財團法人車輛安全審驗中心
Vehicle Safety Certification Center

車安通訊季刊

遵循法令 公正專業 優質服務

第 114-03 期

＞＞專題報導

□國際自駕車冗餘設計發展與我國應用管理策略初探

車安中心 蕭翔民

一、 前言

自動駕駛技術快速發展，雖帶來交通革新，但也因其複雜性使安全性與可靠性面臨挑戰。為確保自動駕駛車輛能安全運行的核心安全關鍵策略之一是系統冗餘設計[1-2]，其目的在於系統內建多個功能相同或相似的模組，以同步或接續運行的方式，確保當部分組件失效時，能即時由其他組件接管，提供備援輔助，維持車輛基礎操作能力，如執行安全停車。因此，自駕系統開發者依車輛行駛環境及運行要求等條件，從各類系統的冗餘設計中，選用合適的備援系統，讓系統達到「失效可操作」(維持運行)或至少「失效安全」(安全停車)的容錯能力；反之，若缺乏相關冗餘設計，可能導致嚴重事故，損害公眾對自動駕駛的信任，進而阻礙其技術普及化。有鑒於此，本篇深入剖析國際間冗餘設計的發展趨勢，以及初步探討我國應用管理策略，並分享讀者參考。

本文擬先聚焦探討自動駕駛汽車的感知、運算平台、軟體系統、控制設備、電源系統與通訊系統等六大核心系統，在冗餘設計上常見的參採策略，而為俾於讀者理解本文引述的專有詞彙，故內文中將結合引用由OpenAI創建的ChatGPT[3]，生成圖1至圖10所檢附之圖片，供讀者閱讀及理解，此外，亦將說明現行車輛相關國際規範中，可藉由冗餘設計間接達到安全要求的條例項目，並分析Waymo、Tesla、Mercedes-Benz等國際自駕車產業在自動駕駛冗餘系統上的實際設計案例，透過理論基礎到工程實踐的層面，全面剖析冗餘設計的最新進展與挑戰，最終提出國際觀察與國內推動建議，以期能協助於我國自動駕駛產業在全球競爭中佔據有利地位。

二、 自動駕駛汽車冗餘系統介紹

(一) 自駕車需要冗餘設計之原因可歸納如下四點：

1. 安全性為最高優先：自動駕駛系統取代人為判斷與操作，單一組件故障可能導致嚴重事故，冗餘設計能確保系統故障時車輛仍可維持控制或執行安全停車（最小化風險操作，MRM），保障最高安全。

2. 系統複雜性高：自駕系統負責環境感知、決策與動態控制，組件與演算法眾多，潛在故障點隨之增加，因此對冗餘的需求相對極高。

3. 運行環境多變且不可預測：自駕車運行於多變且不可預測的環境，單一感測器因物理限制難以全天候可靠工作，故需多樣化感測器相互補充與備份，確保可靠感知。

4. 實現高階自動駕駛的必要條件：對於實現 SAE L4（高度自動駕駛）和 L5（完全自動駕駛）級別，要求系統在失效時能自主處理，必須具備「失效可操作」或至少「失效安全」的容錯能力，因此冗餘設計便成為高容錯性的關鍵。

(二) 自駕車冗餘設計的主要類型

自動駕駛車輛常於感知、運算平台、軟體、控制設備、電源供應以及通訊網路等關鍵領域，透過冗餘策略[4-8]，共同構建一個具有深度防禦能力且穩健可靠的自動駕駛系統架構，以下將逐一探討各類別是如何應用不同的冗餘策略，以確保自動駕駛的安全得以實現：

1. 感知冗餘（Sensor Redundancy）：主要作法可分成異質性冗餘、同質性冗餘與感知融合（Sensor Fusion）三項，其概述彙整於下圖 1。

異質性冗餘

結合攝影機、光達、雷達等不同感測器，以克服單一感測器限制，確保系統在各種環境下穩定感測

同質性冗餘

部署多個相同感測器以重複覆蓋和互相支援，即使其中一個故障，系統仍能持續運作

感知融合

整合不同或相同感測器資料，結合優點以減少誤判和漏判，提升辨識與追蹤精準度

來源：圖片 OpenAI、文字車安中心彙整

圖 1.感知冗餘與感測器融合策略

2. 運算平臺冗餘（Computing Platform Redundancy）：本項主要作法可分成三項，分別為主/備模式、鎖步模式與異質計算冗餘，其概述彙整於下圖 2。

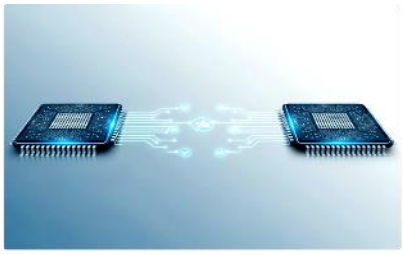
財團法人車輛安全審驗中心
Vehicle Safety Certification Center

車安通訊季刊

遵循法令 公正專業 優質服務

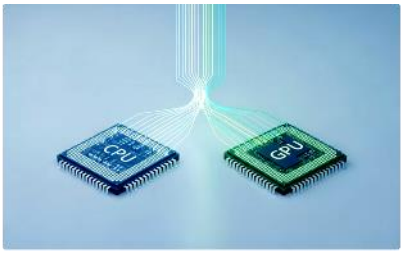
主/備模式

配置主用與備用運算單元，主單元故障時備用單元接管。依啟動方式可分為冷備（主系統故障時啟動）、溫備（低功耗待命）和熱備（同時運行並同步數據）。



鎖步模式

兩處理核心同步執行相同指令，即時比對運算結果。計算不一致會立即警示，專為偵測硬體隨機錯誤，常用於高安全關鍵計算。



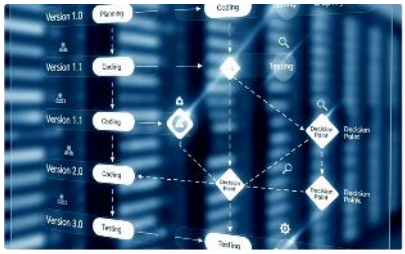
異質計算冗餘

採用不同類型處理器執行關鍵運算，例如CPU與GPU組合，並可搭配不同團隊開發的軟體並行，以降低共因失效的風險，防範單一設計瑕疵。

來源：圖片 OpenAI、文字車安中心彙整

圖2.自動駕駛系統運算平臺冗餘設計策略

3. 軟體冗餘（Software Redundancy）：本項主要作法可分成多版本程式設計、監控與恢復機制及演算法冗餘三項，其概述彙整於下圖 3。



多版本程式設計

獨立開發多版本軟體，並行處理並裁決，提升容錯性並消除共同模式故障

監控與恢復機制

即時偵測系統異常並恢復，透過監控評估狀態，自動重啟、切換或降級

演算法冗餘

為相同功能提供多種演算法，並行處理與融合，提升準確性和可用性，適合複雜環境

來源：圖片 OpenAI、文字車安中心彙整

圖3.軟體安全與容錯關鍵策略

4. 控制設備冗餘（Actuation Redundancy）：本項含括兩大項目，分別為線控轉向冗餘與線控煞車冗餘，其概述彙整於下圖 4 與圖 5。

財團法人車輛安全審驗中心　地址：505029 彰化縣鹿港鎮鹿工北二路 2 號
電話：04-781-2180　傳真：04-781-2181　E-mail：service@vscc.org.tw

財團法人車輛安全審驗中心
Vehicle Safety Certification Center

車安通訊季刊

遵循法令 公正專業 優質服務

冗餘感測器

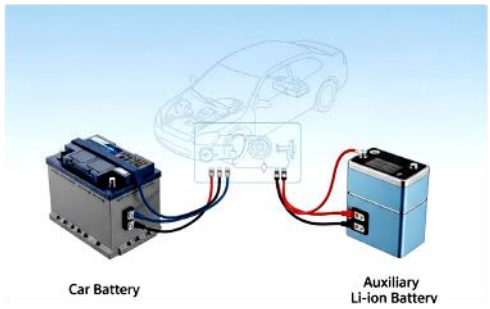
透過方向盤角度、輪子速度和轉向角度等有多個獨立的感測器,來確保轉向角度非常精準

冗餘電子控制單元（ECU）

車子有2個獨立的控制器同步運作並比對數據，使單一控制器出問題,也能繼續工作

冗餘致動器

轉向機構有2組獨立的馬達,即使其中一個故障,另一個仍能提供至少一半的轉向力



冗餘電源供應

除主電池,車子還有獨立的備用電池，使其故障,備用電池可提供數分鐘的緊急電力

故障偵測與切換邏輯

系統內建快速的故障偵測和隔離機制,可在數毫秒內發現問題並採取應對措施

冗餘通訊匯流排

車子使用多條獨立的通訊線路,即使其中一條出問題,其他線路仍能正常工作

來源：圖片 OpenAI、文字車安中心彙整

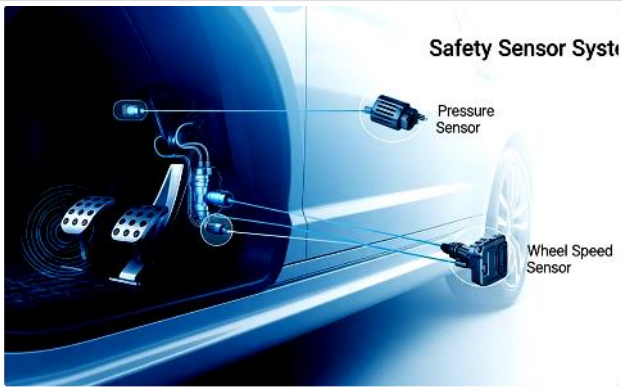
圖4.線控轉向冗餘常見6大手法

財團法人車輛安全審驗中心　地址：505029 彰化縣鹿港鎮鹿工北二路 2 號
電話：04-781-2180　傳真：04-781-2181　E-mail：service@vscc.org.tw

財團法人車輛安全審驗中心
Vehicle Safety Certification Center

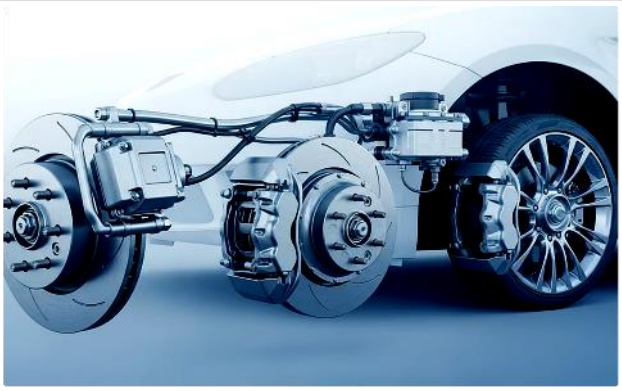
車安通訊季刊

遵循法令 公正專業 優質服務



冗餘感測器

系統採用多種感測器同時監測煞車系統的運作狀態，如煞車踏板位置感測器、壓力感測器及輪速感測器等



冗餘致動器

配置雙重煞車執行機構，含電動液壓煞車系統與保留傳統液壓通路作為備援。

另第三項至第六項的餘電子控制單元（ECU）、冗餘電源供應、冗餘通訊匯流排與故障偵測與切換邏輯等冗餘對策亦相似於線控轉向，故於此不再贅述。

來源：圖片 OpenAI、文字車安中心彙整

圖5.線控煞車冗餘常見6大手法

5. 電源冗餘（Power Supply Redundancy）：透過配置主電池和輔助電池，可以建立一個高度可靠的汽車電源系統，其概述彙整於下圖 6。

獨立供電系統

為不同關鍵負載單獨供電，確保一個系統失效時不會影響整車運作。

電源路徑冗餘

為關鍵電子控制單元提供多條獨立供電線路，每條連接到不同的電源分配單元(PDU)。

智慧監控系統

配置電源管理IC(PMIC)持續監控各電源電壓、電流狀態，偵測異常時自動快速切換到備援電源。

來源：圖片 OpenAI、文字車安中心彙整

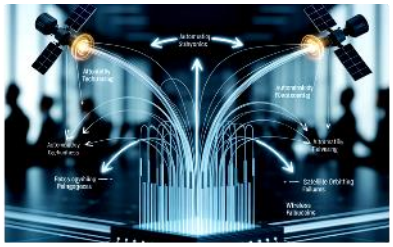
圖6.汽車電源系統冗餘設計

6. 通訊冗餘（Communication Redundancy）：透過硬體冗餘、技術冗餘、時間冗餘及錯誤偵測與修正之策略，方得為系統的持續安全運作提供根本性保障，適於針對需要高可靠性的關鍵系統，其概述彙整於下圖 7。

財團法人車輛安全審驗中心　地址：505029 彰化縣鹿港鎮鹿工北二路 2 號
電話：04-781-2180　傳真：04-781-2181　E-mail：service@vscc.org.tw

硬體冗餘

採用多條並行乙太網路纜線與雙環網拓撲，確保物理連接的穩定性。



技術冗餘

同時使用多種通訊技術（如光纖、無線、衛星），在單一技術失效時自動切換。

時間冗餘

重複發送關鍵訊息或資料包，以彌補暫時性網路問題導致的資料丟失。

錯誤偵測與修正

在傳輸的資料中加入校驗位元，用於錯誤偵測與修正，確保資料的完整性。

來源：圖片 OpenAI、文字車安中心彙整

圖7.通訊冗餘策略：多重備援保障資料安全

(三) 適用自駕車冗餘設計的國際規範(國際規範對自駕車冗餘要求)

自動駕駛安全仰賴冗餘設計的客觀量化評估，這亦是對主管機關與產業的挑戰。國際標準化組織（ISO）與聯合國歐洲經濟委員會（UNECE）已制定相關國際規範。其中，ISO 26262（道路車輛—功能安全）[9] 透過車輛安全完整性等級（ASIL），間接應證出冗餘設計的重要性，並與專注於處理功能盲區所引發安全風險的 ISO 21448（預期功能安全）互補 [10]。在法規層面，UN R157（自動車道維持系統, ALKS）[11]則因要求系統，如感知、控制、電源等關鍵系統需具備失效操作能力，從而加深冗餘對於符合其法規的必要性。本章節將從車輛安全管理的視角，深入探討上述各項適用於自駕車冗餘設計的關鍵國際標準與法規之具體內涵。

1. 國際標準（International Standards）

(1) ISO 26262-道路車輛-功能安全標準

本標準所建立一套涵蓋產品全生命週期的系統性安全流程始於「危害分析與風險評估（HARA）」，用以識別潛在危害並評估其風險

等級（ASIL），進而定義安全目標並層層落實到設計、開發、生產及報廢各環節，透過持續驗證，確保故障時不會造成人員傷害。對於錯綜複雜的自動駕駛系統，具備故障偵測與容錯能力的冗餘設計，是維持安全運行的必然選擇，以下彙整 ISO 26262 標準有引用冗餘設計精神之相關內容，如下圖 8：

第三部份：概念階段-第六條 危害分析與風險評估	第四部份：系統層級-第六條 技術安全概念	第五部份：硬體層級的產品開發	第六部份：軟體層級的產品開發
ADS車輛 關 鍵 系統屬ASIL D級，而為滿足其高要求，冗餘設計即為可參採的對策	為滿足條例對於容錯的高規要求，冗餘設計成為將要求轉為具體架構的可行方案	考量零組件存故障風險，採雙模組冗餘設計，成為達成嚴格結果的合理過程	軟體冗餘設計可協助解決邏輯瑕疵、位元錯誤等問題，得建構軟體穩健性

來源：圖片OpenAI、文字車安中心彙整

圖8. ISO 26262功能安全標準與冗餘設計的關鍵影響

上述本項標準與冗餘的間接關係在於標準本身提出了必須達成的安全「目標」與行為準則，而多樣化的冗餘策略，則是工程師為了滿足這些抽象且嚴格的準則，所能採用的最有效的佐證「策略」手段之一。

(2) ISO 21448-預期功能安全（Safety of the Intended Functionality, SOTIF）

隨著車輛電子系統日益複雜與駕駛自動化程度提升， ISO 21448 從設計階段即評估非預期、非故障性的問題，以及評估人類駕駛員對系統的錯誤使用或濫用行為等，制定對策並執行驗證與確認，同時透過監控實際運行，確保滿足 SOTIF 所需的安全要求，以下彙整 ISO 21448 標準有引用冗餘設計精神之相關內容，如下圖 9：

來源：圖片OpenAI、文字車安中心彙整

圖9. ISO 21448 SOTIF標準中的冗餘設計

上述 ISO 21448 標準並未在條文中硬性規定必須使用冗餘，但其從風險識別、設計應對至最終驗證的完整邏輯鏈，使得具備良好設計的冗餘系統成為達成「預期功能安全」最重要、也最合乎邏輯的實現路徑。

2. 國際法規（International Regulations）

(1) UN R157 自動車道維持系統（Automated Lane Keeping Systems, ALKS）

UN R157（ALKS）法規與 ISO 26262 及 ISO 21448 等國際標準性質截然不同。ISO 標準提供安全開發的「流程與方法論」，而 UN R157 則轉化為具體、可測的「強制性性能要求」。其要求自駕系統須持續監控自身狀態，當偵測到危及安全的故障或超出運行範圍時，能以安全、可預測的方式回應。此強制性反應機制，直接催生了對冗餘設計的需求，使其不僅是提升可靠度的選項，更是系統具備自我診斷與安全接管能力、滿足法規認證的必要條件，以下彙整 UN R157 對於冗餘設計的相關要求，如下圖 10：

來源：圖片OpenAI、文字車安中心彙整

圖 10. UN R157 自動車道保持系統(ALKS)介接的冗餘策略

三、 國際車廠自動駕駛冗餘設計實際案例分析

國際法規為自動駕駛冗餘設計提供框架性的安全目標，然要將此轉化為可量產、可靠且具成本效益的工程實踐，則需視各家車廠與系統供應商的技術量能、安全理念與市場策略的權衡。從車輛安全管理的角度，理解國際領先車廠如何將這些抽象的安全要求，具體落實到車輛的硬體佈局與軟體策略中，不僅是技術層面的探討，亦能助於我國未來制定自動駕駛車輛型式安全審驗標準、評估國內產業技術缺口、以及輔導產業發展策略的參考依據。本章節聚焦Waymo[12-14]、Tesla[15-19]、Mercedes-Benz[4][20]等國際領先車廠的實際冗餘設計，並透過案例分析歸納技術主流與趨勢，期確保我國在邁向自動駕駛新時代的道路上，能建立起一套與國際接軌、務實且有效的車輛安全管理體系。

(一) 國際車廠冗餘設計理念與架構

1. Waymo Driver

Waymo 的核心理念是「從零打造，為完全無人駕駛而設計」，其安全架構追求在所有關鍵環節實現全面的物理性冗餘，以應對任何可能的單點故障，設計理念重點如下：

(1) 感知設備：Waymo Driver 採用多層次、多原理感測器配置（13 支攝

影機、6 顆雷達、4 顆光達等）與其互補，得確保單一類型失效時仍獲完整可靠環境資訊。

(2) 煞車系統：車輛平台具備冗餘煞車系統，除主系統外，獨立電子煞車備援確保失效時能安全煞停。

(3) 轉向系統：車輛配備冗餘轉向系統，含兩組獨立馬達與電子控制器，使一套故障，另一套無縫接管，維持轉向。

(4) 運算系統：Waymo Driver 運算系統採多層級冗餘。主路徑故障時，備援系統即時啟動，持續安全決策與操作，如安全停靠路邊。

(5) 電源供應系統：為確保主電力故障時核心功能運作，車輛搭載備用電源，以為煞車、轉向、運算等關鍵系統供電，方能執行安全停車。

來源：Waymo

圖 11. 搭載第六代 Waymo Driver 系統的車輛

2. Tesla FSD

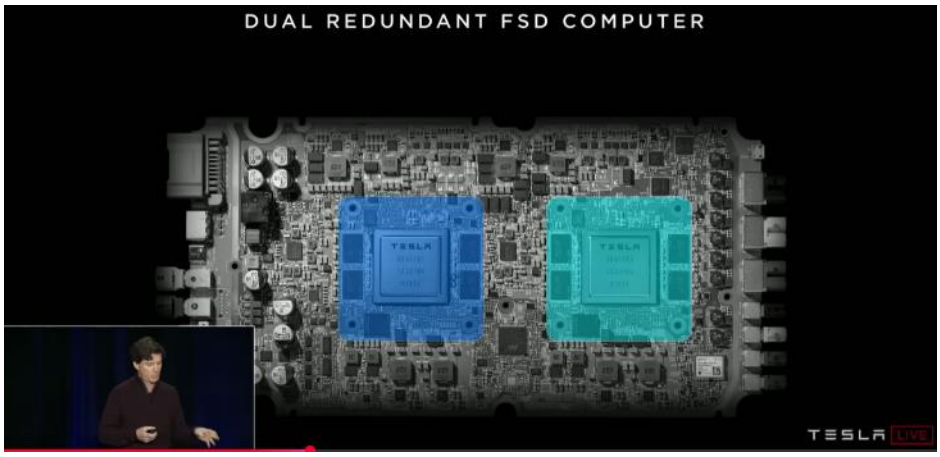
Tesla 對於 FSD 的發展理念是以「類人」的視覺感知為核心，透過強大的中央運算與神經網路，實現極致的軟體定義車輛，其冗餘設計緊密圍繞此核心展開，設計理念重點如下：

(1) 轉向與煞車系統：Tesla 的方向盤和煞車均具備用系統。轉向含冗餘馬達與控制器；煞車除液壓主煞外，整合電子穩定及動能回收。旨在主煞車失效時，仍能安全減速停車。

(2) 運算系統：FSD 所搭載的兩組獨立 SoC，擁有各自獨立的 CPU、GPU 和神經網路處理器等，並能獨立運算，然若異常或失效，即依賴正常晶片決策或中止 FSD 功能。

(3) 攝影機設備：Tesla 感知冗餘來自多個視野重疊攝影機。另 FSD 系統亦被訓練成即便單一攝影機失效，也能利用其他資訊重建完整環境模型，進而實現感測冗餘。

(4) 電源供應系統：車輛配備高壓主電池及獨立低壓電池系統，主電源失效時，低壓電池確保 FSD 與車輛控制持續運作，執行安全停車。



來源：Tesla

圖 12.全自動輔助駕駛（FSD）運算平臺冗餘

3. Mercedes-Benz DRIVE PILOT

Mercedes-Benz 對於其DRIVE PILOT(L3級別自駕系統)的開發理念是「體系化的安全工程」。在現有的汽車安全開發流程，逐步增加自動駕駛功能，其所設計的冗餘架構，乃為確保在極不可能發生的故障情況下，系統也能保有操作能力，並能隨時安全地將控制權交還駕駛，設計理念重點如下：

(1) 煞車系統：系統配備完全冗餘的煞車與控制器；當主煞車系統或控制器故障時，備援系統能立即接管，確保煞車指令執行。

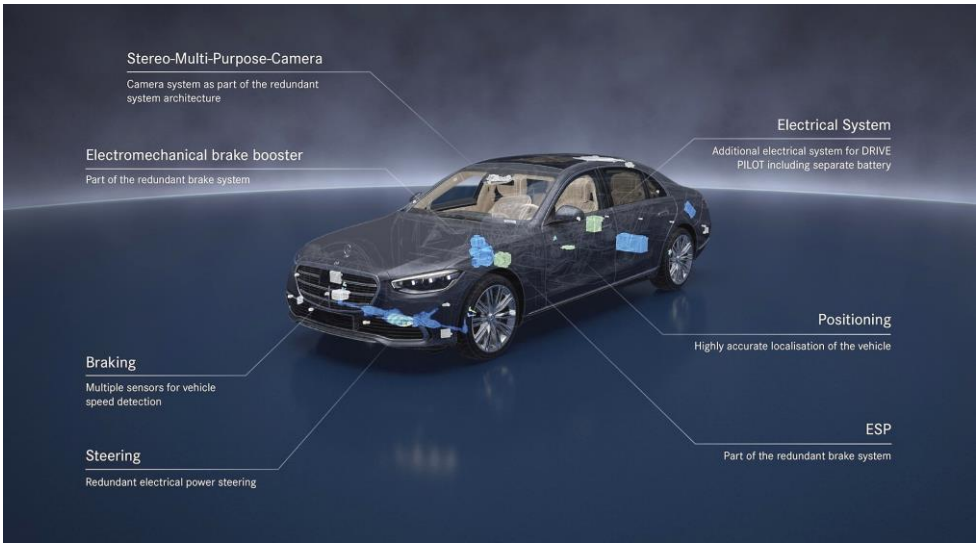
(2) 運算系統：系統運算架構採冗餘設計；異質感測器數據經計算與交叉驗證，系統持續自我診斷，若偵測到偏差或故障，即觸發安全備援並

啟動駕駛員接管程序。

(3) 感知設備：系統整合多元異質感知設備，透過交叉驗證確保環境感知可靠，包括：不受光線影響的高精度光達；惡劣天氣下可靠的長距離雷達；具物件識別能力的攝影機等。

(4) 電源供應系統：為確保主電力系統故障時仍能安全交接控制權，系統配備冗餘車載電氣系統。當主電源失效時，仍能確保安全將控制權交還駕駛。

(5) 轉向系統：轉向系統與煞車系統相似，採用冗餘控制器和動力輔助馬達。當主系統異常時，備援系統無縫介入，維持車輛方向控制直至駕駛員接管。



來源：Mercedes-Benz

圖13. 確保安全條件式自動駕駛的冗餘系統

(二) 綜合比較與趨勢分析：

經剖析Waymo、Tesla及Mercedes-Benz，雖目標皆為實現更安全自駕，然技術路徑、安全理念與市場策略有差異。此差異深源於其對技術成熟度、法規及消費者信任的根本判斷，下表一將從核心感測器方案、感知、冗餘設計及目前市場狀態等關鍵角度歸納，以宏觀掌握主流自駕安全設計典範，並奠定趨勢分析與管理策略基礎。

財團法人車輛安全審驗中心
Vehicle Safety Certification Center

車安通訊季刊

遵循法令 公正專業 優質服務

表一、企業自駕技術路徑與安全策略比較分析表

比較項目	Waymo	Tesla	Mercedes-Benz
技術路徑與目標	**主打 L4/L5 全自駕** 目標打造無需人類駕駛介入的自駕計程車服務	**L2 逐步演進至全自駕** 透過車隊數據與軟體更新，逐步發展至 L5 完全自駕	**漸進式、法規導向** 已取得 L3自動駕駛的法規認證
核心感測器方案	多重感測器融合	純視覺方案	多重感測器融合
冗餘設計策略	完善冗餘規劃	倚重AI與大數據收集	完善冗餘規劃
目前市場狀態	在美國鳳凰城、舊金山等城市提供商業化L4等級 Robotaxi 載客服務	目前已於美國奧斯汀推出車上有安全員的Robotaxi服務，並規劃拓點至舊金山	在德國、美國加州等市場，於旗艦車型(S-Class, EQS)提供選配L3 DRIVE PILOT功能
核心理念	安全至上，硬體先行	AI 驅動，快速迭代	法規遵循，務實漸進

自駕產業雖路徑各異，但共通的是技術挑戰與安全要求。這對制定前瞻法規與管理制度至關重要。以下歸納五大核心趨勢：

1. 底層硬體冗餘已具共識：業者對於L3以上的自駕車，於轉向、煞車、電源、運算單元等關鍵組件須有物理冗餘備份，後續可評估納入作為基礎安全的門檻。

2. 兩大感知路線：以Waymo和Mercedes-Benz為代表的「異質感知融合」，採不同物理原理的感測器作為安全互補的基石，另以Tesla為代表的「視覺核心」，憑藉強大AI和數據，克服單一感測器類型的局限。

3. 從「失效安全」到「失效可操作」：傳統的 L2 ADAS發生故障時，系統關閉，而L3 以上系統則必須達到失效可操作，亦即發生故障時，備援系統需能維持車輛穩定運行一段時間，以完成安全權責轉換或執行最小風險操作。

財團法人車輛安全審驗中心 地址：505029 彰化縣鹿港鎮鹿工北二路 2 號
電話：04-781-2180 傳真：04-781-2181 E-mail：service@vscc.org.tw

4. 從硬體「功能安全」到軟體「預期功能安全」: 傳統車輛安全聚焦於硬體失效，對此，已成熟的ISO 26262功能安全標準提供了完善的規範框架。然而，AI 的導入及日益複雜的應用情境帶來了新的挑戰，以致自動駕駛系統在超出設計範圍或遭遇未知/不確定情境時，可能產生安全風險。ISO 21448預期功能安全既能作為適合因應之標準，亦代表對於自駕車輛的安全管理不僅須硬體備援，更要評估軟體演算法的穩健性。

綜上所述，國際車廠對於冗餘設計已從單純硬體備份，擴展至涵蓋感知、決策、執行與軟體的全面安全架構，政府主管機關亦需持續與各界檢討共通性原則與差異化監管機制，以建立符合在地環境需求的自駕車安全管理體系。

四、 國內未來管理策略建議

(一) 推動專業人才培訓，深化產業安全文化：自動駕駛安全需專業人才實現。建議主管機關可鼓勵產業取得ISO 26262功能安全及ISO 21448預期功能安全等認證資格，以提升工程師冗餘設計、危害分析與風險評估知能，強化產業自主安全設計能力，形塑正向安全文化。

(二) 自駕車分級分類管理：考量商用自駕車安全標準應顯著高於L2/L3個人車輛。建議主管機關對於公共接駁、物流等應用服務，可訂立相應的安全管理與營運許可條件，以確保其運行安全效益。

(三) 發展國際資訊觀測平台：由於自駕安全標準正不斷演進，我國對於自駕車的安全管理亦持續與國際接軌，主管機關可透過資訊觀測平台的建立持續追蹤，並參考聯合國及ISO等相關國際規範趨勢，有助於產官學研各界掌握最新資訊並持續精進管理策略。

(四) 建立安全數據共享平台：考量到自動駕駛技術的安全性高度仰賴於實際運行中的學習與數據累積，國內自駕車業者應可共同組建一個分析潛在風險、發展驗證方式，並加速整體產業在安全方面的成熟度的「自駕車輛安全數據平台」。透過該平台數據共享模式，不僅能從廣泛的實際案例中學習與改進，也能有效提升自身自駕技術的穩健性與安全性。

(五) 對於交通部所發布自駕公車實驗運行安全指引的後續發展建議：

1. 冗餘設計明確化：現行指引缺乏獨立明確的冗餘設計欄位，為確保自駕公車此類高承載運具基礎安全，建議將冗餘設計列為顯性審查要項，並增設「關鍵系統冗餘設計架構說明」，要求業者以文字與圖表說明轉向、煞車、動力、感知及電源供應等五大核心系統的備援機制。

2. 導入失效安全（Fail-Safe）設計：現行指引偏重風險控管，冗餘設計旨在故障時，能執行預先規劃的「失效安全」或「失效後維持運作」策略，故可參照 ISO 26262 標準核心精神，增訂關鍵系統失效情境與應對措施分析。業者應針對冗餘系統進行初步危害分析，或說明主系統失效時，如何偵測、備援介入、車輛行動（如MRM、緩慢滑行、緊急煞停）及警示方式等，將有助於評估安全策略周延性。

3. 納入觸發測試：現有實車測試多著重正常功能表現，尚不含備援系統能否在關鍵時刻「正確觸發」並「有效作動」。考量業者負擔，建議可於實車測試審查中，以鼓勵方式讓業者於封閉場域執行至少一項「冗餘系統觸發測試」項目。

4. 監控應對機制：考量系統觸發備援機制處於降級狀態，若安全員卻不知情，可能錯失介入時機。建議隨車人員訓練應包含系統狀態與健康度監控課程，以及人機介面能清楚顯示關鍵系統狀態，期促使業者設計更為清晰且有效的駕駛監控介面。

五、 總結

國際自駕車冗餘設計已是自動駕駛系統核心安全策略，確保系統於非預期失效時仍維持基本運作，備援機制除能大幅降低單點故障所引發的安全風險，更是自駕車推動過程中贏得公眾信任、實現商業化之先決條件。

為協助國內自駕車發展並與國際接軌，以確保日後運行安全效益，本專題提出前述建議，期建構前瞻務實、創新友善的安全監理環境，促進國內自駕車產業穩健發展。

六、 參考文獻

[1] Doubling down on safety: understanding our approach to redundancy in autonomous vehicles, 2024,

https://www.volvoautonomoussolutions.com/en-en/news-and-insights/insights/articles/2024/jul/doubling-down-on-safety.html

[2] Anis Boubakri, Sonia Mettali Gammar, “A New Architecture of Autonomous Vehicles: Redundant Architecture to Improve Operational Safety,” Int. J. Robot. Control Syst., Vol. 1, No. 3, 2021, pp. 355-368

[3] OpenAI. (2025). ChatGPT (GPT-5, Jul 22-31 version) [Large language model]. OpenAI. https://chat.openai.com/

[4] Redundancy for safe conditionally automated driving, 2022, https://group.mercedes-benz.com/innovation/product-innovation/autonomous-driving/redundancy-drive-pilot.html

[5] Redundancy? For sure!, https://www.bosch.com/stories/redundant-systems-automated-driving/

[6] Autonomous-Vehicle Safety Demands True Redundancy™, 2020, https://www.mobileye.com/blog/av-safety-demands-true-redundancy/

[7] Redundancy concepts and automated driving – Knorr-Bremse pushes ahead with systems for Level 4 architecture, 2024, https://newsroom.knorr-bremse.com/en/redundancy-concepts-and-automated-driving--knorr-bremse-pushes-ahead-with-systems-for-level-4-architecture/

[8] C. Chen, A. Seff, A. Kornhauser and J. Xiao., “Deep Driving: Learning Affordance for Direct Perception in Autonomous Driving,” Proc. 15th IEEE Int. Conf. Comput. Vis., 2016, pp. 2722-2730

[9] ISO 26262-1:2018 Road vehicles — Functional safety, https://www.iso.org/publication/PUB200262.html

[10] ISO 21448:2022 Road vehicles — Safety of the intended functionality, https://www.iso.org/standard/77490.html

[11] UN Regulation No. 157 - Automated Lane Keeping Systems （ALKS）, https://unece.org/transport/documents/2021/03/standards/un-regulation-no-157-automated-lane-keeping-systems-alks

[12] Meet the 6th-generation Waymo Driver: Optimized for costs, designed to handle more weather, and coming to riders faster than before, 2024, https://waymo.com/blog/2024/08/meet-the-6th-generation-waymo-driver
[13] Self-Driving Car Technology for a Reliable Ride - Waymo Driver, 2025, https://waymo.com/intl/zh-tw/waymo-driver/
[14] Waymo Safety Report, 2021, https://waymo.com/intl/zh-tw/safety/
[15] 2023 Investor Day |Tesla, https://www.youtube.com/watch?v=Hl1zEzVUV7w&t=4885s
[16] Tesla Autonomy Day, https://www.youtube.com/watch?v=Ucp0TTmvqOE&t=9075s
[17] A. Esmail, I. J. Chung, L. Jain, B. Tripathi, “High-speed-wiring-system architecture,” U.S. Patent 20190248310A1, Aug. 15, 2019.
[18] Tesla engineers share Model 3 steering, drivetrain, and suspension secrets, https://www.teslarati.com/tesla-model-3-steering-drivetrain-suspension-secrets-revealed/
[19] Tesla starts activating HW3’s Autopilot Dual Redundancy in latest update, https://www.teslarati.com/tesla-hw3-autopilot-dual-redundancy-activated/
[20] Mercedes-Benz receives world's first internationally valid system approval for conditionally automated driving, https://mercedes-benz-media.co.uk/releases/1455