叶变换在处理非平稳信号时存在的局限性, 而阶次跟踪分析可以很好地解决这一问题。

阶次谱如图 3 所示。从图 3 中可以很清晰地看到: 齿轮的 1 阶、2 阶和 4 阶啮合频率, 与模拟中设置的频率成分相吻合。由此可以证明上述分析结果的正确性。

4 风力发电机组的故障诊断实验

4.1 实验台及实验装置描述

风力发电实验台如图 4 所示。图 4 中, 左边的电机用来模拟风力发电机组中的低转速叶轮, 中间部分为齿轮变速箱, 最右边部分为发电机。通过这样一套

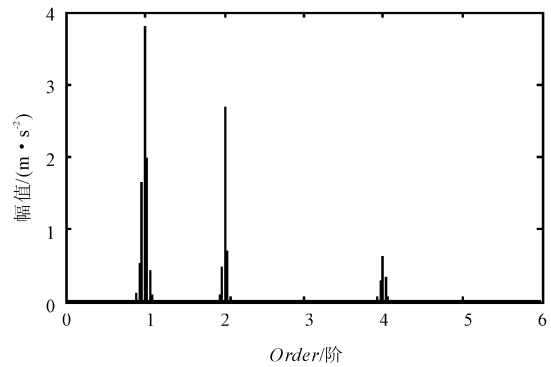


图 3 阶次谱

装置, 可以简单地模拟风力发电的过程。左边电机的额定功率为 $1\ 100\ \text{W}$, 额定转速为 $1\ 500\ \text{r/min}$ 。

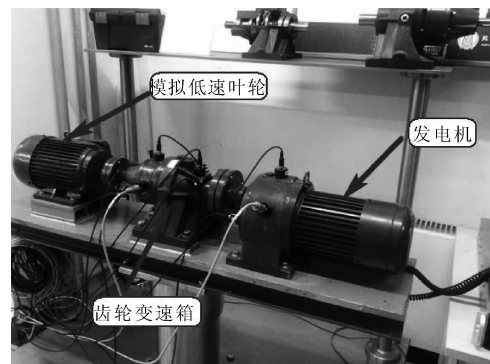


图 4 风力发电实验台

试验中所用到的实际数据是用 Compact RIO (简称 c-RIO) 进行采集的。c-RIO 是 NI 推出的一款高性能的数据采集设备, 为工业与嵌入式控制应用提供所需的高性能与高可靠性^[13]。c-RIO 可以在条件比较恶劣的环境下稳定可靠地工作, 能够实现 16 通道同步数据采集, 采样率最高可达 $51\ 200\ \text{Hz}$ 。

数据采集装置 Compact RIO 如图 5 所示。

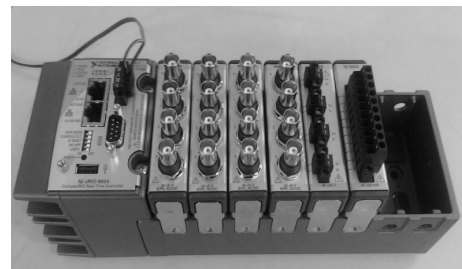


图 5 Compact RIO

4.2 实验过程描述

本研究用 c-RIO 进行数据采集时所用采样率 $f_s = 25\ 600\ \text{Hz}$, 齿轮转速由 $660\ \text{r/min}$ 上升到 $2\ 400\ \text{r/min}$, 持续一段时间后再降速到 $700\ \text{r/min}$, 整个过程大概持续 $7\ \text{s}$ 左右。本研究首先用正常齿轮进行试验, 获得

正常的振动信号,然后再用具有点蚀故障的齿轮进行试验,获得齿轮点蚀故障时的振动信号。分别对正常的振动信号和故障信号进行包络阶次分析,然后对比正常齿轮和点蚀齿轮的包络阶次谱差别。

4.3 实验结果

本研究采集到的正常齿轮振动信号如图 6 所示。点蚀故障齿轮振动信号如图 7 所示。

从图 6 和图 7 中可以看到,振动的大小随着转速的增加逐渐增大,随着转速的减小而减小。

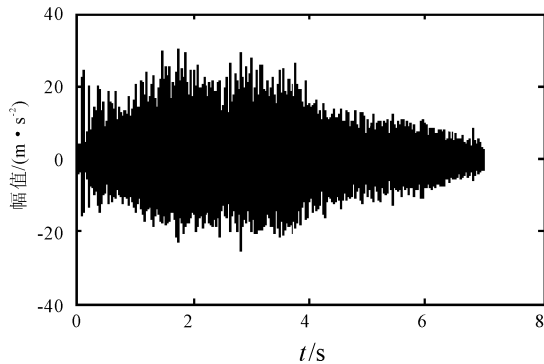


图 6 正常齿轮的振动信号

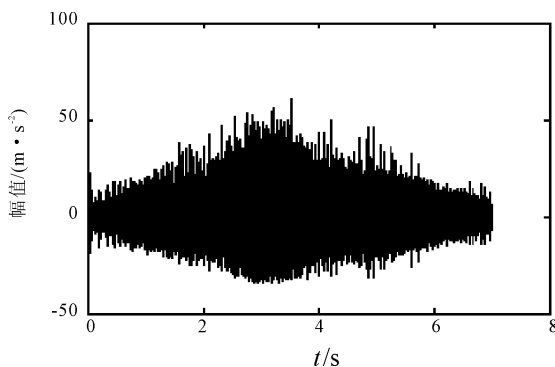


图 7 点蚀故障齿轮的振动信号

本研究对采集到的齿轮的振动信号和点蚀故障信号进行包络提取,再把等时间间隔的包络信号转化为等角度包络信号。

本研究对等时间间隔的振动信号进行包络谱分

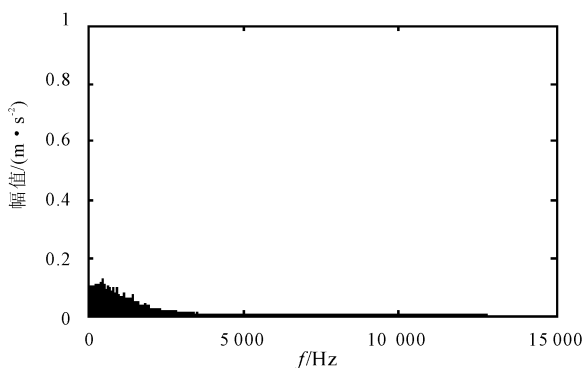


图 8 正常齿轮信号的包络谱

析,得到其包络谱图,如图 8、图 9 所示。从包络谱图上可以很清楚地看到产生了“频谱模糊”的现象,因此通过它无法识别故障频率特征。

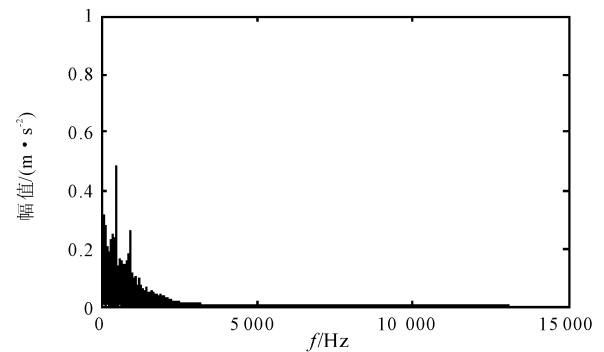


图 9 点蚀故障齿轮信号的包络谱

本研究对等角度包络信号进行 FFT,得到振动信号的包络阶次谱图如图 10、图 11 所示。

从阶次谱图上研究者可以比较清楚地看到故障特征频率成分。正常齿轮为 12 阶、4 阶啮合频率,点蚀故障齿轮在 12 阶、24 阶啮合频率附近出现了 11 阶、13 阶、23 阶和 25 阶的边频带。

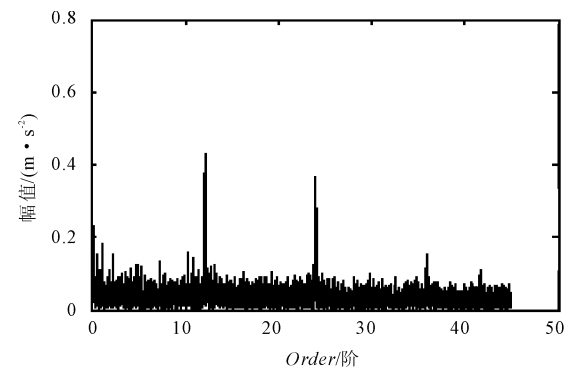


图 10 正常齿轮振动信号的包络阶次谱

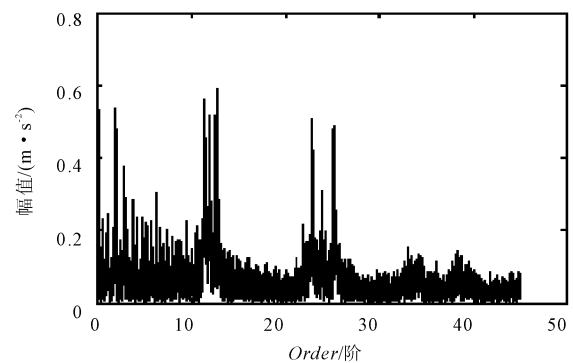


图 11 点蚀故障齿轮信号的阶次谱

(下转第 1263 页)

参考文献 (References):

- [1] ARIKAWA K, HIROSE S. Development of Quadruped Walking Robot TITAN—VIII [C]//IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, Osaka: [s. n.], 1996:208-214.
- [2] 陈德明. 四足仿生机器人运动控制系统的设计与实现 [D]. 西安:西北工业大学机电学院,2007.
- [3] 刘 静,赵晓光,谭 民,等. 腿式机器人的研究综述[J]. 机器人,2006,28(1):81-88.
- [4] 张 奔. 四足机器人结构与运动控制算法研究 [D]. 常州:河海大学机电工程学院,2010.
- [5] 李贻斌,李 彬,荣学文,等. 液压驱动四足仿生机器人的结构设计和步态规划[J]. 山东大学学报:工学版,2011,41(5):32-36,45.
- [6] 段清娟,张锦荣,王润孝,等. 基于虚拟样机技术的四足机器人结构设计[J]. 机械科学与技术,2008,27(9):1171-1174.
- [7] 杨东超,赵明国,陈 昱,等. 拟人机器人自由度的分析[J]. 中国机械工程,2003,14(6):453-456.
- [8] 王新杰,黄 涛,陈鹿民. 四足步行机器人爬行步态的计算机仿真[J]. 计算机仿真,2007,24(4):172-175.
- [9] 董金秋,蒋 蓁,彭 为,等. 四足滑冰机器人直线运动规律研究[J]. 机电工程,2010,27(11):115-118.
- [10] 张建新. 自主机器人移动机构设计与研究[J]. 现代制造技术与装备,2011(2):8-9.
- [11] 何冬青,马培菀. 四足机器人动态步行仿真及步行稳定性分析[J]. 计算机仿真,2005,22(2):146-149.
- [12] 黄金梭,陈开强. 基于 VB 的工业机器人 PLC 控制系统 [J]. 轻工机械,2010,28(3):65-68.

[编辑:张 翔]

(上接第 1246 页)

5 结束语

在风力发电机组齿轮箱变速过程中,振动信号属于非平稳信号,传统的傅里叶变换对于频率成分的分析显然存在不足。本研究采用阶次跟踪分析可以有效地分析出与转速有关的振动信号的特征频率成分。

仿真模拟结果表明,阶次跟踪分析可以解决传统傅里叶变换在处理非平稳信号时的“频谱模糊”现象。同时,通过齿轮点蚀故障试验结果,验证了包络阶次谱能够有效地分析出点蚀故障齿轮的特强频率,即验证了阶次分析的有效性。因此,阶次跟踪分析方法在风力发电机组齿轮箱的故障诊断的实际应用中具有较广阔的应用前景。

参考文献 (References):

- [1] 周燕莉. 风力发电的现状与发展趋势[J]. 甘肃科技,2008,24(3):9-11.
- [2] 王秀丽. 风力发电系统发展现状分析[J]. 华电技术,2010,32(8):73-75.
- [3] 康海英,栾军英,田 燕,等. 阶次跟踪在齿轮磨损中的应用[J]. 振动与冲击,2006,25(4):112-114.
- [4] 绳晓玲,钟勇超. 基于倒谱和包络解调的齿轮箱故障诊断[J]. 机械,2011,38(6):70-73.
- [5] 丁 康,朱小勇,陈亚华. 齿轮箱典型故障振动特征与诊断策略[J]. 振动与冲击,2001,20(3):7-12.
- [6] 高胜利,赵小荣,申 强. 风力发电机组齿轮箱故障诊断[J]. 电力电子技术,2011,45(10):39-41.
- [7] FYFE K R, MUNCK E D S. Analysis of computed order tracking [J]. **Mechanical Systems and Signal Processing**, 1997, 11(2):187-205.
- [8] 栾军英,康海英,郑海起,等. 基于阶次跟踪的旋转机械启动过程振动分析[J]. 军械工程学院学报,2005,17(2):23-25.
- [9] 天 昊,栾军英,田 广,等. 阶次跟踪分析在齿面磨损故障诊断中的应用[J]. 军械工程学院学报,2005,17(5):57-60.
- [10] 康海英,祁彦杰,阎 文,等. 阶次跟踪和奇异谱降噪在齿轮早期故障诊断中的应用[C]//全国高校机械工程测试技术研究会华北分会、中国振动工程学会动态测试专业委员会华北分会 2009 年学术年会论文集. 天津:中国振动工程学会全国高校机械工程测试技术研究会,2009.
- [11] 余碧琼. 基于 Duffing 方程的齿轮故障检测方法研究[J]. 现代制造技术与装备,2011(1):11-13.
- [12] 康海英,栾军英,郑海起,等. 基于阶次跟踪和经验模式分解的齿轮故障诊断[J]. 上海交通大学学报,2007,41(9):1529-1932.
- [13] 王洪超,胡文兴,邱红辉,等. eRIO 远程数据采集装置及其应用[J]. 油气储运,2011,30(12):951-952.

[编辑:罗向阳]