检测异常征兆并显示回避步骤的成套设备运行支援系统

Plant Operation Support System That Detects Abnormality Sign and Provides Guidance on Avoidance

鸣海　克则 NARUMI, Katsunori　　铃木　聪 SUZUKI, Satoshi　　馆山　淳也 TATEYAMA, Junya

成套设备运行中，需要能根据各种情况进行正确操作的技术。另外，成套设备积累了包括运行等在内的各种大量数据。通过分析这些数据，富士电机开发出了可进行正确操作的成套设备运行支援系统。该系统使用基于多变量分析等多个预测模型同时预测，对预测值进行综合分析，提高了预测精度。因此，可早期高精度地检测异常征兆。此外，该系统还具有检测出异常征兆后即从回避步骤数据库中检索相应回避步骤，并通知用户的功能。

Plant operations require technologies capable of performing appropriate operations in various situations. Plant equipment stores large amounts of various types of data, such as operation data. Fuji Electric has developed a plant operation support system that can perform appropriate operations through the analysis of large amounts of data. The system uses multivariate analysis with multiple prediction models to perform simultaneous prediction and aggregates predicted values to improve predict accuracy. This allows for early detection of abnormality sign with high accuracy. When detecting an abnormality sign, it will search the database for avoidance procedures to inform users of them.

1　引言

确保成套设备稳定安全运行的熟练操作人员减少，非常规操作和紧急操作的经验没有得到充分传承。此外，操作步骤很难在操作手册中完全体现出来，构建自动化软件和模型在人力和成本方面也并不现实。另一方面，成套设备监控系统中积累了大量的历史运行数据（从传感器等获得的运行数据）和操作人员的操作及控制动作等事件日志、警报日志等各种数据。

为了解决这些课题，富士电机开发了成套设备运行支援系统[(1)]，通过分析监控系统中积累的大量数据（大数据），可在早期发现异常征兆（异常征兆检测），并显示相应防异常于未然的操作步骤（回避步骤指示）。

2　成套设备运行支援系统的整体构成

2.1　成套设备运行支援系统的需求

为确保制造产品的品质，成套设备通常会采取对影响品质的工艺变量设定上下限值的方式来判断有无异常。但是，因与多个工艺变量有相关关系，所以仅通过监视各个变量很难进行正确判断。另外，即使工艺变量变动很大，有时也有可确保质量的正常运行状态。因此，仅通过设置上下限值可能难以做出正确判断。为此，需要一种在考虑多个变量间相互关系的同时进行诊断的技术。

成套设备启动、停机以及发生异常等非常规运行时，需要手动应对。但因体验成套设备异常的机会变少、熟练操作人员减少等缘故，对应时需要花费一定时间。原则上都是按照手册进行操作，但手动操作时，会因操作人员的经验而有所出入，所以需要能根据各种情况优化操作的技术。

针对这些课题，须对成套设备的测量趋势数据、警报数据、动作日志数据、手动操作的日志数据进行分析，并将其应用于成套设备的操作支援。

2.2　成套设备的日志数据与运行数据

成套设备收集、积累了两大类数据：日志数据和运行数

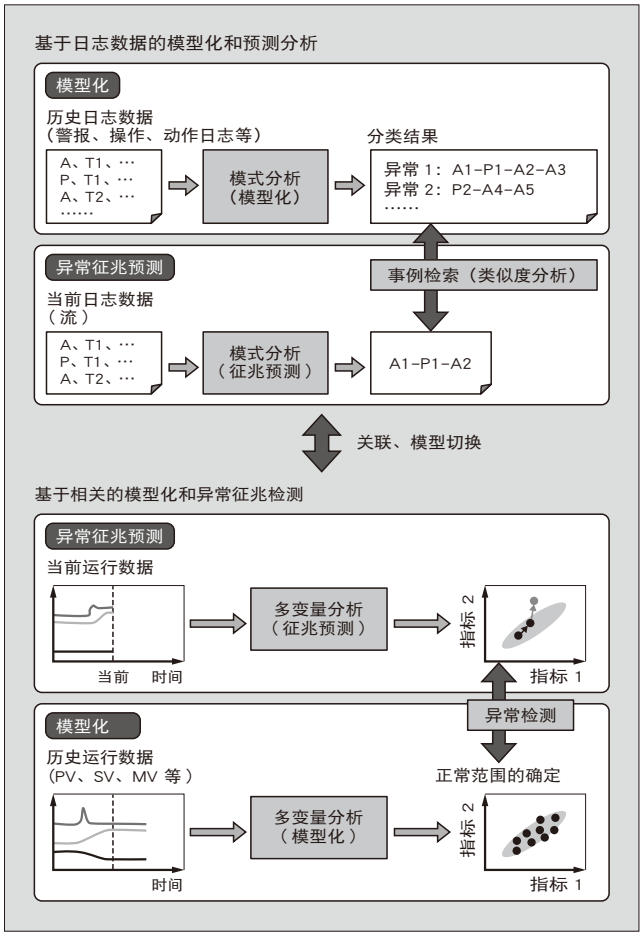

图 1　基于数据分析的成套设备运行支援系统

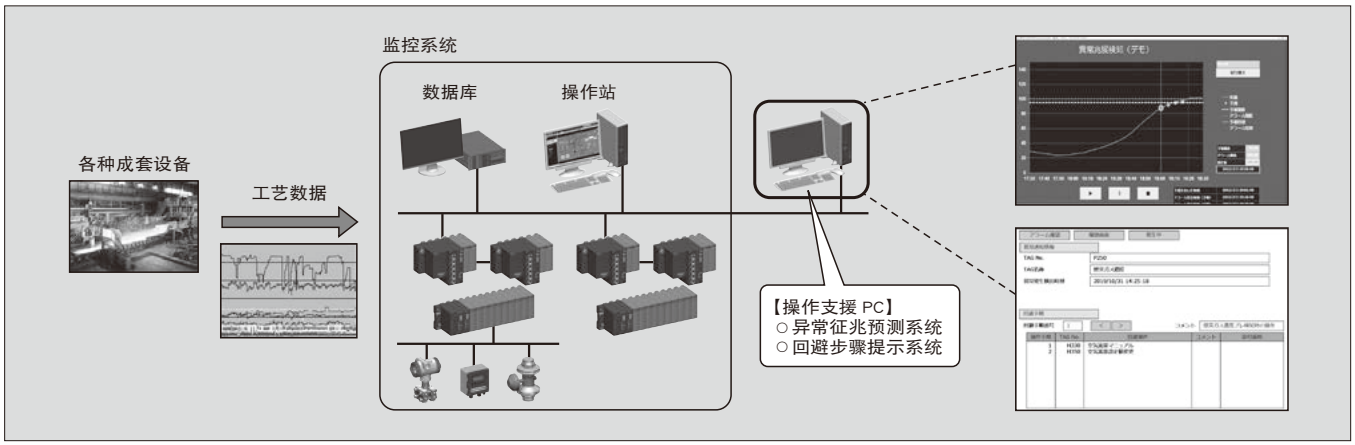

图 2　成套设备运行支援系统的整体构成

据。

日志数据除监控系统发出的警报日志之外，还包括控制系统的动作日志、操作人员的操作日志等。

运行数据中，除监控系统测量的传感器数据（流量、压力、温度、水位等）外，还包括控制系统的设置值和阀等执行器的指令值和响应（开度和电流值）。

2.3　基于数据分析的运行支援

图 1 所示为成套设备运行支援系统模式图。成套设备运行支援系统利用积累的日志数据和运行数据，为成套设备提供运行支援。

首先，根据数据构建以某种形式模拟成套设备行为的模型。在模型化的方法中，日志数据有模式分类，运行数据有多变量分析等。这样，通过给构筑的模型输入或比较近期数据，即可推测或预测当前的成套设备运行状态，用于运行支援。

2.4　系统整体构成

图 2 所示为成套设备运行支援系统的整体构成。该系统与监控系统联动，基于成套设备数据进行异常征兆预测，并将针对异常的备选回避步骤通知给用户。

3　异常征兆检测

3.1　异常征兆检测的必要性

在成套设备的异常监视中，通常将监视对象——连续量作为变量（监视变量），在偏离了设置的管理界限（上下限的管理阈值）时发出警报。与此相对，在预测监视变量的未来值，通过该预测值偏离管理界限来进行异常征兆检测的异常征兆预测中，因操作人员在成套设备异常发生前便进行回避操作，可事先防范，因此更加有效。

在此，对基于监视变量预测的异常征兆预测的概要，以及通过对预测值控制限的设置方法来获得与用户规格相符的预测精度方法[2]进行说明。

3.2　基于预测器的预测警报发生

预测器是根据迄今为止所得到的信息来预测某个连续变量未来值的模型。预测器通常分为物理模型和统计模型。成套设备运行支援系统通过以下所示的在线和离线框架，应对物理和统计两种模型。

使用预测器的异常征兆预测步骤如**图 3** 所示。工艺预测值超过管理阈值时，作为“异常征兆”处理。成套设备运行支援系统进行工艺测量值近期未来的预测，在预测到预测值超过上限阈值或低于下限阈值时，发出“检测到异常征兆”的通知（**图 4**）。

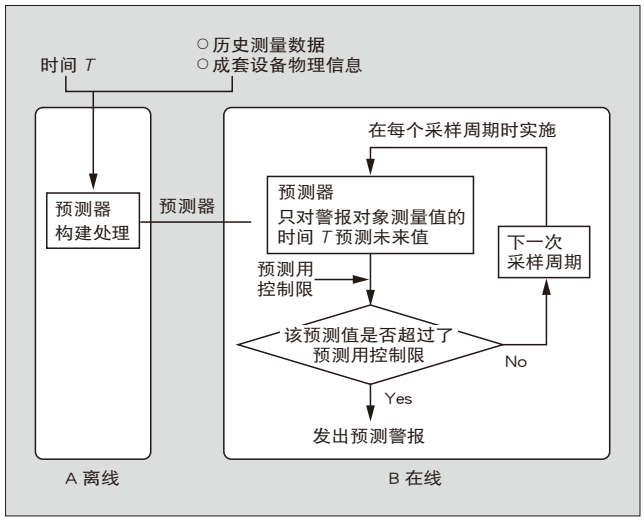

图 3　基于预测器的异常征兆预测框架

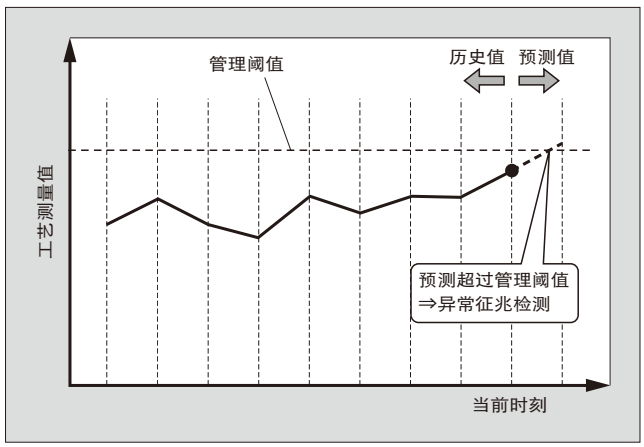

图 4　基于预测器的异常征兆预测概念图

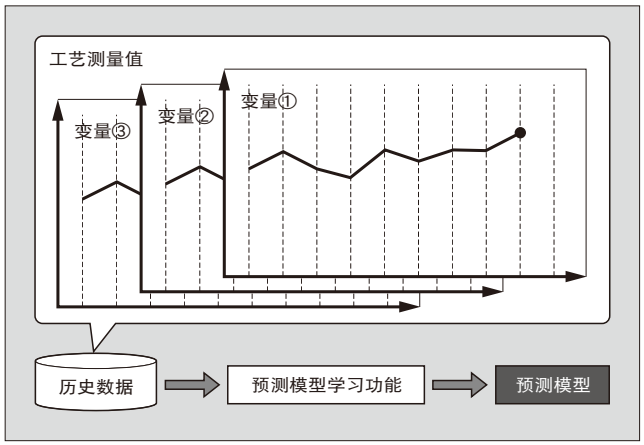

图 5　预测器的学习

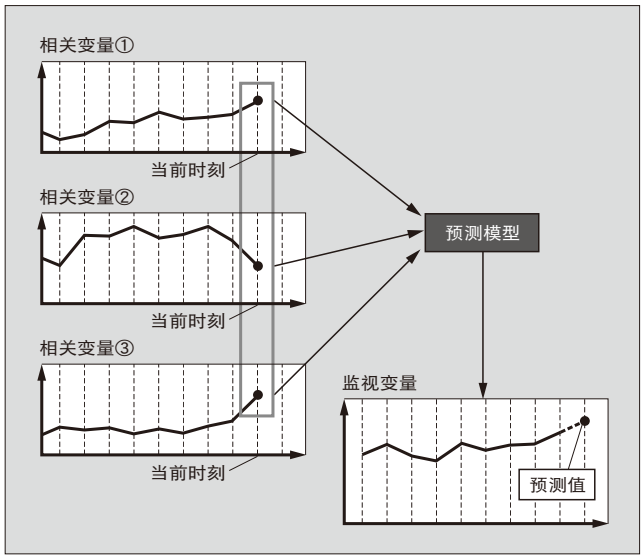

图 6　基于预测器的预测

离线时，使用基于历史测量数据的统计模型和用方程表示物理现象的物理模型等，构建仅在时间 *T* 对未来的监视变量值进行预测的预测器（**图 5**）。接着，使用构筑的该预测器，在线对每个时刻（每 1 分钟周期）预测监视变量时间 *T* 的未来值。如果这样获得的预测值偏离了预测值管理阈值，则发出异常征兆检测警报（**图 6**）。

3．3　异常征兆预测的精度评估和控制限的设置

如 **3．2 节**所述，基于控制限下异常征兆预测的各时刻（每 1 分钟周期）的异常判定结果，根据有无偏离监视变量预测值的控制限和有无偏离与之对应的实绩值进行分类，其结果如**表 1** 所示。未偏离时为正常，偏离时为异常。

表 1　异常征兆预测有无偏差

项目		实绩	
		正常	异常
预测	异常	③错误检测	④正确预测
	正常	①正确预测	②检测遗漏

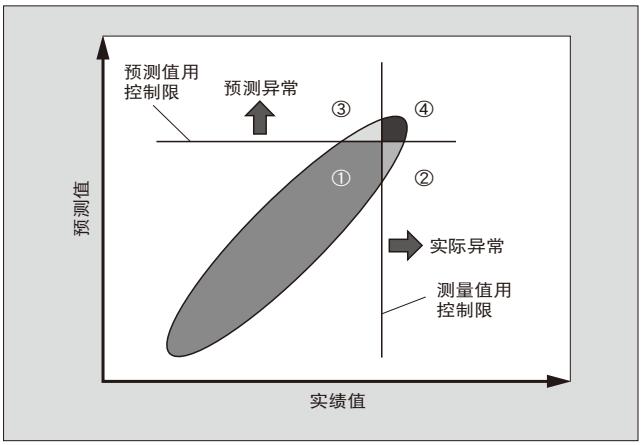

图 7　基于实绩值与预测值散布图的评价（模式图）

①与④为正确预测，②为检测遗漏，③为错误检测。

通常，使用以下两个指标的式⑴和式⑵来评价异常征兆预测的精度。这两个指标为权衡关系，因此一方减小，则另一方就会变大。例如，当以安全为优先进行优化时，即使错误检测增加，也可以消除检测遗漏。

$$\text{检测遗漏率} = ② / (② + ④) \quad \cdots\cdots(1)$$

$$\text{错误检测率} = ③ / (③ + ④) \quad \cdots\cdots(2)$$

$$\text{预测正确率} = ④ / (② + ④) \quad \cdots\cdots(3)$$

如**图 7** 所示，实绩值与预测值呈正相关。这样，对实绩值的控制限（实绩值用控制限）对应于图中的纵线，对预测值的控制限（预测值用控制限）对应于图中的横线。

在此，如果变更预测值用控制限，则①～④的值会发生变化，错误检测率和检测遗漏率也会发生变化。因此，如果有历史监视变量的实绩值和与其对应的预测值，则变更预测值用控制限并与此联动，如**图 7** 所示，在散布图上显示①～④的数值、检测遗漏率、错误检测率，用户可确定合适的预测值用控制限。

3．4　预测器的构成

接下来，对预测器的构成方法进行说明。成套设备运行支援系统将使用了机器学习的预测模型用作预测器（**表 2**）。

⑴　PLS（偏最小二乘法）

针对成套设备的监视对象变量，基于与其他测量变量之间的关系和运行数据，用偏最小二乘法[3]（PLS：Partial Least Squares）创建了一个模型。输入变量间即使存在相

表 2　预测模型的方式

方式	特点
PLS （偏最小二乘法）	适用于与监视变量和监视变量有关的变量相关对象。 ○在有偏差的监视变量下，使用差分预测。 ○如果与监视变量相关联变量的历史值相关，则使用动态化。
LW-PLS （局部偏最小二乘法）	可应对非线性要素、特性波动。
ARMA （自回归移动平均法）	适用于捕捉监视变量的变化趋势。

关性，PLS 也会将它们集中为被称为潜在变量的中间变量后，再表现输出变量。因此，即便存在多重共线性[注]，也可得到合适的模型。

另外，即使 PLS 输入变量多，也无需像多元回归分析模型那样通过事前分析缩小输入变量，可直接使用所有变量简单地制作模型。因此，能大幅减轻模型制作工作量。这样，特别是在以输入变量多的工艺和具有多重共线性的工艺为对象时，PLS 非常有用。

基于 PLS 模型的监视对象变量的推测值，可通过式(4)求得。

$$\hat{y} = Q\,(W^{\mathrm{T}}P)^{-1}W^{\mathrm{T}}x \cdots\cdots(4)$$

$\hat{y}$ ：监视对象变量的推测值（标量）
x ：模型的输入变量矢量
W ：权重矩阵
W^{T}：矩阵 W 的转置矩阵
P、Q：关于输入变量和推测值的系数矩阵

另外，在普通的 PLS 模型中，推测相对于输入变量当前值的输出变量当前值。与此相对，因本次模型被用作预测器，所以相对于输入变量当前值，推测输出变量未来值。而且，在推测未来值时，除了当前值之外，还需考虑历史值的影响。因此，成套设备运行支援系统构建了根据输入变量的历史值和输出变量的当前值进行推测的模型。此外，对 PLS 模型的输入变量进行多重化，对输入变量的历史值（5 分钟前、10 分钟前、15 分钟前……）和输出变量当前值的关系进行模型化（**图 8**）。

⑵ LW-PLS（局部偏最小二乘法）

局部偏最小二乘法（LW-PLS[4]：Locally-Weighted Partial Least Squares）并非事前构建预测模型，而是追随成套设备的特性波动，可根据当前值与类似历史数据反复重构预测模型的非线性 PLS 之一。

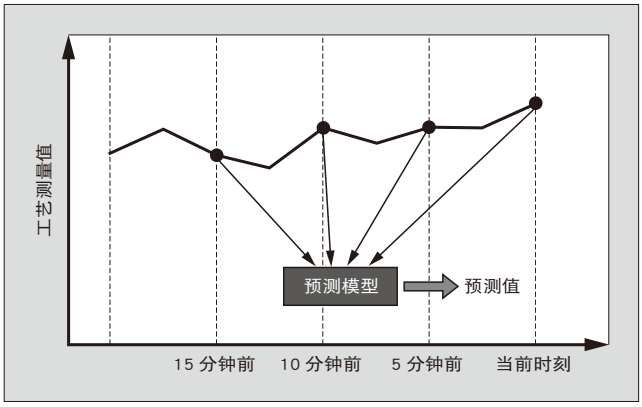

图 8　使用了多重化及历史值的预测模型

⑶ ARMA（自回归移动平均法）

自回归移动平均法（ARMA：Autoregressive Moving Average）是根据预测对象的多个历史值求得预测值的方法，因此适合于捕捉预测值的变化趋势。

3.5　调和功能

如果持续使用一个预测模型，因成套设备的经年老化等原因，预测精度会下降。此外，成套设备存在特性波动时，仅用一个预测模型很难全面处理。

为应对这些课题，成套设备运行支援系统具备可使用多个预测模型同时预测，通过综合这些预测值来提高预测精度的机制。该机制称为调和。调和通过确定多个预测模型预测值的加权平均来获得最终预测值。根据各预测模型的预测误差结果自动调整权重，预测精度高的预测模型优先（**图 9**）。

另外，成套设备运行支援系统也有每隔一定期间自动生成 PLS 模型并添加到调和中的机制，因此，根据经年老化重构模型，可维持精度。

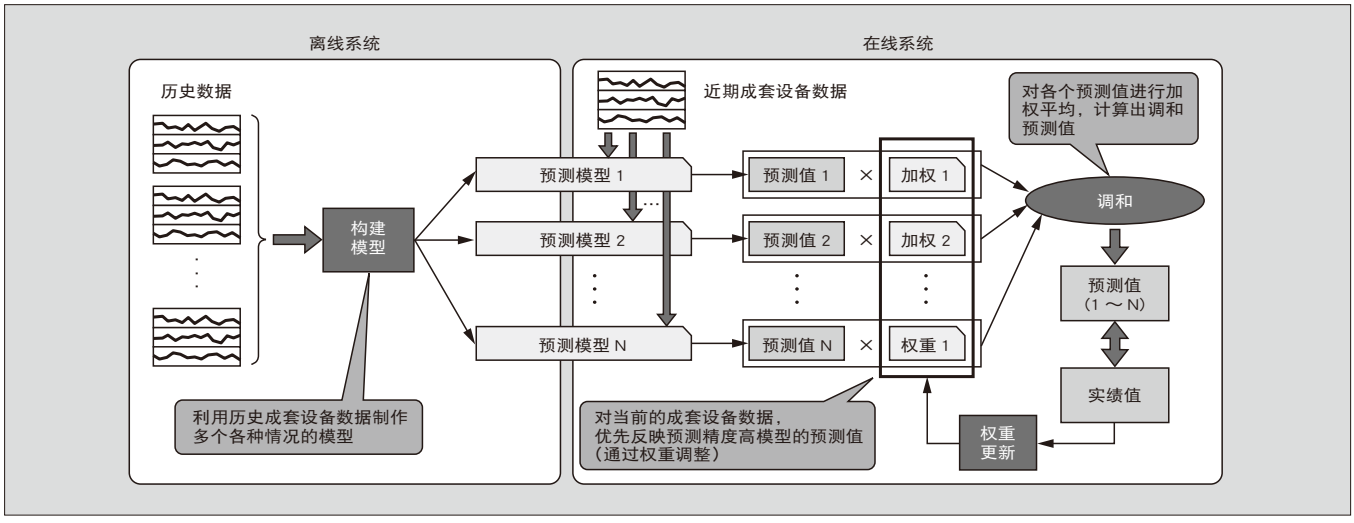

图 9　调和功能

〈注〉多重共线性：指输入变量之间存在强相关关系时，一般性重回归分析无法构建准确的模型。

3．6　评价实验结果

在某成套设备数据中将一定期间作为学习期间，使用其间的数据制作预测器（PLS 模型）。将与学习期间不同的期间作为评价期间，根据设置的管理界限，评价异常征兆检测的精度。

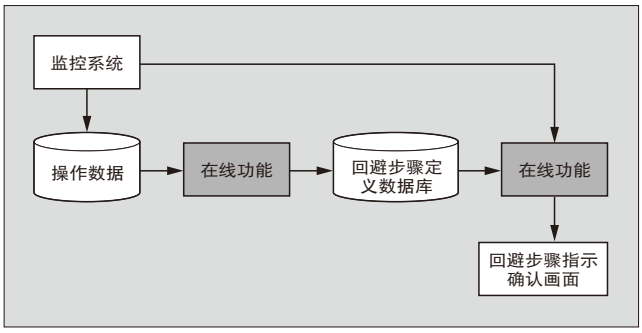

图 10　回避步骤指示系统的功能构成

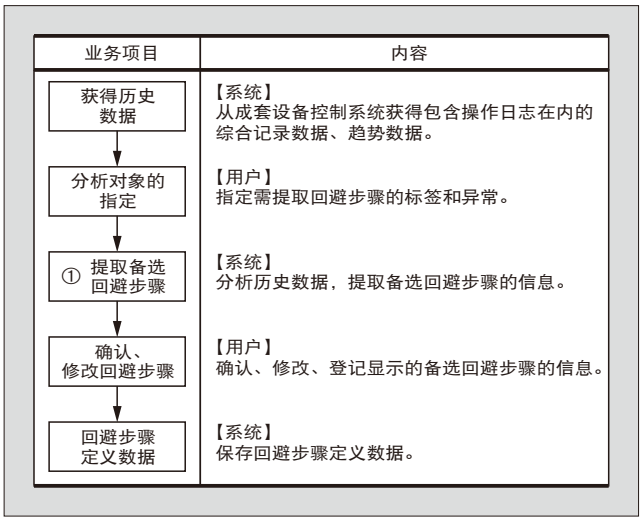

图 11　离线功能流程

其结果显示，预测正确率（式(3)）为 83%，检测遗漏率（式(2)）为 17%。

4　回避步骤指示系统

4．1　基于回避步骤指示系统的运行支援

在很多成套设备运行现场，检测到异常后，操作人员会根据经验进行回避异常的操作。另一方面，随着成套设备可靠性提高和自动化发展，经历异常的机会和经验丰富的操作人员减少。

为解决该课题，成套设备运行支援系统还安装了自动显示回避操作步骤（回避步骤）功能。

4．2　回避步骤指示系统的功能构成

成套设备运行支援系统由离线（工程）功能和在线（运行支援）功能构成（**图 10**）。

(1)　离线（工程）功能

离线功能是从历史操作数据中提取与作为对象的异常发生关联强的操作数据，并将回避步骤作为数据库进行积累的工程功能。

离线功能的大致流程如**图 11** 所示。

(a)　从历史操作数据中提取异常发生时刻的数据。

(b)　检索操作日志，提取回避异常恢复操作的记录数据。

(c)　向用户提示并确认后，将该操作日志作为回避步骤信息登记。

在离线功能中提示用户的画面示意如**图 12** 所示。

(2)　在线（运行支援）功能

在线功能是监视成套设备运行中的异常征兆，一旦检测到异常征兆后，则参照回避步骤数据库来检索相应的回避步骤，并通知用户的运行支援功能。在线功能的大致流程如**图 13** 所示。

(a)　检测异常的发生。

(b)　检索回避步骤定义数据库，并提示所定义的回避步骤。

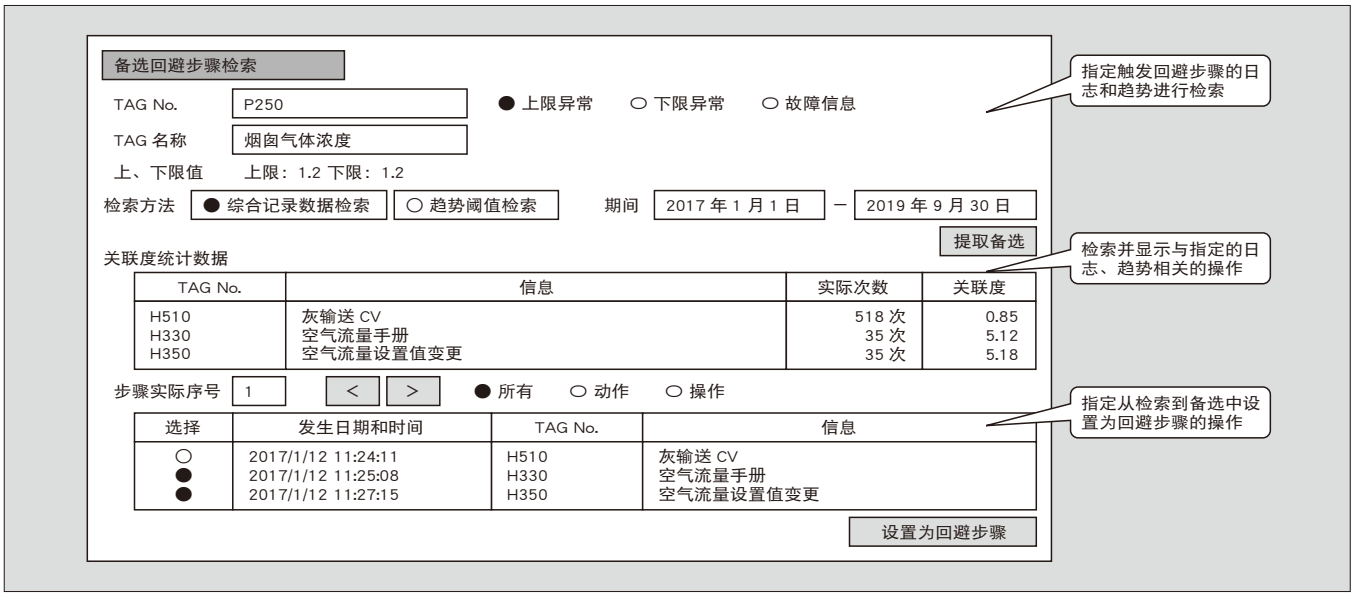

图 12　离线功能画面

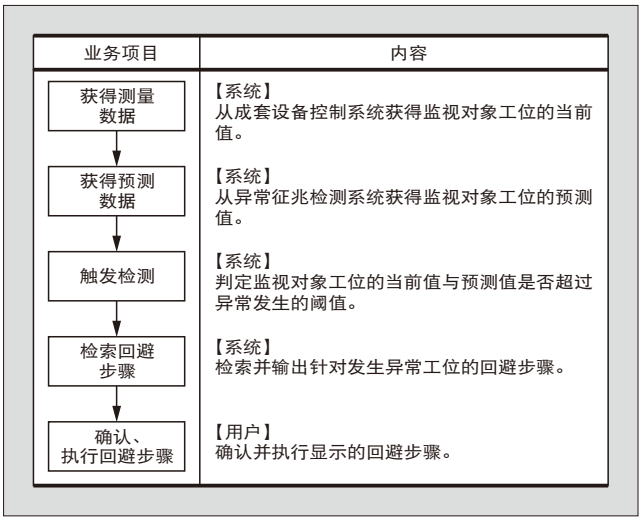

图 13　在线功能流程

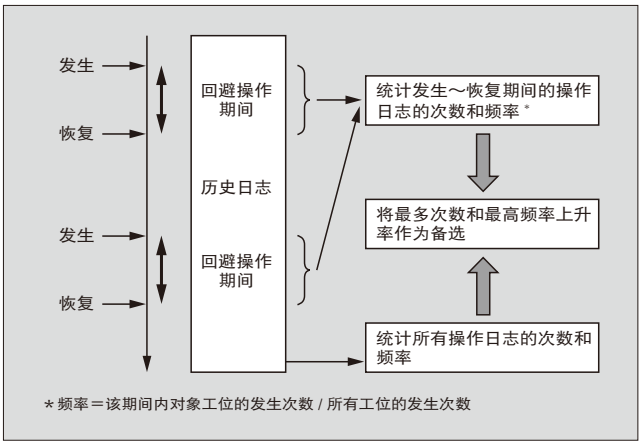

图 15　工程精度提高技术

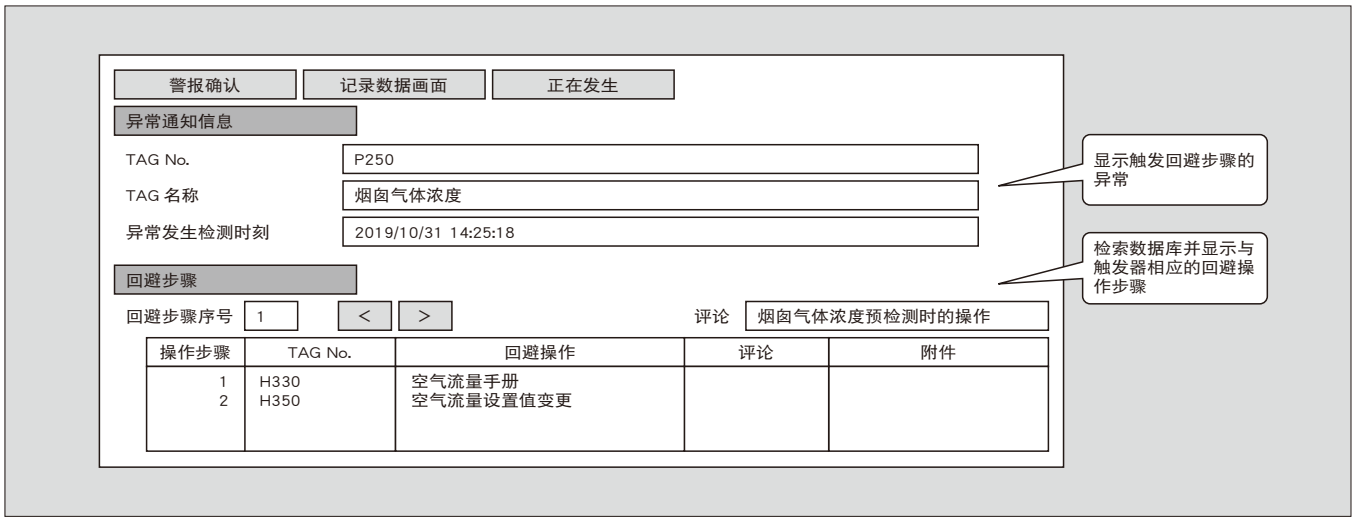

图 14　在线功能画面

在线功能中提示用户的画面如**图 14** 所示。

4. 3　提高工程精度的技术

以下内容，为实现回避步骤备选提取功能（**图 11** ①）时需注意的事项及其对策。

⑴　课题

通常，在成套设备的监控系统中会同时发生各种日志。在离线功能（工程）中分析历史运行数据时，只需要提取与对象异常相关的操作。

⑵　对策

我们注意到，与通常时段相比，异常发生时的特定运行日志会以高频率出现。利用该趋势，如**图 15** 所示，开发了计算对象异常和各运行日志的关联度，用其对运行日志进行过滤并提取备选回避步骤的技术。

5　后记

本文对检测异常征兆并显示回避步骤的成套设备运行支援系统进行了论述。

提前检测异常，并显示其回避步骤，有利于非熟练操作人员稳定安全操作，降低操作人员的负荷。

近年来，就针对日益高涨的成套设备的安全、高效运行的操作支援需求，富士电机希望通过将成套设备运行支援系统与监控系统联动，对成套设备备的安全性提高和高效率化做出贡献。

参考文献

⑴　松井哲郎等. 成套设备控制的数据分析技术 富士电机技报. 2014, vol.C6, no.2, p.51-55.

⑵　村上賢哉ほか. アラーム予測モデルの精度評価方式の開発. 2014, 電気学会全国大会.

⑶　V. Venkatasubramanian. et al. “A review of process fault detection and diagnosis Part I : Quantitative model-based methods, Part II : Qualitative models and search strategies, Part III : Process history based methods.”. Computers and Chemical Engineering, 2003, vol.27, p.293-346.

⑷　加納学ほか. プロセスケモメトリクスによる統計的プロ

セス管理 . システム / 制御 / 情報 , 2004, vol.48, no.5, p.165-170.

鸣海　克则

从事钢铁领域的测量控制系统的工程设计业务。现为富士电机株式会社电力电子系统电子系统工业事业本部自动化事业部技术第一部担当课长。

铃木　　聪

从事信息、控制系统的研究开发。现为富士电机株式会社技术开发本部数字创新研究所 AI 解决方案中心 AI 研究部主任。测量自动控制学会会员、人工智能学会会员。

馆山　淳也

从事信息、控制系统的开发。现为富士电机株式会社电力电子系统产业事业本部开发统括部 HMI 开发部主任。

富士电机

Fuji Electric

＊本刊记载的公司名称及产品，有可能是各相关公司的商标或注册商标。