利用速度建议挖掘列车运行的节能潜力

Farhad Mehta 博士
systransis 公司高级系统工程师，项目经理
f.mehta@systransis.ch

Christian Rößiger 硕士工程师
systransis 公司系统工程师，项目经理
Christian.Roessiger@irfp.de

Markus Montigel 博士
systransis 公司 CEO，董事会主席
m.montigel@systransis.ch

应用行车调度控制系统的目的主要是优化各项运营目标，例如维护运行计划的稳定。但是，应用这样的系统所得到的附属效应很受欢迎，它常常能够实现大幅度节能。本文介绍勒奇山隧道铁路自动化功能控制系统的节能潜力，展望在瑞士全路采用类似系统所能取得的好处。

勒奇山山底隧道长34.6km，穿过瑞士境内的阿尔卑斯山，是目前世界上最长的铁路隧道之一。该隧道于2007年12月投入运营，采用由泰勒斯信号技术和咨询集团（Thales）的分包商 systransis 公司开发的勒奇山铁路专用行车调度控制系统 AF，用于监控隧道内的列车运行。

受隧道地形的限制，该隧道铁路的行车调度管理是一项很特殊的挑战性任务。该隧道线路只有占三分之一长度的南段线路按双线设计，而从道岔“W60”开始的北段线路按单线设计。图 1 是隧道线路的布局示意图。为避免列车在隧道线路上占用冲突所采取的措施使优化利用单线区段通过能力受到非常大的影响。

勒奇山山底隧道装备了 ETCS -2 级信号设备，它能够准连续地监控列车运行的速度和位置，并能与列车的 ETCS 车载设备进行通信。

AF 系统的主要任务是预测和解决列车占线冲突，其解决过程如下：为一列涉及运行冲突的列车计算出一条速度－时间曲线，延迟该列车的运行，使其能够无障碍地通过冲突地点。AF 系统从这条速度－时间曲线计算推导出速度建议，把它处理成文本信息，并以大约 30 秒的时间间隔发送给列车的 ETCS 车载设备。如果列车运行不再存在冲突，就把该信息以“$vopt = v_{最大}$”的形式显示给列车司机。

把优化的速度信息发送给 ETCS 车载设备的优先目标是减少继发晚点，减少因列车追踪间隔造成的隧道内停车次数，从而保证隧道的通过能力和运行计划的稳定。图 2 示出了作为 AF 系统工作依据的运行冲突解决方案。

这种优化方法的附属效应很受欢迎，它能够减少牵引电能的需求量。对于不是因列车追踪间隔限制而制动停车的列车，能够减少所需的牵引电能。为了对这种假定进行验证，开展了下列研究工作，就是在考虑实际运营数据的条件下对牵引电能节省效果进行定量化计算。

过去有一些题目类似的研究成果，但这些研究大多数是为了计算速度－距离曲线，以优化牵引能的使用。与这些研究不同的是现在这项研究第一次以实际运营数据为依据计算节能潜力。

1 应用的方法

为创建速度建议，从记录的运营数据中提取了隧道内各次列车的运行线。利用这些运营数据的目的是为了对列车在隧道内的实际（优化）运行过程进行仿真，计算每次列车的能耗。

为评价节能效果，把经过速度优化的列车实际使用的牵引电能与同一列不向其发送速度建议（不对其运行过程进行优化）的列车所需要的牵引电能进行比较。因为 AF 系统的优化功能处于经常

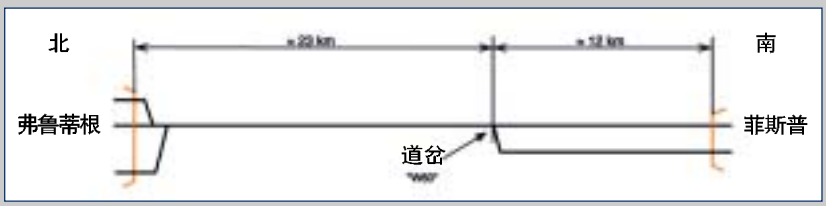


图 1　隧道线路布局示意图

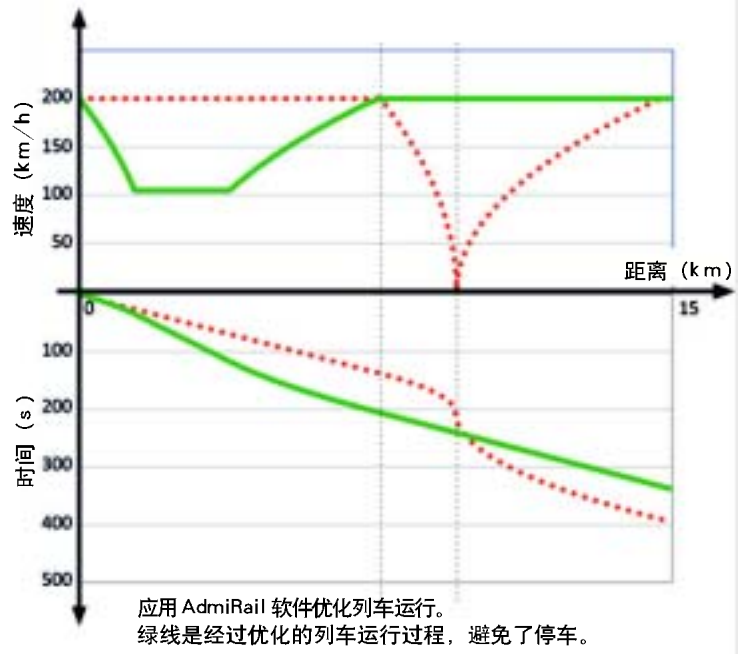


图2　速度优化图

激活状态，因此从运行记录数据中不可能读出未优化运行过程的数据，所以必须为计算这些运行过程设假定情况。

2 研究的冲突种类

AF 系统在以下三种情况下向运行在隧道内的列车司机发送速度建议：

－会让冲突；

－列车进路进入同一线路的冲突；

－列车追踪间隔时间冲突。

图 3 示出了这三种运行冲突。引起冲突的列车以蓝色表示，但只有涉及冲突的列车才收到红色速度建议。

在这三种列车运行冲突中，就可能的节能而言，会让冲突和列车进路进入同一线路的冲突这两种特别有意义，因为这些运行冲突在许多情况下可能要导致相关的列车停车。对于列车追踪间隔冲突，在这项研究中不加以探讨，因为对于这种情况很难说清楚所涉及的列车运行过程没有得到优化。另外，对记录数据的分析显示，由于列车运行计划和调度方面的原因，在研究分析的时间段内极少出现这种运行冲突。还应指出，实际情况是几种冲突经常相互联系，就是说，解决一种冲突的方案还会影响其他几个未来的冲突。但是，为避免研究问题过于复杂，在这项研究中没有把各种冲突看作是相互联系的。

3 研究分析的线路区段范围

从 AF 系统的记录数据中提取了涉及隧道内会让冲突或列车进路进入同一条线路冲突的每列车的数据，它们是：

● 列车性能：机车类型、重量、列车类别（旅客列车或货物列车）；

● 反映实际运行过程的速度－距离曲线；

● 向列车司机发送的速度建议：速度－距离曲线。

为得到能反映列车专用的牵引电能需求量的可比值，只对截取的一个有限区段内的数据进行评价。这个区段由下列地点限定：

● 第一次发送速度建议的地点；

●在列车通过“W60”道岔之后达到同一匀速随后马上进入加速阶段的地点。

图 4 举例示出了在优化运行过程中记录数据选取区段的限界点。

4 对未优化运行过程的计算

然后，根据确定的优化运行过程的基本条件反推出可能的运行过程，调度控制系统对于这个运行过程不发送速度建议。这个运行过程由三段组成：

(1) 在达到“W60”道岔之前，以入口速度运行至最后一个信号机前的制动曲线始端；

(2) 进行制动直至停车；

(3) 进行加速直至达到出口速度。

这个运行过程也表示在图 4 中。与未优化运行时的列车速度有关，这种计算基于运行动力学模型，该模型也应用于 AF 系统的

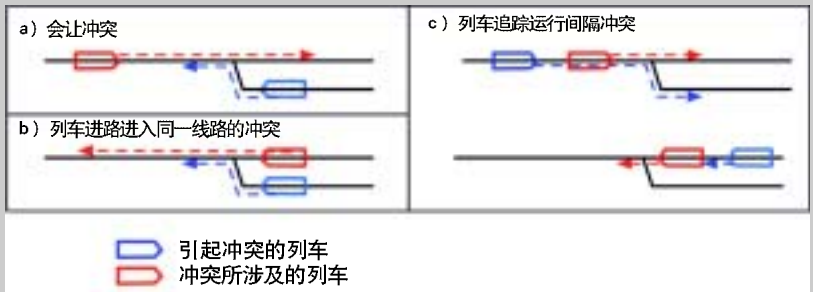


图3　运行冲突的种类

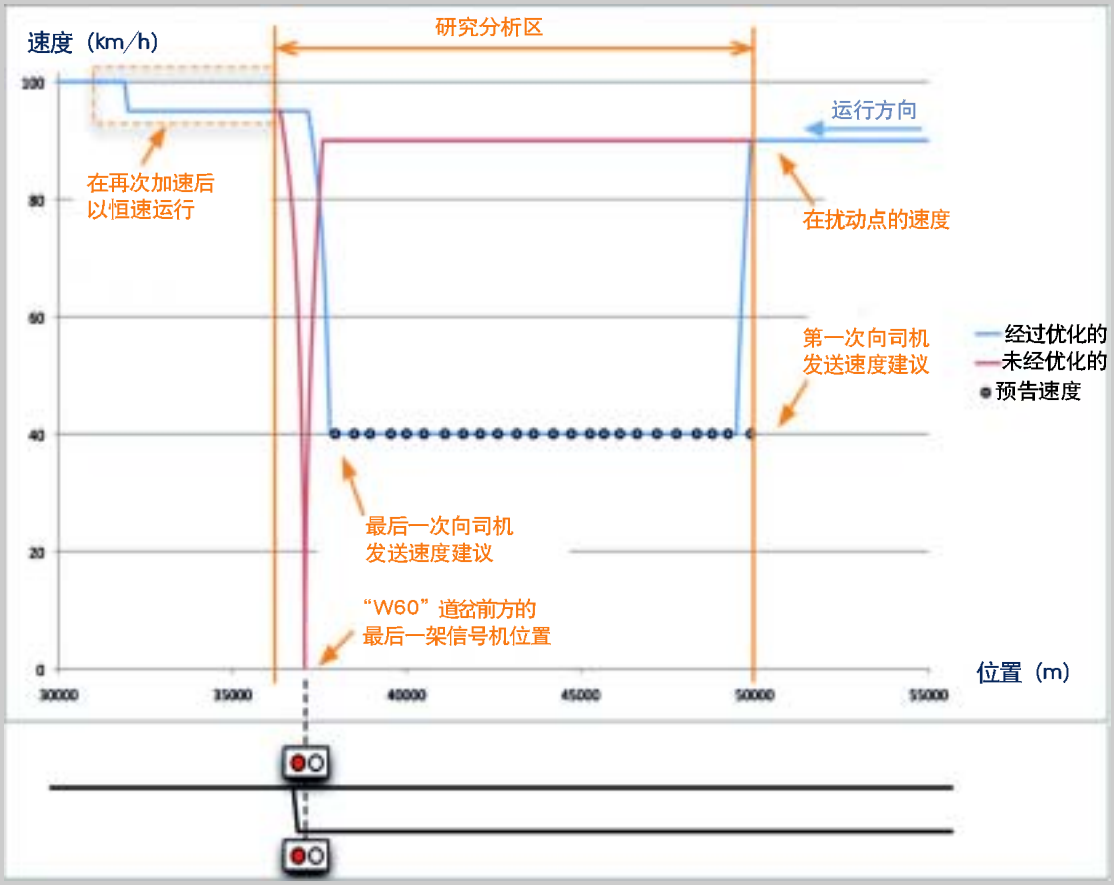


图 4　研究分析的线路区段范围

算法。

计算时把制动过程按恒定减速度建模，对旅客列车和货物列车选择不同的制动过程。不考虑滑行过程，即对未实施有效制动的速度降低不加考虑。

为对加速阶段建模，对每种类型的机车依据当时的速度分别计算牵引力。在对列车可能的加速度的计算中考虑了列车重量、列车类别和运行阻力。

5 计算牵引所需能量的模型

牵引所需能量是利用下列标准公式在列车走行的线路（s_i）上对机车牵引力（F_i）进行积分求出的：

$$E = \sum_{i=1}^{n} F_i s_i$$

计算中考虑了牵引力的下列各项因素：

- 滚动阻力（与速度有关，取整值）；
- 隧道阻力，包括空气阻力在内（对上坡线路取正值，对下坡线路取负值）；
- 产生的加速力（加速过程取正值，制动过程取负值）。

以 AF 系统记录的列车位置和速度数据为依据，计算产生的加速度。把阻力作为功能创建模型，这个阻力值只与当时的速度和列车性能有关。所有这些力的总和必须是由列车施加的，因此把所需能量作为走行距离的积分计算得出。

6 牵引能量的反馈

假定有一定比例的负值加速力，即一定比例的制动力转化为反馈电网的电能。这个比例的大小反映反馈过程的效益和接触网导线的线路耗损，它说明只有反馈电能的受电弓在同一时间点位于同一接触网区段内时才能进行电能反馈。本研究课题对上述比例应用了两个值：

（1）在已优化运行过程的情况下预计有相对较高比例的制动能（40%）反馈。其原因是 AF 系统的算法应用了制动加速度值，这个值完全能够通过电制动达到。

（2）未进行优化的运行过程制动能反馈比例降低（20%），因为根据估计，在所有制动功中，大部分不是通过电制动产生的。

7 研究结果和讨论

为进行上述研究，在2008年8～10 月三个月时间内研究分析了 746 次列车的运行过程，其中旅客列车运行 117 次，货物列车运行 629 次。

7.1 定量化分析结果

所研究分析的各次列车运行

节约的总电能达45655kWh。由此得出平均每次列车节约的牵引电能为61.2kWh。

尽管以kWh单位表示的每次列车所节约的电能绝对值变动很大，但是在未优化的运行过程的总牵引能耗中，相对节能值（节能比例）是比较恒定的。图5也显示了这种结果。分析结果表明，所节约的电能占整个牵引电能的12.4%。

这个估计值略偏保守一些，因为未解决的另一些运行冲突可能把未来的其他冲突聚到一起，而这些是无法用计算方法反映的。如果取消向司机发送速度建议这一措施，估计发展趋势将是出现更多次的冲突，这又将导致增加能耗。

对于上述研究结果应该考虑到，应用AF算法的初衷不是为了节约牵引电能，而是为了优化利用线路能力，减少继发晚点，所以应当说，这种节能效果是非常令人欢迎的附属效应。

7.2 定性化分析结果

除了对结果进行定量化分析外，还进行了定性分析，以便能对节能大小的各种影响进行评价分析。

显而易见的原因估计是列车性能，诸如列车重量或使用的机车对节能有影响，但是这样的因果关系不好确定。同样不好确定的是建议速度大小与入口速度大小的比例对节能效果的影响程度，这个比例是对所引起的冲突大小进行度量的尺度。

另一个对取得节能效果有潜在影响的因素可能是列车种类。旅客列车以高速度（160～200 km/h）通过隧道，这就是说，有很大一部分牵引电能必须用来克服与速度有关的阻力。货物列车的发展趋势是越来越重，所以在列车通过“W60”道岔后必须在很长的一段线路上再次进行加速。对于这两种列车的节能效果分别进行了评价。结果显示，货物列车的节能效果相对较好，达到12.9%，而旅客列车为10.3%。但是必须注意，在这项研究中进行评价分析的货物列车运行次数约是旅客列车运行次数的5倍。

对于制动能反馈对能耗的影响经常很受重视。因为反馈电能的总值受到多种多样因素的影响，所以不能简单地仅根据制动能反馈效果来作最后的评价。为了评估假设的反馈电能比例的敏感程度，这里引用另一些反馈比例（0%～0%；50%～100%）计算了几个案例，以便比较。结果显示，所取得节能效果与原来的节能相差值不大于1.5%，其原因可能是：

（1）列车在隧道内运行的阻力比在地面线路运行的阻力大，列车需要用较大比例的制动能来克服这个阻力，这就是说，在制动过程中，只有一小部分制动能转化为反馈电能；

（2）对整个距离进行研究分析后发现，列车只在很短的区段进行制动，即制动过程对于整个调查分析的作用是有限的。

最后调查了机车司机在何种程度上遵守速度建议。为此，对每个运行过程都根据第一次提示的速度建议计算了理想的速度时间

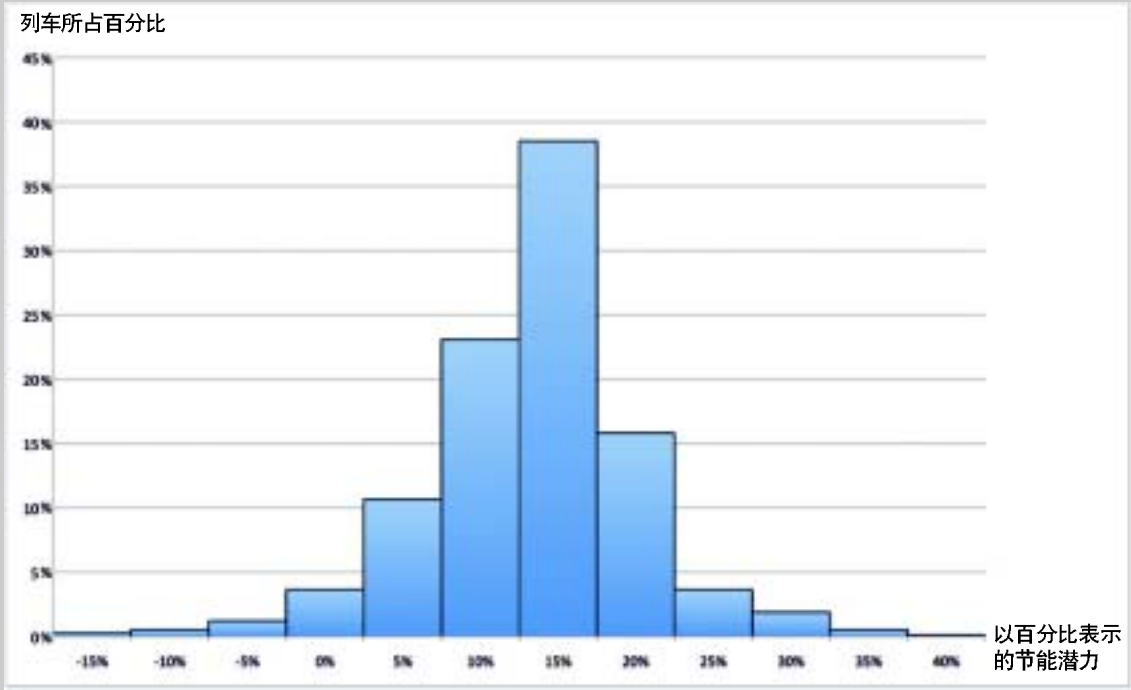


图5 节能结果分布情况

曲线。调查显示，在实际的运行过程中所达到的节能效果达 12.4%，略高于按理想曲线运行取得的节能效果 10.1%。对于这个意外结果的解释可以是：

（1）可能的原因是没有采用制动，而是通过滑行使列车速度降低到提示的建议速度。在由 AF 系统计算的各优化速度曲线中没有规定这种选择。

（2）AF 系统的算法是为减小继发晚点时间而设计的，即由 AF 系统建议的速度不是为了绝对降低能耗。

8 整个瑞士路网的节能潜力

根据勒奇山山底隧道的运营数据分析，迄今为止所取得的成绩显示，通过 AF 系统向司机发送速度建议提示的方法，每解决一次运行冲突大约能够节约 60kWh 的电能。根据这个数据粗略计算了在整个瑞士路网应用如 AF 这样的自动化系统后可能达到的节能效果。

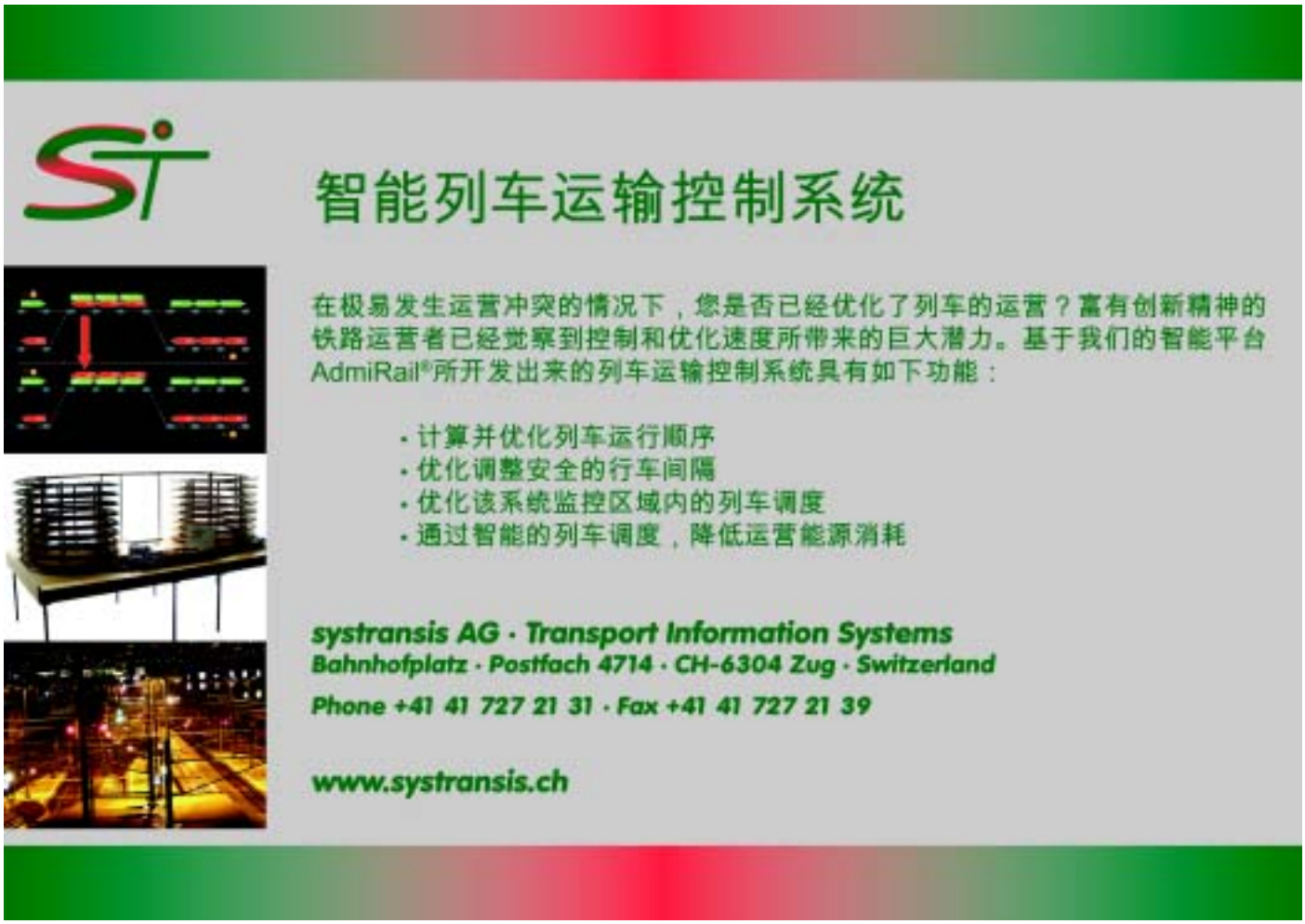
为进行这种计算，按2009年瑞士联邦铁路为冬季运行图应用周期预测的运量假定如下：

- 每天在瑞士铁路网开行的长途旅客列车约为 1500 列，其中每列车平均遇到 2 次导致计划外停车的运行冲突。
- 每天开行约 2000 列货物列车，其中每列车平均遇到 3 次导致计划外停车的运行冲突。

根据这些数据计算出一年的节能潜力达到 200GWh 的量级（2 亿 kWh）。按每 kWh 的电费为 0.20 瑞士法郎（CHF）计算，每年仅因减少能耗而节约的费用约为 0.4 亿瑞士法郎，这里还不包括因减少晚点和提高运行计划的稳定性所带来的好处。

9 结论

作为研究成果可以肯定，通过应用解决运行冲突的自动化系统如 AF 系统，能够挖掘出巨大的节能潜力。在勒奇山山底隧道这个具体的应用实例中，通过向司机发送速度建议这一措施，每解决一次运行冲突就能节省约 60kWh 的电能。

这些电量相当于本研究中列车运行所消耗的总牵引能的 12.4%。这个比例基本不受制动能反馈、冲突大小或列车种类的影响。

根据在勒奇山山底隧道取得的节能效果，粗略估算瑞士全路的节能潜力大约为每年 200GWh。由此计算出每年可能节约的费用约为 0.4 亿瑞士法郎。这充分说明，在全路投资配备解决运行冲突的系统在经济上是很有利的。