

# 線性滑軌模擬流程

## Simulation for Linear Guideways

林俊志

財團法人車輛研究測試中心

Email : [cclin@artc.org.tw](mailto:cclin@artc.org.tw)

### 摘要

本文藉由 ABAQUS 求取滑軌在載重且重心偏移的情況下，各滾珠所產生的反力，藉由局部的 model 分析確認滾珠在靜負載下應力值是否有超過所設定之限制值，並且計算滑軌使用壽命是否有達到設計需求。

因滾珠滑軌屬於大量接觸面計算的問題，在使用 CAE 套裝軟體求解時，往往因為接觸收斂性的問題，導致 debug 時間過長。

因此本文採用的方法為，簡化整組 model 滾珠滑軌部分，將其與滾珠之接觸點，假設為點接觸並簡化成一直線力量傳遞，因此只要將滑軌上的 node 與相對應與滾珠接觸的 node 在連線的軸向上，以 Coupling 連結，求取其接點反力，再以此反力，套入局部 model 的 load 數值，分析確認滾珠在靜負載下應力值是否有超過所設定之限制值；再求取其接點反力並取出平均工作負荷，將其套入滑軌使用壽命公式，確保其滑軌規格符合設計。

**關鍵字：**滾珠滑軌、ABAQUS

### 一、緒論

利用 CAE 軟體模擬機構時，常常會遇到接觸收斂性的問題，其中最為典型的就為滾珠滑軌。

滾珠滑軌其應用於各個領域上，由於滑軌在載重並且移動時，重心會產生偏移，且滑軌行程時間大都相當的長，因此不適合以 Explicit 求取，故接觸收斂性的問題，就變得十分棘手，因此本文利用一簡易的模擬流程，藉此評估線性滑軌是否符合設計規格。

### 二、文獻回顧

#### 2.1 線性導軌簡介

沒有導軌的運動物體，它的運動方向完全取決於作用力的方向，因此導軌元件在機構中扮演著引導的角色。導軌的接觸方式大致可分為接觸式與非接觸式，接觸式最常見的例子就是火車的導軌，而非接觸式就屬磁浮列車的導軌最為典型。表 1 為各種導軌的特性分析

表 1、導軌的特性分析[1]

項目、導軌形式	滑動	滾動	靜液壓	靜氣壓	磁性
摩擦係數	大	中	中	~0	~0
滯滑(stick slip)	有	很小	無	無	無
移動精度	低	中	高	高	高
移動距離	長	長	中	中	中
移動速度	慢	中	中	快	高
剛性	高	中	中	低	小
壽命	短	中	長	長	長
發熱	高	中	中	~0	少

本文是採用滾動式導軌，滾動式導軌的靜摩擦力及動摩擦力差異很小，且不易發生滯滑(stick slip)，在價格上也相對的便宜，因此在工業上十分常見。一般滾動式導軌已量產化，因此設計者只需針對設計規格挑選合適的規格品，其所需考慮的設計值為導軌幾何尺寸、容許負載、移動精度等...。圖 1 為線性導軌架構示意圖

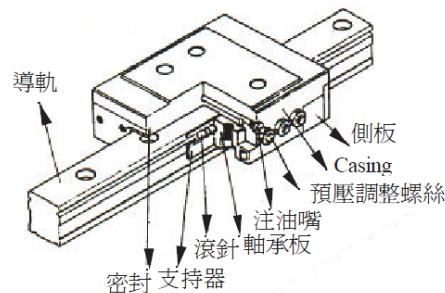


圖 1、線性導軌架構圖[2]

#### 2.2 滾動元件接觸系統

滾珠在滑軌與滑塊之間的接觸型式，可分為哥德弧(Gothic-arc)四點接觸型，或是圓弧(Circular-arc)兩點接觸型(如圖 2 所示)。

哥德弧接觸型由滾動元件接觸區表面各點，到迴轉中心的距離差異較大(如圖 2 中  $d_1$  及  $d_2$ )，產生明顯的速度差。因此具有

較大的差動滑動，意指滾珠表面會因運動速度差異而有相對滑動。同時，因四點接觸的拘束性相對較強，所以局部剛性較為明顯；若安裝誤差較大時，線性滑軌將出現異常受力的現象，導致磨耗量增加進而造成壽命縮短，因此哥德弧接觸型需有較高的安裝精度，才能確保其順暢度與壽命。[3]

圓弧接觸型，藉由適當的接觸角度，達到理想的兩點接觸構造設計，其差動滑動量小，且因兩點接觸相對於較小的拘束，使得局部的剛性較小，接觸點可在小範圍內移動，產生所謂的「自動調心」的效果。即使安裝有些許偏差對於整體滑動上，並不會產生太大的影響。[3]

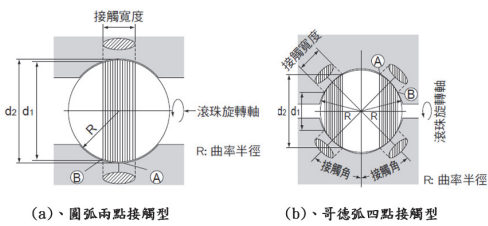


圖 2、線性導軌滾動接觸種類[4]

### 2.3 Hertz 接觸理論

兩個曲面物體互相擠壓時，在接觸部位鄰近的應力稱之為接觸應力。

接觸應力對滾珠滑軌的接觸疲勞和磨損有重要的影響，在很大程度上決定著滾珠滑軌的壽命，由於接觸面很小，即使負荷不大，接觸應力也可能相當的高。通常，滾珠滑軌內的接觸應力在4200MPa~4600MPa之間[5]。

Hertz 最早研究兩個彈性體的接觸問題，在某些簡化假設下求得接觸面的壓力分佈以及物體內的應力。計算結果和試驗很符合，表達型式也較簡單，至今仍然是滾珠滑軌應力計算的主要方法。

接觸面的形狀與尺寸影響到物體間的磨擦。只有在理想的點接觸時，才能產生純滾動。一旦形成接觸面必然伴隨著滑動，這在計算滾動軸承的摩擦時是必須考慮的因素。

在 1881 年，Hertz 求得接觸應力及變形的解，在此計算下，採用了下列的基礎假設：

(1).接觸物體只產生彈性變形，且依循虎克(Hooke)定律，採用線彈性力學的理论

及方法。其接觸處的總塑性變形量不超過滾動體直徑的萬分之一。

(2).不計算接觸物體之間的摩擦力，且負載垂直於接觸面。

(3).接觸面的尺寸與接觸物體表面的曲率半徑相比是很小的，意指接觸變形相當小。

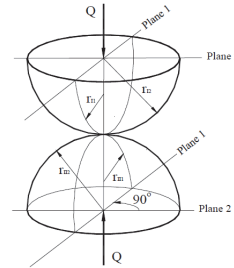


圖 3、兩光滑曲面的 Hertz 接觸圖

### 2.4 滑軌使用壽命(L)計算

當線性滑軌承受負荷並作直線運動時，球槽表面與滾動元件因不斷地受到循環應力的作用，一但到達滾動疲勞的臨界值，接觸面就會開始產生疲勞破損，並在部分表面產生魚鱗狀薄片的剝落現象，此種現象叫做表面剝離。壽命(L)的定義即為軌道表面及滾動元件因材料疲勞而產生表面剝離時的總運行距離。

線性滑軌的壽命會因實際承受的工作負荷不同而不同，可依選用線性滑軌的基本額定動負載(C)及工作負載(P)推算出使用壽命，根據文獻[5]：

不考慮環境因素影響，壽命計算如下所示：

$$L = \left( \frac{C_{50B}}{P} \right)^3 \times 50 \text{ Km}$$

其中，L 為額定壽命， $C_{50B}$  為基本額定動負荷(公稱壽命 50 公里)，P 為平均工作負荷。

### 三、滾珠滑軌模擬流程

本文所採用的滑軌型式為圓弧兩點接觸型，為避免求取整機組裝 model 因局部網格細化以及接觸面過多導致計算量過於龐大，因此採用滑軌特性計算流程(如圖 4 所示)，藉此確認其滑軌規格是否達到設計需求。

圖 5 為滑軌一般的使用情況，承載物體鎖於滑座上，而導軌固定於端點處，使得滑座在導軌上可進行往復移動。

滾珠在滑座與導軌之間，所受反力並非固定值，因此本文藉由 ABAQUS 求取滾珠滑軌在承載物體移動時，各個滾珠的反力，藉此計算滾珠滑軌靜負荷是否達到設計值，亦可由此求得平均工作負荷，進而計算滑軌的使用壽命。

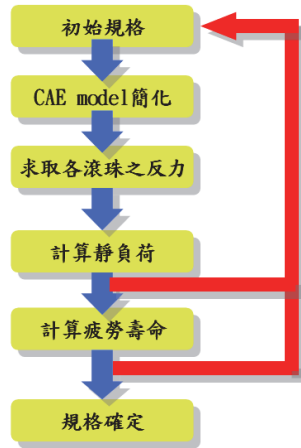


圖 4、滑軌特性計算流程圖

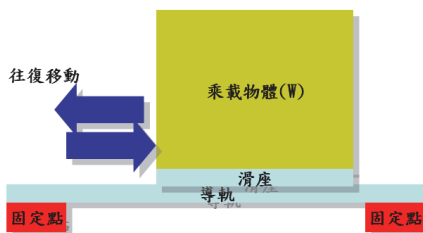


圖 5、滑軌計算示意圖

### 3.1 滑軌 model 簡化說明

假設其滾珠位置不產生偏置且其接觸為點接觸，因此在滾珠與導軌的點接觸位置，利用 Coupling 連接滾珠與導軌之間的接觸點，並且假設其滾珠為剛體，其中滾珠的接觸 node 需要對齊滑軌的 node。

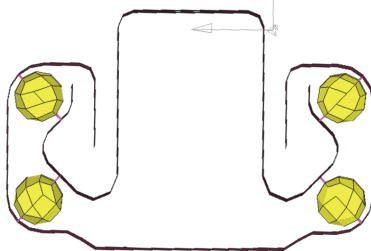


圖 6、滑軌 model 簡化示意圖

## 四、模擬結果

### 4.1 靜負荷計算

靜負荷模擬示意圖，如圖 7 所示，計算其滾珠及導軌內壓應力是否有超過 4200MPa，若有超過滑軌規格將進行修改。

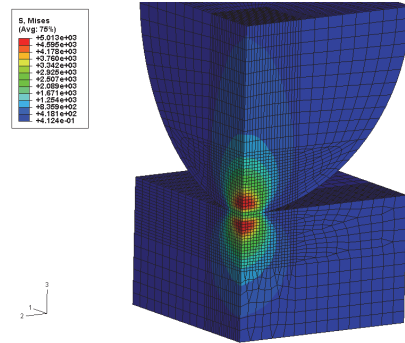


圖 7、靜負荷計算結果示意圖

### 4.2 疲勞壽命計算

藉由簡化的 model 計算其各滾珠在各個部位的反力，進而求取出平均工作負荷，套入公式計算滑軌使用壽命(L)，若未達設計值其滑軌規格將進行修改。

滑軌使用壽命公式如下：

$$L = \left( \frac{C_{50B}}{P} \right)^3 \times 50 \text{ Km}$$

其中  $C_{50B}$  為基本額定動負荷，此為產品規格。

## 五、結論

本文利用一簡易的計算流程，避免整機組裝 model，因局部網格細化以及接觸面過多導致計算量過於龐大，甚至無法收斂之情況，藉此求得靜負載以及滑軌使用壽命。

## 六、參考文獻

- [1] 謝尚鋒，虛擬雙軸線性滑動平台剛性分析及動態模擬，國立雲林科技大學機械工程學系碩士論文。
- [2] 井澤 實著，杜光宗 編譯，精密訂位技術及其設計技術，建宏出版社，1992。
- [3] 沈家緯，低組裝型線性滑軌的基本特性分析，機械月刊 2012 年 9 月號。
- [4] THK，LM 導軌產品型錄。
- [5] ISO 14728-2, Rolling bearings-Linear motion rolling bearings-Part 2: Static load ratings, 2004.