



[12] 发明专利申请公布说明书

[21] 申请号 200480044627.1

[43] 公开日 2007年11月28日

[11] 公开号 CN 101080699A

[22] 申请日 2004.12.17
[21] 申请号 200480044627.1
[86] 国际申请 PCT/KR2004/003329 2004.12.17
[87] 国际公布 WO2006/064990 英 2006.6.22
[85] 进入国家阶段日期 2007.6.15
[71] 申请人 韩国标准科学研究院
地址 韩国大田
[72] 发明人 郑完燮 林钟延 郑光和 李树甲

[74] 专利代理机构 北京铭硕知识产权代理有限公司
代理人 郭鸿禧 李友佳

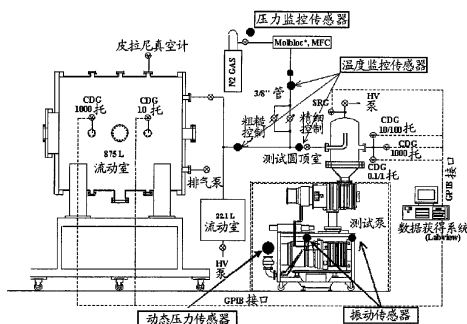
权利要求书4页 说明书20页 附图10页

[54] 发明名称

真空泵的趋势监控和诊断分析方法及其趋势监控和诊断分析系统以及包括执行该方法的计算机程序的计算可读存储介质

[57] 摘要

开发本发明(例如主动诊断算法)不仅实现早期检测失去功率的真空泵以防止泵故障,而且提供它们的预测维持。根据本发明,能够在泵在交替的空闲操作条件和气体加载操作条件下运行的情况下,找出处理由逐泵操作特性的大变化和工艺条件引起的技术问题的简单且有效的方式,具体地讲,在半导体制造工艺中。



1、一种在交替的空闲操作条件和气体加载操作条件下运行的真空泵的故障保护和预报维护的趋势监控和诊断分析方法，包括步骤：

对于空闲操作条件和气体加载操作条件，以预定比率对状态变量信号的时间序列采样；

对于空闲操作条件和气体加载操作条件，从比波动状态变量信号分量的周期长的连续采样的信号的每一分段组挑选出状态变量的时间序列的最大值和最小值；

对于空闲操作条件和气体加载操作条件，通过使用基于线性参数模型的主动诊断算法从挑选的每一状态变量的最大值估计一组渐进上限的最佳拟合的模型参数，并且从挑选的每一状态变量的最小值估计另一组的渐进下限的最佳拟合的模型参数；

每当观察到从气体加载操作条件到空闲操作条件的过渡状态时，通过使用原位估计方法基于进气压力信号估计抽气速度指标；

每当观察到从气体加载操作条件到空闲操作条件的过渡状态时，存储对于每一空闲操作条件和气体加载操作条件的所有考虑的状态变量的渐进上限和渐进下限的估计的上模型参数和下模型参数以及估计的抽气速度指标；

重复对于空闲操作条件和气体加载操作条件的每一状态变量的上限和下限的模型参数的估计以及抽气速度指标的估计；和

从为连续的空闲操作条件收集的所有考虑的状态变量的估计的上模型参数和下模型参数、以及从为连续气体加载操作条件收集的所有考虑的状态变量的估计的上模型参数和下模型参数、以及从气体加载操作状态到空闲状态的重复过渡连续收集的抽气速度指标监控变化趋势，并且基于其变化趋势分析结果诊断该真空泵异常与否。

2、如权利要求1所述的方法，其中，真空泵用于半导体制造工艺。

3、如权利要求1所述的方法，其中，状态变量包括：进气压力信号、排气压力信号和增压泵和干式泵的供电电流、增压泵和干式泵上的均方根机械振动级以及增压泵和干式泵之间的中间位置附近的均方根声学噪声级。

4、如权利要求3所述的方法，在增压泵和干式泵上的均方根的机械振动级和增压泵和干式泵之间的中间位置附近的均方根的声学噪声级的情况下，

所述方法还包括步骤：对空闲操作条件和气体加载操作条件估计机械振动和声学噪声信号的峰值。

5、如权利要求1所述的方法，其中，原位估计方法包括以与泵停工测试方法相似的方式测试进气压力信号，在泵停工测试方法中，进气压力的负过渡用于估计抽气速度。

6、如权利要求1所述的方法，其中，抽气速度指标被定义为每单位体积的抽气速度，也就是

$$I_p = \frac{Q}{V} = 3.6 \times 10^4 \cdot \alpha$$

其中，符号 I_p 和 α 表示抽气速度指数符和指数衰减常数，符号 Q 和 V 表示将被抽空的抽气速度和体积；从与进气压力的负过渡区域相应的进气压力信号 $\{P_n: n=1, \dots, N\}$ 的对数值获得指数衰减常数：

$$y_n = -\alpha \cdot n + \beta, y_n = \ln(P_n) \text{ 并且 } \beta = \ln(P_0)$$

其中，通过使用最小二乘法获得最佳拟合的指数衰减常数 α 和初始值 β 的估计。

7、如权利要求1所述的方法，其中，用于描述每一采样的状态变量的上渐进限和下渐进限的参数线性模型被给出为：

$$y_{k,n} = a_k \cdot n + b_k$$

其中，下标 k 表示上渐进模型或下渐进模型 $\{k=U \text{ 或 } L\}$ ；通过使用如下的最小二乘法获得每一状态变量的两组的上模型参数和下模型参数 $\{a_k, b_k: k=U \text{ 或者 } L\}$ ：

$$a_k = \frac{N \cdot \sum_{n=1}^N n \cdot y_{k,n} - \sum_{n=1}^N n \cdot \sum_{n=1}^N y_{k,n}}{N \cdot \sum_{n=1}^N n^2 - (\sum_{n=1}^N n)^2}, b_k = \frac{\sum_{n=1}^N n^2 \cdot \sum_{n=1}^N y_{k,n} - \sum_{n=1}^N n \cdot \sum_{n=1}^N n \cdot y_{k,n}}{N \cdot \sum_{n=1}^N n^2 - (\sum_{n=1}^N n)^2}$$

其中，第一参数 $\{a_k: k=U \text{ 或者 } L\}$ 是上限和下限的斜率，第二参数 $\{b_k: k=U \text{ 或者 } L\}$ 是上限和下限的初始值。

8、如权利要求1所述的方法，其中，通过监控进气压力级的阈值级实施确定从气体加载操作条件到空闲操作条件的过渡状态的步骤。

9、如权利要求1所述的方法，其中，通过监控增压泵的供电电流级或者排气压力信号的阈值级实施确定从气体加载操作条件到空闲操作条件的过渡状态的步骤。

10、如权利要求1所述的方法，其中，使用一对二维构造的数据矩阵执

行监控和诊断考虑的真空泵的变化趋势的步骤，所述二维构造的数据矩阵包括估计的模型参数和从下面的每一空闲操作条件或气体加载操作条件获得的每一状态变量的峰值：

$$\{p_{\text{Idle}}(n, (j-1) \times K + k), p_{\text{Load}}(n, (j-1) \times K + k)\} \quad n=1, \dots;$$

$$j=1, \dots, J(\text{采样的状态变量的总数});$$

$$k=1, \dots, K(\text{估计的模型参数的总数})$$

其中，下标符号“Idle”和“Load”表示空闲操作条件和气体加载操作条件，行索引 n 表示制造工艺的顺序，列索引 j 和 k 表示状态变量的分类号和每一状态变量估计的模型参数的顺序。

11、一种在包括交替的空闲操作条件和气体加载操作条件的多工艺下运行的真空泵的故障保护和预报维护的趋势监控和诊断分析系统，包括：

数据获得单元，实时地对空闲阶段和气体加载阶段以预定比率对状态变量信号的时间序列采样；和

信号处理单元，设置有用于来自数据获得单元的测量的信号的计算装置和存储装置，所述信号处理单元的特征在于提供以下步骤：

对空闲操作条件和气体加载操作条件，从比波动状态变量信号分量的周期长的连续采样的信号的每一分段组挑选出状态变量的时间序列的最大值和最小值；

对空闲操作条件和气体加载操作条件，从挑选的每一状态变量的最大值估计一组渐进上限的最佳拟合的模型参数，并且从挑选的每一状态变量的最小值估计另一组的渐进下限的最佳拟合的模型参数；

每当观察到从气体加载操作条件到空闲操作条件的过渡状态时，通过使用原位估计方法基于进气压力信号估计抽气速度指标；

存储每一状态变量的渐进上限和下限的估计的上模型参数和下模型参数以及估计的抽气速度指标；

从为连续的空闲操作条件收集的所有考虑的状态变量的估计的上模型参数和下模型参数、以及从为连续气体加载操作条件收集的所有考虑的状态变量的估计的上模型参数和下模型参数、以及从气体加载操作状态到空闲状态的重复过渡连续收集的抽气速度指标监控变化趋势，并且基于其变化趋势分析结果诊断该真空泵异常与否。

12、一种包括执行用于在交替的空闲操作条件和气体加载操作条件下运

行的真空泵的故障保护和预报维护的在权利要求 1 至 10 中的任何一个中保护的
趋势监控和诊断分析方法的计算机程序的计算机可读存储介质。

真空泵的趋势监控和诊断分析方法及其趋势监控和诊断分析系统以及包括执行该方法的计算机程序的计算可读存储介质

技术领域

本发明涉及用于真空泵的故障保护和维护的诊断方法，更具体地讲，涉及具有多个操作条件的半导体制造工艺。

背景技术

对现代半导体制造工艺中真空泵的可用性和可靠性的需求不断增长。原因在于随着生产晶片尺寸越来越大，失败的批量生产晶片的成本和损失的生产时间越来越高。Bahnen 和 Kuhn 已经提出了对这种现代半导体工艺的真空泵的技术需求[参考文件 1: R.Bahnen and M Kuhn, "Increased reliability of dry pumps due to process related adaptation and pre-failure warning," Vacuum, Vol.44, No 5-7, pp.709-712, 1993]:没有不定期的停机时间的高可靠性，非常低的维护，抽空腐蚀且反应气体混合物的高能力、抽空粒子和可升华气体混合物的高能力以及低振动和噪声级等。为了满足这些需求，用于现代半导体工艺的新的干式泵应提供对依赖各种工艺的运行条件的自适应能力[参考文件 1]。显示的对不同处理的自适应需要操作参数(例如干式泵阶段内的温度和气体压力)的专用测量和控制。这些与工艺相关的参数对于检查是否满足期望的泵操作条件非常重要。除了与工艺相关的参数外，Bahnen 和 Kuhn 也建议了泵操作相关参数(电功率、冷却水、吹扫气、泵部件-轴承、封条、变速箱和发动机的磨损)的监控方案[参考文件 1]来避免除了干式泵的工艺自适应之外的不定期停机时间的风险。建议了对于每一操作参数的基于警告和报警级别的监控方案来避免意外的泵故障。但是，没有提出任何选择所有依赖工艺参数和操作相关参数的警告和报警的逻辑方法。在真空泵故障的早期检测中，这种阈值级选择仍然是非常具有挑战性的问题。

基于阈值级的监控被广泛认为是用于泵的故障保护的传统技术[参考文件 2: R.H. Greene 和 D.A.Casada, Detection of pump degradation, NUREG/CR-6089/ORNL-6765, Oak Ridge National Laboratory, 1995]。然而，

Wegerich 等[参考文件 3: S.W. Wegerich, D.R.Bell 和 X.Xu, “Adaptive modeling of changed states in predictive condition monitoring,” WO 02/057856 A2, 2002]; 对比文件 4: S.W. Wegerich, A.Wolosewicz 和 R.M Pipke, “Diagnostic systems and methods for predictive condition monitoring,” WO 02/086726 A1, 2002] 指出了基于传感器输出的阈值告警和报警方案的缺点: “传统技术不能提供对工艺或机器的操作参数的总改变做出响应, 总是不能提供适当的告警来防止意外停机、装备损坏或者悲惨的安全危险。” 为了克服传统技术的这种限制, 他们建议了适合于新的操作状态的基于神经网络的参数模型 [参考文件 3]和用于预测条件监控的基于模型的诊断系统[参考文件 4]的使用。在对动态系统的识别和控制的先前研究 [参考文件 5: Wan-Sup Cheung, “Identification, stabilization and control of nonlinear systems using the neural network-based parametric nonlinear modeling,” Ph.D. Thesis, University of Southampton, 1993] 中已知的神经网络模型具有内插位于训练数据组之间的新的状态和外插训练组外(但是非常近)的相邻状态的有效能力。Wegerich 等[参考文件 3, 参考文件 4]采用训练神经网络的内插和外插能力来响应于传感器输出的测量值估计工艺或机器的当前状态。从实际测量的传感器输出减去估计的状态值来获得用于判断该工艺或系统如何偏离建模的状态的残差信号。而且, 这些残差信号也被用于产生残差阈值报警以执行检查工艺或系统改变到新的操作条件的统计测试, 并且对改变的操作区域重建新的训练组。看得出包括用于改变的操作区域的新的训练组的指令和它们的模型学习处理的建议的产生报警和适应改变的操作区域的信号处理方案需要严格的计算工作并且附有建议的基于模型的诊断系统的内部复杂性。这种不切实际的计算负担和建议的监控系统的实现复杂度已经变成在现代半导体制造工艺的泵监控系统中遭遇的不可避免的技术问题。因此, 适合泵操作条件的简单模型在开发泵监控系统中非常重要。这点已经成为本发明稍后将解决的主要技术论点之一。

代替使用适合于随着使用寿命改变真空泵的操作条件的上述参数模型, Ushiku 等[参考文件 6 : Y. Ushiku, T Arikado, S. Samata, T. Nakao, and Y. Mikata, "Apparatus for predicting life of rotary machine, equipment using the same, method for predicting life and determining repair timing of the same," U.S. Patent Application Publication, US2003/0009311 A1, 2003]、Samata 等 [参考文件 7 : S. Samata, Y. Ushiku, K. Ishii, and T. Nakao, "Method for diagnosing life of

manufacturing equipment using rotary machine," U.S. Patent Application Publication, US2003/0154052 A1, 2003; 参考文件 8 : S. Samata, Y. Ushiku, T. Huruata, T. Nakao , and K. Ishii, "Method for predicting life span of rotary machine used in manufacturing apparatus and life predicting system," U.S. Patent Application Publication, US2003/01543997 A1, 2003] 和 Ishii 等 [参考文件 9 : K. Ishii, T. Nakao, Y. Ushiku, and S. Samata, "Method for avoiding irregular shutoff of production equipment and system for irregular shutoff," U.S. Patent Application Publication, US2003/0158705 A1, 2003] 提出确定是否从相应于正常操作条件设置的“参考”时间序列数据得到当前测量的时间序列数据的统计分析方法和基于 Mahalanobis 距离的分析方法。统计分析方法基于采样的信号的二阶统计特性[参考文件 10 : J.S. Bendat A.G. Piersol, Random data: Analysis and measurement procedures, John Wiley & Sons N. Y., 1985], 例如平均值、标准偏差和相关函数。由于统计特性的使用仅对平稳过程有意义, 因此它们对不同产品所需的依赖多负载的操作条件具有有限的应用性。这意味着需要相应于每一依赖加载的操作设置的每一参考时间序列数据。这里的关键问题是如何构建足够覆盖正常操作条件的整个范围的依赖加载参考时间序列的数据组。Y. Ushiku 等 [参考文件 6]、Samata 等 [参考文件 7, 参考文件 8]和 Ishii 等 [参考文件 9]仍没有提出构建它们的有效方法。为了克服使用统计分析方法检测异常运行条件的有限能力, 它们也考虑在多变量统计中公知的量化分析当前时间序列数据和参考时间序列数据之间的相似度的 Mahalanobis 距离分析方法[参考文件 11 : W.H. Woodall, R. Koudelik, Z.G. Stoumbos, K.L. Tsui, S. B. Kim, CP. Carvounis, "A review and analysis of the Mahalanobis-Taguchi system," TECHNOMETRICS, Vol. 45, No. 1, pp. 1-14, 2003]。当参考时间序列数据包括正常操作条件的整个范围时, 这些估计数量好像比用于传统趋势监控系统的二阶统计(均值和方差)方法更有效。然而, 仅在每一指定处理的最开始, 获得新的或复原的真空泵的正常操作条件的时间序列, 从而在没有时间消耗数据获得和信号处理工作的情况下, 不能获得具有正常操作条件的整个范围的参考数据。甚至在现代半导体制造团体中也不完全明白构造这种参考数据组的任意实际方法。实际上, 现代半导体制造单元需要具有如改变的曲面压力、气体流量速度和不同的气体混合物和特性这类不同操作条件的多工艺。半导体制造商的这些与工艺相关的特性和操作条

件非常机密，从而真空泵提供商通常不能接触到它们。注意到用于现代半导体工艺的真空泵监控和诊断系统应该对多工艺条件具有自适应能力非常重要。开发识别不同的工艺条件和诊断它们的操作状态的主动方法对现代半导体工艺的干式泵监控和诊断系统是必需的。显示的本发明稍后提供这种技术问题的实际方案。

发明内容

技术问题

本专利的发明人已经开展低真空泵的精确的性能测试以及估计方法，并且在几个技术论文[参考文件 12: J.Y.Lim, S.H.Jung, W.S.Cheung, K.H.Chung, Y.H.Shin, S.S.Hong,和 W.G.Sm, "Expanded characteristics evaluation for low vacuum dry pumps," AVS 49th International Symposium, x-x, 2002;参考文件 13: J. Y. Lim, W.S. Cheung, J.H. Joo, Y.O. Kim, W.G. Sm, and K.H. Chung, "Characteristics evaluation practice of predictable performance monitoring for low vacuum dry pumps," AVS 50th International Symposium, 9-10, 2003; 参考文件 14: W.S. Cheung, J. Y. Lim and K.H. Chung, "Experimental study on noise characteristics of dry pumps," Inter-noise 2002, Port Lauderdale: USA, 2002;参考文件 15 : W.S. Cheung, J.Y. Lim and K.H. Chung, "Acoustical characteristics of dry pumps designed for semiconductor processes," Inter-noise 2003, Jeju, Korea, 2003]中发表了它们的试验结果。在低真空泵测试工作台(test bench)上实施这些试验，其示意图在图 1 中显示。

测试工作台已经用于估计低真空泵的性能因数，例如抽气速度、极限压力、电功率消耗、气体加载仿真、残差气体分析、以及声学噪声和机械振动级等。目前为止已经测试了供应给半导体制造商的多于一百个的真空泵。它们的测试结果已经向发明人提供了对各种真空泵的关键性能因数和动态特性的系统化的理解。

图 2 示出从相同模型的多个泵测量的抽气速度的统计特性(最大值、最小值和平均值)。正方形标记的线、星号标记的线以及圆圈标记的线表示测试结果中的最大抽气速度、最小抽气速度和平均抽气速度，从通过控制图 1 中显示的测试圆顶室的内部气压仿真的不同气体加载条件获得所述测试结果。观察由平均值与标准偏差之比定义的抽气速度的变化系数，在测试圆顶室的内

部压力等于 0.01[mbar]时变化系数是 6.7%，在压力是 0.02[mbar]时变化系数是 5.0%。从比 0.05[mbar]高的级别看出变化系数等于或小于 3.5%。这意味着测试的真空泵的抽气速度在小变化内控制的质量相当好。看出小变化内的抽气速度是判断泵的当前运行状态正常与否的好指示器非常重要。实际上，抽气速度是低真空泵的性能参数中最重要的因素。但是，用于监控真空泵的操作条件的先前发明不认为抽气速度是监控状态变量。

在下一部份中，本发明将显示监控原位安装的泵的抽气速度的系统方法。图 3 显示测试的泵中存在声学噪声和机械振动级的多少变化量。尽管图 2 中显示的它们的抽气速度具有小的变化，但是对于相同模型的每一泵显示声学噪声和机械振动级是非常不同的。通过将由 ISO 3744 标准推荐的十个选择的位置测量的声压平均化来估计声学噪声级。在测试圆顶室压力为 2[mbar]时，观察声学噪声级的最大差是 12dBA。在其它气体加载条件下，声压级(SPL)差接近大约 9 dBA。这种大的 SPL 差等于响度差的四倍(每 5dBA SPL 差两倍响度)。在 0.01[mbar]到 10[mbar]的压力范围发现声压级的变化系数是 51%~65%。在 1 mbar 压力以下，发现机械振动(加速度)级的变化系数是 19%~23%，当气压达到 10[mbar]时变化系数增加到 51%。而且，在 1[mbar]气压以下，观察机械加速度级的最小级与最大级之比是 1.4 至 1.6，而当气压达到 10[mbar]时，观察机械加速度级的最小级与最大级之比快速增加到 3.3。这种大的变化表示每个泵对于声学噪声和机械振动具有它自己的正常操作条件。这种依赖逐泵的操作特性在使用用于产生机械操作监控系统的告警或报警信号的基于固定级的阈值方法上已经产生许多困难，这是因为甚至对于正常运行机器，它们也经常引起不可靠和不一致的状态监控结果，即，错误告警或报警信号。为了改善基于固定级的机器状态监控和诊断系统的这种有限能力，本发明将在第三部分建议主动算法，其对依赖逐泵的正常操作条件的自适应。

应该注意，这种对于机械操作监控系统的状态变量的这种大变化不受声学噪声和机械振动信号的限制。图 4 显示从增压泵和干式泵测量的电功率消耗值的统计特性(最大值、最小值和平均值)。在 2[mbar]气压以下，观察增压泵的最小功率消耗值和最大功率消耗值之比是 1.3，当气压达到 10[mbar]时，观察增压泵的最小功率消耗值和最大功率消耗值之比增加到 1.6。在 1[mbar]气压以下，看出增压泵的变化系数是 9%~11%，而当气压达到 10[mbar]时，

看出增压泵的变化系数急剧增加到 57%。与增压泵的电功率消耗的大的变化不同，在超过测试的气压范围，观察干式泵的最小功率消耗值与最大功率消耗值之比是 1.1~1.2。在超过测试的气压范围，也看出变化系数是 4%~6%。这些测试结果表示增压泵和干式泵的总功率消耗是具有大变化的状态变量，从而对状态监控系统，总电功率消耗值低效。其结果是，在本发明中考虑增压泵和干式泵的两个分离的功率消耗值。

理解在超过泵操作范围，随着气体加载条件的改变，测量的状态变量增加多少量非常重要。通过仔细地观察图 3 和 4 中显示的实验结果的平均值(由星号标记的实线表示)对找出问题的答案有帮助。尽管测试圆顶室气压逐渐增加到一定程度，但是平均值保持平坦。这是测量的状态变量：声学噪声级、机械振动级和电功率消耗级与气体加载无关的区域。本发明也利用对测量的状态变量与气体加载无关的特性来诊断真空泵操作条件。在实际工艺条件中，经常找到这种与气体加载无关的条件。好的例子是运行真空泵的“空闲”状态，“空闲”状态是任何外部气体没有供应到泵进气口的时间间隔。本发明在下一部份将提出真空泵监控和诊断系统的状态变量的与加载无关的行为的建模的系统方法。此外，当气压增加到与气体加载无关的区域之上时，显示出声学噪声变量、机械振动变量和电功率消耗变量的平均值增加。例如，显示气体加载相关区域中的最大声学噪声级是 12dBA，这比与气体加载无关的区域中的最大声学噪声级高四倍。相似地，显示气体加载相关区域中的最大机械振动级是 2.4 倍高，并且增压泵和干式泵的电功率消耗级分别是 2.3 和 1.2 倍高。这里，由于真空泵的实际操作范围总是包括气体加载相关条件，因此状态监控和诊断系统遭遇的另一技术问题在于找出描述状态变量的那些状态与加载相关的行为的拟合模型。在下一部份中，本文也将提出将气体加载相关区域中的状态变量的动态特性建模的系统方法。当然，显示算术上相同的模型可适用于气体加载无关条件和气体加载相关条件。其结果是，一个模型专用于与气体加载无关的运行区域，另一模型专用于气体加载相关的运行区域。已经开发出两个单独的模型来尽早改善用于检测真空泵的可能异常运行条件的可靠性和可信度。

在本文很明显，关于气体加载条件的监控信息，即真空泵的进口气体压力信号应在区别真空泵的异常运行条件，更具体地讲，是判断是否由气体加载引起监控的状态变量的增加中起重要作用。为了更可靠地改善真空泵的异

常运行条件的诊断的能力,在先前发明中尚未进行监控进气压力信息的使用。在本中作中,显示进口气体压力的监控除了能改进诊断能力之外,还能够进行抽气速度的量化分析。由于估计的抽气速度引起确定感兴趣的真空泵应该被新的真空泵替换的适合时间,因此这点是有价值的。本发明提出了在半导体制造领域中评估运行真空泵的抽气速度的逻辑方法。

技术方案

根据本发明,提供一种在交替的空闲操作条件和气体加载操作条件下运行的真空泵的故障保护和预报维护的趋势监控和诊断分析方法,包括步骤:对于空闲操作条件和气体加载操作条件,以预定比率对状态变量信号的时间序列采样;对于空闲操作条件和气体加载操作条件,从比波动状态变量信号分量的周期长的连续采样的信号的每一分段组挑选出状态变量的时间序列的最大值和最小值;对于空闲操作条件和气体加载操作条件,通过使用基于线性参数模型的主动诊断算法从挑选的每一状态变量的最大值估计一组渐进上限的最佳拟合的模型参数,并且从挑选的每一状态变量的最小值估计另一组的渐进下限的最佳拟合的模型参数;每当观察到从气体加载操作条件到空闲操作条件的过渡状态时,通过使用原位估计方法基于进气压力信号估计抽气速度指标;每当观察到从气体加载操作条件到空闲操作条件的过渡状态时,存储对于每一空闲操作条件和气体加载操作条件的所有考虑的状态变量的渐进上限和渐进下限的估计的上模型参数和下模型参数以及估计的抽气速度指标;重复对于空闲操作条件和气体加载操作条件的每一状态变量的上限和下限的模型参数的估计以及抽气速度指标的估计;从为连续的空闲操作条件收集的所有考虑的状态变量的估计的上模型参数和下模型参数、以及从为连续气体加载操作条件收集的所有考虑的状态变量的估计的上模型参数和下模型参数、以及从气体加载操作状态到空闲状态的重复过渡连续收集的抽气速度指标监控变化趋势,并且基于其变化趋势分析结果诊断该真空泵异常与否。

根据本发明,还提供一种在包括交替的空闲操作条件和气体加载操作条件的多工艺下运行的真空泵的故障保护和预报维护的趋势监控和诊断分析系统,包括:数据获得单元,实时地对空闲阶段和气体加载阶段以预定比率对状态变量的时间序列采样;和信号处理单元,设置有益于来自数据获得单元的测量的信号的计算装置和存储装置,所述信号处理单元的特征在于提供以

下步骤：对空闲操作条件和气体加载操作条件，从比波动状态变量信号分量的周期长的连续采样的信号的每一分段组挑选出状态变量的时间序列的最大值和最小值；对空闲操作条件和气体加载操作条件，从挑选的每一状态变量的最大值估计一组渐进上限的最佳拟合的模型参数，并且从挑选的每一状态变量的最小值估计另一组的渐进下限的最佳拟合的模型参数；每当观察到从气体加载操作条件到空闲操作条件的过渡状态时，通过使用原位估计方法基于进气压力信号估计抽气速度指标；存储每一状态变量的渐进上限和下限的估计的上模型参数和下模型参数以及估计的抽气速度指标；从为连续的空闲操作条件收集的所有考虑的状态变量的估计的上模型参数和下模型参数、以及从为连续气体加载操作条件收集的所有考虑的状态变量的估计的上模型参数和下模型参数、以及从气体加载操作状态到空闲状态的重复过渡连续收集的抽气速度指标监控变化趋势，并且基于其变化趋势分析结果诊断该真空泵异常与否。

根据本发明，还提供一种包括执行上述的用于在交替的空闲操作条件和气体加载操作条件下运行的真空泵的故障保护和预报维护的趋势监控和诊断分析方法的计算机程序的计算机可读存储介质。

有益效果

本文中具有最大挑战性的问题是找出处理逐泵操作特性和多工艺条件的较大变化引起的技术问题的简单且有效的方式。

本文提出两个单独的模型参数组，即，一个是真空泵空闲操作条件下估计的模型参数组，另一是在气体加载的操作条件下估计的模型参数组。原因在于在两个操作条件下测量的状态变量信号具有相当不同的统计特性，并且对于操作条件空闲和气体加载操作条件的分开的趋势监控和诊断分析被选择来实现对早期检测真空泵故障的改善的性能。

当然，本文提出使用如进气压力、增压泵的供电电流和排气压力的这样的测量状态变量来分离空闲操作条件和气体加载操作条件的有效方式。

此外，本文引入使用测量的进气压力信号估计抽气速度的原位算法(in-situ algorithm)和提出的抽气速度评估算法，其实现检查当前抽气速度与初始值相比下降什么程度。关于这种泵速度下降程度的知识是有价值的，因为它使得泵维护工程师能够判断考虑的真​​空泵应该何时被新的真空泵替换。

此外, 本文提出将一系列与七个状态变量和抽气速度指示器相应的最佳拟合的模型参数系列构建为适合于多变量统计分析、性能分析和 Mahalanobis 距离分析的矩阵类型的数据的逻辑方法。数据矩阵构建的模型参数移植到这种传统分析算法(多变量统计分析、工艺性能分析和 Mahalanobis 距离分析)无疑是本文贡献的主要成就之一。

附图说明

图 1 是本发明的低真空泵的性能测试工作台的示意图;

图 2 显示低真空泵的抽气速度的统计特性;

图 3 中的(a)和(b)分别显示低真空泵的空间平均声学噪声级特性和低真空泵的机械振动级特性;

图 4 的(a)和(b)显示增压泵的电功率消耗特性和干式泵的电功率消耗特性;

图 5a 至 5d 分别显示测量的状态变量信号、进气压力和排气压力以及增压泵和干式泵的供电电流;

图 6a 至 6d 显示对于进气压力信号和排气压力信号以及增压泵和干式泵的电流信号的挑选的最大值和最小值(细实线)和基于拟合的模型的估计结果(粗实线)的比较;

图 7a 至 7d 分别显示振动加速度信号和声学噪声信号和它们的渐近线上限曲线和下限曲线(粗实线)的均方根(rms)值;

图 8 显示存在于第一气体加载的操作区域和第二空闲区域之间的第一负向过渡区域的进气压力信号(粗实线表示拟合的指数衰变函数模型)。

具体实施方式

真空泵的主动诊断算法(Active Diagnostic Algorithms of Vacuum Pumps)

本发明中的状态变量被定义为选择以定量检查考虑的真空泵的操作条件的周期采样的物理参数之一。存在各种泵操作相关状态变量, 例如发动机电流、进气压力和排气压力、声压信号、机械振动信号、吹扫气压力及其流速、体温、冷却水温度、润滑油压力和真空泵级别等。这些真空泵状态变量已经用于诊断真空泵运行条件。但是, 选择有限数目的状态变量来实现真空泵的有效诊断。已经根据气体加载依赖性作出了本发明中它们的选择。如果对真

空泵的进气压力的状态变量响应依赖性高, 则其被分类为在每一短周期采样(即每秒 10 个采样)的“实时”监控变量。作为实时监控变量, 进气压力和排气压力、增压泵和干式泵的供电电流、机械振动和声学噪声信号在本发明中被考虑。另一方面, 如果它的响应依赖性相对低, 则其被分类为以低速采样(即, 每秒一个采样)的“辅助”状态变量。作为辅助状态变量, 吹扫气压力及其流速、体温、冷却水温度、润滑油压力和真空泵的级别在本文中被分类。由于传统二阶统计方法足够成功实现它们的趋势监控和诊断, 因此本文不考虑这些辅助状态变量。原因是它们很好地满足了统计稳定条件。将来的工作可研究提出主动诊断算法对以上所列的辅助状态变量的状态监控和诊断的有效性。

在数字信号处理和理论[参考文件 16: B. Widrow and S. D. Stearns, Adaptive Signal Processing, Prentice-Hall, Englewood Cliffs: NJ, 1985; 参考文件 17: P.A. Nelson and S.J. Elliott, Active Control of Sound Academic Press, London, England 1992]中众所周知的主动算法(active algorithm)已经提供了用于调整考虑的系统模型的参数的有效工具, 选择考虑的系统模型来描述嵌入测量的状态变量中的动态特性。该主动算法能够对被调整好来动态改变状态变量的模型参数进行估计。利用估计的模型参数诊断真空泵运行条件。这种理论方法在本发明中被称为“主动诊断”算法。注意该主动算法提供调谐为不同泵操作特性(即多工艺条件)的模型参数组是重要的。当然, 仍然能够甚至对不同泵的参数进行估计。这些泵相关参数组对检查一组相同模型真空泵的操作改变尤其有用。这是对真空泵的诊断使用基于参数模型的主动算法的原因。

1. 诊断状态变量的参数建模的主动算法(Active Algorithm for Parametric Modeling of Diagnostic State Variables)

根据对测量的状态变量的信号特性的观察进行本文中的参数模型的选择。图 5a-5d 分别显示测量的信号: 每秒 12 个字的速率采样的(5a)进气压力、(5b)排气压力、(5c)增压泵的供电电流和(5d)干式泵的供电电流。

如图 5a 所示, 从进气压力信号明显观察到两个不同幅度区域(即一组“振荡幅度分级的”区域以及一组“平坦幅度分级的”区域)。平坦幅度分级的区域与没有任何抽气体从处理室外部地供应到真空泵的真空泵“空闲”操作状态相应。

如图 5a 所示, 振荡幅度分级的区域与抽气操作状态相应, 该抽气操作状态的气体加载条件在上渐进曲线和下渐进曲线之间改变。假设 y_m 表示第 m 个采样的进气压力信号, 下标 m 表示时间坐标。在本文中, 采样率被选为 10Hz(每秒 10 个采样)。进气压力的采样的时间序列 $\{y_m: m=1, 2, \dots\}$ 被用于在用户选择的周期, 即每 30 秒或每分钟(此选择比在气体加载操作条件下的震荡进气压力信号的周期长)中挑选出最小值和最大值。由于震荡压力信号的最长周期是 54 秒, 因此每分钟执行一次对最大值和最小值的挑选。

图 6a-6d 示出(6a)进气压力信号、(6b)排气压力信号、(6c)增压泵的电流信号和(6d)干式泵的电流信号的挑选的最大值和最小值(细实线)和基于拟合的模型的估计结果(粗实线)的比较。

图 6a 显示挑选的进气压力信号的最大值和最小值。假设最大值和最小值是从每组连续采样的 600 个信号(等于一分钟的记录信号)获得的 $\{y_{U, n}, y_{L, n}: n=1, 2, \dots\}$ 。本发明建议使用用于描述上渐进曲线和下渐进曲线的线性模型, 给出的线性模型如下:

MathFigure 1

$$y_{k,n} = a_k \cdot n + b_k$$

在方程式(1)中, 下标 k 表示上渐进模型或下渐进模型, 即对于上渐进模型 $k=U$, 对于下渐进模型 $k=L$ 。在方程式(1)中, 通过使用最小二乘法容易地获得两组模型参数 $\{a_k, b_k: k=U \text{ 或者 } L\}$ 。假设对每一抽气状态挑选的最大值和最小值的时间序列是 $\{y_{k,n}: n=1, 2, \dots, N\}$ 。如下获得最佳拟合的模型参数:

MathFigure 2

$$a_k = \frac{N \cdot \sum_{n=1}^N n \cdot y_{k,n} - \sum_{n=1}^N n \cdot \sum_{n=1}^N y_{k,n}}{N \cdot \sum_{n=1}^N n^2 - (\sum_{n=1}^N n)^2}, b_k = \frac{\sum_{n=1}^N n^2 \cdot \sum_{n=1}^N y_{k,n} - \sum_{n=1}^N n \cdot \sum_{n=1}^N n \cdot y_{k,n}}{N \cdot \sum_{n=1}^N n^2 - (\sum_{n=1}^N n)^2}$$

方程式(2)中的第一参数 $\{a_k: k=U \text{ 或者 } L\}$ 是指示随着测量时间的过去的增加或减少速率的进气压力信号的斜率。第二参数 $\{b_k: k=U \text{ 或者 } L\}$ 指示每一初始进气压力级(即, 在 $n=0$)。图 6a 中的粗实线示出使用上渐进曲线和下渐进曲线最佳拟合的模型估计的结果。气体加载条件的上渐进曲线和下渐进曲线显示很适合。此外, 参数能够有效地用于检查对于每一气体加载处理条件存在进气压力多少变化量。其指示对于每一处理阶段进气压力波动特征的趋势能够被模型参数定量表征的事实。由于仅两组拟合的模型参数实现当前进气

压力的趋势监控和诊断，因此这点是有价值的。由于提出的方法对每一处理阶段不使用整组的采样时间序列，因此使用拟合的模型参数为趋势监控和诊断系统节省很多钱。这意味着可通过使用拟合的模型参数实现基于紧凑硬件的执行系统。应该注意也通过使用下述方程式获得每一上渐进曲线或下渐进曲线的平均值和标准偏差。

MathFigure 3

$$y_{k,mean} = \frac{N+1}{2} \cdot a_k + b_k, \sigma_k = a_k \cdot \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{n=1}^N (y_{k,n} - a_k \cdot n - b_k)^2} \quad a \neq 0$$

$$y_{k,mean} = b_k, \sigma_k = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{n=1}^N (y_{k,n} - b_k)^2} \quad a = 0$$

在零值斜率(方程式(3)中 $a=0$)的情况下，显示的第二参数是平均值。

在方程式(3)中显示估计的参数能够进行统计特性(平均值和标准偏差值)的计算以及测量的进气压力的增加或减小速率的分析。其揭示了使用参数模型的有用性，参数模型对于测量的状态变量的统计特性是可调整的。关于进气压力信号的统计信息对于检查运行真空泵的当前气体加载条件是非常有用的。目前已经考虑了对从气体加载操作条件观察的动态操作特性建模的主动算法。如图 5a 所示，平坦幅度区域中的进气压力的幅度看上去平坦，而当平坦幅度分级区域的尺寸缩小时，看见小量的波动存在。即使对于空闲状态，也可考虑与上渐进限和下渐进限相应的两个参数模型。也采用与对气体加载抽气条件实现的相同主动算法来估计对空闲状态的上渐进曲线和下渐进曲线的模型参数。给出了挑选的空闲状态下采样的进气压力信号的最大值和最小值的时间序列，从方程(2)获得两组的上模型参数和下模型参数。也从方程(3)获得每一渐进曲线的平均值和标准偏差。对于真空泵的趋势监控和诊断，除了使用在气体加载操作条件下估计的拟合的模型参数和他们的统计特性之外，也使用在空闲操作区域中估计的那些拟合的模型参数和他们的统计特性。对于不仅检查在运行真空泵时施加多少气体加载条件而且检查维持空闲状态下的真空级到什么程度，组合的参数组的空闲操作条件和气体加载操作条件是非常有用的。将显示对真空泵的气体加载条件的知识在区分观察的异常泵操作的可能原因(即检查是否通过异常气体加载条件或其他机械故障引起特别的泵操作)中起关键作用。如果通过某些异常气体加载条件引起这种泵操作，则它们不是真空泵故障的情况。因此运行真空泵的气体加载条件的知识对于准确和可靠诊断非常重要。本文强调进气压力信号用于在半导体制造工

艺中专门使用的真空泵的精确诊断。

目前为止已经提出了描述从真空泵观察的进气压力信号的动态行为选择的参数模型的理论背景。该方法也可应用到其他状态变量，例如图 5b 至 5d 中显示的增压泵和干式泵的排气压力信号和供电电流信号。通过从数据获得系统供应的每块连续 600 个采样(等于一分钟记录的信号)挑选出最大值和最小值来容易地获得每一状态变量的最大值和最小值的时间序列。图 6b 至 6d 分别示出对于排气压力信号和供应到增压泵和干式泵的电流信号挑选的最大值和最小值(细实线)和基于拟合的模型的估计结果(粗实线)的时间序列。给出了对于空闲和气体加载操作条件挑选的每一状态变量的时间序列，通过使用方程式(2)获得与上限和下限相应的两个参数组。估计的上限和下限的参数组也被用于检查在重复的空闲操作条件和气体加载操作条件下每一状态变量的多少变化量被维持。

从图 5 和图 6 看出，在五小时期间观察的泵操作条件包括七个操作步骤，即四个空闲状态和三个气体加载状态。表 1 显示对于每一操作条件，即四个状态(表 1 中的空闲状态 1~4)和三个气体加载状态(表 1 中的气体加载状态 1~3)估计的渐进上限和渐进下限的参数组。

表 1 显示四个状态变量(进气压力信号和排气压力信号以及增压泵和干式泵的供电电流信号)的估计的渐进上限和渐进下限的参数组。BP 和 DP 表示增压泵和干式泵， a_U 和 b_U 表示渐进上限曲线的斜率和初始值， a_L 和 b_L 表示渐进下限曲线的斜率和初始值。

表 1

泵操作条件		步骤 1	步骤 2	步骤 3	步骤 4	阶段 5	阶段 6	阶段 7	
		空闲状态 1	气体加载 状态 1	空闲状态 2	气体加载 状态 2	空闲状态 3	气体加载 状态 3	空闲状 态 4	
		0~15 [分]	35~110 [分]	126~150 [分]	170~200 [分]	213~226 [分]	246~275 [分]	286~29 8 [分]	
进气 压力 [mba r]	上 限	a_U	-0.0012	-0.037	-0.0006	-0.031	-0.0011	-0.012	-0.0013
		b_U	0.56	21.04	0.59	19.19	0.60	17.76	0.60
	下 限	a_L	-0.0006	0.0001	-0.0006	0.0067	-0.0011	0.0072	-0.0019
		b_L	0.49	9.97	0.53	9.40	0.54	9.23	0.54

排气 压力 [mba r]	上	a_U	-0.029	0.0059	-0.0032	-0.0084	-0.023	0.012	0.023
	限	b_U	1040	1049	1040	1049	1040	1049	1039
	下	a_L	0.073	0.0022	0.056	0.0062	-0.038	-0.01	-0.085
	限	b_L	1032	1038	1032	1038	1033	1038	1033
BP 供电 电流 [A]	上	a_U	0.002	0.0003	0.0031	0.0023	0.0009	0.0017	0.0032
	限	b_U	4.73	11.11	4.66	11.04	4.68	11.12	4.46
	下	a_L	0.0018	-0.0025	0.0027	-0.0017	0.0023	-0.0016	0.0031
	限	b_L	4.16	9.19	4.54	9.05	4.55	9.02	4.52
DP 供电 电流 [A]	上	a_U	-0.0003	-0.0008	-0.0004	0.0021	-0.0002	0.0026	-0.0005
	限	b_U	16.2	15.8	16.2	15.7	16.1	15.7	16.2
	下	a_L	-0.0011	-0.0002	-0.0016	0.0017	-0.0021	0.0021	-0.0086
	限	b_L	16.0	15.4	16.0	15.3	16.0	15.3	16.0

注意空闲状态和气体加载状态之间的过渡状态没有用于参数估计。用于参数估计的时间间隔指定到表 1 的第三行。从表 1 明显的是通过六个参数描述每一状态变量的操作特性，这六个参数分别是：两个时间戳(初始时间和最终时间)、空闲状态的两个模型参数(斜率和初始值)、以及用于气体加载状态的两个模型参数(斜率和初始值)。它们通知何时空闲状态或气体加载状态发生以及上限和下限之间空闲状态或气体加载状态下的进气压力改变什么程度。当然，连续空闲状态(表 1 中的奇数步骤：步骤 1、步骤 3、步骤 5 和步骤 7)的比较被显示以能够进行它们变化的量化分析。此外，通过比较它们的模型参数可实现另外显示的后来的气体加载状态(即，偶数步骤：步骤 2、步骤 4 和步骤 6)之间的量化趋势分析。通过比较表 1 列出的它们的相应的模型参数容易地实现这种对于其他状态变量(即，排气压力和增压泵和干式泵的供电电流)的趋势分析。很明显，提出的诊断方法展示估计适合于真空泵操作条件的模型参数的主动算法，随后采用测量的状态变量的趋势分析的拟合模型参数。

在本文中显示出对两个分离的空闲区域和气体加载操作区域进行这种趋势分析。如在图 5 和 6 中，根据气体加载条件，四个状态变量(进气压力和排气压力以及增压泵和干式泵的供电电流)的上限级和下限级是明显的。那些机械和电子状态变量通常被认为是一类的静态特性。与那些静态特性不同，对于趋势和诊断分析，包括高频分量的机械振动和声学噪声信号已经被用作状态变量。

图 7a 和 7c 显示增压泵的振动加速度和在增压泵和干式泵之间的中间位置附近测量的声学噪声的均方根值。振动加速度的频率带宽被选择为 10Hz 到 10kHz, 并且声学噪声信号的频率带宽是 20Hz 至 20kHz。以 40.96kHz 的速率对信号进行数字采样。每块的 4096 个采样(等于 100ms 的时间间隔)被用于计算图 7a 和 7c 中显示的均方根(rms)值。600rms 值(等于一分钟时间间隔)的每一记录被用于挑选出图 7b 和 7d 中显示的振动加速度和声学噪声级(细实线)的最大值和最小值。

它们的渐进上曲线和渐进下曲线的模型参数在表 2 中列出。表 2 显示用于振动加速度和声学噪声级的估计的渐进上限和渐进下限的参数组, a_U 和 b_U 表示渐进上限曲线的斜率和初始值, a_L 和 b_L 表示渐进下限曲线的斜率和初始值。

表 2

泵操作条件			步骤 1	步骤 2	步骤 3	步骤 4	阶段 5	阶段 6	阶段 7
			空闲状态 1	气体加载 状态 1	空闲状态 2	气体加载 状态 2	空闲状态 3	气体加载 状态 3	空闲状 态 4
			0~15 [分]	35~110 [分]	126~150 [分]	170~200 [分]	213~226 [分]	246~275 [分]	286~29 8 [分]
振动 级 [m/s ²]	上 限	a_U	-0.0162	-0.0059	-0.0117	0.0052	-0.0063	-0.0031	-0.0287
		b_U	5.28	4.87	5.49	5.00	5.36	5.24	5.15
		峰 值	5.43	5.97	5.64	5.59	5.60	5.94	5.64
	下 限	a_L	-0.0217	-0.0043	-0.0073	0.0007	-0.0149	-0.0026	-0.0172
		b_L	3.74	3.34	3.91	3.59	3.50	3.73	3.80
		峰 值	1.04	1.29	1.03	1.18	1.00	1.38	1.14
声学 噪声 级 [Pa]	上 限	a_U	0.0008	0.0010	-0.0006	0.0016	-0.0023	0.0014	0.0062
		b_U	0.97	0.99	0.97	0.98	0.98	1.04	0.93
		峰 值	1.04	1.29	1.03	1.18	1.00	1.38	1.14

	下	a_L	-0.0001	-0.0000	-0.0004	0.0004	-0.0017	0.0003	-0.0001
	限	b_L	0.61	0.61	0.61	0.60	0.61	0.60	0.60

从表 1 中给出的七步操作条件(四个空闲操作状态和三个气体加载状态)估计这些模型参数。与图 5 和图 6 中显示的进气压力和排气压力以及增压泵和干式泵的供电电流不同,显示的图 7 中的振动加速度和声学噪声级没有展示明显的气体加载相关特性。不管气体加载条件,显示的振动加速度和声学噪声的渐进下限相当平坦,而显示的它们的渐进上限揭示斜率相关参数的符号改变(正和负)的特性。看排气体加载操作条件与正斜率相应,而除了最后的空闲操作区域外,首先的三个空闲状态与负斜率相应。从上限级观察图 7 中显示的区别特征之一,即波动信号分量。由图 7b 和 7d 中的“圆圈”符号标记的七个分段的操作步骤的波动分量的峰值被选择为另一诊断变量。也在表 2 中给出了它们的级别和相应的时间戳。它们在判断在每一操作步骤期间发生什么程度的过度振动和声学噪声级是有用的。其结果是,使得能够识别发生的可能告警或报警状态发生什么处理。

注意到对于每一状态变量的渐进上限和下限的参数组可极大地减小用于趋势监控和诊断分析的数据大小是非常有意思的。估计诊断指南(e-diagnostics guideline)的本版本[参考文件 18: Harvey Wohlwend, e-Diagnostics Guidebook, International SEMATECH, Version 1.5, October, 2002]推荐将对于每一状态变量的最小采样率设置为 10Hz(每秒 10 个采样)或者更高。根据估计诊断指南本文中的采样率被选择为 10Hz。如先前评论的,在本文中选择五小时采样的信号。找出的对于每一状态变量的采样总数等于 180,000。相反,找出的对于每一静止状态变量的拟合的模型参数以及它们的时间戳仅是 42 个数据(7 组的四个模型参数以及 7 组的初始时间戳和最终时间戳)。当考虑动态状态变量时,十四个附加数据(7 组的峰值和相应的时间戳)被添加到它们。这种诊断数据减小率极高。其通过使用非常紧凑的数字信号处理器,例如 TMS320C2000 系列的 TI 的模型 [参考文件 19: Data Manual for TMS320LF2407, TMS320LF2406, TMS320LF2402 Digital Signal Processors, Literature Number: SPRS094I, September 2003; 参考文件 20: Data Manual for TMS320F2810, TMS320F2811, TMS320F2812, TMS320C2810, TMS320C2811, TMS320C2812 Digital Signal Processors, Literature Number: SPRS 174J, December 2003]进行趋势监控和诊断系统的实现。

2.抽气速度的原位估计方法(In-situ Estimation Method for Pumping Speed)

在先前段中，已经详细陈述了估计适合于真空泵的操作条件的模型参数的主动算法。其显示出对分离的空闲操作条件和气体加载条件估计的渐进上限和渐进下限的模型参数。在本段中引用了分离泵操作条件的逻辑方法。由于在本文中直接测量进气压力，因此自然对这种分离使用进气压力。当在反应室中继续半导体制造工艺时，由于从反应室供应的气体流引起真空泵的进气压力级保持在最小级以上。根据生产气体和相关产品找出最小级，本文中指阈值级。例如，从图 5a 观察的进气压力信号的阈值级在 9[mbar]以上。本文安全地选择 5[mbar]阈值级来分离空闲操作条件和气体加载操作条件。这种安全选择从来没有做出任何错误判断。本文将从阈值级之前的十秒到阈值级之后的十秒范围定义为过渡区域。稍后显示的在过渡区域中采样的进气压力信号在估计抽气速度相关参数中起关键作用。即使没有直接测量进气压力信号，也没有禁止泵操作条件的分离。图 5 中显示的供电电流信号或者排气压力信号的使用能够以与对进气压力信号选择相同的方式对阈值级进行选择。如图 5b~5d 所示，由于增压泵的供电电流信号比排气压力信号或者真空泵的供电电流信号具有与进气压力信号更接近的相似度，因此本文提出将增压泵的供电电流信号的使用作为用于泵操作条件的分离的第二选择。然而，看出排气压力的使用需要良好电调谐放大器和噪声滤波器电路以尽小地最小化错误分离。提出的分离空闲操作条件和气体加载操作条件的方法是由本文贡献的有区别的成果之一。

从图 5a 观察两类进气压力过渡区域，即正区域和负区域。在处理阶段开始当打开反应室的排气阀时发生进气压力的正过渡，当在处理阶段结束之后当关闭排气阀时发生负过渡。由于它们的信号特性平滑，因此本文采用在负过渡区域中测量的进气压力信号。

图 8 示出存在于第一气体加载操作区域和第二空闲区域之间的第一负过渡区域的进气压力信号，在此图中，粗实线表示指数衰减函数的拟合模型。

在本文开始，很明显图 8 中显示的进气压力信号的指数衰减特性直接涉及安装的真空泵的抽气速度。在本文中采用在真空理论[参考文件 21: Nigel. S. Hariss, Modern Vacuum Practice, McGraw-Hill Book Company, London: England 1989]中公知的抽气速度和泵停工时间的基本关系。代数方程被给出：

MathFigure4

$$P_n = P_0 \cdot e^{-\alpha n}, \alpha = 2.77 \times 10^{-4} \cdot \frac{Q}{V} \cdot \Delta T$$

在方程(4)中，符号 Q 和 V 表示将被抽空的抽气速度 [m³/h]和体积[m³]。符号 ΔT 表示按秒的采样周期(在本文中 ΔT=100[ms])。方程(4)中的符号 α 是其值直接涉及抽气速度的指数衰减常数。该公式假设初始值 P₀ 和最终级 P_n 之间的压力范围中的抽气速度不变。其结果是，通过选择关于图 8 中显示的半对数曲线上选择线性区域确定初始进气压力级和最终进气压力级的适当范围。粗实线表示用于在不同的压力区域估计两个指数衰减常数的用于初始位置和最终位置的两个选择区域。第一区域中的初始压力级和最终压力级被选为在连续气体流停止之前观察的进气压力的 80%和 20%级。第二区域中的两个级也被分别选为 9%和 7%级。找出选择两个不同区域的这些导向对于估计指数衰减常数非常稳定且有效。采用估计的指数衰减常数来检查随着生产工艺的继续抽气速度性能减小到什么程度。

直接估计与选择的区域相应的最佳拟合的指数衰减常数。让 {P_n: n=1, ..., N}是在选择的区域采样的进气压力信号。通过以下方程获得进气压力信号的对数值:

MathFigure 5

$$y_n = -\alpha \cdot n + \beta, y_n = \ln(P_n) \text{ 并且 } \beta = \ln(P_0)$$

通过使用方程(2)中给出的在先前段中提出的最小二乘法获得最佳拟合的参数 α 和 β 的估计。两个不同区域的最佳拟合的指数衰减常数用于估计近似抽气速度指标，该指标被定义为每单位性能的抽气速度，也就是

MathFigure 6

$$I_p = \frac{Q}{V} = 3.6 \times 10^4 \cdot \alpha$$

表 3 示出估计的指数衰减常数和它们的图 5(a)中显示的进气压力的三个连续负区域的相应的估计的抽气速度指标，并且在这个表中，符号 α 和 I_p 分别表示指数衰减常数和抽气速度指数符。

表 3

两个拟合的模型区域		第一负过渡	第二负过渡	第三负过渡
第一区域	α	0.0856	0.0849	0.0831
	I _p	3081	3056	2991
第二区域	α	0.0059	0.0057	0.0051

	I_p	212	205	153
--	-------	-----	-----	-----

由于已经在本文中提出通过使用测量的进气压力信号估计抽气速度指标的原位方法为泵维护工程师提供适合的信息来通过判断抽气速度目前减小到什么程度来决定所关心的真空泵是否应被替换，因此该方法非常重要。提出的抽气速度指标的原位估计方法甚至在当前泵诊断技术[参考文件 1-4、参考文件 6-9]中仍没有发现的唯一一种。

3、使用模型参数的趋势监控和诊断方法(Trend Monitoring and Diagnostic Methods Using Model Parameters)

在前两段中，考虑的六个状态变量是进气压力和排气压力、增压泵和干式泵的供电电流、机械振动和声学噪声信号以及抽气速度指标。已经显示的估计适合于真空泵的操作条件的模型参数的主动算法提供对每一空闲状态和每一气体加载操作条件分别提供最佳拟合的模型参数 $\{a_U, b_U, a_L, b_L\}$ 。如在段 2 中介绍，由 $\{V_U, PK\}$ 表示的每分钟收集的挑选的最大值中的峰值也被添加到每一(空闲或气体加载)操作条件的四个模型参数。其结果是，每一状态变量的五个参数 $\{a_U, b_U, a_L, b_L, V_U, PK\}$ 是每一(空闲或气体加载)操作条件的代表性数据组。随着生产工艺的继续，以二维矩阵的形式描述所有考虑的状态变量的五个参数系列。

MathFigure 7

$$\{p_{Idle}(n, (j-1) \times 5+k), p_{Load}(n, (j-1) \times 5+k)\} \quad n=1, \dots; j=1, \dots, 7; k=1, \dots, 5$$

注意下标符号(Idle 和 Load)表示空闲操作条件和气体加载操作条件。行索引 n 表示生产工艺的顺序。列索引 j 和 k 表示七个状态变量的分类和对于每一状态变量的五个参数的顺序。第七状态变量相应于对干式泵的机械振动信号测量，尽管没有在段 1 中示出。如果需要，抽气速度指标可以包括在矩阵的最后一列。以方便的方式作出分类数量和参数顺序的选择。当执行空闲状态或气体加载操作状态时，获得其相应的行向量。由于重复空闲操作和气体加载操作，因此获得两个矩阵。

通过使用已知的分析方法：单变量或多变量统计分析、处理能力分析[参考文件 22 : Z.G. Stoumbos, "Process capability indices: Review and extensions," Nonlinear Analysis: Real World Applications, Vol. 3, pp. 191-210, 2002], and the Mahalanobis distance analysis [Reference H], 方程(7)中描述的矩阵数据容易地用于考虑的真空泵的趋势监控和诊断分析。实际上在前段中，已经采用单变

量统计分析中的概念示出估计的模型参数可如何良好地用于真空泵的趋势监控和诊断。在前段中示出的内容和逻辑序列与单变量统计分析很匹配。由于包括处理能力分析和 Mahalanobis 距离分析的多变量分析的技术讨论超出本文的范围,因此目前为止还没有考虑多变量分析。本文优选 Mahalanobis 距离分析,而不是多变量分析和处理能力分析。原因在于其总向我们提供对估计模型参数的小变化的更加敏感响应。显示的包括嵌入测量的状态变量的动态特性的最佳拟合的模型参数的矩阵数据导致另一用于真空泵的趋势和诊断分析的有效方式。模型参数构建的数据矩阵移植到这种传统分析算法(多变量统计分析、处理能力分析和 Mahalanobis 距离分析)无疑是由本文贡献的成果之一。

产业上的可利用性

开发本发明(例如主动诊断算法)不仅实现早期检测性能降低的真空泵以防止泵故障,而且提供它们的预测维持。

根据本发明,能够找出处理由逐泵操作特性的大变化和工艺条件(尤其是在半导体制造工艺中)引起的技术问题的简单且有效的方式。

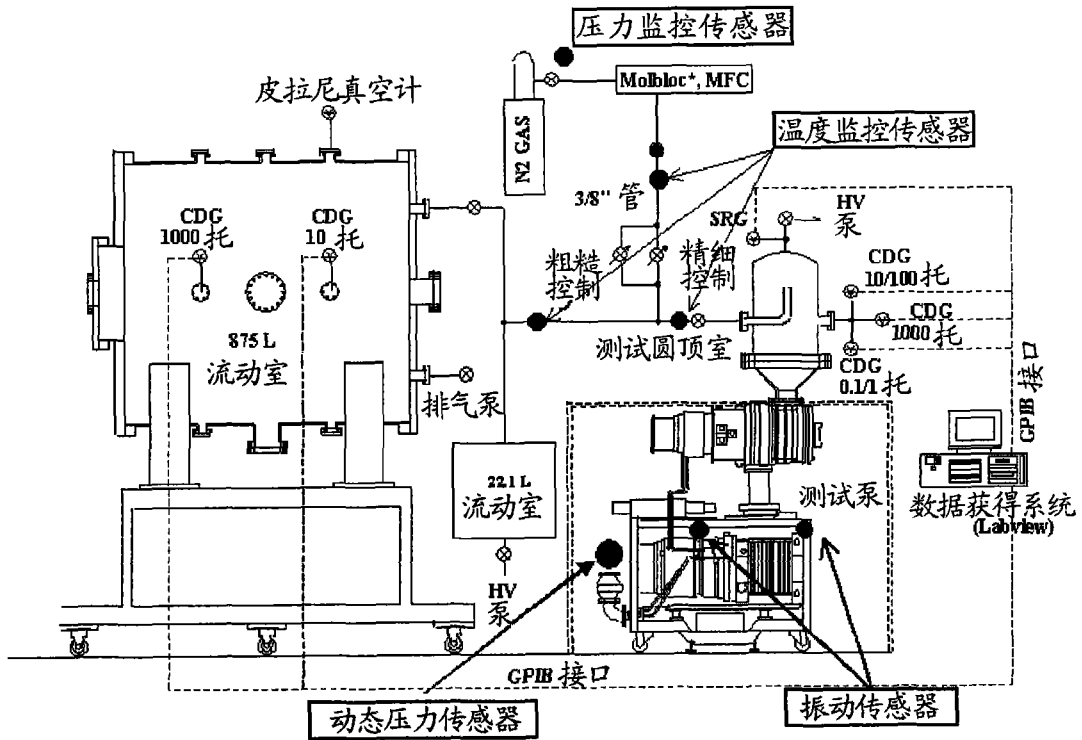


图1

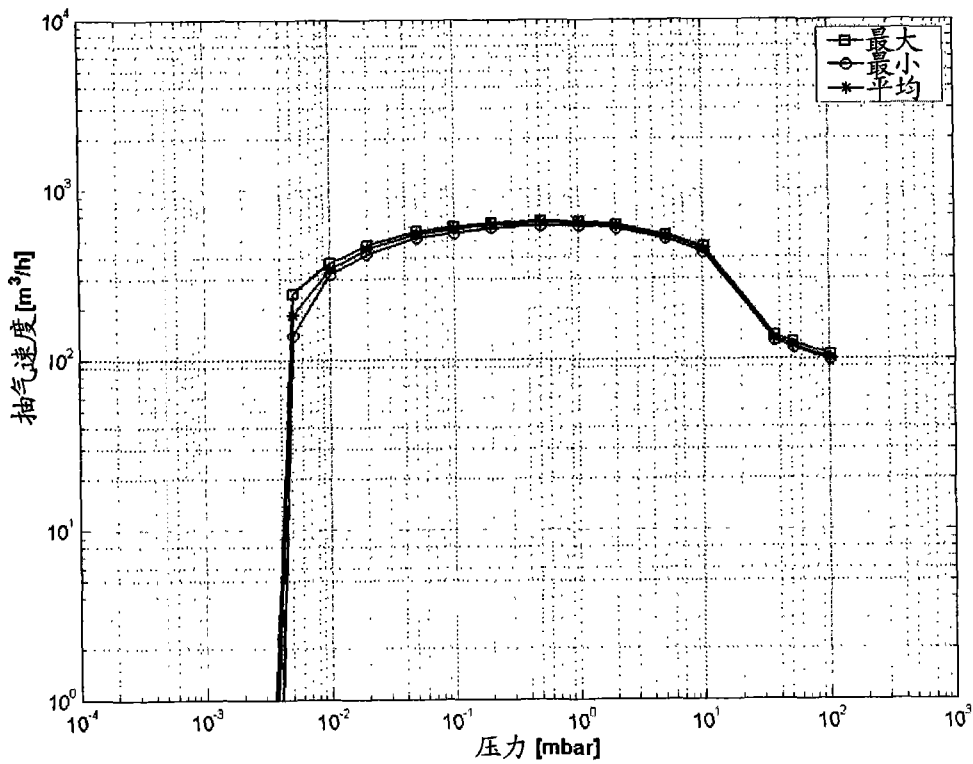


图2

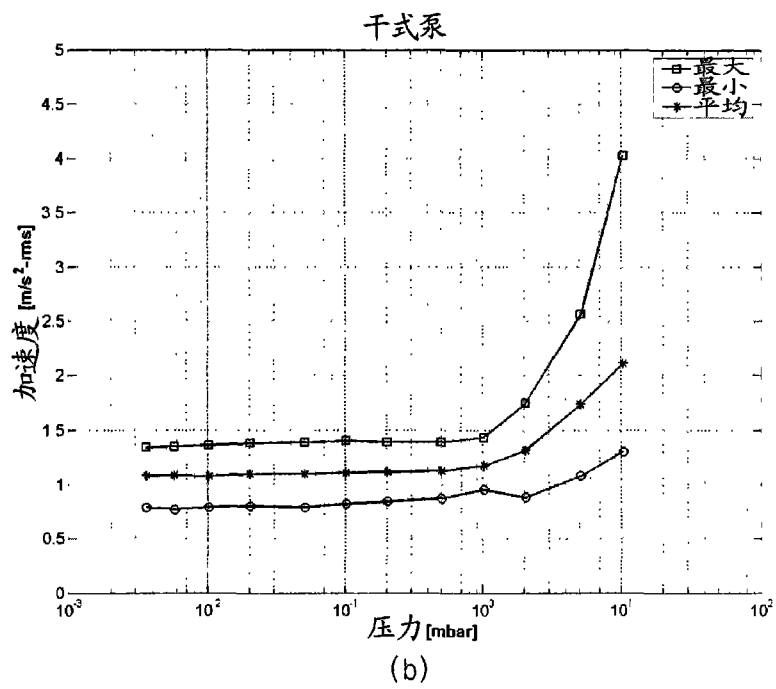
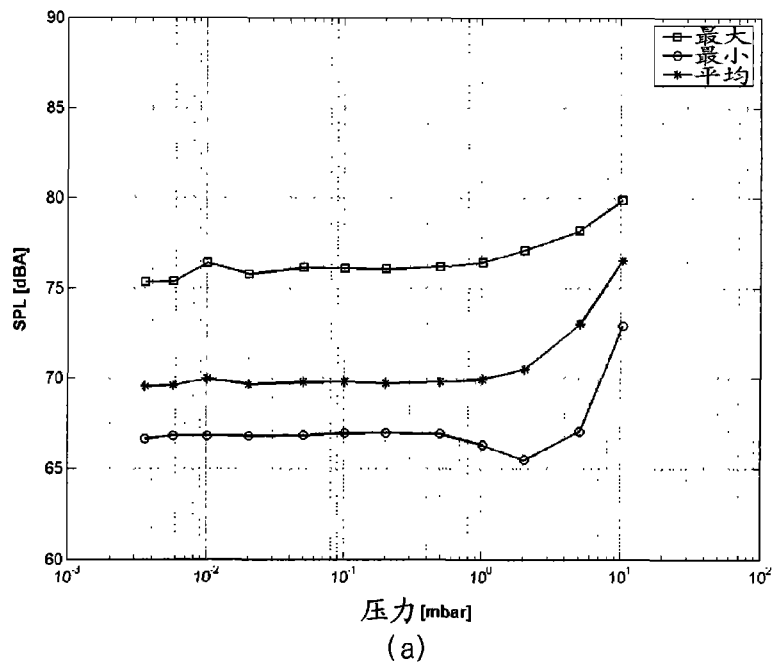


图3

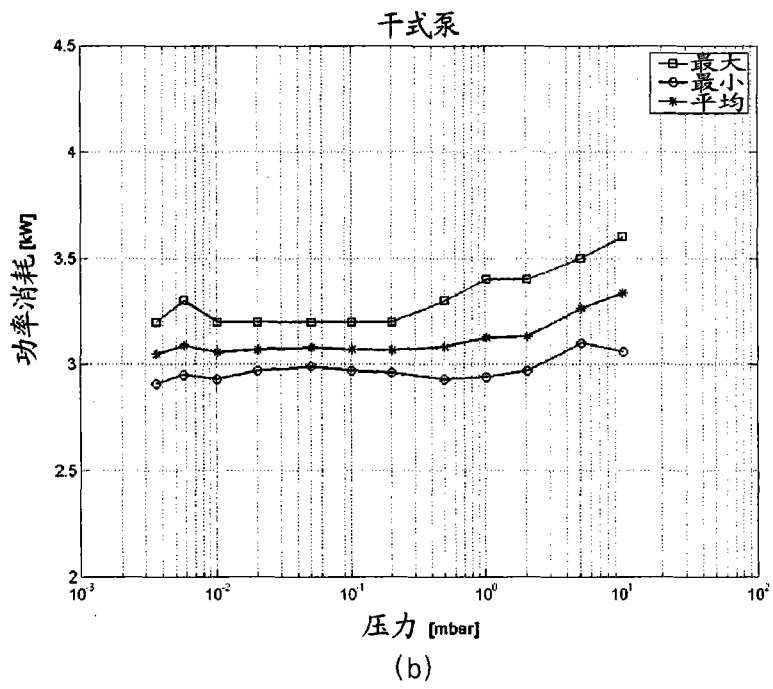
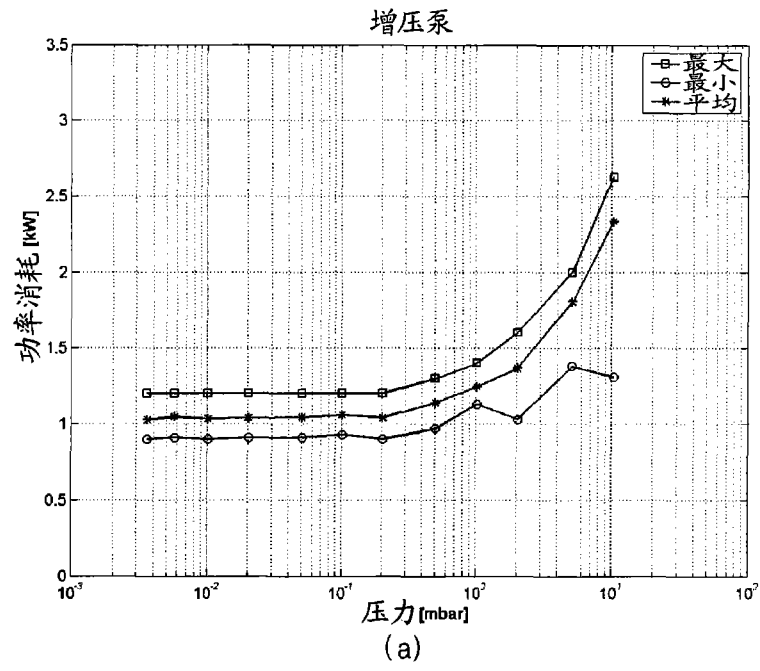


图4

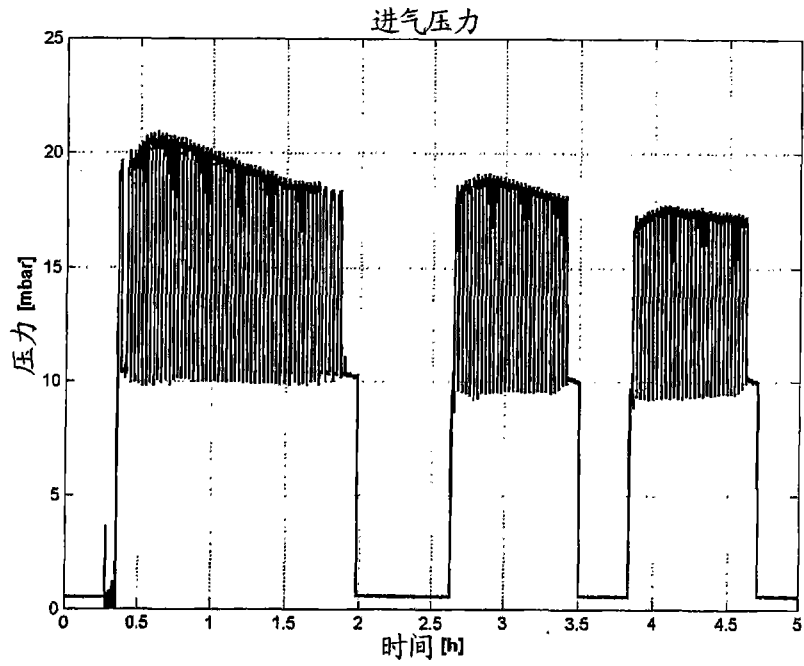


图5a

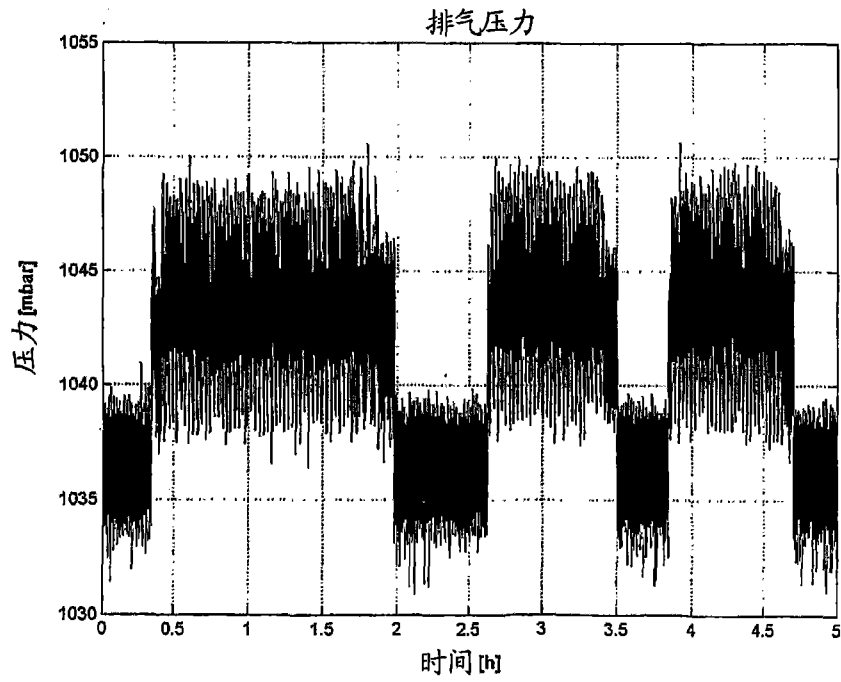
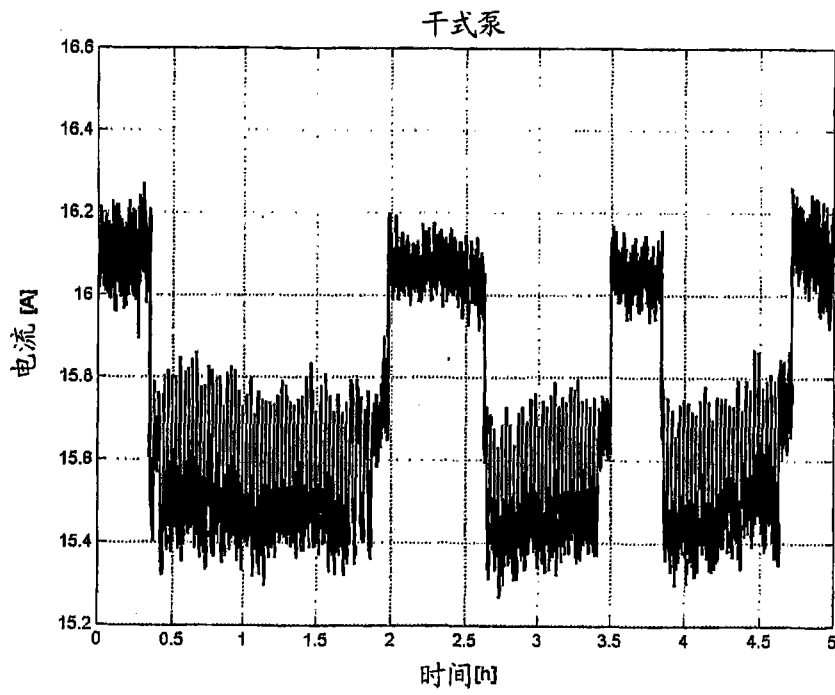
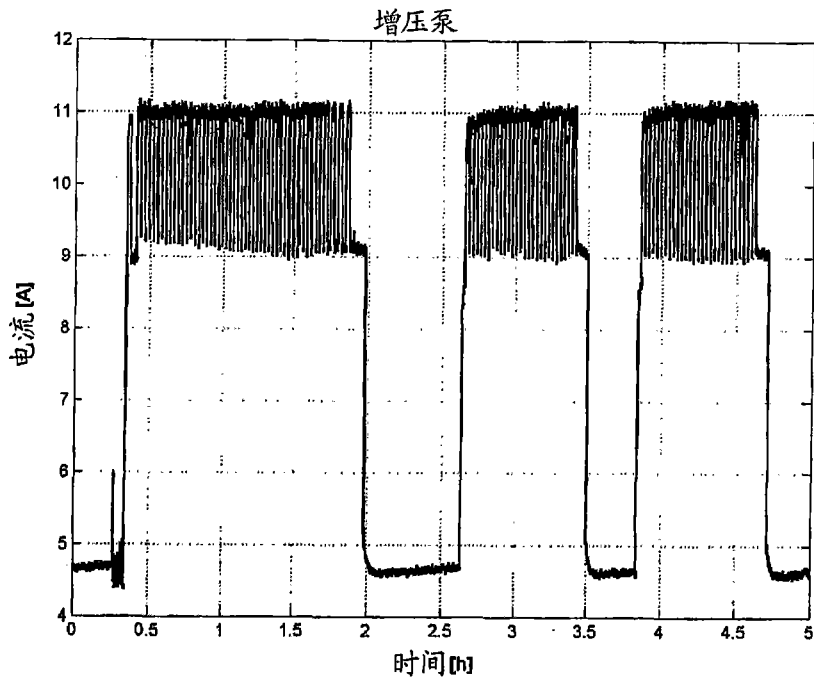


图5b



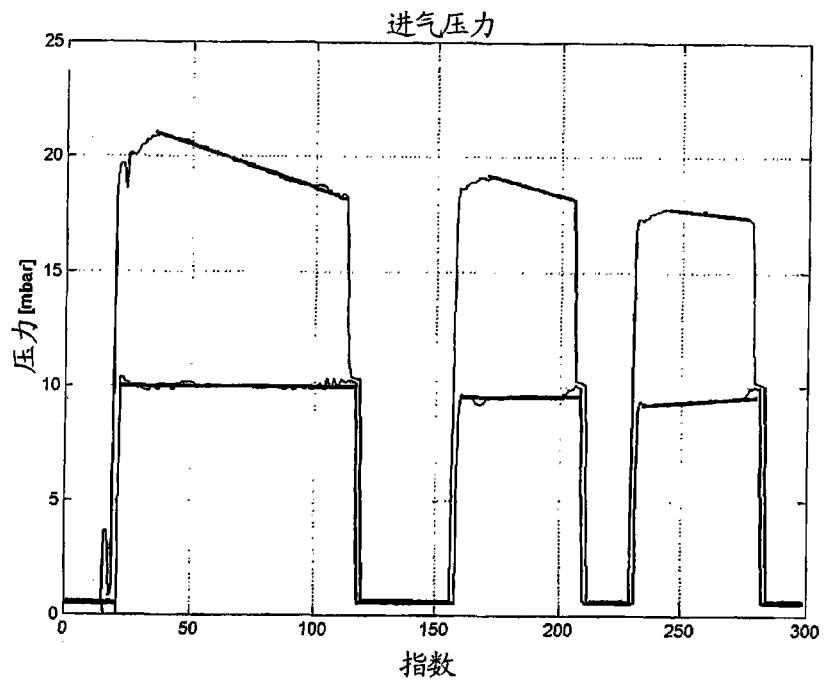


图6a

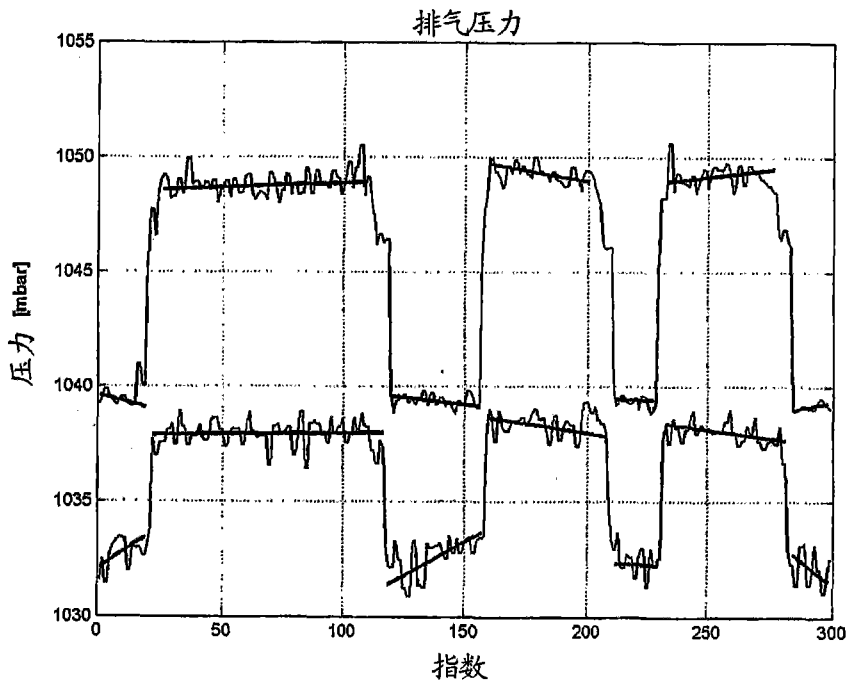


图6b

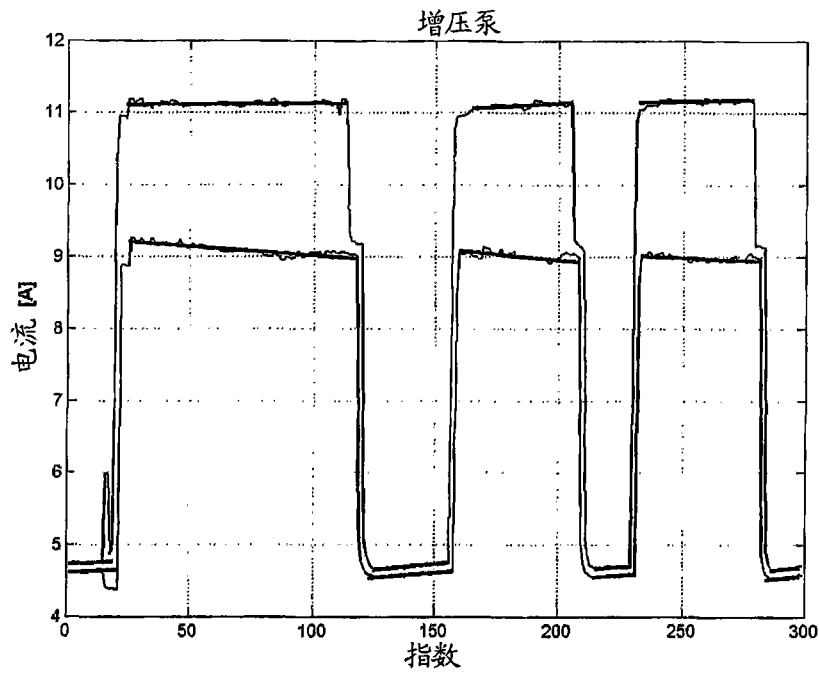


图6c

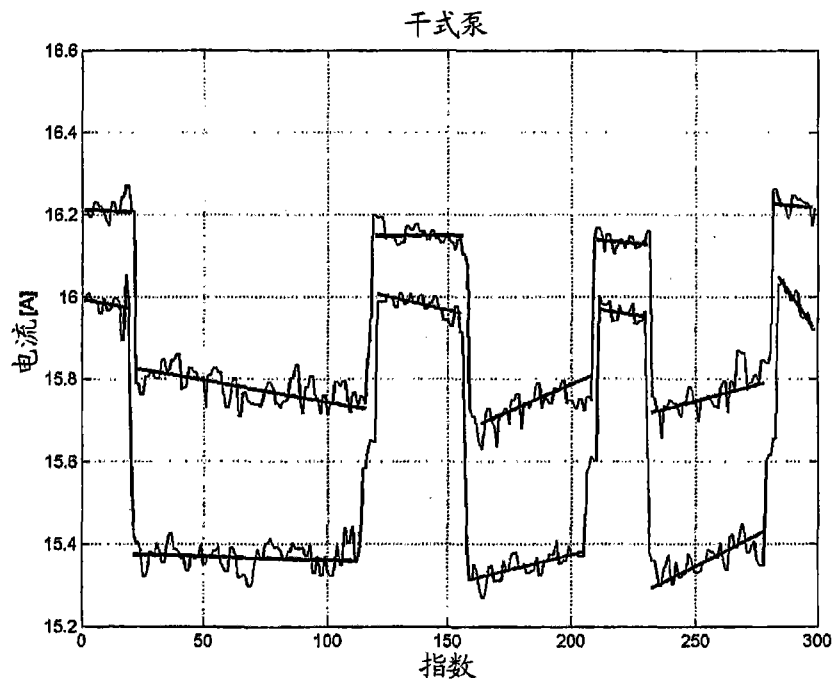


图6d

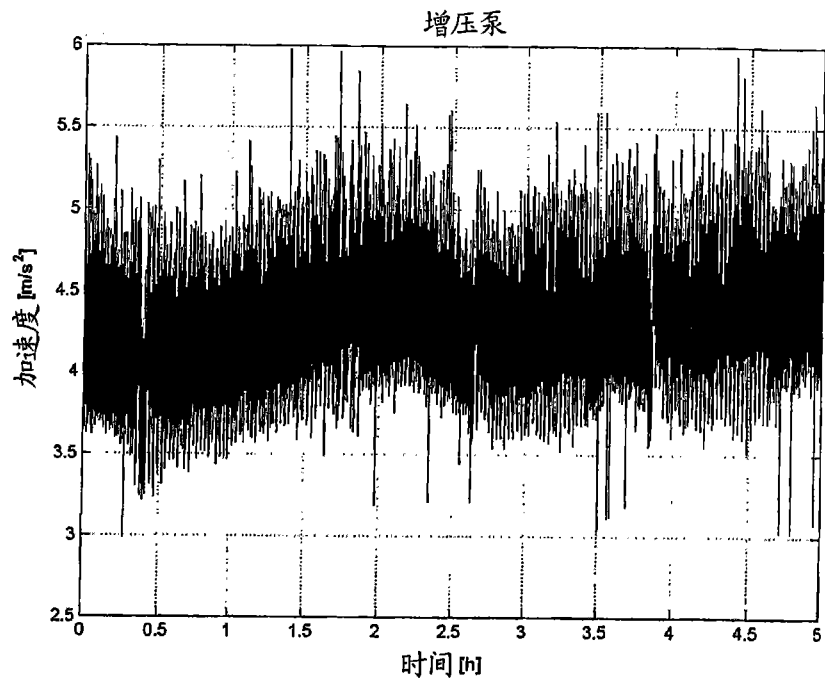


图7a

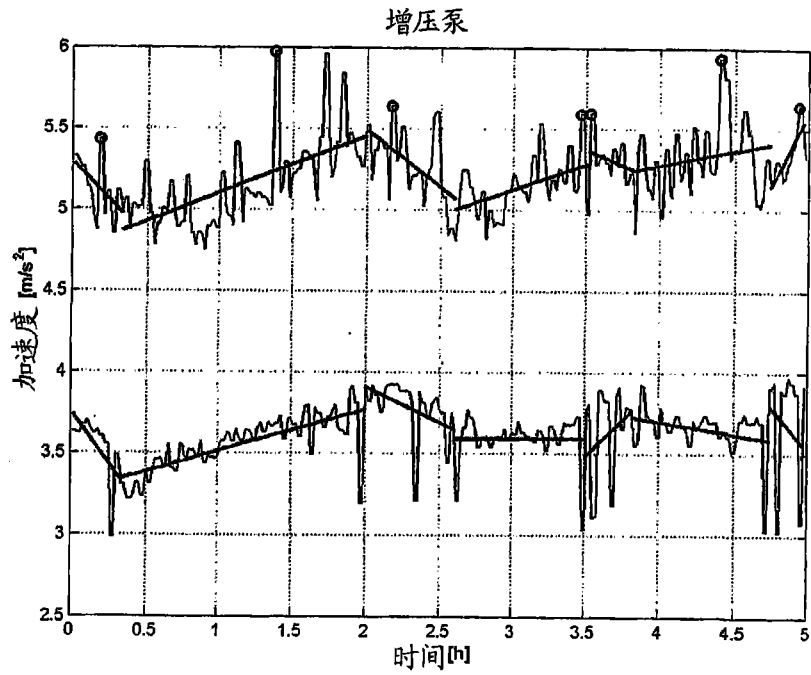


图7b

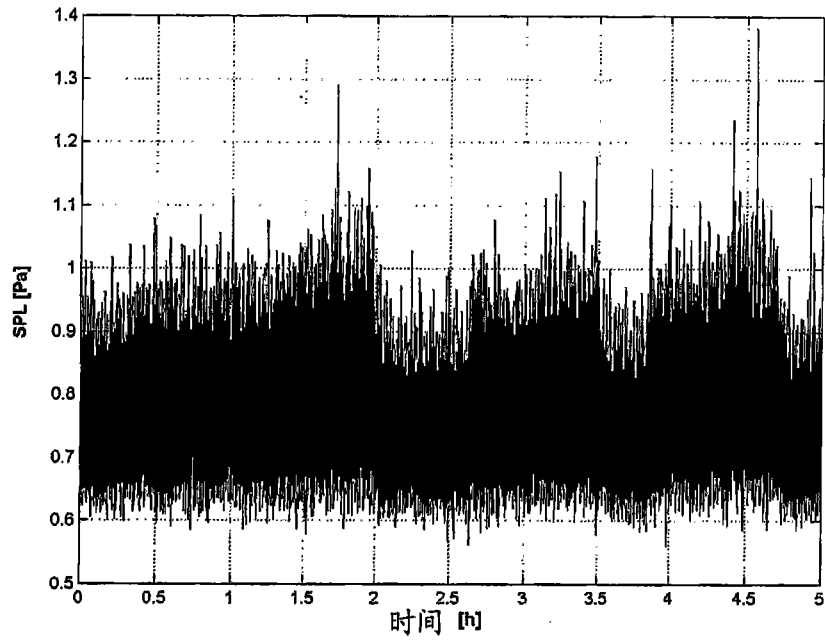


图7c

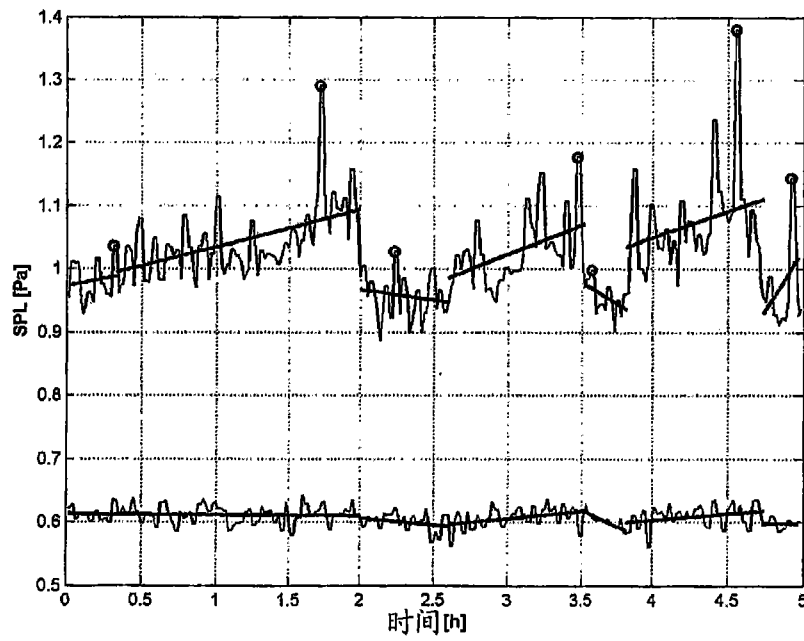


图7d

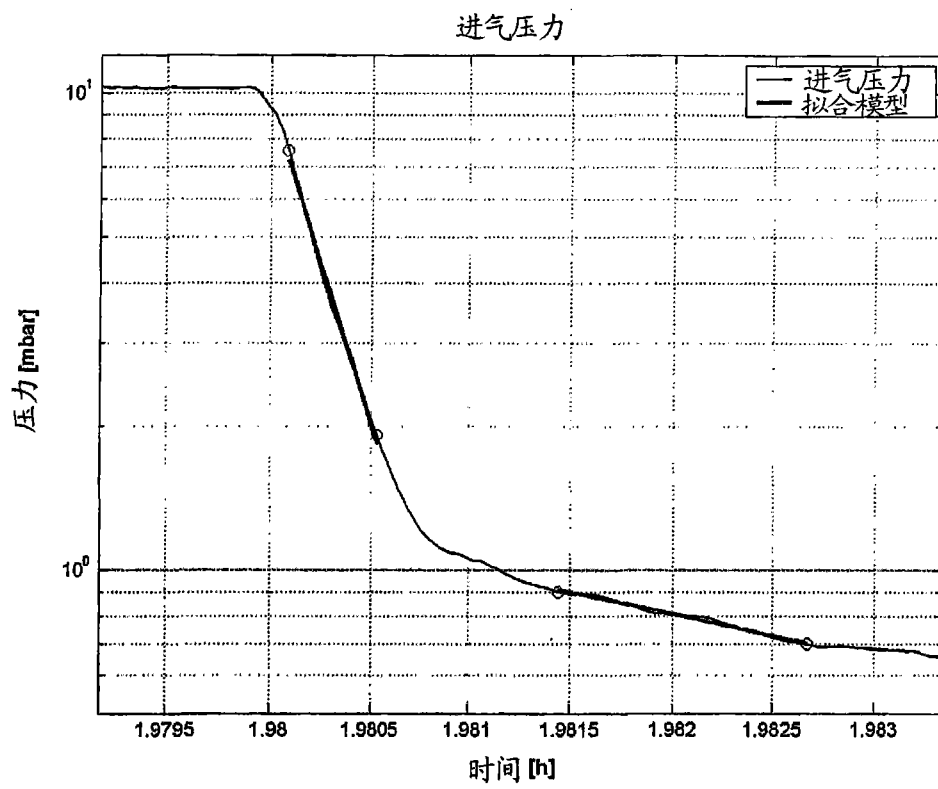


图8