

实用钢结构计算与设计

黄耀怡 著
应达之 审

中 国 铁 道 出 版 社

1991年·北京

实用钢结构计算与设计

黄耀怡 著
应达之 审

中 国 铁 道 出 版 社

1991年·北京

(京)新登字 063号

内 容 简 介

本书系作者根据自己长期从事钢结构研究设计的实践经验,介绍了关于钢结构计算与设计的一些独特方法。这些方法经理论推导和实际使用,证明它们既经济可靠又简单易行,具有较大的推广应用价值。内容包括:计算技术,结构分析,弹性稳定设计,振动与疲劳设计,荷载分布计算,塑性设计,计算机辅助设计,结构静、动载试验等。

读者对象:钢结构或钢桥专业的科研、设计、施工、管理人员,大专院校师生。

实用钢结构计算与设计

黄耀怡 著

*

中国铁道出版社出版、发行

(北京市东单三条14号)

责任编辑 安鸿逵 封面设计 刘景山

各地新华书店经售

中国铁道出版社印刷厂印

开本: 787×1092毫米 1/32 印张: 10.75 字数: 237 千

1991年 11月 第1版 第1次印刷

印数: 1—6500册

ISBN7-113-01029-6/TU·229 定价: 5.30元

序

工程结构的设计理论正处在一个伟大变革的时代。电子计算机及电子仪器的进步，新的建筑材料的研制，实验测试技术及施工方法的进步，再加上一些跨学科的新的理论与方法的互相渗透，使工程结构的设计理论得到了飞速的发展。优化设计、自动设计技术已逐步实用化。最近更由于可靠性理论的应用，正在向概率极限状态设计法过渡。然而，从结构设计的全部内容来看，完全解决这一问题，还需要相当长的一段时间。

过去习惯上常将结构设计的工作范围看得较窄，即结构的力学分析，杆件配置与截面设计。从工作的顺序看，它是计划与施工的中间阶段。其实所谓设计的工作范围，应从结构计划，结构形式的选择，到结构分析和确定截面，包括这个全过程。结构设计的目的是在可能容许的风险率的范围内，对建造中及使用中的全部作用，使结构能满足所需的安全性、耐久性及使用性，包括景观的要求，并达到经济合理。总之，应从系统优化的角度来考虑问题。

就钢结构的具体问题来说，大跨度桥梁与高层建筑的修建，丰富了人们的社会生活。没有钢结构工程学的进步，在以前是难以想象的。其中尤以高强度钢的焊接，应用高强螺栓的接合，作用于钢结构的各种外力的评定以及疲劳强度等的深入研究，促进了钢结构设计的进步。

随着现代科学技术的进步，结构设计领域内的主观的、经验的因素，逐步改变了它原来的作用。例如对安全度的评

价问题,就不再单纯依赖经验来主观评定了。但是,工程技术人员的创造性,艺术性及其宝贵经验是永远不能忽视的。

黄耀怡高级工程师长期从事钢结构和钢桥计算与设计研究工作,勤奋好学,有丰富的实践经验,曾发表过许多有益的论文和报告。现在他在这些工作的基础上,完成了《实用钢结构计算与设计》一书。本书所涉及的内容比较广泛,都是在实际钢结构计算与设计中可能遇到的一些问题。本书以一系列实际例子,比较详细地介绍了许多独具一格的实用方法,并且注意到了本专业科技发展的动态,提出了一些有价值的见解与建议。作者的目的是使设计人员通过简捷的计算求解一些较为复杂的结构问题,既能提高计算效率,又注意到了保证计算精度。著者把重点放在计算技术与结构分析方法上,包括结构稳定、振动与疲劳设计等,相信这些都是工程技术人员所感兴趣的问题,换句话说,本书内容是以处理所谓狭义的结构设计问题为主。如前所述,随机结构分析在实用上目前还处在起步阶段,本书从实用角度出发,以确定性问题为主,对解决工程实际问题是有裨益的。所以我在本序言中补充说明了关于结构设计理论发展的一些个人的看法,目的是为了向读者推荐本书,并了解本书的地位与目的。敬希广大读者提出宝贵意见。

陈英俊

1990年7月28日于北方交通大学

前 言

本书试以“理论密切结合实践并注重实际应用”为指导思想，深入浅出地介绍了实用钢结构计算与设计的一些方法。这些方法大多为作者独创且经实际使用证明，具有较好的实用性。在总结这些方法时，力图使其经济合理、安全可靠，又简单易行，同时注意到与有关现行规范的对应。

本书所涉及的内容较为广泛，包括计算技术、结构分析、弹性稳定设计、结构振动与疲劳设计、荷载分布计算、偏心受剪螺栓连接的弹、塑性设计、计算机辅助设计、用钢分析与选择、结构的静、动载试验等。对于上述每方面的问题，书中以围绕一个专题或实例的方式，力求通俗易懂地将一些独具一格的方法详尽地介绍出来。读者将可见到，全书各章中的每一节，都是一种可以独立地应用于有关钢结构设计的实用方法或新的见解；而各章节之间在内容上又有一定的联系。这些方法，大多数是作者在科研设计实践中首次建立与实现的；也有少数是作者对既有方法的推广与应用（例如第一章中的子结构法与波前法），或是在学习和吸收国外新的规范和新的研究成果的基础上，提出作者的见解与建议（例如第四章中的疲劳设计的应力脉准则）。书中对每种方法的论述，既注意到对基本概念、原理和方法的介绍，又注意到在理论上的严谨推导与分析，力求得出比较简单易行的实用方法，以提高计算效率和确保计算精度。

本书的一些内容曾在有关学报发表，有的被专业学会评为优秀论文，有的被现行的设计规范所采纳。应用过本书所

目 录

第一章 计算技术.....	1
第一节 一次放松全部约束的子结构法的原理与应 用.....	1
一、引 言.....	1
二、位移方程式求解过程的物理意义.....	2
三、子结构法的基本原理.....	4
四、一次放松全部约束的子结构法的基本公式.....	10
五、计算步骤.....	13
六、应用举例.....	14
七、小 结.....	30
第二节 波前法在大型结构分析中的应用.....	31
一、引 言.....	31
二、波前法的基本概念.....	32
三、波前法的解题步骤与应用.....	34
四、总结与提示.....	64
第三节 标示矩阵两大特性在带宽优化中的利用.....	68
一、引 言.....	68
二、利用标示矩阵两大特性的方法要 领.....	69
三、实施步骤及子程序.....	73
四、在迭代法中的运用.....	86
五、结 论.....	89
第四节 程序覆盖技术在微机中的实现.....	89

一、引 言	89
二、程序覆盖概念及用法选择	90
三、程序覆盖技术的实施方法	93
四、举 例	96
五、结 论	98
第二章 结构分析	101
第一节 米字形钢桁梁近似算法及其误差	101
一、引 言	101
二、近似算法	103
三、精确算法	104
四、近似算法的误差	106
五、结论与建议	113
第二节 空间混合式框架体系结构分析的新算法	117
一、引 言	117
二、空间混合式框架体系结构分析常用方法述 评	118
三、关于归平面法	122
四、计算步骤与结果	129
五、结 论	130
第三节 铁路车辆底架结构分析的理想算法	131
一、引 言	131
二、车架结构分析常用方法述评	132
三、车辆底架结构的归平面分析	136
四、不同抗扭刚度之若干计算结果比较	142
五、结论与建议	144
第三章 结构弹性稳定设计	146
第一节 大型起重机械箱形大梁(臂)腹板开大孔设计 的理论与方法	146

一、引 言	146
二、开孔设计的总体考虑	147
三、关于孔周应力集中问题	149
四、 Π 形梁段的总稳定性问题	150
五、开孔腹板的局部稳定性问题	151
六、设计算例及试验研究	162
七、结 论	166
第二节 半穿式钢梁的合理计算	166
一、引 言	166
二、对既有两种算法的讨论分析	167
三、合理的计算方法	174
四、结 论	177
第三节 Π 形拆装式钢桁梁及其侧向稳定性计算	177
一、 Π 形拆装式钢桁梁的特点及力学特征	177
二、受压下弦杆自由长度计算	181
三、桁梁在全悬臂状况下的侧向稳定性分析	190
四、算 例	193
五、结 论	195
第四节 关于压挠杆件稳定设计的若干问题	196
一、引 言	196
二、单向受弯的压挠杆	198
三、双向受弯的压挠杆	199
四、算 例	202
五、结 论	204
第四章 结构振动与疲劳设计	207
第一节 结构自振频率近似计算的等效质量法和叠加 法	207
一、引 言	207

二、用等效质量来计算自振频率的原理 与方法	208
三、单根构件的自振频率计算	209
四、连续结构的自振频率计算	214
五、关于高层构架的摆动计算	227
六、结 论	230
第二节 关于钢桥疲劳设计的应力脉准则	231
一、引 言	231
二、应力脉准则的基本概念与原理	232
三、应力脉准则计算方法说明	236
四、应力脉准则的重要特点及其意义	243
五、结 论	244
第五章 荷载分布计算	248
第一节 铁路桥梁影响线自动加载的直接法	248
一、引 言	248
二、直接加载法原理	248
三、直接加载法的实用算式	249
四、关于列车的等效集中力系	254
五、结论与说明	255
第二节 多片式钢桁梁桥荷载横向分布计算	256
一、引 言	256
二、荷载弹性分布的空间概念与特性	258
三、用等效梁-归平面法计算多片式钢桁梁桥 的荷载横向分布	261
四、结论与建议	271
第六章 结构设计与试验	273
第一节 非永久性钢桥的用钢理论与实践	273
一、引 言	273

二、关于钢材的机械性能	274
三、关于高强钢的可焊性及焊接工艺问题	278
四、疲劳问题	282
五、关于压杆的稳定性	284
六、竖向刚度问题	286
七、防腐蚀问题	287
八、关于钢材的供应	288
九、造价问题	289
十、结 论	290
第二节 计算机辅助设计技术在拆装式桁梁桥梁跨设计	
中的应用	290
一、引 言	290
二、关于电子绘图机的应用	292
三、拆装式桁梁桥梁跨设计自动化实施要点	294
四、自动设计程序框图	300
五、结 论	301
第三节 关于偏心受剪螺栓连接的弹性与塑性设计	302
一、引 言	302
二、偏心受剪螺栓连接的弹性设计	302
三、偏心受剪螺栓连接的塑性设计	305
四、几种设计方法比较	311
五、几点建议	312
第四节 铺轨架桥机结构静、动载试验过程与分析	313
一、引 言	313
二、试验目的和任务	314
三、主要试验仪器及设备	315
四、试验项目、过程及结果分析	315
五、结 论	328

第一章 计 算 技 术

第一节 一次放松全部约束的子结构法的

原理与应用

一、引 言

将整个结构离散为有限个单元，首先进行单元分析，建立单元角点位移与角点力之间的关系；再将所有单元用有限个节点在单元角点处连接起来，进行整体分析，利用节点的平衡或变形协调条件，得到一个描述整个结构受力状态的代数联立方程组，从而求得节点位移或节点力，这是有限元法的一个最基本的分析方法。由于联立方程式的元数等于所分析结构的节点总自由度数，因此，即使简单的结构也有几十元，大型复杂结构就有几百元至上万元。这意味着大型的结构刚度矩阵要占用计算机大量的贮存单元，解高阶方程组须花费大量机时，解线性方程组所耗机时约占总机时的20~50%（方程组阶数越高，所占总机时比例越大），解非线性方程组所耗机时约占总机时的80%左右；而结构刚度矩阵的三角化及方程组的回代求解，其工作量分别与方程组阶数的三次方和二次方成正比。因此，如何最低限度地占用机器的存贮单元，如何最大限度地减少不必要的运算，已是目前结构电算中十分重要的问题。于是，人们在实践中研究出了许多优化算法，本文所述的子结构法就是其中的一种，它已成为当前分析大型复杂结构常用的方法之一，在国内工程领域中

得到了广泛的应用。子结构法种类比较多，本文所述的一次放松全部约束的子结构法是用得最多的一种。

二、位移方程式求解过程的物理意义

由于我们系以位移法为基础来讨论子结构法，故首先说明位移方程式求解过程的物理意义，将有助于对问题的深入理解。

说明求解方程的物理意义，则必须追溯到位移法典型方程式的含义。

结构力学中的位移法典型方程式与应用于电算技术的矩阵位移法刚度方程式是完全一致的，实质上都是结构静力平衡方程式。下面我们将把两者统一起来讨论。

如图1.1a)所示之平面刚架，假定不考虑线位移而仅取节点1、2、3的转角 Z_1 、 Z_2 、 Z_3 为未知数，其相应的基本结构如图1.1b)所示。试比较一下原结构和基本结构，可以发现两者有如下的差别：在外力作用下，原结构各节点均将发生角位移，但基本结构上的节点却没有角位移。另一方面，基本结构在附加约束处具有抵抗力矩，而原结构因在这些地方不存在附加约束，故并无抵抗力矩存在。这是矛盾的。要消除这一矛盾，我们只有强迫基本结构的节点发生与原结构相同的转角即 Z_1 、 Z_2 、 Z_3 。如此，基本结构的变形情况就会与原结构的变形情况完全相同，因而其内力的分布也就相同，故此时基本结构的各附加约束上的抵抗力矩之和也应等于零。我们令 r_{ik} 表示，由于附加约束 K 被强迫转动 $Z_k = 1$ 时，在附加约束 i 上所造成的抵抗力矩， R_{ik} 表示由于荷载在附加约束 i 上产生的抵抗力矩，于是位移法的典型方程式可写成：

$$\left. \begin{aligned} Z_1\gamma_{11} + Z_2\gamma_{12} + Z_3\gamma_{13} + R_{1P} &= 0 \\ Z_1\gamma_{21} + Z_2\gamma_{22} + Z_3\gamma_{23} + R_{2P} &= 0 \\ Z_1\gamma_{31} + Z_2\gamma_{32} + Z_3\gamma_{33} + R_{3P} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1.1)$$

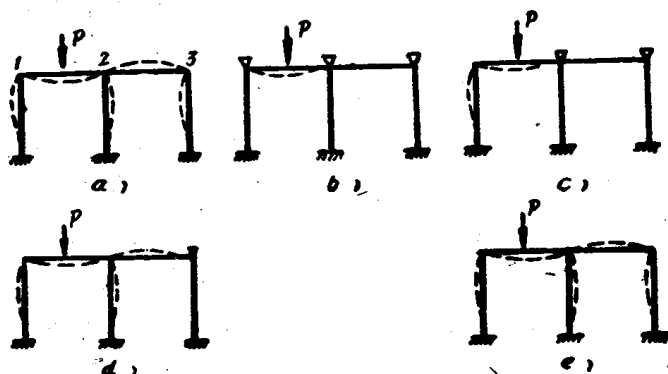


图1.1 位移方程式求解过程的物理意义

前已述及，位移法的典型方程式实质上是结构静力平衡方程式。我们将 R_{iP} 项移至方程式的右端，其负号理解为力的方向而被省略，则(1.1)式可用矩阵形式表示为：

$$\begin{pmatrix} \gamma_{11} & \gamma_{12} & \gamma_{13} \\ \gamma_{21} & \gamma_{22} & \gamma_{23} \\ \gamma_{31} & \gamma_{32} & \gamma_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ Z_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_{1P} \\ R_{2P} \\ R_{3P} \end{pmatrix} \quad (1.2)$$

用高斯消去法将未知数 Z_i 逐一消去后，最终可得一与(1.2)式等价的三角形方程组：

$$\begin{pmatrix} 1 & \gamma_{12}^{(1)} & \gamma_{13}^{(1)} \\ & 1 & \gamma_{23}^{(2)} \\ & & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ Z_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_{1P}^{(1)} \\ R_{2P}^{(2)} \\ R_{3P}^{(3)} \end{pmatrix} \quad (1.3)$$

从(1.3)式可直接得出 $Z_3 = R_{3P}^{(3)}$ ，这就是原结构上第3节点的实际转角，也就是基本结构第3节点的附加约束被强迫产生的转角。这就等于将基本结构上的附加约束全部放松使恢复到原结构的样子时的情形，如图1.1(e)。联系到求

解方程的消去过程可知，要最终消去 Z_3 ，亦即要放松基本结构上的最后一个附加约束，则必须从(1.2)式中首先消去 Z_1 ，再消去 Z_2 ，也就是在基本结构上先放松附加约束1，使节点1转动一个角度，如图1.1(c)；再放松附加约束2，使节点2转动一个角度，如图1.1(d)。注意到当节点2放松时，将牵涉到已放松了的节点1，使节点1又继续转动一个角度；而当节点1放松后也将影响着节点2放松时转动的角度。这种在物理意义方面的放松过程中，后面放松的节点对前面已放松的节点的叠加性影响，以及前面已放松的节点对后面的节点放松时转角的影响，都已经全部记录在三角形方程组(1.3)中。因为很明显，要从(1.2)式的第2、3个方程中消去 Z_1 ，则 Z_2 、 Z_3 的系数及 R_{2P} 、 R_{3P} 的值都必须作相应的改变，并记录在一个等价的方程组中：

$$\left(\begin{array}{c|cc} 1 & \gamma_{12}^{(1)} & \gamma_{13}^{(1)} \\ \hline 0 & \gamma_{22}^{(1)} & \gamma_{23}^{(1)} \\ 0 & \gamma_{32}^{(1)} & \gamma_{33}^{(1)} \end{array} \right) \begin{pmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ Z_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_{1P}^{(1)} \\ R_{2P}^{(1)} \\ R_{3P}^{(1)} \end{pmatrix} \quad (1.4)$$

进而最终记录在(1.3)式中。因此，当回代求解时便可将这种记录直接而又有顺序地再现出来。于是当最后一个节点放松并求得例如 Z_3 的实际值后，即可由式(1.3)用回代过程求出各节点的最终转角。

三、子结构法的基本原理

我们以图1.2所示的多层框架为例来说明子结构法的基本原理。

为了简单起见，假定每个节点只有一个自由度。如采用普通直接刚度法求解图1.2a)所示结构，则方程组的阶数共为21。现在改用子结构法计算，将图1.2a)所示结构分割为

三个子结构，如图1.2b)所示，我们在它们的分割边界上加入人为约束，使三个子结构各自独立，然后截取出来（见图1.2c)、d)、e)），分别进行独立分析。这三个子结构相互之间在边界处分别由节点1~6连接而成主结构（见图1.2f)）。这样的节点，对子结构而言，称为边界节点；对主结构而言，称为主节点。在子结构之内不与其他子结构连接的节点称为内部节点，如图1.2c)中的1~6节点，图1.2d)、e)中的1~3节点。如果我们能够设法把子结构内部节点的刚度凝聚或注入到边界节点的刚度中去，则在处理各个子结构之间的关系时，即将原结构（图1.2a)）转化成为主结构（图1.2f)），在对其进行整体分析时，将可不再考虑各子结构内部节点的作用。从结构或物理的角度看，一个子结构的内部节点不再与其他子结构发生直接的联系，所以，这些内部节点的位移也就不直接影响其他子结构的节点位移。但客观上却存在着间接的影响，即通过其所在子结构的边界节点施加影响。反过来，一个子结构的边界节点的位移又必然要间接或直接地影响着其它子结构的内部节点的位移。显然，它们这种相互制约的关系与(二)节所述的位移法典型方程式的建立及求解过程的物理意义是完全相同的。所以说，子结构实际上就是整体结构中一个仅仅相对独立（不是完全独立）的较小型的结构。另一方面，从图1.2f)可见，子结构实际上又是主结构中一个较大型的普通单元。因此，子结构又被称为子结构单元。

根据上述理由，现在我们可以首先单独分析这些子结构单元，列出它们的结构刚度方程式，然后逐一消去其内部节点的位移变量，最后保留其边界节点的位移变量。这个过程实质上就是将内部节点的刚度注入或凝聚到边界节点刚度上去；从数学的观点分析，刚度凝聚事实上是方程组的局部消

元，我们以图1.2 c)' 为例进一步加以说明。

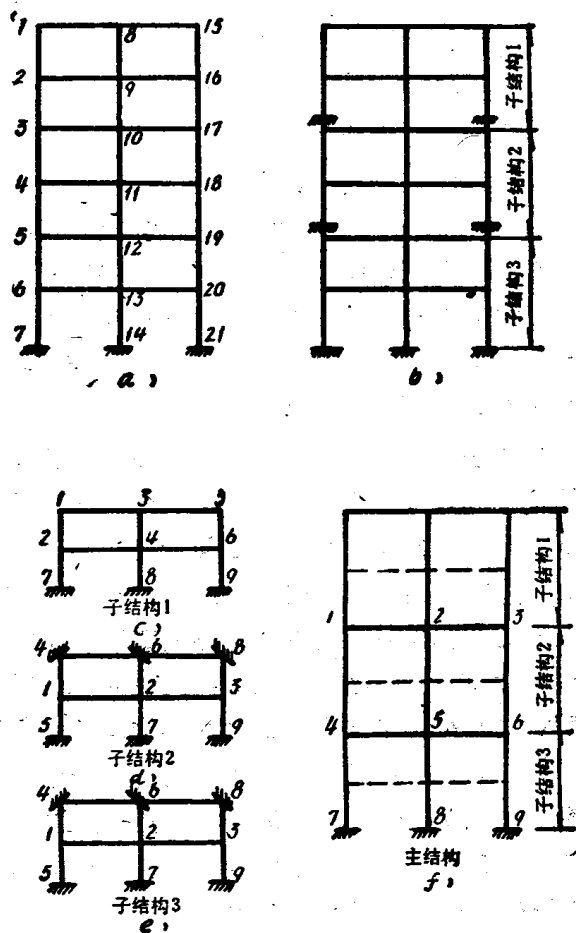


图1.2 子结构法的基本原理

首先对子结构1按先内部节点、后边界节点的次序编号，然后按照通常组集总刚度矩阵的步骤形成子结构刚度矩阵如下：