

基于FTA的毛细管辐射空调系统故障诊断的应用研究

近年来,随着毛细管辐射空调系统的兴起,该系统运行上出现的问题也接踵而至,给用户带来很大的困扰。以实际工程系统为基础,经过分析,采集,考察该系统结构和工作原理,选取该系统中最常见故障之一“夏季房间温度过高”作为顶事件,建立故障树模型后采用上行法求解最小割集,并在实例中应用该故障树模型。在成功排除故障的基础上提出适用于该系统的故障现象及故障诊断意见,为该类系统稳定运行提供参考。

刘润东 刘成刚/苏州科技学院环境工程学院

0 引言

从20世纪90年代中期德国首先开发出聚丙烯毛细管网系统,到21世纪北京某公司与北京化工大学合作将毛细管网国产化,毛细管辐射空调由于其具备高舒适性、高效节能和绿色环保等特性不仅得到越来越多的欧美建筑师和暖通工程师的青睐,而且还在我国建筑应用中比例大幅升高。然而在新技术兴起的背后,毛细管作为空调系统末端出现的运行问题严重影响了系统本身高舒适度的优势,国内外很少有人研究该系统的运行及故障,加上维修人员在此知识上的匮乏,导致问题加剧从而阻碍了该技术的进一步推广。因此,对该系统进行故障诊断研究具有重要意义。

故障树分析法(FTA)是一种以逻辑性强为特点的故障诊断方法,它用逻辑门的方式表示了从顶事件到底事件所有的逻辑关系,如果故障树模型建立准确,将具有故障源检索完全,直观明了的优点^[1, 2]。通过这种方法对毛细管辐射

空调系统进行故障诊断分析,一方面可以填补这种特殊新型空调系统故障诊断研究的空白,另一方面提供一些毛细管作为末端的故障诊断意见,为该类系统稳定运行提供参考,从而推动该技术的发展。

1 毛细管辐射空调系统结构与原理

在我国常见的毛细管辐射空调系统主要有三种表现形式的应用。太阳能与毛细管末端相结合的空调供暖系统,蒸发冷却与毛细管网辐射供冷相结合,最为常见的是热泵与毛细管辐射末端相结合的空调系统,热泵包括空气源热泵、水源热泵和地源热泵等^[3]。本文基于FTA分析故障时所选取的研究对象是地源热泵与毛细管辐射末端组合的空调系统,同时毛细管辐射空调末端还配备较为常见的独立新风的形式。

以苏州某高校的实验楼为研究对象,该系统选取两台型号为MWH020CB的地源热泵(冷水)机组,一用一备,在热泵机组中有两台并联的全封闭式涡旋式压缩机,该压缩机可根据两套水系统进出机组的温度通过模糊控制确定启动台数,冷却水系统由两台水泵设计参数为22 m³/h并联加上地埋管组成,冷冻水系统由两台水泵设计参数为32 m³/h并联组成,两个水系统中均配有定压罐,冷冻水系统末端分别连接毛细管网、风机盘管和新风机组,空调系统原理示意图如图1所示,末端原理和结构如图2



刘润东/硕士研究生

关键词/Keywords

故障树分析·
毛细管辐射空调·
最小割集·
故障诊断·

所示。

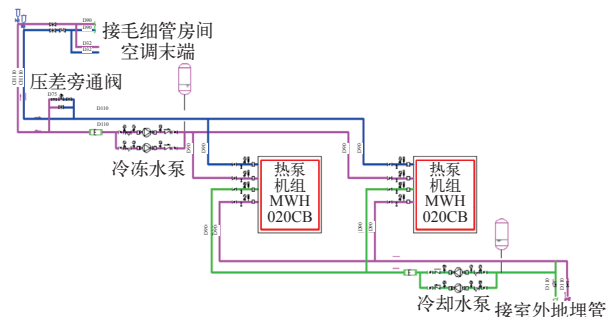


图1 空调系统原理示意

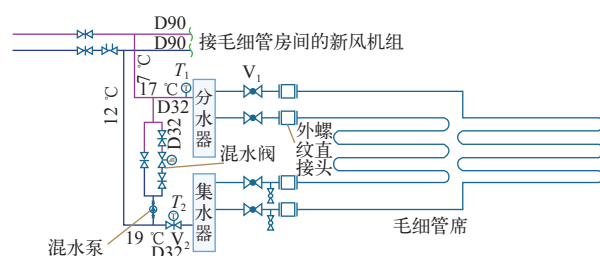


图2 毛细管空调末端示意

标准毛细管网房间总尺寸为7.2 m × 7.2 m × 3.6 m，吊顶距地面为2.8 m，毛细管网换热器由4.3 mm × 0.8 mm 的毛细管相互间隔20 mm排列构成，再粘在石膏吊顶下面制成辐射板，末端结构采用供回水主管与若干毛细管组成集分式结构。由于该冷冻水系统并非单纯地供给毛细管网房间，故冷冻水主管的温度仍为常规空调系统中的供回水温度，而毛细管网的供回水温度则是由混水阀根据进入毛细管网的供水温度传感器来自动控制混水量来调节，夏季使供水温度由7℃提升至17℃，回水温度由12℃提升至19℃，再通过循环泵和集分水器分配毛细管网的流量。

该末端房间运行时，毛细管网承担大部分显热负荷，新风机组则承担所有的湿负荷和部分的显热负荷，为保证毛细管房间的除湿效果，由毛细管房间的新风机组将新风处理到低于室内含湿量后送入房间，新风机组的结构和原理如图3所示。

2 故障树模型的建立

故障树分析法选取对系统影响因子大的故障作为顶事件，通过研究系统及设备部件的特点，找出导致故障发生的中间事件和底事件，再运用逻辑

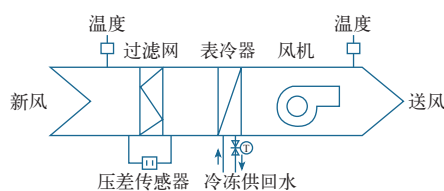


图3 新风机组原理

辑“或门”和“与门”将这些事件相互连接，形成逻辑清晰的倒树状结构的故障树模型^[4]。

2.1 故障树模型建立的前提和准则

首先，空调系统的运行过程中发生的故障分为硬故障与软故障：硬故障是指部件或设备完全失效的情况，例如水泵、风机直接烧毁等，一般易于被检测到；软故障是指部件性能下降或部分失效的各种故障，通常随着时间慢慢出现，在初期往往难以被检测到，如系统中风管、水管的结垢，材料的传热性能下降等。本文故障树模型建立时主要考虑该空调系统运行过程中的软故障，不考虑空调系统出现明显的故障特征，通过理论分析故障产生原因，建立合理准确的故障树模型。

其次，本文在基于研究对象分析之前，只考虑系统中各设备及部件参数均满足设计参数并已完成系统调试，在故障树模型的建立中不包含设计本身上的偏差和设备选型不当等问题。

本文主要针对毛细管辐射空调的用户侧系统进行分析，所以分析到冷源侧时，本次研究不考虑冷源侧的机械故障，将“冷机制冷能力下降”作为不可分割的底事件。

2.2 故障树中的使用符号

顶事件：系统中最不希望发生的故障事件称为顶事件，符号为□。中间事件：系统中介于顶事件和底事件之间的一切事件称为中间事件，符号为◻。底事件：导致顶事件产生的最后一级原因，因无法或没有必要追究其产生的原因称为底事件^[5]，符号为○。逻辑“与门”：因果关系上它表示为两个或两个以上的不同事件同时发生时才能触发上一级事件的发生，符号为◻。逻辑“或门”：因果关系上它表示为多个事件中只要有其中一个事件发生就触发上一级事件的发生，符号

为 Δ ^[6]。

2.3 故障树模型的搭建

要建立准确的故障树，首先要对该系统的组成和工作原理有深刻的认识，同时在系统运行时，熟悉各部件的结构、作用及相互关联性，再结合平时积累的专业知识和维修管理经验，对系统原理图、系统结构图和控制逻辑流程图等进行综合分析。

毛细管作为空调系统的末端时，主要的换热方式是辐射换热，据相关资料显示毛细管辐射板

室内的辐射换热量占到了60%，与常规的风机盘管的结构和原理有很大的不同，如何保持房间的舒适性显得尤为重要。本文选取“夏季房间温度过高”为顶事件利用FTA进行故障诊断分析，在构建故障树过程中，参考最新的理论成果^[7-10]和故障维修的实际经验，循序渐进地找出每层事件所有可能出现的原因，逐步分解到基本事件为止。

选取“夏季房间温度过高”为顶事件所构建的故障树如图4所示。图4中 T 为顶事件， M 为中间事件， X 为底事件。

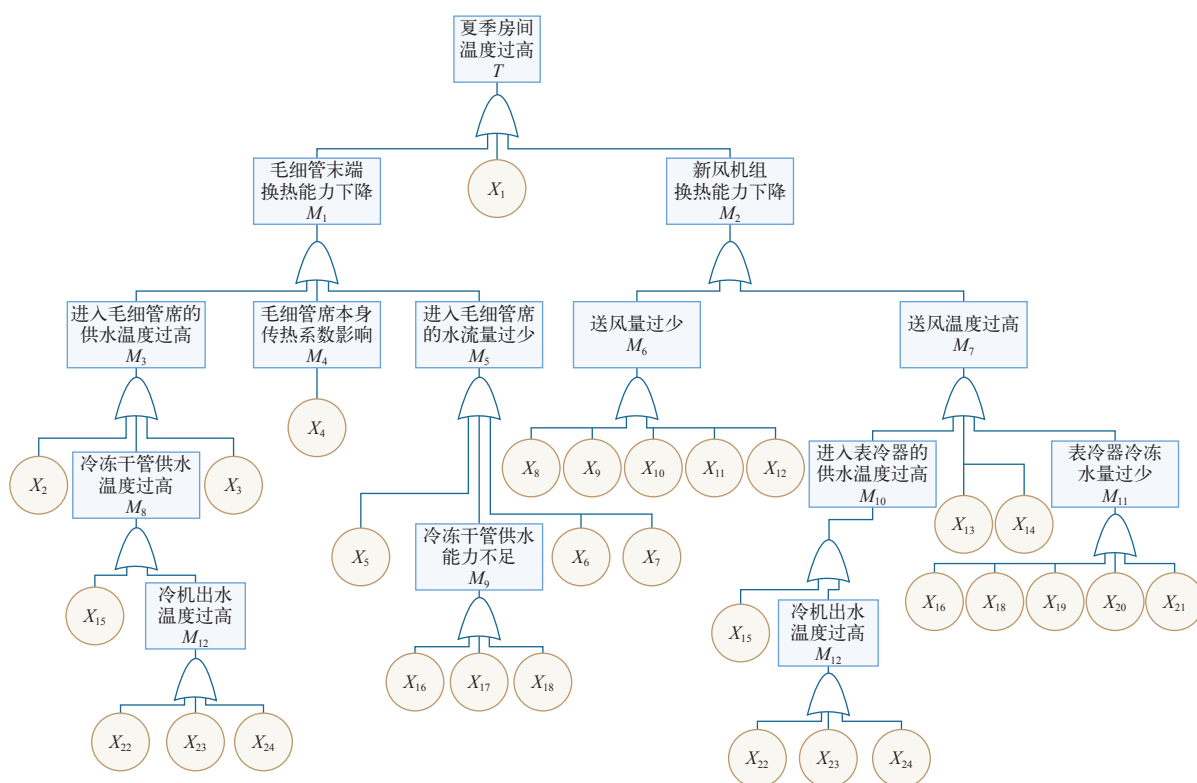


图4 “夏季房间温度过高”为顶事件的故障树

图4中各事件的含义如表1所示。

研究最小割集可找出系统的最薄弱环节，对它们及时采取措施如更换部件，定期清理等都会有效地提高系统运行的效率和稳定性，降低运行成本。故障树最小割集的完整集合代表了顶事件发生的所有可能性，即给定系统的全部故障因素。在已建立好的故障树模型基础上求解最小割集时，较为常用的有上行法和下行法两种。本文采用上行法，即从最下级的中间事件开始，按照

逻辑门运算法则，用底事件表示中间事件，自下而上，每一步都利用集合运算规则进行简化、吸收，最后得到全部的最小割集。计算过程如下。

$$M_{12} = X_{22} + X_{23} + X_{24}$$

$$M_8 = X_{15} + M_{12}$$

$$M_9 = X_{16} + X_{17} + X_{18}$$

$$M_{10} = X_{15} + M_{12}$$

$$M_{11} = X_{16} + X_{18} + X_{19} + X_{20} + X_{21}$$

$$M_3 = X_2 + X_3 + M_8$$

表1 故障树各事件含义表

编号	含义	编号	含义	编号	含义
T	夏季房间温度过高	X_1	房间温度传感器失效	X_{14}	表冷器气侧积灰
M_1	毛细管末端换热能力下降	X_2	混水温度传感器失效	X_{15}	冷冻水管道保温不佳
M_2	新风机组换热能力下降	X_3	混水控制阀卡在较大开度处	X_{16}	冷冻水泵输水能力降低
M_3	进入毛细管席供水温度过高	X_4	毛细管席形成水垢	X_{17}	冷冻水干管出现气塞
M_4	毛细管席本身传热系数影响	X_5	手动平衡阀较小开度状态	X_{18}	压差旁通阀在开度较大处
M_5	进入毛细管席的水流量过少	X_6	毛细管席水路堵塞	X_{19}	表冷器管道出现气塞
M_6	送风量过少	X_7	毛细管席控制阀卡在较小处	X_{20}	控制水阀门卡在开度较小处
M_7	送风温度过高	X_8	新风平衡阀卡在开度较小处	X_{21}	表冷器的水侧堵塞
M_8	冷冻干管供水温度过高	X_9	新风入口处的过滤网堵塞	X_{22}	人为设定温度偏高
M_9	冷冻干管供水能力不足	X_{10}	风机送风能力下降	X_{23}	冷机制冷能力下降
M_{10}	进入表冷器的供水温度过高	X_{11}	新风管道堵塞	X_{24}	机组出水处的温度传感器失效
M_{11}	表冷器中的冷冻水量过少	X_{12}	新风管道漏风严重		
M_{12}	冷机出水温度过高	X_{13}	表冷器水侧结垢		

$$\begin{aligned}M_4 &= X_4 \\M_5 &= X_5 + X_6 + X_7 + M_9 \\M_6 &= X_8 + X_9 + X_{10} + X_{11} + X_{12} \\M_7 &= M_{10} + M_{11} + X_{13} + X_{14} \\M_1 &= M_3 + M_4 + M_5 \\M_2 &= M_6 + M_7 \\T &= M_1 + M_2 + X_1 \\T &= X_1 + (M_3 + M_4 + M_5) + (M_6 + M_7) = X_1 + X_2 + \\&X_3 + X_4 + X_5 + X_6 + X_7 + X_8 + X_9 + X_{10} + X_{11} + X_{12} + X_{13} \\&+ X_{14} + X_{15} + X_{16} + X_{17} + X_{18} + X_{19} + X_{20} + X_{21} + X_{22} + \\&X_{23} + X_{24}\end{aligned}$$

运算结果显示，最小割集的完整集合就是全部底事件，表1中的底事件 X 就是毛细管辐射空调系统的“夏季房间温度过高”的全部故障因素，为下一步找出系统薄弱环节及实际工程应用打下基础。

3 故障树模型的应用

本实际工程在正常运行两年后，在夏季的某几天中毛细管辐射空调的使用者反映出现房间过热的现象，根据“夏季房间温度过热”故障树模型，结合已有的监控系统和仪器进行了现场测试与诊断，以下为实际操作步骤。

第一步：监测系统数据显示房间温度传感器温度为30.2℃，远高于夏季房间设计参数的

25±1℃，根据图4首先检测房间的温度传感器是否失效，即检查底事件 X_1 是否发生。采用HOBO温湿度记录仪在线同步测得实际温度为30.4℃，对比温度传感器所显示温度，发现在允许误差范围以内，排除了“温度传感器的失效”问题，同时证实了故障的发生。

第二步：检测毛细管末端换热能力是否下降，即检查中间事件 M_1 ，依照图4故障树先检测中间事件 M_3 ，监控系统显示进入毛细管席的供水温度 T_1 （见图2）为16.5℃，其中毛细管供水温度设计参数为17±1℃，本次显示处于范围之内，再采用温度计实际测量供水温度为16.8℃，属于在允许误差范围内，排除了混水后的水温温度传感器的故障问题，继而也就排除了“进入毛细管席的供水温度过高”故障下的所有底事件。

第三步：检测是否为毛细管席本身传热系数影响，即检查中间事件 M_4 ，现场测量进入毛细管席的供水温度和回水温度，供水温度 T_1 处为16.5℃，回水温度 T_2 处为23.6℃，其中毛细管供水温度设计参数为19±1℃，本次测量值远高于设计值，从而排除了“毛细管席形成水垢”的故障原因。

第四步：根据故障树模型，在排除中间事件 M_3 、 M_4 后，可以确定进入毛细管席的水流量过少，即中间事件 M_5 ，现场采用流量计对进入毛细管席的水流量进行测量，数值为12 kg/h，测量结

果显示水流量远低于夏季设计值的21~25 kg/h，接着依照故障树 M_5 往下检测；检测集水器后的控制阀 V_2 部分是否卡死在较小处，即检查底事件 X_7 ，现场操作控制阀开度由100%降到0%，同时检查回水温度，该温度随阀门的开度变化而变化，证实阀门并未卡死，从而排除了“控制阀卡死在较小处”的故障。

第五步：检测冷冻干管的水流量是否处于设计值范围以内，即检查中间事件 M_9 ，现场采用流量计对冷冻干管的水流量进行测量，测得冷冻干管水流量为31.4 m³/h满足设计值的28~32 m³/h，从而排除了“冷冻干管供水能力不足”下的所有故障因素。

第六步：检测由分水器到毛细管席末端的手动平衡阀 V_1 是否处于较小开度状态，即检查底事件 X_5 ，作为手动平衡阀开度通常为75%~100%，

现场核查后该手动截止阀 V_1 处于25%的开度，处于异常。经过询问后得知，该系统在春季时系统曾经漏水后，相关维修人员误操作平衡阀，遗留开度在较小处，在负荷较小时，该隐藏故障并不会导致房间温度过高，当夏季负荷变高后，导致了此次故障的发生，找到了本次故障原因为“手动截止阀部分开启状态”，在重新调整毛细管席手动平衡阀到合适开度后，毛细管房间温度为25.4℃，系统恢复正常，同时给出维修意见“重新调整毛细管席手动平衡阀到合适开度”。

以上一系列过程证实了所建故障树模型的实际有效性及高效性，本文根据实际经验针对底事件的故障原因给出维修意见，如表2所示。

4 结束语

本文基于实际工程展开对毛细管辐射空调

表2 故障维修意见

故障编码	故障原因	维修建议
X_1	房间温度传感器失效	更换房间温度传感器或重新调校
X_2	混水温度传感器失效	更换混水温度传感器或重新调校
X_3	混水控制阀卡死在较大开度处	更换混水控制阀
X_4	毛细管席形成水垢	定期进行除垢和清洗
X_5	手动平衡阀较小开度状态	重新调整毛细管席手动平衡阀到合适开度
X_6	毛细管席水路堵塞	反冲洗或更换毛细管席
X_7	毛细管席控制阀卡死在较小处	更换毛细管席控制阀
X_8	新风平衡阀卡死在开度较小处	更换新风平衡阀
X_9	新风入口处的过滤网堵塞	更换或定期清洗过滤网
X_{10}	风机送风能力下降	维修或更换风机部件
X_{11}	新风管道堵塞	定期清理风管道
X_{12}	新风管道漏风严重	修补新风管道
X_{13}	表冷器水侧结垢	定期进行除垢和清洗
X_{14}	表冷器气侧积灰	定期进行除垢和清洗
X_{15}	冷冻水管道保温不佳	修复保护层，增补保温层
X_{16}	冷冻水泵输水能力降低	维修或更换水泵部件
X_{17}	冷冻水干管出现气塞	采取管道排气措施
X_{18}	压差旁通阀在开度较大处	更换或重新调整压差旁通阀
X_{19}	表冷器管道出现气塞	采取管道排气措施
X_{20}	控制水阀门卡死在开度较小处	更换表冷器的控制水阀门
X_{21}	表冷器的水侧堵塞	反冲洗或更换表冷器
X_{22}	人为设定温度偏高	重新设定合适温度
X_{23}	冷机本身能力下降	联系专业维修人员对冷源系统检修
X_{24}	机组出水处的温度传感器失效	更换机组出水处的温度传感器或重新调校

系统的故障诊断方法研究,得到了有效的故障树模型,求解了最小割集,并在实际工程中得以应用和证实,节省了诊断时间,减少了不必要的拆卸,解决了已安装毛细管辐射空调系统的用户的担忧,为毛细管辐射空调系统的稳定运行和进一步推广打下了基础,同时弥补了毛细管辐射空调故障研究的空白,对该空调系统的发展和应用有着实际意义。

参考文献

- [1] 孙立. 地源热泵集中空调系统故障诊断 [D]. 成都: 西南交通大学, 2010.
- [2] 胡珊. 基于FTA地源热泵解水系统故障诊断专家系统研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2013.
- [3] 丁岳, 刘成刚. 浅埋地源热泵与毛细管空调组合系统应用研究 [J]. 流体机械, 2015 (1): 82-86.
- [4] 米祖强. 基于FTA的飞行模拟机故障诊断专家系统 [J]. 科学技术与工程, 2012, 12 (19): 4852-4856.
- [5] 朱芳仪. 故障树分析法在工控故障诊断中的应用 [J]. 现代电子技术, 2012, 35 (8): 104-106.
- [6] 吴欠欠, 王直, 董贺, 等. 故障树分析法在船舶柴油机故障诊断中的应用研究 [J]. 机械设计与制造, 2009 (1): 77-78.
- [7] 冯国会, 崔洁, 黄凯良, 等. 基于太阳能热水的毛细管网壁面低温辐射采暖系统 [J]. 沈阳建筑大学学报: 自然科学版, 2013, 29 (2): 320-326.
- [8] 朱志朋, 翁文兵. 空气源热泵辅助太阳能毛细管辐射供暖系统 [J]. 煤气与热力, 2010, 30 (1): 7-9.
- [9] 吴洁. 毛细管辐射空调系统负荷计算及结露问题的研究 [D]. 济南: 山东建筑大学, 2014.
- [10] 史新民. 故障树分析法在注塑机液压系统维修中的应用 [J]. 机床与液压, 2014 (13): 186-188.

(收稿日期: 2016-11-27) **EA**

信息动态

魏德米勒2016工博会精彩回顾

一年一度的中国国际工业博览会完美谢幕,高科技的产品,人头攒动的展台,有趣的互动,智能制造的落地,2016工博会给人留下了深刻的印象。

魏德米勒恢弘大气的展台吸引了众多参观者驻足观摩,展台集中展示了魏德米勒关注五大行业的解决方案及助力智能制造的新产品,与展会“智能化、信息化和数字化助力未来制造”的主题完美契合。

此次魏德米勒的新产品A-系列直插式接线端子,包含通用类产品及应用类产品两个系列。应用类接线端子针对装配机柜中常见的应用领域提供定制化的解决方案,通用类接线端子能为用户的联接提供多种接线技术的选择。

创新的Klippon® Connect接线端子优化了装配机柜的生产效率,无论是在项目的规划、安装还是操作阶段,产品和流程支持解决方案为所有阶段产生附加值。

荣获2016CEC年度最佳产品奖的魏德米勒“非接触式”电力转换系统是魏德米勒有史以来第一次为工业领域的各种应用而专门设计的传输系统。非接触式电力转换系统采用感应耦合共振传输高达240 W的功率,通过达5 mm的空气间隙,能直接达到90%的转化效率。非接触式电力

转换系统是目前市场上唯一可直接通过一个控制器而无需使用额外接触器的系统,免维护的能量传输系统被设计得非常紧凑,尺寸仅为100 mm×100 mm,高度47 mm。

作为Klippon® Connect产品组合的一部分,魏德米勒提供的maxGUARD能够准确、持续地进一步发展控制电压分配。魏德米勒maxGUARD通过一个完整的解决方案提供了负载监控和等电位分配——它集高效和创新于一体,是一个应用类产品。魏德米勒maxGUARD具有模块化设计,因此用户只须为他们真正需要的负载监测承担费用,可以在空间和布线上大大节省投入。

魏德米勒u-remote最新的DeviceNet及CANopen现场总线耦合器将提供用户模块化的I/O系统规划功能,能为现场总线I/O产品提供最大的兼容性和全面的故障诊断。

魏德米勒展台设置了WMC软件演示区,观众通过计算机演示亲身了解WMC软件如何帮助他们更好的规划;工业4.0触摸屏展示也让观众更直观地了解魏德米勒支持工业4.0落地的解决方案;产品经理们现场为观众答疑解惑,讲解+亲身体验的模式让观众更全面深刻地了解魏德米勒。此外,魏德米勒还首次在微博直播平台与观众互动,充分点燃了观众的参与热情。