捷運與輕軌供電系統電腦化模擬(上)—列車運行模擬

曾乙申

摘　要

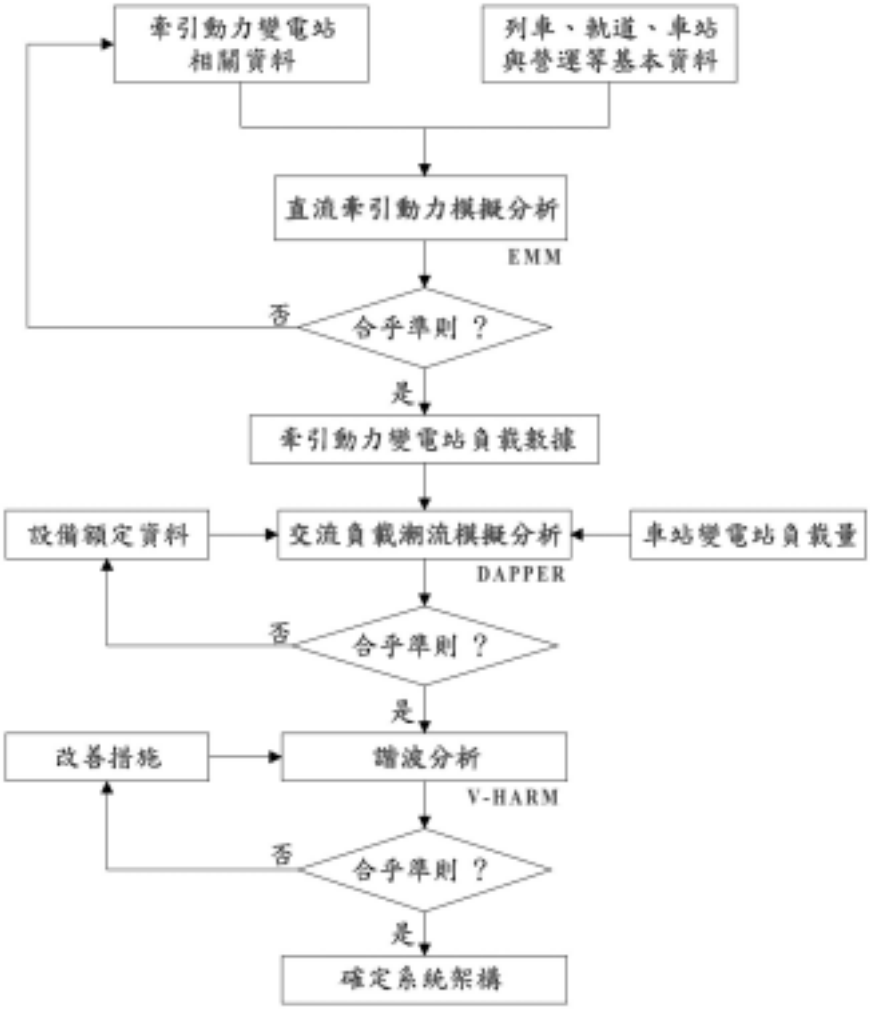
本文之目的在於介紹一套應用於規劃設計使用的本土化直流電化鐵路供電系統模擬軟體。該軟體之模擬功能計有列車運行模擬、直流電力分析、雜散電流分析、交流電力分析、頻率掃描與諧波分析六項。為切合工程規劃設計單位的需求，各模擬項目係針對實際系統的特性與控制策略而開發。經過嚴謹的分析與比較，證實本文所介紹之模擬軟體的確具有相當高的可信度，可提供業界做為捷運與輕軌供電系統架構之建立與驗證的輔助工具。由於軟體之模擬功能甚多，為求詳盡說明各模擬項目，茲將全文拆為列車運行模擬、直流系統分析(直流電力分析與雜散電流分析)與交流系統分析(交流電力分析、頻率掃描與諧波分析)三部份分別探討。本文為全文之第一部份，內容為列車運行模擬之介紹。

關鍵詞：捷運系統、輕軌運輸系統、列車運行模擬、直流電力分析、雜散電流分析、交流電力分析、頻率掃描、諧波分析

亞東技術學院 電機系 副教授

一、研究動機

捷運供電系統之主要模擬項目計有三項，分別為直流電力分析、交流電力分析與諧波分析【黃，1987】。由於具備分析整體供電系統功能之電腦模擬程式撰寫不易，因此，大部分的電聯車製造商、供電系統承包商與捷運局規劃設計單位通常都採用數個具部份模擬功能的電腦軟體，分次進行個別項目的模擬分析。以台北捷運局為例，規劃設計人員所採用之供電系統模擬軟體，計有 EMM【Uher, 1986】、DAPPER【SKM, 1989】與 V-HARM【Copper, 1991】三套。此三套軟體係分別用於進行直流電力分析、交流電力分析與諧波分析三項模擬，其模擬分析流程如圖一所示【黃，1987】。



圖一　捷運供電系統模擬分析流程

針對每一模擬項目使用一套單一用途的商業化軟體，不僅須花費可觀的購置費用，且各套軟體之間往往不具資料共享的功能，造成使用者操作上極大的不方便。

又，由於所購置之軟體通常無法完全掌握各捷運系統的特性，因此，使用者必須配合軟體的限制，對系統模型做較多的近似與假設，其模擬結果的準確性不易掌握。為克服使用多套軟體才能進行供電系統模擬的諸多問題，本文提出一套整合列車運行模擬、直流電力分析、雜散電流分析、交流電力分析、頻率掃描與諧波分析的捷運與輕軌供電系統模擬軟體—**DCRAIL**。

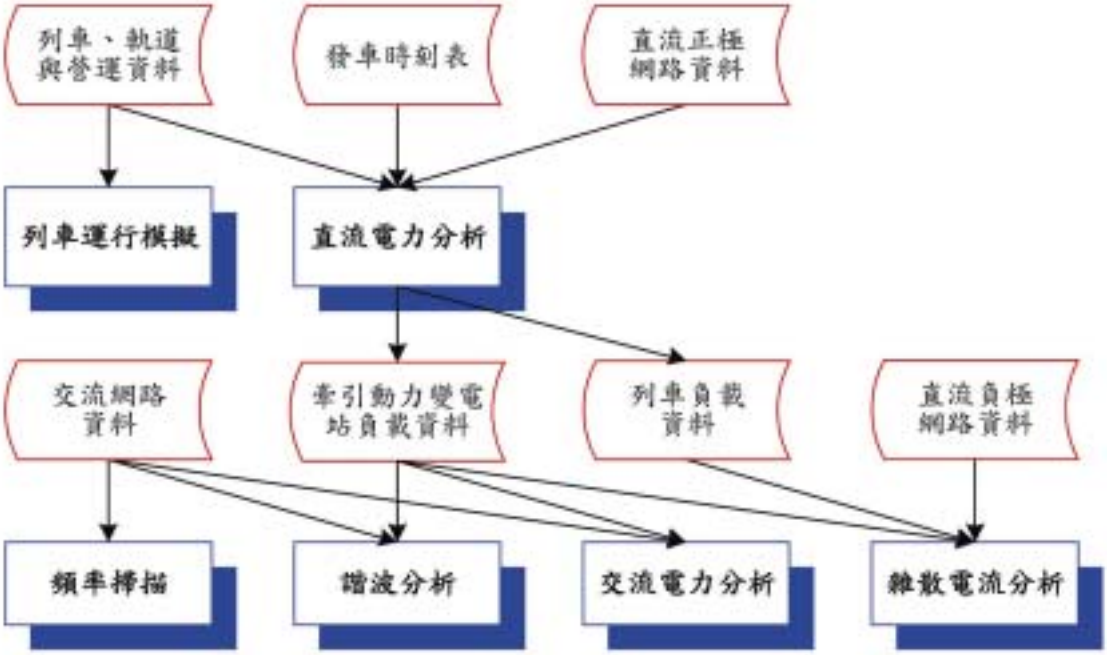
二、模擬軟體簡介

DCRAIL 的開發可溯及 10 年前作者就讀博士班之際, 其時以論文發表為軟體開發的首要考量，因此軟體之學術氣息甚濃，所採用之系統模型頗為複雜，人機操作界面亦不夠親和，且不具備圖形輸出功能【曾，1995】。原始版本之 **DCRAIL** 具有交/直流電力分析、頻率掃描與諧波分析三個主要的 Fortran 程式。之後，在原有的軟體架構上又加入多列車運行模擬程式【曾，1998】，完成列車運行模擬程式與交/直流負載潮流分析程式的整合。不久前，在財團法人中華顧問工程司的研發經費支援下，將原先開發的 **DCRAIL** 程式完全改寫，除增加視窗輸出入功能，大幅改進軟體之人機界面的親和性之外，並配合捷運供電標承商送審作業需求，以直流電力分析與交流電力分析兩個各別執行的程式取代原先整合為一的交/直流電力分析程式，同時加入考慮自動列車操作(Automatic Train Operation, ATO)功能的列車運行模擬功能【曾，2001(a)】。最近，與中鼎工程股份有限公司合作，又為 **DCRAIL** 增加一項新的模擬項目—雜散電流分析【曾，2001(b)】，至此 **DCRAIL** 之模擬功能已趨完備。

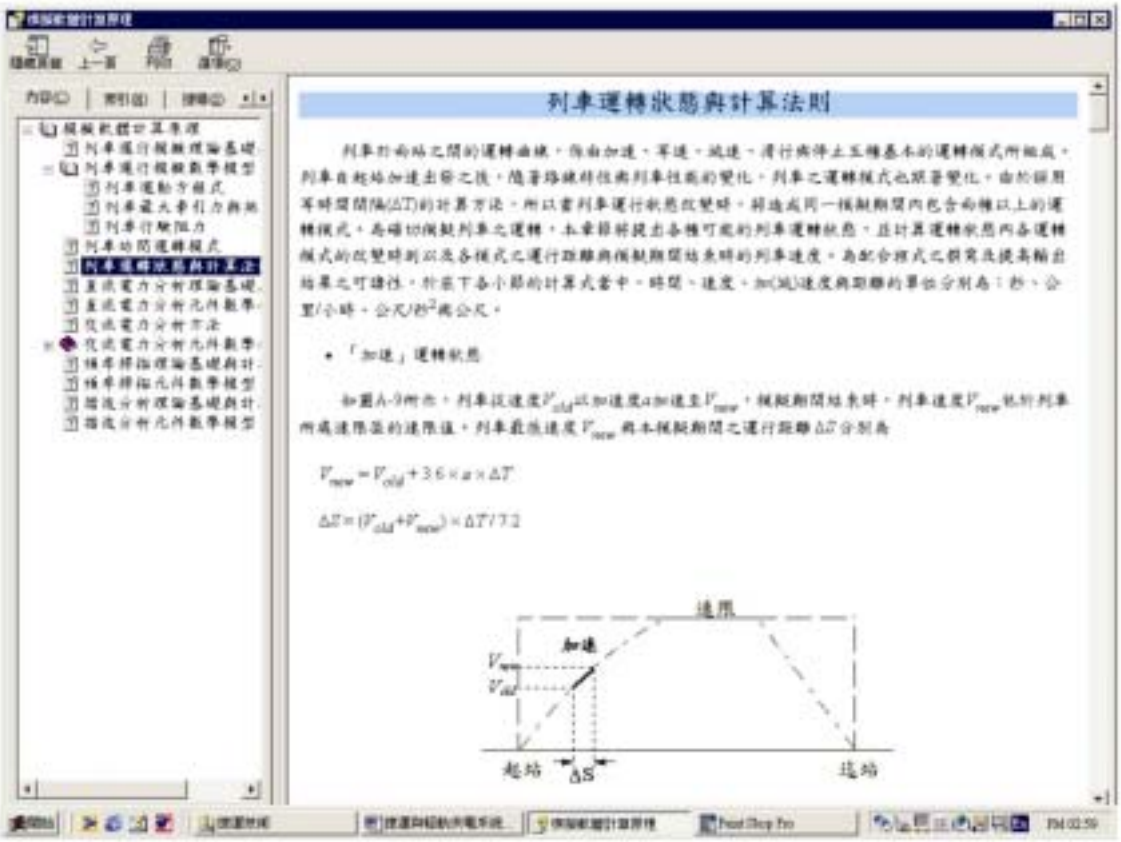
新版之 **DCRAIL** 的基本架構包括「系統模擬模組」與「輸出入模組」兩大部份，如圖二所示。「系統模擬模組」係由列車運行模擬、直流電力分析、交流電力分析、頻率掃描、諧波分析與雜散電流分析六個模擬程式所組成。圖三所示為此六項系統模擬項目之執行流程。除上述的模擬的功能之外，本軟體之「系統模擬模組」亦提供線上操作的計算原理說明程式，讓使用者明瞭各項模擬所採用的數學模型與計算方法。該說明程式係以 HTML 所撰寫，如圖四所示；「輸出入模組」則是處理「系統模擬模組」各程式之資料輸入與結果輸出的人機界面程式，該模組包括檔案建構、資料庫與繪圖等三個子模組。檔案建構模組之功能，在於將捷運與輕軌供電系統之列車、軌道路線以及供電系統等各項原始資料轉換為一系列的輸入資料檔，提供「系統模擬模組」的六個模擬項目使用。為使操作者更清楚地掌握各輸入資料檔與模擬結果輸出檔的格式，檔案建構模組亦提供輸出入檔案格式定義的 HTML 說明檔，如圖五所示。資料庫模組之功能有二，其一為新增模擬系統資料庫，另一為瀏覽或刪除現有系統資料庫(所有輸入與輸出檔)。圖六所示為檔案瀏覽之範例畫面。繪圖模組之功能，係用以將系統模擬之輸出結果從文字檔的形式轉換為圖形的顯示方式，提高模擬結果的可觀察性。圖七所示為列車運行模擬結果之繪圖範例畫面。

為提高模擬軟體之親和性與實用性，有關列車、軌道路線、營運與供電系統等資料庫之建立以及輸出結果之繪圖作業的「輸出入模組」中文視窗化程式，係以 Microsoft Visual Basic (VB) 6.0 套裝軟體撰寫。至於「系統模擬模組」之各項模擬程式，因均涉及複雜之計算，故使用具有強大科學計算能力的 Fortran90 語言撰寫之，並使用可接受中文字型的 Microsoft Fortran PowerStation 4.0 加以編譯。上述 VB 程式與 Fortran 程式之間的連結，採用文字檔互傳的型式處理，即，以 VB 完成輸入資料的處理之後存檔，再啟動相關的 Fortran 程式執行檔執行各「系統模擬」項目，「系統模擬」完成之後輸出存檔，提供 VB 程式之視窗輸出處理。

圖二 捷運與輕軌供電系統模擬軟體主操作視窗

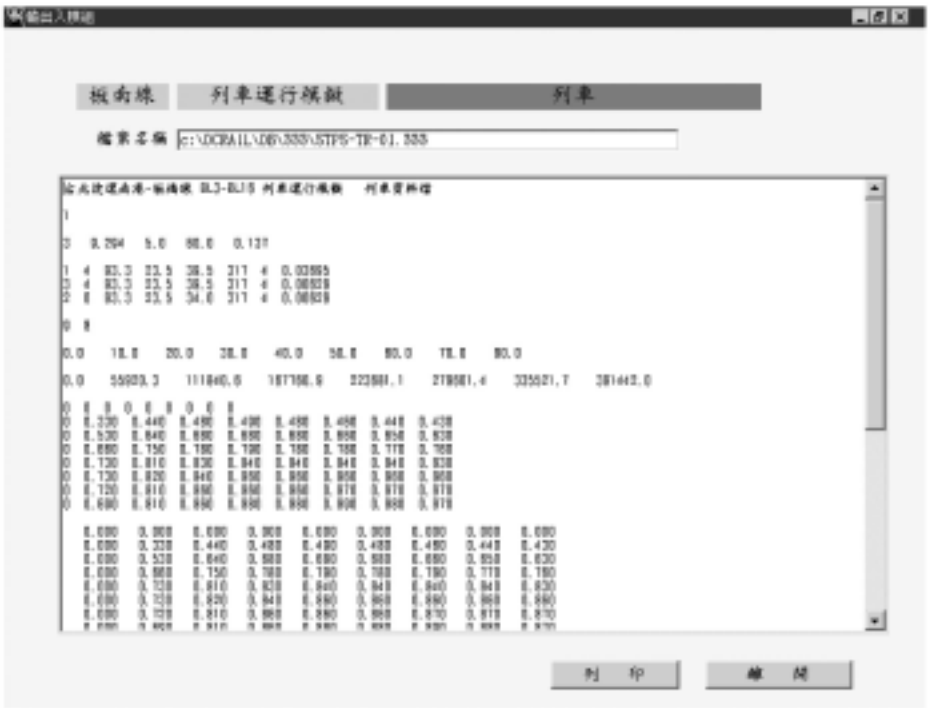


圖三　捷運與輕軌供電系統模擬項目與執行流程

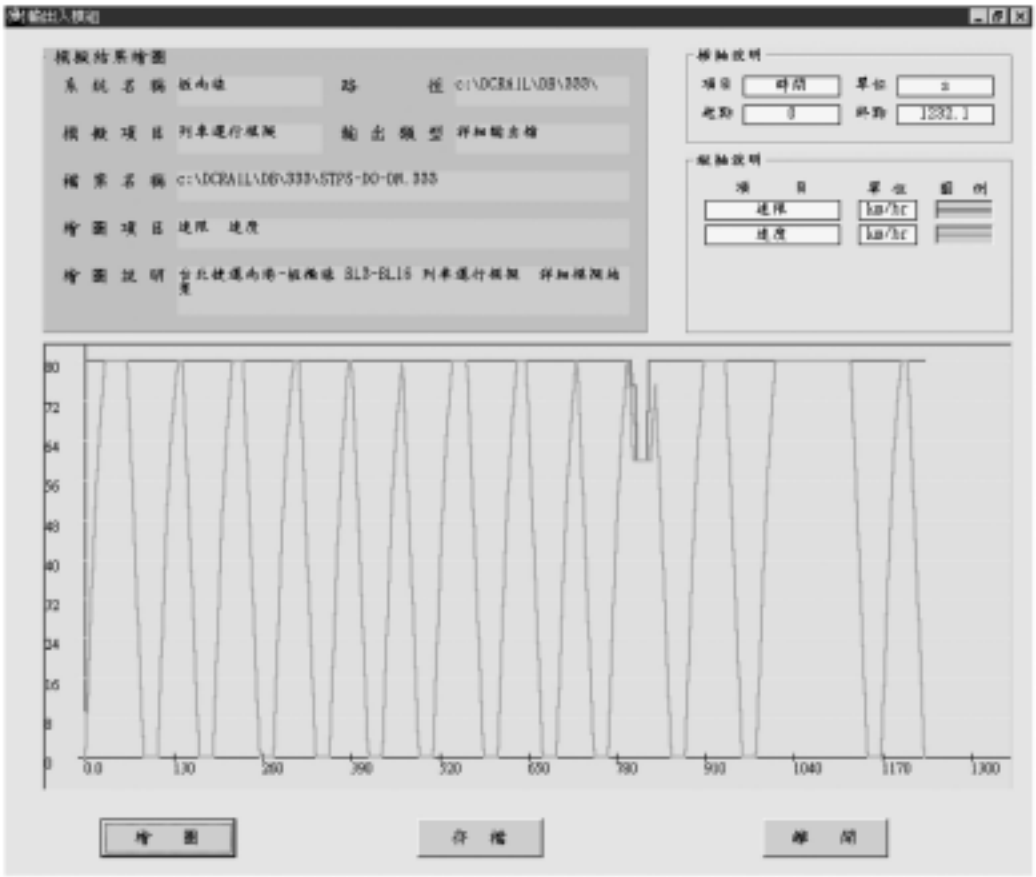


圖四　模擬軟體計算原理說明視窗

圖五　模擬軟體輸出入檔案格式定義說明視窗



圖六　資料庫模組範例—列車資料輸入檔瀏覽畫面



圖七　繪圖模組範例—速限與列車速度變化顯示畫面

三、列車運行模擬原理與數學模型

℃列車運行模擬理論基礎與計算流程

列車運行模擬係以運動方程式為理論基礎，預測單一列車在軌道路線上運行時的機械與電氣行為，包括列車於線上各處之牽引力、行駛阻力、加速度、速度、功率與能源消耗以及各站間之運轉時分…等。就供電系統的研究範疇而言，列車運行模擬可提供列車負載(位置與功率)資訊。

大部分之列車運轉模擬程式對於列車在兩站間之運行速度的估算，多採用前推計算與後推計算兩個步驟的組合來完成【Uher, 1986】。圖八所示為典型之列車站間運行速度示意圖，在不考慮滑行的情況下，列車自起站 A 處經加速、等速與減速三個運行模式的組合，行駛至迄站 G 處，其前推計算與後推計算過程如下：

㊀前推計算($A \rightarrow B \rightarrow H$)：列車自 A 處出發之後，以不超過列車加速度限制值之最大可應用加速度(由列車最大牽引力曲線決定之)加速前進直到 B 點，於該點列車速度已達速限值 V_{max1}，之後列車以 V_{max1} 等速前進直到 H 點，此時速限值由 V_{max1}

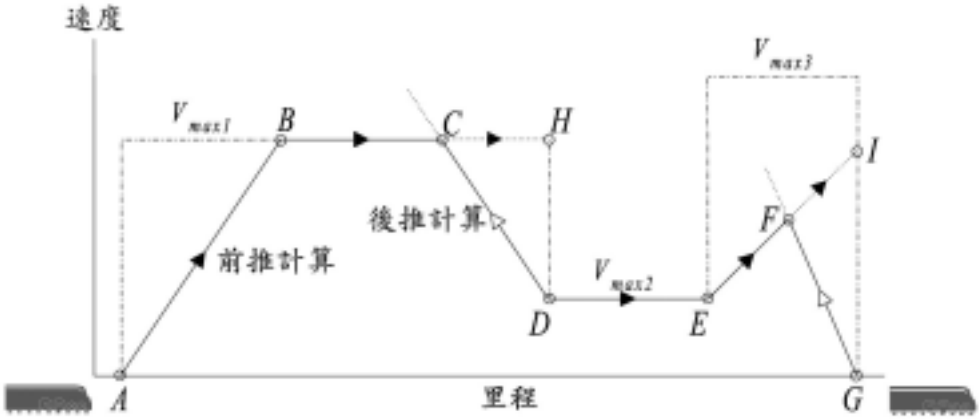
降低為 V_{max2}。

IL 後推計算($D \rightarrow C$)：基於旅客舒適度的考量，列車之減速度與急衝度皆有其極限值，因此，列車在抵達 H 點之前(即圖中之 C 點)必須以適當的減速度由較高的速限 V_{max1} 煞車至較低的速限 V_{max2}。後推計算之目的即在決定煞車點 C，實際的做法為：由 D 點以固定減速度(通常為列車之最大減速度限制值)反推加速，直到後推曲線與前推曲線相交為止，此相交點即為所求之煞車點 C。

IT 前推計算($C \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow I$)：求得煞車點 C 之後，列車以固定之減速度煞車至 D 點，接著以等速度 V_{max2} 行駛至 E 點，此時路線之速限已提高為 V_{max3}，因此，列車通過 E 點之後將再度加速前進，直到下一個停靠站為止。列車駛進停靠站之速度理應減速為零，惟本次前推計算之最終速度並非為零，所以又必須由迄站 G 點做後推計算求出煞車點 F。

IR 後推計算($G \rightarrow F$)：從 G 點以固定減速度由 $V=0$ 反推加速，直到後推曲線與前推曲線相交為止，此相交點即為進站前之煞車點 F。

IC 前推計算($F \rightarrow G$)：求得煞車點 F 之後，列車以固定之減速度煞車至迄站 G 點。



圖八　列車站間運行速度示意圖

由上述的說明不難發現，若列車運行模擬程式採用後推計算的方法來求取實際的煞車點，則在程式撰寫時，必須將列車速度及行車距離兩變數以陣列的方式來儲存，以便將前推計算中任一計算時刻的速度與距離資料記錄起來，如此才能找到後推曲線與前推曲線的相交點(時刻)，即真正的煞車點。以陣列方式儲存任一計算時刻之列車速度及距離變數，非得使用大量的記憶體不可，如果路線甚長或速度限制區塊數甚多，則模擬程式之執行速度必然低落而無效率。再者，以即線(On-line)之後推計算方式求取列車煞車點，亦將造成記憶體(用以儲存真正煞車點之後的列車速度及距離資料)的浪費，並增加模擬程式之執行時間。有鑒於上述之即線式後推計算的弊端，本模擬軟體改採離線(Off-line)的後推計算方式，亦即在列車運行模擬程式開

始執行之前，先行以固定之煞車減速度(即常態減速度)計算出所有的煞車點。如此，列車之速度及距離變數就不用宣告為陣列的型式，而且在模擬程式實際執行時，也可省下後推計算的工作，既節省記憶體又可縮短模擬程式的執行時間。

圖九所示為本軟體之列車運行模擬的概要流程圖，其執行步驟解說如下：

- 輸入列車、軌道路線與系統營運資料。
- 由步驟(1)取得軌道路線資料之後，採固定之煞車減速度，以後推計算法求出全線(上、下軌)所有的煞車起始位置(預定煞車點)。
- 模擬程式執行前之列車變數與系統操作變數初始值設定，包括：列車速度、運行距離及運轉時間的初值設定。
- 根據列車目前之行駛速度、所處位置之坡度與曲度，計算列車各項行駛阻力。
- 依據列車前一時刻之行駛速度、牽引力(煞車力)、行駛阻力以及列車所處位置之加速度與速度限制值，決定列車新的運轉狀態(加速、等速、滑行、煞車或靠站)，並利用運動方程式計算列車新的加速度、速度、距離、功率與能源消耗。
- 終點站之判斷－若列車尚未抵達終點站，則更新模擬時間，回到步驟(4)重複執行，直到列車已行駛至終點站為止。

°F列車運動方程式

根據牛頓第二運動定律的描述可知，列車之淨加速力 F 等於列車之等效質量 M 與其運動之加速度 a 的乘積，即

$$F = 1000Ma \quad \text{(N)}$$

或

$$F = 1000(1+\frac{\alpha}{100})M_T a \quad \text{(N)}$$

其中，

$F =$ 列車加速力(N)

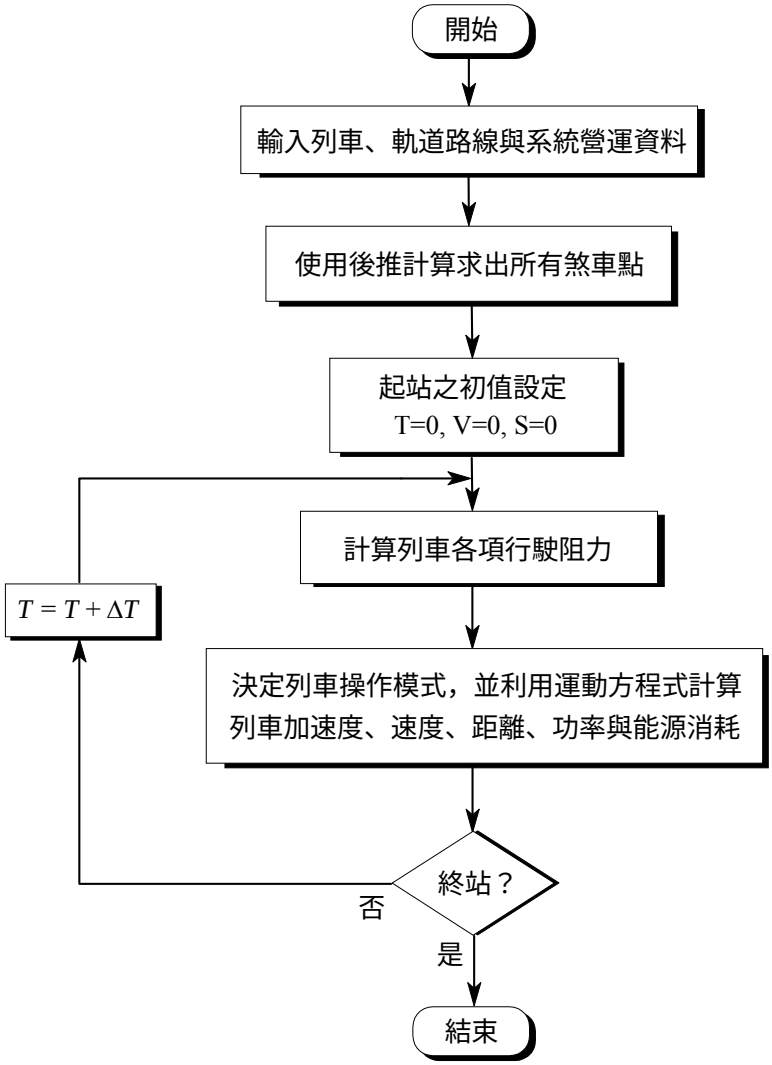
$M_T =$ 列車質量(ton)

$\alpha =$ 列車旋轉部之旋轉慣量係數(%)

$M =$ 含旋轉慣量之列車等效質量(ton)　($M = (1+\frac{\alpha}{100})M_T$)

$a =$ 列車加速度(m/s^2)

列車之淨加速力 F 係指列車動輪之輪周處的淨牽引力，亦即，列車之總牽引力 F_A 在克服列車行駛阻力 R 之餘，用以推動列車而產生行駛加速度的淨力，即 $F = F_A - R$。



圖九 列車運行模擬概要流程圖

a.列車站間運轉模式

列車行駛於兩站間之運轉模式，依速度與加速度之限制條件，可分為底下五種：

全動力加速行駛：列車出站後，以可用之最大加速度加足馬力全速行駛。此時之速度與加速度皆未達限制值，列車可用之牽引力則由列車的速度－最大牽引力曲線所決定。將 3.(五)節所述之各項行駛阻力代入列車運動公式，可得如下之加速度表示式。

$a = (F - R_R - R_A - R_g - R_c) / M \quad (\mathrm{m/s^2})$

部份動力加速行駛：當加速度已達到最大值時($a = a_{max}$)，或已加速至最大速度之後($a = 0,\ V = V_{max}$)，列車將以部份動力運轉，此時之牽引力將比速度－最大牽引力曲線所提供者為小。

滑行：當列車加速至最大速度後，為節省能源消耗，可停止馬達之操作($F = 0$)，

令列車無動力滑行。此時，加速度為

$a = -(R_R + R_A + R_g + R_c) / M$　(m/s^2)　IR

IR煞車減速：列車進站前須煞車減速行駛直到靠站為止，通常煞車期間之減速度可視為定值($a = -d_{max}$)。

IC停止狀態：列車靠站之後，關閉馬達之動力($a = 0, V = 0, F = 0$)，靜待旅客上下車。

加速度決定之後，在牽引力與速率未受到限制的情況下，列車牽引力可由(5)式求得，速度則以尤拉法(Euler's Method)依(6)式計算之。

$F = R_R + R_A + R_g + R_c + M a$　(N)　IC

$V = V_0 + 3.6\, a\, \Delta T$　(km/hr)　PN

其中，ΔT 為模擬時距(s)，V_0 為前一模擬時刻之車速。

求得列車速度之後，根據前一模擬時刻之列車位置 S_0，再利用梯形法則(Trapezoidal Rule)求取新的列車位置。

$S = S_0 + (V + V_0)\, \Delta T / 7.2$　(m)　HN

列車之輸出機械功率 P_o、輸入電功率 P_{in} 與能源消耗 E，則依(8)、(9)與(10)式分別求之。

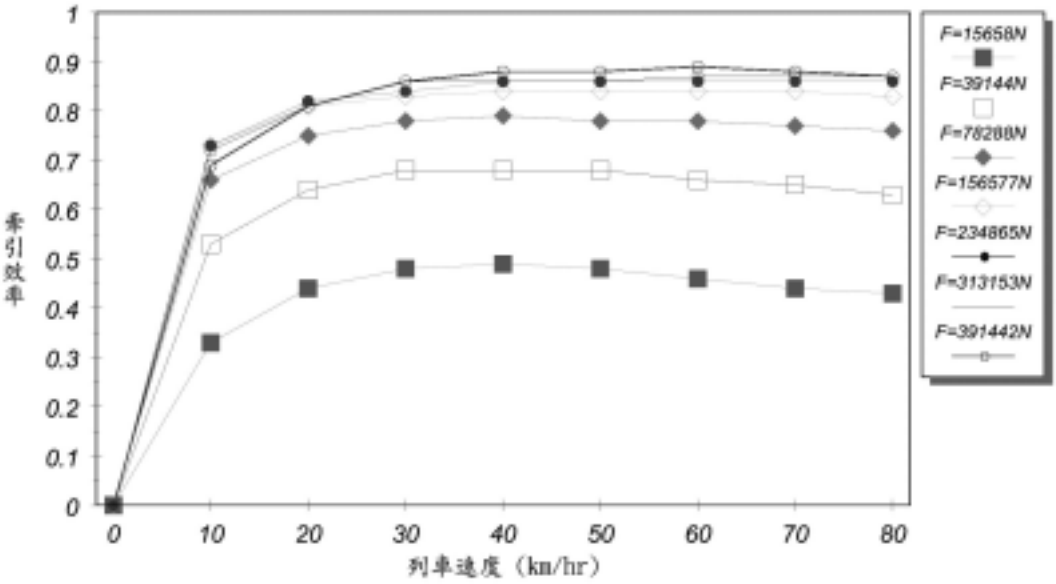
$P_o = F\, V$　(kW)　PD

$P_{in} = P_o / \eta + P_{aux}$　(kW)　HD

$E = E_0 + P_{in}\, \Delta T / 3600$　(kWH)　PL

其中，η為列車推進系統之效率，P_{aux} 為列車輔助負載功率，E_0 為前一模擬時刻列車之能源消耗。

上述列車推進系統效率η係指列車推進系統輸入電功率與輸出機械功率之間的比值。列車推進系統效率之高低，主要由馬達效率與齒輪效率的乘積所決定。由於馬達及齒輪效率皆與轉矩大小和轉速高低有關，因此，列車推進系統效率η可視為輪周牽引力 F 與列車速度 V 的函數，即 $\eta = f(F, V)$。推進系統效率 η 可以使用牽引力 F 與速度 V 的多項式形式($\eta = a_0 + a_1 FV + b_1 F + c_1 V + b_2 F^2 + c_2 V^2 + \ldots$)來表示，亦可採用建(查)表的方式(針對每一特定的牽引力，建立某些特定速度底下的效率值)配合內插法來完成。因多項式係數($a_0, a_1, b_1, c_1, \ldots$)之決定必須使用數值分析的技術，所以在實際應用上較為不便。再者，因不同車速與牽引力下的效率變化相當大，如圖十所示，往往無法以最小平方多項式近似法將效率表為車速與牽引力之方程式。相較之下，建(查)表的方式則較簡單、通用，故為本軟體所採用。牽引與煞車模式下之列車推進系統效率於或有不同，故應分別建立。

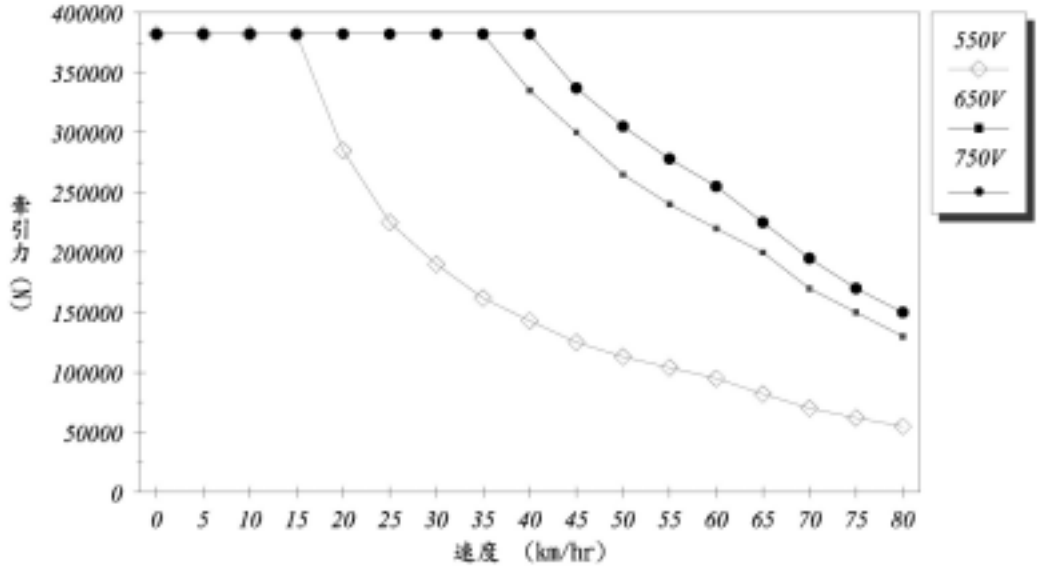


圖十 列車推進系統牽引效率曲線圖

p.m.列車最大牽引力與煞車力

列車於低速行駛時，推進系統所產生的的牽引力和煞車力受限於車輪與鋼軌之間的黏著力，而有最大的極限值。當馬達牽引力大於車輪與鋼軌之黏著力時，將造成車輪之空轉；相同地，如果馬達之煞車力大於車輪與鋼軌之黏著力，則會形成車輪之滑行。因此，列車剛啟動加速運轉或者即將靠站煞車停止時所產生的牽引力與煞車力，皆會受到輪軌黏著力的限制。除黏著力限制之外，列車之最大牽引力與煞車力亦受限於牽引馬達的額定出力。有別於低速時的黏著力限制，此馬達額定出力限制係出現於列車高速運轉的情況。當列車高速行駛時，實際所需的牽引力或煞車力通常低於牽引力(煞車力)圖表所示的最大極限值。由上述知，最大牽引力與最大煞車力曲線，僅當列車以全動力加速或減速時，才會被拿來檢討是否能夠提供足額的牽引力與煞車力。

因黏著力隨列車速度之變化而有所不同，牽引馬達的額定出力亦受限於馬達轉速(列車速度)，且列車速度又與列車操作線電壓有關。因此列車之最大牽引力為列車速度與線電壓的函數。圖十一所示為捷運板南線電聯車 W4 載重時的最大牽引力曲線圖【SIEMENS, 1995】。該圖僅針對列車線電壓為 550V、650V 及 750V 的情況，分別繪有三條對應的曲線。本軟體對於列車最大牽引力與最大煞車力的計算，係採用查表法－針對每一列車線電壓，每隔一定的速度間隔，建立牽引力與速度的關係表。當列車速度與線電壓介於圖示的特定值之間時，則採用內差法取得相對應的牽引力。



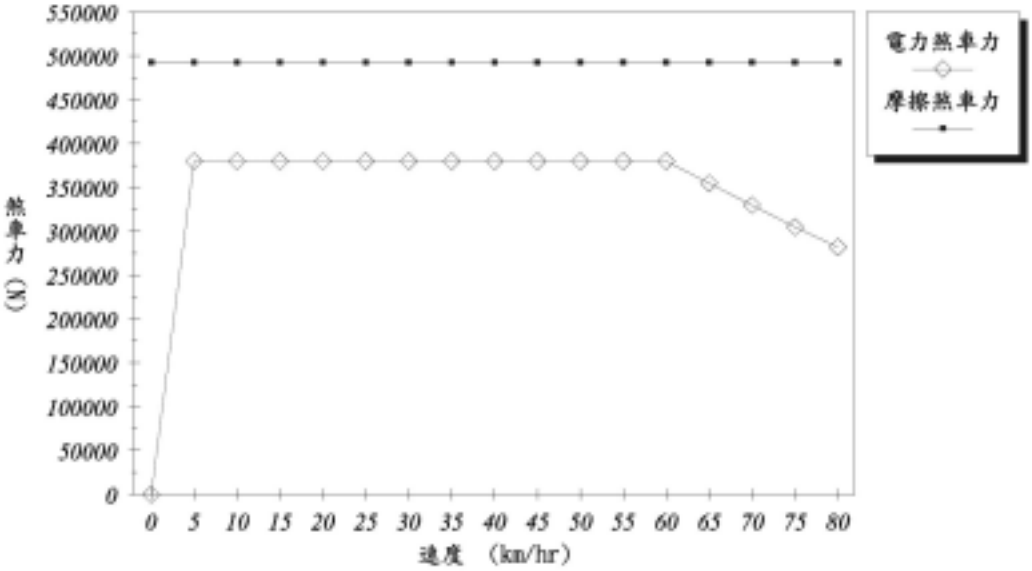
圖十一　列車速度－最大牽引力曲線圖

捷運電聯車之煞車方式，包括摩擦煞車與電力煞車兩種。摩擦煞車係利用軔塊摩擦車輪踏面，或利用煞車卡鉗夾住裝於輪心兩面之煞車碟片或夾住裝於車軸上之煞車碟輪而完成。電力煞車則是利用降低馬達定子繞組之旋轉磁場的同步轉速，使轉子因慣性作用而造成轉軸轉速高於同步轉速的情況，將電動機變為發電機運轉，因而產生煞車轉矩與再生功率。其所產生的電能可回送至直流供電系統，供線上其他電聯車使用，即所謂「再生式電力煞車」。若不將該能量回送直流供電系統，或因再生能量過高而無法有效的讓線上其他電聯車所使用，為避免列車線電壓過高，此多餘之電能將由裝置於車上的煞車電阻器化為熱能而消耗掉，則稱為「動態式電力煞車」。

於電聯車之一般營運煞車過程中，從最初的每小時 80 公里到完全停止，理論上是可以完全由電力煞車獨立完成，而無須使用摩擦煞車的。由於電聯車所使用之牽引馬達為交流感應電動機，於煞車時，定子之旋轉磁場的同步轉速予以降低，造成轉子轉速高於同步轉速，因而產生正比於轉子轉速與同步轉速之轉差的煞車轉矩。理論上來說，當同步轉速降為零時，轉子轉速亦將降至零，電聯車應能順利地完全停下來。但是實際上電動機有其效率的限制，最高僅達 90%，且當轉速降到一定範圍之後，其所產生的轉差將遞減，煞車轉矩亦跟著遞減，因而很難在限定的煞車距離之內使電聯車完全停止。所以，當電聯車以電力煞車減速至某一特定的速度之後，必須輔以摩擦煞車，以期電聯車能正確地停靠於車站。

類似於列車最大牽引力的情況，最大電力煞車力理論上亦應為列車速度與線電壓的函數。惟電聯車廠商通常僅提供標稱電壓下的一條曲線【SIEMENS, 1995】，如圖十二所示，不考慮線電壓變動對電力煞車力的影響。至於列車的最大

摩擦煞車力，則明顯與列車線電壓無關。



圖十二 列車速度－最大摩擦煞車力曲線圖

- 列車行駛阻力

3.5.1 基本阻力

列車行駛阻力按其發生的原因，可分為基本阻力與附加阻力二部份。基本阻力是列車在任何路線(平直道、坡道或彎道)上運行時都存在的阻力；附加阻力則是列車在某些特殊路線上運行時，除基本阻力外所增加的阻力，例如坡度附加阻力與曲線附加阻力。

影響列車基本阻力的因素極為複雜，在實際的運用中很難推導出理論公式用於計算，因此，通常採用大量試驗綜合得出的經驗公式進行計算。本軟體所採用之基本阻力公式有 Davis 修正公式或通用係數公式二種：

Davis 公式：$R=R_R+R_A=2.94M+89n+bVM+\Sigma C_iAV^2$ (N)

其中

M—列車等效質量(ton)

n—列車總軸數

b—輪緣阻力係數(N/tom/kph)，約為 0.0914~0.137

V—列車速度(km/hr)

A—列車前緣面積(m^2)

C_i—第 i 車之空氣阻力係數($N/m^2/kph^2$)，傳統外型機車頭之 C 值約為 0.04434，流線型機車頭之 C 值約為 0.0314，後續客車為 0.00628。

通用係數公式：$R=R_R+R_A=C_1+(C_2+C_3M)V+C_4AV^2$ (N)

其中，C_1 C_4 為通用阻力公式係數。

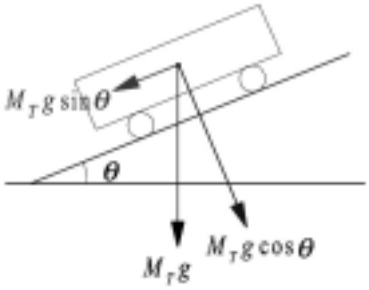
3.5.2 坡度附加阻力

當列車在坡道上運行時，列車總重力($M_T g$)可以分解成兩個分力，一個垂直於軌面連線，另一分量則平行於軌面連線，形成坡度附加阻力。上坡時，坡度附加阻力與列車運行方向相反，因此坡度附加阻力為正值；下坡時，坡度附加阻力與列車運行方向相同，所以坡度附加阻力為負值，負阻力也就是加速力。由圖十三所示之上坡車輛重力分解圖可知，列車往上坡方向運行時必須克服的坡度附加阻力為：

$$R_g = 10^3 \times M_T g \sin\theta \quad \text{(N)} \qquad \text{J}$$

其中，g 為重力加速度(=9.8067 m/s^2)，坡度以軌道與水平面的夾角θ表示之。於工程應用上，坡度通常以每百公尺上升多少公尺來表示，即 i (%) =100 tanθ，因此，$\theta = \tan^{-1}(i / 100)$。所以，坡度附加阻力亦可表示為

$$R_g = 10^3 \times M_T g \sin[\tan^{-1}(i/100)] \text{(N)} \qquad \text{頁}$$



圖十三　列車重力分解圖

3.5.3 曲線附加阻力

列車行駛於彎道時，因離心力之影響，外側車輪輪緣緊壓外軌，使輪軌間之摩擦力加大，又由於曲線處之外軌較內軌長，外輪在外軌會產生滑動的現象，增加輪軌間的摩擦力。上述原因造成列車在彎道所受阻力比在直線上所受阻力大，兩者之差稱為曲線附加阻力。列車在彎道上運轉時所產生之離心力係與速度平方成正比，而與彎道半徑成反比。

曲線附加阻力之大小除依彎道半徑而發生變化外，又依軌距、超高度、加寬度、固定軸距、運行速度等而異，故甚難推導一適合各種條件之公式，通常大都僅以彎道半徑 r(m)及車重 M_T(ton)之函數表示之【運，1998】。

$$R_c = 8000\, M_T / r \quad \text{(N)} \qquad \text{UL}$$

四、DCRAIL 列車運行模擬之資料輸入與結果輸出

℃列車運行模擬之輸入資料

列車運行模擬所需之輸入資料計有：

㈠列車特性資料：列車之前緣面積、行駛阻力係數、牽引(煞車)力曲線、推進系統效率曲線與列車組成(每一列車之動力車及拖車數、每一車輛之長度、重量與輔助功率、每輛動力車之馬達數…等)。

㈡軌道路線資料：路線各處之坡度、彎道半徑、速限與車站里程。

㈢系統控制參數：模擬間距、列車參考電壓、最大加速度、常態減速度、運轉模式(全動力或滑行)、功能位階調整(升階、基本階與降階)【翁，1995】、各站之靠站時間。

上述資料之建立係透過七個輸入資料檔來完成，分別為列車資料檔、車站資料檔、坡度資料檔、曲度資料檔、速限資料檔、控制資料檔與檔案管理檔。圖十四至圖十六為列車資料檔、車站資料檔與控制資料檔之輸入畫面範例。

圖十四 列車資料檔輸入畫面範例

圖十五　車站資料檔輸入畫面範例

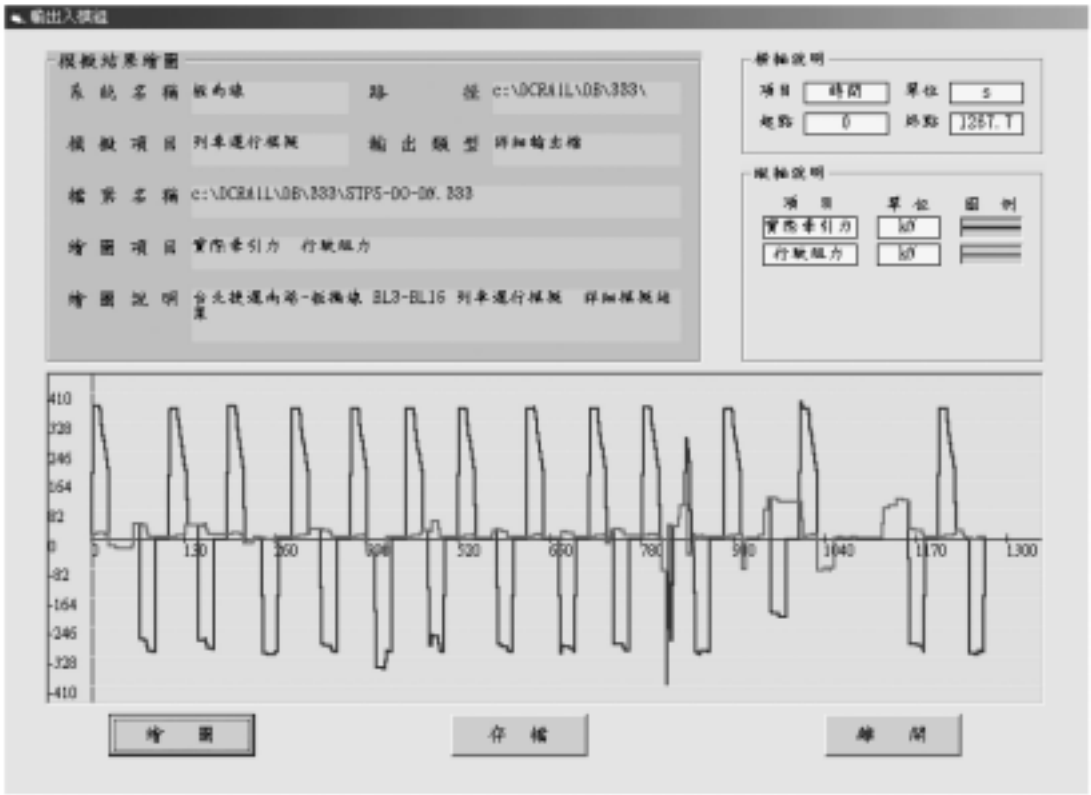
圖十六　控制資料檔輸入畫面範例

°F列車運行模擬之輸出結果

列車運行模擬結果係整理於下述四個輸出檔案：

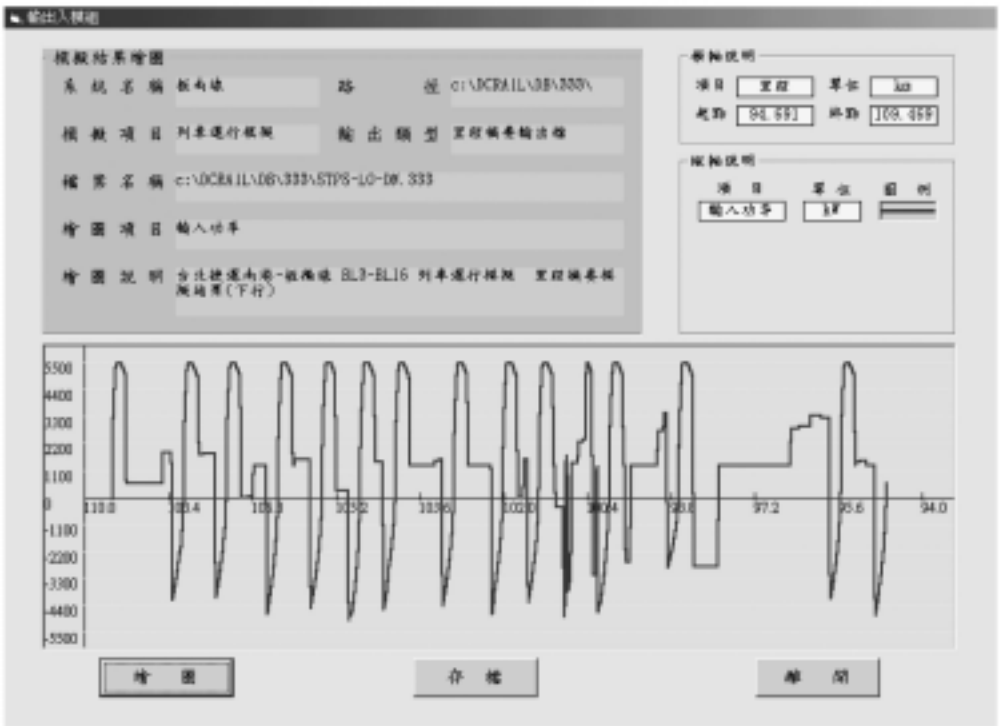
- 詳細輸出檔：以時間為自變數，由 38 個列車變數中選定 10 個項目的模擬結果至輸出檔。
- 站間輸出檔：提供站與站之間以及全線的運行資訊，包括：起訖站名稱、站間距離、行駛時間、駐站時間、平均速度、牽引能量、再生能量與消耗能量。
- 時間摘要輸出檔：以時間為自變數，顯示列車於每一時刻之里程、速度、加速度、牽引力、行駛阻力、輸入功率與消耗能量等七項列車基本運行資訊。
- 里程摘要輸出檔：以里程為自變數，顯示列車於路線各處之速度、牽引力、行駛阻力、輸入功率與消耗能量等五項資訊。

上述四個模擬結果輸出檔，除站間輸出檔僅提供文字視窗之瀏覽功能外，其他三項皆可以文字或圖形方式顯示模擬結果。圖十七至圖十九分別為詳細輸出檔、站間輸出檔與里程摘要輸出檔之顯示畫面範例。



圖十七　詳細輸出檔圖形顯示畫面範例

圖十八　站間輸出檔文字顯示畫面範例



圖十九　里程摘要輸出檔圖形顯示畫面範例

五、列車運行模擬軟體驗證

軟體可信度的驗證乃模擬軟體開發過程中不可或缺的工作。由於實測結果之取得困難，本軟體之驗證係採用與其他軟體之模擬結果相比較的方法。該已通過驗證之比較對象軟體為 **TOM**【Uher, 1997】(即 **EMM** 之 Windows 版)，測試系統為南港-板橋線 BL03 至 BL16(上行)，測試條件如下：

TW列車重量—340 噸(W3)

IL列車運行模式— 全動力(考慮再生煞車)

IT功能位階— 升階(PL1)

IR最大加速度— 1.0 m/s2

IC常態減速度— 0.9 m/s2

PN速度限制— 80 km/hr

HN列車阻力公式— Davis 修正公式

PD各站駐站時間— 20 秒

HD模擬間距— 1.0 秒

表一所示為 **DCRAIL** 與 **TOM** 部份模擬結果之比較，比較項目包括運行時間(含駐站時間)、平均速度、牽引能量、再生能量與輸入能量(即牽引能量與再生能量之差)。由於 **TOM** 之站間摘要輸出檔(Station Summary File)並未提供各兩站之間的牽引能量與再生能量數據，因此該表的相對應處以 **NA**(Not Available)表示。該表顯示，**DCRAIL** 與 **TOM** 所估算之總運行時間與全線平均速度都相當接近，其誤差皆小於 0.1%。由此證明 **DCRAIL** 對於列車之機械運行特性的模擬，已具有相當程度的可信度。

就列車之電氣運行特性的模擬而言，**DCRAIL** 與 **TOM** 所估算之總牽引能量、總再生能量與總輸入能量的誤差則分別為 5.61%、52.70%與 4.67%。5.61%的總牽引能量誤差尚可接受，超過 50%的總再生能量誤差則顯示 **DCRAIL** 與 **TOM** 對於列車再生煞車的處理顯然存在相當大的差異。由表一可知，**DCRAIL** 所估算之總再生能量與總牽引能量的比值為 27.84%，**TOM** 所估算的比值則高達 40.25%。依作者粗淺之認知，就一般的路線條件與營運速度來說，40%的再生能量與牽引能量比值或許是高了些。有關再生能量(或功率)的比較，亦可由表二與表三所示之 **DCRAIL** 與 **TOM** 詳細輸出檔進一步深入探討。

由列車之電力系統架構與組成可知，列車操作於牽引模式時(即加速或等速狀態時)，其輸入電功率為輸出機械功率除以效率再加上列車輔助負載功率，即前述 3.3 節之公式(9)；反之，於再生煞車模式時，其輸入電功率(負值)則為輸出機械功率乘上效率再加上列車輔助負載功率。表二所示的 **DCRAIL** 輸出結果確實反應上述的事實(讀者可自行驗證時間為 3 秒與 40 秒的情況)；表三所示的 **TOM** 輸出結果則違反上述的事實(例如時間為 3 秒與 39.3 秒的情況)，尤其是煞車階段所高估的再生功率

最為明顯，而此高估之再生功率即為前述再生能量與牽引能量比值為何高達 40%的原因。

除上述的說明之外，**TOM** 的詳細輸出檔還出現一個無法避免的問題—雖然模擬間距設定為 1.0 秒整，但表三所示的輸出結果卻出現非整數秒的情況，且有兩筆輸出資料的時間是相同的。究其原委，疑似 **TOM** 採用後推計算求取運轉模式變換點(例如：加速變等速、等速變減速…)時，未能適切處理模擬間距之調整。模擬間距未能維持固定值，將造成 **TOM** 另一模組—**ENS**(Electric Network Simulator)讀取不正確(準確)的列車負載資料(任一時刻之列車位置與輸入電功率)，影響直流分析的準確(精確)度。

表一　**DCRAIL** 與 **TOM** 於南港—板橋線上行軌之運行時間、速度與電能模擬結果比較

起站	訖站	站距 (km)	運行時間(s) **DCRAIL / TOM**	平均速度 (km/hr) **DCRAIL / TOM**	牽引能量 (kWH) **DCRAIL / TOM**	再生能量 (kWH) **DCRAIL / TOM**	輸入能量 (kWH) **DCRAIL / TOM**
BL03	BL04	0.866	**83.55 / 83.4**	**37.31 / 37.43**	**46.52 / NA**	**16.47 / NA**	**30.05 / 31.96**
BL04	BL05	3.079	**182.87 / 182.4**	**60.61 / 60.69**	**116.25 / NA**	**15.30 / NA**	**100.95 / 101.43**
BL05	BL06	1.354	**104.73 / 104.4**	**46.54 / 46.63**	**59.98 / NA**	**15.15 / NA**	**44.82 / 42.90**
BL06	BL07	1.348	**111.63 / 113.4**	**43.47 / 42.74**	**62.86 / NA**	**20.22 / NA**	**42.64 / 40.45**
BL07	BL08	0.686	**75.31 / 75.0**	**32.79 / 32.90**	**41.15 / NA**	**14.83 / NA**	**26.33 / 24.55**
BL08	BL09	0.938	**86.61 / 86.4**	**38.99 / 39.09**	**52.67 / NA**	**14.81 / NA**	**37.86 / 34.75**
BL09	BL10	1.122	**94.90 / 94.8**	**42.56 / 42.66**	**59.50 / NA**	**16.05 / NA**	**43.45 / 43.01**
BL10	BL11	0.666	**74.21 / 73.8**	**32.31 / 32.41**	**39.93 / NA**	**15.65 / NA**	**24.28 / 21.69**
BL11	BL12	0.729	**77.78 / 77.4**	**33.74 / 33.87**	**46.39 / NA**	**13.09 / NA**	**33.30 / 30.32**
BL12	BL13	0.842	**82.27 / 82.2**	**36.85 / 36.95**	**39.60 / NA**	**15.56 / NA**	**24.04 / 21.93**
BL13	BL14	0.986	**88.96 / 88.8**	**39.90 / 40.02**	**54.99 / NA**	**14.48 / NA**	**40.50 / 37.59**
BL14	BL15	0.829	**81.73 / 81.6**	**36.52 / 36.62**	**40.08 / NA**	**16.73 / NA**	**23.34 / 22.09**
BL15	BL16	1.354	**85.31 / 85.2**	**57.14 / 57.29**	**63.42 / NA**	**13.04 / NA**	**50.37 / 45.04**
BL03	BL16	14.799	**1229.86 / 1228.8**	**43.32 / 43.36**	**723.32 / 763.9**	**201.38 / 307.5**	**521.93 / 497.71**
誤　差 **(%)**			**0.086**	**0.092**	**5.61**	**52.70**	**4.67**

表二 **DCRAIL** 於南港－板橋線上行軌之部份模擬結果

時間	加速度	速度	里程	輸出機械-P	推進效率	輔助負載-P	輸入電功率
s	m/s^2	km/hr	km	kW		kW	kW
.0	.00000E+00	.00000E+00	.94687E+02	.00000E+00	.00000E+00	.55980E+03	.00000E+00
1.0	.10000E+01	.36000E+01	.94688E+02	.36244E+03	.24146E+00	.55980E+03	.20608E+04
2.0	.10000E+01	.72000E+01	.94689E+02	.72526E+03	.48299E+00	.55980E+03	.20614E+04
3.0	.10000E+01	.10800E+02	.94692E+02	.10885E+04	.68064E+00	.55980E+03	.21591E+04
4.0	.10000E+01	.14400E+02	.94695E+02	.14523E+04	.72448E+00	.55980E+03	.25644E+04
29.0	.37161E+00	.78671E+02	.95060E+02	.33988E+04	.75730E+00	.55980E+03	.50478E+04
30.0	.35498E+00	.79949E+02	.95082E+02	.33263E+04	.74249E+00	.55980E+03	.50397E+04
31.0	.00000E+00	.80000E+02	.95104E+02	.51240E+03	.17716E+00	.55980E+03	.34520E+04
38.0	.00000E+00	.80000E+02	.95260E+02	.11965E+03	.41371E-01	.55980E+03	.34520E+04
39.0	-.90000E+00	.79536E+02	.95282E+02	-.62303E+04	.87908E+00	.55980E+03	-.49172E+04
40.0	-.90000E+00	.76296E+02	.95303E+02	-.60232E+04	.87581E+00	.55980E+03	-.47154E+04
41.0	-.90000E+00	.73056E+02	.95324E+02	-.60798E+04	.87257E+00	.55980E+03	-.47452E+04

表三 **TOM** 於南港－板橋線上行軌之部份模擬結果

TIME	SPEED-KPH	ACC-MPSSQ	TO WHEEL-W	M-BRAKE-W	EFFICIENCY	AUX-W	ELEC IN-W
.0	0.000E+00	1.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	5.598E+05	5.598E+05
1.0	3.600E+00	1.000E+00	3.622E+05	0.000E+00	1.758E-01	5.598E+05	2.060E+06
2.0	7.200E+00	1.000E+00	7.247E+05	0.000E+00	3.517E-01	5.598E+05	2.060E+06
3.0	1.080E+01	1.000E+00	1.088E+06	0.000E+00	5.040E-01	5.598E+05	2.158E+06
4.0	1.440E+01	1.000E+00	1.451E+06	0.000E+00	5.662E-01	5.598E+05	2.563E+06
27.0	7.752E+01	3.928E-01	3.506E+06	0.000E+00	6.905E-01	5.598E+05	5.077E+06
28.0	7.893E+01	3.750E-01	3.435E+06	0.000E+00	6.764E-01	5.598E+05	5.079E+06
28.8	8.000E+01	3.750E-01	3.481E+06	0.000E+00	6.765E-01	5.598E+05	5.146E+06
28.8	8.000E+01	0.000E+00	5.124E+05	0.000E+00	1.487E-01	5.598E+05	3.447E+06
37.8	8.000E+01	0.000E+00	1.197E+05	0.000E+00	3.472E-02	5.598E+05	3.447E+06
38.6	8.000E+01	-9.000E-01	0.000E+00	5.740E+06	7.908E-01	5.598E+05	-5.181E+06
39.3	7.776E+01	-9.000E-01	0.000E+00	5.868E+06	7.926E-01	5.598E+05	-5.309E+06
40.3	7.452E+01	-9.000E-01	0.000E+00	5.735E+06	7.888E-01	5.598E+05	-5.175E+06

六、結　論

本文所介紹之捷運與輕軌系統列車運行模擬軟體，係以工程使用單位的角度進行軟體的開發，切合實際系統的控制策略，不僅具有操作方便的人機界面，更已通過可信度的驗證。雖然該軟體之開發係以捷運局與工程顧問公司為使用對象，以輔助系統規劃設計為基本目的，惟因確實考慮台北捷運系統之實際操作特性，故亦可提供學術單位與台北捷運公司於系統研究與問題解決上的應用。

參考文獻

x何宗軒,「捷運系統之馬達與驅動系統」,經濟部工業局軌道車輛工業推動小組「軌道車輛工業技術」教育訓練教材，民國 83 年。

x翁聿復,「高運量捷運系統電聯車號誌設備功能與操作概論」，捷運技術，13 期，28-38 頁，民國 84 年。

(i)黃森榮、何湘麟、徐守青與顏坤鴻,「捷運供電系統之規劃與設計」，台北捷運局十週年慶工程研討會論文集，150-181 頁，民國 86 年。

(ii)運轉理論研究會,「運轉理論(第三版)」，財團法人日本鐵道運轉協會，東京，127 頁，平成 9 年。

(iii)曾乙申,「台北捷運工程淡水－新店線供電系統之負載潮流與諧波分析」，國立台灣工業技術學院博士論文，民國 84 年。

(iv)曾乙申,「直流供電捷運系統之多列車運行績效模擬」，1998 工業自動控制與電力應用研討會論文集，D2-1~D2-6 頁，民國 87 年。

(v)曾乙申,「捷運與輕軌供電系統模擬軟體開發計畫」，財團法人中華顧問工程司研發計畫結案報告，民國 90 年(a)。

(vi)曾乙申,「捷運系統雜散電流與鋼軌電位探討」，中鼎工程股份有限公司教育訓練教材，民國 90 年(b)。

(vii)SKM Systems Analysis Inc.,「DAPPER—Distribution Analysis for Power Planning, Evaluation and Reporting」, U.S.A., 1989.

(viii)Richard A. Uher,「EMM—The Transportation System Energy Management Model」, Rail System Center of Carnegie-Mellon University, U.S.A., 1986.

(x)SIEMENS,「CH321/CN331/CC361 EMU Vehicle Characteristics for DC Study」, Document No. ADAAP1010, 1995.

[「Richard A. Uher, 「TOM—The Rail System Train Operations Model (Version 2.0)」,

1997.

」]Cooper Power Systems Inc.,「V-HARM—Power System Harmonics Simulation and Analysis Program」, U.S.A., 1991.