

地铁车辆空调系统设计要点分析

邢光绪

天津一号线轨道交通运营有限公司 天津 300000

摘 要：地铁车辆空调系统是保障乘客舒适度的关键系统。设计要点主要包括：空调负荷计算，需考虑气候条件、载客量等因素；均匀送风道设计，确保风量调节、温度流场等性能符合设计要求；自然排风帽设计，合理控制排风口面积以避免车内压力过高或空调负荷增加；以及控制系统设计，实现软件操控、状态监测与指令发布。设计时还需综合考虑车体保温、密封及材料工艺等问题，以优化系统效能。

关键词：地铁车辆；空调系统；设计要点

引言：随着城市化进程的加速，地铁作为城市公共交通的重要组成部分，其乘车环境的舒适度日益受到关注。地铁车辆空调系统作为确保乘客舒适度的关键设备，其设计合理与否直接关系到乘客的乘车体验。本文旨在深入剖析地铁车辆空调系统的设计要点，从负荷计算、送风道设计、排风系统优化、控制系统智能化及节能环保设计等方面展开探讨，以为地铁车辆空调系统的优化设计提供参考。

1 地铁车辆空调系统概述

1.1 系统组成

地铁车辆空调系统主要由以下几部分组成：（1）空调机组。作为系统的核心，空调机组负责制冷与制热功能。它通常采用环保型制冷剂，并通过压缩机、冷凝器、蒸发器等部件的协同工作，实现对车内温度的精确调控。此外，空调机组还具备除湿功能，能在潮湿天气中有效降低车内湿度，提升乘客的舒适体验。（2）送风系统与排风系统。送风系统负责将经过空调机组处理后的空气均匀地送入车厢内，确保空气流通与温度均匀分布。而排风系统则负责将车厢内的污浊空气排出，保持车内空气清新。这两大系统的协同工作，为乘客营造了一个健康、舒适的乘车环境。（3）控制系统与紧急逆变电源。控制系统负责监测车内温度、湿度等环境参数，并根据预设条件自动调节空调机组的工作状态，以实现节能与舒适度的最佳平衡。同时，它还能接收来自车辆控制系统的指令，实现与其他车载设备的联动控制。紧急逆变电源则用于在主电源故障时提供应急电力，确保空调系统在紧急情况下仍能维持一段时间的通风功能，以保障乘客安全。

1.2 系统功能

地铁车辆空调系统的功能主要体现在以下几个方面：（1）空气降温与除湿。在炎热的夏季，系统能够有效

降低车内温度，同时去除多余湿气，为乘客创造一个凉爽、舒适的乘车环境。这有助于减少乘客的疲劳感，提升乘车体验。（2）新风引入与空气质量保障。系统不断引入外界新鲜空气，并通过高效的空气净化装置去除空气中的尘埃、细菌、病毒等有害物质，确保车内空气质量达到健康标准。这有助于减少呼吸道疾病的传播，保障乘客的身体健康。（3）紧急通风功能。在紧急情况下，如火灾、停电等，系统能迅速切换为紧急通风模式，为乘客提供必要的氧气供应，并减缓烟雾积聚，保障乘客安全疏散。这一功能对于提升地铁列车的应急处理能力具有重要意义。

2 地铁车辆空调系统负荷计算与分析

2.1 负荷类型

地铁车辆空调系统的负荷主要包括以下四种类型：

（1）车体传热量与太阳辐射热负荷。这部分负荷主要由地铁车辆外壳与外界环境之间的热交换产生。车体材料、结构以及外界气候条件（如温度、湿度、太阳辐射强度）均会影响车体传热量的大小。太阳辐射热负荷则是指太阳光线直接照射到车体上，通过吸收、反射和透射作用进入车内的热量。（2）乘客散出的显热与潜热负荷。乘客在地铁车辆内活动时散发热量，这部分热量包括显热和潜热。显热是指人体因新陈代谢产生的热量直接散发到环境中，而潜热则是指人体通过汗液蒸发带走的热量。乘客负荷的大小与客流量、乘客密度、活动水平以及环境条件等因素有关。（3）车内机电设备、照明器具散发热负荷。地铁车辆内部安装的电机、控制器、照明灯具等设备在运行过程中会产生热量，这些热量会直接或间接地释放到车厢内，增加空调系统的负荷。设备负荷的大小与设备种类、功率、运行效率以及散热条件有关^[1]。（4）新风带来的显热与潜热负荷。为了保证车内空气的新鲜度和舒适度，空调系统需要不断

引入外界新鲜空气。新风在引入过程中会带入外界环境的温度和湿度,从而产生显热和潜热负荷。这部分负荷的大小与新风量、外界空气温湿度以及车厢内目标温湿度有关。

2.2 负荷影响因素

地铁车辆空调系统的负荷受多种因素的影响,主要包括:(1)客流量与列车运行状态。客流量的大小直接影响乘客负荷的大小,而列车运行状态(如加速、减速、匀速)则会影响车内空气流动和温度分布,从而影响传热负荷。(2)隧道环境条件与列车运行时间。隧道内的温度、湿度、风速等环境条件会影响车体传热负荷和太阳辐射热负荷的大小。同时,列车运行时间的不同也会导致负荷的变化,例如早晚高峰时段与平峰时段的负荷差异。(3)车体材料与结构,包括传热系数。车体材料的导热性能和隔热性能以及车体的结构设计直接影响热量的传递效率。传热系数是衡量材料导热性能的重要指标,它决定了热量通过车体材料的传递速度。

2.3 负荷计算方法

针对不同类型的负荷,需要采用不同的计算方法:

(1)传热负荷计算。可以采用热传导方程来计算车体传热量,同时考虑车体材料、结构以及外界气候条件的影响。太阳辐射热负荷则可以通过太阳辐射强度、入射角、车体表面反射率和透射率等参数进行计算。(2)乘客散热量计算。可以根据人体热平衡方程和乘客活动水平、环境条件等因素来估算乘客散出的显热和潜热负荷。(3)车内机电设备、照明器具散发热负荷计算。可以通过设备功率、运行效率以及散热条件等参数来估算设备负荷的大小。(4)新风负荷计算。可以采用焓湿图法来计算新风带来的显热和潜热负荷,同时考虑新风量、外界空气温湿度以及车厢内目标温湿度的影响。

3 地铁车辆空调系统关键设计要点

3.1 送风道设计

(1)送风方式选择。送风方式的选择需综合考虑车厢结构、乘客分布、空气动力学原理以及能耗等多方面因素。单端送风方式结构简单,适用于较短车厢,但可能存在送风不均匀的问题;双侧送风则能更好地实现车厢内空气的均匀分布,提高乘客舒适度,但相应地对风道布局 and 材料选择提出了更高要求。设计时,应根据具体车型和运行环境,权衡利弊,选择最合适的送风方式。(2)风道结构与尺寸优化。风道结构的设计应尽可能减少空气流动阻力,提高送风效率。通过CFD(计算流体动力学)模拟,可以优化风道形状、尺寸和内部导流装置,确保空气在风道内流畅、无涡流,从而降低能

耗。同时,风道材料的选择也需兼顾轻量化和耐用性,以满足地铁车辆的轻量化需求和长期运行可靠性。(3)送风口与回风口设计。送风口的设计需确保空气能够均匀、柔和地吹向乘客,避免直吹造成的不适感。可采用扩散板、导风片等装置来优化送风角度和速度。回风口的位置和尺寸也需精心布局,以便有效收集车厢内的污浊空气,保持空气循环畅通。此外,回风口还应具备一定的防尘、防虫功能,确保进入空调系统的空气质量^[2]。(4)均匀送风与降低噪声的措施。为了实现均匀送风,可在风道内设置多个送风口,并根据车厢长度和宽度合理分布。同时,采用消声器、隔音材料等降噪措施,减少空气流动和机械振动产生的噪音,提升乘客的乘车体验。

3.2 排风系统优化

(1)排风帽设计与风量控制。排风帽的设计需考虑空气动力学原理,确保排风顺畅且噪音低。通过优化排风帽的形状、尺寸和内部结构,可以有效提高排风效率,减少能耗。同时,风量控制系统需根据车厢内空气质量、乘客数量等因素动态调节排风量,以保持车厢内空气的新鲜度和舒适度。(2)与新风系统的协调运行。排风系统与新风系统应紧密配合,确保在排风的同时有新风及时补充,维持车厢内空气平衡。通过智能控制系统,可以实时监测车厢内空气质量,并根据需要自动调节排风和新风量,实现节能与舒适的双重目标。

3.3 控制系统设计

(1)自动控制与手动控制策略。控制系统应具备高度自动化和智能化特点,能够根据车厢内温度、湿度、空气质量等参数自动调节空调运行状态。同时,提供手动控制模式,以便操作人员在特殊情况下进行干预。自动控制策略应兼顾节能和舒适,通过先进的算法和模型预测控制,实现能效最大化。(2)网络连接与信息传递。控制系统应具备网络连接能力,能够实时传输和接收数据,实现远程监控和故障诊断。通过网络平台,可以实时监控各车厢空调系统的运行状态,及时发现并处理潜在问题,提高系统的可靠性和稳定性。(3)紧急情况下的应对措施。控制系统需设计有紧急停机、备用电源启动等应急措施,确保在火灾、电力故障等紧急情况下仍能维持基本通风功能,保障乘客安全^[3]。

3.4 新风系统优化

(1)新风量动态调节策略。新风量的动态调节是实现节能与舒适的关键。通过集成传感器和先进的控制系统,可以实时监测车厢内外空气质量、温湿度以及乘客数量等信息,并根据这些信息精确调节新风量。在乘客密集或外界空气质量不佳时,适当增加新风量以确保车

厢内空气新鲜；而在乘客稀少或外界空气良好时，则减少新风量以降低能耗。这种动态调节策略不仅提高了乘客的舒适度，还有效节约了能源。（2）新风热回收技术应用。新风热回收技术是一种高效的节能手段。在地铁车辆空调系统中，可以利用排风中的热量或冷量来预热或预冷新风，从而减少空调系统的能耗。通过安装热交换器，将排风与新风进行热交换，实现能量的回收和利用。这种技术不仅提高了能效，还减少了对外界环境的热污染，符合绿色、环保的设计理念。

3.5 节能与环保设计

（1）变频控制技术应用。变频控制技术是实现地铁车辆空调系统高效运行的重要手段。通过调节电机转速，可以精确控制送风、排风以及压缩机等关键部件的功率输出，从而匹配实际负荷需求，避免不必要的能耗。特别是在低负荷运行时，变频控制技术可以显著降低能耗，提高系统能效。（2）低能耗设备选型与材料使用。在地铁车辆空调系统的设计中，应注重选用能效等级高、运行可靠的设备。例如，选择高效压缩机、低噪音风机、节能型热交换器等。同时，在材料使用上，应优先考虑环保、轻质且耐腐蚀的材料，以减少资源消耗和环境污染^[4]。（3）冷凝器散热与隧道热环境优化。冷凝器的散热效率对地铁车辆空调系统的能效具有重要影响。为了提高散热效率，可以采取多种措施，如优化冷凝器结构设计、增加散热面积、采用高效散热材料等。此外，还可以利用隧道内的热环境来优化冷凝器的散热。例如，在隧道内设置热交换装置，利用隧道壁的热量来预热新风或冷却排风，从而实现对冷凝器散热的辅助作用。

4 地铁车辆空调系统设计实践

4.1 设计原则与目标

在设计地铁车辆空调系统时，遵循以下原则与目标：（1）根据负荷计算结果确定系统容量。首先，通过专业的负荷计算软件，结合地铁车辆的实际运行环境、乘客密度、气候条件等因素，精确计算出所需的空调负荷。然后，根据这个负荷结果来确定空调系统的容量，以确保系统既能满足乘客的舒适度需求，又不会过度消耗能源。（2）综合考虑系统能效比、经济性、环保性。在设计过程中，注重提高系统的能效比，即单位能耗所

能提供的制冷或制热能力。同时，也考虑系统的经济性和环保性，选择性能优异、能效高且符合环保标准的设备和材料，以降低系统的全生命周期成本并减少对环境的影响。

4.2 设计实例分析

以某城市地铁车辆空调系统设计为例，遇到了以下挑战并提出了相应的解决方案：（1）设计挑战。该城市夏季炎热潮湿，对空调系统的制冷能力提出了很高的要求。同时，地铁车辆内部空间有限，对空调设备的尺寸和布局也提出了严格限制。（2）解决方案。采用了高效节能的变频空调系统，通过智能控制算法实时调整设备运行状态，以适应不同负荷需求。此外，还对空调设备的布局进行了精心设计，充分利用车辆内部空间，确保系统既能提供足够的制冷能力，又不会对乘客的乘坐体验造成负面影响。（3）实际运行效果与改进建议。经过实际运行测试，该系统表现出了良好的制冷效果和节能性能。然而，也发现了一些需要改进的地方，如进一步优化控制系统算法以提高能效比，以及加强系统的维护和保养工作以延长设备使用寿命。针对这些改进建议，已制定了相应的措施并计划在未来的设计中加以实施。

结束语

综上所述，地铁车辆空调系统的设计是一个复杂而细致的过程，需综合考虑多种因素以确保系统的性能与效率。通过精准的负荷计算、优化的送风道与排风系统设计、智能化的控制系统以及节能环保的措施，我们能够打造出既满足乘客舒适度需求又高效节能的地铁车辆空调系统。未来，随着技术的不断进步和创新，我们有理由相信地铁车辆空调系统的性能将会更加卓越，为乘客提供更加优质的乘车体验。

参考文献

- [1]温凯.论述地铁车辆空调系统的结构与工作原理[J].中国科技纵横,2020,(06):64-65.
- [2]王业,张参,张丽.地铁车辆空调系统设计要点简析[J].科技创新与应用,2020,(03):31-32.
- [3]穆广友,臧建彬.地铁车辆空调系统设计要点分析[J].城市轨道交通研究,2021,(11):129-130.
- [4]邓增林.地铁车辆空调系统研究[J].科技与企业,2021,(13):131-132.