

科學圖書大庫

機 動 學

譯者 王育璋
張日增

徐氏基金會出版

我們的一個目標

文明的進步，因素很多，而科學居其首。科學知識的傳播，是提高工業生產，改善生活環境的主動力，在整個社會長期發展上，乃人類對未來世代的投資。科學宗旨，固在充實人類生活的幸福也。

近三十年來，科學發展速率急增，其成就超越既往之累積，昔之認為絕難若幻想者，今多已成事實。際茲太空時代，人類一再親履月球，這偉大的綜合貢獻，出諸各種科學建樹與科學家精誠合作，誠令人有無限興奮！

時代日新又新，如何推動科學教育，有效造就人才，促進科學研究與發展，允為社會、國家的急要責任，培養人才，起自中學階段，學生對普通科學，如生物、化學、物理、數學，漸作接觸，及至大專院校，便開始專科教育，均仰賴師資與圖書的啓發指導，不斷進行訓練。科學研究與教育的學者，志在將研究成果貢獻於世與啓導後學。旨趣崇高，立德立言，也是立功，至足欽佩。

科學本是互相啓發作用，富有國際合作性質，歷經長久的交互影響與演變，遂產生可喜的意外收穫。

我國國民中學一年級，便以英語作主科之一，然欲其直接閱讀外文圖書，而能深切瞭解，並非數年之間，所可苛求者。因此，從各種文字的科學圖書中，精選最新的基本或實用科學名著，譯成中文，依類順目，及時出版，分別充作大專課本、參考書，中學補充讀物，就業青年進修工具，合之則成宏大科學文庫，悉以精美形式，低廉價格，普遍供應，實深具積極意義。

本基金會為促進科學發展，過去八年，曾資助大學理工科畢業學生，前往國外深造，贈送一部份學校科學儀器設備，同時選譯出版世界著名科學技術圖書，供給在校學生及社會大眾閱讀，今後當本初衷，繼續邁進，謹祈：

自由中國大專院校教授，研究機構專家、學者；

旅居海外從事教育與研究學人、留學生；

大專院校及研究機構退休教授、專家、學者；

主動地精選最新、最佳外文科學技術名著，從事翻譯，以便青年閱讀，或就多年研究成果，撰著成書，公之於世，助益學者。本基金會樂於運用基金，並藉優良出版系統，善任傳播科學種子之媒介。掬誠奉陳，願學人們，惠然贊助，共襄盛舉，是禱。

徐氏基金會敬啓

再 版 原 序

本書乃將初版稍加修正後再版付印。自 1953 年以後，機動學書籍出版至多，大都為關於機構之組成，而本書則為基於機構分析之探討，其主要內容均係本人之研究心得。在最後一章中，對機構之組成亦略作介紹。

主要參考書列下：

Beyer, R., Kinematische. Getriebesynthese Berling-Heidelberg, Springer-Verlag 1953.

Hain, K., Angewandte Getriebelehre. Düsseldorf, VDI-Verlag, 1961.

Lichtenheldt, W., Konstruktionslehre der Getriebe. Berlin, Akademie-Verlag, 1961.

Kraus, R., Getriebelehre. Bd. III, Massbestimmung. Berlin, Verlag Technik, 1956.

Artobolevski, Levitski, Cherkudinov, Sintez Ploskich Mechanismov. Moscow, 1959.

Hall, A. S., Kinematics and Linkage Design. Englewood Cliffs, Prentice-Hall, 1961.

Hartenberg, R. S., and J. Denavit, Kinematic Synthesis of Linkages. New York, McGraw-Hill, 1964.

作 者：羅申納爾 1967 年 1 月

原 版 序 言

機構在各類工程中經常用到，各種不同形式之曲柄連接桿機構，幾乎到處可見；例如在農業、印刷、紡織等各專用機器中，機構之設計尤具匠心。機構學對工程師雖屬重要，但有關之英文書籍則尚闕如，實不無遺憾。在歐洲則情形迥異，若干歐洲國家在其學校課程，以及科學書刊中，均對此一科學極為重視。

本書僅討論機構運動，其中大部份資料均為羅申納爾博士所撰寫，渠為拉脫維亞大學應用力學方面之多年教授，亦為本書之首席作者。本書原作教材之用，故除可供作工職學校或大學工學院之教本外，並可作為從業工程師研究與分析機構之參考手冊。

本書具有若干特色，作者深感如以數學分析法解決機構學問題，不但繁冗，抑且不易瞭解機構之實際動作，故本書一律採用圖解法。即以科氏加速度而言，在其教科書中所用之作圖法，仍不免使用計算尺加以運算；但在本書中，則全部應用圖解法。

本書所用符號，與其他書籍不盡相同，在機動學中，迄無公認符號可用。本書所用者力求簡單，祇求能確切標示所研究之運動面、運動點以及基準點或基準面而已。

由教學經驗證明，本書之符號甚為簡明易曉。對各機構之文字說明，亦力求簡潔，祇求能使學者瞭解該機構之運動分析即可；蓋作者深信，一般工程師寧可看一目瞭然之圖解，而不願閱讀冗長敘述也。

對某點運動路徑之曲率中心之決定，本書列舉三種方法：即尤拉·薩瓦來方程式圖解法，波比勒方法與哈脫曼方法。

本書圖解中，標示字母力求少用，以免混淆重點。例如：矢量標示法，只用其名稱標示，而略去箭頭二端之字母，並用一陌生符號 ∇ 標示正交速度，此乃將矢量速度 ∇ 旋轉 90 度朝向瞬時中心或背離瞬時中心即得。學者不難發現此一特殊標示法，對速度與加速度之分析，極有幫助。作者建議，若將正交速度繪於機構圖解中，而以“相對法線加速度平面圖”為準之加速度，繪於另一圖解中，則更易瞭解。

在本書速度與加速度之一般分析法各章中，為使讀者易於瞭解若干罕見機構，以個別運動對或成組運動對逐一分析之。一般教科書鉅著，其所能探討之實際機構亦極有限；而本書所採用之一般分析法，則可省去不少重複敘

述，即此一端而言，運動圖解法便更具價值。

本書第十一章所述之拘束運動觀點，對設計工程師當甚有益，足可助其校正新設計機構是否始終具有拘束運動，以完成其所需之作用。在機構組成之一章中，對從業工程師亦大有裨益。在設計機構時，雖常有靈感因素在內，但依據機構組成之合理方法，而決定各連桿之比例，當可取代費時費事之試探法。機構組成法之研究，乃近年來之事。

作者對於新南威爾斯 (New South Wales) 工業大學當局所給予之鼓勵深為感佩，而鮑狄齊，陶勒，賓吉來與克里生諾波羅斯諸位先生之協助繪製圖解，尤應致謝。

作 者： 羅申納爾
維 里 斯

符 號

a	加速度
$\vec{a}$	矢量加速度
a_a	a 點的加速度
$a_a^{k_n}$	在連桿K對於連桿n運動中a點的加速度
a_{ab}	A點對於B點的相對加速度
a_{abn}	A點對於B點的相對法線加速度
$\vec{a}_{abt}$	A點對於B點的相對切線加速度
a_c	科氏 (Coriolis) 加速度
a_n	法線加速度
a_p	瞬時中心P點的加速度
a_t	切線加速度
a_w	向着反曲中心 W_a 的加速度分量
b 或 PB	勃來斯圓的直徑
C	曲率中心
C_a	母曲線的曲率中心
C_e	包線的曲率中心
d 或 PW	反曲圓的直徑
e - e	包線
h	高對的數目
h_n	非自鎖高對的數目
h_s	自鎖高對的數目
$\vec{i}$	單位矢量
$\vec{i}_n$	次法線方向的單位矢量
$\vec{i}_r$	半徑方向的單位矢量
$\vec{i}_t$	切線方向的單位矢量
j	鉸鏈的數目
j_1	單鉸鏈的數目
j_2	雙鉸鏈的數目
k	一點和此點路徑曲率中心間的距離，亦即共軛點間的距離
k_w	一點和此點射線反曲點的距離，即 $k_w = C^a w$

n	連桿的數目
n_2	變件連桿的數目
n_3	三件連桿的數目
p	在分析中爲靜止平面的瞬時中心；在組合中爲極點
PA	A點的射線
PB_0 或 b	勃來斯圓的直徑
PN	瞬心線的公法線
PQ	共線軸
PT	瞬心線的公切線
PW_0 或 d	反曲圓的直徑
r	徑矢量或從瞬時中心至一點的距離，即 PC_0
r_w	由瞬時中心至反曲點的距離，即 PW
r_c	由瞬時中心至曲率中心的距離，即 PC
R	回行點（在分析時），相對極點（在組成時）
R_0	回行中心
s	滑對的數目
V	速度
$\vec{V}$	速度矢量
$\vec{V}$	正交速度矢量
$V_{A,B}$	A點對於B點的速度
V_k^n	連桿 k 對於連桿 n 運動中，A點的速度
V_p	瞬時中心的位移速度
W	射線上的反曲點
W_0	主射線上的反曲中心
z	低對的數目
$\alpha-x$	母曲線
α	角加速度
γ	一點的加速度矢量與加速度中心和該點連線所夾的角
Γ	加速度中心
$d\epsilon$	切線角
π	動平面內的瞬時中心
ρ_α	母曲線的曲率半徑
ρ_e	包線的曲率半徑

ρ_p	靜止瞬心線的曲率半徑
ρ_π	動瞬心線的曲率半徑
ψ	瞬心線公切線和射線間的夾角
ω	角速度
ω_{kn}	連桿 k 對於連桿 n 的角速度

目 錄

再版原序	III
再版序言	V
目 錄	VII
符 號	XI
第一章 運動對	1
第 1 節 運動對之分類	2
第 2 節 平面內支持點之數目	7
第 3 節 高對之分類	11
第二章 運動鏈	15
第 4 節 運動鏈之分類	15
第三章 平面運動	23
第 5 節 瞬心線之作圖法	23
第四章 尤拉—薩瓦來方程式及圖解	35
第 6 節 一點路徑曲率半徑之決定	35
第 7 節 瞬時中心與反曲點間各點之尤拉方程式	40
第 8 節 瞬時中心以下各點之尤拉—薩瓦來方程式	42
第 9 節 尤拉—薩瓦來方程式之通式	43
第 10 節 動平面內一點之位置與其路徑曲率中心間之關係	43
第 11 節 路徑之凸性	47
第 12 節 各種 ϕ 角時 r 和 r_0 間之關係	49
第 13 節 反曲圓	50
第 14 節 包線與母曲線	52
第 15 節 包線曲率中心定理	55
第 16 節 亞倫荷德第一定理	57
第 17 節 亞倫荷德第二定理	58
第 18 節 尤拉—薩瓦來方程式之變換	60
第 19 節 圖解作法	63
第 20 節 已知二條瞬心線之曲率中心其反曲中心之作法	72

第五章 波比勒圖解法	79
第 21 節 用波比勒圖解法決定反曲圓	79
第 22 節 波比勒定理	80
第 23 節 波比勒圖解法之推演	81
第 24 節 亞倫荷德圖解法	83
第 25 節 二條射線之共線軸定理	86
第 26 節 曲柄機構反曲圓之圖解法	87
第 27 節 蚌線圖形之反曲圓和回行圓	88
第 28 節 瓦特調節器	90
第 29 節 普羅埃調節器	91
第 30 節 母曲線與包線間之滾動與滑動運動	92
第六章 直線運動	95
第 31 節 精確橢圓直線運動	95
第 32 節 近似橢圓直線運動或依凡斯機構——第一形式	96
第 33 節 依凡斯機構——第二形式	97
第 34 節 依凡斯機構——第三形式	98
第 35 節 蚌線直線運動	99
第 36 節 擺線運動或柴比雪夫運動	101
第 37 節 雙紐線或瓦特運動	102
第七章 速度	105
第 38 節 速度之圖解法	105
第 39 節 正交速度法	106
第 40 節 二點速度間之矢量關係	108
第 41 節 柏麥斯脫速度定理	109
第 42 節 極矢速度圖	110
第 43 節 瞬時中心之位移速度	110
第 44 節 哈脫曼圖解法	112
第 45 節 母曲線與包線接觸點速度之決定	119
第八章 加速度	123
第 46 節 切線加速度與法線加速度之求法	123
第 47 節 加速度為三個矢量之和	125
第 48 節 加速度為二個矢量之和	126
第 49 節 瞬時中心加速度之圖解法	128

第 50 節	加速度 a_0 之圖解法	129
第 51 節	A 點至反曲點 W 線上法線加速度之表示	130
第 52 節	勃來斯圓與 <u>地拉哈爾圓</u>	131
第 53 節	加速度中心	132
第 54 節	加速度定理	134
第 55 節	法線加速度與總加速度之圖解法	136
第 56 節	平面內二點加速度之關係	140
第 57 節	用 <u>喬克斯基</u> 定理作加速度中心	141
第 58 節	不同條件點加速度之圖解法	142
第 59 節	三點或三點以上加速度之關係	145
第 60 節	極線加速度圖	146
第 61 節	加速度之其他圖解法	147
第九章	三個平面之相對運動	153
第 62 節	相對瞬時中心及三個中心之原理	153
第 63 節	已知各平面內一點之速度其相對中心之圖解法	154
第 64 節	已知旋轉矢量其相對中心之圖解法	156
第 65 節	已知動平面相接觸其相對中心之決定	157
第 66 節	相對速度之決定	160
第 67 節	相對速度六邊形	163
第 68 節	若二平面鉸接其中心線之決定	164
第 69 節	若動平面相接觸其相對滑動速度之決定	164
第 70 節	二接觸平面有平移運動時相對速度之決定	167
第 71 節	相對角加速度	169
第 72 節	相對加速度	169
第 73 節	科氏加速度與相對加速度之圖解法	170
第 74 節	絕對加速度之圖解法	171
第十章	四平面之相對運動	173
第 75 節	相對瞬時中心及共線軸	173
第 76 節	四連桿機構之反曲圓	174
第 77 節	四連桿機構連桿上一點曲率中心之決定	175
第 78 節	四連桿機構速度之決定	176
第 79 節	用極矢速度圖求作速度	185
第 80 節	二連桿用滑對連接之極矢速度圖	186

第 81 節	四平面運動中 加速度之作法	190
第 82 節	用相對法線加速度平面圖作加速度圖	197
第 83 節	在曲柄圓內活塞加速度之變化曲線作法	200
第 84 節	動平面內有滑對機構加速度之圖解法	205
第 85 節	凸輪機溝速度與加速度之圖解法	215
第十一章	n 根連桿之運動鏈	219
第 86 節	n 根連桿瞬時中心之數目	219
第 87 節	中心線之數目	220
第 88 節	具有拘束運動之運動鏈	220
第 89 節	具有單鉸鏈及拘束運動閉鎖鏈中其條件連桿之最少數目	222
第 90 節	具有拘束運動閉鎖鏈中一根連桿上鉸鏈之最多數目	223
第 91 節	運動鏈之一般分析	224
第 92 節	六連桿鏈	225
第 93 節	瓦特機構瞬時中心與中心線之決定	228
第 94 節	史蒂芬生機構瞬時中心與中心線之決定	229
第 95 節	八連桿鏈	230
第 96 節	用高級鉸鏈變換運動鏈	233
第 97 節	用滑對取代轉對	240
第 98 節	滑對鏈	245
第 99 節	具有高對之平面運動鏈	247
第 100 節	具有高對運動鏈之拘束運動標準	249
第 101 節	僅有高對之鏈	251
第 102 節	連桿數目可以變少之運動鏈	252
第 103 節	過份閉鎖的運動鏈	253
第 104 節	有死點與變點之非自鎖鏈	257
第十二章	速度之普遍作法	263
第 105 節	第一種基本情形——二連桿用一鉸鏈連接	263
第 106 節	第二種基本情形——二連桿用一滑對連接	263
第 107 節	第三種基本情形——三連桿系中其中間的連桿由鉸鏈與滑對連接	265
第 108 節	第四種基本情形——一根三件連桿與三根連桿相連接	265
第 109 節	第五種基本情形——一根三件連桿與二根連桿相連接，其中一根與架座形成滑對	267

第110節	速度作圖法之例題	269
第111節	運動鏈中無四連桿組其速度之作法	273
第112節	具有高對機構之速度作	275
第113節	華氏汽閥機關	280
第114節	上述機構運動表示圖之速度作法	282
第十三章	加速度之普通作法	285
第115節	第一種基本情形——二連桿由一鉸鏈連接	285
第116節	第二種基本情形——二連桿由一滑對連接	286
第117節	第三種基本情形——三連桿系中其中間的連桿由鉸鏈與滑對連接	286
第118節	第四種基本情形——一根三件連桿與三根連桿相連接	288
第119節	第五種基本情形——一根三件連桿與三根連桿相連接，其中一根與不動平面形成滑對	290
第120節	第六種基本情形——開口六連桿鏈	292
第121節	第一種問題——荷斯脫機構之加速度分析	295
第122節	第二種問題——特種八連桿機構之加速度分析	297
第123節	第三種問題——普通急回機構	299
第124節	第四種問題——惠氏急回機構	300
第125節	牛頭刨床機構之加速度分析	302
第126節	具有高對機構之加速度分析	306
第127節	用二鉸鏈之速度與加速度矢量作反曲圓與勃來斯圓	311
第十四章	簡介機構之組成	313
第128節	一根連桿之二個位置	313
第129節	一根連桿之三個位置	317
第130節	極點三角形	318
第131節	極點三角形之性質	322
第132節	上述定理實際應用於曲柄機構之三個位置	324
第133節	一根連桿之四個位置	326
第134節	連桿上有一點在圓周上動時此連桿之四個位置	327
第135節	六連桿間歇機構之組成	331
第136節	急回四連桿機構之組成	333
第137節	曲柄機構之組成	336
附錄	科氏加速度	339
索引		343

第一章 運動對

引 言

機動學 (Kinematics of mechanisms) 可區分為兩部份；第一部份為現有機構之分析，包括機構內各點路徑的法線、切線、和曲率中心之決定，以及各種速度與加速度分之分析。第二部份為原始機構之組成或發展，使所設計之機構能作某種特定之運動，並具有所需運動學之特性。

機動學與普通的運動學一樣，僅研究機構之運動，不討論驅動機構之力。

致力於機動學的科學家很多，茲今機動學之知識吾人應感恩於下列學者之名著：

Bétancourt : Essai sur la composition des machines, 1808.

Ampère : Essai sur la philosophie des sciences, 1830.

Coriolis : Mémoire sur les équations du mouvement relatif, 1832.

Poinsot : Théorie de la rotation des corps, 1834.

Weissbach : Abänderung der Bewegung, 1841.

Charles : Propriétés relatives au déplacement fini quelconque, 1860.

Belanger : Traité de cinématique, 1864.

其中最重要之著作為1875年 柳力克斯 所著之理論運動學 (Theoretische Kinematik)；此為一研究機動學最基本之書籍；其後，在1886年 柏麥斯脫 先生又著了一本運動學教科書 (Lehrbuch der Kinematik)。

較近出版者有：

Hartman : Die Maschinengetriebe, 1913.

Grübler : Getriebelehre, 1917.

Wittenbauer: Graphische Dynamik, 1923.

目前在機動學方面值得一提的專家有：費特賀福、亞脫、克拉斯、及拜耳等四位先生；拜耳先生係1931年技術運動學 (Technische Kinetik) 一書的作者。

1. 運動對之分類

機構的另件稱為連桿 (link)：一根連桿與另一根連桿相連接的部份稱為元件 (element)：二根連桿之連接處，每根連桿上各有一元件，此二元件形成一元件對 (Pair of elements) 或稱為運動對 (Kinematic pair)。

運動對可按下列之特性分類：

- (a) 運動之型式；
- (b) 自由度之數目；
- (c) 接觸之型式；
- (d) 閉鎖之型式 (即機構是自鎖還是力鎖)。
- (e) 低對或高對。

茲詳述於下：

(a) 運動之型式。 在運動對中，一元件上之一點對於次一元件之運動不外空間運動、表面運動或線運動等三種運動之一種。

(b) 自由度之數目。 一個自由物體共有六個自由度，形成運動對後，要失去一個或更多個的自由度。故運動對只有 5、4、3、2 或 1 個自由度。

(c) 接觸之型式。 接觸的型式有面接觸、線接觸、及點接觸三種。

(d) 閉鎖之型式。 藉二元件之構造能使此二元件相接觸者稱為自鎖 (Self-closed)；如果需要用一個力 (藉重力或簧力) 使此二元件相接觸者稱為力鎖 (Force-closed)。

(e) 低對。 若有一點和甲元件相連接和乙元件有相對運動，如其路徑與該點和乙元件相連接而和甲元件有相對運動時所得之路徑完全重合者則稱為低對 (Lower pair)。如不合此條件者，則稱為高對 (Higher pair)。

茲舉運動對之例說明之：

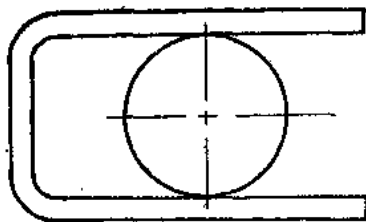


圖 1a

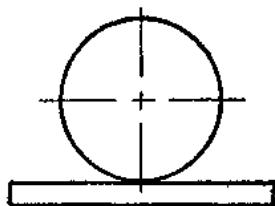


圖 1b

1. 圖1a爲一球在二平行板之間，表示一對具有空間運動、五個自由度（二個移動度和三個旋轉度），和點接觸之運動對。這是自鎖和高對的型式。圖1b已將上面的平板移走僅藉球本身之重量保持與底板相接觸，則此運動對爲力鎖，其餘的情形仍然一樣。

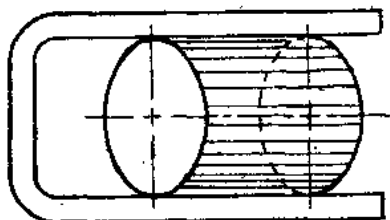


圖 2a

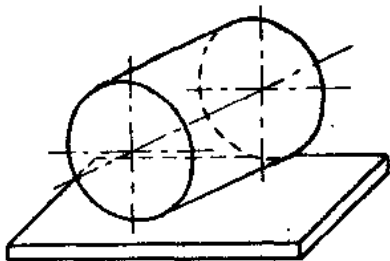


圖 2b

2. 圖2a爲一圓柱體在二平板之間，表示一對具有空間運動，四個自由度（二個移動度和二個旋轉度），和線接觸的運動對。這是屬於自鎖和高對的型式。和前面一樣，將上面的平板移走後，即爲圖2b的情形，成爲力鎖運動對之型式。

3. 圖3a爲一塊平板介於二塊平板之間，是一對具有表面運動（表面爲一平面）、三個自由度（二個移動度和一個旋轉度）、和表面接觸的運動對。這是屬於自鎖和高對的型式。將上面的平板移走便是力鎖運動對的型式，如圖3b所示。

4. 圖4爲一球在圓筒內，是一自鎖高對之例，具有空間運動，四個自由度（一個移動度和三個旋轉度）、和線接觸。

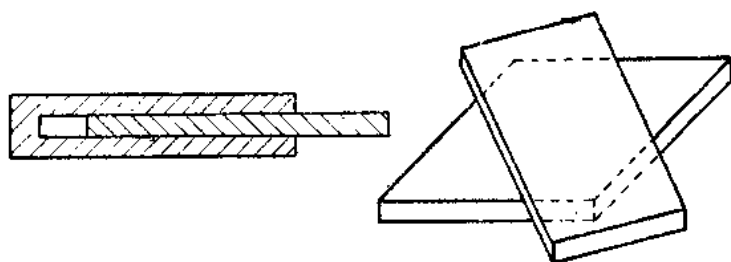


圖 3a

圖 3b

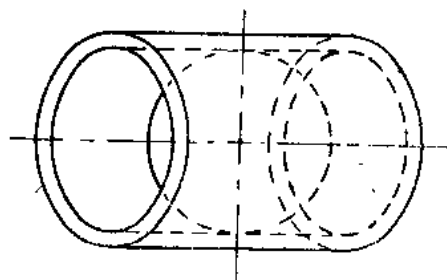


圖 4

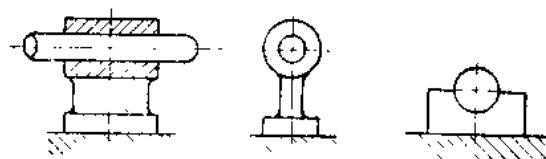


圖 5a

圖 5b