

1. 一种尤其在一精轧机列(3)内控制和/或调节一金属带(6)温度的方法, 其中, 为了确定调节信号将一额定温度变化过程与一实际温度变化过程进行比较, 以及, 在考虑辅助条件的情况下, 构成至少一个用于设备调节机构、尤其在所述精轧机列(3)内的目标函数。
5
2. 按照权利要求 1 所述的方法, 其特征为: 所述目标函数通过求解一个优化问题解出。
3. 按照权利要求 1 或 2 所述的方法, 其特征为: 在所述精轧机列(3)末端规定一个额定温度(T_2^d)。
10
4. 按照权利要求 1 至 3 中任一项所述的方法, 其特征为: 在所述精轧机列(3)内规定至少一个额定温度(T_0^d 、 T_1^d)。
5. 按照权利要求 1 至 4 中任一项所述的方法, 其特征为: 所述金属带(6)的实际温度变化过程借助至少一个模型(9 或 12)来确定。
6. 按照权利要求 5 所述的方法, 其特征为: 对所述模型(9)进行在线适配。
15
7. 按照权利要求 1 至 6 中任一项所述的方法, 其特征为: 确定金属带(6)上各带点(P_0 、 P_1 、 P_2 或 P_j)的温度变化过程。
8. 按照权利要求 1 至 7 中任一项所述的方法, 其特征为: 确定用于冷却剂流(8)的调节信号。
20
9. 按照权利要求 1 至 8 中任一项所述的方法, 其特征为: 确定用于物料流(16)的调节信号。
10. 按照权利要求 1 至 9 中任一项所述的方法, 其特征为: 为了求解所述目标函数, 用线性的辅助条件在线求解一个优化问题。
11. 按照权利要求 10 所述的方法, 其特征为: 求解一个二次优化问题。
25
12. 按照权利要求 9 或 10 所述的方法, 其特征为: 所述优化问题借助一种有效集策略求解。
13. 按照权利要求 1 至 12 中任一项所述的方法, 其特征为: 通过利用辅助条件非线性优化来预先计算出一种能在线的轧制程序算法。
14. 一种用于实施按照上述任一项权利要求所述方法的计算机程序。
30
15. 一种借助按照权利要求 14 所述计算机程序编程的用于控制至少精

轧机列(3)的计算装置(13),其中,该计算装置(13)直接和/或间接地影响金属带(6)的温度。

16. 按照权利要求 15 所述的计算装置(13),其特征为:它有一个用于借助一个模型在线地确定金属带温度的模块(12)和一个用于调节金属带温度的模块(17)。

尤其在轧制金属热轧带材的精轧机列中
调节金属带温度的方法

5

本发明涉及一种尤其在轧制金属热轧带材的精轧机列中控制或调节例如钢或铝的金属带温度的方法。

US 6220067B1 介绍了一种方法，它调节在轧机机列出口侧金属带的温度，亦即最终轧制温度。用这种方法不能足够准确地影响在轧机机列内钢的相转变，这种相转变尤其在双相轧制时对于所轧制金属带的材料性质有重要意义。

所轧制的金属带的材料性质和金相组织由化学成分和尤其在轧制过程中的过程温度例如负荷分配和温度控制来决定。对于轧制温度，尤其最终轧制温度的调节机构，取决于设备类型和通常带速和中间机座冷却装置的工作模式。

本发明的目的是改进尤其在精轧机列中对金属带的温度控制和调节，避免先有技术中已知的缺点，以及尤其改善对上述调节机构的控制和调节。

本发明的目的通过一种控制和/或调节尤其在精轧机列中金属带温度的方法达到，其中，为了确定调节信号将一额定温度变化过程与一实际温度变化过程进行比较；以及在考虑辅助条件的情况下构成至少一个用于设备调节机构、尤其在精轧机列内的目标函数。

目标函数有利地通过求解优化问题解出。在这里以极有利的方式考虑技术性边界条件，尤其调节机构的调节极限，其中尤其保证用于调节机构改变的尽可能大的自由空间，使控制或调节所需的计算时间保持非常短。

有利地，在精轧机列末端规定一个额定温度。作为替代或补充方式，在精轧机列内规定至少一个额定温度。由此显著改善了对金属带的材料性质及其组织成分方面的控制或调节。

金属带实际温度变化过程有利地借助至少一种模型确定。因此，即使在对于控制或调节而言重要的地点，尤其在精轧机列内，不能测量实际带温时，仍可以改善对金属带温度的控制或调节。

有利地，对模型进行在线适配。以此方式可以考虑存在的设备漂移

(Anlagendrift), 以及可以确定尤其用于后续要轧制的那些金属带的切合实际的结果。

有利地确定金属带的各带点的温度变化过程。在这种情况下有利地追踪各带点的路径和优选地附加追踪其性质如温度。因此明显提高了控制或
5 调节的精度。

有利地, 确定用于冷却剂流的调节信号。

有利地, 确定用于物料流的调节信号。

为了求解目标函数, 有利地用线性的辅助条件在线地, 亦即尤其实时地求解优化问题。在这里, 调节极限尤其以等式或不等式辅助条件的形式
10 列出。在这里最优化的解有利地提供用于下一个调节周期的调节参数的值。由此提供了一种清晰、统一和与设备构型无关地构成的调节装置, 这种调节装置能可靠和快速地工作。

有利地求解二次优化问题。因此, 这种优化问题可以非常迅速地解出。

所述优化问题有利地借助有效集策略(Active-Set Strategie)求解。因此这
15 种优化问题可以特别有效地实时求解。

通过用辅助条件非线性优化来有利地预先计算一种能在线的轧制程序算法。因此, 轧制程序计算持续的时间极短。轧制程序计算提供尤其最佳地与在线工作的调节器调谐的设置(set-Up)值。因此调节器具有用于影响带温的足够的自由度。

按照本发明的控制或调节金属带温度的方法尤其也适用于轧制有厚度楔形(Dickenkeil)的带材, 这种厚度楔形例如在半连续轧制时使用于小于
20 1mm 的成品带厚度情况。在轧制有厚度楔形的带材时, 调节机构方面的附加辅助条件起作用。

在权利要求 13 至 15 中说明达到上述本发明目的的其他方案。它们相
25 应地具有针对按照本发明的方法已说明的优点。

由下面结合附图对本发明多种实施例的说明中给出本发明的其他优点和详情。作为范例其中:

图 1 表示一轧机的原理性结构;

图 2 示意表示精轧机列的模型预测式调节装置结构;

30 图 3 示意性表示模型预测式调节装置;

图 4 表示冷却剂流的调节水平或预测水平; 以及

图 5 表示物料流的调节水平或预测水平。

图 1 表示生产金属带 6 的设备，它包括一粗轧机列 2、一精轧机列 3 和一冷却段 4。这种设备典型地用于炼钢工业和金属工业。在冷却段 4 后面设一卷取机 5。由卷取机 5 卷取在轧机机列 2 和 3 中优选地热轧制成和在冷却段 4 中冷却的金属带 6。轧机机列 2 或 3 上游设金属带源 1，它例如设计为在其中加热金属板坯的炉子，或设计为在其中制造金属带 6 的连续铸锭装置。金属带 6 例如由铝或钢制成。

所述设备和尤其轧机机列 2、3 以及冷却段 4 及至少一个卷取机 5 借助一种由一计算装置 13 实施的控制方法来控制。为此，该计算装置 13 与生产钢或铝的设备的各组成部分 1 至 5 在控制技术上相连接。计算装置 13 可通过一个设计为计算机程序的控制程序进行编程，它基于此程序实施按照本发明的用于控制或调节带材 6 温度的方法。

按照图 1，金属带或板坯 6 离开金属带源 1 后首先在粗轧机列 2 内轧制到对应于精轧机列 3 的进口厚度。然后，金属带 6 在精轧机列内部借助轧机机座 3' 轧制到其最终厚度。接下来的冷却段 4 将金属带 6 冷却到规定的卷取温度。

为了保证金属带 6 具有期望的机械特性，精轧机列 3 和冷却段 4 必须遵守恰当的温度变化过程。因为在轧制过程中几乎不进行被轧金属带 6 的展宽，所以通过轧制过程增加带的长度以及在物料流保持不变的前提条件下也提高了带速。

图 2 详细地表示出精轧机列 3 以及其轧机机座 3'，并且说明了对精轧机列 3 按照本发明的模型预测性调节 (Modell-prädiktive Regelung)。

在精轧机列 3 内部是热金属带 6 与轧机机座 3' 的比较冷的工作辊的接触时间，以及中间机座冷却装置 7 是对金属带 6 的温度最重要的影响因素。因此，在精轧机列内控制或调节带温度的调节机构相应地是物料流 16 和冷却剂流 8。在图 2 中为了更简要地说明实施例，作为范例标出金属带 6 的两个带点 P_0 、 P_1 。

精轧机列 3 以其始端 X_A 及其末端 X_E 为界。在精轧机列 3 内的设备动力学有关于温度的特征在于比较长的滞后时间 105。例如，改变冷却剂流 8 对在精轧机列 3 始端 X_A 处温度的影响，一直到受此改变影响的为首的带点 P_0 、 P_1 离开最后一个轧机机座 3' 时才能观察到。这就是按照本发明将带温调

节装置 17 设计为模型预测性调节装置的原因。

用于控制炼钢工业的设备以及尤其用于控制精轧机列 3 的计算装置 13 具有一个带温模型 12 和一个带温调节装置 17。带温模型 12 和带温调节装置 17 在这里优选周期性地按调节步骤工作。

- 5 带温调节装置 17 有一个调节器 14, 它控制或调节中间机座冷却装置 7 的冷却剂流 8 以及金属带 6 的物料流 16, 尤其是其速度 V 。在调节器 14 上游设一线性化的模型 15, 它借助二次程序控制工作。

- 用于在线确定带温的模块 12 具有一个用于确定实时带温的在线监测器 9, 一个用于在线适配模块 10 以及优选地一个用于预报所选出的带点 P_0 、 P_1 的温度 $T_{k=0,1}^j$ 的模块 11。

- 15 在线监测器 9 服务于一个用于确定在精轧机列 3 内部金属带 6 的实时带温和优选地相状态的模型。在线确定带温的模块 12 因而有一个在图中没有详细表示的带温模型。该带温模型可以例如预告带点 P_0 、 P_1 的最终温度, 亦即尤其在位置 X_E 处的带点温度 P_0 、 P_1 。由此出发建立一个线性化的模型 15, 它在给定冷却剂流 8 的改变和/或给定物料流 16 的改变时确定精轧机列 3 工作点的带温。

- 20 通过线性化模型 15 出口二次偏差的最小化, 确定对于冷却剂流 8 或物料流 16 的新修正值, 以及在确定时考虑优选地在精轧机列内部给定的带中间温度额定值或在精轧机列 3 内金属带 6 给定的最终温度额定值。通过带温模型的线性化得到一个二次编程问题, 这一问题对于在线控制带温可以足够快地解出。

- 在线监测器 9 的任务是确定精轧机列 3 的金属带 6 的实时状态, 亦即尤其是其所有为控制或调节所需的中间温度。在线监测器 9 出口处所涉及的数据 102 优选地还包含实时模型修正。

- 25 在精轧机列中实际测得的金属带数据 101 以及尤其温度, 在有些情况下并不始终存在和通常只存在于少量规定的地点, 部分只存在于地点 X_A 和 X_E 。在线适配模块 10 利用由在线监测器 9 计算的数据 102, 尤其由在线监测器 9 确定的温度, 以及优选测量出的温度 101。

- 30 借助在线适配模块 10 确定修正系数, 它们尤其在在线监测器 9 中用于修正模型误差。在这里优选地将实际测量的温度 101 与计算出的温度 102 作比较。在线适配模块 10 不仅与在线监测器 9 而且与用于预告被选出带点

温度的模块 11 连接。

在用于预告带温的模块 11 的入口侧优选地附上来自在线适配模块 10 出口侧的数据。模块 11 可以进一步处理由在线监测器 9 确定的数据。由模块 11 算出的带温进一步传给带温调节装置 17。用于预告带温的模块 11 还使用在线确定带温的模块 12 的带温模型。

带温调节装置 17 或线性化模型 15 的入口参数是由带温模型确定的实际温度变化过程以及一预定的额定温度变化过程。该额定温度变化过程根据设备类型、运行模式、金属带 6 具体的订货要求和期望的特性规定的。

带温调节装置 17 使用由带温模型 12 计算出的入口数据 103。在这里可以特别灵活地使用控制装置规定值，因为在线监测器 9 可以甚至在不存在任何相应的测量值时，确定在精轧机列 3 内部金属带 6 的任何中间温度。

图 3 示意性表示出对于模型预测性调节而言为重要的问题，如那些例如当应在铁素体相态区内轧制金属时出现的问题。除了在精轧机列 3 末端 X_E 处的温度额定规定值 T_2^d 外，人们优选地使用另一些在精轧机列 3 内部温度额定值 T_0^d 、 T_1^d 。若例如应在奥氏体区域实施精轧机列 3 的两个在先的轧机机座 3' 的轧制过程，但在铁素体区域实施其余的轧制过程，亦即设在下游的那些轧机机座的轧制过程，则需要至少三个如在图 3 中表示的额定温度 T_0^d 、 T_1^d 、 T_2^d 。

在第二个轧机机座后的第一个额定温度 T_0^d 应保证在前面的两个轧机机座内轧制过程的温度处于这些相态区域之间的过渡温度之上。第二个温度额定值 T_1^d 应保证在精轧机列 3 的第三个轧机机座前的相变。还应尽可能遵守在精轧机列 3 末端 X_E 处的最终温度 T_2^d 。

需要预告的温度 $T_{k=0,1,2}^d$ 由用于预告带温的模块 11 借助一个优选地用于多个带点 P_0 、 P_1 、 P_2 的模型提供。在这里，带温调节装置 17 也可以对例如由炉子自动化引起的突然的温度波动作出反应。但优选地这通过改变冷却剂流 8 来实现，而不是通过改变带速 V 或物料流 16。突然的温度波动可例如源自于金属带 6 的局部不平度或折弯。

例如可通过一个发生在精轧机列 3 之前的在图中没有进一步表示的辊道引起的长期性温度变动，优选地通过金属带 6 的加速度 a ，亦即通过改变物料流 16 加以补偿。相应地调整了预告水平 106。

为了解决图 3 中表示的问题，优选地借助线性化模型 15 作为最小化问

题求解。为此优选地改变与物料流 16 和冷却剂流 8 相应的控制变量，它们使预告的针对带点 P_0 、 P_1 、 P_2 的温度 $T_{k=0,1,2}^j$ 相对于额定温度 $T_{k=0,1,2}^d$ 而言重要的二次误差最小化(见公式 I)。如在各个阀 7 处造成冷却剂流 Q_0 、 Q_1 或 Q_2 (概括地用 8 表示)，则使它离优选地设计为冷却剂阀或水阀 7 的中间机座冷却装置 7 的技术极限有尽可能远的距离。因此，中间机座冷却装置 7 获得最大可能的间隙，以便今后，亦即在随后的调节步骤中，可以对突然的温度波动作出反应。

必须顾及中间机座冷却装置 7 遵循的调节极限：一个阀 7 的冷却剂流 Q_0 、 Q_1 、 Q_2 只能通过速度改变，此速度与各自的阀 7 的动力对应以及不允许处于技术条件的最小值 Q_i^{\max} 或最大值 Q_i^{\min} 之外，物料流 16 也必须处于技术极限值内部，这些技术极限值尤其通过在离开精轧机列 3 时金属带的最大或最小速度来确定。有关于物料流还必须注意金属带 6 的加速度 a 的下限和上限。

通过模块 12，在借助带温模型的情况下，计算针对给定的冷却剂流 8 和物料流 16 以及针对一个为相应的调节步骤给定的适配系数的预告温度 T_k^j 。对于其他的预告，优选地冻结适配系数。为了计算用于控制紧接着的那些控制步骤的调节参数，将当前的冷却剂流 8 和当前的物料流 16 规定作为工作点。然后可将新的预告温度 \tilde{T}_k^j 表达为 $T_k^j + \Delta T_k^j$ ，其中适用下公式：

$$(I) \quad \Delta T_k^j = \Delta T_k^j(\Delta u_{i_j}^j, \Delta u_{i_{j-1}}^j, \dots, \Delta u_{i_{j_0}}^j, \Delta a, \Delta s)$$

最后，优选地在考虑到前面称为调节极限的情况下求解下面称为目标函数，其中变量 $\Delta u_{i_j}^j$ 、 Δa 和 Δs ，结合图 5 和 6 对这些变量还要详细说明：

$$(II) \quad \sum_{j=0}^{J-1} \sum_{k=0}^{K-1} \frac{w_k^j}{2} |T_k^j + \Delta T_k^j - T_k^d|^2 + \frac{\delta}{2} \sum_{j=0}^{J-1} \sum_{i=i_j}^{i_{k-1,j}} \left| Q_i^{\text{act}} + \Delta u_i^j - \frac{Q_i^{\max} + Q_i^{\min}}{2} \right|^2 + \frac{\alpha}{2} \sum_{j=0}^{J-1} \sum_{i=i_j}^{i_{K-1,j}} \left| \frac{\Delta u_i^j}{\Delta t} \right|^2 + \frac{\beta}{2} \left| \frac{\Delta a}{\Delta t} \right|^2 + \frac{\gamma}{2} \left| \frac{\Delta s}{\Delta t} \right|^2$$

如图 3 所示，对直至带点 P_0 到达最终温度额定值 T_2^d 的这样长远的未来带温作出预告。通常此温度额定值处于精轧机列 3 的末端 X_E 处，在那里

优选地用一个在图中未进一步表示的高温计来测量金属带 6 的实际温度。这种模型预测性的预告始终针对各个调节步骤 Δt 实施。

图 4 和 5 说明冷却剂流(见图 4)和物料流(见图 5)不同的调节水平。在两个图中横坐标表示时间轴。

- 5 物料流 16 优选地通过带速 V 影响, 在这里调节水平优选地限于单个调节步骤。接着, 假定偏移 Δs 和加速度变化 Δa 优选地为常数(见图 5)。反之, 突然的温度波动优选地通过冷却剂流 Q_j 影响。为此, 使用优选地针对带点 P_j 的温度预告值, 沿物料流方向看此带点位于相应的中间机座冷却装置 7 之前, 所以带点 P_j 要经过相应的阀 7 的滞后时间 105 并加上计算时间后才
- 10 到达相应的中间机座冷却装置。

尽管最小化(II)在考虑直至控制水平末端所有未来的冷却剂流修正 Δu_i^j (见图 4)的情况下进行, 但冷却剂流的实时化 Q_{ij}^{act} 只是借助第一次修正 Δu_{ij}^j 完成。为减小可能的振动, 用于 Δu_{ij}^j 、 Δa 和 Δs 的实时化值必要时与张弛系数(Relaxationsfaktor) $0 < x \leq 1$ 相乘。

- 15 方程式(II)在考虑尤其前面已提及的相应的调节极限的情况下的最小化, 意味着求解一个非线性程序设计问题, 这种问题通常计算工作量极大, 以及为了能在线求解必须加速。所有的调节步骤 Δt 按本发明可例如全部用 200 毫秒完成。

- 20 为了达到加速, 人们优选地类似于高斯-牛顿法进行处理, 以及使预告的有关工作点的温度改变线性化:

$$(III) \quad \Delta T_k^j \approx \sum_{i=i_j}^{i_{kj}} S_{ki}^j \Delta u_i^j + \tilde{S}_k^j \Delta a + \bar{S}_k^j \Delta s$$

灵敏度 S_{ki}^j 、 \tilde{S}_k^j 和 \bar{S}_k^j 通过有限差分法近似如下:

25

$$(IV) \quad S_{k,i_j}^j = \frac{T_k^j \Big|_{Q_{ij}^{act} + \Delta} - T_k^j \Big|_{Q_{ij}^{act}}}{\Delta}$$

$$(V) \quad \tilde{S}_k^j = \frac{T_k^0 \Big|_{a^{act} + \Delta} - T_k^0 \Big|_{a^{act}}}{\Delta}$$

$$(VI) \quad \bar{S}_k^j = \frac{T_k^0 \Big|_{h_{exit}^{act} + \Delta} - T_k^0 \Big|_{v_{exit}^{act}}}{\Delta}$$

为了确定灵敏度 S_{ki}^j 、 \tilde{S}_k^j 或 \bar{S}_k^j ，除了预告温度 T_k^j 外必须再次求解带温
5 模型。按照高斯-牛顿法，将线性化(III)结果代入目标函数(II)的二次误差
内。从而得出下列近似值：

$$(VII) \quad \begin{aligned} |T_k^j + \Delta T_k^j - T_k^d|^2 &\approx |T_k^j - T_k^d|^2 + 2(T_k^j - T_k^d) \sum_{i=i_j}^{i_{kj}} S_{ki}^j \Delta u_i^j \\ &+ 2(T_k^j - T_k^d) \tilde{S}_k^j \Delta a + 2(T_k^j - T_k^d) \bar{S}_k^j \Delta s \\ &+ 2\tilde{S}_k^j \Delta a \sum_{i=i_j}^{i_{kj}} S_{ki}^j \Delta u_i^j + 2\bar{S}_k^j \Delta s \sum_{i=i_j}^{i_{kj}} S_{ki}^j \Delta u_i^j + 2\tilde{S}_k^j \bar{S}_k^j \Delta s \Delta a \\ &+ \sum_{i=i_j}^{i_{kj}} \sum_{l=l_j}^{l_{kj}} S_{ki}^j S_{li}^j \Delta u_i^j \Delta u_l^j + |\tilde{S}_k^j|^2 |\Delta a|^2 + |\bar{S}_k^j|^2 |\Delta s|^2 \end{aligned}$$

现在将(VII) 右侧代入(II)，从而以下列形式表示二次程序设计问题：

$$(VIII) \quad \min = f + \underline{g}' \underline{\chi} + \frac{1}{2} \underline{\chi}' \underline{H} \underline{\chi}$$

$$(IX) \quad \underline{b}^{lower} \leq \underline{\chi} \leq \underline{b}^{upper}$$

其中 f 是一个标量， H 是一个对称的、是正的半确定的 $N \times N$ 矩阵，当
20 正的参数 α 、 β 和 γ 选择得足够大时 H 肯定是正的。其余的变量是 n 维的列
矢量。不等式(IX)应理解为分量形式。

为了求解二次优化问题，优选地采用有效集策略。

按照本发明特别有利地计算用于轧制速度 V 和/或用于中间机座冷却装
置(7)水平台(Wasserrampen)或冷却剂平台(Kuhlmittelrampen)的尤其运行图，
25 并以特别高的精度遵守。

除了上述和尤其前言讨论过的本发明的优点外，按照本发明在控制和/
或调节金属带 6 的温度时，首次以简单的方式也可以在优先权的意义上实
现对有关控制而言重要的规定值进行不同权衡。

按本发明提供了一种柔性的控制和调节方法，它也可以用于不同的设

备组成部分，例如尤其粗轧机列 2 或者还有冷却段 4。本发明可以重叠使用于多于一个设备组成部分 1 至 5。特别有利的是本发明在双相轧制中和在轧制半连续板坯期间驱动厚度楔形时使用。

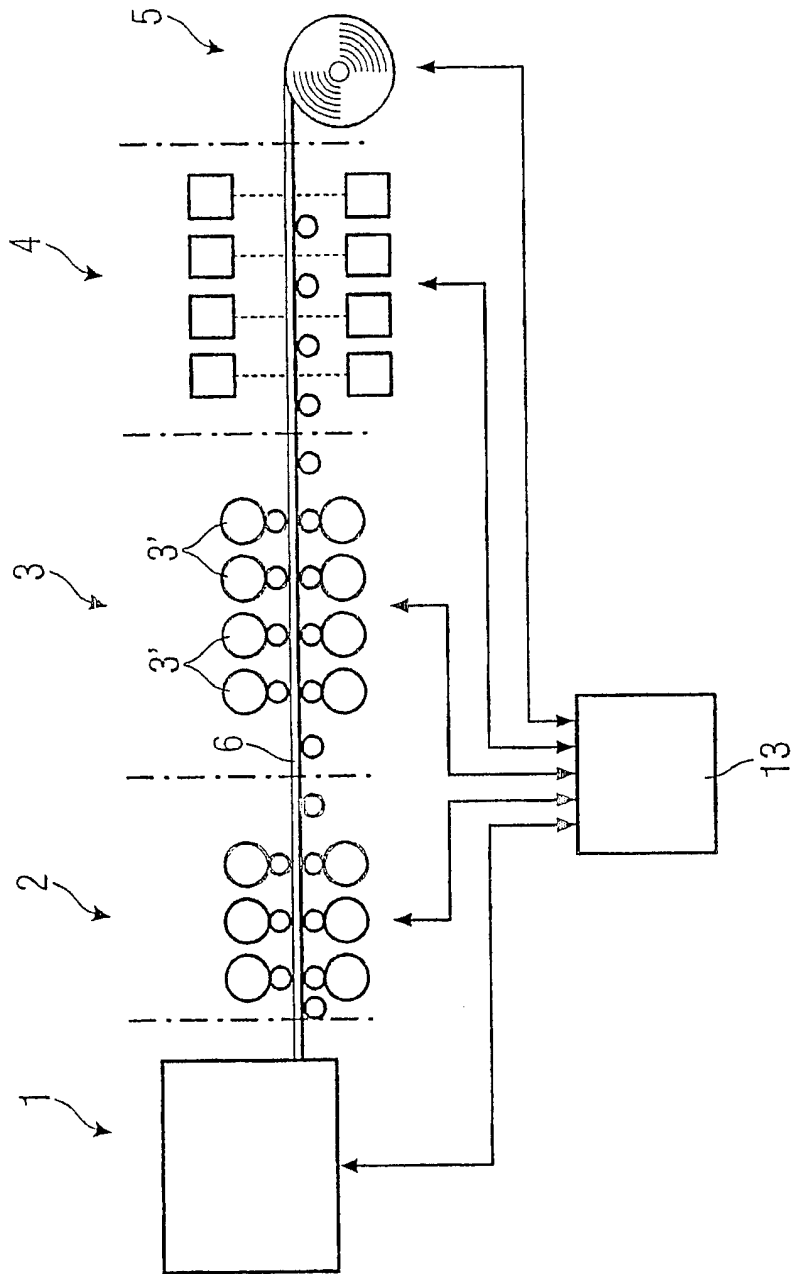


图 1

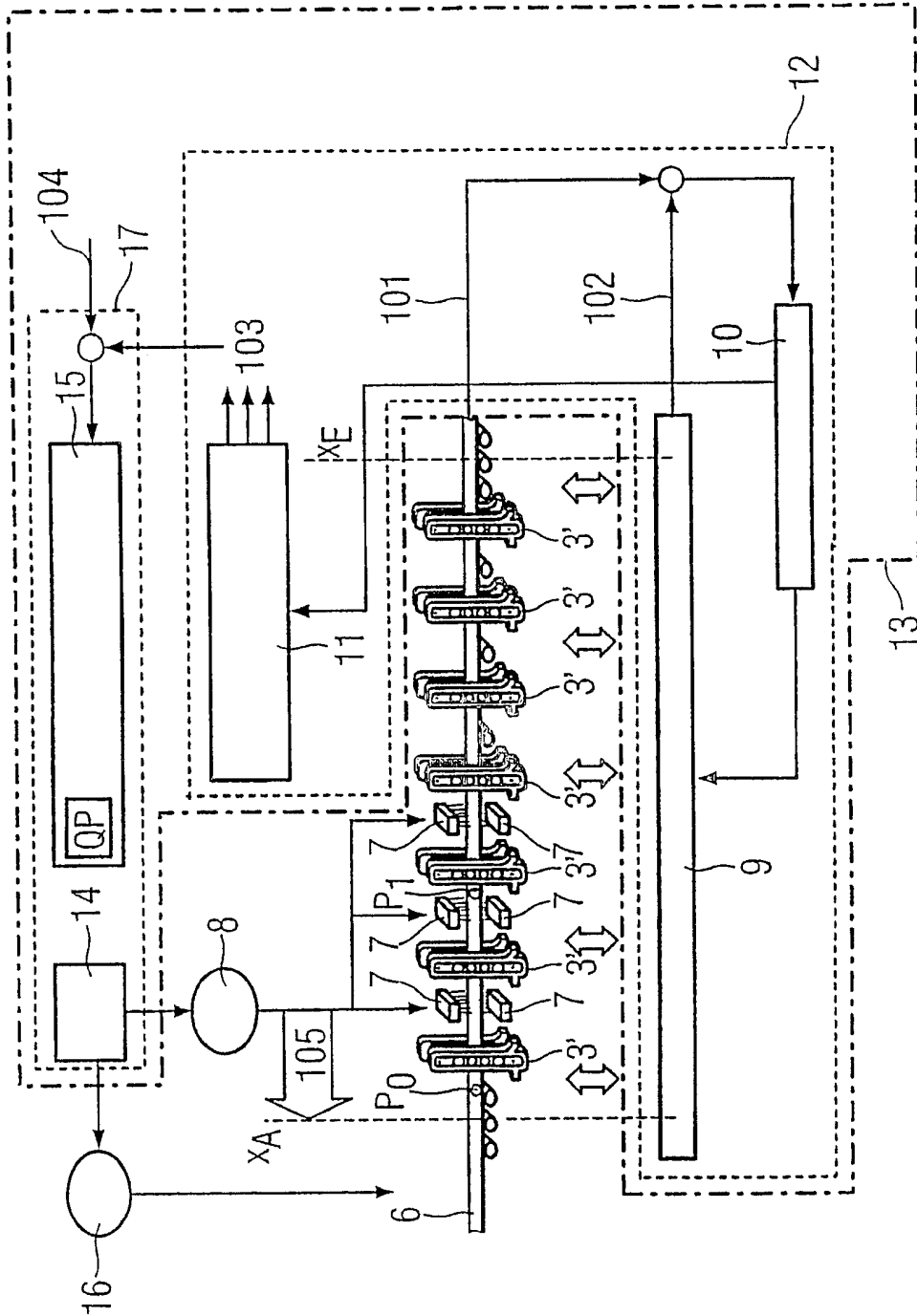


图 2

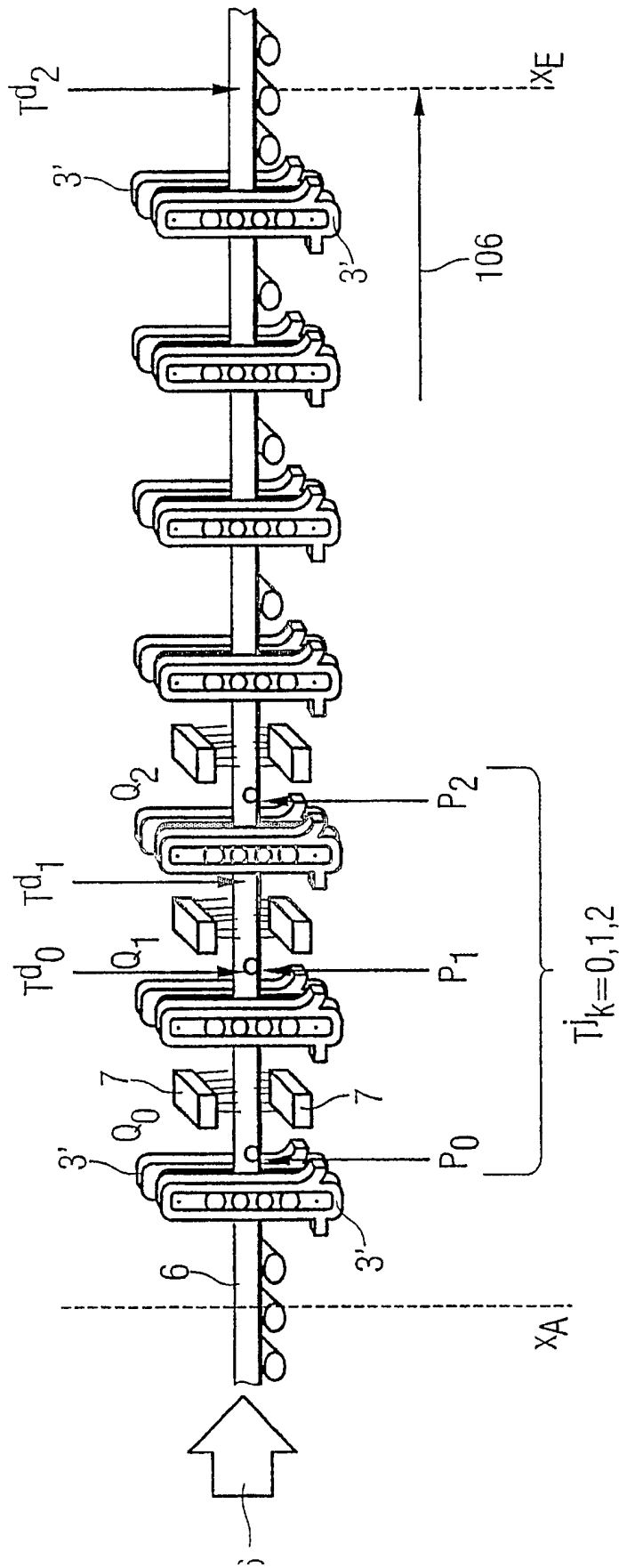


图 3

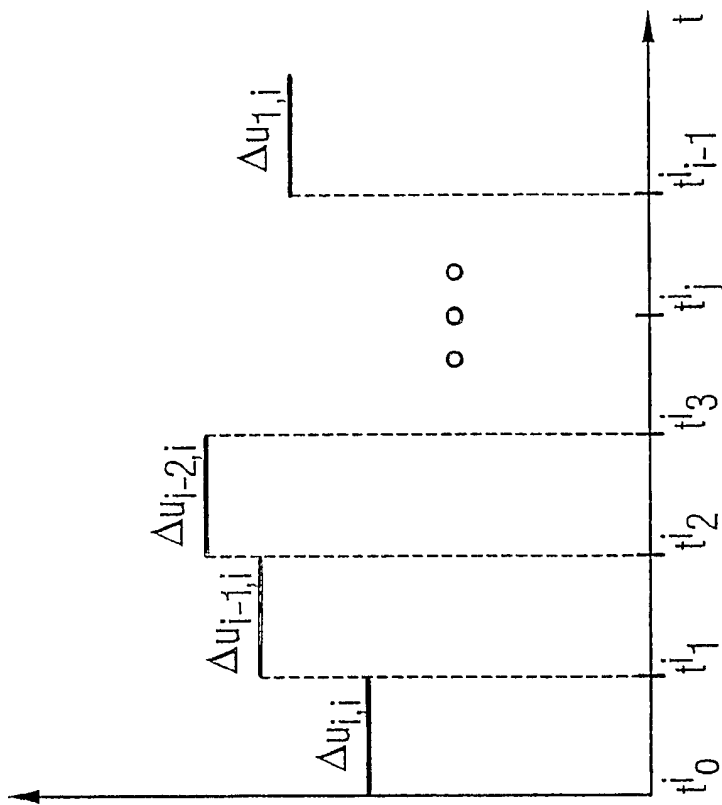


图 4

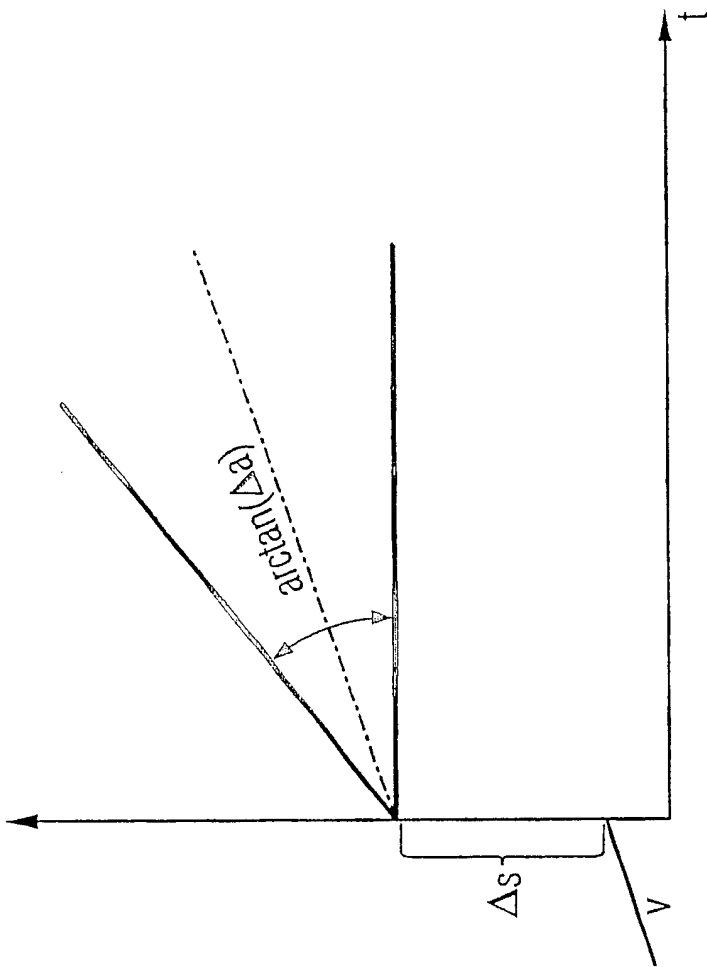


图 5