



(19)中華民國智慧財產局

(12)發明說明書公告本

(11)證書號數：TW I851848 B

(45)公告日：中華民國 113 (2024) 年 08 月 11 日

(21)申請案號：109139543

(22)申請日：中華民國 109 (2020) 年 11 月 12 日

(51)Int. Cl. : G21B1/05 (2006.01)

H01F6/02 (2006.01)

H01F6/06 (2006.01)

(30)優先權：2019/11/12 英國

1916454.0

(71)申請人：英商托卡馬克能量有限公司 (英國) TOKAMAK ENERGY LTD (GB)

英國

(72)發明人：史萊德 羅伯特 SLADE, ROBERT (GB) ; 貝特曼 羅德 BATEMAN, ROD (GB)

(74)代理人：閻啓泰；林景郁

(56)參考文獻：

TW 396353B

US 2018/0315531A1

US 2019/0252104A1

審查人員：劉守禮

申請專利範圍項數：6 項 圖式數：3 共 15 頁

(54)名稱

基於應力之淬火偵測

(57)摘要

一種偵測在包含 HTS 場線圈之超導磁鐵中的預淬火狀況之方法。所述場線圈包含：複數個匝，其包含 HTS 材料與金屬穩定劑；及，導電材料，其連接所述匝，俾使電流可經由所述導電材料在匝間為徑向共用。應力是針對於所述 HTS 場線圈及/或所述 HTS 場線圈之支撐結構而監測。監測的所述應力是與在所述磁鐵正常操作期間的預期應力來比較。響應於所述比較，所述場線圈是否在預淬火狀況下被確定。

一種類似方法被提出，其中所述 HTS 場線圈的磁場而不是所述應力被監測以偵測預淬火狀況。

A method of detecting pre-quench conditions in a superconducting magnet comprising an HTS field coil. The field coil comprises a plurality of turns comprising HTS material and metallic stabilizer; and conductive material connecting the turns such that current can be shared radially between turns via the conductive material. Strain is monitored for the HTS field coil and/or support structures of the HTS field coil. The monitored strain is compared to an expected strain during normal operation of the magnet. In response to the comparison, it is determined whether the field coil is in pre-quench conditions.

A similar method is provided where the magnetic field of the HTS field coil is monitored to detect pre-quench conditions, instead of the strain.

指定代表圖：

- 符號簡單說明：
- 201:HTS 場線圈
 - 202:支撐結構
 - 203:應力感測器
 - 204:磁場感測器
 - 205:淬火保護系統

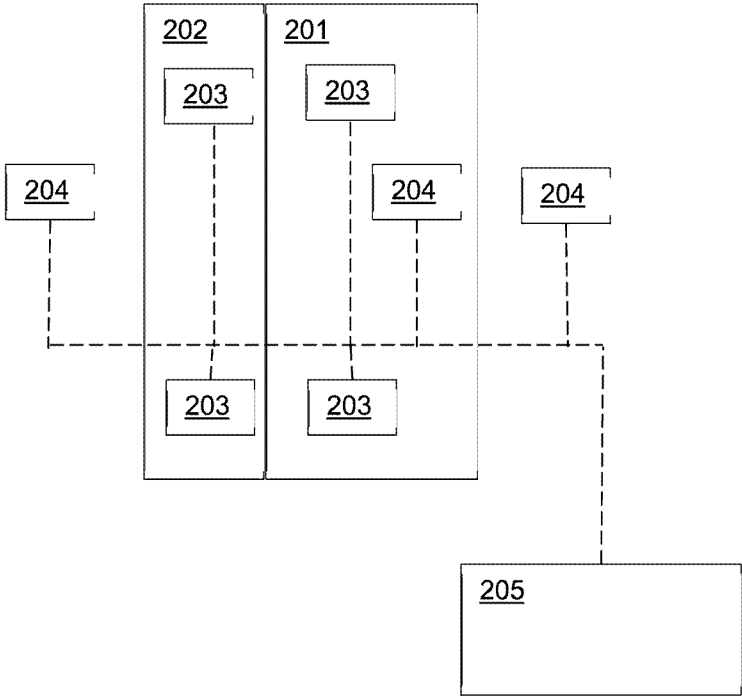


圖2



I851848

【發明摘要】

【中文發明名稱】 基於應力之淬火偵測

【英文發明名稱】 STRAIN-BASED QUENCH DETECTION

【中文】

一種偵測在包含HTS場線圈之超導磁鐵中的預淬火狀況之方法。所述場線圈包含：複數個匝，其包含HTS材料與金屬穩定劑；及，導電材料，其連接所述匝，俾使電流可經由所述導電材料在匝間為徑向共用。應力是針對於所述HTS場線圈及/或所述HTS場線圈之支撐結構而監測。監測的所述應力是與在所述磁鐵正常操作期間的預期應力來比較。響應於所述比較，所述場線圈是否在預淬火狀況下被確定。

一種類似方法被提出，其中所述HTS場線圈的磁場而不是所述應力被監測以偵測預淬火狀況。

【英文】

A method of detecting pre-quench conditions in a superconducting magnet comprising an HTS field coil. The field coil comprises a plurality of turns comprising HTS material and metallic stabilizer; and conductive material connecting the turns such that current can be shared radially between turns via the conductive material. Strain is monitored for the HTS field coil and/or support structures of the HTS field coil. The monitored strain is compared to an expected strain during normal operation of the magnet. In response to the comparison, it is determined whether the field coil is in pre-quench conditions.

A similar method is provided where the magnetic field of the HTS field coil is

monitored to detect pre-quench conditions, instead of the strain.

【指定代表圖】 圖2

【代表圖之符號簡單說明】

201:HTS場線圈

202:支撐結構

203:應力感測器

204:磁場感測器

205:淬火保護系統

【特徵化學式】

無

【發明說明書】

【中文發明名稱】 基於應力之淬火偵測

【英文發明名稱】 STRAIN-BASED QUENCH DETECTION

【技術領域】

【0001】 本發明關於在高溫超導磁鐵系統中的淬火偵測，且尤指淬火偵測之方法、以及經裝配以實施所述方法之磁鐵系統。

【先前技術】

【0002】 產生熔合(fusion)功率之挑戰極為複雜。除了托卡馬克(tokamak)之外的許多替代裝置已經提出，儘管還未產生比得上諸如JET之目前運作的最佳托卡馬克的任何結果。

【0003】 世界上的熔合研究已經在ITER（曾經建造之最大且最昂貴（€150億歐元）的托卡馬克）之建構開始後而進入新的階段。對於商用熔合反應器的成功途徑要求長脈衝、穩定操作且和所需要的高效率結合，以使得電力產生為經濟。這三個狀況特別難以同時達成，且所計畫的方案將需要在ITER與其他熔合設施之多年的實驗研究、以及理論與技術上的研究。普遍預期的是，透過此途徑所開發的商用熔合反應器將不會在西元2050年之前而被建造。

【0004】 要得到對於經濟功率產生(即：功率輸出比功率輸入為更多許多)所需的熔合反應器，習用的托卡馬克必須為巨大(如由ITER所示範)，使得能量侷限時間(大致正比於電漿量)可能為大，以使得電漿可為足夠熱以供熱熔合發生。

【0005】 WO 2013/030554描述一種替代方式，涉及小型球形托卡馬克之使用，以供使用作為中子源或能量源。在球形托卡馬克中之低長寬比的電漿形狀

改善粒子侷限時間，且允許以較小許多的機器之淨功率產生。然而，小直徑的中央柱為必要，其對於電漿侷限磁鐵的設計帶來挑戰。高溫超導體（HTS, high temperature superconductor）場線圈是針對於上述磁鐵為看好的技術。

【0006】 超導材料典型被分為「高溫超導體（HTS）」與「低溫超導體（LTS, low temperature superconductor）」。諸如Nb與NbTi之LTS材料是其超導電性可由BCS理論所描述之金屬或金屬合金。所有低溫超導體具有低於大約30K之臨界溫度（高於其，材料甚至在零磁場下而無法為超導的溫度）。HTS材料的行為並非由BCS理論所描述，且上述材料可具有高於大約30K之臨界溫度（儘管應注意的是其為在超導操作與組成之間的實際差異而不是臨界溫度來定義HTS與LTS材料）。最常用的HTS是「銅氧化物（cuprate）超導體」——基於銅氧化物（含有銅氧化物族的化合物）的陶瓷材料，諸如：BSCCO、或ReBCO（其中Re是稀土元素，通常為Y或Gd）。其他HTS材料包括鐵磷屬化物（pnictide）（例如：FeAs與FeSe）與二硼酸鎂（MgB₂）。

【0007】 ReBCO被典型製造為條帶（tape），具有如在圖1所示的結構。上述條帶100通常為大約100微米厚，且包括基板101（典型為大約50微米厚之電拋光的赫史特合金（hastelloy）），在其上為由IBAD、磁控管濺鍍、或另一種適合技術所沉積大約厚度0.2微米之習稱為緩衝堆疊102的一連串的緩衝層。外延ReBCO-HTS層103（由MOCVD或另一種適合技術所沉積）覆蓋上述緩衝堆疊，且典型為1微米厚。1-2微米的銀層104藉由濺鍍或另一種適合技術被沉積在HTS層上，且銅穩定劑層105藉由電鍍或另一種適合技術被沉積在條帶上，經常將所述條帶完全囊封。

【0008】 基板101提供可經饋送通過生產線且允許後續層之成長的機械骨幹。緩衝堆疊102為需要以提供在其上成長HTS層之雙軸向紋理的結晶樣板，且防止損壞其超導特性之從基板到HTS的元素化學擴散。銀層104為需要以提供從

ReBCO到穩定劑層之低電阻介面，且穩定劑層105提供替代的電流路徑，假使ReBCO任何部分終止超導（進入「正常」狀態）。

【0009】 此外，「剝離（exfoliated）」HTS條帶可經製造，其缺乏基板與緩衝堆疊，而是具有在HTS層之二側上的銀層。具有基板之條帶將稱作為「基底（substrated）」HTS條帶。

【0010】 HTS條帶可經配置為HTS纜線。HTS纜線包含一或多個HTS條帶，其經由導電材料（通常為銅）而沿著其長度被連接。HTS條帶可經堆疊（即：配置以俾使HTS層為平行），或可具有一些其他配置的條帶，其可沿著纜線長度而變化。HTS纜線的顯著特別情況是單HTS條帶、與HTS對。HTS對包含一對HTS條帶，其配置以俾使HTS條帶為平行。在基底條帶被使用的情況下，HTS對可為型式0（HTS層為面對彼此）、型式1（一個條帶的HTS層為面對另一者的基板）、或型式2（基板為面對彼此）。包含超過2個條帶之纜線可將一些或所有條帶配置為HTS對。堆疊的HTS條帶可包含種種配置的HTS對，最常見為一堆型式1對之堆疊或一堆型式0對（或等效為型式2對）之堆疊。HTS纜線可包含基底與剝離的條帶之混合者。

【0011】 一種常見型式的HTS線圈是「薄餅式（pancake）線圈」，其中HTS纜線201被纏繞以形成扁平線圈，類似於一卷絲帶的方式。薄餅式線圈可作成有其為任何二維形狀的內周邊。經常，薄餅式線圈被提供為「雙薄餅式線圈」，其包含以相反方向所繞製的二個薄餅式線圈，具有在薄餅式線圈之間的絕緣，且有連接在一起的內部端子。此意指的是，電壓僅必須被供應到通常為更方便的外部端子，以驅動電流通過線圈的諸匝且產生磁場。

【0012】 HTS線圈可為「絕緣」——具有線圈的諸匝之間的電氣絕緣材料，或「非絕緣」，其中線圈的諸匝被徑向、以及沿著纜線而電氣連接（例如：藉由焊接或藉由直接連接來連接纜線的銅穩定劑層）。此外，線圈可為「部分絕緣」

——即，具有在線圈之間的一層有介於在用於絕緣線圈的絕緣體之間的電阻、或其接合非絕緣線圈的纜線之金屬。舉例來說，部分絕緣者可為較厚層的相當高電阻金屬、或半導體、或構成以提供相當高電阻之複合層。替代而言，部分絕緣線圈可藉由提供由導電材料所作成的其他徑向電流路徑來形成——例如：在場線圈的側面上。

【發明內容】

【0013】 根據第一個觀點，一種偵測在包含HTS場線圈之超導磁鐵中的預淬火狀況之方法被提出。所述場線圈包含：複數個匝，其包含HTS材料與金屬穩定劑；及，導電材料，其連接所述匝，俾使電流可經由所述導電材料在匝間為徑向共用。應力是針對於所述HTS場線圈及/或所述HTS場線圈之支撐結構而監測。監測的所述應力是與在所述磁鐵正常操作期間的預期應力來比較。響應於所述比較，所述場線圈是否在預淬火狀況下被確定。

【0014】 根據第二個觀點，一種偵測在包含HTS場線圈之超導磁鐵中的預淬火狀況之方法被提出。所述場線圈包含：複數個匝，其包含HTS材料與金屬穩定劑；及，導電材料，其連接所述匝，俾使電流可經由所述導電材料在匝間為徑向共用。所述HTS場線圈的磁場被監測。監測的所述磁場是與在所述磁鐵正常操作期間的預期磁場來比較。響應於所述比較，所述場線圈是否在預淬火狀況下被確定。

【0015】 根據第三個觀點，一種高溫超導（HTS）磁鐵系統被提出，其包含HTS場線圈。所述HTS場線圈包含：複數個匝，其包含HTS材料與金屬穩定劑；及，導電材料，其連接所述匝，俾使電流可經由所述導電材料在匝間為共用。所述HTS磁鐵系統更包含淬火保護系統，與位在所述HTS場線圈或在所述HTS場線圈之支撐結構上的一個或多個應力感測器。所述淬火保護系統被裝配以：監測所

述一個或多個應力感測器的應力測量；比較所述應力測量與在所述磁鐵正常操作期間的預期應力；且響應於所述比較，確定所述場線圈是否在預淬火狀況下。

【0016】 根據第四個觀點，一種高溫超導（HTS）磁鐵系統被提出，其包含HTS場線圈。所述HTS場線圈包含：複數個匝，其包含HTS材料與金屬穩定劑；及，導電材料，其連接所述匝，俾使電流可經由所述導電材料在匝間為共用。所述HTS磁鐵系統更包含淬火保護系統與一個或多個磁場感測器。所述淬火保護系統被裝配以：監測所述一個或多個磁場感測器的磁場測量；比較所述磁場測量與在所述磁鐵正常操作期間的預期磁場；且響應於所述比較，確定所述場線圈是否在預淬火狀況下。

【0017】 根據第五個觀點，一種托卡馬克被提出，其包含根據第三或第四個觀點之HTS磁鐵系統，其中所述托卡馬克之環形場線圈或角向（poloidal）場線圈包含所述HTS場線圈。

【圖式簡單說明】

【0018】

[圖1]是一種HTS條帶的示意圖；

[圖2]是一種超導磁鐵系統的示意圖；

[圖3]是包含數個線圈之超導磁鐵系統的示意圖。

【實施方式】

【0019】 部分絕緣與非絕緣的線圈（即：其存有在匝間的（非超導）導電路徑以允許電流徑向流通在匝間之線圈），概括為抗淬火（磁鐵在操作期間變成非超導）且防在淬火期間的損壞（由於此部分地起因於絕緣線圈中的匝間之電弧）。然而，已經得知的是，重大損壞可能起因於在部分絕緣與非絕緣的線圈中

之淬火，而這歸因於從螺旋路徑（即：在線圈的HTS中）轉移到徑向路徑（即：直接透過金屬性連接或部分絕緣）的電流所造成在磁場與造成應力的大移位。此在具有多線圈段的磁鐵系統中為特別顯著，例如：針對於托卡馬克的環形場（TF, toroidal field）線圈組。若TF線圈的一個「分支」淬火，則所造成的磁性不平衡可能歸因於大的不平衡力量而引起對於整個TF線圈組的重大損壞。

【0020】 儘管應力與磁場之大的破壞性的移位顯然為問題，以下說明提議使用其歸因於在匝間電流共用而發生在淬火開始期間之較小的應力與場移位，來偵測起初的淬火且提供足夠的警示，以安全降低磁鐵且減少或防止由淬火所引起的損壞。概括而言，淬火偵測涉及偵測「預淬火狀況」（即：很可能引起淬火的狀況）、或其指出淬火可能很快將發生之諸如在线圈之間共用的電流或線圈內的熱點之徵兆。

【0021】 淬火偵測可藉由監測在所述組的各個線圈中（及/或在附近結構構件中）的應力或、接近在所述組中的各個線圈的磁場之任一者或二者來實行。在廣泛的實例中，當和磁鐵操作期間的預期測量有任何偏差，例如大於使用的應力計之測量準確度，則可發訊預淬火狀況。替代而言，當任何上述偏差為大於臨限（例如：大於預期測量為1%），則可發訊預淬火狀況。此將適用於一種系統，其中較大數目個不必要停機之潛在成本為值得承擔，以節省未受控制的淬火之潛在成本。

【0022】 替代而言，淬火保護系統可被裝配以僅為響應於藉由應力及/或場感測器的某些測量，例如：響應於垂直於在正常操作期間的線圈磁場之磁場（「離軸」場）、或響應於在未預期構件或未預期方向中的應力，（其中「未預期」意指「將在正常操作期間為並未被預期」——即，可能在淬火或預淬火狀況的事件中是被預期的）。

【0023】 在多線圈系統中，在一個線圈中的預淬火狀況之偵測可能基於在

系統的另一個線圈及其周圍的應力之變化——此因為在第一個線圈的磁場之移位引起在系統中的其他線圈上的力量平衡之移位。此適用於無論多個線圈是否為相同磁鐵的部分者（例如：TF線圈組的個別分支）。

【0024】 「在正常操作期間的應力/場」之判斷可基於目前正供應到線圈的功率——例如：淬火保護系統可接收經供應到各個線圈的電流之詳情來作為輸入，基於這些電流來確定應力及/或場模型，（例如：藉由參考查找表或藉由在簡單模型中的計算），且比較應力及/或場感測器的讀數與應力及/或場模型。如上所指出，針對於從所述模型的任何重大偏差、或針對於某些型式的偏差——例如：垂直於預期場/應力，可發訊預淬火狀況，（以及諸如降低所接合的磁鐵之淬火防止程序）。

【0025】 在平衡式多線圈系統中，即：其中應力/磁場型態應對於在正常操作期間的各個線圈為相同之系統，用來比較之在正常操作期間的預期應力/磁場可基於其他線圈的測量應力/磁場——即：在量器準確度之範圍內，預期的應力型態是在於各個線圈上的應力為相同。在應力之特定型態的偏差可指出預淬火狀況——例如：其中相等且相反的偏差為存在於線圈任一側的二個線圈，且減少的相等且相反的偏差為存在於下個最接近的相鄰者。

【0026】 類似的考量適用於非完全平衡、但具有對稱性的系統——例如在多線圈系統具有其關於彼此有映射對稱性之二組線圈的情況下，預期的應力/磁場可為基於各個線圈的測量應力/磁場，期望的是應力/磁場型態亦應具有映射對稱性。

【0027】 在小的球形托卡馬克（電漿主要半徑大約1.5 m）之典型TF線圈中，預期的應力可能高達0.25%（2500微應力），且應力感測器的靈敏度可能優於0.01微應力。如此，在磁鐵上的應力之極精密、高解析度的確定為可能。

【0028】 圖2以示意形式來顯示一種示範的超導磁鐵系統。所述磁鐵系統

包含：

HTS場線圈201，其具有支撐結構202；

在HTS場線圈201與支撐結構202之上的複數個應力感測器203；

複數個磁場感測器204，其定位以監測由HTS場線圈201所產生的磁場；

淬火保護系統205，其裝配以：

監測來自所述應力感測器與磁場感測器的測量；

比較監測的所述測量與在正常操作期間的預期應力輪廓以及在正常操作期間的預期磁場輪廓；

基於所述比較而確定所述場線圈是否在預淬火狀況下。

【0029】 圖3顯示一種多線圈磁鐵系統，其包含如在圖2所示的複數個線圈201（以及關聯的支撐結構202、與感測器203、204）。淬火保護系統305被裝配以：

監測來自所述應力感測器與磁場感測器的測量；

比較監測的所述測量與在正常操作期間的預期應力輪廓以及在正常操作期間的預期磁場輪廓；

使用在各個場線圈上的感測器、以及在其他場線圈上的感測器二者，基於所述比較而確定各個場線圈是否在預淬火狀況下。

【0030】 如在上述的較詳細實例所解說，所述磁鐵系統亦可構成為僅有應力感測器或僅有磁場感測器，且所述淬火保護系統被裝配以考量僅有應力或磁場（視情況而定）。

【0031】 淬火保護電路可被進而裝配以遵循所述場線圈在預淬火狀況之確定而致動某種方式的淬火防止或緩和——例如：觸發磁鐵電流之傾卸到冷塊體，諸如藉由切換到電阻性負載或審慎將大部分的磁鐵淬火。

【符號說明】

【0032】

100:條帶

101:基板

102:緩衝堆疊

103:外延ReBCO-HTS層

104:銀層

105:銅穩定劑層

201:HTS場線圈

202:支撐結構

203:應力感測器

204:磁場感測器

205:淬火保護系統

305:淬火保護系統

【發明申請專利範圍】

【請求項1】一種偵測可能導致在包含複數個高溫超導（HTS）場線圈之超導磁鐵中淬火的狀況之方法，每個所述場線圈包含：

複數個匝，其包含HTS材料與金屬穩定劑；及

導電材料，其連接所述匝，俾使電流可經由所述導電材料在匝間為徑向共用；

所述方法包含：

監測每個所述HTS場線圈的應力及/或磁場；

將每個所述HTS場線圈的所監測的所述應力及/或所述磁場與所述複數個HTS場線圈中的至少一個其他HTS場線圈的所監測的所述應力及/或所述磁場進行比較；

響應於所述比較，確定所述HTS場線圈中的一個或多個是否可能處於淬火。

【請求項2】如請求項1之方法，其中確定所述HTS場線圈中的一個或多個是否可能處於淬火包含以下的一者或多者：

若所監測的所述應力或所述磁場與所述至少一個其他HTS場線圈的所述應力或所述磁場的差異超過臨限值，確定所述HTS場線圈中的一個可能處於淬火；

若所監測的所述應力或所述磁場具有垂直於所述至少一個其他HTS場線圈的所述應力或所述磁場之比臨限值的量大的分量，確定所述HTS場線圈中的一個可能處於淬火。

【請求項3】如請求項2之方法，其中所述臨限值或各個臨限值是所述至少一個其他HTS場線圈的所述應力或所述磁場的預定比例。

【請求項4】一種高溫超導（HTS）磁鐵系統，其包含複數個HTS場線圈，每個所述HTS場線圈包含：

複數個匝，其包含HTS材料與金屬穩定劑；

導電材料，其連接所述匝，俾使電流可經由所述導電材料在匝間為共用；
所述HTS磁鐵系統更包含淬火保護系統和複數個感測器，包括：

一個或多個應力感測器，位在每個所述HTS場線圈或在每個所述HTS場線圈之支撐結構上，及/或

一個或多個磁場感測器，被裝配為監測每個所述HTS場線圈的所述磁場；
其中所述淬火保護系統被裝配以：

使用所述複數個感測器來監測每個HTS線圈的應力及/或磁場測量；

將每個HTS線圈的所述應力及/或磁場測量與所述複數個HTS場線圈中的至少一個其他HTS場線圈的應力及/或磁場測量進行比較；

響應於所述比較，確定所述HTS場線圈中的一個或多個是否可能處於淬火。

【請求項5】如請求項4之HTS磁鐵系統，其中所述導電材料被容納在部分絕緣層內，所述部分絕緣層包含以下的任一者：

間歇絕緣層；

半導體；

金屬條，其具有在各側上的間歇絕緣層；及

金屬－絕緣體過渡材料。

【請求項6】一種托卡馬克，其包含如請求項4或5之HTS磁鐵系統，其中所述複數個HTS場線圈為所述托卡馬克之環形場線圈。

【發明圖式】

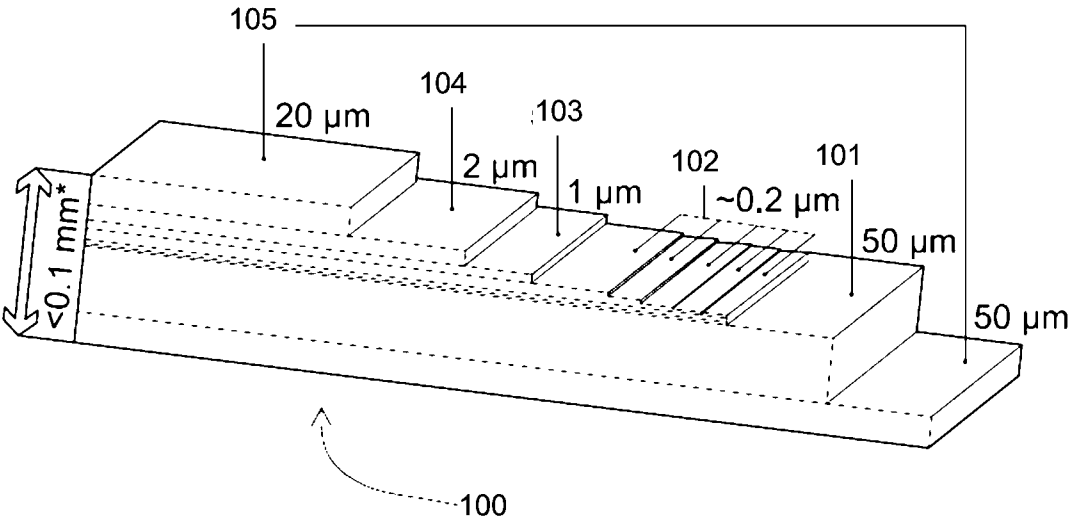


圖1

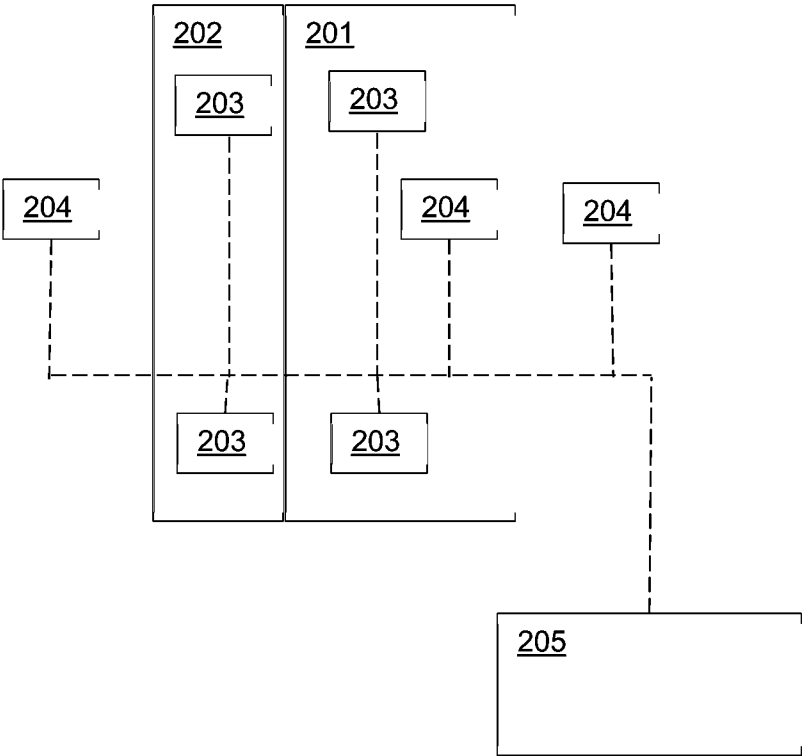


圖2

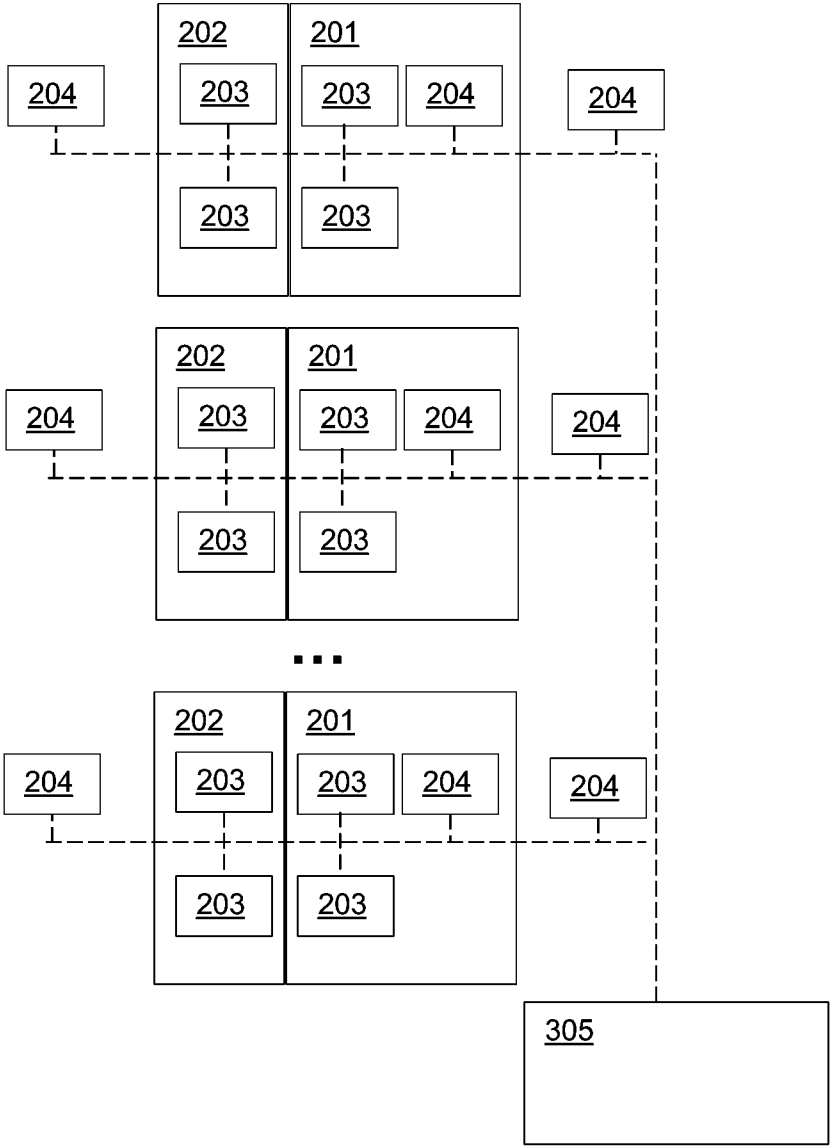


圖3