基于DSP＋ARM＋FPGA架构的风机振动数据采集系统设计与应用

作为风机机械部分关键部件之一，主传动链发生机械故障频率较高，因此降低了风场效益。采集主传动链振动信息进行实时监测与故障预警分析，可全面了解机组运行状况，从而制定合理的检修计划。提出一种以DSP＋ARM＋FPGA为处理器架构的振动数据采集系统，硬件系统主要由CPU、采集电路、通信电路及供电电路构成。基于嵌入式SYS/BIOS及Linux系统的软件平台，实现多通道信号同步采集、本地运算与文件上传等功能，解决了传统采集器无法进行多通道、大数据量采集与上传的难题。所设计的样机经实际风场工程现场验证，可有效采集原始振动信号并进行特征值提取、可靠上传，通过对采集的数据进行分析完成齿轮箱的故障诊断。

唐　铖　郭红霞　杨　苹　曾　军　龙霞飞/华南理工大学电力学院

唐　铖/硕士研究生

关键词/Keywords
DSP＋ARM＋FPGA·
振动数据·
故障诊断·
Linux系统·

0　引言

随着风机单机容量的增加，其机械部件承受的动态载荷也相应增加，使得机械故障率逐年攀升[1-2]。作为机械部件关键部分之一，主传动链实现能量转换和传递，是故障率较高的部分[3-4]。通过振动数据采集系统对主传动链的振动信息进行采集、监测与故障分析，可全面了解机组运行状态，制定合理的检修计划，降低机组因故障的平均停机检修时间[4-5]。

风电监测与故障诊断领域首推德国申克风电监测系统。2001年，申克推出了第一套风电监测系统，型号为WTAS 3652。这套风电监测系统经过十几年的发展积累了大量的应用经验[6]。但国外推出的状态监测与故障诊断系统成本较高，并且后期服务得不到保障，不适用于国内风电场[7]。

在国外振动监测与故障诊断系统技术日渐成熟的基础上，国内在风电监测领域的技术逐步得到了发展。国内某些著名的风力发电企业、风机制造商和各大科研单位相继开展了风力发电机机组状态监测和故障诊断系统的研究性工作，并取得了一系列成果[3]。国内推出的系统，因存在诊断准确度低、难以实现故障预测等问题，并未在风场中得到广泛应用[5]。其中一个重要原因为，用于状态监测与故障分析的振动数据源不完整。一方面，机组部件的监测点位置集中于齿轮箱，未能采集主传动链其余各个关键位置的振动信号；另一方面，振动数据采集器所能采集与上传的数据量较少，无法为状态监测与故障诊断系统提供丰富的特征值与原始振动波形。

为了解决这个难题，本文以主传动链为对象，设计了振动数据采集系统，为机组的状态监测与故障诊断提供充足数据源。

1　数据采集系统设计

系统的设计分为硬件系统与软件系统两部分。其中，硬件系统采用DSP＋ARM＋FPGA三核架构处理器，综合利用DSP的高速信号处理能力、ARM的事务管理能力及FPGA的复杂时序逻辑功能，实现数据的采集、本地运算与上传。相比于只有DSP或ARM的处理器而

大型风电场智能化状态监控与运维调度系统研究及示范（2015BAA06B02）。

言，效率更高。软件系统采用基于SYS/BIOS实时操作系统与Linux分时操作系统的嵌入式软件平台，实现数据的采集、运算与上传。其中，基于Linux系统可实现数据以文件形式上传，相比于传统以报文形式上传，数据量更大且更不易丢失。

1.1 硬件设计

数据采集系统的硬件需要完成振动信号的滤波、高准确度采样、本地缓存及上传。因此，硬件主要由滤波电路、高准确度模数转换电路、CPU处理器、存储单元和通信电路组成。由硬件组成的设备为数据采集及处理装置。

滤波电路主要对振动信号进行基本的隔直及抗混叠滤波处理，由阻容网络组成。高准确度模数转换电路将来自传感器系统的模拟振动信号转换成数字信号，以进行数字运算处理操作。

CPU为DSP＋ARM＋FPGA架构的处理器，由FPGA进行信号的采样控制，其DSP具有高速运算能力，可实现振动信号特征值计算及时域、频域分析的计算，并通过eCAP端口捕捉转速信号的上升沿；利用ARM实现数据以文件形式上传，为故障诊断分析及状态监测提供大量的特征值与原始振动波形。存储单元为NandFlash，主要完成振动数据的本地存储。

通信单元完成振动数据的上传与后台配置文件的下发，并与机组主控系统进行通信，获取机组过程量用于振动信号的同步分析，主要包含了用于数据通信的以太网电路及光纤通信电路，以及用于过程量采集的RS 485总线电路、CAN总线电路。硬件框图如图1所示。

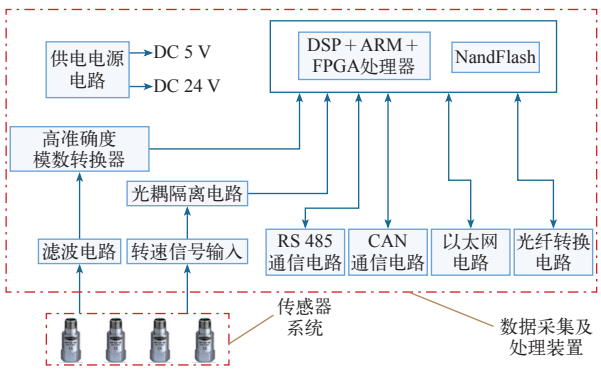


图1 硬件系统框图

1.2 软件设计

软件设计主要完成信号的ADC采样、PFGA数据缓存、数字信号处理和数据文件管理等任务。

其中，FPGA以恒定的频率分别触发4路ADC芯片进行振动信号采样，并将采集的数据缓存在UPP接口。

基于SYS/BIOS实时操作系统的DSP处理器主要完成数字信号处理。DSP以恒定的中断频率进入UPP接口，对FPGA缓存的数据进行抽样提取；eCAP端口对转速信号上升沿进行捕捉，获取转轴转速信号；其余任务为定时器中断与数据运算处理。数据运算部分，主要完成时域的特征值计算及数字滤波、频域的离散傅里叶变换等。完成处理的数据形成数组保存在IPC共享内存区。

基于Linux多线程操作系统的ARM处理器主要完成数据文件管理，其主要线程包含通过IPC内存共享区域与DSP处理器进行数据传输与通信，以获取原始数据及特征值数据片段，并将其打包成数据文件，通过FTP协议完成数据以文件形式上传至后台服务器。软件设计流程图如图2所示。

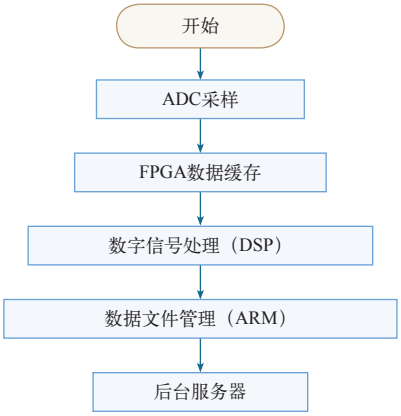


图2 软件流程图

2 特征值分析在齿轮箱状态监测的应用

2.1 时域特征值分析

时域分析是根据信号的时间历程，存储信号数据和波形，并分析信号的组成成分和特征量，可分为时域波形分析和具有参数显示功能的幅域参数分析两种。幅域参数一般分为有量纲和无量

纲两种类型。峰值、均值和方根幅值等为有量纲幅域参数，波形指标、脉冲指标和裕度指标等为无量纲幅域参数。

通过对振动信号的峭度指标进行分析，可对齿轮箱轴承的故障情况进行判断。正常轴承的振动信号近似服从正态分布，其峭度值约为3。当轴承出现故障时，其峭度值将大于3，因此通过振动信号峭度指标可判断齿轮箱轴承的故障情况，峭度指标的计算公式为

$$\text{kurtosis}=\frac{\sum_{i=0}^{N-1}(x_i-\bar{x})^4}{N\times(\sigma^2)^2} \tag{1}$$

式中，x_i为按恒定采样率所得的原始振动信号序列；N为采样点数；$\bar{x}$为其平均值；σ^2为其方差。

2.2 频域特征值分析

尽管时域波形及峭度指标分析可初步判断机组是否存在故障，但需要频域分析才能定量地描述机组振动状态。振动信号的通频能量由原始振动信号经过离散傅里叶变换分解处理，是各个频率振动分量有效值相互叠加后的总振动量有效值，用于表征机械部件的总振动能量。计算振动信号通频能量，并与德国VDI3848状态监测区域划分标准对比，可定量判断齿轮箱故障程度。设周期离散信号$f(n)$的离散傅里叶变换$F(k)$的变换过程为

$$F(k)=\sum_{k=0}^{N-1}f(n)\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\frac{2\pi}{N}nk} \tag{2}$$

式中，n、$k=0$，1，…，$N-1$。

假设第k次振动分量的实部与虚部的模分别为

$$X_{\mathrm{R}}(k)=\left|f(n)\cos\frac{2\pi}{N}nk\right| \tag{3}$$

$$X_{\mathrm{L}}(k)=\left|f(n)\sin\frac{2\pi}{N}nk\right| \tag{4}$$

则振动信号的幅值谱为

$$G_{\mathrm{rms}}(k)=\frac{2}{N}\sqrt{X_{\mathrm{R}}^2(k)+X_{\mathrm{L}}^2(k)} \tag{5}$$

式中，N为$f(n)$一个周期内的点数。由此可得振动信号的通频能量为

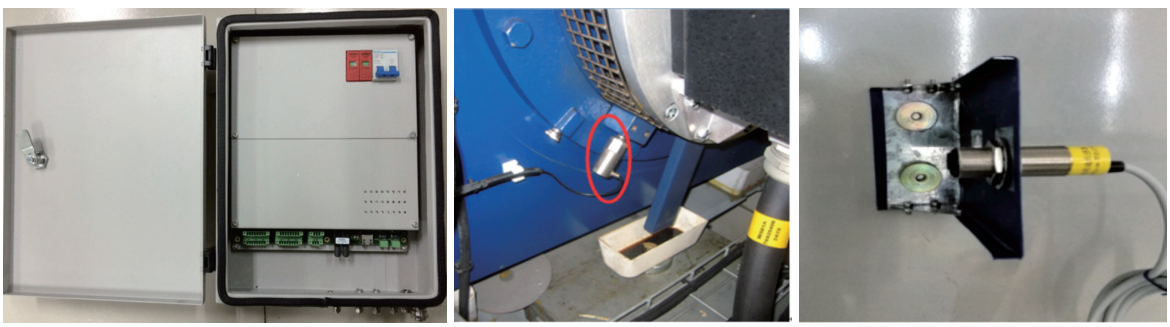
$$\mathrm{Amp}=\sqrt{\frac{2}{N}\sum_{k=0}^{\frac{N}{2}-1}G_{\mathrm{rms}}^2(k)} \tag{6}$$

3 现场应用

将设计的数据采集系统应用于湛江灯楼角风电场，对风场的24台2 MW风机的机械状态进行监测，重点监测曾发生过机械故障的2#机组与23#机组。

3.1 现场实施

分别将两台数据采集系统安装在2#机组和23#机组机舱，现场实施图片如图3所示。采样通道中，AN4为齿轮箱行星架上风向轴承轴承座的测点，AN7为齿轮箱低速轴轴承座测点，AN8为中间轴轴承座测点，AN9为高速轴轴承座测点。通过光纤及现场交换机，将数据由数据采集系统传输至风场控制室服务器。从服务器下发配置文件至数据采集系统，使其以40 kHz采样率连续采样10 min，采集机组开机起动及大功率运行的数据，同时限制23#机组输出功率不超过40%。从服务器获



（a）数据采集系统样机　（b）齿轮箱振动传感器安装　（c）光电传感器安装

图3 现场安装实物图

取原始信号波形及特征值信息，并进行故障分析。

3.2 故障分析

齿轮箱为机组主传动链故障率较高的部件，分析机组的故障，可先从齿轮箱的故障分析入手。从服务器提取2#机组、23#机组齿轮箱各测点通频能量有效值、峭度指标及时域波形，通过分析初步得出齿轮箱故障结论，分析过程中，采用了德国VDI3834的监测区域划分标准为参考。

1）考虑到23#机组输出功率只在40%以内，齿轮箱各测点时域振动信号有效值已经基本达到VDI3834标准规定的预警值。与2#机组比对发现，23#机组齿轮箱各测点在输出功率为700 kW时的振动信号有效值已远大于2#机组相应测点在输出功率1 300 kW时的有效值。由此表明23#机组齿轮箱整体振动情况严重。

2）由数据采集系统返回的特征值列表可知，通道AN4、AN7、AN8和AN9振动信号的峭度指标分别为3.745 4、3.555、7.377和6.618 1，各个数值明显大于3，且最高为7.377，表明整个齿轮箱轴承都受到了较为严重的冲击。

3）观察振动信号的时域波形，可了解机组传动链瞬时振动冲击幅值及周期。图4为齿轮箱各测点0～2 000 Hz 带通信号时域波形，时域长度为从10～10.3 s。表明冲击明显，23#机组齿轮箱整体振动情况严重。由齿轮箱中间轴轴承座测点AN8以及高速轴轴承座测点AN9的振动时域波形可知，在0.3 s的时间长度范围内，出现幅值超过30 m/s^2，周期约为37.5 ms的周期性冲击脉冲。

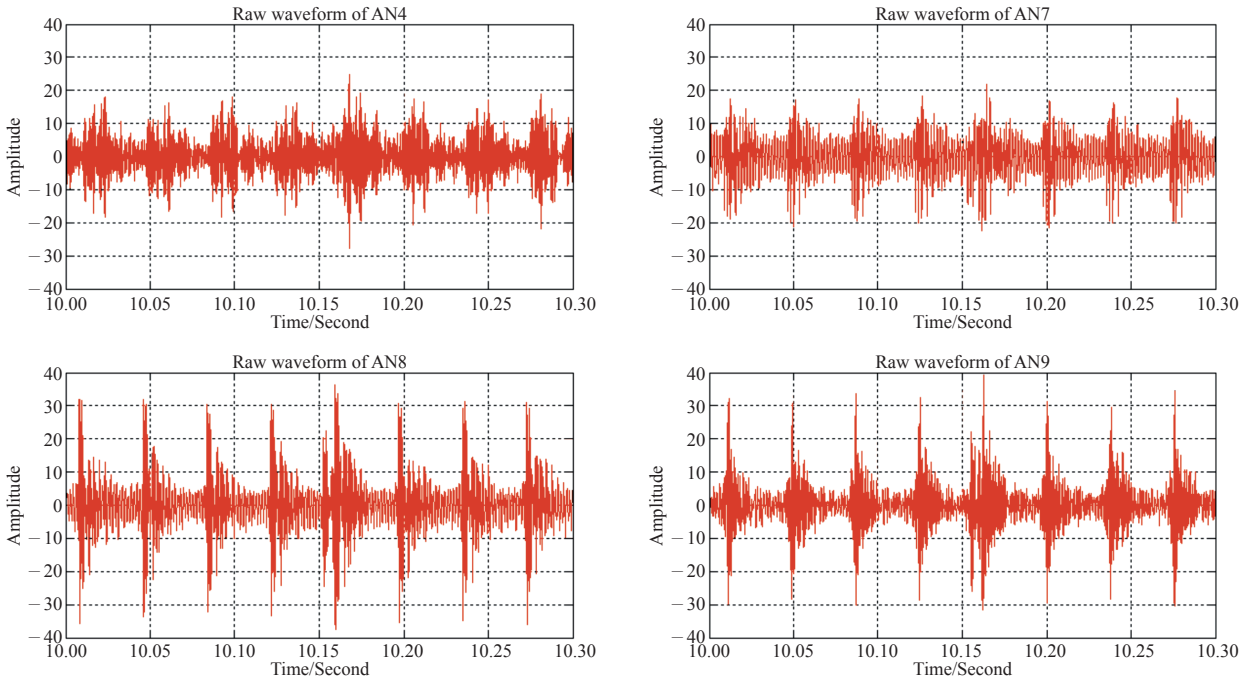


图4 齿轮箱各测点时域振动波形

4）图5为齿轮箱各测点0～2 000 Hz通频能量有效值在发电机高速轴输出不同转速条件下随时间的变化情况，不同颜色的曲线用于区分不同转速范围。从曲线的幅值随横坐标时间变化的规律可知，当发电机输出轴转速小于1 200 r/min时，通频能量有效值接近0；当发电机输出轴转速在1 200～1 500 r/min范围变化时，各测点通频能量有效值随时间发生较大变化，最大值接近7 m/s^2，最小值为0；当发电机输出轴转速在200～1 500 r/min 范围变化时，各测点通频能量有效值随时间变化较小，且维持维持在较高水平，最大值接近8 m/s^2，最小值为4.8 m/s^2。如图中的黄线所示，当齿轮箱高速轴转速为1 500～1 800 r/min时，各测点通频能量有效值明显偏大，通道AN8的通频能量接近

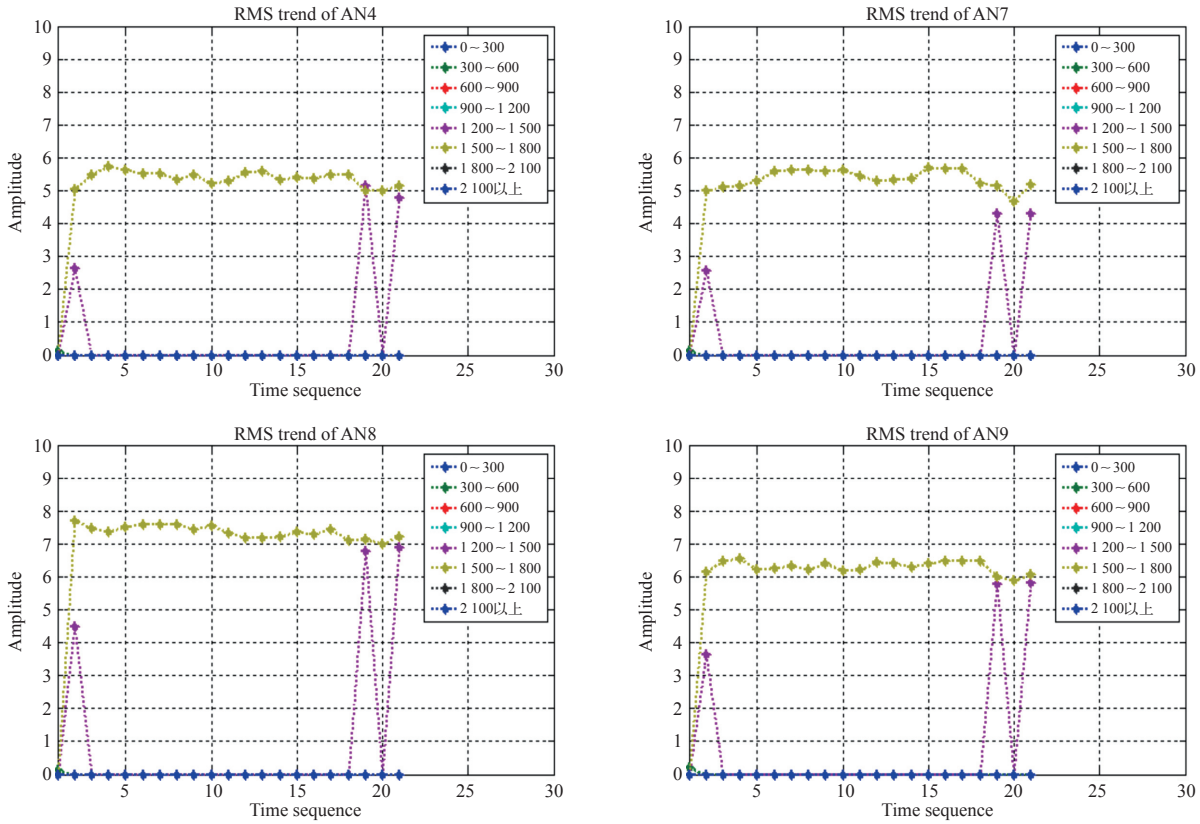


图5　齿轮箱各测点0～2 000 Hz通频能量有效值

8 m/s^2，已超过VDI3834标准推荐监测阈值7.5 m/s^2，表明23$^{\#}$机组齿轮箱整体振动情况严重。

5）机舱内人耳听到规律的周期性碰撞声音，进一步表明23$^{\#}$机组齿轮箱内部存在机械损伤。查看时域波形，高速轴信号稳定地每隔57个冲击周期产生一个大冲击。考虑到输出级啮合齿轮对齿数为22/104，因此输出级啮合齿轮对可能各有一个齿损伤严重。

3.3　运维建议及处理结果

一般而言，风机运维及处理步骤包含电气维护和机械维护两部分。首先对电气故障进行维护，主要关注发电机的电气故障，如滑环拉弧、发电机温度过高等；然后对机械故障进行维护，主要关注齿轮箱故障、主轴故障、塔筒故障和叶片故障等。其中，由主轴及齿轮箱组成的传动链是导致机组停机检修时间最长的部件，其故障率较高，因此需对传动链故障进行重点关注。

针对以上故障分析及运维步骤，对23$^{\#}$机组提出如下运维建议。

1）应立即停机检查齿轮箱输出级，特别注意输出级齿轮对是否各有一个齿出现齿面大面积剥落或断齿。

2）应限制23$^{\#}$机组输出功率在1 000 kW以下。

3）应持续监测23$^{\#}$机组齿轮箱的振动变化情况，将齿轮箱振动信号变化的趋势作实时记录。

4）检查齿轮箱减振器附近是否有大面积齿面脱落。

根据运维建议，风场工作人员在现场进行故障排查，发现齿轮箱过滤系统侧减振器出现齿面大面积剥落，如图6所示。风场负责人将23$^{\#}$机组停

图6　大面积齿面脱落

机检修，发现输出级齿轮对有一个齿出现断齿，如图7所示。

图7 齿轮箱故障图片

4 结束语

所设计的主传动链振动数据采集系统可采集大量数据用于风机状态监测与故障诊断并实现稳定可靠的数据上传。为推进风机故障预测分析的研究、基于数据融合的风机故障诊断的研究奠定基础，为其提供充足的数据源。

参考文献

[1] 汪光阳，周义莲．风机振动故障诊断综述 [J]．安徽工业大学学报：自然科学版，2006 (1)：64-68.

[2] 龙泉．风电机组齿轮传动系统动态特性及故障诊断方法研究 [D]．北京：华北电力大学，2012.

[3] 李辉，胡姚刚，李洋，等．大功率并网风电机组状态监测与故障诊断研究综述 [J]．电力自动化设备，2016 (1)：6-16.

[4] 辛卫东，马志勇，滕伟，等．振动监测技术在风电机组齿轮箱故障诊断中的应用 [J]．中国电力，2012 (5)：77-80.

[5] 冯志鹏，褚福磊．行星齿轮箱齿轮局部分布式故障振动频谱特征 [J]．中国电机工程学报，2013，33 (5)：118-125.

[6] Jae Yoon，David He，Brandon Van Hecke．On the use of a single piezoelectric strain sensor for wind turbine planetary gearbox fault diagnosis [J]．IEEE Transactions on Industrial Electronics，2015，62 (10)：6585-6593.

[7] Thomas Bruce，Hui Long，Rob S Dwyer-Joyce．Dynamic modelling of wind turbine gearbox bearing loading during transient events [J]．IET Renewable Power Generation，2015，9 (7)：821-830.

（收稿日期：2016－12－11）EA

(上接第20页)

参考文献

[1] Eriksson C J．Electric heating of pipelines with variable resistance wire [J]．IEEE Transactions on Industry Applications，1972，IA-8 (5)：572-577.

[2] Eriksson C J．Electric heating-take another look [J]．IEEE Transactions on Industry Applications，1980，IA-16 (5)：641-648.

[3] Barth R E，Johnson B C，Guthrie T K．Electric heat tracing design from a temperature perspective [C]．IEEE Industry Applications Magazine，1995，1 (5)：4-8.

[4] Brooks D，Drozd P，Graff D，et al．Reducing the final cost of ownership of electricheat tracing systems in Northern Alberta [C]．Petroleum and Chemical Industry Conference，2000：173-186.

[5] 姚传进，雷光伦，吴川，等．高凝油井电伴热优化计算 [J]．石油学报，2010，31 (5)：843-848.

[61] 唐芳轩，周千盛，曾利民，等．核电厂辅助电加热锅炉电极套管故障原因及其处置 [J]．核动力工程，2010，31 (3)：110-112.

[7] 梁曦东，陈昌渔，周远翔．高电压工程 [M]．北京：清华大学出版社，2006.

[8] 胡细保，郗亮，谭智勇，等．高频高压大功率变压器优化设计方法研究 [J]．电气工程学报，2016，11 (6)：40-47.

（收稿日期：2016－02－10）EA