

高等学校教材

汽轮机最优经济运行

华中理工大学 翦天聪 编

水利电力出版社

内 容 提 要

本书着重阐述运用数学规划方法求解汽轮发电机组最优经济运行问题。主要内容：拟定汽轮机经济运行问题的目标函数、数学模型和约束条件；介绍线性规划、非线性规划和动态规划的方法；汽轮机技术经济指标的实时计算；凝汽器与循环水系统的优化；变压运行时最优初压的确定和汽轮发电机组间最优负荷分配；汽轮机优化运行的自适应控制等。

本书为高等学校电厂热能动力专业研究生的教材，也可供有关工程技术人员使用。

高等学校教材

汽轮机最优经济运行

华中理工大学 葛天聪 编

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 11印张 247千字

1989年10月第一版 1989年10月北京第一次印刷

印数 0001—1540 册

ISBN 7-120-00760-2/TK·139

定价2.25元

前 言

本书是按照高等学校电厂热能动力专业培训研究生的教学要求,并结合科学研究课题的实践过程写成的。

为了适应我国国民经济建设的需要,全国各地建起了大批火力发电厂,火力发电也就成为我国电力事业上的一支主力军。机组运行的安全性和经济性,直接影响到人民的生产和生活,因此,日益受到人们的重视。过去科技人员在这方面曾经做了大量的工作,如对机组容量和工质初参数的选择,主机、辅机和热力系统运行方式,机组运行和管理的优化等方面,都进行了实验和研究,增强了机组的安全可靠性,提高了机组的经济效益。由于近几十年来数学规划方法已在各个学术领域内得到推广和应用,因此本书主要内容是探讨如何运用数学规划方法解决汽轮机组经济运行的最优化问题。书中着重介绍了数学规划的基本知识和一些比较普通的或行之有效的算法及其应用,并把这些方法与汽轮机的主要经济运行问题结合起来。

本书共分十章。第一、二章介绍如何运用数学规划方法解汽轮机经济运行问题的可能性,并介绍拟定目标函数和数学模型的方法。第三章至第五章介绍线性规划、非线性规划和动态规划的基本概念和方法。第六章介绍衡量汽轮机经济性的主要技术经济指标的实时计算。第七章至第九章介绍数学规划方法在循环水系统、机组变压运行和机组间负荷分配等问题中优化的应用。第十章介绍汽轮机优化运行的自适应控制。

本书可作为高等学校电厂热能动力专业研究生的教材,也可以供有关工程技术人员使用。

本书由河北电力学院研究生部张保衡教授主审,并得到华中理工大学参加汽轮机经济运行研究课题的教师和研究生的帮助,及有关的技术人员的支持,谨在此表示衷心感谢!

由于作者水平有限,不当之处,在所难免,热诚地希望读者指正。

翦 天 聪

一九八八年五月

1988-5-1

目 录

前 言

第一章 汽轮发电机组的经济运行	1
第一节 改善汽轮发电机组经济性的途径	1
第二节 运用数学规划的方法指导汽轮机经济运行	4
第三节 几种常见的最优化问题	6
第二章 目标函数和约束条件	8
第一节 汽轮机优化运行中常用的目标函数	8
第二节 拟定对象数学模型的方法	9
第三节 把理论公式转化为线性稳态模型	12
第四节 稳态模型的统计方法	13
第五节 线性回归的校验方法	18
第六节 制定汽轮发电机组数学模型的基本方程	22
第七节 汽轮发电机组主要环节的数学模型	25
第八节 对状态变量和控制量的约束	27
第三章 线性规划问题	29
第一节 线性规划问题的标准型	29
第二节 线性规划的基本性质	30
第三节 单纯形法	32
第四节 修正单纯形法	39
第五节 参数变化对线性规划的影响	48
第四章 非线性规划问题	56
第一节 非线性规划问题的一般概念	56
第二节 用导数求无约束极小化问题的方法	60
第三节 不用导数求无约束极小化问题的方法	70
第四节 有约束的非线性规划方法	76
第五章 动态规划问题	85
第一节 贝尔曼最优决策	85
第二节 间断性函数的动态规划	89
第三节 马尔科夫连锁	92
第四节 马尔科夫吸收连锁	96
第五节 马尔科夫连锁的应用	99
第六章 汽轮发电机组技术经济指标的实时计算	101
第一节 原始数据的采集与处理	101
第二节 水和水蒸气状态方程	103

第三节	锅炉技术经济指标计算	111
第四节	汽轮机技术经济指标计算	115
第五节	汽轮机技术经济指标的修正计算	117
第六节	汽轮机组经济指标的简化计算	119
第七章	凝汽器与循环水系统的优化	122
第一节	汽轮机特性	122
第二节	凝汽器特性	125
第三节	循环水系统的特性	128
第四节	循环水系统最优化问题的求解	131
第八章	变压运行时最优初压的确定	136
第一节	变压运行时机组的数学模型	136
第二节	电动调速给水泵的特性	140
第三节	机组变压运行优化计算的数学模型与搜索方法	144
第九章	汽轮发电机组间最优负荷分配	150
第一节	火电系统机组最优组合问题	150
第二节	火电系统机组间负荷最优分配问题	154
第三节	最优负荷分配的优化方法	155
第十章	汽轮机优化运行的自适应控制	161
第一节	自适应控制系统的组成	162
第二节	测量输入信号的自适应控制系统	163
第三节	测量对象动特性的自适应控制系统	165
第四节	极值自适应控制系统	167

第一章 汽轮发电机组的经济运行

目前,我国在研究如何提高汽轮发电机组的安全性能和自动化水平工作,已经取得了很大的成绩。结合我国目前国民经济建设的需要,对提高汽轮发电机组运行的经济效益的研究,也已受到火力发电厂和有关科研部门的重视。因为经济效益的提高给企业带来了新的活力,所以火力发电厂的经济运行在今后的科研和技术革新工作中,都将成为重要课题之一。

经济运行是以机组安全运行为基础的,不安全的运行就谈不上机组的经济性,所以研究机组经济运行的前提是一切改善机组经济性能的措施都必须符合安全运行的要求。

第一节 改善汽轮发电机组经济性的途径

汽轮发电机组的热力系统及其附属设备所组成的生产过程是比较复杂的。系统内的调节变量和状态变量是比较多的。所以提高机组的经济效益的方法也是各式各样的。经过对汽轮机组运行特点的研究,经济运行是分块进行的。如对汽轮机本体、循环水系统、回热系统及各系统中的一些主要设备进行优化研究。同时综合各部份优化研究的结果,再对整个汽轮发电机组进行优化,籍以求得机组的最优运行方式。然后对于整个火力发电厂再进行各机组间的负荷分配的优化研究。这种分块研究机组最优经济运行的方法是研究优化问题的一种普通的方法。

过去,改善机组经济性所采用的方法较多,现介绍两种。

1. 因子试验偏差法

它是一种很有效的方法,也是火电厂中应用得较为广泛的方法。这种方法是以汽轮机组或机组的某些附属系统的设计特性,或者是它们在某些特定的条件下制定较优的特性曲线作为依据。当机组运行时,若要对某一调节量或某个设备的运行方式进行控制或调节时,可以根据机组运行的实测值和特性曲线所反映的经济性偏差,来指导机组的某个调节量,向提高经济性的方向调整,以取得较好的运行效益。

譬如,在研究如何确定循环水泵最佳运行方式时,就是根据一系列的实验,测取由于循环水泵运行方式不同所消耗的电功率和对凝汽器供给的循环水量,并求出或实地测取由于循环水量不同、循环水温随气候的变化和负荷变化等因素所产生的凝汽器真空。然后再按实验资料计算出在不同循环水泵运行方式之间,汽轮机组实发功率的增值与循环水泵耗功的增值之差。根据这些数据,绘制在不同的汽轮机负荷、凝汽器循环水量和水温下,循环水泵的最佳组合运行方式的特性曲线。以这个特性曲线作为依据,指导循环水系统选择合理的运行方式以获得最优的效益。

因为循环水温是随季节不同而变化的,所以这项试验有时不得不延长到半年或一年才

能完成。由于时间拖得较长，凝汽器中的传热系数也会发生变化，在同一条特性曲线中采用不同的传热系数，以及它与运行时的传热系数之间的差异，都将造成明显的误差。所幸循环水泵运行方式的选择允许具有一定的死区，这样还可以补偿由于管道不清洁等原因造成的凝汽器传热系数改变引起的误差。为了便于运行人员使用，一般将以上资料绘制成简单的图形，如图1-1、图中I、II、III表示不同的循环水泵组合方式。运行人员可以根据实际运行情况与图形中所示的最优组合方式与凝汽器真空之间的关系来调整循环水系统的运行方式。

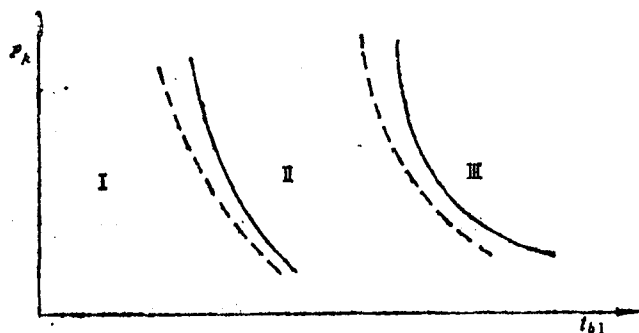


图 1-1 p_k 和 t_{k1} 与循环水泵组合方式关系曲线

2. 基准偏差法

这是运用基准偏差对机组效率进行监控的方法。这种方法是利用制造厂提供的热耗曲线作为依据，如图1-2所示。在机组运行时运行人员再根据机组实际运行资料和热耗率 α_s 的

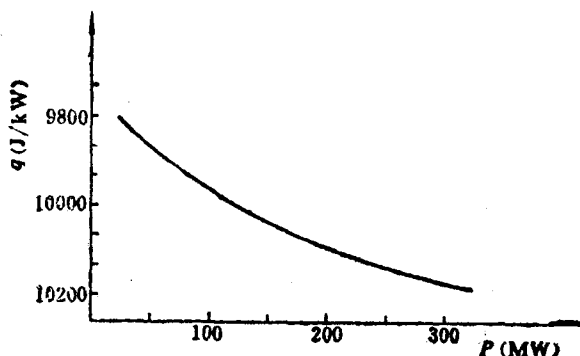


图 1-2 300MW汽轮发电机组热耗曲线

计算公式计算其值：

$$\alpha_s = \frac{\alpha_t}{\eta_b(1-\alpha_s)(1-\alpha_{ts})} \quad (1-1)$$

式中 α_s ——整个机组的热耗率， $\alpha_s = \frac{q_s}{P}$ ；

q_s ——整个机组的热耗量，kJ；

α_t ——汽轮机的热耗率， $\alpha_t = \frac{q_t}{P}$ ；

q_i ——汽轮机的热耗量, kJ;

η_b ——锅炉效率;

α_e ——厂用电率;

α_{r_w} ——机组补给水热损率, $\alpha_{r_w} = \frac{q_{r_w}}{P}$;

P ——机组的电功率, kW;

q_{r_w} ——机组补给水热耗量, kJ。

运行人员可根据两者的差值, 分析原因进行监控。如果机组缺少这方面的资料, 即制造厂家没有提供热耗曲线时, 运行厂应根据机组检修后的最佳情况通过试验或计算求得。这时对所选定的监控参数的基准值或最佳运行范围可用以下三种方式确定:

(1) 设计值;

(2) 最佳运行调整试验结果或历年运行的最好纪录;

(3) 变工况计算结果。

一般应用热力学的基本公式和试验资料进行计算:

$$q_i = \frac{q_0}{w_{ii}\eta_{0i}\eta_m\eta_g} = \frac{T_{0,m}\Delta s}{(T_{0,m} - T_{h,i})\Delta s\eta_{0i}\eta_m\eta_g} \quad (1-2)$$

且

$$q_0 = (h_0 + h_{r_w}) + \alpha_r(h_r - h_h) \quad (1-3)$$

$$\Delta s = (s_0 - s_{r_w}) + \alpha_r(s_r - s_h) \quad (1-4)$$

$$\alpha = \frac{D_r}{D_0} \quad (1-5)$$

式中 q_i ——汽轮机热耗, kJ;

w_{ii} ——蒸汽所作的功, $w_{ii} = (T_{0,m} - T_{h,i})\Delta s$, kJ;

q_0 ——蒸汽吸收的热量, $q_0 = T_{0,m}\Delta s$, kJ;

$T_{0,m}$ ——平均吸热温度, $T_{0,m} = \frac{q_0}{\Delta s}$, K;

h_0, s_0 ——主蒸汽的焓, 熵;

h_r, s_r ——再热蒸汽的焓, 熵;

h_h, s_h ——高压缸排汽的焓, 熵;

h_{r_w}, s_{r_w} ——给水的焓, 熵;

D_0, D_r ——主蒸汽和再热蒸汽流量, kg/h;

$T_{h,i}$ ——排汽压力下的饱和温度, K;

$\eta_{0i}, \eta_m, \eta_g$ ——汽轮机内效率, 机械效率和发电机效率。

蒸汽参数变化时对热耗的校正与机组负荷关系不大, 一般应根据试验结果计算蒸汽参数变化时的校正系数, 在运行中对其热耗进行校正。

(a) 主蒸汽压力与温度变化时热耗的校正系数 $c_{p,t}$ 与 $c_{t,t}$ 可分别用下列公式求得

$$c_{p,t}(c_{t,t}) = 1 + \frac{\Delta q_i}{q_i} \quad (1-6)$$

其中

$$\frac{\Delta q_i}{q_i} = - \frac{T_{h,i} \Delta T_{0,m}}{(T_{0,m} - T_{h,i}) T_{0,m}} \quad (1-7)$$

$$\Delta T_{om} = T_{om} - T_{om}^* \quad (1-8)$$

(b) 再热蒸汽温度变化时热耗的校正系数 c_{tr} 为

$$c_{tr} = 1 + \frac{\Delta q_t}{q_t} \quad (1-9)$$

$$\frac{\Delta q_t}{q_t} = - \frac{T_{kt} \Delta T_{om}}{(T_{om} - T_{kt}) T_{om}} + \frac{\Delta \eta_{oi}}{\eta_{oi}} \quad (1-10)$$

$$\Delta T_{om} = T_{om} - T_{om}^*$$

以上诸式中 q_t ——汽轮机的热耗量, kJ;

Δq_t ——汽轮机在蒸汽参数变化时的热耗增量, kJ;

T_{om} ——汽轮机的平均吸热温度的额定值, K;

T_{kt} ——汽轮机的排汽温度, K;

η_{oi} ——汽轮机的内效率;

$\Delta \eta_{oi}$ ——汽轮机内效率的变化量。

(c) 排汽压力变化时热耗的校正系数 c_{ps} 为

$$c_{ps} = \frac{1}{1 - \frac{\Delta P}{P}} \quad (1-11)$$

式中 P ——汽轮机的实发功率, kW;

ΔP ——汽轮机排汽压力每增大1.333Pa (1mmHg) 时, 发电机功率减少量, 一般为300kW左右。

对汽轮发电机组进行监控时, 根据监控参数的偏差值, 即运行值与基准值之差值, 查热耗校正曲线, 求得校正系数 c 计算热损失。如果有几个监控参数均发生偏差时, 可以分别计算热损失, 然后求和即得总损失。也可以将所有热耗校正系数计算公式, 编成计算程序, 采用微机计算。

效率监控法是考核机组运行经济性的一种简单而有效的方法。它能提高运行人员操作准确性, 使监控的运行参数尽可能地接近基准值, 从而提高了运行经济性。通过效率监控还能指出热损失的主要原因, 不过有些参数在正常情况下, 与基准值相差不大, 因而对这些参数的监控显得意义不大。此外对汽轮机排汽压力的监控, 虽能清楚地反映出排汽压力偏差值, 但是因为排汽压力的基准值是随循环水量而改变的, 所以还不能用来直接指导循环水泵的调度。

第二节 运用数学规划的方法指导汽轮机经济运行

由于运筹学的发展, 优化理论已经普及到设计、制造、工艺和运行维护等各个领域。运用数学规划的方法求解汽轮发电机组经济运行的问题, 已经成为热能工作者很重视的问题之一。配合微机在解题中的应用, 发挥了它的计算功能的优越性, 使得这种方法不仅可以实时地在线计算离线指导汽轮机经济运行, 还可以进一步做到按计算的结果对汽轮机进行实时的控制。

数学规划是对某些事件, 系统或函数求极值的一种通用方法。对于某一优化控制问题, 它是在满足系统方程和某些限制条件下的一组控制参数中, 选取使目标函数为极值的控制参数的方法。

数学规划是一种数学方法, 而不是工程方法, 它与应用数学、计算机科学和专业领域都有密切的关系。用这种方法解决实际问题, 一般分三步进行:

(1) 提出最优化问题: 叙述目标是什么, 约束条件是什么, 变量是什么, 建立最优化问题的数学模型, 确定变量, 列出目标函数及约束方程式。

(2) 分析模型: 选择合适的求解方法。

(3) 编写程序: 用计算机求最优解, 对算法的收敛性、通用性、简便性、计算时间与误差等作出评价。

用数学规划方法求解最优化问题时, 一般是按照一定的模式进行的。其模式为:

$$\begin{aligned} \max(\min) \quad & M=f(x_i) \\ \text{s.t.} \quad & g_j(x_i) \leq (\geq) b_j \\ & x_i \geq 0 \\ & i=1, 2, \dots, n \\ & j=1, 2, \dots, m \end{aligned} \quad (1-12)$$

$M=f(x_i)$ 是课题的目标函数, 它是“最优化”的标准或评价条件。目标函数是这种标准的数学表达式。这种标准可以是性能指标、利润、效益、精确度、灵敏度等, 也可以是功率、能量、燃料、材料等其他资源的函数。

$g_j(x_i) \leq (\geq) b_j$ 是系统或对象的数学模型和某些限制, 称为求目标函数求极值时的约束条件。前者是对某物理系统或对象应满足的基本方程和性能方程, 如控制系统的状态方程和用高阶微分、差分方程所描述的物理性质等。后者是对系统的某些限制, 如资源、人力、时间等方面对求目标函数极值时的特定限制。可见列出来的约束方程越接近实际系统, 则所求得的最优化问题的解、也越接近于实际的最优解。

数学规划中目标函数和全部约束方程都是变量的线性函数时称为线性规划。如果在上述的函数中有一个或几个函数是变量的非线性函数时则称为非线性规划。通常由于汽轮机组的数学模型存在着非线性函数关系, 加以经常使用的蒸汽状态方程也是非线性的, 所以汽轮机经济运行课题采用非线性规划求解比较方便。只有某些具有突出线性关系的部件, 它的优化问题才使用线性规划方法求解。

求解汽轮机优化问题的基本观点是:

(1) 数学规划是一种求极值的方法, 所以提出的优化问题在一定的工况范围内是否存在极值, 应先用汽轮机的基本理论进行分析和判断, 确认课题在某一目标函数的要求下, 满足提出的约束条件, 存在着最优值。一般的情况下, 汽轮机组的经济工况就是该机组的设计工况, 所以经济运行最优化程序的最终计算结果也应符合设计值。但是用这样的结论对指导机组优化运行是没有实际意义的, 它只能是一种校验计算程序是否正确的一种尺度。所幸数学规划方法一般是逐步逼近最优值的, 无论机组处于什么初始状态, 运用数学规划方法都将逐步改变其控制变量, 使其目标函数所要求之值逐渐趋向于极值, 并逐步改善其经济

性能,直到最优值。因此,数学规划法可以发挥其指导机组运行,改善其经济效益的作用。

(2) 机组经济运行的效益是用一定时间间隔内的平均值表示的,火力发电厂的热耗、煤耗和汽耗都是某一定时间间隔内的平均值。虽然它与瞬时技术经济指标和效益密切相关,但从表达经济性来说,瞬时值还是次要的。

对于带基本负荷的机组,稳定运行过程的时间较长,所以过渡过程的经济性对整个过程来说是可以忽略的。对于带尖峰负荷的机组,虽然机组经常处于负荷变动的情况下工作,甚至在所研究的时间间隔内,机组很少运行在稳定工况,但在计算宏观经济效益时,还是应按一定时间间隔内的平均值计算。所以,汽轮机组的优化计算和汽轮机变工况运行的计算一样是根据运行时的各个稳态参数或参数的区间平均值进行分析和计算的。

(3) 汽轮机组优化计算的现实性有赖于机组的可调节性。对于调节能力很差的机组,即使从理论上可以找到改善机组效益的措施,但实际上有时是无法实现的。对于调节性能好,而且可调节参数多的机组,由于从某一运行工况通向最优运行工况的途径并不是唯一的(譬如,要增大机组的功率可以提高蒸汽初参数,也可以降低蒸汽的终参数),所以通过优化程序计算所提出的或推荐的操作方式也不一定是唯一的或完全相同的,即改变某几个参数所得的增益可能与改变另外几个参数所得的增益相同,这在汽轮发电机组的运行中也是常见的。

(4) 衡量汽轮机组运行的经济性均以机组的技术经济指标(如热耗、煤耗和汽耗)为标准。所以,在比较不同工况的经济性或计算最优工况的经济效益时,必须使用相同的采样仪器和计算方法,才有可比性。因此,及时检测必要的运行参数,实时地计算汽轮机组的技术经济指标是优化计算不可缺少的。但是,要精确的检测机组的全部参数,并精确的计算出机组的技术经济指标还是相当复杂的,有时甚至是很困难的。这是因为在机组及其热力系统中存在着某些难以准确测量的蒸汽小流量,或难以连续测量的物理量,如煤粉发热量、煤量、煤粉细度、排烟中的含碳量、含氧量以及难以估计的热量损失等。即使能够解决这些困难,准确计算机组的技术经济指标的程序也很复杂,计算量大,计算时间长,影响实时地表达。好在优化计算过程中,主要是求新工况与原工况间机组效益的差值,所以只要热力系统在新旧工况没有很明显的改变,使用相同的采样手段和计算方法是可以求得比较准确的增益值的。因此略去那些由于难以检测的小蒸汽流量、疏水量和散热量所引起的损失就不会影响新旧工况之间效益增值的准确度。

第三节 几种常见的最优化问题

为了解题方便,对最优化问题按目标函数和约束条件所表达的形式不同分为以下几种类型。它们的性质和特点:

1. 无约束与有约束最优化问题

求无约束极值时,课题的最优解是目标函数的极值。而有约束条件下求极值时,是求课题的条件极值。

例 1-1 $\min f(x) = (x-a)^2 + b$

- (1) 无约束;
- (2) 等式约束 $x = c$;
- (3) 不等式约束 $x > c$, 设 $c < a$ 。

解: 这是单变量求极值的问题, 如图1-3所示。

(1) 无约束, 最优解是目标函数的极值 $x^* = a$ 和 $f(x^*) = b$, 如图1-3A点。

(2) 等式约束, $x = c$ 是一条直线, 由于目标函数是单变量, 所以只有唯一解 $x^* = c$ $f(x^*) = (c-a)^2 + b$, 如图1-3B点。

(3) 不等式约束, $x \geq c$, 且 $c < a$, 由于可行域在直线 $x = c$ 的右边, 这时最优解和无约束一样, $x^* = a$, $f(x^*) = b$, 如图1-3A点。

2. 确定性和随机性最优问题

确定性最优问题中, 每个变量取值都是确定和可知的。随机最优问题中某些变量的取值是不确定的, 但根据大量实验统计, 可以知道变量取值服从一定的概率分布。例如汽轮机组的最大输出功率, 循环水泵的运行方式等参数是确定的。而热力系统运行的可靠性问题则是一个随机最优问题, 因为人们还不能准确地掌握热力系统中某些部件发生事故的时间, 只能根据经验或统计资料掌握其概率规律。

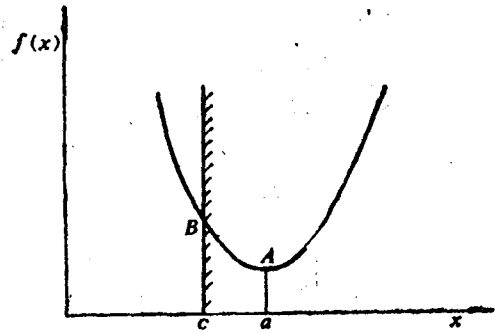


图 1-3 单变量函数的极小值

所以随机最优问题只有在它能够表示成数学规划的模式时, 才能和确定性最优问题一样, 用数学规划的法则求解。

3. 线性最优化与非线性最优化问题

目标函数和所有的约束方程都是线性的, 这种最优化问题是线性最优化或线性规划。如果其中任意一个方程是变量的非线性函数则称为非线性最优化或非线性规划。所以线性规划实际上是非线性规划的特殊情况。显然求解非线性规划问题要比求解线性规划问题更困难。为此, 对某些非线性最优化问题, 特别是在某些局部范围内, 也可用线性函数近似规划问题中的非线性函数, 然后用线性规划方法求解非线性规划问题, 使之逐步逼近非线性规划的最优解。

4. 静态最优化和动态最优化问题

最优化问题的解不随时间而变, 这类问题称为静态最优化问题。若最优化问题的解随时间而变, 即变量是时间 t 的函数, 则属于动态最优化问题。

动态规划和静态规划方法并不是完全对立的, 如果动态最优化问题能够表示成线性规划的模式, 那么, 当然可以用线性规划来求解动态最优化问题。同理, 动态规划方法不但可以求解动态最优化问题, 也可以用来求解象分配问题这样的静态最优化问题。

如果动态最优化问题表达成为非线性规划的模式, 也可以将非线性规划的数值解法应用到动态最优化问题中去。

第二章 目标函数和约束条件

第一节 汽轮机优化运行中常用的目标函数

目标函数是评定某一生产过程中优化程度指标的数学表达式。对汽轮机组经济运行课题而言,它是评定汽轮机组运行时某一项经济性能的具体条件。所以,首先应正确地提出与课题要求和机组的实际情况相符合的目标函数,才能使数学规划的求解得到正确的答案。

依据最优化问题的要求和解题的方便,目标函数的表达式,可以写成最大化的形式,也可以写成最小化的形式。它们实质上是同一课题的对偶函数,是可以互相转化的。譬如,当工作在汽轮机中的蒸汽初、终参数不变时,求机组的最小汽耗率,或最大相对内效率是可以互相转换的。

在一般情况下,目标函数是状态变量 $x(t)$ 和调节变量 $u(t)$ 的函数,称为 F 型。

$$F = F(u_1, u_2, \dots, u_m, x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (2-1)$$

也可以只用控制量表示,称为 G 型。

$$G = G(u_1, u_2, \dots, u_m) \quad (2-2)$$

目标函数通常用质量、数量、时间、价值等物理量表示。它是寻求系统极大值或极小值最优化问题的具体条件,所以它既是质量指标,又是优化计算中的准则函数,是求解最优化问题的核心。常见的目标函数有以下几种形式:

1. 用代数方程式表示

$$\max(\min) M = \sum_{i=1}^n M_i(x_i) \quad (2-3)$$
$$i=1, 2, \dots, n$$

譬如,当寻求并列运行机组间的负荷最优分配时,就应求各并列运行机组的总煤耗量为最小,这时 $M_i(x_i)$ 表示第 i 台机组输出功率为 x_i 时的燃料消耗量。

又如,循环水系统的最优运行条件是汽轮机发出的功率与为形成凝汽器真空所耗费的功率之代数和为最大。这时 $M_i(x_i)$ 就是汽轮发电机组及各循环水泵的功率。

此外,还可以根据具体情况,用加权累加的形式反映某些因素对目标函数影响的重要程度。这时 $M = \sum_{i=1}^n R_i M_i(x_i)$, R_i 是 $M_i(x_i)$ 的加权系数。

2. 用乘积的形式表示

$$\max \eta = \prod_{i=1}^n \eta_i(x_i) \quad (2-4)$$
$$i=1, 2, \dots, n$$

当寻求汽轮发电机组的最大效率时,必须求出锅炉效率、汽轮机效率、发电机效率及其它附属设备的综合效率的乘积为最大值。

3. 用积分式表示

$$\min F = \int_{t_b}^{t_f} (u_1, u_2, \dots, u_m; x_1, x_2, \dots, x_n, t) dt \quad (2-5)$$

式中 $u_1, u_2, \dots, u_m$ ——控制变量;

$x_1, x_2, \dots, x_n$ ——状态变量;

t_b, t_f ——过程的初始和终止时间;

t ——时间。

用积分形式描述目标函数,一般是表示系统在约束边界的限制内,某一变量达到极值所需的时间。如寻求汽轮机调节系统对某一调节量进行调节时,其过渡过程所需要时间的最小值。

4. 用均方差的形式表示

$$\min F = \sum_{i=1}^n k_i (\bar{x}_i - x_i)^2 \quad (2-6)$$

式中 k_i ——对第 i 个状态变量的加权系数;

$\bar{x}_i$ ——对第 i 个状态变量的理论要求值;

x_i ——对第 i 个状态变量的实测值。

这是目标函数的一种最好的形式。当生产过程中需要用偏差值表示机组运行的经济性时,若根据理论分析可以确定该状态变量的最优值时,则采用均方差最小的形式表示问题的目标函数,可以获得较小的误差。

第二节 拟定对象数学模型的方法

系统或对象的数学模型是系统的动态特性的数学表达式,它也是表示系统或对象的各种物理、化学、几何尺寸及时间等因素的关系式。如果以矢量 $x(t)$ 表示时间 t 的状态输出, $u(t)$ 表示时间 t 的控制输入, $\alpha(t)$ 表示时间 t 的系统操作因素的参数,则系统的数学模型可表示如下:

$$\frac{dx_i}{dt} = f_i[x_1(t), \dots, x_n(t), u_1(t), \dots, u_m(t), \alpha_1(t), \dots, \alpha_r(t)] \quad (2-7)$$

$$x_i(t_0) = x_i^0$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

任何事物都是处在不断运动、发展和变化之中,系统的状态都处在某种外部输入所引起的变化下,这种随时间改变输出状态的模型叫动态模型。如果 x 与 u 是一次相依的,则模型是线性的,它可以写成标准矩阵形式,其式为

$$\dot{X} = AX + Bu \quad (2-8)$$

式中 A —— $n \times n$ 维状态矩阵;

B —— $n \times 1$ 维控制矩阵;

X —— n 维状态矢量;

u —— m 维控制矢量。

如果系统的生产过程中, 动态相依条件是非线性的, 即 $f_i(x_1, x_2, \dots, x_n, u_1, u_2, \dots, u_m, t)$ 的函数关系中有一些函数是非线性的。若系统在正常运行时, 变量偏离理想点的量值不太远, 则可以运用泰勒公式把 $f_i(x, u, t)$ 在其理想点附近展开, 进行线性化处理。理想点就是系统接近或达到稳态的点, 这时它必须满足下列方程:

$$\frac{dX}{dt} = F(X, u, t) = \text{常数} \quad (2-9)$$

当然也可以用上式求得理想点的值。

在描述系统或对象运动规律的数学模型中不含有时间因素的叫稳态模型。它是动态过程的一种极限情况, 是动态模型描述稳态情况的简化结果。由于汽轮发电机组正常运行条件下要求尽可能稳定, 特别是寻求机组在经济上的最优控制条件时, 都是根据稳定工况进行分析的。所以, 我们不仅可能而且应该把动态模型转化为稳态模型来处理。这就是在汽轮机组经济运行问题中为什么要使用稳态模型的原因。

拟定汽轮发电机组各个部件的数学模型, 就是寻求他们在生产过程中的客观规律, 所以应该以现场实验数据和运行纪录等资料为基础, 结合专业理论知识进行。一般有以下几种方法:

1. 理论分析法

建立对象数学模型时, 运用专业理论知识进行分析, 确定控制变量与状态变量之间所应满足的函数关系, 这个函数关系通常称为传递函数。一般的情况下, 在求得对象的各个通道和各个环节的局部传递函数之后, 再组成系统的综合数学模型。这些局部的传递函数是不难通过 Z 变换或其他变换编制成便于计算的程序进行计算的。也可以直接以线性微分方程为基础, 进行数值积分求得。但是, 这些方法只适用于线性化的系统, 适用于在稳态点附近的小扰动范围。若要建立全工况的数学模型还必须把负荷区分为若干区段, 每段有一个中心点和与之相应的有效扰动范围, 进行数学模型中函数的线性化, 然后分段进行优化。但因为每段的时间常数往往并不相同, 所以也不容易使各段之间形成光滑连续的衔接。为了避免这种缺陷, 充分利用计算机的计算速度、精度和灵活性, 无需对方程组进行线性化, 可将各种非线性函数直接进行数值求解和数值积分, 便可得到准确的解答。

由于目标函数不同, 对数学模型的复杂程度和准确度的要求也随之不同。譬如, 为了研究大电网的稳定性而建立机炉数学模型时, 可以只需极少数的输出量, 如功率、流量和初参数等, 因而只要建立一两个传递函数的简单模型即可。如研究机组启停过程的最优化时, 则要求包括机组的动态特性、热应力特性在内的数学模型, 研究的对象虽然都是汽轮机和锅炉, 但可能需要由几十或几百个微分方程组成。数学模型有时可能是不精确的, 有时甚至附加了某些推想, 但是最优化问题, 不仅和数学模型的精度有关而且与数学模型对目标函数的作用有关。所以建立复杂的数学模型, 并不一定比简单的数学模型有更好的效果。由此可见, 数学模型的复杂程度和精确度必须与目标函数紧密配合, 譬如再热器数学

模型从理论上分析,应该是一个分布参数的环节,即蒸汽的状态参数是空间座标的函数。但是,在某些问题中也可以用集中参数描述,即再热器中蒸汽的状态参数用某一点的参数代表来建立数学模型。也可以将再热器分为若干段,每一段用集中参数描述,再将各段的数学模型汇总成为再热器的数学模型,究竟选用那一种方法,需要根据目标函数的要求和再热器在整个课题中的作用,从理论上进行分析来确定。

用理论公式计算的结果与实际运行数据相比较往往会有一定的偏差,只要这些偏差在技术要求的精度许可范围之内,或经过修正后能够满足精度的要求,就可以认为所拟定的数学模型是正确的。

为能方便而准确的拟定对象数学模型,应该对所研究的对象进行分析,突出其主要矛盾,兼顾其矛盾的次要方面,提出切合实际的简化假设。所以,即使对同样的对象,由于课题任务和要求不同,简化条件不同,也会得到不完全相同的数学模型。将复杂的系统分解为若干子系统,如汽轮机组的数学模型可分为本体、循环水系统、回热系统和给水系统等子系统。如有必要时,还可将子系统进一步分解为若干环节。如循环水系统可分为凝汽器、循环水供水管道和循环水泵等环节。这样就使整个系统具有模块式结构、对分析、研究和建立数学模型是很有好处的。

2. 统计分析法

当我们无法从理论分析得到系统或对象的规律,又得不到原始设计资料时,可以从过去的正常运行纪录数据中,通过统计分析的方法,找到各状态变量或调节变量之间的函数关系,这种关系就是某一环节的数学模型,这种方法叫做黑箱法。

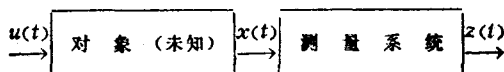


图 2-1 环节输入输出量的关系

如图2-1所示, $u(t)$ 为输入量, $z(t)$ 为输出量,其中若测量系统的规律是已知的,采用统计分析法就可以列出环节的运动方程,即 $u(t)$ 与 $x(t)$ 之间的函数关系式。

一般的情况,首先凭经验假定系统具有某种形式的数学表达式,再用最小二乘法回归分析,将运行的实际数据回归成为 $u(t)$ 与 $x(t)$ 之间的多项式或矩阵表达式。最后观察所求得的规律是否与运行的实际数据相符合,逐步改善使之达到所需要的精确度,便可使用。如果所求得的结果,由于假定的数学表达式的型式或若干系数的缘故,使之与统计数组间的规律相差较大,则应重新假定数学表达式,再进行回归分析,直到与统计数组所体现的规律相符为止,这样求得的函数就是对象的数学模型。

这种方法有赖于机组正常运行的记录是否齐全和准确,由于机组一般经常运行在经济负荷数值的附近,所以得不到全工况的运行记录,因此往往不能获得准确地表达式。但采用这种方法,求对象的数学模型,不会影响正常的运行,所以常用它作为数学模型的校验手段。

3. 因子试验法

为了获得对象在全工况的运行特性,弥补机组正常运行记录的不足,对所研究的对象

或系统有计划的作一些因子试验,譬如,作40%, 50%或60%全负荷的试验,或作切除高压加热器的热力系统运行试验等特殊条件试验,称为因子试验。根据试验结果进行分析和综合,以求得对象的输入量和输出量之间的全工况函数关系,即对象的数学模型,可以写成:

$$y_k = F(k_i, x_j) \quad (2-10)$$

式中 k_i ——系统操作因子参数,一般为已知数(如阀门的开度、汽压的波动等);

x_j ——试验时输入变量;

y_k ——试验后输出变量;

i, j, k ——分别表示操作因子参数、输入变量和输出变量的组成数。

因子试验可以根据制定数学模型的需要安排输入变量。以验证统计资料的准确性,也可以为弥补统计资料不足而特地安排。如在汽轮机的低负荷或半负荷进行试验时,可以找到在正常运行时少见的工况下输出量与输入量之间的关系。但是,由于试验时,每次改变输入量都要使对象达到新的稳定状态,并维持稳定运行一定时间后才能记录数据,否则将不能反映对象的真实情况,所以每次试验都要花费相当长的时间。如果试验次数越多,所需时间就越长,而汽轮机又不在其经济工况下运行,所以,这种方法将要影响正常生产,并使生产受到一定的损失。

对规模较大的复杂模型,试验时可以分块进行,否则将会涉及到的变量增多,需要由试验测定的数据也增多,需要绘制的图表也增多,由此,可能产生的误差也会相应的增大。所以汽轮发电机组的数学模型都是分解成若干小单元进行试验,从简单到复杂,逐步建立数学模型。

4. 联合法

理论分析法一般适用于对系统或对象的机理了解得比较透彻的场合,否则就应该通过实际运行或试验数据来确定对象的函数关系。统计分析法虽然不影响对象的正常运行,但有时往往找不到正确的关系式。因子试验法虽能按需要安排实验,但对生产影响较大。因此,一般采用几种方法的综合,称为联合法。

联合法是通过理论分析初步确定对象的输出量与输入量之间的函数关系形式。再运用正常运行记录,根据统计分析来判断所提供的函数关系式中各个系数的大小。也可以通过因子试验的结果来确定函数的系数大小,藉以校核和补充统计分析法之不足。由此可见生产实际和实验的记录数据不仅是建立对象数学模型的基础,也是判断对象数学模型是否正确和合理的重要依据。

第三节 把理论公式转化为线性稳态模型

现实的情况是我们只知道一些生产过程的理论公式,对于生产过程的最优工作点缺乏认识。所以,要求凭经验调节好汽轮发电机组正常工作状态,测量出各种变量的数据,藉以找出稳定状态下的数学模型。

即使理论公式是正确的,也不一定能满足生产过程中每一组的参数集合。就是说,理论计算值将与实际测量数据之间存在一定的误差。实际测量数据必须在标称点和以标称点