



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 114008422 A

(43) 申请公布日 2022. 02. 01

(21) 申请号 202080047820.X

(22) 申请日 2020.06.30

(30) 优先权数据

62/869,208 2019.07.01 US

(85) PCT国际申请进入国家阶段日

2021.12.29

(86) PCT国际申请的申请数据

PCT/US2020/040266 2020.06.30

(87) PCT国际申请的公布数据

W02021/003140 EN 2021.01.07

(71) 申请人 保热感应公司

地址 美国弗吉尼亚州

(72) 发明人 A·R·罗加尼扎

(74) 专利代理机构 中国专利代理(香港)有限公司 72001

代理人 毕铮 周学斌

(51) Int.Cl.

G01K 7/00 (2006.01)

G01N 25/18 (2006.01)

A61B 5/01 (2006.01)

G01K 13/02 (2021.01)

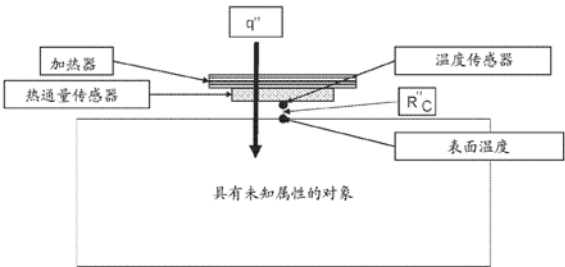
权利要求书10页 说明书52页 附图36页

(54) 发明名称

用于非侵入式热询问的装置、系统和方法

(57) 摘要

各种非侵入式传感器适于放置在具有带有内部区域的体积的对象的表面上。对象的内部区域具有由相应的内部参数和内部温度分布指示的内部属性,所述内部温度分布是内部参数和表面热信号的函数。每个非侵入式传感器包括:具有一个或多个热通量传感器输出端子的热通量传感器,用于提供对象表面的所测热传递信号;以及具有一个或多个温度传感器输出端子的温度传感器,用于提供对象表面的所测温度信号。包括一个或多个传感器的系统执行对象的非侵入式感测,包括准确且快速地确定对象内部区域的内部温度分布以及对象的一个或多个其他内部属性。



1. 一种用于对具有带有表面和内部区域的体积的对象进行非侵入式感测的系统, 包括:

非侵入式传感器, 包括:

具有一个或多个热通量传感器输出端子的热通量传感器;

具有一个或多个温度传感器输出端子的温度传感器,

其中非侵入式传感器适于放置在对象表面上或附近, 其中对象的内部区域具有由相应的内部参数和内部温度分布指示的内部属性,

耦合到一个或多个热通量传感器输出端子和一个或多个温度传感器输出端子的控制电路, 用于:

在一个或多个指定时间从温度传感器接收所测温度信号;

在一个或多个指定时间从热通量传感器接收所测热通量信号;

在一个或多个指定时间确定每个内部参数的值;

基于所测温度信号、所测热通量信号和内部参数值, 在一个或多个指定时间确定对象内部区域的内部温度分布; 以及

生成指示在一个或多个指定时间对象内部区域的内部温度分布的信息。

2. 根据权利要求1所述的系统, 其中控制电路被配置为基于所测热通量信号确定在表面离开或进入对象的热传递的测量结果。

3. 根据权利要求1所述的系统, 其中控制电路被配置为生成指示在一个或多个指定时间为内部参数确定的一个或多个值的信息。

4. 根据权利要求1所述的系统, 其中控制电路被配置为基于所测温度信号、所测热通量信号、内部参数的值以及与温度传感器和对象表面之间的估计热接触电阻相关联的一个或多个效应, 来在一个或多个指定时间确定对象的内部区域的内部温度分布。

5. 根据权利要求4所述的系统, 其中控制电路被配置为在距指定时间不到1秒的时间内生成信息, 所述信息被生成来指示在该指定时间对象内部区域的内部温度分布。

6. 根据权利要求3所述的系统, 其中控制电路被配置为在距指定时间不到1秒的时间内生成信息, 所述信息被生成来指示在该指定时间为内部参数确定的一个或多个值。

7. 根据权利要求1所述的系统, 其中控制电路被配置为在指定时间使用一个或多个内部参数的预定值。

8. 根据权利要求1所述的系统, 其中控制电路被配置为在指定时间使用一个或多个内部参数的估计值。

9. 根据权利要求1所述的系统, 其中控制电路被配置为:

基于所测温度信号、所测热通量信号和温度传感器与对象表面之间的估计热接触电阻, 确定一个或多个内部参数的估计值。

10. 根据权利要求9所述的系统, 其中控制电路被配置为:

基于所测温度信号、所测热通量信号、一个或多个估计的内部参数值、当存在一个或多个剩余内部参数值时一个或多个剩余内部参数值、以及与估计的热接触电阻相关联的一个或多个效应, 在一个或多个指定时间确定所计算的传感器温度; 以及

将所计算的传感器温度与基于所测温度信号的所测温度进行比较, 以确定差异。

11. 根据权利要求10所述的系统, 其中控制电路被配置为:

基于所述差异调整一个或多个内部参数和估计的热接触电阻的值,以产生内部参数和热接触电阻的更新值;以及

基于所测温度信号、所测热通量信号、以及内部参数和估计的热接触电阻的更新值,确定对象内部区域的内部温度分布。

12. 根据权利要求10所述的系统,其中控制电路被配置为调整一个或多个内部参数和估计的热接触电阻的值,以减小所述差异,并且

其中当所述差异小于阈值量或以其他方式确定为最小时,内部参数的值和热接触电阻的值处于最佳更新值,并且控制电路被配置为生成指示内部参数和热接触电阻的最佳更新值的信息。

13. 根据权利要求10所述的系统,其中控制电路被配置为使用一种或多种优化技术调整一个或多个内部参数和热接触电阻的值,以减小所述差异。

14. 根据权利要求10所述的系统,其中控制电路被配置为使用一种或多种机器学习技术调整一个或多个内部参数和热接触电阻的值,以减小所述差异。

15. 根据权利要求9所述的系统,其中控制电路被配置为独立于内部参数的值来确定热接触电阻的估计值。

16. 根据权利要求9所述的系统,其中控制电路被配置为基于内部参数的值确定热接触电阻的估计值。

17. 根据权利要求9所述的系统,其中控制电路被配置为基于对象的总稳态热阻确定热接触电阻的估计值。

18. 根据权利要求10所述的系统,其中控制电路被配置为实时调整一个或多个内部参数和估计的热接触电阻的值,以减小所述差异。

19. 根据权利要求1所述的系统,其中控制电路被配置为使用一种或多种机器学习技术,基于所测温度信号和所测热通量信号,在一个或多个指定时间确定对象内部区域的内部温度分布。

20. 根据权利要求1所述的系统,其中控制电路被配置为使用基于一个或多个表面热通量边界条件的对象的一个或多个热数学模型,在一个或多个指定时间确定对象内部区域的内部温度分布。

21. 根据权利要求20所述的系统,其中热数学模型具有瞬态温度解,所述瞬态温度解定义为初始温度分布、热通量、时间、空间和内部参数的函数。

22. 根据权利要求20所述的系统,其中热数学模型包括一个或多个稳态条件。

23. 根据权利要求21所述的系统,其中初始温度分布基于稳态温度轮廓。

24. 根据权利要求1所述的系统,其中内部参数包括来自列表中的一个或多个参数,所述列表包括:

R'' : 稳态热阻,

x : 距表面的深度,

R''_{Total} : 总稳态热阻,

U : 总热传递系数,

k :热传导性,

ρ :密度,

C :热容,

ρC :体积热容,

$\sqrt{k\rho C}$:热惯性,

$\alpha = \frac{k}{\rho C}$:热扩散率,

h :对流热传递系数,

$\dot{v}$:流速率,

δ :壁厚,

τ :时间常数,以及

W :血液灌注。

25. 根据权利要求1所述的系统,其中非侵入式传感器包括热绝缘体,以减小所测信号噪声。

26. 根据权利要求1所述的系统,其中非侵入式传感器包括热绝缘层体,以控制通过非侵入式传感器发生的热传递的量。

27. 根据权利要求1所述的系统,其中温度传感器是薄膜热电偶、薄温度传感器、电阻温度传感器或光纤温度传感器。

28. 根据权利要求1所述的系统,其中热通量传感器基于差分热电堆技术。

29. 根据权利要求1所述的系统,其中热通量传感器基于薄膜技术。

30. 根据权利要求1所述的系统,其中热通量传感器是薄热通量传感器。

31. 根据权利要求1所述的系统,其中热通量传感器是柔性热通量传感器。

32. 根据权利要求1所述的系统,其中热通量传感器基于一个或多个热电设备。

33. 根据权利要求1所述的系统,还包括用于加热或冷却非侵入式传感器的一个或多个外部热设备。

34. 根据权利要求1所述的系统,其中控制电路控制用于加热或冷却非侵入式传感器的一个或多个外部热设备。

35. 根据权利要求1所述的系统,其中控制电路控制用于加热或冷却非侵入式传感器的一个或多个外部热设备,以维持所测热通量信号和/或温度信号。

36. 根据权利要求1所述的系统,其中温度传感器位于热通量传感器感测区域上或附近。

37. 根据权利要求1所述的系统,其中温度传感器在对象和热通量传感器之间。

38. 根据权利要求1所述的系统,其中热通量传感器在对象和温度传感器之间。

39. 一种用于对具有带有表面和内部区域的体积的对象进行非侵入式感测的系统,包括:

非侵入式传感器,包括:

具有一个或多个热通量传感器输出端子的热通量传感器;

具有一个或多个温度传感器输出端子的温度传感器,

其中非侵入式传感器适于放置在对象表面上或附近,其中对象的内部区域具有由相应的内部参数和内部温度分布指示的内部属性,

耦合到一个或多个热通量传感器输出端子和一个或多个温度传感器输出端子的控制电路,用于:

在一个或多个指定时间从温度传感器接收所测温度信号;

在一个或多个指定时间从热通量传感器接收所测热通量信号;

基于所测温度信号和所测热通量信号,在一个或多个指定时间确定一个或多个内部参数的估计值;以及

生成指示在一个或多个指定时间为内部参数确定的一个或多个估计值的信息。

40. 根据权利要求39所述的系统,其中控制电路被配置为基于所测热通量信号确定在表面离开或进入对象的热传递的测量结果。

41. 根据权利要求39所述的系统,其中控制电路被配置为包括与温度传感器和对象表面之间的估计热接触电阻相关的一个或多个效应。

42. 根据权利要求39所述的系统,其中控制电路被配置为:

基于所测温度信号、所测热通量信号、温度传感器和对象表面之间的估计热接触电阻、以及在一个或多个指定时间为对象的内部区域的一个或多个内部属性确定的内部属性值,在一个或多个指定时间确定一个或多个内部参数的估计值;以及

生成指示为内部参数确定的至少一个估计值的信息。

43. 根据权利要求39所述的系统,其中控制电路被配置为在距指定时间不到1秒的时间内生成信息,所述信息被生成来指示在该指定时间为内部参数确定的一个或多个估计值。

44. 根据权利要求42所述的系统,其中控制电路被配置为在距指定时间不到1秒的时间内生成信息,所述信息被生成来指示在该指定时间为内部参数确定的一个或多个估计值。

45. 根据权利要求42所述的系统,其中控制电路被配置为使用一个或多个内部属性的预定值。

46. 根据权利要求42所述的系统,其中控制电路被配置为使用一个或多个内部属性的估计值。

47. 根据权利要求42所述的系统,其中控制电路被配置为:

基于所测温度信号、所测热通量信号、一个或多个估计的内部参数值、一个或多个内部属性值以及与估计的热接触电阻相关联的一个或多个效应,在一个或多个指定时间确定所计算的传感器温度;以及

将所计算的传感器温度与基于所测温度信号的所测温度进行比较,以确定差异。

48. 根据权利要求47所述的系统,其中控制电路被配置为基于所述差异调整一个或多个内部参数和估计的热接触电阻的值,以产生内部参数和热接触电阻的更新值。

49. 根据权利要求47所述的系统,其中控制电路被配置为调整一个或多个内部参数和估计的热接触电阻的值,以减小所述差异,并且

其中当所述差异小于阈值量或以其他方式确定为最小时,内部参数的值和热接触电阻

的值处于最佳更新值,并且控制电路被配置为生成指示内部参数和热接触电阻的最佳更新值的信息。

50.根据权利要求47所述的系统,其中控制电路被配置为使用一种或多种优化技术调整一个或多个内部参数和热接触电阻的值,以减小所述差异。

51.根据权利要求47所述的系统,其中控制电路被配置为使用一种或多种机器学习技术调整一个或多个内部参数和热接触电阻的值,以减小所述差异。

52.根据权利要求41所述的系统,其中控制电路被配置为独立于内部参数的值来确定热接触电阻的估计值。

53.根据权利要求41所述的系统,其中控制电路被配置为基于内部参数的值确定热接触电阻的估计值。

54.根据权利要求41所述的系统,其中控制电路被配置为基于对象的总稳态热阻确定估计的热接触电阻的值。

55.根据权利要求47所述的系统,其中控制电路被配置为实时调整一个或多个内部参数和估计的热接触电阻的值,以减小所述差异。

56.根据权利要求39所述的系统,其中控制电路被配置为使用一种或多种机器学习技术,基于所测温度信号和所测热通量信号,确定一个或多个内部参数的估计值。

57.根据权利要求37所述的系统,其中控制电路被配置为使用基于一个或多个表面热通量边界条件的对象的一个或多个热数学模型来确定一个或多个内部参数的估计值。

58.根据权利要求57所述的系统,其中热数学模型具有瞬态温度解,所述瞬态温度解定义为初始温度分布、热通量、时间、空间和内部参数的函数。

59.根据权利要求57所述的系统,其中热数学模型包括一个或多个稳态条件。

60.根据权利要求58所述的系统,其中初始温度分布基于稳态温度轮廓。

61.根据权利要求39所述的系统,其中内部参数包括来自列表中的一个或多个参数,所述列表包括:

R'' :稳态热阻,

x :距表面的深度,

R''_{Total} :总稳态热阻,

U :总热传递系数,

k :热传导性,

ρ :密度,

C :热容,

ρC :体积热容,

$\sqrt{k\rho C}$:热惯性,

$\alpha = \frac{k}{\rho c}$: 热扩散率,

h : 对流热传递系数,

$\dot{v}$: 流速率,

δ : 壁厚,

τ : 时间常数, 以及

W : 血液灌注。

62. 根据权利要求39所述的系统, 其中非侵入式传感器包括热绝缘体, 以减小所测信号噪声。

63. 根据权利要求39所述的系统, 其中非侵入式传感器包括热绝缘体, 以控制通过非侵入式传感器发生的热传递的量。

64. 根据权利要求39所述的系统, 其中温度传感器是薄膜热电偶、薄温度传感器、电阻温度传感器或光纤温度传感器。

65. 根据权利要求39所述的系统, 其中热通量传感器基于差分热电堆技术。

66. 根据权利要求39所述的系统, 其中热通量传感器基于薄膜技术。

67. 根据权利要求39所述的系统, 其中热通量传感器是薄热通量传感器。

68. 根据权利要求39所述的系统, 其中热通量传感器是柔性热通量传感器。

69. 根据权利要求39所述的系统, 其中热通量传感器基于一个或多个热电设备。

70. 根据权利要求39所述的系统, 还包括用于加热或冷却非侵入式传感器的一个或多个外部热设备。

71. 根据权利要求39所述的系统, 其中控制电路控制用于加热或冷却非侵入式传感器的一个或多个外部热设备。

72. 根据权利要求39所述的系统, 其中控制电路控制用于加热或冷却非侵入式传感器的一个或多个外部热设备, 以维持所测热通量信号和/或温度信号。

73. 根据权利要求39所述的系统, 其中温度传感器位于热通量传感器感测区域上或附近。

74. 根据权利要求39所述的系统, 其中温度传感器在对象和热通量传感器之间。

75. 根据权利要求39所述的系统, 其中热通量传感器在对象和温度传感器之间。

76. 一种用于对具有带有表面和内部区域的体积的对象进行非侵入式感测的系统, 包括:

第一非侵入式热通量传感器-温度传感器对;

第二非侵入式热通量传感器-温度传感器对;

第一和第二非侵入式热通量传感器-温度传感器对中的每一对包括:

具有一个或多个热通量传感器输出端子的热通量传感器;

具有一个或多个温度传感器输出端子的温度传感器,

其中第一和第二非侵入式热通量传感器-温度传感器对适于放置在对象表面上或附近的
不同位置, 并且其中对象的内部区域具有由相应的内部参数和内部温度分布指示的内部

属性,

控制电路,耦合到第一和第二非侵入式热通量传感器-温度传感器对中的每一对的一个或多个热通量传感器输出端子和一个或多个温度传感器输出端子,并且被配置为:

在一个或多个指定时间从第一非侵入式热通量传感器-温度传感器对中的温度传感器接收第一所测温度信号;

在一个或多个指定时间从第一非侵入式热通量传感器-温度传感器对中的热通量传感器接收第一所测热通量信号;

在一个或多个指定时间从第二非侵入式热通量传感器-温度传感器对中的温度传感器接收第二所测温度信号;

在一个或多个指定时间从第二非侵入式热通量传感器-温度传感器对中的热通量传感器接收第二所测热通量信号;

在一个或多个指定时间确定每个内部参数的值;

基于在一个或多个指定时间来自第一和第二非侵入式热通量传感器-温度传感器对中的温度传感器的所测温度信号、在一个或多个指定时间来自第一和第二非侵入式热通量传感器-温度传感器对中的热通量传感器的所测热通量信号、以及在一个或多个指定时间的内部参数值,在一个或多个指定时间确定内部温度分布;以及

生成指示在一个或多个指定时间内部温度分布的信息。

77.根据权利要求76所述的系统,其中每个相应的温度传感器在对象和与其对应的热通量传感器之间。

78.根据权利要求76所述的系统,其中控制电路被配置为基于第一所测热通量信号,在一个或多个指定时间确定通过第一非侵入式热通量传感器-温度传感器对发生的以及在表面离开或进入对象的热传递的测量结果。

79.根据权利要求76所述的系统,其中控制电路被配置为基于第二所测热通量信号,在一个或多个指定时间确定通过第二非侵入式热通量传感器-温度传感器对发生的以及在表面离开或进入对象的热传递的测量结果。

80.根据权利要求76所述的系统,其中控制电路被配置为初始使用内部参数的预定值。

81.根据权利要求76所述的系统,其中控制电路被配置为初始使用内部参数的估计值。

82.根据权利要求76所述的系统,其中第一和第二非侵入式热通量传感器-温度传感器对经受差分热通量环境。

83.根据权利要求76所述的系统,其中控制电路被配置为计及与第一非侵入式热通量传感器-温度传感器对中的温度传感器和对象表面之间的估计热接触电阻相关联的一个或多个效应。

84.根据权利要求76所述的系统,其中控制电路被配置为计及与第二非侵入式热通量传感器-温度传感器对中的温度传感器和对象表面之间的估计热接触电阻相关联的一个或多个效应。

85.根据权利要求76所述的系统,其中控制电路在稳态条件下被配置为:

基于在一个或多个指定时间来自第一和第二非侵入式热通量传感器-温度传感器对中的温度传感器的所测温度信号和在一个或多个指定时间来自第一和第二非侵入式热通量传感器-温度传感器对中的热通量传感器的所测热通量信号,在一个或多个指定时间确定

内部温度分布。

86. 一种用于对具有带有表面和内部区域的体积的对象进行非侵入式感测的系统, 包括:

第一非侵入式热通量传感器-温度传感器对;

第二非侵入式热通量传感器-温度传感器对,

第一和第二非侵入式热通量传感器-温度传感器对中的每一对包括:

具有一个或多个热通量传感器输出端子的热通量传感器;

具有一个或多个温度传感器输出端子的温度传感器,

其中第一和第二非侵入式热通量传感器-温度传感器对适于放置在对象表面上或附近的
不同位置, 并且其中对象的内部区域具有由相应的内部参数和内部温度分布指示的内部
属性,

控制电路, 耦合到第一和第二非侵入式热通量传感器-温度传感器对中的每一对的一个
或多个热通量传感器输出端子和一个或多个温度传感器输出端子, 并且被配置为:

在一个或多个指定时间从第一非侵入式热通量传感器-温度传感器对中的温度传感器
接收第一所测温度信号;

在一个或多个指定时间从第一非侵入式热通量传感器-温度传感器对中的热通量传感
器接收第一所测热通量信号;

在一个或多个指定时间从第二非侵入式热通量传感器-温度传感器对中的温度传感器
接收第二所测温度信号;

在一个或多个指定时间从第二非侵入式热通量传感器-温度传感器对中的热通量传感
器接收第二所测热通量信号;

在一个或多个指定时间确定每个内部参数的初始值;

基于在一个或多个指定时间来自第一和第二非侵入式热通量传感器-温度传感器对中的
温度传感器的所测温度信号和在一个或多个指定时间来自第一和第二非侵入式热通量
传感器-温度传感器对中的热通量传感器的所测热通量信号、以及在一个或多个指定时间
的内部参数的初始值, 在一个或多个指定时间确定对象的一个或多个内部参数; 以及

生成指示在一个或多个指定时间对象的一个或多个内部参数的信息。

87. 根据权利要求86所述的系统, 其中控制电路被配置为基于第一所测热通量信号, 在
一个或多个指定时间确定通过第一非侵入式热通量传感器-温度传感器对发生的以及在表
面离开或进入对象的热传递的测量结果。

88. 根据权利要求86所述的系统, 其中控制电路被配置为基于第二所测热通量信号, 在
一个或多个指定时间确定通过第二非侵入式热通量传感器-温度传感器对发生的以及在表
面离开或进入对象的热传递的测量结果。

89. 根据权利要求86所述的系统, 其中每个相应的温度传感器在对象和与其对应的热
通量传感器之间。

90. 根据权利要求86所述的系统, 其中控制电路被配置为初始使用内部参数的预定值。

91. 根据权利要求86所述的系统, 其中控制电路被配置为初始使用内部参数的估计值。

92. 根据权利要求86所述的系统, 其中第一和第二非侵入式热通量传感器-温度传感器
对经受差分热通量环境。

93. 根据权利要求86所述的系统, 其中控制电路被配置为计及与第一非侵入式热通量传感器-温度传感器对中的温度传感器与对象表面之间的估计热接触电阻相关联的一个或多个效应。

94. 根据权利要求86所述的系统, 其中控制电路被配置为计及与第二非侵入式热通量传感器-温度传感器对中的温度传感器与对象表面之间的估计热接触电阻相关联的一个或多个效应。

95. 根据权利要求86所述的系统, 其中控制电路在稳态条件下被配置为:

基于在一个或多个指定时间来自第一和第二非侵入式热通量传感器-温度传感器对中的温度传感器的所测温度信号和在一个或多个指定时间来自第一和第二非侵入式热通量传感器-温度传感器对中的热通量传感器的所测热通量信号, 确定对象的一个或多个内部参数。

96. 一种非侵入式传感器, 其适于放置在具有带有内部区域的体积的对象表面上或附近, 其中对象的内部区域具有由相应的内部参数和内部温度分布指示的内部属性, 所述非侵入式传感器包括:

非侵入式热通量传感器-温度传感器对;

非侵入式热通量传感器-温度传感器对包括:

具有一个或多个热通量传感器输出端子以提供对象表面的所测热通量信号的热通量传感器, 以及

具有一个或多个温度传感器输出端子以提供对象表面的所测温度信号的温度传感器, 其中热通量传感器和温度传感器被配置为经受相同的热条件。

97. 根据权利要求96所述的非侵入式传感器, 还包括用于加热或冷却非侵入式传感器的一个或多个外部热设备。

98. 根据权利要求97所述的非侵入式传感器, 其中一个或多个外部热设备包括加热器或冷却器。

99. 根据权利要求96所述的非侵入式传感器, 其中热通量传感器被布置成产生指示在对象表面通过热通量传感器发生的热传递的差分电压。

100. 根据权利要求99所述的热通量传感器, 其中差分电压通过与热通量传感器相关联的校准常数或敏感度常数, 与通过热通量传感器和在对象表面处发生的热传递相关。

101. 根据权利要求99所述的热通量传感器, 其中差分电压通过与热通量传感器相关联的校准曲线或敏感度曲线, 与通过热通量传感器和在对象表面处发生的热传递相关。

102. 根据权利要求96所述的非侵入式传感器, 其中热通量传感器基于薄膜差分热电堆技术。

103. 根据权利要求96所述的非侵入式传感器, 其中热通量传感器包括两个或更多个串联连接的热电偶接头, 以提供指示跨给定热阻的温度差的电压输出。

104. 根据权利要求96所述的非侵入式传感器, 其中温度传感器基于热电偶或热敏电阻器技术。

105. 根据权利要求96所述的非侵入式传感器, 其中温度传感器的厚度小于或等于热通量传感器的厚度。

106. 根据权利要求96所述的非侵入式传感器, 其中热通量传感器为ASTM标准E2683所

描述的种类。

107. 根据权利要求96所述的非侵入式传感器,其中热通量传感器为ASTM标准E2684所描述的种类。

108. 一种非侵入式传感器,其适于放置在具有带有表面和内部区域的体积的对象表面上或附近,所述非侵入式传感器包括:

第一非侵入式热通量传感器-温度传感器对;

第二非侵入式热通量传感器-温度传感器对;

第一和第二非侵入式热通量传感器-温度传感器对中的每一对包括:

具有一个或多个热通量传感器输出端子的热通量传感器;

具有一个或多个温度传感器输出端子的温度传感器,

其中第一和第二非侵入式热通量传感器-温度传感器对适于放置在对象表面上或附近的不同位置,其中对象的内部区域具有由相应的内部参数和内部温度分布指示的内部属性。

109. 根据权利要求108所述的非侵入式传感器,还包括用于加热或冷却第一非侵入式热通量传感器-温度传感器对的一个或多个外部热设备。

110. 根据权利要求108所述的非侵入式传感器,还包括用于加热或冷却第二非侵入式热通量传感器-温度传感器对的一个或多个外部热设备。

111. 根据权利要求108所述的非侵入式传感器,其中第一和第二非侵入式热通量传感器-温度传感器对中的每个热通量传感器被布置成分别产生指示通过第一和第二非侵入式热通量传感器-温度传感器对发生的热传递的差分电压。

112. 根据权利要求111所述的热通量传感器,其中第一和第二非侵入式热通量传感器-温度传感器对中的每个热通量传感器产生的差分电压通过与热通量传感器相关联的校准常数或敏感度常数,与通过对应热通量传感器-温度传感器对发生的热传递相关。

113. 根据权利要求111所述的热通量传感器,其中第一和第二非侵入式热通量传感器-温度传感器对中的每个热通量传感器产生的差分电压通过与热通量传感器相关联的校准曲线或敏感度曲线,与通过对应热通量传感器-温度传感器对发生的热传递相关。

114. 根据权利要求108所述的非侵入式传感器,其中热通量传感器基于薄膜差分热电堆技术。

115. 根据权利要求108所述的非侵入式传感器,其中热通量传感器包括两个或更多个串联连接的热电偶接头,以提供指示跨给定热阻的温度差的电压输出。

116. 根据权利要求108所述的非侵入式传感器,其中温度传感器基于热电偶或热敏电阻器技术。

117. 根据权利要求107所述的非侵入式传感器,其中温度传感器的厚度小于或等于热通量传感器的厚度。

118. 根据权利要求108所述的热通量传感器,其中热通量传感器为ASTM标准E2683所描述的种类。

119. 根据权利要求108所述的热通量传感器,其中热通量传感器为ASTM标准E2684所描述的种类。

用于非侵入式热询问的装置、系统和方法

[0001] 相关申请的交叉引用

本申请要求于2019年7月1日提交的美国临时专利申请序列号62/869208的优先权,其内容通过引用并入本文。

背景技术

[0002] 温度传感器和其他热感测系统在许多不同的技术领域和应用中都很重要。特别重要的是为非侵入式的温度传感器和其他热感测系统。本申请中的技术针对非侵入式热询问装置、系统和方法,这些装置、系统和方法提供改进的可靠性、准确性、成本、复杂性、尺寸、易于制造、易于使用、计算时间、所需处理力、响应时间和跨不同行业的适用性。

[0003] 非侵入式热询问(NITI)利用热感测提供无损检测和监测。使用表面温度信号和表面热传递(例如热通量)信号的同时组合进行非侵入式热询问(NITI)。在对象或系统表面上同时测量时,表面温度和表面热通量信号可用于非侵入式地确定对象或系统内部区域的内部参数(例如,热传导性、密度、热容、对流系数、稳态热阻等)和内部温度分布(例如,内部温度剖面)。对象或系统的内部温度分布通常是内部参数的函数。取决于进行NITI和/或NITI应用的对象或系统,内部参数可能会有所不同。内部参数和内部温度分布定义为对象或系统的内部属性。

[0004] 由于无论何时存在热信号NITI都允许对对象或系统进行无损测试和监测,因此NITI可用于许多各种各样的应用。在没有足够热信号的情况下,可在对象或系统表面生成热信号。

发明内容

[0005] 至少一些示例提供了用于对具有带有表面和内部区域的体积的对象进行非侵入式感测的系统。该系统包括非侵入式传感器,包括:具有一个或多个热通量传感器输出端子的热通量传感器和具有一个或多个温度传感器输出端子的温度传感器。非侵入式传感器可放置在对象表面上或附近。对象的内部区域具有由相应的内部参数和内部温度分布指示的内部属性。耦合到一个或多个热通量传感器输出端子和一个或多个温度传感器输出端子的控制电路适于:在一个或多个指定时间从温度传感器接收所测温度信号;在一个或多个指定时间从热通量传感器接收所测热通量信号;基于在一个或多个指定时间的所测热通量信号,确定在表面处离开或进入对象的热传递测量值;在一个或多个指定时间确定每个内部参数的值;基于所测温度信号、所测热通量信号和内部参数值,在一个或多个指定时间确定对象内部区域的内部温度分布;以及生成指示在一个或多个指定时间对象内部区域的内部温度分布的信息。

[0006] 至少一些示例提供了用于对具有带有表面和内部区域的体积的对象进行非侵入式感测的系统。该系统包括非侵入式传感器,包括:具有一个或多个热通量传感器输出端子的热通量传感器和具有一个或多个温度传感器输出端子的温度传感器。非侵入式传感器适于放置在对象表面上或附近,并且对象的内部区域具有由相应的内部参数和内部温度分布

指示的内部属性。耦合到一个或多个热通量传感器输出端子和一个或多个温度传感器输出端子的控制电路适于：在一个或多个指定时间从温度传感器接收所测温度信号；在一个或多个指定时间从热通量传感器接收所测热通量信号；基于所测温度信号和所测热通量信号，在一个或多个指定时间确定一个或多个内部参数的估计值；以及生成指示在一个或多个指定时间为内部参数确定的一个或多个估计值的信息。

[0007] 至少一些示例提供了用于对具有带有表面和内部区域的体积的对象进行非侵入式感测的系统。该系统包括第一非侵入式热通量传感器-温度传感器对和第二非侵入式热通量传感器-温度传感器对。第一和第二非侵入式热通量传感器-温度传感器对中的每一对包括具有一个或多个热通量传感器输出端子的热通量传感器和具有一个或多个温度传感器输出端子的温度传感器。第一和第二非侵入式热通量传感器-温度传感器对可放置在对象表面上或附近的不同的位置。对象的内部区域具有由相应的内部参数和内部温度分布指示的内部属性。耦合到第一和第二非侵入式热通量传感器-温度传感器对中的每一对的一个或多个热通量传感器输出端子和一个或多个温度传感器输出端子的控制电路被配置为：在一个或多个指定时间从第一非侵入式热通量传感器-温度传感器对中的温度传感器接收第一所测温度信号；在一个或多个指定时间从第一非侵入式热通量传感器-温度传感器对中的热通量传感器接收第一所测热通量信号；在一个或多个指定时间从第二非侵入式热通量传感器-温度传感器对中的热通量传感器接收第二所测热通量信号；在一个或多个指定时间确定每个内部参数的值；基于在一个或多个指定时间来自第一和第二非侵入式热通量传感器-温度传感器对中的温度传感器的所测温度信号、在一个或多个指定时间来自第一和第二非侵入式热通量传感器-温度传感器对中的热通量传感器的所测热通量信号、以及在一个或多个指定时间的内部参数值，在一个或多个指定时间确定内部温度分布；以及生成指示在一个或多个指定时间内部温度分布的信息。

[0008] 至少一些示例提供了用于对具有带有表面和内部区域的体积的对象进行非侵入式感测的系统，包括第一非侵入式热通量传感器-温度传感器对和第二非侵入式热通量传感器-温度传感器对。第一和第二非侵入式热通量传感器-温度传感器对中的每一对包括具有一个或多个热通量传感器输出端子的热通量传感器和具有一个或多个温度传感器输出端子的温度传感器。第一和第二非侵入式热通量传感器-温度传感器对可放置在对象表面上或附近的不同的位置。对象的内部区域具有由相应的内部参数和内部温度分布指示的内部属性。耦合到第一和第二非侵入式热通量传感器-温度传感器对中的每一对的一个或多个热通量传感器输出端子和一个或多个温度传感器输出端子的控制电路被配置为：在一个或多个指定时间从第一非侵入式热通量传感器-温度传感器对中的温度传感器接收第一所测温度信号；在一个或多个指定时间从第一非侵入式热通量传感器-温度传感器对中的热通量传感器接收第一所测热通量信号；在一个或多个指定时间从第二非侵入式热通量传感器-温度传感器对中的温度传感器接收第二所测温度信号；在一个或多个指定时间从第二非侵入式热通量传感器-温度传感器对中的热通量传感器接收第二所测热通量信号；在一个或多个指定时间确定每个内部参数的初始值；基于在一个或多个指定时间来自第一和第二非侵入式热通量传感器-温度传感器对中的温度传感器的所测温度信号和在一个或多个指定时间来自第一和第二非侵入式热通量传感器-温度传感器对中的热通量传感器的所测热通量信号、以及在一个或多个指定时间的内部参数值，在一个或多个指定时间确定对象

的一个或多个内部参数;以及生成指示在一个或多个指定时间对象的一个或多个内部参数的信息。

[0009] 至少一些示例提供了非侵入式传感器,其可放置在具有带有内部区域的体积的对象表面上或附近,其中对象的内部区域具有由相应的内部参数和内部温度分布指示的内部属性。非侵入式传感器包括非侵入式热通量传感器-温度传感器对,其包括具有一个或多个热通量传感器输出端子以提供对象表面的所测热通量信号的热通量传感器,以及具有一个或多个温度传感器输出端子以提供对象表面的所测温度信号的温度传感器。热通量传感器和温度传感器配置为经受相同的热条件。

[0010] 至少一些示例提供了非侵入式传感器,其可放置在具有带有表面和内部区域的体积的对象表面上或附近。该非侵入式传感器包括第一非侵入式热通量传感器-温度传感器对和第二非侵入式热通量传感器-温度传感器对。第一和第二非侵入式热通量传感器-温度传感器对中的每一对包括具有一个或多个热通量传感器输出端子的热通量传感器和具有一个或多个温度传感器输出端子的温度传感器。第一和第二非侵入式热通量传感器-温度传感器对适于放置在对象表面上或附近的不同位置,其中对象的内部区域具有由相应的内部参数和内部温度分布指示的内部属性。

[0011] 本申请中呈现的技术的另外方面、特征和优点将从以下示例的描述中清楚,这些示例将结合附图阅读。

附图说明

[0012] 图1示出了根据示例热通量传感器实施例具有厚度 t 、宽度 W 和长度 H 的热通量传感器示例。

[0013] 图2A示出了根据示例实施例的包括热阻层的差分热电堆的横截面。

[0014] 图2B示出了根据示例实施例的差分热电堆的横截面,该差分热电堆包括热阻层并且可更容易制造。

[0015] 图3示出了其中跨接头施加热通量并且热流总体被限制在通过接触点传导的示例。

[0016] 图4示出了示例CHFT+实施例的横截面,该示例CHFT+实施例包括放置在具有未知内部属性的对象表面上的热通量传感器和温度传感器,其中加热器(外部热设备)放置在热通量传感器上。

[0017] 图5示出了示例CHFT-实施例的横截面,该示例CHFT-实施例包括放置在具有未知内部属性的对象表面上的热通量传感器和温度传感器。

[0018] 图6A示出了示例CHFT-实施例的横截面,该示例CHFT-实施例包括热通量传感器、温度传感器以及热通量传感器和温度传感器(即热通量传感器-温度传感器对)上的一块绝缘体。

[0019] 图6B示出了示例CHFT-实施例的横截面,该示例CHFT-实施例包括热通量传感器、温度传感器、和热通量传感器和温度传感器(即热通量传感器-温度传感器对)上的一块绝缘体以及周围对象区域的一部分。

[0020] 图6C示出了示例CHFT-实施例的横截面,该示例CHFT-实施例包括热通量传感器、温度传感器以及热通量传感器和温度传感器(即热通量传感器-温度传感器对)上及周围的

一块绝缘体。

[0021] 图7A示出了包括热通量传感器、温度传感器和外部热设备(例如加热器)的示例CHFT+实施例的横截面。

[0022] 图7B示出了示例CHFT+实施例的横截面,该示例CHFT+实施例包括热通量传感器、温度传感器和向热通量传感器-温度传感器对提供热事件的外部热设备(例如加热器)。

[0023] 图7C示出了示例CHFT+实施例,该示例CHFT+实施例包括温度传感器、热通量传感器、加热器和相应的输出端子。

[0024] 图7D示出了示例CHFT+实施例的横截面,该示例CHFT+实施例包括热通量传感器、温度传感器和外部热设备(例如加热器),其中温度传感器位于热通量传感器和外部热设备之间。

[0025] 图7E示出了示例CHFT+实施例的横截面,该示例CHFT+实施例包括热通量传感器、温度传感器和外部热设备(例如加热器),其中温度传感器位于热通量传感器内。

[0026] 图7F示出了示例CHFT+实施例的横截面,该示例CHFT+实施例包括热通量传感器、温度传感器和外部热设备(例如加热器),其中热通量传感器和温度传感器由衬底分离。

[0027] 图7G示出了示例CHFT+实施例的横截面,该示例CHFT+实施例包括热通量传感器、温度传感器和外部热设备(例如加热器),其中热通量传感器和温度传感器由衬底分离,并且温度传感器由热兼容材料包围。

[0028] 图8是功能框图,其图示了用CHFT-执行NITI的示例NITI系统。

[0029] 图9是功能框图,其图示了用CHFT+执行NITI的示例NITI系统。

[0030] 图10是流程图,其概述了示例NITI系统中控制电路执行的非限制性示例过程,该示例NITI系统包括用于确定对象的一个或多个内部属性的NITI传感器,包括使用所测热通量、所测温度和对象内部参数的确定值在一个或多个指定时间确定对象的内部温度分布。

[0031] 图11是示出了NITI系统中控制电路执行的参数估计方案示例过程的流程图。

[0032] 图12示出了放置在具有未知内部属性的对象表面上的示例DUO(并行传感器对)CHFT+(具有加热器)实施例的横截面。

[0033] 图13示出了在每个传感器节点上具有不同热绝缘量的示例DUO(并行传感器对)CHFT-实施例的横截面。

[0034] 图14示出了示例DUO(并行传感器对)CHFT-实施例的横截面,其中一个CHFT-节点并入了热绝缘而另一个CHFT-节点被暴露。

[0035] 图15示出了示例DUO(并行传感器节点)CHFT+/-感测实施例的横截面,其中一个传感器节点并入CHFT+并且一个传感器节点并入CHFT-。

[0036] 图16示出了示例DUO(并行传感器对)CHFT-实施例的横截面,其中两个传感器节点都没有热绝缘。

[0037] 图17是功能框图,其图示了执行NITI的示例NITI系统,具有并行操作来确定对象的一个或多个内部属性的两个非侵入式热通量传感器-温度传感器对。

[0038] 图18A是流程图,示出了与控制电路执行的基于差分的数据处理方法相关的示例过程。

[0039] 图18B是流程图,示出了与控制电路在稳态条件下执行的基于差分的数据处理方法相关的示例过程。

[0040] 图19A是流程图,示出了与控制电路执行的基于商的数据处理方法相关的示例过程。

[0041] 图19B是流程图,示出了与控制电路在稳态条件下执行的基于商的数据处理方法相关的示例过程。

[0042] 图20是概述示例DUO NITI实施例的非限制性示例过程的流程图,该实施例使用两个非侵入式热通量传感器-温度传感器对来确定对象的一个或多个内部参数。

[0043] 图21是概述示例DUO NITI实施例的非限制性示例过程的流程图,该实施例使用两个非侵入式热通量传感器-温度传感器对来确定对象的内部温度分布。

[0044] 图22示出了组织中血液灌注(流)的示例应用。

[0045] 图23是示出了参数估计方案与实验数据一起使用时确定最佳灌注(w)值的能力的图表。

[0046] 图24是图示示例CHFT+血液灌注实施例的所计算(输出)传感器温度曲线和所测(输入)传感器温度之间的匹配示例的图表。

[0047] 图25是图示示例CHFT+血液灌注实施例的所计算(输出)传感器温度曲线和所测(输入)传感器温度之间的失配示例的图表。

[0048] 图26是图示了在示例血液灌注应用中所计算(输出)传感器温度曲线对内部参数随时间变化的不同敏感度的图表。

[0049] 图27是示出示例DUO CHFT+实施例和示例周期性CHFT+实施例在用于测量灌注伪组织的灌注率时的结果的图表。

[0050] 图28是示出示例CHFT+实施例(主动测温)用于测量灌注伪组织的核心温度时的结果的图表。

[0051] 图29是示出了示例CHFT-实施例(被动测温)用于测量灌注伪组织的核心温度时的结果的图表。

[0052] 图30是示出了示例CHFT+ZHF实施例(零热通量测温)用于测量灌注伪组织的核心温度时的结果的图表。

[0053] 图31示出了用于确定与管道或其他导管中流体流动相关的一个或多个参数的技术的另一应用。

[0054] 图32是示出了用铜管中流体流的实验测量结果发展出的示例相关性的图表。

[0055] 图33是示出了参数估计方案在与实验数据一起使用时确定最佳对流系数(h)值的能力的图表。

[0056] 图34是示出铜管实施例中针对示例CHFT+流体流的所计算(输出)传感器温度曲线和所测(输入)传感器温度之间的匹配示例的图表。

[0057] 图35是示出了示例CHFT+实施例(主动测温)用于测量铜管内流体流的内部温度时的结果的图表。

[0058] 图36是示出了示例DUO CHFT+/-实施例(一个传感器节点具有加热器,并且一个传感器节点没有加热器)用于测量铜管内流体流的内部温度时的结果的图表。

[0059] 图37是示出了示例DUO CHFT+/-实施例(一个传感器节点具有加热器,并且一个传感器节点没有加热器)用于测量CPVC管道内流体流的内部温度时的结果的图表。

具体实施方式

[0060] 下面将讨论一些具体的示例。将意识到的是,本发明不限于这些特定示例。

[0061] 以下描述出于解释而非限制的目的阐述了示例实施例。但是,本领域技术人员将意识到,除了这些具体细节之外,还可以采用其他示例实施例。在一些实例中,省略了对公知方法、接口、电路和设备的详细描述,以避免不必要的细节模糊了描述。在一些图中示出了单独块。本领域技术人员将意识到,那些块的功能可以使用单独的硬件电路、结合适当编程的数字微处理器或通用计算机使用软件程序和数据和/或使用专用集成电路(ASIC)和/或使用一个或多个数字信号处理器(DSP)来实现。软件程序指令和/或数据可以存储在非暂时的计算机可读存储介质、一个或多个云、一个或多个服务器上,并且当指令由计算机或其他合适的处理器控件执行时,计算机或处理器执行与那些指令相关联的功能。

[0062] 本文使用术语信号来涵盖以电、电子、电磁、磁或机械(例如,超声信号)形式将能量和/或信息从一个位置或区域传输到另一个位置或区域的任何信号。信号可以通过电导体或磁性导体从一个位置或区域传导到另一个位置或区域,但术语信号还包括光和其他电磁形式的信号,以及由于电、电子、电磁、磁或弹性效应而通过非导电区域传输的其他信号。信号包括模拟信号和数字信号二者。模拟电信号包括连续可变物理量形式的信息,例如电压。数字电信号包括物理特性离散值形式的信息,物理特性也可以是例如电压。

[0063] 如果组件、层或其他结构充分地将热能(例如,通过传导、辐射和/或对流传递的热能)从一个位置或区域传导到另一个位置或区域,则该组件、层或其他结构是导热或热传导的,在所述另一个位置或区域的操作可能会受到热能的影响。术语感测意味着从物理刺激中获取信息,并且因此感测包括诸如检测、测量等动作。热感测是对热刺激的感测,所述热刺激诸如分子、原子或更小物质组分的热、温度或随机动能。热传感器是执行热感测并生成与热能相关信号的设备。如果热能包括信息,则检测热能的热传感器或热传感器组合可能能够感测信息。取决于上下文,本申请中使用的不同形式和/或类型的热能和热信号可被视为热传递、热传递信号、温度和温度信号。

[0064] 除非上下文另有指示,否则术语电路和回路指的是其中一个或多个电子组件具有足够的电连接以一起操作或以相关方式操作的结构。在某些实例中,电路项目可以包括多于一个回路。包括处理器的电路项目有时可分为硬件和软件组件;在此上下文中,软件指控制处理器操作或在操作时由处理器访问的所存储数据,并且硬件指存储、传输和操作数据的组件。电路可以基于其操作或其他特性来描述。例如,执行控制操作的电路有时称为控制电路,并且执行处理操作的电路有时称为处理电路。

[0065] 一般而言,传感器、处理器和其他此类项目可包括在自动或部分自动操作的系统中。术语系统是指两个或更多个部分或组件的组合,这些部分或组件可以一起执行操作。系统可以由其操作来表征。

[0066] 集成结构是由微加工或类似过程产生的具有电组件和连接的结构。例如,集成结构可以位于产生它的衬底或另一合适的支撑结构上或之上。其他组件可以位于具有集成结构的同一支撑结构上,例如由其他类型的过程产生的分立组件。

[0067] 基于热的感测和监测通常仅用温度传感器和/或温度信号执行。例如,为了确定对象或系统的内部温度,将侵入式温度探头插入规定的感兴趣深度。示例使用插入热电偶套管中的侵入式温度探头测量管道或导管内的内部流温度。热电偶套管放置通常需要复杂的

过程,其中管道或导管表面被钻孔和/或以其他方式穿透,以便将热电偶套管放置在内部流体流中。然后将温度传感器(例如热电偶、电阻温度设备(RTD)、热敏电阻器、温度计等)插入热电偶套管内,在所述热电偶套管内防止其受到流体流的影响。由于热电偶套管的热容,热电偶套管内温度传感器的响应时间变慢。此外,由于热电偶套管壁可能会将热从管道或导管中传导出(或传导到管道或导管中),因此温度传感器的精度可能会受到负面影响。通常,这种测量流体流温度的方法比例如测量管道或导管的表面温度测量结果更精确。然而,由于这种技术的侵入式性质,在它们使用之前通常会进行数种设计考虑。对于许多应用来说,这些设计考虑可能是复杂且昂贵的。例如,热电偶套管的材料和/或设计特性可能基于应用而不同,并且需要遵守广泛的标准(例如,美国材料与试验学会(ASTM)标准)。此外,热电偶套管的侵入式性质导致复杂的长期维护,例如,由于腐蚀和/或长时间暴露在高能流体流中,所述高能流体流可能导致结构应力和振动。

[0068] 另一个侵入式探头用于对象和/或系统内部温度测量的基于热的感测示例是核心体温测量。例如,在医疗保健中,当前作为实时核心体温测量准确方法使用和接受的方法是,例如,基于食管、直肠和肺动脉的温度测量。所有这些方法都使用侵入式的且通常不舒服的探头,探头放置在身体内的不同位置。由于其侵入式性质,此类方法可能导致感染和/或其他并发症。这种方法的侵入式性质也限制了可以何时何地进行测量的范围。例如,除非患者已经经受麻醉或其他类似过程,否则很少使用侵入式探头。侵入式探头也不适用于可穿戴技术或设备。

[0069] 鉴于侵入式内部温度测量技术的限制,可替代方法可能是基于表面和/或其他外部温度读数(例如环境温度)对对象或系统进行内部温度测量。然而,这种方法通常会导致不准确的测量,并且可能需要复杂的硬件和软件系统,以便基于此类非侵入式温度测量确定内部温度测量结果。在一些实施例中,可在对象或系统表面上或附近使用多个温度传感器,和/或在放置在对象或系统表面上或附近的设备内部使用多个温度传感器。此外,可能需要一个或多个热校准组件(例如,绝缘件、精密温度传感器等)。这进一步导致复杂化和/或复杂的测量系统。其他实施例可包括一个或多个控制系统、一个或多个加热器、一个或多个冷却器和/或多个温度传感器。例如,这些实施例可被设计为创建和确定用于内部温度测量的零热通量环境。这种非侵入式方法通常慢且不准确,尤其是在变化或极端热条件下。此外,在某些情况下,为了精确的内部温度测量,传感器和/或设备的放置可能限于对象或系统表面上的特定区域。例如,关于核心体温测量,传感器和/或设备的放置可能限于身体上的某些辅助位置(例如,腋窝或前额)。此外,由于硬件复杂性,实施例可能与大的形状因素相关联,从而导致许多应用的不便。例如,关于核心体温测量,对于可穿戴应用而言,大形状因素是不切实际的。关于非侵入式内部管道或导管温度测量,大的形状因素可能会阻碍传感器和/或设备安装在某些位置,例如管道表面和周围热绝缘之间。最后,此类系统的复杂性可能导致制造困难以及增加的制造成本。

[0070] 其他基于热的感测应用可使用基于温度的信号,以通过热风速测量确定内部流体流。这种方法需要内部探测,以便通过已建立的相关性测量与所测温度信号相对应的流体流。相反,热分散流量计是一种非侵入式系统,其在管道或导管表面使用温度传感器,在温度传感器之间,加热器向管道/导管表面提供热能。在加热元件前后放置的温度传感器之间的温差与内部流体流速率相关。然而,热分散流量计在管道由热绝缘材料制成的情况下无

法适当地起作用。此外,当在不同条件下使用时,它们容易出现不准确的情况,因为通过加热器进入管道或导管的热能(即热传递)的具体量未知,并且只能用基本假设进行估计。因此,热分散流量计通常针对特定条件和使用情况进行校准。

[0071] 其他基于热的技术可用于使用表面和/或内部温度测量来预测(例如,分析确定)对象或系统的表面热传递(例如,热通量)。此类技术可进一步用于基于预测的表面热传递(例如,热通量)和表面或内部温度信号来确定对象或系统的内部属性。然而,这些技术可能有数种限制,例如精度差、分辨率低、处理时间长,以及噪声放大,这归因于在根据所测温度信号确定热传递(例如热通量)时需要的数学积分。

[0072] 例如,可将确定的对象或系统的表面热传递(例如,热通量)与(例如,通过热通量传感器)所测表面热传递进行比较,以确定对象或系统的内部属性。同样,由于基于温度测量的热传递(例如热通量)预测的限制,通过此类技术确定的对象或系统内部属性的值可能不准确且对应用而言不切实际。此外,当使用此类技术时,从其确定表面热传递的所测温度(例如表面温度)与对象或系统的所测热传递(例如表面热通量)之间可能存在失配。例如,当在对象或系统表面(例如,通过热通量传感器)测量的热传递(例如,热通量)与在表面温度传感器位置发生的热传递(例如,热通量)不同时,可能会发生失配。这可能是由例如位于热通量传感器附近的表面温度传感器导致的,该表面温度传感器未经受与热通量传感器经历的相同热(例如,热传递和/或温度)条件。在其他示例中,温度传感器可位于热通量传感器上或附近,但位于热通量传感器感测区域之外的位置,这也可能导致测量失配。当使用如下温度传感器时可能会出现类似问题,该温度传感器例如位于热通量传感器感测区域上或附近,但由于例如其设计(例如厚度)和/或材料导致热通量传感器和对象/系统表面之间的接触不足。在该示例中,发生失配是因为所测温度不是表面温度的精确表示,和/或所测热传递不是对象/系统表面正发生的和/或温度传感器经历的现实情况。在其他示例中,用于构造热通量传感器和温度传感器和/或其周围环境的材料可能完全不同(例如,不同的热阻值),并导致对均匀热条件的非均匀响应。这也可能导致热通量传感器和温度传感器输出之间的失配。

[0073] 在另一示例中,作为示例薄温度传感器的薄膜热电偶可位于热通量传感器感测区域上,在该区域热通量传感器与对象/系统表面之间建立充分接触。在这种情况下,尽管薄膜热电偶温度传感器不会产生任何上述示例问题(例如,由于厚度导致的接触不足),并且经受与热通量传感器相同的热(例如,热传递和/或温度)条件,但是可能经历热分流,其中由于热能通过热电偶材料和/或输出端子(例如热电偶引线)传导到热电偶接头或从热电偶接头传导(即离开或进入)而导致所测温度不准确。在这种情况下,所测温度可能低于或高于热通量传感器感测区域处或附近经历的实际温度。所有这些非限制性和示例条件都是在使用基于热的感测技术时对于准确确定对象或系统内部属性的潜在问题。

[0074] 在基于热的感测技术中使用热传递(例如热通量)测量的一个问题是效率低下。热传递通常被理解和解释为温度梯度的结果。这种传统方法可能会导致热传递(例如热通量)测量技术效率低下和不准确,以及热传递(例如热通量)和温度差异之间的普遍混淆。例如,测量热传递的一种方式可以在某种绝缘材料(即热阻层)的任一侧使用一个或多个温度传感器,例如热电偶、RTD、负或正温度系数(NTC)传感器、热敏电阻器等,以创建分层热通量计——一种一维平面(即平)量规。在该示例方法中,测量绝缘材料任一侧绝对温度的测定

值(例如,平均值),并使用它们之间的差用校准的或以其他方式确定的热阻值来确定通过绝缘材料发生的热传递量。在另一示例方法中,热电偶可放置在校准绝缘材料(即热阻层)的任一侧(例如顶部和底部),形成热电偶对。热电偶对的布置可以使得当串联连接时,热电偶对的输出是指示(例如成比例)跨热阻层的温差和通过热阻层发生的热传递(例如热通量)的差分电压。这些示例方法可能导致慢、不准确、高成本和大热通量设备(即热通量通道),该热通量设备可能需要多次校准,并且可能难以制造。

[0075] 基于热的感测技术的另一个不足之处是无法确定或以其他方式计及热接触电阻。这会导致错误的表面温度测量,这可能会影响基于热的感测和监测的准确性。然而,在执行基于热的感测时,热接触电阻的建模和/或确定可能是困难和不清楚的。这部分是由于与仅使用温度信号和/或基于温度信号预测热传递的方法来确定热接触电阻相关联的复杂性和不精确性。

[0076] 本申请中描述的技术解决了这些技术问题,并提供了以下示例技术益处。最重要的是,除了表面温度的测量外,本申请中描述的技术还提供进入或离开对象和/或系统表面的热传递(例如,热通量)的测量,作为基于热的感测和/或监测例程(即,技术)的一部分。在一个或多个热数学模型中,此热传递(例如热通量)测量用作直接输入和/或边界条件,这些模型可能因不同应用而不同。作为输入和/或直接边界条件的热传递(例如,热通量)测量允许准确且鲁棒的热感测和监测(即询问)技术。

[0077] 该技术通过一个或多个热通量传感器执行热传递(例如热通量)测量。出于本申请的目的,术语热通量传感器是指设计用于使用差分电压输出信号测量热传递(例如热通量)的传感器,差分电压输出信号是流经传感器的热传递(即热能)的结果。热传递测量的一个非限制性示例是热通量,其定义为每单位时间内每单位面积进入或离开表面的热能量,并且可以用 W/m^2 的SI单位来度量。热通量传感器通常具有校准常数(即,敏感度值),该校准常数将热通量传感器差分电压输出信号与通过其发生的热传递(例如,热通量)直接关联。校准常数可能随传感器操作温度而变化,其影响可通过确定的校准曲线来计及,该曲线基于传感器操作温度指定校准常数。就本申请而言,重要的是要注意热通量传感器和热通量设备、热通量通道等之间的区别。热通量传感器通常是薄的,并且由于其设计具有快速响应时间。这提供了示例益处,包括增加的精度、更小的形状因素以及其他热传递测量技术无法实现的鲁棒测量能力。

[0078] 此外,本申请中描述的技术确保,无论温度传感器靠近热通量传感器(例如,在热通量传感器感测区域旁边、上或附近等)与否,对象或系统的所测温度(例如表面温度)和所测热传递(例如表面热通量)之间不存在失配(即热通量传感器和温度传感器经受相同的热条件)。例如,在可能的情况下,温度传感器可位于热通量传感器感测区域上或附近,同时保持热通量传感器与对象/系统表面之间的充分接触,并在适用的情况下,针对与用于构造的材料的热分流和/或热同质性相关的可能影响进行设计。在其他示例实施例中,温度传感器可以位于热通量传感器和/或热通量传感器感测区域上或附近(例如,邻近),并且可以被确保热通量传感器和温度传感器之间具有相同热(例如,热传递和/或温度)条件的材料包围和/或与之接触。

[0079] 本申请中技术的另一个主要益处是能够容易且快速地确定温度传感器与对象或系统表面之间的热接触电阻。这提高了热感测和监测的准确性和有效性,尤其是在热接触

电阻的影响不可忽略和/或不可预测的示例应用中。

[0080] 本申请中技术的另一个主要益处是非侵入性和使用简单。例如,不需要针对侵入式技术所需的广泛设计考虑或预防措施。此外,该技术不局限于其中侵入性是许可的应用。

[0081] 本申请中技术的进一步益处包括所需的最小处理时间和减小的处理力。这一益处部分归因于使用热通量边界条件以及并入快速和精密的确定热接触电阻的方法。另一个益处是减少了设计用于热传递(例如热通量)测量的传感器的校准需求。例如,对于通过热通量传感器进行热传递测量,本申请中的技术通常仅需要一个校准常数(即,敏感度值)。

[0082] 本申请中的技术基于同时使用热通量和温度传感器,以非侵入式方式确定对象和/或系统的一个或多个内部属性。对象和/或系统不限于固体对象,还包括例如流体(例如水、空气等)或其他材料,例如冶金粉末、环氧树脂、碳纤维复合材料等。为简单起见,本申请中使用的术语对象包括系统。例如,内部有流体流动的管道是对象。术语非侵入式热询问(NITI)在本文中用于指基于表面热通量和表面温度测量的同时组合的传感器技术。当放置在对象上时,NITI传感器测量表面热传递(例如,热通量)和表面温度信号的一个或多个同时组合,这些信号转换为数字形式并进行处理以确定对象的一个或多个内部属性。对于给定的测量,本申请中使用的术语同时组合指在一定时间范围内(即在指定的时间量内)测量的一个或多个表面热传递(例如,热通量)和表面温度信号。时间范围可包括单个时间(即,指定时间)。为简单起见,本申请中使用的术语指定时间被定义为包括时间范围(即,在指定的时间量内)以及单个时间。

[0083] NITI技术的非限制性示例应用包括但不限于:对象(例如,哺乳动物、非哺乳动物、肉类、管道/导管、电力变压器、木材/木料、壁、机器、电池等)内部温度分布测量、对象(例如哺乳动物、非哺乳动物、肉类、管道/导管、电力变压器、木材/木料、壁、机器、电池等)内部参数测量、组织血液灌注(流)测量、组织溃疡预防和/或监测、出血检测和/或监测、脑震荡检测和/或监测、组织水化测量、代谢产热测量、运动员表现监测、热量消耗测量、睡眠监测、昼夜节律监测、哺乳动物排卵预测和/或检测、中暑监测和/或预防、镰状细胞贫血检测和/或监测、贫血检测和/或监测、心血管健康、皮瓣和/或移植物监测、疾病/患病预测、监测和/或检测(例如阿尔茨海默氏症、帕金森氏症、癌症等)、管道和/或导管中的流速测量、管道和/或导管中的能量测量、管道/导管防冻、管道/导管解冻、HVAC霜冻/除霜检测、HVAC系统监测、HVAC制冷剂液位监测、泄漏检测(例如管道/导管漏水、HVAC制冷剂泄漏等)、热水器监测、热交换器监测、腐蚀检测和/或测量(例如管道/导管腐蚀等)、污垢检测和/或测量(例如管道/导管污垢等)、流量检测、存在和/或运动检测、半导体硬件监测、散热器性能监测、热界面材料监测、热阻测量、建筑物绝缘测量、对象和/或材料(例如冶金粉末、环氧树脂、碳纤维复合材料等)的密度、热容、体积热容、热传导性、热惯性、热渗出率、热扩散率等测量、水化/含水量测量、对流热传递系数测量、平流热传递系数测量、建筑物的热处置、热卫生、热处理、热舒适性、热性能、精准农业、智能农场、食品加工、对象冷冻、对象解冻、冶金加工、3D打印、对象质量控制、智能建筑、效率监测、防止对象过热、对象(例如机器、齿轮箱、压缩机、风扇、机电系统等)故障检测和/或预测/预防、高级温度控制、电池性能监测(例如锂离子电池健康状态超时等)、电池量热法、物联网(IoT)、可穿戴传感器、预测分析、规定分析、描述性分析、人工智能以及研究和发展。

[0084] 本申请中使用的术语对象内部区域的内部温度分布(即内部温度分布)包括在一

个或多个指定时间对象特定深度处的单个温度,在一个或多个指定时间作为对象深度函数的多个温度,在一个或多个指定时间对象特定深度处的单个平均温度,在一个或多个指定时间作为对象深度函数的多个平均温度,在一个或多个指定时间对象内的单个最高或最低温度,在一个或多个指定时间对象内的多个最高或最低温度,在一个或多个指定时间对象内的单个最高或最低平均温度,或在一个或多个指定时间对象内的多个最高或最低平均温度。此外,对象内部区域的内部温度分布被定义为包括对象表面温度的测量。例如,可在一个或多个指定时间在对象表面(即深度(x)为0)处评估内部温度分布。

[0085] 本申请中使用的术语对象内部区域的内部参数(即内部参数)包括对象的一个或多个热、物理、机械等特性。例如,对象的内部参数可包括对象的热传导性、对象的密度、对象的热容、对象的体积热容、对象的热扩散率、对象的热惯性、对象的热渗出率,对象的稳态热阻、对象的内部或外部对流系数、对象的内部或外部平流系数、对象的厚度、对象的体积、对象的质量、对象的横截面积、对象的孔隙度,对象的状态(例如,液体、固体、气体等)、对象表面的感兴趣深度等。一些内部参数可基于内部参数的组合(例如,两个或更多个内部参数的商和/或乘积)。此外,并非对象的所有内部参数对于NITI实施例和/或应用都可以被利用和/或是必需的。为简单起见,本申请中使用的术语内部参数包括为对象执行的NITI实施例所必需和/或期望的一个或多个内部参数(即,对应的内部参数)。

[0086] NITI传感器示例实施例

NITI的示例传感器实施例(即NITI传感器)包括一个或多个热通量传感器和一个或多个温度传感器。经受相同热(例如,热传递和/或温度)条件并在一个或多个指定时间同时进行测量的热通量传感器和温度传感器称为热通量传感器-温度传感器对(即,传感器对)。NITI传感器还可包括与意图用于NITI的控制电路一起使用的外部热设备。

[0087] 在其他示例传感器实施例中,可选外部热设备在NITI传感器的一侧创建热能源,该热能源行进穿过NITI传感器并进入正被测量的对象。在其他示例实施例中,可选外部热设备在NITI传感器的一侧创建热能汇集器(即,散热器),该热能汇集器导致从正被测量的对象通过NITI传感器并进入散热器的热传递。外部热设备可以是加热器和/或冷却器(例如,珀耳帖设备),该加热器和/或冷却器与意图用于NITI的控制电路一起使用,以创建热事件(加热和/或冷却),从而不同的热传递(例如,热通量)和温度信号的同时组合可以在对象表面生成、获取(例如,测量)和处理。外部热设备可以任何方式(稳定、周期性、循环等操作)。在一些示例实施例中,外部热设备可用于随时间在对象表面提供周期性(例如,正弦)温度和/或热通量条件。另外的示例实施例将相位角确定技术与所述的一种或多种NITI技术一起使用,以确定对象的一种或多种内部属性。

[0088] 通常,外部热设备适于向包含整个热通量传感器-温度传感器对的区域提供热事件,其中至少整个热通量传感器感测区域经受热事件。在其他示例实施例中,外部热设备可适于向包含整个热通量传感器-温度传感器对的区域以及围绕热通量传感器-温度传感器对的对象表面区域提供热事件。在其他示例实施例中,外部热设备可向多个热通量传感器-温度传感器对提供热事件。在其他示例实施例中,例如,当进行询问的对象具有非平面(例如,弯曲)表面时,外部热设备可设计为向包括热通量传感器-温度传感器对的区域并且不向周围对象表面提供热事件。

[0089] 在其他示例传感器实施例中,外部热设备可与意图用于NITI的控制电路一起使

用,以消除对象和NITI传感器表面之间发生的热传递。例如,外部热设备(例如加热器)可在对象表面施加或去除热量(即热能),并在接触对象和NITI传感器表面之间创建“零热通量环境”。在零热通量环境中,NITI传感器的热通量传感器组件输出并保持最小电压(例如,“0”),并且在稳态条件下时,由NITI传感器在对象表面测量的相应表面温度指示对象内部区域的内部温度分布。

[0090] 关于下文所述的示例NITI传感器和/或系统实施例,CHFT+/-指组合热通量和温度传感器(即热通量传感器-温度传感器对),且+或-分别指示是否使用外部热设备(例如加热器、珀耳帖设备等),该外部热设备与意图用于NITI的控制电路一起使用。DUO NITI是指具有并行操作的多个(例如,两个)NITI传感器(例如,CHFT+或CHFT-)的NITI传感器和/或系统实施例。例如,DUO NITI示例实施例可以使用基于差分和/或商的数据处理方法来简化和进行更鲁棒的NITI测量。此外,DUO CHFT+指仅利用两个或更多个并行CHFT+实施例的DUO NITI示例实施例。类似地,DUO CHFT-指仅利用两个或更多个并行CHFT-实施例的DUO NITI示例实施例。DUO CHFT+/-指利用并行操作的至少一个CHFT+示例实施例和至少一个CHFT-示例实施例的DUO NITI示例实施例。与本申请相关,CHFT+、CHFT-、DUO CHFT+/-、DUO CHFT+和DUO CHFT-是可在不同NITI系统中使用的NITI传感器实施例的非限制性示例,其中一些在下文中描述。

[0091] 尽管热通量设备、热通量通道等可用于NITI,但出于前面所述的原因,热通量传感器是优选的。使用多种方法和技术(例如薄膜技术、厚膜技术、热电堆技术、差分热电堆技术、热电技术、塞贝克效应技术、横向塞贝克效应技术、对接焊技术、基于微机电系统(MEMS)的技术、基于纳米机电系统(NEMS)的技术、基于互补金属氧化物半导体(CMOS)的技术、添加剂制造技术、丝网印刷技术、喷墨技术、纺织传感器技术、绕线技术、基于RTD的技术、基于NTC的技术、基于热敏电阻器的技术、基于半导体的技术等)制造的所有各种热通量传感器(即热通量计、热通量仪、热通量换能器、热通量表、热流表、热流计、热流仪等)可用于NITI。在一些示例实施例中,一个或多个热通量传感器基于ASTM标准E2684所述的差分热电堆技术,并在ASTM标准E2683中进一步讨论。差分热电堆是一种将热能转换为电能(例如电压和/或电流)的无源电子换能器。差分热电堆通常由几个串联或(不那么常见的)并联的热电偶组成。通常,热电偶(即热电偶接头)位于一种或多种材料(即热阻层)的任一侧。单独热电偶(即热电偶接头)测量其接头点与热电偶电压输出被测量点之间的温差。串联时,热阻层任一侧的两个热电偶(即差分热电偶对或热电偶对)的电压输出通常是差分电压,该差分电压与跨(例如穿过)热阻层的温差和通过热阻层发生的热传递(例如热通量)相关(例如成比例)。串联添加更多热电偶对会增加差分电压输出的幅度,从而导致更高热通量传感器的敏感度。差分电压输出还受所用热电偶(即热电)材料的影响。因此,对于跨热阻层的给定温差,某些热电偶材料可能会导致比其他材料更高的差分电压输出。因此,热电偶材料的选择也会影响热通量传感器的敏感度。同样,用于热阻层的材料和/或厚度可能会影响热通量传感器敏感度以及热通量传感器响应时间。差分热电堆可以由至少两个热电偶接头组成的单个热电偶对或多个热电偶对构成。差分热电堆不测量绝对温度,而是代之以生成指示局部温差或温度梯度(例如,与之成比例)的差分电压输出。如前所述,该温度梯度是通过差分热电堆和/或热阻层发生的热传递(例如热通量)的结果,并因此,指示通过差分热电堆和/或热阻层发生的热传递(例如热通量)的测量。

[0092] 一个用于热传递测量的示例差分热电堆是使用薄膜材料和聚酰亚胺(即热阻层)构造的,以创建具有精确读数和快速响应时间(远小于1秒)的薄热通量传感器。另一示例可以是通过热阻层中的一个或多个导电通孔(即导通孔)构造的差分热电堆。其他示例可包括基于差分热电堆技术但设计用于通过例如热能收集(例如热电发电机(TEG))将热能转换为电能的设备。除了热能收集,这些设备还可以用作热通量传感器,鉴于它们可以输出指示通过设备发生的热传递(即热能)(例如,与之成比例)的差分电压。然而,由于不同的设计标准,当前的TEG技术通常昂贵,并且与为热通量传感器应用而设计的差分热电堆相比,具有大的形状因素。因此,使用此类设备可能导致使用困难和/或热传递(例如,热通量)测量不准确以及慢响应时间。另一个示例是基于织物的热通量传感器,其中差分热电堆构造在织物或其他材料内,所述织物或其他材料设计用于穿戴或以其他方式接触或接近例如人体。

[0093] 为简单起见,本申请中使用的热通量传感器测量的热传递的测量结果是热通量,单位为 W/m^2 。这是热传递的示例且非限制性测量,其可用于NITI和/或相关联主题(例如,热通量传感器设计、热接触电阻效应、数据处理方法等)。

[0094] 图1示出了基于差分热电堆技术的热通量传感器示例,该传感器具有厚度 t 、宽度 W 和长度 H 。感测区域由宽度 A 和长度 B 定义,并且传感器输出包括热通量输出电压引线(即输出引线)。

[0095] 图2A示出了示例差分热电堆的横截面,该热电堆包括热阻层,其中 k 是热阻层的热传导率, T_1 是热温度结, T_2 是冷温度结, ΔT 是 T_1 和 T_2 之间的温差,并且相当于跨热阻层的温差,并且 ΔV 是串联热电偶对输出的差分电压,并且直接指示 ΔT (例如,与之成比例),其是 q'' (通过热阻层发生的热通量)的结果。热电偶对的数量越多,热通量传感器的敏感度就越高(对于给定量的 q'' , ΔV 越大)。在该示例中,通过热阻层将两种不同的热电材料(例如M1和M2)串联,形成每个温度结。不同热电材料可包括具有不同塞贝克系数以生成热电电压的材料(例如铜和康铜、铜和镍、铜和银、铋和碲化铋、正掺杂材料和负掺杂材料、p型半导体材料和n型半导体材料等)。

[0096] 图2B示出了另一个示例差分热电堆,其包括两种不同的热电材料(即M1和M2)以及电导体(M3)。在该示例实施例中,M3用于通过热阻层串联连接M1和M2。示例差分热电堆的这种配置具有示例益处,包括更低的制造成本、更高的敏感度、更大的设计自由度等,并且可以使用一种或多种制造技术(例如,基于MEMS的技术、基于NEMS的技术、基于CMOS的技术、基于添加剂的技术等)来实现。在其他示例实施例中,在M3设计为与M1或M2相同的材料的情况下,可进一步简化制造。

[0097] 当通过将两种相似或不同的金属材料压在一起形成热电偶接头时,或当温度传感器被置于与对象表面接触时,由于接触表面的不平整度和粗糙度,只有一小部分标称表面积实际接触。如果跨接头和/或接触表面施加热通量,则热流(即热能)通常限于通过接触点传导。参见图3所示的示例。接触点的受限数量和尺寸导致实际接触面积,该实际接触面积明显小于表观接触面积。这种受限的接触面积和间隙的存在会导致称为接触电阻或热接触电阻的热阻(R_c'')。

[0098] 热接触电阻(R_c'')的存在影响温度测量的质量。具体而言,例如,示例NITI实施例的温度传感器与对象表面之间存在热接触电阻(R_c'')会导致不准确的温度读数。换句话说,即

使通过例如薄膜热电偶技术实现了充分的接触和热分流设计时,对象的实际表面温度也不同于温度传感器测量的温度。这种不准确与存在的热接触电阻(R_C'')的大小(通常为常数)以及在指定时间通过其发生的热通量相关。这种关系在数学上表示如下:

$$T_{Surface}(t) = T_{Sensor}(t) - q_{Sensor}(t) \times R_C'' \quad [1]$$

当进入对象时,热通量定义为正,并且其中:

t 是指定时间, $q_{Sensor}(t)$ 是在指定时间的所测热通量, $T_{Sensor}(t)$ 是在指定时间传感器测量的表面温度(即所测传感器温度、所测温度),以及 $T_{Surface}(t)$ 是指定时间的实际表面温度。关于本申请,除非上下文另有指示,否则示例NITI传感器实施例的温度传感器与对象表面之间的热接触电阻(R_C'')可称为NITI传感器与对象表面之间的热接触电阻。

[0099] 图4示出了示例CHFT+实施例,该实施例包括热通量传感器和温度传感器,该温度传感器放置在对象的表面上,该对象具有与该对象内部区域相关的未知内部属性,并且其中加热器(即外部热设备)放置在热通量传感器上。在本例中,热通量传感器与温度传感器接触,该温度传感器与对象表面接触。同样,温度传感器和对象表面之间的受限接触面积导致温度传感器和对象表面温度之间的热阻,并示出为热接触电阻(R_C'')。此外,温度传感器上的层(例如,由于保护层、粘合剂等)可能会影响(例如,增加)存在的热接触电阻(R_C'')的量。热通量(q'')示出为指向对象的向量,并在该方向上定义为正。因此,如方程[1]所指示,对象的实际表面温度($T_{Surface}(t)$)使用来自温度传感器测得的所测温度($T_{Surface}(t)$)、来自热通量传感器的所测热通量($q_{Sensor}(t)$)、以及热接触电阻(R_C'')来确定。在一些示例实施例中,可努力使热接触电阻(R_C'')最小化,以便假设方程[1]中的值为“0”。这可以例如通过在接触表面之间使用导热粘合剂来完成。

[0100] 在其他示例实施例中,为了获得准确的实际表面温度测量($T_{Surface}(t)$),热接触电阻(R_C'')的估计值可能需要确定(例如,测量)。在某些情况下,估计的热接触电阻(R_C'')(即热接触电阻(R_C''))值可确定为可忽略不计或为零。在其他情况下,估计的热接触电阻(R_C'')值可使用来自例如用于安装NITI传感器的胶带的制造规范的预定规范来确定。

[0101] 示例实施例能够对对象进行精确的NITI测量,无论是在稳态或瞬态环境中进行。示例实施例在其各自的热数学模型(热通量是输入)中利用热通量边界条件,其比基于温度的边界条件更鲁棒和准确。示例输出包括对象内部属性(例如对象内部区域的内部温度分布和/或对象的一个或多个内部参数)的准确值。

[0102] 参考图5,CHFT-实施例包括热通量传感器和温度传感器,它们放置在具有未知内部属性的对象表面上。一个示例应用是在发生某种形式的外部热事件的情形中,例如,将CHFT-放置在发动机上,其中外部热事件是发动机产生和排放的热量。另一应用是将CHFT-放置在人或其他动物的身体上,例如,运动的运动员。在该后一个示例中,身体散热和在CHFT-上移动的气流的组合对应于外部热事件。其他外部热事件可来源于加热灯、风扇、散热器、太阳辐射、与其他对象(例如金属板)的接触等,这些对象不与意图用于NITI的控制电路一起使用(即,非受控外部热事件)。

[0103] 为了限制来自由于例如小环境变化和/或其他外部刺激而登记的热通量噪声和零星信号,可在CHFT-顶部放置一块热绝缘体(即热绝缘层或热绝缘件),如图6A所示。该块绝缘体起到过滤器的作用,并且只允许将由CHFT-检测的实质性热通量和温度信号。此外,热绝缘件可用于控制(即,限制、增加等)通过CHFT-发生的热通量的量。绝缘件的厚度、材料、形状因素和尺寸取决于CHFT-正被使用的应用以及其他因素。在一些示例实施例中,热绝缘体可嵌入在其上安装热通量传感器和/或温度传感器的衬底或材料中。例如,可在用于布置和电连接到热通量传感器和/或温度传感器的印刷电路板(例如,刚性和/或柔性材料)内设计具有低热传导性的气隙或其他区域。

[0104] 图6A示出了示例,其中热绝缘件适于覆盖整个热通量传感器-温度传感器对。在其他示例实施例中,如图6B所示,绝缘件也可与热通量传感器-温度传感器对周围的对象表面区域重叠。在一些示例实施例中,诸如图6C所示,可以指定热绝缘件或附加热绝缘体围绕热通量传感器和/或温度传感器,以最小化热损失。在一些示例实施例中,热绝缘材料可包括金属或其他导热材料,其设计用于增强和增加通过CHFT-发生的热通量的量。图6A-图6C所示的绝缘、过滤和热通量控制技术可以可选性地用于一些或全部NITI传感器实施例。

[0105] 参考图7A,示例CHFT+实施例包括热通量传感器、温度传感器和外部热设备,例如加热器、冷却器、流体流通道、风扇、加热灯等,该外部热设备与意图用于NITI的控制电路一起使用。当外部热事件不发生并且在大多数情况下保持稳态条件时,CHFT+实施例特别有用。但是,它们也可用于不受控外部热事件正发生的情形。利用外部热设备,CHFT+可生成受控热事件,其产生瞬态响应(即不同的热信号)。例如,外部热设备可对加热器(即,外部热设备)循环供电以在对象表面提供周期性热事件。必要时,可以控制外部热设备以达到稳态条件。在其他示例实施例中,CHFT+可包括一个以上的外部热设备。例如,加热器和珀耳帖冷却器都可以用作外部热设备,以便根据需要创建热热源和热散热器。作为另一示例,单个珀耳帖设备可用作外部热设备以实现热加热和冷却。在图7A中,加热器图示作为外部热设备的示例。在该示例中,加热器(即,外部热设备)被设计为向包含整个热通量传感器-温度传感器对以及围绕热通量传感器-温度传感器对的对象表面区域的区域提供热事件。在图7B中,图示了另一示例实施例,其中加热器(例如,外部热设备)设计为仅向包含整个热通量传感器-温度传感器对的区域提供热事件。图7C示出了示例CHFT+实施例的俯视图,其包括具有输出引线(即,输出端子连接)的温度传感器、具有输出引线(示例输出端子)的热通量传感器和具有电源引线(示例电源端子)的加热器(示例外部热设备)。在此示例中,输出和电源引线连接(例如,焊接)到每个组件的相应输出端子。在其他示例实施例中,输出端子可以连接到为表面安装或通孔设备设计的其他端子(例如,导电垫),例如,通过使用刚性和/或柔性印刷电路板技术。在其他示例CHFT+实施例中,加热器可以通过具有受控电阻、形状和/或尺寸的跟踪图案构造在例如印刷电路板内,该跟踪图案直接连接到电路内的电源。鉴于这种设计的嵌入式方面,这可以简化制造过程。在一些示例NITI传感器实施例中,一个或多个温度传感器输出引线可连接到接地端子和/或参考电阻器,该接地端子和/或参考电阻器可用作电路的一部分,以基于温度传感器电阻(例如,热敏电阻器)进行温度测量。

[0106] 在其他示例实施例中,诸如图7D所示,温度传感器可位于与对象表面接触的热通量传感器感测区域的相对侧上或附近。在这些示例实施例中,可以假设温度传感器的输出与图7A中配置的温度传感器的输出相同。当热通量传感器由于其设计(例如,低厚度、高热

传导率等)而具有可忽略不计的热阻时和/或在产生零热通量条件的情况下,尤其如此。在其他示例实施例中,例如热通量传感器的热阻不可忽略的实施例,热通量传感器的热阻的一个或多个效应可以建模为温度传感器和对象表面之间的热接触电阻的一部分。在其他示例实施例中,例如,热通量传感器接头的数量和热通量传感器敏感度准确已知的实施例,热通量传感器输出可用于实时确定跨热通量传感器的温差,使得可以将输出与图7D中的温度传感器组合,以确定热通量传感器和对象表面之间的温度。

[0107] 在其他示例实施例中,诸如图7E所示,温度传感器可嵌入热通量传感器和/或热通量传感器感测区域内。

[0108] 在其他示例实施例中,诸如图7F所示,热通量传感器和温度传感器可位于衬底的任一侧,同时避免测量失配。例如,热通量传感器和温度传感器可以在衬底(例如,柔性印刷电路板)的任一侧对准,使得热通量传感器和/或热通量传感器感测区域包含相对侧的温度传感器。这可以通过例如将热通量传感器放置在衬底相对侧的温度传感器下方或顶部来实现。在这些示例实施例中,热通量传感器和/或温度传感器可进一步被其他热兼容材料(例如热阻接近温度/或热通量传感器的材料)包围和/或与之接触,以确保通过热通量传感器和温度传感器的均匀热能流(例如热流)。图7G中图示了示例实施例。

[0109] 图7D-图7G中所示的示例实施例的非限制性特征可以可选性地用于任何示例NITI实施例,包括示例CHFT-实施例。

[0110] 具有用于确定对象一个或多个内部属性的一个或多个热通量传感器-温度传感器对的系统实施例

图8图示了使用CHFT-执行NITI的示例NITI系统。CHFT-包括温度传感器和热通量传感器(即热通量传感器-温度传感器对)。在其他示例实施例中,CHFT-可包括一个以上的温度传感器和/或一个以上的热通量传感器(例如,多个热通量传感器-温度传感器对)。温度传感器和热通量传感器相对于彼此和对象的配置可以例如如图5和6A-6C中的任何一个所示。来自温度传感器和热通量传感器的模拟信号输出(对应于测量的温度传感器和测量的热通量传感器模拟信号)通过合适的通信路径(例如,电导体)提供,并通过数据采集(DAQ)电路转换为数字信号,数据采集(DAQ)电路可包括例如一个或多个模数转换器(ADC)、微控制器等。DAQ电路通过合适的通信路径(例如,电导体、无线电信号等)向控制电路提供测量的温度传感器和测量的热通量传感器数字信号,以进行以下更详细的描述的处理。控制电路可以包括一个或多个适当配置的计算机、微处理器、DSP、FPGA或其他数据处理器。控制电路的适当配置可在硬件、软件或组合中实现。控制电路包括诸如显示器、网络、云计算机系统、如蜂窝电话之类的通信设备、可穿戴技术等输出或与之通信。该输出还可用于一个或多个控制操作,诸如传感器启用和禁用、远程监测、测量启动/停止,数据记录、温度控制、能量控制、系统故障控制、预防性维护控制、诊断、系统性能、数据输入、数据显示、分析等。

[0111] 图9图示了使用CHFT+执行NITI的NITI系统示例。与CHFT-一样,CHFT+包括温度传感器和热通量传感器(即热通量传感器-温度传感器对)。在其他示例实施例中,CHFT+可包括一个以上的温度传感器和/或一个以上的热通量传感器(例如,多个热通量传感器-温度传感器对)。此外,CHFT+包括外部热设备,诸如所示的电阻性加热器。温度传感器、热通量传感器和外部热设备相对于彼此和对象的配置可以例如如图7A-7G中的任一所示。在其他示例实施例中,CHFT+可包括一个以上的外部热设备(例如,加热器和冷却器)。来自温度传感

器和热通量传感器的模拟信号输出(对应于测量的温度传感器和测量的热通量传感器模拟信号)通过合适的通信路径(例如,电导体)提供,并通过数据采集(DAQ)电路转换为数字信号,数据采集(DAQ)电路可包括例如一个或多个模数转换器(ADC)、微控制器等。DAQ电路通过合适的通信路径(例如,电导体、无线电信号等)向控制电路提供测量的温度传感器和测量的热通量传感器数字信号,以进行以下更详细描述的处理。控制电路可以包括一个或多个适当配置的计算机、微处理器、DSP、FPGA或其他数据处理器。控制电路的适当配置可在硬件、软件或组合中实现。控制电路包括诸如显示器、网络、云计算系统、如蜂窝电话之类的通信设备、可穿戴技术等输出或与之通信。该输出还可用于一个或多个控制操作,诸如传感器启用和禁用、远程监测、测量启动/停止,外部热设备操作、数据记录、温度控制、能量控制、系统故障控制、预防性维护控制、诊断、系统性能、数据输入、数据显示、分析等。在此非限制性示例中,外部热设备使用中继器(示例开关)进行控制,并且中继器由来自DAQ的中继信号操作,DAQ基于来自控制电路的输入提供中继信号。

[0112] 图10是流程图,概述了非限制性和示例NITI系统中控制电路执行的示例过程,该系统包括用于确定对象一个或多个内部属性的NITI传感器,包括使用所测热通量、所测温度和确定的对象内部参数值,在一个或多个指定时间确定对象内部区域的内部温度分布。控制电路在一个或多个指定时间从温度传感器接收所测温度信号(步骤S1)。控制电路还在一个或多个指定时间从测量的热通量传感器接收所测热通量信号,以产生在表面离开或进入对象的热传递的测量结果(步骤S2)。控制电路在步骤S3中在一个或多个指定时间确定内部参数的值,并在步骤S4中基于所测温度信号、所测热通量信号以及内部参数的值,在一个或多个指定时间确定对象内部区域的内部温度分布。控制电路生成指示在一个或多个指定时间的内部温度分布的信息(例如,用于输出)(步骤S5)。控制电路还在步骤S6中生成指示在一个或多个指定时间的一个或多个内部参数的信息(例如,用于输出)。控制电路可以可选地在步骤S5之前执行步骤S6和/或可以可选地不执行步骤S4、步骤S5和/或步骤S6。控制电路可以可选地在步骤S1之前执行步骤S2。在一些示例实施例中,控制电路可以可选地在步骤S2和/或步骤S1之前执行步骤S3。

[0113] 在另外的示例实施例中可以使用附加过程。例如,确定对象的热数学模型(即,热模型),并规定适当的初始和边界条件,以便求解热数学解(即,数学解)。对于更一般情况,热数学模型和相应的热数学解可在热传递文献中找到,而更独特情况的模型可能需要推导和求解。可以使用各种方法来推导和/或求解热数学模型,包括但不限于分析方法、有限差分方法、数值方法等。热数学模型可以基于一维热传递或多维热传递(例如,二维)。

[0114] 为了获得更准确、鲁棒和一致的NITI,热数学模型的边界条件定义为包括表面热通量边界条件,从而利用热通量输入导致对象的热数学解(例如内部温度分布)。可以使用表面热通量边界条件,因为NITI传感器使用例如在对象表面的热通量传感器直接测量热通量。因此,热通量可直接用于热数学模型(即热通量边界条件),其在相应的热数学解(即数学解)中导致热通量输入。表1提供了详细但仍为示例的一维热数学模型(即热模型),其包括偏微分方程(PDE)、适当的边界条件和半无限固体(即半无限介质)的初始条件、示例对象和热传递文献中的一般情况。

[0115] 表1. 具有热通量边界条件的半无限固体热模型

PDE	$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$
边界条件	$-k \frac{\partial T}{\partial x} = \dot{q}_{Sensor}(t) \quad , \quad x = 0$ $T \rightarrow T_0 \quad , \quad x \rightarrow \infty$
初始条件	$T = T_0 \quad , \quad t = 0$
其中： k =对象的热传导率 ρ =对象的密度 C =对象的比热容 α =对象的热扩散率 x =距对象表面的深度 t =时间 T =对象的内部温度分布（ x 和 t 的函数） T₀ =对象的内部温度	

[0116] 对于半无限介质(对象)的发生在表面的恒定阶跃热通量输入($x = 0$),表1中热模型的数学解如下所示:

$$T(x, t) = T_0 + \frac{2\dot{q}_{Sensor,0} \left(\frac{\alpha t}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}}}{k} \exp\left(\frac{-x^2}{4\alpha t}\right) - \frac{\dot{q}_{Sensor,0} x}{k} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}\right) \quad [2]$$

其中 $\dot{q}_{Sensor,0}$ 是边界处的恒定阶跃热通量输入。

[0117] 使用Duhamel叠加法(一种示例数学方法),可以推导出热通量输入随时间变化的方程[2],这是NITI传感器输出的实际情况:

$$T_m(x, t_m) = T_0 + \sum_{j=1}^m (\dot{q}_{Sensor,j} - \dot{q}_{Sensor,j-1}) \left(\frac{2 \left(\frac{\alpha(t_m - t_{j-1})}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}}}{k} \exp\left(\frac{-x^2}{4\alpha(t_m - t_{j-1})}\right) - \frac{x}{k} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha(t_m - t_{j-1})}}\right) \right) \quad [3]$$

其中m指示由NITI传感器进行的第m个测量,从而 $T_m(x, t_m)$ 是指深度为x并且第m次测量的对象内部温度,其对应于指定时间(t_m)。

[0118] 在本例中,方程[3]表示表1中指定的非限制性且为示例的热模型的热数学解,即对象内部区域的内部温度分布的数学表达式。

[0119] 评估表面处的方程[3] ($x = 0$)并实现 $\alpha = \frac{k}{\rho C}$:

$$T_{Surface,m} = T_{Surface,0} + \sum_{j=1}^m (\dot{q}_{Sensor,j} - \dot{q}_{Sensor,j-1}) \times \sqrt{t_m - t_{j-1}} \times \frac{2}{\sqrt{\pi} \sqrt{k\rho C}} \quad [4]$$

其中 $T_{Surface,m}$ 是表1中建模的示例对象的所计算表面温度。注意,在本例中,方程[4]是稳态条件下表面对象温度的函数($T_{Surface,0}$),并且例如在瞬态热事件之前或之后确定。方程[4]也是一个或多个指定时间的表面热通量测量结果($q_{Sensor,m}''$)和对象热传导率(k)、对象密度(ρ)以及对象的比热容(C)乘积的平方根的函数。此对象内部参数($\sqrt{k\rho C}$)通常被称为热惯性(即热发射率)。

[0120] 方程[4]中确定的所计算对象表面温度可与数据处理方法一起使用,该数据处理方法可包括例如一个或多个参数估计方案。对于在一个或多个指定时间测量的NITI传感器输出值(即热通量和温度),数据处理方法可将测量的传感器温度与计算的表面温度进行比较,如在本例中使用方程[4]时所发现的那样。除其他事项外,这允许确定对象的相应内部参数的估计值;在这种情况下,对象的热惯性(即热发射率)的内部参数($\sqrt{k\rho C}$)。

[0121] 在其他数据处理方法中,在本例中,对象热传导率(k)、对象密度(ρ)以及对象的比热容(C)的内部参数的估计值可单独确定。例如,对于上述情况,密度(ρ)和比热容(C)的预定值可根据参考材料(例如教科书或制造规范)确定,从而允许数据处理方法基于对象热惯性(即热发射率)的估计值($\sqrt{k\rho C}$)或 $k\rho C$ 确定热传导率(k)的估计值。在其他示例中,可使用相应的热数学解开发不同的热数学模型,与方程[4]相反,该热数学解在对象中深度(x)处(例如, $x = 0$)评估时在每个单独的内部参数之间进行区分。这将允许与适当的数据处理方法一起使用时确定每个单独内部参数(例如 k 、 ρ 、 C 等)的估计值。控制电路还可以执行进一步的步骤,以提高NITI传感器的精度和/或扩大其应用。例如,如前所述,由于在温度传感器和对象表面之间存在热接触电阻(R_C''),所测传感器温度与对象(例如,半无限固体)实际表面温度的测量结果不同。这导致对象的实际表面温度与所测传感器温度之间的差异。热接触电阻(R_C'')可能是由于NITI传感器的温度传感器上可能分层的材料以及其与对象表面的粘附程度造成的。对象表面的平滑度/粗糙度也可能影响热接触电阻(R_C'')以及NITI的整体准确性。因此,可以优选光滑表面。使用粘合剂(例如热糊、压敏粘合剂等)安装传感器也可能会影响热接触电阻(R_C'')。图4图示了热接触电阻(R_C''),其与示例NITI实施例有关。

[0122] 从数学上讲,所测传感器温度和实际表面温度可通过方程[1]关联,此处以索引形式示出为:

$$T_{Surface,m} = T_{Sensor,m} - q_{Sensor,m}'' \times R_C'' \quad [5]$$

其中当进入对象时,热通量定义为正。

[0123] 在电工程类比中,热接触电阻(R_C'')可建模为电阻器且 $q_{Sensor,m}''$ 为电流。因此,当电流($q_{Sensor,m}''$)流过电阻器(R_C'')时,产生电压降(差)。这里,电压差类似于传感器(即被测)和对象(即实际)表面温度之间的温差。

[0124] 在某些情况下,可能还需要考虑与用于安装传感器的材料相关联的热效应。例如,与例如安装材料热传导性(k)、安装材料密度(ρ)以及安装材料比热容(C)相关联的一个或多个效应可能需要在用于NITI的热数学模型中包括和计及。

[0125] 为了获得更精确的NITI,热接触电阻(R_C'')的这些效应应该被考虑。将方程[4]与方程[5]结合使用,得出方程[6]中所计算传感器温度的表达式。

$$T_{\text{Calculated},m} = T_{\text{Sensor},0} - q_{\text{Sensor},0}'' \times R_C'' + \sum_{j=1}^m (q_{\text{Sensor},j}'' - q_{\text{Sensor},j-1}'') \times \sqrt{t_m - t_{j-1}} \times \frac{2}{\sqrt{\pi} \sqrt{k\rho c}} + q_{\text{Sensor},m}'' \times R_C'' \quad [6]$$

[0126] 可在数据处理方法中使用方程[6]代替方程[4],并且例如将方程[6]与来自NITI传感器的所测传感器温度输出进行比较,以确定对象的一个或多个内部参数的估计值。这样做的一个示例且非限制性方法是在参数估计方案中定义最小化的目标函数。示例目标函数可以使用方程[7]定义为两个不同传感器温度测量结果之间的均方根误差(RMSE)。

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{m=1}^{M-1} (T_{\text{Sensor},m} - T_{\text{Calculated},m})^2} \quad [7]$$

[0127] 其中

$$T_{\text{Calculated},m} = T_{\text{Surface},m} + q_{\text{Sensor},m}'' \times R_C'' \quad [8]$$

因此,方程[7]可以改写为:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{m=1}^{M-1} (T_{\text{Sensor},m} - (T_{\text{Surface},m} + q_{\text{Sensor},m}'' \times R_C''))^2} \quad [9]$$

其中 M 是NITI传感器在一段时间内(即一个或多个指定时间)进行的测量总数。应当注意,根据实施例, m 可能并不总是如方程[7]和方程[9]中所示从值1开始。类似地,数量 $M-1$ 也可以根据实施例而有所不同。例如 $M-1$ 可以用 $M-15$ 或 M 替代。在其他示例实施例中, $M-1$ 可替换为 $m+30$ 、 $m+10$ 、 $m+5$ 等,其定义了第 m 个测量后指定数量测量的目标函数。

[0128] 在其他数据处理方法中,例如,基于目标函数(例如,方程[9])的导数的方程可以设置为等于零。相应的内部参数和热接触电阻(R_C'')最能满足此条件的值是确定的估计值。

[0129] 如前所述,准确且实际的NITI的主要组成部分是热接触电阻(R_C'')确定。对于某些情况,例如,低热通量环境(例如,零热通量条件)或以其他方式可忽略不计的热接触电阻(R_C'')条件,热接触电阻(R_C'')可以忽略或以其他方式确定为具有为零的估计值。但对于许多情况,这并不是一个准确的假设。在这些情况下,热接触电阻(R_C'')的估计值例如可能需要通过先前的测量预先确定,作为数据处理方法的一部分来确定(例如,通过参数估计方案),或以其他方式确定(例如,由制造规范预先确定)。

[0130] 确定热接触电阻(R_C'')估计值的一种方法将其作为未知变量包括在可包括参数估计方案的数据处理方法中。对应的内部参数值和热接触电阻(R_C'')值在计算的传感器温度和测量的传感器温度之间生成最佳匹配(即最小误差)的组合可被视为确定的估计值(即最佳

输出值)。

[0131] 例如,对于上面介绍的一般和示例半无限对象情况,对于 $\sqrt{k\rho C}$ 尝试(例如,猜测)的每个值,一系列不同的 R_C'' 值也被尝试并输入方程[6]。对于尝试的 $\sqrt{k\rho C}$ 和 R_C'' 值的每个组合,将方程[6]的结果(即,计算的传感器温度)与测量的传感器温度(作为NITI传感器的输出)进行比较。该比较可通过目标函数(例如方程[7]中定义的目标函数)进行。在本例中,针对内部参数(例如 $\sqrt{k\rho C}$)和热接触电阻(R_C'')尝试的在计算的传感器温度和测量的传感器温度之间生成最佳匹配(即最小误差(例如,最小RMSE值))的值组合可被视为确定的估计值(即,最佳输出值)。然而,这种示例方法(即蛮力数据处理方法)可能是耗时的,尤其是当期望更精确的结果时。因此,这种方法使大多数NITI应用变得不切实际。虽然耗时,但该技术比基于使用基于温度的边界条件的数学解的蛮力数据处理方法更精确且更快。这是由于基于温度的边界条件的复杂性和限制的结果。

[0132] 另一种方法是通过优化方案确定相应内部参数(例如 $\sqrt{k\rho C}$)以及热接触电阻(R_C'')值的估计值。例如,优化方案可设计为通过例如内部参数值(例如 $\sqrt{k\rho C}$)以及热接触电阻(R_C'')值的非线性变化组合来最小化目标函数(例如方程[7])。与上述暴力数据处理方法相比时,这种方法可以产生更快的结果,但可能不那么准确。

[0133] 一种确定接触热阻(R_C'')估计值的新方法是基于对象的内部属性来确定(例如,计算)它。这大大缩短了处理时间,并使该技术在许多应用中更加实际。这种方法利用了热接触电阻(R_C'')关于时间是恒定的。因此,在任何指定时间或任何给定的测量,热接触电阻(R_C'')相当于在之前或之后指定时间或测量的热接触电阻(R_C'')。从数学上讲,这可以表示为:

$$R_C'' = R_{C_n}'' \quad [10]$$

其中n指示NITI传感器进行的第n个测量(一段时间期间总共N个测量)。因此,出于本非限制性示例的目的, $N = M$ 。此外,数量n可根据实施例而不同。例如n可以用 $n-1$ 或 $n+1$ 替代。

[0134] 鉴于这种一致性,在指定时间或测量的热接触电阻(R_C'')相当于进行测量的整个时间段的平均接触热阻,并且可表示为:

$$R_{C_n}'' = \frac{\sum_{n=1}^{N-1} R_{C_n}''}{N-1} \quad [11]$$

此外,方程[5]可以重新排列为:

$$R_{C_n}'' = \frac{T_{Sensor,n} - T_{Surface,n}}{q_{Sensor,n}} \quad [12]$$

将方程[10]、方程[11]和方程[12]结合起来,得出:

$$R_C'' = \frac{\sum_{n=1}^{N-1} \frac{T_{Sensor,n} - T_{Surface,n}}{q_{Sensor,n}}}{N-1} \quad [13]$$

关于前面描述的示例数据处理方法,将方程[13]输入到方程[9](参数估计方案的示例目标函数),结果是:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{m=1}^{M-1} \left(T_{\text{Sensor},m} - \left(T_{\text{Surface},m} + q_{\text{Sensor},m}^* \times \frac{\sum_{n=1}^{N-1} T_{\text{Sensor},n} - T_{\text{Surface},n}}{N-1} \right) \right)^2} \quad [14]$$

应当注意,根据示例实施例,n可能并非总是如方程[14]所示以1的值开始。类似地,数量 $N-1$ 也可以根据实施例而有所不同。例如 $N-1$ 可以用 $N-15$ 或 N 替代。在其他示例实施例中, $N-1$ 可替换为 $n+30$ 、 $n+10$ 、 $n+5$ 等,这定义了第n个测量之后针对指定数量测量的方程[13]。

[0135] 与方程[9]相比,方程[14]中示例目标函数的这个版本在很大程度上独立于热接触电阻(R_C'')。唯一依赖于热接触电阻(R_C'')的项是 $T_{\text{Surface},0}$,其中,作为方程[5]的结果,该项定义为 $T_{\text{Sensor},0} - q_{\text{Sensor},0}^* \times R_C''$ 。应该注意的是,在许多情况下,数量 $q_{\text{Sensor},0}^* \times R_C''$ 可以忽略不计。在其不可忽略的情况下,需要更好的设计,并且数量 $q_{\text{Sensor},0}^* \times R_C''$ 可能需要计及。实现这一点的示例方法是在本数据处理方法示例中进行参数估计方案之前尝试(例如,猜测)热接触电阻(R_C'')的初始值。无论尝试的初始值如何,参数估计方案都将确定热接触电阻(R_C'')的准确估计值以及内部参数的准确估计值。

[0136] 作为数据处理方法的一部分,在参数估计方案中使用方程[14]作为目标函数,大大减少了进行NITI测量所需的时间。为了获得可比的准确度并使用相同计算机,发明人确定,该数据处理方法可在不到1秒的处理时间内完成,而相比之下,对于相同的数据集(75秒的数据-1HZ的采样频率)使用基于上述蛮力方法的数据处理方法时该数据处理方法在约为15分钟内完成。

[0137] 最后,另一个不明显的方法是基于给定对象的内部参数和整体稳态热阻(R_{Total}'')确定热接触电阻(R_C'')的估计值。下文针对示例NITI应用描述了该方法的非限制性示例。

[0138] 应注意的是,用于热接触电阻(R_C'')确定的这些方法不限于特定的数据处理方法和/或NITI技术。相反,它们可用作热接触电阻(R_C'')确定的一般表达式和方法,而无论NITI和/或NITI应用采用何种数据处理方法。

[0139] 图11是流程图,示出了控制电路执行的示例数据处理方法的非限制性示例过程,以确定对象的一个或多个内部属性(即内部属性)和在对象和NITI传感器表面之间估计的热接触电阻(R_C'')。在此示例中,数据处理方法包括参数估计方案。在一个或多个指定时间测量的对象表面温度(即,测量的传感器温度)、在一个或多个指定时间测量的对象表面热通量、对象一个或多个内部参数(例如 R'' (对象的稳态热阻)、 k 、 ρ 、 C 、 $\sqrt{k\rho C}$ 等)的初始值以及热接触电阻(R_C'')的初始值输入到计算的传感器温度方程(例如,方程[6]),以生成一个或多个指定时间的所计算传感器温度。在此示例中,确定一个或多个指定时间的所计算传感器温度与一个或多个指定时间的所测传感器温度之间的差异(例如,误差)。该差异例如与

预定阈值相比较,并且如果大于阈值,则该差异用于调整一个或多个内部参数值和热接触电阻(R_c'')值。为简单起见,一个或多个调整的内部参数值和一个或多个其他(即,非调整的)内部参数值统称为更新值。可以通过多种不同的方式进行调整。例如,一个或多个内部参数和热接触电阻(R_c'')的后续值可在不考虑由以前使用的内部参数和热接触电阻(R_c'')值产生的历史差异(例如误差)的任何趋势或模式的情况下使用。在其他示例中,可根据以前使用的内部参数和热接触电阻(R_c'')值产生的历史差异(例如误差)进行调整。在非限制性示例中,如果 k (例如 k_0)的值与100的差异(即误差)相关并且用于 k (例如 k_1)的下一个值(更大的值)与为200的误差相关时,倘若使用大于 k_0 (k_1)的值时差异(即误差)增加的话,控制电路可尝试小于 k (k_0)的原始值的值。一旦差异小于或等于阈值或以其他方式被视为最小值,控制电路将用于内部参数和热接触电阻(R_c'')的相应值视为精确和最佳(即输出)估计值。然后,通过使用例如方程[3],控制电路生成与指示对象内部区域的内部温度分布的一个或多个准确值相对应的信息(例如,用于输出)。此外,如果期望,控制电路生成对应于准确估计值的信息(例如,用于输出),该准确估计值指示对象的一个或多个内部参数,例如 R'' 、 k 、 ρ 、 C 、 $\sqrt{k\rho C}$ 等,以及热接触电阻(R_c'')。

[0140] 刚才描述的方法是由控制电路执行的非限制性示例周期性NITI数据处理方法,该方法可通过后置处理从放置在对象表面上并同时可经受热事件的NITI传感器输出的热通量和温度信号,来确定对象内部参数(例如 R'' 、 k 、 ρ 、 C 、 $\sqrt{k\rho C}$ 等)、在温度传感器和对象表面之间的热接触电阻(R_c'')、对象内部区域的内部温度分布(例如 $T_m(x, t_m)$)等。对于CHFT+,该热事件可由例如与控制电路一起使用的外部热设备生成。而CHFT-设计用于例如在外部热事件环境下操作,所述外部热事件环境例如身体散热、发动机缸体热损失、对流冷却或加热等,这些环境不与控制电路一起使用。由于控制电路可以非常快速执行此过程,因此可以与在测量热通量和温度信号并将其作为输入提供给控制电路实时地执行数据处理。对于每个附加测量,重新运行数据处理方法,确定对象内部区域的一个或多个内部属性(即,内部属性)的值,并生成例如用于输出的信息。

[0141] NITI的其他方法(即技术)可通过例如根据感兴趣的内部属性将热数学解(例如,方程[3])修改为不同形式来执行。下文针对不同的应用提供了热数学解和相应的NITI方法的修改排列的非限制性示例。这些应用中的每种应用都有相应的热数学模型。通常,根据所使用的NITI应用和过程,可以使用不同的数据处理方法来确定对象的一个或多个内部属性的估计值。这些方法中的一些可以利用参数估计方案,而另一些则可以不利用参数估计方案,并且取而代之的是,例如,基于计算。

[0142] 在其他示例实施例中,可以对例如热数学解执行各种数学运算(例如,导数运算、积分运算等),以确定(例如,通过数据处理方法)对象的一个或多个内部属性。

[0143] 具有用于确定对象一个或多个内部属性的一个或多个并行热通量传感器-温度传感器对的系统实施例

通过多个(至少两个)NITI传感器(例如CHFT+或CHFT-)并行获取对象热通量和温度测量的示例NITI系统实施例被称为DUO NITI实施例。除了允许对象的更简单和更鲁棒的NITI之外,DUO NITI实施例消除了可能与非限制性示例NITI系统实施例和/或上述示例

CHFT+和/或示例CHFT-NITI系统实施例的方法相关联的不确定性。

[0144] 为了并行进行测量,示例DUO NITI实施例中的每个NITI传感器可以具有每个热通量传感器检测到的不同热通量值,对应于每个NITI传感器位置(也称为传感器节点)处发生的热通量的量差异。示例DUO NITI实施例的这一方面被称为差分热通量环境。下面的示例实施例可用于实现该条件。通常,由于差分热通量环境,每个传感器节点(即节点)处的温度测量结果也不同。

[0145] 使用示例DUO CHFT+实施例(多个CHFT+节点)创建差分热通量环境的一种方法是改变每个CHFT+外部热设备(例如,加热器)提供的热能的量。在加热器的情况下,这可以通过例如区分提供给每个加热器的电压、区分每个加热器的电阻、区分每个加热器的功率密度等来实现,以创建所需的差分热通量环境。图12示出了示例DUO(并行NITI传感器节点)CHFT+(带加热器)实施例的横截面。在该示例实施例中,每个NITI传感器(即传感器节点)包含一个热通量传感器-温度传感器对,并且由于是CHFT+节点而包括加热器(即外部热设备)。

[0146] 如果外部热设备(例如加热器)不是一个选项、不期望或不使用,则创建差分热通量环境的另一种方法是在每个传感器节点上放置不同量的热绝缘体。绝缘体可用于控制(即限制、增加等)通过传感器节点发生的热通量的量。通过不同的绝缘厚度和/或材料,可以实现不同量的热绝缘体。热绝缘体可包括金属或其他导热材料,其设计用于增强和增加通过传感器节点发生的热传递量。此外,绝缘体可充当过滤器,并仅允许将由NITI传感器检测到的实质性热通量和温度信号(例如CHFT+或CHFT-)。绝缘体还可用于保护NITI传感器免受可能影响测量质量的外部损坏和/或外部刺激的影响。图13示出了示例DUO(并行NITI传感器节点)CHFT-实施例的横截面,每个传感器节点上具有不同量的热绝缘体,以促进差分热通量环境。在NITI示例实施例中,传感器节点处使用的热绝缘体的属性不需要已知、实验确定或校准以进行一个或多个对象内部属性的测量。

[0147] 可替代地,例如,当信号噪声可能不是问题时,一个CHFT-节点可以并入热绝缘体,而另一个CHFT-节点被暴露。该示例实施例的横截面在图14中示出。

[0148] 图15中的另一示例实施例示出了DUO CHFT+/-系统的横截面,其中一个传感器节点并入CHFT+,并且一个传感器节点并入CHFT-。

[0149] DUO CHFT-系统横截面的再一示例实施例在图16中图示。该示例实施例可适用于外部热事件特定于单独传感器节点的情况。例如,一个传感器节点用灯加热,而另一个传感器节点用风扇冷却。

[0150] 创建差分热通量环境的另一示例实施例包括为每个热通量传感器-温度传感器对使用具有不同热阻的材料。例如,一个传感器节点并入由高热阻材料制成的示例NITI实施例(例如,CHFT-),并且一个传感器节点并入由低热阻材料制成的示例NITI实施例(例如,CHFT+)。每个传感器节点处的总热阻差异允许实现差分热通量环境。不同的热阻可以例如通过用于粘附、连接、容纳和/或接触热通量传感器和/或温度传感器(例如,刚性和/或柔性印刷电路板、粘合剂、衬底等)的一种或多种材料内的导电或绝缘通过孔/间隙引入到示例NITI实施例中。在其他示例实施例中,一个传感器节点的热通量传感器和/或温度传感器可以使用低热传导率和/或指定厚度的材料制造,而另一个传感器节点的热通量传感器和/或温度传感器可以使用高热传导率和/或不同指定厚度的材料制造。

[0151] 作为并入示例DUO NITI实施例中的一个或多个并行传感器节点的结果,除了执行上述示例CHFT+和示例CHFT-方法(其中传感器节点独立操作)之外,创新的信号测量和数据处理方法也是可能的。出于展示的目的,现在描述DUO NITI系统在差分热通量环境下操作时基于差分 and 商的一般、非限制性和示例数据处理方法。

[0152] 在本例中,两个NITI传感器节点(即传感器节点)被建模为放置在给定对象上,其中在该示例中假设对象的内部属性在两个传感器节点位置处是均匀的。这将在每个传感器节点(节点1和节点2)处产生以下示例独立方程:

$$T_{Sensor1,m} - q_{Sensor1,m} \times R_{C1}'' = T_{Internal} + R'' \times \left(q_{Sensor1,0} + \sum_{j=1}^m \Delta q_{Sensor1,j} \times \psi(t_m - t_{j-1}) \right) \quad [15]$$

$$T_{Sensor2,m} - q_{Sensor2,m} \times R_{C2}'' = T_{Internal} + R'' \times \left(q_{Sensor2,0} + \sum_{j=1}^m \Delta q_{Sensor2,j} \times \psi(t_m - t_{j-1}) \right) \quad [16]$$

其中 $T_{Internal}$ 是对象的内部温度(即内部温度分布),以及 ψ 是响应函数,其计及对象在一个或多个指定时间的瞬态热传递效应。通常, ψ 是为每个热模型独立导出的,并且可以基于一个或多个内部参数。因此,对于给定的NITI应用和相应的热模型,它通常是唯一的。在一些示例DUO NITI实施例中,出于与响应函数(ψ)相关的目的,可能需要确定一个或多个指定时间的一个或多个内部参数的初始值。这些初始值可以是预先确定的(例如,从教科书、参考资料等)、估计的(例如,通过数据处理方法)或以其他方式确定的。在一些示例实施例中,初始值在一个或多个指定时间内不改变并保持恒定。在其他示例实施例中,初始值可以在一个或多个指定时间更新或以其他方式调整。

[0153] 在稳态形式下,方程[15]和方程[16]简化为:

$$T_{Sensor1,m} = T_{Internal,m} + q_{Sensor1,m} \times (R'' + R_{C1}'') \quad [17]$$

$$T_{Sensor2,m} = T_{Internal,m} + q_{Sensor2,m} \times (R'' + R_{C2}'') \quad [18]$$

注意,方程[17]和方程[18]不包括计及对象的瞬态热传递效应的响应函数(ψ)。因此,它们通常不限于特定的NITI应用和相应的热模型。

[0154] DUO NITI系统的一般和示例基于差分的数据处理方法包括确定方程[15]和方程[16]之间的差异,这得出:

$$\begin{aligned} & (T_{Sensor1,m} - q_{Sensor1,m} \times R_{C1}'') - (T_{Sensor2,m} - q_{Sensor2,m} \times R_{C2}'') \\ & = R'' \times \left(q_{Sensor1,0} + \sum_{j=1}^m \Delta q_{Sensor1,j} \times \psi(t_m - t_{j-1}) \right) - R'' \times \left(q_{Sensor2,0} + \sum_{j=1}^m \Delta q_{Sensor2,j} \times \psi(t_m - t_{j-1}) \right) \end{aligned} \quad [19]$$

重新排列:

$$R'' = \frac{(T_{Sensor1,m} - q_{Sensor1,m} \times R_{C1}'') - (T_{Sensor2,m} - q_{Sensor2,m} \times R_{C2}'')}{q_{Sensor1,0} - q_{Sensor2,0} + \sum_{j=1}^m \Delta q_{Sensor1,j} \times \psi(t_m - t_{j-1}) - \sum_{j=1}^m \Delta q_{Sensor2,j} \times \psi(t_m - t_{j-1})} \quad [20]$$

方程[19]和方程[20]代表了DUO NITI系统基于差分的数据处理方法的示例一般形式,其中计及瞬态效应,并并行使用了两个传感器节点。在稳态条件下,方程[20]简化为:

$$T_{Sensor1,m} - T_{Sensor2,m} = \bar{q}_{Sensor1,m} \times (R'' + R''_{C1}) - \bar{q}_{Sensor2,m} \times (R'' + R''_{C2}) \quad [21]$$

重新排列:

$$R'' = \frac{(T_{Sensor1,m} - \bar{q}_{Sensor1,m} \times R''_{C1}) - (T_{Sensor2,m} - \bar{q}_{Sensor2,m} \times R''_{C2})}{\bar{q}_{Sensor1,m} - \bar{q}_{Sensor2,m}} \quad [22]$$

在本例中,当每个传感器节点的热接触电阻(R''_{C1} 和 R''_{C2})已知时,方程[20]和方程[22]可用于确定对象的稳态热阻(R''),其基于并因此指示对象的内部参数。因此,如果期望,当为一个或多个其他内部参数确定(例如,预定、估计等)值时,对象的稳态热阻(R'')可用于确定对象的一个或多个内部参数。下文提供了这方面的非限制性示例。

[0155] 如果传感器节点处的热接触电阻的估计值(R''_{C1} 和/或 R''_{C2})未知,可确定(例如,通过上述示例CHFT+或CHFT-过程)或以其他方式确定(例如,使用预定值)来确定该估计值。

[0156] 当每个传感器节点的热接触电阻(R''_{C1} 和 R''_{C2})估计为可忽略不计时,方程[20]简化为:

$$R'' = \frac{T_{Sensor1,m} - T_{Sensor2,m}}{\bar{q}_{Sensor1,0} - \bar{q}_{Sensor2,0} + \sum_{j=1}^m \Delta \bar{q}_{Sensor1,j} \times \psi(t_m - t_{j-1}) - \sum_{j=1}^m \Delta \bar{q}_{Sensor2,j} \times \psi(t_m - t_{j-1})} \quad [23]$$

并且方程[22]简化为:

$$R'' = \frac{T_{Sensor1,m} - T_{Sensor2,m}}{\bar{q}_{Sensor1,m} - \bar{q}_{Sensor2,m}} \quad [24]$$

当每个传感器节点处的热接触电阻相等时($R''_C = R''_{C1} = R''_{C2}$),方程[22]简化为:

$$R''_{Total} = \frac{T_{Sensor1,m} - T_{Sensor2,m}}{\bar{q}_{Sensor1,m} - \bar{q}_{Sensor2,m}} \quad [25]$$

其中 R''_{Total} 是对象的总稳态热阻,并且:

$$R''_{Total} = R'' + R''_C \quad [26]$$

DUO NITI系统的基于商的一般和示例数据处理方法包括确定方程[15]和方程[16]之间的商,其得到:

$$\frac{(T_{Sensor1,m} - \bar{q}_{Sensor1,m} \times R''_{C1}) - T_{Internal}}{(T_{Sensor2,m} - \bar{q}_{Sensor2,m} \times R''_{C2}) - T_{Internal}} = \frac{(\bar{q}_{Sensor1,0} + \sum_{j=1}^m \Delta \bar{q}_{Sensor1,j} \times \psi(t_m - t_{j-1}))}{(\bar{q}_{Sensor2,0} + \sum_{j=1}^m \Delta \bar{q}_{Sensor2,j} \times \psi(t_m - t_{j-1}))} \quad [27]$$

重新排列:

$$T_{Internal,m} = \frac{(T_{Sensor2,m} - \bar{q}_{Sensor2,m} \times R''_{C2}) \times (\bar{q}_{Sensor1,0} + \sum_{j=1}^m \Delta \bar{q}_{Sensor1,j} \times \psi(t_m - t_{j-1})) - (T_{Sensor1,m} - \bar{q}_{Sensor1,m} \times R''_{C1}) \times (\bar{q}_{Sensor2,0} + \sum_{j=1}^m \Delta \bar{q}_{Sensor2,j} \times \psi(t_m - t_{j-1}))}{(\bar{q}_{Sensor1,0} + \sum_{j=1}^m \Delta \bar{q}_{Sensor1,j} \times \psi(t_m - t_{j-1})) - (\bar{q}_{Sensor2,0} + \sum_{j=1}^m \Delta \bar{q}_{Sensor2,j} \times \psi(t_m - t_{j-1}))} \quad [28]$$

方程[27]和方程[28]表示基于DUO NITI系统商的数据处理方法的示例一般形式,其中计及了瞬态效应,并且并行使用了两个传感器节点。在稳态条件下,方程[27]简化为:

$$\frac{(T_{Sensor1,m} - q_{Sensor1,m} \times R_{C1}'') - T_{Internal}}{(T_{Sensor2,m} - q_{Sensor2,m} \times R_{C2}'') - T_{Internal}} = \frac{q_{Sensor1,m}}{q_{Sensor2,m}} \quad [29]$$

重新排列：

$$T_{Internal,m} = \frac{(T_{Sensor2,m} - q_{Sensor2,m} \times R_{C2}'') \times q_{Sensor1,m} - (T_{Sensor1,m} - q_{Sensor1,m} \times R_{C1}'') \times q_{Sensor2,m}}{q_{Sensor1,m} - q_{Sensor2,m}} \quad [30]$$

在该示例数据处理方法中,当每个传感器节点处的热接触电阻(R_{C1}'' 和 R_{C2}'')已知时,方程[28]和方程[30]可用于确定对象的内部温度分布($T_{Internal,m}$)。如果传感器节点处的热接触电阻的估计值(R_{C1}'' 和/或 R_{C2}'')未知,可确定(例如,通过上述示例CHFT+或CHFT-过程)或以其他方式确定(例如,通过预定值)该估计值。

[0157] 当每个传感器节点处的热接触电阻(R_{C1}'' 和 R_{C2}'')估计为可忽略不计时,方程[28]简化为:

$$T_{Internal,m} = \frac{T_{Sensor2,m} \times (q_{Sensor1,0} + \sum_{j=1}^m \Delta q_{Sensor1,j} \times \psi(t_m - t_{j-1})) - T_{Sensor1,m} \times (q_{Sensor2,0} + \sum_{j=1}^m \Delta q_{Sensor2,j} \times \psi(t_m - t_{j-1}))}{(q_{Sensor1,0} + \sum_{j=1}^m \Delta q_{Sensor1,j} \times \psi(t_m - t_{j-1})) - (q_{Sensor2,0} + \sum_{j=1}^m \Delta q_{Sensor2,j} \times \psi(t_m - t_{j-1}))} \quad [31]$$

并且方程[30]简化为:

$$T_{Internal,m} = \frac{T_{Sensor2,m} \times q_{Sensor1,m} - T_{Sensor1,m} \times q_{Sensor2,m}}{q_{Sensor1,m} - q_{Sensor2,m}} \quad [32]$$

当每个传感器节点处的热接触电阻相等时($R_C'' = R_{C1}'' = R_{C2}''$),方程[32]也是方程[30]的形式。

[0158] 如前所述,鉴于响应函数(ψ)的存在,例如基于差分 and 商的数据处理方法的非限制性和示例瞬态形式对于每个NITI应用和热模型通常是唯一的。然而,例如基于差分 and 商的非限制性和示例数据处理方法的稳态形式通常是通用的,并且适用于几乎任何NITI应用和相应的热模型。

[0159] 图17图示了示例NITI系统,该系统使用并行热通量传感器-温度传感器对(即DUO NITI系统)执行NITI,以确定对象的一个或多个内部属性。示出了两个NITI传感器(一个称为“第一”,并且另一个称为“第二”,以区分它们)(尽管可以使用两个以上的NITI传感器),并且每个NITI传感器(例如CHFT+或CHFT-)包括温度传感器和热通量传感器(即热通量传感器-温度传感器对)。在其他示例实施例中,每个NITI传感器可包括一个以上的温度传感器和/或一个以上的热通量传感器。每个NITI传感器的温度传感器和热通量传感器相对于彼此、相对于另一个NITI传感器以及对象的配置可如图12-16所示的任何非限制性示例所示。来自温度传感器和热通量传感器的模拟信号输出(对应于来自每个NITI传感器的测量的温度传感器和测量的热通量传感器模拟信号),通过合适的通信路径(例如,电导体)提供,并通过数据采集(DAQ)电路转换为数字信号,该数据采集(DAQ)电路可包括例如一个或多个模数转换器(ADC)、微控制器等。DAQ电路通过合适的通信路径(例如,电导体、无线电信号等)向控制电路提供测量的温度传感器和测量的热通量传感器数字信号,以进行上述和下文进一步所述的处理。控制电路可以包括一个或多个适当配置的计算机、微处理器、DSP、FPGA或

其他数据处理器。控制电路的适当配置可在硬件、软件或组合中实现。控制电路包括诸如显示器、网络、云计算系统、如蜂窝电话之类的通信设备、可穿戴技术等输出或与之通信。该输出还可用于一个或多个控制操作,诸如传感器启用和禁用、远程监测、测量启动/停止,外部热设备操作、数据记录、温度控制、能量流控制、系统故障控制、预防性维护控制、诊断、系统性能、数据输入、数据显示、分析等。在本非限制性示例中,适用时(例如,使用CHFT+节点时),每个外部热设备使用各自的中继器(即开关)进行控制,并且中继器由来自DAQ的中继信号操作,DAQ继而根据来自控制电路的输入提供中继信号。

[0160] 图18A是流程图,示出了基于差分的数据处理方法的示例过程,该数据处理方法由控制电路执行以便使用两个并行NITI传感器(一个称为“第一”,并且另一个称为“第二”以区分它们)确定对象的一个或多个内部参数(即内部参数)。将在一个或多个指定时间来自第一和第二NITI传感器每个中的温度传感器的所测表面温度(即,所测传感器温度)和在一个或多个指定时间来自第一和第二NITI传感器每个中的热通量传感器的所测表面热通量输入到控制电路。一个或多个内部参数(例如 R'' 、 k 、 ρ 、 C 、 $\sqrt{k\rho C}$ 等等)在一个或多个指定时间的初始值和在每个传感器节点处的热接触电阻值(R''_{c1} 和 R''_{c2})也输入到控制电路。然后,控制电路使用基于差分的数据处理方法,该方法例如基于方程[20]在一个或多个指定时间确定一个或多个内部参数。最后,控制电路生成对应于一个或多个准确值的信息(例如,用于输出),该一个或多个准确值指示对象的内部参数,例如 R'' 、 k 、 ρ 、 C 、 $\sqrt{k\rho C}$ 等。

[0161] 图18B是流程图,示出了基于差分的数据处理方法的示例过程,该数据处理方法由控制电路执行以便在稳态条件下使用两个NITI传感器(一个称为“第一”并且另一个称为“第二”以区分它们)确定对象的稳态热阻(内部参数)。将在一个或多个指定时间来自第一和第二NITI传感器每个中的温度传感器的所测温度(即,所测传感器温度)和在一个或多个指定时间来自第一和第二NITI传感器每个中的热通量传感器的所测热通量输入到控制电路。每个传感器节点处的热接触电阻值(R''_{c1} 和 R''_{c2})也输入到控制电路。然后,控制电路使用基于差分的数据处理方法,该数据处理方法例如基于方程[22]在一个或多个指定时间确定对象的稳态热阻(内部参数)。最后,控制电路生成与指示对象稳态热阻的准确值相对应的信息(例如,用于输出)。此外,如果期望,控制电路可以基于确定的对象稳态热阻和一个或多个确定(例如,预先确定、估计等)的内部参数来生成对应于一个或多个准确值的信息(例如,用于输出),该一个或多个准确值指示对象的一个或多个其他内部参数,例如 k 、 ρ 、 C 、 $\sqrt{k\rho C}$ 等。

[0162] 图19A是流程图,示出了基于商的数据处理方法的示例过程,该数据处理方法由控制电路执行以便使用两个并行的NITI传感器(一个称为“第一”并且另一个称为“第二”以区分它们)确定对象内部区域的内部温度分布(即内部温度分布)。将在一个或多个指定时间来自第一和第二NITI传感器每个中的温度传感器的所测温度(即,所测传感器温度)和在一个或多个指定时间来自第一和第二NITI传感器每个中的热通量传感器的所测热通量输入到控制电路。一个或多个内部参数(例如 R'' 、 k 、 ρ 、 C 、 $\sqrt{k\rho C}$ 等等)在一个或多个指定时间的值和在每个传感器节点处的热接触电阻值(R''_{c1} 和 R''_{c2})也输入到控制电路。然后,控制电路使用基于商的数据处理方法,该数据处理方法例如基于方程[30]在一个或多个指定时

间确定对象内部区域的内部温度分布。最后,控制电路生成与指示对象内部区域的内部温度分布的一个或多个准确值相对应的信息(例如,用于输出)。

[0163] 图19B是流程图,示出了基于商的数据处理方法的示例过程,该数据处理方法由控制电路执行以便使用两个并行的NITI传感器(一个称为“第一”并且另一个称为“第二”以区分它们)在稳态条件下确定对象内部区域的内部温度分布(即内部温度分布)。将在一个或多个指定时间来自第一和第二NITI传感器每个中的温度传感器的所测温度(即,所测传感器温度)和在一个或多个指定时间来自第一和第二NITI传感器每个中的热通量传感器的所测热通量输入到控制电路。每个传感器节点处的热接触电阻值(R_{C1}'' 和 R_{C2}'')也输入到控制电路。然后,控制电路使用基于商的数据处理方法,该数据处理方法例如基于方程[32]在一个或多个指定时间确定对象内部区域的内部温度分布。最后,控制电路生成与指示对象内部区域的内部温度分布的一个或多个准确值相对应的信息(例如,用于输出)。

[0164] 图20是流程图,概述了非限制性和示例NITI系统中控制电路执行的示例过程,该系统包括基于并行NITI传感器节点(即DUO NITI系统)的NITI传感器和用于在一个或多个指定时间确定对象的一个或多个内部参数的基于差分的数据处理方法。控制电路在一个或多个指定时间从第一非侵入式热通量传感器-温度传感器对中的温度传感器接收第一所测温度信号(步骤S7)。控制电路在一个或多个指定时间从第一非侵入式热通量传感器-温度传感器对中的热通量传感器接收第一所测热通量信号,以在一个或多个指定时间确定在表面离开或进入对象的热传递的测量结果(步骤S8)。控制电路在一个或多个指定时间从第二非侵入式热通量传感器-温度传感器对中的温度传感器接收第二所测温度信号(步骤S9)。控制电路从第二非侵入式热通量传感器-温度传感器对中的热通量传感器接收第二所测热通量信号,以在一个或多个指定时间确定在表面离开或进入对象的热传递的测量结果(步骤S10)。控制电路在一个或多个指定时间确定每个内部参数的初始值(步骤S11)。然后,控制电路根据在一个或多个指定时间来自第一和第二非侵入式热通量传感器-温度传感器对中的温度传感器的所测温度信号、在一个或多个指定时间来自第一和第二非侵入式热通量传感器-温度传感器对中的所测热通量信号、以及在一个或多个指定时间的内部参数的初始值,在一个或多个指定时间确定对象的一个或多个内部参数(步骤S12)。控制电路生成指示在一个或多个指定时间对象的一个或多个内部参数的信息(例如,用于输出)(步骤S13)。在控制电路执行的后续过程中(即,在一个或多个未来指定时间),控制电路可以基于之前(即,在一个或多个指定时间)在步骤S12中确定的一个或多个内部参数的值,在步骤S11中确定一个或多个内部参数的初始值。此外,控制电路可以以任何顺序执行步骤S7到步骤S11,并且不限于此非限制性过程示例中指定的顺序。在稳态条件下,控制电路可以可选地不执行步骤S11和/或在步骤S12中不使用内部参数的初始值。此外,控制电路还可以执行步骤,以确定和计及与第一非侵入式热通量传感器-温度传感器对中的温度传感器和对象表面之间的热接触电阻相关联的一个或多个效应,和/或与第二非侵入式热通量传感器-温度传感器对中的温度传感器和对象表面之间的热接触电阻相关联的一个或多个效应。

[0165] 图21是流程图,概述了非限制性和示例NITI系统中控制电路执行的示例过程,该系统包括基于并行NITI传感器节点(即DUO NITI系统)的NITI传感器和用于在一个或多个指定时间确定对象内部区域的内部温度分布的基于商的数据处理方法。控制电路在一个或多个指定时间从第一非侵入式热通量传感器-温度传感器对中的温度传感器接收第一所测

温度信号(步骤S14)。控制电路在一个或多个指定时间从第一非侵入式热通量传感器-温度传感器对中的热通量传感器接收第一所测热通量信号,以在一个或多个指定时间确定在表面离开或进入对象的热传递的测量结果(步骤S15)。控制电路在一个或多个指定时间从第二非侵入式热通量传感器-温度传感器对中的温度传感器接收第二所测温度信号(步骤S16)。控制电路从第二非侵入式热通量传感器-温度传感器对中的热通量传感器接收在一个或多个指定时间测量的第二所测热通量信号,以在一个或多个指定时间确定在表面离开或进入对象的热传递的测量结果(步骤S17)。控制电路在一个或多个指定时间确定每个内部参数的值(步骤S18)。然后,控制电路根据在一个或多个指定时间来自第一和第二非侵入式热通量传感器-温度传感器对中的温度传感器的所测温度信号、在一个或多个指定时间在第一和第二非侵入式热通量传感器-温度传感器对中的所测热通量信号、以及在一个或多个指定时间的内部参数值,来在一个或多个指定时间确定对象内部区域的内部温度分布(步骤S19)。控制电路生成指示在一个或多个指定时间对象内部区域的内部温度分布的信息(例如,用于输出)(步骤S20)。此外,控制电路可按任何顺序执行步骤S14至步骤S18,且不限于此非限制性过程示例中指定的顺序。在稳态条件下,控制电路可以可选地不执行步骤S18和/或在步骤S19中不使用内部参数的值。此外,控制电路还可以执行步骤,以确定和计及与第一非侵入式热通量传感器-温度传感器对中的温度传感器和对象表面之间的热接触电阻相关联的一个或多个效应,和/或与第二非侵入式热通量传感器-温度传感器对中的温度传感器和对象表面之间的热接触电阻相关联的一个或多个效应。

[0166] 由非限制性和示例NITI系统中的控制电路执行的另外示例过程可以包括一种以上的数据处理方法,该NITI系统包括基于并行NITI传感器节点的NITI传感器。例如,NITI系统可包括分别用于确定(例如,计算)对象的一个或多个内部参数和确定(例如,计算)对象内部区域的内部温度分布的基于差分的数据处理方法和基于商的数据处理方法二者。例如,NITI系统可以随后或同时执行多种数据处理方法。在其他示例实施例中,数据处理方法可以基于多种数据处理方法的组合来确定一个或多个内部属性。

[0167] 示例DUO NITI实施例可利用控制电路来维持规定的热通量和温度条件。例如,控制电路可用于通过调整提供给外部热设备(例如加热器)的功率来维持稳态条件。在其他示例实施例中,控制电路可以将在一个传感器节点处发生的热通量的量和/或温度调节为在另一个传感器节点处发生的热通量和/或温度的常数倍数。

[0168] 在没有控制电路的情况下,可以进一步实现类似的条件。例如,每个传感器节点上的规定量的热绝缘还可用于将每个传感器节点处发生的热通量或温度调节到例如另一个传感器节点的常数倍数。

[0169] 创建这样的环境,其中传感器节点处发生的热通量和/或温度通过例如常数倍数(Y)来相关,允许进一步简化DUO NITI系统和数据处理方法。

[0170] 例如,如果使用控制电路和/或热绝缘体来维持每个传感器节点处发生的热通量之间的以下关系:

$$Y \times q_{\text{Sensor1},m} = q_{\text{Sensor2},m} \quad [33]$$

方程[27]可以改写为:

$$\frac{(T_{\text{Sensor1},m} - \dot{q}_{\text{Sensor1},m} \times R_{C1}'') - T_{\text{Internal}}}{(T_{\text{Sensor2},m} - Y \times \dot{q}_{\text{Sensor1},m} \times R_{C2}'') - T_{\text{Internal}}} = \frac{(\dot{q}_{\text{Sensor1},0} + \sum_{j=1}^m \Delta \dot{q}_{\text{Sensor1},j} \times \psi(t_m - t_{j-1}))}{(Y \times \dot{q}_{\text{Sensor1},0} + \sum_{j=1}^m Y \times \Delta \dot{q}_{\text{Sensor1},j} \times \psi(t_m - t_{j-1}))} \quad [34]$$

这简化为:

$$T_{\text{Internal},m} = \frac{Y \times (T_{\text{Sensor1},m} - \dot{q}_{\text{Sensor1},m} \times R_{C1}'') - (T_{\text{Sensor2},m} - Y \times \dot{q}_{\text{Sensor1},m} \times R_{C2}'')}{(Y - 1)} \quad [35]$$

假设在每个传感器节点处可忽略不计或等效的热接触电阻(R_C''):

$$T_{\text{Internal},m} = \frac{Y \times T_{\text{Sensor1},m} - T_{\text{Sensor2},m}}{(Y - 1)} \quad [36]$$

在此示例中,方程[35]和方程[36]可用于给定对象的简化实时内部温度($T_{\text{Internal},m}$)测量,而对随时间的瞬态热传递效应(例如,通过响应函数(ψ))和/或对象的内部参数没有任何考虑。

[0171] 示例应用

现在针对NITI的不同示例应用和方法描述示例实施例。这些示例中的一些具有基于发明人执行的测试包括的实验数据结果。这并不意味着是应用或方法的详尽列表,而是说明了可以使用的示例NITI方法。此外,示例NITI方法不限于下面列出的应用和/或示例实施例,并且可以被使用和/或作为不同应用和/或示例实施例的其他示例NITI方法的基础。

[0172] 实验数据结果基于示例NITI传感器实施例,其包括一个或多个基于差分热电堆技术的热通量传感器和一个或多个基于薄膜热电偶技术的温度传感器。然而,无论使用何种类型的热通量传感器或温度传感器(例如RTD温度传感器、光纤温度传感器、NTC温度传感器、热敏电阻器、热电堆等),都可以获得类似的结果。

[0173] 血液灌注测量应用

一种应用是组织中的血液灌注(流),如图22中描绘的示例实施例所示。NITI传感器(CHFT+)被示出为与组织接触。组织(即对象)包括多个内部参数,包括血液灌注(w)、组织热传导性(k)、组织密度(ρ)以及组织热容(C)。随着组织深度(x)增加,组织的内部温度分布(T)接近核心血液温度(T_{Core})。在本示例应用中,鉴于大多数活组织由血液组成,核心血液温度(T_{Core})假设等于核心组织温度(即,与之热平衡)。

[0174] 下表2阐述了生物热传递的示例热数学模型,其包括组织中血液灌注的影响。

[0175] 表2 具有热通量边界条件的组织热数学模型(基于Pennes生物热方程)

PDE	$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - w(T - T_{\text{Core}})$
边界条件	$-k \frac{\partial T}{\partial x} = \dot{q}_{\text{Sensor}}(t), \quad x = 0$ $T \rightarrow T_{\text{Core}}, \quad x \rightarrow \infty$
初始条件	$T = T_{\text{Initial}}(x), \quad t = 0$

[0176] 在组织表面进行评估时($x = 0$),表2中热数学模型的解(内部温度分布(T))是:

$$T_{Tissue,m} = T_{Tissue,0} + \sum_{j=1}^m \Delta q_{Sensor,j}'' \times \frac{1}{k} \sqrt{\frac{\alpha}{w}} \times Erf\left(\sqrt{w(t_m - t_{j-1})}\right) \quad [37]$$

其中,初始组织表面温度为:

$$T_{Tissue,0} = T_{Core} + q_{Sensor,0}'' \times \frac{1}{k} \sqrt{\frac{\alpha}{w}} \quad [38]$$

并且其中当进入组织时,热通量被定义为正。

[0177] 根据NITI传感器输出重写方程[37]并且包括在NITI传感器和组织表面之间的热接触电阻(R_C'')的影响而得到:

$$T_{Tissue,m} = T_{Sensor,0} - q_{Sensor,0}'' \times R_C'' + \sum_{j=1}^m \Delta q_{Sensor,j}'' \times \frac{1}{k} \sqrt{\frac{\alpha}{w}} \times Erf\left(\sqrt{w(t_m - t_{j-1})}\right) \quad [39]$$

其中 $\frac{1}{k} \sqrt{\frac{\alpha}{w}} = \sqrt{\frac{1}{k\rho Cw}}$ 是组织的稳态热阻(R'')。

[0178] 在这个非限制性示例中,核心血液温度(T_{Core})假设随时间为常数且不变。但是,如果核心血液温度(T_{Core})不是恒定的,影响可以与内部参数(例如血液灌注(w))变化相关的影响不同。这是由于这些变化产生的一个或多个影响中的差异。例如,在某些情况下,与血液灌注(w)的变化有关的影响例如可以通过表面温度变化来实现,在本例中,表面温度变化是方程[39]中非线性表达式的结果。然而,与核心血液温度(T_{Core})的变化相关的影响可以例如通过表面温度变化来实现,在本例中,表面温度变化是方程[38]和方程[39]组合中发现的线性表达式的结果。线性和非线性影响中的差异允许在不同的根本原因(例如,核心血液温度(T_{Core})或内部参数的变化)之间进行区分和辨别。此外,可以导出其他热数学模型来计及核心血液温度(T_{Core}),与本非限制性示例中假设核心血液温度(T_{Core})恒定相对的,其随时间而变化。

[0179] 血液灌注——使用参数估计的周期性测量实施例

对于与周期性数据处理方法一起使用的示例NITI传感器实施例(例如,CHFT+或CHFT-),可以在参数估计方案中使用方程[39]来确定血液灌注(w)的内部参数、核心血液(即组织)温度(T_{Core})、和/或在NITI传感器和组织表面之间的热接触电阻(R_C'')。这类似于作为NITI系统实施例中示例给出的一般情况,具有上面部分中的一个或多个热通量传感器-温度传感器对,但对于不同的NITI应用具有不同的热模型。在该示例中,使用组织热传导率(k)、组织密度(ρ)以及组织热容(C)的内部参数预定恒定值。在此示例应用中,要最小化的示例目标函数为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{m=1}^{M-1} (T_{Sensor,m} - T_{Calculated,m})^2} \quad [40]$$

其中:

$$T_{\text{Calculated},m} = T_{\text{Tissue},m} + q_{\text{Sensor},m} \times R_C'' \quad [41]$$

并且其中：

$$R_C'' = \frac{\sum_{n=1}^{N-1} \frac{T_{\text{Sensor},n} - T_{\text{Tissue},n}}{q_{\text{Sensor},n}}}{N-1} \quad [42]$$

在能够在伪组织中创建受控水灌注和温度环境的活组织模拟器上测试示例CHFT+实施例(带加热器)。这个模拟器被称为体模组织系统或体模。在不同流速率(灌注速率)下,将CHFT+置于伪组织上,并进行如下测量：

-记录10秒的稳态数据。

[0180] -加热器开启约65秒,导致CHFT+通过表面热通量和表面温度信号测量的组织瞬态热响应。

[0181] -整个数据通过周期性数据处理方法进行处理,包括在不到1秒的时间内进行参数估计方案,从而产生灌注(w)、核心水温(T_{Core})、以及在CHFT+和伪组织表面之间的热接触电阻(R_C'')的输出。

[0182] 表3 具有周期参数估计数据处理方法的示例血液灌注CHFT+实施例的结果

流速率 ($\frac{CC}{min}$)	灌注 - $w(\frac{ml_B/s}{ml_T})$			温度 - $T_{\text{Core}}(^{\circ}C)$		$R_C''(^{\circ}C \frac{m^2}{W})$
	CHFT+	体模	差异	CHFT+	体模	
10	0.0237	0.0185	21.94 %	32.83	32.92	0.000206
15	0.0360	0.0347	3.61 %	32.12	31.93	0.000205
20	0.0533	0.0524	1.69 %	33.03	33.23	0.000254
25	0.0810	0.0709	12.47 %	30.24	30.48	0.000218

[0183] 从表3可以看出,使用示例CHFT+实施例对灌注(w)的估计值与15 $\frac{CC}{min}$ 和20 $\frac{CC}{min}$ 流速率的体模CFD模型(即体模)非常一致。10 $\frac{CC}{min}$ 和25 $\frac{CC}{min}$ 分别经受21.94%和12.47%的差异。这可能是因为当发明人进行实验数据收集时,很难维持10 $\frac{CC}{min}$ 和25 $\frac{CC}{min}$ 流速率。当设置这些流速率时,流速率通常会比预期的偏大,并与体模模型相比会导致更高的流测量结果。注意血液灌注(w)的单位表示为 $\frac{ml_B/s}{ml_T}$,其中提供了通过一定体积的组织(例如,毫米组织)的血流速率(例如,每秒吹气流毫升数)的测量。在体模组织系统上测试的这些示例实施例中,血液灌注替代地指定为灌注,并且血液流速率替代地为水流速率。

[0184] 在一些示例实施例中,血液灌注(w)的单位可进一步简化为 s^{-1} 。在其他示例实施例中,血液灌注(w)的单位可与密度值结合,以提供通过给定质量的组织(例如,100克)的血流速率测量结果。

[0185] 此外,灌注(w)的估计值随着流速率的增加而增加。此外,热接触电阻(R_C'')相对恒定,这表明其在整个实验测量过程中的一致性,如预期的那样。灌注水的估计核心温度

(T_{Core})与在体模内使用浸入式珠热电偶记录灌注水温度(T_{Water})匹配良好。最大的差异约为发生在 $25 \frac{CC}{min}$ 处的 $0.24^{\circ}C$ 。

[0186] 为了展示当与实验数据一起使用时此数据处理方法中在确定最佳灌注(w)值中使用的参数估计方案的能力,方程[40]中的示例目标函数(即RMSE)与 $15 \frac{CC}{min}$ 情况下灌注(w)之间的关系在图23中显示。图23中的图表图示了该关系在灌注(w)值为 $0.0360 s^{-1}$ 处具有全局最小值。这对应于 $15 \frac{CC}{min}$ 情况下灌注的估计值,如表3所示。

[0187] 对于 $15 \frac{CC}{min}$ 情况,图24是图示所计算(输出)传感器温度曲线和所测(输入)传感器温度曲线之间匹配示例的图表。两条温度曲线之间的匹配指示内部参数值(k, ρ, C, w)以及用于通过方程[41]构造所计算(输出)传感器温度曲线的热接触电阻(R_C'')值与组织(即对象)中发生的实际值相同。不正确的值会导致匹配不良,如例如图25所示。

[0188] 如前所述,在此示例中,组织热传导率(k)、组织密度(ρ)以及组织热容(C)的预定值在上述用于灌注测量的示例数据处理方法中作为常数值输入,以确定组织热惯性的内部参数($\sqrt{k\rho C}$)。确定组织热惯性的另一种方法是例如通过作为数据处理方法的一部分的一个或多个参数估计方案。

[0189] 估计组织热惯量的一种示例方法可以是进行表面测量的不同时间段定义不同的目标函数。这是可能的,因为所计算的(输出)传感器温度曲线随时间具有不同的内部参数敏感度,并因此每个内部参数(例如 $\sqrt{k\rho C}$ 和 w)的影响是可以分辨的。因此,可以单独估计内部参数值。图26示出了所计算(输出)传感器温度曲线对内部参数的不同敏感度。具体而言,在初始时间段期间对组织热传导率(k)、组织密度(ρ)以及组织热容(C)的乘积有更大的敏感性,而对血液灌注(w)的敏感性最初是最小的,但随着时间的推移而增加。因此,例如,在可包括参数估计方案的数据处理方法中,设计用于确定 $k\rho C$ 的估计值的目标函数可定义为包括初始时间段,而设计用于确定 w 的值的目標函数可以定义为包括之后的时间段。此外,可将目标函数定义为同时操作或按规定顺序操作(例如,一个接一个)。

[0190] 另一种确定组织热传导率(k)、组织密度(ρ)以及组织热容(C)的示例方法是在已经使用组织热传导率(k)、组织密度(ρ)以及组织热容(C)的预定值时确定了血液灌注(w)值后计算它们。例如,一旦已经使用例如组织热传导率(k)、组织密度(ρ)以及组织热容(C)的内部参数的预定值确定了最佳血液灌注(w)值,数量 $k\rho C$ 例如可使用方程[43]计算如下:

$$k\rho C = \frac{1}{w} \left(\frac{\sum_{j=1}^m \Delta q_{Sensor,j}'' \times \text{Erf}(\sqrt{w(t_m - t_{j-1})})}{T_{Sensor,m} - q_{Sensor,m}'' \times R_C'' - T_{Sensor,0} + q_{Sensor,0}'' \times R_C''} \right)^2 \quad [43]$$

其中右边的血液灌注(w)是当使用组织热传导率(k)、组织密度(ρ)以及组织热容(C)的预定(即先前)值时确定的最佳的血液灌注(w)值。

[0191] 基于例如方程[43]的方法可用于多种方法中,以确定组织热传导率(k)、组织密度(ρ)以及组织热容(C)的乘积。例如,可以在单个或多个索引(m)上进行测量。在多个索引的

情况下,例如,结果值的平均值可作为确定值。如果期望, $k\rho C$ 的最近确定值可更新先前确定的值,并用于重新估计血液灌注(w)值。这一例程实践得越多,组织热惯性($\sqrt{k\rho C}$)和血液灌注(w)的确定值就可以变得越准确。该非限制性示例NITI方法可用于一些或所有示例NITI实施例和/或应用。

[0192] 血液灌注——使用参数估计的实时测量实施例

在示例血液灌注-使用参数估计的周期性测量实施例中,控制电路进行的数据处理在进行所有测量之后开始。因此,在上面的实验体模测试中,大约每75秒以周期性的方式输出测量结果。NITI传感器(例如CHFT+或CHFT-)数据可以可替代地实时处理,以提供血液灌注(w)、核心体温(T_{core})和/或在NITI传感器和组织表面之间的热接触电阻(R_C'')的实时输出。随着时间的推移,更多的数据点被添加到通过数据处理方法实时处理的表面热通量和表面温度曲线中,该数据处理方法包括参数估计方案并在不到1秒的时间内输出值。

[0193] 血液灌注——无参数估计的实时测量实施例

方程[39]可以重新排列为:

$$\sqrt{\frac{1}{k\rho cw}} = \frac{T_{Tissue,m} - (T_{Sensor,0} - q_{Sensor,0}'' \times R_C'')}{\sum_{j=1}^m \Delta q_{Sensor,j}'' \times \text{Erf}(\sqrt{w(t_m - t_{j-1})})} \quad [44]$$

其中:

$$T_{Tissue,m} = T_{Sensor,m} - q_{Sensor,m}'' \times R_C'' \quad [45]$$

组合方程[44]和方程[45]:

$$w = \left[k\rho c \left(\frac{(T_{Sensor,m} - q_{Sensor,m}'' \times R_C'') - (T_{Sensor,0} - q_{Sensor,0}'' \times R_C'')}{\sum_{j=1}^m \Delta q_{Sensor,j}'' \times \text{Erf}(\sqrt{w(t_m - t_{j-1})})} \right)^2 \right]^{-1} \quad [46]$$

当在NITI传感器(例如CHFT+或CHFT-)和组织表面之间的热接触电阻(R_C'')已知并且组织热传导性(k)、组织密度(ρ)以及组织热容(C)的典型值被输入时,当血液灌注(w)的典型值在右侧输入时方程[46]可用于实时血液灌注测量。在一些示例实施例中,例如当血液灌注(w)的变化受关注时,数量 $T_{Sensor,0} - q_{Sensor,0}'' \times R_C''$ 可在一个或多个指定时间被假设。在其他示例实施例中,数量 $T_{Sensor,0} - q_{Sensor,0}'' \times R_C''$ 可通过例如使用附加温度传感器来确定;其输出指示组织表面和/或核心(即内部)组织温度。

[0194] 虽然左侧的所计算血液灌注(w)值将不精确,但仍将足以进行准确的定量和/或定性测量。此外,为了获得最准确的结果,右侧血液灌注(w)的典型值可更新,以反映通过方程[46]计算的最新和/或准确值。在其他方法中,左右两侧的血液灌注(w)值可同时确定,从而提供准确的定量测量。这可以省略在右侧输入典型血液灌注(w)值的需要。如果热接触电阻(R_C'')值未知,可以确定(例如,通过上述NITI过程)或以其他方式确定和计及它。在某些情况下,热接触电阻(R_C'')可能被估计为可忽略不计。

[0195] 此外,在稳态条件下,方程[46]简化为:

$$w = \left[k\rho c \left(\frac{(T_{Sensor,m} - q_{Sensor,m}'' \times R_{C1}'') - (T_{Sensor,0} - q_{Sensor,0}'' \times R_{C1}'')}{q_{Sensor,m}'' - q_{Sensor,0}''} \right)^2 \right]^{-1} \quad [47]$$

方程[47] 右侧不再需要典型血液灌注(w)值。稳态条件可以通过多种方式实现,包括通过外部热设备(例如加热器、冷却器等)调节组织表面发生的热通量和/或温度的控制电路。

[0196] 血液灌注——DUO NITI传感器实施例

对于使用第一和第二并行NITI传感器节点(每个节点具有热通量传感器-温度传感器对)时的示例DUO NITI传感器实施例,形成两个独立的方程:

$$T_{Sensor1,m} - q_{Sensor1,m}'' \times R_{C1}'' = T_{Core} + q_{Sensor1,0}'' \times \frac{1}{k} \sqrt{\frac{\alpha}{w}} + \sum_{j=1}^m \Delta q_{Sensor1,j}'' \times \frac{1}{k} \sqrt{\frac{\alpha}{w}} \times Erf\left(\sqrt{w(t_m - t_{j-1})}\right) \quad [48]$$

$$T_{Sensor2,m} - q_{Sensor2,m}'' \times R_{C2}'' = T_{Core} + q_{Sensor2,0}'' \times \frac{1}{k} \sqrt{\frac{\alpha}{w}} + \sum_{j=1}^m \Delta q_{Sensor2,j}'' \times \frac{1}{k} \sqrt{\frac{\alpha}{w}} \times Erf\left(\sqrt{w(t_m - t_{j-1})}\right) \quad [49]$$

使用示例基于差分的数据处理方法,方程[48]-方程[49]得到:

$$w = \left[k\rho c \left(\frac{(T_{Sensor1,m} - q_{Sensor1,m}'' \times R_{C1}'') - (T_{Sensor2,m} - q_{Sensor2,m}'' \times R_{C2}'')}{(q_{Sensor1,0}'' - q_{Sensor2,0}'' + \sum_{j=1}^m \Delta q_{Sensor1,j}'' \times Erf(\sqrt{w(t_m - t_{j-1})}) - \sum_{j=1}^m \Delta q_{Sensor2,j}'' \times Erf(\sqrt{w(t_m - t_{j-1})}))} \right)^2 \right]^{-1} \quad [50]$$

当在右边输入组织热传导性(k)、组织密度(ρ)、组织比热容(C)以及血液灌注(w)时,该瞬态方程是DUO NITI传感器配置的结果,并允许实时血液灌注(w)测量而无论核心血液温度(T_{Core})如何。

[0197] 虽然左侧的所计算血液灌注(w)值将不精确,但仍然将非常接近,并足以进行准确的定量和/或定性测量。此外,为了获得最准确的结果,血液灌注(w)的典型值可更新以反映通过方程[50]计算的最新和/或准确值。在其他方法中,左右两侧的血液灌注(w)值可同时确定,从而提供准确的定量测量。这可以省略在右侧输入典型的血液灌注(w)值的需要。

[0198] 每个NITI传感器(例如,CHFT+或CHFT-)与组织表面之间的热接触电阻(R_{C1}'' 和 R_{C2}'')的估计值可以被确定(例如,通过上述NITI过程)或以其他方式确定。在某些情况下,热接触电阻(R_{C1}'' 和/或 R_{C2}'')可能被估计为可忽略不计。

[0199] 在稳态条件下,方程[50]简化为:

$$w = \left[k\rho c \left(\frac{(T_{Sensor1,m} - q_{Sensor1,m}'' \times R_{C1}'') - (T_{Sensor2,m} - q_{Sensor2,m}'' \times R_{C2}'')}{(q_{Sensor1,m}'' - q_{Sensor2,m}'')} \right)^2 \right]^{-1} \quad [51]$$

其中右侧不再需要典型血液灌注(w)值。稳态条件可以通过多种方式实现,包括通过外部热设备(加热器、冷却器等)调节组织表面发生的热通量和/或温度的控制电路。

[0200] 图27是示出用于在不同流速率 $30 \frac{CC}{min}$ 、 $20 \frac{CC}{min}$ 、 $10 \frac{CC}{min}$ 测量体模上伪组织的灌注(w)时示例DUO CHFT+实施例的结果的图表。该图表示出示例DUO CHFT+实施例能够当初始在 $30 \frac{CC}{min}$ (灌注(w)速率为约 $0.035 \frac{ml_B/s}{ml_T}$)开启时,确定体模上伪组织的灌注(w)。随后,在大约 $10 \frac{CC}{min}$

分钟后,当体模流速率调整为 $10 \frac{CC}{min}$ (灌注(w)速率为约 $0.020 \frac{ml_B/s}{ml_T}$)并稍后增加到 $20 \frac{CC}{min}$ (灌注(w)速率为约 $0.027 \frac{ml_B/s}{ml_T}$)时,示例DUO CHFT+实施例实时确定灌注(w)的变化,其中实验测量在大约10分钟后结束。为了实时示出示例DUO CHFT+方法的准确性和一致性,还使用了用于灌注测量的不同示例NITI方法(CHFT+周期性方法)来确定每个指定流速率下的灌注速率。两种测量之间的一致性指示了两种方法在确定组织灌注(w)速率方面的有效性。

[0201] 组织水化的测量应用

上述用于血液灌注测量的所有示例方法和实施例也可用于确定 $\sqrt{\frac{1}{k\rho cw}} = \frac{1}{k} \sqrt{\frac{\alpha}{w}}$, 其是这些示例方法中定义的组织稳态热阻(R'')。组织稳态热阻(R'')可以是组织水化的准确且可靠的指示器。例如,可以开发相关性,并将其用作根据例如组织稳态热阻计量组织水化和脱水水平的手段。指示血液灌注(w)或其他内部参数的独立值也可用于计量组织水化和脱水水平。

[0202] 组织核心温度测量应用

组合方程[37]和方程[38]:

$$T_{Tissue,m} = T_{Core} + q_{Sensor,0} \times \frac{1}{k} \sqrt{\frac{\alpha}{w}} + \sum_{j=1}^m \Delta q_{Sensor,j} \times \frac{1}{k} \sqrt{\frac{\alpha}{w}} \times Erf\left(\sqrt{w(t_m - t_{j-1})}\right) \quad [52]$$

根据NITI传感器输出重写方程[52],并包括在NITI传感器和组织表面之间的热接触电阻(R''_C)的影响:

$$T_{Sensor,m} - q_{Sensor,m} \times R''_C = T_{Core} + q_{Sensor,0} \times \frac{1}{k} \sqrt{\frac{\alpha}{w}} + \sum_{j=1}^m \Delta q_{Sensor,j} \times \frac{1}{k} \sqrt{\frac{\alpha}{w}} \times Erf\left(\sqrt{w(t_m - t_{j-1})}\right) \quad [53]$$

重新排列和认识到 T_{Core} 取决于随时间变化的值(测量索引(m))

$$T_{Core,m} = T_{Sensor,m} - q_{Sensor,m} \times R''_C - q_{Sensor,0} \times \frac{1}{k} \sqrt{\frac{\alpha}{w}} - \sum_{j=1}^m \Delta q_{Sensor,j} \times \frac{1}{k} \sqrt{\frac{\alpha}{w}} \times Erf\left(\sqrt{w(t_m - t_{j-1})}\right) \quad [54]$$

方程[54]是核心组织温度($T_{Tissue,m}$)测量的示例方程并在下面的示例实施例中使用。对于这些示例实施例中的一些实施例,组织热传导率(k)、组织密度(ρ)、组织比热容(C)、在NITI传感器和组织表面之间的热接触电阻(R''_C)和/或血液灌注(w)的值需要确定。这可以通过例如确定这些值(例如,通过前面描述的CHFT+或CHFT-方法)或例如通过使用预定值(例如,来自教科书的值)来实现。

[0203] 组织核心温度——CHFT+(主动测温)实施例

CHFT+实施例使用集成的外部热设备(例如加热器)来创建可用于执行NITI的热事件(即热传递)。对于核心组织温度($T_{Core,m}$)测量,加热器可以任何方式(稳定、周期、循环等)操作,并且在本例中,当在右侧输入血液灌注(w)、组织热传导性(k)、组织密度(ρ)、组织热容(C)以及估计的热接触电阻(R''_C)的值时,方程[54]将准确且实时地输出核心组织温度

($T_{Core,m}$)。这些值可以通过例如使用数据处理方法(例如,其包括参数估计方案)来确定或以其他方式确定和计及。在某些情况下,热接触电阻(R_C'')可能被估计为可忽略不计。尽管没有要求,但用绝缘材料覆盖CHFT+可能是有益的,以防止来自外部刺激(例如运行、接触等)的错误信号。

[0204] 图28是图表,示出了用于在 $2\frac{CC}{min}$ 流速率测量体模上伪组织核心温度($T_{Core,m}$)时示例CHFT+实施例(带集成加热器)的结果。在该图表中,示出示例CHFT+实施例能够确定体模上伪组织核心温度($T_{Core,m}$) (即(内部)测量),而不管表面温度条件如何。具体而言,由于集成加热器开启,表面温度初始会升高。随后,在一段时间之后,由于在示例CHFT+实施例上外部风扇(即,热扰动)吹风,表面温度降低。不管环境热条件中的这些突然和意外变化如何,示例CHFT+实施例与放置在体模内且在伪组织下的内部探针紧密一致地测量伪组织的核心温度($T_{Core,m}$)。

[0205] 组织核心温度——CHFT-(被动测温)实施例

CHFT-实施例使用外部热事件(诸如例如哺乳动物的身体散热)来执行NITI。例如,当经受外部热事件时,当在右侧输入血液灌注(w)、组织热传导性(k)、组织密度(ρ)、组织热容(C)以及估计的热接触电阻(R_C'')时,方程[54]将准确且实时地输出核心组织温度($T_{Core,m}$)。这些值可以通过例如使用数据处理方法(例如,包括参数估计方案)来确定或以其他方式确定和计及。在某些情况下,热接触电阻(R_C'')可能被估计为可忽略不计。尽管没有要求,但用绝缘材料覆盖CHFT-可能是有益的,以防止来自外部刺激(例如运行、接触等)的错误信号。

[0206] 图29是图表,示出了用于在 $2\frac{CC}{min}$ 流速率测量体模上伪组织核心温度($T_{Core,m}$)时示例CHFT-实施例的结果。在该图表中,示出示例CHFT-实施例能够确定体模上伪组织核心温度($T_{Core,m}$) (即(内部)测量),而不管表面温度条件如何。具体而言,尽管表面温度初始是稳定的,但外部风扇(即热扰动)循环(即开启和关闭)以在示例CHFT-实施例和伪组织上吹气。不管环境热条件中的这些突然和意外变化如何,示例CHFT-实施例与放置在体模内且在伪组织下的内部探针紧密一致地测量伪组织的核心温度($T_{Core,m}$)。

[0207] 组织核心温度——CHFT+(周期性测量)实施例

除了上述用于组织核心温度测量的示例实时方法和实施例外,还可以在不同的稳态条件下操作时使用NITI传感器(例如,CHFT+或CHFT-)来进行核心组织温度(T_{Core})的周期性测量。例如,热事件($T_{Sensor,0}, q_{Sensor,0}''$)之前的稳态测量可与热事件($T_{Sensor,END}, q_{Sensor,END}''$)期间、之后或结束时的稳态测量进行比较,以便使用如下方程确定核心组织温度(T_{Core}):

$$T_{Core} = \frac{T_{Sensor,0} \times q_{Sensor,END}'' - T_{Sensor,END} \times q_{Sensor,0}''}{q_{Sensor,END}'' - q_{Sensor,0}''} \quad [55]$$

CHFT+和/或CHFT-示例实施例都可以随时间而经受不同的稳态条件。然而,由于可用于创建不同稳态条件的一个或多个外部热设备的增加的操作控制,优选CHFT+实施例。

[0208] 核心温度——CHFT+(零热通量测温)实施例

使用控制电路,示例CHFT+实施例可用于创建零热通量环境,其中组织和传感器表面之间不发生热传递,即其中热通量传感器测得没有热量进入或离开组织(最小电压输出,即“零”)。在稳态条件下,零热通量环境将方程[54]简化为:

$$T_{Core,m} = T_{Sensor,m} \quad [56]$$

其中所测传感器温度($T_{Sensor,m}$)相当于组织的核心温度($T_{Core,m}$)。

[0209] 这种方法的一个优点是一旦获得稳态零热通量环境,核心组织温度($T_{Core,m}$)测量与内部参数值(例如血液灌注(w)、组织热惯性($\sqrt{k\rho C}$)等)和热接触电阻(R_c'')无关。由所测传感器温度($T_{Sensor,m}$)输出所确定的达到此类稳态条件所需的时间量,根据所使用的示例实施例而变化,并且是不利用NITI技术的现有零热通量技术的常见限制。在获得稳态零热通量环境之前,示例NITI零热通量测温实施例可利用其他示例实施例,例如用于组织的核心温度测量的示例主动测温实施例,以进行核心组织温度($T_{Core,m}$)的准确测量。

[0210] 图30是图表,示出了用于在 $2\frac{CC}{min}$ 流速率测量体模上伪组织核心温度($T_{Core,m}$)时示例CHFT+零热通量(ZHF)实施例的结果。该图示出示例CHFT+ZHF实施例能够在不管表面温度条件且没有延迟的情况下确定体模上伪组织核心温度($T_{Core,m}$)。具体而言,尽管表面温度需要大约8分钟实现指示伪组织核心温度($T_{Core,m}$)的输出,当与放置在体模内和组织下的内部探针相比时,示例CHFT+ZHF实施例从一开始就以紧密一致性测量伪组织核心温度($T_{Core,m}$)。

[0211] 核心温度——DUO NITI(双测温)实施例

对于示例DUO NITI实施例,当使用第一和第二并行NITI传感器节点(每个节点具有热通量传感器-温度传感器对)时,形成两个独立的方程:

$$(T_{Sensor1,m} - \dot{q}_{Sensor1,m} \times R_{C1}'') - T_{Core,m} = \frac{1}{k} \sqrt{\frac{\alpha}{w}} \left(\dot{q}_{Sensor1,0} + \sum_{j=1}^m \Delta \dot{q}_{Sensor1,j} \times \text{Erf} \left(\sqrt{w(t_m - t_{j-1})} \right) \right) \quad [57]$$

$$(T_{Sensor2,m} - \dot{q}_{Sensor2,m} \times R_{C2}'') - T_{Core,m} = \frac{1}{k} \sqrt{\frac{\alpha}{w}} \left(\dot{q}_{Sensor2,0} + \sum_{j=1}^m \Delta \dot{q}_{Sensor2,j} \times \text{Erf} \left(\sqrt{w(t_m - t_{j-1})} \right) \right) \quad [58]$$

使用基于商的数据处理方法,方程[57]/方程[58]得出:

$$\frac{(T_{Sensor1,m} - \dot{q}_{Sensor1,m} \times R_{C1}'') - T_{Core,m}}{(T_{Sensor2,m} - \dot{q}_{Sensor2,m} \times R_{C2}'') - T_{Core,m}} = \frac{(\dot{q}_{Sensor1,0} + \sum_{j=1}^m \Delta \dot{q}_{Sensor1,j} \times \text{Erf}(\sqrt{w(t_m - t_{j-1})}))}{(\dot{q}_{Sensor2,0} + \sum_{j=1}^m \Delta \dot{q}_{Sensor2,j} \times \text{Erf}(\sqrt{w(t_m - t_{j-1})}))} \quad [59]$$

重新排列:

$$T_{Core,m} = \frac{(T_{Sensor2,m} - \dot{q}_{Sensor2,m} \times R_{C2}'') \times (\dot{q}_{Sensor1,0} + \sum_{j=1}^m \Delta \dot{q}_{Sensor1,j} \times \text{Erf}(\sqrt{w(t_m - t_{j-1})})) - (T_{Sensor1,m} - \dot{q}_{Sensor1,m} \times R_{C1}'') \times (\dot{q}_{Sensor2,0} + \sum_{j=1}^m \Delta \dot{q}_{Sensor2,j} \times \text{Erf}(\sqrt{w(t_m - t_{j-1})}))}{(\dot{q}_{Sensor2,0} + \sum_{j=1}^m \Delta \dot{q}_{Sensor2,j} \times \text{Erf}(\sqrt{w(t_m - t_{j-1})})) - (\dot{q}_{Sensor1,0} + \sum_{j=1}^m \Delta \dot{q}_{Sensor1,j} \times \text{Erf}(\sqrt{w(t_m - t_{j-1})}))} \quad [60]$$

该瞬态方程是DUO NITI配置的结果,并当在右侧输入组织热传导性(k)、组织密度(ρ)、组织比热容(C)以及血液灌注(w)的典型值时允许实时核心组织温度($T_{Core,m}$)测量。

[0212] 在每个NITI传感器节点(例如,CHFT+或CHFT-)和组织表面之间的热接触电阻

(R''_{C1} 和 R''_{C2}) 的估计值可以确定(例如,通过上述NITI过程)或以其他方式确定和计及。在某些情况下,热接触电阻(R''_{C1} 和/或 R''_{C2})可能被估计为可忽略不计。

[0213] 在稳态条件下,以及 $R''_C \cong R''_{C1} \cong R''_{C2}$ 或 R''_{C1} 和 R''_{C2} 估计可忽略不计的情况下,方程[60]简化为:

$$T_{Core,m} = \frac{T_{Sensor2,m} \times q''_{Sensor1,m} - T_{Sensor1,m} \times q''_{Sensor2,m}}{q''_{Sensor1,m} - q''_{Sensor2,m}} \quad [61]$$

其中右侧不再需要组织热传导性(k)、组织密度(ρ)、组织比热容(C)以及血液灌注(w)的典型值。稳态条件可以通过多种方式实现,包括通过外部热设备(例如加热器、冷却器等)调节组织表面处发生的热通量和/或温度的控制电路。

[0214] 管道参数确定应用

图31示出了NITI技术的另一个应用,用于确定与管道或其他导管中流体流动相关的一个或多个内部参数。在此示例中,使用加热器(示例CHFT+实施例),但在其他示例中,加热器(即外部热设备)是可选的。

[0215] 当经受表面热通量时,具有内部流的管道或其他导管(例如铜管)的示例热数学解为:

$$T_{Pipe,m} = T_{Pipe,0} + \sum_{j=1}^m \left(\frac{q''_{Sensor,j} - q''_{Sensor,j-1}}{h} \right) (1 - e^{-\left(\frac{t_m - t_{j-1}}{\tau}\right)}) \quad [62]$$

其中,初始管道表面温度为:

$$T_{Pipe,0} = T_{Fluid} + \frac{q''_{Sensor,0}}{h} \quad [63]$$

其中当进入管道/导管时,热通量定义为正,并且其中 $\tau = \frac{\rho C \delta}{h}$ 是管道/导管的热时间常数(即时间常数), ρ 是管道/导管的密度, C 是管道/导管的比热容, δ 是管道/导管的壁厚, h 是管道/导管的内部对流热传递系数(即对流系数)并且与管道/导管的内部流速率(即流速率)相关, T_{Pipe} 是管道/导管表面温度,以及 T_{Fluid} 是核心(即内部)流体温度。

[0216] 根据NITI传感器输出重写方程[62]并包括NITI传感器和管道/导管表面之间的热接触电阻(R''_C)的影响得到:

$$T_{Pipe,m} = T_{Sensor,0} - q''_{Sensor,0} \times R''_C + \sum_{j=1}^m \left(\frac{q''_{Sensor,j} - q''_{Sensor,j-1}}{h} \right) (1 - e^{-\left(\frac{t_m - t_{j-1}}{\tau}\right)}) \quad [64]$$

其中 $\frac{1}{h}$ 是对流内部流速率的稳态热阻(R'')。

[0217] 方程[62]和方程[64]对于由高热传导性材料制成的管道或导管是有效的。对于其他材料,诸如PVC,可能需要开发不同的热模型和相应的解决方案。还可以为具有高热传导性的材料开发其他热模型和解决方案。

[0218] 在本例中,流速率($\dot{v}$)越大,对流换热系数(h)越大。 $\dot{v}$ 和 h 之间的关系通常不是线性

的,除非在低(例如层流)流速率下,并因此两个变量之间的相关函数是合期望的。例如,可以通过实验测试找到这种相关函数。当CHFT+在内径为 $\frac{3}{4}$ "(0.01905m)且壁厚为0.05"(0.00127m)的L型铜管上操作时,实验发现的一个相关性示例为:

$$h = 1035.2 \left[\frac{W}{m^2 - ^\circ C} \left(\frac{min}{gal} \right)^{0.2137} \right] \dot{v}^{0.2137} \quad [65]$$

重新排列:

$$\dot{v} = 1 * 10^{-14} \left[\frac{gal}{min} \left(\frac{m^2 - ^\circ C}{W} \right)^{4.6475} \right] h^{4.6475} \quad [66]$$

因此,对流系数(h)和流速率($\dot{v}$)之间相关性的示例一般形式如下可为:

$$h = Z \left[\frac{W}{m^2 - ^\circ C} \left(\frac{min}{gal} \right)^P \right] \dot{v}^P \quad [67]$$

其中 Z 和 P 是相关值。

[0219] 根据所使用的数学技术(例如对数函数、指数等),可以开发其他形式的相关性。

[0220] 图32是图表,示出了可如何通过实验测量开发示例相关性。在本例中,通过绘制不同流速率下测量的实验结果来发现相关性。在不同流速率下进行足够数量的测量后,可使用最佳拟合曲线(例如趋势线)找到将所测对流系数(h)和流速率($\dot{v}$)相关(或反之亦然)的相关性(即方程)。

[0221] 在其它示例实施例中,相关性函数和/或其它将对流热传递系数(h)和流速率($\dot{v}$)相关(或反之亦然)的方法可使用机器学习方法(例如,神经网络等)确定。

[0222] 管道应用——使用参数估计的周期性测量实施例

对于使用周期性数据处理方法的示例NITI传感器实施例(例如,CHFT+或CHFT-),可在参数估计方案中使用方程[64]来确定对流系数(h)、核心(即内部)流体温度(T_{Fluid})和/或在NITI传感器和管道/导管表面之间的热接触电阻(R_C'')的内部参数。这类似于作为示例呈现的一般情况,例如上文部分的具有一个或多个热通量传感器-温度传感器对的NITI系统实施例,但对于不同的NITI应用具有不同的热模型。在此示例中,管道密度(ρ)、管道热容(C)以及管道壁厚(δ)的内部参数的预定常数值被使用。在本例中,从管道制造商规范中获得预定值。在此示例应用中,要最小化的示例目标函数为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{m=1}^{M-1} (T_{Sensor,m} - T_{Calculated,m})^2} \quad [68]$$

其中:

$$T_{Calculated,m} = T_{Pipe,m} + q_{Sensor,m} \times R_C'' \quad [69]$$

并且其中:

$$R''_C = \frac{\sum_{n=1}^{N-1} \frac{T_{Sensor,n} - T_{Pipe,n}}{q_{Sensor,n}}}{N-1} \quad [70]$$

在 $\frac{3}{4}$ " (0.01905m) 内径、壁厚为0.05" (0.00127m) 的L型铜管上对示例CHFT+实施例(带加热器)进行测试,其中水在不同流速率和温度下流过该铜管。将CHFT+附接到管道表面,并进行如下测量:

-记录10秒的稳态数据。

[0223] -加热器开启约65秒,导致CHFT+通过表面热通量和表面温度信号测量的管壁瞬态热响应。

[0224] -整个数据通过周期性数据处理方法进行处理,包括在不到1秒的时间内进行参数估计方案,从而产生对流系数(h)、核心水温(T_{Fluid})以及在CHFT+和管道表面之间的热接触电阻(R''_C)。

[0225] 一旦对流系数(h)确定后,将其用于相关性方程(例如方程[66])中,以确定与流体质量流速率和速度(例如kg/s和m/s)相关的流速率。结果在下表4中制成表格。

[0226] 表4 管道参数确定结果(具有周期性参数估计的示例CHFT+实施例)

流速率 ($\frac{gal}{min}$)	h ($\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$)	τ (s)	R''_C ($^\circ C \frac{m^2}{W}$)	RMSE ($^\circ C$)	CHFT+ 估计流速率 ($\frac{gal}{min}$)
1	838	5.22	0.000331	0.126	0.9
	829	5.27	0.000327	0.134	0.9
	825	5.30	0.000334	0.134	0.9
	826	5.29	0.000331	0.143	0.9
	826	5.29	0.000334	0.137	0.9
	826	5.29	0.000329	0.041	0.9
4	1378	3.17	0.000329	0.041	3.9
	1385	3.16	0.000329	0.038	4.0
	1377	3.17	0.000329	0.043	3.9
	1366	3.20	0.000328	0.041	3.7
	1388	3.15	0.000328	0.037	4.0
	1401	3.12	0.000331	0.036	4.2
7	1588	2.75	0.000331	0.023	7.5
	1585	2.76	0.000328	0.023	7.4

	1583	2.76	0.000329	0.024	7.4
	1594	2.74	0.000328	0.021	7.6
	1589	2.75	0.000331	0.022	7.5
	1599	2.73	0.00033	0.023	7.8
10	1687	2.59	0.000332	0.020	10.0
	1695	2.58	0.000333	0.021	10.2
	1690	2.59	0.000331	0.021	10.0
	1688	2.59	0.000333	0.023	10.0
	1683	2.60	0.000331	0.022	9.8
	1682	2.60	0.000331	0.025	9.8
13	1786	2.45	0.000332	0.019	13.0
	1796	2.43	0.000331	0.019	13.3
	1808	2.42	0.000331	0.020	13.7
	1794	2.44	0.000329	0.019	13.2
	1794	2.44	0.000329	0.020	13.2
	1800	2.43	0.00033	0.020	13.5
16	1869	2.34	0.000329	0.019	16.0
	1864	2.35	0.00033	0.020	15.8
	1863	2.35	0.000331	0.021	15.8
	1857	2.35	0.00033	0.020	15.6
	1863	2.35	0.000331	0.025	15.8
	1857	2.35	0.00033	0.021	15.6

[0227] 为了展示当与实验数据一起使用时该数据处理方法中使用的参数估计方案在确定最佳对流系数(h)值方面的能力, $10 \frac{\text{gal}}{\text{min}}$ 情况下方程[68]中的示例目标函数(即RMSE)与对流系数(h)之间的关系在图33中显示。图33中的图表图示了该关系在对流系数(h)值为 $1690 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{C}}$ 处具有全局最小值。这与表4中所示在 $10 \frac{\text{gal}}{\text{min}}$ 情况下的估计值相对应。

[0228] 对于 $10 \frac{\text{gal}}{\text{min}}$ 情况, 图34是图示所计算(输出)传感器温度曲线和所测(输入)传感器温度曲线之间匹配示例的图表。两条温度曲线之间的匹配指示用于通过方程[69]构造所计算(输出)传感器温度曲线的内部参数值(h, ρ, C, δ)以及热接触电阻(R_c'')值与管道(即对象)中发生的实际值相同。

[0229] 如前所述, 在此示例中, 管道密度(ρ)、管道热容(C)以及管道壁厚(δ)的预定值使用铜管制造商规范确定, 并在针对管道参数确定执行的示例数据处理方法中作为常数输入。虽然在本例中它是作为数据处理方法的一部分确定的, 但估计的热接触电阻(R_c'')的值也可以预先作为预定值输入, 并且仍然实现类似的结果。在该示例实施例中, 无论热接触电阻(R_c'')的预定值是否准确, 流速率($\dot{v}$)结果输出都可以是准确的, 因为热接触电阻(R_c'')的预定值中任何不准确性的影响由随后开发的相关性进行补偿。

[0230] 定义和确定热接触电阻(R_c'')的另一种方法是使用热传递系数的总体定义 U , 其中:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h} + R_c'' \quad [71]$$

U (即,对象的总稳态热阻)可通过多种方法确定。一种示例方法是使用稳态条件下(例如,热事件之前、之后或结束时)进行的测量,其中,例如:

$$U = \frac{\dot{q}_{\text{Sensor,END}}}{T_{\text{Sensor,END}} - T_{\text{Fluid,END}}} \quad [72]$$

因此,热接触电阻(R_C'')可定义为:

$$R_C'' = \frac{T_{\text{Sensor,END}} - T_{\text{Fluid,END}}}{\dot{q}_{\text{Sensor,END}}} - \frac{1}{h} \quad [73]$$

并替换方程[70]。为了利用方程[73],通常需要确定 $T_{\text{Fluid,END}}$ 的值。一些确定 $T_{\text{Fluid,END}}$ (即 $T_{\text{Fluid,m}}$)的示例方法在下文描述。在其他示例实施例中, $T_{\text{Fluid,m}}$ 可假设或以其他方式确定,例如使用表面安装的可被绝缘的温度传感器。

[0231] 另一个确定 U 的示例方法使用在不同稳态条件下(例如,热事件之前、结束时或之后)进行的测量:

$$U = \frac{\dot{q}_{\text{Sensor,END}} - \dot{q}_{\text{Sensor,0}}}{T_{\text{Sensor,END}} - T_{\text{Sensor,0}}} \quad [74]$$

其中 $\dot{q}_{\text{Sensor,END}}$ 和 $T_{\text{Sensor,END}}$ 表示热事件结束时在稳态条件下进行的热通量和表面温度测量。

[0232] 应注意,方程[74]要求不同的稳态条件,例如,其可通过在例如通过外部热设备生成热事件之前和之后进行测量来获得。

[0233] 使用方程[74]和方程[71]:

$$R_C'' = \frac{T_{\text{Sensor,END}} - T_{\text{Sensor,0}}}{\dot{q}_{\text{Sensor,END}} - \dot{q}_{\text{Sensor,0}}} - \frac{1}{h} \quad [75]$$

一种包括参数估计方案和流速率($\dot{v}$)相关性的数据处理方法也可以在不区分对流换热传递系数(h)和热接触电阻(R_C'')的情况下执行。相反,该数据处理方法可基于使用总热传递系数(U)表示的热解,例如,如方程[76]所示:

$$T_{\text{Calculated}_U,m} = T_{\text{Sensor,0}} + \sum_{j=1}^m \frac{(\dot{q}_{\text{Sensor},j} - \dot{q}_{\text{Sensor},j-1})}{U} (1 - e^{-\left(\frac{t_m - t_{j-1}}{\tau}\right)}) \quad [76]$$

其中 $T_{\text{Calculated}_U,m}$ 是使用总热传递系数(U)时发现的所计算(输出)温度曲线。此外,该示例实施例中的示例目标函数可以是:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{m=1}^{M-1} (T_{\text{Sensor},m} - T_{\text{Calculated}_U,m})^2} \quad [77]$$

当估计的热接触电阻(R_C'')最小或以其他方式估计为可忽略不计时,该方法尤其有用。

[0234] 管道应用——使用参数估计的实时测量实施例

在示例管道应用-使用参数估计的周期性测量实施例中,控制电路进行的数据处理在进行所有测量之后开始。因此,在上面的实验管道测试中,大约每75秒以周期性的方式输出测量结果。NITI传感器(例如CHFT+或CHFT-)数据可以可替代地实时处理,以提供对流系数(h)、核心流体温度(T_{Fluid})和/或NITI传感器和管道/导管表面之间的热接触电阻(R_C'')的实时输出。随着时间的推移,更多的数据点被添加到通过数据处理方法实时处理的表面热通量和表面温度曲线中,该数据处理方法包括参数估计方案并在不到1秒的时间内输出值。

[0235] 管道应用——无参数估计的实时测量实施例

方程[64]可以重新排列为:

$$\frac{1}{h} = \frac{T_{Pipe,m} - (T_{Sensor,0} - q_{Sensor,0}'' \times R_C'')}{\sum_{j=1}^m \Delta q_{Sensor,j}'' \times (1 - e^{-\left(\frac{t_m - t_{j-1}}{\tau}\right)})} \quad [78]$$

其中:

$$T_{Pipe,m} = T_{Sensor,m} - q_{Sensor,m}'' \times R_C'' \quad [79]$$

组合方程[78]和方程[79]:

$$h = \frac{\sum_{j=1}^m \Delta q_{Sensor,j}'' \times (1 - e^{-\left(\frac{t_m - t_{j-1}}{\tau}\right)})}{(T_{Sensor,m} - q_{Sensor,m}'' \times R_C'') - (T_{Sensor,0} - q_{Sensor,0}'' \times R_C'')} \quad [80]$$

当NITI传感器(例如CHFT+或CHFT-)和管道/导管表面之间的热接触电阻(R_C'')已知时,当在右侧输入热时间常数(τ)的典型值时,方程[80]可用于实时对流系数(h)的测量。如前所述,热时间常数(τ)是对流系数(h)的函数。因此,需要确定对流系数(h)的典型值。在一些示例实施例中,例如当对流系数(h)的变化受关注时,数量 $T_{Sensor,0} - q_{Sensor,0}'' \times R_C''$ 可在一个或多个指定时间被假设。在其他示例实施例中,数量 $T_{Sensor,0} - q_{Sensor,0}'' \times R_C''$ 可通过例如使用附加温度传感器来确定;其输出指示管道表面和/或核心(即内部)流体温度。

[0236] 虽然左侧的所计算对流系数(h)值将不精确,但仍将足以进行准确的定量和/或定性测量。此外,为了获得最准确的结果,右侧与热时间常数(τ)有关的对流系数(h)的典型值可随时间更新,以反映通过方程[80]计算的最新和/或准确值。在其他方法中,左右两侧的对流系数(h)的值可同时确定,从而提供准确的定量测量。这可以省略在右侧输入典型对流系数(h)值的需要。如果热接触电阻(R_C'')值未知,其可以被确定(例如,通过上述NITI过程)或以其他方式确定和计及。在某些情况下,热接触电阻(R_C'')可能被估计为可忽略不计。

[0237] 将确定的对流系数(h)值从方程[80]输入到相关性方程(例如方程[66])实时产生相应的流速率($\dot{v}$)值。

[0238] 此外,在稳态条件下,方程[80]简化为:

$$h = \frac{q_{Sensor,m}'' - q_{Sensor,0}''}{(T_{Sensor,m} - q_{Sensor,m}'' \times R_{C1}'') - (T_{Sensor,0} - q_{Sensor,0}'' \times R_{C1}'')} \quad [81]$$

方程[80]在右侧不再需要典型的热时间常数(τ)值。稳态条件可以通过多种方式实现,包括通过外部热设备(例如加热器、冷却器等)调节表面处发生的热通量和/或温度的控制电路。

[0239] 针对方程[76]也可以进行类似的重新排列,其中总热传递系数(U)被利用并得到:

$$U = \frac{\sum_{j=1}^m \Delta q_{Sensor,j}'' \times (1 - e^{-\left(\frac{t_m - t_{j-1}}{\tau}\right)})}{T_{Sensor,m} - T_{Sensor,0}} \quad [82]$$

并且在稳态条件下:

$$U = \frac{q_{Sensor,m}'' - q_{Sensor,0}''}{T_{Sensor,m} - T_{Sensor,0}} \quad [83]$$

管道应用——DUO NITI传感器实施例

对于使用第一和第二并行NITI传感器节点(每个节点具有热通量传感器-温度传感器对)时的示例DUO NITI传感器实施例,形成两个独立的方程:

$$T_{Sensor1,m} - q_{Sensor1,m}'' \times R_{C1}'' = T_{Fluid} + q_{Sensor1,0}'' \times \frac{1}{h} + \sum_{j=1}^m \left(\frac{q_{Sensor,j}'' - q_{Sensor,j-1}''}{h} \right) (1 - e^{-\left(\frac{t_m - t_{j-1}}{\tau}\right)}) \quad [84]$$

$$T_{Sensor2,m} - q_{Sensor2,m}'' \times R_{C2}'' = T_{Fluid} + q_{Sensor2,0}'' \times \frac{1}{h} + \sum_{j=1}^m \left(\frac{q_{Sensor,j}'' - q_{Sensor,j-1}''}{h} \right) (1 - e^{-\left(\frac{t_m - t_{j-1}}{\tau}\right)}) \quad [85]$$

使用基于差分的示例数据处理方法,方程[84]-方程[85]得出:

$$h = \frac{\left(q_{Sensor1,0}'' - q_{Sensor2,0}'' + \sum_{j=1}^m \Delta q_{Sensor1,j}'' \times (1 - e^{-\left(\frac{t_m - t_{j-1}}{\tau}\right)}) - \sum_{j=1}^m \Delta q_{Sensor2,j}'' \times (1 - e^{-\left(\frac{t_m - t_{j-1}}{\tau}\right)}) \right)}{(T_{Sensor1,m} - q_{Sensor1,m}'' \times R_{C1}'') - (T_{Sensor2,m} - q_{Sensor2,m}'' \times R_{C2}'')} \quad [86]$$

该瞬态方程是DUO NITI传感器配置的结果,并且当在右侧向对流系数(h)的函数输入热时间常数(τ)的典型值时,允许在不考虑核心流体温度(T_{Fluid})的情况下进行实时对流系数(h)测量。

[0240] 虽然左侧的所计算对流系数(h)值将不精确,但仍将足以进行准确的定量和/或定性测量。此外,为了获得最准确的结果,右侧与热时间常数(τ)有关的对流系数(h)的典型值可随时间更新,以反映通过方程[86]计算的最新和/或准确值。在其他方法中,左右两侧的对流系数(h)的值可同时确定,从而提供准确的定量测量。这可以省略在右侧输入典型对流系数(h)值的需要。

[0241] 每个NITI传感器节点(例如CHFT+或CHFT-)与管道/导管表面之间的热接触电阻(R_{C1}'' 和 R_{C2}'')的估计值可以被确定(例如,通过上述NITI过程)或以其他方式确定和计及。在某些情况下,热接触电阻(R_{C1}'' 和/或 R_{C2}'')可能被估计为可忽略不计。

[0242] 在稳态条件下,方程[86]简化为:

$$h = \frac{(q_{\text{Sensor1},m}'' - q_{\text{Sensor2},m}'')}{(T_{\text{Sensor1},m} - q_{\text{Sensor1},m}'' \times R_{C1}'') - (T_{\text{Sensor2},m} - q_{\text{Sensor2},m}'' \times R_{C2}'')} \quad [87]$$

其中在右侧不再需要典型热时间常数(τ)值。可通过多种方式维持稳态条件,包括通过外部热设备(例如,加热器、冷却器等)调节每个传感器节点表面处发生的热通量和/或温度的控制电路。

[0243] 在 $\frac{3}{4}$ " (0.01905m) 内径、壁厚为0.05" (0.00127m) 的L型铜管上测试了示例DUO CHFT +/- 实施例,其中一个传感器节点具有加热器(CHFT+),并且另一个传感器节点没有加热器(CHFT-),其中水在不同流速率和温度下流过该铜管。将DUO CHFT +/- 装置附接到管道表面,并将测量结果与示例CHFT+实施例以及在线流量计进行比较。

[0244] 表5 示例DUO CHFT +/- 实施例的结果

流量计	CHFT+	DUO CHFT +/-
流速率 ($\frac{\text{gal}}{\text{min}}$)	流速率 ($\frac{\text{gal}}{\text{min}}$)	流速率 ($\frac{\text{gal}}{\text{min}}$)
4.0	3.8	3.9
7.0	7.3	7.5
10.0	9.8	10.4
13.0	13.1	12.9
16.0	15.9	15.6

[0245] 对于方程[76]也可以进行类似的重新排列,其中总热传递系数(U)被利用并得到:

$$U = \frac{(q_{\text{Sensor1},0}'' - q_{\text{Sensor2},0}'' + \sum_{j=1}^m \Delta q_{\text{Sensor1},j}'' \times (1 - e^{-\frac{(t_m - t_{j-1})}{\tau}})) - \sum_{j=1}^m \Delta q_{\text{Sensor2},j}'' \times (1 - e^{-\frac{(t_m - t_{j-1})}{\tau}}))}{T_{\text{Sensor1},m} - T_{\text{Sensor2},m}} \quad [88]$$

并且在稳态下:

$$U = \frac{q_{\text{Sensor1},m}'' - q_{\text{Sensor2},m}''}{T_{\text{Sensor1},m} - T_{\text{Sensor2},m}} \quad [89]$$

除了流速率($\dot{v}$)以及核心流体温度(T_{Fluid}),此NITI应用(即管道参数确定)可能能够确定管道内部流传递的热能,即 $\dot{v}$ 和 T_{Fluid} 的函数。

[0246] 腐蚀/污垢检测应用

上述用于管道参数确定的所有示例方法和示例实施例确定了 h 或 U ,然后将其输入相关性函数以确定流速率($\dot{v}$)。独立地监测 h 或 U 也可用于确定管道/导管随时间发生的腐蚀或污垢。这是因为 h 或 U 的值对于管道中发生的给定流速率量应一致。当腐蚀或污垢发生时,值开始变化,并因此可以检测到腐蚀或污垢。监测例如由高热传导性材料制成的管道/导管的热时间常数(τ)也得到类似的能力。例如,在此示例应用中,热时间常数(τ)是管道/导管属性(包括密度(ρ)、比热容(C)以及壁厚(δ))的函数。这些属性的值受到腐蚀或污垢的影响,这因此影响管道/导管的热时间常数(τ)。

[0247] 管道或导管的内部温度测量应用

组合方程[62]和方程[63]:

$$T_{Pipe,m} = T_{Fluid} + \frac{q''_{Sensor,0}}{h} + \sum_{j=1}^m \left(\frac{q''_{Sensor,j} - q''_{Sensor,j-1}}{h} \right) (1 - e^{-\left(\frac{t_m - t_{j-1}}{\tau}\right)}) \quad [90]$$

根据NITI传感器输出重写方程[90]并包括在NITI传感器和管道/导管表面之间的热接触电阻(R''_C)的影响:

$$T_{Sensor,m} - q''_{Sensor,m} \times R''_C = T_{Fluid} + \frac{q''_{Sensor,0}}{h} + \sum_{j=1}^m \left(\frac{q''_{Sensor,j} - q''_{Sensor,j-1}}{h} \right) (1 - e^{-\left(\frac{t_m - t_{j-1}}{\tau}\right)}) \quad [91]$$

重新排列和认识到: T_{Fluid} 取决于随时间变化的值(测量索引(m)):

$$T_{Fluid,m} = T_{Sensor,m} - q''_{Sensor,m} \times R''_C - \frac{q''_{Sensor,0}}{h} - \sum_{j=1}^m \left(\frac{q''_{Sensor,j} - q''_{Sensor,j-1}}{h} \right) (1 - e^{-\left(\frac{t_m - t_{j-1}}{\tau}\right)}) \quad [92]$$

方程[92]是在具有高热传导性(例如铜)的管道或导管中进行核心流体温度($T_{Fluid,m}$)测量的示例方程,并在下文的以下示例实施例中使用。对于这些示例实施例中的一些,需要确定对流系数(h)、NITI传感器和管道/导管表面之间的估计热接触电阻(R''_C)、和/或热时间常数(τ)的值。例如,这可以通过确定这些值(例如,通过前面描述的CHFT+或CHFT-方法)或通过输入预定值(例如,来自教科书中的值)来进行。

[0248] 与以下那些实施例类似的示例实施例可与方程[76]一起使用,其中总热传递系数(U)被使用,而不是利用对流系数(h)和在NITI传感器和管道/导管表面之间的热接触电阻(R''_C)的组合。

[0249] 管道内部温度——CHFT+(主动测温)实施例

CHFT+实施例使用集成的外部热设备(例如加热器)来创建可用于执行NITI的热事件(即热传递)。对于核心流体温度($T_{Fluid,m}$)测量,加热器可以任何方式(稳定、周期、循环等)操作,并且在本例中,当在右侧输入对流系数(h)、热时间常数(τ)以及估计的热接触电阻(R''_C)的值时,方程[92]将准确且实时地输出核心流体温度($T_{Fluid,m}$)。这些值可以通过例如使用数据处理方法(例如,包括参数估计方案)来确定或以其他方式确定和计及。在某些情况下,热接触电阻(R''_C)可能被估计为可忽略不计。尽管没有要求,但用绝缘材料覆盖CHFT+可能是有益的,以防止来自外部刺激(例如环境变化、接触等)的错误信号。

[0250] 表6提供了用于测量内径为 $\frac{3}{4}$ " (0.01905m)、壁厚为0.05" (0.00127m)的L型铜管在不同流速率下核心流体温度($T_{Fluid,m}$)时示例CHFT+实施例(带有集成加热器)的实验结果,其中核心流体温度测量($T_{Fluid,m}$)的测量结果在时间上进行平均:

表6 内部管道温度的示例CHFT+实施例结果

流速率 ($\frac{gal}{min}$)	CHFT+ 输出 (°C)	所测 T_{Fluid} (°C)	ΔT (°C)
1	24.76	24.86	0.10
	24.98	25.09	0.11
	25.18	25.30	0.12
	25.42	25.52	0.10
	25.62	25.73	0.11
4	25.85	25.95	0.10
	22.28	22.41	0.13
	22.45	22.58	0.13
	22.75	22.86	0.11
	22.95	23.10	0.15
	23.25	23.31	0.06
7	23.70	23.84	0.14
	22.65	22.68	0.03
	22.86	22.91	0.05
	23.14	23.19	0.05
	23.40	23.46	0.06
	23.77	23.85	0.08
10	24.12	24.17	0.05
	25.46	25.58	0.12
	25.66	25.76	0.10
	29.24	29.27	0.03
	29.63	29.69	0.06
	29.89	29.86	0.03
13	30.34	30.32	0.02
	25.47	25.61	0.14
	25.65	25.77	0.12
	25.86	25.99	0.13
	26.04	26.13	0.09
	26.25	26.40	0.15
16	26.51	26.66	0.15
	26.24	26.42	0.18
	26.38	26.49	0.11
	26.51	26.60	0.09
	26.68	26.79	0.11
	26.83	27.01	0.18
	27.02	27.19	0.17

[0251] 图354是图表,示出了用于测量内径为 $\frac{3}{4}$ " (0.01905m)、壁厚为0.05" (0.00127m)、经历15 $\frac{gal}{min}$ 流体流的L型铜管的核心流体温度($T_{Fluid.m}$)时示例CHFT+实施例(带有集成和受控加热器)的结果。在该图中,示例CHFT+实施例能够在不管表面温度条件如何的情况下确定管道的核心流体温度($T_{Fluid.m}$)。具体而言,在该示例中,由于集成加热器开启,表面温度随时间升高。不管表面温度随时间的该持续升高,示例CHFT+实施例与放置在管道内部和管道流内的内部探头紧密一致地测量铜管内的核心流体温度($T_{Fluid.m}$)。

[0252] 管道内部温度--CHFT-(被动测温)实施例

CHFT-实施例使用外部热事件(例如管道对环境的散热)来执行NITI。当经受外部

热事件时,当在右侧输入对流系数(h)、热时间常数(τ)以及估计的热接触电阻(R_C'')的值时,方程[92]例如将准确且实时地输出核心流体温度($T_{Fluid,m}$)。这些值可以通过例如使用数据处理方法(例如,其包括参数估计方案)来确定或以其他方式确定和计及。在某些情况下,热接触电阻(R_C'')可能被估计为可忽略不计。尽管没有要求,但用绝缘材料覆盖CHFT-可能是有益的,以防止来自外部刺激(例如环境变化、接触等)的错误信号。

[0253] 管道内部温度-CHFT+(周期性测量)实施例

除了上述用于管道或导管内部温度测量的示例实时方法和示例实施例外,还可以在不同的稳态条件下操作时使用NITI传感器对核心流体温度(T_{Fluid})进行周期性测量。例如,热事件 ($T_{Sensor,0}, q_{Sensor,0}''$) 之前的稳态测量可与热事件($T_{Sensor,END}, q_{Sensor,END}''$)期间、之后或结束时的稳态测量结果进行比较,以便使用如下方程确定核心流体温度(T_{Fluid}):

$$T_{Fluid} = \frac{T_{Sensor,0} \times q_{Sensor,END}'' - T_{Sensor,END} \times q_{Sensor,0}''}{q_{Sensor,END}'' - q_{Sensor,0}''} \quad [93]$$

CHFT+和/或CHFT-示例实施例二者都可能随时间而经受不同的稳态条件。然而,由于可用于创建不同稳态条件的一个或多个热事件设备的增加的操作控制,优选CHFT+示例实施例。

[0254] 管道内部温度——CHFT+(零热通量测温)实施例

使用控制电路,示例CHFT+实施例可用于创建零热通量环境,其中管道和传感器表面之间不发生热传递,即其中热通量传感器没有测得热量进入或离开管道(最小电压输出,即“零”)。

[0255] 在稳态条件下,零热通量环境将方程[92]简化为:

$$T_{Fluid,m} = T_{Sensor,m} \quad [94]$$

其中所测传感器温度($T_{Sensor,m}$)相当于核心流体温度($T_{Sensor,m}$)。这种方法的优点是:一旦获得稳态零热通量环境,核心流体温度($T_{Sensor,m}$)测量与内部参数值(例如,对流系数(h)、热时间常数(τ)等)及热接触电阻(R_C'')无关。在获得稳态零热通量环境之前,可以利用其他实施例,例如用于管道或导管内部温度测量的主动测温实施例,来对核心流体温度($T_{Sensor,m}$)进行准确测量。由测量的传感器温度($T_{Sensor,m}$)输出确定的达到此类稳态条件所需的时间量根据所使用的示例实施例而变化,并且是不利用NITI技术的现有零热通量技术的常见限制。在获得稳态零热通量环境之前,示例零热通量测温实施例可利用其他示例NITI实施例,例如用于管道内部温度测量的示例主动测温实施例,以对核心流体温度($T_{Sensor,m}$)进行准确测量。

[0256] 管道内部温度——DUO NITI(双测温)实施例

对于使用第一和第二并行NITI传感器节点(每个节点具有热通量传感器-温度传感器对)时的示例DUO NITI传感器实施例,当放置在由具有高热传导性的材料制成的管道/导管上时形成两个独立的方程:

$$(T_{Sensor1,m} - \dot{q}_{Sensor1,m} \times R''_{C1}) - T_{Fluid,m} = \frac{1}{h} \left(\dot{q}_{Sensor1,0} + \sum_{j=1}^m \Delta \dot{q}_{Sensor1,j} \times (1 - e^{-\left(\frac{t_m - t_{j-1}}{\tau}\right)}) \right) \quad [95]$$

$$(T_{Sensor2,m} - \dot{q}_{Sensor2,m} \times R''_{C2}) - T_{Fluid,m} = \frac{1}{h} \left(\dot{q}_{Sensor2,0} + \sum_{j=1}^m \Delta \dot{q}_{Sensor2,j} \times (1 - e^{-\left(\frac{t_m - t_{j-1}}{\tau}\right)}) \right) \quad [96]$$

使用基于商的数据处理方法,方程[95]/方程[96]得出:

$$\frac{(T_{Sensor1,m} - \dot{q}_{Sensor1,m} \times R''_{C1}) - T_{Fluid,m}}{(T_{Sensor2,m} - \dot{q}_{Sensor2,m} \times R''_{C2}) - T_{Fluid,m}} = \frac{\left(\dot{q}_{Sensor1,0} + \sum_{j=1}^m \Delta \dot{q}_{Sensor1,j} \times (1 - e^{-\left(\frac{t_m - t_{j-1}}{\tau}\right)}) \right)}{\left(\dot{q}_{Sensor2,0} + \sum_{j=1}^m \Delta \dot{q}_{Sensor2,j} \times (1 - e^{-\left(\frac{t_m - t_{j-1}}{\tau}\right)}) \right)} \quad [97]$$

重新排列:

$$T_{Fluid,m} = \frac{(T_{Sensor2,m} - \dot{q}_{Sensor2,m} \times R''_{C2}) \times \left(\dot{q}_{Sensor1,0} + \sum_{j=1}^m \Delta \dot{q}_{Sensor1,j} \times (1 - e^{-\left(\frac{t_m - t_{j-1}}{\tau}\right)}) \right) - (T_{Sensor1,m} - \dot{q}_{Sensor1,m} \times R''_{C1}) \times \left(\dot{q}_{Sensor2,0} + \sum_{j=1}^m \Delta \dot{q}_{Sensor2,j} \times (1 - e^{-\left(\frac{t_m - t_{j-1}}{\tau}\right)}) \right)}{\left(\dot{q}_{Sensor1,0} + \sum_{j=1}^m \Delta \dot{q}_{Sensor1,j} \times (1 - e^{-\left(\frac{t_m - t_{j-1}}{\tau}\right)}) \right) - \left(\dot{q}_{Sensor2,0} + \sum_{j=1}^m \Delta \dot{q}_{Sensor2,j} \times (1 - e^{-\left(\frac{t_m - t_{j-1}}{\tau}\right)}) \right)} \quad [98]$$

该瞬态方程是DUO NITI配置的结果,并且当在右侧输入对流系数(**h**)和热时间常数(**τ**)的典型值时允许实时核心流体温度($T_{Fluid,m}$)测量。

[0257] 每个NITI传感器节点(例如CHFT+或CHFT-)与管道/导管表面之间的热接触电阻(R''_{C1} 和 R''_{C2})的估计值可以被确定(例如,通过上述NITI过程)或以其他方式确定和计及。在某些情况下,热接触电阻(R''_{C1} 和/或 R''_{C2})可能被估计为可忽略不计。

[0258] 在稳态条件下,并且在 $R''_C \cong R''_{C1} \cong R''_{C2}$ 或 R''_{C1} 和 R''_{C2} 估计为可忽略不计的情况下,方程[98]简化为:

$$T_{Fluid,m} = \frac{T_{Sensor2,m} \times \dot{q}_{Sensor1,m} - T_{Sensor1,m} \times \dot{q}_{Sensor2,m}}{\dot{q}_{Sensor1,m} - \dot{q}_{Sensor2,m}} \quad [99]$$

其中在右侧不再需要对流系数(**h**)和热时间常数(**τ**)的典型值。这意味着,在稳态条件下时,无论管道/导管材料、壁厚等如何,方程[99]都可以用于管道/导管。可通过多种方式实现稳态条件,包括通过外部热设备(例如加热器、冷却器等)调节组织表面处发生的热通量和/或温度的控制电路。

[0259] 图36是图表,示出了用于测量内径为 $\frac{3}{4}$ "(0.01905m)、壁厚为0.05"(0.00127m)、经历15 $\frac{gal}{min}$ 的流体流的L型铜管的内部温度时示例DUO CHFT+/-实施例(一个传感器节点带加热器,并且一个传感器节点不带加热器)的结果。在本例中,两个传感器节点均被绝缘体覆盖,以便防止零星的热传递和温度信号影响测量质量。该示例在稳态和瞬态条件二者下进行。如图所示,示例DUO CHFT+/-实施例和内部探头(放置在管道内和管道流内)之间存在紧密一致性。

[0260] 图37是图表,示出了用于测量内径为1.939"(0.0492506m)、壁厚为0.218"(0.0055372m)、经历50 $\frac{gal}{min}$ 的流体流的80级CPVC管的内部温度时DUO CHFT+/-实施例(一个传感器节点带加热器,并且一个传感器节点不带加热器)的结果。在本例中,两个传感器节

点均未覆盖绝缘体。该示例在稳态条件下进行,在稳态条件下,无需对管道的内部参数进行准确测量。如图所示,示例DUO CHFT+/-实施例和内部探头(放置在管道内和管道流内)之间存在紧密一致性。然而,由于没有用绝缘体覆盖传感器节点,因此有更多的零星测量。

[0261] 尽管已经详细示出和描述了各种示例实施例,但权利要求不限于任何特定实施例或示例。此外,上面的示例实施例使用热信号(例如,热传递和温度信号)与基于热数学模型的分析解相结合来确定对象的一个或多个内部属性。其他示例实施例可利用其他方法,包括但不限于经验方法、机器学习方法(例如,神经网络)、基于回归的方法、基于人工智能的方法、基于移动平均的方法等,以便根据在对象表面测量的热信号确定对象的一个或多个内部属性。

[0262] 在其他示例实施例中,其他基于非NITI的设备的输出可与NITI技术结合使用,以确定对象内部区域的一个或多个内部属性。例如,管道内内部温度探头的输出可与表面安装的NITI传感器一起使用,以确定管道内的流速率。

[0263] 在本申请中,词语“配置为……”用于意指装置的元件具有能够执行所定义的操作的配置。“配置”还可指硬件或软件互连的布置或方式。例如,装置可以具有提供所定义的操作的专用硬件,或者处理器或其他处理设备可以被编程以执行该功能。“配置为”并不意味着为了提供定义的操作,需要以任何方式更改装置元件。

[0264] 上述任何描述都不应被理解为暗示任何特定构件、步骤、范围或功能是必要的。本领域普通技术人员已知的上述实施例的构件的所有结构和功能等效物通过引用并入本文中,并打算包括在内。此外,本说明书中的任何实施例、特征、组件或步骤都不打算贡献于公众。

[0265] 尽管本文参考附图详细描述了说明性实施例,但应理解,本发明不限于这些精确实施例,并且本领域技术人员可以在不脱离所附权利要求范围的情况下对其进行各种更改和修改。

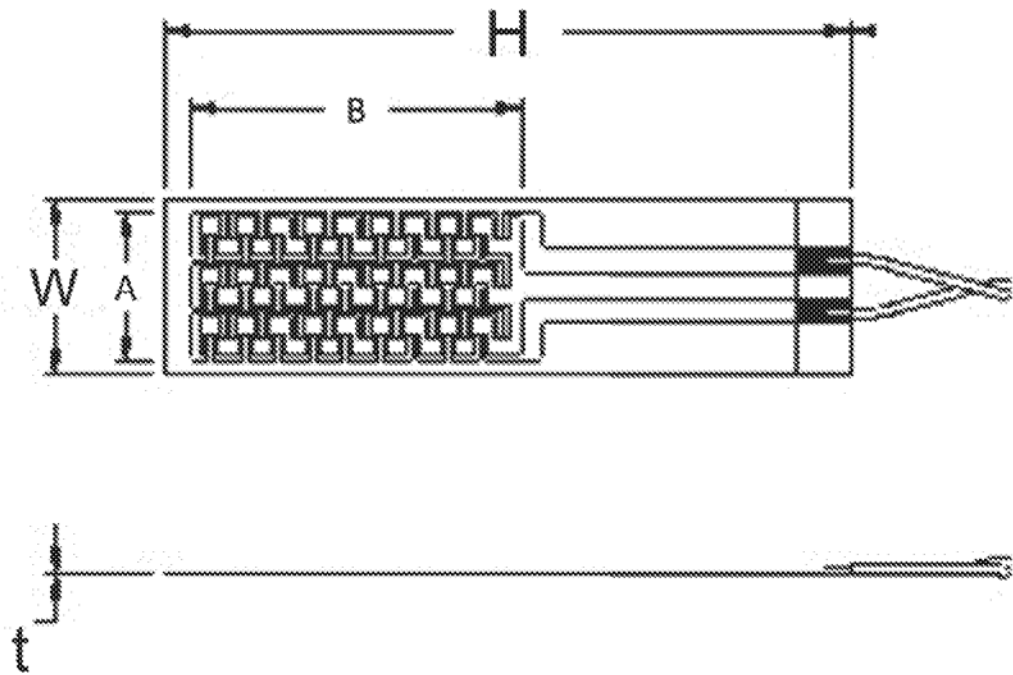


图 1

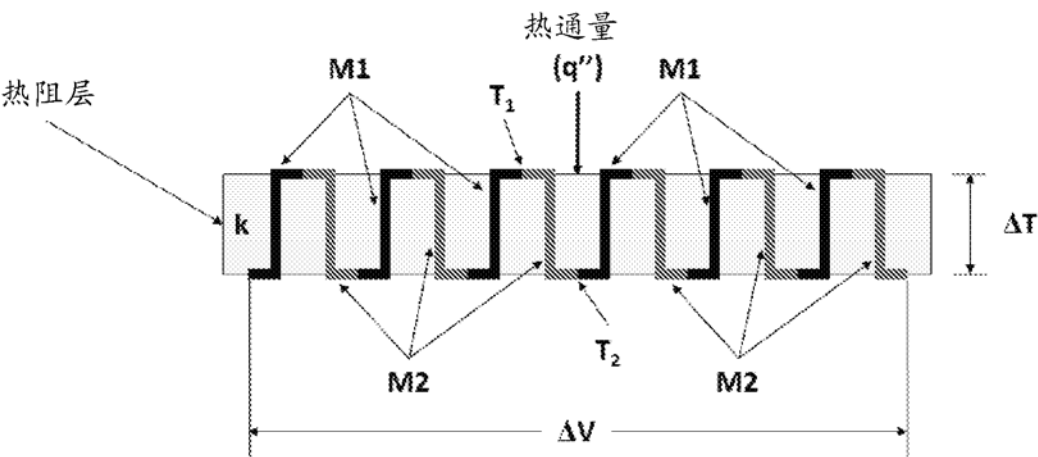


图 2A

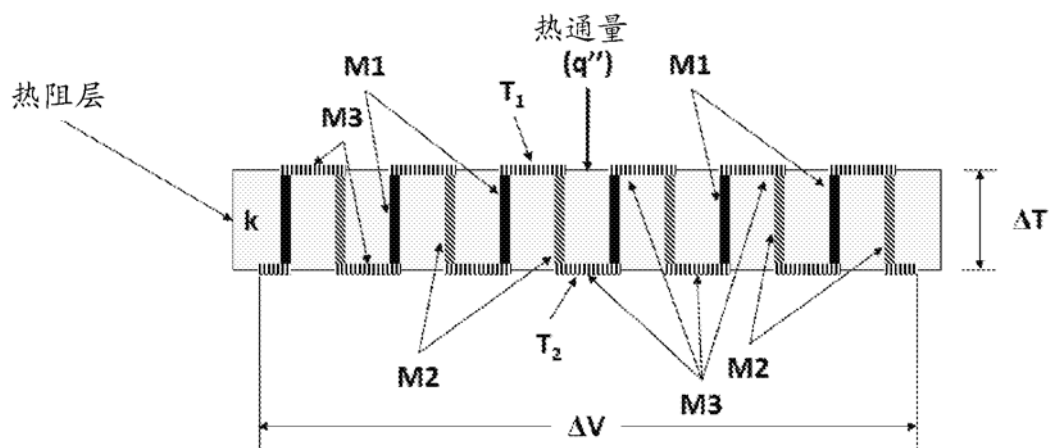


图 2B

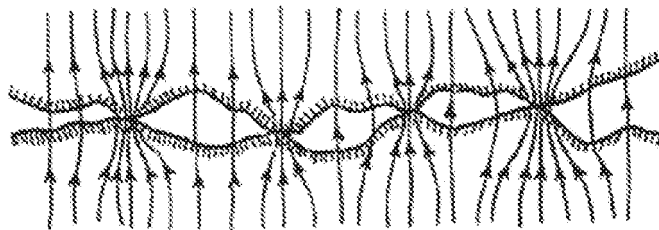


图 3

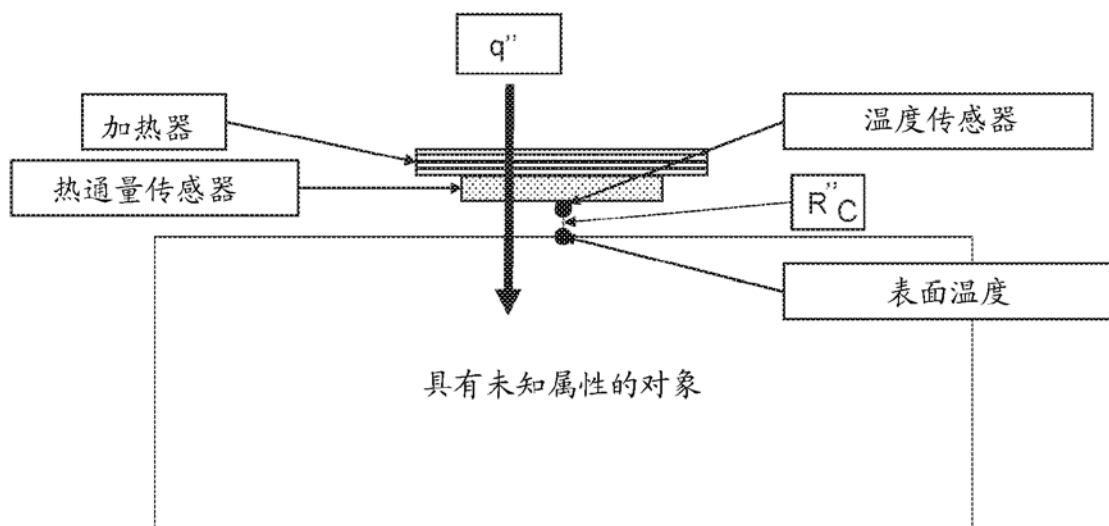


图 4

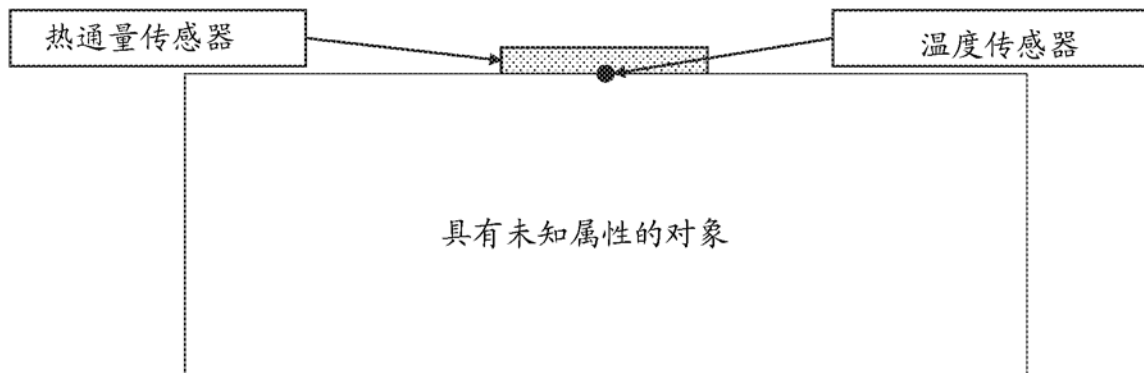


图 5

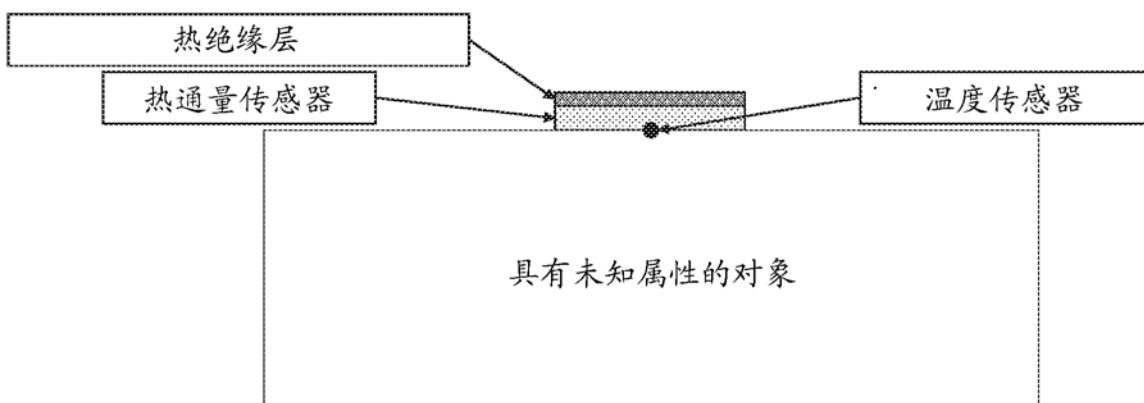


图 6A

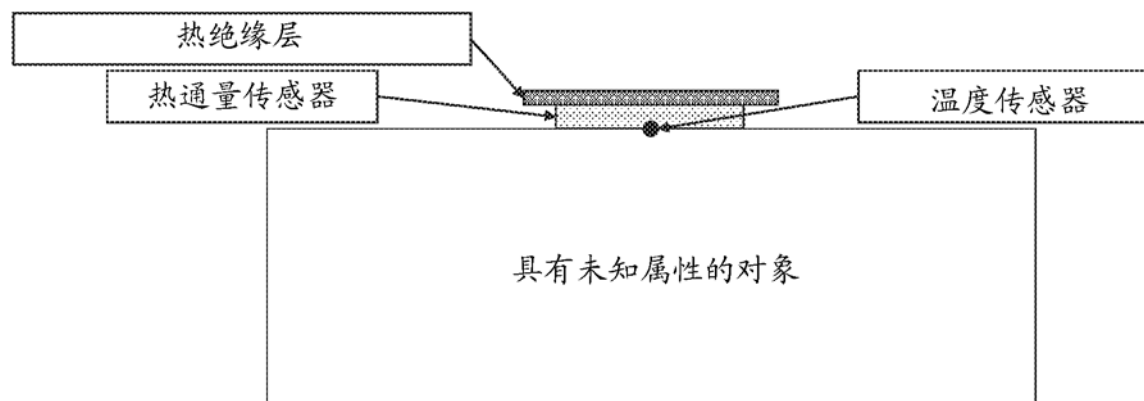


图 6B

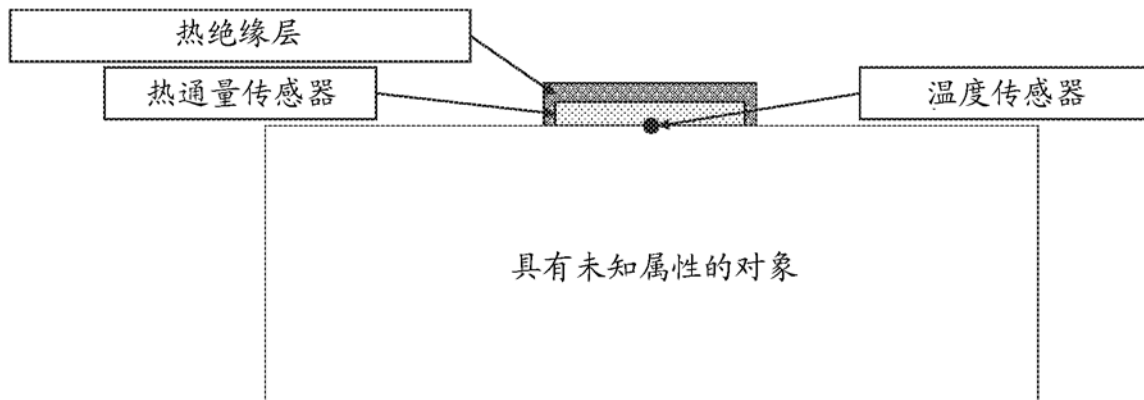


图 6C

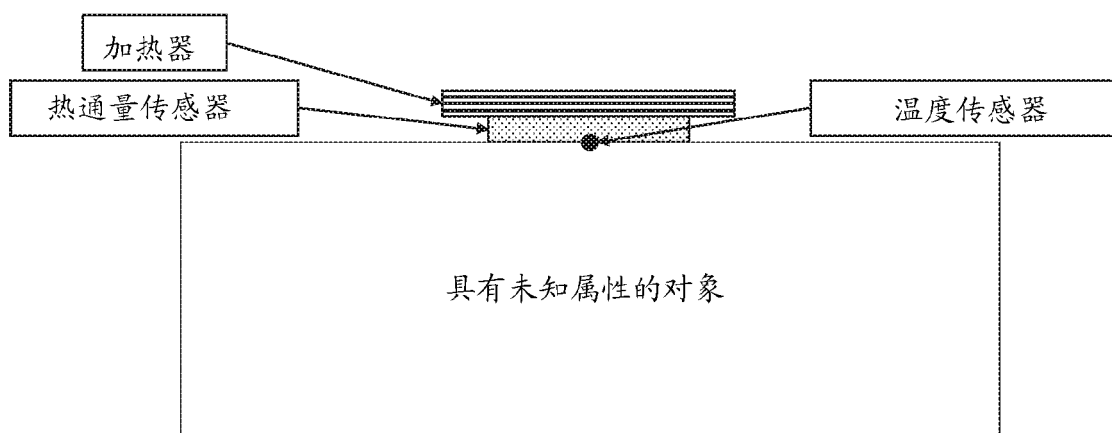


图 7A

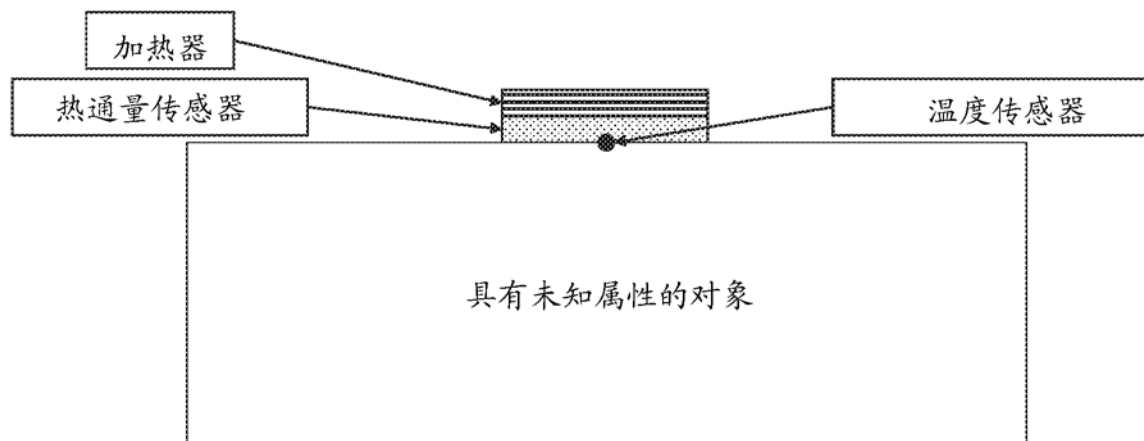


图 7B

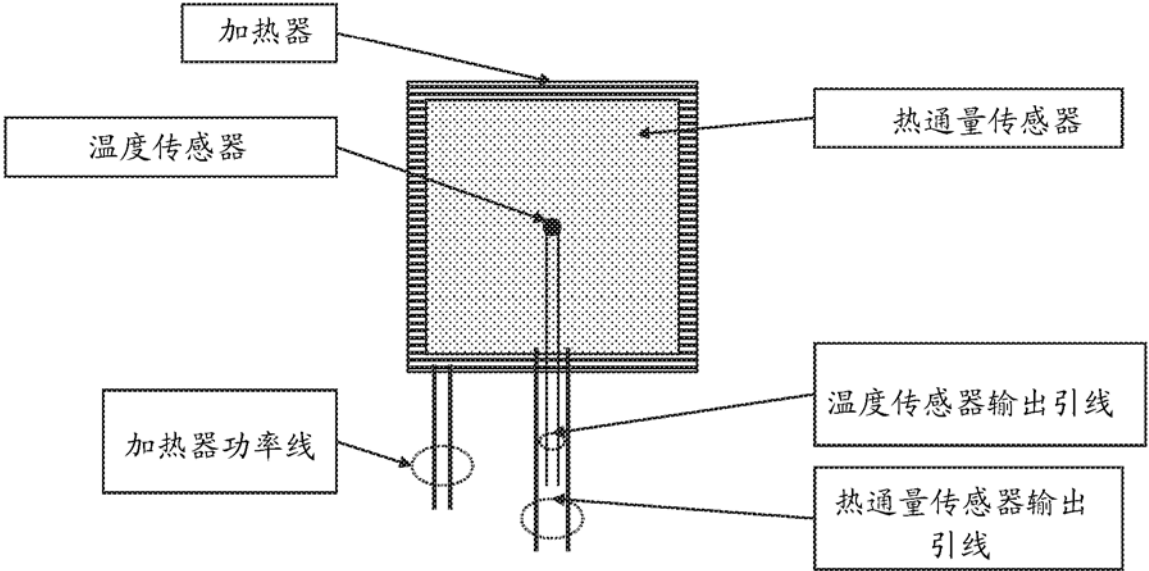


图 7C

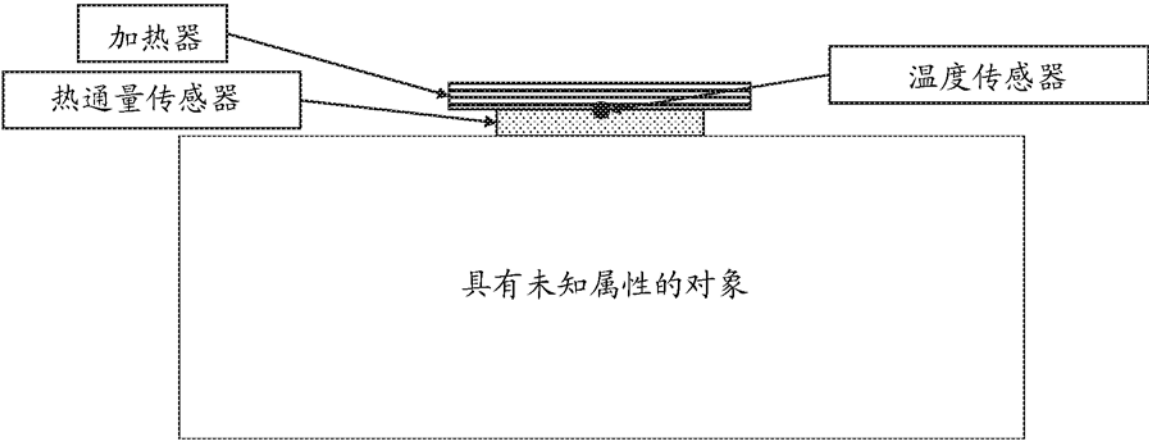


图 7D

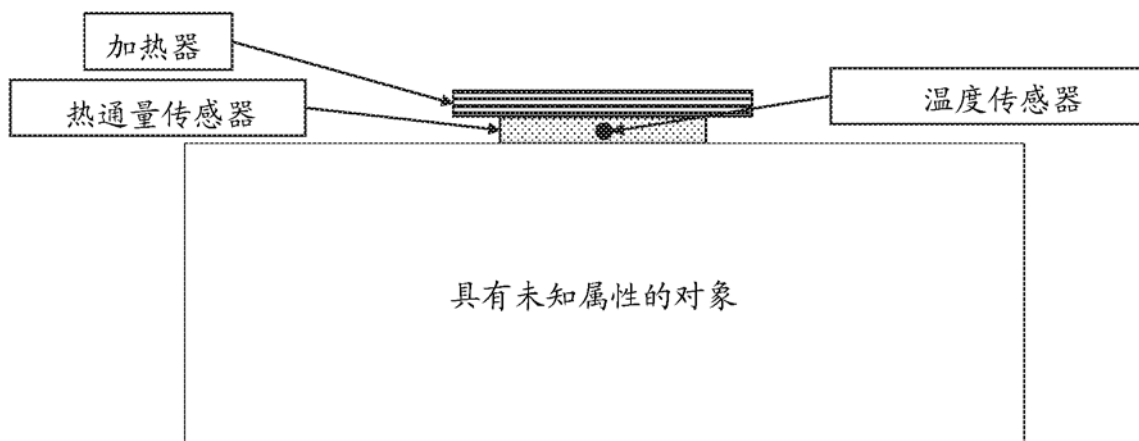


图 7E

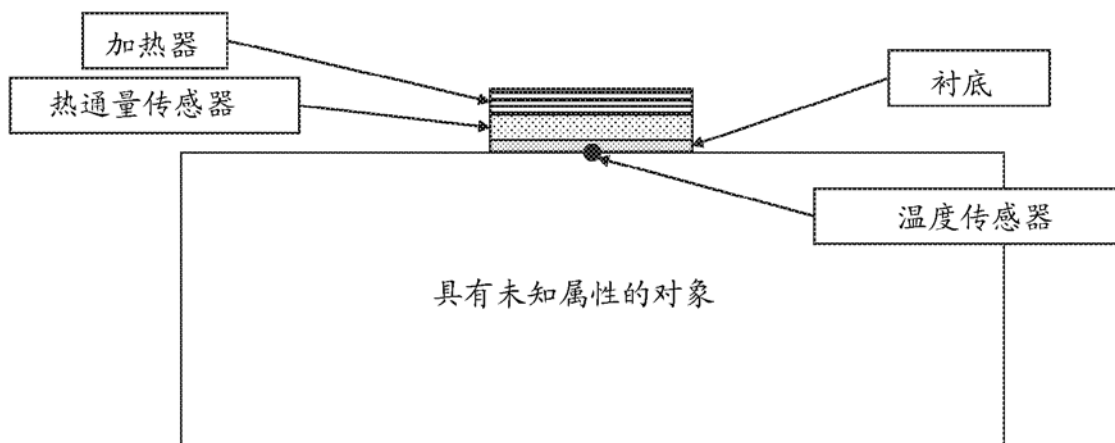


图 7F

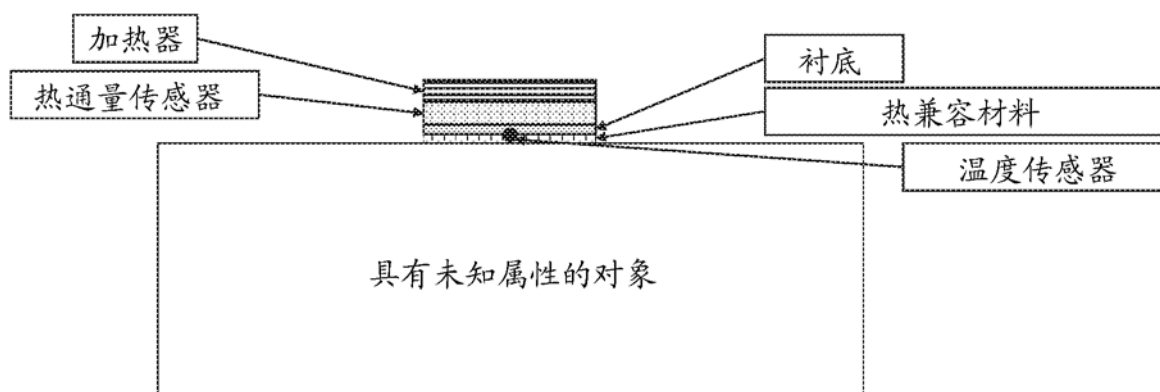


图 7G

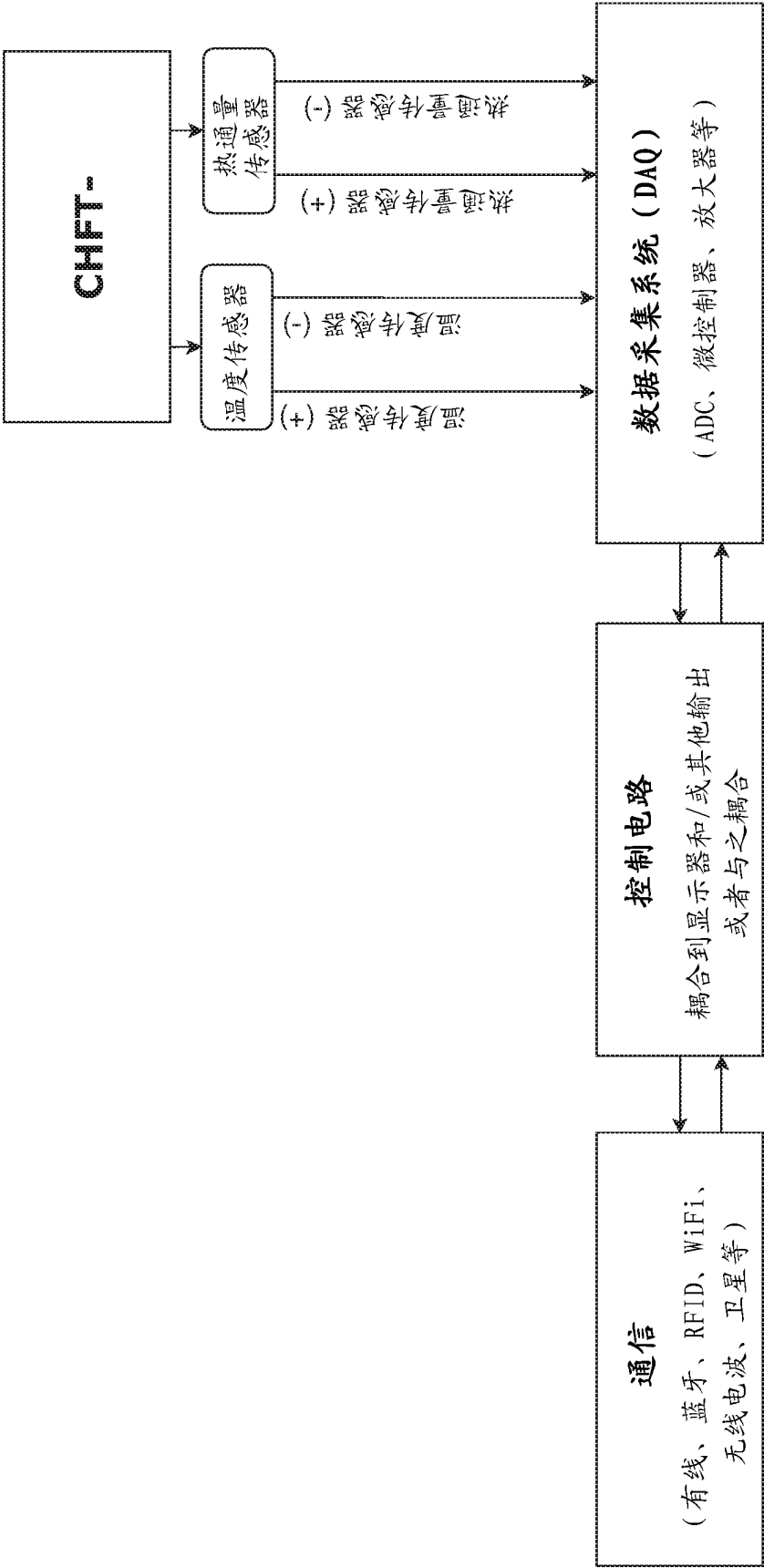


图 8

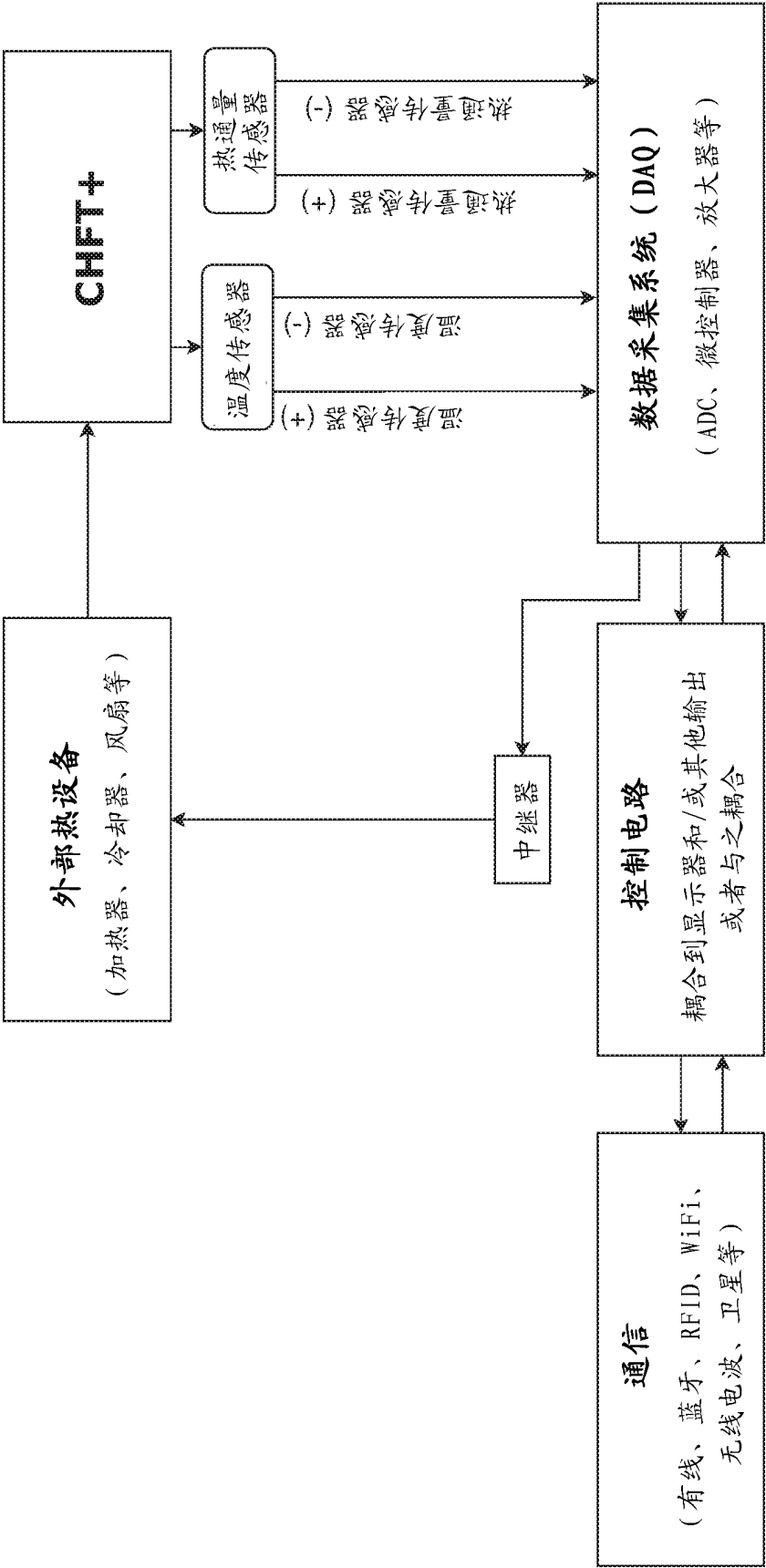


图 9

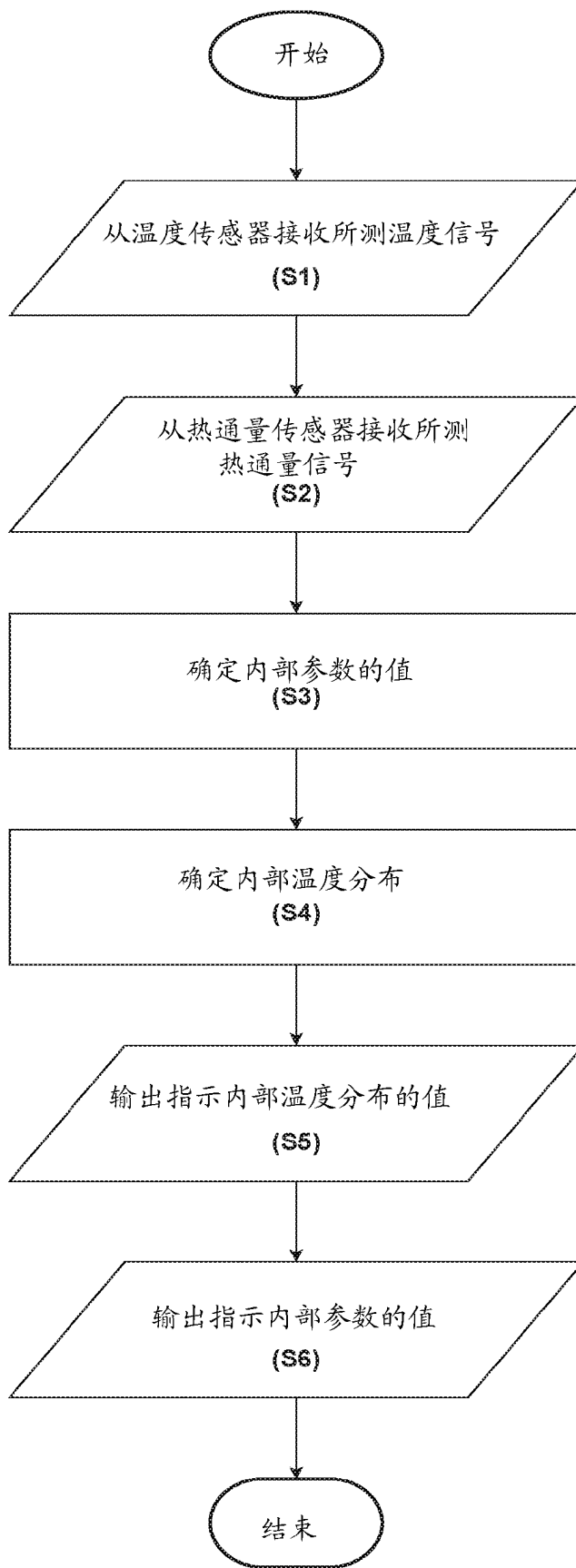


图 10

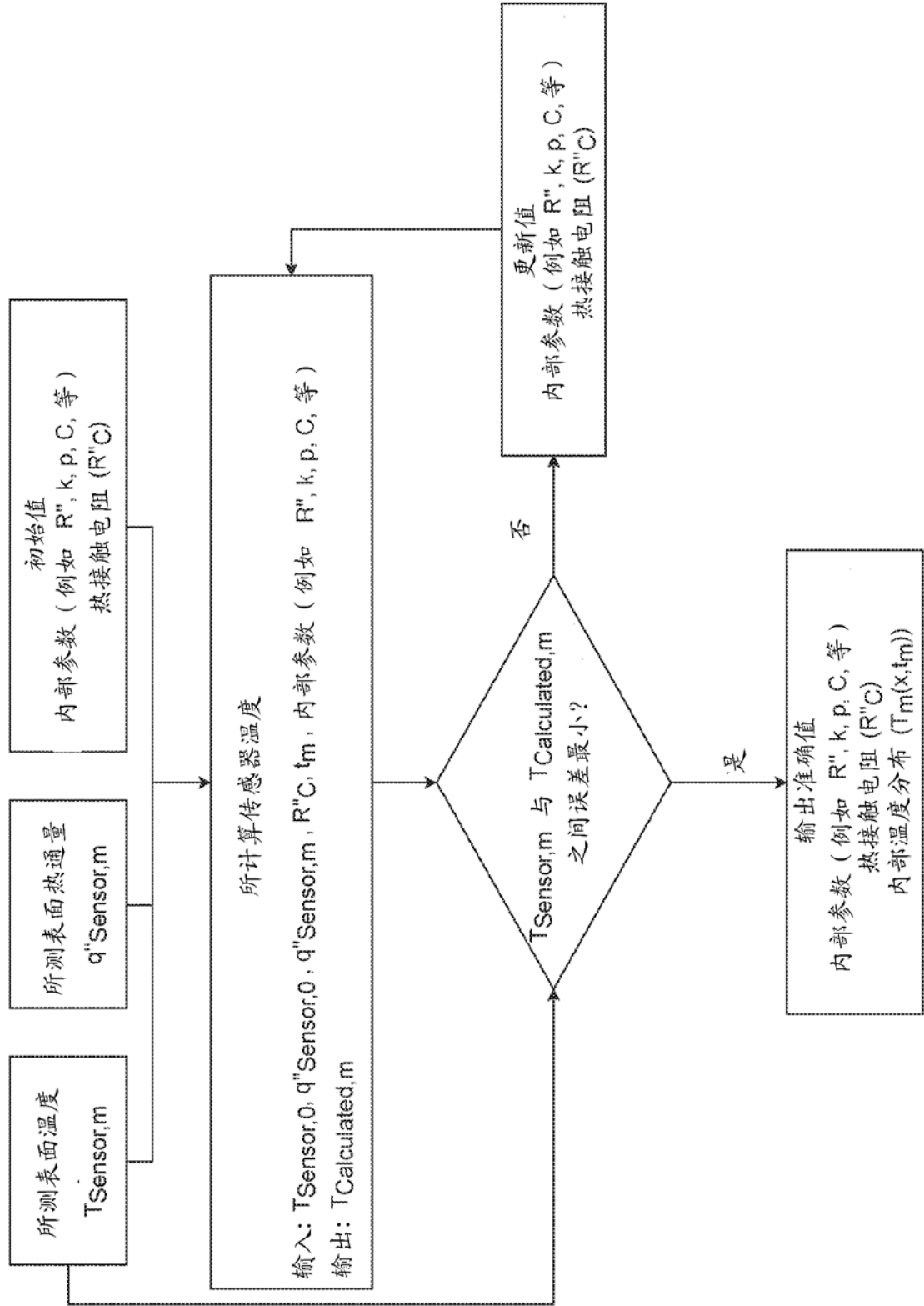


图 11

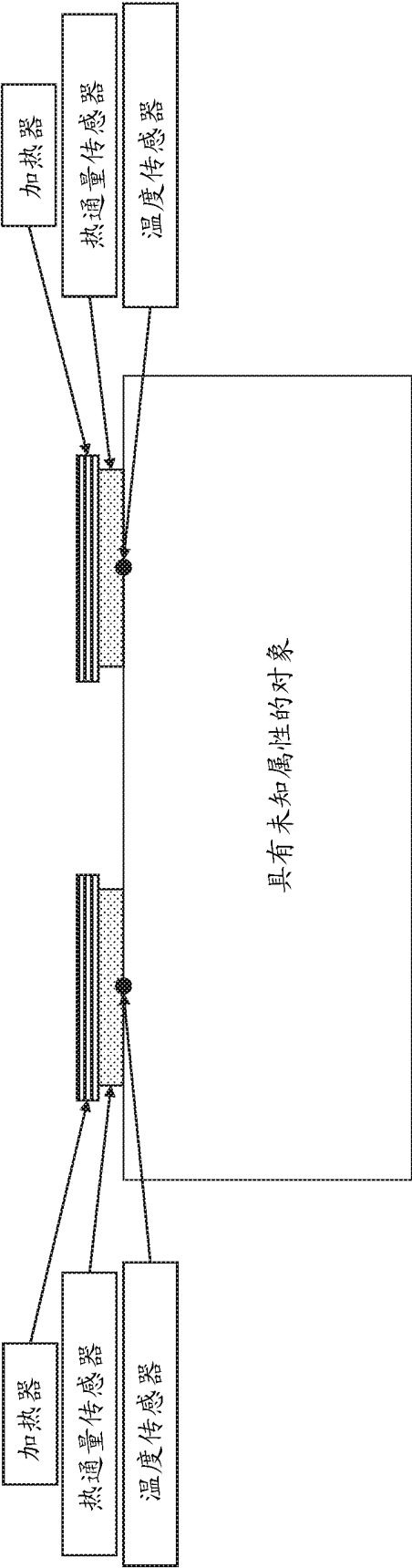


图 12

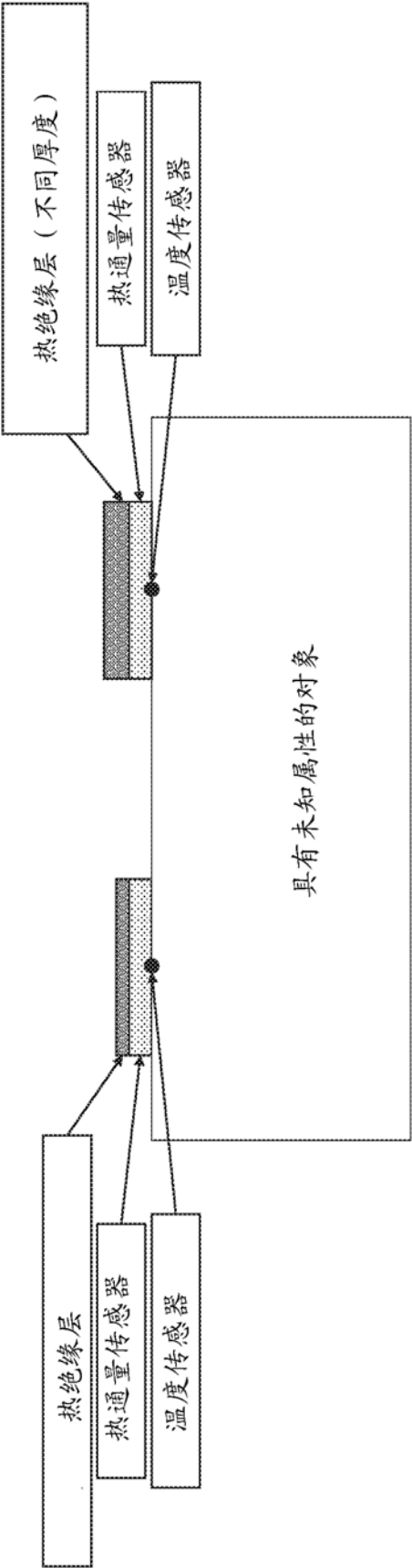


图 13

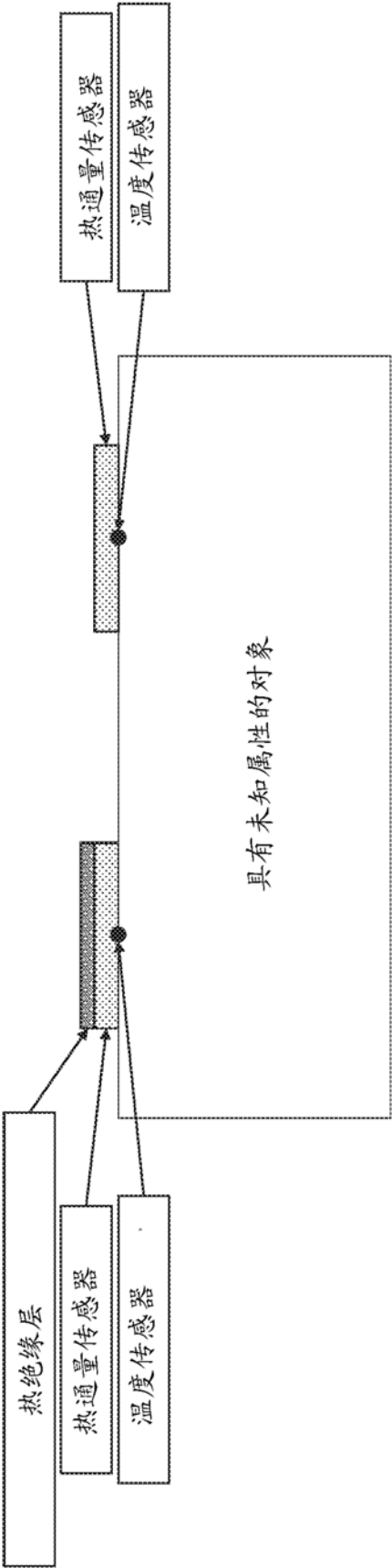


图 14

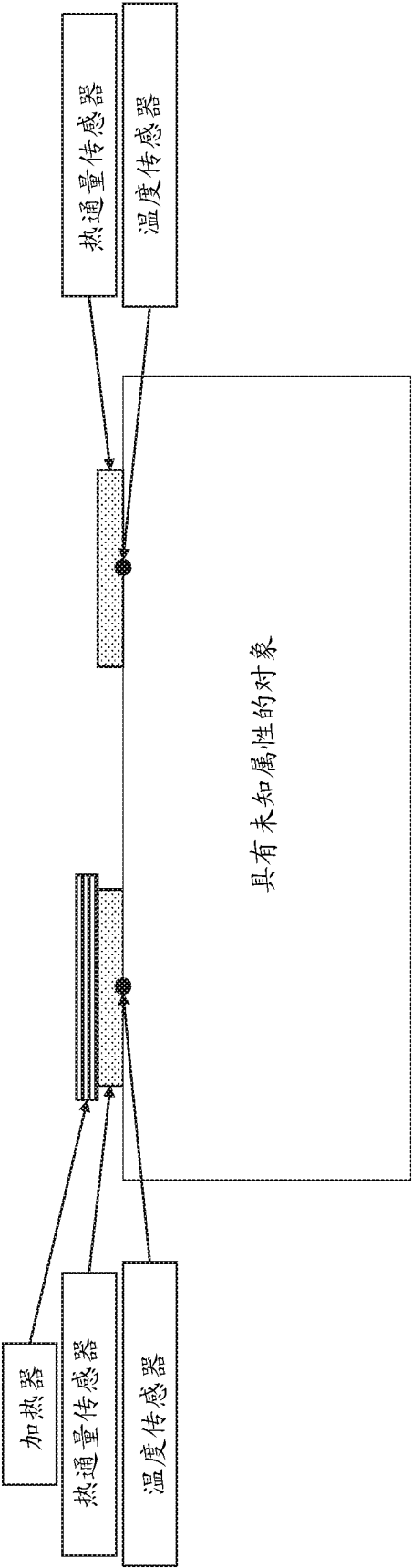


图 15

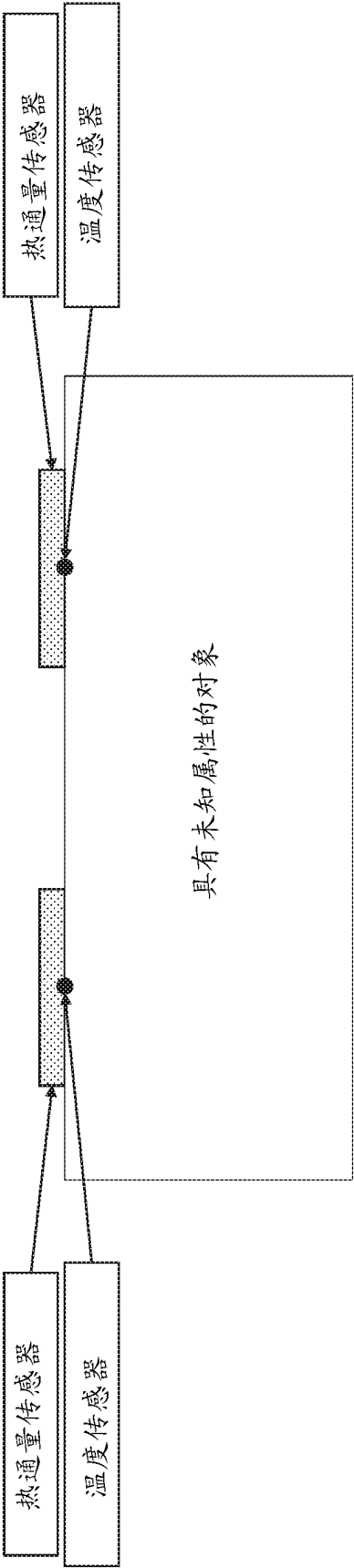


图 16

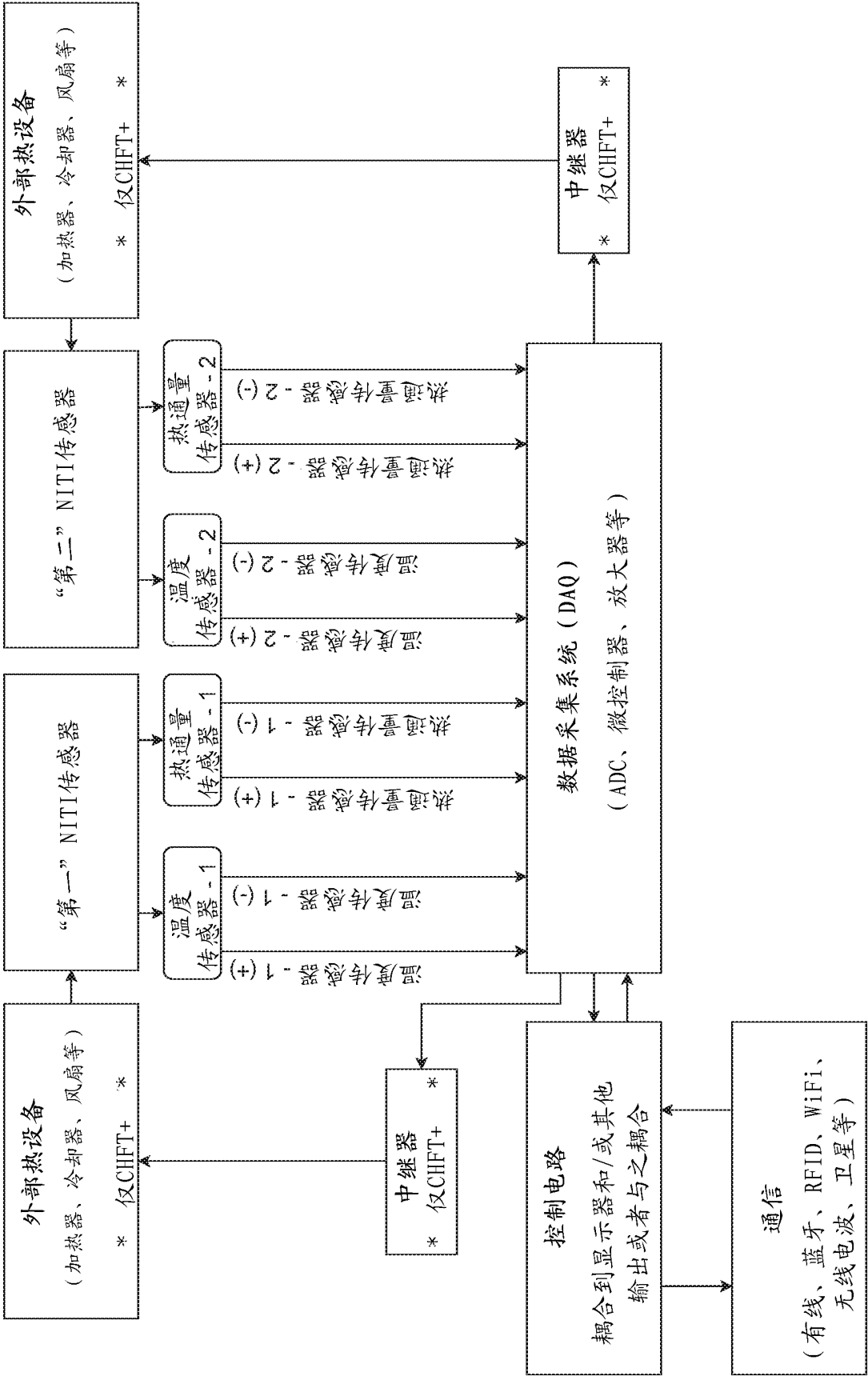


图 17

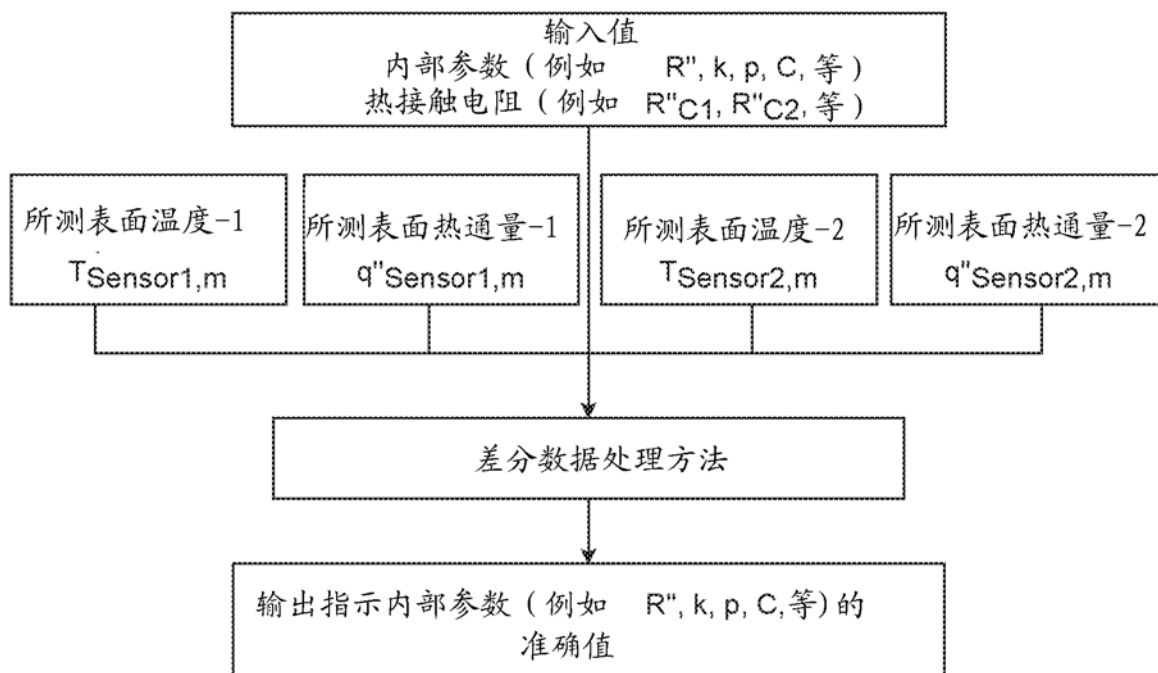


图 18A

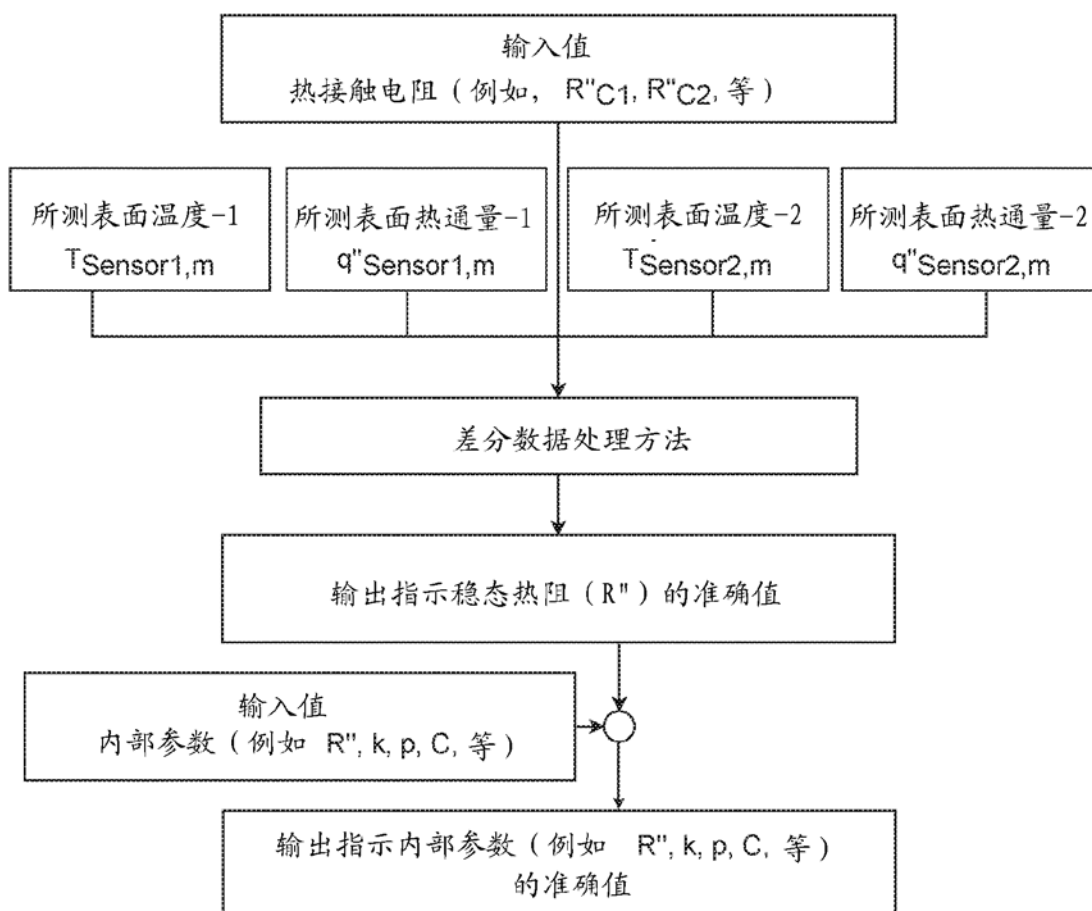


图 18B

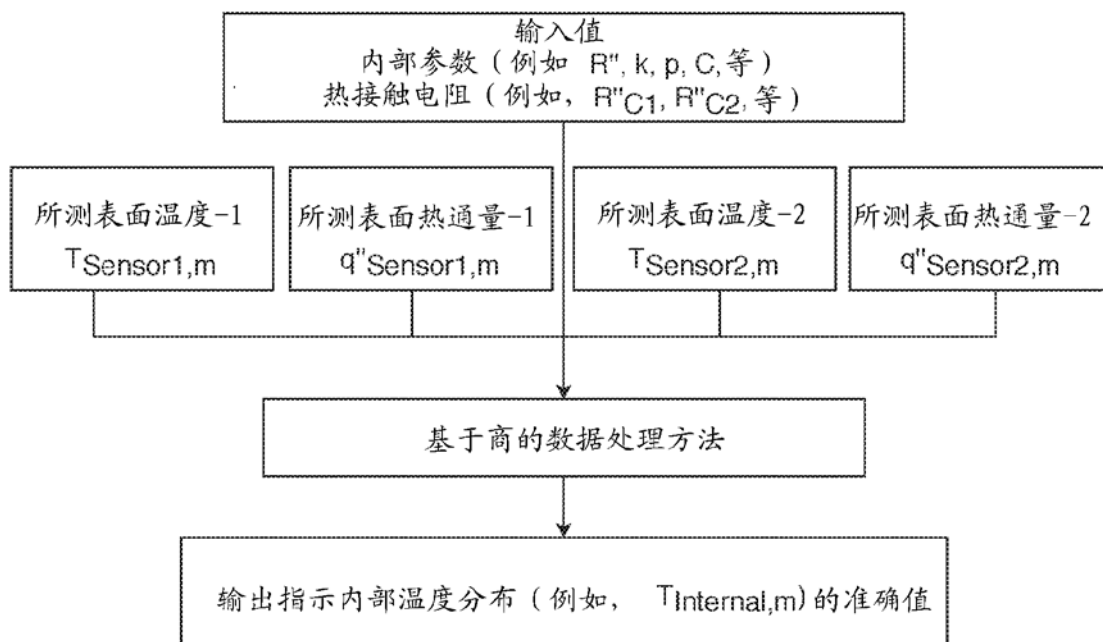


图 19A

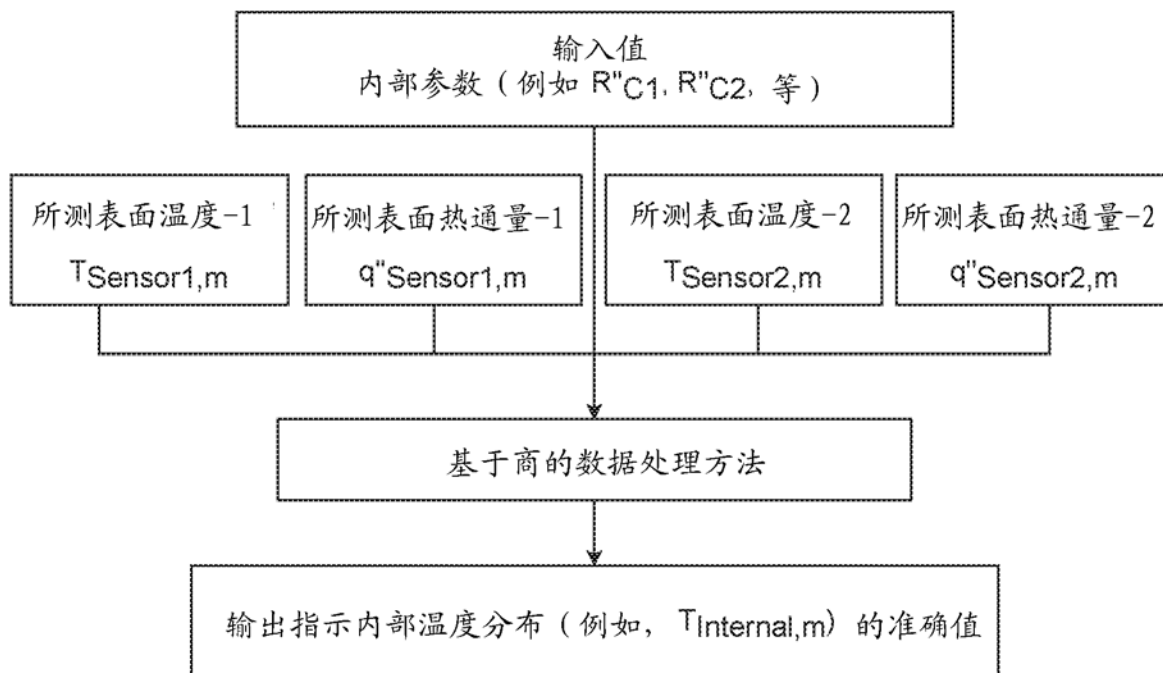


图 19B

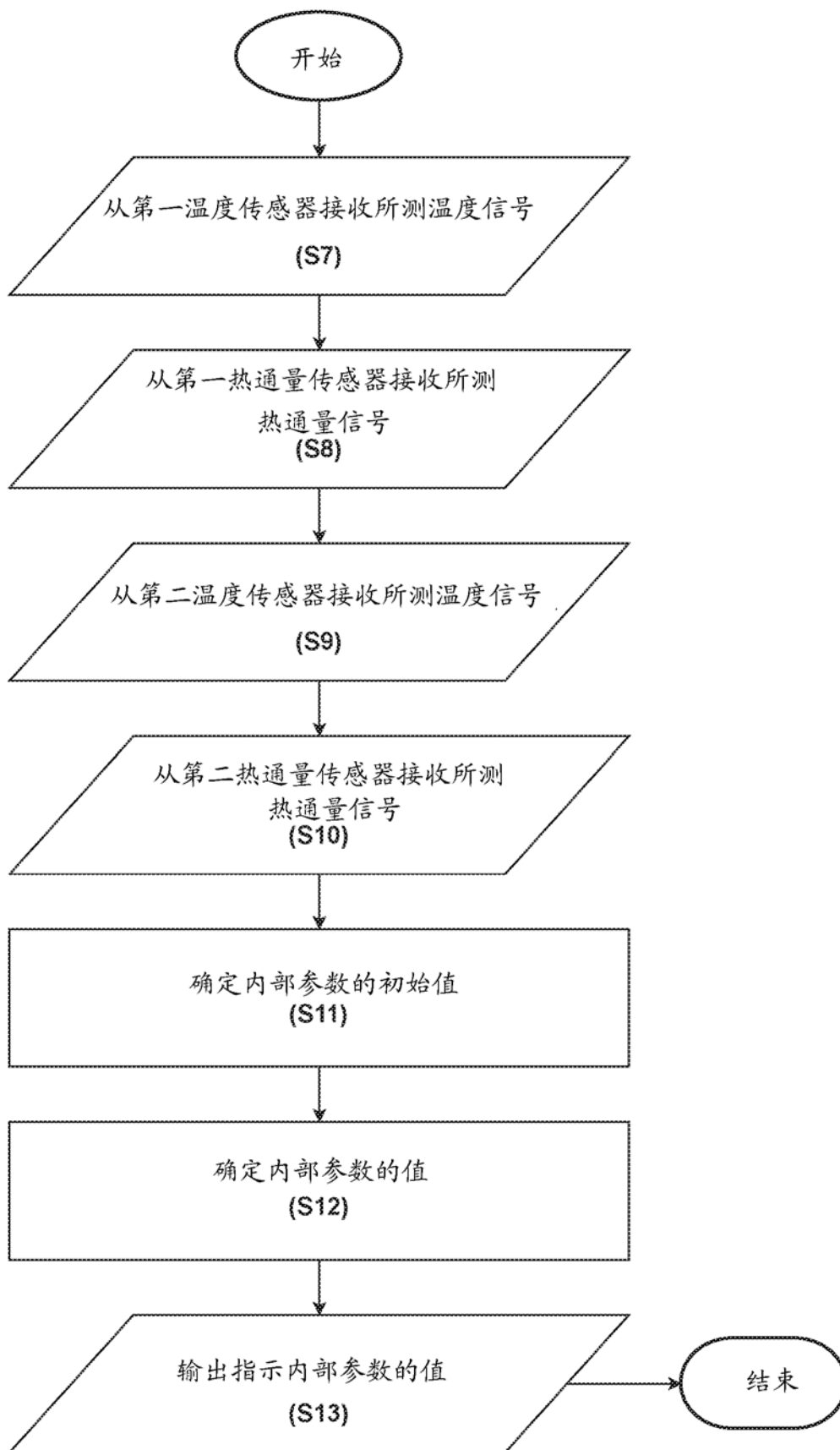


图 20

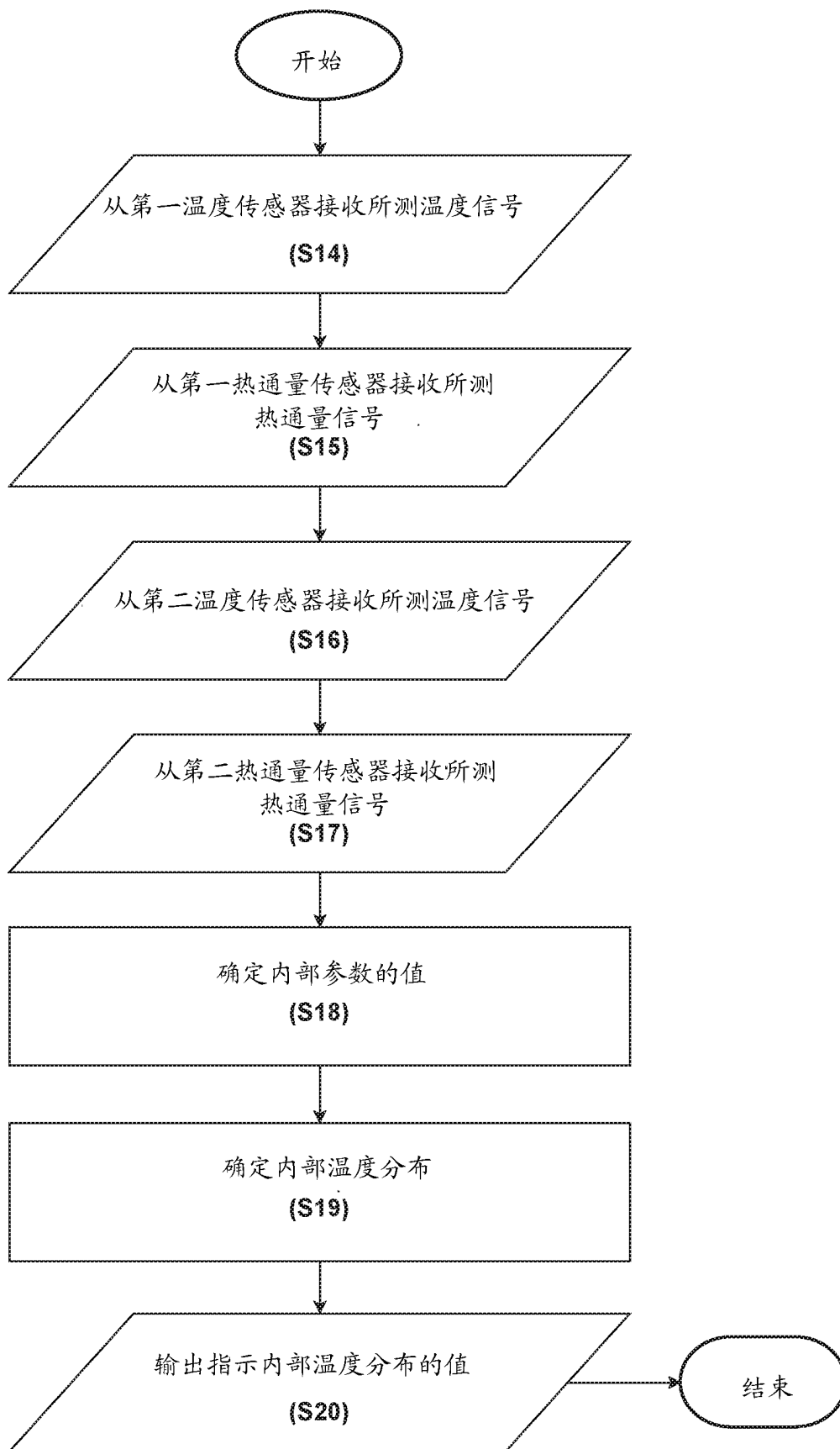


图 21

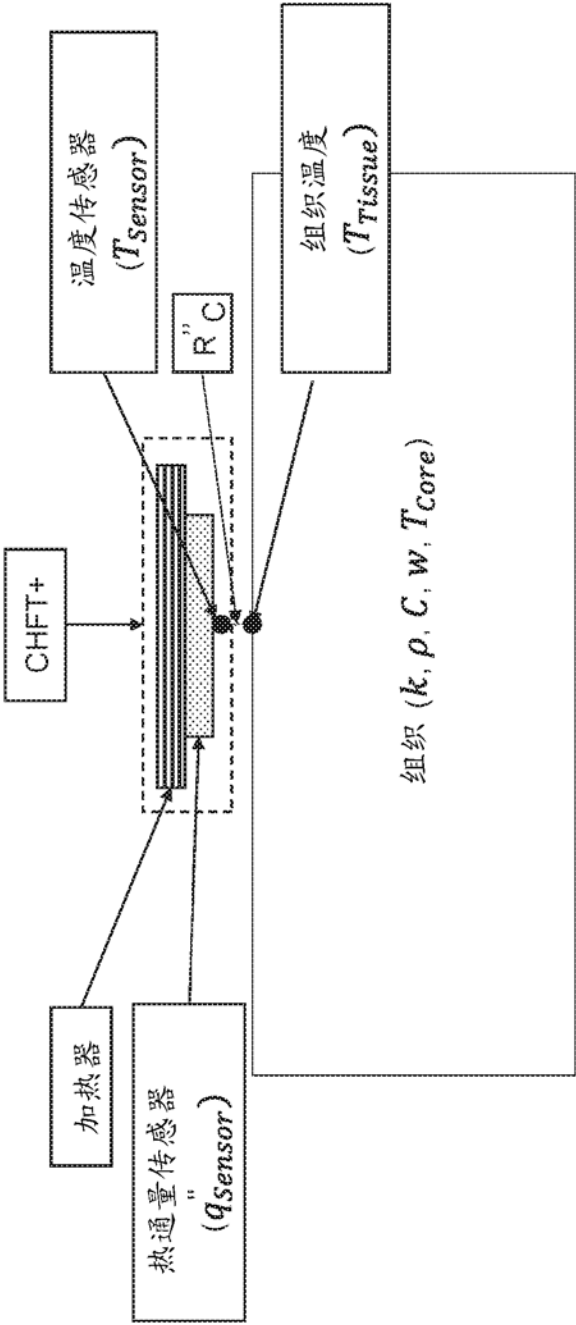


图 22

目标函数与w之间的关系——实验数据

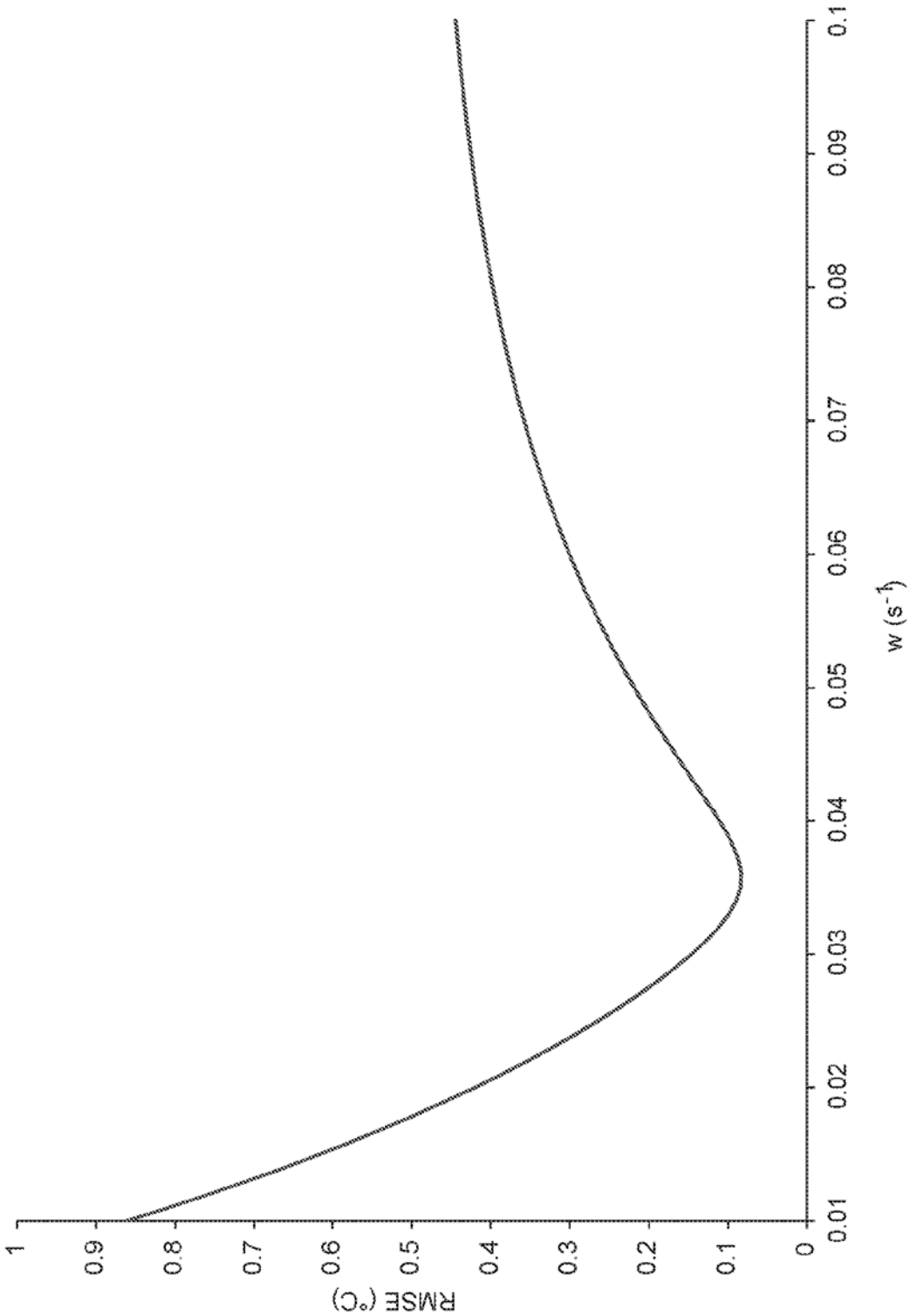


图 23

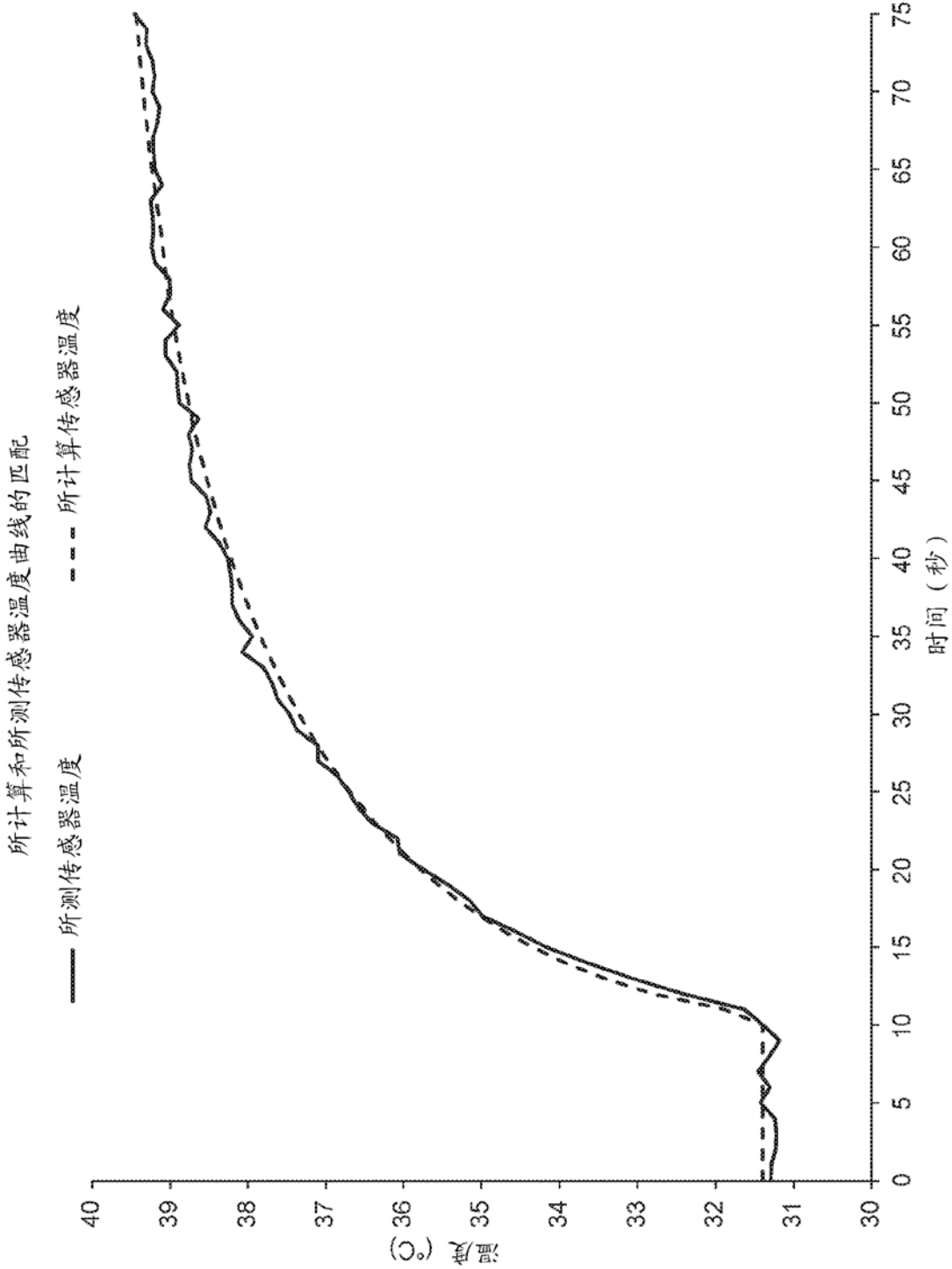


图 24

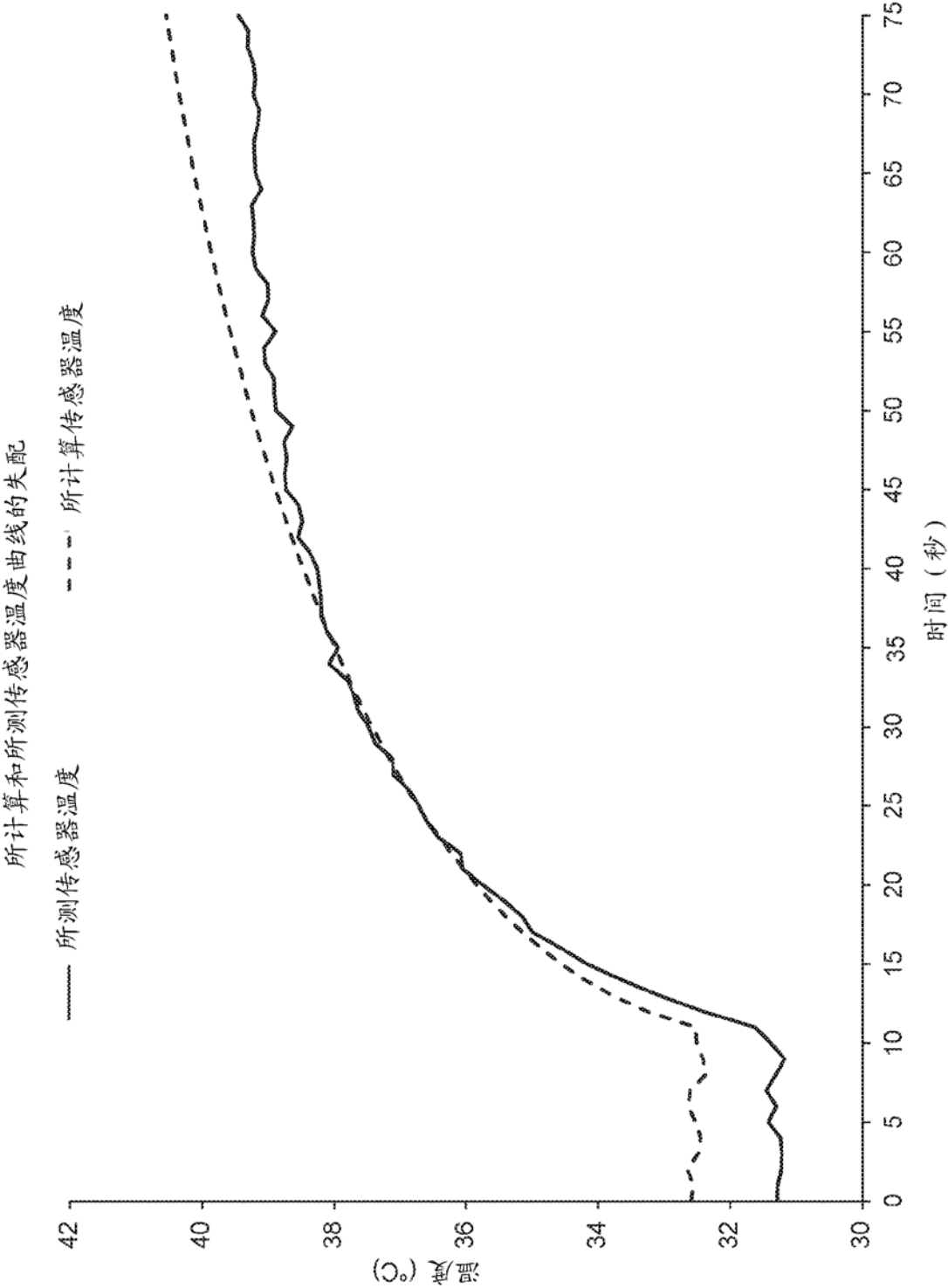


图 25

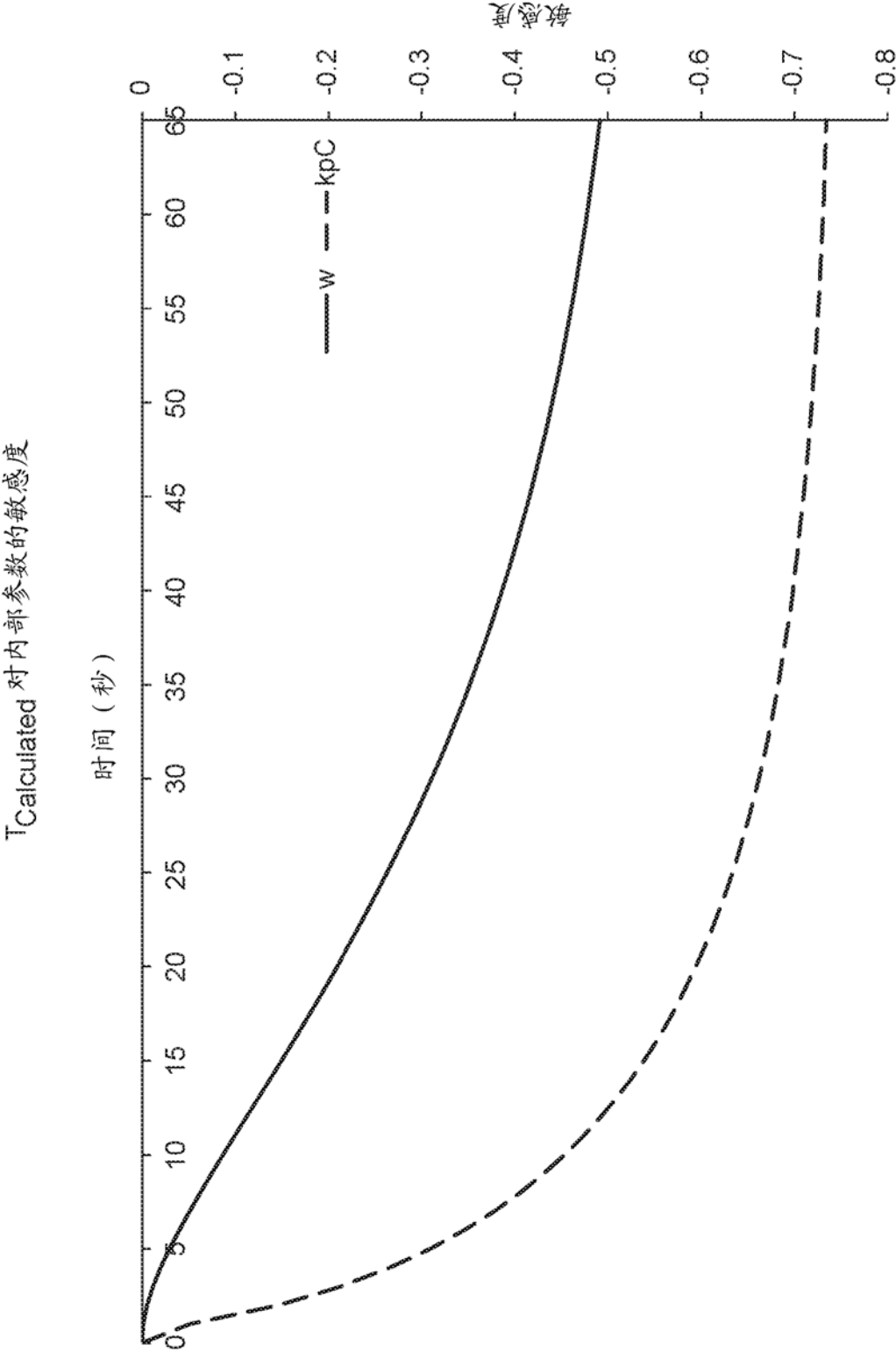


图 26

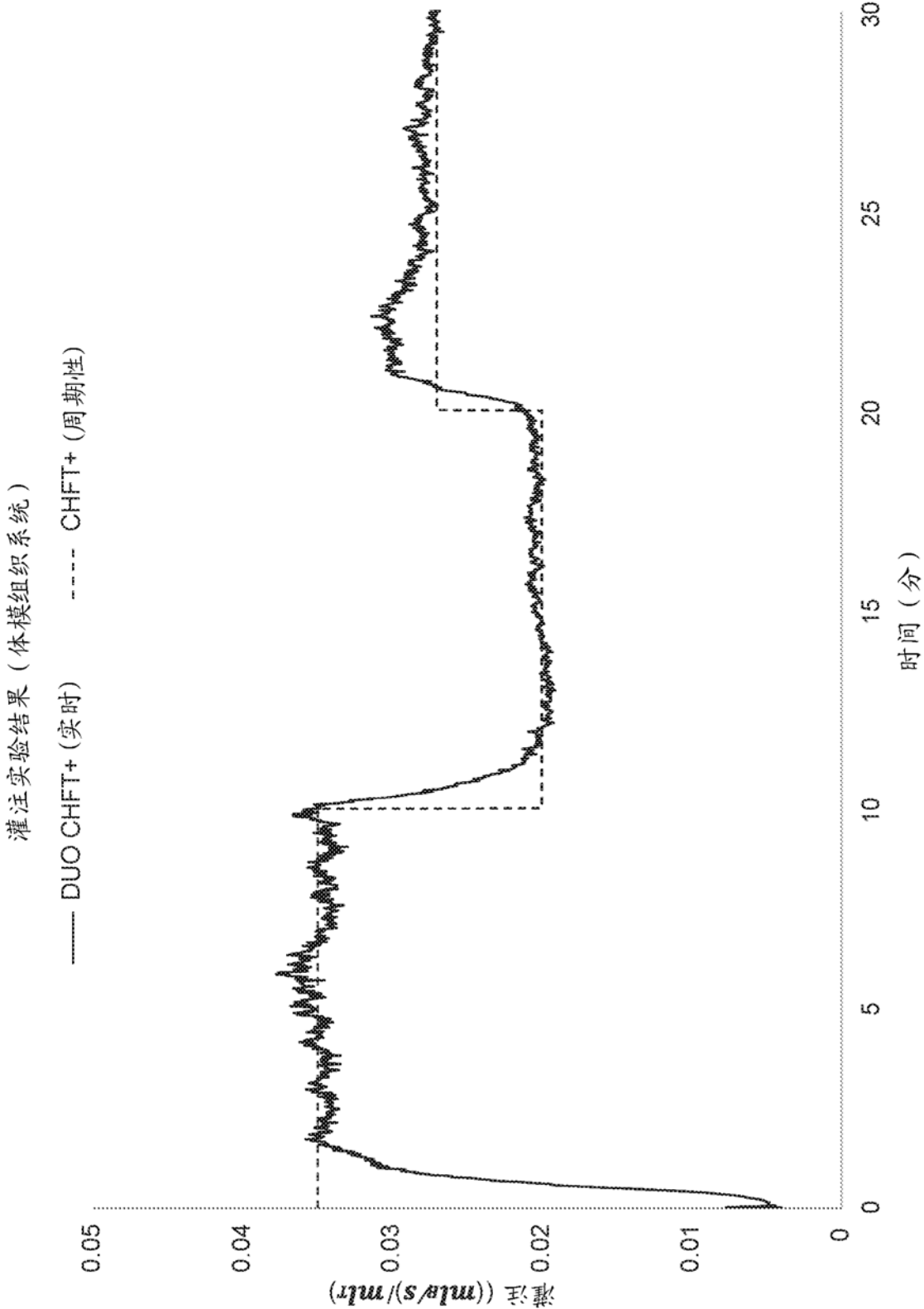


图 27

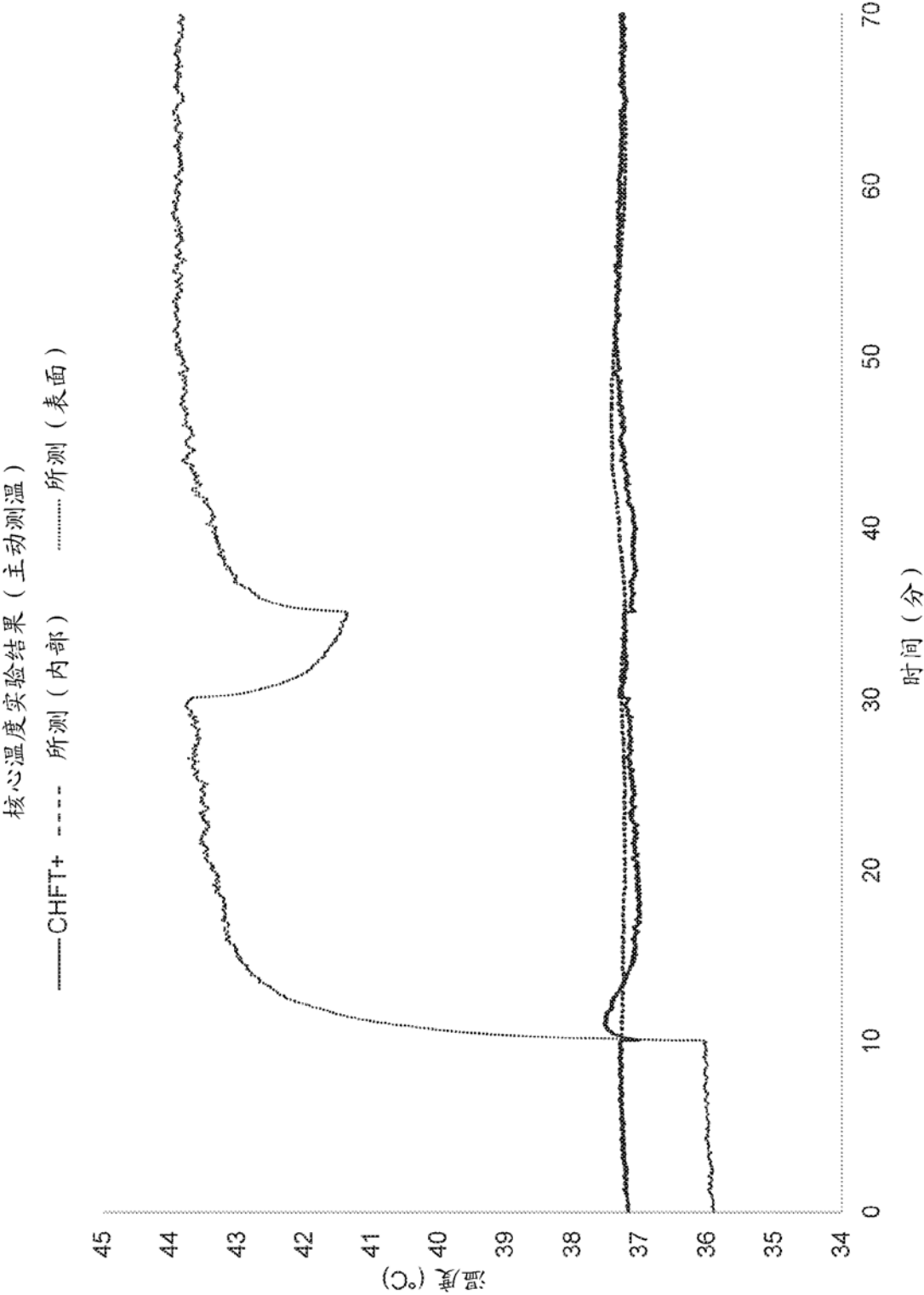


图 28

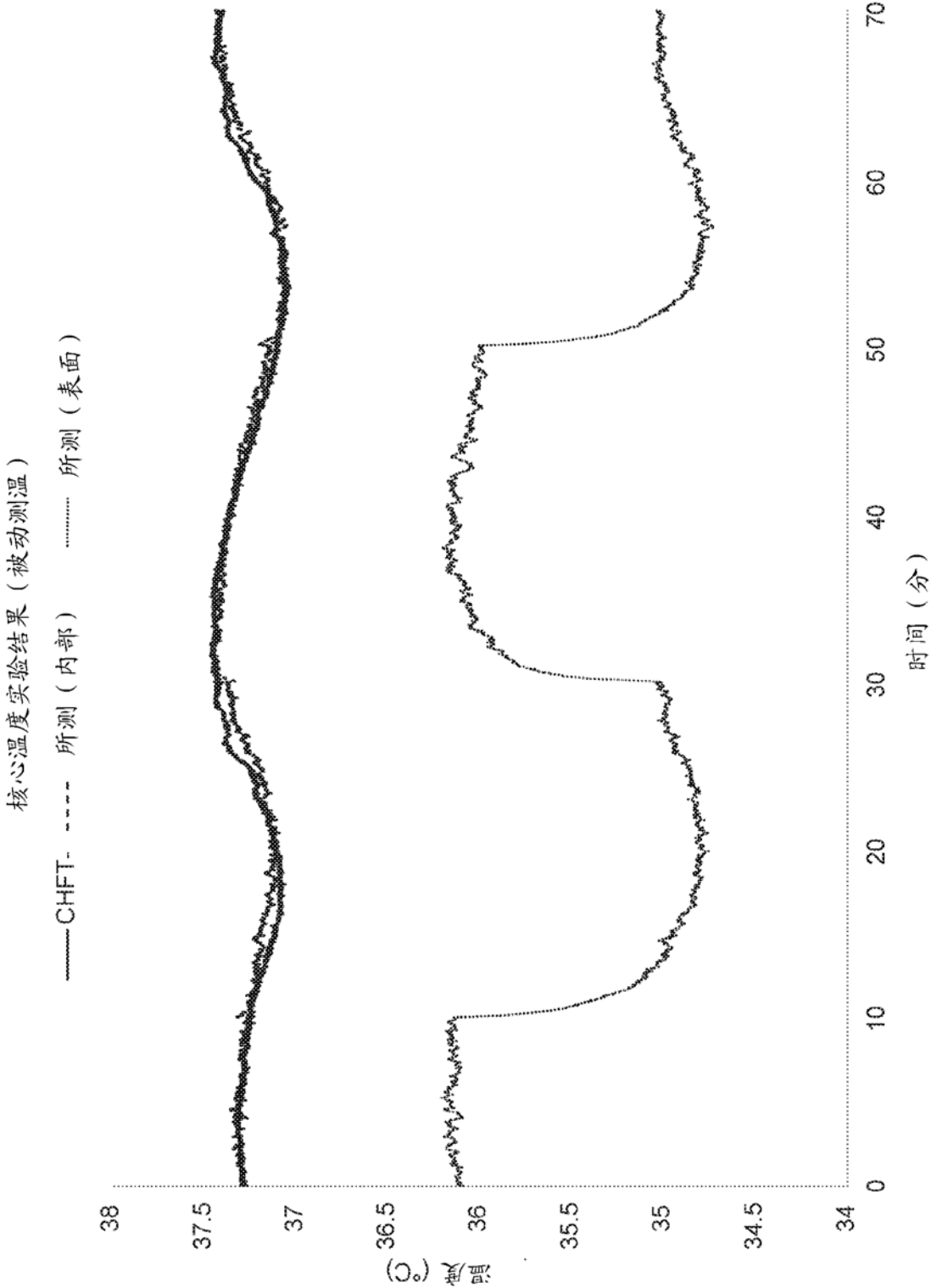


图 29

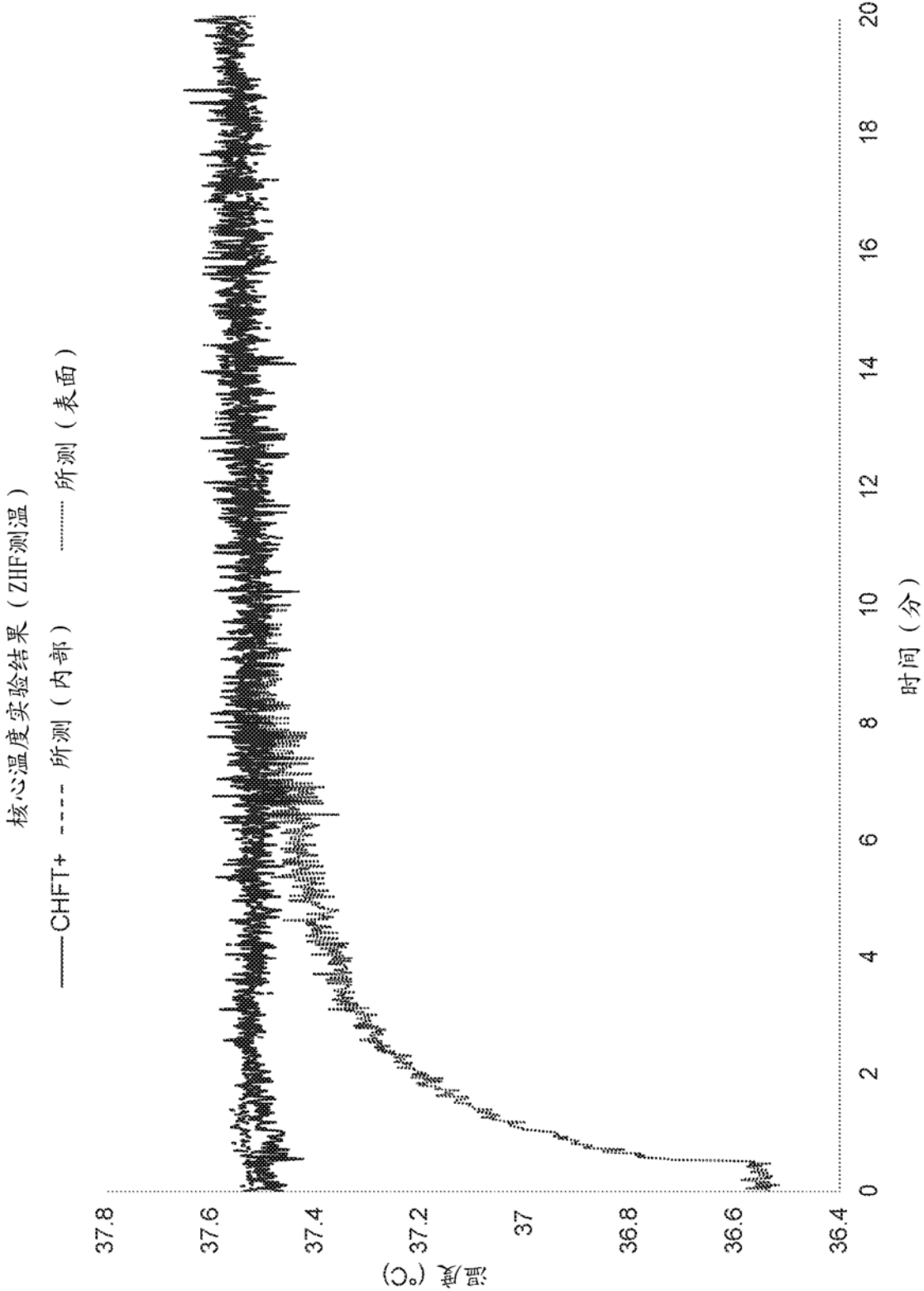


图 30

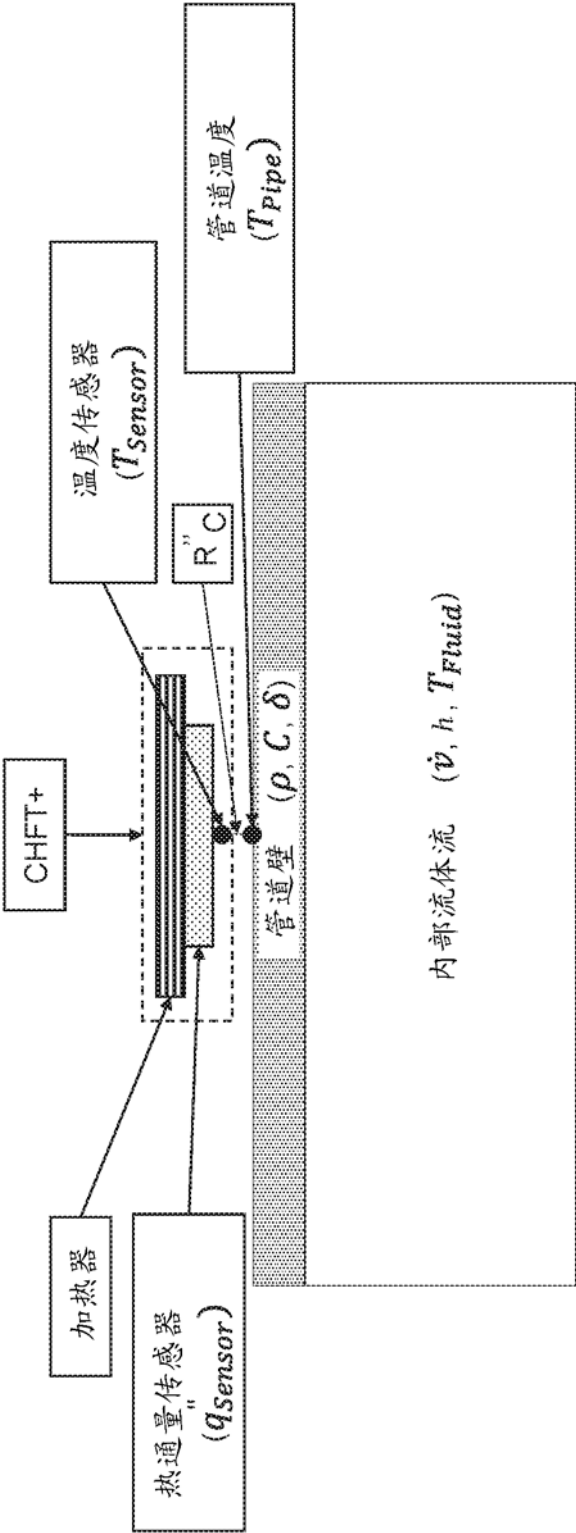


图 31

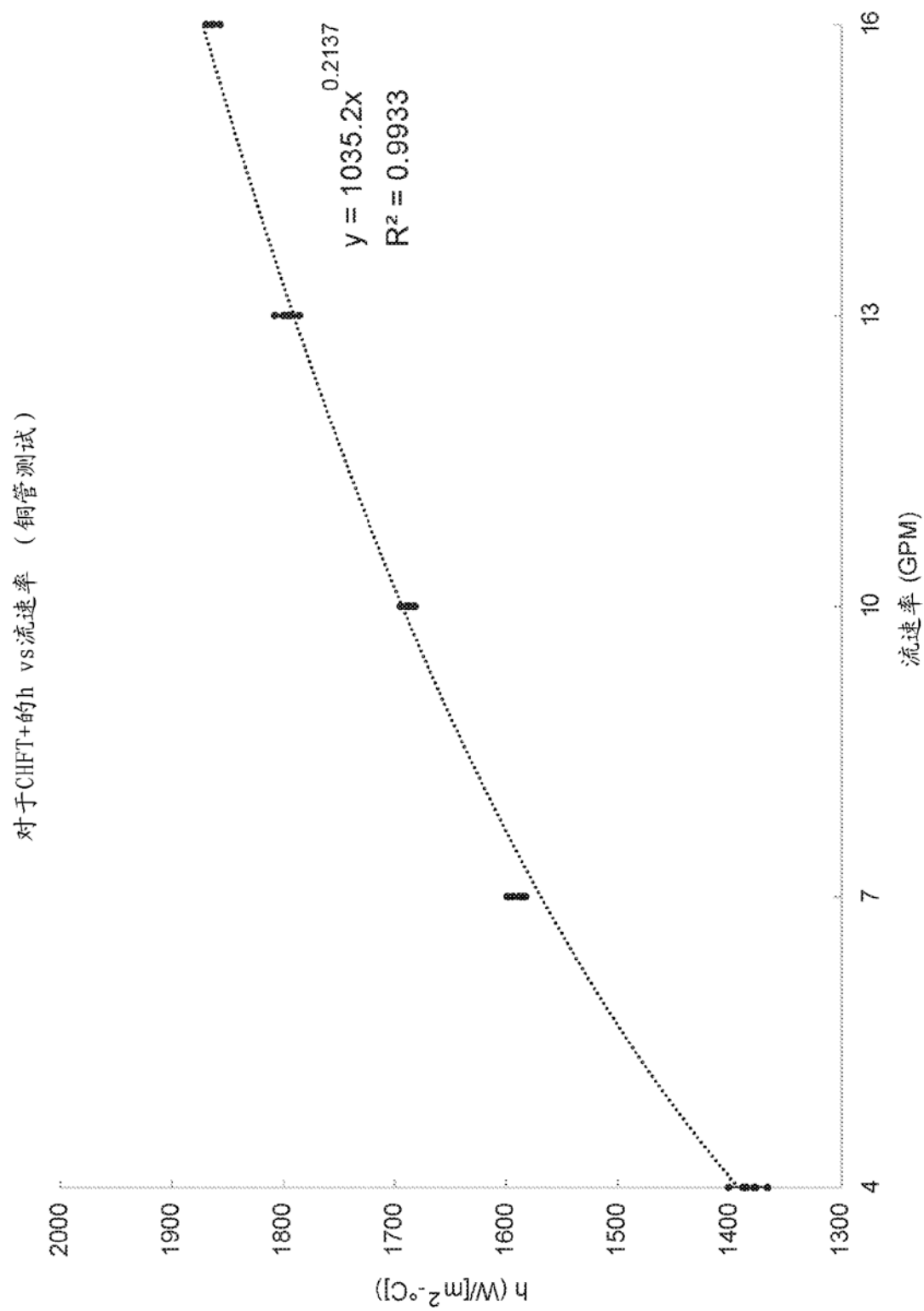


图 32

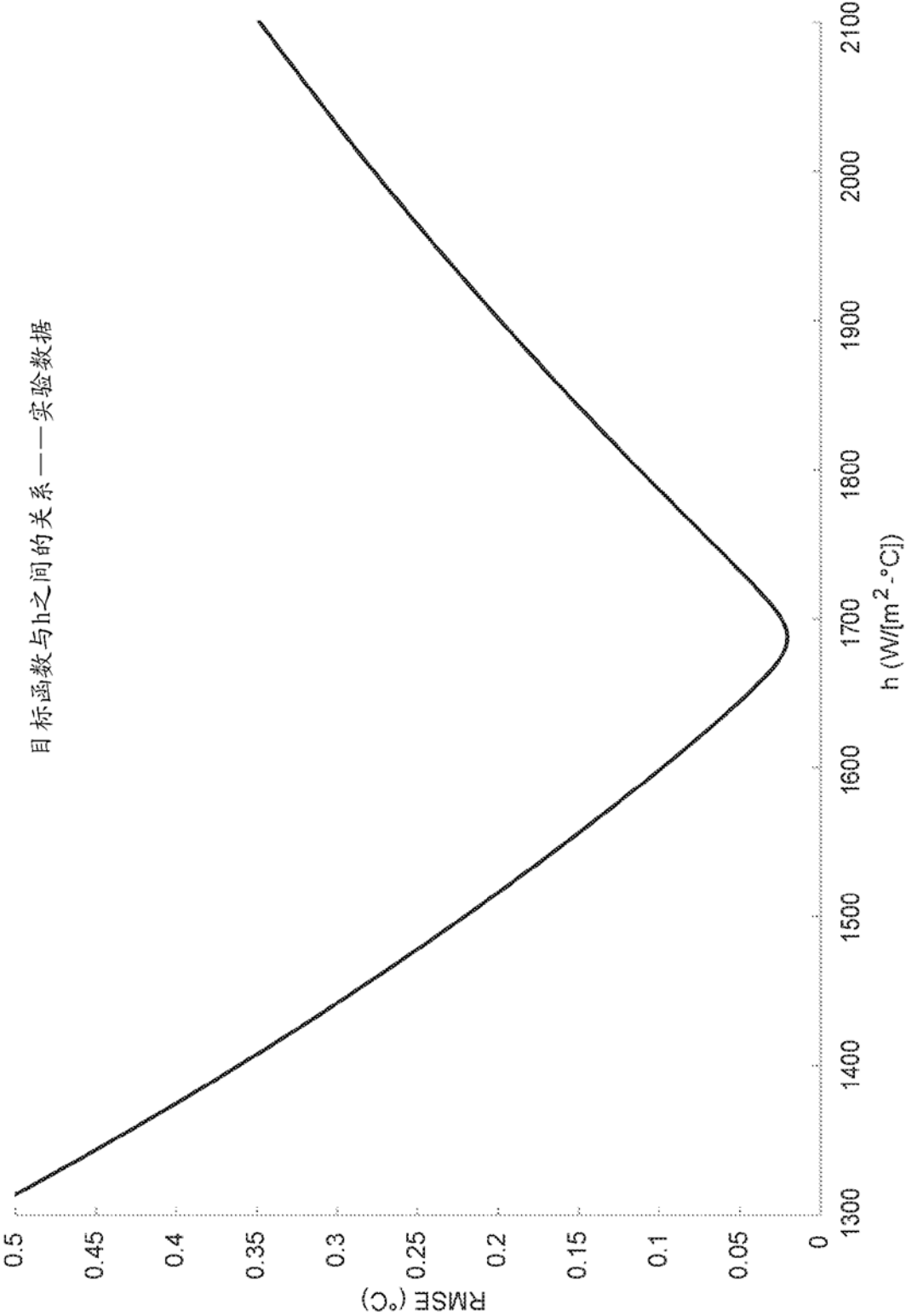


图 33

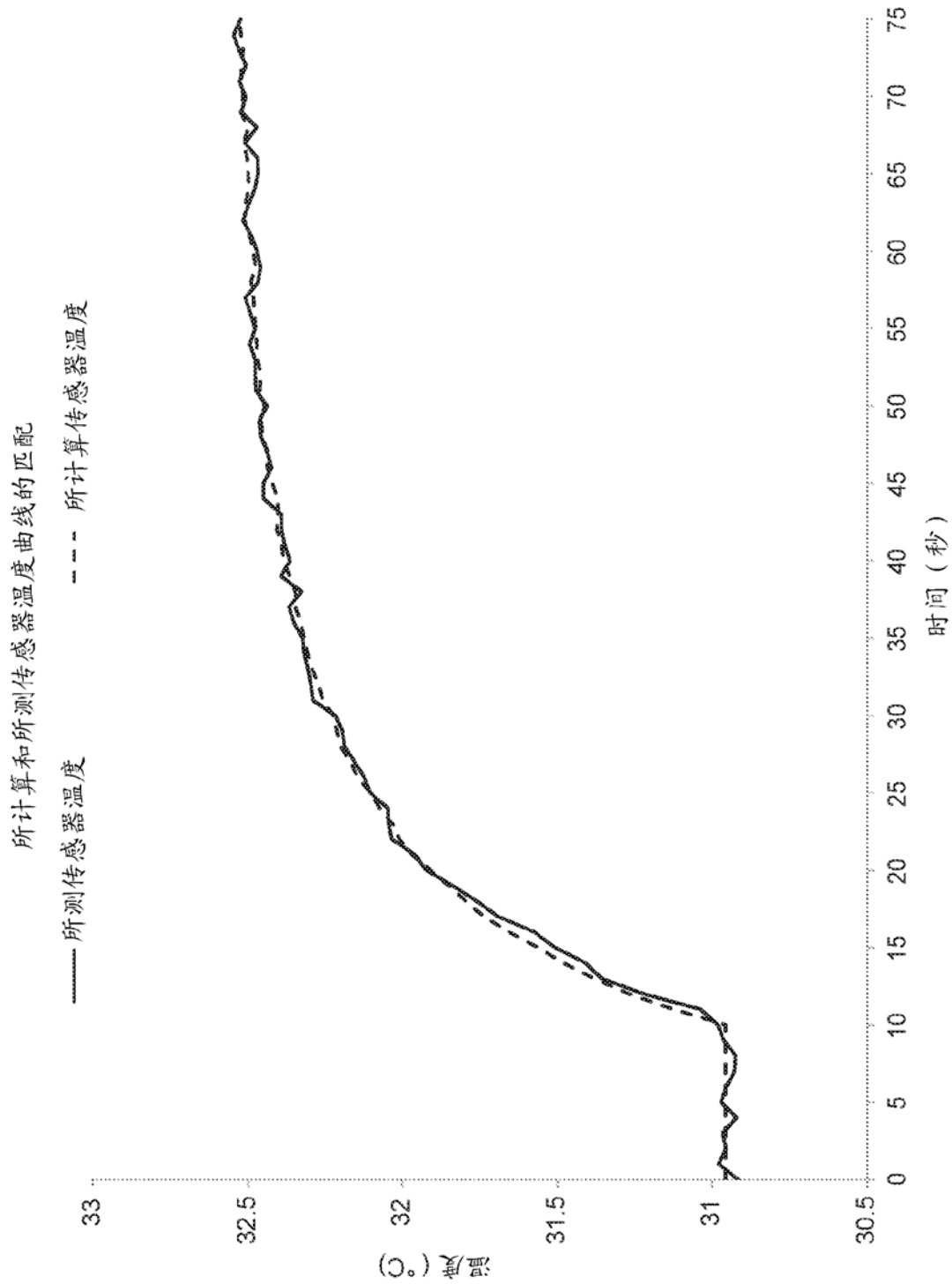


图 34

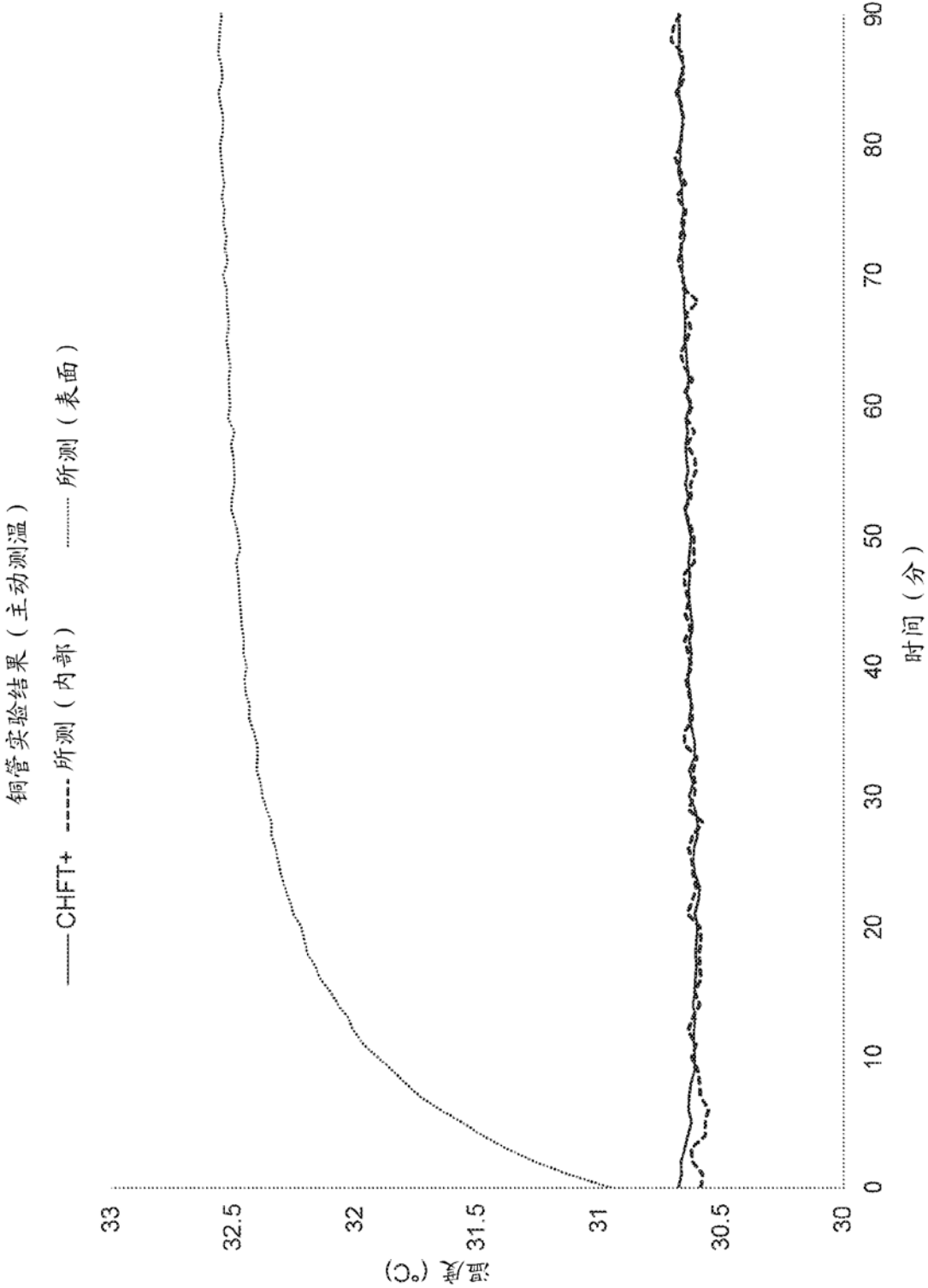


图 35

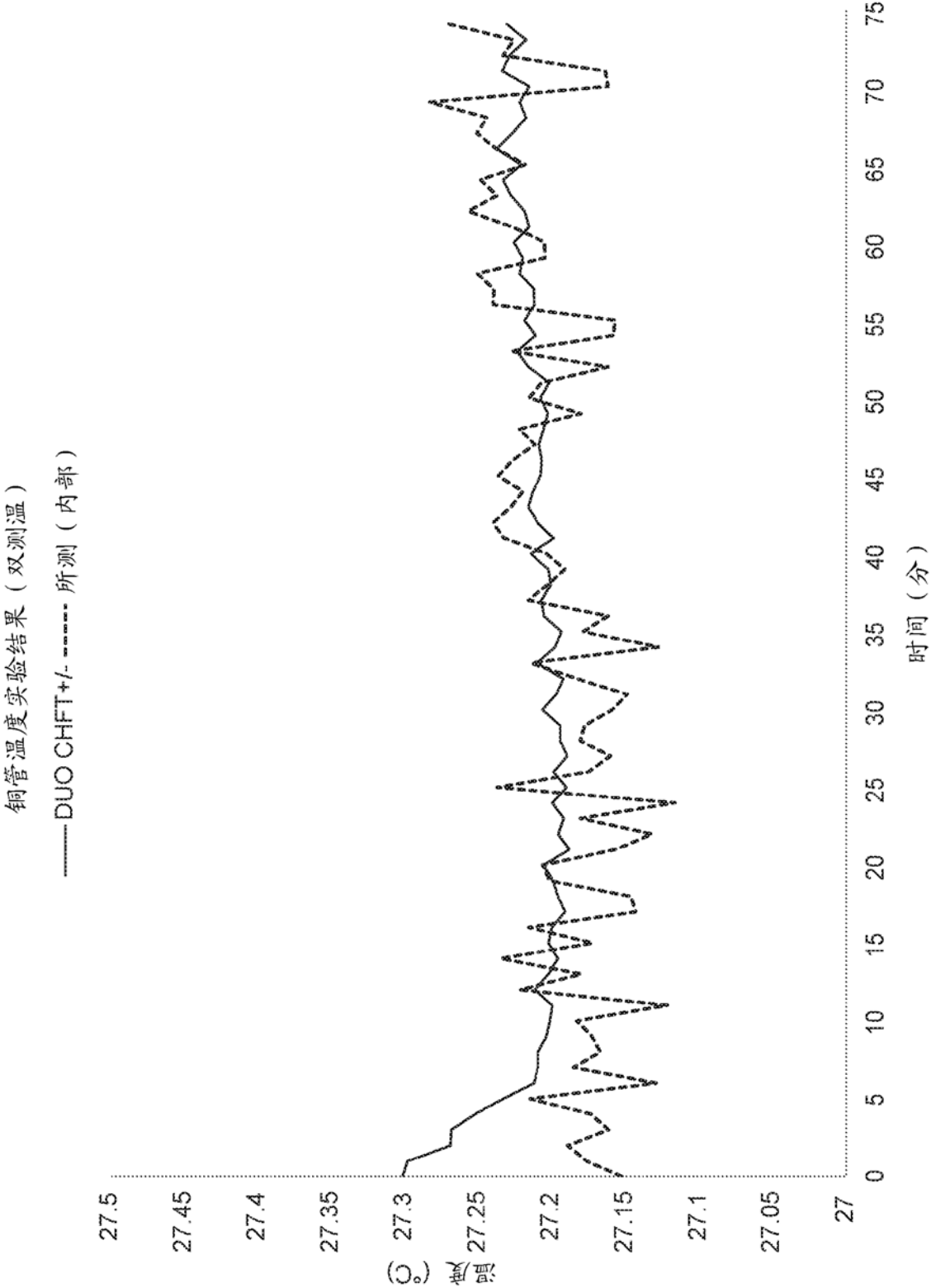


图 36

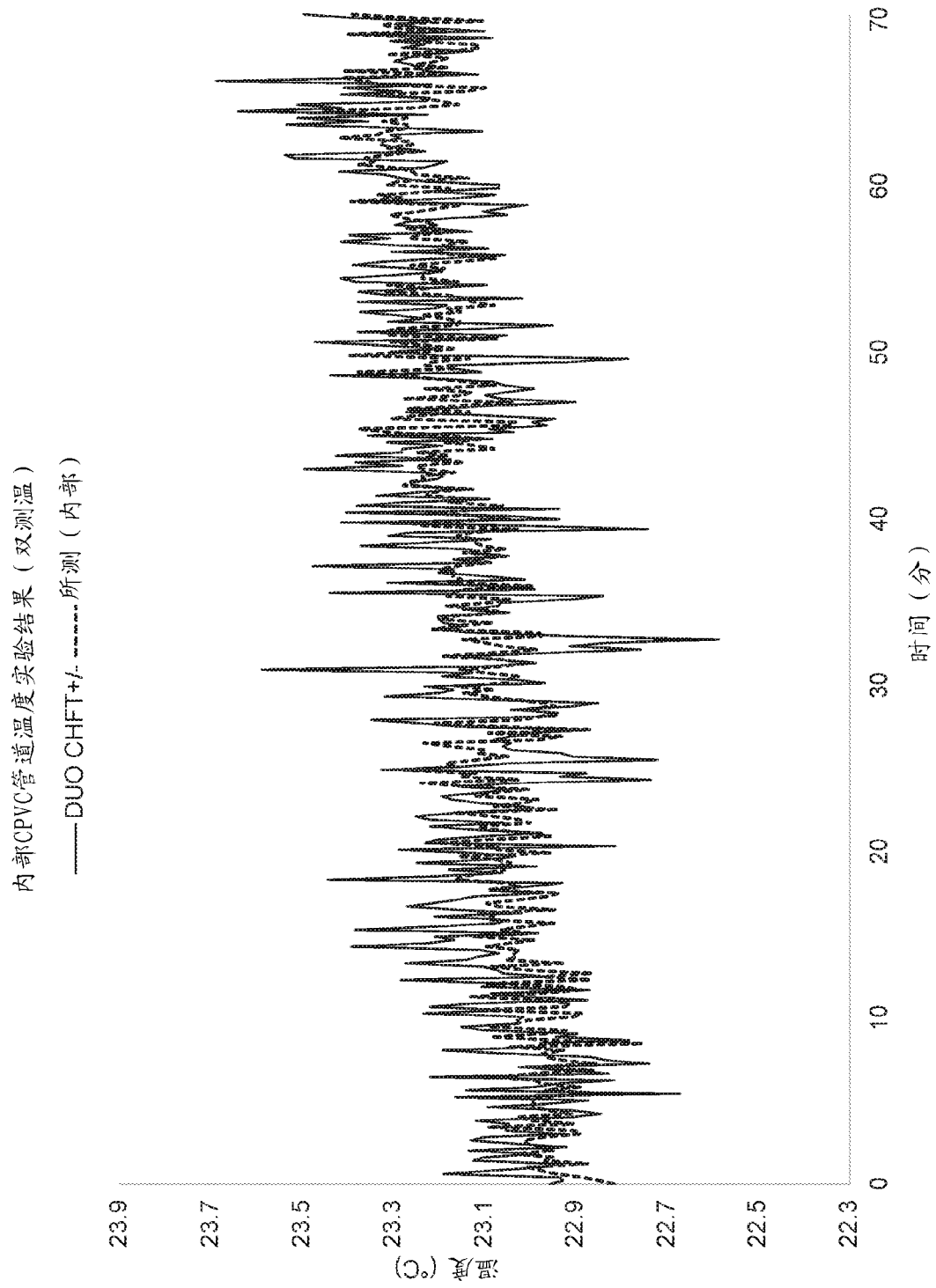


图 37