

科學圖書大庫

機械振動概論

譯者 陳 木

徐氏基金會出版

科學圖書大庫

J x zh D G
機械振動概論

譯者 陳 木

徐氏基金會出版

原再版序

在第一版的序言裏，我已詳述何以要再寫這個振動書本的理由，並附記我教機械振動的一點感想。教這門課程的確使本書在題材編排上，產生了一些不妥當的安排。雖然自第一版發行以來，我在教學上的感受一直沒有改變。例如，我仍深深感到，如在第六章之前就介紹阻尼的話，實是教學法的一大錯誤。

一般說來，自第一版以來，機械振動方面並無多大的變化，如果有的話，也許是對多自由度系統更加重視而已。但這僅使對基本原理更需作一通盤瞭解罷了。隨機振動的重要性逐漸減小，一如所預期的。隨機振動唯一真實的來源是火箭馬達，因此隨機振動的應用，不可避免地繫於太空計畫，當太空計畫式微，則我們對隨機振動的興趣，也隨著減低了。

在本版裏，並無多大的改變要說明，僅有一點小變化而已。例如，我們對遲滯阻尼的解說已加以推廣，而有關的題集也加以擴充。如果你將兩次版本加以對照的話，你將注意到我已新加入大約 50 個問題，並刪除一些不再有用的。特別在非線性振動，已有更多的問題。我仍堅信學習機械振動，最好的方法還是隨著解答問題而獲得。

本版中完全使用公制單位系統。在機械振動中應該使用什麼單位，曾有過相當的辯論，甚至比所得的利益還多。由於阻尼比、頻率比、及振幅比是無因次的，使用何種單位實際上都沒有關係。大多數的振動量度是以毫米計測的，而且記錄在紙條的圖表，是以每秒毫米的速率刻度來運轉的。示波圖的讀數亦是以毫米校定的。公制單位對我來說，似乎是很合理的。因此在本版裏，我已放棄傳統的單位而喜歡用它們。

扭轉振動（現在的第九章）的內容已從離散系統（第十章）的內容

裏分出來。在第一版裏，我將此兩主題合併在一大章裏，因為我覺得對霍耳茲及柯·威爾遜等早期的研究是可以給多自由度系統一個很有價值的背景環境。他們在沒有現代計算機的情況下，獲致可觀的成就。我覺得霍耳茲法雖然古老了些，但却是我們現在數值法的先驅。在學習如何運作許多人們的系統時，瞭解一些歷史背景是有用的，現在此點已經建立，無須再去責怪它了。第九章看學者或教師覺得適用與否，可以將它包含在內，或是刪略。

在本版中，我要感激戴維斯加州大學的哲拉德·漢德生教授，及柏克來的巴尼爾·馬特教授，他作為我私下的摯友，給我只有摯友才可能給的一些對本書所有思維與意見。他們的指教有無限的價值。我也要向波各大美洲大學的笛亞·日美內教授致以謝忱，他與我對某些特定問題密切合作，並且我從他那裏獲益甚多。一些較有挑戰性的問題大多由於他令人信服的來信指正而刪除了，我希望此種替換將會增色不少。

我深盼您讀初版序文，並祝您在機械振動上工作愉快。

柏克來，加州 1978

羅伯·史德爾

原初版序

在讀機械振動緒論書本的序時，心裏頭最大的疑問，我想是在機械振動中何以仍須另有一本書呢？我寫本書的理由很簡單，我要尊敬並感激許多傑出的書本與論文對機械振動的探討，但在我所經歷過的場合裏，却都無適用的。我唯一的方針是試著以我自己的方法來發展，並期望別人同我有一樣的看法，而對那些不同意的也希望能接受些微差異的方式。

就我的看法，研究機械振動有兩個階段。機械系統正常並不設計承受振動，而有一些例外，如在航空器的設計；但是振動在它發生了以後，通常則是需加面對的問題。如果它並未發生，則可忽略。總之，有關振動的經驗即是在解決問題。因此，學習去解決振動問題是第一個階段。研究的第二個階段乃是振動工程師不僅必須解決問題，而且要加以解釋。文獻堆中填滿了災難、診斷，以及最後成功的歷史事例。經常出現的疑問是“爲什麼？”必須解釋何以結構或系統必須改變，材料改變或速率改變，以及何以成本必須上漲。向別人解釋是振動工程師工作中，一項重要的部份。解釋必須力求清晰簡潔且能扼要說明問題。

在組織機械振動概論時，我有三個主要目標，第一是加強問題與例題。本書文中收集的問題比本文還要多，我喜歡以此方式處理，這是我教育的信念——學習最好是隨解決問題而得，此點我已強調過。大多數的工程學者，只要他們在課堂上有一位好老師，就能學得很好；而一本好書，則能伴其渡過夜晚黑暗的時刻；而一些好的問題則能強迫思考。這些問題必須演算出答案，不可能只加概述而將數目留給別人。社會不僅要工程師們對他們的工作負責任，並要他們對其錯誤受到懲罰。事實上，對工程上的失職而進牢獄的可能性已成爲一件非常現實的事，此點

對從實際問題求得解答給予特別的強調。

我的第二個目標是加強觀念。機械振動並非是一能自行表明的東西，它有它自己的語言，大多數的工程師對其語義都很嚴謹。除非觀念是牢實的，否則你很難探討機械振動問題，更遑論解決它們了。一些觀念如坐標、頻率與特性頻率、方式、阻尼、相與振幅、過渡的與穩定狀態振動等，都是非常簡單，但這些在非線性、不穩定、隨機振動更須技巧的問題裏，則被匆匆帶過。我曾有這樣的經驗，那就是機械與土木工程的前輩們對這些都曾聽過或讀過，但却不瞭解它們。

第三是特別考慮能量散逸或在機械工程系統中的阻尼。阻尼大都認為是黏性的，但在機械工程中，則僅有兩種黏性阻尼的通例。一個是流體經過一開槽時的層流；另一個則是流經孔口時的層流。所有其他型式的阻尼則屬另一回事了。為何一般書中要在第一章裏，就提前作黏性阻尼的探討，一直困擾著我。關於阻尼的另一個問題是當在考慮多於單自由度時，是否應該將它包含在內的疑問。我是喜歡不要包含在內的，因為它對闡釋僅能增加少許助益，但却大大地增加了複雜性。在大多數的結構中，阻尼是非常輕微的，小於 5 % 的臨界阻尼，除在共振時外，都可輕易地加以忽略。

本書前八章對機械振動做相當地介紹，對三個月的或十週課程的將有一令人滿意的基礎了。本書前六章安排為每章一週，第七章與第八章則每章兩週，而使學者能從自由與強迫振動，阻尼與無阻尼，而進入雙自由度系統的探討。介紹多自由度的觀念並不需要探討多於雙自由度，你能夠從雙自由度裏學習到與十個自由度的一樣多，而却更容易。

第九章與第十章就多於雙自由度的與解該類問題的技巧有所探討。這兩章是經讀者與出版者的建議後增訂的。在學校裏三個月的課程中，我是不將它包含在內的。但對研究所的學者，或有較多時間的，如十四週的，則我將它包含在內。教學是一件非常個人化的事情，我知道別人想應須將此等題材包含才好。如有更多的時間可利用，則我最少將用三週於第九章，而用一週於第十章。

在前八章的每一章中均包括兩個或三個段落。每一段落意即使用一堂課節數，而每一段落均附有討論此段落的一些問題，我想每週五個問

題是一很理想的作業，如作業太多的話，則學習效果將減少。我沒有將困難的與容易的問題分開，主要是因為我無法做此等判斷。對一位學者來說是困難的，而對另一位則可能是容易的。本書有解答手冊，包含所有問題的詳解，以供老師們參考。

我謹向五位幫助我形成有關機械振動理念的人致以謝忱。第一位是我在哥倫比亞大學的老師—達德禮·福樂教授，他是我機械振動的啓蒙者。第二位是我在柏克來時的老師且是系主任—柯立·福·加蘭，以他細心而有效的方法，他教導我精細的研究工程問題之價值，這是我以前尚未熟悉的。拉索普·米瑞恩，杜克大學以前的狄恩工程，也是我的老師，亦是十年來力學上的伙伴，他教導我解決問題的價值與瞭解觀念，他也是一位精通物理解釋的專家。在本書中使用的一些問題與在狄恩米瑞恩作品中的一部份有相同的一般背景，並有一個或兩個是相同的，是經其允許使用的。這一點，我完全瞭解。第四位我要感激的是羅倫斯放射實驗室的奧斯汀，奧斯汀博士數年前是我的學生之一，他是我私下的朋友，他對大部份手稿加以校對。第五位是我內人—珍，她耐性地容忍著，在準備工作的這幾年裏，與我分勞。如無她的存在與鼓勵，本書將仍是一個美好的構想而已。

我也要感激數百個機械工程的學生們，他們並不知道我以他們供作實驗對象，而將問題一個接一個地加以解出。我要感謝瑪格麗特—法蘭西夫人，她將原稿的大部份加以打字。並感謝瑪格麗特—漢斯夫人、芭芭拉—米登夫人及瑪麗·珍·阿爾伐夫人等，她們將瑪格麗特—法蘭西夫人尚未打字的加以完成了。

柏克來，加州

八月 1971

羅伯·史德爾

Robert F. Steidel, T_R.

譯者小語

機械振動問題，是工程師們必須面對的最困擾的問題之一，目前有關機械振動的研究，在國內工程界，已被日益重視，坊間有關機械振動的書籍約有十幾種版本，而僅有稀有的幾本中文版，對於有興趣研究機械振動的初學者，實有無從着手的感覺，因此譯者不揣鄙陋，試於公餘之暇，選譯本書，或可供有興趣研究機械振動的學者們參考。

原著對機械振動之探討，深入淺出，切要簡明，不失為一理想的教材。譯者淺陋，誤植之處，敬請不吝指正。

謹以此譯本紀念核三廠一號機於 2 月 18 日順利完成核燃料裝填工程。

陳 木

於恒春核三廠， 1984

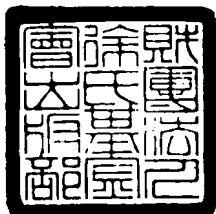
徐氏基金會科學圖書編譯委員會

監修人 徐銘信

發行人 呂幻非

科學圖書大庫

版權所有



不許翻印

中華民國七十四年六月十日初版

機械振動概論

基本定價 3.80

譯者 陳 木 台電核能三廠施工處汽機課機械工程師

本書如發現裝訂錯誤或缺頁情形時，敬請「刷掛」寄回調換。 謝謝惠顧

局版台業字第3033號

出版者 財團 徐氏基金會出版部 臺北市郵政信箱 13-306 號

發行者 財團 徐氏基金會出版部 郵政劃撥帳戶 00157952 號

承印者 大興圖書印製有限公司 三重市三和路四段一五一號

電話 9221763號
9271575號
9271576號
9286842號

電話 9719739號

目 錄

第一章 動力學.....	1
1.1 緒 論.....	1
1.2 位移、速度、與加速度.....	2
1.3 坐 標.....	6
1.4 運動方程式.....	9
1.5 質點動力學.....	20
1.6 剛體動力學.....	22
1.7 功與能.....	29
1.8 衝量與動量.....	30
第二章 週期運動	41
2.1 緒 論.....	41
2.2 自由振動.....	42
2.3 諧和運動.....	44
2.4 扭轉運動.....	53
2.5 單 擺.....	54
2.6 複 擺.....	55
2.7 線 擺.....	57
第三章 能量法與 <u>瑞利</u> 原理	68
3.1 能量法.....	68
3.2 單自由度.....	69

3.3 瑞利能量法	70
3.4 基準的選擇	72
3.5 模式與彈性構件質量的效應	80
3.6 分布參數	82
3.7 集中系統	84
3.8 瑞利原理	90
第四章 強迫週期運動	102
4.1 緒 論	102
4.2 無阻尼強迫諧和振動, $F(t) = F_1 \sin \omega t$	103
4.3 由 $F(t) = F_1 e^{i\omega t}$ 所生的強迫振動	105
4.4 由轉動不平衡力, $F(t) = m_0 \omega^2 e \sin \omega t$ 所生的強迫振動	105
4.5 傳動力與振動隔離	107
4.6 由諧和地面運動所生的強迫振動	108
4.7 振動量度儀器	109
4.8 諧波分析	121
4.9 諧波係數的數值解法	123
4.10 每循環的功	127
4.11 非線性系統的強迫振動	140
第五章 初狀況與過渡振動	150
5.1 緒 論	150
5.2 矩形階梯力函數	151
5.3 斜坡或線增加力函數	152
5.4 指數衰變階梯函數	153
5.5 力函數的組合	154
5.6 狀態空間與相平面	164
5.7 矩形階梯衝力的狀態空間反應	166
5.8 拉普拉斯變換法的使用	170

5.9 褶 積	171
第六章 阻 尼	181
6.1 緒 論	181
6.2 黏性阻尼	182
6.3 對數減縮	186
6.4 黏性阻尼中的能量散逸	188
6.5 比阻尼	189
6.6 遲滯阻尼	195
6.7 複剛性	199
6.8 失潤阻尼(庫倫阻尼)	204
6.9 阻尼自由振動的結論	207
第七章 阻尼強迫振動	214
7.1 緒 論	214
7.2 強迫阻尼諧和振動 $\mathbf{F}(t) = \mathbf{F}_1 \sin \omega t$	214
7.3 由轉動不平衡力 $\mathbf{F}(t) = m_0 \omega^2 e \sin \omega t$ 所生的強迫阻尼振動	218
7.4 傳動力與振動隔離	220
7.5 感震儀器	222
7.6 遲滯阻尼的強迫諧和振動	231
7.7 乾磨擦阻尼的強迫諧和振動	234
7.8 等黏性阻尼	237
7.9 隨機振動	244
第八章 雙自由度	257
8.1 自由振動與頻率方程式	257
8.2 模式與模態分式	261
8.3 雙自由度的主坐標	271
8.4 耦合方式與耦合坐標	274

8.5 強迫振動	284
8.6 動力振動減震器	286
8.7 力與運動的傳動	291
第九章 扭轉振動	297
9.1 分立系統	297
9.2 扭轉振動	298
9.3 霍耳茲法	301
9.4 動力等值系統	303
9.5 扭轉系統的強迫振動	304
第十章 分立系統	321
10.1 運動的矩陣方程式	321
10.2 影響係數	323
10.3 矩陣迭代法	325
10.4 <u>唐克雷—邵日威爾</u> 方程式	327
10.5 主模式的正交	328
10.6 主坐標	330
10.7 多自由度系統的強迫振動	332
10.8 狀態向量與轉移矩陣	350
10.9 強迫振動與展開矩陣	354
10.10 樑的轉移矩陣	365
10.11 無因次轉移矩陣	368
第十一章 均布系統	378
11.1 緒論	378
11.2 波動方程式	381
11.3 均等樑的橫向振動	391
11.4 轉動與剪力效應	393
11.5 軸向負荷的效應	395

參考資料 404

附 錄 405

索 引 406

第一章 動力學

1.1 緒 論

振動大多簡單定義為振盪運動。在以往和大部份的定義裏，這種振盪運動也是週期性的，此點今日不像以往是正確的，因為現在我們對非週期性與過渡的以及用解析的方法以分析這種運動，將有所涉及。此刻只暗示運動是連續的，而且有平均值或平均應力、平均位移或某種程度的反作用力。

任何振動研究，首先必須對動力學作一複習，因為振動是所有運動的首要部份，而動力學（Dynamics）是用以表示所要研究運動的物體和引起運動的力的力學部份。運動學（Kinematics）屬於動力學的一部份，用以研究運動的幾何學，而不涉及力和質量。動力學（Kinetics）是研究物體的運動和作用於其上的力之相互關係。

動力學及振動可追溯到伽利略（Galileo 1564 — 1642）的研究工作，在 1584 年 20 歲那年，他正確地設計了等時單擺的原理。在 1657 年，荷蘭數學家惠更斯（Huygens 1629 — 1695），將此原理應用在時鐘上。在 1950 年，伽利略因發現並證明自由落體定律而在實驗物理上獲致重大成就。他對運動和加速度所作的研究成為日後牛頓先生（Sir Isaac Newton 1642 — 1727）完成運動定律的基礎。

此後的兩百多年裏，有關振動的研究，一直侷限於單擺週期，天體和潮汐的運動，及這些有關的攝動等。直到十九世紀末期，高速機械導致它包含現在所說的機械振動等許多新的問題。巴倫約翰威廉史脫拉特，羅德瑞利（Baron John William Strutt, Lord Rayleigh 1842

— 1919) 等，將振動的理論加以組合並推廣之，由於他所作的貢獻，才能獲致今日的成就。現代已有許多人對之加以廣泛地推廣，使之更加成長。尤其狄摩新可 (S. Timoshenko) 及殿·哈多哥 (J. P. Den Hartog) 的研究工作具有特別的參考價值，他們是機械振動在工業問題解決的先驅，也是偉大的工程導師。

1.2 位移、速度、與加速度

運動學是研究運動而不涉及力和質量。主要是專注於位移、速度、加速度和時間等的相互關係。

線位移是一點從任意方便的原點沿一路徑移動的有向距離。由於其為有向量，因此為一向量而遵守向量特性的所有定律。如原點固定，則位移為絕對的；如原點本身也在運動，則位移是相對的。在動力學中，瞭解運動是相對的或絕對的是很重要的。牛頓運動定律列出在力、質量和絕對加速度間的關係。

在圖 1.1 裏，向量 s 為 P 點距原點 O 的位移。可選定一方便的坐標以

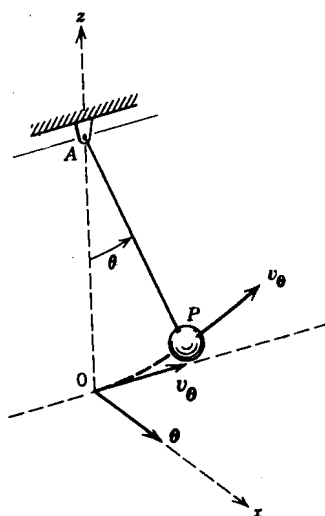


圖 1-1

描述向量 $\mathbf{s}$

$$\mathbf{s} = \mathbf{x} + \mathbf{y} + \mathbf{z} \quad (1.1)$$

坐標應選用數學上比較方便的一種，問題的物理分析與所選用的坐標無關。

P 點的瞬時速度是位移 $\mathbf{s}$ 的時間變化率，

$$\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{s}}{dt} = \dot{\mathbf{s}} \quad (1.2)$$

變數上的點號是指對時間一次微分的傳統表示法，變數上的兩點是對時間的二次微分。當使用傳統表示法較簡單和較清楚時，我們將用來代替微分形式。當運動是其他變數與時間的函數時，使用傳統表示法可能導致混亂而非清楚了。

如 P 點沿直線運動，如圖 1-2 的 x - 軸，位移和速度為單一橫坐標 x 的函數時，可以純量表示運動，

$$v_x = \frac{dx}{dt} = \dot{x} \quad (1.3)$$

此時， P 點有一自由度，因為只要單獨一個坐標就可決定 P 的位置了。

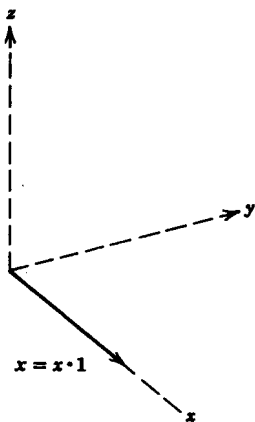


圖 1-2