

苏联电站部地区发电厂及綫路改进局

在叶片結有爐水鹽垢时 汽輪机的清洗

田 鴻 吉譯

電力工業出版社

內 容 提 要

本書總結了蘇聯地區發電廠及綫路改進局在清洗不同型式和不同容量的汽輪機時所取得的實際經驗。書中敘述了對葉片結鹽垢的監督方法，並介紹了蘇聯地區發電廠及綫路改進局所制訂的在帶負荷運行以及其他運行方式下（特別是在空負荷、低轉速及汽輪機在冷狀態起動時）清洗汽輪機的方法。此外，還專題敘述了葉片在結有硅酸鹽垢的情況下所應用的鹼質清洗法。

發電廠汽輪機運行人員在組織對葉片結鹽垢進行監督時，以及用水質或鹼性溶液清洗汽輪機時，可將本書作為實際參考資料。

МЭС СССР ОРГРЕС

ПРОМЫВКА ПАРОВЫХ ТУРБИН ПРИ ЗАНОСЕ
ЛОПАТОК СОЛЯМИ КОТЛОВОЙ ВОДЫ

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

МОСКВА

1954

在葉片結有爐水鹽垢時汽輪機的清洗

根據蘇聯國立動力出版社1954年莫斯科版翻譯

田 鴻 吉譯

537R129

電力工業出版社出版（北京府右街26號）

北京市書刊出版業營業許可證出字第082號

北京市印刷一廠排印 新華書店發行

787×1092 $\frac{1}{2}$ 開本 * 2 $\frac{3}{4}$ 印張 * 42千字

1957年2月北京第1版

1957年2月北京第1次印刷（0001—5,600冊）

統一書號：15036·468 定價（第10類）0.32元

序 言

进入汽轮机內的蒸汽質量不佳时，在汽轮机叶片上就会有鹽質附着物——鹽垢形成。鹽垢形成后所發生的噴阻与叶片通道的阻塞現象，將使汽轮机出力受到限制，使經濟性变坏并且使安全可靠性降低。

凡在运行中能維持住蒸汽含鹽量标准的电厂，叶片上积結鹽垢就極輕微或完全不結垢。如果提高了一般运行水平，尤其是消除了凝汽器內循环水往凝結水中滲漏的現象，根除了表面式蒸汽冷却器的不严密現象（或把純凝結水噴濺到混合式过热調整器內代替給水），以及采取了防止有大量鹽質随蒸汽一起由鍋爐中帶出的一切措施以后，就能达到上述良好的結果。

因此，就不应当把清洗汽轮机看成为防止叶片結鹽垢的根本方法，而只能当作在必要的蒸汽質量未被保証以前的一种暫時性的必要措施。

为了將能溶解于水中的鹽垢由叶片上除去，可采用湿蒸汽清洗的方法，对以硅酸形式存在的不能溶解于水中的鹽垢，則采用机械的方法或采用碱性溶液清洗的方法清除。

在帶負荷情况下用湿蒸汽清洗汽輪机的方法，于1936年即为苏联地区發电厂及綫路改进局开始采用。現在，这种由

叶片上去除鹽垢的方法已被广泛应用。

在本書中，就苏联地区发电厂及綫路改进局在不同型式与不同容量的汽輪机上进行清洗的实际經驗加以綜合与系統化。其中述及对叶片結鹽垢的監督方法和为苏联地区发电厂及綫路改进局所制訂的在帶負荷及其他（其中特別是在空負荷、低轉速及汽輪机在由冷状态起動时）运行方式下清洗汽輪机的工作法。此外，对叶片在結件酸鹽垢情况下所应用的碱髒清洗方法也作了单独敘述。

本書可作为电厂运行人員在組織对叶片結鹽垢監督及进行用水質或碱液溶液清洗汽輪机时的实际参考資料。

目 录

序言	4
一 概論	4
二 鹽質的附着区域及汽輪机在叶片結鹽垢情况下的工作条件	7
三 对叶片結鹽垢的监督	12
四 在汽輪机監視段內蒸汽压力增高的允許限度	17
五 在帶負荷情况下用湿蒸汽清洗汽輪机	18
六 AK-100-1 型汽輪机清洗情况的分析与清洗結果	49
七 用碱性溶液清洗汽輪机及叶片的机械法清理	53
八 用湿蒸汽清洗汽輪机的其他方法	62

一、概 論

汽輪机的实际运行經驗証明，当蒸汽不純潔时爐水中的鹽質即会附着在噴咀、动叶片与靜叶片的表面上，甚至附着在汽輪机的汽門上面。

附于叶片上的鹽垢，由可溶于水的鹽質与不溶于水的鹽質兩部分所組成。

可溶性鹽垢，主要为鈉与鉀的化合物所組成。这种鹽垢附着于較高汽温区域内的叶片的凸、凹表面上。

不溶性鹽垢由硅酸、氧化鉄与氧化鋁所組成。

不溶性鹽垢非常强固地附于叶片表面上，甚至利用机械方法(用刮刀)清除均感到困难。这种鹽垢主要附着在高压汽輪机的蒸汽过热度較低或者甚至于湿蒸汽区域内的叶片上。在中压汽輪机的叶片上附着的多半是可溶性鹽垢。

可溶性鹽垢的形成，主要是由于有水珠随蒸汽一起进入汽輪机內的緣故，此系因汽水分离裝置工作不良以及水的运行方式調节不佳所致；通过凝汽器和汽温調节器的蒸汽冷却器的不严密处漏洩循环水与給水，也同样是形成可溶性鹽垢的一个原因。

不溶性鹽垢凡含硅酸較多者，其形成系由于該类鹽質的分子游离現象所引起，这种情况是在鹽質个别分子破裂并跑到蒸汽中去时發生的。这种鹽質溶化在蒸汽中，并与蒸汽一

起被帶进汽輪机內来。

下面，作为例子，我們援引了在安裝于不同电厂中的兩台中压汽輪机叶片上所發現的鹽質成分。

表3中所示，为在一台BK-100-2型高压汽輪机叶片上所發現的不溶性硅酸性鹽垢的化学成分。

由下例即可看出叶片結垢会达到怎样严重的程度：甚至当每公斤蒸汽中只含硅酸0.05毫克时，在汽輪机帶200吨/时蒸汽流量运行了1000小时以后，在叶片上就会积有10公斤的鹽質。

蒸汽的最初规范影响着汽輪机通汽部分結鹽垢的輕重程度。較高压的汽輪机，其結鹽垢速度比中压汽輪机快。在这方面，由直流式鍋爐供汽的汽輪机結鹽垢尤为严重。所有这些首先应解釋为：在高压鍋爐中难以获得純淨的蒸汽。此外，高压汽輪机的噴咀与叶片通道又較中压汽輪机的窄小。

鍋爐的运行方式同样影响着叶片結鹽垢的程度。

在鍋爐于最大出力下或于負荷剧烈变化的情况下运行

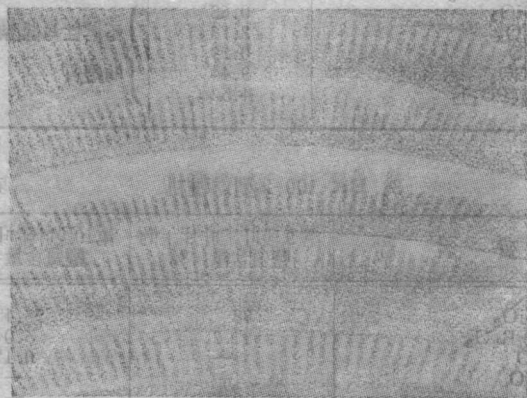


圖1 冲动式汽輪机通汽部分叶片严重結鹽垢的情况

1. AK-100-1 型汽輪機 表 1

鹽 質 名 稱	調整段的动叶片	第 2 段的动叶片	備 註
	鹽 質 含 量 %		
碳酸鈉 Na_2CO_3	75.26	64.66	可溶性鹽質
硫酸鈉 Na_2SO_4	4.06	2.52	
氯化鈉 NaCl	0.86	3.25	
磷酸三鈉 Na_3PO_4	0.72	0.85	
碳酸氫鈉 NaHCO_3	1.68	3.36	不溶性與低溶解性的鹽質
硫酸鈣 CaSO_4	1.25	0.96	
硫酸鎂 MgSO_4	0.21	0.30	
二氧化矽 SiO_2	4.96	2.88	
氧化鐵 Fe_2O_3	4.26	5.06	
氧化鋁 Al_2O_3	2.48	0.14	

2. AK-25-1 型汽輪機 表 2

鹽 質 名 稱	在第 9 段叶片上的鹽質, %	備 註
碳酸鈉 Na_2CO_3	75.66	溶于水的鹽質
碳酸氫鈉 NaHCO_3	6.31	
二氧化矽 SiO_2	0.68	不溶性與低溶解性的鹽質
氧化鐵 Fe_2O_3	2.78	
氧化鎂 MgO	0.99	
碳酸鈣 CaCO_3	9.44	
磷酸鈣 $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$	4.32	

3. BK-100-2 型汽輪機 表 3

鹽 質 名 稱	第 9 段叶輪叶片上的鹽質含量, %	第 10 段叶輪叶片上的鹽質含量, %
二氧化矽 SiO_2	88	98.48
倍半氧化物 R_2O_3	11.2	3.04
氧化鈣 CaO	—	0.11
氧化鎂 MgO	—	—
硫酸鹽	0.6	—

时，鍋爐內經常有爐水被甩出来。这样，叶片結鹽垢就会比鍋爐在低負荷或稳定負荷下运行时形成的快；当汽輪机連續帶額定負荷或在接近于額定負荷情況下运行时，叶片結鹽垢同样比在帶低負荷运行时要快。

已經知道，在个别电厂中，由于水的运行方式不佳，由于有化学淨水吸入到給水管中以及鍋爐負荷剧烈变化等結果，汽輪机叶片結鹽垢極为严重，甚至有必要在經過10至15天运行后就需要进行清洗。

圖1所示，为冲动式中压汽輪机的动叶片結鹽垢的情况。

清除叶片上的鹽垢通常用清洗汽輪机通汽部分的方法。

鹽垢如系可溶于水，則采用湿蒸汽来清洗；如系不溶于水而由硅酸化合物所組成的鹽垢，則采用苛性碱溶液清洗。用湿蒸汽清洗汽輪机的原理如下：在距汽輪机不远的地方，經專門的減温器向蒸汽管道中噴灑給水，于是湿蒸汽就进入正在轉动下的汽輪机中，而將鹽垢由叶片上洗去。为了清洗不溶于水的鹽垢，还要往湿蒸汽中注入苛性鈉或苛性鉀的溶液。

(1) 虽然清洗汽輪机能將叶片上的鹽垢除去，但这只能被認為是一种为保証汽輪机安全运行并維持其正常出力的消極办法。治本的措施是改善爐水質量并保証良好的汽水分离作用。

二、鹽質的附着区域及汽輪机在叶片結鹽垢情况下的工作条件

經驗証明，在較高的温度与压力下运行的各段內，鈉及其他可溶性鹽質附着情况最为严重。不溶于水的硅酸化合

物，則佔优势地附着于过热度較低或者是在湿蒸汽範圍內运行的各段叶片上。

叶片上附着的鹽垢性質和积結鹽垢的段数多少，主要决定于被蒸汽所帶來的鹽質的物理化学性能、段前的蒸汽规范、叶片的表面状态以及段內的蒸汽流速。其中，每种因素对叶片結鹽垢影响的程度，这些鹽垢在动叶片和静叶片上的分佈特点，以及这些因素的相互作用关系等，还没有足够的研究。但是，动叶片的通道經常要比静叶片結鹽垢严重。

叶片結鹽垢后，如各調整汽門位置与蒸汽规范均不变更，通过汽輪机的蒸汽量就要減少，并使汽輪机通汽部分效率降低，因而使汽輪机出力減少。由于节流調速的汽輪机第一段內的热力降一般不大，并且在低于临界速度的情况下运行，所以就更容易受积結鹽垢的感应。在数量式調速且調整段为兩列叶片的叶輪構成的汽輪机內，如調整汽門位置不变，則由于結鹽垢影响在該段內的汽压值超过临界压力值时，汽輪机出力將會显著下降；該临界压力值可按下面的公式决定

$$p_k = p_1 0.545 + 0.455 \sqrt{q-1}, \quad (1)$$

式中 p_1 ——汽輪机前新蒸汽的压力；

$$q = \frac{f_g}{f_k},$$

式中 f_g ——噴咀的出口截面积，公分²；

f_k ——噴咀的最小截面积，公分²。

背压式高压汽輪机在叶片結鹽垢情况下的出力降低尤其显著。例如，根据全苏热工研究所^①在試驗英国茂偉制造厂

① 参看“全苏热工研究所消息报”1952年第2期。

(Метро-Виккерс)制造的 BP-24 型前置汽轮机(工作汽压 $p_0 = 125$ 绝对大气压, 汽温 $t_0 = 485^\circ\text{C}$)时所得的数据, 当汽压在监视段(第五段)内超过55绝对大气压后每升高1个大气压时, 汽轮机的相对内效率要降低1%。在汽轮机清洗前, 该效率在接近额定负荷的情况下大约比叶片在纯净状态时低4%。

这样, 叶片结盐垢后当调整汽门位置不变, 或者当蒸汽压力在监视段(例如调整段)内维持不变时, 汽轮机的出力就会因蒸汽流量的减少与叶片效率的变坏而降低。

与蒸汽流量减少及汽轮机出力降低的同时, 叶片结垢同样引起结盐垢段与其前面各段蒸汽状态的变化。例如, 在同一蒸汽流量下, 结盐垢各段前面的蒸汽压力会增大, 而结盐垢各段(除最后一段外)内的热力降要减小。由于在最后一个结盐垢段后面的蒸汽压力还仍旧是该蒸汽流量下的正常压力, 所以该段内的热力降和压力降均将增大, 此时, 该段前的蒸汽压力为正常值与结盐垢后通道阻力的和。

对同一汽流量来说, 在最后的结盐垢段内的热力降和压力降的增長值(与纯净叶片比较)约等于它们在以前各段上减少数值的总和。这些段结盐垢情况愈是严重, 最后结盐垢段原计算的降下值愈小, 则该段降下的相对增長值就愈大。同时, 在任何时候, 热力降和压力降的增加对最后结盐垢段的影响都要比因结盐垢所造成的蒸汽流量减少的影响要大; 正因为这样, 在叶片与隔板结盐垢情况下, 其中的应力总要增加。

所以, 当叶片上积结了盐垢时, 对冲动式汽轮机最后一个严重结盐垢段的动叶片与隔板, 以及对反动式汽轮机的静叶片与动叶片就产生了过负荷的危险性。

反动段内动叶片的过负荷尤其不利。因为在实际中不止一次地证明了，由于这种过负荷造成的一个或数个叶片的损坏情况将会使其他各段叶片损坏。按段内(见正策)叶片的损坏，汽轮机带额定蒸汽流量运行的工作条件，对最后结盐垢段叶片及隔板最为危险。在实际运行中曾发生过一次极为严重的事故，即当叶片积结大量盐垢(叶片通道面积减少接近于50%)而使压力降增大时，最后结盐垢段的隔板弯曲了11公厘。由于事故扩大，推力轴承瓦乌金熔化，最后结盐垢段的动叶轮严重变形，并产生了汽轮机转子的残余弯曲。由于同类原因所发生的隔板弯曲事故，在其他电厂中也有过。

在叶片结盐垢情况下，推力轴承同样也会产生过负荷的危险性。当动叶片间的通道比静叶片或喷嘴结盐垢严重时，原来没有反动性的各段会有反动性出现，同时在原设计已知有反动度的各段内反动性会增大，这样就引起了轴向推力的增加。除此以外，在旁通调速式汽轮机内，当在旁通汽门开启情况下运行时，由于自热压力降在前数段内的减少，也同样会引起轴向推力的增大。

冲动式汽轮机受到的轴向推力最大，因为在反动式汽轮机中动叶片上压力降的增长仅仅作用在叶片的圆周表面上，而在冲动式汽轮机内压力差是作用在整个叶轮面积上的。除此以外，反动式汽轮机还因为平衡装置存在而使其推力轴承的工作条件减轻。因此，在很大程度上，推力轴承过负荷的危险性将发生在冲动式汽轮机中。而对高压汽轮机来说，由于在产生反动性时叶轮的相对压力降大大增加，以致将使这种危险性更加增长。在实际运行中，由于叶片过度和结盐垢，以致使中压汽

輪機推力軸承發生事故的有過數次。可以舉一次在基洛夫工廠製造的 AK-12-1 型汽輪機上發生過的推力軸承損壞事故作為例子：由於葉片嚴重結鹽垢，在同一蒸汽流量下，节流汽門和過負荷汽門後的蒸汽壓力相對地比在葉片純淨時各增高了 47% 與 38%，致使推力軸瓦烏金全部熔化。

輻流式汽輪機結鹽垢段內的热力过程变化特征仍与軸流式汽輪機相同，也就是說當葉片結鹽垢時，各段汽壓均增大，而热力降除在最後一個結鹽垢段內將增加外，在其前的各段均將減小。最後結鹽垢段動葉片過負荷的危險性，也同在軸流式汽輪機中一樣，將會發生。這些汽輪機的安全可靠性，依其是否有對由於葉片在結鹽垢時所產生的補助軸向應力的抵償作用所決定。在單流動式汽輪機內部密封處於正常狀態的情況下，或者是在雙流動式汽輪機中兩方面的葉片通道結鹽垢相均衡時，葉片結鹽垢後作用在推力軸承的負荷不會有很大變化。

雖然反動式汽輪機（軸流式及輻流式的）推力軸承延負荷的危險性比沖動式汽輪機輕，但它並不能擺脫由於葉片結鹽垢所生的一切危險後果。例如，在實際中就曾發生過一次西民斯-舒克爾特（Сименс-Шуккерт）廠製造的容量為 25 000 瓩的前置雙流輻流式汽輪機推力軸承的損壞事故。

這次事故的發生，是由於左右兩側葉輪上的葉片不均稱結鹽垢而產生了軸向推力，以致使推力軸承過負荷所造成的；這一次軸瓦烏金熔化了有 1.7 公厘深。事故發生時的汽輪機負荷是額定出力的 65%。

該汽輪機所發生的葉片結鹽垢不均稱情況可由這點來說明，即當事故產生之前，在發電機側的調整段內汽壓較原值增大了 24%，而在汽輪機調速器側的調整段內則相對增大

了36%。在第17段后(第2个叶輪后)汽室中的蒸汽絕對压力由于叶片結鹽垢而增長了50%。汽輪机在这样結鹽垢的情况下的出力,只能达到額定出力的65%。

如此看来,叶片結鹽垢并不因汽輪机有不同的型式和構造而有所不同,結果都会造成汽輪机出力减少并使安全可靠性和經濟性降低。从其可靠性降低这一点来講,汽輪机在結鹽垢情况下运行和汽輪机在通汽部分蒸汽过負荷情况下运行性質是相同的。因此,汽輪机在叶片結鹽垢的情况下运行应受到一定允許范围的限制,超过該范围时汽輪机的安全就要受到威胁。

三、对叶片結鹽垢的監督

为了知道汽輪机叶片結鹽垢的情况,必須对其通汽部分的潔淨程度进行系統的監督。最簡便的監督方法是根据各結鹽垢段前的汽压变化,因为在一定蒸汽流量之下,段前汽压

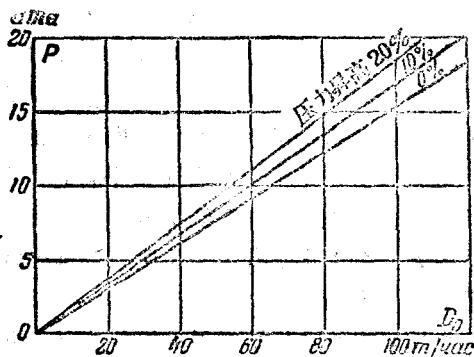


圖 2 凝汽式汽輪机監視段內蒸汽压力与蒸汽流量及叶片結鹽垢程度的关系

將因該段結鹽垢程度的增加而成正比地增大。

凝汽式汽輪機當葉片潔淨時，其段內蒸汽壓力與通過該段的蒸汽流量之間的關係，可以用通過坐標軸的一條直線來表示，如圖 2 所示。

對已經結了鹽垢的葉片來說， $(p_k = f(D))^*$ 這條關係線表示得比較陡立，即它的隨着積結鹽垢的程度而增加的傾斜角被增大了。

對帶調節抽氣的抽氣式汽輪機（調整抽氣室前各段）或背壓式汽輪機，蒸汽壓力與蒸汽流量的關係 $p_k = f(D)$ 隨葉片結鹽垢程度的不同而用不同的曲線來表示，其特征如圖 3 所示。

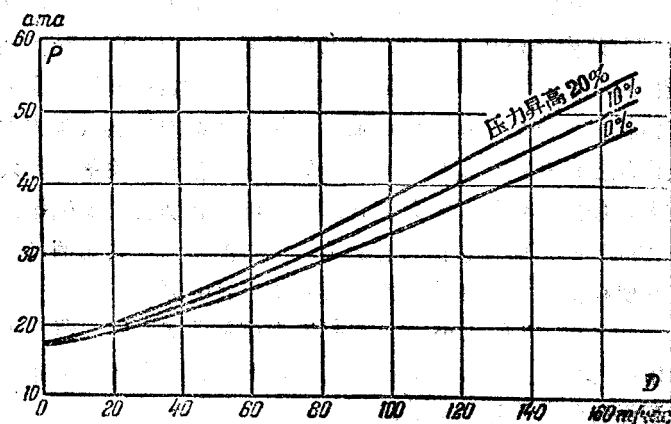


圖 3 背壓式及帶調節抽氣的汽輪機（調整抽氣室前各段）監視段內蒸汽壓力與蒸汽流量及葉片結鹽垢程度之間的關係

通常用監視段蒸汽壓力的相對增長率來估量葉片結鹽垢

* 式中 p_k 表示段前的蒸汽壓力， D 表示蒸汽流量。——譯者

的程度，該值由下式確定：

$$\Delta p = \frac{p_{\kappa}^{\text{зан}} - p_{\kappa}^{\text{ччс}}}{p_{\kappa}^{\text{ччс}}} \times 100\%, \quad (2)$$

式中 $p_{\kappa}^{\text{зан}}$ 及 $p_{\kappa}^{\text{ччс}}$ 分別為經過該汽輪機閘隔，在同一蒸汽流量下，當葉片結鹽垢與葉片在潔淨狀態時監視段內的蒸汽壓力值，絕對大氣壓。

下列各處可以作為測量蒸汽壓力的監視點：節流與過負荷汽門後的汽室；調節段汽室；非調節抽汽各段汽室；當軸式汽輪機低壓汽缸葉片結鹽垢時，作為監視點的還有導流汽門後的調節段汽室。

為了按照方程(2)求出 Δp ，必須預先知道當葉片潔淨時調節段內蒸汽壓力與蒸汽流量的關係 $p_{\kappa} = f(D)$ 。該關係綫圖可在進行汽輪機試驗時根據所得的試驗數據製出；或者在汽輪機大修後的運行中，通過測量監視段內的蒸汽壓力與蒸汽流量值在這個基礎上直接繪制出來。繪制該關係綫圖只需要在額定蒸汽流量60%到100%的範圍內(隨着汽輪機運行方式的不同，尚可選擇其它的蒸汽流量範圍)，其比例尺寸應該使在決定蒸汽壓力值時的誤差不超過0.5%。

為了求 Δp 的大小，可以直接去測量監視段內的蒸汽壓力值，並由 $p_{\kappa} = f(D)$ 關係綫圖中找出在該蒸汽流量下葉片在潔淨時的蒸汽壓力值來即可。

根據不同的結鹽垢數值，按照方程(2)可制出一個曲綫圖，其形狀與圖2和圖3類似，有了這個圖， Δp 值可以直接查出。根據該曲綫查出的 Δp 值在兩條坐標直綫的交點上，這兩條坐標綫代表着所測得的蒸汽流量與段內蒸汽壓力的值。

运行方式曲线图的绘制尺码比示于圖 2 与圖 3 上的大得多，例如：段内蒸汽压力每升高 1% 就制出一条曲线来，蒸汽流量在额定蒸汽流量 70% 至 100% 的范围内。

这种确定叶片结盐垢情况的曲线图表，最好能在每一台汽轮机处都悬挂出来，以使运行人员有可能在运行过程中了解叶片结盐垢情况的变化。

对叶片结盐垢的监督性检查应在一定运行条件下来做，也就是说，蒸汽流量约为额定值的 80%，汽轮机前、调节抽汽与背压处的蒸汽规范保持不变，并在同一回热加热系统下运行。这些规范数值应与在绘制 $p_x = f(D)$ 曲线图时所采取的各数值相符合。新蒸汽压力和温度与绘制曲线图时所用值之间的误差，不应超过苏联电力工业技术运行法规中的规定。

进行监督性检查时的调节抽汽压力与背压的误差，不应超过在绘制洁净叶片的 $p_x = f(D)$ 曲线时所采取的额定值的 $\pm 5\%$ 。

叶片结盐垢的情况，应直接根据结盐垢段前汽室中或于该段邻近汽室中的蒸汽压力进行监督。如果在头几段叶片上积结了钠及其他可溶于水的盐垢，而积结在以后数段叶片上的硅及其他不溶于水的化合物盐垢，则监督叶片结盐垢的情况必须用分别测量这些组结盐垢段当中每组前的蒸汽压力的方法来进行。为此，必要时应在汽缸相应的各点上钻孔，以便安装压力表。

在带一段或两段旁通进汽的汽轮机中，应对旁通汽门前的各段叶片结盐垢情况进行检查监督。这种监督应根据通汽部分各个间隔在相当于下列状态时的蒸汽流量下进行：(1) 节流汽门全开，第一段旁通汽门开始开启前，(2) 第一段旁通汽门开启，第二段旁通汽门开启前；(3) 两段旁通汽门全