

## 探空火箭级间段的CAD系统

李国光 黄建华

(航天技术系)

**摘要** 本文在 CADKEY 绘图软件包的支持下,开发了加筋圆柱结构 CAD 系统—Hcadx. 此系统通过菜单引导用户的操作,可用经验公式或解析法作轴压稳定分析,用罚函数法优化参数,可以在不退出Hcadx的情况下启动CADKEY,自动绘制设计草图。此草图经过适当地编辑、修改、便可成为工程中能接受的工作图纸。

**关键词** CAD, 优化设计, 稳定分析

**分类号** V421

## 主要符号

$A_1, A_2$	纵向加筋与环向加筋的横截面积	$a, b$	圆柱壳的长度与周长
$E$	弹性模量	$e_1, e_2$	纵向与环向加筋截面形心对蒙皮中面的偏心距
$h$	圆筒壳壁厚	$I_1, I_2$	纵向与环向加筋对蒙皮中面的转动惯量
$h_1, h_2$	纵向与环向加筋高度	$m, n$	圆筒屈曲波型在纵向的半波数与在环向的波数
$J_1, J_2$	纵向与环向加筋对其形心的扭转惯性矩	$p_j$	设计轴压
$N_1, N_2$	纵向与环向加筋数目	$t_1, t_2$	纵向与环向的加筋宽度
$p$	单位宽度上的轴向压力	$\mu$	波桑比
$R$	圆柱壳半径		

计算机图形学、结构CAD和微型计算机等新技术的发展,为计算力学开辟了广阔的领域。在飞行器结构设计中,将结构分析、优化设计与这些新技术结合起来,开展设

1989年4月10日收稿

solve the 2D compressible RANS equations for the numerical simulation of the supersonic external flow over a rearward facing step with transverse injection. The velocity vector field, pressure contour and Mach contour of the field are given. The step bottom pressure increases by about one time as compared with the case without injection.

**Key words:** supersonic flow, separation transverse injection, numerical simulation

计、计算机绘图一体化工作,是个很重要的发展方向。本文介绍我们研制的探空火箭级间段的CAD系统—Hcadx,该系统以CADKEY绘图软件包为支持软件,包括有稳定分析、优化设计、建立CADL文件和计算机绘图等部份。它具有如下功能:

- (1) 利用解析法或经验公式作加筋圆柱结构的轴压稳定分析。
- (2) 利用罚函数法进行优化设计。
- (3) 自动生成加筋圆柱结构的参数绘图文件CADL。
- (4) 内部启动CADKEY执行CADL文件,绘制出结构设计图。
- (5) 临时建立DOS运行环境,以执行另外的DOS进程,可作为用户临时进行磁盘文件组织与管理。

整个系统采用批处理菜单控制,操作方便,初步形成了具有交互功能的设计、计算机绘图一体化的集成系统,为结构CAD在飞行器结构设计中的应用,提供了一套可行的办法。

## 1 Hcadx的模块化结构

Hcadx由30多个模块组成,它们各自完成不同的功能,彼此间又互相联系。一部分模块是Hcadx与键盘、显示器及操作系统的接口,用宏汇编语言编写,以便提高速度。其余大部分的分析计算模块及与CADKEY的接口模块,则采用FORTRAN语言完成。

Hcadx系统中的主要模块有:系统初始化、菜单驱动、轴压稳定分析、优化设计、分析和设计结果的文本输出、CADKEY启动、DOS进程执行和系统出口等模块。它们之间的关系如图1所示。

Hcadx通过菜单驱动模块管理其它各模块,建立与用户的联系。在菜单提示下,用户通过键盘上的功能键切换Hcadx的各个功能模块。在主菜单下面有子菜单,以便完成各部分的任务,且可在任一级菜单下通过 $\overline{ESC}$ 键可返回到上一级菜单。Hcadx的主菜单如图2所示。

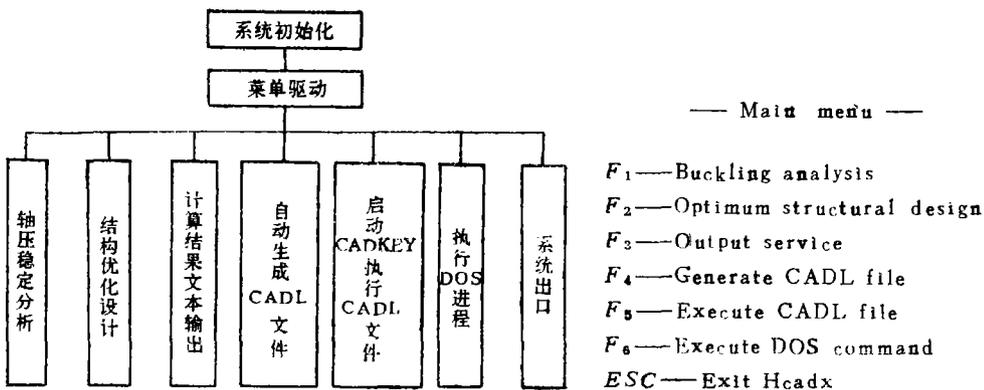


图1 Hcadx主模块

图2 Hcadx主菜单

## 2 轴压稳定分析与优化设计

探空火箭级间段担负着两级弹体的连接与分离任务，其周围固定着四片弹翼。当两级弹体分离后，级间段就成了二级火箭的尾段。我们根据某探空火箭的设计要求和级间段的受力特点，采用了加筋圆柱结构，对待开孔问题采用局部补强的办法，而在作稳定分析时没作考虑，因此把结构简化成如图 3 所示的形式。

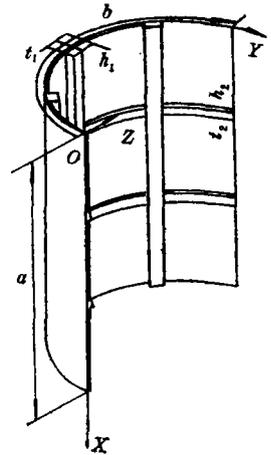


图 3

### 2.1 轴压稳定分析

考虑实际设计的需要，本文采用解析法和经验公式两种分析方法，其中经验公式取自文献[3]提供的计算公式，解析法则用最小势能原理导出轴压失稳临界力公式。按照线性理论和平面假设，加筋圆柱壳屈曲时的应变位移关系为：

蒙皮

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} - z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \\ \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{w}{R} - z \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \\ \varepsilon_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} - 2z \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \end{cases} \quad (1)$$

纵向加强筋

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} - z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \quad (2)$$

环向加强筋

$$\varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} - z \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - \frac{w}{R} \quad (3)$$

假设下组位移函数

$$\begin{cases} u = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N u_{mn} \cos \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \\ v = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N v_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \cos \frac{n\pi y}{b} \\ w = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N w_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \end{cases} \quad (4)$$

可推出如下应变能表达式：

蒙皮应变能

$$\begin{aligned}
 U_0 = & \frac{\pi^2 E h}{8(1-\mu^2)} \cdot \frac{b}{a} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N m^2 \left\{ \left[ 1 + \frac{1-\mu}{2} \left( \frac{na}{mb} \right)^2 \right] u_{mn}^2 \right. \\
 & + (1+\mu) \frac{na}{mb} u_{mn} v_{mn} + \left[ \frac{1-\mu}{2} + \left( \frac{na}{mb} \right)^2 \right] v_{mn}^2 \\
 & + \frac{2\mu}{m} \frac{a}{\pi R} u_{mn} w_{mn} + 2 \frac{na}{mb} \frac{a}{\pi R} v_{mn} w_{mn} \\
 & \left. + \left[ \left( \frac{a}{\pi m R} \right)^2 + m^2 \pi^2 \frac{h^2}{12a^2} \left( 1 + \left( \frac{na}{mb} \right)^2 \right)^2 \right] w_{mn}^2 \right\} \quad (5)
 \end{aligned}$$

纵向加强筋应变能

$$\begin{aligned}
 U_1 = & \frac{\pi^2 E}{8a} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N m^2 \left\{ N_1 A_1 u_{mn}^2 - \frac{2m\pi}{a} N_1 A_1 e_1 u_{mn} w_{mn} \right. \\
 & \left. + \left[ N_1 I_1 \left( \frac{m\pi}{a} \right)^2 + \frac{N_1 J_1}{2(1+\mu)} \left( \frac{n\pi}{b} \right)^2 \right] w_{mn}^2 \right\} \quad (6)
 \end{aligned}$$

环向加强筋应变能

$$\begin{aligned}
 U_2 = & \frac{\pi^2 E}{8a} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N n^2 \left\{ \left( \frac{N_2+1}{b} \right) A_2 a v_{mn}^2 + 2(N_2+1) A_2 \left( \frac{a}{n\pi R} - \frac{n\pi a e_2}{b^2} \right) v_{mn} w_{mn} \right. \\
 & + (N_2+1) \left[ \frac{A_2 a}{b} \left( \frac{b}{n\pi R} \right)^2 - \frac{2A_2 e_2 a}{Rb} + \frac{I_2 a}{b} \left( \frac{n\pi}{b} \right)^2 \right. \\
 & \left. \left. + \frac{J_2}{2(1+\mu)} \left( \frac{m\pi}{a} \right)^2 \frac{a}{b} \right] w_{mn}^2 \right\} \quad (7)
 \end{aligned}$$

外力势

$$\begin{aligned}
 U_p = & \frac{1}{2} \int_0^b \int_0^a \left( 1 + \frac{N_1 A_1}{bh} \right) p \left( \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 dx dy \\
 = & \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{N_1 A_1}{bh} \right) p \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \left( \frac{m\pi}{a} w_{mn} \right)^2 \frac{ab}{4} \quad (8)
 \end{aligned}$$

应用最小势能原理, 便可得到加筋圆柱壳失稳时单位宽度上的临界轴压力

$$p = c_3(a_2^2 - a_1 b_2) + b_3(a_1 b_3 - a_2 a_3) + a_3(a_3 b_2 - a_2 b_3) / [d(a_2^2 - a_1 b_2)] \quad (9)$$

$$\text{式中 } a_1 = \frac{hb}{1-\mu^2} \left[ 1 + \frac{1-\mu}{2} \left( \frac{na}{mb} \right)^2 \right] + N_1 A_1, \quad a_2 = \frac{hb}{(1-\mu)} \frac{a}{2b}$$

$$a_3 = \frac{\mu hb}{(1-\mu^2)} \frac{a}{\pi R} - \frac{m\pi}{a} N_1 A_1 e_1, \quad b_2 = \frac{hb}{1-\mu^2} \left[ \frac{1-\mu}{2} + \left( \frac{na}{mb} \right)^2 \right] + (N_2+1) A_2 \frac{n^2 a}{m^2 b}$$

$$b_3 = \frac{hb}{(1-\mu^2)} \frac{na}{mb} \frac{a}{\pi R} + (N_2+1) A_2 \left( \frac{a}{m\pi R} - \frac{m\pi a e_2}{b^2} \right) \frac{n^2}{m^2}$$

$$c_3 = \frac{hb}{1-\mu^2} \left[ \left( \frac{a}{\pi m R} \right)^2 + m^2 \pi^2 \frac{h^2}{12a^2} \left[ 1 + \left( \frac{na}{mb} \right)^2 \right]^2 \right] + N_1 I_1 \left( \frac{m\pi}{a} \right)^2$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{1}{2(1+\mu)} N_1 J_1 \left( \frac{n\pi}{b} \right)^2 + \frac{n^2}{m^2} (N_2 + 1) A_2 \left[ \frac{b}{a} \left( \frac{a}{n\pi R} \right)^2 \right. \\
& \left. - \frac{2e_2 a}{Rb} + \frac{I_2 a}{A_2 b} \left( \frac{n\pi}{b} \right)^2 + \frac{1}{2(1+\mu)} \frac{J_2 a}{A_2 b} \left( \frac{m\pi}{a} \right)^2 \right] \\
d = & \frac{b}{E} \left( 1 + \frac{N_1 A_1}{hb} \right)
\end{aligned}$$

如令  $b = \pi R$ , 即可求得加筋圆柱壳整体失稳时的临界轴压力

$$p'_{e_j} = p(2\pi R h + N_1 A_1) \quad (10)$$

依据级间段的具体结构, 在上式中令  $b = \pi R$ , 再令  $a = a/N_1$ , 并以  $N_1 = 0$ 、 $N_2 = 0$  代入, 便可得到局部失稳临界压力  $p''_{e_j}$ .

## 2.2 优化设计

本文以蒙皮厚度  $h$ , 纵向与环向加筋高度  $h_1$ 、 $h_2$ , 纵向与环向加筋宽度  $t_1$ 、 $t_2$  为设计变量, 取结构重量最轻为目标函数, 提出了总体不失稳、局部不失稳、板材规格、工艺要求等约束, 利用罚函数法求解, 并在系列无约束优化问题的求解中, 采用了数值稳定性比较好、效率很高的BFGS变尺度法。

## 3 剖面线的绘制算法

本文提出一个有效的剖面线绘制算法。此法突破了传统的求端点计算方法, 用线段的分割与拟合代替了建立剖面边界的数学描述, 用坐标变换把繁杂的求端点坐标转换为计算单值函数, 从而大大地减少了计算量。

### 3.1 数据结构

要完整地描述一平面图形, 其数据结构应包括: 节点的位置、节点间的连接关系以及节点间的连接类型标志(直线或圆弧)。

表 1

本文定义一个二维实数组  $\text{point}(2, \text{nd})$ ,  $\text{nd}$  为节点数, 来存贮平面图形的节点坐标; 定义一个一维整数数组  $\text{link}(\text{nd})$ , 以  $\text{link}(i)$  存贮与第  $i$  节点相连接的节点编号; 定义一个一维数组  $\text{type}(\text{nd})$ , 以  $\text{type}(i)$  存贮  $i$  节点至  $i+1$  节点的连接类型标志。  $\text{type}(i)$  的取值如表 1 所示。

$\text{type}(i)$ 的取值	第 $i$ 个实体的类型
$10^{30}$	直线
0	无连接线
$(0, 10^{30})$ 之间	圆弧, 圆弧半径 $r_{nd} = \text{type}(i)$ 圆弧扫过的角度小于 180 度
$(-10^{30}, 0)$ 之间	圆弧, 圆弧半径 $r_{nd} =  \text{type}(i) $ 圆弧扫过的角度大于 180 度

利用这种数据结构, 如果第  $i$  个实体为直线, 则数据结构中的信息直观地反映了实体的形状; 如果第  $i$  个实体为圆弧, 则可利用数据结构中提供的信息, 计算出该圆弧的圆心  $(x_c, y_c)$ 、起始角  $\theta_1$  和终止角  $\theta_2$ 。

### 3.2 基本原理

利用上面的数据结构, 可以确定出第  $i$  个边界的图形数据。若该边界为直线, 可得两个端点的直线方程为

$$\frac{y - y_1}{y_2 - y_1} = \frac{x - x_1}{x_2 - x_1}, \min(x, x_2) \leq x \leq \max(x_1, x_2) \quad (11)$$

若该边界为圆弧, 可得方程

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = r^2 \quad (12)$$

如令剖面线的方向为  $\alpha$  (以逆时针为正),

则第  $m$  条剖面线方程为

$$y = (x - x_m) \operatorname{tg} \alpha \quad (13)$$

其中  $x_m$  为该剖面线在  $x$  轴上的截距。直接求解方程组(11)和(13)或(12)和(13), 便可得到剖面线与剖面边界的交点, 但这样作的计算量是很大的。本文采用坐标变换办法, 将坐标轴顺时针转  $90^\circ - \alpha$ , 使新坐标系  $x'oy'$  的纵坐标  $oy'$  与剖面线方向一致。如图4所示。

坐标变换后, 剖面边界和剖面线的方程也随之改变, 边界为直线的方程为

$$\frac{y' - y'_1}{y'_2 - y'_1} = \frac{x' - x'_1}{x'_2 - x'_1}, \min(x'_1, x'_2) \leq x' \leq \max(x'_1, x'_2) \quad (14)$$

或表示为

$$y' = \frac{y'_2 - y'_1}{x'_2 - x'_1} (x' - x'_1) + y'_1 = f(x'), \min(x'_1, x'_2) \leq x' \leq \max(x'_1, x'_2) \quad (15)$$

边界为圆的方程为

$$(x' - x'_0)^2 + (y' - y'_0)^2 = r^2 \quad (16)$$

如果任一剖面线与该圆弧边界只有一个交点, 则可进一步表示为

$$y' = y'_0 + \operatorname{SIGN} \sqrt{r^2 - (x' - x'_0)^2} = f(x') \quad (17)$$

其中  $\operatorname{SIGN} = 1$  或  $-1$ , 由  $(x'_1, y'_1)$ 、 $(x'_2, y'_2)$  和  $\operatorname{type}(i)$  决定。当圆弧边界与剖面线的交点不只一个时, 则可用图4中所示的切点  $p$  将圆弧分为两段, 则每段圆弧均能表示为  $x'$  的单值函数。剖面线方程变为

$$x' = x'_m \quad (18)$$

经过上述变换, 可以看到: 求剖面线交点的计算, 已变成简单地求解下面所示函数值的计算

$$y'_m = f(x') | x' = x'_m, \min(x'_1, x'_2) \leq x' \leq \max(x'_1, x'_2) \quad (19)$$

若  $x'_m < \min(x'_1, x'_2)$  或  $x'_m > \max(x'_1, x'_2)$ , 则可以断定第  $m$  条剖面线与该边界没有交点, 否则得交点坐标为  $(x'_m, f(x'_m))$ 。因此, 求交点的计算量大大地减少。

### 3.3 冗余交点问题

如图4所示, 第  $m$  条剖面线与剖面域第12、4、5、6、7、9、10边界的交点分别为  $p_1, \dots, p_7$  诸点, 按照奇偶连线法则, 则得到如图5所示的错误连法。原因是此剖面线正好通

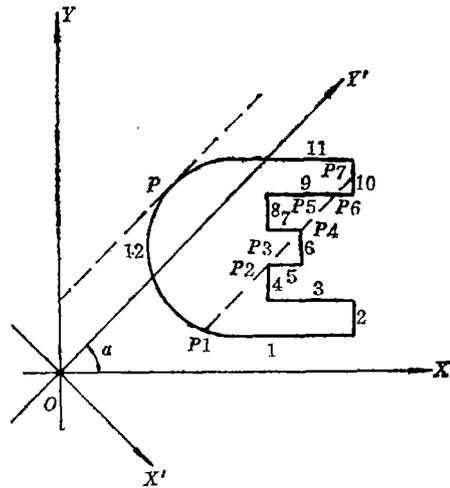


图 4

过边界 4 与边界 5 的交点、边界 6 与边界 7 的交点， $p_2$  与  $p_3$ 、 $p_4$  与  $p_5$  是同一个交点。它们之中有冗余交点，本文采用如下办法处理。设某剖面线上有某两个交点  $p_i$  与  $p_j$  是同一个点，其中  $p_i$ 、 $p_j$  是剖面线与边界  $i$ 、边界  $j$  的交点。若边界  $i$  与边界  $j$  分别处于剖面线两侧时，则  $p_i$ 、 $p_j$  中有一个是冗余交点，应予以舍去；若边界  $i$  与边界  $j$  同处于剖面线一侧时，则  $p_i$ 、 $p_j$  均为有效交点。排除冗余交点后，重新排序，再按奇偶连线法，便可绘制出正确的剖面线，如图 6 所示。

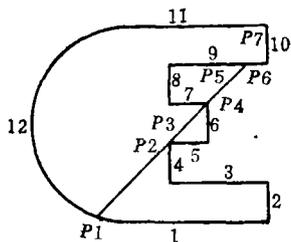


图 5

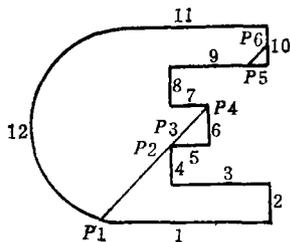


图 6

### 4 工程结构图的计算机绘制

本文采用的办法是：运行 Hcadx 系统得到加筋圆柱壳的基本设计图，然后利用

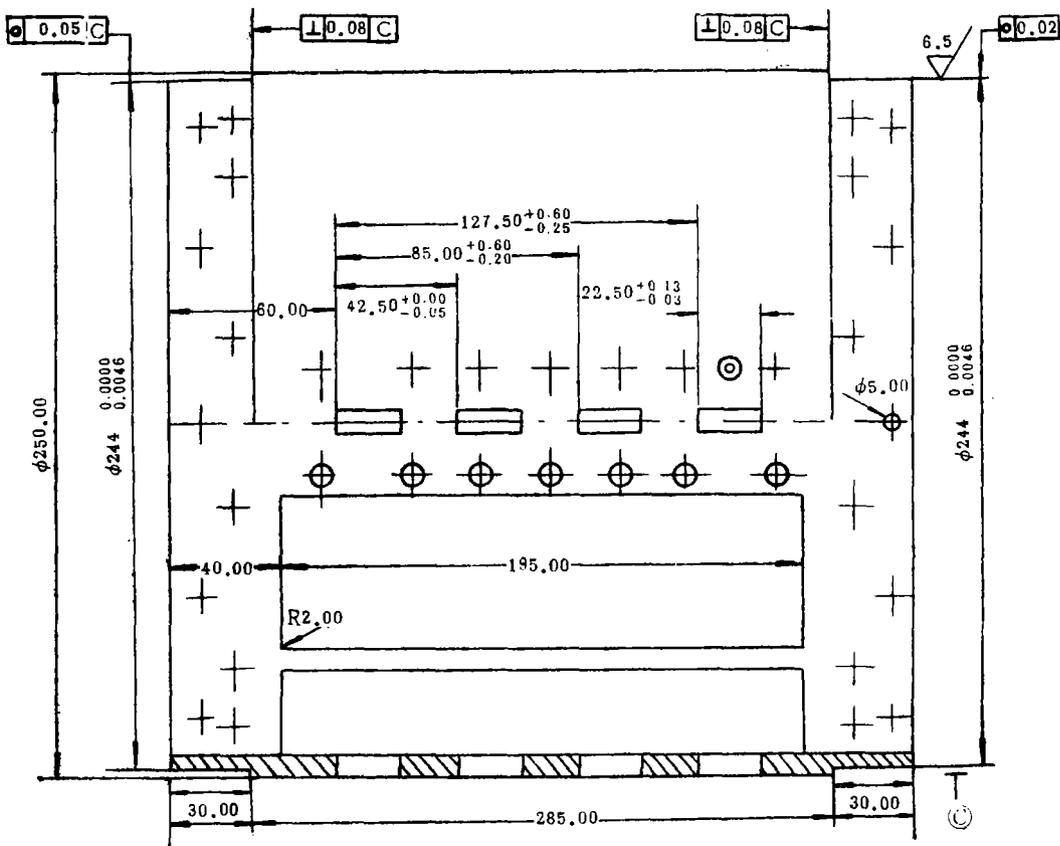


图 7

CADKET的图形编辑功能,依据实际结构的具体要求,通过人机对话对设计草图作进一步的修改和完善,最后得到如图7所示的工程结构图。当然随着对Hcadx系统参数绘图功能的进一步开发,人机对话式修改草图的工作量将会减少。

## 5 结束语

本文通过一体化设计Hcadx系统的建立,把计算机图形生成与处理引入了加筋圆柱壳的结构设计,从而改变了手工绘制分析和设计结果的状态,为结构CAD提供一个具体应用方法。系统在某探空火箭级间段的设计中得到了很好的应用。文章的主体结构思想也可在类似的结构设计中采用。

## 参 考 文 献

- [1] 黄少昌等. 计算机辅助机械设计技术基础. 北京: 清华大学出版社, 1988
- [2] 黄建华. 加筋圆柱结构CAD系统的研究. 国防科技大学研究生论文, 1989
- [3] [苏]B. T. 利津. 薄壁结构设计. 北京: 国防工业出版社, 1983
- [4] Block D L, Card M F and Mikulas M M. Buckling of Eccentrically Stiffened Orthotropic Cylinders. NASA, TND-2080, 1965

# CAD System for Joint Segment between Two Stages of Sounding Rocket

Li Guoguang Huang Jianhua  
(Department of Aerospace Technology)

## Abstract

This paper develops a CAD system (Hcadx) for stiffened waffle cylinder, supported by CADKEY as graphics system. The CAD system can introduce user's operations by menu and can do buckling analysis of stiffened waffle cylinder by empirical formula or by analytic method. It can also obtain optimal parameters by penalty function algorithm and may invoke CADKEY to plot design drawings of stiffened waffle cylinder automatically. It is not necessary to exit Hcadx. These design drawings can be edited easily to become acceptable work drawings.

**Key words:** computer aided design (CAD); optimum design; stability analysis