

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

(第七期)



中交公路規劃設計院有限公司澳門分公司

二零二五年四月

目 錄

1 監測數據分析	3
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 斜拉索振動統計及索力分析	7
1.1.4 動力特性分析	35
1.2 環境類數據分析	44
1.2.1 風速	45
1.2.2 環境溫濕度	46
2 數據分析結果	50
2.1 結構回應類	50
2.2 環境類	51

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：支座伸縮縫位移、主樑撓度、主樑振動、橋塔振動、應變；環境類包括：風速風向、環境溫濕度、結構溫度等。

各監測項所有監測數據進行統計分析（統計方法包括：十分鐘均值、均方根值、最大最小值或去均值的最大最小值等），對統計數據最大或最小以及變化量最大的測點，將發生最大值（最小值、變化量最大值）時段的一小時原始數據進行詳細分析。對於全部測點的統計數據結果，均放在附件 1 中。

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

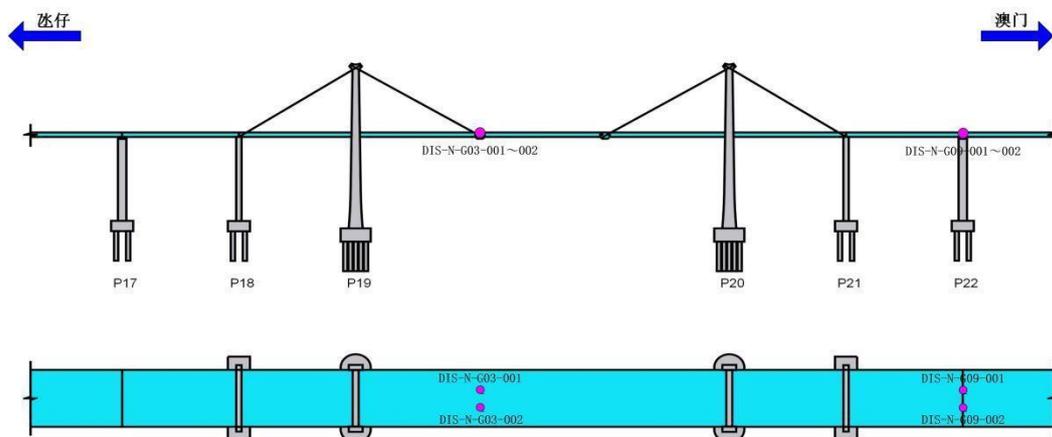


圖 1.1.1-1 內主橋樑端位移計監測點佈置圖

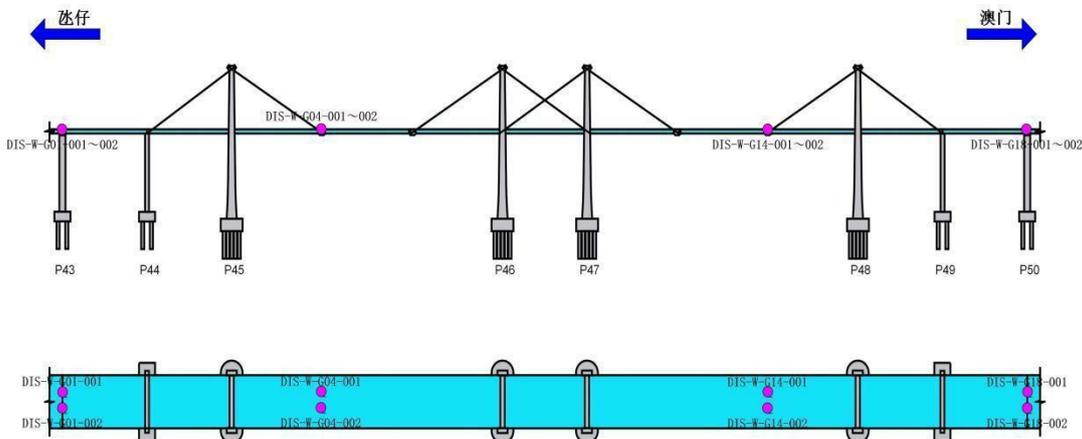


圖 1.1.1-2 外主橋樑端位移計監測點佈置圖

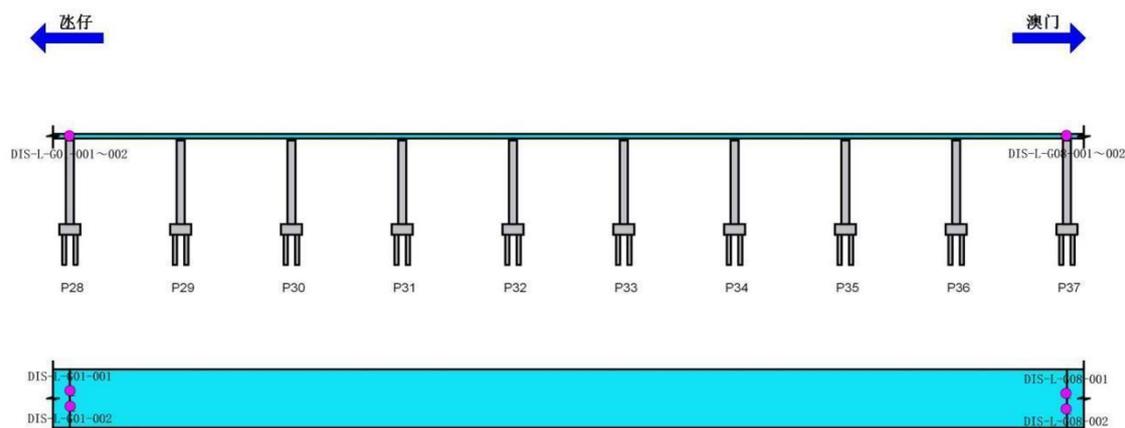
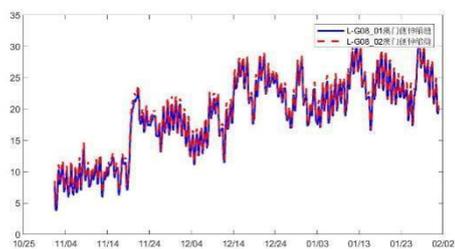
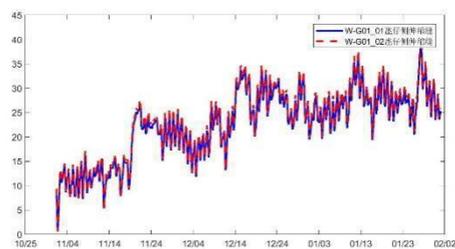


圖 1.1.1-3 連續梁梁端位移計佈置圖

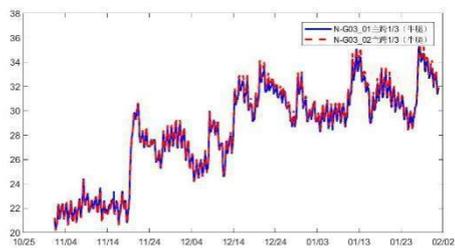
將同一截面的上下游感測器位移監測值繪製在同一幅圖中，檢查橋樑結構的縱向變形對稱性。



DIS-L-G08-001 vs DIS-L-G08-002



DIS-W-G01-001 vs DIS-W-G01-002



DIS-N-G03-001 vs DIS-N-G03-002

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

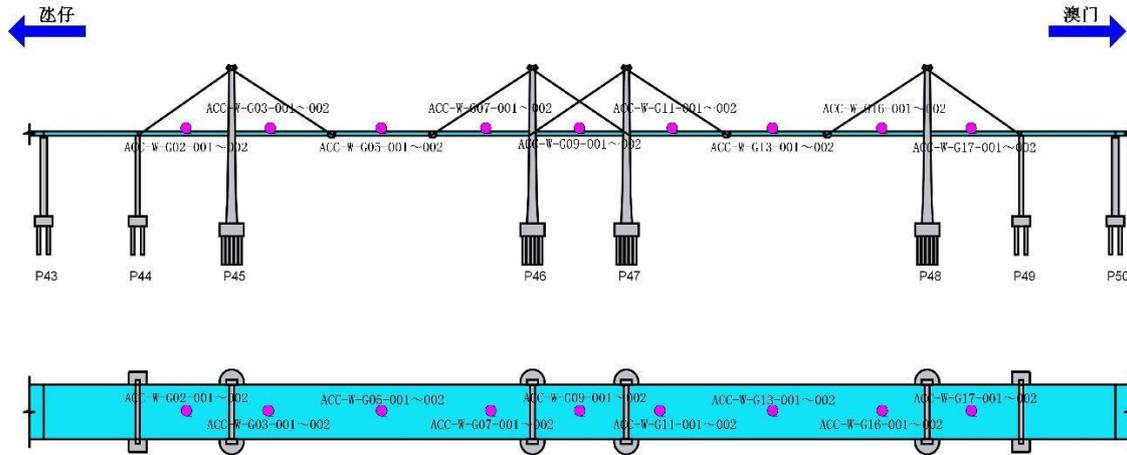


圖 1.1.2-1 外主橋加速度佈置圖

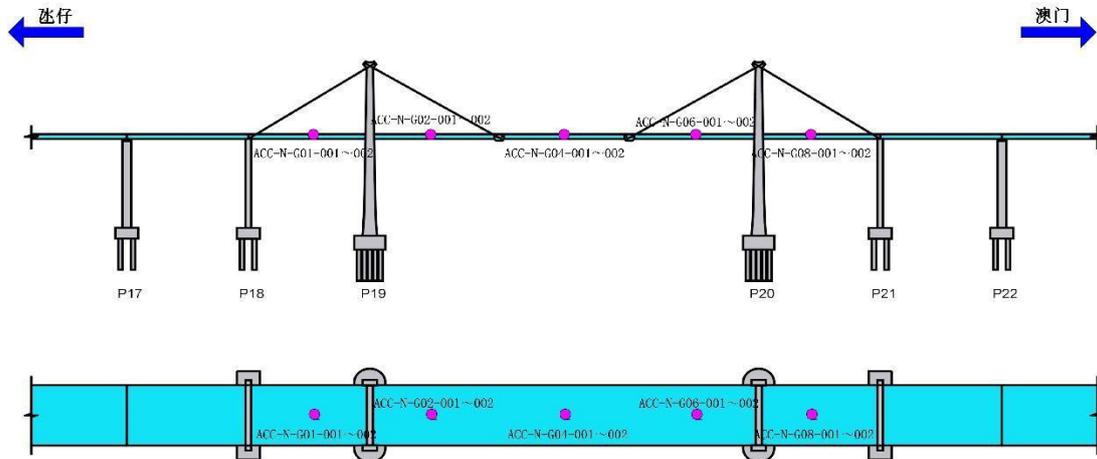


圖 1.1.2-2 內主橋加速度佈置圖

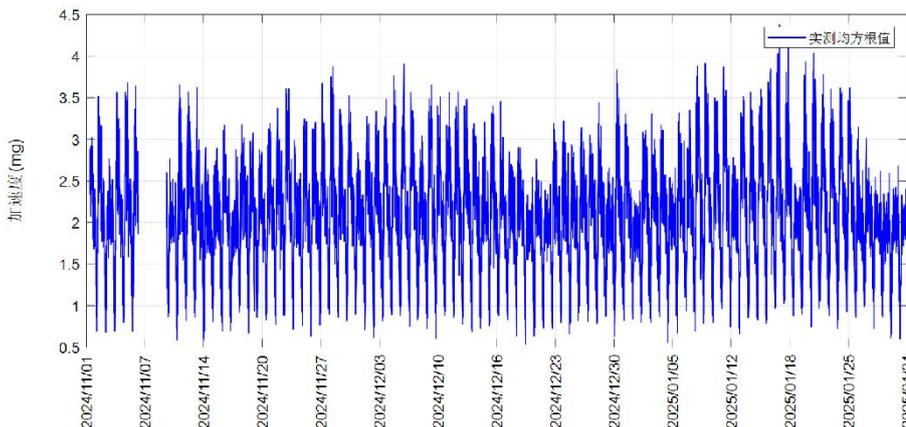
表 1.1.2-1 加速度監測點資訊一覽表

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	4.4	2025-01-17 16:20	P19 与 P20 墩间梁段跨 5/6 点竖 向



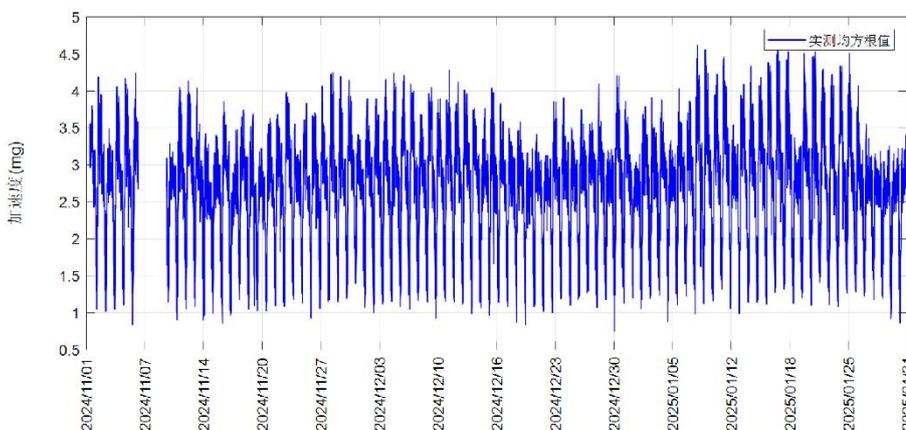
ACC-N-G06-002
圖 1.1.2-3 加速度最大值時程圖

以上分析表明，內主橋最大加速度為 4.38mg，發生在 P19 與 P20 墩間梁段跨 5/6 點豎向（傳感器編號：ACC-N-G06-002），時間為 2025-01-17 16:20。

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	4.6	2025-01-17 11:40	P45 與 P46 墩間梁段跨 1/6 點橫向



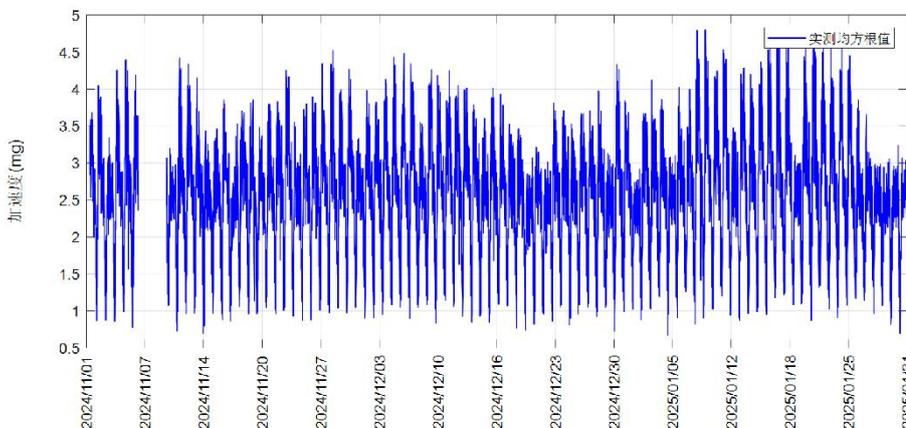
ACC-W-G03-001
圖 1.1.2-4 加速度最大值時程圖

以上分析表明，外主橋最大加速度為 4.64mg，發生在 P45 與 P46 墩間梁段跨 1/6 點橫向（傳感器編號：ACC-W-G03-001），時間為 2025-01-17 11:40。

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	4.8	2025-01-17 11:40	P36 与 P37 墩间梁段跨中竖向



ACC-L-G07-002

圖 1.1.2-5 加速度最大值時程圖

以上分析表明，連續梁最大加速度为 4.81mg，发生在 P36 与 P37 墩间梁段跨中竖向（传感器编号：ACC-L-G07-002），时间为 2025-01-17 11:40。

1.1.3 斜拉索振動統計及索力分析

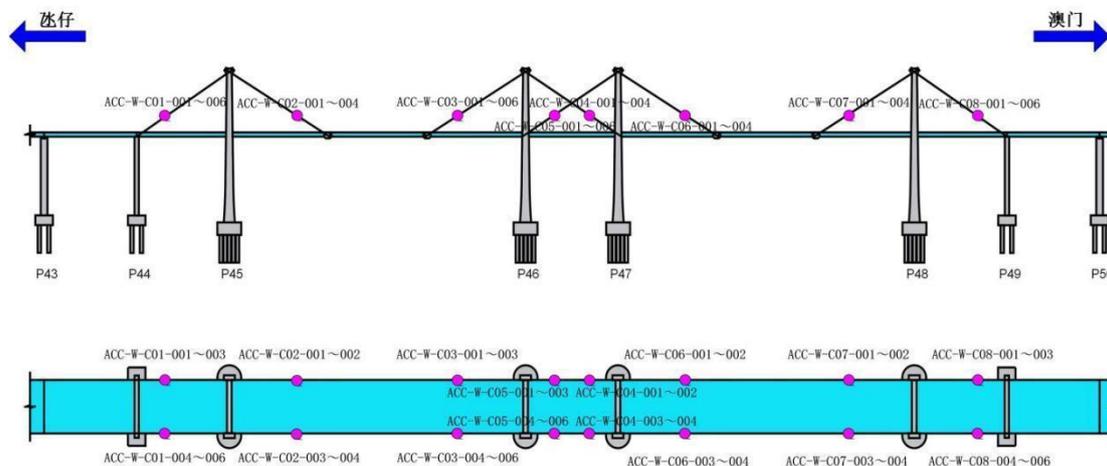


圖 1.1.3-1 外主橋拉索加速度監測點佈置圖

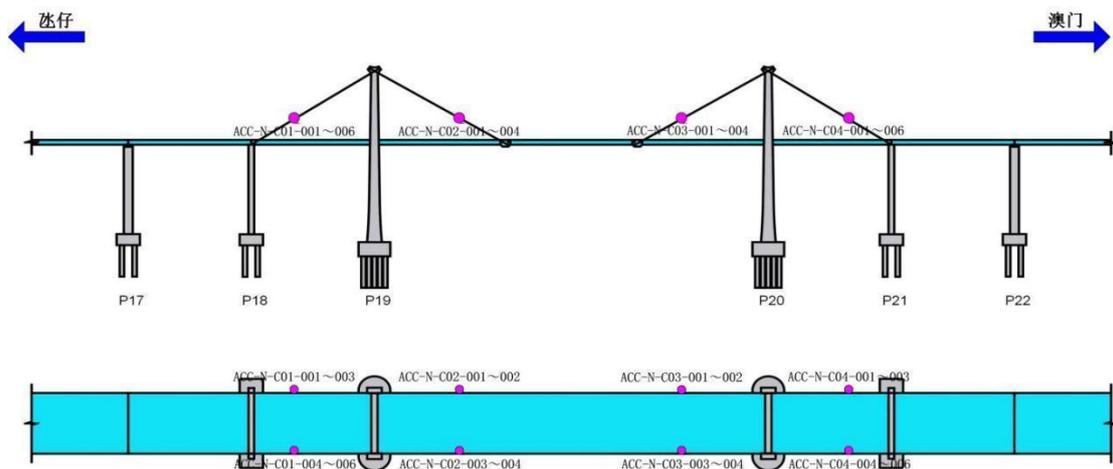


圖 1.1.3-2 內主橋斜拉索加速度監測點佈置圖

表 1.1.3-1 斜拉索加速度監測點資訊一覽表

感測器編號	位置	監測項	數量
ACC-W-C01-001~006	外橋側拉索	加速度	6
ACC-W-C02-001~004	外橋側拉索	加速度	4
ACC-W-C03-001~006	外橋側拉索	加速度	6
ACC-W-C04-001~004	外橋側拉索	加速度	4
ACC-W-C05-001~006	外橋側拉索	加速度	6
ACC-W-C06-001~004	外橋側拉索	加速度	4
ACC-W-C07-001~004	外橋側拉索	加速度	4
ACC-W-C08-001~006	外橋側拉索	加速度	6
ACC-N-C01-001~006	內橋側拉索	加速度	6
ACC-N-C02-001~004	內橋側拉索	加速度	4
ACC-N-C03-001~004	內橋側拉索	加速度	4
ACC-N-C04-001~006	內橋側拉索	加速度	6

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；

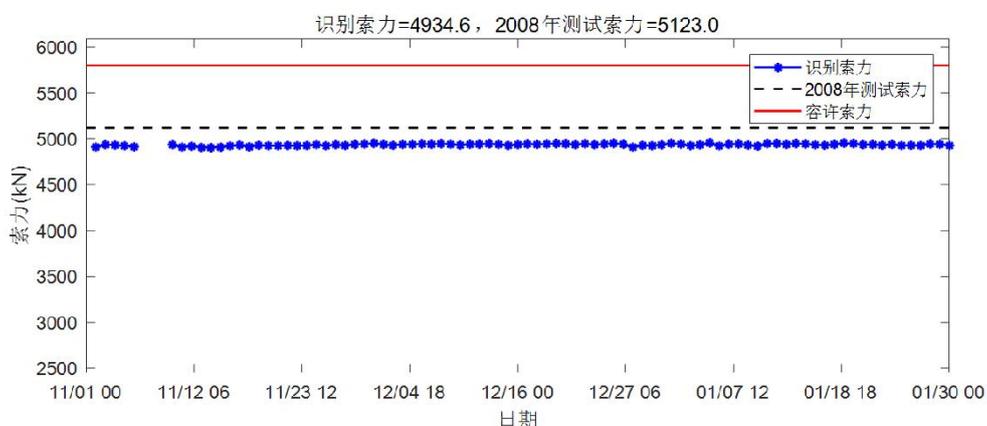
l —拉索的計算長度；

—拉索每延米品質

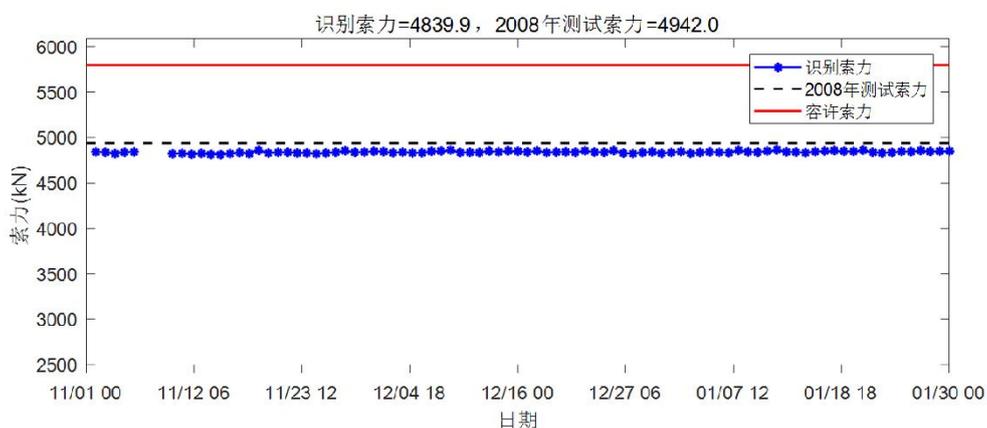
1.1.3.2 監測結果



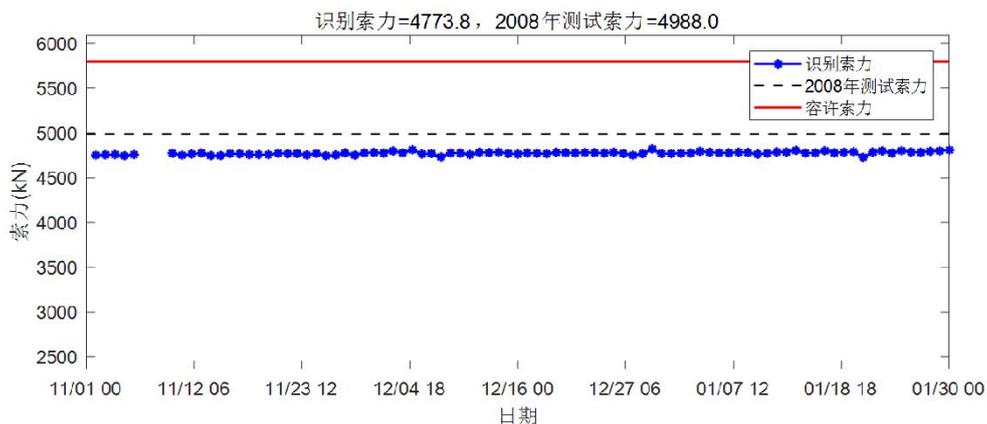
索力图 1-ACC-W-C01-001



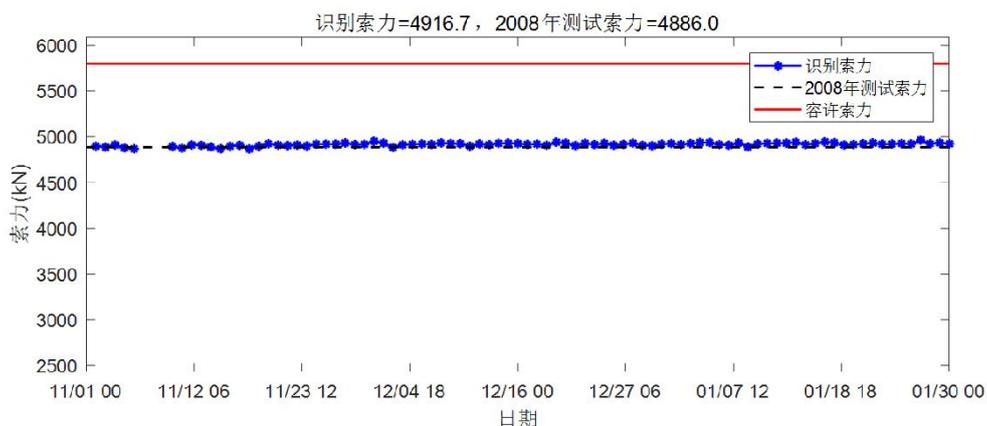
索力图 2-ACC-W-C01-002



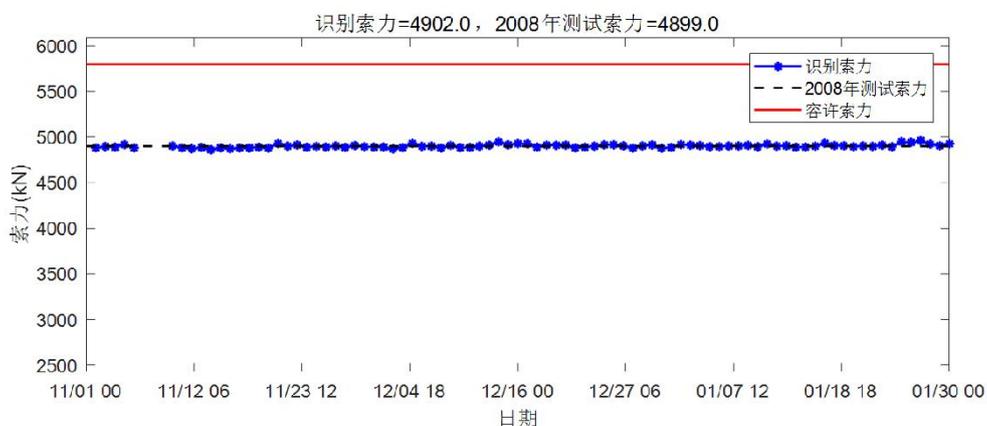
索力图 3-ACC-W-C01-003



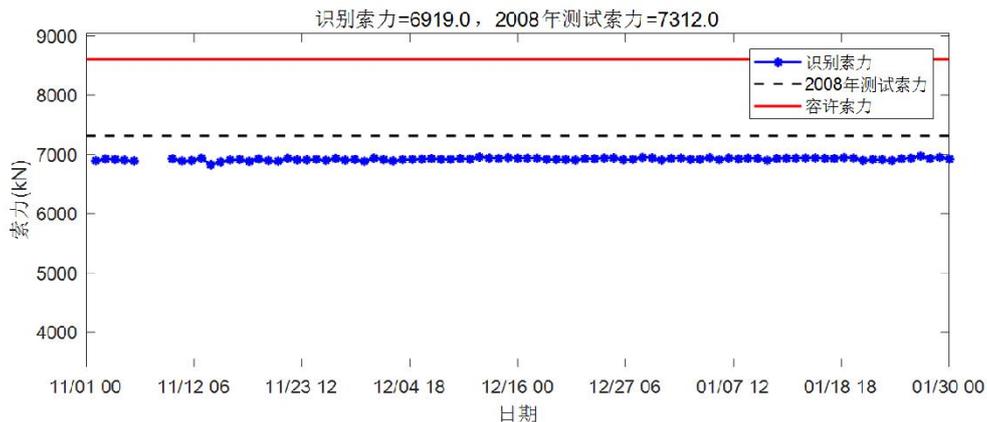
索力图 4-ACC-W-C01-004



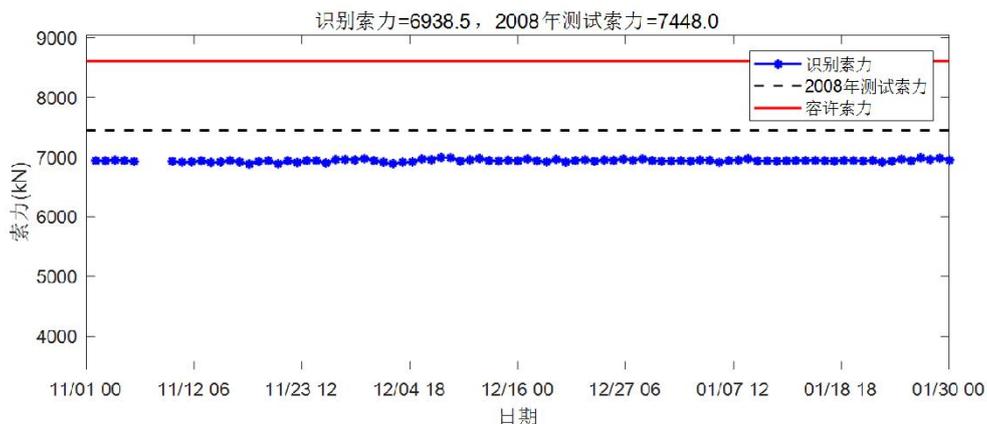
索力图 5-ACC-W-C01-005



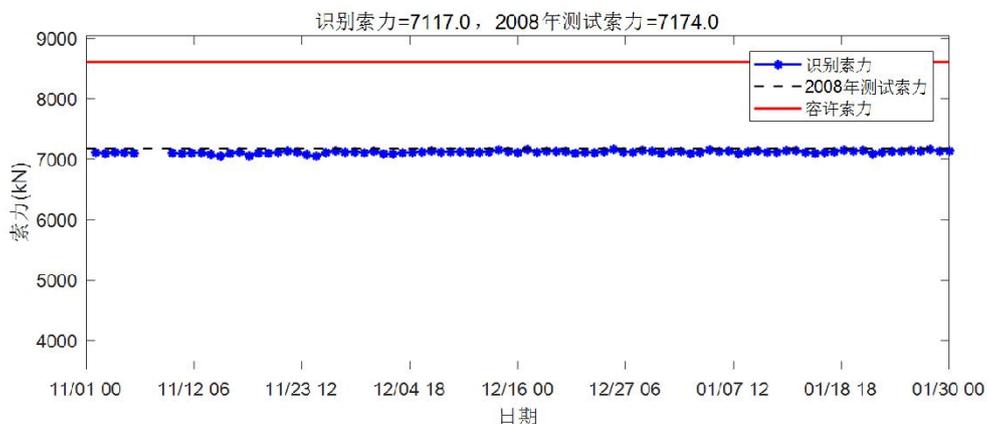
索力图 6-ACC-W-C01-006



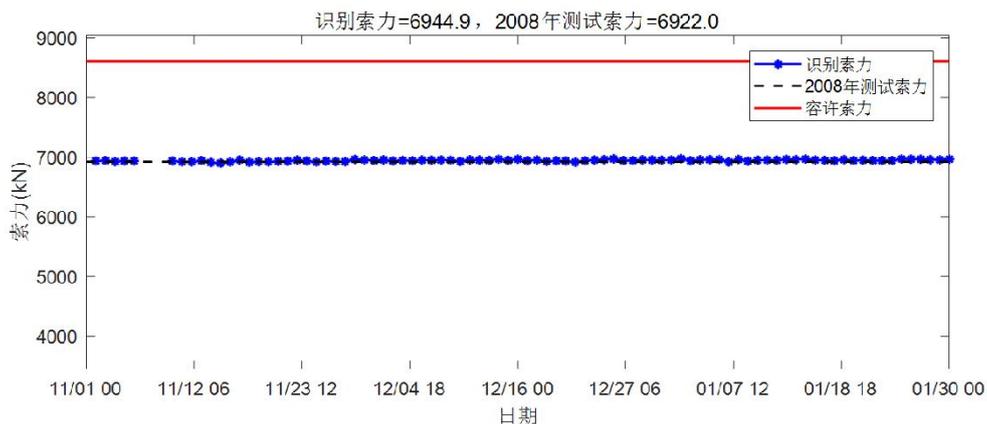
索力图 7-ACC-W-C02-001



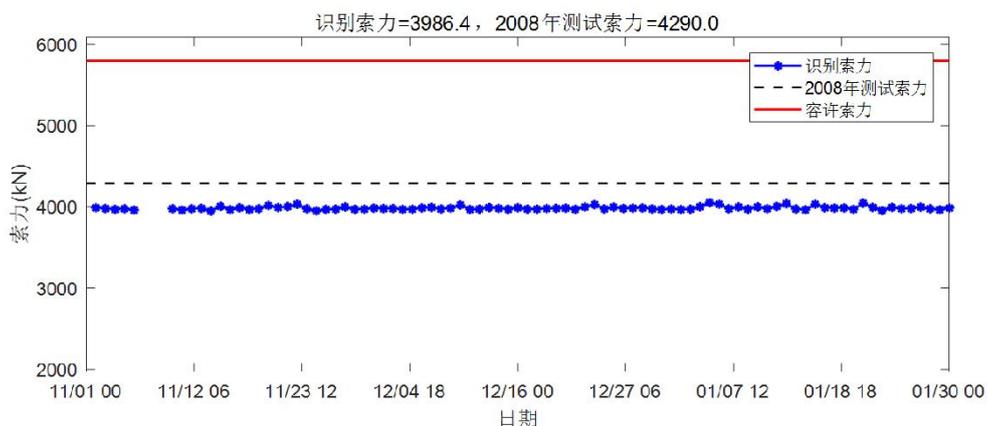
索力图 8-ACC-W-C02-002



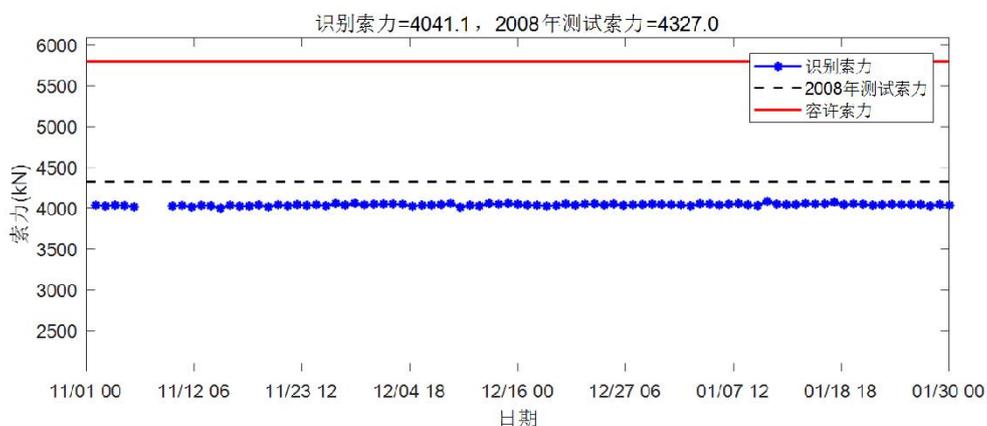
索力图 9-ACC-W-C02-003



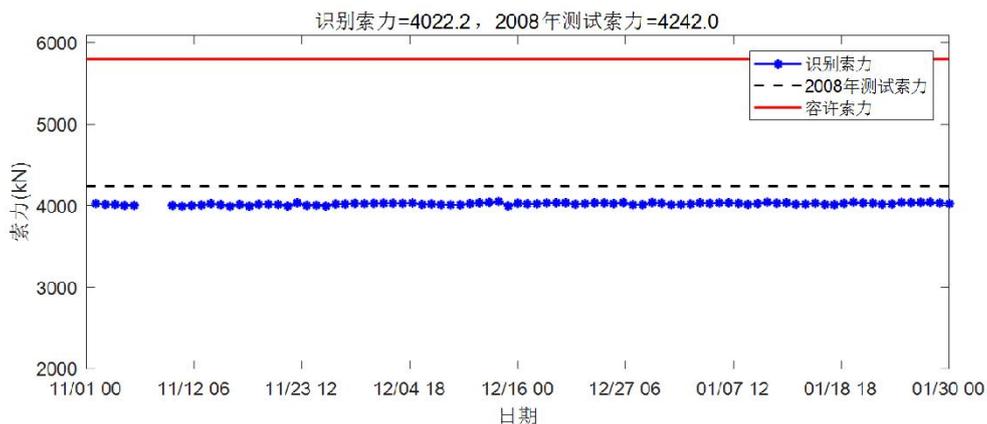
索力图 10-ACC-W-C02-004



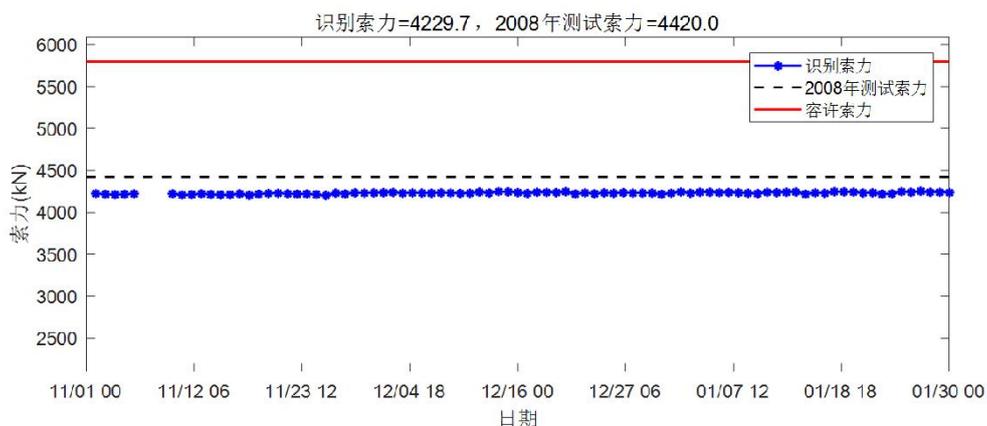
索力图 11-ACC-W-C03-001



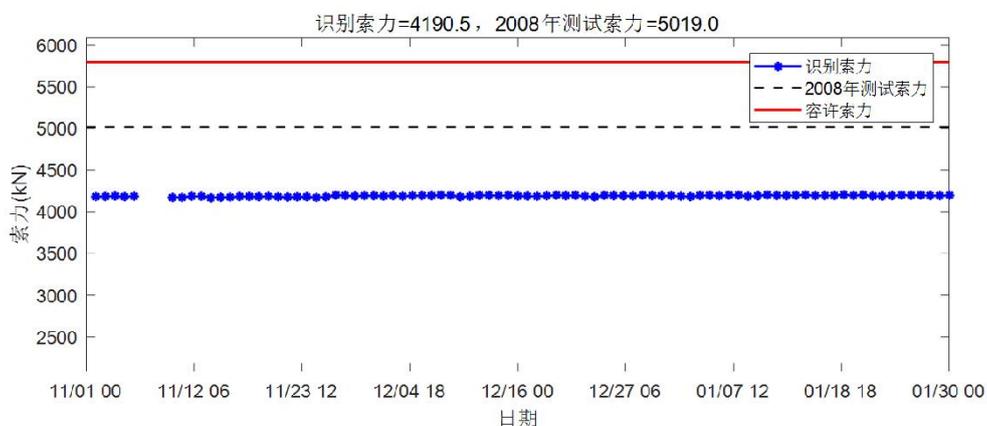
索力图 12-ACC-W-C03-002



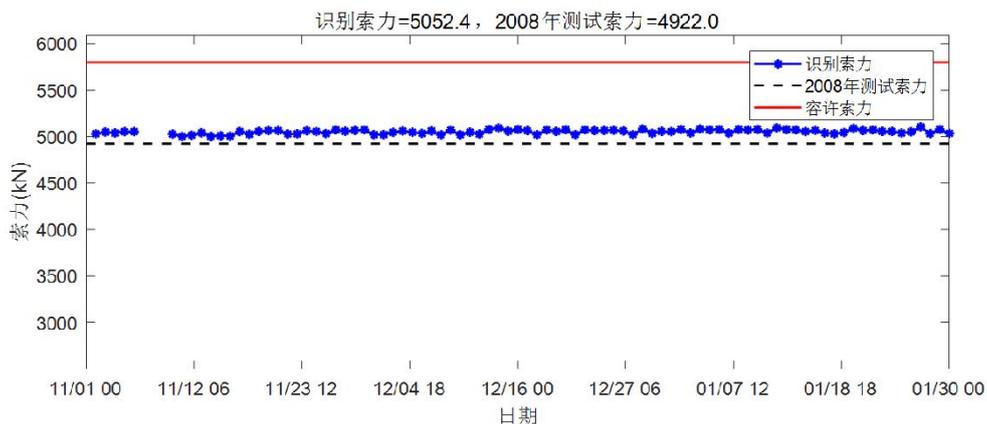
索力图 13-ACC-W-C03-003



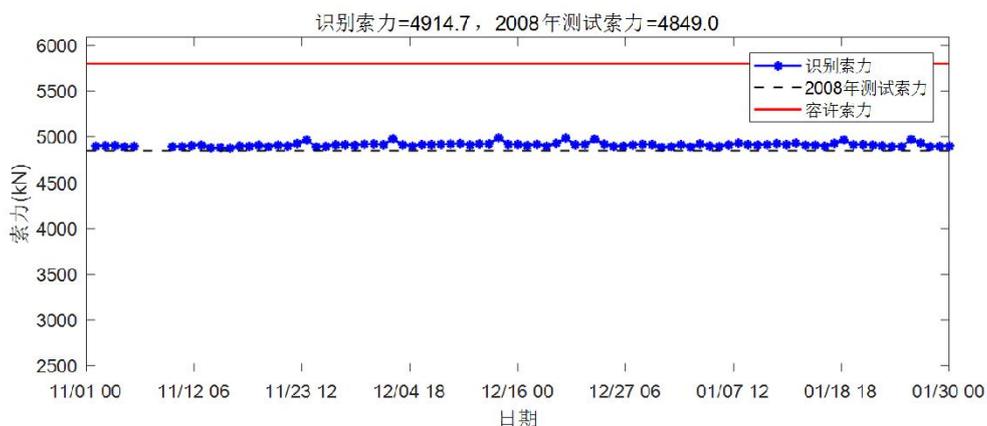
索力图 14-ACC-W-C03-004



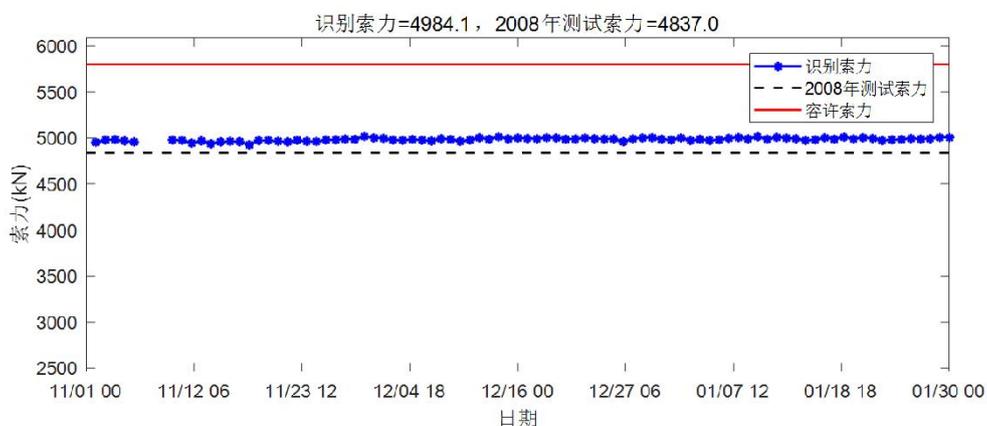
索力图 15-ACC-W-C03-005



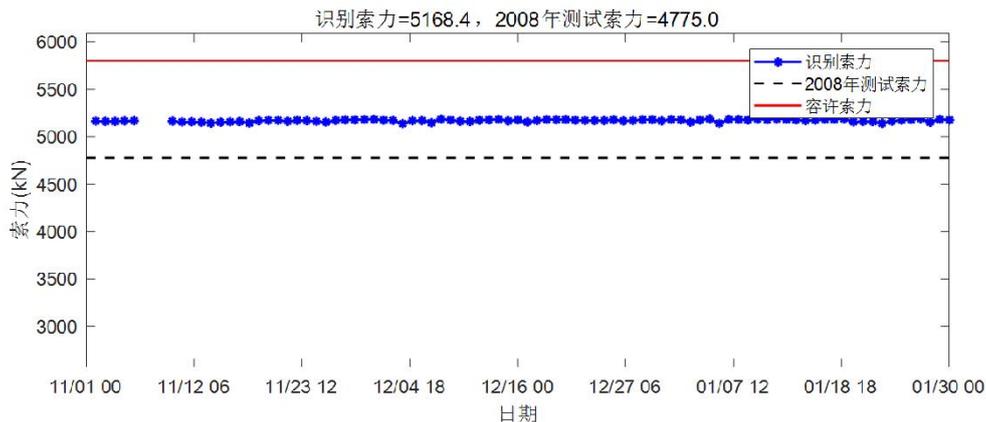
索力图 17-ACC-W-C05-001



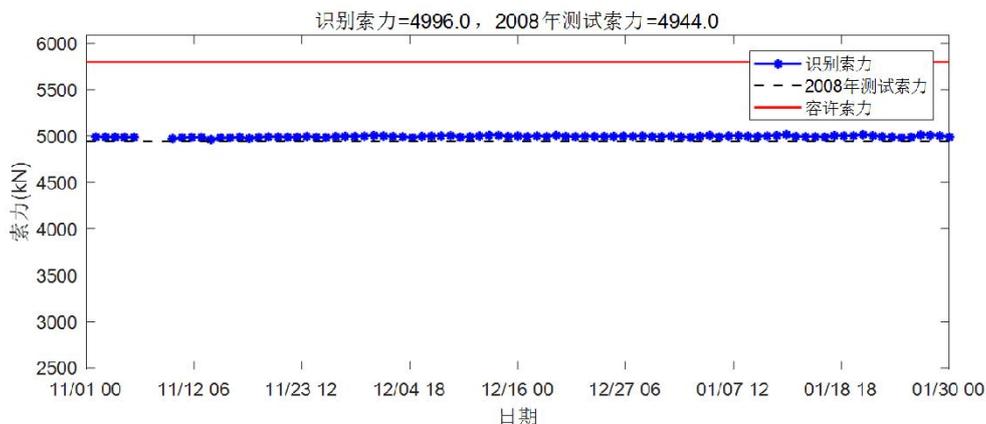
索力图 18-ACC-W-C05-002



索力图 19-ACC-W-C05-003



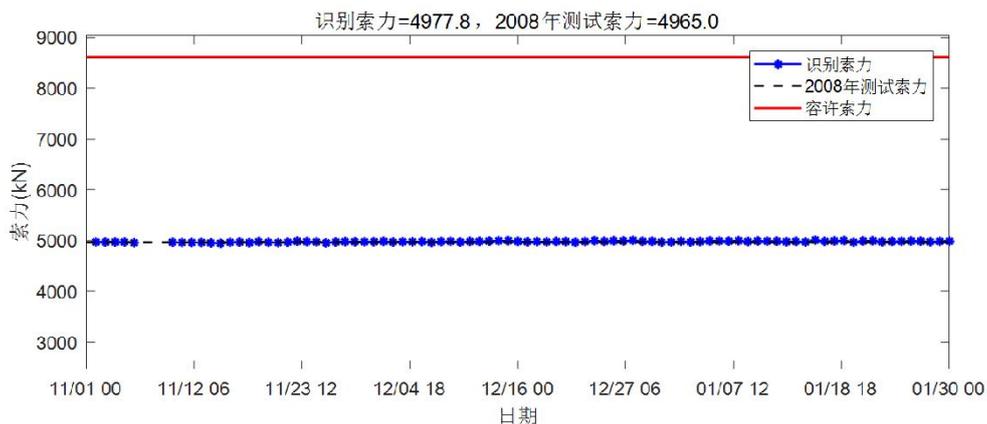
索力图 20-ACC-W-C05-004



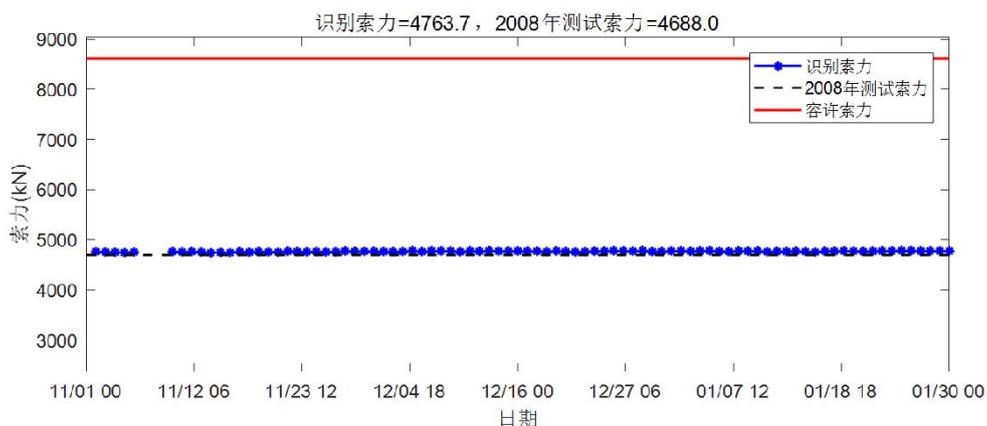
索力图 21-ACC-W-C05-005



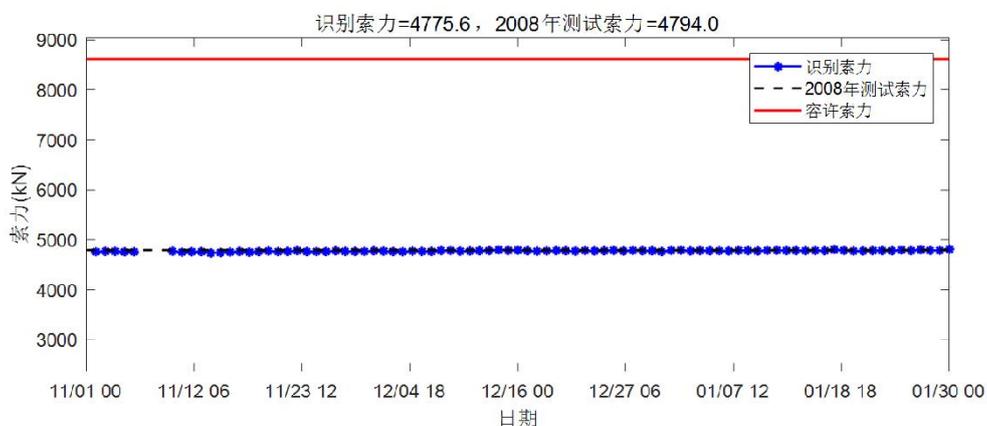
索力图 22-ACC-W-C05-006



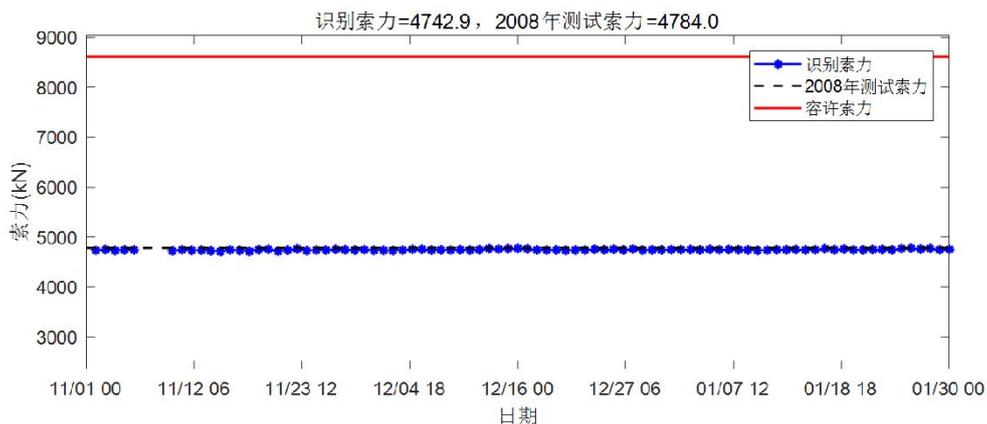
索力图 23-ACC-W-C04-001



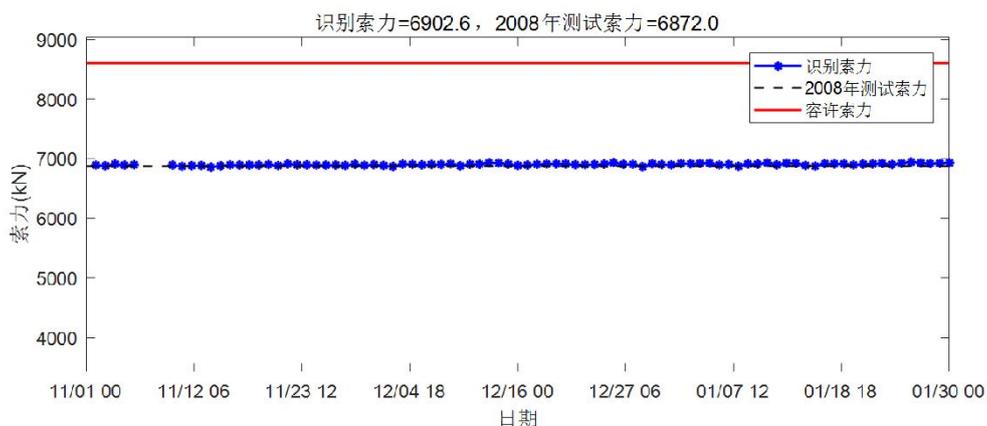
索力图 24-ACC-W-C04-002



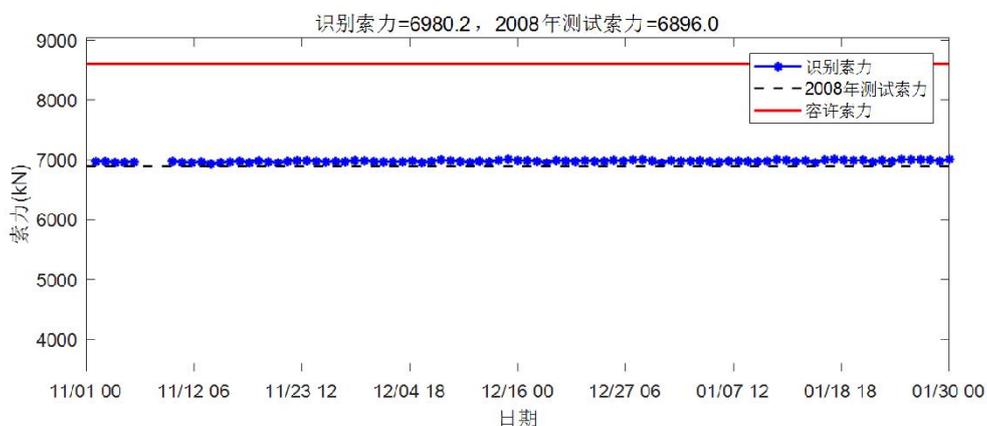
索力图 25-ACC-W-C04-003



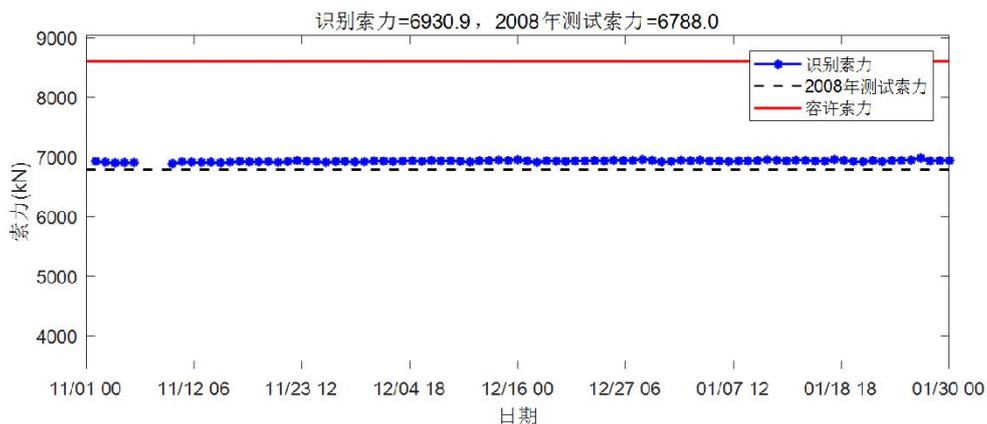
索力图 26-ACC-W-C04-004



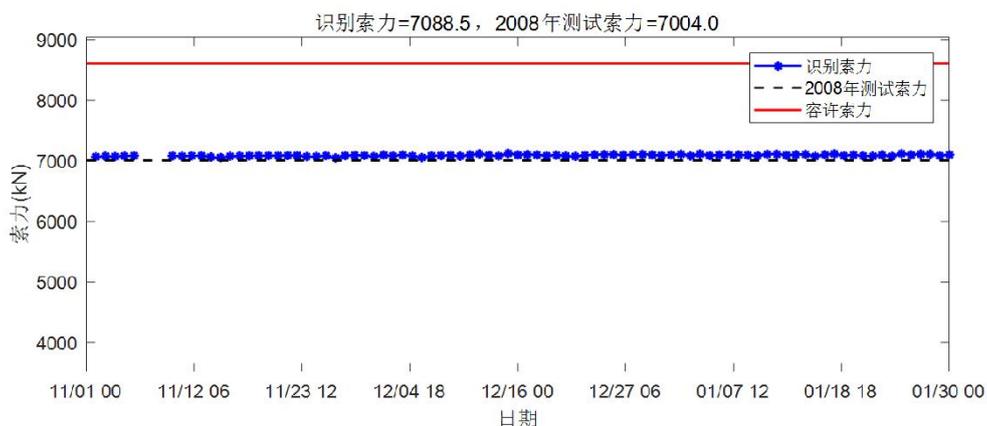
索力图 27-ACC-W-C06-001



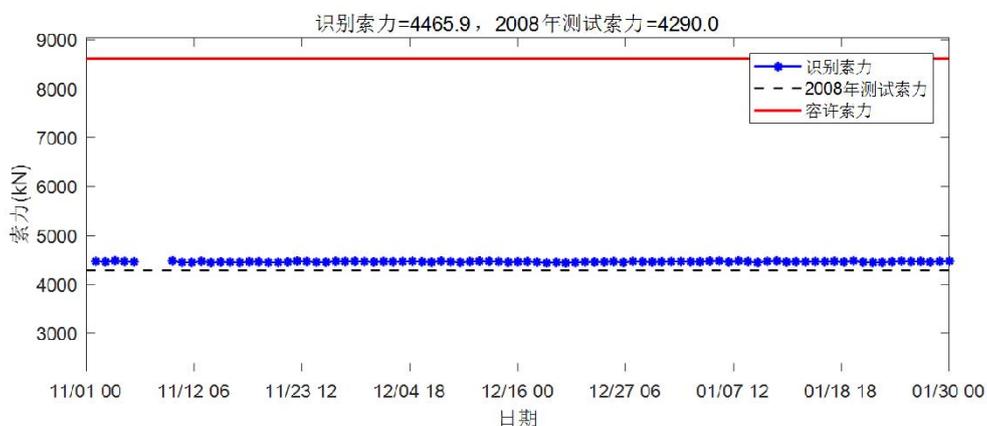
索力图 28-ACC-W-C06-002



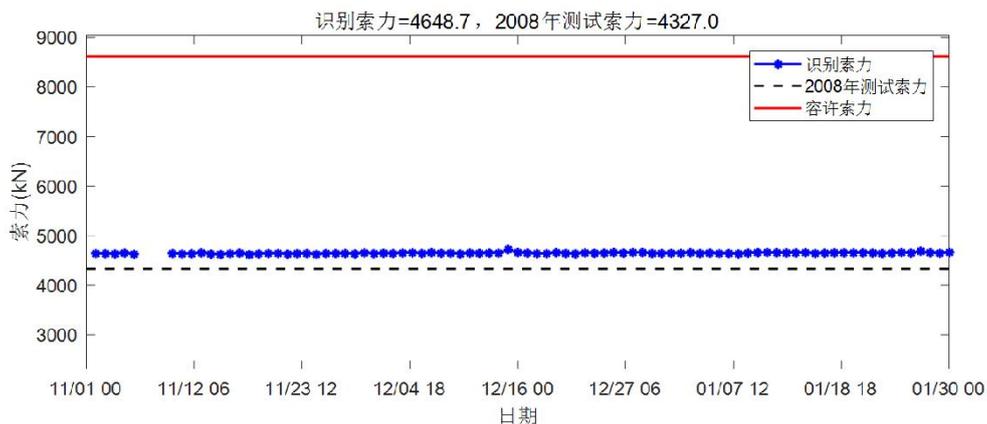
索力图 29-ACC-W-C06-003



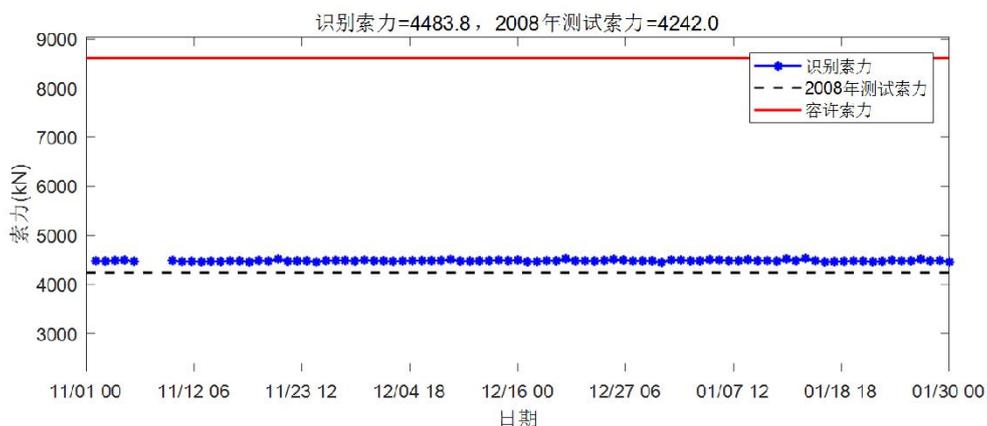
索力图 30-ACC-W-C06-004



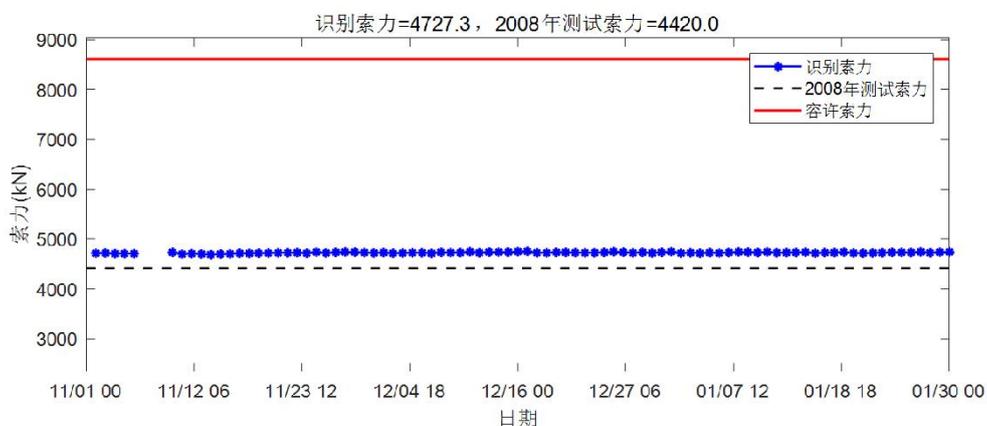
索力图 31-ACC-W-C07-001



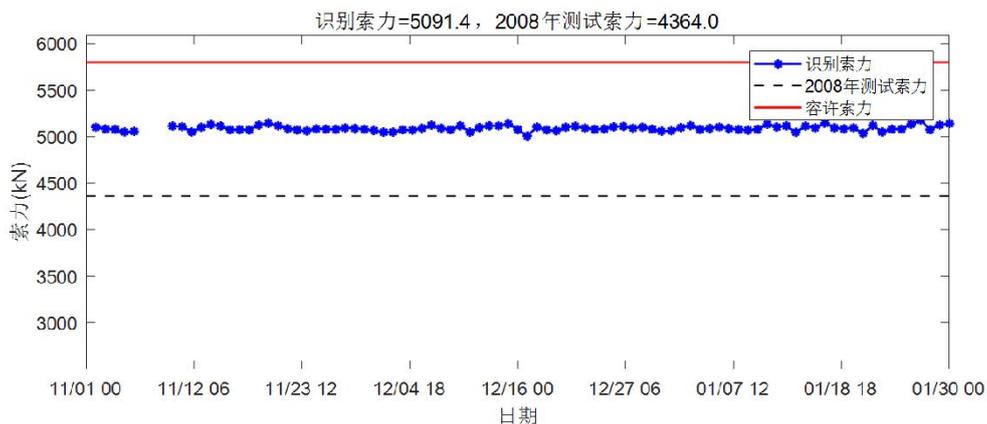
索力图 32-ACC-W-C07-002



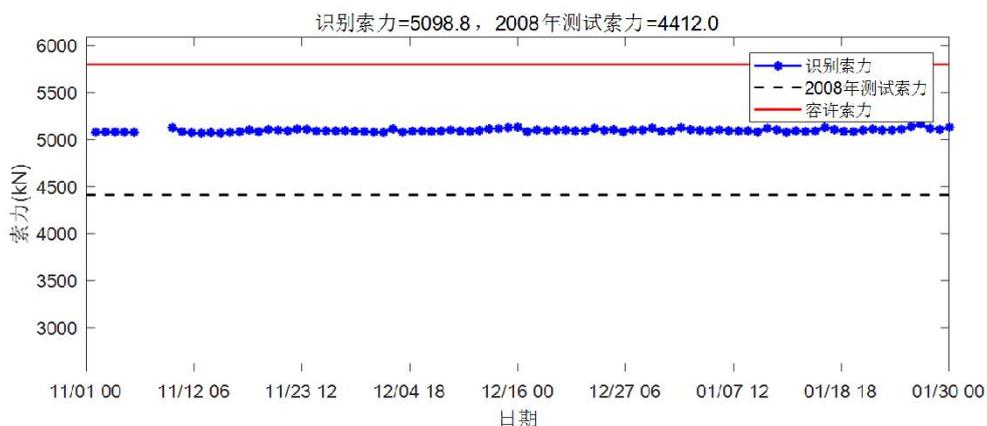
索力图 33-ACC-W-C07-003



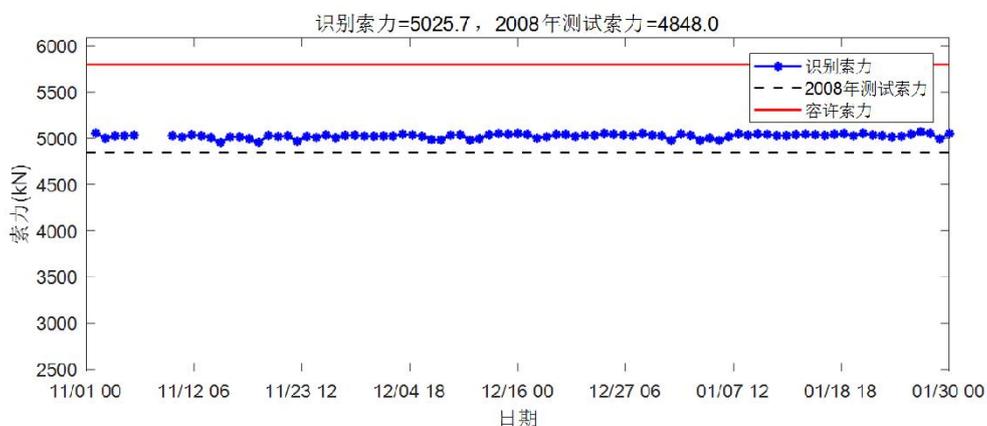
索力图 34-ACC-W-C07-004



索力图 35-ACC-W-C08-001



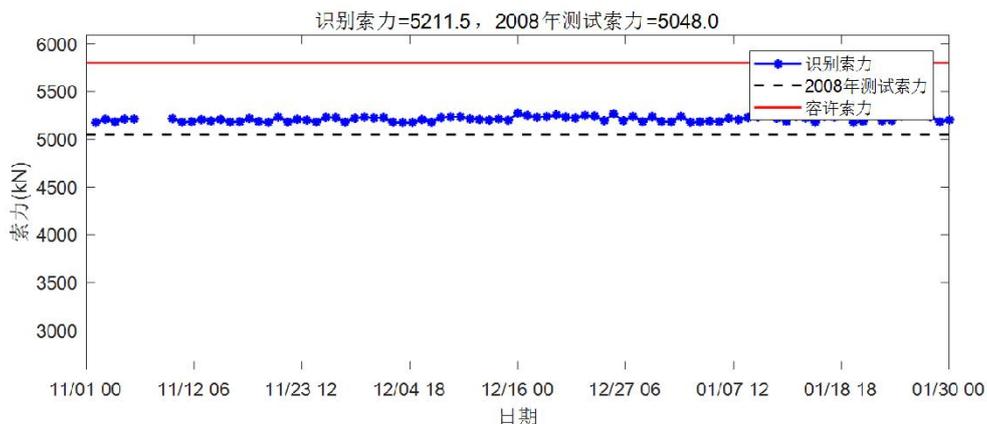
索力图 36-ACC-W-C08-002



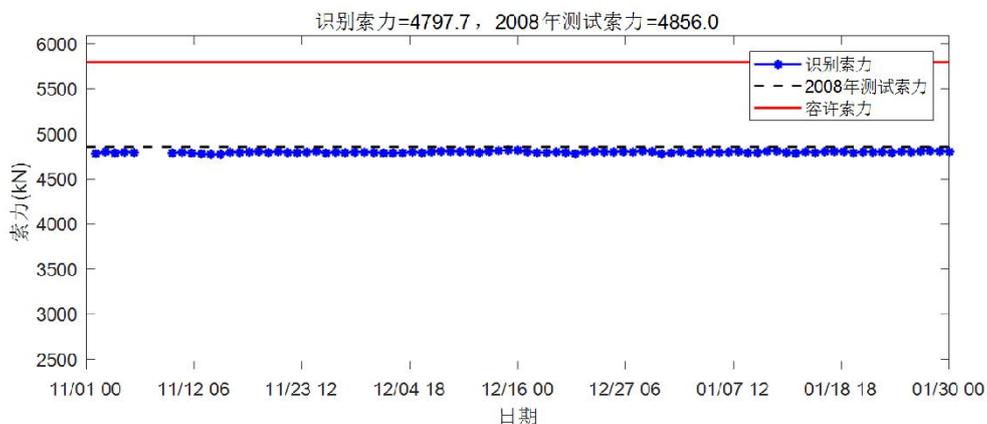
索力图 37-ACC-W-C08-003



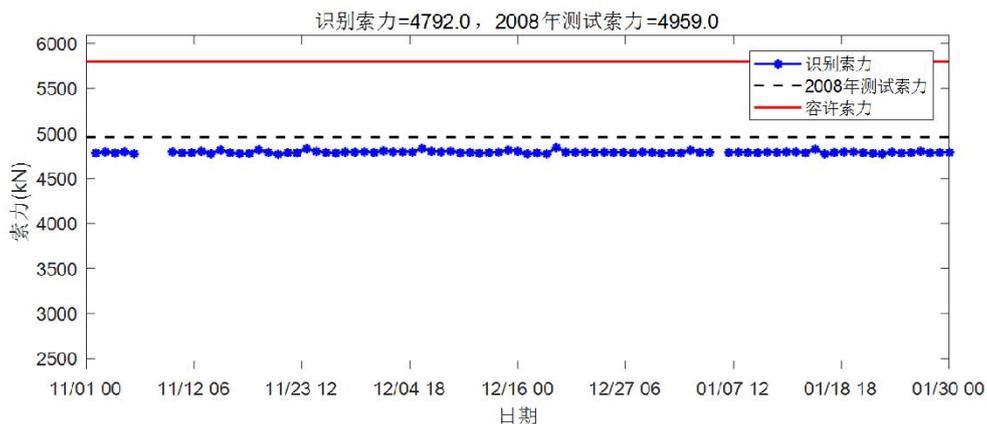
索力图 38-ACC-W-C08-004



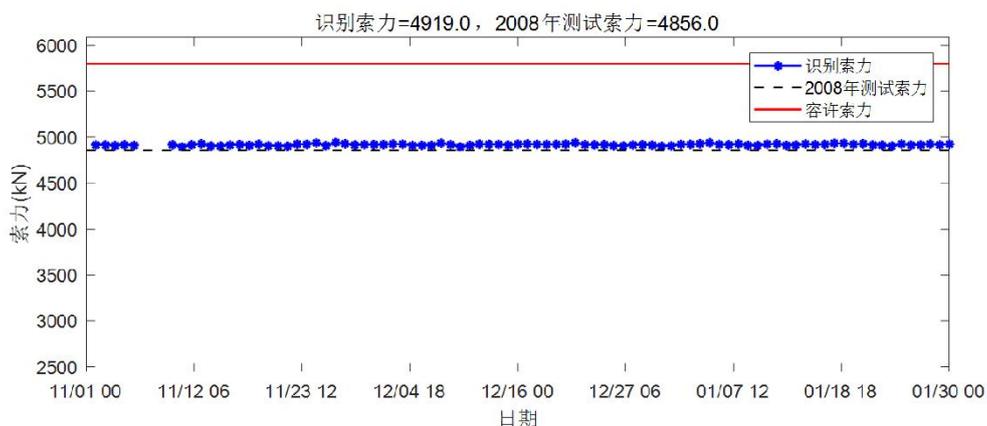
索力图 39-ACC-W-C08-005



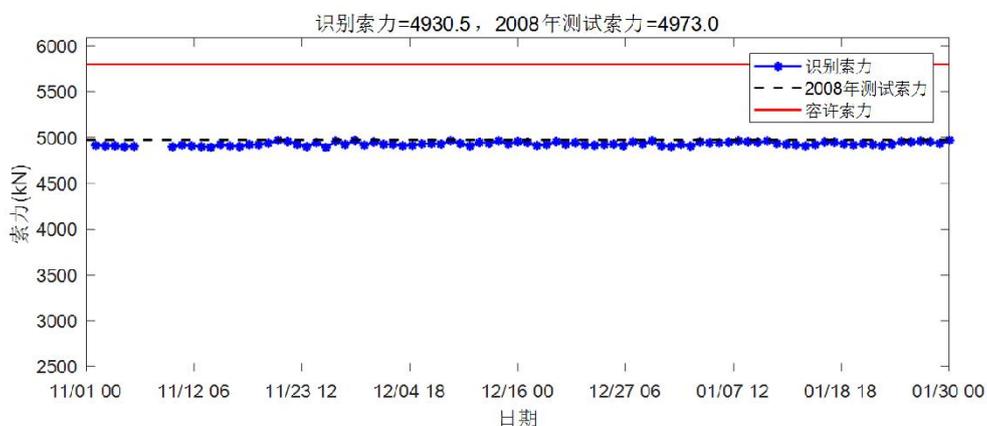
索力图 40-ACC-W-C08-006



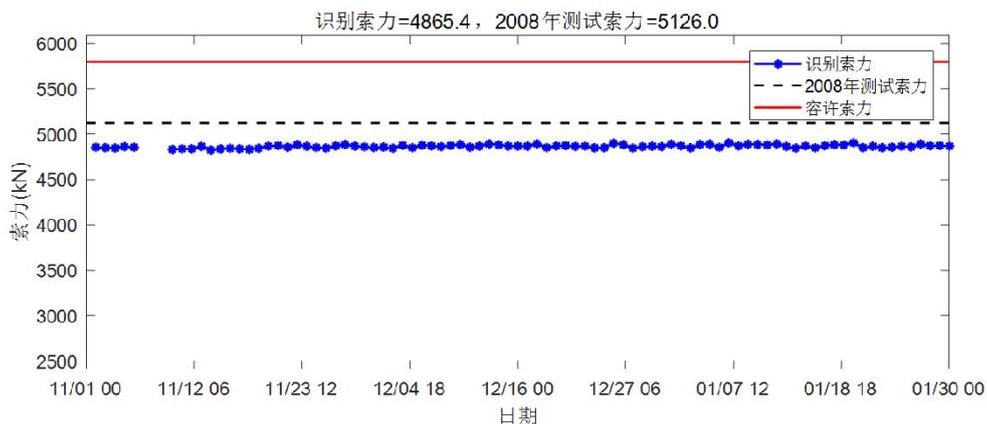
索力图 41-ACC-N-C01-001



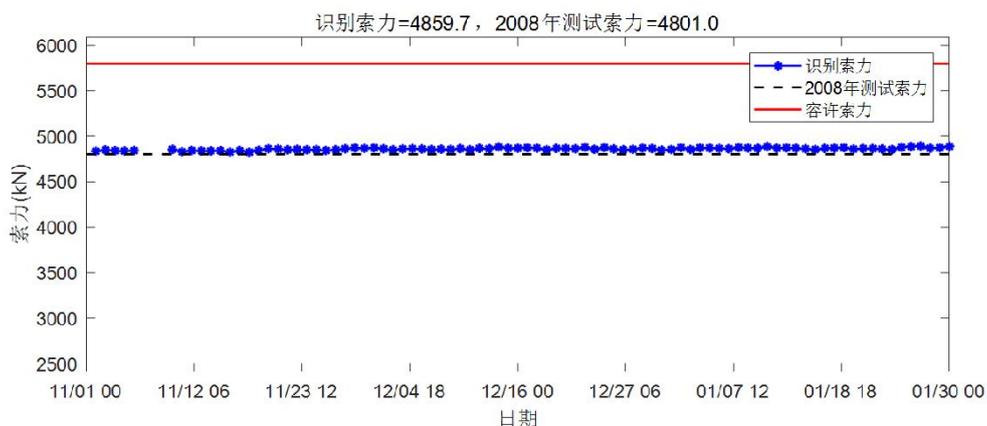
索力图 42-ACC-N-C01-002



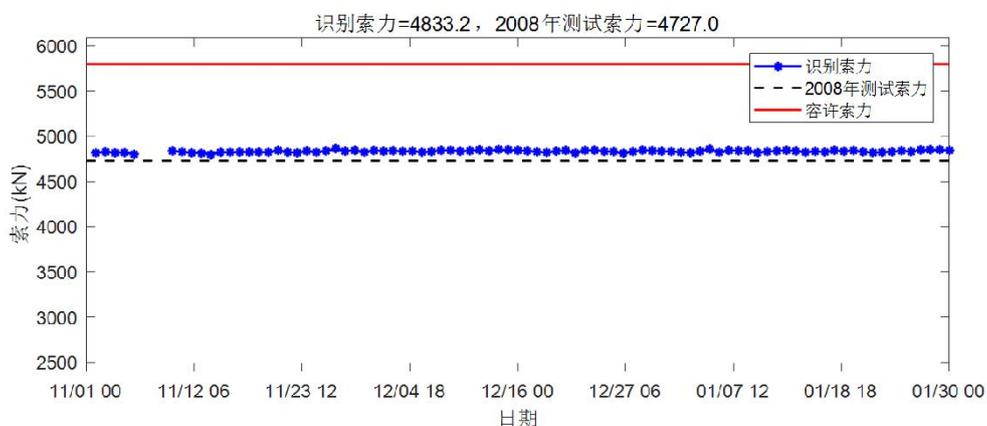
索力图 43-ACC-N-C01-003



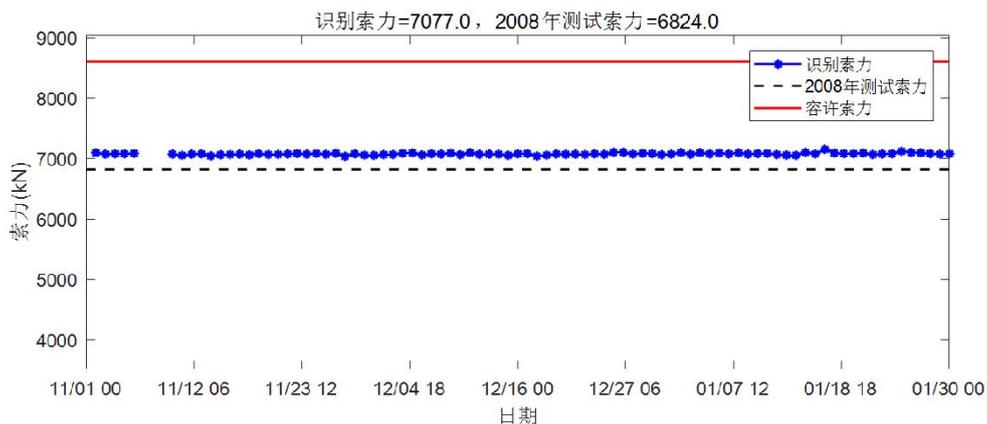
索力图 44-ACC-N-C01-004



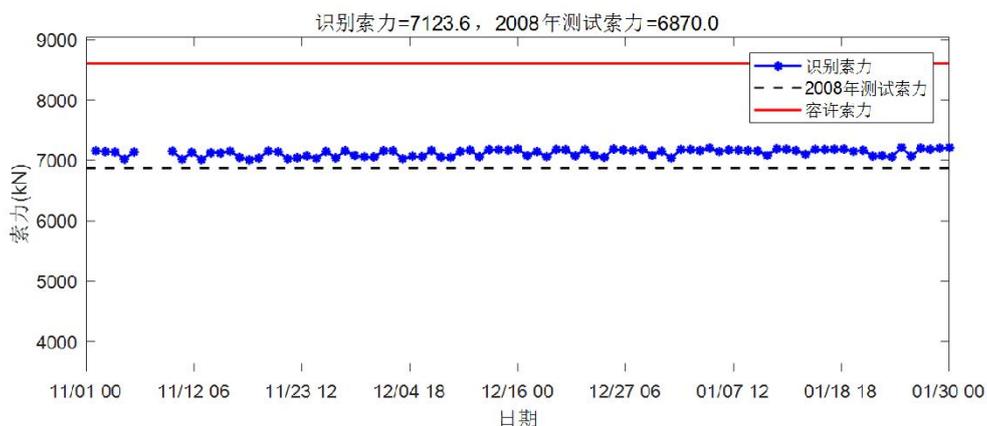
索力图 45-ACC-N-C01-005



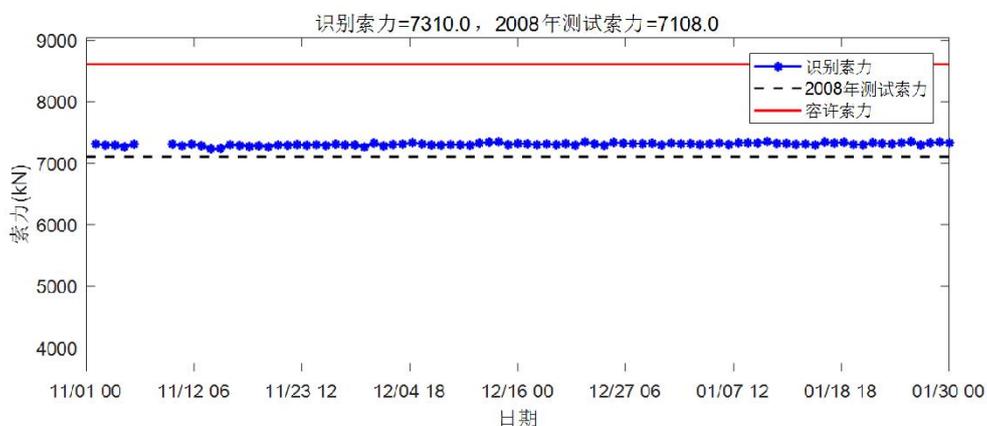
索力图 46-ACC-N-C01-006



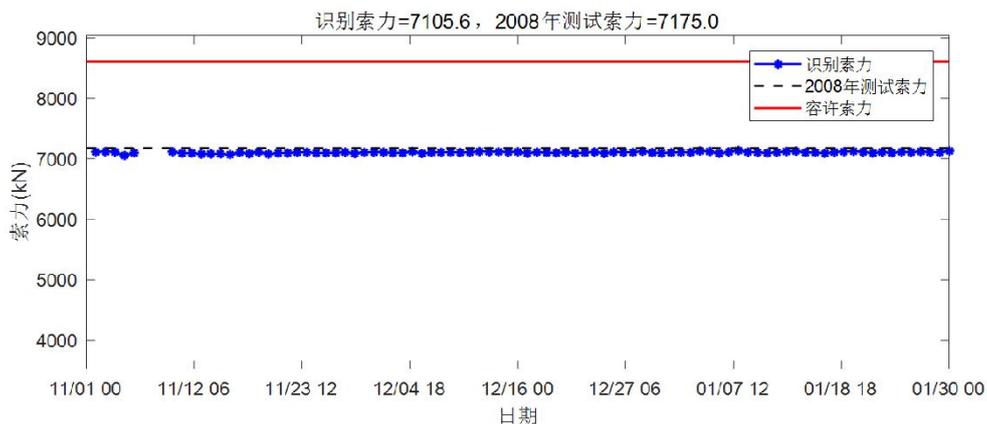
索力图 47-ACC-N-C02-001



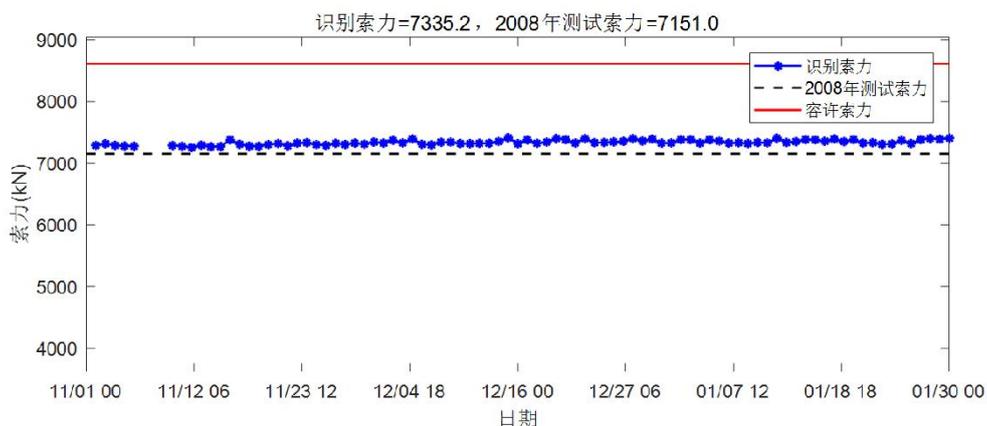
索力图 48-ACC-N-C02-002



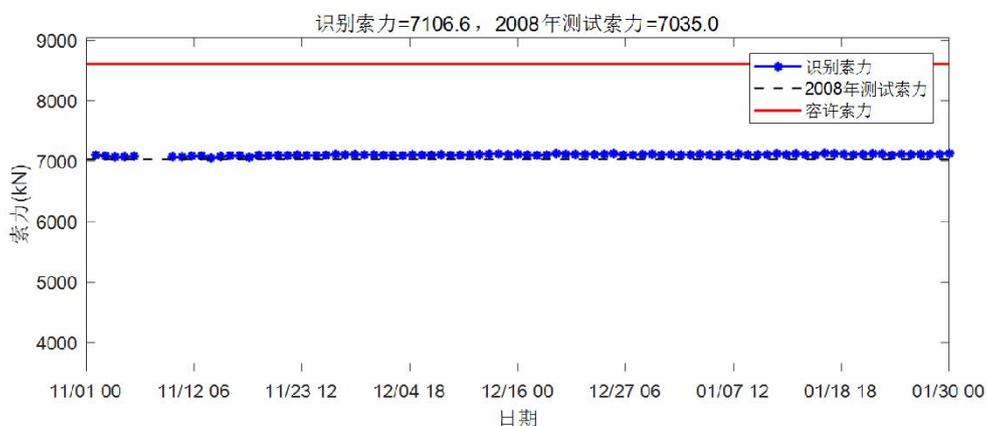
索力图 49-ACC-N-C02-003



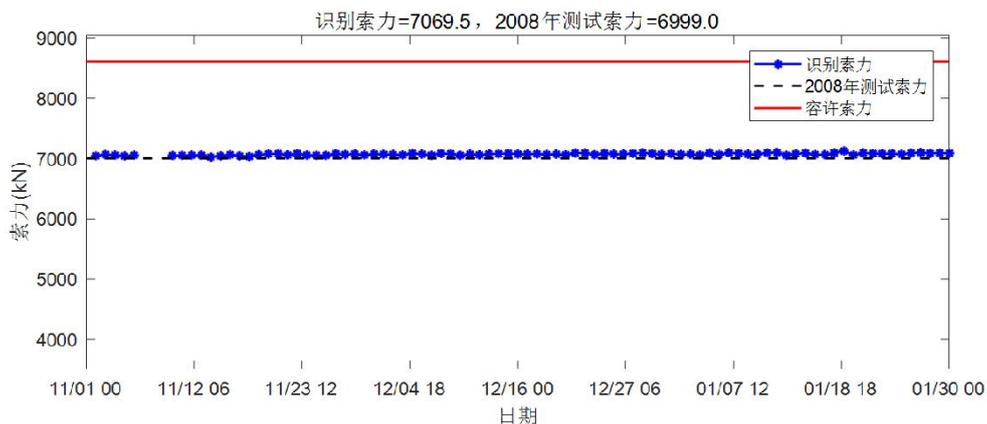
索力图 50-ACC-N-C02-004



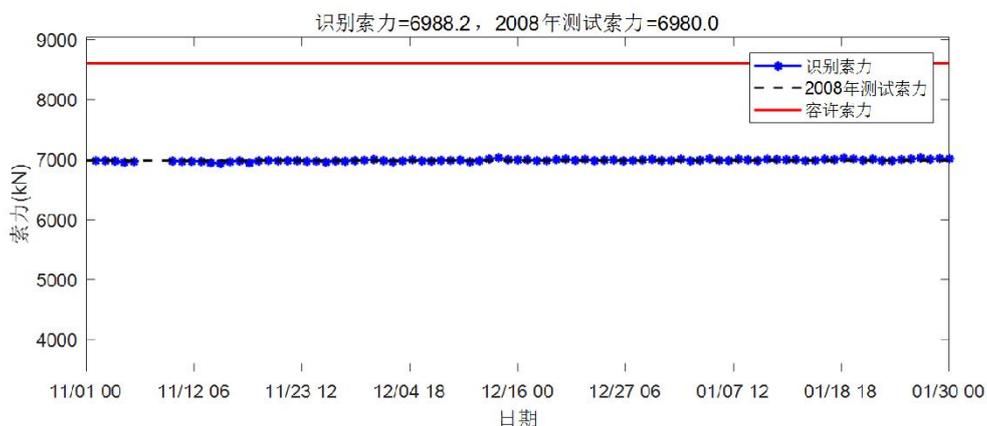
索力图 51-ACC-N-C03-001



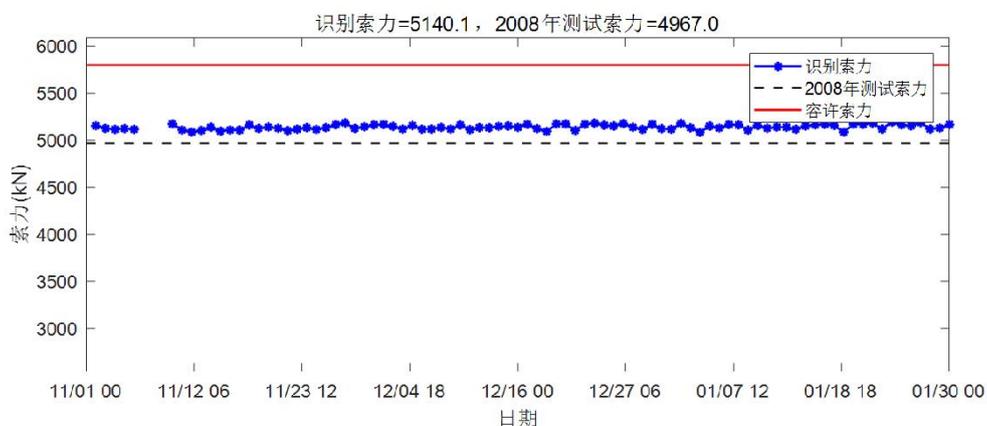
索力图 52-ACC-N-C03-002



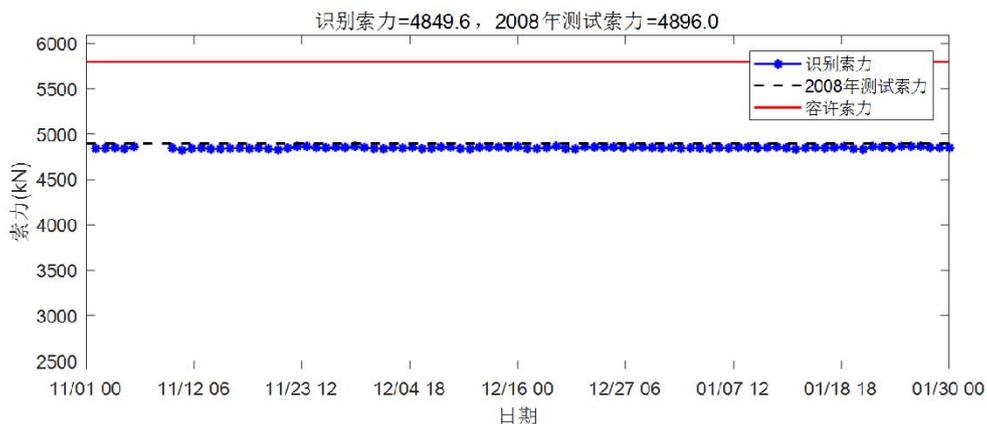
索力图 53-ACC-N-C03-003



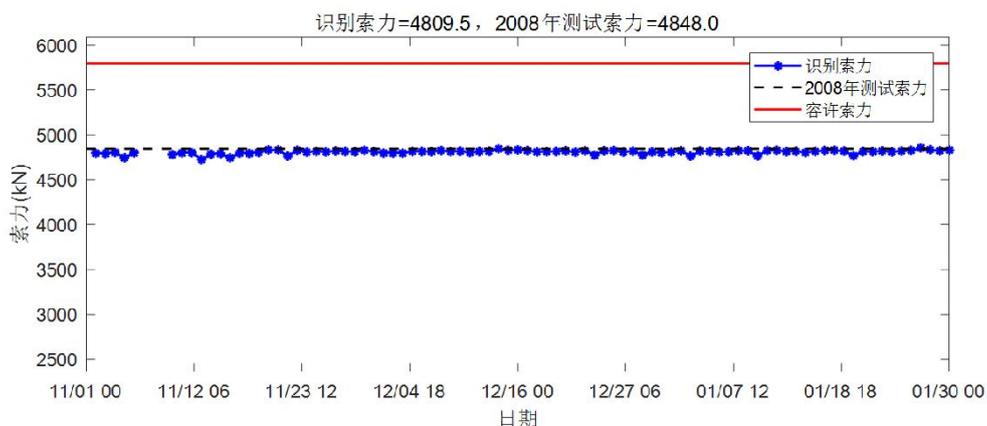
索力图 54-ACC-N-C03-004



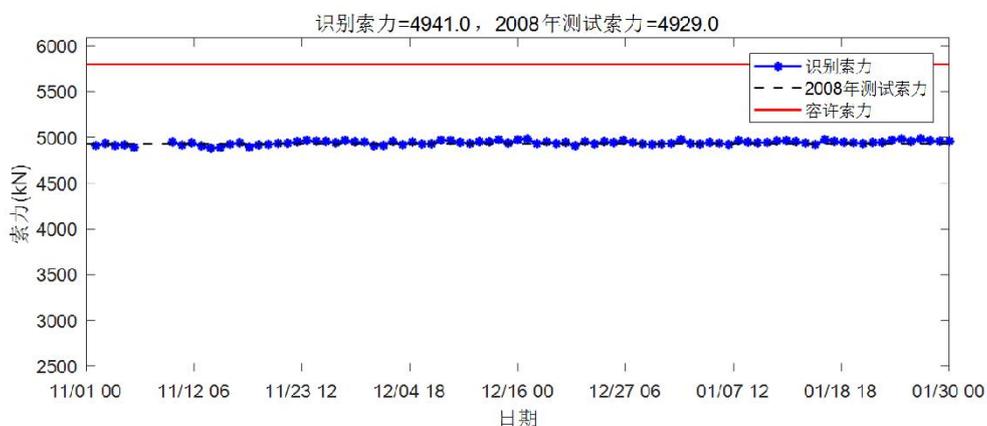
索力图 55-ACC-N-C04-001



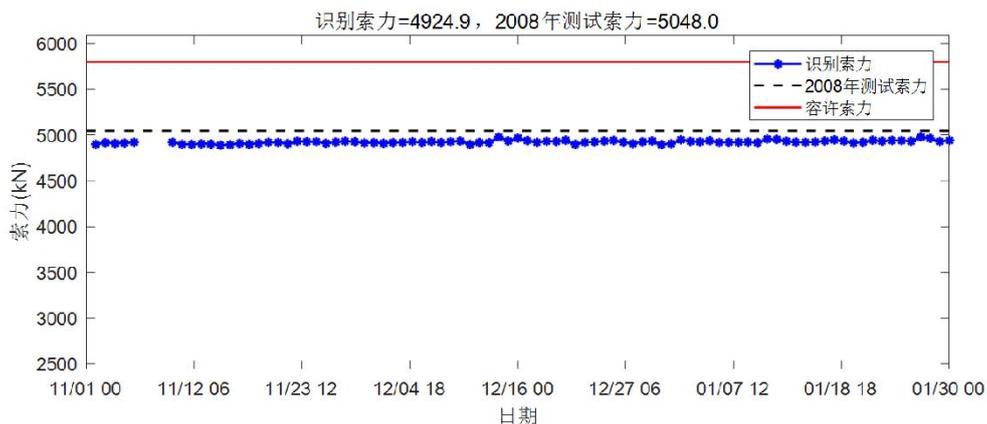
索力图 56-ACC-N-C04-002



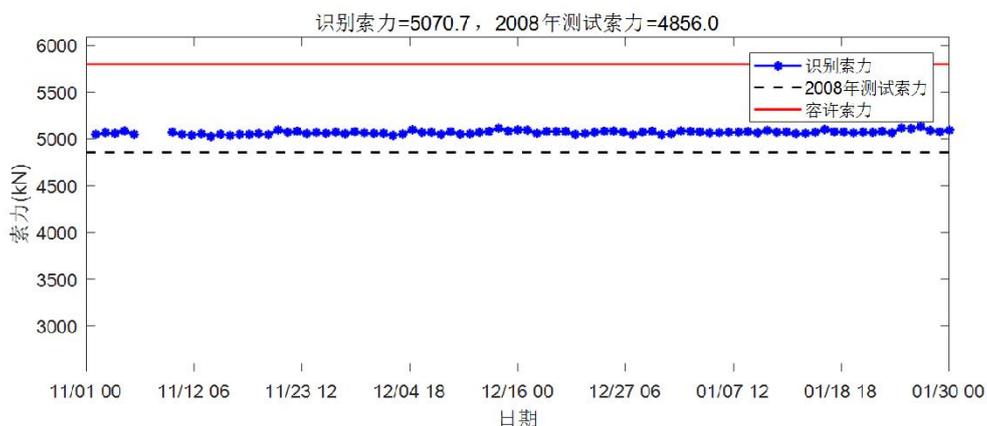
索力图 57-ACC-N-C04-003



索力图 58-ACC-N-C04-004



索力图 59-ACC-N-C04-005



索力图 60-ACC-N-C04-006

圖 1.1.3-3 索力時程圖

表 1.1.3-2 拉索計算索力參數表

列號	名稱	位置	單位品質 (kg/m)	索長(m)	彈性模量(Pa)	截面慣性矩 (m ⁴)	2008 年測試索力(kN)	容許索力 (kN)
1	ACC-W-C01-001	左幅外側斜拉索	59.8	38.09	195000	3.79E+06	4959	5798.8
2	ACC-W-C01-002	左幅中間斜拉索	59.8	38.09	195000	3.79E+06	5123	5798.8
3	ACC-W-C01-003	左幅內側斜拉索	59.8	38.09	195000	3.79E+06	4942	5798.8
4	ACC-W-C01-004	右幅內側斜拉索	59.8	37.52	195000	3.79E+06	4988	5798.8
5	ACC-W-C01-005	右幅中間斜拉索	59.8	37.52	195000	3.79E+06	4886	5798.8
6	ACC-W-C01-006	右幅外側斜拉索	59.8	37.52	195000	3.79E+06	4899	5798.8
7	ACC-W-C02-001	左幅外側斜拉索	89.7	38.59	195000	8.52E+06	7312	8608.9
8	ACC-W-C02-002	左幅內側斜拉索	89.7	38.59	195000	8.52E+06	7448	8608.9
9	ACC-W-C02-003	右幅內側斜拉索	89.7	38.63	195000	8.52E+06	7174	8608.9
10	ACC-W-C02-004	右幅外側斜拉索	89.7	38.63	195000	8.52E+06	6922	8608.9
11	ACC-W-C03-001	左幅外側斜拉索	59.8	38.04	195000	3.79E+06	7228	5798.8
12	ACC-W-C03-002	左幅中間斜拉索	59.8	38.04	195000	3.79E+06	7335	5798.8
13	ACC-W-C03-003	左幅內側斜拉索	59.8	38.04	195000	3.79E+06	7160	5798.8
14	ACC-W-C03-004	右幅內側斜拉索	59.8	38.68	195000	3.79E+06	7139	5798.8
15	ACC-W-C03-005	右幅中間斜拉索	59.8	38.68	195000	3.79E+06	5019	5798.8
16	ACC-W-C03-006	右幅外側斜拉索	59.8	38.68	195000	3.79E+06	4902	5798.8
17	ACC-W-C05-001	左幅外側斜拉索	59.8	37.86	195000	3.79E+06	4922	5798.8
18	ACC-W-C05-002	左幅中間斜拉索	59.8	37.86	195000	3.79E+06	4849	5798.8
19	ACC-W-C05-003	左幅內側斜拉索	59.8	37.86	195000	3.79E+06	4837	5798.8
20	ACC-W-C05-004	右幅內側斜拉索	59.8	37.37	195000	3.79E+06	4775	5798.8
21	ACC-W-C05-005	右幅中間斜拉索	59.8	37.37	195000	3.79E+06	4944	5798.8
22	ACC-W-C05-006	右幅外側斜拉索	59.8	37.37	195000	3.79E+06	4864	5798.8

列號	名稱	位置	單位品質 (kg/m)	索長(m)	彈性模量(Pa)	截面慣性矩 (m ⁴)	2008 年測試 索力(kN)	容許索力 (kN)
23	ACC-W-C04-001	左幅外側斜拉索	89.7	39.68	195000	8.52E+06	4965	8608.9
24	ACC-W-C04-002	左幅內側斜拉索	89.7	39.68	195000	8.52E+06	4688	8608.9
25	ACC-W-C04-003	右幅內側斜拉索	89.7	37.61	195000	8.52E+06	4794	8608.9
26	ACC-W-C04-004	右幅外側斜拉索	89.7	37.61	195000	8.52E+06	4784	8608.9
27	ACC-W-C06-001	左幅外側斜拉索	89.7	38.64	195000	8.52E+06	6872	8608.9
28	ACC-W-C06-002	左幅內側斜拉索	89.7	38.64	195000	8.52E+06	6896	8608.9
29	ACC-W-C06-003	右幅內側斜拉索	89.7	39.23	195000	8.52E+06	6788	8608.9
30	ACC-W-C06-004	右幅外側斜拉索	89.7	39.23	195000	8.52E+06	7004	8608.9
31	ACC-W-C07-001	左幅外側斜拉索	89.7	38.68	195000	8.52E+06	4290	8608.9
32	ACC-W-C07-002	左幅內側斜拉索	89.7	38.68	195000	8.52E+06	4327	8608.9
33	ACC-W-C07-003	右幅內側斜拉索	89.7	38.6	195000	8.52E+06	4242	8608.9
34	ACC-W-C07-004	右幅外側斜拉索	89.7	38.6	195000	8.52E+06	4420	8608.9
35	ACC-W-C08-001	左幅外側斜拉索	59.8	37.93	195000	3.79E+06	4364	5798.8
36	ACC-W-C08-002	左幅中間斜拉索	59.8	37.93	195000	3.79E+06	4412	5798.8
37	ACC-W-C08-003	左幅內側斜拉索	59.8	37.93	195000	3.79E+06	4848	5798.8
38	ACC-W-C08-004	右幅內側斜拉索	59.8	37.81	195000	3.79E+06	4929	5798.8
39	ACC-W-C08-005	右幅中間斜拉索	59.8	37.81	195000	3.79E+06	5048	5798.8
40	ACC-W-C08-006	右幅外側斜拉索	59.8	37.81	195000	3.79E+06	4856	5798.8
41	ACC-N-C01-001	左幅外側斜拉索	59.8	37.49	195000	3.79E+06	4959	5798.8
42	ACC-N-C01-002	左幅中間斜拉索	59.8	37.49	195000	3.79E+06	4856	5798.8
43	ACC-N-C01-003	左幅內側斜拉索	59.8	37.49	195000	3.79E+06	4973	5798.8
44	ACC-N-C01-004	右幅內側斜拉索	59.8	37.74	195000	3.79E+06	5126	5798.8
45	ACC-N-C01-005	右幅中間斜拉索	59.8	37.74	195000	3.79E+06	4801	5798.8

列號	名稱	位置	單位品質 (kg/m)	索長(m)	彈性模量(Pa)	截面慣性矩 (m ⁴)	2008 年測試 索力(kN)	容許索力 (kN)
46	ACC-N-C01-006	右幅外側斜拉索	59.8	37.74	195000	3.79E+06	4727	5798.8
47	ACC-N-C02-001	左幅外側斜拉索	89.7	38.83	195000	8.52E+06	6824	8608.9
48	ACC-N-C02-002	左幅內側斜拉索	89.7	38.83	195000	8.52E+06	6870	8608.9
49	ACC-N-C02-003	右幅內側斜拉索	89.7	39.02	195000	8.52E+06	7108	8608.9
50	ACC-N-C02-004	右幅外側斜拉索	89.7	39.02	195000	8.52E+06	7175	8608.9
51	ACC-N-C03-001	左幅外側斜拉索	89.7	38.83	195000	8.52E+06	7151	8608.9
52	ACC-N-C03-002	左幅內側斜拉索	89.7	38.83	195000	8.52E+06	7035	8608.9
53	ACC-N-C03-003	右幅內側斜拉索	89.7	38.99	195000	8.52E+06	6999	8608.9
54	ACC-N-C03-004	右幅外側斜拉索	89.7	38.99	195000	8.52E+06	6980	8608.9
55	ACC-N-C04-001	左幅外側斜拉索	59.8	37.64	195000	3.79E+06	4967	5798.8
56	ACC-N-C04-002	左幅中間斜拉索	59.8	37.64	195000	3.79E+06	4896	5798.8
57	ACC-N-C04-003	左幅內側斜拉索	59.8	37.64	195000	3.79E+06	4848	5798.8
58	ACC-N-C04-004	右幅內側斜拉索	59.8	37.6	195000	3.79E+06	4929	5798.8
59	ACC-N-C04-005	右幅中間斜拉索	59.8	37.6	195000	3.79E+06	5048	5798.8
60	ACC-N-C04-006	右幅外側斜拉索	59.8	37.6	195000	3.79E+06	4856	5798.8

表 1.1.3-3 澳門友誼橋 2024 年 11 月--2025 年 1 月基頻監測結果 (單位:Hz) (*代表識別錯誤)

拉索編號	2024 年 11 月--2025 年 1 月識別頻率 (HZ)	2008 年測試基頻 (HZ)
ACC-W-C01-001	3.76	3.84
ACC-W-C01-002	3.77	3.903
ACC-W-C01-003	3.73	3.834
ACC-W-C01-004	3.74	3.826
ACC-W-C01-005	3.80	3.787
ACC-W-C01-006	3.79	3.792
ACC-W-C02-001	3.57	3.676
ACC-W-C02-002	3.58	3.71
ACC-W-C02-003	3.56	3.623
ACC-W-C02-004	3.62	3.559
ACC-W-C03-001	3.52	3.655
ACC-W-C03-002	3.55	3.682
ACC-W-C03-003	3.52	3.623
ACC-W-C03-004	3.53	3.618
ACC-W-C03-005	3.54	3.848
ACC-W-C03-006	-	3.803
ACC-W-C05-001	3.85	3.811
ACC-W-C05-002	3.81	3.786
ACC-W-C05-003	3.84	3.782
ACC-W-C05-004	3.90	3.757
ACC-W-C05-005	3.79	3.774
ACC-W-C05-006	3.83	3.743
ACC-W-C04-001	3.80	3.782
ACC-W-C04-002	3.77	3.731
ACC-W-C04-003	3.77	3.773
ACC-W-C04-004	3.75	3.769
ACC-W-C06-001	3.59	3.586
ACC-W-C06-002	3.61	3.592
ACC-W-C06-003	3.59	3.56
ACC-W-C06-004	3.62	3.616
ACC-W-C07-001	3.58	3.52
ACC-W-C07-002	3.65	3.535
ACC-W-C07-003	3.60	3.501
ACC-W-C07-004	3.62	3.514
ACC-W-C08-001	3.77	3.492
ACC-W-C08-002	3.77	3.511
ACC-W-C08-003	3.81	3.74
ACC-W-C08-004	3.78	3.784
ACC-W-C08-005	3.83	3.748
ACC-W-C08-006	3.72	3.739
ACC-N-C01-001	3.77	3.803

拉索編號	2024 年 11 月--2025 年 1 月識別頻率 (HZ)	2008 年測試基頻 (HZ)
ACC-N-C01-002	3.82	3.763
ACC-N-C01-003	3.79	3.808
ACC-N-C01-004	3.81	3.917
ACC-N-C01-005	3.81	3.791
ACC-N-C01-006	3.80	3.761
ACC-N-C02-001	3.64	3.569
ACC-N-C02-002	3.64	3.581
ACC-N-C02-003	3.64	3.587
ACC-N-C02-004	3.58	3.604
ACC-N-C03-001	3.63	3.649
ACC-N-C03-002	3.63	3.62
ACC-N-C03-003	3.63	3.619
ACC-N-C03-004	3.61	3.614
ACC-N-C04-001	3.83	3.799
ACC-N-C04-002	3.75	3.772
ACC-N-C04-003	3.76	3.753
ACC-N-C04-004	3.80	3.796
ACC-N-C04-005	3.79	3.842
ACC-N-C04-006	3.80	3.768

表 1.1.3-4 澳門友誼橋 24 年 11 月--25 年 1 月測試索力值 (單位:kN)

拉索編號	2024 年 11 月--2025 年 1 月識別索力平均值 (kN)	2024 年 11 月--2025 年 1 月識別索力最大值 (kN)	2008 年測試索力 (kN)	容許索力 (kN)	2024 年 11 月--2025 年 1 月測試安全係數
ACC-W-C01-001	4933.56	4971.00	4959	5798.8	2.92
ACC-W-C01-002	4912.64	4940.57	5123	5798.8	2.93
ACC-W-C01-003	4821.76	4845.06	4942	5798.8	2.99
ACC-W-C01-004	4764.83	4796.77	4988	5798.8	3.02
ACC-W-C01-005	4884.97	4915.65	4886	5798.8	2.95
ACC-W-C02-001	6889.45	6943.69	7312	8608.9	3.10
ACC-W-C02-002	6927.61	6988.02	7448	8608.9	3.08
ACC-W-C02-003	7099.22	7164.20	7174	8608.9	3.00
ACC-W-C02-004	6929.35	6970.64	6922	8608.9	3.09
ACC-W-C03-001	3976.49	4008.51	4290	5798.8	3.62
ACC-W-C03-002	4028.15	4052.59	4327	5798.8	3.58
ACC-W-C03-003	4009.63	4032.72	4242	5798.8	3.59
ACC-W-C03-004	4212.88	4233.47	4420	5798.8	3.42
ACC-W-C03-005	4179.43	4201.83	5019	5798.8	3.45
ACC-W-C05-001	5026.17	5054.47	4922	5798.8	2.87
ACC-W-C05-002	4895.27	4968.84	4849	5798.8	2.92
ACC-W-C05-003	4959.34	4990.83	4837	5798.8	2.90

拉索編號	2024年11月-- 2025年1月識 別索力平均值 (kN)	2024年11 月--2025年1 月識別索力 最大值 (kN)	2008年測 試索力 (kN)	容許索力 (kN)	2024年11 月--2025年 1月測試安 全係數
ACC-W-C05-004	5152.46	5189.12	4775	5798.8	2.79
ACC-W-C05-005	4978.01	5002.10	4944	5798.8	2.90
ACC-W-C05-006	4991.75	5014.74	4864	5798.8	2.89
ACC-W-C04-001	4968.20	4992.97	4965	8608.9	4.31
ACC-W-C04-002	4750.22	4773.83	4688	8608.9	4.51
ACC-W-C04-003	4751.76	4772.99	4794	8608.9	4.51
ACC-W-C04-004	4734.67	4777.73	4784	8608.9	4.50
ACC-W-C06-001	6886.43	6927.90	6872	8608.9	3.11
ACC-W-C06-002	6958.92	6988.89	6896	8608.9	3.08
ACC-W-C06-003	6907.44	6930.69	6788	8608.9	3.11
ACC-W-C06-004	7066.84	7096.20	7004	8608.9	3.03
ACC-W-C07-001	4206.00	4487.22	4290	8608.9	4.80
ACC-W-C07-002	4637.31	4657.80	4327	8608.9	4.62
ACC-W-C07-003	4478.27	4508.86	4242	8608.9	4.77
ACC-W-C07-004	4713.50	4742.90	4420	8608.9	4.54
ACC-W-C08-001	5081.96	5146.64	4364	5798.8	2.82
ACC-W-C08-002	5075.52	5111.71	4412	5798.8	2.84
ACC-W-C08-003	4991.31	5071.97	4848	5798.8	2.86
ACC-W-C08-004	4881.57	4904.14	4929	5798.8	2.96
ACC-W-C08-005	5183.32	5228.57	5048	5798.8	2.77
ACC-W-C08-006	4790.73	4811.08	4856	5798.8	3.01
ACC-N-C01-001	4784.45	4809.10	4959	5798.8	3.01
ACC-N-C01-002	4913.52	4934.65	4856	5798.8	2.94
ACC-N-C01-003	4908.83	4926.82	4973	5798.8	2.94
ACC-N-C01-004	4854.90	4895.85	5126	5798.8	2.96
ACC-N-C01-005	4838.38	4858.68	4801	5798.8	2.98
ACC-N-C01-006	4818.40	4840.37	4727	5798.8	3.00
ACC-N-C02-001	7071.49	7113.74	6824	8608.9	3.03
ACC-N-C02-002	7090.08	7181.18	6870	8608.9	3.00
ACC-N-C02-003	7295.75	7345.32	7108	8608.9	2.93
ACC-N-C02-004	7072.41	7139.21	7175	8608.9	3.01
ACC-N-C03-001	7777.93	7344.35	7151	8608.9	2.93
ACC-N-C03-002	7510.69	7088.48	7035	8608.9	3.04
ACC-N-C04-001	5265.43	5176.48	4967	5798.8	2.80
ACC-N-C04-002	5037.35	4896.77	4896	5798.8	2.96
ACC-N-C04-003	4972.25	5411.55	4848	5798.8	2.68
ACC-N-C04-004	4997.88	5473.01	4929	5798.8	2.65
ACC-N-C04-005	4993.34	4929.73	5048	5798.8	2.94
ACC-N-C04-006	5134.83	4085.75	4856	5798.8	3.55

由上文分析可得：實測在 2024 年 11 月--2025 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，2024 年 11 月--2025 年 1 月最大索力對應的安全係數在 2.76~4.79 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 2024/12/15 01:00~02:00 時長 1 小時的主樑振動數據，測點佈設如圖 2.1.7-1 所示。

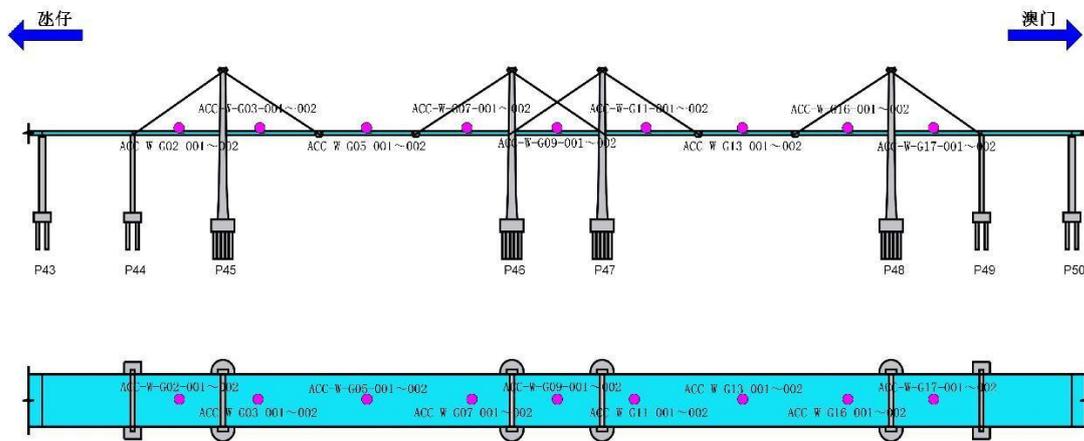


圖 1.1.4-1 外主橋加速度計佈置圖

首先根據測點佈設建立外主橋模態分析模型如下：

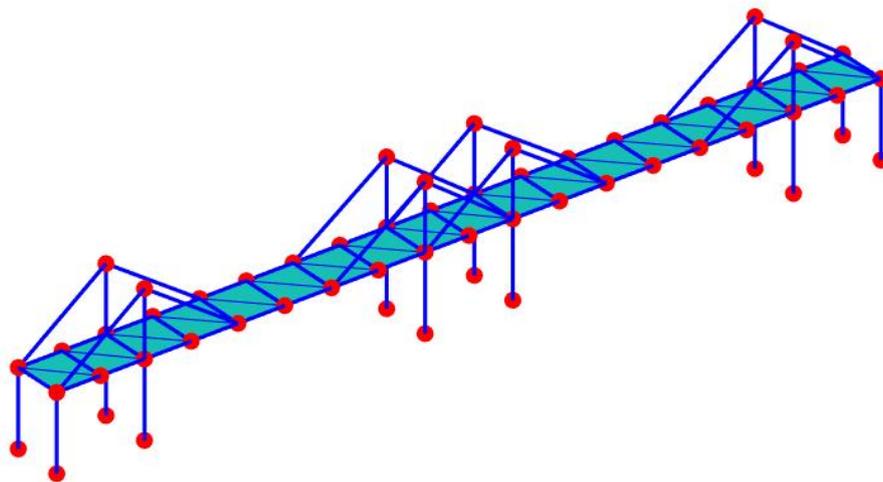


圖 1.1.4-2 外主橋模態識別模型

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：

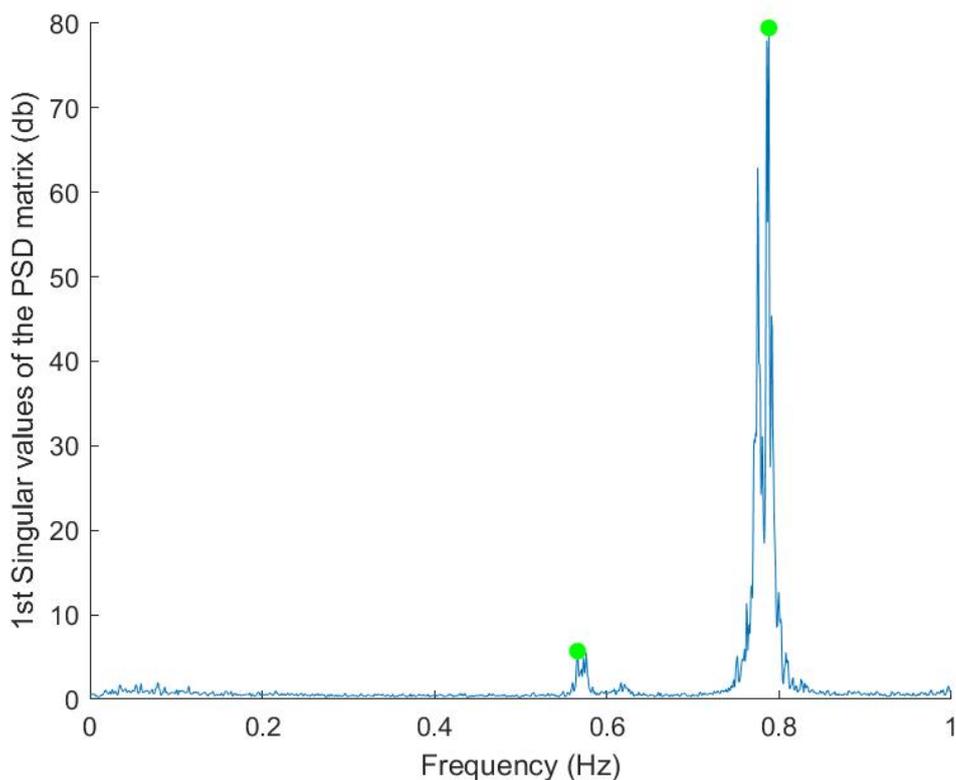


圖 1.1.4-3 外主橋模態頻率峰值拾取

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	2024 年 11 月-- 2025 年 1 月實 測模態頻率 (Hz)	2024 年 8 月-- 10 月實測模態 頻率 (Hz)	2024 年 5 月-- 7 月實測模態 頻率 (Hz)	2024 年 2 月-- 4 月實測模態 頻率 (Hz)	2017--2018 年 實測模態頻率 (Hz)
1	0.5721	0.5669	0.5721	0.5735	0.5547
2	0.7873	0.7903	0.7873	0.7915	0.7668

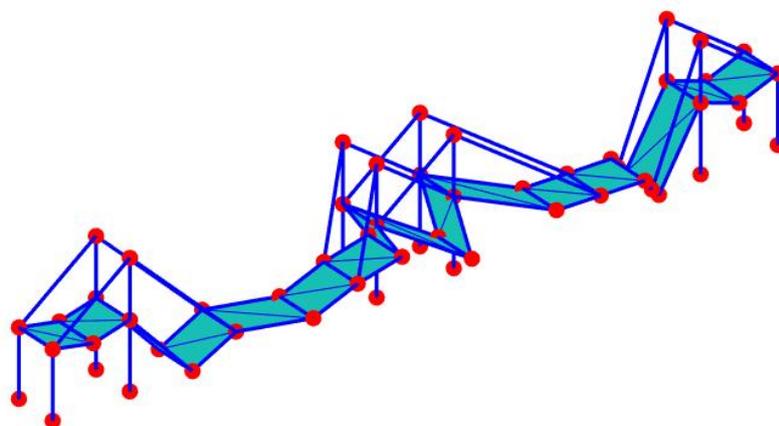


圖 1.1.4-4 第一階振型

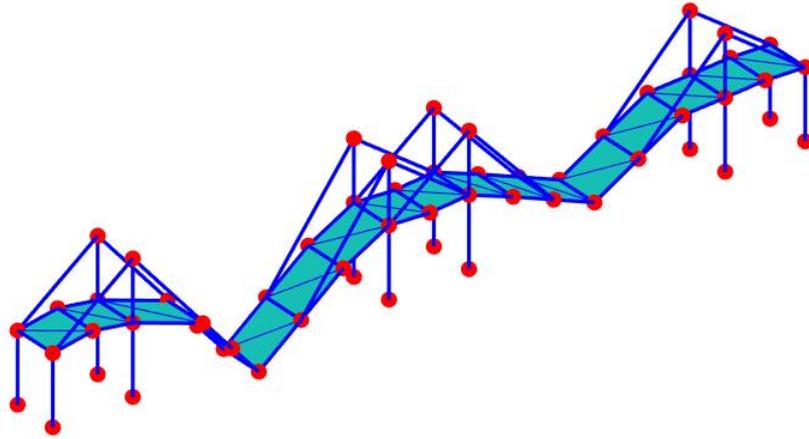


圖 1.1.4-5 第二階振型

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 2024/25/15 01:00~02:00 時長 1 小時的主樑振動數據，測點佈設如圖所示。

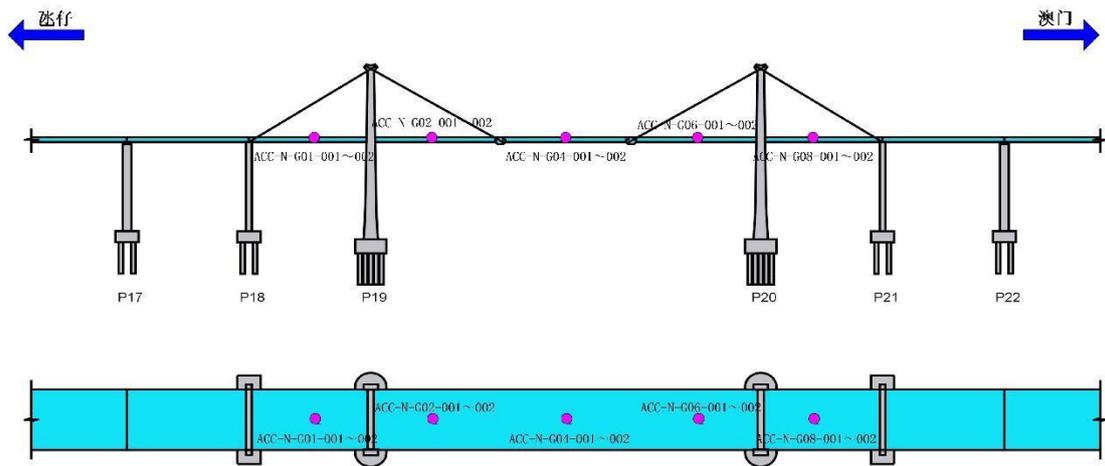


圖 1.1.4-6 內主橋加速度計佈置圖

根據測點佈設建立內主橋模態分析模型如下：

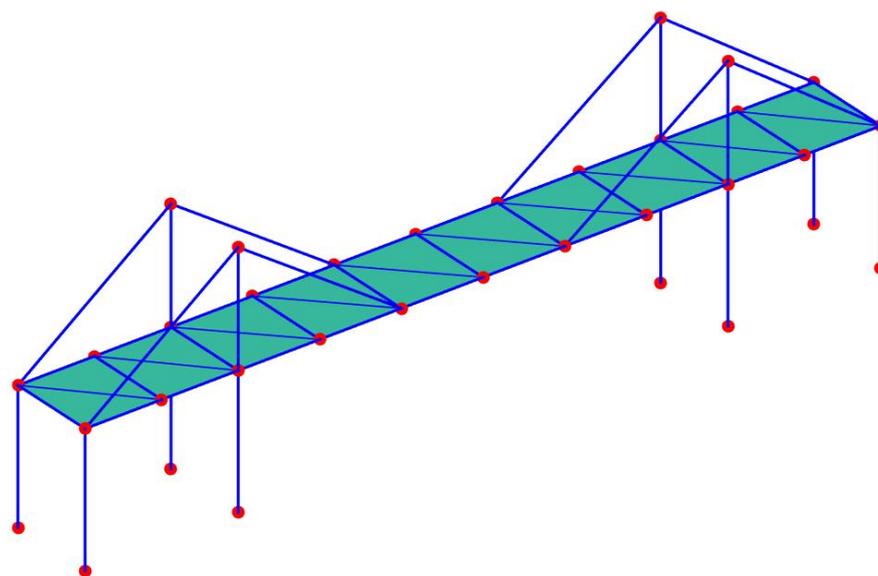


圖 1.1.4-7 內主橋模態識別模型

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：

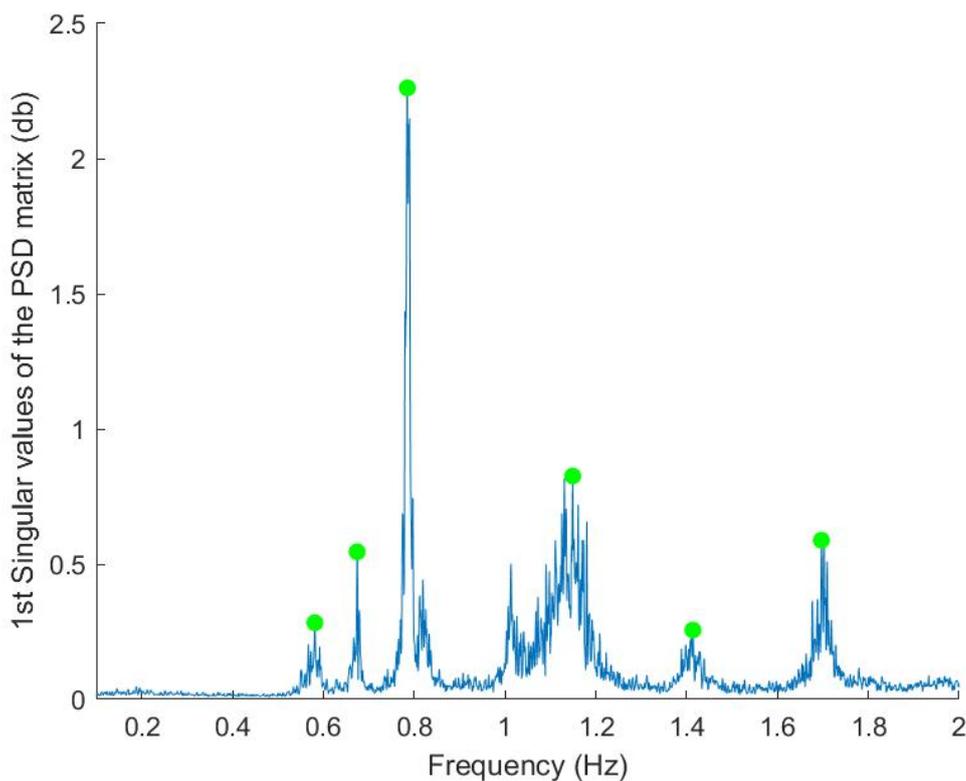


圖 1.1.4-8 內主橋模態頻率峰值拾取

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	2024 年 11 月- -2025 年 1 月 實測模態頻率	2024 年 8 月-- 10 月實測模態 頻率	2024 年 5 月-- 7 月實測模態 頻率 (Hz)	2024 年 2 月-- 4 月實測模態 頻率 (Hz)	2017--2018 年 實測模態頻率 (Hz)

	(Hz)	(Hz)			
1	0.5756	0.5743	0.5709	0.5749	0.511
2	0.6744	0.6706	0.6710	0.6774	0.617
3	0.7860	0.7800	0.7807	0.7839	0.768
4	1.1371	1.1150	1.1129	1.1329	1.035
5	1.4135	1.4016	1.3940	1.3946	1.387
6	1.6903	1.6807	1.6767	1.6946	1.637

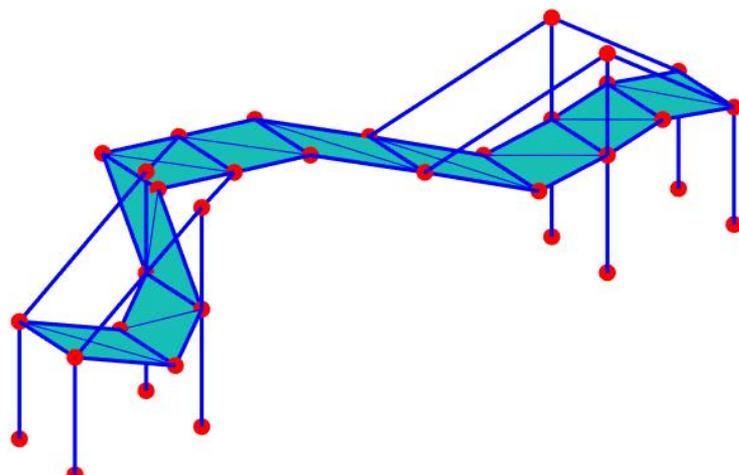


圖 1.1.4-9 第一階振型

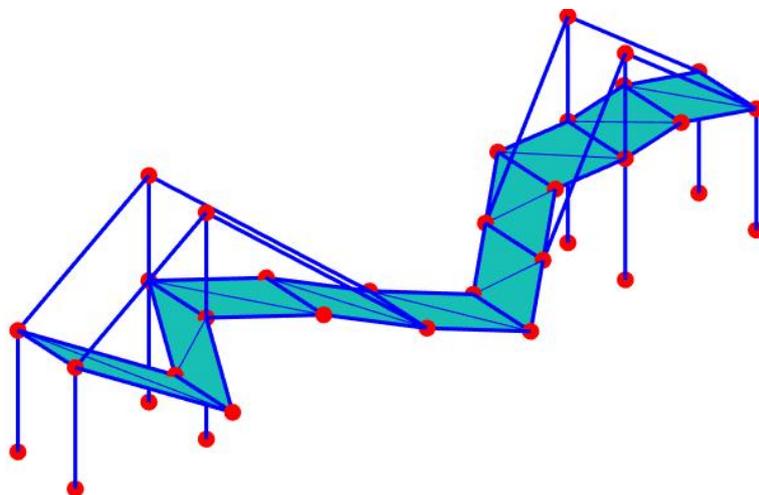


圖 1.1.4-10 第二階振型

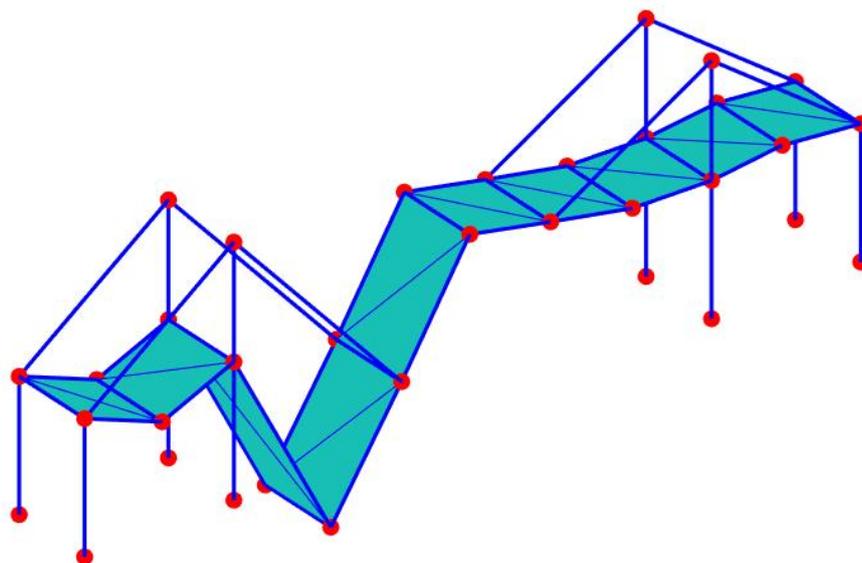


圖 1.1.4-11 第三階振型

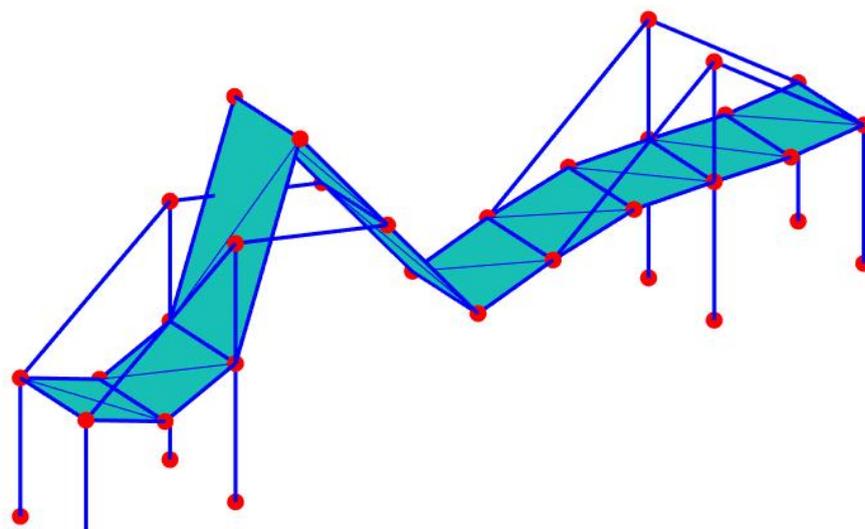


圖 1.1.4-12 第四階振型

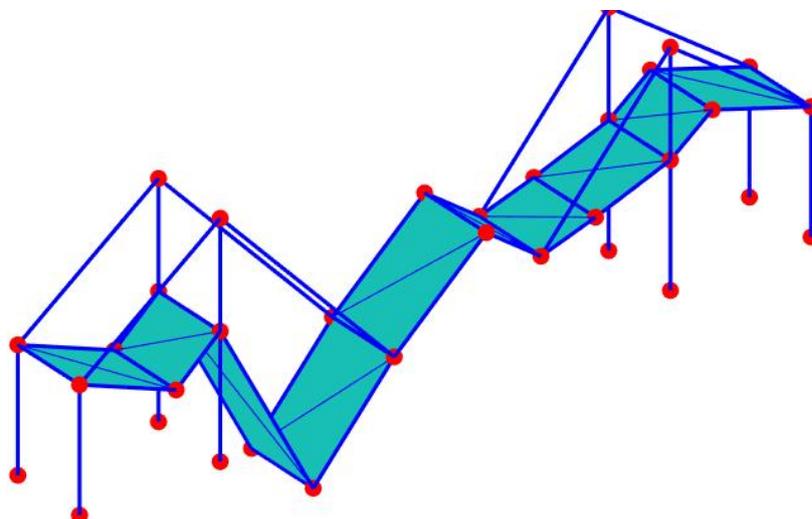


圖 1.1.4-13 第五階振型

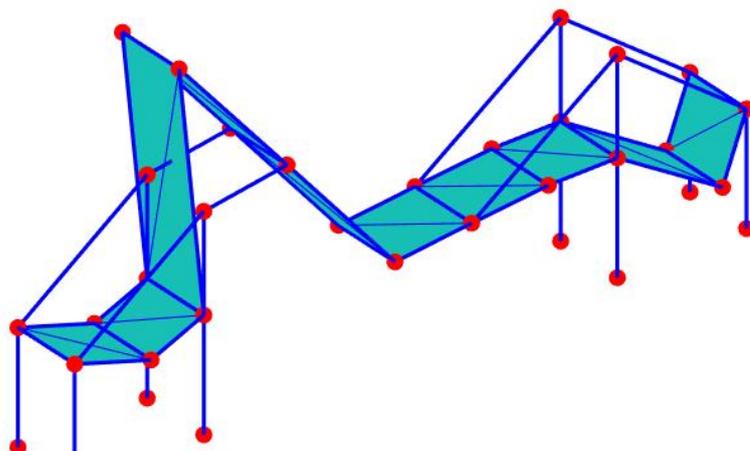


圖 1.1.4-14 第六階振型

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 2024/25/15 10:00~11:00 時長 1 小時的主樑振動數據，測點佈設如圖所示。

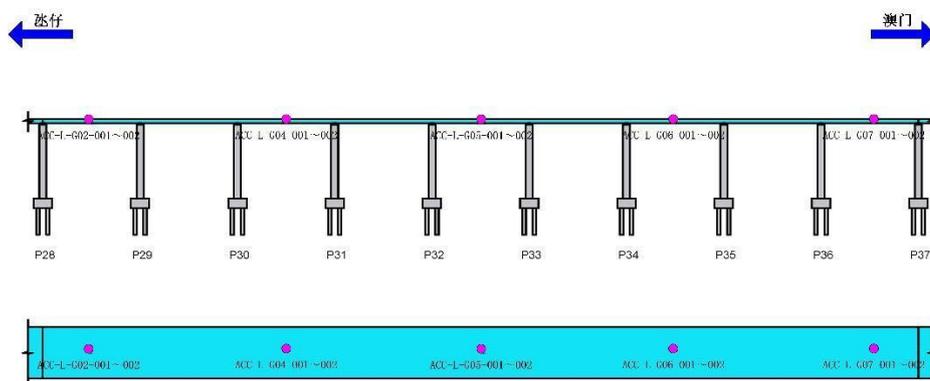


圖 1.1.4-15 高架連續梁振動監測點佈置圖

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分析模型如下：

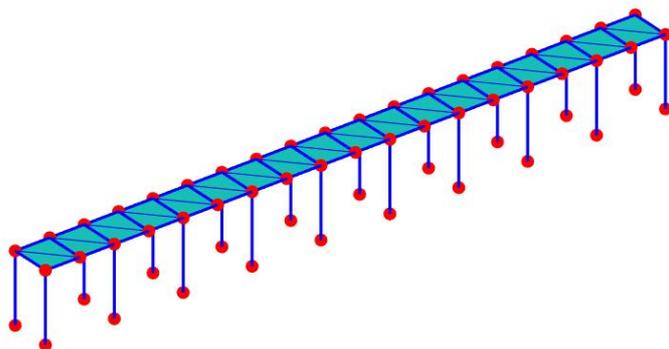


圖 1.1.4-16 高架連續梁模態識別模型

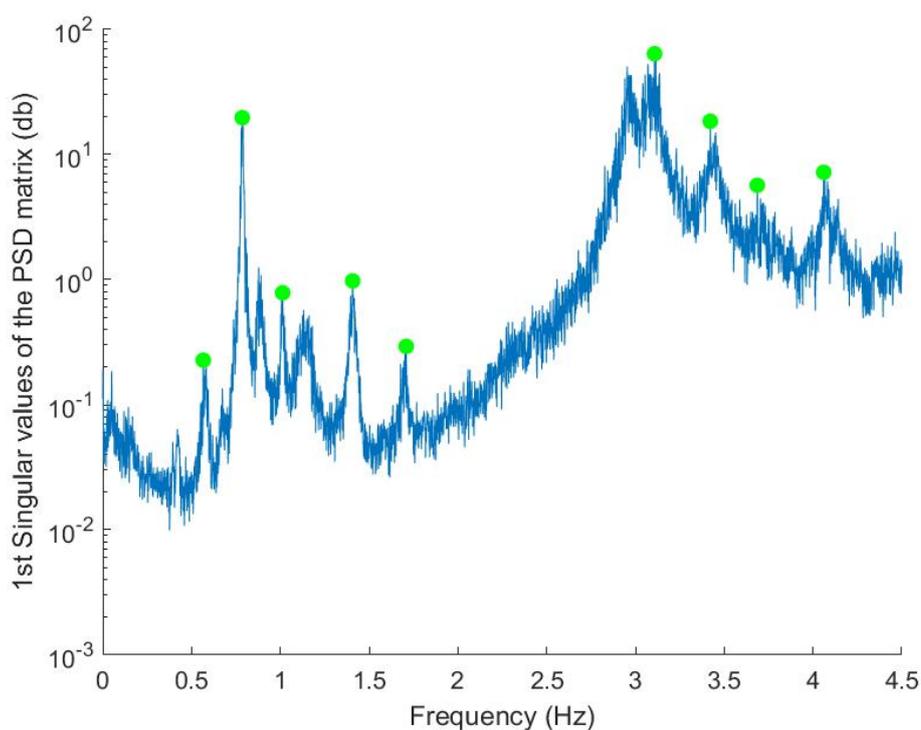


圖 1.1.4-17 連續梁模態頻率峰值拾取

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	2024 年 11 月--2025 年 1 月實測模態頻率 (Hz)	24 年 8 月--10 月實測模態頻率 (Hz)	2024 年 5 月--7 月實測模態頻率 (Hz)	2024 年 2 月--4 月實測模態頻率 (Hz)	2017--2018 年實測模態頻率 (Hz)
	0.5778	0.5735	0.7511	0.5742	-
1	0.7861	0.7800	0.7808	0.7840	-
2	1.0124	1.0088	-	1.1355	-
3	1.4091	1.4015	1.3933	1.3949	-

	1.7091	1.6818	1.6817	1.6945	-
4	-	-	2.9512	-	3.046
6	3.0966	3.0423	-	3.0427	3.357
7	3.6865	3.7392	3.6613	3.7223	3.637
8	4.0715	4.0717	4.0327	4.0861	3.981

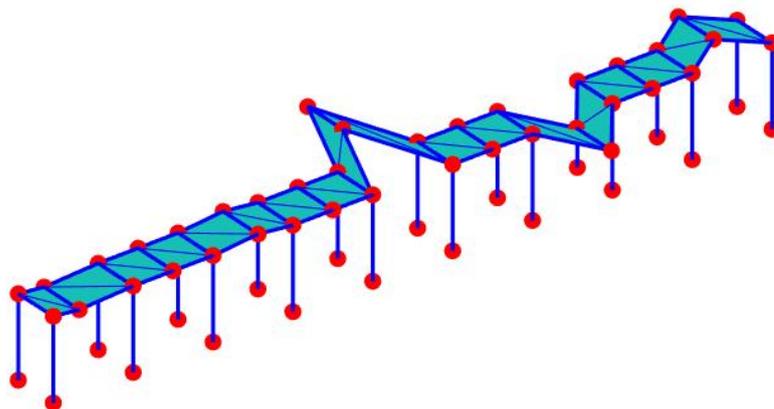


圖 1.1.4-18 連續梁第 3 階模態

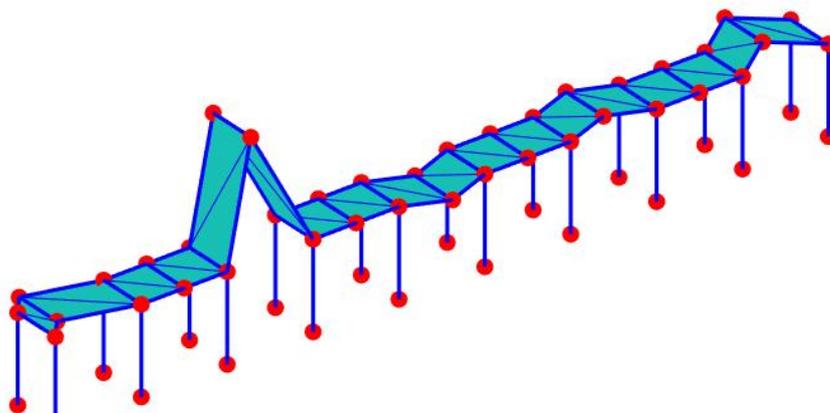


圖 1.1.4-19 連續梁第 4 階模態

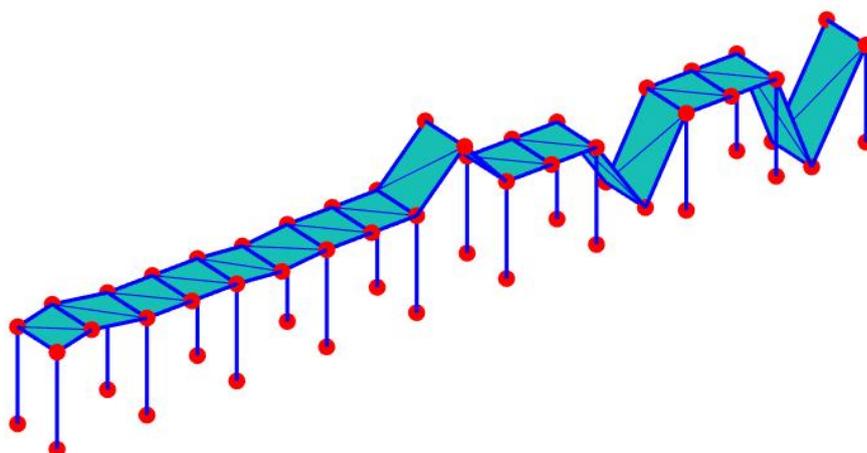


圖 1.1.4-20 連續梁第 6 階模態

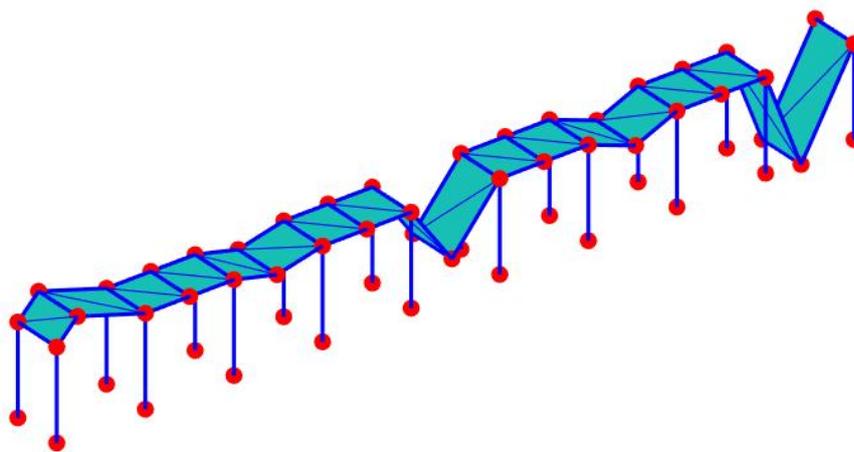


圖 1.1.4-21 連續梁第 7 階模態

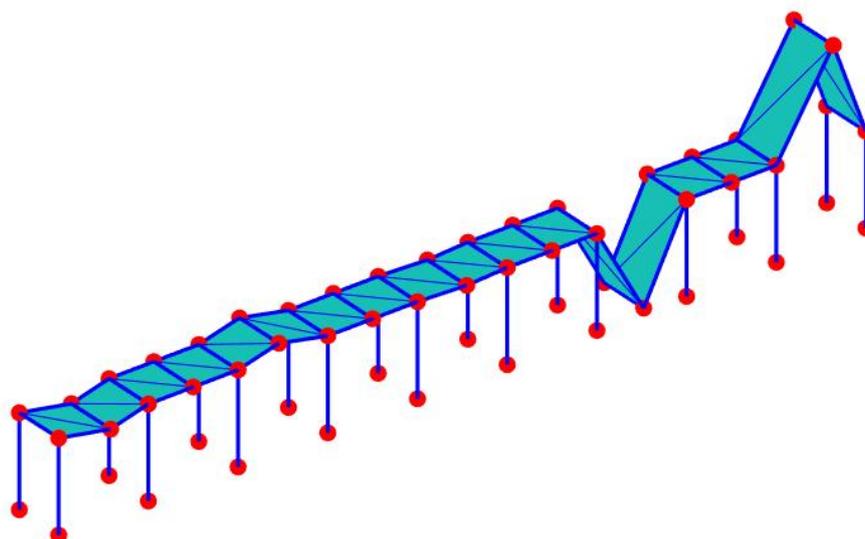


圖 1.1.4-22 連續梁第 8 階模態

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

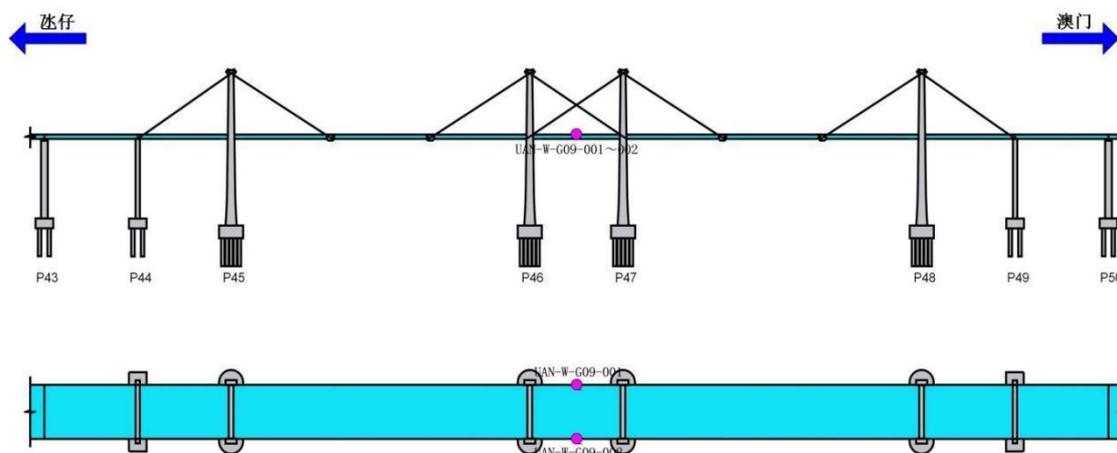
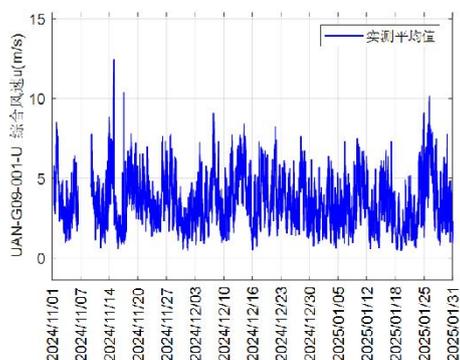


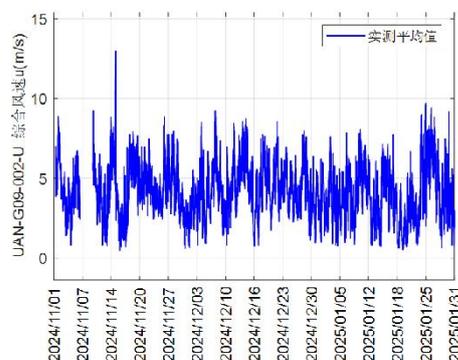
圖 1.2.1-1 外主橋索塔風速儀感測器位置

表 1.2.1-1 外主橋風速監測資訊一覽表

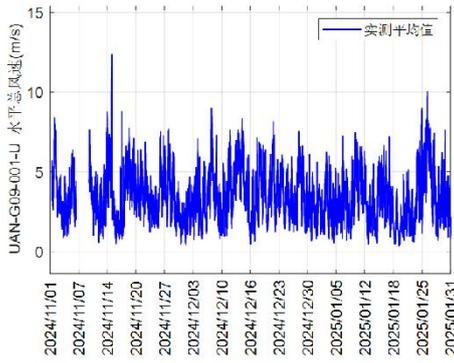
感測器編號	位置	監測項	數量
UAN-G09-001-U	外主橋 P46、P47 橋塔之間跨跨中截面西側	風速	1
UAN-G09-001-V	外主橋 P46、P47 橋塔之間跨跨中截面西側	風速	1
UAN-G09-001-W	外主橋 P46、P47 橋塔之間跨跨中截面西側	風速	1
UAN-G09-002-U	外主橋 P46、P47 橋塔之間跨跨中截面東側	風速	1
UAN-G09-002-V	外主橋 P46、P47 橋塔之間跨跨中截面東側	風速	1
UAN-G09-002-W	外主橋 P46、P47 橋塔之間跨跨中截面東側	風速	1



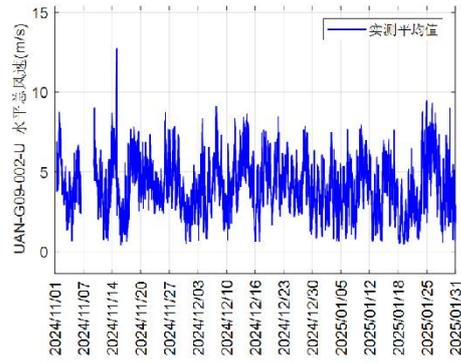
UAN-G09-001-U 綜合風速 u



UAN-G09-002-U 綜合風速 u



UAN-G09-001-U 水平总风速



UAN-G09-002-U 水平总风速

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	12.4	2024-11-15 03:50	0.5	2025-01-20 03:30	11.9	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	13.0	2024-11-15 03:50	0.5	2024-11-16 02:40	12.5	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	12.4	2024-11-15 03:50	0.4	2025-01-20 03:30	12.0	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	12.7	2024-11-15 03:50	0.4	2024-11-16 02:40	12.3	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

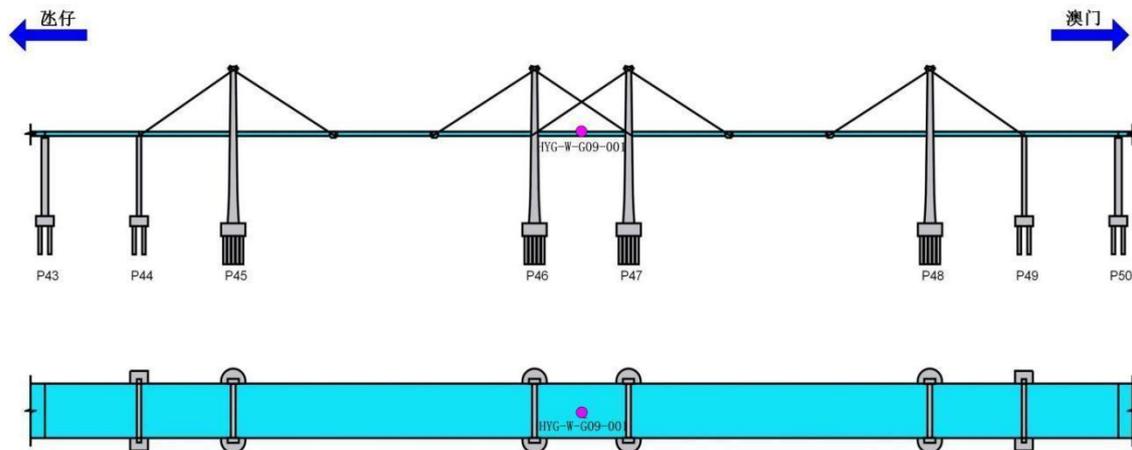


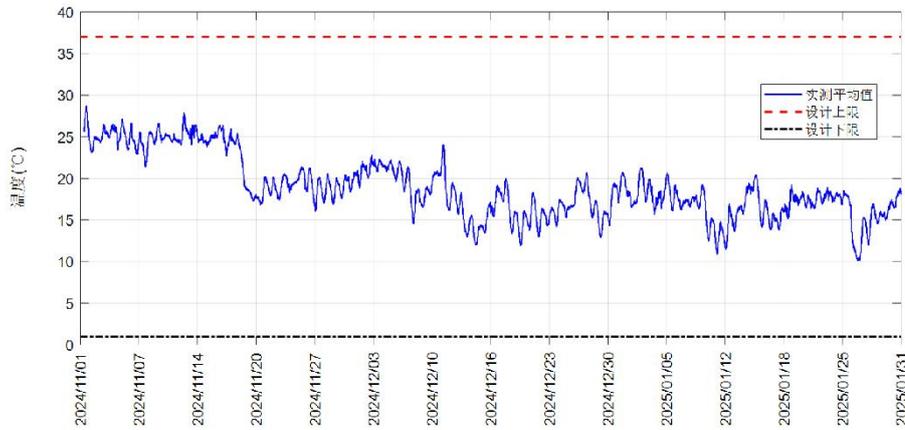
圖 1.2.2-1 外主橋橋面溫濕度佈置

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

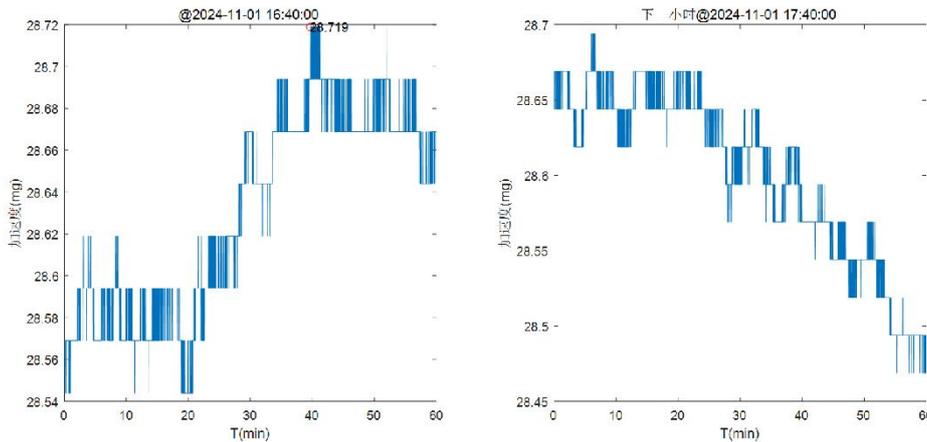
表 1.2.2-2 總體統計最值表 (°C)

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	28.7	2024-11-01 16:40	10.2	2025-01-27 03:10	18.5	P46、P47 墩間橋面跨中
最小值	HYG-W-G09-001-溫度	28.7	2024-11-01 16:40	10.2	2025-01-27 03:10	18.5	P46、P47 墩間橋面跨中



HYG-W-G09-001-溫度

最大值@2024-11-01 16:40:00

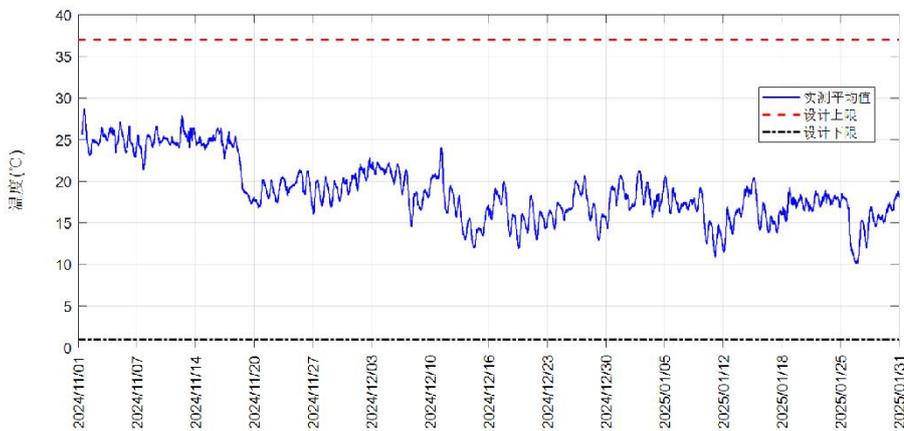


最大值一小時原始時程圖

圖 1.2.2-2 溫度最大值時程圖

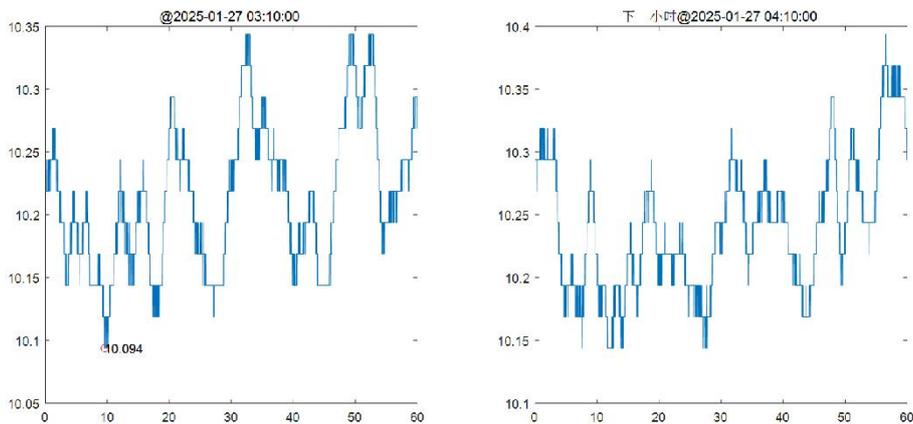
以上分析表明，全橋最高溫度為 28.68°C，發生在 P46、P47 墩間橋面跨中（感測器編號：HYG-W-G09-001-溫度），時間為 2024-11-01 16:40；對應時刻原

始数据分析表明，该时段温度波动正常，最大瞬时温度为 28.72°C，温度在 28.54~28.72°C 之间波动；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@2025-01-27 03:10:00



最小值一小時原始時程圖

圖 1.2.2-3 溫度最小值時程圖

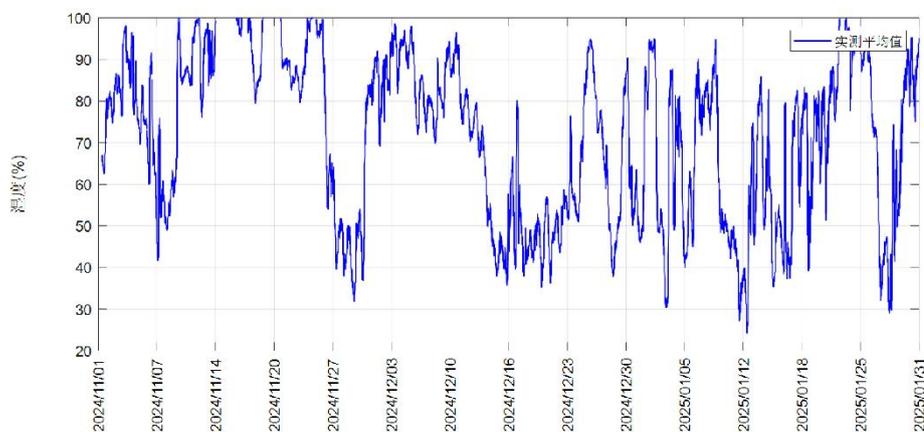
以上分析表明，全橋最小溫度为 10.18°C，发生在 P46、P47 墩间桥面跨中（传感器编号：HYG-W-G09-001-溫度），时间为 2025-01-27 03:10；对应时刻原始数据分析表明，该时段温度波动正常，最小瞬时温度为 10.09°C，温度在 10.09~10.34°C 之间波动。因此，該位置處溫度變化無異常。

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-	100.0	2024-11-	24.2	2025-01-	75.8	P46、P47 墩

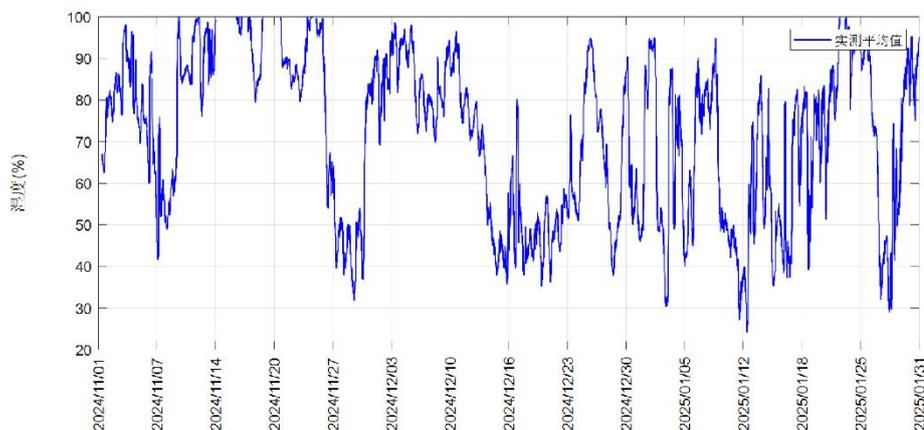
	G09-001-湿度		12 05:40		12 17:10		间桥面跨中
最小值	HYG-W-G09-001-湿度	100.0	2024-11-12 05:40	24.2	2025-01-12 17:10	75.8	P46、P47 墩间桥面跨中



HYG-W-G09-001-湿度

圖 2.2.2- 1 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（傳感器編號：HYG-W-G09-001-濕度），時間為 2024-11-12 05:40，濕度較大，需引起注意。



HYG-W-G09-001-濕度

圖 1.2.2-4 濕度最小值時程圖

以上分析表明，全橋最小濕度為 24.24%，發生在 P46、P47 墩間橋面跨中（傳感器編號：HYG-W-G09-001-濕度），時間為 2025-01-12 17:10。

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57.05mm，最小位移為15.88mm；連續梁梁端最大位移為33.25mm，最小位移為-112.88mm；外主橋樑端最大位移為40.38mm，外主橋最小位移為-68.10mm，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. 主樑撓度：

內主橋最大撓度為 72.29mm，最小撓度為-42.68mm，最大撓度變化為 82.43mm；外主橋最大撓度為 35.48mm，最小撓度為-41.80mm，最大撓度變化為 77.28mm。內、外主橋最大下撓均未超過對應截面黃色預警值：內主橋 G03 截面：144mm，外主橋 G04 截面：107.2mm。

3. 主樑振動：

內主橋最大加速度為4.38mg，外主橋最大加速度為4.64mg，連續梁最大加速度為4.81mg，振動幅度較低，未對結構產生影響。

4. 斜拉索振動：

外主橋拉索最大加速度為58.81mg，發生在右幅中間斜拉索；內主橋拉索最大加速度為72.31mg，發生在右幅中間斜拉索，內、外主橋斜拉索振動基本在 100mg 以下。

5. 模態分析：

模態分析表明，主橋2024年11月--2025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。

6. 車輛荷載：

2024年11月--2025年1月監測期間小客車或小貨車占比較大，分別為72%、71%和67%，特大貨車占比較小基本在1%以下。總車流量4388400輛。該監測期間無超過42噸以上超重車輛，最大車載為41.0噸。超速車輛占比重極小均在 0.1% 以下，對橋樑衝擊影響較小。

2.2 環境類

1. 風速：

外主橋橋面風速最大值為13.0m/s，未超過設計運營風速（25m/s）。

2. 內部溫度：

環境最大溫度為 28.68°C，最小溫度為 10.18°C，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24.2%，全橋濕度較大，需引起注意。

綜上所述，澳門友誼橋 2024 年 11 月--2025 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。