支持 IoT 解决方案的数学应用技术

Mathematical Application Technology for IoT Solutions

松井 哲郎 MATSUI, Tetsuro　　村上 贤哉 MURAKAMI, Kenya　　丹下 吉雄 TANGE, Yoshio

随着 IoT (Internet of Things) 的普及，过去未连接到网络上的机器实现连接，无法测量的数据也终于可以收集。利用收集到的多种数据，发现新价值并提供给客户是非常重要的。为实现这一点，富士电机开发了数据分析、优化等的数学应用技术。最新的数学应用技术包括面向批处理工艺的异常诊断技术、基于集合预测的预兆检测技术、通过方程处理优化的剩余节能空间可视化技术，它们被应用于各种产品和系统。

As the Internet of Things (IoT) becomes increasingly widespread, devices which have conventionally not been connected to a network will become connected, and likewise, data which traditionally could not be measured will be collected and analyzed. It is very important that the wide variety of collected data should be used to discover and provide value. In order to achieve this, Fuji Electric has developed a mathematical application technology for data analysis and optimization. The latest mathematical application technologies are being applied to various types of products and systems. These technologies include anomaly diagnosis technology for batch processing, anomaly symptom detection based on ensemble prediction, and a technology for visualizing potential energy savings via formula manipulation optimization.

1 引言

IoT (Internet of Things) 是将物、人经由网络相互连接，从而创造新价值的一个概念。在产业界，尤其是制造业，凭借工业用网络等，过去事业所内已经构建起了各种机器的网络，并对大规模成套设备实施着合理的监控。随着 IoT 的普及，过去未连接到网络上的机器已成功连接，无法测量的数据也终于可以收集。在收集到多种多样的数据后，如何充分利用、能发现哪些价值、能否提供给客户，这些都是非常重要的。

富士电机开发了如下所示的数据分析和优化等的数学应用技术，通过产品和系统充分利用数据，为广大客户提供了富有价值的服务[1][2]。

(a) 实施高精度的预测和异常诊断，可贡献于成套设备的高效运用和稳定运行的独创神经网络技术

(b) 制定成套设备的最佳运用计划、实现成本最小化的数学规划法，以及适合非线性、大规模优化问题的通用启发式演算法优化技术

(c) 实现稳定的成套设备控制的 PID 控制技术，多变量类的模型预测控制技术，对因控制对象的特性变化导致的控制性能劣化进行监控的控制性能监控技术

本稿将对 IoT 解决方案相关的数学应用技术的全貌和最新的数学应用技术进行介绍。

2 IoT 解决方案相关数学应用技术的全貌

富士电机开发的 IoT 解决方案针对产业成套设备、社会基础设施领域中的问题，充分利用数据分析技术、人工智能技术，进行异常诊断以及预测推测，然后根据其结果实施优化以及创造新价值（**图 1**）。

异常诊断通过充分利用数据分析技术，对组件、系统发生了什么问题、其原因是什么进行高精度的诊断。过去，成套设备监控系统和各类制造装置对各测量项目设定上限或下限的阈值，以此作为异常判断标准，通过是否超过阈值来监控成套设备的状态。为了今后能收集到更详细、更大量的监控对象整体的数据，监控这些数据整体的动向，并可帮助尽早做出异常诊断的功能将备受期待。

预测和推测通过分析数据，充分利用构建的模型，对监控对象未来的状态进行预测，或推测未直接测量的变量值等。例如，在大规模成套设备中，边预测未来动向边运行可减轻操作者的负荷，实现更安全、安心的运行。

优化和新价值的创造则根据诊断结果和预测结果决定什么是最佳的，然后反馈到现实问题中。通过反复进行这些反馈，以期解决问题。**表 1** 中展示了富士电机具有代表性的数学应用技术。

从下一章开始，作为最新研究开发成果中可支持 IoT 解决方案的数学应用技术，我们将对面向批处理工艺的异常诊断技术、基于集合预测的预兆检测技术，以及通过方程处理优化的剩余节能空间可视化技术进行介绍。

3 面向批处理工艺的异常诊断技术[3]

近年来，在产业和民生领域，对制造工序的设备保全管理和制造品质管理的要求越来越高。作为制造工序之一的批处理工艺，是指使用同一设备和装置反复执行原料投入、加工和制造处理、产品和中间产品出仓的工艺。本稿将设备、装置反复进行类似动作的所有对象称为批处理工艺。例如，除化学领域中的聚合工艺、半导体制造工艺、注塑成型工艺等以外，适用事例中所介绍的冷藏展示柜等冷却设备也与此相符。

在批处理工艺中，由于传感器技术的进步，各类机器上都安装了许多传感器，随时可测量详细的状态量。富士电机

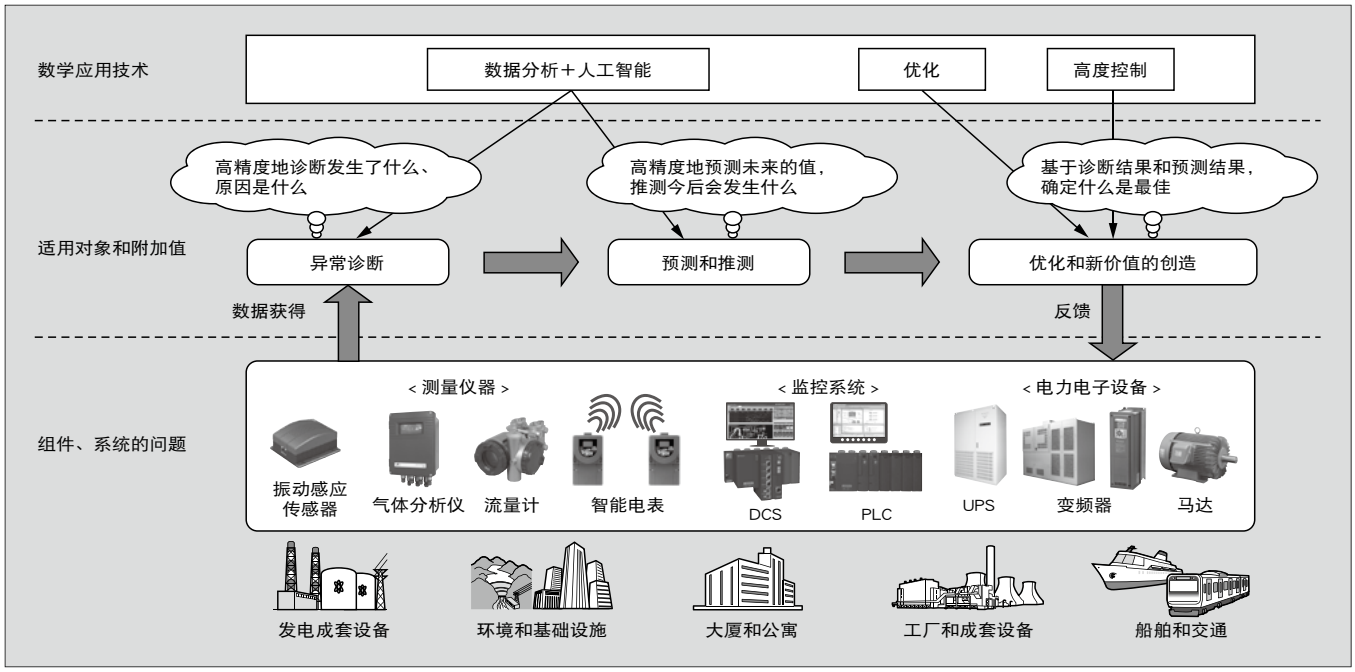

图 1　IoT 解决方案相关的数学应用技术的全貌

表 1　代表性数学应用技术

分类	技术	概要
数据分析技术	面向连续工艺的异常诊断技术	分析大量的数据， 自动检测成套设备的异常状态 （不同于通常状态的状态）
	面向批处理工艺的异常诊断技术	以工艺值并非固定状态、 中途变量间的相关关系会变化的批量类工艺为对象， 进行异常诊断
	品质预测技术	基于制造中的测量数据和中间检查结果， 预测最终产品的品质指标
	品质仿真技术	通过试制或仿真求出以实验设计法确定的制造条件下的品质， 将制造条件和品质模型化， 通过模型探索推测最佳制造条件
	软测量技术	在可通过在线测定的数据和难以测定的数据间创建方程模型， 在线推测难以测定的数据
	事件模式提取技术	分析存储的事件日志数据， 自动抽取频繁出现的模式
	基于集合预测的预兆检测技术	依据简易规则， 将过去由专家精心调查后确定的学习数据和输入变量总结成多种类型， 且在注重高精度模型的基础上进行预测
	异常回避操作提示技术	检索过去成套设备的事件日志数据， 以候选的形式提示操作步骤， 使操作者避开异常
	结构健康监测技术	基于振动感应传感器测量的数据， 计算出最大加速度和最大层间变形角
优化技术	能源成套设备最佳运用技术	自动制定既能供应正好满足必要需求的能源， 又能使燃料成本最小化的能源供应成套设备的运行计划
	能源需求预测技术	根据日历和气象数据 （最高气温、 天气等） 预测次日每 1 小时共 24 个点的需求和最大最小需求
	面向超市、 便利店的综合优化技术	优化超市、 便利店中空调和展示柜的运用 （运行和停止状态、 能源平衡）， 实现节能和削减环境负载
	通过方程处理优化实现的剩余节能空间可视化技术	使用最新的方程处理技术， 分析能源供应成套设备的优化模型， 实现运用范围可视化， 从而明确理论上的剩余节能空间和界限
	配送计划优化技术	当多辆汽车从一个配送点出发为客户 （配送目的地） 配送货物时， 确定最佳路线 （各车的分配和配送顺序）
高度控制技术	控制性能监控技术	以四项指标对控制性能定量化， 评估控制系统的性能， 从而高效率地从多个控制环路中发现必须改善的环路
	控制参数调节技术	使用成套设备的输入输出数据 （MV、 PV） 识别成套设备模型， 计算出满足控制的要求规格 （校正时间、 过冲等） 的 PID 参数
	模型预测控制技术	使用控制对象的模型， 预测未来成套设备的动向， 求得使控制对象在目标值内的最佳操作量的同时进行控制

利用面向批处理工艺的多变量统计工艺管理 (MSPC：Multivariate Statistical Process Control) 开发了高精度的异常诊断技术。由此，在防止制造工序内不良品和设备的预防保全等方面，有望大幅提升管理水平。

3.1　MSPC

统计工艺管理是充分利用统计手法，监控工艺的运行状态，从而防止制造不合格产品，提升生产率的技术。从过去开始就被广泛使用的单变量统计工艺管理 (USPC：Uni-

variate Statistical Process Control），是通过对影响品质的工艺变量设定管理界限的上下限，从而诊断异常的技术。但上下限的幅度过小时，可能会发生异常的误检测，相反，上下限的幅度过大时，可能无法检测到异常。

对此，MSPC 并非单纯根据上下限来判定异常，而是考虑变量间的相关关系后进行诊断（**图 2**）。首先，用主成分分析手法，将正常范围的数据模型化。使用该模型，将**图 2**(b)所示的椭圆形的范围定义为正常范围。诊断时，根据诊断对象的变量值与这一正常范围的背离程度进行判定。这样，使用 MSPC 可正确检测出用 USPC 无法检测到的异常。

3.2 面向批处理工艺的 MSPC

一般来说，批处理工艺的工艺值不是固定状态的，变量间的相关关系会在工艺过程中发生变化。因此，若直接使用 MSPC，异常会被工序进展所对应的变量间相关关系的显著变化所掩盖，导致难以被检测到。为解决这一问题，富士电机从如**图 3** 所示的批处理工艺原始数据中扣除标准属性（平均的批处理工艺动向），从而开发了可正确检测批处理工艺中的微小异常的、面向批处理工艺的 MSPC。

3.3 适用事例

接下来介绍将面向批处理工艺的 MSPC 适用于便利店、超市等销售生鲜食品所用的冷藏展示柜中的事例。冷藏展示柜在夏季高温潮湿时期会因为结霜而发生故障。若发生故障，无论是店铺还是消费者都会蒙受巨大损失，因此，必须事前预测并应对。冷藏展示柜每隔一定时间会进行除霜处理，温度等数据会有周期性的变化，因此可作为批处理工艺进行应对。

图 4 展示了某一实际店铺的冷藏展示柜对因结霜发生高温警报进行诊断的示例。过去，如果不发生警报就无法发现，但异常发生约 3 周前，诊断指标急剧增大，可明显捕捉到异常征兆。

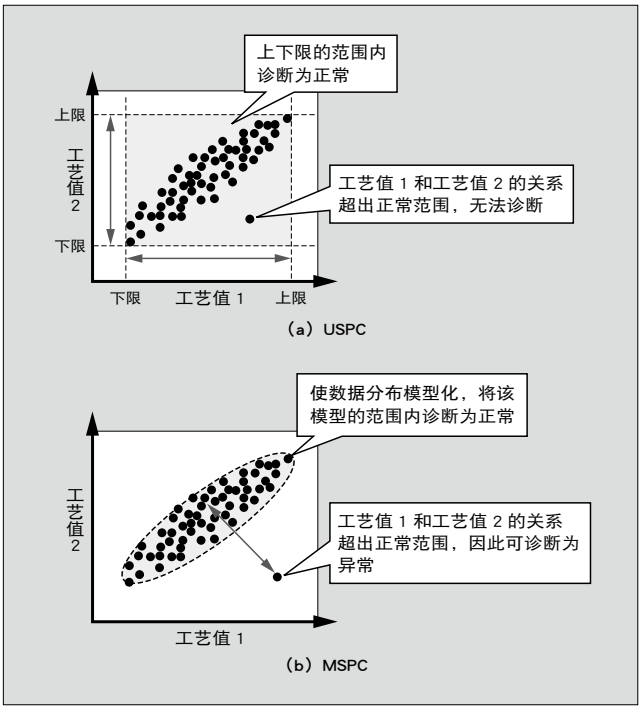

图 2　异常诊断中 USPC 和 MSPC 的区别

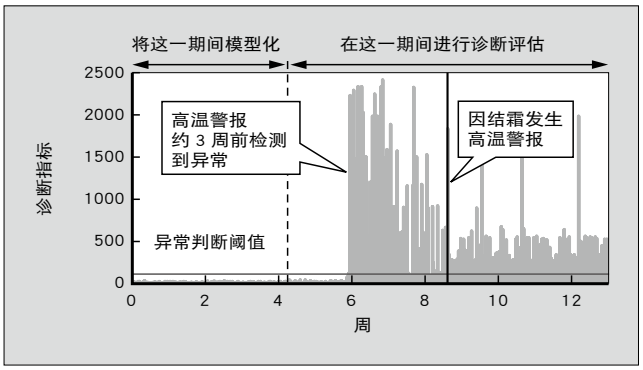

图 4　冷藏展示柜中的适用事例

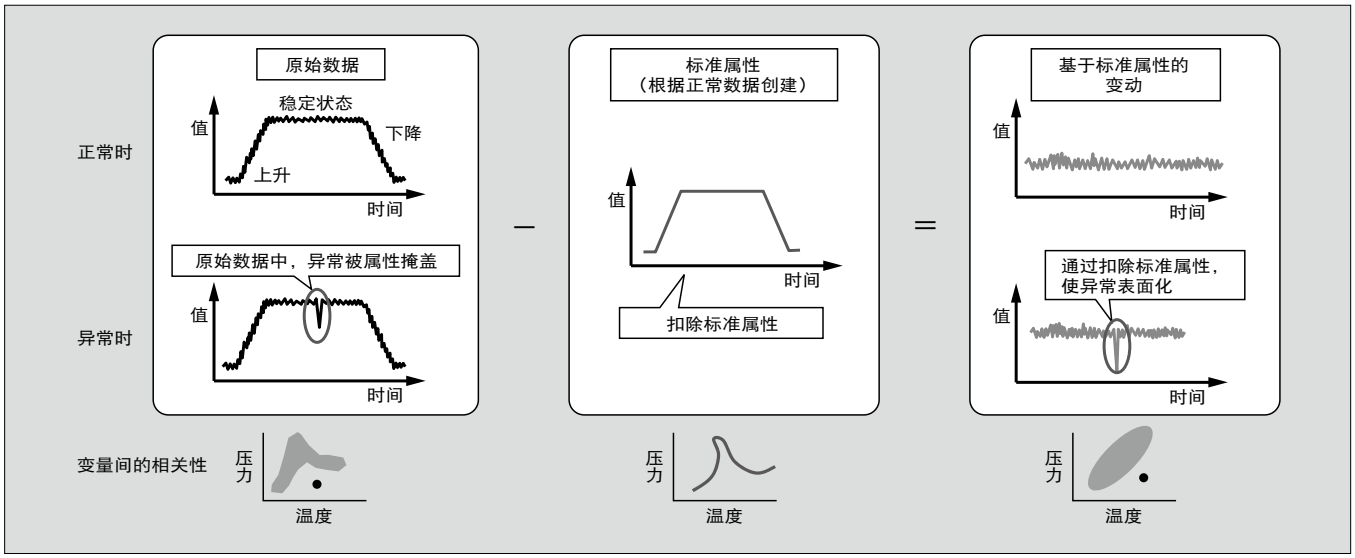

图 3　面向批处理工艺的 MSPC

4 基于集合预测的预兆检测技术[4]

过去在运用各种成套设备时，一般是对监控对象的变量设定上下限，然后根据此发出异常警报的 USPC 来实施。操作者为避免发出警报，运行设备时会事前设想异常情况。为事前预测，常见的做法是确认监控对象变量的趋势，将警报的上下限水平按正式警报和其前一阶段的预警报这 2 个阶段设定，然后对预警报进行监控。例如，将上限设定为预警报，上上限设定为正式警报，超过上限阈值时，为避免发出正式警报，通过操作使成套设备安全运行。但是这一方法存在即使发出了预警报，却不一定能保证发出正式警报，以及，若预警报的阈值设定得较低会导致误检测增加的问题。

富士电机为解决这些问题，根据存储的大量数据构建了成套设备的预测模型，并使用这一模型预测监控对象的动向，从而开发出了预测异常发生的技术。其主要特点如下所示。

(a) 预警报后的监控对象的动向也能预测。

(b) 即使预警报的阈值较高，也能通过预测提高检测率。

(c) 从预测后到正式警报发出前，可保持较长的缓冲时间。

4.1 集合预测

根据数值数据构建预测模型的手法，多使用统计模型或神经网络。而统计模型有多重回归模型、部分最小平方法等。这些模型，其创建中使用的数据选择方法和预处理，作为解释变量而使用的变量选择方法，以及模型创建时的各种参数值，对预测精度有很大的影响。过去，为了合理选择和设定模型的创建条件，必须针对各对象反复进行试验。另外，不同的预测模型，预测精度可能存在很大偏差。

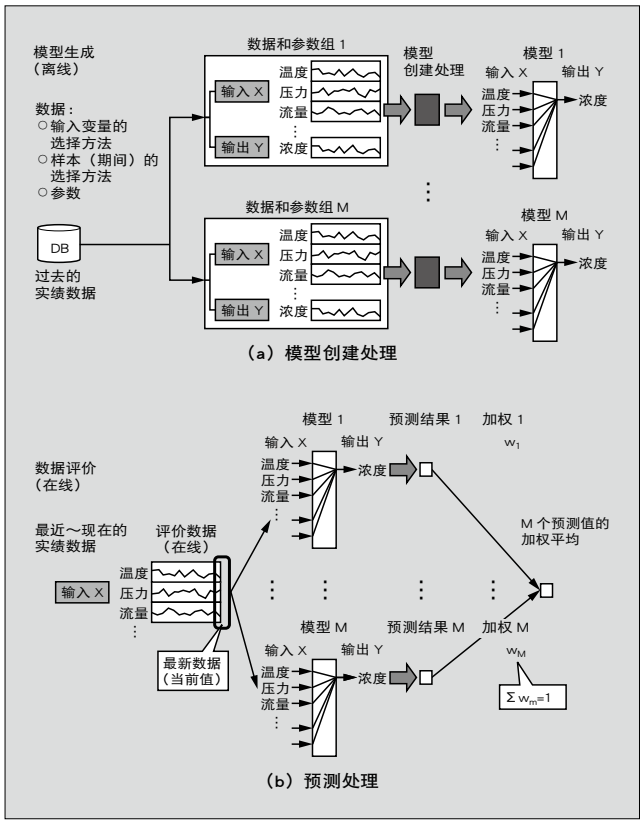

图 5 集合预测的概要

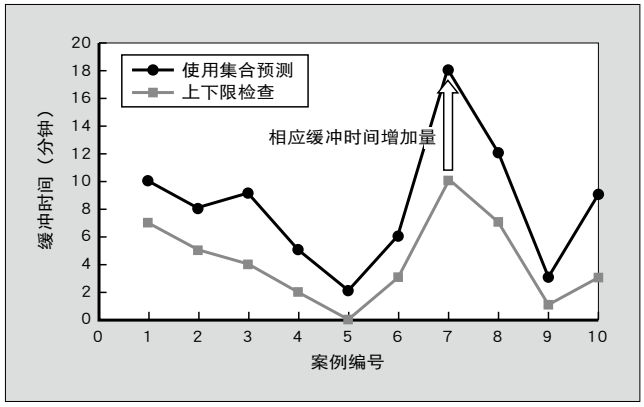

图 6 垃圾焚烧成套设备中的使用事例

为解决这些问题，富士电机开发了“集合预测”手法，它以学习数据、参数不同的多个模型输出的加权平均值为预测结果（**图 5**）。通过集合预测，各模型的预测精度的偏差被平均化，可实现高精度的预测。

4.2 适用事例

图 6 展示了对某垃圾焚烧成套设备的监控对象变量进行预测的示例。图中的案例编号表示实际发生异常的事件案例。缓冲时间是从检测到异常征兆开始到实际异常发生的时间。在发生了异常的全部案例中，采用集合预测手法的可保持较长的缓冲时间，这表示使用者对于异常的发生，可保证事先有充分的时间进行应对。

5 通过方程处理优化实现的剩余节能空间可视化技术[5]

富士电机致力于普及可测量工厂、事业所等能源消耗量和供应量，优化设备运行的 EMS（Energy Management System）。EMS 普及的关键是导入后的节能效果和投资回收年数等的事前评估。要导入 EMS，测量仪器和数据管理系统、监控系统、优化系统等不可缺少，因此很多时候，初期投资金额庞大。因此，事前把握能否实现与初期投资成本相匹配的能源削减非常重要，但在导入前要做到正确预估并不容易。

富士电机为解决这一问题，基于设备的能源效率特性公式，通过对最节能设备可运行范围和过去的运行作比较，开发了世界首款实现剩余节能空间可视化的剩余节能空间可视化软件。

5.1 方程处理

方程处理是使用量词消去法等算法，自动解决数学问题的技术。量词消去法是通过反复进行方程的转换和代入，将根据一阶谓词逻辑表示法表现的带量词的多项式全部转换为同值的无量词多项式的方法。该剩余节能空间可视化软件，通过量词消去法，将能源供应设备的特性、运行限制条件等方程的集合全部转换为负载和供应成本方程的集合。这样便可实现负载和供应成本关系的可视化。

5.2 剩余节能空间可视化软件

剩余节能空间可视化软件，通过用方程处理解析作为对象的能源供应设备的能源效率特性、输出上下限等运行限制条件，求得满足限制条件的可运行范围，并与过去的运行作比较，从而实现剩余节能空间可视化。

这里提到的设备可运行范围并非单纯指设备能力上限的总值。而是在满足上述输出上下限、能源供求平衡等设备运行限制条件基础上运行时的可运行范围。如**图 7** 所示，根据负载和供应给负载的能源成本间的关系，可用图表示可运行范围。可运行范围最下方是成本最小的运行，可简单地根据与运行实绩的差把握剩余节能空间。

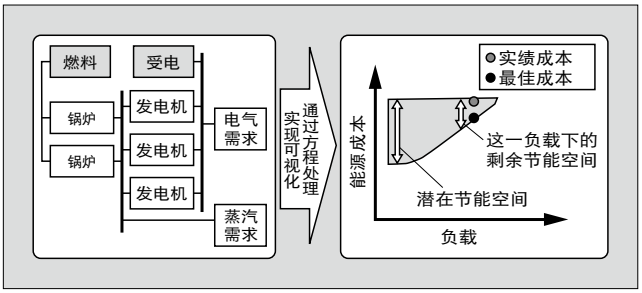

图 7　剩余节能空间可视化的概要

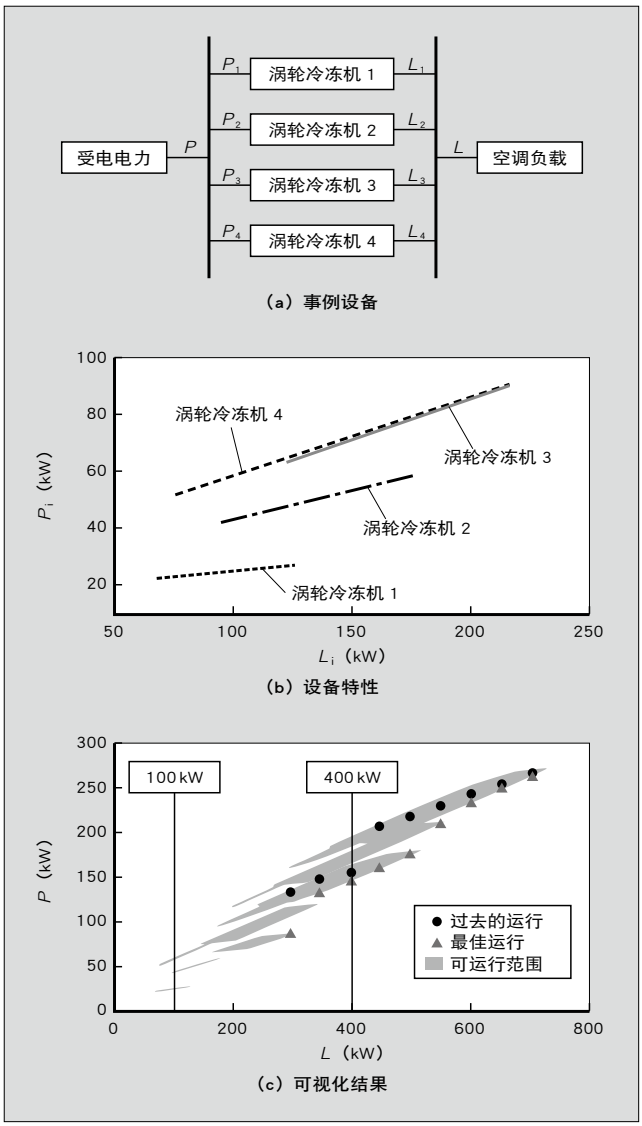

图 8　涡轮冷冻机中的适用事例

5.3 适用事例

图 8 展示了对于以 4 台涡轮冷冻机提供空调负载的设备，通过方程处理进行可视化的示例。如**图 8**(b)所示，4 台涡轮冷冻机的能源效率特性和输出上下限不同，因此，仅通过单纯的均等输出分配或台数控制难以实现高效的运行。

图 8(c)展示了可视化的结果。横轴为全体的空调负载 L，纵轴为受电电力合计 P，图中阴影范围表示可运行范围。相对于横轴负载，纵轴受电电力幅度狭窄部分意味着运行的自由度小。例如，在 100 kW 的负载下，用 3 条线表示的可运行范围与涡轮冷冻机 1、2、4 对应，可以看出其中涡轮冷冻机 1 效率最高，受电电力较低。另外，如 400 kW 的负载所对应的纵轴受电电力幅度较宽的部分，因为是多台设备组合运行，所以受电电力会因各设备的输出分配而发生显著的变化。此外，●代表过去的运行，▲代表过去的运行所对应的最佳运行状态，其中的差就是剩余节能空间。在差较大的领域中，通过优化获得的节能效果较大。

像这样，通过使用剩余节能空间可视化软件，可事前了解在各种运用条件下导入 EMS 带来的经济效果。另外，通过在已导入的 EMS 使用本软件，可确认 EMS 运用状态是否处于最佳，以及设备特性等前提条件的确切性。并且，在探讨能源供应设备的更新和新设备增设时，能事前定量掌握通过更新、增设可获得的节能效果。

6 后记

本稿对 IoT 解决方案相关的数学应用技术的全貌，以及作为最新数学应用技术面向批处理工艺的异常诊断技术、基于集合预测的预兆检测技术、通过方程处理优化的剩余节能空间可视化技术进行了介绍。今后，富士电机将通过在实际成套设备中运用这些技术来不断提高完成度、创造全新的客户价值。

参考文献

(1) 黒谷宪一，户高雄二. 测量控制技术的现状与展望. 富士时报. 2012, vol.C4, no.1, p.1-5.
(2) 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.
(3) 村上賢哉ほか. バッチプロセス向けオンライン MSPC システムの開発. 電気学会 C 部門大会. 2015.
(4) 鈴木聡ほか. 制御システムのデータ解析によるプラント運転支援. 電気学会 C 部門大会. 2014.
(5) 丹下吉雄ほか. エネルギーマネジメントのための数式処理による可視化ツール. シミュレーション. 2016.

松井　哲郎

从事用于各类产业系统的优化技术以及预测、诊断技术的研究开发。现为富士电机株式会社技术开发本部核心技术研究所控制技术开发中心控制系统开发部经理。电气学会会员、测量自动控制学会会员。

村上　贤哉

从事产业、社会系统中的数据分析、预测、控制技术的研究开发。现为富士电机株式会社技术开发本部核心技术研究所控制技术开发中心控制系统开发部主任。测量自动控制学会会员。

丹下　吉雄

从事成套设备控制技术、能源管理技术、数学应用技术的研究开发。现为富士电机株式会社技术开发本部核心技术研究所控制技术开发中心控制系统开发部主任。测量自动控制学会会员、电气学会会员。

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。