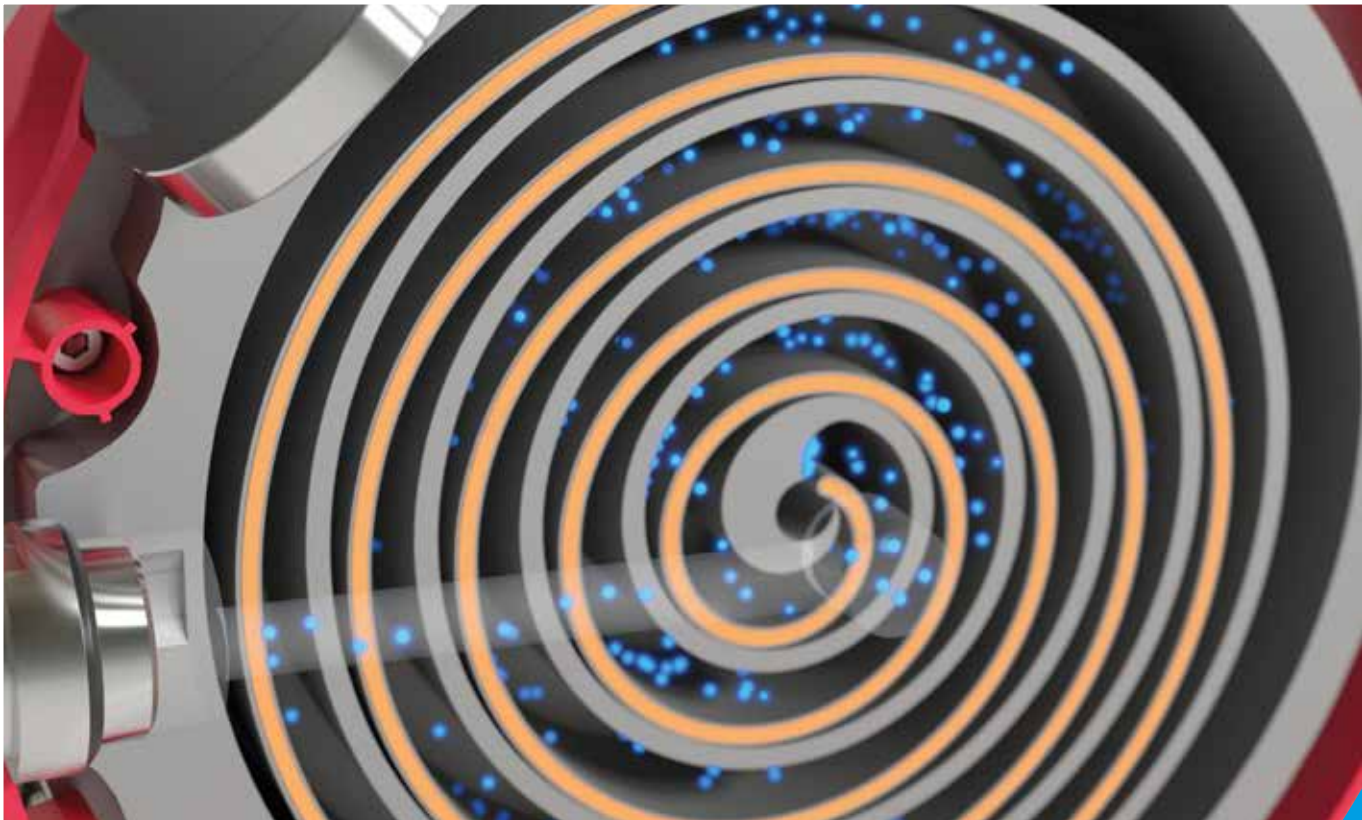


优化涡旋泵的生命周期成本 实现温度管理

干式涡旋泵适用于需要无油泵送的工艺。它们足以替代广泛使用的旋片泵，因为旋片泵的抽速并不逊色。然而，其所需的干式密封件会逐渐磨损，而泵内的温度条件对此起着重要作用。通过将工作温度降低15%，可延长维护间隔，并在更高的吸入压力下实现更高的性能。同时，测量工作参数的冗余性也提高了运行可靠性。

为了优化温度，我们使用有限元法（FEM）计算了泵在三种运行条件和不同设计变量下的温度场。这样就可以确定热引起磨损最大的点。因此，根据传感器的温度读数和电机的功率消耗，开发出了智能风扇控制系统。

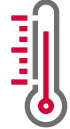


涡旋泵整体热系统示意图

新开发的涡旋泵可以使用数值模拟技术来预测和优化整个泵内的温度分布。此外，还可以确定无法进入点的温度，并找出热点。在产品开发过程中，使用有限元法 (FEM) 计算泵部件在三种工作状态和不同设计变量下的温度场。

绘制整体热系统图的问题在于，并非所有的物理现象都能完全解决，因此并非所有的边界条件都是已知的。这些现象包括

- 腔体内运动流体的热传导
- 通过旋转轴承的热传导，润滑油也在其中循环
- 由于外壳外表面的强制对流、关键字撞击流和罩的偏转而产生的传热系数



为了确定未知参数，我们采用工程方法将其与实际原型机的温度读数进行拟合。图 1 展示了拟合过程。首先，根据经验值假设不确定的参数，计算有限元模型，然后与可用的测量点进行比较。然后对参数进行调整并再次计算，直到测量与模拟之间的一致性令人满意为止。实践证明，测量值和模拟值之间的一致性大于 94 % 是令人满意的。这一过程针对三种不同的运行状态进行。只有当所有状态下的测量值和计算值偏差都很小时，才能认为参数的确定是合理的。有了数值模型和边界条件，就可以对进一步的设计方案进行比较和评估。



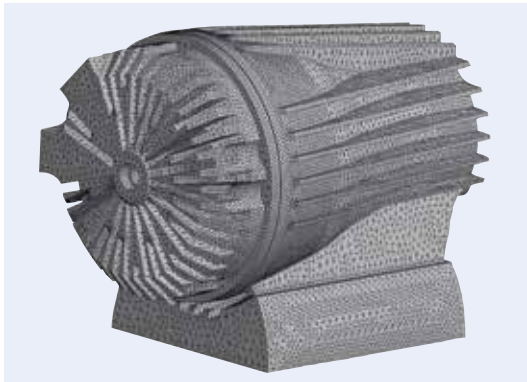


图 2：涡旋泵的计算网格。

为后续计算建立基本模型

考虑热稳定状态，并将泵作为静态系统建模。数值计算网格由 1,200,000 个节点组成（图 2）。该网格分辨率足以评估温度，因为温度的导数热流密度作用不大。轴承以简化方式映射，轴承材料的导热系数作为自由参数根据测量值进行调整。在泵容积中，气体分布在最内侧的三个腔中，因为这里的压力最高。在外部通道中，由于压力较低，热传导份额和压缩功率都较低，因此这里的气体被忽略。

涡旋泵的功率损耗以确定热源

在实验中，确定了泵在最终压力（无气体流动）以及两种不同气体负载下的总功耗。能量在泵内通过以下损耗机制转化为热量：

- 电机损耗，其中大部分发生在电机定子中。
- 电力电子设备/末级中的损耗
- 轴承摩擦
- 两端密封的摩擦力
- 气体的压缩力
- 气体散热（如果存在气体负载）
- 波纹管中的能量耗散

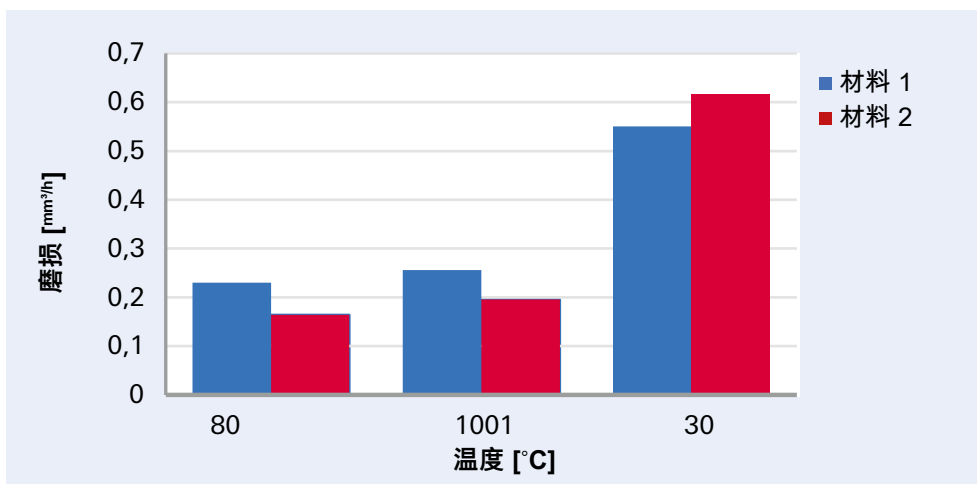


图 1：两种塑料的平均磨损值与温度的关系，由普发真空测量。

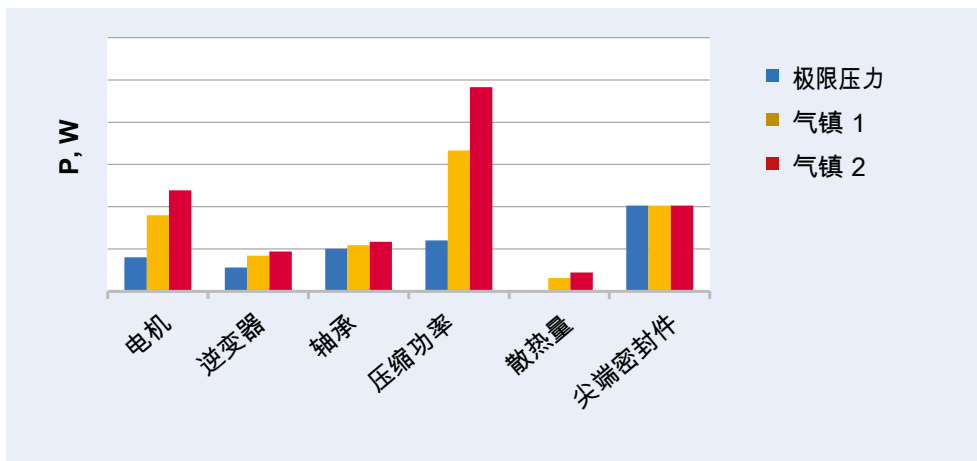


图 3：不同运行条件下的计算功率损耗。

电机和变频器的效率是已知的。同样，轴承摩擦力也可以根据轴承制造商的计算规范，确定为负载、润滑油粘度和温度的函数。气体的压缩功率和散热量可通过热力学方程和真空技术计算得出的压力曲线确定。波纹管中的能量消耗低于 1 瓦，因此忽略不计。由于除了顶端密封件的摩擦功率外，最终压力的所有损耗都是已知的，这就是总功率的差值。密封件的损耗或摩擦功率主要取决于接触压力。这取决于几何条件（间隙比）以及泵送系统内的压力分布。在此，最初假设所有工作条件下的摩擦功率都是恒定的。

图 3 显示，在“最终压力”运行条件下，端部密封的摩擦功率占总损耗的最大份额。如果泵吸入气体，则大部分热量由气体压缩产生，因此也同样在泵送系统内产生。因此，这两种损耗机制对运动螺旋的温度有很大影响。电机的损耗会随着吸入气体量的增加而显著增加。由于采用了同步技术，电机损耗主要发生在定子区域，因此可以很好地消除损耗，而不会对转子的温度平衡造成特别大的负荷。在有气体入口的运行状态下，轴承和电力电子设备的损耗很低。

关于热损耗的优化，必须考虑到对压缩功率和气体散热量的影响。同样，轴承损耗也无法直接影响。顶端密封的接触压力会影响其摩擦力，这一点也不能随意降低，否则就无法确保系统的密封性。

考虑泵壳的传热以分析冷却的可能性

泵的冷却是通过外部空气的强制对流实现的。泵体中的散热片与风扇结合使用，可将泵的温度保持在较低水平。为了量化热传导系数，在外壳上的几个点测量了流速。在导气罩的正后方，流速为 2.1 米/秒，然后降至 1.24 米/秒，直至泵的末端。在泵和底座之间，空气通过以冷却电子元件。对流平板的分析计算得出的传热系数为 10 - 42 W/m²/K。由于几何形状复杂，而且风扇正后方还有一股撞击流，因此表面被划分为三个区域，并根据这些区域的测量结果调整传热系数。



泵系统的排出区域有一个直接的热点，温度最高可达 122 °C。

图 5 显示了涡旋泵温度最高的区域。在泵系统的出口区域有一个直接的热点，温度高达 122 °C。这是由于内腔的高压缩性能造成的。尽管螺旋定子的外表面增加了对流，但由于螺旋壁厚的原因，该处的散热效果很差。可以预见的是，密封件的热磨损在这一区域最为严重，这一点可以通过测试得到证实。否则，温度分布相对均匀或存在低温度梯度，这可以归因于足够尺寸的壁厚。

根据找到的模型参数，研究了以下优化变体等：

- 下部结构热解耦，这样电子元件的热损失就不会通过泵散失。
- 法兰轴承与运动螺旋部分脱钩，这样轴承的摩擦损失就不会散失到运动螺旋部分。
- 轴由铝而非钢制成，因为铝的导热系数明显更高
- 降低尖端密封件摩擦的效果
- 由于润滑剂的改变，轴承的热传导增加
- 外壳电机侧增加风扇

通过计算，可以看出不同工作条件下对热性能的影响。由于温度曲线的微小变化，可以排除一些变体，从而最大限度地减少测试所需的工作量。原则上可以得出这样的结论：只有通过降低整体温度水平，才能降低密封件区域的温度。这反过来又可以通过增加外表面的对流来实现，而这又必然会由于风扇性能的提高而导致气流的增加。

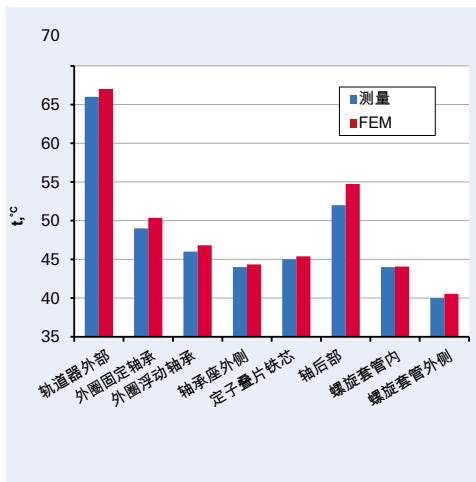


图 4：极限压力下温度测量值与模拟值的比较。

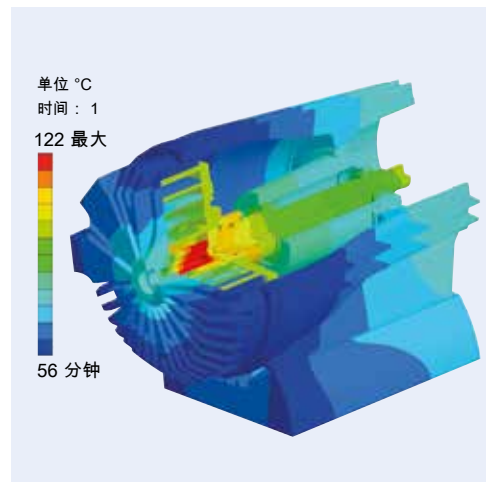


图 5：在环境温度较高的 "气镇 2 级" 运行条件下涡旋泵内部的温度场。

实施智能控制系统，利用适当的传感器管理温度

对实际泵进行的温度测量表明，考虑到适度的设计变更，不可能单独降低单个组件的温度。此外，我们还发现，在不同的负载条件下，泵各部件的温度水平表现大致相同。因此，并不是绝对有必要安装传感器来检测关键部件（如移动螺旋部件）的温度。

在产品开发过程中，可以在新开发的涡旋泵内确定温度传感器的位置。利用这些温度传感器，可以实现一个控制回路，从而进行有效的温度管理。通过大量实验来确定控制参数。针对不同的应用和外部温度，可确保泵在最佳温度范围内运行。在集成温度传感器的帮助下，电机和风扇的速度控制可用于在所有运行条件下保持尽可能低的泵温，并防止出现临界运行状态。

除上述传感器技术外，该泵还采用了同步 IPM 电机，而非异步电机，从而提高了效率。它还可以在很宽的速度范围内进行速度控制。此外，使用这种电机技术，大部分功率损耗都产生在定子中，这对转子的温度发展有积极影响。

增加对流冷却以调节温度

作为降低温度的第一种方法，可以通过提高风扇转速或选择吞吐量更大的风扇来增加强制对流冷却。

需要注意的是，这两种方法都会增加噪音排放。中小抽速范围内的涡旋泵常用于实验室应用。在这里，噪音水平起着非常重要的作用。图 6 显示了试验泵的排放声压级与两个风扇转速的函数关系。从图中可以看出，泵的噪音水平几乎随着风扇转速的增加而成正比增加（因此空气流量也会增加）。因此，有必要在泵的噪音和温度水平之间找到一个合理的折衷方案。

可以看出，随着风扇转速的增加，泵的噪音水平也几乎成比例地增加。

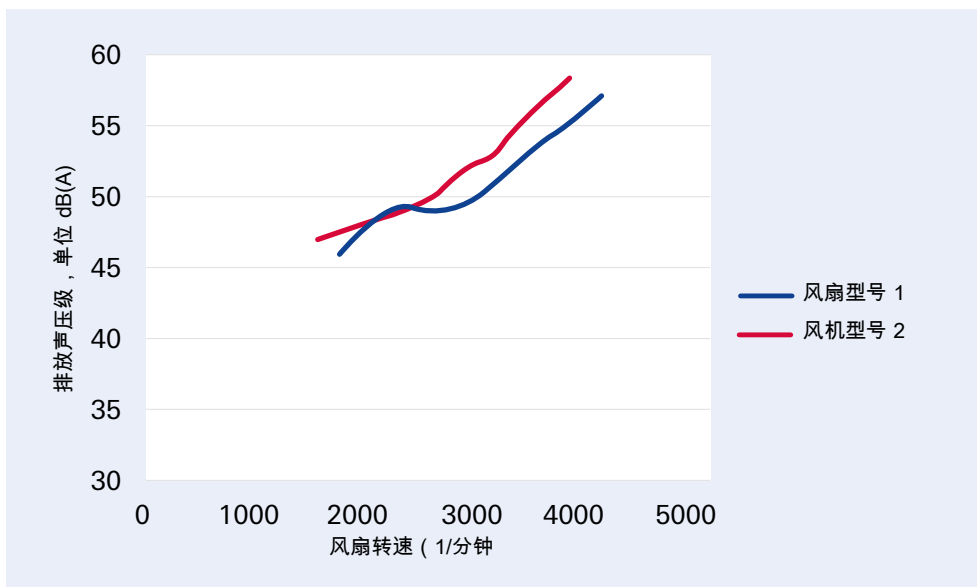


图 6：测试泵的测量排放声压级与相应风扇转速和风扇型号的函数关系。

在泵负荷较低的情况下，例如在低环境温度下以极限压力运行时，对流冷却和噪音水平可以保持在较低水平。由于庞大的部件设计和相关的惯性，即使泵在负载下短时间运行（抽空一个小容器），对温度水平的影响也很小。但是，如果泵是在较大的容器、较高的环境温度、较高的进气压力（> 100 毫巴）或较大的气镇量下进行抽真空操作，则泵的温度会显著升高，从而导致磨损。在这种情况下，目标是在负载增加期间增加对流冷却。

因此，为了满足所有要求，最好根据泵的温度以及泵的负载来控制对流冷却。此外，在某些情况下（例如泵无意中超载），可能有必要降低泵的性能数据，以防止对泵造成长期损害。

例如，如果泵在已经达到热负荷能力的情况下又承受了更大的负荷，泵的转速或最大可用驱动功率就会降低，直到泵停止。这就确保了泵的内在安全性。较高的环境温度或较高的压力比可以达到热负荷。

现代真空泵的驱动电子装置可用于控制泵电机、集成电气附件或提供用于通信的电气接口。驱动电子装置还可用于实施温度管理，其形式包括对流冷却的情景控制和基于温度的性能数据缩减。

热概念的进一步发展 扩大分析范围，确定极限值并进一步优化

在产品开发过程中，为泵配备了温度传感器，并选择了一种风扇型号，该型号除了具有较高的预期寿命外，还具有通过脉宽调制（PWM）在较大范围内进行速度控制的特性。由于电缆连接的实用性有限，没有使用螺旋部件上的温度传感器，特别是因为模拟结果表明，在稳态工作条件下，各部件的温度表现类似。

在大多数情况下，电子元件（如驱动器的功率级）都带有温度传感器。此外，电机绕组内也装有温度传感器。

在广泛的温度测试（包括环境温度变化的测试）中，确定了温度管理选项和极限值。通过这一系列测试，可以根据现有温度传感器的测量值对其他部件的温度得出结论。

测试表明，由于可能的运行条件很多，单纯根据温度传感器的数据进行对流冷却控制是无效的。根据传感器的温度读数和功耗（驱动电子设备中的可用参数），确定了风扇控制。如果超过了规定的限制，风扇转速就会不断调整，以与功耗相匹配。此外，还为所有温度传感器定义了极限值。如果超过这些临界值，风扇转速也会增加到最大值，而与功耗无关，因为可以认为临界运行状态即将到来。如果超过了单个温度传感器的第二个阈值，则会逐渐降低驱动侧的泵功率，从而防止损坏泵或驱动组件。

与此同时，在抽空过程中还能显著提高冷却能力。

与纯粹基于温度传感器的对流冷却相比，这种根据经验开发的基于功耗和温度测量的温度管理具有可对负载变化做出动态响应的优势。它还能确保在所有运行条件下实现最低噪音水平。例如，在排空过程结束后，风扇转速会立即降低，因此噪音水平也会随着功耗的降低而降低。同时，与固定转速的风扇相比，疏散过程中的冷却能力明显提高。情景风扇控制还可大大提高泵的负载，例如，在较高的吸入压力下可实



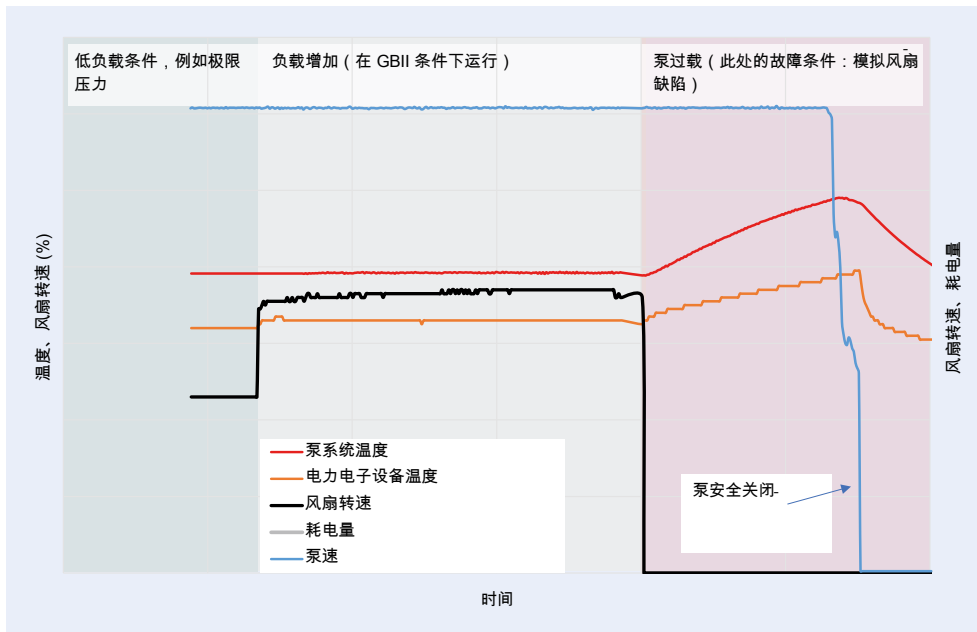


图 7：以各种负载条件下的涡旋泵为例说明温度管理的功能。

现更高的性能。特别是可以实现短期过载能力（增压模式）。在最终压力下或泵开启后，风扇转速较低，可确保快速加热，从而为运行做好准备。



由于多个温度测量变量和功率都包含在温度管理中，因此实现了冗余，从而提高了运行可靠性。在发生简单故障（如风扇故障、吸入或排出压力不允许）时，性能数据的减少可防止单个泵部件或整个泵的损坏。

图 7 显示了采用软件温度管理的涡旋泵在不同负载条件下的测量温度、风扇转速、泵转速和内部功耗。由于风扇转速的提高（相当于功耗），泵系统的温度和电力电子设备的温度几乎保持不变。此外，该图还说明了安全停机的功能，例如由于风扇缺陷造成的安全停机。在超过极限温度后，泵的功率会逐渐降低，直至完全关闭，从而防止对泵部件造成不可逆转的损坏。此外，消除强制对流显然会导致温度显著升高。

图 8 显示了在固定风扇转速的影响下，与根据上述说明定义的智能风扇控制相比，在泵运行点的温度测量曲线。很明显，在工作时间内，加热效果有很大差异。在此示例中，使用风扇控制可使温度降低 7-9 °C。同时，还确保了低负荷时的低噪音排放。

温度降低不仅对密封件的使用寿命有积极影响，而且对轴承和电力电子设备等其他部件的耐用性也有积极影响。

温度降低对密封件的使用寿命有积极影响

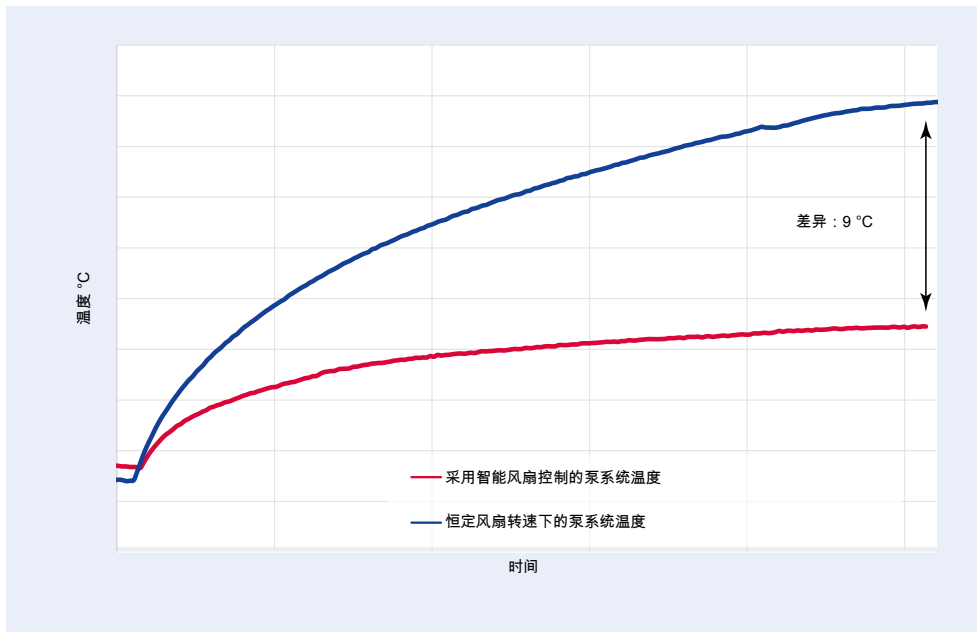


图 8：涡旋泵平均负载条件下的温度曲线测量示例（恒定风扇转速与智能风扇控制的比较）。

总结

总之，可以说，利用智能驱动技术、高质量风机和现代计算方法，可以优化涡旋泵的温度平衡，从而延长重要部件的使用寿命。通过模拟可以在早期阶段确定关键部件，确定优化变体，并对不同的方法进行比较。此外，模拟还能对关键部件的温度得出结论，而这些温度是无法通过经验确定的。

通过现有的传感器技术，利用广泛的测试系列来控制风扇和水泵的转速，从而确定了基于软件的智能温度管理。因此，泵的性能得以提高。在实现这一目标的同时，不会影响部件的使用寿命，尤其是泵头密封件。与传统设计原则相比，温度最多可降低 15%，从而延长了维护间隔。

在即将开发的涡旋泵中实施温度管理的目的是在低噪音的情况下优化各个组件的使用寿命，尤其是在高负荷的情况下，从而满足当今可持续发展和二氧化碳减排的要求。足迹方面的要求。

Your Success. Our Passion.

We give our best for you every day –
worldwide!

您是否正在寻找
完美的真空解决方案？
请联系我们：

普发真空技术（上海）有限公司
Pfeiffer Vacuum
(Shanghai) Co., Ltd.
T +86 (21) 3393 3940
info@pfeiffer-vacuum.cn

Pfeiffer Vacuum GmbH
德国总部
T +49 6441 802-0



Errors excepted. All data subject to change without prior notice. PI 0563 PZH (July 2023/0)

Follow us on social media
#pfeiffervacuum



www.pfeiffer-vacuum.cn

PFEIFFER  **VACUUM**