

57561

飛機裝備防振學

約力士 著



機械工業出版社

飛機裝備防振學

約力士著
賀聯奎譯



機械工業出版社

1954

出版者的話

本書取材於蘇聯近年來對飛機裝備(儀表、無線電、照像設備等)振動問題研究之結果,討論飛機裝備減振器的理論、設計、試驗等問題。

譯本可供我國大學航空學院儀表、結構兩組作教學的參考資料,也可作空軍及航空工業中,高級技術人員在飛機裝備減振問題上的參考及進修資料。

飛機裝備減振問題與汽車、坦克等的減振問題息息相通(參看第二章),所以本書亦可作為這些方面的輔助參考資料。

本書根據蘇聯 Ю. И. Иорин 著 'Защита самолетного оборудования от вибрации' (Обorongиз 1949 年第一版)一書譯出

* * *

著者:約力士 譯者:賀聯奎

特約責任編輯:黃克累 文字編輯:季培館 責任校對:唐佩卿

1954 年 1 月發排 1954 年 5 月初版 0,001—3,300 冊

書號 0339-0-105 31×43 $\frac{1}{25}$ 180 千字 104 印刷頁 定價 12,800 元(甲)

機械工業出版社(北京盛甲廠 17 號)出版

機械工業出版社印刷廠(北京泡子河甲 1 號)印刷

新華書店發行

原 序

現代飛機飛行性能的改進，特別是速度的增加，使飛機結構各部分所受的力量增加了。飛機在劇烈變更速度時、作各種機動運動時、俯衝及拉起時，在飛機速度變更的瞬間，飛機的荷載達到穩定飛行時的4~10倍。隨速度的增加、發動機馬力的增加，飛機的振動也增加。振動是受着連續振動的振源的作用而部分地加大，但在高速飛行中有時會突然發生強烈的振動，此種振動會使飛機解體。研究航空的歷史，我們會看到很多這種例子。

航空工程和其他的技術一樣，不斷地、嚴格地要求着材料強度的增加及其比重的減低。很多正確計算方法的提出、很多合理飛機構造法的提出，都是希望消除可能發生的危險的過荷載和空氣動力所引起的劇烈振動，同時也希望由發動機及螺旋槳所引起的振動被限制在其發生的地點。

最近數年來對於空氣動力振動問題的努力研究成為飛機構造的重要問題。經過苦心的研究已獲得相當的成績。至於因發動機工作所產生的振動，即所謂發動機振動，因為它沒有造成什麼嚴重的不幸事件，所以對於它的研究不如對前者來得透澈。但是，即使在最新式的飛機上有時也會因為它發生相當強的振動，因為這種振動是伴隨着發動機的運動而不停地發生，所以它會毀壞飛機和飛機上的一切裝備。精密的航空儀器如：自動駕駛儀、陀螺儀、高度表、速度表、測距儀、自動器械、複雜的電氣裝備等等，在碰撞、衝擊、特別在經常的振動下被磨耗，損失其精密程度，而很快地報廢。飛機上值得考慮的損壞有：軸及軸承的磨損、氣密性的喪失、零件的破裂、細管及導線的折斷、發電機及電動機電刷的破裂、照像設備的損壞，這些損壞主要的發生原因都是發動機的強烈振動。

振動還有另一方面的影響：擾亂裝備的正常工作。儀表指針的顫動

或移動(圖1、圖2),使觀察困難,讀數不準;照像設備所拍照片不清晰;無線電設備發生故障;電氣系統自動機構與繼電器動作不協調及其他。

我們這裏還沒有注意到振動所給予飛行員的疲勞,如儀表指針的顫動使飛行員視力疲勞。不容懷疑,振動是有害的運動,其為害的情形正如上述。

與振動作鬥爭,除去從根本解決問題——改良飛機及發動機的構造以減低振動外,還可用兩種其他的方式:第一,製造在振動中自己可以保持穩定的裝備;第二,製造裝備外面的減振器保護裝備,除防振外同時使它不受劇烈的碰撞和衝擊。

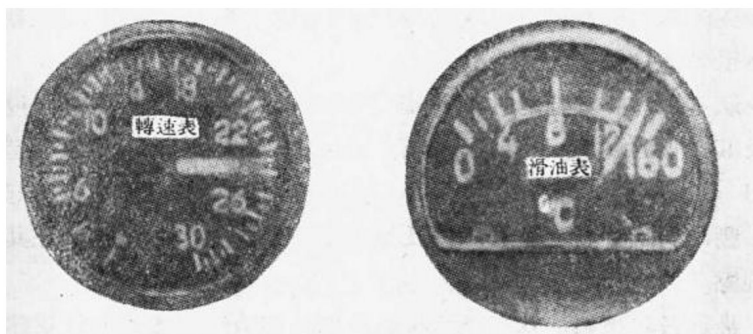


圖1 離心式轉速表在劇烈振動時的情形

圖2 滑油溫度電表在劇烈振動時的情形

實際工作中的情況告訴我們,要多在製造減振器方面努力。因為製造在振動中保持自己穩定的裝備有連接上的困難,並且需要更換現有的結構。同時,自己保持穩定的裝備在製造過程中已調節好其本身的頻率,因此,即使更換其中的一個不重要的零件也會引起很大的頻率改變。

此外,為種種不同目的所作的航空儀表研究工作告訴我們,從改變現有裝備的結構方面着手的工作,目前在停滯中,因為在改進振動中穩定性的工作上有小小的例外情形。

在製造外部減振器方面已有了不少的研究。在其他各種技術方面,已造出有隔絕振源和需要減振的結構所用的彈性減振器,減振效果良

好。但在飛機裝備外部所用減振器問題的研究上仍不充分。

從前曾經廣泛應用過的羅爾德（Лорд）式平橡皮減振器現在早已不用了，其他的缺點姑且不提，只是強度不夠和低溫變硬的兩個缺點即足以使它失效。德國的有心式橡皮減振器與此類似。英國的 6A/617 式彈簧減振器減振性不足。國產（蘇聯）標準 НКАП 1600с 型彈簧減振器一般性能還好，但因為構造複雜，製造困難，得不到廣泛的應用。除此之外這種減振器在靜止時下垂變形太大，使排列及安裝裝備困難。上述各種減振器都不能滿足彈性方面和製造以及使用等其他方面的要求。

現在工作的最後目標是創造合理的減振器，即解決減振器的構造和它的零件的計算上、製造上、安裝上及正確使用上的問題。

如果沒有在特殊的非線性振動理論上的、應用彈性理論上的深刻而廣泛的理論與實驗方面的研究及現在所採用的隔離振動法臨界分析，決不可能完善地解決這一技術問題。

這些問題的研究工作主要由蘇聯科學家克雷羅夫（А.Н.Крылов）、曼傑利失塔木（Л.И.Мандельштам）、巴巴列克西（Н.Д.Папалекси）、卡布雷根（С.А.Чаплыгин）、加列爾金（Б.Г.Галеркин）、安德龍諾夫（А.А.Андронов）、布爾加闊夫（Б.В.Булгаков）盧利葉（А.И.Лурье）等人担任。最近十年內研究的結果，在非線性振動方面得到顯著的勝利，並找出問題的近似解法。

這樣，以上研究的結果，結合目前製造工作上的總結，使我們可以得到飛機裝備防振問題的一般理論。

寫著本書時多承著者所領導的試驗室工作人員的協助，特別是工程師也林尼次基（Н.И.Елиницкий）及工程師龔內謝夫（В.И.Коньчев），他們在設計及試驗時作了不少工作。此外計算員也作了不少計算。

在完成這一工作上，作者應該向科學試驗所所長別特洛夫（Н.И.Петров）及副所長拉贊切夫（Н.Д.Рязанцев）致謝，因為在解決科學問題上他們有所協助。

魯熱夫金（С.Н.Ржевкин）教授曾對此書有所指正，茲致深深的謝意。

目 次

原序

一 飛機發動機的振動	9
1 發動機振動的原因	9
2 振動的記錄和研究	10
3 發動機振動的參變數及振動的特性形狀	11
4 噴氣式飛機的振動	18
二 彈性支架有六度自由的一般情形	19
1 問題的由來	19
2 在有六度自由的一般情形下有彈性支持裝備物的自由振動	20
3 依坐標區分成獨立的振動(正則坐標)	24
4 安裝減振器時的要求(合理安裝)	26
5 例題。連有四個減振器的儀表板的合理安裝	30
6 減振器排列的特例	31
7 合理安裝時自振頻率與支架各參變數間的關係	33
8 強迫振動的運動方程式	34
9 摩擦力的計算	35
三 有一度自由的彈性支架	41
1 在一度自由系統內的振動	41
2 微示減振系統的各量	45
3 與變形成比例的摩擦力	49
4 動彈性係數及非完全彈性材料之摩擦力	52
5 機械阻抗	53
6 減振器與其他彈性體之連接	56
四 等頻減振器	58
1 等頻問題	59
2 運動方程式	61
3 具有指數作用力特性的振動系統之自由振動	62
4 具有指數作用力特性的振動系統之強迫振動	64
5 強迫振動振幅的穩定性	70
6 用波波夫氏法計算非線性彈簧	72

7 指數式彈簧的計算	74
8 指數式彈簧的製造技術	77
9 等頻減振器在合理安裝中之特殊性	78
五 附加減振	79
1 問題的由來	79
2 應用附加減振法時的彈性支架	79
3 強迫振動	84
六 着陸時衝擊的消除。行程的限制	89
1 飛機着陸時裝備物減振器的動作	89
2 摩擦力的計算	94
3 着陸時行程限制器的作用	96
4 行程限制器第一次最大變形的近似解	101
5 關於行程限制器厚度的問題	104
6 實驗性研究	105
7 結論	108
七 具有彈性行程限制器的振動系統的強迫振動	110
1 具有線性作用力特性的彈性行程限制器	111
2 高級近似	120
3 具有非線性作用力特性的行程限制器	123
4 實驗性研究	125
八 在具有彈性行程限制器的振動系統中之亞和諧共振	128
1 過去的工作。專門術語	128
2 現象的描寫	129
3 現象的理論	131
4 數量性度量	144
5 結論	148
九 減振器各參變數的實驗室度量法	150
1 作用力特性與縱變形間關係的取得及縱向彈性係數的確定	150
2 作用力特性與橫變形間關係的取得及橫方向彈性係數的確定	151
3 彈力與變形關係的精密度量	151
4 自振頻率及動彈性係數的確定	152
5 在零上及零下溫度中振動系統自振頻率的確定及動防凍性係數的確定	153

6 對數衰減率、阻滯係數及摩擦係數的確定	154
7 在零上及零下的溫度中,對數衰減率、阻滯係數及摩擦係數的確定	154
8 減振係數的確定	154
9 有正弦式外力作用時自振頻率的確定	156
10 在動力情形下確定彈性及摩擦係數	156
11 在動力情形下彈性及摩擦係數的確定(簡化方法 I)	159
12 在動力情形下彈性係數及摩擦係數的確定(簡化方法 II)	160
13 耐振性試驗(方法 I)	160
14 耐振性試驗(方法 II)	161
15 行程限制器橡皮緩衝墊回彈係數的確定	161
16 摹仿實際情況的試驗	162
17 其他試驗	163
一〇 飛機裝備減振器的構造	164
1 橡皮減振器	164
2 彈簧減振器	174
3 等頻減振器	176
4 橡皮-彈簧減振器	187
5 結論	187
一一 連接到裝備物上的導管對於隔離振動性的影響。對安裝減振器的建議	188
1 問題的由來。以前研究的結果	188
2 試驗的方法	189
3 試驗的結果	191
4 由試驗結果所得的結論	193
5 對安裝減振器的基本建議	193
一二 飛機裝備減振器的基本要求	196
1 被減振系統自振頻率的適宜數值	196
2 止動器。自由行程及緩衝墊的彈性	197
3 阻滯	198
4 荷載的範圍和大小	199
5 堅固性	201
6 對氣象影響的穩定性,防銹層	201
7 構造的規格,配件	202
參考文獻	203
中俄名詞對照表	206

一 飛機發動機的振動

本章敘述發動機振動的原因及其主要特性，使讀者對它有概括的觀念，以便學習防振問題的處理方法（不包括發動機及其彈性支架構造改善）。讀者如果想對振動的原因及振動的記錄方法作進一步的了解，請閱讀參考書目中所列有關這一方面的文獻。

1 發動機振動的原因

發動機——螺旋槳整體及其運動零件是裝有活塞式發動機的飛機的發動機振動的基本根源。

現代大馬力的發動機，其機件具有相當大的質量和運動速度。所以當製造得即使有極輕微的不平衡和間隙，即足以引起振動。有了這種製造上的不準確尤其會因為曲軸及螺旋槳的迴轉，混合氣在汽缸內的燃燒、活塞及連桿的運動而引起強烈的振動。螺旋槳葉片安裝角的不準確、葉片的振動、氣流壓力的變化、由螺旋槳轉動所引起的飛機各部壓力的變化等，也都是發生劇烈振動的原因。使用雙葉螺旋槳的飛機，尚有因螺旋槳迴轉所生陀羅效果所引起的振動，此種振動主要是在轉彎及俯衝時發生。

以上所述飛機及發動機各種構造上的振源，有的被放大的被減低，但其中某些不能不予考慮。或說這些振動均相當劇烈不能不予考慮。雖然許多振源同時在各方面產生多種振動，但我們可用下列方式統一考慮；將發動機——螺旋槳考慮為一個用彈性體支持起來的剛體，此剛體有六個自由度。此剛體在

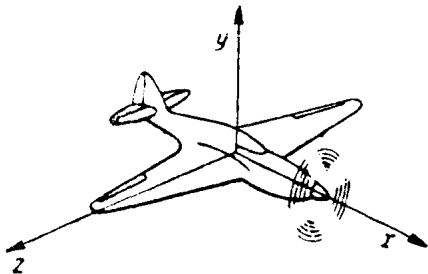


圖3 坐標軸的方向

空間的位置由飛機重心的三個平移位移，例如圖 3 所示的 XYZ 直角坐標軸及圍繞此三軸的角位移 φ, ψ, θ 角決定。依這樣安排，在六度自由內均有相當複雜的振動。

發動機系統的振動經過發動機安裝架傳出。如果發動機諧振分量的頻率與飛機構件的自振頻率相近時，即使飛機構件離發動機架很遠，它也會受到很强的振動（參看第 3 節）。

飛機上其他機構所產生的振動，如像強力發電機及電動機的振動並不顯著，故從略。

2 振動的記錄和研究

據我們所知，開始研究發動機的振動問題不過才是二十年前的事，開始時所用的資料只是普通手繪振動曲線而已。

從那時開始，由於利用了在其他技術部門——音響學、無線電學、電學儀器構造學、精密儀器構造學等等——的成就，作出了極完善的振動度量和振動記錄的儀器，並在各國進行了無數次的發動機振動的度量。振動儀器的使用是極複雜的，例如按數百陰極管的工作來解釋、分析振動圖譜的煩難工作，也是儀器使用工作整體中的一部分。在各種艱苦條件下的飛行和複雜的儀器使用工作相結合，才得出今日發動機振動問題研究的結果。同時，也只有大規模的研究組織才能科學地建立、分類地執行這種研究。有了這些研究的結果，我們才可以用它們為基礎，無困難地從它們的一般性質中找出基本的結論。

尚須注意，大部分的振動研究工作是向着一個狹窄的、有着完全決定了目標的方向進行。舉例來說，一個研究機構及其研究人員只不過對於一種發動機、它的發動機架、它的螺旋槳和它的裝備進行究研而已。

還可指出，在極細緻的研究工作內還有很多具體問題，如各種發動機架的優劣比較。我國（蘇聯）科學及試驗機構所進行的很多研究工作，其細節即是這種工作。

雖然這樣，根據最近若干年內的研究結果依然很難找出飛機振動的一般特性。

由於研究時所用儀器型式不同及其使用方法不同，比較各研究所，如皮巴爾特(Пибарт)、喀山斯基(Казанский)、日托米爾斯基(Житомирский)各研究所彼此間最一般的研究時，其結果亦有出入。只是到最近各處才按標準方法工作。

雖然如此，比較各著名的研究結果，其中包括我們(指作者)的研究結果，我們可以看出發動機振動參變數的一些概括意義，下面的一節即敘述這些性質。

3 發動機振動的參變數及振動的特性形狀

發動機本身上的振動最大。現代大馬力的發動機上，其各方向的振動位移可以達到 0.5~1 公厘。考慮其諧振分量到達每秒 200~300 週時，其振動加速度之和可以達到或超過 10g。發動機架的振動，即使發動機所安裝的減振器不好或根本沒有減振器時，它也比較地小。從各種情形下所得到的結果看來，它不超過 0.5 公厘。振動沿飛機傳遞，愈遠愈小，但在最遠處仍有 0.1~0.2 公厘。飛機結構上的巨大構件例外，它們的振動相當的小。例如機翼的翼樑(圖 3 Z 軸)的振動簡直感覺不到。安裝在經過仔細選擇的、調整好了的彈簧減振器上的飛機裝備物，其振動可以被減到完全不予考慮的程度。如果使用橡皮減振器，則溫度降低時減振性會惡化(在 -20°C 時低溫用橡皮亦硬化，因而消失其減振性)。

振動的形狀及振動的頻率圖譜由每一個振源的頻率決定。在一定的飛行狀況下振源的主要部分發出有一定頻率的週期運動。例如發動機曲軸所產生的含有諧振分量的振動，其頻率等於曲軸的轉數(現代航空發動機的轉數是每分鐘 2000~3000 轉)、等於曲軸轉數的倍數和半數(四衝程的發動機曲軸迴轉兩轉完成一循環)。螺旋槳所產生的振動，其頻率則等於螺旋槳的轉數及轉數的倍數(因為有減速機構，所以這些頻率低於發動機轉數的一倍半到兩倍)。混合氣的爆發也產生振動，其頻率則等於單位時間內爆發的次數。諧振分量的頻率是所有這些振源總作用的結果，各類率彼此間的關係並不簡單。因此上述振動有時非常複雜。同時因為發動機的運轉通常沒有一定的規律，所以在發動機經過

長時間運轉以後其振動大部分變化不定。

下面我們分別說明各種振動的特性。

1 週期振動 正如上面所述，發動機的振動一般地沒有嚴格的週期性。即使兩個相連的振動彼此大部分仍不相同。雖然如此，我們却常常看到一些振動，每經過一段相等的時間其瞬時的位移數值(速度或加速度)變為零或達到極值，同時保有一定的形狀。此外在一定間隔內保有一定數目的極大與極小(波峯與波谷)(圖4、5及6)。我們稱這種振

振動特性形狀圖

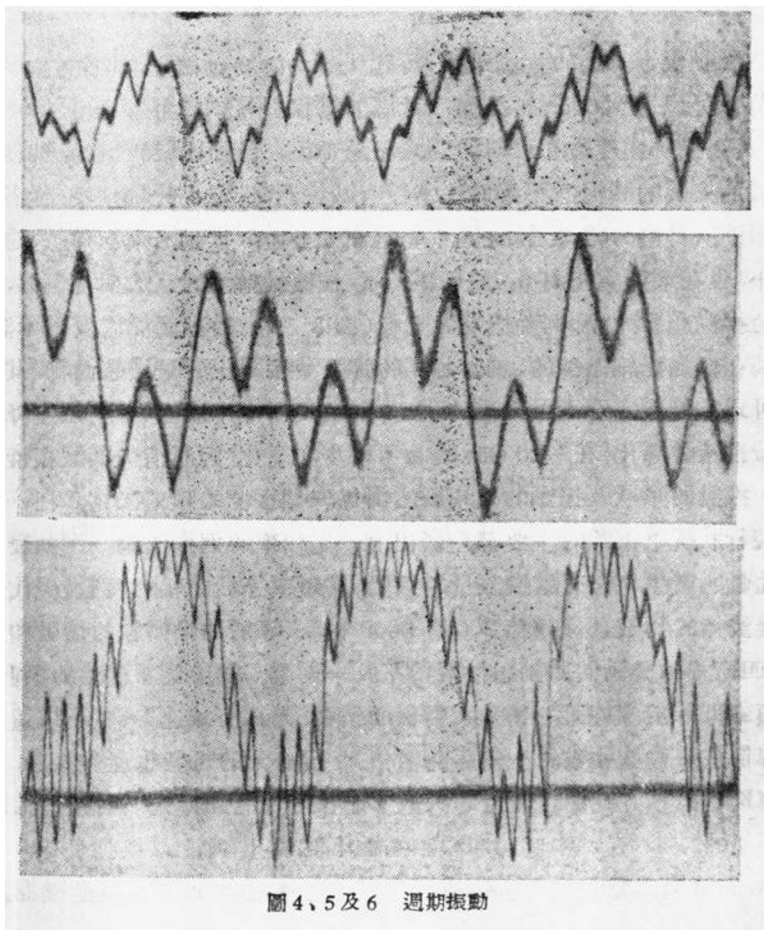


圖4、5及6 週期振動

動爲週期振動。此種振動常常在剛性不大的彈性體，如發動機架連接頭、飛機裝備連接架等處發現。它的振幅圖譜常常含有多數的諧振分量。諧振分量中間的幾個，其位移可以大於基本諧振的振幅。

2 不定式週期性振動 此種振動的瞬時位移數值（速度或加速度），每經過一段相等的時間後變爲零或極端值。但其振動輪廓的大小却可能有相當的變化（圖 7、8 及 9）。不定式週期振動的振幅圖譜含有一些頻率各不相同的諧振分量，這些分量即使是極高的等級（10 級以上）其位移亦不能有減弱的趨勢。不定式週期振動一般發生在發動機上或距發動機極近的地方。

3 正弦振動 這種振動是週期振動的特殊形式。當週期振動的記錄是正弦形狀，我們便稱它爲正弦振動（圖 10 及 11）。此種振動是下述各構件振動的特性：1）距離發動機較遠的飛機構件，如飛機機尾及裝置於該處的裝備物；2）剛性較低的構件，如與飛機橫軸平行的操縱桿、管子接頭等；3）個別的裝備物其減振器不够柔軟，當高頻率諧振分量消失，諧振中的頻率較低的分量有些與安裝系統的自振頻率相同或相近時。

正弦振動的振幅圖譜的波峯尖銳時，表示它含高頻率分量較多，但頻率增高振幅却迅速降低。

4 變振幅式振動 在振動中常常發現週期性或非週期性的振幅加強及減弱的現象。其外形類似擊拍或調幅振動（圖 12 及 13）。我們稱這種振動爲變振幅式振動。發動機的運轉情形不够穩定或單位時間內發動機的轉數不一定時，常常發生這種振動。飛機受空氣動力干擾所發生的自振動（主要在 y 軸方面），也有這種形狀（圖 14）。

5 混亂振動 有些振動沒有任何週期性（圖 15）。我們稱這種振動爲混亂振動。在連接不牢固的零件上，有餘隙的迴轉零件，以及在已損壞而仍受力的零件上會發生叮噠聲，此時我們常常發現這種振動。此外，對於高頻率低振幅的非週期性振動（圖 16），我們也稱之爲混亂振動。

6 脈動振動 上述各種振動中任何一種還可能有脈動性質，即基

振動特性形狀圖

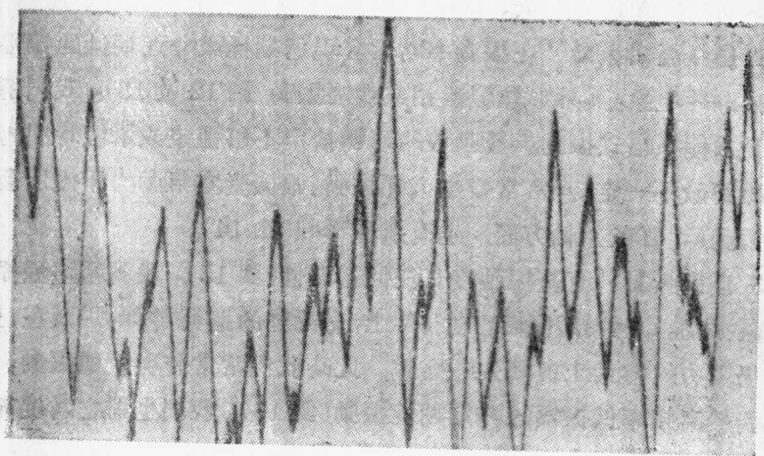
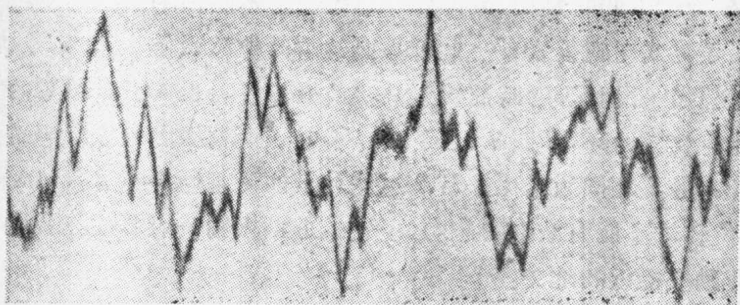


圖 7、8 及 9 不定式週期振動

振動特性形狀圖

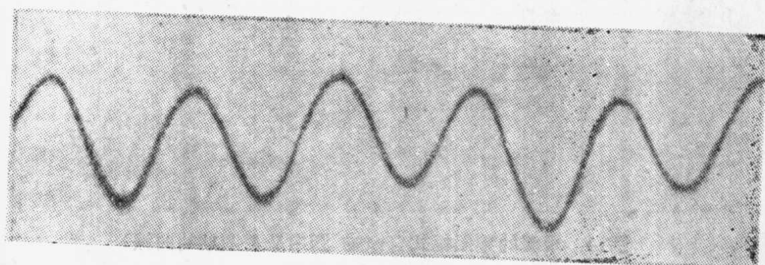
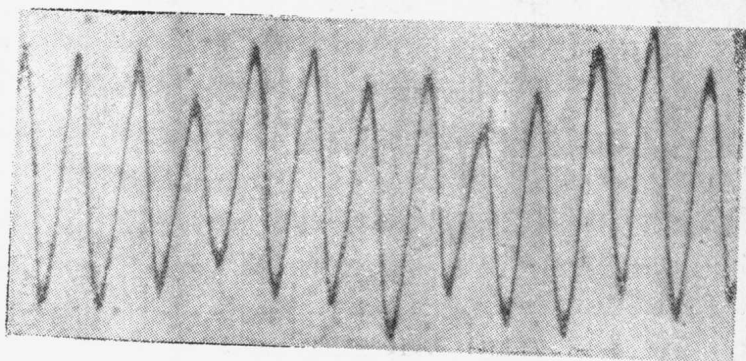


圖10及11 正弦運動

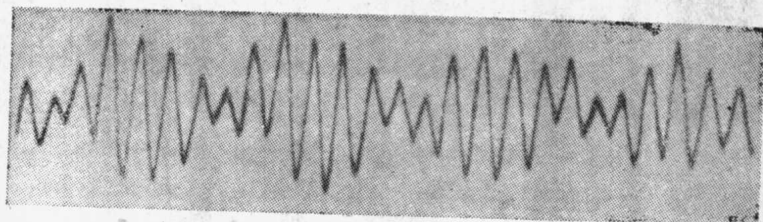


圖12 週期性變幅式振動

振動特性形狀圖

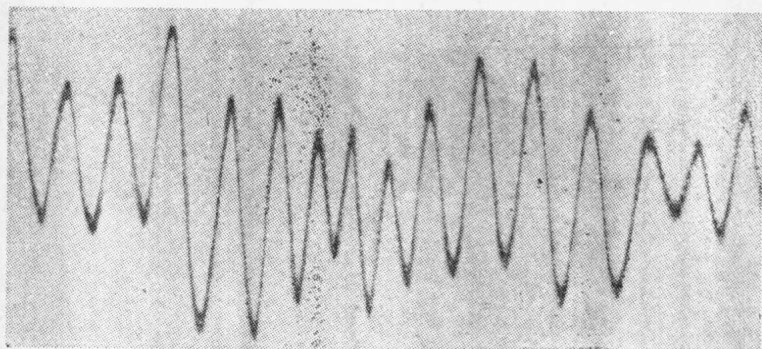


圖13 非週期性變振幅式振動

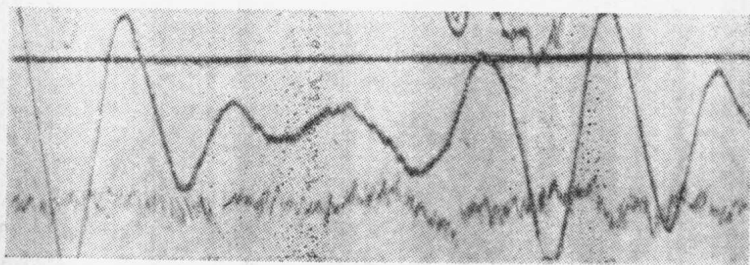


圖14 飛機的變振幅式自振動(圖內是長週期的曲線)

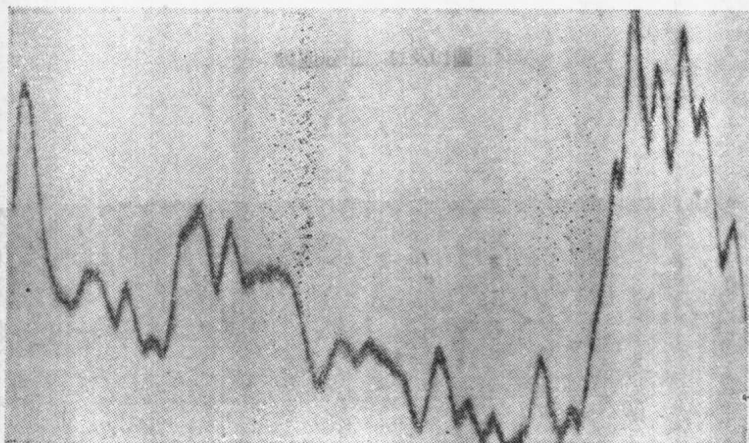


圖15 混亂振動