

结构振动和撞击算法

H.K. 斯尼特考

建筑工程出版社

結構振動和撞击計算法

梅占馨 王蔭長 宋忠保 合譯
劉 銓 李德成

建築工程出版社出版

• 1957 •

內容提要 本書敘述了工程結構撞擊計算的實用方法，介紹了著者所研究的应用在梁和自由剛架振動理論中的初參數法、力矩法和位移法。著者在本書里提出了任意形式的剛架振動問題(用機動鏈作基本系)的一般解法。

書中列舉了系統受瞬時力和非週期力作用時許多動荷計算問題的解答，以及結構受各種重複撞擊時的簡單計算方法。闡明這些問題時，考慮到了蘇聯科學的最新成就。

本書可供從事工程結構振動和撞擊計算的工程師和設計人員參考之用。

原本說明

書名 МЕТОДЫ РАСЧЕТА СООРУЖЕНИЙ НА ВИБРАЦИЮ И УДАР

著者 Н.К. Снитко

出版者 Государственное издательство литературы по строительству и архитектуре

出版地點及年份 Ленинград—1953—Москва

結構振動和撞擊計算法

梅占騷等譯

*

建築工程出版社出版(北京市東城門外南風土路)

(北京市書刊出版業營業許可證出字第152號)

建築工程出版社印刷廠印刷·新華書店發行

書 3544 236千字 870×1092 $\frac{1}{30}$ 印張 10 $\frac{4}{15}$

1957年8月第1版 1957年8月第1次印刷

印數：1—1,050册 定價(11) 2.40元

目 录

前 言	5
第一章 緒論。一个自由度系統的自然振动	7
第一節 概況。动荷系数	7
第二節 动力荷載和动荷效应	10
第三節 振动的种类	13
第四節 一个自由度系統的無阻尼自然振动	18
第五節 一个自由度系統的阻尼自然振动	29
第二章 一个自由度系統的强迫振动。短时力和周 期力的作用	35
第六節 緒 論	35
第七節 在任意非周期力的作用下强迫振动的綜合方程式	39
第八節 不变的突加力作用。最簡單的撞击	43
第九節 任何延續時間的周期突加力作用問題的一般解答	51
第十節 干擾力的綫性变化	57
第十一節 冲量和任何干擾力的共同作用	65
第十二節 周期力的作用。共振	70
第十三節 在一般情况下的强迫阻尼振动。非周期力的作用	76
第十四節 有阻尼时周期力的作用	83
第十五節 在周期力作用下并且考虑阻尼时的动荷系数。 計算例题	88
第三章 結構撞击計算	94
第十六節 撞击計算理論的基本原理	94
第十七節 按照冲量和突加力作用研究撞击	97
第十八節 有阻尼时的撞击作用。在撞击时考虑荷載的离开	104
第十九節 荷載对結構的重复撞击	108
第四章 若干个和多个自由度系統的振动	115
第二十節 两个自由度系統的自然振动頻率的確定	115

第二十一節	两个自由度系統对称性的利用。例題	122
第二十二節	折算質量。結点質量法	129
第二十三節	求主要振動形式。主要形式的正交特性	131
第二十四節	用支承彈簧彈性聯結質量的豎向振動	135
第二十五節	任意个自由度系統的自然振動	140
第二十六節	拱自然振動頻率的確定	152
第二十七節	在振動荷載作用下 n 个自由度系統計算的一般 程序	158
第二十八節	作剛架動荷力矩圖的一般程序。計算例題	164
第五章	連續分布質量時杆件系統的振動	168
第二十九節	常截面梁的自由橫向振動	168
第三十節	單跨梁的自由振動。彈性基礎梁	177
第三十一節	連續梁自由振動理論中的三彎矩方程式	188
第三十二節	求剛架自由振動頻率的力矩法	195
第三十三節	實腹拱自由振動頻率的計算	204
第三十四節	剛架自由振動理論中的位移法	208
第三十五節	自由振動理論中建築力學的基本定理。確定第 n 个頻率的近似法	224
第三十六節	在周期力作用下有分布質量的梁和剛架系統的 強迫橫向振動	236
第三十七節	梁振動計算例題。彈性基礎梁	242
第三十八節	用位移法計算剛架振動	247
第六章	壓弯杆和剛架的振動	257
第三十九節	压杆橫向振動頻率的確定。有分布質量和集中質 量的压杆的振動	257
第四十節	確定受压弯剛架橫向振動頻率的—般方法	268
第四十一節	压弯杆和剛架的強迫周期振動	276
第七章	動荷穩定性。彈性杆件的縱向振動	280
第四十二節	概論	280
第四十三節	杆件的動荷穩定性	282
第四十四節	杆件動荷穩定性的計算	288
第四十五節	彈性杆件的縱向振動	298
附表	用變形法計算剛架振動頻率的函數表	303

結構振動和撞击計算法

梅占馨 王蔭長 宋忠保 合譯
劉 銓 李德成

建築工程出版社出版

• 1957 •

內容提要 本書敘述了工程結構撞擊計算的實用方法，介紹了著者所研究的应用在梁和自由剛架振動理論中的初參數法、力矩法和位移法。著者在本書里提出了任意形式的剛架振動問題(用機動鏈作基本系)的一般解法。

書中列舉了系統受瞬時力和非週期力作用時許多動荷計算問題的解答，以及結構受各種重複撞擊時的簡單計算方法。闡明這些問題時，考慮到了蘇聯科學的最新成就。

本書可供從事工程結構振動和撞擊計算的工程師和設計人員參考之用。

原本說明

書 名 МЕТОДЫ РАСЧЕТА СООРУЖЕНИЙ НА
ВИБРАЦИЮ И УДАР

著 者 Н.К. Снитко

出版者 Государственное издательство литературы
по строительству и архитектуре

出版地点 及 年份 Ленинград—1953—Москва

結構振動和撞擊計算法

梅占騷 等 譯

*

建築工程出版社出版(北京市東城門外南風土路)

(北京市書刊出版業營業許可證出字第152號)

建築工程出版社印刷廠印刷·新華書店發行

書 3544 236千字 870×1092 $\frac{1}{30}$ 印張 10 $\frac{4}{15}$

1957年8月第1版 1957年8月第1次印刷

印數: 1—1,050册 定價(11) 2.40元

目 录

前 言	5
第一章 緒論。一个自由度系統的自然振动	7
第一節 概況。动荷系数	7
第二節 动力荷載和动荷效应	10
第三節 振动的种类	13
第四節 一个自由度系統的無阻尼自然振动	18
第五節 一个自由度系統的阻尼自然振动	29
第二章 一个自由度系統的强迫振动。短时力和周 期力的作用	35
第六節 緒 論	35
第七節 在任意非周期力的作用下强迫振动的綜合方程式	39
第八節 不变的突加力作用。最簡單的撞击	43
第九節 任何延續時間的周期突加力作用問題的一般解答	51
第十節 干擾力的綫性变化	57
第十一節 冲量和任何干擾力的共同作用	65
第十二節 周期力的作用。共振	70
第十三節 在一般情况下的强迫阻尼振动。非周期力的作用	76
第十四節 有阻尼时周期力的作用	83
第十五節 在周期力作用下并且考虑阻尼时的动荷系数。 計算例题	88
第三章 結構撞击計算	94
第十六節 撞击計算理論的基本原理	94
第十七節 按照冲量和突加力作用研究撞击	97
第十八節 有阻尼时的撞击作用。在撞击时考虑荷載的离开	104
第十九節 荷載对結構的重复撞击	108
第四章 若干个和多个自由度系統的振动	115
第二十節 两个自由度系統的自然振动頻率的確定	115

第二十一節	两个自由度系統对称性的利用。例題	122
第二十二節	折算質量。結点質量法	129
第二十三節	求主要振動形式。主要形式的正交特性	131
第二十四節	用支承彈簧彈性聯結質量的豎向振動	135
第二十五節	任意个自由度系統的自然振動	140
第二十六節	拱自然振動頻率的確定	152
第二十七節	在振動荷載作用下 n 个自由度系統計算的一般 程序	158
第二十八節	作剛架動荷力矩圖的一般程序。計算例題	164
第五章	連續分布質量時杆件系統的振動	168
第二十九節	常截面梁的自由橫向振動	168
第三十節	單跨梁的自由振動。彈性基礎梁	177
第三十一節	連續梁自由振動理論中的三彎矩方程式	188
第三十二節	求剛架自由振動頻率的力矩法	195
第三十三節	實腹拱自由振動頻率的計算	204
第三十四節	剛架自由振動理論中的位移法	208
第三十五節	自由振動理論中建築力學的基本定理。確定第 n 个頻率的近似法	224
第三十六節	在周期力作用下有分布質量的梁和剛架系統的 強迫橫向振動	236
第三十七節	梁振動計算例題。彈性基礎梁	242
第三十八節	用位移法計算剛架振動	247
第六章	壓弯杆和剛架的振動	257
第三十九節	压杆橫向振動頻率的確定。有分布質量和集中質 量的压杆的振動	257
第四十節	確定受压弯剛架橫向振動頻率的一般方法	268
第四十一節	压弯杆和剛架的強迫周期振動	276
第七章	動荷穩定性。彈性杆件的縱向振動	280
第四十二節	概論	280
第四十三節	杆件的動荷穩定性	282
第四十四節	杆件動荷穩定性的計算	288
第四十五節	彈性杆件的縱向振動	298
附表	用變形法計算剛架振動頻率的函數表	303

前 言

根据苏联共产党第十九次代表大会对于发展第五个五年计划的指示，大型工业結構和水工結構的大規模建設正在进行着。因此，发展結構的动荷計算是非常重要的。

十分明显，必須使結構动荷的計算方法大加改进和簡化，才能获得足够精确，而且在实用上很方便的求动荷內力的方法。

本書叙述杆件系統自由振动和强迫振动的一般原理，結構撞击計算中最基本問題的解法以及动荷稳定問題。

著者在强迫振动和自由振动理論中广泛地运用了初参数法，这个方法还是著者在 1930 年提出的 [51]。在任意非周期力作用下，無論阻尼存在与否，若利用分析函数的特性和計算干扰荷載中突变的一般原理，則对于基本的最簡單系統的动荷位移問題，能够得到簡單的一般解答。到現在为止，大家对于这个問題 还注意得不够，其实这个問題有很大的实际意义，特別对于受重复撞击的結構計算，以及当研究不連續的动荷載系統的作用时是如此。

最近很受注意的是結構动荷稳定性的分析，需要有受压系統自然振动頻率方面的知識。关于結構物动荷稳定性問題，本書根据已有的图解分析比拟法和采用的結点質量法，利用三角函数已作出有成效的解答。

当系統的形狀复杂时，为了得到振动頻率問題的普遍而精确的解答，非常重要是要有这种复杂系統的普遍而通用的計算图形。彈性环节机动鏈形式的基本系統，就是这种通用的图形，而这种基本系統实际上的不变性，可用按照可能位移原理写出的平衡方程式来表示。彈性环节机动鏈在 1934 年我們的著作里的靜力学問題中已經研究过。利用它，我們得到关于任意自由剛架結構当考虑質量沿其杆件長度分布时振动計算問題的普遍而精确的解答。

说到这里,就不能不提到铰链杆件系统机动法 创始人 H.M.拉賓諾維奇教授在1928年的第一部著作〔42〕。在該書中,机动法在任意剛架結構的振動計算中,無論是純彎曲或壓彎情形,都得到最普遍的应用。

解决了在分布質量作用下的自由剛架結構的橫向振動問題,就能够利用修正的方法,相当精确地估計任意复杂的剛架系統中压力对橫向振動的影响。

著者認為,重要的是在叙述杆件剛架系統振動計算的普遍原理和方法时,而不必用大量的各种图表和不作結論地引用研究結果去填充書中的叙述,因为这些东西不能使工程师正确地利用純粹的参考材料来解决新的实际問題。但是,理論上的解析无疑地应该用例子加以說明,而本書正是这样做的。

第 一 章

緒論。一个自由度系統的自然振动

第一節 概況。動荷系數

結構动力学乃是广义建筑力学的第二个部分。

高速机器、新的起重设备、快速运输工具、輕型桥梁 和工业結構应用的日益增加，引起了結構振动和撞击計算的实际方法——結構动力学发展的必要性。結構动力学的方法，使研究大型工业楼板在快速运转机器作用下的振动、桥梁和基础的振动的重要問題，在理論上确定振动、运动和撞击荷载的动荷系数問題，确定运动着的运输車輛动荷內力的問題，以及减振等等問題，都获得了解决。

与結構靜力学不同，結構动力学研究随着 時間而 很快地变化着的动力荷载的作用；因此，在計算中就必须考虑运动荷载的慣性力，以及速度和其他参变数。

实用結構动力学方法的发展，主要是由于苏联 科学家們的劳动，其中以A. H. 克雷洛夫院士和H. П. 彼特罗夫教授的卓越著作最为出色。

在許多情形下，結構物实际工作中所作用的荷载是动力的，但是在实际的工程計算中，計算荷载的动荷效应常常仅仅用 引入所謂动荷系数的方法，这个动荷系数是根据不同的試驗憑 經驗的方法决定的，这种試驗是以总和的形式反映出在一定条件下荷载的动荷作用。

一百多年以前(1847年)，由于契斯捷尔斯基桥的破坏，成立了研究荷载的动荷作用的第一个委员会。这个委员会确定了在撞击和振动的运动荷载作用下，桥梁的梁內 挠度和应力与靜荷时相比

能够增大一倍,并且提出了“撞击次数”或者增补动荷系数的概念[39]。

按照交通人民委员会(НКПС) 1931年的铁路桥梁标准,在计算桥跨结构的杆件、支座部分的构件和直接承受动荷作用的实体支座部分时,推荐如下的完全的动荷系数公式:

$$\psi = \frac{P_n}{P_{cm}} = 1 + \mu = 1 + \frac{27}{30 + l}, \quad (1.1)$$

式中 l ——影响綫载荷部分的长度(当 $l=5$ 公尺时, $\psi=1.77$);

μ ——增补动荷系数;

P_{cm} ——静荷压力;

P_n ——考虑全部动荷效应的全压力。

許多的研究指出,由于沿着水平路綫运动着的不变的力(所謂列車的“駛入效应”)使桥梁发生振动所引起的动荷增补,甚至列車用很大速度行駛时也不超过5~10%[22]。

无疑地,沿着桥梁等速度运动的脉动力將引起严重的效应,这种脉动力是由于过剩的平衡錘离心力作用的结果而产生的,平衡錘牽引着并且联結着不完全平衡的機車的車輪[70]。

同时在这最簡單的解答里得到,运动的脉动力的动荷增补(車輪效应)与跨度大小的平方根成正比,也就是說动荷系数是随着跨度的增大而增大的。

运动的脉动力系作用在小跨度(30公尺以下)桥梁上,由于共振現象在这里实际上是不可能的,所以其最大动荷撓度非常小[37]。

桥梁試驗[64]指出,在振动时实际的动荷撓度大約是理論上的动荷撓度的五分之一,这个可以用共振范围内阻尼对于强迫振动振幅的显著影响加以解釋。如同桥梁試驗所指出的那样[33]、[22]、[64],在周期荷載作用下,对于一定条件和在不大的時間間隔內,共振是不可避免的,但是,就是在小的阻尼系数情形下,运动着的脉动力所产生的强迫振动也是迅速地停滯下来。当阻尼存在时,桥梁由于脉动的可动荷載所产生的动荷撓度被减小了好多

[64]。当然,只是在很短的时间內才可以允許結構与荷載在共振中工作。

同时必須指出,通常的暫時荷載很显著地影响著系統(桥梁+列車)自由振动的頻率,而且很剧烈地改变着发生共振的条件。振动質量数值的連續变化产生了特殊的参数振动。在桥梁的实际計算中,在列車作用情形下决定动荷撓度时,可以建議代替自由振动的周期 T_0 用平均的算术值:

$$T_0 = \frac{1}{2}(T_c + T_n),$$

式中 T_n ——桥梁沿其全部長度受有列車載荷时系統的振动周期。

荷載的撞击作用是对动荷系数产生最大影响的主要因素,这种撞击作用是由于路面的不平坦、車輪邊緣的凹陷等等所引起的。通常吊車梁的最大动荷系数約为 1.2~1.3,它的产生就是由于路面不平坦和鉄軌有缺点的結果[40]、[48]。对于輕質的小跨度梁,撞击荷載的影响是特別大的。由于暫時荷載的質量具有很大的相对值,当荷載突然作用时,小跨度桥梁撓度的动荷系数就显著地增加。系統自由振动的頻率随着暫時荷載的增大而减小,因而,在撞击荷載作用下动荷系数也就减小了[61]。

当行动機車的成对車輪經過軌道的接合点时,或者当軌道上存在着凹陷时,將发生有节奏的撞击,因为在軸間距离相等时將发生极有害的振动的合成。所以这种撞击的动荷影响是特別严重的。研究結果指出,在共振区域內并且当阻尼存在时,由节奏的撞击所产生的动荷撓度比仅由单独撞击作用所产生的撓度可以大 5 倍多。如果認為振动質量是不变的,則在許多情形下結構在共振範圍內的工作問題是完全現實的[37]。因此,在共振範圍內考虑阻尼时的結構計算,获得一个有根据的方法是重要的[16]。最近的研究指出了阻尼对于頻率的独立性。根据中央工业建筑科学研究院(ЦНИИПС)專門进行的实验研究的結果而积累的实验資料,現在已經可以采用关于振动时內消毫的最完善的假定。

本書將介紹解决建筑方面杆件結構的动力学問題的最有效的

第二節 動力荷載和動荷效應

一、動力荷載的種類

在結構動力學里，研究數值和位置隨着時間很快地變化着的荷載作用。因而，動力荷載使結構物各個杆件的位移隨着時間而改變。動力過程的特徵是在變速度運動時，產生杆件運動的加速度和慣性力。結構動力學的任务是求結構物的位移和內力以及決定最大的動荷係數。

動力荷載分為以下類型。

(一) 不動的撞擊荷載

我們把很快地加在結構物上的荷載叫做不動的撞擊荷載，而荷載的運動速度在很短的時間間隔內發生變化。當撞擊荷載落在樁上時，就使樁具有一定的動能貯備，並且在落下荷載與樁接觸的第一瞬間，速度發生劇烈的變化，結果就形成系統共同運動時的初速度。當鍛鐵時，由於錘頭在極短的時間內喪失了它的初速度，所以被撞擊的平台得到了顯著的加速度。撞擊現象，可概略的說成是荷載的突然加載（即荷載 P 從高度 $h=0$ 落下，在一瞬間加上它的全部數量）。

不動的撞擊荷載發生在下面幾種情形：

- 1) 當打樁機、打鐵錘、砸碎廢鋼用的底座（撞擊作用機械）工作時；
- 2) 當道路不平和車輛輪緣有凹陷時；
- 3) 當突然地加載和去掉荷載時（在起重機工作中不經心地放下荷載時）；
- 4) 當損壞性的坍塌和荷載落在承重結構上時（山嶺塌滑在路上、撞擊波的作用等等）。

撞擊時第一次接觸時間的持續可能是很短的，然後荷載就從

被撞击物体上跳开,但它的位移减小了,接着发生了新的撞击等等。因而,落下的荷载在它的撞击过程中可能是接连有节奏的撞击。

由于道路的不平坦或者輪緣上凹陷的存在,发生产生动力荷载的撞击作用。撞击是列車动荷载的特性之一。

結構物往往受到定期的、经过相同時間間隔的連續不断的撞击,也就是所謂周期性的撞击作用。当機車(当其軸間距离相等时)经过有空隙的軌道接合点时,就发生很明显的周期性重复撞击作用。

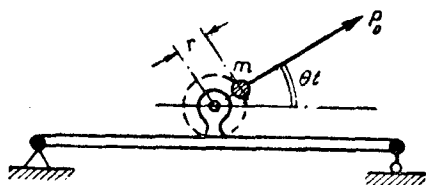


圖 1

所有的撞击都引起振动(也就是机械的振动),这是因为落下的荷载与結構第一次接触后就发生振动,作为時間函数的运动速度等于零时相当于振动的最大值。

(二) 不動的、隨着時間變化的荷载

各种类型的具有轉动部分的不平衡机器,都产生按位置來說是不動的,而随時間來說是变化的荷载。这种机器的轉数会是很大的(到10000轉/分鐘)。

質量为 m 的荷载对于轉动的軸有半徑長度为 r 的偏心(图1)时,这个荷载的轉动將引起机械的不平衡性,而使机械产生周期性的干扰力。使質量 m 得到向心加速度 $\theta^2 r$, 这里 θ ——轉动的角速度,

$\theta = \frac{2\pi n}{60}$ ——发动机一分鐘的轉动次数。在这种不平衡运动的情

形下,將使轉动的軸受有离心慣性力 P_0 , 它等于:

$$P_0 = m\theta^2 r.$$

梁的橫向振動是由离心力的豎直分力所引起的：

$$P_t = P_0 \sin \theta t, \quad (2.1)$$

式中 P_0 ——力的變化幅度；

t ——時間。

很显然，当時間 t 的增量為時間間隔 $T = \frac{2\pi}{\theta}$ 時， P_t 的大小重複它的數值，因此 T 是周期力數值的振動周期（它的轉動周期），而 θ 是干擾力變化頻率（所謂“圓周頻率”）。

在許多實際情況中，用時間的幂函數表示作用力（當常值集中力行動時，當連續均布荷載等行動時，主梁上結點壓力的變化規律）。時間函數的任意干擾力 $P(t)$ 的作用，可以根據疊加原理採用積分的形式進行研究：先確定沖量 $dS = P(t) \times dt$ 作用的效應，接着把表示沖量作用的函數積分，求所有力在變數從 0 到 t 的變化區間內作用的結果。

（三）可動的、隨着時間變化的荷載

這種荷載沿着結構物運動着，同時還作為時間的函數而變化着。當機車運行時，其過剩的平衡錘离心力的豎直分力產生可動的脈動荷載；因此對於機車就存在有可動的脈動力系，它隨着時間根據 (2.1) 式而變化它的大小。

（四）可動的撞擊振動荷載

實際上，機車的可動荷載產生非常複雜的撞擊振動作用，因為除了運動速度和豎直力周期性變化的因素以外，由於車輪外緣有凹陷和道路的不平坦，還經常地發生可動荷載的撞擊作用。特別有害的是經過相同的時間間隔作用在結構上有次序的一系列的撞擊作用〔9〕、〔37〕。並且荷載撞擊的節奏和結構自然振動頻率間的比例有一定的意義；如果這個比例接近於 1，則將發生很大的、對於結構有危險的動荷撓度和內力。