

### 3.2.2 機電一體化設計的學科系統

設計的如圖所示的設計 3.1 受到以下主要方面的驅動，以滿足各種要求：機身與驅動負載之間的集成（質量，幾何包絡），對環境的抵抗力（熱和振動），瞬時功率和節能，動態性能，使用壽命，可靠性，對故障的耐受性或耐受性。

表 3.1 總結了這些不同的設計觀點以及基於模型的设计可能的關聯建模級別。優化此類系統時，這些多種設計觀點產生了真正的挑戰。為了在同一循環中考慮這些標準，來自多學科設計優化（MDO）的工具可能會有用[8]。MDO 是工程學領域，它使用統計和優化方法來解決包含 2D / 3D FEM 代表的所有相關學科的设计問題

表 3.1 機電一體化系統设计過程中的设计視圖和相關的建模級別，一個飛行控制執行器的示例 要求相應的 设计或尺寸觀點。

**Table 3.1** Design views and associated modelling levels during design of mechatronics systems, an example of a flight control actuator

Requirements	Corresponding design or sizing viewpoints	Algebraic models (0D)	Differential algebraic (1D) equations	CAD (3D)	FEM (3D)
Integration	Mass	⊗		⊗	
	Geometrical envelope	⊗		⊗	
Mechanical resistance	Transient stress		⊗		⊗
	Fatigue/Thermal/Wear stress	⊗	⊗		⊗
	Vibration	⊗	⊗		⊗
Reliability	Life time/MTBF/Failure rate	⊗	⊗		
	Failure/Critical cases: winding short circuit, jamming, shock		⊗		⊗
Dynamic/Control	Natural modes	⊗	⊗		⊗
	Bandwidth		⊗		
	Precision	⊗	⊗		
Power/Energy	Transient input power	⊗	⊗		
	Energy consumption	⊗	⊗		

分析同時進行 0D / 1D 模擬和代數計算。每個特定的計算都被視為一個黑匣子，可以直接調用它，並通過實驗设计（DoE）進行分析。所有計算都可以鏈接在一起，並用於设计探索，靈敏度，優化和穩健性分析； iSight [9]，Optimus [10]和 ModelCenter [11]是此類框架的示例。

優化任務需要較少的模型計算時間。替代模型或元模型[8]，或另一種模型的簡化或近似描述模型，可用於表示進入機電一體化層的特定領域層模型（FEM）。機電一體化層通常在時域中處理動態系統，並使用瞬態時間仿真，但是通過評

估負載曲線的主要諧波[近似時域行為的方法 12 在設計優化過程中，]來可能很有吸引力。

這些優化和統計支持工具允許以自由選擇的順序鏈接設計過程的步驟。但是，它們在選擇如何構造計算中的連接或將哪些參數作為設計參數，約束或目標考慮在內時沒有提供幫助。

基於知識的工程（KBE）是一門結合了基於知識的方法和計算機輔助設計的學科，對設計支持也很有用。KBE 軟件包專用於集中特定產品設計的所有知識和專長。在這些環境中使用的科學概念和方法如下：

- 知識庫和計算機輔助設計：使用非定向的代數方程式（聲明性方法）將組件的知識大寫[13]。這些組件可以輕鬆組裝以描述不同的體系結構。
- 約束網絡，圖論和優化：最初以聲明性形式定義的方程組的方向是為了獲得可由優化算法使用的計算過程。

可以通過符號計算，區間計算或人工智能來支持對等式的適應或分析。這些 KBE 工具可以是：

- 鏈接到的 CAD 軟件，該軟件 Genus Designer [14]中捕獲配置規則並為執行過程自動化 Solidworks。
- 如，Enventive 專門 [15]中所述用於平面機構的概念設計（優化，公差，靈敏度分析）；
- 開發了多個領域，例如 FST 研究所軟件（TUHH 大學），該軟件在相同的基礎上支持升力機構[的初步設計 16]，液壓網絡[17 飛機]和 EMA；
- 常規語言，例如 TKSolver [18]，Ascend [19]，Cades [20]，Design 43 [21]或 PaceLab suite [22]，它們通常是說明性語言，可以根據不同的輸入使用一組代數方程式在設計目標上。

這些工具可以為設計人員提供有趣而重要的幫助，尤其是當系統由於多種技術而變得複雜時。結合 MDO 工具和專用的元建模技術，它們可能代表機電一體化系統設計的未來。

### 3.2.3 綜合最佳架構的能力

在設計機電系統時，可以在架構級別設想許多解決方案。選擇最合適的體系結構的任務是一項複雜的任務，目前主要通過手動定義，評估和比較設想的體系結構來完成。在體系結構級別使用設計綜合和優化技術可以使設計人員設想更廣泛的解決方案，其中包括潛在的創新解決方案，並在正式基礎上進行比較（使用定義明確的指標），以便選擇最合適的一個。

工程設計綜合[23]是一套基於知識的綜合技術，可合成工程製品（2D / 3D 形狀，建築等）。關於人工製品的目的，其預期特性和設計知識（明確地形式化或從先前的設計中提取）。

優化技術迭代地修改一些初始解決方案（通常是隨機生成的），以優化所測試解決方案的特性。但是，他們幾乎不考慮設計知識以生成可行的解決方案。

耦合設計綜合和優化可以生成可行的解決方案，並找到性能最佳的解決方案。

由於探索的設計空間可能更大，並且由於該過程不受認知偏差（例如信念）的影響，因此它通常比手動過程更有效。但是，這需要具有評估所有生成的解決方案以及所有定義的選擇標準（優化目標/約束）的能力。這種類型技術的使用示例是機器人手臂[24]，真空吸塵器[25]或飛機駕駛艙[26]的設計。

#### 3.2.4 機電的安全性和可用性

##### 系統中研究

可靠性，可用性，可維護性和安全性（RAMS）標準通常是設計過程中進行研究的一部分。必須針對每個考慮的替代方案進行大量此類研究，以便根據這些標準（可靠性，可用性，可維護性等）量化不同體系結構的性能。

目前，這些研究是由構建機電系統 RAMS 模型並對其進行分析以得出結論的專家進行的。RAMS 模型通常使用專門的形式來構建，例如 Petri 網，貝葉斯網絡，可靠性框圖或更高級的語言，例如 Altarica [27]和 Figaro [28]。

為了加快研究速度，將 RAMS 研究鏈接到（描述性或行為性）體系結構模型將是一個優勢。實際上，RAMS 研究期間可以重用設計模型中嵌入的許多信息。

第一種方法考慮使用 RAMS 數據（故障模式，可靠性比率等）豐富設計模型，以便能夠自動生成 RAMS 模型。例如，SysML [29]模型（具有特定配置文件）可用於自動計算系統級故障率[30]。

另一種方法考慮將設計模型鏈接到 RAMS 模型，以確保 RAMS 模型的一致性。在 MODRIO 項目[的框架中 31]，開發了一個原型，以從自動生成 Figaro 模型 Modelica [32]模型和 Figaro 知識庫[33]。使用 Modelica 特定的構造從知識基礎和其他必要信息中聲明與 Figaro 塊的對應關係。

#### 3.1 3 機電一體化的未來挑戰

##### 3.2.5 產品功能虛擬表示

的機電一體化系統的設計和集成是一個多學科的設計過程，需要多個領域進行協作和交換信息。在當今非常大的公司和擴展型企業中，擁有這些信息流對於提高設計階段的效率至關重要。

改善團隊之間溝通的一種方法是共享集成了所有觀點的產品的通用虛擬表示。這種表示方式使不同的團隊可以查看其他團隊的約束，並始終可以訪問設計的最新版本。此外，它還可以考慮模擬過程中來自其他領域的影響。

綜合視圖還可以為所有相關學科的所有限制和目標提供一個觀點，從而為決策提供了更堅實的基礎。

這種表示形式的主要技術推動力是能夠在使用不同工具和數據格式的不同團隊之間交換工程數據，以及能夠集成來自不同學科的模型的能力。

#### 3.3 驗證和驗證中的挑戰

##### 3.3.1 虛擬驗證系統能力

的機電一體化系統的驗證對於工業（尤其是航空航天業）而言是一項非常昂貴的任務。確實，這既需要系統可用，又需要開發和製造測試平台，而這些測試平台通常無法在程序之間重複使用。降低測試成本的一種方法是虛擬測試。該

實踐旨在開發虛擬手段（系統模型和系統仿真環境）來測試系統並驗證其是否符合要求。例如，實際機翼上的測試可以用有限元模型代替。

虛擬測試的主要好處是成本，因為虛擬測試台的成本通常比實際測試台低得多，並且通常可以從一個程序重用到另一個程序。實際上，每個程序的許多系統都是相似的，並且它們的模型通常可以通過有限的努力就可以適應新的設計。

不太明顯的好處是，虛擬測試台可以在比系統在其生命週期中遇到的實際刺激更近的條件下刺激系統。例如，在機翼彎曲試驗中，將載荷局部施加在實際試驗台上，而載荷則可以均勻地施加在

32 N 上。

虛擬的，從而以更準確的方式表示實際負載。在系統模型中，某些方面（例如熱效應）也可以更輕鬆地考慮到，而如果需要進行真正的測試，則它們需要非常昂貴的測試手段。

要啟用虛擬測試，必須很好地管理驗證過程的多個方面。首先，當然必須對模型及其仿真環境進行驗證。這可以通過將結果與測試台數據或飛行測試數據進行比較來完成。在這方面，需要模型校準和不確定性管理技術。

### 3.3.2 正式向模型供應商提供模型請求

越來越多的模型用於在系統上執行驗證和確認（V&V）活動。這些模型通常由系統的供應商（內部或外部客戶）設計。但是，在功能，有效性範圍，精度等方面能夠陳述模型期望的內容仍然是一個挑戰。實際上，請求者對總體仿真環境（即其他交互模型，仿真輸入等）有一種看法，而這種看法很少以正式的方式與模型開發者進行交流。在將預期模型實際提供給模型請求者之前，這通常會導致多次迭代。

最近，模型身份證被提出作為模型要求的標準描述[34]。MIC 允許描述模型的某些所需特性，以指導模型的開發。首先，必須定義模型的接口，以描述模型的端口和交換的變量。其次，必須按以下方式填寫模型信息的四個部分：

對象-模型名稱，粒度級別，參考文檔對象上下文用法-時間計算，工具方法-模型尺寸，方法，線性模型質量-準確性，驗證，驗證

另一個潛力這種類型的標準化模型規範的使用是對現有模型的重用。確實，對模型的特徵進行形式化可以在模型數據庫中進行後搜索，並可以在不同的上下文中重用模型。

### 3.3.3 交換和無縫集成模型的能力

工業合作夥伴之間

關於建立多系統仿真平台以驗證機電一體化系統的目標，主要要素是交換和集成模型的能力。當前，模型集成商傾向於強迫其供應商使用一種工具並遵循特定的建模程序（例如，AP2633 [35]）。在這方面，模型供應商希望使用自己的工具對系統進行建模。因此，能夠交換和集成來自不同工具模型將是巨大的進步。



功能化的模型界面（FMI）計劃[36]通過提供獨立於工具的標準來交換動態模型和進行聯合仿真而朝著這個方向發展。它允許的生成“的中性-格式（的C代碼和xml的形式下”的模型<sup>1</sup>其可以無縫集成在兼容的平台文件）。目前，大約有70種工具支持該標準。

這些標準模型交換錶格的使用提供了靈活性，因為可以使用許多不同的工具來開發仿真平台的組成模型。因此，模型提供者可以自由選擇和更改其首選工具，而不會影響整個仿真框架。在模型集成者方面，還可以確保靈活性，因為可以在一組可用工具中選擇和更改集成平台，而不會影響現有模型。

這種類型的標準還可能替代內部開發的工具之間的許多點對點接口，這些工具是為滿足特定需求而內部開發或由工具供應商出售的。對於公司而言，這可以節省大量開發或許可成本。

### 3.3.4 通過對機電一體化系統進行形式驗證

#### 模型

在早期設計階段檢測系統缺陷一直是基於模型的系統工程（MBSE）的核心，以減少全球開發時間，同時提高最終產品的質量。迄今為止，仿真是驗證開發中系統行為的最常用方法。但是存在一個固有的主要缺點，即有限數量的測試方案的局限性。

正式的驗證技術可以證明模型確實符合其規範，即使情況是無限的。其中，模型檢查能夠在計算機上以自動化過程執行驗證。

為了確保最佳的可靠性，在航空航天，鐵路，微型計算機等高科技工業領域，以及更普遍的任何關鍵嵌入式系統的開發中，使用模型檢查已經是一種普遍的做法。技術和工具已經發展起來，克服了模型檢查的某些原始限制，如今可以處理具有連續和離散零件的物理模型。被稱為混合模型檢查，這開闢了新的應用前景，尤其是在機電一體化領域。

在當前的現有技術中，混合模型檢查器通常限於證明安全屬性（即係統將永遠不會進入一組特定的狀態），因為它們經常依賴於過度逼近。例如，這使他們成為證明飛機避碰機動性正確性的良好候選人。

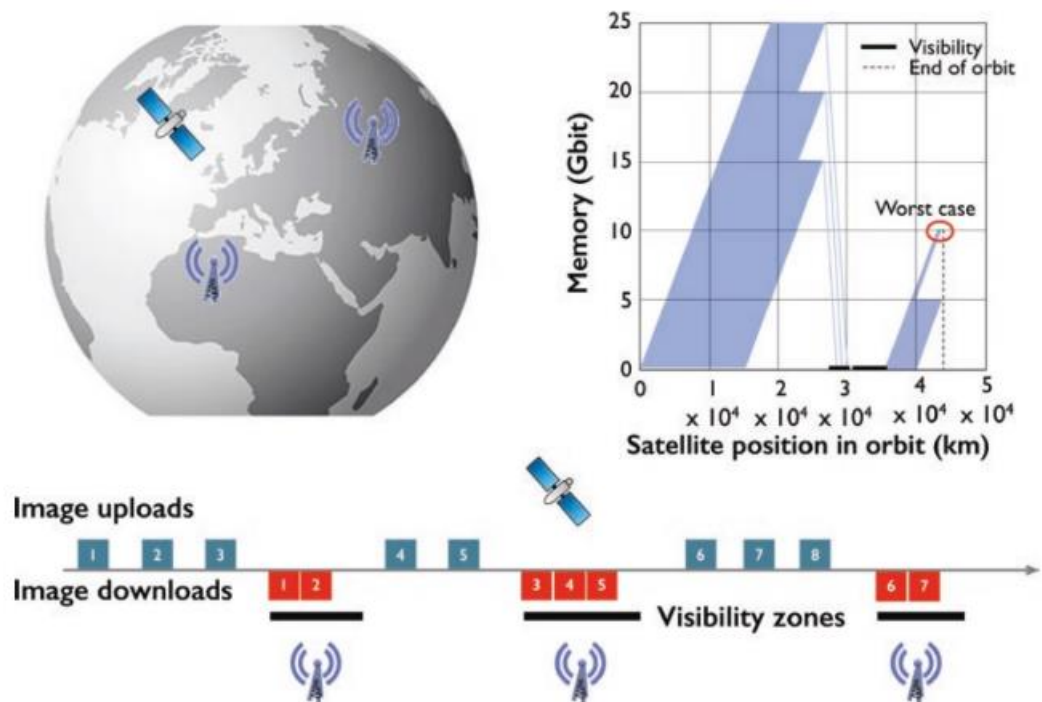


圖 3.3 使用混合模型檢查對衛星存儲器進行驗證

圖 3.3 顯示了另一個案例，衛星的任務是根據請求捕獲地球圖像，並在可見時將其下載到地面站；目標是根據特定的地面站配置和每個軌道的最大請求數量，正式驗證衛星的存儲緩衝區不會被超出。這些請求離散的，而數據傳輸則是連續建模的。

混合模型檢查器的表達性（例如，它們支持哪種微分方程）和它們提供的逼近方法彼此不同。

當證明安全性還不夠時，混合定理證明如 KeYmaera [37] 可以用作機電一體化背景下的另一種形式驗證選擇。這些嘗試使所需屬性的數學證明自動化，但通常需要用戶沿演示進行一些高級輸入才能得出結論，這對於復雜的系統可能非常棘手。