

2021年1月
版次：1.1

氣流與 電梯

為判定電梯乘客曝露於新冠肺炎
相對風險所進行的氣流研究之重點

OTIS

執行摘要

電梯在世界各地人們日常移動上扮演著非常重要的角色。然而，全球蔓延的新冠肺病（COVID-19），讓我們對共用空間的相對傳染風險產生了一定的憂慮，包括電梯。在這場流行病的早期階段，大眾和科學出版品都開始報導說，根據我們的瞭解，空氣傳播是疾病散播的主要方法之一，而電梯車廂是空氣流通有限的密封空間，這造成了對搭乘電梯的疑慮，但對電梯空氣流通有限的觀念至少部分是錯誤。

事實上，電梯是通風良好的空間。根據法規，電梯必須有通風開口。這些開口連同電梯中常見的風扇，促成了高度的空氣交換。

由於搭乘電梯的時間相當短，在電梯內曝露於空氣和其他人的時間也是有限的 - 在最高的大樓平均不到2分鐘，許多人搭乘電梯大概只有30秒。雖然前述的事實和簡單的分析都暗示，電梯內的氣霧和微粒空氣傳播比其他許多共用空間低許多，但未考量特定情況的動力學，包括乘客流的動、通風速率、電梯車廂大小，以及戴口罩和空氣淨化等減緩策略。

每一次搭乘電梯的情況皆不同，有多個變數對人、空氣和電梯的移動都很重要。為了瞭解這些動力學的影響，並提供有科學根據的資訊和解決方法來支援我們的客戶及搭乘電梯的大眾，奧的斯電梯公司（Otis）委託進行了一項為期三個月的電梯氣流研究，這項研究的重點是要了解在電梯中曝露於新冠肺病的相對風險。我們將回答相關問題，包括減緩策略的影響，以及使用電梯與我們身處的其他情況相較起來如何。更具體來說，研究團隊進行研究的目的是：

- 評估在搭乘電梯時，經由空中微粒傳播感染新型冠狀病毒（SARS-CoV-2，造成新冠肺病的病毒）的風險。
- 研究可能對曝露風險產生重大影響的不同電梯設計參數，包括風扇速度。
- 確認減緩策略及方法的影響。
- 比較電梯相對於辦公室或城市公車等其他封閉空間的曝露風險。



這項研究是由陳清焰博士主導，他是普渡大學機械工程系的 James G. Dwyer 教授，他深入研究傳染病如何經由室內空調系統散播，以及如何防止這種情況，其成

就受到廣泛認同。陳清焰博士和他的團隊與奧的斯電梯公司的團隊密切合作。

這項調查使用了最先進的多分區模型來模擬建築物電梯橫跨的多個區域之間的氣流，並使用計算流體動力學來模擬搭乘電梯2分鐘相較於花時間待在其他共用空間的微粒散佈情況。關於搭乘電梯，我們模擬了多種情況，包括當門打開乘客進出電梯時的微粒散佈情況。

配合我們對於電梯設計和運作的所知，研究發現的結果顯示，搭乘電梯是相對低風險的活動。這項研究已證明，空氣交換程度越高，例如由有更

高速的電梯風扇來達成，曝露於風險的可能性越低。在考量常見室內活動的相對風險時，研究結果發現搭乘電梯相對於待在辦公室或公車上的時間是短的。因此，當你考量待在公車或辦公室的平均時間相較於搭乘電梯是較長的時，我們觀察到待在電梯的相對曝露風險低許多。

此外，研究顯示減緩策略能夠進一步降低風險。適當使用口罩能將潛在風險減半，透過針點雙極離子化（NPBI）的空氣淨化能降低20-30%的風險，而將這兩項策略結合可使得相對曝露風險減少60-65%。^{*} 雖然計算式本身不會改變，但計算的結果會因為搭乘電梯的時間以及搭乘者在電梯中的位置而有不同。

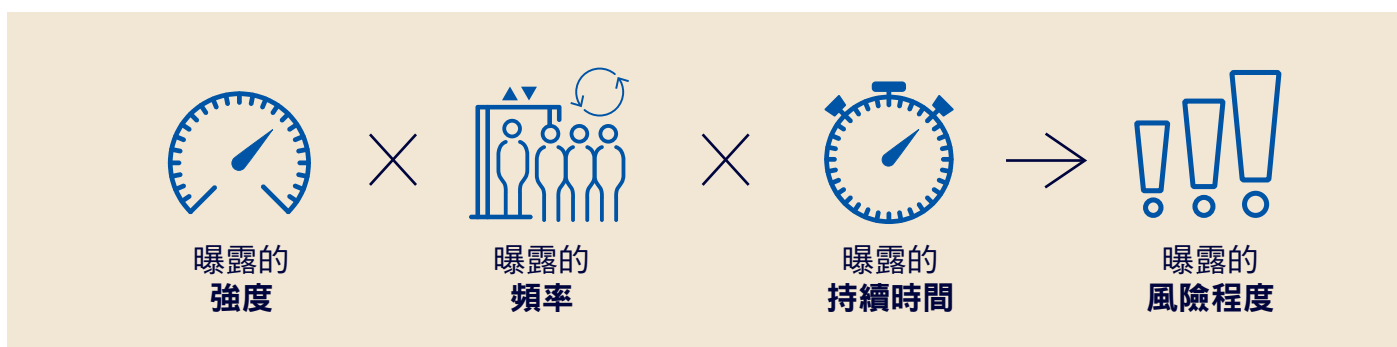
奧的斯公司致力於讓電梯乘客在新冠肺炎流行病期間及未來獲得充分的資訊，而本研究及其發現的結果便是這項承諾的一部分。我們持續支援我們的客戶，提供行為指引及多層次的技術解決方法，而且我們致力於進行更深入的研究，以促進我們對風險的共同了解。

適當使用口罩能將潛在風險減半，透過針點雙極離子化（NPBI）的空氣淨化能降低20-30%的風險，而將這兩項策略結合可使得相對曝露風險減少60-65%。^{*}

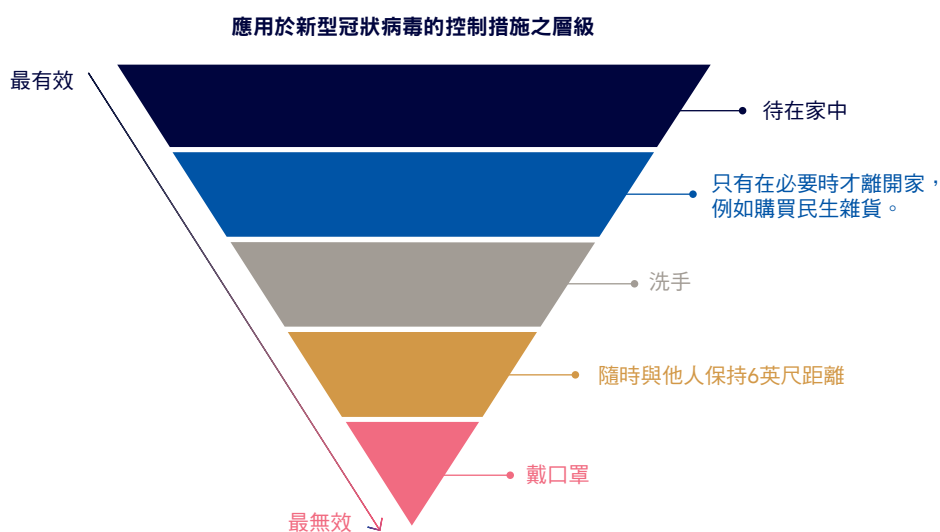
^{*} 關於比較的細節及其他資訊，請參照第16頁。

評估風險與新冠肺炎

隨著世界持續探討新冠肺炎（COVID-19）流行病，各個社會都在努力想辦法恢復日常生活的各個面向，各學科領域的專家體認到，沒有所謂的「銀彈」解決方法。我們需要以科學知識為依據的風險基礎方法，為每一種情況建議合理的控制措施（Defile, 2020）。風險程度是依照曝露的強度、頻率及持續時間來決定。對於每一種應用，經由空氣途徑或實體接觸的曝露程度可能不同。若未結合各種方法及不同的學科領域，無法輕易比較所有應用。



透過風險基礎方法，我們能夠決定層級策略的各個要素，並制定這些要素的優先順序，這個層級策略同時包含了行為和技術建議，每一項建議都有不同程度的效用和干擾。



這些概括的原則可適用於電梯案例。隨著我們期望解決在電梯中相對曝露風險的相關顧慮，我們需要平衡好幾個因素及情況，才能為我們的客戶及搭乘電梯的大眾獲得一定範圍的正面結果和解決方法。我們不僅需要考量電梯的動力學，也需要考量建築物的環境及人們的行為。了解相對風險以及如何整合不同層級的控制方法和解決方法，是關鍵所在。

行為



身體距離與指引



虛擬與遠距工作

技術



非接觸式技術



乘客溝通



淨化與衛生



監視與追蹤

在思考如何因應當前的新冠肺炎大流行時，這些解決方法主要聚焦於四個關鍵領域：

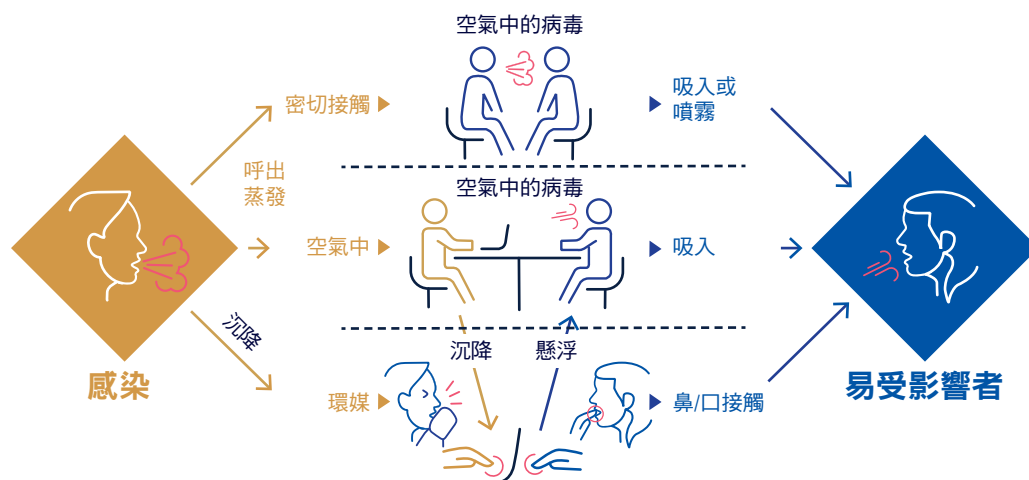
- 人與電梯的移動
- 安全搭乘指南
- 減緩曝露風險
- 先進技術解決方法

其他考量因素包括電梯的垂直移動、門的開關，以及人進出電梯的移動，所有這些都發生在合理的小封閉空間中。因此，我們需要從新冠肺炎如何經由空氣船舶的科學知識基礎來檢視這些因素。

探討新冠肺炎（COVID-19）的傳播

世界衛生組織（WHO）、美國疾病管制與預防中心（CDC）及其他專家皆指出，造成新冠肺炎的新型冠狀病毒（SARS-CoV-2）有多種傳播模式。

新出現的科學證據似乎支持空氣傳播比表面到表面的傳播更為重要（世界衛生組織及Mandavilli, 2020）。隨著人們越來越認為空氣傳播是主要途徑，對於室內空氣品質及氣流的重視持續增長。



透過大飛沫或小氣霧的空氣傳播程度取決於吸入的微粒大小和量。在不同的情況期間，呼出的微粒量是不同的。相較於說話，呼吸散佈的微粒量較少，但尺寸較小，而說話散佈的微粒可能比咳嗽大。呼吸、咳嗽或說話所花的時間多寡很重要，與人接觸的距離和持續時間以及促成微粒在空間中移動的氣流也很重要。呼氣的強度、你接近被感染者的持續時間以及接觸的頻率，全都可能促成感染擴散的相對風險。*

許多快速的分析可能檢視完全混合的空氣，並將情況檢查。然而，同時分析空氣移動、人移動和電梯移動可提供更多細節。欲獲得完整的分析，進一步的工作可能包括詳細研究表面到表面或環媒傳播。

我們有多種方法可用來分析病毒的空氣傳播及散佈，包括使用公共衛生與醫療、工程、數學與統計、網絡理論及其他許多領域的方法。

會造成影響的不是只有空氣中的微粒數目，這些微粒會往哪裡去，以及它們是否被吸入並停留在你肺部的上半部還是下半部也很重要。我們可以建立微粒和空氣的模型，但是我們也需要考量對於在不同情況中的人累積的相對微粒量。單單研究氣流本身未必是足夠的，我們也需要瞭解在不同時間點和不同情況下可能受感染的微粒之濃度和分佈，才能更準確地評估風險。

呼氣類型	飛沫直徑 (微米)	飛沫數目
咳嗽	13.5	947-2085 每次咳嗽的微粒數
說話	16	112-6720 說話的微粒數 (從1數到100)
呼吸	0.4	525 每次呼吸的微粒數

了解電梯

在探討電梯內曝露於新冠肺炎的相對風險時，根據已知的微粒空氣傳播科學知識，我們知道要將重點放在氣流上。現代的電梯車廂雖然相當小，但卻是有著頻繁空氣循環系統的通風良好空間。



By code, 所有電梯都必須有通風開口。



由於待在電梯車廂的平均時間相當短，因此曝露時間非常少。



電梯有高度的空氣交換，可降低曝露程度。

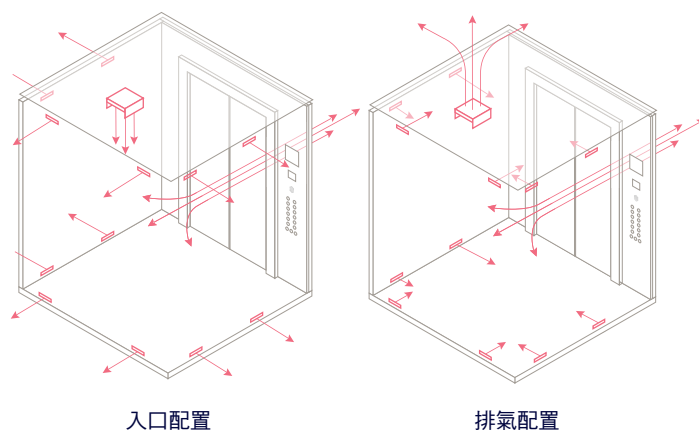
電梯有規定的通風標準。根據法規，為了達到自然對流，電梯必須有開口，而且大多數的電梯都有風扇，或者很容易加裝風扇。電梯風扇的尺寸經常能提供每分鐘一次的空氣交換 - 或每小時六十次的空氣交換。每小時換氣率（ACH）是衡量某個空間換氣速率的指標，它的定義是在1小時內加入某個空間或從某個空間排出的空氣量除以空間的體積，數值越高，表示通風越佳。

根據北美電梯相關法規，電梯車廂必須提供平台面積的3.5%來做為對流目的用的通風開口（美國機械工程師學會，2019）。適用於世界許多地

方的歐洲規範EN81-1要求要有2.0%的通風，不論電梯車廂的配置為何，這仍是相當大的開口量（英國標準協會，2014）。

系統中的系統

在思考搭乘電梯時，我們考量了乘客在電梯車廂中接觸的空氣和空間、電梯在其中升降的電梯井，以及人們在其中移動的建築物其他部分。風扇的開口以及門周圍的開口可能被納入計算。這些開口提供了被動氣流對流轉換的入口和出口，而且在有較主動的通風時也能提供助益。視建築物的複雜度而定，我們也需要考量其他因素，包括加壓、消防和更複雜的暖通空調系統，以及電梯與大廳或不同站的樓層之間的空氣移動。



入口配置

排氣配置

研究概要

根據我們對電梯系統、通風和設計以及新冠肺炎本質的瞭解，在電梯內的相對曝露風險比起其他許多共用空間是低的。然而，這並未考量特定情況的動力學，包括乘客的流動、通風速率、電梯車廂大小，以及戴口罩和空氣淨化等減緩策略。

為了瞭解這些動力因素的真正影響，奧的斯電梯公司委託了普渡大學的一個團隊進行一項研究，目的是要瞭解在電梯中曝露於新冠肺炎的相對風險。這項研究聚焦於氣流，且調查了在電梯環境中的通風速率和類型、淨化技術以及包括戴口罩在內的介入行動之影響。



通風速率



風類型以及
風扇吹的方向



電梯車廂配置，研究有某些變化的最受歡迎車廂尺寸。



適當使用口罩的影響



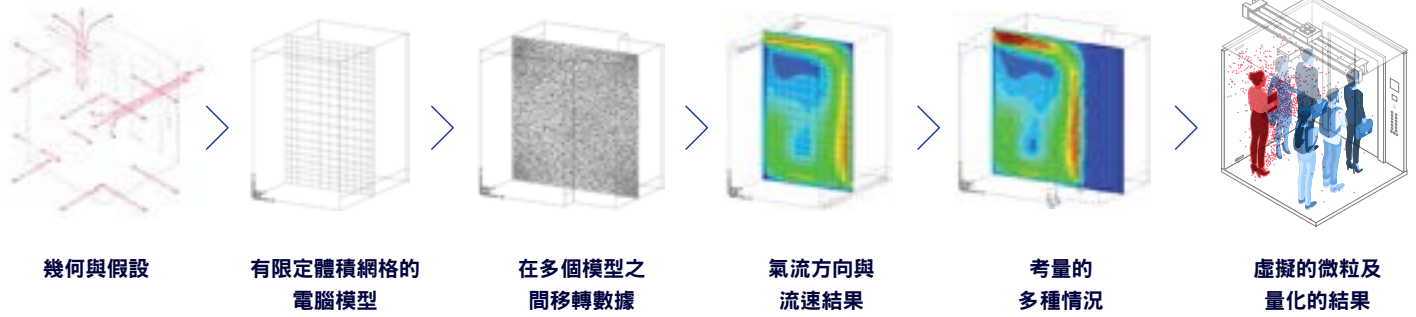
淨化技術的影響，尤其是針點雙極離子化（NPBI）技術。

氣流模型簡介

氣流相當複雜，但可以在電腦中建立氣流模型，並在實驗中測量實際的氣流。為了快速研究多種情況和變數，電腦模型建立經常是被建議的方法。本研究使用了電腦模型建立和數值模擬方法，這些都是當今科學最先進的方法。

對於單一封閉空間，計算流體動力學（CFD）是最強大的氣流和污染物模型建立工具。CFD向來受到廣泛使用，因為它可以提供在封閉環境中微粒瞬時傳播的資訊性及準確結果。污染物傳播的計算流體動力學模型有兩個部分：氣流模型建立以及微粒模型建立。

為了獲得氣流分佈的資訊，計算流體動力學從數據解決了一組涉及質量守恆、動量（納維-斯托克斯方程式）、能及亂流量的偏微分方程式。這個解決方法包括空氣流速分佈、壓力、溫度、亂流參數及污染物濃度。



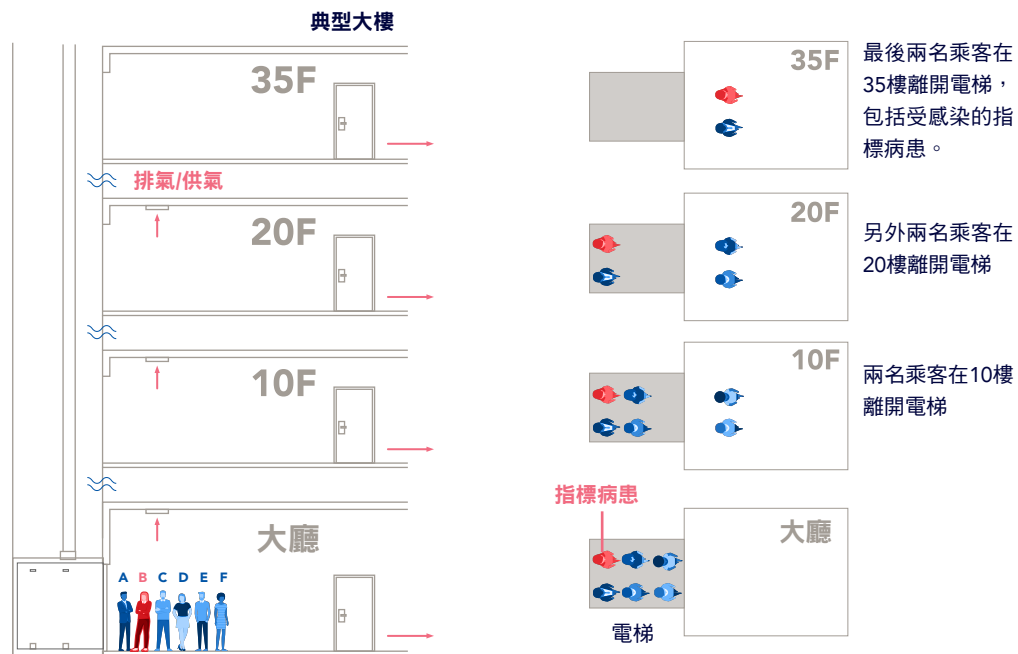
為了盡可能模擬電梯的環境，我們使用了一種多分區模型，因為它可適用於有門、窗和縫隙等開口連接的多個房間。多分區模型也假設每個區域都是充分混合的空間。雖然每個區域中都有一致空氣污染物濃度的假設未必是有效的，但足以模擬氣流經過電梯車廂與電梯井之間以及電梯井與大廳之間的縫隙。這是因為在這些大空間中的不確定性非常高。相較於病毒濃度分佈一致性的問題，氣流流經小開口是比較重要的。

雷諾平均納維-斯托克斯（RANS）模型是最受歡迎的計算流體動力學模型。RANS 模型解決了空氣流速、空氣溫度等一般空氣變數，並藉由解答亂流傳送方程式來找出模擬亂流的特性。關於室內氣流的模型建立，Zhang等人（2007）在檢視並比較許多模型後，建議採用

RNG k- ϵ 模型，因此本研究選擇使用這個模型。雖然這項研究並不包括實驗測量，但數值模擬方法是以確效的工具為基礎。舉例而言，我們在計算流體動力學中使用了拉格朗日模型來模擬在清淨房間中的微粒散佈（Murakami等人, 1992）。我們也比較了模擬和測量的微粒濃度分佈。拉格朗日方程式的計算乃是以100,000的樣本數為基礎（亦即軌道的數目），結果與實驗數據合理一致。拉格朗日模型微粒追蹤法可能將不確定性引進微粒濃度計算中。當微粒數目是低的，由於模型中使用了隨機因素，預測的微粒濃度可能不是穩定的解答，這可在本專案中獲致的結果身上觀察到。

研究模型建立方法

本研究使用上述的多分區電腦模型建立和數值模擬方法，試圖模擬各種電梯搭乘經驗來檢視潛在的曝露風險。為了考量搭乘電梯的整個過程，我們假設在35層樓的商業大廈中搭乘電梯的情況。在六名乘客當中，有兩名乘客在10樓離開電梯，另外兩名在20樓離開，而最後兩名在35樓離開。在35樓離開的兩名乘客其中之一是指標病患，就是下圖中穿紅衣的那位。最長的搭乘時間為2分鐘。這棟典型的大樓和代表性的電梯搭乘讓我們能將各個變數獨立出來，並判定電梯速度或路徑的確切細節不如待在每個空間中的總時間長度來得重要。



這項調查使用了多分區模型「ContamW」來模擬氣流通過電梯車廂與電梯井以及電梯井與大廳之間的縫隙。多分區氣流模擬的結果被用來熱-流體分界條件的一部分，以詳細模擬搭乘電梯的新冠肺炎病毒微粒傳播。詳細的模擬使用了前文所述的計算流體動力學方法，以及微粒散佈的拉格朗日方法。由於考量到搭乘電梯時的流動領域變化，搭乘電梯2分鐘的模擬被進一步區分為八種子案例。前一個子案例的微粒和氣流分佈被用來當作目前這個子案例的初始條件，以確保數據可以順利移轉來準確模擬搭乘電梯時的微粒傳播。使用的計算流體動力學方法是雷諾平均納維-斯托克斯方程式，有內建於ANSYS Fluent電腦程式的RNG k- ϵ 亂流模型。ANSYS Fluent是目前可取得的較精密計算流體動力學程式碼之一，普遍被用於先進電腦模擬。

這項調查主要考量了指標病患呼吸所產生的空氣微粒傳播，每一次呼吸循環都持續4秒，並產生525個直徑0.4微米的微粒。本研究也探究了指標病患進入電梯後咳嗽一次的咳嗽案例。

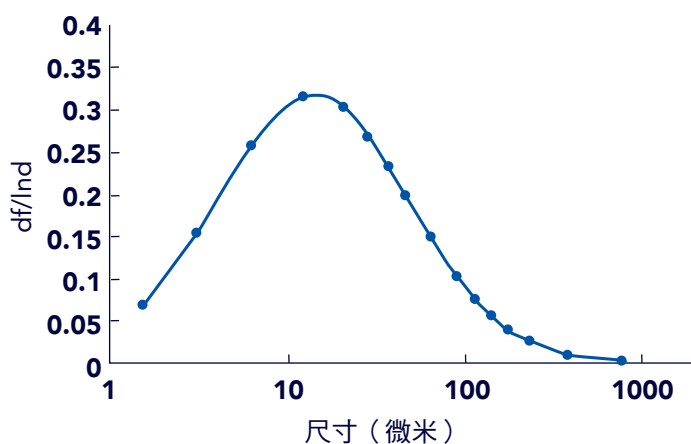
不同的電梯設計參數對微粒傳播的影響也受到研究：

- 350 cfm、150 cfm及55 cfm的通風速率以及36 cfm的滲透率。
- 吹入空氣及吹出空氣
- 寬型電梯車廂與深型電梯車廂

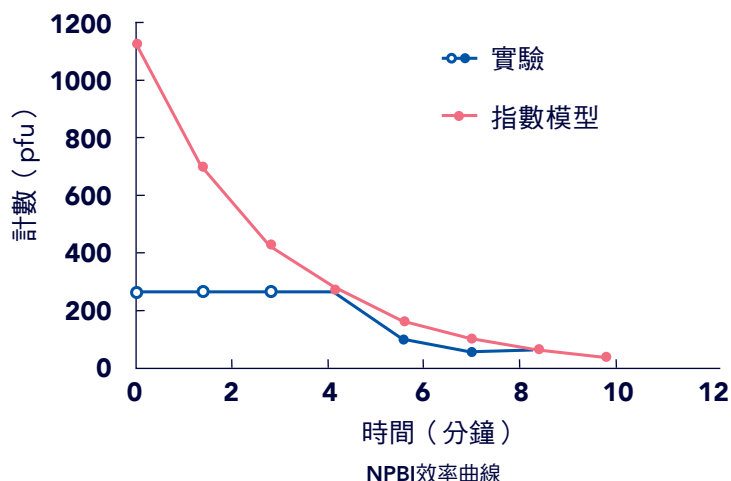
既然研究使用了易受感染的乘客吸入的微粒數目或微粒質量來做為評估標準，它無法顯示絕對的風險，因此我們比較了搭乘電梯與待在辦公室中和公車上曝露於微粒的程度。

本研究調查了指標病患經由呼吸和咳嗽產生微粒

的來源。關於呼吸，數值模擬使用了直徑0.4微米的平均微粒尺寸，每一次呼吸循環會產生525個微粒，而每一次呼吸循環會持續4秒。關於咳嗽，本研究使用了下圖顯示的十六種不同的微粒尺寸和數目（Chao等人, 2009），每次咳嗽的總微粒數目是1,951。此外，經由鼻子呼吸以及經由口腔咳嗽的流動分界條件乃是以Gupta等人（2011）的研究為依據。



根據Chao等人（2009）的研究繪製的咳嗽微粒尺寸分佈



空氣淨化模型建立

為了評估每個易受感染者的累積微粒量，這項調查發展了一種用戶定義函數（UDF）來計算累積微粒數目，並透過方程式來計算每個人的呼吸區中的累計微粒質量，這些都是計算流體動力學模擬產生的結果。呼吸區是個以每個人的鼻子為中心的球形空間，半徑為0.2公尺。

除了在不同的乘客和氣流情況下的累積微粒量外，本研究也使用模型來模擬針點雙極離子化（NPBI）做為空氣淨化策略的影響。我們發展了一個類似的用戶定義函數來模擬空氣淨化的效應。

研究結果

研究結果顯示，搭乘電梯是風險相對較低的活動。電梯中的高空氣交換率降低了曝露風險，且搭乘電梯的時間相較於待在辦公室中或公車上是短的。包括戴口罩以及使用針點雙極離子化的空氣淨化技術等減緩策略，也被證明能進一步降低風險。

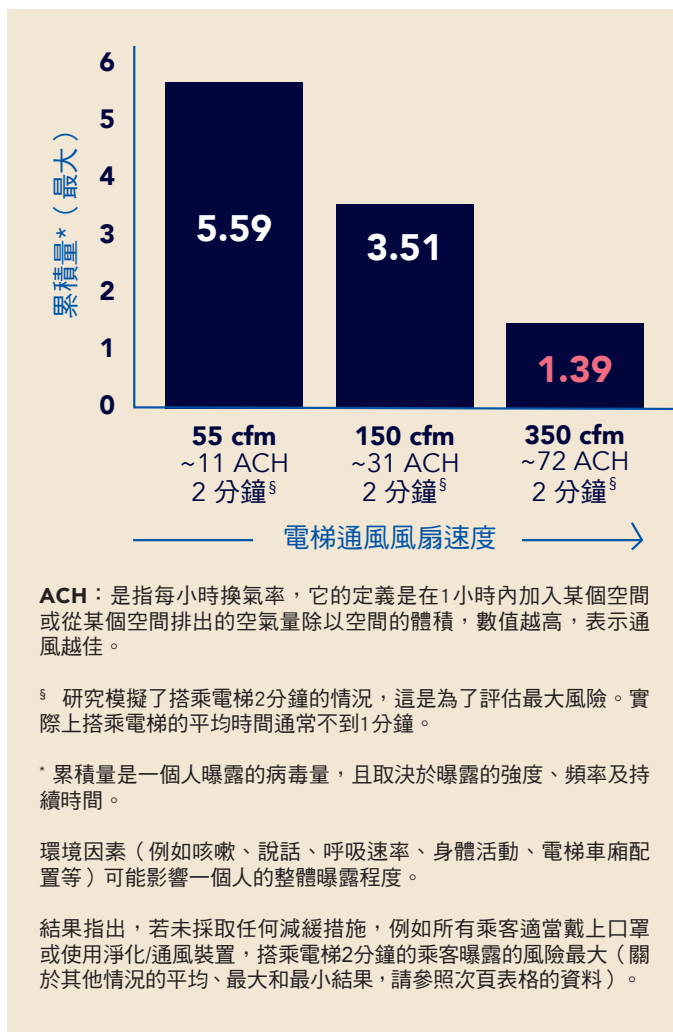
通風與曝露

由於搭乘電梯的持續時間相當短，通風速率高的電梯代表曝露風險較低。雖然呼吸會連續產生微粒，但相較於咳嗽，呼吸的微粒數目和尺寸是較低的。因此，在咳嗽案例，易受感染的乘客曝露的累積微粒質量可能是呼吸案例的六倍。

通風速率越高，累積量可能越低。然而，情況並非永遠如此，因為在某些案例，即使通風速率較高，微粒分佈不均勻也可能造成較高的累積量。深型電梯車廂可能讓微粒陷在電梯內，而空氣供應方向也會影響電梯車廂內的微粒散佈。

在這個案例，位在一樓大廳曝露於微粒的量是低的，因為暖通空調系統的通風及來自乘客的熱煙流會造成微粒驅散。乘客移動可能會在他們身後留下一些微粒。在電梯車廂內的微粒分佈是非常

不均勻的。站在指標病患前方的人曝露程度是最高的，而站在指標病患旁邊的人累積微粒量是最高的，因為曝露時間最長。



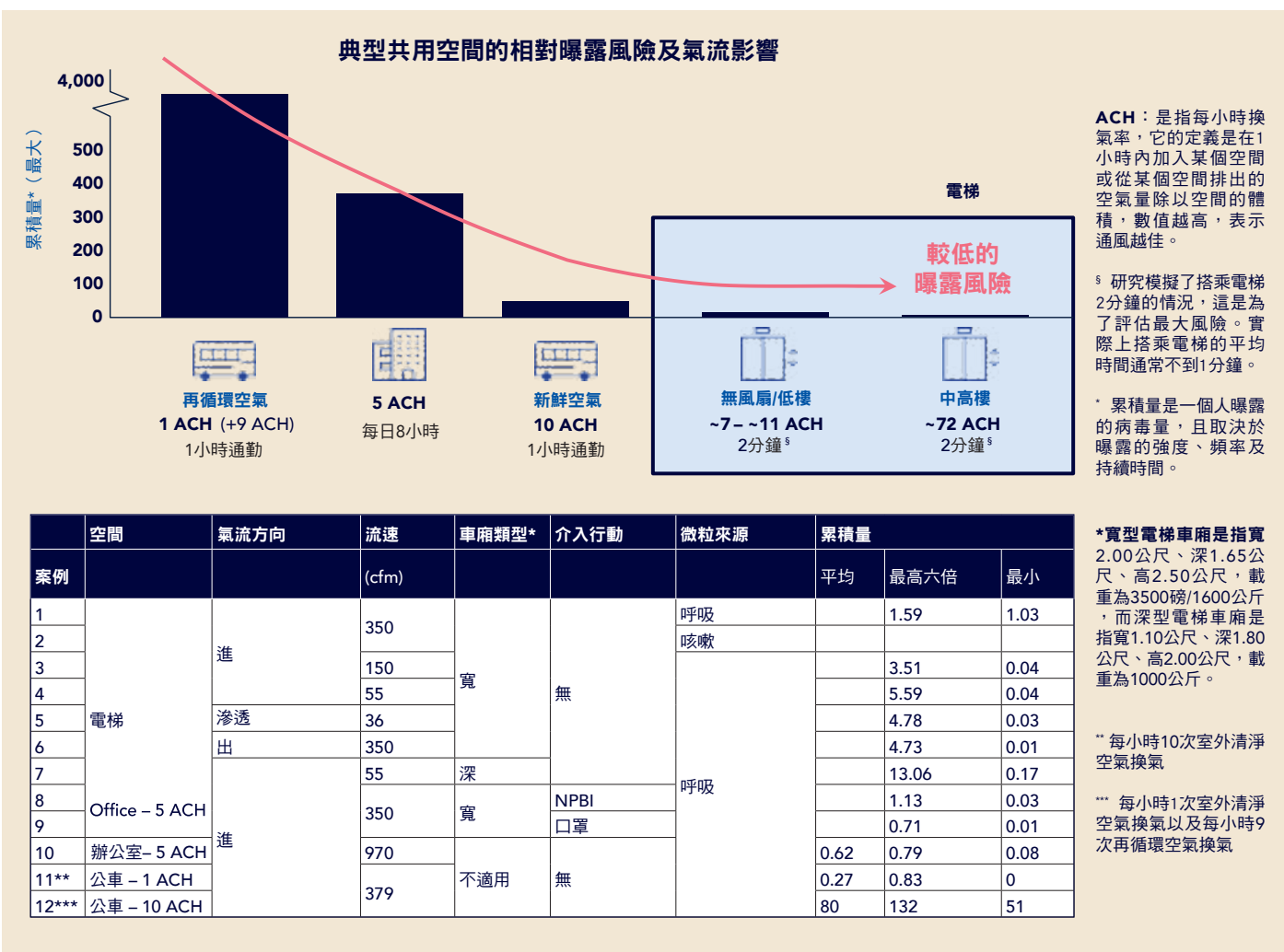
與其他活動比較

為了更清楚搭乘電梯風險的真正本質，本研究比較了搭乘電梯的各種情況與在其他共用空間和辦公室工作相關活動的累積量之量化結果。更具體來說，我們檢視了有不同空氣品質的公車及辦公室環境，重點在於與氣流息息相關的風險，而我們確認空氣交換是關鍵因素之一。

在速率達350 cfm的通風良好電梯中，累積的微粒量相當於只在供應清淨空氣且每小時換氣率達5次的辦公室待4分鐘。即使是在速率只有55 cfm

的通風不良電梯中，搭乘電梯的累積量也與待在辦公室中15分鐘相同。在每小時10次室外空氣換氣的公車上，風險相對是低的，但在有90%再循環空氣的公車上，風險會是搭乘電梯的25倍以上。

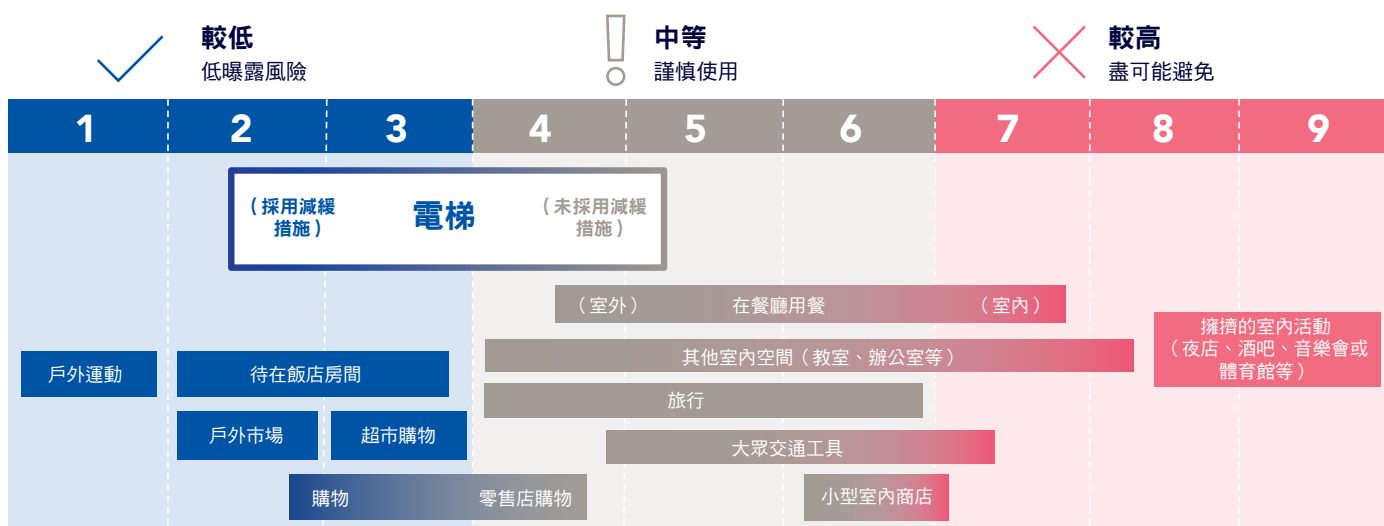
當我們考量這些活動的持續時間時，搭乘電梯的風險在比較之下是顯著較低的。如前文所指出，搭乘電梯的平均持續時間不到2分鐘，而一天待在辦公室8小時或搭乘公車1小時，已被證明會曝露於以指數計算的較高累積量。



除了定量的結果外，定性的比較也讓我們更能感知搭乘電梯的相對曝露風險。下表讓我們對於採用以及未採用減緩措施搭乘電梯的相對風險會落在其他活動光譜上的何處有個整體概念，然而應注意的是，要與許多不同的情況進行定量比較有其困難性。

即使在控制的電腦模擬情境中，也會有許多變數，自然和建造的環境都有許多變化，尤其是在結合人的行為時。舉例而言，在餐廳用餐的風險會因為用餐者人數、靠近程度、待在該空間中的時間及其他許多因素而有不同。同樣地，與其他室內活動有關的風險，也會因為與環境本身及使用者的行為有關的種種變數而有很大差異。

儘管如此，根據我們已知道的，我們大體上可將搭乘電梯歸入曝露風險相對低到中等的類別，視列舉的因素而定，搭乘電梯相較於待在飯店房間或外出用餐是相對較安全的。



即使在每一種活動類別中，曝露的強度、頻率和持續時間變化也會造成不同程度的曝露風險。
改編自最初由哈佛大學的Julie Marcus及波士頓大學的Eleanor Murray提出的相對風險架構。
搭乘電梯的曝露風險可藉由適當使用口罩、空氣淨化技術（例如NPBI）及身體距離等措施來降低。

減緩策略

雖然研究結果顯示電梯對於新冠肺炎感染而言是風險較低的室內空間，但仍應考量採用任何減緩方法。這項調查考量了兩種介入方法：使用醫療用口罩以及針點雙極離子化消毒。

本研究選擇醫療用口罩來研究戴口罩對於易受感染者累積量的影響。我們假設相較於指標病患呼出的微粒，醫療用口罩對於易受感染的乘客吸入微粒的過濾效率是相同的。這項調查使用了Bowen（2010）為醫療用口罩計算的33%平均過濾效率。

結果指出，如果所有搭乘電梯者都戴上醫療用口罩，微粒量可降低50%。本研究假設當指標病患進入電梯後會咳嗽一次，這個咳嗽會造成其他乘客吸入指標病患在整個搭乘期間連續呼吸的累積量大約六倍的微粒質量。

戴醫療用口罩者的不同情況

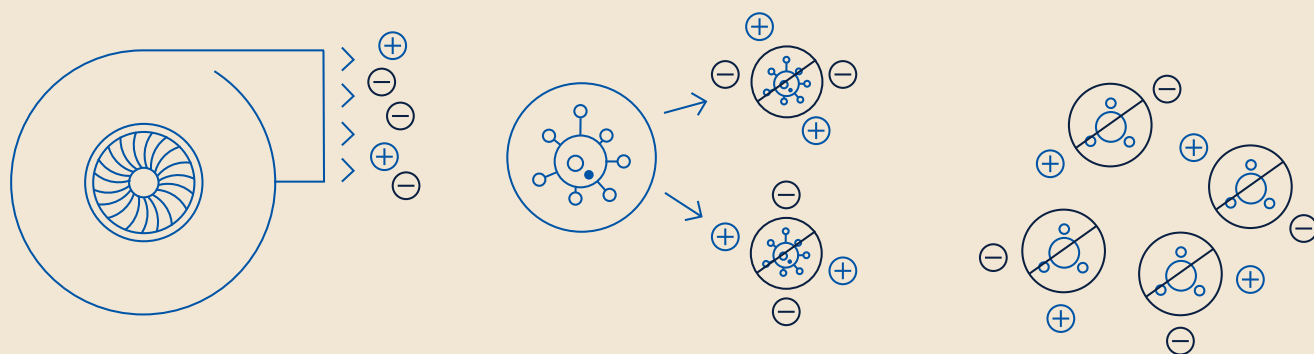
不同的情況	指標病患 A	其他人 B, C, D, E, F
第一種情況	 未戴口罩	 未戴口罩
第二種情況	 戴醫療用口罩	 未戴口罩
第三種情況	 未戴口罩	 戴醫療用口罩
第四種情況	 戴醫療用口罩	 戴醫療用口罩

不同戴口罩情況的累積量

過濾效率	其他人 B, C, D, E, F
  第一種情況	0.0%
  第二種情況	33.3%
  第三種情況	33.3%
  第四種情況	55.5%

我們也檢視了針點雙極離子化做為電梯車廂空氣淨化方法的影響。雙極離子化是一種用來改善空氣品質的技術，根據多年的研究，這項技術能降低曝露的強度，且試驗結果也支持了它的安全性和功效。雙極離子化會發射正電荷及負電荷粒子，這些粒子會附著在有害的物質上，例如細菌、過敏原、黴菌、病毒、揮發性有機化合物（VOC）及其他微粒，並使得這些有害物質無法活動（Essien, 2017以及Hagbom, 2015）。

如何運作



1 電離器會產生並驅散負離子和正離子。

2 隨著細菌、病毒或其他細胞分裂，離子會附著在細胞上，造成化學反應。

3 這些有害的病毒或其他病原體被中和化 - 這降低了空氣中微粒擴散的可能性。

關於針點雙極離子化及其他空氣淨化解決方法的更多細節，請參照我們的「當今電梯內的空氣淨化」技術簡報，可在otis.com取得。

在細菌和病毒的情況，這個化學反應會在有機體內製造氧化壓力，消耗它們作用的能力，並且實際破壞它們的外層，有效地讓它們無法活動。隨著空氣離子附著在它們身上，粒子物質可被去除，造成它們離子化，並接著吸引其他帶電粒子，經由重量增加沉降速率（Kim, 2017）。

我們的模型指出，視搭乘電梯的時間以及乘客在電梯中的位置而定，使用針點雙極離子化技術可將曝露風險降低20%到30%。再者，使用針點雙極離子化技術加上所有乘客均適當戴上口罩，可使相對風險降低60%到65%。



重要結論

這項調查結合使用了計算流體動力學（CFD）及多分區模型，來研究在有35層樓的典型辦公大樓搭乘電梯時，空氣微粒傳播新冠肺炎的情況。計算流體動力學模擬了指標病患搭乘電梯時經由呼吸呼出的空氣微粒之擴散情況。多分區模型被用來計算樓層與電梯井之間的氣流，以及進出電梯時流經縫隙和小開口的氣流。研究計算了在不同的情況下，易受感染的乘客與指標病患共同搭乘電梯的累積量，例如在不同的通風速率、空氣供應方法、電梯車廂幾何及介入方法下。



淨化解決方法可將曝風險降低**20%到30%**。



所有乘客適當使用口罩加上針點雙極離子化可將相對曝風險降低**60%到65%**。



電梯有**高度**的空氣交換，這降低了曝程度。



搭乘電梯所花費的時間相當短，因此曝風險不會比待在辦公室中或公車上來得大。



適當使用口罩將曝風險降低**50%**。

研究的介入方法包括乘客戴上醫療用口罩，以及在電梯內使用針點雙極離子化技術。這項調查也探討了指標病患進入電梯後咳嗽一次的情況。為了進行比較，我們也計算了待在每小時有5次清淨空氣供應換氣的辦公室8小時，以及在每小時有10次90%再循環空氣換氣的公車上1小時的累積量。本研究導出以下結論：

- 由於搭乘電梯的時間相當短，通風良好的電梯風險是低的。在通風速率為350 cfm的參考案例，接近指標病患的易受感染者最高累積微粒量是1.59。
- 由於微粒在電梯車廂中的分佈非常不均勻，累積量未必與通風速率成反比。累積量會因為乘客相對於指標病患的位置而受影響。我們也發現深型電梯車廂可能讓微粒陷在電梯中，且空氣供應的方向也會影響微粒在電梯車廂內的散佈。

- 在通風速率達350 cfm的通風良好電梯中，累積量相當於在每小時有5次清淨空氣供應換氣的辦公室待上4分鐘。即使是在通風速率只有55 cfm的通風不良電梯中，搭乘電梯的累積量也與待在辦公室15分鐘是相同的。每小時有10次室外空氣換氣的公車是非常乾淨的，但有90%再循環空氣的公車比電梯髒25倍。
- 介入方法可進一步降低曝露。舉例而言，藉由使用雙極離子化，視搭乘時間及乘客位置而定，可將曝露風險進一步降低20%到30%。
- 如果所有乘客都戴上醫療用口罩，累積量可降低50%。本研究假設指標病患在進入電梯後咳嗽一次，這個咳嗽會造成其他乘客吸入指標病患在整個搭乘期間連續呼吸的累積量大約六倍的微粒質量。
- 使用針點雙極離子化技術加上所有乘客適當使用口罩，可進一步將曝露風險降低60%到65%。

限制

這項調查有以下限制：

- 由於整個過程的數值模擬是非常困難的，本研究將整個過程區分為八個子案例，如此在模擬每個子案例後便可移轉資料。既然每個案例的網格不可能是完全相同的，因此可能會引進某些錯誤。
- 既然我們需要模擬行走中的人，使用真人形狀的人會需要非常龐大的電腦運算資源。此外，Nielson（2003）發現，真人形狀的人與簡化的人之間的熱移轉和流動並無大差異，因此本研究使用了長方形柱來模擬人。
- 我們假設一樓大廳的暖通空調系統從天花板供應新鮮空氣，且大廳與其他空間相連，因此通風口被設置在兩面連接牆上。在我們模擬的特定案例，來自指標病患的所有微粒全都先往上移動，然後再往其他空間移動。所有其他易受感染乘客的曝露量幾乎是0，這在實際上未必是如此，因為30秒鐘的等候時間相當長。我們不應該忽略對易受感染乘客的曝露影響。
- 本研究使用了一個電腦叢集來進行計算流體動力學的模擬。每一次模擬都使用了兩個節點，而每個節點在2.60GHz的Skylake中央處理器上都有24個處理器核心。每個節點的記憶體為96 GB。每個子案例的平均計算時間為將近12個小時，這表示有八個子案例的試驗案例需要將近100個小時的計算時間，因此計算工作量相當大。

進一步的研究領域

本專案屬於奧的斯電梯公司發起的電梯研究的第一階段。在兩名全職的博士後研究員進行了超過三個月的調查後，本專案已達成初步的目標。然而，研究團隊及特別審查委員會建議未來短期內應進行以下領域的進一步研究。

- 模擬結果必須驗證，但由於本專案的時間短，我們只能根據先前的經驗進行微粒分佈的數值模擬，但對於數值結果也必須進行實驗驗證。
- 這項調查考量了兩種介入方法：真點雙極離子化消毒及戴口罩。其他方法也應加以研究，例如光觸媒氧化、紫外線消毒、高效率粒子濾網過濾等。
- 本研究僅考量了呼吸和咳嗽情況。然而，呼吸、咳嗽、說話和打噴嚏產生的微粒在幾何直徑、尺寸和數目方面皆不同。說話、咳嗽和打噴嚏產生的微粒有著大質量，可能是呼吸微粒的好幾倍。因此參考案例的設計需要改良，以便能夠判定累積量，這很重要。若能與流行病學家及毒物學家合作，並可能判定更明確的感染風險機率。
- 本專案主要聚焦於空氣微粒，世界衛生組織、美國疾病管制與預防中心及其他專家都認為空氣傳播是造成感染風險最可能的途徑，但還有其他潛在的傳播途徑，只不過我們在本

研究並未模擬這些途徑。舉例而言，由於電梯空間非常小，大飛沫可能經由直接接觸或噴射動能而散佈到呼吸區，這個部分應收到進一步的研究。

- 不同社交距離的影響也必須考量，尤其是在不同載重的電梯中乘客面向的位置。本研究也發現在一般和深型電梯車廂中的位置很重要。
- 此外，在電梯中的環媒接觸也不應被忽略。我們的模擬可判定在不同表面上的微粒沉降，例如電梯中的數字按鍵板及扶手等表面。我們應該研究微粒沉降是否是環媒接觸造成感染傳播的原因。
- 我們的研究已假設，電梯車廂的空氣清淨程度各不相同。對於常用電梯，電梯車廂可能含有新冠肺炎病毒。研究電梯車廂在下一次服務之前是否應該消毒，以及需要花多少時間通風才能達到可接受的清淨程度，將是有益的。
- 本研究使用標準的門開關時間。當門打開時的空氣交換也應該受到進一步研究，包括門打開的時間長短。研究可能包括電梯車廂與降落區之間的小壓差相對於乘客拖行的影響。研究也可能檢視在電梯中有受感染者時，直接到達目的地樓層（花費時間較短）抑或定時停下來增加通風比較好。

Made to move you™

奧的斯公司致力於讓電梯乘客在新冠肺炎流行病期間及未來獲得有科學根據的資訊，而本研究及其發現的結果便是這項承諾的一部分。我們在這場大流行病一開始便為客戶提供支援，包括提供資源和行為指引，以及新的解決方法和技術。我們將持續創新並推動研究，以協助世界安全地往前邁進。

請造訪奧的斯網站（[otis.com](https://www.otis.com)）索取完整的技術報告，並查看與本研究有關的其他資源，以及促進乘客安全的解決方法和策略。

團隊簡介

本研究是由普渡大學的陳清焰博士主導，並由兩名博士後研究員協助進行。研究團隊與奧的斯電梯公司的技術專家密切合作，以進研究的進行、達到所有列舉的目標，並清楚傳達研究發現的結果。

陳清焰博士是普渡大學機械工程系的James G. Dwyer教授，也是《建築物與環境》期刊的主編。他深入研究傳染病如何經由室內空調系統散播，以及如何防止這種情況，其成就受到廣泛認同。

陳清焰在1983年獲得中國清華大學工程學系學士學位，接著於1985年獲得工程學系碩士學位，並在1988年取得荷蘭台夫特理工大學（TU Delft）博士學位。他曾在蘇黎世聯邦理工學院（ETH-Zurich）擔任研究科學家，進行博士後研究，也曾在荷蘭的應用科學研究組織（TNO）專案管理人。在加入普渡大學之前，他是台夫特理工大學及麻省理工學院（MIT）教職員。他目前同時在澳洲、歐洲及中國的大學任教。

陳清焰博士目前的研究主題包括室內環境、飛機機艙環境，以及節省能源、健康且永續的建築物

設計與分析。他已經發表三本著作，以及超過470篇的期刊和會議報告，且曾受國際之邀發表超過170場的演講。

近年來，陳清焰博士榮獲好幾項技術報告與海報獎，以及美國採暖、製冷與空調工程師學會（ASHRAE）的傑出與卓越服務獎。他也是a fellow of ASHRAE及國際室內空氣品質學會的會員。在成為《建築物與環境》期刊的主編之前，他擔任過《暖通空調與製冷研究》期刊的副主編，也曾是其他六種期刊的編輯委員會委員。

Sumei Liu博士是中國天津大學的博士後研究員。她的博士論文主題是發展先進的模型來準確模擬建築物社區中的氣流。她取得中國湖南大學的理學士學位，且曾擔任在中國天津的建造環境集團（Built Environment Group）擔任顧問工程師，後來在天津大學攻讀博士學位。她曾到普渡大學擔任訪問學者及博士後研究員。

Xingwang Zhao 博士取得中國重慶大學理學士學位以及天津大學博士學位。他曾是普渡大學的訪問學者及博士後研究員，後來加入中國東南大學擔任他的第二個博士後研究員。他過去的研究包括使用伴隨法來探究和設計室內熱與空氣品質環境 - 這根據環境設計目標來尋找分界條件的優化方法。

Stephen R. Nichols 是一名系統工程師，他的興趣在於產品開發、建築、創新及策略。Nichols 喜歡在複雜的系統中找出簡明，也喜歡探究人類經驗和人本設計與垂直運輸技術、建築物生態及都會環境的交集。他目前服務於奧的斯的工程中心，以及在康乃狄克州法明頓的世界總部。他曾兩度擔任美國國家工程學院工程前線小組的成員，且在2019年獲得 Gilbreth 講師職位。他取得塔夫茨大學及壬色列理工學院（RPI）機械工程學位，以及麻省理工學院的系統工程的專業證書。自2020年3月起，他便一直擔任奧的斯電梯公司跨部門全球工作小組的研發與整合領導者，聚焦於流行病的因應方法，包括引導客戶如何面對快速的創新、技術與產品開發、研究、策略及合作活動。

James T. Auxier 博士是奧的斯電梯公司的全球技術開發領導者，專精於新興技術趨勢、商業需求，以及技術開發的策略領域。他具有建築物系統、航太及醫療器材產業的經驗，也曾廣泛參與大學的合作與研究，包括曾有十五年時間專研氣動熱技術的發展。他取得耶魯大學的生物醫療工程學位、史丹佛大學的機械工程碩士學位，以及肯塔基大學的生物醫療工程博士學位。

Tricia Derwinski 在奧的斯電梯公司已有超過30年開發系統、子系統和元件的經驗，她擅長的領域包括電梯車廂殼和結構天花板的設計、整合與發展，以及強迫和自然通風。她是帝國大廈電梯現代化的領導工程師，也是全國多個地標性建築物和大型專案的系統領導者。她取得華盛頓大學土木工程系理學士學位，以及康乃狄克大學機械工程系理學碩士學位。她是國家電梯產業公司（NEII）效能標準委員會以及美國機械工程師學會（ASME）A17國際標準委員會的長期委員，也曾參與好幾項與升降機和電梯搭乘品質有關的國際標準組織（ISO）活動。

Murilo Bonilha 博士是奧的斯電梯公司的系統架構、創新與模型建立總監。在2019年12月加入奧的斯之前，Bonilha曾服務於聯合技術公司（UTC），他在該公司擔任多項職務，包括工程管理、物理學應用模型建立及其他角色，包括在中國上海及愛爾蘭科克的國際領導任務。

Bonilha 取得英國南安普敦大學的聲學與振動博士學位、洛杉磯南加州大學的系統架構與工程理學碩士學位、巴西聖卡塔琳娜州聯邦大學的機械工程系理學碩士學位，以及巴西聖保羅大學造船與海洋工程理學士學位。

致謝辭

研究團隊也想要感謝許多具名及不具名的合作夥伴，他們協助進行這項工作，且持續給予支援。具體來說，研究團隊要對協助審查工作的人表達感激之意，包括波特蘭州立大學的Richard Corsi教授、哥倫比亞大學的Darby Jack、香港大學的Yuguo Li、哥倫比亞大學的Faye McNeill以及波特蘭州立大學的Elliott Gall。他們的評論和建議非常有遠見，對於本研究的下一個階段甚有助益。我們也很感謝奧的斯電梯公司的Rob Wheeler、Steve Kempf及Richard Pierce，他們在整個過程中提供了額外的協助。

參考文獻

Allen J G, Macomber J D. 「促成辦公大樓『健康』的因素為何」《哈佛商業評論》2020年4月29日。參照：<https://hbr.org/2020/04/what-makes-an-office-building-healthy>。

Allen J G. 「研究：辦公室空氣不流通造成你生產力降低」《哈佛商業評論》2017年3月21日。參照：<https://hbr.org/2017/03/research-stale-office-air-is-making-you-less-productive>。

美國採暖、製冷與空調工程師學會。ASHRAE手冊 - 暖通空調應用 (SI)。美國喬治亞州亞特蘭大市，2007年。

美國採暖、製冷與空調工程師學會。「過濾與空氣清淨立場文件」，在2015年1月29日初次刊行後，於2018年1月13日由技術委員會重申。參照：<https://www.ashrae.org/file%20library/about/position%20documents/filtration-and-air-cleaning-pd.pdf>。

美國機械工程師學會。A17.1/CSA B44電梯與升降機安全規範手冊。

Axley J. 「建築物多分區氣流模型建立：歷史與理論」《暖通空調與製冷研究》，13:907-928，2007年。

Bae S, Shin H, Koo H, Lee S, Yang J, Yon D. 「新型冠狀病毒在撤離專機上的無症狀傳播」《新興傳染病》，26 (11):2705-2708，2020年。

Blocken B. 2020. <https://www.youtube.com/watch?v=MvLYHSODHV0>

Bolster D T, Linden P F. 「低耗能通風系統中的微粒傳播：第二部分：暫態與實驗」《室內空氣》，19:130-144，2009年。

Buonanno G, Stabile L, Morawska L. 「空氣病毒散佈評估：嚴重急性呼吸道症候群冠狀病毒2型量子發散速率相對於感染風險之評估」《國際環境》，141，2020年。

美國疾病管制與預防中心。2019年。<https://www.cdc.gov/coronavirus/2019-ncov/faq.html#Spread>。

美國疾病管制與預防中心DC/國家職業安全與衛生學會「結核病的環境管制：健康照護環境的基本上層空間紫外線殺菌放射指導方針」《第2009-105號出版品》，2009年。

Chao C Y H, Wan M P. 「使用多階段方法探討單向往下及天花板回流型的氣流之研究」《室內空氣》，16:296-312，2006年。

Chao C Y H, Wan M P, Morawska L, Johnson G R, Ristovski Z D, Hargreaves M, Mengersen K, Corbett S, Li Y, Xie X, Katoshevski D. 「口腔打開當下吐氣空氣噴射與微粒尺寸分佈之特徵」《氣霧科學期刊》，40 (2) :122-133，2009年。

Chen C, Lin C H, Jiang Z, Chen Q. 「模擬戴口罩後從咳嗽呼出氣流之簡化模型」《室內空氣》，24 (6) :580- 591，2014年。

Chen C, Zhao B, Cui W, Dong L, An N, Ouyang X. 「空氣清淨機控制牙科診所室內環境中從病患口腔散發的微粒/氣霧粒子之有效性」《英國皇家學會學報：介面》，7:1105-1118，2010年。

Chen C, Zhao B, Yang X, Li Y. 「因溫差造成的雙向氣流在嚴重急性呼吸道症候群傳播上扮演的角色：再探香港規模最大的院內嚴重急性呼吸道症候群爆發」《英國皇家學會學報：介面》，8:699-710，2011年。

Chen J, He H, Cheng W, Liu Y, Sun Z, Chai C, Kong Q, Sun W, Zhang J, Guo S, Shi X, Wang J, Chen E, Chen Z. 「嚴重急性呼吸道症候群冠狀病毒2型在新加坡往中國杭州班機上的潛在傳播：一項流行病學調查」《旅遊醫學與傳染病》，36:101816，2020年。

Chen Q. 「建築物通風效能預測：方法概要與近期的應用」《建築物與環境》，44:848-858，2009年。

Chen Q, Zhao S L, Liu S. 「評估搭乘電梯時感染新冠肺炎的風險」，奧的斯電梯公司，2020年12月。

Cheng V C, Wong S C, Chuang V W, So S Y, Chen J H, Sridhar S, To K K, Chan J F, Hung I F, Ho P L, Yuen K Y. 「全社區戴口罩控制嚴重急性呼吸道症候群冠狀病毒2型造成的2019年新冠肺炎流行病的作用」《感染醫學期刊》，2020年。

Chin A W H, Poon L L M. 「嚴重急性呼吸道症候群冠狀病毒2型在不同環境條件下的穩定性」《刺絡針：微生物》，1 (1) :p. e10，2020年。

Choi E M, Chu D, Cheng P, Tsang D, Peiris M, Bausch D G, Poon L L, Watson-Jones D. 「嚴重急性呼吸道症候群冠狀病毒2型在班機上的傳播」《新興傳染病》，26（11）:2713-2716，2020年。

Choudhury D. 「重整化群方法與亂流模型建立簡介」，加農斯堡Fluent公司1993年TM-107技術備忘錄。

Dai H, Zhao B. 「新冠肺炎感染機率與侷限空間通風速率的關聯性：A Wells-Riley Equation Based Investigation.” 2020年。

Darnell M E, Subbarao K, Feinstone S M, Taylor D R. 「抑制誘發嚴重急性呼吸道症候群的冠狀病毒」《病毒學方法期刊》，121, 85-91，2004年。

Defile N C, Allen J G, Scheepers P, Levy J. 「新冠肺炎大流行：曝露科學簡介」《曝露科學與環境流行病學期刊》，2020年4月29日。參照：<https://www.nature.com/articles/s41370-020-0225-3>。

Derwinski T. 「安全鏈：以2018年芝加哥事件為鑑檢視現代大樓電梯中的安全系統」《電梯世界》，2019年6月。參照：www.elevatorworld.com。

FUJITEC公司2008年。http://www.fujitec.com.ar/english/IHO_ionful.html。

GAMBIT計算流體動力學預處理器《使用指南》Lebanon, NH: Fluent公司，1998年。

Gao N, Niu J. 「模擬室內環境的微粒散佈與沉降」《大氣環境》，41:3862-3876，2007年。

Gao X, Li Y, Xu P, Cowling B J. 「包括控制流行性感冒傳播的通風在內的校內介入行動策略評估」《建築物模擬》，5:29-37，2012年。

Gupta J K, Lin C H, Chen Q. 「從呼吸和說話呼出的氣流之特徵」《室內空氣》，20:31-39，2010年。

Gupta J K, Lin C H, Chen Q. 「呼氣微粒在班機機艙內的傳播」《室內空氣》，21:3-11，2011年。

Hang J, Li Y, Jin R. 「在六床位隔離室走動對氣流和空氣傳播的影響：追蹤氣體模擬」《建築物與環境》，77:119-134，2014年。

Hagbom M, Nordgren J, Nybom R, Hedlund K O, Wigzell H, Svensson L. 「離子化空氣會影響流行性感冒病毒的感染力並預防空氣傳播」《科學報告》，5:11431，2015年。

Hoehl S, Karaca O, Kohmer N, Westhaus S, Graf J, Goetsch U, Ciesek S. 「評估嚴重急性呼吸道症候群冠狀病毒2型在國際班機和觀光客團體當中的傳播」《美國醫學會期刊》JAMA網路開放版，3（8）:e2018044，2020年。

Hyun J, Lee S G, Hwang J. 「應用電暈放電產生的空氣離子來過濾氣霧化病毒並抑制過濾的病毒」《氣霧傳染科學期刊》2017年。iF世界設計指南。<https://ifworldddesignguide.com/entry/76697-mive>。

Jones R M, Masago Y, Bartrand T, Nicas M, Rose J B. 「使用定量微生物風險評估來發掘在商務客機中感染結核桿菌的風險特徵」《風險分析》，29:355-365，2009年。

Khanh N C, Thai P Q, Quach H L, Thi N A H, Dinh P C, Duong T N, Mai L T Q, Nghia N D, Tu T A, Quang L N, Quang T D, Nguyen T T, Vogt F, Anh D D. 「嚴重急性呼吸道症候群冠狀病毒2型在長途班機期間的傳播」《新興傳染病》，26（11）:2617-2624，2020年。

Ko G, Thompson K M, Nardell E A. 「商務班機的結核病風險評估」《風險分析》，24:379-88，2004年。

Kratzel A, Todt D, V'kovski P, Steiner S, Gultom M L, Thao T T N, Ebert N, Holwerda M, Steinmann J, Niemeyer D, Dijkman R, Kampf G, Drosten C, Steinmann E, Thiel V, Pfaender S. 「世界衛生組織建議的搓手公式與酒精可有效率地抑制嚴重急性呼吸道症候群冠狀病毒2型」bioRxiv，2020年。

Kujundzic E, Hernandez M, Miller S L. 「紫外線殺菌放射法殺死上層空間空氣中的真菌孢子和細菌以及暖通空調的管內配置」《環境工程科學期刊》，6:1-9，2007年。

Launder B E, Spalding D B. 「亂流數值計算」《應用力學與能源的電腦方法》，3:269-289，1974年。

Li X, Niu J, Gao N. 「共同使用者在不同通風方法下的人呼吸道微粒殘餘物空間分佈與曝露風險」《暖通空調與製冷研究》，17:432-445，2011年。

Li X, Niu J, Gao N. 「共同使用者曝露於呼氣微粒——覆蓋口腔的效用」《暖通空調與製冷研究》，18:575-587，2013年。

Li Y, Qian H, Hang J, Chen X, Hong L, Liang P, Li J, Xiao S, Wei J, Liu L, Kang M. 「嚴重急性呼吸道症候群冠狀病毒2型在通風不良餐廳中可能透過氣霧傳播的證據」medRxiv，04.16.20067728，2020年。

Liu X, Wu J, Liu M, Dai Y, Zhou D, Li W, Lv P, Zhou N, Wu P 2020年「在侷限空間群聚時發生的新冠肺炎症狀發生前傳播：一則病例報告」。

Lim T, Cho J, Kim B S. 「預測與衡量醫院大樓中室內空氣病毒傳播的煙囪效應效應」《建築物與環境》，46:2413-2424，2011年。

Lopez G, Northrop A. 「如何用一張圖表衡量在新冠肺炎流行期間外出的風險」Vox，2020年7月3日。<https://www.vox.com/2020/5/22/21266756/coronavirus-pandemic-covid-risks-social-distancing-chart>。

Mandavilli A. 「239位專家重大宣言：冠狀病毒可空氣傳播」《紐約時報》2020年7月4日。參照：<https://www.nytimes.com/2020/07/04/health/239-experts-with-one-big-claim-the-coronavirus-is-airborne.html>。

Marr L, Corsi R. 「室內空氣中的嚴重急性呼吸道症候群冠狀病毒2型：原理與各種情況」美國環境保護署於2020年7月16日呈現的室內空氣品質科學與技術網路研討會。參照：<https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/indoor-air-quality-science-and-technology>。

Mazumdar S, Poussou S, Lin C H, Isukapalli S S, Plesniak M W, Chen Q. 「積垢與身體移動對班機機艙內汙染物傳播的影響」《大氣環境》，45（33）:6019-6028，2011年。

Mazumdar S, Chen Q. 2009年「空氣汙染物在班機機艙內傳播的一維分析模型」《室內空氣》，19（1）:3-13，2009年。

Mazumdar S, Long Z, Chen Q. 「擬機艙內空氣汙染物傳播的計算流體動力學與分析結合模型」《市內與建成環境》，23:946-954，2014年。

McDevitt J J, Lai K M, Rudnick S N, Houseman E A, First M W, Milton D K. 「牛痘病毒對紫外線的敏感性特徵」《應用與環境微生物學》，73:5760-5766，2007年。

McDevitt J J, Rudnick S N, Radonovich L J. 「流行性感冒病毒氣霧對紫外線的敏感性」《應用與環境微生物學》，78:1666-1669，2012年。

McLean R. 「亞洲流行性感冒散佈的機制：一般討論」《美國呼吸系統疾病評論》，83:36-38，1961年。

Megri A C, Haghighat F. 「模擬建築物室內環境的分區模型建立：回顧、近期的發展及應用」《暖通空調與製冷研究》，13:887-905，2007年。

Mitchell B W, King D J. 「負空氣離子化對新城病毒空氣傳播的效應[J]」《禽病》，38（4）:725-732，1994年。

Morawska L, Tang J W, Bahnfleth W, Bluysen P M, Boerstra A, Buonanno G, Cao J, Dancer S, Floto A, Franchimon F, Haworth C, Hogeling J, Isaxon C, Jimenez J L, Kurnitski J, Li Y, Loomans M, Marks J, Marr L C, Mazzarella L, Melikov A K, Miller S, Milton K D, Nazaroff W, Nielsen P V, Noakes C, Peccia J, Querol X, Sekhar C, Seppänen O, Tanabe S-I, Tellier R, Tham K K, Wargocki P, Wierzbicka A, Yao M. 「如何將新冠肺炎在室內的空氣傳播降到最低？」《國際環境》，142:105832，2020年。

Murakami S, Kato S, Nagano S, Tanaka S. 「重力沉降 in a 在對流主導的室內流場中空氣微粒受氣流沉降影響的擴散特徵」《美國採暖、製冷與空調工程師學會紀要》，98（1）:82-97，1992年。

美國國家學院「紫外線（UV）是否能殺死冠狀病毒？」《科學根據》2020年4月22日刊行。參照：<https://www.nationalacademies.org/based-on-science/covid-19-does-ultraviolet-light-kill-the-coronavirus>。

Nichols S, Auxier J. 「氣流與電梯：為判定電梯乘客暴露於新冠肺炎相對風險所進行的氣流研究之重點」奧的斯電梯公司，2021年1月。

Nielsen P V 「電腦模擬人的標竿試驗」《室內空氣》，14.7. 2003:144-156。

Noakes C J, Khan M A I, Gilkeson C A 「模擬上層空間紫外線殺菌放射系統在多房間環境中的感染風險及耗能」《建築物環境科學與技術》，21:99-111，2015年。

Poussou S B, Mazumdar S, Plesniak M W, Sojka P E, Chen Q. 2010年。「移動者在客機機艙內造成的氣流和汙染物傳播：模型實驗與計算流體動力學的預測」《大氣環境》，44（24）:2830-2839。

加拿大公共衛生局。「健康照護環境的預防與控制：加拿大流行性感冒大流行準備：保健部門規劃指南」。參照：<https://www.canada.ca/en/public-health/services/flu-influenza/canadian-pandemic-influenza-preparedness-planning-guidance-health-sector/prevention-and-control-of-influenza-during-a-pandemic-for-all-healthcare-settings.html>。

Shao S, Zhou D, He R等人「無症狀者在不同實際環境中透過空氣傳播新冠肺炎的風險評估」《氣霧傳染科學期刊》，151:105661，2021年。

Singh N, Kaczmarczyk S, Ehrl T 「升降系統中的氣流效應分析」。2017年英國北安普頓大學第七屆升降機與電梯技術座談會。

Speake H, Phillips A, Chong T, Sikazwe C, Levy A, Lang J, Scalley B, Speers D J, Smith D W, Effler P, McEvoy S P 「全基因體定序證實的嚴重急性呼吸道症候群冠狀病毒2型搭乘班機傳染」《新興傳染病》，26（12）:2872-2880，2020年。

Smagorinsky J. 「使用原始方程式I的一般計算實驗：基本實驗」《天氣評論月刊》，91:99-164，1963年。

Song D, Lim H. 「在高樓大廈電梯井空間應用機械通風來減緩操作階段下的煙囪效應」，23（1）:81-91，2014年。

Song F, Zhao B, Yang X, Jiang Y, Gopal V, Dobbs G, Sahm M. 「室內環境使用機械通風的分區模型建立新方法」《建築物與環境》，43:278-286，2008年。

美國環境保護署2020年1月29日發表的「冠狀病毒病例促使環境保護署快速反應」。參照：

<https://www.epa.gov/pesticides/coronavirus-cases-trigger-epa-rapid-response>

Walker C M, Ko G. 「紫外線殺菌放射法對病毒氣霧的功效」《環境科學與技術》，41:5460-5465，2007年。

Walkinshaw D S. "Germs, Flying and the Truth." ASHRAE Journal, 52:70-73. 2010.

Wang J, Chow T T. 「在醫院人移動對空氣中感染性微粒傳播的影響」《建築物效能模擬期刊》，8（4）:205-215，2015年。

Wang L, Dols W S, Chen Q. 「使用CONTAM 3.0的計算流體動力學功能來模擬建築物內和周圍的氣流與污染物傳播」《暖通空調與製冷研究》，16（6）:749-763，2010年。

世界衛生組織。科學簡報：「新型冠狀病毒的傳播：對感染預防措施的涵義」，2020年7月9日，參照：

<https://www.who.int/publications/i/item/modes-of-transmission-of-virus-causing-covid-19-implications-for-ipc-precaution-recommendations>。

Xie C, Zhao H, Li K, Zhang Z, Lu X, Peng H, Wang D, Chen J, Zhang X, Wu D, Gu Y, Yuan J, Zhang L, Lu, J. 「在中國廣州報告的新型冠狀病毒間接傳播證據」，《BMC大眾健康》，20（1）:1-9，2020年。

Xu P, Kujundzic E, Peccia J, Schafer M P, Moss G, Hernandez M, Miller S L. 「環境因素對於上層空間空氣中的紫外線殺菌照射法消滅空氣中分枝桿菌的功效之影響」《環境科學與技術》，39（24）:9656-9664，2005年。

Xu P, Peccia J, Fabian P, Martyny J W, Fennelly K P, Hernandez M, Miller S L. 「上層空間空氣中的紫外線殺菌照射法對於消滅空氣中細菌孢子和分枝桿菌的功效之原尺寸研究」《大氣環境》，37:405-419，2003年。

Yakhot V, Orszag S A 「亂流的重整化群分析」《科學運算期刊》，1:3-51，1986年。

Young L, Wormser G. 「結核桿菌重現蹤跡」《北歐傳染病期刊》補遺，93:9-19。

You R, Lin C H, Wei D, Chen Q. 「評估使用不同空氣分配系統的商務班機機艙環境」，《室內空氣》，29（5）:840-853，2019年。

Yu L, Peel G K, Cheema F H, Lawrence W S, Bukreyeva N, Jinks C W, Peel J E, Peterson J W, Paessler S, Hourani M, Ren Z. 「暖氣空調消毒系統捕捉和消滅空氣中的新型冠狀病毒以控制新冠肺炎散佈」《當今材料物理學》，15:100249，2020年。

Zhang L, Li Y. 「高鐵車廂客滿咳嗽微粒散佈」《建築物與環境》，47:58-66，2012年。

Zhang R, Li Y, Zhang A L, Wang Y, Molina M J. 「確認空氣傳播是新冠肺炎傳播的主要途徑」《美國國家科學院院刊》，2020年。

Zhang Z, Zhai Z Q, Zhang W, Chen Q. 「計算流體動力學預測封閉環境中氣流與亂流的各種亂流模型之評估：第二部分 – 與文獻實驗數據比較」《暖通空調與製冷研究》，13:871-886，2007年。

Zhou Y, Shen J. 「在發燒門診中的人產生氣霧微粒傳播之實驗和數據研究」《建築物與環境》，187，2020年。

Zemouri C, Awad S F, Volgenant C M C, Crielaard W, Laheij A M G A, de Soet J J. 「Modeling of the Transmission of 冠狀病毒、麻疹病毒、流感病毒、結核桿菌及退伍軍人桿菌在牙醫診所內傳播之模型建立」《口腔醫學研究期刊》，（9）:002203452094028，2020年。