

# 机械罗茨泵的真空性能计算比较研究

在炼钢厂炉外精应用中，由于具有更为环保的特性，机械干式真空泵正在不断替代传统的蒸汽喷射泵系统。准确预测制造的机械罗茨泵的功率非常重要，否则真空系统在交付时可能不满足用户的需求，导致被迫变更工艺参数或增加后续的额外设备以补偿不足的部分。

一些制造厂商使用简单的预测模型，这样的模型通常预测的性能优于实践中实际取得的性能。潜在的误差等级可能较为明显，并导致机械罗茨泵罗茨泵增压级数的增加。Edwards Ltd (爱德华真空) 是真空设备的主要供应商，有着先进的模拟能力并能更准确地预测系统效能，因而更好地定义设备需求。

作者: Dr. Neil Turner 尼尔·特纳博士  
Edwards Ltd



图 1 机械真空系统示例

尽管当今世界经济上下波动并对钢价颇有影响，总体来说对钢材的需求，尤其是高质量钢材，仍然保持着显著的正向需求。要满足这一对精炼钢材的需求，扩展炉外精炼工艺获得了特别的关注，包括真空脱气(VD)以及真空氧气脱碳(VOD)工艺(包括Ruhrstahl Heracus (RH) 型系统)。此外，降低能耗并减少温室气体排放在现代钢厂中已经变得更加重要。这就是为什么在这些应用中干式真空泵不断替换传统的蒸汽喷射泵。机械泵系统通常使用VD工厂，在全世界许多装置中已经得到验证；而使用有着巨大抽气速度的VOD甚至RH工厂的需求也在增加。

典型的炼钢脱气装置如图1所示。要满足真空度<1毫巴的性能要求，需要安装多级机械罗茨泵，并组合以适合的前级泵。要设计这些真空系统需要对不同压力情况下机械罗茨泵的性能有深刻的理解。

对应不同抽速与压力下的压缩比的效率特性，确定了机械罗茨泵的性能，该信息通常由制造商提供以辅助真空系统设计。

这些特性的计算需要使用到复杂的真空性能模型，该性能模型基于对机械罗茨泵的全几何尺寸描述。这需要考虑所有的断面和净空尺寸以及动态效能。

当其所有元素已知并且排放到大气压时，可以直接表达真空泵系统的稳态性能特征。简单的抽速(或质量流量)曲线对应入口压力即可满足；当排放压力由于天气状况变化而改变时，其引起的性能变动通常很小并可以忽略不计。

机械罗茨泵的前级泵并非总是事先已知的，因此制造商不能提供他们的机器的泵抽速特性。而前级泵与罗茨泵组合的性能计算的需求一直存在。如果前级泵能通过抽速曲线(或等价的)进行特性化，那么一些制造商可以使用基于他们的产品的详细设计的专利方法合理地准确预计泵组的性能。

大多数制造商会选择不将专利方法公布给组织之外的人，而将其视作他们的知识产权。有一种基于压缩比特性的方法被广泛地用于估计在与任意的泵组合中罗茨泵的性能。由于缺少复杂的方法，这个方法仍然被一些人(没有任何其它模型的制造商和终端用户)用来预计给定前级泵的机械罗茨泵的性能。这个计算方法很可能预测性能好于实践中实际能达到的水平。

## 计算增压器罗茨泵性能

图2与一些机械增压器罗茨泵制造商提供的信息相似的信息表中每一个(几乎)平行曲线是压缩比曲线，显示为出口压力的函数；压缩比标准化为峰值压力。每条曲线代表不同的、机械增压器罗茨泵的恒定泵抽速 $S$ ，记作 $K\eta v$ ，其中 $\eta v = S/S_D$ 是在泵抽速下实现的机械增压器罗茨泵的物理位移 $S_D$ 名义抽速 $S_D$ 比例。图表显示的恒定压力线与(对数)轴成 $45^\circ$ 角平行。

预测真空性能的方法可以用图2中的数据参考进行解释。例如，假设表中的增压器罗茨泵有 $47,500 \text{米}^3/\text{小时}$ 的物理位移名义抽速，峰值压缩比为 $K_{\max} = 85$ 。那么在 $0.67$ 毫巴下实现泵抽速为 $33,250 \text{米}^3/\text{小时}$ ，在机械增压器罗茨泵入口处前级泵的泵抽速应该为多少？要找到答案，找到 $0.67$ 毫巴入口压力线与压缩比曲线

$\eta_v=33,250/47,500=0.7$ 的交点。这发生在出口压力为14毫巴，因此，需要1,600米<sup>3</sup>/小时的前级泵抽速。同样的信息可被用来诠释不同问题的回答，根据您的需要，例如，要计算给定输出给定出口压力的压力比，或者预测在机械增压器罗茨泵出口处能实现的压力。

通常在相同的图表上呈现允许的操作运行区域作为性能特性。例如，在图3和4中，粗粉色线分割区域为左边的区域或线下面的区域是允许操作运行的区域，而线上面或者右边的区域是操作运行受限的区域。通常该指标是某一类型的热限制。两个图是在同一比例下制作的，但有着相当大的机械增压器罗茨泵特性。图3中的数据描述的增压器罗茨泵有着相当紧的净空小的间隙，在低流量抽速下能够产出相对高的压缩比，但有着大面积的热限制。图4中的数据描述的增压器罗茨泵热能力更大，可能因为其有着更大的内部净空间隙，但是在低流量抽速下产不出那么高的压缩比。（图4中描述的增压器罗茨泵是Edwards增压器罗茨泵，刚好也比图3中的来自另一制造商的有着稍微低一些的位移名义抽速，虽然不能直接从给出的特性中看出来。）

可能第一眼看到会觉得第二种设计效率不足并且不太适合给定的应用，但事实上它比看上去更高效的设计更适合。例如，考虑一个应用需要泵的输出在入口压力为0.67毫巴或以下时为23千克/小时。每个图中的连续黑线连接每个增压器罗茨泵特性对应的泵能力23千克/小时的点，以及灰色虚线对应入口压力为0.67毫巴（如前所述）。在图3中，这些交叉在出口压力为约12毫巴，而在图4中显示的出口压力为约6.5毫巴。然而，只有第二个增压器罗茨泵罗茨泵的交叉点落在机器的允许操作运行区间，因而第一个增压器罗茨泵罗茨泵不能使用其较优的压缩比。事实上，对于第一个增压器罗茨泵，在23千克/小时曲线落在允许操作区域的范围内的第一个点是在前级泵压力为4.5毫巴时。因此，虽然第一个比第二次在低流量下产出更高的压缩，它需要比更小位移名义抽速的有着更低压缩特性的增压器罗茨泵大40%的前级泵。

如果表中所有的特性均测量或计算准确，那么像上述描述的方法应给出在给定配置下性能的准确估计。然而，通常只有零流量压缩曲线会被测量，其它特性是从其推导出的。（事实上，在图2-4种，只有零流量压缩特性是准确估计的，更高 $\eta_v$ 值的特性是使用下面要描述的简单方法计算的。）

### 简单计算方法

来自增压器罗茨泵入口到出口的输出质量流量 $Q$ 通过显示的输出质量流量 $Q_b$ 和反向泄漏返流 $Q_L$ 之间的差值给出。

$$Q = Q_b - Q_L \dots\dots(1)$$

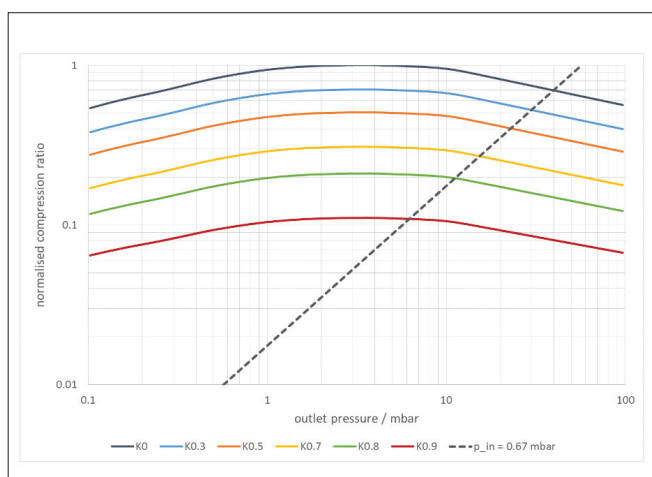


图2 标准化的机械罗茨泵特性特性值

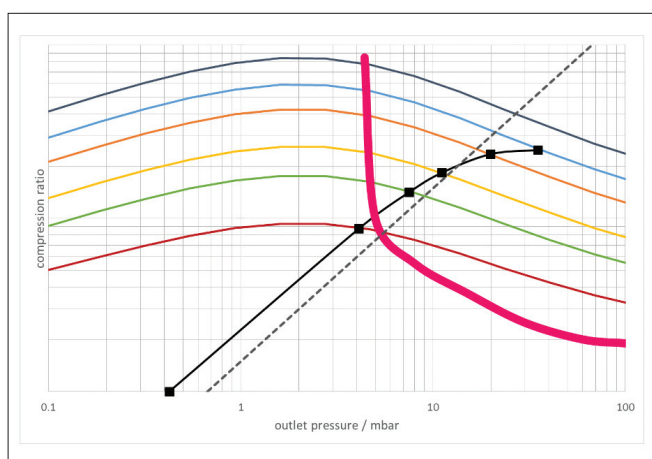


图3 带热限制线的压缩特性有严格热限制的高压缩比罗茨泵

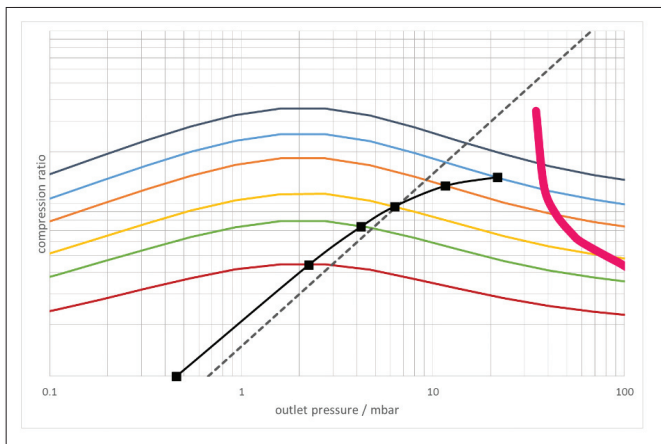


图 4 低压缩比及较宽热限制的压缩特性

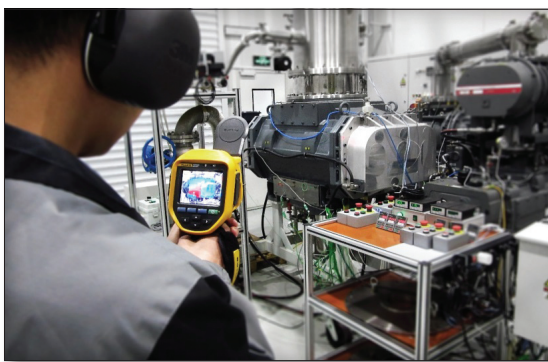


图 5 罗茨泵性能Edwards试验室测试台

泄漏返流假设其特性符合流导率，再乘以入口和出口之间的压力差。

$$Q_L = C(P_{out} - P_{in}) \dots (2)$$

注意  $C$ ，泄漏返流流导率，不是一个常数，并且通常是未知的。将这一表达式代入等式1中并除以  $P_{in}$ ，入口压力，得到下述：

$$S = S_D - C(K - 1) \dots (3)$$

这里， $K = P_{out}/P_{in}$ ，是通用压缩比。在下一步中，我们假设泄露流导率可以通过零流量特性推导出，通过在前述公式中设置  $S=0$ 。

$$C = S_D / (K_0 - 1)$$

在入口和出口压力与零流量情形不同的情形下如何使用这些流导率值并不清楚。实际的流导率可以是一个复杂入口和出口压力之间的公式，并取决于机械增压器罗茨泵的几何参数。总之，在这些简单计算中，显示出假定流导率仅取决于出口压力。

让这个结果表达式代入等式5中获得泵抽速：

$$S = S_D (K_0 - K) / (K_0 - 1) \dots (5)$$

这可以通过给出  $K$  关于  $K_0$  和  $\eta v$  的公式重新安排。

$$K = K_0 (1 - \eta v) + \eta v \dots (6)$$

在这两个表达式中， $K$  和  $K_0$  应该取相同的出口压力。最后一个公式已绘图如图1-3所示。

当前级泵的速度  $S_B$  已知时，那么连续性假定  $S = S_B K$  可用于估计压缩比。

$$K = K_0 / (1 + S_B / S_D (K_0 - 1)) \dots (7)$$

如果从零流量压缩特性假定无效，那么计算方法就将会不准确。

事实上，在简单计算中用于估计泄漏返流流导率的假定仅在分子流的范围内有效，即当气体表现得如同单独的分子的集合时，这种情形仅在非常低的出口压力 ( $<0.05-0.1$  毫巴) 时会发生。

当增压泵罗茨泵的出口压力相对较高 ( $>5-10$  毫巴) 时，通过净空隙的泄漏返流流量将在连续流区域集范围内，在管道中的气体表现如同连续性液体为连续流。这时泄漏返流流量可以通过流导率乘以压力差获得其特性值，但是流导率远远不止仅取决于上游压力（在机械增压器罗茨泵出口处的压力）。在下游压力（在机械增压器罗茨泵入口处的）下泄漏返流途径的流导率将会显著增加。众所周知，例如，在连续性层流范围内管道的流导率，此时气体流量主要取决于气体的粘度，大约与上游和下游的压力成比例。在非常低的下游压力计算泄漏返流流导率的任何估计，当下游压力更高时始终比实际的流导率低估。

可能，/也很可能在零流量时的压缩将足够高以致阻塞通过净空隙间的流量。在这些条件下，泄漏返流流量与压力差不成比例，而仅却取决于上游压力。再次，在通过泵净空隙的阻塞流量下计算泄漏返流流导率的估计，当下游压力更高时始终比实际的流导率低估。

这两个缺陷，使用阻塞流体条件状态估计连续集续流时流导率，以及忽略下游压力增加时流导率的增加，导致在压力差减少时泄漏返流流量被低估，即机械增压器罗茨泵的性能在泵抽速增加将被高估。

在大多数情况下泄漏返流净空隙中的流量状态范围会被描述为过渡流性的。这里，流量不完全通过气体的粘度描述，也不完全是独立分子的集合。在这个范围内有效率的泄漏返流流导率也会随入口压力的增加而增加，与连续流集范围的方式相似，因此简单计算类似地也不准确。

当增压泵罗茨泵出口处压力低时，主导的回流完全不通过间隙净空，而是由所谓的气体的“根部罗茨捕捉”，即通过机器旋转在转子断面所抓到的气体传回入口处引起。这个回流的元素也不取决于机械增压器罗茨泵的入口和出口间的压力



差，而仅取决于出口处的压力。如果没有考虑到这些效应，简单计算将再次低估回流，从而由于泵抽速增加导致对泵性能的高估。

能够明确的是此简单计算很可能在整个出口压力范围内高估性能。

### 更复杂的计算方法

要准确获取增压泵罗茨泵的性能要求建立一个机器内所有回流工艺的物理模型。Edwards模型包括对整个机械机制的准确几何描述，允许计算罗茨根捕捉效应，以及净空的泄漏回流模型，在整个压力范围内起作用。罗茨泵加速器性能在实验室测试台上被定期测量，为模型完善提供数据（参看图5）。

### 计算方法比较

图6比较来自零流量压缩曲线的压缩曲线（直线），使用前面描述的方法，其中压缩曲线（符号）计算自Edwards性能模型相同的泵抽速。

在所有情形下按照复杂计算得出的性能差于简单计算。如同预期的，简单方法始终低估了泄漏返流量。

这两个计算方法在泵抽速低时（浅蓝色线）大多数情况符合得很接近，此时入口和出口压力非常近似零流量情形。随着泵抽速增加，偏差逐渐增大，因为在任何给定点入口压力将比零流量曲线上的高得多。

在低压力时偏差更大。在表( $\eta_v=0.8$ ,  $P_{out} \approx 0.2$ 毫巴)时描述的情形差异最大，简单计算预测的压缩比比复杂计算得出的超过10倍。

### 与测量的特性值比较

总而言之，罗茨泵实际真实生活中的性能与复杂计算符合得比简单计算好得多。

在表1中测量的压缩比与复杂计算比平均偏差大约为15%，而测量值与简单计算的平均偏差大约为75%。

这是上面所预期的结果，并显示了罗茨泵实际真实生活中性能与简单计算方法使用者的预测值之间差距的可能数量级。注意表1中的数据和计算与前面图表中所引用的来自不同的泵机器。测量值与标准化的压缩比值在两点相等，即  $\eta_v=0.7$ ，这纯粹是所测试系统下的巧合，此时等于简单计算方法计算所得的两个值。高估给定前级泵压力下的压缩比导致在给定入口压力下对泵抽速的高估。

图7显示了使用简单和复杂计算两种方法预测值对应测量的性能的情况。简单计算高估了可用泵抽速大约20%，而复杂计算与测得的性能匹配得很好。简单计算可能导致设计师提出一个四泵组设置的真空系统来满足用户要求，而实际需要五个泵组一个五泵设置。如果性能计算设计到多级

$\eta_v$	出口压力毫巴	标准化压力比		复杂计算
		测量值	简单计算	
0.7	0.496	0.124	0.234	0.144
0.7	2.82	0.124	0.234	0.159
0.5	0.059	0.120	0.184	0.122

表1 比较压缩计算与速度取现测量值

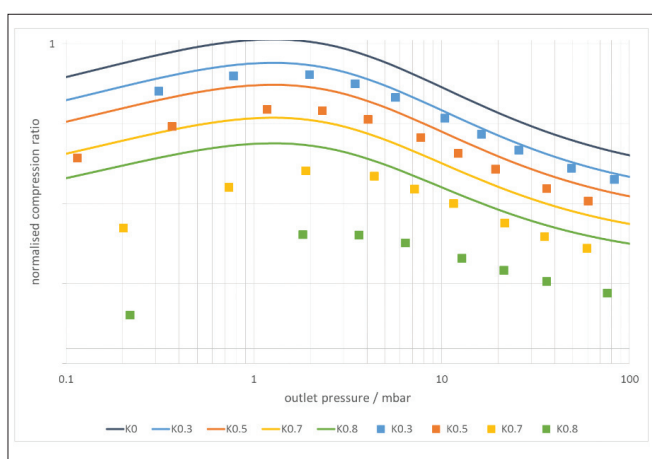


图6 使用两种不同方法计算得到的机械罗茨泵压缩特性值

## 主要工艺

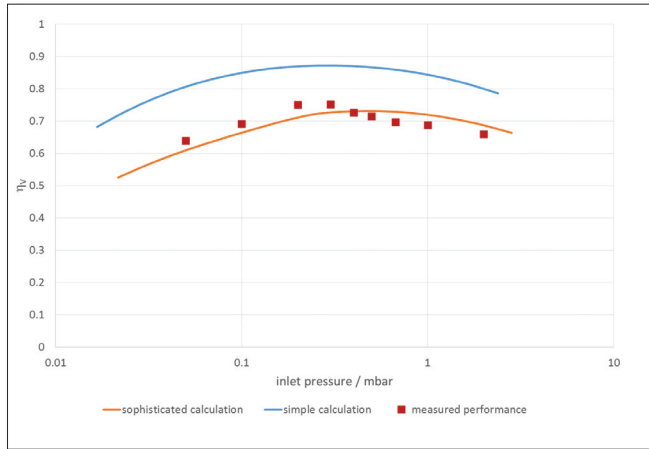


图7 泵抽速计算值与测量值的比较

机械增压器罗茨泵，偏差的数量级将在每一步进一步放大。

### 对最终用户的提示

由对于最终用户比较不同来源的性能模型是困难的。重要的是用户懂得所使用的方法及其相应的不足。当最终用户联系像Edwards这样有着先进建模能力的真空系统制造商时，他们将会收到系统性能准确预计；制造厂商给出的系统性能才会规格与用户的需求也很一致。当系统规格是整个基于简单计算，那么系统性能很可能被高估。真空系统交付时可能不能满足用户要求，被迫变更工艺参数或后续增加额外的真空泵以支持基础设计补偿不足的部分。潜在的误差等级可能很显著，并导致机械增压器罗茨泵级数的增加。MS

尼尔·特纳博士是Edwards Ltd的高级技术专家，是Atlas Copco Vacuum Technique, Global Technology Centre, Burgess Hill, UK的一员。

联系方式: [Anke.Teeuwsen@edwardsvacuum.com](mailto:Anke.Teeuwsen@edwardsvacuum.com)

## DEDICATED TO STEEL DEGASSING

[edwardsvacuum.com/steel](http://edwardsvacuum.com/steel)

Edwards is the smart choice if you're looking for a complete module with proven performance, or if you want to replace any mechanical booster.

The new Edwards GMB40K leads the pack in the large booster class thanks to:

- An extremely compact design
- Unrivalled performance that results in faster pump down
- A small carbon footprint because of its low energy consumption
- Worry-free maintenance with spare parts that are readily available

**EDWARDS**

