

植被及國土變遷觀測儀受熱負載作用下系統效能之模擬分析

Computational Analyses on System Performances of VCDi Undergoing Thermal Loadings

陳志堅

Jyh-Jian Chen

當外界溫度改變時，對光學系統的溫度場有影響，可能導致其光學和機械性質的變化，而影響整個系統的特性和品質。本文介紹植被及國土變遷觀測儀鏡頭系統熱控部分的模擬分析，討論系統在熱環境變化下，在鏡頭外圍有或無加裝加熱片時，探討其對溫度場的影響，分析溫度場對系統光學性質及幾何特徵的效應，以評估這些影響是否在容差範圍內。在不先做乾燥處理下，若系統溫度低於 10 °C 時，鏡片將有結霧現象產生，本文建議一個解決方案以避免此問題。

The optical properties and physical dimensions of optical components change with temperature, and hence also do the characteristics of optical systems. The thermal control system of Vegetation and Change Detection imager was numerically analyzed in this work. The effects of temperature changes on the performance of this typical optical system were described in this paper. Whether their performance with or without heat sources at ambient conditions and the maximum operating temperature within the allowed tolerance was reported. While lens temperature is below 10 °C, there will be some liquid saturated on the lens without taken into drying processes in advance. A simple method is suggested to prevent the lens from saturation and condensation of water vapor.

一、緒論

光學系統應用於遙測 (remote sensing) 和監視系統中非常廣泛，這是因為它可提供高解析度及高品質的影像；而會降低影像品質的主因是熱像差 (thermal aberration) 和色像差 (chromatic aberr-

ation)。例如因為鏡片材質的光學折射率 (refractive indices) 與溫度和波長有非常高度的相關，所以光學焦點的偏移會造成這類的像差。

外界溫度的改變對光學系統的溫度分布有其影響，造成光學元件不均勻的膨脹或收縮，可能導致其光學性質 (如光學折射率) 和機械性質及幾何特

徵 (如鏡片形狀和幾何間距) 的變化, 而造成整個光學系統的特性和品質改變。一般光學系統依其功能在不同的外界環境下工作, 若暴露於極高溫或極低溫的熱環境時 (一般而言操作範圍約為 -50 至 70 $^{\circ}\text{C}$), 部分元件會保持其整體溫度一致而隨時間改變溫度值, 或是有些元件會在內部產生極大的溫度梯度, 或是兩者皆有, 所產生的暫態應力可能超過其材料的拉伸強度 (tensile strength), 將可能產生像差, 影響成像的品質, 這稱為熱的低穩定性 (thermal destabilization)。例如一般空中偵察的光學系統經常暴露於這種溫度變化極大的環境中, 設計者在做光學設計和機械設計時, 就必須特別注意這類問題。而大部分應用於紅外線波長範圍之光學系統的物質, 都有較佳的光學性質, 但也都屬於比較脆性的材料, 所以當此紅外線光學系統必須暴露於熱衝擊 (thermal shock) 下時, 選擇適當的材料便是件非常重要的事, 這可以避免熱衝擊引起的破壞。

早期已有部分文獻在探討光學系統受熱效應下的影響, 而近年紅外線系統的廣泛應用後, 此方面的討論也就受到更多人的重視。Geary⁽¹⁾ 以實驗方法探討長焦距光學系統受熱衝擊的影響, 一個系統受到熱衝擊, 表示其在極短時間內外界環境的溫度改變極大, 文中顯示其線性的尺寸會改變 (導致焦長的改變), 並引起些微的表面不對稱 (導致像品質的降低), 並估計其受熱衝擊後系統的恢復時間 (recovery time), 顯示即使系統設計其可在一個較大範圍的溫度範圍下工作, 仍會因為恢復時間較長而影響品質。Jamieson^(2,3) 探討單一鏡片到多片鏡片系統受環境熱變化時, 系統光學性質及幾何尺寸的變化, 獲得溫度變化所產生的像差。

光機電系統會產生的熱變形原因主要分為以下兩種, 一為系統由不同材料所組成而暴露於熱環境中, 另一為系統由相同或不同材料所組成而內部有溫度梯度的產生。一般而言, 定義一個系統的熱/結構的容差主要為各元件的溫度不超過容許之操作和非操作時的最大或最小溫度、應力必須小於容許降服應力 (yield strength), 而且其安全係數至少為 1.5, 以及變形必須在容差範圍內。當光機電系統暴露於熱環境中或施加熱負載時, 有效地對溫度分布、應力分布及其對光學性質的改變做電腦模擬分

析, 對整體的設計和評估將有非常大的幫助。Miller 等人⁽⁴⁾ 建立一個整合性的電腦模擬軟體, 可分析光電系統受到熱/機械負載時的熱/結構/光學 (thermal/structural/optical, TSO) 的表現; 他們討論產生機械穩定容差的方法, 及如何自動將熱、結構及光學程式的界面連接, 並比較分析及實驗的結果。Klein⁽⁵⁾ 提出當光學系統忽然暴露在一個超音速的流場中, 其暫態應力與熱流體的比爾數 (Biot number) 有直接的關係, 利用塊狀參數近似法 (lumped parameter approximation) 分析紅外線穿透性材質的熱衝擊熱阻; 在選擇視窗 (window) 的材料時, 允許的熱通量不但與材料性質有關, 也與外界熱傳遞係數 (Bi 大於 1) 或厚度 (Bi 小於 1) 有關。

除熱效應 (athermalization) 是指利用特別設計的光學元件或是利用可調整的機構, 針對因熱效應而產生較低的光學品質做補償的原則, 將影響的量減小和影響的時間縮短; 其目的為將聚焦點相對於夾具的位置保持固定, 而不是相對於鏡片的位置保持固定。被動式的光學除熱效應相當於去色差的功能, 由光學設計者選用適當光學性質的材料來製作光學元件, 以配合機械的膨脹; 而被動式的機械除熱效應則是利用可移動的元件, 驅動力來自元件本身的熱膨脹能力, 機械設計者選用可以配合焦距偏移 (defocus) 的結構。主動式的除熱效應則需外加的驅動能量來調整可移動元件的位置, 以保持其光學特徵, 通常是當被動式的方法失敗時, 才考慮此方法, 因為此方法需要機械、控制和電磁等外界能量的輸入, 但其優點是直接和簡單。Friedman⁽⁶⁾ 分析兩個作為空中偵察的長焦距鏡片組, 在 20 到 60 $^{\circ}\text{C}$ 的操作溫度下光學特徵的變化, 並考慮被動式補償對背焦長 (back focal length) 的改變。Tamagawa 等人⁽⁷⁾ 建立一個除熱圖 (athermal chart) 以提供光學設計者一個圖示的設計參考值, 當設計一個光學系統 (特別是多鏡片系統) 時, 可滿足消色差和除熱效應。接著 Tamagawa 和 Tajime⁽⁸⁾ 將此應用延伸至鏡片厚度較大及鏡片間距較寬的情況, 同樣可以獲得不錯的結果。Kryszczyński 和 Lesniewski⁽⁹⁾ 假設光學系統為塊狀系統 (lumped system), 分析熱效應對成像位置、焦距和色差的影響, 並提出利用光學式補償 (被動式) 和熱機械式補償 (主動式) 的方法作

修正，塊狀系統即指系統整體溫度分布一致，這通常表示系統的熱傳導係數很大。

植被及國土變遷觀測儀 (vegetation and change detection imager, VCDi) 為一多光譜數位遙測系統，係由精儀中心自行研發之機載系統，可應用於植被調查及國土變遷監測。本文乃介紹 VCDi 遙測取像系統的熱控分析部分。建立 VCDi 熱控系統的目的是為了讓所有的元件在暴露於熱環境下，且在任何模式下運作時，都能保持在允許的工作溫度範圍內；這樣不但能夠確保元件不受環境影響而破壞，更能避免熱環境對成像品質有負面的影響。在此先分析 VCDi 在熱環境變化下，各元件的熱場分布情形，以提供熱控系統設計前的參考。然後在最佳位置加裝加熱片或散熱器，討論其對溫度場的影響，若配合溫度感測器和回授電路的運用，便可建立成一 VCDi 熱控系統。利用計算所得的系統溫度場分布，分析其對系統光學性質及幾何特徵的效應，以評估這些影響是否在容差範圍內。當在室溫時，鏡頭系統不做任何乾燥處理下，若系統溫度降至 10 °C 以下時，第一片鏡片內外表面將會有結霧的現象產生，本文建議一個解決方案以避免鏡片結霧問題。

二、理論分析

圖 1 表示 VCDi 光學系統的幾何模型。系統中利用熱量傳遞方程式 (heat transfer equation)，配合適當的邊界條件，可以描述其溫度場的變化⁽¹⁰⁾。由於此幾何形狀在軸方向是對稱的，可將統御方程式簡化成二維的模式；而無因次的方程式可表示如下：

$$\frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t} = \nabla(k \nabla T)$$

數值模擬的計算乃藉由商用軟體 CFDRC (Version 2002, CFD Research Corporation, Huntsville, AL) 的 CFD-ACE+™ 模組；在求解溫度場時，則利用有限體積法 (finite volume approach)。邊界條件則假設為對流的狀態或加熱片的熱通量輸入；配合不同的外界環境條件及初始條件，可以得到 VCDi 中的暫態溫度場的分布。

在考慮熱應力時，可利用平衡方程式 (equations of equilibrium) 求解應力分布或位移變化。平衡方程式可表示為⁽¹¹⁾：

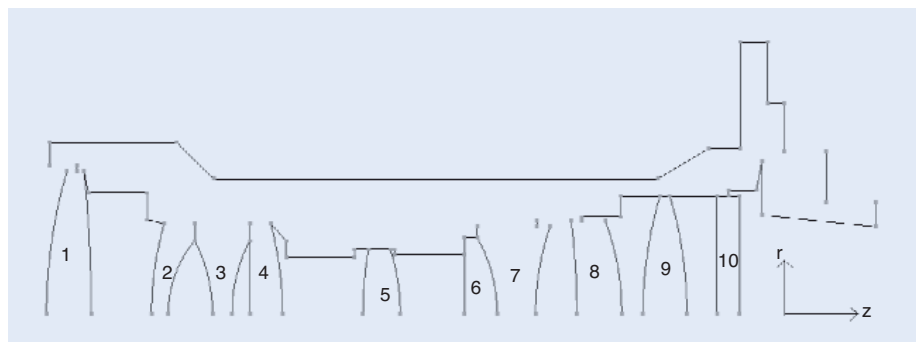
$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\tau_{rz}}{r} &= 0 \\ \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} &= 0 \end{aligned}$$

加上應變及位移的關係

$$\begin{aligned} \epsilon_r &= \frac{\partial u}{\partial r} \\ \epsilon_\theta &= \frac{u}{r} \\ \epsilon_z &= \frac{\partial w}{\partial z} \\ \gamma_{rz} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial r} \right) \end{aligned}$$

圖 1.

VCDi 光學系統的幾何模型。



和應力與應變的關係

$$\begin{Bmatrix} \sigma_r \\ \sigma_\theta \\ \sigma_z \\ \tau_{rz} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{11} & E_{12} & E_{13} & E_{14} \\ & E_{22} & E_{23} & E_{24} \\ & & E_{33} & E_{34} \\ & & & E_{44} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_r \\ \epsilon_\theta \\ \epsilon_z \\ \gamma_{rz} \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} \alpha T \\ \alpha T \\ \alpha T \\ 0 \end{Bmatrix}$$

其中

$$E_{11} = E_{22} = E_{33} = (1 - \nu)c$$

$$E_{12} = E_{13} = E_{23} = \nu c$$

$$E_{44} = G$$

$$E_{14} = E_{24} = E_{34} = 0$$

而

$$c = \frac{E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}$$

且

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

配合適當的邊界條件，可獲得應力或位移的分布。有效應力又稱 Von Mises 應力，則可表示如下：

$$\sigma_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{(\sigma_r - \sigma_z)^2 + (\sigma_r - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_z)^2}{2}}$$

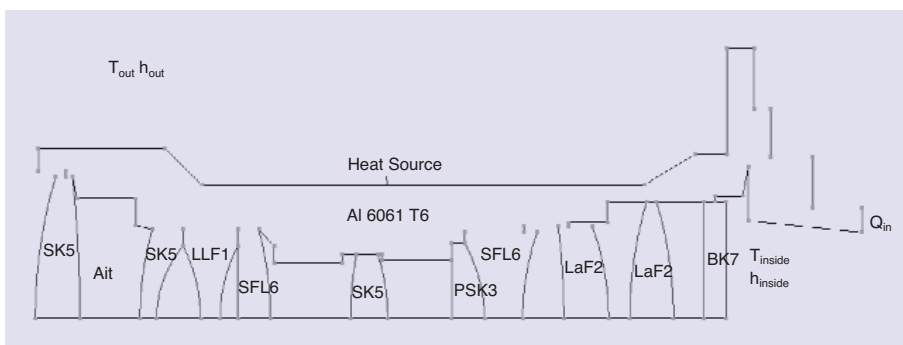


圖 2. VCDi 鏡頭部分的物理模型。

而鏡片的光學折射率與溫度變化的關係，隨鏡片的材質不同而變，可表示如下：

$$\frac{dn}{dT} = \frac{n^2 - 1}{2n} \left(D_0 + 2D_1\Delta T + 3D_2\Delta T^2 + \frac{E_0 + 2E_1\Delta T}{\lambda^2 - \lambda_{TK}^2} \right)$$

另外在組裝過程或有施加熱負載時，作用在光學元件的機械力量可能會造成雙折射 (birefringence) 的現象，因此熱應力的產生對光學折射率的影響，可以下列數學式表示：

$$\Delta n = K\Delta\sigma$$

以上兩式的參數值皆可由光學鏡片手冊查出⁽¹²⁾。

三、結果和討論

圖 2 為 VCDi 鏡頭部分的物理模型。本文所討論的 VCDi 鏡頭部分包含鏡筒和鏡片部分，鏡筒部分為鋁合金的材質 Aluminum 6061-T6，此合金是最常用來當結構體的材料，含有 0.6% 的矽、0.25% 的銅、1% 的鎂和 0.2% 的鉻；而鏡片部分則有十片，分別為六種不同的玻璃材料，排列順序由左到右為第一片至第十片，其物理及其機械性質如表 1 所示⁽¹³⁾。

本文分析 VCDi 置於飛機莢艙內，而此莢艙並未加上視窗時，當其受外界環境的影響，此鏡頭部分的溫度分布。在考慮實際量測溫度時熱電偶 (thermocouple) 的個數和擺放位置，其可量測得到的結果皆對加熱片的設計有極大的影響；過多的熱

表 1. 鏡筒與鏡片材料之物理及機械性質。

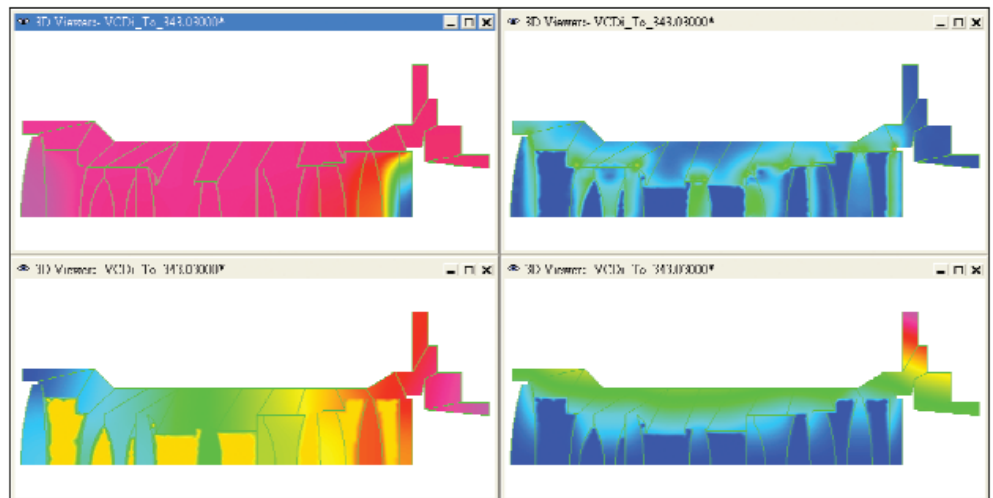
	Al 6061-T6	SK5	BK7	LaF2	LLF1	PSK3	SFL6
密度 (kg/m ³)	2710	3300	2510	4340	2940	2910	3310
比熱 (J/kg·K)	960	560	858	480	675	682	570
熱傳導係數 (W/mK)	171	0.901	0.741	0.648	0.738	0.783	0.94
波森比	0.332	0.256	0.208	0.289	0.21	0.226	0.26
楊氏係數 (N/m ²)	6.9×10^{10}	8.4×10^{10}	8.1×10^{10}	9.3×10^{10}	6.0×10^{10}	8.4×10^{10}	9.3×10^{10}
熱膨脹係數 (m/°C)	23×10^{-6}	5.5×10^{-6}	7.1×10^{-6}	8.1×10^{-6}	8.1×10^{-6}	6.2×10^{-6}	9.0×10^{-6}

電偶數目對電腦訊號擷取部分增加極大的負荷，但過少的熱電偶數目對量測結果能提供的設計參數幫助不大。當鏡頭部分的系統屬於三維不對稱模型時，不論在數值分析及溫度量測上皆有很大的負擔，若我們考慮使用環形加熱片時，整個鏡頭將簡化成二維軸對稱的模型，對整體熱控設計有極大的幫助，所以在此我們考慮使用環形加熱片，分析 CFDRC 二維模型時的鏡頭熱場分布。我們考慮初始溫度為 300 K、外界環境溫度為 T_{out} ，在有強制對流作用下， h_{out} 為 $20 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ ；接觸 CCD 部分的面積有熱傳進入， Q_{in} 為 1 kW/m^2 ；而鏡筒和 CCD 部分的空間內，其溫度 T_{inside} 為 300 K，考慮有自然對流作用， h_{inside} 為 $10 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ ；圖中標示熱源 (heat source) 處為貼加熱片的位置。

首先考慮在極限外界溫度下，即 T_{out} 為 343 K 和 223 K 時，無外加熱源的情況下，鏡頭的溫度分布、Von Mises 應力分布和 r 及 z 方向的位移。圖 3

顯示外界溫度為 343 K 時所得的模擬結果。左上方為溫度分布的結果，整個系統溫差約為 $14.2 \text{ }^\circ\text{C}$ 。由於鋁合金有極大的熱傳導係數，當環境溫度改變時，可很均勻的反應至全部的鏡筒部分，可發現整個鏡筒的溫度幾乎保持一樣。內部鏡片部分 (扣除前後的兩片) 除了直接與鏡筒接觸外，還與空氣接觸，由於空氣的熱傳導係數極低，鏡片可視為置於一兩旁絕熱的空間裡，所以溫度分布幾乎和鏡筒相同，只是需要較長的時間才能達到穩定的溫度 (因為鏡片的熱傳導係數也是很低)。而第二片和第九片鏡片的溫度則受到第一片和第十片鏡片的影響，但由於有空氣的隔絕，影響並不大，且加熱效應僅止於此，不會再繼續傳入內部鏡片。鏡頭部分前端的第一片鏡片附近都會有最高的溫度分布，而第十片有最低的溫度分布。由於鏡片的熱傳導係數較小時，表示鏡片的熱阻值較大，相較於外界環境有較小的熱阻，所外加的熱量會往鏡筒部分或外界環境

圖 3. 外界溫度為 343 K 時，所得的鏡頭的溫度分布、Von Mises 應力分布和 r 及 z 方向的位移。



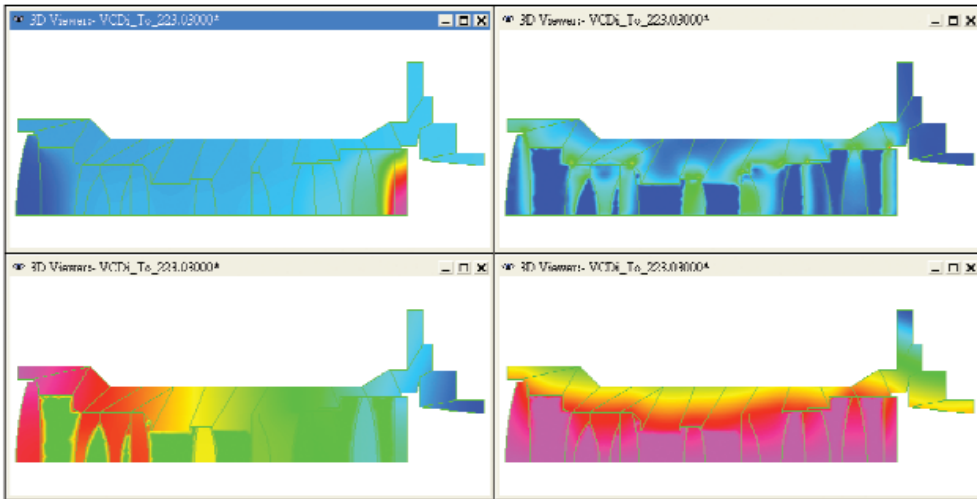


圖 4. 外界溫度為 223 K 時，所得的鏡頭的溫度分布、Von Mises 應力分布和 r 及 z 方向的位移。

傳遞，即是造成溫度不同的原因，且在鏡片上也會有較大的溫度梯度。右上方為 Von Mises 應力分布的結果，熱應力主要是由於同一材質的溫度分布不均勻及不同材質的熱膨脹係數不同所引起的。圖中顯示鏡片與鏡片、鏡片與鏡筒和鏡片組與鏡筒接觸的部分，由於不同熱膨脹係數的影響而有大的應力分布，而且較大的應力值皆發生在接觸面的邊緣部分。對單一鏡片而言，若鏡片邊緣與鏡筒僅有部分面積接觸，則接觸部分的體積會有較大的應力分布，如圖中所示，第一片鏡片的右邊區域和第八、十片的左邊區域在相較於鏡片本身的其他區域而言會有較大的應力分布；而第五片和第九片的鏡片邊緣與鏡筒完全接觸，所以鏡片內部的應力分布也較為均勻。對鏡片組而言(第二、三、四片及第六、七片)，由於彼此的接觸和鏡片邊緣與鏡筒完全接觸，可有效地將應力分配於各鏡片上；因為第六片的左上方與鏡筒另有接觸，而使得其所受應力較大。左下方及右下方表示 r 及 z 方向的位移分布圖，由於鋁合金有較大的熱膨脹係數，使得其 r 及 z 方向的位移皆較大， z 方向的最大位移在右端，而 r 方向的最大位移也在右上方；且鏡頭為受外界加熱的情況，位移皆為向外膨脹。圖 4 則顯示外界溫度為 223 K 時所得的模擬結果。由於外界溫度與初始溫度相差較大，從溫度分布圖可知其穩態的溫度分布也較不均勻，整個系統溫差約為 25.6 °C，也使得其 Von Mises 應力分布值增加，但應力分布

的趨勢是相似的；而 r 及 z 方向的位移也同樣增加。在此因為外界的溫度較初始溫度為低，系統則為收縮的狀況，即位移的方向是相反的。

就溫度差對鏡頭系統的影響而言，有兩部分的效應：一為各元件厚度的改變，此將造成熱應力而產生應變；二為鏡片光學折射率的改變，皆將影響成像的品質。鏡片的光學折射率與溫度變化的關係，隨鏡片的材質不同而變。以 VCDi 系統而言，在外界操作環境的極限溫度下，溫度變化最大的部分為第一片，此片的材質為 SK5，當鏡片溫度變化最大在 50 °C 時，所造成的光學折射率變化量為 3.17×10^{-4} ，此變化值小於系統設計時的容許誤差值 5×10^{-4} 。熱應力的產生對光學折射率的影響，也同樣隨鏡片的材質不同而變。以本系統而言，Von Mises 應力最大的部分為第十片，此片的材質為 BK7，當外界溫度低於系統初始溫度為 50 °C 時，第十片鏡片的 Von Mises 應力為 1.74×10^8 N/m²，所造成的光學折射率變化量為 4.82×10^{-4} ，此變化值亦小於容許誤差值 5×10^{-4} 。由此可知，在外界操作環境的極限溫度下，鏡片光學折射率的變化都在系統設計時的容許誤差值之內。當外界溫度低於系統初始溫度為 50 °C 時，所產生 r 方向的最大位移值為 74.4 μm， z 方向的最大位移值為 154.8 μm，但系統設計時的容許誤差值為 10 μm。由此結果可知，系統最大位移值遠大於系統設計時的容許誤差值；這種線性尺寸的改變，將導致焦長

圖 5. 不同加熱片位置對鏡頭系統的影響，左為加熱片位置在最左端，右為加熱片位置在最右端，上為溫度分布，下為 Von Mises 應力分布。

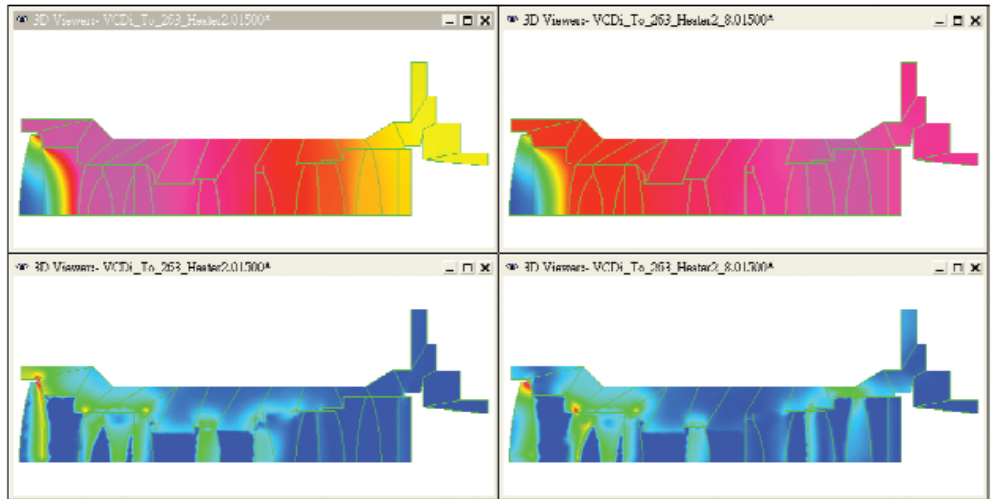
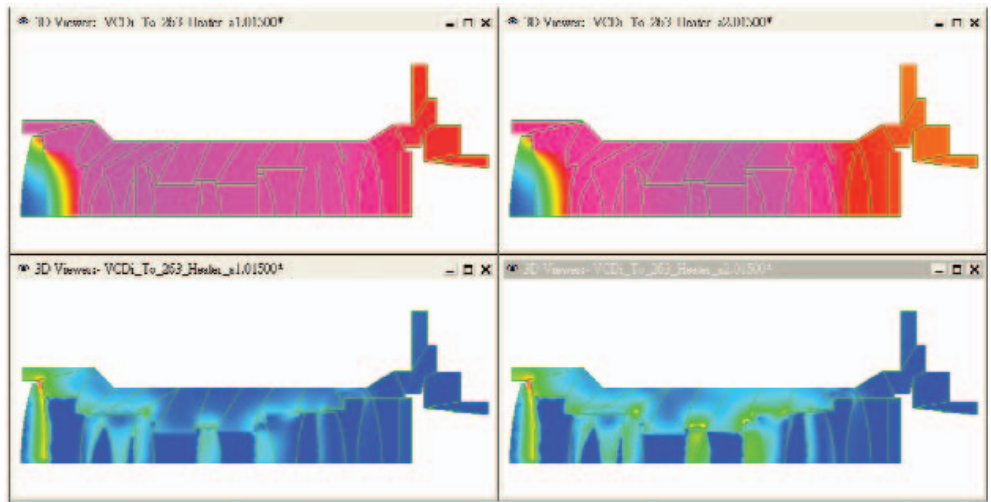


圖 6. 不同加熱片位置對鏡頭系統溫度分布和 Von Mises 應力分布的影響，在此加熱片有兩片。



的改變，進而影響成像的品質。因此若 VCDi 系統的操作環境溫度在 223 K 至 343 K 的範圍時，將系統溫度控制在一定的操作溫度範圍內是必要的。

由於在未加裝加熱或冷卻裝置的狀況下，鏡頭之溫度分布不在操作範圍內，整個系統的變形將影響成像的品質。加熱或冷卻裝置是為了加入外來熱量或移出內部熱量，故僅探討加熱裝置對整體設計的影響，而冷卻裝置的影響則為類似的結果。圖 5 顯示不同加熱片位置對鏡頭系統的影響，外界環境溫度為 263 K，當加熱片位置由左到右共分八段，每段代號分別為一至八，每段 10 mm，輸入功率為 20 kW/m^2 時，系統由左至右每段位置分別放置一片加熱片，所得結果溫度分布由左到右為 285.3

K—307.5 K 遞減至 280.7 K—302.2 K，此乃因為鏡頭前半部接觸較多的冷空氣環境；若將加熱片置於較前方，可升高此部分的溫度。由於第一片鏡片直接與外界接觸，會有較低的溫度，而置放加熱片部分的溫度會升高較多，所以當加熱片置於較前方時，鏡頭系統的前方會有較大的溫度梯度，因而導致有較大的應力分布和位移量；而後方溫度分布較為均勻，因此熱應力和位移量也較小。若將加熱片置於較後方時，鏡頭系統的前方仍會有較大的溫度梯度，而放置加熱片位置的部分也有大的溫度梯度，所以有較大的應力分布和位移量；然而中央部份則可保持溫度均勻。圖 6 同樣顯示不同加熱片位置對鏡頭系統的影響，在此加熱片有兩片，但輸入

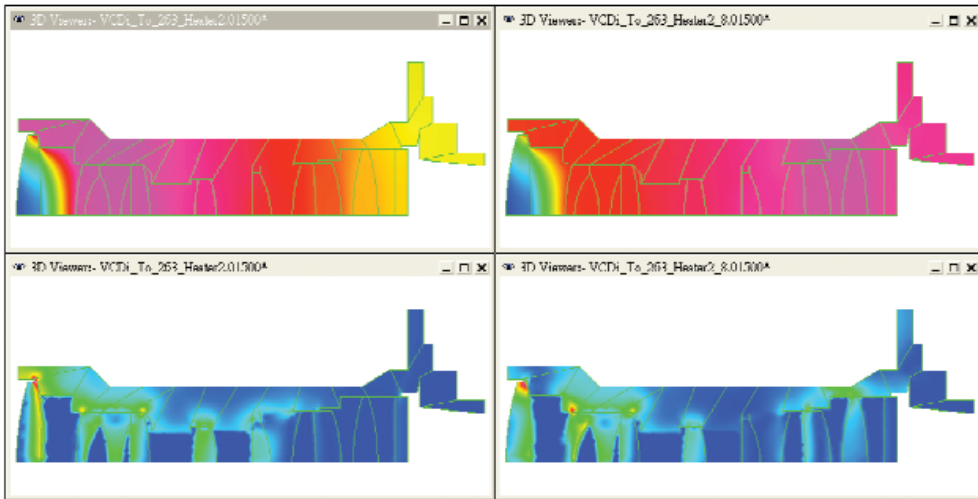


圖 7. 不同加熱片功率對鏡頭系統溫度分布的影響。

功率減半為 10 kW/m^2 ，位置分別在一和八、二和七、三和六及中間有二 (四和五)，初始溫度和外界環境溫度分別為 300 K 和 263 K 。可知加熱片數增加而總輸入功率不變，可得較均勻的溫度分布；置放位置較分散、溫度較均勻，也因此會有較小的熱應力分布和位移量。

圖 7 顯示不同加熱片功率對鏡頭系統的影響，外界環境溫度為 263 K ，此部份的加熱片位置在最靠近鏡筒前端 (圖中最左端)，加熱片輸入功率分別為 5 、 10 、 20 和 30 kW/m^2 。當加熱片輸入功率為 10 kW/m^2 時，整個鏡筒系統溫度範圍為 $275.3 \text{ K} - 288.6 \text{ K}$ ，所以當操作溫度設定在 $0 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上時，至少需使用功率大於 10 kW/m^2 的加熱片。當加熱片輸入功率為 20 kW/m^2 時，鏡筒系統溫度範圍為 $285.3 \text{ K} - 307.5 \text{ K}$ ，此溫度範圍最接近系統初始溫度，所以溫度變化所產生的 Von Mises 應力分布較小；而所產生 r 方向的最大位移值為 $4.1 \mu\text{m}$ ， z 方向的最大位移值為 $9.7 \mu\text{m}$ ，因此在此外界環境，外加輸入功率 20 kW/m^2 的加熱片，可將系統最大位移保持在系統設計時的容許誤差值 ($10 \mu\text{m}$) 內。

當 VCDi 系統做機載取像時，鏡頭系統會受到外界環境影響而有溫度下降的現象，在避免溫度變化引起的熱漲冷縮超過系統設計時的容許位移值下，鏡頭系統外圍加上加熱裝置時，第一片鏡片溫度仍會由室溫降至 $10 \text{ }^\circ\text{C}$ 以下。當在室溫時，鏡頭系統不做任何乾燥處理下，鏡頭部分內部的相對濕

度約為 50% ，若系統溫度降至 $10 \text{ }^\circ\text{C}$ 以下時，第一片鏡片將會有結霧的現象產生，因為此溫度低於此原來環境的露點 (dew point) $19 \text{ }^\circ\text{C}$ 以下⁽¹⁴⁾。此時必須在室溫時先將鏡頭內部的相對溼度降至 20% ，才可避免內部結霧的情況發生。但外部仍有結霧的可能性發生，就此設計而言，則無法解決此問題。在此建議在鏡頭的第一片鏡片前，再加上一片視窗，此視窗加鍍一層高導電、高穿透的薄膜，或是在不影響系統特徵的情況下，直接在第一片鏡片加鍍一層特殊薄膜，此薄膜加上電壓即可產生熱量，如此便可避免第一片鏡片低溫的問題，這樣的作法應可解決結霧問題，且不需事先做乾燥的工作。

四、結論

植被及國土變遷觀測儀 (VCDi) 為一多光譜數位遙測系統，係由精儀中心自行研發之機載系統，本文乃介紹 VCDi 遙測取像系統的熱控分析系統。由分析結果可知，未裝上加熱或冷卻裝置前，在外界操作環境的極限溫度下 (223 K 至 343 K)，鏡片光學折射率的變化都在系統設計時的容許誤差值之內，而系統最大位移值遠大於系統設計時的容許誤差值，進而影響成像的品質，因此若 VCDi 系統的操作環境溫度在此極限值時，將系統溫度控制在一定的操作溫度範圍內是必要的。當加熱片置於較前方時，鏡頭系統的前方會有較大的溫度梯度，因而

導致有較大的應力分布和位移量。另外加熱片數增加，而總輸入功率不變，可得較均勻的溫度分布；加熱片置放位置較分散，溫度也較均勻，也因此會有較小的熱應力分布和位移量。在此建議在鏡頭的第一片鏡片或在其之前方再加上一片視窗，此鏡片或視窗加鍍一層高導電、高穿透的薄膜，可解決鏡片結霧問題。

參考文獻

1. J. M. Geary, *Optical Engineering*, **19**, 233 (1980).
 2. T. H. Jamieson, *Optical Engineering*, **20**, 156 (1981).
 3. T. H. Jamieson, *Optomechanical Design*, 131 (1992).
 4. J. Miller, M. Hatch, and K. Green, *Optical Engineering*, **20**, 166 (1981).
 5. C. A. Klein, *Optical Engineering*, **37**, 2826 (1998).
 6. I. Friedman, *Optical Engineering*, **20**, 161 (1981).
 7. Y. Tamagawa, S. Wakabayashi, T. Tajime, and T. Hashimoto, *Applied Optics*, **33**, 8009 (1994).
 8. Y. Tamagawa and T. Tajima, *Optical Engineering*, **35**, 3001 (1996).
 9. T. Kryszczyński and M. Lesniewski, *Optical Engineering*, **36**, 1596 (1997).
 10. F. P. Incropera and D. P. de Witt, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 3rd ed., John Wiley & Sons, Inc., New York (1990).
 11. B. A. Boley and J. H. Weiner, *Theory of Thermal Stresses*, John Wiley & Sons, Inc., New York (1960).
 12. Schott, *Schott Optical Glass Catalog*, Schott Glass Technologies, Germany (1982).
 13. P. R. Yoder, Jr., *Opto-Mechanical System Design*, Marcel Dekker, Inc., New York (1993).
 14. W. F. Stoecker and J. W. Jones, *Refrigeration And Air Conditioning*, 2nd ed., McGraw-Hill, New York (1982).
-

· 陳志堅先生為國立交通大學機械工程博士，現任國科會精密儀器發展中心副研究員。

· Jyh-Jian Chen received his Ph.D. in mechanical engineering from National Chiao Tung University. He is currently an associate researcher at Precision Instrument Development Center, National Science Council.