〔苏〕П．М．沃尔科夫
M．M．捷涅巴乌姆 著

农业机械强度和可靠性的计算及其理论基础

中国农业机械出版社

农业机械强度和可靠性的计算及其理论基础

[苏] П·М·沃尔科夫
M·M·捷涅巴乌姆 著

焦宝仁 杜广铮 魏松龄 译
华国柱 校

中国农业机械出版社

ОСНОВЫ ТЕОРИИ И РАСЧЕТА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАШИН НА ПРОЧНОСТЬ И НАДЕЖНОСТЬ

П.М.Волков М.М.Тененбаум

Москва, “Машиностроение”, 1977

* * *

农业机械强度和可靠性的计算及其理论基础

[苏] П·М·沃尔科夫 M·M·捷涅巴乌姆 著

焦宝仁 杜广铃 魏松龄 译

华国柱 校

*

中国农业机械出版社出版
北京市海淀区阜成路东钓鱼台乙七号
北下关印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行
新华书店经售

*

850×1168 32开 10印张 255千字
1983年7月北京第一版・1983年7月北京第一次印刷
印数：0,001—3,300 定价：1.25元
统一书号：15216・146

译者的话

这是一本关于农业机械强度和可靠性设计的书籍。书的作者比较全面地论述了农业机械的强度、耐磨性和可靠性的理论和计算，比较系统地介绍了苏联有关的研究试验成果。

全书分为四篇共十五章。

第一篇　机械金属结构的强度和寿命的理论和计算。论述了复杂空间机架的计算理论、农业机械典型机架的计算和薄壁断面型钢的设计，并结合实例介绍了应用矩阵和电子计算机进行计算的方法。书中还系统地分析了农业机械使用中产生的应力，阐述了零部件疲劳强度的试验研究和计算确定。

第二篇　机器零件的设计耐磨性理论基础和计算。阐述了机械寿命和零件的耐磨性，讨论了磨损动力学理论和磨损零件最佳设计参数的选定以及机械零件和工作部件设计耐磨性的计算。

第三篇　动力传动的寿命计算。阐述了三角皮带传动、减速器、万向节和滚柱链传动的寿命计算。

第四篇　机器可靠性的评定，阐述了可靠性的特点及试验的组织。

书中还详细地列出了参考文献目录。

充分发挥农业机械效能的重要前提就是要保证机械的寿命和可靠性，本书对与此有关的强度、耐磨性和可靠性，从理论和设计方面，根据试验研究成果，做了较详尽的讨论，并列举了许多实例。本书可供从事农业机械的研究、设计人员，农业机械制造专业和农业机械化专业的师生，以及其他有关专业的工程技术人员阅读参考。

本书第一篇一至三章由杜广铮同志翻译，四至六章由焦宝仁同志翻译，第二、三篇由魏松龄同志翻译，第四篇由焦宝仁同志

翻译。全书由华国柱同志校订。

在翻译中，名词术语尽量采用现行通用的译法。限于我们的业务水平，错误和不妥之处，请读者批评指正。

前 言

提高农业机械的可靠性，是有效地提高农业生产效率和在综合机械化的基础上，进一步发展农业和降低农产品成本的最重要的前提。

保证机器寿命和提高工作中的可靠性，节约金属和简化设计等问题，只有根据强度、耐磨性和可靠性的理论，并实际应用现代化的设计方法和手段，才能成功地解决。

农业机械的理论和设计，大约在四十年以前由B.П.戈利雅奇金院士及其同辈奠定了基础[32、111、112]。但是，从那时起到现在，机器的型号数量和复杂性已大大增加，速度也提高了。近几十年来，在应用数字电子计算机对复杂设计进行强度计算方面出现了一些新的进展。最近，又发展了机械及其元件的耐磨性理论和强度理论。在机械及其零部件强度、耐磨性和可靠性的设计理论及试验方面，学者和工程师们进行了大量的研究工作。研究的结果已在许多著作中论述。

本书的意图是综合这些材料，用便于实际应用的形式加以论述。为此，在书中的各个篇章里叙述了有关理论和方法的基本原则，还列举了计算实例。所述的机械理论、计算及试验等材料大部分是作者研究的成果，而且是首次发表。

本书提出了用矩阵理论计算农业机械机架结构的新方法。现在，用电子数字计算机计算复杂的静不定系统已在建筑结构的设计中应用推广，减少了设计的劳动量。矩阵法计算的优点是比较严密，通用性广。

农业机械的机架动力计算，还采用了解集中质量动力模型振动系统的微分方程式的矩阵形式。书中给出了农业机械典型机架的计算实例，理论计算的结果已由机架电测得到的实验数据所证实。

为了简化弯曲型钢几何特性的计算，采用了断面“形状系数”的概念。使用这种系数，断面特征点的坐标、惯性力矩、阻力矩以及其他几何参数，可以通过相应的毛坯特性和由形状决定的系数来表示。这就大大简化了由弯曲型钢制造的机架系统的计算，还可以对采用的不同断面形状进行分析对比。

本书对获得农业机械零部件的载荷特性、强度特性的实验方法，对机械零部件疲劳寿命的计算确定都给予很大的注意。

作者制定了农业机械不对称循环交变载荷的统计分析方法，并用许多例子加以说明。还引出了算法和用“明斯克-32”电子计算机处理应力波形图的程序。根据程序可以按下列的方法进行处理：最大值、折算或不折算成对称循环的幅值（原始的）及全波处理等。

第一次研究了农业机械零部件疲劳寿命试验方法的依据问题，包括近似于实际的随机载荷历程。制定了可以用作设计机械制造结构元件的寿命试验台的装置方框图。

在论证疲劳寿命的计算方法时，应用了C.B.谢列先和B.П.柯加叶夫制定的概率计算方法。这个方法考虑了农业机械的特点。

农业机械的寿命是许多设计的、工艺的和使用的因素的函数。对机械寿命影响最大的是零件和工作部件的耐磨性水平。耐磨性不够不仅增加备件需要量，而且缩短使用期限。零件和工作部件的磨损会破坏满足农艺要求的程度和稳定性，降低可靠性，降低效率。

提高零件和工作部件的耐磨性，是一个复杂的任务。它的基础研究比强度研究差。B.П.戈利雅奇金在研究农业机械设计的基本问题时就指出，他们的设计应有自己的特色，即建立在磨损的基础上[32]。由此，本书研究了磨损动力学理论的要素，极限磨损和它的确定，以便进行寿命计算，以及以磨损动力学分析为基础的磨损件参数的优化设计。

以上述材料为基础，设计师可以在新机器制定设计方案的阶

段，选定磨损零件在某些情况下保证规定使用寿命的最佳参数。

农业机械的可靠性和使用期限，很大程度取决于所采用的动力传动的寿命。本书介绍了农业机械的减速器、三角皮带传动、万向节和链传动等常用动力传动计算寿命的确定方法。推荐的计算方法带有估算的性质，需要根据实际数据进行补充和修正。

农业机械的使用特点，对可靠性问题提出了一系列的重要课题。农业机械属于多次作用的系统，它的使用有周期性。季节性使用，在一年中大部分时间停歇，它们的工作时间不长。

机组和零部件的可靠性不够，会引起停机，影响在最好的季节完成农事作业。农业机械的型号非常复杂（超过1000种），工作条件也很不同。因此，解决农业机械的可靠性问题，必须从分析研究的具体对象开始，既要利用其他工业部门推荐的一般规定，又要考虑特定任务进行必要的补充研究。

机械的强度、寿命理论和计算方法的进一步发展，应导致对问题的综合性解决。不言而喻，要应用电子计算机，将考虑一系列的因素：包括载荷、构件强度、耐磨性以及各种设计、工艺和使用的因素。

目　录

第一篇　机械金属结构强度和寿命的理论与计算

第一章　复杂空间构架的计算

矩阵理论的基础知识

数a_{ij}或其他性质的元素的集合，排列成矩形表的形式称为矩阵。

$$A=\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13}\cdots a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23}\cdots a_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots\cdots \\ a_{m1} & a_{m2} & a_{m3}\cdots a_{mn} \end{pmatrix}$$

矩阵的阶以行数m和列数n表征。$m=n$时，称为方阵。

由单行组成的矩阵，称为行矩阵。由单列组成的矩阵，称为列矩阵。行矩阵和列矩阵，称为行向量和列向量。

除主对角线元素外，其余元素均为零的方阵，叫做对角矩阵。

$$B=\begin{pmatrix} a_{11} & 0 & 0\cdots 0 & 0 \\ 0 & a_{22} & 0\cdots 0 & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots\cdots & \cdots \\ 0 & 0 & 0\cdots 0 & a_{nn} \end{pmatrix}$$

如果对角矩阵的主对角线元素全等于1（$a_{ii}=1$），叫单位

矩阵，即

$$E=\begin{bmatrix} 1 & & & 0 \\ & 1 & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & 1 \end{bmatrix}$$

元素$a_{ij}=a_{ji}$的方阵叫对称矩阵。每个方阵A有一个相对应的由矩阵元素组成的行列式

$$A=|A|=\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12}\cdots a_{1n} \\ a_{21} & a_{22}\cdots a_{2n} \\ \cdots\cdots & \cdots\cdots\cdots \\ a_{n1} & a_{n2}\cdots a_{nn} \end{vmatrix}$$

如矩阵的行列式等于零，称为奇异矩阵。反之，若矩阵的行列式不为零，则矩阵是非奇异矩阵。

若两个矩阵阶数相同，而且每一个对应元素都相等，就说这两个矩阵相等（$A=B$，若$a_{ij}=b_{ij}$）。

矩阵可以进行加、减、乘、除等数学运算。

两个矩阵A与B的和记作C，矩阵C中的元素$c_{ij}=a_{ij}+b_{ij}$。从两个矩阵和的定义，可推论出：只有同阶矩阵，才能进行相加。同样，两矩阵差，由等式$g_{ij}=a_{ij}-b_{ij}$来决定。

两矩阵相乘的概念，具有特殊的意义。设矩阵A有n列和r行，矩阵B为n行和m列：

$$A=\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12}\cdots a_{1n} \\ \cdots\cdots & \cdots\cdots\cdots \\ a_{r1} & a_{r2}\cdots a_{rn} \end{pmatrix}; \quad B=\begin{pmatrix} b_{11}\cdots b_{1m} \\ \cdots\cdots\cdots \\ b_{n1}\cdots b_{nm} \end{pmatrix}$$

实际上矩阵A的列数等于矩阵B的行数。矩阵之积AB就是mr阶的矩阵C（m—列数，r—行数），矩阵C的元素

$$c_{kl}=\sum_{i=1}^{i=n} a_{ki}b_{il}$$

或写成更直观的公式

$$c_{kl}=a_{k1}b_{1l}+a_{k2}b_{2l}+\cdots+a_{kn}b_{nl}$$

$$
(a_{k1}a_{k2}\cdots a_{kn})\begin{bmatrix} b_{1l} \\ b_{2l} \\ \vdots \\ b_{nl} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} & \vdots & \\ \cdots & c_{kl} & \cdots \\ & \vdots & \end{bmatrix}
$$

通常，矩阵的乘法不适合交换律：$AB \neq BA$。不难证明$AE = EA = A$。

借助于矩阵，可简单的写出线性代数方程组。例如方程组

$$
\left.\begin{aligned}
\delta_{11}x_1+\delta_{12}x_2+\cdots+\delta_{1n}x_n &= -\varDelta_{1p} \\
\delta_{21}x_1+\delta_{22}x_2+\cdots+\delta_{2n}x_n &= -\varDelta_{2p} \\
\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \\
\delta_{n1}x_1+\delta_{n2}x_2+\cdots+\delta_{nn}x_n &= -\varDelta_{np}
\end{aligned}\right\} \tag{1-1}
$$

等价于矩阵方程

$$
\delta X = -\varDelta \tag{1-2}
$$

式中

$$
\delta = \begin{pmatrix} \delta_{11} & \delta_{12}\cdots\delta_{1n} \\ \delta_{21} & \delta_{22}\cdots\delta_{2n} \\ \cdots & \cdots\cdots \\ \delta_{n1} & \delta_{n2}\cdots\delta_{nn} \end{pmatrix};\quad X = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix};\quad \varDelta = \begin{pmatrix} \varDelta_{1p} \\ \varDelta_{2p} \\ \vdots \\ \varDelta_{np} \end{pmatrix}
$$

可以证明，矩阵的乘法适合结合律，如$ABC = (AB)C = A(BC)$，即在阶数不变的情况下，矩阵乘法可以取任意方便的组合。关于加法分配律，对矩阵乘法完全适用，即$A(B+C)D = ABD + ACD$。

如果将矩阵A的行和列依次互换，反之，也一样，得到转置矩阵A'。这样，$a_{ij} = a_{ji}$，式中：a'_{ij}——转置矩阵A'的元素、a_{ji}——矩阵A的元素。很易得到等式$(ABCD)' = D'C'B'A'$。如果矩阵是对称的，即$A' = A$。

对于每一个非奇异方阵A，都可从等式$A^{-1}A = AA^{-1} = E$中求出逆矩阵A^{-1}。逆矩阵元素$a_{ij}^{-1} = A_{ji}/|A|$，式中A_{ji}——矩阵A元素a_{ji}的代数余子式。

如果矩阵A是对称的，那么它的逆矩阵A^{-1}也是对称的。容易验证下列等式

$$E^{-1}=E$$

$$(ABCD)^{-1}=D^{-1}C^{-1}B^{-1}A^{-1}$$

借助于逆矩阵，代数方程组（1-1）或（1-2）的解可以写成矩阵。对公式（1-2）两边各乘以δ^{-1}，得到

$$\delta^{-1}\delta X=-\delta^{-1}\Delta$$

或

$$X=-\delta^{-1}\Delta$$

矩阵，尤其是方阵，常常作为线性算子来解。

在矩阵方程$Y=AX$中，X和Y——向量；A——是非奇异矩阵，也就是把向量X变换到向量Y的算子。在这样变换时，向量的长度和方向都改变。

方向不变的向量的变换只是长度改变。这类向量称为矩阵A的特征向量。特征向量变换后的长度和变换前的长度之比叫做矩阵A的特征值。通常，特征向量和特征值的数等于矩阵A的阶。

确定矩阵的特征值λ的方程为$AX=\lambda X$。

展开后为

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12}\cdots a_{1n} \\ a_{21} & a_{22}\cdots a_{2n} \\ \cdots & \cdots\cdots \\ a_{n1} & a_{n2}\cdots a_{nn} \end{pmatrix}\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}=\begin{pmatrix} \lambda x_1 \\ \lambda x_2 \\ \vdots \\ \lambda x_n \end{pmatrix} \qquad (1\text{-}3)$$

代数方程组（1-3）没有自由项。它存在非零解的必要条件是使未知量系数组成的行列式等于零。即

$$\begin{vmatrix} a_{11}-\lambda & a_{12} & \cdots a_{1n} \\ a_{21} & a_{22}-\lambda & \cdots a_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots a_{nn}-\lambda \end{vmatrix}=0$$

这个方程叫特征方程，展开后如下：

$$\lambda^n+B_{n-1}\lambda^{n-1}+B_{n-2}\lambda^{n-2}+\cdots+B_1\lambda+B_0=0 \qquad (1\text{-}4)$$

由方程（1-4）可确定特征值λ_1，λ_2，λ_3，…，λ_n。对应每

个特征值λ_i 的向量（x_{1i}， $x_{2i}\cdots x_{ni}$）， 可将特征值 λ_i代入方程（1-3）后确定：

$$\left.\begin{array}{l}(a_{11}-\lambda_i)x_{1i}+a_{12}x_{2i}+\cdots+a_{1n}x_{ni}=0\\ a_{21}x_{1i}+(a_{22}-\lambda_i)x_{2i}+\cdots+a_{2n}x_{ni}=0\\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\\ a_{n1}x_{1i}+a_{n2}x_{2i}+\cdots+(a_{nn}-\lambda_i)x_{ni}=0\end{array}\right\}$$

超静定框架的计算

影响矩阵和位移矩阵。为了确定弹性杆系的内力，不管是静定结构或是超静定结构，平面结构或是空间结构，可以利用影响矩阵。影响矩阵就是影响线的组合，它把决定变截面杆系内在系数的影响线结合成为一个整体。

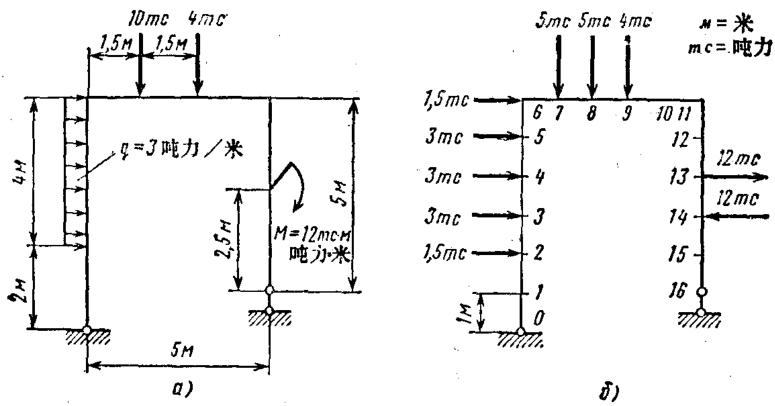

图 1-1 以集中力系代替外载

假定外载仅仅看作是作用在弹性系统确定断面上的集中力系。那么这样限制的结果，公式带有近似性。而计算的精度取决于所取的断面数。

研究图1-1a所示的框架系统。上面作用着强度为 $q=3$吨力/米的分布载荷，两个集中力10吨力和 4 吨力及一个集中力矩$M=$

12吨·米。

这个系统计算时，首先，以作用在确定断面上的集中力系代替外载。把框架分成长度为1米的区段。每段的长度不一定取成相等。以作用在截面2，3，4，5，6的（图1-1б）集中力系代替分布载荷。10吨力平均作用在截面7和8中间，可以分成两个5吨力，分别作用在截面7和8上。把集中力$P=4$吨力作用在截面9上，不要再分。然后把作用在13和14截面上的力偶来代替集中力矩。

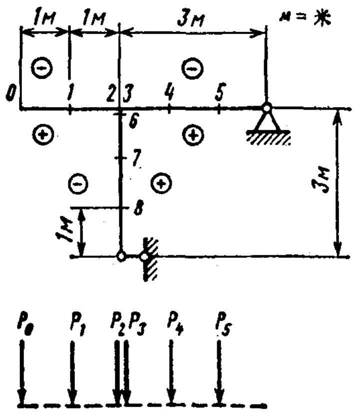

图 1-2　静定平面框架

为了说明影响矩阵是怎样建立的，研究图1-2所示的框架系统和建立弯矩影响矩阵。假设外力等于1，依次作用于截面0，1，2，3，4，5。力$P=1$作用在j截面时，在截面i上所产生的弯矩用m_{ij}表示。如果力$P=1$作用在0截面上，即得

$m_{00}=0$；$m_{10}=-1$；$m_{20}=-2$；$m_{30}=3$；$m_{40}=2$；
$m_{50}=1$；$m_{60}=5$；$m_{70}=10/3$；$m_{80}=5/3$

力$P=1$作用在截面1时，得

$m_{01}=0$；$m_{11}=0$；$m_{21}=-1$；$m_{31}=3$；$m_{41}=2$；
$m_{51}=1$；$m_{61}=4$；$m_{71}=8/3$；$m_{81}=4/3$

类似地可得到单位力作用在其他断面产生的弯矩。结果得到的矩阵为

$$m=\begin{bmatrix} m_{00} & m_{01} & m_{02}\cdots m_{05} \\ m_{10} & m_{11} & m_{12}\cdots m_{15} \\ m_{20} & m_{21} & m_{22}\cdots m_{25} \\ \cdots\cdots & \cdots\cdots & \cdots\cdots \\ m_{80} & m_{81} & m_{82}\cdots m_{85} \end{bmatrix}$$