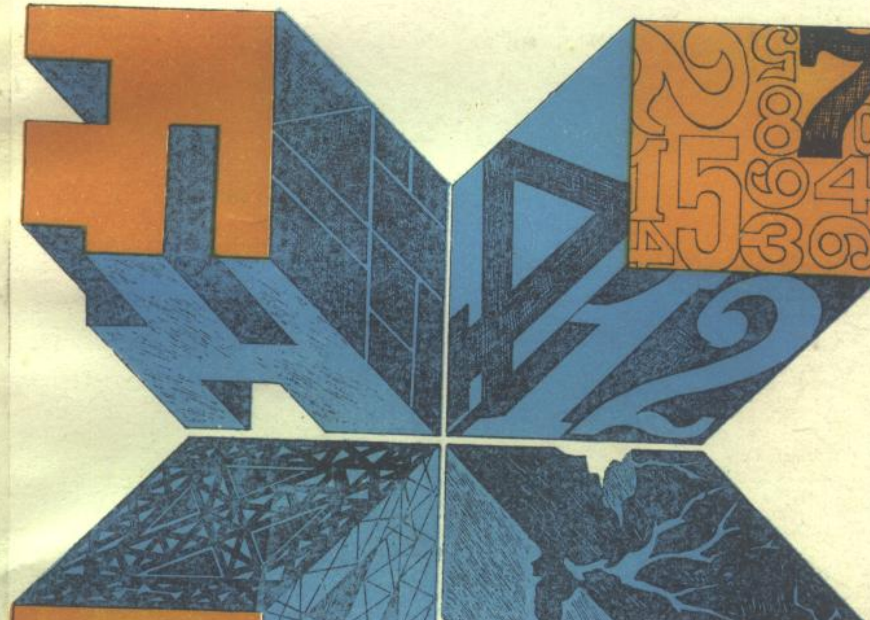
怎样保证强度

[苏] M.И.列伊特曼 著　　程捷　郑法学　黎钟 译



中国建筑工业出版社

怎样保证强度

[苏] M.И.列伊特曼 著
程 捷 郑法学 黎 钟 译

中国建筑工业出版社

今天不但仿生学和控制论日新月异，就是结构力学和材料力学这些古老的学科也不停地发展，要跟上它多么不容易。一些在职的工程技术人员，学生时代学到的知识不过是一点浮光掠影，由于工作繁忙要涉猎所有新的知识领域几乎不可能。本书目的就是要给他们填补这些知识的空白。书中力图浅显地介绍一些现代结构计算方法和近十年来这门科学的成果，包括矩阵法、有限元法、统计方法等。特别是使用电子计算机的方法和结构优化设计方法。从书中不但能了解一些新的知识，还能读到一点有关结构力学的小趣闻。

本书可供一般工程技术人员和工科大专院校师生阅读。

«ЗАЛОГ ПРОЧНОСТИ»
М.И.РЕЙТМАН
Стройиздат
МосквА, 1979

* * *

怎样保证强度
程 捷 郑法学 黎 钟 译

*

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
北京市顺义县印刷厂印刷

*

开本：787×1092毫米 1/32 印张：3½ 字数：79 千字
1982年11月第一版 1982年11月第一次印刷
印数：1—12,800册 定价：0.38元
统一书号：15040·4324

原书科学编辑序

本书是一本现代结构力学的普及读物。通常认为，科普读物是供没有受过很多专业教育的广大读者阅读，使他们以最简捷的途径了解某些对他们来说是新的学科的知识。目前，对于这样的认识，很多人认为已经过时和太狭隘了。一方面，一些客观上是新的科学概念、见解和方法迅速形成；另一方面，需要获得一些新思想体系情报的专业读者的数量大大增加。自然，就得根据这些数量很大的专业读者的需要（只要想想现有几百万高等学校毕业生就够了！），寻求最简单的方式给他们介绍最新的情报。

现代的科普读物风格正逐步形成。这些读物摆脱了次要的细节，而以受过专业教育的读者为对象，因为这些读者完全清楚地知道，他们离开校门并不等于学习结束，而要力求赶上时代发展的步伐。现在已有不少这样的读物，尤其在力学领域内。可见，这样的科普文献不但已作出一定的成绩，而且具有广阔的发展前景！

考虑到所有的读者对象，这类书的作者必须少采用数学和分析力学的工具。此外，这些书既属科学普及读物，对象是广大读者（广大并不意味都没受过很多专业教育），那就要将科学原理叙述得尽量简明。但时移势易，在今天没有数学公式已经不再是科普文章的必然标准了！

本书就属于这样的一种风格。书中浅显地阐述了结构力学以及结构计算方面科学思想的新方向，作者不但对现代科学问题具有敏锐的理解力，还具有文学的天才，也就是采用了所谓“轻松的笔调”。他将两者融为一体，创造出一本逸趣横生的读物，成功地普及新的思想，开阔读者的眼界。

前　　言

结构力学虽然早已诞生，但它迄今仍不失为一门十足的现代学科。很多学者曾为它献出自己的天才和劳动，但更多的人直接利用它的方法进行机械和建筑结构的计算。本书主要以后者为对象，目的在阐述结构力学的新方向。

结构力学非常缺乏普及性的读物❶。我们就是要或多或少地填补这些空白，但首先遇到的是选材的困难，最后选择了十个专题。选题的标准是：（1）对现代结构设计的实践是重要的；（2）相对来说只属于基本概念。当然，作者的科学兴趣还是起主要作用。

这是一本普及读物，既非教材也非评论❷，是准备写给研究材料力学、结构力学，以及希望马上毫无困难地就能知道今天强度科学现状的读者阅读的；同时，对于结构力学的专业人员来说，既可以作为一本"轻松的简介性读物"，也可借以反复思考若干现代科学的问题。

这里来谈一谈书中采用的叙述体裁问题。据说，欧几里得曾经骄傲地向企图轻而易举地掌握几何学的国王宣称：在科学中"没有帝王的道路"。这个故事可以有各种各样的理解。但不能排除它是由一些蹩脚的老师编造的。一些专家都

---

❶ 结构力学的普及读物只有：M.Гордон的[7]（该书与其说是结构计算，不如说是新材料的介绍）В.И.Феодосьев的[21]（该书对象首先是机械制造工人）以及Г.Б.Колчин的[10]（该书题材与本书类似）。

❷ 参考书[5]即为这样的评论。

以“没有帝王的道路”为骄傲，给大部分读者切断了通向学术之宫的道路。因此，作者极力注意使书中的叙述易为读者所理解。可惜，还不能完全避免应用数学的计算，因为没有它，很多重要的结构力学原理就不能表达。由于基础不同，对于数学公式，有些人一看就懂，有些人则难以理解。考虑到各方面的兴趣，编写时我们尽量使读者能从中吸取一些有用的知识，而又避免某些计算问题。

在这样宽阔的课题下，要介绍的书刊内容显然是不可能全面的，因此，我们只能选择那些对读者有用的出版物的内容加以列出。

书后附的参考文献列入了相当广泛的出版物；对于与结构力学无关而我们又感兴趣的某些方面的出处，则在正文以脚注列出。

读者如认为本书有任何优点的话，那完全可能是由于作者的同仁给予真诚的帮助带来的。在拟订提纲时尔然尼采（А.Р.Ржаницын）及卢金(О.В.Лужин)的意见是有裨益的；在整理初稿时，列卡奇（В.Г.Рекач）提出了内容丰富的意见，柯尔钦（Г.Б.Колчин）提供了一些统计资料。遗憾的是，不能在前言中将所有曾给予帮助的人一一提出。

目　　录

第一章　什么是结构力学

我们在这里先和读者共同回顾一下结构力学的诞生，并粗略地给它勾划出一个“概括性的轮廓”，也就是从各个角度对它作一个描述。

力学是一门古老的学科，它已有好几千年的历史。无疑地，当阿基米德致力研究并以自己的著作使结构力学增辉时，这门科学就早已存在了。虽然，第一个将力学原理用于解决强度计算问题的是十七世纪的伽利略，但真正应用力学进行实际工程计算并不太早。直至1826年法国学者纳维埃还写道：“大多数的匠师都是根据已有的结构样板来决定机械和工程结构部件尺寸的”。

通常专门匠师是从前人的经验中得知，结构在什么情况下能经久耐用，在什么情况下会破坏，只凭经验办事。这就非常不方便了，因为常常会在快要建好时产生怀疑，特别当建造的结构并非仿造旧有建筑时就更是这样了！

萨马尔汗宏伟的比．比-哈内姆(Би Би-Ханым)清真寺的遗迹表明，由于建筑上的错误导致了清真寺在建好后三十年就因砖的强度不足而破坏。这样的情况在古代应该说是不少的。但随着结构的破坏，这些错误的证据也随之消失了。因而，使后来的人们得出一个错误的结论，认为古代的建筑全都是很牢固的。其实，只不过那些建造得牢固的能保存下来吧了！还没有结构强度的计算方法时，建筑师的责任是非常重的。这在古代法律中曾有所记载。例如，巴比伦的立法者

汉穆拉比（约在公元前1700年）就曾写道，“凡匠师建造或设计之房屋不牢，使房屋倒塌，以至住户死亡者，应将匠师判处死刑”；❶当然，与此同时，并没有提到如何保证强度的问题。因为人为的法律规定必然远比揭开自然的规律为早；而对这些硬性法律的反响只能在更晚的时候才能察觉。1830年建筑师罗西(К.И.Росси 1775～1849)建造彼得堡亚历山大剧院时（现为普希金大剧院），为了答复人们对他设计的铁屋架强度的怀疑而向政府发誓[3]：“……如果上述金属屋盖结构的房屋发生任何不测，请把我立刻吊在其中的一根梁上示众❷”。再早一点的其它俄国建筑师卡扎洛夫(М.Ф.Казалов)参与莫斯科大学校舍一个圆拱顶的设计中，在开始审查他设计的拱架时就遇到另外一些参加者的反对。这个圆拱顶至今还完整无损。

十八世纪末的工业革命，以及随后狂热的技术发展，特别是运输业的发展，使强度问题的解决成为当时科学发展的基础。它们解决问题的半直观、半经验的方法已成为进步的严重障碍。在建造大型的工程结构，首先是铁路桥梁时，就再也不能只依靠经验和感觉了。由于错误而直接和间接造成的损失越来越大。这样，在上世纪二十年代的实际需要促使下，材料力学终于成为一门独立的学科。与此同时，又建立弹性理论，在整个十九世纪期间成功地发展了杆件体系的理论。在十九世纪的下半叶，找到了解决超静定结构的一般方

❶ 摘自Proc.Inst.Civ.Engr.V.56,407-427Nov.,1974中A.Baker的论文。

❷ 大家可以看出，这句话的背后是狡猾的。因为屋架梁有不测或破坏时就不能把罗西吊在上面了。不过罗西的感觉和经验并未找到根据，屋架也没有倒塌。当然，从罗西的屋架中抽掉一些材料还是可以不影响它的可靠性的。

法，出现板壳理论，并筹划解决某些动力强度问题等等。在工程设计中对结构强度估计有了可靠的基础[见克雷洛夫文集《设计计算》（Превычисления）]。

但结构的型式不断发展和复杂化；新的结构形状和结构材料不断出现；实践在理论面前不断提出新的问题；使强度学不断地向广度和深度发展。它的发展具有狂潮般的特征，而且特别应该指出，时至今日还仍然是这样❶。

不论是高达几百米的电视塔，也不论是今天一跨长度达一公里半的大桥，或者大多数体型尺寸虽不大但作用极其重要的房屋及结构物等等，所有这些在本世纪中都是经过结构力学计算而建造起来的。按人们的想象，对于社会文明是如此重要的学科本应具有严肃的社会信誉；但令人奇怪的是，它至今没有达到这样的地步。结构力学与各种技术不同，社会的各阶层在任何时候都不会对它极端关心的（而对电磁学之类则不然）。我们知道，陀斯妥耶夫斯基和谢什克都受过工程师的教育，曾经学过材料力学，但要在他们的作品中找到这些痕迹是徒劳的。甚至工程建筑家格林-米哈伊洛夫斯基在它的小说《工程师》内也没有一次提到结构强度的计算问题❷。相反，可以回想一下，医生的职业给契可夫、布尔加科夫、维雷萨耶夫或莫埃姆的作品却打下非常明显的烙印。公道也好，不公道也好；反正结构计算问题是很少能

❶ 在二十世纪中叶以前，这些发展的详细过程在铁木辛柯的名著[9]中有详细的介绍（也可参考[3,9]）。

❷ 似乎，首先在文艺作品中对强度讲得最清楚的是十八世纪中国古典文学家曹雪芹利用中国古代神话的描述，他写道："……那女娲氏炼石补天之时……，炼成高十二丈，见方二十四丈大顽石三万六千五百零一块"（见《红楼梦》第一回译者注）。这样的描述几乎成了一幅施工图，后来的作者大都不去描述这样的技术细节，而只详细描述女娲炼石修补成的美丽的天空而矣！

够触动社会和那些社会喉舌的。

的确，结构力学是一门不惹人注意的学科，但它成为一门独立的学科已经三百年，在各门学科的集汇中却占有虽然是平凡而却被人尊敬的地位。

不管那些怀疑论者有什么意见，结构力学作为一门科学并没有完结，其中还有很多问题仍然未被学者认识❶，结构力学本身也还不是经常能够给建筑工作者提供帮助。不管贝利在他的小说“十点半的台球”一书中描写的主人公古戈说什么：“静力学，这是关于力的平衡，以及承重结构中应力和变形的学问，没有这些学问就不能建造那怕是一所非洲的茅屋。”❷但迄今为止，不但是小房子，也不但在赤道上，还经常有未经计算或只经非常简单计算而建造起来的房屋。但不是说，它能保证工程质量都是好的！

什么是今日的结构力学呢？从情报的观点看，这就是包括几千万册的书籍、文章、报告和文摘；每年投入这个海洋中的还有壹万伍千个研究项目。要想找到一个能完全掌握这些情报的专家就太天真了。自然，任何人也不能一天阅读五十篇论文，何况这些论文中还有多卷本的呢？但各种门类的专家毕竟想出了办法，掌握自己本门学科的发展总趋势，起码掌握他们接近的各分支的发展趋势。所有的研究成果、经验、文摘期刊《力学》（可能还有报刊消息），都能帮助他

---

❶ 但是学者们了解的很多主要东西，其它人是不知道的。

❷ 顺便提一下，这大概是作者所知道的作为结构力学家出现的唯一小说人物 但它总使人怀疑，小说作者主要是强调主人公的职业是乏味的。在现代小说中描写那么多各种各样的专业工程师，即使是虚构的，也不知道为什么几乎总碰不到一个作者的同行呢？[古戈是贝利（Г.Бёлль）的小说《十点半的台球》（Бильярд Вполовино Десятого）中的主人公——译者注]

们从整个结构力学的巨流中吸取对他们极为有用的涓涓不断的源泉。但对工程实践家就不好办了。因为他们要掌握这些情报资料是困难的，何况在结构力学中应用的数学也确实太复杂了。今天应用到的，除微分方程和代数外，还有概率论、数学规划、电子计算机的程序设计、矩阵及向量计算。为了开展现代结构力学的研究，不掌握各种各样的数学工具是不成的，其中包括：控制论、张量、函数分析、群论、代数拓扑学……等等，难道还要开列下去吗？爱恩斯坦曾经带着半开玩笑的口吻指出："就是其中一门数学，不再加别的学科，也足以费尽人的短促的一生了"。

但数学的困难，并不是掌握最新科学成就的唯一障碍，还有语言的困难。有人根据收集到的用各种文字写出的有关结构力学的文章进行统计，其所占的百分比如下（摘自《力学》文摘）：

年	俄　语	英　语	德　语	法　语	其　它
1955	28.8	38.8	15.1	8.8	13.5
1965	32.9	45.6	7.9	3.7	9.9
1975	46.5	37	4.4	2.4	9.7

上述数据说明，撑握外国语也是相当重要的。

怎样选定结构力学中当前最急需发展的方向呢？现代科学标准就是它的选择准则之一❶。结构力学最急需发展的门类，其文章资料增加的数量要比整个学科文章资料增加的数量要多得多。整个结构力学文章资料的数量九年增加一倍，

❶ 参见В.В.Налимов З.М.Мульченко М.Наукометрия：«Наука»，1969。

而结构优化设计方面则四年半就增加了一倍。非弹性材料的结构计算研究项目，比弹性结构研究项目的增加要快一倍半。近年来突出的是有限元法，有限元法的文章资料每三年就增加一倍。但这种判别准则并不是无可非议的。很多文章只不过制造了一种"情报性的热闹气分"，而且这些文章完全是按假定分类的，属于最新科学门类的出版物昨天却还完全没有。但无可怀疑，与经济学、计算技术、概率论等其它学科有关的结构力学问题首先属于最急需发展的门类。

第二章　位移法及矩阵理论基础

位移法是现代结构力学的主要方法之一。它的方法怎样，以及如何运用现代矩阵运算呢？设有一杆系，其结点的广义位移为u_1、u_2……，以单位线位移或单位角位移量度，且外力作用于节点上。（您也许会问：如果外力作用于杆件的中间怎么办呢？那就应该简单地假设在外力的作用点处有一节点了。）又设各节点作用着广义力P_1、P_2……，它们中每一个力对应于同脚码的节点的广义位移。设u_1及P_1分别为节点A的转角（图1a）及作用于该节点的外力矩。图1所示刚架共有两个广义位移，即节点A及B的转角。按位移法，首先研究单位位移$u_1=1$及$u_2=1$引起的结果。令节点A作一顺时针的单位旋转。根据已知的材料力学公式，这时候，各杆将产生反作用力矩：

$$\left.\begin{aligned} M_{A1}^{(1)}=M_{A2}^{(1)}=M_{A3}^{(1)}=\frac{4EJ}{l} \\ M_{B1}^{(1)}=\frac{2EJ}{l};\quad M_{B4}^{(1)}=0 \end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}1)$$

同时，节点B的单位旋转也使各杆具有下列反作用力矩

$$M_{A1}^{(2)}=\frac{2EJ}{l};\quad M_{A2}^{(2)}=M_{A3}^{(2)}=0\ ;\quad M_{B1}^{(2)}=M_{B4}^{(2)}=\frac{4EJ}{l}. \qquad (2\text{-}2)$$

在外荷载作用下节点实际的角位移u_1及u_2在各杆引起的实际反作用力矩，比上述单位位移引起的反作用力矩相应地要大u_1及u_2倍。

对于节点A

$$R_A=r_{11}u_1+r_{12}u_2=\left(\frac{4EJ}{l}+\frac{4EJ}{l}+\frac{4EJ}{l}\right)u_1+\frac{2EJ}{l}u_2$$

对于节点B

$$R_B=r_{21}u_1+r_{22}u_2=\left(\frac{4EJ}{l}+\frac{4EJ}{l}\right)u_2+\frac{2EJ}{l}u_1 \qquad (2-3)$$

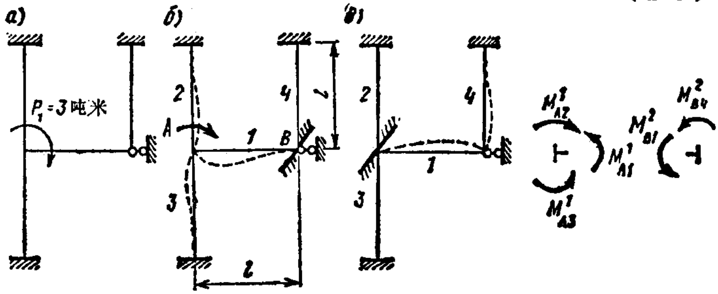


图 1

式中 r_{11}——在第一节点中由于该节点作单位旋转引起的反作用力矩；r_{12}——在第一节点中由于第二节点的旋转而引起的反作用力矩，等等。

考虑节点在杆件的反作用力矩及外荷载作用下应处于平衡。由此，

$$\left.\begin{aligned}r_{11}u_1+r_{12}u_2=P_1\\ r_{21}u_1+r_{22}u_2=P_2\end{aligned}\right\} \qquad (2-4)$$

设各杆刚度EJ相同，且$EJ/l=1$，则利用式（2-3），方程组（2-4）可表为

$$\left.\begin{aligned}12u_1+2u_2=3\\ 2u_1+8u_2=0\end{aligned}\right\} \qquad (2-5)$$

这样，我们便可写出由未知位移表示的位移法正则方程。解这一方程组得$u_1=6/23$，$u_2=-3/46$。这就是根据位移法算出的刚架节点的真实角位移。大概自上世纪的下半叶直到本世纪的中叶，位移法都是以这样的形式出现的。但是，利用向量和矩阵方法时，就有必要将上述方法表示成某些其它的形式。

象军队下命令那样

在结构力学中常常有大量的的数值和变量要以相同方式进行变换。力法和位移法的未知数都满足同样类形的方程组。然而，在一般数学写法中，都必须将各方程组的每一项分别写出。能不能象司令官给军队下命令那样，不分别针对一个士兵，即方程的各项，而利用成组的数进行运算呢？利用矩阵理论是可以的。矩阵理论在近代结构力学中已得到广泛的应用。

设变量x_1、x_2……及y_1、y_2……的关系式为：

$$\left.\begin{array}{l} y_1=a_{11}x_1+a_{12}x_2+\cdots\cdots+a_{1n}x_n \\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \\ y_m=a_{m1}x_1+a_{m2}x_2+\cdots\cdots+a_{mn}x_n \end{array}\right\} \qquad (2\text{-}6)$$

为了简捷地写出这些关系式，不得不引入若干专门的概念，也就是，将y_1、y_2……y_m及x_1、x_2……x_n的集合称为**列向量**，以花括号表示，如

$$\{y\}=\left\{\begin{array}{c} y_1 \\ y_2 \\ \cdots \\ y_m \end{array}\right\} \qquad (2\text{-}7)$$

$$\{x\}=\left\{\begin{matrix} x_1 \\ x_2 \\ \cdots \\ x_n \end{matrix}\right\} \tag{2-8}$$

这样的向量与一个班的士兵排成“纵行”相似。方程组系数的集合 $a_{ij}(i=1,\ \cdots\cdots m;\ j=1\cdots\cdots n)$ 则称为矩阵$[a]$：

$$[a]=\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix} \tag{2-9}$$

这可比拟为军队中分别排成“纵行”的 n 个班组成的一个排。公式（2-6）的运算，由矩阵$[a]$与向量$\{x\}$相乘求得。这就可将公式（2-6）写成紧凑的形式：

$$\{y\}=[a]\{x\} \tag{2-10}$$

如果在某些书籍中，将这个关系式写成其它的形式也不要觉得奇怪，比如写成

$$y=Ax$$

式中　y 及 x——向量，A——矩阵，没有加专门的小方括号。

在这里我们选用的是有限元法文献[8]中广泛应用的符号。

这样，$[a]\{x\}$乘积的列向量中的每个元素，即为矩阵$[a]$各行的元素与列向量$\{x\}$各元素乘积之和。因此，矩阵与向量的乘法运算，只当矩阵的列数与列向量$\{x\}$的维数（分量）相等时，才有意义。在特殊情况下，如矩阵只有一行，也就是