文章编号：1671-6612（2026）05-770-04

严寒地区空冷室内吸风调相机厂房冬季通风节能设计研究

寇希望　张庆喆　刘振一　王新辉

（中国电力工程顾问集团东北电力设计院有限公司　长春　130021）

【摘　要】　为保障调相机厂房内设备的安全可靠运行，需要保证厂房室内参数满足工艺需求，调相机厂房通风系统的设计极其重要。以严寒地区某空冷室内吸风调相机项目为例，基于热量平衡、风量平衡原理对通风系统进行了冬季节能设计研究，结果表明，所提出的通风方案能够充分利用调相机设备散热量及其冷却风量，有效维持厂房内所需的温度和压力环境，显著降低供暖与通风系统能耗，节能环保效果突出。

【关键词】　调相机厂房；风量平衡；热量平衡；节能

中图分类号　TU834.1　　文献标志码　A

Design and Research of Ventilation Energy-saving in Winter for Air-cooled Indoor Air-intake Synchronous Condenser Workshop in Severe Cold Regions

Kou Xiwang　Zhang Qingzhe　Liu Zhenyi　Wang Xinhui

(Northeast Electric Power Design Institute of China Power Engineering Consulting Group Co., Ltd, Changchun, 130021)

【Abstract】　To ensure the safe and reliable operation of equipment inside the synchronous condenser workshop, the indoor environmental parameters must meet the process requirements, making the design of the ventilation system critically important. Taking an air-cooled indoor air-intake synchronous condenser project in a severe cold region as an example, this paper conducts an energy-saving design study on the ventilation system in winter based on the principles of heat balance and air volume balance. The results indicate that the proposed ventilation scheme can fully utilize the heat dissipation from the synchronous condenser equipment and its cooling air volume to effectively maintain the required temperature and pressure environment inside the workshop, while significantly reducing the energy consumption of heating and ventilation systems, with remarkable energy-saving and environmental protection benefits.

【Keywords】　Synchronous condenser workshop; Air volume balance; Heat balance; Energy-saving

0　引言

调相机是一种无功补偿装置，具有保持无功平衡、提供暂动态无功、提供电压支撑、有助于事故后的电压恢复及提供转动惯量等作用。当前，新能源及特高压项目中，大多数情况都有调相机的配置。调相机组在运行中会发生能量损耗，包括定子铁芯和绕组的发热、气体与转子之间的摩擦发热以及励磁损耗等，这些损耗最终以热量形式释放，导致设备温度升高，因此必须配备性能良好的冷却系统，以控制温升在允许范围内[1]。除冷却系统带走的热量外，调相机组的部分热量会直接散入厂房内；同时，厂房内布置的管道、电气盘柜等设备也会向室内散热。为确保设备安全运行并满足室内温度、洁净度等工艺要求，调相机厂房通风系统的设

作者（通讯作者）简介：寇希望（1985.09-），男，硕士研究生，高级工程师，E-mail：kouxiwang@nepdi.net
收稿日期：2026-04-24

计至关重要。

1　调相机厂房通风系统

1.1　调相机冷却方式

调相机的冷却方式主要有空冷（包括空空冷和空水冷）、双水内冷和氢冷三种。其中，空空冷作为空冷方式的重要类型，已在 50MVar 等主流调相机机型中实现工程化应用。该方式无需冷却水系统，且可根据运行工况自动调节损耗，具有较好的运行经济性[2]。采用空空冷方式的调相机通过换热器与空气进行间接热交换，其内冷却要求持续引入大量新风。根据取风来源不同，室外吸风方式通过独立进风管道将新风引入，经冷却系统换热后由排风管道排出；室内吸风方式则直接从厂房内吸入空气，再经排风管道排至室外[3,4]。

1.2　空冷室内吸风调相机厂房通风方案

空冷室内吸风调相机厂房的通风系统需同时满足排除室内余热和补充调相机吸风量的双重需求。对于位于北方供暖地区的项目，冬季通风系统仍需持续运行以补偿调相机吸风量。若采用自然进风、机械排风的方案，大量室外冷空气直接进入室内，易造成厂房底部温度过低，进而冻坏设备、管道及仪表，威胁系统安全。因此，该类厂房应采用机械送风、机械排风方案，且送风设备需配备加热装置，对室外空气预热后送入室内。通风系统的设计应基于风量平衡与热量平衡计算。

1.3　调相机厂房通风系统热平衡、风量平衡分析

1.3.1　全面通风热量平衡、风量平衡原理

厂房全面通风系统热量平衡、风量平衡原理[5]如式（1）及式（2）所示：

$$G_{zj}+G_{jj}=G_{zp}+G_{jp} \tag{1}$$

式中：G_{zj} 为自然进风量，kg/s；G_{jj} 为机械进风量，kg/s；G_{zp} 为自然排风量，kg/s；G_{jp} 为机械排风量，kg/s。

$$\sum Q_h+c\cdot L_p\cdot\rho_n\cdot t_n=\sum Q_f+c\cdot L_{jj}\cdot\rho_{jj}\cdot t_{jj} \tag{2}$$
$$+c\cdot L_{zj}\cdot\rho_{jw}\cdot t_w+c\cdot L_{xh}\cdot\rho_n\left(t_s-t_n\right)$$

式中：ΣQ_h 为通过围护结构的总失热量，kW；ΣQ_f 为设备及供暖设备的总放热量，kW；L_p 为局部排风与全面排风风量之和，m^3/s；L_{jj} 为机械进风量，m^3/s；L_{zj} 为自然进风量，m^3/s；L_{xh} 为室内循环风量，m^3/s；ρ_n 为室内空气密度，kg/m^3；ρ_w 为室外空气密度，kg/m^3；ρ_{jj} 为机械进风空气密度，kg/m^3；t_n 为室内排出空气温度，℃；t_w 为室外空气计算温度，℃；t_{jj} 为机械进风温度，℃；t_s 为循环送风温度，℃。

厂房通风系统可根据式（1）风量平衡计算结果根据式（3）转换关系代入式（2）进行热量平衡计算：

$$G_i=L_i\cdot\rho_i \tag{3}$$

式中：G_i 为不同方式的进（排）风质量流量，kg/s；L_i 为该方式下的体积流量，m^3/s；ρ_i 为该方式下对应的空气密度，kg/m^3。

1.3.2　空冷室内吸风调相机厂房热量平衡、风量平衡分析

空冷室内吸风调相机厂房机械进风、机械排风系统热量平衡、风量平衡分析如图 1 及图 2 所示。

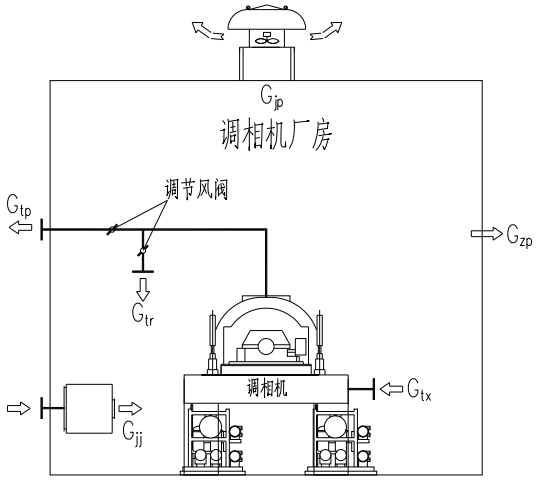


图 1　风量平衡示意图

Fig.1　Schematic diagram of air volume balance

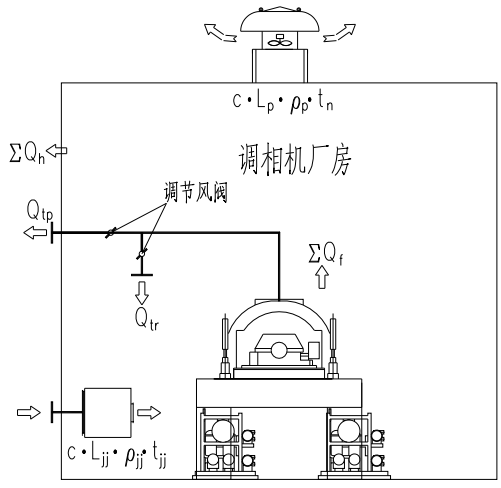


图 2　热量平衡示意图

Fig.2　Schematic diagram of heat balance

调相机厂房风量平衡中，机械进风量 G_{jj} 等于机械排风量 G_{jp}、自然排风量 G_{zp} 及调相机排至室外风量 G_{tp} 之和，自然排风量 G_{zp} 即保证厂房正压所需风量；调相机室内吸风量 G_{tx} 等于旁通风量 G_{tr} 和排出室外风量 G_{tp} 之和，即 $G_{tx}=G_{tr}+G_{tp}$。夏季及过渡季时，旁通风阀全关，排风全部排至室外；冬季则通过热量平衡计算结果，调节旁通阀门开度，使部分热空气排至室内，提高厂房室内温度，减少机械送风量 G_{jj}，节约通风能耗。

调相机厂房冬季热量平衡关系式如式（4）、式（5）所示。

$$\sum Q_h + c\cdot L_p\cdot\rho_n\cdot t_n = \sum Q_f + c\cdot L_{jj}\cdot\rho_{jj}\cdot t_{jj} + Q_{tr} \quad (4)$$

$$Q_{tr} = c\cdot L_{tr}\cdot\rho_n\cdot\left(t_{tp}-t_n\right) \quad (5)$$

为最大限度降低冬季供暖与通风能耗，冬季可调节调相机空冷排风管道上的旁通阀门，使部分被加热后的热空气回流至室内。旁通风量需结合送风设备配置确定，以确保室内正压和温度满足要求。

2　空冷室内吸风调相机节能通风系统设计研究

严寒地区冬季室外气温低且持续时间久，对于严寒地区空冷室内吸风调相机厂房通风系统，当机械送风系统采用直接加热方式时，由于调相机项目一般无集中供暖热源，加热方式一般采用电加热，需要设置较大功率的电加热器，极大浪费能源，同时，使用电加热器也带来了安全隐患。通风系统设计理念是在满足冬季室内温度标准前提下，充分利用调相机设备散热量，减少送风系统加热能耗，契合工业建筑节能减碳的发展需求。

以内蒙古通辽地区某单台 50Mvar 调相机厂房为例，项目地处严寒地区，冬季供暖室外计算温度为-19℃。依据厂家数据，50Mvar 调相机本体总散热量约 510kW，散入室内热量约 71.1kW，冷却设计风量约 72000m³/h，进排风设计温差约 21℃。

计算夏季排热通风量（进排风温差 10.8℃时）为 19535m³/h＜72000m³/h，为保持房间正压和节省设备投资，调相机散入室内的热量由调相机冷却系统承担，通风系统设备配置如下：送风机组 3 台，单台机组风量 27000m³/h。夏季及过渡季开启 3 台送风机组满足排热及维持室内正压。冬季开启 1 台送风机组，调节调相机排风管道上的旁通阀门，使部分被加热后的热空气回流至室内。

冬季设计工况下，维持室内 20℃时厂房围护结构热负荷约 48kW，室内余热量为调相机散入室内热量与围护结构热负荷的差值。为减少设备运行能耗，冬季按照运行 1 台送风机组计算。通风系统根据风量、热量平衡计算式如式（6）（7）所示。

$$G_{jj} = G_p + G_{zp} = 27000\text{m}^3/\text{h} = 10.425\text{kg/s} \quad (6)$$

$$c\cdot\left(G_p+G_{zp}\right)\cdot t_n = (71.1-48) + c\cdot G_{jj}\cdot t_w + c\cdot G_x\cdot\left(t_p-t_n\right) \quad (7)$$

式中：t_w=-19℃；t_p-t_n=21℃；c 取值 1.01kJ/(kg·℃)。

根据上述求得 G_x=18.27kg/s=58521m³/h，即调相机冷却系统旁通风量 58521m³/h。计算得 G_p=13479m³/h，即调相机冷却排风系统排至室外的风量 13479m³/h。通过调整调相机冷却排风系统中排风电动阀开度比时可满足计算要求，通风系统原理如图 3 所示。

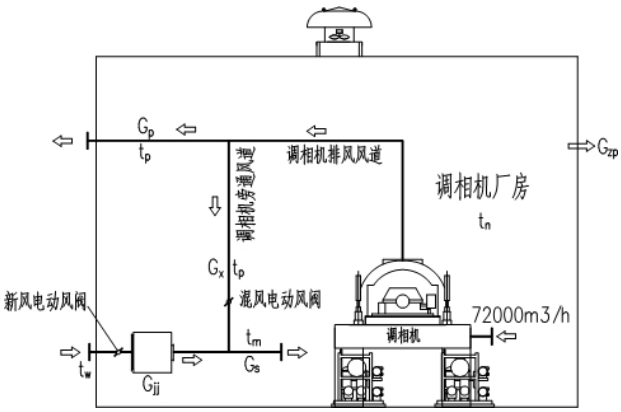


图 3　通风系统原理图

Fig.3　Schematic diagram of ventilation system

当冬季采用运行 3 台送风机组，将室外新风加热直接送入室内的方式时，取加热后送风温度 5℃，此时计算配置电加热器功率为：

$$P = c\cdot G_{jj}\cdot(t_{jj}-t_w) \quad (8)$$

式中：P 为电加热器功率，kW；G_{jj}=31.275kg/s；t_w=-19℃；t_{jj}=5℃。

代入数据求得 P=758kW。电加热输出功率依据室外温度进行控制，当室外温度高于 5℃时，电加热器关闭；低于 5℃时启动，通过调节加热器输出功率，使加热后送风温度保持在 5℃。

电加热器输出功率与室外气温的变化相关，上述电加热器输出功率与室外气温关系式如式（9）所示。

$$P_i = c \cdot L_{jj} \cdot \left(\frac{353}{273 + t_i} \right) \cdot (5 - t_i) / 3600 \quad (9)$$

计算整个冬季电加热器能耗如式（10）所示。

$$Q_d = \sum_i P_i T_i \quad (10)$$

式中：Q_d 为电加热器能耗，kWh；P_i 为室外温度 i℃时所需电加热器功率，kW；T_i 为室外温度 i℃持续时间。

通辽地区冬季室外温度低于 5℃的持续时间以及电加热器能耗如表 1 所示。

表 1　通辽冬季室外温度持续时间及电加热器能耗表

Table 1　Duration schedule of outdoor temperature and electric heater power consumption in Tongliao in winter

No.	t_i/℃	T_i/h	P_i/kW	Q_d/kWh	No.	t_i/℃	T_i/h	P_i/kW	Q_d/kWh
1	4	158	29	4576	13	-8	159	394	62571
2	3	158	58	9185	14	-9	159	425	67639
3	2	158	88	13827	15	-10	159	458	72746
4	1	158	117	18503	16	-11	159	490	77892
5	0	158	147	23214	17	-12	160	523	83600
6	-1	158	177	27959	18	-13	160	555	88858
7	-2	159	207	32946	19	-14	160	588	94157
8	-3	159	238	37792	20	-15	160	622	99497
9	-4	159	268	42674	21	-16	161	655	105534
10	-5	159	299	47593	22	-17	161	689	110991
11	-6	159	330	52548	23	-18	163	724	117938
12	-7	159	362	57541	24	-19	120	758	90957

根据表 1 计算整个冬季电加热器耗电量为 1440738kWh，即采用节能通风系统每年可节约 1440738kWh 用电量，按照 0.3 元/kWh 电费计算，每年节约运行费用约 43.22 万元，节能、环保、经济效益明显。这种基于热量回收的节能设计，是工业建筑通风系统低碳化改造的重要方向。

3　结语

本文采用热量平衡、风量平衡分析方法对空冷室内吸风调相机厂房通风系统进行设计研究，并以通辽单台 50Mvar 调相机厂房通风系统为例进行冬季节能计算。计算结果验证了冬季利用调相机冷却排风旁通回流至室内，在维持室内 20℃条件下，仅需运行 1 台送风机组，即可维持室内温度与正压。该方案节能效益分析表明，相比电加热新风直送方案，每年可节省耗电量约 144.1 万 kWh，节约运行费用约 43.22 万元，节能效果显著。该设计方案充分利用设备余热，降低了供暖通风能耗，可为严寒地区同类工业厂房通风节能设计提供参考。

参考文献：

[1] 成诚,邹强龙,张俊,等.直流特高压工程大型调相机组冷却系统选型分析[J].湖北电力,2016,(40):9-12.

[2] 陈薇.50Mvar 级 GVPI 空冷调相机定子两侧出线结构设计[J].电机技术,2022,(2):5-8.

[3] 郑东平,张嘉康,徐国俊,等.50Mvar 级空冷同步调相机通风及温升设计[J].电机技术,2021,(5):1-6.

[4] 王银.大容量空冷同步调相机流-热耦合模型及风量分配优化[D].北京:华北电力大学,2025.

[5] 陆耀庆.实用供热空调设计手册(2 版)[M].北京:中国建筑工业出版社,2008.