

9555

TK471

1

# 燃气轮机循环理论

〔日〕佐藤 豪 著

王 仁 译

陈佐一 校

机械工业出版社

本书从热力学的循环理论角度对燃气轮机的各种循环及其在实际中的应用作了相当详尽的叙述。其中第Ⅰ篇是热力学中的循环理论在燃气轮机上的具体化，这是进行燃气轮机的原则性热力设计的依据和基础。第Ⅱ篇则是某些特定条件下，上述基本原理的具体运用。书中较详细地讨论了各种实际中被采用的燃气轮机循环，并在每章中分别介绍了一种工程上常用的处理手法。

本书可作为大学燃气轮机专业的本科生和研究生的参考书；对于从事燃气轮机研究和设计工作的工程技术人员也有一定的参考价值。

# ガスタービンサイクル論

〔日〕 慶応義塾大学教授 佐藤 豪 著  
工 学 博 士

山 海 堂

昭和47年7月25日初版

東 京

\*

\*

\*

## 燃气轮机循环理论

〔日〕佐藤 豪 著

王 仁 译

陈佐一 校

\*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

煤炭工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

\*

开本 $787 \times 1092^{1/32}$ ·印张 $11^{3/4}$ ·字数 250 千字

1983年2月北京第一版·1983年2月北京第一次印刷

印数0,001—2,600·定价 1.20 元

\*

统一书号：15033·5385

## 译 者 的 话

燃气轮机是一种新型动力装置，它具有体积小，重量轻，运行、维护方便，易于实现自动控制等优点。因而在问世以来的短短四十多年中，不仅完全取代了往复式内燃机而成为主要的航空发动机，而且在陆用和船用领域也越来越受到“青睐”。随着高温、高强材料的发展和数控技术，冷却技术等方面的进步，燃气轮机必将更加显示其强大的生命力。

由于今天的燃气轮机终究还只是处于“青年”时期，其性能指标随着新材料的发展和制造技术的进步一直在不断上升。而从热力学和循环理论的角度来进行研究，是提高燃气轮机性能的治本之道。

佐藤豪教授对燃气轮机进行了长期研究，而且实地参加了多种新机型的开发研究工作。因此可以说本书既有一定的理论水平，也密切联系着燃气轮机在各种领域的实际应用。

本书第Ⅰ篇系统而有条理地介绍了各种循环的分析计算，并给出了通用公式。这是由各种实际循环中概括、提高、汇总而成，作为基础理论体系而形成一个整体。第Ⅱ篇则是上述基本原理的具体应用。从理论体系上来说，这是第Ⅰ篇中基础理论在各种情况下的求解；而从工程意义上来说，这是基础理论到进行具体设计之间的一种衔接。特别应当指出的是本书作者有意识地在第Ⅱ篇各章中介绍了工程上具体

#### IV

处理问题的各种手法，尤其是计算机的应用、系统最佳条件的求解和用大量图表来给出实验结果并进行讨论的方法，是很值得我们参考的。

在本书翻译过程中得到清华大学敦瑞堂副教授热情地帮助，并审阅了译稿，特致以衷心的感谢！

由于译者水平有限，难免有许多错误和不妥之处，敬请读者指正。

## 序

喷气发动机以第二次世界大战为标志，出色地进入了航空发动机领域，并取得了垄断地位。而与此对应，其它用途的燃气轮机的实际应用却发展不快。但是，近几年来，对燃气轮机的需求却急剧增长。具体地说来，燃气轮机在今天的應用包括作为回避长期停电而设的紧急备用电站动力、高速集装箱船所用航机转用型燃气轮机及应用燃气轮机的全能量系统等方面。此外，汽车用燃气轮机已不仅用在大型拖车和公共汽车上，甚至连轿车用的燃气轮机也得到了发展，双轴和单轴等结构形式都正在研究。之所以有这样的發展，是因为燃气轮机具有下述特点：

- (1) 不需用水；
- (2) 起动方便；
- (3) 在排气公害指标上较优越；
- (4) 比功大。

正是基于对上述特点中的一项或几項的考虑，而使各种形式的燃气轮机得到了实际应用。1971年第一次在我国（指日本一译者注）召开了国际燃气轮机会议。今年六月，日本燃气轮机会议也召开了。这些都充分说明了燃气轮机事业在今天的发展情况。

我认为，这次佐藤豪教授所著的“燃气轮机循环理论”一书的出版确是非常及时。作者是一位地地道道的燃气轮机研究者，他不仅在理论方面颇有造诣，而且实地参加筹划了

我国多处燃气轮机的开发研究，是燃气轮机方面第一流的学者。在工程技术上，一般来说基础都是很重要的。若是忽略了基础知识，只局限于燃气轮机方面，舍本逐末，是不可能期望很好地完成燃气轮机开发事业的。

本书是由作者的学位论文、学会论文等多年成果汇集而成。我认为，对于已在积极从事燃气轮机工作的技术人员和研究人员来说，本书对其日常各方面工作都是大有帮助的；另外，对于正在学习的研究生和大学生来说无疑地更是必读之书。

草成此文，就作为一篇序言推荐此书吧！

渡部一郎

1972年6月24日

## 自序

燃气轮机近年来得到了很大发展，进展很快。除航空用的涡轮喷气发动机、涡轮螺旋桨发动机和涡轮轴发动机等机种外，在发电、高炉鼓风、化学工业、产业、船舶、车辆、压缩机拖动和泵拖动等各方面也都应用了燃气轮机，应用的范围日趋扩大。

近来，对于工业生产的环境条件增加了严酷的要求。燃气轮机由于具有体积小、重量轻、排气清洁、余热便于应用、保养简便和起动容易等特点，因而越来越受到人们的重视。

我于昭和十九年（1944年）在中岛飞机公司从事涡轮喷气发动机ネ-10、ネ-10改及ネ-230等型的设计和研制工作。这是本人初次接触燃气轮机。

战后，由于在庆应大学工学院任职，继续进行了燃气轮机方面的研究工作。在这段期间，以三井造船公司二千马力燃气轮机的试生产为开始，先后有幸参加了二、三家公司的燃气轮机的研制设计工作。关于燃烧室和燃气轮机主要部件的研究工作也作了一些，而有关燃气轮机循环的热力学研究工作则一直不间断地在进行着。

本书是作者将至今为止所进行的有关燃气轮机循环的热力学研究的内容进行汇总，并作为燃气轮机循环理论这样一个体系而写成的。内容除了已在专门杂志上发表的一些论文外，其余大部分都是作者的学位论文，其中也包括了在作者

指导下共同进行研究的工程技术博士梁玉龙的学位论文的内容。

如上所述，本书的内容因为 是长年研究内容的汇集整理，所以在研究方法和论文中的实例计算数值等方面不免稍感陈旧，最终也未进行修订。因为作者是随着燃气轮机事业的发展而逐步深入地进行研究的，我这样不加改动地把这些内容编辑入书是希望使读者看清我们研究工作摸索进展的不易，也可借此知道一些研究工作进一步发展的方向。

本人一直有仅以自己的论文为主编辑出版一书的愿望，但在日本，这样一种个人愿望是难以实现的。多亏日本机械学会，山海堂的川井正男社长和内燃机编辑部的八木国夫、本间元子等人的好意，多年的愿望才能得以实现。特此一一致以深切的谢意。再者，在本书的编辑过程中，承蒙作者研究室的川口修、藤本元、福井直静和藤井裕子等人给予了很大帮助。

佐藤 豪

1972年6月17日

# 目 录

译者的话

序

自序

绪言 ..... 1

## 第 I 篇 基 础 理 论

|                                                   |    |
|---------------------------------------------------|----|
| 1. 理想燃气轮机循环 .....                                 | 5  |
| 1-1 理想燃气轮机循环 .....                                | 5  |
| 1-2 埃里克森循环 .....                                  | 5  |
| 1-3 布雷敦循环 (理想简单燃气轮机循环) .....                      | 8  |
| 2. 不计压力损失的实际燃气轮机循环 .....                          | 15 |
| 2-1 实际简单燃气轮机循环 .....                              | 15 |
| 2-2 不计压力损失的实际简单燃气轮机循环 .....                       | 19 |
| 2-2-1 热效率 .....                                   | 20 |
| 2-2-2 对应于最大热效率的最佳压比 $\varphi_{opt}$ .....         | 20 |
| 2-2-3 最高温度 $T_3$ 对热效率的影响 .....                    | 23 |
| 2-2-4 简单燃气轮机实现的条件 .....                           | 24 |
| 2-2-5 进气温度 $T_1$ 对热效率的影响 .....                    | 25 |
| 2-2-6 压气机效率 $\eta_K$ 和透平效率 $\eta_T$ 对热效率的影响 ..... | 25 |
| 2-2-7 比功 $l_{sa}$ .....                           | 26 |
| 2-2-8 对应于最大比功的最佳压比 $\varphi'_{opt}$ .....         | 27 |
| 2-2-9 压气机效率 $\eta_K$ 和透平效率 $\eta_T$ 对比功的影响 .....  | 28 |
| 2-2-10 功比 $\alpha$ .....                          | 28 |
| 2-2-11 简单燃气轮机循环小结 .....                           | 29 |

|                                                    |    |
|----------------------------------------------------|----|
| 2-3 提高燃气轮机性能的方法 .....                              | 32 |
| 2-4 不计压力损失的回热循环 .....                              | 33 |
| 2-4-1 回热循环和回热度 .....                               | 33 |
| 2-4-2 热效率 .....                                    | 34 |
| 2-4-3 临界压比 .....                                   | 36 |
| 2-4-4 对应于最大热效率的最佳压比 .....                          | 37 |
| 2-4-5 比功 .....                                     | 38 |
| 2-5 不计压力损失的中间冷却循环 .....                            | 38 |
| 2-5-1 中间冷却循环 .....                                 | 38 |
| 2-5-2 采用中间冷却时压比的分配 .....                           | 39 |
| 2-5-3 热效率 .....                                    | 41 |
| 2-5-4 比功 .....                                     | 43 |
| 2-5-5 功比 .....                                     | 43 |
| 2-6 不计压力损失的中间冷却-回热循环 .....                         | 44 |
| 2-7 不计压力损失的再热循环 .....                              | 46 |
| 2-7-1 再热循环 .....                                   | 46 |
| 2-7-2 采用再热时压比的分配 .....                             | 47 |
| 2-7-3 热效率 .....                                    | 48 |
| 2-7-4 比功 .....                                     | 49 |
| 2-7-5 功比 .....                                     | 50 |
| 2-8 不计压力损失的再热-回热循环 .....                           | 50 |
| 2-9 不计压力损失的中间冷却-再热-回热循环<br>(单轴燃气轮机各种循环的通用公式) ..... | 52 |
| 3. 有压力损失的燃气轮机循环 .....                              | 59 |
| 3-1 有压力损失的燃气轮机循环 .....                             | 59 |
| 3-2 有压力损失的简单循环(1-1-0) .....                        | 59 |
| 3-2-1 热效率 .....                                    | 59 |
| 3-2-2 对应于最大热效率的最佳压比 .....                          | 61 |
| 3-2-3 有压力损失的简单循环的实现条件 .....                        | 63 |
| 3-2-4 比功 .....                                     | 63 |

|                                                  |     |
|--------------------------------------------------|-----|
| 3-2-5 对应于最大比功的最佳压比 .....                         | 64  |
| 3-3 有压力损失的回热循环(1-1- $\eta_R$ ) .....             | 64  |
| 3-3-1 热效率 .....                                  | 65  |
| 3-3-2 对应于最大热效率的最佳压比和临界压比 .....                   | 66  |
| 3-3-3 比功 .....                                   | 67  |
| 3-4 有压力损失的中间冷却-回热循环(2-1- $\eta_R$ ) .....        | 67  |
| 3-5 有压力损失的中间冷却-再热-回热循环(2-2- $\eta_R$ ) .....     | 70  |
| 4. 多轴式燃气轮机循环 .....                               | 74  |
| 4-1 多轴式燃气轮机循环 .....                              | 74  |
| 4-2 各种布置的符号表示法 .....                             | 76  |
| 4-3 多轴式燃气轮机循环的特性 .....                           | 77  |
| 4-4 双轴低压动力透平式再热-回热循环(1/LP/RE) .....              | 77  |
| 4-4-1 平衡条件 .....                                 | 77  |
| 4-4-2 比功 .....                                   | 79  |
| 4-4-3 热效率 .....                                  | 80  |
| 4-5 双轴高压动力透平式再热-回热循环(1/HP/RE) .....              | 82  |
| 4-5-1 平衡条件及比功 .....                              | 82  |
| 4-5-2 热效率 .....                                  | 82  |
| 4-6 1/C/E、1/C/RE、1/LP/RE及1/HP/RE<br>诸方案的比较 ..... | 83  |
| 4-7 双轴低压动力透平式中间冷却-再热-回热循环<br>(1/LP/IRE) .....    | 87  |
| 5. 特殊燃气轮机循环 .....                                | 91  |
| 5-1 特殊燃气轮机循环 .....                               | 91  |
| 5-2 闭式循环 .....                                   | 91  |
| 5-3 燃烧室后置循环 .....                                | 92  |
| 5-4 燃烧室前置循环 .....                                | 97  |
| 5-5 外燃式循环 .....                                  | 101 |
| 5-6 爆燃式循环(等容燃烧循环) .....                          | 104 |
| 5-7 其他特殊循环 .....                                 | 106 |

## **第 II 篇 基础理论的应用**

|                             |            |
|-----------------------------|------------|
| <b>1. 核能动力用燃气轮机循环 .....</b> | <b>107</b> |
| 1-1 序论 .....                | 107        |
| 1-2 高温气冷反应堆和闭式循环燃气轮机 .....  | 108        |
| 1-2-1 高温气冷反应堆 .....         | 108        |
| 1-2-2 闭式循环燃气轮机 .....        | 109        |
| 1-3 使用气体的选定 .....           | 111        |
| 1-3-1 放射性方面的考虑 .....        | 111        |
| 1-3-2 传热性能方面的考虑 .....       | 112        |
| 1-3-3 对反应堆结构材料稳定性的考虑 .....  | 113        |
| 1-3-4 流体力学特性的考虑 .....       | 113        |
| 1-3-5 对燃气轮机的适应性 .....       | 114        |
| 1-3-6 计算前气体的选定 .....        | 115        |
| 1-4 计算中各参量的选定 .....         | 116        |
| 1-4-1 循环的选定 .....           | 116        |
| 1-4-2 计算中各参量的选定 .....       | 117        |
| 1-5 循环计算公式 .....            | 119        |
| 1-5-1 回热循环 .....            | 119        |
| 1-5-2 一次间冷-回热循环 .....       | 119        |
| 1-5-3 一次间冷-再热-回热循环 .....    | 120        |
| 1-5-4 二次间冷-回热循环 .....       | 120        |
| 1-5-5 二次间冷-再热-回热循环 .....    | 121        |
| 1-5-6 比热比是常量时的计算 .....      | 122        |
| 1-6 比热比变化时的计算方法 .....       | 122        |
| 1-6-1 循环的选定 .....           | 122        |
| 1-6-2 参量的选定 .....           | 123        |
| 1-6-3 计算方法 .....            | 124        |
| 1-6-4 计算公式和计算方法 .....       | 124        |

|                                     |     |
|-------------------------------------|-----|
| 1-7 计算结果及其讨论 .....                  | 126 |
| 1-7-1 燃气轮机的内部热效率 $\eta_{oi}'$ ..... | 126 |
| 1-7-2 比功 .....                      | 133 |
| 1-7-3 比热比的影响 .....                  | 135 |
| 1-8 结论 .....                        | 138 |
| 2. 高炉用燃气轮机循环 .....                  | 141 |
| 2-1 序论 .....                        | 141 |
| 2-2 高炉用燃气轮机的热力特性 .....              | 142 |
| 2-3 基本循环 .....                      | 144 |
| 2-3-1 带有回热器的基本循环 .....              | 144 |
| 2-3-2 带有空气预热器的基本循环 .....            | 151 |
| 2-3-3 带有高炉煤气预热器的基本循环 .....          | 154 |
| 2-3-4 将燃气轮机排气供应热风炉的循环 .....         | 154 |
| 2-3-5 没有热风炉的基本循环 .....              | 155 |
| 2-3-6 无热风炉但有第二燃烧室的基本循环 .....        | 157 |
| 2-4 燃烧室后置循环(排气加热循环) .....           | 159 |
| 2-4-1 有热风炉的燃烧室后置循环 .....            | 159 |
| 2-4-2 无热风炉的燃烧室后置循环 .....            | 164 |
| 2-4-3 将燃气轮机排气供应热风炉的燃烧室后置循环 .....    | 166 |
| 2-5 外燃式循环 .....                     | 166 |
| 2-5-1 简单外燃式循环 .....                 | 166 |
| 2-5-2 抽气式外燃循环 .....                 | 168 |
| 2-5-3 混合循环 .....                    | 168 |
| 2-6 燃烧室前置循环 .....                   | 169 |
| 2-6-1 有冷却器的燃烧室前置循环 .....            | 169 |
| 2-6-2 有回热器的燃烧室前置循环 .....            | 170 |
| 2-6-3 送风加热式燃烧室前置循环 .....            | 171 |
| 2-7 用氧气或富氧空气进行燃烧的循环 .....           | 173 |
| 2-8 闭式循环 .....                      | 176 |
| 2-9 结论 .....                        | 176 |

|                                          |     |
|------------------------------------------|-----|
| 3. 用燃气发生器的燃气轮机循环 .....                   | 180 |
| 3-1 序论 .....                             | 180 |
| 3-2 燃气发生器 .....                          | 182 |
| 3-2-1 输入燃气发生器的物质 .....                   | 182 |
| 3-2-2 物质的平衡 .....                        | 183 |
| 3-2-3 平衡计算 .....                         | 185 |
| 3-2-4 热量平衡 .....                         | 189 |
| 3-2-5 生成燃气的分子量、比热和气体常数 .....             | 196 |
| 3-2-6 气化效率 .....                         | 199 |
| 3-3 燃气轮机循环 .....                         | 199 |
| 3-3-1 压气机 K .....                        | 199 |
| 3-3-2 燃气发生器 G .....                      | 202 |
| 3-3-3 透平 T .....                         | 202 |
| 3-3-4 燃气轮机的有效输出功 $L_N$ .....             | 205 |
| 3-3-5 内部效率 $\eta_i$ .....                | 206 |
| 3-3-6 功比 $\alpha$ .....                  | 207 |
| 3-4 总装置 .....                            | 207 |
| 3-4-1 总装置的布置 .....                       | 207 |
| 3-4-2 有效燃气的供给压比 .....                    | 207 |
| 3-4-3 带制氧机的总装置的输出功 .....                 | 208 |
| 3-4-4 带有制氧机的总装置能独立运行的条件 .....            | 208 |
| 3-5 燃气发生器计算举例 .....                      | 209 |
| 3-5-1 计算条件 .....                         | 209 |
| 3-5-2 计算结果 .....                         | 209 |
| 3-6 燃气轮机循环的计算举例 .....                    | 217 |
| 3-6-1 无换热器的燃气轮机循环 .....                  | 217 |
| 3-6-2 具有换热器、给水预热器和蒸汽过热器的<br>燃气轮机循环 ..... | 222 |
| 3-7 结论 .....                             | 230 |

## 4. 具有抽气式空气冷却器的进气冷却燃气

|                                            |     |
|--------------------------------------------|-----|
| 轮机循环 .....                                 | 232 |
| 4-1 序论 .....                               | 232 |
| 4-2 抽气式进气冷却燃气轮机循环的构成 .....                 | 233 |
| 4-3 循环的基本公式 .....                          | 235 |
| 4-3-1 符号和设计工况的给定值 .....                    | 235 |
| 4-3-2 求设计工况性能的基本公式 .....                   | 236 |
| 4-4 设计工况的性能 .....                          | 240 |
| 4-4-1 压气机进气温度下降率 .....                     | 241 |
| 4-4-2 抽气率对热效率及比功的影响 .....                  | 242 |
| 4-4-3 抽气压比对热效率及比功的影响 .....                 | 244 |
| 4-4-4 大气温度对热效率及比功的影响 .....                 | 244 |
| 4-5 变工况特性 .....                            | 246 |
| 4-5-1 抽气率的影响 .....                         | 250 |
| 4-5-2 抽气压比的影响 .....                        | 251 |
| 4-5-3 压气机进气温度、透平进气温度及<br>循环温比与热效率的关系 ..... | 251 |
| 4-5-4 压气机和透平效率的变化 .....                    | 253 |
| 4-5-5 压气机和透平的流量特性 .....                    | 254 |
| 4-5-6 透平排气温度的变化 .....                      | 255 |
| 4-5-7 大气温度的影响 .....                        | 256 |
| 4-5-8 部分负荷时的运行状态 .....                     | 257 |
| 4-6 结论 .....                               | 258 |

## 5. 具有余热利用式吸收制冷机的进气冷却

|                                          |     |
|------------------------------------------|-----|
| 燃气轮机循环 .....                             | 260 |
| 5-1 总论 .....                             | 260 |
| 5-2 具有余热利用式吸收制冷机的进气冷却<br>燃气轮机循环的构成 ..... | 261 |
| 5-3 循环的基本公式 .....                        | 262 |
| 5-3-1 符号 .....                           | 262 |

|       |                               |     |
|-------|-------------------------------|-----|
| 5-3-2 | 热效率及比功 .....                  | 264 |
| 5-3-3 | 发生器热源温度 .....                 | 266 |
| 5-3-4 | 热量分配比 .....                   | 268 |
| 5-4   | 具有吸收制冷机的进气冷却燃气轮机循环的一般特性 ..... | 268 |
| 5-4-1 | 吸收制冷机的性能和燃气轮机的进气温度 .....      | 268 |
| 5-4-2 | 燃气轮机余热的分配 .....               | 272 |
| 5-4-3 | 热源温度和循环的工作区域 .....            | 273 |
| 5-4-4 | 回热率对热效率的影响 .....              | 276 |
| 5-4-5 | 蒸发温度对热效率的影响 .....             | 278 |
| 5-4-6 | 大气温度对热效率的影响 .....             | 278 |
| 5-4-7 | 蒸发温度对比功的影响 .....              | 279 |
| 5-4-8 | 大气温度对比功的影响 .....              | 280 |
| 5-4-9 | 进气冷却循环的最佳条件 .....             | 281 |
| 5-5   | 循环特性的比较 .....                 | 285 |
| 5-6   | 结论 .....                      | 286 |
| 6.    | 燃气轮机的全能量系统 .....              | 288 |
| 6-1   | 序论 .....                      | 288 |
| 6-1-1 | 全能量系统 .....                   | 288 |
| 6-1-2 | 循环的概念 .....                   | 289 |
| 6-2   | 符号和术语 .....                   | 289 |
| 6-2-1 | 符号 .....                      | 289 |
| 6-2-2 | 术语 .....                      | 291 |
| 6-2-3 | 热利用率 .....                    | 292 |
| 6-3   | 设计工况性能 .....                  | 293 |
| 6-3-1 | 计算方法 .....                    | 293 |
| 6-3-2 | 压比及回热器的影响 .....               | 294 |
| 6-3-3 | 大气温度的影响 .....                 | 299 |
| 6-3-4 | 余热锅炉的影响 .....                 | 299 |
| 6-3-5 | 吸收制冷机的影响 .....                | 300 |

|                                         |     |
|-----------------------------------------|-----|
| 6-4 变工况特性 .....                         | 301 |
| 6-4-1 计算方法 .....                        | 301 |
| 6-4-2 计算结果及其讨论 .....                    | 306 |
| 6-5 运行方式 .....                          | 309 |
| 6-6 利用燃气轮机进行供热发电的经济性<br>(办公大楼的例子) ..... | 310 |
| 6-6-1 设计对象 .....                        | 311 |
| 6-6-2 经济性比较 .....                       | 312 |
| 6-6-3 结果 .....                          | 317 |
| 6-7 结论 .....                            | 318 |
| 7. 双函道发动机 .....                         | 320 |
| 7-1 序论 .....                            | 320 |
| 7-2 符号 .....                            | 321 |
| 7-2-1 下角 .....                          | 321 |
| 7-2-2 状态参量、效率等的符号 .....                 | 322 |
| 7-2-3 拉格朗日乘数法用到的符号 .....                | 323 |
| 7-3 主要的假设 .....                         | 323 |
| 7-4 各部位状态和效率的计算 .....                   | 324 |
| 7-4-1 空气入口 .....                        | 324 |
| 7-4-2 主流压气机 .....                       | 324 |
| 7-4-3 燃烧室 .....                         | 324 |
| 7-4-4 透平 .....                          | 325 |
| 7-4-5 主流喷管 .....                        | 325 |
| 7-4-6 旁路压气机 .....                       | 325 |
| 7-4-7 旁路喷管 .....                        | 326 |
| 7-4-8 推力 .....                          | 326 |
| 7-4-9 推进效率 .....                        | 326 |
| 7-4-10 内部效率 .....                       | 327 |
| 7-4-11 总效率 .....                        | 327 |
| 7-5 约束条件 .....                          | 327 |