

Research on the Application of Quality Pipeline Model in Enhancing Product Quality Consistency

Jianping HU¹ Yuhan PU²

1. CISDI Engineering Co., Ltd, Chongqing, 401122, China

2. Boston University, USA

Abstract

To enhance the consistency of product quality, this paper proposes a quality pipeline model that achieves comprehensive and dynamic product quality control from material input to product output (QPM). This model is based on a systematic approach, embedding several quality design subsystems and highly integrating various quality influencing factors. Due to the complex interactions among these influencing factors, which have significant impacts on product quality, it is difficult to predict and manage product quality with a single analytical or statistical model. The introduction of the quality pipeline model addresses this complex issue. Based on the quality pipeline model, one can identify the quality stability genes and systematic defects causing quality fluctuations in existing products, improve the stability of the production process and the consistency of product quality, thereby increasing the batch qualification rate and overall yield. It is suitable for both continuous industrial processes' quality improvement and discrete industrial processes' quality management.

Keywords

product quality; consistency; quality pipeline model; comprehensive domain; dynamic; stability factors; systematic defects

质量管道模型在产品质量一致性提升中的应用研究

胡建平¹ 蒲禹涵²

1. 中冶赛迪工程技术股份有限公司, 中国·重庆 401122

2. 波士顿大学, 美国

摘要

为了提升产品质量一致性, 本文提出了一种质量管道模型, 实现从物质输入到产品输出全域、动态的产品质量控制。该模型基于系统论方法, 嵌入若干质量设计子系统, 高度集成了若干质量影响因子。由于各个影响因子之间存在复杂交互关系, 其对产品质量均会产生重要影响, 难以用单一的解析模型或统计模型来预测和管控产品质量, 质量管道模型的提出就是应对这一复杂问题的。基于质量管道模型, 可以发现现有产品的质量稳定基因和质量波动的系统性缺陷, 改善生产过程的稳定性和产品质量的一致性, 从而提高产品的批次合格率和综合成材率。其既适合连续型工业流程的质量提升, 也适应离散型工业流程的质量管控。

关键词

产品质量; 一致性; 质量管道模型; 全域; 动态; 稳定基因; 系统性缺陷。

1 研究背景

无论是在连续型制造业还是在离散型制造业中, 产品质量一致性偏低是一个普遍的问题, 同入异出、异入异出现象仍旧突出^[1]。产品质量本质上是由从入到出的过程质量所决定的。这个过程是若干生产活动或生产环节的高度集成。质量的波动和偏差等就发生在这个质量影响因子高度集成的过程中。造成这种状况的原因主要有三个方面: (1) 当前制造全流程普遍存在信息孤岛^[2], 制造信息和质量信息弱

相关或无法关联; (2) 没有建立全流程的质量因子流或质量因子集, 没有将过程质量控制同最终质量进行内在有机衔接; (3) 仍旧缺乏物理的或第一性原理的底层计算分析模型来模拟、仿真、管控表观的质量演变轨迹, 从而使得质量管控具有不可控的偏离。这样的例子在金属材料制造流程中尤其明显。

要解决这样的问题, 一方面需要加强数字化产线基础设施建设^[3], 这是质量管控的基础和前提, 一方面需要实现目标质量同过程质量的全域衔接, 过程质量同生产过程的梯级衔接, 构建质量演变的车间级生态网络, 需要强化基础应用研究实现底层模拟预测同表观质量演变的衔接, 从而为目标质量的可控找到影响因子的控制边界和范围。将若干边界

【作者简介】胡建平(1972-), 男, 中国四川平昌人, 正高级工程师, 博士, 从事金属材料及加工研究。

和范围进行量化描述并连接之后即可构建描述并管控产品质量一致性的管道模型，实现全过程、无间断的质量管控。

该模型基于系统论方法，集成了从原材料输入到成品产出的每一个质量控制环节及其影响因子，包括人机料法环

以及时空因子等。由于各个因子之间的复杂交互关系对产品质量均会产生重要影响，难以用单一的解析模型或统计模型来预测和管控，质量管道模型的提出就是应对这一复杂问题的。

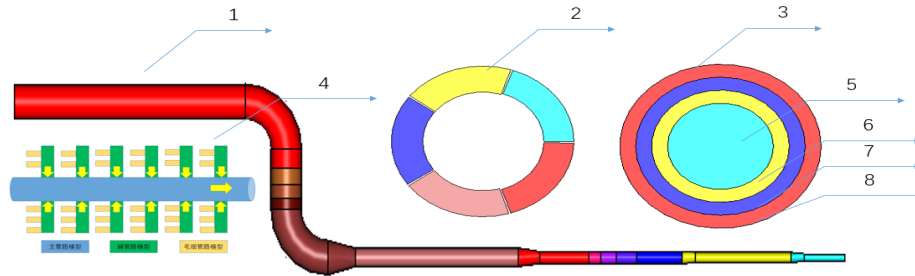


图 1 质量管道模型

1- 质量主管道，2- 管道质量因子环列分布图，3- 质量管道壁，4- 质量管网，5- 物质、信息和能量流动空间，6- 敏感层，7- 迟钝层，8- 保护层

2 质量管道模型的定义

构建质量管道模型，就是将产品质量、过程质量以及影响因子全部约束在管道中，建立产品质量、过程质量以及影响因子之间全域^[4]动态模型^[5]，对影响质量波动的因子进行动态监测和实时控制，进一步对产品质量进行预测和管控，以便获得质量稳定的产品。质量主管道，质量辅管道，管道内的物质流、信息流和能量流等共同构成质量管网，参见图 1。该模型可显著改善生产过程的稳定性和产品质量的一致性，从而提高产品的批次合格率和综合成材率，同时还可以为新产品开发提供孪生仿真模拟，实现虚拟产品开发，大大缩短工业级产品开发周期，降低开发成本。

3 质量管道模型的功能

通过实时数据采集和分析，基于质量管道模型，及时发现并解决生产过程中的质量问题，抑制质量缺陷的累积和扩散，提高产品一致性和可靠性，减少浪费和降低成本是质量管道模型的主要功能。其实施过程是面向工业流程，开展质量管道模型的构建、定义、量化、计算、分析和对质量数据的收集、监控、预警、诊断、追述、评价、判定、预测等。其服务对象是产品，且限定在产品制造流程内，不涉及质量研发、质量管理、质量体系、质量服务、品牌效应、客户回馈等。

4 实施方法研究

4.1 质量管道模型的构建

4.1.1 定义主管道模型

将生产过程的主流映射为需要定义的主管道，包括

管道的长度、直径、壁厚等，覆盖从物料输入到产品输出的全过程，该主管道称之为质量主管道模型。随后需要明确产线的质量目标，例如：合格率、成材率、缺陷率等。其次，将产品质量目标分解为过程质量目标，该过程质量目标对应到流程的工步上。例如，机械性能、表面状态、尺寸精度等。第三，梳理影响过程质量目标的主要因子和次要因子，例如：物料参数、工艺参数、设备状态和控制参数等。准备完毕后，将这些属性赋值于主管道上，实现主管道模型的数字化，参见图 2。

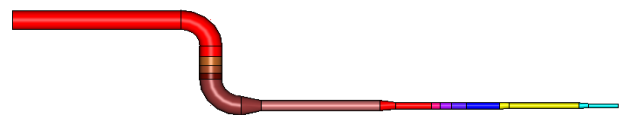


图 2 质量主管道模型

4.1.2 定义质量管网模型

将物理现实中的子系统映射为虚拟世界中的辅管道模型并将其连接到主管道模型上，例如能源子系统，动力子系统，环境子系统，物料子系统等，形成了如图 2 所示的质量管网模型。

质量管网模型具有封闭性和兼容性特点。封闭性是指不应在主管道或辅管道上存在开口或断开等情况，防止信息流的突然崩塌或遗失。兼容性是指辅管道可以采用插拔式和主管道相连，从而可以灵活配置构建管道模型。所谓插拔式是可以根据需要将辅管路连接或脱离主管路。拔掉时，其并不会对主管道模型分析结果产生实质性的影响。插入时，其不会扰乱主管道模型的运行机制。

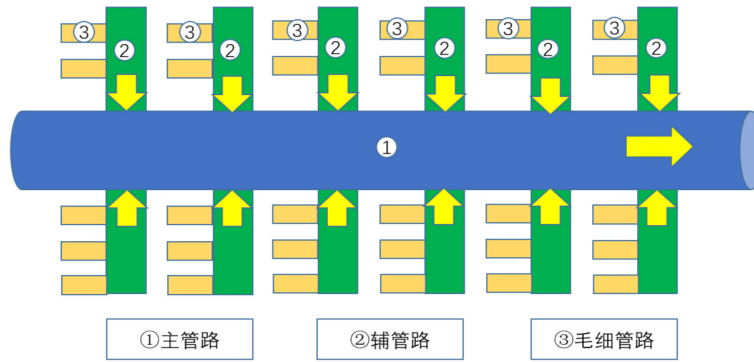


图 3 质量管网模型

4.1.3 定义模型管道截面

构建管道模型时，在管道截面上实现参数环列，参见图 4。这里的参数为生产过程不同工步上该截面所对应的质量影响因子，一般包括人机料法环等五因素，也可以是其中的几种。在管道截面上各个因子之间无需进行关联。例如，水的温度和机械设备的磨损两者之间完全不同，但是通过参数环列形成管道截面后，任何一个因子的波动会引起截面形状变化，直接影响过程质量，最终反映到产品质量端。

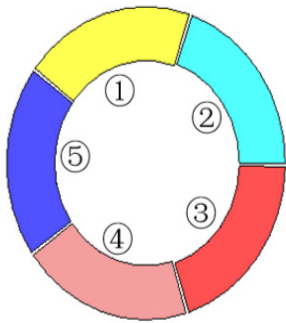


图 4 管道质量因子环列图

①人的因素，②设备状态，③材料特性，④工艺方法，⑤环境因素

进一步，沿着管径方向，将管道环列因子进行径向排序，可对管道壁厚进行分层定义，以确定质量敏感层、质量迟钝层和质量保护层所包含的关键变量，如图 5 所示。

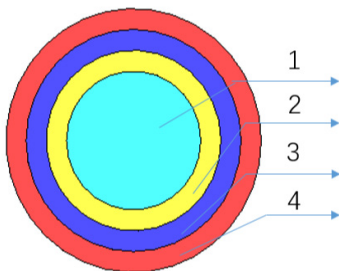


图 5 质量因子径向排布图

1- 物质流，2- 敏感层，3 迟钝层，4- 保护层

敏感层聚集了在生产过程中快速变化的因子，这些快速变化的因子直接对过程质量或产品质量产生快速影响，例如生产过程中的温度、压力、流量、流速、振动频率、振动幅值、场强、热量、能量及操作人员的干预等。这一层设置在管道的里层并与管道内流动的物质状态密切相关。

迟钝层聚集了对生产过程影响不显著的因子，其呈现缓慢变化特征，总体上有规律可循。可以基于迟钝因子建立起迟钝模型对主管道模型进行修正和补偿。例如磨损、腐蚀、疲劳、衰减、氧化、风化等。这些缓慢变化量将改变敏感层快速变化因子的边界。如果不进行修正，往往会使得快速变化量产生异常波动甚至系统振荡。

保护层是确保不发生管道破坏，质量崩溃而采取的额外保护措施，设置在管道模型最外层。其由一系列规则或方法组成，例如：预警机制、预测机制、偏离机制、疏通机制、修复机制等。在每一个机制下又由诸多方法来实现。

图 4 和图 5 的组合会形成若干具体方案，需基于不同流程进行个性化配置。

4.1.4 定义管道综合模型

基于以上描述，可形成一个目标质量 Q 随多个质量因子变化的多维函数，即：

$$Q=f(x, \theta, R_{in}, S_{123}, K_{ij}, t) \quad \text{公式 1}$$

其中：

Q 表示产品质量或者过程质量。

x 表示质量控制点对应的物理位置，一般映射到不同工步上。

θ 表示管道截面的方位，取值范围为 $0\sim 360^\circ$ 。

R_{in} 表示管内径，物质流动的物理空间或逻辑空间。

S_{123} 表示管壁分层厚度

K_{ij} 表示不同方位和不同管壁厚度上的质量影响因子

t 表示时间

公式 1 建立了质量同过程影响因子之间的量化关系，其输出为控制参数集。当然，这是一个复杂的求解过程。

4.1.5 质量管道失控机制

质量管道模型是否能为生产服务，还需要建立一套质

量管道失效管控机制，确保质量管道健康，主要包括以下 12 种工况的管控。每种管控机制互不相同，后期会陆续进行阐述。

- 1) 管道泄露：控制因子丢失导致质量失控
- 2) 管道膨胀：控制边界放大导致质量发散
- 3) 管道突变：控制因子异常导致质量偏离
- 4) 管道爆炸：控制因子严格导致质量失控
- 5) 管道失压：内侧因子偏弱导致质量偏差
- 6) 管道腐蚀：控制因子波动导致质量偏差
- 7) 管道扭曲：控制因子错位导致质量异常
- 8) 管道缩颈：控制边界缩小导致质量发散
- 9) 管道断裂：遗传因子失效导致质量偏离
- 10) 管道隐藏：控制因子忽略导致质量偏离

- 11) 管道堵塞：控制因子趋紧导致质量失控
- 12) 管道增压：控制因子波动导致质量偏差

4.2 质量管道模型的研究

质量管道模型研究及应用需要回答一系列科学及实践问题。如下对几个关键问题进行探析。

4.2.1 过程状态的描述及量化

对生产过程的量化描述是质量管道模型的基础性工作，一般可以利用鱼骨图因果分析法将影响因子连接到过程质量指标上。例如：影响某一工序的加工精度的因子包括工器具、环境温度、润滑液品质、设定参数、机床振动等。又例如：影响酸洗表面质量的因子包括从开卷机到卷取机全流程各个环节的工艺参数，生产规程以及相应的设备状态等，参见图 6 所示。

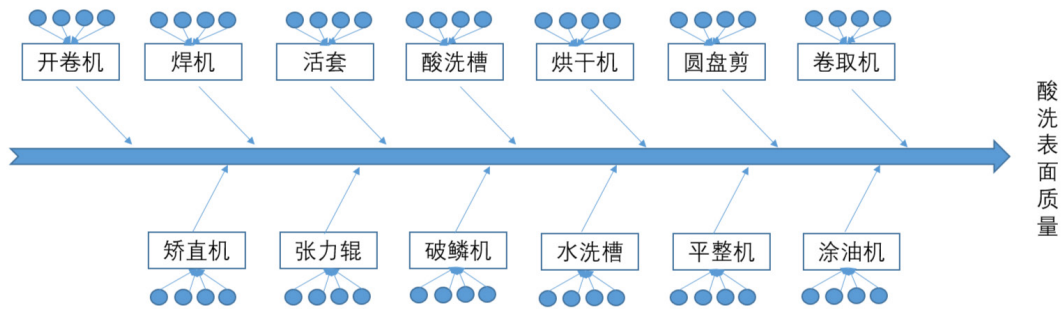


图 6 某机组质量影响因子鱼骨图

在 4.1 小节中模型定义并赋值的过程就是对管道模型进行量化的过程。首先要确定质量指标，包括合格率、次品率、成材率、收得率等，随后按照鱼骨图方式逐层向下分解到过程质量指标并赋值，第三，每个影响过程质量指标的因子需要确定的范围，需要对影响因子进行边界赋值。这样整个质量管道控制模型就基本形成。辅之以数据监测、收集、智能算法、机理模型等，质量管道模型即可按照设定规则运算并输出质量实时状态和优化改进措施。

4.2.2 质量状态表征及输出

在质量管道模型中建立质量状态表征的可视化图表等，可以非常直观地展示和评估产品质量水平和状态，常见的表征方法包括：柏拉图、直方图、控制图、SPC 监控图、雷达图、排列图、散布图等。典型指标包括产品技术型质量指标（例如：机械性能、尺寸精度、表观质量）和统计型质量指标（例如合格率、次品率、成材率、收得率等）。通过以上方法，可以全面、准确地了解产品质量状态，为质量改进提供有力支持。

4.2.3 质量管道的边界

定义质量管道的边界需遵循松紧相依的原则，将管道内物质流、信息流和能量流约束在限定空间内，确保质量可控。松散型边界使得质量管控容易发散，紧致型边界使得质量管控容易断裂。良好的质量管道模型既基于物理现实的自然规则，又抽象于物理映射的逻辑定义。其内涵应当包括物

理边界、逻辑边界、功能边界等。在 4.1 小节中已经对物理边界进行了定义，而逻辑边界即为逻辑判断准则，让物理要素在可控范围内活跃起来，其可以充分保证物理边界的密封性和兼容性。功能边界的引入增强了逻辑边界的目标性和清晰度。功能边界可以对应到过程质量或流程工步上，包括子系统管控的目标、策略、制度、流程、责任、接口、人员等。图 7 示意了三者之间关系。

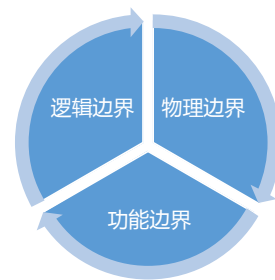


图 7 质量管道的边界组成

4.2.4 质量管道的连接和管道刚性的评价

质量管道模型避开了物理连接的逻辑解释，采用了插拔式模块化设计，实现主管道、子管道和毛细管道的无缝衔接和自由增减，避开了主管道同辅管道模型连接的物理解释和数学推理，确保了系统较强的兼容特性。

质量管道刚性是指系统抵抗指标失控的能力，其目的

是确保管道系统能够安全、稳定运行。其涉及管道的材质、管道的几何特性、管道的支撑、管道的环境、管道的载荷等。针对不同的工况进行适应性定义，并基于系统建立评价准则。以质量波动 Δy 与因变量变化 Δx 的比值同临界值 δ 作为判断标准，逐一对系统的过程质量和目标质量进行扫描式判定，从而为系统的稳定性做出评价。

$$\frac{\Delta y_{ij}}{\Delta x_{ijk}} < |\delta_{ij}| \quad \text{公式 2}$$

Δy_{ij} ，表示与流程对应的第 i 个节点上第 j 个过程质量指标变化值

Δx_{ijk} ，表示与流程对应的第 i 个节点上第 j 个过程质量指标相关联的第 k 个影响因子

δ_{ij} ，表示第 i 个节点上的第 j 个过程质量敏感度允许最大偏差，即 4.2.3 小节中的功能边界

于是可以形成一个系统的质量敏感度矩阵，如下所示：

$$\eta = \begin{bmatrix} \delta_{11} & \cdots & \delta_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \delta_{m1} & \cdots & \delta_{mn} \end{bmatrix} \quad \text{公式 3}$$

η 为系统刚性评价矩阵，用于观察系统的稳定性，并以此触发系统的安全预警机制。

4.2.5 装备健康与质量波动量化关系研究

在质量管道模型的构建中，装备状态变量设置在迟钝层，参见 4.1 小节。装备状态用装备健康指数来表征。生产中，装备状态呈现缓慢变化趋势，但其对敏感层的影响是逐渐呈现的，并最终影响产品质量的一致性。为此，需要建立装备健康与产品质量波动之间的量化关系。例如装备的响应特性，加工精度，检测精度，运动速率，疲劳寿命，磨损状况，对环境的适应能力，数据采集的能力，推理能力，驱动控制精度，图像识别能力，自诊断能力等。

$$\Delta R_{ij} \rightarrow \Delta S_{ij} \rightarrow \Delta Q_{ij}$$

表示了第 i 个节点上第 j 个设备状态的变化量，在模型构建过程中对设备状态 R_{ij} 进行了预定义。

表示了第 i 个节点上第 j 个设备状态变化量对相关关联的敏感层影响幅度，根据物理模型建立对应关系并引入到管道模型中。

表示了过程质量的变化幅度，根据物理模型建立对应关系并引入到管道模型中。

为便于理解，以板链式斗提运输机为例。在重载情况下，板链连接处销轴的磨损缓慢增加，齿轮箱上的齿条和板链之间的啮合会缓慢错位，冲击增加，进而引发设备振动，单位时间内的物料输送量会发生偏离，最终导致产品质量偏离。因此，任何影响产品质量的因子都不应被忽略，这是质量管道模型的优势。

4.2.6 多因素多目标质量控制与妥协；

一个产品可以有多个质量指标，一项质量指标又会受到若干个因子所影响。在一个管道模型中多个质量指标和多

个影响因子相互交错，增加了系统的复杂性。过去的解决方案是基于经验大幅度精简并聚焦到典型指标和关键因素上，寻求二者间的关系。但要显著提高产品质量一致性，这是不够的。一个质量指标受到多个因子的影响，一个因子也会影响多个质量指标。因此，在多目标多因素质量控制系统中控制与妥协十分必要。控制的目的让物质流、信息流和能量流在质量管道中有序流动，有助于目标和计划的实现，可以用公式 4 表示。妥协的目的是基于相互调整，相互让步，追求融洽，寻求系统平衡，达到系统最优，可以用公式 5 表示。公式 6 为约束条件。

$$Q_i = f(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}) \quad \text{公式 4}$$

$$X_i = f^{-1}(\Delta Q_1, \Delta Q_2, \dots, \Delta Q_m) \quad \text{公式 5}$$

$$G_k(x_1, x_2, \dots, x_m) \leq B_k \quad \text{公式 6}$$

公式 4 表示了第 i 个质量指标 Q 受到 n 个因子 x 的影响。无论是隐式或显示，这个方程为第 i 个质量指标的控制方程。

公式 5 表示了第 i 个因子 x 在多个质量指标上的妥协值。公式中 x 为妥协后的影响因子取值，为 m 个过程质量指标波动幅值。 x 数值可能会偏离初始设定目标，但不会使得系统质量指标溢出，从而达到系统最优。

公式 6 表示了影响因子的约束条件，即 4.2.3 所述的逻辑边界，其是求解方程 4 和方程 5 的必要条件。 G 为约束表达式， B 为约束目标。

4.2.7 仿真计算及过程模拟

基于质量管道模型，可以将物理系统映射到虚拟空间中，其为仿真计算及过程模拟创造了条件。质量管道模型将所有同质量相关的影响因子进行了高度集成，并嵌入了工艺模型和大数据信息等，为高通量计算创造了有利条件。图 8 为某冶金工艺流程中，质量管道模型和仿真计算模拟的映射关系图。

在连续型流程中工业中，基于第一性原理的仿真计算模拟输出结果反过来将会优化质量管道模型的控制边界或实时控制参数，从而为获得一致性较高的产品质量提供保证。随着大数据时代的到来、各种智能算法的持续改进以及算力的快速提升，基于质量管道模型开展质量设计必将成为新的发展趋势。在离散型流程工业中，也可引入物流仿真分析技术，以获得 6 的质量管控水平。

4.2.8 解耦分析在质量管道模型中的应用

解耦分析^[6,7]是一种用于识别和分离复杂系统中多个影响因素并实现降维求解的有效方法。常用的解耦技术为统计解耦方法，如多元回归分析、路径分析、假设检验、SPC 监测等。在质量管道模型中，各因素之间存在复杂的交互关系，甚至于难以用显示公式来表达。通过解耦分析，可以揭示这些隐藏的关系，帮助我们理解各个质量控制环节之间的相互作用，识别出影响产品质量的重要因素，从而高效地进行质量改进和优化。

例如：某企业零部件加工批次合格率存在差异，这种差异主要体现在不同时间段上而不是在不同班组之间。为此，将所有可能影响批次合格率的因子全部放置在质量管道模型中，总计 52 个。采用解耦分析方法，梳理 52 个影响因子后发现，加工机床受到上午的阳光，而其余时间没有被阳光照射。阳光照射影响了加工机床的环境温度，导致批次合

格率异常。在这里引入了时间因子进行分析，使得质量管道模型更加丰富，印证了质量管道模型的全域特性和时域特性。经改进，该企业显著提升了批次合格率。

这个案例中，阳光照射改变了加工机床的环境温度，这是一个隐藏的间接关系，无法用数学公式表达，但基于质量管道模型利用解耦分析却可以轻松完成。

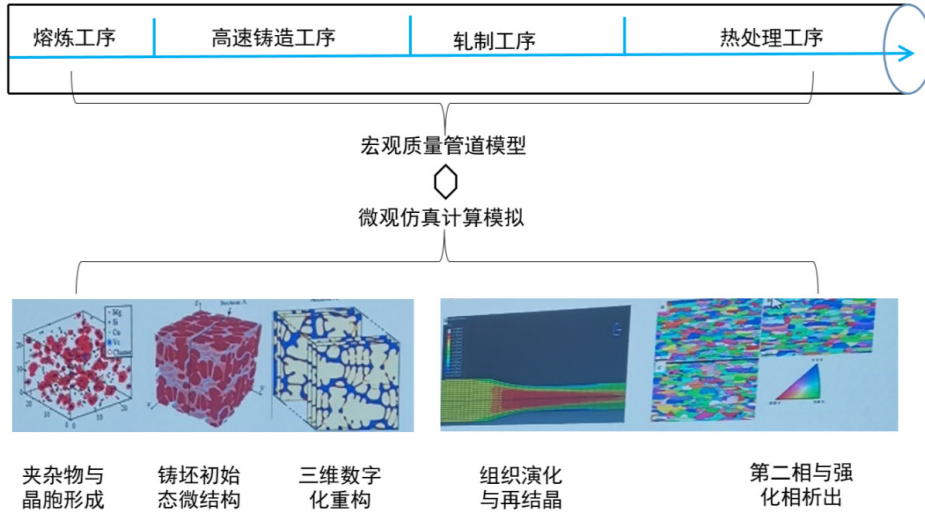


图 8 质量管道模型和仿真计算模拟的映射关系

4.3 质量管道模型的应用

针对每个案例均可按照上述实施方案进行细化以获得具有实用价值的质量管道模型。如下为某连续型制造流程的质量管道模型案例。

图 9 中，下部为物理意义上的工业流程，上部为逻辑意义上的质量管道。按照上 4.1 小节的步骤逐一进行定义，按照 4.2 小节进行逐个描述、建模、求解，最终可形成质量

管道模型并实时控制。

又例如，针对某钢铁产线，为获得强度在 198.8~218.8Mpa 之间的质量指标，在管道模型构建中涉及到 500 多个因变量。随后基于统计分析和机器学习，按照敏感度进行筛选，选取了 59 个因变量，参见图 10。将这些变量控制在管道模型所建议的范围内，一段时间内强度指标合格率为 99.7%，达到 3σ 质量控制水平。

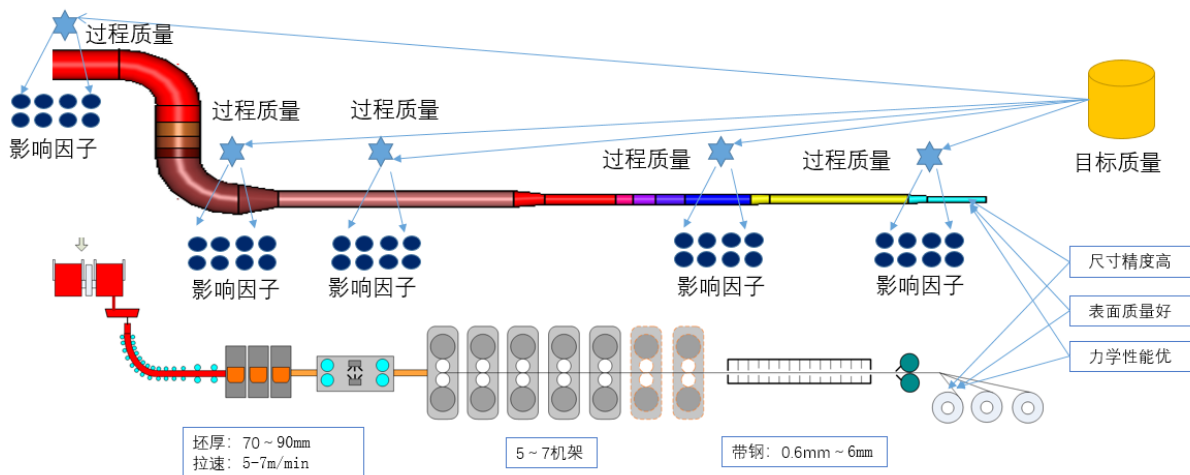


图 9 某连续型制造流程质量管道模型案例

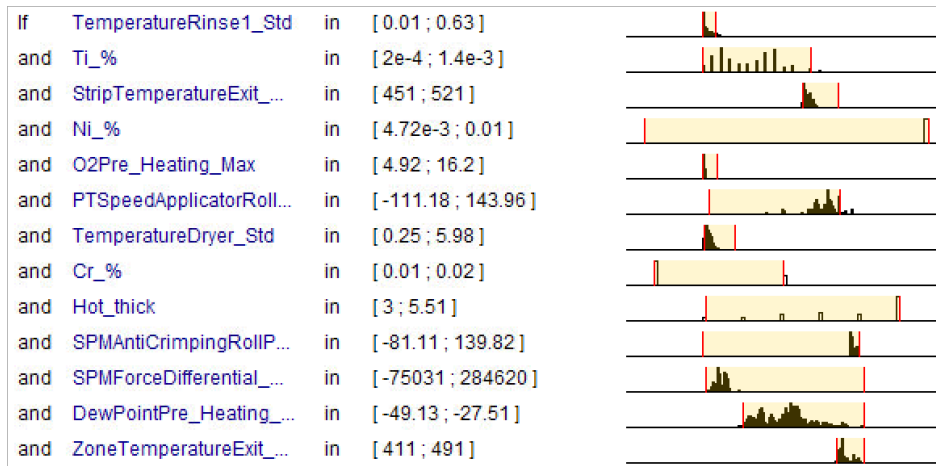


图 10 影响因子优化取值窗口

5 展望

具有全域动态特性的质量管道模型既适合连续型工业流程的质量提升，也适合离散型工业流程的质量管控。其可以发现现有产品的质量稳定基因和质量波动的系统性缺陷，改善生产过程的稳定性和产品质量的一致性，从而提高产品的批次合格率和综合成材率，也可以为新产品开发提供孪生仿真模拟，实现新产品虚拟开发，大大缩短产品开发周期，降低开发成本。随着大数据、大模型及深度 AI 智能分析技术和算力的提升，复杂系统中多目标多因子的实时在线分析也将逐步从理论研究走向工业应用，质量管道模型所追求的产品质量一致性也将得到大幅度提升。

参考文献

[1] 余永涛等，基于过程能力指数的电子元器件质量一致性综合评

价方法[J]，质量与可靠性，2018, No.2, P49~52, 56

- [2] 姚雄等，“信息孤岛”问题及PLM解决方案[J]，机械制造与自动化，2004, Vol33.No.4, P68~70+75
- [3] 武逸凡等，离散型特种制造业数字化转型建设路径探究 [J]，新技术新工艺, P2024(03):1-8
- [4] 胡婕等，基于全域信息融合和多维关系感知的命名实体识别模型[J]，计算机应用, P1-10
- [5] 田博涵等，电弧炉炼钢动态模型的建立与评价[J]，炼钢，2024, Vol.40, No.6, P23-27
- [6] 姚伯威，干法窑控制中的解耦方法与专家系统[J]，电子科技大学学报，1997(8), Vol.6 No.4, P409~413
- [7] 宋世哲等，柔性双层隔振系统振动能量解耦方法及应用[J]，西南交通大学学报，2023(04), Vol.58 No.2, P304~313