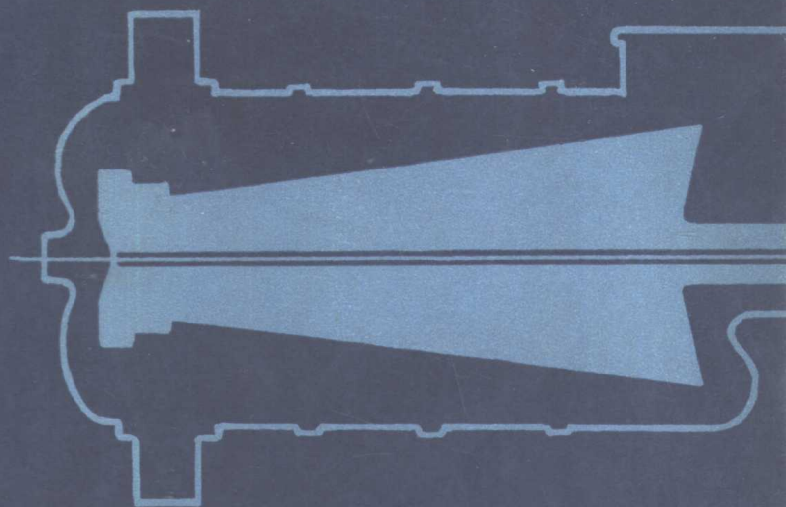


基本负荷和调峰运行 透平装置的 热状态问题

〔苏〕Д. А. 别列维尔捷夫著



机械工业出版社

基本负荷和调峰运行透平 装置的热状态问题

【苏】Д.А. 别列维尔捷夫 著

王玉蓉 译

周海澜 校



机械工业出版社

前 言

我国^①大量能源的开发，在很大程度上是与综合性地解决提高蒸汽轮机、燃气轮机的功率、经济性、可靠性、机动性和持久性等方面存在的问题有关。蒸汽轮机和燃气轮机是热电站中燃用有机燃料和核燃料的主要原动机，由这些原动机发出之电能占总发电量的80~85%。

制造高效能的透平装置，要求在科学研究——设计——制造——运行等整个周期的各个环节中，不断地完善形成透平装置结构的手段。这要看透平的类型和周期中各环节上研制方法的熟练程度；其中改进装置结构的主要潜力，有时候可能包含在这一环节中，有时候也可能包含在另一个环节中，或者包含在某几个环节之中^[247, 253]。

在现代动力透平制造业中，最重要的是科学研究及设计这两个环节。大功率蒸汽轮机装置是高超的（就功率、强度、尺寸等方面而言）工业技术的产物。有时候一台装置的价格可与整个制造厂的投资相比拟，同时，试验样机的调试要耗费巨大的经费，因而提高了科学研究和设计这两个环节在整个研制周期中的作用。

透平装置的设计总体系是建立在综合求解透平机械元件中相互有约束和相互有联系的力学问题的基础上的。在该体系内求解热状态和热保护问题，对选择材料、确定部套的结构以及装置在电厂中可靠而又经济地运行等方面问题起着重

① 指苏联。——译者注

要的作用。

在50年代末期到60年代末期，由于显著地提高了蒸汽参数（为了提高透平装置的经济性和基本负荷的极限功率：最高功率可达500~800MW以及1200MW）并为了在实际运行中掌握这些机组，求解热状态问题在透平制造业面前被尖锐地提出来了。在那时期，提高蒸汽初参数是指把参数提高到30MPa和650℃。为此，在这样的参数条件下，研究元件的稳态温度场以及在此基础上研制透平前面高温部件的冷却系统，及使用已经掌握的材料来制造透平等这些问题给予了极大的注意^[184~186, 248]。

国内外的经验表明，现有的工业技术发展水平还不可能制造出经济性能良好的、蒸汽初温高于580℃的透平装置。所以我国^①的动力工业目前暂时还将蒸汽初温限制在540~560℃（最大压力为23~26MPa情况下）。这一温度是利用成熟的珠光体钢的极限值。

随着电网容量的迅速发展和增长以及昼夜间、一周内和年度内电力需求不均匀性的增大，对透平装置的机动性要求也日益提高^[9, 48, 88, 119, 180, 181, 195]。（在确保零部件必要的可靠性和使用寿命的情况下，缩短起动时间和停机时间；迅速改变工况；包括甩负荷在内，扩大可调范围，提高低负荷工况下装置的经济性等等）。

过渡工况运行时产生的透平元件不稳定热状态问题，在很大程度上决定了透平装置的寿命和可靠性^[58, 88, 195]。因此对这一问题的研究极为重视。现在越来越多地对蒸汽初温为520~540℃的透平装置中的关键部件进行冷却，这样可使蠕

① 指苏联。——译者注

变和低周疲劳对其在尖峰运行和调峰运行时的工作能力和寿命的不良影响降到最小(甚至可以完全消除)。

可靠的透平元件热状态方面的技术资料可使装置在各种热状态下按最佳方案起动,这就提高了透平的机动性。如果再考虑到现代动力工业具有的宏伟规模,则就可保障有巨大的经济效益。因此,大功率蒸汽轮机装置的机动性就成为一个重要的技术经济指标。

动力工业发展状况的预测表明:(考虑到有限的煤、石油和天然气的储藏量以及用它们作为化工原料的趋势)到2000年,占总发电量50%以上的电能将由原子能电站来提供^[266,267]。这些原子能电站主要承担基本负荷,那时所有其它类型的大功率电站(燃用有机燃料的电站、水电站、蓄能水电站等)已将不足以覆盖统一电网负荷分配图上的变负荷部分的负载,某些原子能电站亦将在部分负荷工况条件下运行^[108]。因此,对各种类型蒸汽轮机装置(无论是国营州立电站,还是原子能电站)的机动性都将提出越来越高的要求。

长期来,有关各部门(电力工业部、研究单位、制造厂、电站等等)为了制造承担覆盖半尖峰负载的调峰运行机组而进行了探讨^[9,48,78,110,181,195,216]。有一种意见认为必须要有专用的机组,这一专用机组具有亚临界蒸汽参数(采用塑性珠光体钢,减少设备壁厚)、汽包锅炉、滑压节流调节、高级级燃料(天然气或重油)及不会沉析出氧化铁的冷凝器的清洗系统等。然而,这种类型的机组从开始设计、制造到大批量投入运行,至少还需要十年左右的时间。在这一时间内,向苏联提供发电设备的设计思想基本上还是承担基本负荷的。

正像已指出的那样，在不久的将来所有燃用有机燃料（包括一部分核电站）的机组必然要在负荷分配图中的变负荷部分运行，因此，制造专用的低蒸汽参数调峰机组也不解决问题。虽然这些燃用有机燃料的机组在一年中运行的时间不到4000~4500h，但其在主要调峰工况运行时的经济性大体应与承担基本负荷的机组相同。由于这些因素，解决提高大功率透平装置的机动性问题从设计开始就成为特别迫切需要解决的一个问题，当然，为了相同的目的，还要对已安装的和已制造出来的机组进行改进。但至今为止，这些问题通常是在机组的调试和运行阶段来解决，因此，就需要额外地花费大量资金，并且常常又不能得到令人满意的效果。

考虑到解决提高机动性问题必须在设计——调试——运行周期的各个环节中进行，故在本文中推荐了各种数学模型的综合结构。并在此基础上建立了可在电子数字计算机上自动求解透平机械热状态问题的统一体系（第一章）。

建立和应用统一体系，就能精确地安排透平装置热状态问题范围内的主要工作。这一热状态问题是发生在承担基本负载和调峰运行的大功率透平装置的设计和运行阶段。从这样的观点出发，提出并解决控制透平机械零部件热状态、不稳定热交换、热传导等迫切问题（第二章~第五章）。

在第二章和第三章里，叙述了在蒸汽轮机和燃气轮机中如何确定单相和两相热交换以及不稳定温度场边界条件的办法。

第四章里，探讨了本书中叙述的一些主要问题，这里，提出并解决了在零件承受最大热应力和转子相对热膨胀的约束下控制透平机械最佳热状态的问题。这些问题求解的结果是应得到承受最大热应力零件的主要几何尺寸和工作介质参

数随时间变化的规律。这些尺寸和介质参数确保了必要的
(至少是要达到的)透平装置机动性的指标。

根据所得到的求解方法,详细拟定了由各种模型组成的透平机械热状态问题自动化求解体系的枢纽方框图,并使之实现。建立和实施自动化求解体系的主要子系统,其目的是求解最佳起动工况,并确定转子的相对膨胀和详细分析透平机械的温度场(第五章)。

借助这些模型和子系统,对300MW K-300-240型和500MW K-500-240型汽轮机进行了大量的研究。这些研究表明:由于起动工况时间的缩短,可极大地提高这些透平的机动性,也指出了大功率蒸汽轮机装置在设计阶段以及完善已有的大功率蒸汽轮机装置的过程中提高机动性的现实途径(第六章)。

译者的话

本书是苏联乌克兰科学院机械制造研究所与哈尔科夫、轮机制造厂在共同开发大功率蒸汽轮机的过程中，对大功率蒸汽轮机在调峰运行时遇到的各类问题进行了大量工作之后所取得的科研成果。同时，本书又系统地论述了蒸汽轮机调峰运行性能的各种要素，以及求出蒸汽轮机最佳结构的设计方法和最佳起动工况，以改善和提高蒸汽轮机的可靠性和调峰性能。书中所推荐的数学模型和在电子计算机上的具体求解方法，以及提高蒸汽轮机调峰能力的一些措施可以应用于实践中。

本书概括了20世纪60年代到70年代末这段期间苏联在提高蒸汽轮机调峰能力方面的成果。但由于在80年代电子计算机技术，特别是应用软件得到了迅猛发展，因此可借助于这些新技术在较短的运算时间内获得更精确的结果，以进一步提高蒸汽轮机的调峰性能。即使如此，书中所提供的数学模型仍然是有效的，可以继续参考和使用。

如果本书的出版对从事蒸汽轮机设计和运行的工程技术人员有所收益的话，校译者感到十分欣慰，这也是我们的愿望。

目 录

前言

符号说明

第一章 动力透平装置热状态问题的解法 1

一、研究透平机械热状态问题的方法及其发展 1

二、透平在最佳起动工况条件下求解零件热状态问题的方法 ... 6

三、一般的设计体系中透平机械热状态问题的自动化求解 13

第二章 解透平机械元件不稳定热状态问题时确定热交

换边界条件的方法 21

一、透平过渡工况的热交换边界条件 21

二、用过热蒸汽加热透平装置时的二相不稳定热交换的计算 ... 27

三、在复杂的分支元件和组合元件中不稳定热交换总特性的求解方法 36

第三章 求解透平零件中不稳定热传导问题的解析法和

有限差分法 47

一、求解圆柱体壁面不稳定热传导问题的解析法 47

二、有限长空心圆柱体二元不稳定热传导问题的解析解 54

三、有限差分法解一元不稳定热传导问题 56

四、有限差分法解二元不稳定热传导问题 62

五、单元热平衡方法 72

第四章 在不同的约束条件下透平机械热状态最佳控制

问题 80

一、透平机械热状态最佳控制问题的提出 及其求解方法 80

二、当具有最大热应力状态的零部件加上热应力约束 时的求解方法 94

三、转子受相对热膨胀约束时问题的求解	111
四、在同时给定零件的热应力和转子相对热膨胀约束条件下问题的求解	134
第五章 自动求解透平机械热状态问题的数学模型和子系统	149
一、汽缸和转子的热状态模型	149
二、起动工况最佳化的子系统	160
三、确定转子不稳定相对热膨胀的子系统	164
第六章 开发提高大功率蒸汽透平装置机动性潜力的研究	170
一、透平装置从各种不同热状态起动时新蒸汽管路的加热	170
二、在解热传导正命题的基础上选择蒸汽透平的法兰连接结构和合理的起动工况	177
三、在求解控制透平热状态问题的基础上起动工况的最佳化	184
四、挖掘提高大功率透平装置机动性潜力的途径	193
参考文献	196

第一章 动力透平装置热状态问题的解法

一、研究透平机械热状态问题的方法及其发展

50~60年代,为了研制和掌握高温燃气轮机以及功率分别为100、200、300、500、800MW的亚临界及超临界参数的蒸汽轮机,在轮机制造业面前提出了透平机械元件热状态分析结果的应用和研究这一问题。目前,正在利用各种方法和手段进行此项研究工作。

分析任意几何形状的固态物体热状态问题,主要在于求解热传导微分方程,

$$c\rho\frac{\partial t}{\partial \tau} = \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} t) \quad (1-1)$$

此方程考虑了 λ 、 c 、 ρ 随温度和坐标的变化关系(非线性问题),并在给定的边缘条件(初始条件和边界条件)下求解^[47, 61, 86, 100]。

透平机械元件温度场的计算主要是在第三类边界条件下进行的,即已知介质温度 t_0 及其与物体表面(Π)热交换的规律(放热系数 α)。

$$-\lambda\left(\frac{\partial t}{\partial n}\right)_n = \alpha(t_0 - t_n) \quad (1-2)$$

式中 n ——垂直于表面的法线;

t_n ——物体表面的温度。

在圆柱形坐标下(在分析透平机械元件时它是最方便的坐标)方程式(1-1)变换成下列形式,

$$c\rho \frac{\partial t}{\partial \tau} = \lambda \nabla^2 t + \frac{\partial \lambda}{\partial r} \frac{\partial t}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial \lambda}{\partial \varphi} \frac{\partial t}{\partial \varphi} + \frac{\partial \lambda}{\partial z} \frac{\partial t}{\partial z} \quad (1-3)$$

$$\text{或 } c\rho \frac{\partial t}{\partial \tau} = \lambda \nabla^2 t + \frac{\partial \lambda}{\partial t} \left[\left(\frac{\partial t}{\partial r} \right)^2 + \frac{1}{r^2} \left(\frac{\partial t}{\partial \varphi} \right)^2 + \left(\frac{\partial t}{\partial z} \right)^2 \right] \quad (1-4)$$

该方程附带的边界条件是方程式(1-2)，而初始条件为

$$t(r, \varphi, z, 0) = f(r, \varphi, z)$$

式中 $t = t(r, \varphi, z, \tau)$

$$\nabla^2 t = \frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 t}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2}$$

如果忽略热传导系数随温度的变化关系 $\left(\frac{\partial \lambda}{\partial t} = 0 \right)$ ，则

由方程式(1-4)可得

$$c\rho \frac{\partial t}{\partial \tau} = \lambda \nabla^2 t \quad (1-5)$$

这一表达式在文献中称之为不稳定热传导方程。

方程式(1-1)~(1-4)中，如果 λ 、 c 和 ρ 与温度无关，则成为线性微分方程。

应注意，透平材料的热传导系数 λ 随温度 t 的变化很小，当热物理的特征值(平均值)为恒定时，或者在计算过程中对它进行逐步修正时，就可以利用方程(1-5)来计算透平机械元件的温度场。根据文献[195]和我们的数据，对于所研究的对象来说，这种方案计算的结果与非线性方程计算的结果相比，其误差不超过最高温度的1.5~2%。

确定温度场的实用方法有：理论解析法、水模拟和电模拟方法、有限差分数解方法、热(物理)模型的试验研究和在实际运行条件下的实物试验等方法。每种方法都各有优缺点

点,采用哪种方法往往与研究者所拥有的试验研究设施有关。然而,所积累的经验表明,为了得到可靠的技术资料,必须综合地进行上面提到的各种方法。

一般说来,理论解析法是最为基本的方法,它可在简化的情况下完成对热状态的初始理论分析(有时候也是最终的分析)^[110、184]。在开始进行结构设计时,这种方法可以有效地解决许多设计问题。理论解析法可以从所有的准则中挑选出有决定性的准则。这样,在采用物理模拟和数值解等研究方法时工作量可大大地减少。最后,最重要的作用是它能对模拟和数值解的研究方法进行监控。

为了得到理论解析的关系式,采用了分离变数、积分变换和源泉法等各种方法^[110、184、189],下面将举一些具体例题来说明某些方法之应用。

理论解析关系一般是线性热传导方程求解的结果,主要是针对那些具有不太复杂的热交换边界条件的典型物体(半球体、圆柱体、薄板等)。由于透平机械元件的形状很复杂,所以在全面分析透平机械主要元件(转子和汽缸)热状态中,该方法的使用受到了限制。但是理论解析法仍然起着标准解决方法的作用。

专业研究所和各部门组织(中央透平锅炉研究所,全苏热工研究所、苏联国家州立电站电网组织和合理化公司)、大学(莫斯科动力学院、哈尔科夫工学院、列宁格勒工学院、伊万诺夫斯基动力学院)、科学研究院(乌克兰科学院工程热物理研究所、乌克兰科学院力学研究所、乌克兰科学院机械制造研究所、苏联科学院高温研究所)和制造厂(哈尔科夫透平工厂、列宁格勒金属工厂、乌拉尔透平工厂)都对解决透平机械热状态问题做出了很大的贡献,有很多课题

是由上面一些组织联合解决的。

在这些单位里，科斯丘克^[82, 83]、施韦茨、迪巴和费道洛夫^[236, 237]、科兹道巴^[75, 77]、塞莱兹涅夫^[106, 107]、兹西娜-莫劳任^[46, 47]、卡伯诺斯^[62 ~ 67]、马采维特^[117]、伊里琴柯^[54 ~ 58]、萨风诺夫^[106]等学者做了大量的和有影响的工作。

这些著作中用模拟方法求解透平机械元件热状态问题占了绝大部分。尽管电子数字计算机已广泛普及，但在此领域中模拟装置（特别是电模拟）目前还能和通用电子数字计算机进行竞争，其原因是缺乏好的求解复杂几何形状固态物体热传导方程的计算程序，并且需要较长的时间来编制这些程序；当电子计算机更新换代时，必须重新编制程序（直到现在为止，电子计算机尚处在发展之中）；此外，当程序编制者对电子计算机不熟悉时，还存在着运行系统的操纵问题等等。专用模拟计算机一般来说使用范围较窄，完全可由提出和求解具体任务的研究者所掌握。

但是，电子计算机将能更有效地缩短设计周期和完善设计过程，上述一些缺点将会得到克服。因此在计算机上利用有限差分法来解热状态方程是很有前途的，这是由于它可以获得必需的全部技术资料并可以转化成便于实用的形式。也就是说，全部计算过程都已完全自动化，有时候甚至可以通过计算机来作出决断（例如选择最佳起动工况）。

在计算机上用有限差分法计算温度场具有通用和简易的特点，其实质是用近似差分方程来代替微分方程，把解边界条件的问题变成解代数方程组。求解的结果，通常要与其它更为精确的（标准的）方法所得的结果相比较或者与实物试验相比较，再对其可靠性作出评价。

通常分析的是原始微分方程式的显式或隐式的有限差分近似法。

用显式有限差分近似法来解题是比较简单的，因为区域内任一点的温度可单纯地由前面的一个时间间隔的温度来确定。但是为了得到稳定解，时间间隔和几何间隔之间必须服从一定的关系^[21, 110, 237]

$$\Delta\tau = k_{T,r} (\Delta h)^2 \quad (1-6)$$

式中 $\Delta\tau$ ——时间间隔，

Δh ——几何形状间隔，

$k_{T,r}$ ——系数，取决于被研究区间的热物理特性和几何特性。

由此式可看出，在网格划得比较稠密的情况下（例如为了使计算结果精度更高），时间间隔就会显著地缩短，随之而来的是明显地增加了计算工作量。因此，有时候采用显式有限差分近似法来解方程就变得十分繁复了。

绝对稳定的有限差分法就没有这个缺点。此时，在选择时间间隔时可与几何间隔无关^[84, 110, 188~191]。但是，与显式有限差分近似法不同的是每个时间间隔都必须解方程组，而方程的阶数取决于网格结点数。因此，要求计算机有很大的存贮量。

在一元问题情况下得到的方程是具有特殊的三对角线形式，很容易用追赶法来求解。这是消除未知数方法中的一种方法^[34, 110]。

在二元和三元问题的情况下，已不直接采用追赶法了，因为得到的有限差分方程组已不具有三对角线形式。然而，实际上在许多重要情况下复杂的方程可以分解成较为简单的方程，从而再连续地用追赶法来求解^[189, 190]。

目前,在求解具有复杂边界条件的不稳定热传导的问题时,已开始采用结构分析方法^[176~179,201]和有限元法^[251,252,253]。但是,就数学转换的简易程度和计算费用来说,暂时还不能和有限差分法相比。在分析单一零件时(如作为整体的转子和汽缸的稳定热状态,或其在最大不均匀温度场情况下的应力)这一方法可能是适用的。针对蒸汽轮机元件热传导的特点,首先应推荐那些能考虑复杂的热交换边界条件和被研究区域的几何形状能相当好地逼近原始边界条件并能绝对稳定且很简易地在计算机上进行计算的方法。上面提到的分解多元的那一种方法在许多方面能满足这些要求。本文(第三章~第五章)将要阐述某些方法。单元热平衡法也有不少优点^[21,237],它把物体任意分割成单元,得到必要的代数方程组,并且计算出具有复杂边界条件物体的不稳定温度场(按实际所需要的精度),而不用求解热传导微分方程。

研究透平机械中具有复杂形状的主要零部件的热状态及热应力方面的资料虽然每年都有所增加,但仍是不够的。不断地补充这方面的资料,有助于设计和科研人员更好地解决在制造和掌握大功率透平机组中不可避免地出现的一些复杂问题。在这样的情况下,必须力求做到合理地组合及协调所有可能应用的设计研究方法(理论解析法、模拟法、有限差分数值计算、物理模型和实物试验等方法)。

二、透平在最佳起动工况条件下求解零件热状态问题的方法

分析表明:在解决提高透平机组的机动性问题时,大量的科研工作在于求解透平装置的最佳起动工况(为了提高机

组机动性，就提出了最佳起动工况问题)。透平的最佳起动工况通常可以理解成：确定在最短时间内完成启动和加载的条件。

自然，通过选择适当的结构和运行工况这两个措施，可以实现透平装置的最佳起动工况。

解决这一复杂问题的最有效的方法乃是建立在现代高速计算机基础上的数学模型方法。数学模型可以看作是描绘该过程的各种方程式以及相互间的关系、公式和表格的总和。同时，它也应该满足决定这一过程参数的不等式和约束条件^[20, 254]。为了使这一模型得到实现，就必须编制模型算法，即把各个子模型按照逻辑关系归纳整理，最后形成能在计算机中进行计算的数学模型，例如快速计算机上的程序。

最佳起动工况的数学模型可看作是相互间有联系和有约束的体系（透平装置元件的不稳定对流热交换、不稳定热传导、热弹性、热塑性、低周热疲劳等等），这些问题的联解是十分复杂的，甚至在利用现代先进的大容量计算技术条件下也是如此。

然而，经验表明：可以建立分阶段性的模型，这样就可以显著地简化求解所提出的问题。对蒸汽轮机而言，没有必要考虑相邻边界上的不稳定热交换问题。若考虑这一问题，就要求解液体中热量的对流传递和固体中热传导方程。以后的叙述将表明：在对流层中不稳定效应将很快地消失，于是热传导问题就转化成具有第三类边界条件的问题^[142, 144]。此时，热交换系数可以认为是准稳定的。此外，蒸汽轮机装置元件（很少有例外）具有下面的工作性质，即元件的形变对热状态的影响是很微小的。因此，在热传导微分方程中忽略与力学有关系的项^[16, 208]，使上述相互间有联系有约束的体