

## 第 2 章 SDP 軟體的組成模組

Shaft Design Platform (SDP)軟體的特點在於採用 Euler Beam 或 Timoshenko Beam 的理論來進行軸系的各種計算與分析，為降低軸系設計人員的工作壓力，縮短軸系設計開發的時程，SDP 提供了多個軸系計算與分析模組，而且軸系的數學模型可以在不同的模組之間自動進行轉換，強調一次性的軸系建模，即可完成所有必要的軸系計算與分析工作。截至目前為止，SDP 軸系軟體所提供的軸系計算與分析模組共有 7 個：(1)一維靜態分析模組(Static Analysis 1D)，(2)二維靜態分析模組(Static Analysis 2D)，(3)下垂量與間隙量分析模組(Sag and Gap Analysis)，(4)側向振動分析模組(Transverse Vibration Analysis Full)，(5)軸向振動分析模組(Axial Vibration Analysis Full)，(6)扭轉振動分析模組(Torsional Vibration Full)，(7)軸系轉換器(Shaft Converter)。上述 7 個軸系計算與分析模組的相關功能，敘述如下。

### 2.1 一維靜態分析模組(Static Analysis 1D)

船艦在不同的船況下(例如：空載、半載、滿載、上船塢、...等)，船體結構會有不同程度的變形產生，而上述船體變形將造成軸系支撐軸承的偏移(Offset)，進而導致軸承負載(Bearing Load)不均勻分佈或軸承負載(或壓力)改變。因此，對於船艦軸系而言，無論軸系在任何條件下運作，每一個軸系軸承負載都必需要均勻分佈，且其負載與壓力必需在支撐軸承的可允許範圍內，這是軸系在初始設計階段必須要確認的重要工作。軸系在任何條件下運作，如果軸承負載不均

勻、軸承負載(或壓力)超過支撐軸承的可允許範圍，則上述支撐軸承可能損壞，進而威脅船艦的安全性。由於上述緣故，在軸系的初始設計階段，使用正確可靠的理論來計算垂直靜態軸承載荷（或壓力），並確認支撐軸承負載是否均勻分佈，是船艦軸系設計的最基本要求。關於軸系支撐軸承的垂直靜態負載(或壓力)的計算，有限元素法（Finite Element Method）和三力矩方程式法（Three Moment Equation Method）是較為廣泛使用的理論。SDP 軟體將採用有限元素法（Finite Element Method）與 Euler Beam 的理論，來計算支撐軸承垂直靜態載荷（或壓力），並確認支撐軸承負載是否均勻分佈，以便協助軸系設計人員在軸系初始設計階段，快速確認推進軸系上每一個支撐軸承負載(或壓力)的合理性。除了軸系支撐軸承的負載(或壓力)計算，SDP 軟體也可以計算船艦在不同船況下的軸系撓曲曲線、節點旋轉角度曲線、剪力曲線、剪應力曲線、彎矩曲線、彎曲應力曲線和影響係數矩陣，以協助軸系設計人員，快速確認推進軸的強度是否在可接受範圍之內，以避免未來發生斷軸的情形。

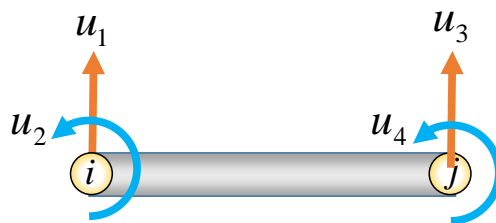


圖 2.1 一維靜態分析模組(Static Analysis 1D)所採用的 2 節點 4 自由度樑元素

SDP 軟體的一維靜態分析模組(Static Analysis 1D)採用 2 節點 4 自由度的樑元素(參考圖 2.1)作為軸系靜態分析的理論基礎，由圖 2.1 可以發現，該樑元素並沒有水平方向的自由度，換句話說，上述樑元素無法考慮水平方向的作用力，因

此，SDP 軟體的一維靜態分析模組(Static Analysis 1D)只能用來進行沒有傾斜角度之軸系(即水平軸系)的靜態分析。如果要分析具有傾斜角度的軸系(即傾斜軸系)，則必須採用 SDP 軟體的二維靜態分析模組(Static Analysis 2D)。

SDP 軟體的一維靜態分析模組(Static Analysis 1D)可計算輸出的資料，簡述如下：

- ◎軸承負載(Bearing Load)
- ◎撓曲曲線(Deflection Curve)
- ◎節點旋轉角度曲線(Node Rotational Angle Curve)
- ◎剪力曲線(Shear Force Curve)
- ◎剪應力曲線(Shear Stress Curve)
- ◎彎矩曲線(Bending Moment Curve)
- ◎彎曲應力曲線(Bending Stress)
- ◎影響係數矩陣(Influence coefficient matrix)
- ◎完整報告輸出(Output Full Report)
- ◎自動繪製不同船況下之各類曲線圖，包括：軸承負載、撓曲曲線、節點旋轉角度曲線、剪力曲線、剪應力曲線、彎矩曲線、彎曲應力曲線等。

SDP 軟體所繪製的軸系軸承負載示意圖請參考圖 2.2，軸系撓曲曲線與節點旋轉角度曲線請參考圖 2.3，軸系剪力曲線與剪應力曲線請參考圖 2.4，軸系彎矩曲線與彎曲應力曲線請參考圖 2.5。SDP 軟體可自動計算不同船況下之各類曲線，並自動繪製相關曲線圖，以協助工程師能快速強化軸系設計。

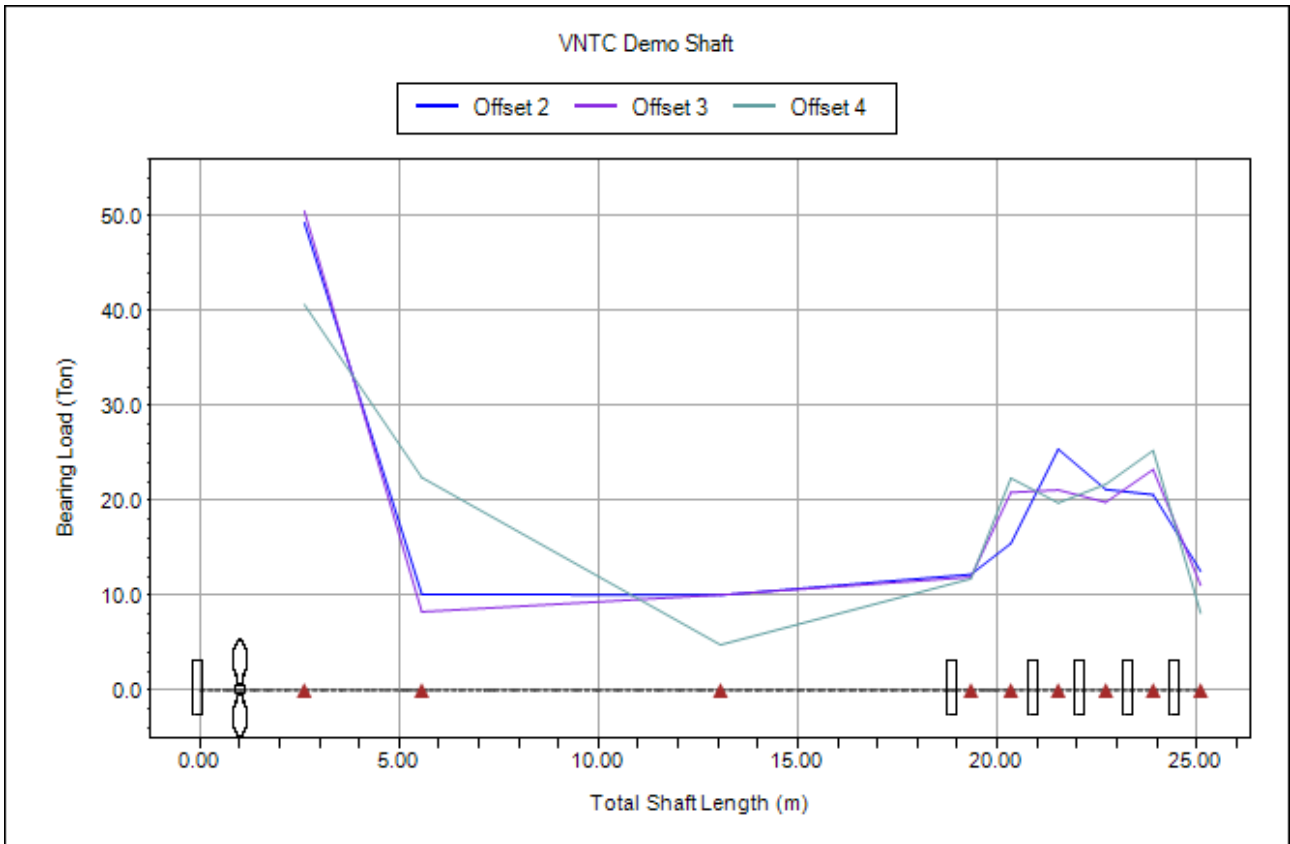
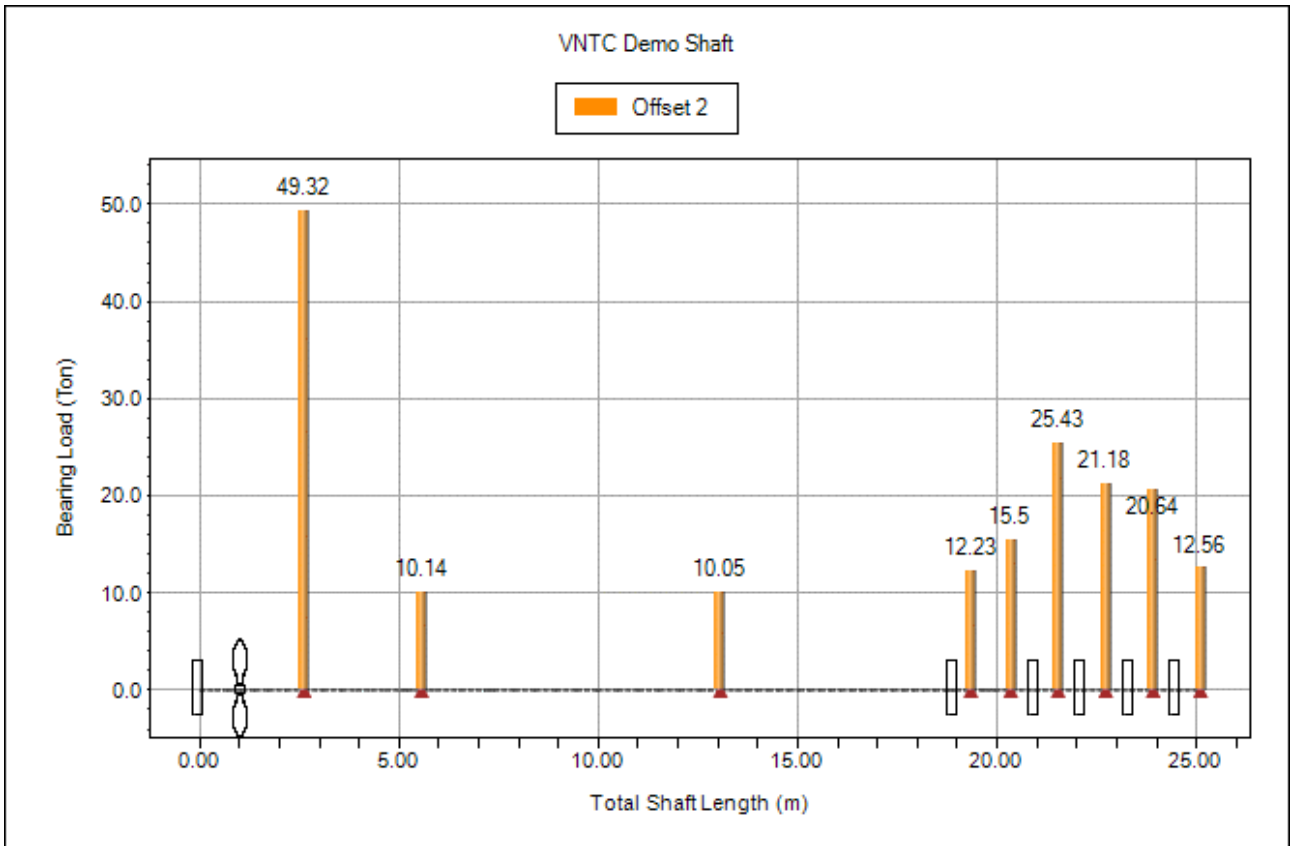


圖 2.2 SDP 軟體所繪製的軸系軸承負載示意圖

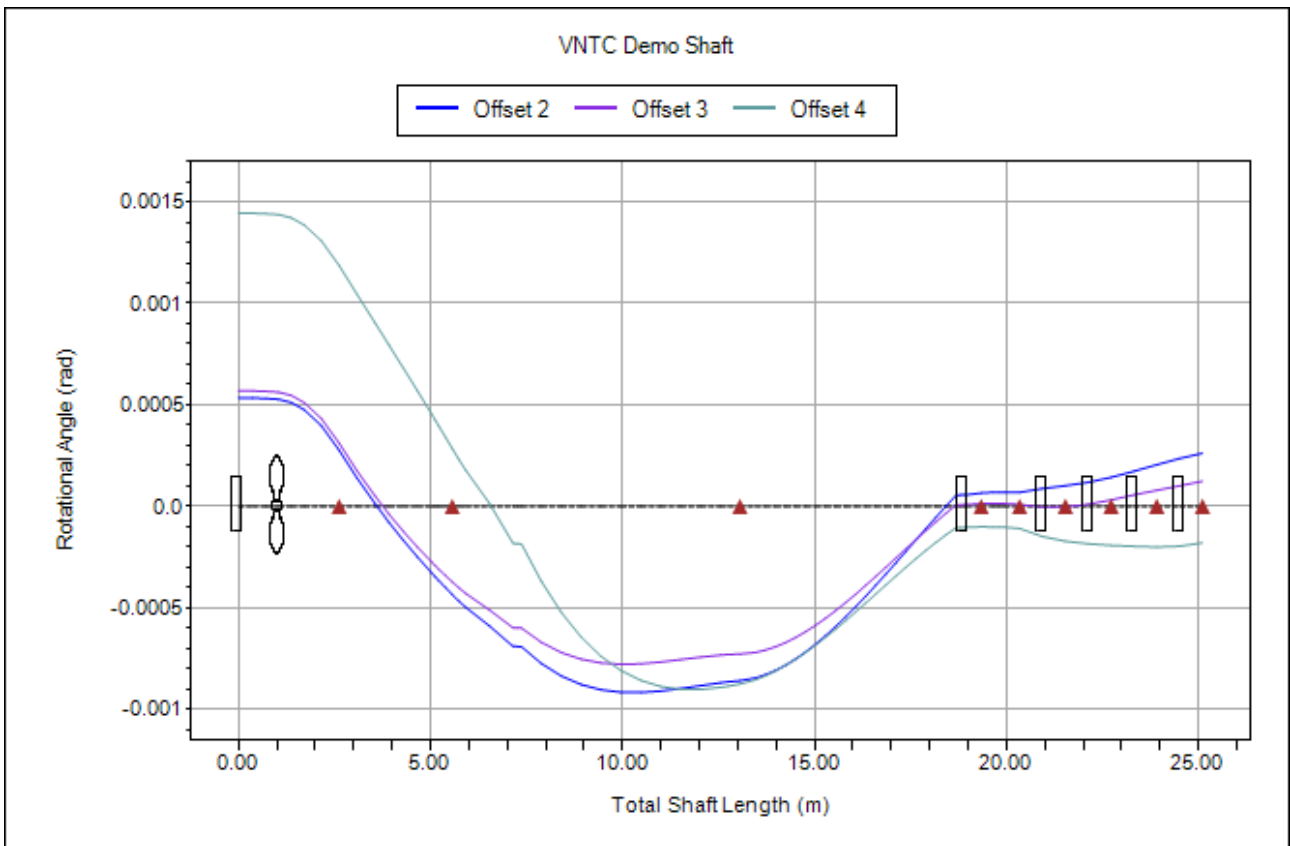
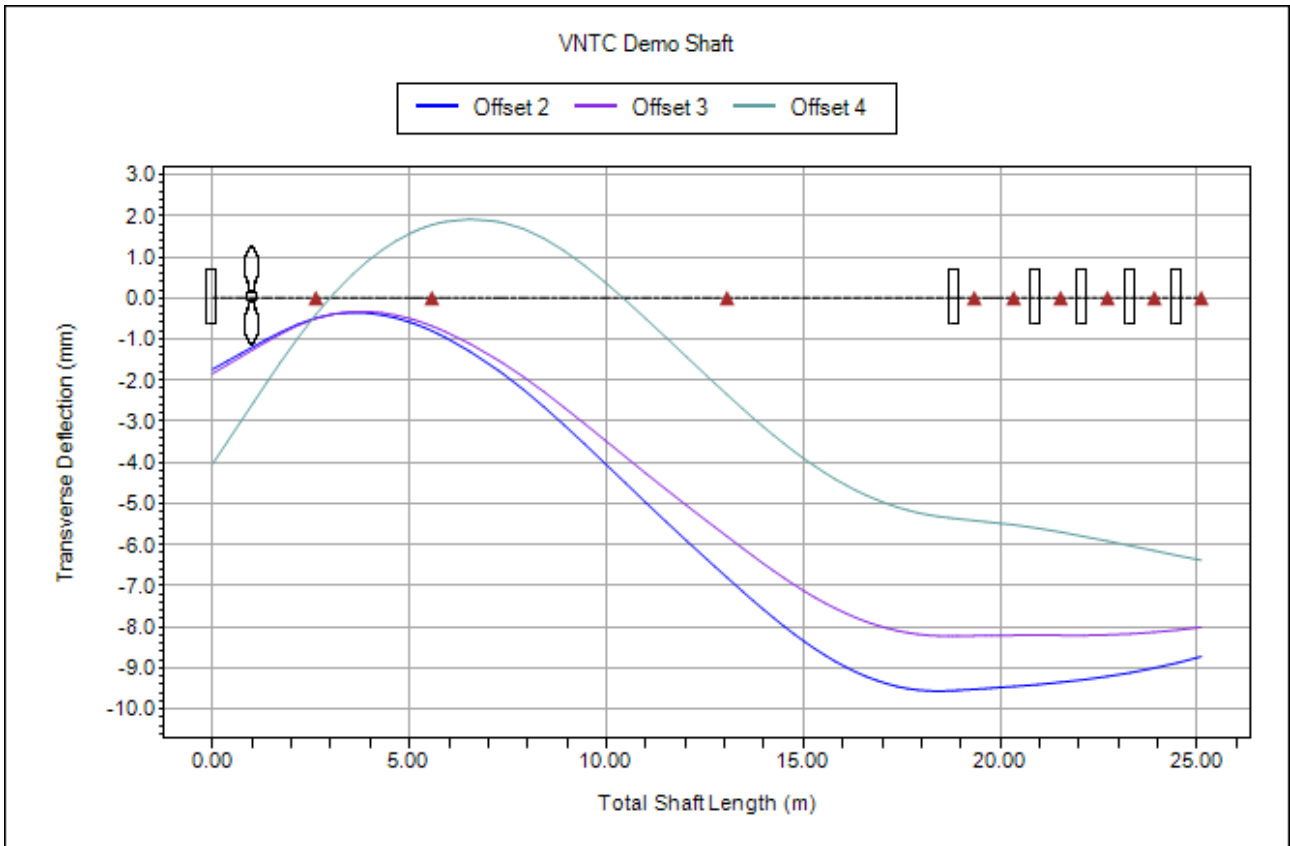


圖 2.3 SDP 軟體所繪製的軸系撓曲曲線與節點旋轉角度曲線示意圖

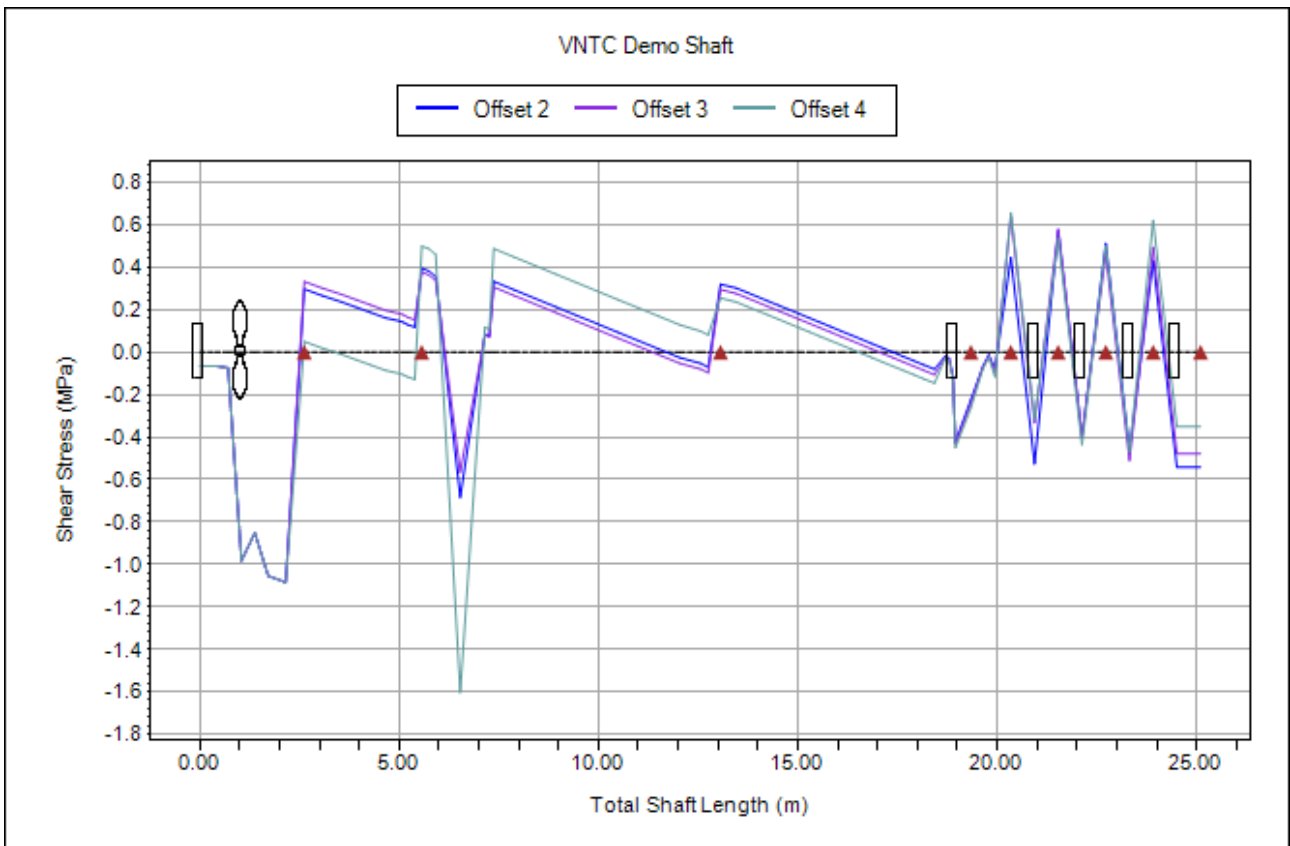
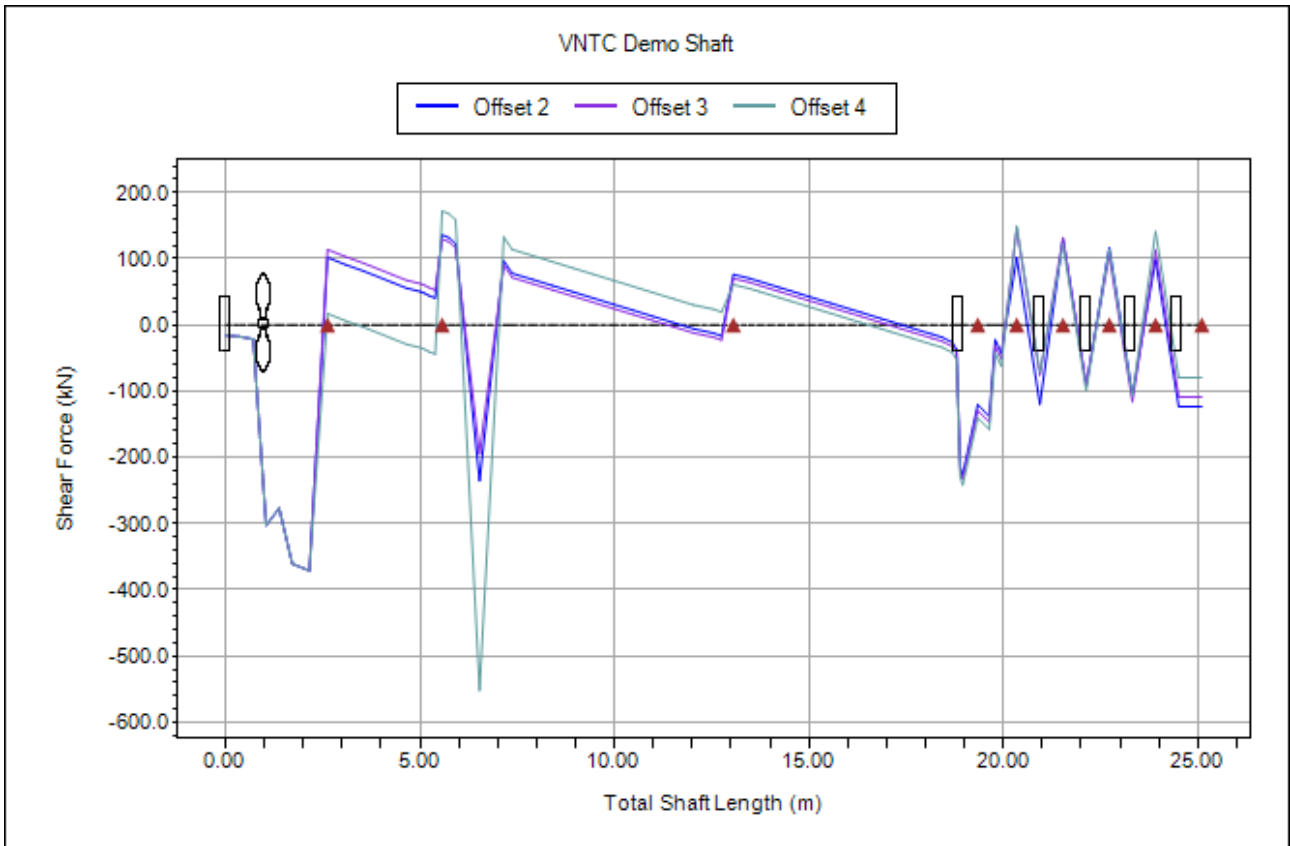


圖 2.4 SDP 軟體所繪製的軸系剪力曲線與剪應力曲線示意圖

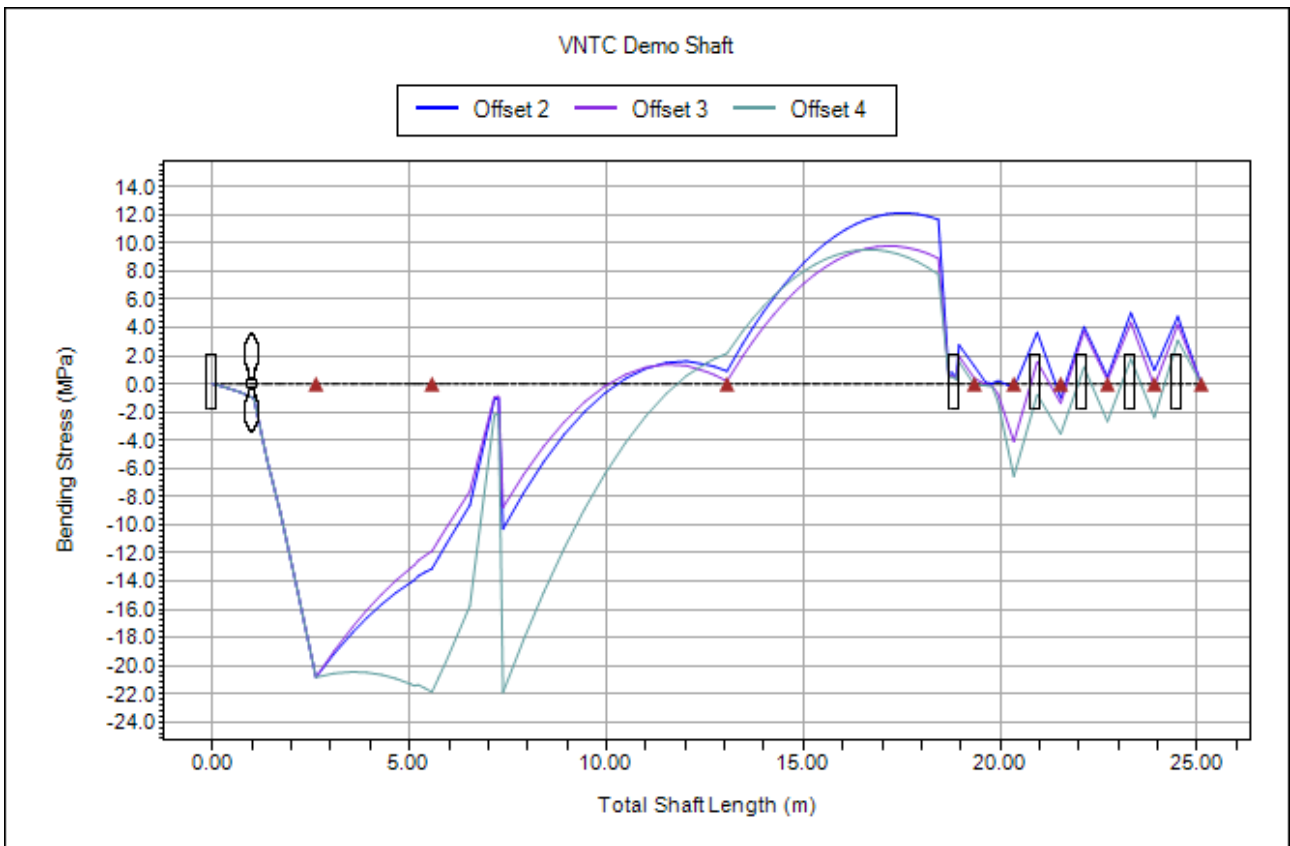
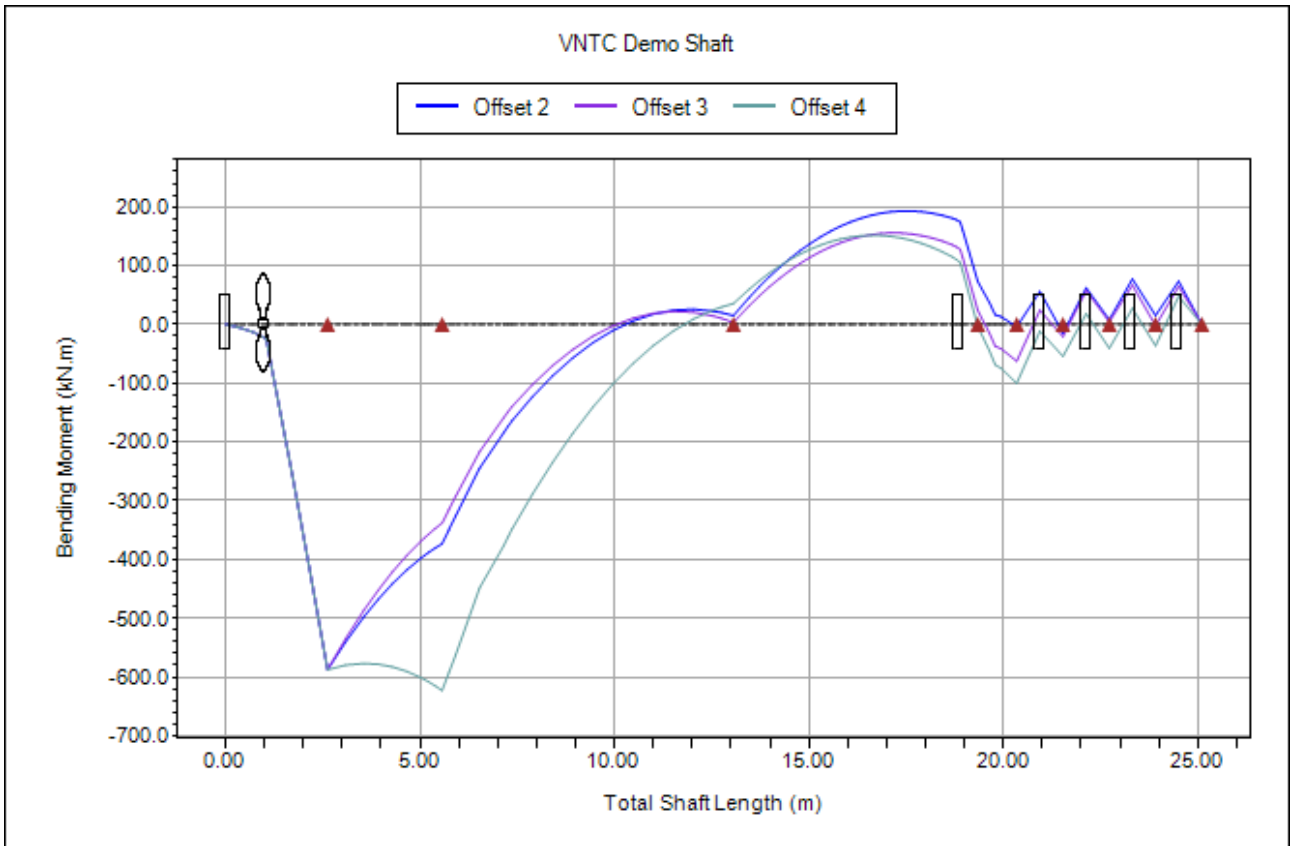


圖 2.5 SDP 軟體所繪製的軸系彎矩曲線與彎曲應力曲線示意圖

## 2.2 二維靜態分析模組(Static Analysis 2D)

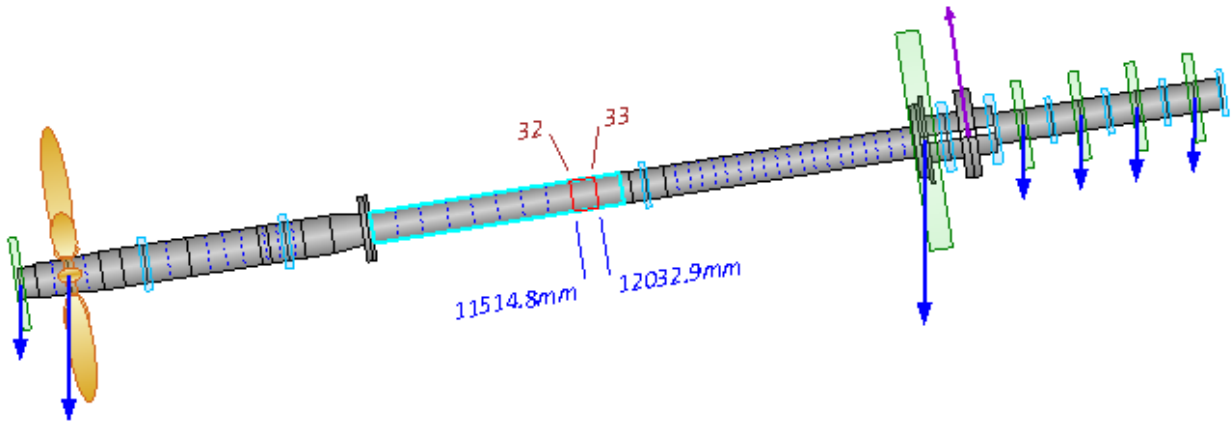


圖 2.6 具有傾斜角度的推進軸系(傾斜軸系)示意圖

SDP 軟體的二維靜態分析模組(Static Analysis 2D)可以用來針對具有傾斜角度的軸系(即傾斜軸系，參考圖 2.6)進行二維靜態分析。SDP 軟體的二維靜態分析模組(Static Analysis 2D)採用 2 節點 6 自由度的 Euler Beam 元素(參考圖 2.7)作為軸系靜態分析的理論基礎，比較圖 2.1 與圖 2.7 可以發現，圖 2.7 的樑元素多了水平方向的自由度，換句話說，圖 2.7 的樑元素可同時考慮垂直與水平方向的作用力。

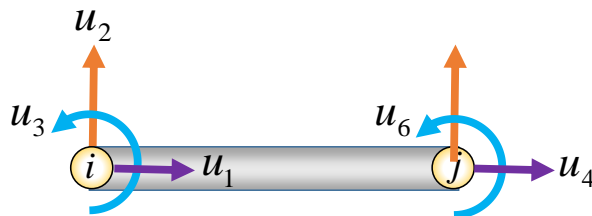


圖 2.7 二維靜態分析模組(Static Analysis 2D)所採用的 2 節點 6 自由度樑元素

SDP 軟體的二維靜態分析模組(Static Analysis 2D)可計算輸出的資料，簡述如下：



- ◎考慮軸系傾斜角度的軸承正向負載(Bearing Normal Load)
- ◎考慮軸系傾斜角度的軸系撓曲曲線(Deflection Curve)
- ◎考慮軸系傾斜角度的軸系節點旋轉角度曲線(Node Rotational Angle Curve)
- ◎考慮軸系傾斜角度的軸系剪力曲線(Shear Force Curve)
- ◎考慮軸系傾斜角度的軸系剪應力曲線(Shear Stress Curve)
- ◎考慮軸系傾斜角度的軸系彎矩曲線(Bending Moment Curve)
- ◎考慮軸系傾斜角度的軸系彎曲應力曲線(Bending Stress)
- ◎考慮軸系傾斜角度的止推軸承(Trust Bearing)軸向力(Axial Force)計算
- ◎完整報告輸出(Output Full Report)
- ◎自動繪製不同船況下之各類曲線圖，包括：軸承負載、撓曲曲線、節點旋轉角度曲線、剪力曲線、剪應力曲線、彎矩曲線、彎曲應力曲線等。
- ◎可使用排軸編輯器(ShaftAlignment Editor)來繪製不同傾斜角度軸系的各類曲線圖，並加以比較，包括：軸承負載、撓曲曲線、節點旋轉角度曲線、剪力曲線、剪應力曲線、彎矩曲線、彎曲應力曲線等。

SDP 軟體所繪製的軸系側向撓曲曲線示意圖(軸系傾斜角度為：0 度、10 度、20 度與 30 度)，請參考圖 2.8，節點旋轉角度曲線示意圖請參考圖 2.9，軸承正向負載曲線示意圖請參考圖 2.10，剪力曲線示意圖請參考圖 2.11，剪應力曲線示意圖請參考圖 2.12，彎矩曲線示意圖請參考圖 2.13，彎曲應力曲線示意圖請參考圖 2.14。

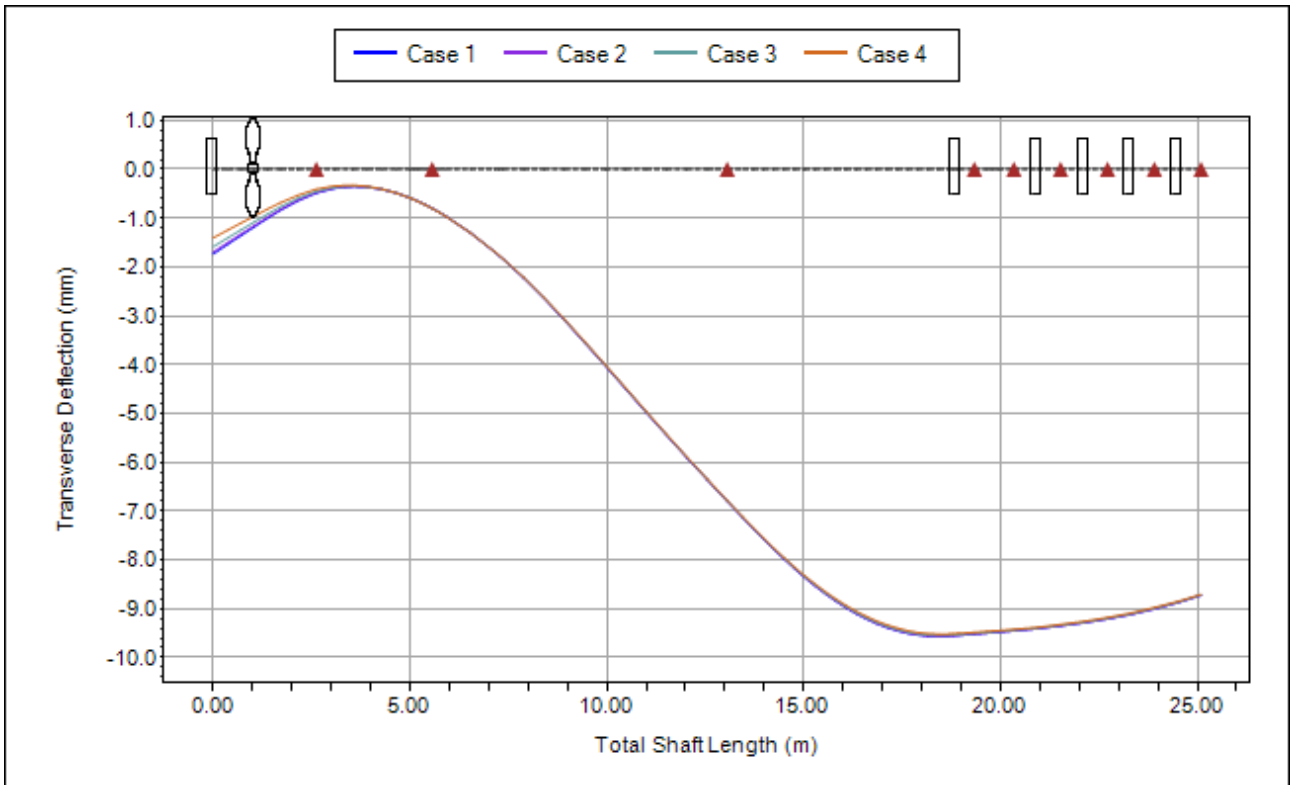


圖 2.8 SDP 軟體所繪製的軸系側向撓曲曲線示意圖(軸系傾斜角度為：0 度、10 度、20 度與 30 度)

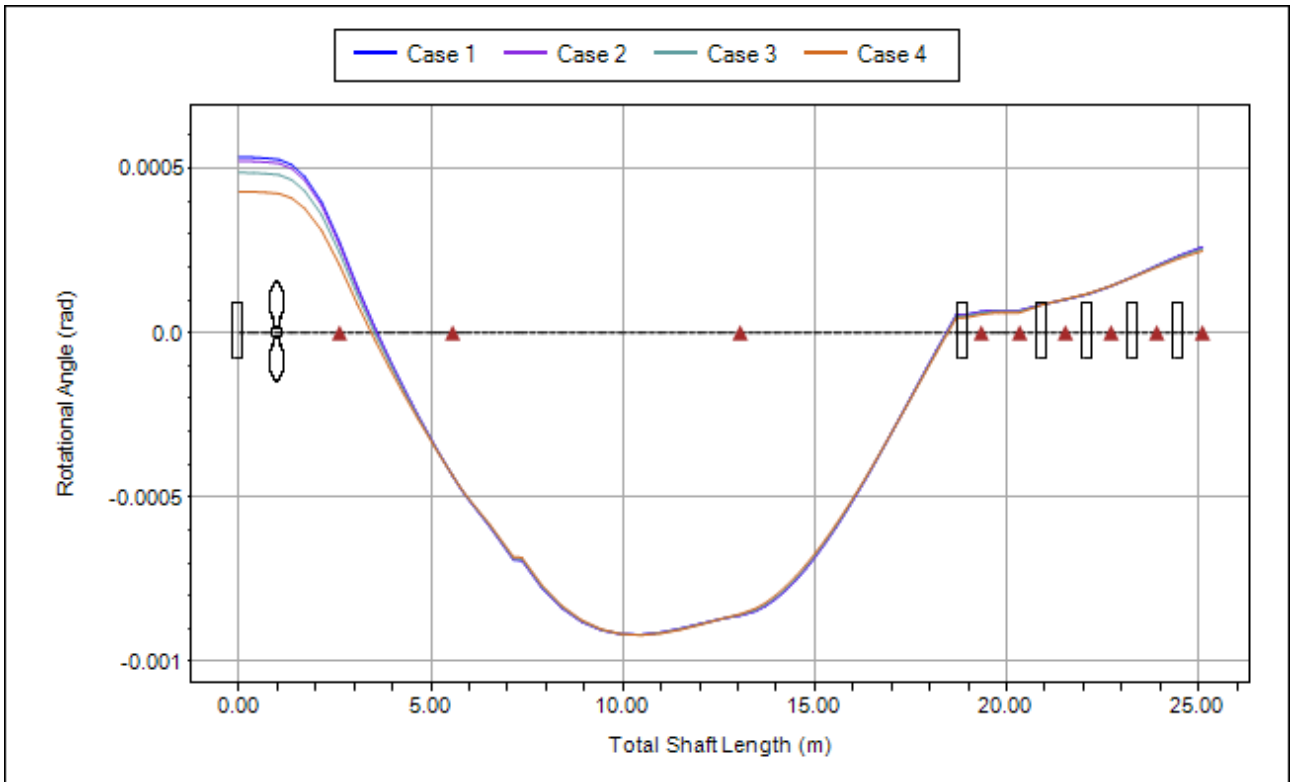


圖 2.9 SDP 軟體所繪製的軸系節點旋轉角度曲線示意圖(軸系傾斜角度為：0 度、10 度、20 度與 30 度)

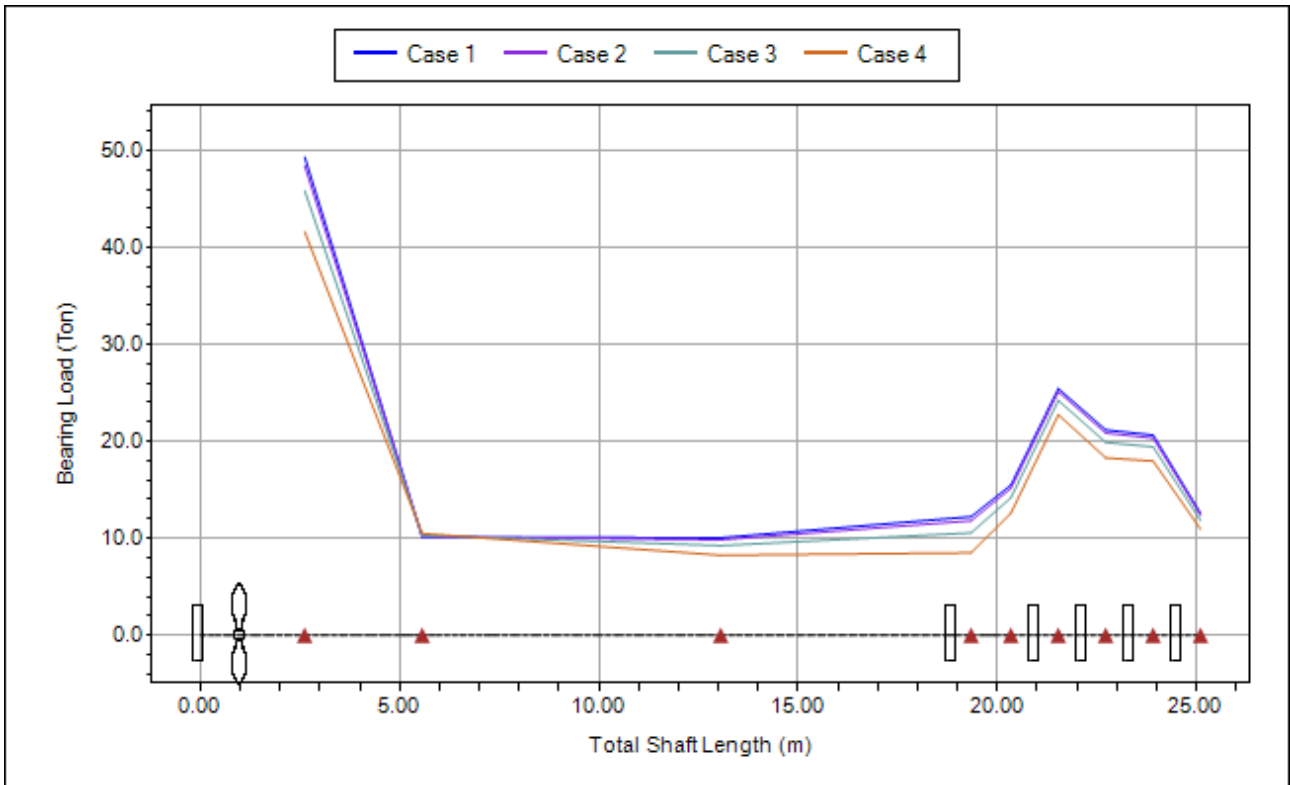


圖 2.10 SDP 軟體所繪製的軸承正向負載曲線示意圖(軸系傾斜角度為：0 度、10 度、20 度與 30 度)

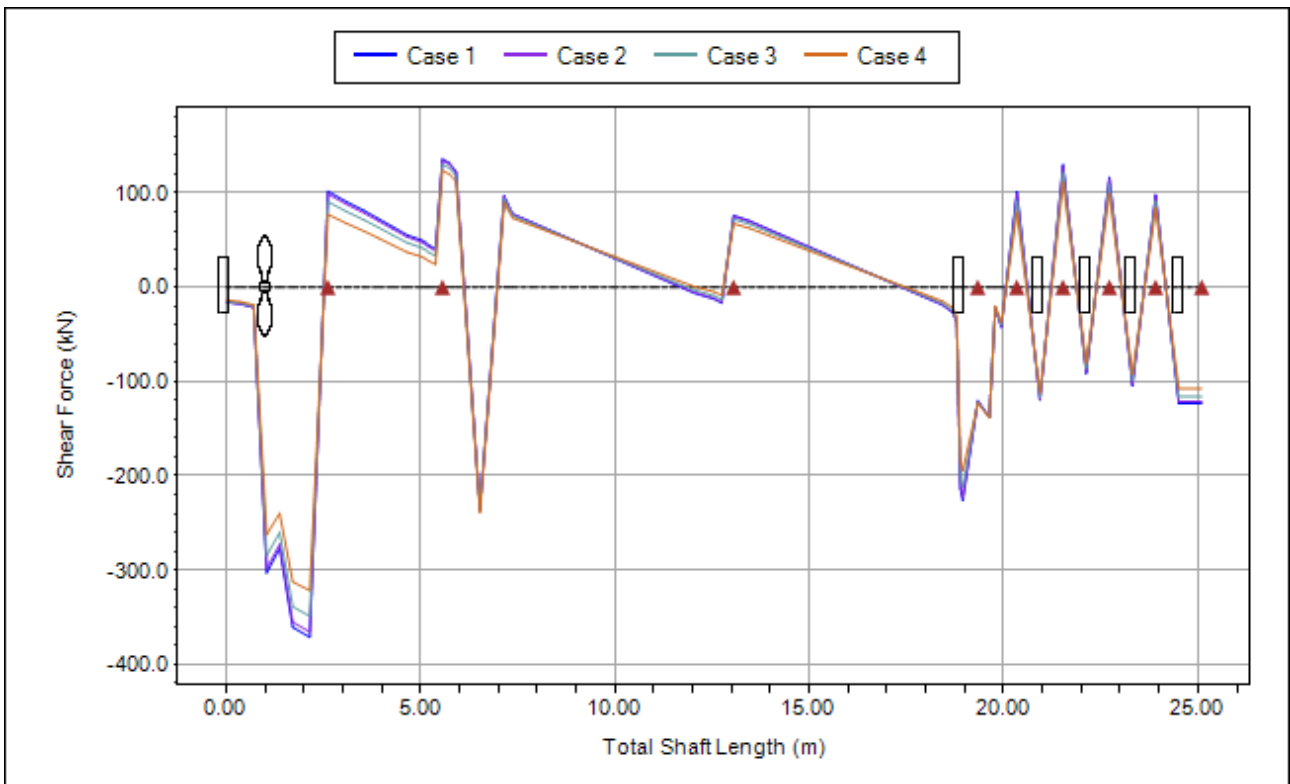


圖 2.11 SDP 軟體所繪製的軸系剪力曲線示意圖(軸系傾斜角度為：0 度、10 度、20 度與 30 度)

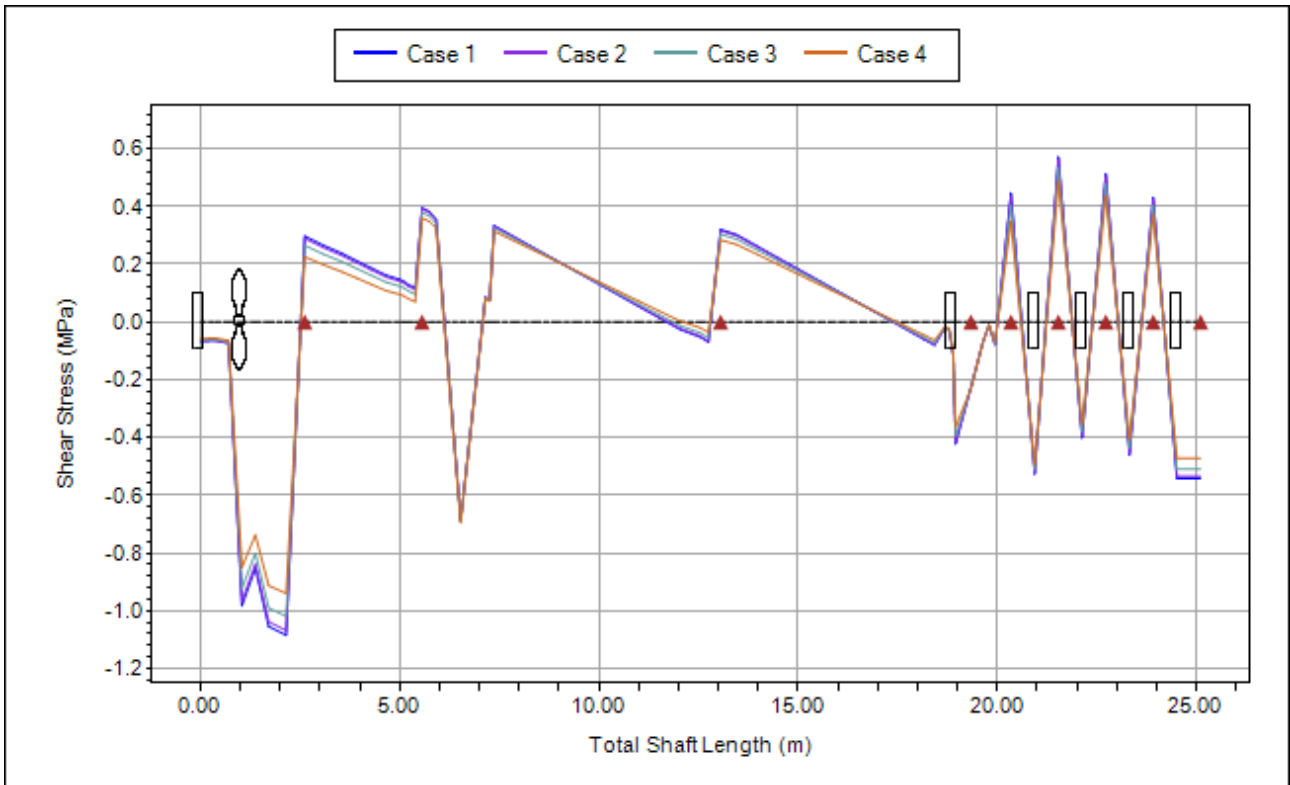


圖 2.12 SDP 軟體所繪製的軸系剪應力曲線示意圖(軸系傾斜角度為:0 度、10 度、20 度與 30 度)

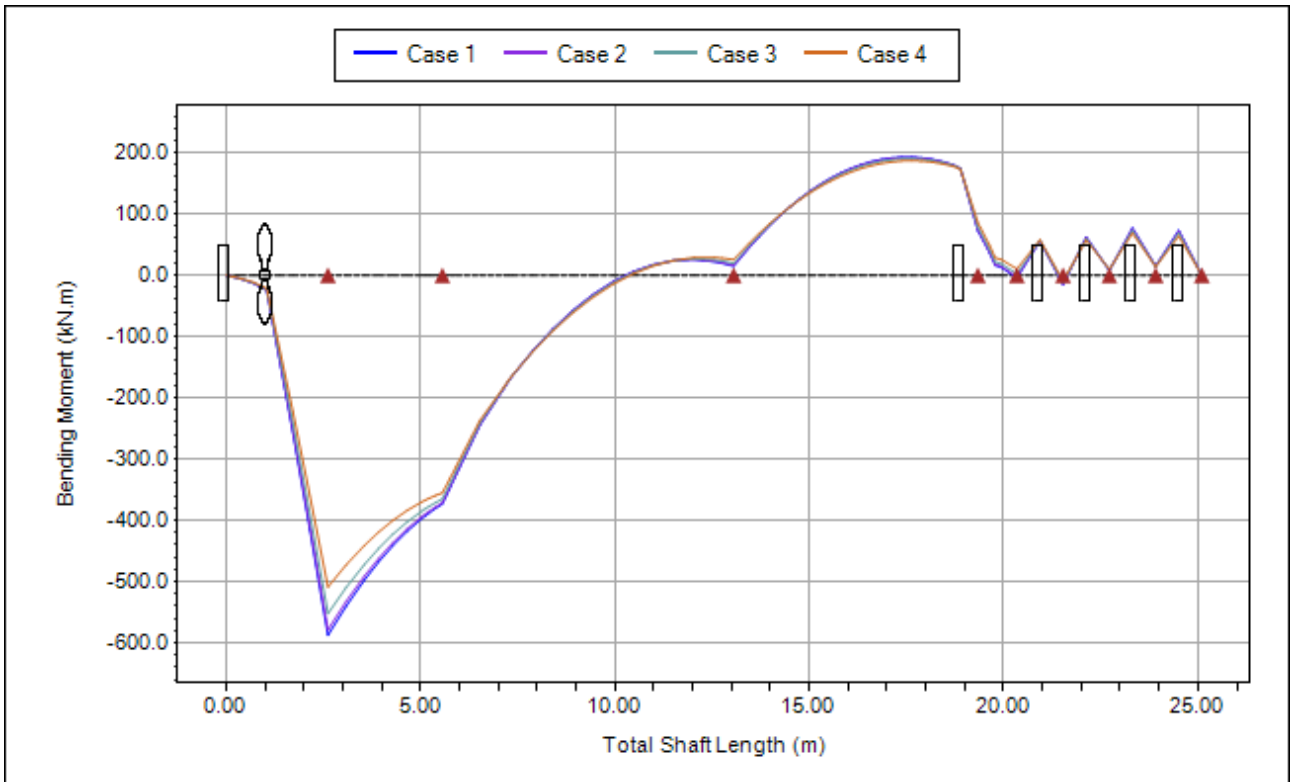


圖 2.13 SDP 軟體所繪製的軸系彎矩曲線示意圖(軸系傾斜角度為:0 度、10 度、20 度與 30 度)

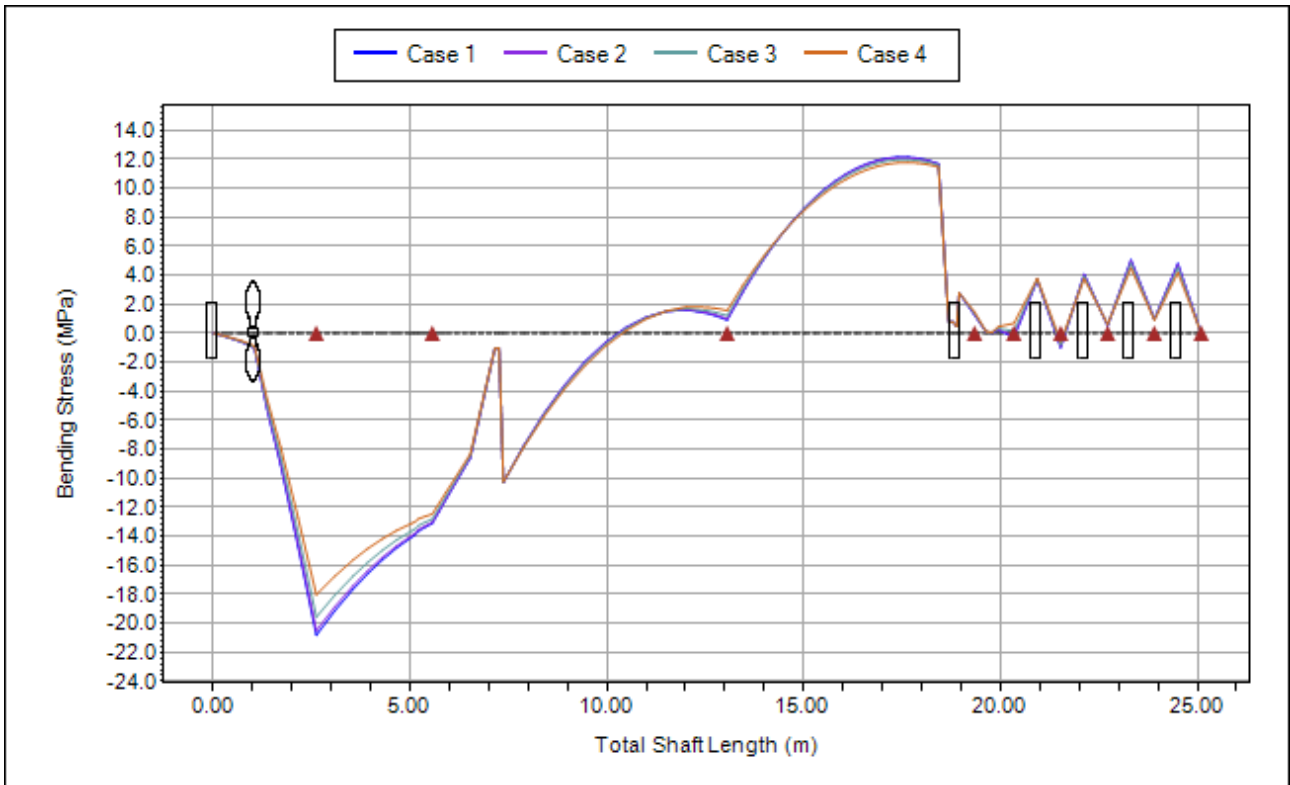


圖 2.14 SDP 軟體所繪製的軸系彎曲應力曲線示意圖(軸系傾斜角度為：0 度、10 度、20 度與 30 度)

### 2.3 下垂量與間隙量分析模組(Sag and Gap Analysis)

大型船舶的軸系長度通常很長(例如：100 公尺以上)，這類軸系往往是由幾根長度較短的段軸(Shaft Segment)所組成，例如：圖 2.15 的軸系，它是由一根尾軸、一根中間軸與一根曲柄軸所連接而成。上述軸系並非是在安裝至船舶前就連接完成，而是在安裝至船舶期間才連接在一起的。上述三根段軸尚未連接前，應已放置在船舶的軸承上，由於重力的緣故，軸系將產生變形，進而導致段軸連接處的兩相鄰法蘭有不同的直線位移與角位移(參考圖 2.15)，依照船舶軸系安裝實務經驗可以發現，上述兩相鄰法蘭的直線位移與角位移將可分為 8 種類型(參考圖 2.16)。SDP 軟體之下垂量與間隙量分析模組(Sag and Gap Analysis)的主要目的即在於預測段軸連接處之兩相鄰法蘭的位移類型，並計算兩相鄰法蘭的下

垂量(Sag)與間隙量(Gap)，以使連接軸系的施工程序可以較為順利。

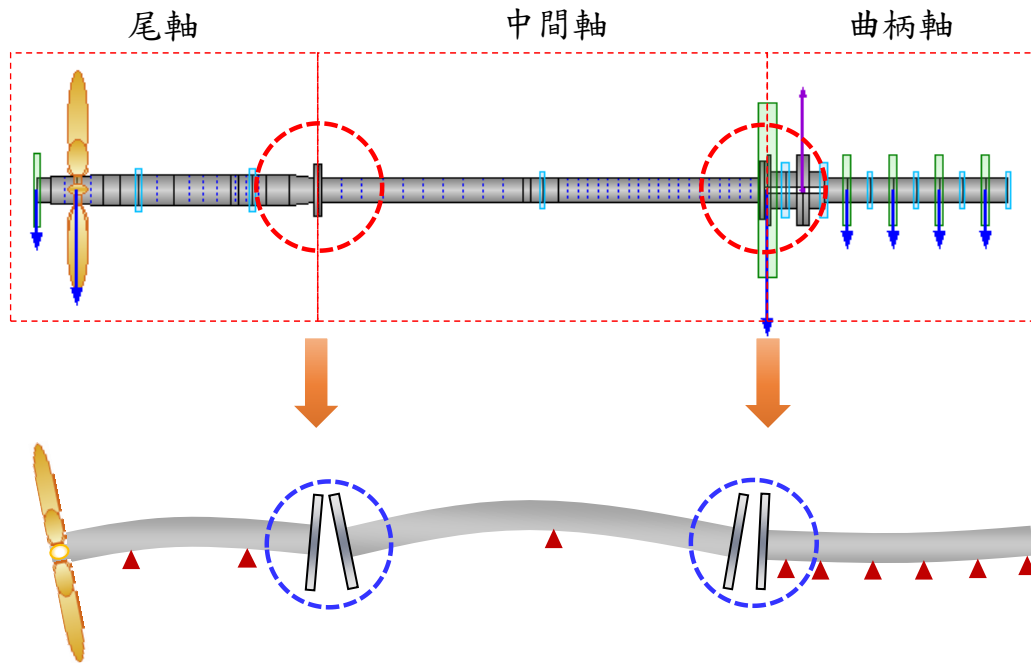


圖 2.15 重力對軸系法蘭連接處所造成的位移示意圖

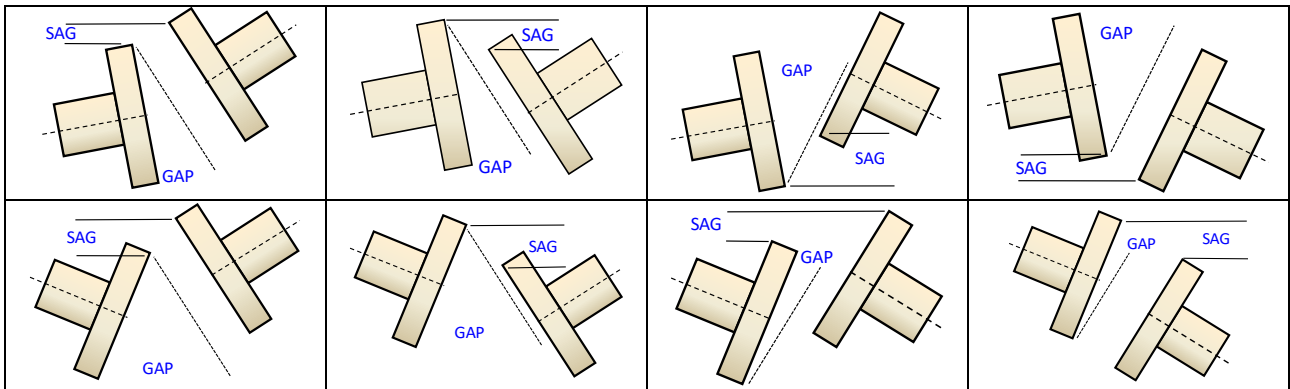


圖 2.16 兩相鄰法蘭的直線位移與角位移可分為 8 種類型

SDP 軟體的下垂量與間隙量分析模組(Sag and Gap Analysis)可計算輸出的資料，簡述如下：

- ◎各根段軸的軸承與臨時支撐的正向負載(Bearing Normal Load)
- ◎各根段軸的軸系撓曲曲線(Deflection Curve)
- ◎各根段軸的軸系節點旋轉角度曲線(Node Rotational Angle Curve)

- ◎各根段軸的軸系剪力曲線(Shear Force Curve)
- ◎各根段軸的軸系剪應力曲線(Shear Stress Curve)
- ◎各根段軸的軸系彎矩曲線(Bending Moment Curve)
- ◎各根段軸的軸系彎曲應力曲線(Bending Stress)
- ◎完整的下垂量與間隙量分析報告輸出(Output Full Report)

SDP 軟體的下垂量與間隙量分析模組所繪製之各根段軸的側向撓曲曲線示意圖，請參考圖 2.17，節點旋轉角度曲線示意圖請參考圖 2.18，軸承與臨時支撐正向負載示意圖請參考圖 2.19，剪力曲線示意圖請參考圖 2.20，剪應力曲線示意圖請參考圖 2.21，彎矩曲線示意圖請參考圖 2.22，彎曲應力曲線示意圖請參考圖 2.23，完整的下垂量與間隙量分析報告請參考圖 2.24。

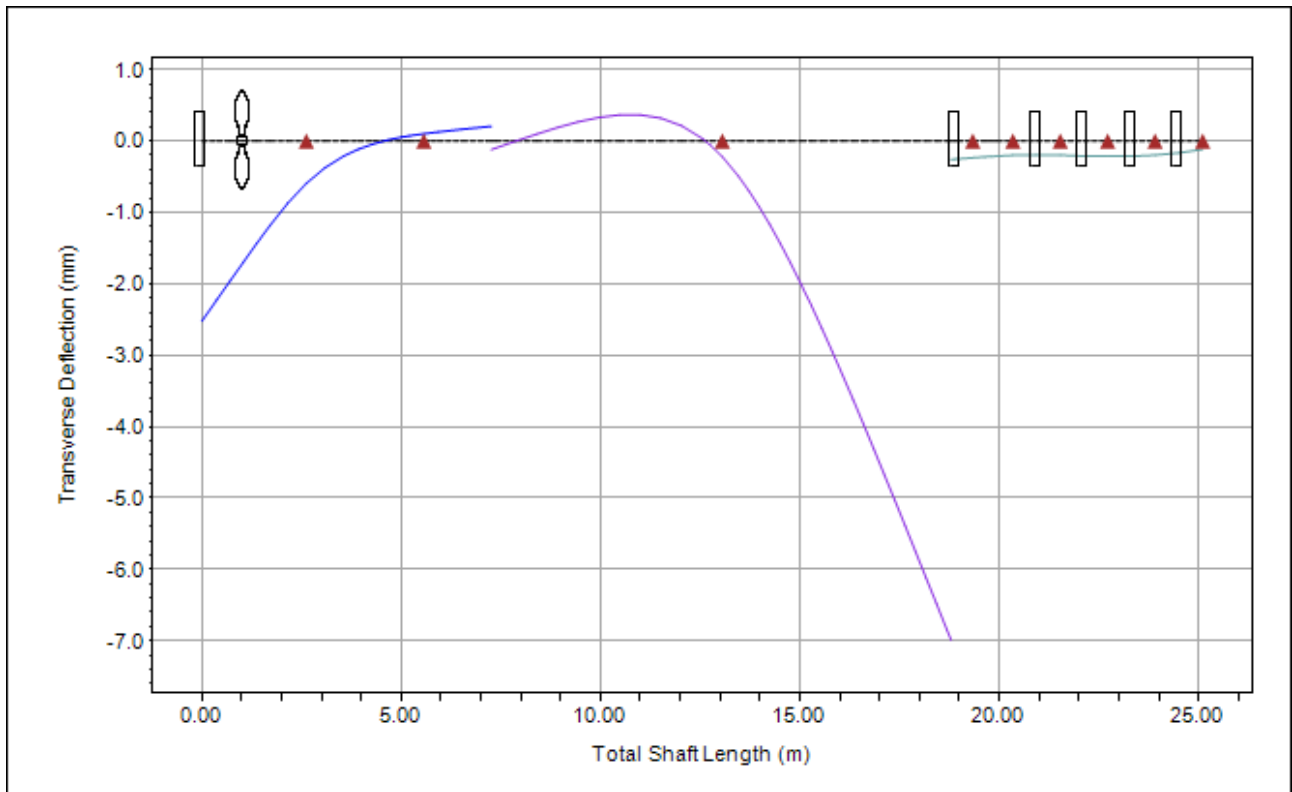


圖 2.17 各根段軸的側向撓曲曲線示意圖

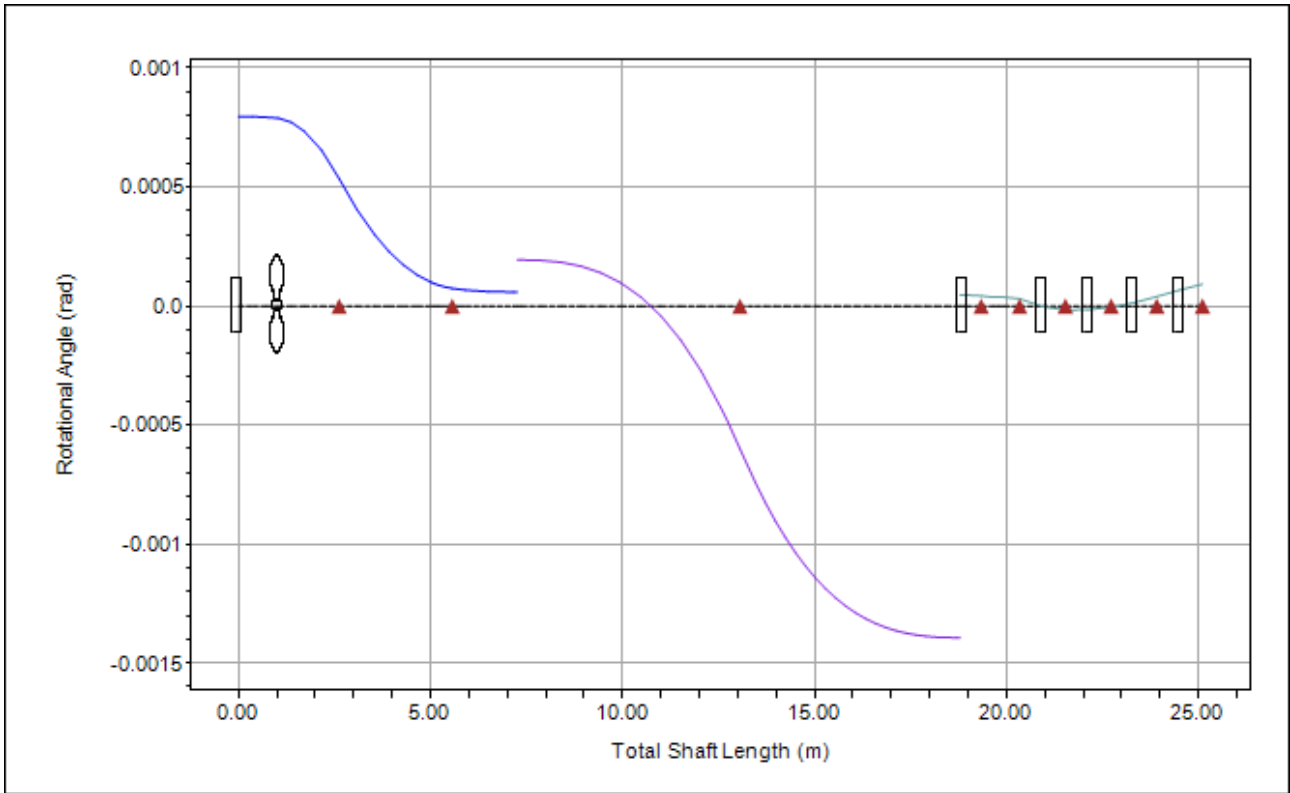


圖 2.18 各根段軸的節點旋轉角度曲線示意圖

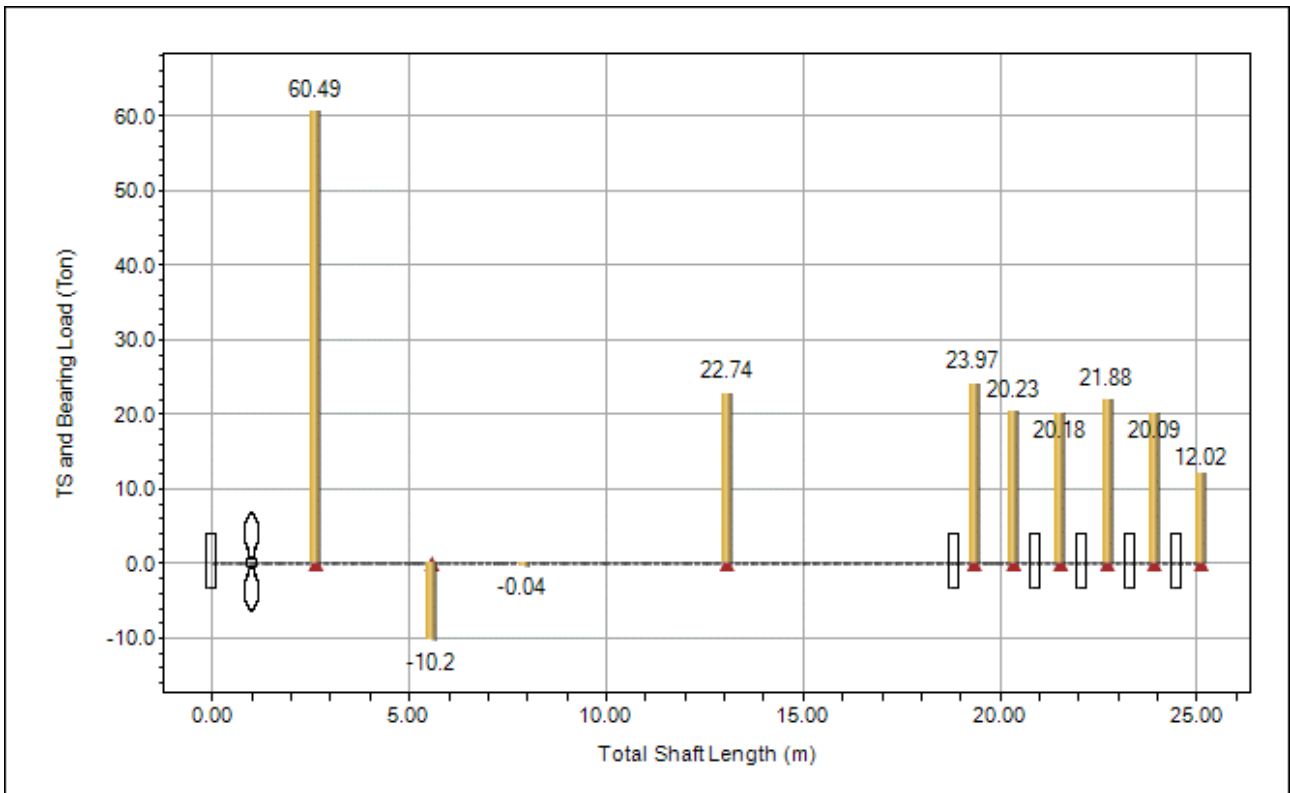


圖 2.19 各根段軸的軸承與臨時支撐正向負載示意圖



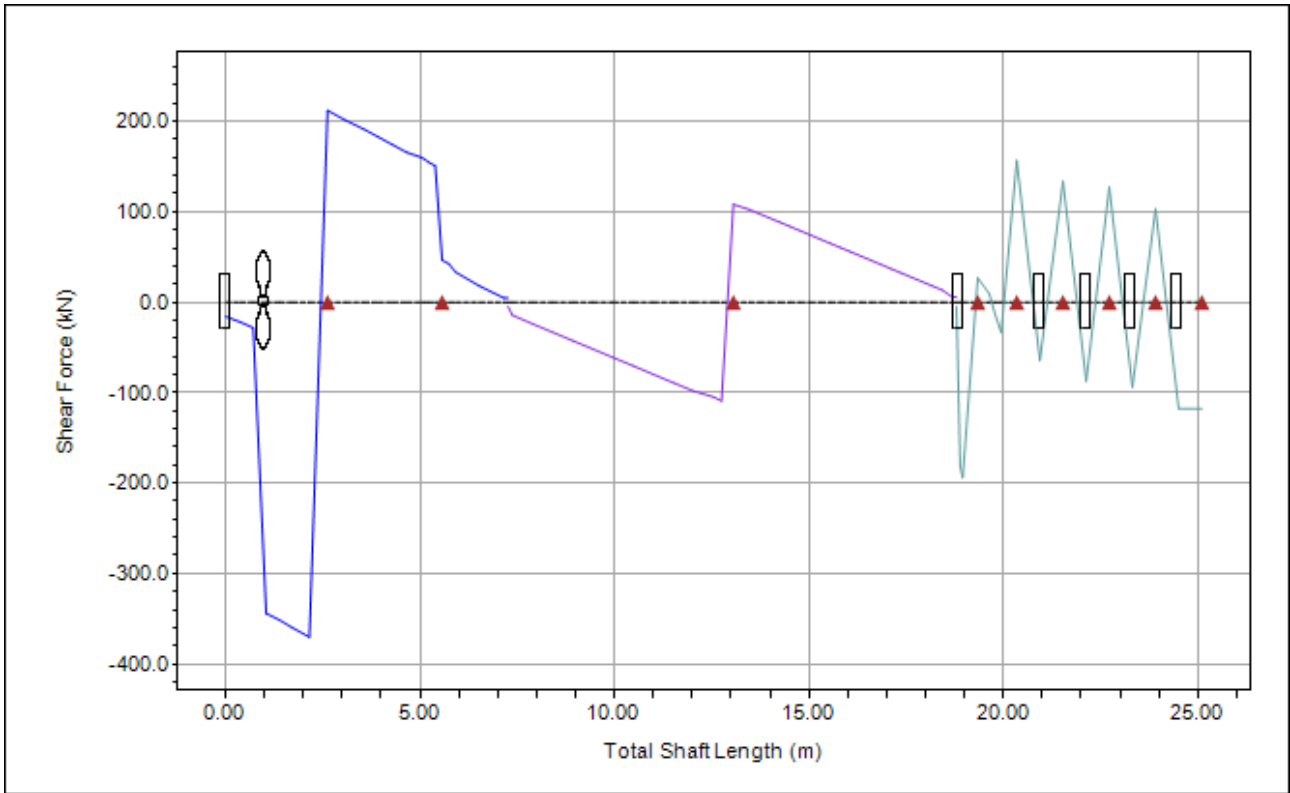


圖 2.20 各根段軸的剪力曲線示意圖

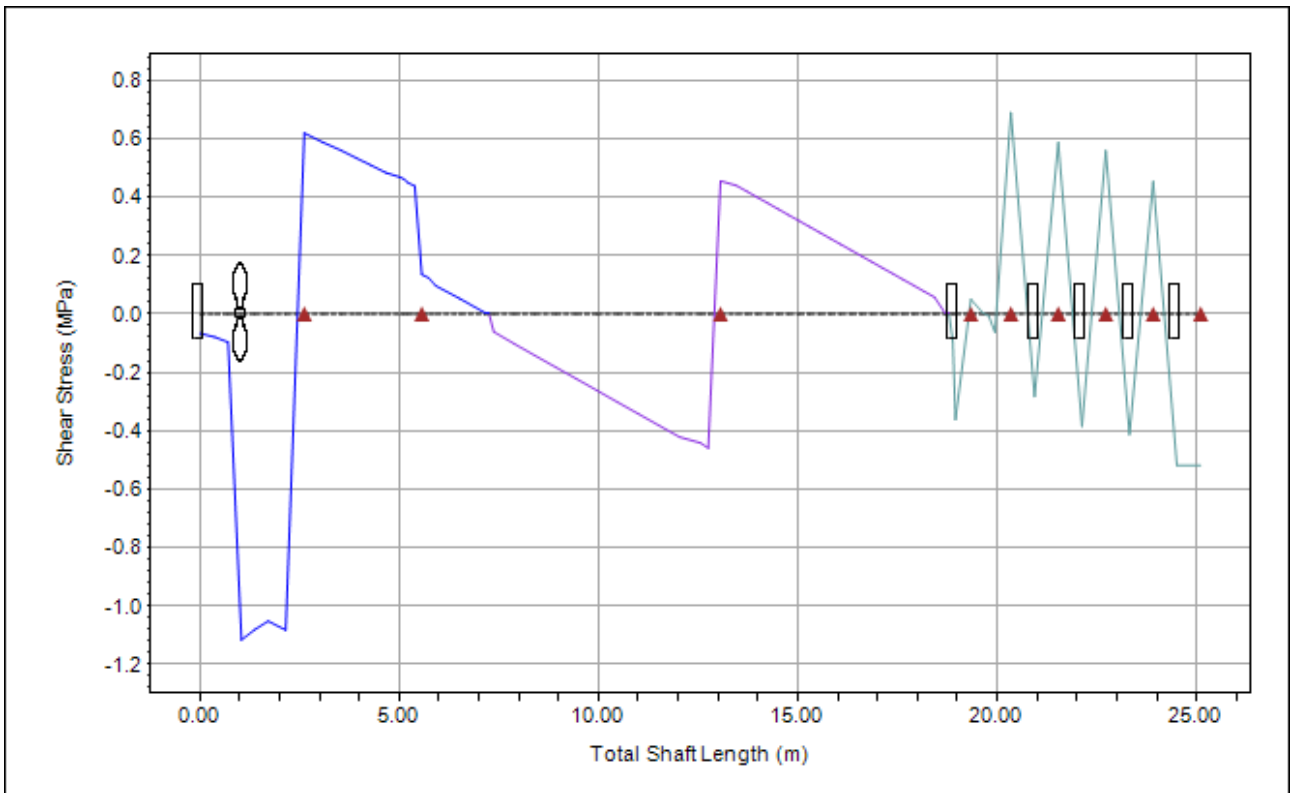


圖 2.21 各根段軸的剪應力曲線示意圖

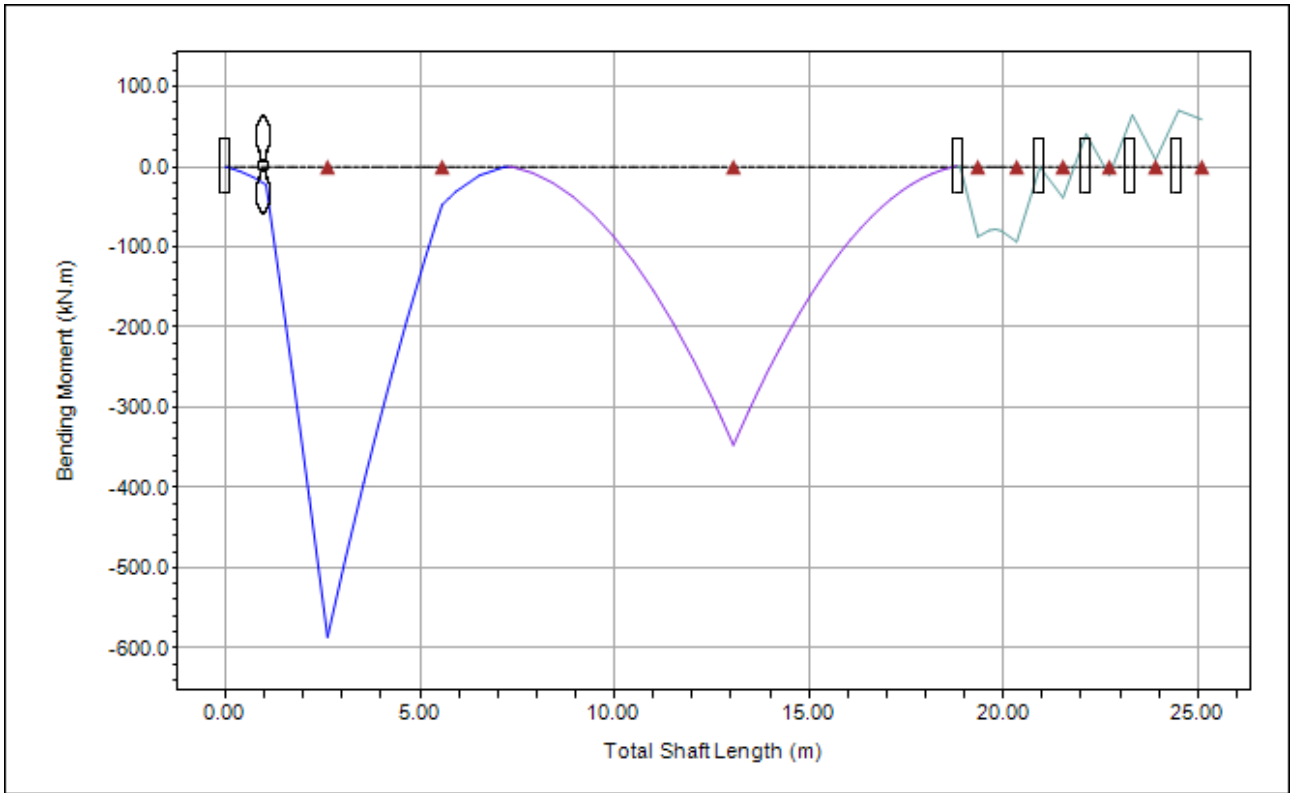


圖 2.22 各根段軸的彎矩曲線示意圖

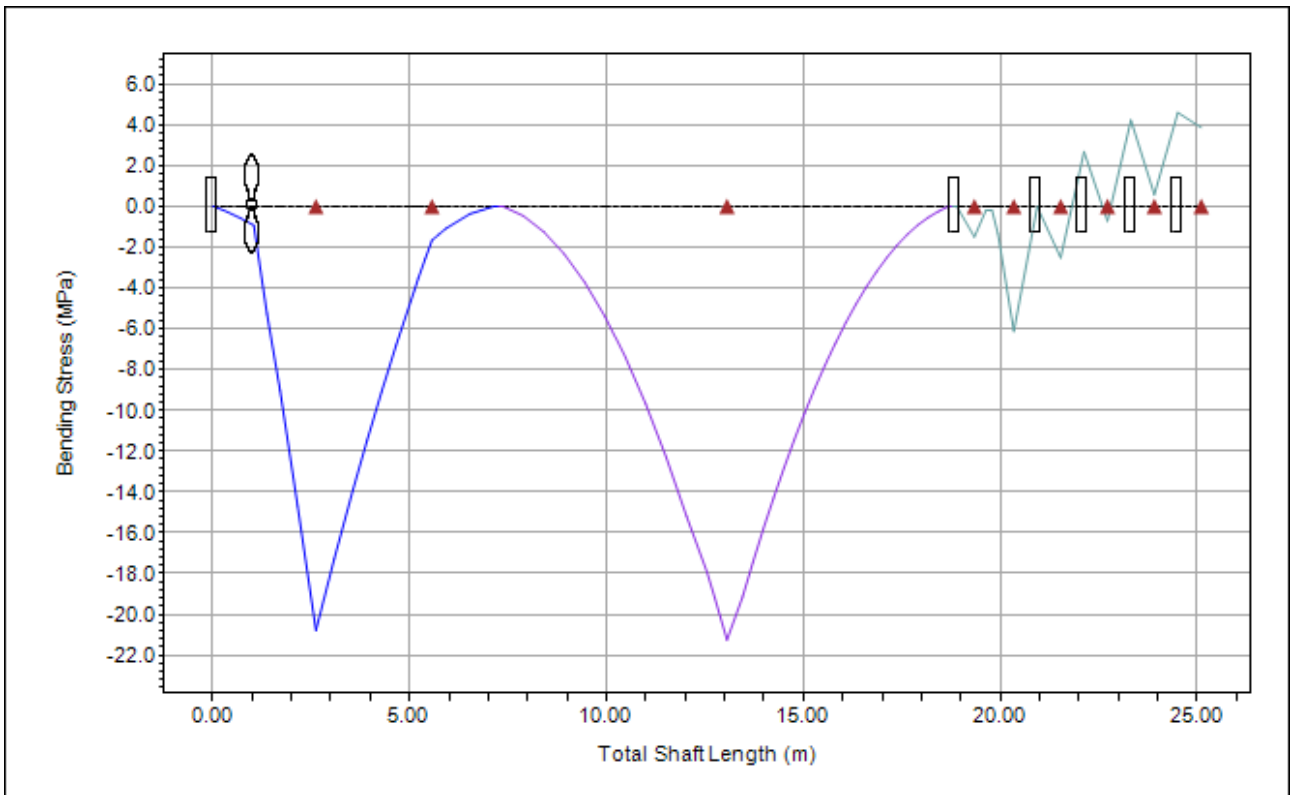


圖 2.23 各根段軸的彎曲應力曲線示意圖

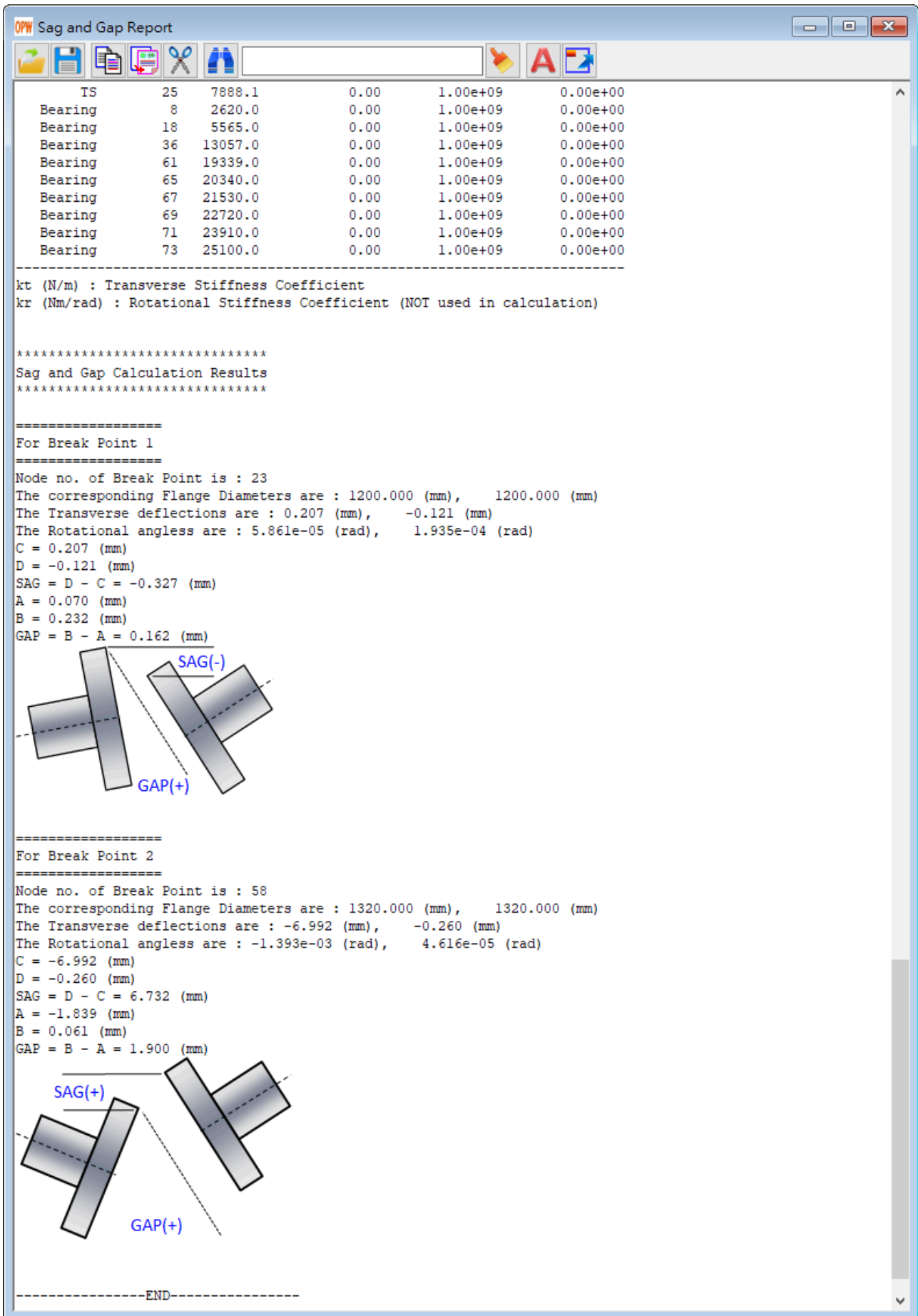


圖 2.24 SDP 軟體的下垂量與間隙量分析模組所輸出的下垂量與間隙量分析報告

## 2.4 側向振動分析模組(Transverse Vibration Analysis Full)

每一個軸系在製作與安裝的過程總是會有「誤差」存在，當軸系高速運轉時，上述「誤差」將會使軸系在垂直軸中心線的方向(軸的徑向或側向)發生較大的振動量，這類振動稱之為側向振動(Transverse Vibration)或迴旋振動(Whirling Vibration)。以圖 2.25 為例，如果軸系可以簡化為  $xy$  平面上的水平向振動或  $xz$  平面上的垂直向振動時，則以二維的軸系模型即可預測軸系的側向振動特性。很明顯的，這類軸系振動理論假設軸系在  $xy$  平面上的水平向振動與  $xz$  平面上的垂直向振動完全相同，當軸系轉速不高時(例如：低於 100 rpm)，上述假設的誤差很小。但是，當軸系轉速變高時，上述假設的誤差將隨著軸系轉速變高而加大，此時，二維的軸系模型已不足以用來精確預測軸系的振動特性。如果要精確預測軸系在高轉速時的振動行為，需使用三維的軸系模型(參考圖 2.26)，配合軸系迴旋振動理論(Whirling Vibration Theory)，才可以獲得合理的軸系振動資訊。值得一提的是，在圖 2.26 的軸系模型中，軸系在  $xy$  平面上的水平向振動與  $xz$  平面上的垂直向振動相耦合，但不相同，相關內容可由現有文獻中去尋找。

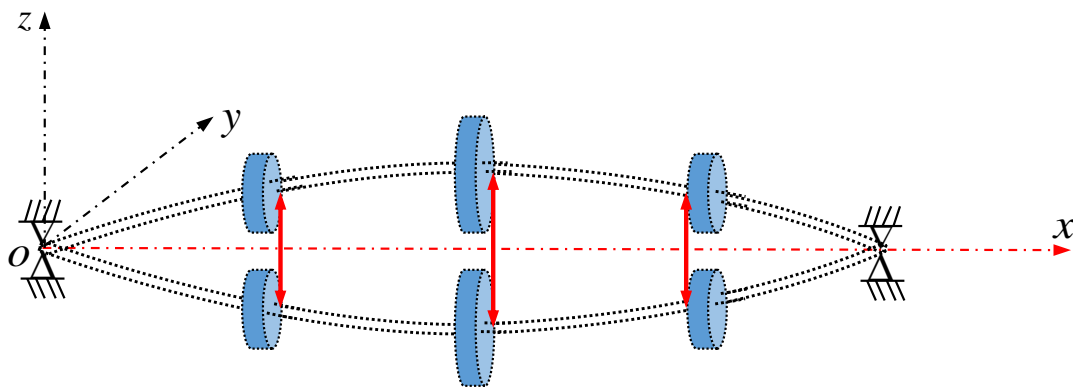


圖 2.25 軸系側向振動(Transverse Vibration)示意圖

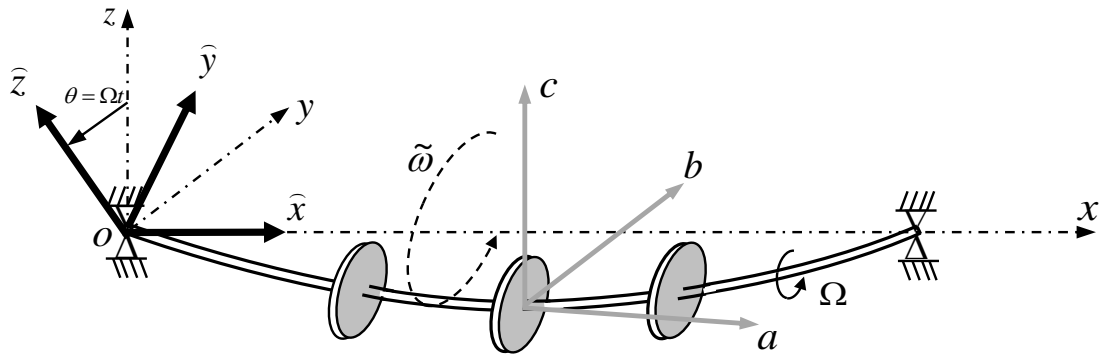


圖 2.26 軸系迴旋振動(Whirling Vibration)示意圖

SDP 軟體的側向振動分析模組(Transverse Vibration Analysis Full)是以 Timoshenko Beam 的理論來建立實體軸系(Full-Size Shaft)的有限元素模型，然後再配合相關的數值技術來求解軸系的側向振動特性(Transverse Vibration Characteristics)與迴旋振動特性(Whirling Vibration Characteristics)。SDP 軟體的側向振動分析模組(Transverse Vibration Analysis Full)可以對軸系進行側向振動分析(Transverse Vibration Analysis)與迴旋振動分析(Whirling Vibration Analysis)，可計算輸出的資料，簡述如下：

- ◎側向振動—自然頻率、臨界轉速、振動模態(參考圖 2.27)、Campbell Diagram 與共振點分析資料(參考圖 2.28)。
- ◎側向振動完整計算報告輸出(參考圖 2.29)。
- ◎迴旋振動—向前迴旋頻率(Forward Whirling Frequency)、向後迴旋頻率(Backward Whirling Frequency)、向前迴旋臨界轉速(Forward Whirling Critical Speed)、向後迴旋臨界轉速(Backward Whirling Critical Speed) (參考圖 2.30)、Campbell Diagram 與共振點分析資料(參考圖 2.31)。

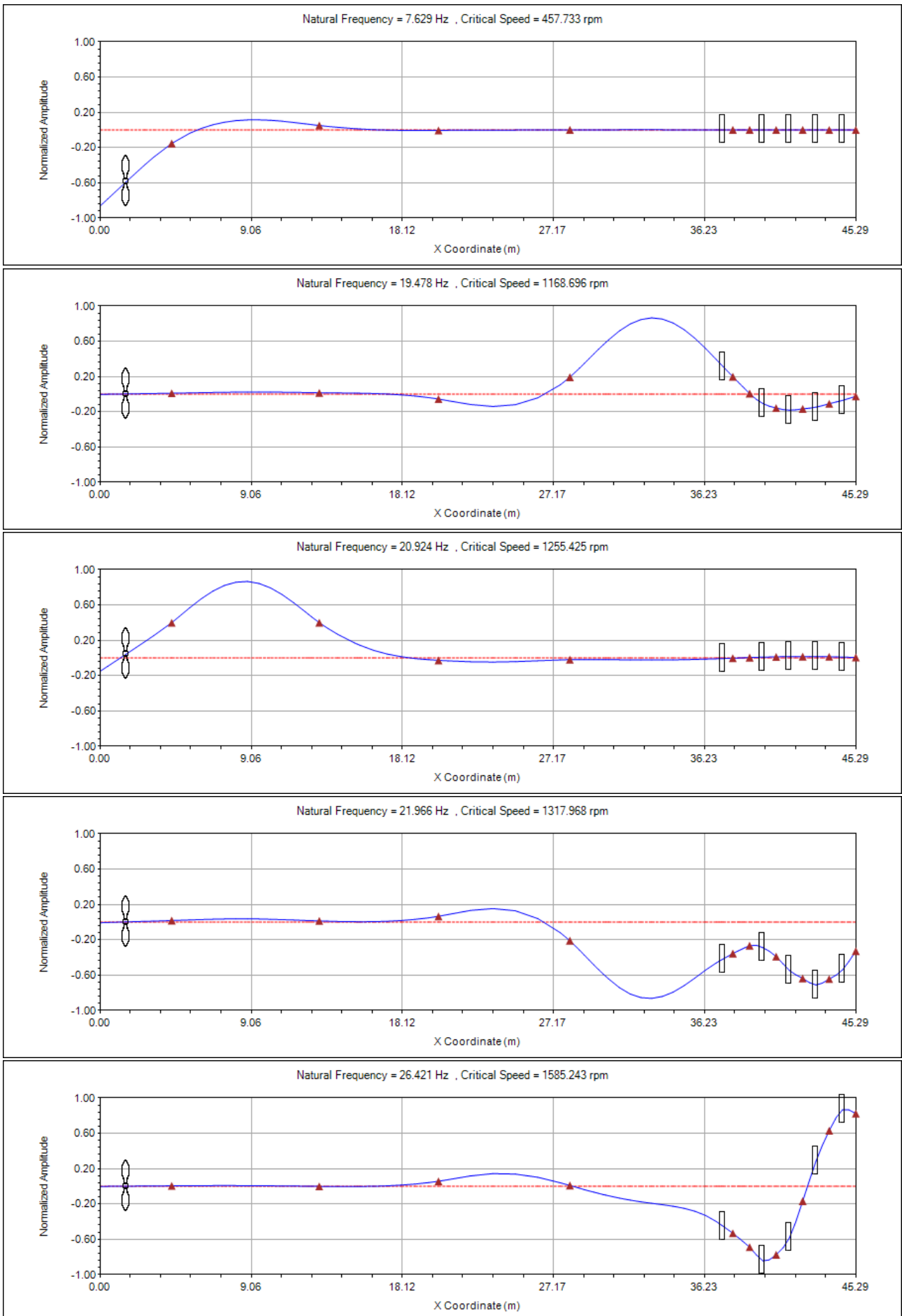


圖 2.27 SDP 軟體輸出之軸系側向振動的自然頻率、臨界轉速與振動模態示意圖

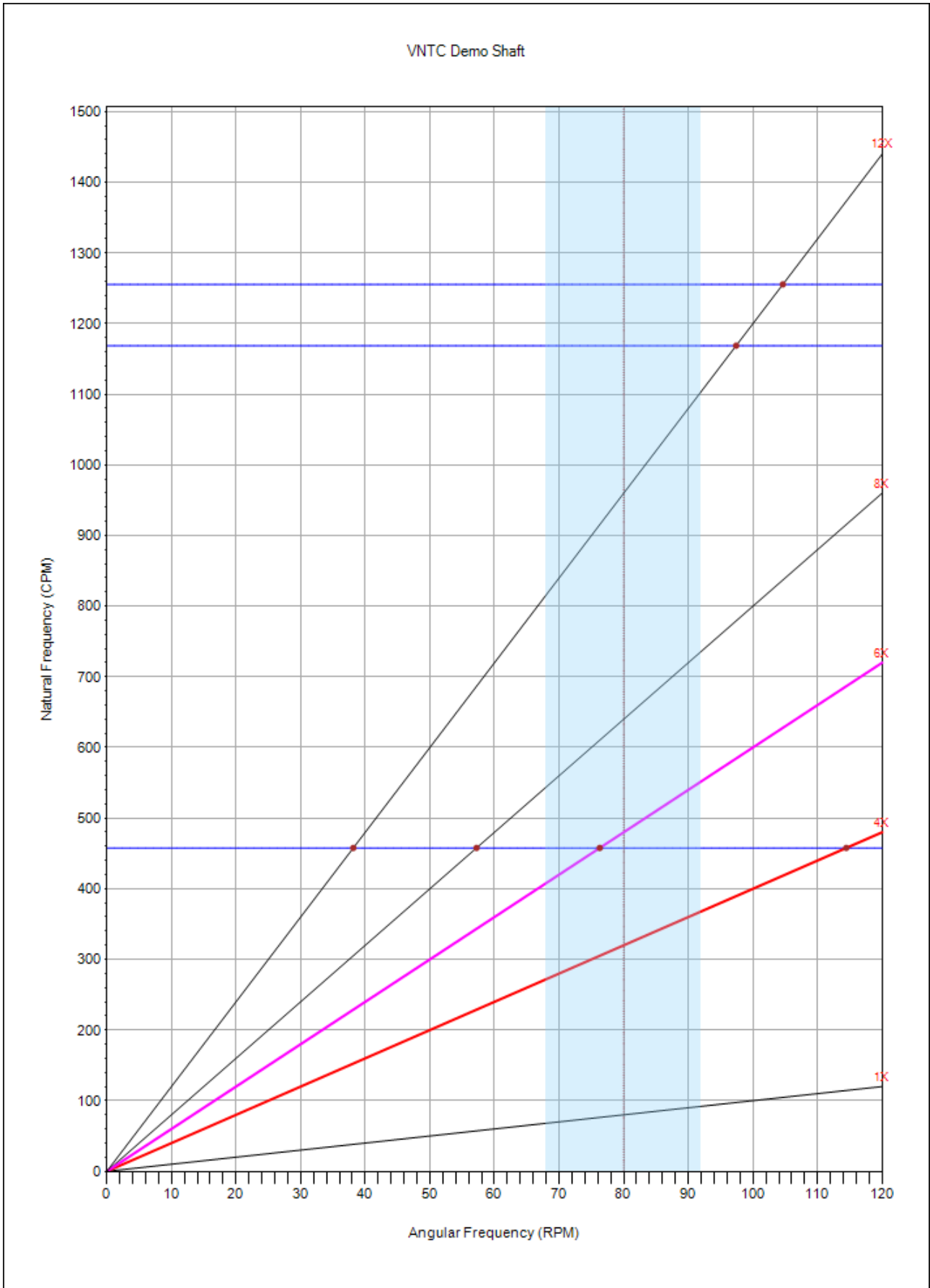


圖 2.28 SDP 軟體輸出之軸系側向振動的 Campbell Diagram 與共振點示意圖

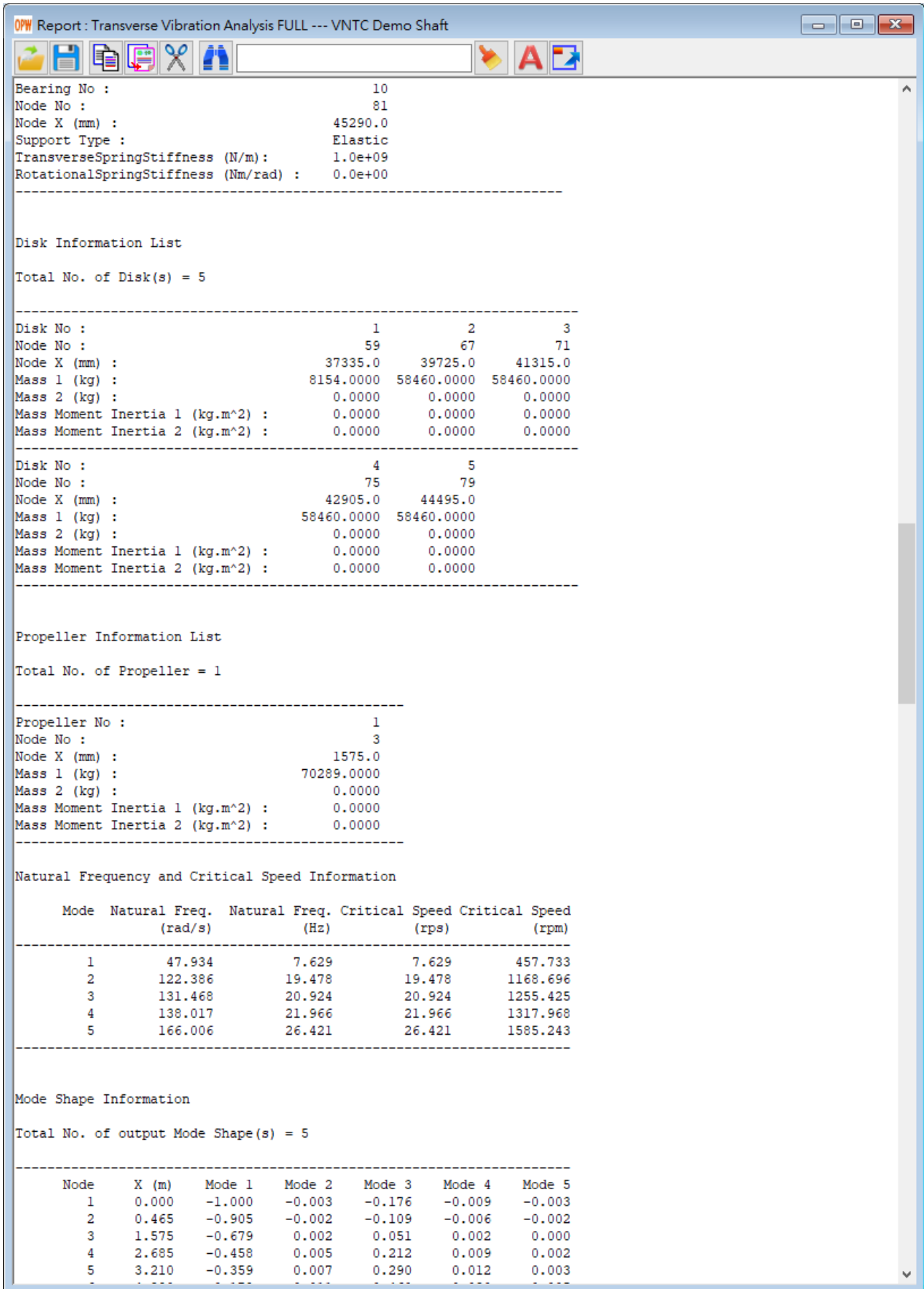


圖 2.29 SDP 軟體輸出之軸系側向振動計算報告示意圖



Whirling Vibration Viewer : P-P Shaft with 3 disks

Campbell Diagram Whirling Vibration Data (rad/s) Whirling Vibration Data (rpm)

	$\Omega 0$	$\Omega 1$	$\Omega 2$	$\Omega 3$	$\Omega 4$	$\Omega 5$	$\Omega 6$
Spin Speed (rpm)	0.000	250.000	500.000	750.000	1000.000	1250.000	1500.000
WF1 (rad/s)	75.380	75.960	76.540	77.121	77.701	78.282	78.863
WB1 (rad/s)	75.380	74.800	74.221	73.642	73.065	72.488	71.911
WF2 (rad/s)	290.606	292.852	295.071	297.263	299.428	301.565	303.686
WB2 (rad/s)	290.606	288.335	286.038	283.717	281.373	279.006	276.616
WF3 (rad/s)	610.765	614.852	618.826	622.688	626.438	630.076	633.693
WB3 (rad/s)	610.765	606.566	602.257	597.840	593.318	588.694	583.961
WF4 (rad/s)	957.724	981.087	1005.079	1029.698	1054.939	1080.796	1107.269
WB4 (rad/s)	957.724	934.990	912.885	891.408	870.556	850.323	830.701
WF5 (rad/s)	1285.047	1304.915	1325.432	1346.599	1368.411	1390.864	1413.957
WB5 (rad/s)	1285.047	1265.832	1247.266	1229.349	1212.075	1195.440	1179.439
WF6 (rad/s)	1496.465	1520.607	1545.221	1570.308	1595.865	1621.890	1648.383
WB6 (rad/s)	1496.465	1472.798	1449.604	1426.884	1404.637	1382.861	1361.546
WF7 (rad/s)	4571.377	4570.318	4569.271	4568.244	4567.250	4566.278	4565.327
WB7 (rad/s)	4571.377	4570.303	4569.257	4568.241	4567.239	4566.262	4565.311
WF8 (rad/s)	4571.388	4572.488	4573.614	4574.761	4575.949	4577.165	4578.406
WB8 (rad/s)	4571.388	4572.474	4573.601	4574.761	4575.940	4577.151	4578.362

Whirling Vibration Viewer : P-P Shaft with 3 disks

Campbell Diagram Whirling Vibration Data (rad/s) Whirling Vibration Data (rpm)

	$\Omega 0$	$\Omega 1$	$\Omega 2$	$\Omega 3$	$\Omega 4$	$\Omega 5$	$\Omega 6$
Spin Speed (rpm)	0.000	250.000	500.000	750.000	1000.000	1250.000	1500.000
$\Omega F1$ (rpm)	719.825	725.365	730.908	736.451	741.994	747.535	753.076
$\Omega B1$ (rpm)	719.825	714.289	708.758	703.233	697.717	692.210	686.701
$\Omega F2$ (rpm)	2775.086	2796.530	2817.722	2838.656	2859.328	2879.734	2899.872
$\Omega B2$ (rpm)	2775.086	2753.395	2731.465	2709.301	2686.913	2664.308	2641.586
$\Omega F3$ (rpm)	5832.372	5871.401	5909.357	5946.236	5982.041	6016.778	6050.444
$\Omega B3$ (rpm)	5832.372	5792.279	5751.134	5708.956	5665.774	5621.616	5576.481
$\Omega F4$ (rpm)	9145.587	9368.692	9597.801	9832.891	10073.922	10320.846	10573.651
$\Omega B4$ (rpm)	9145.587	8928.494	8717.411	8512.322	8313.194	8119.984	7932.681
$\Omega F5$ (rpm)	12271.298	12461.016	12656.947	12859.071	13067.363	13281.774	13502.293
$\Omega B5$ (rpm)	12271.298	12087.802	11910.515	11739.414	11574.464	11415.612	11262.857
$\Omega F6$ (rpm)	14290.192	14520.726	14755.778	14995.337	15239.386	15487.904	15740.881
$\Omega B6$ (rpm)	14290.192	14064.181	13842.698	13625.738	13413.294	13205.354	13001.917
$\Omega F7$ (rpm)	43653.434	43643.319	43633.327	43623.513	43614.027	43604.747	43595.661
$\Omega B7$ (rpm)	43653.434	43643.179	43633.191	43623.485	43613.923	43604.586	43595.441
$\Omega F8$ (rpm)	43653.538	43664.044	43674.794	43685.753	43697.095	43708.707	43720.579
$\Omega B8$ (rpm)	43653.538	43663.909	43674.668	43685.745	43697.012	43708.575	43720.391

圖 2.30 SDP 軟體輸出之軸系向前迴旋頻率、向後迴旋頻率、向前迴旋臨界轉速、

向後迴旋臨界轉速示意圖

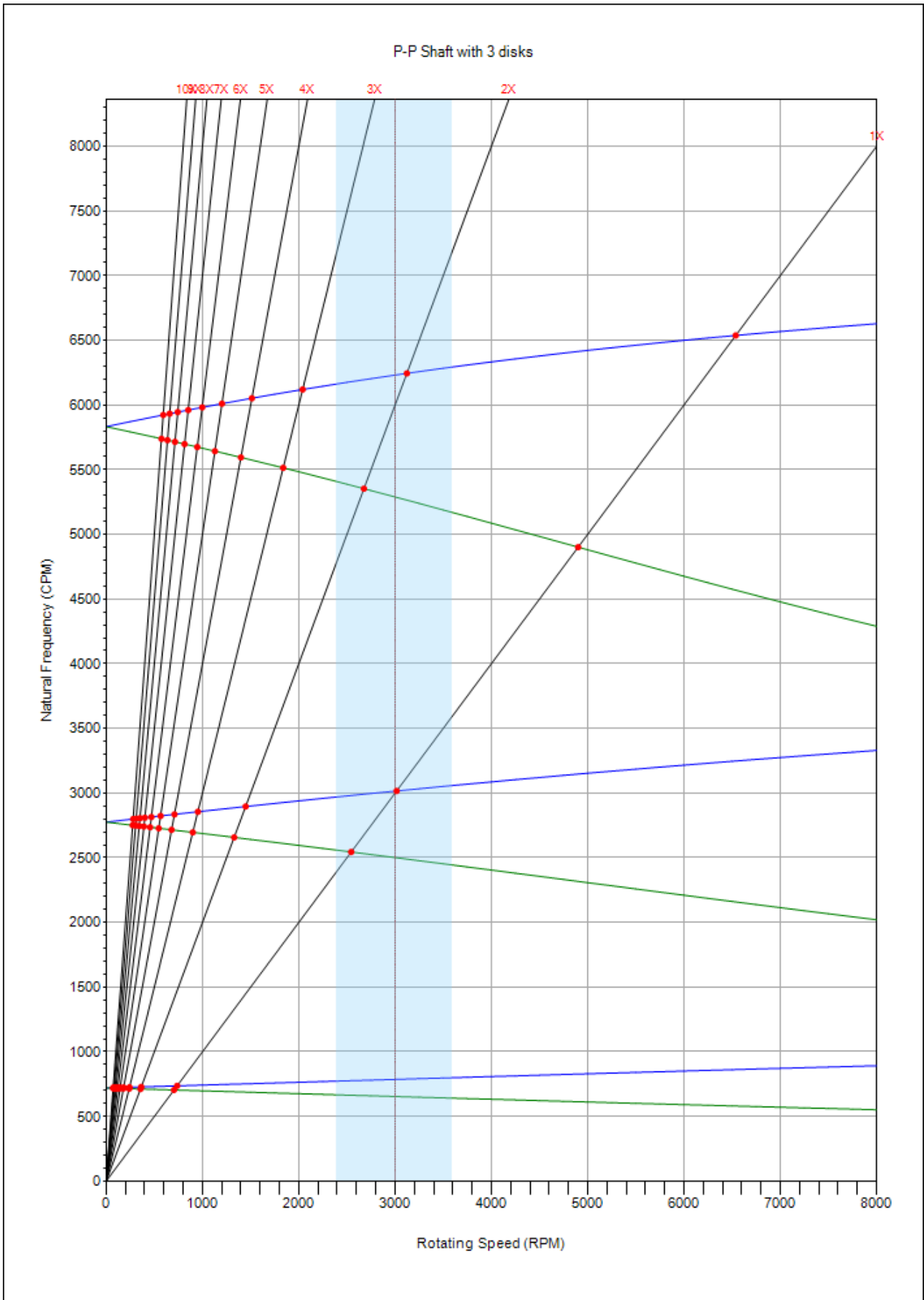


圖 2.31 SDP 軟體輸出之軸系迴旋振動的 Campbell Diagram 與共振點示意圖

## 2.5 軸向振動分析模組(Axial Vibration Analysis Full)

水泵系統軸系、工具機軸系、船舶推進軸系、...等系統在運轉時都會有軸向力(與軸中心線方向平行的力)產生(參考圖 2.32)，為了避免上述軸向力影響軸系的穩定性，軸系通常會有止推軸承(Trust Bearing)的設計，此時，軸系的軸向振動分析就變得相當重要，軸系軸向振動特性(參考圖 2.32)應該在軸系設計階段就納入設計參數中，以增加軸系穩定性，提升軸系產品品質。

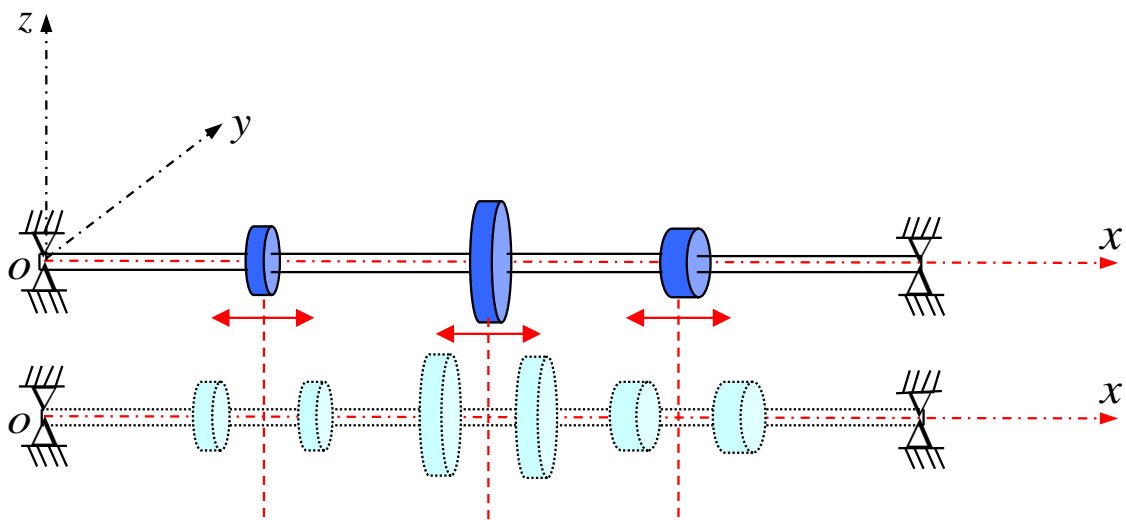


圖 2.32 軸系軸向振動(Axial Vibration)示意圖

SDP 軟體的軸向振動分析模組(Axial Vibration Analysis Full)是以 Timoshenko Beam 的理論來建立實體軸系(Full-Size Shaft)的有限元素模型，然後再配合相關的數值技術來求解軸系的軸向振動特性(Axial Vibration Characteristics)。SDP 軟體的軸向振動分析模組(Axial Vibration Analysis Full)可計算輸出的資料，簡述如下：

- ◎軸向振動—自然頻率、臨界轉速、振動模態(參考圖 2.33)。
- ◎軸向振動—Campbell Diagram 與共振點分析資料(參考圖 2.34)。
- ◎軸向振動完整計算報告輸出(參考圖 2.35)。

SDP Viewer : Axial Vibration Analysis FULL --- VNTC Demo Shaft

Mode Shape | Campbell Diagram | **Modal Data** | Report

Total modes in report : 5

	Natural Frequency (rad/s)	Natural Frequency (Hz)	Critical Speed (rpm)	Critical Speed (rpm)
Mode 1	0.000	0.000	0.000	0.002
Mode 2	274.483	43.685	43.685	2621.117
Mode 3	583.204	92.820	92.820	5569.185
Mode 4	983.240	156.488	156.488	9389.255
Mode 5	1246.647	198.410	198.410	11904.602
Mode 6	1558.074	247.975	247.975	14878.511

	x coordinate	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4	Mode 5
Node 1	0.000	-1.000	-1.000	-0.466	-0.329	-0.348
Node 2	0.125	-1.000	-1.000	-0.466	-0.329	-0.347
Node 3	0.215	-1.000	-1.000	-0.466	-0.328	-0.346
Node 4	0.395	-1.000	-0.999	-0.464	-0.324	-0.339
Node 5	1.090	-1.000	-0.996	-0.458	-0.312	-0.318
Node 6	1.785	-1.000	-0.974	-0.411	-0.222	-0.171
Node 7	2.360	-1.000	-0.955	-0.373	-0.148	-0.050
Node 8	2.460	-1.000	-0.952	-0.366	-0.135	-0.029
Node 9	2.490	-1.000	-0.951	-0.364	-0.131	-0.023

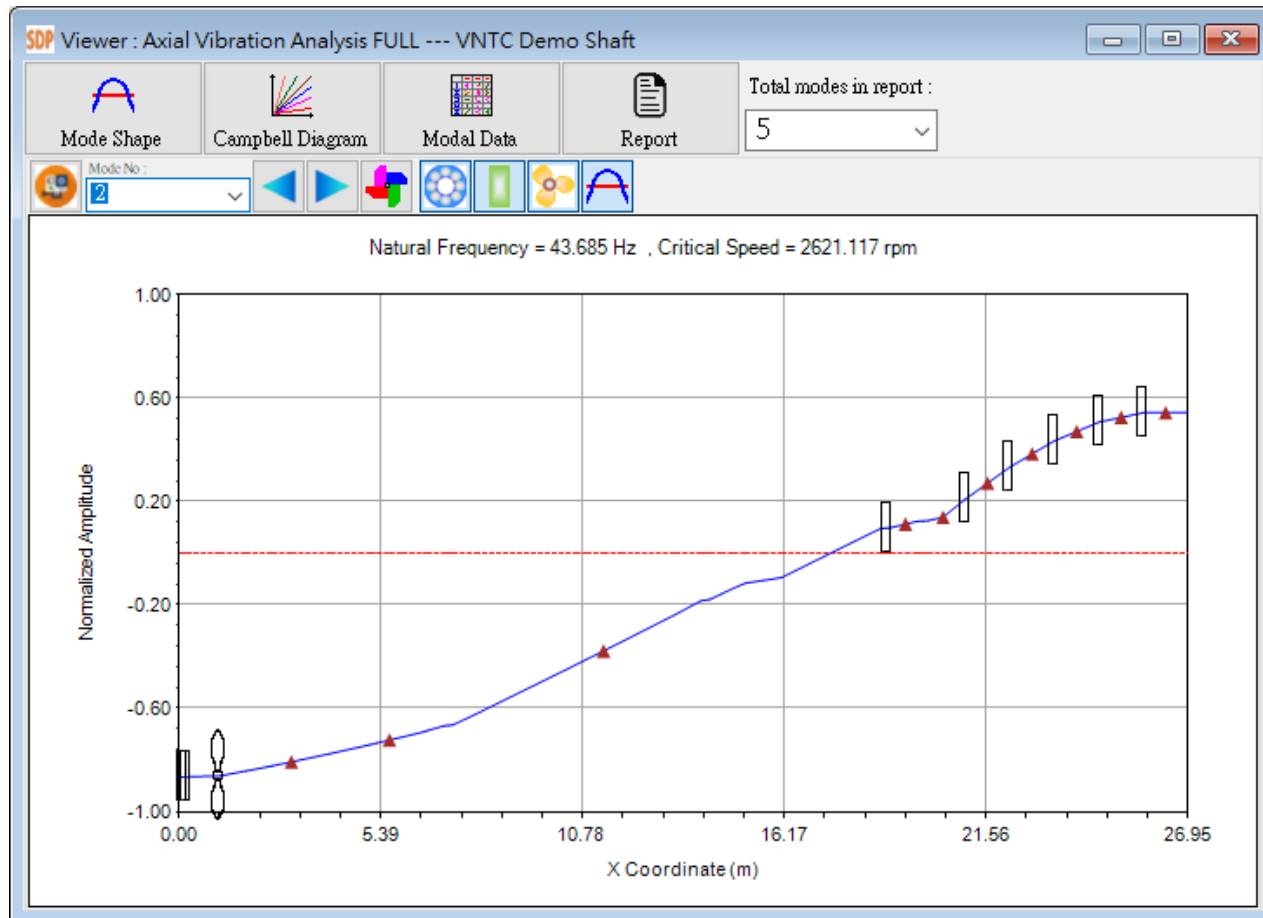


圖 2.33 SDP 軟體輸出之軸系軸向振動的自然頻率、臨界轉速與振動模態示意圖

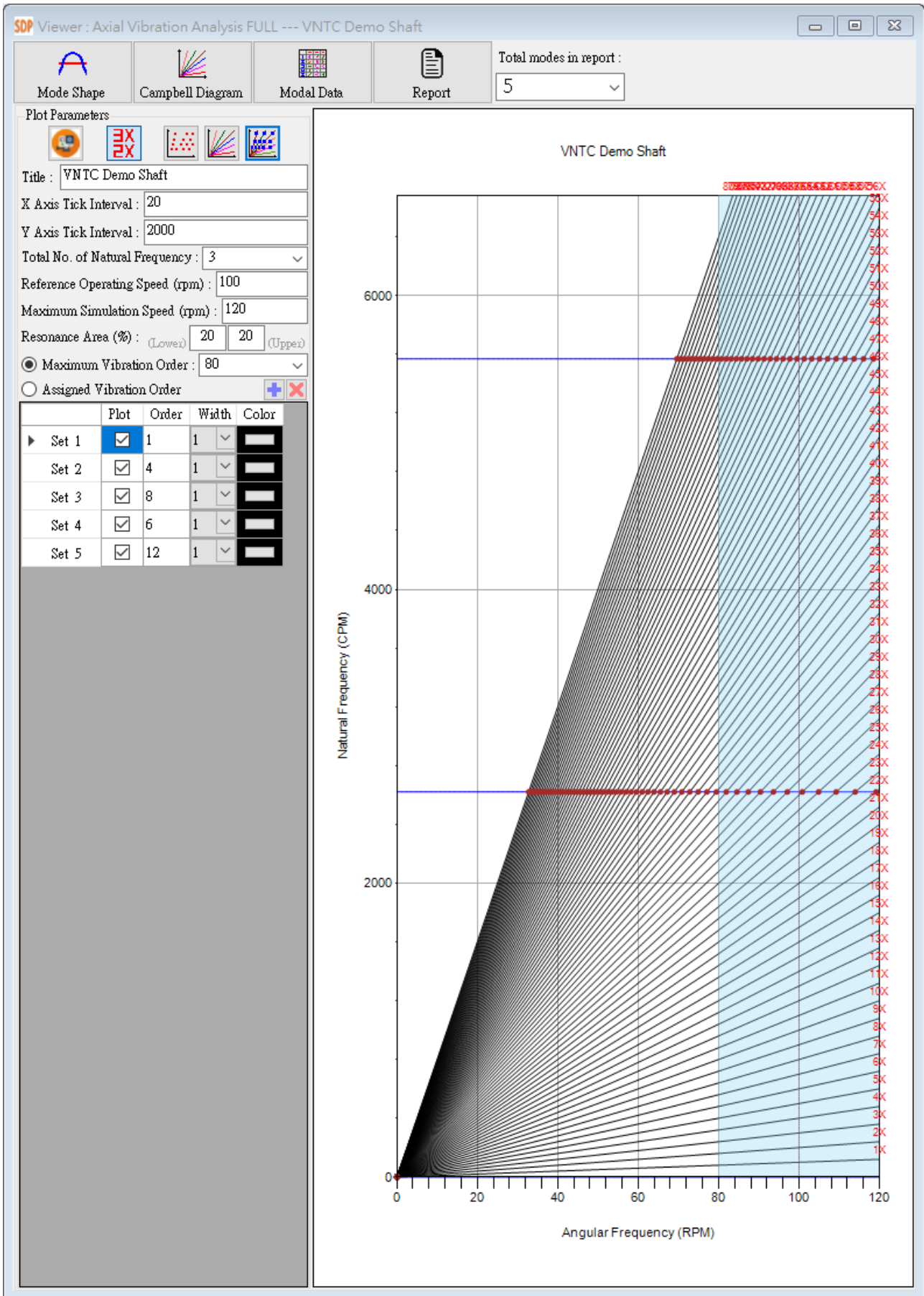


圖 2.34 SDP 軟體輸出之軸系軸向振動的 Campbell Diagram 與共振點示意圖

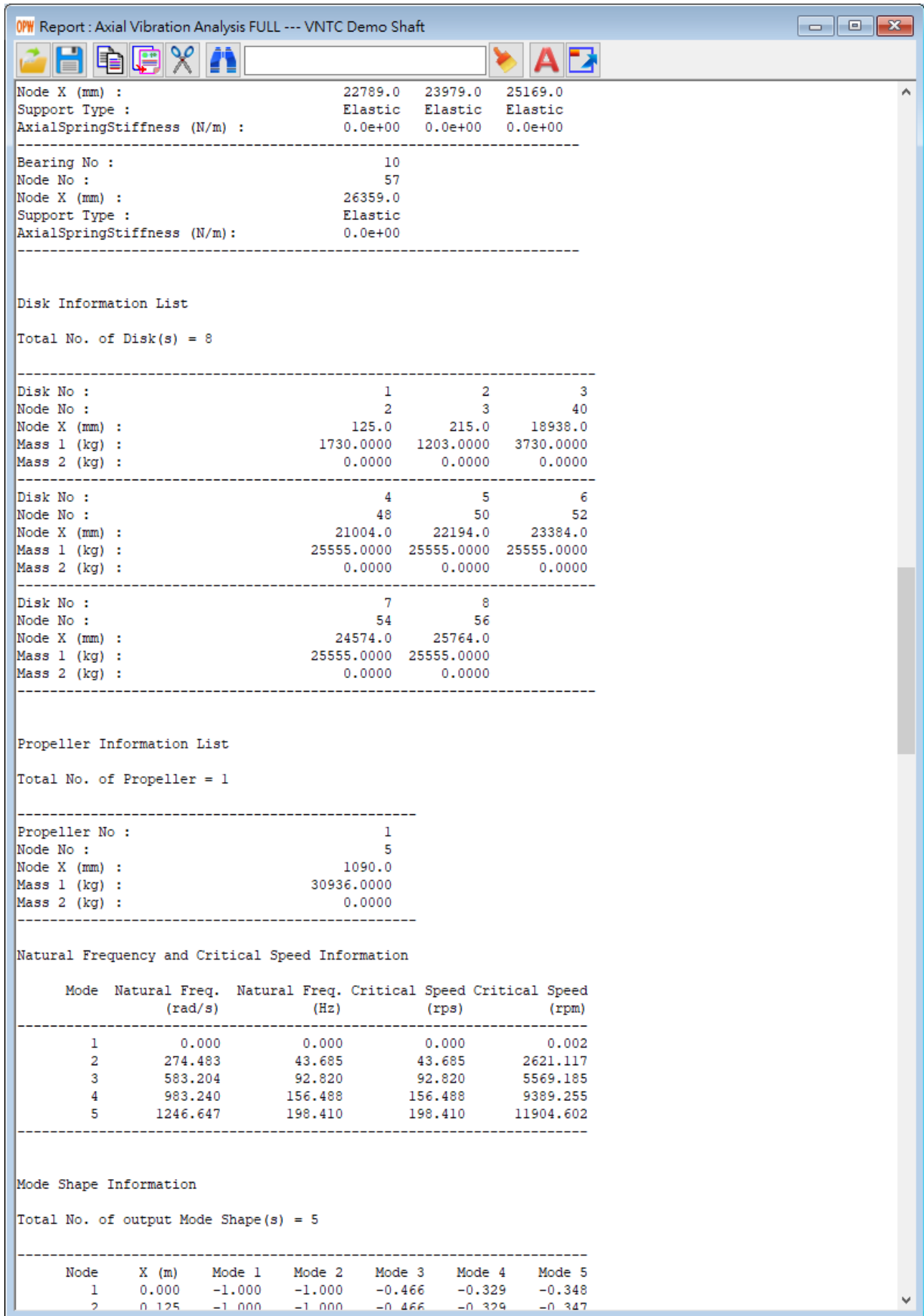


圖 2.35 SDP 軟體輸出之軸系軸向振動的計算報告示意圖



## 2.6 扭轉振動分析模組 (Torsional Vibration Analysis Full)

軸系的主要功能在於傳遞扭矩，當扭矩的變動頻率與軸系的扭轉自然頻率一致時，軸系便會處於共振的情形，這個時候，軸系的扭轉振動應力會達到最大，且軸系結構可能會發生不可預期的結果。為了避免上述情形的發生，軸系必須進行適當的扭轉振動分析，且軸系扭轉振動特性(參考圖 2.36)必須在軸系設計階段就納入設計參數中，以確保軸系在運轉期間能夠避免發生共振的情形，提升軸系的安全性。

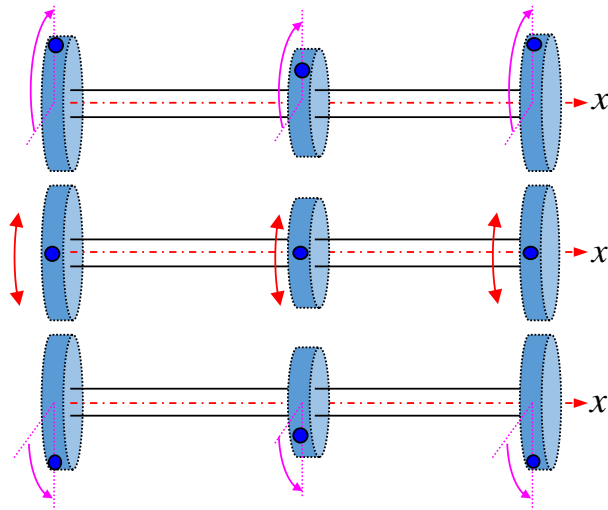


圖 2.36 軸系扭轉振動 (Torsional Vibration) 示意圖

SDP 軟體的扭轉振動分析模組 (Torsional Vibration Analysis Full) 是以 Timoshenko Beam 的理論來建立實體軸系 (Full-Size Shaft) 的有限元素模型，然後再配合相關的數值技術來求解軸系的扭轉振動特性 (Torsional Vibration Characteristics)。SDP 軟體的扭轉振動分析模組可計算輸出的資料，簡述如下：

- ◎ 扭轉振動—自然頻率、臨界轉速、振動模態(參考圖 2.37)。
- ◎ 扭轉振動—Campbell Diagram 與共振點分析資料(參考圖 2.38)。
- ◎ 扭轉振動完整計算報告輸出(參考圖 2.39)。

	Natural Frequency (rad/s)	Natural Frequency (Hz)	Critical Speed (rps)	Critical Speed (rpm)
Mode 1	0.000	0.000	0.000	0.002
Mode 2	212.367	33.799	33.799	2027.956
Mode 3	721.183	114.780	114.780	6886.788
Mode 4	1060.716	168.818	168.818	10129.093
Mode 5	1565.003	249.078	249.078	14944.674
Mode 6	1926.969	306.687	306.687	18401.201

	x coordinate	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4
Node 1	0.000	-1.000	-1.000	-0.583	-0.903
Node 2	0.155	-1.000	-1.000	-0.583	-0.902
Node 3	0.310	-1.000	-1.000	-0.581	-0.898
Node 4	1.040	-1.000	-0.993	-0.539	-0.756
Node 5	1.770	-1.000	-0.986	-0.493	-0.609
Node 6	2.155	-1.000	-0.982	-0.467	-0.527
Node 7	2.455	-1.000	-0.979	-0.444	-0.457
Node 8	3.315	-1.000	-0.966	-0.368	-0.234
Node 9	3.712	-1.000	-0.959	-0.328	-0.124

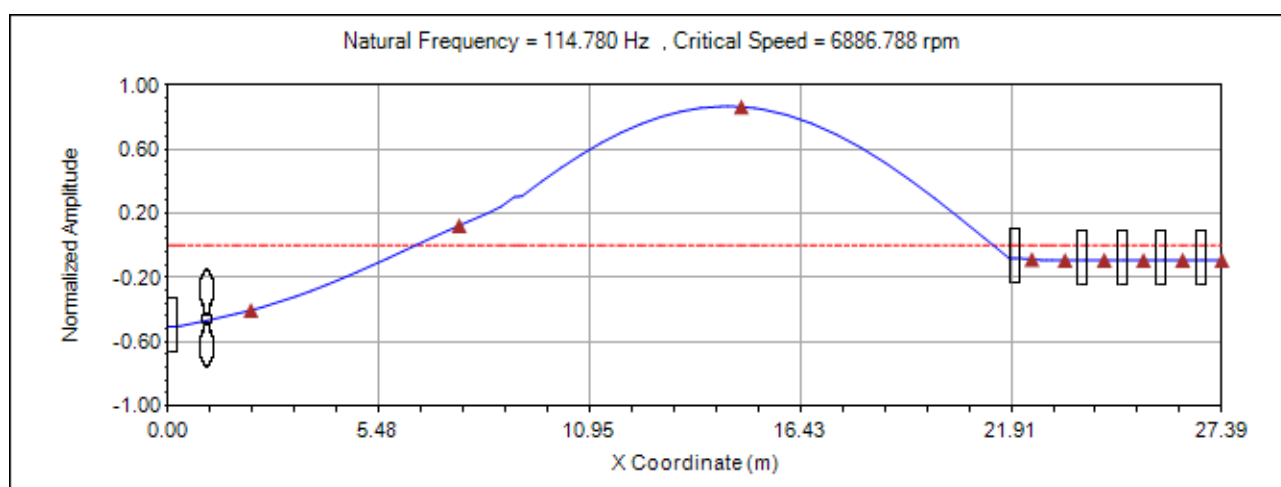
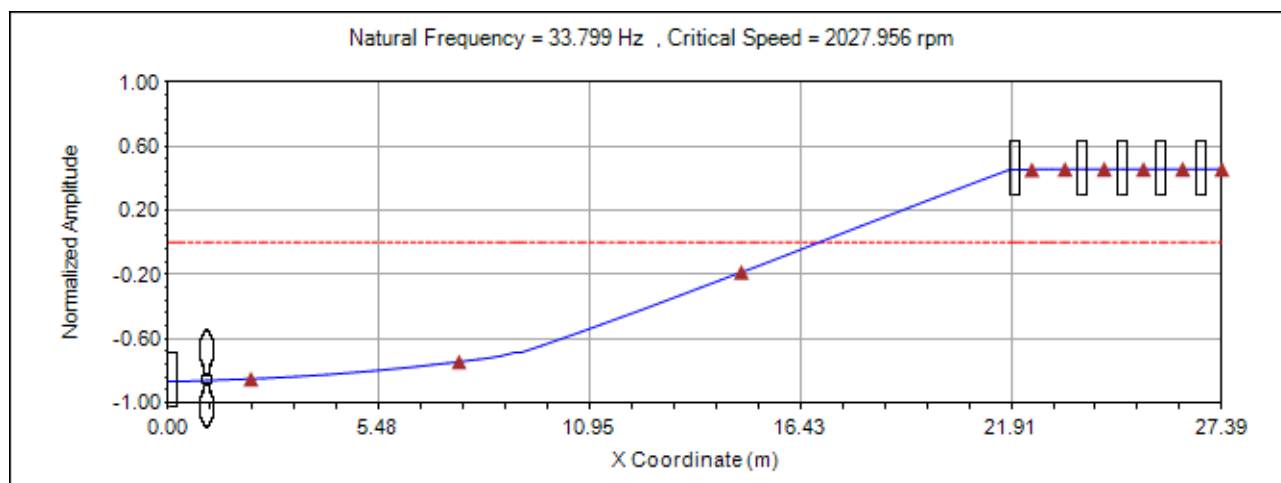


圖 2.37 SDP 軟體輸出之軸系扭轉振動的自然頻率、臨界轉速與振動模態示意圖



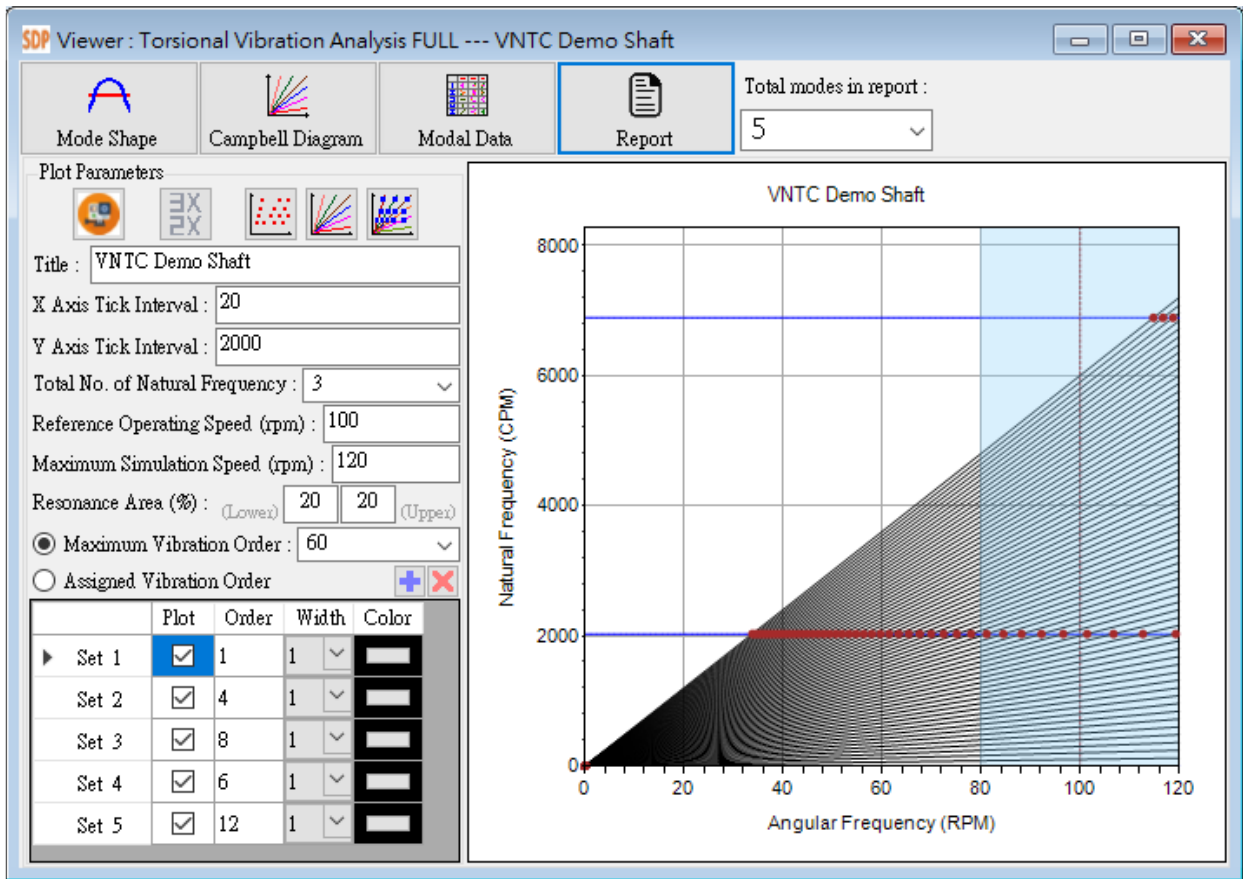


圖 2.38 SDP 軟體輸出之軸系扭轉振動的 Campbell Diagram 與共振點示意圖

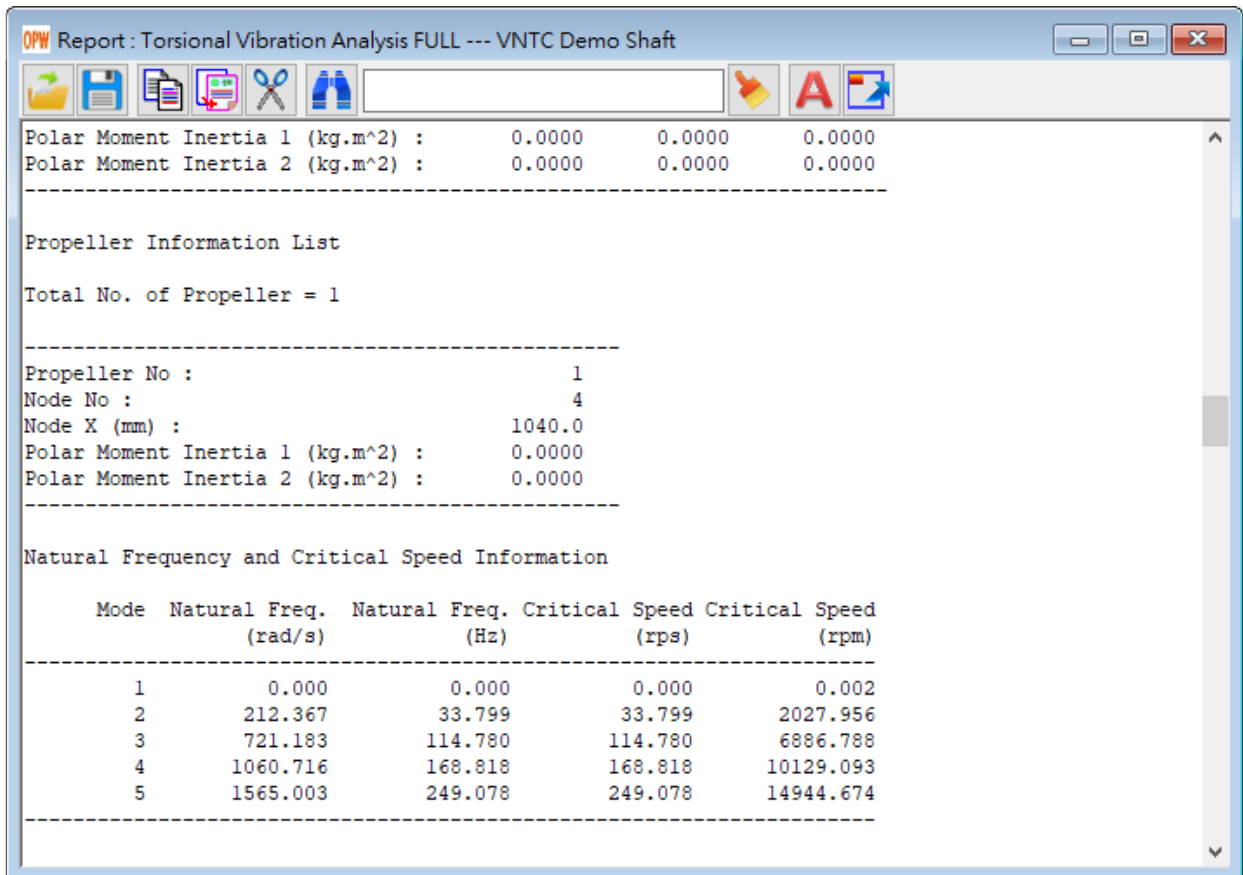


圖 2.39 SDP 軟體輸出之軸系扭轉振動的計算報告示意圖

## 2.7 軸系轉換器(Shaft Converter)

SDP 軟體之扭轉振動分析模組(Torsional Vibration Analysis Full)的主要功能在於利用 Timoshenko Beam 的理論來建立實體軸系(Full-Size Shaft)的有限元素模型，然後計算軸系的扭轉自由振動特性(Torsional Free Vibration Characteristics)，其主要內容包括軸系的扭轉振動自然頻率、臨界轉速、振動模態、Campbell Diagram 與共振點分析資料，SDP 軟體之扭轉振動分析模組(Torsional Vibration Analysis Full)並沒有提供軸系的強迫振動計算功能。為降低軸系強迫振動計算的複雜度，國際海事組織(IMO)建議採用軸系的等效扭轉振動模型(Equivalent Torsional Vibration Model)來處理軸系扭振的相關問題，而 SDP 軟體之軸系轉換器(Shaft Converter)的主要功能，即在於將 SDP 軟體所建立的實體軸系數學模型，自動轉換為軸系的等效扭轉振動模型，此時，軸系設計人員便可以直接將相關參數輸入軸系扭振強迫振動分析軟體內，以利進行更進一步的軸系扭振分析。SDP 軟體之軸系轉換器(Shaft Converter)的詳細內容，將在後續相關章節詳細介紹。