**E题 高速铁路牵引供电系统能耗优化**

在“双碳”战略与智慧交通深度融合的时代背景下，中国高铁运营里程已突破4.5万千米，占全球高铁总里程70%以上。牵引供电系统能耗占高铁总能耗的60%-70%。某繁忙干线年耗电量达10亿千瓦时，相当于30万人口城市全年用电量。实验表明，通过系统优化可以使能耗降低10%-15%，不仅能产生显著经济效益，更对国家能源安全战略具有重要支撑作用。

解决牵引供电系统能耗过高的问题，具有极其重要的经济和社会意义。在经济方面，通过对牵引供电系统的优化，可显著降低高速铁路的运营成本。以一条繁忙的高铁线路为例，每年因降低能耗节省的电费开支可能高达数千万元甚至更多，这部分资金可投入到其他关键领域，如线路维护升级、提升服务质量等，增强铁路运营企业的市场竞争力。从环境意义而言，减少能耗意味着降低了发电过程中对化石能源的依赖，进而减少了二氧化碳等温室气体以及其他污染物的排放，助力实现国家的节能减排目标，对缓解全球气候变化、改善生态环境有着积极贡献，为社会可持续发展创造有利条件。

在高速铁路运营中，牵引供电系统的能耗与运行速度和运行时间密切相关，对速度进行优化，可在一定程度上降低能耗。已知某段高速铁路线路长度为千米，沿线均匀分布着个牵引变电所（在线路的起点和终点均有一个变电所）。每列列车的额定功率为千瓦，列车在运行过程中的速度（单位：千米/小时）与牵引力（单位：千牛）满足关系，其中和为常数。假设列车在该线路上以恒定速度运行，列车的运行速度在区间内可调节，同时，考虑实际运行中列车速度不能突变，相邻列车的速度差不能超过。设每个牵引变电所的供电范围为相邻两个变电所间的线路，如起点的变电所（第一个）负责给起点到第二个变电所范围的列车供电，考虑牵引变电所之间的功率传输损耗，假设功率传输损耗率为(即每传输1千瓦功率，损耗千瓦)。

**问题1** 考虑牵引变电所间功率传输损耗特性，构建在给定速度下，整列列车运行全程的牵引供电系统总能耗的计算模型。需推导考虑损耗累积效应的数学表达式，分析损耗与线路长度、速度的关系。

**问题2** 当线路日运行列列车时，构建以系统日总能耗最小化为目标的优化模型。约束条件包括速度区间限制、相邻列车速度差限制，以及功率传输损耗约束，给出求解最佳速度组合 的算法。

**问题3** 考虑到不同时间段内电力价格的差异，假设一天分为个时间段，每个时间段的电力价格为(单位：元/千瓦时)。在这种情况下，优化问题2的模型，在满足列车运行需求的前提下，通过合理安排列车的运行速度和运行时间，使牵引供电系统一天的总电费支出最小，计算出附件1中列车运行时牵引供电系统的总电费支出。

**问题4** 假设千米，个，千瓦，，，，，千米/小时，千米/小时，千米/小时，（时间段分别为：0-6时，6-12时，12-18时，18-24时），元/千瓦时，元/千瓦时，元/千瓦时，元/千瓦时。给出该线路上每列列车的最佳运行速度和运行时间安排，并分析结果的合理性。

附件1 G1371列车运行时间表

附件2 部分列车运行速度与费用