

高速流动型激光器喷管的计算

盛家宁

(中国科学院北京力学研究所)

一、前言

气动激光器、化学激光器及其他各种高速流动型激光器,由于它们独特的优点,正获得日益广泛的发展。这类激光器都要用到喷管这一部件,由于喷管的性状极大地影响着整个激光器的性能,因此许多文献都对喷管进行了理论和实验的研究^[6~9,11],但均未提出可供设计的资料。

这类激光器对喷管的基本要求是尺度小、膨胀快、气流均匀及型线精度高等,风洞中常用的喷管设计法^[3],即使令其达到最快膨胀,膨胀速率仍是不够满意的,并且均匀性也差(见本文结果),文献[2]的最小长度锐角喷管,虽然膨胀速率达到了二维超音速喷管的上限,但流场中会出现过度膨胀、逆压梯度和激波等现象,而且由于喉道处呈角状,作列阵喷管排列时加工误差也不易控制。

为了克服上述缺点,为高速流动型激光器提供比较合理的型线,以及初步地估计文献[2,3]的型线在高速流动型激光器中的适用程度,就必须考虑跨音速流场的二维效应,以弯曲的等特性线为起始条件来进行计算。

文献[1]给出了喉部呈双曲线型时各种曲率半径、各种比热比下的跨音速流场特性,这是我国自己最近的一个比较完备的喷管跨音速流场解析解,本文以它给出的弯曲的等马赫数线为起始条件,用特征线法将喷管向超音速段延拓。

二、方法简介

取文献[1]给出的某等马赫数线 RGE 作我们的起始边界线(见图1。这里取马赫数 $M=1.1$), G 点是枝线 BG 和等速线 RE 的交点,由跨音速流场特性知,必有一顺时特征线 $PGVF$ 和等速线 RE 相切于 G 点^[5],由于对称,图中仅画出了喷管上半部分, OX 轴是喷管对称轴。在等速线 RGE 上取一系列等分点(我们取为50等分),利用顺时特征线 $dy/dx = \operatorname{tg}(\theta - \mu)$ 上的关系 $\theta + \omega = \text{常数}$ 以及逆时特征线

$dy/dx = \operatorname{tg}(\theta + \mu)$ 上的关系 $\theta - \omega = \text{常数}$ 解出等速线 RGE 的决定区—— $\triangle GRP$ 和 $\triangle GEV$ 中一切节点处的 X 、 Y 、 θ 和 ω 值。这里 X 、 Y 、 θ 、 ω 和 μ 分别代表所取点上的横坐标、纵坐标、气流方向角、普朗特-迈益膨胀角和马赫角。再按

$$\omega = \sqrt{\frac{K+1}{K-1}} \operatorname{tg}^{-1} \sqrt{\frac{K-1}{K+1}} (M^2 - 1) - \operatorname{tg}^{-1} \sqrt{M^2 - 1} \quad \text{及} \quad \mu = \sin^{-1} \left(\frac{1}{M} \right)$$

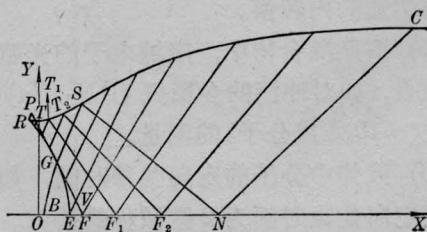


图1 型线③示意图

收稿日期: 1978年6月12日。

附表 1

 $K=1.4$ $M_E=4.50$

型线 ①

| | | | | | | | | | | | |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| X | -0.112 | -0.031 | 0.498 | 1.294 | 2.057 | 3.282 | 5.101 | 7.470 | 8.963 | 10.724 | 12.813 |
| Y | 1.003 | 1.000 | 1.376 | 1.965 | 2.511 | 3.323 | 4.386 | 5.573 | 6.235 | 6.950 | 7.721 |
| X | 15.302 | 18.279 | 21.853 | 26.161 | 31.374 | 37.710 | 45.443 | 54.925 | 66.609 | 81.081 | 90.473 |
| Y | 8.551 | 9.437 | 10.379 | 11.368 | 12.390 | 13.423 | 14.430 | 15.359 | 16.126 | 16.612 | 16.695 |

型线 ②

| | | | | | | | | | | | |
|---|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|
| X | -0.112 | -0.041 | 0.300 | 0.590 | 1.026 | 1.615 | 2.243 | 5.217 | 9.350 | 16.276 | 28.441 |
| Y | 1.003 | 1.001 | 1.200 | 1.412 | 1.734 | 2.165 | 2.605 | 4.416 | 6.382 | 8.877 | 11.950 |
| X | 50.678 | 94.507 | | | | | | | | | |
| Y | 15.293 | 17.470 | | | | | | | | | |

型线 ④

| | | | | | | | | | | | |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| X | -0.112 | -0.041 | 1.040 | 1.616 | 2.552 | 3.828 | 4.917 | 6.204 | 8.130 | 11.608 | 15.190 |
| Y | 1.003 | 1.001 | 1.320 | 1.667 | 2.294 | 3.076 | 3.687 | 4.351 | 5.250 | 6.656 | 7.887 |
| X | 19.964 | 25.613 | 29.897 | 35.021 | 41.160 | 45.919 | 57.376 | 68.022 | 76.299 | 85.668 | 95.785 |
| Y | 9.278 | 10.653 | 11.545 | 12.470 | 13.409 | 14.026 | 15.186 | 15.918 | 16.295 | 16.548 | 16.638 |

型线 ⑤

| | | | | | | | | | | | |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|
| X | -0.112 | -0.040 | 4.875 | 8.196 | 13.333 | 19.725 | 22.921 | 28.102 | 31.785 | 37.628 | 43.296 |
| Y | 1.003 | 1.000 | 1.302 | 1.652 | 2.290 | 3.240 | 3.728 | 4.534 | 5.148 | 6.175 | 7.192 |
| X | 52.059 | 62.808 | 73.832 | 82.030 | 88.088 | 96.496 | 106.764 | 122.070 | 132.941 | 152.768 | 174.620 |
| Y | 8.730 | 10.435 | 11.934 | 12.897 | 13.617 | 14.246 | 14.957 | 15.730 | 16.107 | 16.505 | 16.631 |

型线 ⑥

| | | | | | | | | | | | |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| X | 0 | 0.828 | 1.670 | 2.001 | 2.676 | 3.287 | 4.137 | 6.774 | 8.905 | 10.647 | 12.713 |
| Y | 1 | 1.600 | 2.223 | 2.438 | 2.899 | 3.295 | 3.812 | 5.214 | 6.181 | 6.890 | 7.655 |
| X | 15.173 | 18.114 | 21.644 | 25.897 | 31.040 | 37.288 | 44.910 | 54.248 | 65.747 | 76.127 | 89.878 |
| Y | 8.477 | 9.356 | 10.288 | 11.268 | 12.280 | 13.302 | 14.310 | 15.221 | 15.984 | 16.333 | 16.562 |

型线 ⑦

| | | | | | | | | | | | |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| X | 0 | 0.488 | 0.977 | 1.465 | 2.521 | 3.935 | 4.883 | 6.540 | 8.000 | 10.106 | 13.131 |
| Y | 1 | 1.066 | 1.245 | 1.509 | 2.236 | 3.156 | 3.697 | 4.545 | 5.214 | 6.083 | 7.182 |
| X | 18.093 | 24.513 | 32.704 | 37.005 | 43.026 | 49.831 | 57.496 | 66.106 | 82.071 | 91.168 | 98.521 |
| Y | 8.706 | 10.313 | 11.941 | 12.649 | 13.503 | 14.303 | 15.025 | 15.643 | 16.342 | 16.519 | 16.562 |

注: 型线 ③ 同附表 2 $M_E=4.50$ 之型线。

型线 ①~⑤ 为本文型线, 型线 ⑥ 为文献[2]之脱角喷管, 型线 ⑦ 为文献[3]之最快膨胀喷管。限于篇幅, 型线数据都作了精简。

附表 2

 $K=1.4 \quad M_E=4.00$

| | | | | | | | | | | | | | | |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|--------|--------|
| X | -0.112 | -0.041 | 0.311 | 0.607 | 1.096 | 1.670 | 2.154 | 3.025 | 4.220 | 5.648 | 7.424 | 9.665 | 12.550 | 16.310 |
| Y | 1.003 | 1.001 | 1.058 | 1.190 | 1.509 | 1.878 | 2.174 | 2.676 | 3.301 | 3.969 | 4.700 | 5.500 | 6.378 | 7.324 |
| X | 19.893 | 21.269 | 22.743 | 26.040 | 29.865 | 34.313 | 39.505 | 45.582 | 52.722 | 55.124 | | | | |
| Y | 8.064 | 8.314 | 8.562 | 9.053 | 9.525 | 9.960 | 10.332 | 10.613 | 10.759 | 10.765 | | | | |

 $K=1.4 \quad M_E=4.50$

| | | | | | | | | | | | | | | |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|
| X | -0.112 | -0.041 | 0.317 | 0.602 | 1.051 | 1.659 | 2.242 | 3.265 | 4.382 | 5.570 | 7.648 | 10.356 | 13.980 | 18.903 |
| Y | 1.003 | 1.001 | 1.064 | 1.203 | 1.529 | 1.968 | 2.370 | 3.030 | 3.664 | 4.337 | 5.349 | 6.498 | 7.817 | 9.317 |
| X | 23.774 | 27.759 | 32.479 | 38.089 | 44.783 | 52.802 | 62.450 | 74.109 | 88.266 | 92.699 | | | | |
| Y | 10.558 | 11.431 | 12.332 | 13.243 | 14.142 | 14.992 | 15.743 | 16.323 | 16.628 | 16.645 | | | | |

 $K=1.4 \quad M_E=5.00$

| | | | | | | | | | | | | | | |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|--------|
| X | -0.112 | -0.041 | 0.304 | 0.614 | 1.077 | 1.708 | 2.319 | 3.884 | 5.701 | 7.448 | 9.636 | 11.400 | 13.484 | 15.951 |
| Y | 1.003 | 1.001 | 1.064 | 1.223 | 1.592 | 2.091 | 2.555 | 3.647 | 4.773 | 5.745 | 6.845 | 7.657 | 8.547 | 9.518 |
| X | 18.884 | 22.385 | 26.583 | 31.635 | 37.744 | 45.163 | 54.217 | 65.320 | 79.007 | 95.975 | 117.137 | 143.697 | 151.595 | |
| Y | 10.578 | 11.730 | 12.979 | 14.324 | 15.760 | 17.276 | 18.849 | 20.441 | 21.989 | 23.396 | 24.510 | 25.106 | 25.137 | |

 $K=1.4 \quad M_E=5.50$

| | | | | | | | | | | | | | | |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|
| X | -0.112 | -0.041 | 0.308 | 0.603 | 0.933 | 1.510 | 2.227 | 3.255 | 4.621 | 6.258 | 8.359 | 0.089 | 12.138 | 14.590 |
| Y | 1.003 | 1.001 | 1.068 | 1.228 | 1.505 | 2.004 | 2.600 | 3.402 | 4.383 | 5.458 | 1.709 | 7.656 | 8.699 | 9.858 |
| X | 17.546 | 21.124 | 25.476 | 30.792 | 37.319 | 45.374 | 55.367 | 67.836 | 83.488 | 103.262 | 128.414 | 160.647 | 202.284 | 241.158 |
| Y | 11.148 | 12.583 | 14.177 | 15.943 | 17.891 | 20.026 | 22.347 | 24.837 | 27.455 | 30.127 | 32.719 | 35.012 | 36.643 | 37.094 |

 $K=1.4 \quad M_E=6.00$

| | | | | | | | | | | | | | | |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| X | -0.112 | -0.041 | 0.311 | 0.611 | 1.032 | 1.705 | 2.445 | 3.876 | 5.499 | 7.548 | 9.270 | 11.347 | 13.851 | 16.920 |
| Y | 1.003 | 1.001 | 1.072 | 1.243 | 1.624 | 2.241 | 2.890 | 4.056 | 5.259 | 6.640 | 7.708 | 8.909 | 10.255 | 11.744 |
| X | 20.646 | 25.263 | 30.984 | 38.114 | 47.048 | 58.310 | 72.599 | 90.853 | 114.340 | 144.801 | 184.642 | 237.236 | 307.368 | 373.667 |
| Y | 13.494 | 15.440 | 17.641 | 20.126 | 22.921 | 26.040 | 29.522 | 33.333 | 37.438 | 41.734 | 46.016 | 49.907 | 52.752 | 53.543 |

和上述型线相连接的跨音速段型线

| | | | | | | | | | | | | | | |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--|--|--|
| X | -6.303 | -5.129 | -4.161 | -3.360 | -2.693 | -2.135 | -1.662 | -1.256 | -0.900 | -0.581 | -0.285 | | | |
| Y | 4.568 | 3.762 | 3.107 | 2.577 | 2.151 | 1.811 | 1.543 | 1.337 | 1.185 | 1.081 | 1.020 | | | |

注: 限于篇幅, 型线坐标都作了精简。

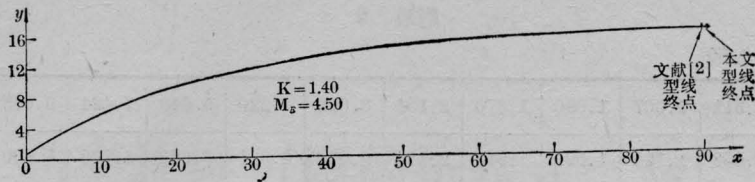


图3 文献[2]锐角喷管和本文锐角喷管型线比较

计,而不必拘泥于本文型式的锐角喷管。

弧型喉道喷管

附表1的②③④⑤型线分别是 $d\theta$ 取为0.1、0.01366415、0.008和0.002的弧型喉道喷管型线,它们分别代表了弧型喉道喷管四种不同膨胀速率的类型(图4)。

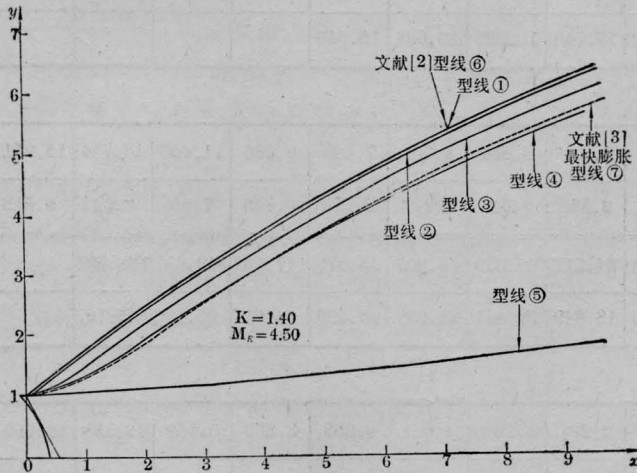


图4 本文型线①②③④⑤和文献[2,3]对应型线喉部比较图

1. 型线②

这类喷管在枝线BGS上游某点 T_1 处(图5)已经达到 $\theta_{T_1} + \omega_{T_1} = \omega_E$,于是在型线的 T_1S 段仍会出现 θ 角增大而 M 数下降的现象,由计算知, $M_{T_1} \approx 2.40$, $M_S \approx 2.34$,所以 T_1S 段逆压减速似乎也不严重,但这总不是理想的流动状态。

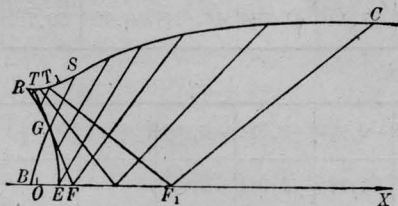


图5 型线②示意图

2. 型线③

这类喷管恰好在枝线BGS的S点上达到 $\theta_S + \omega_S = \omega_E$ (图1),因此整个型线上 M 数处处单调上升,这是流场中不发生逆压梯度的最快膨胀形式。对于高速流动型激光器,这种型线兼顾了气流均匀性、气流振动能冻结效果和加工有利等几个方面,因而是比较可取的。附表2中给出了 $K=1.40$, $M_E=4.00$ 、4.50、5.00、5.50及6.00时和文献[1]跨音速段型线(也见附表2)相连接的这种喷管型线,可供设计参考。

3. 型线④

这类喷管在S点下游的某点 T_1 处才达到 $\theta_{T_1} + \omega_{T_1} = \omega_E$ (图6),它的膨胀速度比型线③为慢,但喷管全程不出现逆压梯度,它适用于不要求膨胀速率而要求气流均匀性的场合。

4. 型线⑤

这类喷管由于 $d\theta$ 取值太小,以至 T 点

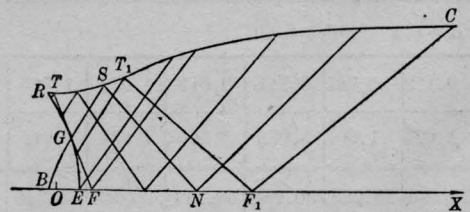


图6 型线④示意图

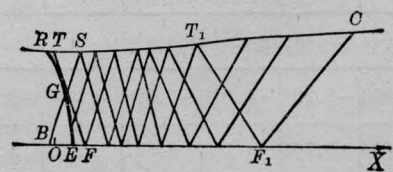


图7 型线⑤示意图

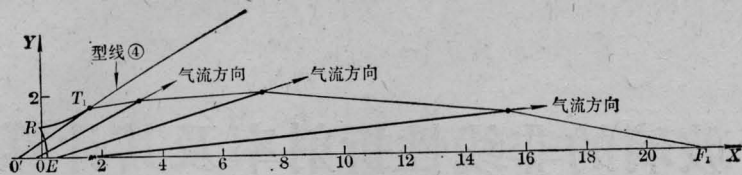


图8 T_1F_1 特征线上气流方向

及其后的曲率也太小, 尽管 TS 段型线在膨胀, 但仍不能顺应跨音速流场二维效应的要求, 喷管中要出现逆压减速激波等现象, 这类喷管是不可取的(图7)。

5. 型线⑦

型线⑦是 $K=1.40$, $M_E=4.50$, 壁面最大膨胀角 $\theta_{\max}=\omega_E/2$ 的文献[3]的喷管形状, 将它和型线③比较(图4), 发现两者有明显差别, 型线⑦尽管取用了方法所能达到的最快膨胀形式, 但喉部型线的膨胀仍明显地较型线③为慢, 因此气流振动能的冻结效果将不如型线③。另外, 型线⑦是基于假设径向流和喉道处有均匀轴向音速流假定的, 事实上在喉部大曲率时不但喉道处不是直音速线, 而且喷管初始膨胀段中流动也不近似于径向流, 图8上画出了型线④初始膨胀段最后一根特征线 T_1F_1 上的气流方向, 若是径向流, 这些方向应该交汇于中心线 OX 轴的某个固定点处, 但事实上它们完全不交于同一点。由于型线⑦的假设前提明显地偏离了实际状况, 因此就无法保证其流场的均匀性, 实践也表明, 壁面最大膨胀角 $\theta_{\max} > \frac{\omega_E}{4}$ 时, 以文献[3]方法设计的喷管流场均匀性是不佳的。因此从冻结效果和流场均匀性两个方面看, 文献[3]的方法用作气动激光器喷管设计是不够理想的。

四、结 论

1. 本文附表2中所列的型线, 是喉道呈

弧形膨胀时壁面不出现逆压梯度的最快膨胀型式, 在对气流均匀性和膨胀速率同时要求的场合, 可作设计参考。

2. 在更加强调膨胀速率而对气流均匀性要求不甚严格的场合, 可以采用锐角喷管, 而文献[2]的锐角喷管可以代替本文锐角喷管用于设计。

3. 文献[3]的设计法用作快速膨胀喉部大曲率的超音速喷管设计是不够理想的。

参 考 文 献

- [1] 贾振学, 林同骥; “跨声速双曲型喷管喉部流动”, 《气动参考资料》, 1976年第三期。
- [2] 盛家宁; “锐角喷管计算”, 中国科学院力学研究所1977年科技成果。
- [3] A. O. L. Atkin; Two-dimensional supersonic channel design, ARC R&M, 2174(1945).
- [4] A. H. Shapiro; The dynamics and thermodynamics of compressible fluid flow, Vol. I, 1953.
- [5] L. Howarth; Modern developments in fluid dynamics(High speed flow), Vol. I, 1953.
- [6] Wagner; A cold flow experimental study associated with a two-dimensional multiple nozzle NOLTR, 71~78(1971).
- [7] Greenberg; Rapid expansion nozzle for gas dynamic lasers, *AIAA J.*, 1972, **10**, No.11, 1494-1498.
- [8] J. D. Anderson; Modern developments in physics of gas dynamic laser, *AIAA Paper*; No. 72~143(1972).
- [9] D. M. Kuehn; Importance of nozzle geometry to high pressure dynamic laser, *Appl. Phys. Lett.*, 1972, **21**, 112.
- [10] 林同骥; “收缩段型线和流动特性”, 《空气动力学参考资料》, (内部刊物) 1975.3.
- [11] Anderson; Population inversions in an expanding gas: Theory and experiment, *Phys. Fluid*, 1971, **14**, 2620.