

12605

FD18

2

结构分析的 计算机方法

沈蒲生 编著

林产工业设计研究院



图书资料



JIEGOU FENXIDE JISUANJI FANGFA

湖南科学技术出版社

结构分析的 计算机方法

沈蒲生 编著

湖南科学技术出版社

结构分析的计算机方法

沈蒲生编著

责任编辑：陈增林

*

湖南科学技术出版社出版

(长沙市展览馆路14号)

湖南省新华书店发行 湖南省新华印刷二厂印刷

*

1985年8月第1版第1次印刷

开本：787×1092毫米 1/32 印张：14.5 字数：334,000

印数：1—8,700

统一书号：15204·138 定价：2.40 元

前 言

微型计算机的应用正在我国各个部门迅速推广和普及,它必将给我国的生产带来巨大的变革。许多土建部门的同志希望能够有一本关于结构分析的计算机方法的书,它不但能够介绍一些与计算机方法有关的数学和力学的基本知识,而且要求提供相应的计算机程序,对于所提供的程序,不但能在大型的计算机上求解一般性的力学问题,而且要求结合我国的特点,能在微型计算机上计算多层和高层房屋结构或其它结构的内力与位移。本书就是为了适应这种需要而编写的。

本书将以平面弹性杆件体系在静力荷载作用下的问题为主,向具有一定数学、力学基础并且学习过FORTRAN语言的同志介绍如何用矩阵位移法求解结构的内力与位移。对于弹性力学平面问题的有限单元法,也作了简要的介绍。

全书一共分为七章。其中,第一章绪论中,介绍了由于电子计算机的出现所导致结构分析方法的变革。第二章介绍电子计算机与结构分析的关系。第三章介绍矩阵代数的基本知识。它是用计算机分析结构的数学基础。第四章介绍用计算机分析结构的基本方法——普通刚度法。第五章介绍用计算机分析结构的实用方法——直接刚度法。第六章介绍用计算机分析大型

复杂结构的有效方法——子结构法。最后，在第七章中，介绍了弹性力学平面问题的有限单元法。

全书一共提供了23个完整的计算机程序。这些程序都是笔者自己编写或者是参照有关程序改写的。所有这些计算机程序都是在计算机上进行过试调、使用，证明是切实可行的。为了帮助读者阅读这些程序，对每个程序的内容都作了适当的解释。同时，在本书末尾的附录中，还对FORTRAN语言作了简要的介绍。为了说明这些程序的使用方法，书中还引入了许多例题。对于初次学习结构分析的计算机方法的读者，建议开始时将重点放在掌握结构分析的计算机方法的原理以及计算机程序的使用，而不要纠缠于对程序中个别语句的理解上。在学习计算机程序时，要由浅入深，由简单到复杂，由阅读到自己能慢慢地编写。

笔者有机会于1981年9月至1983年9月以访问学者的身份在美国威斯康辛大学美籍华裔教授王志锴(C.K.Wang)先生的指导下进修学习，得到过他的许多教导和帮助。笔者希望借此机会向他表示深切的谢意。

由于笔者水平所限，书中错误之处一定不少，衷心地希望大家批评指正。

沈蒲生

一九八四年四月

目 录

第一章 绪论	(1)
第二章 电子计算机与结构分析的关系	(9)
第一节 电子计算机概述	(9)
第二节 计算机语言的发展概况	(16)
第三节 利用电子计算机分析结构的过程	(21)
第三章 矩阵代数与结构分析的关系	(24)
第一节 矩阵的定义及其表示方法	(24)
第二节 结构分析与矩阵的关系	(26)
第三节 几个特殊形式的矩阵	(28)
第四节 矩阵的基本运算方法及其计算机程序	(36)
第五节 线性联立方程组解法	(74)
第四章 结构分析的计算机方法之一——普通刚度法	
.....	(123)
第一节 概述	(123)
第二节 普通刚度法的基本概念	(123)
第三节 普通刚度法的解题步骤	(127)
第四节 用普通刚度法分析铰接桁架的位移 和内力	(127)
第五节 用普通刚度法分析连续梁和框架的 位移和内力	(151)

第五章 结构分析的计算机方法之二——直接刚度法

.....	(186)
第一节 概述.....	(186)
第二节 杆件的结构刚度矩阵.....	(187)
第三节 结构的总体刚度矩阵.....	(196)
第四节 用直接刚度法计算桁架结构的内力和位 移.....	(198)
第五节 用直接刚度法计算框架结构的内力和位 移.....	(213)
第六节 节点自由度的编号方法.....	(228)
第七节 结构对称性在电算中的应用.....	(230)
第六章 结构分析的计算机方法之三——子结构法.....	(274)
第一节 概述.....	(274)
第二节 子结构计算的基本公式.....	(276)
第三节 一次放松所有约束节点的子结构法.....	(279)
第四节 依次放松约束节点的子结构法.....	(325)
第五节 结构划分注意事项.....	(356)
第七章 弹性力学平面问题有限单元法基础.....	(358)
第一节 两类平面问题.....	(358)
第二节 有限单元法的概念.....	(364)
第三节 节点荷载矩阵.....	(366)
第四节 单元结构刚度矩阵的一般计算公式.....	(371)
第五节 用三角形单元分析平面应力问题.....	(374)
第六节 用四边形单元分析平面应力问题.....	(393)
第七节 单元形式及数量对计算结果准确性的影 响.....	(413)
附录: FORTRAN语言简介.....	(419)

第一章 绪 论

“结构”是房屋、桥梁、船舶、水利等各种工程中承受荷载的骨架。结构按其形式和受力特征，可以分为四种基本类型：

一、杆件结构

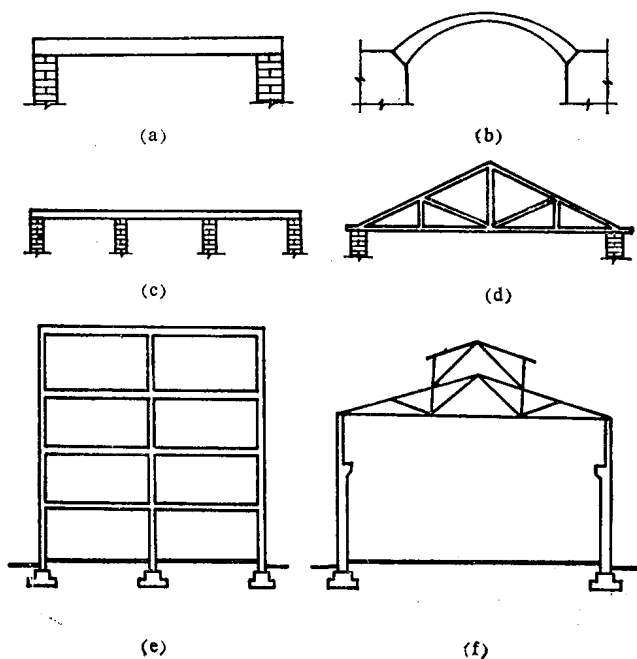


图1.1 常见的杆件结构

•

层工业厂房排架等，都是实际工程中最常采用的杆件结构。

构件的拉力、压力、弯矩、剪力或扭矩传递给支座。



1997, 1998, 1999, 2000, 2001, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021, 2022, 2023, 2024, 2025, 2026, 2027, 2028, 2029, 2030, 2031, 2032, 2033, 2034, 2035, 2036, 2037, 2038, 2039, 2040, 2041, 2042, 2043, 2044, 2045, 2046, 2047, 2048, 2049, 2050, 2051, 2052, 2053, 2054, 2055, 2056, 2057, 2058, 2059, 2060, 2061, 2062, 2063, 2064, 2065, 2066, 2067, 2068, 2069, 2070, 2071, 2072, 2073, 2074, 2075, 2076, 2077, 2078, 2079, 2080, 2081, 2082, 2083, 2084, 2085, 2086, 2087, 2088, 2089, 2090, 2091, 2092, 2093, 2094, 2095, 2096, 2097, 2098, 2099, 2100, 2101, 2102, 2103, 2104, 2105, 2106, 2107, 2108, 2109, 2110, 2111, 2112, 2113, 2114, 2115, 2116, 2117, 2118, 2119, 2120, 2121, 2122, 2123, 2124, 2125, 2126, 2127, 2128, 2129, 2130, 2131, 2132, 2133, 2134, 2135, 2136, 2137, 2138, 2139, 2140, 2141, 2142, 2143, 2144, 2145, 2146, 2147, 2148, 2149, 2150, 2151, 2152, 2153, 2154, 2155, 2156, 2157, 2158, 2159, 2160, 2161, 2162, 2163, 2164, 2165, 2166, 2167, 2168, 2169, 2170, 2171, 2172, 2173, 2174, 2175, 2176, 2177, 2178, 2179, 2180, 2181, 2182, 2183, 2184, 2185, 2186, 2187, 2188, 2189, 2190, 2191, 2192, 2193, 2194, 2195, 2196, 2197, 2198, 2199, 2200, 2201, 2202, 2203, 2204, 2205, 2206, 2207, 2208, 2209, 2210, 2211, 2212, 2213, 2214, 2215, 2216, 2217, 2218, 2219, 2220, 2221, 2222, 2223, 2224, 2225, 2226, 2227, 2228, 2229, 2230, 2231, 2232, 2233, 2234, 2235, 2236, 2237, 2238, 2239, 2240, 2241, 2242, 2243, 2244, 2245, 2246, 2247, 2248, 2249, 2250, 2251, 2252, 2253, 2254, 2255, 2256, 2257, 2258, 2259, 2260, 2261, 2262, 2263, 2264, 2265, 2266, 2267, 2268, 2269, 2270, 2271, 2272, 2273, 2274, 2275, 2276, 2277, 2278, 2279, 2280, 2281, 2282, 2283, 2284, 2285, 2286, 2287, 2288, 2289, 2290, 2291, 2292, 2293, 2294, 2295, 2296, 2297, 2298, 2299, 2300, 2301, 2302, 2303, 2304, 2305, 2306, 2307, 2308, 2309, 2310, 2311, 2312, 2313, 2314, 2315, 2316, 2317, 2318, 2319, 2320, 2321, 2322, 2323, 2324, 2325, 2326, 2327, 2328, 2329, 2330, 2331, 2332, 2333, 2334, 2335, 2336, 2337, 2338, 2339, 2340, 2341, 2342, 2343, 2344, 2345, 2346, 2347, 2348, 2349, 2350, 2351, 2352, 2353, 2354, 2355, 2356, 2357, 2358, 2359, 2360, 2361, 2362, 2363, 2364, 2365, 2366, 2367, 2368, 2369, 2370, 2371, 2372, 2373, 2374, 2375, 2376, 2377, 2378, 2379, 2380, 2381, 2382, 2383, 2384, 2385, 2386, 2387, 2388, 2389, 2390, 2391, 2392, 2393, 2394, 2395, 2396, 2397, 2398, 2399, 2400, 2401, 2402, 2403, 2404, 2405, 2406, 2407, 2408, 2409, 2410, 2411, 2412, 2413, 2414, 2415, 2416, 2417, 2418, 2419, 2420, 2421, 2422, 2423, 2424, 2425, 2426, 2427, 2428, 2429, 2430, 2431, 2432, 2433, 2434, 2435, 2436, 2437, 2438, 2439, 2440, 2441, 2442, 2443, 2444, 2445, 2446, 2447, 2448, 2449, 2450, 2451, 2452, 2453, 2454, 2455, 2456, 2457, 2458, 2459, 2460, 2461, 2462, 2463, 2464, 2465, 2466, 2467, 2468, 2469, 2470, 2471, 2472, 2473, 2474, 2475, 2476, 2477, 2478, 2479, 2480, 2481, 2482, 2483, 2484, 2485, 2486, 2487, 2488, 2489, 2490, 2491, 2492, 2493, 2494, 2495, 2496, 2497, 2498, 2499, 2500, 2501, 2502, 2503, 2504, 2505, 2506, 2507, 2508, 2509, 2510, 2511, 2512, 2513, 2514, 2515, 2516, 2517, 2518, 2519, 2520, 2521, 2522, 2523, 2524, 2525, 2526, 2527, 2528, 2529, 2530, 2531, 2532, 2533, 2534, 2535, 2536, 2537, 2538, 2539, 2540, 2541, 2542, 2543, 2544, 2545, 2546, 2547, 2548, 2549, 2550, 2551, 2552, 2553, 2554, 2555, 2556, 2557, 2558, 2559, 2560, 2561, 2562, 2563, 2564, 2565, 2566, 2567, 2568, 2569, 2570, 2571, 2572, 2573, 2574, 2575, 2576, 2577, 2578, 2579, 2580, 2581, 2582, 2583, 2584, 2585, 2586, 2587, 2588, 2589, 2590, 2591, 2592, 2593, 2594, 2595, 2596, 2597, 2598, 2599, 2600, 2601, 2602, 2603, 2604, 2605, 2606, 2607, 2608, 2609, 2610, 2611, 2612, 2613, 2614, 2615, 2616, 2617, 2618, 2619, 2620, 2621, 2622, 2623, 2624, 2625, 2626, 2627, 2628, 2629, 2630, 2631, 2632, 2633, 2634, 2635, 2636, 2637, 2638, 2639, 2640, 2641, 2642, 2643, 2644, 2645, 2646, 2647, 2648, 2649, 2650, 2651, 2652, 2653, 2654, 2655, 2656, 2657, 2658, 2659, 2660, 2661, 2662, 2663, 2664, 2665, 2666, 2667, 2668, 2669, 2670, 2671, 2672, 2673, 2674, 2675, 2676, 2677, 2678, 26

CONCLUSIONS

都是房屋建筑中常用的板结构。

传递给边梁或墙体。在无梁楼盖中,板上的荷载直接由柱子承

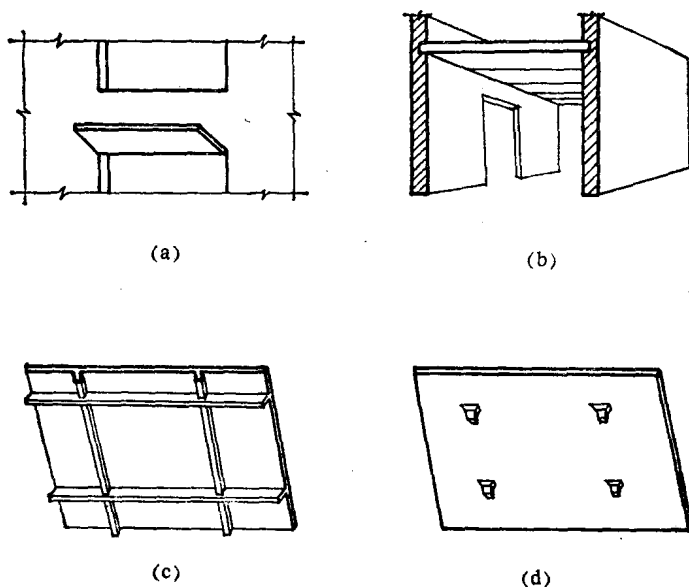


图1.3

担。

周边支承的板，根据长边边长与短边边长的比值，可以分为单向板和双向板。单向板是指长边边长与短边边长的比值较大的板（按照弹性理论分析时，这个比值应大于2；按照塑性理论分析时，这个比值应大于3）。在单向板中，板上的荷载主要是沿着短边方向传递给长边的支座的，而沿着长边方向传递给短边支座的荷载很小，可以忽略不计。双向板是指长边边长与短边边长的比值小于上述数值的板。双向板上的荷载沿着长边与短边两个方向同时传递给周边各支座。

壳体是弯曲的空间薄壁结构。壳体结构由于外型合理，壳中内力以压力为主。因此，它可以有效地利用混凝土等抗压强

度高、抗拉和抗剪强度低的建筑材料，可以节约钢材、跨越较大的空间和有较强的刚度。壳体结构常用于工业与民用建筑的屋盖（图1.4a和1.4b）、水池的池壁和顶盖（图1.4c）以及贮存物料的筒仓（图1.4d）等结构之中。

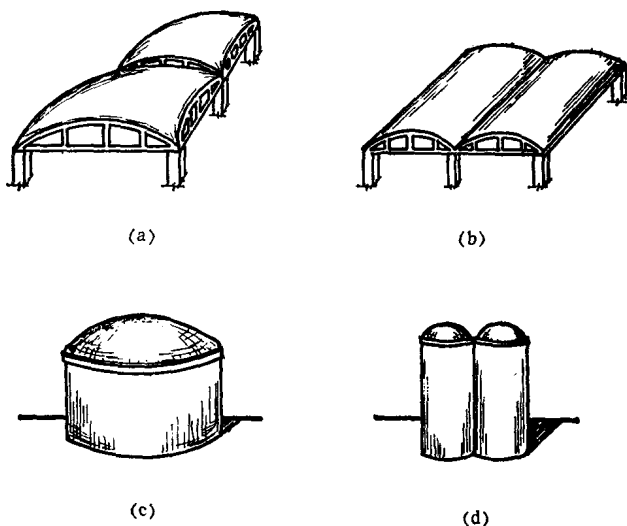


图1.4

三、块体结构

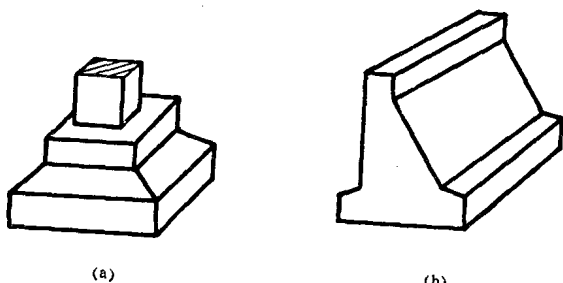
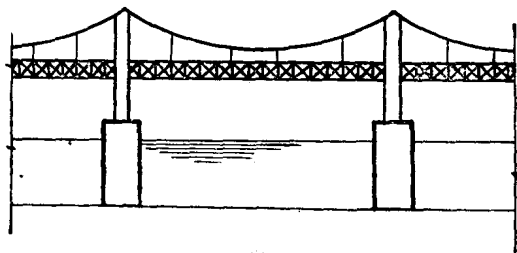


图1.5

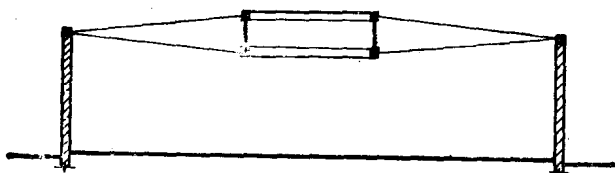
三个方向的尺寸为同量级的结构，称为块体结构。

属于块体结构的有水利工程中的堤坝，房屋建筑中的柱下基础和设备基础，以及挡土墙等结构。图1.5a和1.5b所示分别为柱下基础及挡土墙的示意图。

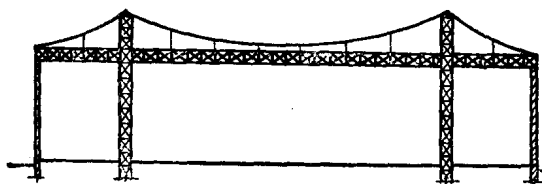
四、悬索结构



(a)



(b)



(c)

图1.6

悬索结构中,主要的受力构件为柔性的缆索及其支承构件。缆索所受的力为拉力。因此,缆索一般采用高强钢丝、钢丝束或者其它抗拉强度高的材料做成。悬索结构可以充分利用钢材,可以跨越很大的空间而不需要设置中间支座。因此,它能较好地满足生产及使用上的要求。悬索结构主要用于大跨度的桥梁(图1.6a)、体育馆(图1.6b)以及飞机库(图1.6c)等工程中。

进行结构设计,一是要保证结构在整个使用期限内满足安全使用的要求;二是要使所设计的结构符合经济节约的原则。所谓安全使用,就是不允许结构在使用期间发生倒塌,出现过大的变形或过宽的裂缝。所谓经济节约,就是不允许任意增大安全系数,造成人力、物力和财力上的浪费现象。

安全与经济是一对矛盾。要妥善地处理好这对矛盾,要求进行结构设计时,对结构在各种荷载作用下的受力情况进行科学地分析。结构分析的目的,就是为结构设计提供结构在各

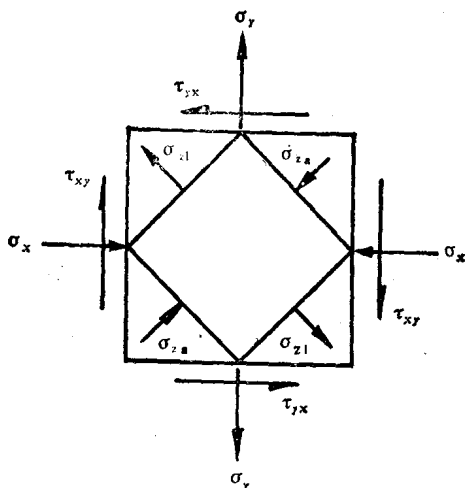


图1.7

种荷载作用下的内力和位移值。

结构的内力可以分为图1.2所示的轴向拉力、轴向压力、弯矩、剪力和扭矩等五种基本形式。设计时，有时不仅需要知道截面上内力的大小，还需要了解截面上某一单位面积上内力的大小。单位面积上的内力称为应力。截面上的应力可以分为正应力、剪应力和主应力等。正应力是指与截面垂直的应力，如图1.7中的 σ_x 和 σ_y 。剪应力是指作用在截面内的应力，如图1.7中的 τ_{xy} 和 τ_{yx} 。主应力是指剪应力为零截面上的正应力，如图1.7中的主拉应力 σ_{z1} 和主压应力 σ_{z2} 。

结构的位移包括线位移与角位移。线位移又可以分为水平线位移与垂直线位移两种。角位移是指截面受力后的转动角度。某截面的角位移，可以用变形前后杆轴曲线上过该截面重心的切线间夹角来度量。图1.8所示的悬臂梁在荷载 P 的作用下，B点的角位移为 θ_B ，水平线位移为 Δ_x ，垂直线位移为 Δ_y 。

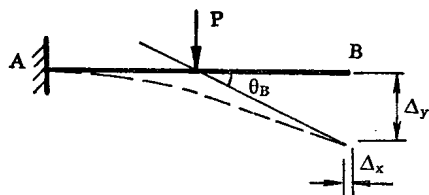


图1.8

《结构力学》学科以杆件结构为主要对象，研究结构在荷载等因素影响下支座反力以及杆件内力和位移的计算方法。对于静定结构，只需要列出数量足够的静力平衡方程式便可以求解，例如，对于静定的平面杆件结构，只需要列出三个静力平衡方程式便可以求解。对于静不定结构，用力法或位移法或是在这两种基本方法的基础上发展起来的其它方法便可以求解。

《弹性力学》学科以板壳结构为主要对象，研究结构在荷载等因素影响下任意一点的应力和应变大小。由板壳上任意一点的平衡关系，可以得到它的基本方程式是一个高阶的微分方程式。可以对微分方程式直接求解，也可以用近似方法求解。例如，可以用一组差分方程代替基本微分方程，即是用有限差分法求解；或者用有限自由度体系代替无限自由度体系，即是用有限单元法求解。

长期以来，由于条件的限制，人们只能借助简单的计算工具对一些比较简单的结构进行分析和设计。1946年，一种现代化的、能进行自动计算的电子机器——电子计算机问世，并且以很快的速度不断得到改进和发展，它使结构的分析工作也发生了重大的变革：

(一) 它使结构分析工作由传统的手算方式，转变为由人指挥电子计算机计算的电算方式。

(二) 它使结构分析的对象由只能局限在小型、简单结构，转变为有可能分析任何大型、复杂结构。

(三) 它使结构的分析工作由速度慢、精度低、易出错，转变为速度快、精度高、不易出错。

(四) 它使广大的设计工作者从繁重的计算工作中解放出来，使他们有更多的时间和精力去探索新的结构形式，研究更合理的计算方法，设计更多、更好、更经济的结构物。

计算机正在我国迅速发展，计算机的应用正在各地区、各部门日益推广和普及，结构设计工作者应该了解计算机的组成和特点，学习一些用计算机进行结构分析的理论基础，掌握用计算机分析结构的基本方法，适应形势发展的要求。

第二章 电子计算机与结构分析的关系

第一节 电子计算机概述

一、电子计算机的特点

电子计算机是一种现代化的、能进行自动计算的电子机器。它具有以下的主要特点：

(一) 计算速度快

一个人用计算尺、计算器等普通计算工具进行计算时，假定一秒钟内便可以完成一次运算，一天工作八小时，可以完成28800次运算。然而，一般的中小型电子计算机，每秒钟内可以完成几万至几十万次运算，大型电子计算机每秒钟内可以完成几百万、几千万甚至上亿次运算。因此，一个人用普通计算工具在一天内所完成的工作，计算机在不到一秒钟的时间就有可能完成。

以图2.1所示的六跨十一层钢筋混凝土框架结构为例，如果要求用精确法分析，计算各杆在每一种荷载作用下的内力，并对其进行组合，求出各控制截面的最大内力值，然后计算各截面所需要的钢筋面积。此项任务，如果由人用普通的计算工具进行计算，即使是对于一个比较熟练的设计人员，几个月内也难以完成。然而，如果改用计算机计算，有可能在一个小时之内

得到全部计算结果。

（二）计算精度高

计算机的精确度取决于字长。字长愈长，计算的精度愈高。从原理上讲，计算机本身的计算精度是可以不受限制的。但是，字长愈长，设备愈要增多，运算速度则可能降低。因此，一般的计算机都只有十几位的有效数字。这种精度用手算是较难做到的。

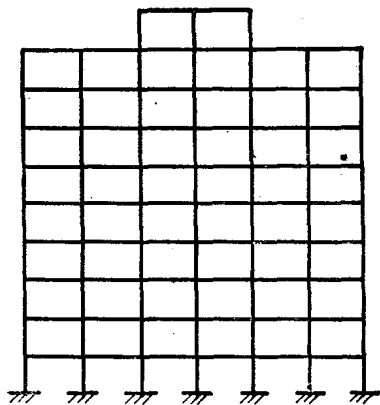


图2.1

（三）自动化程度高

计算机具有“记忆”和逻辑判断的能力。它能够贮存计算机程序及各种数据，并且按照程序的要求，进行加、减、乘、除等算术运算和逻辑运算。它可以从开始工作到输出计算结果，整个工作都是在程序的控制下自动进行，不需要人去帮助完成。

二、电子计算机的发展简况

第一台电子计算机是1946年问世的。三十多年来，它的发展是异常迅速的。电子计算机的发展一般划分成下面四个阶段：

1. 1958年以前，电子计算机是用真空管制造的。计算机的体积十分庞大。它以磁带作为储存媒介，资料储存数量十分有限，计算的速度也较慢。这就是第一代电子计算机。

2. 从1958年至1964年，随着晶体管的出现，使计算机的体积缩小很多，计算速度加快。它以磁带和磁盘做储存媒介，资料储存数量也大量增加。这就是第二代电子计算机。