

进气道资料译文集



国外航空编辑部

1979. 2.

国外航空技术专题资料
进气道资料译文集

*

国外航空编辑部
北京市 1652 号信箱

*

内部发行
1979 年 2 月 书号: 110

4.00元

前 言

近些年来，进气道的研究有很大发展，国外发表的资料很多。根据一九七三年十月西安“《航空气动手册》编写工作会议”的决定，我们组织编译了《进气道资料译文集》（第一集）。题目是根据一些厂、所及院校的意见选定的。原先选定的题目较多，但由于完成的编译稿有限以及一些资料（如内流空气动力学手册等）已由其他单位编写，故本译文集是极不全面的。文集中所用术语也不尽统一。

为便于有关人员查阅进气道方面的其他译文，文集末尾附有“已出版的进气道的部分译文目录索引”。

限于编者的水平，错误及不当之处必不少，欢迎读者指正。

目 录

一、轴对称和二维超音速进气道及喷口的设计准则·····	1
二、进气道的附加阻力及其对飞机性能的影响·····	39
三、利用结合特征线法的计算机程序设计超音速进气道·····	54
四、单级锥超音速进气道的附加阻力计算公式·····	151
五、轴对称管道内的不可压紊流、涡旋流的理论和实验的比较·····	153
六、超音速进气道流场的粘性——非粘性流的综合分析·····	165
七、一种超音速外压式进气道附面层内部旁路的功能·····	176
八、 $M=2.5$ 的高性能轴对称混压式进气道的多孔抽吸功效·····	186
九、附面层放气系统的反压和开孔面积对 $M=2.5$ 的轴对称混压式进气道性能的影响·····	213
十、超音速进气道控制系统的控制概念和风洞实验·····	237
十一、具有各种辅助进气口的超音速进气道的低速风洞实验研究·····	263
十二、超音速进气道动态特性的一种数学分析·····	276
十三、轴对称超音速进气道的控制系统概念·····	299
十四、动力装置的动态特性和控制·····	308
已出版的进气道部分译文目录索引·····	337

轴对称和二维超音速进气道 及喷口的设计准则

摘 要

本文提供了马赫数到 4.0 的单、双斜激波进气道的设计图线, 以及具有汇交马赫线(按理论情况)的轴对称等熵面和二维等熵面的设计图线。还提供了马赫数从 2.0 到 4.0, 增量为 0.25 的一族等熵面的无量纲几何型面, 以及型面上的当地马赫数和气流角。所有的图线都是从自由流马赫数到当地马赫数为 1.0 的, 这些图线既可以用于进气道设计, 也可以用于喷管设计。

在使用等熵进气道时, 根据激波结构的理论分析, 对波系汇交于唇口点、且满足涡面两侧压强相等和气流方向相同的激波结构, 存在着一个压缩极限。与此压缩极限对应的激波解, 是由压强——气流折转角的激波极曲线来判定的。由于存在着压缩极限, 一个压缩波系汇交于唇口的全外压式进气道, 在自由流马赫数为 4.0 时, 仅由激波损失造成的总压恢复, 其理论值最大为 0.685。

本文也考虑了唇口内外激波附着于唇口的要求。对等熵进气道来说, 激波附体要求对最大总压恢复的限制比激波结构的限制小。

本文比较了按激波压缩极限设计的等熵进气道与理论上最佳的单、双斜激波进气道的性能, 进行比较的自由流马赫数到 4.0。

引 言

具有汇交马赫线(按理论情况)的等熵面, 由于它的性能好, 在马赫数接近 2.0 (或更高)的喷气发动机进气道或排气喷管上可能得到广泛应用。这种等熵面是用特征线法来设计的, 因而至少对于轴对称情况来说是十分烦琐和费时间的。为方便设计者, 对一族二维和轴对称等熵面的型线及流场, 用 NACA Lewis 实验室的电子计算机(一种卡片程序计算机)作了计算。这里提供的是马赫数到 4.0 的结果。

对在更高马赫数(即在 2.2 以上)工作的, 并具有指定汇焦压缩波或在唇口只有波的一个交点的超音速进气道, 外部压缩量被限制在等于或低于自由流正激波压强增量以内。这个限制是涡面两侧的静压要平衡的结果。对于等熵进气道, 压缩限制的另一种情况是由唇口内外的激波要附着在唇口上引起的。为更确切地定出这些压缩限制以及确定它们对进气道性能的限制范围, 本文作了理论分析, 并给出分析的结果, 分析的马赫数范围到 4.0。

为了说明各种压缩面可达到的相对性能, 对无溢流等熵进气道及最佳单、双斜激波进气道的理论压力恢复作了比较。所有的压力恢复都只考虑激波损失, 不考虑粘性影响。由

于缺乏合用的在大逆压梯度作用下的附面层理论解，故未对型面作附面层位移厚度修正。各进气道的外阻，在比较时也没有考虑。

符 号

这篇报告中使用下列符号：

- A 面积
- M 马赫数
- P 总压
- p 静压
- r 焦点半径
- x 距斜板前缘或锥尖的轴向距离
- y 距轴线的径向距离或高度
- γ 空气的比热比
- λ 相对于自由流方向的气流角，度
- λ_{d, M_0} 与自由流马赫数相应的二维离体角，度
- λ_{d, M_0} 与扩压器进口马赫数相应的二维离体角，度
- λ_1 初始楔角，度
- λ_2 第二楔角与初始楔角的差，度
- θ_1 初始半锥角，度
- θ_2 第二半锥角与第一半锥角之差，度
- η_{ke} 动能效率，定义为：扩压器后可用动能（假设等熵膨胀到环境压强）与自由流动能之比。

$$1 - \frac{2}{(\gamma - 1)M_0^2} \left[\left(\frac{P_0}{P_s} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} - 1 \right]$$

- ψ 射线角，在锥型激波角和半锥角之间变化的锥型半角。

下标：

- a 强激波与涡面之间的状态
- b 涡面与反射波之间的状态
- c 反射波与等熵压缩扇形末端之间的状态
- e 扩压器进口处的状态
- f 焦点处的状态
- l 对应于压缩限制的状态
- s 沿压缩面的状态
- 1 第一激波后的状态
- 3 正激波后状态（在完成超音速压缩后）

分析和讨论

首先考虑用于等熵面设计的假设和计算过程。重要的几何参数及气动力参数是以图表

形式扼要给出的。然后介绍超音速进气道的压缩限制问题。最后比较受到压缩限制的各种进气道的压力恢复理论值, 比较的自由流马赫数到 4.0。

等熵面的设计

为了建立和确定一族等熵面(它们可能适合超音速进气道(或喷口)), 对其设计条件作了如下限制:

- <1> 起始激波的总压恢复为 0.99;
- <2> 所有的特征线都聚集或汇交于一个点;
- <3> 零半径的气流折转(普朗特-麦耶流)发生在汇交点处, 此汇交点在起始激波上。

为了确定在一定气流折转角下起始激波强度对整个压力恢复的影响, 亦即权衡正激波与斜激波间的损失, 作了一个计算。问题是这样的: 为了达到相同的气流折角, 在正激波前是完全采用等熵压缩好, 还是先有一个有限强度的起始激波, 接着等熵压缩到较低的马赫数, 然后再产生一个正激波好。计算是对一个假设的外罩进行, 此外罩的起始外罩角等于自由流的激波离体角, 外罩内表面与当地气流平行。计算结果表明: 正激波前全为等熵压缩($P_1/P_0=1.0$)得到的总压恢复是外压式进气道最大可能的总压恢复。然而, 为了避免压缩面过薄和过长, 实际上常常希望有一个有限的起始压缩角。因此对本文的这一族等熵面来说, 取起始激波的总压恢复为 0.99, 这是任意选取的, 这对整个总压恢复没有多大影响(在上面说的那个计算中, 自由流马赫数为 2.0 时, 由此使 P_3/P_0 的减小量最大为 0.01, 自由流马赫数为 4.0 时, 最大为 0.005。)由于选定了起始激波的总压恢复, 因而压缩面的起始角随自由流马赫数就是变化的, 速度越低, 起始角越大。

在图 1 中, 用图形说明了一个典型的轴对称中心体的计算。在一给定的马赫数下, 先用锥顶激波总压恢复为 0.99 这一条件确定起始锥角及它的激波角。这两个角度是根据参考资料 1 中的锥型激波图表确定的。然后据锥型流场(参考资料 2)确定起始特征线。在焦点处, 二维逆向普朗特-麦耶的流线关系仍成立, 其折转半径为零。从起始特征线及逆向的普朗特-麦耶关系, 用轴对称特征线方法(参考资料 3)计算等熵流场。参照参考资料 4 的叠代程序, 计算特征线网格的每一个节点。通过沿汇交的特征线的流函数积分, 按连续关系确定物面形状。用连续方程计算出末端点($M=1.00$), 此连续方程是在音速线为直线及流动为一维流假设下的。

这样, 马赫数从 2.0 到 4.0, 增量为 0.5 的轴对称中心体的解就算出来了。计算结果给予表 1 中。增量为 0.25 的数据是用内插法计算的。全部结果汇总在图 2 中。图 2(a) 是几何型面以及它们的焦点的无量纲座标。图 2(b) 是每一轴向距离 x/r 处的当地物面角及当地马赫数。由图 2(c) 可查得焦点处的马赫数及气流角, 图中的 x/r 是由焦点沿特征线向上游求得的物面点的 x/r 。到此为设计等熵轴对称中心体所需的全部数据, 以及唇口附近的流动情况就可以从这些图表中确定出来了。

对于二维等熵斜板, 类同的设计参数在图 3 中给出。设计条件与轴对称情况相同。图 3(a) 中给出的是几何型面和相应的焦点。在二维情况下, 沿任意一特征线的流动状态自然是常量。因此, 物面上的状态与焦点处的状态相同。图 3(b) 给出的是马赫数和气流角

随轴向距离 x/r 的变化。在二维情况下，具有汇交特征线的等熵型面计算和流场计算很简单，仅涉及到应用绕菱角流动的普朗特-麦耶理论。表 I 给出了一些特定参数的定义和便于使用的数值表。利用表 I 可以很容易地确定出任意选定起始激波强度的等熵型面及其流场。

比较图 2 (c) 与图 3 (b)，当地马赫数以及气流角二者的起始值稍有差异，而不相符合。这是由于轴对称情况使用了资料 1 的锥型激波图表引起的。一些变化可能是由于所用的空气比热比有差异的缘故，另一些可能是由于图表的精度缘故。气流通过起始激波折转的偏差量小于 1° 。这无论对进气道设计或喷口设计来说，其净影响估计是很小的，可以忽略。

图 2 和图 3 的图线可用来设计等熵喷管堵锥或排气喷管，由起始流场为锥型流这一假设引起的推力误差，是可忽略的小量。对与这些图线对应的型面的理论推力及理想推力之比进行了计算，其量级比 1.0 小百分之 0.5。对于轴对称设计，中心体在喉道处的表面角最大误差为 0.1° 。这些误差都是很小的，足以使上述图线能同样用于喷口设计问题。

等熵进气道的压缩极限

为确定超音速等熵进气道性能（即总压恢复）在理论上的限制，作了一个分析。对于在唇口具有汇交压缩波的进气道，研究了下列两种情况：（1）以激波结构要求的压强和气流折转为依据的最大总压恢复，（2）以唇口内外激波附体为依据的最大总压恢复。

如图 4 所示，要分析的分叉激波结构是由等熵压缩扇形波的一个交点，可能有的一道反射波（或者是膨胀波，或者是压缩波），一个涡面，以及一道激波等组成的。任意波相交的理论要求是，涡面两侧的静压及气流方向必须相同。分析使用的虽是二维流的关系，但分析的结果同样适用于轴对称情况，因为在焦点邻近的流动可看为是局部二维的。理论解是借助压强——气流折转角的激波极曲线来论证的，这种极曲线如资料 6 所作。在图 5 中，自由流的激波极曲线用实线表示，等熵压缩流场的压强——气流折转角的特征线，或说等熵线由虚线表示。

为满足涡面两侧气流方向相同和压强相等，理论解要求反射波的极曲线（无论是压缩波还是膨胀波）与自由流的激波极曲线有一个交点。这一限制条件发生在等熵线的这样一点上：即从这一点作反射波的极曲线恰与自由流的激波极曲线相切，这一点对应于最大气流折角。此最大等熵压缩折转角用小圆圈符号绘示在各马赫数的等熵线上。超过此限制的等熵折转角，多波系仅有一个交点的理论解是不可能的。在马赫数为 3.5 时，等熵折转限制发生在等熵线与自由流激波极曲线的交点处（即不要求有反射波发生）。马赫数大于 3.5，要求有一个弱的膨胀波的反射波，而在较低的马赫数下，反射波为压缩波。在马赫数为 1.5 时，等熵线差不多与自由流的激波极曲线重合，而且终止在其上。在马赫数为 2.0 或 2.0 以上时，压缩极限处的压强增加 (p_a/p_0) 比最大激波折转角处的压强增加要稍大一些，但比自由流正激波的压强增加要小得多（约小 10%~15%）。

激波结构限制的分析结果汇总于图 6。图中绘示了与压缩极限相应的当地马赫数和气流折转角的变化情况，自由流马赫数范围到 4.0。此外还把理论上最大的总压恢复也表示成自由流马赫数的函数，并绘于图上（此总压恢复相当于进口马赫数等于压缩波后，反射

波前的马赫数的进气道的总压恢复。) 以一个例子来说明压缩极限的意义, 在马赫数为4.0时, 一个在全流量状态下工作的等熵全外压式进气道, 仅就激波损失而论, 其理论最大总压恢复仅有0.685。此时的当地正激波马赫数为2.08。由于分析中把流动作为二维流问题来考虑, 为求得轴对称等熵锥类同的极限参数($\lambda_{r,c}$ 和 $M_{r,c}$), 需要引用图2。在任意自由流马赫数下, 其步骤都是这样的, 由图6定出 λ_c 或 M_c ; 按 $\lambda_c = \lambda_f$ 或 $M_c = M_f$ 由图2(c)确定出相应的 x/r ; 然后由图2(b)就能得出压缩极限的 $\lambda_{r,c}$ 及 $M_{r,c}$ 。

为弄清唇口内外激波附体这一要求对等熵进气道性能的影响, 也作了一个分析。用来作分析计算的等熵进气道, 其起始外唇角等于自由流的高体角, 外罩包含角(即结构角)假设为 3° , 当地进口马赫数为起始内唇角是离体角的马赫数。计算结果绘示于图7。由图看出, 唇口内外激波附体要求对进气道性能(即总压恢复)的限制, 比基于激波结构的压缩极限的限制小得多。在马赫数4.0时, 与基于激波结构限制的总压恢复0.685相比, 从唇口内外激波附体考虑的无内收缩等熵进气道的总压恢复为0.89。图中还包括了具有最大允许内收缩的进气道的压缩极限, 最大允许内收缩是指为保证起动所允许的最大内收缩。

不同进气道外形的最佳性能比较

性能比较是对基于激波结构压缩极限的等熵进气道和几种其他形式的进气道来进行的。如前所述, 只比较各种进气道的内流性能。没有考虑外阻。比较结果如图8所示, 超音速马赫数到4.0。按总压恢复递增排列, 用来比较的进气道外形为: 正激波型, 收敛扩张型, 单级锥型, 二级锥型以及等熵型。单级锥型, 二级锥型及等熵型又分有内收缩和无内收缩两种情况。单级锥, 二级锥进气道的锥角是对总压恢复来说的最佳锥角。如图8曲线所示, 随着自由流马赫数的增加, 从内部性能来看, 采用更多级压缩的进气道更合乎要求。图中的等动能效率(η_{ke})线也说明这一点, 对冲压喷气发动机来说, 如果燃烧因子保持不变, 动能效率 η_{ke} 是衡量推力性能的一个尺度。反过来说, 单级锥进气道(无内收缩情况)在马赫数为2.0时其动能效率为0.97, 为在马赫数4.0得到同样的内部性能就得用等熵进气道。本文没有考虑带孔壁的收敛扩张型扩压器, 这种扩压器的内部性能是不会有压缩限制的。

附录A和B分别提供了确定单斜激波型和双斜激波型进气道最佳性能和非设计情况性能的理论设计计算。二维和轴对称两种情况都包括在内。

小 结

本文给出了便于设计等熵进气道和喷口的图表, 包括几何型面和沿型面的及在焦点处的当地马赫数分布及气流角分布。分析和计算了等熵进气道所能利用的压缩折转限制, 马赫数范围到4.0。对于等熵进气道, 基于激波结构要求的压缩极限从马赫数1.5开始起作用。在马赫数4.0时, 流量系数为1.0的全外压等熵进气道的理论总压恢复限于0.680以下。为说明带压缩限制的等熵进气道的相对效能, 对几种常规型进气道的最佳性能进行了比较, 比较的超音速马赫数是相当广的。

附录 A

单斜激波进气道的估算性能

图 9 是有内收缩和无内收缩单级锥及单楔形超音速进气道的理论总压恢复。所考虑的损失是经过一道斜激波和一道正激波造成的损失。对于有内收缩情况来说，用的是起动所允许的最大内收缩(资料 7)。对轴对称进气道，正激波前的马赫数假设为斜激波紧后面的马赫数与锥面上的马赫数的算术平均值。图上表示的是总压恢复随半锥角和楔形角的变化，自由流马赫数到 4.0。图线上还算出了各马赫数下的最佳锥角或最佳楔形角的连线，轴对称进气道的混合流区 ($M_1=1.00$) 连线，以及二维进气道的激波离体连线等。从这些图线可得出最佳情况的性能和非设计情况的性能。

附录 B

双斜激波进气道的估算性能

图 10 是有内收缩和无内收缩二级锥和双楔形超音速进气道的理论总压恢复。这些情况下的总压损失是经过两道斜激波和一道正激波产生的。对有内收缩的情况来说,所用的是为起动所允许的最大内收缩(资料 7)。

对轴对称进气道来说,计算中用了一些简化假设。一级锥锥型流场的马赫数假设为锥顶激波紧后面的马赫数与沿一级锥面上的马赫数的算术平均值。然后就按这个平均马赫数的气流做二维折转来计算第二道斜激波的损失,其折转角假设等于第二级锥的与第一级锥的半锥角之差。进口马赫数的平均值也是用这样的假设得出的。在某些情况下,为避免唇口外激波离体,内罩表面必须倾斜于当地气流,结果产生一道内部反射波。无内收缩情况没有考虑这道波的压缩。对为起动所允许的最大内收缩情况,由进口到喉道的流动假设是一维流的流动。

虽然对前面讲的理论总压恢复计算不是必需的,但这里仍介绍一种构成第二道曲线激波的近似方法,这种方法对确定第一道与第二道激波交点的位置以及唇口位置设计是相当满意的。这种方法首先在资料 8 中提出的。在起始斜激波后与一级锥锥面之间,假设马赫数及气流斜角随射线角 ψ 按线性变化。在这样的流场分布下,假设气流通过第二道激波都折转一个相同的角度(这个角度就等于第二级锥的与第一级锥的半角之差)。在这些假设下,从锥面开始一步一步地就能计算和构成曲线的第二道激波。

据图 10 的图线可以估算角度组合范围及自由流马赫数范围相当大的各种进气道的性能。图 11 扼要地给出自由流马赫数范围到 4.0 的最佳总压恢复以及对应的最佳角度组合。

参 考 资 料

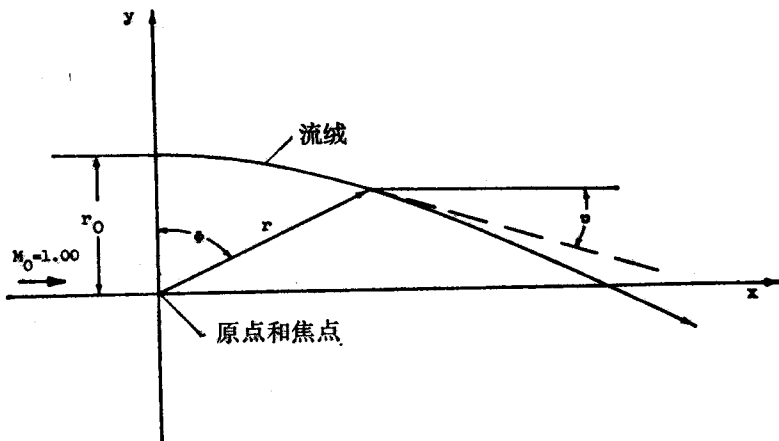
1. Moeckel, W. E., and Connors, J. F.: Charts for the Determination of Supersonic Air Flow Against Inclined Planes and Axially Symmetric Cone. NACA TN 1373, 1947
2. Anon: Tables of Supersonic Flow Around Cones. Dept. Elec. Eng., M. I. T., 1947
3. Ferri, Antonio: Application of the Method of Characteristics of Supersonic Rotational Flow. NACA Rep. 814, 1946. (Supersedes NACA TN 1135)
4. Cronvich, Lester L.: Numerical-Graphical Method of Characteristics for Axially Symmetric Isentropic Flow. Jour. Aero. Sci., Vol. 15, no. 3, Mar. 1948,

pp. 152-162

5. Evvard, John C., and Maslen, Stephen H.: Three-Dimensional Supersonic Nozzles and Inlets of Arbitrary Exit Cross Section. NACA TN 2688, 1952
6. Courant, R., and Friedrichs, K. O.: Supersonic Flow and Shock Waves. Interscience Pub., Inc., 1948
7. Kantrowitz, Arthur, and Donaldson, Coleman Dup.: Preliminary Investigation of Supersonic Diffusers. NACA WR L-713, 1945. (Supersedes NACA ACR L5D20.)
8. Moeckel W. E., Connors, J. F., and Schroeder, A. H.: Investigation of Shock Diffusers at Mach Number 1.85. I - Projecting Double-Shock Cones. NACA RM E6L13, 1947
9. Evvard, John C., and Blakey, John W.: The Use of Perforated Inlets for Efficient Supersonic Diffusion. NACA RM E51B10, 1951, (Supersedes NACA RM E7C26.)

表 I: 所计算的等熵中心体的设计参数

x/r	y/r	M_B	λ_B	M_F	λ_F	x/r	y/r	M_B	λ_B	M_F	λ_F
$M_0 = 2.00$						$M_0 = 3.00$					
0.6172	0.2101	1.600	18.8	1.72	7.75	0.9614	0.2344	2.55	13.65	2.73	5.50
.6566	.2239	1.57	19.7	1.70	8.40	1.1237	.2742	2.53	14.6	2.65	7.17
.6978	.2387	1.55	20.2	1.68	8.99	1.2414	.3039	2.51	15.5	2.60	8.29
.7368	.2536	1.53	21.0	1.66	9.58	1.4463	.3648	2.42	17.8	2.50	10.6
.7746	.2684	1.52	21.6	1.64	10.2	1.6114	.4212	2.33	20.0	2.40	13.0
.8097	.2829	1.50	22.3	1.62	10.8	1.7474	.4737	2.24	22.3	2.30	15.4
.8442	.2968	1.48	23.0	1.60	11.35	1.8596	.5224	2.14	24.7	2.20	18.0
.9078	.3242	1.45	24.2	1.56	12.5	1.9518	.5668	2.05	27.2	2.10	20.6
.9667	.3516	1.41	25.5	1.52	13.7	2.0293	.6089	1.96	29.8	2.00	23.3
1.0200	.3775	1.37	26.6	1.48	14.9	2.0936	.6481	1.86	32.4	1.90	26.1
1.0701	.4034	1.34	27.8	1.44	16.1	2.1483	.6942	1.77	35.1	1.80	29.0
1.1171	.4288	1.30	29.0	1.40	17.2	2.1915	.7158	1.67	37.8	1.70	31.9
1.1714	.4598	1.25	30.4	1.35	18.7	2.2292	.7463	1.57	40.6	1.60	34.8
1.2223	.4904	1.20	31.8	1.30	20.0	2.2606	.7753	1.48	43.5	1.50	37.8
1.2714	.5219	1.15	33.3	1.25	21.4	2.2874	.8026	1.38	46.4	1.40	40.7
1.3200	.5553	1.10	34.6	1.20	22.7	2.3109	.8289	1.28	49.2	1.30	43.5
1.3720	.5920	1.04	35.2	1.15	23.8	2.3320	.8542	1.18	51.7	1.20	46.1
1.5210	.6980	1.00	35.3	1.00	26.2	2.3530	.8810	1.09	52.0	1.10	48.4
1.3319	1.0000					2.3853	.9219	1.00	52.0	1.00	49.7
						2.2889	1.0000				
$M_0 = 2.50$						$M_0 = 3.50$					
0.8083	0.2364	2.055	16.3	2.22	6.70	1.1427	0.2387	3.08	11.80	3.20	5.00
.9300	.2726	2.02	17.2	2.15	8.51	1.4074	.2958	3.01	13.2	3.10	6.86
1.0319	.3045	2.00	18.5	2.10	9.84	1.6407	.3537	2.93	15.0	3.00	8.75
1.1229	.3351	1.95	20.0	2.05	11.2	1.8379	.4105	2.85	16.8	2.90	10.7
1.2061	.3657	1.91	21.3	2.00	12.6	1.9965	.4617	2.74	18.7	2.80	12.8
1.2800	.3956	1.87	22.8	1.95	14.0	2.1303	.5089	2.65	20.6	2.70	14.9
1.3463	.4246	1.82	24.1	1.90	15.4	2.2373	.5505	2.56	22.8	2.60	17.1
1.4075	.4527	1.77	25.5	1.85	16.8	2.3325	.5926	2.46	24.8	2.50	19.4
1.4616	.4796	1.73	26.8	1.80	18.2	2.4098	.6300	2.37	27.0	2.40	21.7
1.5120	.5057	1.68	28.3	1.75	19.7	2.4755	.6647	2.27	29.3	2.30	24.2
1.5566	.5304	1.63	29.7	1.70	21.1	2.5300	.6963	2.18	31.7	2.20	26.8
1.5971	.5543	1.59	31.2	1.65	22.6	2.5771	.7263	2.08	34.2	2.10	29.4
1.6351	.5782	1.54	32.7	1.60	24.1	2.6163	.7548	1.98	36.8	2.00	32.1
1.6692	.6004	1.49	34.1	1.55	25.6	2.6484	.7805	1.89	39.5	1.90	34.9
1.6992	.6221	1.44	35.4	1.50	27.0	2.6753	.8026	1.79	42.2	1.80	37.8
1.7289	.6437	1.40	36.9	1.45	28.5	2.6989	.8251	1.69	45.0	1.70	40.7
1.7565	.6647	1.35	38.5	1.40	30.0	2.7197	.8458	1.59	47.7	1.60	43.7
1.7811	.6853	1.30	40.0	1.35	31.4	2.7358	.8658	1.49	50.8	1.50	46.6
1.8042	.7047	1.25	41.3	1.30	32.8	2.7497	.8832	1.39	53.7	1.40	49.5
1.8257	.7247	1.20	42.4	1.25	34.1	2.7616	.9000	1.28	56.5	1.30	52.3
1.8466	.7428	1.15	43.1	1.20	35.4	2.7721	.9168	1.18	59.0	1.20	55.0
1.8694	.7642	1.10	43.2	1.15	36.6	2.7816	.9332	1.08	59.3	1.10	57.2
1.8963	.7900	1.04	43.3	1.10	37.6	2.7984	.9616	1.00	59.5	1.00	58.51
1.9516	.8426	1.00	43.3	1.00	38.94	2.7326	1.0000				
1.8115	1.0000										
$M_0 = 4.00$											
1.1288	0.1889	3.62	9.50	3.70	4.20	3.0596	0.7784	2.29	35.3	2.30	31.5
1.5141	.2609	3.50	11.4	3.60	5.71	3.0911	.8026	2.19	37.7	2.20	34.1
1.7899	.3185	3.41	12.9	3.50	7.27	3.1158	.8226	2.09	40.2	2.10	36.7
2.0188	.3736	3.32	14.3	3.40	8.90	3.1368	.8416	2.00	42.8	2.00	39.4
2.2098	.4253	3.23	15.9	3.30	10.6	3.1553	.8584	1.90	45.5	1.90	42.2
2.3716	.4737	3.14	17.4	3.20	12.3	3.1703	.8732	1.80	48.0	1.80	45.1
2.5045	.5173	3.04	19.1	3.10	14.2	3.1835	.8895	1.70	50.8	1.70	48.0
2.6254	.5581	2.95	20.9	3.00	16.0	3.1937	.9042	1.60	53.5	1.60	50.9
2.7173	.5972	2.86	22.6	2.90	18.0	3.2028	.9174	1.50	56.2	1.50	53.9
2.8000	.6337	2.77	24.6	2.80	20.1	3.2095	.9295	1.40	58.8	1.40	56.8
2.8697	.6671	2.67	26.5	2.70	22.2	3.2158	.9411	1.30	61.4	1.30	59.6
2.9289	.6979	2.58	28.6	2.60	24.4	3.2211	.9511	1.20	63.5	1.20	62.2
2.9798	.7263	2.48	30.7	2.50	26.7	3.2258	.9616	1.10	65.5	1.10	64.5
3.0229	.7537	2.38	33.0	2.40	29.1	3.2340	.9805	1.00	66.2	1.00	65.8
						3.1910	1.0000				



符号：

- r, ϕ 极坐标
- x, y 笛卡尔坐标
- ν 气流角
- β 马赫角
- M 马赫数

$$\sin^{-1} \frac{1}{M}$$

方程：

$$\phi = \frac{1}{k} \tan^{-1} k \sqrt{M^2 - 1}$$

其中

$$k = \sqrt{(\gamma - 1)/(\gamma + 1)}, \quad \gamma = 1.40$$

$$\nu = \phi + \beta - 90 \text{ (deg)}$$

对于流线：

$$r/r_0 = 1/(\cos k\phi)^6$$

$$x/r_0 = r/r_0 \cos(\beta - \nu), \quad y/r_0 = r/r_0 \sin(\beta - \nu)$$

表 II：绕棱角的二维流（普朗特-麦耶理论）

M	ν	ϕ	$\frac{r}{r_0}$	$\frac{x}{r_0}$	$\frac{y}{r_0}$	M	ν	ϕ	$\frac{r}{r_0}$	$\frac{x}{r_0}$	$\frac{y}{r_0}$
1.00	0	0	1.0000	0	1.0000	1.10	1.336	25.956	1.1087	0.48526	0.99687
1.01	.04473	8.114	1.0101	.14256	.99997	1.11	1.532	27.255	1.1206	.51318	.99620
1.02	.1257	11.490	1.0203	.20325	.99989	1.12	1.735	28.501	1.1327	.54048	.99541
1.03	.2294	14.092	1.0308	.25097	.99976	1.13	1.944	29.698	1.1450	.56725	.99457
1.04	.3510	16.293	1.0414	.29215	.99953	1.14	2.160	30.854	1.1574	.59358	.99361
1.05	.4874	18.240	1.0521	.32931	.99923	1.15	2.381	31.973	1.1701	.61958	.99258
1.06	.6367	20.007	1.0631	.36370	.99890	1.16	2.607	33.057	1.1829	.64525	.99145
1.07	.7973	21.637	1.0742	.39608	.99852	1.17	2.839	34.112	1.1960	.67073	.99022
1.08	.9680	23.160	1.0856	.42695	.99807	1.18	3.074	35.138	1.2093	.69602	.98895
1.09	1.148	24.595	1.0971	.45660	.99752	1.19	3.314	36.138	1.2228	.72113	.98754
1.10	1.336	25.956	1.1087	.48526	.99687	1.20	3.558	37.115	1.2365	.74612	.98601

表 I (续)

M	v	ϕ	$\frac{r}{r_0}$	$\frac{x}{r_0}$	$\frac{y}{r_0}$	M	v	ϕ	$\frac{r}{r_0}$	$\frac{x}{r_0}$	$\frac{y}{r_0}$
1.20	3.556	37.115	1.2365	0.74612	0.98601	1.90	23.59	81.83	2.9551	2.925	0.4199
1.21	3.806	38.071	1.2505	.77110	.98444	1.91	23.87	82.30	2.9949	2.968	.4013
1.22	4.057	39.006	1.2646	.79592	.98270	1.92	24.15	82.76	3.0349	3.011	.3824
1.23	4.312	39.921	1.2790	.82075	.98088	1.93	24.43	83.22	3.0741	3.053	.3631
1.24	4.569	40.818	1.2936	.84559	.97901	1.94	24.71	83.68	3.1143	3.095	.3429
1.25	4.830	41.700	1.3085	.87043	.97696	1.95	24.99	84.14	3.1578	3.141	.3224
1.26	5.093	42.565	1.3235	.89528	.97477	1.96	25.27	84.59	3.1990	3.185	.3016
1.27	5.359	43.418	1.3388	.91759	.97250	1.97	25.55	85.04	3.2415	3.230	.2805
1.28	5.627	44.252	1.3544	.94511	.97011	1.98	25.83	85.50	3.2873	3.277	.2579
1.29	5.898	45.075	1.3701	.97009	.96756	1.99	26.10	85.93	3.3311	3.323	.2364
1.30	6.170	45.885	1.3862	.99521	.96493	2.00	26.38	86.38	3.3750	3.368	.2131
1.31	6.445	46.678	1.4023	1.0202	.96215	2.01	26.66	86.82	3.4200	3.415	.1897
1.32	6.721	47.470	1.4190	1.0457	.95923	2.02	26.93	87.26	3.4650	3.461	.1656
1.33	7.000	48.247	1.4358	1.0712	.95615	2.03	27.20	87.69	3.5125	3.510	.1416
1.34	7.279	49.011	1.4529	1.0967	.95296	2.04	27.48	88.13	3.5613	3.560	.1162
1.35	7.561	49.766	1.4702	1.1223	.94959	2.05	27.75	88.55	3.6075	3.606	.09127
1.36	7.844	50.512	1.4879	1.1483	.94617	2.06	28.02	88.98	3.6563	3.656	.06508
1.37	8.128	51.248	1.5056	1.1742	.94266	2.07	28.29	89.40	3.7051	3.705	.03879
1.38	8.413	51.974	1.5238	1.2003	.93867	2.08	28.56	89.82	3.7552	3.755	.01179
1.39	8.699	52.692	1.5422	1.2267	.93475	2.09	28.83	90.24	3.8066	3.807	-.01595
1.40	8.987	53.402	1.5609	1.2531	.93059	2.10	29.10	90.66	3.8580	3.858	-.04444
1.41	9.276	54.105	1.5799	1.2798	.92627	2.11	29.36	91.07	3.9078	3.907	-.07296
1.42	9.565	54.798	1.5991	1.3067	.92183	2.12	29.63	91.49	3.9635	3.962	-.1031
1.43	9.855	55.484	1.6187	1.3337	.91720	2.13	29.90	91.90	4.0144	4.012	-.1331
1.44	10.15	56.17	1.6385	1.361	.9122	2.14	30.16	92.30	4.0700	4.067	-.1633
1.45	10.44	56.84	1.6589	1.389	.9074	2.15	30.43	92.71	4.1254	4.121	-.1950
1.46	10.73	57.50	1.6795	1.416	.9022	2.16	30.69	93.11	4.1806	4.174	-.2268
1.47	11.02	58.16	1.6995	1.444	.8965	2.17	30.95	93.51	4.2373	4.229	-.2594
1.48	11.32	58.81	1.7209	1.472	.8913	2.18	31.21	93.91	4.2937	4.284	-.2928
1.49	11.61	59.45	1.7425	1.501	.8857	2.19	31.47	94.30	4.3518	4.340	-.3263
1.50	11.91	60.10	1.7643	1.529	.8795	2.20	31.73	94.69	4.4092	4.395	-.3605
1.51	12.20	60.73	1.7867	1.559	.8735	2.21	31.99	95.09	4.4723	4.455	-.3968
1.52	12.49	61.35	1.8085	1.587	.8671	2.22	32.25	95.48	4.5310	4.510	-.4327
1.53	12.79	61.98	1.8312	1.617	.8603	2.23	32.51	95.87	4.5935	4.570	-.4699
1.54	13.09	62.60	1.8543	1.646	.8533	2.24	32.76	96.25	4.6555	4.628	-.5070
1.55	13.38	63.20	1.8779	1.676	.8466	2.25	33.02	96.63	4.7148	4.683	-.5446
1.56	13.68	63.81	1.9019	1.707	.8395	2.26	33.27	97.01	4.7801	4.744	-.5832
1.57	13.97	64.41	1.9260	1.737	.8318	2.27	33.53	97.39	4.8473	4.807	-.6234
1.58	14.27	65.00	1.9497	1.767	.8239	2.28	33.78	97.77	4.9116	4.866	-.6640
1.59	14.56	65.59	1.9747	1.798	.8159	2.29	34.03	98.14	4.9776	4.927	-.7048
1.60	14.86	66.18	2.0000	1.830	.8078	2.30	34.28	98.51	5.0454	4.990	-.7467
1.61	15.16	66.76	2.0259	1.862	.7994	2.31	34.53	98.88	5.1125	5.051	-.7894
1.62	15.45	67.33	2.0521	1.893	.7909	2.32	34.78	99.25	5.1813	5.114	-.8326
1.63	15.75	67.91	2.0786	1.926	.7818	2.33	35.03	99.61	5.2521	5.179	-.8766
1.64	16.04	68.47	2.1053	1.958	.7726	2.34	35.28	99.98	5.3220	5.242	-.9223
1.65	16.34	69.03	2.1313	1.990	.7628	2.35	35.53	100.35	5.3937	5.306	-.9692
1.66	16.63	69.59	2.1594	2.024	.7530	2.36	35.77	100.70	5.4675	5.372	-1.015
1.67	16.93	70.15	2.1872	2.057	.7428	2.37	36.02	101.06	5.5432	5.440	-1.063
1.68	17.22	70.69	2.2158	2.091	.7328	2.38	36.26	101.41	5.6148	5.504	-1.111
1.69	17.52	71.24	2.2452	2.126	.7221	2.39	36.50	101.77	5.6925	5.573	-1.161
1.70	17.81	71.78	2.2748	2.162	.7113	2.40	36.75	102.13	5.7703	5.642	-1.212
1.71	18.10	72.31	2.3031	2.194	.6999	2.41	36.99	102.47	5.8445	5.707	-1.262
1.72	18.40	72.85	2.3332	2.229	.6881	2.42	37.23	102.82	5.9242	5.777	-1.315
1.73	18.69	73.38	2.3641	2.265	.6761	2.43	37.47	103.17	6.0024	5.845	-1.367
1.74	18.98	73.90	2.3958	2.302	.6644	2.44	37.71	103.52	6.0864	5.918	-1.423
1.75	19.27	74.42	2.4254	2.336	.6515	2.45	37.95	103.86	6.1690	5.989	-1.478
1.76	19.56	74.94	2.4582	2.374	.6386	2.46	38.18	104.19	6.2461	6.056	-1.531
1.77	19.86	75.46	2.4907	2.411	.6254	2.47	38.42	104.54	6.3331	6.130	-1.590
1.78	20.15	75.97	2.5236	2.448	.6118	2.48	38.66	104.88	6.4193	6.204	-1.648
1.79	20.44	76.48	2.5562	2.485	.5976	2.49	38.89	105.21	6.5062	6.278	-1.707
1.80	20.73	76.98	2.5907	2.524	.5837	2.50	39.12	105.54	6.5920	6.351	-1.766
1.81	21.01	77.47	2.6239	2.561	.5693	2.51	39.36	105.88	6.6800	6.425	-1.828
1.82	21.30	77.97	2.6588	2.600	.5542	2.52	39.59	106.21	6.7659	6.497	-1.889
1.83	21.59	78.47	2.6947	2.640	.5387	2.53	39.82	106.54	6.8634	6.579	-1.954
1.84	21.88	78.96	2.7293	2.679	.5227	2.54	40.05	106.87	6.9541	6.655	-2.018
1.85	22.16	79.44	2.7663	2.720	.5071	2.55	40.28	107.19	7.0472	6.732	-2.082
1.86	22.45	79.93	2.8019	2.759	.4901	2.56	40.51	107.52	7.1429	6.811	-2.150
1.87	22.73	80.40	2.8409	2.801	.4736	2.57	40.75	107.84	7.2369	6.889	-2.217
1.88	23.02	80.89	2.8763	2.841	.4555	2.58	40.98	108.15	7.3298	6.965	-2.283
1.89	23.30	81.36	2.9163	2.883	.4380	2.59	41.19	108.48	7.4294	7.046	-2.355
1.90	23.59	81.83	2.9551	2.925	.4199	2.60	41.41	108.79	7.5301	7.129	-2.425

表 2 (续)

M	v	θ	$\frac{r}{r_0}$	$\frac{x}{r_0}$	$\frac{y}{r_0}$	M	v	θ	$\frac{r}{r_0}$	$\frac{x}{r_0}$	$\frac{y}{r_0}$
2.60	41.41	108.79	7.5301	7.129	-2.425	3.30	55.22	127.58	18.574	14.72	-11.33
2.61	41.64	109.11	7.6278	7.208	-2.497	3.31	55.39	127.81	18.611	14.86	-11.53
2.62	41.86	109.42	7.7280	7.288	-2.570	3.32	55.56	128.03	18.633	14.99	-11.73
2.63	42.09	109.74	7.8308	7.370	-2.645	3.33	55.73	128.25	18.679	15.14	-11.94
2.64	42.31	110.05	7.9428	7.461	-2.723	3.34	55.90	128.48	18.724	15.28	-12.15
2.65	42.53	110.36	8.0615	7.548	-2.801	3.35	56.07	128.70	18.755	15.42	-12.35
2.66	42.75	110.67	8.1500	7.625	-2.877	3.36	56.24	128.93	18.811	15.57	-12.58
2.67	42.97	110.97	8.2645	7.717	-2.958	3.37	56.41	129.15	18.872	15.72	-12.80
2.68	43.19	111.28	8.3682	7.797	-3.037	3.38	56.58	129.37	18.913	15.86	-13.01
2.69	43.40	111.58	8.4890	7.894	-3.122	3.39	56.75	129.59	18.981	16.01	-13.24
2.70	43.62	111.88	8.5985	7.979	-3.205	3.40	56.91	129.81	19.030	16.16	-13.46
2.71	43.84	112.19	8.7108	8.065	-3.290	3.41	57.07	130.02	19.106	16.30	-13.69
2.72	44.05	112.48	8.8183	8.148	-3.372	3.42	57.24	130.24	19.166	16.46	-13.93
2.73	44.27	112.78	8.9445	8.247	-3.463	3.43	57.40	130.45	19.244	16.58	-14.13
2.74	44.48	113.07	9.0580	8.333	-3.550	3.44	27.56	130.66	19.285	16.75	-14.39
2.75	44.69	113.37	9.1743	8.422	-3.639	3.45	57.73	130.88	19.361	16.91	-14.64
2.76	44.91	113.67	9.3023	8.520	-3.735	3.46	57.89	131.09	19.433	17.06	-14.88
2.77	45.12	113.96	9.4251	8.613	-3.828	3.47	58.05	131.30	19.503	17.21	-15.12
2.78	45.33	114.25	9.5511	8.709	-3.923	3.48	58.21	131.51	19.571	17.37	-15.37
2.79	45.54	114.54	9.6749	8.801	-4.018	3.49	58.37	131.72	19.637	17.52	-15.62
2.80	45.75	114.83	9.8039	8.898	-4.117	3.50	58.53	131.93	19.701	17.68	-15.88
2.81	45.95	115.10	9.9305	8.993	-4.213	3.51	58.69	132.14	19.762	17.84	-16.14
2.82	46.16	115.39	10.0600	9.088	-4.314	3.52	58.85	132.35	19.821	18.01	-16.42
2.83	46.37	115.68	10.195	9.188	-4.417	3.53	59.00	132.54	19.878	18.16	-16.66
2.84	46.57	115.95	10.324	9.283	-4.518	3.54	59.16	132.75	19.934	18.32	-16.94
2.85	46.78	116.24	10.460	9.383	-4.624	3.55	59.32	132.96	19.989	18.48	-17.21
2.86	46.98	116.51	10.592	9.479	-4.728	3.56	59.47	133.16	20.042	18.65	-17.49
2.87	47.19	116.80	10.743	9.589	-4.844	3.57	59.63	133.36	20.094	18.81	-17.76
2.88	47.39	117.07	10.879	9.688	-4.951	3.58	59.78	133.56	20.145	18.98	-18.04
2.89	47.59	117.35	11.024	9.792	-5.064	3.59	59.94	133.77	20.195	19.14	-18.34
2.90	47.79	117.62	11.164	9.891	-5.176	3.60	60.09	133.96	20.244	19.28	-18.60
2.91	47.99	117.89	11.306	9.993	-5.289	3.61	60.24	134.16	20.292	19.48	-18.92
2.92	48.19	118.16	11.459	10.10	-5.408	3.62	60.40	134.36	20.339	19.64	-19.21
2.93	48.39	118.43	11.605	10.21	-5.525	3.63	60.55	134.56	20.385	19.82	-19.52
2.94	48.59	118.70	11.752	10.31	-5.643	3.64	60.70	134.75	20.430	19.98	-19.81
2.95	48.78	118.97	11.913	10.42	-5.771	3.65	60.85	134.95	20.474	20.16	-20.13
2.96	48.98	119.23	12.066	10.53	-5.899	3.66	61.00	135.14	20.517	20.33	-20.43
2.97	49.18	119.50	12.220	10.64	-6.017	3.67	61.15	135.34	20.559	20.49	-20.74
2.98	49.37	119.76	12.380	10.75	-6.145	3.68	61.30	135.53	20.600	20.68	-21.07
2.99	49.56	120.02	12.538	10.86	-6.273	3.69	61.45	135.73	20.641	20.85	-21.40
3.00	49.76	120.29	12.710	10.98	-6.411	3.70	61.60	135.92	20.681	21.02	-21.71
3.01	49.95	120.55	12.875	11.09	-6.544	3.71	61.74	136.10	20.720	21.20	-22.04
3.02	50.14	120.80	13.029	11.19	-6.672	3.72	61.89	136.30	20.758	21.40	-22.39
3.03	50.33	121.06	13.198	11.31	-6.809	3.73	62.04	136.49	20.795	21.58	-22.73
3.04	50.52	121.32	13.369	11.42	-6.949	3.74	62.18	136.67	20.831	21.75	-23.05
3.05	50.71	121.57	13.545	11.54	-7.091	3.75	62.33	136.86	20.867	21.94	-23.41
3.06	50.90	121.83	13.721	11.66	-7.236	3.76	62.47	137.05	20.902	22.12	-23.76
3.07	51.09	122.08	13.900	11.78	-7.382	3.77	62.61	137.23	20.937	22.30	-24.11
3.08	51.28	122.33	14.071	11.89	-7.525	3.78	62.76	137.42	20.971	22.49	-24.47
3.09	51.46	122.58	14.255	12.01	-7.676	3.79	62.90	137.60	21.005	22.65	-24.81
3.10	51.65	122.83	14.443	12.14	-7.831	3.80	63.04	137.78	21.038	22.84	-25.17
3.11	51.84	123.08	14.620	12.25	-7.980	3.81	63.19	137.97	21.071	23.03	-25.55
3.12	52.02	123.33	14.813	12.38	-8.140	3.82	63.33	138.15	21.103	23.23	-25.94
3.13	52.20	123.57	14.997	12.50	-8.293	3.83	63.47	138.33	21.135	23.42	-26.32
3.14	52.39	123.82	15.195	12.62	-8.458	3.84	63.61	138.52	21.166	23.62	-26.71
3.15	52.57	124.06	15.385	12.75	-8.617	3.85	63.75	138.70	21.197	23.82	-27.11
3.16	52.75	124.30	15.574	12.87	-8.776	3.86	63.89	138.88	21.227	23.99	-27.48
3.17	52.93	124.54	15.783	13.00	-8.949	3.87	64.03	139.05	21.257	24.20	-27.89
3.18	53.11	124.78	15.977	13.12	-9.113	3.88	64.16	139.22	21.286	24.38	-28.26
3.19	53.29	125.02	16.179	13.25	-9.285	3.89	64.30	139.40	21.315	24.57	-28.66
3.20	53.47	125.26	16.380	13.37	-9.456	3.90	64.44	139.58	21.343	24.77	-29.08
3.21	53.65	125.50	16.600	13.51	-9.640	3.91	64.58	139.76	21.371	24.95	-29.48
3.22	53.83	125.74	16.810	13.64	-9.819	3.92	64.71	139.93	21.398	25.16	-29.92
3.23	54.00	125.97	17.021	13.78	-10.00	3.93	64.85	140.11	21.425	25.38	-30.36
3.24	54.18	126.20	17.235	13.91	-10.18	3.94	64.98	140.28	21.451	25.55	-30.76
3.25	54.35	126.43	17.452	14.04	-10.36	3.95	65.12	140.46	21.477	25.79	-31.25
3.26	54.53	126.67	17.674	14.18	-10.55	3.96	65.25	140.62	21.502	25.96	-31.63
3.27	54.71	126.90	17.899	14.31	-10.75	3.97	65.39	140.80	21.527	26.18	-32.10
3.28	54.88	127.13	18.126	14.45	-10.94	3.98	65.52	140.97	21.551	26.40	-32.57
3.29	55.05	127.35	18.359	14.58	-11.13	3.99	65.65	141.14	21.575	26.61	-33.02
3.30	55.22	127.58	18.574	14.72	-11.33	4.00	65.78	141.30	21.598	26.79	-33.44

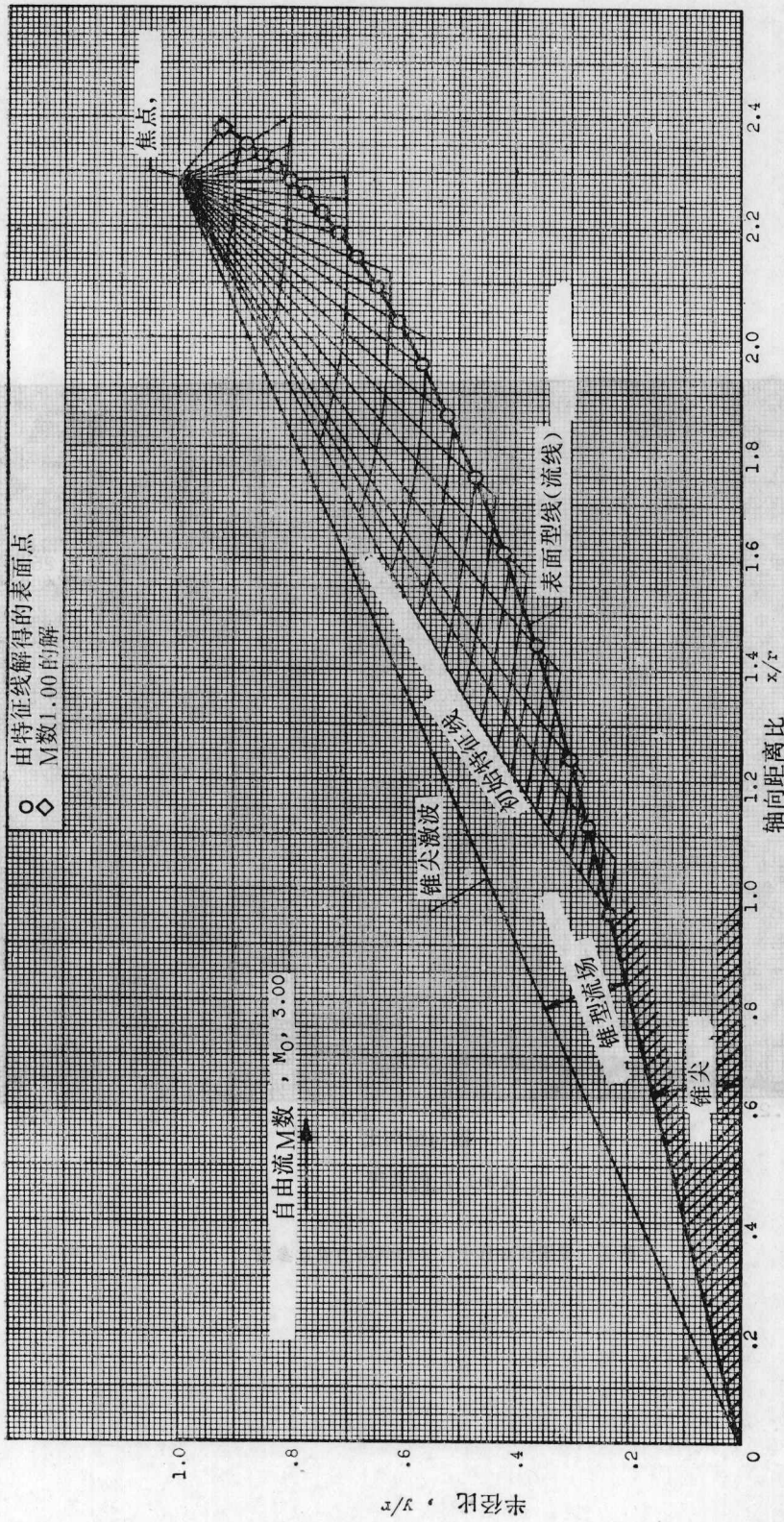


图1 等瓣中心体的典型轴对称特征线解