

友誼大橋結構健康監測系統 2023-2025 年度服務

# 監測數據分析報告簡報

(第三期)



中交公路規劃設計院有限公司澳門分公司

二零二四年四月

## 目 錄

<b>1</b>	<b>監測數據分析</b>	<b>3</b>
1.1	結構回應類數據分析	3
1.1.1	支座伸縮縫位移統計分析	3
1.1.2	主橋振動加速度統計分析	5
1.1.3	斜拉索振動統計分析	7
1.1.4	動力特性分析	29
1.2	環境類數據分析	39
1.2.1	風速	39
1.2.2	環境溫濕度	40
<b>2</b>	<b>數據分析結果</b>	<b>44</b>
2.1	結構回應類	44
2.2	環境類	44

# 1 監測數據分析

本章節將監測系統所有數據分為：結構回應類數據和環境類數據兩大類，分別進行分析。其中，結構回應類包括：主樑振動、斜拉索振動；環境類包括：風速風向、環境溫濕度等。

## 1.1 結構回應類數據分析

結構回應類分為靜力回應和動力回應，靜力回應主要包括應變、撓度等；動力回應主要體現在主橋振動和斜拉索振動。

### 1.1.1 支座伸縮縫位移統計分析

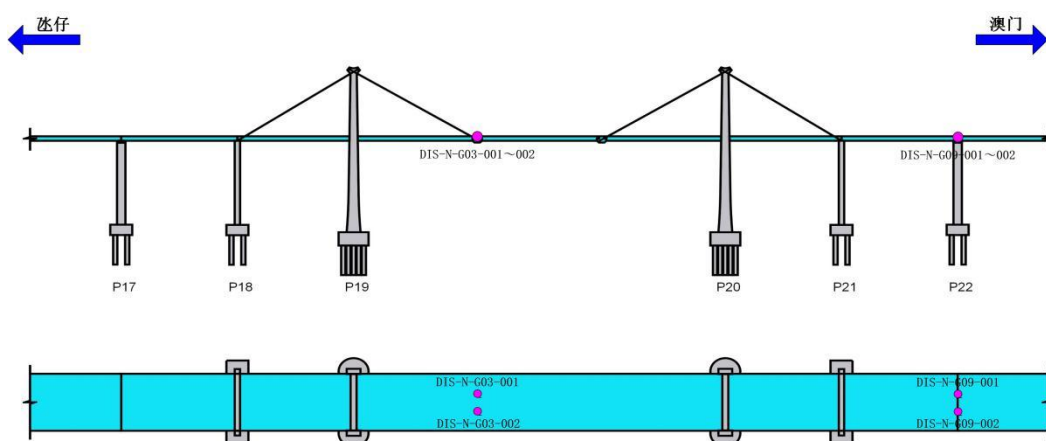


圖 1.1.1-1 內主橋樑端位移計監測點佈置圖

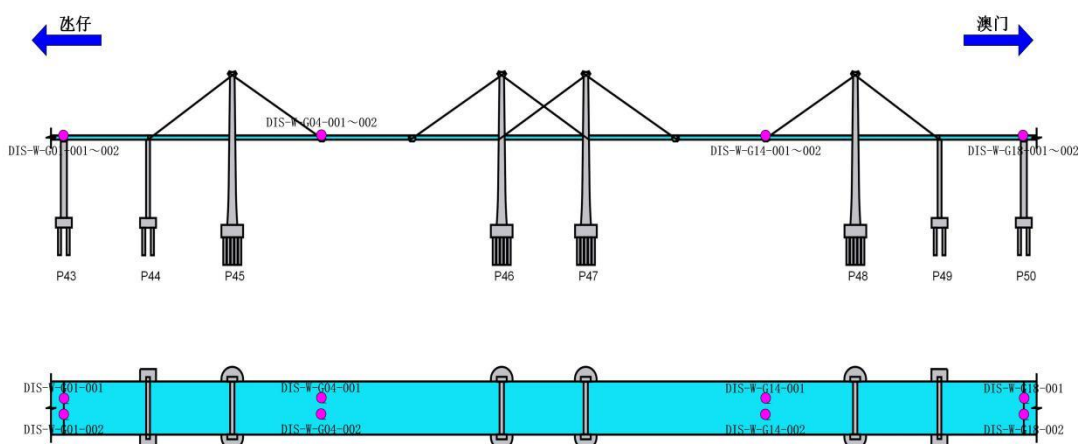


圖 1.1.1-2 外主橋樑端位移計監測點佈置圖

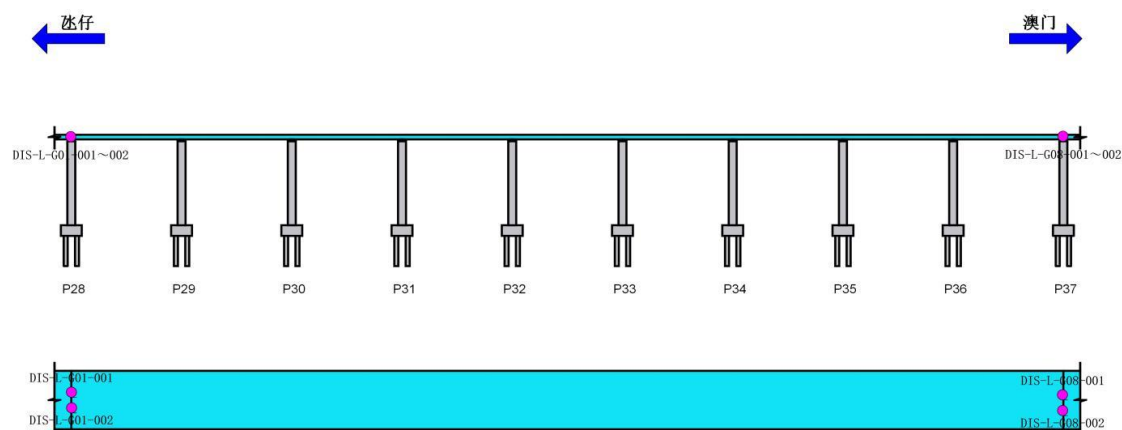


圖 1.1.1-3 連續梁梁端位移計佈置圖

將同一截面的上下游感測器位移監測值繪製在同一幅圖中，檢查橋樑結構的縱向變形對稱性。

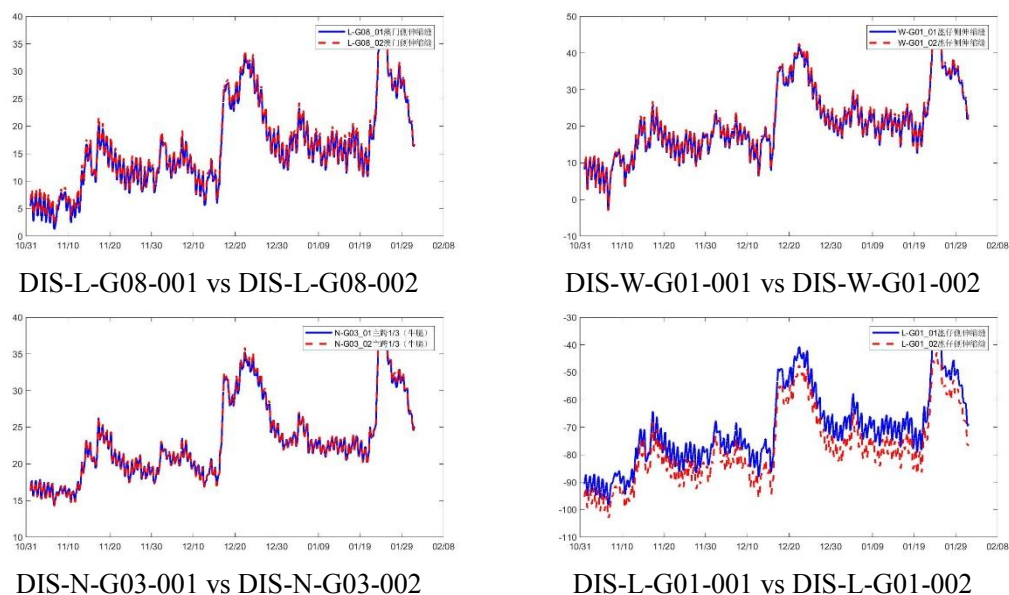


圖 1.1.1-4 上下游位移對稱圖

通過上下游的位移計數值對比可以看出，同一截面的上下游感測器的位移變化趨勢、大小保持一致，具有較好的對稱性。

### 1.1.2 主橋振動加速度統計分析

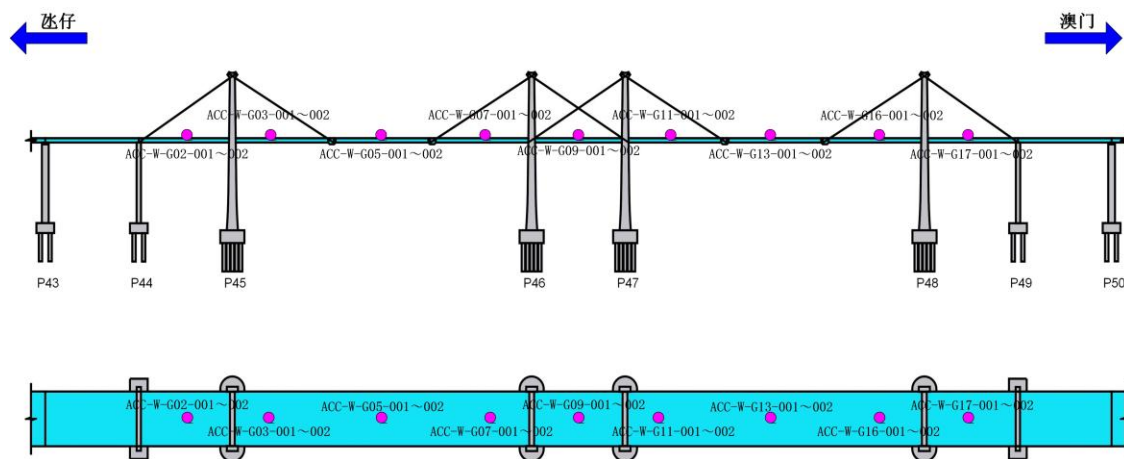


圖 1.1.2-1 外主橋加速度佈置圖

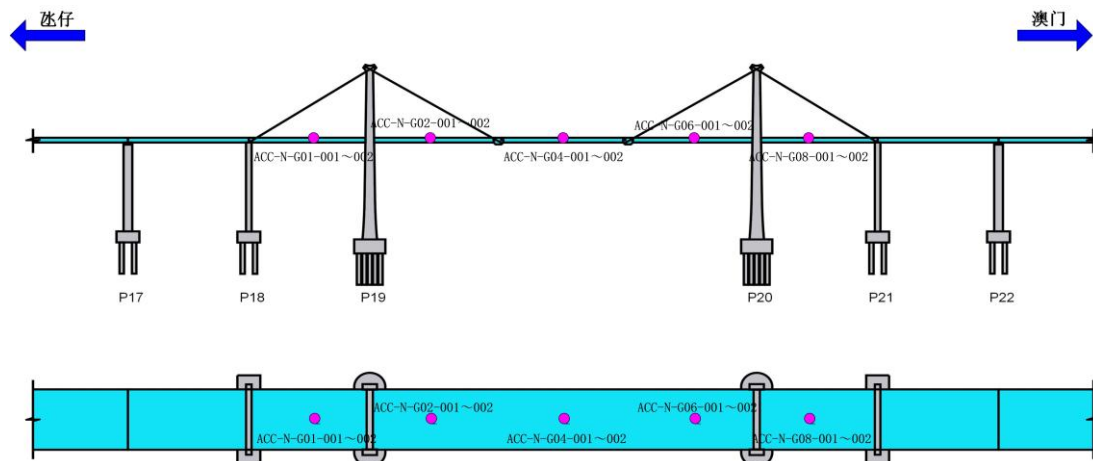


圖 1.1.2-2 內主橋加速度佈置圖

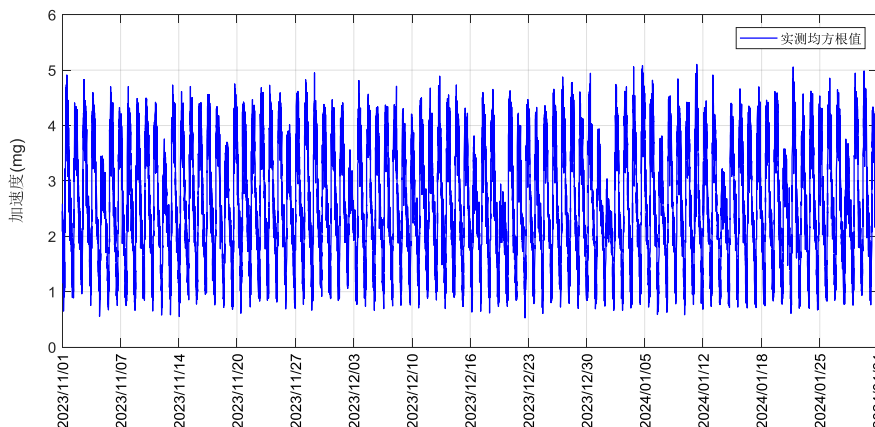
表 1.1.2-1 加速度監測點資訊一覽表

感測器編號	位置	監測項	數量
ACC-L-G09-001~ ACC-L-G07-002	高架連續梁梁段	加速度	12
ACC-N-G01-001~ ACC-N-G08-002	內主橋樑段	加速度	10
ACC-W-G02-001~ACC-W-G17-002	外主橋樑段	加速度	18

#### 1.1.2.1 內主橋振動統計分析

表 1.1.2-2 總體統計最值表 (mg)

各最值	編號	最大值	時間	位置
最大值	ACC-N-G06-002	5.1	2024-01-11 14:10	P19 與 P20 墩間梁段跨 5/6 點豎向



ACC-N-G06-002

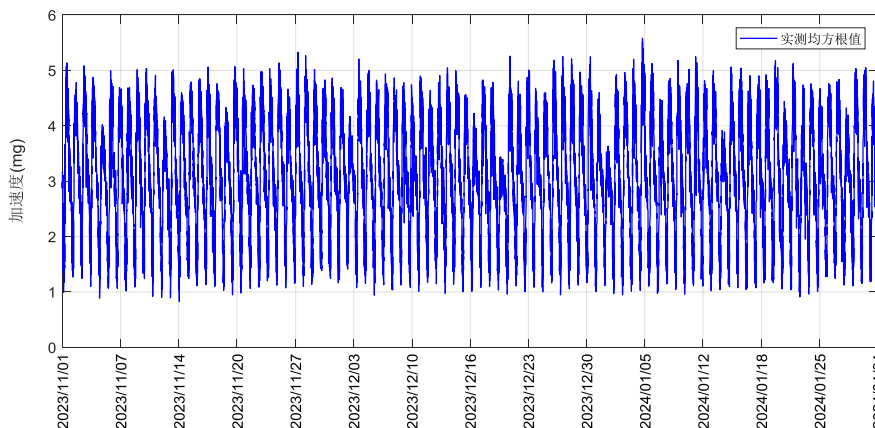
圖 1.1.2-3 加速度最大值時程圖

以上分析表明，內主橋最大加速度為 5.10mg，發生在 P19 與 P20 墩間梁段跨 5/6 點豎向（感測器編號：ACC-N-G06-002），時間為 2024-01-11 14:10。

### 1.1.2.2 外主橋振動統計分析

表 1.1.2-3 總體統計最值表 (mg)

各最值	編號	最大值	時間	位置
最大值	ACC-W-G03-001	5.6	2024-01-05 10:50	P45 與 P46 墩間梁段跨 1/6 點橫向



ACC-W-G03-001

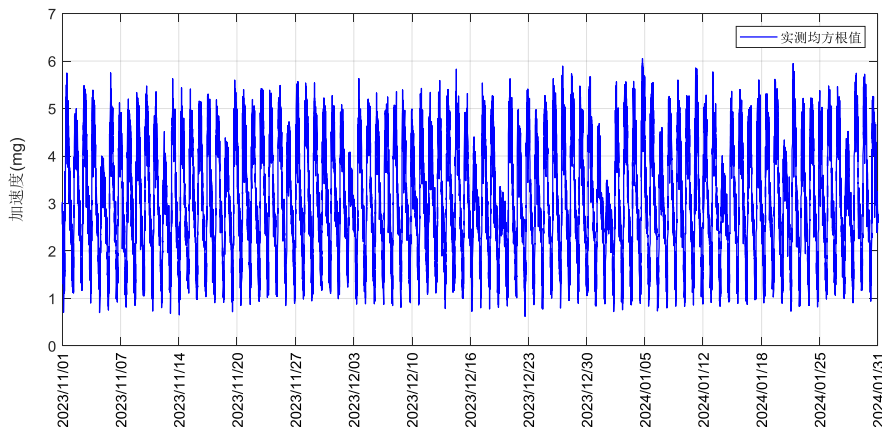
圖 1.1.2-4 加速度最大值時程圖

以上分析表明，外主橋最大加速度為 5.58mg，發生在 P45 與 P46 墩間梁段跨 1/6 點橫向（感測器編號：ACC-W-G03-001），時間為 2024-01-05 10:50。

### 1.1.2.3 連續梁振動統計分析

表 1.1.2-4 總體統計最值表 (mg)

各最值	編號	最大值	時間	位置
最大值	ACC-L-G07-002	6.1	2024-01-05 10:50	P36 與 P37 墩間梁段跨中豎向



ACC-L-G07-002

圖 1.1.2-5 加速度最大值時程圖

以上分析表明，連續梁最大加速度為 6.05mg，發生在 P36 與 P37 墩間梁段跨中豎向（感測器編號：ACC-L-G07-002），時間為 2024-01-05 10:50。

### 1.1.3 斜拉索振動統計分析

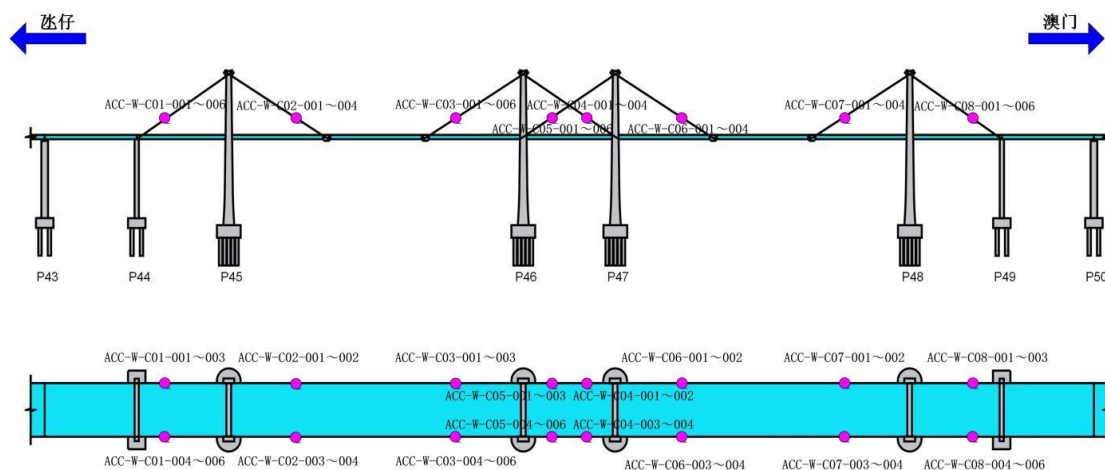


圖 1.1.3-1 外主橋拉索加速度監測點佈置圖

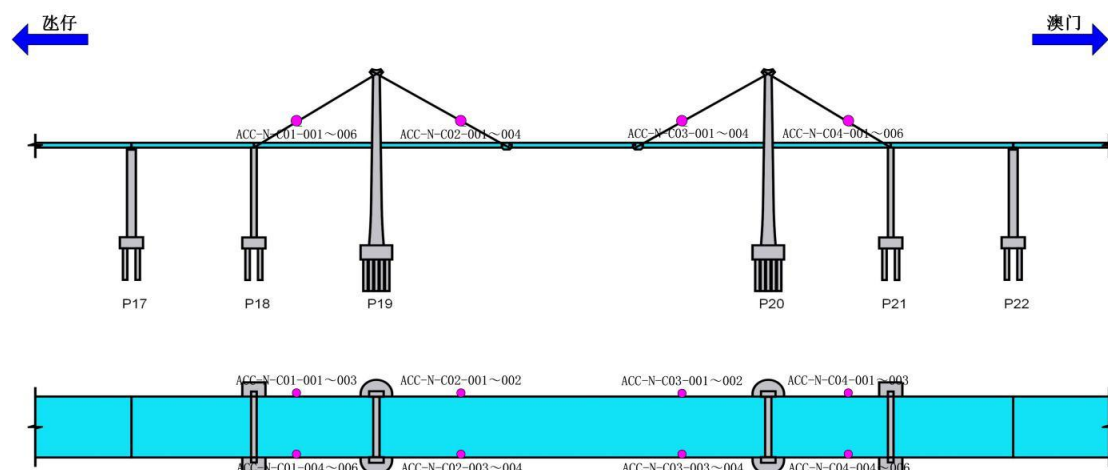


圖 1.1.3-2 內主橋斜拉索加速度監測點佈置圖

### 1.1.3.1 測試原理

斜拉索索力測試方法為振動頻率法。通過對現場採集的振動信號進行譜分析後，得到斜拉索索自振頻率，然後綜合考慮拉索邊界條件、垂度、阻尼器、抗彎剛度等因素後，對索力進行計算。索力計算公式：

$$T_0 = \frac{4ml^2 f_n^2}{n^2} - \frac{n^2 \pi^2 EI}{l^2}$$

式中：  $T_0$  — 實測索力；

$f_n$  — 拉索第  $n$  階固有振動頻率(Hz)；

$n$  — 拉索振動的第  $n$  階次；

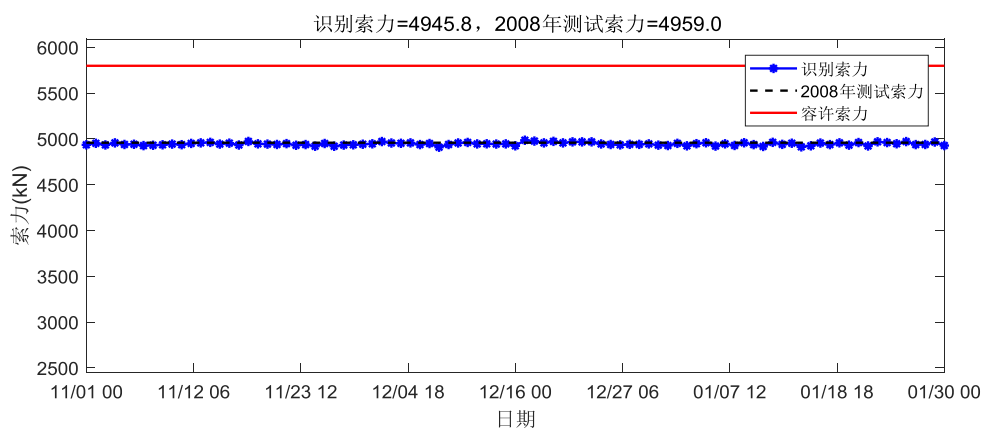
$EI$  — 拉索的抗彎剛度；

$l$  — 拉索的計算長度；

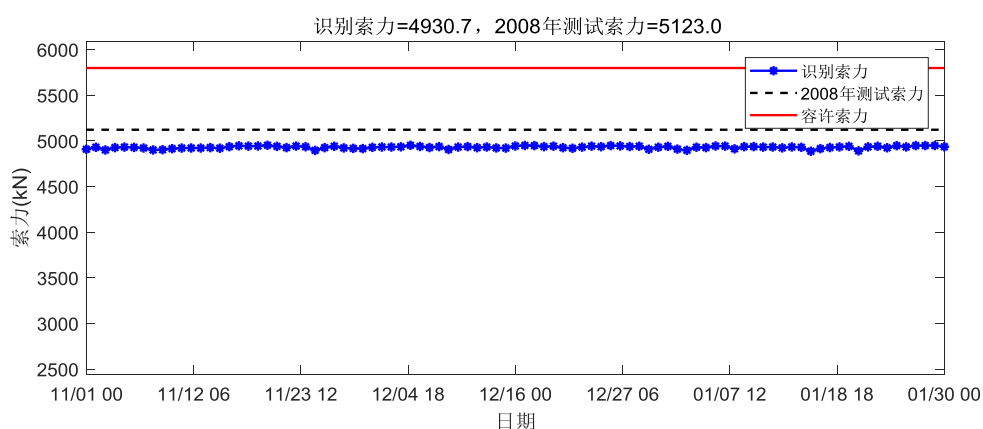
$m$  — 拉索每延米品質



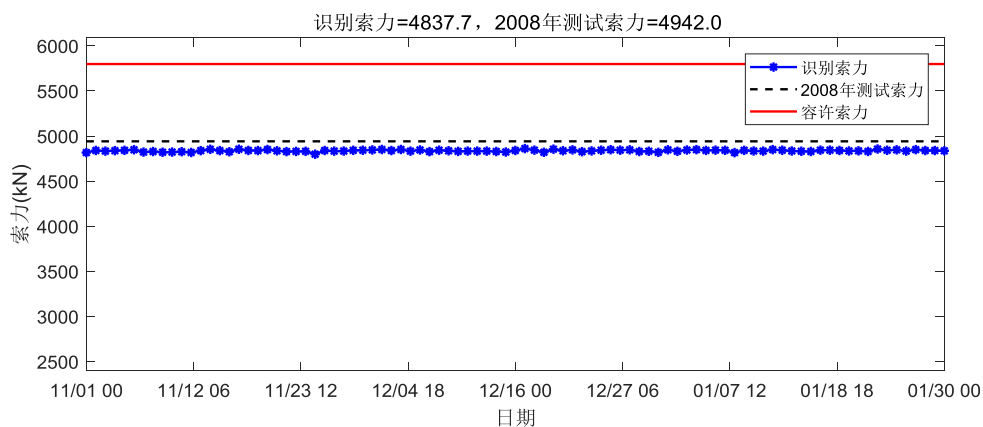
### 1.1.3.2 監測結果



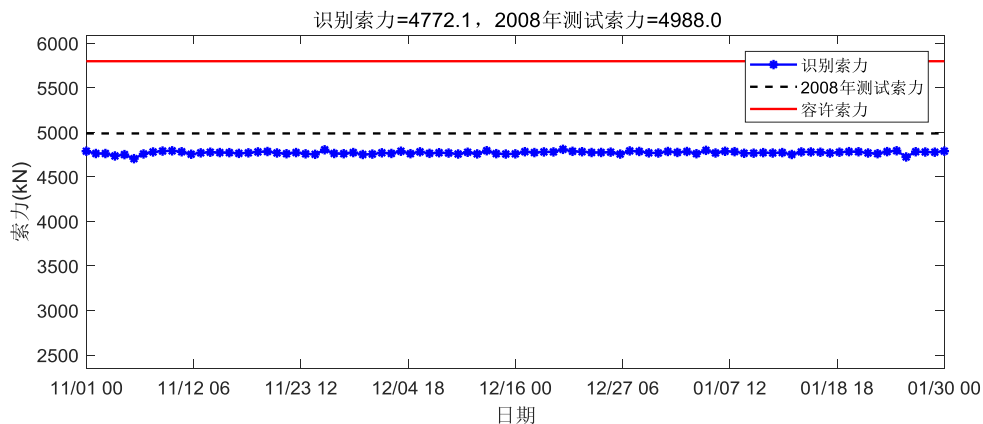
索力圖 1-ACC-W-C01-001



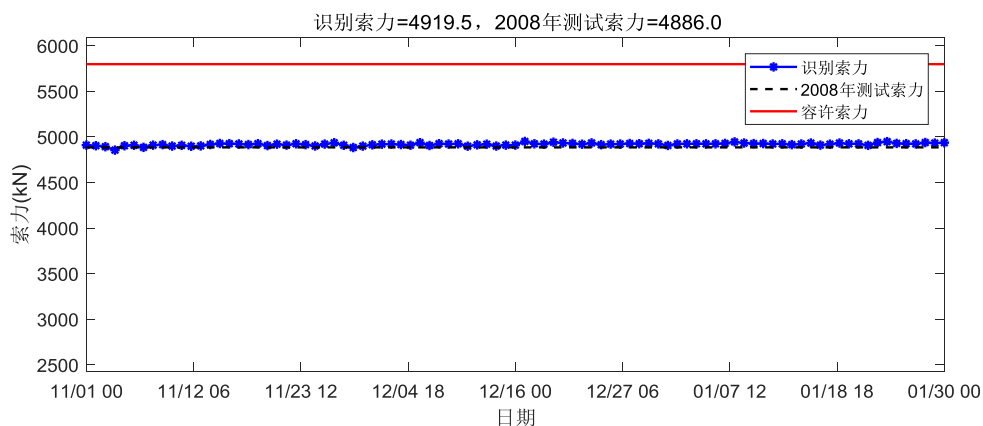
索力圖 2-ACC-W-C01-002



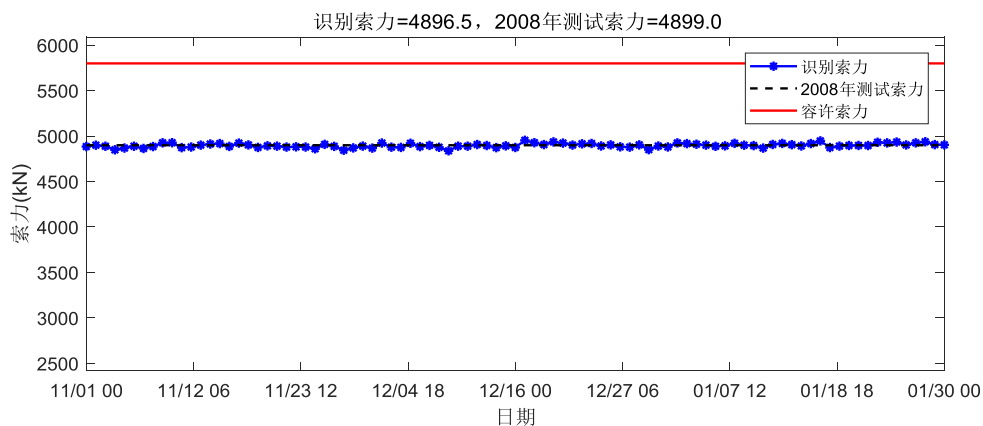
索力圖 3-ACC-W-C01-003



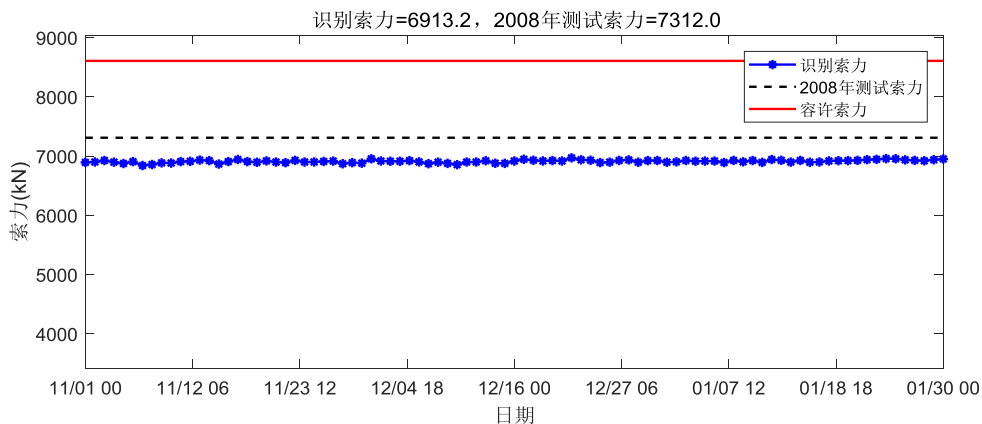
索力圖 4-ACC-W-C01-004



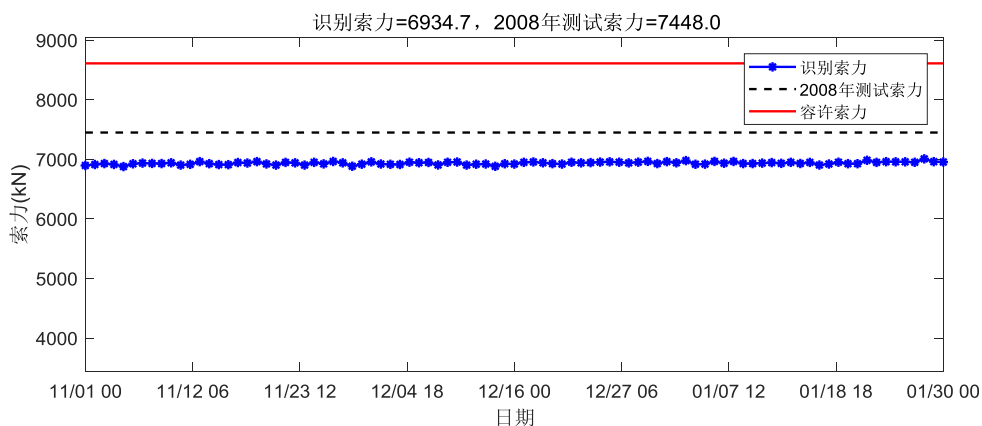
索力圖 5-ACC-W-C01-005



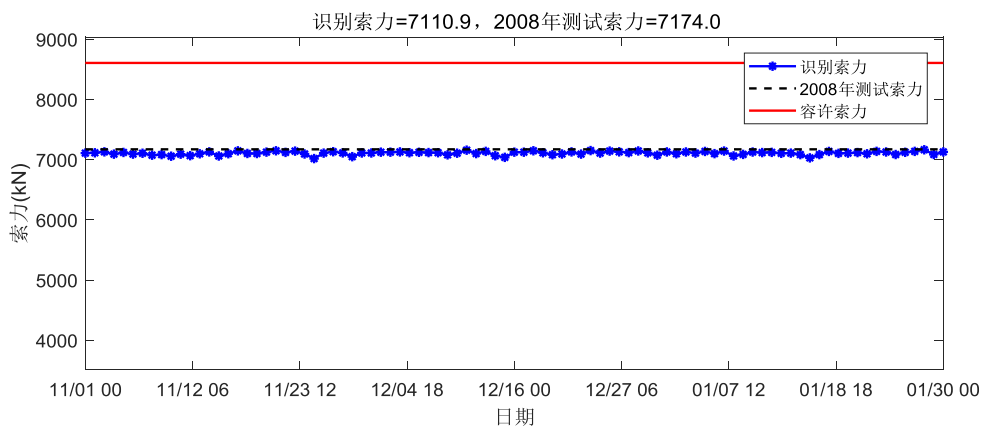
索力圖 6-ACC-W-C01-006



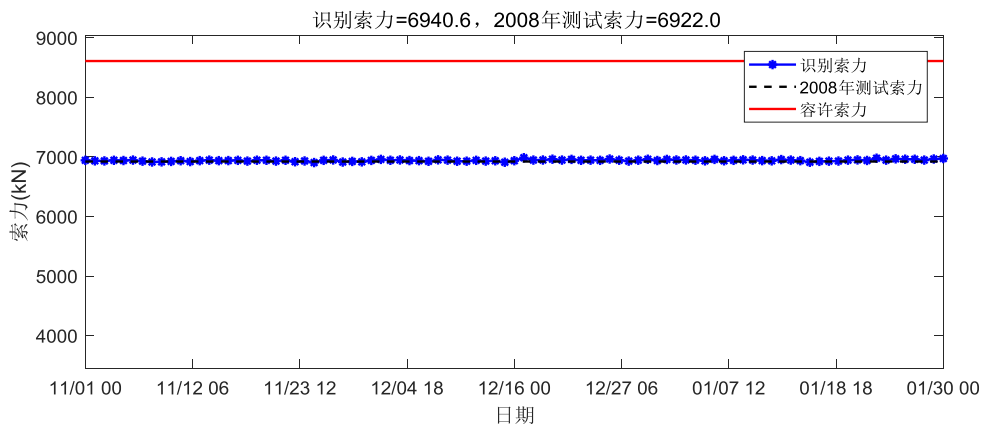
索力圖 7-ACC-W-C02-001



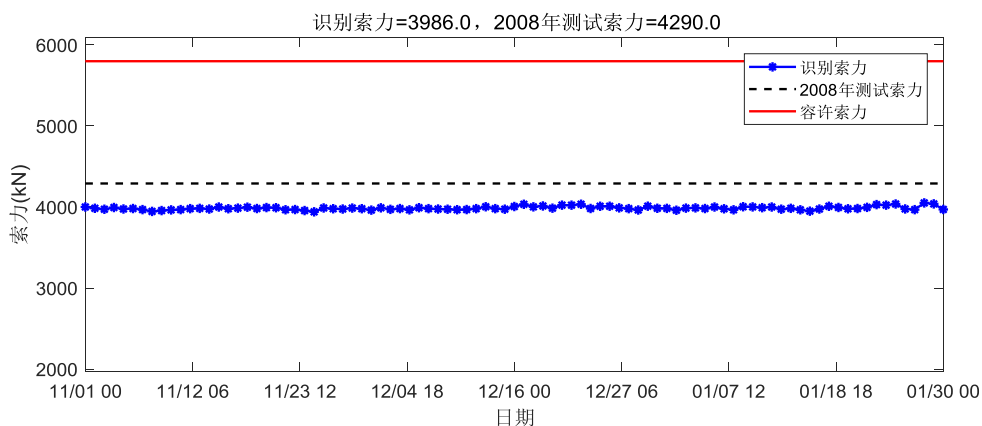
索力圖 8-ACC-W-C02-002



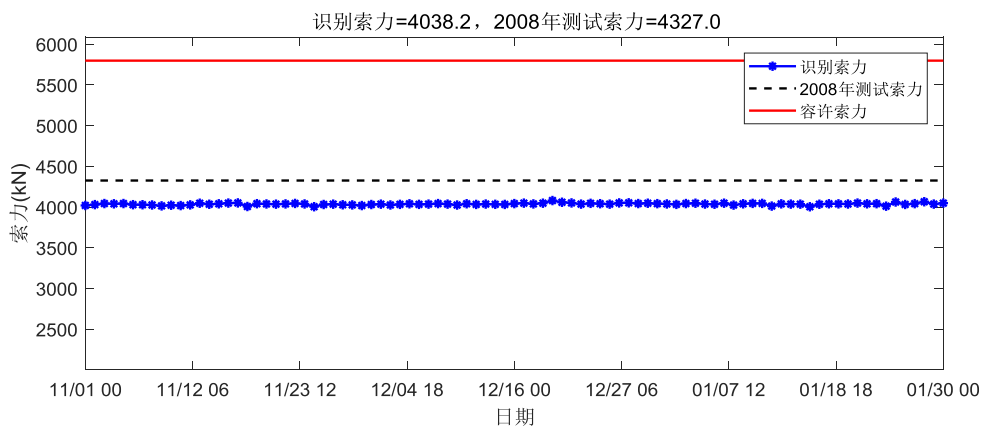
索力圖 9-ACC-W-C02-003



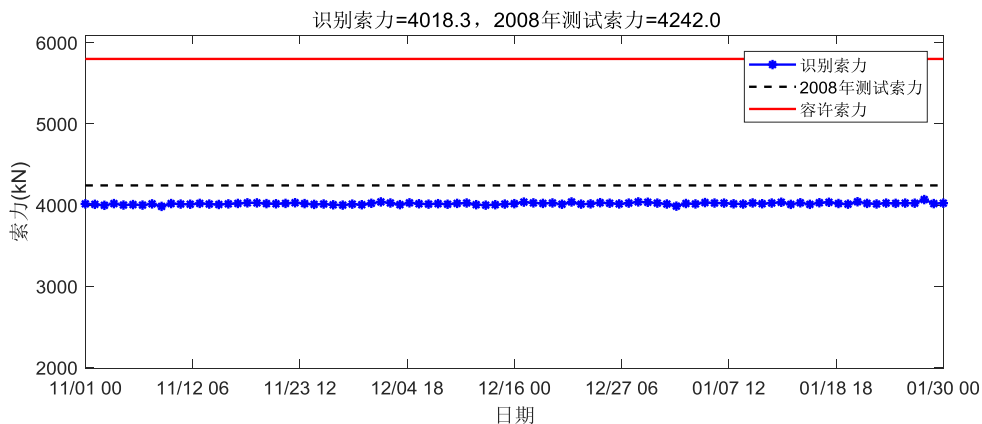
索力圖 10-ACC-W-C02-004



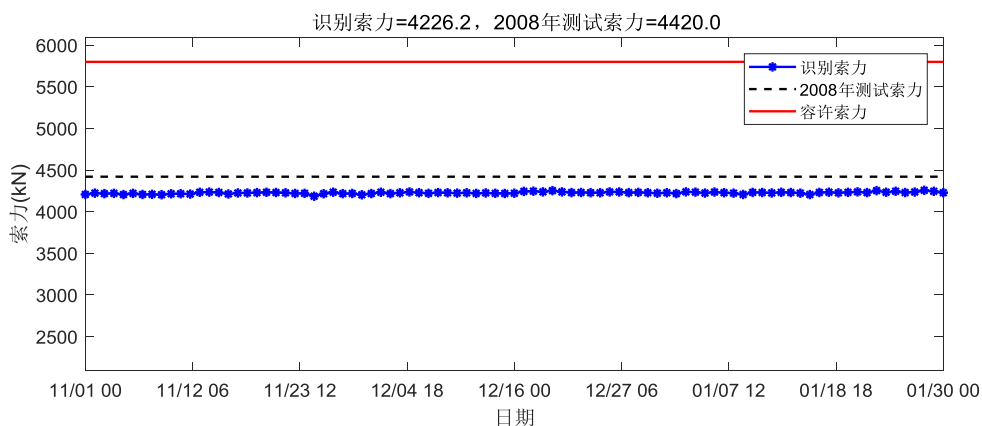
索力圖 11-ACC-W-C03-001



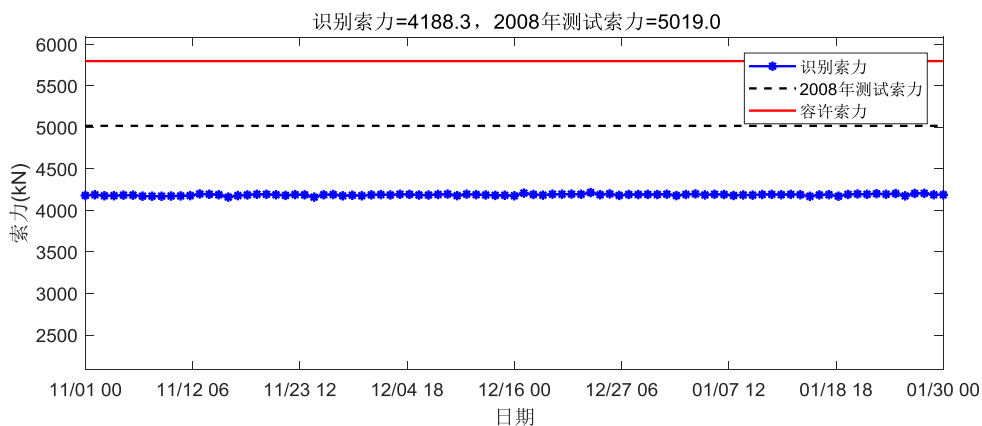
索力圖 12-ACC-W-C03-002



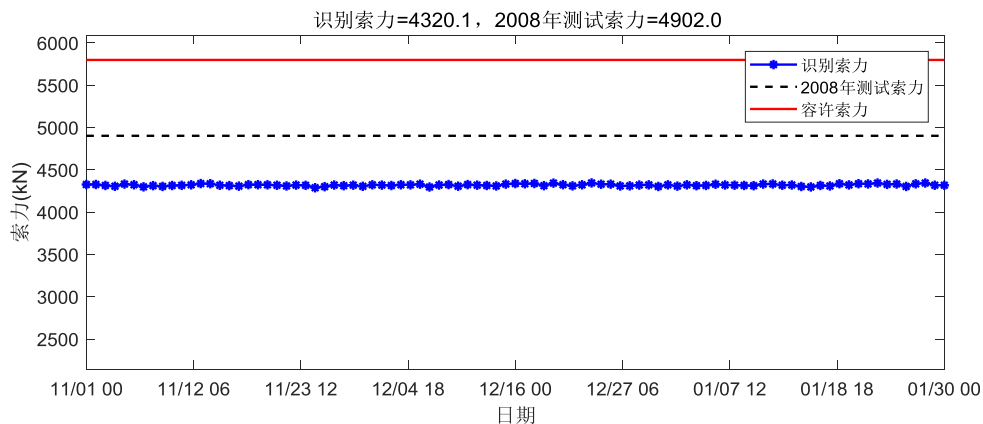
索力圖 13-ACC-W-C03-003



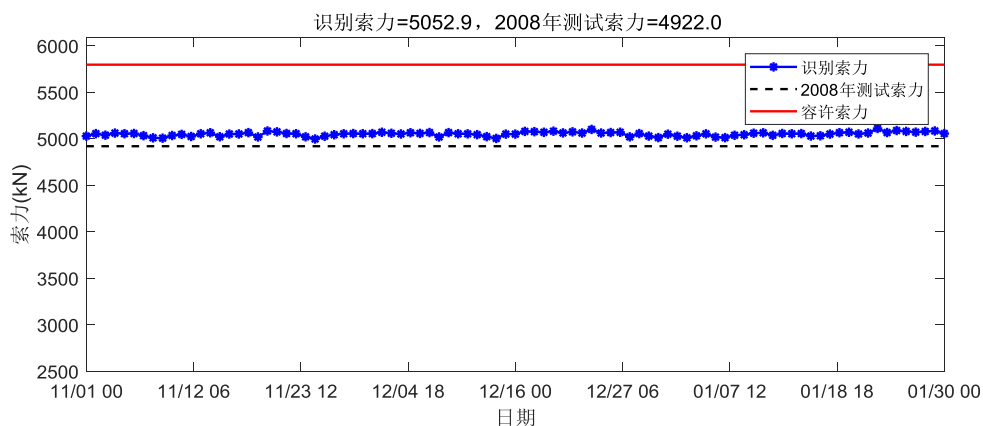
索力圖 14-ACC-W-C03-004



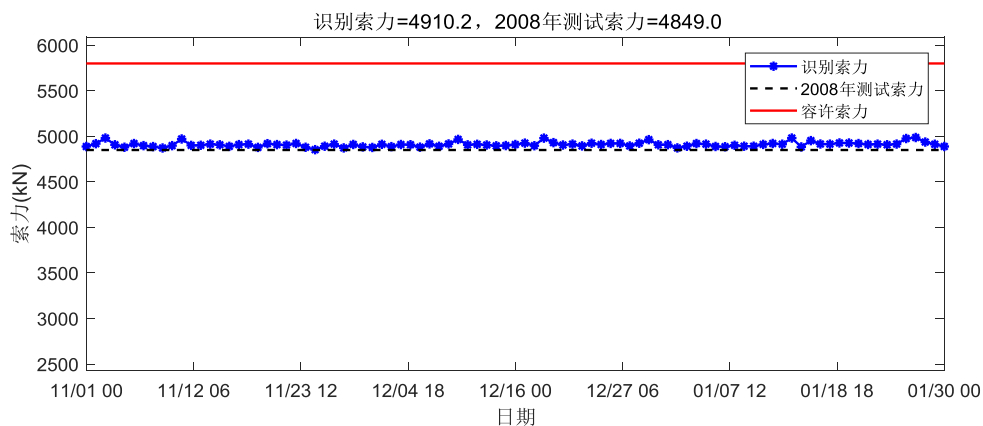
索力圖 15-ACC-W-C03-005



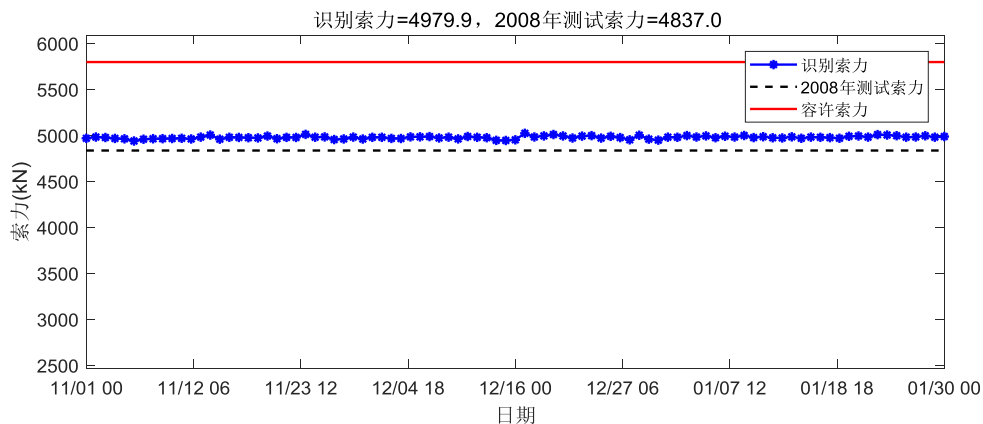
索力圖 16-ACC-W-C03-006



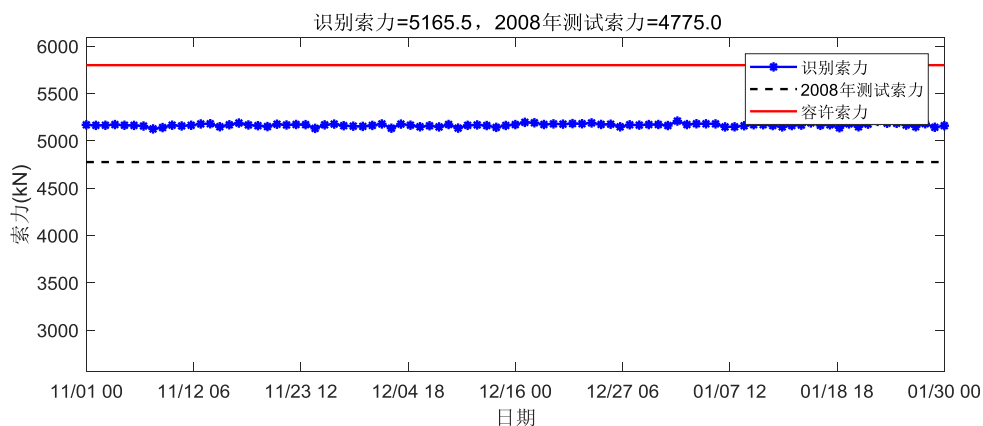
索力圖 17-ACC-W-C05-001



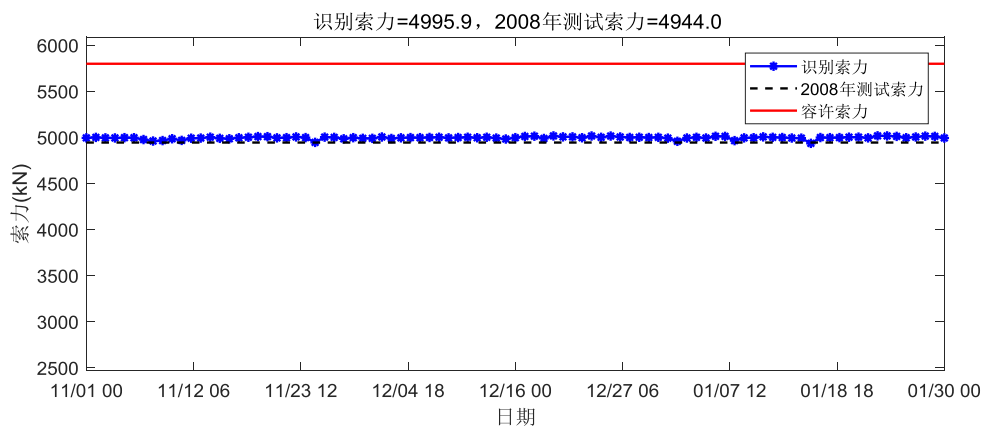
索力圖 18-ACC-W-C05-002



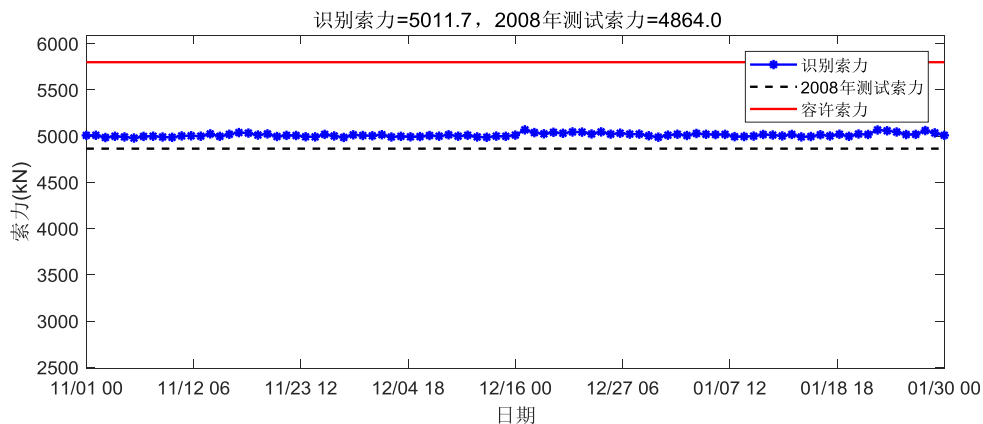
索力圖 19-ACC-W-C05-003



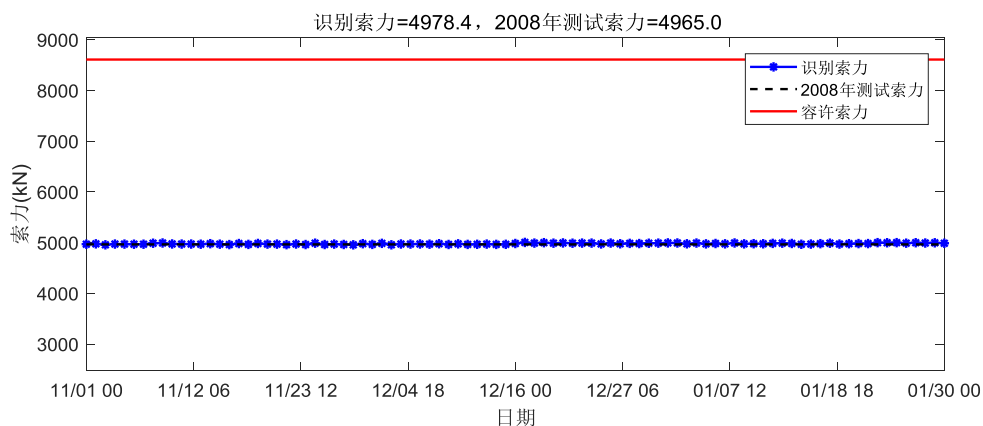
索力圖 20-ACC-W-C05-004



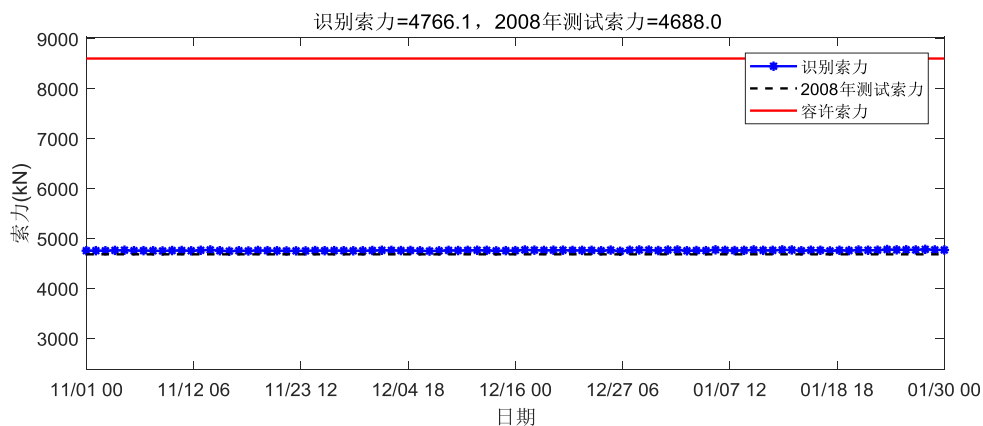
索力圖 21-ACC-W-C05-005



索力圖 22-ACC-W-C05-006

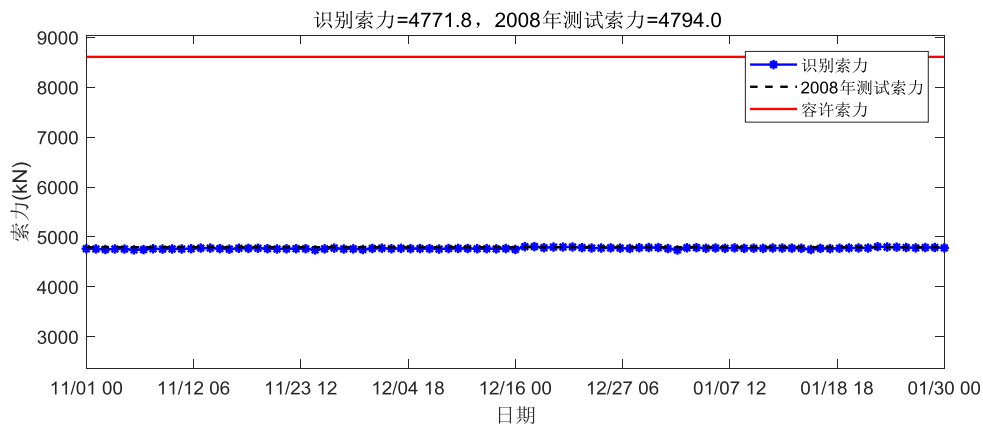


索力圖 23-ACC-W-C04-001

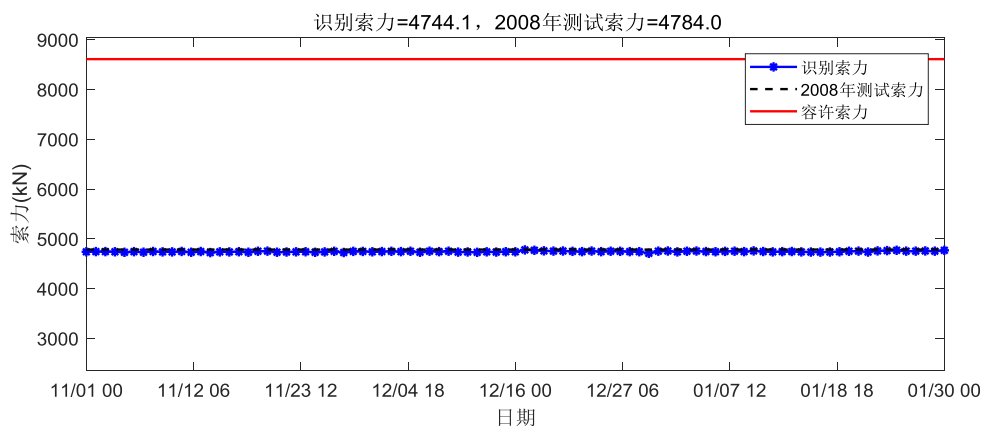


索力圖 24-ACC-W-C04-002

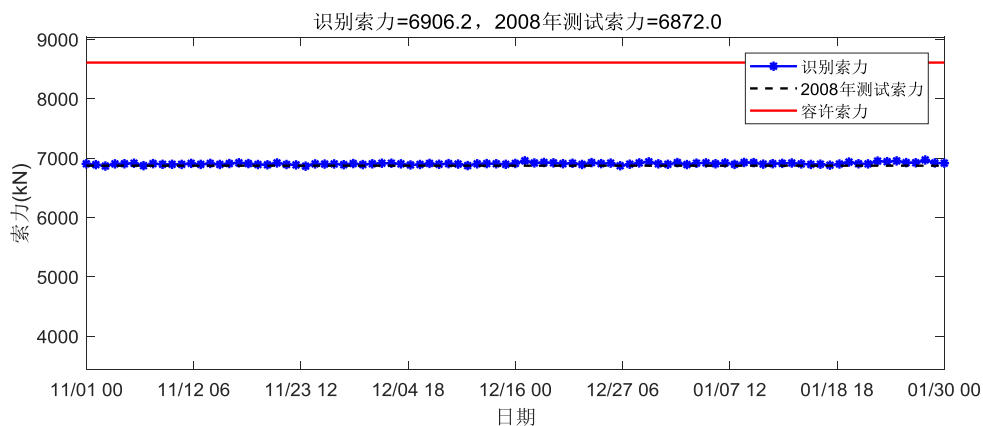




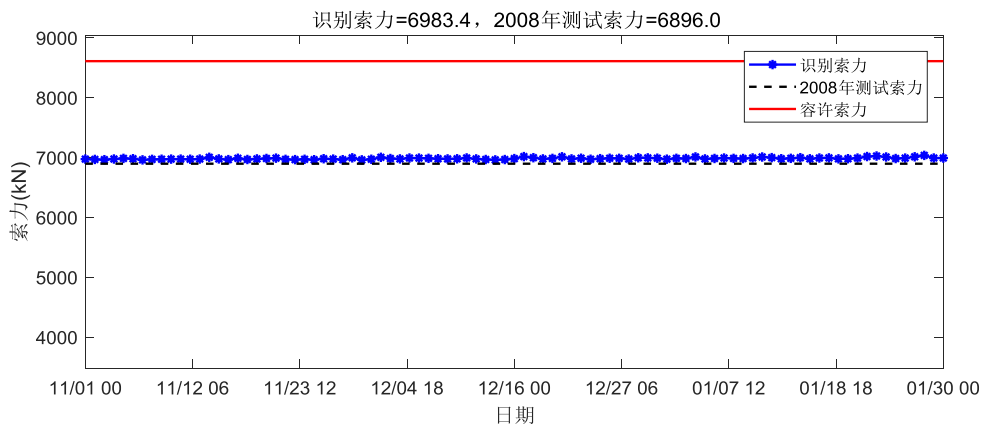
索力圖 25-ACC-W-C04-003



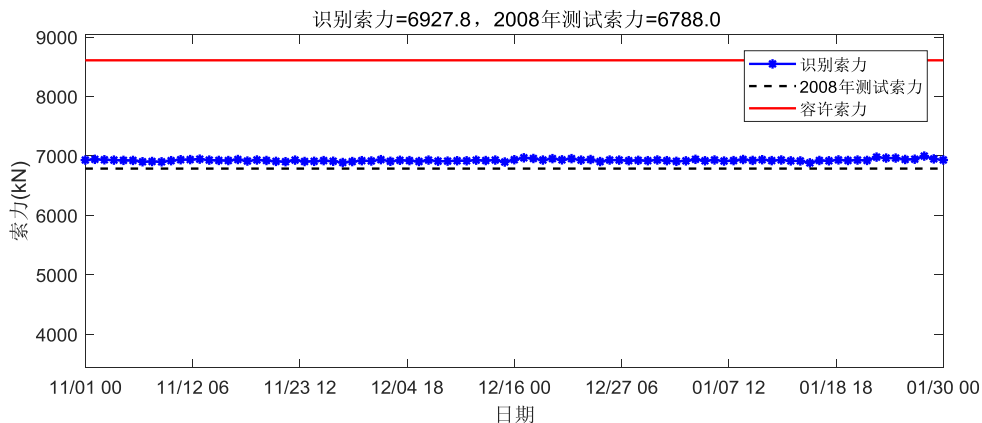
索力圖 26-ACC-W-C04-004



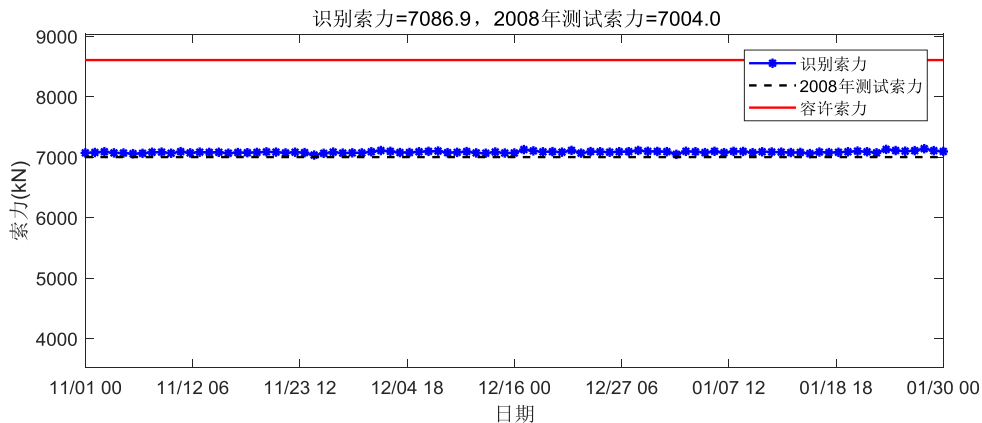
索力圖 27-ACC-W-C06-001



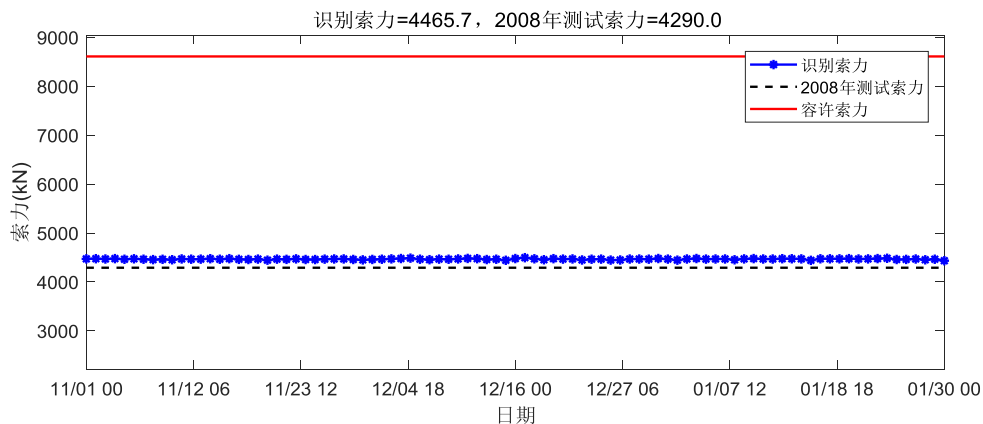
索力圖 28-ACC-W-C06-002



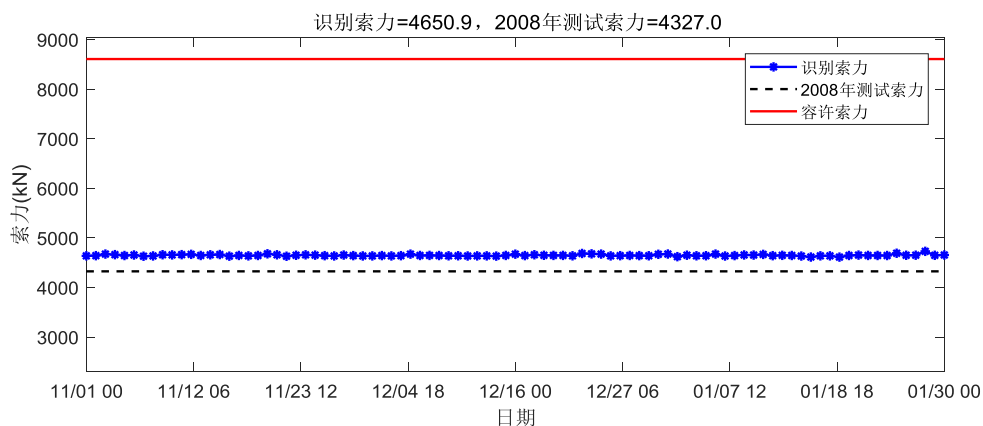
索力圖 29-ACC-W-C06-003



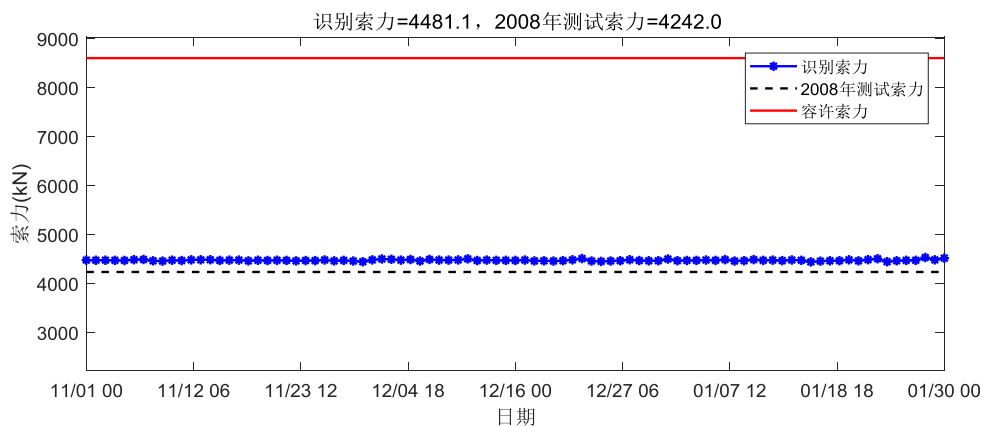
索力圖 30-ACC-W-C06-004



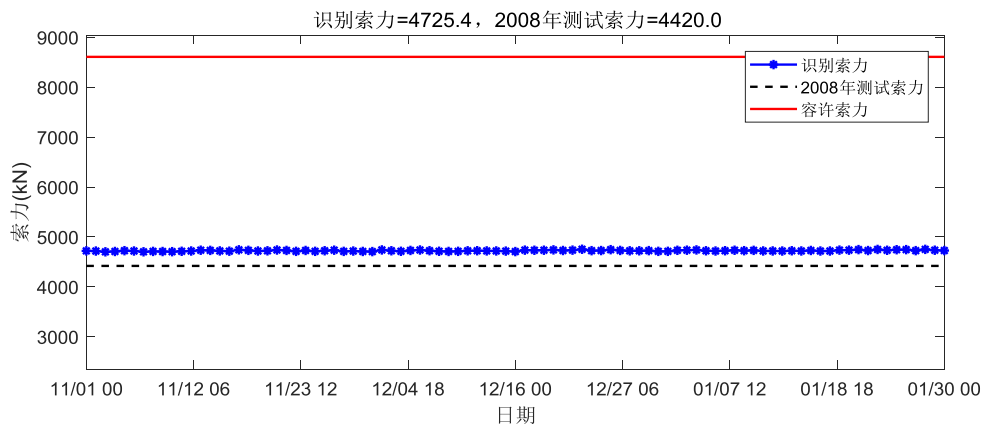
索力圖 31-ACC-W-C07-001



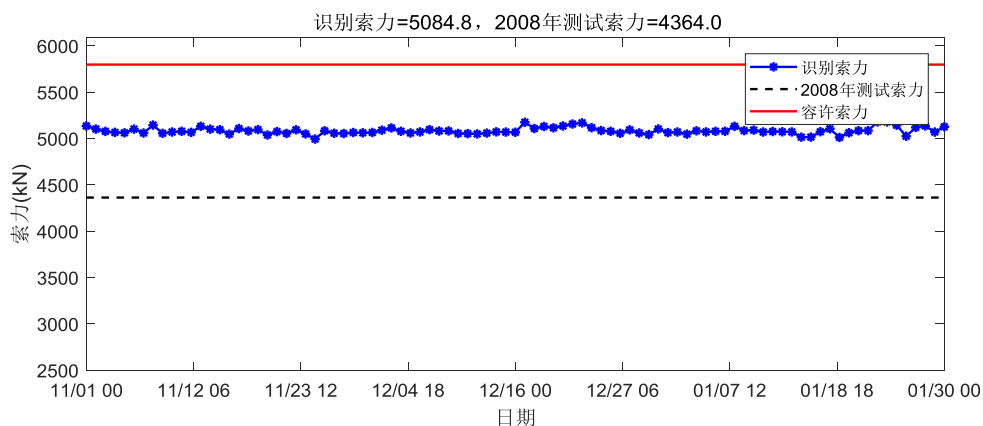
索力圖 32-ACC-W-C07-002



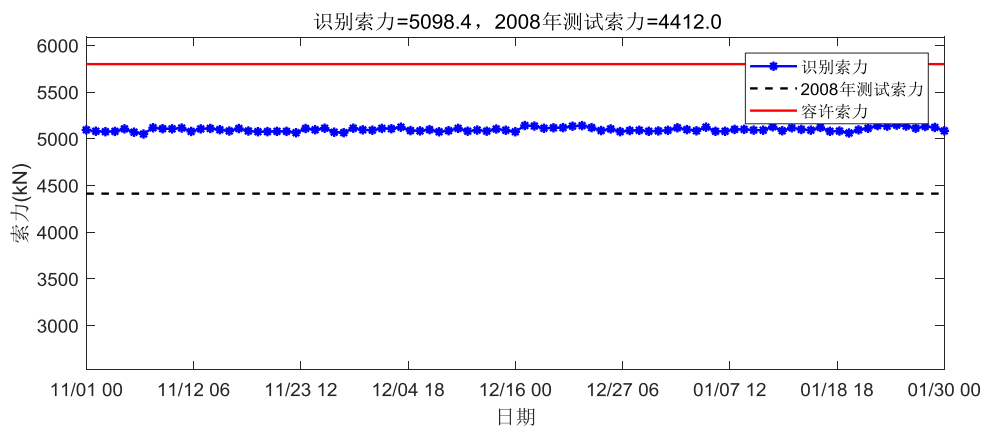
索力圖 33-ACC-W-C07-003



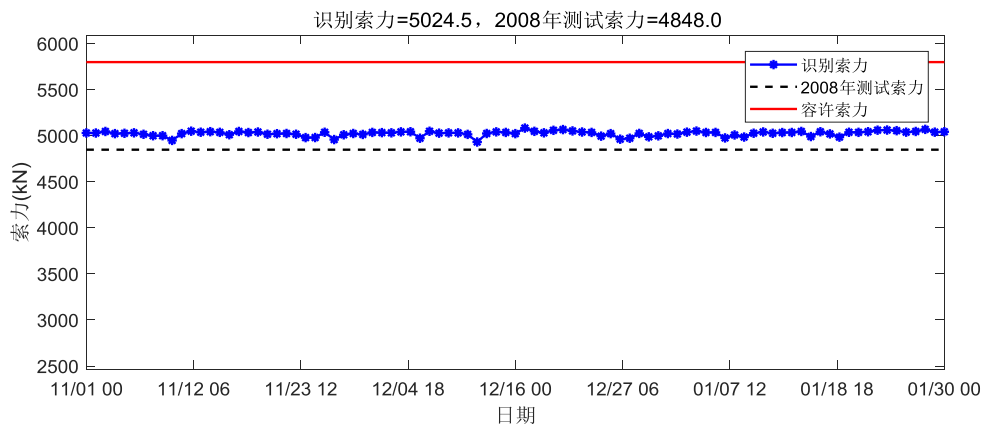
索力圖 34-ACC-W-C07-004



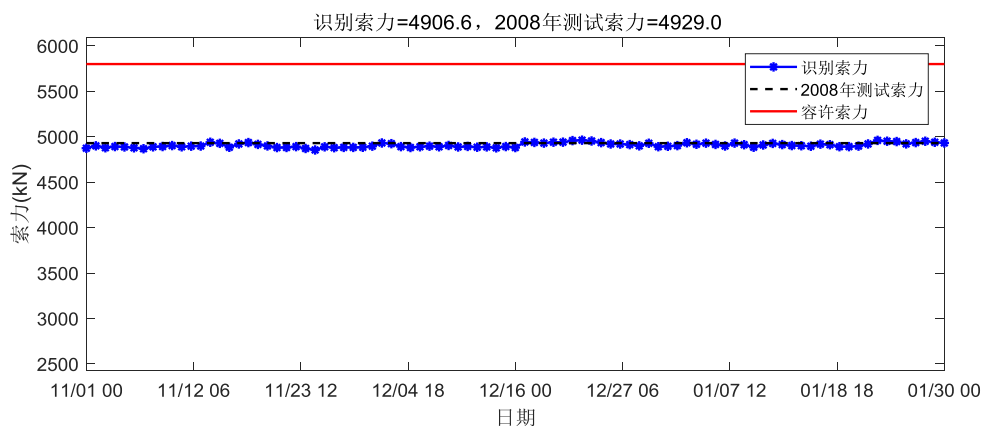
索力圖 35-ACC-W-C08-001



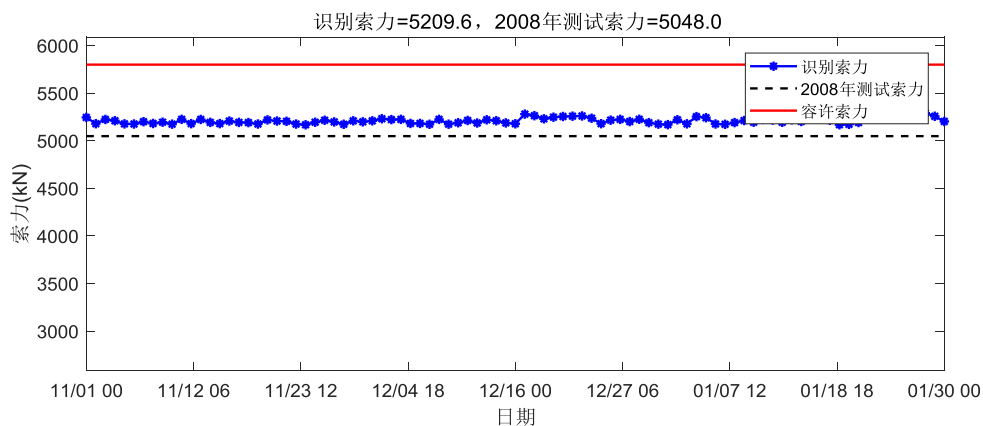
索力圖 36-ACC-W-C08-002



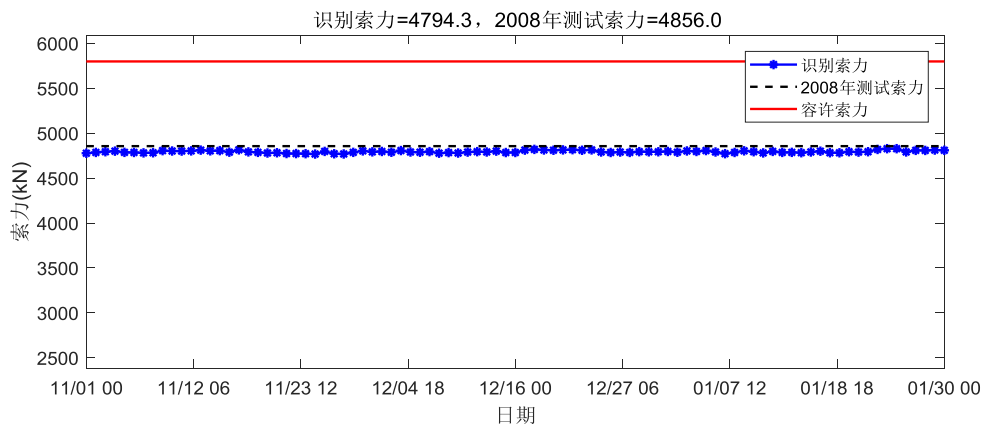
索力圖 37-ACC-W-C08-003



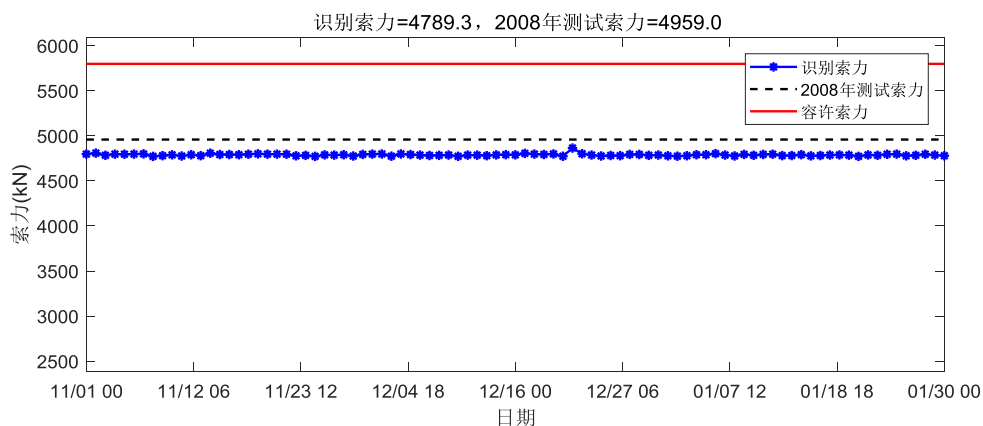
索力圖 38-ACC-W-C08-004



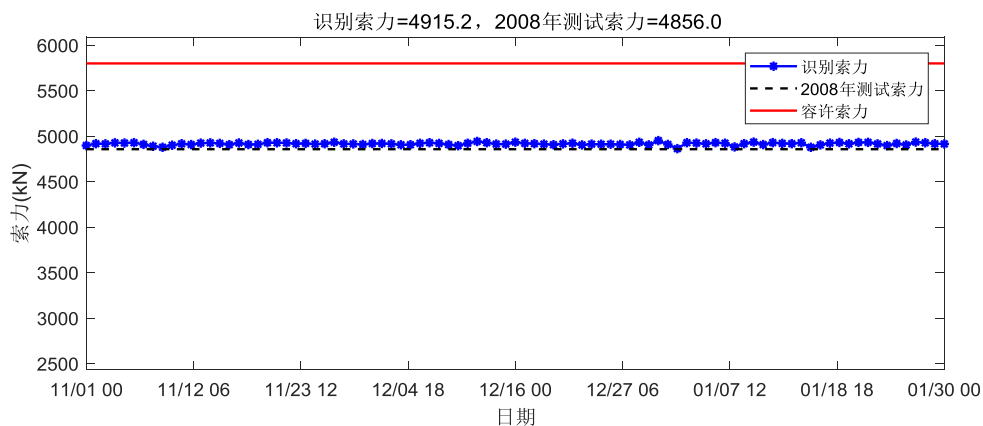
索力圖 39-ACC-W-C08-005



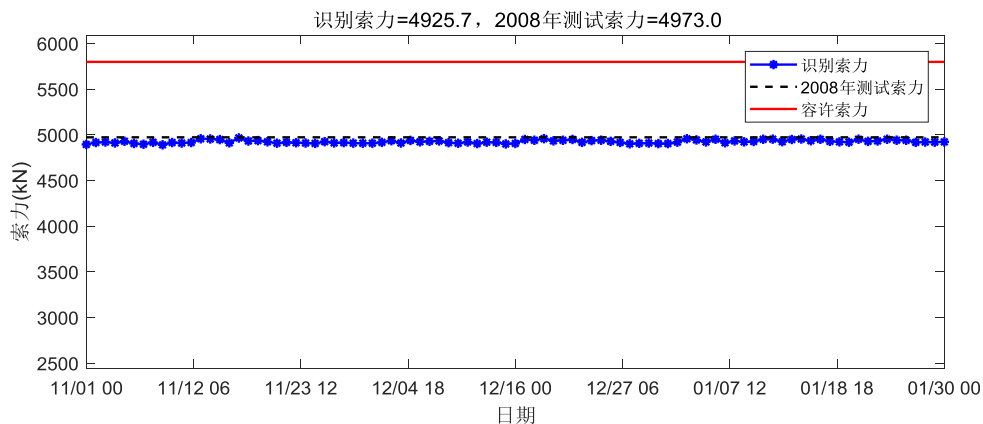
索力圖 40-ACC-W-C08-006



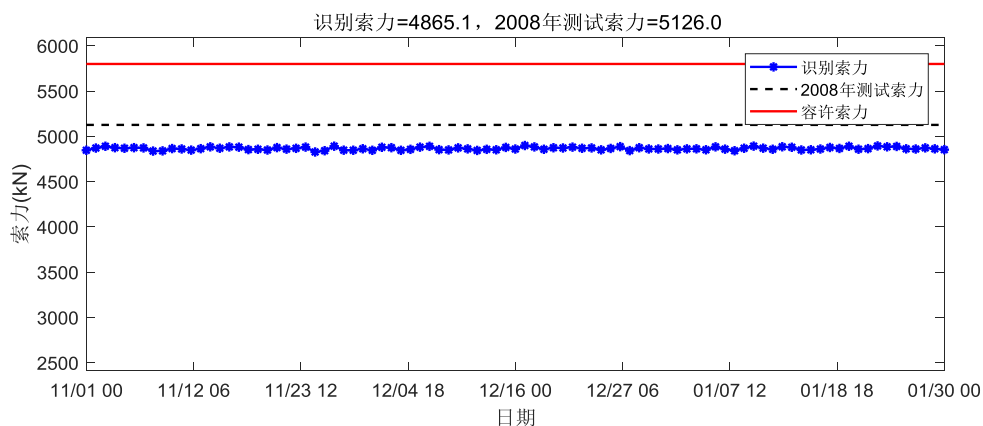
索力圖 41-ACC-N-C01-001



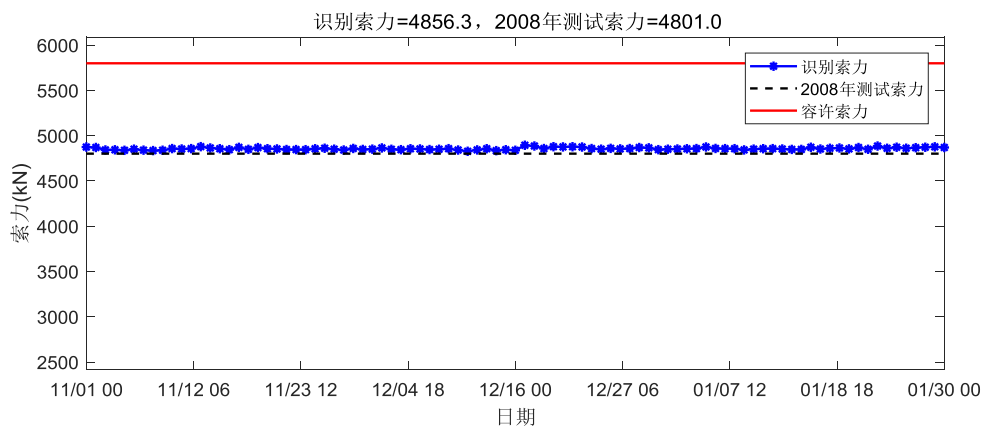
索力圖 42-ACC-N-C01-002



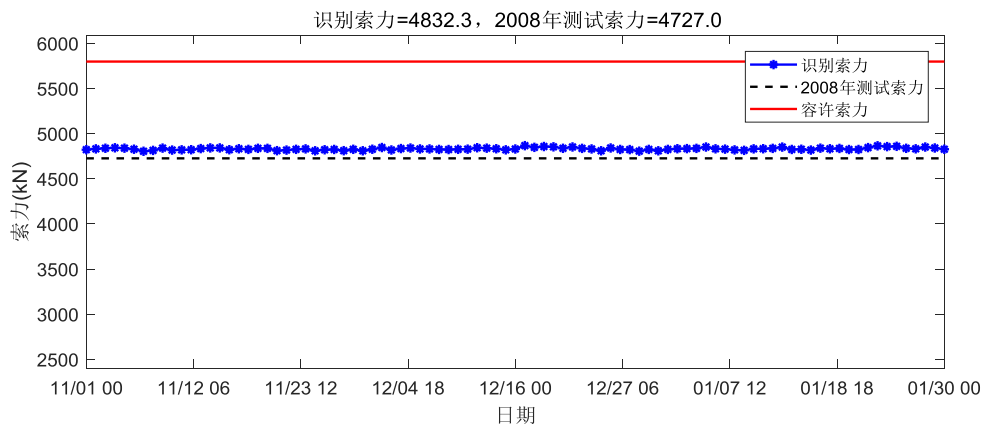
索力圖 43-ACC-N-C01-003



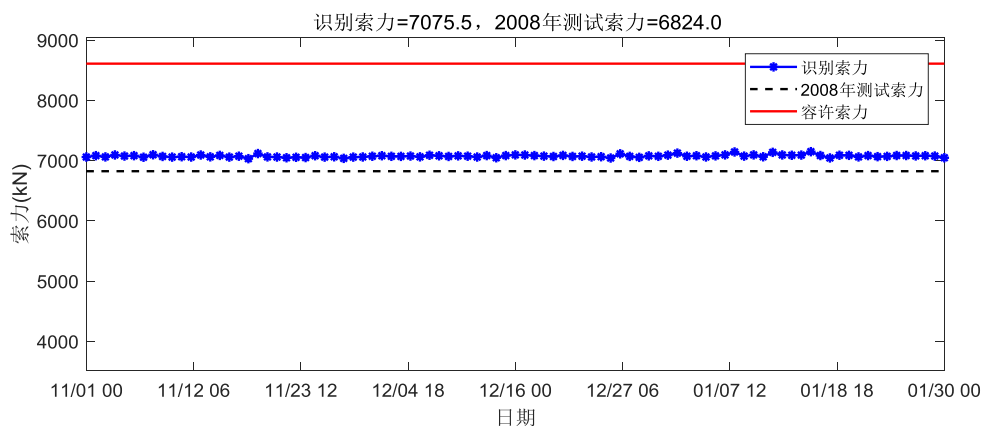
索力圖 44-ACC-N-C01-004



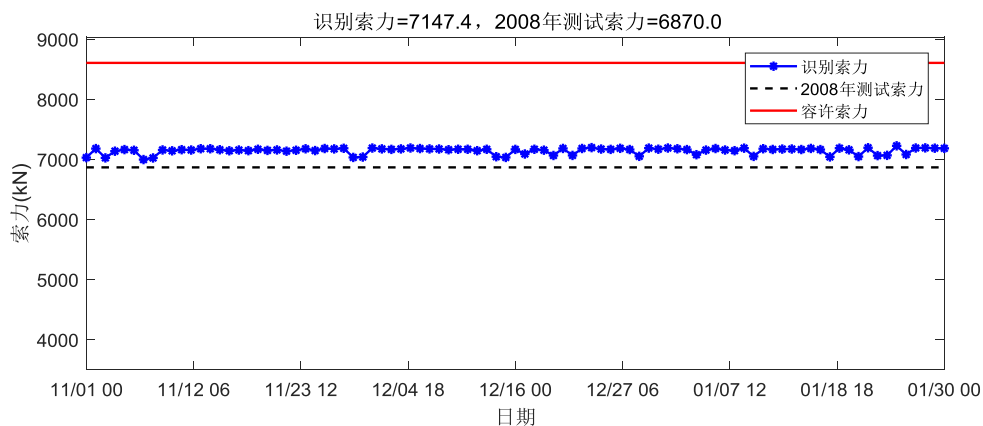
索力圖 45-ACC-N-C01-005



索力圖 46-ACC-N-C01-006

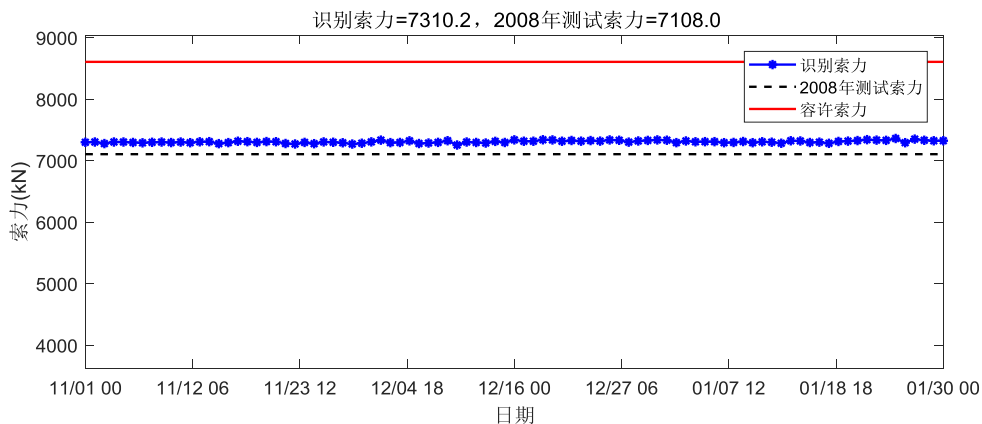


索力圖 47-ACC-N-C02-001

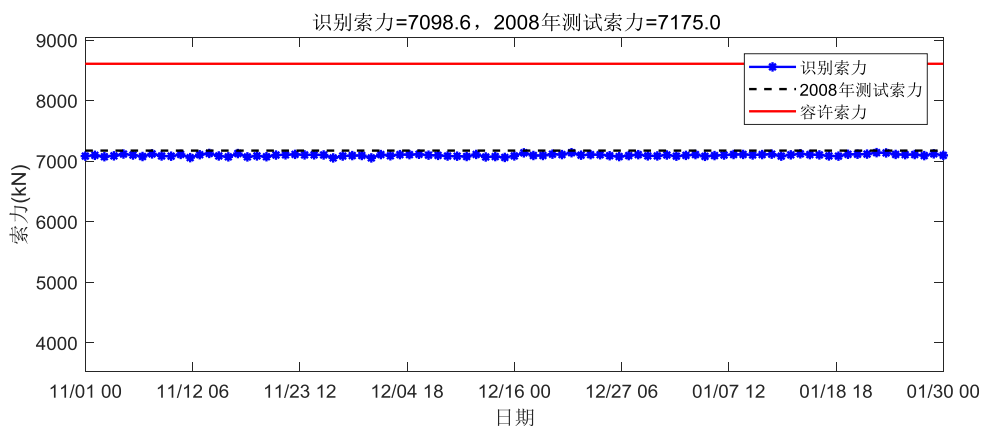


索力圖 48-ACC-N-C02-002

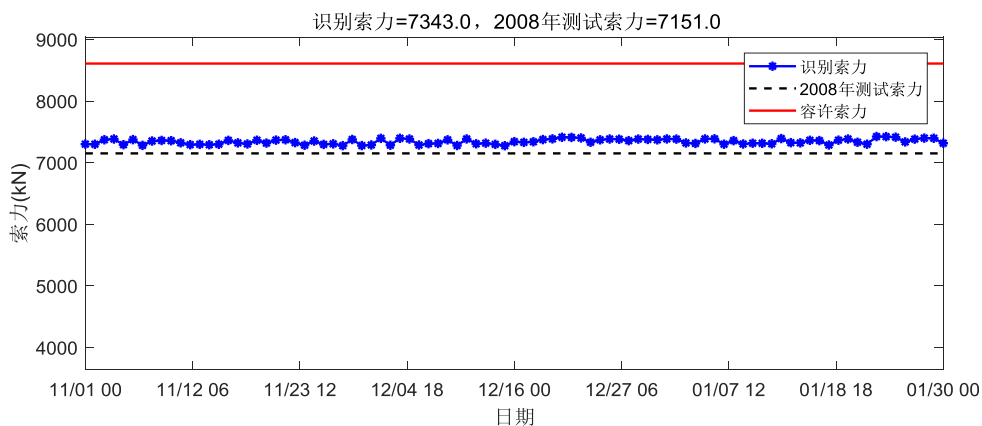




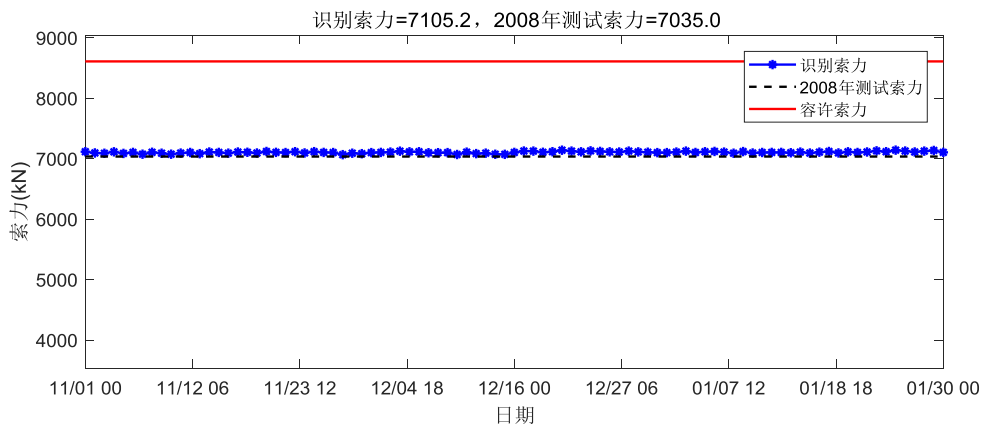
索力圖 49-ACC-N-C02-003



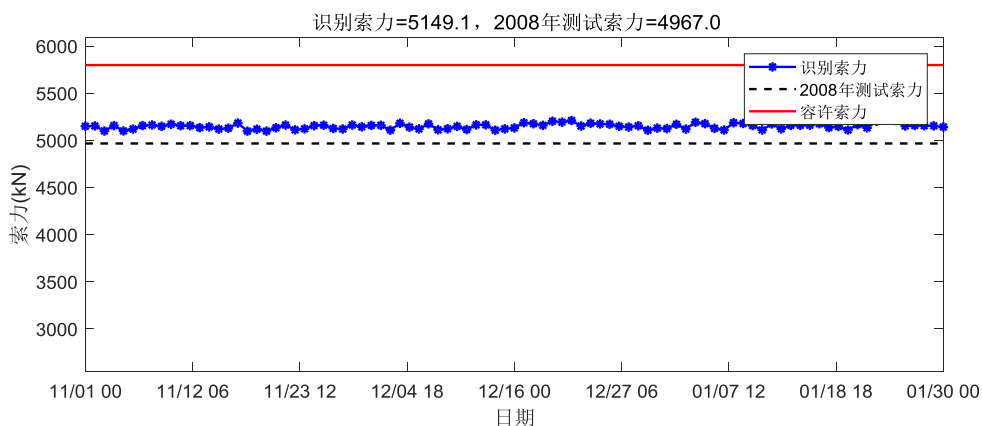
索力圖 50-ACC-N-C02-004



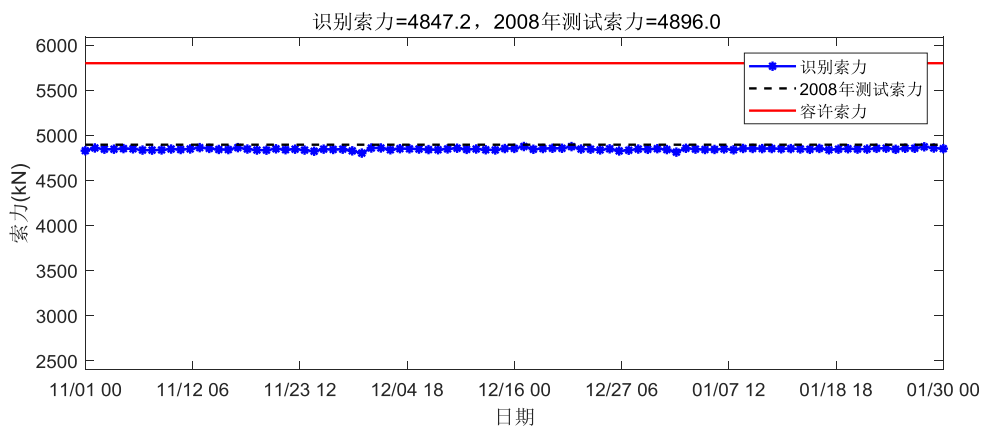
索力圖 51-ACC-N-C03-001



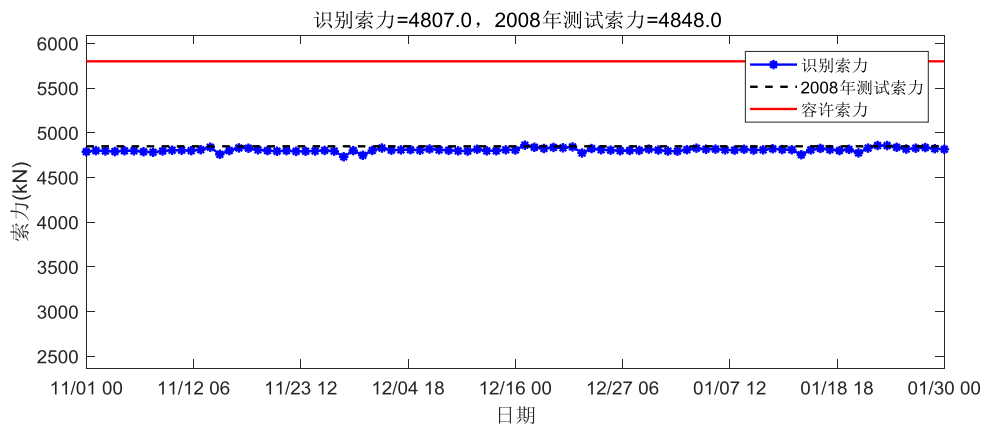
索力圖 52-ACC-N-C03-002



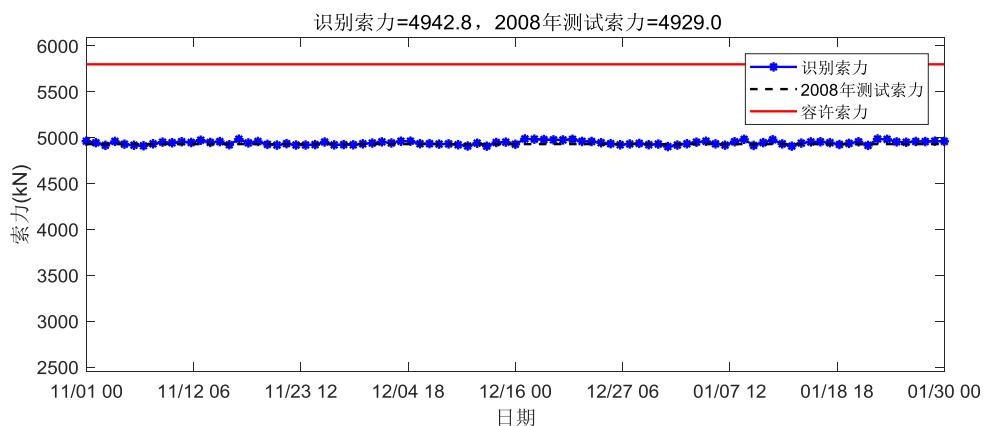
索力圖 55-ACC-N-C04-001



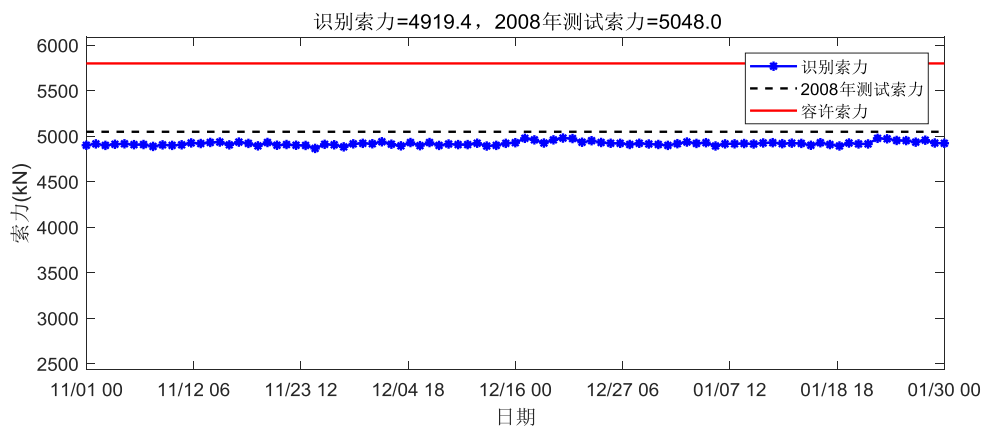
索力圖 56-ACC-N-C04-002



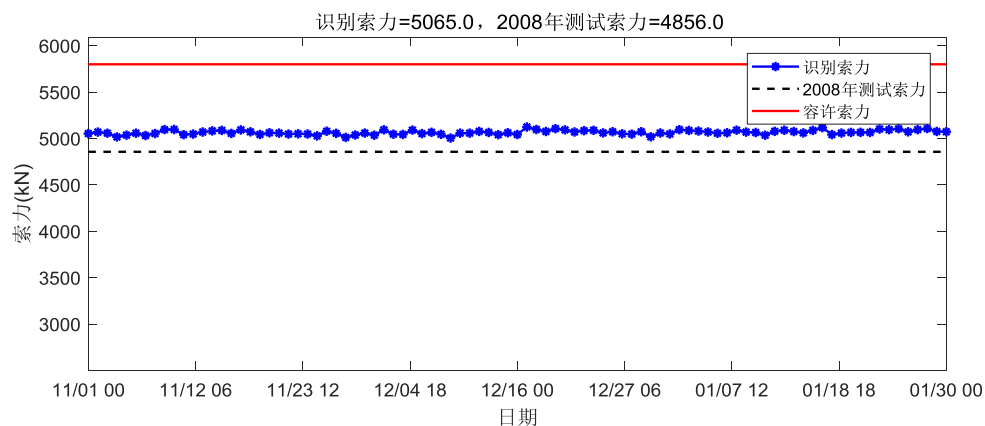
索力圖 57-ACC-N-C04-003



索力圖 58-ACC-N-C04-004



索力圖 59-ACC-N-C04-005



索力圖 60-ACC-N-C04-006

圖 1.1.3-3 索力時程圖

由上文分析可得：實測在 2023 年 11 月--2024 年 1 月期間，大橋整體上拉索索力分佈規律和大小處於穩定狀態，與 2008 年測試索力相比變化很小，2023 年 11 月--2024 年 1 月最大索力對應的安全係數在 2.74~4.79 之間，均大於 2.5 限值。後續運營過程中將繼續進行監測，關注索力發展趨勢和變化規律。

## 1.1.4 動力特性分析

### 1.1.4.1 外主橋模態識別結果

分析採用澳門友誼大橋結構健康監測系統監測到的外主橋 2023/11/10 01:00~02:00 時長 1 小時的主樑振動數據，測點佈設如圖 1.1.3-2 所示。

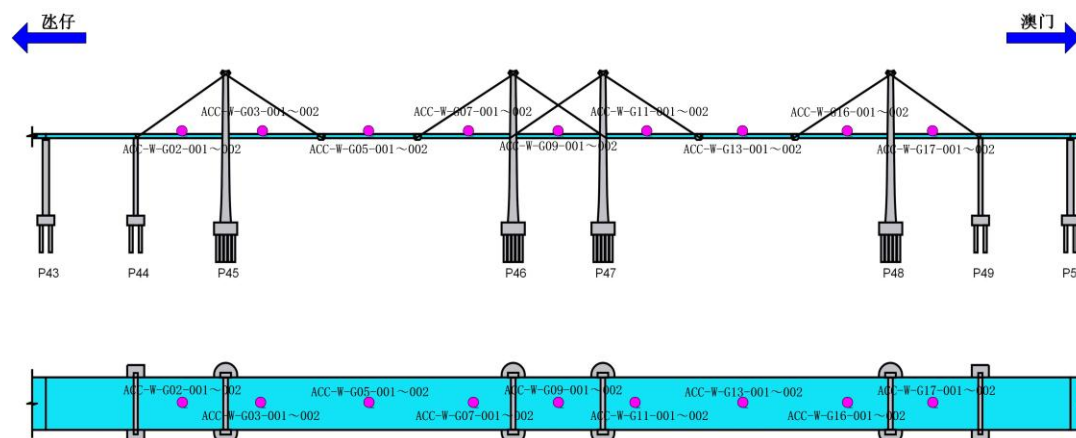


圖 1.1.4-1 外主橋加速度計佈置圖

首先根據測點佈設建立外主橋模態分析模型如下：

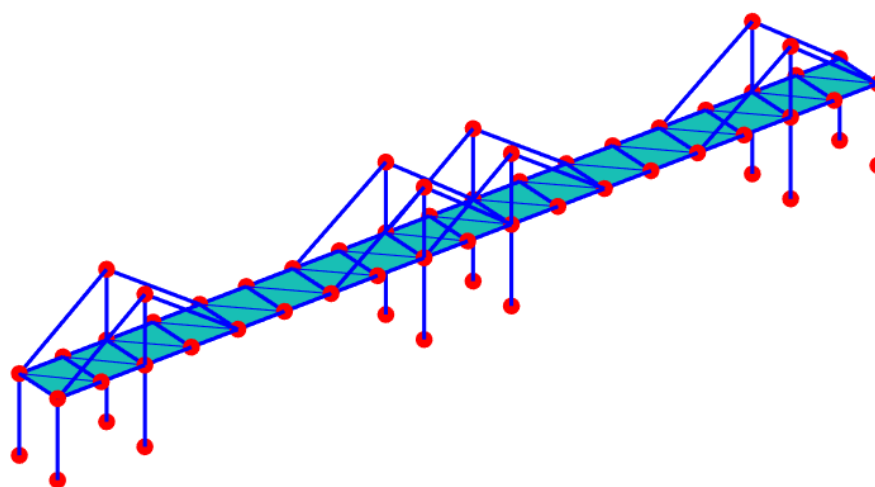


圖 1.1.4-2 外主橋模態識別模型

模態分析方法採用頻域分解法（FFD），模態頻率峰值拾取如下圖所示：

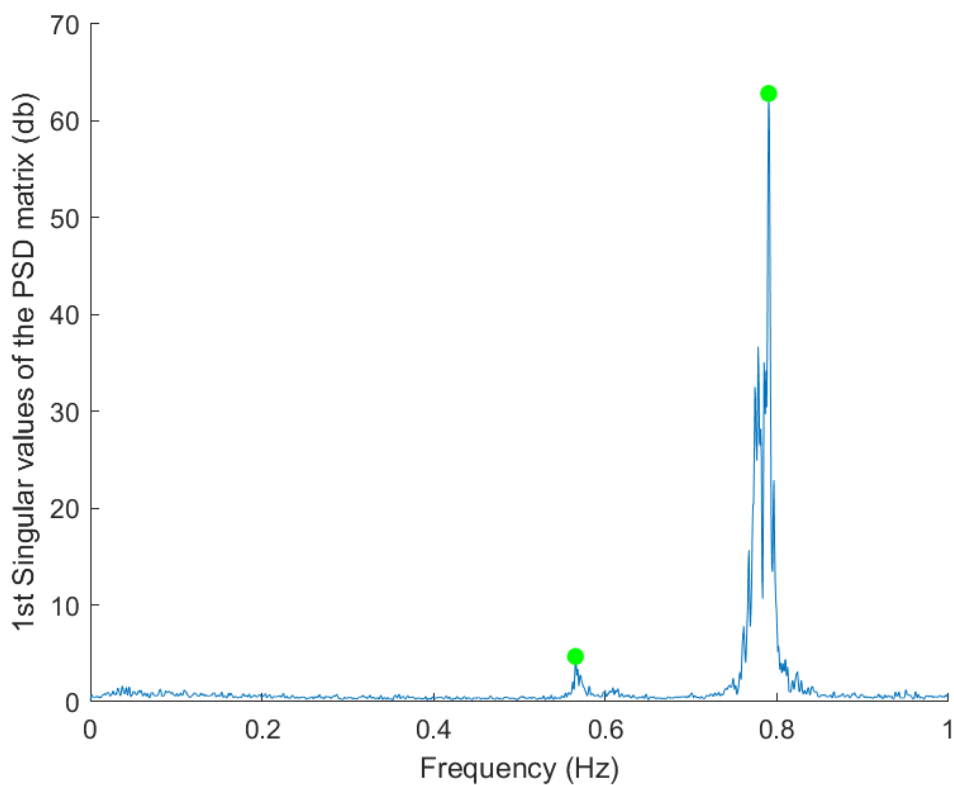


圖 1.1.4-3 外主橋模態頻率峰值拾取

實測振型和頻率詳見下表。

表 1.1.4-1 外主橋動力特性監測結果

階次	2023 年 11 月-2024 年 1 月實測模態頻率 (Hz)	2023 年 8 月-10 月實測模態頻率 (Hz)	2023 年 5 月-7 月實測模態頻率 (Hz)	2023 年 2 月-4 月實測模態頻率 (Hz)	2017-2018 年實測模態頻率 (Hz)
1	0.5669	0.5670	0.5716	0.5723	0.5547
2	0.7903	0.7857	0.7864	0.7924	0.7668

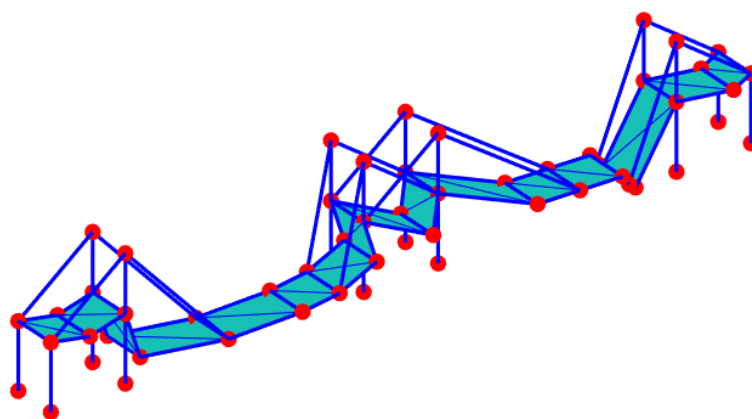


圖 1.1.4-4 第一階振型

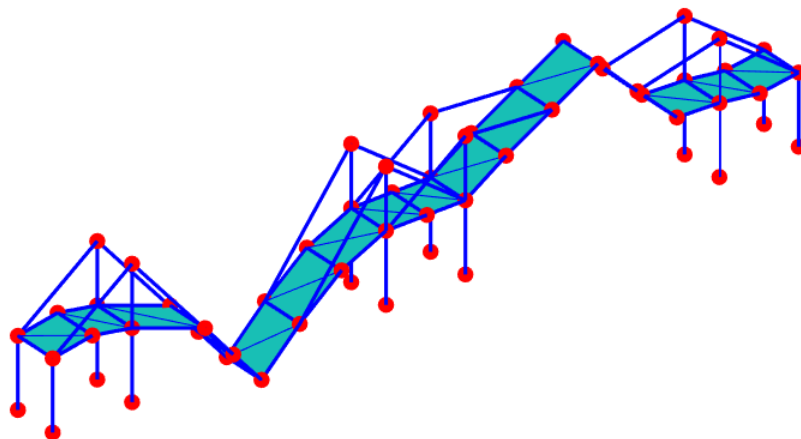


圖 1.1.4-5 第二階振型

### 1.1.4.2 內主橋模態識別結果

分析採用澳門友誼大橋結構健康監測系統監測到的內主橋 2023/11/10 01:00~02:00 時長 1 小時的主樑振動數據，測點佈設如圖所示。

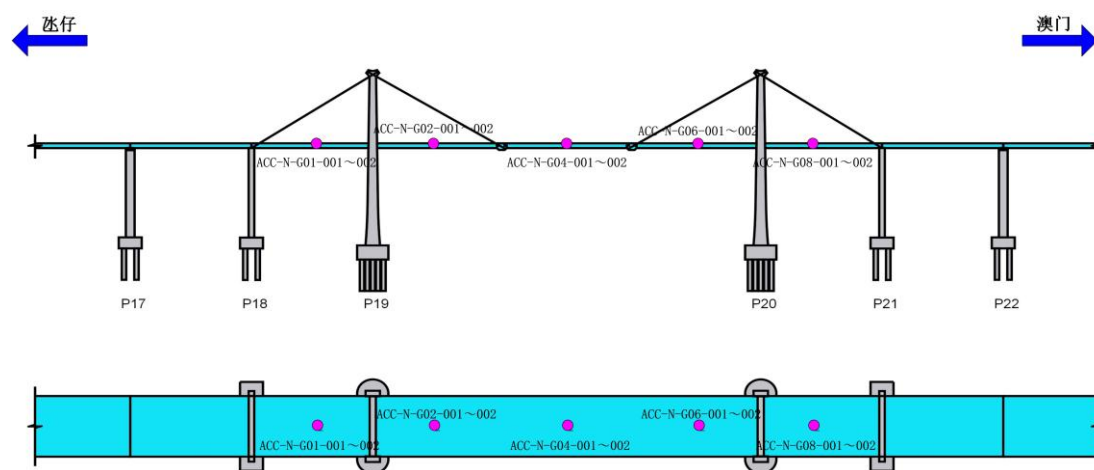


圖 1.1.4-6 內主橋加速度計佈置圖

根據測點佈設建立內主橋模態分析模型如下：

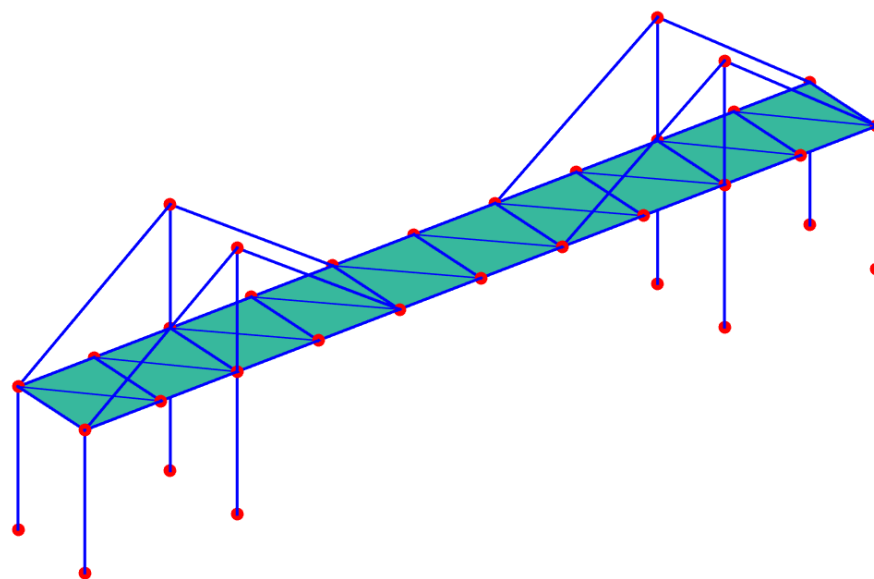


圖 1.1.4-7 內主橋模態識別模型

模態分析方法採用頻域分解法（FFD），模態頻率峰值拾取如圖所示：

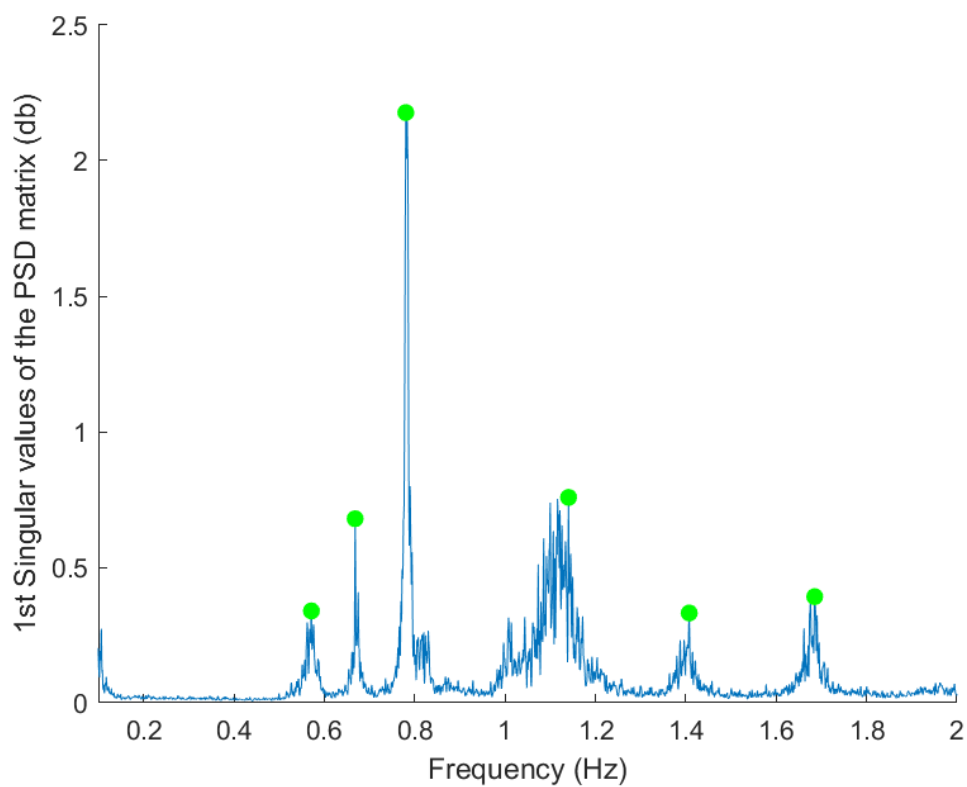


圖 1.1.4-8 內主橋模態頻率峰值拾取

實測頻率詳見下表。



表 1.1.4-2 內主橋動力特性監測結果

階次	2023年11月-2024年1月實測模態頻率 (Hz)	2023年8月-10月實測模態頻率 (Hz)	2023年5月-7月實測模態頻率 (Hz)	2023年2月-4月實測模態頻率 (Hz)	2017-2018年實測模態頻率 (Hz)
1	0.5702	0.5715	0.5731	0.5800	0.511
2	0.6697	0.6715	0.6703	0.6756	0.617
3	0.7822	0.7791	0.7800	0.7857	0.768
4	1.1170	1.1033	1.1177	1.1269	1.035
5	1.4069	1.3885	1.3897	1.4080	1.387
6	1.6817	1.6703	1.6777	1.6889	1.637

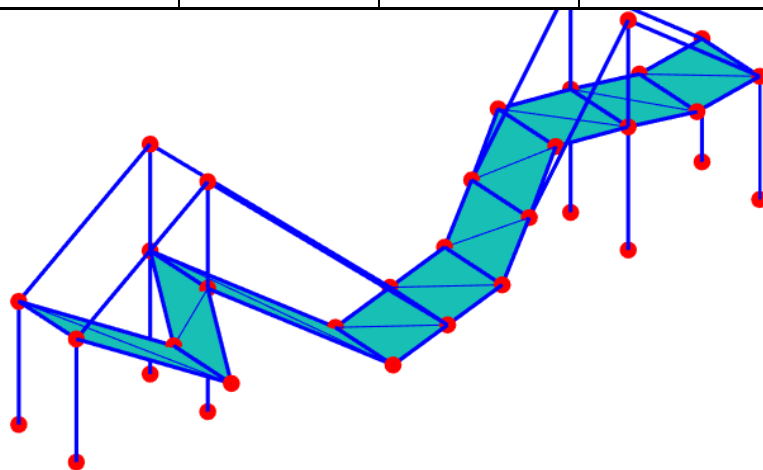


圖 1.1.4-9 第一階振型

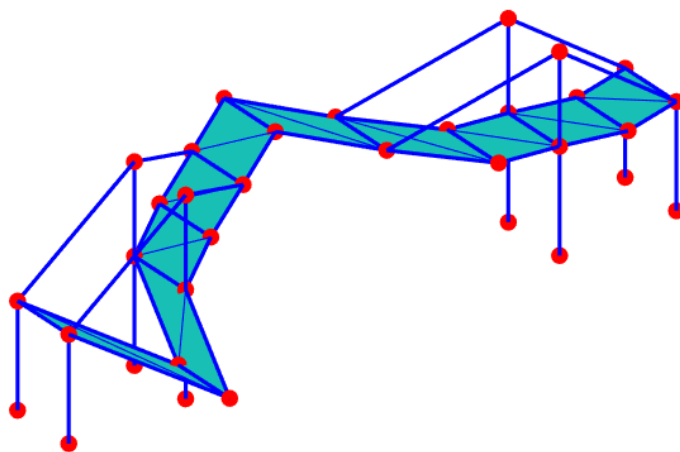


圖 1.1.4-10 第二階振型

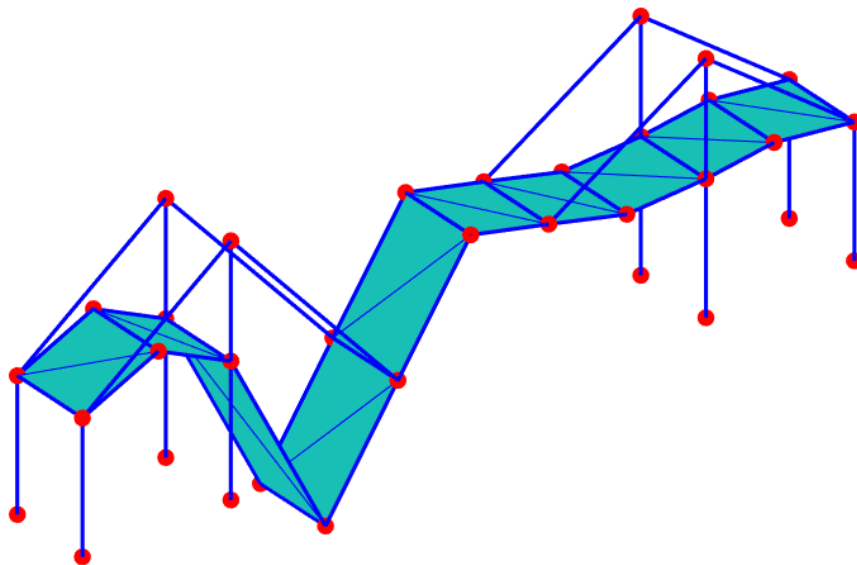


圖 1.1.4-11 第三階振型

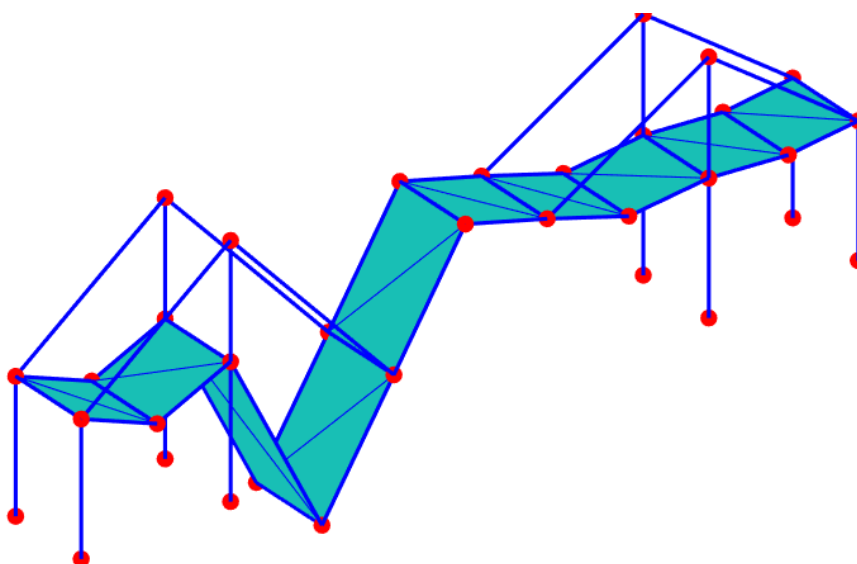


圖 1.1.4-12 第四階振型

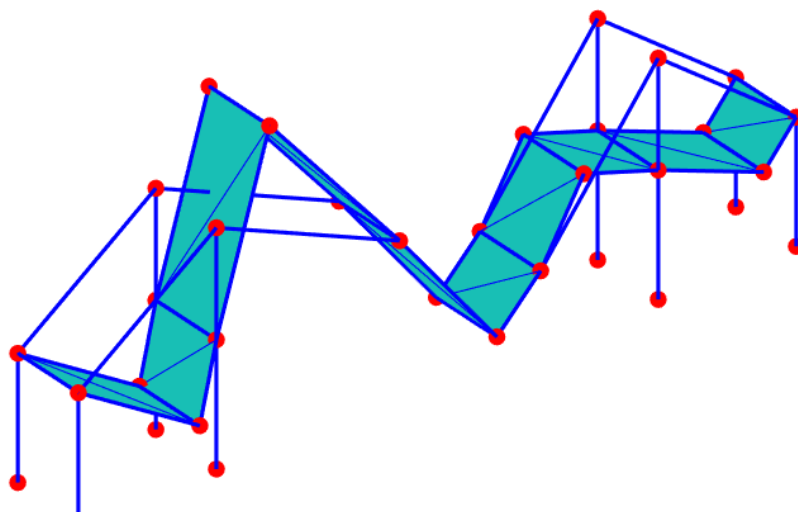


圖 1.1.4-13 第五階振型

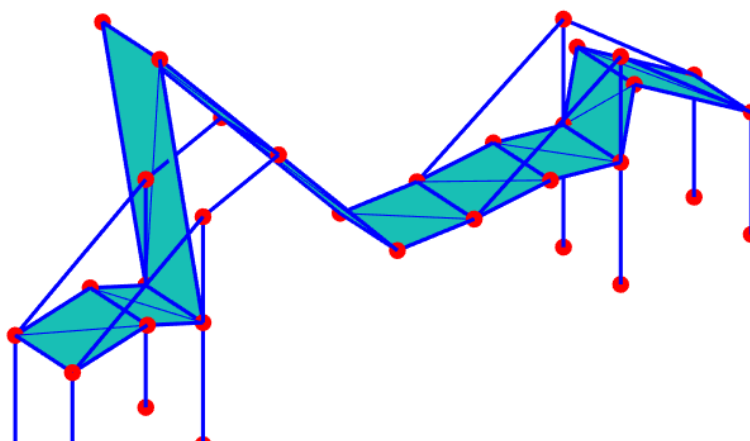


圖 1.1.4-14 第六階振型

### 1.1.4.3 高架連續梁橋模態識別結果

分析採用澳門友誼大橋結構健康監測系統監測到的連續梁橋 2023/11/15 10:00~11:00 時長 1 小時的主樑振動數據，測點佈設如圖所示。

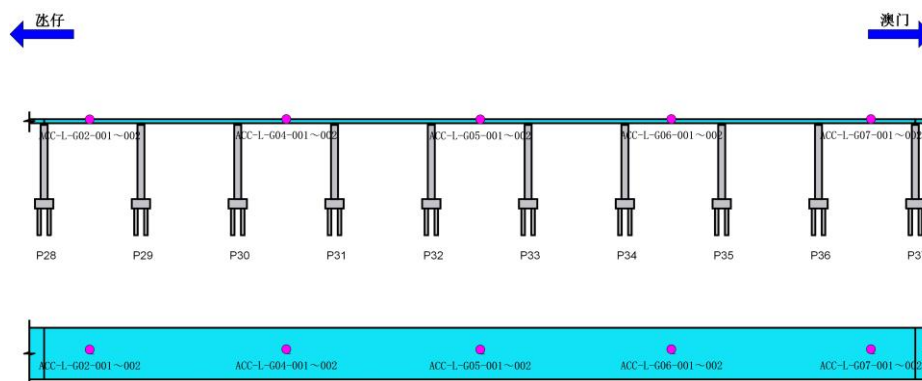


圖 1.1.4-15 高架連續梁振動監測點佈置圖

分析採用澳門友誼大橋結構健康監測系統監測到的主樑振動數據。首先根據測點佈設建立高架連續梁橋模態識別模型如下：

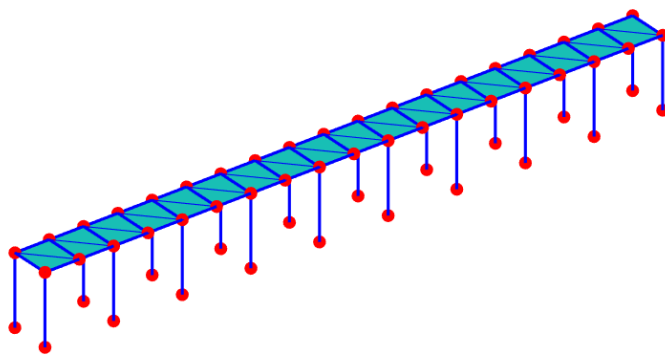


圖 1.1.4-16 高架連續梁模態識別模型

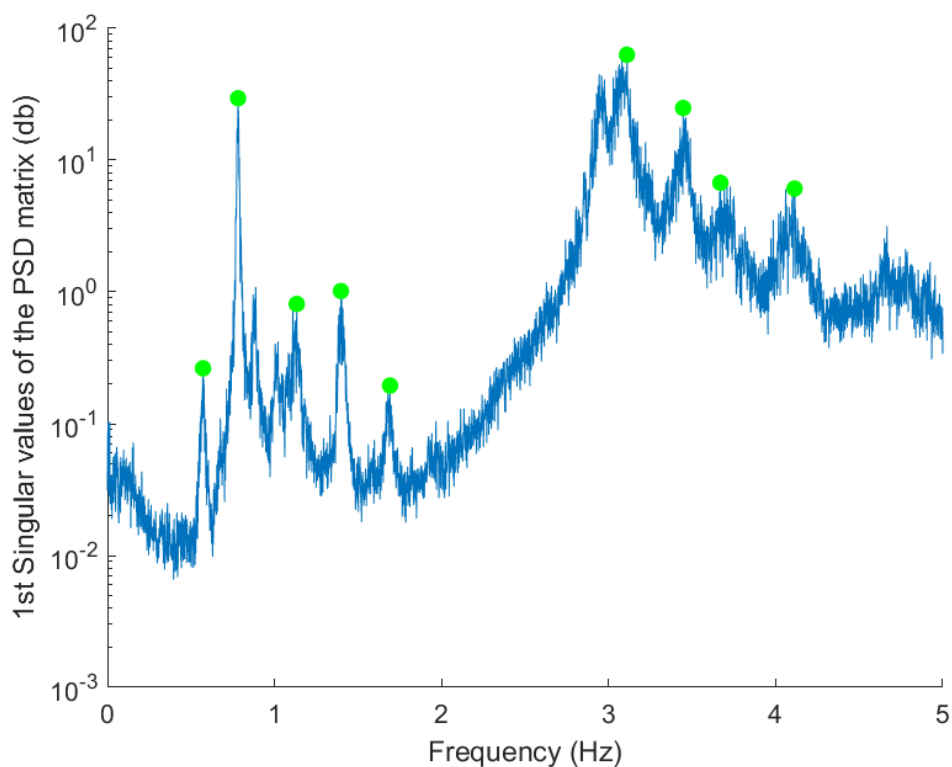


圖 1.1.4-17 連續梁模態頻率峰值拾取

實測振型和頻率詳見下表。

表 1.1.4-3 連續梁動力特性監測結果

階次	2023 年 11 月-2024 年 1 月實測模態頻率 (Hz)	2023 年 8 月-10 月實測模態頻率 (Hz)	2023 年 5 月-7 月實測模態頻率 (Hz)	2023 年 2 月-4 月實測模態頻率 (Hz)	2017-2018 年實測模態頻率 (Hz)
	0.5720	0.5700	0.5716	0.5565	-
1	0.7820	0.7793	0.7808	0.7785	-
2	1.1247	1.1119	1.1025	1.0947	-
3	1.3985	1.3899	1.3965	1.4042	-
	1.6916	1.6692	1.6838	1.6794	-
4	2.9503	2.9503	2.9240	3.0702	3.046
6	3.0844	3.4254	3.4557	3.4291	3.357
7	3.6706	3.9696	3.7300	3.6785	3.637
8	4.1096	4.0986	3.9544	4.0506	3.981

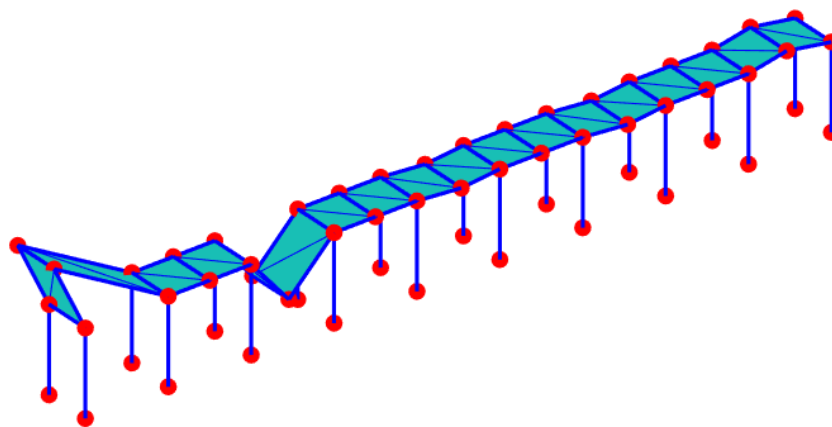


圖 1.1.4-18 連續梁第 3 階模態

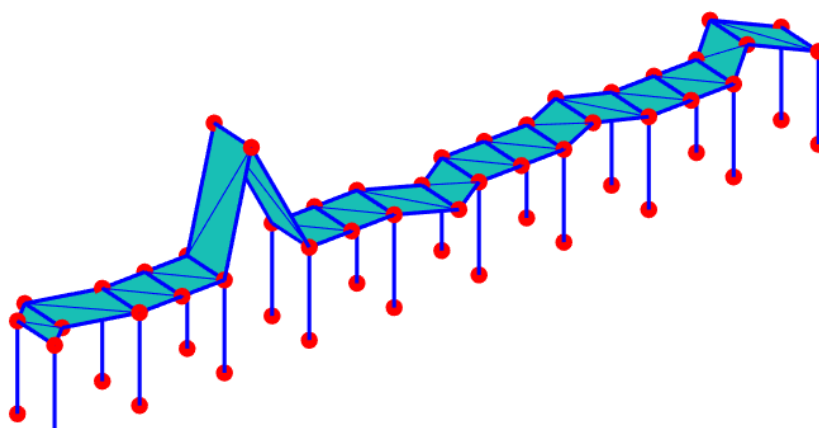


圖 1.1.4-19 連續梁第 4 階模態

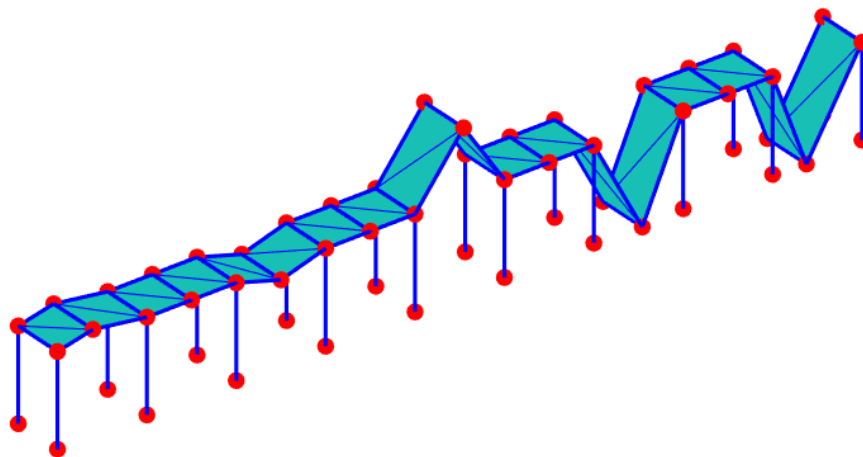


圖 1.1.4-20 連續梁第 6 階模態

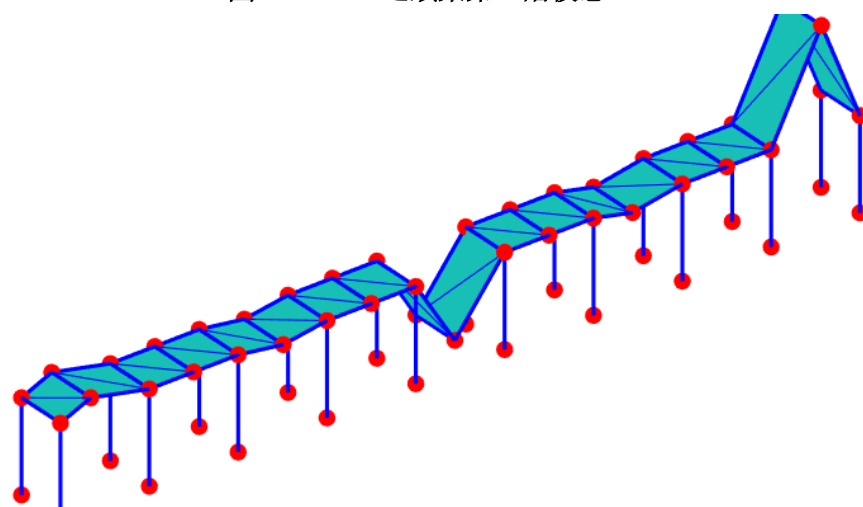


圖 1.1.4-21 連續梁第 7 階模態

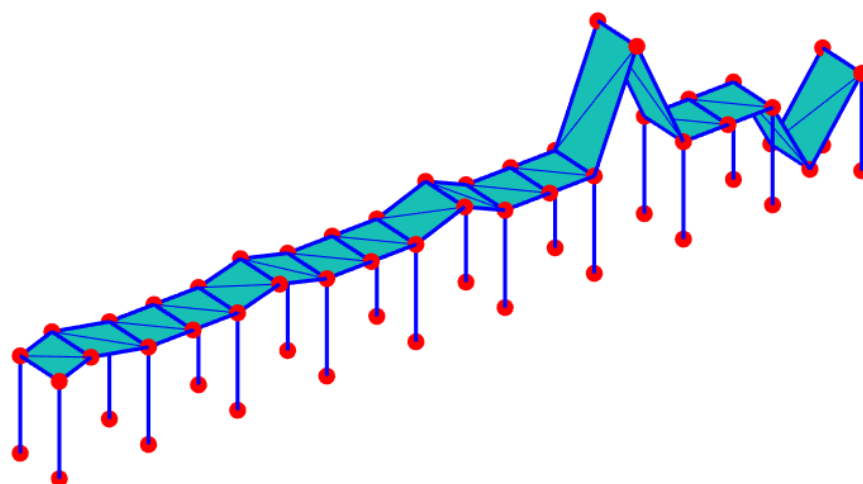


圖 1.1.4-22 連續梁第 8 階模態

與試運行階段相比，模態頻率差異很小，可以認為是演算法誤差。因此，可以判定友誼橋動力特性、邊界條件未發生明顯改變。

## 1.2 環境類數據分析

環境監測類主要包括風荷載、環境溫濕度與結構溫度等監測項。

### 1.2.1 風速

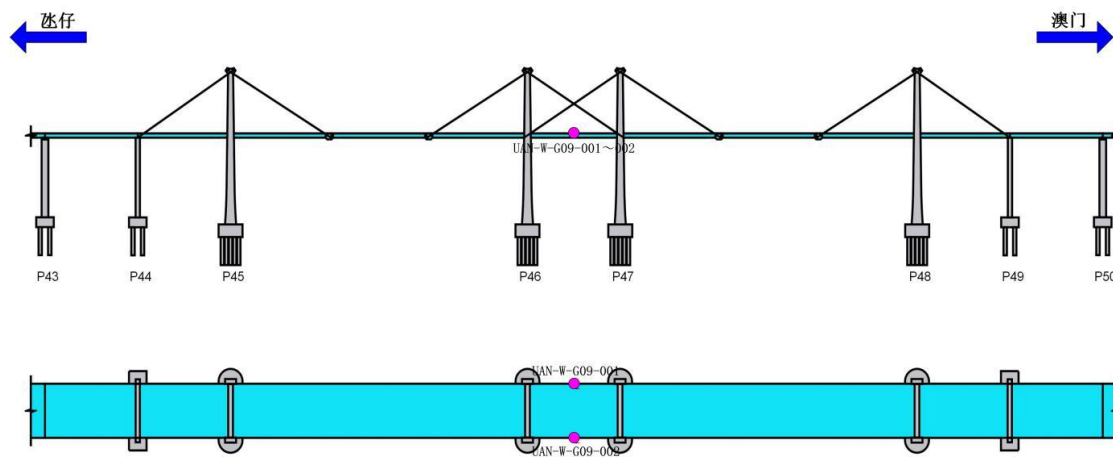
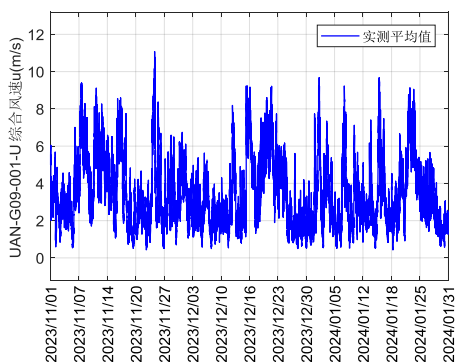


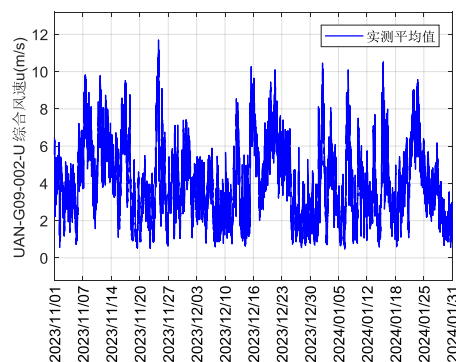
圖 1.2.1-1 外主橋索塔風速儀感測器位置

表 1.2.1-1 外主橋風速監測資訊一覽表

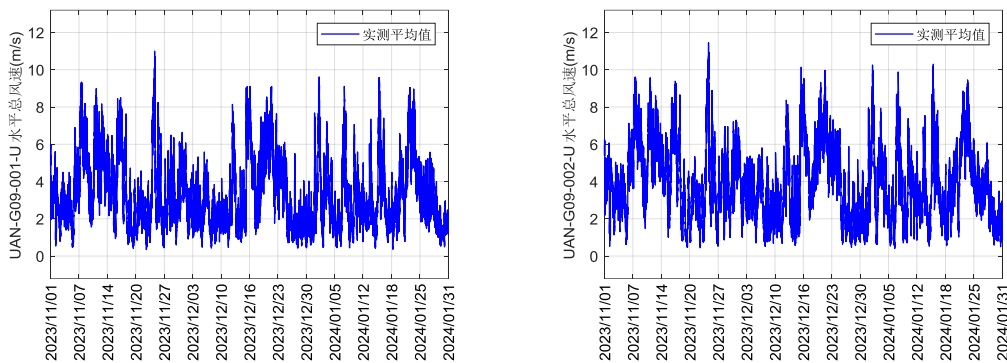
感測器編號	位置	監測項	數量
UAN-G09-001-U	外主橋 P46、P47 橋塔之間跨跨中截面西側	風速	1
UAN-G09-001-V	外主橋 P46、P47 橋塔之間跨跨中截面西側	風速	1
UAN-G09-001-W	外主橋 P46、P47 橋塔之間跨跨中截面西側	風速	1
UAN-G09-002-U	外主橋 P46、P47 橋塔之間跨跨中截面東側	風速	1
UAN-G09-002-V	外主橋 P46、P47 橋塔之間跨跨中截面東側	風速	1
UAN-G09-002-W	外主橋 P46、P47 橋塔之間跨跨中截面東側	風速	1



UAN-G09-001-U 綜合風速 u



UAN-G09-002-U 綜合風速 u



UAN-G09-001-U 水準總風速

UAN-G09-002-U 水準總風速

圖 1.2.1-2 外主橋風速風向時程統計曲線

表 1.2.1-2 外主橋橋面風荷載監測單元統計 (風速: m/s)

編號	最大值		最小值		變化量 /m/s	位置
	數值	時間	數值	時間		
UAN-G09-001-U 綜合風速 u	11.1	2023-11-25 02:00	0.4	2024-01-19 03:50	10.6	外主橋 P46、P47 橋塔之間跨跨中截面西側
UAN-G09-002-U 綜合風速 u	11.7	2023-11-25 02:00	0.5	2024-01-07 03:30	11.2	外主橋 P46、P47 橋塔之間跨跨中截面西側
UAN-G09-001-U 水準總風速	11.0	2023-11-25 02:00	0.3	2023-11-23 03:40	10.6	外主橋 P46、P47 橋塔之間跨跨中截面西側
UAN-G09-002-U 水準總風速	11.4	2023-11-25 02:00	0.4	2024-01-07 03:30	11.0	外主橋 P46、P47 橋塔之間跨跨中截面西側

## 1.2.2 環境溫濕度

### 1.2.2.1 溫度

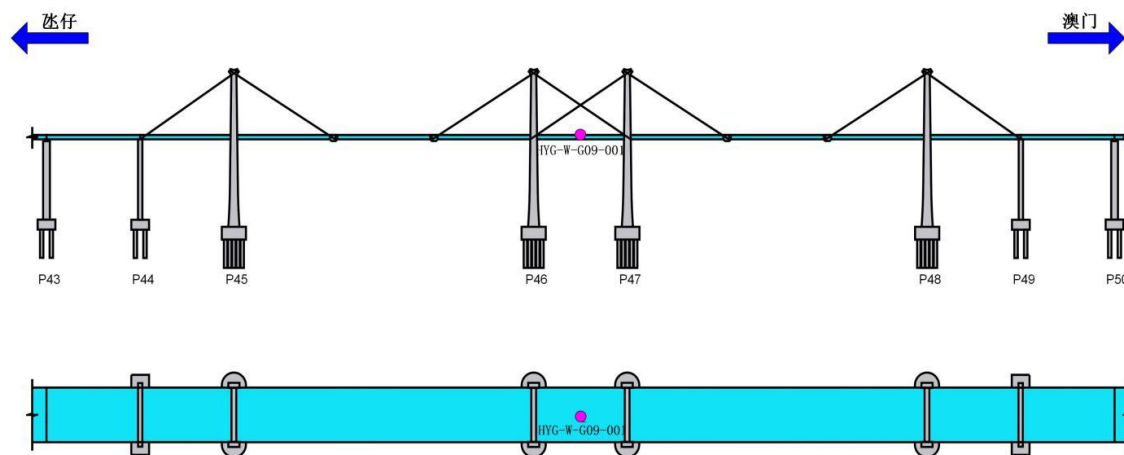


圖 1.2.2-1 外主橋橋面溫濕度佈置

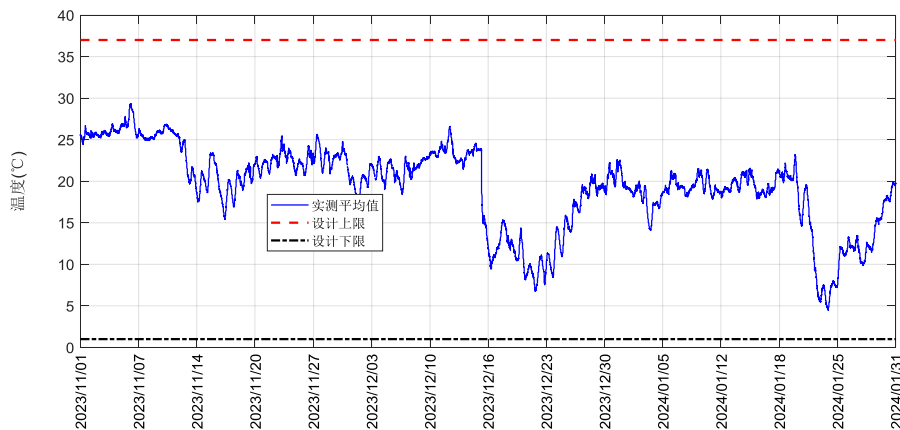


表 1.2.2-1 環境溫濕度監測點資訊一覽表

感測器編號	位置	監測項	數量
HYG-W-G09-001-濕度	P46、P47 墩間橋面跨中	濕度	1
HYG-W-G09-001-溫度	P46、P47 墩間橋面跨中	溫度	1

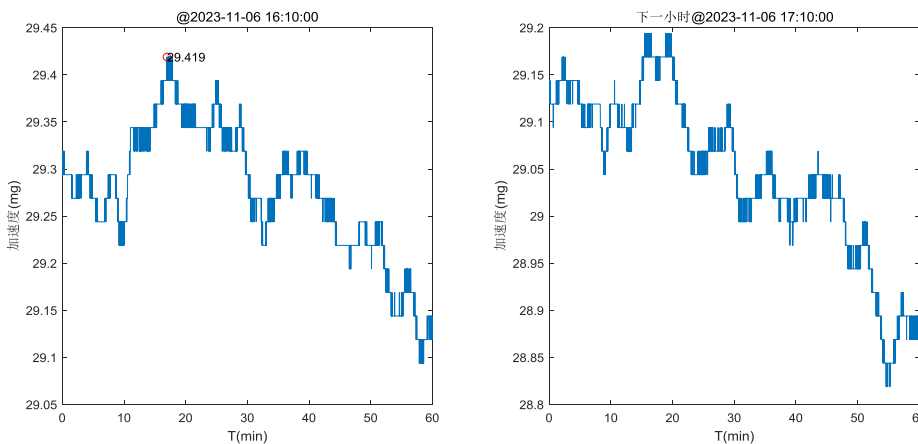
表 1.2.2-2 總體統計最值表 (°C)

各最值	編號	最大值	時間	最小值	時間	變化量 /°C	位置
最大值	HYG-W-G09-001-溫度	29.4	2023-11-06 16:10	4.5	2024-01-24 08:30	24.9	P46、P47 墩間橋面跨中
最小值	HYG-W-G09-001-溫度	29.4	2023-11-06 16:10	4.5	2024-01-24 08:30	24.9	P46、P47 墩間橋面跨中



HYG-W-G09-001-溫度

最大值@2023-11-06 16:10:00

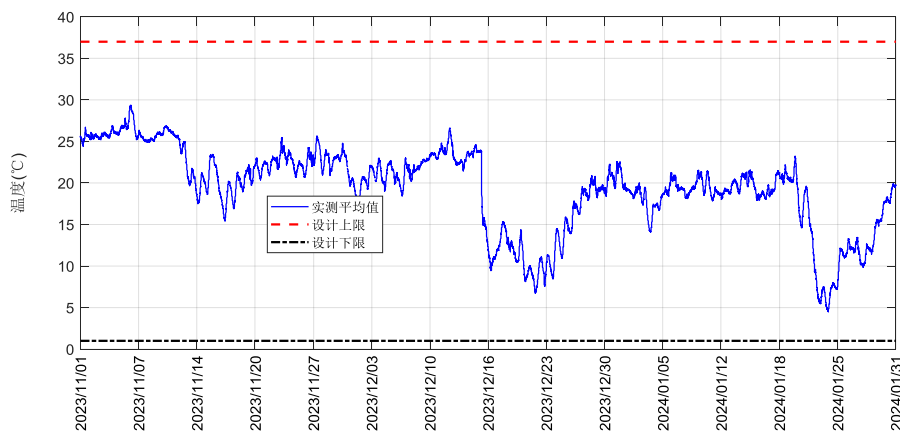


最大值一小時原始時程圖

圖 1.2.2-2 溫度最大值時程圖

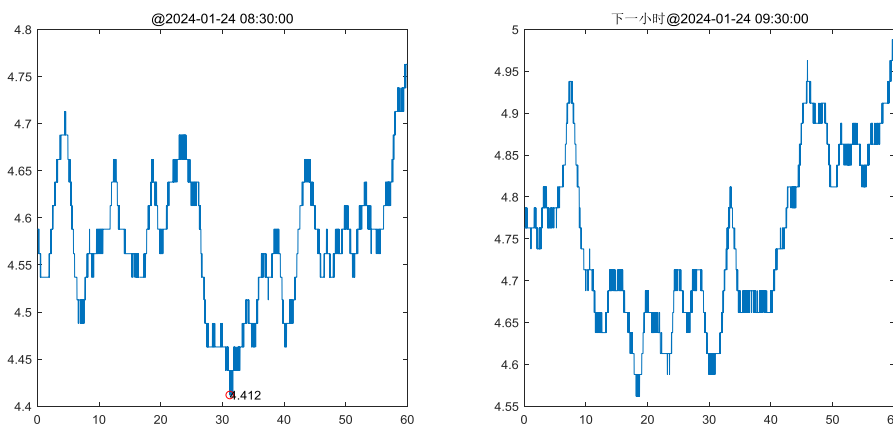
以上分析表明，全橋最高溫度為 29.35°C，發生在 P46、P47 墩間橋面跨中（感測器編號：HYG-W-G09-001-溫度），時間為 2023-11-06 16:10；對應時刻原

始數據分析表明，該時段溫度波動正常，最大暫態溫度為 29.42℃，溫度在 29.09~29.42℃之間波動；下一小時，溫度變化幅度較小。因此，該位置處溫度變化無異常。



HYG-W-G09-001-溫度

最小值@2024-01-24 08:30:00



最小值一小時原始時程圖

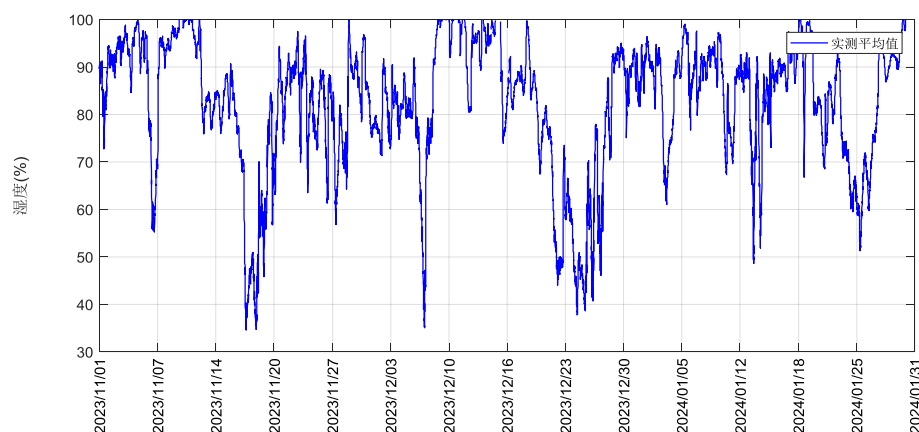
圖 1.2.2-3 溫度最小值時程圖

以上分析表明，全橋最小溫度為 4.50℃，發生在 P46、P47 墩間橋面跨中（感測器編號：HYG-W-G09-001-溫度），時間為 2024-01-24 08:30；對應時刻原始數據分析表明，該時段溫度波動正常，最小暫態溫度為 4.41℃，溫度在 4.41~4.76℃之間波動。因此，該位置處溫度變化無異常。

### 1.2.2.2 濕度

表 1.2.2-3 總體統計最值表 (%)

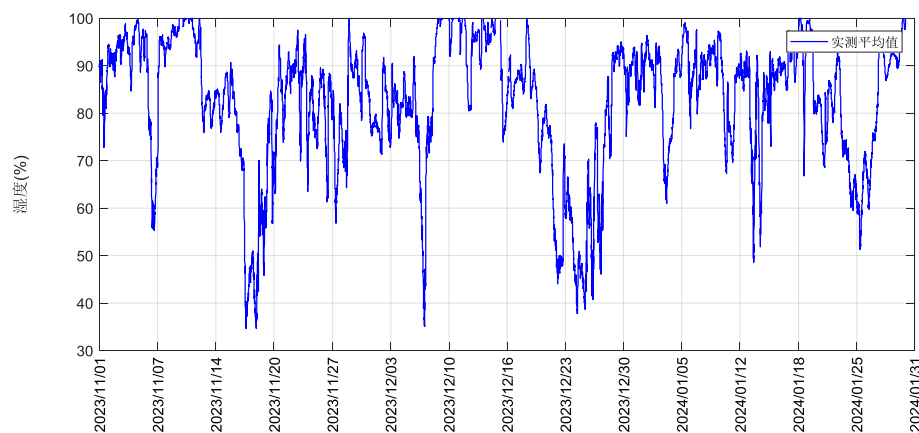
各最值	編號	最大值	時間	最小值	時間	變化量 /%	位置
最大值	HYG-W-G09-001-濕度	100.0	2023-12-10 00:20	34.6	2023-11-17 12:50	65.4	P46、P47 墩間橋面跨中
最小值	HYG-W-G09-001-濕度	100.0	2023-12-10 00:20	34.6	2023-11-17 12:50	65.4	P46、P47 墩間橋面跨中



HYG-W-G09-001-濕度

圖 1.2.2-4 濕度最大值時程圖

以上分析表明，全橋最大濕度為 99.99%，發生在 P46、P47 墩間橋面跨中（感測器編號：HYG-W-G09-001-濕度），時間為 2023-12-10 00:20，濕度較大，需引起注意。



HYG-W-G09-001-濕度

圖 1.2.2-5 濕度最小值時程圖

以上分析表明，全橋最小濕度為 34.59%，發生在 P46、P47 墩間橋面跨中（感測器編號：HYG-W-G09-001-濕度），時間為 2023-11-17 12:50，濕度較小，需引起注意。

測器編號：HYG-W-G09-001-濕度)，時間為 2023-11-17 12:50。

## 2 數據分析結果

### 2.1 結構回應類

#### 1. 梁端縱向位移：

內主橋最大位移為55.42mm，最小位移為13.35mm；連續梁梁端最大位移為38.57mm，最小位移為-102.88mm；外主橋樑端最大位移為46.30mm，外主橋最小位移為-69.90mm，所有監測點位移均未超過預警值。同一截面的上下游感測器的位移變化趨勢、大小保持一致，具有較好的對稱性。

#### 2. 斜拉索索力：

實測在2023年11月--2024年1月期間，大橋整體上拉索索力分佈規律和大小處於穩定狀態，與2008年測試索力相比變化很小，2023年11月--2024年1月最大索力對應的安全係數在2.74~4.79之間，均大於2.5限值。後續運營過程中將繼續進行監測，關注索力發展趨勢和變化規律。

#### 3. 模態分析：

模態分析表明，主橋2023年11月--2024年1月實測頻率與前三季度模態分析相比頻率變化較小，結構實際剛度和實際約束條件滿足有關設計要求，結構整體性能狀況良好。

### 2.2 環境類

#### 1. 風速：

外主橋橋面風速最大值為11.7m/s，未超過設計運營風速（25m/s）。

#### 2. 內部溫度：

環境最大溫度為 29.35℃，最小溫度為 4.50℃，未見極端異常天氣。

#### 3. 環境濕度：

全橋最大濕度為99.99%，最小濕度為34.59%。

#### 4. 結構溫度：

外主橋最大溫度為31.65℃，最小溫度為5.90℃；連續梁最大溫度為30.81℃，最小溫度為7.97℃；內主橋最大溫度為29.32℃，最小溫度為6.64℃。結構溫度較高，建議加強檢查，關注橋面鋪裝工作性能。

綜上所述，澳門友誼橋 2023 年 11 月--2024 年 1 月各項監測數據基本正常，從監測數據角度分析大橋結構基本無異常狀況。

