

# 结构优化设计计算机程序述评<sup>\*</sup>

V. B. Venkayya N. S. Khot

俄亥俄州，莱特-彼得逊空军基地，美国空军飞行动力实验室<sup>1)</sup>

**摘要** 本文为政府、产业、大学等方面现有结构优化计算机程序的一个简编。本资料打算供正在寻找便于使用的结构优化计算机程序的工程技术人员和研究工作者使用。资料的编写方式使得工程技术人员能够决定这些程序需要什么样的计算机设备。大量资料是通过绘有关作者发调查表的方式搜集的。各程序的目的及其主管人员的姓名和地址也作了简略说明。

## 引言

本文的目的，是把搜集到的结构优化程序资料，用一种便于使用的适当形式，介绍给正在寻找这种程序的从事实际工作的工程技术人员。文中包括结构优化计算机程序的容量、工作效能、语言、适当的计算机结构、基本技术、可靠性和费用等项目的概要。

本文对现有的通用程序和商用程序都加以评述。我们认为，这些程序，只有当它们具有充分的证明文件，并且所宣称的能力已经通过相当多的一些试验问题所证实，而且最好是通过一些用户的证明所证实的时候，才会使那些可能使用这些程序的用户感到兴趣。可惜，在结构优化设计中并没有很多的程序能够满足这些必须遵守而又重要的要求。

对于承受具有应力、位移和尺寸约束的静载荷的结构，其优化问题的领域已作了充分的探索。对于大多数情况，目的是要在满足设计要求的条件下使结构重量最轻。有大量能够处理这些要求的计算机程序。其中许多程序还是研究性的而不适合于实际应用。然而，也有一些通用的程序，可以用来进行多种载荷作用下具有上千个设计变量和自由度的结构的设计。因为这些程序中有很多是用有限元素法进行分析的，所以处理大量变量的能力显得很重要。这些程序尽管不完善，但是能够凑合对付实际设计情况。另一方面，也设计了一些非常实用的程序，主要用来处理一些专用结构，如板梁、柱、输电塔及加劲板等的优化问题。这些程序能按预期目的非常好地工作。在进行静载荷设计时，可以断定总的情况是令人满意的。

承受动载荷的结构优化设计则还研究得不够，至少从实际观点来看是这样。进展缓慢的原因有两方面。实际结构的动态分析目前费用很大，还没有研制出适用于优化设计的程序。其次，确定动载荷的特殊设计要求太困难。许多研究工作者把动态优化设计作为频率约束问题来处理。这种情况下，目标是使结构的重量最轻而又不违反指定的频率约

\* 原文题目为“结构的优化”。——译者

1) AFFDL W-PAFB (Air Force Flight Dynamic Laboratory, Wright-Patterson Air Force Base), Ohio

束。有时，也可以提高或降低特殊频率而在减轻重量方面付出少量的代价。作为频率约束问题的结构优化设计的狭隘观点，只是在实际问题中有效。一个真正的动态优化设计程序，应该在它的表述中包括动态响应。如果响应会被一个特殊的频率所加剧，这个程序就应当有能力去控制这种情况。这种处理动态优化设计的方法非常复杂。因此，承受周期力和非周期力的结构的优化设计方法才刚刚出现，以这些方法为依据的计算机程序，充其量也不过是着重于研究性的。

正在积极开展研究的又一个领域，是具有气动弹性要求的结构的优化设计。在这个领域里，大部分优化设计程序是把颤振速度约束作为单一的设计要求看待的。这种方法类似于动载荷问题的频率约束法。由于问题的复杂性，这些简化假定是必要的。目前，正在开展除了气动弹性要求外还包括静载荷的优化设计程序的研究。虽然大部分动态优化设计程序基本上是着重于研究性的，我们也把其中的一些程序搜集于此，因为在这个领域里还没有较实用的程序可用。

### 计算机程序的评价

计算机程序的效能，很大程度上可用设计任务、试验问题及其结果、输入和输出机构、大程序情况下的内部诊断等来确定。而最好的评价方法，是形成程序和文件并用于除作者试验过的那些问题以外的一些典型问题。但是，财源和机器有效工作时间都排除了任何多于一个或二个程序的这样一种试验。首先，几乎没有什么程序具有综合文件。就结构优化设计程序而论尤其是这样，因为其中的大多数还处于发展阶段。其次，最好的方法是从尽可能多的用户那里得到资料。但这种资料恰好是难于得到的，因为许多场合下作者和他的亲密同事是唯一的用户。这并不是说作者的经验不可靠，而是说作者往往对程序太熟悉，有关程序的细节对他来说很显然，而对用户则可能不是这样。此外，如果作者觉察到有某些缺点，他常常会改正它们。因为本文是打算为那些可能使用程序的用户写的，所以过去用户的经验便是程序能力的最好度量；笔者对列于本文中近25%的程序的评价有这类资料。对于其余那些程序，则把作者对程序能力的叙述作为主要的来源。

因为优化设计方法是说明程序能力的项目之一，所以这里对优化问题和方法作了简要的叙述。真正的结构优化问题包含寻求一个重量最轻（或费用最低）的结构物来掩护一个给定的空间。所谓空间的掩护，意思是指有效地传递附加力而不危害所掩护的各个事物的安全。这是结构优化设计的最高目标，但要达到这个目标却也是最困难的任务，因为它有无限多个可能的解。结构优化问题的更恰当的定义如下：

给定一个结构构形，在不违反特定设计要求的情况下，怎样的构件尺寸组合会得到重量最轻（或费用最低）的结构。载荷条件、材料性能、最小和最大尺寸，则都是一些设计要求。

结构优化的符号可看成对目标函数（例如重量或费用）求最小值，此目标函数为

$$F(A) = F(A_1, A_2, \dots, A_m) \quad (1)$$

承受的约束条件，定义为

$$G_1(A) = G_1(A_1, A_2, \dots, A_m) \leq G_1 \quad (2)$$

这里  $A_1$  到  $A_m$  为  $m$  个设计变量。单元尺寸可以看成是设计变量。应力、位移大小等等的限制代表约束条件。

求解这种优化问题有两种方法。第一种方法称为优化的直接法，它包含所有线性规划和非线性规划的数值搜索方法。梯度投影法和可行方向法为数值搜索方法的两个例子。所有这些方法都是迭代法，其基本特征可用下列递推公式阐明：

$$A^{v+1} = A^v + \tau^v D^v \quad (3)$$

这里  $A^{v+1}$  和  $A^v$  为新、老设计变量向量， $v$  是迭代次数。向量  $D^v$  决定行进方向，标量  $\tau^v$  表示搜索时步长大小。行进矩阵  $D^v$  一般是目标函数（方程 1）和约束函数（方程 2）的梯度函数。从简短的描述明显可知，直接法是结构优化问题中最合乎逻辑的方法；在考虑任何目标函数或约束函数时，它们具有普遍性。一个更有吸引力的特点，是这些优化程序可以从一个学科转用到另一个学科。尽管有这些优点，但直接法在结构优化设计中尚未被证明为非常成功。特别对具有大量设计变量的问题时更是如此。它的不成功有两个主要原因。对于大型问题，决定行进方向的梯度资料需要很大费用。没有一种合理的方法来决定行进的起点和步长，但二者都影响设计的结果。

第二个方法是间接法，也称最佳准则法。这个方法包含导出一个最佳准则和建立达到此准则所需要的递推关系。最佳准则往往与结构中某种能量函数有关。这种方法没有数值搜索法那样的普遍性。对静载荷和动载荷需要不同的最佳准则。并不总是能够导出适当的递推关系的。然而，当这些最佳准则可以应用时，特别在具有大量设计变量的情况下，它们远比直接法有效。另外，它们对迭代的起点和步长不太敏感。这些结论都以过去的经验为依据，可以设想，这两种情况的缺点都是可以补救的。

从方法的描述中，用户至少可以定性地评价出对他的特殊需要合适的程序。

### 计算机程序资料

表 1 包含了结构优化设计程序的资料。这个表并不完善或者说资料并不全面。资料被编成 17 项，其中有许多项还有小项。对于每一个程序，表中所列资料所指的项号给出表格的索引。首先列入具有静载荷优化能力的有限元程序，接着是动载荷，气动弹性和部件的优化。这种规律有一两个例外情况，在某些情况下，目标的说明在下一节给出。

| 项号  | 内容说明   | 项号 | 内容说明  | 项号 | 内容说明                                    |
|-----|--|----|---|----|---|
| I   | 程序名  | IV | 载荷<br>(A) 静载荷<br>(B) 动载荷<br>(1) 自由振动<br>(2) 瞬态响应<br>(3) 颤振<br>(C) 热载荷<br>(D) 其他 | V  | 分析方法<br>(A) 有限元法<br>(B) 有限差分法<br>(C) 其他 |
| II  | 作者   |    |   |    |   |
| III | 结构类型<br>(A) 土木工程<br>(B) 飞机/航空航天<br>(C) 原子反应堆<br>(D) 其他 |    |   | VI | 元件类型<br>(A) 杆<br>(B) 梁<br>(C) 三角形薄膜     |
|     |  |    |   |    |   |

| 项号  | 内容说明  | 项号   | 内容说明   | 项号 | 内容说明  |
|-----|---|------|--|----|---|
|     | (D) 四边形薄膜<br>(E) 受剪板<br>(F) 弯曲板<br>(G) 薄壳<br>(H) 轴对称元件<br>(I) 立方体元件<br>(J) 其他 |      | (B) 非线性规划<br>(C) 最佳准则<br>(D) 结构索引<br>(E) 其他  |    | (E) 颤振<br>(F) 最小和最大尺寸<br>(G) 变量连接<br>(H) 离散变量<br>(I) 其他                   |
| VII | 优化方法<br>(a) 线性规划  | VIII | 约束类型<br>(A) 应力<br>(B) 位移<br>(C) 频率<br>(D) 响应 | IX | 程序大小—原始语句<br>(A) 2000以下<br>(B) 2000—4000<br>(C) 4000—10000<br>(D) 超过10000 |

| 项号   | 内容说明   | 项号   | 内容说明   |
|------|--|------|--|
| X    | 最小磁心要求<br>(A) IBM(二进制)<br>(1) (2) (3) (4)<br>120K 120—150 250—400 超过400K<br>(B) CDC(八进制)<br>100K 100—200 200—300 —<br>(C) 其他                 | XIV  | 程序状态<br>(A) 完全可供使用<br>(B) 在发展中<br>(C) 其他   |
|      |  | XV   | 程序语言<br>(A) FORTRAN<br>(B) ALGOL<br>(C) 其他   |
| XI   | 问题大小<br>(A) 自由度<br>(1) (2) (3) (4)<br>200以下 200—500 500—1000 1000—3000<br>(B) 元素数<br>200以下 200—500 500—1000 1000—3000<br>(C) 变量数<br>(D) 磁心要求 | XVI  | 公开资料来源<br>(A) 论文<br>(B) 报告<br>(C) 其他用户的辅助材料  |
| XII  | 估计计算机运行时间<br>(A) 处理机时间<br>(B) 输入/输出时间<br>(C) 其他时间  | XVII | 可用文件<br>可用<br>任意° 照原价<br>(1) (2)<br>(A) 技术说明 ( ) ( )<br>(B) 原始编排 ( ) ( )<br>(C) 试验程序包的编排 ( ) ( )<br>(D) 试验结果 ( ) ( )<br>(E) 用户手册 ( ) ( )<br>(F) 举例问题的卡片组 ( ) ( ) |
| XIII | 操作该程序的计算机<br>(A) IBM360或370<br>(B) CDC6600<br>(C) UNIVAC1103<br>(D) 其他计算机  |      |  |

\* 名义价格可包括文件和卡片组的复制。

表 1 程 序 能 力 概 要

| 程<br>序<br>号 | I<br>程<br>序<br>名          | II<br>作<br>者<br>或<br>人<br>员 | III<br>结<br>构<br>类<br>型 | IV<br>载<br>荷 | V<br>分<br>析<br>方<br>法 | VI<br>元<br>件            | VII<br>优<br>化<br>方<br>法 | VIII<br>约<br>束<br>类<br>型 | IX<br>程<br>序<br>大<br>小 | X<br>要<br>求         | XI<br>问<br>题<br>大<br>小        | XII<br>计<br>算<br>时<br>间 | XIII<br>操<br>作<br>系<br>统 | XIV<br>程<br>序<br>状<br>态 | XV<br>语<br>言 | XVI<br>资<br>料<br>来<br>源 | XVII<br>文<br>件              |
|-------------|---------------------------|-----------------------------|-------------------------|--------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|------------------------|---------------------|-------------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|--------------|-------------------------|-----------------------------|
| 1           | ASOP                      | W.DWYER                     | A,B                     | A            | A                     | A,B,C,<br>D,E,F         | C                       | A,B,F                    | D                      | A-1,<br>B-1         | A-4,B-4,<br>C(2000)<br>D(260) | A(50)<br>B(100)         | A,B                      | A                       | A            | A,<br>B,C               | 全部-1                        |
| 2           | OPTSTATIC                 | V.VENKAYYA                  | A,B                     | A            | A                     | A,C,D,<br>E             | C                       | A,B,F                    | A                      | A-1,<br>B-1,<br>C-1 | A-3,B-3<br>C(800)<br>D(266)   | A(60)<br>B(30)          | A,B,<br>C,D              | A                       | A            | A,B                     | 全部-1                        |
| 8           | OPTIM                     | R.GELLATLY                  | A,B                     | A            | A                     | A,C,D,<br>E             | C                       | A,B,F,<br>G              | C                      | A-2,<br>B-2         | A-3,B-3<br>C(1000)<br>D(200)  | A(100)<br>B(200)        | A,B<br>(200)             | B                       | A            | A,B                     | 全部-1                        |
| 4           | OPTCOMPOSITE              | N.S.KHOT                    | B                       | A            | A                     | A,B,C,<br>D,E,I         | C                       | A,B,F,<br>G              | B                      | A-1,<br>B-1         | A-2,B-2<br>C(300)<br>D(260)   | A(100)<br>B(30)         | A,B                      | A                       | A            | A,B                     | 全部-                         |
| 5           | ASDP                      | R.N.KARNES                  | A,B                     | A,C          | A                     | A,B,C,<br>D,E,J         | B                       | A,B,F,<br>G,I            | C                      | B-2                 | A-1,B-2<br>C(140)<br>D(200)   | -                       | B                        | A                       | A            | A,B                     | E-1,G                       |
| 6           | TRUSSOPT2                 | J.S.ARORA                   | A                       | A            | A                     | A                       | B                       | A,B,C,<br>G              | A                      | A-2                 | A-1,B-1<br>C(96)<br>D(184)    | A(250)                  | A                        | A                       | A            | B                       | A,B,<br>D,E                 |
| 7           | FRAMOPT                   | J.S.ARORA                   | A                       | A            | A,<br>B-1             | B                       | B                       | A,B,C,<br>G              | A                      | A-2                 | A-1,B-1<br>C(96)<br>D(184)    | A(250)                  | A                        | A                       | A            | B                       | A,B,<br>D,E                 |
| 8           | SAFER                     | R.J.MELOSH                  | A,B                     | A            | A                     | A,B,C,<br>E,F           | C                       | A,B,F,<br>H              | D                      | A-2,<br>B-2         | A-2                           | -                       | C                        | A                       | A            | A,B                     | A-2,<br>B-2,<br>D-2,<br>E-2 |
| 9           | PARADES                   | R.J.MELOSH                  | A,B                     | A            | A                     | A,B                     | A                       | A                        | D                      | A-2,<br>B-2         | A-2                           | -                       | C                        | B                       | A            | A,B                     | A-1,<br>B-1,<br>E-1,<br>F-1 |
| 10          | AUTOTIER                  | W.M.WEAVER                  | A                       | A            | A                     | B                       | E                       | A                        | B                      | A-1                 | A-4,B-4                       | -                       | A                        | A                       | A            | A,B                     | 全部-2                        |
| 11          | AUTOTRUSS                 | W.M.WEAVER                  | A                       | A            | A                     | A                       | E                       | A                        | B                      | A-1                 | A-4,B-4                       | -                       | A                        | A                       | A            | A,B                     | 全部-2                        |
| 12          | ECI-ICES-<br>STRUPL/DYNAL | E.L.GHENT                   | A,B<br>C,D              | A            | A                     | A,B,C,<br>D,F,G,<br>I,J | E                       | A,F,I                    | D                      | A-2                 | A-4,B-4                       | -                       | A                        | A                       | A            | A,B,<br>C               | D-1,<br>F-1,<br>G-2,<br>H-1 |
| 13          | ARROW                     | A.J.DODD                    | B                       | A            | A                     | A,E                     | B,C,A,<br>B,F,<br>G     | C                        | C                      | A-2                 | A-4,B-4,<br>C(2500)<br>D(400) | A(720)<br>B(1800)       | A                        | A                       | A            | B                       | -                           |
| 14          | TRAN-TOWER                | D.LO                        | A                       | A            | A                     | A                       | E                       | A,F,I                    | C                      | C-1                 | A-4,B-4<br>C-6<br>D(75)       | A(3600)<br>B(7200)      | C                        | B                       | A            | A,B                     | 全部-2<br>G                   |

表 1 (续)

| 程序号 | I<br>程 序 名   | II<br>作 者 或 人 员         | III<br>结 构 类 型 | IV<br>载 荷   | V<br>分 析 方 法 | VI<br>元 件     | VII<br>优 化 方 法 | VIII<br>约 束 类 型         | IX<br>程 序 大 小 | X<br>燃 心 要 求 | XI<br>问 题 大 小                | XII<br>计 算 时 间   | XIII<br>操 作 系 统 | XIV<br>程 序 状 态 | XV<br>语 言 | XVI<br>资 料 来 源 | XVII<br>文 件                    |
|-----|--------------|-------------------------|----------------|-------------|--------------|---------------|----------------|-------------------------|---------------|--------------|------------------------------|------------------|-----------------|----------------|-----------|----------------|--------------------------------|
| 15  | SAD          | G.VANDERPLAATS          | A,B            | A,<br>B-1   | A            | A,B,C,<br>D,E | B,C            | A,B,C,<br>F,G           | C             | A-3,<br>B-2  | A-2,B-2,<br>C(200)<br>D(270) | -                | A,D             | B              | A         | -              | B-1,D-1<br>F-1                 |
| 16  | OPTDYNAMIC   | V.B.VENKAYYA            | A,B            | B-1,<br>B-2 | A            | A,C,D,<br>E   | C              | A,D,F                   | A             | A-1,<br>B-1  | A-2,B-2,<br>C(400)<br>D(260) | A(100)<br>B(30)  | A,B             | B              | A         | A,B            | 全部-1                           |
| 17  | SOAR         | L.GWINN                 | B              | B-3         | A            | A,B,C,<br>D,E | B              | E,F,G                   | C             | B-2          | A-2,B-1,<br>C(100)<br>D(300) | A(2000)<br>B(60) | A,B             | A              | A         | A,B            | 全部-1<br>G                      |
| 18  | TSO          | L.A. McCULLERS<br>et al | B              | A,<br>B-3   | B            | B,I           | B              | A,B,C,<br>E,F,G,<br>H,I | B             | B-3          | A-1                          | A(300)<br>B(150) | A,B             | A              | A         | A,B,<br>C      | 全部-1<br>G                      |
| 19  | WIDOWAC      | R.T.HAFTKA              | B              | A,<br>B-3   | A            | A,C,D,<br>E   | B              | A,E,F                   | -             | -            | -                            | -                | -               | -              | -         | -              | -                              |
| 20  | PLATE-GIRDER | R.T.DOUTY               | A              | A           | C            | B,E,F         | B              | A,B,F,<br>G,H           | D             | A-3          | C(22)<br>D(350)              | A(15)            | A               | A              | C         | B,C            | A-1,D-2                        |
| 21  | PLATE-GIRDER | S.L.CHU                 | A              | A           | C            | B             | E              | A,F                     | C             | A-1,<br>C-1  | A-1                          | -                | C               | A              | A         | -              | G                              |
| 22  | CONCRETE     | P.SHUNMUGAVEL           | A              | A           | A            | B             | B              | A,F,G                   | B             | A-3          | A-1,B-1,<br>C(100)<br>D(290) | -                | A               | A              | A         | -              | -                              |
| 23  | STFSLH(1)    | M.PAPPAS                | D              | A           | C            | -             | B              | A,C,F,<br>H,I           | A             | A-1          | C-8                          | A(900)           | A,D             | A              | A         | A,B            | A-1,B-1<br>D-1,<br>E-1,<br>F-1 |
| 24  | GMSP         | H.H.DIXON               | B              | A,C         | C            | B             | C              | A,F                     | D             | B-2          | C(13)<br>D(40)               | A(60)            | B               | A              | A         | B              | A,B,D,<br>E,F-2                |
| 25  | CONMIN       | G.VANDERPLAATS          | D              | -           | -            | -             | B              | -                       | A             | A-1,<br>B-1  | C(160)                       | -                | A,D             | A              | A         | A,B            | 全部-1                           |
| 26  | COMAND       | G.VANDERPLAATS          | B              | A           | C            | I             | B              | F,G,I                   | A             | A-1,<br>B-1  | C(12)                        | A-1,<br>B-2      | A,D             | A              | A         | A              | 全部-1                           |
| 27  | CYLINDER     | W.M.MORROW              | B              | A           | C            | -             | B              | A,F                     | B             | C-1          | C(7)                         | -                | C               | A              | A         | A,B            | 全部-1                           |

## 程序及其任务

本节对每个程序的任务作简要的说明, 补充资料在最后一节给出。程序主管人员的姓名和地址见附录 I。其他资料可按表 1 程序号列出的参考文献中找到。

1. ASOP (自动结构优化程序) 本程序能在静载荷条件下设计重量最轻结构。它是一个有限元程序, 为了修改结构元件, 改进的应力比法和数值搜索法一道使用。本程序能处理 2000 到 3000 个自由度和相当数量的元件数的结构优化问题。本程序只对应力约束问题极有效, 但对位移约束的大型问题不经济。求数值搜索用的位移梯度的过程则无效, 需要加以改进。只在具有位移约束时, 程序才在完成设计之前输入数值搜索方法。为了避免局部屈曲, 程序对每个结构元件备有输入稳定表。用应力分析的惯用形式组织输出。程序在 IBM360/370 和 CDC 6000 和 7000 系列机上运算。不同磁心要求的版本对不同规模的问题有效。结合对位移约束加入一种更有效的算法以及给稳定表一种较好的形式使得程序有所改善, 打算在不久的将来发表。

2. OPTSTATIC<sup>3</sup> 本程序打算供承受静载荷条件的重量最轻结构设计使用。优化设计的基础是把最佳准则和数值搜索相结合。最佳准则以结构内的应变能分布为依据。主程序包括杆、三角形薄膜、四边形薄膜、剪切板。也可得到本程序的只具有杆的一种文本和只具有矩形盒式梁的另一种文本。在存储设备相当于 CDC 6000 系列的机器上, 这些程序能处理 800 到 900 个自由度和相当数量的元件。本程序对应力约束问题极有效。但对位移约束的大型问题不太经济, 因为在完成设计之前要输入数值搜索方法。用一种基于最佳准则(虚应变能准则)的算法来代替数值搜索法, 是不久的将来打算要作的改进之一。它是一个实验性的程序, 适于研究结构优化设计。

3. OPTIM 本程序打算供承受静载荷条件的重量最轻结构设计使用。它是一个有限元程序, 其极小化过程以最佳准则为依据。它包括杆、三角形薄膜、四边形薄膜和剪切板。它对应力约束问题和位移约束问题都极有效。本程序的一个早期文本目前可供分发。该文本只能处理 300 个自由度和相当数量的元件。正在校验的新文本预期更为有效, 其安排更适合于实际工作的工程技术人员, 并能处理较大型的问题。

4. OPTCOMPOSITE 本程序打算供层状、纤维增强和复合材料等结构的优化设计使用。它是一个有限元程序, 其极小化过程以最佳准则为依据。层状复合材料蒙皮可以看成是重叠的等价各向异性薄膜元件。每个元件的刚度为各层刚度的总和。最佳准则用于元件级和整个结构。本程序可用来处理金属元件和复合材料元件的混合结构。对位移约束问题, 如在 OPTSTATIC 中一样, 程序要输入数值搜索方法。用一种基于最佳准则的算法代替数值搜索法的程序正在改进中。它是一个实验性程序, 适于研究复合材料结构的优化设计。

5. ASDP (自动结构设计程序) 本程序适用于在静载荷条件下设计重量最轻结构。除列于表中的元件外, 本程序还包括正交板和特殊的梁元件。本程序以所谓可行方向法的数值搜索法为基础。必须有一种初始设计作为输入。可是, 它不必是一种可行的设计。本程序适用于装配结构。可以认为它是把非线性规划法运用于结构优化设计中最好的例子之一。对于大型问题, 除非把变量连接起来以减少变量数目外, 计算费用会变得

十分昂贵。本程序的分发受限制。决定根据一个一个的情况予以发表。

**6. TRUSSOPT (桁架优化程序文本 2)** 本程序适用于静载荷下的二维桁架和三维桁架的最小重量设计。它以改进的最速下降法为基础。文件包含许多与公开结果比较的试验问题。本程序对小型问题十分有效。有可能用改善求解格式和专门选用连接变量的方法,来扩大本程序处理较大型问题的能力。

**7. FRAMOPT** 本程序指定用于承受静载荷的平面框架的最小重量设计。它的其他方面,大多数与TRUSSOPT 2相似。在设计要求中包括了若干美国钢结构学会(AISC)的规格。

**8. SAFER (结构分析弱点估计和重新设计)** 本程序原来打算供承受静载荷的结构作最小重量设计用。它也可供系统可靠性的分析和薄弱环节的分析。它基于改进的满应力设计法,适用于应力约束问题。构件尺寸既可看成是连续变量,也可看成是离散变量。它能处理多达500个自由度和那样多的变量。

**9. PARDES (抛物面反射器分析和设计子系统)** 本程序根据理想的抛物面寻找均方根误差最小的反射器表面的变形。结构重量是主要的约束,而元件中的应力则看成为次要约束。由于重力载荷引起的结构位移控制是用均方根误差最小的方法。本程序在矩形坐标系或圆柱坐标系中提供了重复和接近重复的子结构算法。其基础是线性规划,它能处理多达500个自由度的结构。

**10. AUTOTIER** 本程序用于承受由建筑物死载和活载组成的静载荷作用下的矩形框架设计。它是一个适合1969美国钢结构学会规格考虑到宽凸缘截面的有限元程序。它是一个对设计多层建筑非常实用的程序。本程序的一些特点是绘图机能够与给定的载荷条件一起画出最终尺寸的框架平面图和梁、柱图。它可以以200美元的代价从Stanford大学购买。

**11. AUTOTRUSS** 本程序用于桁架结构的设计。它的任务和能力类似于AUTOTIER。本程序对同样的方面也有效。

**12. ECI-ICES-STRUDL/DYNAL** 基本上这是一个考虑到多种多样的成功设计大型实际结构的结构分析程序。实际上它不是一个优化程序,但基于最小重量准则具有从顺序表选择设计的能力。把它称为一个结构分析和设计系统而不称为一个程序更为合适。它可以按三种形式从麦克唐纳·道格拉斯自动化公司(McDonnell Douglas Automation Co.)获得:(a)按月出租:855—1235美元/月;(b)按惯例从该公司网络上购买;(c)以16000—23000美元出售。

**13. ARBOR (自动重新分析和重新设计最佳重量)** 本程序正在道格拉斯飞机公司(McDonnell Douglas)研制。发表的程序不完全可供使用,而正在内部使用。它打算供承受静载荷的大型航空航天结构的自动设计用。非线性规划和最佳准则都被用来做优化方法。本程序包含大量的有限元代码FORMAT供结构分析。

**14. TRAN-TOWER (输电塔设计和分析)** 实质上这是一个对输电塔考虑到许多实用选择合适尺寸的有限元分析程序。程序所选构件尺寸适合美国土木工程师学会(ASCE)塔设计规格。对平面桁架和空间桁架问题,本程序已经准备了数据生成、绘图、审查和选择构件尺寸。它是顾问工程师Sargent和Lundy的专利程序。有现成程序供出售。



15. SAD (结构分析和设计) 本程序打算供承受静载荷的结构最小重量设计用。它是一个具有杆、梁和薄膜板元件的有限元程序。用一种混合法来求优化。对应力约束问题,它使用修改尺寸元件的一种改进的应力比法。对位移约束问题,它开始用改进的应力比法,而完成设计时用数值搜索法。对于数值搜索,它采用基于可行方向法的子程序CONMIN(参看下面25)。本程序对应力约束问题极有效,而对位移约束问题不太经济。它是一种小的磁心内程序,适合研究结构优化设计。

16. OPTDYNAMIC (用于动载荷的结构优化) 本程序正在美国空军飞行动力学实验室(AFFDL)研制。其任务是在周期力和非周期力的作用下设计具有瞬态响应约束的最小重量结构。它的基础是动态刚度的最佳准则。这个方法称为动模态设计。它包含取决于强制函数性质的一个单一的固有模态或一组固有模态的一种组合。目前可以获得本程序的两个初级文本。一个文本只包含杆元件,另一个文本包含简单的盒形梁元件。目前两种情况都只有周期力可供使用。它们都是初级的研究程序而对实际结构并不很适用。

17. SOAR (用于气动弹性要求的结构优化) 本程序供具有固定颤振速度约束的结构确定结构元件尺寸,使之达到最小重量用。它使用可行方向法搜索最佳点,使用有限元分析来决定动态性质。颤振速度梯度的数据由Van de Vooren法得到。目前本程序可以处理多达200个自由度和100个设计变量的问题。它特别适合具有气动弹性要求的结构优化研究。加进静态强度要求会改进程序的实用性。

18. TSO 本程序是一个机翼气动弹性的综合程序,目的是要在满足颤振约束和满足用气动弹性载荷的强度约束的情况下,获得复合材料或金属机翼蒙皮的最佳蒙皮厚度分布和铺层方向。机翼盒形件用当量平板模拟,而刚度矩阵和质量矩阵由Raleigh-Ritz方法得到。优化方法是用具有罚函数的所谓序列无约束最小化方法(SUMT)的一种非线性规划法。程序原来是为机翼设计定制的,它也可用于初步设计。

19. WIDOWAC (具有气动弹性约束的机翼设计优化) 本程序打算供具有强度和气动弹性约束的机翼结构最小重量设计用。它是一个具有对称剪切板和薄膜板元件的有限元程序。优化方法是与牛顿法一起使用的近似二阶导数搜索法。为了减少有限元模型的变量数,必须使用连接方法。它是一个供研究强度和气动弹性相结合的优化设计的引导程序。

20. PLATE GIRDER 本程序按1969年规格要求,供混合板梁设计用。用混合这个术语,是因为程序允许用不同强度的钢来做凸缘和腹板。它也允许由于局部屈曲引起的腹板起皱,由此产生的载荷重新分布,可以用张力场理论来解释。本程序是由私人资助研制的,可用一定代价在商用计时公用系统上得到。

21. PLATE GIRDER 本程序是以美国钢结构学会规格作为设计准则的板梁最小重量设计程序。如同许多部件优化程序那样,它把重点安排在适合处理实际设计条件上。它是工程师Sargent和Lundy的专利程序,可以购买。

22. CONCRETE 本程序供二维加筋混凝土建筑框架优化设计用。它用力法进行分析,用可行方向法进行优化设计。结构的设计满足具有极限强度要求的1971年美国混凝土学会(ACI)的建筑物规格。优化中的约束是强度和元件尺寸。程序由作者作为

在伊利诺斯(Illinois)大学博士论文要求的一部分(N. Khachaturian 指导下)而研制的。

**23. STFSHL(1)** 本程序的作者M. Pappas已经指出,该系列里有三个程序:1)STFSHL(1),2)SUBSI(2),3)SUBSL4(3)。这些程序打算供框架、刚架、潜水艇、环形壳和圆柱壳的自动设计用。为了预计响应,这些程序用了刚性圆柱壳屈曲公式。使用“直接搜索设计算法”进行优化设计。加强支肋凸缘、腹板厚度、凸缘宽度和蒙皮厚度为设计变量,壳体重量为要求达到最小的目标函数。变量一般看作是连续的。可是,这些程序中,有些程序可以推广到离散变量。

**24. GMSP(一般导弹定大小程序)** 本程序供加劲壳结构初步设计用。目前它能够处理圆柱形、锥形或椭圆形横截面的壳。壳体为了承受剪切和力矩载荷而设计。用标准形状的手册公式来决定响应。实质上,按强度限制来设计,这些设计类似于同时破坏方式型。程序已装有蜂窝、加劲肋和基本硬壳式结构。它对每条弹道考虑了十个定时点。

**25. CONMIN** 这是一个约束极小化过程,它本身不是一个程序。然而,如果分析指令组能够提供所需的梯度信息,那么该过程便可用于结构优化程序。它基本上以约束极小化的可行方向法为基础。它也有一些无约束极小化的文本。它适于发展一种作为研究目的的小型结构优化程序用。

**26. COMAND** 本程序供层状复合材料平板的最小重量设计用。平面应力的合力 $N_x$ ,  $N_y$ 和 $N_{xy}$ 被输入到程序。它允许多种载荷条件。纵向、横向和剪切应变为约束条件。程序提供一个外加的刚度约束。纤维方向被输入程序。程序能决定每种方向的层数。用过程CONMIN导致优化。

**27. CYLINDER** 本程序供承受多种载荷条件的加劲圆柱的最小重量设计用。圆柱的纵向和周向用矩形加强件加强。蒙皮厚度、加强件间跨距和加强件的尺寸为优化中的设计变量。程序用加劲圆柱壳屈曲公式来决定破坏方式。设计载荷为轴向力和内压或外压。优化采用有罚函数的所谓序列无约束极小化方法的非线性规划法。

### 参 考 文 献

[1] ASOP Dwyer, W. J., Emerton, R. K., and Ojalvo, I. U., "An Automated procedure for the Optimization of Practical Aerospace Structure,"AFFDL-TR-70-118(Vol. I and Vol. II)1970,AFFDL, W-PAFB, Ohio.

Dwyer, W. J., "Finite Element Modeling and Optimization of Aerospace Structure",AFFDL-TR-72-59,1972,AFFDL, W-PAFB, Ohio.

[2] OPTSTATIC Venkayya, V. B., Khot, N. S., and Reddy, V. S., "Energy Distribution in an Optimum Structural Design",AFFDL-TR-68-156,1968,AFFDL, W-PAFB, Ohio.

Venkayya, V. B., "Design of Optimum Structures",An International

- Journal, Computer and Structures, Vol. 1, No. 1/2, Aug. 1971, pp. 265-309.
- [3] OPTIM Gellatly, R. A. and Berke, L., "Optimal Structural Design," AFFDL-TR-70-165, 1970, AFFDL, W-PAFB, Ohio.  
Berke, L., "An Efficient Approach to the Minimum Weight Design of Deflection Limited Structures," AFFDL-TM-70-4-FDTR, 1970, AFFDL, W-PAFB, Ohio.
- [4] OPTCOMPOSITE Khot, N. S., Venkayya, V., Johnson, C. D. and Tischler, V. A., "Application of Optimality Criterion to Fiber-Reinforced Composites," AFFDL-TR-73-6, 1973, AFFDL, W-PAFB, Ohio.
- [5] ASDP Karnes, R. N., Tocher, J. L., and Twigg, D. W., "Automated Analysis and Design of General Engineering Structures," Boeing Document DG-24387, 1970, Boeing Computing Center, Seattle, Washington.  
Tocher, J. L., and Karnes, R. N., "The Impact of Automated Structural Optimization on Actual Design," ASME/AIAA Structures and Material Conference, Anaheim, California, Apr. 19-21, 1971.
- [6] TRUSSOPT 2 Arora, J. S., and Rim, K., "Computer Program for Truss Optimization by Generalized Steepest Descent," Dept. of Mechanics and Hydraulics, College of Engineering, TR-6, 1973, The University of Iowa, Iowa City, Iowa.
- [7] FRAMOPT Arora, J. S., and Rim, K., "Optimal Design of Elastic Structures under Multiple Constraint Conditions," Dept. of Mechanics and Hydraulics, College of Engineering, TR-4, 1971, The University of Iowa, Iowa City, Iowa.
- [8] SAFER Melosh, R. J., "Structural Analysis, Frailty Evaluation and Redesign," AFFDL-TR-70-15, 1970, AFFDL, W-PAFB, Ohio.
- [9] PARADES Levy, R., and Melosh, R., "PARADES Structural Design System Capabilities," The Deep Space Network Progress Report, TR-32-1526, Vol. XII, pp. 68-73, JPL, Pasadena, Calif., 1972.
- [10] AUTOTIER Agaskar, V. L. and Weaver, W., "Automated Design of Tier Building," Internat. Jour., Computer and Structures, Vol. 2, No. 5/6, Dec. 1972, pp. 991-1011.
- [11] AUTOTRUSS Weaver, Jr. W. and Patton, F. W., "Automated Design of Space Truss," AISC Engng. J. Vol. 5, 1968, pp. 26-36.
- [12] ECI-ICES-STRUDL/DYNAL User's Manual ECI-ICES-STRUDL

/DYNAL McDonnell Douglas Automation Co. P.O. Box 516, St. Louis, MO.

- [13] ARROW Dodd, A. J., "Specification for a Static Structural Optimization Capacity," Douglas Aircraft Division IRAD Rep. MDC-J5442, 1972, Douglas Aircraft Company, Long Beach, Calif.
- [14] TRAN-TOWER Lo, D., Morcos, A. and Goel, S. K., "Computer Aided Design of Steel Transmission Towers," Presented at the ASCE National Structural Engineering Meeting in Cincinnati, Ohio, Apr. 22-26, 1974.
- [15] SAD Vanderplaats, G., "Structural Analysis and Design Program, User's Manual," NASA-TMX (in preparation), NASA Ames Research Center, Moffett Field, Calif.
- [16] OPTDYNAMIC Venkayya, V. B., Khot, N. S., Tischler, V. A., and Taylor, R. F., "Design of Optimum Structures for Dynamic Loads," Presented at the 3rd Air Force Conf. on Matrix Method in Structural Mechanics W-PAFB, Ohio, 1971.
- [17] SOAR Gwin, L. B., and McIntosh, Jr., S. C., "A Method of Minimum-Weight Synthesis for Flutter Requirements," AFFDL-TR-72-22 (vol. 1 I and II), 1972, AFFDL, W-PAFB, Ohio.
- [18] TSO McCullers, L. A., Lynch, R. W., "Dynamic Characteristics of Advanced Filamentary Composite Structures," AFFDL-TR-73-111. (Vol. I and II), 1973, AFFDL, W-PAFB, Ohio.
- [19] WIDOWAC Hafka, R. T., "Automated Procedure for Design of wing Structure to Satisfy Strength and Flutter Requirements," NASA-TN-D-7264, 1973, NASA Langley Research Center, Hampton, Virginia.
- [20] PLATE-GIRDER Douty, R. T., "Welded Hybrid Girder Program-1969, AISC Specification," Informal User's Manual Can be Obtained from the Author.
- [21] PLATE-GIRDER Beck, S., and Chu, S. L., "Minimum Weight Design of a Plate Girder," Presented at ASCE Joint Speciality Conf. on Optimization and Nonlinear Problems, Chicago, Illinois, Apr. 18-21, 1968.  
Chu, S. L., "An Integrated Computer System for Structural Analysis and Design," Presented at Summer Institute in Structural Design held at Illinois Institute of Technology, Chicago, Illinois, July 10-Aug. 4, 1972.

- [22] CONCRETE Shunmugavel, P., "Optimization of Two-Dimensional Reinforced Concrete Building Frames," Thesis Submitted to the University of Illinois in Partial Fulfillment of the Degree of Doctor of Philosophy, Jan. 1974.
- [23] STFSL(1) Pappas, M. and Allentuch, A., "Extended Structural Synthesis Capability for Automated Design of Frame-Stiffened Submersible, Circular, Cylindrical Shells," NCE Rep. NO. NV 8, 1973, Newark College of Engineering, Newark, New Jersey.
- [24] GMSP Dixon, H. M., "Theory, Coding and Operation of the General Missile Sizing Program," MDC Rep. SM-48752, 1965, McDonnell Douglas Astronautic Company, Huntington Beach, Calif.
- [25] CONMIN Vanderplaats, G., "CONMIN, A Fortran program for Constrained Function Minimization--User's Manual," NASA-TMX-62282, 1973, NASA Ames Research Center, Moffett Field, Calif.
- [26] COMMAND Vanderplaats, G., "COMMAND, A Fortran Program for Simplified Composite Analysis and Design," NASA Ames Research Center, Moffett Field, Calif.
- [27] CYLINDER Morrow, W. M. and Schmit, Jr., L. A., "Structural Synthesis of a Stiffened Cylinder," NASA CR-1217, 1968, NASA Langley Research Center, Hampton, Virginia.

#### 附录 I

- |   |   |
|---|---|
| [1] ASOP<br>V. B. Venkayya<br>AFFDL/FBR<br>WPAFB, Ohio 45433          | Seattle, Washington 98124   |
| [2] OPTSTATIC<br>(同上)   | [6] TRUSSOPT2<br>J. S. Arora<br>Dept. of Mechanics The Univ.<br>of Iowa, Iowa City, Iowa<br>52242 |
| [3] OPTIM<br>L. Berke<br>(地址同上)                                       | [7] FRAMOPT<br>(同上)   |
| [4] OPTCOMPOSITE<br>N. S. Khot<br>(地址同上)                              | [8] SAFER<br>L. Berke<br>AFFDL/FBR<br>WPAFB, Ohio 45433   |
| [5] ASDP<br>R. N. Karnes<br>Boeing Computer Center<br>P. O. Box 24346 | [9] PARADES<br>R. Levy<br>Telecommunication Division<br>JPL, California Institute of              |

- Technology  
Pasadena, California 91103
- [ 10 ] AUTOTIER  
W. Weaver  
Prof. of Structural Engr.  
Stanford University  
Stanford, Calif. 94305
- [ 11 ] AUTOTRUSS  
(同上)
- [ 12 ] ECI-ICES-STRUDL/DYNAL  
E. L. Ghent  
Engineering Product Manager  
McDonnell Douglas Automation Company P. O. Box 516  
St. Louis, Missouri 63166
- [ 13 ] ARROW  
A. J. Dodd  
Senior Engineer Scientist  
CI-250(35-42)  
Douglas Aircraft Company  
3855 Lakewood Blvd  
Long Beach, Calif. 90846
- [ 14 ] TRAN-TOWER  
C. F. Beck  
Head, Computer Services  
Sargent & Lundy Engineers  
140 South Dearborn Street  
Chicago, Illinois 60603
- [ 15 ] SAD  
G. Vanderplaats  
NASA Ames Research Center  
MS 227-2  
Moffett Field, Calif. 94035
- [ 16 ] OPTDYNAMIC  
V. B. Venkayya  
AFFDL/FBR  
WPAFB, Ohio 45433
- [ 17 ] SOAR  
R. A. Taylor  
AFFDL/FYS  
WPAFB, Ohio 45433
- [ 18 ] TSO  
LtK. E. Griffin  
(地址同上)
- [ 19 ] WIDOWAC  
J. Starnes  
NASA LRC  
Mail stop 362  
Hampton, Virginia 23665
- [ 20 ] PLATE GIRDER  
National CSS Computer Networks (for details contact:  
R. T. Douty  
1412 Ridgement Court  
Columbia, Missouri 65201)
- [ 21 ] PLATE GIRDER  
C. Beck  
Head, Computer Services  
Sargent & Lundy Engineers  
140 South Dearborn Street  
Chicago, Illinois 60603
- [ 22 ] CONCRETE  
P. Shunmugavel  
Sargent & Lundy Engineers  
or Prof N. Khachaturian  
University of Illinois  
Urbana, Illinois 61801
- [ 23 ] STFSHL(1)  
M. Pappas  
Dept. of Mechanical Engr.  
Newark College of Engr. 323  
High Street Newark,  
New Jersey 07102
- [ 24 ] GMSP  
H. H. Dixon

- |  |  |
|--|--|
| McDonnell Douglas<br>Astronautic Company<br>5301 Bolsa Avenue<br>Huntington Beach, Calif.<br>92647 | Moffett Field, Calif. 94035  |
| [25] CONMIN<br>G. Vanderplaats<br>NASA Ames Research Center<br>MS 227-2                            | [26] COMAND<br>(同上)<br>[27] CYLINDER<br>W. J. Stroud<br>NASA LRC<br>Mail stop 362<br>Hampton, Virginia 23665 |

译自: Pilkey, W., Saczalski, K., Schaeffer, H. (eds) (1974), *Structural Mechanics Computer Programs—Surveys, Assessments, and Availability*, University Press of Virginia, 227—253.  
(沈守正译 董务民校)

## 动态断裂实验研究

J. W. Dally

**提要** 本文是Kalthoff, Kobayashi, Theocaris和Dally对扩展裂纹性状方面近期所作动态实验的述评。对于用Cranz-Schardin高速记录装置结合焦散法和光弹性法研究动态断裂,作了简略的叙述。讨论了所观察到的裂纹扩展的性状,包括:裂纹尖端的加速度和减速度,断裂引起的应力波,表征材料特性的 $K-\dot{a}$ 关系,超高速裂纹的扩展和分叉。

### 一、引言

尽管30年来力学和材料科学的研究工作者都作了重大的努力[1],对断裂过程的许多问题却仍没有清楚的解释或了解。不过,如果把一个纯断裂区,即脆性断裂,看成是在结构中预先存在的缺陷处开裂的裂纹的不稳定扩展,那么,显然它已取得重大的进展。从工程角度看,如果材料的开裂韧性 $K_{IC}$ 已知,则裂纹尖端的应力奇异性就可用一个应力强度因子 $K$ 来表征,而且可以预测使结构中预先存在的裂纹开裂所需要的临界载荷[2—4]。

虽然在预测不稳定裂纹扩展的开裂方面已有相当大的进展,但很令人奇怪,关于裂纹开裂后的动态性状却很少有人注意。断裂问题的这个方面极端复杂。因为区域的边界随时间而改变,控制方程又不好求解,所以难于用理论方法解决问题。曾尝试用数值方法模拟动态断裂现象和研究裂纹的性状[5],然而,由于对断裂过程了解得并不清楚,由于模型是否合宜而引起一些严重问题,这种方法受到限制。

看来,必须通过动态断裂现象的实验研究,来进行为了更好地弄清楚裂纹扩展过程