



ISBN 978-7-302-19115-5



9 787302 191155 >

定价：98.00元

*Cai Ruixian's Analects*

# 蔡睿贤论文选集

清华大学出版社  
北京

## 内 容 简 介

本书是中国科学院院士、中国科学院工程热物理研究所研究员蔡睿贤 1958—2007 年间发表的 300 多篇学术论文的精选文集,内容包括四部分:第一部分,叶轮机械气动热力学;第二部分,能源动力系统;第三部分,严格简明解析解;第四部分,其他。

本书可供高校工程热物理、热能工程、机械等专业的师生阅读,也可供科研院所的研究人员参考。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

## 图书在版编目(CIP)数据

蔡睿贤论文选集/蔡睿贤著. —北京:清华大学出版社,2009.1

ISBN 978-7-302-19115-5

I. 蔡… II. 蔡… III. 热物理—文集—汉、英 IV. TK12-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 199813 号

责任编辑:黎 强

责任校对:王淑云

责任印制:王秀菊

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn>

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, [c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质 量 反 馈:010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

印 装 者:北京铭成印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印 张:29.75 插 页:4 字 数:730 千字

版 次:2009 年 1 月第 1 版 印 次:2009 年 1 月第 1 次印刷

印 数:1~1000

定 价:98.00 元

---

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:(010)62770177 转 3103 产品编号:031329-01

## 编辑出版说明

(1) 为了尊重历史原貌和作者的意愿,本选集中个别年代稍远的论文采用了扫描照片的形式,其中涉及的繁体字、变量的表示、数学符号以及个别名词术语等均与现行标准略有出入;

(2) 论文的格式和各级标题的处理基本遵从原有形式;

(3) 论文的编辑排版尽量采用了现行标准,包括行文用语、标点符号、变量字母的大小写、变量字母正斜体和黑白体的处理,也包括物理量的量纲、各种数学符号等,但出于尊重历史原貌的考虑,个别名词、用语、物理量、数学符号以及量纲等未作改动,这可能与现行标准和习惯仍有一些差别。例如,作者原稿中燃气轮机的输出功率采用的是“马力”概念,而不是当今人们习惯的“千瓦”;压气机的压力采用的是“公斤(力)”的概念,而不是现在的“牛顿”;反正切为  $\text{tg}^{-1}$  或  $\text{tan}^{-1}$ ,而不是现在的  $\arctan$ ,等等。读者在阅读时,可以参照相应的国家标准进行物理量、数学符号或量纲的对照、换算,本书不再给出具体的说明和换算关系;

(4) 图稿的绘制处理采用了兼顾原有风格和现行标准、规范的做法;

(5) 除个别论文的名称稍作技术处理外,其余的论文均为原始名称。

清华大学出版社  
2008年12月

## 自序

近年来,有些同寅建议我出书。自己也曾考虑过:大半辈子各种形式的文章写过不少,就是未成功写过书,是否弥补一下? 30 多岁时在清华大学教本专业主课“叶轮机械原理”,也算努力,教学效果逐步有所提高(其中主要一招是听赵访熊校长的教导,每堂课必准备一个与讲授内容有密切关系的笑话)。当时,教研组要我写一本教材,我欣然应命,但只出了一份油印稿就开始“文革”,该书稿的下场也就不必多说了。可以自慰的是:该书稿“文革”后在清华还发挥了一点作用,总算没有白干,不过,那时我已经不在清华了。此后又过了 30 多年,年近古稀,有一天想起这些年在燃气轮机装置的理解与分析上,亦有些与众不同之处,也许还值得一提,供高级科普之用,于是,终于有了动笔的“决心”。然而,仅仅写出了第一章第一大节,就因各种琐事,还有非干不可的其他事项而不得不搁笔,一直延宕至今。

到了今年,同寅们又屡屡建议我写点东西。考虑到同寅们的真诚和热心,又考虑到各种事务性的差事均已先行办理,想如上一次那样自我停歇,实在对不起众多同寅,于是只好承诺来个真正的“决心”,非要尽快出本书不可!但表态容易,真正落实这个“决心”可就难了。我的文笔粗滞,一天写不了多少字,何况又未退休,“正事”(不能也不敢说是“杂事”)依旧繁多,加上日渐衰老,已非当年之“拼命三郎”,可以夜以继日。如何落实这个“决心”,践约出书?情急之下,我突然想到可以搞一个集子,也就是科技论文选集,这不也是出书么?!于是就开始择优挑选,将以往陆续发表的各种论文加以整理。当然,要认真“择优”,不能对不起读者与同寅,自忖所选论文当然比不上大师之作,但除几篇多少出于怀旧而挑选的论文之外,所选的大多数论文至少在发表时尚有一定创新之处,其中的很多观点和结论至今还有一些理论与实用价值。如此想来,自己也就有了这种“可以交差”的信心。不管怎么说,既然是集子,既然要把那些曾经发表过的东西重新拿出来示人,就要尽量挑选那些比较好的论文,这不光是为了完成出书任务,了却一桩心事,还要能对同寅们多少有个交代。假如这个集子还能对同行和晚辈学子有所启迪,那就是我的造化了。

本文集的主要内容分为三个部分:叶轮机械与气动热力学,能源动力系统,严格简明解析解;另有 3 篇拙文不好归入这三部分,遂有单独的一个“其他”部分。各部分均按发表时间排序。很凑巧,我的历史与“三”大有不解之缘:除上述三种学科内容外,自己的小学、初中、大学均分别念过三所(大学在清华、北航与交大,分别进过三种专业);工作类型也有三种:大学老师、工厂工程师、研究所研究员。其他凑巧与“三”有关的轶事还包括:被选上科学院学部委员(后来改称为院士)的同班同学也是三人。写上这一段,是想顺便夹带我对科技学习是“专”好还是“通”好的想法。我这一代人,在专业上大多是“从一而终”,相对而言,我的经历是比较“通”的。最初我想这多倒霉,变来变去,后来经历多了,倒觉得“通”也有其好处。不过,我的“通”经历是在三样比较相近的“专”中转圈的,也许是“通”中带“专”或者“专”不忘“通”比较好。可能话说偏了,下面按上述的三个主要部分再略加描述。

有关叶轮机械与气动热力学的大部分工作是在吴仲华先生直接指导下进行的。我刚参

加工作就被他指定为助教,在他身边工作时间很长,当过多年的助手,应该说获益良多。我的体会是大师平常的身教(一般的共事经历、讨论与聊天等)比言教(正式上课)更重要。即使在先生去世后,我的成绩某种程度上也可以说是先生言传身教的结果。吴先生是国际叶轮机械与气动热力学领域的一流权威,他始终对我要求甚严,所以这部分论文我自觉至少是及格的,这部分工作的一个主要内容就是发展了吴先生的中心流线法。

后来,我从事能源动力系统的研究,也是吴先生指令的。他认为发展动力系统很重要,而当时工程热物理研究所这方面人员很少,他认为我有三种行业的工作经历,比较“通”,让我也参加系统方面的工作。加上当时所里在叶轮机械方面力量特强,我的工作也就逐渐由叶轮机械气动热力学转向更多地从事能源动力系统的研究。这部分工作的主要内容涉及新的热力循环系统和新的循环理论分析方法,有些论文则对某些权威见解进行了讨论与扬弃。

在严格简明解析解部分,除1篇论文外,其他都是1990年代以后撰写的,时间比较晚近。虽然吴先生已经辞世,但这些文章中仍有他的影响。其实,以前我改进他的中心流线法,基本招数就是解析化;在从事能源动力系统的研究工作中,也有不少解析化的痕迹。非线性或多变数的严格简明解析解,其实在20世纪中叶已极少有新解,因为太难导出,而且电子计算机与计算方法的迅速发展也部分降低了解析解的作用。但解析解的重要理论意义以及作为标准解来发展数值解的方法等,则是无可代替的。这部分内容给出的解都是创新的解,例如非定常带激波的解,场协同传热解等。此外,这部分内容还给出了一些求解解析解的新方法与思路。

读者如果看过本书,也许会奇怪为什么所有论文的作者都没有吴仲华先生的名字。其实,不只是选出来的这几十篇论文,所有我公开发表的论文,没有一篇论文的作者署名中出现吴先生的名字。反过来,吴先生的所有论文作者中也没有我的名字。这是按吴先生的严格要求办的。早年他就对我说过,作为一篇论文的作者,应该是对该论文有重要或突出贡献的,我以后就完全照此办理,尤其不想让别人觉得我想让吴先生在论文上签名以提高身价。尽管如此,吴先生对我的研究工作仍旧多有指教,我也替他校阅过不少论文,甚或提点小建议,但习惯上都互不署名,最多在文后写上致谢的字样。唯一有一次互相认为都该署名的(包括其他同志的署名),但后来高层领导建议集中突出主要人物,于是署名也就只有吴先生一人。

最后自我评价:本书中既有一般而特色不甚明显的论文,也有一些有创见的著述。后者基本上都是对已有的成熟结论与权威说法,在有根据的情况下提出的异议。如果全无异议,何来创新?长江后浪推前浪,一浪更比一浪强。希望读者诸君,特别是年青学子们敢于创新、善于创新,有所发展、有所突破,不断超越前人。这也算是我的人生感悟吧。

蔡睿贤 谨识

2008年10月 于北京

# 目 录

|          |   |
|----------|---|
| 自序 ..... | I |
|----------|---|

## 第一部分 叶轮机械气动热力学

|                                                                                                             |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 小功率燃气透平转速的选择 .....                                                                                          | 2   |
| 平面叶栅的中心流线法解析解 .....                                                                                         | 7   |
| 静叶内围带对轴流式压气机气动性能的影响及 4500 马力机车燃气轮机的热力性能 .....                                                               | 36  |
| 燃气轮机起动与压气机低速特性 .....                                                                                        | 44  |
| Constraint on Design Parameters and Twist of $S_1$ Surfaces in Turbomachines .....                          | 48  |
| A Summary of Developments of the Mean-Streamline Method in China .....                                      | 55  |
| 校验叶轮机械三维数值解的某些解析解 .....                                                                                     | 68  |
| An Improved Simple Method for Designing Optimum Annular Diffusers .....                                     | 75  |
| 轴流式叶栅完全反问题工程解 .....                                                                                         | 87  |
| A Rapid Engineering Method for Solving Poisson Equation in A Doubly<br>Connected Region .....               | 93  |
| Basic Analysis of Counter-Rotating Turbines .....                                                           | 97  |
| 三对转涡轮及其基本分析 .....                                                                                           | 111 |
| 透平叶栅自动设计程序 .....                                                                                            | 117 |
| Discussion on “The Influence of Shrouded Stator Cavity Flows on Multistage<br>Compressor Performance” ..... | 121 |
| 有关对转涡轮基本设计与应用的进一步思考 .....                                                                                   | 123 |

## 第二部分 能源动力系统

|                                                                                                          |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 在燃烧室及后燃室中产生给定温度燃气所需燃料量的计算公式的讨论 .....                                                                     | 132 |
| 余热锅炉式燃气-蒸汽轮机联合循环近似热力学分析 .....                                                                            | 135 |
| Discussion on “Thermodynamic Availability and Its Application to Combined Heat<br>and Power Plant” ..... | 141 |
| 功热并供评价准则及燃气轮机功热并供基本分析 .....                                                                              | 143 |
| 甲醇燃料燃气轮机及其效率 .....                                                                                       | 148 |
| Comparison Method for Complex Cycle Analysis .....                                                       | 154 |

|                                                                                                                                      |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 燃气轮机回热循环新析·····                                                                                                                      | 164 |
| 余热锅炉变工况计算·····                                                                                                                       | 171 |
| Analysis of A Novel Hydrogen and Oxygen Combined Cycle ·····                                                                         | 176 |
| 工程热物理研究所建所以来热力循环分析研究工作综述·····                                                                                                        | 186 |
| The Basic Performance of Combined Cycles and Their Optimum Gas Turbine<br>Pressure Ratios ·····                                      | 197 |
| 涡扇发动机内外函回热分析·····                                                                                                                    | 209 |
| 论可再生能源动力装置的评价指标及优化方向·····                                                                                                            | 213 |
| Analytical Solutions and Typical Characteristics of Part-Load Performances of<br>Single Shaft Gas Turbine and Its Cogeneration ····· | 218 |
| 无补燃余热锅炉型联合循环性能的简捷估算方法·····                                                                                                           | 230 |
| 关于分布式能源系统的思考·····                                                                                                                    | 239 |
| Analysis of the Recuperative Gas Turbine Cycle with a Recuperator Located<br>between Turbines ·····                                  | 243 |
| An Advanced Zero Emission Power Cycle with Integrated Low Temperature<br>Thermal Energy ·····                                        | 257 |
| An Advanced Oxy-Fuel Power Cycle with High Efficiency ·····                                                                          | 271 |
| A Novel Hybrid Oxy-Fuel Power Cycle Utilizing Solar Thermal Energy ·····                                                             | 293 |
| A Proposed Scheme for Coal Fired Combined Cycle and Its Concise<br>Performance ·····                                                 | 307 |

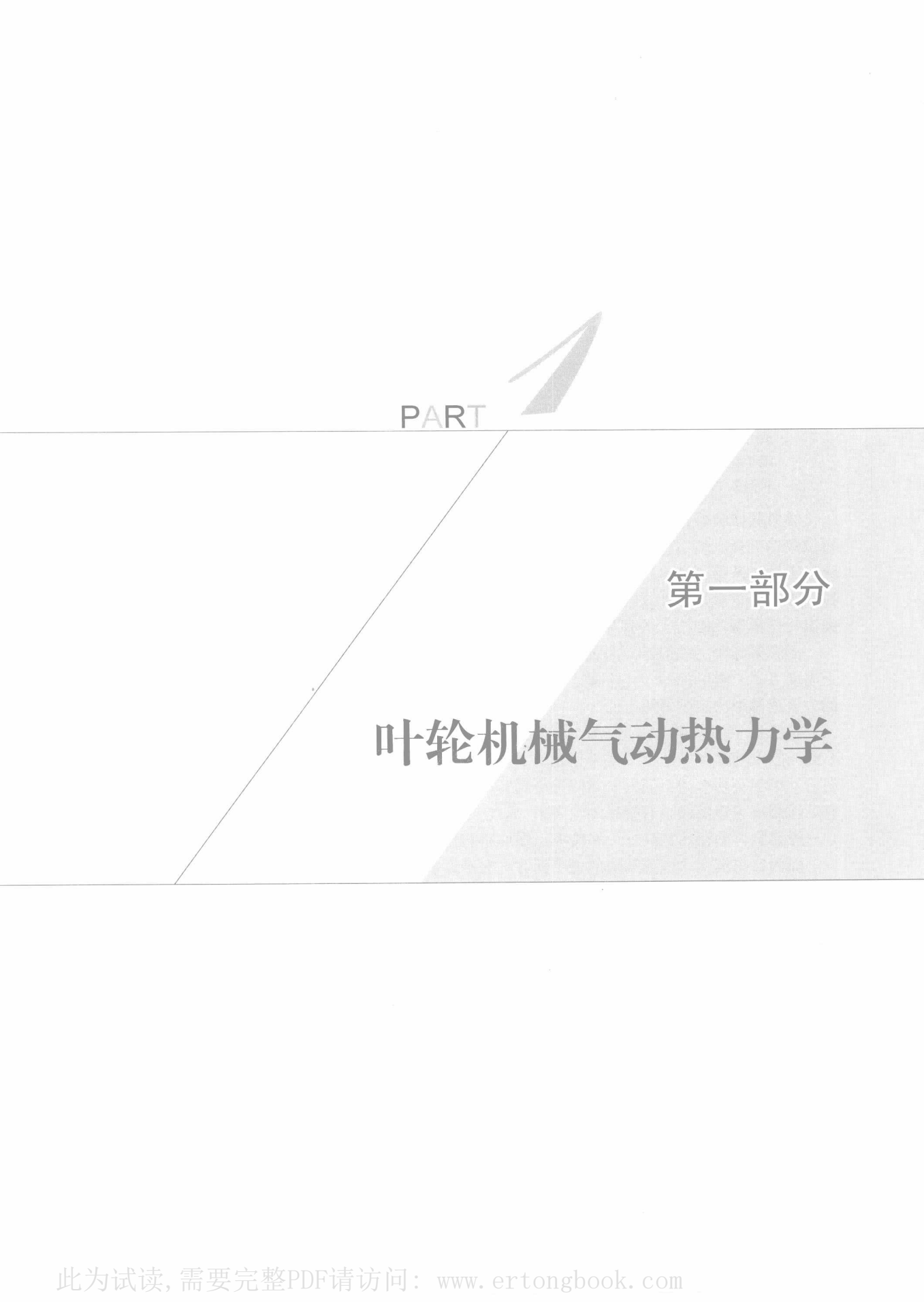
### 第三部分 严格简明解析解

|                                                                                                                       |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Unsteady One-Dimensional Analytical Solutions for Bioheat Transfer Equations ·····                                    | 320 |
| Explicit Analytical Solutions of Non-Fourier Heat Conduction Equation for<br>IC Chip ·····                            | 327 |
| Some Explicit Analytical Solutions of Unsteady Compressible Flow ·····                                                | 332 |
| 关于完全气体无粘可压流动的解析解·····                                                                                                 | 342 |
| One-Dimensional Algebraic Explicit Analytical Solutions of Unsteady Non-<br>Fourier Heat Conduction in a Sphere ····· | 347 |
| 非定常可压等熵流非线性方程显式解析解的推导·····                                                                                            | 353 |
| Explicit Analytical Wave Solutions of Unsteady 1D Ideal Gas Flow with Friction<br>and Heat Transfer ·····             | 359 |
| Some Algebraically Explicit Analytical Solutions of Unsteady Nonlinear Heat<br>Conduction ·····                       | 367 |
| 两相非定常流的一些显式解析解·····                                                                                                   | 373 |
| Explicit Analytical Solutions of the Anisotropic Brinkman Model for the Natural<br>Convection in Porous Media ·····   | 379 |
| Explicit Analytical Solutions of Incompressible Unsteady 2-D Laminar Flow                                             |     |

|                                                                                                                                 |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| with Heat Transfer .....                                                                                                        | 389 |
| Explicit Analytical Solutions of Linear and Nonlinear Interior Heat and Mass<br>Transfer Equation Sets for Drying Process ..... | 396 |
| Explicit Analytical Solutions of 2-D Laminar Natural Convection .....                                                           | 405 |
| Exact Solutions of Double Diffusive Convection in Cylindrical Coordinates<br>with $Le=1$ .....                                  | 412 |
| Algebraically Explicit Analytical Solutions of Unsteady 3-D Nonlinear Non-Fourier<br>(Hyperbolic) Heat Conduction .....         | 422 |
| Algebraically Explicit Analytical Solutions for the Unsteady Non-Newtonian<br>Swirling Flow in an Annular Pipe .....            | 429 |
| Discussion on the Convective Heat Transfer and Field Synergy Principle .....                                                    | 434 |

#### 第四部分 其 他

|                                      |     |
|--------------------------------------|-----|
| 红套加销钉盘鼓式等鼓径转子的简化强度计算方法及其计算结果分析 ..... | 452 |
| 应该由谁决定中国基础性研究的方向 .....               | 462 |
| 确定科研评价准则要万分慎重 .....                  | 464 |
| 后 记 .....                            | 466 |



PART

第一部分

# 叶轮机械气动热力学

# 小功率燃气透平轉速的選擇

蔡 睿 賢

(燃气輪機教研組)

## 提 要

本文敘述如何以氣體流動觀點來選擇燃气透平的轉速：一方面要保證透平級得到所希望的葉片高度，另一方面要保證透平級得到透平理論所指出的速度比。按照這些觀點推出選擇透平轉速的公式。這些公式特別適用於小功率的自由活塞式燃气輪機裝置及普通雙軸燃气輪機裝置中的“負荷透平”。

燃气輪機裝置是新型熱力發動機之一，它有著一系列的優點。在祖國大躍進聲中，有不少單位紛紛準備試制這種新型熱力機械。我校動力機械系燃气輪機教研組在 1958 年初也曾與天津動力機廠及中國科學院動力研究室合作設計製造小型自由活塞式燃气輪機，預定作為汽車拖拉機等的發動機用。在設計過程中，曾發現並研究了一些問題；現就其中的透平部分熱力計算提出一些經驗及總結，供有關方面參考。

對燃气透平的熱力計算而言，其所根據的給定參數一般為透平前氣體的滯止壓力  $p_0^*$ ，滯止溫度  $T_0^*$ ，透平背壓  $p_z$  與通過透平的氣體流量  $G$ 。其中  $p_0^*$ 、 $T_0^*$  及  $G$  均應先在整個裝置的方案選擇中決定設計值，而  $p_z$  一般即為大氣壓力。

在已知  $p_0^*$ 、 $T_0^*$ 、 $p_z$  及  $G$  值而着手設計透平時，如另已知透平設計轉速  $n$ （轉/分）（如一般大功率電站透平，透平轉速即為發電機轉速），即可按一般透平熱力計算方法與步驟進行。但對小功率透平而言，為使透平尺寸緊湊，同時要使透平中各級的速度比值恰當，葉片有足夠高度，以使透平有較高的內效率，常常是按透平的具體條件選擇對其最有利的轉速  $n$ （一般比負荷的轉速為高），然後再用變速箱將轉速變到輸出所需值。

而對自由活塞式燃气輪機的透平而言，它不象普通的燃气輪機裝置中那樣還要帶動本裝置的壓氣機，而一般是只拖動外界負荷，所以透平的轉速就有可能只按它本身所需要的來選擇。這是自由活塞式燃气輪機中的透平的設計特點。當然普通多軸燃气輪機裝置中如有不帶壓氣機的“負荷透平”，也可以如此考慮。而其它情況下的燃气透平一般還要直接帶動壓氣機，轉速的選擇除了透平本身外還要考慮到壓氣機的要求。

小功率的透平為使結構緊湊，級數均不會多，常常盡可能做成單級；而且以用單級徑流向心式透平比用軸流式更為合適（見圖 1 及圖 2）<sup>(4)</sup>。故本文先討論單級透平的轉速選擇。

小功率燃气透平選擇轉速時，在流動條件上首先要保證的是兩個方面：一方面是將來設計出的透平葉片要有足夠的高度；這在小功率也就是小流量的透平，而又要單級用去所有熱降，不是隨便能辦得到的。另一方面為了要保證透平有足夠高的內效率，必須使輪周綫速度與氣流速度之比達到透平理論所需的某一定值。前一方面為了要保證葉片有足夠的高度，在流量與其它參數為定值時，就要使葉輪直徑小到某一個數值。而在這個輪徑數值及一定的熱降數值下，

就會需要一定的轉速。在下面我們就將以這個觀點來定出選擇透平轉速的公式。當然，在最後定案時也要適當滿足強度、結構與工藝方面的要求。

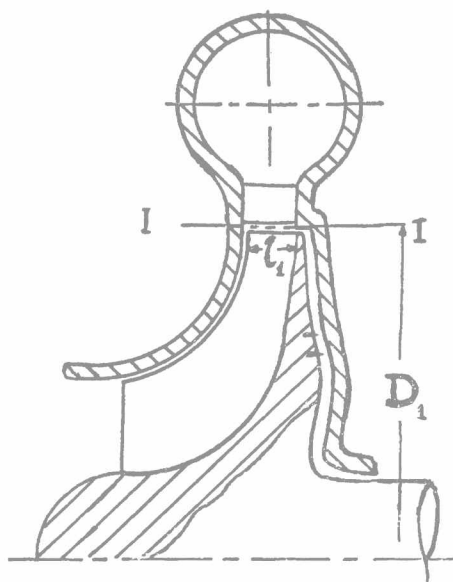


圖 1 單級向心式透平

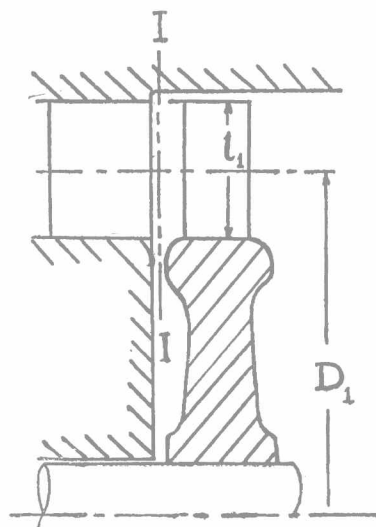


圖 2 單級軸流式透平

在計算時，根據我們的經驗發現：按透平初溫及等熵熱降大小而選擇好平均定壓比熱  $C_p$ ，然後將之視為常數（亦即比熱比值  $k$  為常數）以計算透平，與由精確的燃氣熱力性質圖表<sup>(8)</sup>所計算的比較，誤差很小。所以下面我們就按這比熱為常數的假設來推導公式。

推導是以一元流動方程對級中噴管與動葉中間隙的截面，也就是透平理論中通常所謂的 I—I 截面而進行的（見圖 1 及圖 2）。對向心式與軸流式透平可以用同樣方法推導，只是所用數值會不一樣。

首先，先按透平級熱降算出所需要的輪周速度（向心式）或輪級平均速度（軸流式） $u_1$ 。在透平理論中，常用的速度比是：

$$x_1 = \frac{u_1}{C_1} \dots\dots\dots (1)$$

$$x_a = \frac{u_1}{C_{ad}} \dots\dots\dots (2)$$

其中  $C_1$  及  $C_{ad}$  分別為在 I—I 截面上氣流的絕對速度及相應於總理想熱降的假想氣流速度；其公式分別可示如下<sup>(1)</sup>：

$$C_1 = \varphi \sqrt{2g \frac{k}{k-1} RT_0^* (1-\rho) \left[ 1 - \left( \frac{p_z}{p_0^*} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} \dots\dots\dots (3)$$

$$C_{ad} = \sqrt{2g \frac{k}{k-1} RT_0^* \left[ 1 - \left( \frac{p_z}{p_0^*} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} \dots\dots\dots (4)$$

其中  $\varphi$  為速度系數，可按噴管葉型選取，大致可取為 0.95； $g$  為重力加速度（9.81 公尺/秒<sup>2</sup>）；

$R$  為氣體常數，可取為 29.3 公斤-公尺/公斤-度； $\rho$  為所選擇的反動度，對向心式透平通常取約為 50%。又  $T_0^*$  要用絕對溫度作為量綱。

分別將 (8)、(4) 代入 (1)、(2)，即可得：

$$u_1 = x_1 \varphi \sqrt{2g \frac{k}{k-1} RT_0^* (1-\rho) \left[ 1 - \left( \frac{p_z}{p_0^*} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} \quad \dots\dots\dots(5)$$

及 
$$u_1 = x_a \sqrt{2g \frac{k}{k-1} RT_0^* \left[ 1 - \left( \frac{p_z}{p_0^*} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} \quad \dots\dots\dots(6)$$

其中  $x_1$  及  $x_a$  的值可按透平形式及反動度大小而選取。一般在向心式透平中可選取  $x_1 = \cos \alpha_1$  ( $\alpha_1$  為噴管出口氣流與輪周切向所夾的角) 以使葉輪葉片進口可為徑向以得較佳的強度條件；或可按經驗選取  $x_a = 0.6 \sim 0.7$ 。而在軸流級中  $x_1$  按級為反動式或沖動式而各選取為比  $\cos \alpha_1$  或  $\frac{\cos \alpha_1}{2}$  小一點的數值。

由公式 (5) 或 (6) 所得出的速度  $u_1$  值，可作為大致的轉子強度校核標準；由此可看出在所給定的透平設計熱降值下，能否以單級用去所有熱降。對於目前通用材料， $u_1$  值一般不宜大於 400 公尺/秒。如算出  $u_1$  值太大，那就或者要用多級透平；或者修改一下整個裝置的參數選擇，使壓比或初溫降低點；或者犧牲一點透平內效率，使所用  $x_1$  或  $x_a$  值比理想值降低點；這都要看具體情況而定。

如果條件滿足，可用單級透平， $u_1$  值已定，則可應用在 I—I 截面上的流量方程<sup>(1)</sup>：

$$l_1 = \frac{GRT_{1t}}{\mu\pi D_1 C_{1t} P_{1t} \sin \alpha_1} \quad \dots\dots\dots(7)$$

其中  $l_1$  與  $D_1$  值的意義可見圖 1 及圖 2， $p_{1t}$ 、 $T_{1t}$  與  $C_{1t}$  分別為假設噴管中為等熵流動時 I—I 截面上的氣流壓力（以後壓力均以公斤/公尺<sup>2</sup>計）、溫度與速度，它們與透平初參數有以下關係<sup>(1)</sup>：

$$\frac{T_{1t}}{P_{1t}} = \frac{T_0^*}{P_0^*} \left( \frac{T_0^*}{T_{1t}} \right)^{\frac{1}{k-1}} = \frac{T_0^*}{P_0^*} \left\{ \frac{1}{1 - (1-\rho) \left[ 1 - \left( \frac{p_z}{p_0^*} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} \right\}^{\frac{1}{k-1}} \quad \dots\dots\dots(8)$$

$$C_{1t} = \sqrt{2g \frac{k}{k-1} RT_0^* (1-\rho) \left[ 1 - \left( \frac{p_z}{p_0^*} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} = \frac{C_1}{\varphi} = \frac{u_1}{x_1 \varphi} \quad \dots\dots\dots(9)$$

$\mu$  為考慮到實際流動情況時的流量係數，對燃氣透平大致可取為 0.97。

我們如果要保證一定的葉片高度  $l_1$ （公尺），則把公式 (8)、(9) 代入 (7)，且注意到  $u_1 = \frac{\pi D_1 n}{60}$ ，經過簡單置換後，即可得：

$$n = \frac{60 \mu u_1^2 \sin \alpha_1}{R \varphi x_1} \cdot l_1 \cdot \frac{P_0^*}{G T_0^*} \left\{ 1 - (1-\rho) \left[ 1 - \left( \frac{p_z}{p_0^*} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \right\}^{\frac{1}{k-1}} \quad \dots\dots\dots(10)$$

這就是我們所需要的轉速  $n$ 。公式右方的各項或為給定值，或可容易地適當選擇。

假如我們要保證一定的  $l_1/D_1$ （這也是一個很重要的幾何參數），用同樣的公式經過另一置換，可得：

$$n = 60 \sqrt{\frac{\mu u_1^3 \sin \alpha_1}{\pi R x_1 \varphi} \cdot \frac{l_1}{D_1} \cdot \frac{P_0^*}{G T_0^*} \left\{ 1 - (1-\rho) \left[ 1 - \left( \frac{p_z}{p_0^*} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \right\}^{\frac{1}{k-1}}} \quad \dots\dots\dots(11)$$

這是我們所要的另一個公式。如以透平理論中的無因次參數表示，則可改寫為：

$$\frac{n D_1}{\sqrt{T_0^*}} = 60 \sqrt{\frac{\mu \sin \alpha_1 \left( \frac{u_1}{\sqrt{T_0^*}} \right)^8}{\pi R x_1 \varphi} \cdot \frac{l_1}{D_1} \cdot \frac{1}{\frac{G \sqrt{T_0^*}}{D_1^2 P_0^*}} \left\{ 1 - (1 - \rho) \left[ 1 - \left( \frac{P_z}{P_0^*} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \right\}^{\frac{1}{k-1}}} \quad \text{.....(11a)}$$

我們在以公式 (10) 或 (11) 求出所需要的  $n$  值後，即可以  $D_1 = \frac{60 u_1}{\pi n}$  式而求得  $D_1$ 。以後計算即可按通常辦法進行。而其實對單級透平而言，剩下的熱力計算也已不多。

我們合作設計的單級向心式透平，所選取的數值為

$$\begin{aligned} G &= 0.4 \text{ 公斤/秒,} \\ P_0^* &= 2.9 \text{ 大氣壓,} \\ T_0^* &= 652^\circ \text{K,} \\ P_z &= 1 \text{ 大氣壓,} \\ \alpha_1 &= 15^\circ, \\ k &= 1.37, \\ x_1 &= \cos \alpha_1, \\ \varphi &= 0.95, \\ R &= 29.28 \text{ 公斤-公尺/公斤一度,} \\ \rho &= 0.507, \\ \mu &= 0.97, \end{aligned}$$

所需保證的  $l_1$  為 7.75 公厘。用公式 (5) 與 (10) 算得  $u_1 = 379$  公尺/秒 與  $n = 5 \times 10^4$  轉/分。這與最初未用上述公式經過多次摸索，並用詳盡的熱力性質表所算得的  $u_1 = 379$  公尺/秒 與  $n = 4.9 \times 10^4$  轉/分 對比，可認為是在計算誤差之內的。

我們還可注意到 (10) 式中  $u_1$  值是取 (5) 式算得的值。如把 (5) 直接代入 (10)，可得：

$$n = 120 \sin \alpha_1 \cdot x_1 \mu g_{\frac{k}{k-1}} \varphi (1 - \rho) \left[ 1 - \left( \frac{P_z}{P_0^*} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \left\{ 1 - (1 - \rho) \left[ 1 - \left( \frac{P_z}{P_0^*} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \right\}^{\frac{1}{k-1}} P_0^* l_1 \cdot \frac{1}{G} \quad \text{.....(12)}$$

如果估計到大致強度不成問題，那麼就可以不必先算公式 (5) 而直接用公式 (12) 算出  $n$ 。值得注意的是這時 (保證一定的  $l_1$  值)  $n$  的絕對值與  $T_0^*$  無關。當然將 (5) 代入 (11)，也可得與 (12) 相類似的式子。但此時 (要保證一定的  $l_1/D_1$  值) 的  $n$  仍與  $T_0^*$  有關。

上面所推公式是適用於採取  $x_1$  為速度比的情況下計算。如採用  $x_a$  為速度比，當然也可以推出類似式子。但一般習慣用  $x_a$  的較少，且因篇幅關係，不再推導。另外附帶值得提一下的是前面各公式中的  $\left[ 1 - \left( \frac{P_z}{P_0^*} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]$  項，對某一些  $k$  值有些參考文獻<sup>(2)</sup> 中有表可查，不必自己計算。

以上公式均對單級透平而言。正如前面已述：當透平熱降較大時，即要選用多級透平。另外如選出轉速太大，減速或軸承有問題時也會因之而改用多級。但如我們按另外的辦法選擇好

級數，分配好熱降<sup>(2)</sup>（因燃氣透平一般壓比不大，這個步驟並不困難），則第一級熱降為已知，也就可以應用上面的公式（5）、（10）、（11）或（12）以決定所需轉速。當然其中方程右面的參數均為第一級所用數值；而  $p_z$  則為第一級後的壓力（由分配熱降可得其大小）。

因此本文所述選擇轉速的公式，不僅適用於小功率自由活塞式燃氣透平，而且也完全適用於其它一些可按透平自己需要而選擇透平轉速的情況；還可以供一般燃氣輪機裝置選擇轉速時參考。它將可以加速燃氣透平的初步試算工作。不過應指出的是這兒只是從流動觀點來看轉速的選擇；而透平機械轉速的最後肯定，還與其它一些因素有關，如變速箱、軸承的制造與運轉因素等。

又所推出的公式右端，除  $p_0^*$ ， $T_0^*$ ， $G$  等項外，其它均可以用常用值代入，這樣即可得一最初步估計的簡便公式。曾用之以估算英國 Budworth 廠的向心式透平，所得結果極近於實際採用值。又對這簡便公式如建造好圖表來代替計算，那就更為方便了。

## 参 考 文 献

- （1）А. В. Щегляев, “Паровые Турбины”, Госэнергоиздат, Москва, 1955.
- （2）Б. С. Стечкин и др., “Теория реактивных двигателей”, Оборонгиз, Москва, 1956.
- （3）吳仲華, “燃氣的熱力性質表”, 北京, 科學出版社, 1957。
- （4）H. R. Cox, “Gas Turbine Principles and Practice”, Newnes, London, 1955.

## Определение числа оборотов газовых турбин малой мощности

Цай Руй-сен

В статье излагается, как выбирать число оборотов газовых турбин с точки зрения течения газа. С одной стороны необходимо обеспечить получение желаемой высоты лопаток, с другой стороны — заданного теорией турбин соотношения скорости. С этих точек зрения можно выводить формулы для выбора числа оборотов. Полученные формулы выгоднее применять к турбине газотурбинных установок с СПДГ и силовой турбине двухвальных ГТУ малой мощности.

# 平面叶栅的中心流线法解析解<sup>①</sup>

## ——中心流线法的某些发展(一)

**提 要** 本文提出了中心流线法的一个改进措施——采用解析解。这样可以使得计算比以前大大加快而又同时提高了计算的精确度。在文中给出了简便的计算公式和便于计算用的函数表以及计算示例。为了方便设计,文中还初步分析了如何选用设计参量以得到所希望的透平叶型。利用这些办法与资料,就可以在一天左右的时间设计出良好的可压流动中的透平叶栅(如果只要计算不可压流动,计算速度还可以增快几倍)。本文最后还给出与实验数据的比较及提出了进一步发展中心流线法的若干可能方向。

### 符 号

$A$   $\beta$  的三角函数

$a$  叶片间流道的出口喉部宽度

$B$   $\beta$  的三角函数,或叶片的  $Z$  向宽度

$b$  叶片弦长

$C$   $\beta$  的三角函数

$c_p$  气体的定压比热

$D$  叶片间流道的内接圆直径

$G$   $\beta$  的三角函数

$H$   $\beta$  的三角函数

$i$  气体的焓

$l$  叶片表面或叶片表面的弧长

$M$  气流的马氏数

$n$  叶片  $y$  向厚度最大处离前缘的  $z$  向距离

$P$   $\beta$  的三角函数

$p$  气体的压强

$q$  任意物理量

$R$  气体常数

$r$  半径

$T$   $\beta$  的三角函数

$t$  叶栅的栅距

$W$  气流速度

$y$  坐标向(叶栅额线的方向)

$z$  坐标向(透平机械的轴向)

$\Delta y$  中心流线与叶片表面间的  $y$  向距离绝对值

$\beta$  角度(自  $z$  坐标起算,反时针向为正)

$\delta$  叶片各处的  $y$  向厚度

$\gamma$  气体的比热比

$\eta$  常数

$\lambda$  常数;或除以临界速度的气流速度值,即速度系数

$\theta$  常数

$\rho$  气体的密度

$\omega$  函数

### 上 标

$*$  相对值(除以进口参数)

$'$  对  $z$  的导数

$\cdot$  叶栅后额线处参数

### 下 标

$0$  滞止值

$1, 2, 3, \dots, n$  不同的函数或常数

<sup>①</sup> 本文曾在 1965 年 8 月全国第一届工程热物理学术会议上宣读;作者:蔡睿贤。本文发表于《机械工程学报》,1966,14(1):17~49。